



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ & ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

**Δυναμική Ανάλυση Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας
με Αιολική Παραγωγή.**

**Dynamic Analysis of Electric Power Systems
with Wind Power Generation.**



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ & ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Δυναμική Ανάλυση Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας
με Αιολική Παραγωγή.**

**Dynamic Analysis of Electric Power Systems
with Wind Power Generation.**

ΣΠΑΝΟΣ ΙΑΣΩΝ

A.M.:2009010064

Επιβλέπων: Φώτιος Κανέλλος

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή, την 19/10/ 2017

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

.....
Φώτιος Κανέλλος
Επίκουρος Καθηγητής

.....
Ευάγγελος Γρηγορούδης
Καθηγητής

.....
Γιώργος Τσιναράκης
Ε.ΔΙ.Π.

Χανιά 2017

Πρόλογος:

Η παρούσα διπλωματική εκπονήθηκε από τον Σεπτέμβριο του 2015 έως τον Ιούλιο του 2017. Αντικείμενο της διπλωματικής αυτής, είναι η ανάπτυξη απλοποιημένων μοντέλων αιολικής παραγωγής και συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με σκοπό την δυναμική ανάλυση του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας της Κρήτης. Τα μοντέλα αυτά ενσωματώνονται στο Matdyn, με την βοήθεια του οποίου, γίνεται η δυναμική ανάλυση και αναλύεται η ευστάθεια του δικτύου. Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέπων καθηγητή κ. Φώτη Κανέλλο για την ανάθεση της διπλωματικής αλλά και για την πολύτιμη καθοδήγηση που μου παρείχε κατά την εκπόνηση της εργασίας. Ακόμα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Γιάννη Συλλιγνάκη για την συνεργασία, την υπομονή, τις γνώσεις και όλη την βοήθεια που μου πρόσφερε κατά την εκπόνηση της εργασίας.

Χανιά, 2017
ΙΑΣΩΝ ΣΠΑΝΟΣ

Περίληψη

Η αλματώδης ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενεργείας τα τελευταία χρόνια, οφείλεται κυρίως στην προστασία του περιβάλλοντος αλλά και στην περατότητα των πρώτων υλών για την παράγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε συνδυασμό με την αυξανόμενη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας. Συνεπώς δημιουργείται η ανάγκη της μέγιστης ένταξης μονάδων παράγωγης ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, στα υπάρχοντα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Η ένταξη μονάδων παράγωγης από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, είναι λογικό να επηρεάζει τον τρόπο λειτουργίας και απόκρισης των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας κατά την διάρκεια μεταβατικών φαινομένων.

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας, είναι η δυναμική ανάλυση συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας με αιολική παραγωγή, κατά την διάρκεια μεταβατικών φαινομένων. Για την δυναμική ανάλυση, έγινε χρήση του προγράμματος MatDyn. Λόγω του ότι το πρόγραμμα δεν διαθέτει μοντέλα ανεμογεννητριών αλλά μόνο μοντέλα συμβατικών γεννητριών, χρειάστηκε να τροποποιηθούν τα μοντέλα αυτά έτσι ώστε να αναπαριστούν την λειτουργία ανεμογεννητριών. Για να γίνει αυτό έπρεπε να βρεθούν και να δοθούν συγκεκριμένες τιμές, στις παραμέτρους των ήδη υπαρχόντων μοντέλων συμβατικών γεννητριών.

Αρχικά γίνεται η μελέτη ενός αιολικού πάρκου στο πρόγραμμα Simulink. Έχοντας σαν σημείο αναφοράς τον τρόπο λειτουργίας του αιολικού από το Simulink, χρησιμοποιείται ευρετικός αλγόριθμος για την εύρεση των ζητούμενων τιμών των παραμέτρων. Στην συνέχεια γίνεται η εισαγωγή των νέων τιμών των παραμέτρων σε μοντέλο συμβατικής γεννήτριας του Matdyn, με σκοπό την προσέγγιση του τρόπου λειτουργίας ενός αιολικού πάρκου. Για την εύρεση των παραμέτρων χρησιμοποιήθηκε ο ευρετικός αλγόριθμος βελτιστοποίησης με σμήνος σωματιδίων.

Στην συνέχεια τα μοντέλα αυτά εισήχθησαν στο ΣΗΕ της Κρήτης και πραγματοποιήθηκε δυναμική ανάλυση του συστήματος για δύο διαφορετικά σενάρια. Για κάθε σενάριο πραγματοποιήθηκαν δύο προσομοιώσεις, μια χωρίς την ένταξη των αιολικών και μια με ένταξη, προκειμένου να γίνει η σύγκριση της απόκρισης του συστήματος για κάθε περίπτωση.

Λέξεις Κλειδιά

Σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, ΣΗΕ, Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, ΑΠΕ, Αιολικό Πάρκο, Ανεμογεννήτριες, Δυναμική Ανάλυση συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, Ευστάθεια συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, Matdyn, βελτιστοποίηση σμήνους σωματιδίων, Κρήτη

Index Terms

Electric Power System, Renewable Energy Sources, Wind Park, Wind Generators, Dynamic Analysis of Electric Power Systems, Stability of Electric Power Systems, Matdyn, Particle Swarm Optimization, Crete

Περιεχόμενα

Πρόλογος:	5
Περίληψη	7
Λέξεις Κλειδιά	9
Index Terms	9
Περιεχόμενα	10
Ονοματολογία	14
1.ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	16
1.1 Το ιστορικό της ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα	16
1.2 Δομή Συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας	18
1.3 Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας	19
1.3.1 Μοντέλα Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας	21
1.4 Μεταφορά και Διανομή Ηλεκτρικής Ενέργειας	23
1.4.1 Μεταφορά Ηλεκτρικής Ενέργειας	23
1.4.2 Διανομή Ηλεκτρικής Ενέργειας	25
2.ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	26
2.1 Εισαγωγή	26
2.2 Είδη ευστάθειας	27
2.2.1 Ευστάθεια τάσης	28
2.2.2 Ευστάθεια γωνίας δρομέα	30
2.2.3 Ευστάθεια συχνότητας	31
2.3 Επίδραση των Α/Γ στην ευστάθεια των συστημάτων	32
3 ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	33
3.1 Εισαγωγή	33
3.2 Η αναγκαιότητα των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας	34

3.3 Τα πλεονεκτήματά των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας	35
3.4 Αιολική Ενέργεια	36
4 ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ ΚΑΙ ΑΝΕΜΟΓΕΝΗΤΡΙΕΣ	37
4.1 Εισαγωγή	37
4.2 Τρόπος λειτουργίας ανεμογεννήτριας.....	38
4.3 Κατηγοριοποίηση Ανεμογεννητριών ως προς τον τρόπο λειτουργίας τους	40
4.3.1 Ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών	40
4.3.2 Ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών.....	40
4.4 Είδη ανεμογεννητριών ως προς τον τύπο της ηλεκτρικής γεννήτριας.....	41
4.5 Συμπεριφορά ανεμογεννητριών κατά την διάρκεια μεγάλων διαταραχών.....	41
4.5.1 Συμπεριφορά ανεμογεννητριών κατά την διάρκεια βύθισης τάσης του δικτύου	42
4.6 Ένταξη των ανεμογεννητριών στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας	43
5 ΣΥΣΤΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΤΗΣ ΚΡΗΤΗΣ	45
5.1 Γενική περιγραφή συστήματος	45
5.2 Χαρακτηριστικά Σταθμών Παραγωγής Κρήτης	46
5.3 Χαρακτηριστικά συστήματος μεταφοράς της Κρήτης	50
5.4 Στοιχεία Αιολικής ηλεκτρικής παραγωγής Κρήτης.....	51
6 ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΣΗΕ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ	53
6.1 Εισαγωγή	53
6.2 Το πρόγραμμα Matpower	53
6.2.1 Δεδομένα εισαγωγής	54
6.3 Το πρόγραμμα MatDyn	56
6.3.1 Μοντέλο ηλεκτρικής γεννήτριας στο Matdyn.....	57
6.3.2 Δεδομένα εισαγωγής στο Matdyn	59
6.3.3 Δεδομένα εξόδου	62
7 Προσαρμογή παραμέτρων σύγχρονης γεννήτριας για την προσέγγιση της συμπεριφοράς ανεμογεννήτριας.....	63

7.1 Ένταξη αιολικών στο Matdyn	63
7.1.1 Σχεδιασμός συστήματος αναφοράς.....	65
7.1.2 Μοντελοποίηση συστήματος αναφοράς στο Matdyn.....	66
7.2 Μοντέλο αιολικού πάρκου στο Simulink	68
7.2.1 Το πρόγραμμα Simulink	68
7.3 Προσομοίωση αιολικού στο Simulink	70
7.3.1 Αποτελέσματα προσομοίωσης στο Simulink	71
7.4 Ευρετικός αλγόριθμος βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων.....	73
7.4.1 Εισαγωγή	73
7.4.2 Ο αλγόριθμος	73
7.4.3 Υλοποίηση του αλγορίθμου	75
7.4.4 Χρήση του PSO για την προσαρμογή των παραμέτρων της σύγχρονης γεννήτριας	76
7.4.5 Αποτελέσματα PSO.....	78
8 Προσομοίωση του ηλεκτρικού συστήματος της Κρήτης	80
8.1 Εισαγωγή	80
8.2 Μοντελοποίηση του Δικτύου της Κρήτης στο Matdyn	80
8.2.1 Γεννήτριες.....	81
8.2.2 Γραμμές μεταφοράς και ζυγοί δικτύου.....	83
8.3 Ένταξη αιολικών στο δίκτυο της Κρήτης	85
8.4 Προσομοίωση του συστήματος για διαφορετικά σενάρια	89
8.5 Συμπεράσματα και προοπτικές επέκτασης της Διπλωματικής Εργασίας	96
Βιβλιογραφία	98

Ονοματολογία

ΣΗΕ	Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας
ΑΠΕ	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας
ΔΕΗ	Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού
Α/Π	Αιολικό Πάρκο
ΑΓ	Ανεμογεννήτριες
DC	Direct Current
ΣΡ	Συνεχές Ρεύμα
AC	Alternating current
ΕΡ	Εναλλασσόμενο Ρεύμα
MW	Mega(10^6) Watt
KW	Kilo (10^3) Watt
ΑΗΣ	Ατμοηλεκτρικός Σταθμός
ΑΔΜΗΕ	Ανεξάρτητος Διαχειριστής Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας
ΔΕΔΔΗΕ	Διαχειριστής ηλεκτρικού δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας
Υ/Τ	Υψηλή Τάση
Μ/Τ	Μέση Τάση

1.ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

1.1 Το ιστορικό της ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα

Ο ηλεκτρισμός εμφανίστηκε για πρώτη φορά στην Ελλάδα το 1889. Βάσει ιστορικών στοιχείων της ΔΕΗ, η 'Γενική Εταιρεία Εργοληψιών' κατασκεύασε στην Αθήνα, τον πρώτο σταθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Τα Ανάκτορα είναι το πρώτο κτίριο που φωτίστηκε και πάρα πολύ σύντομα ο ηλεκτροφωτισμός φτάνει στο σημερινό κέντρο της πόλης. Την ίδια χρονική στιγμή ηλεκτροδοτήθηκε η Θεσσαλονίκη, η οποία άνηκε ακόμα στην Οθωμανική Αυτοκρατορία. Μια Βελγική Εταιρεία ανέλαβε απ' τις τουρκικές αρχές το φωτισμό και την τροχοδρόμηση της πόλης με τον σταθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Δέκα χρόνια αργότερα εμφανίστηκαν πολυεθνικές εταιρείες ηλεκτρισμού στην Ελλάδα. Η αμερικανική εταιρεία Thomson-Houston σε συνεργασία με την Εθνική Τράπεζα, ιδρύουν την Ελληνική Ηλεκτρική Εταιρεία η οποία αναλαμβάνει την ηλεκτροδότηση των μεγάλων πόλεων. Μέχρι το 1929 θα έχουν ηλεκτροδοτηθεί πάνω από 250 πόλεις με πληθυσμό άνω των 5.000 κατοίκων.

Σε πιο απομακρυσμένες αλλά και αραιοκατοικημένες περιοχές, την ηλεκτροδότηση αναλαμβάνουν ιδιώτες ή δημοτικές και κοινοτικές αρχές κατασκευάζοντας μικρά εργοστάσια, λόγω του ότι ήταν οικονομικά ασύμφορο για τις μεγάλες εταιρείες να κατασκευάσουν μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Έως το 1950 δημιουργήθηκαν στην Ελλάδα περίπου 400 εταιρείες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Ως πρωτογενή καύσιμα χρησιμοποιούνται το πετρέλαιο και ο γαιάνθρακας, τα οποία εισάγονταν από το εξωτερικό.

Λόγω της διαμοιρασμένης παραγωγής σε πολλές μικρές μονάδες και σε συνδυασμό με την εισαγωγή καυσίμων, η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας εκτοξευόταν στα ύψη, φτάνοντας τρεις έως πέντε φορές πάνω από τις τιμές που ίσχυαν σε άλλες ευρωπαϊκές χώρες. Έτσι η ηλεκτρική ενέργεια, ήταν ένα αγαθό πολυτελείας ενώ, αξίζει να σημειωθεί ότι τις περισσότερες φορές παρεχόταν για συγκεκριμένες ώρες, με τις ξαφνικές διακοπές να είναι σύνηθες φαινόμενο.

Τον Αύγουστο του 1950 ιδρύθηκε η ΔΕΗ, και έτσι οι λειτουργίες παραγωγής, μεταφοράς και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας συγκεντρώθηκαν σε ένα δημόσιο φορέα. Η ΔΕΗ αμέσως στράφηκε στην αξιοποίηση και εκμετάλλευση των εγχώριων πηγών ενέργειας, ενώ σταδιακά ξεκίνησε και η ενοποίηση των διάσπαρτων δικτύων μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, σε ένα εθνικό συνδεδεμένο Σύστημα. Τα πλούσια κοιτάσματα του ελληνικού εδάφους σε λιγνίτη που είχαν νωρίτερα εντοπισθεί, άρχισαν να εξορύσσονται και να χρησιμοποιούνται ως καύσιμη ύλη στις λιγνιτικές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής που δημιουργούσε η ΔΕΗ. Παράλληλα, η επιχείρηση ξεκίνησε την αξιοποίηση της δύναμης των υδάτων, με την κατασκευή υδροηλεκτρικών σταθμών στα μεγάλα ποτάμια της χώρας.

Από την 1/1/2001, η ΔΕΗ Α.Ε. λειτουργεί ως ανώνυμη εταιρεία ενώ από την 12/12/2001 έχει εισαχθεί στα Χρηματιστήρια Αξιών Αθηνών και Λονδίνου. Η ΔΕΗ Α.Ε. δραστηριοποιείται ως παραγωγός και είναι ο κύριος προμηθευτής ηλεκτρικής ενέργειας. Μέχρι το 2013 κατείχε σχεδόν το 75% της εγκατεστημένης ισχύος των θερμοηλεκτρικών σταθμών παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος στην ηπειρωτική Ελλάδα περιλαμβάνοντας στο ενεργειακό της δυναμικό λιγνιτικούς, υδροηλεκτρικούς και πετρελαϊκούς σταθμούς, όπως επίσης και σταθμούς φυσικού αερίου, αλλά και μονάδες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Παράγοντας σχεδόν το 50% της ηλεκτρικής της παραγωγής από λιγνίτη, είναι ο 2ος μεγαλύτερος παραγωγός ηλεκτρικής ενέργειας από λιγνίτη στην Ευρωπαϊκή Ένωση. Προμηθεύει περίπου το 98% (στοιχεία 2013) της καταναλισκόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Τέλος, σύμφωνα με την πρόσφατη ελληνική νομοθεσία (ν. 4001/2011) παραμένει στην ιδιοκτησία της το δίκτυο διανομής συνολικού μήκους 217.000 χλμ.(στοιχεία 2009), ενώ η κυριότητα του εθνικού συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας μήκους 11.650 χλμ. μεταβιβάζεται στον ΑΔΜΗΕ Α.Ε..

Μετά την απόσχιση από τη ΔΕΗ Α.Ε. των κλάδων Μεταφοράς και Διανομής, δημιουργήθηκαν δύο 100% θυγατρικές εταιρείες της ΔΕΗ Α.Ε., ο ΑΔΜΗΕ Α.Ε. (Ανεξάρτητος Διαχειριστής Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας Α.Ε.) και ο ΔΕΔΔΗΕ Α.Ε. (Διαχειριστής Ελληνικού Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας Α.Ε.). Ο ΑΔΜΗΕ Α.Ε. έχει την ευθύνη της διαχείρισης, λειτουργίας, ανάπτυξης και συντήρησης του Ελληνικού Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας και των διασυνδέσεών του, ενώ ο ΔΕΔΔΗΕ Α.Ε. έχει την ευθύνη για τη διαχείριση, ανάπτυξη, λειτουργία και συντήρηση του Ελληνικού Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας. [Πηγή ΠΑΕ]



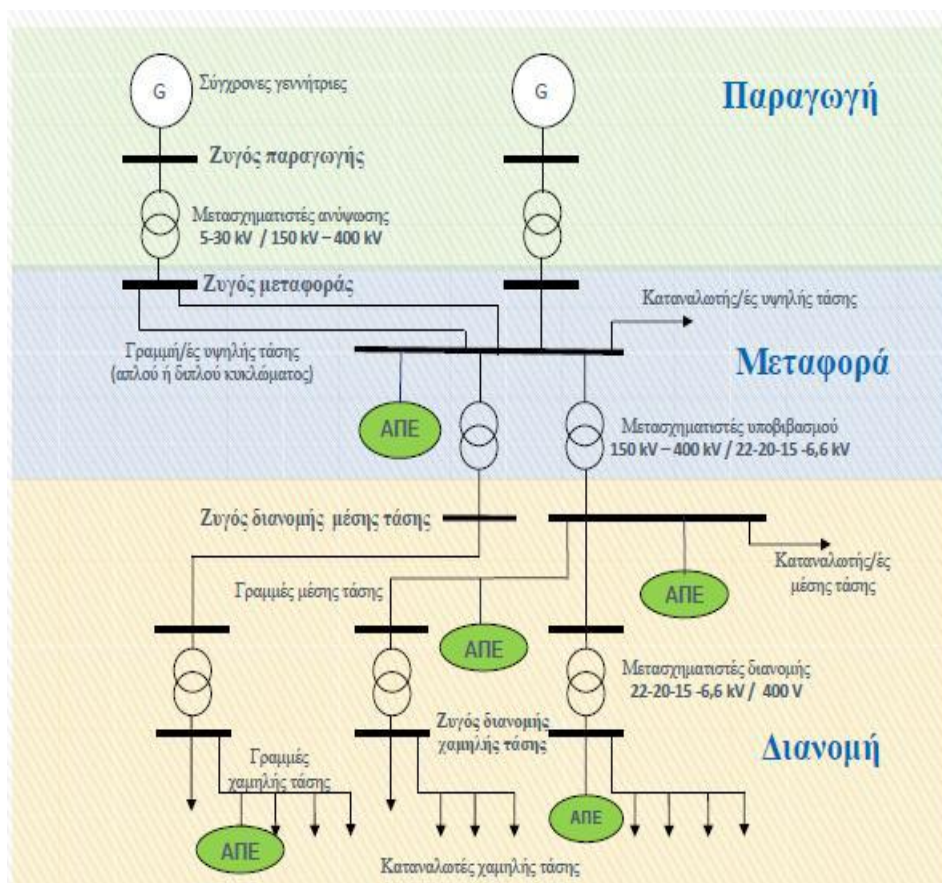
Εικόνα 1.1: Σταθμός παράγωγης ηλεκτρικού ρεύματος ΑΗΣ Αλιβερίου της ΔΕΗ όπου διακρίνονται και οι 5 μονάδες παράγωγης:

- 1) 1^η & 2^η μονάδα λιθάνθρακα ισχύος 40 +40 MW ,1953-1968(εφεδρεία 1986-1997 με μαζούτ),
- 2) 3^η & 4^η μονάδα πετρελαίου ισχύος 150 +150 MW 1968-2010 (εφεδρεία 2010-2016) και
- 3) 5^η μονάδα φυσικού αερίου ισχύος 427 MW, 2013- σήμερα

1.2 Δομή Συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας

Ως Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας ορίζεται το σύνολο των εγκαταστάσεων και των μέσων τα οποία χρησιμοποιούνται για την παραγωγή, μεταφορά και διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας στις περιοχές κατανάλωσης. Επίσης, στο Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας, συμπεριλαμβάνονται και όλα τα απαραίτητα συστήματα ελέγχου και τηλεπικοινωνιών για τη λειτουργία του.

Η παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στους καταναλωτές, προϋποθέτει τρεις ξεχωριστές λειτουργίες που αναφέρονται παρακάτω: την παραγωγή, την μεταφορά και την διανομή. Η ηλεκτρική ενέργεια από το σημείο που θα παραχθεί μέχρι το σημείο που θα καταναλωθεί βρίσκεται σε μία συνεχή ροή. Λόγω της ιδιαιτερότητας της ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία δεν μπορεί να αποθηκευτεί σε μεγάλες ποσότητες με οικονομικό τρόπο πρέπει να παράγεται την στιγμή ακριβώς που χρειάζεται η κατανάλωση της.



Σχήμα 1.2: Δομή Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας [Κανέλλος Φ.]

1.3 Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας επιτυγχάνεται με την εκμετάλλευση διαφόρων πρωτογενών πηγών ενέργειας και παρουσιάζει μεγάλες διαφοροποιήσεις από περιοχή σε περιοχή. Η επιλογή της πηγής γίνεται ανάλογα με τους διαθέσιμους εγχώριους ενεργειακούς πόρους, την ενεργειακή πολιτική της χώρας, τις γεωλογικές αλλά και τις κλιματικές ιδιαιτερότητες αυτής. Μια γενική κατηγοριοποίηση των πηγών παραγωγής ενέργειας γίνεται με βάση:

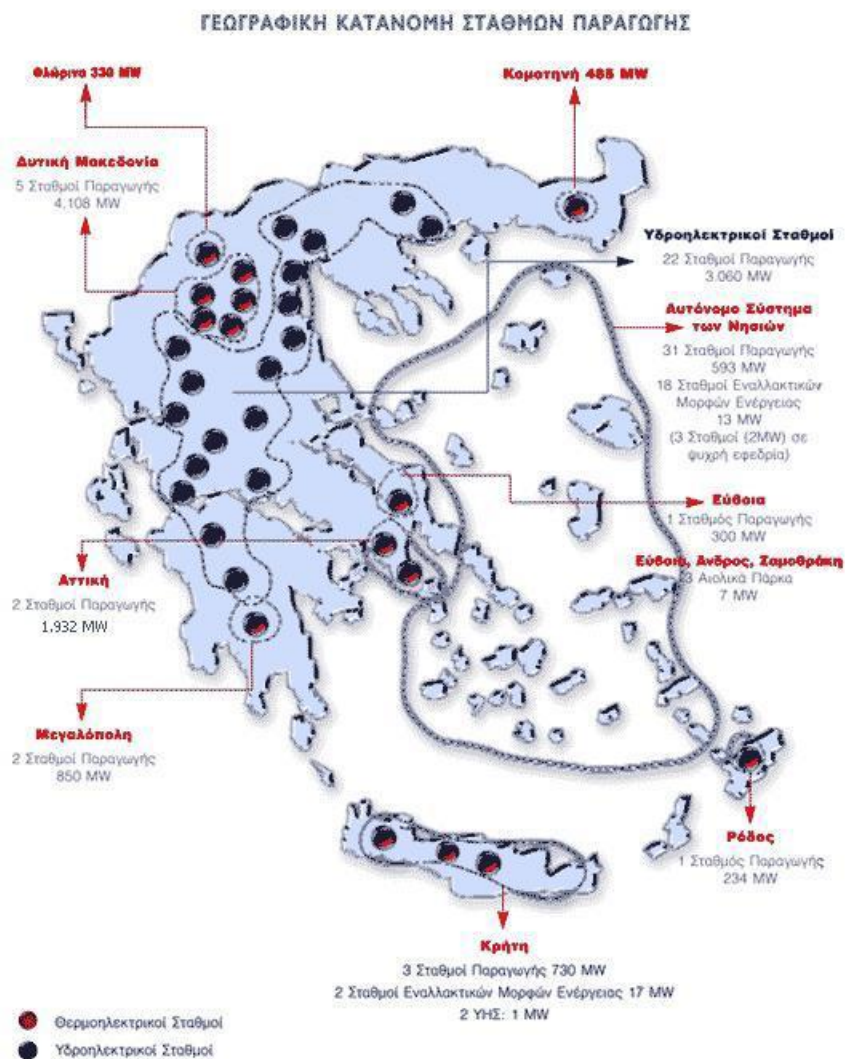
1. Τις συμβατικές πηγές ενέργειας όπως τα ορυκτά, υγρά ή αέρια καύσιμα (π.χ. πετρέλαιο, λιθάνθρακας και φυσικό αέριο).
2. Την πυρηνική ενέργεια, η οποία προέρχεται από σχάση φυσικού ή εμπλουτισμένου ουρανίου.
3. Τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (π.χ. άνεμος, ήλιος, νερό).

Το ποσοστό συμμετοχής του πετρελαίου στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι ιδιαίτερα υψηλό όπως είναι φυσικό, σε κάποιες αραβικές πετρελαιοπαραγωγικές χώρες, αλλά γενικότερα στις άλλες χώρες το ποσοστό του πετρελαίου στην ηλεκτροπαραγωγή έχει περιοριστεί σημαντικά.

Τα στατιστικά στοιχεία του 2006 δείχνουν, ότι η χρήση του λιθάνθρακα κυριαρχεί στη Νότια Αφρική (93%) και στην Πολωνία (92%), ενώ διατηρεί υψηλό ποσοστό στη Δανία (54%), στη Μ. Βρετανία (37.5%), στην Κορέα (38%) και στις Ην. Πολιτείες (σχεδόν 50%). Ο λιγνίτης παίζει σημαντικό ρόλο στην Ελλάδα (55%) και στη Γερμανία (42%). Το ποσοστό της πυρηνικής ενέργειας στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι υψηλό στη Γαλλία (78%), στο Βέλγιο (54.5%), στην Ουγγαρία (37.5%), στη Σουηδία (47%), στη Νότια Κορέα (37%) και στην Ελβετία (43%). Τέλος, το ποσοστό της υδροηλεκτρικής ενέργειας εμφανίζει υψηλές τιμές στη Νορβηγία (98,5%), στην Αυστρία (64%), στον Καναδά (58%), στην Ελβετία (51%), καθώς και σε πολλές αναπτυσσόμενες χώρες, με χαρακτηριστικότερα παραδείγματα την Γκάνα (67%), τη Βραζιλία (83%), την Κένυα (51%) και τη Βενεζουέλα (72%). [Πηγή ΡΑΕ]

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα προέρχεται κυρίως από θερμοηλεκτρικούς σταθμούς. Στην Περιφέρεια Δυτικής Μακεδονίας παράγεται περίπου το 50% της συνολικής ηλεκτρικής ενέργειας. Η συγκέντρωση των θερμοηλεκτρικών σταθμών στο Βορρά της χώρας δημιουργεί αυξημένες απώλειες κατά τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας στα κέντρα κατανάλωσης και ανισορροπία στη λειτουργία.

Ωστόσο ο σχεδιασμός τους, βασίστηκε στο ότι στις περιοχές αυτές υπάρχουν πλούσια κοιτάσματα λιγνίτη, ο οποίος αποτελεί την καύσιμη πρώτη ύλη για αυτούς τους σταθμούς. Στη χώρα μας υπάρχουν τέσσερις περιοχές με σημαντικά αποθέματα λιγνίτη, στη Δράμα, στη Δυτική Μακεδονία, στην Ελασσόνα και στη Μεγαλόπολη. Σύμφωνα με στοιχεία του 2011 για το Διασυνδεδεμένο Σύστημα (National Report ΠΑΕ 2012), το 66.5% της εγκατεστημένης ισχύος των ηλεκτροπαραγωγικών μονάδων είναι θερμικοί σταθμοί, εκ των οποίων με λιγνίτη 4930 MW, με πετρέλαιο 730 MW και με φυσικό αέριο 4579 MW. Το 19.6% είναι μεγάλοι υδροηλεκτρικοί σταθμοί και το 13.9% είναι μονάδες ΑΠΕ.



Σχήμα 1.3: Γεωγραφική κατανομή σταθμών παραγωγής Ελλάδος [ΑΔΜΗΕ 2013]

1.3.1 Μοντέλα Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας

Υπάρχουν δύο μοντέλα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η συγκεντρωμένη παραγωγή και η διεσπαρμένη παραγωγή.

1)Συγκεντρωμένη παραγωγή

Στην συγκεντρωμένη παραγωγή, η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται από τους διάφορους κεντρικούς σταθμούς παραγωγής, αποστέλλεται στο σύστημα μεταφοράς και εν συνεχεία στα τοπικά δίκτυα διανομής όπου διανέμεται στους καταναλωτές.

2)Διεσπαρμένη παραγωγή

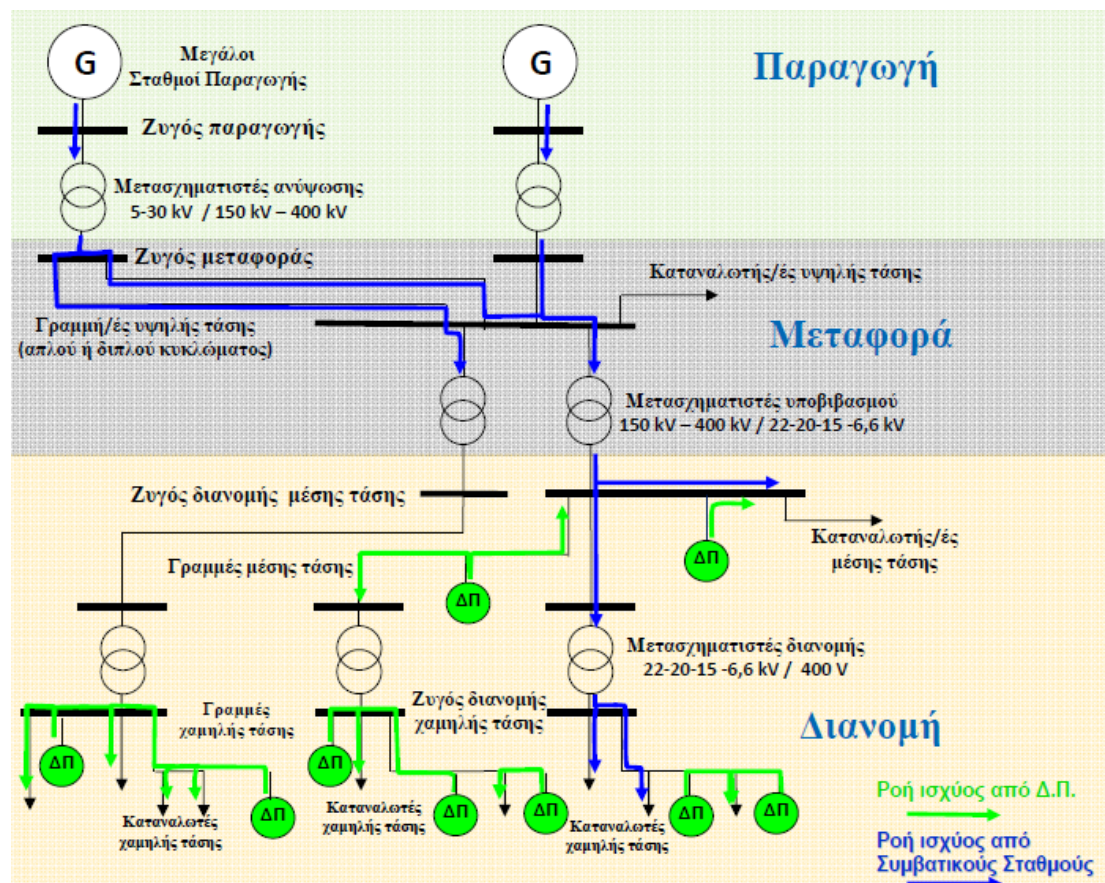
Η διεσπαρμένη παραγωγή είναι η παραγωγή ενέργειας μικρότερης κλίμακας, με τιμές που κυμαίνονται κατά κανόνα από 1kW μέχρι 100MW, ενώ με τον όρο διεσπαρμένη παραγωγή αναφερόμαστε σε εγκατεστημένες μονάδες παραγωγής ενέργειας σε κοντινό σημείο από το σημείο κατανάλωσης. Η διεσπαρμένη παραγωγή υπερτερεί της παραγωγής από μεγάλα κεντρικά εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, αφού παρέχει στους καταναλωτές μεγαλύτερη αξιοπιστία υπηρεσιών, πιο καλή ποιότητα ισχύος και ενεργειακή ανεξαρτησία. Τέλος προσφέρει και περιβαλλοντικό όφελος αφού ο όρος της διεσπαρμένης παραγωγής είναι συνυφασμένος με τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Υπάρχουν πολλοί λόγοι, κυρίως τεchnοοικονομικοί και περιβαλλοντικοί για την ανάπτυξη και την εξέλιξη της Διεσπαρμένης Παραγωγής. Στην συνέχεια παρουσιάζονται οι βασικότεροι λόγοι:

- Από οικονομικής άποψης, ελαχιστοποιούνται οι απώλειες μεταφοράς, άρα και το κόστος μεταφοράς, επειδή η παραγωγή της ενέργειας πραγματοποιείται κοντά στην τοποθεσία που καταναλώνεται. Ακόμα επειδή η διεσπαρμένη παραγωγή συνεπάγεται την χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της τιμής της ηλεκτρικής ενέργειας, λόγω της μείωσης της ζήτησης καυσίμων.
- Από τεχνικής άποψης, πολύ σημαντικά οφέλη που προσφέρει η διεσπαρμένη παραγωγή και κυρίως η χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, είναι η υποστήριξη τάσης σε τοπικό επίπεδο και η εφεδρεία για απρόβλεπτα φαινόμενα. Ακόμα η αύξηση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ή άλλες μορφές διεσπαρμένης παραγωγής έχει σαν αποτέλεσμα την παροχή πιο ασφαλούς ηλεκτρικής ενέργειας λόγω της μείωσης της απομακρυσμένης μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

- Από περιβαλλοντικής άποψης, μειώνονται η κατανάλωση καύσιμων και οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, αφού συνήθως οι μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής και κυρίως οι μη συμβατικές αναφέρονται σε παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Η Διεσπαρμένη Παραγωγή παρουσιάζει και σημαντικά προβλήματα. Πρώτον, το κόστος ανά KW εγκατεστημένης ισχύος, είναι πολύ πιο υψηλό σε σύγκριση με αυτό των κεντρικών μεγάλων εργοστασίων παραγωγής. Ακόμα, τα ήδη υπάρχοντα ηλεκτρικά δίκτυα μεταφοράς σχεδιάστηκαν ώστε να μεταφέρουν την ενέργεια με μονοκατευθυντική ροή στους καταναλωτές μέσω των δικτύων διανομής. Η διεσπαρμένη παραγωγή μπορεί να επηρεάσει την κατεύθυνση ροής της ισχύος στα δίκτυα διανομής, αλλάζοντας έτσι τρόπο λειτουργία τους. Επομένως, η τροποποίηση του δικτύου θεωρείται αναγκαία, καθώς επίσης αυξάνονται αισθητά οι απαιτήσεις για τοπική ρύθμιση της τάσης και σε ορισμένες περιπτώσεις της παραγόμενης ισχύος.



Σχήμα 1.4: Δομή Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας με διεσπαρμένη παραγωγή. [Κανέλλος Φ.]

1.4 Μεταφορά και Διανομή Ηλεκτρικής Ενέργειας

Για την επίλυση των προβλημάτων σχετικά με τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις, κατασκευάστηκε το πρώτο επαγωγικό πηνίο από τον William Stanley, το οποίο αποτέλεσε την αρχή του σύγχρονου ηλεκτρικού μετασχηματιστή ισχύος, καθώς επίσης και το ξεκίνημα ενός συστήματος υψηλής τάσης εναλλασσόμενου ρεύματος. Έχουμε δύο τύπους ηλεκτρικών δικτύων, ανάλογα με την τάση της ηλεκτρικής ισχύος που διακινείται, το δίκτυο Μεταφοράς και το δίκτυο Διανομής. Το σύστημα μεταφοράς αποτελείται από υποσταθμούς υψηλής τάσης και γραμμές μεταφοράς. Όλη η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται στους σταθμούς παραγωγής, αρχικά μεταφέρεται σε κοντινούς μετασχηματιστές που μετατρέπουν τη μέση τάση σε υψηλή. Με αυτόν τον τρόπο, η ηλεκτρική ενέργεια μεταφέρεται με τις γραμμές μεταφοράς σε πολύ μεγάλες αποστάσεις με λιγότερες απώλειες, καθώς οι σταθμοί παραγωγής είναι συνήθως μακριά από μεγάλα αστικά κέντρα. Το δίκτυο μεταφοράς μεταφέρει την ηλεκτρική ενέργεια στους υποσταθμούς μέσης και χαμηλής τάσης, στους οποίους μετατρέπεται η τάση από υψηλή σε μέση και χαμηλή τάση, προκειμένου με τη βοήθεια γραμμών διανομής, να διανεμηθεί σε βιομηχανίες που χρησιμοποιούν μέση τάση και σε σπίτια που χρησιμοποιούν χαμηλή τάση.

1.4.1 Μεταφορά Ηλεκτρικής Ενέργειας

Στο σύστημα μεταφοράς, αρχικά μεταφέρεται η ηλεκτρική ενέργεια από τους σταθμούς παραγωγής σε υποσταθμούς μεταφοράς. Η μεταφορά γίνεται σε υψηλή τάση, μέσω του δικτύου υψηλής τάσης στα 150kV και υπερύψηλης στα 400kV για να μειωθούν οι απώλειες ισχύος, κυρίως όταν οι αποστάσεις είναι μεγάλες. Οι γραμμές μεταφοράς δεν μπορούν να τροφοδοτήσουν απευθείας τους καταναλωτές λόγω διαφορετικού μεγέθους τάσης που χρησιμοποιούν (χαμηλή τάση 220/380V) αλλά φθάνουν μέχρι κάποια σημεία, τους υποσταθμούς μεταφοράς, όπου γίνεται υποβιβασμός της τάσης στα 20 kV. Οι υποσταθμοί αυτοί αποτελούν κόμβους στο δίκτυο του ηλεκτρισμού. Και πάλι το επίπεδο της τάσης δεν είναι κατάλληλο για τους καταναλωτές. Έτσι από αυτούς τους κόμβους αυτούς, αρχίζουν οι γραμμές διανομής, που καταλήγουν στους υποσταθμούς διανομής όπου γίνεται υποβιβασμός της μέσης τάσης στη χαμηλή τάση που χρησιμοποιούν οι περισσότεροι καταναλωτές.

Τα συστατικά στοιχεία των γραμμών μεταφοράς είναι:

- Οι πυλώνες ή πύργοι, στους οποίους στηρίζονται οι αγωγοί των εναέριων γραμμών.
- Μονωτήρες, μέσω των οποίων αναρτώνται στους πυλώνες οι αγωγοί γραμμών.
- Αγωγοί, κυρίως από χαλκό και αλουμίνιο.



Εικόνα 1.5: Δυο αγωγοί ίδιας φάσης της τάξεως 400KV αναρτημένοι σε πυλώνα μέσω μονωτήρα.



▲ High-strength Invar wire for ultra-high-voltage overhead transmission line

Εικόνα 1.6: Τομή αγωγού μεταφοράς υπερύψηλης τάσης (400kV).

1.4.2 Διανομή Ηλεκτρικής Ενέργειας

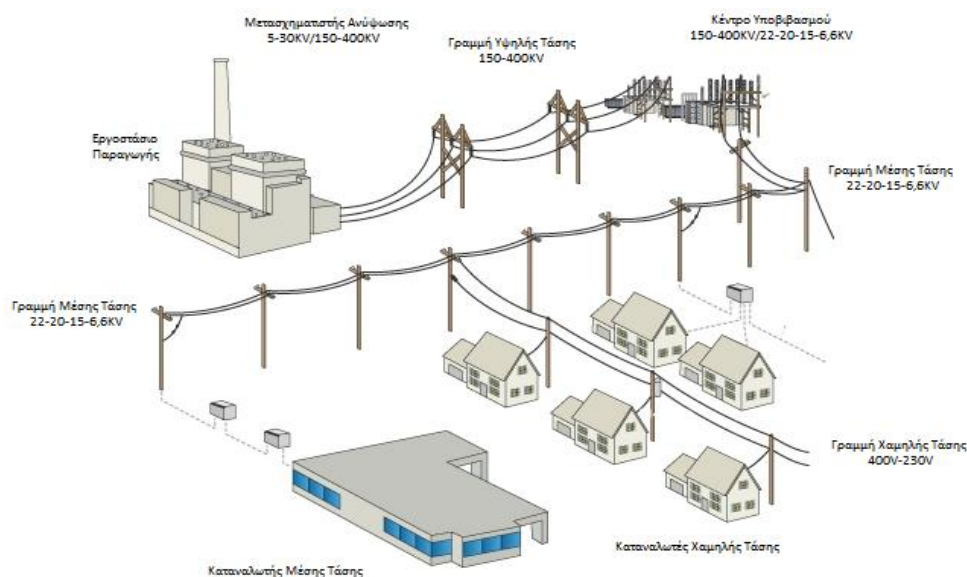
Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, οι γραμμές μεταφοράς δεν μπορούν να τροφοδοτήσουν άμεσα τους καταναλωτές που χρησιμοποιούν χαμηλή τάση 230/400V, αλλά φθάνουν σε κοντινά σημεία, τους υποσταθμούς μεταφοράς, όπου γίνεται υποβιβασμός της τάσης στη μέση τάση, δηλαδή στα 20 kV. Στα σημεία στα οποία βρίσκονται οι υποσταθμοί μεταφοράς, αρχίζουν οι γραμμές διανομής, που καταλήγουν στους υποσταθμούς διανομής όπου πραγματοποιείται ο υποβιβασμός της μέσης τάσης στη χαμηλή τάση που χρησιμοποιεί η πλειοψηφία των καταναλωτών.

Για την διατήρηση ασφαλούς, αξιόπιστου και αποδοτικού δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας στην εκάστοτε περιοχή που καλύπτει, λαμβάνοντας τη δέουσα μέριμνα για το περιβάλλον, υπεύθυνος είναι ο ΔΕΔΔΗΕ.

Λέγοντας διανομή ηλεκτρικής ενέργειας εννοούμε το σύνολο των διαδικασιών λειτουργίας και ελέγχου με τις οποίες η ηλεκτρική ενέργεια διανέμεται στους καταναλωτές.

Το δίκτυο Διανομής αποτελείται από:

- Το δίκτυο διανομής μέσης τάσης (20kV) που μεταφέρει την ηλεκτρική ενέργεια από τους υποσταθμούς μεταφοράς στους υποσταθμούς διανομής.
- Το δίκτυο διανομής χαμηλής τάσης (230/400V) που μεταφέρει την ηλεκτρική ενέργεια από τους υποσταθμούς διανομής στους καταναλωτές.



Εικόνα 1.7: Αναπαράσταση Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας.

2.ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

2.1 Εισαγωγή

Η ευστάθεια του Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας ορίζεται από την ικανότητα του συστήματος μετά από μία διαταραχή, που οδηγεί τις περισσότερες μεταβλητές του συστήματος κοντά στα όριά τους, να μπορεί να επανακτά ένα αποδεκτό σημείο λειτουργίας. Η διατήρηση της ευστάθειας ενός ΣΗΕ στην περίπτωση μίας διαταραχής, εξαρτάται από τις αρχικές λειτουργικές συνθήκες, αλλά και από τη φύση της διαταραχής. Τα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας δέχονται ένα μεγάλο αριθμό μικρών και μεγάλων διαταραχών. Μικρές διαταραχές συμβαίνουν διαρκώς, δεδομένου ότι το ηλεκτρικό φορτίο των διαφόρων καταναλωτών μεταβάλλεται συνεχώς. Σε αυτή την περίπτωση, το εξεταζόμενο σύστημα θα πρέπει να διαθέτει την ικανότητα της άμεσης προσαρμογής στις εκάστοτε λειτουργικές συνθήκες. Επίσης, σημαντική είναι και η αντοχή του συστήματος σε ιδιαίτερα κρίσιμες διαταραχές, όπως είναι ένα τριφασικό βραχυκύκλωμα σε μία γραμμή μεταφοράς, η απώλεια ενός ζυγού ή η απώλεια μίας μεγάλης μονάδας παραγωγής. Μία μεγάλη διαταραχή μπορεί να προκαλέσει την ενεργοποίηση ορισμένων διακοπών προστασίας, με αποτέλεσμα τη μεταβολή της τοπολογίας του δικτύου και τη δημιουργία δύο ή περισσότερων νησίδων. Ωστόσο, σε αρκετές περιπτώσεις το ενδιαφέρον ως προς την ευστάθεια επικεντρώνεται σε μία συγκεκριμένη περιοχή ή σε ένα σύνολο γεννητριών. Ειδικότερα, μία απομονωμένη γεννήτρια είναι πιθανό να αποσυγχρονιστεί από το δίκτυο, χωρίς να έχει προηγηθεί εμφάνιση φαινομένου αστάθειας στο υπόλοιπο σύστημα. Ακόμα οι μεταβολές των τάσεων των ζυγών επηρεάζουν τους ρυθμιστές τάσης των γεννητριών και των δικτύων μεταφοράς. Επίσης, οι μεταβολές στην ταχύτητα των σύγχρονων γεννητριών έχουν αντίκτυπο στη συμπεριφορά των στροβίλων και των ρυθμιστών στροφών ενώ ταυτόχρονα, οι μεταβολές της τάσης και της συχνότητας επηρεάζουν σε μικρότερο ή μεγαλύτερο βαθμό την κατανάλωση των φορτίων.

Η απόκριση ενός ηλεκτρικού δικτύου σε μία διαταραχή μπορεί να εμπλέξει ένα μεγάλο μέρος του εξοπλισμού ανάλογα με την τεχνολογία που διαθέτει. Για παράδειγμα, ένα σφάλμα σε ένα κρίσιμο στοιχείο και η συνακόλουθη απομόνωσή του λόγω της δράσης του αντίστοιχου εξοπλισμού προστασίας, μπορεί να προκαλέσει μεταβολές στη ροή ισχύος των γραμμών, στην τάση των ζυγών και στην ταχύτητα των δρομέων των μηχανών. Οι μεταβολές της τάσης των ζυγών επηρεάζουν τους ρυθμιστές τάσης των γεννητριών και των δικτύων μεταφοράς. Έτσι, οι παραπάνω μεταβολές είναι πιθανό να οδηγήσουν στην ενεργοποίηση κάποιων διατάξεων προστασίας, οι οποίες με τη σειρά τους θα αποσυνδέσουν τις αντίστοιχες διατάξεις από το δίκτυο, με αποτέλεσμα περαιτέρω επιβάρυνση του δικτύου, που μπορεί να καταλήξει σε εκδήλωση φαινομένων αστάθειας.

Σε περίπτωση που το δίκτυο επανέλθει μετά από μία διαταραχή, θα οδηγηθεί σε ένα νέο σημείο ισορροπίας. Ένα πλήθος γεννητριών και φορτίων πιθανόν να αποσυνδεθούν από το δίκτυο είτε εξαιτίας της απομόνωσης του εξοπλισμού που συνδέεται με το σφάλμα, είτε λόγω σκόπιμης απόρριψης ορισμένων διατάξεων προκειμένου να διατηρηθεί η συνέχεια της λειτουργίας του υπόλοιπου συστήματος. Σε περιπτώσεις σημαντικών διαταραχών σε διασυνδεδεμένα συστήματα, η απομόνωση ορισμένων στοιχείων μπορεί να οδηγήσει στο διαχωρισμό του συστήματος σε δύο ή περισσότερες νησίδες, προκειμένου να ικανοποιηθεί όσο το δυνατόν μεγαλύτερο μέρος του φορτίου. Στη συνέχεια, η δράση των αυτόματων ελεγκτών του συστήματος σε συνδυασμό με τους χειρισμούς θα αποκαταστήσουν σταδιακά την ομαλή λειτουργία του συστήματος.

2.2 Είδη ευστάθειας

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

Ένα Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας μπορεί να είναι ευσταθές για μία δεδομένη μεγάλη διαταραχή και ασταθές για μια άλλη. Επομένως η σχεδίαση ευσταθών Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας σε κάθε πιθανή διαταραχή δεν είναι συμφέρουσα ούτε από πρακτικής, αλλά ούτε από οικονομικής πλευράς. Η σχεδίαση ενός ΣΗΕ γίνεται λοιπόν λαμβάνοντας υπόψη μόνο τις διαταραχές που εμφανίζονται συχνά. Έτσι, η ανάλυση της ευστάθειας των ΣΗΕ πραγματοποιείται με κατάλληλες τεχνικές ανάλυσης για κάθε περίπτωση, λαμβάνοντας υπόψη κάποιες απλουστευτικές παραδοχές. Οι παραδοχές αυτές οδηγούν σε ένα απλούστερο μοντέλο του συστήματος, στο οποίο όμως διατηρείται η δυναμική των φαινομένων που συμβαίνουν κάθε φορά. Συγκεκριμένα, η μελέτη της ευστάθειας των ΣΗΕ περιλαμβάνει την ανάλυση των φαινομένων τα οποία συνεισφέρουν στη διέγερση των μηχανισμών αστάθειας και στη συνέχεια την επεξεργασία μεθόδων ενίσχυσης της ευσταθούς λειτουργίας του συστήματος. Ανάλογα με τις επιπτώσεις της διαταραχής στο δίκτυο, διακρίνονται η ευστάθεια μικρών και μεγάλων διαταραχών.

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

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

Η κατηγοριοποίηση των φαινομένων ευστάθειας των ΣΗΕ σύμφωνα με τον Πίνακα 2.1, γίνεται θεωρώντας τα εξής δύο κριτήρια: α) τη χρονική κλίμακα εξέλιξης των φαινομένων και β) την κινητήρια δύναμη των δυναμικών φαινομένων αστάθειας.

ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΣΗΕ		
Χρονική κλίμακα	Παραγωγή-Γεννήτριες	Φορτία-Ζυγοί
Βραχυπρόθεσμα	Ευστάθεια γωνίας	Ευστάθεια τάσης
Μακροπρόθεσμα	Ευστάθεια συχνότητας	Ευστάθεια τάσης

Πίνακας 2.1: Κατηγοριοποίηση των φαινομένων ευστάθειας των ΣΗΕ.

2.2.1 Ευστάθεια τάσης

Η ευστάθεια τάσης αναφέρεται στην δυνατότητα του συστήματος να διατηρεί αποδεκτές τάσεις σε όλους τους ζυγούς του συστήματος κάτω από συνθήκες κανονικής λειτουργίας αλλά και κατά την διάρκεια μιας διαταραχής. Ο ακριβής ορισμός είναι ο ακόλουθος: Η αστάθεια τάσης προκαλείται από την αύξηση της ισχύος που καταναλώνει το φορτίο πέρα από τη φυσική ικανότητα μεταφοράς του συνδυασμένου συστήματος παραγωγής και μεταφοράς. Η αστάθεια τάσης, μπορεί να έχει τη μορφή μιας σταδιακής πτώσης ή αύξησης της τάσης σε κάποιους ζυγούς. Ο πιο σημαντικός παράγοντας που συνεισφέρει στη διέγερση των φαινομένων αστάθειας τάσης, είναι η περιορισμένη ικανότητα του συστήματος να διατηρεί ένα σωστό ισοζύγιο της άεργου ισχύος.

Η ευστάθεια τάσης μεγάλης διαταραχής σχετίζεται με την δυνατότητα του συστήματος να διατηρεί σταθερές τάσεις μετά από μεγάλες διαταραχές. Η ευστάθεια τάσης μικρής διαταραχής, αφορά την ικανότητα ενός συστήματος να ελέγξει μικρές διακυμάνσεις της τάσης, όπως για παράδειγμα η αύξηση στο φορτίο του συστήματος. Σύμφωνα με τον παραπάνω ορισμό, η ευστάθεια τάσης εξαρτάται από την ικανότητα του συστήματος να διατηρεί ή να αποκαθιστά την ισορροπία μεταξύ της παραγωγής και της κατανάλωσης ισχύος των φορτίων. Το φαινόμενο της αστάθειας τάσης ενός συστήματος, μπορεί να διαρκέσει από μερικά δευτερόλεπτα έως και μερικά λεπτά. Η εξέλιξη ενός σεναρίου αστάθειας τάσης μπορεί να έχει μία από τις παρακάτω καταλήξεις:

- Μη ομαλή μόνιμη κατάσταση λειτουργίας σε εξαιρετικά χαμηλό επίπεδο τάσεων. Η κατάσταση αυτή εμφανίζεται συνήθως όταν οι μηχανισμοί που συνεισφέρουν στην αστάθεια απενεργοποιούνται επειδή συναντούν τα άνω ή κάτω όρια λειτουργίας τους.
- Μία επιτάχυνση του φαινομένου, η οποία οδηγεί στην απότομη βύθιση των τάσεων στην περιοχή εμφάνισης του σφάλματος. Στην περίπτωση αυτή, το φαινόμενο ονομάζεται κατάρρευση τάσης. Η κατάρρευση τάσης έχει ως αποτέλεσμα τη μερική ή ολική σβέση του συστήματος.

Το φαινόμενο της αστάθειας των τάσεων μπορεί να προκληθεί από τα συστήματα περιορισμού διέγερσης των σύγχρονων γεννητριών. Αν και στην πλειοψηφία των περιπτώσεων, η αστάθεια τάσης σημαίνει πτώση τάσης, υπάρχουν περιπτώσεις που η αστάθεια τάσης αφορά ανύψωση των τάσεων. Η ανύψωση των τάσεων συνήθως προκαλείται από τη συμπεριφορά του δικτύου, όταν οι γραμμές μεταφοράς υπερύψηλης τάσης, λειτουργούν κάτω από το κανονικό όριο φόρτισης, σε συνδυασμό με την δράση συστημάτων προστασίας από υποδιέγερση, τα οποία προστατεύουν τις σύγχρονες γεννήτριες από την απορρόφηση άεργου ισχύος. Σε αυτή την περίπτωση, η αστάθεια της τάσης συσχετίζεται με την περιορισμένη δυνατότητα του συστήματος παραγωγής και μεταφοράς να λειτουργεί κάτω από ένα επίπεδο φόρτισης.

Η τελική κατάληξη ενός σεναρίου αστάθειας τάσης, μπορεί να είναι είτε η απόρριψη φορτίου σε ένα κομμάτι του συστήματος, είτε η απώλεια μερικών γραμμών ή ζυγών μεταφοράς. Ειδικότερα, μετά από μία διαταραχή, η καταναλισκόμενη ισχύς των φορτίων τείνει να αποκατασταθεί από:

- α) τη μεταβολή της ολίσθησης των κινητήρων επαγωγής,
- β) τη δράση των ρυθμιστών τάσης στο δίκτυο διανομής,
- γ) την ενεργοποίηση των μηχανισμών ΣΑΤΥΦ των μετασχηματιστών,
- δ) τη δυναμική των αυτορυθμιζόμενων φορτίων.

2.2.2 Ευστάθεια γωνίας δρομέα

Η ευστάθεια γωνίας δρομέα αναφέρεται στην ικανότητα των σύγχρονων μηχανών ενός διασυνδεδεμένου συστήματος να παραμείνουν σε συγχρονισμό κάτω από συνθήκες κανονικής λειτουργίας και μετά από μια διαταραχή. Αυτό εξαρτάται από την ικανότητα να συντηρήσει ή να αποκαταστήσει την ισορροπία μεταξύ ηλεκτρομαγνητικής και μηχανικής ροπής, της κάθε σύγχρονης μηχανής στο σύστημα.

Σε συνθήκες μονίμου καταστάσεως (σημείο ισορροπίας), η μηχανική ροπή εισόδου είναι ίση με την ηλεκτρομαγνητική ροπή που αναπτύσσεται σε κάθε γεννήτρια, ενώ η ταχύτητα δρομέα παραμένει σταθερή. Εάν συμβεί μία διαταραχή στο σύστημα, η ισορροπία αναταράσσεται με αποτέλεσμα, την επιτάχυνση ή την επιβράδυνση των δρομέων των μηχανών. Εάν προσωρινά μία γεννήτρια περιστρέφεται πιο γρήγορα από μία άλλη, η σχετική γωνιακή ταχύτητα της πρώτης ως προς δεύτερη θα αυξάνεται. Οπότε, η επακόλουθη διαφορά των γωνιών δρομέα των δύο μηχανών θα μεταφέρει μέρος του φορτίου της βραδύτερης προς την ταχύτερη γεννήτρια.

Αυτή η μεταφορά ισχύος τείνει να μειώσει τη διαφορά των ταχυτήτων περιστροφής των δύο γεννητριών και άρα και τη σχετική γωνιακή τους θέση. Μία αύξηση στη διαφορά των δύο γωνιών συνοδεύεται από μία μείωση της μεταφερόμενης ισχύος, ώστε η γωνιακή διαφορά να οδηγηθεί σε περαιτέρω αύξηση. Στην περίπτωση αυτή, η αστάθεια εκδηλώνεται εάν το σύστημα δεν έχει τη δυνατότητα να απορροφήσει την επιπλέον κινητική ενέργεια, η οποία αντιστοιχεί στην διαφορά των ταχυτήτων δρομέα. Η διατήρηση της ευστάθειας της γωνίας του συστήματος, εξαρτάται από το εάν οι αποκλίσεις των σχετικών γωνιών δρομέα οδηγούν σε ανάπτυξη επαρκών ροπών αποκατάστασης. Η απώλεια του συγχρονισμού μπορεί να συμβεί μεταξύ μίας μηχανής και του υπόλοιπου συστήματος, ή μεταξύ διαφορετικών ομάδων μηχανών.

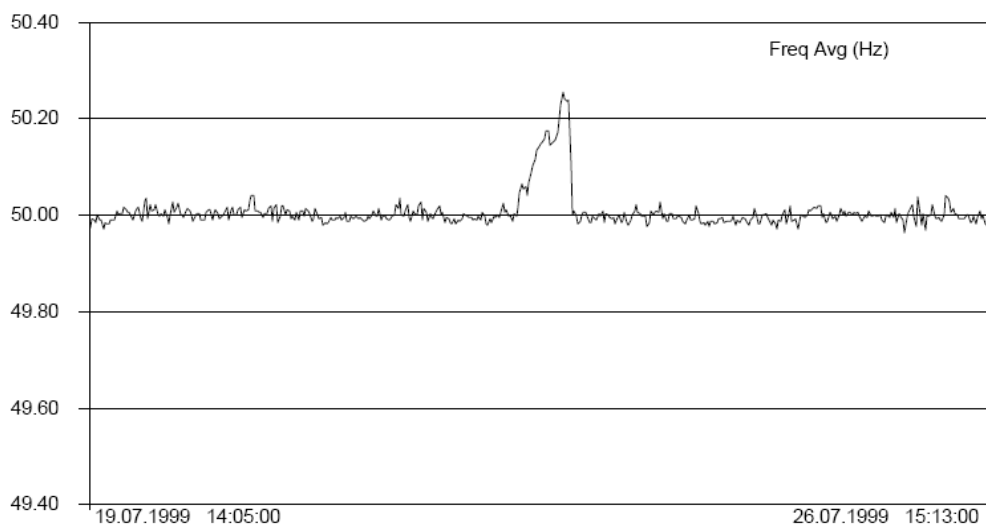
Η ευστάθεια γωνίας δρομέα υποδιαιρείται σε ευστάθεια μικρών διαταραχών και μεταβατική ευστάθεια.

- Η ευστάθεια μικρού σήματος αναφέρεται στην ικανότητα του συστήματος να διατηρήσει συγχρονισμό κάτω από μικρές διαταραχές.
- Η μεταβατική ευστάθεια έχει να κάνει με την ικανότητα του συστήματος να διατηρήσει συγχρονισμό όταν υπόκειται σε σοβαρές μεταβατικές διαταραχές, όπως είναι για παράδειγμα ένα τριφασικό βραχυκύκλωμα σε μία γραμμή ή σε ένα ζυγό μεταφοράς. Η απόκριση ενός δικτύου σε μία τόσο σοβαρή διαταραχή διακρίνεται από μεγάλες μεταβολές των γωνιών δρομέα των γεννητριών.

Το χρονικό διάστημα σε μελέτες ευστάθειας γωνίας είναι συνήθως της τάξης λίγων δευτερολέπτων μετά τη διαταραχή. Ωστόσο, σε περιπτώσεις αρκετά μεγάλων ΣΗΕ το διάστημα αυτό μπορεί να επεκταθεί σε λίγες δεκάδες δευτερολέπτων λόγω της κυριαρχίας των ταλαντώσεων διασυνδέσεων.

2.2.3 Ευστάθεια συχνότητας

Η ευστάθεια συχνότητας αναφέρεται στην ικανότητα ενός ΣΗΕ να διατηρεί τη συχνότητά του εντός ενός προκαθορισμένου εύρους τιμών μετά από μία διαταραχή. Η συχνότητα στα ηλεκτρικά συστήματα αποτελεί έναν δείκτη της ισορροπίας μεταξύ παραγωγής και κατανάλωσης και κατά τη διάρκεια της κανονικής τους λειτουργίας πρέπει να είναι σταθερή και κοντά στις προκαθορισμένες τιμές. Στην Ευρώπη η συχνότητα είναι συνήθως $50 \pm 0,1$ Hz και πέφτει ή ανεβαίνει αντίστοιχα στα 49-50.3 Hz πολύ σπάνια. Ειδικότερα, η ευστάθεια συχνότητας εξαρτάται από την ικανότητα του συστήματος να διατηρεί ή να επαναφέρει το ισοζύγιο μεταξύ παραγωγής και ζήτησης με τη μικρότερη δυνατή απόρριψη φορτίου. Στην περίπτωση αυτή, μία πιθανή αστάθεια εκδηλώνεται με τη μορφή συνεχών ταλαντώσεων στην τιμή της συχνότητας, οι οποίες μπορεί να οδηγήσουν στη διαδοχική αποκοπή μονάδων παραγωγής και φορτίων μέχρι την ολική σβέση του συστήματος. Τα φαινόμενα ευστάθειας συχνότητας όπως παρουσιάστηκαν στον πίνακα 2.1, κατατάσσονται στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στη διέγερσή τους, κυρίαρχο ρόλο διαδραματίζουν ορισμένες αργές συνιστώσες του συστήματος, όπως είναι για παράδειγμα οι στρόβιλοι και οι αντίστοιχοι ρυθμιστές στροφών των μονάδων παραγωγής, καθώς επίσης και τα συστήματα προστασίας των σύγχρονων γεννητριών.



Σχήμα 2.2 : Διακύμανση συχνότητας για διάστημα μιας εβδομάδας.

2.3 Επίδραση των Α/Γ στην ευστάθεια των συστημάτων

Είναι λογικό η διείσδυση αιολικών πάρκων να επηρεάσει την ευστάθεια και τον τρόπο λειτουργίας ενός ΣΗΕ, και λόγω της διεσπαρμένης παραγωγής αλλά κυρίως λόγω της ιδιαιτερότητας του τρόπου που παράγεται ο ηλεκτρισμός από τις Α/Γ. Κατά τη σύνδεση νέων εγκαταστάσεων παραγωγής στα δίκτυα πρέπει να τηρούνται μια σειρά από τεχνικούς όρους και προϋποθέσεις ώστε να εξασφαλίζεται ότι η λειτουργία των μονάδων δεν προκαλεί ανεπίτρεπτες διαταραχές στην τάση του δικτύου και άρα δεν επηρεάζει τη λειτουργία των λοιπών συνδεόμενων στο δίκτυο. Η διείσδυση αιολικής ισχύος σε ένα ΣΗΕ είναι βέβαιο ότι θα προκαλέσει μεταβολές τάσεων στους ζυγούς, μεταβολές στην συχνότητα, στην γωνία αλλά και την ισχύ των μηχανών. Στην συγκεκριμένη εργασία θα αναπτυχθούν μοντέλα Α/Γ κατάλληλα για την μελέτη της ευστάθειας τάσης και συχνότητας και θα εφαρμοστούν στο σύστημα της Κρήτης. Υπάρχουν διάφορα είδη ανεμογεννητριών, με διαφορές στην αρχή λειτουργίας τους και στα ειδικά χαρακτηριστικά τους, οι οποίες διαφέρουν ως προς την απόκριση τους σε διαταραχές του συστήματος. Είναι σημαντική λοιπόν η κατανόηση της μεταβατικής συμπεριφοράς των Α/Γ, για την εκτίμηση της συμβολής μεμονωμένων αιολικών πάρκων στην ευστάθεια, καθώς και η έρευνα πάνω στα αίτια οποιασδήποτε αστάθειας που μπορεί να παρατηρηθεί. Ο τύπος ανεμογεννητριών που θα αναπτυχθεί το ισοδύναμο μοντέλο του είναι αυτός με ασύγχρονη γεννήτρια διπλής τροφοδότησης.

3 ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

3.1 Εισαγωγή

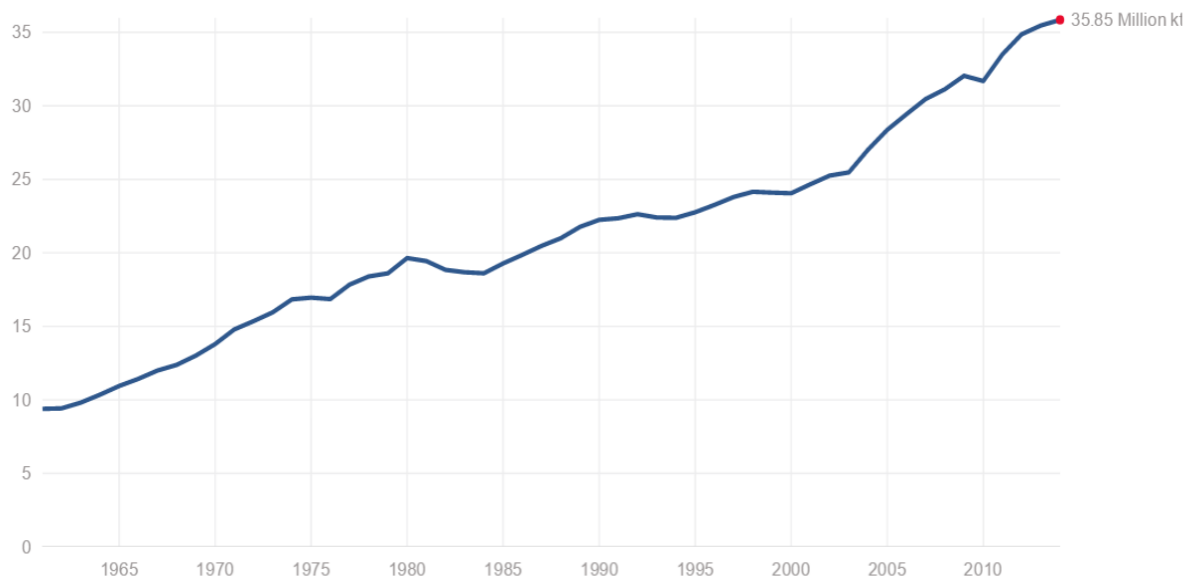
Ως ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ΑΠΕ, ορίζονται οι ενεργειακές πηγές (ο ήλιος, το νερό, ο άνεμος, η βιομάζα, κλπ.), οι οποίες υπάρχουν σε αφθονία στο φυσικό μας περιβάλλον και είναι ανεξάντλητες. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι η πρώτη μορφή ενέργειας που χρησιμοποίησε ο άνθρωπος, πριν στραφεί έντονα στη χρήση των ορυκτών καυσίμων. Πρακτικά, η χρήση τους δεν ρυπαίνει το περιβάλλον, ενώ η αξιοποίησή τους περιορίζεται μόνο από την ανάπτυξη αξιόπιστων και οικονομικά αποδεκτών τεχνολογιών, που θα έχουν σαν σκοπό την αποδοτική αξιοποίηση του δυναμικού τους. Το ενδιαφέρον για την ανάπτυξη των τεχνολογιών αυτών εμφανίσθηκε μετά την πρώτη πετρελαϊκή κρίση του 70' και παγιώθηκε με την συνειδητοποίηση των παγκόσμιων σοβαρών περιβαλλοντικών προβλημάτων. Οι ΑΠΕ αποτελούν μια εγχώρια πηγή ενέργειας με ευνοϊκές προοπτικές συνεισφοράς στο ενεργειακό τους ισοζύγιο, συμβάλλοντας στη μείωση της εξάρτησης από τα ακριβά εισαγόμενα καύσιμα αλλά και στην ενίσχυση της ασφάλειας του ενεργειακού συστήματος. Παράλληλα, συμβάλλουν στη βελτίωση της ποιότητας του περιβάλλοντος, καθώς έχει πλέον αποδειχθεί ότι ο ενεργειακός τομέας είναι ο κλάδος που ευθύνεται κατά κύριο λόγο για τη ρύπανση του περιβάλλοντος.

Οι μορφές των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι:

- Η ηλιακή ενέργεια, με υποτομείς τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα, τα παθητικά ηλιακά συστήματα και τη φωτοβολταϊκή μετατροπή.
- Η αιολική ενέργεια.
- Η υδραυλική ενέργεια, με περιορισμό στα μικρά υδροηλεκτρικά, ισχύος κάτω των 10MW.
- Η γεωθερμική ενέργεια, υψηλής και χαμηλής ενθαλπίας.
- Η ενέργεια από βιομάζα, θερμική ή χημική ενέργεια με την παραγωγή βιοκαυσίμων, τη χρήση υπολειμμάτων δασικών εκμεταλλεύσεων και την αξιοποίηση βιομηχανικών αγροτικών (φυτικών και ζωικών) και αστικών αποβλήτων.
- Η κυματική, παλιρροϊκή και ενέργεια των ωκεανών από τη διαφορά θερμοκρασίας των νερών στην επιφάνεια και σε μεγάλο βάθος

3.2 Η αναγκαιότητα των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας

Η χρήση συμβατικών καυσίμων για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, είναι ένας από τους κυριότερους παράγοντες μόλυνσης της ατμόσφαιρας και γενικότερα του περιβάλλοντος. Για παράδειγμα, αναφέρονται οι σημαντικές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα CO₂, οξειδίων του θείου SO_x και του αζώτου NO_x, ενώ δεν πρέπει να αγνοούνται οι περιπτώσεις άμεσης απειλής από την χρήση της πυρηνικής ενέργειας. Στο σχήμα 3.1 απεικονίζονται οι συνολικές εκπομπές CO₂ σε παγκόσμιο επίπεδο από το 1960 έως και το 2013.



Σχήμα 3.1: Παγκόσμιες εκπομπές CO₂ στο χρόνο.

Η Ευρωπαϊκή Ένωση θέλοντας να μειώσει τις εκπομπές του CO₂ στα επίπεδα του 1990, διαμορφώνει την ενεργειακή πολιτική της, δίνοντας κίνητρα ανάπτυξης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και αυξάνοντας την ανταγωνιστικότητα της χρήσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Αξίζει να σημειωθεί το γεγονός, ότι για κάθε KWh ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές, αποτρέπεται η έκλυση κατά μέσο όρο ενός κιλού CO₂, το οποίο επιβαρύνει την ατμόσφαιρα.

Εκτός της μόλυνσης που προέρχεται από την χρήση συμβατικών καυσίμων για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, ένα ακόμα πρόβλημα αναγνωρίζεται από το 1970 και μετά, είναι η περατότητα των συμβατικών πηγών ενέργειας (κάρβουνο, πετρέλαιο, φυσικό αέριο, ουράνιο κλπ) σε σύγκριση με τους αυξανόμενους ρυθμούς κατανάλωσης ενέργειας. Μετά την πετρελαϊκή κρίση κατά την δεκαετία του '70, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας άρχισαν να αποτελούν υποχρεωτική εναλλακτική και συγχρόνως ρεαλιστική λύση. Τα τελευταία 20 χρόνια η χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας έχει εξέλθει και έχει ξεπεράσει αρκετά τεχνολογικά προβλήματα ενώ σε αρκετές περιπτώσεις έχει καταφέρει να γίνει οικονομικά ανταγωνιστική και να κερδίσει την εμπιστοσύνη των επιστημόνων. Για παράδειγμα, η μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική κοστίζει πλέον μόλις το 1/10 του ποσού που κόστιζε την περασμένη δεκαετία, ενώ μέσα στα επόμενα χρόνια το κόστος αυτό θα μειωθεί ακόμα περισσότερο. Ακόμα με τις νέες τεχνολογίες που έχουν ενταχθεί στις ανεμογεννήτριες, η παράγωγή ηλεκτρικής ισχύς είναι πλέον οκταπλάσια από αυτήν που παραγόταν την δεκαετία του 90 ενώ πλέον είναι και πιο αξιόπιστες.

3.3 Τα πλεονεκτήματά των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας

Τα κύρια πλεονεκτήματά τους, αναφέρονται παρακάτω:

- Είναι ανεξάντλητες πηγές ενέργειας, σε αντίθεση με τους συμβατικούς ενεργειακούς πόρους οι οποίοι με το πέρασμα του χρόνου εξαντλούνται.
- Είναι εγχώριες πηγές ενέργειας και συνεισφέρουν στην ενίσχυση της ενεργειακής ανεξαρτησίας και της ασφάλειας του ενεργειακού εφοδιασμού σε εθνικό επίπεδο.
- Έχουν συνήθως χαμηλό λειτουργικό κόστος, το οποίο επιπλέον δεν επηρεάζεται από τις διακυμάνσεις της διεθνούς οικονομίας και ειδικότερα των τιμών των συμβατικών καυσίμων.
- Είναι γεωγραφικά διεσπαρμένες και οδηγούν στην αποκέντρωση του ενεργειακού συστήματος. Έτσι, δίνετε η δυνατότητα να καλύπτονται οι ενεργειακές ανάγκες σε τοπικό και περιφερειακό επίπεδο, ανακουφίζοντας τα συστήματα υποδομής ενώ παράλληλα μειώνονται οι απώλειες μεταφοράς ενέργειας.
- Δίνουν τη δυνατότητα επιλογής της κατάλληλης μορφής ενέργειας που είναι προσαρμοσμένη στις ανάγκες του χρήστη (π.χ. ηλιακή ενέργεια για θερμότητα χαμηλών θερμοκρασιών έως αιολική ενέργεια για ηλεκτροπαραγωγή), επιτυγχάνοντας πιο ορθολογική χρήση των ενεργειακών πόρων.
- Οι επενδύσεις των ΑΠΕ , δημιουργούν πολλές θέσεις εργασίας ιδιαίτερα σε τοπικό επίπεδο.
- Μπορούν να αποτελέσουν σε πολλές περιπτώσεις πυρήνα για την αναζωογόνηση υποβαθμισμένων, οικονομικά και κοινωνικά, περιοχών και πόλο για την τοπική ανάπτυξη, με την προώθηση επενδύσεων που στηρίζονται στη συμβολή των ΑΠΕ (π.χ. καλλιέργειες θερμοκηπίου με γεωθερμική ενέργεια).
- Είναι φιλικές προς το περιβάλλον και τον άνθρωπο και η αξιοποίησή τους είναι γενικά αποδεκτή από το κοινό.

Παρά τα εξαιρετικά τους πλεονεκτήματα συγκριτικά με τις συμβατικές μονάδες παραγωγής, παρουσιάζουν και ορισμένα χαρακτηριστικά που δυσχεραίνουν την αξιοποίηση και ταχεία ανάπτυξή τους:

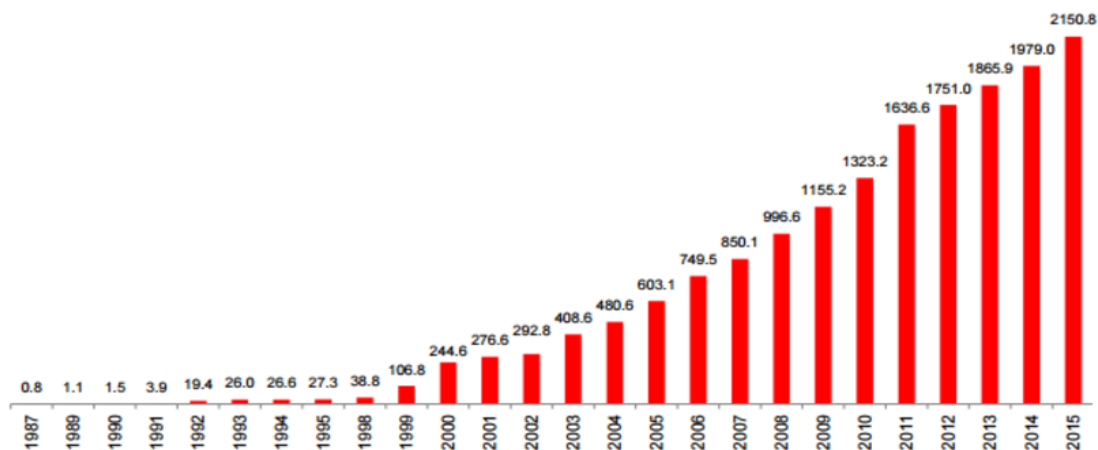
- Το διεσπαρμένο δυναμικό τους είναι δύσκολο να συγκεντρωθεί σε μεγάλα μεγέθη ισχύος, ώστε να μεταφερθεί και να αποθηκευτεί.
- Έχουν χαμηλή πυκνότητα ισχύος και ενέργειας και συνεπώς για μεγάλη παραγωγή, απαιτούνται συχνά εκτεταμένες εγκαταστάσεις.
- Παρουσιάζουν συχνά διακυμάνσεις στη διαθεσιμότητά τους που μπορεί να είναι μεγάλης διάρκειας, απαιτώντας την εφεδρεία άλλων ενεργειακών πηγών ή γενικά δαπανηρές μεθόδους αποθήκευσης.
- Η χαμηλή διαθεσιμότητά τους, συνήθως οδηγεί σε χαμηλό συντελεστή χρησιμοποίησης των εγκαταστάσεων εκμετάλλευσής τους.
- Το κόστος επένδυσης ανά μονάδα εγκατεστημένης ισχύος σε σύγκριση με τις σημερινές τιμές των συμβατικών καυσίμων, παραμένει ακόμη υψηλό.

3.4 Αιολική Ενέργεια

Η κινητική ενέργεια του ανέμου, αποτελεί μια χρήσιμη πηγή ενέργειας, η οποία ονομάζεται αιολική ενέργεια. Ανήκει στις ήπιες ή ανανεώσιμες πηγές ενέργειας δεδομένου εκτός του ότι δεν ρυπαίνει το περιβάλλον, είναι και θεωρητικά ανεξάντλητη. Είναι μια από τις παλαιότερες μορφές φυσικής ενέργειας που αξιοποιήθηκε από πολύ νωρίς για την παραγωγή μηχανικού έργου και έπαιξε καθοριστικό ρόλο στην εξέλιξη της ανθρωπότητας.

Τα τελευταία τριάντα χρόνια και κυρίως μετά τις διαδοχικές ενεργειακές κρίσεις αλλά και σε συνδυασμό με την οξύτητα περιβαλλοντικών προβλημάτων, οι άνθρωποι, έδειξαν αυξημένο ενδιαφέρον για την αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας. Είναι αξιοσημείωτο το γεγονός, ότι τεχνοοικονομικά η αιολική ενέργεια, αυτή τη στιγμή αποτελεί την πλέον συμφέρουσα ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, αφού ήδη το κόστος παραγωγής κιλοβατώρας από αιολική ενέργεια συναγωνίζεται το κόστος συμβατικής κιλοβατώρας, χωρίς να συμπεριληφθεί το κοινωνικό και περιβαλλοντικό κόστος. Για αυτό το λόγο, τα τελευταία χρόνια γίνονται επενδύσεις στον συγκεκριμένο τομέα τόσο από ιδιωτικούς όσο και από δημόσιους φορείς. Η αιολική ενέργεια αποτελεί συνεπώς μία σοβαρή πηγή ενέργειας με σημαντικό δυναμικό και με απεριόριστη πρώτη ύλη και καθίσταται ως μία από τις πιο κατάλληλες εναλλακτικές πηγές για την παραγωγή ηλεκτρισμού. Όμως το ποσοστό αξιοποίησης της αιολικής ενέργειας είναι μικρό με αποτέλεσμα για να παραχθεί μια αξιόλογη ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας, όπως αυτής των συμβατικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής, να απαιτούνται εκατοντάδες ανεμογεννήτριες. Λόγω της δυσκολίας της διαθεσιμότητας γης σε συνδυασμό με την ύπαρξη καλού αιολικού δυναμικού, η ηλεκτροπαραγωγή από ανεμογεννήτριες σε μεγάλη κλίμακα γίνεται σε αιολικά πάρκα, δηλαδή σε συγκεντρωμένες περιοχές, όπου εγκαθίστανται σε ορισμένες αποστάσεις μεταξύ τους οι ανεμογεννήτριες. Η θέση εγκατάστασης των αιολικών μηχανών, η διάταξη τόσο μεταξύ τους όσο και ως προς την επικρατούσα κατεύθυνση ανέμου αποτελεί αντικείμενο ερευνητικής προσπάθειας σήμερα με στόχο την βέλτιστη ενεργειακή απόδοση του αιολικού πάρκου.

Η χώρα μας διαθέτει εξαιρετικά πλούσιο αιολικό δυναμικό και η αιολική ενέργεια μπορεί να γίνει σημαντικός μοχλός ανάπτυξής της. Από το 1982, όπου εγκαταστάθηκε από τη ΔΕΗ το πρώτο αιολικό πάρκο στην Κύθνο έως σήμερα η αιολική ενέργεια που παράγεται στην Ελλάδα έχει σημειώσει ραγδαία αύξηση.



Σχήμα 3.2 : Εγκαταστημένη ισχύς αιολικών στην Ελλάδα, ανά χρόνο.

[HWEA WIND Energy Statistics 2015]

4 ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ ΚΑΙ ΑΝΕΜΟΓΕΝΗΤΡΙΕΣ

4.1 Εισαγωγή

Η τεχνολογία που εκμεταλλεύεται τον άνεμο για παραγωγή ενέργειας έχει φτάσει στο απόγειο της. Αυτό συμβαίνει λόγω της συνεχής προόδου και της ανάπτυξης της τεχνογνωσίας και της τεχνολογίας των ανεμογεννητριών που σημειώνεται τα τελευταία χρόνια. Έτσι σήμερα υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί τύποι ανεμογεννητριών, κάθε ένας από τους οποίους είναι κατάλληλος σε διαφορετικές περιπτώσεις. Επίσης αν και υπάρχουν αυτόνομα συστήματα ανεμογεννητριών που χρησιμοποιούν για παράδειγμα σύστημα αποθήκευσης της παραγόμενης ενέργειας σε μπαταρίες, η πλειοψηφία των ανεμογεννητριών είναι συνδεδεμένες στο δίκτυο.

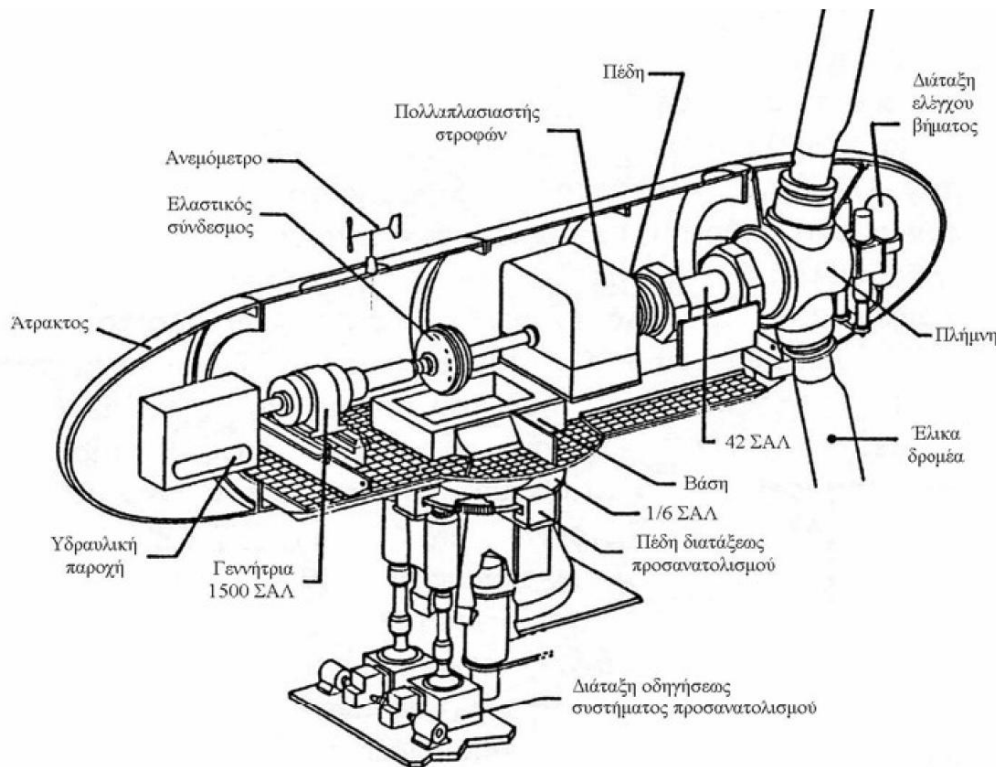
Για να παραχθεί μία ικανοποιητική ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας από τον αέρα δεν αρκεί μόνο μια ανεμογεννήτρια, αλλά αρκετές. Το σύνολο αυτών των ανεμογεννητριών τοποθετείται συγκεντρωμένο σε μια περιοχή και ονομάζεται αιολικό πάρκο. Ένα αιολικό πάρκο δεν είναι απαραίτητο να βρίσκεται στην στεριά. Πολλές φορές οι κάτοικοι μίας περιοχής αντιδρούν στην δημιουργία αιολικού πάρκου. Συγκεκριμένα πολλές φορές προκύπτουν σοβαρά οικονομικά προβλήματα για την αποζημίωση των χώρων που θα εγκατασταθούν οι ανεμογεννήτριες και προβλήματα περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Εναλλακτικά, τα αιολικά πάρκα μπορούν να τοποθετηθούν στην θάλασσα. Στη θάλασσα οι περίοδοι που επικρατεί άπνοια είναι εξαιρετικά σπάνιες και ελάχιστης χρονικής διάρκειας με μόνο μειονέκτημα την δύσκολη μεταφορά της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας και την δυσκολότερη τοποθέτηση και συντήρηση του αιολικού πάρκου.

Όταν λοιπόν οι ανεμογεννήτριες είναι οργανωμένες σε μεγάλα αιολικά πάρκα, προκύπτουν ορισμένες απαιτήσεις για τον ολοκληρωμένο σχεδιασμό των βασικών υποσυστημάτων του αιολικού πάρκου:

- η επιλογή τύπου ανεμογεννήτριας
- η εσωτερική δομή του αιολικού πάρκου
- η σύνδεσή του στο υφιστάμενο δίκτυο
- καθώς και η μεταφορά της παραγόμενης ενέργειας

4.2 Τρόπος λειτουργίας ανεμογεννήτριας

Οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες προορίζονται κυρίως για εφαρμογές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε αντίθεση με τους παλαιούς ανεμόμυλους που χρησιμοποιούνταν κυρίως για άλεση. Παρακάτω φαίνεται η σχηματική αναπαράσταση του χώρου και των μηχανισμών μίας ανεμογεννήτριας σε τομή.



Σχήμα 4.1: Τομή Ανεμογεννήτριας και ανάδειξη μηχανισμών.

Το συγκεκριμένο μοντέλο ανεμογεννήτριας αποτελείται από τρεις έλικες, που είναι συνδεδεμένες με την πλήμνη που μεταφέρει την κίνηση στον άξονα περιστροφής της γεννήτριας. Το σύστημα ελέγχου κατεύθυνσης και ταχύτητας του αέρα σε συνδυασμό με την διάταξη οδήγησης προσανατολισμού περιστρέφει όλη την διάταξη αντίθετα στην κατεύθυνση του ανέμου, ενώ συνήθως υπάρχουν παρόμοιοι μηχανισμοί μέσα στην πλήμνη, που δίνουν κλίση στα πτερύγια (pitch control) με σκοπό την μεγίστη δυνατή εκμετάλλευση του ανέμου. Όταν πρόκειται να τεθεί σε λειτουργία η ανεμογεννήτρια, το σύστημα πέδησης απελευθερώνεται και ξεκινάει η περιστροφή του άξονα όπου μέσω του συστήματος του πολλαπλασιαστή στροφών καταλήγει η κίνηση στην γεννήτρια παράγωγης ρεύματος. Στην συνέχεια αναλαμβάνει το ηλεκτρονικό μέρος της ανεμογεννήτριας, το οποίο το μετατρέπει το ρεύμα στην επιθυμητή μορφή.

Τα ποσά ενέργειας που υπάρχουν στις μεγάλες μάζες του ανέμου είναι τεράστια και τουλάχιστον προς το παρόν είναι αυτά που προσφέρονται περισσότερο για μετατροπή και εκμετάλλευση. Ένα ρεύμα αέρα διατομής A , στιγμιαίας ταχύτητας V ίδιας σε όλη την διατομή και πυκνότητας ρ περικλείει στιγμιαία ισχύ που δίνεται από την σχέση 4.1:

$$P_w = \frac{1}{2} * \rho * V^3 * A \quad (4.1)$$

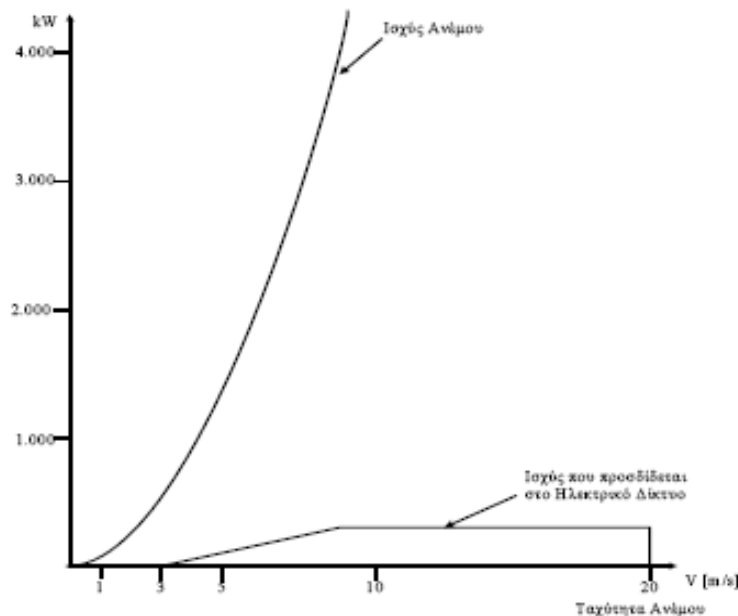
Όμως η ισχύς που παρέχει η έλικα είναι μικρότερη και δίνεται από την σχέση 4.2

$$P_{ak} = C_p * \frac{1}{2} * \rho * V^3 * A \quad (4.2)$$

όπου C_p είναι ο συντελεστής ισχύος. Ο C_p δεν είναι απαραίτητα ο βαθμός απόδοσης του δρομέα, λόγω του ότι αναφέρεται σε μία ισχύ που δεν μπορούμε να εκμεταλλευτούμε εξολοκλήρου, ακόμα και με μία ιδανική διάταξη ελίκων.

Η ανεμογεννήτρια δεν μπορεί να αξιοποιήσει όλη την ισχύ του ανέμου. Σε περίπτωση που η ταχύτητα του ανέμου είναι πολύ μικρή, τότε λόγω τριβών και αδρανείας, η ανεμογεννήτρια δεν μπορεί να εκκινήσει, ενώ σε περίπτωση που η ταχύτητα του ανέμου φθάνει σε υψηλές τιμές, διακόπτεται η λειτουργία της εγκατάστασης λόγω επικινδυνότητας. Στο σχήμα 4.3 παρουσιάζεται η τυπική καμπύλη ισχύος ανεμογεννήτριας,

- διαμέτρου **D = 32 m**
- ονομαστικής ισχύος **PR = 225 kW**
- ονομαστικής ταχύτητας **VR = 9,0 m/s**
- με ταχύτητα έναρξης ίση με **V_{start} = 4,2 m/s**
- και με ταχύτητα διακοπής λειτουργίας **V_{stop} = 20 m/s**



Σχήμα 4.3: Σχέση ανέμου –ισχύος.

4.3 Κατηγοριοποίηση Ανεμογεννητριών ως προς τον τρόπο λειτουργίας τους

4.3.1 Ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών

Οι ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών αποτελούν το πρώτο είδος ανεμογεννητριών που χρησιμοποιήθηκε στην παράγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτή η τεχνολογία ανεμογεννητριών επικρατούσε στις αρχές της δεκαετίας του 1990. Σε αυτό το είδος η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα είναι σταθερή και δεν εξαρτάται από τη ταχύτητα του ανέμου αλλά καθορίζεται από τη συχνότητα του δικτύου, το λόγο του κιβωτίου ταχυτήτων και τα χαρακτηριστικά της γεννήτριας. Για το λόγο αυτό, παρουσιάζεται ευαισθησία στις μεταβολές αλλά και σε απότομες διακυμάνσεις του ανέμου. Εξαιτίας της σταθερής ταχύτητας η μεταβολή του ανέμου μεταφράζεται σαν μεταβολή στη ροπή στο δρομέα και άρα σαν μεταβολή στην ηλεκτρική ισχύ που παράγεται. Αυτό γίνεται αντιληπτό ειδικά στα ασθενή δίκτυα όπου η διακύμανση της ισχύος σημαίνει διακύμανση τάσης και συχνότητας. Λόγω των σταθερών στροφών η ανεμογεννήτρια δεν μπορεί να εκμεταλλευτεί με τον βέλτιστο τρόπο την αεροδυναμική ροπή, επομένως έχει χαμηλότερη απόδοση.

4.3.2 Ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών

Τα τελευταία χρόνια οι ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών είναι ο κυρίαρχος τύπος ανεμογεννητριών. Αυτός ο τύπος ανεμογεννητριών μπορεί να πετύχει μέγιστη αεροδυναμική απόδοση γύρω από ένα ευρύ φάσμα ταχυτήτων ανέμου. Στις ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών η ταχύτητα περιστροφής της γεννήτριας μπορεί να προσαρμοστεί στην ταχύτητα ανέμου που επικρατεί κάθε χρονική στιγμή. Αυτό επιτυγχάνεται διατηρώντας σταθερό το λόγο $\lambda = \omega * \frac{R}{V}$ (όπου ω η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής, R η ακτίνα της έλικας και V η ταχύτητα ανέμου), σε μια βέλτιστη τιμή ώστε να επιτυγχάνεται ο μέγιστος αεροδυναμικός συντελεστής C_p . Έτσι επιτυγχάνεται πολύ καλύτερη απόδοση από ότι στον τύπο σταθερών στροφών. Η μεταβολή στην ταχύτητα του ανέμου εξομαλύνεται από τις αλλαγές στη ταχύτητα του άξονα μετάδοσης κίνησης και συνεπώς τις αλλαγές στη ταχύτητα του δρομέα της γεννήτριας. Σε αντίθεση με την λειτουργία σταθερών στροφών, στη λειτουργία μεταβλητών στροφών οι μεταβολές του ανέμου απορροφώνται από τις αλλαγές της ταχύτητας περιστροφής της γεννήτριας. Οι ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών εντάσσονται στο δίκτυο μέσω μετατροπέα συχνότητας. Ο μετατροπέας ελέγχει την ταχύτητα της γεννήτριας ελέγχοντας την ηλεκτρική ροπή που απαιτείται κάθε στιγμή.

4.4 Είδη ανεμογεννητριών ως προς τον τύπο της ηλεκτρικής γεννήτριας

Τα είδη των ανεμογεννητριών, εκτός από το μηχανικό μέρος έχουν διαφορές και στον τρόπο παραγωγής της ηλεκτρικής ισχύος, λόγω του διαφορετικού τύπου των γεννητριών. Υπάρχουν πολλοί τύποι γεννητριών που χρησιμοποιούνται σε ανεμογεννήτριες, εκ των οποίων οι πιο βασικοί παρουσιάζονται στην συνέχεια :

- A) Ανεμογεννήτριες με γεννήτρια επαγωγής τύπου κλωβού. Αυτές οι γεννήτριες χρησιμοποιούνται σε ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών.
- B) Ανεμογεννήτριες με γεννήτρια επαγωγής τυλιγμένου δρομέα. Αυτές οι γεννήτριες χρησιμοποιούνται σε ανεμογεννήτριες μερικής μεταβολής των στροφών.
- Γ) Ανεμογεννήτριες με γεννήτρια διπλής τροφοδότησης (DFIG). Πιο σύγχρονες γεννήτριες σε σχέση με τις προηγούμενες και πιο αποδοτικές λόγω του ελέγχου ισχύος με μετατροπείς ισχύος. Χρησιμοποιούνται σε ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών.
- Δ) Ανεμογεννήτριες με σύγχρονη γεννήτρια και συστήματα μετατροπών πλήρους ισχύος. Χρησιμοποιούνται σε ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών.

4.5 Συμπεριφορά ανεμογεννητριών κατά την διάρκεια μεγάλων διαταραχών

Όπως αναλύθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο είναι λογικό η διεύθυνση αιολικών πάρκων να επηρεάσει την ευστάθεια και τον τρόπο λειτουργίας ενός Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας και λόγω της διεσπαρμένης παραγωγής αλλά κυρίως λόγω της ιδιαιτερότητας του τρόπου λειτουργίας τους. Παρομοίως, μια διαταραχή σε ένα Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας επηρεάζει την λειτουργία ενός αιολικού πάρκου. Βέβαια ανάλογα με την εκάστοτε τεχνολογία ανεμογεννητριών που χρησιμοποιείται σε ένα αιολικό πάρκο διαφέρει και ο τρόπος απόκρισης των ανεμογεννητριών κατά την διάρκεια της διαταραχής. Παρακάτω αναλύεται ο τρόπος απόκρισης μιας ανεμογεννήτριας σε βυθίσεις τάσεων ανάλογα με τις παραπάνω τεχνολογίες.

4.5.1 Συμπεριφορά ανεμογεννητριών κατά την διάρκεια βύθισης τάσης του δικτύου

Πριν τεθούν σε ισχύ οι κώδικες που ισχύουν σήμερα κυρίαρχη τακτική ήταν να αποσυνδέονται τα αιολικά από το δίκτυο στην περίπτωση που η τάση στα άκρα τους έπεφτε κάτω από ένα επίπεδο (συνήθως 80% της ονομαστικής). Αυτό συνέβαινε διότι οι ανεμογεννήτριες αρχικά αντιμετωπίζονταν ως αρνητικά φορτία του ηλεκτρικού συστήματος και όχι ως σταθμοί παραγωγής, οι οποίοι συμβάλλουν στον έλεγχο και την ευστάθειά του. Έτσι, όσο η αιολική διείσδυση και η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανεμογεννήτριες ήταν σχετικά μικρές, η αποσύνδεση των αιολικών πάρκων σε μη κανονικές συνθήκες λειτουργίας του δικτύου, θεωρούνταν η καλύτερη λύση μιας και δεν αποτελούσε ουσιαστικό κίνδυνο για το υπόλοιπο σύστημα. Οι ανεμογεννήτριες δεν διέθεταν τη δυνατότητα παραμονής σε λειτουργία υπό συνθήκες σημαντικών βυθίσεων τάσης, όχι μόνο για λόγους ευστάθειας, αλλά κυρίως διότι διακόπτονταν η παροχή σε κρίσιμα βοηθητικά τους υποσυστήματα. Η απώλεια τάσης στα συστήματα αυτά οδηγούσε άμεσα σε εντολή στάσης.

Λόγω της υψηλής διείσδυσης της αιολικής ενέργειας και της σύνδεσης των αιολικών πάρκων στο δίκτυο ΥΤ, οι ανεμογεννήτριες των αιολικών πάρκων καλούνται να υποστηρίξουν την ευστάθεια και την αξιοπιστία του δικτύου. Η συμπεριφορά όμως των ανεμογεννητριών στη βύθιση τάσης διαφοροποιείται ανάμεσα στις διάφορες τεχνολογίες. Παρακάτω παρουσιάζονται οι διαφορές ανάμεσα σε δυο σύγχρονους τύπους ανεμογεννητριών κατά την διάρκεια μιας βύθισης της τάσης σε ένα δίκτυο.

Στις ανεμογεννήτριες διπλής τροφοδότησης ο δρομέας συνδέεται στο δίκτυο μέσω μετατροπέα (converter) ενώ ο στάτης είναι άμεσα συνδεδεμένος με το δίκτυο. Ένα σφάλμα στο δίκτυο προκαλεί υψηλά ρεύματα στο στάτη. Εξαιτίας των υψηλών ρευμάτων στο στατή, επάγονται υψηλές τάσεις στα τυλίγματα δρομέα και συνεπώς αναπτύσσονται υψηλά ρεύματα δρομέα. Έτσι τα υψηλά ρεύματα του δρομέα μπορεί να καταστρέψουν τα ευαίσθητα ηλεκτρονικά ισχύος του μετατροπέα. Για αυτό χρειάζεται διάταξη προστασίας των ηλεκτρονικών ισχύος. Στις σύγχρονες υλοποιήσεις η διάταξη προστασίας ονομάζεται crowbar. Με τη χρήση του crowbar, αποφεύγεται η αποσύνδεση της ανεμογεννήτριας κατά τη διάρκεια της βύθισης τάσης.

Στις ανεμογεννήτριες με μετατροπέα πλήρους ισχύος ο δρομέας αλλά και ο στάτης είναι συνδεδεμένοι στο δίκτυο μέσω μετατροπέα ισχύος. Ο μετατροπέας που υπάρχει στη πλευρά του δικτύου προσπαθεί να διατηρεί σταθερή τη συνεχή τάση. Έτσι οποιαδήποτε διαταραχή στο δίκτυο δεν επηρεάζει τη γεννήτρια. Ο μετατροπέας που υπάρχει στη πλευρά του δικτύου για να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις για παροχή επιπλέον έργου ισχύος κατά τη διάρκεια της βύθισης, ίσως χρειαστεί να μειώσει τη μεταφερόμενη ενεργό ισχύ για να μη ξεπεράσει τα όρια φόρτισης. Με αυτόν τον τρόπο, κατά τη διάρκεια βυθίσεων τάσης η ανεμογεννήτρια μπορεί να παραμείνει σε λειτουργία ενώ μετά την επαναφορά της τάσης η μηχανή επανέρχεται άμεσα στην κανονική της λειτουργία, χωρίς να υπάρχουν άλλα μεταβατικά φαινόμενα.

4.6 Ένταξη των ανεμογεννητριών στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας

Η ένταξη των ανεμογεννητριών στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, εκτός από τα προαναφερθέντα πλεονεκτήματα, συνεπάγεται και κάποια προβλήματα. Η συνεχώς μεταβαλλόμενη δυναμική του ανέμου προκαλεί σημαντικές διακυμάνσεις στην ισχύ των ανεμογεννητριών, με αποτέλεσμα την εμφάνιση μηχανικών και ηλεκτρικών ταλαντώσεων καθώς και τη μειωμένη ποιότητα της ηλεκτρικής ισχύος που τροφοδοτείται το ηλεκτρικό δίκτυο. Το πρόβλημα αυτό είναι πιο έντονο στις περιπτώσεις διεσπαρμένης παραγωγής, όπου τα δίκτυα στα οποία συνδέονται τα αιολικά συστήματα είναι συνήθως πιο ασθενή δίκτυα. Οι κυριότερες επιπτώσεις της διεσπαρμένης παραγωγής στη λειτουργία των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας είναι οι ακόλουθες:

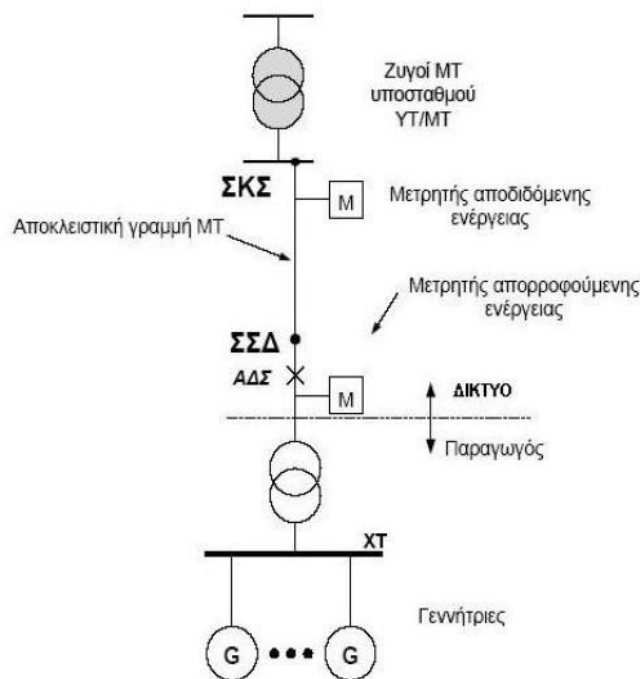
- Αλλαγές στο επίπεδο της τάσης των δικτύων.
- Μειωμένη ποιότητα ηλεκτρικής ισχύος.
- Αύξηση των ρευμάτων από σφάλματα του δικτύου- αλλαγή του επιπέδου βραχυκύκλωσης.
- Αύξηση της αρμονικής παραμόρφωσης των τάσεων και ρευμάτων του δικτύου.
- Πιθανή υποβάθμιση της ευστάθειας του συστήματος.
- Ανάγκη αλλαγής των συστημάτων ελέγχου και επιτήρησης των ηλεκτρικών δικτύων.
- Τροποποίηση της προστασίας του δικτύου.

Πολλά από τα προβλήματα που αφορούν το σύστημα μεταφοράς μπορούν να αντιμετωπισθούν με τη χρήση σύγχρονων και ευέλικτων συστημάτων μεταφοράς. Η τεχνολογία των συστημάτων αυτών βασίζεται στη χρήση αξιόπιστων γρήγορων διατάξεων ηλεκτρονικών ισχύος. Οι συσκευές αυτές, συνδεδεμένες στο αιολικό πάρκο, συνεισφέρουν στη βελτίωση της ποιότητας της ηλεκτρικής ισχύος που παράγεται, στον έλεγχο της πραγματικής και άεργου ισχύος και στην ενίσχυση της ευστάθειας του συστήματος. Τέλος, όταν το αιολικό πάρκο πρέπει να συνδεθεί σε ένα απομακρυσμένο δίκτυο, μια ενδιαφέρουσα και ταχέως αναπτυσσόμενη τεχνολογία είναι αυτή της διασύνδεσης εναλλασσομένου -συνεχούς - εναλλασσομένου ρεύματος. Τα κύρια πλεονεκτήματά της τεχνολογίας αυτής είναι ότι επιτρέπει τη διασύνδεση ασθενών δικτύων με αιολική παραγωγή και ότι προσφέρει βελτιωμένη ποιότητα τροφοδοτούμενης ισχύος σε συνδυασμό με ανεξάρτητο έλεγχο της άεργου ισχύος.

Τέλος, όταν μιλάμε για συνδεδεμένη λειτουργία του αιολικού πάρκου στο δίκτυο είναι χρήσιμο να γίνει αναφορά στους βασικούς ορισμούς του σημείου σύνδεσης στο δίκτυο και σημείο κοινής σύνδεσης.

- Το σημείο σύνδεσης στο δίκτυο (ΣΣΔ) είναι ένα σημείο του δικτύου Μέσης ή χαμηλής τάσης, όπου συνδέονται οι εγκαταστάσεις του αιολικού και βρίσκεται πάντοτε στην έξοδο των εγκαταστάσεων αυτών. Στο ΣΣΔ υπάρχουν οι διατάξεις μέτρησης της ισχύος, την οποία απορροφούν οι αιολικές εγκαταστάσεις από το δίκτυο. Η ενέργεια που αποδίδει το αιολικό στο δίκτυο, μεταφέρεται πάντοτε μέσω του σημείου σύνδεσης στο δίκτυο.
- Το σημείο κοινής σύνδεσης (ΣΚΣ) είναι το πλησιέστερο σημείο του δικτύου προς τις εγκαταστάσεις του αιολικού, στο οποίο συνδέεται το αιολικό. Το ΣΚΣ αποτελεί το σημείο αναφοράς, για τον προσδιορισμό των επιπτώσεων στο δίκτυο, οι οποίες προκαλούνται από τις εγκαταστάσεις αιολικής παραγωγής.

Τα σημείο σύνδεσης στο δίκτυο και σημείο κοινής σύνδεσης μπορεί να ταυτίζονται σε περιπτώσεις που το αιολικό είναι συνδεδεμένο στο δίκτυο με αποκλειστική γραμμή.



Σχήμα 4.4: Σύνδεση αιολικών στο δίκτυο.

5 ΣΥΣΤΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΤΗΣ ΚΡΗΤΗΣ

5.1 Γενική περιγραφή συστήματος

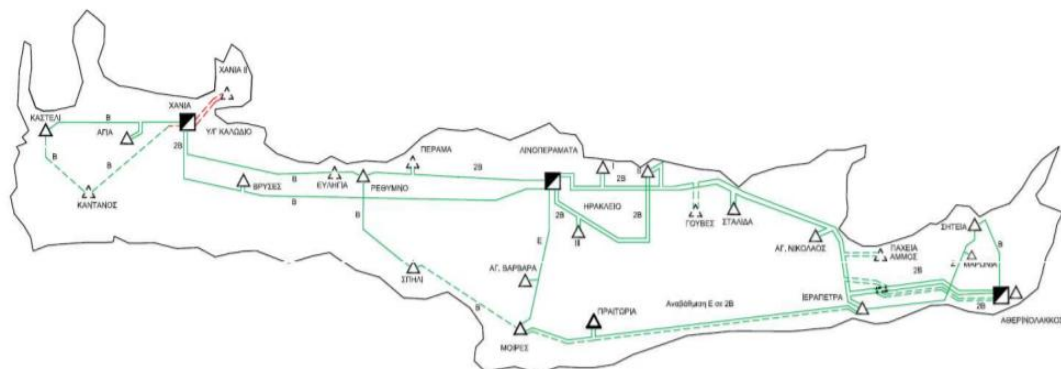
Τα χαρακτηριστικά του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας στην Κρήτη είναι τα εξής:

- Α) Είναι αυτόνομο (δεν είναι διασυνδεδεμένο με το δίκτυο της ηπειρωτικής Ελλάδας).
- Β) Το κυρίως φορτίο είναι χαμηλό λόγω της χαμηλής βιομηχανικής δραστηριότητας.
- Γ) Παρουσιάζει έντονες εποχιακές διακυμάνσεις στην ζήτηση ενέργειας λόγω του τουρισμού.

Το Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας της Κρήτης, αποτελείται από 3 βασικούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Οι σταθμοί αυτοί βρίσκονται:

1. Στο νομό Χανίων στην περιοχή Ξυλοκαμάρα
2. Στο νομό Ηρακλείου στην περιοχή Λινοπεράματα
3. Στο νομό Λασιθίου στην περιοχή Αθρινόλακκος



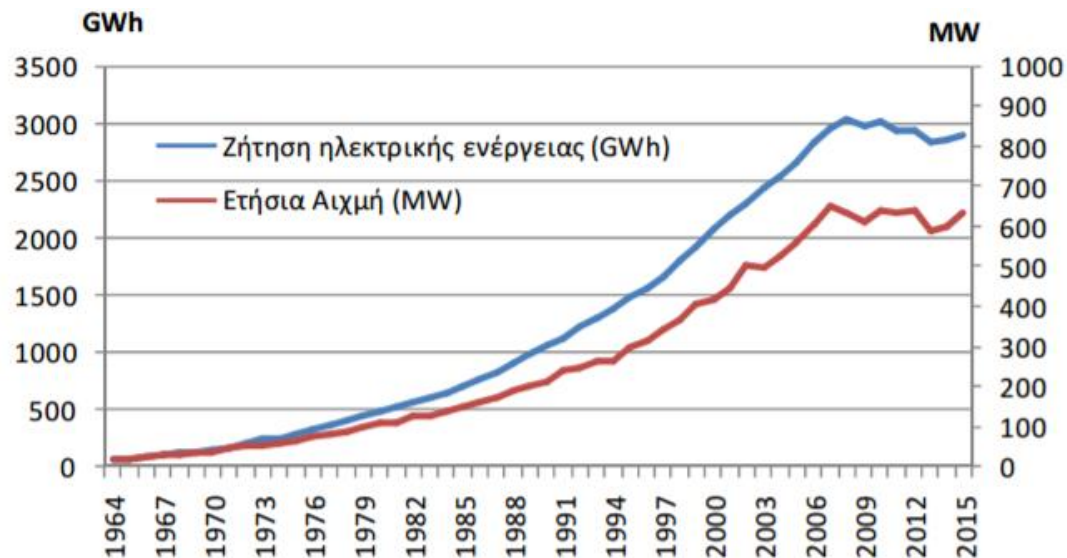
Σχήμα 5.1: Σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας Κρήτης. [ΔΕΔΔΗΕ]

ΥΠΟΜΝΗΜΑ		
ΣΗΛΕΙΟΥΡΓΙΑ	ΜΕΛΕΤΗΤΙΚΟ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ
		ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΙ ΣΤΑΘΜΟΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ
		ΥΠΟΣΤΑΘΜΟΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ 150kV ή 66kV
		ΓΡΑΜΜΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ 150kV ΑΓΛΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ
		ΓΡΑΜΜΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ 150kV ΔΙΠΛΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ
		ΥΠΟΓΕΙΟ ΚΑΛΩΔΙΟ 150 kV
Ε : ΓΡΑΜΜΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ 150kV ΑΓΛΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ΕΛΑΦΡΟΥ ΤΥΠΟΥ Β : ΓΡΑΜΜΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ 150kV ΑΓΛΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ΒΑΡΕΟΥ ΤΥΠΟΥ ΖΒ : ΓΡΑΜΜΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ 150kV ΔΙΠΛΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ΒΑΡΕΟΥ ΤΥΠΟΥ Ζ : ΓΡΑΜΜΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ 150kV ΑΓΛΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ΜΕ ΑΓΩΓΟΥΣ ΤΥΠΟΥ ACSS		
ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ - ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΝΗΣΟΥ ΚΡΗΤΗΣ		
ΔΕΔΔΗΕ Α.Ε. ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΝΗΣΙΩΝ		

5.2 Χαρακτηριστικά Σταθμών Παραγωγής Κρήτης

Η Κρήτη αποτελεί το μεγαλύτερο αυτόνομο νησιωτικό ηλεκτρικό σύστημα της χώρας. Κύρια χαρακτηριστικά του συστήματος (με βάση στοιχεία 2015) είναι τα ακόλουθα:

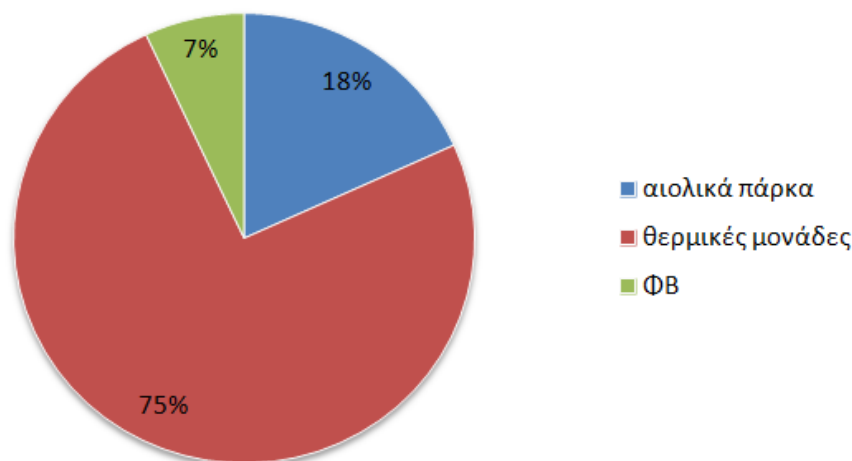
- Αιχμή φορτίου: 634 MW.
- Ετήσια ζήτηση: 2898 GWh που αντιστοιχεί σε 5% της Εθνικής ζήτησης.



Σχήμα 5.2: Ετήσια Ζήτηση και ετήσια Αιχμή. [ΔΕΔΔΗΕ Α.Ε.]

Το παραγωγικό δυναμικό περιλαμβάνει:

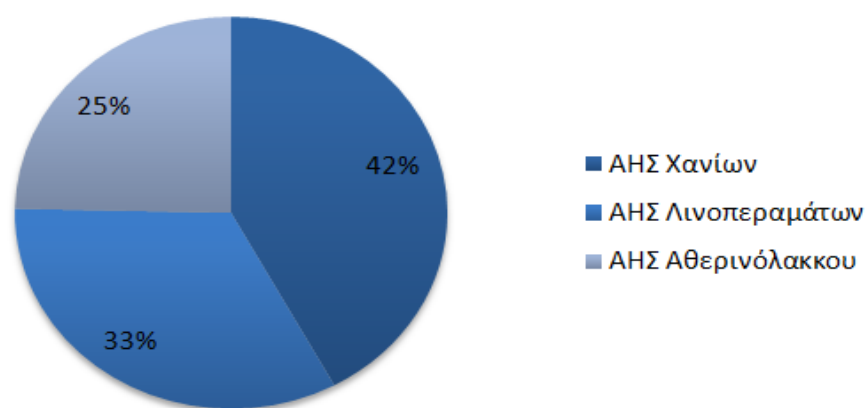
- 27 θερμικές μονάδες με καύσιμο μαζούτ και diesel , συνολικής ισχύος 820,02 MW
- 35 Αιολικά Πάρκα συνολικής ισχύος 170 MW
- 1047 Φωτοβολταϊκοί Σταθμοί συνολικής ισχύος 77 MW



Σχήμα 5.3: Ποσοστό παραγωγικού δυναμικού με βάση το είδος παραγωγής.

Στην Κρήτη λειτουργούν 3 θερμικοί σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, συνολικής εγκατεστημένης ισχύος 820,02 MW, με μέγιστη αποδιδόμενη καθαρή ισχύ θέρους 695,86 MW

- ΑΗΣ Χανίων: 9 μονάδες συνολικής εγκατεστημένης ισχύος 345,19 MW (μέγ. αποδ. καθ. ισχύς θέρους 272,11 MW)
- ΑΗΣ Λινοπεραμάτων: 14 μονάδες με καύσιμο μαζούτ και diesel, συνολικής εγκατεστημένης ισχύος 272,59 MW (μέγ. αποδ. καθ. ισχύς θέρους 232,75 MW)
- ΑΗΣ Αθερινόλακκου: 4 μονάδες με καύσιμο μαζούτ, συνολικής εγκατεστημένης ισχύος 202,24 MW (μέγ. αποδ. καθ. ισχύς θέρους 191 MW)



Σχήμα 5.4: Ποσοστό παραγωγικού δυναμικού των σταθμών παραγωγής.

Οι σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας του δικτύου της Κρήτης, περιλαμβάνουν συνολικά τα παρακάτω είδη συμβατικών μονάδων:

Α) Αεριοστροβιλικές Μονάδες (Μονάδες φορτίου αιχμής)

Β) Μηχανές Εσωτερικής Καύσης (Μονάδες βάσης, κυμαινόμενου φορτίου)

Γ) Ατμοστροβιλικές Μονάδες (Μονάδες βάσης)

Δ) Μονάδα Συνδυασμένου Κύκλου (Μονάδες βάσης, κυμαινόμενου φορτίου)

Σε κάθε σταθμό παραγωγής παρατηρούνται διαφορές στην ονομαστική και καθαρή ισχύ των μονάδων, στα τεχνικά ελάχιστα τους, στον τύπο καύσιμης ύλης που χρησιμοποιούν, καθώς και στους χρόνους εκκίνησης και ρύθμισης τους. Σημαντικές είναι επίσης και οι διαφοροποιήσεις των μονάδων όσον αφορά το λειτουργικό κόστος και το κόστος εκκίνησής τους. Παρακάτω φαίνονται αναλυτικά τα είδη και τα τεχνικά χαρακτηριστικά των μονάδων των τριών σταθμών.

ΤΥΠΟΣ ΜΟΝΑΔΑΣ	ΜΟΝΑΔΑ	ΚΑΥΣΙΜΟ	ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ ΙΣΧΥΣ [MW]	Μεγ. Αποδιδόμενη ΙΣΧΥΣ [MW]
Ατμοστρόβιλος	ATM2	MAZOYT	15	13
Ατμοστρόβιλος	ATM3	MAZOYT	15	13
Ατμοστρόβιλος	ATM4	MAZOYT	25	22,35
Ατμοστρόβιλος	ATM5	MAZOYT	25	22
Ατμοστρόβιλος	ATM6	MAZOYT	25	22
Αεριοστρόβιλος	A/Σ 1	DIESEL	16.25	12,5
Αεριοστρόβιλος	A/Σ 2	DIESEL	16.25	12,5
Αεριοστρόβιλος	A/Σ 3	DIESEL	43.3	36,3
Αεριοστρόβιλος	A/Σ 4	DIESEL	14.72	12,8
Αεριοστρόβιλος	A/Σ 5	MAZOYT	27.95	24,3
Ντίζελ	D1	MAZOYT	12.28	10,5
Ντίζελ	D2	MAZOYT	12.28	10,5
Ντίζελ	D3	MAZOYT	12.28	10,5
Ντίζελ	D4	MAZOYT	12.28	10,5
Σύνολο - ΙΣΧΥΣ [MW]			272,59	232.75

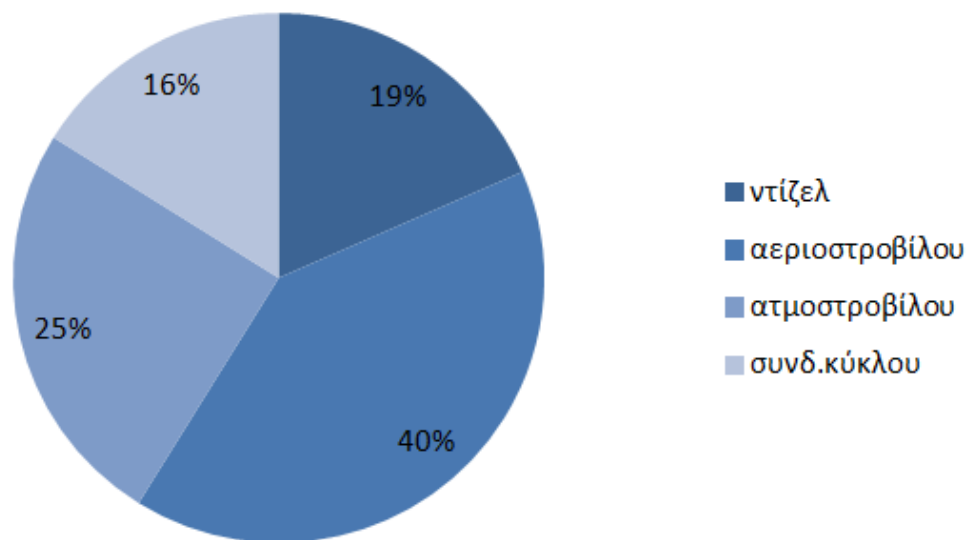
Πίνακας 5.5: Στοιχεία μονάδων του σταθμού παράγωγης Λινοπεραμάτων [ΔΕΔΔΗΕ Α.Ε. 2015]

ΤΥΠΟΣ ΜΟΝΑΔΑΣ	ΜΟΝΑΔΑ	ΚΑΥΣΙΜΟ	ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ ΙΣΧΥΣ [MW]	Μεγ. Αποδιδόμενη ΙΣΧΥΣ [MW]
Αεριοστρόβιλος	A/Σ 1	DIESEL	16.2	-
Αεριοστρόβιλος	A/Σ 4	DIESEL	20	17.25
Αεριοστρόβιλος	A/Σ 5	DIESEL	30	26.2
Αεριοστρόβιλος	A/Σ 11	DIESEL	59.37	49.63
Αεριοστρόβιλος	A/Σ 12	DIESEL	59.37	49.63
Αεριοστρόβιλος	A/Σ 13	DIESEL	27.95	24.4
Συνδυασμένου Κύκλου	A/Σ 6	DIESEL	44.9	105
	A/Σ 7	DIESEL	44.9	
	ATM8	DIESEL	42.5	
Σύνολο - ΙΣΧΥΣ [MW]			345.19	272.11

Πίνακας 5.6: Στοιχεία μονάδων του σταθμού παράγωγης Χανίων. [ΔΕΔΔΗΕ Α.Ε. 2015]

ΤΥΠΟΣ ΜΟΝΑΔΑΣ	ΜΟΝΑΔΑ	ΚΑΥΣΙΜΟ	ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ ΙΣΧΥΣ [MW]	Μεγ. Αποδιδόμενη ΙΣΧΥΣ [MW]
Ντίζελ	D1	ΜΑΖΟΥΤ	51.12	49
Ντίζελ	D2	ΜΑΖΟΥΤ	51.12	49
Ατμοστρόβιλος	ATM1	ΜΑΖΟΥΤ	50	46.5
Ατμοστρόβιλος	ATM2	ΜΑΖΟΥΤ	50	46.5
Σύνολο - ΙΣΧΥΣ [MW]			202.24	191

Πίνακας 5.7 :Στοιχεία μονάδων του σταθμού παράγωγης Αθρινόλακου.[ΔΕΔΔΗΕ Α.Ε. 2015]



Σχήμα 5.8: Συνολικό ποσοστό ονομαστικής ισχύος ανά είδος μονάδας.

5.3 Χαρακτηριστικά συστήματος μεταφοράς της Κρήτης

Για την μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας στο νησί, υπάρχει ένα σύστημα μεταφοράς το οποίο αποτελείται από 17 υποσταθμούς μεταφοράς υψηλής τάσης οι οποίοι συνδέονται μεταξύ τους με 21 γραμμές μεταφοράς συνολικού μήκους 600 km. Τα χαρακτηριστικά του συστήματος παρουσιάζονται αναλυτικά παρακάτω.

Υ/Σ	Τοποθεσία	Τάση (kV)
1	ΚΑΣΤΕΛΛΙ	150
2	ΑΓΥΙΑ	150
3	ΒΡΥΣΕΣ	150
4	ΡΕΘΥΜΝΟ	150
5	ΛΙΝΟΠΕΡΑΜΑΤΑ	150
6	ΗΡΑΚΛΕΙΟ Ι	66
7	ΗΡΑΚΛΕΙΟ ΙΙΙ	150
8	ΗΡΑΚΛΕΙΟ ΙΙ	150
9	ΑΓΙΑ ΒΑΡΒΑΡΑ	150
10	ΜΟΙΡΕΣ	150
11	ΠΡΑΙΤΩΡΙΑ	150
12	ΙΕΡΑΠΕΤΡΑ	150
13	ΜΑΡΩΝΙΑ	150
14	ΑΘΕΡΙΝΟΛΑΚΚΟΣ	150
15	ΣΗΤΕΙΑ	150
16	ΑΓΙΟΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ	150
17	ΣΤΑΛΙΔΑ	150

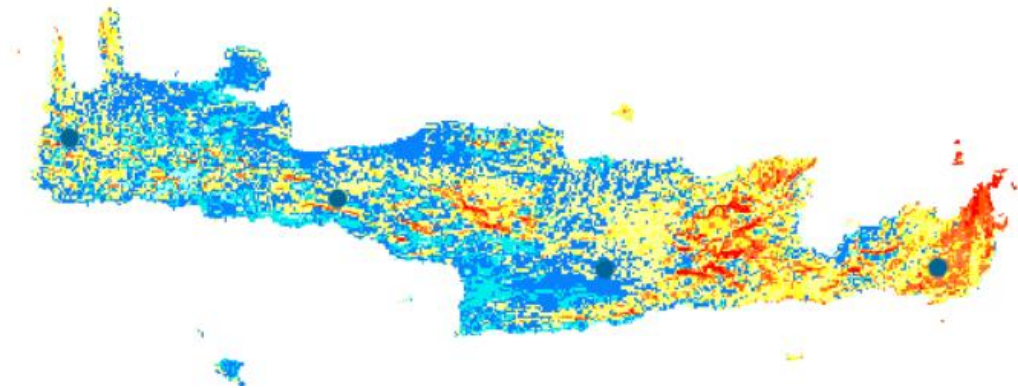
Πίνακας 5.9: Στοιχεία υποσταθμών μεταφοράς.

α/γραμμής	Υ/Σ Αναχώρησης	Υ/Σ Ζυγός Άφιξης	Ονομ. Τάση (kV)
1	ΑΓΥΙΑ	ΚΑΣΤΕΛΛΙ	150
2	ΧΑΝΙΑ	ΑΓΥΙΑ	150
3	ΒΡΥΣΕΣ	ΧΑΝΙΑ	150
4	ΒΡΥΣΕΣ	ΛΙΝΟΠΕΡΑΜΑΤΑ	150
5	ΧΑΝΙΑ	ΡΕΘΥΜΝΟ	150
6	ΡΕΘΥΜΝΟ	ΛΙΝΟΠΕΡΑΜΑΤΑ	150
7	ΛΙΝΟΠΕΡΑΜΑΤΑ	ΑΓ. ΒΑΡΒΑΡΑ	150
8	ΑΓ. ΒΑΡΒΑΡΑ	ΜΟΙΡΕΣ	150
9	ΜΟΙΡΕΣ	ΠΡΑΙΤΩΡΙΑ	150
10	ΠΡΑΙΤΩΡΙΑ	ΙΕΡΑΠΕΤΡΑ	150
11	ΛΙΝΟΠΕΡΑΜΑΤΑ	ΗΡΑΚΛΕΙΟ Ι (Α)	66
12	ΛΙΝΟΠΕΡΑΜΑΤΑ	ΗΡΑΚΛΕΙΟ Ι (Β)	66
13	ΗΡΑΚΛΕΙΟ ΙΙΙ	ΗΡΑΚΛΕΙΟ ΙΙ	150
14	ΛΙΝΟΠΕΡΑΜΑΤΑ	ΗΡΑΚΛΕΙΟ ΙΙ	150
15	ΗΡΑΚΛΕΙΟ ΙΙ	ΣΤΑΛΙΔΑ	150
16	ΣΤΑΛΙΔΑ	ΑΓ.ΝΙΚΟΛΑΟΣ	150
17	ΑΓ.ΝΙΚΟΛΑΟ	ΙΕΡΑΠΕΤΡΑ	150
18	ΙΕΡΑΠΕΤΡΑ	ΜΑΡΩΝΙΑ	150
19	ΜΑΡΩΝΙΑ	ΣΗΤΕΙΑ	150
20	ΑΘΕΡΙΝΟΛΑΚΚΟΣ	ΙΕΡΑΠΕΤΡΑ	150
21	ΑΘΕΡΙΝΟΛΑΚΚΟΣ	ΣΗΤΕΙΑ	150

Πίνακας 5.10: Στοιχεία γραμμών μεταφοράς.

5.4 Στοιχεία Αιολικής ηλεκτρικής παραγωγής Κρήτης

Λόγω της αύξησης των ενεργειακών αναγκών του νησιού αλλά και λόγω του κατάλληλου αιολικού δυναμικού έχει ευνοηθεί αρκετά η ανάπτυξη της παράγωγης ηλεκτρικής ενέργειας από τον άνεμο. Μετά την διασύνδεση του νησιού με την ηπειρώτικη Ελλάδα θα καταστεί δυνατή η ανάπτυξη σταθμών παράγωγης από αιολική ενέργεια πολύ μεγαλύτερης συνολικής ισχύος από την σημερινή.



Σχήμα 5.11: Αιολικό δυναμικό Κρήτης.

Το πρώτο Αιολικό Πάρκο στην Κρήτη ήταν της ΔΕΗ στο Τοπλού Σητείας το 1993 και μετά το νομό 2244/94, το πρώτο ιδιωτικό Αιολικό Πάρκο ισχύος 10 MW εγκαταστάθηκε στη Σητεία συνολικής. Σήμερα στην Κρήτη είναι εγκατεστημένα 35 Αιολικά Πάρκα συνολικής ισχύος άνω των 170 MW που αντιστοιχεί σε ποσοστό 18% της συνολικής εγκατεστημένης παραγωγής.



Σχήμα 5.12: Γεωγραφική θέση Αιολικών πάρκων στην Κρήτη.

Όπως παρατηρείται από το Σχήμα 5.9 υπάρχει αυξημένο αιολικό δυναμικό στην ανατολική Κρήτη και κυρίως στο νομό Λασιθίου. Εκεί υπάρχει και αυξημένο πλήθος αιολικών σε σχέση με το υπόλοιπο νησί.

Παρακάτω ακολουθεί ο πίνακας της ισχύος των αιολικών σε MW ανά νομό, το έτος 2011 .

Νομός	Παραγωγή (MW)
Λασιίθι	98,90
Ηράκλειο	41,4
Ρέθυμνο	7,2
Χανιά	26,45

Πίνακας 5.13: Ισχύς αιολικών ανά νομό.

Υπάρχουν αρκετά τεχνικά προβλήματα στην λειτουργία των αιολικών πάρκων που κυρίως σχετίζονται με την ευστάθεια του Συστήματος, όπως η μικρή ανοχή των παλαιών Ανεμογεννητριών σε διαταραχές τάσης που είναι συχνές σε μικρά Συστήματα, όπως της Κρήτης. Ωστόσο οι νέες Α/Γ είναι εφοδιασμένες με κατάλληλα συστήματα και η εμπειρία της Κρήτης ώθησε τους παραγωγούς να προμηθευτούν αυτά τα συστήματα προστασίας, ενώ προστέθηκε όρος στον Κώδικα Διαχείρισης Ηλεκτρικής Ενέργειας (Ικανότητα αδιάλειπτης λειτουργίας υπό χαμηλή τάση). Έτσι για την ένταξη νέων αιολικών πάρκων πρέπει να τηρούνται οι παρακάτω προδιαγραφές που αφορούν:

- Α) Όρια συχνότητας και τάσης για υποχρεωτική δυνατότητα λειτουργίας
- Β) Υποχρεωτική δυνατότητα ρύθμισης τάσης
- Γ) Απαιτήσεις ρύθμισης τάσης, άεργου ισχύος και συντελεστή ισχύος
- Δ) Ικανότητα αδιάλειπτης λειτουργίας υπό χαμηλή τάση
- Ε) Συνεισφορά στη ρύθμιση φορτίου-συχνότητας
- ΣΤ) Επικοινωνία με το κέντρο ελέγχου ενέργειας.

6 ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΣΗΕ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ

6.1 Εισαγωγή

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο γίνεται η ανάπτυξη απλοποιημένων μοντέλων αιολικής παραγωγής, με σκοπό την δυναμική ανάλυση τους και την μελέτη της ευστάθειας μετά από διαταραχές στο δίκτυο. Για την ανάπτυξη των εν λόγω μοντέλων δυναμικής λειτουργίας Α/Γ επιλέχθηκε το πρόγραμμα ανοιχτού κώδικα Matdyn, και επιβοηθητικά χρησιμοποιήθηκαν τα Matpower, Simulink και ευρετικός αλγόριθμος με βελτιστοποίηση σμήνους σωματιδίων. Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει η ανάλυση του τρόπου λειτουργίας και χρήσης των προγραμμάτων που χρησιμοποιήθηκαν αλλά και ο τρόπος ανάπτυξης προσεγγιστικών δυναμικών μοντέλων Α/Γ.

6.2 Το πρόγραμμα Matpower

Το MATPOWER είναι ένα πρόγραμμα κυρίως για την επίλυση προβλημάτων που σχετίζονται με ροή φορτίου και βέλτιστη ροή φορτίου. Προορίζεται για έρευνα και εκπαιδευτικούς σκοπούς καθώς είναι εξαιρετικά εύκολο στην χρήση και εύκολα τροποποιήσιμο από άτομα που έχουν απλές γνώσεις δομημένου προγραμματισμού.

Το MATPOWER περιλαμβάνει ένα σύνολο έτοιμων μοντέλων Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας και ένα σύνολο εντολών για την προσομοίωση της ροής φορτίου με διάφορες μεθόδους. Ο χρήστης έχει την δυνατότητα να προσθέτει ζυγούς και διάφορους περιορισμούς στο κάθε σύστημα, καθώς επίσης έχει την δυνατότητα να εκτελεί προσομοιώσεις που του επιτρέπουν να ελέγχει τις ροές φορτίου και άλλα αποτελέσματα.

Όπως θα αναλυθεί σε επόμενη ενότητα, το MATPOWER είναι απαραίτητο για την χρήση του συνεργαζόμενου προγράμματος Matdyn στο οποίο προσομοιώνεται η δυναμική λειτουργία ενός ΣΗΕ με βάση την ροή φορτίου που υπολογίζεται από το MATPOWER.

6.2.1 Δεδομένα εισαγωγής

Τα αρχεία δεδομένων που χρησιμοποιούνται από το MATPOWER είναι αρχεία σε μορφή M-files και σε αυτά ορίζονται οι τιμές των μεταβλητών (baseMVA, bus, branch, gen) που είναι απαραίτητες για την προσομοίωση της ροής φορτίου.

Το πρώτο όρισμα που συναντάμε είναι το **baseMVA** το οποίο παίρνει την τιμή της χρησιμοποιούμενης βάσης ισχύος.

Τα υπόλοιπα ορίσματα είναι σε μορφή τριών πινάκων (ένας πίνακας για τα στοιχεία των ζυγών, ένας για τα στοιχεία των γεννητριών και ένας για τα στοιχεία των γραμμών). Κάθε γραμμή του εκάστοτε πίνακα δεδομένων εισαγωγής, αντιστοιχεί σε έναν ζυγό, κλάδο ή γεννήτρια αντιστοίχως. Οι στήλες των πινάκων αναφέρονται σε διάφορα στοιχεία του εκατοστέ ζυγού, γεννήτριας ή γραμμής.

Παρακάτω ακολουθεί η ανάλυση των πινάκων δεδομένων που χρησιμοποιούνται στο Matpower.

Αριθ. στήλης	Bus Data Format	Δεδομένα Ζυγών
1	bus number	όνομα ζυγού
2	bus type	είδος ζυγού
3	Pd real power demand (MW)	ζήτηση ενεργού ισχύος
4	Qd, reactive power demand (MVar)	ζήτηση άεργου ισχύος
5	Gs, shunt conductance	εγκάρσια αγωγιμότητα διακλαδώσεων
6	Bs, shunt susceptance (MVar)	εγκάρσια χωρητικότητα
7	area number	-
8	Vm, voltage magnitude (p.u.)	μέτρο τάσης
9	Va, voltage angle (degrees)	φασική γωνία της τάσης σε μοίρες
10	baseKV, base voltage (kV)	βασική τάση (kV)
11	zone, loss zone (1-999)	-
12	maxVm, maximum voltage magnitude (p.u.)	μέγιστο μέτρο τάσης (α.μ.)
13	minVm, minimum voltage magnitude (p.u.)	ελάχιστο μέτρο τάσης (α.μ.)

Πίνακας 6.1: Πίνακας εισαγωγής στοιχείων των ζυγών.

Αριθμ. στήλης	Generator Data Format	Δεδομένα Γεννητριών
1	Generator number	Αριθμός γεννήτριας
2	Pg, real power output (MW)	Ενεργός ισχύς εξόδου
3	Qg, reactive power output (MVar)	Άεργος ισχύς εξόδου
4	Qmax, maximum reactive power output (MVar)	Μέγιστη άεργος ισχύς εξόδου
5	Qmin, minimum reactive power output (MVar)	Ελάχιστη άεργος ισχύς εξόδου
6	Vg, voltage magnitude setpoint (p.u.)	Μέτρο τάσης αναφοράς
7	mBase, total MVA base of this machine	Βάση ισχύος γεννήτριας
8	status	Κατάσταση
9	Pmax, maximum real power output (MW)	Μέγιστη έξοδος ενεργού ισχύος
10	Pmin, minimum real power output (MW)	Ελάχιστη έξοδος ενεργού ισχύος
11	Pc1, lower real power output of PQ (MW)	Ελάχιστη έξοδος ενεργού ισχύος
12	Pc2, upper real power output of PQ (MW)	Άνω όριο εξόδου ενεργού ισχύος
13	Qc1min, minimum reactive power output (MVar)	Ελάχιστη έξοδος άεργου ισχύος
14	Qc1max, maximum reactive power output (MVar)	Μέγιστη έξοδος άεργου ισχύος
15	Qc2min, minimum reactive power output (MVar)	Ελάχιστη έξοδος άεργου ισχύος
16	Qc2max, maximum reactive power output (MVar)	Μέγιστη έξοδος άεργου ισχύος
17	RAMP_AGC, ramp rate for load for load following/AGC (MW/min)	Μέγιστος ρυθμός αύξησης φορτίου/AGC
18	RAMP_10, ramp rate for load for 10 minutes reserves (MW)	Μέγιστος ρυθμός αύξησης ισχύος για 10 λεπτά
19	RAMP_30, ramp rate for load for 30 minutes reserves (MW)	Μέγιστος ρυθμός αύξησης ισχύος για 30 λεπτά
20	RAMP_Q, ramp rate for reactive power (MVar/min)	Μέγιστος ρυθμός αύξησης για άεργο

Πίνακας 6.2: Πίνακας εισαγωγής στοιχείων των γεννητριών.

Αριθμ. στήλης	Branch Data Format	Δεδομένα Γραμμών μεταφοράς
1	f, from bus number	ζυγός αναχώρησης (από)
2	t, to bus number	ζυγός άφιξης (προς)
3	r, resistance (p.u.)	αντίσταση(α.μ.)
4	x, reactance (p.u.)	επαγωγική αντίδραση (α.μ.)
5	b, total line charging susceptance (p.u.)	ολική χωρητικότητα γραμμής (α.μ.)
6	Rate A, MVA rating A	μακροπρόθεσμο όριο μεταφερόμενης ισχύος
7	Rate B, MVA rating B (short term rating)	βραχυπρόθεσμο όριο μεταφερόμενης ισχύος
8	Rate C MVA rating C	όριο μεταφερόμενης ισχύος MVA έκτακτης ανάγκης
9	ratio, transformer off nominal turns ratio	αντίσταση στο ζυγό κατεύθυνσης
10	angle, transformer phase shift angle	αλλαγή φάσης μετασχηματιστή
11	initial branch status, 1 on, 0 off	κατάσταση γραμμής μεταφοράς
12	minimum angle difference, (degrees)	ελάχιστη διαφορά φάσης τάσεων (σε μοίρες)
13	maximum angle difference, (degrees)	μέγιστη διαφορά φάσης τάσεων (σε μοίρες)

Πίνακας6.3: Πίνακας εισαγωγής στοιχείων των γεννητριών.

6.3 Το πρόγραμμα MatDyn

Το MatDyn είναι ένα ελεύθερο πρόγραμμα ανοιχτού κώδικα σε Matlab και χρησιμοποιείται για την εκτέλεση της δυναμικής ανάλυσης Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας. Είναι βασισμένο στο MATPOWER και μοιράζεται τη φιλοσοφία του.

Προορίζεται ως εργαλείο προσομοίωσης για ερευνητικούς και εκπαιδευτικούς σκοπούς και είναι εύκολο στη χρήση και την τροποποίηση του. Σκοπός του MatDyn είναι η δυναμική ανάλυση της συμπεριφοράς και απόκρισης ενός Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας σε διάφορα είδη σφαλμάτων και διαταραχών.

Οι απαιτήσεις για το MatDyn είναι οι ακόλουθες:

α) Πρέπει να εγκατασταθεί η Matlab

β)Το MATPOWER πρέπει να εγκατασταθεί και να προστεθεί στο path του Matlab

γ)Το MatDyn πρέπει να εγκατασταθεί και να προστεθεί path του Matlab.

Για τις ανάγκες της εργασίας τα προγράμματα που έχουν χρησιμοποιηθεί είναι τα:

- MATPOWER 4.1
- MatDyn1.2

6.3.1 Μοντέλο ηλεκτρικής γεννήτριας στο Matdyn

Το πρόγραμμα Matdyn περιέχει 2 έτοιμα μοντέλα γεννητριών και δίνει την δυνατότητα στο χρήστη να επιλέξει ένα από αυτά ή να προσθέσει κάποιο νέο μοντέλο. Τα μοντέλα αυτά, αφορούν κλασικές γεννήτριες και γεννήτριες 4^{ης} τάξεως. Σε όλες τις προσομοιώσεις χρησιμοποιήθηκαν οι σύγχρονες γεννήτριες 4^{ης} τάξεως. Παρακάτω αναλύονται οι εξισώσεις επίλυσης των γεννητριών, των exciters και των governor που χρησιμοποιούνται από το πρόγραμμα και αφορούν τις γεννήτριες 4^{ης} τάξεως.

Εξισώσεις επίλυσης γεννητριών

$$d\omega = \pi * \frac{freq}{H} * (-D * (\omega - \omega_s) + P_m - P_e) \quad (6.1)$$

$$dE_q = \frac{1}{T_{d_{tr}}} * (E_{fd} - E_{q_{tr}} + (x_d - x_{d_{tr}}) * I_d) \quad (6.2)$$

$$dE_d = \frac{1}{T_{q_{tr}}} * (-E_{d_{tr}} - (x_q - x_{q_{tr}}) * I_q) \quad (6.3)$$

Όπου:

P_e : Ηλεκτρική ισχύς

P_m : Μηχανική ισχύς

H : Αδράνεια της γεννήτριας

D : Σταθερά απόσβεσης της γεννήτριας

ω : Τρέχουσα γωνιακή ταχύτητα της γεννήτριας

ω_s : Η γωνιακή ταχύτητα βάσης

E_q : Συνιστώσα της τάσης του στάτη στον άξονα q

E_d : Συνιστώσα της τάσης του στάτη στον άξονα d

E_{fd} : Διέγερση Τάσης στον άξονα d

Εξισώσεις επίλυσης exciter

$$U_x = A_{ex} * e(B_{ex} * E_{fd}) \quad (6.4)$$

$$dU_r = \frac{1}{T_a} * (K_a * (U_{ref} - U + U_{ref2} - U_f) - U_r) \quad (6.5)$$

$$dU_f = \frac{1}{T_f} * \left(\frac{K_f}{T_e} * (U_r - U_x - K_e * E_{fd}) - U_f \right) \quad (6.6)$$

$$dE_{fd} = \frac{1}{T_e} * (U_{r2} - U_x - K_e * E_{fd}) \quad (6.7)$$

Όπου:

$$U_r = U_x + K_e * E_{fd}$$

$$U_{ref2} = U + \frac{(U_x + K_e * E_{fd})}{K_a} - U$$

$$U_{ref} = U$$

$$dU_r = U_x + K_e * E_{fd}$$

Εξισώσεις επίλυσης governor

$$dx = K * \left(-\frac{1}{T_1} * x + \left(1 - \frac{T_2}{T_1} \right) * (\omega - \omega_{gas}) \right) \quad (6.8)$$

$$dP = \frac{1}{T_1} * x + \frac{T_2}{T_1} * (\omega - \omega_{gas}) \quad (6.9)$$

Όπου:

$$P = K * (2\pi * \text{freq} - \omega)$$

$$x = T_1 * \left(1 - \frac{T_2}{T_1} \right) * (2\pi * \text{freq} - \omega)$$

6.3.2 Δεδομένα εισαγωγής στο Matdyn

Τα δεδομένα εισαγωγής χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες:

1. **Power flow data** - Δεδομένα για την ροή ισχύος
2. **Dynamic data** - Δεδομένα για την δυναμική ανάλυση
3. **Event data** - Δεδομένα γεγονότων

1. Power flow data - Δεδομένα για την ροή ισχύος

Για τα δεδομένα Power flow το Matdyn χρησιμοποιεί τα αποτελέσματα από το MATPOWER του οποίου η εισαγωγή δεδομένων αναλύθηκε παραπάνω.

2. Dynamic data - Δεδομένα για την δυναμική ανάλυση

Για τα δεδομένα Dynamic εισάγει ο χρήστης τα παρακάτω δεδομένα :

- α) Γενικά στοιχεία
- β) Στοιχεία γεννητριών
- γ) Στοιχεία exciter
- δ) Στοιχεία governor

α) Στα Γενικά στοιχεία εισάγουμε τα εξής στοιχεία:

freq	συχνότητα δικτύου [Hz]
stepsize	βήμα ολοκλήρωσης αλγόριθμου
stoptime	χρόνος παύσης προσομοίωσης

β) Στα στοιχεία γεννητριών εισάγουμε τιμές των σταθερών μεταβλητών των γεννητριών αλλά και των τύπο των γεννητριών. Τα δεδομένα των γεννητριών καθορίζονται στον πίνακα gen. Ο πίνακας έχει τόσες γραμμές, όσες οι γεννήτριες και κάθε μια γραμμή έχει στις στήλες της τα στοιχεία της εκάστοτε γεννήτριας. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα στοιχεία των στηλών.

genmodel	μοντέλο γεννήτριας
excmodel	μοντέλο exciter
govmodel	μοντέλο governor
H	αδράνεια γεννήτριας
D	απόσβεση γεννήτριας
X	αντίδραση
x'	παροδική αντίδραση

Πίνακας 6.4: Στοιχεία γεννητριών για κλασικά μοντέλα γεννητριών.

genmodel	μοντέλο γεννήτριας
excmodel	μοντέλο exciter
gonmodel	μοντέλο governor
H	αδράνεια γεννήτριας
D	απόσβεση γεννήτριας
xd	αντίδραση
xq	αντίδραση
Xd'	παροδική αντίδραση
Xq'	παροδική αντίδραση
T'd	Χρόνος αντίδρασης
T'q	Χρόνος αντίδρασης

Πίνακας 6.5: Στοιχεία γεννητριών για γεννήτριες 4ης γενιάς.

γ) Τα δεδομένα του exciter καθορίζονται στον πίνακα exc. Ο πίνακας έχει τόσες γραμμές, όσες οι γεννήτριες. Ο ορισμός των στηλών εξαρτάται από το μοντέλο του exciter. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα στοιχεία των στηλών.

gen	αριθμός των γεννητριών
Ka	κέρδος του ενισχυτή
Ta	χρονική σταθερά του ενισχυτή
Ke	κέρδος του exciter
Te	χρονική σταθερά του exciter
Kf	κέρδος stabilizer
Tf	χρονική σταθερά του stabilizer
Aex	συνάρτηση κορεσμού
Bex	συνάρτηση κορεσμού
Urmin	Κατώτερο όριο τάσης
Urmx	Ανώτερο όριο τάσης

Πίνακας 6.6: Πίνακας exc.

δ) Τα δεδομένα του governor ορίζονται στον πίνακα gon. Ο πίνακας έχει όσες γραμμές όσες και οι γεννήτριες. Ο ορισμός των στηλών εξαρτάται από το μοντέλο γεννήτριας και governor. Τα στοιχεία στον πίνακα καθορίζουν τις παραμέτρους της ταχύτητας του ρυθμιστή-governor.

Gen	αριθμός των γεννητριών
K	κέρδος
T1	χρονική σταθερά
T2	χρονική σταθερά
T3	χρονική σταθερά σε ρεβοκηνιτήρα
Pup	Ανώτερο όριο ισχύς
Pdown	Κατώτερο όριο ισχύς
Pmax	Μέγιστη ισχύς εξόδου
Pmin	Ελάχιστη ισχύς εξόδου

Πίνακας 6.7: Πίνακας gon.

3. Event data - Δεδομένα γεγονότων

Στο αρχείο εισαγωγής Event data εισάγονται τα δεδομένα των γεγονότων-σφαλμάτων που θέλουμε να προσομοιώσουμε. Το αρχείο αποτελείται από τρεις πίνακες.

Ο πρώτος πίνακας event, περιέχει όλους τους τύπους των γεγονότων και την χρονική στιγμή που συμβαίνουν κατά την διάρκεια της προσομοίωσης. Πιο αναλυτικά σε κάθε γραμμή εισάγεται το κάθε γεγονός, ενώ στις στήλες, η χρονική στιγμή και ο τύπος του γεγονότος. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα στοιχεία των στηλών.

Event data

time	Χρονικό σημείο συμβάντος	
event type	Είδος γεγονότος	1 για αλλαγή παραμέτρων των ζυγών
		2 για αλλαγή παραμέτρων των γραμμών

Στον δεύτερο πίνακα bus change εισάγονται οι αλλαγές των στοιχείων των ζυγών. Στην κάθε γραμμή εισάγεται το κάθε γεγονός, ενώ στις στήλες, η χρονική στιγμή, ο αριθμός του ζυγού που θα συμβεί η αλλαγή, η παράμετρος (από το MATPOWER) του αντίστοιχου ζυγού που θα υποστεί την αλλαγή και η νέα τιμή της παραμέτρου. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα στοιχεία των στηλών.

Bus change - Αλλαγή παραμέτρων των ζυγών

Time	χρονική στιγμή που συμβαίνει το γεγονός
Bus(row)	αριθμός του ζυγού που γίνεται η αλλαγή
Parameter(column)	παράμετρος του ζυγού που αλλάζει
newvalue	νέα τιμή παραμέτρου

Ουσιαστικά σε αυτόν τον πίνακα ορίζονται οι αλλαγές στοιχείων του αρχείου εισαγωγής του MATPOWER για τους ζυγούς.

Στον δεύτερο πίνακα line change εισάγονται οι αλλαγές των στοιχείων των γραμμών. Ομοίως και οι παράμετροι των γραμμών κατά την διάρκεια της προσομοίωσης μπορούν να αλλάξουν ορίζοντας τον πίνακα αλλαγής των κόμβων (Branch data του MATPOWER) με τον ίδιο τρόπο που αλλάζονται οι παράμετροι των ζυγών.

Line change - Αλλαγή παραμέτρων των γραμμών

time	χρονική στιγμή που συμβαίνει το γεγονός
Line(row)	αριθμός της γραμμής που γίνεται η αλλαγή
parameter(column)	παράμετρος της γραμμής προς αλλαγή
newvalue	νέα τιμή παραμέτρου

6.3.3 Δεδομένα εξόδου

Τα δεδομένα εξόδου που προκύπτουν από το πρόγραμμα παρουσιάζονται σε γραφικές παραστάσεις αλλά και αναλυτικά στο workspace της matlab:

- Angles : Γωνίες της γεννήτριας σε μοίρες
- Speeds: Ταχύτητα της γεννήτριας
- Eq_tr: Συνιστώσα Q-axis της τάσης πριν την παροδική αντίδραση
- Ed_tr: Συνιστώσα D-axis της τάσης πριν την παροδική αντίδραση
- Efd: Διέγερση Τάσης
- PM: Μηχανική ισχύς εξόδου
- Voltages: Τάση δικτύου $U/_\delta$ σε p.u.
- Stepsize: Μέγεθος βήματος της ολοκλήρωσης
- Errest: Εκτίμηση σφάλματος (μηδέν για τις μεθόδους Modified Euler και Range-Kutta)
- Time: Χρόνος των βημάτων σε δευτερόλεπτα

7 Προσαρμογή παραμέτρων σύγχρονης γεννήτριας για την προσέγγιση της συμπεριφοράς ανεμογεννήτριας

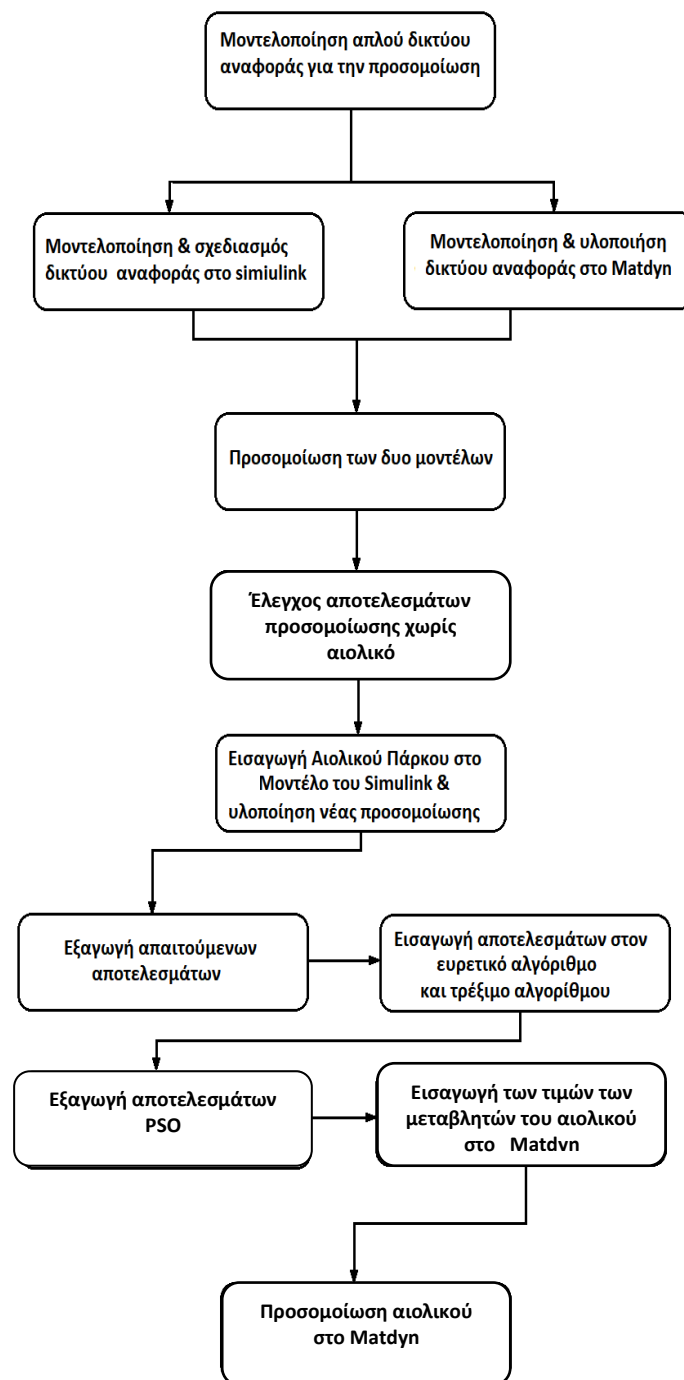
7.1 Ένταξη αιολικών στο Matdyn

Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα, το Matdyn διαθέτει δύο διαφορετικά μοντέλα σύγχρονων γεννητριών. Ο στόχος ήταν η δημιουργία και η ένταξη μιας νέου τύπου γεννήτριας στο πρόγραμμα, που θα αντιστοιχούσε σε μια ανεμογεννήτρια. Για να γίνει αυτό θα έπρεπε να εισαχθούν, οι εξισώσεις του μοντέλου της ανεμογεννήτριας στο Matdyn. Εναλλακτικά μπορεί να γίνει επιλογή κατάλληλων παραμέτρων του μοντέλου της σύγχρονης γεννήτριας, που θα οδηγεί σε συμπεριφορά σχεδόν όμοια με αυτή μιας ανεμογεννήτριας. Ουσιαστικά, ο στόχος είναι η εύρεση τιμών των παραμέτρων του υπάρχοντος μοντέλου γεννήτριας στο Matdyn, οι οποίες καθιστούν τον τρόπο λειτουργίας της γεννήτριας ίδιο με αυτόν ενός αιολικού. Για την εύρεση των παραμέτρων χρησιμοποιήθηκε ο ευρετικός αλγόριθμος Particle Swarm Optimization (PSO). Η διαδικασία εύρεσης αυτών των τιμών, παρουσιάζεται αναλυτικά παρακάτω.

Αρχικά έγινε η προσομοίωση ενός απλού ΣΗΕ με ένταξη αιολικού, στο πρόγραμμα Simulink της Matlab. Έχοντας σαν σημείο αναφοράς την λειτουργία του αιολικού (χρονοσειρά τάσης και ρεύματος κατά τη διάρκεια του χρόνου προσομοίωσης), έγινε η προσπάθεια προσομοίωσης ενός ταυτόσημου ΣΗΕ στο Matdyn, όπου ο ρόλος του αιολικού αντικαθίσταται από μια συμβατική γεννήτρια. Σκοπός είναι η εύρεση των τιμών της γεννήτριας έτσι ώστε η συνεισφορά και ο τρόπος λειτουργίας της να είναι ίδιος με το αιολικό στο Simulink.

Σχεδιάστηκε λοιπόν, ένα απλοποιημένο δίκτυο αναφοράς το οποίο στην συνέχεια μοντελοποιήθηκε και σχεδιάστηκε στο πρόγραμμα Simulink, ενώ ταυτόχρονα μοντελοποιήθηκε και στο πρόγραμμα Matdyn. Έπειτα πραγματοποιήθηκε η προσομοίωση και στα δυο προγράμματα με σκοπό τον έλεγχο ομοιότητας της συμπεριφοράς του δικτύου για ένα συγκεκριμένο σφάλμα στα δύο προγράμματα. Αφού πραγματοποιήθηκε ο έλεγχος, στο μοντέλο του Simulink προστέθηκε ένα αιολικό πάρκο και έγινε η προσομοίωση του μοντέλου προκειμένου να δούμε την συμπεριφορά του αιολικού κατά την διάρκεια του σφάλματος. Έχοντας δεδομένο τον τρόπο συμπεριφοράς του αιολικού και με την βοήθεια ευρετικού αλγορίθμου με βελτιστοποίηση σμήνους σωματιδίων, πραγματοποιήθηκε η εύρεση των τιμών, των αναγκαίων μεταβλητών για την αναπαράσταση του αιολικού σε υπάρχον τύπο γεννήτριας του Matdyn όπως αναφέρθηκε πιο πάνω. Τέλος, αφού βρέθηκαν τα απαραίτητα στοιχεία, έγινε η εισαγωγή τους στο απλοποιημένο δίκτυο αναφοράς του μοντέλου στο Matdyn, ενώ πραγματοποιήθηκε ο έλεγχος συμπεριφοράς του αιολικού με τον τρόπο συμπεριφοράς του αιολικού στο Simulink.

Παρακάτω παρουσιάζεται σχηματικά ο τρόπος επίλυσης του προβλήματος της εύρεσης των τιμών των παραμέτρων του μοντέλου γεννήτριας στο Matdyn για την προσέγγιση του τρόπου λειτουργίας του αιολικού πάρκου.

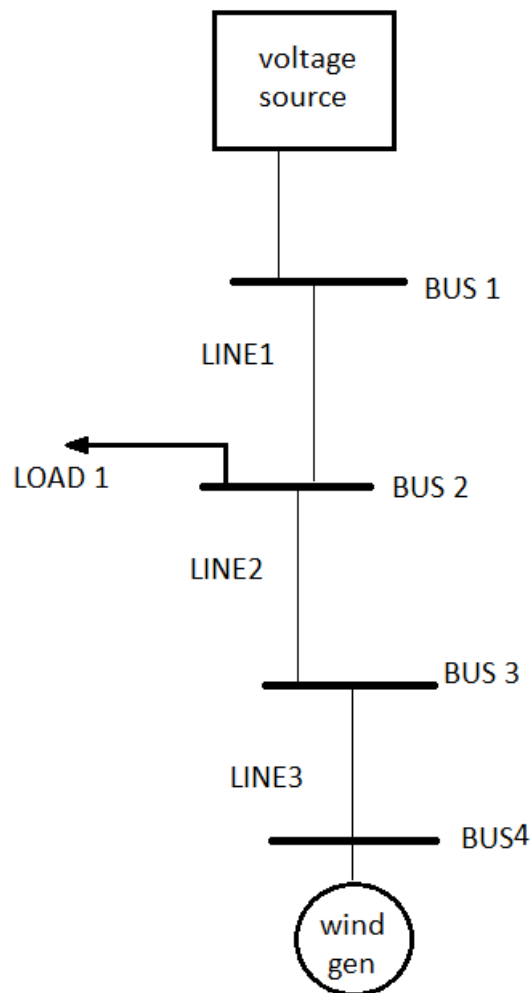


Σχήμα 7.1: Σχηματική αναπαράσταση του τρόπου επίλυσης του προβλήματος.

7.1.1 Σχεδιασμός συστήματος αναφοράς

Το σύστημα αναφοράς σχεδιάστηκε λαμβάνοντας υπόψη την απλότητα που απαιτείται για την εύκολη προσαρμογή στα δύο προγράμματα προσομοίωσης αλλά και για την προσέγγιση ρεαλιστικών τιμών των τάσεων κατά την διάρκεια ενός σφάλματος.

Το εν λόγω σύστημα αποτελείται από μια σταθερή πηγή τάσης 3 φάσεων που τροφοδοτεί το δίκτυο με τάση 150 kV, από ένα αιολικό πάρκο 9 MW (6 A/Γ των 1,5 MW), ένα φορτίο 35MW και 4 ζυγούς μεταφοράς οι οποίοι συνδέονται μεταξύ τους μέσω 3 γραμμών μεταφοράς. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η τοπολογία του συστήματος αναφοράς.



Σχήμα 7.2: Τοπολογία απλού δικτύου αναφοράς.

7.1.2 Μοντελοποίηση συστήματος αναφοράς στο Matdyn

Σε αυτήν την ενότητα γίνεται η προσαρμογή του συστήματος αναφοράς στο πρόγραμμα Matdyn. Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα ανάλυσης του προγράμματος, το Matdyn παίρνει σαν δεδομένα εισαγωγής, τα χαρακτηριστικά των γεννητριών, την τοπολογία του δικτύου, το είδος των σφαλμάτων, την μέθοδο επίλυσης αλλά και γενικά στοιχεία όπως η συχνότητα του δικτύου και ο χρόνος προσομοίωσης. Παρακάτω ακολουθούν τα δεδομένα εισαγωγής σε πινάκες.

Δεδομένα δυναμικής ανάλυσης

A) Στο αντίστοιχο αρχείο .mat εισήχθησαν τα χαρακτηριστικά των γεννητριών τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω.

Γενικά δεδομένα

Freq = 50 (hz)
stepsize = 0.001
Stop time = 0.7

Για την εισαγωγή της σταθερής πηγής τάσης επιλέχθηκε γεννήτρια τύπου 1, της οποίας οι τιμές των παραμέτρων της παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες.

Δεδομένα γεννήτριας

H	D	x	x'
3000000	0.01	0.000005	0.000005

Δεδομένα Exciter

Ka	Ta	Ke	Te	Kf	Tf
25	0.5	-0.17	0.095	0.04	0.001

Δεδομένα Governor

K	T1	T2	T3	Pup	Pdown	Pmax	Pmin
15	0.5	1	1	0.1	-0.2	1	0

Για την αναπαράσταση του αιολικού επιλέχθηκε γεννήτρια τύπου 2. Οι τιμές των παραμέτρων της γεννήτριας είναι άγνωστες και είναι αυτές που ψάχνουμε. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι μεταβλητές για την γεννήτρια τύπου 2 των οποίων τις τιμές ψάχνουμε.

GEN	H	Xd	Xq	Xd_tr	Xq_tr	Td_tr	Tq_tr
EXC	Ka	Ta	Ke	Te	Kf		
GOV	K	T1	T2	T3			

Δεδομένα για την ροή ισχύος

Στο αντίστοιχο αρχείο .mat εισήχθησαν τα χαρακτηριστικά των ζυγών, των γραμμών μεταφοράς, τα φορτία και η τοπολογία του δικτύου. Παρακάτω παρουσιάζονται οι πίνακες των δεδομένων εισόδου.

Βάση ισχύος συστήματος σε MVA

mpc.baseMVA = 100

Δεδομένα ζυγών

bus_i	type	Pd	Qd	Gs
1	3	0	0	0
2	1	35	15	0
3	1	0	0	0
4	2	0	0	0

Πίνακας 7.3

Δεδομένα γεννητριών

bus	Pg	Qg	Qmax	Qmin	Vg	mBase	status	Pmax	Pmin
1	51	0	50	0	1	100	1	500	0
4	9	0	9	-9	1	100	1	9	0

Πίνακας 7.4

Δεδομένα γραμμών

fbus	tbus	r	x	b
1	2	0.02846	0.06928	0.00317
2	3	0.113866	0.27710	0.01271
3	4	0.17080	0.41571	0.019075

Πίνακας 7.5

Δεδομένα γεγονότων

Στο αντίστοιχο αρχείο .mat εισήχθησαν τα στοιχεία για τον τύπο του σφάλματος.

Παράδειγμα δεδομένων γεγονότων δίνεται στους επόμενους πίνακες.

time	Event type
0.6	1
0.8	1

Πίνακας 7.6

Στον Πίνακα 7.6 γίνεται η εισαγωγή των γεγονότων. Την χρονική στιγμή 0.6 πραγματοποιείται συμβάν τύπου 1, δηλαδή αλλαγή σε κάποιο χαρακτηριστικό ενός ζυγού. Ομοίως και την χρονική 0.8.

time	bus(row)	attribute(col)	new_value
0.6	3	5	22000
0.8	3	5	0

Πίνακας 7.7

Στον πίνακα 7.7 γίνεται η δήλωση των ζυγών που πραγματοποιούνται οι αλλαγές για κάθε χρονική στιγμή, το χαρακτηριστικά που αλλάζουν και η νέα τιμή τους. Αναλυτικότερα οι αλλαγές που πραγματοποιήθηκαν αφορούν τον 3^ο ζυγό και συγκεκριμένα το χαρακτηριστικό της 5^{ης} γραμμής του πίνακα 7.3, δηλαδή το Gs (αγωγιμότητα). Έτσι με βάση τους πίνακες 7.7 και 7.3 την χρονική στιγμή 0.6 το Gs αλλάζει από 0 σε 22000 και την χρονική στιγμή 0.8 επανέρχεται στην αρχική τιμή.

7.2 Μοντέλο αιολικού πάρκου στο Simulink

7.2.1 Το πρόγραμμα Simulink

Το simulink είναι ένα εξαιρετικά χρήσιμο εργαλείο του Matlab με το οποίο καθίσταται δυνατή η προσομοίωση συστημάτων προερχομένων από πληθώρα επιστημονικών περιοχών. Παρόλο που η χρήση του δεν προϋποθέτει γνώση του Matlab, η γνώση αυτή αποτελεί ένα σημαντικό πλεονέκτημα καθώς παρέχει την δυνατότητα αποδοτικότερης χρήσης του. Ένα από τα σημαντικότερα προτερήματα του simulink είναι η απλότητά του καθώς οι διευκολύνσεις που παρέχει στον χρήστη είναι πολυάριθμες και σε συνδυασμό με το γραφικό του περιβάλλον το καθιστούν εύχρηστο.

- **Άνοιγμα αρχείων και προσθήκη στοιχείων σε αυτά**

Για να ανοίξουμε ένα νέο αρχείο simulink ή ένα ήδη υπάρχον χρησιμοποιούνται οι γνωστές συντομεύσεις των windows στην γραμμή menu πάνω αριστερά στο παράθυρο Simulink Library Browser.

Για να προστεθεί στο νέο αρχείο ένα block από το παράθυρο Simulink Library Browser, απλώς το σύρουμε από το παράθυρο στο αρχείο, κατά τον ίδιο τρόπο που μεταφέρουμε αρχεία από ένα παράθυρο σε ένα άλλο στα windows. Από την στιγμή που στο καινούργιο αρχείο έχει τοποθετηθεί ένα block, κάνοντας διπλό click σε αυτό ανοίγει ένα παράθυρο με τις ρυθμίσεις του. Κάθε block έχει ξεχωριστές ιδιότητες οι οποίες θα παρουσιαστούν στην συνέχεια. Επίσης, κάνοντας δεξί click πάνω στο block, εμφανίζεται ένα menu. Επιλέγοντας το Help παρουσιάζεται λεπτομερής βοήθεια για αυτό.

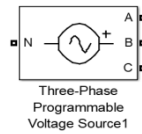
- **Βιβλιοθήκη Simulink**

Η βιβλιοθήκη Simulink χωρίζεται σε 15 μικρότερες οι οποίες αναφέρονται ακολούθως:

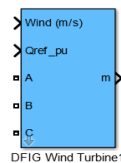
1. Commonly Used Blocks
2. Continuous
3. Discontinuities
4. Discrete
5. Logic and Bit Operations
6. Look-Up Tables
7. Math Operators
8. Model Verification
9. Model Wide Utilities
10. Ports & Subsystems
11. Signal Attributes
12. Signal Routing
13. Sinks
14. Sources
15. User -Defined Functions.

- **Χρήση των στοιχείων των βιβλιοθηκών του simulink**

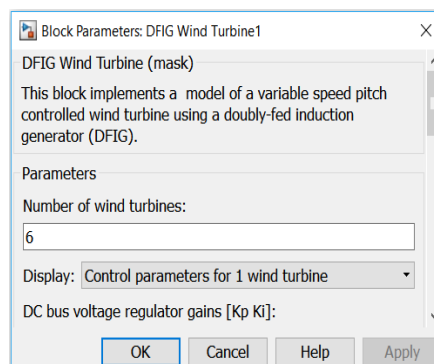
Τα στοιχεία των βιβλιοθηκών είναι τα blocks τα οποία παρουσιάζονται γραφικά. Παρακάτω φαίνονται δυο παραδείγματα block των βιβλιοθηκών τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για την εκτέλεση της συγκεκριμένης εργασίας.



Το παραπάνω block αναπαριστά την λειτουργία μιας τριφασικής πηγής τάσης, ενώ το επόμενο block αναπαριστά την λειτουργία ενός αιολικού πάρκου.



Για να τοποθετηθεί ένα block σε ένα αρχείο του simulink αρκεί να το σύρουμε από το παράθυρο Simulink Library Browser στο αρχείο, όπως μεταφέρουμε αρχεία μεταξύ των παραθύρων των windows. Για να ανοίξουμε το παράθυρο των ρυθμίσεων ενός block αφού το έχουμε τοποθετήσει στο αρχείο, αρκεί να κάνουμε διπλό click πάνω του. Παρακάτω φαίνεται το παράθυρο ρυθμίσεων παραμέτρων του προηγούμενου παραδείγματος αναπαράστασης του αιολικού.



Για να συνδέσουμε δύο blocks μεταξύ τους, μπορούμε να σύρουμε έχοντας πατημένο το αριστερό πλήκτρο του mouse, το βέλος που ξεκινά από το ένα block μέχρι την υποδοχή του άλλου.

- **Αποτελέσματα του simulink**

Αφού ολοκληρώσουμε το μοντέλο που θέλουμε να προσομοιώσουμε και αφού προσθέσουμε και block μετρήσεων, των οποίων η λειτουργία είναι να αποθηκεύουν

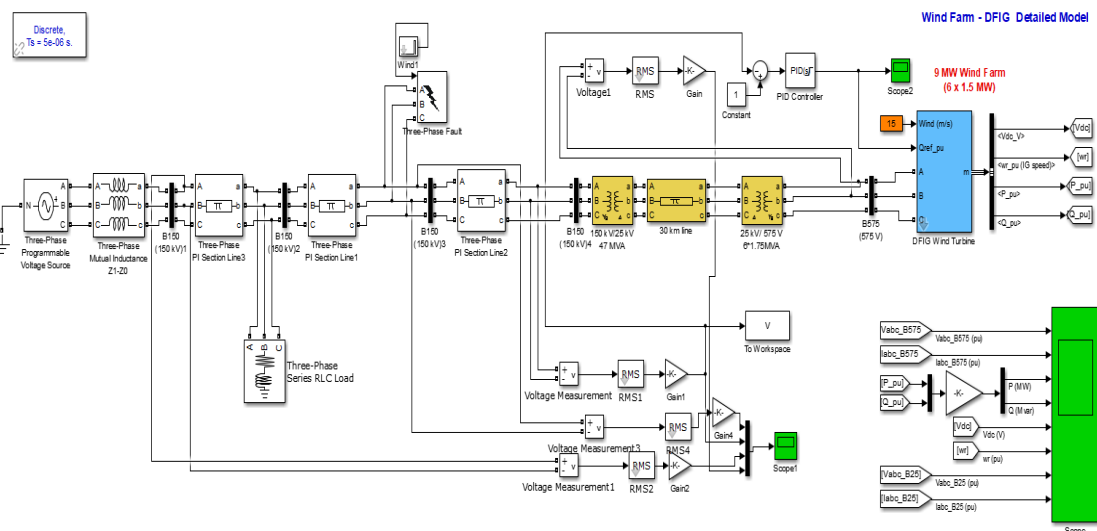
αποτελέσματα μεταβλητών αλλά και να σχεδιάζουν γραφικές παραστάσεις αποτελεσμάτων, προσχωρούμε στην έναρξη της προσομοίωσης πατώντας το run.

Στην συνέχεια για να προβληθούν τα αποτελέσματα, πρέπει να ανοιχτούν τα μετρητικά block ή οι αποθηκευμένοι πίνακες αποτελεσμάτων στο workspace της matlab.

7.3 Προσομοίωση αιολικού στο Simulink

Αφού έγινε ο σχεδιασμός του δικτύου αναφοράς περάσαμε στην υλοποίηση του και στο σχεδιασμό του στο γραφικό περιβάλλον του Simulink .

Το δίκτυο που σχεδιάστηκε στο γραφικό περιβάλλον του Simulink είναι αυτό που αναφέρθηκε παραπάνω, δηλαδή ένα δίκτυο που αποτελείται από μια σταθερή πηγή τάσης 3 φάσεων που τροφοδοτεί το δίκτυο, από ένα αιολικό πάρκο της τάξεως των 9 MW(6 Α/Γ των 1,5 MW) και από 4 ζυγούς μεταφοράς 150 kV οι οποίοι συνδέονται μεταξύ τους με γραμμές μεταφοράς. Ο τύπος των ανεμογεννητριών που χρησιμοποιήθηκαν, είναι ανεμογεννήτριες με ασύγχρονη γεννήτρια διπλής τροφοδότησης (DFIG), οι οποίες είναι εξελιγμένης τεχνολογίας γεννήτριες και πιο αποδοτικές λόγω του ελέγχου ισχύος με μετατροπείς ισχύος. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται το δίκτυο που προσομοιώθηκε, σε γραφικό περιβάλλον του Simulink.



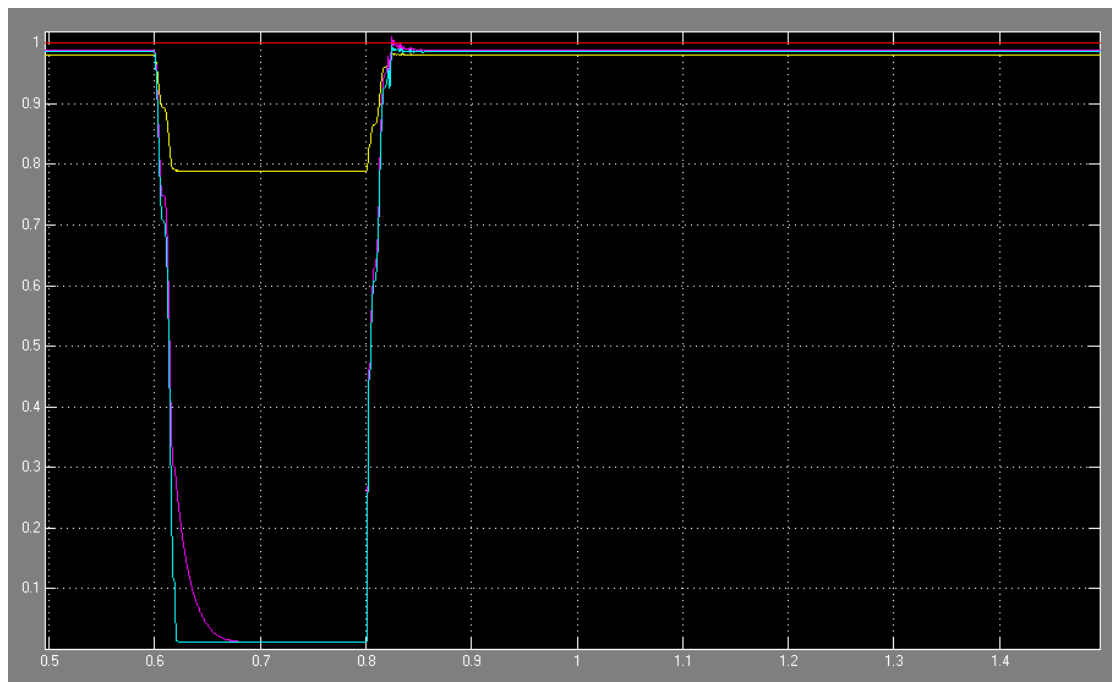
Σχήμα 7.8: Προσομοίωση συστήματος αναφοράς στο Simulink.

Το σφάλμα για το οποίο μελετήθηκε η συμπεριφορά του συστήματος , είναι ένα τριφασικό σφάλμα βραχυκυκλώματος προς γη στον τρίτο ζυγό , διάρκειας δύο δεκάτων του δευτερόλεπτου. Παρακάτω αναλύονται τα στοιχεία εισαγωγής και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

7.3.1 Αποτελέσματα προσομοίωσης στο Simulink

Αφού έγινε η μοντελοποίηση του απλού δικτύου αναφοράς στο simulink πραγματοποιήθηκαν δύο προσομοιώσεις, μια χωρίς το αιολικό και μια με το αιολικό. Σκοπός είναι να μελετηθεί ο τρόπος απόκρισης του συστήματος κατά την διάρκεια του σφάλματος με και χωρίς το αιολικό. Ο βασικός λόγος της προσομοίωσης χωρίς το αιολικό είναι ο έλεγχος της ομοιότητας του δικτύου αναφοράς με το αντίστοιχο στο Matdyn. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τις δύο προσομοιώσεις.

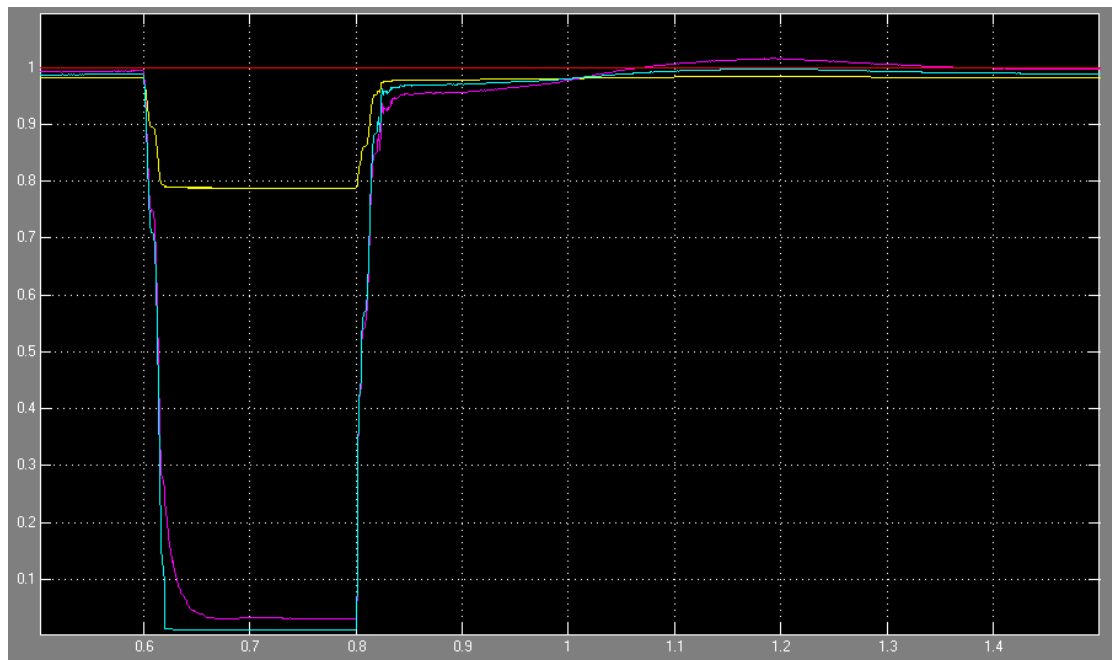
Α) Προσομοίωση για σφάλμα τριφασικού βραχυκυκλώματος την χρονική στιγμή 0.6s έως 0.8 s στον ζυγό 3 (σχήμα 7.2) με αποσυνδεδεμένο αιολικό.



Σχήμα 7.9: Γραφική παράσταση τάσεων – χρόνου στους 3 ζυγούς στο Simulink.

Στο παραπάνω γράφημα φαίνεται η βύθιση της τάσης στους ζυγούς 2, 3 και 4 κατά την διάρκεια του σφάλματος, ενώ παρατηρούμε ότι όσο πιο κοντά στο σφάλμα βρίσκεται κάποιος ζυγός τόσο πιο πολύ επηρεάζεται η τάση σε αυτόν. Το γεγονός ότι η τάση στον ζυγό 1 δεν επηρεάζεται, οφείλεται στην ισχυρή πηγή τάσης η οποία κρατώντας σταθερό τον τρόπο λειτουργίας της κατά την διάρκεια του σφάλματος μας δίνει την ευκαιρία να παρατηρήσουμε πιο καθαρά την συμπεριφορά του αιολικού στην αντίστοιχη προσομοίωση. Έτσι μπορούμε να πάρουμε ένα πιο καλό αποτέλεσμα για τον τρόπο απόκρισης του αιολικού κατά την διάρκεια ενός σφάλματος.

Β) Προσομοίωση για σφάλμα τριφασικού βραχυκυκλώματος το χρονικό διάστημα 0.6s έως 0.8s στον 3 ζυγό, με συνδεδεμένο το αιολικό πάρκο.



Σχήμα 7.10: Γραφική παράσταση τάσεων – χρόνου στους 3 ζυγούς στο Simulink με αιολικό. .

Στο παραπάνω γράφημα, παρουσιάζεται η τάση στον ζυγό 4 (ροζ γραμμή), του αιολικού κατά την διάρκεια του σφάλματος. Όπως φαίνεται από την γραφική ο ζυγός στον οποίο είναι συνδεδεμένο το αιολικό πάρκο, έχει μικρότερη πτώση τάσης κατά την διάρκεια του σφάλματος σε σχέση με την περίπτωση μη σύνδεσης του πάρκου. Αυτό οφείλεται στο ότι η εξεταζόμενη ανεμογεννήτρια, είναι μια εξελιγμένης τεχνολογίας ανεμογεννήτρια με μετατροπείς ισχύος, όπου κατά την διάρκεια του σφάλματος παραμένει σε λειτουργία, συνεισφέροντας έτσι στην απόκριση της τάσης.

7.4 Ευρετικός αλγόριθμος βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων

7.4.1 Εισαγωγή

Η τεχνική βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων επινοήθηκε από τον Russell Eberhart και τον James Kennedy το 1995 και αρχικά προοριζόταν ως εργαλείο μελέτης κοινωνικής συμπεριφοράς, ωστόσο μετεξελίχτηκε σε μέθοδο βελτιστοποίησης, μιμούμενο τη συμπεριφορά ενός σμήνους ζώων ή εντόμων κατά την αναζήτηση τροφής. Εάν αποκωδικοποιηθεί ένα σύνολο από επιμέρους δράσεις (όπως π.χ. η αποφυγή της σύγκρουσης μεταξύ τους αλλά παράλληλα η μη απομάκρυνσή τους από το σμήνος) και αποδοθεί σε άτομα μιας πληθυσμιακής στοχαστικής μεθόδου, τότε οδηγούμαστε στη Βελτιστοποίηση Σμήνους Σωματιδίων.

Η βελτιστοποίηση Σμήνους Σωματιδίων (Particle Swarm Optimization – PSO) είναι ένας πολυδιάστατος στοχαστικός αλγόριθμος, ο οποίος βασίζεται σε ένα σύνολο σωματιδίων, που κάνει αναζήτηση ανάμεσα σε ένα πλήθος δυνατών λύσεων, της βέλτιστης λύσης του προβλήματος. Κάθε σωματίδιο αποτελεί και μια πιθανή λύση, ενώ ως σμήνος (swarm) ονομάζονται όλες οι δυνατές λύσεις σε κάθε επανάληψη του αλγορίθμου.

Στον αλγόριθμο PSO δεν απαιτείται η προσέγγιση των παραγώγων της αντικειμενικής συνάρτησης. Συνήθως ο αρχικός αριθμός των σωματιδίων δημιουργείται μέσω μιας γεννήτριας ψευδοτυχαίων αριθμών έχοντας ως στόχο να υπάρξει ομοιόμορφη κατανομή των σωματιδίων στο χώρο έρευνας, ο οποίος έχει καθοριστεί από τον χρήστη. Έπειτα τα σωματίδια κινούνται εντός του ν-διαστατού χώρου λύσεων, καθώς ακολουθούν ντετερμινιστικούς και στοχαστικούς κανόνες όπου αλλάζουν τις θέσεις και τις ταχύτητές τους. Οι θέσεις αυτές περνούν από αξιολόγηση μέσω της ορισμένης αντικειμενικής συνάρτησης. Κάθε ένα σωματίδιο γνωρίζει τη βέλτιστη θέση που έχει βρεθεί το ίδιο μέχρι εκείνη την ώρα, η οποία καλείται τοπικό βέλτιστο (local best), καθώς και την ολική βέλτιστη θέση που έχει βρεθεί είτε από το ίδιο είτε από κάποιο άλλο σωματίδιο του σμήνους έως εκείνη τη στιγμή, η οποία καλείται ολικό βέλτιστο (global best).

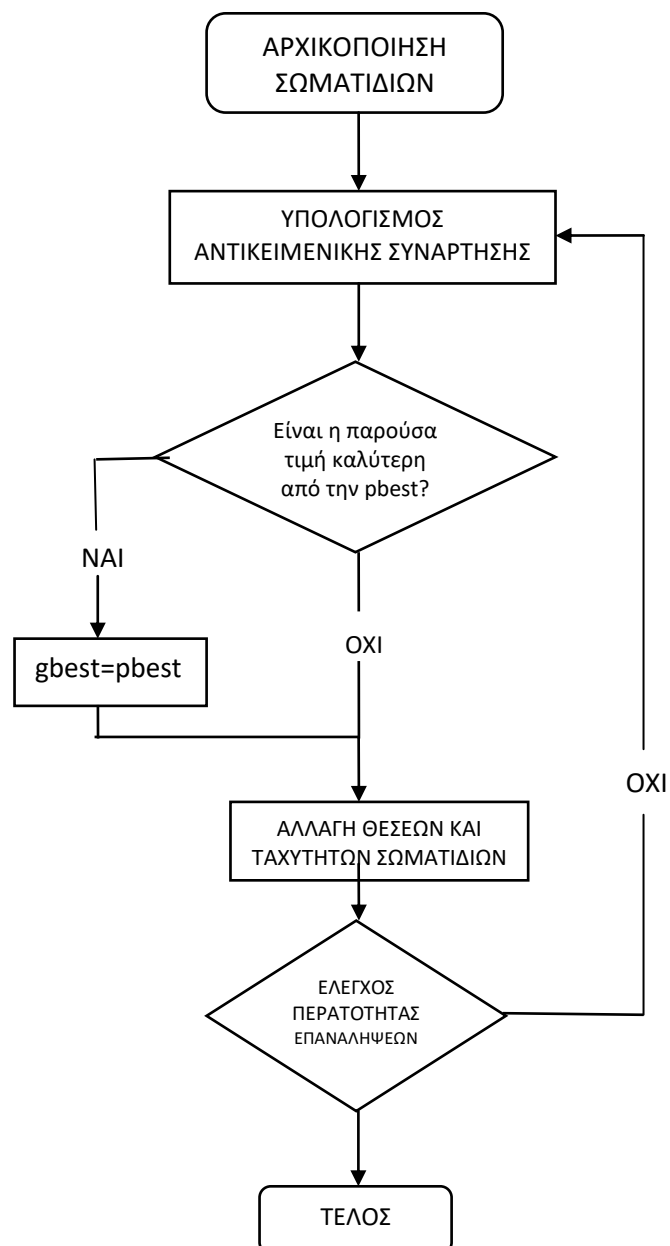
Όταν το σμήνος καλείται ως γειτονιά, τότε χρησιμοποιείται η ολική (global) έκδοση του αλγορίθμου. Σαν αποτέλεσμα, τα σωματίδια του σμήνους έλκονται στοχαστικά κοντά στις προηγούμενες τους βέλτιστες θέσεις καθώς και στις προηγούμενες βέλτιστες θέσεις των γειτόνων τους.

7.4.2 Ο αλγόριθμος

Η διαδικασία επίλυσης προβλημάτων με τη χρήση της μεθόδου PSO συνοψίζεται στα παρακάτω βήματα:

1. Αρχικοποιείται το σμήνος με την ανάθεση μιας τυχαίας θέσης, στον πολυδιάστατο χώρο του προβλήματος, σε κάθε σωματίδιο.
2. Αξιολογείται η αντικειμενική συνάρτηση για κάθε σωματίδιο.

3. Κάθε σωματίδιο, συγκρίνει την τιμή της συνάρτησης με το τοπικό βέλτιστο. Αν η τιμή αυτή είναι καλύτερη από το τοπικό βέλτιστο, την ορίζει ως το νέο τοπικό βέλτιστο και ορίζει τη θέση του σωματιδίου ως τη θέση του νέου τοπικού βέλτιστου.
4. Εντοπίζει το σωματίδιο που έχει την καλύτερη τιμή στην συνάρτηση καταλληλότητας και την ορίζει ως ολικό βέλτιστο, ενώ ορίζεται και η θέση του ως η θέση του νέου ολικού βέλτιστου.
5. Ενημερώνει τις καινούριες ταχύτητες και τις θέσεις όλων των σωματιδίων.
6. Επαναλαμβάνει τα βήματα 2-5 μέχρι να φτάσει σε ένα αρκετά καλό αποτέλεσμα ή να συμπληρωθεί ο αριθμός των επαναλήψεων που έχουν οριστεί.



Σχήμα 7.11: Διάγραμμα ροής αλγορίθμου .

7.4.3 Υλοποίηση του αλγορίθμου

Έστω $k \in \mathbb{N}$, ο αριθμός ο οποίος εκφράζει τον αριθμό των γενιών, η μεταβλητή $n_p \in \mathbb{N}$ ο αριθμός των σωματιδίων σε κάθε γενιά, η $x_i(k) \in \mathbb{R}^{nc}$ η οποία εκφράζει τη θέση του i -οστού σωματίδιου της k -όστης γενιάς και η $u_i(k) \in \mathbb{R}^{nc}$ όπου εκφράζει την ταχύτητα των σωματιδίων. Ακόμα, οι μεταβλητές $c_1, c_2 \in \mathbb{R}$ εκπροσωπούν την ατομικότητα και την κοινωνικότητα των σωματιδίων, ενώ οι $\rho_1(k), \rho_2(k) \in U(0, 1)$ είναι ομοιόμορφες κατανομές τυχαίων αριθμών μεταξύ 0 και 1. Με βάση την αρχική έκδοση του αλγορίθμου PSO οι εξισώσεις ενημέρωσης της θέσης και ταχύτητας των σωματιδίων, για κάθε $i \in \{1, \dots, n_p\}$ και για όλα τα $k \in \mathbb{N}$, ορίζονται ως εξής:

Εξίσωση ταχύτητας σωματιδίων:

$$u_i(k+1) = u_i(k) + c_1 \rho_1(p_{l,i}(k) - x_i(k)) + c_2 \rho_2(p_{g,i}(k) - x_i(k)) \quad (7.1)$$

Περιορισμός διανύσματος ταχύτητας :

$$u_i(k+1) = \text{sign}(u_i(k+1)) \min\{|u_i(k+1)|, u_{\max}\}, \quad i \in \{1, \dots, n_c\} \quad (7.2)$$

Εξίσωση ενημέρωσης θέσης:

$$x_i(k+1) = x_i(k) + u_i(k+1) \quad (7.3)$$

Όπου,

$p_{l,i}(k)$: Η βέλτιστη θέση του i σωματιδίου με την πιο χαμηλή τιμή συνάρτησης κόστους ανά γενιά.

$p_{g,i}(k)$: Η βέλτιστη θέση στη γειτονιά, που έχει βρεθεί έως εκείνη την χρονική στιγμή.

$c_1 \rho_1(p_{l,i}(k) - x_i(k))$: Είναι η σύνδεση της εμπειρίας ενός σωματιδίου με την τρέχουσα θέση και τη σταθερά C_1 η οποία ονομάζεται ατομικότητα (cognitive acceleration).

$c_2 \rho_2(p_{g,i}(k) - x_i(k))$: Είναι οι κοινωνικές επιρροές ανάμεσα στα σωματίδια σε μία γειτονιά, όπου το C_2 καλείται κοινωνικότητα (social acceleration).

7.4.4 Χρήση του PSO για την προσαρμογή των παραμέτρων της σύγχρονης γεννήτριας

Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης με σμήνος σωματιδίων χρησιμοποιήθηκε για να βρεθούν οι τιμές των παραμέτρων μιας σύγχρονης γεννήτριας που προσεγγίζουν την λειτουργία μιας ανεμογεννήτριας. Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναλυθεί συνοπτικά η υλοποίηση του αλγορίθμου.

Αρχικά συγκεντρώθηκαν οι μεταβλητές που θα καθόριζε ο PSO. Παρακάτω ακολουθεί ο πίνακας με τις μεταβλητές των οποίων την τιμή ψάχνουμε.

GEN	H	Xd	Xq	Xd_tr	Xq_tr	Td	Tq
EXC	Ka	Ta	Ke	Te	Kf		Tf
GOV	K	T1		T2			T3

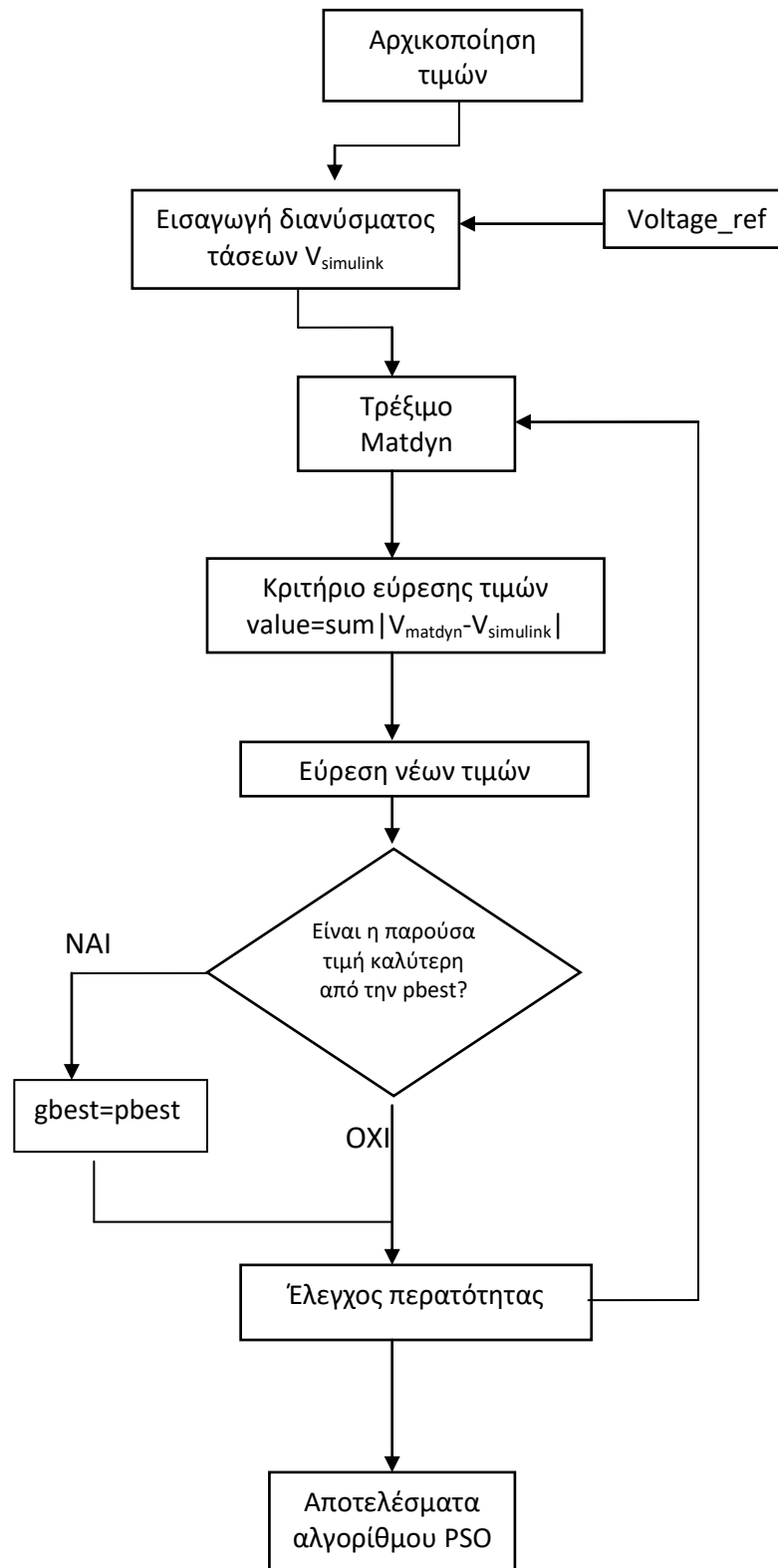
Πίνακας 7.12: Μεταβλητές των οποίων τις τιμές ψάχνουμε.

Στην συνέχεια δημιουργήθηκε το αρχείο εισαγωγής με όνομα Voltage_ref το οποίο περιέχει τη χρονοσειρά της τάσης, από την προσομοίωση που πραγματοποιήθηκε στο μοντέλο του Simulink με το αιολικό, στον ζυγό στον οποίο είναι συνδεδεμένο το αιολικό (ΣΚΣ). Οι τιμές των τάσεων που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι τιμές των τάσεων κατά την διάρκεια του σφάλματος και αυτό, γιατί μας ενδιαφέρει το διάστημα που σημειώνεται το σφάλμα μέχρι την στιγμή που ισορροπεί το σύστημα.

Ο αλγόριθμος PSO καλεί κάθε φορά το μοντέλο του συστήματος αναφοράς στο Matdyn, που παρουσιάστηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο και με βάση τις τιμές των τάσεων από το Simulink (αρχείο Voltage_ref) στον τέταρτο ζυγό (ΣΚΣ), πραγματοποιεί την αναζήτηση των χαρακτηριστικών της γεννήτριας, από τις οποίες προκύπτει ένα παρόμοιο προφίλ τάσης στον αντίστοιχο ζυγό του συστήματος αναφοράς στο Matdyn. Δηλαδή έχοντας γνωστή την τιμή της τάσης για κάθε χρονική στιγμή κατά την διάρκεια του σφάλματος πραγματοποιείται η διαδικασία της εύρεσης των ζητούμενων τιμών της γεννήτριας. Το κριτήριο αναζήτησης και εύρεσης των ζητούμενων τιμών ορίστηκε το άθροισμα της απόλυτης τιμής των διαφορών των τάσεων του Matdyn και του Simulink για κάθε χρονική στιγμή της περιόδου του σφάλματος.

$$\text{Κριτήριο αναζήτησης: value} = \sum |V_{\text{matdyn}} - V_{\text{simulink}}| \quad (7.4)$$

Παρακάτω ακολουθεί η σχηματική αναπαράσταση υλοποίησης του αλγορίθμου.



Σχήμα 7.13: Διάγραμμα ροής αλγορίθμου PSO.

Για τον αλγόριθμο PSO ορίσαμε τις απαραίτητες παραμέτρους.

PS = 100 Ο αριθμός των σωματιδίων του αλγορίθμου.
Epochs=65 Ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων του αλγορίθμου.
varrange =[0.0001,20] Το εύρος αναζήτησης των ζητούμενων τιμών.

Στην συνέχεια δίνονται τα αποτελέσματα από το τρέξιμο του αλγορίθμου.

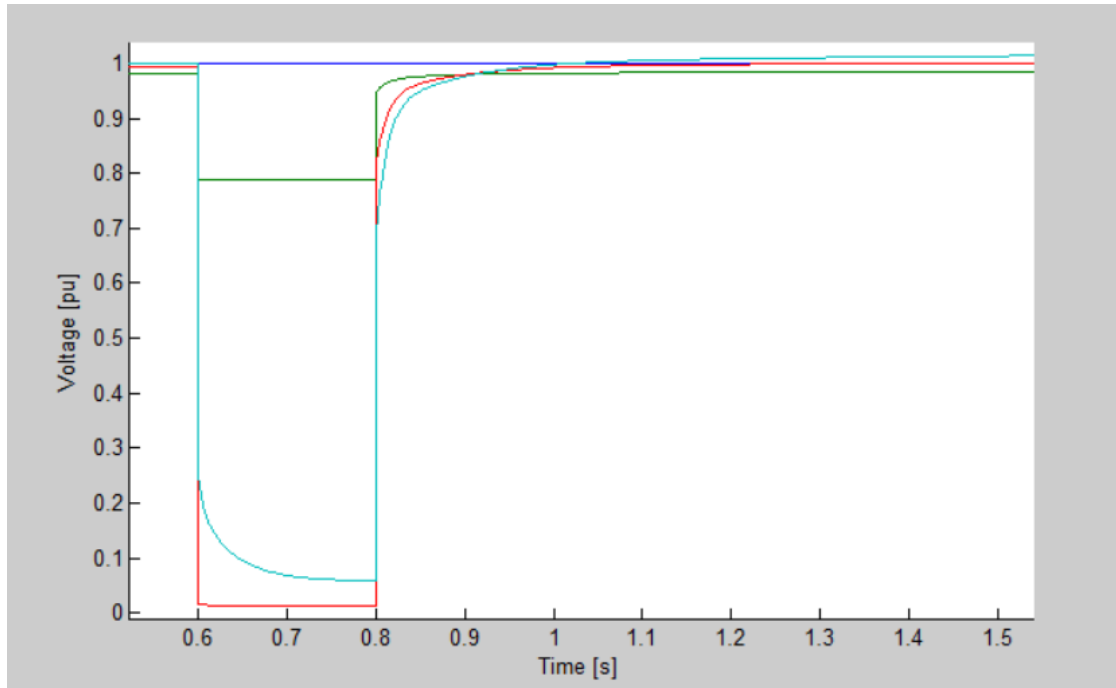
7.4.5 Αποτελέσματα PSO

Μετά το πέρας της εκτέλεσης του αλγορίθμου πήραμε τα αποτελέσματα των ζητούμενων τιμών των παραμέτρων της γεννήτριας που παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα.

H	41.265
Xd	5
Xq	10
Xd_tr	0,931356
Xq_tr	0,0001
Td_tr	0,0418
Tq_tr	0,5039
Ka	63,76542
Ta	7,464715
Ke	-1,06109
Te	9,232914
Kf	4,664397
Tf	3,747413
K	216,6724
T1	3,602576
T2	18,49274
T3	8,59004

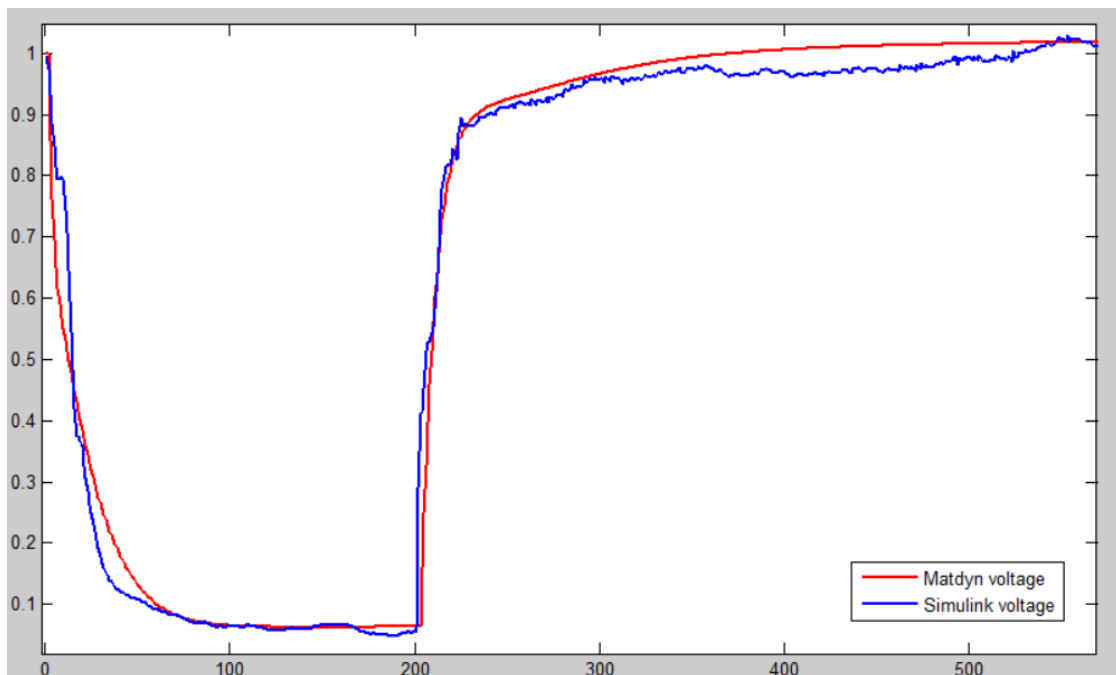
Πίνακας 7.14: Αποτελέσματα PSO.

Εκτός από την ύπαρξη της ανάγκης, να ελεγχθεί η εύρυθμη λειτουργία του αιολικού στο δίκτυο του Matdyn, πρέπει να πραγματοποιηθεί και η σύγκριση της συμπεριφοράς του συστήματος, μεταξύ των δύο προγραμμάτων Simulink και Matdyn. Αφού λοιπόν ο ευρετικός αλγόριθμος βρήκε τις τιμές, των παραμέτρων των συμβατικών γεννητριών, που προσομοιώνουν την λειτουργία ενός αιολικού πάρκου περάσαμε στην ένταξη του αιολικού στο απλό δίκτυο του Matdyn. Έτσι, παρακάτω παρουσιάζονται οι γραφικές των τάσεων στους 4 ζυγούς από τις προσομοιώσεις των δύο προγραμμάτων, προκειμένου να δούμε την σωστή λειτουργία του αιολικού στο Matdyn.



Σχήμα 7.15: Γραφική των τάσεων στους ζυγούς συναρτήσει του χρόνου στο Matdyn.

Συγκρίνοντας τις δύο γραφικές του Matdyn και του Simulink στο διάγραμμα του σχήματος 7.16, παρατηρούμε μεγάλη ομοιότητα των αποτελεσμάτων. Θεωρώντας αξιόπιστα τα αποτελέσματα του αλγορίθμου PSO, δίνεται πλέον η δυνατότητα να χρησιμοποιήσουμε τις μεταβλητές της γεννήτριας, ώστε να προσομοιώνουμε τον τρόπο λειτουργίας ενός αιολικού και σε άλλες εφαρμογές στο Matdyn.



Σχήμα 7.16: Σύγκριση της τάσης στον ζυγό σύνδεσης του αιολικού όπως προσομοιώνεται στο Simulink και το Matdyn.

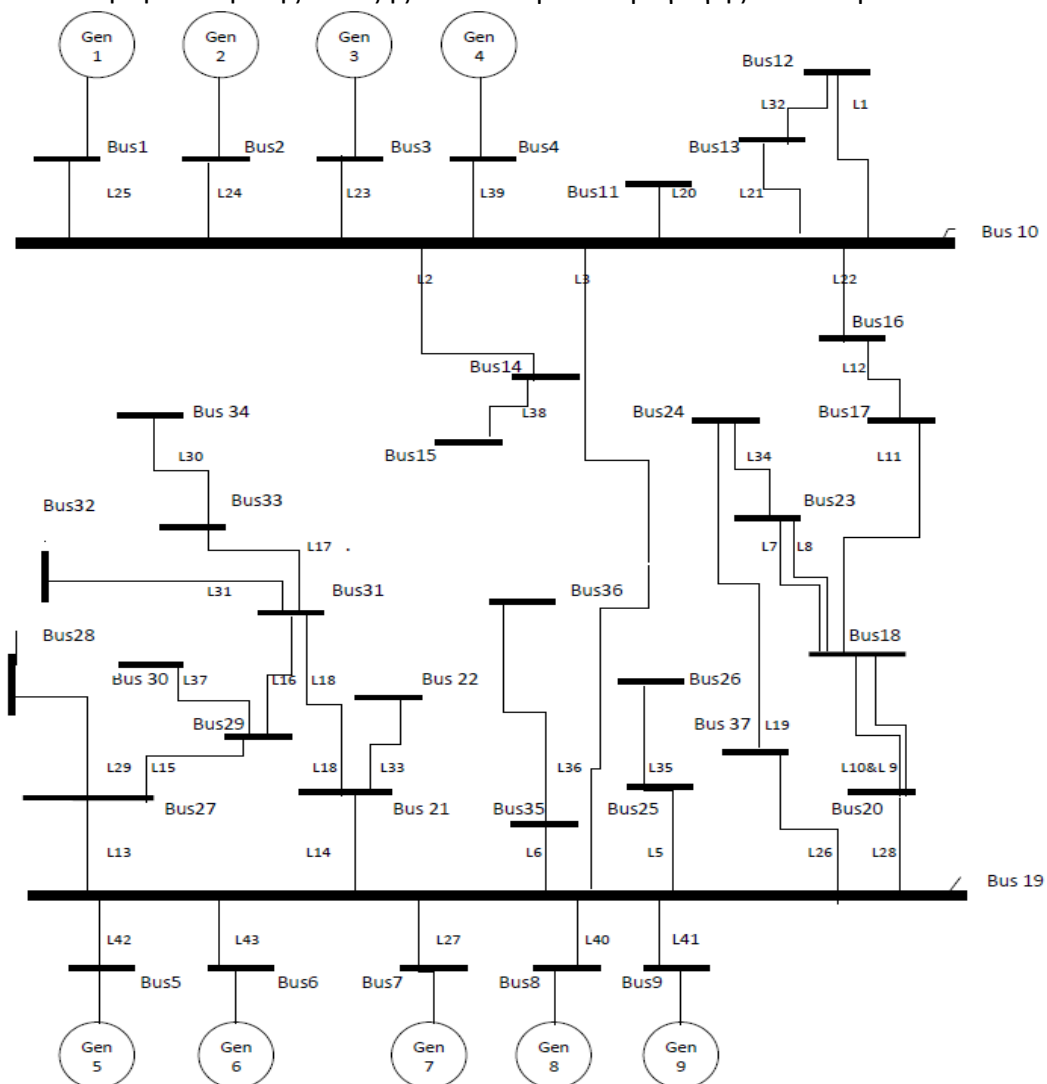
8 Προσομοίωση του ηλεκτρικού συστήματος της Κρήτης

8.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο, γίνεται η προσομοίωση της λειτουργίας του δικτύου της Κρήτης με ένταξη αιολικών πάρκων κατά τη διάρκεια σφαλμάτων. Η δυναμική ανάλυση πραγματοποιήθηκε με το πρόγραμμα Matdyn στο οποίο εντάχθηκαν τα στοιχεία του συστήματος της Κρήτης. Τα μοντέλα των αιολικών του συστήματος, εισήχθησαν στην μορφή κλασικών γεννητριών με τις παραμέτρους που υπολογίστηκαν στο κεφάλαιο 7.

8.2 Μοντελοποίηση του Δικτύου της Κρήτης στο Matdyn

Η μοντελοποίηση έγινε με στοιχεία του Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας της Κρήτης που ανακτήθηκαν από την μεταπτυχιακή εργασία [4]. Παρακάτω ακολουθούν τα δεδομένα του Συστήματος σε πίνακες, ενώ αξίζει να σημειωθεί ότι οι μεταβολές του τωρινού Συστήματος είναι ελάχιστες σε σχέση με το Σύστημα που μοντελοποιήθηκε πλην της ένταξης του σταθμού παραγωγής του Αθερινόλακου.



Σχήμα 8.1: Τοπολογία ζυγών, γεννητριών και γραμμών μεταφοράς του δικτύου.

8.2.1 Γεννήτριες

Σύμφωνα με τα στοιχεία της πηγής [4], τα χαρακτηριστικά των γεννητριών του δικτύου της Κρήτης παρουσιάζονται στον Πίνακα 8.2, ενώ στον Πίνακα 8.3 παρουσιάζεται η ομαδοποίηση των γεννητριών για την απλοποίηση του συστήματος.

α/α	Γεννήτρια	Ονομαστική Ισχύς MVA	Ονομαστική Τάση KV
1	GAS 1 HANIA	21,3	6,3
2	GAS 4 HANIA	30	11
3	GAS 5 HANIA	42	11
4	GAS 6 HANIA	65	11,5
5	GAS 7 HANIA	65	11,5
6	STEAM 1 HANIA	65	11,5
7	DIESEL 1 LINOP	15	10
8	DIESEL 2 LINOP	15	10
9	DIESEL 3 LINOP	15	10
10	DIESEL 4 LINOP	15	10
11	STEAM 4 LINOP	31	6,3
12	STEAM 5 LINOP	31	6,3
13	STEAM 6 LINOP	31	6,3
14	GAS 1 LINOP	19	6,3
15	GAS 2 LINOP	19	6,3
16	STEAM 3 LINOP	19	15,7
17	STEAM 2 LINOP	19	15,7
18	STEAM 1 LINOP	8	15,7

Πινάκας 8.2: Ονομαστικά μεγέθη γεννητριών Κρήτης. [Τσεκούρας Γ.]

α/γεν	Γεννήτρια	Ζυγός	Ονομαστική Ισχύς MVA	Ονομαστική Τάση KV
1	GAS 1 HANIA	BUG01	21,3	6,3
2	GAS 4 HANIA	BUG02	30	11
3	GAS 5 HANIA	BUG03	42	11
4	GAS 6 HANIA	BUG04	195	11,5
	GAS 7 HANIA 5			
	STEAM 1 HANIA			
5	DIESEL 1-LINOP	BUG05	60	10
	DIESEL 2-LINOP			
	DIESEL 3-LINOP			
	DIESEL 4-LINOP			
6	STEAM 4 LINOP	BUG06	93	6,3
	STEAM 5 LINOP			
	STEAM 6 LINOP			
7	GAS 1 LINOP	BUG07	38	6,3
	GAS 1 LINOP			
8	STEAM 3 LINOP	BUG08	38	15,7
	STEAM 2 LINOP			
9	STEAM 3 LINOP	BUG09	8	15,7

Πινάκας 8.3: Ονομαστικά μεγέθη και ομαδοποίηση γεννητριών Κρήτης. [Τσεκούρας Γ.]

Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά των εννιά γεννητριών τα οποία απαιτούνται για την μοντελοποίηση του δικτύου στο πρόγραμμα Matdyn.

α/α	H	xd	xq	xd_tr	xq_tr	Td_tr	Tq_tr
1	2.13	2.06	0.134	2	0.089	6	3.7
2	8	1.84	0.201	1.75	0.17	6	3.7
3	8.57	1.5	0.175	1.1	0.126	8	3.7
4	1.1	2.48	0.126	2.48	0.126	6.8	3.7
5	2.48	1.48	0.45	0.87	0.35	5.2	0.15
6	2.82	1.7	0.2	1.7	0.1	7.5	3.7
7	2.36	2.1	0.223	2.1	0.157	9	3.7
8	2.57	1.6	0.195	1.6	0.129	0.6	0.6
9	3.49	1.5	0.22	1.5	0.12	6	3.7

Πινάκας 8.4: Χαρακτηριστικά γεννητριών.

Να σημειωθεί ότι το **H** είναι η αδράνεια της γεννήτριας, τα **xd**, **xd_tr** είναι αντίστοιχα η επαγωγική και η μεταβατική αντίδραση ευθέως άξονα, τα **xq**, **xq_tr** η επαγωγική και η μεταβατική αντίδραση εγκάρσιου άξονα ενώ τα **Td_tr** και **Tq_tr** είναι αντίστοιχα οι μεταβατικοί χρόνοι ευθέως και εγκάρσιου άξονα. Οι παραπάνω μεταβλητές ορίζονται σε ανά μονάδα σύστημα. Πολλά από τα μεγέθη που θα συναντήσουμε είναι στο ανά μονάδα σύστημα με βάση ισχύος τα 100 MVA και βάση συχνότητας τα 50hz.

Παρακάτω ακολουθεί ο Πινάκας 8.5 με χαρακτηριστικά μεγέθη των γεννητριών, όπως μοντελοποιήθηκαν στο Matdyn.

Γεν/ζυγό	Pg	Qmax	Qmin	Vg	status	Pmax	Pmin
1	21.3	30	-20	1.1	1	30	10
2	30	50	-50	1.1	1	50	10
3	42	50	-50	1.1	1	70	10
4	195	500	-300	1.1	1	500	5
5	60	80	-40	1.1	1	90	5
6	90.3	80	-40	1.1	1	100	5
7	38	40	-40	1.1	1	40	10
8	38	40	-40	1.1	1	40	10
9	8	40	-40	1.1	1	40	10

Πινάκας 8.5: Στοιχεία γεννητριών.

Όπου τα Qmax Qmin είναι τα όρια της άεργου ισχύος που παράγει η γεννήτρια προκειμένου να διατηρεί στο ζυγό που είναι συνδεδεμένη τάση ίση με Vg. Το Pg αναφέρεται στην παραγόμενη ισχύ της κάθε γεννήτριας ενώ τα Pmax, Pmin είναι τα όρια της ισχύος. Τα μεγέθη είναι σε ανά μονάδα σύστημα.

8.2.2 Γραμμές μεταφοράς και ζυγοί δικτύου.

Σε αυτήν την ενότητα γίνεται η ανάλυση των στοιχείων των γραμμών και των ζυγών και παρουσιάζεται ο τρόπος που μοντελοποιήθηκαν για την εισαγωγή τους στο Matdyn. Ακόμα παρουσιάζεται η συνδεσμολογία των στοιχείων του συστήματος και η τοπολογία του δικτύου.

α/ζυγών	Τοποθεσία	Type	Pd	Qd	Base kV
1	Χανιά	2	0	0	6,3
2	Χανιά	2	0	0	11
3	Χανιά	2	0	0	11
4	Χανιά	3	0	0	11,5
5	Λινοπεράματα	2	0	0	10
6	Λινοπεράματα	2	0	0	6,3
7	Λινοπεράματα	2	0	0	6,3
8	Λινοπεράματα	2	0	0	16
9	Λινοπεράματα	2	0	0	16
10	Χανίων ΥΤ	1	0	0	150
11	Χανίων ΜΤ	1	78.4	58.8	16
12	Καστελίου ΥΤ	1	0	0	150
13	Καστελίου ΜΤ	1	19.6	19.6	16
14	Ρεθύμνου	1	0	0	150
15	Ρεθύμνου	1	58.8	44.1	16
16	Χανίων 66kV	1	0	0	66
17	Χανίων-Λινοπεραμάτων	1	0	0	66
18	Λινοπεράματα Β	1	0	0	66
19	Λινοπεράματα Α	1	0	0	150
20	Ενδιάμεσος Λινοπερ. Α&Β	1	0	0	66
21	Μοίρες	1	0	0	150
22	Μοίρες	1	39.2	29.4	16
23	Ηράκλειο Ι ΥΤ	1	0	0	66
24	Ηράκλειο Ι ΜΤ	1	19.6	10.5	16
25	Ηράκλειο ΙΙ ΥΤ	1	0	0	150
26	Ηράκλειο ΙΙ ΜΤ	1	39.2	29.4	16
27	Σταλίδα ΥΤ	1	0	0	150
28	Σταλίδα ΜΤ	1	10	10	16
29	Άγιος Νικόλαος ΥΤ	1	0	0	150
30	Άγιος Νικόλαος ΜΤ	1	19.6	14.7	21
31	Ιεράπετρα ΥΤ	1	0	0	150
32	Ιεράπετρα ΜΤ	1	39.2	29.4	16
33	Σητεία ΥΤ	1	0	0	150
34	Σητεία ΜΤ	1	39.2	29.4	16
35	Ηράκλειο ΙΙ** ΥΤ	1	0	0	150
36	Ηράκλειο ΙΙ** ΜΤ	1	0	0	16
37	Ενδιάμεσος Λνπερ Α - Ηρκλ Ι	1	39.2	29.4	16

Πίνακας 8.6: Στοιχεία ζυγών του δικτύου της Κρήτης.

Ο Πίνακας 8.6 αναφέρεται στα στοιχεία των ζυγών αλλά και στα φορτία που υπάρχουν στο σύστημα όπως μοντελοποιήθηκε στο Matdyn.

A/γραμ.	fbus	tbus	r	x	b
1	12	10	0.0142	0.0613	0.0201
2	14	10	0.0227	0.0915	0.0345
3	19	10	0.0431	0.1769	0.0657
4	14	19	0.0201	0.0812	0.3067
5	19	25	0.0083	0.0334	0.0126
6	19	35	0.0083	0.0334	0.0126
7	18	23	0.0285	0.0625	0.0008
8	18	23	0.0365	0.0800	0.0011
9	18	20	0.0004	0.0009	0.0000
10	18	20	0.0011	0.0025	0.0000
11	18	17	0.2241	0.4910	0.0066
12	17	16	0.1972	0.4322	0.0058
13	19	27	0.0319	0.0777	0.0228
14	19	21	0.0312	0.0759	0.0223
15	27	29	0.0234	0.0571	0.0167
16	29	31	0.0171	0.0416	0.0122
17	31	33	0.0346	0.0842	0.0247
18	31	21	0.0653	0.1591	0.0467
19	37	24	0.2440	0.1304	0.0029
20	10	11	0.0038	0.2301	0.0000
21	10	13	0.0031	0.1200	0.0000
22	10	16	0.0011	0.0650	0.0000
23	10	3	0.0030	0.1035	0.0000
24	10	2	0.0030	0.0934	0.0000
25	10	1	0.0057	0.0990	0.0000
26	19	37	0.0051	0.1686	0.0000
27	19	7	0.0040	0.1013	0.0000
28	19	20	0.0032	0.1002	0.0000
29	27	28	0.0051	0.2209	0.0000
30	33	34	0.0051	0.1529	0.0000
31	31	32	0.0051	0.1529	0.0000
32	12	13	0.0025	0.1090	0.0000
33	21	22	0.0050	0.2095	0.0000
34	23	24	0.0050	0.2000	0.0000
35	25	26	0.0029	0.2149	0.0000
36	35	36	0.0029	0.2149	0.0000
37	29	30	0.0051	0.2210	0.0000
38	14	15	0.0050	0.2000	0.0000
39	10	4	0.0057	0.0990	0.0000
40	19	8	0.0133	0.3072	0.0000
41	19	9	0.0625	1.0940	0.0000
42	19	5	0.0062	0.1580	0.0000
43	19	6	0.0043	0.1036	0.0000

Πίνακας 8.7: Στοιχεία γραμμών & συνδεσμολογίας δικτύου.

Στον πίνακα 8.7 παρουσιάζονται τα στοιχεία των γραμμών, όπως ο ζυγός αναχώρησης και ο ζυγός άφιξης αλλά και οι αντιστάσεις των γραμμών.

8.3 Ένταξη αιολικών στο δίκτυο της Κρήτης

Αφού έγινε η μοντελοποίηση του δικτύου της Κρήτης, προχωρήσαμε στην ένταξη των αιολικών πάρκων τα οποία τοποθετήθηκαν με βάση την τοποθεσία των αιολικών που υπάρχουν ήδη στο νησί. Παρακάτω ακολουθεί ο χάρτης της τοποθεσίας των αιολικών και των ζυγών υψηλής τάσης.



Εικόνα 8.8: Χάρτης τοποθεσίας αιολικών πάρκων.[ΔΕΗ 2009]

Από τον παραπάνω χάρτη παρατηρούμε μεγάλο πλήθος αιολικών στην ανατολική Κρήτη. Παρακάτω ακολουθεί ο πίνακας που αναφέρεται στην σύνδεση των αιολικών στο εξεταζόμενο δίκτυο.

BUS	Τοποθεσία	Ισχύς σε MW
12 (150 KV)	ΚΑΣΤΕΛΙ	20,15
21(150 KV)	ΜΟΙΡΕΣ	31,9
27(150 KV)	ΑΓ.ΝΙΚΟΛΑΟΣ	11,9
31(150 KV)	ΙΕΡΑΠΕΤΡΑ	25,5
33(150 KV)	ΣΗΤΕΙΑ	60,55

Πινάκας 8.9:Στοιχεία τοποθέτησης αιολικών.

Με βάση τα στοιχεία της ΔΕΗ [2], παρακάτω ακολουθούν τα στοιχεία τοποθεσίας και σύνδεσης των αιολικών στο δίκτυο της Κρήτης. Τα Α/Π στον ζυγό της Ιεράπετρας, είναι τοποθετημένα στον ζυγό ΥΤ Μαρωνίας, ο οποίος λείπει από το δίκτυο μας λόγω ομαδοποίησης, οπότε τοποθετήθηκαν στον αμέσως κοντινότερο ζυγό, που είναι της Ιεράπετρας. Το ίδιο έγινε και για τα Α/Π ENVITEC ΒΑΡΔΙΑ & ENVITEC

ΒΑΤΑΛΙ που είναι συνδεδεμένα στο ζυγό ΥΤ Αγκιάς και τοποθετήθηκαν στο ζυγό του Καστελιού.

Τοποθεσία	Ζυγός	Αιολικό Πάρκο	Ισχύς Α/Π (MW)	Συνολική ισχύς(MW)
ΣΗΤΕΙΑ	BUS33	ΑΝΕΜΟΕΣΣΑ	5	60,55
		ΤΟΠΛΟΥ 1-2	5,1	
		ΤΟΠΛΟΥ 3	1,5	
		ΡΟΚΑΣ	18	
		ΞΗΡΟΛΗΜΝΗ	13,2	
		ΕΝΤΕΚΑ	2,85	
		ΟΑΣ	0,5	
		ΙWECO	4,5	
		ΑΙΟΛΟΣ	9,9	
ΜΟΙΡΕΣ	BUS21	TERNA	14,45	31,9
		ΙWECO	4,95	
		ΜΟΙΡΩΝ Α/Π	5,25	
		ΔΙΕΘΝΗΣ ΑΙΟΛΙΚΗ ΚΡΗΤΗΣ	7,25	
ΑΓ. ΝΙΚΟΛΑΟΣ	BUS29	ΠΛΑΣΤΙΚΑ ΚΡΗΤΗΣ	11,9	11,9
ΙΕΡΑΠΕΤΡΑ	BUS31	ENERCON	2,5	25,5
		KRYA	10	
		ΑΧΛΑΔΙΑ	10	
		WRE	3	
ΚΑΣΤΕΛΙ	BUS12	ENVITEC ΒΑΡΔΙΑ	5,4	20,15
		ENVITEC ΒΑΤΑΛΙ	5,4	
		ΥΔΡΟΑΙΟΛΙΚΗ	9,35	
ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΙΣΧΥΣ Α/Π				150

Πίνακας 8.10: Στοιχεία σύνδεσης αιολικών πάρκων.

Παρακάτω ακολουθεί ο πίνακας με τα στοιχεία των γεννητριών και στην συνέχεια παρουσιάζεται ο ίδιος πίνακας τροποποιημένος.

Γεν/ζυγό	P _g	Q _{max}	Q _{min}	V _g	status	P _{max}	P _{min}
1	16.2	30	-20	1.1	1	30	10
2	24	50	-50	1.1	1	50	10
3	36	50	-50	1.1	1	70	10
4	195	500	-300	1.1	1	500	5
5	49.2	80	-40	1.1	1	90	5
6	70.5	80	-40	1.1	1	100	5
7	32.4	40	-40	1.1	1	40	10
8	30	40	-40	1.1	1	40	10
9	6.2	40	-40	1.1	1	40	10

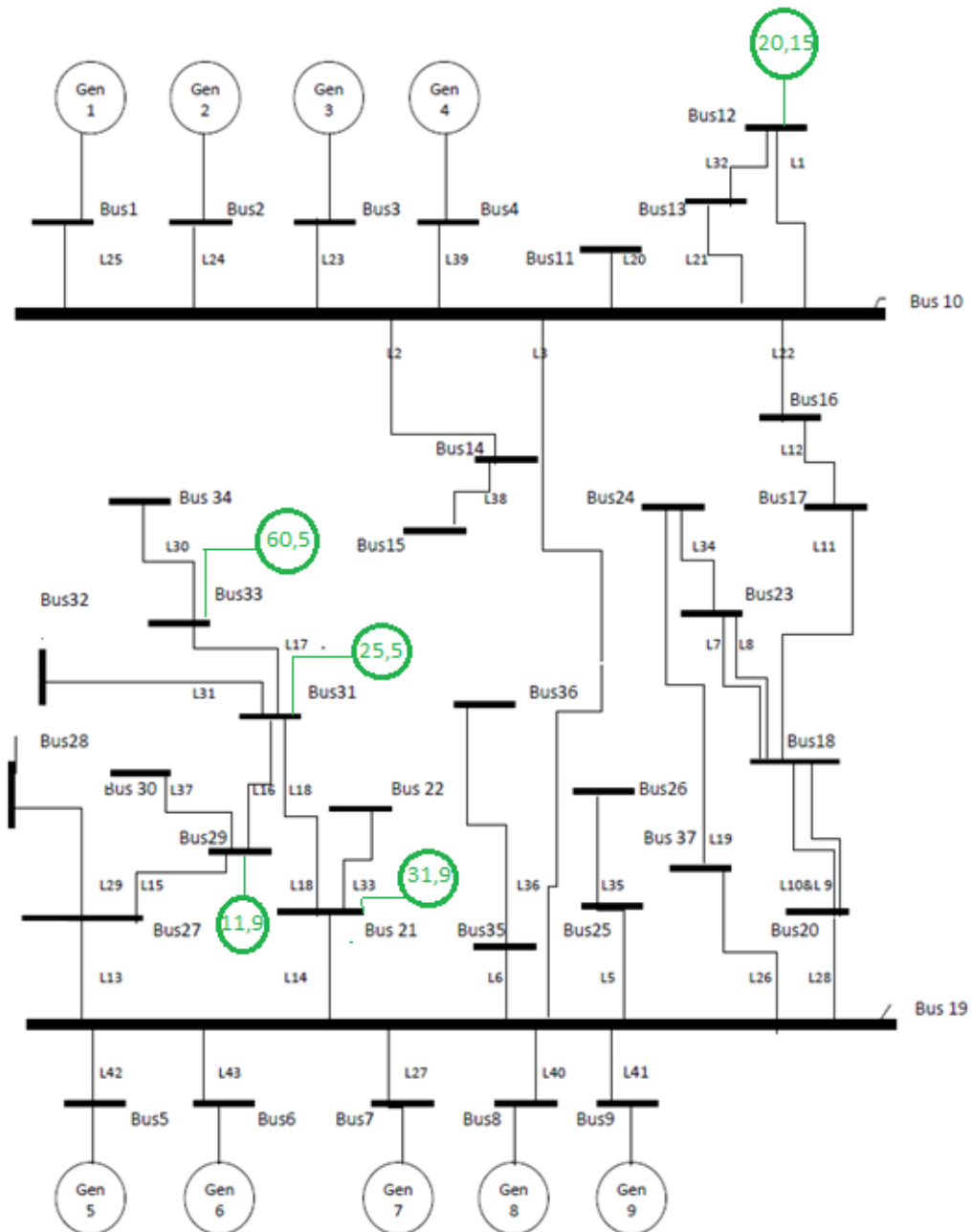
Πινάκας 8.11: Στοιχεία γεννητριών

Η τροποποίηση του πίνακα 8.11 έγινε με βάση το ισοζύγιο ισχύος του δικτύου. Αφού έγινε η ένταξη των αιολικών, των οποίων η συνολική παραγόμενη ισχύς υποτίθεται ίση με 150 MW, έπρεπε να αφαιρεθούν αντίστοιχα 150 MW από τις μονάδες παραγωγής. Ο τρόπος για την αφαίρεση της περίσσειας ισχύος, είναι η απενεργοποίηση κάποιων μονάδων από το σύστημα ή η μείωση της παραγόμενης ισχύος κάποιων μονάδων. Στη συνέχεια επιλέχτηκε ο δεύτερος τρόπος, δηλαδή η μείωση της παραγόμενης ισχύος κάποιων μονάδων, με σκοπό την ανάλυση του συστήματος με την μέγιστη δυνατή δυναμικότητα παραγωγής. Ωστόσο αξίζει να σημειωθεί ότι στους ζυγούς που τοποθετήθηκαν αιολικά με μεγάλη παραγόμενη ισχύ, μειώθηκε αντίστοιχα μεγαλύτερο ποσοστό ισχύος από τις κοντινές συμβατικές μονάδες.

Γεν/ζυγό	P _g	Q _{max}	Q _{min}	V _g	status	P _{max}	P _{min}
1	13.2	30	-20	1.1	1	30	10
2	20	50	-50	1.1	1	50	10
3	30	50	-50	1.1	1	70	10
4	110	500	-300	1.1	1	500	5
5	42.2	80	-40	1.1	1	90	5
6	50.5	80	-40	1.1	1	100	5
7	20.4	40	-40	1.1	1	40	10
8	15	40	-40	1.1	1	40	10
9	3.2	40	-40	1.1	1	40	10
12	20,15	25	-25	1.1	1	21	4
21	31,9	35	-35	1.1	1	32	10
29	11,9	15	-15	1.1	1	12	3
31	25,5	30	-30	1.1	1	26	5
33	60,55	70	-70	1.1	1	62	15

Πινάκας 8.12: Στοιχεία γεννητριών με ένταξη αιολικών.

Έτσι, η τοπολογία του δικτύου που παρουσιάστηκε παραπάνω, τροποποιήθηκε και παρουσιάζεται εκ νέου παρακάτω στο Σχήμα 8.13.



Σχήμα 8.13: Τοπολογία ζυγών, γεννητριών και γραμμών μεταφοράς του δικτύου μετά την ένταξη των αιολικών.

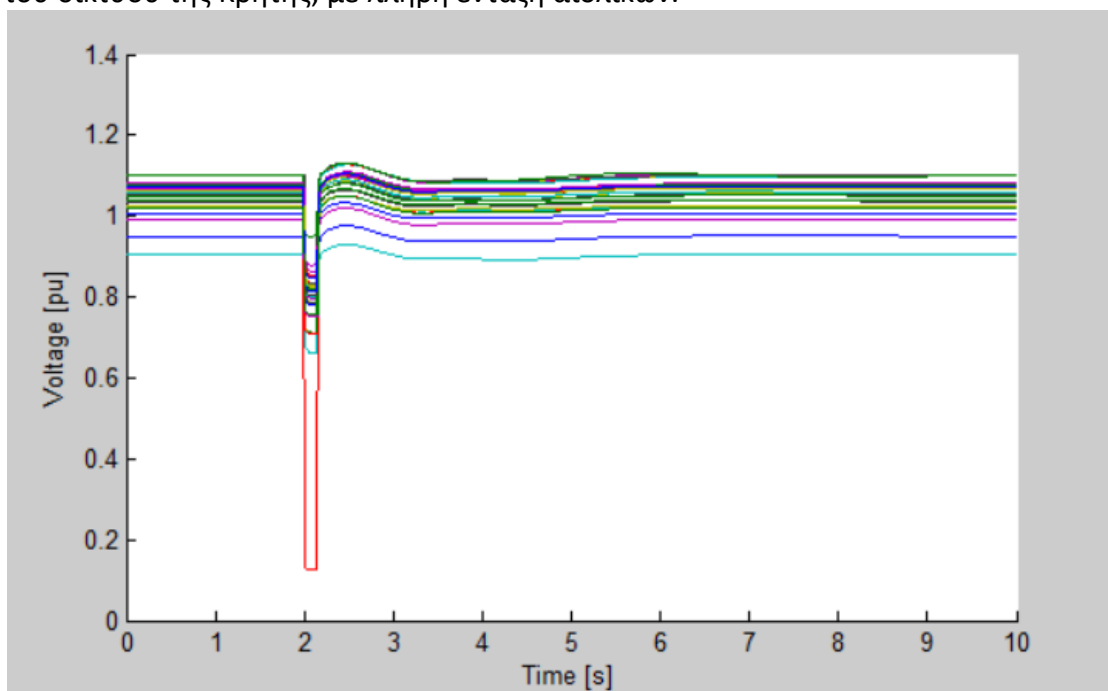
8.4 Προσομοίωση του συστήματος για διαφορετικά σενάρια

Αφού έγινε η ένταξη των αιολικών και μοντελοποιήθηκε το δίκτυο της Κρήτης στο Matdyn , προχωρήσαμε στην ανάλυση της λειτουργίας του δικτύου για διάφορα πιθανά σενάρια διαταραχών που μπορούν να σημειωθούν στο σύστημα.

Σενάριο 1^ο

Το πρώτο σενάριο, αφορά σφάλμα τριφασικού βραχυκυκλώματος προς γη. Το σφάλμα για το οποίο θα μελετηθεί η συμπεριφορά του συστήματος είναι σφάλμα στον ζυγό 17 Χανίων-Λινοπεραμάτων. Προσομοιώθηκε σφάλμα για την χρονική περίοδο $T_1=2$ sec έως $T_2= 2.15$ sec. Στην συνέχεια έγινε η σύγκριση της απόκρισης του συστήματος με και χωρίς διεύθυνση αιολικών. Στις παρακάτω γραφικές παρουσιάζονται οι τάσεις του συστήματος.

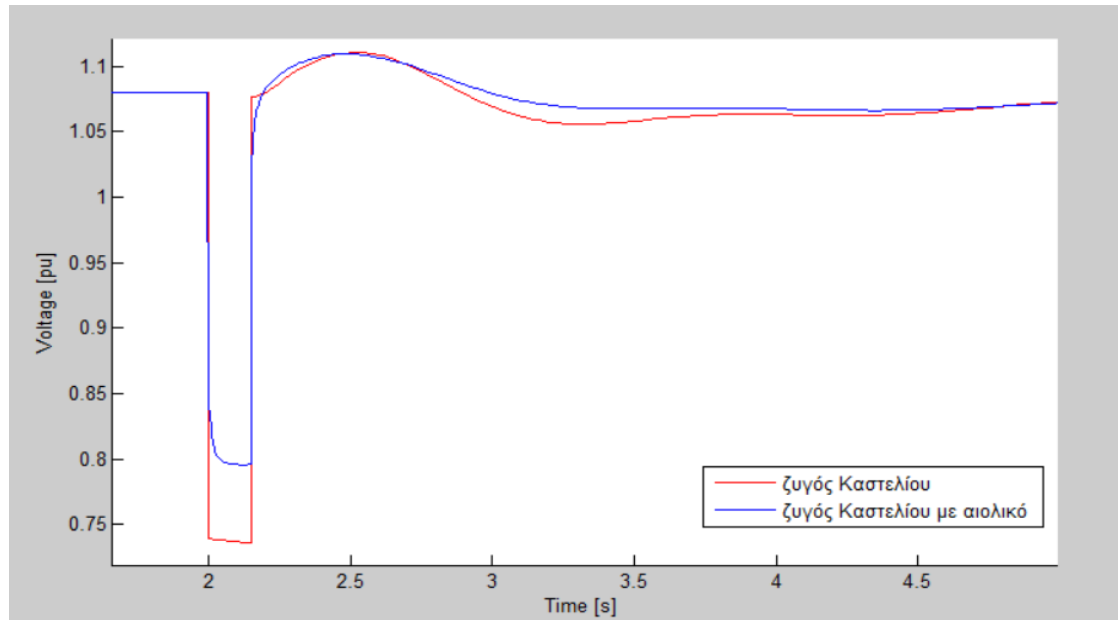
Στο παρακάτω γράφημα του σχήματος 8.14 γίνεται η παρουσίαση των τάσεων του δικτύου της Κρήτης, με πλήρη ένταξη αιολικών.



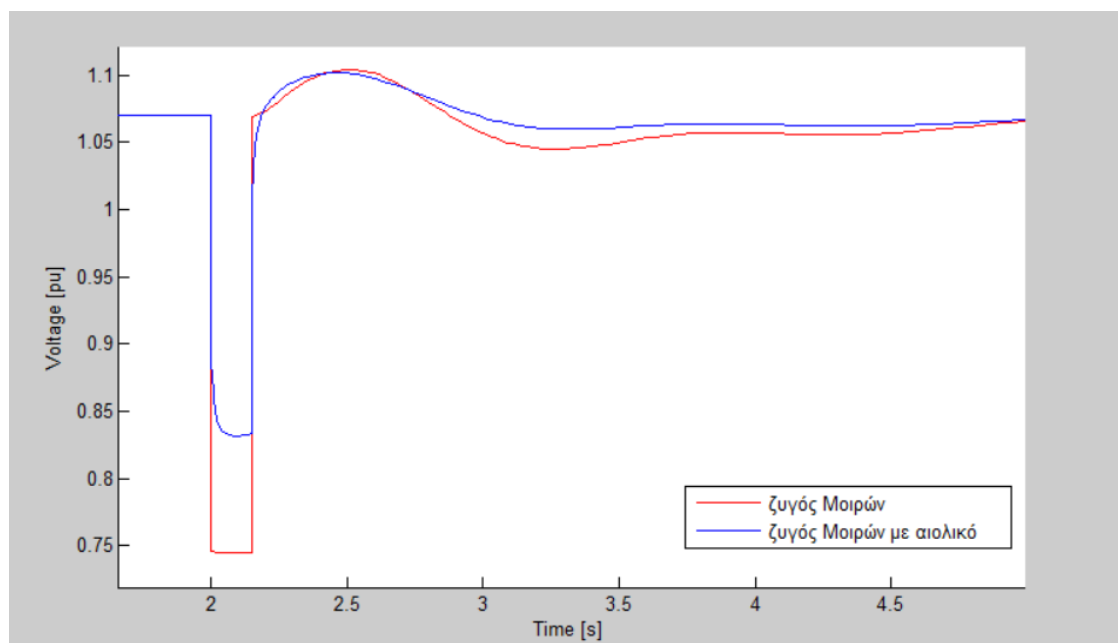
Σχήμα 8.14: Διάγραμμα Τάσεων στους ζυγούς του δικτύου με ένταξη αιολικών κατά την διάρκεια σφάλματος.

Παρατηρούμε ότι μετά το σφάλμα το σύστημα επανέρχεται σε ευστάθεια ενώ σε διάστημα 5 δευτερολέπτων έχει επανέλθει πλήρως. Αξίζει να σημειωθεί πως η μεγαλύτερη βύθιση τάσης εμφανίζεται στον ζυγό 17 που πραγματοποιείται το σφάλμα.

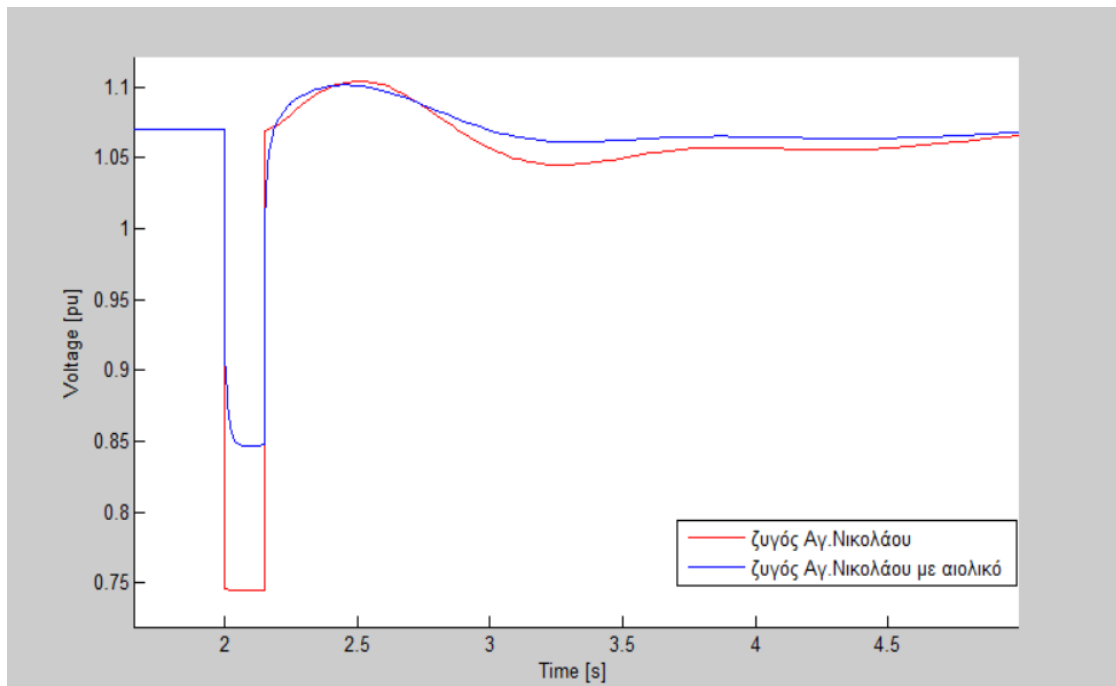
Στη συνέχεια πραγματοποιείται η σύγκριση της απόκρισης του συστήματος με και χωρίς τη συνεισφορά των αιολικών πάρκων. Συγκεκριμένα, μελετήσαμε τους ζυγούς στους οποίους συνδέονται τα αιολικά. Σημειώνεται ότι όταν έγινε η προσομοίωση του αντίστοιχου δικτύου χωρίς τα αιολικά, τοποθετήθηκαν τα αντίστοιχα αρνητικά φορτία στους αντίστοιχους ζυγούς λόγω του ότι τα αιολικά παράγουν ισχύ. Με αυτόν τον τρόπο μελετήθηκε καθαρά, η συνεισφορά των αιολικών στην ευστάθεια της τάσης του δικτύου υπό τις ίδιες συνθήκες φόρτισης του δικτύου.



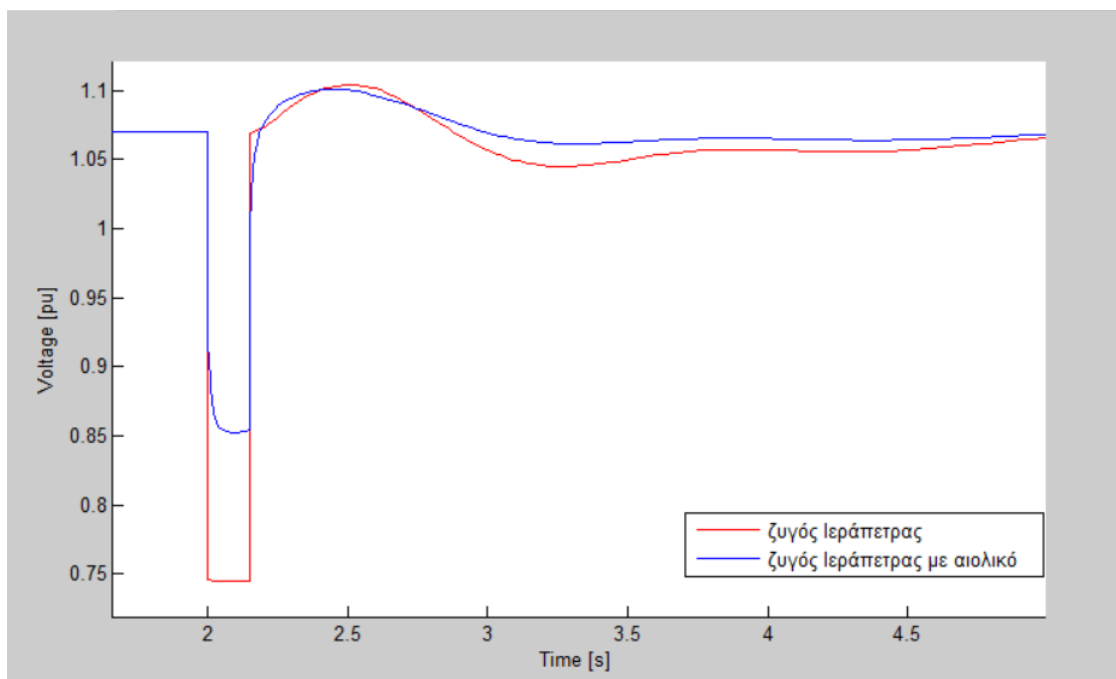
Σχήμα 8.15: Διάγραμμα της τάσης στον ζυγό του Καστελίου με αιολικό και χωρίς.



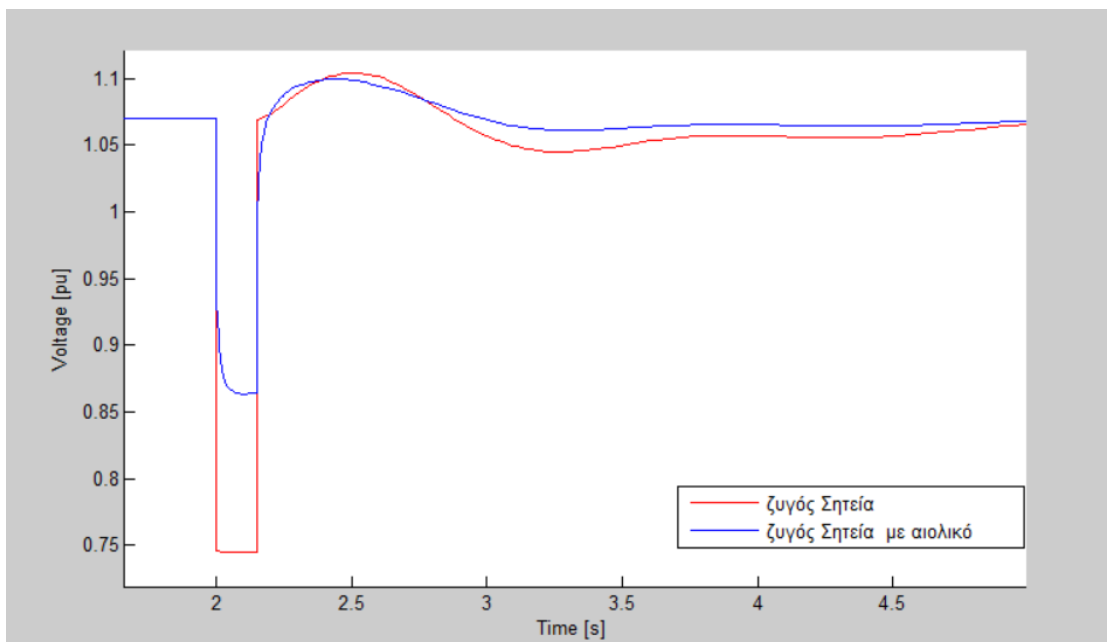
Σχήμα 8.16: Διάγραμμα της τάσης στον ζυγό Μοιρών με αιολικό και χωρίς.



Σχήμα 8.17: Διάγραμμα της τάσης στον ζυγό του Αγ. Νικολάου με αιολικό και χωρίς.

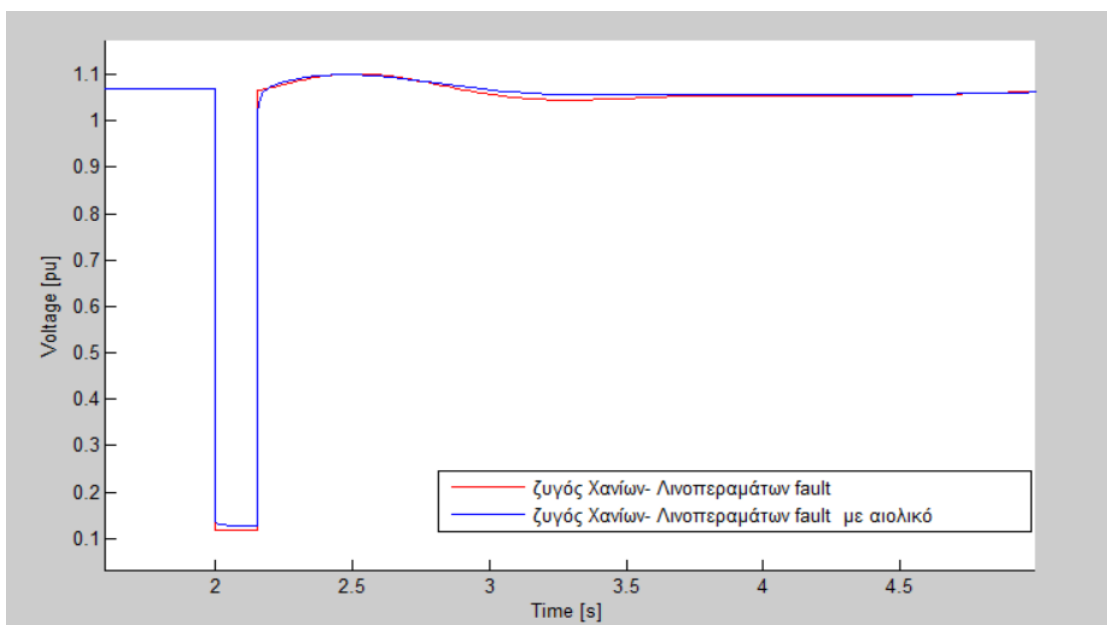


Σχήμα 8.18: Διάγραμμα της τάσης στον ζυγό της Ιεράπετρας με αιολικό και χωρίς.



Σχήμα 8.19: Διάγραμμα της τάσης στον ζυγό της Σητείας με αιολικό και χωρίς.

Από τα παραπάνω διαγράμματα των σχημάτων 8.14-8.19, είναι φανερό πως στους ίδιους ζυγούς, για τα ίδια φορτία, παρατηρείται εκτός από την ελάχιστη πιο γρήγορη και ομαλή επαναφορά της τάσης, σημαντικά μικρότερη βύθιση κατά την διάρκεια του σφάλματος, όταν υπάρχει η συνεισφορά αιολικής παραγωγής.

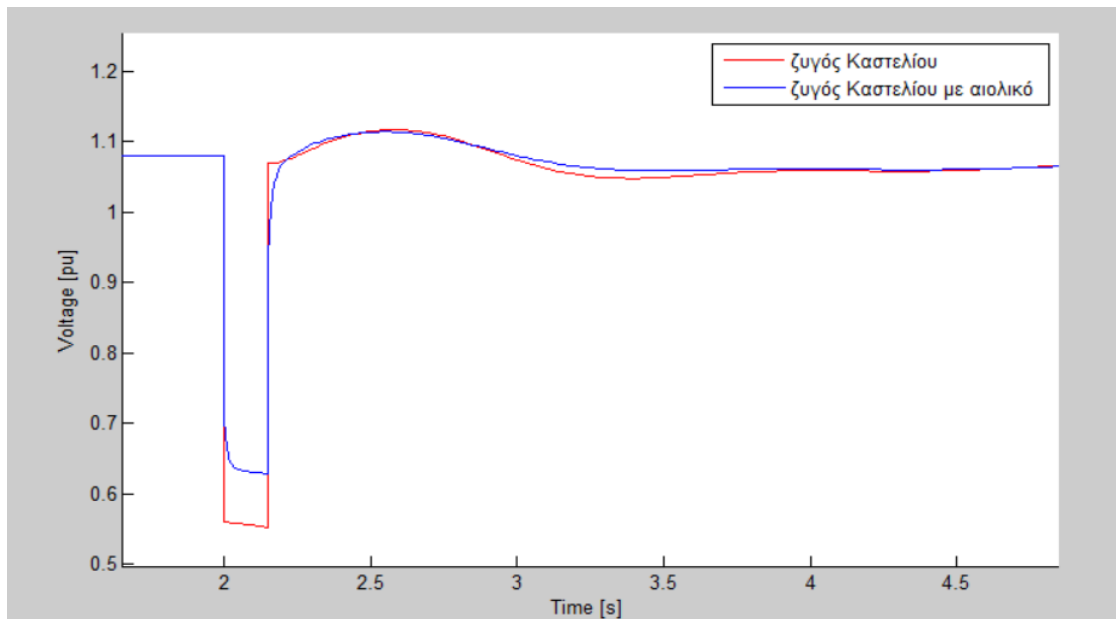


Σχήμα 8.20: Διάγραμμα της τάσης στον ζυγό που πραγματοποιήθηκε το σφάλμα Χανίων-Λινοπεραμάτων με αιολικό και χωρίς.

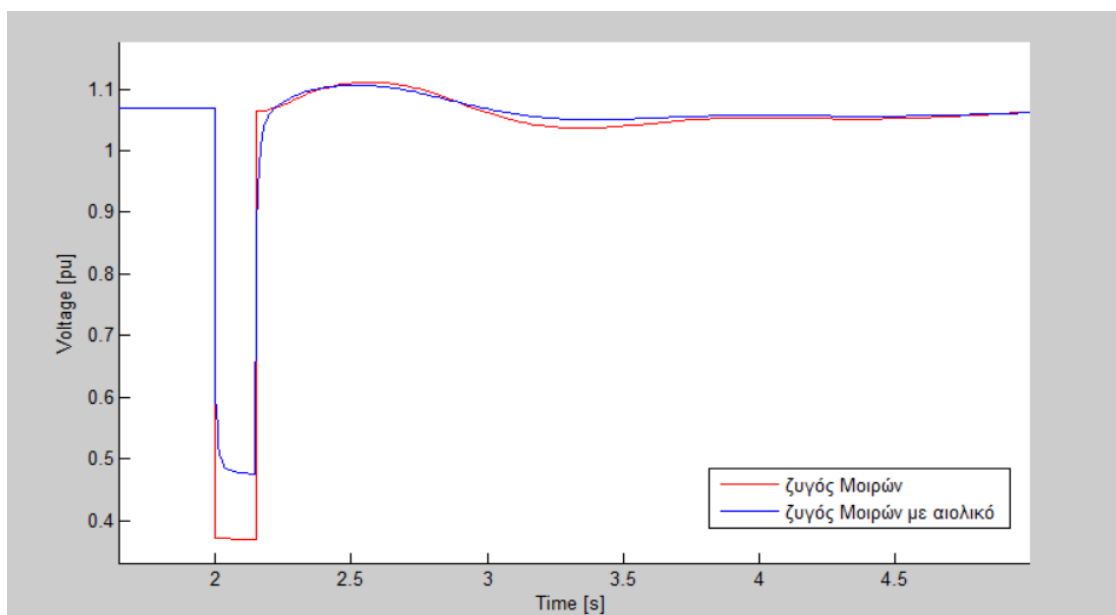
Το παραπάνω διάγραμμα του σχήματος 8.20, αφορά τον ζυγό όπου πραγματοποιήθηκε το σφάλμα. Η διαφορά μεταξύ των δύο τάσεων είναι σχετικά μικρή. Αυτό οφείλεται στο γεγονός, ότι το σφάλμα τοπολογικά έχει δημιουργηθεί σε μακρινό ζυγό από τα αιολικά, ενώ σημαντικό ρόλο παίζει και το μέγεθος του σφάλματος.

Σενάριο 2^ο

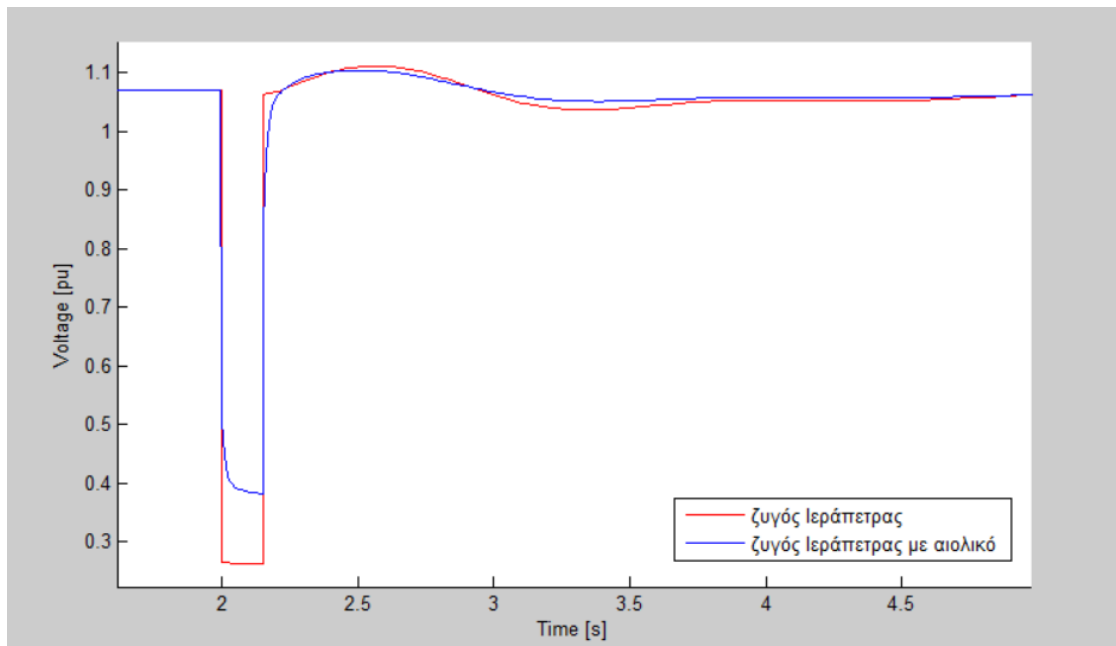
Το δεύτερο σενάριο, αφορά επίσης σφάλμα τριφασικού βραχυκυκλώματος προς γη σε ζυγό υψηλής τάσης κοντινό στα αιολικά. Το σφάλμα για το οποίο θα μελετηθεί η ευστάθεια της τάσης του συστήματος πραγματοποιήθηκε στον ζυγό 27, στην τοποθεσία Σταλίδα, όπου πραγματοποιείται η σύνδεση μεγάλου πλήθους αιολικών, με πάνω από την μισή αιολική παραγωγή της Κρήτης. Προσομοιώθηκε τριφασικό σφάλμα για την χρονική περίοδο $T1=2 \text{ sec}$ έως $T2=2.15 \text{ sec}$.



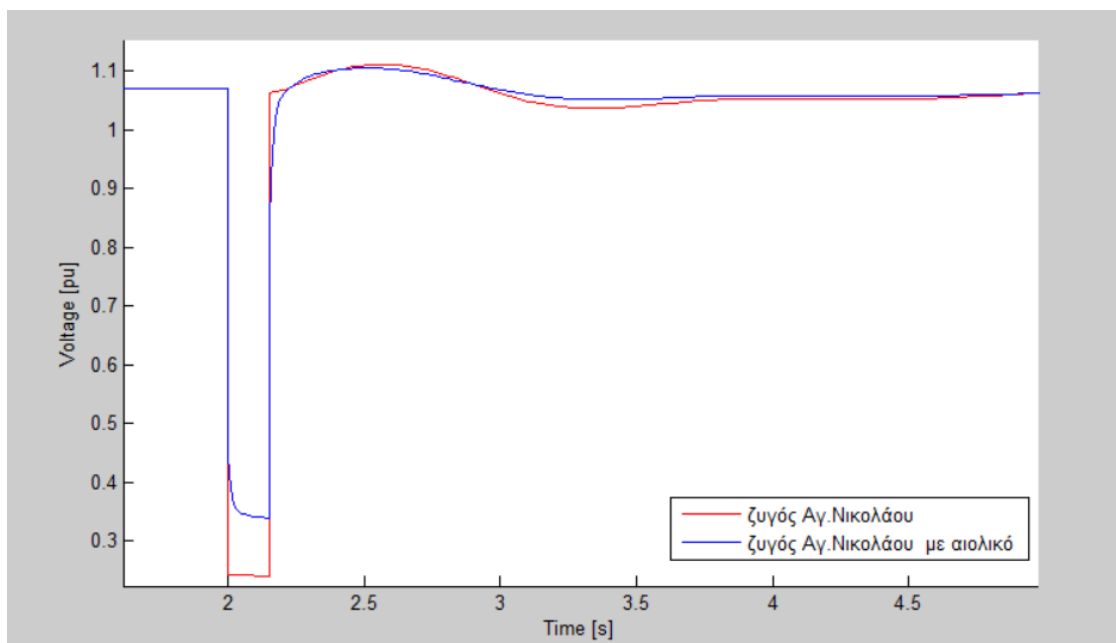
Σχήμα 8.21: Διάγραμμα της τάσης στον ζυγό του Καστελίου με αιολικό και χωρίς.



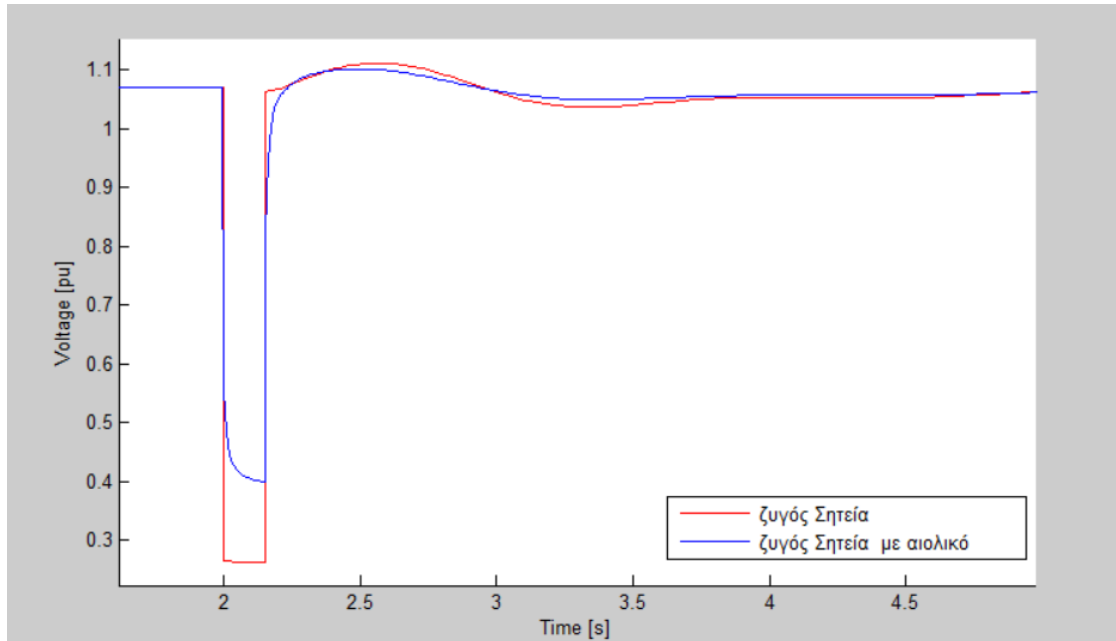
Σχήμα 8.22: Διάγραμμα της τάσης στον ζυγό Μοιρών με αιολικό και χωρίς.



Σχήμα 8.23: Διάγραμμα της τάσης στον ζυγό της Ιεράπετρας.

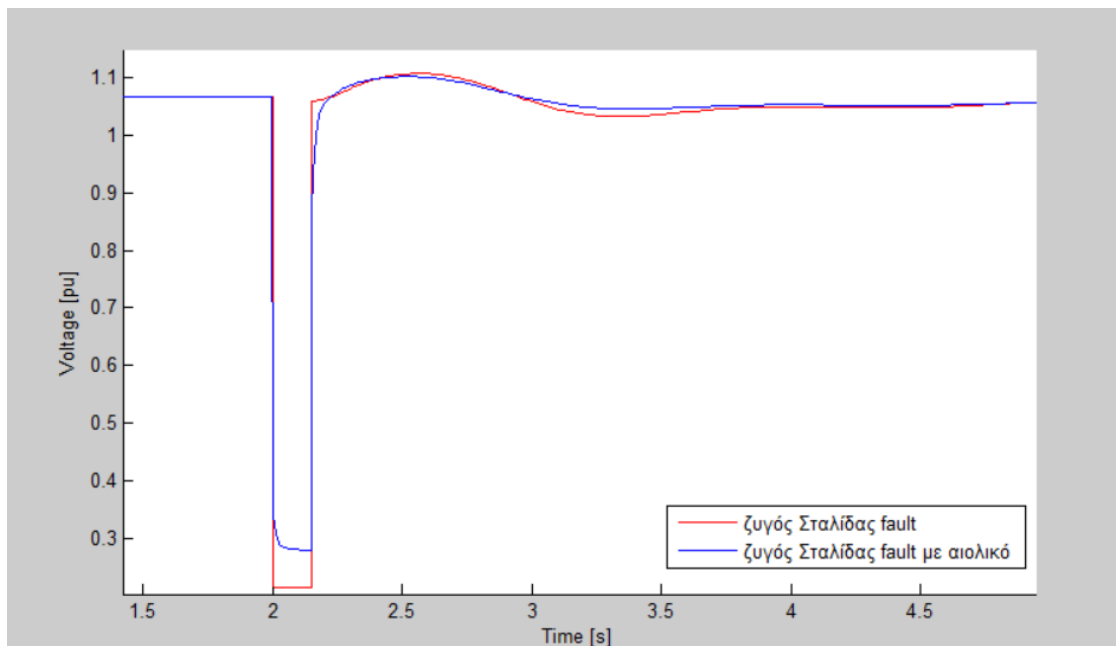


Σχήμα 8.24: Διάγραμμα της τάσης στον ζυγό του Αγίου Νικολάου με αιολικό και χωρίς.



Σχήμα 8.25: Διάγραμμα της τάσης στον ζυγό της Σητείας με αιολικό και χωρίς.

Όπως και στο 1^ο σενάριο, από τα διαγράμματα των σχημάτων 8.21-8.25 είναι φανερή η συνεισφορά των αιολικών στην ευστάθεια της τάσης του Συστήματος, κατά την διάρκεια του σφάλματος.



Σχήμα 8.26: Διάγραμμα της τάσης στον ζυγό Σταλίδα ,που πραγματοποιήθηκε το σφάλμα με αιολικό και χωρίς.

Το παραπάνω διάγραμμα του σχήματος 8.26, αφορά τον ζυγό όπου πραγματοποιήθηκε το σφάλμα. Είναι αξιοσημείωτο το γεγονός, ότι στον ζυγό που σημειώνεται το σφάλμα, υπάρχει σημαντική διαφορά στο επίπεδο βύθισης της τάσης σε σχέση με το σενάριο 1. Αυτό οφείλεται στο γεγονός, ότι κοντά στο ζυγό στον οποίο σημειώθηκε το σφάλμα, υπάρχει μεγάλη αιολική παραγωγή (βλέπε σχήμα 8.13).

8.5 Συμπεράσματα και προοπτικές επέκτασης της Διπλωματικής Εργασίας

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η δυναμική ανάλυση του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας της Κρήτης με αιολική παραγωγή κατά την διάρκεια μεταβατικών φαινομένων στο πρόγραμμα Matdyn. Λόγω του ότι το πρόγραμμα δεν διαθέτει έτοιμα μοντέλα ανεμογεννητριών αλλά μόνο μοντέλα συμβατικών γεννητριών, χρειάστηκε να τροποποιηθούν τα υπάρχοντα μοντέλα έτσι ώστε να προσομοιώνουν την λειτουργία αιολικών πάρκων. Για να γίνει αυτό έπρεπε να βρεθούν και να δοθούν συγκεκριμένες τιμές, στις μεταβλητές των ήδη υπάρχοντων μοντέλων. Έτσι έγινε η μελέτη ενός αιολικού στο πρόγραμμα Simulink και στην συνέχεια με την χρήση ευρετικού αλγορίθμου έγινε η εύρεση των ζητούμενων τιμών, έχοντας σαν μοντέλο αναφοράς, το μοντέλο του Simulink. Ο τύπος της ανεμογεννήτριας που επιλέχθηκε στο Simulink είναι ανεμογεννήτρια μεταβλητών στροφών με γεννήτρια διπλής τροφοδότησης (DFIG).

Στην συνέχεια τα μοντέλα αυτά εισήχθησαν στο ΣΗΕ της Κρήτης και πραγματοποιήθηκε δυναμική ανάλυση του συστήματος για δύο διαφορετικά σενάρια σφαλμάτων του δικτύου. Για κάθε σενάριο πραγματοποιήθηκαν δύο προσομοιώσεις, μια χωρίς την ένταξη των αιολικών και μια με ένταξη, προκειμένου να γίνει η σύγκριση της απόκρισης του Συστήματος σε κάθε περίπτωση.

Αυτό που παρατηρήθηκε είναι ότι με την ένταξη των αιολικών και για τα ίδια δεδομένα του συστήματος, υπήρξε βελτίωση στην απόκριση της τάσης. Κατά την διάρκεια του σφάλματος, σε όλες τις περιπτώσεις όπου υπήρχε αιολικό η βύθιση της τάσης ήταν μικρότερη ενώ η απόκριση του συστήματος ήταν πιο άμεση και ομαλή. Επομένως αυτό που προκύπτει είναι ότι μετά την ένταξη των αιολικών που διαθέτουν ανεμογεννήτριες κατάλληλης τεχνολογίας (ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών και σύγχρονους μετατροπείς ισχύος) παρατηρείται σημαντική βελτίωση στην ευστάθεια της τάσης σε αντίθεση με αυτό που συνέβαινε παλαιότερα με τη χρήση ανεμογεννητριών σταθερών στροφών.

Για την ανάλυση του συστήματος της Κρήτης τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν βασιστήκαν σε στοιχεία της ΔΕΗ και άλλων διπλωματικών εργασιών, όπως αναφέρονται στην βιβλιογραφία. Επομένως τα αποτελέσματα αποτελούν μια προσέγγιση και διαφέρουν από την πραγματικότητα.

Παρακάτω αναφέρονται οι προοπτικές συνέχισης της διπλωματικής για την προσέγγιση ακριβέστερων αποτελεσμάτων.

- Αρχικά το μοντέλο που επιλέχθηκε για τις προσομοιώσεις αφορά συγκεκριμένη τεχνολογία ανεμογεννήτριας. Επειδή στο σύστημα της Κρήτης υπάρχουν εγκατεστημένες ανεμογεννήτριες διαφόρων τεχνολογιών, προοπτική επέκτασης της διπλωματικής, θα μπορούσε να αποτελέσει η εύρεση πληροφοριών σχετικά με την τεχνολογία των ανεμογεννητριών που είναι εγκατεστημένες στην Κρήτη. Στην συνέχεια ακολουθώντας την ίδια διαδικασία εύρεσης των τιμών για κάθε τεχνολογία ανεμογεννητριών

ξεχωριστά και εισάγοντας τα νέα στοιχεία στο σύστημα, το αποτέλεσμα που θα προέκυπτε θα ήταν πιο ρεαλιστικό.

- Ακόμα θα μπορούσε να ακολουθηθεί η ίδια διαδικασία για την εισαγωγή φωτοβολταϊκών συστημάτων στο σύστημα της Κρήτης, καθώς στην Κρήτη υπάρχει σημαντική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκά πάρκα.
- Επιπλέον το αιολικό που εισήχθηκε στο Matdyn για την δυναμική ανάλυση, είναι ένα προσεγγιστικό μοντέλο. Η προσέγγιση του μοντέλου έγινε με δεδομένη την λειτουργία ενός αιολικού στο Simulink για ένα συγκεκριμένο σφάλμα. Για καλύτερη προσέγγιση του αιολικού, θα μπορούσε να επαναληφθεί η διαδικασία εύρεσης των τιμών για ένα πλήθος διαφορετικών σφαλμάτων.
- Τέλος θα μπορούσαν να αναπτυχθούν αναλυτικά μοντέλα ανεμογεννητριών και να εισαχθούν στο πρόγραμμα Matdyn.

Βιβλιογραφία

[1] ΡΑΕ Ρυθμιστική αρχή ενέργειας , “ Το ιστορικό της ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα”

http://www.rae.gr/site/categories_new/consumers/know_about/electricity/history.csp

[2] Αντιόπη Γιγαντίδου , “ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΣΤΗΝ ΚΡΗΤΗ”, ΔΕΗ
http://library.tee.gr/digital/m2387/m2387_gigantidou.pdf

[3] Γ. ΚΑΜΠΟΥΡΗΣ, “Διασύνδεση Κρήτης, Σχεδιασμός & Οδικός Χάρτης Υλοποίησης”, ΑΔΜΗΕ

http://www.crete.gov.gr/attachments/article/10001/%CE%91%CE%94%CE%9C%CE%97%CE%95_%CE%9A%CE%91%CE%9C%CE%A0%CE%9F%CE%A5%CE%A1%CE%97%CE%A3.pdf

[4] ΓΕΩΡΓΙΟΣ Ι. ΤΣΕΚΟΥΡΑΣ “Μοντελοποίηση δικτύου υψηλής τάσης νήσου Κρήτης για την μελέτη ταχέων ηλεκτρομαγνητικών μεταβατικών φαινομένων ”, Μεταπτυχιακή Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Ιούλιος 2000

[5] ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ, “ ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ SIMULINK ”, Σχολή Χημικών Μηχανικών ,Εργαστήριο Αυτόματης Ρύθμισης και Πληροφορικής .

[6] Παπαδόπουλος Κ. “Ανάπτυξη Κατανεμημένης Πλατφόρμας Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων και Εφαρμογή σε Προβλήματα Σύνθεσης Στοιχειοκεραιών”, Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο 2011

[7] Κεφαλλονίτης Α.-Παρασκευόπουλος Ν. “ Σχεδίαση ελεγκτών τάσης και συχνότητας σύγχρονων γεννητριών χρησιμοποιώντας μοντέρνες μεθόδους αυτομάτου ελέγχου”, ΑΤΕΙ Πειραιά 2001

[8] ΦΙΛΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ “ Σχεδιασμός ανάπτυξης δικτύου Διασύνδεσης νέων έργων ΑΠΕ με το Σύστημα Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας με χρήση Ευρετικών αλγορίθμων ”. Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης 2014

[9] ΣΕΡΓΗΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ, “Βέλτιστος προγραμματισμός λειτουργίας θερμικών μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση ευρετικών αλγορίθμων”. Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης 2016

[10] Πολύδωρος Ιάσων , Βέλτιστος προγραμματισμός λειτουργίας συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας με μεγάλη διεύθυνση αιολικής παραγωγής”, Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης 2017

[11]HWEA, Wind Energy Statistics, 2015
http://eletaen.gr/wp-content/uploads/2015/06/2015-June_HWEA_Statistics_Greece.pdf

- [12] Τσιριγιώτακης Κωνσταντίνος , “ Απαιτήσεις σύνδεσης αιολικών πάρκων στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας ”. Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2009
- [13]Κανέλλος Φώτιος,“ Παρουσιάσεις μαθήματος Ηλεκτρική Οικονομία”, Πολυτεχνείο Κρήτης
- [14] Ν. Α. Βοβός , “Ανάλυση, Έλεγχος και Ευστάθεια Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας”, ΖΗΤΗ, 2001.
- [15] ΡΑΕ Ρυθμιστική αρχή ενέργειας, “Μεταφορά και Διανομή Ηλεκτρικής Ενέργειας” http://www.rae.gr/site/categories_new/consumers/know_about/electricity/distribution.csp
- [16] ΡΑΕ Ρυθμιστική αρχή ενέργειας, “Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας” http://www.rae.gr/site/categories_new/consumers/know_about/electricity/production.csp
- [17] Ψύχας Κωνσταντίνος, “ Ανάπτυξη Γραφικού Περιβάλλοντος για την Ανάλυση Δυναμικής Ευστάθειας Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας”. Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης 2017
- [18] Κωνσταντίνος Ραφαήλ Κουσουλίδης, “ Ανάπτυξη Λογισμικού για Μοντελοποίηση και Προσομοίωση Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας”, Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2015.

