



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

*Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και
Μηχανικών Υπολογιστών*

Διπλωματική Εργασία

***«Σύστημα Ελέγχου Φόρτισης Ηλεκτρικών Οχημάτων με
Βέλτιστη Λειτουργία του Δικτύου Διανομής»***

του Ιωάννη Στ. Ψαρρά

Εξεταστική Επιτροπή

Καλαϊτζάκης Κωνσταντίνος, Καθηγητής ΗΜΜΥ (επιβλέπων)

Κουτρούλης Ευτύχιος, Καθηγητής ΗΜΜΥ

Κατσίγιαννης Ιωάννης, Διδάσκων ΗΜΜΥ

Χανιά , Μάρτιος 2018

Ευχαριστίες

*Η διπλωματική αυτή εργασία εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2017-2018 υπό την επίβλεψη του κ. **Κωνσταντίνου Καλαϊτζάκη**, Καθηγητή του Πολυτεχνείου Κρήτης της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, στον οποίο οφείλω ευχαριστίες για την βοήθεια και τις συμβουλές που μου παρείχε καθόλη την διάρκεια υλοποίησης της διπλωματικής μου εργασίας.*

*Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. **Φώτιο Κανέλλο**, Καθηγητή του Πολυτεχνείου Κρήτης της σχολής Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, στον οποίο οφείλω ευχαριστίες για την ανάθεσή της, δίνοντας μου την ευκαιρία να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα. Η βοήθεια του ήταν κάτι παραπάνω από πολύτιμη και η ανταπόκρισή του σε οποιοδήποτε πρόβλημα μου ήταν άμεση και καθοριστική.*

*Επιπλέον, ευχαριστώ τον κ. **Ιωάννη Κατσίγιαννη**, διδάκτορα του Πολυτεχνείου Κρήτης και επιστημονικό συνεργάτη του T.E.I. Κρήτης για την παροχή δεδομένων για την προσομοίωση του αλγορίθμου μου και την εξαγωγή αποτελεσμάτων.*

Τέλος, οφείλω ευχαριστίες στους γονείς μου, στον αδερφό μου και στους φίλους μου για τη στήριξη και τη βοήθειά τους σε όλα τα χρόνια των σπουδών μου.

Σε όλους εκείνους, που μοιραστήκαμε τις ίδιες ανησυχίες και ονειρευτήκαμε έναν αλλιώτικο κόσμο. Άλλωστε, η πιο όμορφη θάλασσα είναι αυτή που δεν έχουμε ακόμα ταξιδέψει.

Περίληψη

Η παγκόσμια ανησυχία για ζητήματα που αφορούν το περιβάλλον, όπως η έντονη αύξηση των αέριων ρύπων, του φαινομένου του θερμοκηπίου σε συνδυασμό με την έλλειψη των ορυκτών καυσίμων έδωσε ώθηση στην υιοθέτηση εναλλακτικών μέσων μεταφοράς φιλικότερων προς το περιβάλλον. Ιδανική λύση στο ζήτημα των μεταφορών αποτελούν τα ηλεκτρικά οχήματα. Παράλληλα με τα οικονομικά και τα περιβαλλοντικά οφέλη που προσφέρουν τα ηλεκτρικά οχήματα, η μαζική παραγωγή τους μπορεί να τροποποιήσει σημαντικά το προφίλ της ζήτησης των δικτύων διανομής. Το γεγονός αυτό αναμφισβήτητα μπορεί να προκαλέσει επιβάρυνση στη ομαλή λειτουργία του δικτύου, όπως διακυμάνσεις της τάσης, υπερφορτίσεις του δικτύου κ.α.

Προκειμένου να αποφευχθούν αυτά τα θέματα, είναι απαραίτητο να εφαρμοστεί ένα μοντέλο ενεργειακής διαχείρισης της φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων. Σκοπός της παρούσας διπλωματικής είναι η ανάπτυξη ενός συστήματος ελέγχου φόρτισης που ως στόχο έχει την ικανοποίηση των αναγκών φόρτισης των χρηστών των ηλεκτρικών οχημάτων χωρίς να παραβιάζονται ταυτόχρονα οι τεχνικοί περιορισμοί του δικτύου. Η μελέτη αυτή αφορά τις επιπτώσεις διείσδυσης των οχημάτων στο δίκτυο για δύο σενάρια φόρτισης:

- Μη ελεγχόμενη Φόρτιση (Dumb Charging)
- Ελεγχόμενη Φόρτιση (Smart Charging)

Βασικά κριτήρια σύμφωνα με τα οποία αναπτύχθηκε το συγκεκριμένο σύστημα ελέγχου αποτέλεσαν:

- Διακύμανση της τάσης των ζυγών του δικτύου σε όρια τα οποία θέτει ο διαχειριστής.
- Ελαχιστοποίηση των απωλειών του δικτύου.
- Ελαχιστοποίηση του κόστους φόρτισης των οχημάτων σύμφωνα με την τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας κάθε χρονική στιγμή.

Η ανάλυση των αποτελεσμάτων και η εξαγωγή συμπερασμάτων αναγράφονται στις τελευταίες σελίδες της διπλωματικής και παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Δίνεται λοιπόν έμφαση στην όσο το δυνατόν πιο ομαλή απορρόφηση των ηλεκτρικών οχημάτων από τα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας. Η έμφαση αυτή γίνεται ολοένα και πιο δαπανηρή, σε ένα περιβάλλον με ραγδαίες τεχνολογικές εξελίξεις που προσφέρουν δυνατότητες για σημαντική αύξηση της απόδοσης των συστημάτων ενέργειας.

Abstract

The global concern over environmental issues, such as the intense growth of gaseous pollutants of the greenhouse effect in conjunction with the lack of fossil fuels, stimulated the adoption of alternative means of transportation which are more environmentally friendly. The ideal solution to the transport issue is electric vehicles. Along with the economics and the environmental benefits of electric vehicles, their mass production can significantly modify the demand profile of distribution networks. This can undoubtedly cause a burden to the smooth operation of the network, such as voltage fluctuations, network overloads and so on.

In order to avoid these issues, it is essential to apply a model of energy management of the electric vehicle charging. The purpose of this thesis is to develop a charging control system that aims to meet the charging requirements of electric vehicles without breaking the technical limitations of the network. This study deals with the impacts of vehicle connection on the network for two charging scenarios:

- Dumb Charging
- Smart Charging

The main criteria according to which this specific control system was developed were:

- Variation of the voltage of the bus scales to limits set by the manager.
- Minimization of the network losses.
- Minimization of the cost of charging the vehicles according to the price of electricity at all times.

The analysis of results and the conclusions can be found in the last pages of this thesis and are of particular interest. So, emphasis is placed on the smoothest absorption of the electric vehicles by electricity networks. This emphasis is becoming more and more costly, in an environment with rapid technological advancements that offer opportunities for a significant increase in the performance of energy systems.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	2
Περίληψη	3
Abstract	4
Περιεχόμενα Εικόνων	9
Περιεχόμενα Πινάκων	13
1. Εισαγωγή.....	14
1.1 Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	14
1.1.1 Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας	14
1.1.2 Μεταφορά Ηλεκτρικής Ενέργειας	15
1.1.3 Διανομή Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	17
1.1.4 Υποσταθμοί και Γραμμές Μεταφοράς.....	19
1.2 Φορτία Συστημάτων Διανομής.....	20
1.2.1 Τεχνικά Χαρακτηριστικά του Φορτίου.....	23
1.3 Αιολική Ενέργεια	27
1.3.1 Συντελεστής Ισχύος Α/Γ	28
1.3.2 Καμπύλη Ισχύος.....	29
1.3.3 Συντελεστής Χρησιμοποίησης.....	30
1.3.4 Κατηγοριοποίηση Α/Γ	31
1.4 Ηλιακή Ενέργεια	32
1.4.1 Το Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο.....	32
1.4.2 Φωτοβολταϊκά Συστήματα	34
1.5 Ηλεκτρικά Οχήματα	35
1.5.1 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα Ηλεκτρικών Οχημάτων	35
1.5.2 Πρόβλεψη Διείσδυσης Ηλεκτρικών Οχημάτων	37
1.6 Σκοπός και Δομή της Εργασίας.....	38
2. Ηλεκτροκίνηση	41
2.1 Τεχνολογίες Ηλεκτρικών Οχημάτων.....	41
2.2 Κλάσεις Ηλεκτρικών Οχημάτων.....	44

2.3 Τεχνολογίες Αποθήκευσης	44
2.4 Σταθμοί Φόρτισης	49
2.4.1 Τεχνολογίες Σταθμών Φόρτισης	49
2.4.2 Θέσεις Σταθμών Φόρτισης.....	52
3. Ένταξη Ηλεκτρικών Οχημάτων στο Δίκτυο Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	54
3.1 Μέθοδος Προσδιορισμού Ενεργειακών Αναγκών	54
3.2 Νέοι Ενεργειακοί Παράγοντες Ηλεκτροκίνησης	55
3.3 Πολιτικές Φόρτισης.....	56
3.3.1 Μη Ελεγχόμενη Φόρτιση (Dumb Charging)	57
3.3.2 Φόρτιση Πολλαπλής Χρέωσης (Multiple Tariff Charging)	58
3.3.3 Ελεγχόμενη Φόρτιση (“Valley-Filling”).....	58
3.4 Αλληλεπίδραση Ηλεκτρικών Οχημάτων με το Δίκτυο	59
3.4.1 Grid to Vehicle.....	60
3.4.2 Vehicle to Grid.....	60
3.5 Φάσεις Διείσδυσης	61
4. Μελέτη Ροής Ισχύος και Βέλτιστη Ροή Ισχύος	65
4.1 Μελέτη Ροής Ισχύος	65
4.1.1 Μοντέλα Συνιστωσών ΣΗΕ	65
4.1.2 Εξισώσεις Ροών Ισχύος	68
4.1.3 Θεμελίωση του Προβλήματος Ροών Φορτίου	71
4.1.4 Μέθοδοι Επίλυσης του Προβλήματος Ροής Ισχύος	73
4.2 Βέλτιστη Ροή Ισχύος	73
4.2.1 Μαθηματική Περιγραφή Προβλήματος.....	74
4.2.2 Συνάρτηση Κόστους	75
4.2.3 Εξισώσεις Βέλτιστης Ροής Ισχύος.....	76
4.2.4 Ανισωτικοί Περιορισμοί	77
4.2.5 Μέθοδοι Επίλυσης Βέλτιστης Ροής Ισχύος	78
5. Περιγραφή Λογισμικού MATPOWER.....	80
5.1 Εισαγωγικά Στοιχεία	80
5.2 Έναρξη.....	80
5.2.1 Απαιτήσεις Συστήματος.....	80

5.2.2 Εγκατάσταση Προγράμματος	81
5.3 Μοντελοποίηση	81
5.3.1 Κλάδοι.....	82
5.3.2 Γεννήτριες.....	83
5.3.3 Φορτία.....	83
5.3.4 Εγκάρσια Στοιχεία	84
5.3.5 Εξισώσεις Δικτύου.....	84
5.4 Διάταξη Αρχείου Δεδομένων	85
5.4.1 Περίληψη Αρχείων	89
5.5 Ροή Φορτίου (PF)	90
5.6 Βέλτιστη Ροή Φορτίου (OPF)	91
5.7 P-Q Καμπύλες Ικανότητας των Γεννητριών	92
5.8 Κατανεμημένα Φορτία	93
5.9 Τμηματικά Γραμμικά Κόστη.....	95
6. Υλοποίηση Συστήματος Ελέγχου Φόρτισης Ηλεκτρικών Οχημάτων	97
6.1 Μοντέλο Ηλεκτρικού Οχήματος	97
6.1.1 Χρόνοι Φόρτισης	97
6.1.2 Κατάσταση Φόρτισης Συσσωρευτή.....	98
6.1.3 Επίπεδα Λειτουργίας Ενεργού Ισχύος.....	100
6.1.4 Χαρακτηριστική Καμπύλη Ικανότητας P-Q.....	103
6.2 Περιγραφή Συστήματος Ελέγχου Φόρτισης.....	105
6.3 Περιεχόμενο Μηνυμάτων.....	106
6.3.1 Πρώτη Φάση Επικοινωνίας	106
6.3.2 Δεύτερη Φάση Επικοινωνίας	110
6.3.3 Τρίτη Φάση Επικοινωνίας	111
6.3.4 Τέταρτη Φάση Επικοινωνίας	113
6.4 Θεώρηση Πλασματικού Κόστους Γεννητριών	117
6.4.1 Εύρεση Συναρτήσεων Κόστους.....	118
7. Προσομοίωση και Αποτελέσματα	120
7.1 Περιγραφή Δικτύου Διανομής.....	120
7.2 Προσομοίωση Φόρτισης.....	128

7.3 Μη Ελεγχόμενη Φόρτιση	131
7.4 Ελεγχόμενη Φόρτιση	134
7.5 Εξαγωγή και Σύγκριση Αποτελεσμάτων	139
7.5.1 Επίπεδα Τάσεων Ζυγών Αναφοράς	139
7.5.2 Μέσες Απώλειες Δικτύου	141
7.5.3 Κόστος Φόρτισης Ηλεκτρικών Οχημάτων	143
8. Συμπεράσματα	145
9. Παράρτημα.....	147
9.1 Ηλεκτρική Ισχύς.....	147
9.1.1 Συντελεστής Ισχύος	148
9.2 Αριθμητικό Παράδειγμα στις Καμπύλες Φορτίου	150
10. Βιβλιογραφία.....	151

Περιεχόμενα Εικόνων

Εικόνα 1.1 : <i>Διάγραμμα Τάσης / Χρόνου ενός Μονοφασικού</i>	16
Εικόνα 1.2 : <i>Διάγραμμα Τάσης / Χρόνου ενός Τριφασικού</i>	16
Εικόνα 1.3 : <i>Δομή Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας</i>	18
Εικόνα 1.4 : <i>Τυπική Ημερήσια Καμπύλη Φορτίου</i>	20
Εικόνα 1.5 : <i>Τυπική Χρονολογική Καμπύλη Φορτίου</i>	22
Εικόνα 1.6 : <i>Τυπική Καμπύλη Διάρκειας Φορτίου</i>	22
Εικόνα 1.7 : <i>Εικοσιτετράωρη Καμπύλη Φορτίου ενός Καταναλωτή</i>	23
Εικόνα 1.8 : <i>Συντελεστής Ετεροχρονισμού σε Συνάρτηση της Αύξησης του Πλήθους των Καταναλωτών</i>	26
Εικόνα 1.9 : <i>Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας Τυπικής Α/Γ</i>	28
Εικόνα 1.10 : <i>Καμπύλη Ισχύος Α/Γ</i>	30
Εικόνα 1.11 : <i>Συμπεριφορά Ηλιακού Στοιχείου κατά το Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο</i>	33
Εικόνα 1.12 : <i>Ιεραρχία Φ/Β Συστημάτων</i>	34
Εικόνα 1.13 : <i>Πρόβλεψη Πώλησης Ηλεκτρικών Οχημάτων Σύμφωνα με τον Διεθνή Οργανισμό Ενέργειας (IEA)</i>	37
Εικόνα 2.1 : <i>Διάγραμμα Κυρίων Μελών ενός Ηλεκτροκίνητου Οχήματος</i>	43
Εικόνα 2.2 : <i>Κόστος και Πυκνότητα Ενέργειας Μπαταρίας</i>	45
Εικόνα 2.3 : <i>Προτεινόμενη Λύση Επαγωγικής Φόρτισης από το Ευρωπαϊκό Πρόγραμμα FastInCharge</i>	51
Εικόνα 2.4 : <i>Η Διάκριση των Ενδεχόμενων Θέσεων Σταθμών Φόρτισης Ηλεκτροκίνητων Οχημάτων</i>	53
Εικόνα 3.1 : <i>Επιπρόσθετη Ημερήσια Ζήτηση Λόγω Φόρτισης Ηλεκτρικών Οχημάτων για τα τρία Σενάρια Διείσδυσης</i>	59
Εικόνα 3.2 : <i>Φάσεις Ενσωμάτωσης Ηλεκτρικών Οχημάτων στο Δίκτυο Ηλεκτρικής Ενέργειας</i>	61
Εικόνα 4.1 : <i>Ονομαστικό Ισοδύναμο Κύκλωμα Π Γραμμής Μεταφοράς</i>	66

Εικόνα 4.2 : <i>Παράσταση Εγκάρσιου Στοιχείου.....</i>	66
Εικόνα 4.3 : <i>Παράσταση M/Σ σε Ονομαστική Σχέση Μετασχηματισμού.....</i>	67
Εικόνα 4.4 : <i>Παράσταση Φορτίων.....</i>	68
Εικόνα 4.5 : <i>Γενικευμένος Ζυγός Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας</i>	69
Εικόνα 4.6 : <i>Τυπικό Ωριαίο Κόστος Λειτουργίας Θερμικής Μονάδας.....</i>	75
Εικόνα 4.7 : <i>Διαφορικό Κόστος Λειτουργίας Θερμικής Μονάδας</i>	76
Εικόνα 5.1 : <i>Κοινό Μοντέλο Απεικόνισης Γραμμών Μεταφοράς, Μετασχηματιστών και Μετατροπέων Γωνίας Φάσης</i>	82
Εικόνα 5.2 : <i>Περιοχή Εμπιστοσύνης για τη Λειτουργία της Γεννήτριας</i>	93
Εικόνα 5.3 : <i>Καμπύλη Ζήτησης του Φορτίου</i>	94
Εικόνα 5.4 : <i>Τμηματικά Γραμμική Καμπύλη Κόστους Συναρτήσει της Ισχύος.....</i>	94
Εικόνα 5.5 : <i>Τμηματικά Γραμμική και Κυρτή Συνάρτηση Κόστους</i>	95
Εικόνα 6.1 : <i>Χρονική Καμπύλη Επιπέδου Φόρτισης Οχήματος.....</i>	99
Εικόνα 6.2 : <i>Χαρακτηριστική Καμπύλη Ικανότητας $P-Q$ του Μοντέλου</i>	104
Εικόνα 6.3 : <i>Η Πορεία της Επικοινωνίας και Ανταλλαγής Μηνυμάτων στο Έξυπνο Δίκτυο</i>	105
Εικόνα 6.4 : <i>Πρώτη Φάση Επικοινωνίας</i>	106
Εικόνα 6.5 : <i>Τα Διαφορετικά Επίπεδα Ισχύος Φόρτισης του Οχήματος</i>	107
Εικόνα 6.6 : <i>Όρια Ισχύος Λειτουργίας για $P_{current} = P_{sheduled}$</i>	108
Εικόνα 6.7 : <i>Όρια Ισχύος Λειτουργίας για $P_{current} = 0$</i>	108
Εικόνα 6.8 : <i>Όρια Ισχύος Λειτουργίας για $P_{current} = P_{max}$.....</i>	109
Εικόνα 6.9 : <i>Δεύτερη Φάση Επικοινωνίας.....</i>	110
Εικόνα 6.10 : <i>Τρίτη Φάση Επικοινωνίας.....</i>	111
Εικόνα 6.11 : <i>Τέταρτη και Τελευταία Φάση Επικοινωνίας.....</i>	113
Εικόνα 6.12 : <i>Μηχανή Καταστάσεων (FSM) για τα Διαφορετικά Επίπεδα Ισχύος Λειτουργίας του Οχήματος.....</i>	114
Εικόνα 6.13 : <i>Τελικά Όρια Αέργου Ισχύος του Οχήματος</i>	115
Εικόνα 6.14 : <i>Στιγμιότυπο Συναρτήσεων Κόστους Γεννητριών για την χρονική στιγμή t</i>	117

Εικόνα 7.1 : Σχεδιαστική Απεικόνιση του Δικτύου Διανομής	121
Εικόνα 7.2 : Συνολική Ημερήσια Καμπύλη Κατανάλωσης Ενεργού και Άεργου Ισχύος των Ζυγών Φορτίου του Δικτύου	123
Εικόνα 7.3 : Ημερήσια Καμπύλη Παραγόμενης Ισχύος Αιολικού Πάρκου	126
Εικόνα 7.4 : Ημερήσια Καμπύλη Παραγόμενης Ισχύος των Φωτοβολταϊκών Πλαισίων του Δικτύου	127
Εικόνα 7.5 : Συνολική Ζήτηση Ισχύος Δικτύου με Παράλληλη Απεικόνιση της Αντίστοιχης Παραγόμενης Ποσότητας ΑΠΕ την ίδια χρονική στιγμή	127
Εικόνα 7.6 : Κατανομή Οχημάτων σε Σταθμούς Φόρτισης την χρονική στιγμή t_0	129
Εικόνα 7.7 : Ημερήσια Κατανομή Εισόδου-Εξόδου Οχημάτων στους Σταθμούς Φόρτισης του Δικτύου	130
Εικόνα 7.8 : Ημερήσια Διακύμανση της Τιμής της Ηλεκτρικής Ενέργειας Σύμφωνα με Δεδομένα του ΑΔΜΗΕ	130
Εικόνα 7.9 : Καμπύλες Φορτίου του Δικτύου Διανομής κατά το Σενάριο της Μη Ελεγχόμενης Φόρτισης	131
Εικόνα 7.10 : Κατάσταση Φόρτισης Οχημάτων κατά το Σενάριο της Μη Ελεγχόμενης Φόρτισης	132
Εικόνα 7.11 : Επίπεδα Ενεργού Ισχύος Λειτουργίας του Σταθμού Φόρτισης στον Ζυγό 37 κατά το Σενάριο της Μη Ελεγχόμενης Φόρτισης	133
Εικόνα 7.12 : Κατάσταση Φόρτισης Οχημάτων κατά το Σενάριο της Μη Ελεγχόμενης Φόρτισης στον Ζυγό 37	134
Εικόνα 7.13 : Καμπύλες Φορτίου του Δικτύου Διανομής κατά το Σενάριο της Ελεγχόμενης Φόρτισης	135
Εικόνα 7.14 : Κατάσταση Φόρτισης Οχημάτων κατά το Σενάριο της Ελεγχόμενης Φόρτισης	136
Εικόνα 7.15 : Όρια Ενεργού Ισχύος Λειτουργίας του Σταθμού Φόρτισης στον Ζυγό 37 κατά το Σενάριο της Ελεγχόμενης Φόρτισης	137
Εικόνα 7.16 : Όρια Αέργου Ισχύος Λειτουργίας του Σταθμού Φόρτισης στον Ζυγό 37 κατά το Σενάριο της Ελεγχόμενης Φόρτισης	138
Εικόνα 7.17 : Κατάσταση Φόρτισης Οχημάτων κατά το Σενάριο της Ελεγχόμενης Φόρτισης στον Ζυγό 37	139
Εικόνα 7.18 : Επίπεδα Τάσεων Ζυγών Αναφοράς του Δικτύου κατά το Σενάριο της Μη Ελεγχόμενης Φόρτισης	140
Εικόνα 7.19 : Επίπεδα Τάσεων Ζυγών Αναφοράς του Δικτύου κατά το Σενάριο της Ελεγχόμενης Φόρτισης	141

Εικόνα 7.20 : Συνολικές Μέσες Απώλειες Δικτύου Διανομής κατά το Σενάριο της Μη Ελεγχόμενης Φόρτισης	142
Εικόνα 7.21 : Συνολικές Μέσες Απώλειες Δικτύου Διανομής κατά το Σενάριο της Ελεγχόμενης Φόρτισης	143
Εικόνα 7.22 : Κόστος Φόρτισης Οχημάτων (σε €) για τα δύο Σενάρια Φόρτισης	144
Εικόνα 9.1 : Διανύσματα Ισχύος στο Χώρο	147
Εικόνα 9.2 : Διάγραμμα Επαγωγικής και Χωρητικής Συμπεριφοράς Φορτίου	149
Εικόνα 9.3 : Ημερήσια Κατανάλωση Φορτίου ανά ώρα.....	150

Περιεχόμενα Πινάκων

Πίνακας 2.1 : Συγκριτικά Αποτελέσματα Ενεργειακής Πυκνότητας για Διαφορετικούς Τύπους Μπαταριών	48
Πίνακας 2.2 : Συγκριτικά Χαρακτηριστικά Ενσύρματης και Ασύρματης Φόρτισης	52
Πίνακας 7.1 : Μέσο Καταναλισκόμενο Φορτίο Ενεργού και Αέργου Ισχύος ανά Ζυγό	122
Πίνακας 7.2 : Παράμετροι Σύνθετης Αντίστασης Γραμμών Διανομής	124
Πίνακας 7.3 : Δεδομένα Παραμέτρων Οχημάτων Προσομοίωσης	128
Πίνακας 7.4 : Πιθανότητα Εμφάνισης Κλάσης Ηλεκτρικού Οχήματος	128
Πίνακας 7.5 : Κόστος Φόρτισης Οχημάτων (σε €) για τα Δύο Σενάρια Φόρτισης	143

1. Εισαγωγή

1.1 Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας

Ως σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ) χαρακτηρίζεται το σύνολο των εγκαταστάσεων και των μέσων που χρησιμοποιούνται για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε περιοχές εξυπηρέτησης. Αποτελείται από σταθμούς παραγωγής, υποσταθμούς ανύψωσης και υποβίβασης τάσης όπως επίσης και γραμμές μεταφοράς και διανομής. Η λειτουργία ενός τέτοιου συστήματος, αποσκοπεί στην εξυπηρέτηση διαφόρων ειδών καταναλωτών οι οποίοι είναι αναγκαίο να τροφοδοτούνται ανάλογα με τις ανάγκες ζήτησής τους.

Η ομαλή και σωστή λειτουργία ενός ΣΗΕ προϋποθέτει ασφάλεια του συστήματος, σταθερότητα σε συχνότητα και τάση και κυρίως υψηλή αξιοπιστία στην τροφοδότηση με το μικρότερο δυνατό κόστος και απώλειες. Επιπρόσθετα, δεδομένης της συνεχούς χρονικής μεταβολής της ζήτησης ισχύος, το σύστημα θα πρέπει να ικανοποιεί συνεχώς την μεταβολή αυτή και να είναι ευέλικτο και αποδοτικό σε τυχόν απρόβλεπτους παράγοντες.

Τα ΣΗΕ είναι ιδιαίτερα πολύπλοκα. Προκειμένου να αναλυθούν, τα διακρίνουμε σε υποσυστήματα, κυρίως με γνώμονα την τάση λειτουργίας σε κάθε περίπτωση. Πρόκειται για τρεις ξεχωριστές λειτουργίες: την Παραγωγή, τη Μεταφορά και τη Διανομή.

1.1.1 Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας

Το σύστημα *παραγωγής*, αποτελεί το πρώτο συστατικό τμήμα ενός ΣΗΕ. Περιλαμβάνει το σύνολο των σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και τους υποσταθμούς ανύψωσης της τάσης που είναι απαραίτητοι για τη μεταφορά του ρεύματος υπό υψηλή (110-220 kV) και υπερυψηλή τάση (220-750 kV). Στους σταθμούς παραγωγής επιτυγχάνεται η μετατροπή των πρωτογενών ενεργειακών πόρων (πχ λιγνίτη, φυσικό αέριο, ηλιακή ή αιολική ενέργεια κλπ) σε δευτερογενή μορφή ενέργειας, τον ηλεκτρισμό.

Το σύνολο της ηλεκτρικής ενέργειας που παρέχεται στον καταναλωτή προέρχεται κυρίως από *θερμοηλεκτρικούς σταθμούς* με την καύση ορυκτών καυσίμων (άνθρακας, λιγνίτης, πετρέλαιο, φυσικό αέριο), από *υδροηλεκτρικούς σταθμούς* με τη ροή ή την πτώση των υδάτων, από *πυρηνικούς σταθμούς* με την πυρηνική σχάση (ουράνιο, θόριο, πλουτώνιο) και τα τελευταία χρόνια με μεγαλύτερη ένταση από *σταθμούς ανανεώσιμων πηγών ενέργειας*, όπως ο άνεμος (αιολική ενέργεια), τα θαλάσσια κύματα, η ηλιακή ενέργεια, η γεωθερμία, η βιομάζα κτλ.

Οι μονάδες ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας τους χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

- Μονάδες βάσης
- Μονάδες αιχμής

Μονάδες βάσης είναι μονάδες που προγραμματίζονται ανοικτές κατά την διάρκεια ενός 24ώρου χωρίς να διακόπτουν την λειτουργία τους. Είναι μονάδες μεγάλης ισχύος που έχουν συνήθως μεγάλο βαθμό απόδοσης και χαμηλό κόστος ηλεκτροπαραγωγής. Εξαιτίας του μεγέθους τους οι μονάδες βάσης χρειάζονται πολλές ώρες για να τεθούν από την κατάσταση αδράνειας, σε λειτουργία. Το μεγαλύτερο ποσοστό της ηλεκτρικής ενέργειας σε ένα σύστημα παράγεται από μονάδες βάσης. Βασικό χαρακτηριστικό των μονάδων αυτών είναι ότι η παραγόμενη ισχύς δεν πρέπει να παρουσιάζει μεγάλες αυξομειώσεις, όπως παρουσιάζει η ισχύς που παράγεται για παράδειγμα από την αιολική ενέργεια¹. Αξιοποιούν συχνά φθηνό καύσιμο (λιγνίτης, μαζούτ) ενώ έχουν ακριβό κόστος εγκατάστασης.

Από την άλλη πλευρά οι **μονάδες αιχμής** βρίσκονται σε πλήρη αντιδιαστολή με τις μονάδες βάσης. Είναι μικρές μονάδες που σκοπό έχουν την παραγωγή ισχύος σε συνθήκες πολύ μεγάλης ζήτησης. Οι μονάδες αιχμής μπορεί να λειτουργούν πολύ λίγες ώρες το χρόνο και γι αυτό το λόγο κατασκευάζονται με σχετικά χαμηλό βαθμό απόδοσης (20% - 30%) έτσι ώστε να παραμένει χαμηλό το κόστος αγοράς τους, ενώ παράλληλα απαιτούν μικρό χώρο εγκατάστασης. Βασικό χαρακτηριστικό των μονάδων αιχμής είναι ότι μπορούν να συνδεθούν εύκολα και γρήγορα στο δίκτυο και να παράσχουν την απαιτούμενη ισχύ μέσα σε χρόνο λίγων λεπτών. Απαιτούν πιο «εξευγενισμένο» καύσιμο, συνήθως (ελαφρύ) πετρέλαιο.

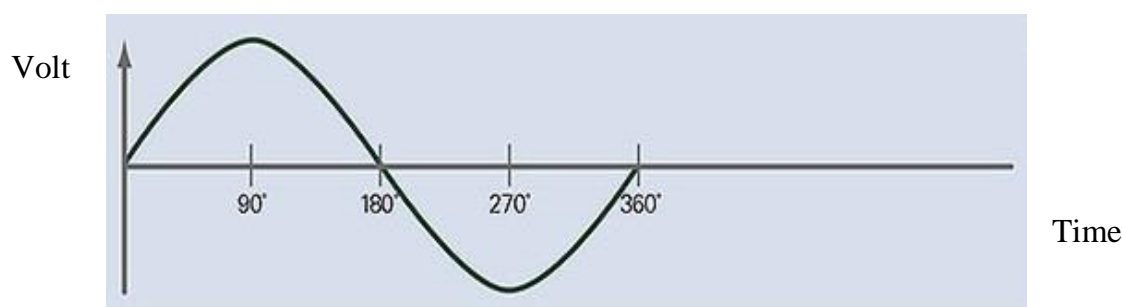
1.1.2 Μεταφορά Ηλεκτρικής Ενέργειας

Με τον όρο *μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας* εννοούμε το σύνολο των διαδικασιών λειτουργίας και ελέγχου των εγκαταστάσεων και των μέσων που χρησιμοποιούνται για την μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας από την έξοδο των σταθμών παραγωγής, σε κεντρικά σημεία του δικτύου, τους *υποσταθμούς*. Η μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλες ποσότητες από τα εργοστάσια παραγωγής προς τις περιοχές κατανάλωσης γίνεται με τις γραμμές υψηλής και υπερυψηλής τάσης. Η διατήρηση της υψηλής τάσης στο σύστημα μεταφοράς, εξυπηρετεί στην μείωση των απωλειών των γραμμών, καθώς επίσης επιτρέπει αυξημένες δυνατότητες μεταφοράς ισχύος. Η ισχύς η οποία μπορεί να μεταφερθεί

¹ Η απόδοση μιας ανεμογεννήτριας (Α/Γ) εξαρτάται από το μέγεθος της και την ταχύτητα του ανέμου. Σε περίπτωση υψηλής ταχύτητας του ανέμου η απόδοση της Α/Γ βρίσκεται σε υψηλά επίπεδα ενώ σε αντίθετη περίπτωση η Α/Γ υπολειτουργεί. Οι απότομες μεταβολές της έντασης του ανέμου έχουν ως αποτέλεσμα και απότομες αυξομειώσεις στην απόδοση των αιολικών πάρκων.

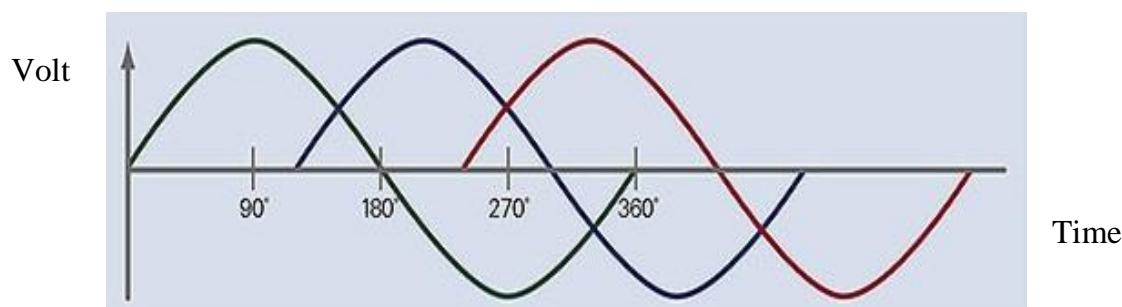
από μία γραμμή μεταφοράς είναι ανάλογη προς το τετράγωνο της τάσης και επομένως είναι προφανής ο ρόλος των υπερυψηλών τάσεων στην επίτευξη μεγάλων ισχύων μεταφοράς.

Η μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται σε τρεις φάσεις. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι γιατί ένα μονοφασικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας δεν αποτελεί τη βέλτιστη λύση τροφοδότησης, καθώς σε μία ημιτονοειδής καμπύλη τάσης / χρόνου (**Εικόνα 1.1**) οι τιμές της τάσης είναι μηδέν ή κοντά στο μηδέν για σχετικά μεγάλα χρονικά διαστήματα.



Εικόνα 1.1 : Διάγραμμα Τάσης / Χρόνου ενός Μονοφασικού Συστήματος Μεταφοράς

Το πρόβλημα αυτό έρχονται να λύσουν τα πολυφασικά συστήματα, στα οποία χρησιμοποιούνται για τροφοδότηση περισσότερες μονοφασικές πηγές, κατάλληλα συνδεδεμένες μεταξύ τους έτσι ώστε να εξαλείφονται όσο το δυνατόν καλύτερα αυτά τα διαστήματα χρόνου. Για τον λόγο αυτό έχουν επικρατήσει τα τριφασικά συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Στα τριφασικά συστήματα η ροή της ενέργειας είναι συνεχής και κάνει τη λειτουργία τους πολύ πιο ομαλή και αποδοτική απ' ό τι θα ήταν αν η ροή ήταν παλλόμενη όπως συμβαίνει στα μονοφασικά. Τα τριφασικά συστήματα ρευμάτων και τάσεων πρέπει να είναι συμμετρικά, με ίσα τα μεγέθη των τριών φάσεων και γωνιακές αποκλίσεις 120° μεταξύ τους (**Εικόνα 1.2**).



Εικόνα 1.2 : Διάγραμμα Τάσης / Χρόνου ενός Τριφασικού Συστήματος Μεταφοράς

Τα δίκτυα μεταφοράς είναι δυνατόν να τροφοδοτούν απευθείας καταναλωτές υψηλής τάσης, ενώ ταυτόχρονα μπορούν να διασυνδέσουν και γειτονικά ΣΗΕ. Παράλληλα θα πρέπει να παρέχουν σταθερή (ή σχεδόν σταθερή) τάση και συχνότητα. Η συχνότητα λειτουργίας των επιμέρους συστημάτων (παραγωγής, μεταφοράς, διανομής) θα πρέπει να είναι ίδια για να διασφαλίζεται η ομαλή διασύνδεσή τους².

1.1.3 Διανομή Ηλεκτρικής Ενέργειας

Η διανομή είναι συνήθως μία διαφορετική λειτουργία, η οποία σχεδιάζεται και αναπτύσσεται ανεξάρτητα και εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της περιοχής και των καταναλωτών, τους οποίους εξυπηρετεί.

Με τον όρο *διανομή ηλεκτρικής ενέργειας* εννοούμε το σύνολο των διαδικασιών λειτουργίας και ελέγχου με τις οποίες η ηλεκτρική ενέργεια διανέμεται στους καταναλωτές. Τα δίκτυα διανομής περιλαμβάνουν τις γραμμές ηλεκτρικής ενέργειας, μέσω των οποίων αυτή φτάνει στους καταναλωτές και τους υποσταθμούς υποβιβασμού της τάσης, οι οποίοι την συνδέουν με το σύστημα μεταφοράς.

Τα δίκτυα διανομής διακρίνονται, ανάλογα με την τάση λειτουργίας τους σε δύο βασικές κατηγορίες:

- Τα **δίκτυα μέσης τάσης** (10 – 30 kV) που μεταφέρουν την ηλεκτρική ενέργεια από τους υποσταθμούς μεταφοράς στους υποσταθμούς διανομής
- Τα **δίκτυα χαμηλής τάσης** (400 V) που μεταφέρουν την ηλεκτρική ενέργεια από τους υποσταθμούς διανομής στους καταναλωτές.

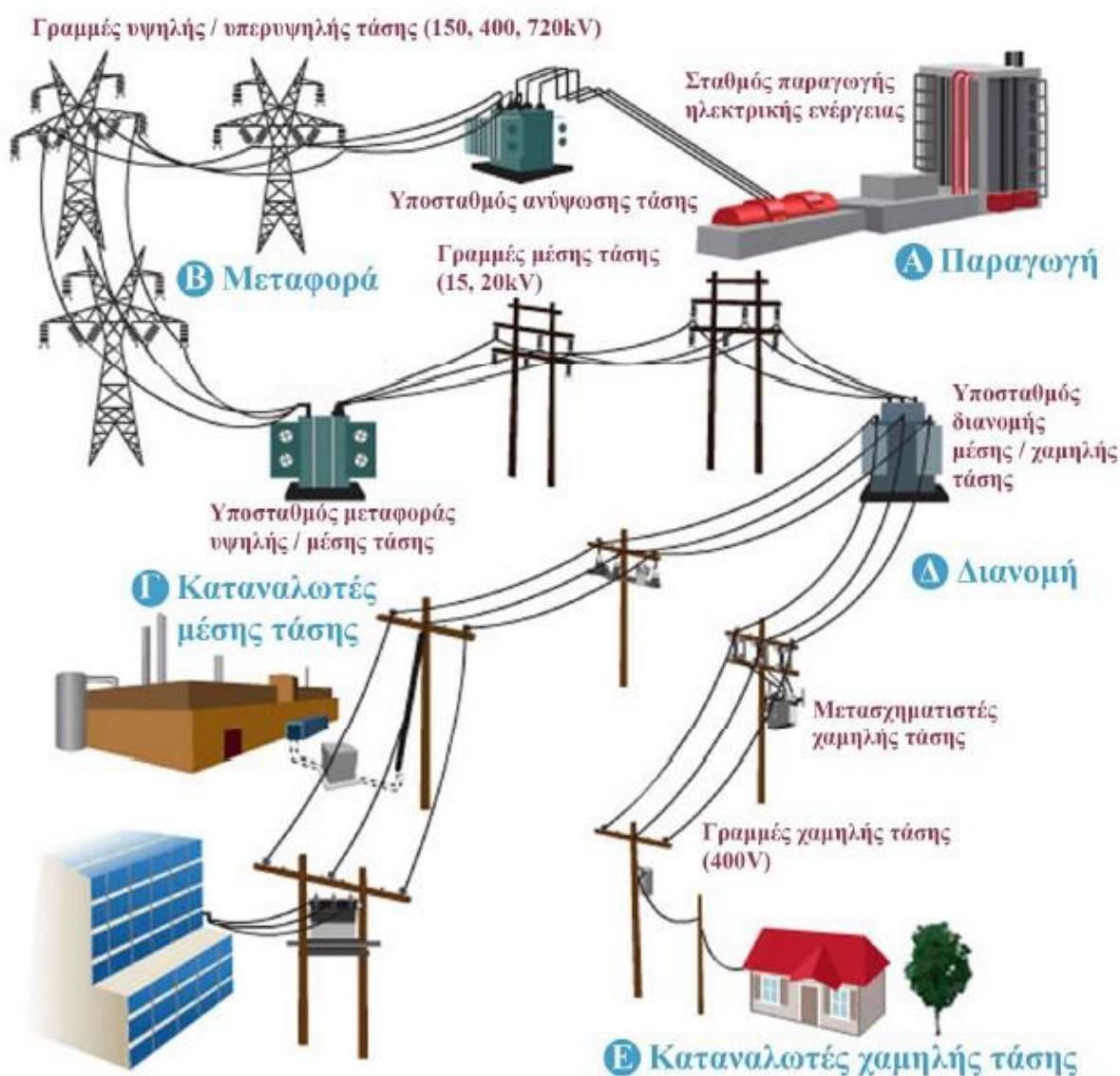
Οι γραμμές μεταφοράς στη μέση τάση έχουν τρεις αγωγούς φάσεων (όπως και στην υψηλή), με τις γραμμές της χαμηλής τάσης να διαθέτουν επιπλέον έναν, τον ουδέτερο. Σημαντικό είναι το γεγονός και ότι οι απώλειες ενέργειας στο επίπεδο της διανομής είναι περίπου διπλάσιες απ' ότι στο επίπεδο της μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

Ανάλογα με την κατασκευή τους, τα δίκτυα διανομής διακρίνονται σε *εναέρια* και σε *υπόγεια*. Τα εναέρια δίκτυα είναι περισσότερο διαδεδομένα και χρησιμοποιούνται κατά κόρον κυρίως γιατί είναι λιγότερο δαπανηρά από τα υπόγεια, ενώ ταυτόχρονα η αποκατάσταση τυχόν βλάβης είναι λιγότερο χρονοβόρα και περίπλοκη. Παρόλα αυτά η χρήση υπογείων δικτύων διανομής

² Η συχνότητα των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας στην Ευρώπη είναι στα 50 Hz ενώ στις Η.Π.Α. είναι στα 60 Hz.

παρατηρείται σε αστικά κέντρα κυρίως για λόγους ασφάλειας (απόσταση καλωδίων από τα κτίρια) αλλά και αισθητικής.

Τα δίκτυα διανομής φτάνουν μέχρι το μετρητή της παρεχόμενης στον καταναλωτή ενέργειας. Μετά τον μετρητή αρχίζει η εσωτερική ηλεκτρική εγκατάσταση, που περιλαμβάνει το εσωτερικό δίκτυο διανομής και τις συσκευές κατανάλωσης. Τα σημεία κατανάλωσης, τα οποία περιλαμβάνουν φορτία ζήτησης του δικτύου, δηλαδή τους καταναλωτές, διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες: τους καταναλωτές μέσης τάσης και τους καταναλωτές χαμηλής τάσης. Οι καταναλωτές χαμηλής τάσης αντιπροσωπεύουν την πλειονότητα των φορτίων ενός συστήματος, ενώ σε εκείνους της μέσης τάσης ανήκουν καταναλωτές με υψηλά φορτία ζήτησης (βιομηχανίες, παραγωγικές μονάδες κ.α.) που συνήθως διαθέτουν δικό τους υποσταθμό υποβιβασμού της τάσης.



Εικόνα 1.3 : Δομή Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας

1.1.4 Υποσταθμοί και Γραμμές Μεταφοράς

Οι υποσταθμοί αποτελούν βασικούς κόμβους του δικτύου παροχής ηλεκτρικής ενέργειας. Πρόκειται για ηλεκτρικές εγκαταστάσεις που μετασχηματίζουν την τάση, κυρίως με την λειτουργία κατάλληλων μετασχηματιστών. Ανάλογα με την τάση τροφοδοσίας τους χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: τους υποσταθμούς μεταφοράς και τους υποσταθμούς διανομής.

- **Υποσταθμοί Μεταφοράς:** Βρίσκονται στο δίκτυο μεταφοράς ενός ΣΗΕ και ανάλογα με τη λειτουργία τους διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες:
 1. **Υποσταθμοί Ανύψωσης.** Είναι εγκατεστημένοι κοντά σε σταθμούς παραγωγής, με σκοπό την ανύψωση της τάσης της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας ώστε να μεταφερθεί προς κατανάλωση με τις λιγότερες δυνατές απώλειες. Η ανύψωση που πραγματοποιείται είναι της τάξης αρκετών kV (από 10-30 kV μέσης τάσης, σε τιμές υψηλών τάσεων 110-220 kV ή υπερυψηλών 220-750 kV).
 2. **Υποσταθμοί Υποβιβασμού.** Αποτελούν τους ενδιάμεσους κόμβους μεταξύ δικτύων μεταφοράς και δικτύων διανομής. Ρόλος τους είναι να υποβιβάζουν τις υψηλές και υπερυψηλές τιμές των τάσεων σε τιμές μέσης τάσης.
 3. **Υποσταθμοί Ζεύξεως.** Είναι υπεύθυνοι για την ζεύξη των γραμμών μεταφοράς, χωρίς να συμβαίνει απαραίτητα κάποιος μετασχηματισμός στην τάση.
- **Υποσταθμοί Διανομής:** Είναι εγκατεστημένοι στο δίκτυο διανομής και υποβιβάζουν την μέση τάση (10-30 kV) σε τάση κατανάλωσης (400 V).

Ένα ΣΗΕ μπορεί να ενωθεί και να λειτουργήσει με άλλα αντίστοιχα συστήματα μέσω κατάλληλων γραμμών μεταφοράς. Οι γραμμές αυτές μπορεί να είναι είτε *εναλλασσόμενου* (AC) είτε *συνεχούς* (DC) ρεύματος κάτι που καθορίζεται κυρίως από την απόσταση που καλείται να καλύψει η εκάστοτε γραμμή. Οι εναλλασσόμενες τάσεις μπορούν να ανυψωθούν εύκολα και με μεγάλο βαθμό απόδοσης σε υψηλές τάσης μεταφοράς και να υποβιβαστούν στην τάση λειτουργίας του πελάτη με την ίδια ευκολία. Επίσης οι γεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος των σταθμών παραγωγής μπορούν να παράγουν τάσεις υψηλότερες από τις παραγόμενες σε σχέση με τις γεννήτριες συνεχούς ρεύματος. Συνοψίζοντας λοιπόν το εναλλασσόμενο ρεύμα πλεονεκτεί στην παραγωγή και διανομή, αλλά το συνεχές ρεύμα έχει το πλεονέκτημα στην μεταφορά.

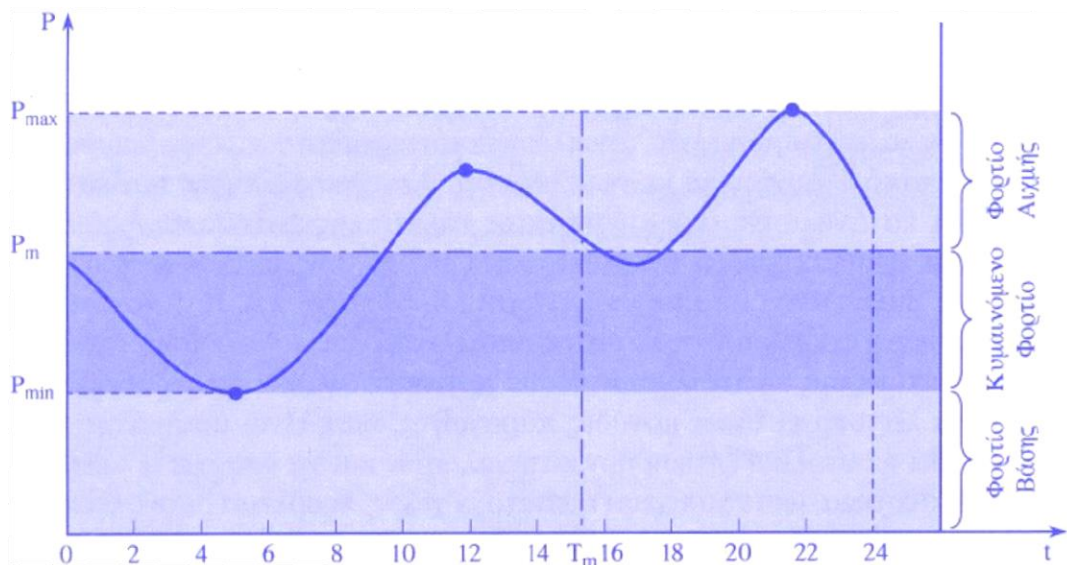
Σημειώνεται ότι η δομή του συστήματος επηρεάζεται σημαντικά από:

- ✓ Το μέγεθος της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας.
- ✓ Τη χρονική της μεταβολή κατά την διάρκεια του 24ώρου.
- ✓ Από την χωροταξική της κατανομή.

1.2 Φορτία Συστημάτων Διανομής

Η ηλεκτρική ενέργεια, από το σημείο που θα παραχθεί μέχρι το σημείο που θα καταναλωθεί βρίσκεται σε μία συνεχή ροή και επειδή δεν μπορεί εύκολα να αποθηκευτεί, πρέπει να παράγεται ακριβώς την στιγμή που καταναλώνεται. Για τον λόγο αυτό η ισχύς των εγκαταστάσεων παραγωγής, μεταφοράς και διανομής, που πρέπει να έχει διαθέσιμη κάθε στιγμή μία επιχείρηση ηλεκτρισμού, καθορίζεται από την συνολική μέγιστη ζήτηση ηλεκτρικής ισχύος.

Στα Δίκτυα Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΔΔΗΕ) το φορτίο ενός καταναλωτή ή μίας ομάδας καταναλωτών μεταβάλλεται συνεχώς. Κάθε φορά που ένας λαμπτήρας ή μία ηλεκτρική συσκευή ενεργοποιείται ή απενεργοποιείται, το φορτίο της αντίστοιχης γραμμής διανομής αλλάζει. Τα φορτία των ΔΔΗΕ μεταβάλλονται, επειδή οι ανθρώπινες δραστηριότητες ακολουθούν ημερήσιες, εβδομαδιαίες και μηνιαίες κυκλικές μεταβολές. Η ζήτηση ποικίλλει ανάλογα με την ημέρα, την ώρα, την εποχή και τις καιρικές συνθήκες. Σε γενικές γραμμές οι παράγοντες που επηρεάζουν τη ζήτηση του φορτίου είναι αρκετοί και σχετίζονται κυρίως με την ανθρώπινη δραστηριότητα αλλά ταυτόχρονα διαφοροποιούνται και από τους κοινωνικούς και οικονομικούς παράγοντες που διέπουν τη ζωή των κατοίκων μιας συγκεκριμένης περιοχής.



Εικόνα 1.4 : Τυπική Ημερήσια Καμπύλη Φορτίου

Στο γράφημα της **Εικόνας 1.4** διακρίνεται η τυπική ημερήσια καμπύλη φορτίου. Το φορτίο βάσης είναι η πρώτη περιοχή στη βάση του διαγράμματος και περιλαμβάνει τις τιμές ζήτησης που εμφανίζονται κατά τη διάρκεια όλης της ημέρας. Το φορτίο αιχμής αποτελεί την ανώτερη περιοχή του διαγράμματος και διακρίνεται από τις υψηλές τιμές ζήτησης, στη διάρκεια της ημέρας. Τέλος, το κυμαινόμενο φορτίο βρίσκεται μεταξύ του φορτίου βάσης και αιχμής, το οποίο διακρίνεται από συνεχής μεταβολές σχεδόν για όλη την διάρκεια της ημέρας.

Τα φορτία ταξινομούνται σε κατηγορίες με όμοια χαρακτηριστικά. Οι πιο συνηθισμένες κατηγορίες είναι **τα οικιακά, τα εμπορικά και τα βιομηχανικά** φορτία. Η ζήτηση του φορτίου είναι γενικά υψηλότερη κατά τη διάρκεια της ημέρας και νωρίς το απόγευμα, όταν τα βιομηχανικά και εμπορικά φορτία είναι υψηλά, και χαμηλότερη από αργά το βράδυ έως νωρίς το πρωί, όταν οι περισσότεροι άνθρωποι κοιμούνται. Στα οικιακά φορτία, η αιχμή παρουσιάζεται συνήθως νωρίς το βράδυ, ενώ στα εμπορικά φορτία τις μεσημεριανές ώρες. Στη βιομηχανική κατηγορία, το φορτίο είναι χαμηλό νωρίς το πρωί, στη συνέχεια αυξάνεται και διατηρείται περίπου σταθερό μέχρι το απόγευμα, οπότε και μειώνεται σημαντικά, καθώς μειώνεται ή σταματά η βιομηχανική δραστηριότητα.

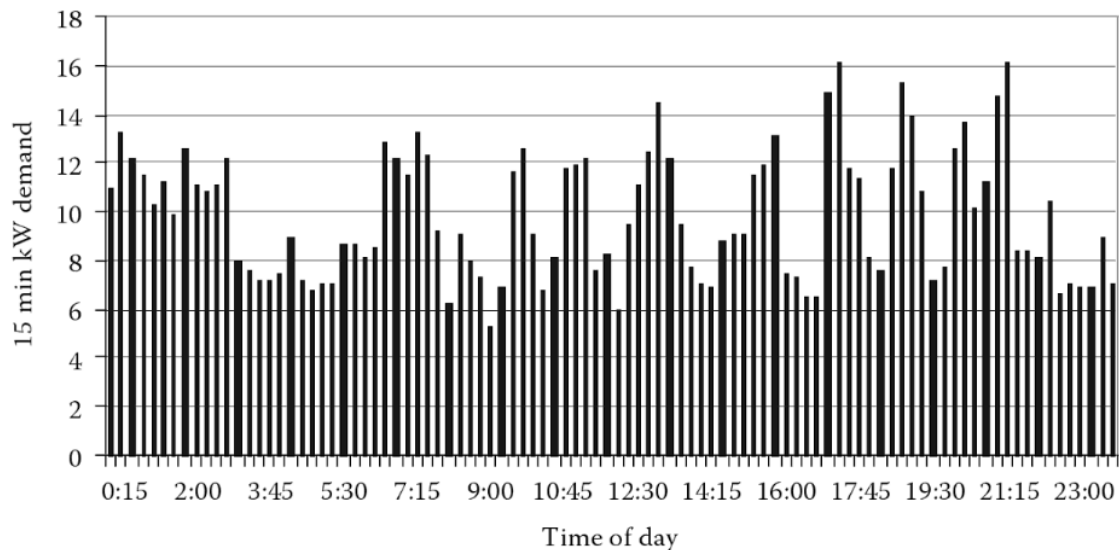
Σημαντικό να τονιστεί στο σημείο αυτό είναι ότι οι καταναλωτές της ίδιας κατηγορίας (οικιακοί, εμπορικοί, βιομηχανικοί) δεν ζητούν ταυτόχρονα το μέγιστο φορτίο τους, δηλαδή παρατηρείται **ετεροχρονισμός**, με αποτέλεσμα το συνολικό μέγιστο φορτίο μιας κατηγορίας να είναι μικρότερο από το άθροισμα των επιμέρους μέγιστων φορτίων των καταναλωτών της κατηγορίας αυτής. Το γεγονός αυτό, που είναι χαρακτηριστικό γνώρισμα κάθε κατηγορίας φορτίων, εκφράζεται με τον αντίστοιχο συντελεστή ετεροχρονισμού. Επίσης το φαινόμενο του ετεροχρονισμού παρατηρείται και μεταξύ των μέγιστων φορτίων των επιμέρους κατηγοριών, με αποτέλεσμα το συνολικό μέγιστο φορτίο του συστήματος να είναι μικρότερο από το άθροισμα των μέγιστων φορτίων των επιμέρους κατηγοριών.

Για να προγραμματιστεί η λειτουργία των εγκαταστάσεων ενός συστήματος είναι απαραίτητη να προβλεφθεί και η ζήτηση της κατανάλωσης. Αυτό επιτυγχάνεται με τη μελέτη των καμπυλών φορτίου. Οι συνηθέστερες από αυτές είναι η **χρονολογική καμπύλη φορτίου** και η **καμπύλη διάρκειας φορτίου**.

- Η μεταβολή της ζήτησης των καταναλωτών συναρτήσει του χρόνου ονομάζεται **χρονολογική καμπύλη φορτίου**. Ο χρόνος μέσα στον οποίο μεταβάλλεται η ζήτηση και επομένως εξελίσσεται η χρονολογική καμπύλη φορτίου μπορεί να είναι 24 ώρες, ένας μήνας, ένα έτος κτλ.
- Η **καμπύλη διάρκειας φορτίου** παριστάνει τα φορτία κατά την θεωρούμενη περίοδο, διατεταγμένα κατά φθίνουσα σειρά μεγέθους και προκύπτουν από τις αντίστοιχες χρονολογικές καμπύλες. Ο άξονας των χρόνων στην περίπτωση αυτή απεικονίζει τη χρονική διάρκεια που η ζήτηση είναι ίση με την αντίστοιχη συγκεκριμένη τιμή ισχύος ή την ξεπερνά.

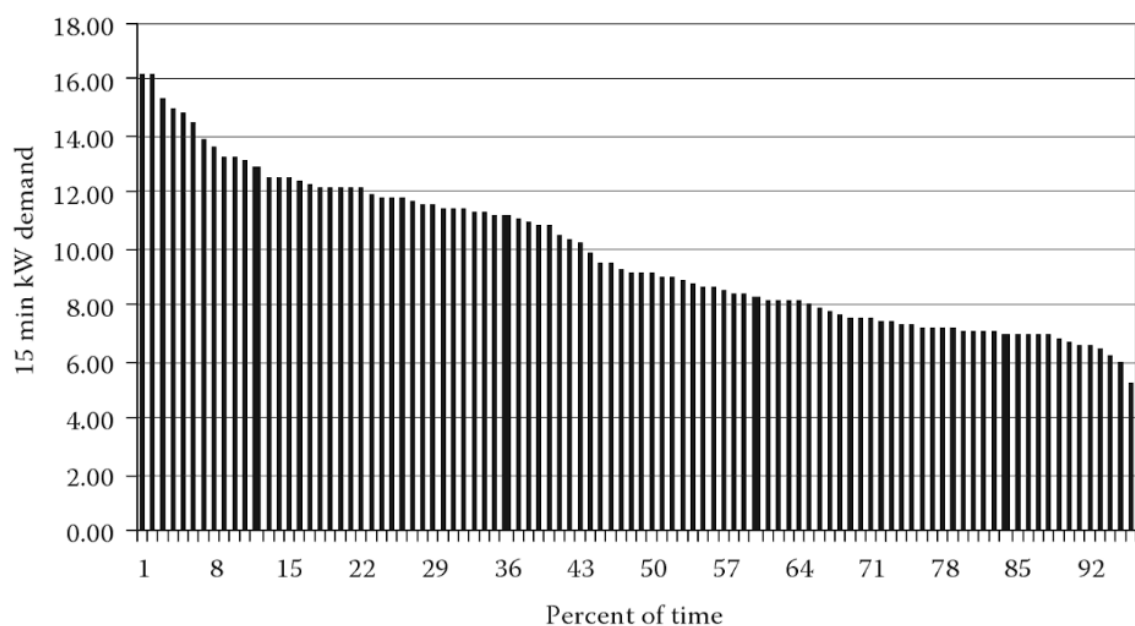
Η **Εικόνα 1.5** απεικονίζει μία τυπική χρονολογική καμπύλη φορτίου ενός καταναλωτή κατά την διάρκεια μιας μέρας. Ο κάθετος άξονας αναφέρεται στις τιμές σε (kW) του καταναλισκόμενου φορτίου ενώ ο οριζόντιος άξονας αφορά τις χρονικές στιγμές κατά την διάρκεια της μέρας που αυτό παρατηρήθηκε. Γίνονται

εμφανείς οι απότομες μεταβολές του φορτίου, αποτέλεσμα απόλυτα λογικό καθώς πρόκειται για την συμπεριφορά ενός μόνο καταναλωτή. Ταυτόχρονα η δειγματοληψία έχει πραγματοποιηθεί με περίοδο 15 λεπτών γεγονός που ενισχύει ακόμα περισσότερο τις απότομες αυτές μεταβολές.



Εικόνα 1.5 : *Τυπική Χρονολογική Καμπύλη Φορτίου*

Η **Εικόνα 1.6** αναφέρεται στην καμπύλη διάρκειας φορτίου του παραπάνω καταναλωτή. Τα φορτία στον κάθετο άξονα είναι διατεταγμένα κατά φθίνουσα σειρά όπως ορίζει η συγκεκριμένη καμπύλη ενώ ο οριζόντιος άξονας αναφέρεται στο ποσοστό χρόνου που η ζήτηση είναι ίση ή μεγαλύτερη από την αντίστοιχη τιμή ισχύος.



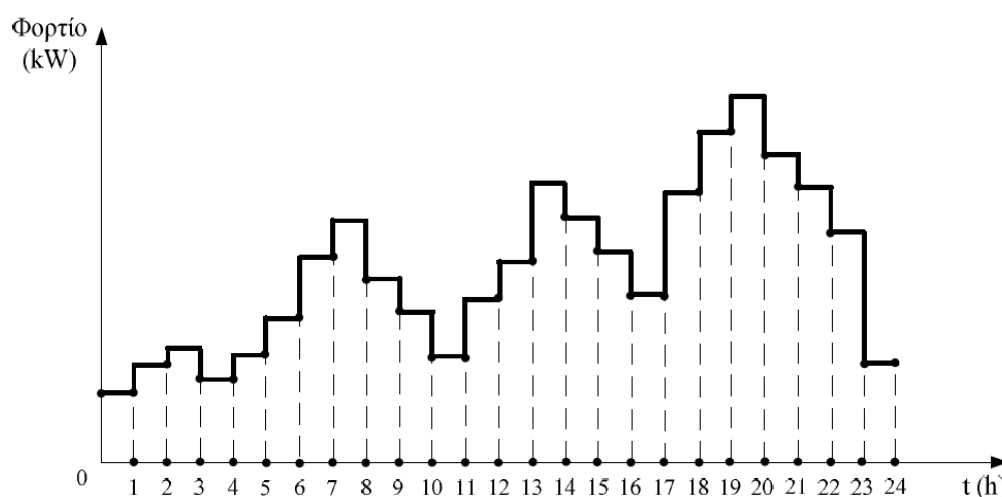
Εικόνα 1.6 : *Τυπική Καμπύλη Διάρκειας Φορτίου*

1.2.1 Τεχνικά Χαρακτηριστικά του Φορτίου

Οι παραπάνω καμπύλες φορτίου εμφανίζουν κάποια πολύ ενδιαφέροντα τεχνικά χαρακτηριστικά τα οποία και παρουσιάζονται αναλυτικά στην συνέχεια.

❖ Καμπύλη Φορτίου

Για να κατασκευαστεί η καμπύλη φορτίου, θα πρέπει η καμπύλη του στιγμιαίου φορτίου να χωριστεί σε ίσα χρονικά διαστήματα και σε κάθε χρονικό διάστημα να υπολογιστεί η μέση τιμή του φορτίου. Για παράδειγμα, τα χρονικά αυτά διαστήματα μπορούν να έχουν διάρκεια 15 λεπτά ή 30 λεπτά ή μία ώρα, οπότε για να κατασκευαστεί η ημερήσια καμπύλη φορτίου (24 ώρες) απαιτούνται 96 ή 48 ή 24 μέσες τιμές του φορτίου, αντίστοιχα. Όσο πιο μικρό είναι το χρονικό διάστημα τόσο πιο ακριβής είναι η τιμή του φορτίου. Η διαδικασία αυτή για την κατασκευή της καμπύλης φορτίου είναι παρόμοια με την αριθμητική ολοκλήρωση.



Εικόνα 1.7 : Εικοσιτετράωρη Καμπύλη Φορτίου ενός Καταναλωτή

Στην **Εικόνα 1.7** φαίνεται η ημερήσια (εικοσιτετράωρη) καμπύλη φορτίου ενός καταναλωτή, όπου τα ευθύγραμμα τμήματα που είναι παράλληλα στον άξονα του χρόνου αναπαριστούν τη μέση τιμή του φορτίου σε κάθε χρονικό διάστημα. Η ημερήσια καμπύλη φορτίου της εικόνας αυτής αποτελείται από 24 επίπεδα φορτίου, ένα για κάθε μία ώρα του 24ώρου, το οποίο σημαίνει ότι για την κατασκευή της συγκεκριμένης καμπύλης φορτίου έχουν επιλεγεί 24 ίσα χρονικά διαστήματα διάρκειας μίας ώρας το καθένα.

❖ Περίοδος Φορτίου

Περίοδος φορτίου T (h), είναι η συνολική διάρκεια μίας καμπύλης φορτίου. Η ημερήσια καμπύλη φορτίου, όπως αυτή της **Εικόνας 1.7**, έχει περίοδο

φορτίου $T = 24$ h. Η εβδομαδιαία καμπύλη φορτίου έχει περίοδο φορτίου $T = 168$ h, ενώ η ετήσια καμπύλη φορτίου (365 ημέρες) έχει περίοδο φορτίου $T = 8760$ h.

❖ Φορτίο Αιχμής

Όπως φαίνεται από την καμπύλη φορτίου της **Εικόνας 1.7**, στη διάρκεια του εικοσιτετραώρου, υπάρχει σημαντική μεταβολή στη ζήτηση του φορτίου. Αιχμή φορτίου, P_A (kW), είναι η μέγιστη ζήτηση φορτίου που εμφανίζεται σε μία συγκεκριμένη καμπύλη φορτίου. Για παράδειγμα, στην συγκεκριμένη καμπύλη φορτίου η αιχμή φορτίου εμφανίζεται στο χρονικό διάστημα από την ώρα 19:00 έως την ώρα 20:00.

❖ Φορτίο Βάσης

Η ελάχιστη ζήτηση ηλεκτρικής ισχύος κατά την διάρκεια μιας δεδομένης περιόδου T ονομάζεται φορτίο βάσης P_B (kW). Στο συγκεκριμένο παράδειγμα η ελάχιστη τιμή ζήτησης φορτίου παρατηρείται τις πρώτες πρωινές ώρες της μέρας και συγκεκριμένα στο χρονικό διάστημα από 00:00 έως 01:00.

❖ Ζήτηση Ενέργειας

Η ζήτηση ενέργειας E (kWh), είναι ίση με το εμβαδόν της καμπύλης φορτίου που σχηματίζεται μεταξύ της καμπύλης και του άξονα του χρόνου. Δηλαδή, η ζήτηση ενέργειας είναι η συνολική καταναλισκόμενη ενέργεια κατά τη διάρκεια της περιόδου φορτίου.

❖ Μέσο Φορτίο

Το μέσο φορτίο P_μ (kW), ορίζεται ως:

$$P_\mu = \frac{E}{T} \quad (1.1)$$

δηλαδή το μέσο φορτίο είναι ίσο με τον λόγο της ζήτησης ενέργειας E (kWh), προς την περίοδο του φορτίου T (h)

❖ Μέσος Χρόνος Φορτίου

Ο μέσος χρόνος φορτίου T_A (h), υπολογίζεται ως ακολούθως:

$$T_A = \frac{E}{P_A} \quad (1.2)$$

δηλαδή ο μέσος χρόνος φορτίου είναι ίσος με τον λόγο της ζήτησης ενέργειας E (kWh), προς την αιχμή του φορτίου P_A (kW).

❖ Συντελεστής Φορτίου

Ο συντελεστής φορτίου $\Sigma\Phi$, υπολογίζεται ως εξής:

$$\Sigma\Phi = \frac{P_{\mu}}{P_A} \quad (1.3)$$

δηλαδή ο συντελεστής φορτίου είναι ίσος με τον λόγο του μέσου φορτίου, P_{μ} (kW), προς την αιχμή του φορτίου, P_A (kW).

Ο συντελεστής φορτίου δίνει μία ένδειξη για το πόσο καλά χρησιμοποιείται το δίκτυο μίας ηλεκτρικής εταιρίας. Έτσι, για μία ηλεκτρική εταιρία, ο βέλτιστος συντελεστής φορτίου είναι ίσος με ένα, επειδή το ηλεκτρικό δίκτυο έχει σχεδιαστεί για να εξυπηρετεί την αιχμή φορτίου. Οι ηλεκτρικές εταιρίες χρεώνουν τους βιομηχανικούς καταναλωτές που έχουν χαμηλό συντελεστή ισχύος. Με τον τρόπο αυτό, παρέχουν κίνητρο στους βιομηχανικούς καταναλωτές να αυξήσουν το συντελεστή φορτίου τους.

❖ Συντελεστής Ζήτησης

Ο συντελεστής ζήτησης ΣZ , ενός καταναλωτή υπολογίζεται ως:

$$\Sigma Z = \frac{P_A}{P_{εγκ}} \quad (1.4)$$

δηλαδή ο συντελεστής ζήτησης του καταναλωτή είναι ίσος με τον λόγο της αιχμής του φορτίου, P_A (kW), προς το συνολικά συνδεδεμένο φορτίο $P_{εγκ}$ (kW), όπου $P_{εγκ}$ είναι το άθροισμα της συνολικής ονομαστικής ισχύος όλων των ηλεκτρικών συσκευών του καταναλωτή.

Ο συντελεστής ζήτησης δίνει μία ένδειξη του ποσοστού των ηλεκτρικών συσκευών που είναι σε λειτουργία τη χρονική στιγμή που λαμβάνει χώρα η αιχμή φορτίου του καταναλωτή.

❖ Συντελεστής Χρησιμοποίησης

Ο συντελεστής χρησιμοποίησης ΣX , μιας ηλεκτρικής συσκευής (για παράδειγμα, ενός μετασχηματιστή ή μίας γραμμής διανομής) είναι ίσος με τον λόγο της αιχμής του φορτίου προς την ονομαστική ισχύ της ηλεκτρικής συσκευής.

$$\Sigma X = \frac{P_A}{P_{nom}} \quad (1.5)$$

Ο συντελεστής χρησιμοποίησης δίνει μία ένδειξη του πόσο καλά χρησιμοποιείται η ονομαστική ισχύς μίας ηλεκτρικής συσκευής.

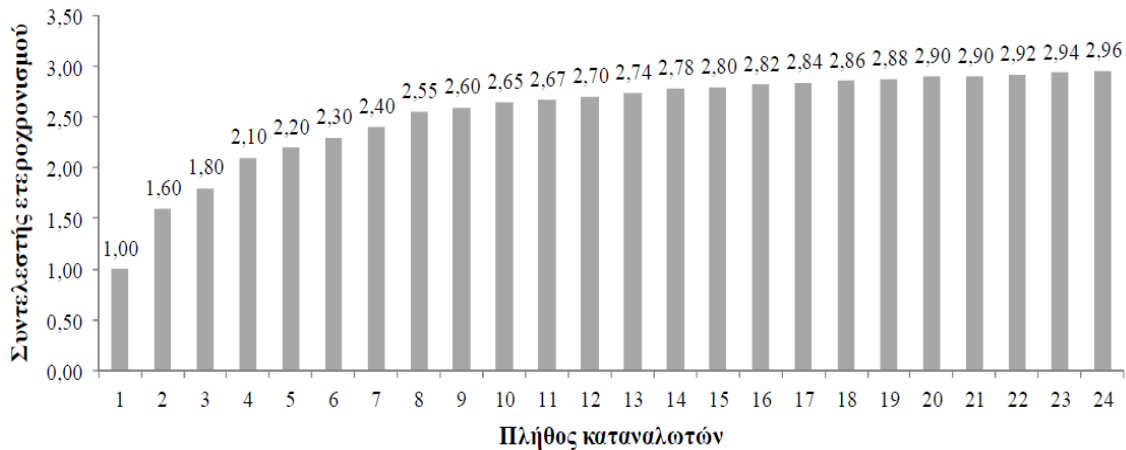
❖ Συντελεστής Ετεροχρονισμού

Ο συντελεστής ετεροχρονισμού ΣE , μίας ομάδας N φορτίων υπολογίζεται ακολούθως:

$$\Sigma E = \frac{P_N}{P_A} = \frac{\sum_{i=1}^N P_{Ai}}{P_A} \geq 1,00 \quad (1.6)$$

δηλαδή ο συντελεστής ετεροχρονισμού είναι ίσος με τον λόγο του αθροίσματος της αιχμής του φορτίου κάθε ενός από τα N φορτία προς την αιχμή φορτίου της ομάδας των N φορτίων.

Στη παραπάνω σχέση P_{Ai} (kW) είναι η αιχμή του φορτίου i , P_N (kW) είναι το άθροισμα των αιχμών φορτίου των N φορτίων και P_A (kW) είναι η αιχμή φορτίου της ομάδας των N φορτίων. Επειδή η αιχμή φορτίου καθενός από τα N φορτία λαμβάνει χώρα διαφορετική χρονική στιγμή σε σχέση με τη χρονική στιγμή που λαμβάνει χώρα η συνολική αιχμή φορτίου της ομάδας των N φορτίων, προκύπτει ότι: $P_N \geq P_A$, δηλαδή $\Sigma E \geq 1,00$.



Εικόνα 1.8 : Συντελεστής Ετεροχρονισμού σε Συνάρτηση της Αύξησης του Πλήθους των Καταναλωτών

Στην **Εικόνα 1.8** φαίνεται ο συντελεστής ετεροχρονισμού σε σχέση με το πλήθος των καταναλωτών. Οι τιμές αυτές του συντελεστή ετεροχρονισμού έχουν προκύψει με βάση μελέτη για συγκεκριμένους καταναλωτές. Η χρησιμότητα του συντελεστή ετεροχρονισμού είναι η ακόλουθη. Γνωρίζοντας την τιμή του συντελεστή ετεροχρονισμού της ομάδας των N φορτίων καθώς και την αιχμή φορτίου P_{Ai} καθενός από τα i φορτία της ομάδας των N φορτίων, τότε η αιχμή φορτίου P_A της ομάδας των N φορτίων υπολογίζεται ως ακολούθως:

$$P_A = \frac{\sum_{i=1}^N P_{Ai}}{\Sigma E} \quad (1.7)$$

❖ Συντελεστής Ταυτοχρονισμού

Ο συντελεστής ταυτοχρονισμού ΣT , μίας ομάδας N φορτίων υπολογίζεται ακολούθως:

$$\Sigma T = \frac{1}{\Sigma E} = \frac{P_A}{P_N} = \frac{P_A}{\sum_{i=1}^N P_{A_i}} \quad (1.8)$$

δηλαδή ο συντελεστής ταυτοχρονισμού είναι το αντίστροφο του συντελεστή ετεροχρονισμού.

Γνωρίζοντας την τιμή του συντελεστή ταυτοχρονισμού της ομάδας των N φορτίων και την αιχμή φορτίου P_{A_i} καθενός από τα i φορτία της ομάδας των N φορτίων, τότε η αιχμή φορτίου P_A της ομάδας των N φορτίων υπολογίζεται ως ακολούθως:

$$P_A = \Sigma T \cdot \sum_{i=1}^N P_{A_i} \quad (1.9)$$

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι μεγαλύτερες μεταβολές του φορτίου εμφανίζονται στο επίπεδο του ατομικού καταναλωτή, ενώ οι μεταβολές του φορτίου είναι μικρότερες στο επίπεδο της γραμμής διανομής και ακόμα μικρότερες σε επίπεδο υποσταθμών υποβίβασης υψηλής τάσης σε μέση τάση. Η μελέτη των φορτίων είναι καθοριστικός παράγοντας για τη σχεδίαση και ανάπτυξη ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Η ακρίβεια της πρόβλεψης των φορτίων, τόσο βραχυπρόθεσμα όσο και μακροπρόθεσμα έχει αυξηθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια, με την χρησιμοποίηση σύγχρονων μεθόδων μαθηματικής ανάλυσης και ψηφιακής επεξεργασίας δεδομένων.

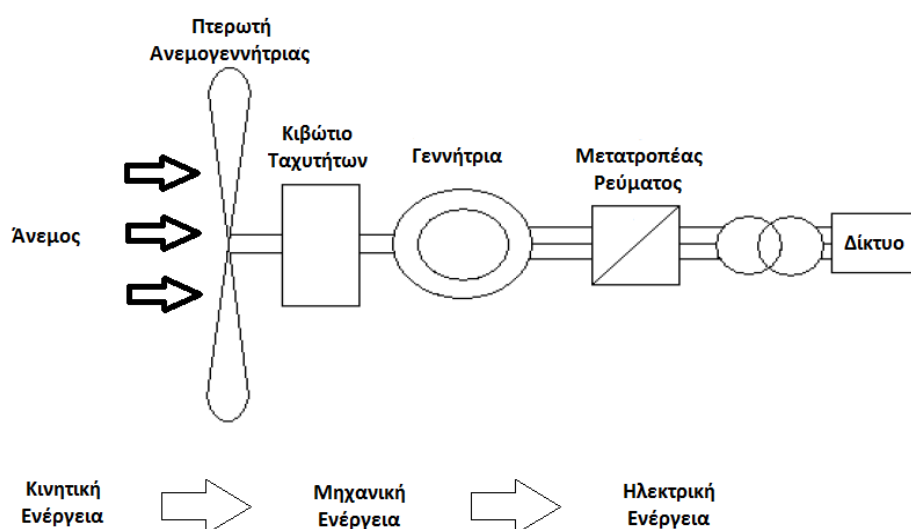
1.3 Αιολική Ενέργεια

Η αιολική ενέργεια αποτελεί το στυλοβάτη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η αιολική ενέργεια αποτελεί σήμερα μια ελκυστική λύση στο πρόβλημα της ηλεκτροπαραγωγής. Το «καύσιμο» είναι άφθονο, αποκεντρωμένο και δωρεάν. Δεν εκλύονται αέρια και άλλοι ρύποι, και οι επιπτώσεις στο περιβάλλον είναι μικρές σε σύγκριση με τα εργοστάσια ηλεκτροπαραγωγής από συμβατικά καύσιμα. Επίσης, τα οικονομικά οφέλη μιας περιοχής από την ανάπτυξη της αιολικής βιομηχανίας είναι αξιοσημείωτα.

Παρόλα αυτά όμως οι ανεμογεννήτριες μπορεί να προκαλέσουν τραυματισμούς ή θανατώσεις πουλιών (κυρίως αποδημητικών) ενώ ταυτόχρονα η δημιουργία αιολικών πάρκων προκαλεί επιβάρυνση του περιβάλλοντος. Σε κάθε περίπτωση, πριν τη δημιουργία ενός αιολικού πάρκου ή και οποιασδήποτε

εγκατάστασης ΑΠΕ θα πρέπει να έχει προηγηθεί Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων (ΜΠΕ). Με την εξέλιξη όμως της τεχνολογίας και την αυστηρότερη επιλογή του τόπου εγκατάστασης (π.χ. πλωτές πλατφόρμες σε ανοικτή θάλασσα) τα παραπάνω προβλήματα, αλλά και ο θόρυβος από τη λειτουργία των μηχανών, έχουν σχεδόν λυθεί.

Η εκμετάλλευση του αιολικού δυναμικού μιας περιοχής γίνεται με τη χρήση των ανεμογεννητριών. Η μετατροπή της κινητικής ενέργειας του ανέμου σε ηλεκτρική ενέργεια, αποτελεί την αρχή λειτουργίας μιας Α/Γ η οποία και απεικονίζεται σχηματικά στην **Εικόνα 1.9**. Ο άνεμος εισέρχεται στην διάταξη περιστρέφοντας τα πτερύγια, τα οποία είναι συνδεδεμένα με ένα περιστρεφόμενο άξονα (δρομέας). Συνεπώς η κινητική ενέργεια μετατρέπεται σε μηχανική. Στη συνέχεια, η χαμηλή ταχύτητα περιστροφής του δρομέα από τον άνεμο αυξάνεται μέσω του κιβωτίου ταχυτήτων. Το κιβώτιο συνδέεται με έναν άξονα μεγάλης ταχύτητας περιστροφής ο οποίος κινεί μια γεννήτρια, μετατρέποντας πλέον την ενέργεια σε ηλεκτρική. Διατάξεις φρένων (δισκόφρενα) είναι εγκατεστημένες στο σύστημα, με στόχο τον περιορισμό των υψηλών ταχυτήτων περιστροφής των πτερυγίων για την προστασία της Α/Γ. Ειδικοί μετατροπείς ρεύματος (DC/AC, AC/DC/AC), ανάλογα με τις ανάγκες της διάταξης παρεμβάλλονται πριν την διοχέτευση της ενέργειας στο δίκτυο.



Εικόνα 1.9 : Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας Τυπικής Α/Γ

1.3.1 Συντελεστής Ισχύος Α/Γ

Η οριζόντια και κατακόρυφη κίνηση των αέριων μαζών της ατμόσφαιρας ορίζουν την έννοια του ανέμου. Αιτία της δημιουργίας του ανέμου είναι η διαφορά της θερμοκρασίας του αέρα που δημιουργεί διαφορές βαρομετρικής πίεσης μεταξύ παρακείμενων τόπων, με αποτέλεσμα τη μετακίνηση αέριας μάζας

από τη ψυχρότερη προς την θερμότερη περιοχή. Η ισχύς μιας αέρας δέσμης υπολογίζεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$P_{Air} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \quad (1.10)$$

όπου ρ η πυκνότητα του αέρα, A η επιφάνεια που καλύπτει η δέσμη του ανέμου που μελετάται (για τις Α/Γ θεωρείται η επιφάνεια σάρωσης των πτερυγίων) και V η ταχύτητα του ανέμου. Η πυκνότητα του αέρα ρ , εξαρτάται από την ατμοσφαιρική πίεση P_{atm} και την απόλυτη θερμοκρασία T του μέρους που μελετάται, σύμφωνα με το νόμο των ιδανικών αερίων (όπου R η παγκόσμια σταθερά αερίων):

$$\rho = \frac{P_{atm}}{R \cdot T} \quad (1.11)$$

Η πραγματική ισχύς που εκμεταλλεύεται μία Α/Γ αποτελεί ένα ποσοστό της ισχύος του αέρα που προσπίπτει στα πτερύγια. Το ποσοστό αυτό εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της Α/Γ και ορίζεται ως συντελεστής ισχύος C_P . Ουσιαστικά αποτελεί τον αεροδυναμικό βαθμό στην αεροδυναμική σχεδίαση των πτερυγίων. Σύμφωνα με τον Betz³ η βελτίωση του C_P δεν μπορεί να ξεπεράσει το άνω όριο το οποίο ορίζεται στο 59.3% ($C_P \leq 16/27 = 0,593$). Συνεπώς η ισχύς μιας Α/Γ ορίζεται ως εξής :

$$P_{A/G} = \frac{1}{2} \cdot C_P \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \cdot n_{H/M} \quad (1.12)$$

Όπου ρ η πυκνότητα του αέρα, A η επιφάνεια σάρωσης των πτερυγίων, V η ταχύτητα του ανέμου και $n_{H/M}$ ο ηλεκτρομηχανικός βαθμός απόδοσης της Α/Γ.

1.3.2 Καμπύλη Ισχύος

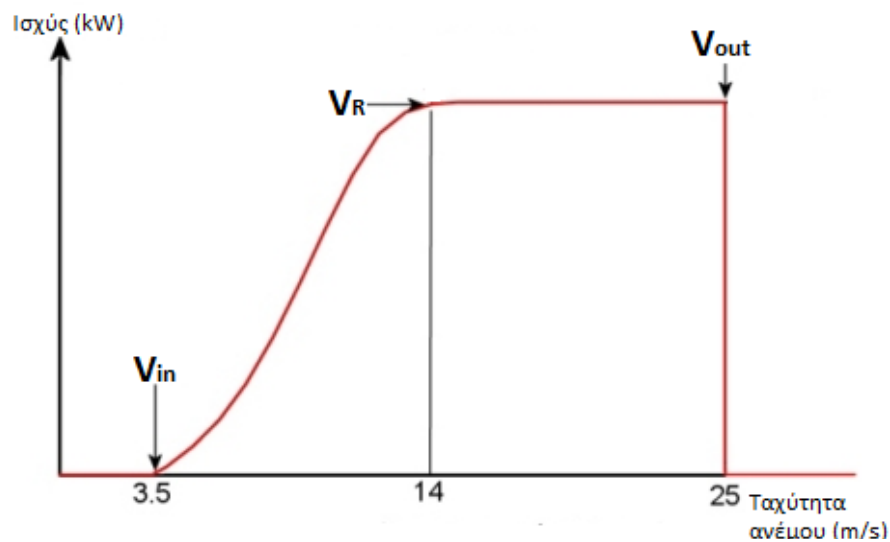
Σημαντικό παράγοντα για το αξιοποιήσιμο, από μία Α/Γ, αιολικό δυναμικό μιας περιοχής αποτελεί η καμπύλη ισχύος μιας Α/Γ, η οποία εξαρτάται από τα τεχνικά χαρακτηριστικά, το σχεδιασμό της και την ταχύτητα του ανέμου. Συνεπώς, ορίζονται τρία σημεία λειτουργίας για κάθε Α/Γ ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου:

- **Ταχύτητα έναρξης λειτουργίας – V_{in}** : Κυμαίνεται μεταξύ 2 – 5 m/sec ταχύτητας ανέμου και αποτελεί την ταχύτητα στην οποία ξεκινάει τη λειτουργία της η Α/Γ. Για τιμές κάτω από την V_{in} η Α/Γ δεν περιστρέφεται εξαιτίας του ότι οι απώλειες κενού φορτίου, είναι μεγαλύτερες από την παραγόμενη ισχύ.

³ Ο Albert Betz (25 Δεκεμβρίου 1885 – 16 Απριλίου 1968) ήταν Γερμανός φυσικός ο οποίος θεωρείται πρωτοπόρος στην τεχνολογία των ανεμογεννητριών.

- **Ονομαστική ταχύτητα λειτουργίας – V_R** : πρόκειται για τη μικρότερη ταχύτητα ανέμου (10 – 15 m/sec), στην οποία η Α/Γ λειτουργεί στην ονομαστική της ισχύ. Για τιμές πάνω από την ονομαστική ταχύτητα λειτουργίας (υψηλές ταχύτητες), υπάρχει απώλεια σημαντικού μέρους της ενέργειας του ανέμου, καθώς η παραγόμενη ισχύς της Α/Γ παραμένει σταθερή για λειτουργικούς λόγους.
- **Ταχύτητα διακοπής λειτουργίας – V_{out}** : Αφορά τις ιδιαίτερα υψηλές ταχύτητες του ανέμου με τυπικές τιμές 20 – 25 m/sec, όπου για λόγους ασφαλείας διακόπτεται η λειτουργία της Α/Γ.

Η **Εικόνα 1.10** Παρουσιάζει την καμπύλη ισχύος μιας Α/Γ για τις τρεις τυπικές ταχύτητες του ανέμου.



Εικόνα 1.10 : Καμπύλη Ισχύος Α/Γ

Η ταχύτητα του ανέμου αποτελεί βασικό κριτήριο για την εγκατάσταση αιολικών τεχνολογιών (Α/Γ), καθώς η ισχύς του ανέμου είναι ανάλογη με τον κύβο της ταχύτητας του. Η εγκατάσταση αιολικών πάρκων (Α/Π) παρουσιάζει επενδυτικό ενδιαφέρον σε περιοχές με μέση ταχύτητα του ανέμου ετησίως, μεγαλύτερη των 5,5 m/sec. Τέτοιες περιοχές κυρίως είναι κοντά σε θαλάσσιες ακτές ή ομαλές κορυφογραμμές. Η εγκατάσταση ανεμογεννητριών γίνεται σύμφωνα με την επικρατούσα διεύθυνση του ανέμου της περιοχής, ενώ σημαντική είναι και η χωροθέτηση τους για την καλύτερη δυνατή απόδοση τους.

1.3.3 Συντελεστής Χρησιμοποίησης

Κριτήριο για την αποδοτικότητα των Α/Γ αποτελεί ο ετήσιος συντελεστής χρησιμοποίησης, ο οποίος ορίζεται ως εξής:

$$\text{Ετήσιος_}\Sigma X = \frac{E_{WT_{year}}}{P_R \cdot 8760h} \quad (1.13)$$

Όπου E_{wYear} είναι η ενέργεια που παράγει η Α/Γ σε ένα χρόνο, ενώ P_R (MW) η ονομαστική της ισχύς και εκφράζει το πηλίκο της ενέργειας που παράγει σε ένα χρόνο η Α/Γ με την ενέργεια που θα παρήγαγε στη διάρκεια ενός έτους (8760 ώρες), εφόσον λειτουργούσε στην ονομαστική της ισχύ.

1.3.4 Κατηγοριοποίηση Α/Γ

Ανάλογα με τον προσανατολισμό του άξονα τους, οι ανεμογεννήτριες διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες:

- **Οριζόντιου άξονα**, παράλληλου με το επίπεδο του εδάφους και πτερύγια προσανατολισμένα κάθε στιγμή προς την κατεύθυνση του ανέμου.
- **Κατακόρυφου άξονα**, που είναι σταθερός και κάθετος στην επιφάνεια του εδάφους.

Οι Α/Γ ανάλογα με τις αρχές λειτουργίας και ελέγχου τους, διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, σε ανεμογεννήτριες:

- **Σταθερών στροφών**: με την ταχύτητα περιστροφής τους να βρίσκεται λίγο πιο πάνω από τη σύγχρονη ταχύτητα, που είναι άμεσα συνδεδεμένη με τη συχνότητα του δικτύου. Η σύνδεση αυτών των γεννητριών γίνεται απ' ευθείας με το δίκτυο μέσω μιας επαγωγικής γεννήτριας και δεν υπάρχει η δυνατότητα ελέγχου ποιότητας της εγχεόμενης στο δίκτυο ισχύος.
- **Μεταβλητών στροφών**: σε αντίθεση με τις Α/Γ σταθερών στροφών έχουν ένα μεγαλύτερο εύρος στροφών λειτουργίας πάνω και κάτω από την σύγχρονη ταχύτητα. Ο σχεδιασμός τους, επιδιώκει την βελτιστοποίηση της ταχύτητας περιστροφής ανάλογα με την τιμή του εισερχόμενου ανέμου, οδηγώντας στην καλύτερη ενεργειακή απόδοση των Α/Γ. Αποτελούνται από μια σύγχρονη ή επαγωγική γεννήτρια και συνδέονται στο δίκτυο μέσω ενός μετατροπέα ισχύος.

Οι γεννήτριες των ανεμογεννητριών μπορεί να είναι είτε **σύγχρονες** είτε **ασύγχρονες**. Οι σύγχρονες γεννήτριες είναι πιο απλές στην κατασκευή τους (απλούστερο κιβώτιο ταχυτήτων) , έχουν χαμηλό κόστος και έχουν καλύτερη συμπεριφορά στο δίκτυο που είναι εγκατεστημένες. Αντίθετα οι ασύγχρονες γεννήτριες διαθέτουν παλαιότερες τεχνολογίες ενώ τείνουν να ζητούν άεργο ισχύ από το δίκτυο, ιδίως σε περιπτώσεις υψηλού αιολικού δυναμικού.

1.4 Ηλιακή Ενέργεια

Η ενέργεια που προέρχεται από τον ήλιο και φτάνει στη γη, με διάφορες μορφές όπως το φως και η θερμότητα χαρακτηρίζεται ως ηλιακή ενέργεια. Πρόκειται για μια μορφή ενέργειας στην οποία οφείλεται η ύπαρξη του ανθρώπου και γενικότερα η ζωή πάνω στον πλανήτη Γη. Είναι πρακτικά ανεξάντλητη, αφού προέρχεται από τον ήλιο, και ως εκ τούτου δεν υπάρχουν περιορισμοί χώρου και χρόνου για την εκμετάλλευσή της. Η ηλιακή ενέργεια είναι πρωτογενής ήπια και ανανεώσιμη πηγή ενέργειας η οποία έμμεσα δίνει γένεση σε άλλες τρεις ήπιες και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας την υδραυλική (υδατοπτώσεις), την αιολική (ενέργεια του ανέμου) και την ενέργεια της βιομάζας (ενέργεια από φυτά). Η γη δέχεται τεράστιες ποσότητες ηλιακής ενέργειας καθημερινά, η οποία φτάνει σχεδόν αμετάβλητη στο ανώτατο στρώμα της ατμόσφαιρας του πλανήτη Γη με την προσπίπτουσα ακτινοβολία να διαφέρει ανάλογα με την εποχή, την ώρα και τις καιρικές συνθήκες.

Η εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας έχει γνωρίσει ραγδαία ανάπτυξη τον 21^ο αιώνα και διακρίνεται σε τρεις κατηγορίες:

- ο τα παθητικά ηλιακά συστήματα
- ο τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα
- ο τα φωτοβολταϊκά συστήματα

Η λειτουργία των *παθητικών* και των *ενεργητικών* ηλιακών συστημάτων βασίζεται στην θερμότητα που εκπέμπεται μέσω της ηλιακής ακτινοβολίας και χρησιμοποιείται σε συστήματα ψύξης και θέρμανσης. Από την άλλη πλευρά, **τα φωτοβολταϊκά συστήματα** μετατρέπουν την ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω του φωτοβολταϊκού φαινομένου. Αποτελούν μια ιδιαίτερα ανεπτυγμένη τεχνολογία ΑΠΕ, συμβάλλοντας στην συνολική παραγωγή συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας.

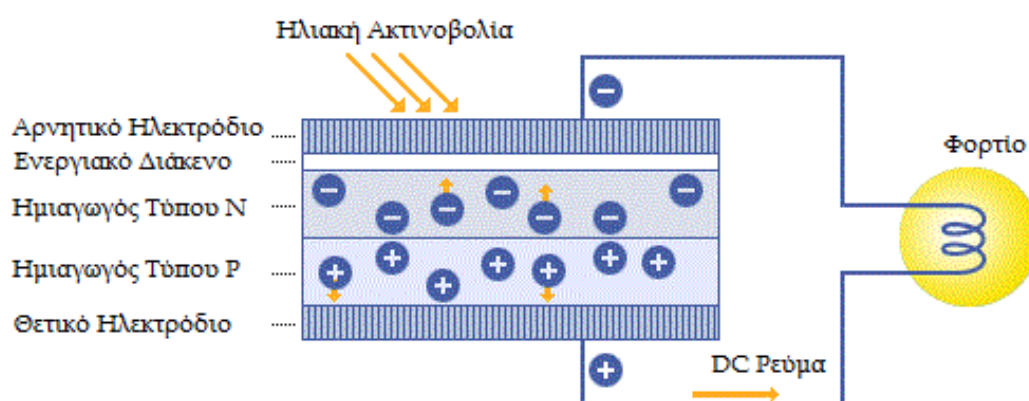
1.4.1 Το Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο

Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο περιγράφεται ως η πόλωση των ηλεκτρικών φορτίων που συμβαίνει σε συγκεκριμένα υλικά όταν αυτά εκτεθούν σε φωτεινή ακτινοβολία. Κάτι τέτοιο παρατηρείται στα ηλιακά στοιχεία που ανήκουν στην ομάδα των ημιαγωγών καθώς και στις τεχνητές ημιαγωγικές διατάξεις.

Τα ηλιακά στοιχεία είναι δίοδοι ημιαγωγού με την μορφή ενός δίσκου (δηλαδή η ένωση p-n εκτείνεται σε όλο το πλάτος του δίσκου) που δέχεται την ηλιακή ακτινοβολία όπως φαίνεται και στην **Εικόνα 1.11**. Κάθε φωτόνιο της ακτινοβολίας με ενέργεια ίση ή μεγαλύτερη από το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού, έχει την δυνατότητα να απορροφηθεί από ένα χημικό δεσμό και να

ελευθερώσει ένα ηλεκτρόνιο. Δημιουργείται, όσο διαρκεί η ακτινοβολήση, μία περίσσεια από ζεύγη φορέων (ελεύθερα ηλεκτρόνια και οπές) πέρα από τις συγκεντρώσεις που αντιστοιχούν στις συνθήκες ισορροπίας. Οι φορείς αυτοί, καθώς κυκλοφορούν στο στερεό και εφόσον δεν επανασυνδεθούν με φορείς αντίθετου πρόσημου, μπορεί να βρεθούν στην περιοχή της ένωσης p-n οπότε θα δεχθούν την επίδραση του ενσωματωμένου της ηλεκτροστατικού πεδίου. Έτσι τα ελεύθερα ηλεκτρόνια εκτρέπονται προς το τμήμα τύπου n και οι οπές εκτρέπονται προς το τμήμα τύπου p, με αποτέλεσμα να δημιουργηθεί μία **διαφορά δυναμικού** ανάμεσα στους ακροδέκτες των δύο τμημάτων της διόδου. Δηλαδή, η διάταξη αποτελεί μία πηγή ηλεκτρικού ρεύματος που διατηρείται όσο διαρκεί η πρόσπτωση τον ηλιακού φωτός πάνω στην επιφάνεια του στοιχείου.

Η εκδήλωση της διαφοράς δυναμικού ανάμεσα στις δύο όψεις του φωτιζόμενου δίσκου, η οποία αντιστοιχεί σε ορθή πόλωση της διόδου, ονομάζεται **φωτοβολταϊκό φαινόμενο**. Η αποδοτική λειτουργία των ηλιακών φωτοβολταϊκών στοιχείων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στηρίζεται στην πρακτική εκμετάλλευση του παραπάνω φαινομένου.



Εικόνα 1.11 : Συμπεριφορά Ηλιακού Στοιχείου κατά το Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο

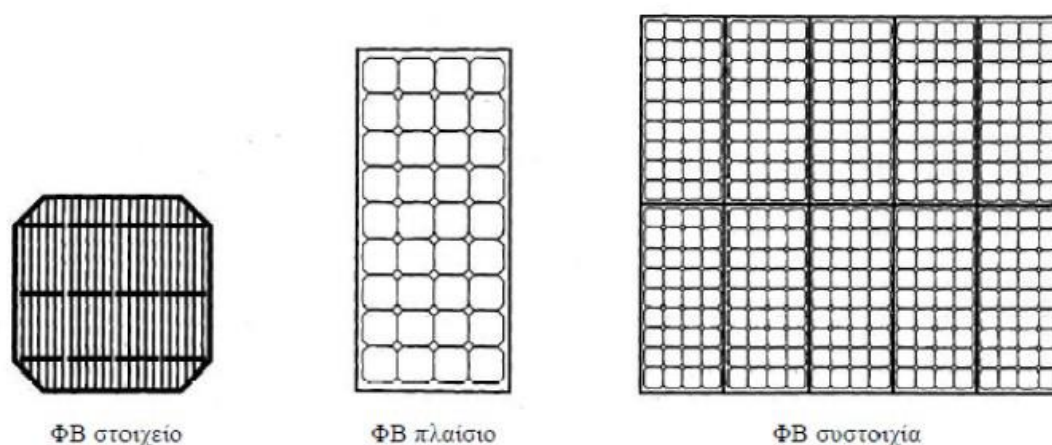
Στα φωτοβολταϊκά στοιχεία δεν είναι δυνατή η μετατροπή σε ηλεκτρική ενέργεια του συνόλου της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχονται στην επιφάνειά τους. Ένα μέρος από την ακτινοβολία ανακλάται πάνω στην επιφάνεια του στοιχείου και διαχέεται πάλι προς το περιβάλλον.

Από την ακτινοβολία που διεισδύει στον ημιαγωγό, προφανώς δεν μπορεί να απορροφηθεί το μέρος εκείνο που αποτελείται από φωτόνια με ενέργεια μικρότερη από το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού. Για τα φωτόνια αυτά ο ημιαγωγός συμπεριφέρεται σαν διαφανές σώμα. Έτσι η αντίστοιχη ακτινοβολία διαπερνά άθικτη το ημιαγωγικό υλικό του στοιχείου και απορροφάται τελικά στο μεταλλικό ηλεκτρόδιο που καλύπτει την πίσω όψη του με αποτέλεσμα να το

θερμαίνει. Αλλά και από τα φωτόνια που απορροφά ο ημιαγωγός, μόνο το μέρος εκείνο της ενέργειάς τους που ισούται με το ενεργειακό διάκενο συμβάλλει στην εκδήλωση του φωτοβολταϊκού φαινομένου. Το υπόλοιπο μεταφέρεται σαν κινητική ενέργεια στο ηλεκτρόνιο που ελευθερώθηκε από τον δεσμό και τελικά μετατρέπεται επίσης σε θερμότητα.

1.4.2 Φωτοβολταϊκά Συστήματα

Μια Φ/Β διάταξη έχει ως βασικό μέρος το Φ/Β στοιχείο, το οποίο αποτελεί τη θεμελιώδη μονάδα μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική. Τα Φ/Β στοιχεία συνδέονται μεταξύ τους σε σειρά ή σε παράλληλες σειρές συνθέτοντας ένα Φ/Β πλαίσιο. Τα Φ/Β πλαίσια με τη σειρά τους είναι η βασική δομική μονάδα ενός τέτοιου συστήματος και η παράλληλη ή σε σειρά σύνδεση τους δημιουργεί τη Φ/Β συστοιχία. Η **Εικόνα 1.12** απεικονίζει την ιεραρχία Φ/Β συστημάτων σύμφωνα με την παραπάνω περιγραφή.



Εικόνα 1.12 : Ιεραρχία Φ/Β Συστημάτων

Σε μια εγκατάσταση, τα Φ/Β πλαίσια τοποθετούνται σε ειδικές κατασκευές στήριξης. Πρόκειται για δύο κατηγορίες συστημάτων στήριξης:

- **Τα σταθεροποιημένα συστήματα**, όπου τα Φ/Β πλαίσια διατηρούν σταθερή κλίση και προσανατολισμό.
- **Τα συστήματα ιχνηλάτισης**, στα οποία τα Φ/Β πλαίσια μετακινούνται, ακολουθώντας την πορεία του ηλίου κατά τα διαρκεία της ημέρας, με στόχο την καλύτερη απόδοση στην παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια.

Ο προσανατολισμός τους, επιλέγεται από νοτιοανατολικός έως νοτιοδυτικός, ενώ η κλίση της επιφάνειάς τους επιδιώκεται να είναι ίση με το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής. Αξίζει να σημειωθεί ότι η απόδοση μιας Φ/Β εγκατάστασης, υπολογίζεται με τον **συντελεστή χρησιμοποίησης (ΣΧ)** που ορίζει το πηλίκο της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από τη Φ/Β εγκατάσταση προς την ενέργεια που θα παραγόταν εάν λειτουργούσε στην ονομαστική της ισχύ για διάστημα ενός έτους. Οι Φ/Β εγκαταστάσεις συνδέονται στο δίκτυο ηλεκτρικής

ενέργειας συνήθως στη χαμηλή τάση (230V). Απαιτείται η εγκατάσταση μετατροπέων (DC/AC μετατροπείς) εξαιτίας του ότι τα φωτοβολταϊκά παράγουν συνεχές (DC) ρεύμα και το δίκτυο είναι (AC) εναλλασσόμενου ρεύματος. Επιπρόσθετα, υπάρχουν και εγκαταστάσεις Φ/Β που συνδέονται άμεσα στη μέση τάση (20 KV). Πρόκειται για Φ/Β πάρκα με σχετικά υψηλή εγκατεστημένη ισχύ τα οποία συνδέονται σε υποσταθμούς που μετατρέπουν την χαμηλή σε μέση τάση (XT/MT).

1.5 Ηλεκτρικά Οχήματα

Η παγκόσμια ανησυχία για ζητήματα που αφορούν το περιβάλλον, όπως η έντονη αύξηση των αέριων ρύπων και του φαινομένου του θερμοκηπίου σε συνδυασμό με την έλλειψη των ορυκτών καυσίμων έδωσε ώθηση στην υιοθέτηση εναλλακτικών μέσων μεταφοράς φιλικότερων προς το περιβάλλον. Ιδανική λύση στο ζήτημα των μεταφορών αποτελούν τα ηλεκτρικά οχήματα.

Οι πρόσφατες τεχνολογικές εξελίξεις στο χώρο των συσσωρευτών ενίσχυσαν την ανταγωνιστικότητα των ηλεκτροκίνητων οχημάτων ωθώντας την προσοχή των κυβερνήσεων και των αυτοκινητοβιομηχανιών προς το τομέα αυτό. Ωστόσο, χρειάζονται αρκετές ακόμα προσπάθειες ώστε τα ηλεκτρικά οχήματα να γίνουν μέρος της καθημερινότητάς μας. Η έλλειψη κατάλληλων υποδομών και συγκεκριμένου ρυθμιστικού πλαισίου για την διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων στο ηλεκτρικό δίκτυο είναι τα σημαντικότερα εμπόδια. Ο βαθμός στον οποίο τα ηλεκτρικά οχήματα θα επιβαρύνουν το ηλεκτρικό δίκτυο εξαρτάται από το πλήθος των οχημάτων που συνδέονται στο κάθε σημείο του ηλεκτρικού δικτύου, καθώς επίσης και από την ισχύ και τη χρονική περίοδο στην οποία τα ηλεκτρικά οχήματα φορτίζονται από αυτό.

1.5.1 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα Ηλεκτρικών Οχημάτων

Όπως είναι αναμενόμενο αυτές οι τεχνολογίες παρουσιάζουν τόσο πλεονεκτήματα όσο και μειονεκτήματα έναντι των συμβατικών τρόπων μετακίνησης η κατανόηση των οποίων θα βοηθήσει στην βελτίωση τους.

Πλεονεκτήματα:

- ο Με τη χρήση των ηλεκτρικών οχημάτων επιτυγχάνεται **ο περιορισμός της ζήτησης πετρελαίου** όσον αφορά τον τομέα των μεταφορών, μειώνοντας με τον τρόπο αυτό την ενεργειακή εξάρτηση κυρίως από τις χώρες της μέσης ανατολής. Έτσι μειώνεται σημαντικά το κόστος της καθημερινής χρήσης ενός οχήματος, καθώς τα τελευταία χρόνια η τιμή του πετρελαίου έχει παρουσιάσει πολύ ανοδικές τάσεις.

- *Δεν εκπέμπουν ρυπογόνα αέρια*, επομένως δε συμβάλλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Μελέτες έχουν δείξει πως οι ρύποι που δημιουργούνται κατά την ηλεκτροπαραγωγή για τη φόρτιση των συσσωρευτών των ηλεκτρικών οχημάτων, είναι μειωμένοι κατά 2/3 σε σχέση με εκείνους των συμβατικών οχημάτων. Επίσης, αξίζει να αναφερθεί πως τα επίπεδα της ηχορύπανσης κατά τη λειτουργία ενός ηλεκτρικού οχήματος, είναι πολύ μικρότερα από εκείνα κατά τη λειτουργία ενός κινητήρα εσωτερικής καύσης.
- Μέσω της χρήσης ηλεκτρικών οχημάτων *αυξάνεται η ενεργειακή απόδοση*, καθώς οι υπάρχοντες ηλεκτροκινητήρες αποδίδουν το 75% της χημικής ενέργειας η οποία βρίσκεται αποθηκευμένη στους συσσωρευτές τους για την κίνηση των τροχών, σε αντίθεση με τις μηχανές εσωτερικής καύσης που μετατρέπουν μόνο το 20% της ενέργειας που είναι αποθηκευμένη στη βενζίνη.
- Ένα ηλεκτρικό όχημα έχει την ευχέρεια να λειτουργεί σε *υψηλότερες στροφές* από ότι ένας βενζινοκινητήρας, καθώς μπορεί να φτάσει και έως τις 14.000 στροφές/λεπτό. Ακόμα ένα σημαντικό πλεονέκτημα αποτελεί το γεγονός πως τα ηλεκτρικά οχήματα επιτυγχάνουν σχεδόν *σταθερή ροπή* από την ακινησία έως και το μέγιστο όριο στροφών λειτουργίας τους.

Ωστόσο, τα ηλεκτρικά οχήματα χαρακτηρίζονται και από αρκετούς περιορισμούς που προκαλούν επιφυλάξεις στους καταναλωτές σχετικά με την καθημερινή χρήση τους. Χρειάζεται περαιτέρω έρευνα, έτσι ώστε να αντιμετωπιστούν σημαντικές προκλήσεις που αφορούν κυρίως την τεχνολογία των συσσωρευτών, για να επιτευχθεί μακροπρόθεσμα η καθιέρωση της χρήσης των ηλεκτρικών οχημάτων. Παρακάτω παρουσιάζονται μερικά από τα μειονεκτήματα που αφορούν τα ηλεκτρικά οχήματα.

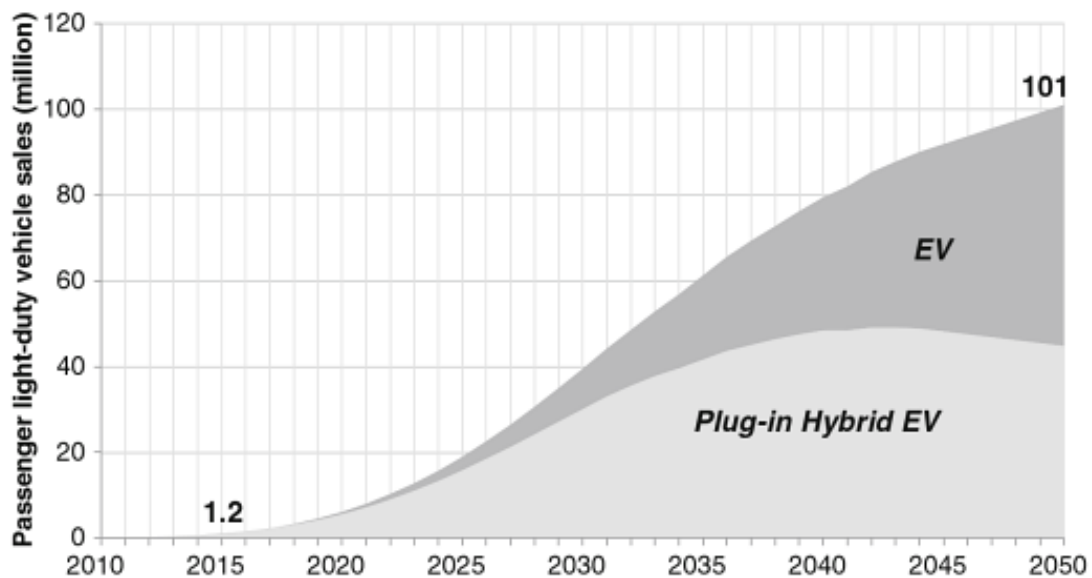
Μειονεκτήματα:

- Το βασικότερο μειονέκτημα των ηλεκτρικών οχημάτων αποτελεί η *αυτονομία* τους, καθώς με κάθε κύκλο φόρτισης της μπαταρίας τους μπορούν να διανύσουν περιορισμένη χιλιομετρική απόσταση. Κατά το παρελθόν ένα ηλεκτρικό όχημα χρειαζόταν κάθε 60 χιλιόμετρα επαναφόρτιση, ενώ στις μέρες μας τα σύγχρονα μοντέλα παρουσιάζουν αυτονομία ταξιδιού που φτάνει τα 150 χιλιόμετρα στα αυτοκίνητα πόλης και τα 300 χιλιόμετρα αντίστοιχα σε οχήματα μεγάλης ισχύος.
- Σημαντικό εμπόδιο στην εξάπλωση της χρήσης των ηλεκτρικών οχημάτων αποτελεί ο *μεγάλος χρόνος επαναφόρτισης* τους, που συνήθως φτάνει τις 6 ώρες για μια πλήρη επαναφόρτιση. Αξίζει βέβαια να αναφερθεί πως αρκετά σύγχρονα μοντέλα μπορούν να φορτίσουν κατά το 80% της μπαταρίας τους σε χρόνο μικρότερο της μίας ώρας.

- Τα ηλεκτρικά οχήματα παρουσιάζουν υψηλές δαπάνες κατασκευής, γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα την **υψηλή τιμή** πώλησής τους. Η χαμηλή ζήτηση, που προκαλείται από τα χαμηλά ποσοστά διείσδυσης ηλεκτρικών οχημάτων μέχρι σήμερα, όπως είναι λογικό οδηγεί στην διατήρηση σε υψηλά επίπεδα της τιμής τους.
- **Ο όγκος και το βάρος των συσσωρευτών** ενός ηλεκτρικού οχήματος είναι ένα ακόμα κομμάτι που θα πρέπει να βελτιωθεί τα επόμενα χρόνια, καθώς οι συστοιχίες μπαταριών είναι βαριές και καταλαμβάνουν σημαντικό χώρο στο όχημα. Ακόμα στον όγκο των συσσωρευτών, πρέπει να προστεθεί και ο όγκος των εγκατεστημένων συστημάτων ασφαλείας που αφορούν την προστασία από την εκδήλωση πυρκαγιάς στις μπαταρίες είτε λόγω βραχυκυκλώματος, είτε λόγω υπερθέρμανσης.

1.5.2 Πρόβλεψη Διείσδυσης Ηλεκτρικών Οχημάτων

Η τεχνολογική εξέλιξη στον τομέα των ηλεκτρονικών ισχύος και των μπαταριών προμηνύει ότι η βιομηχανία των ηλεκτρικών οχημάτων θα έχει μια αξιοσημείωτη επίδραση στην παγκόσμια αγορά αυτοκινήτου. Τα επόμενα είκοσι χρόνια ο αριθμός των ηλεκτρικών οχημάτων αναμένεται να αυξηθεί σημαντικά σε σχέση με σήμερα.



Εικόνα 1.13 : Πρόβλεψη Πώλησης Ηλεκτρικών Οχημάτων Σύμφωνα με τον Διεθνή Οργανισμό Ενέργειας (IEA)

Σύμφωνα με τις προβλέψεις του Διεθνούς Οργανισμού Ενέργειας-International Energy Agency (IEA), οι οποίες και παρουσιάζονται στην **Εικόνα 1.13**, πάνω από 7 εκατομμύρια πωλήσεις ηλεκτρικών οχημάτων προβλέπονται για το 2020, ενώ πιο αισιόδοξα πλάνα έχουν ανακοινωθεί από τις εθνικές κυβερνήσεις

των χωρών σε παγκόσμιο επίπεδο για πιο μακροπρόθεσμο διάστημα. Πιο συγκεκριμένα, προβλέπεται ότι το 2030 οι πωλήσεις ηλεκτρικών οχημάτων θα ανέρχονται σε περισσότερες από 30 εκατομμύρια, με τον αριθμό αυτό να εκτοξεύεται σε περισσότερες από 100 εκατομμύρια για το 2050.

Τα επόμενα είκοσι χρόνια στα δίκτυα διανομής θα λάβουν χώρα σημαντικές αλλαγές, οι οποίες, σε μεγάλο βαθμό, θα αποτελούν τις απαραίτητες λύσεις στις νέες προκλήσεις που επιβάλλουν η διανεμημένη παραγωγή (ΑΠΕ) και τα ηλεκτρικά οχήματα. Σύγχρονα συστήματα διαχείρισης του δικτύου διανομής και άλλο λογισμικό κέντρων ελέγχου ενέργειας είναι αναγκαία για να ξεκλειδώσουν τα πλεονεκτήματα από την αυξημένη ανάπτυξη των αισθητήρων και του υλικού ελέγχου. Τα αυτόματα συστήματα ανίχνευσης και απομόνωσης σφαλμάτων και αποκατάστασης της λειτουργίας του συστήματος και τα αυτόματα συστήματα ελέγχου της τάσης και της άεργου ισχύος απαιτούν σύγχρονο υλικό και λογισμικό, αλλά προσφέρουν ως αντάλλαγμα σημαντικά πλεονεκτήματα.

Αν οι ρυθμιστικές αρχές και οι ηλεκτρικές εταιρίες θα επηρεάζουν κατάλληλα τη φόρτιση, ώστε ως επί το πλείστον να μην συμπίπτει με την αιχμή φορτίου του συστήματος, τότε τα ηλεκτρικά οχήματα θα βελτιώνουν τον συντελεστή φορτίου του συστήματος και δεν θα προκαλούν δύσκολα διαχειρίσιμες καταστάσεις για το ηλεκτρικό δίκτυο. Διαφορετικά, η ενσωμάτωση των ηλεκτρικών οχημάτων θα απαιτεί περισσότερες επενδύσεις σε εξοπλισμό.

Δίνεται λοιπόν έμφαση στην όσο το δυνατόν πιο ομαλή απορρόφηση των ηλεκτρικών οχημάτων από τα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας. Η έμφαση αυτή γίνεται ολοένα και πιο δαπανηρή, σε ένα περιβάλλον με ραγδαίες τεχνολογικές εξελίξεις που προσφέρουν δυνατότητες για σημαντική αύξηση της απόδοσης. Οι ρυθμιστικές αρχές θα πρέπει να σχεδιάσουν μηχανισμούς για την κατανομή των χρηματοοικονομικών κινδύνων για καινοτόμες επενδύσεις που στοχεύουν στην αύξηση της απόδοσης του συστήματος, καθώς και μηχανισμούς που θα διασφαλίζουν ότι τα αποτελέσματα των καινοτόμων επενδύσεων μοιράζονται με τους καταναλωτές.

1.6 Σκοπός και Δομή της Εργασίας

Η παρούσα εργασία αφορά την μελέτη φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων σε ένα δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Η μελέτη αυτή αφορά τις επιπτώσεις διείσδυσης των οχημάτων στο δίκτυο για δύο σενάρια φόρτισης:

- Μη Ελεγχόμενη Φόρτιση (Dumb Charging)
- Ελεγχόμενη Φόρτιση (Smart Charging)

Για την μελέτη αυτή χρησιμοποιήθηκε ένα πρότυπο δίκτυο διανομής 33 ζυγών της IEEE με τις απαραίτητες τροποποιήσεις σε ζυγούς και γραμμές διανομής οι οποίες κρίθηκαν απαραίτητες και αφορούσαν:

- Την δημιουργία σταθμών φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων
- Την διείσδυση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ)

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας αποτέλεσε η δημιουργία ενός συστήματος ελέγχου φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων με βασική προϋπόθεση την βέλτιστη λειτουργία του παραπάνω δικτύου διανομής. Για τον λόγο αυτό θεωρήθηκε μοντέλο ηλεκτρικού οχήματος το οποίο έχει την δυνατότητα να υλοποιεί λειτουργίες οι οποίες αφορούν την ροή ισχύος είτε από το δίκτυο προς το όχημα (G2V) είτε από το όχημα προς το δίκτυο (V2G).

Βασικά κριτήρια σύμφωνα με τα οποία αναπτύχθηκε το συγκεκριμένο σύστημα ελέγχου αποτέλεσαν:

- Διακύμανση της τάσης των ζυγών του δικτύου σε όρια τα οποία θέτει ο διαχειριστής.
- Ελαχιστοποίηση των απωλειών του δικτύου.
- Ελαχιστοποίηση του κόστους φόρτισης των οχημάτων σύμφωνα με την τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας κάθε χρονική στιγμή.

Στο δεύτερο κεφάλαιο της εργασίας πραγματοποιείται μία πρώτη επαφή του αναγνώστη με τον κλάδο της ηλεκτροκίνησης. Διαχωρίζονται οι τεχνολογίες των ηλεκτρικών οχημάτων με μία συνοπτική αναφορά στα κύρια χαρακτηριστικά κάθε μίας και γίνεται περιγραφή των βασικών λειτουργικών τμημάτων τους. Επιπλέον λαμβάνει χώρα ο διαχωρισμός των κλάσεων των ηλεκτρικών οχημάτων όπως επίσης και οι τεχνολογίες των συσσωρευτών τους με την παράλληλη σύγκριση αυτών. Το τέλος του κεφαλαίου αφορά τις τεχνολογίες και τις θέσεις των σταθμών φόρτισης των οχημάτων

Το τρίτο κεφάλαιο αφορά την ένταξη των ηλεκτρικών οχημάτων στο ηλεκτρικό δίκτυο με τον προσδιορισμό των ενεργειακών αναγκών και παραμέτρων τους. Στην συνέχεια γίνεται συνοπτική περιγραφή των τρόπων φόρτισης των οχημάτων και των βασικών λειτουργιών V2G και G2V. Επιπλέον διακρίνονται οι τρεις φάσεις ενσωμάτωσης των ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας όπως καθορίστηκαν στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος MERGE της Ευρωπαϊκής Ένωσης.

Στο τέταρτο κεφάλαιο λαμβάνει χώρα η ανάλυση της μελέτης ροής ισχύος, με την απεικόνιση του μοντέλου στοιχείων ενός Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας, καθώς επίσης και η παρουσίαση των βασικότερων εξισώσεων ροών ισχύος. Στην συνέχεια ακολουθεί το πρόβλημα της βέλτιστης ροής ισχύος (OPF)

περιλαμβάνοντας τους βασικότερους περιορισμούς του προβλήματος και μία αναφορά στους τρόπους επίλυσης.

Στο πέμπτο κεφάλαιο περιγράφεται το πρόγραμμα MATPOWER το οποίο χρησιμοποιήθηκε για τις ανάγκες της διπλωματικής εργασίας. Αναλύεται η διάταξη για τα αρχεία δεδομένων που αφορούν τους ζυγούς, τις γεννήτριες, τις γραμμές διανομής και τα κόστη των γεννητριών ενώ τέλος αναφέρεται ο τρόπος επίλυσης ροής φορτίου και βέλτιστης ροής φορτίου μέσω του συγκεκριμένου προγράμματος.

Στο έκτο κεφάλαιο αναπτύσσεται λεπτομερώς το μοντέλο του ηλεκτρικού οχήματος το οποίο θεωρήθηκε για τις ανάγκες τις εργασίας. Στην συνέχεια του κεφαλαίου προσδιορίζονται οι ενεργειακοί παράγοντες του δικτύου διανομής, η επικοινωνία μεταξύ αυτών καθώς και το περιεχόμενο των μηνυμάτων τους. Το σύστημα αυτό αναπτύχθηκε σε κώδικα Matlab μέσω του προγράμματος MATPOWER με τα αποτελέσματα τα οποία εξήχθησαν να παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον και να αναγράφονται στο έβδομο κεφάλαιο.

Τέλος το όγδοο κεφάλαιο περιλαμβάνει χρήσιμα συμπεράσματα της συνολικής μελέτης και γίνεται η συνολική αποτίμηση της συγκεκριμένης μελέτης

2. Ηλεκτροκίνηση

2.1 Τεχνολογίες Ηλεκτρικών Οχημάτων

Η εξέλιξη της τεχνολογίας των αυτοκινήτων και των μπαταριών έχει καταστήσει πλέον την ηλεκτροκίνηση μια απτή πραγματικότητα, η οποία αλλάζει ριζικά τα δεδομένα της αυτοκίνησης. Η αντιμετώπιση των μεγάλων περιβαλλοντικών και οικονομικών προκλήσεων, που συνδέονται με την κλιματική αλλαγή και την εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα δημιουργεί νέες συνθήκες για την αυτοκινητοβιομηχανία αλλά και για την καθημερινότητα μας. Η ηλεκτρική ενέργεια όπως και τα υπόλοιπα εναλλακτικά καύσιμα κερδίζουν συνεχώς έδαφος.

Τα ηλεκτρικά οχήματα διαχωρίζονται, ανάλογα με την τεχνολογία τους, στις εξής κατηγορίες:

✓ *Ηλεκτρικά Οχήματα Μπαταρίας (Battery Electric Vehicles - BEV)*

Τα ηλεκτρικά οχήματα με συσσωρευτές είναι εκείνα που χρησιμοποιούν αποκλειστικά χημική ενέργεια αποθηκευμένη σε επαναφορτιζόμενες μπαταρίες. Δεν διαθέτουν μηχανή εσωτερικής καύσης κατά συνέπεια δεν χρειάζονται καύσιμα ή δεξαμενή καυσίμων. Η χημική ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στη μπαταρία χρησιμοποιείται για την κίνηση ενός ή περισσότερων ηλεκτρικών κινητήρων. Σημαντικό ρόλο παίζουν και οι τεχνικές φόρτισης των συσσωρευτών (αναπαραγωγικό φρενάρισμα), οι οποίες αξιοποιούν τη θερμότητα που παράγεται κατά το φρενάρισμα του οχήματος. Η αυτονομία οδήγησης, χωρίς ενδιάμεση φόρτιση, είναι περιορισμένη (περίπου 150km κατά μέσο όρο). Το κόστος για τη φόρτιση της μπαταρίας τους και, συνεπώς, το λειτουργικό κόστος τους, είναι ιδιαίτερα χαμηλό συγκριτικά με το αντίστοιχο των συμβατικών οχημάτων. Οι άμεσες εκπομπές ρύπων από τα ηλεκτρικά οχήματα μπαταρίας είναι μηδενικές. Ενδεικτικά παραδείγματα οχημάτων αυτής της κατηγορίας είναι τα: Smart-for-Two, Tesla Roadster, Nissan Leaf, i-MiEV, BMW i3, Renault Zoe, κ.α.

✓ *Ηλεκτρικά Οχήματα Αυξημένης Αυτονομίας (Extended Range Electric Vehicles - EREV)*

Τα οχήματα της κατηγορίας αυτής διαθέτουν τόσο μηχανή εσωτερικής καύσης όσο και ηλεκτρικό κινητήρα. Ωστόσο, η κίνηση του οχήματος στηρίζεται αποκλειστικά στον ηλεκτρικό κινητήρα. Η μηχανή εσωτερικής καύσης χρησιμοποιείται μόνο για την κίνηση μιας γεννήτριας που σκοπό έχει την φόρτιση της κύριας μπαταρίας του ηλεκτρικού οχήματος. Η βασική και

πλήρης φόρτιση της μπαταρίας πραγματοποιείται με την διασύνδεση του οχήματος στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Η τεχνολογία αυτή δίνει τη δυνατότητα αύξησης της αυτονομίας οδήγησης (>300km) εν συγκρίσει με τα καθαρά ηλεκτρικά οχήματα BEV. Ενδεικτικά παραδείγματα οχημάτων αυτής της κατηγορίας είναι: Opel Ampera, Chevrolet Volt, Fisker Karma, Renault Kangoo, κ.α.

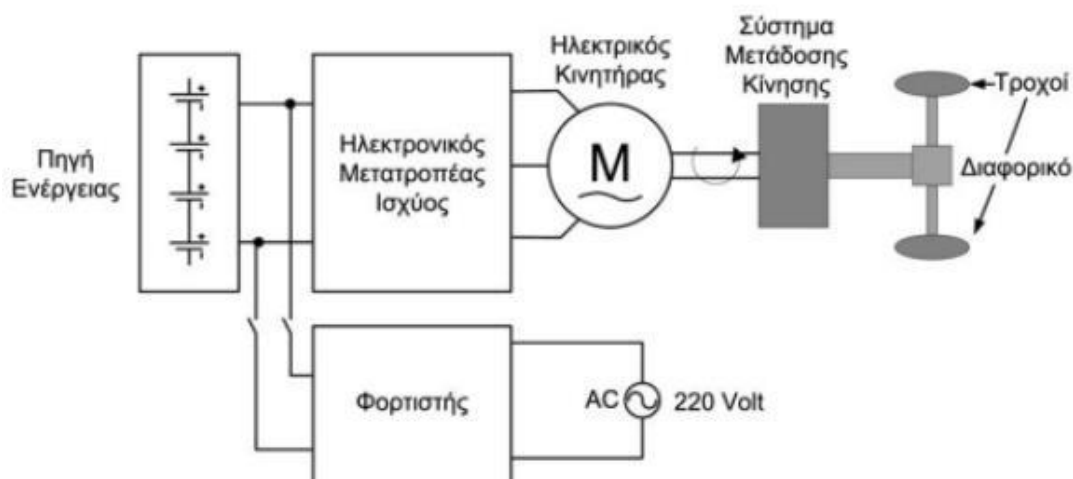
✓ ***Ηλεκτρικά Οχήματα Κυψελών Καυσίμου (Fuel Cell Electric Vehicles - FCEV)***

Τα ηλεκτρικά οχήματα κυψελών καυσίμου αποτελούν μια ξεχωριστή κατηγορία οχημάτων τα οποία χρησιμοποιούν μια συσκευή fuel cell device με την οποία παράγουν ηλεκτρισμό ο οποίος με την σειρά του τροφοδοτεί έναν ηλεκτρικό κινητήρα. Αποθηκεύουν ενέργεια με τη μορφή υδρογόνου H_2 , η οποία τροφοδοτεί μια κυψέλη καυσίμου μαζί με ατμοσφαιρικό οξυγόνο O , παράγοντας ηλεκτρισμό με τη διαδικασία της ηλεκτρόλυσης, με μόνα παραπροϊόντα την θερμότητα και το νερό, τα οποία είναι προφανές ότι δεν εκπέμπουν ρύπους προς την ατμόσφαιρα. Η απαιτούμενη υποδομή για τη διανομή του H_2 , η επί του οχήματος αποθήκευσή του H_2 και οι απώλειες μετατροπής αποτελούν σημαντικά προβλήματα που αφήνουν ανοιχτό το ερώτημα κατά πόσο τα ηλεκτρικά οχήματα κυψελών καυσίμου θα αποτελέσουν μια πρακτική και συμφέρουσα λύση στο μέλλον. Ενδεικτικά παραδείγματα οχημάτων αυτής της κατηγορίας είναι: Honda Clarity Hydrogen Fuel Cell, Hyundai ix35 Fuel Cell κ.α.

✓ ***Plug-in Υβριδικά Οχήματα (Plug-in Hybrid Electric Vehicles - PHEV)***

Τα ηλεκτρικά οχήματα της συγκεκριμένης κατηγορίας έχουν τη δυνατότητα να συνδέονται στο δίκτυο και να ανταλλάσσουν ηλεκτρική ενέργεια με αυτό. Τα PHEV, όπως και τα EREV, διαθέτουν δύο τύπους κινητήρων: ***ένα ηλεκτροκινητήρα***, ο οποίος τροφοδοτείται από μια μπαταρία παρέχοντας αυτονομία οδήγησης μερικών δεκάδων χιλιομέτρων, και ***έναν κινητήρα εσωτερικής καύσης***. Υπάρχουν διαφορετικοί τύποι υβριδικών ηλεκτρικών οχημάτων: ***παράλληλης σύνδεσης*** όπου η μηχανή εσωτερικής καύσης και ο ηλεκτρικός κινητήρας είναι συνδεδεμένα στο μηχανικό σύστημα μετάδοσης της κίνησης, ***εν σειράς σύνδεσης*** όπου μόνο ο ηλεκτρικό κινητήρας δίνει την κίνηση στους τροχούς, ενώ η μηχανή εσωτερικής καύσης χρησιμοποιείται για να φορτίζει τη μπαταρία ή να παρέχει ισχύ στο ηλεκτρικό κινητήρα και ***μεικτού τύπου*** όπου συνδυάζονται η παράλληλη και η εν σειρά σύνδεση. Ενδεικτικά παραδείγματα οχημάτων της συγκεκριμένης κατηγορίας είναι: Chevrolet Volt PHEV, Saturn VUE PHEV, Kia LPGand electric Hybrid, κ.α.

Το κύριο στοιχείο που διαφοροποιεί τα αμιγώς ηλεκτρικά οχήματα από τα υβριδικά είναι η απουσία μηχανής εσωτερικής καύσης. Η ενέργεια του οχήματος προέρχεται από καθαρά ηλεκτρική πηγή και η κίνηση του οχήματος βασίζεται αποκλειστικά σε έναν ή περισσότερους ηλεκτρικούς κινητήρες. Στην **Εικόνα 2.1** παρουσιάζεται ένα απλουστευμένο διάγραμμα των κύριων λειτουργικών τμημάτων ενός ηλεκτρικού οχήματος.



Εικόνα 2.1 : Διάγραμμα Κυρίων Μελών ενός Ηλεκτροκίνητου Οχήματος

- **Πηγή Ηλεκτρικής Ενέργειας:** Είναι το τμήμα του ηλεκτρικού οχήματος που τροφοδοτεί με ενέργεια το υπόλοιπο σύστημα. Το τμήμα αυτό λειτουργεί είτε ως πηγή είτε ως αποθήκη ηλεκτρικής ενέργειας είτε ως συνδυασμός και των δύο. Για την αποθήκευση ενέργειας χρησιμοποιούνται συσσωρευτές, ενώ η φόρτισή τους συνήθως γίνεται με ηλεκτρονικούς μετατροπείς όπου μετατρέπουν το εναλλασσόμενο ρεύμα σε συνεχές.
- **Ηλεκτρονικός Μετατροπέας:** Το τμήμα αυτό είναι υπεύθυνο για την κατάλληλη μετατροπή της τάσεως της πηγής ώστε να τροφοδοτήσει τον κινητήρα. Επιπλέον ελέγχει και τη λειτουργία του οχήματος ελέγχοντας ουσιαστικά την ταχύτητα και τη ροπή του κινητήρα.
- **Ηλεκτρικός Κινητήρας:** Ο κινητήρας μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική η οποία είναι απαραίτητη για την κίνηση του οχήματος.
- **Σύστημα Μετάδοσης Κίνησης:** Το μηχανολογικό αυτό τμήμα του οχήματος μεταδίδει την κίνηση στους τροχούς μέσω του διαφορικού του οχήματος προσαρμόζοντας κατάλληλα τη ροπή και την ταχύτητα.

Η **Εικόνα 2.1** απεικονίζει ένα ενδεικτικό διάγραμμα ενός ηλεκτρικού οχήματος το οποίο φυσικά ανάλογα την εκάστοτε τεχνολογία θα παρουσιάζει διαφορές. Ορισμένα τμήματα μπορούν να διαφοροποιούνται ή ακόμα και να μην υπάρχουν. Για παράδειγμα μέρος ή ακόμα και ολόκληρο το σύστημα μετάδοσης

κίνησης μπορεί και να μην υπάρχει. Επιπλέον, το όχημα μπορεί να διαθέτει περισσότερους από ένα κινητήρα και μετατροπέα.

2.2 Κλάσεις Ηλεκτρικών Οχημάτων

Όλα τα οχήματα, ανάλογα με τον αριθμό των τροχών που διαθέτουν και την χρήση τους κατατάσσονται (σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή νομοθεσία) σε διάφορες κατηγορίες. Οι σημαντικότερες κατηγορίες είναι οι εξής:

- ❖ **L1e:** Δίκυκλα οχήματα με μία μέγιστη ταχύτητα που δεν ξεπερνά τα 45 km/h και κινητήρα με ονομαστική ισχύ μικρότερη από 4KW.
- ❖ **L2e:** Τρίκυκλα οχήματα με μία μέγιστη ταχύτητα που δεν ξεπερνά τα 45 km/h και κινητήρα με ονομαστική ισχύ μικρότερη από 4KW.
- ❖ **L3e:** Δίκυκλα οχήματα με ταχύτητα μεγαλύτερη των 45 km/h.
- ❖ **L6e:** Οχήματα τεσσάρων τροχών με βάρος (χωρίς φορτίο) όχι μεγαλύτερο από 350kg (το βάρος της μπαταρίας δε συμπεριλαμβάνεται). Η μέγιστη ταχύτητα των οχημάτων αυτών είναι 45 km/h, ενώ η ισχύς του κινητήρα δεν ξεπερνά τα 4KW.
- ❖ **L7e:** Οχήματα τεσσάρων τροχών με μέγιστο βάρος (χωρίς φορτίο), το οποίο δεν περιλαμβάνει και το βάρος της μπαταρίας, 400kg (550kg για οχήματα που προορίζονται να μεταφέρουν εμπορεύματα). Η μέγιστη ισχύς του κινητήρα είναι 15KW.
- ❖ **M1:** Επιβατικά οχήματα τεσσάρων τροχών με το πολύ 8 θέσεις συν τη θέση του οδηγού. Τα οχήματα της κλάσης αυτής αναμένεται να είναι τα κυρίαρχα στην αγορά ηλεκτρικών οχημάτων.
- ❖ **M2,M3:** Μεγαλύτερα επιβατικά οχήματα με βάρος ίσο ή μεγαλύτερο από 5 τόνους (M2 και M3 αντίστοιχα) τεσσάρων τροχών, με το πολύ 8 θέσεις συν τη θέση του οδηγού.
- ❖ **N1:** Οχήματα για τη μεταφορά αγαθών με βάρος (χωρίς φορτίο) που δεν ξεπερνά τους 3,5 τόνους.
- ❖ **N2:** Οχήματα για τη μεταφορά αγαθών με βάρος (χωρίς φορτίο) που κυμαίνεται μεταξύ 3,5 και 12 τόνων.

Οι διαθέσιμες τεχνολογίες ηλεκτρικών οχημάτων και συστοιχιών καθιστούν αποτρεπτική τη χρήση τους για εμπορικά οχήματα με βάρος μεγαλύτερο των 12 τόνων.

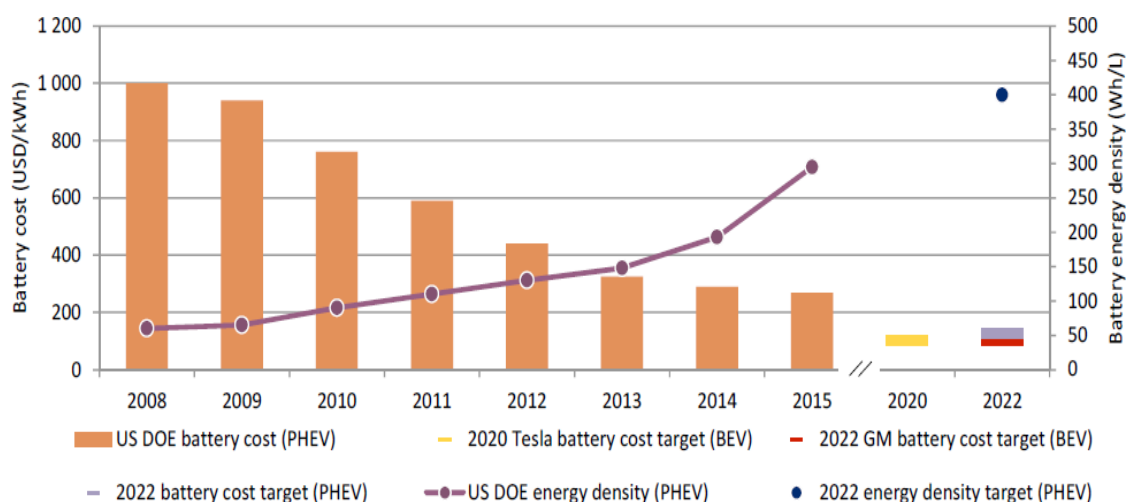
2.3 Τεχνολογίες Αποθήκευσης

Ένα από τα βασικότερα μέρη του Ηλεκτρικού Οχήματος, αν όχι το βασικότερο, είναι η συστοιχία ηλεκτροχημικών συσσωρευτών. Οι ηλεκτροχημικοί συσσωρευτές μετατρέπουν την χημική ενέργεια σε ηλεκτρική. Αυτό επιτυγχάνεται με την ύπαρξη δύο διαφορετικών στοιχείων, *την άνοδο και την κάθοδο* που

αντιδρούν μέσα σε έναν ηλεκτρολύτη. Τα στοιχεία αυτά ανταλλάσσουν ηλεκτρόνια, τα οποία κινούμενα δίνουν το απαιτούμενο ηλεκτρικό ρεύμα. Τα τελευταία χρόνια επενδύονται σημαντικά κεφάλαια και παρουσιάζεται παγκοσμίως έντονη επιστημονική δραστηριότητα για τη βελτίωση των χαρακτηριστικών υφιστάμενων τύπων συσσωρευτών ή/και την επινόηση νέων.

Στην κατασκευή οποιουδήποτε οχήματος τόσο ο όγκος όσο και η μάζα αποτελούν παράγοντες, που ελέγχονται αυστηρά, και επιδιώκεται η βέλτιστη αξιοποίησή τους. Στόχος είναι η ευρεία παραγωγή συσσωρευτών με μικρότερο κόστος, μεγαλύτερη χωρητικότητα και ισχύ, καθώς και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής. Η ανοχή σε ακραίες συνθήκες λειτουργίας είναι επίσης απαραίτητο χαρακτηριστικό, καθώς πρέπει να εξασφαλισθεί η ομαλότητα σε μεγάλο εύρος συνθηκών. Η αντοχή στους κύκλους φόρτισης-αποφόρτισης που υποδεικνύει πόσες φορές μπορεί να γίνει αυτός ο κύκλος χωρίς να πέσει σε μη αποδεκτά επίπεδα η απόδοση της μπαταρίας είναι επίσης πολύ σημαντική. Παρόλα αυτά θα πρέπει όλα τα παραπάνω να επιτευχθούν στα πλαίσια ενός αποδεκτού κόστους.

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μια σημαντική μείωση στο κόστος της μπαταρίας με παράλληλη αύξηση της πυκνότητας ενέργειας, όπως περιγράφεται στην αναφορά της IEA “Global EV outlook 2016”[9]. Η **Εικόνα 2.2** περιγράφει την μείωση του κόστους των μπαταριών από το έτος 2008 έως το έτος 2015 με την παράλληλη αύξηση της (ογκομετρικής) πυκνότητας ενέργειας (Wh/L), καθώς επίσης και για τις προβλέψεις τόσο στο κόστος όσο και στην πυκνότητα ενέργειας στο άμεσο μέλλον για διαφορετικές κατηγορίες οχημάτων (PHEV, BEV). Η αύξηση της απόδοσης της πυκνότητας ενέργειας των μπαταριών έχει ως αποτέλεσμα την αυξημένη αυτονομία των ηλεκτρικών οχημάτων σε χιλιόμετρα και επομένως την βελτίωση της απόδοσης τους. Το συγκεκριμένο γεγονός σε συνάρτηση με την παράλληλη μείωση του κόστους των μπαταριών των αποτελεί προάγγελο θετικών εξελίξεων στον τομέα της ηλεκτροκίνησης.



Εικόνα 2.2 : Κόστος και Πυκνότητα Ενέργειας Μπαταρίας

Υπάρχουν διαφορετικές τεχνολογίες μπαταριών που είναι εμπορικά διαθέσιμες. Κάθε τεχνολογία έχει τα δικά της χαρακτηριστικά και, επομένως, τα δικά της πλεονεκτήματα/μειονεκτήματα συγκριτικά με τις ανταγωνιστικές τεχνολογίες. Στη συνέχεια, αναλύονται οι κύριες τεχνολογίες συσσωρευτών που χρησιμοποιούνται σήμερα για την αποθήκευση ενέργειας στα ηλεκτρικά οχήματα:

✓ *Μολύβδου Οξέος (Lead-Acid)*

Είναι μία αρκετά διαδεδομένη τεχνολογία, κυρίως λόγω του χαμηλού κόστους της, που κυμαίνεται μεταξύ 70-110€/KWh. Το χαμηλό κόστος μετέτρεψε αυτό τον τύπο μπαταριών στην κύρια επιλογή για τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα μέχρι και τα μέσα της δεκαετίας του '90. Οι ιδιαίτερα μεγάλες απαιτήσεις των συσσωρευτών αυτών σε μάζα και σε όγκο (30-40Wh/kg) περιορίζουν την εφαρμογή του στα ηλεκτρικά οχήματα, όπου ο παράγοντας χαμηλού κόστους υπερτερεί. Η απόδοση και η ικανότητα αποθήκευσης αυτής της τεχνολογίας μπαταριών μειώνεται όταν οι θερμοκρασίες περιβάλλοντος είναι χαμηλές. Σε ακραίες καιρικές συνθήκες, είναι απαραίτητη η εκτροπή ενέργειας από τις μπαταρίες για τη λειτουργία του συστήματος θέρμανσης τους, με αποτέλεσμα να μειώνεται σημαντικά η απόδοσή τους. Επιπρόσθετα, έχει παρατηρηθεί πως η διάρκεια ζωής των μπαταριών αυτών μειώνεται από τις συνεχόμενες εκφορτίσεις για επίπεδα εκφόρτισης άνω του 20% της ονομαστικής χωρητικότητας. Μεγάλες εκφορτίσεις καταπονούν τις μπαταρίες και περιορίζουν τη διάρκεια ζωής τους στα τέσσερα χρόνια, καθώς οι κύκλοι φόρτισης δεν μπορούν να ξεπεράσουν τους 400.

Η χωρητικότητά τους μάλιστα μειώνεται σημαντικά καθώς αυξάνεται η ταχύτητα εκφόρτισης. Αυτό συμβαίνει σε όλες τις μπαταρίες, λόγω μη επιθυμητών πλευρικών αντιδράσεων μέσα στον συσσωρευτή, είναι ωστόσο ιδιαίτερα έντονο στις μπαταρίες μολύβδου οξέος. Η περιορισμένη χωρητικότητα τους προσφέρει αυτονομία περίπου 80 χιλιομέτρων. Το γεγονός αυτό περιορίζει την εφαρμογή τους σε ηλεκτρικά αυτοκίνητα που πραγματοποιούν μικρές διαδρομές. Παρά τα μειονεκτήματα που έχουν οι μπαταρίες μολύβδου οξέος, το ιδιαίτερα χαμηλό κόστος τους, η φιλικότητά τους προς το περιβάλλον (αφού η διαδικασία ανακύκλωσης τους είναι απλή) και η υψηλή ενεργειακή ισχύ τους, η συγκεκριμένη τεχνολογία παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον στον χώρο της ηλεκτροκίνησης.

✓ *Ιόντων Λιθίου (Lithium-Ion)*

Οι συσσωρευτές αυτής της τεχνολογίας εφαρμόζονται σήμερα ευρέως σε πολλές ηλεκτρονικές συσκευές με άριστη αποδοτικότητα. Η εφαρμογή σε

ηλεκτρικά οχήματα είναι ιδιαίτερα ελκυστική, αφού διαθέτουν υψηλή πυκνότητα ενέργειας ανά μονάδα μάζας και όγκου, προσφέροντας έτσι ιδιαίτερα αυξημένη αυτονομία. Πιο συγκεκριμένα, οι συγκεκριμένες μπαταρίες παρουσιάζουν περίπου 2-3 φορές μεγαλύτερη ενεργειακή πυκνότητα από άλλες τεχνολογίες μπαταριών (300W/kg ή 100Wh/kg). Η διάρκεια ζωής των μπαταριών αυτών ανέρχεται στους 1000 πλήρεις κύκλους λειτουργίας.

Τα παραπάνω χαρακτηριστικά καθιστούν την τεχνολογία αυτή ιδανική για εφαρμογές όπως τα ηλεκτρικά οχήματα, επιτρέποντας μεγαλύτερη αυτονομία οδήγησης συγκριτικά με τη τεχνολογία μολύβδου-οξέος. Ωστόσο, το υψηλό κόστος των μπαταριών αυτού του τύπου είναι ένα σημαντικό αρνητικό στοιχείο μιας και το αρχικό κεφάλαιο επένδυσης σε ηλεκτρικό όχημα αυξάνεται σημαντικά συγκριτικά με το κόστος του αντίστοιχου συμβατικού οχήματος. Το 2007, το κόστος των συγκεκριμένων συσσωρευτών ήταν περίπου 1500 \$/kWh, ενώ το 2020 αναμένεται να μειωθεί σημαντικά (250\$/kWh).

✓ *Νικελίου Υδριδίου Μετάλλου (Ni-MH)*

Τα κυριότερα πλεονέκτημα αυτής της τεχνολογίας μπαταριών είναι η αποδεδειγμένη διάρκεια ζωής τους και η ογκομετρική χωρητικότητα τους και η δυνατότητα αποδοτικής λειτουργίας τους σε μεγάλο εύρος θερμοκρασιών. Ωστόσο έχουν σημαντικούς περιορισμούς όσον αφορά στην πυκνότητα ενέργειας (μεταξύ 50-60% της ενεργειακής πυκνότητας των μπαταριών Ιόντων-Λιθίου) και ισχύος. Το κυριότερο μειονέκτημα τους είναι ότι η συνεχής εκφόρτιση των μπαταριών αυτού του τύπου σε υψηλή ισχύ μειώνει αισθητά τη διάρκεια ζωής τους σε 200-300 πλήρους κύκλους λειτουργίας. Η αποδοτικότερη χρήση των μπαταριών επιτυγχάνεται όταν η εκφόρτιση κυμαίνεται μεταξύ 20-50% της ονομαστικής χωρητικότητας. Η κατασκευή των μπαταριών αυτών από συγκεκριμένα στοιχεία και χημικές αντιδράσεις περιορίζει σημαντικά τις προοπτικές βελτίωσής τους. Ένα ακόμα μειονέκτημα αυτής της τεχνολογίας είναι το υψηλό τους κόστος το οποίο και δεν αναμένεται να μειωθεί σημαντικά στα επόμενα έτη. Η συγκεκριμένη τεχνολογία χρησιμοποιείται κυρίως σε υβριδικά-ηλεκτρικά οχήματα.

✓ *Νικελίου Καδμίου (Ni-Cd)*

Οι μπαταρίες Νικελίου-Καδμίου έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής και επιτρέπουν την πλήρη εκφόρτιση τους χωρίς να επηρεάζεται η απόδοσή τους. Η ενεργειακή πυκνότητα των μπαταριών αυτών είναι μικρή (περίπου 55Wh/kg) συγκριτικά με την αντίστοιχη των μπαταριών Ιόντων-Λιθίου. Το κυριότερο μειονέκτημα τους είναι το κόστος εγκατάστασής τους.

Επιπρόσθετες τεχνολογίες Ψευδαργύρου καθώς και διαφορετικές τεχνολογίες Ιόντων-Λιθίου μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές ηλεκτρικών οχημάτων. Ωστόσο αυτές που αναφέρθηκαν αντιπροσωπεύουν το μεγαλύτερο μέρος της συγκεκριμένης αγοράς. Τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των υπερ-πυκνωτών (σημαντικά μεγάλη πυκνότητα ισχύος και πολύ γρήγορος ρυθμός φόρτισης/εκφόρτισης) αξιοποιούνται στα βοηθητικά συστήματα ενέργειας των ηλεκτρικών οχημάτων, για παράδειγμα αποθήκευση και ανάκτηση της ενέργειας της πέδησης βελτιώνοντας έτσι την απόδοσή τους.

Η κύρια τεχνολογία που αναμένεται να αξιοποιηθεί σε μεγάλο βαθμό είναι αυτή που αφορά τις μπαταρίες Ιόντων-Λιθίου, καθώς το ερευνητικό ενδιαφέρον είναι έντονο ώστε να μειωθεί το κόστος τους. Οι μπαταρίες μολύβδου οξέος, που χρησιμοποιούνταν σε πολλά ηλεκτρικά οχήματα παλιότερα λόγω του χαμηλού τους κόστους, θα μπορούσαν να επιστρέψουν σε εφαρμογές ηλεκτρικών οχημάτων αν με κάποιο τρόπο αυξανόταν η διάρκεια ζωής τους, προσφέροντας παράλληλα αυξημένη αυτονομία.

Στον **Πίνακα 2.1** συνοψίζονται τα συγκριτικά χαρακτηριστικά των διαφορετικών τεχνολογιών μπαταρίας που αναλύθηκαν παραπάνω. Πρόκειται κατά σειρά για τις μπαταρίες: Μολύβδου Οξέος (Lead-Acid), Ιόντων Λιθίου (Lithium-Ion), Νικελίου Καδμίου (Ni-Cd), Νικελίου Υβριδίου Μετάλλου (Ni-MH) καθώς επίσης και κάποιες επιπρόσθετες τεχνολογίες ψευδαργύρου (Zinc/bromine, Zinc/air). Για κάθε μία από αυτές παρουσιάζονται κατά σειρά η βαρυμετρική πυκνότητα ενέργειας (Wh/kg), βαρυμετρική πυκνότητα ισχύος (W/Kg), η ενεργειακή απόδοση (%), η διάρκεια ζωής σε κύκλους καθώς επίσης και το κόστος (\$/kWh) της εκάστοτε μπαταρίας.

	Πυκνότητα Ενέργειας (Wh/Kg)	Πυκνότητα Ισχύος (W/Kg)	Ενεργειακή Απόδοση (%)	Διάρκεια Ζωής (κύκλοι)	Κόστος (\$/kWh)
Lead-Acid	35-50	150-400	>80	500-1000	120-150
Lithium-ion	80-130	200-300	>95	1000	200
Ni-metal-Hydride	70-90	200-300	70	750-1200	200-350
Nickel/Cadmium	40-60	80-150	75	800	250-350
Zinc/bromine	70-85	90-110	65-75	500-2000	200-250
Zinc/air	100-200	30-80	60	600	90-120

Πίνακας 2.1 : Συγκριτικά Αποτελέσματα Ενεργειακής Πυκνότητας για Διαφορετικούς Τύπους Μπαταριών

2.4 Σταθμοί Φόρτισης

Η ανάπτυξη κατάλληλων υποδομών φόρτισης είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας που θα δώσει ώθηση στην αγορά των ηλεκτρικών αυτοκινήτων. Η επάρκεια του δικτύου ηλεκτρικής φόρτισης εξαρτάται από τρεις παραμέτρους:

- Τον κατάλληλο αριθμό φορτιστών
- Την κατάλληλη τοποθεσία εγκατάστασης των φορτιστών
- Τον απαιτούμενο χρόνο φόρτισης

Ο αριθμός και η τοποθεσία εγκατάστασης των σταθμών φόρτισης απαιτεί ένα οργανωμένο στρατηγικό πλάνο που θα λαμβάνει υπόψη του τόσο τις ανάγκες και συνθήκες των οδηγών, όσο και την επάρκεια των υποδομών ηλεκτρικής ενέργειας, ώστε να μην διαταράσσεται βραχυπρόθεσμα η ομαλή λειτουργία του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας (υπερφορτίσεις, μεγάλες πτώσεις τάσεως). Όσον αφορά τον χρόνο φόρτισης, είναι αδύνατη σήμερα η μείωσή του σε επίπεδα αντίστοιχα του χρόνου ανατροφοδότησης των συμβατικών αυτοκινήτων

2.4.1 Τεχνολογίες Σταθμών Φόρτισης

Οι σημερινές τεχνολογίες μπαταριών δεν μπορούν να ικανοποιήσουν την κάλυψη μεγάλων αποστάσεων. Η μόνη διαφαινόμενη λύση στη βαρύνουσα σημασία ανησυχία των οδηγών για την περιορισμένη αυτονομία των ηλεκτρικών αυτοκινήτων είναι η επάρκεια υποδομών φόρτισης. Οι υποδομές αυτές διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες: την αγωγήμη φόρτιση και την ασύρματη (επαγωγική) φόρτιση.

➤ Φόρτιση με Αγωγήμη Σύνδεση

Η φόρτιση αυτού του τύπου απαιτεί τη σύνδεση των ηλεκτρικών οχημάτων σε κατάλληλο ηλεκτρικό εξοπλισμό, με επαφές που πρέπει να συνδεθούν άμεσα μεταξύ τους. Ανάλογα με το επίπεδο ισχύος φόρτισης, οι υποδομές φόρτισης διακρίνονται στις παρακάτω κατηγορίες σύμφωνα με το πρότυπο IEC 62196.

- **Επίπεδο 1 (Mode 1):** Αυτός είναι ο πιο συνηθισμένος τρόπος φόρτισης που απαιτεί τη σύνδεση του αυτοκινήτου σε μονοφασική παροχή εναλλασσόμενου ρεύματος, η οποία μπορεί να είναι και ένας συμβατικός οικιακός ρευματοδότης. Στην Αμερική, όπως ορίζεται και από το πρότυπο SAE J1772, η μέγιστη ισχύ φόρτισης είναι 1,92kW (καθώς η ονομαστική τιμή της τάσης είναι 110-120V και το ονομαστικό ρεύμα είναι 16A). Στην Ευρώπη, όπου οι ρευματοδότες έχουν τάση 220-230V, η αντίστοιχη μέγιστη ισχύς είναι 3,2kW. Τα περισσότερα ηλεκτρικά οχήματα διαθέτουν ένα κατάλληλο καλώδιο φόρτισης που παρέχεται με την αγορά τους με αποτέλεσμα να μην απαιτείται επιπλέον εξοπλισμός για τη φόρτισή τους. Ο χρόνος φόρτισης σε τέτοιες

υποδομές φόρτισης είμαι μεγάλος (μπορεί να ξεπεράσει και τις δώρες μια πλήρη φόρτιση) και χρησιμοποιούνται μόνο για οικιακή φόρτιση.

- **Επίπεδο 2 (Mode 2):** Μονοφασική φόρτιση με ονομαστικό ρεύμα φόρτισης 32A και μέγιστη ισχύς 7.2kW. Για τη φόρτιση αυτή, ο οικιακός ρευματοδότης δεν επαρκεί και απαιτείται συγκεκριμένη υποδομή φόρτισης. Η μέγιστη ισχύς των υποδομών αυτών μπορεί φτάσει την τιμή των 19,2kW με μέγιστο ρεύμα 80A, σύμφωνα με το πρότυπο SAE J1772. Ο απαιτούμενος χρόνος φόρτισης στο επίπεδο 2 είναι μειωμένος κατά 50% συγκριτικά με τον αντίστοιχο του επιπέδου 1.
- **Επίπεδο 3 (Mode 3):** Το επίπεδο αυτό αφορά στην ταχεία φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων (< 1ώρα) με τριφασική παροχή ηλεκτρικού ρεύματος ή με χρήση DC ρεύματος. Σε αυτό το επίπεδο φόρτισης, το ονομαστικό εναλλασσόμενο ρεύμα φόρτισης είναι 63A επιτρέποντας μεταφερόμενη ισχύ ίση με 42kW. Στη περίπτωση συνεχούς ρεύματος, η ισχύς φόρτισης μπορεί να φτάσει τα 100kW. Οι φορτιστές συνεχούς ρεύματος είναι αρκετά σύνθετοι μιας και απαιτούν την ενσωμάτωση του μετατροπέα εναλλασσόμενου ρεύματος σε συνεχές στις υποδομές φόρτισης. Το κόστος αυτών των υποδομών φόρτισης είναι πολύ υψηλό και μπορεί να φτάσει τις μερικές δεκάδες χιλιάδες ευρώ.

➤ Ασύρματη (Επαγωγική) Φόρτιση

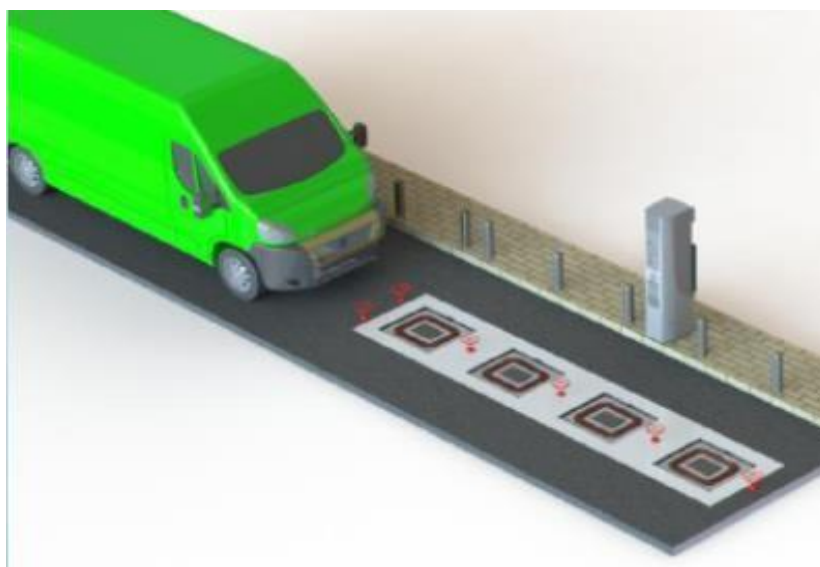
Μια ιδιαίτερα υποσχόμενη μέθοδος ταχείας φόρτισης είναι η επαγωγική φόρτιση. Η επαγωγική φόρτιση επιτρέπει την ασύρματη μεταφορά μεγάλων ποσών ισχύος μεταξύ του ηλεκτρικού δικτύου και της μπαταρίας του ηλεκτρικού οχήματος. Το όχημα αρχίζει να φορτίζει όταν τοποθετηθεί πάνω από τον φορτιστή. Ο συγκεκριμένος τρόπος φόρτισης των ηλεκτρικών αυτοκινήτων απαλλάσσει τον οδηγό από τη χρήση καλωδίων απλοποιώντας τη διαδικασία της φόρτισης. Οι επαγωγικοί σταθμοί φόρτισης εξαλείφουν επίσης κάθε είδους κίνδυνο σχετικό με τη χρήση καλωδίων, όπως η χρήση φθαρμένων καλωδίων ή η χρήση καλωδίων σε βροχερό ή χιονισμένο περιβάλλον. Επιπλέον το επαγωγικό σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος είναι τοποθετημένο υπογείως, εξασφαλίζοντας τη μη έκθεσή του σε άσχημες καιρικές συνθήκες, συμβάλλοντας παράλληλα και στην αποφυγή βανδαλισμών, όπως η κλοπή του καλωδίου φόρτισης.

Τα συστήματα που φορτίζουν με τον τρόπο αυτό μεταφέρουν εναλλασσόμενη ισχύ με μαγνητική σύμπλεξη ενός πρωτεύοντος πηνίου στην πλευρά της παροχής και ενός δευτερεύοντος από την πλευρά του οχήματος χρησιμοποιώντας έναν μετασχηματιστή. Επειδή η μπαταρία του οχήματος μπορεί να φορτιστεί μόνο με DC ρεύμα, το εναλλασσόμενο ρεύμα στην έξοδο του

δευτερεύοντος πηγίου ανορθώνεται πριν εισέλθει στη μπαταρία. Οι φορτιστές αυτού του τύπου διατηρούν το μεγαλύτερο μέρος του κυκλώματος φόρτισης εκτός του οχήματος και επικοινωνούν με τη μπαταρία μέσω υπέρυθρων ή ραδιοσυχνοτήτων.

Πέραν της στατικής επαγωγικής (ασύρματης) φόρτισης, υπάρχει και η **δυναμική φόρτιση** όπου η ενέργεια φόρτισης μεταφέρεται στο όχημα καθώς αυτό κινείται. Στη δυναμική φόρτιση δεν απαιτείται η επαφή του οχήματος με τις λωρίδες, αφού επιτρέπεται η ύπαρξη ενός διάκενου αέρος. Με τη χρήση αυτή της τεχνολογίας τα ηλεκτρικά οχήματα είναι ικανά να φορτίζουν την μπαταρία τους σε διάφορα σημεία κατά τη διάρκεια του ταξιδιού τους, μειώνοντας την ανάγκη να σταματούν σε σταθμούς φόρτισης.

Η δυναμική φόρτιση, επομένως δύναται να επιλύσει επιτυχώς τα όποια προβλήματα σχετίζονται με την περιορισμένη ικανότητα των ηλεκτρικών οχημάτων για κάλυψη μεγάλων αποστάσεων. Μάλιστα η ικανότητα φόρτισης σε πολλαπλά σημεία κατά τη διάρκεια μιας διαδρομής επιτρέπει τη χρήση μπαταριών μικρότερης χωρητικότητας, συμβάλλοντας έτσι σε σημαντική μείωση του κόστους των ηλεκτρικών οχημάτων. Ένα ενδεικτικό παράδειγμα δυναμικής φόρτισης, όπως αυτό προτάθηκε στο Ευρωπαϊκό ερευνητικό πρόγραμμα FastInCharge, παρουσιάζεται στην **Εικόνα 2.3**.



Εικόνα 2.3 : Προτεινόμενη Λύση Επαγωγικής Φόρτισης από το Ευρωπαϊκό Πρόγραμμα FastInCharge

Τα συγκριτικά χαρακτηριστικά των δύο μεθόδων φόρτισης (ενσύρματης και ασύρματης/επαγωγικής) αναφέρονται στον **Πίνακα 2.2**. Ο παρακάτω πίνακας παρουσιάζει συνοπτικά τα κύρια χαρακτηριστικά των 2 μεθόδων φόρτισης.

	Ενσύρματη Φόρτιση	Ασύρματη Φόρτιση
Κόστος	<i>Πιο οικονομική</i>	<i>Πιο ακριβή</i>
Πολυπλοκότητα	<i>Απλούστερη</i>	<i>Αρκετά σύνθετη</i>
Ασφάλεια	<i>Αρκετά καλή λόγω των αποδοτικών τεχνικών ανίχνευσης σφάλματος που εφαρμόζονται</i>	<i>Καλύτερη από τη φόρτιση με Επαφή, λόγω της ηλεκτρικής απομόνωσης του οχήματος με την τροφοδοσία</i>
Ενεργειακή Απόδοση	<i>Πιο αποδοτική</i>	<i>Όχι τόσο αποδοτική (απώλειες μαγνητικού κυκλώματος κ.λ.π.)</i>

Πίνακας 2.2 : Συγκριτικά Χαρακτηριστικά Ενσύρματης και Ασύρματης Φόρτισης

2.4.2 Θέσεις Σταθμών Φόρτισης

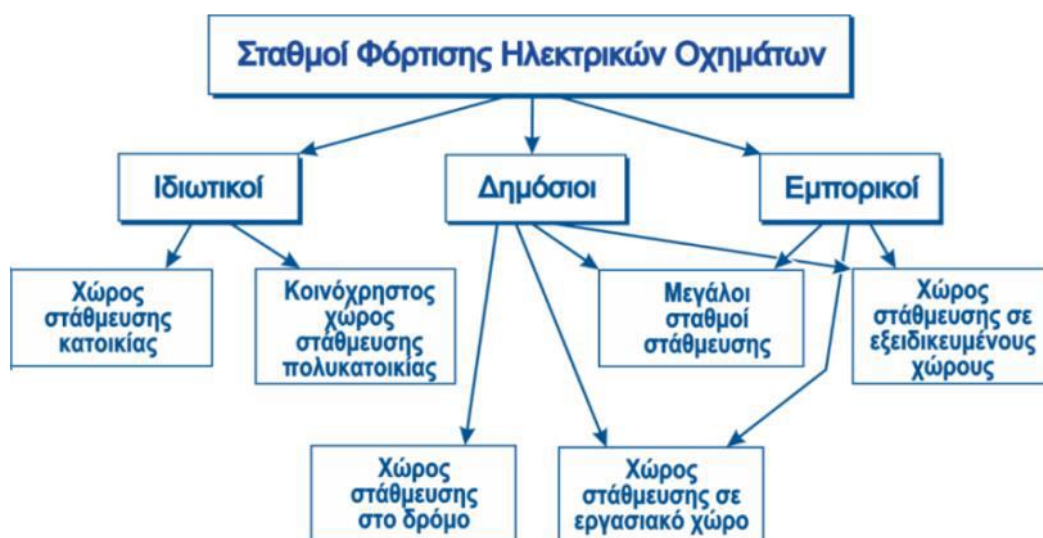
Τα συμβατικά οχήματα με μηχανές εσωτερικής καύσης ανεφοδιάζονται με υγρά καύσιμα σε ειδικούς σταθμούς ανεφοδιασμού. Κατ' αντιστοιχία, για τη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων απαιτείται η διασύνδεση τους στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας μέσω υποδομών φόρτισης. Η μεγάλη έκταση του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας προσφέρει πολλές επιλογές δυνητικών θέσεων εγκατάστασης υποδομών φόρτισης. Οι τοποθεσίες στις οποίες αναμένεται να εγκατασταθούν οι σταθμοί φόρτισης κατηγοριοποιούνται ως εξής:

- **Ιδιωτική περιοχή – επιτρέπεται η πρόσβαση μόνο σε ιδιώτες:**
 - **Ιδιωτικοί χώροι στάθμευσης στην οικία:** Δεν απαιτείται κάποιο επιπλέον κόστος ή εγκατάσταση για απλή φόρτιση, από τη στιγμή που υπάρχει παροχή ρεύματος με προστασία γείωσης.
 - **Ιδιωτικοί χώροι στάθμευσης που μοιράζονται από περισσότερους του ενός κατοίκους:** Στην περίπτωση αυτή είναι δυνατή η εγκατάσταση σταθμού φόρτισης που θα αναγνωρίζει ποιος από τους χρήστες φορτίζει το αυτοκίνητό του, ώστε το κόστος φόρτισης να επιβαρύνει μόνο αυτόν.
- **Ιδιωτική περιοχή – επιτρέπεται η δημόσια πρόσβαση:**
 - **Μεγάλοι χώροι στάθμευσης,** όπου τα οχήματα αναμένεται να είναι σταθμευμένα για σχετικά μακρύ χρονικό διάστημα (2-3 ώρες, π.χ. εμπορικά καταστήματα, κινηματογράφοι) ή σύντομο χρόνο (π.χ. εστιατόρια γρήγορου φαγητού ή σουπερμάρκετ).

- **Χώροι εργασίας** (π.χ. ο χώρος στάθμευσης για τους υπαλλήλους σε μία εταιρία): Πολλές εταιρίες εξετάζουν το αντίκτυπο που θα είχε η εγκατάσταση σταθμών φόρτισης για τους εργαζόμενους σε αυτές, αφού η φόρτιση κατά τη διάρκεια της εργασίας σχεδόν αυξάνει την ημερήσια απόσταση που είναι δυνατό να διανύσει ένα ηλεκτρικό όχημα.
- **Κατάλληλα διαμορφωμένοι χώροι ειδικά για τη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων:** Οι οδηγοί πιθανότητα να επιθυμούν χρόνους φόρτισης αντίστοιχους με αυτούς των συμβατικών πρατηρίων υγρών καυσίμων. Ωστόσο, επειδή η γρήγορη φόρτιση έχει κάποιους περιορισμούς λόγω υπερθέρμανσης της μπαταρίας, αναπτύχθηκε ένας πρότυπος σταθμός φόρτισης για αντικατάσταση της αφόρτιστης μπαταρίας με φορτισμένη σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα (BetterPlace). Το κόστος επένδυσης ενός τέτοιου σταθμού φόρτισης καθώς και τα προβλήματα διαλειτουργικότητας που υπήρχαν καθιστά τη λύση αυτή μη βιώσιμη.

➤ **Δημόσια περιοχή (εμπορική εκμετάλλευση) - επιτρέπεται η δημόσια πρόσβαση:**

- **Σταθμοί φόρτισης (κυρίως Επιπέδου 2)** που είναι εγκατεστημένοι σε δημόσιους δρόμους και εξυπηρετούν οδηγούς ηλεκτρικών οχημάτων που ζουν σε πυκνοκατοικημένες περιοχές, όπου δεν υπάρχουν οικιακά γκαράζ.
- **Υποδομές ταχείας φόρτισης** αναμένεται να εγκατασταθούν σε δρόμους ταχείας κυκλοφορίας ώστε να αυξήσουν την αυτονομία των οχημάτων και να καταστήσουν δυνατή τη μετακίνηση τους για μεγάλες αποστάσεις. Οι σταθμοί προβλέπεται να εγκατασταθούν ανά 80 περίπου χιλιόμετρα σε δρόμους ταχείας κυκλοφορίας και πρέπει να απέχουν λιγότερο από 1,5 χιλιόμετρο από τις αντίστοιχες εξόδους.



Εικόνα 2.4 : Η Διάκριση των Ενδεχόμενων Θέσεων Σταθμών Φόρτισης Ηλεκτροκίνητων Οχημάτων

3. Ένταξη Ηλεκτρικών Οχημάτων στο Δίκτυο Ηλεκτρικής Ενέργειας

3.1 Μέθοδος Προσδιορισμού Ενεργειακών Αναγκών

Η ένταξη των ηλεκτρικών οχημάτων στο ηλεκτρικό δίκτυο απαιτεί ριζικές αλλαγές στο ήδη υπάρχον. Οι αλλαγές αυτές θα πρέπει να γίνουν με γνώμονα τις ενεργειακές ανάγκες των καταναλωτών αλλά ταυτόχρονα λαμβάνοντας υπόψιν τις απαιτήσεις του δικτύου για την ασφαλή και ομαλή λειτουργία του.

Οι ενεργειακές ανάγκες των ηλεκτρικών οχημάτων καθορίζονται από την ημερήσια μετακίνηση τους, δηλαδή τις ημερήσιες αποστάσεις που διανύονται και την κυκλοφοριακή συμπεριφορά του χρήστη. Η ημερήσια μετακίνηση και η κυκλοφοριακή συμπεριφορά τους δεν μπορούν να προσδιοριστούν με ντετερμινιστικό τρόπο και ως εκ τούτου ο προσδιορισμός του φορτίου φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων δεν μπορεί να γίνει με ντετερμινιστικές μεθόδους. Επιπρόσθετα, οι τεχνικές προδιαγραφές του στόλου ηλεκτρικών οχημάτων (η τεχνολογία των οχημάτων, η κατανάλωση του ανά χιλιόμετρο κτλ.), και των υποδομών φόρτισης (επίπεδο φόρτισης, απώλειες μεταφοράς ισχύος κτλ) καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό την καμπύλη της φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων.

Το σύνολο των παραμέτρων που καθορίζουν την καμπύλη ζήτησης των ηλεκτρικών οχημάτων μπορεί να χωριστεί σε δύο υποσύνολα, σύμφωνα με τη φύση της εκάστοτε παραμέτρου, όπως συνοψίζονται παρακάτω:

Σταθερές παράμετροι:

- Επίπεδο διείσδυσης ηλεκτρικών οχημάτων
- Κατηγοριοποίηση των ηλεκτρικών οχημάτων
- Χωρητικότητα μπαταρίας
- Τεχνολογίες σταθμών φόρτισης (επίπεδο 1, 2 και 3)
- Διαθεσιμότητα φόρτισης (σπίτι, σπίτι/χώρος εργασίας)
- Απώλειες φόρτισης
- Στρατηγική φόρτισης (Μη ελεγχόμενη, Ελεγχόμενη με διζωνικό τιμολόγιο, Ελεγχόμενη φόρτιση, V2G)

Πιθανοτικές παράμετροι:

- Ημερήσια απόσταση που διανύεται
- Συνδεσιμότητα των οχημάτων (ώρα άφιξης/αναχώρησης)

3.2 Νέοι Ενεργειακοί Παράγοντες Ηλεκτροκίνησης

Η ομαλή ενσωμάτωση των ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας απαιτεί την ανάπτυξη νέων ενεργειακών παραγόντων, οι οποίοι περιγράφονται στη συνέχεια (σύμφωνα με τον οδικό χάρτη ηλεκτροκίνησης που αναπτύχθηκε στο ερευνητικό πρόγραμμα MERGE)[8].

✓ **Ιδιοκτήτης Ηλεκτρικού Οχήματος:**

Ο νέος αυτός παράγοντας θα έχει στην κατοχή του ένα ηλεκτρικό όχημα, με την απαίτηση το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας του σε καθημερινή βάση να επαρκεί για την κάλυψη των μετακινήσεων του.

✓ **Ιδιοκτήτες Συσσωρευτών:**

Ο συσσωρευτής ευθύνεται για το υψηλό κόστος των ηλεκτρικών οχημάτων, κόστος το οποίο αποτελεί τροχοπέδη για την ευρεία διάδοση των οχημάτων αυτών, ιδιαίτερα μάλιστα αν ληφθεί υπόψη και η μικρή διάρκεια ζωής τους. Στην προσπάθεια να παρακαμφθεί το συγκεκριμένο εμπόδιο, είναι πιθανό να αναπτυχθούν νέα επιχειρηματικά μοντέλα με διάφορες δομές ιδιοκτησίας και παράγοντες οι οποίοι θα αναλάβουν το ρίσκο της κατοχής, εγγύησης και ελέγχου της λειτουργίας των μπαταριών, ώστε να διαχωριστεί το κόστος της μπαταρίας από το κόστος του οχήματος. Έτσι ο μελλοντικός ιδιοκτήτης ηλεκτρικού οχήματος θα μπορεί να αγοράζει το ηλεκτρικό όχημα άνευ μπαταρίας, την οποία στη συνέχεια θα μπορεί να προμηθεύεται υπό τη μορφή ενοικίασης (battery leasing). Σε ένα μελλοντικό και πιο φιλόδοξο πλάνο, οι μπαταρίες των οχημάτων θα μπορούν να αξιοποιηθούν για να υποστηρίξουν το ηλεκτρικό δίκτυο προσφέροντας επικουρικές υπηρεσίες σε αυτό.

✓ **Διαχειριστής του Σημείου Φόρτισης:**

Ο ρόλος του συγκεκριμένου παράγοντα θα είναι διπλός:

1. Ως τελικός πελάτης μπορεί να αγοράζει την απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια για να φορτίσει το ηλεκτρικό όχημα που έχει στη κατοχή του ή
2. Ως ένα νέο επιχειρηματικό μοντέλο μπορεί να προμηθεύεται από την αγορά ένα ποσό ενέργειας, το οποίο μπορεί να μεταπουλά, μέσω διμερών συμβολαίων, σε άλλους ιδιοκτήτες ηλεκτρικών οχημάτων που συνδέονται σε έναν σταθμό φόρτισης.

✓ **Ιδιοκτήτης των Υποδομών Φόρτισης Ηλεκτρικών Οχημάτων:**

Ο παράγοντας αυτός είναι παρόμοιος με τον διαχειριστή σημείου φόρτισης, με τη διαφορά ότι δεν παρέχει υπηρεσίες φόρτισης και διαχείρισης των ενεργειακών αναγκών. Στην περίπτωση ιδιωτικής περιουσίας, η εγκατάσταση της υποδομής φόρτισης θεωρείται ότι

πραγματοποιείται από τον ιδιοκτήτη της συγκεκριμένης περιουσίας, ο οποίος μπορεί να αναθέσει σε έναν διαχειριστή σημείου φόρτισης, με σύμβαση υπεργολαβίας, τη διαχείριση και παροχή υπηρεσιών φόρτισης. Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι ο υπεύθυνος μίας εγκατάστασης εμπορικών κτιρίων, όπου η στάθμευση δεν είναι η κύρια λειτουργία της κατασκευής.

✓ ***Προμηθευτής-Συναθροιστής Ηλεκτρικής Ενέργειας Ηλεκτρικών Οχημάτων:***

Είναι υπεύθυνος για την προμήθεια της ενέργειας από την αγορά ηλεκτρικής ενέργειας και τη μεταπώληση της στους ιδιοκτήτες των ηλεκτρικών οχημάτων, με διμερή σύμβαση που παρέχει πρόσβαση σε συγκεκριμένα σημεία φόρτισης. Η καινοτομία του συγκεκριμένου παράγοντα είναι ότι παρέχει στους ιδιοκτήτες ηλεκτρικών οχημάτων τη δυνατότητα φόρτισης των οχημάτων τους σε διαφορετικά σημεία σύνδεσης, γεωγραφικώς ανεξάρτητα μεταξύ τους. Οι προμηθευτές ηλεκτρικών οχημάτων λειτουργούν ως λιανοπωλητές. Επομένως, η επιχείρησή τους πρέπει να ορίζεται ως ανταγωνιστική δραστηριότητα, αποδεδειγμένη από άλλες λειτουργίες του συστήματος ηλεκτρικής ισχύος. Οι προμηθευτές επιδιώκουν τη σύναψη όσο το δυνατόν μεγαλύτερου αριθμού συμβάσεων με ιδιοκτήτες ηλεκτρικών οχημάτων, γεγονός που θα τους δώσει μελλοντικά τη δυνατότητα για παροχή επικουρικών υπηρεσιών (V2G λειτουργία) στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας.

✓ ***Πάροχος Τεχνολογίας Μετάδοσης Πληροφοριών για Ηλεκτρικά Οχήματα:***

Η ελεγχόμενη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων απαιτεί την ανταλλαγή σημαντικής ποσότητας πληροφοριών, ενισχύοντας την αλληλεπίδραση μεταξύ των εμπλεκόμενων παικτών. Το γεγονός αυτό δίνει την ευκαιρία σε εταιρείες που είναι εξειδικευμένες σε τεχνολογίες μεταβίβασης πληροφοριών να εμπορευτούν την τεχνογνωσία τους. Ως εκ τούτου, τέτοιου είδους εταιρίες αποτελούν τον σύνδεσμο μεταξύ ενεργειακών παραγόντων, παρέχοντας αξιόπιστη και ασφαλή μεταφορά πληροφοριών σε πραγματικό χρόνο. Η κατοχή και η διαχείριση μια τέτοιας πληροφορίας υπόκεινται στα νομικά πλαίσια των ευαίσθητων προσωπικών δεδομένων και ως εκ τούτου απαιτείται αυστηρό ρυθμιστικό πλαίσιο για την παροχή τέτοιων υπηρεσιών.

3.3 Πολιτικές Φόρτισης

Η ένταξη των ηλεκτρικών οχημάτων κάνει επιτακτική ανάγκη για καθιέρωση και τυποποίηση συγκεκριμένων στρατηγικών φόρτισης ανάλογα με παράγοντες όπως ο πληθυσμός της περιοχής, η εποχή, οι συνήθειες των οδηγών

κτλ, ώστε να αποφευχθούν ανεπιθύμητες παρενέργειες με όσο τον δυνατόν λιγότερες επεμβατικές αλλαγές. Η αύξηση της ζήτησης σε ένα δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας συνεπάγεται και την αύξηση των τιμών της ηλεκτρικής ενέργειας. Ωστόσο, όταν το ποσοστό διείσδυσης των ηλεκτρικών οχημάτων είναι ιδιαίτερα υψηλό, η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να μεταβληθεί αναλόγως με το προφίλ της ζήτησης για την πλήρη φόρτιση των ηλεκτρικών αυτοκινήτων.

Αντιθέτως η μείωση της αιχμής ζήτησης από τη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων συνεισφέρει στην μείωση των αιχμών του φορτίου ενός δικτύου διανομής, στη μείωση των απωλειών των γραμμών και αυξάνει τον μέγιστο αριθμό οχημάτων που μπορούν να συνδεθούν στο δίκτυο χωρίς να απαιτούνται επενδύσεις αναβάθμισης του δικτύου. Επιπρόσθετα, για μεγάλα ποσοστά διείσδυσης η μείωση της αιχμής ζήτησης των οχημάτων σε μακροσκοπικό επίπεδο (σύστημα παραγωγής) συνεισφέρει στην οικονομικότερη λειτουργία του δικτύου ενέργειας (δεδομένου ότι απότομη αύξηση του φορτίου συνεπάγεται απότομη αύξηση των τιμών αγοράς ενέργειας).

Όσον αφορά την επίδραση που θα έχει η διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο θα πρέπει να ληφθεί υπόψη και η πολιτική φόρτισης που θα επιλεγεί από τους χρήστες. Οι στρατηγικές φόρτισης χωρίζονται στις εξής κατηγορίες:

- Μη Ελεγχόμενη Φόρτιση (*Dumb Charging*)
- Φόρτιση Πολλαπλής Χρέωσης (*Multiple Tariff Charging*)
- Ελεγχόμενη Φόρτιση – (“*Valley-Filling*”)

3.3.1 Μη Ελεγχόμενη Φόρτιση (Dumb Charging)

Αποτελεί τη μη σχεδιασμένη σύνδεση των ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο. Αυτό σημαίνει ότι οι ιδιοκτήτες των ηλεκτρικών οχημάτων είναι ελεύθεροι να φορτίσουν τα οχήματα τους οποιαδήποτε στιγμή χωρίς κανένα είδος ελέγχου ή χωρίς να τους δοθεί κάποιο κίνητρο να φορτίσουν τα οχήματα τους σε ώρα χαμηλής ζήτησης. Η στρατηγική αυτή αναφέρεται κυρίως στην οικιακή φόρτιση, όπου το επίπεδο φόρτισης είναι χαμηλό (επίπεδο 1) και απαιτείται μεγάλο χρονικό διάστημα για την πλήρη φόρτιση της μπαταρίας. Η φόρτιση ξεκινά αυτόματα τη στιγμή που το αυτοκίνητο θα συνδεθεί στο δίκτυο μέχρι να φορτιστεί πλήρως ή ο ιδιοκτήτης να διακόψει τη φόρτιση. Σε περίπτωση που πολλοί χρήστες επιλέξουν αυτόν τον τρόπο φόρτισης ενδέχεται να υπάρξουν προβλήματα στο δίκτυο όπως πτώσεις τάσεις ή υπερφορτώσεις γραμμών.

Το επιπρόσθετο φορτίο των ηλεκτρικών οχημάτων μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τόσο τη λειτουργία όσο και τον σχεδιασμό των υφιστάμενων δικτύων διανομής, ειδικότερα, στην περίπτωση υψηλών επιπέδων διείσδυσης ηλεκτρικών

οχημάτων. Η μη ελεγχόμενη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων για μικρά ποσοστά διείσδυσης δεν αναμένεται να προκαλέσει αισθητές επιπτώσεις στη λειτουργία των δικτύων διανομής. Ωστόσο, η συνεχής αύξηση του στόλου των ηλεκτρικών οχημάτων και η μη υιοθέτηση μηχανισμών διαχείρισης της φόρτισης τους επιδρά σημαντικά στην αύξηση της αιχμής του φορτίου του συστήματος.

3.3.2 Φόρτιση Πολλαπλής Χρέωσης (Multiple Tariff Charging)

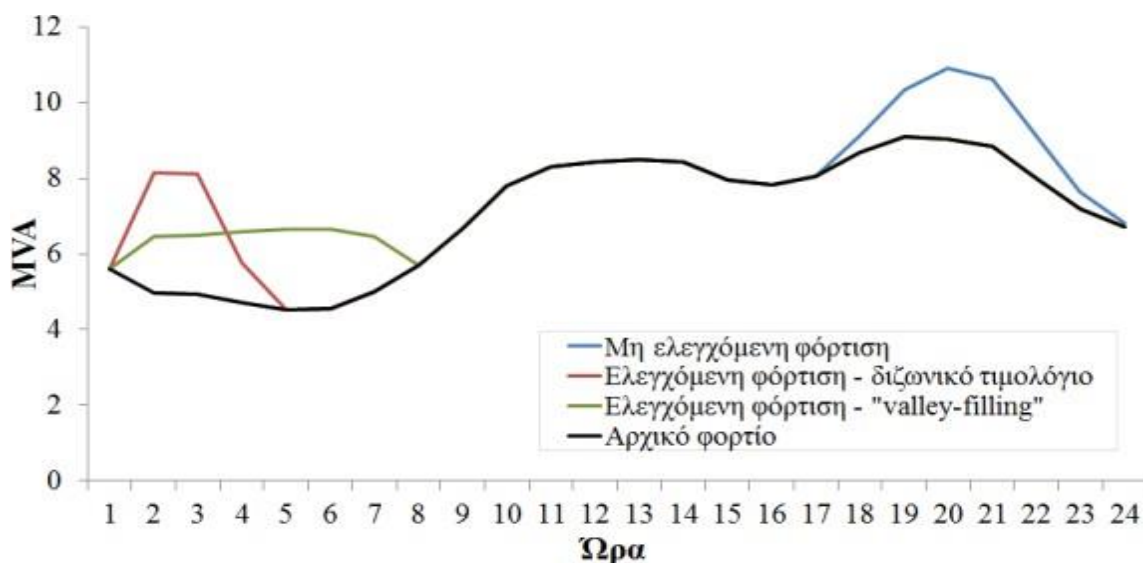
Η μέθοδος αυτή είναι ένας απλοποιημένος μηχανισμός της αγοράς για την έμμεση (μέσω κινήτρων) διαχείριση της κατανάλωσης. Σκοπός της στρατηγικής αυτής είναι η μετατόπιση της κατανάλωσης από τις ώρες αιχμής σε ώρες χαμηλής κατανάλωσης. Αυτό επιτυγχάνεται με την υιοθέτηση διαφορετικών λιανικών τιμών αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας για κάθε μια χρονική ζώνη εντός μιας ημέρας. Ο πιο απλός και πολύ-εφαρμοζόμενος μηχανισμός είναι το διζωνικό τιμολόγιο, σύμφωνα με το οποίο υπάρχουν δύο ζώνες (υψηλής και χαμηλής) χρέωσης της ενέργειας.

Η μετατόπιση του φορτίου από τις ώρες αιχμής στις ώρες μη αιχμής μπορεί να επιτευχθεί με ποικίλους τρόπους. Ο πιο συνηθισμένο και απλός τρόπος μετατόπισης φορτίου που υιοθετείται ευρέως είναι η δημιουργία χρονικών ζωνών όπου η ενέργεια τιμολογείται διαφορετικά, ώστε να αντικατοπτρίζεται το επίπεδο ζήτησης: υψηλό φορτίο συνεπάγεται ζώνη υψηλής τιμολόγησης της ενέργειας. Ωστόσο υιοθέτηση διζωνικού τιμολογίου δεν είναι πάντοτε επαρκής λύση, ιδιαίτερα στην περίπτωση όπου το δίκτυο είναι ήδη αρκετά επιβαρυνόμενο. Η απλή υιοθέτηση του διζωνικού τιμολογίου έχει ως αποτέλεσμα το ονομαζόμενο «payback effect», δηλαδή τη μετατόπιση του φορτίου σε μεταγενέστερες ώρες. Το «payback effect» στη περίπτωση διζωνικού τιμολογίου έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας απότομης αιχμής φορτίου κατά την έναρξη του χαμηλού τιμολογίου, η οποία μπορεί να προκαλέσει προβλήματα στη λειτουργία του δικτύου.

3.3.3 Ελεγχόμενη Φόρτιση (“Valley-Filling”)

Στο συγκεκριμένο σενάριο υιοθετείται μια πιο σύνθετη διαδικασία ελέγχου των ηλεκτρικών οχημάτων που σκοπό έχει τη μετατόπιση του φορτίου των ηλεκτρικών οχημάτων σε ώρες με χαμηλή κατανάλωση κατά τρόπο ώστε οι κοιλότητες της καμπύλης φορτίου να πληρούνται ομοιόμορφα. Η στρατηγική αυτή ελεγχόμενης φόρτισης είναι ευρέως διαδεδομένη στη βιβλιογραφία με το όνομα “valley-filling”. Η πλήρωση των κοιλοτήτων της καμπύλης φορτίου με την εφαρμογή της στρατηγικής “valley-filling” έχει συνεπακόλουθο πλεονέκτημα την ελαχιστοποίηση της διακύμανσης του φορτίου. Η εφαρμογή της φόρτισης αυτής εξυπηρετείται από το γεγονός ότι η κινητικότητα των ηλεκτρικών οχημάτων τις

ώρες στις οποίες το φορτίο του δικτύου παρουσιάζει πτώση (κυρίως για βραδινές ώρες) είναι περιορισμένη.



Εικόνα 3.1 : Επιπρόσθετη Ημερήσια Ζήτηση Λόγω Φόρτισης Ηλεκτρικών Οχημάτων για τα τρία Σενάρια Διείσδυσης

Στην **Εικόνα 3.1** παρουσιάζεται η επιπρόσθετη ημερήσια ζήτηση της φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων για τα τρία σενάρια διείσδυσης. Ο κάθετος άξονας αναφέρεται στην συνολική ζήτηση ισχύος (MVA) που παρουσιάζει ένα τυπικό δίκτυο διανομής και ο οριζόντιος άξονας οριοθετεί την ζήτηση αυτή στα πλαίσια ενός 24ώρου. Η αιχμή ζήτησης από την εφαρμογή της στρατηγικής “valley-filling” είναι σχεδόν η μισή της αντίστοιχης στην ελεγχόμενη φόρτιση μέσω διζωνικού τιμολογίου και περίπου διπλάσια της αντίστοιχης της μη ελεγχόμενης φόρτισης.

Βέβαια, στη στρατηγική ελεγχόμενης φόρτισης “valley-filling” η ζήτηση των ηλεκτρικών οχημάτων κατανέμεται ομοιόμορφα στις ώρες που η κατανάλωση του συστήματος είναι ελάχιστη. Το γεγονός αυτό συμβάλει στη μείωση της διαφοράς μεταξύ μέγιστης και ελάχιστης ημερήσιας ζήτησης βελτιώνοντας με αυτό τον τρόπο τον συντελεστή φορτίου του συστήματος.

3.4 Αλληλεπίδραση Ηλεκτρικών Οχημάτων με το Δίκτυο

Τα ηλεκτρικά οχήματα και το δίκτυο ηλεκτροδότησης είναι πολύ στενά συνδεδεμένες οντότητες καθώς τα αυτά εξαρτώνται από το δίκτυο για την κινητήρια δύναμή τους, και το δίκτυο μπορεί να ωφεληθεί πολύ από τη συνεργασία του με τα οχήματα. Η αλληλεπίδραση των ηλεκτρικών οχημάτων με το δίκτυο ηλεκτροδότησης είναι αμφίδρομη καθώς η κατεύθυνση της ενέργειας μπορεί να είναι από το δίκτυο στα οχήματα (Grid to Vehicle, G2V) αλλά και από τα οχήματα στο δίκτυο (Vehicle to Grid, V2G).

3.4.1 Grid to Vehicle

Ο όρος “G2V” αναφέρεται στην μεταφορά ενέργειας από το δίκτυο στα οχήματα, δηλαδή στην φόρτιση των μπαταριών τους στις περισσότερες περιπτώσεις, και συνήθως μελετάται σε πλαίσιο ενός ή πολλών σταθμών φόρτισης. Εναλλακτικά, μπορεί η φόρτιση να γίνεται μέσω οικιακής ηλεκτρικής σύνδεσης, ή ακόμα και σε κατάλληλα διαμορφωμένες θέσεις στάθμευσης. Το δίκτυο έχει τον ρόλο διαχείρισης των φορτίσεων με εξειδικευμένους αλγόριθμους, λαμβάνοντας υπόψη του τα δεδομένα και τις πληροφορίες που συλλέγει κατά τη λειτουργία του.

Έχουν αναπτυχθεί αλγόριθμοι που διαχειρίζονται το πρόγραμμα φόρτισης των οχημάτων με σκοπό την βελτιστοποίηση της απόδοσης με διάφορα κριτήρια. Οι αλγόριθμοι μπορεί να λειτουργούν έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται η επιβάρυνση του δικτύου και παράλληλα οι διακυμάνσεις στην κατανάλωση ενέργειας. Εναλλακτικά ο προγραμματισμός των φορτίσεων μπορεί να γίνεται με γνώμονα την ελάχιστη οικονομική επιβάρυνση των οδηγών, καθώς οι τιμές του ηλεκτρικού ρεύματος μεταβάλλονται, ίσως ανάλογα με την ζήτηση και παραγωγή. Επίσης, το οικονομικό κίνητρο μπορεί να περιλαμβάνει τις διαφοροποιήσεις των τιμών ανάλογα με την συμφόρηση σε κάθε σταθμό, οι οποίες γίνονται με σκοπό την δυναμική διαχείριση της ζήτησης. Αν ένας σταθμός έχει μεγάλο όγκο προσερχόμενων οχημάτων τότε μπορεί να ανεβάσει το κόστος του για να αποθαρρύνει επιπλέον οχήματα να προσέλθουν, και έτσι να προστατεύεται η ικανότητα του σταθμού να παρέχει τις υπηρεσίες του.

3.4.2 Vehicle to Grid

Η λειτουργία V2G αφορά την κατεύθυνση ενέργειας από τα οχήματα στο δίκτυο. Βασική αιτία για να επιστρέψουν ενέργεια τα οχήματα στο δίκτυο αποτελεί η χρήση τους ως αποθηκευτικά μέσα ενέργειας του δικτύου. Αυτό προϋποθέτει εξειδικευμένες υποδομές από τη μεριά του δικτύου έτσι ώστε να μπορεί να δεχθεί ενέργεια από τα οχήματα, καθώς και ειδικές τεχνολογίες από τη πλευρά των οχημάτων οι οποίες να παρέχουν την δυνατότητα να μεταφερθεί ενέργεια προς το δίκτυο. Αυτή η διαδικασία μπορεί να γίνει εφόσον το όχημα είναι σταθμευμένο σε θέση η οποία παρέχει την δυνατότητα για μεταφορά ενέργειας κατά την κατεύθυνση G2V.

Το πιο ρεαλιστικό είναι να γίνεται σε πλαίσιο σταθμού φόρτισης, όπου βολεύει επίσης για την φόρτιση άλλων οχημάτων που χρειάζονται ενέργεια, αλλά μπορεί να γίνεται ακόμα και στις οικίες ή σε δημόσιες θέσεις στάθμευσης με κατάλληλες υποδομές. Η ύπαρξη μεθόδων αποθήκευσης ενέργειας στο δίκτυο δίνει μεγάλη ευελιξία και ικανότητα για καλύτερη χρήση της παραγόμενης

ενέργειας. Τα δίκτυα ηλεκτροδότησης δεν έχουν τέτοιες υποδομές, όμως με την εισαγωγή μεγάλου αριθμού ηλεκτρικών οχημάτων αλλάζουν τα δεδομένα. Υπολογίζεται πως ένα όχημα λειτουργεί κατά μέσο όρο 4-5% του χρόνου οπότε τον υπόλοιπο είτε φορτίζει είτε παραμένει αδρανές. Οπότε το διάστημα που παραμένουν αδρανή τα οχήματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν μπαταρίες του δικτύου, αποθηκεύοντας ενέργεια όταν η ζήτηση δεν είναι μεγάλη και δίνοντάς τη πίσω όταν το δίκτυο δυσκολεύεται να ικανοποιήσει τις ανάγκες των καταναλωτών. Έτσι, μπορούν να εξομαλύνονται οι διακυμάνσεις της κατανάλωσης ενέργειας, ή μπορεί η κατανάλωση να εξισορροπείται σε σχέση με την παραγωγή ενέργειας.

Εναλλακτικά, η συγκεκριμένη λειτουργία V2G μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μικρότερη κλίμακα: υποστηρικτικά σε οικίες. Και σε αυτή την περίπτωση η βασική του χρήση είναι ως μπαταρία, συγκεκριμένα, της οικίας. Έχει ιδιαίτερη αξία σε συστήματα οικιών που βασίζονται σε αυτόνομες μονάδες παραγωγής ενέργειας όπως φωτοβολταϊκά και ανεμογεννήτριες. Ο λόγος της σημαντικότητάς τους είναι, όπως και στο δίκτυο, ότι η παραγωγή ενέργειας από τέτοιες πηγές παρουσιάζει μεγάλες μεταβολές. Ένα ηλεκτρικό όχημα μπορεί να αποθηκεύσει ενέργεια που αρκεί για δύο μέρες λειτουργίας μίας οικίας, προσφέροντας έτσι πολύ μεγάλη ευελιξία σε τέτοιες περιπτώσεις.

3.5 Φάσεις Διείσδυσης

Η ενσωμάτωση των ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας θα πρέπει να γίνει σταδιακά έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η εξυπηρέτηση αυτού του επιπρόσθετου φορτίου χωρίς να διαταράσσεται η ομαλή λειτουργία του δικτύου. Παράλληλα, θα πρέπει να αναπτυχθούν και τα απαραίτητα νομοθετικά πλαίσια που καθορίζουν τα ρυθμιστικά ζητήματα για τη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων. Στο διάγραμμα της **Εικόνα 3.2** παρουσιάζονται οι τρεις φάσεις ενσωμάτωσης των ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας όπως καθορίστηκαν στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος MERGE της Ευρωπαϊκής Ένωσης.



Εικόνα 3.2 : Φάσεις Ενσωμάτωσης Ηλεκτρικών Οχημάτων στο Δίκτυο Ηλεκτρικής Ενέργειας

Κάθε μια φάση εξυπηρετεί έναν συγκεκριμένο στόχο και απαιτεί είτε την επέκταση των αρμοδιοτήτων των υπαρχόντων παικτών στο χώρο της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας είτε την ανάπτυξη νέων που εξυπηρετούν συγκεκριμένες διεργασίες για την αποδοτική σύνδεση των ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο.

❖ Καταλυτική Φάση

Κύριος στόχος της φάσης αυτής είναι η εξυπηρέτηση των ενεργειακών αναγκών των ηλεκτρικών οχημάτων και η άμβλυνση της ανασφάλειας των χρηστών για την αυτονομία των ηλεκτρικών οχημάτων. Η ανάπτυξη επαρκούς δικτύου φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων θα προσφέρει στους χρήστες τη δυνατότητα για μεγαλύτερες διανυόμενες ημερήσιες αποστάσεις και θα λειτουργήσει ως κίνητρο για την διευκόλυνση της διείσδυσης των ηλεκτρικών οχημάτων. Ο διαχειριστής του συστήματος θα πρέπει να εξασφαλίζει την ομαλή παροχή ισχύος προς τα ηλεκτρικά οχήματα χωρίς να γίνεται διάκριση, υπέρ ή κατά, των υπολοίπων καταναλωτών. Στο συγκεκριμένο στάδιο, δεν αναμένεται να υπάρξουν πολύπλοκοι μηχανισμοί φόρτισης, οπότε δεν θα προσφέρεται η δυνατότητα αυτοματοποιημένου ελέγχου της φόρτισης.

Καθώς δεν υπάρχει η δυνατότητα άμεσου ελέγχου της διαδικασίας της φόρτισης, ο *Προμηθευτής-Συναθροιστής* μπορεί έμμεσα να επηρεάσει τη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων προσφέροντας οικονομικά κίνητρα (ειδικά διαμορφωμένα τιμολόγια) στους χρήστες ηλεκτρικών οχημάτων. Τα τιμολόγια αυτά θα δώσουν τα κατάλληλα κίνητρα στους χρήστες των ηλεκτρικών οχημάτων, ώστε να πραγματοποιούν τη φόρτιση σε συγκεκριμένες ώρες με χαμηλή κατανάλωση. Ωστόσο, τιμολόγια με διαφοροποιήσεις ως προς τη χρονική περίοδο κατανάλωσης μπορεί να προκαλέσουν απότομες αιχμές φορτίου στο σύστημα αν όλοι οι χρήστες των οχημάτων ταυτόχρονα πραγματοποιούν τη φόρτιση σε ώρες που είναι ωφέλιμες για αυτούς. Για μικρά επίπεδα διείσδυσης ηλεκτρικών οχημάτων, η αιχμή από την φόρτιση τους δεν επηρεάζει αισθητά τη λειτουργία του δικτύου, ωστόσο μια σημαντική αύξηση της διείσδυσης τους μπορεί να προκαλέσει πρόωρες αναβαθμίσεις του δικτύου. Στη φάση αυτή, οι ρυθμιστικές διατάξεις πρέπει να εστιάσουν στην αποζημίωση του διαχειριστή του συστήματος διανομής για το επιπλέον κόστος (ενίσχυση δικτύου, ενεργειακές απώλειες, λειτουργικό κόστος, κόστος διαχείρισης δικτύου) που θα επιφέρουν τα ηλεκτρικά οχήματα.

❖ Φάση εδραίωσης

Η έναρξη της φάσης εδραίωσης αναμένεται όταν η διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων γίνει σχετικά έντονη σε σύγκριση με τα υπόλοιπα φορτία του δικτύου. Εκτιμάται ότι θα ξεκινήσει στο μεσοπρόθεσμο διάστημα και επομένως δεν απαιτεί άμεση μέριμνα. Η φάση εδραίωσης είναι ουσιαστικά η

φάση κατά την οποία θα πρέπει να αναπτυχθούν συστήματα ελεγχόμενης φόρτισης του στόλου των ηλεκτρικών οχημάτων, με σκοπό να μην διαταραχθεί η ομαλή λειτουργία του δικτύου.

Για την κάλυψη των αυξημένων ενεργειακών αναγκών των ηλεκτρικών οχημάτων απαιτείται η φόρτιση σε δημόσιους χώρους ή σε κατάλληλα διαμορφωμένους σταθμούς φόρτισης. Ο έλεγχος της φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων δίνει την δυνατότητα ανάπτυξης νέων επιχειρηματικών μοντέλων, όπως του Προμηθευτή/Συναθροιστή Ηλεκτρικής ενέργειας (EV Supplier/Aggregator - EVS/A), ο οποίος είναι υπεύθυνος για την αγορά της απαιτούμενης ισχύος από την αγορά ηλεκτρικής ενέργειας και τη διαχείριση του φορτίου των ηλεκτρικών οχημάτων.

Στη φάση αυτή, σημαντικό ρόλο έχουν οι διαχειριστές του σημείου φόρτισης, οι οποίοι θα μπορούν να αγοράζουν ενέργεια, είτε από τη χονδρική αγορά είτε από έναν προμηθευτή, και στη συνέχεια να τη μεταπωλούν στους ιδιοκτήτες οχημάτων. Στην περίπτωση αγοράς ενέργειας από τη χονδρική αγορά, οι χρηματοοικονομικές υποχρεώσεις τους θα πρέπει να προσδιορίζονται με τον ίδιο βαθμό αυστηρότητας που χαρακτηρίζει τις αντίστοιχες των προμηθευτών. Σε κάθε περίπτωση, οι αρμοδιότητες των διαχειριστών του σημείου φόρτισης θα πρέπει να καθορίζονται από αυστηρές νομοθετικές ρυθμίσεις.

❖ Προχωρημένη Φάση

Στις προηγούμενες φάσεις διείσδυσης των ηλεκτρικών οχημάτων, κύριος στόχος ήταν η προμήθεια ηλεκτρικής ενέργειας από τη χονδρεμπορική αγορά ηλεκτρικής ενέργειας για τη φόρτιση των οχημάτων σύμφωνα με τις απαιτήσεις των χρηστών. Στη προχωρημένη φάση, τα ηλεκτρικά οχήματα μπορεί να αποδειχθούν ιδιαίτερα σημαντικά για τη λειτουργία του δικτύου, προσαρμόζοντας τον ρυθμό φόρτισής τους ή εγγέροντας ισχύ στο δίκτυο.

Η φάση αυτή ανταποκρίνεται σε μακροπρόθεσμα και ιδιαίτερα αισιόδοξα σενάρια. Στη φάση αυτή τα ηλεκτρικά οχήματα είναι σε θέση να προσφέρουν επικουρικές υπηρεσίες (Vehicle-to-Grid, V2G). Για την προσφορά υπηρεσιών V2G απαιτούνται πιο σύνθετοι τρόποι διαχείρισης των μπαταριών των οχημάτων, ανάπτυξη αμφίδρομων υποδομών φόρτισης για τα οχήματα και τους σταθμούς φόρτισης καθώς και σύγχρονων επικοινωνιακών υποδομών. Οι δαπάνες αυτές θα μπορούν να αντισταθμιστούν από τα οφέλη που θα προκύψουν, ωστόσο υπάρχει ένα ρίσκο λόγω της αβεβαιότητας του ποσοστού συμμετοχής των καταναλωτών. Οι υπηρεσίες υποστήριξης του δικτύου από τα ηλεκτρικά οχήματα μπορούν να επιφέρουν ένα επιπρόσθετο κέρδος στους ιδιοκτήτες των οχημάτων, το μέγεθος του οποίου μπορεί να επηρεάσει τη συμμετοχή τους στην παροχή V2G υπηρεσιών.

Η προσφορά υπηρεσιών V2G αναμένεται ιδιαίτερα ευνοϊκή για τον διαχειριστή του δικτύου/συστήματος. Οι ηλεκτρονικές διατάξεις που ρυθμίζουν τη λειτουργία της μπαταρίας μπορούν εύκολα να ελέγξουν την έγχυση/απορρόφηση ενεργού και άεργου ισχύος. Επιπρόσθετα, η V2G λειτουργία μπορεί να αξιοποιηθεί για την υποστήριξη της συχνότητας του δικτύου, ειδικότερα σε συστήματα με υψηλή διείσδυση ΑΠΕ.

4. Μελέτη Ροής Ισχύος και Βέλτιστη Ροή Ισχύος

4.1 Μελέτη Ροής Ισχύος

Ο ρόλος ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας είναι η ικανοποίηση της ζήτησης πραγματικής και άεργου ισχύος των φορτίων, που βρίσκονται στους εγκατεστημένους ζυγούς του δικτύου. Τα φορτία καλούνται να εξυπηρετηθούν από ένα δεδομένο αριθμό γεννητριών μέσω των γραμμών του δικτύου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, την επιλογή μιας «βέλτιστης» ροής ισχύος μεταξύ των άπειρων άλλων που προκύπτουν. Η επίλυση του προβλήματος της ροής ισχύος αποτελεί σημαντικό εφόδιο για όλα τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας καθώς λαμβάνει υπόψη σημαντικούς περιορισμούς:

- Διατήρηση των τάσεων των ζυγών σε σταθερά επιθυμητά επίπεδα, μέσα στα επιτρεπόμενα όρια ανοχής.
- Διατήρηση των ορίων λειτουργίας των γραμμών μεταφοράς και διανομής σχετικά με τη μεταφορά ενέργειας.
- Επιδίωξη για την οικονομική λειτουργία του συστήματος, με την κατάλληλη προσαρμογή της παραγωγής των γεννητριών με στόχο την οικονομική κατανομή του φορτίου.
- Την πρόβλεψη για την αντιμετώπιση πιθανών διαταραχών του συστήματος.
- Την ευελιξία σχετικά με την εξέλιξη του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας με την προσθήκη ζυγών, γραμμών μεταφορά και άλλων στοιχείων.

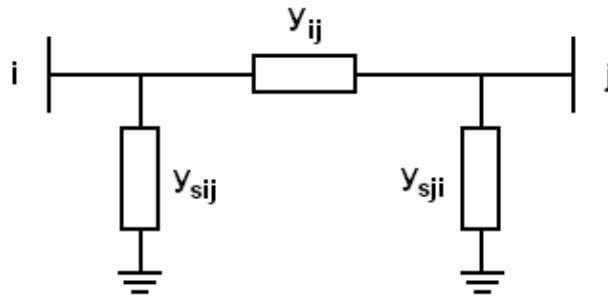
4.1.1 Μοντέλα Συνιστωσών ΣΗΕ

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται τα μοντέλα των στοιχείων ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, όπως αυτά χρησιμοποιούνται σε μελέτες ροών φορτίου. Επειδή η μελέτη ροών φορτίου προϋποθέτει τη συμμετρική κατάσταση του συστήματος, η ανάλυση βασίζεται στα μονοφασικά ισοδύναμα κυκλώματα, οι παράμετροι των οποίων εκφράζονται σε κοινό ανά μονάδα σύστημα. Τα στοιχεία του συστήματος που θα παρουσιαστούν είναι τα εξής:

- Γραμμές μεταφοράς
- Εγκάρσιοι πυκνωτές και αυτεπαγωγές
- Μετασχηματιστές
- Γεννήτριες
- Φορτία

❖ Παράσταση Γραμμών Μεταφοράς

Οι γραμμές μεταφοράς παριστάνονται στις μελέτες ροών φορτίου με το ονομαστικό κύκλωμα Π όπως απεικονίζεται στην **Εικόνα 4.1**:



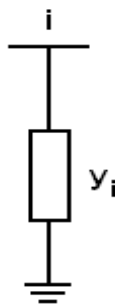
Εικόνα 4.1 : Ονομαστικό Ισοδύναμο Κύκλωμα Π Γραμμής Μεταφοράς

Στην **Εικόνα 4.1** η αγωγιμότητα y_{ij} είναι η αγωγιμότητα σειράς της γραμμής, ενώ οι y_{sij} , y_{sji} είναι οι εγκάρσιες αγωγιμότητες. Οι αγωγιμότητες αυτές μπορούν να γραφούν χωρίζοντας πραγματικά και φανταστικά μέρη ως εξής:

$$\begin{aligned} y_{ij} &= g_{ij} + j \cdot b_{ij} \\ y_{sij} &= g_{sij} + j \cdot b_{sij} \\ y_{sji} &= g_{sji} + j \cdot b_{sji} \end{aligned} \quad (4.1)$$

❖ Παράσταση Εγκάρσιων Πυκνωτών και Αυτεπαγωγών

Οι πυκνωτές και τα πηνία συνδέονται σε υποσταθμούς του συστήματος μεταφοράς προκειμένου να συμβάλουν στην αντιστάθμιση της άεργου ισχύος και τη ρύθμιση της τάσης. Οι συνιστώσες αυτές εισάγουν μία άεργη αγωγιμότητα μεταξύ του ζυγού που συνδέονται και της Γης και ονομάζονται εγκάρσιες συσκευές άεργης αντιστάθμισης. Οι εγκάρσιοι πυκνωτές και αυτεπαγωγές παριστάνονται με μια απλή αγωγιμότητα y_i όπως στην **Εικόνα 4.2**.



Εικόνα 4.2 : Παράσταση Εγκάρσιου Στοιχείου

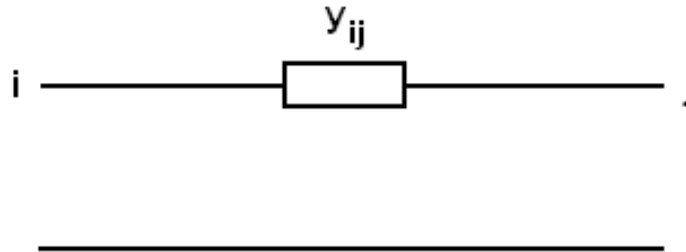
Η αγωγιμότητα y_i είναι της μορφής:

$$y_i = j \cdot b_i \quad (4.2)$$

όπου η παράμετρος b_i είναι θετική για πυκνωτή και αρνητική για αυτεπαγωγή.

❖ Παράσταση Μετασχηματιστών

Οι μετασχηματιστές παριστάνονται τις περισσότερες φορές στις μελέτες ροών φορτίου με το απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα χωρίς την αγωγιμότητα μαγνητίσεως. Οπότε, ο μετασχηματιστής παριστάνεται με μια αγωγιμότητα σειράς, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 4.3**:



Εικόνα 4.3 : Παράσταση M/Σ σε Ονομαστική Σχέση Μετασχηματισμού

Η παραπάνω εικόνα αναφέρεται σε ένα μετασχηματιστή με ονομαστική σχέση μετασχηματισμού, δηλαδή τέτοια που να αντιστοιχεί στο λόγο των βασικών τάσεων πρωτεύοντος και δευτερεύοντος. Στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας υπάρχουν επίσης μετασχηματιστές ρύθμισης, η σχέση μετασχηματισμού των οποίων διαφέρει από το λόγο των ονομαστικών τάσεων. Στους μετασχηματιστές αυτούς πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και η σχέση μετασχηματισμού ανάγοντας τις ανά μονάδα αντιστάσεις στο ένα από τα δύο τυλίγματά του.

❖ Παράσταση Γεννητριών

Οι γεννήτριες παριστάνονται σαν πηγές ενεργού και άεργου ισχύος:

$$S_G = P_G + j \cdot Q_G \quad (4.3)$$

Όπου S_G η μιγαδική παραγόμενη ισχύς, P_G η παραγόμενη ενεργός ισχύς και Q_G η παραγόμενη άεργος ισχύς.

Οι σύγχρονες γεννήτριες ρυθμίζονται συνεχώς από δύο διατάξεις ελέγχου:

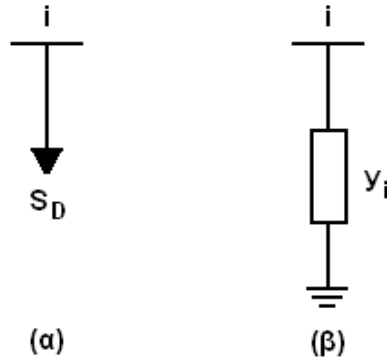
1. **τον αυτόματο ρυθμιστή τάσεως (APT)**, ο οποίος διατηρεί σταθερό το μέτρο της τερματικής τάσης της γεννήτριας ρυθμίζοντας κατάλληλα το ρεύμα διεγέρσεως και
2. **τον ρυθμιστή στροφών**, ο οποίος κρατάει σταθερή την ενεργό παραγωγή προσαρμόζοντας την παραγόμενη μηχανική ισχύ της κινητήριας μηχανής.

Έτσι, στις μελέτες ροής φορτίου οι σύγχρονες γεννήτριες παριστάνονται συνήθως με σταθερή κατά μέτρο τερματική τάση και σταθερή παραγωγή πραγματικής ισχύος.

❖ Παράσταση Φορτίων

Τα φορτία που συμπεριλαμβάνονται στις συνηθισμένες μελέτες ροών φορτίου ταξινομούνται σε δύο κατηγορίες:

- Φορτία σταθερής ενεργού και άεργου ισχύος (**Εικόνα 4.4.α**)
- Φορτία σταθερής σύνθετης αγωγιμότητας (**Εικόνα 4.4.β**)



Εικόνα 4.4 : Παράσταση Φορτίων

Όσον αφορά το φορτίο σταθερής ισχύος, η μιγαδική ισχύς που απορροφά είναι:

$$S_D = P_D + j \cdot Q_D \quad (4.4)$$

Όπου P_D είναι η ενεργός ισχύς και Q_D είναι η άεργος ισχύς.

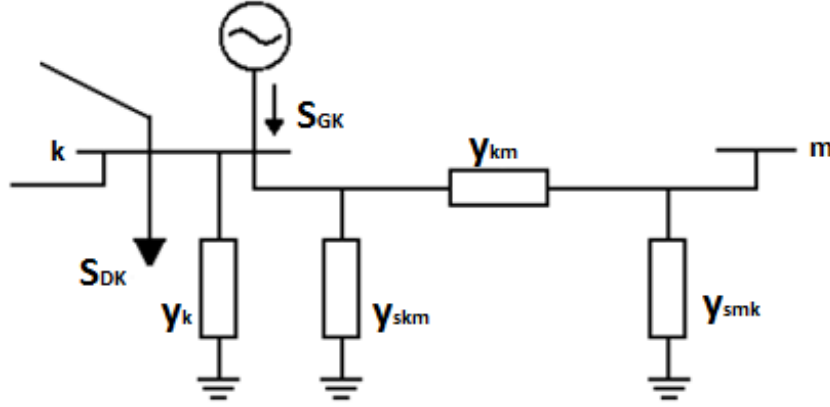
Ενώ, το φορτίο σταθερής αγωγιμότητας παριστάνεται με την εξής μορφή:

$$y_i = g_i + j \cdot b_i \quad (4.5)$$

4.1.2 Εξισώσεις Ροών Ισχύος

Για την επίλυση του προβλήματος της μελέτης ροής ισχύος, γίνεται χρήση του μοντέλου «εξισώσεις ροής φορτίου». Η παρουσίαση του, θα γίνει με τη βοήθεια ενός συστήματος δύο ζυγών (k, m) όπως φαίνεται στην **Εικόνα 4.5**. Στον ζυγό k είναι εγκατεστημένο ένα φορτίο σταθερής ενεργού και άεργου ισχύος, ένα φορτίο αγωγιμότητας και μια γεννήτρια, ενώ η γραμμή μεταφοράς που συνδέει τους ζυγούς k και m , παριστάνεται με το π-ισοδύναμο κύκλωμα. Αναλυτικότερα:

- S_{GK} : Η μιγαδική ισχύς που παράγει η γεννήτρια του ζυγού k .
- S_{DK} : Η μιγαδική ισχύς που καταναλώνει το φορτίο σταθερής ισχύος του ζυγού k .
- y_k : Η εγκάρσια σύνθετη αγωγιμότητα στο ζυγό k , που συμπεριλαμβάνει οποιαδήποτε συστοιχία πυκνωτών, πηνίων ή φορτίων αγωγιμότητας.
- y_{km} : Η αγωγιμότητα σειράς της γραμμής που συνδέει τους ζυγούς k, m .
- y_{skm}, y_{smk} : Οι εγκάρσιες αγωγιμότητες της γραμμής που συνδέει τους ζυγούς k, m .



Εικόνα 4.5 : Γενικευμένος Ζυγός Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας

Το ρεύμα του ζυγού k που απορροφάται από την κοντινότερη εγκάρσια αγωγιμότητα της γραμμής ισούται:

$$\hat{I}_{skm} = y_{skm} \cdot \hat{V}_k \quad (4.6)$$

Το ρεύμα του ζυγού k που απορροφάται από την αγωγιμότητα σειράς γραμμής ισούται:

$$\hat{I}_{km} = y_{km} \cdot \hat{V}_k \quad (4.7)$$

Το ρεύμα του ζυγού m που απορροφάται από την αγωγιμότητα σειράς της γραμμής ισούται:

$$\hat{I}_{mk} = y_{mk} \cdot \hat{V}_m \quad (4.8)$$

Τελικά από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει το ρεύμα που ρέει στην γραμμή από τον ζυγό k στον ζυγό m και ισούται με:

$$\hat{I}_{km} = (y_{skm} + y_{km}) \cdot \hat{V}_k - y_{km} \cdot \hat{V}_m \quad (4.9)$$

Εφαρμόζοντας τον νόμο του Kirchhoff στο ζυγό k , παίρνουμε:

$$\hat{I}_{Gk} - \hat{I}_{Dk} = y_k \cdot \hat{V}_k + \sum_{m \in A(k)} \hat{I}_{km} \quad (4.10)$$

Όπου \hat{I}_{Gk} το ρεύμα που παράγει η γεννήτρια στο ζυγό k , \hat{I}_{Dk} το ρεύμα που απορροφά το φορτίο στο ζυγό k , $y_k \cdot \hat{V}_k$ το ρεύμα που απορροφάται από την εγκάρσια αγωγιμότητα y_k , και $A(k)$, το σύνολο των ζυγών που είναι διασυνδεδεμένοι με τον ζυγό k .

Αντικαθιστώντας την εξίσωση (4.9) στην εξίσωση (4.10) προκύπτει ότι:

$$\hat{I}_{Gk} - \hat{I}_{Dk} = \left[y_k + \sum_{m \in A(k)} (y_{skm} + y_{km}) \right] \cdot \hat{V}_k - \sum_{m \in A(k)} y_{km} \cdot \hat{V}_m \quad (4.11)$$

Θέτοντας:

$$Y_{kk} = y_k + \sum_{m \in A(k)} (y_{skm} + y_{km}) \quad (4.12)$$

$$Y_{km} = -y_{km}$$

Προκύπτει ο πίνακας ή μήτρα αγωγιμοτήτων $[Y]$ διαστάσεων $n \times n$, όπου n ο αριθμός των ζυγών του εξεταζόμενου συστήματος, με τα στοιχεία Y_{kk} να αποτελούν τα διαγώνια στοιχεία του πίνακα και Y_{km} τα μη διαγώνια. Συνεπώς η εξίσωση γενικεύεται και η καθαρή έγχυση ρεύματος στον ζυγό k ορίζεται ως:

$$\hat{I}_k = \hat{I}_{Gk} - \hat{I}_{Dk} = Y_{kk} \cdot \hat{V}_k + \sum_{m \in A(k)} Y_{km} \cdot \hat{V}_m \quad (4.13)$$

Στις μελέτες ροής φορτίου οι μεταβλητές που ενδιαφέρουν, είτε ως δεδομένα, είτε ως ζητούμενα, σε κάθε ζυγό δεν είναι τα ρεύματα, αλλά οι μιγαδικές ισχύεις παραγωγής S_{Gk} και του φορτίου S_{Dk} . Οι μιγαδικές αυτές ισχύεις δίνονται (στο ανά μονάδα σύστημα) από τις σχέσεις:

$$S_{Gk} = \hat{V}_k \cdot \hat{I}_{Gk}^* \quad (4.14)$$

$$S_{Dk} = \hat{V}_k \cdot \hat{I}_{Dk}^*$$

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις (4.13) και (4.14) παίρνουμε ότι:

$$S_k = S_{Gk} - S_{Dk} = Y_{kk}^* \cdot \hat{V}_k^2 + \hat{V}_k \cdot \sum_{m \in A(k)} Y_{km}^* \cdot \hat{V}_m^* \quad (4.15)$$

Όπου $S_k = P_k + j \cdot Q_k$ η καθαρή έγχυση μιγαδικής ισχύος στον ζυγό k . Η εξίσωση (3.15) εκφράζει το ισοζύγιο ισχύος στον ζυγό k και ονομάζεται μιγαδική εξίσωση ροής φορτίου στον ζυγό k . Εν συνεχεία, χρησιμοποιούμε τον συμβολισμό:

$$\hat{V}_k = V_k \cdot e^{j\delta_k} \quad \& \quad Y_{km} = G_{km} + j \cdot B_{km} \quad (4.16)$$

Αντικαθιστώντας τις αγωγιμότητες και τις τάσεις από την (4.16) στην εξίσωση (4.15) και ξεχωρίζοντας πραγματικά και φανταστικά μέρη, παίρνουμε τις εξισώσεις ροής φορτίου σε πραγματική μορφή:

$$P_{Gk} - P_{Dk} = V_k^2 \cdot G_{kk} - V_k \cdot \sum_{m \in A(k)} V_m \cdot \alpha_{km} \quad (4.17)$$

$$Q_{Gk} - Q_{Dk} = -V_k^2 \cdot B_{kk} - V_k \cdot \sum_{m \in A(k)} V_m \cdot \beta_{km}$$

Όπου:

$$\alpha_{km} = -G_{km} \cdot \cos(\delta_k - \delta_m) - B_{km} \cdot \sin(\delta_k - \delta_m) \quad (4.18)$$

$$\beta_{km} = -G_{km} \cdot \sin(\delta_k - \delta_m) + B_{km} \cdot \cos(\delta_k - \delta_m)$$

Για ένα σύστημα n ζυγών υπάρχουν n εξισώσεις ενεργού και άεργου ισχύος της μορφής (4.17). Οι $2n$ αυτές εξισώσεις αποτελούν τις εξισώσεις ροής φορτίου με πραγματικές μεταβλητές. Ας σημειωθεί ότι η μορφή (4.17) δεν είναι η μοναδική, αφού αντί για την *πολική μορφή* των τάσεων μπορεί να χρησιμοποιηθεί η *καρτεσιανή*, και αντιστρόφως.

4.1.3 Θεμελίωση του Προβλήματος Ροών Φορτίου

Θεωρώντας τη γενική περίπτωση ενός ζυγού του συστήματος, με παραγωγή και φορτίο που εκφράζονται ως ισχείς, διακρίνουμε τα ακόλουθα 6 μεγέθη:

- P_G : παραγόμενη ενεργός ισχύς
- Q_G : παραγόμενη άεργος ισχύς
- P_D : ενεργός ισχύς φορτίου
- Q_D : άεργος ισχύς φορτίου
- V : μέτρο τάσης του ζυγού
- δ : φασική γωνία τάσης του ζυγού

Τα ηλεκτρικά αυτά μεγέθη αποτελούν τις μεταβλητές του προβλήματος και είναι 6 ανά ζυγό. Σε ένα σύστημα με n ζυγούς υπάρχουν συνολικά $6n$ μεταβλητές, οι οποίες μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις ομάδες:

- Τα φορτία, ή *μεταβλητές ζήτησης* (P_D , Q_D) χαρακτηρίζονται και σαν *μεταβλητές διαταραχής* και μπορούν να αποτελέσουν τα στοιχεία ενός διανύσματος διάστασης $2n$. Είναι οι ανεξάρτητες μεταβλητές του προβλήματος.
- Οι ισχείς παραγωγής (P_G , Q_G) χαρακτηρίζονται σαν *μεταβλητές ελέγχου* και μπορούν επίσης να θεωρηθούν σαν στοιχεία ενός άλλου διανύσματος $2n$. Ονομάζονται έτσι γιατί οι μονάδες παραγωγής αποτελούν τα κύρια μέσα ελέγχου της λειτουργίας του συστήματος.
- Οι τάσεις και οι γωνίες των ζυγών ανήκουν στις *μεταβλητές κατάστασης* και είναι εξαρτημένες. Οπότε μπορούν να αποτελέσουν τα στοιχεία ενός διανύσματος κατάστασης, διάστασης $2n$.

Η εγγεόμενη ενεργός και άεργος ισχύς σε ένα ζυγό i έχει χαρακτήρα παραγωγής όταν εισέρχεται στο δίκτυο ή χαρακτήρα φορτίου όταν εξέρχεται από αυτό και ορίζεται ως εξής:

$$P_i = P_{Gi} - P_{Di} \quad (4.19)$$

$$Q_i = Q_{Gi} - Q_{Di}$$

Οι ζυγοί ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας ταξινομούνται σε τρεις κατηγορίες:

- **Ζυγός Φορτίου (PQ)**, στον οποίο θεωρούνται γνωστές η ενεργός και άεργος ισχύς φορτίου και κατά συνέπεια οι εγχύσεις ενεργού και άεργου ισχύος ($P_i = -P_{Di}$, $Q_i = -Q_{Di}$). Ενώ, άγνωστα θεωρούνται το μέτρο και η γωνία τάσης του ζυγού.
- **Ζυγός παραγωγής (PV)**, στον οποίο είναι γνωστά η παραγόμενη ενεργός ισχύς και το μέτρο της τάσης και άγνωστα η παραγόμενη άεργος ισχύς και η γωνία της τάσης.
- **Ζυγός Ταλάντωσης ή Ζυγός Αναφοράς ($slack$)**, ο οποίος είναι ζυγός παραγωγής που χρησιμοποιείται για να αντισταθμίζει τις άγνωστες εξ αρχής απώλειες του δικτύου και γενικά για άμεση αντιμετώπιση των μεταβολών ισχύος. Στον ζυγό αυτό επιβάλλεται σταθερή τάση κατά μέτρο και γωνία, ενώ προσδιορίζονται η ενεργός και άεργος παραγόμενη ισχύς. Συνήθως, ορίζουμε για το ζυγό ταλάντωσης γωνία τάσης $\delta=0$.

Γενικά, το πρόβλημα προσδιορισμού των ροών φορτίου για ένα σύστημα με n ζυγούς ανάγεται στην επίλυση n μιγαδικών εξισώσεων (4.15) με n αγνώστους. Οι εξισώσεις αυτές συνδέουν ισχείς, τάσεις και γωνίες, δηλαδή τις τρεις χαρακτηριστικές μεταβλητές του προβλήματος. Τα ρεύματα δεν μας ενδιαφέρουν ποτέ απευθείας και υπολογίζονται εύκολα μετά την εύρεση των τάσεων και των γωνιών. Ωστόσο, το πρόβλημα αυτό παρουσιάζει τις εξής ιδιαιτερότητες:

- Οι εξισώσεις είναι μιγαδικές:** Δεδομένου ότι οι περισσότεροι ηλεκτρονικοί υπολογιστές έχουν τη δυνατότητα επεξεργασίας μιγαδικών αριθμών, η μιγαδική φύση των εξισώσεων ροής φορτίου δεν παρουσιάζει ιδιαίτερη δυσκολία. Αν δεν υπάρχει αυτή η δυνατότητα, θα πρέπει οι μιγαδικές εξισώσεις (4.14) να μετατραπούν σε πραγματικές εξισώσεις (4.17). Η διαδικασία αυτή ωστόσο διπλασιάζει τον αριθμό των προς επίλυση εξισώσεων σε $2n$.
- Οι εξισώσεις είναι μη γραμμικές:** Ο μη γραμμικός χαρακτήρας των εξισώσεων ροής φορτίου δυσχεραίνει κάπως την αναλυτική επίλυση του προβλήματος. Ωστόσο, με τη βοήθεια ισχυρών ψηφιακών υπολογιστών μπορούμε να επιλύσουμε το πρόβλημα αριθμητικά με επαναληπτικούς αλγορίθμους.

4.1.4 Μέθοδοι Επίλυσης του Προβλήματος Ροής Ισχύος

Οι ψηφιακές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τους υπολογισμούς των ροών φορτίου μπορούν να επιλύσουν με ικανοποιητική ακρίβεια τις μη γραμμικές αλγεβρικές εξισώσεις των ροών φορτίου για μεγάλα συστήματα με εκατοντάδες ζυγούς και απώλειες. Οι τρεις βασικές επαναληπτικές μέθοδοι που εφαρμόζονται στις μελέτες ροών φορτίου είναι:

- Μέθοδος Gauss-Seidel
- Μέθοδος Newton-Raphson
- Επαναληπτική Ταχεία Αποζευγμένη Μέθοδος (FDLF)

Και οι τρεις αυτές μέθοδοι ξεκινούν από μια αρχική λύση και με διαδοχικές ανακυκλώσεις προσεγγίζουν την τελική με τον ακόλουθο τρόπο: Η αρχική λύση χρησιμοποιείται στις εξισώσεις του προβλήματος για να βρεθεί μια καινούρια καλύτερη λύση. Εν συνεχεία, η δεύτερη λύση χρησιμοποιείται για να βρεθεί μια τρίτη ακόμα καλύτερη κ.ο.κ. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται συνεχώς έως ότου η λύση συγκλίνει. Μια τέτοια συγκλίνουσα διαδικασία ονομάζεται μέθοδος ανακυκλώσεως και η ποιότητά της κρίνεται από την ταχύτητα σύγκλισής της.

4.2 Βέλτιστη Ροή Ισχύος

Η βέλτιστη ροή ισχύος, γνωστή και με την αγγλική ορολογία "Optimal Power Flow" (OPF) αποτελεί μια εξέλιξη της επίλυσης του προβλήματος της Μελέτης Ροής Φορτίου. Αποσκοπεί στην βέλτιστη διαχείριση της παραγωγής και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας σε ένα ΣΗΕ ακολουθώντας μια αλληλουχία περιορισμών. Βασικό περιορισμό αποτελεί η οικονομική κατανομή ισχύος-φορτίου (Economic Dispatch) επιδιώκοντας την ελαχιστοποίηση του λειτουργικού κόστους των θερμικών μονάδων και ως επέκταση ολόκληρου του δικτύου, πάντα σε συνδυασμό με τους υπόλοιπους περιορισμούς του προβλήματος, που αποτελούν κυρίως τεχνικά όρια λειτουργίας του συστήματος.

Η διατήρηση της ασφάλειας του συστήματος απαιτεί κάθε στοιχείο του συστήματος να λειτουργεί στα επιθυμητά όρια ασφαλείας μόνιμης κατάστασης. Αυτό περιλαμβάνει το ελάχιστο και μέγιστο όριο εξόδου της γεννήτριας, τη μέγιστη ροή ισχύος στις γραμμές μεταφοράς και τους μετασχηματιστές καθώς και τη διατήρηση των τάσεων των ζυγών του συστήματος στα καθορισμένα όρια. Η τεχνική του OPF έχει γνωρίσει σημαντική ανάπτυξη σε υπολογιστικά συστήματα, για την επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης, κυρίως σε συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Έχει τη δυνατότητα επίλυσης προβλημάτων με βέλτιστο τρόπο, σε πολυσύνθετα συστήματα με αρκετά πολύπλοκους υπολογισμούς.

4.2.1 Μαθηματική Περιγραφή Προβλήματος

Η αντικειμενική συνάρτηση που χρησιμοποιείται στη Βέλτιστη Ροή Ισχύος συνήθως πρέπει να ελαχιστοποιηθεί. Σε μερικές περιπτώσεις όμως, όπως στη μεταφορά ισχύος μπορεί το πρόβλημα να διατυπωθεί με τέτοιο τρόπο που να απαιτείται μεγιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης. Το γενικό πρόβλημα της βέλτιστης ροής ισχύος που θα εξεταστεί στο κεφάλαιο αυτό έχει να κάνει με την ελαχιστοποίηση μιας γενικής αντικειμενικής συνάρτησης, ικανοποιώντας ταυτόχρονα κάποιους περιορισμούς για την ασφαλή λειτουργία του συστήματος. Συγκεκριμένα, το πρόβλημα διατυπώνεται ως εξής:

➤ Συμβολίζουμε την *Αντικειμενική Συνάρτηση Κόστους*: $F(x, u)$

Το πρόβλημα της βέλτιστης ροής ισχύος που στοχεύει στην ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης, περιλαμβάνει περιορισμούς ισότητας, ανισοτικούς περιορισμούς και όρια των μεταβλητών κατάστασης και των μεταβλητών ελέγχου. Ισχύουν οι εξής περιορισμοί:

$$g(x, u) = 0$$

$$h(x, u) \leq 0$$

$g(x, u)$: αναπαριστά τους μη γραμμικούς εξισωτικούς περιορισμούς (εξισώσεις ροής φορτίου) και

$h(x, u)$: είναι οι μη γραμμικοί ανισωτικοί περιορισμοί των διανυσμάτων x και u . Το διάνυσμα x αποτελείται από τις *εξαρτημένες μεταβλητές*, ενώ το διάνυσμα u τις *μεταβλητές ελέγχου*.

Οι *μεταβλητές ελέγχου* αποτελούν ποσότητες των στοιχείων του συστήματος οι οποίες μπορούν να προσαρμοστούν για την ελαχιστοποίηση του κόστους λειτουργίας. Συμβάλλουν δηλαδή στη διαμόρφωση του λειτουργικού κόστους και είναι οι ακόλουθες:

- Ενεργός ισχύς των γεννητριών
- Άεργος ισχύς των γεννητριών
- Πυκνωτές και επαγωγικά στοιχεία του συστήματος
- Καθαρή ανταλλαγή ενεργού ισχύος μέσω των γραμμών μεταφοράς/διανομής

Οι *εξαρτημένες μεταβλητές* αποτελούν τις μεταβλητές που δεν μπορούν να ελεγχθούν αλλά είναι απαραίτητο να βρίσκονται μέσα στα επιθυμητά όρια. Οι εξαρτημένες μεταβλητές συνοψίζονται σε:

- Μέτρο τάσης των ζυγών
- Γωνίες τάσης των ζυγών

Η αντικειμενική συνάρτηση μπορεί να πάρει διάφορες μορφές εκτός από αυτήν της ελαχιστοποίησης του κόστους παραγωγής. Συνηθίζεται να εκφράζεται η βέλτιστη ροή ισχύος ως η ελαχιστοποίηση των ηλεκτρικών απωλειών σε ένα σύστημα μεταφοράς ή ως η ελάχιστη απόκλιση της παραγωγής και άλλων ελέγχων από ένα βέλτιστο σημείο λειτουργίας. Ανεξάρτητα από την αντικειμενική συνάρτηση, η βέλτιστη ροή φορτίου πρέπει να λυθεί, ώστε όλοι οι περιορισμοί ισχύος να περιλαμβάνονται και να ικανοποιούνται στη λύση.

4.2.2 Συνάρτηση Κόστους

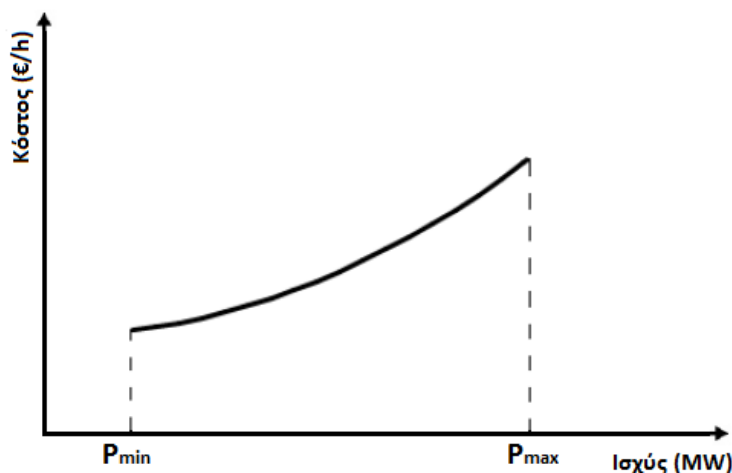
Η βέλτιστη ροή ισχύος καλείται να ελαχιστοποιήσει το λειτουργικό κόστος του συστήματος. Η λογική που ακολουθείται είναι ότι εντάσσονται αρχικά οι πιο φθηνές μονάδες παραγωγής, ενώ όσο αυξάνεται το φορτίο ζήτησης, αναγκαία θέτονται σε λειτουργία οι πιο ακριβές. Η τιμή του καυσίμου που καταναλώνεται από τις θερμικές μονάδες μετρίεται σε €/hour και η παραγωγή της σε MW. Για την ελαχιστοποίηση του κόστους απαιτείται η χρήση των χαρακτηριστικών καμπυλών κόστους καυσίμου ή καμπύλες εισόδου-εξόδου, των θερμικών μονάδων παραγωγής.

Η τετραγωνική και η κυβική αποτελούν τις πιο συνηθισμένες μεθόδους απεικόνισης της καμπύλης κόστους στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας. Επιλέγοντας την τετραγωνική μορφή η συνάρτηση κόστους ορίζεται:

$$C_i = (a_i + b_i \cdot P_i + c_i \cdot P_i^2) \cdot cost_{fuel} \quad (4.20)$$

Όπου P_i η ενεργός παραγωγή σε MW και a_i , b_i , c_i , οι συντελεστές της καμπύλης κόστους της μονάδας i .

Η **Εικόνα 4.6** περιέχει σε καρτεσιανό σύστημα αξόνων μία τυπική καμπύλη κόστους μιας θερμικής μονάδας παραγωγής. Ο κατακόρυφος άξονας αναφέρεται στο κόστος λειτουργίας (σε €) ανά ώρα για μία συγκεκριμένη τιμή ισχύος P (MW) της γεννήτριας λειτουργίας.

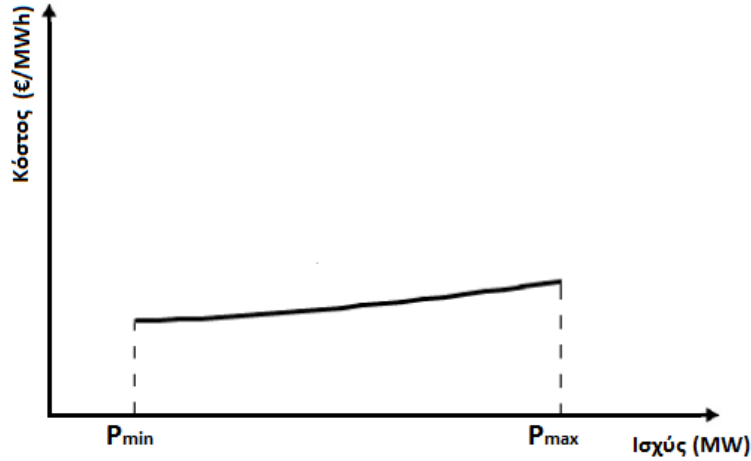


Εικόνα 4.6 : Τυπικό Ωριαίο Κόστος Λειτουργίας Θερμικής Μονάδας

Υπολογίζοντας την παράγωγο του ωριαίου κόστους λειτουργίας:

$$\frac{dC_i}{dP_i} = b_i + 2 \cdot C_i \cdot P_i \quad (4.21)$$

προκύπτει η καμπύλη διαφορικού κόστους λειτουργίας (€/MWh) όπως απεικονίζεται στην **Εικόνα 4.7**. Αποτελεί μία καμπύλη κόστους, αύξουσα πολυωνική, τμηματικά γραμμική και εκφράζει την αύξηση του κόστους παραγωγής σε περίπτωση που παραχθεί μία επιπλέον MWh από τη συγκεκριμένη μονάδα.



Εικόνα 4.7 : Διαφορικό Κόστος Λειτουργίας Θερμικής Μονάδας

4.2.3 Εξισώσεις Βέλτιστης Ροής Ισχύος

Οι εξισώσεις της βέλτιστης ροής ισχύος αναφέρονται στην ενεργό και άεργο ισχύ σε κάθε ζυγό. Αντικατοπτρίζουν την σωστή λειτουργία του συστήματος με σεβασμό στα όρια της τάσης. Η σωστή λειτουργία του συστήματος επιβάλλεται μέσω των εξισώσεων που ορίζουν ότι η ενεργός και η άεργος ισχύς σε κάθε ζυγό είναι μηδέν όπως ορίζονται στην συνέχεια.

$$G(V, \delta) = \begin{cases} P_i(V, \delta) - P_i^{net} \\ Q_i(V, \delta) - Q_i^{net} \end{cases} = 0 \quad (4.22)$$

Οι ισχείς P_i^{net} , Q_i^{net} αναφέρονται στην καθορισμένη ενεργό και άεργο ισχύ του ζυγού φορτίου (PQ), ενώ η τάση V στην εκάστοτε τάση κάθε ζυγού του συστήματος και η γωνία δ στην αντίστοιχη γωνία τάσης. Τέλος P_i και Q_i είναι η ενεργός και η άεργος ισχύς στην έξοδο και υπολογίζονται ως εξής:

$$P_i = P_{Load} + P_{Loss} \quad (4.23)$$

$$Q_i = Q_{Load} + Q_{Loss}$$

Όπου P_{Load} και Q_{Load} η ενεργός και η άεργος ζήτηση αντίστοιχα και P_{Loss} , Q_{Loss} οι εκάστοτε απώλειες ενεργού και αέργου ισχύος.

4.2.4 Ανισωτικοί Περιορισμοί

Ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας απαρτίζεται από ένα σύνολο περιορισμών, που διέπουν την ασφαλή λειτουργία του συστήματος. Πρόκειται για ανισότητες που οριοθετούν την λειτουργία των οντοτήτων ενός ΣΗΕ και ικανοποιούνται αποκλειστικά από τη βέλτιστη ροή ισχύος. Είναι αναγκαίο τα στοιχεία του συστήματος να ακολουθούν τους λειτουργικούς αυτούς περιορισμούς, για τη διατήρηση της ασφάλειας και της ευστάθειας του δικτύου.

❖ Ενεργός και άεργος παραγωγή γεννητριών

Η ενεργός και άεργος παραγωγή των γεννητριών οριοθετείται μεταξύ του τεχνικού της ελαχίστου και μέγιστου. Η λειτουργία των γεννητριών είναι περισσότερο αποδοτική και περισσότερο οικονομική όταν η παραγωγή της κυμαίνεται στα επιτρεπτά όρια, ενώ υπάρχει πιθανότητα η υπέρβαση των ορίων να αποφέρει τεχνικά προβλήματα στην ίδια τη γεννήτρια. Η ανισότητες της παραγωγής ορίζονται ως ακολούθως:

$$P_{G_i}^{min} \leq P_{G_i} \leq P_{G_i}^{max} \quad (4.24)$$

$$Q_{G_i}^{min} \leq Q_{G_i} \leq Q_{G_i}^{max}$$

Όπου P_{G_i} και Q_{G_i} η ενεργός και η άεργος ισχύς παραγωγής της θερμικής μονάδας i .

❖ Τάση και γωνία τάσης ζυγών

Σε κάθε ζυγό του εξεταζόμενου συστήματος, η τάση απαιτείται να διατηρείται σταθερή χωρίς μεγάλες αποκλίσεις, εντός των ορίων που έχουν οριστεί. Για τους ζυγούς που διαθέτουν κάποια μονάδα (PV), η τάση μπορεί εύκολα να ελεγχθεί και να ρυθμιστεί μέσω της ρύθμισης, κυρίως της άεργου παραγωγής της γεννήτριας. Τα όρια της τάσης και της γωνίας της τάσης για κάθε ζυγό ορίζονται ως:

$$V_i^{min} \leq V_i \leq V_i^{max} \quad (4.25)$$

$$\delta_i^{min} \leq \delta_i \leq \delta_i^{max}$$

Όπου V_i και δ_i η τάση και η γωνία τάσης του ζυγού i .

❖ Ροή γραμμών μεταφοράς / διανομής

Κάθε γραμμή μεταφοράς / διανομής επιτρέπει την μεταφορά ενός συγκεκριμένου ποσού ισχύος. Εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της γραμμής, το μήκος της και τον τύπο των ζυγών που συνδέει.

4.2.5 Μέθοδοι Επίλυσης Βέλτιστης Ροής Ισχύος

Σε όλες τις μεθόδους επίλυσης του προβλήματος βέλτιστης ροής ισχύος πρέπει να εφαρμοστούν, κάποιες σταθερές απαιτήσεις. Αυτές είναι:

- **Αξιοπιστία:** Οι υπολογισμοί για την επίλυση του προβλήματος πρέπει να είναι αξιόπιστοι για εφαρμογή σε πραγματικά χρόνο.
- **Ταχύτητα:** Οι μέθοδοι επίλυσης πρέπει να συγκλίνουν γρήγορα.
- **Ευελιξία:** Οι αλγόριθμοι πρέπει να είναι ευέλικτοι και να προσαρμόζουν ένα τεράστιο εύρος μοντέλων αντικειμενικών συναρτήσεων και περιορισμών.
- **Επεκτασιμότητα:** Ένας αλγόριθμος πρέπει να περιλαμβάνει ένα σχέδιο βασισμένο σε κανόνες και να διατηρεί εύκολα τα χαρακτηριστικά του για εφαρμογές σε πραγματικού χρόνο.

Το πρόβλημα της βέλτιστης ροής φορτίου επειδή ακριβώς πρόκειται για ένα πολύ μεγάλο, μη γραμμικό πρόβλημα μαθηματικού προγραμματισμού, χρειάστηκαν δεκαετίες για να αναπτυχθούν αποτελεσματικοί αλγόριθμοι για την επίλυσή του. Αλγόριθμοι που να μπορούν να επιλύουν πολύπλοκα συστήματα και ταυτόχρονα να χαρακτηρίζονται για την αξιοπιστία, την ταχύτητα, την ευελιξία και τη επεκτασιμότητα τους. Κάποιες από τις χρησιμοποιούμενες μεθόδους είναι οι ακόλουθες:

- Η μέθοδος Lagrange
- Η μέθοδος κλίσης (Gradient)
- Η μέθοδος Newton
- Ο γραμμικός προγραμματισμός (LP)
- Η μέθοδος εσωτερικού σημείου (IP)

Κάθε μέθοδος επίλυσης έχει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Πιο συγκεκριμένα η μέθοδος *Lagrange* αποτελεί τη βάση για πολλά προγράμματα οικονομικής κατανομής φορτίου σε πραγματικό χρόνο. Παρόλα αυτά δεν είναι αποτελεσματική για πολύπλοκες συναρτήσεις κόστους, εξαιτίας του δύσκολου υπολογισμού της παραμέτρου λ . Η μέθοδος κλίσης (*Gradient*) παρουσιάζει αργή απόκριση και συναντάται το πρόβλημα της σύγκλισης εξαιτίας των ανισωτικών περιορισμών. Η μέθοδος *Newton* έχει σαφώς πιο γρήγορη απόκριση από την μέθοδο *Gradient*, με τα αποτελέσματα που προκύπτουν να διατηρούν αρκετά χαμηλά το κόστος λειτουργίας με το μειονέκτημα ότι υπάρχει ιδιαίτερη ευαισθησία στον ορισμό των αρχικών συνθηκών.

Από την άλλη πλευρά η μέθοδος του γραμμικού προγραμματισμού (*LP*) είναι μία από τις πλήρως ανεπτυγμένες μεθόδους με ευρεία εφαρμογή και χρήση. Επεξεργάζεται εύκολα περιορισμούς ανισοτήτων ενώ παράλληλα μη γραμμικές αντικειμενικές συναρτήσεις και περιορισμοί μπορούν να επεξεργαστούν μετά από

γραμμικοποίηση. Επιπλέον παρέχει τη δυνατότητα για πολύ γρήγορους υπολογισμούς άλλα όχι και ιδιαίτερα ακριβής εξαιτίας της γραμμικότητας του προβλήματος. Τέλος, η μέθοδος εσωτερικού σημείου (*IP*) είναι ταχύτερη από εκείνη του γραμμικού προγραμματισμού, όμως και εκείνη υπάρχει περίπτωση να οδηγήσει σε λανθασμένα αποτελέσματα εάν το βήμα δεν έχει οριστεί καταλλήλως.

5. Περιγραφή Λογισμικού MATPOWER

5.1 Εισαγωγικά Στοιχεία

Το MATPOWER αποτελεί ένα πακέτο λογισμικού ανοικτού κώδικα MATLAB, που λειτουργεί προσομοιώνοντας την ηλεκτρική ενέργεια, ενώ ταυτοχρόνως χρησιμοποιεί έναν κώδικα ο οποίος είναι εύκολα κατανοητός και προσαρμόσιμος. Αναπτύχθηκε από τους Ray D. Zimmerman, Carlos E. Murillo-Sanchez και Deqiang Gan στο πανεπιστήμιο Cornell υπό την καθοδήγηση του Robert Thomas. Χρησιμοποιείται για την προσομοίωση τόσο της AC και DC Ροής Φορτίου, όσο και της Βέλτιστης Ροής Φορτίου (ΒΡΦ), κυρίως για ερευνητικούς και εκπαιδευτικούς σκοπούς.

Το πρόγραμμα περιλαμβάνει ένα σύνολο έτοιμων δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας με πολλαπλούς ζυγούς και ένα σύνολο εντολών για την προσομοίωση της ροής φορτίου με διάφορες μεθόδους. Είναι δυνατή η επεξεργασία των δικτύων των ζυγών και η προσθήκη επιπρόσθετων περιορισμών από το χρήστη. Οι διάφορες μέθοδοι ροής φορτίου παρέχουν μεγάλη ευελιξία στο χρήστη, καθώς μπορεί να εκτελέσει τις ροές φορτίου και να δει τα αποτελέσματα σε πραγματικό χρόνο. Επίσης έχει τη δυνατότητα παροχής εύκολων στη χρήση λειτουργιών για τον υπολογισμό της μεταφοράς ενέργειας και των παραγόντων διανομής της διακοπής λειτουργίας, καθώς επίσης υπολογίζει τις πρώτες και τις δεύτερες παραγώγους των εξισώσεων Ροής Φορτίου ενώ τέλος εφαρμόζει όλα τα συνηθισμένα μοντέλα μόνιμης κατάστασης που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση της Ροής Φορτίου.

Όσον αφορά τη **MATLAB**, αποτελεί το ιδανικότερο εργαλείο για επιστημονικούς υπολογισμούς, καθώς συνδυάζει μια γλώσσα υψηλού επιπέδου ιδανική για υπολογισμούς διανυσμάτων και πινάκων, μια πλατφόρμα διασταύρωσης του χρόνου εκτέλεσης στηριζόμενη σε ισχυρές μαθηματικές βιβλιοθήκες, ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον ανάπτυξης και ένα γραφικό περιβάλλον με εξαιρετικές δυνατότητες απεικόνισης.

5.2 Έναρξη

5.2.1 Απαιτήσεις Συστήματος

Για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιήθηκε η έκδοση 6.0 του MATPOWER, η οποία εγκαταστάθηκε και έτρεξε στην έκδοση R2014a του προγράμματος MATLAB. Απαραίτητα εργαλεία για να μπορέσει κάποιος να χρησιμοποιήσει το MATPOWER έκδοσης 6.0 είναι:

- Η έκδοση Matlab 7 (R2014) ή μεταγενέστερη.
- Το Optimization Toolbox της Matlab (απαιτείται μόνο για μερικούς αλγορίθμους B.P.Φ).

5.2.2 Εγκατάσταση Προγράμματος

Για την εγκατάσταση του προγράμματος πρέπει να εφαρμοστούν με τη σειρά τα εξής βήματα:

Βήμα 1: Μετάβαση στην ιστοσελίδα του *MATPOWER*.

Βήμα 2: Επιλογή της επιθυμητής έκδοσης του προγράμματος.

Βήμα 3: Φόρτωση δεδομένων στον υπολογιστή.

Βήμα 4: Αποσυμπίεση (unzip) του αρχείου φόρτωσης.

Βήμα 5: Τοποθέτηση των αρχεία σε ένα φάκελο του καταλόγου αρχείων της Matlab.

Βήμα 6: Προσθήκη των παρακάτω διευθύνσεων στο υπολογιστικό σύστημα της Matlab μέσω της εντολής *addpath()*.

- `addpath('C:\...\matpower6.0')`
- `addpath('C:\...\matpower6.0\t')`
- `addpath('C:\...\matpower6.0\most')`
- `addpath('C:\...\matpower6.0\most\t')`

Βήμα 7: Εκτέλεση της εντολής *test_matpower* στο παράθυρο εντολών της Matlab για την επικύρωση της διαδικασίας εγκατάστασης.

5.3 Μοντελοποίηση

Το *MATPOWER* περιέχει όλα τα συνήθη μοντέλα μόνιμης κατάστασης που χρησιμοποιούνται τυπικά για ανάλυση ροής ισχύος. Εσωτερικά, οι αγωγιμότητες όλων των συνιστωσών εκφράζονται σε ανά μονάδα σύστημα και οι γωνίες των σύνθετων ποσοτήτων σε ακτίνια. Αρχικά όλες οι αποσυνδεδεμένες γεννήτριες καθώς και οι κλάδοι, αφαιρούνται πριν την δημιουργία του μοντέλου για την επίλυση της ροής φορτίου ή την βέλτιστης ροής φορτίου. Όλοι οι ζυγοί αριθμούνται συνεχόμενα, ξεκινώντας από το νούμερο 1 και οι γεννήτριες αναδιατάσσονται με βάση τον αριθμό ζυγού.

Τα αρχεία δεδομένων που χρησιμοποιούνται στο *Matpower* είναι αρχεία Matlab, M ή MAT τύπου, τα οποία ορίζουν και επιστρέφουν μια μόνο δομή Matlab. Τα αρχεία M έχουν δομή κειμένου και μπορούν να τροποποιηθούν με κάθε επεξεργαστή κειμένου.

Τα πεδία της επιστρεφόμενης δομής είναι τα εξής:

- *baseMVA*
- *bus*
- *branch*
- *gen*
- *gencost* (προαιρετικά)

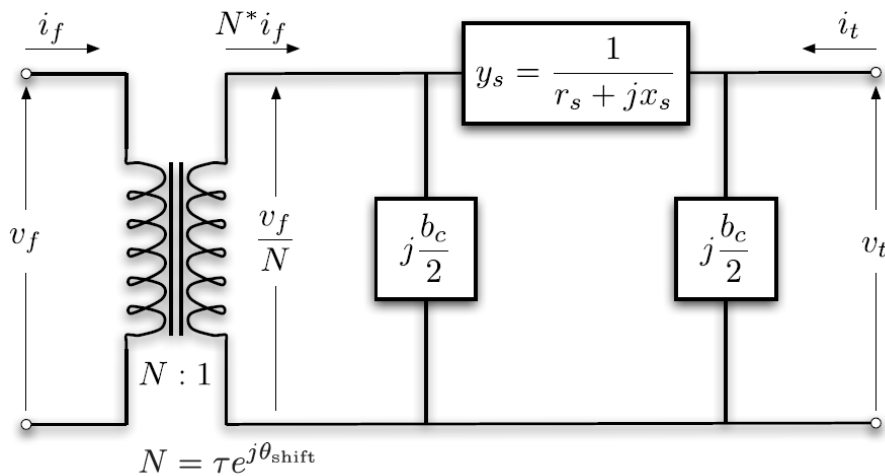
με το μέγεθος *baseMVA* να είναι βαθμωτό ενώ τα υπόλοιπα πίνακες, στους οποίους κάθε γραμμή αντιστοιχεί σε έναν μόνο ζυγό, κλάδο ή γεννήτρια. Ο αριθμός των γραμμών ανά ζυγό, κλάδο και γεννήτρια είναι n_b , n_l και n_g αντίστοιχα. Τέλος αν υπάρχει το πεδίο *gencost*, έχει n_g γραμμές όταν περιέχει στοιχεία μόνο για την ενεργό ισχύ ή $2n_g$ γραμμές όταν συμπεριλαμβάνεται και η άεργος ισχύς.

5.3.1 Κλάδοι

Όλες οι γραμμές μεταφοράς, οι μετασχηματιστές και οι μετατροπείς γωνίας φάσης απεικονίζονται με ένα κοινό μοντέλο γραμμών, το οποίο αποτελείται από το ισοδύναμο Π κύκλωμα της γραμμής με μιγαδική αντίσταση:

$$\mathbf{z}_s = \mathbf{r}_s + j \cdot \mathbf{x}_s \quad (5.1)$$

και συνολική επαγωγική (εγκάρσια) αγωγιμότητα \mathbf{b}_s , συνδεδεμένο σειριακά με έναν ιδανικό μετασχηματιστή γωνίας φάσης. Ο μετασχηματιστής, του οποίου η αναλογία ρύθμισης έχει μέτρο τ και γωνία μετατόπισης θ_{shift} βρίσκεται στο αριστερό άκρο του κλάδου όπως φαίνεται και στην **Εικόνα 5.1**.



Εικόνα 5.1 : Κοινό Μοντέλο Απεικόνισης Γραμμών Μεταφοράς, Μετασχηματιστών και Μετατροπέων Γωνίας Φάσης

Οι παράμετροι r_s , x_s , b_c , θ_{shift} ορίζονται απευθείας στις λίστες: BR_R, BR_X, BR_B, TAP και SHIFT, των αντίστοιχων γραμμών του πίνακα κλάδων. Οι διανυσματικές ροές ρεύματος i_f και i_t στα άκρα αναχώρησης και άφιξης του κλάδου, εκφράζονται με την χρήση μιας 2×2 μήτρας αγωγιμοτήτων, της μήτρας Y_{br} και των αντίστοιχων τάσεων τερματισμού u_f και u_t .

$$\begin{bmatrix} i_f \\ i_t \end{bmatrix} = Y_{br} \cdot \begin{bmatrix} u_f \\ u_t \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

Με την εν σειρά αγωγιμότητα στο ισοδύναμο κύκλωμα Π να γράφεται:

$$y_s = 1/z_s \quad (5.3)$$

η μήτρα αγωγιμοτήτων του κλάδου (των γραμμών) μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$Y_{br} = \begin{bmatrix} \left(y_s + j \cdot \frac{b_c}{2}\right) \cdot \frac{1}{\tau^2} & -y_s \frac{1}{\tau \cdot e^{-j\theta_{shift}}} \\ -y_s \frac{1}{\tau \cdot e^{j\theta_{shift}}} & \left(y_s + j \cdot \frac{b_c}{2}\right) \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

5.3.2 Γεννήτριες

Οι γεννήτριες μπορούν να μοντελοποιηθούν σαν σύνθετες εγχύσεις ισχύος σε συγκεκριμένο ζυγό. Για την i -οστή γεννήτρια, η ροή είναι:

$$s_g^i = p_g^i + j \cdot q_g^i \quad (5.5)$$

Όπου $S_g = P_g + j \cdot Q_g$ είναι το διάνυσμα μεγέθους $n_g \times 1$ όλων των εγχύσεων των γεννητριών. Τα ισοδύναμα των p_g^i σε MW και q_g^i σε MVA, πριν την μετατροπή σε ανά μονάδα σύστημα, ορίζονται στις στήλες PG και QG αντίστοιχα στην γραμμή i του πίνακα gen . Έτσι μπορεί να οριστεί ένας πίνακας C_g διαστάσεων $n_b \times n_g$, ώστε το (i, j) στοιχείο του να είναι 1 αν η γεννήτρια j βρίσκεται στο ζυγό i και 0 σε αντίθετη περίπτωση. Το διάνυσμα $n_b \times 1$ όλων των ροών ισχύος από γεννήτριες σε ζυγούς, μπορεί να εκφραστεί ως:

$$S_{g,bus} = C_g \cdot S_g \quad (5.6)$$

5.3.3 Φορτία

Τα φορτία σταθερής ισχύος μοντελοποιούνται σαν καθορισμένη καταναλισκόμενη ποσότητα ενεργού και άεργου ισχύος σε έναν ζυγό. Για τον i -οστό ζυγό το φορτίο είναι:

$$s_d^i = p_d^i + j \cdot q_d^i \quad (5.7)$$

Όπου $S_d = P_d + j \cdot Q_d$ υποδηλώνει το $n_b \times 1$ διάνυσμα του μιγαδικού φορτίου σε όλους τους ζυγούς. Τα ισοδύναμα των p_d^i σε MW και q_d^i σε MVAr πριν την μετατροπή σε ανά μονάδα σύστημα ορίζονται στις στήλες PD και QD αντίστοιχα στην γραμμή i του πίνακα bus . Σταθερή αντίσταση και φορτία σταθερού ρεύματος δεν δηλώνονται άμεσα, άλλα τα τμήματα σταθερής αντίστασης μοντελοποιούνται σαν εγκάρσιο στοιχείο όπως περιγράφεται ακολούθως. Τα κατανεμημένα φορτία μοντελοποιούνται σαν αρνητικές γεννήτριες και εμφανίζουν αρνητικές τιμές μιγαδικής ισχύος S_g .

5.3.4 Εγκάρσια Στοιχεία

Ένα εγκάρσια συνδεδεμένο στοιχείο όπως είναι για παράδειγμα ένας πυκνωτής ή ένα πηνίο, μοντελοποιείται σαν σταθερά γειωμένη αντίσταση ζυγού. Η αγωγιμότητα ενός τέτοιου στοιχείου σε i -οστό ζυγό δίνεται ως:

$$y_{sh}^i = g_{sh}^i + j \cdot b_{sh}^i \quad (5.8)$$

Όπου η ποσότητα $Y_{sh} = G_{sh} + j \cdot B_{sh}$ δηλώνει το διάνυσμα $n_b \times 1$ της εγκάρσιας αγωγιμότητας σε όλους τους ζυγούς. Οι παράμετροι g_{sh}^i και b_{sh}^i ορίζονται στις στήλες GS και BS, αντίστοιχα, της i -οστής γραμμής του πίνακα bus , σαν ισοδύναμη καταναλισκόμενη ενεργή ισχύς σε MW και εγχεόμενη άεργη σε MVAr σε ονομαστικό μέτρο τάσης 1 ανά μονάδα και μηδενική γωνία φάσης.

5.3.5 Εξισώσεις Δικτύου

Για ένα δίκτυο με n_b ζυγούς όλα τα στοιχεία σταθερής σύνθετης αντίστασης του μοντέλου ενσωματώνονται σε μια, μήτρα αγωγιμοτήτων ζυγού, Y_{bus} διαστάσεων $n_b \times n_b$ που συνδέει τις μιγαδικές εγχύσεις ρεύματος κάθε ζυγού I_{bus} με τις αντίστοιχες κομβικές τάσεις V , ως εξής:

$$I_{bus} = Y_{bus} \cdot V \quad (5.9)$$

Με το ίδιο σκεπτικό για δίκτυο με n_l κλάδους οι μήτρες αγωγιμοτήτων Y_f και Y_t , του $n_l \times n_b$ συστήματος, συσχετίζουν τις τάσεις ζυγών με τους διανυσματικούς πίνακες I_f και I_t (διάστασης $n_l \times 1$) των ρευμάτων αναχώρησης και άφιξης των κλάδων αντίστοιχα.

$$I_f = Y_f \cdot V \quad (5.10)$$

$$I_t = Y_t \cdot V$$

Εάν το σύμβολο $[\cdot]$ χρησιμοποιείται για να δείξει την διαδικασία με την οποία από ένα $n \times 1$ διάνυσμα δημιουργείται ο αντίστοιχος $n \times n$ διαγώνιος

πίνακας (με τα στοιχεία του διανύσματος να βρίσκονται στην διαγώνιο), τότε οι μήτρες αγωγιμότητας σχηματίζονται ως ακολούθως:

$$Y_f = [Y_{ff}] \cdot C_f + [Y_{ft}] \cdot C_t$$

$$Y_t = [Y_{tf}] \cdot C_f + [Y_{tt}] \cdot C_t$$

$$Y_{bus} = C_f^T \cdot Y_f + C_t^T \cdot Y_t + [Y_{sh}]$$

Οι ροές ρεύματος (που αναλύθηκαν πριν) μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό των ροών μιγαδικής ισχύος συναρτήσει των σύνθετων τάσεων των ζυγών.

$$S_{bus}(V) = [V] \cdot I_{bus}^* = [V] \cdot Y_{bus}^* \cdot V^* \quad (5.11)$$

$$S_f(V) = [C_f \cdot V] \cdot I_f^* = [C_f \cdot V] \cdot Y_f^* \cdot V^*$$

$$S_t(V) = [C_t \cdot V] \cdot I_t^* = [C_t \cdot V] \cdot Y_t^* \cdot V^*$$

Οι (κομβικές) εγχύσεις μεταξύ ζυγών, αντιστοιχίζονται έτσι με τις ροές από τα φορτία και τις γεννήτριες, ώστε να σχηματιστούν οι AC εξισώσεις του ενεργειακού ισοζυγίου, εκφραζόμενες σαν συνάρτηση των σύνθετων τάσεων ζυγών και των εγχύσεων γεννητριών σε μορφή σύνθετων πινάκων ως εξής:

$$g_s(V, S_g) = S_{bus}(V) + S_d - C_g \cdot S_g \quad (5.12)$$

5.4 Διάταξη Αρχείου Δεδομένων

Παρακάτω δίνονται οι δείκτες, τα ονόματα και η σημασία τους για κάθε στήλη των πινάκων *bus*, *gen*, *branch* και *gencost*:

• Διάταξη των Δεδομένων των Ζυγών (Πίνακας BUS)

1	BUS_I	αριθμός του ζυγού (1 to 29997)
2	BUS_TYPE	τύπος ζυγού <ul style="list-style-type: none"> ▪ PQ ζυγός = 1 ▪ PV ζυγός = 2 ▪ ζυγός αναφοράς = 3 ▪ απομονωμένος ζυγός = 4
3	PD	ζήτηση ενεργού ισχύος (MW)
4	QD	ζήτηση άεργου ισχύος (MVar)
5	GS	εγκάρσια αγωγιμότητα (MW (ζητούμενη) at V = 1.0 p.u.)
6	BS	εγκάρσια επιδεκτικότητα (MVar (εγχυόμενη) at V = 1.0 p.u.)

7	BUS_AREA	αριθμός περιοχής, 1-100
8	VM	μέτρο τάσης (p.u.)
9	VA	γωνία τάσης (degrees)
10	BASE_KV	βασική τιμή τάσης (kV)
11	ZONE	ζώνη απωλειών (1-999)
12	VMAX	μέγιστο μέτρο τάσης (p.u.)
13	VMIN	ελάχιστο μέτρο τάσης (p.u.)

Οι στήλες 14-17, οι οποίες τυπικά δεν εμφανίζονται στον πίνακα εισόδου δεδομένων, προστίθενται σε αυτόν μετά από τη λύση B.P.Φ.

14	LAM_P	πολλαπλασιαστής Lagrange της απόκλισης ενεργού ισχύος (u/MW)
15	LAM_Q	πολλαπλασιαστής Lagrange της απόκλισης άεργου ισχύος (u/MVAr)
16	MU_VMAX	Kuhn-Tucker πολλαπλασιαστής του ανώτερου ορίου τάσης (u/p.u.)
17	MU_VMIN	Kuhn-Tucker πολλαπλασιαστής του κατώτερου ορίου τάσης (u/p.u.)

• **Διάταξη των Δεδομένων των Γεννητριών (Πίνακας GEN)**

1	GEN_BUS	αριθμός ζυγού
2	PG	έξοδος ενεργού ισχύος (MW)
3	QG	έξοδος άεργου ισχύος (MVAr)
4	QMAX	μέγιστη έξοδος άεργου ισχύος (MVAr)
5	QMIN	ελάχιστη έξοδος άεργου ισχύος (MVAr)
6	VG	δεδομένο μέτρο τάσης (p.u.)
7	Mbase	συνολική βασική ισχύς MVA, καθορίζεται στη τιμή της baseMVA
8	GEN_STATUS	κατάσταση μηχανής: <ul style="list-style-type: none"> ▪ > 0 – μηχανή σε λειτουργία ▪ ≤ 0 – μηχανή εκτός λειτουργίας
9	Pmax	μέγιστη έξοδος ενεργού ισχύος (MW)
10	Pmin	ελάχιστη έξοδος ενεργού ισχύος (MW)
11	PC1	κατώτερη έξοδος ενεργού ισχύος της PQ καμπύλης ικανότητας (MW)

12	PC2	ανώτερη έξοδος ενεργού ισχύος της PQ καμπύλης ικανότητας (MW)
13	QC1MIN	ελάχιστη έξοδος άεργου ισχύος στο Pc1 (MVar)
14	QC1MAX	μέγιστη έξοδος άεργου ισχύος στο Pc1 (MVar)
15	QC2MIN	ελάχιστη έξοδος άεργου ισχύος στο Pc2 (MVar)
16	QC2MAX	μέγιστη έξοδος άεργου ισχύος στο Pc2 (MVar)
17	RAMP_AGC	κλίση ράμπας για το επόμενο φορτίο/AGC (MW/min)
18	RAMP_10	κλίση ράμπας για 10 λεπτά εφεδρείας (MW)
19	RAMP_30	κλίση ράμπας για 30 λεπτά εφεδρείας (MW)
20	RAMP_Q	κλίση ράμπας για άεργο ισχύ (MVar/min)
21	APF	παράγοντας συμμετοχής της περιοχής

Οι στήλες 22-25, οι οποίες τυπικά δεν εμφανίζονται στον πίνακα εισόδου δεδομένων, προστίθενται σε αυτόν μετά από τη λύση B.P.Φ.

22	MU_PMAX	Kuhn-Tucker πολλαπλασιαστής του ανώτερου ορίου της P_g (u/MW)
23	MU_PMIN	Kuhn-Tucker πολλαπλασιαστής του κατώτερου ορίου της P_g (u/MW)
24	MU_QMAX	Kuhn-Tucker πολλαπλασιαστής του ανώτερου ορίου της Q_g (u/MVar)
25	MU_QMIN	Kuhn-Tucker πολλαπλασιαστής του κατώτερου ορίου της Q_g (u/MVar)

• **Λιάταξη των Δεδομένων των Κλάδων (Πίνακας *BRANCH*)**

1	F_BUS	αριθμός ζυγού αναχώρησης (from)
2	T_BUS	αριθμός ζυγού άφιξης (to)
3	BR_R	αντίσταση (p.u.)
4	BR_X	αντίδραση (p.u.)
5	BR_B	συνολική επιδεκτικότητα φορτίου γραμμής (p.u.)
6	RATE_A	MVA εκτίμηση rating A (long term rating)
7	RATE_B	MVA rating B (short term rating)
8	RATE_C	MVA rating C (emergency rating)
9	TAP	λόγος M/Σ με tap (= 0 για τις γραμμές)
10	SHIFT	φασική γωνία μετατόπισης M/Σ (μοίρες), θετική => καθυστέρηση

11	BR_STATUS	αρχική κατάσταση κλάδου: <ul style="list-style-type: none"> ▪ 1 – σε λειτουργία ▪ 0 – εκτός λειτουργίας
12	ANGMIN	ελάχιστη διαφορά φάσης: $\text{angle}(V_f) - \text{angle}(V_i)$ (μοίρες)
13	ANGMAX	μέγιστη διαφορά φάσης: $\text{angle}(V_f) - \text{angle}(V_i)$ (μοίρες)

Οι στήλες 18-21, οι οποίες τυπικά δεν εμφανίζονται στον πίνακα εισόδου δεδομένων, προστίθενται σε αυτόν μετά από τη λύση B.P.Φ.

18	MU_SF	Kuhn-Tucker πολλαπλασιαστής του ορίου MVA στο ζυγό "from" (u/MVA)
19	MU_ST	Kuhn-Tucker πολλαπλασιαστής του ορίου MVA στο ζυγό "to" (u/MVA)
20	MU_ANGMIN	Kuhn-Tucker πολλαπλασιαστής του κατώτερου ορίου διαφοράς γωνιών (u/μοίρες)
21	MU_ANGMAX	Kuhn-Tucker πολλαπλασιαστής του ανώτερου ορίου διαφοράς γωνιών (u/μοίρες)

• **Διάταξη των Δεδομένων του Κόστους Γεννητριών (Πίνακας *GENCOST*)**

1	MODEL	κόστος μοντέλου: <ul style="list-style-type: none"> 1 – τμηματικά γραμμική συνάρτηση 2 – πολυωνυμική συνάρτηση
2	STARTUP	κόστος εκκίνησης σε US δολάρια
3	SHUTDOWN	κόστος τερματισμού σε US δολάρια
4	NCOST	αριθμός των συντελεστών κόστους για πολυωνυμική συνάρτηση κόστους, ή αριθμός των δεδομένων σημείων για τμηματικά γραμμική
5	COST	1 ^η στήλη των παραμέτρων κόστους Δεδομένα κόστους που ορίζουν τη συνολική συνάρτηση κόστους - Για πολυωνυμικό κόστος (πρώτα ο μεγαλύτερης τάξης συντελεστής): π.χ. c_2, c_1, c_0 όπου το πολυώνυμο είναι: $c_0 + c_1 * P + c_2 * P^2$ - Για τμηματικά γραμμικό κόστος: $x_0, y_0, x_1, y_1, x_2, y_2, \dots$ όπου τα $x_0 < x_1 < x_2 < \dots$ και τα σημεία $(x_0, y_0), (x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots$ είναι τα ακριανά και ενδιάμεσα σημεία της συνάρτησης κόστους.

Σημείωση: Αν η γεννήτρια έχει n γραμμές, τότε οι πρώτες n γραμμές της συνάρτησης κόστους περιέχουν το κόστος της ενεργού ισχύος, της παραγόμενης από την αντίστοιχη γεννήτρια. Αν το κόστος γεννήτριας έχει $2n$ γραμμές τότε οι $n+1$ ως $2n$ γραμμές περιέχουν τα κόστη άεργου ισχύος με την ίδια διάταξη.

5.4.1 Περίληψη Αρχείων

Το *MATPOWER* διαθέτει μεγάλο αριθμό αρχείων που προορίζονται για διαφορετικό σκοπό το καθένα. Στη συνέχεια, περιγράφεται συνοπτικά τα περιεχόμενά τους και τη λειτουργία τους.

<code>caseformat.m</code>	κείμενο για τη διάταξη αρχείου δεδομένων εισόδου
<code>loadcase.m</code>	δεδομένα φορτίων από ένα case file ή struct σε πίνακες δεδομένων εισόδου
<code>savecase.m</code>	αποθηκεύει του πίνακες δεδομένων σε ένα case file
<code>printpf.m</code>	εκτυπώνει τη λυμένη PF ή OPF case
<code>idx_area.m</code>	ορισμοί δεικτών των στηλών για τον πίνακα <code>areas</code>
<code>idx_brch.m</code>	ορισμοί δεικτών των στηλών για τον πίνακα <code>branch</code>
<code>idx_bus.m</code>	ορισμοί δεικτών των στηλών για τον πίνακα <code>bus</code>
<code>idx_cost.m</code>	ορισμοί δεικτών των στηλών για τον πίνακα <code>gencost</code>
<code>idx_gen.m</code>	ορισμοί δεικτών των στηλών για τον πίνακα <code>gen</code>
<code>totcost.m</code>	υπολογίζει το συνολικό κόστος για δεδομένη κατανομή
<code>rundcopf.m</code>	εκτελεί μια DC OPF
<code>rundcpf.m</code>	εκτελεί μια DC ροή φορτίου
<code>runduopf.m</code>	εκτελεί μια DC OPF με αποσυνδεδεμένη μονάδα
<code>runopf.m</code>	εκτελεί μια βέλτιστη ροή φορτίου (OPF)
<code>runpf.m</code>	εκτελεί μια ροή φορτίου
<code>runuopf.m</code>	εκτελεί μια OPF με μονάδα εκτός λειτουργίας
<code>runcomp.m</code>	εκτελεί 2 OPF και συγκρίνει αποτελέσματα
<code>compare.m</code>	εκτυπώνει περιληπτικά τις διαφορές μεταξύ 2 λυμένων cases
<code>hasPQcap.m</code>	ελέγχει για περιορισμούς της P-Q καμπύλης ικανότητας της γεννήτριας
<code>makeB.m</code>	κατασκευάζει τον B πίνακα που χρησιμοποιείται από την ταχεία αποζευγμένη ροή φορτίου

<code>getlosses.m</code>	υπολογίζει τις απώλειες δικτύου
<code>isload.m</code>	ελέγχει αν οι γεννήτριες είναι πρακτικά κατανεμημένα φορτία
<code>load2disp.m</code>	μετατρέπει ένα σταθερό φορτίο σε dispatchable
<code>mpoption.m</code>	θέτει τις επιλογές του MATPOWER
<code>applychanges.m</code>	ενημερώνει τα στιγμιότυπα πινάκων με τις καινούργιες αλλαγές

5.5 Ροή Φορτίου (PF)

Για να εκτελεστεί μια απλή ροή φορτίου με τη μέθοδο Newton-Raphson, π.χ. για το σύστημα 9 ζυγών, που υπάρχει στα αποθηκευμένα αρχεία του MATPOWER με το όνομα *case9.m*, με τις επιλογές του προκαθορισμένου αλγορίθμου, αρκεί να πληκτρολογηθεί στο παράθυρο εντολών της Matlab η εξής εντολή:

```
>> runpf( 'case9' ) ;
```

Εκτός από το να εκτυπωθεί η έξοδος στην οθόνη, γεγονός το οποίο γίνεται προκαθορισμένα, η *runpf()* επιστρέφει τη λύση σε ορίσματα εξόδου:

```
>> [ baseMVA, bus, gen, branch, success, et ] =  
    runpf( 'casename' ) ;
```

Οι τιμές της λύσης αποθηκεύονται ως εξής:

<code>bus(:, VM)</code>	πλάτη τάσεων των ζυγών
<code>bus(:, VA)</code>	γωνίες τάσεων των ζυγών
<code>gen(:, PG)</code>	εγχύσεις γεννήτριας ενεργού ισχύος
<code>gen(:, QG)</code>	εγχύσεις γεννήτριας άεργου ισχύος
<code>branch(:, PF)</code>	εγγεόμενη ενεργός ισχύς στο άκρο “from” του κλάδου
<code>branch(:, PT)</code>	εγγεόμενη ενεργός ισχύς στο άκρο “to” του κλάδου
<code>branch(:, QF)</code>	εγγεόμενη άεργος ισχύς στο άκρο “from” του κλάδου
<code>branch(:, QT)</code>	εγγεόμενη άεργος ισχύς στο άκρο “to” του κλάδου
<code>success</code>	1 = επιλύθηκε επιτυχώς, 0 = αδύνατο να λυθεί
<code>et</code>	υπολογισμός του απαιτούμενου χρόνου για τη λύση

Το MATPOWER έχει πέντε τεχνικές επίλυσης ροής φορτίου, οι οποίες μπορούν να προσπελαστούν μέσω της συνάρτησης *runpf()*. Η προκαθορισμένη

τεχνική επίλυσης ροής φορτίου βασίζεται σε μια πρότυπη μέθοδο Newton. Οι αλγόριθμοι 2 και 3 είναι παραλλαγές της ταχείας αποζευγμένης μεθόδου ενώ ο αλγόριθμος 4 είναι η πρότυπη μέθοδος Gauss-Seidel. Για να χρησιμοποιηθεί μία από τις τεχνικές επίλυσης ροής φορτίου αντί της πρότυπης μεθόδου Newton, πρέπει να τεθεί ρητά η επιλογή *PF_ALG*. Για παράδειγμα, για την ταχεία αποζευγμένη μέθοδο 2, πληκτρολογούμε:

```
>> mpropt = mproption('PF_ALG', 2 );  
>> runpf('casename', mpropt );
```

Η τελευταία μέθοδος είναι μια DC ροή φορτίου, η οποία προκύπτει εκτελώντας την *runpf()* με την επιλογή *PF_DC* να τίθεται ίση με το 1, ή ισοδύναμα εκτελώντας απευθείας την *rundcpf()*. Η DC ροή φορτίου προκύπτει με μια άμεση, μη επαναληπτική μέθοδο των γωνιών τάσεων των ζυγών από τις καθορισμένες εγχύσεις ζυγών ενεργού ισχύος.

Για τις τεχνική επίλυσης της AC ροής φορτίου, εάν η επιλογή *ENFORCE_Q_LIMS* τεθεί ίση με 1 (η προκαθορισμένη τιμή είναι 0), τότε αν το όριο άεργου ισχύος κάποιας γεννήτριας παραβιαστεί μετά την εκτέλεση της AC ροής φορτίου, ο αντίστοιχος ζυγός μετατρέπεται σε ένα PQ ζυγό, με την άεργο έξοδο να τίθεται ίση με το όριο και η περίπτωση ξαναεκτελείται. Το πλάτος της τάσης στο ζυγό θα αποκλίνει από την καθορισμένη τιμή, έτσι ώστε να ικανοποιεί το όριο άεργου ισχύος. Αν η γεννήτρια του ζυγού αναφοράς φθάσει ένα όριο άεργου ισχύος και ο ζυγός μετατραπεί σε έναν PQ ζυγό, ο πρώτος απομένων PV ζυγός θα χρησιμοποιηθεί σαν ο ζυγός αναφοράς για την επόμενη επανάληψη. Αυτό μπορεί να επηρεάσει την έξοδο ενεργού ισχύος αυτής της γεννήτριας, όντας ελαφρά εκτός από τις καθορισμένες τιμές.

Η παρουσία των τεχνικών επίλυσης ροής φορτίου, με εξαίρεση της Gauss-Seidel, μπορεί να αποδειχθεί έξοχη ακόμα και για συστήματα μεγάλης κλίμακας, εφόσον οι αλγόριθμοι και η υλοποίηση έχουν το πλεονέκτημα του χειρισμού του κατασκευασμένου αραιού πίνακα της MATLAB.

5.6 Βέλτιστη Ροή Φορτίου (OPF)

Το *MATPOWER* περιέχει πολλές τεχνικές επίλυσης για το πρόβλημα βέλτιστης ροής φορτίου (BPΦ), οι οποίες μπορούν να προσπελαστούν μέσω της συνάρτησης *runopf()*. Για να εκτελεστεί μια βέλτιστη ροή φορτίου για το σύστημα 30 ζυγών του οποίου τα δεδομένα βρίσκονται στο αποθηκευμένο αρχείο με το όνομα *case30.m*, με τις επιλογές του προκαθορισμένου αλγορίθμου, αρκεί να πληκτρολογηθεί στο παράθυρο εντολών της Matlab η εξής εντολή:

```
>> runopf('case30') ;
```

Εκτός από το ότι εκτυπώνεται η έξοδος στην οθόνη, γεγονός το οποίο γίνεται προκαθορισμένα, η *runopf()* επιστρέφει προαιρετικά τη λύση σε ορίσματα εξόδου:

```
>> [baseMVA, bus, gen, gencost, branch, f, success, et] =  
      runopf('casename');
```

Το πρόβλημα B.P.Φ περιλαμβάνει ακόμα τις εξής τιμές:

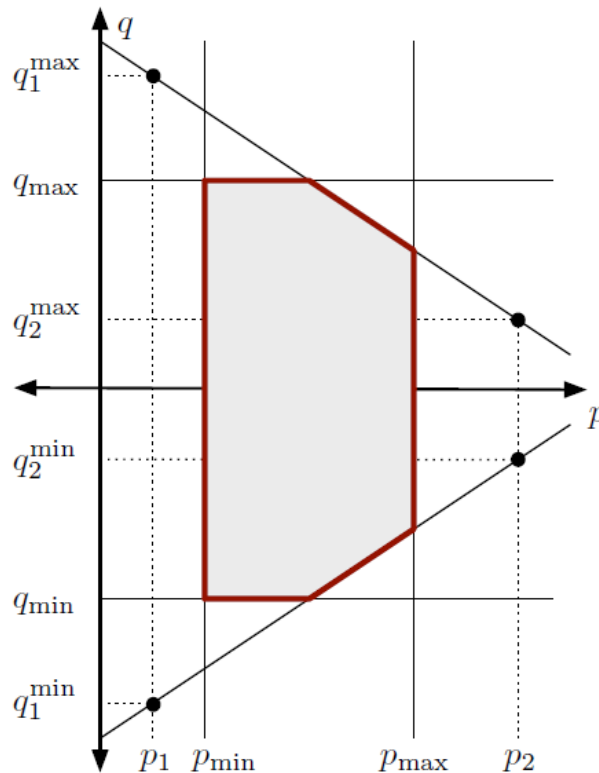
<code>bus(:, LAM_P)</code>	πολλαπλασιαστής Lagrange για την απόκλιση της ενεργού ισχύος του ζυγού
<code>bus(:, LAM_Q)</code>	πολλαπλασιαστής Lagrange για την απόκλιση της αέργου ισχύος του ζυγού
<code>bus(:, MU_VMAX)</code>	Kuhn-Tucker πολλαπλασιαστής για το ανώτατο όριο τάσης ζυγού
<code>bus(:, MU_VMIN)</code>	Kuhn-Tucker πολλαπλασιαστής για το κατώτατο όριο τάσης ζυγού
<code>gen(:, MU_PMAX)</code>	Kuhn-Tucker πολλαπλασιαστής για το ανώτατο όριο ενεργού ισχύος της γεννήτριας
<code>gen(:, MU_PMIN)</code>	Kuhn-Tucker πολλαπλασιαστής για το κατώτατο όριο ενεργού ισχύος της γεννήτριας
<code>gen(:, MU_QMAX)</code>	Kuhn-Tucker πολλαπλασιαστής για το ανώτατο όριο αέργου ισχύος της γεννήτριας
<code>gen(:, MU_QMIN)</code>	Kuhn-Tucker πολλαπλασιαστής για το κατώτατο όριο αέργου ισχύος της γεννήτριας
<code>branch(:, MU_SF)</code>	Kuhn-Tucker πολλαπλασιαστής για το όριο MVA στο άκρο "from" του κλάδου
<code>branch(:, MU_ST)</code>	Kuhn-Tucker πολλαπλασιαστής για το όριο MVA στο άκρο "to" του κλάδου
<code>f</code>	τελική τιμή αντικειμενικής συνάρτησης

Το *MATPOWER* μπορεί να χρησιμοποιήσει έναν αριθμό διαφορετικών τεχνικών επίλυσης B.P.Φ. οι οποίες και αναφέρονται συνοπτικά στην παράγραφο 5.4.1. Η υλοποίηση B.P.Φ του *MATPOWER* δεν είναι ικανή ακόμα να χειριστεί μη συνδεδεμένα ή μη ενεργοποιημένα τμήματα του δικτύου.

5.7 P-Q Καμπύλες Ικανότητας των Γεννητριών

Η παραδοσιακή διατύπωση AC B.P.Φ μοντελοποιεί τις P-Q καμπύλες ικανότητας των γεννητριών σαν απλούς περιορισμούς από τις P_{min} , P_{max} , Q_{min} και Q_{max} στήλες του πίνακα *gen*. Σε νεότερες εκδόσεις του *MATPOWER*

(συγκεκριμένα από την έκδοση 3.2 και μετά), περιλαμβάνονται 6 νέες στήλες στον πίνακα *gen* για τον καθορισμό επιπλέον κεκλιμένων ανώτερων και κατώτερων τμημάτων των καμπυλών ικανότητας. Οι νέες στήλες είναι οι *PC1*, *PC2*, *QC1_{min}*, *QC1_{max}*, *QC2_{min}*, και *QC2_{max}*. Η περιοχή εμπιστοσύνης για τη λειτουργία της γεννήτριας με αυτή την πιο γενική καμπύλη ικανότητας επεξηγείται από την σκιασμένη περιοχή στην **Εικόνα 5.2**.



Εικόνα 5.2 : Περιοχή Εμπιστοσύνης για τη Λειτουργία της Γεννήτριας

Οι ειδικές τιμές των *PC1* και *PC2* δεν είναι τόσο σημαντικές και μπορούν να τεθούν για ευκολία ίσες με το P_{min} και το P_{max} , αντίστοιχα. Το σημαντικό είναι να τεθούν τα αντίστοιχα όρια QCn_{max} , QCn_{min} με τέτοιο τρόπο, ώστε τα δύο σημεία αποτελεσμάτων να ορίζουν την επιθυμητή γραμμή σχετικά με το κεκλιμένο ανώτερο (κατώτερο) τμήμα της καμπύλης ικανότητας.

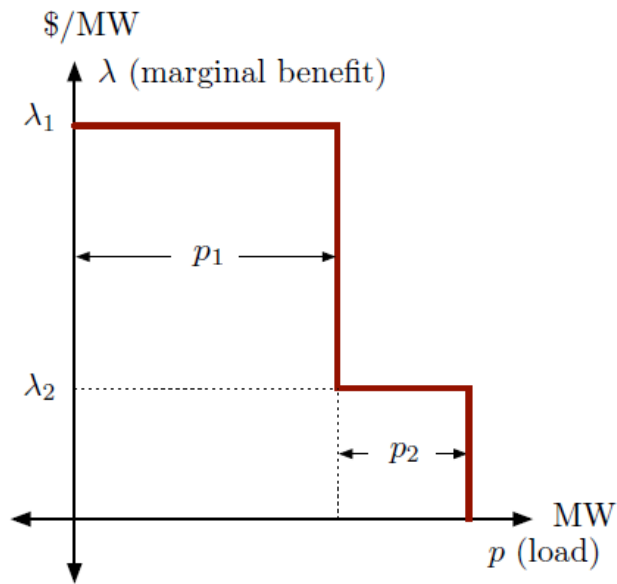
5.8 Κατανεμημένα Φορτία

Γενικά, κατανεμημένα ή ευαίσθητα στην τιμή φορτία μπορούν να μοντελοποιηθούν σαν αρνητικές εγχύσεις ενεργού ισχύος με τα σχετικά κόστη. Εάν για μία γεννήτρια ισχύει:

$$P_{min} < P_{max} = 0$$

τότε είναι στα αλήθεια ένα κατανεμημένο φορτίο.

Έστω ένα φορτίο έχει μια καμπύλη ζήτησης, όπως η ακόλουθη **Εικόνα 5.3**:

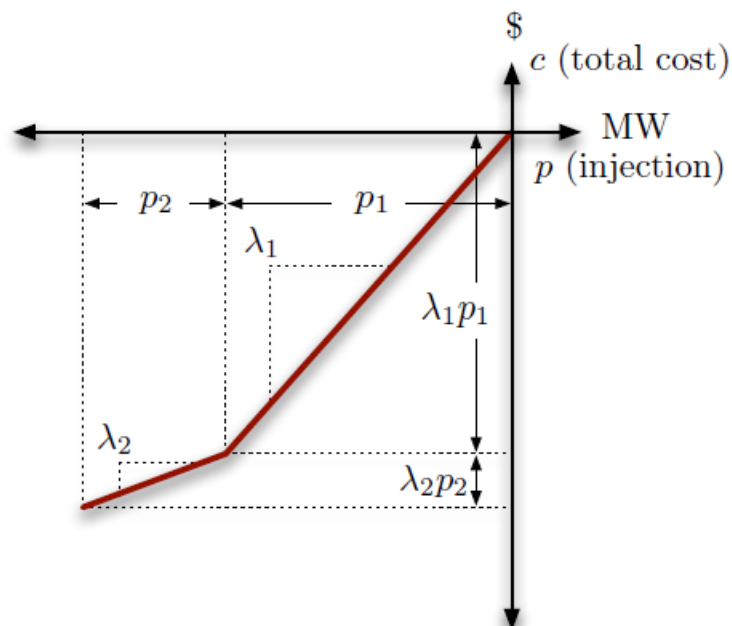


Εικόνα 5.3 : Καμπύλη Ζήτησης του Φορτίου

Με βάση την καμπύλη αυτή, το φορτίο καταναλώνει:

- μηδέν αν η τιμή είναι μεγαλύτερη της λ_1 ,
- P_1 αν η τιμή είναι μικρότερη της λ_1 αλλά μεγαλύτερη της λ_2 , και
- P_2 αν η τιμή είναι ίση ή μικρότερη της λ_2 .

Αυτό υποδηλώνει την τμηματικά γραμμική καμπύλη κόστους του σχήματος (**Εικόνα 5.4**):



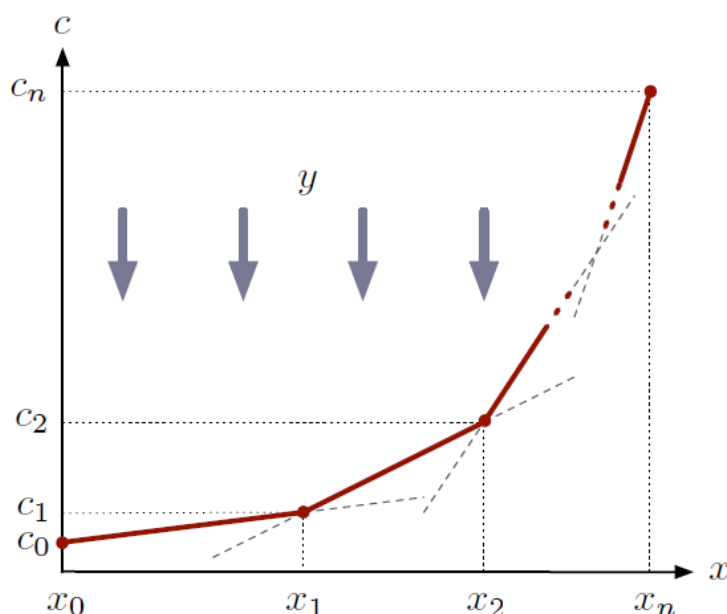
Εικόνα 5.4 : Τμηματικά Γραμμική Καμπύλη Κόστους Συναρτήσει της Ισχύος

Όταν υπάρχουν κατανεμημένα φορτία, εμφανίζεται το ζήτημα της άεργου κατανομής. Αν τα όρια παραγωγής Q_{min}/Q_{max} για την “αρνητική γεννήτρια” δεν τεθεί ίση με το μηδέν, τότε ο αλγόριθμος θα κατανέμει την άεργο έγχυση στην πιο κατάλληλη τιμή. Σε περίπτωση που αυτό δεν είναι φυσιολογική συμπεριφορά του φορτίου, θεωρείται ότι τα κατανεμημένα φορτία διατηρούν έναν σταθερό παράγοντα ισχύος στην γενικευμένη διατύπωση. Εφαρμόζεται ο μηχανισμός για να τεθούν επιπλέον γενικοί γραμμικοί περιορισμοί, έτσι ώστε να περιληφθούν αυτόματα περιορισμοί για αυτές τις εγχύσεις, που να κρατήσουν τον ρυθμό του P_g και Q_g σταθερό.

Αυτός ο ρυθμός εξάγεται από τις τιμές του P_{min} , και είτε του Q_{min} (για επαγωγικά φορτία) είτε του Q_{max} (για χωρητικά φορτία) στον πίνακα **gen**. Είναι σημαντικό να τεθούν κατάλληλα, έχοντας υπόψη ότι η P_G είναι αρνητική και ότι, για φυσιολογικά επαγωγικά φορτία, η Q_G πρέπει να είναι επίσης αρνητική (ένα θετικό άεργο φορτίο είναι μια αρνητική άεργος έγχυση).

5.9 Τμηματικά Γραμμικά Κόστη

Οι διατυπώσεις B.P.Φ στο MATPOWER επιτρέπουν τον προσδιορισμό των τμηματικά γραμμικών και κυρτών συναρτήσεων κόστους για την ενεργό ή άεργο έξοδο της γεννήτριας. Ένα παράδειγμα μιας τέτοιας καμπύλης κόστους φαίνεται στην **Εικόνα 5.5** που ακολουθεί.



Εικόνα 5.5 : Τμηματικά Γραμμική και Κυρτή Συνάρτηση Κόστους

Αυτό το μη διαφορίσιμο κόστος μοντελοποιείται χρησιμοποιώντας μια επιπλέον βοηθητική μεταβλητή κόστους για κάθε τέτοια καμπύλη κόστους, και

επιπρόσθετους περιορισμούς για αυτή τη μεταβλητή και την P_g , έναν για κάθε τμήμα της καμπύλης.

Οι περιορισμοί συνθέτουν ένα κυρτό ισοδύναμο “basin” που απαιτεί η μεταβλητή κόστους να βρίσκεται στην επιγραφή της καμπύλης κόστους. Όταν το κόστος ελαχιστοποιείται, η μεταβλητή κόστους θα ωθηθεί ενάντια σε αυτό το basin. Αν y είναι η βοηθητική μεταβλητή κόστους, τότε η συνεισφορά του κόστους της γεννήτριας στο συνολικό κόστος είναι ακριβώς y . Στην παραπάνω περίπτωση οι δύο επιπρόσθετοι απαιτούμενοι περιορισμοί είναι:

$$1) \quad y \geq m_1(P_g - x_0) + c_0 \quad (\text{η } y \text{ πρέπει να βρίσκεται πάνω από το πρώτο τμήμα})$$

$$2) \quad y \geq m_2(P_g - x_1) + c_1 \quad (\text{η } y \text{ πρέπει να βρίσκεται πάνω από το δεύτερο τμήμα})$$

όπου m_1 και m_2 είναι οι κλίσεις των δύο τμημάτων.

Επίσης, απαραίτητοι είναι οι περιορισμοί για την P_g : $P_{\min} \leq P_g \leq P_{\max}$. Το πρόσθετο τμήμα του κόστους που συνεισφέρει αυτή η γεννήτρια είναι y .

Αυτή η διατύπωση της περιορισμένης μεταβλητής κόστους (CCV) χρησιμοποιείται από όλες τις τεχνικές επίλυσης B.P.Φ του *MATPOWER* για χειρισμό των τμηματικά γραμμικών συναρτήσεων κόστους.

6. Υλοποίηση Συστήματος Ελέγχου Φόρτισης Ηλεκτρικών Οχημάτων

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η ανάλυση και υλοποίηση ενός συστήματος διαχείρισης φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων σε ένα δίκτυο διανομής. Η μαζική φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων τροποποιεί σημαντικά το προφίλ ζήτησης του δικτύου με συνέπεια την έντονη διακύμανση των τάσεων και την υπερφόρτισή του. Ο υπό ανάλυση αλγόριθμος έχει ως στόχο την βέλτιστη λειτουργία του δικτύου λαμβάνοντας υπόψη τις ενεργειακές ανάγκες των ηλεκτρικών οχημάτων και τους περιορισμούς που επιβάλλει ο διαχειριστής του δικτύου. Σκοπός είναι η φόρτιση των οχημάτων να πραγματοποιηθεί στα χρονικά πλαίσια που θέτει ο χρήστης του οχήματος με την παράλληλη εκμετάλλευση του οχήματος από τον διαχειριστή προς όφελος του δικτύου.

Βασικά κριτήρια σύμφωνα με τα οποία αναπτύχθηκε ο αλγόριθμος αποτελούν τα εξής:

- Διακύμανση της τάσης του δικτύου σε όρια τα οποία θέτει ο διαχειριστής.
- Ελαχιστοποίηση των απωλειών του δικτύου.
- Ελαχιστοποίηση του κόστους φόρτισης των οχημάτων σύμφωνα με την τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας κάθε χρονική στιγμή.

6.1 Μοντέλο Ηλεκτρικού Οχήματος

Στην συγκεκριμένη υποενότητα αναπτύσσεται λεπτομερώς το μοντέλο του ηλεκτρικού οχήματος το οποίο θεωρήθηκε για τις ανάγκες της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας. Πρόκειται για όχημα κατηγορίας PHEV (Plug-in Hybrid Electric Vehicle) κύριο γνώρισμα της οποίας αποτελεί η δυνατότητα την οποία έχει το όχημα να συνδέεται στο δίκτυο και να ανταλλάσει ηλεκτρική ενέργεια με αυτό. Η ροή της ηλεκτρικής ενέργειας που ανταλλάσει το ηλεκτρικό όχημα με το δίκτυο είναι αμφίδρομη υλοποιώντας τις λειτουργίες Grid to Vehicle (G2V) και Vehicle to Grid (V2G) οι οποίες και αναπτύχθηκαν στο τρίτο κεφάλαιο.

6.1.1 Χρόνοι Φόρτισης

Βασικό χαρακτηριστικό του συγκεκριμένου μοντέλου αποτελεί η ευελιξία που παρέχει ο χρήστης στον διαχειριστή του δικτύου σχετικά με τις απαιτήσεις του για τον τρόπο και τον χρόνο φόρτισης του οχήματος. Πιο συγκεκριμένα κατά την εισαγωγή του οχήματος στο σύστημα ελέγχου φόρτισης απαιτείται από τον

χρήστη να παρέχει στο σύστημα τον ακριβή χρόνο κατά τον οποίο το όχημα ενδέχεται να παραμείνει συνδεδεμένο για φόρτιση. Έτσι λοιπόν ορίζονται οι παρακάτω χρόνοι:

- T_{in} : Η ακριβής ώρα εισαγωγής του ηλεκτρικού οχήματος στο υπολογιστικό σύστημα για την φόρτιση του.
- $T_{charging}$: Η διάρκεια φόρτισης του οχήματος η οποία αποφασίζεται από τον χρήστη κατά την ώρα άφιξης του οχήματος.
- T_{out} : Η αναμενόμενη ώρα αναχώρησης του ηλεκτρικού οχήματος και αποσύνδεσής του από το δίκτυο.

Ο χρόνος T_{out} υπολογίζεται από το σύστημα χρησιμοποιώντας τα δεδομένα από την ώρα άφιξης και την διάρκεια φόρτισης του οχήματος ως εξής:

$$T_{out} = T_{in} + T_{charging} \quad (6.1)$$

Η αποσύνδεση του οχήματος από το δίκτυο βρίσκεται στην ευχέρεια του χρήστη του οχήματος. Ο χρήστης μπορεί να επιλέξει να παραλάβει το όχημα του πριν την αναμενόμενη ώρα αποχώρησης από τον σταθμό φόρτισης ή μετά το πέρας του χρονικού ορίου που ο ίδιος έχει θέσει. Τα αποτελέσματα στην μία ή στην άλλη περίπτωση περιγράφονται στην συνέχεια.

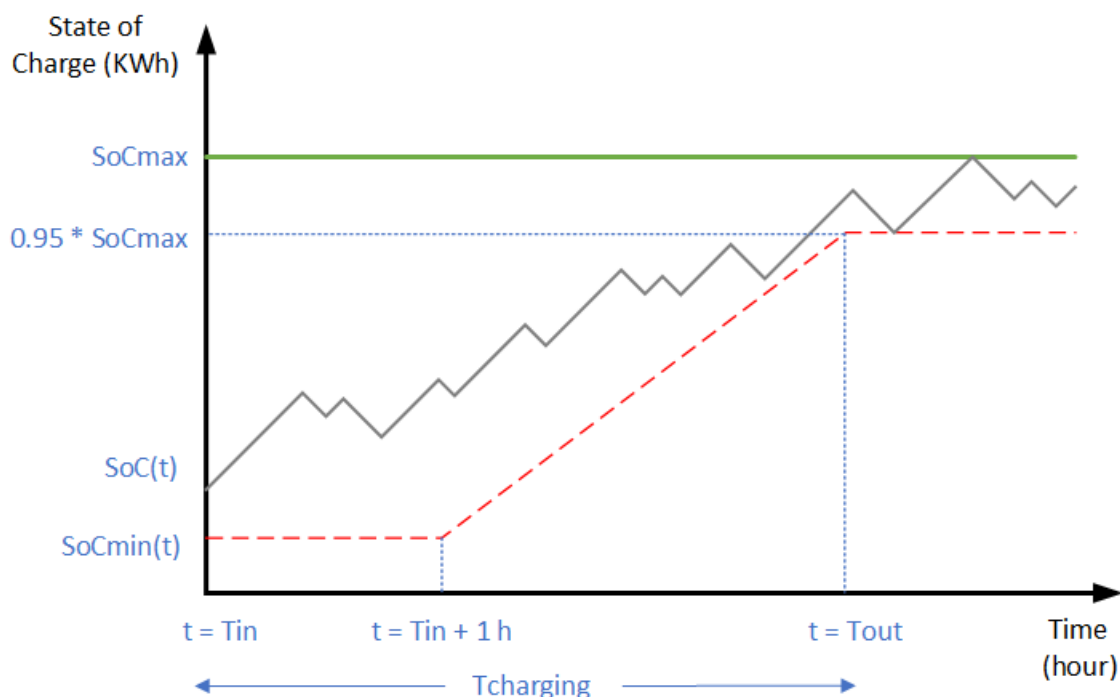
6.1.2 Κατάσταση Φόρτισης Συσσωρευτή

Από την στιγμή που το ηλεκτρικό όχημα θα συνδεθεί στο δίκτυο για την φόρτιση του, αυτόματα το σύστημα αναγνωρίζει τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα του συσσωρευτή, υπολογίζοντας την κατάσταση φόρτισης (State of Charge) της μπαταρίας για μία δεδομένη χρονική στιγμή t όπως επίσης την ελάχιστη και μέγιστη ενεργειακή της στάθμη.

Συνοπτικά λοιπόν ορίζονται τα χαρακτηριστικά του οχήματος όσον αφορά τα επίπεδα φόρτισης του συσσωρευτή ως εξής:

- $SoC(t)$: Το επίπεδο φόρτισης του συσσωρευτή του οχήματος (σε kWh) για μία δεδομένη χρονική στιγμή t .
- SoC_{max} : Η μέγιστη χωρητικότητα (σε kWh) του συσσωρευτή.
- SoC_{min} : Το κατώτατο επιτρεπόμενο όριο εκφόρτισης του συσσωρευτή (σε kWh) το οποίο δίνεται από τον κατασκευαστή. Η παραβίαση του ορίου αυτού για τον εκάστοτε λόγο ενδέχεται να προκαλέσει μόνιμα προβλήματα στην απόδοση της μπαταρίας.

Αφού το σύστημα αναγνωρίσει τα χαρακτηριστικά του συσσωρευτή στην συνέχεια δημιουργεί μία χρονοσειρά για το κατώτατο επιτρεπόμενο όριο εκφόρτισης του οχήματος $SoC_{min}(t)$ λαμβάνοντας υπόψη τις ανάγκες φόρτισής του και το χρόνο στον οποίο το όχημα ενδέχεται να παραμείνει στο σταθμό φόρτισης σύμφωνα με τον χρήστη. Τα όρια αυτά απεικονίζονται στο διάγραμμα της **Εικόνας 6.1** που ακολουθεί.



Εικόνα 6.1 : Χρονική Καμπύλη Επιπέδου Φόρτισης Οχήματος

Στην χρονική καμπύλη της **Εικόνας 6.1** γίνονται κατανοητά τα χρονικά όρια φόρτισης που αναλύθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο και τα οποία αναγράφονται στον οριζόντιο άξονα. Ο κάθετος άξονας αναφέρεται στην κατάσταση φόρτισης του συσσωρευτή με την παράλληλη απεικόνιση του ανώτατου και κατώτατου ορίου. Πιο συγκεκριμένα το κατώτατο επιτρεπόμενο όριο εκφόρτισης $SoC_{min}(t)$ μοντελοποιείται με τον εξής τρόπο.

Για την πρώτη μία ώρα κατά την οποία το όχημα παραμένει στον σταθμό φόρτισης το κατώτατο όριο εκφόρτισης παραμένει σταθερό και ίσο με την τιμή την οποία έχει θέσει ο κατασκευαστής. Στην συνέχεια όμως για χρόνο μεγαλύτερο της μίας ώρας παραμονής του οχήματος στο δίκτυο ($t > T_{in} + 1 \text{ hour}$) το κατώτατο όριο εκφόρτισης ακολουθεί την πορεία μιας γραμμικής συνάρτησης με σημείο εκκίνησης το SoC_{min} για χρόνο $t = T_{in} + 1 \text{ h}$ και σημείο τερματισμού το 95% της μέγιστης χωρητικότητας του συσσωρευτή ($0,95 \cdot SoC_{max}$) για χρόνο ίσο με τον αναμενόμενο χρόνο αποσύνδεσης του οχήματος από το δίκτυο (T_{out}).

Ο λόγος για τον οποίο συμβαίνει αυτό είναι για να αποφευχθεί η έντονη διακύμανση του επιπέδου φόρτισης ($SoC(t)$) κατά την διάρκεια που το όχημα παραμένει συνδεδεμένο στο δίκτυο. Παράλληλα δημιουργούνται οι προϋποθέσεις από το σύστημα έτσι ώστε το επίπεδο φόρτισης του οχήματος να βρίσκεται στα επιθυμητά όρια τιμών την χρονική στιγμή T_{out} στην οποία ο χρήστης έχει θέσει ως χρονικό όριο.

Τέλος πολύ σημαντικό είναι το γεγονός ότι μετά το πέρας του χρονικού ορίου T_{out} εάν το όχημα εξακολουθεί να παραμένει συνδεδεμένο στο δίκτυο το κατώτατο επιτρεπόμενο όριο εκφόρτισης παραμένει σταθερό και ίσο με το 95% της μέγιστης χωρητικότητας του συσσωρευτή. Με τον τρόπο αυτό παρέχεται η δυνατότητα της περεταίρω εκμετάλλευσης του οχήματος στο διαχειριστή του δικτύου προς όφελος του δικτύου.

Ανακεφαλαιώνοντας λοιπόν ισχύουν:

$$\left\{ \begin{array}{ll} SoC_{min}(t) = SoC_{min} & (T_{in} \leq t < T_{in} + 1h) \\ SoC_{min} \leq SoC_{min}(t) \leq 0,95 \cdot SoC_{max} & (T_{in} + 1h \leq t < T_{out}) \\ SoC_{min}(t) = 0,95 \cdot SoC_{max} & (t \geq T_{out}) \end{array} \right. \quad (6.2)$$

Με τον τρόπο αυτό καθόλη την διάρκεια στην οποία το όχημα θα βρίσκεται στο σταθμό φόρτισης ισχύει η παρακάτω σχέση:

$$SoC_{min}(t) \leq SoC(t) \leq SoC_{max} \quad (6.3)$$

6.1.3 Επίπεδα Λειτουργίας Ενεργού Ισχύος

Το επίπεδο ισχύος λειτουργίας του οχήματος επιλέγεται από το σύστημα ελέγχου φόρτισης. Παρόλα αυτά δεν είναι καθ' ανάγκη στατικό καθ' όλη την διάρκεια παραμονής του οχήματος στο δίκτυο αλλά αντιθέτως ενδέχεται να μεταβάλλεται διαρκώς ανάλογα με τις ανάγκες του διαχειριστή και του δικτύου.

Το συγκεκριμένο μοντέλο ηλεκτρικού οχήματος έχει την δυνατότητα να λειτουργεί με πέντε διαφορετικά επίπεδα ενεργού ισχύος P . Πρόκειται για περιπτώσεις στις οποίες το όχημα είτε καταναλώνει ισχύς από το δίκτυο, είτε προσφέρει σε αυτό με την παράλληλη εκφόρτιση του συσσωρευτή του, είτε δεν πραγματοποιεί καμία από τις δύο λειτουργίες παραμένοντας μεν συνδεδεμένο σε αυτό βρισκόμενο δε σε μία σχετική αδράνεια.

Οι περιπτώσεις αυτές και τα επίπεδα ισχύος λειτουργίας του συγκεκριμένου μοντέλου ηλεκτρικού οχήματος παρουσιάζονται ακολούθως:

- P_1 : Η μέγιστη προσφερόμενη ποσότητα ισχύος (σε kW) του ηλεκτρικού οχήματος προς το δίκτυο.
- P_2 : Επίπεδο προσφερόμενης ισχύος στο δίκτυο (σε kW) για την οποία ισχύει ότι $P_2 < P_1$ κατ' απόλυτη τιμή.
- P_3 : Το όχημα είναι συνδεδεμένο στο σύστημα ελέγχου φόρτισης, με τη διαφορά ότι παραμένει αδρανές. Δηλαδή δεν καταναλώνει ούτε προσφέρει ισχύ στο δίκτυο.
- P_4 : Η προβλεπόμενη ισχύς λειτουργίας (σε kW) του οχήματος κατά την οποία το όχημα καταναλώνει ισχύ από το δίκτυο τέτοια ώστε μετά το πέρας του χρονικού ορίου φόρτισης που έχει θέσει ο χρήστης τα επίπεδα φόρτισης του συσσωρευτή να βρίσκονται στα επιθυμητά όρια τιμών. Ισχύει ότι $P_4 = P_2$ κατ' απόλυτη τιμή.
- P_5 : Η μέγιστη ισχύς λειτουργίας (σε kW) του οχήματος κατά την οποία το όχημα καταναλώνει ισχύ από το δίκτυο για την φόρτιση του με $P_5 > P_4$ κατ' απόλυτη τιμή.

Οι ποσότητες ισχύος P_1 και P_5 ορίζονται από το ίδιο το όχημα στο σύστημα ελέγχου και αφορούν τις μέγιστες τιμές προσφερόμενης και καταναλισκόμενης ποσότητας ισχύος προς και από το δίκτυο αντίστοιχα. Αν θεωρηθεί ως θετική η κατεύθυνση ροής ισχύος από το δίκτυο προς το ηλεκτρικό όχημα τότε ισχύει η σχέση:

$$P_5 = -P_1 = P_{max} \quad (6.4)$$

Ταυτόχρονα για τις ποσότητες ισχύος P_2 και P_4 θα ισχύει η σχέση:

$$P_4 = -P_2 = P_{sheduled} \quad (6.5)$$

Όπου $P_{sheduled}$ ορίζεται από τον τύπο:

$$P_{sheduled} = \frac{SoC_{max} - SoC(T_{in})}{T_{charging}} \quad (6.6)$$

για μία δεδομένη χρονική στιγμή T_{in} στην οποία το όχημα εισάγεται στο σύστημα ελέγχου φόρτισης.

Γίνεται αντιληπτό ότι η ποσότητα ισχύος $P_{sheduled}$ εξαρτάται από τρεις παραμέτρους οι οποίες είναι:

- Η μέγιστη χωρητικότητα (σε kWh) του συσσωρευτή (SoC_{max}),
- Το επίπεδο φόρτισης του συσσωρευτή (σε kWh) την στιγμή της σύνδεσης του οχήματος στο σύστημα $SoC(T_{in})$ καθώς επίσης και
- Από τον συνολικό χρόνο φόρτισης του οχήματος ($T_{charging}$).

Εφόσον οι ποσότητες ισχύος P_1 και P_5 ορίζονται στο σύστημα από το ίδιο το όχημα ενώ οι ποσότητες P_2 και P_4 υπολογίζονται, σύμφωνα με τα παραπάνω, από το σύστημα ελέγχου κατά την σύνδεση του οχήματος, υπάρχει περίπτωση για ένα σχετικά μικρό χρονικό διάστημα φόρτισης $T_{charging}$ η ποσότητα της ισχύος $P_{sheduled}$ να αυξηθεί υπερβολικά με συνέπεια να ισχύει:

$$P_{sheduled} > P_{max} \quad (6.7)$$

Η συνθήκη αυτή παραβιάζει τις απαιτήσεις του συστήματος. Για τον λόγο αυτό σε περιπτώσεις που ισχύει η παραπάνω ανίσωση το σύστημα θέτει την ποσότητα ισχύος $P_{sheduled}$ με το 95% της μέγιστης επιτρεπόμενης ισχύος φόρτισης του οχήματος. Οπότε θα ισχύει:

$$P_4 = -P_2 = P_{sheduled} = 0.95 \cdot P_{max} \quad (6.8)$$

με αποτέλεσμα να υπολογίζεται εκ νέου ο τελικός ρεαλιστικός στόχος του επιπέδου φόρτισης του συσσωρευτή στο χρονικό πλαίσιο που θέτει ο χρήστης του οχήματος ως εξής:

$$SoC_{target} = SoC(T_{in}) + P_{sheduled} \cdot T_{charging} \quad (6.9)$$

Ενώ σε περιπτώσεις κατά τις οποίες ο τελικός ρεαλιστικός στόχος του επιπέδου φόρτισης του οχήματος για την νέα τιμή του $P_{sheduled}$ είναι μεγαλύτερος από την μέγιστη χωρητικότητα (σε kWh) του συσσωρευτή ($SoC_{target} > SoC_{max}$) τότε το σύστημα απλά τον θέτει ίσο με αυτήν:

$$SoC_{target} = SoC_{max} \quad (6.10)$$

Υπολογίζοντας εκ νέου την ποσότητα $P_{sheduled}$ του οχήματος.

Συνοψίζοντας λοιπόν ισχύουν:

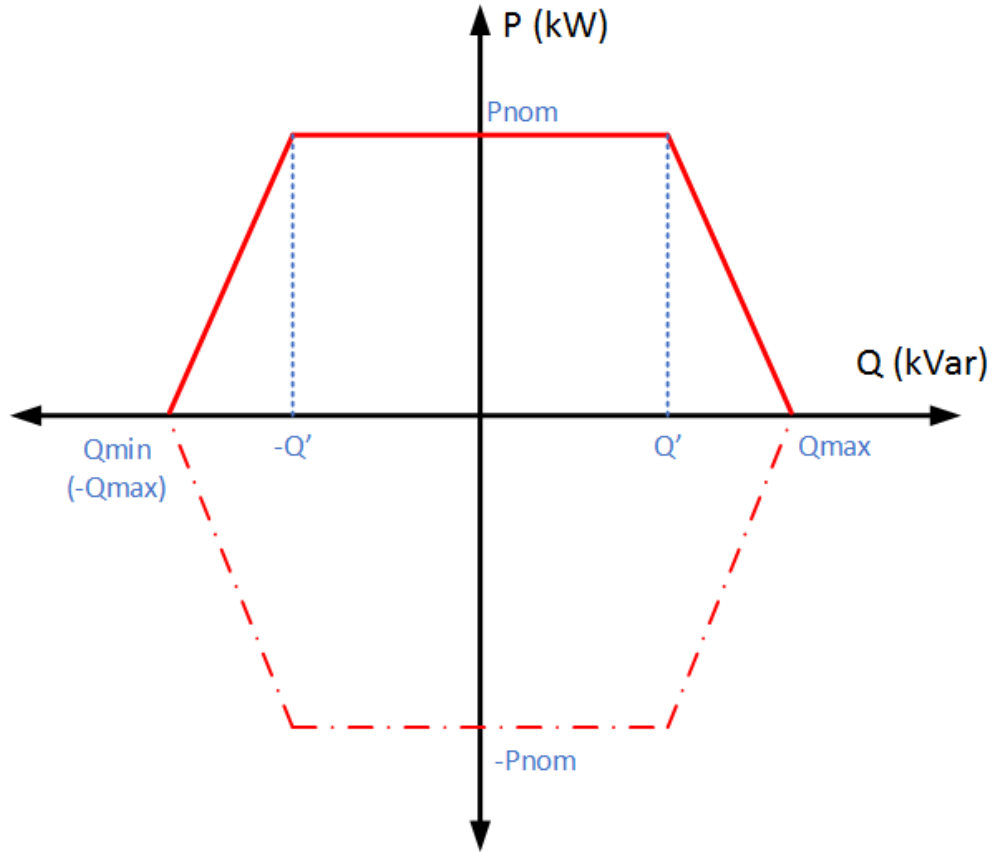
$$\mathbf{P} = \begin{cases} \mathbf{P}_1 = -\mathbf{P}_{max} \\ \mathbf{P}_2 = -\mathbf{P}_{sheduled} \\ \mathbf{P}_3 = \mathbf{0} \\ \mathbf{P}_4 = \mathbf{P}_{sheduled} \\ \mathbf{P}_5 = \mathbf{P}_{max} \end{cases} \quad (6.11)$$

Η μετάβαση από ένα επίπεδο ισχύος σε ένα άλλο είναι ομαλή και πραγματοποιείται σταδιακά αποτρέποντας τις απότομες μεταβολές στα επίπεδα ισχύος λειτουργίας του συσσωρευτή. Το επίπεδο ισχύος λειτουργίας του οχήματος επιλέγεται από τον αλγόριθμο του συστήματος ελέγχου φόρτισης. Αρχικά όταν το όχημα συνδεθεί στο δίκτυο σε μία δεδομένη χρονική στιγμή t ο αλγόριθμος θέτει ως σημείο λειτουργίας του οχήματος το επίπεδο $\mathbf{P}_4 = \mathbf{P}_{sheduled}$ δηλαδή την προβλεπόμενη καταναλισκόμενη ισχύ του οχήματος από το δίκτυο ανεξαρτήτως της κατάστασης του δικτύου την συγκεκριμένη χρονική στιγμή.

6.1.4 Χαρακτηριστική Καμπύλη Ικανότητας P-Q

Για το συγκεκριμένο μοντέλο ηλεκτρικού οχήματος αναπτύχθηκε και η λειτουργία ανταλλαγής αέργου ισχύος \mathbf{Q} με το ηλεκτρικό δίκτυο. Ουσιαστικά το όχημα έχει την δυνατότητα είτε να καταναλώνει άεργο ισχύ από το δίκτυο είτε να προσφέρει σε αυτό ανάλογα με την συνθήκη φόρτισης και τις ανάγκες του δικτύου. Στην μία περίπτωση δηλαδή θα λειτουργεί ως πυκνωτής προσπαθώντας να εξουδετερώσει την άεργο ισχύ του δικτύου ενώ σε άλλη περίπτωση παράγει άεργο ισχύ λειτουργώντας ως πηνίο. Φυσικά η εκάστοτε λειτουργία του οχήματος δεν εξαρτάται αποκλειστικά από το ίδιο αλλά κατά κύριο λόγο από το διαχειριστή του δικτύου ο οποίος αποφασίζει ανάλογα την κατάσταση τον τρόπο με τον οποίο επιθυμεί να το αξιοποιήσει.

Στην **Εικόνα 6.2** απεικονίζεται η χαρακτηριστική καμπύλη ικανότητας $P-Q$ του μοντέλου. Τα όρια μέγιστης προσφερόμενης ή καταναλισκόμενης αέργου ισχύος αφορούν την ποσότητα \mathbf{Q}_{max} ενώ τα αντίστοιχα της ελάχιστης, αφορούν την ποσότητα \mathbf{Q}_{min} . Τα όρια μέγιστης προσφοράς ή κατανάλωσης αέργου ισχύος δίνονται από τον κατασκευαστή του μοντέλου και εξαρτώνται πλήρως από την ονομαστική ισχύ (\mathbf{P}_{nom}) του οχήματος.



Εικόνα 6.2 : Χαρακτηριστική Καμπύλη Ικανότητας P - Q του Μοντέλου

Αν θεωρηθεί ως ονομαστική ισχύς του μοντέλου η μέγιστη καταναλισκόμενη (ή προσφερόμενη) ισχύς του οχήματος από (ή προς) το δίκτυο:

$$P_{nom} = P_{max} \quad (6.12)$$

τότε τα όρια αέργου ισχύος του μοντέλου ορίστηκαν ως:

$$Q_{max} = 0.4 \cdot P_{nom} \quad (6.13)$$

$$Q_{min} = -Q_{max}$$

Τα παραπάνω όρια εξαρτώνται πλήρως από την ονομαστική ισχύ του οχήματος. Έτσι λοιπόν για δύο ηλεκτρικά οχήματα του ίδιου πάντα μοντέλου για τα οποία ισχύει ότι: $P_{nom_1} \neq P_{nom_2}$ τότε:

$$Q_{min_1} \neq Q_{min_2} \quad (6.14)$$

$$Q_{max_1} \neq Q_{max_2}$$

Ενώ αντίστοιχα για δύο ηλεκτρικά οχήματα του ίδιου πάντα μοντέλου με την ίδια ονομαστική ισχύ $P_{nom_1} = P_{nom_2}$ ισχύει ότι:

$$Q_{min_1} = Q_{min_2} \quad (6.15)$$

$$Q_{max_1} = Q_{max_2}$$

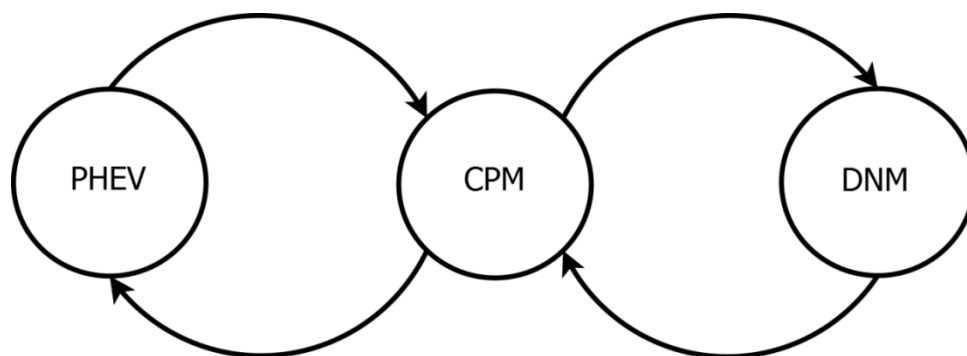
6.2 Περιγραφή Συστήματος Ελέγχου Φόρτισης

Το μοντέλο συστήματος που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας απαιτεί την αρμονική συνύπαρξη τριών ενεργειακών παραγόντων:

- Του ηλεκτρικού οχήματος κατηγορίας PHEV (Plug-in Hybrid Electric Vehicles)
- Του διαχειριστή σημείου φόρτισης (Charging Point Manager - CPM)
- Του διαχειριστή δικτύου διανομής (Distribution Network Manager - DNM)

Η αξιοποίηση των ηλεκτρικών οχημάτων (PHEV) από τον διαχειριστή του δικτύου διανομής (Distribution Network Manager - DNM) αποτελεί αυτοσκοπό για το έξυπνο δίκτυο του μέλλοντος. Απαραίτητη προϋπόθεση για αυτό είναι η δημιουργία ενός μοντέλου συστήματος το οποίο θα ενσαρκώνει την παραπάνω θεώρηση. Πρωταγωνιστικό ρόλο σε αυτό αποκτά ο διαχειριστής του σημείου φόρτισης των οχημάτων (Charging Point Manager - CPM) ο οποίος αναλαμβάνει ρόλο μεσολαβητή στην ομαλή επικοινωνία μεταξύ των δύο αυτών οντοτήτων.

Η ανταλλαγή μηνυμάτων μεταξύ των τριών ενεργειακών παραγόντων είναι συνεχής και αμφίδρομη καθόλη την διάρκεια στην οποία το όχημα παραμένει συνδεδεμένο στο δίκτυο. Η πορεία της επικοινωνίας αυτής συνοψίζεται στην **Εικόνα 6.3** που ακολουθεί.



Εικόνα 6.3 : Η Πορεία της Επικοινωνίας και Ανταλλαγής Μηνυμάτων στο Έξυπνο Δίκτυο

Η πορεία της ανταλλαγής μηνυμάτων ξεκινάει από το όχημα το οποίο είναι επιφορτισμένο να μεταφέρει όλη την απαιτούμενη πληροφορία η οποία σχετίζεται με τα δεδομένα φόρτισης του στον διαχειριστή του σημείου φόρτισης (CPM) όπου ανήκει. Αυτός με την σειρά του αφού πρώτα ομαδοποιήσει την πληροφορία όλων των μηνυμάτων από τα ηλεκτρικά οχήματα του σταθμού (Clustering) την μεταφέρει στον διαχειριστή του δικτύου (DNM). Με τον τρόπο αυτό ο διαχειριστής του δικτύου έχει πλήρη εικόνα των αναγκών και των απαιτήσεων του δικτύου σε πραγματικό χρόνο και την δυνατότητα να αποφασίσει την πορεία

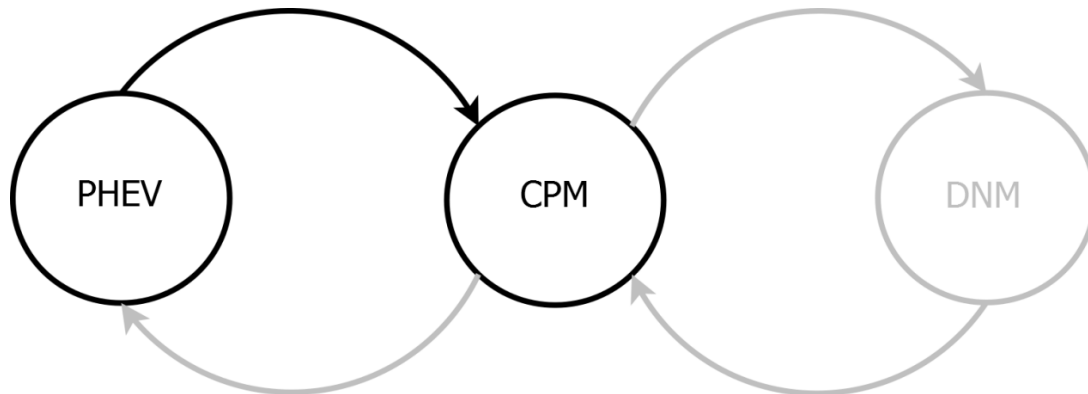
φόρτισης των οχημάτων. Στο σημείο αυτό ξεκινάει η αντίστροφη πορεία της επικοινωνίας από τον διαχειριστή του δικτύου προς τα ηλεκτρικά οχήματα μέσω του διαχειριστή του σημείου φόρτισης με όλη την απαιτούμενη πληροφορία η οποία και αναλύεται στην συνέχεια.

6.3 Περιεχόμενο Μηνυμάτων

Στην συγκεκριμένη υποενότητα αναλύεται το περιεχόμενο των μηνυμάτων αποστολής των τριών ενεργειακών παραγόντων του έξυπνου δικτύου καθώς επίσης και η επεξεργασία τους από τον καθένα ξεχωριστά. Η πορεία της επικοινωνίας θα μπορούσε να διακριθεί σε τέσσερις φάσεις.

6.3.1 Πρώτη Φάση Επικοινωνίας

Το ηλεκτρικό όχημα το οποίο είναι συνδεδεμένο στο έξυπνο δίκτυο θα πρέπει ανά πάσα στιγμή να ενημερώνει τον διαχειριστή του δικτύου για την κατάσταση φόρτισης στην οποία βρίσκεται ενώ ταυτόχρονα οφείλει να παρέχει όλη την απαιτούμενη πληροφορία την οποία χρειάζεται ο διαχειριστής για την αξιοποίησή του προς όφελος του δικτύου.



Εικόνα 6.4 : Πρώτη Φάση Επικοινωνίας

Το περιεχόμενο της πληροφορίας το οποίο αποστέλλει το ηλεκτρικό όχημα στο διαχειριστή του σημείου φόρτισης (**Εικόνα 6.5**) περιλαμβάνει:

- Την ονομαστική τιμή της ισχύος του

$$P_{nom}$$

- Το επίπεδο ισχύος λειτουργίας του την δεδομένη χρονική στιγμή t

$$P_{current}$$

- Τα όρια λειτουργίας αέργου ισχύος του

$$Q_{min}$$

$$Q_{max}$$

- Το άνω και κάτω όριο ενεργού ισχύος λειτουργίας του

$$P_{limit_{min}}$$

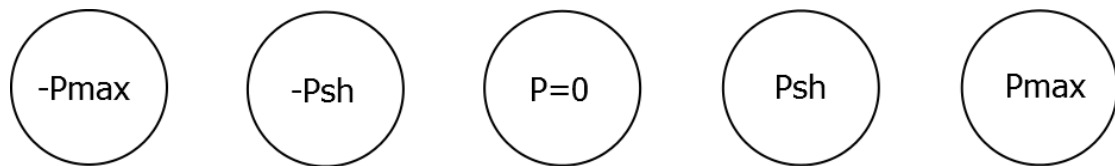
$$P_{limit_{max}}$$

- Την ελαστικότητα στην μείωση και αύξηση του επιπέδου ισχύος του

$$Flexibility_{decrease}$$

$$Flexibility_{increase}$$

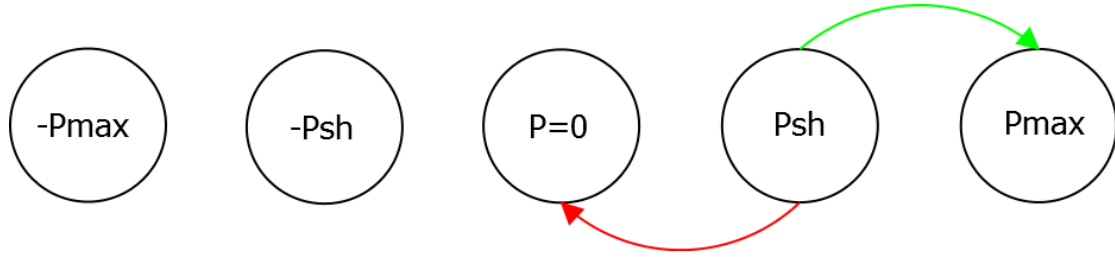
Όπως ήδη έχει αναφερθεί το μοντέλο του ηλεκτρικού οχήματος το οποίο έχει θεωρηθεί για τις ανάγκες της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας έχει την δυνατότητα να λειτουργεί με πέντε διαφορετικά επίπεδα ενεργού ισχύος P όπως φαίνεται και στην **Εικόνα 6.5**.



Εικόνα 6.5 : Τα Διαφορετικά Επίπεδα Ισχύος Φόρτισης του Οχήματος

Η μετάβαση από ένα επίπεδο ισχύος λειτουργίας σε ένα άλλο αποφασίζεται από τον διαχειριστή του δικτύου (DNM) ενώ οι πιθανές μεταβάσεις καθορίζονται από το ίδιο το όχημα και εξαρτώνται πλήρως από το επίπεδο ισχύος λειτουργίας στο οποίο βρίσκεται ($P_{current}$).

Για παράδειγμα αν το όχημα βρίσκεται στην κατάσταση $P_{sheduled}$ για δεδομένη χρονική στιγμή t οι πιθανές μεταβάσεις σε γειτονικά επίπεδα ισχύος για την επόμενη χρονική στιγμή $t+1$ αφορούν είτε την αύξηση της ισχύος κατανάλωσης από το δίκτυο σε P_{max} είτε την μείωση της ισχύος κατανάλωσης του σε μηδέν ($P = 0$). Φυσικά το όχημα μπορεί να μην χρειαστεί να πραγματοποιήσει καμία από τις δύο αυτές μεταβάσεις διατηρώντας το επίπεδο ισχύος του σταθερό και στις δύο χρονικές στιγμές.



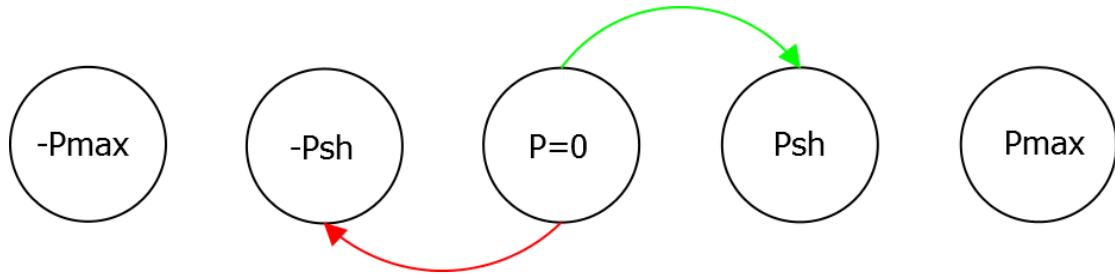
Εικόνα 6.6 : Όρια Ισχύος Λειτουργίας για $P_{current} = P_{scheduled}$

Η **Εικόνα 6.6** περιγράφει τις πιθανές μεταβάσεις του οχήματος στα διαφορετικά επίπεδα ισχύος για το παραπάνω παράδειγμα. Τα όρια τα οποία θα αποστείλει το όχημα στον διαχειριστή του σημείου φόρτισης (CPM) είναι τα ακόλουθα:

$$P_{limit_{min}} = 0$$

$$P_{limit_{max}} = P_{max}$$

Το συγκεκριμένο παράδειγμα αφορά αποκλειστικά την μείωση ή αύξηση της ζήτησης φορτίου στο δίκτυο. Το ίδιο δεν συμβαίνει για το παράδειγμα της **Εικόνας 6.7** στην οποία το όχημα βρίσκεται σε κατάσταση μερικής αδράνειας στην οποία ούτε καταναλώνει ούτε προσφέρει ισχύ στο δίκτυο.



Εικόνα 6.7 : Όρια Ισχύος Λειτουργίας για $P_{current} = 0$

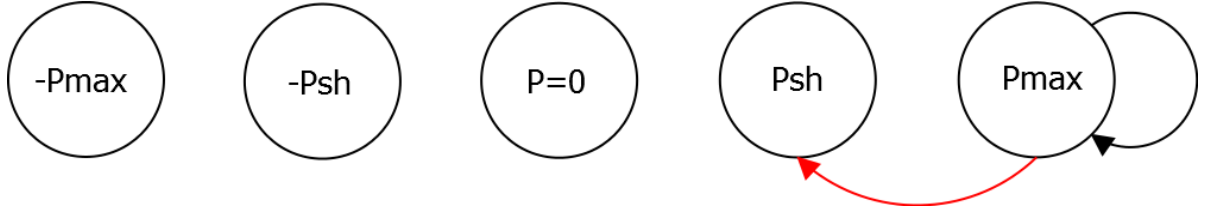
Για το συγκεκριμένο παράδειγμα της **Εικόνας 6.7** τα όρια ισχύος τα οποία θα αποστείλει το όχημα στον διαχειριστή του σημείου φόρτισης (CPM) είναι τα ακόλουθα:

$$P_{limit_{min}} = -P_{scheduled}$$

$$P_{limit_{max}} = P_{scheduled}$$

Το όχημα στην περίπτωση αυτή προσφέρει στο διαχειριστή την ευελιξία να το αντιμετωπίσει είτε ως μονάδα παραγωγής ενέργειας στο δίκτυο είτε ως επιπλέον φορτίο ζήτησης. Στην μία περίπτωση το όχημα θα προσφέρει ισχύ στο δίκτυο ενώ στην άλλη θα καταναλώσει ισχύ από αυτό.

Τέλος αξίζει να αναφερθεί μία ακόμα περίπτωση (**Εικόνα 6.8**) πιθανής μεταβολής της ισχύος λειτουργίας του οχήματος και καθορισμός ορίων.



Εικόνα 6.8 : Όρια Ισχύος Λειτουργίας για $P_{current} = P_{max}$

Το παράδειγμα της **Εικόνας 6.8** αφορά τα πιθανά επίπεδα μετάβασης της ισχύος λειτουργίας του οχήματος από την κατάσταση $P_{current} = P_{max}$ τα οποία είναι:

$$P_{limit_{min}} = P_{sheduled}$$

$$P_{limit_{max}} = P_{max}$$

Εφόσον το όχημα βρίσκεται ήδη στο ανώτατο επίπεδο ισχύος λειτουργίας του δεν μπορεί να αυξήσει επιπλέον την ισχύ του παρά μόνο είτε να την μειώσει είτε να την διατηρήσει σταθερή.

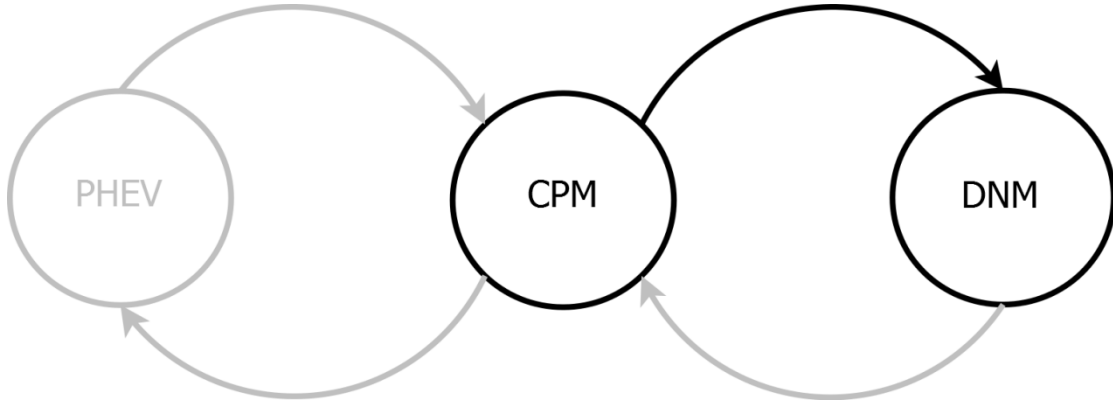
Η πιθανότητα μετάβασης από το ένα επίπεδο σε ένα άλλο καθορίζεται πλήρως από τα δεδομένα της κατάστασης φόρτισης του οχήματος. Είναι λογικό ένα όχημα με χαμηλό επίπεδο φόρτισης του συσσωρευτή του να έρχεται δεύτερο σε προτεραιότητα από ένα άλλο με αντίστοιχα υψηλότερο επίπεδο για περιπτώσεις προσφοράς ισχύος στο δίκτυο. Το αντίθετο φυσικά συμβαίνει για ένα όχημα με υψηλό επίπεδο φόρτισης σε σχέση με ένα άλλο με χαμηλότερο επίπεδο φόρτισης από αυτό.

Οι πιθανότητες μετάβασης σε γειτονικά επίπεδα ισχύος καθορίζονται σύμφωνα με την ελαστικότητα που προσφέρουν τα οχήματα στον διαχειριστή και προσδιορίζονται σύμφωνα με τους τύπους:

$$\begin{aligned} Flexibility_{increase} &= \frac{SoC_{max} - SoC(t)}{SoC_{max} - SoC_{min}(t)} \\ Flexibility_{decrease} &= \frac{SoC(t) - SoC_{min}(t)}{SoC_{max} - SoC_{min}(t)} \end{aligned} \quad (6.16)$$

6.3.2 Δεύτερη Φάση Επικοινωνίας

Το περιεχόμενο του μηνύματος κατά την πρώτη φάση επικοινωνίας αποστέλλεται από κάθε όχημα ξεχωριστά στον διαχειριστή του σταθμού φόρτισης στον οποίο ανήκει. Με τον τρόπο αυτό ο διαχειριστής του εκάστοτε σταθμού γνωρίζει τα δεδομένα μόνο των οχημάτων τα οποία βρίσκονται συνδεδεμένα με αυτόν. Από την στιγμή που τα δεδομένα αυτά αποσταλούν στον διαχειριστή του σημείου φόρτισης (CPM), εκείνος καλείται αφού πρώτα τα επεξεργαστεί να τα αποστείλει στον DNM.



Εικόνα 6.9 : Δεύτερη Φάση Επικοινωνίας

Το περιεχόμενο της πληροφορίας (**Εικόνα 6.9**) την οποία αποστέλλει ο διαχειριστής του σημείου φόρτισης (CPM) στον διαχειριστή του δικτύου (DNM) περιλαμβάνει:

- Τα όρια λειτουργίας ενεργού ισχύος του σταθμού φόρτισης

$$P_{mincluster}$$

$$P_{maxcluster}$$

- Τα όρια λειτουργίας αέργου ισχύος του σταθμού φόρτισης

$$Q_{mincluster}$$

$$Q_{maxcluster}$$

Η εύρεση των ορίων λειτουργίας ενεργού ισχύος του σταθμού υπολογίζεται αθροίζοντας τα αντίστοιχα όρια λειτουργίας των οχημάτων όπως αναλύθηκαν σε προηγούμενη παράγραφο. Αν i το πλήθος των οχημάτων στον σταθμό φόρτισης θα ισχύει ότι:

$$P_{mincluster} = \sum_i P_{limit_{min}}(i) \quad (6.17)$$

$$P_{max_{cluster}} = \sum_i P_{limit_{max}}(i)$$

Για την εύρεση των ορίων αέργου ισχύος θα πρέπει αρχικά ο διαχειριστής του σημείου φόρτισης (CPM) να υπολογίσει την ονομαστική τιμή της ισχύος του σταθμού φόρτισης αθροίζοντας την ονομαστική τιμή ισχύος κάθε οχήματος. Αν i το πλήθος των οχημάτων στον σταθμό φόρτισης θα ισχύει ότι:

$$P_{nom_{cluster}} = \sum_i P_{nom_{PEV}}(i) \quad (6.18)$$

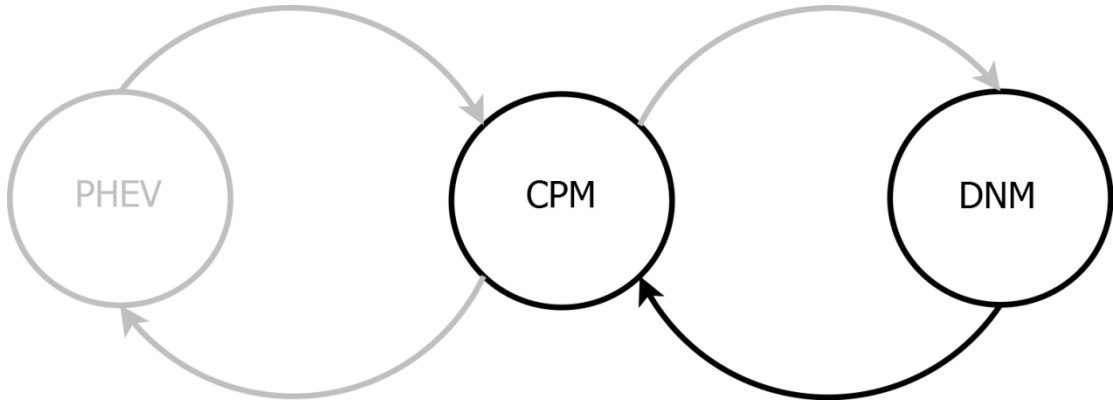
Στην συνέχεια ο υπολογισμός των ορίων υπολογίζεται ως εξής:

$$Q_{max_{cluster}} = 0.4 \cdot P_{nom_{cluster}} \quad (6.19)$$

$$Q_{min_{cluster}} = -Q_{max_{cluster}}$$

6.3.3 Τρίτη Φάση Επικοινωνίας

Ο διαχειριστής του δικτύου διανομής (DNM) θα πρέπει ανά πάσα στιγμή να γνωρίζει την κατάσταση την οποία βρίσκεται το δίκτυο έτσι ώστε να έχει τον πλήρη έλεγχο της σωστής και ομαλής λειτουργίας του (*Εικόνα 6.10*).



Εικόνα 6.10 : Τρίτη Φάση Επικοινωνίας

Η συνολική εικόνα του δικτύου περιλαμβάνει πληροφορίες οι οποίες αφορούν:

- Την συνολική ζήτηση ισχύος των ζυγών φορτίου με πλήρη γνώση της ενεργού και αέργου ισχύος για τον εκάστοτε ζυγό
- Την συνολική παραγωγή ισχύος από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) του δικτύου διανομής.

- Τα επίπεδα λειτουργίας ηλεκτρικών οχημάτων με πλήρη γνώση της ενεργού και αέργου ισχύος για το εκάστοτε όχημα.
- Τα όρια λειτουργίας ηλεκτρικών οχημάτων με πλήρη γνώση της ενεργού και αέργου ισχύος για το εκάστοτε όχημα.
- Την πτώση τάση των ζυγών αναφοράς
- Τις απώλειες ενέργειας του δικτύου λόγω της πτώσης τάσης στους ζυγούς και της υπερφόρτισης των γραμμών διανομής.

Η ορθή αξιολόγηση των παραπάνω δεδομένων αποτελεί κριτήριο ομαλής λειτουργίας του δικτύου διανομής. Ο διαχειριστής καλείται να λάβει αποφάσεις για την επίτευξη των στόχων οι οποίοι συνοψίζονται:

- Στην βελτίωση του προφίλ των τάσεων του δικτύου.
- Στην μείωση των απωλειών ενέργειας του δικτύου.

Για να επιτευχθούν οι στόχοι αυτοί, ο διαχειριστής του δικτύου καλείται να θέσει περιορισμούς στην λειτουργία των ζυγών φορτίου που αφορούν τα ανώτατα και κατώτατα επιτρεπόμενα όρια διακύμανσης της τάσης τους ως εξής:

$$V_{i,min} \leq V_i(t) \leq V_{i,max} \quad (6.20)$$

Όπου $V_{i,min}$ η ελάχιστη τιμή της ανά μονάδα τάσης λειτουργίας του ζυγού i , $V_{i,max}$ η μέγιστη και $V_i(t)$ η πραγματική τάση λειτουργίας του ζυγού i για μία δεδομένη χρονική στιγμή t .

Αξιοποιώντας τα δεδομένα και *εφαρμόζοντας ανάλυση βέλτιστης ροής φορτίου (OPF)* ο διαχειριστής επιλέγει το βέλτιστο επίπεδο λειτουργίας ενεργού και αέργου ισχύος για τον κάθε σταθμό φόρτισης ξεχωριστά.

Το περιεχόμενο της πληροφορίας (*Εικόνα 6.11*) την οποία αποστέλλει ο διαχειριστής του δικτύου διανομής (DNM) στον εκάστοτε διαχειριστή σημείου φόρτισης περιλαμβάνει:

- Το βέλτιστο επίπεδο λειτουργίας ενεργού ισχύος του σταθμού φόρτισης

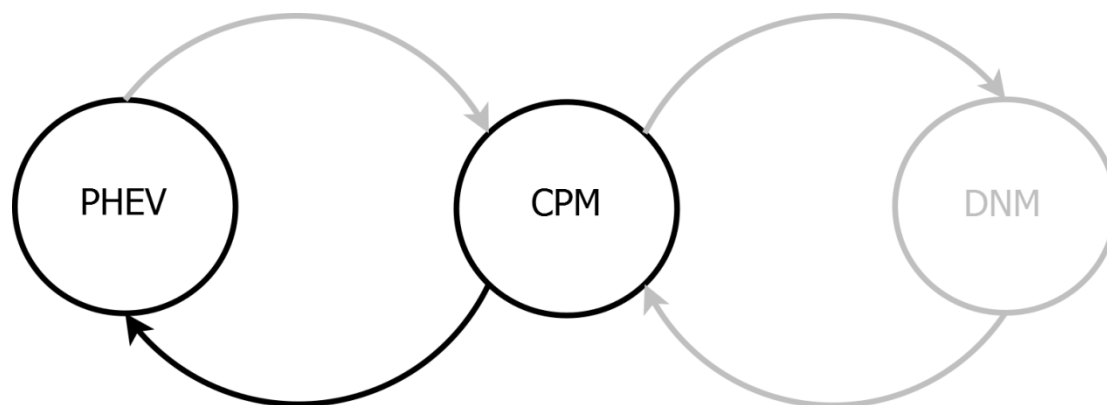
$$P^*_{cluster}$$

- Το βέλτιστο επίπεδο λειτουργίας αέργου ισχύος του σταθμού φόρτισης

$$Q^*_{cluster}$$

6.3.4 Τέταρτη Φάση Επικοινωνίας

Στην τέταρτη και τελευταία φάση της επικοινωνίας ο διαχειριστής κάθε σημείου φόρτισης (CPM) αποφασίζει για το επίπεδο λειτουργίας ενεργού και αέργου ισχύος κάθε οχήματος και στην συνέχεια το αποστέλλει στο κάθε όχημα ξεχωριστά (*Εικόνα 6.11*).

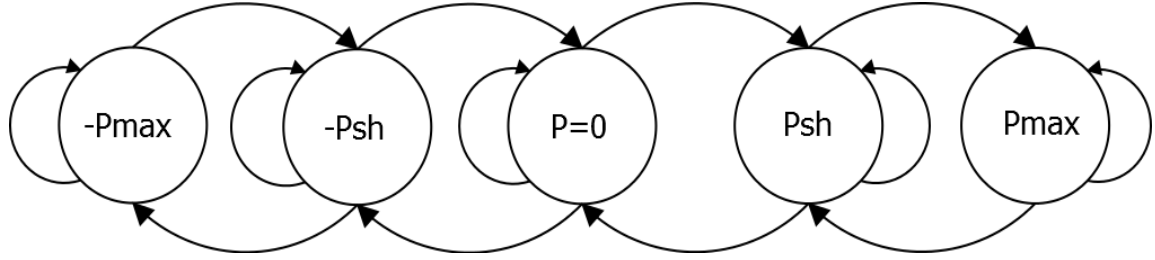


Εικόνα 6.11 : Τέταρτη και Τελευταία Φάση Επικοινωνίας

Αν το βέλτιστο επίπεδο λειτουργίας ενεργού ισχύος των οχημάτων το οποίο έχει αποφασίσει ο διαχειριστής του δικτύου ότι θα πρέπει να εφαρμοστεί στον εκάστοτε σταθμό φόρτισης για την χρονική στιγμή $t+1$ έχει αυξηθεί σε σχέση με το αντίστοιχο την χρονική στιγμή t τότε ο διαχειριστής του σημείου φόρτισης οφείλει να αυξήσει το επίπεδο ισχύος λειτουργίας σε ορισμένα οχήματα. Τα οχήματα αυτά επιλέγονται από τον διαχειριστή του σημείου φόρτισης με προτεραιότητα η οποία ορίζεται βάση της ελαστικότητας **Flexibility_{increase}** η οποία αποστάλθηκε κατά την πρώτη φάση της επικοινωνίας από τα οχήματα στον σταθμό φόρτισης. Οχήματα με υψηλή ελαστικότητα στην αύξηση ισχύος επιλέγονται πρώτα μέχρις ότου το επίπεδο ισχύος λειτουργίας του σταθμού να φτάσει την βέλτιστη ποσότητα $P^*_{cluster}$.

Αντίστοιχη διαδικασία ακολουθείται φυσικά και για την περίπτωση κατά την οποία το βέλτιστο επίπεδο λειτουργίας ενεργού ισχύος των οχημάτων το οποίο έχει αποφασίσει ο διαχειριστής του δικτύου ότι θα πρέπει να εφαρμοστεί στον εκάστοτε σταθμό για την χρονική στιγμή $t+1$ έχει μειωθεί σε σχέση με το αντίστοιχο την χρονική στιγμή t . Τότε η προτεραιότητα των οχημάτων ορίζεται βάση της ελαστικότητας **Flexibility_{decrease}**.

Η μετάβαση από μία κατάσταση ισχύος λειτουργίας ενός ηλεκτρικού οχήματος σε μία άλλη μοντελοποιείται ως μία μηχανή καταστάσεων (FSM) για τα διαφορετικά επίπεδα ισχύος που αναλύθηκαν σε προηγούμενη ενότητα και διακρίνονται στην *Εικόνα 6.12* που ακολουθεί.



Εικόνα 6.12 : Μηχανή Καταστάσεων (FSM) για τα Διαφορετικά Επίπεδα Ισχύος Λειτουργίας του Οχήματος

Τέλος όσον αφορά την κατανομή της αέργου ισχύος στα οχήματα ο διαχειριστής του σημείου φόρτισης οφείλει να διανείμει την άεργο ισχύ $Q^*_{cluster}$ ολόκληρου του σταθμού ποσοστιαία στα οχήματα.

Η τιμή της αέργου ισχύος $Q^*_{cluster}$ του σταθμού φόρτισης μπορεί να είναι είτε θετική είτε αρνητική. Στην μία περίπτωση δηλαδή ο διαχειριστής του σημείου φόρτισης καλείται να διανέμει την θετική άεργο ισχύ στα οχήματα μετατρέποντας στην ουσία τους συσσωρευτές τους σε πυκνωτές με σκοπό να εξουδετερώσουν την άεργο ισχύ του δικτύου ενώ στην άλλη περίπτωση ο CPM διανέμει την θετική άεργο ισχύ στα οχήματα παρομοιάζοντας την λειτουργία των συσσωρευτών τους ως πηνία. Η παραπάνω διαδικασία διανομής αέργου ισχύος εξαρτάται πλήρως από το επίπεδο ενεργού ισχύος λειτουργίας $P_{current}$ του κάθε οχήματος ξεχωριστά με ενδεχόμενη διαφοροποίηση των ορίων αέργου ισχύος του μοντέλου ηλεκτρικού οχήματος που αναπτύχθηκε στην παράγραφο 6.1.

Έστω ότι ένα όχημα για μία δεδομένη χρονική στιγμή t έχει:

$$P_{current} = 0$$

τότε τα όρια ενεργού ισχύος του οχήματος είναι τα ακόλουθα:

$$P_{limit_{min}} = -P_{sheduled}$$

$$P_{limit_{max}} = P_{sheduled}$$

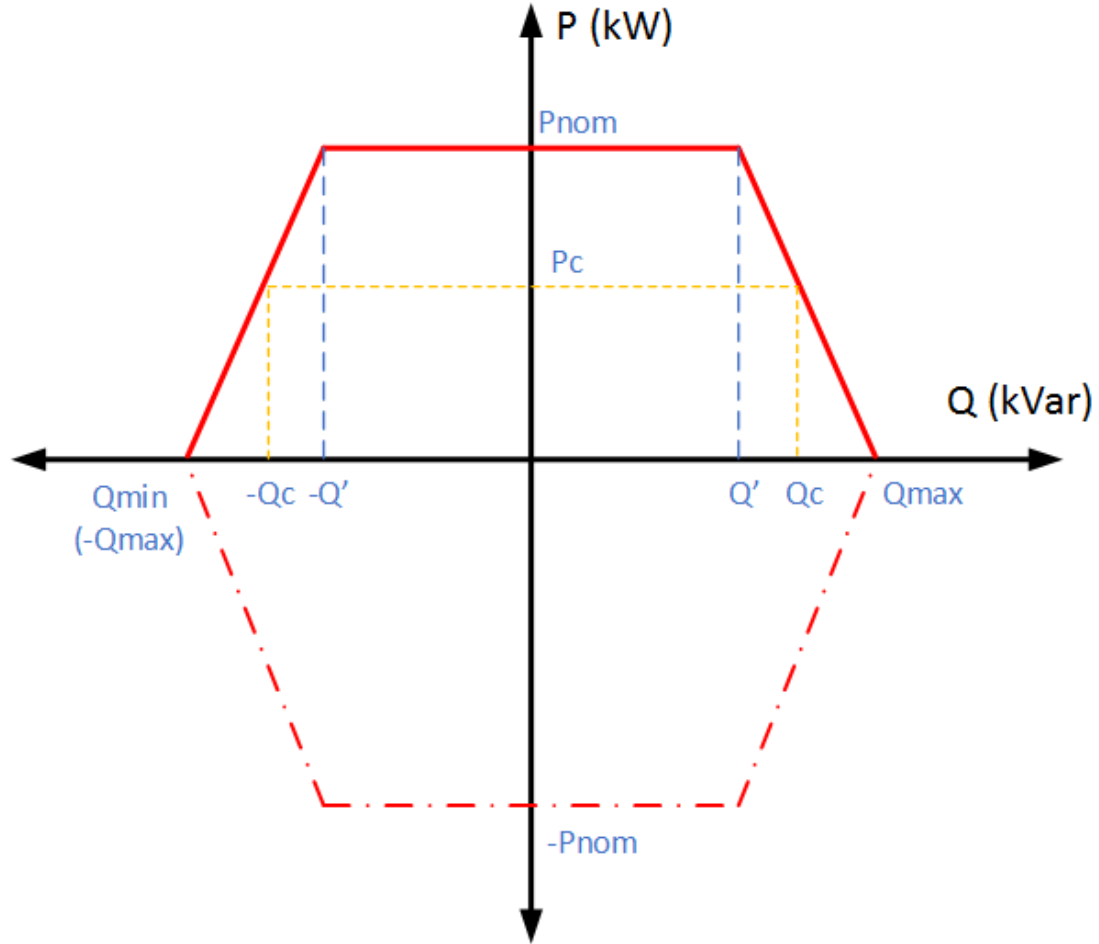
Η μέγιστη τιμή ενεργού ισχύος του οχήματος για την ίδια χρονική στιγμή είναι λοιπόν:

$$P_C = P_{limit_{max}}$$

Έτσι το ανώτατο όριο στην χαρακτηριστική καμπύλη ικανότητας $P-Q$ κάθε οχήματος τροποποιείται θεωρώντας Q' (για θετικές τιμές αέργου ισχύος) τέτοιο ώστε:

$$Q_{min} \leq Q_C \leq Q_{max}$$

Με Q_c να ορίζεται ως το μέγιστο όριο αέργου ισχύος στην καμπύλη ικανότητας την χρονική στιγμή t κάθε οχήματος. Η παραπάνω θεώρηση απεικονίζεται στην **Εικόνα 6.13** που ακολουθεί.



Εικόνα 6.13 : Τελικά Όρια Αέργου Ισχύος του Οχήματος

Έτσι λοιπόν τα όρια αέργου ισχύος ολόκληρου του σταθμού φόρτισης θα είναι το άθροισμα των ορίων όλων των οχημάτων που βρίσκονται συνδεδεμένα στο δίκτυο μέσω του συγκεκριμένου σταθμού.

$$Q_{final} = \sum_i Q_c(i) \quad (6.21)$$

Ο διαχειριστής του σημείου φόρτισης οφείλει να κατανέμει ισόποσα την τιμή $Q_{cluster}^*$ στα οχήματα του σταθμού την οποία έλαβε και για την οποία ισχύει ότι:

$$-Q_{final} \leq Q_{cluster}^* \leq Q_{final} \quad (6.22)$$

Υπολογίζοντας το ποσοστό σύμφωνα με το οποίο κάθε όχημα οφείλει να συνεισφέρει στο δίκτυο ως εξής:

$$\mathit{coefficient} = \frac{Q_{cluster}^*}{Q_{final}} \quad (6.23)$$

Τέλος κάθε όχημα i θα συνεισφέρει στον διαχειριστή του σταθμού φόρτιση ποσότητα αέργου ισχύος ίση με:

$$Q'_{final}(i) = \mathit{coefficient} \cdot Q_c(i) \quad (6.24)$$

Αν για παράδειγμα θεωρηθούν τρία (3) ηλεκτρικά οχήματα σταθμού φόρτισης με όρια αέργου ισχύος Q_c :

$$-2KVar \leq Q_{c1} \leq 2KVar$$

$$-3KVar \leq Q_{c2} \leq 3KVar$$

$$-5KVar \leq Q_{c3} \leq 5KVar$$

Δηλαδή συνολικά όρια αέργου ισχύος Q_{final} για τον σταθμό:

$$-10 KVar \leq Q_{final} \leq 10 KVar$$

Διακρίνονται οι εξής δύο (2) περιπτώσεις:

1. Έστω ότι ο DNM αποφασίζει $Q_{cluster}^* = 6 KVar$ τότε για κάθε ηλεκτρικό όχημα από τα παραπάνω θα ισχύει ότι:

$$\mathit{coefficient} = \frac{Q_{cluster}^*}{Q_{final}} = \frac{6 KVar}{10 KVar} = 0.6$$

$$Q'_{final}(1) = 0.6 \cdot 2 = 1.2 KVar$$

$$Q'_{final}(2) = 0.6 \cdot 3 = 1.8 KVar$$

$$Q'_{final}(3) = 0.6 \cdot 5 = 3 KVar$$

2. Έστω ότι ο DNM αποφασίζει $Q_{cluster}^* = -7 KVar$ τότε για κάθε ηλεκτρικό όχημα από τα παραπάνω θα ισχύει ότι:

$$\mathit{coefficient} = \frac{Q_{cluster}^*}{Q_{final}} = \frac{-7 KVar}{10 KVar} = -0.7$$

$$Q'_{final}(1) = -0.7 \cdot 2 = -1.4 KVar$$

$$Q'_{final}(2) = -0.7 \cdot 3 = -2.1 KVar$$

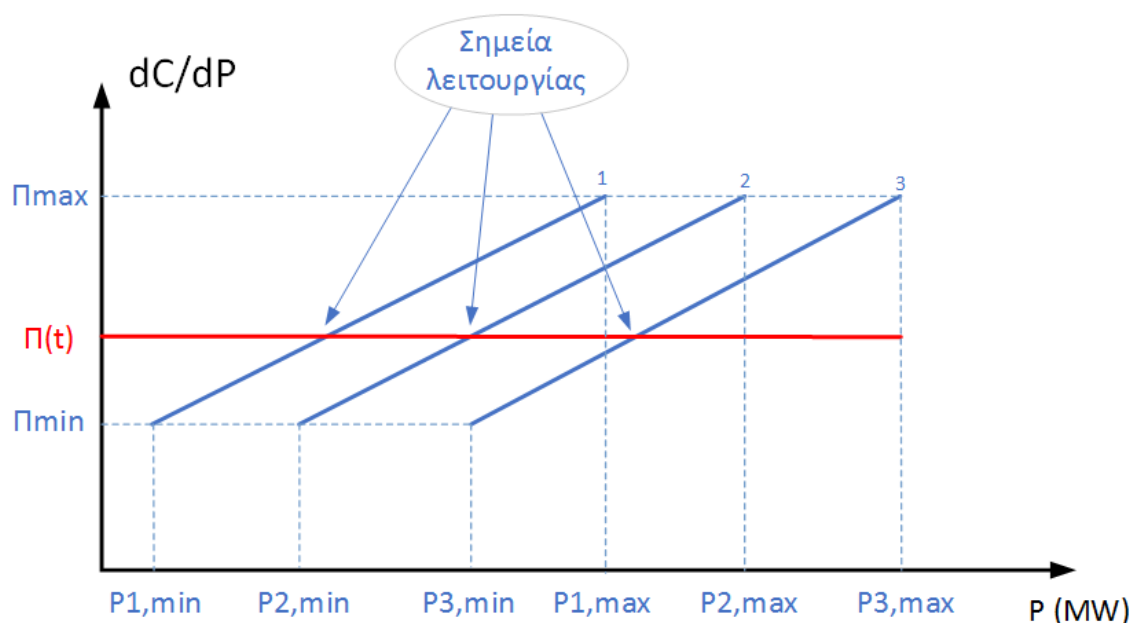
$$Q'_{final}(3) = -0.7 \cdot 5 = -3.5 KVar$$

6.4 Θεώρηση Πλασματικού Κόστους Γεννητριών

Στην βέλτιστη ροή ισχύος (OPF) του MATPOWER τα κόστη λειτουργίας των γεννητριών δίνονται ως πολυώνυμα της ισχύος τους. Για τις ανάγκες της διπλωματικής το σημείο φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων παρομοιάζεται με την λειτουργία «ιδιαίτερης» γεννήτρια η οποία έχει την δυνατότητα να λειτουργεί και με αρνητική ισχύ. Δηλαδή μπορεί είτε να τροφοδοτεί τα ηλεκτρικά οχήματα με ισχύ, καταναλώνοντας την από το δίκτυο, είτε καταναλώνοντας ισχύ από τα ηλεκτρικά οχήματα προσφέροντας την στο δίκτυο όταν αυτό κρίνεται αναγκαίο από τον διαχειριστή. Το κόστος λειτουργίας κάθε σταθμού φόρτισης υπολογίζεται από μία πολυωνμική συνάρτηση δεύτερης ($2^{\text{ης}}$) τάξης της ισχύος. Συνεπώς:

- Τα διαφορικά κόστη λειτουργίας των σημείων φόρτισης είναι γραμμικές συναρτήσεις της ισχύος.
- Το διαφορικό κόστος της βασικής γεννήτριας του υποσταθμού του δικτύου διανομής θα ισούται με την τιμή ηλεκτρικής ενέργειας κάθε χρονική στιγμή.

Από την μέθοδο Lagrange είναι γνωστό ότι το συνολικό κόστος λειτουργίας του συστήματος ελαχιστοποιείται όταν τα διαφορικά κόστη των γεννητριών εξισώνονται. Η **Εικόνα 6.14** αναφέρεται στις γραμμικές εξισώσεις του διαφορικού κόστους λειτουργίας τριών σταθμών φόρτισης του δικτύου με την παράλληλη απεικόνιση της τιμής ηλεκτρικής ενέργειας του δικτύου κάθε χρονική στιγμή.



Εικόνα 6.14 : Στιγμιότυπο Συναρτήσεων Κόστους Γεννητριών για την χρονική στιγμή t

6.4.1 Εύρεση Συναρτήσεων Κόστους

Για την εύρεση των συναρτήσεων κόστους $C(t)$ θεωρούνται οι παρακάτω ποσότητες:

- $P_i(t)$: Η ισχύς που απορροφά η γεννήτρια του i -οστού σημείου φόρτισης την χρονική στιγμή t .
- $\Pi(t)$: Η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας την χρονική στιγμή t .
- $P(t)$: Η ισχύς που εγχέεται στον άπειρο ζυγό την χρονική στιγμή t .

Θεωρήθηκε το «πλασματικό» κόστος λειτουργίας του i -οστού σημείου φόρτισης ως εξής:

$$C_i(t) = a_i \cdot P_i^2(t) + b_i \cdot P_i(t) + c_i \quad (6.25)$$

Το συνολικό κόστος λειτουργίας του δικτύου θα είναι:

$$C(t) = P(t) \cdot \Pi(t) + \sum_i C_i(t) \quad (6.26)$$

Συνθήκες ελαχιστοποίησης κόστους από Lagrange:

$$\Pi(t) = 2 \cdot a_i \cdot P_i(t) + b_i \quad (6.27)$$

Άρα

$$P_i(t) = \frac{\Pi(t) - b_i}{2 \cdot a_i} \quad (6.28)$$

Έστω ότι για το επόμενο χρονικό διάστημα η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας είναι:

$$\Pi_{min} \leq \Pi(t) \leq \Pi_{max} \quad (6.29)$$

Και επίσης ότι η ισχύς γεννήτριας του για του σημείου φόρτισης i είναι:

$$P_{i,min}(t) \leq P_i(t) \leq P_{i,max}(t) \quad (6.30)$$

Απαιτείται σύμβαση γεννήτριας

$$\begin{cases} P_{i,max}(t) = \frac{\Pi_{max} - b_i}{2 \cdot a_i} \\ P_{i,min}(t) = \frac{\Pi_{min} - b_i}{2 \cdot a_i} \end{cases} \quad (6.31)$$

Η επιλογή των \mathbf{a}_i , \mathbf{b}_i και \mathbf{c}_i λοιπόν γίνεται από την επίλυση του συστήματος των παραπάνω σχέσεων και είναι:

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{a}_i = \frac{\Pi_{max} - \Pi_{min}}{2 \cdot (P_{i,max}(t) - P_{i,min}(t))} \\ \mathbf{b}_i = \frac{P_{i,max}(t) \cdot \Pi_{min} - P_{i,min}(t) \cdot \Pi_{max}}{P_{i,max}(t) - P_{i,min}(t)} \\ \mathbf{c}_i = 0 \end{array} \right. \quad (6.32)$$

7. Προσομοίωση και Αποτελέσματα

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο αναλύεται το δίκτυο διανομής στα πλαίσια του οποίου πραγματοποιήθηκε η μελέτη για την φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων. Η συνέχεια του κεφαλαίου αναφέρεται στην προσομοίωση του δικτύου με αληθοφανή δεδομένα για την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων. Η προσομοίωση αυτή αφορά δύο σενάρια φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων.

- Μη ελεγχόμενη φόρτιση
- Ελεγχόμενη φόρτιση

Το πρώτο σενάριο αφορά την μη ελεγχόμενη φόρτιση των οχημάτων στο δίκτυο διανομής. Στην συνέχεια προσομοιώνεται το δεύτερο σενάριο ελεγχόμενης φόρτισης το οποίο αναπτύχθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, υλοποιώντας την επικοινωνία τεσσάρων φάσεων μεταξύ των ενεργειακών παραγόντων του δικτύου. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο αυτών σεναρίων φόρτισης παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον και εμπεριέχεται στις επόμενες σελίδες της διπλωματικής εργασίας.

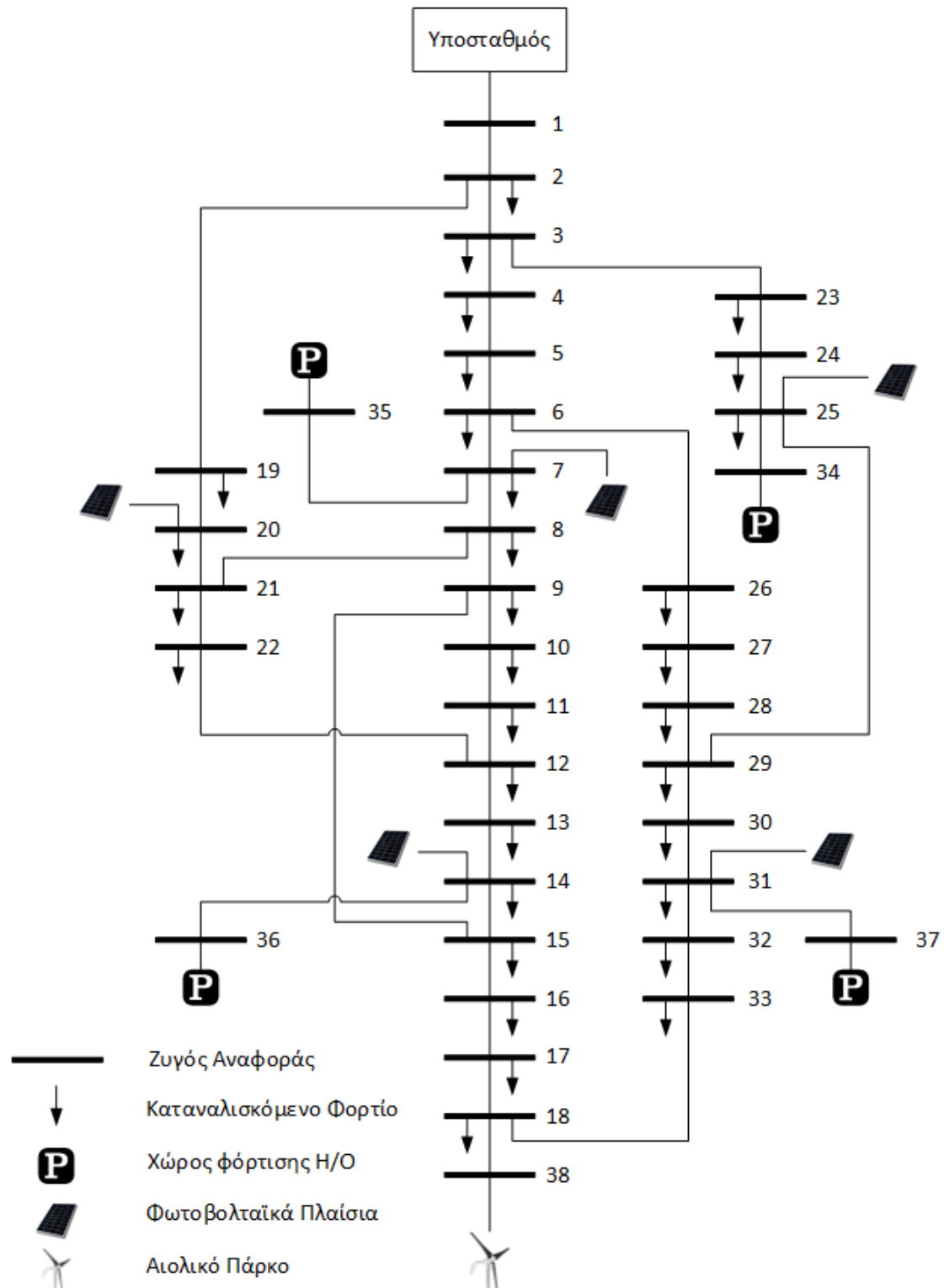
7.1 Περιγραφή Δικτύου Διανομής

Το δίκτυο που χρησιμοποιήθηκε για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας είναι ένα πρότυπο δίκτυο διανομής 33 ζυγών της IEEE [6]. Η ισχύς βάσης του συστήματος είναι 100 MVA ενώ η ονομαστική τάση λειτουργίας του δικτύου διανομής ανέρχεται στα 12,66 kV.

Στο συγκεκριμένο δίκτυο υπήρξε η προσθήκη επιπλέον ζυγών και κατ' επέκταση γραμμών διανομής για την ομαλή ένταξη των ηλεκτρικών οχημάτων σε αυτό. Αρχικά η προσθήκη αφορά τους ζυγούς 34, 35, 36 και 37 οι οποίοι βρίσκονται σε σύνδεση με τους ζυγούς 25, 7, 14 και 31 αντίστοιχα, με γραμμές διανομής αμελητέας σύνθετης αντίστασης. Πρακτικά στους ζυγούς 34, 35, 36 και 37 δημιουργήθηκαν χώροι στάθμευσης για την φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων.

Επιπλέον υπήρξε τροφοδότηση του δικτύου διανομής με την διείσδυση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ). Για τον λόγο αυτό κρίθηκε απαραίτητη η δημιουργία ενός επιπλέον ζυγού (ζυγός 38) για τις ανάγκες ενός αιολικού πάρκου. Τέλος φωτοβολταϊκά πλαίσια συνδέθηκαν σε επιλεγμένους ζυγούς στο δίκτυο για την επιπλέον τροφοδότηση του με ισχύ.

Στην **Εικόνα 7.1** απεικονίζεται σχεδιαστικά το δίκτυο διανομής με όλες τις τροποποιήσεις που έχουν πραγματοποιηθεί σε σχέση με το πρωτότυπο το οποίο και υπάρχει στην βιβλιογραφία.



Εικόνα 7.1 : Σχεδιαστική Απεικόνιση του Δικτύου Διανομής

Συνοπτικά λοιπόν ισχύουν:

- Ζυγός Ταλάντωσης (Ζυγός 1)
- Ζυγοί Φορτίου (Ζυγός 2 έως Ζυγός 33)
- Σταθμοί Φόρτισης Ηλεκτρικών Οχημάτων (Ζυγοί 34, 35, 36, 37)
- Φωτοβολταϊκά Πλαίσια (Ζυγοί 7, 14, 20, 25, 31)
- Αιολικό Πάρκο (Ζυγός 38)

Όσον αφορά τις τιμές ζήτησης των φορτίων του δικτύου διανομής αυτές παρουσιάζονται στον **Πίνακα 7.1** που ακολουθεί. Φυσικά οι τιμές αυτές δεν είναι σταθερές κατά την διάρκεια ενός 24ωρου αλλά μεταβάλλονται διαρκώς. Οι τιμές του **Πίνακα 7.1** αναφέρονται κατά προσέγγιση στο μέσο φορτίο P_{μ} ανά ζυγό καθώς επίσης και στην μέση κατανάλωση αέργου ισχύος.

Ζυγός Αναφοράς	P_D (KW)	Q_D (KVar)	Ζυγός Αναφοράς	P_D (KW)	Q_D (KVar)
2	100	60	18	90	40
3	90	40	19	90	40
4	120	80	20	90	40
5	60	30	21	90	40
6	60	20	22	90	40
7	200	100	23	90	50
8	200	100	24	420	200
9	60	20	25	420	200
10	60	20	26	60	25
11	45	30	27	60	25
12	60	35	28	60	20
13	60	35	29	120	70
14	120	80	30	200	100
15	60	10	31	150	70
16	60	20	32	210	100
17	60	20	33	60	40

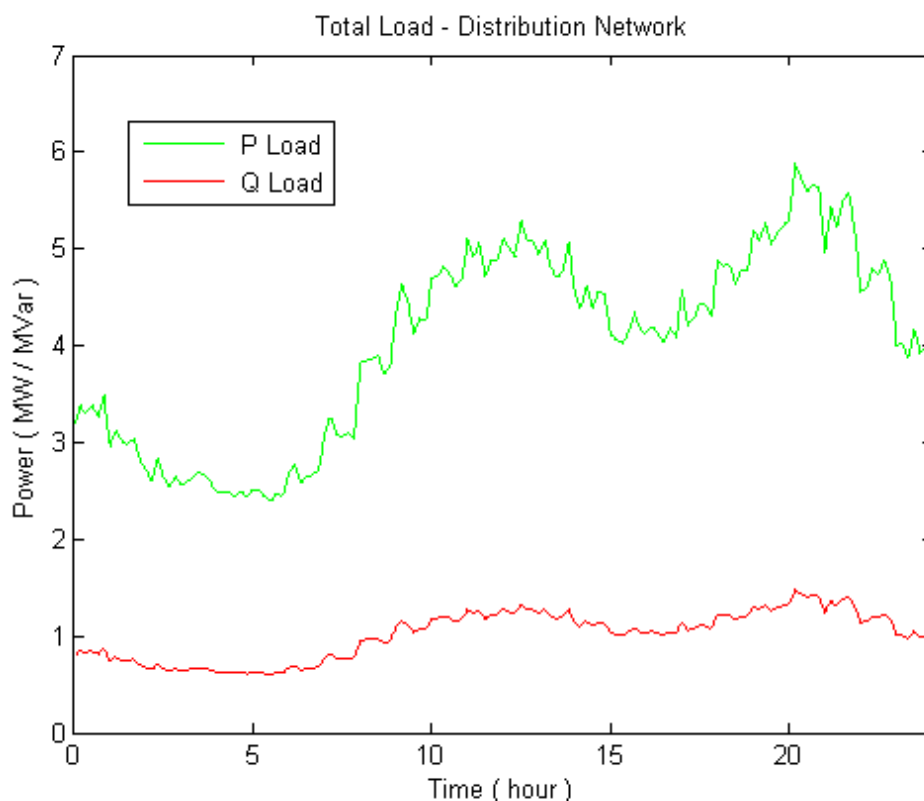
Πίνακας 7.1 : Μέσο Καταναλισκόμενο Φορτίο Ενεργού και Αέργου Ισχύος ανά Ζυγό

Όπως γίνεται αντιληπτό η μέση ζήτηση ισχύος διαφέρει από ζυγό σε ζυγό. Οι λόγοι για τους οποίους συμβαίνει αυτό είναι κυρίως το πλήθος των καταναλωτών ανά ζυγό αλλά φυσικά και το είδος του φορτίου (οικιακό, εμπορικό ή βιομηχανικό). Το υψηλότερο καταναλισκόμενο μέσο φορτίο σύμφωνα με τον **Πίνακα 7.1** παρατηρείται στους ζυγούς 24 και 25 με τιμή φορτίου $P_{\mu} = 420$ KW ενώ το χαμηλότερο στον ζυγό 11 με αντίστοιχη τιμή μέσου φορτίου $P_{\mu} = 45$ KW,

με την ημερήσια διακύμανση της τιμής ζήτησης του φορτίου ανά ζυγό πάντως να παρουσιάζει παρόμοια συμπεριφορά.

Στην συνέχεια παρουσιάζεται σχεδιαστικά (**Εικόνα 7.2**) μία ενδεικτική συνολική ημερήσια καμπύλη κατανάλωσης ενεργού και αέργου ισχύος των ζυγών φορτίου του δικτύου. Με πράσινο χρώμα είναι η καμπύλη ζήτησης ενεργού ισχύος, ενώ με κόκκινο εκείνη της αέργου. Σημαντική επισήμανση αποτελεί το γεγονός ότι οι τιμές αυτές αναφέρονται αποκλειστικά και μόνο στα καταναλισκόμενα φορτία των ζυγών χωρίς να περιλαμβάνονται οι τιμές ισχύος από την εισχώρηση των ΑΠΕ στο δίκτυο.

Το φορτίο αιχμής παρατηρείται κυρίως στις μεσημεριανές και βραδινές ώρες γεγονός απόλυτα ρεαλιστικό και αναμενόμενο. Το φορτίο αιχμής P_A είναι της τάξης των 6 MW κατά προσέγγιση, ενώ το αντίστοιχο φορτίο βάσης P_B κυμαίνεται στα επίπεδα των 2.5 MW και παρατηρείται τις πρώτες πρωινές ώρες. Τέλος όσον αφορά τις τιμές κατανάλωσης αέργου ισχύος, αυτές κυμαίνονται σε χαμηλότερα επίπεδα τιμών, κάτι απόλυτα φυσιολογικό. Η διακύμανση της τιμής της αέργου ισχύος βρίσκεται στο επίπεδο του 1 MVar χωρίς ιδιαίτερη απόκλιση από αυτό.



Εικόνα 7.2 : Συνολική Ημερήσια Καμπύλη Κατανάλωσης Ενεργού και Αεργου Ισχύος των Ζυγών Φορτίου του Δικτύου

Από τον Ζυγό	Προς τον Ζυγό	R (Ω)	X (Ω)
1	2	0.057525912	0.029324489
2	3	0.307595167	0.156667640
3	4	0.228356656	0.116299674
4	5	0.237777928	0.121103899
5	6	0.510994811	0.441115179
6	7	0.116798814	0.386084969
7	8	0.443860450	0.146684835
8	9	0.642643047	0.461704714
9	10	0.651378001	0.461704714
10	11	0.122663712	0.040555144
11	12	0.233597628	0.077241951
12	13	0.915922324	0.720633708
13	14	0.337917936	0.444796338
14	15	0.368739846	0.328184702
15	16	0.465635443	0.340039282
16	17	0.804239697	1.073775420
17	18	0.456713311	0.358133116
2	19	0.102323747	0.097644308
19	20	0.938508419	0.845668336
20	21	0.255497406	0.298485858
21	22	0.442300637	0.584805173
3	23	0.281515090	0.192356167
23	24	0.560284909	0.442425422
24	25	0.559037059	0.437434020
6	26	0.126656834	0.064513875
26	27	0.177319567	0.090281989
27	28	0.660736881	0.582559042
28	29	0.501760717	0.437122057
29	30	0.316642084	0.161284687
30	31	0.607952801	0.600840053
31	32	0.193728802	0.225798562
32	33	0.212758523	0.330805188
21	8	1.247850580	1.247850580
9	15	1.247850580	1.247850580
12	22	1.247850580	1.247850580
18	33	0.311962644	0.311962644
25	29	0.311962644	0.311962644
25	34	0.003119626	0.003119626
7	35	0.001266568	0.001642643
14	36	0.004654483	0.003400393
31	37	0.001965365	0.002252370
38	18	0.019653647	0.022523703

Πίνακας 7.2 : Παράμετροι Σύνθετης Αντίστασης Γραμμών Διανομής

Στον **Πίνακα 7.2** παρουσιάζονται οι τιμές των παραμέτρων $R(\Omega)$, $X(\Omega)$, της σύνθετης αντίστασης $Z(\Omega)$ των γραμμών διανομής. Η σύνθετη αντίσταση Z ορίζεται ως εξής:

$$Z = R + j \cdot X \quad (7.1)$$

Όπου R , η πραγματική και X μιγαδική ή επαγωγική ηλεκτρική αντίσταση.

Τα συμπεράσματα από τον **Πίνακα 7.2** είναι εξίσου σημαντικά και αφορούν την συνολική αντίσταση των γραμμών διανομής ενδιάμεσα δύο κόμβων. Όσο αυξάνεται η συνολική αντίσταση ενός κλάδου τόσο αυξάνεται η πτώση τάσης με συνέπεια φυσικά την αύξηση των απωλειών του δικτύου. Η υψηλότερη τιμή συνολικής αντίστασης παρατηρείται στους κλάδους 21-8, 9-15, 12-22 με την τιμή των παραμέτρων της σύνθετης αντίστασης να είναι $R = X = 1,248 \Omega$. Παράλληλα στους κλάδους 25-34, 7-35, 14-36 και 31-37 παρατηρείται αμελητέα συνολική αντίσταση.

Οι ζυγοί αναφοράς 34, 35, 36 και 37 αποτελούν τους ζυγούς στους οποίους έγινε η μελέτη για την φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων και από τους οποίους εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό η συνολική συμπεριφορά του δικτύου. Κάθε ένας από αυτούς αντιστοιχεί σε μία και μόνο γεννήτρια η οποία είναι υπεύθυνη είτε για την ροή ισχύος από το δίκτυο προς τα ηλεκτρικά οχήματα είτε το αντίθετο. Πρόκειται ουσιαστικά για «αδιαίτερες» γεννήτριες οι οποίες μπορούν να λειτουργούν και με αρνητική ισχύ. Δηλαδή μπορούν είτε να τροφοδοτούν τα ηλεκτρικά οχήματα με ισχύ, καταναλώνοντας την από το δίκτυο, είτε καταναλώνοντας ισχύ από τα ηλεκτρικά οχήματα προσφέροντας την στο δίκτυο όταν αυτό κρίνεται αναγκαίο από τον διαχειριστή. Το επίπεδο λοιπόν του φορτίου των συγκεκριμένων ζυγών αλλά και το πρόσημο του είναι δυναμικό, δηλαδή μεταβάλλεται διαρκώς και απότομα. Η διακύμανση αυτή εξαρτάται κάθε χρονική στιγμή από το πλήθος των οχημάτων που βρίσκονται συνδεδεμένα στο δίκτυο, από την συνολική κατάσταση του δικτύου αλλά και από το κόστος λειτουργίας των γεννητριών λαμβάνοντας υπόψιν την τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας.

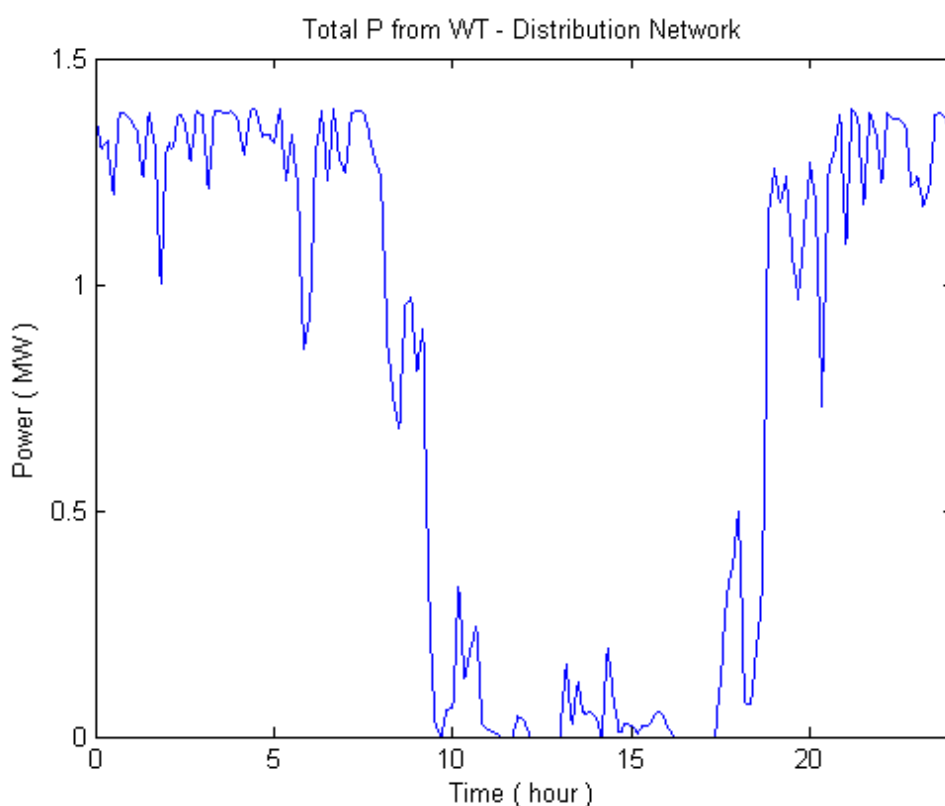
Τέλος όσον αφορά τις μονάδες παραγωγής ΑΠΕ, η ένταξη της ισχύος τους στο δίκτυο πραγματοποιείται με την πλήρη εξίσωση της παραγόμενης τιμής ισχύος κάθε χρονική στιγμή με την αντίστοιχη ζήτηση ισχύος.

Αν για παράδειγμα $P_{D_i}(t)$ η τιμή ζήτησης φορτίου στον ζυγό i την χρονική στιγμή t και $P_{ΑΠΕ_i}(t)$ η παραγόμενη ποσότητα ισχύος από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας την ίδια χρονική στιγμή, τότε το συνολικό φορτίο του ζυγού την χρονική στιγμή t είναι:

$$P'_{D_i}(t) = P_{D_i}(t) - P_{ΑΠΕ_i}(t) \quad (7.2)$$

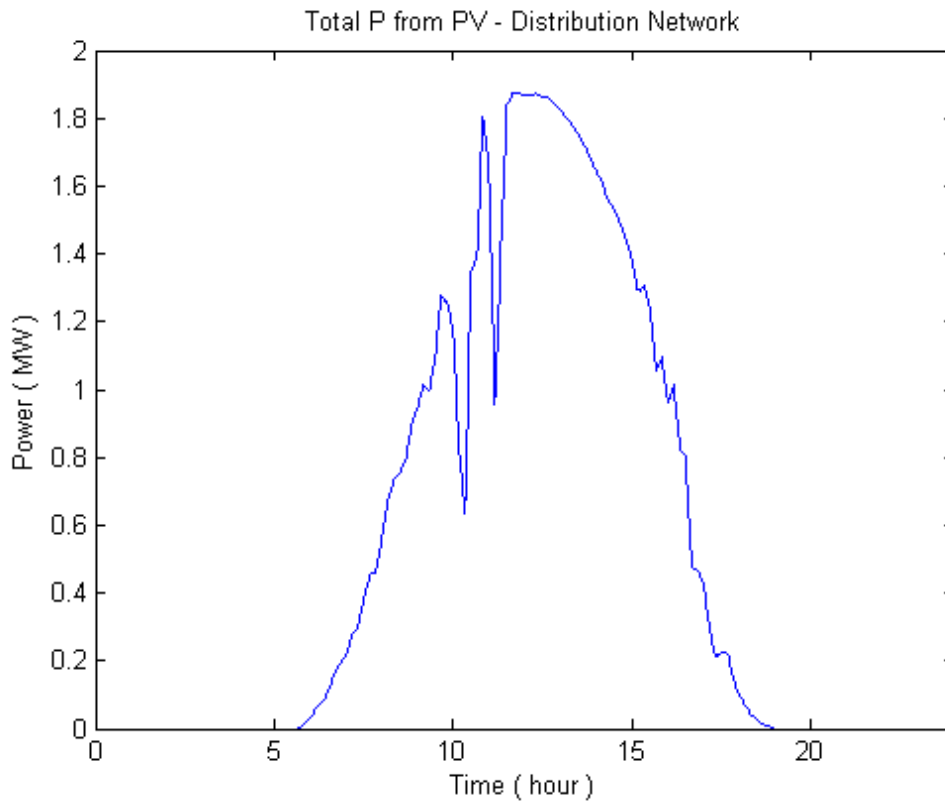
Η **Εικόνα 7.3** απεικονίζει την ημερήσια καμπύλη παραγόμενης ισχύος του αιολικού πάρκου του ζυγού 38. Γίνονται αντιληπτές οι έντονες διακυμάνσεις του παραγόμενου φορτίου λόγω της μεταβαλλόμενης έντασης του ανέμου. Το σημείο αιχμής της παραγόμενης ισχύος είναι της τάξης των $P_A=1.5$ MW και παρατηρείται τις πρωινές και βράδυνες ώρες. Αντίστοιχα οι μικρότερες έως και μηδενικές ποσότητες παραγόμενης ισχύος παρατηρούνται τις μεσημεριανές ώρες.

Θα πρέπει να επισημανθεί στο σημείο αυτό ότι οι τιμές παραγόμενης ισχύος του αιολικού πάρκου ακολουθούν μία αληθοφανή καμπύλη για τις ανάγκες της προσομοίωσης. Θεωρήθηκε ως μηδενικός ο συντελεστής ισχύος του αιολικού πάρκου ($\cos\phi = 0$), δηλαδή η παραγόμενη άεργος ισχύς ήταν μηδέν.



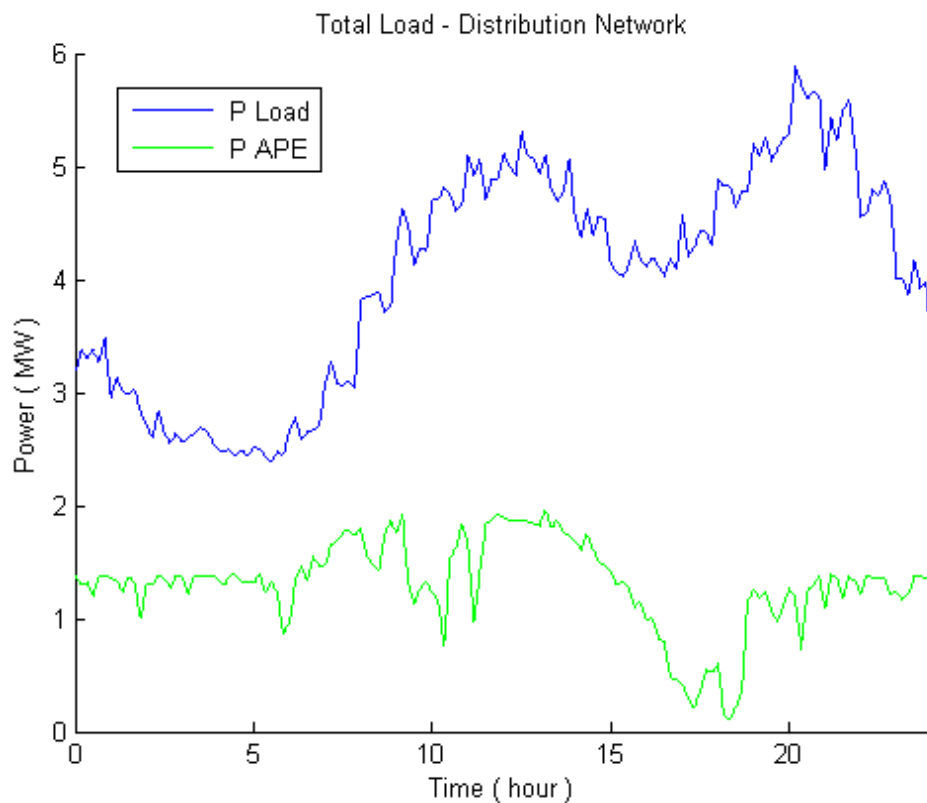
Εικόνα 7.3 : Ημερήσια Καμπύλη Παραγόμενης Ισχύος Αιολικού Πάρκου

Αντίστοιχα η **Εικόνα 7.4** που ακολουθεί απεικονίζει την ημερήσια παραγόμενη ισχύ των φωτοβολταϊκών πλαισίων του δικτύου διανομής. Είναι απολύτως λογικό τις πρώτες πρωινές ώρες της μέρας και φυσικά τις βράδυνες η παραγόμενη ισχύς των φωτοβολταϊκών πλαισίων να είναι μηδέν ή έστω πολύ κοντά στο μηδέν. Η μέγιστη παραγόμενη ποσότητα ισχύος παρουσιάζεται τις μεσημεριανές ώρες και είναι της τάξης των $P_A=1.8$ MW. Και για τα φωτοβολταϊκά πλαίσια θεωρήθηκε ως μηδενικός ο συντελεστής ισχύος ($\cos\phi = 0$), δηλαδή η παραγόμενη άεργος ισχύς ήταν μηδέν.



Εικόνα 7.4 : Ημερήσια Καμπύλη Παραγόμενης Ισχύος των Φωτοβολταϊκών Πλαισίων του Δικτύου

Τέλος σε πλήρη χρονική αντιστοιχία παρουσιάζονται οι καμπύλες φορτίου (**Εικόνα 7.5**) για την ενεργό και άεργο ισχύ ζήτησης φορτίου με την παράλληλη έγχυση της παραγόμενης ισχύος των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας του δικτύου.



Εικόνα 7.5 : Συνολική Ζήτηση Ισχύος Δικτύου με Παράλληλη Απεικόνιση της Αντίστοιχης Παραγόμενης Ποσότητας ΑΠΕ την ίδια χρονική στιγμή

7.2 Προσομοίωση Φόρτισης

Η προσομοίωση φόρτισης των οχημάτων πραγματοποιήθηκε κατά την διάρκεια ενός 24ώρου. Το στιγμιότυπο του δικτύου την χρονική στιγμή t_0 (το πρώτο λεπτό του 24ώρου) αφορά την φόρτιση 600 οχημάτων τα οποία βρίσκονται σε σύνδεση με το δίκτυο. Πρόκειται για τέσσερις διαφορετικούς τύπους οχημάτων χαρακτηριστικά των οποίων αποτελούν:

- Μέγιστη Προσφερόμενη Ισχύς των οχημάτων στο δίκτυο (KW)
- Μέγιστη Καταναλισκόμενη Ισχύς των οχημάτων από το δίκτυο (KW)
- Μέγιστο Επίπεδο Φόρτισης Συσσωρευτή (KWh)
- Ελάχιστο Επίπεδο Φόρτισης Συσσωρευτή (KWh)

Όσον αφορά το ελάχιστο επίπεδο φόρτισης του συσσωρευτή των οχημάτων αυτός υπολογίζεται ως το 20% της αντίστοιχης μέγιστης χωρητικότητας του ως εξής:

$$State_of_Charge_{min} = 20\% State_of_Charge_{max} \quad (7.3)$$

Για τις τέσσερις διαφορετικές κλάσεις ηλεκτρικών οχημάτων ισχύουν:

Αριθμός Κλάσης	Μέγιστη Προσφερόμενη Ισχύς (KW)	Μέγιστη Καταναλισκόμενη Ισχύς (KW)	Μέγιστο Επίπεδο Φόρτισης (KWh)	Ελάχιστο Επίπεδο Φόρτισης (KWh)
1	-5	5	20	4
2	-7	7	24	4.8
3	-8	8	26	5.2
4	-10	10	30	6

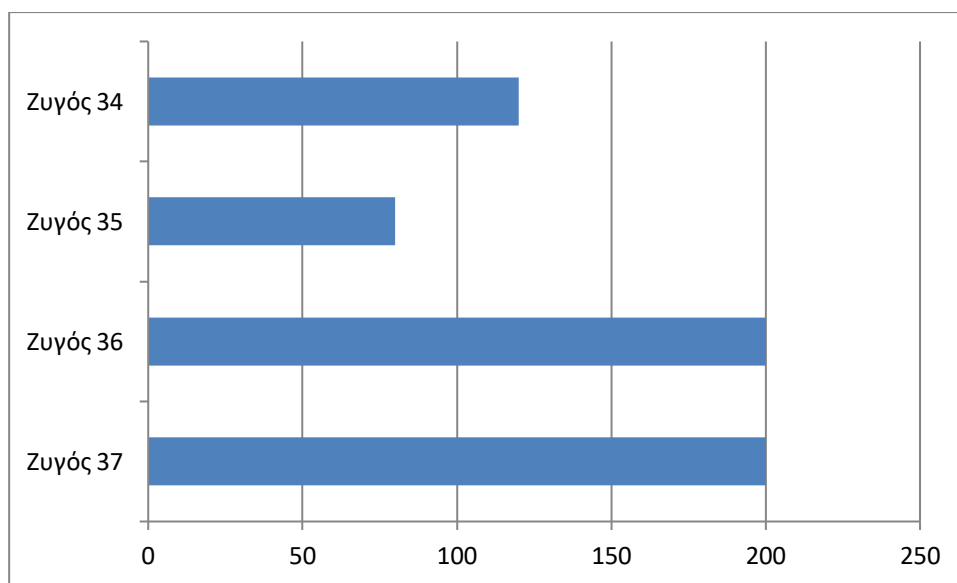
Πίνακας 7.3 : Δεδομένα Παραμέτρων Οχημάτων Προσομοίωσης

Ενώ όσον αφορά την πιθανότητα εμφάνισης των παραπάνω κλάσεων κατά την προσομοίωση αυτές παρουσιάζονται στον **Πίνακα 7.4** που ακολουθεί

Αριθμός Κλάσης	Πιθανότητα Εμφάνισης (%)
1	30%
2	35%
3	25%
4	10%

Πίνακας 7.4 : Πιθανότητα Εμφάνισης Κλάσης Ηλεκτρικού Οχήματος

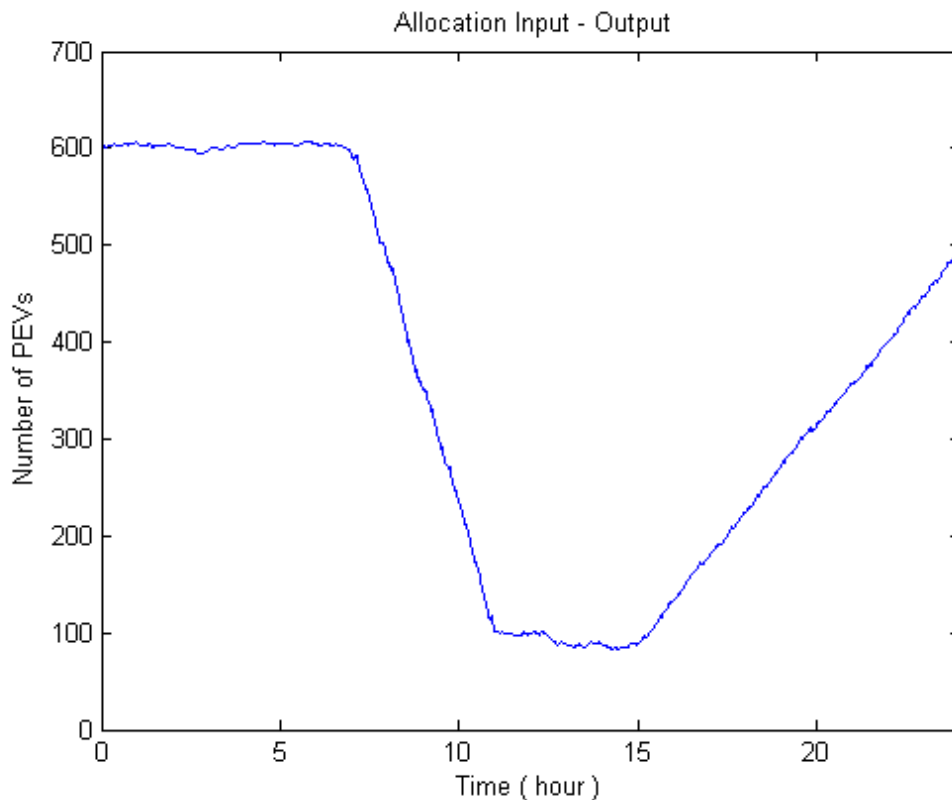
Η διάρκεια φόρτισης ($T_{charging}$) που προσομοιώθηκε για κάθε κλάση επιλέγεται από τον αλγόριθμο τυχαία σύμφωνα με κανονική κατανομή (Gauss) με μέση τιμή τις 8 ώρες και διασπορά 2. Η κατανομή των ηλεκτρικών οχημάτων στους σταθμούς φόρτισης για το στιγμιότυπο δικτύου την χρονική στιγμή t_0 των 600 οχημάτων πραγματοποιήθηκε όπως φαίνεται στην **Εικόνα 7.6**.



Εικόνα 7.6 : Κατανομή Οχημάτων σε Σταθμούς Φόρτισης την χρονική στιγμή t_0

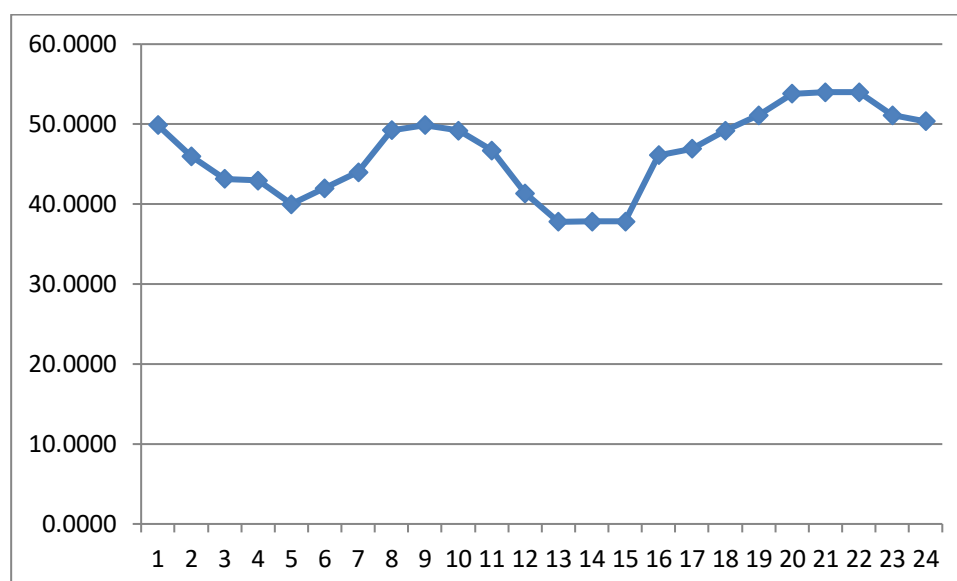
Το σημείο φόρτισης στον Ζυγό 34 αρχικοποιήθηκε με 120 οχήματα ενώ χαμηλότερα σε αριθμό (80) τοποθετήθηκαν στον Ζυγό 35. Στους σταθμούς φόρτισης των Ζυγών 36 και 37 συνδέθηκαν από 200 οχήματα στον καθένα. Φυσικά ο αριθμός των οχημάτων δεν παρέμεινε σταθερός αλλά ακολουθήθηκε μία κατανομή Εισόδου-Εξόδου από τους σταθμούς φόρτισης του δικτύου διανομής.

Η κατανομή Εισόδου-Εξόδου των οχημάτων στους σταθμούς φόρτισης του δικτύου κατά την διάρκεια της προσομοίωσης του 24ωρου δημιουργήθηκε λαμβάνοντας υπόψη τις συνήθειες των οδηγών. Κατά την διάρκεια της νύχτας από τα μεσάνυχτα έως και τις πρώτες πρωινές ώρες της μέρας (07:00h) η εισαγωγή ενός οχήματος στο σύστημα φόρτισης παρουσιάζει παρόμοια πιθανότητα με εκείνη της εξόδου οχήματος από αυτό. Στην συνέχεια η εξαγωγή των οχημάτων από την βάση φόρτισης είναι συνεχής μέχρι περίπου τις 11 το πρωί με την εισαγωγή οχημάτων στο ίδιο διάστημα να είναι σχεδόν αμελητέα. Η ισορροπία στην κατανομή Εισόδου-Εξόδου επανέρχεται τις μεσημεριανές ώρες (11:00h – 15:00h) κατά τις οποίες στους σταθμούς φόρτισης υπάρχουν ελάχιστα οχήματα σε σύνδεση. Τέλος παρατηρείται μία συνεχής εισροή οχημάτων στο σύστημα φόρτισης κατά την διάρκεια του απογεύματος και της νύχτας όπως φαίνεται και στην **Εικόνα 7.7** που ακολουθεί.



Εικόνα 7.7 : Ημερήσια Κατανομή Εισόδου-Εξόδου Οχημάτων στους Σταθμούς Φόρτισης του Δικτύου

Εν κατακλείδι η ημερήσια δिकύμανση της ηλεκτρικής ενέργειας προήλθε από δεδομένα του ΑΔΜΗΕ (Ανεξάρτητος Διαχειριστής Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας) και χρησιμοποιήθηκε για το κόστος υπολογισμού των γεννητριών στα σημεία φόρτισης οχημάτων όπως αυτή αναλύθηκε στην παράγραφο 6.4 με το παράθυρο πρόβλεψης τιμή ισχύος να κυμαίνεται στις 12 ώρες. Ο κάθετος άξονας αναφέρεται στην τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας (€/MWh) για το αντίστοιχο ωριαίο χρονικό διάστημα.



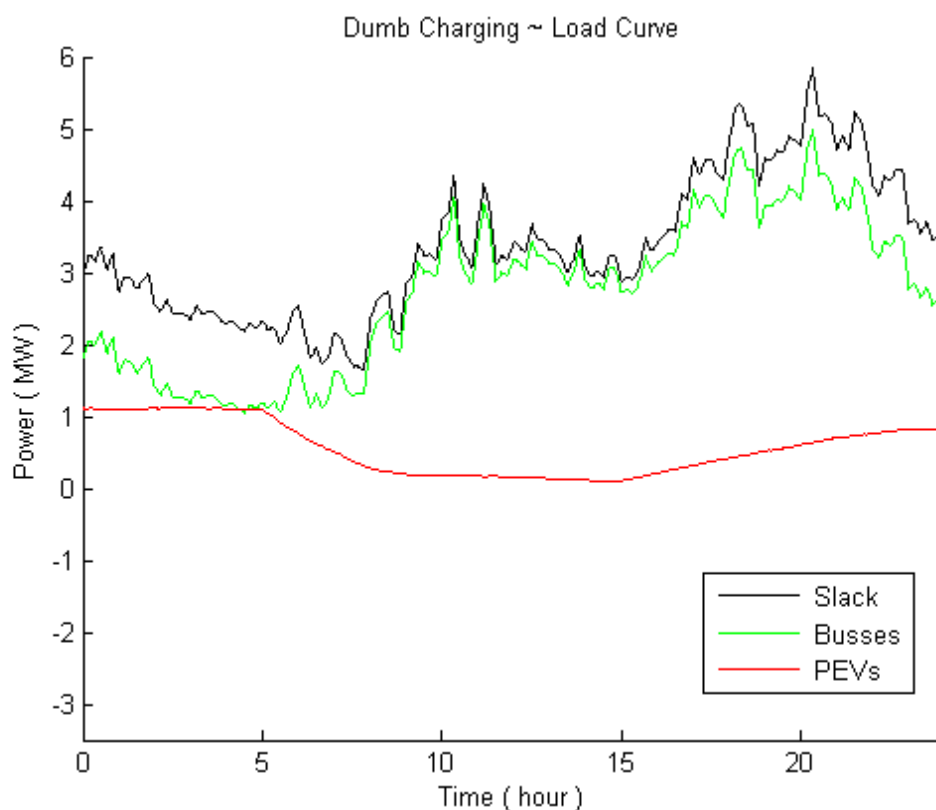
Εικόνα 7.8 : Ημερήσια Διακύμανση της Τιμής της Ηλεκτρικής Ενέργειας Σύμφωνα με Δεδομένα του ΑΔΜΗΕ

7.3 Μη Ελεγχόμενη Φόρτιση

Στο σενάριο της μη ελεγχόμενης φόρτισης τα οχήματα κατά την σύνδεση τους στα σημεία φόρτισης αυτομάτως μετατρέπονται σε φορτία ζήτησης για το δίκτυο διανομής. Η σύνδεση των οχημάτων μπορεί να πραγματοποιηθεί οποιαδήποτε στιγμή της μέρας και το δίκτυο οφείλει να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις τους ανεξάρτητα από την κατάσταση στην οποία βρίσκεται την δεδομένη χρονική στιγμή. Ο DNM δεν έχει την δυνατότητα να τα διαχειριστεί προς όφελος του δικτύου καθώς τα ίδια δεν παρέχουν καμία απολύτως ευελιξία σε αυτόν. Κατά την στιγμή της σύνδεσης τα οχήματα λειτουργούν με ισχύ:

$$P_{sheduled} = \frac{SoC_{max} - SoC(T_{in})}{T_{charging}} \quad (7.4)$$

Δηλαδή την προβλεπόμενη ισχύ λειτουργίας (σε KW) κατά την οποία το όχημα καταναλώνει ισχύ από το δίκτυο τέτοια ώστε μετά το πέρας του χρόνου φόρτισης που έχει θέσει ο χρήστης τα επίπεδα φόρτισης του συσσωρευτή να βρίσκονται στα επιθυμητά όρια. Η ισχύς αυτή δεν μεταβάλλεται κατά την διάρκεια φόρτισης για οποιοδήποτε λόγο παρά μόνο όταν η κατάσταση φόρτισης



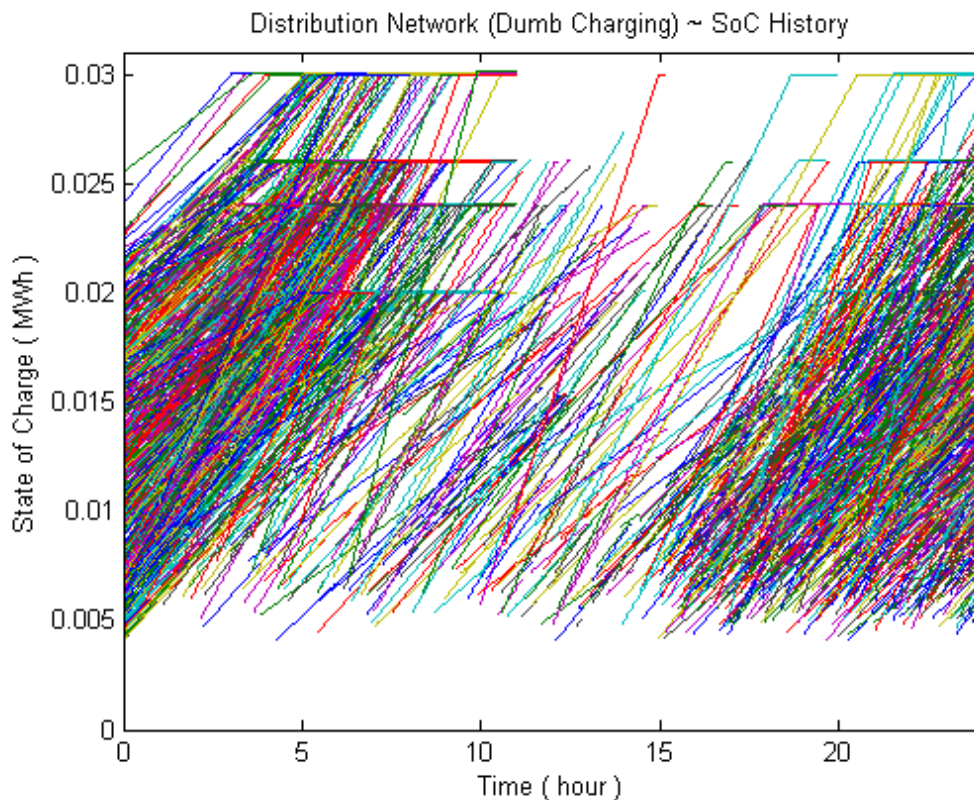
Εικόνα 7.9 : Καμπύλες Φορτίου του Δικτύου Διανομής κατά το Σενάριο της Μη Ελεγχόμενης Φόρτισης

του συσσωρευτή φτάσει στα ανώτατα επίπεδα τιμών ενέργειας. Την στιγμή κατά την οποία συμβεί αυτό αυτομάτως το όχημα σταματάει την ροή ισχύος από το δίκτυο προς το συσσωρευτή του και παραμένει αδρανές έως ότου εξέλθει του σταθμού φόρτισης. Ο ζυγός ταλάντωσης καλείται να ικανοποιήσει την ζήτηση ισχύος τόσο των οχημάτων όσο και των ζυγών την ίδια χρονική στιγμή. Στην **Εικόνα 7.9** απεικονίζονται οι καμπύλες ενεργού ισχύος P (MW) που αφορούν:

- Την ισχύ τροφοδοσίας του δικτύου (MW) κατά την διάρκεια του 24ώρου από τον ζυγό ταλάντωσης (Slack Power).
- Την ισχύ ζήτησης (MW) των ζυγών φορτίου του δικτύου κατά την ίδια περίοδο.
- Την ισχύ ζήτησης (MW) των οχημάτων σε πλήρη αντιστοιχία με τα παραπάνω.

Το επίπεδο φόρτισης των οχημάτων (KWh) υπολογίζεται από το σύστημα κάθε λεπτό. Έστω ότι το επίπεδο φόρτισης την χρονική στιγμή t είναι: $SoCharge(t)$ και η ισχύς τροφοδοσίας του συσσωρευτή του από το δίκτυο την ίδια χρονική στιγμή είναι $P_{sheduled}(t)$ τότε για το επόμενο λεπτό το επίπεδο φόρτισης του οχήματος θα είναι:

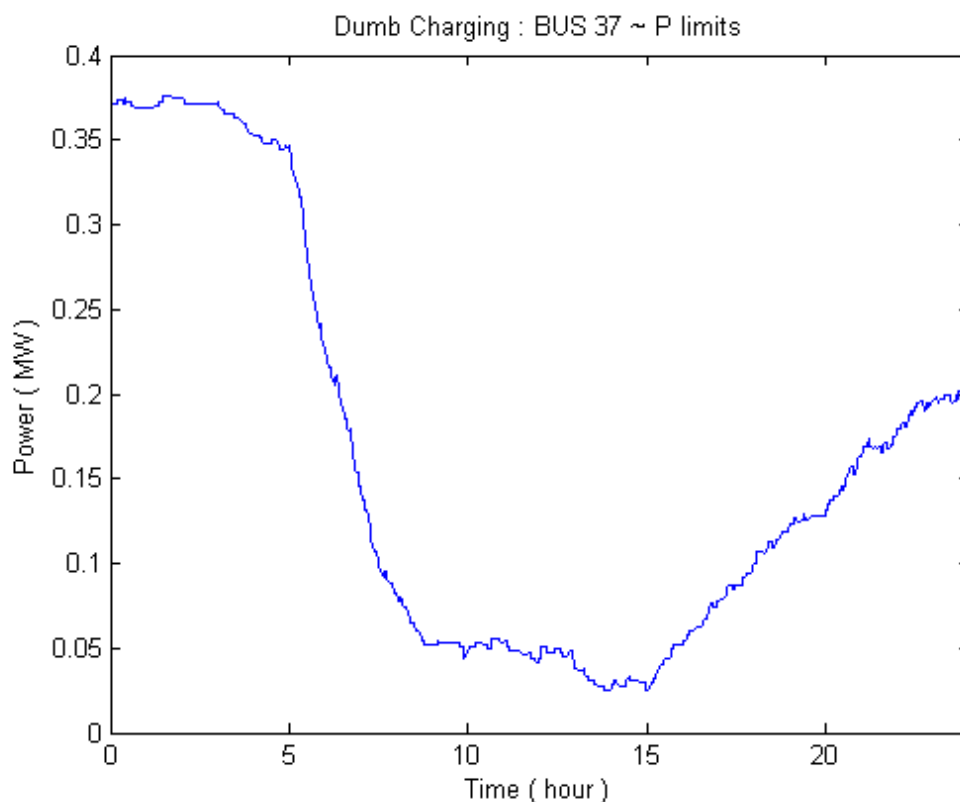
$$SoCharge(t + 1) = SoCharge(t) + P_{sheduled}(t) (KW) \cdot 1/60 (h)$$



Εικόνα 7.10 : Κατάσταση Φόρτισης Οχημάτων κατά το Σενάριο της Μη Ελεγχόμενης Φόρτισης

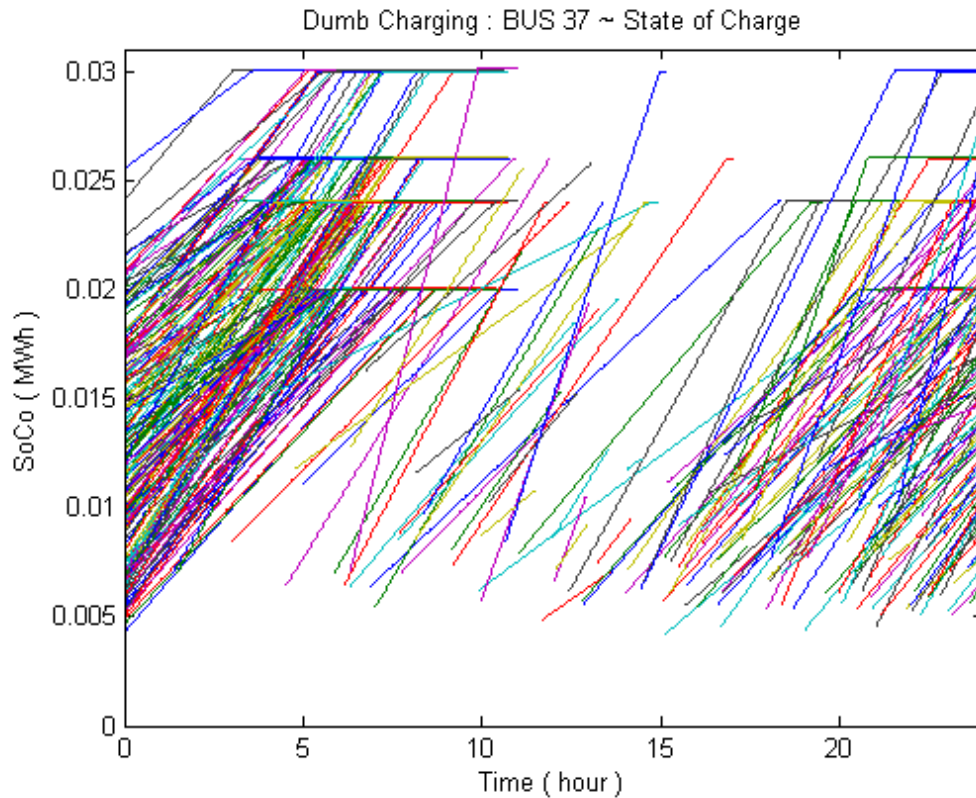
Στην **Εικόνα 7.10** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του επιπέδου φόρτισης όλων των οχημάτων του δικτύου διανομής στην διάρκεια του 24ωρου της προσομοίωσης κατά το σενάριο της μη ελεγχόμενης φόρτισης. Ενδιαφέρον παρουσιάζουν και τα αποτελέσματα ανά σημείο φόρτισης του δικτύου. Οι **Εικόνες 7.10** και **7.11** παρουσιάζουν τα δεδομένα του σημείου φόρτισης στον ζυγό 37.

Τα επίπεδα ισχύος των οχημάτων όπως γίνεται αντιληπτό στην **Εικόνα 7.10** παραμένουν πάντα θετικά ακολουθώντας την μορφή ζήτησης ενός τυπικού φορτίου του δικτύου διανομής. Στην συγκεκριμένη καμπύλη παρατηρείται μείωση στην ζητούμενη ποσότητα ισχύος των οχημάτων κατά τις ώρες 07:00-11:00 κατά τις οποίες σύμφωνα με την κατανομή Εισόδου-Εξόδου της προσομοίωσης η έξοδος των οχημάτων από το σύστημα φόρτισης είναι συνεχής. Αναμενόμενη αύξηση παρουσιάζεται στην ζήτηση τις απογευματινές και βραδινές ώρες στις οποίες η είσοδος των οχημάτων στο σύστημα είναι αυξανόμενη.



Εικόνα 7.11 : Επίπεδα Ενεργού Ισχύος Λειτουργίας του Σταθμού Φόρτισης στον Ζυγό 37 κατά το Σενάριο της Μη Ελεγχόμενης Φόρτισης

Τέλος στην **Εικόνα 7.12** παρουσιάζονται τα επίπεδα φόρτισης των οχημάτων του ζυγού 37. Είναι εμφανής η μαζική έξοδος των οχημάτων από το δίκτυο τις πρωινές ώρες όπως επίσης και η σταδιακά αυξανόμενη είσοδος σε αυτό στην συνέχεια της ημέρας.



Εικόνα 7.12 : Κατάσταση Φόρτισης Οχημάτων κατά το Σενάριο της Μη Ελεγχόμενης Φόρτισης στον Ζυγό 37

7.4 Ελεγχόμενη Φόρτιση

Στο σενάριο της ελεγχόμενης φόρτισης η οποία και αναλύθηκε εκτενώς στο κεφάλαιο 6 τα ηλεκτρικά οχήματα παρέχουν στον διαχειριστή του δικτύου ευελιξία στον τρόπο με τον οποίο επιθυμεί να τα εκμεταλλευτεί. Στο συγκεκριμένο σενάριο τα οχήματα στους σταθμούς φόρτισης έχουν την δυνατότητα να είτε να απορροφούν ισχύ από το δίκτυο για την φόρτισή τους είτε να προσφέρουν ισχύ σε αυτό όταν κρίνεται απαραίτητο με την απαιτούμενη εκφόρτιση του συσσωρευτή τους.

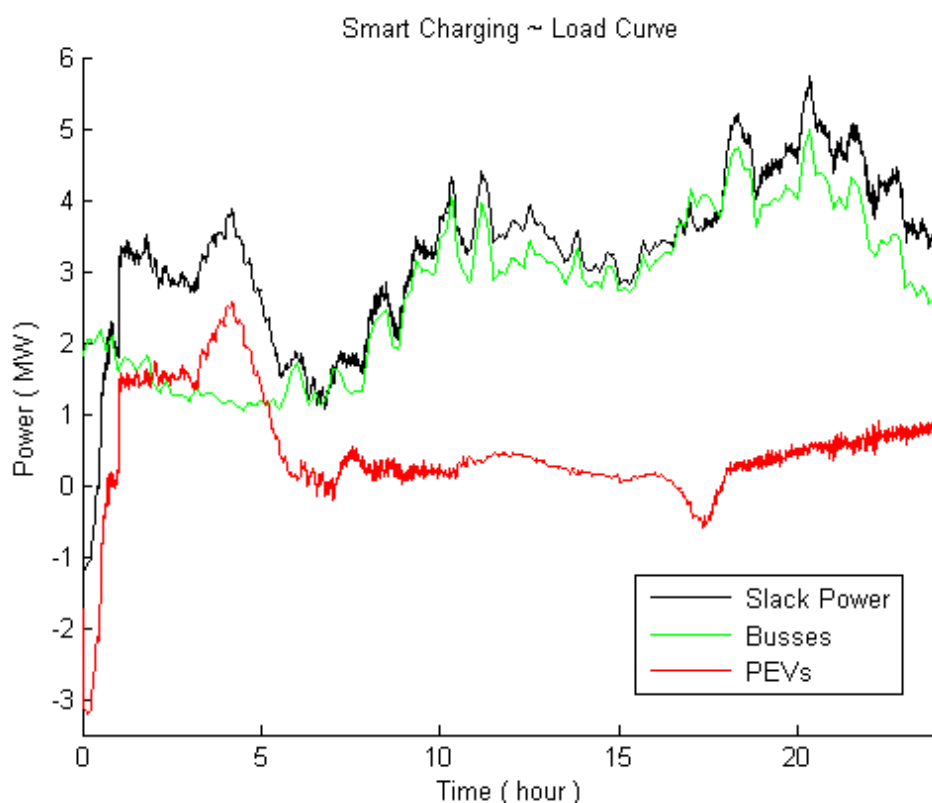
Τα οχήματα την στιγμή της σύνδεσής τους λειτουργούν με την προβλεπόμενη ισχύ λειτουργίας $P_{sheduled}$ όπως ακριβώς συμβαίνει και στο σενάριο της μη ελεγχόμενης φόρτισης. Σε αντίθεση όμως με αυτήν το επίπεδο ισχύος λειτουργίας είναι δυναμικό καθόλη την διάρκεια φόρτισης και η μετάβαση σε διαφορετικά επίπεδα πραγματοποιείται σύμφωνα με τον αλγόριθμο του συστήματος φόρτισης του προηγούμενου κεφαλαίου.

Βασικά κριτήρια για τον τρόπο διαχείρισης των οχημάτων αποτέλεσαν όπως ήδη έχει αναφερθεί η ελαχιστοποίηση των απωλειών του δικτύου, η διακύμανση του επιπέδου των τάσεων στα επίπεδα που θέτει ο διαχειριστής και η

τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας κάθε χρονική στιγμή με παράθυρο πρόβλεψης 12 ωρών. Στην **Εικόνα 7.13** απεικονίζονται οι καμπύλες ενεργού ισχύος P (MW) με σύμβαση φορτίου και αφορούν:

- Την ισχύ τροφοδοσίας του δικτύου (MW) κατά την διάρκεια του 24ώρου από τον ζυγό ταλάντωσης (Slack Power).
- Την ισχύ ζήτησης (MW) των ζυγών φορτίου του δικτύου κατά την ίδια περίοδο.
- Την ισχύ ζήτησης ή προσφοράς (MW) των οχημάτων σε πλήρη αντιστοιχία με τα παραπάνω.

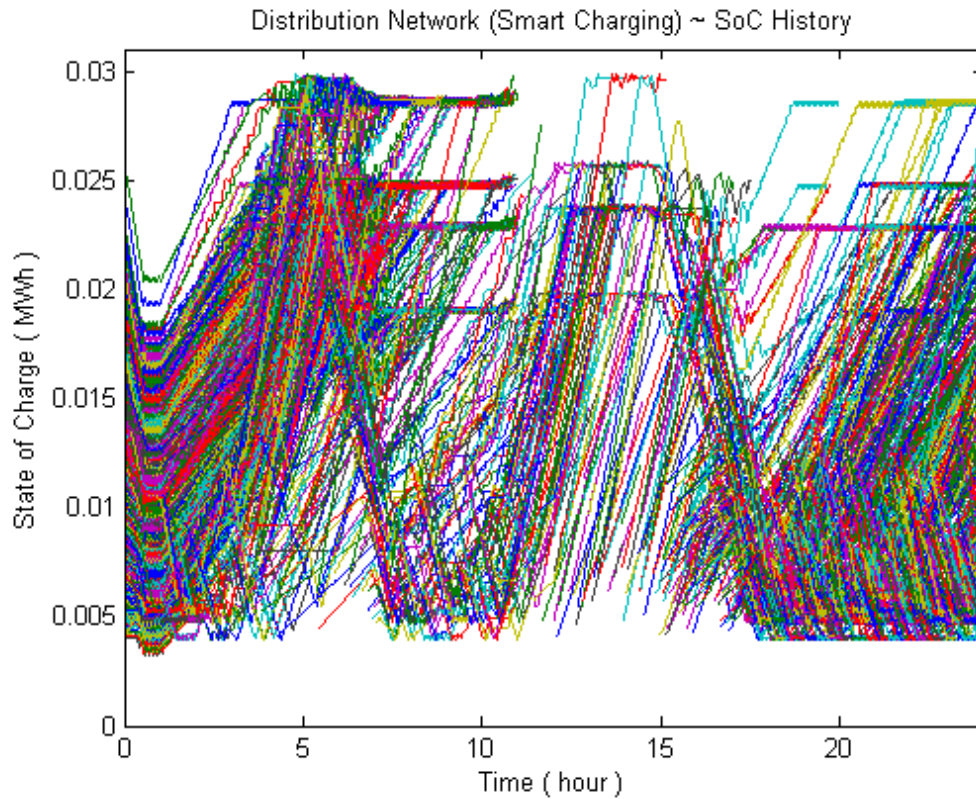
Όπως γίνεται αντιληπτό παρατηρώντας και την τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας της **Εικόνας 7.8**, σύμφωνα με δεδομένα του ΑΔΜΗΕ, σε περίπτωση που η τιμή είναι χαμηλή τα οχήματα απορροφούν ισχύ από το δίκτυο για την φόρτιση τους. Σε αντίθετη όμως περίπτωση κατά την οποία η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας βρίσκεται σε αυξημένα επίπεδα τιμών τα ηλεκτρικά οχήματα προσφέρουν ισχύ σύμφωνα με αυτήν που θέτει ο διαχειριστής του δικτύου.



Εικόνα 7.13 : Καμπύλες Φορτίου του Δικτύου Διανομής κατά το Σενάριο της Ελεγχόμενης Φόρτισης

Αποτέλεσμα όλων αυτών είναι τα επίπεδα φόρτισης των οχημάτων να παρουσιάζουν αυξομειώσεις κατά την διάρκεια φόρτισης τους με την καμπύλη της

Εικόνα 7.14 να αντικατοπτρίζει την παραπάνω αυξομείωση στην ισχύ λειτουργίας τους.



Εικόνα 7.14 : Κατάσταση Φόρτισης Οχημάτων κατά το Σενάριο της Ελεγχόμενης Φόρτισης

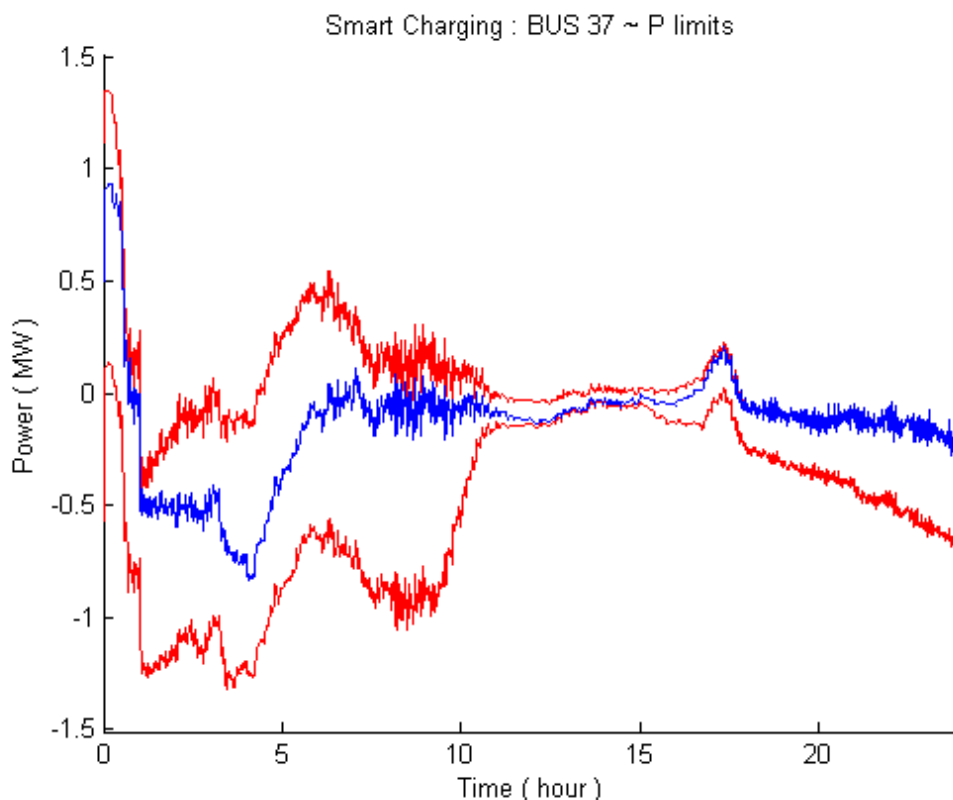
Το επίπεδο φόρτισης των οχημάτων (KWh) υπολογίζεται από το σύστημα κάθε λεπτό όπως ακριβώς συμβαίνει και στην μη ελεγχόμενη φόρτιση. Έστω ότι το επίπεδο φόρτισης την χρονική στιγμή t είναι: $SoCharge(t)$ και η ισχύς τροφοδοσίας του συσσωρευτή του από το δίκτυο την ίδια χρονική στιγμή είναι $P_{max}(t)$ τότε για το επόμενο λεπτό το επίπεδο φόρτισης του οχήματος θα είναι:

$$SoCharge(t + 1) = SoCharge(t) + P_{max}(t) (KW) \cdot 1/60 (h)$$

Στην περίπτωση κατά την οποία το όχημα προσφέρει ισχύ στο δίκτυο το πρόσημο στην παραπάνω σχέση είναι αρνητικό. Ενδιαφέρον παρουσιάζουν και τα αποτελέσματα ανά σημείο φόρτισης του δικτύου. Οι **Εικόνες 7.15, 7.16** και **7.17** παρουσιάζουν τα δεδομένα του σημείου φόρτισης στον ζυγό 37.

Η **Εικόνα 7.15** παρουσιάζει με κόκκινη καμπύλη τα ελάχιστα και τα μέγιστα όρια ισχύος κάθε χρονική στιγμή της ημέρας με την παράλληλη απεικόνιση της πραγματικής ισχύος λειτουργίας των οχημάτων την εκάστοτε

χρονική στιγμή. Τα αποτελέσματα αυτά παρουσιάζονται με σύμβαση γεννήτριας. Σε αντίθεση με την καμπύλη φορτίου οι θετικές τιμές του διαγράμματος της **Εικόνας 7.15** αφορούν την ροή ισχύος από το όχημα προς το δίκτυο και οι αρνητικές τιμές αντίστοιχα την ροή από το δίκτυο προς το όχημα. Δηλαδή όταν η μπλε καμπύλη βρίσκεται πάνω από το μηδενικό επίπεδο τιμής ισχύος τότε το άθροισμα των επιπέδων λειτουργίας των οχημάτων του σταθμού είναι θετικό με συνέπεια ο σταθμός φόρτισης να προσφέρει ισχύ στο δίκτυο διανομής. Σε αντίθετη περίπτωση καταναλώνει από αυτό για την φόρτιση των οχημάτων.

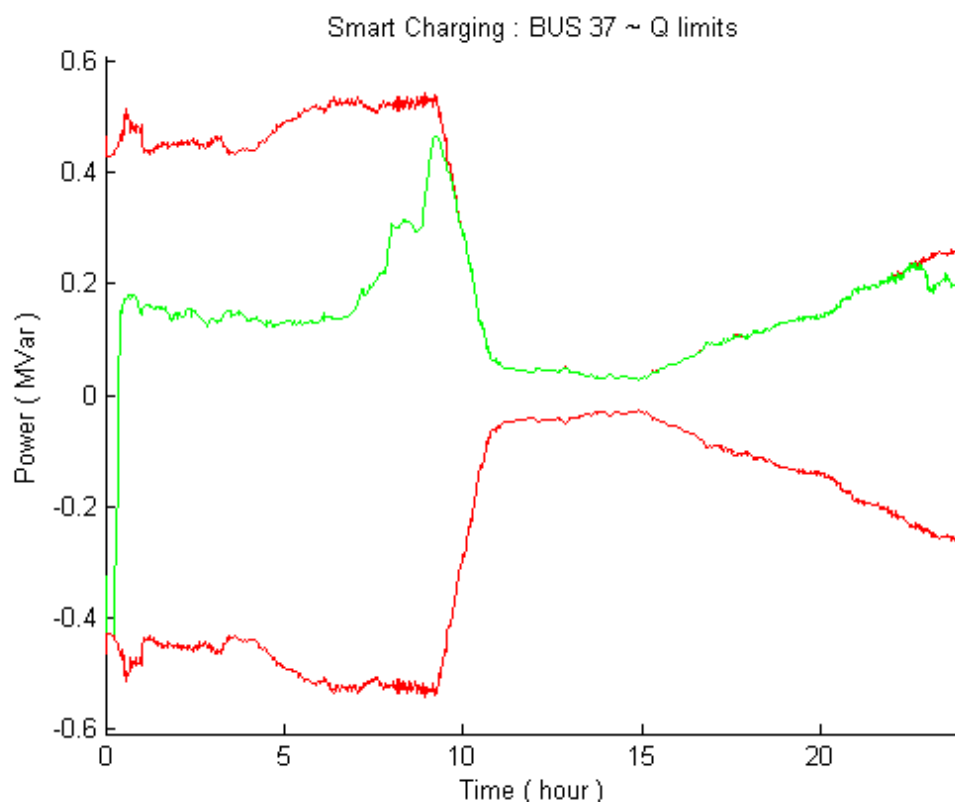


Εικόνα 7.15 : Όρια Ενεργού Ισχύος Λειτουργίας του Σταθμού Φόρτισης στον Ζυγό 37 κατά το Σενάριο της Ελεγχόμενης Φόρτισης

Παρατηρώντας τις παραπάνω καμπύλες, στο διάστημα φόρτισης 00:00 έως και 08:00 το εύρος τιμών των ορίων για τα ανώτατα και κατώτατα επίπεδα λειτουργίας των οχημάτων είναι ιδιαίτερα αυξημένο. Το γεγονός αυτό οφείλεται στον αρκετά μεγάλο αριθμό οχημάτων που βρίσκεται σε σύνδεση με το δίκτυο. Στην συνέχεια είναι εμφανές ότι το εύρος των ορίων ελαχιστοποιείται και οφείλεται πάλι στην απότομη μείωση του πλήθους των οχημάτων από τους σταθμούς φόρτισης. Γίνεται έτσι αντιληπτό ότι η ευελιξία που παρέχεται στον διαχειριστή είναι ανάλογη του πλήθους των οχημάτων τα οποία βρίσκονται σε σύνδεση με αυτό.

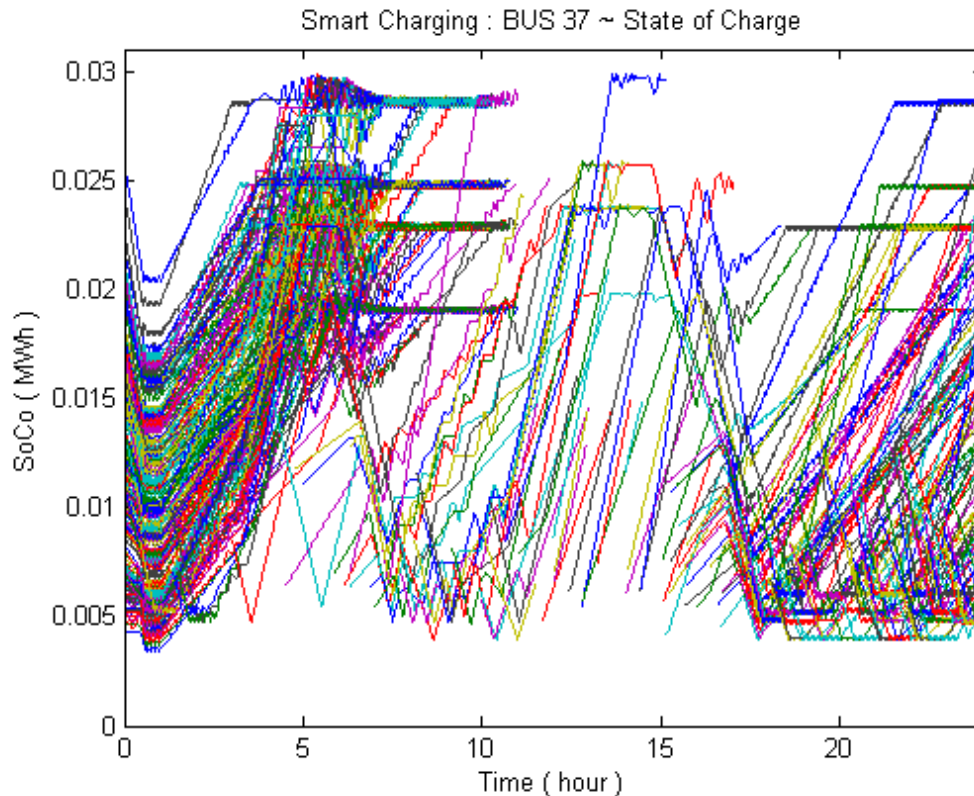
Αναφορικά με την συμβολή των οχημάτων στην διαμόρφωση του επιπέδου των τάσεων των ζυγών μέσω της ευελιξίας τους να απορροφούν και να παράγουν άεργο ισχύ αυτή συμπεριλαμβάνεται στην **Εικόνα 7.16**. Τα όρια λειτουργίας αέργου ισχύος αλλά και τα πραγματικά όρια τιμών της αφορά την συμπεριφορά των οχημάτων στον ζυγό 37. Φυσικά παρόμοια είναι και στους υπόλοιπους ζυγούς σταθμών φόρτισης.

Ανάλογα με το πλήθος των οχημάτων το εύρος λειτουργίας αέργου ισχύος αυξάνεται όπως ακριβώς συμβαίνει και στην ενεργό. Τα δεδομένα της **Εικόνας 7.16** αφορούν σε επίπεδα λειτουργίας γεννήτριας σύμφωνα με τα οποία για θετικές τιμές της καμπύλης τα οχήματα προσφέρουν άεργο ισχύ στο δίκτυο ενώ σε αρνητικές τιμές καταναλώνουν άεργο από αυτό.



Εικόνα 7.16 : Όρια Αέργου Ισχύος Λειτουργίας του Σταθμού Φόρτισης στον Ζυγό 37 κατά το Σενάριο της Ελεγχόμενης Φόρτισης

Τέλος στην **Εικόνα 7.17** παρουσιάζονται τα επίπεδα φόρτισης των οχημάτων του ζυγού 37 για το σενάριο της ελεγχόμενης φόρτισης. Είναι εμφανής η μαζική έξοδος των οχημάτων από το δίκτυο τις πρωινές ώρες όπως επίσης και η σταδιακά αυξανόμενη είσοδος σε αυτό στην συνέχεια της ημέρας.



Εικόνα 7.17 : Κατάσταση Φόρτισης Οχημάτων κατά το Σενάριο της Ελεγχόμενης Φόρτισης στον Ζυγό 37

7.5 Εξαγωγή και Σύγκριση Αποτελεσμάτων

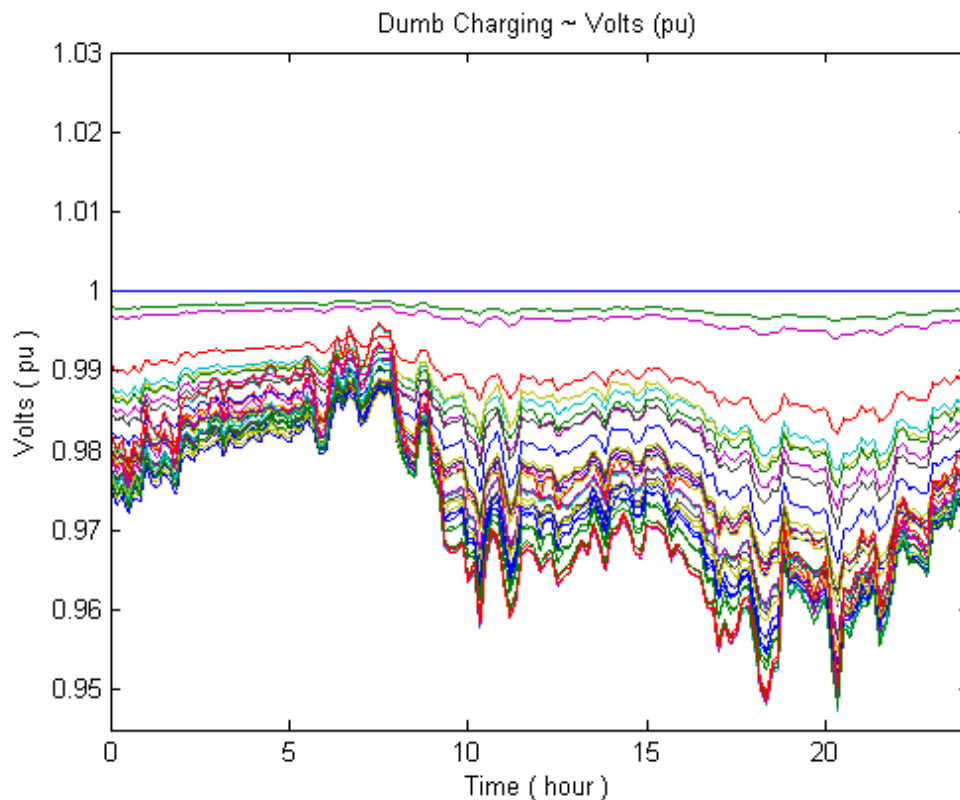
Στην τελευταία ενότητα του κεφαλαίου παρουσιάζονται και συγκρίνονται τα αποτελέσματα για τα δύο σενάρια φόρτισης τα οποία αφορούν:

- Τα επίπεδα τάσεων των ζυγών αναφοράς.
- Τις συνολικές απώλειες του δικτύου.
- Το κόστος φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων.

7.5.1 Επίπεδα Τάσεων Ζυγών Αναφοράς

Κατά την επίλυση ροής ισχύος του συστήματος στην περίπτωση της μη ελεγχόμενης φόρτισης δεν υπήρξε κανένας περιορισμός στα ανώτατα και κατώτατα όρια που αφορούσαν τις τάσεις των ζυγών αναφοράς καθώς τα οχήματα δεν παρέχουν καμία ευελιξία στον διαχειριστή του δικτύου και η καταναλισκόμενη ισχύς για την φόρτισή τους αποτελεί ουσιαστικά επιπλέον φορτίο ζήτησης για το δίκτυο διανομής.

Στην **Εικόνα 7.18** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του επιπέδου τάσεως των ζυγών αναφοράς κατά το σενάριο της μη ελεγχόμενης φόρτισης. Παρατηρείται πτώση τάσης σε επίπεδα κάτω του 0.95 ανά μονάδα για ορισμένες χρονικές στιγμές της μέρας μεταξύ 17:00h και 21:00h. Η πτώση τάσης στα επίπεδα αυτά οφείλεται κατά κύριο λόγο στην αυξημένη ζήτηση ισχύος στο δίκτυο τις ώρες αυτές με τον παράλληλα αυξανόμενο ρυθμό εισαγωγής οχημάτων σε σταθμούς φόρτισης σύμφωνα με την κατανομή Εισόδου-Εξόδου της προσομοίωσης.



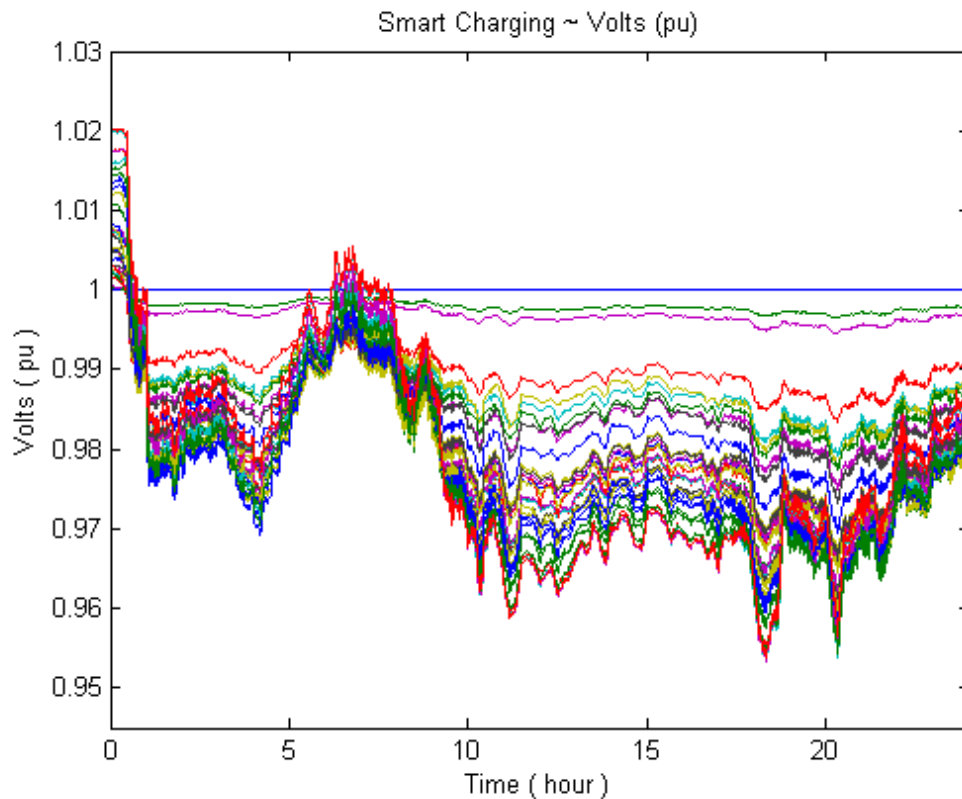
Εικόνα 7.18 : Επίπεδα Τάσεων Ζυγών Αναφοράς του Δικτύου κατά το Σενάριο της Μη Ελεγχόμενης Φόρτισης

Σε αντίθεση με τα παραπάνω, στο σενάριο της ελεγχόμενης φόρτισης ο διαχειριστής εκμεταλλεύεται την ευελιξία που του παρέχουν τα ηλεκτρικά οχήματα κυρίως στην περίπτωση διαχείρισης της αέργου ισχύος του δικτύου και θέτει τα ανώτατα και κατώτατα όρια τάσεων των ζυγών σύμφωνα με την σχέση:

$$0.95 \text{ α. μ.} \leq V(t) \leq 1.02 \text{ α. μ} \quad (7.5)$$

Στην **Εικόνα 7.19** απεικονίζονται τα επίπεδα τάσεων ανά μονάδα του δικτύου κατά την επίλυση της βέλτιστης ροής ισχύος σύμφωνα με τον παραπάνω περιορισμό. Τα επίπεδα αυτά παραμένουν πάνω από το φράγμα της πτώσης τάσης

του 0.95 α.μ. που θέτει ο διαχειριστής καθώς η εκμετάλλευση της αέργου ισχύος των οχημάτων συνέβαλε προς αυτήν την κατεύθυνση.



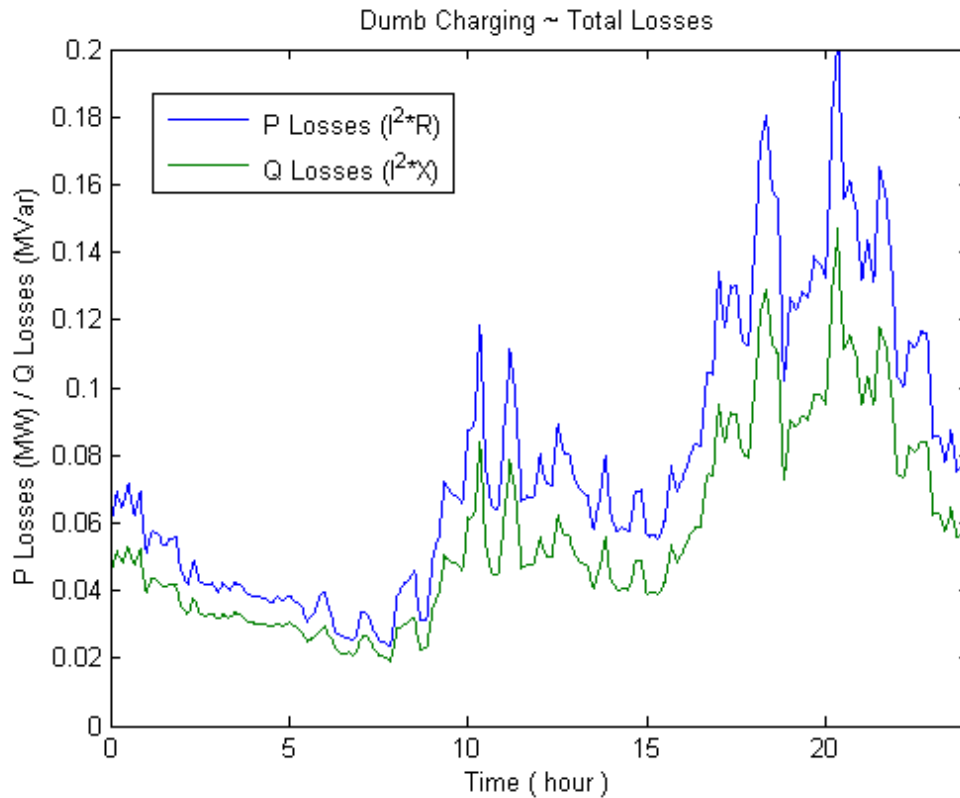
Εικόνα 7.19 : Επίπεδα Τάσεων Ζυγών Αναφοράς του Δικτύου κατά το Σενάριο της Ελεγχόμενης Φόρτισης

Στην περίπτωση κατά την οποία οι τάσεις πλησιάζουν την ανύψωση άνω του 1.02 α.μ τότε τα οχήματα καλούνται να παράξουν άεργο ισχύ έτσι ώστε να μην επιτρέψουν την ανύψωση της τάσης πάνω από τα επίπεδα αυτά. Η παραγωγή αέργου ισχύος στην περίπτωση αυτή φαίνεται καθαρά και στην **Εικόνα 7.16** της προηγούμενης ενότητας

7.5.2 Μέσες Απώλειες Δικτύου

Ενδιαφέρον παρουσιάζουν και οι μέσες απώλειες του δικτύου για τα δύο σενάρια φόρτισης. Για το σενάριο της μη ελεγχόμενης φόρτισης αυτές απεικονίζονται στην **Εικόνα 7.20** που ακολουθεί. Οι μέσες απώλειες του δικτύου σύμφωνα με τα αποτελέσματα του αλγορίθμου για το ίδιο σενάριο υπολογίστηκαν ως εξής:

- $P_{\mu} = 78.52 \text{ KW}$
- $Q_{\mu} = 57.59 \text{ KVar}$



Εικόνα 7.20 : Συνολικές Μέσες Απώλειες Δικτύου Διανομής κατά το Σενάριο της Μη Ελεγχόμενης Φόρτισης

Οι αντίστοιχες μέσες απώλειες του δικτύου για το σενάριο της ελεγχόμενης φόρτισης υπολογίστηκαν ως:

- $P_{\mu} = 68.28 \text{ KW}$
- $Q_{\mu} = 49.82 \text{ KVar}$

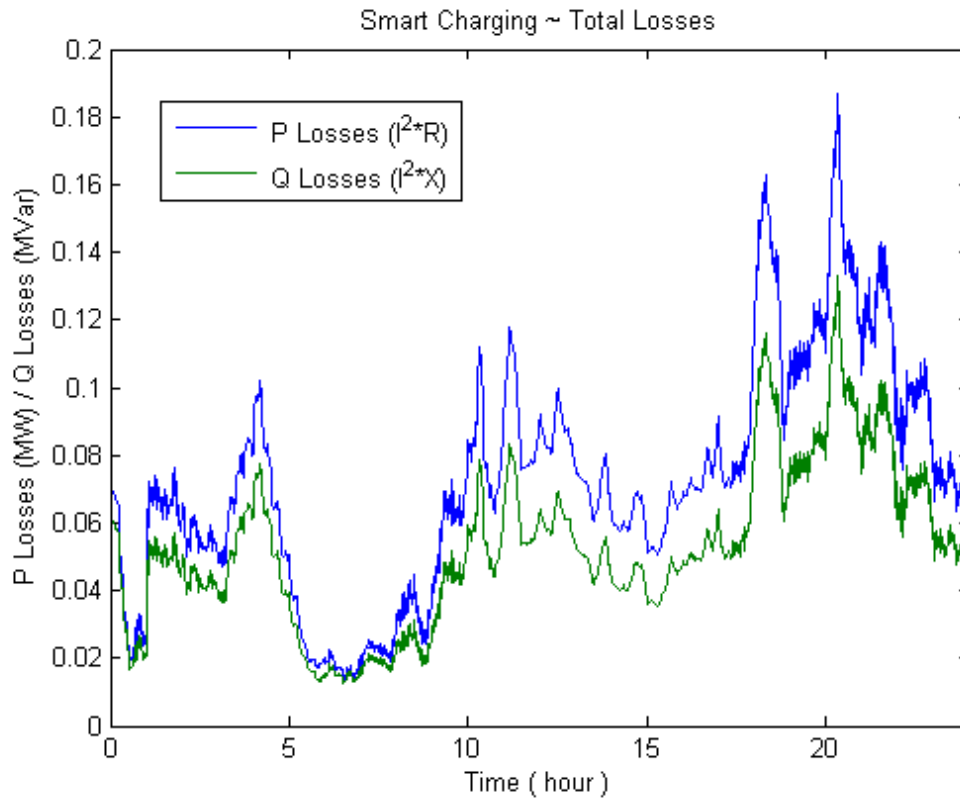
Και παρουσιάζονται στο διάγραμμα της **Εικόνας 7.21** της επόμενης σελίδας.

Παρατηρώντας τα παραπάνω δεδομένα γίνεται αμέσως αντιληπτό η συνεισφορά της ελεγχόμενης φόρτισης των οχημάτων στο δίκτυο διανομής. Η συνολική μείωση στις απώλειες ενεργού ισχύος του δικτύου στο σενάριο της ελεγχόμενης φόρτισης σε σχέση με τα δεδομένα της μη ελεγχόμενης φόρτισης είναι σε ποσοστό:

$$P_{\text{απωλειών}} \% = \frac{78.52 \text{ KW} - 68.28 \text{ KW}}{78.52 \text{ KW}} 100\% = \mathbf{13.03 \%}$$

Ενώ το αντίστοιχο ποσοστό μείωσης απωλειών αέργου ισχύος του δικτύου είναι:

$$Q_{\text{απωλειών}} \% = \frac{57.59 \text{ KVar} - 49.82 \text{ KVar}}{57.59 \text{ KVar}} 100\% = \mathbf{11.35 \%}$$



Εικόνα 7.21 : Συνολικές Μέσες Απώλειες Δικτύου Διανομής κατά το Σενάριο της Ελεγχόμενης Φόρτισης

7.5.3 Κόστος Φόρτισης Ηλεκτρικών Οχημάτων

Στη τελευταία υποενότητα του κεφαλαίου παρουσιάζονται τα αποτελέσματα τα οποία αφορούν το κόστος φόρτισης των οχημάτων για τα δύο σενάρια που αναλύθηκαν.

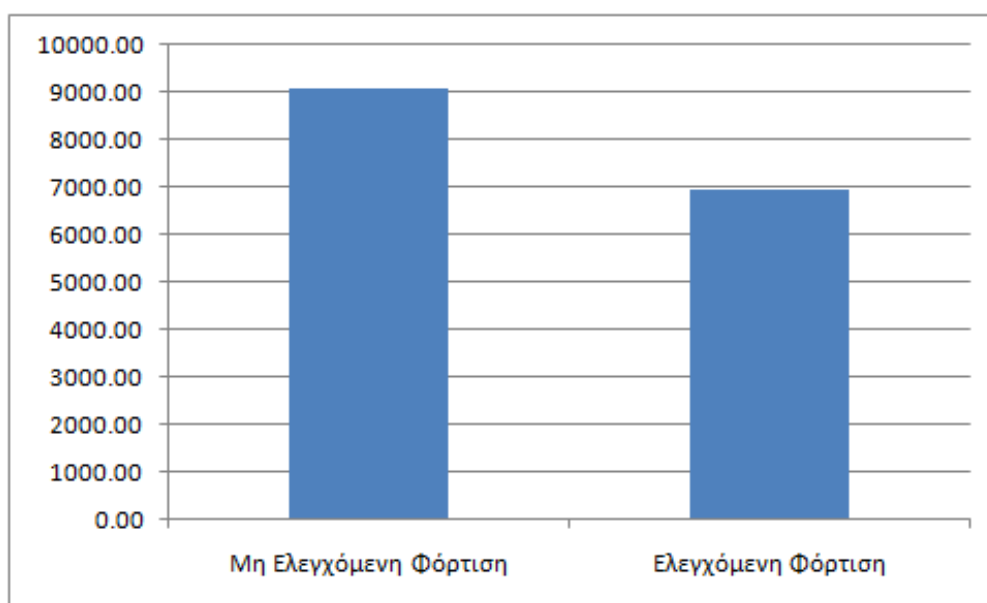
Τα κόστη (σε €) παρουσιάζονται στον **Πίνακα 7.5** που ακολουθεί, με βάση την διακύμανση της ηλεκτρικής ενέργειας σύμφωνα δεδομένα του ΑΔΜΗΕ της **Εικόνας 7.8**.

Σενάριο Φόρτισης	Συνολικό Κόστος (σε €)
Μη Ελεγχόμενη Φόρτιση	9072.02
Ελεγχόμενη Φόρτιση	6950.77

Πίνακας 7.5 : Κόστος Φόρτισης Οχημάτων (σε €) για τα Δύο Σενάρια Φόρτισης

Η **Εικόνα 7.22** παρουσιάζει σε διάγραμμα στηλών τα δεδομένα του **Πίνακα 7.5**. Είναι εμφανής η εξοικονόμηση χρημάτων στο σενάριο της ελεγχόμενης φόρτισης. Αυτό το γεγονός οφείλεται στην συμπεριφορά των οχημάτων κατά την ελεγχόμενη φόρτιση η οποία καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από την διακύμανση της τιμής της ηλεκτρικής ενέργειας. Όταν η τιμή είναι χαμηλή τότε τα οχήματα καταναλώνουν ισχύ από το δίκτυο τόσο όση ορίζει ο διαχειριστής του συστήματος μέσω του κόστους γεννητριών που αναλύθηκε σε προηγούμενη ενότητα.

Αντίθετα στο σενάριο της μη ελεγχόμενης φόρτισης τα οχήματα φορτίζουν την στιγμή που συνδέονται λειτουργώντας στο επίπεδο ισχύος που ορίζουν εκείνα στο σύστημα ανεξάρτητα της τιμής της ηλεκτρικής ενέργειας κάθε χρονική στιγμή.



Εικόνα 7.22 : Κόστος Φόρτισης Οχημάτων (σε €) για τα δύο Σενάρια Φόρτισης

Το ποσοστό του συνολικού κέδρους από την φόρτισης των δύο σεναρίων υπολογίστηκε:

$$\text{Κέρδος \%} = \frac{9072.02 \text{ €} - 6950.77 \text{ €}}{9072.02 \text{ €}} 100\% = \mathbf{23.38 \%}$$

Το ποσοστό αυτό αντιστοιχεί σε ένα ποσό χρημάτων της τάξης των **2121.03 €** το οποίο αναμφισβήτητα θεωρείται αρκετά σημαντικό.

8. Συμπεράσματα

Ο εξηλεκτρισμός του τομέα των μεταφορών απαιτεί τη διασύνδεση των ηλεκτρικών οχημάτων με το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας μέσω κατάλληλων υποδομών φόρτισης. Οι ενεργειακές ανάγκες των ηλεκτρικών οχημάτων θα πρέπει να εξυπηρετούνται όπως και η οικιακή κατανάλωση, χωρίς καμία διάκριση. Η διαφορετικότητα του φορτίου των ηλεκτρικών οχημάτων συγκριτικά με το οικιακό φορτίο έγκειται στο γεγονός ότι το φορτίο των ηλεκτρικών οχημάτων δεν είναι στατικό και μπορεί να μετατοπιστεί τόσο χωρικά όσο και χρονικά. Από την πλευρά των δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας, η ζήτηση των ηλεκτρικών οχημάτων για τη φόρτιση τους αποτελεί ένα επιπρόσθετο φορτίο που αναμένεται να μεταβάλλει την καμπύλη φορτίου του συστήματος, ανάλογα με το επίπεδο ενσωμάτωσης των ηλεκτρικών οχημάτων και τον τρόπο φόρτισης τους.

Το επιπρόσθετο αυτό φορτίο όταν δεν υιοθετείται κάποια στρατηγική φόρτισης ταυτοχρονίζεται με την περίοδο αυξημένης κατανάλωσης του δικτύου. Οι αρνητικές επιπτώσεις της μη ελεγχόμενης φόρτισης στη λειτουργία των δικτύων διανομής αναλύθηκαν εκτενώς στα πλαίσια της διπλωματικής και καθιστούν απαραίτητη την υιοθέτηση νέων στρατηγικών φόρτισης. Προς την κατεύθυνση αυτή όμως απαιτούνται καινοτόμες αλλαγές στην λειτουργία των δικτύων διανομής και καθιστούν την ανάπτυξη νέων υποδομών για την ομαλή ένταξη των ηλεκτρικών οχημάτων στα δίκτυα διανομής απαραίτητη.

Μία τέτοια στρατηγική ελεγχόμενης φόρτισης παρουσιάστηκε στα πλαίσια της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας και η οποία πραγματοποιήθηκε από τον συγγραφέα. Η εξαγωγή και σύγκριση των αποτελεσμάτων για τα δύο σενάρια της μη ελεγχόμενης και της ελεγχόμενης φόρτισης αφορούσε:

- Τα επίπεδα τάσεων των ζυγών αναφοράς,
- Τις συνολικές απώλειες του δικτύου και
- Το κόστος φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων.

Τα αποτελέσματα ήταν ιδιαίτερα ενθαρρυντικά. Τα επίπεδα τάσεων των ζυγών στο σενάριο της ελεγχόμενης φόρτισης κυμάνθηκαν στα επιθυμητά όρια τιμών μεταξύ 0,95 α.μ. και 1,02 α.μ. σε σχέση με τα αποτελέσματα της μη ελεγχόμενης φόρτισης στην οποία τα επίπεδα τιμών των τάσεων ήταν ακόμα και κάτω του 0.95 α.μ. Στο γεγονός αυτό συνέβαλε ενεργά η ευελιξία που παρείχαν τα ηλεκτρικά οχήματα στον διαχειριστή για την διαχείριση της αέργου ισχύος του δικτύου.

Σημαντική ήταν και η συνεισφορά στις απώλειες του δικτύου με το σενάριο της ελεγχόμενης φόρτισης να παρουσιάζει μείωση στις απώλειες κατά

13.03% στις τιμές ενεργού ισχύος και 11,35% στις αντίστοιχες της άεργου. Η υιοθέτηση της V2G λειτουργίας επιτρέπει τη λειτουργία των μπαταριών των ηλεκτρικών οχημάτων ως αποθηκευτικό μέσο που μπορεί σαν αθροιστική χωρητικότητα να συνεισφέρει στην εξυπηρέτηση μέρους της αιχμής ζήτησης του δικτύου σε τοπικό επίπεδο μειώνοντας τις ροές από το δίκτυο και συνεπώς μειώνοντας τις απώλειες του δικτύου.

Τέλος σημαντική ήταν και η εξοικονόμηση χρημάτων για την φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων με το κέρδος στο κόστος φόρτισης των δύο σεναρίων να κυμαίνεται σε πολύ υψηλά επίπεδα της τάξης του 23%. Το κόστος φόρτισης των οχημάτων αποτελεί αναμφισβήτητα πολύ σημαντική παράμετρος για την ενδεχόμενη επένδυση κεφαλαίων σε σκοπό την αναμόρφωση των δικτύων διανομής του μέλλοντος.

9. Παράρτημα

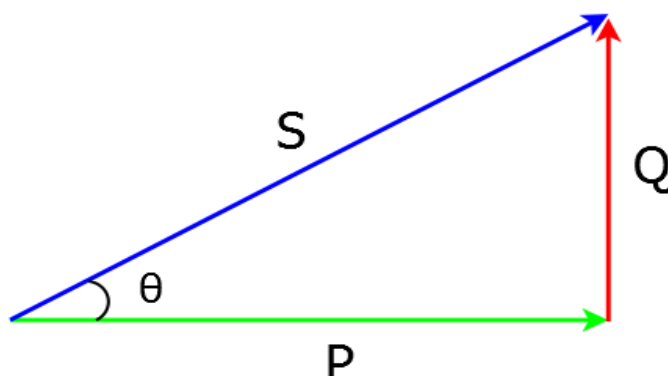
9.1 Ηλεκτρική Ισχύς

Η Ισχύς, στη φυσική, είναι ο ρυθμός μεταβολής έργου ή αλλιώς το ποσό της ενέργειας που καταναλώνεται στη μονάδα του χρόνου. Για ένα καθορισμένο φυσικό σύστημα, ισχύς ορίζεται ως η ενέργεια στη μονάδα του χρόνου που προσδίδεται στο σύστημα από το περιβάλλον (ή αντίστροφα, αποδίδεται στο περιβάλλον από το σύστημα). Στα ηλεκτρικά κυκλώματα, η ηλεκτρική ισχύς αναφέρεται στον ρυθμό με τον οποίο η ηλεκτρική ενέργεια μεταφέρεται από ένα ηλεκτρικό κύκλωμα.

Η συνολική ισχύς που διαπερνά ένα ηλεκτρικό κύκλωμα καλείται **φαινόμενη (ή μιγαδική) ισχύς** και συμβολίζεται με το γράμμα S . Η φαινόμενη ισχύς είναι το γινόμενο της τάσης (V) και της έντασης του ρεύματος (I) σε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα και μονάδα μέτρησης της είναι το Volt-Ampere (VA). Το σύνολο της ισχύς χωρίζεται σε δύο υποσύνολα: την *ενεργό ισχύ* (P) και την *άεργο ισχύ* (Q).

Η μιγαδική ισχύς S όπως αναφέρθηκε παραπάνω δίνεται από την σχέση:

$$S = V \cdot I \angle \theta^\circ \quad (9.1)$$



Εικόνα 9.1 : Διανύσματα Ισχύος στο Χώρο

Η ενεργός και άεργος ισχύς αποτελούν τις δύο συνιστώσες της φαινόμενης ισχύος, όπως φαίνεται και στην **Εικόνα 9.1**. Η ενεργός ισχύς (P) αποτελεί το πραγματικό μέρος της μιγαδικής ισχύος (S) ενώ η άεργος (Q) το φανταστικό.

Έτσι λοιπόν ισχύει η εξίσωση:

$$S = P + j \cdot Q \quad (9.2)$$

Όπου j η φανταστική μονάδα: $j^2 = -1$

Η **ενεργός ισχύς** αποτελεί τα πρώτο υποσύνολο της συνολικής μιγαδικής ισχύος. Συμβολίζεται με το γράμμα P και αναφέρεται στην ηλεκτρική ενέργεια ανά δευτερόλεπτο που παράγει πραγματικό έργο. Με τον όρο «πραγματικό έργο» εννοείται το σύνολο της ενέργειας που τελικά μετατρέπεται σε ωφέλιμο έργο. Μονάδα μέτρησης της ενεργού ισχύος είναι το Watt.

$$P = \operatorname{Re} \{ S \} = V \cdot I \cdot \cos\theta \quad (9.3)$$

Το δεύτερο υποσύνολο της φαινόμενης ισχύος, η **άεργος ισχύς** συμβολίζεται με το γράμμα Q . Ονομάζεται άεργος ισχύς διότι σε αντίθεση με την ενεργό ισχύ δεν μετατρέπεται σε έργο, αλλά αντανακλάται από τη συσκευή και επιστρέφει στο ηλεκτρικό δίκτυο με διαφορετική μορφή. Μονάδα μέτρησης της άεργου ισχύος είναι τα Volt-Ampere-reactive (VAr).

$$Q = \operatorname{Im} \{ S \} = V \cdot I \cdot \sin\theta \quad (9.4)$$

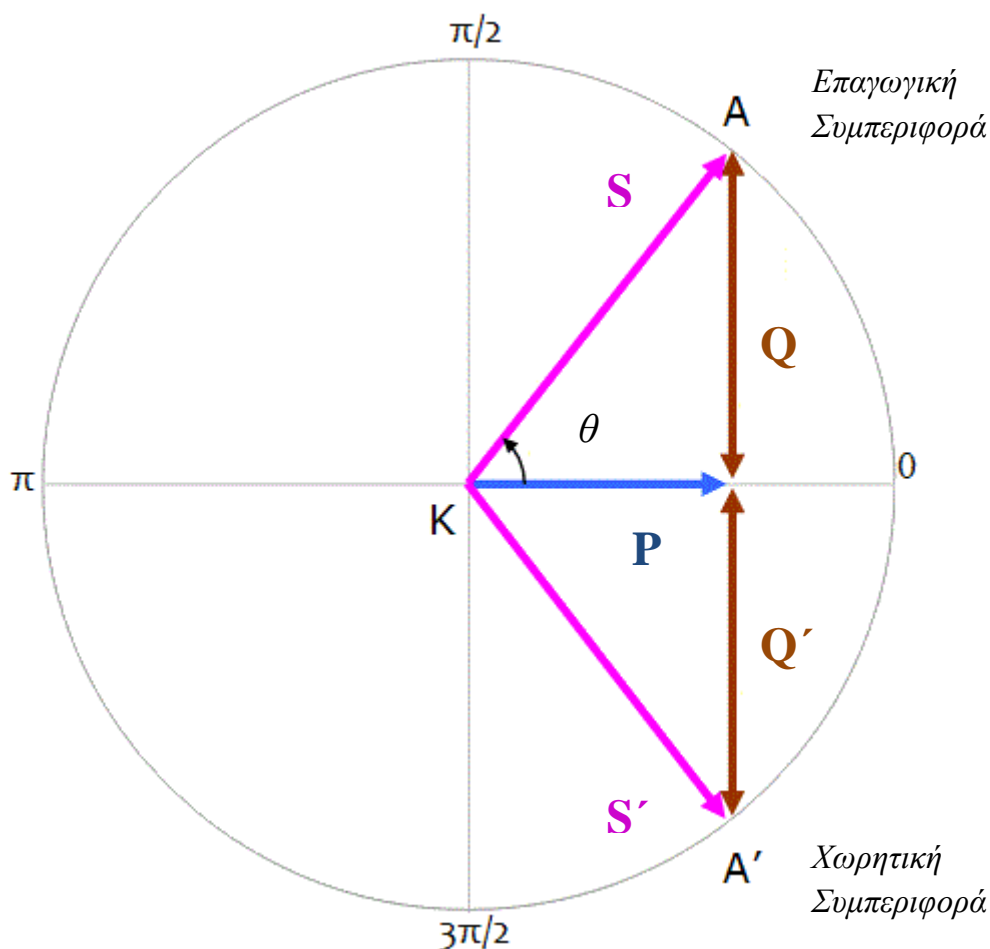
9.1.1 Συντελεστής Ισχύος

Η φάση της μιγαδικής ισχύος, δηλαδή η γωνία θ , αναφέρεται ως γωνία συντελεστή ισχύος. Ο συντελεστής ισχύος (ΣI) είναι το συνημίτονο της γωνίας θ .

$$\Sigma I = \cos\theta \quad (9.5)$$

Επειδή από το συνημίτονο της γωνίας θ και μόνο δεν φαίνεται αν η γωνία θ είναι θετική ή αρνητική, ο συντελεστής ισχύος πρέπει πάντα να χαρακτηρίζεται είτε ως **επαγωγικός** (επαγωγική φόρτιση), είτε ως **χωρητικός** (χωρητική φόρτιση). Η επαγωγική και χωρητική συμπεριφορά ενός φορτίου περιγράφεται διαγραμματικά και στην **Εικόνα 9.2**

- **Επαγωγική φόρτιση:** όταν το φορτίο είναι επαγωγικό, η τάση προηγείται του ρεύματος, δηλαδή η γωνία θ είναι θετική και η άεργος ισχύ που καταναλώνεται είναι επίσης θετική. Στην περίπτωση αυτή το επαγωγικό φορτίο *απορροφά άεργο ισχύ*.
- **Χωρητική φόρτιση:** όταν το φορτίο είναι χωρητικό, η τάση ακολουθεί το ρεύμα, δηλαδή η γωνία θ είναι αρνητική και η απορροφούμενη άεργος ισχύς είναι επίσης αρνητική. Στην περίπτωση αυτή το χωρητικό φορτίο *απορροφά αρνητική άεργο ισχύ ή, ισοδύναμα παράγει άεργο ισχύ*.
- Προφανώς όταν $\Sigma I = 1$ ($\theta = 0$), η τάση και το ρεύμα βρίσκονται στην ίδια φάση και ο συντελεστής ισχύος δεν είναι ούτε χωρητικός ούτε επαγωγικός.



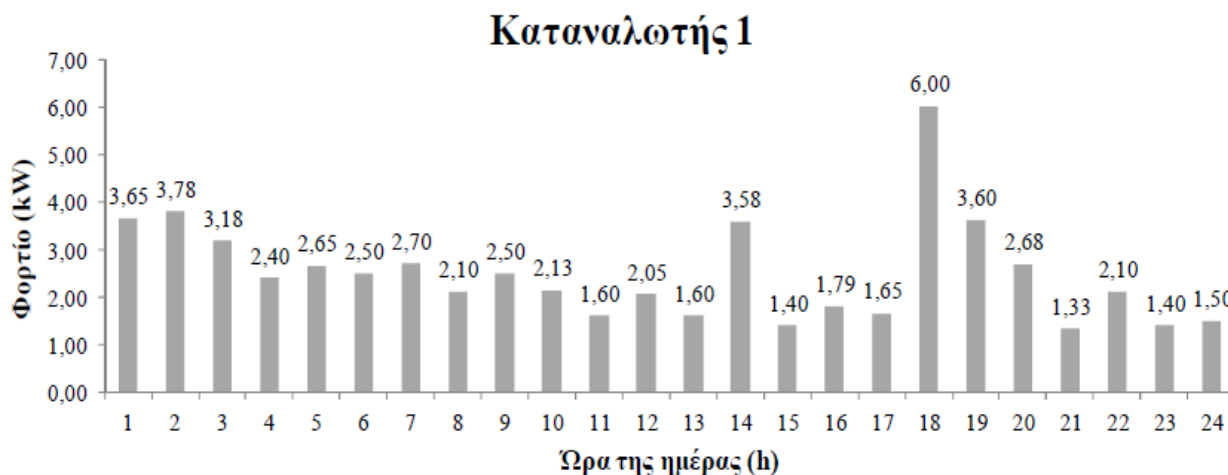
Εικόνα 9.2 : Διάγραμμα Επαγωγικής και Χωρητικής Συμπεριφοράς Φορτίου

Η άεργος ισχύς είναι χαρακτηριστικό του εναλλασσόμενου ρεύματος και δεν υφίσταται στο συνεχές. Οφείλεται στην εμφάνιση των *αυτεπαγωγών* και *χωρητικοτήτων* ενός κυκλώματος, φαινόμενα τα οποία προκαλούνται από την ύπαρξη πηνίων και πυκνωτών σε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα. Οι αυτεπαγωγές και οι χωρητικότητες δημιουργούν άεργο ισχύ λόγω του τρόπου με τον οποίο συνεχώς ανταλλάσσουν ενέργεια με το δίκτυο.

Όπως περιγράφεται και παραπάνω η άεργος ισχύς δημιουργείται κυρίως από συσκευές με επαγωγική συμπεριφορά, δηλαδή συσκευές που ενσωματώνουν πηνία όπως για παράδειγμα είναι οι κινητήρες, τα φωτιστικά φθορισμού, οι μετασχηματιστές κ.α. ενώ καταναλώνεται από συσκευές με χωρητική συμπεριφορά που ενσωματώνουν πυκνωτές. Έτσι λοιπόν σε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα και κατ' επέκταση σε δίκτυα μεταφοράς και διανομής με την τοποθέτηση χωρητικών και επαγωγικών διατάξεων γίνεται εφικτή η απορρόφηση της άεργου ισχύος από το δίκτυο. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται **αντιστάθμιση** και είναι ιδιαίτερα σημαντική για την αποδοτική λειτουργία των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας.

9.2 Αριθμητικό Παράδειγμα στις Καμπύλες Φορτίου

Η εικοσιτετράωρη καμπύλη φορτίου του Καταναλωτή 1 φαίνεται στο **Εικόνα 9.3**. Το συνολικά συνδεδεμένο φορτίο του καταναλωτή αυτού είναι 30 KW. Να υπολογιστεί η ημερήσια ζήτηση ενέργειας, η αιχμή φορτίου, το μέσο φορτίο, ο συντελεστής φορτίου και ο συντελεστής ζήτησης του Καταναλωτή 1.



Εικόνα 9.3 : Ημερήσια Κατανάλωση Φορτίου ανά ώρα

Η ημερήσια ζήτηση ενέργειας υπολογίζεται από το εμβαδόν της καμπύλης φορτίου του παραπάνω σχήματος ως εξής:

$$E = [(3,65 + 3,78 + 1,50) \text{ KW}] * (1h) \Rightarrow E = 59,87 \text{ KWh}$$

Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει ότι η ημερήσια αιχμή φορτίου είναι $P_A = 6,00 \text{ KW}$ και λαμβάνει χώρα την ώρα 18:00. Η περίοδος της καμπύλης φορτίου είναι $T = 24 \text{ h}$.

Το μέσο ημερήσιο φορτίο είναι:

$$P_\mu = \frac{E}{T} = \frac{59,87 \text{ KWh}}{24 \text{ h}} \Rightarrow P_\mu = 2,49 \text{ KW}$$

Ο ημερήσιος συντελεστής φορτίου είναι:

$$\Sigma\Phi = \frac{P_\mu}{P_A} = \frac{2,49 \text{ KW}}{6,00 \text{ KW}} \Rightarrow \Sigma\Phi = 0,42$$

Ο συντελεστής ζήτησης είναι ο λόγος της μέγιστης ζήτησης προς το συνολικά συνδεδεμένο φορτίο:

$$\Sigma Z = \frac{6,00 \text{ KW}}{30,00 \text{ KW}} \Rightarrow \Sigma Z = 0,20$$

10. Βιβλιογραφία

- [1] Βουρνάς Κ. & Κονταξής Γ. (2010). *Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας*. Αθήνα: ΣΥΜΜΕΤΡΙΑ
- [2] Νικόλαος Α. Βοβός & Γαβλιήλ Β. Γιαννακόπουλος (2008). *Ανάλυση Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας*. Θεσσαλονίκη: ΖΗΤΗ
- [3] Βασίλη Ν. Ξάνθου (2003). *ΠΑΡΑΓΩΓΗ – ΜΕΤΑΦΟΡΑ – ΔΙΑΝΟΜΗ, Μέτρηση και Εξοικονόμηση Ηλεκτρικής Ενέργειας*. Θεσσαλονίκη: ΖΗΤΗ
- [4] William H. Kersting (2002). *Distribution System Modeling and Analysis*. Boca Raton: CRC Press
- [5] Evangelos L. Karfopoulos & Nikos D. Hatziargyriou (May 2013). *A Multi-Agent System for Controlled Charging of a Large Population of Electric Vehicle*. IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 28, No. 2
- [6] Arif Wazir & Naeem Arbab (2016). *Analysis and Optimization of IEEE 33 Bus Radial Distributed System Using Optimization Algorithm*. (JETAE) Journal of Emerging Trends in Applied Engineering Vol. 1, No. 2.
- [7] Ray D. Zimmerman & Carlos E. Murillo-Sanchez (December 2016). *Matpower 6.0 User's Manual*.
- [8] EU MERGE Project (September 2011). *LEARNING FROM EV FIELD TESTS*. Online: http://www.transport-research.info/sites/default/files/project/documents/20140203_154611_45611_Deliverable_1.4__Learning_from_EV_Field_Tests.pdf
- [9] International Energy Agency (IEA) report: “Global EV outlook 2016”. Online: https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Global_EV_Outlook_2016.pdf
- [10] The Boston Consulting Group (BCG) (2009). *Batteries for Electric cars- Challenges, Opportunities and the Outlook to 2020*. Online: <http://www.bcg.com/documents/file36615.pdf>
- [11] Kwo Young & Caisheng Wang & Le Yi Wang & Kai Strunz. *Electric Vehicle Battery Technologies*. Chapter 2.
- [12] Ιωάννης Καρακίτσος & Ευάγγελος Καρφόπουλος & Νίκος Χατζηαργυρίου. *Ασύρματη Φόρτιση Ηλεκτρικών Οχημάτων*.

- [13] Πάσχου Δροσιά (Σεπτέμβριος 2016). *“Ανάλυση μοντέλου ενεργειακής διαχείρισης στόλου ηλεκτρικών οχημάτων σύμφωνα με την ελαστικότητα που προσφέρουν οι χρήστες ηλεκτρικών οχημάτων”* Αθήνα, Μεταπτυχιακή Εργασία.
- [14] Μιχάλης Ν. Αγιοβλασίτης (Ιούλιος 2013). *“Ανάπτυξη Αλγορίθμου για Βέλτιστη Φόρτιση Ηλεκτρικών Οχημάτων με Χρήση Γεννητικών Αλγορίθμων”*. Αθήνα, Διπλωματική Εργασία
- [15] Απόστολος Δ. Πετρόπουλος (Φεβρουάριος 2014). *“Βέλτιστη Ροή Ενεργού και Αέργου Ισχύος σε Δίκτυο Διανομής με Μονάδες Διεσπαρμένης Παραγωγής και Μονάδες Αποθήκευσης Ενέργειας”*. Αθήνα, Διπλωματική Εργασία.
- [16] Ιωάννα Σ. Φάμπου (Οκτώβριος 2008). *“Βέλτιστη Ροή Ισχύος σε Δίκτυα Ηλεκτρικής Ενέργειας και σε Υβριδικούς Ενεργειακούς Διανομείς”*. Αθήνα, Διπλωματική Εργασία.
- [17] Δράκος Σ. Γεώργιος (Ιούλιος 2016). *“Ανάπτυξη Αλγορίθμου Ενεργειακής Διαχείρισης Στόλου Ηλεκτρικών Οχημάτων στα Πλαίσια Λειτουργίας ενός Εικονικού Σταθμού Παραγωγής”*. Αθήνα, Διπλωματική Εργασία.
- [18] Ιωάννα Π. Καρκατσούλη (Οκτώβριος 2010). *“Επιδράσεις της Σύνδεσης Ηλεκτρικών Οχημάτων σε Δίκτυα Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας για Μόνιμη Κατάσταση Λειτουργίας και Μελέτη Αύξησης της Διείσδυσης ΑΠΕ”*. Αθήνα, Διπλωματική Εργασία.
- [19] Σωτήριος Γ. Θανόπουλος (Απρίλιος 2014). *“Βέλτιστη Τοποθέτηση Σταθμών Ταχείας Φόρτισης Ηλεκτρικών Οχημάτων με τη Χρήση Γενετικού Αλγορίθμου και Ροής Φορτίου”*. Αθήνα, Διπλωματική Εργασία.
- [20] Ευάγγελος Λ. Καρφόπουλος (Μάρτιος 2017). *“Συμβολή στη Διαχείριση των Ηλεκτρικών Οχημάτων για την Αποδοτικότερη Ενσωμάτωση τους στα Δίκτυα Ηλεκτρικής Ενέργειας”*. Αθήνα, Διδακτορική Διατριβή.
- [21] Ανεξάρτητος Διαχειριστής Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΑΔΜΗΕ). Online: <https://www.admie.gr/>.
- [22] Διαχειριστής Ελληνικού Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΔΕΔΔΗΕ). Online: <https://www.deddie.gr/>.