

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ



Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Στήριξη Συχνότητας από Σταθμούς Φόρτισης
Ηλεκτρικών Οχημάτων**

Όνομα: Δακανάλης Μιχαήλ

ΑΜ: 2014030114

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Κανέλλος Φώτιος, Αναπληρωτής Καθηγητής ΗΜΜΥ(επιβλέπων)

Κουτρούλης Ευτύχιος, Αναπληρωτής Καθηγητής ΗΜΜΥ

Καλαϊτζάκης Κωνσταντίνος, Καθηγητής ΗΜΜΥ

Χανιά, Ιούνιος 2020

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Φώτη Κανέλλο για την πολύτιμη καθοδήγηση του αλλά και την άμεση διαθεσιμότητά του καθ' όλη τη διάρκεια της διπλωματικής μου εργασίας.

Περίληψη

Τα τελευταία χρόνια, τα ηλεκτρικά οχήματα (PEVs) έχουν γίνει εξαιρετικά δημοφιλή και βρίσκονται σε μια τροχιά συνεχούς ανάπτυξης. Κατά συνέπεια, τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας αντιμετωπίζουν νέα ζητήματα και προκλήσεις που απειλούν την ασφάλεια και την αξιοπιστία του δικτύου. Τέτοιου είδους οχήματα, επί του παρόντος, συμπεριφέρονται ως απλά φορτία λόγω της χαμηλής διείσδυσής τους στην αγορά. Ωστόσο, καθώς το πλήθος τους αυξάνεται, τα PEVs μπορούν να αξιοποιηθούν ως καταναεμημένες μονάδες αποθήκευσης ενέργειας, παρέχοντας βοηθητικές υπηρεσίες στο σύστημα. Οι μπαταρίες που χρησιμοποιούνται σε PEVs έχουν κατασκευαστεί για να μπορούν να αυξομειώνουν ταχύτητα την ενεργό ισχύ που παρέχουν, καθιστώντας τις μια εξαιρετική λύση για στήριξη συχνότητας. Σε αυτή την εργασία προτείνεται ένα λεπτομερές δυναμικό μοντέλο που μπορεί να προβλέψει την στήριξη συχνότητας από μεγάλο αριθμό ηλεκτρικών οχημάτων, χρησιμοποιώντας μία ισοδύναμη μπαταρία, μειώνοντας έτσι τον υπολογιστικό χρόνο και την πολυπλοκότητα. Η προτεινόμενη μέθοδος εφαρμόστηκε στο σύστημα της Κρήτης χρησιμοποιώντας πραγματικά δεδομένα μπαταριών και δρομολογίων των οχημάτων. Από τις προσομοιώσεις αποδεικνύεται ότι τα PEVs μπορούν αποτελεσματικά να περιορίσουν τις διακυμάνσεις της συχνότητας και να βελτιώσουν τη συνολική αντοχή του συστήματος, προς όφελος τόσο του ιδιοκτήτη όσο και του ηλεκτρικού δικτύου.

Abstract

In recent years, plug-in electric vehicles (PEVs) have gained massive popularity and are on a trajectory for continued growth. As a consequence, power systems are facing new issues and challenges threatening the safety and reliability of the grid. PEVs are currently treated as simple loads due to their low penetration in the market. However, as their numbers are growing, PEVs could be potentially exploited as distributed energy storages, providing ancillary services to the power system. Batteries used in PEVs are developed to deliver instantaneous active power, making them an excellent solution for load frequency support. This diploma proposes a fully detailed dynamic model that is able to predict frequency support from a large number of PEVs, using an aggregated equivalent of the battery, with respect to the constraints, reducing the computational time and complexity. The proposed method is applied to the power system of Crete using real battery data and transportation distributions. It is proved that PEVs can effectively suppress frequency fluctuations and improve the overall robustness of the grid, benefiting both the owner and the electric system.

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή.....	8
1.1 Σκοπός της Εργασίας.....	8
1.2 Δομή της Εργασίας	8
2. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση.....	10
2.1 Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας	10
2.1.1. Ορισμός του Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας	10
2.1.2. Ιστορική Αναδρομή.....	10
2.1.3. Δομή του Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας	12
2.2 Ρύθμιση Συχνότητας.....	15
2.2.1. Γενικά	15
2.2.2. Επίπεδος Έλεγχος συχνότητας	17
2.3 Ηλεκτρικά Αυτοκίνητα	18
2.3.1. Εισαγωγή.....	18
2.3.2. Ιστορική αναδρομή	20
2.3.3. Αρχές λειτουργίας	21
2.3.4. Διαθέσιμοι τρόποι φόρτισης ηλεκτρικών αυτοκινήτων.....	22
2.3.5. Μπαταρίες ηλεκτρικών αυτοκινήτων.....	24
2.3.6. Ηλεκτρικά οχήματα και δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας.....	26
2.4 Οριακή Τιμή Συστήματος (ΟΤΣ)	29
3. Μαθηματική Μοντελοποίηση Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	30
3.1 Τι είναι η μαθηματική μοντελοποίηση	30
3.2 Περιγραφή μοντέλου ρύθμισης συχνότητας	30
3.3 Μοντέλο ρύθμισης συχνότητας με τέσσερις γεννήτριες .	33
4. Διατύπωση και Επεξήγηση της μεθοδολογίας επίλυσης.....	39

4.1	Σύντομη επισκόπηση	39
4.2	Εισαγωγή Δεδομένων	40
4.2.1.	Κατηγορίες ηλεκτρικών οχημάτων	40
4.2.2.	Κατανομές χρόνου αφίξεων και παραμονής	40
4.2.3.	Κατανομές επιπέδου φόρτισης της μπαταρίας κατά την άφιξη και την αναχώρηση	44
4.3	Διατύπωση μεθοδολογίας φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων.....	45
4.3.1.	Καθορισμός των περιορισμών φόρτισης	45
4.3.2.	Περιγραφή της συνάρτησης βελτιστοποίησης	46
4.3.3.	Διερεύνηση της ακρίβειας του ισοδύναμου μοντέλου μπαταρίας.....	52
4.4	Στήριξη συχνότητας με ασαφή λογική	55
4.4.1.	Εισαγωγή στην ασαφή λογική.....	55
4.4.2.	Εφαρμογές ασαφούς λογικής.....	56
4.4.3.	Μηχανισμός ελέγχου στήριξης συχνότητας με ασαφή λογική	57
4.4.4.	Διερεύνηση ακρίβειας του ισοδύναμου μοντέλου στον ασαφή ελεγκτή	60
4.5	Μοντελοποίηση του ηλεκτρικού συστήματος της Κρήτης.....	62
5.	Αποτελέσματα Προσομοιώσεων	66
5.1	Προσομοίωση σταθμών φόρτισης.....	66
5.2	Αύξηση ηλεκτρικών οχημάτων σε σταθερή μεταβολή φορτίου	70
5.3	Απόκριση σταθερού πλήθους οχημάτων ανάλογα με την μεταβολή του φορτίου.....	72
5.4	Απόκριση σταθερού πλήθους οχημάτων ανάλογα με το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας.....	74

5.5	Επαναφορά του επιπέδου φόρτισης της μπαταρίας μετά την στήριξη συχνότητας	77
5.6	Απόκριση ηλεκτρικών οχημάτων σε μείωση φορτίου	78
5.7	Απόκριση ηλεκτρικών οχημάτων σε ανεπάρκεια ισχύος.....	80
5.8	Απόκριση Ηλεκτρικών Οχημάτων σε περιπτώσεις υπερύψωσης συχνότητας.....	83
6.	Συμπεράσματα-Προτάσεις	88
6.1	Συνολική ανασκόπηση της διπλωματικής εργασίας.....	88
6.2	Προτάσεις για μελλοντική συνέχεια της δουλειάς.....	89
7.	Πηγές	90

1. Εισαγωγή

1.1 Σκοπός της Εργασίας

Ο σκοπός της συγκεκριμένης εργασίας είναι η κατασκευή ενός δυναμικού μοντέλου που θα προβλέπει την ικανότητα στήριξης της συχνότητας από μεγάλο πλήθος ηλεκτρικών οχημάτων. Για την εξαγωγή του αποτελέσματος το μοντέλο χρησιμοποιεί τα χαρακτηριστικά μιας και μόνο μπαταρίας η οποία αποτελείται από το άθροισμα όλων των επιμέρους μπαταριών των συνδεδεμένων οχημάτων στο δίκτυο. Όπως αποδείχθηκε, αυτή η προσέγγιση προσομοιώνει σε αρκετά ικανοποιητικό βαθμό την πραγματική λειτουργία ενός τέτοιου συστήματος. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί να γίνει μία εκτίμηση για την στήριξη συχνότητας με μεγάλη ακρίβεια και σε πολύ μικρότερο χρόνο. Το μοντέλο είναι δυναμικό, κάτι που σημαίνει ότι κάθε στιγμή η ισοδύναμη μπαταρία έχει διαφορετικές τιμές, όρια και χαρακτηριστικά. Με αυτό τον τρόπο, επιτυγχάνεται ακριβέστερη πρόβλεψη και ρεαλιστικότερα αποτελέσματα, σε σχέση με άλλα πιο αφηρημένα μοντέλα που υπάρχουν αυτή την στιγμή. Δεν εκτιμάται δηλαδή προσεγγιστικά μόνο η διαθέσιμη ισχύς που μπορούν να δώσουν ή να απορροφήσουν τα οχήματα σε κάποιο δεδομένο χρονικό σημείο, αλλά προσδιορίζεται με ακρίβεια τόσο η ισχύς όσο και η διαθέσιμη ενέργεια, συνυπολογίζοντας τα εκάστοτε όρια και εξασφαλίζοντας παράλληλα τις απαιτήσεις του χρήστη (π.χ. όσο το δυνατόν μικρότερη καταπόνηση της μπαταρίας, φόρτιση του οχήματος πάνω από μία συγκεκριμένη τιμή, βέλτιστος και οικονομικότερος τρόπος φόρτισης). Η γενική ιδέα της υλοποίησης που θα επεξηγηθεί αναλυτικά στα επόμενα κεφάλαια, απεικονίζεται στο Σχήμα 1.1 της επόμενης σελίδας

1.2 Δομή της Εργασίας

Στο πρώτο κεφάλαιο περιγράφεται ο στόχος της διπλωματικής εργασίας και μία επισκόπηση της δομής της.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται μία βιβλιογραφική ανασκόπηση με στόχο την εξοικείωση σε κάποιες βασικές έννοιες, απαραίτητες για την κατανόηση της εν λόγω διπλωματικής. Αρχικά γίνεται μία περιγραφή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας, στις βασικές αρχές και στην δομή της λειτουργίας τους. Στην συνέχεια περιγράφεται η έννοια της στήριξης

συχνότητας και ο τρόπος με τον οποίο επιτυγχάνεται. Έπειτα, γίνεται μία ιστορική αναδρομή στην εξέλιξη των ηλεκτρικών οχημάτων και μία σύντομη περιγραφή του τρόπου λειτουργίας και συνεισφοράς τους στο δίκτυο. Τέλος, περιγράφεται η έννοια της οριακής τιμής συστήματος και ο τρόπος που διαμορφώνεται ανάλογα με την ζήτηση.

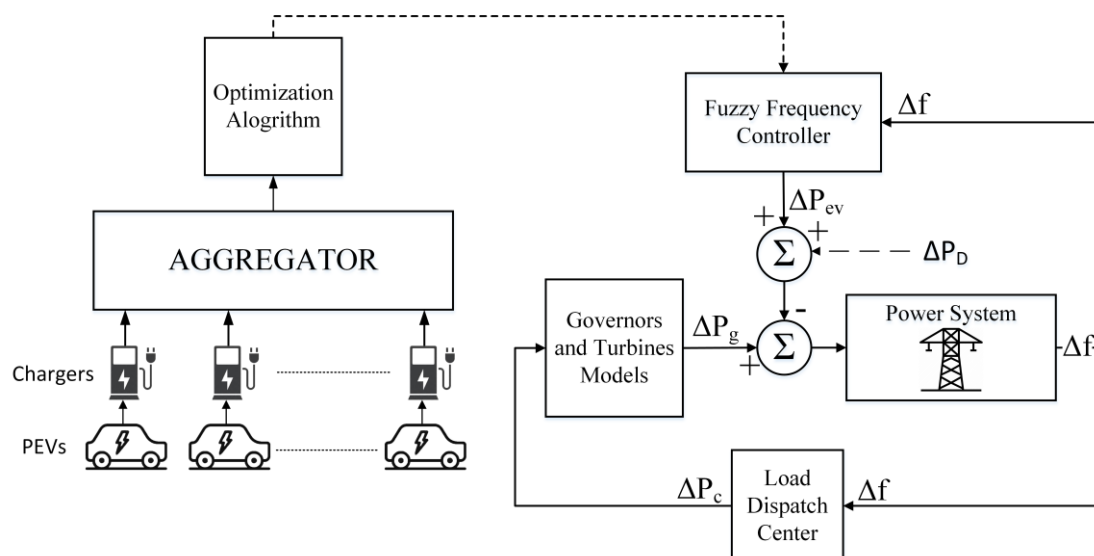
Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η μαθηματική μοντελοποίηση των επιμέρους συνιστωσών ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας και η μεταξύ τους σύνδεση για την δημιουργία ενός ενιαίου μοντέλου που προσομοιώνει την λειτουργία ενός ΣΗΕ.

Στο τέταρτο κεφάλαιο περιγράφεται όλη η μεθοδολογία επίλυσης του προβλήματος βήμα προς βήμα έως το τελικό αποτέλεσμα

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται και περιγράφονται τα αναλυτικά αποτελέσματα των προσομοιώσεων που κατασκευάστηκαν.

Στο έκτο κεφάλαιο παρατίθενται τα συμπεράσματα τα οποία εξήχθησαν από τις προσομοιώσεις, καθώς και κάποιες προτάσεις για μελλοντική διερεύνηση.

Στο έβδομο κεφάλαιο επισυνάπτονται οι πηγές από τις οποίες αντλήθηκαν τα στοιχεία που βοήθησαν στην συγγραφή της διπλωματικής εργασίας.



Σχήμα 1.1: Αφηρημένη απεικόνιση του συστήματος στήριξης συχνότητας από σταθμούς φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων

2. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

2.1 Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας

2.1.1. Ορισμός του Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας

Με τον όρο Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ) χαρακτηρίζουμε το σύνολο του εξοπλισμού, που αποτελείται από σταθμούς παραγωγής, υποσταθμούς ανύψωσης και υποβιβασμού τάσης, εναέριες και υπόγειες γραμμές μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Σκοπός του συστήματος είναι η τροφοδότηση των καταναλωτών με την απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια αξιόπιστα, με υψηλά ποιοτικά χαρακτηριστικά και με χαμηλό κόστος. Τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας λειτουργούν σήμερα αποκλειστικά με εναλλασσόμενες τριφασικές τάσεις και με συχνότητες 50 Hz ή 60 Hz. Η ιδιότητα των εναλλασσόμενων τάσεων να ανυψώνονται ή να υποβιβάζονται με τους μετασχηματιστές, επιτρέπει την επιλογή του βέλτιστου επιπέδου τάσης σε κάθε επιμέρους τμήμα ενός ΣΗΕ. Έτσι οι γεννήτριες στους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας λειτουργούν σε τάσεις 10-30 kV, οι καταναλωτές στα 400 V και η μεταφορά από τους σταθμούς παραγωγής στα κέντρα κατανάλωσης γίνεται με πολύ υψηλές τάσεις 110 kV έως 735 kV, ελαχιστοποιώντας έτσι το ρεύμα και τις απώλειες μεταφοράς. Η ηλεκτρική ενέργεια από την στιγμή που θα παραχθεί έως ότου καταναλωθεί βρίσκεται σε μία συνεχή ροή καθώς δεν μπορεί να αποθηκευτεί σε μεγάλη κλίμακα. Γι' αυτό τον λόγο, πρέπει να παράγεται όση ενέργεια καταναλώνεται κάθε στιγμή. Εκτός όμως από την ποσοτική κάλυψη των συνολικών αναγκών των καταναλωτών, είναι αναγκαία και η ικανοποίηση των χρονικών και τοπικών διακυμάνσεων του φορτίου. Ακόμα, ένα ΣΗΕ πρέπει να παρέχει καλής ποιότητας ηλεκτρική ισχύ. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι πρέπει να τηρούνται τα θεσμοθετημένα όρια διακύμανσης της τάσης και της συχνότητας, τα οποία συνήθως είναι 5% και 0.5% αντίστοιχα. Τέλος η ενέργεια που παράγεται, πρέπει να παρέχεται με τα ελάχιστα οικονομικά και οικολογικά κόστη.

2.1.2. Ιστορική Αναδρομή

Τα πρώτα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας εμφανίστηκαν στα τέλη της δεκαετίας του 1870, όταν χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας σε πελάτες για τον φωτισμό τους από τον G. Lane-

Fox και τον Thomas Edison. Ο πρώτος σταθμός παραγωγής λειτούργησε στο Λονδίνο στις 12 Ιανουαρίου 1882 και ο δεύτερος στις 4 Σεπτεμβρίου το ίδιο έτος στην Νέα Υόρκη. Το ηλεκτρικό ρεύμα που χρησιμοποίησαν τα πρώτα ΣΗΕ ήταν συνεχές (ΣΡ), χαμηλής τάσης και οι περιοχές που εξυπηρετούσαν οι πρώτοι κεντρικοί σταθμοί ήταν αναγκαστικά περιορισμένες λόγω της μικρής απόστασης που μπορούσε να μεταφερθεί αποδοτικά το συνεχές ρεύμα. Η τεράστια ωφέλεια του κοινωνικού συνόλου από την χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας αναγνωρίστηκε αμέσως και αυτό συνετέλεσε ταχύτατα στην εφεύρεση ποικιων αποδοτικών μεθόδων και στην εξέλιξη των ΣΗΕ στην σύγχρονη μορφή τους.

Επαναστατική αλλαγή στα ΣΗΕ αποτέλεσε η εισαγωγή του εναλλασσόμενου ρεύματος (ΕΡ) στις αρχές τις δεκαετίας του 1880, με την παράλληλη ανάπτυξη της γεννήτριας ΕΡ και του μετασχηματιστή. Οι αρχικές ευρεσιτεχνίες των A. Gaulard και G. Gibbs αγοράστηκαν, το 1885, από τον G. Westinghouse και ακολούθησε η ανάπτυξη και η εφαρμογή τους. Τα πλεονεκτήματα του εναλλασσόμενου ρεύματος φάνηκαν με την πρώτη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας σε απόσταση 1200 m, που έγινε στη Μασαχουσέτη το 1886, όπου χρησιμοποιήθηκε ένας μετασχηματιστής στην αρχή της γραμμής για να ανυψώσει την τάση στα 3000 V και ένας δεύτερος στο τέλος για να την υποβιβάσει στα 50 V. Ακολούθησε η εφεύρεση των πολυφασικών συστημάτων ΕΡ και της πρώτης διφασικής γεννήτριας ΕΡ το 1893, στην ανάπτυξη των οποίων μεγάλη ήταν η συμβολή του Nikola Tesla. Έκτοτε οι εξελίξεις ήταν ταχύτατες και η παγκόσμια εξάπλωση των ΣΗΕ ραγδαία. Την ίδια χρονιά λειτούργησε η πρώτη τριφασική γραμμή μήκους 21 km και τάσης 2300 V στην Καλιφόρνια.

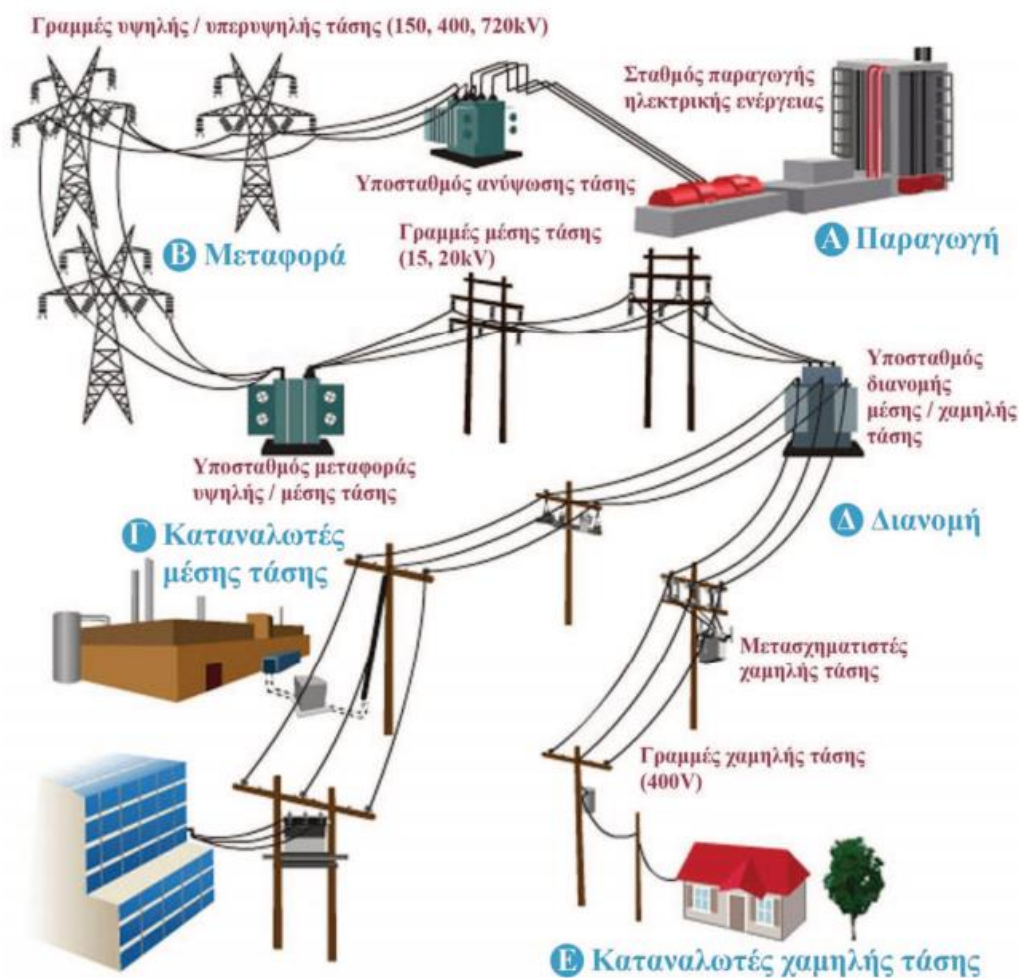
Η συχνότητα δεν είχε τυποποιηθεί από την πρώτη περίοδο της λειτουργίας των συστημάτων εναλλασσόμενου ρεύματος. Πολλές διαφορετικές συχνότητες είχαν χρησιμοποιηθεί, όπως 25, 50, 60, 125 και 133 Hz. Το γεγονός αυτό εμπόδιζε τη διασύνδεση των επιμέρους συστημάτων. Τελικά η συχνότητα των 60 Hz επικράτησε στην Β. Αμερική και η συχνότητα των 50 Hz στην Ευρώπη. Η ανάγκη μεταφοράς μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας σε μεγαλύτερες αποστάσεις μεταξύ κέντρων παραγωγής και κατανάλωσης οδήγησε στη χρήση υψηλότερων τάσεων 12, 44 και 60 kV. Από την δεκαετία του 1920 είχαν κατασκευαστεί μεγάλα θερμικά και υδροηλεκτρικά εργοστάσια, καθώς και γραμμές μεταφοράς

220 kV σε πολλά μέρη του κόσμου και τα ΣΗΕ άρχισαν να παίρνουν τη σύγχρονη μορφή τους. Η τάση αυξήθηκε στα 287 kV το 1935, στα 300 kV το 1953 και στα 500 kV το 1965. Το 1966 η ηλεκτρική επιχείρηση του Καναδά, Hydro Quebec, λειτούργησε την πρώτη γραμμή των 735 kV και το 1969 στις ΗΠΑ κατασκευάστηκε η πρώτη γραμμή των 765 kV.

2.1.3. Δομή του Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας

Ένα ΣΗΕ αποτελείται από τις ακόλουθες συνιστώσες:

- Σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας
- Δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας
- Δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας



Σχήμα 2.1: Δομή συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, Κατσαπρακάκης Δ. 2015

Σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας

Είναι οι εγκαταστάσεις στις οποίες μία μορφή πρωτογενούς ενέργειας μετατρέπεται σε ηλεκτρική. Ο όρος “παραγωγή” ηλεκτρικής ενέργειας είναι καταχρηστικός διότι στην πραγματικότητα η ενέργεια δεν παράγεται αλλά μετατρέπεται σε ηλεκτρική από άλλες προϋπάρχουσες στην φύση μορφές.

Οι σταθμοί παραγωγής μπορεί να είναι:

- Θερμοηλεκτρικά εργοστάσια, στα οποία η ηλεκτρική ενέργεια αποτελεί προϊόν μετατροπής θερμικής ενέργειας από κάποιο ενδιάμεσο στάδιο της συνολικής αλληλουχίας ενεργειακών μετατροπών. Η αρχική μορφή ενέργειας μπορεί να είναι είτε χημική ενέργεια ορυκτών καυσίμων (λιγνίτης, λιθάνθρακας, πετρέλαιο, φυσικό αέριο) είτε πυρηνική ενέργεια ορυκτών καυσίμων (ουράνιο, πλουτώνιο). Οι σταθμοί χωρίζονται σε ατμοηλεκτρικούς, ντιζελοηλεκτρικούς, και πυρηνικούς. Οι θερμοηλεκτρικές γεννήτριες είναι σύγχρονες γεννήτριες, δηλαδή οι στρόφοι τους συμπίπτουν με την ονομαστική συχνότητα του παραγόμενου εναλλασσόμενου ρεύματος (στην Ελλάδα 50 Hz).
- Υδροηλεκτρικά εργοστάσια, όπου η ηλεκτρική ενέργεια προέρχεται από τη μετατροπή της διαθέσιμης δυναμικής ενέργειας του νερού που βρίσκεται σε υψηλότερη υψομετρική στάθμη σε σχέση με τη θέση του υδροηλεκτρικού σταθμού. Οι γεννήτριες στις οποίες υλοποιείται αυτή η μετατροπή ονομάζονται υδροστρόβιλοι και είναι και αυτές σύγχρονες.
- Διάφορες τεχνολογίες Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ), όπως είναι τα αιολικά πάρκα, οι φωτοβολταϊκοί σταθμοί, οι σταθμοί γεωθερμίας, οι σταθμοί βιομάζας κ.α.

Η τοποθεσία της εγκατάστασης των σταθμών παραγωγής καθορίζεται από διάφορους τεchnοοικονομικούς παράγοντες. Έτσι, για παράδειγμα, οι λιγνιτικοί σταθμοί κατασκευάζονται δίπλα στο πεδίο εξόρυξης, ενώ οι υδροηλεκτρικοί και οι αιολικοί σταθμοί εκεί όπου υπάρχει εκμεταλλεύσιμο υδραυλικό ή αιολικό δυναμικό. Σημαντικός παράγοντας επιλογής της θέσης ενός θερμικού σταθμού είναι και η διαθεσιμότητα του απαιτούμενου νερού για τη λειτουργία των κυκλωμάτων ψύξης.

Δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας

Το σύστημα μεταφοράς περιλαμβάνει τις γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας υπερύψηλης τάσης και τους υποσταθμούς ανύψωσης και υποβιβασμού. Για τη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιούνται εναέριες γραμμές ή υπόγεια καλώδια τριφασικού εναλλασσόμενου ρεύματος. Σε σπανιότερες περιπτώσεις και κυρίως για διασυνδέσεις με υποθαλάσσια καλώδια, χρησιμοποιείται το συνεχές ρεύμα. Τυπικά επίπεδα τάσης για το δίκτυο μεταφοράς είναι, για το Ελληνικό δίκτυο τα 150 kV και τα 400 kV ενώ στην Ευρώπη χρησιμοποιούνται και τα 220 kV. Η τάση των γεννητριών που είναι συνήθως 20 kV – 30 kV ανυψώνεται στα επίπεδα των τάσεων του συστήματος μεταφοράς. Η μεταφορά γίνεται σε υψηλή και υπερύψηλη τάση για να μειωθούν οι απώλειες ισχύος κατά την μεταφορά σε μεγάλες αποστάσεις. Στην συνέχεια, οι γραμμές μεταφοράς τερματίζουν σε υποσταθμούς όπου υποβιβάζουν το επίπεδο της τάσης στα 15 kV - 20 kV για να διανεμηθεί στα αστικά και βιομηχανικά κέντρα.

Δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας

Αποτελεί την συνέχεια του συστήματος μεταφοράς προς την κατεύθυνση της κατανάλωσης. Αποτελείται και αυτό από το σύνολο των εναέριων γραμμών και υπόγειων καλωδίων, καθώς και των υποσταθμών υποβιβασμού της τάσης. Οι τάσεις λειτουργίας του, χωρίζονται σε δύο επίπεδα, τη μέση τάση (MT) και τη χαμηλή τάση (XT). Στο ελληνικό δίκτυο διανομής η μέση τάση είναι συνήθως στα 20 kV, ενώ η χαμηλή τάση είναι στα 400 V. Το σύστημα διανομής περιλαμβάνει και τα φορτία, δηλαδή τους καταναλωτές της ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτά μπορεί να είναι οικιακοί και μικροί βιοτεχνικοί καταναλωτές ή μεγαλύτεροι βιομηχανικοί πελάτες. Ανάλογα με την εγκατεστημένη ισχύ του καταναλωτή μεταβάλλεται η τάση και ο τρόπος τροφοδοσίας τους.

2.2 Ρύθμιση Συχνότητας

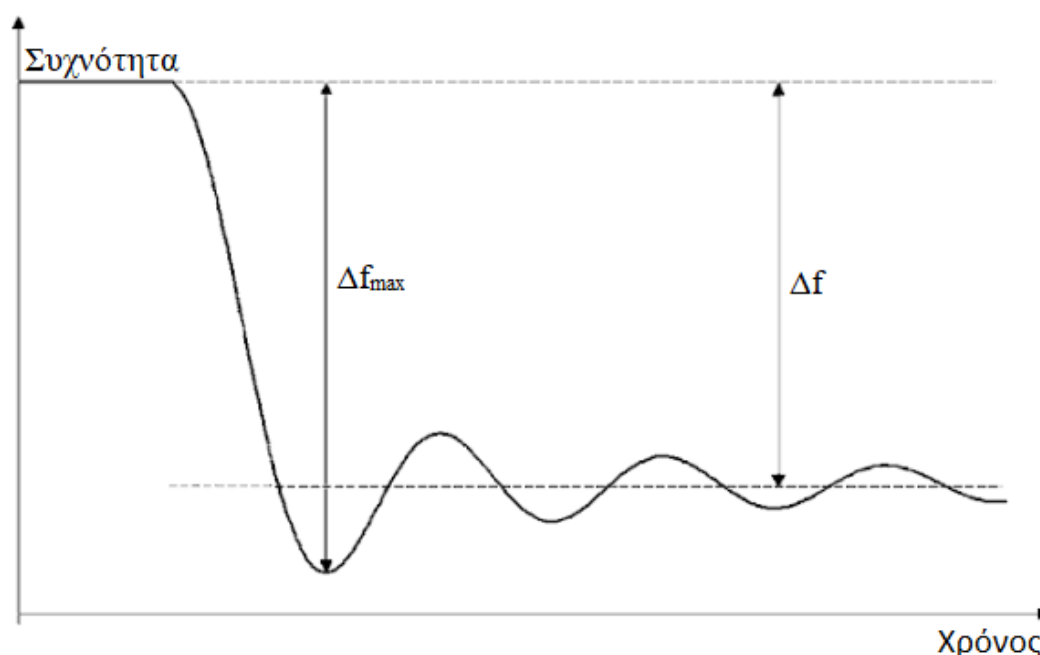
2.2.1. Γενικά

Η ρύθμιση της συχνότητας είναι πρωταρχική και τελείως απαραίτητη ανάγκη για την λειτουργία ενός ΣΗΕ. Η σταθερότητα της συχνότητας σε ένα ηλεκτρικό δίκτυο συνδέεται με την διατήρηση του ισοζυγίου παραγωγής-ζήτησης. Εάν η συχνότητα πέσει κάτω από την ονομαστική τιμή τότε υπάρχει έλλειμα παραγωγής. Στην αντίθετη περίπτωση υπάρχει πλεόνασμα. Στο διασυνδεδεμένο ΣΗΕ της ηπειρωτικής Ευρώπης η συχνότητα μπορεί να κυμαίνεται σε φυσιολογικές συνθήκες από 49,85 Hz έως 50,15 Hz. Όταν η συχνότητα αποκλίνει των φυσιολογικών τιμών απαιτείται κατάλληλη ρύθμιση για την επαναφορά της. Αυτή η ρύθμιση συχνότητας διακρίνεται σε τρία επίπεδα ελέγχου.

Πρωτεύων Έλεγχος: Τοπικός αυτόματος έλεγχος σε κάθε Μονάδα παραγωγής (≤ 30 sec) που παρέχει εφεδρεία ισχύος με αντίθετο πρόσημο προς κάθε μεταβολή συχνότητας. Οι μονάδες παραγωγής δηλαδή, μοιράζονται μεταξύ τους τις μεταβολές του φορτίου κατά ποσότητες αντιστρόφως ανάλογες του στατισμού των ρυθμιστών τους σύμφωνα με τον τύπο: $\Delta P_g(t) = -\frac{\Delta f}{R}$, όπου ΔP_g είναι μεταβολή της ισχύος της γεννήτριας, Δf η μεταβολή της συχνότητας και R ο στατισμός των ρυθμιστών της. Επειδή η ρύθμιση αυτή προσπαθεί να επαναφέρει το ισοζύγιο παραγωγής-κατανάλωσης εις βάρος της κινητικής ενέργειας των στρεφόμενων μαζών των γεννητριών, αφήνει πάντα ένα μόνιμο σφάλμα συχνότητας όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.2

Δευτερεύων Έλεγχος: Κεντρικός (από το Διαχειριστή Συστήματος) αυτόματος έλεγχος (30 sec – 15 min) που παρέχει εφεδρεία ισχύος ώστε να επαναφέρει τη συχνότητα και τα προγράμματα ανταλλαγών ενέργειας στις τιμές που επιδιώκουμε. Στην ουσία, το φορτίο μπορεί να ανακατανεμηθεί μετακινώντας παράλληλα τις χαρακτηριστικές φορτίου-συχνότητας των μονάδων μέσω του μηχανισμού αλλαγής στροφών των ρυθμιστών. Αυτό το είδος ρύθμισης ονομάζεται επίσης ρύθμιση φορτίου-συχνότητας του συστήματος ή Load Frequency Control (LFC) και έχει ως στόχο να εναρμονίσει την παραγωγή με το φορτίο ενός ΣΗΕ που είναι είτε αυτόνομο, είτε διασυνδεδεμένο με άλλα συστήματα μέσω μίας ή και περισσότερων διασυνδετικών γραμμών. Η ρύθμιση φορτίου-συχνότητας γίνεται από συμβατικές μονάδες με γρήγορη απόκριση όπως είναι οι

αεροστροβιλικές και τα υδροηλεκτρικά. Στα μεγάλα διασυνδεδεμένα Συστήματα όπως το Ευρωπαϊκό Διασυνδεδεμένο Σύστημα, σε κανονικές συνθήκες, είναι δύσκολο να συμβούν σημαντικές διακυμάνσεις στην συχνότητα. Μη διασυνδεδεμένα δίκτυα ή περιπτώσεις διαταραχών που οδηγούν σε νησιδοποιήσεις είναι πιο ευάλωτες σε τέτοιου είδους διαταραχές. Ο δευτερεύων έλεγχος απαιτεί έναν κεντρικό ρυθμιστή, ένα σύστημα μέτρησης της εναλλαγής της ισχύος στις διασυνδετικές γραμμές και ένα σύστημα μετάδοσης σημάτων στον ρυθμιστή των σχετικών μονάδων παραγωγής.



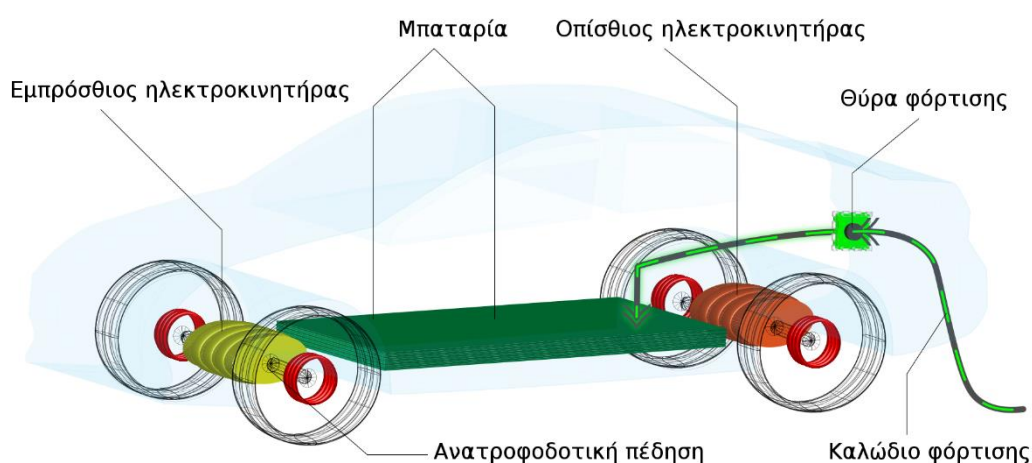
Σχήμα 2.2: Το μέγιστο και το μόνιμο σφάλμα συχνότητας μετά την πρωτεύουσα ρύθμιση

Τριτεύων Έλεγχος: Από τοπική ενέργεια στις μονάδες παραγωγής χειροκίνητης μεταβολής που ζητείται από τον διαχειριστή, ώστε να αποκατασταθεί η εφεδρεία του δευτερεύοντα ελέγχου για να ελεγχθούν ενδεχόμενες συμφορήσεις στο σύστημα και να επαναφέρουν τη συχνότητα και τα προγράμματα ανταλλαγών ενέργειας, αν η εφεδρεία δευτερεύουσας ρύθμισης δεν είναι αρκετή.

2.3 Ηλεκτρικά Αυτοκίνητα

2.3.1. Εισαγωγή

Ως ηλεκτρικό αυτοκίνητο (ΗΑ) ή plug-in electric vehicle (PEV) ονομάζουμε το αυτοκίνητο που χρησιμοποιεί την ηλεκτρική ενέργεια που αποθηκεύεται σε επαναφορτιζόμενες συστοιχίες συσσωρευτών ή αλλιώς μπαταρίες. Η βασική διαφορά των ΗΑ σε σχέση με τα συμβατικά οχήματα είναι ότι αντί για μηχανές εσωτερικής καύσης χρησιμοποιούν ηλεκτρικούς κινητήρες. Όσον αφορά στα επιβατηγά οχήματα, γίνεται διάκριση μεταξύ των αμιγώς ηλεκτρικών με συσσωρευτή, που κινούνται αποκλειστικά με ηλεκτρικό κινητήρα, και διαφόρων ειδών υβριδικών ηλεκτρικών αυτοκινήτων με ρευματολήπτη, τα οποία διαθέτουν ηλεκτρικό κινητήρα και κινητήρα εσωτερικής καύσης. Υπάρχουν επίσης και άλλα είδη οχημάτων που κινούνται με ηλεκτρική ενέργεια όπως είναι τα ηλεκτρικά ποδήλατα, τα ημιφορτηγά και τα λεωφορεία. Βέβαια η ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιείται επίσης σε μηχανές σιδηροδρόμων, πλοία αλλά και μικρά σκάφη.



Σχήμα 2.4: Απεικόνιση των κύριων χαρακτηριστικών ενός ηλεκτρικού αυτοκινήτου, Ian Furst 2019

Όπως είναι γνωστό η χρήση των ορυκτών καυσίμων έχει βλαβερές επιπτώσεις στην ποιότητα του αέρα και το κλίμα. Αυτό οφείλεται στις εκπομπές καυσαερίων διοξειδίου του άνθρακα και των επιβλαβών ατμοσφαιρικών ρύπων, όπως οξειδίων του αζώτου και άλλων σωματιδίων. Μόνο στις ΗΠΑ τα προϊόντα του πετρελαίου ευθύνονται για το 92% της

ενέργειας που χρησιμοποιήθηκε για τις μεταφορές το 2018. Η αντιμετώπιση αυτών των περιβαλλοντικών ζητημάτων έχει οδηγήσει τα τελευταία χρόνια σε μία ραγδαία ανάπτυξη των ηλεκτρικών οχημάτων. Η ΕΕ έχει δεσμευτεί να απαλλάξει το σύστημα μεταφορών της από τις εκπομπές άνθρακα και να στηρίζει εναλλακτικές λύσεις έναντι των συμβατικών καυσίμων και κινητήρων εσωτερικής καύσης. Ορισμένες πολιτικές ενθαρρύνουν την ανάπτυξη ανανεώσιμων καυσίμων και ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ άλλες στοχεύουν στις υποδομές που απαιτούνται για τα ηλεκτρικά οχήματα, όπως η δημιουργία σημείων επαναφόρτισης σε ολόκληρη την Ευρώπη. Ειδικές νομοθετικές πράξεις ορίζουν στόχους σχετικά με την ποσότητα διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) που μπορούν να εκπέμπουν τα νέα αυτά οχήματα ανά χιλιόμετρο. Οι εν λόγω πράξεις έχουν συμβάλει στη δημιουργία κινήτρων για την κατασκευή οχημάτων χαμηλών εκπομπών και έχουν αναγκάσει όλες τις μεγάλες αυτοκινητοβιομηχανίες να στρέψουν το βλέμμα τους προς την ηλεκτροκίνηση. Με τα πιο πρόσφατα δεδομένα του 2018, ο παγκόσμιος στόλος αυτοκινήτων ξεπέρασε τα 5 εκατομμύρια, έχοντας μία αύξηση της τάξεως του 60% σε σχέση με το 2017. Προβλέπεται ότι έως το 2030 οι πωλήσεις των ηλεκτρικών οχημάτων θα κυμαίνονται από 20 έως 40 εκατομμύρια, κάτι που δείχνει την μεγάλη διεύρυνση που θα έχουν στην αγορά τα επόμενα χρόνια. Πολλές χώρες έχουν θέσει ήδη στόχους να σταματήσουν τις πωλήσεις των βενζινοκίνητων και πετρελαιοκίνητων οχημάτων στο μέλλον. Για παράδειγμα: η Νορβηγία μέχρι το 2025, η Δανία, η Κίνα και η Ινδία μέχρι το 2030, η Γερμανία και η Γαλλία μέχρι το 2040 και η Βρετανία μέχρι το 2040-2050. Αυτή την στιγμή η Νορβηγία ηγείται παγκοσμίως στο μερίδιο αγοράς με το 5.1% των οχημάτων που βρίσκονται στους δρόμους της να είναι ηλεκτρικά. Στις αρχές του 2019 μάλιστα, οι πωλήσεις ηλεκτρικών αυτοκινήτων στη Νορβηγία ξεπέρασαν αυτές των βενζινοκίνητων.

Ωστόσο υπάρχουν κάποια βασικά μειονεκτήματα που συνοδεύουν τα ΗΑ και αποτελούν μελλοντικές προκλήσεις, όπως το κόστος, η αυτονομία και η ταχύτητα φόρτισης. Επί του παρόντος η φόρτιση ενός οχήματος για διαδρομή 100 χλμ. διαρκεί 20-30 λεπτά στους ταχύτερους σταθμούς. Μια απλή πρίζα των 230 V μπορεί να προσφέρει περίπου 300 km σε 8 ώρες. Η αυτονομία ενός ΗΑ εξαρτάται από το πλήθος των μπαταριών που χρησιμοποιεί, την φθορά που έχουν υποστεί, το βάρος του οχήματος, αλλά και την θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Η αυτονομία

των ηλεκτρικών αυτοκινήτων το 2020 ποικίλει από 100 km (Renault Twizy) μέχρι 630 km (Tesla Model S). Αλλά ένα πρόβλημα που πρέπει να αντιμετωπιστεί είναι η βελτίωση των υποδομών έτσι ώστε τα σημεία φόρτισης να καταστούν εξίσου διαδεδομένα με τα πρατήρια καυσίμων. Τέλος, θα πρέπει να γίνει ενδυνάμωση του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας σε συνδυασμό με μεγάλη διείσδυση των ΑΠΕ. Πρέπει να τονιστεί ότι τα πλήρη περιβαλλοντικά οφέλη της ηλεκτροκίνησης επιτυγχάνονται όταν η παραγωγή ενέργειας που καταναλώνουν συνδυάζεται με ανανεώσιμες μορφές ενέργειας.

2.3.2. Ιστορική αναδρομή

Το έτος 1886 θεωρείται το έτος γέννησης του σύγχρονου αυτοκινήτου, όταν ο Γερμανός εφευρέτης Karl Benz κατοχυρώνει το δίπλωμα ευρεσιτεχνίας του Benz Patent-Motorwagen το οποίο διέθετε κινητήρα εσωτερικής καύσης. Δύο χρόνια μετά, το 1888, ο Γερμανός εφευρέτης Andreas Flocken σχεδίασε το *Flocken Elektrowagen* το οποίο μπορεί να θεωρηθεί το πρώτο ηλεκτρικό αυτοκίνητο. Στα τέλη 19ου και στις αρχές του 20ου αιώνα, τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα ήταν ο πιο δημοφιλής τύπος αυτοκινήτων, καθώς προσέφεραν περισσότερη άνεση και ήταν πιο εύκολα στην λειτουργία τους σε σχέση με τα τότε αυτοκίνητα εσωτερικής καύσης. Στις αρχές του 20ου αιώνα υπήρχαν περίπου 30.000 ηλεκτρικά αυτοκίνητα. Η εξέλιξη όμως των μηχανών εσωτερικής καύσης ξεπέρασε τα πλεονέκτημα των ηλεκτρικών αυτοκινήτων. Οι πιο γρήγοροι χρόνοι ανεφοδιασμού και το χαμηλότερο κόστος παραγωγής τους, τα έκαναν πιο δημοφιλή.

Στα τέλη του 20^{ου} αιώνα, το 1990, ο οργανισμός California Air Resources Board άρχισε να απαιτεί για αυτοκίνητα με λιγότερους ρύπους, που είχε σαν στόχο αυτοκίνητα μηδενικών ρύπων όπως τα ηλεκτρικά. Μετέπειτα η πρωτοπόρος κατασκευάστρια εταιρία Tesla Motors, ξεκίνησε να εργάζεται πάνω σε ένα ηλεκτρικό μοντέλο που αργότερα έγινε το Tesla Roadster με τις πρώτες παραδόσεις να γίνονται το 2008. Ήταν επίσης το πρώτο ΗΑ που χρησιμοποιούσε μπαταρίες λιθίου-ιόντων με αυτονομία 320 χλμ. ανά φόρτιση. Μέσα στα επόμενα χρόνια οι πωλήσεις της εταιρίας εκτοξεύτηκαν φτάνοντας το 2018 τις 360.000, κάνοντας τα ηλεκτρικά οχήματα γνωστά στο ευρύ κοινό.

Εκτός από τα μειονεκτήματα που αναφέρθηκαν παραπάνω ένας ακόμη λόγος που τα ΗΑ δεν ήταν τόσο διαδεδομένα μέχρι και σήμερα, ήταν ότι οι μεγάλες πετρελαϊκές εταιρίες είχαν κατά καιρούς υπονομεύσει τις προσπάθειες παραγωγής ηλεκτρικών οχημάτων για να προστατέψουν τα συμφέροντα τους.



Σχήμα 2.5: Ηλεκτρικό αυτοκίνητο κατασκευασμένο από τον Thomas Parker το 1884 που λειτουργούσε με επαναφορτιζόμενες μπαταρίες που σχεδίασε ο ίδιος.

2.3.3. Αρχές λειτουργίας

Τα βασικότερα εξαρτήματα των ηλεκτρικών αυτοκινήτων είναι οι μπαταρίες και ο ηλεκτρικός κινητήρας. Αυτό σημαίνει ότι τα μηχανικά μέρη είναι πολύ λιγότερα σε σχέση με ένα συμβατικό όχημα εσωτερικής καύσης, πράγμα που μειώνει κατά πολύ το κόστος συντήρησης. Η αρχή λειτουργίας ενός ΗΑ είναι σχετικά απλή. Το πεντάλ της επιτάχυνσης συνδέεται με ένα ποτενσιόμετρο που ανάλογα με την δύναμη που εφαρμόζει ο οδηγός στέλνει σήμα σε έναν ελεγκτή ο οποίος ρυθμίζει ανάλογα την τάση στα άκρα της μηχανής.

2.3.4. Διαθέσιμοι τρόποι φόρτισης ηλεκτρικών αυτοκινήτων

Ο τομέας της φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων αποτελεί ίσως το βασικότερο κομμάτι για την ευρεία διάδοση και την ανεμπόδιστη χρήση τους. Για την επαναφόρτιση των μπαταριών έχουν καθιερωθεί διεθνή πρότυπα που προσφέρουν, ανάλογα με τις δυνατότητες του δικτύου ηλεκτροδότησης, διαφορετική ποιότητα και ταχύτητες φόρτισης.

Η Διεθνής Ηλεκτροτεχνική Επιτροπή (IEC) έχει καθιερώσει τέσσερις τυποποιημένους τρόπους, που αποτελούν τις κύριες μεθόδους φόρτισης των ηλεκτρικών αυτοκινήτων ως εξής:

- Mode 1: Βραδεία φόρτιση (AC) από ρευματοδότη γενικής χρήσεως
Απαιτείται ένας απλός ρευματοδότης οικιακού τύπου εναλλασσόμενου ρεύματος χωρίς κάποια διάταξη προστασίας κατά της ηλεκτροπληξίας. Το ρεύμα φόρτισης δεν υπερβαίνει τα 16 A ενώ η τάση τα 250 V σε μονοφασική και τα 400 V σε τριφασική εγκατάσταση.
- Mode 2: Βραδεία φόρτιση (AC) από ρευματοδότη γενικής χρήσεως με διάταξης προστασίας κατά της ηλεκτροπληξίας (RCD) επί του καλωδίου
Απαιτείται ένας απλός ρευματοδότης οικιακού τύπου εναλλασσόμενου ρεύματος. Για την ασφαλή διαδικασία φόρτισης έχει προβλεφθεί κατάλληλη γραμμή, χωρίς άλλα φορτία, στον πίνακα διανομής και έχει τοποθετηθεί ασφάλεια κατά της ηλεκτροπληξίας. Το ρεύμα φόρτισης δεν υπερβαίνει τα 32 A ενώ η τάση τα 250 V σε μονοφασική και τα 400 V σε τριφασική εγκατάσταση. Μία πλήρης φόρτιση μπορεί να διαρκέσει κατά μέσο όρο 10 ώρες ή και περισσότερο, αναλόγως των χαρακτηριστικών και της χωρητικότητας της μπαταρίας του κάθε αυτοκινήτου.
- Mode 3: Φόρτιση (AC) από ειδικό ρευματοδότη
Απαιτείται η χρήση μίας ειδικής συσκευής φόρτισης (Wall Box) που εμπεριέχει ένα ενσωματωμένο σύστημα ελέγχου και προστασίας. Σε γενικές γραμμές επιτρέπει γρηγορότερη φόρτιση σε σχέση με τις προηγούμενες δύο μεθόδους αναλόγως πάντα την σύνδεση στο δίκτυο και τον τύπου του φορτιστή του οχήματος. Εκτός από την οικιακή χρήση, αυτού του είδους η φόρτιση συναντάται και σε σταθμούς

εναλλασσόμενου ρεύματος ημιταχείας φόρτισης σε κοινόχρηστους χώρους όπως σούπερ μάρκετ, πάρκινγκ κτλ.

- Mode 4: Ταχεία/Υπερταχεία φόρτιση (DC) από εξωτερικό φορτιστή που παρέχει συνεχές ρεύμα

Απαιτείται μετατροπέας εναλλασσόμενου ρεύματος σε συνεχές, το οποίο παρέχεται στις μπαταρίες του οχήματος απευθείας από τον εξωτερικό φορτιστή. Επιτυγχάνονται πάρα πολύ γρήγορες ταχύτητες φόρτισης αναλόγως με την ισχύ του φορτιστή που μπορεί να κυμαίνεται από 40 έως 350 kW (Terra High Power Fast Charger). Η επαναφόρτιση μπορεί να επιτευχθεί κατά μέσο όρο σε χρόνο από 20 έως 40 λεπτά.

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά και οι προδιαγραφές των βυσμάτων που χρησιμοποιούνται για την επαναφόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων ορίζονται από μία σειρά προτύπων που έχουν υιοθετηθεί από την αυτοκινητοβιομηχανία αλλά και από νομοθετικά πλαίσια που ισχύουν για τα Κράτη μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Ενδεικτικά, οι βασικότεροι τύποι ρευματοληπτών για την φόρτιση των ΗΑ είναι:

1. Τύπος 2 / IEC 62196: Είναι το κοινό πρότυπο πρίζας για όλους του σταθμούς φόρτισης στην Ευρωπαϊκή Ένωση.



2. J1772 / Τύπος 1: Χρησιμοποιείται για την φόρτιση AC αυτοκινήτων όπως Citroen, FIAT, Honda, KIA, NISSAN, Mitsubishi, Opel, Peugeot, Renault.



3. Combo / CCS: Χρησιμοποιείται σε σταθμούς DC για την φόρτιση αυτοκινήτων BMW, FORD, Hyundai, Mercedes, VW.



4. CHAdeMO: Χρησιμοποιείται για την ταχεία φόρτιση αυτοκινήτων όπως Citroen, KIA, Honda, NISSAN, Mitsubishi, Peugeot, TESLA (με κατάλληλο αντάπτορα), Toyota.



Τέλος, υπάρχει και η ασύρματη-επαγωγική φόρτιση, η οποία δεν έχει ακόμα ευρεία εφαρμογή στην φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων λόγω διαφόρων οικονομοτεχνικών παραγόντων, αλλά χρησιμοποιείται σε ειδικές εφαρμογές κυρίως ηλεκτροκίνητων μέσων μαζικής μεταφοράς. Κατά την διαδικασία της φόρτισης, το ΗΑ σταθμεύει πάνω από τον επαγωγέα που βρίσκεται εγκατεστημένος εντός του δαπέδου και η φόρτιση ξεκινάει αυτόματα χωρίς την παρέμβαση του οδηγού. Αυτή την στιγμή, η ισχύς φόρτισης κυμαίνεται από 6 έως 10 kW.

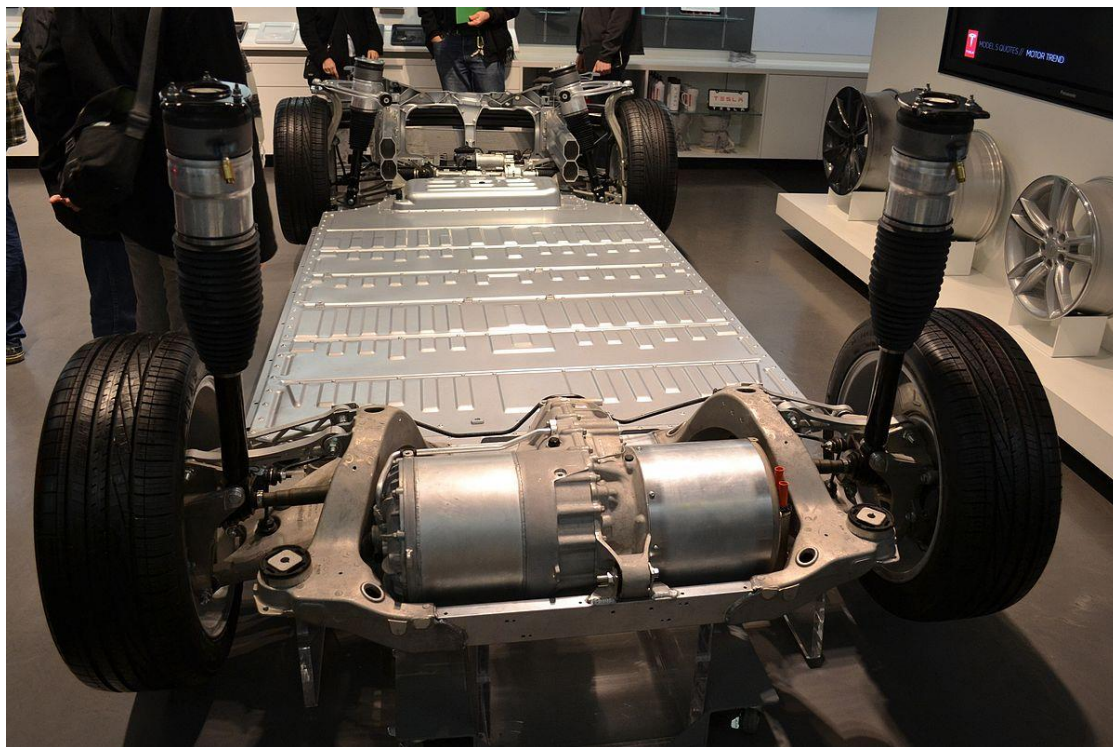


Σχήμα 2.6: Σταθμός φόρτισης με ταχυφορτιστές της εταιρίας Tesla στην Καλιφόρνια των ΗΠΑ

2.3.5. Μπαταρίες ηλεκτρικών αυτοκινήτων

Οι μπαταρίες μολύβδου οξέος και οι μπαταρίες υδριδίου νικελίου-μετάλλου (NiMH) ήταν από τις πρώτες τεχνολογίες μπαταριών που χρησιμοποιήθηκαν σε ηλεκτρικά οχήματα όπως το EV1 της General Motors. Ωστόσο, η χρήση τους ως κύρια πηγή αποθήκευσης θεωρείται πλέον παρωχημένη. Οι μπαταρίες μολύβδου οξέος έχουν χρησιμοποιηθεί σε συμβατικά οχήματα και είναι σχετικά φθηνές. Όμως, αυτός ο τύπος μπαταρίας έχει χαμηλή ενέργεια ανά κιλό (34 Wh/kg). Οι μπαταρίες NiMH θεωρούνται ανώτερες, καθώς διαθέτουν μέχρι και διπλάσια ενέργεια ανά κιλό (68 Wh/kg) σε σύγκριση με τις μπαταρίες μολύβδου οξέος. Αυτό επιτρέπει στα ηλεκτρικά οχήματα που χρησιμοποιούν μπαταρίες NiMH να είναι σημαντικά ελαφρύτερα, μειώνοντας με αυτό τον τρόπο την συνολική

κατανάλωση ενέργειας. Ωστόσο, οι μπαταρίες NiMH έχουν κάποια μειονεκτήματα, όπως η χαμηλότερη απόδοση φόρτισης και η αυτοεκφόρτιση (έως 12,5% την ημέρα υπό κανονικές συνθήκες θερμοκρασίας δωματίου) που επιδεινώνεται όταν οι μπαταρίες βρίσκονται σε περιβάλλον υψηλής θερμοκρασίας. Αυτό καθιστά τις μπαταρίες NiMH λιγότερο ιδανικές για πιο ζεστά περιβάλλοντα.



Σχήμα 2.7: Το σασί ενός Tesla Model S, με την συστοιχία των μπαταριών λιθίου-ιόντων στο δάπεδο του οχήματος και του ηλεκτροκινητήρες συνδεδεμένους στους εμπρόσθιους τροχούς

Πλέον το πρότυπο για τα σύγχρονα ηλεκτρικά οχήματα θεωρείται η μπαταρία λιθίου ιόντων (Li-ion). Υπάρχουν πολλοί τύποι μπαταριών ιόντων λιθίου με διαφορετικά χαρακτηριστικά, αλλά οι κατασκευαστές έχουν εστιάσει σε αυτούς με την μεγαλύτερη διάρκεια ζωής. Σε σύγκριση με άλλες τεχνολογίες, οι μπαταρίες λιθίου ιόντων έχουν τα περισσότερα οφέλη. Διαθέτουν πολύ μεγάλη ενέργεια ανά κιλό (140 Wh/kg) και ενεργειακή πυκνότητα, καθιστώντας τις ιδανικές μπαταρίες για ηλεκτρικά οχήματα. Είναι επίσης εξαιρετικές στη διατήρηση της ενέργειας, με ρυθμό αυτοεκφόρτισης 5% ανά μήνα, αρκετά χαμηλότερη από τις μπαταρίες NiMH. Έχουν όμως ορισμένα μειονεκτήματα. Πέραν του υψηλού κόστους, υπάρχουν επίσης σημαντικές ανησυχίες σχετικά με την

υπερφόρτιση και υπερθέρμανση τους. Υπήρξαν για παράδειγμα, μερικές περιπτώσεις όπου το Tesla Model S, το οποίο χρησιμοποιούσε μπαταρίες ιόντων λιθίου, έπιασε φωτιά λόγω ζητημάτων στην φόρτιση ή λόγω ζημιών στην μπαταρία. Ωστόσο, έχουν καταβληθεί μεγάλες προσπάθειες για τη βελτίωση της ασφάλειας των οχημάτων που χρησιμοποιούν μπαταρίες ιόντων λιθίου και είναι πλέον ο κυρίαρχος τύπος μπαταριών που χρησιμοποιείται στα ηλεκτρικά οχήματα.

Στον Πίνακα 2.1 παρουσιάζονται κάποια από τα πιο δημοφιλή ηλεκτρικά αυτοκίνητα της αγοράς μαζί με τα χαρακτηριστικά των μπαταριών τους ως προς την αυτονομία, την χωρητικότητα και την ταχύτητα φόρτισης.

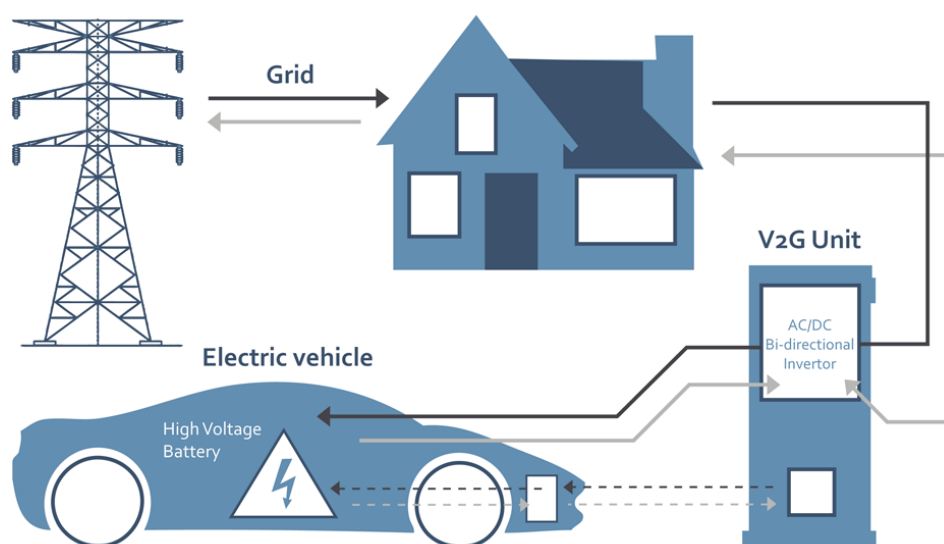
Πίνακας 2.1

Brand	Battery Capacity (kWh)	Electric Range (km)	Charge Power / Charge Time	Fastcharge Power / Charge Time	Price (approx.)
Nissan Leaf	40	220	3.6 kW AC / 11 hours and 45 mins	46 kW DC / 40 mins	30.000 €
Renault Zoe	54.7	320	22 kW AC / 3 hours	46 kW DC / 56 mins	32.000 €
Hyundai Kona	42	255	11 kW AC / 4 hours and 15 mins	50 kW DC / 50 mins	35.000 €
Tesla Model 3	75	460	11 kW AC / 7 hours and 45 mins	250 kW DC / 22 mins	55.000 €
Jaguar I-Pace	90	370	7.4 kW AC / 13 hours and 30 mins	104 kW DC / 44 mins	80.000 €
Tesla Model S	100	525	16.5 kW AC / 7 hours	200 kW DC / 38 mins	85.000 €

2.3.6. Ηλεκτρικά οχήματα και δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας

Η σύνδεση των ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο αποτελεί ένα επιπρόσθετο φορτίο, το οποίο σε μεγάλη κλίμακα και χωρίς καμία ρύθμιση φόρτισης-εκφόρτισης μπορεί να προκαλέσει διάφορα προβλήματα, όπως διακυμάνσεις της τάσης και της συχνότητας ή και υποβάθμιση της ποιότητας ισχύος. Για την αντιμετώπιση τέτοιων προβλημάτων εισάγεται μία νέα τεχνολογία με όνομα Vehicle-to-Grid (V2G) ή αλλιώς αμφίδρομη φόρτιση. Η τεχνολογία V2G καθορίζει τη φόρτιση και την εκφόρτιση των μπαταριών των ηλεκτρικών οχημάτων σύμφωνα με τις ανάγκες των χρηστών αλλά και εκείνες του ίδιου του δικτύου με το οποίο είναι συνδεδεμένο το όχημα (Σχήμα 2.8). Αυτό σημαίνει ότι τα ΗΑ που

συνδέονται στο δίκτυο μέσω των σημείων φόρτισης, μπορούν να ανταλλάσσουν αποδοτικά ενέργεια και να συμπεριφέρονται σαν ένας μεγάλος σταθμός παραγωγής όταν αυτό κρίνεται απαραίτητο. Ένα τέτοιο σενάριο είναι απόλυτα ρεαλιστικό αν σκεφτεί κανείς ότι κατά μέσο όρο, ένα ηλεκτρικό όχημα είναι σταθμευμένο το 90-95% του χρόνου του μέσα στην ημέρα.



Σχήμα 2.8: Σύνδεση ενός ηλεκτρικού οχήματος στο δίκτυο μέσω της τεχνολογίας V2G

Βλέποντας αθροιστικά τις μπαταρίες του κάθε ΗΑ, προκύπτει μία ισοδύναμη μπαταρία μεγάλης χωρητικότητας η οποία είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από τα σημερινά συστήματα μπαταριών, τα οποία έχουν ικανότητα αποθήκευσης της τάξεως του 2,2% της συνολικής παραγόμενης ισχύος. Τα ηλεκτρικά οχήματα μπορούν, επομένως, να συνεισφέρουν στο δίκτυο ως μονάδες προσωρινής αποθήκευσης ενέργειας παίζοντας καταλυτικό ρόλο στην ανάπτυξη και την μεγαλύτερη διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Μπορούν δηλαδή, να χρησιμοποιηθούν για τη σταθεροποίηση ανισορροπιών στην συχνότητα και στο φορτίο λόγω της γρήγορης απόκρισης των μπαταριών τους, οι οποίες έχουν σχεδιαστεί για να αντέχουν μεγάλες και συχνές διακυμάνσεις ισχύος, ανταποκρινόμενες σχεδόν στιγμιαία όταν αυτό ζητείται. Ταυτόχρονα, οι πελάτες απολαμβάνουν πιο οικολογική και οικονομικότερη ενέργεια ενώ ανταμείβονται και για την “εξυπηρέτηση” που παρέχουν στο ηλεκτρικό δίκτυο.

Αν και το V2G δεν εφαρμόζεται προς το παρόν σε μεγάλη κλίμακα ήδη κάποιες χώρες έχουν αρχίσει να στρέφονται προς αυτή την κατεύθυνση. Για παράδειγμα, προς τα τέλη του 2019, ο Luigi Ferraris ο οποίος είναι ο CEO της Terna, εταιρείας που διαχειρίζεται το δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας στην Ιταλία αλλά και ο CEO της FCA (Fiat Chrysler Automobiles) για την περιοχή EMEA, Pietro Gorlier, υπέγραψαν ένα μνημόνιο κατανόησης για τη συνεργασία των δύο ομίλων στην έρευνα των υπηρεσιών που αφορούν στα δίκτυα V2G, για την σύνδεση των ηλεκτρικών και υβριδικών οχημάτων στο κεντρικό δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Η συνεργασία περιλαμβάνει τη κατασκευή ενός πρωτοποριακού εργαστηρίου στο Τορίνο με την ονομασία E-mobilityLab (Σχήμα 2.9), το οποίο θα επιτρέψει την πραγματοποίηση δοκιμών σχετικών με τις δυνατότητες των ηλεκτρικών οχημάτων να ενταχθούν στα συστήματα V2G και τις σχετικές υπηρεσίες που θα πρέπει να αναπτυχθούν.



Σχήμα 2.9: Δίκτυο V2G στο εργοστάσιο Mirafiori της FCA στο Τορίνο

Τον Ιούλιο του 2020 αναμένεται να συνδεθούν 32 αμφίδρομοι ταχυφορτιστές με απόδοση έως 50kW που θα μπορούν να φορτίζουν ταυτόχρονα συνολικά έως 64 ηλεκτρικά αυτοκίνητα. Μέχρι τα τέλη του 2021, το σύστημα, θα μπορεί να υποστηρίξει μέχρι και 700 ηλεκτρικά οχήματα. Το δίκτυο θα λαμβάνει ενέργεια και από το ηλιακό πάρκο των 150.000τ.μ., απόδοσης 15MW, που επίσης κατασκευάζεται στο Mirafiori και θα συμβάλει στη μείωση των εκπομπών CO₂ κατά 5.000 τόνους. Με

την ολοκλήρωση του, το δίκτυο V2G στο Mirafiori, θα έχει την δυνατότητα παροχής 25 MW, κάτι που θα το καθιστά τη μεγαλύτερη αντίστοιχη εγκατάσταση στον κόσμο. Χαρακτηριστικό είναι ότι θα έχει τη δυνατότητα να βελτιστοποιεί τη ροή ενέργειας που αντιστοιχεί στην κατανάλωση που έχουν 8.500 σπίτια. Η παροχή ηλεκτρισμού στο δίκτυο από τα οχήματα θα βοηθήσει στη σταθεροποίηση του συστήματος και παράλληλα θα μειώσει το συνολικό κόστος χρήσης του αυτοκινήτου.

2.4 Οριακή Τιμή Συστήματος (ΟΤΣ)

Η οριακή Τιμή του Συστήματος σύμφωνα με την ρυθμιστική αρχή ενέργειας (ΡΑΕ) είναι η τιμή στην οποία εκκαθαρίζεται η αγορά ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και η τιμή που εισπράττουν όλοι οι όσοι εγγέουν ενέργεια στο σύστημα και πληρώνουν όλοι όσοι ζητούν ενέργεια από αυτό. Συγκεκριμένα, η ΟΤΣ διαμορφώνεται από τον συνδυασμό των προσφορών τιμών και ποσοτήτων που υποβάλλουν κάθε μέρα οι διαθέσιμες μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, και του ωριαίου φορτίου ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας, που διαμορφώνεται σε καθημερινή βάση από του καταναλωτές. Επιχειρώντας μία απλή περιγραφή του τρόπου υπολογισμού της Οριακής Τιμής του Συστήματος, σύμφωνα με τις βασικές αρχές της μικροοικονομικής θεωρίας, μπορεί να αναφερθεί ότι οι μονάδες παραγωγής κατατάσσονται αναλόγως των προσφορών τους σε αύξουσα σειρά, ξεκινώντας από την χαμηλότερη προσφερόμενη τιμή για ορισμένη ποσότητα ενέργειας και καταλήγοντας στην υψηλότερη προσφερόμενη τιμή. Στο σημείο, όπου οι προσφερόμενες ποσότητες ενέργειας εξυπηρετούν το ζητούμενο φορτίο, καθορίζεται και η Οριακή Τιμή του συστήματος. Στην ουσία η ΟΤΣ συμπίπτει με την προσφορά της τελευταίας μονάδας που πρέπει να λειτουργήσει για να καλυφθεί η ζήτηση. Για λόγους προστασίας των καταναλωτών και διαμόρφωσης συνθηκών υγιούς ανταγωνισμού τίθεται διοικητικά ανώτερο όριο ως προς την προσφερόμενη τιμή, το οποίο έχει τεθεί ίσο με 150 €/MWh καθώς και κατώτερο επίπεδο προσφορών, το οποίο είναι το μεταβλητό κόστος της μονάδας, ώστε στις περισσότερες περιπτώσεις οι παραγωγοί να πληρώνονται το κόστος καυσίμου τους.

3. Μαθηματική Μοντελοποίηση Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας

3.1 Τι είναι η μαθηματική μοντελοποίηση

Μαθηματική μοντελοποίηση είναι η περιγραφή ενός φαινομένου, ενός συστήματος ή μιας διαδικασίας χρησιμοποιώντας μαθηματικές έννοιες. Είναι δηλαδή η διαδικασία ανάπτυξης ενός μαθηματικού μοντέλου που περιγράφει ένα τεράστιο αριθμό εν δυνάμει εφαρμογών. Τα μαθηματικά μοντέλα μπορούν να λάβουν πολλές μορφές, συμπεριλαμβανομένων δυναμικών συστημάτων, στατιστικών μοντέλων, διαφορικών εξισώσεων κ.α. Οι στόχοι ενός μαθηματικού μοντέλου είναι οι εξής:

- Η μελέτη και κατανόηση της συμπεριφοράς πολύπλοκων συστημάτων.
- Η χρήση και η ανάπτυξη νέων, μαθηματικών εργαλείων που απαιτούνται για την επίλυση ενός μοντέλου.
- Η προσομοίωση και η πρόβλεψη συμπεριφορών και ιδιοτήτων πολύπλοκων συστημάτων.
- Ο έλεγχος των υποθέσεων ενός μοντέλου και η αντίστοιχη βελτίωση του.

Η βελτίωση του μαθηματικού μοντέλου βασίζεται στο γεγονός ότι το τέλειο μοντέλο δεν είναι εφικτό να υπάρχει. Όλα βασίζονται σε υποθέσεις και παραδοχές καθώς είναι αδύνατον να συμπεριληφθούν (είτε επειδή είναι άγνωστες είτε επειδή είναι πάρα πολλές) όλες οι πιθανές παράμετροι που μπορούν να επηρεάσουν ένα σύστημα.

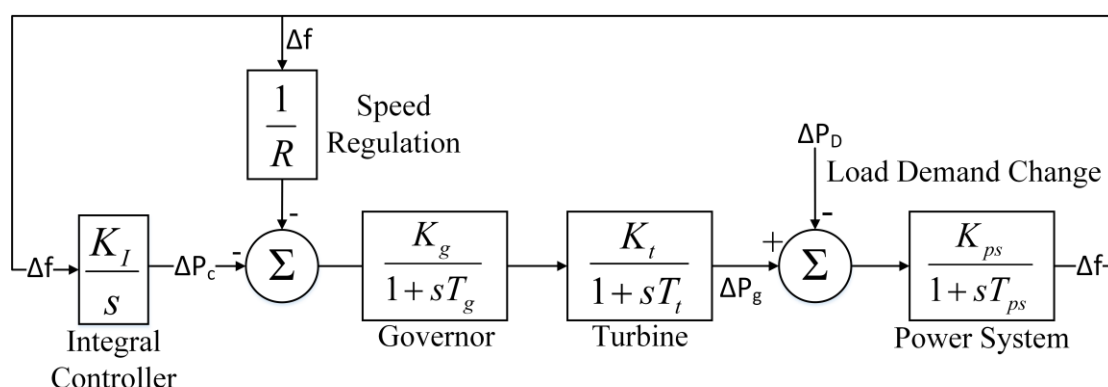
Στην εν λόγω διπλωματική θα αναπτυχθούν τα μαθηματικά μοντέλα που προσομοιώνουν και μοντελοποιούν ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας που περιλαμβάνει τέσσερις τύπους γεννητριών (Ατμοστροβιλική, Αεριοστροβιλική, Υδροστροβιλική, Ντιζελογεννήτρια).

3.2 Περιγραφή μοντέλου ρύθμισης συχνότητας

Ένα πολύ απλοϊκό μοντέλο που προσομοιώνει την διαδικασία της ρύθμισης συχνότητας σε ένα ΣΗΕ απεικονίζεται στο Σχήμα 3.1. Αρχικά, παρουσιάζεται η συνάρτηση μεταφοράς ενός ρυθμιστή στροφών

(governor), όπου στον αριθμητή βρίσκεται το κέρδος K_g που συνήθως παίρνει τιμή ίση με την μονάδα και στον παρονομαστή η χρονική σταθερά T_g . Στην συνέχεια παρουσιάζεται η συνάρτηση μεταφοράς ενός στροβίλου (Turbine). Το μαθηματικό μοντέλο του στροβίλου είναι σχετικά πολύπλοκο, ιδιαίτερα για τις μεγάλες διαταραχές στο δίκτυο. Αν θεωρηθεί ότι οι μεταβολές στην ροπή είναι μικρές και ότι η τάση είναι σταθερή, μπορεί να απλοποιηθεί σε μία συνάρτηση μεταφοράς που στον αριθμητή έχει ένα απλό συντελεστή κέρδους (συνήθως μονάδα) και στον παρονομαστή μία χρονική σταθερά T_t που κυμαίνεται στην περιοχή από 0.2-2 sec. Ακόμη, το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας μαζί με την ηλεκτρική γεννήτρια μπορεί να μοντελοποιηθεί χρησιμοποιώντας την εξίσωση: $G_{ps}(s) = \frac{K_{ps}}{1+sT_{ps}}$, όπου K_{ps} είναι το κέρδος και T_{ps} η χρονική σταθερά.

Τέλος υπάρχει ένας ρυθμιστής ταχύτητας (Speed regulation) και ένας ολοκληρωτικός ελεγκτής (Integral Controller) για την εξάλειψη του ολοκληρωτικού σφάλματος.



Σχήμα 3.1: Μπλοκ διάγραμμα μοντέλου ρύθμισης συχνότητας

Για την περιγραφή της λειτουργίας του Σχήματος 3.1 θεωρούμε μία απότομη αύξηση φορτίου (ΔP_D). Επειδή όμως η παραγωγή της γεννήτριας δεν είναι δυνατόν να αυξηθεί αμέσως, η επιπλέον ισχύς που χρειάζεται η γεννήτρια για να καλύψει την αύξηση, αντλείται από την αποθηκευμένη κινητική ενέργεια των στρεφόμενων μερών της. Η κατανάλωση αυτής της ενέργειας οδηγεί σε μείωση της ταχύτητας περιστροφής των γεννητριών. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την πτώση της συχνότητας από την ονομαστική της τιμή (Δf). Ο ρυθμιστής ταχύτητας και ο ολοκληρωτικός ελεγκτής διαβάζουν την διαταραχή, και στην συνέχεια παράγουν την αντίστοιχη μεταβολή ισχύος. Αυτό που κάνει ο ρυθμιστής ταχύτητας (αναλογικός

έλεγχος) είναι να αναλάβει τις γρήγορες μεταβολές ισχύος (πρωτεύουσα ρύθμιση) ενώ ο ολοκληρωτικός έλεγχος να εξαλείψει το σφάλμα μόνιμης κατάστασης (δευτερεύουσα ρύθμιση). Ο governor λαμβάνει το άθροισμα των μεταβολών από τους δύο ελεγκτές και ανοίγει την βαλβίδα για να παράγει η γεννήτρια περισσότερη ισχύ (ΔP_g). Η νέα μεταβολή δημιουργεί μία διαφορετική τιμή του Δf η οποία τροφοδοτείται ξανά στους ρυθμιστές κλείνοντας τον κύκλο ελέγχου. Όταν η μεταβολή της παραγόμενης ισχύος εξισωθεί με την μεταβολή του φορτίου ($\Delta P_g - \Delta P_D = 0$) τότε η συχνότητα έχει επανέλθει στην ονομαστική της τιμή και το σύστημα βρίσκεται σε ισορροπία.

Αν δεν υπήρχε ο ολοκληρωτικός έλεγχος, είναι προφανές ότι με την πάροδο του χρόνου, όπου η γεννήτρια θα αύξανε την παραγωγή της κατά ποσοστό ίσο με την αρχική αύξησή, θα στρεφόταν με μικρότερη ταχύτητα από την αρχική και θα κατέληγε σε μία νέα κατάσταση ισορροπίας. Υπολογίζεται λοιπόν ότι οι τιμές των μεταβολών της συχνότητας υπολογίζονται από τον τύπο: $\frac{\Delta f}{\Delta P_g} = -R$. Αυτό μας δείχνει την φυσική σημασία της σταθεράς R που όπως έχουμε αναφέρει στο Κεφάλαιο 2, ονομάζεται και στατισμός (Droop) της μονάδας. Καθορίζει δηλαδή πόση τελική μεταβολή της συχνότητας έχουμε για να πάρουμε μία συγκεκριμένη μεταβολή στην παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ (θεωρώντας πάντα ότι δεν υπάρχει ολοκληρωτικός έλεγχος). Όταν η ισχύς μετρηθεί σε pu, οι μονάδες του R είναι Hz/pu MW. Αν και η συχνότητα μετρηθεί σε pu της ονομαστικής συχνότητας (π.χ. 50 Hz) τότε και οι μονάδες του R είναι σε pu.

Η έξοδος του ολοκληρωτικού ελεγκτή είναι ένα σήμα που ονομάζεται ΔP_c ή αλλιώς μηχανισμός αλλαγής στροφών. Αυτό το σήμα δίνει στο διαχειριστή την δυνατότητα να επιτυγχάνει οποιαδήποτε ισχύ εξόδου στην γεννήτρια χωρίς να μεταβάλλεται η ονομαστική της συχνότητα, μια απαίτηση που είναι επιθυμητή κατά την αλλαγή της παραγόμενης ισχύος. Κάτι τέτοιο είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για την μεταφορά παραγωγής από μία μονάδα σε κάποια άλλη (π.χ. βέλτιστη κατανομή φορτίου).

3.3 Μοντέλο ρύθμισης συχνότητας με τέσσερις γεννήτριες

Σε αυτή την υποεννότητα θα παρουσιαστεί ένα μοντέλο ρύθμισης συχνότητας με τις παρακάτω γεννήτριες:

Ατμοστρόβιλος με αναθέρμανση (Steam-reheat turbine)

- Ρυθμιστής στροφών: $G_{steam_gov}(s) = \frac{1}{1+sT_g}$
- Στάδιο αναθέρμανσης: $G_{steam_reheat}(s) = \frac{1+sK_rT_r}{1+sT_r}$
- Στρόβιλος: $G_{steam_turb}(s) = \frac{1}{1+sT_t}$

Υδροστρόβιλος (Hydraulic turbine)

Το ακριβές μαθηματικό μοντέλο του υδροστροβίλου απαιτεί γνώση πολλών παραμέτρων και διαθέτει μεγάλη πολυπλοκότητα. Για την πλειοψηφία των μελετών που σχετίζονται με ρύθμιση συχνότητας, χρησιμοποιείται το μοντέλο IEEE2.

- Ρυθμιστής στροφών: $G_{hydro_gov}(s) = \frac{1+sT_R}{(1+sT_{RH})(1+sT_{GH})}$
- Στρόβιλος: $G_{hydro_turb}(s) = \frac{1-sT_w}{1+0.5sT_w}$

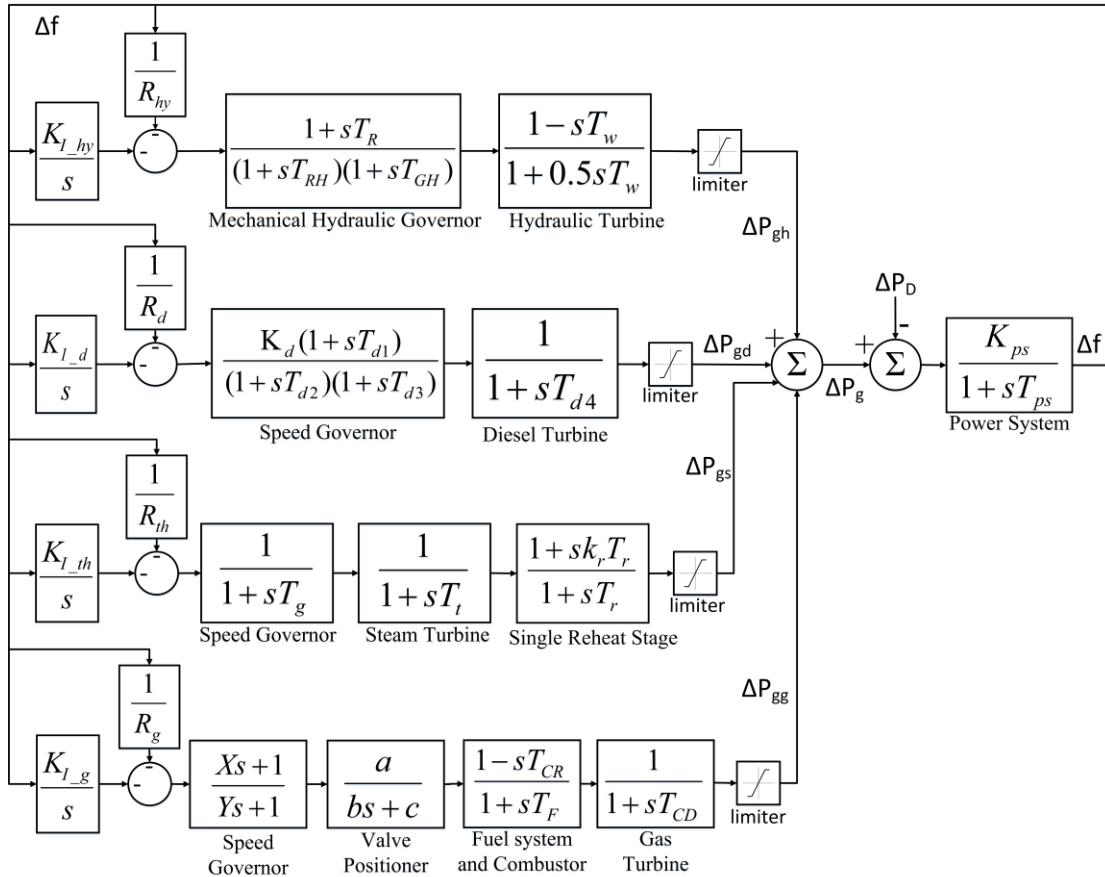
Ντιζελογεννήτρια (Diesel turbine)

- Ρυθμιστής στροφών: $G_{diesel_gov}(s) = \frac{K_d(1+sT_{d1})}{(1+sT_{d2})(1+sT_{d3})}$
- Στρόβιλος: $G_{diesel_turb}(s) = \frac{1}{1+sT_{d4}}$

Αεριοστρόβιλος (Gas turbine)

Το απλοποιημένο μοντέλο του αεριοστροβίλου αποτελείται από τέσσερις μονάδες. Τον ρυθμιστή στροφών (governor), τον ρυθμιστή βαλβίδας (valve positioner), το σύστημα καυσίμου μαζί με τον καυστήρα (fuel system and combustor) και τον στρόβιλο (gas turbine). Κανονικά οι αεριοστρόβιλοι έχουν τρία κυκλώματα ελέγχου. Έλεγχο ταχύτητας, έλεγχο θερμοκρασίας και έλεγχο επιτάχυνσης. Με την υπόθεση ότι η θερμοκρασία στον θάλαμο που γίνεται η καύση δεν είναι ποτέ αρκετά υψηλή ώστε να καταστρέψει τις λεπίδες του στροβίλου και ότι δεν χρειάζεται να δουλέψει ο ελεγκτής επιτάχυνσης για να ξεκινήσει ή να κλείσει τον στρόβιλο, το μοντέλο μπορεί να απλοποιηθεί χρησιμοποιώντας μόνο τον ελεγκτή ταχύτητας.

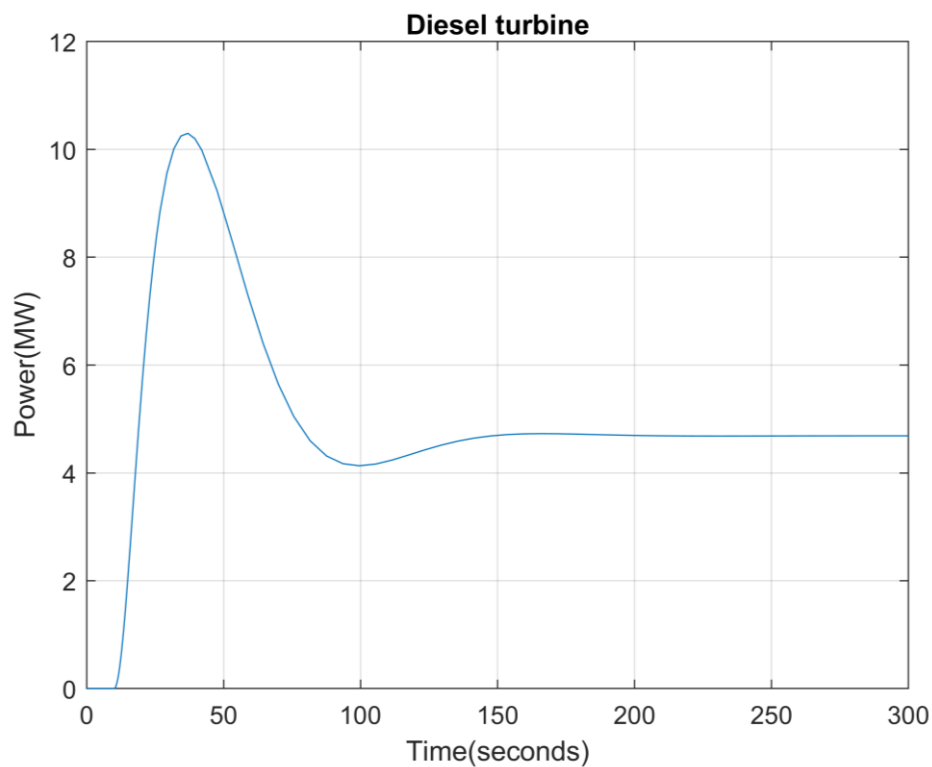
- Ρυθμιστής στροφών: $G_{gas_gov}(s) = \frac{Xs+1}{Ys+1}$
- Ρυθμιστής βαλβίδας: $G_{valv_pos}(s) = \frac{a}{bs+c}$
- Σύστημα καυσίμου με καυστήρα: $G_{fuel_comb}(s) = \frac{1-sT_{CR}}{1+sT_F}$
- Στρόβιλος: $G_{gas_turb}(s) = \frac{1}{1+sT_{CD}}$



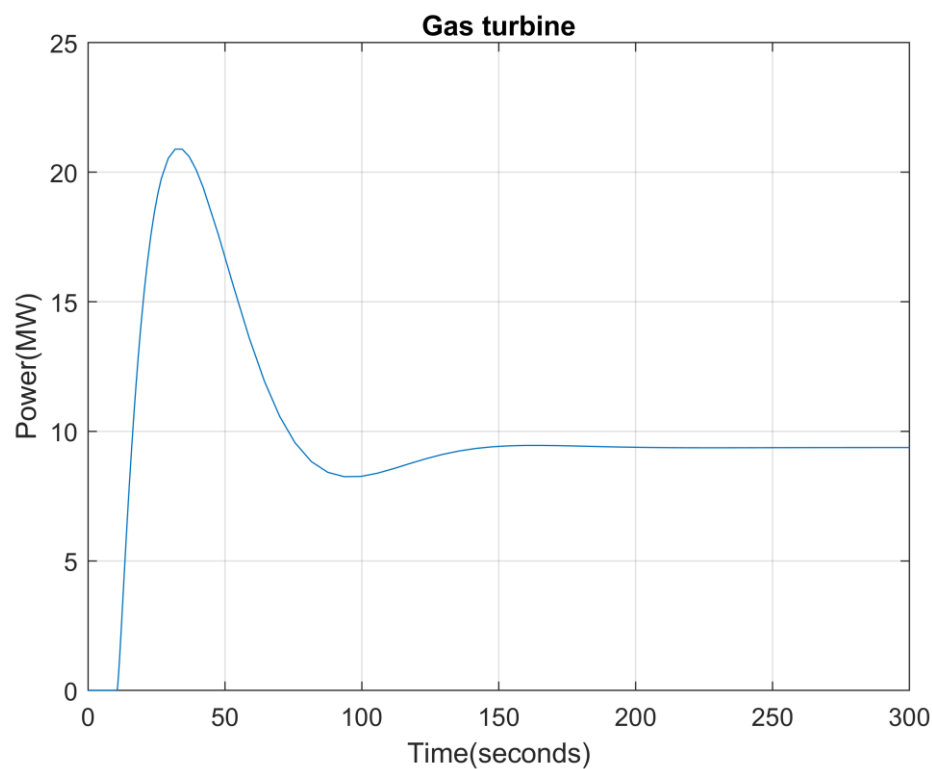
Σχήμα 3.2: Μπλοκ διάγραμμα μοντέλου ρύθμισης συχνότητας με τέσσερις γεννήτριες

Όπως αναφέρθηκε στο τέλος του προηγούμενου υποκεφαλαίου, έχει επιλεχθεί ολοκληρωτικός έλεγχος για την δημιουργία της εντολής ΔP_c σύμφωνα με τον τύπο: $\Delta P_c = -K_I \int \Delta f$. Το αρνητικό πρόσημο είναι απαραίτητο διότι, ένα θετικό σφάλμα συχνότητας πρέπει να προκαλεί μία εντολή μείωσης της ισχύος εξόδου ενώ ένα θετικό μία εντολή αύξησης. Ο κάθε ελεγκτής του Σχήματος 3.2 έχει διαφορετική τιμή κέρδους K_I και R ανάλογα με τον τύπο της γεννήτριας, για να προσομοιωθεί όσο το δυνατόν καλύτερα η βέλτιστη κατανομή των μονάδων. Έτσι, οι Diesel και οι Gas

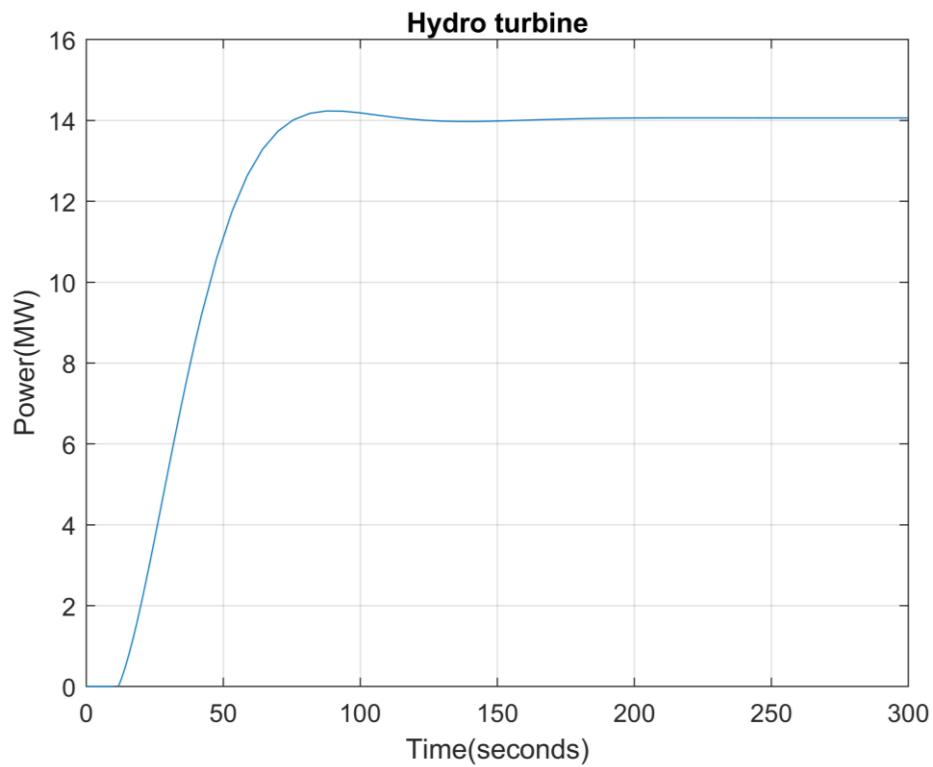
μηχανές οι οποίες έχουν γρήγορους ρυθμούς απόκρισης αλλά λιγότερη παραγωγή ισχύος, λόγω υψηλού κόστους λειτουργίας, έχουν μικρότερες τιμές στον ολοκληρωτικό έλεγχο και μεγαλύτερες στον αναλογικό (που ευθύνεται για τις απότομες μεταβολές). Αντιθέτως οι Steam για παράδειγμα, έχουν μεγάλη τιμή στον ολοκληρωτικό ελεγκτή για να λάβουν μεγαλύτερη μόνιμη μεταβολή και να καλύψουν το μεγαλύτερο μέρος της παραγωγής, λόγω χαμηλού κόστους λειτουργίας. Έχουν όμως μικρό αναλογικό έλεγχο γιατί δεν μπορούν να ανταποκριθούν στις γρήγορες μεταβολές. Οι ακόλουθες εικόνες προσομοιώνουν την απόκριση των γεννητριών σε μία αύξηση φορτίου της τάξεως των 75 MW. Το σύστημα μοντελοποιήθηκε στο λογισμικό MATLAB με την χρήση των παραμέτρων του Πίνακα 3.1.



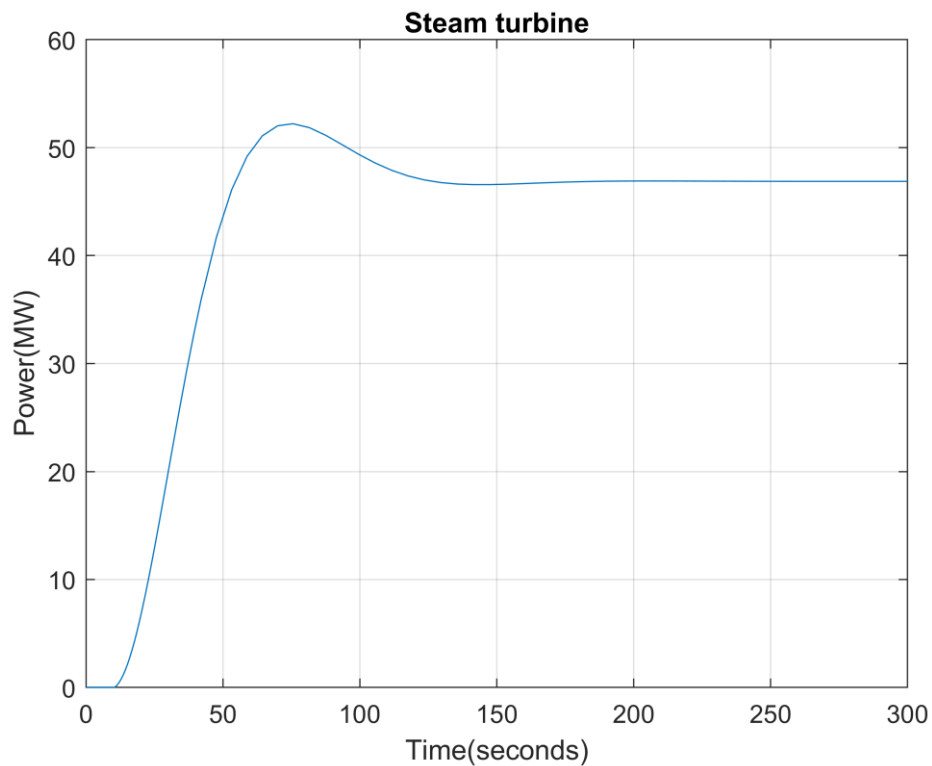
Σχήμα 3.3: Μεταβολή ισχύος της Ντιζελογεννήτριας



Σχήμα 3.4: Μεταβολή ισχύος της αεριοστροβιλικής γεννήτριας



Σχήμα 3.5: Μεταβολή ισχύος της υδροστροβιλικής γεννήτριας



Σχήμα 3.6: Μεταβολή ισχύος της ατμοστροβιλικής γεννήτριας

Οι ενδεικτικές τιμές των παραμέτρων φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:
(Βάση ισχύος = 100 MVA, Βάση συχνότητας = 50 Hz).

Πίνακας 3.1

Steam turbine parameters		
T_g	Steam turbine governor time constant	0.1 sec
T_t	Steam turbine time constant	0.4 sec
k_r	Coefficient of reheat steam turbine	0.5
T_r	Reheat time constant	10.0 sec
R_{th}	Steam speed governor regulation parameter	0.6 p.u.
K_{i_th}	Steam turbine integral controller gain	1 p.u.
Hydraulic turbine parameters		
T_w	Water time constant	1 sec
T_{GH}	Main servo time constant	0.2 sec
T_R	Speed governor rest time	5.0 sec
T_{RH}	Transient droop time constant	28.75 sec
R_{hy}	Hydro speed governor regulation parameter	0.25 p.u.
K_{i_hy}	Hydro turbine integral controller gain	0.3 p.u.
Diesel turbine parameters		
T_{d1}	Diesel turbine governor time constant	1.0 sec
T_{d2}	Diesel turbine governor time constant	2.0 sec
T_{d3}	Diesel turbine governor time constant	0.025 sec
T_{d4}	Diesel turbine time constant	3.0 sec
K_d	Diesel turbine governor gain	1.0
R_d	Diesel speed governor regulation parameter	0.2 p.u.
K_{i_d}	Diesel turbine integral controller gain	0.1 p.u.
Gas turbine parameters		
X	Speed governor lead time constant	0.6 sec
Y	Speed governor lag time constant	1.0 sec
a	Valve positioner constant	1.0
b	Valve positioner constant	0.05
c	Valve positioner constant	1.0
T_{CR}	Combustion reaction time delay	0.3 sec
T_F	Fuel time constant	0.23 sec
T_{CD}	Compressor discharge volume time constant	0.2 sec
R_g	Gas speed governor regulation parameter	0.1 p.u.
K_{i_g}	Gas turbine integral controller gain	0.2 p.u.
Power system parameters		
K_{ps}	Power system gain	0.06 p.u.
T_{ps}	Power system time constant	20.0 sec

4. Διατύπωση και Επεξήγηση της μεθοδολογίας επίλυσης

4.1 Σύντομη επισκόπηση

Στις παρακάτω υποενότητες γίνεται επεξήγηση κάθε βήματος που χρειάστηκε για την μελέτη και την προσομοίωση του μοντέλου στήριξης συχνότητας με την βοήθεια ηλεκτρικών οχημάτων. Αρχικά, ορίζονται τα χαρακτηριστικά των ΗΑ, τίθενται ξεχωριστές απαιτήσεις φόρτισης για κάθε χρήστη και με βάση πραγματικά δεδομένα αφίξεων και αναχωρήσεων γίνεται η προσομοίωση της συμπεριφοράς ενός ηλεκτρικού αυτοκινήτου. Στην συνέχεια, ανάλογα με τον χρόνο παραμονής, το επιθυμητό SOC κατά την αναχώρηση και την οριακή τιμή του συστήματος, γίνεται μία βελτιστοποίηση της ισχύος που πρέπει να λαμβάνει ή να απορροφά ένα ΗΑ καθ' όλη την διάρκεια της σύνδεσής του στο δίκτυο. Αυτή η βελτιστοποίηση μπορεί να γίνει είτε σε κάθε μπαταρία ξεχωριστά είτε για την ισοδύναμη μπαταρία, που είναι στην ουσία το άθροισμα των χαρακτηριστικών όλων των επιμέρους μπαταριών που είναι συνδεδεμένες κάθε στιγμή. Αυτή η προσέγγιση, είναι ασφαλώς πιο γρήγορη και αρκετά ακριβής ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μεγάλο πλήθος ΗΑ, μειώνοντας δραματικά τον υπολογιστικό χρόνο. Έχοντας λοιπόν μία αναλυτική περιγραφή των χαρακτηριστικών της συνολικής μπαταρίας, ως προς τα όρια της ισχύος και της ενέργειας που μπορεί να αποθηκεύσει και ως προς την διακύμανση της ισχύος και του SOC σε βάθος 24ώρου, μπορούμε ανά πάσα στιγμή να γνωρίζουμε την δυνατότητα στήριξης της συχνότητας σε περίπτωση σφάλματος. Ο μηχανισμός ελέγχου που διαχειρίζεται την ποσότητα της ισχύος που θα δοθεί ή θα απορροφηθεί από τα ΗΑ, ανάλογα με τα δεδομένα που έχουν υπολογιστεί προηγουμένως, έχει κατασκευαστεί με fuzzy λογική, η οποία θα επεξηγηθεί στην συνέχεια. Τέλος, μοντελοποιήθηκε το ΣΗΕ της Κρήτης όπου εφαρμόστηκε το σύστημα στήριξης συχνότητας για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων.

4.2 Εισαγωγή Δεδομένων

4.2.1. Κατηγορίες ηλεκτρικών οχημάτων

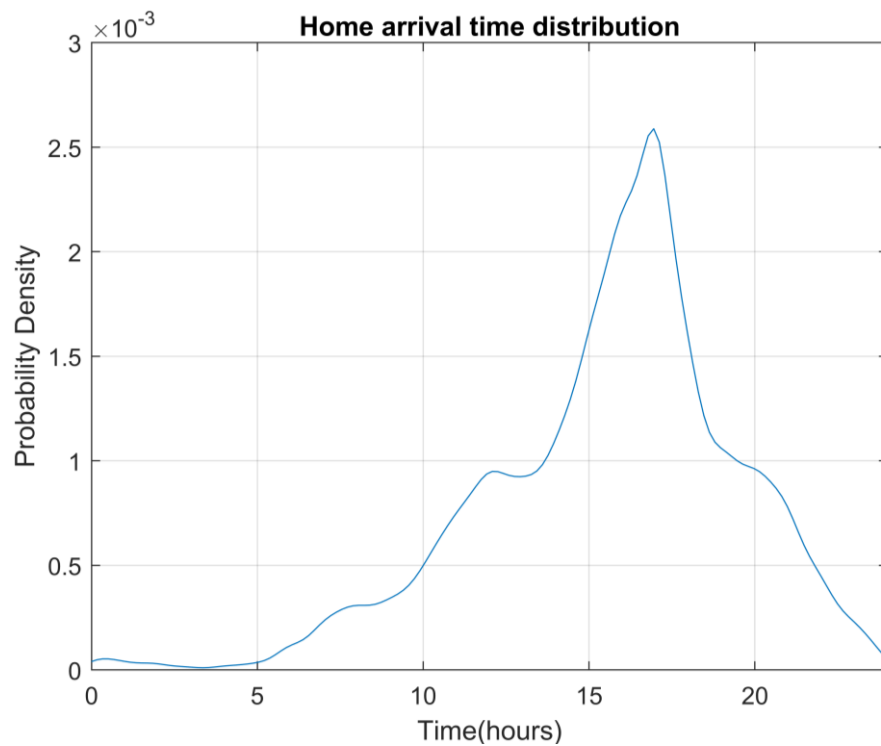
Τα ηλεκτρικά οχήματα που χρησιμοποιήθηκαν χωρίστηκαν σε πέντε κατηγορίες, ανάλογα με το εύρος τιμής. Μάλιστα, για να επιτευχθεί μία ρεαλιστική προσέγγιση, όσο πιο χαμηλή είναι η κατηγορία τιμής τόσο μεγαλύτερο ποσοστό έχει στο συνολικό πλήθος οχημάτων. Στον πίνακα 4.1 φαίνονται οι πέντε κατηγορίες τιμής και τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά των μπαταριών τους. Για τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών υπολογίστηκε ο μέσος όρος δέκα ηλεκτρικών αυτοκινήτων κάθε κατηγορίας. Τα δεδομένα αντλήθηκαν από την ιστοσελίδα: <https://ev-database.org/> η οποία περιέχει μία πλήρη επισκόπηση όλων των ηλεκτρικών οχημάτων που είναι διαθέσιμα στην Ευρώπη.

Πίνακας 4.1

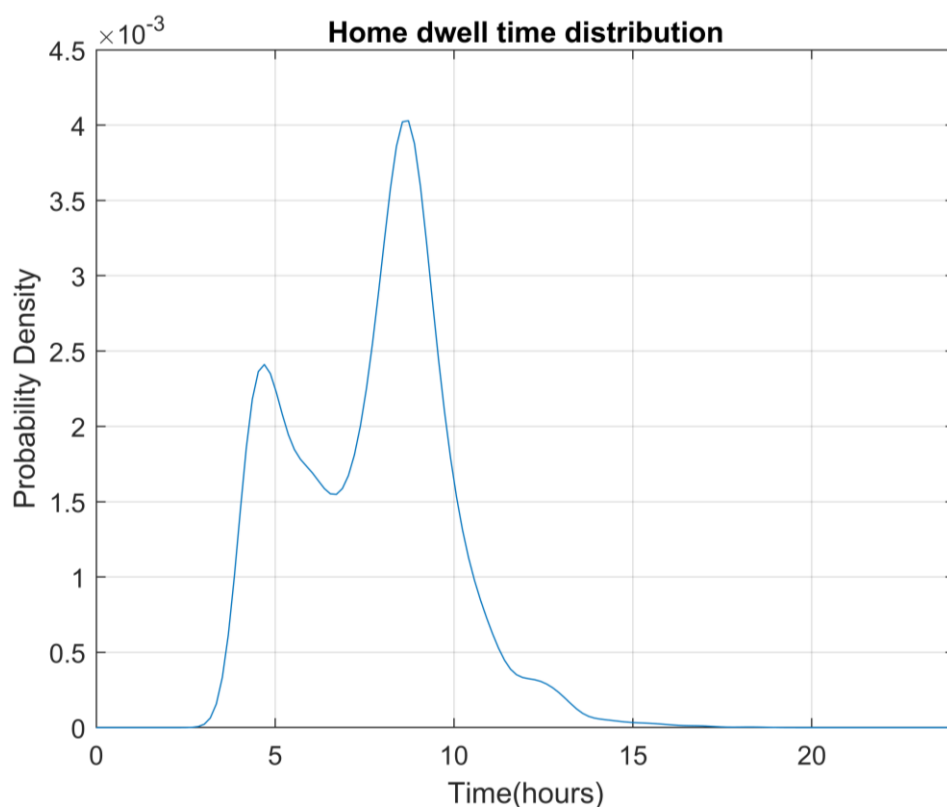
Price Range	Battery Capacity(kWh)	Charge Power(kW)	% of total cars
Low	35.3	7.3	35
Low Medium	51.5	10.25	30
Medium	63.9	9.5	20
High Medium	83.6	10.8	10
High	95.6	12.8	5

4.2.2. Κατανομές χρόνου αφίξεων και παραμονής

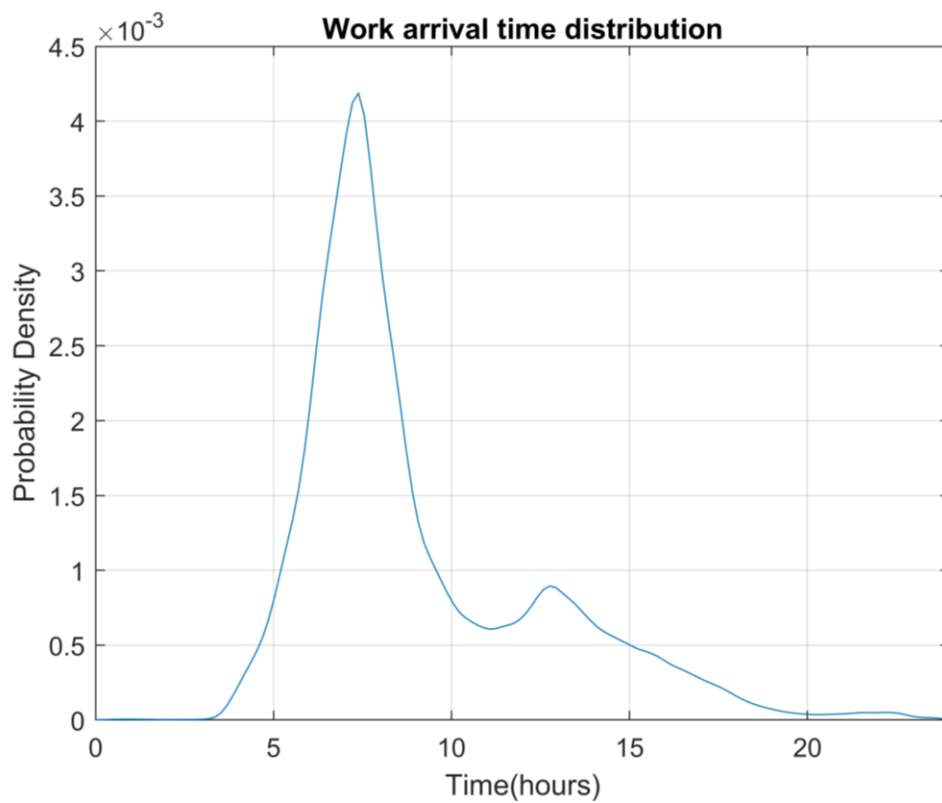
Εκτός από τα χαρακτηριστικά των μπαταριών, προσομοιώθηκε επίσης η στιγμή και η διάρκεια σύνδεσης κάθε οχήματος στο σημείο φόρτισης ανάλογα με τρεις διαφορετικές διαδρομές (οικία, εργασία, άφιξη σε κατάστημα ή ψυχαγωγική δραστηριότητα). Οι παρακάτω κατανομές δείχνουν την στιγμή άφιξης και τον χρόνο παραμονής εντός του 24ωρου για κάθε μία από τις τρεις κατηγορίες διαδρομών.



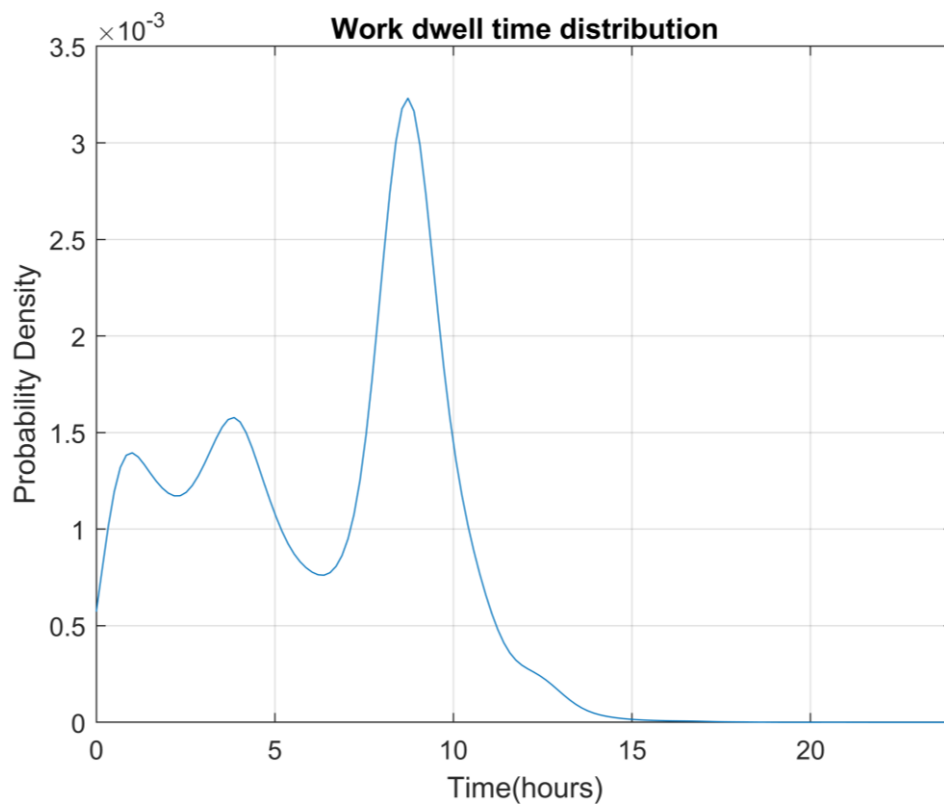
Σχήμα 4.1: Κατανομή χρόνου άφιξης στην οικία



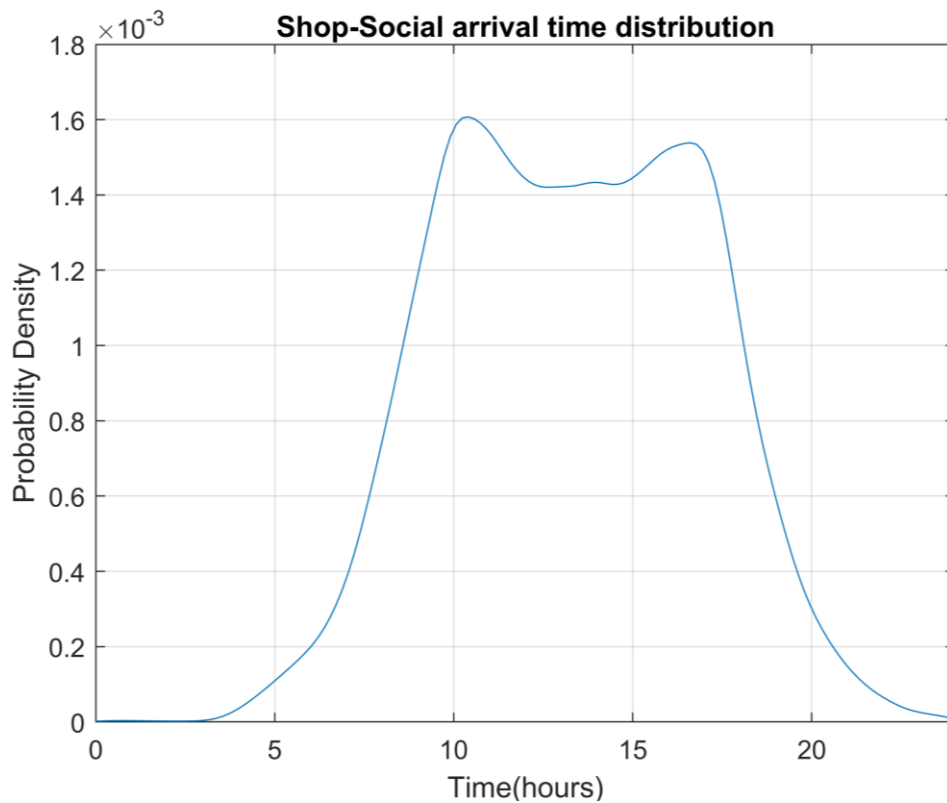
Σχήμα 4.2: Κατανομή χρόνου παραμονής στην οικία



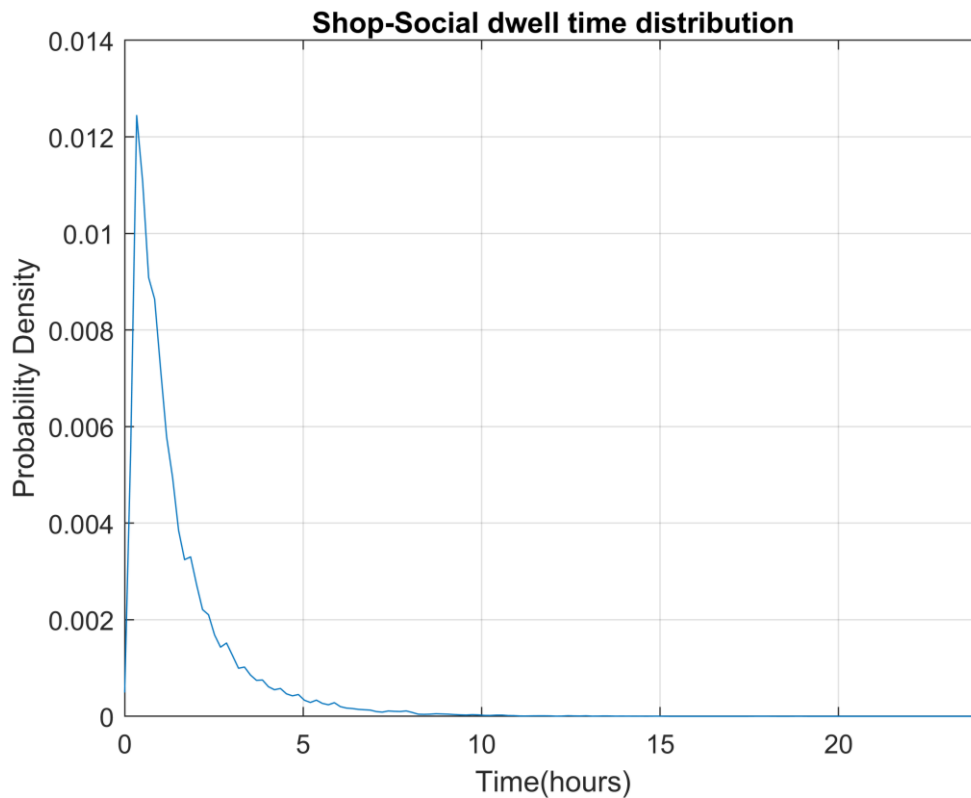
Σχήμα 4.3: Κατανομή χρόνου άφιξης στην εργασία



Σχήμα 4.4: Κατανομή χρόνου παραμονής στην εργασία



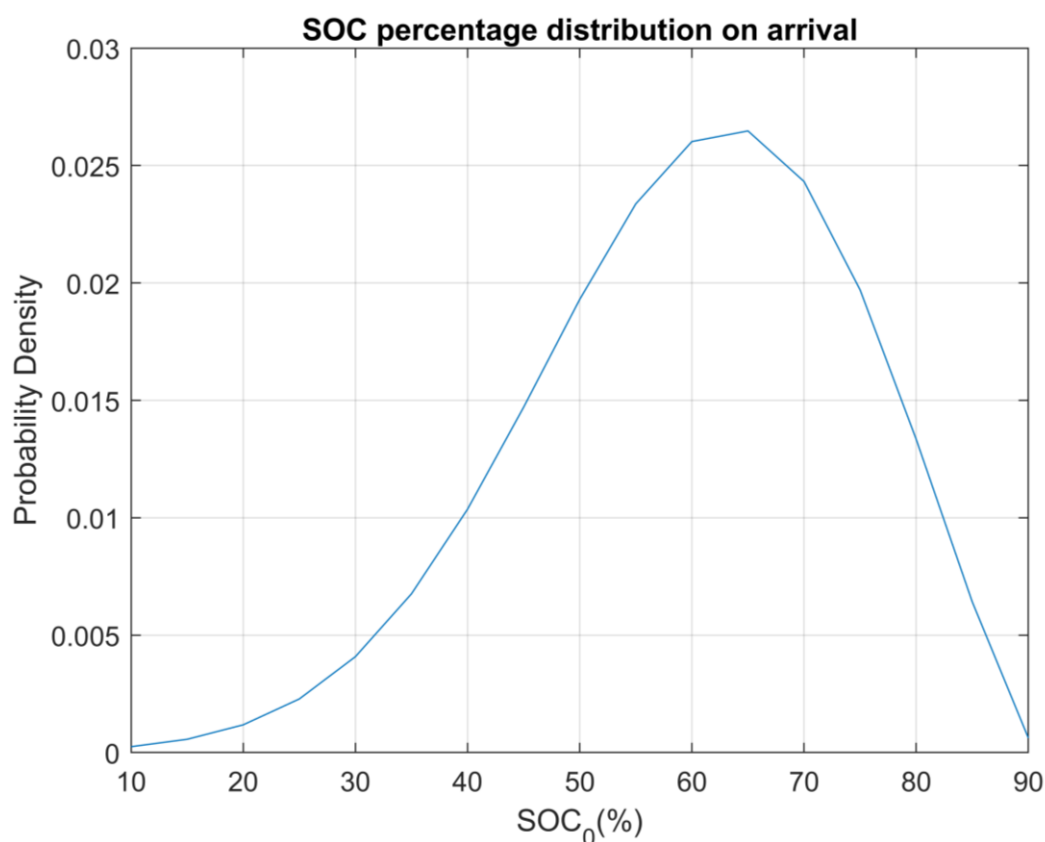
Σχήμα 4.5: Κατανομή χρόνου άφιξης σε κατάστημα ή σε ψυχαγωγική δραστηριότητα



Σχήμα 4.6: Κατανομή χρόνου παραμονής σε κατάστημα ή σε ψυχαγωγική δραστηριότητα

4.2.3. Κατανομές επιπέδου φόρτισης της μπαταρίας κατά την άφιξη και την αναχώρηση

Όταν ένα όχημα συνδέεται σε ένα φορτιστή, εκτός από τον χρόνο άφιξης και παραμονής πρέπει να είναι γνωστό το αρχικό SOC (ή αλλιώς SOC_0) της μπαταρίας κατά την σύνδεση και το επιθυμητό SOC κατά την αποσύνδεση (ή αλλιώς SOC_{trgt}). Το SOC_0 προσδιορίζεται από την κατανομή του Σχήματος 4.7 και εκφράζει το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας κατά την άφιξη (σε ποσοστό). Το SOC_{trgt} προσδιορίζεται από μία κανονική κατανομή και μπορεί να λάβει τιμές από 80% - 100%. Σε περίπτωση που ο χρόνος παραμονής στον φορτιστή, σε συνδυασμό με την μέγιστη ισχύ που μπορεί να απορροφήσει το αυτοκίνητο δεν επαρκούν ώστε η στάθμη της μπαταρίας να φτάσει το SOC_{trgt} , ορίζεται νέα τιμή που ισούται με το μέγιστο δυνατό SOC_{trgt} που μπορεί να επιτευχθεί υπό τις παραπάνω συνθήκες. Σημειώνεται επίσης ότι δεν είναι απαραίτητο το SOC κατά την αποσύνδεση από τον φορτιστή να ισούται επακριβώς με το SOC_{trgt} . Μία μέγιστη απόκλιση της τάξεως του $\pm 5\%$ έχει τεθεί ως το επιτρεπτό.



Σχήμα 4.7: Κατανομή αρχικού *State of Charge* κατά την σύνδεση (σε ποσοστό)

4.3 Διατύπωση μεθοδολογίας φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων

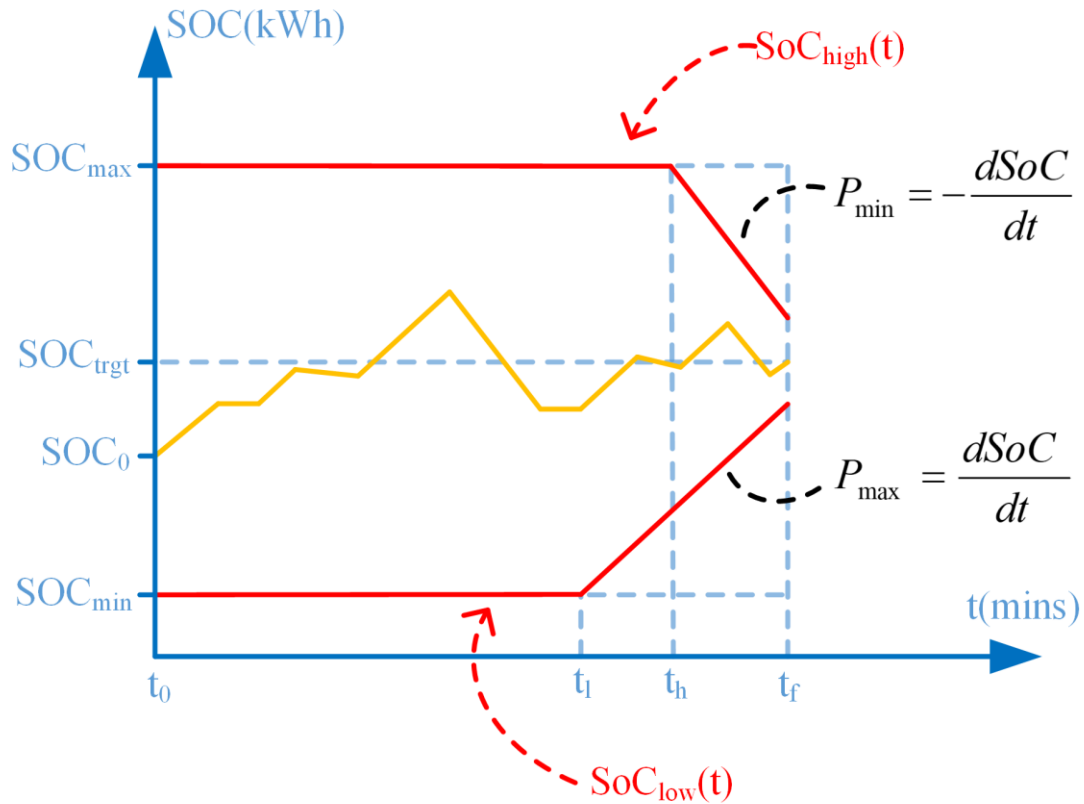
4.3.1. Καθορισμός των περιορισμών φόρτισης

Για την επιτυχή προσομοίωση της διαδικασίας φόρτισης ενός ηλεκτρικού οχήματος από το SOC_0 έως το SOC_{trgt} , πρέπει να οριστούν κάποιοι περιορισμοί. Αρχικά το SOC δεν θα πρέπει να ξεπερνάει σε καμία στιγμή τα όρια της μπαταρίας. Το κατώτατο όριο ονομάζεται SOC_{min} και το ανώτατο SOC_{max} . Στον Πίνακα 4.2 παρατίθενται οι τιμές του μέγιστου και ελάχιστου επιτρεπτού SOC ως ποσοστό της συνολικής μπαταρίας, ανάλογα με την κατηγορία τιμής.

Πίνακας 4.2

Price Range	SOC_{max} (% of total battery capacity)	SOC_{min} (% of total battery capacity)
Low	90	10
Low Medium	91	10
Medium	93	10
High Medium	94	10
High	95	10

Εκτός όμως από τα SOC_{min} και SOC_{max} , χρειάζονται κάποια επιπλέον όρια στον υπολογισμό του SOC. Γνωρίζοντας την μέγιστη και την ελάχιστη ισχύ που μπορεί να απορροφάει και να παρέχει το κάθε όχημα, καθορίζονται τα όρια εντός των οποίων θα πρέπει να κυμαίνεται το SOC για να είναι δυνατή η επίτευξη του SOC_{trgt} την στιγμή της αναχώρησης (t_f). Τα άνω όριο ονομάζεται SOC_{high} ενώ το κάτω SOC_{low} . Όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 4.8 οι χρόνοι t_l και t_h είναι οι στιγμές που τα όρια της μπαταρίας παύουν να είναι SOC_{max} και SOC_{min} και αρχίζουν να συγκλίνουν προς το SOC_{trgt} . Η κλίση με την οποία συγκλίνουν καθορίζεται από την μέγιστη και την ελάχιστη ισχύ του κάθε αυτοκινήτου. Με αυτό τον τρόπο εξασφαλίζεται ότι σε οποιοδήποτε σημείο εντός αυτών των ορίων και αν βρεθεί το SOC (στο Σχήμα 4.8 φαίνονται με κόκκινο χρώμα) θα μπορεί να φτάσει την περιοχή του SOC_{trgt} κατά την αναχώρηση (η περιοχή όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως ορίζεται ως το SOC_{trgt} με απόκλιση έως $\pm 5\%$)



Σχήμα 4.8: Αναλυτική απεικόνιση των απαραίτητων στοιχείων για την μοντελοποίηση του συστήματος βέλτιστης φόρτισης

4.3.2. Περιγραφή της συνάρτησης βελτιστοποίησης

Η κίτρινη γραμμή που φαίνεται στο Σχήμα 4.8 είναι η τροχιά που ακολουθεί το SOC από την στιγμή της σύνδεσης t_0 έως την στιγμή της αποσύνδεσης t_f . Ο τρόπος υπολογισμού αυτής της τροχιάς γίνεται με την βοήθεια ενός αλγορίθμου βελτιστοποίησης που λαμβάνει υπόψη του, τους περιορισμούς ισχύος και ενέργειας της εκάστοτε μπαταρίας, το επιθυμητό SOC_{trgt} κατά την αναχώρηση και την διακύμανση της ΟΤΣ εντός του 24ώρου.

Πιο συγκεκριμένα, η αντικειμενική συνάρτηση που πρέπει να ελαχιστοποιηθεί είναι η εξής:

$$\sum_{t_0}^{t_f} P_{ev}(t) \cdot EP(t) \cdot \Delta t$$

Όπου το P_{ev} είναι η ισχύς του απορροφά ή επιστρέφει στο δίκτυο η μπαταρία, EP (Energy Price) είναι η οριακή τιμή συστήματος και Δt είναι το χρονικό βήμα που καθορίζεται από το πόσο συχνά μεταβάλλεται η ΟΤΣ (π.χ. 15 λεπτά, 30 λεπτά, 1 ώρα) μέσα στο 24ωρο. Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στην προηγούμενη υποενότητα, θα πρέπει επιπλέον να ικανοποιούνται οι εξής περιορισμοί:

- Περιορισμός διακύμανσης ισχύος εντός των ορίων

$$P_{min} < P_{ev}(t) < P_{max} \quad \forall t \quad (1)$$

- Περιορισμός διακύμανσης SOC εντός των ορίων

$$SOC_{min} < SOC(t) < SOC_{max} \quad \forall t \quad (2)$$

- Επιθυμητό SOC την στιγμή αναχώρησης

$$SOC(t_f) = SOC_{trgt} \quad (3)$$

Όπου το SOC υπολογίζεται ως εξής:

$$SOC(t) = SOC(t_0) + \sum_{t_0}^t P_{ev}(t) \cdot \Delta t \quad \forall t \quad (4)$$

Σημειώνεται ότι στους περιορισμούς του SOC δεν χρησιμοποιήθηκαν οι αυστηροί περιορισμοί SOC_{low} και SOC_{high} αλλά οι SOC_{max} και SOC_{min} . Σύμφωνα με τον περιορισμό (3) το τελικό SOC πρέπει να ισούται με το SOC_{trgt} . Έτσι, εξ ορισμού το SOC δεν μπορεί να ξεφύγει εκτός των ορίων, καθώς η συνάρτηση βελτιστοποίησης θα υπολογίσει κατάλληλες τιμές ισχύος που να ικανοποιούν αυτό τον περιορισμό. Τα αυστηρότερα όρια θα χρειαστούν κατά την διαδικασία στήριξης συχνότητας όπου το SOC θα αποκλίνει του προϋπολογισμένου, ενώ παράλληλα θα πρέπει να κυμαίνεται εντός των ορίων (SOC_{low} , SOC_{high}) προκειμένου να “πιάσει” το SOC_{trgt} .

Για την διαδικασία της βελτιστοποίησης χρησιμοποιήθηκε η συνάρτηση `fmincon` της MATLAB. Για την ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης $f(x)$, όπου x σε αυτή την περίπτωση είναι η ισχύς P_{ev} , πρέπει να ικανοποιούνται οι περιορισμοί της μορφής:

$$\min_x f(x) \text{ έτσι ώστε } \begin{cases} c(x) \leq 0 \\ c_{eq}(x) \\ Ax \leq b \\ A_{eq}x = b_{eq} \\ lb \leq x \leq ub \end{cases}$$

Οι δύο πρώτες σχέσεις αφορούν μη γραμμικούς περιορισμούς που δεν υπάρχουν στην εν λόγω μελέτη.

Ο περιορισμός (1) μπορεί να περιγραφεί με την βοήθεια της σχέσης:

$$lb \leq x \leq ub \text{ όπου } x = P_{ev}, lb = P_{min} \text{ και } ub = P_{max}.$$

Στην συνέχεια, ο περιορισμός (2) μπορεί να εκφραστεί από την γραμμική ανισότητα $Ax \leq b$. Αν σπάσουμε την ανισότητα σε δύο μέλη προκύπτει ότι $SOC(t) < SOC_{max}$ και $SOC_{min} < SOC(t)$. Αναλύοντας την πρώτη ανισότητα, με την βοήθεια της σχέσης (4), προκύπτει ότι:

$$SOC(t_0) + \sum_{t_0}^t P_{ev}(t) \cdot \Delta t < SOC_{max} \quad (5)$$

Για να έρθει όμως στην μορφή $Ax \leq b$ πρέπει να αφαιρεθεί ο όρος $SOC(t_0)$ και στα δύο μέλη. Έτσι προκύπτει η σχέση:

$$\sum_{t_0}^t P_{ev}(t) \cdot \Delta t < SOC_{max} - SOC(t_0) \quad (6)$$

Από την παραπάνω σχέση προκύπτει ότι ο πίνακας A είναι ένας κάτω διαγώνιος πίνακας της μορφής:

$$A_1 = \begin{bmatrix} \Delta t & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \Delta t & \Delta t & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \Delta t & \Delta t & \Delta t & 0 & \dots & 0 \\ \Delta t & \Delta t & \Delta t & \Delta t & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \Delta t & \Delta t & \Delta t & \Delta t & \Delta t & \Delta t \end{bmatrix}$$

Η διαστάσεις του πίνακα είναι της μορφής $M \times M$ όπου M είναι το πλήθος των Δt που χρειάζονται κάθε φορά. Π.χ. αν ο συνολικός χρόνος παραμονής από t_0 σε t_f είναι τρεις ώρες τότε με δεδομένο ότι το Δt ισούται με ένα τέταρτο της ώρας (δηλαδή η ΟΤΣ αλλάζει κάθε τέταρτο), θα χρειαστούν 6 Δt . Δηλαδή $M = 6$.

Για το υπολογισμό του b αρκεί να πολλαπλασιαστεί το δεξί μέλος της εξίσωσης (6) με ένα μοναδιαίο διάνυσμα διαστάσεων $1 \times M$ ώστε να μπορεί να γίνει ο πολλαπλασιασμός των πινάκων.

$$b_1 = \{SOC_{max} - SOC(t_0)\} * \left[\begin{array}{c} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{array} \right] \Bigg\} \text{διάσταση } M$$

Έπειτα, για να έρθει ο περιορισμός $SOC_{min} < SOC(t)$ στην μορφή $Ax \leq b$ πρέπει και τα δύο μέλη να πολλαπλασιαστούν με -1 όπως φαίνεται παρακάτω:

$$-SOC(t) < -SOC_{min}$$

Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία με προηγουμένως υπολογίζεται ότι:

$$A_1 = -A_2$$

και

$$b_2 = -\{SOC_{min} - SOC(t_0)\} * \left[\begin{array}{c} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{array} \right] \Bigg\} \text{διάσταση } M$$

Οπότε, οι τελικοί πίνακες A και b είναι:

$$A = \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \end{bmatrix}, b = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix}$$

Ο περιορισμός (3) μπορεί να εκφραστεί από την ισότητα $A_{eq} * x = b_{eq}$. Αφού $SOC(t_f) = SOC_{trgt}$ τότε με την βοήθεια της εξίσωσης (4) προκύπτει ότι $SOC(t_0) + \sum_{t_0}^{t_f} P_{ev}(t_f) \cdot \Delta t = SOC_{trgt}$.

Αφαιρώντας κατά μέλη προκύπτει η εξίσωση της μορφής:

$$\sum_{t_0}^{t_f} P_{ev}(t_f) \cdot \Delta t = SOC_{trgt} - SOC(t_0)$$

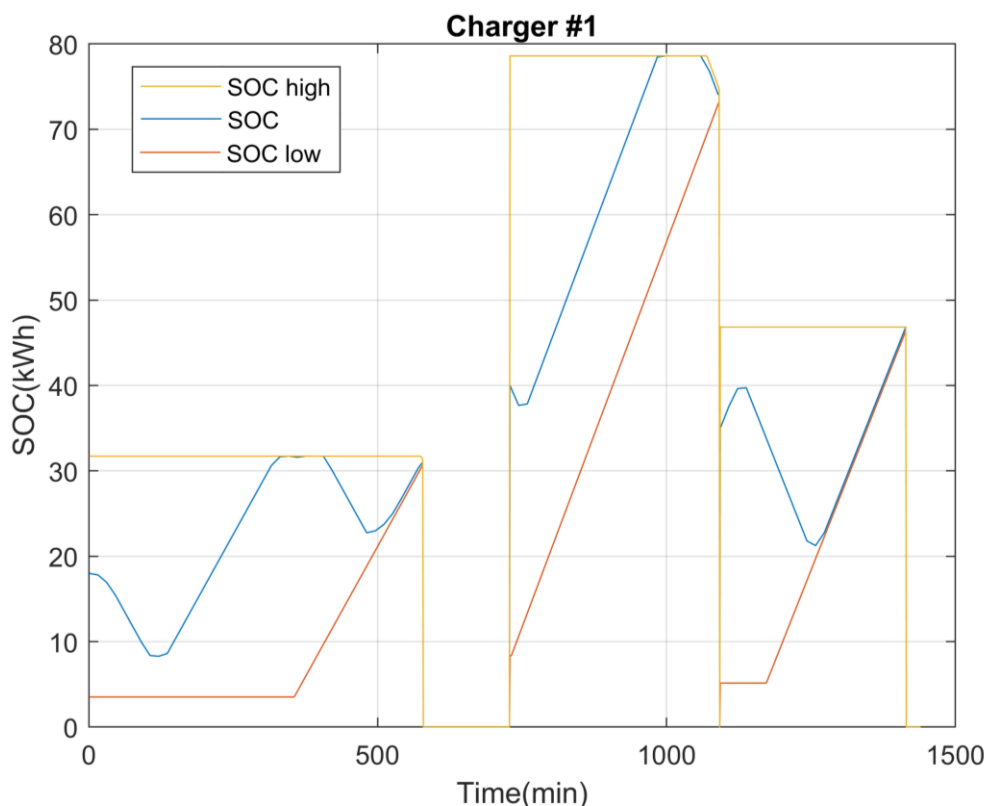
Βρίσκεται δηλαδή στην μορφή $A_{eq} * x = b_{eq}$.

Όπως παρατηρείται εύκολα, ο πίνακας A_{eq} ισούται με την τελευταία στήλη του πίνακα A_1 , ενώ το $b_{eq} = SOC_{tgt} - SOC(t_0)$

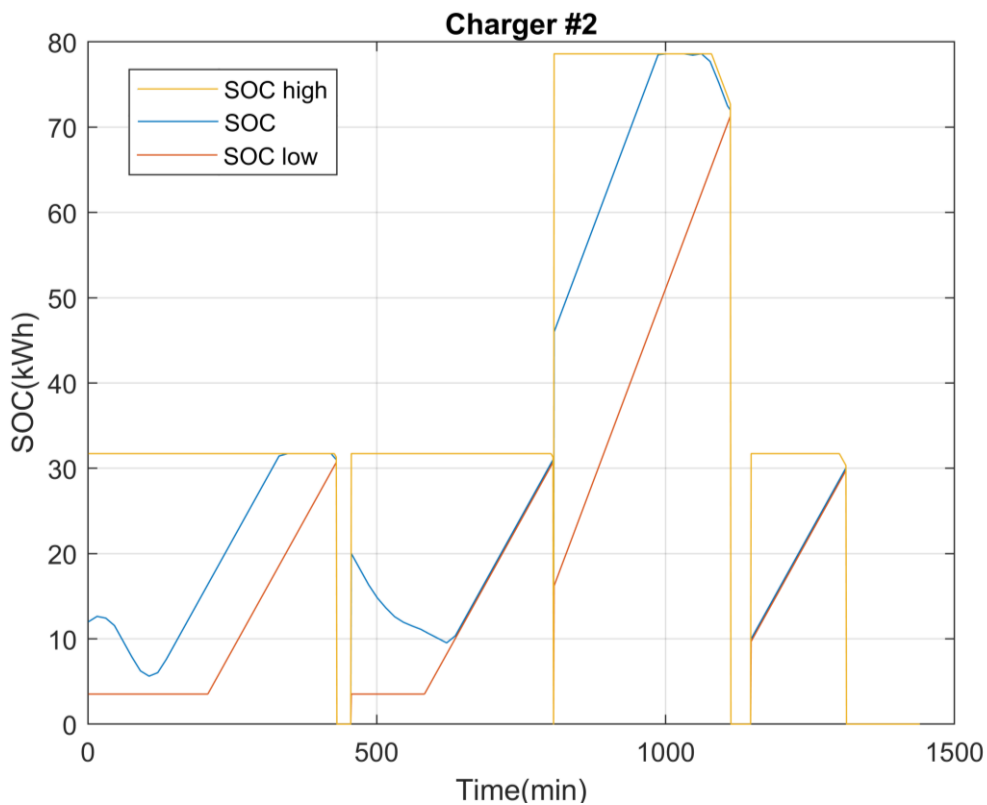
Με την χρήση των παραπάνω μεταβλητών, η `fmincon` μπορεί να υπολογίσει τις βέλτιστες τιμές του P_{ev} για κάθε χρονική στιγμή Δt .

Τέλος, αντικαθιστώντας στην εξίσωση (4) το P_{ev} που υπολογίστηκε από την `fmincon`, προκύπτει το βέλτιστο SOC.

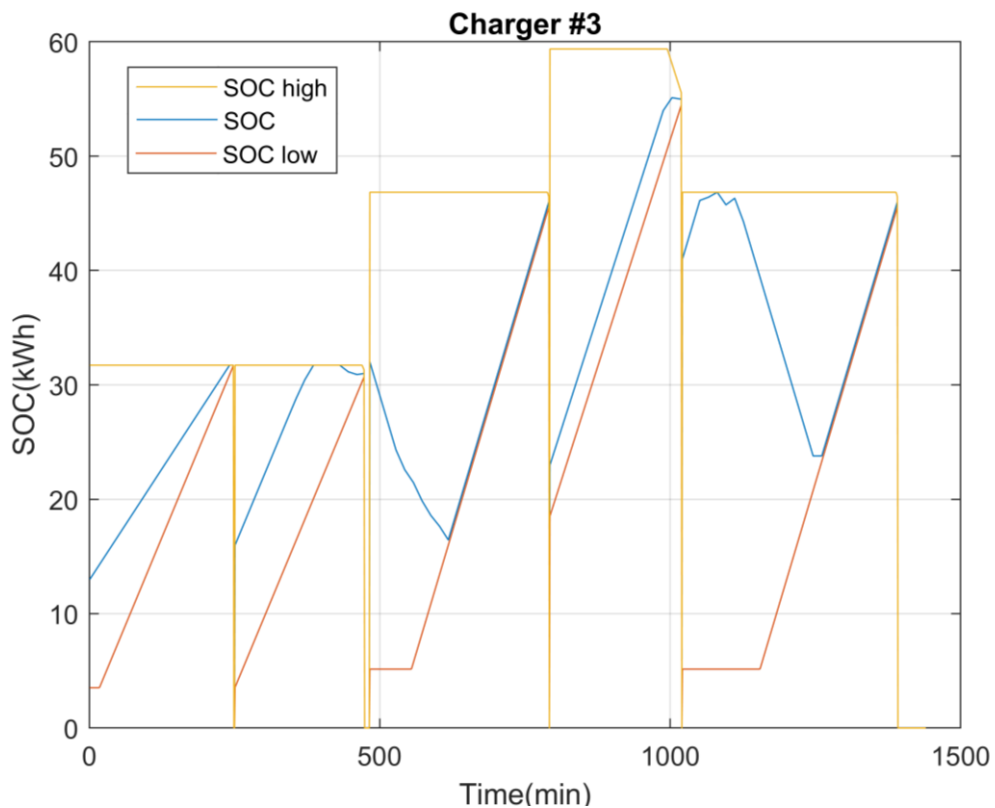
Ενδεικτικές εφαρμογές της συνάρτησης βελτιστοποίησης παρουσιάζονται στις παρακάτω εικόνες:



Σχήμα 4.9: Αποτελέσματα της συνάρτησης βελτιστοποίησης για τρία οχήματα συνδεδεμένα στον ίδιο φορτιστή σε βάθος 24ώρου



Σχήμα 4.10: Αποτελέσματα της συνάρτησης βελτιστοποίησης για τέσσερα οχήματα συνδεδεμένα στον ίδιο φορτιστή σε βάθος 24ώρου



Σχήμα 4.11: Αποτελέσματα της συνάρτησης βελτιστοποίησης για πέντε οχήματα συνδεδεμένα στον ίδιο φορτιστή σε βάθος 24ώρου

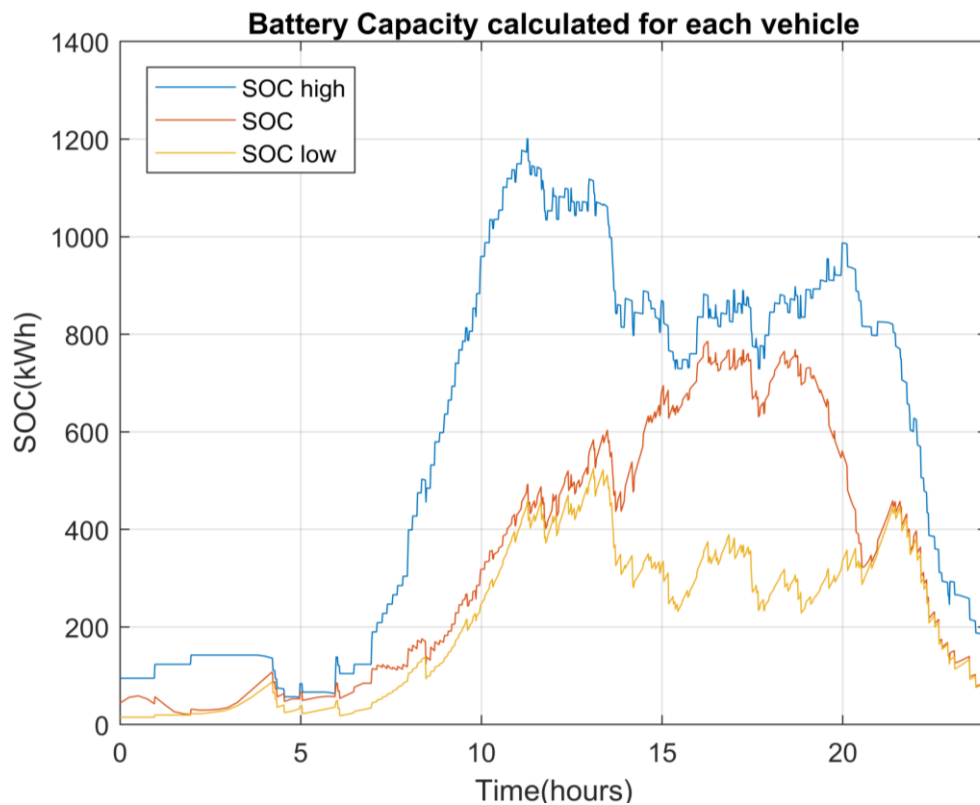
4.3.3. Διερεύνηση της ακρίβειας του ισοδύναμου μοντέλου μπαταρίας

Όπως έχει αναφερθεί στην εισαγωγή, η κλήση της συνάρτησης βελτιστοποίησης `fmincon` για κάθε αυτοκίνητο ξεχωριστά δεν είναι καλή πρακτική. Ιδιαίτερα όταν θέλουμε να προσομοιάσουμε την συμπεριφορά χιλιάδων ή και εκατομμυρίων οχημάτων. Γι' αυτό τον λόγο η συνάρτηση βελτιστοποίησης προτείνεται να καλείται μόνο μία φορά για την συνολική ισοδύναμη μπαταρία, δηλαδή για το άθροισμα όλων των επιμέρους μπαταριών που είναι συνδεδεμένες. Για να έχουν όμως αυτές οι δύο μέθοδοι όμοια αποτελέσματα χρειάζεται μία μετατροπή στην εξίσωση (4). Πρέπει να προστεθεί ο όρος ΔSOC ως εξής:

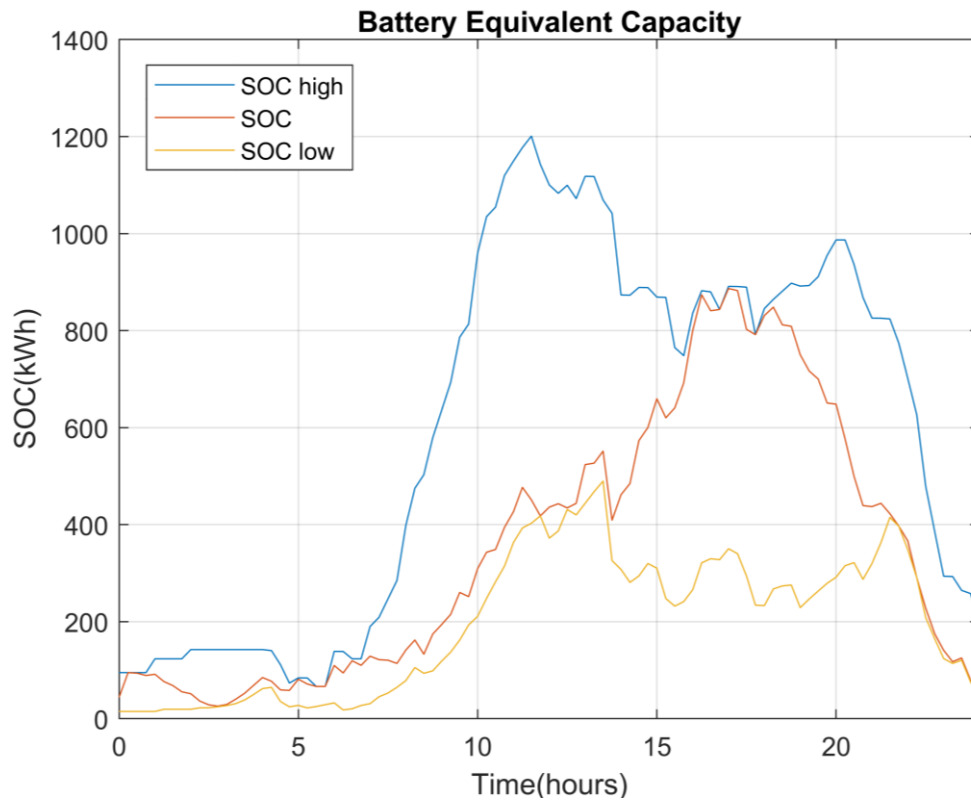
$$SOC(t) = SOC(t_0) + \Delta SOC(t) + \sum_{t_0}^t P_{ev}(t) \cdot \Delta t \quad \forall t \quad (7)$$

Επειδή η `fmincon` υπολογίζει τιμές ανά χρονικό βήμα Δt , εάν για παράδειγμα το $\Delta t = 30$ λεπτά, τότε στις ενδιάμεσες χρονικές στιγμές, είναι αναμενόμενο να έχουν συνδεθεί και αποσυνδεθεί κάποια επιπλέον οχήματα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να αυξάνουν ή να μειώνουν την τιμή του SOC μέσα στο διάστημα αυτό. Το ΔSOC που προστίθεται στην εξίσωση (7), ισούται με την διαφορά του αρχικού SOC όλων των οχημάτων που συνδέονται στο δίκτυο μείον το τελικό SOC όλων των οχημάτων που αποσυνδέονται, εντός του διαστήματος Δt .

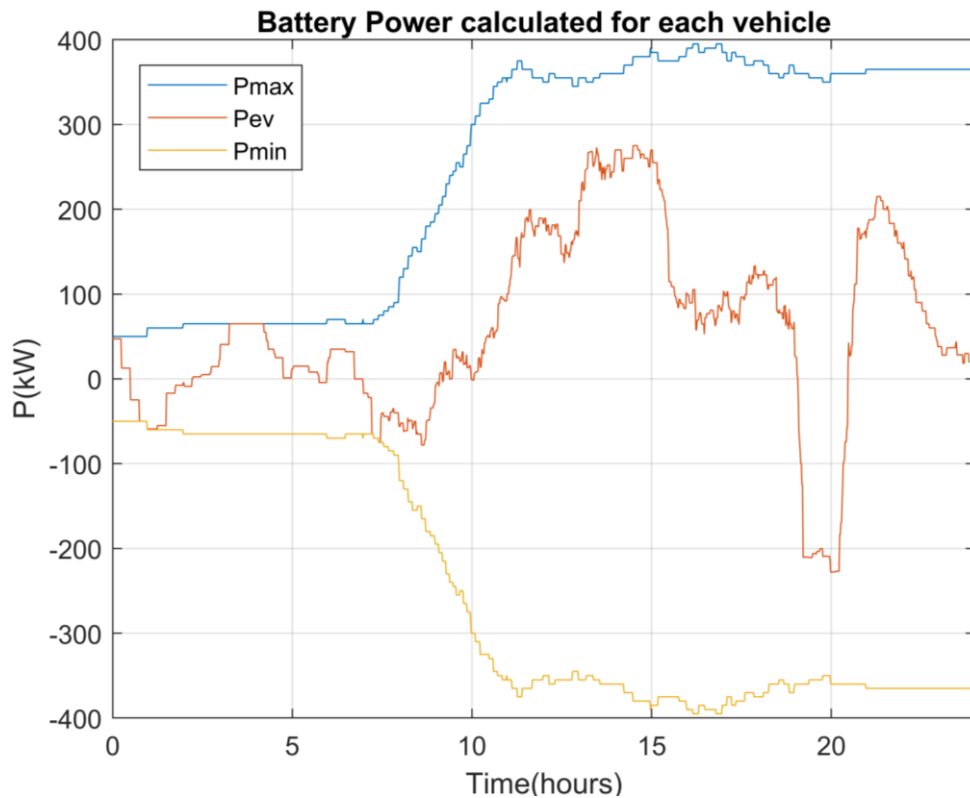
Στα Σχήμα 4.12 βλέπουμε τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης όταν η συνάρτηση χρησιμοποιείτε σε κάθε αυτοκίνητο ξεχωριστά, ενώ στο Σχήμα 4.13 όταν χρησιμοποιείται μόνο μία φορά, με την προσθήκη του ΔSOC στο ισοδύναμο μοντέλο. Όπως φαίνεται από τα σχήματα τα αποτελέσματα είναι αρκετά κοντά μεταξύ τους, τόσο στην ισχύ όσο και στο SOC. Έτσι αποδεικνύεται ότι η δεύτερη μέθοδος μπορεί εύκολα να χρησιμοποιηθεί, επιτυγχάνοντας μεγάλη ακρίβεια αλλά και ταχύτητα στους υπολογισμούς.



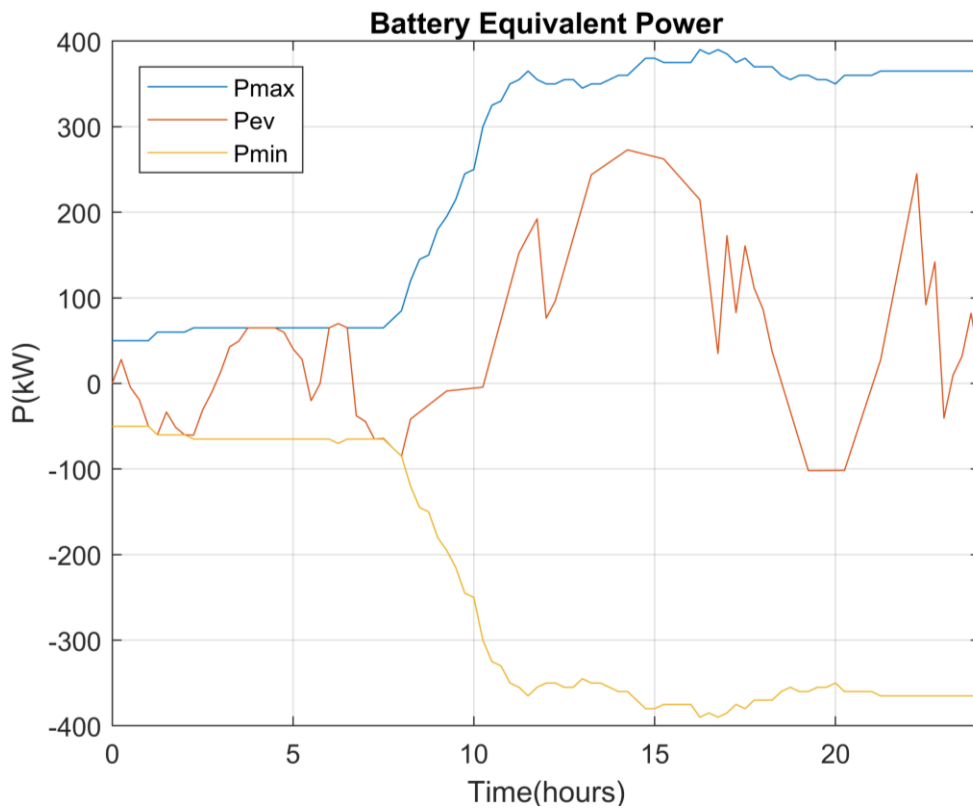
Σχήμα 4.12: Αθροιστικά αποτελέσματα των συναρτήσεων βελτιστοποίησης για κάθε όχημα ξεχωριστά ως προς το SOC



Σχήμα 4.13: Αποτελέσματα της συνάρτησης βελτιστοποίησης στο ισοδύναμο μοντέλο μπαταρίας ως προς το SOC



Σχήμα 4.14: Αθροιστικά αποτελέσματα των συναρτήσεων βελτιστοποίησης για κάθε όχημα ξεχωριστά ως προς την ισχύ



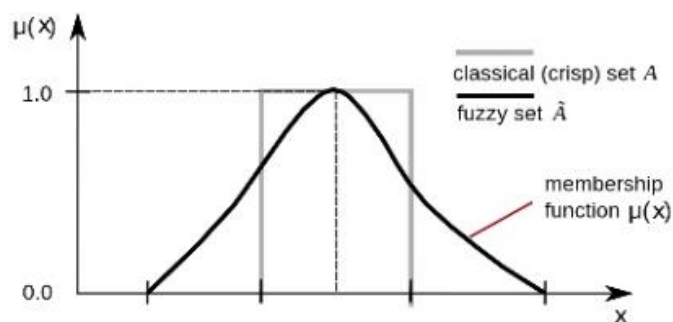
Σχήμα 4.15: Αποτελέσματα της συνάρτησης βελτιστοποίησης στο ισοδύναμο μοντέλο μπαταρίας ως προς την ισχύ

4.4 Στήριξη συχνότητας με ασαφή λογική

4.4.1. Εισαγωγή στην ασαφή λογική

Η ασαφής λογική ή αλλιώς fuzzy logic, είναι ένα υπερσύνολο της κλασικής λογικής, η οποία έχει επεκταθεί ώστε να μπορεί να χειριστεί τιμές αληθείας μεταξύ του “απολύτως αληθές” και του “απολύτως ψευδές”. Πιο απλά, η ασαφής λογική βασίζεται στο ότι τα φαινόμενα στον πραγματικό κόσμο δεν είναι είτε “άσπρο” είτε “μαύρο” αλλά υπάρχουν και ενδιάμεσες αποχρώσεις. Είναι δηλαδή η προσπάθεια μαθηματικοποίησης της φυσικής γλώσσας του ανθρώπου επεκτείνοντας την Boolean λογική των δύο τιμών 0 και 1 σε μία λογική όπου όλες οι τιμές του συνόλου $[0,1]$ είναι δυνατές. Στην ασαφή λογική δηλαδή, μία πρόταση είναι αληθής μέχρι κάποιο βαθμό. Για παράδειγμα, αν θεωρήσουμε ότι ένα άτομο πάνω από 1,95 θεωρείται ψηλό τότε σύμφωνα με την κλασική λογική κάποιος που είναι 1,94 θεωρείται κοντός. Όταν λοιπόν θέλουμε να περιγράψουμε τέτοιου είδους συστήματα η κλασική λογική δεν βοηθάει.

Η ασαφής λογική βασίζεται στην επέκταση της έννοιας του κλασσικού συνόλου, στη γενικευμένη έννοια του ασαφούς συνόλου (fuzzy set). Σε ένα κλασσικό σύνολο, ένα στοιχείο είτε ανήκει σε αυτό είτε όχι. Σε ένα ασαφές σύνολο όμως, ένα στοιχείο μπορεί να ανήκει μερικώς σε ένα σύνολο. Ο βαθμός συμμετοχής του στο σύνολο, ονομάζεται συνάρτηση συμμετοχής (membership function) $\mu_A(x)$ και μας δείχνει τον βαθμό κατά τον οποίο η τιμή x ανήκει στο σύνολο A . Μια συνάρτηση συμμετοχής μπορεί να εκφράσει υποκειμενικές απόψεις για την ίδια έννοια, σε αντίθεση με την χαρακτηριστική συνάρτηση ενός κλασσικού συνόλου που εκφράζει μία απόλυτη έννοια για όλους τους παρατηρητές. Αυτό σημαίνει ότι η ίδια ασαφής έννοια μπορεί να εκφράζεται από πολλά διαφορετικά ασαφή σύνολα.



Σχήμα 4.16: Συνάρτηση συμμετοχής ενός κλασσικού συνόλου και ενός ασαφούς συνόλου

Επίσης, η ασαφής λογική προσπαθεί μέσω των ασαφών ή αλλιώς λεκτικών μεταβλητών (fuzzy ή linguistic variables), όπως είναι το ύψος ενός ανθρώπου, να προσομοιάσει την ανθρώπινη επικοινωνία. Εξάλλου, η ασάφεια είναι ένα εγγενές χαρακτηριστικό της γλώσσας και του τρόπου που ο ανθρώπινος εγκέφαλος κάνει συλλογισμούς. Στο παράδειγμα με το ύψος, το οποίο μπορεί να θεωρηθεί ως μία ασαφή ή αλλιώς λεκτική μεταβλητή, το πεδίο τιμών που θα μπορούσε να πάρει θα ήταν π.χ. {κοντός, μεσαίος, ψηλός}. Οι τιμές των λεκτικών μεταβλητών μπορούν να συνδυαστούν μεταξύ τους με ένα σύνολο λεκτικών τελεστών όπως το AND, OR, NOT, VERY κτλ. κατασκευάζοντας τους ασαφείς κανόνες (fuzzy rules). Έτσι, για κάθε είσοδο, ενεργοποιούνται ορισμένοι ασαφείς κανόνες, σχηματίζοντας μία ασαφή έξοδο (fuzzy output). Τέλος, με διάφορες τεχνικές αποσαφοποίησης (defuzzification) του ασαφούς συνόλου, προκύπτουν σαφείς και συγκεκριμένες (crisp) τιμές.

4.4.2. Εφαρμογές ασαφούς λογικής

Η ασαφής λογική έχει απεριόριστες πρακτικές εφαρμογές στην βιομηχανία. Ενδεικτικά αναφέρουμε τις εξής:

- Σύστημα Linkman (ιστορικά η πρώτη εφαρμογή): έλεγχε την μίξη των υλικών και την κατεργασία τους σε περιστρεφόμενο κλίβανο, σε βιομηχανίες παραγωγής τσιμέντου (σε χρήση και στην Ελλάδα).
- Ο υπόγειος σιδηρόδρομος Sendai στην Ιαπωνία: έλεγχος ρυθμού επιτάχυνσης και επιβράδυνσης των συρμών, κλπ.
- Φωτογραφικές μηχανές που εστιάζουν και ρυθμίζουν το χρόνο έκθεσης αυτόματα.
- Πλυντήρια ρούχων που αποφασίζουν μόνα τους το πρόγραμμα πλύσης ανάλογα με την ποσότητα ρούχων, το πόσο βρώμικα είναι και την ποιότητα του νερού.
- Συσκευές video-camera: για συνεχή εστίαση αλλά και σταθεροποίηση της εικόνας.
- Ασαφή συστήματα πέδησης (fuzzy ABS) και μετάδοσης κίνησης σε αυτοκίνητα.
- Ασαφή συστήματα ελέγχου λαβής σε ρομποτικούς βραχίονες.
- Ασαφείς συσκευές κλιματισμού.
- Ασαφείς βαλβίδες για έλεγχο ροής.

- Ασαφή συστήματα κατανομής καυσίμου ανάλογα με το φάκελο πτήσης σε δεξαμενές πολεμικών αεροσκαφών.

Τέλος, πρέπει να γίνει ιδιαίτερη αναφορά στον τομέα της ιατρικής και ειδικότερα στην λήψη ιατρικών αποφάσεων. Γνωρίζοντας ότι τα δεδομένα ιατρικής και υγειονομικής περίθαλψης μπορεί να είναι υποκειμενικά ή ασαφή, οι εφαρμογές σε αυτόν τον τομέα έχουν μεγάλες δυνατότητες να επωφεληθούν χρησιμοποιώντας προσεγγίσεις fuzzy λογικής. Η ασαφής λογική χρησιμοποιείται για την διάγνωση με τη βοήθεια υπολογιστή (CAD) σε πολλές διαφορετικές πτυχές. Τέτοιες πτυχές περιλαμβάνουν την ανάλυση ιατρικής εικόνας, ανάλυση βιοϊατρικών σημάτων, επιλογή εικόνων ή σημάτων κ.α.

4.4.3. Μηχανισμός ελέγχου στήριξης συχνότητας με ασαφή λογική

Για την στήριξη της συχνότητας, κατασκευάστηκε ένας fuzzy ελεγκτής ο οποίος μπορεί να αυξομειώνει την ισχύ των ηλεκτρικών οχημάτων συμβάλλοντας επικουρικά στην ήδη υπάρχουσα παραγωγή ισχύος που ρυθμίζεται από τους ελεγκτές στροφών. Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενα κεφάλαια, κατά την απότομη μεταβολή του φορτίου, υπάρχει μία αντίστοιχη μεταβολή στην συχνότητα. Στην περίπτωση αύξησης του φορτίου, ο fuzzy ελεγκτής αντιδράει ελαττώνοντας το φορτίο των ηλεκτρικών οχημάτων, μειώνοντας την ισχύ που απορροφούν ή ακόμα και δίνοντας πίσω στο δίκτυο ένας μέρος της. Αντιθέτως, όταν υπάρχει απότομη μείωση φορτίου, δηλαδή αύξηση της συχνότητας, ο ελεγκτής αυξάνει την ισχύ που απορροφούν τα ΗΑ σε μία προσπάθεια να “τραβήξει” την πλεονάζουσα ισχύ από το δίκτυο. Όσο μεγαλύτερη είναι η μείωση ή η αύξηση της συχνότητας τόσο μεγαλύτερη είναι και η ισχύς που παρέχεται από τον ελεγκτή (εφόσον υπάρχει διαθέσιμη). Με βάση τα παραπάνω, η πρώτη ασαφής μεταβλητή του συστήματος είναι η μεταβολή της συχνότητας (Δf).

Εκτός όμως από το Δf , ο ελεγκτής πρέπει λαμβάνει υπόψη του και το τρέχον SOC της συνολικής μπαταρίας. Έτσι, όταν για παράδειγμα η συχνότητα αυξάνεται, πρέπει να αυξηθεί και η ισχύς που απορροφούν τα οχήματα. Αυτή όμως η απορρόφηση έχει ως αποτέλεσμα και την αύξηση του συνολικού SOC. Γι’ αυτό τον λόγο ο ελεγκτής πρέπει να γνωρίζει την απόσταση που απέχει το τρέχον SOC, από το μέγιστο επιτρεπτό SOC της μπαταρίας. Αντίστοιχα, κατά την βύθιση της συχνότητας υπάρχει ανάγκη

για αύξηση της παρεχόμενης ισχύος. Άρα ο ελεγκτής πρέπει να γνωρίζει και την απόσταση του SOC από το κατώτερο όριο. Έτσι, η δεύτερη ασαφής μεταβλητή που εισάγεται στο fuzzy σύστημα ονομάζεται SOC_{dist} και έχει διπλή σημασία. Όταν το Δf είναι θετικό, το SOC_{dist} εκφράζει την απόσταση του SOC από το SOC_{high} ενώ όταν το Δf είναι αρνητικό τότε εκφράζει την απόσταση του SOC από το SOC_{low} . Με αυτό τον τρόπο ο ελεγκτής κάνει κάποιους συμβιβασμούς αναφορικά με το πόσο πρέπει να μεταβληθεί η ισχύς, λαμβάνοντας υπόψη τόσο το Δf όσο και το SOC.

Οι είσοδοι Δf και SOC_{dist} , κανονικοποιούνται ώστε να μπορούν να εισαχθούν σωστά στο fuzzy σύστημα λαμβάνοντας τιμές από το 0 έως το 1, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.17. Πιο συγκεκριμένα, έχει τεθεί σαν μέγιστη απόκλιση συχνότητας τα ± 2 Hz. Έτσι, η τιμή 1 δίνεται όταν το Δf ξεπεράσει τα 2 ή τα -2 Hz αντίστοιχα. Το SOC_{dist} , όταν το Δf είναι θετικό, εκφράζει την απόσταση από το SOC_{high} . Το SOC απέχει το μέγιστο από το SOC_{high} όταν ισούται με το SOC_{low} . Άρα τότε παίρνει την τιμή 1. Αντίστροφα, για Δf αρνητικό, το SOC θα απέχει την μέγιστη απόσταση και άρα θα πάρει την τιμή 1 όταν ισούται με το SOC_{high} . Για τιμές εισόδου εκτός των ορίων αντιστοιχίζονται οι ακραίες τιμές 0 και 1 αντίστοιχα.

Οι τιμές που μπορούν να λάβουν οι δύο fuzzy μεταβλητές είναι:

Για το Δf : Very Small, Small, Medium, Big, Very Big

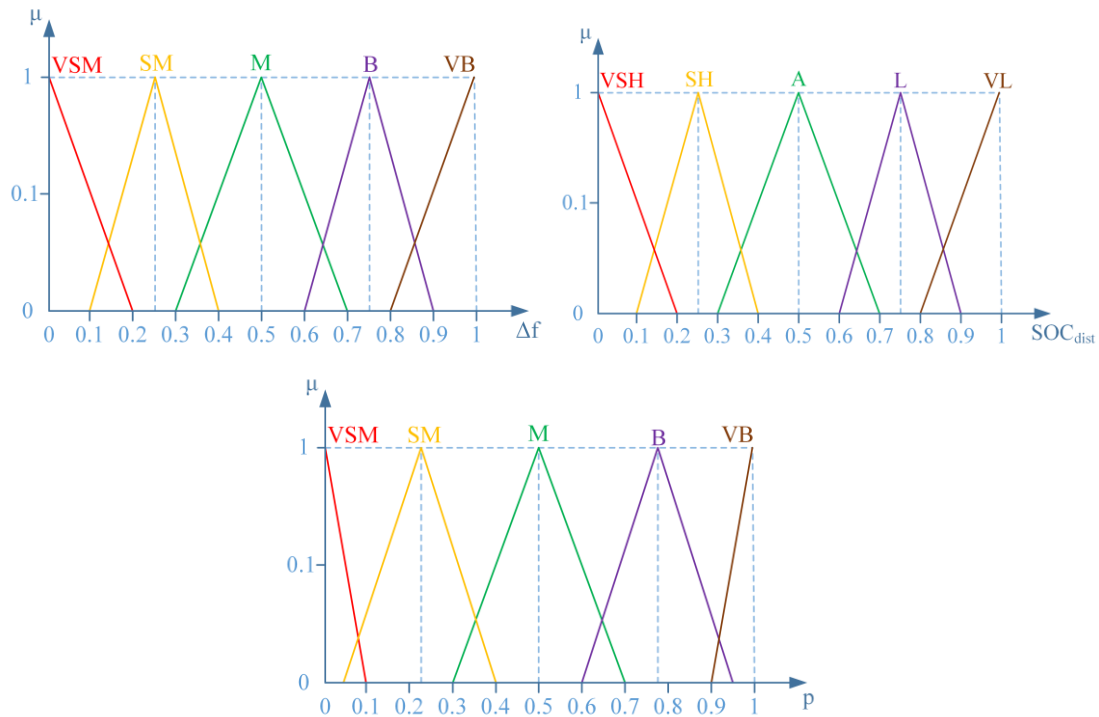
Για το SOC_{dist} : Very Short, Short, Average, Large, Very Large

Η fuzzy έξοδος p λαμβάνει, σύμφωνα με τους κανόνες του Πίνακα 4.2, τις εξής τιμές: Very Small, Small, Medium, Big, Very Big

Πίνακας 4.2

$\Delta f \backslash SOC_{dist}$	Very Small	Small	Medium	Big	Very Big
Very Short	Very Small	Very Small	Very Small	Very Small	Very Small
Short	Very Small	Small	Small	Medium	Big
Average	Very Small	Small	Medium	Big	Big
Large	Very Small	Medium	Big	Big	Very Big
Very Large	Very Small	Big	Big	Very Big	Very Big

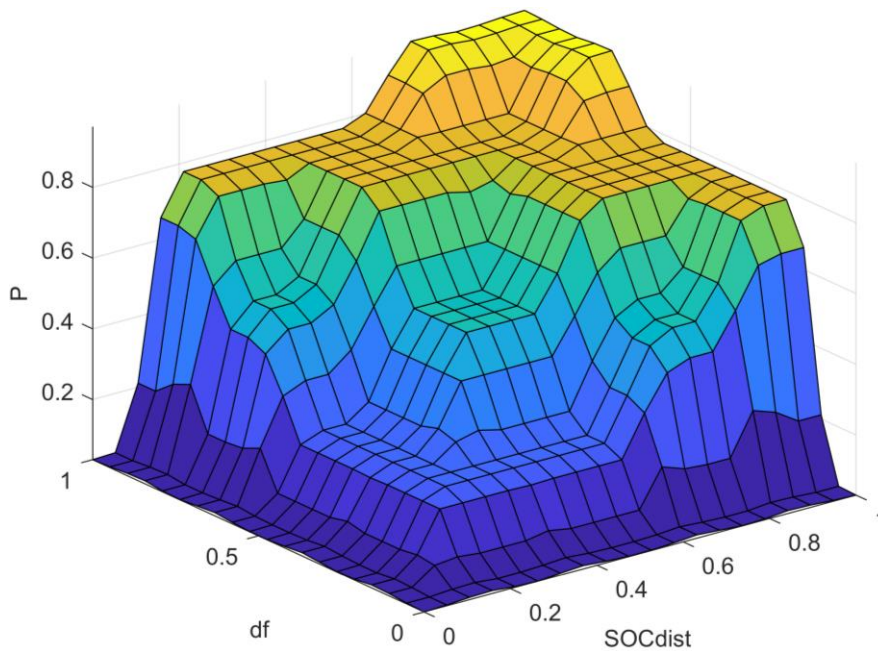
Στο Σχήμα 4.17 απεικονίζονται οι συναρτήσεις συμμετοχής των ασαφών μεταβλητών εισόδου και εξόδου



Σχήμα 4.17: Συναρτήσεις συμμετοχής των fuzzy variables

Λαμβάνοντας υπόψη τις παραπάνω συναρτήσεις συμμετοχής και εφαρμόζοντας τους ασαφείς κανόνες καταλήγουμε στη fuzzy έξοδο. Με την διαδικασία της αποσαφιοποίησης προκύπτει ένας crisp αριθμός που ονομάζεται P και παίρνει τιμές από 0 έως 1 όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.18. Αυτή η τιμή εκφράζει το ποσοστό κατά το οποίο μπορεί να μεταβληθεί η ισχύς σε σχέση με την μέγιστη. Αν για παράδειγμα σε μία χρονική στιγμή η μέγιστη διαθέσιμη μεταβολή ισχύος των οχημάτων είναι 10 MW τότε η μεταβολή που θα προκύψει από τον ελεγκτή θα είναι $10 \cdot P$ MW.

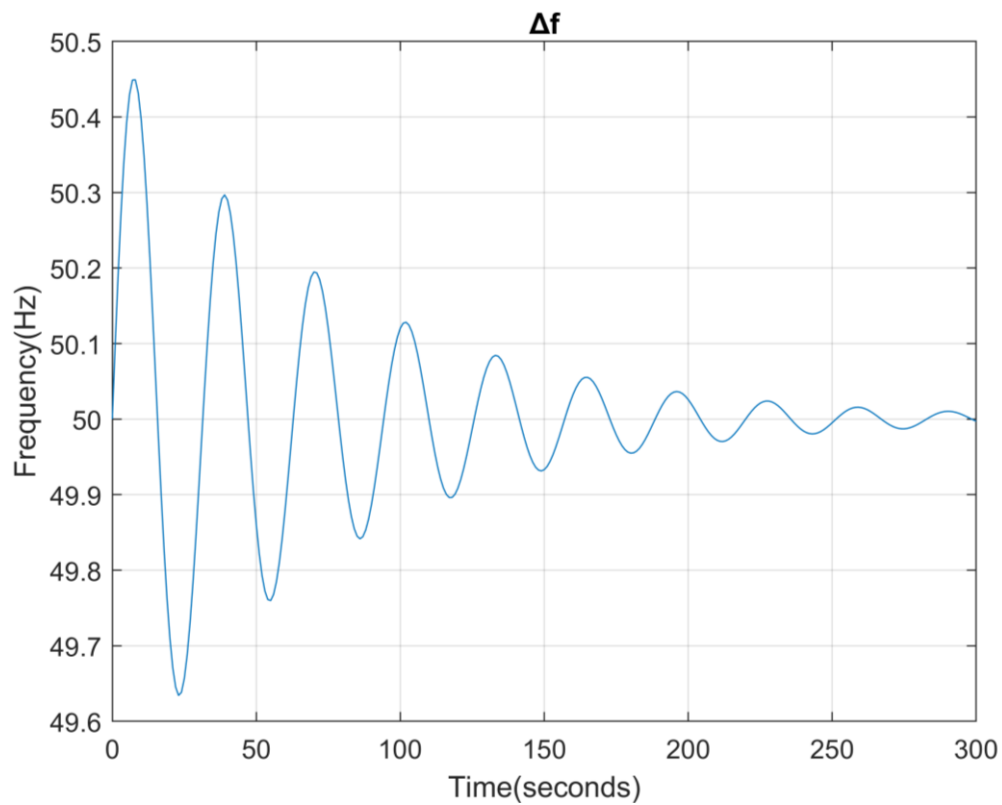
Ο fuzzy ελεγκτής διαβάζει την μεταβολή της συχνότητας (Δf) κάθε 0.1 δευτερόλεπτα και ρυθμίζει κατάλληλα την ισχύ των ΗΑ. Με αυτό τον τρόπο προσομοιώνεται ταυτόχρονα η λειτουργία της πρωτεύουσας και της δευτερεύουσας ρύθμισης. Η πρωτεύουσα ρύθμιση καλύπτεται, λόγω της άμεσης παροχής ισχύος για την εξισορρόπηση του ισοζυγίου παραγωγής-κατανάλωσης. Εκτός αυτού όμως, ο fuzzy ελεγκτής μεταβάλλει διαρκώς την ισχύ των ΗΑ έως ότου μηδενισεί τη μεταβολή της συχνότητας ($\Delta f = 0$). Συνεισφέρει δηλαδή στην εξάλειψη του μόνιμου σφάλματος, μαζί με την δευτερεύουσα ρύθμιση των γεννητριών.



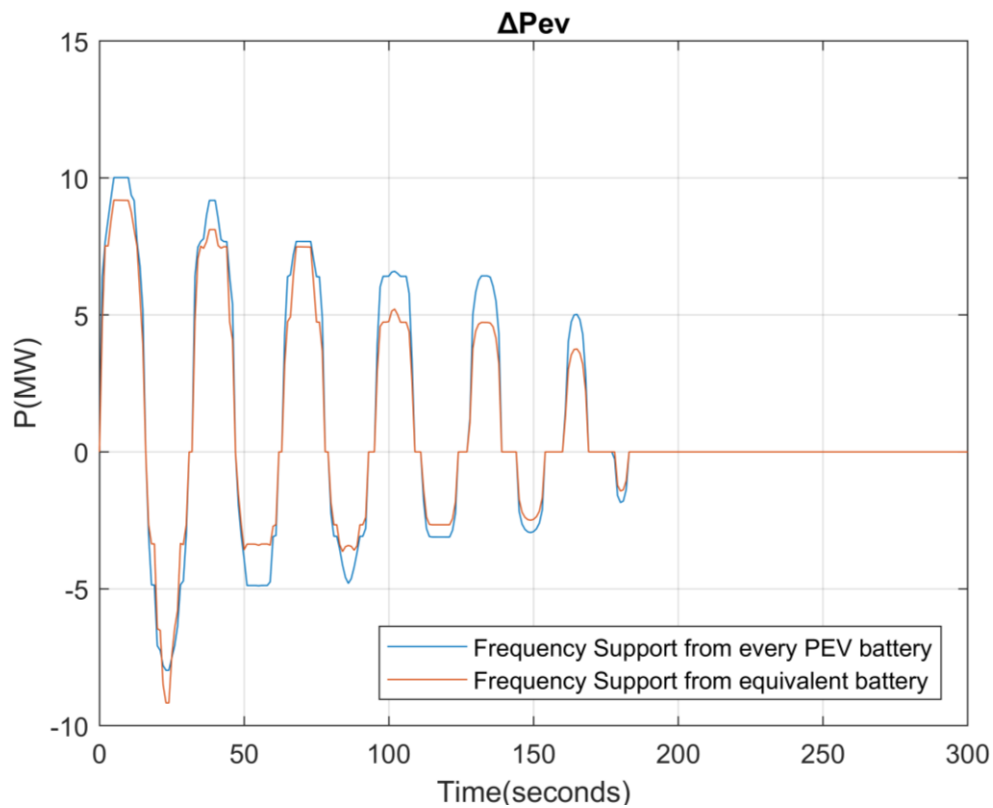
Σχήμα 4.18: Γραφική αναπαράσταση των τιμών εξόδου ανάλογα με τις τιμές εισόδου του fuzzy συστήματος

4.4.4. Διερεύνηση ακρίβειας του ισοδύναμου μοντέλου στον ασαφή ελεγκτή

Όπως και στην περίπτωση της συνολικής μπαταρίας, πρέπει και σε αυτό το σημείο να αποδειχθεί ότι η στήριξη συχνότητας μπορεί να γίνει με την βοήθεια ενός και μόνο fuzzy ελεγκτή. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.19, εφαρμόζεται μία τυχαία διαταραχή στην συχνότητα, ενώ στο σχήμα 4.20 φαίνεται πως οι fuzzy ελεγκτές αποκρίνονται σε αυτή την διαταραχή. Όπως είναι φανερό είτε χρησιμοποιηθεί ένας ελεγκτής για την ισοδύναμη μπαταρία είτε πολλοί επιμέρους ελεγκτές που αντιστοιχούν σε κάθε ΗΑ, τα αποτελέσματα είναι πολύ κοντά μεταξύ τους. Όμως αυτό που επιτυγχάνεται στην πρώτη περίπτωση είναι η ταχύτητα των υπολογισμών. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι για το συγκεκριμένο παράδειγμα όπου χρησιμοποιήθηκαν 1000 ηλεκτρικά οχήματα, η προσομοίωση με την πρώτη μέθοδο διήρκεσε 2185 δευτερόλεπτα, δηλαδή περίπου 37 λεπτά, ενώ η δεύτερη μόλις 2,17 δευτερόλεπτα. Είναι προφανές, ότι ένας τέτοιος υπολογισμός σε εκατοντάδες ή και εκατομμύρια οχήματα θα ήταν μία εξαιρετικά χρονοβόρα διαδικασία



Σχήμα 4.19: Τυχαία διαταραχή συχνότητας



Σχήμα 4.20: Μεταβολή ισχύος από τον fuzzy ελεγκτή όταν εφαρμόζεται στην συνολική μπαταρία και έπειτα σε κάθε μπαταρία ξεχωριστά

4.5 Μοντελοποίηση του ηλεκτρικού συστήματος της Κρήτης

Το τελικό στάδιο της υλοποίησης είναι η ενσωμάτωση του συστήματος των συνδεδεμένων οχημάτων, σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Έτσι, για την συγκεκριμένη ανάλυση επιλέχθηκε το ΣΗΕ της Κρήτης. Το δίκτυο περιλαμβάνει 3 θερμικούς σταθμούς παραγωγής και 27 εγκατεστημένες συμβατικές μονάδες συνολικής ισχύος 820,02 MW, με μέγιστη καθαρή αποδιδόμενη ισχύ θέρους 695,86 MW.

Ποιο αναλυτικά σύμφωνα με τον ΑΔΜΗΕ:

Ο Ατμοηλεκτρικός Σταθμός Λινοπεραμάτων διαθέτει 14 μονάδες με καύσιμο μαζούτ και Diesel, συνολικής εγκατεστημένης ισχύος 272,59 MW (μέγιστη αποδιδόμενη καθαρή ισχύς θέρους 232,75 MW)

Ο Ατμοηλεκτρικός Σταθμός Χανίων διαθέτει 9 μονάδες με καύσιμο Diesel, συνολικής εγκατεστημένης ισχύος 345,19 MW (μέγιστη αποδιδόμενη καθαρή ισχύς θέρους 272,11 MW)

Ο Ατμοηλεκτρικός Σταθμός Αθρινόλακου διαθέτει 4 μονάδες με καύσιμο μαζούτ, συνολικής εγκατεστημένης ισχύος 202,24 MW (μέγιστη αποδιδόμενη καθαρή ισχύς θέρους 191 MW)

Δύο από τις παραπάνω μονάδες (ΑΕΡ1 Λινοπεραμάτων και ΑΕΡ4 Χανίων) συνολικής εγκατεστημένης ισχύος 36,25 MW έχουν τεθεί με υπουργική απόφαση σε ψυχρή εφεδρεία.

Στον Πίνακα 4.3 παρουσιάζεται το πλήθος όλων των γεννητριών ανάλογα με το είδος και τον σταθμό παραγωγής που είναι εγκατεστημένες.

Πίνακας 4.3

Number of Generators				
Power Plant	Gas turbine	Steam turbine	Diesel turbine	Total installed power generation capacity (MW)
Heraklion	5	5	4	14
Chania	8	1	-	9
Lasithi	-	2	2	4
Total Power (MW)	13	8	6	27

Στον Πίνακα 4.4 παρουσιάζεται η ισχύς όλων των γεννητριών ανάλογα με το είδος και τον σταθμό παραγωγής που είναι εγκατεστημένες.

Πίνακας 4.4

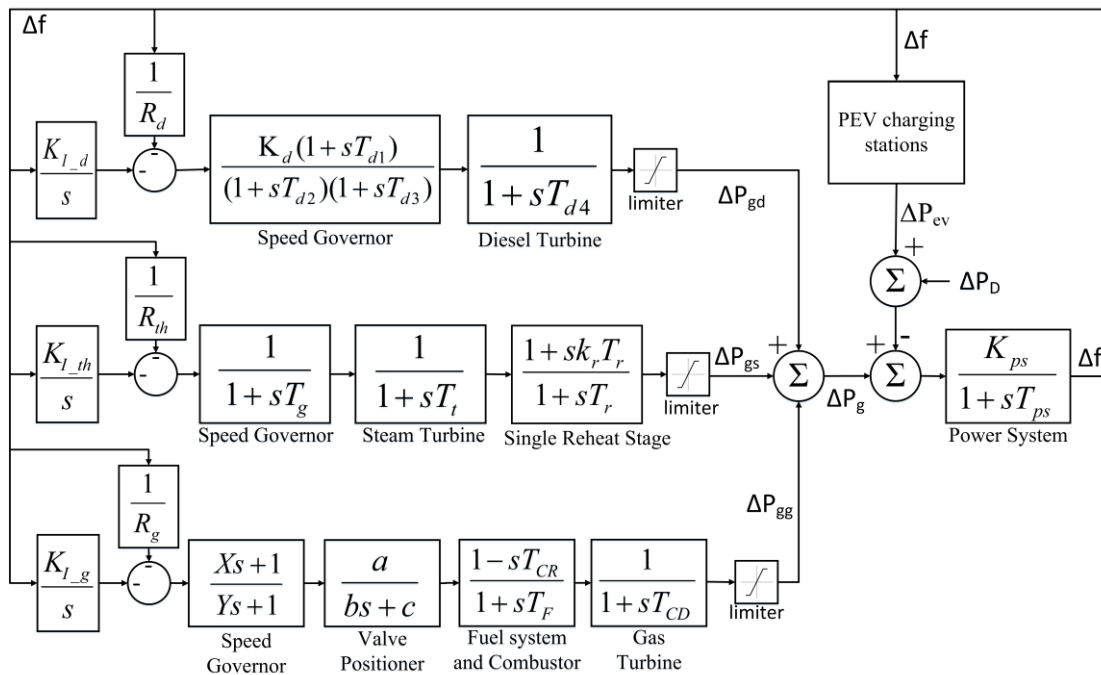
Installed Power				
Power Plant	Gas turbine	Steam turbine	Diesel turbine	Total installed power generation capacity (MW)
Heraklion	118,47	105	49,12	272,59
Chania	302,69	42,5	-	345,19
Lasithi	-	100	102,24	202,24
Total Installed Power (MW)	421,16	205	151,36	820,02

Στον Πίνακα 4.5 παρουσιάζονται τα τεχνικά ελάχιστα για κάθε είδος γεννήτριας και κάθε σταθμό παραγωγής.

Πίνακας 4.5

Minimum required Power for operation				
Power Plant	Gas turbine	Steam turbine	Diesel turbine	Minimum required power generation capacity (MW)
Heraklion	19	74	15	108
Chania	36	11	-	47
Lasithi	-	44	60	104
Total Minimum Power (MW)	55	129	75	259

Το μαθηματικό ισοδύναμο που περιγράφει το συνολικό σύστημα μαζί με το μοντέλο στήριξης συχνότητας από τα ΗΑ φαίνεται στο Σχήμα 4.21



Σχήμα 4.21: Μαθηματικό μοντέλο του ΣΗΕ της Κρήτης μαζί με τα ΗΑ

Σε αντίθεση με το ισοδύναμο που περιγράψαμε στο Κεφάλαιο 3, η διαταραχή που εισάγεται στο σύστημα δεν ισούται με ΔP_D αλλά με το άθροισμα $\Delta P_D + \Delta P_{ev}$. Επειδή το σύστημα των ΗΑ προσπαθεί να μειώσει την μεταβολή του φορτίου (ΔP_D), αυτές οι δύο τιμές έχουν πάντα αντίθετα πρόσημα. Αυτό σημαίνει πρακτικά, ότι τα ΗΑ απορροφούν ένα μέρος της διαταραχής του φορτίου λόγω της άμεσης απόκρισής τους, εισάγοντας στο σύστημα μια συνολικά μικρότερη διαταραχή.

Για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων που παρουσιάζονται στο επόμενο κεφάλαιο επιλέχθηκε να προσομοιωθεί το σύστημα του Σχήματος 4.21 για τον μήνα Αύγουστο όπου υπάρχει μεγάλη κατανάλωση ισχύος και οι γεννήτριες δουλεύουν κοντά στα τεχνικά τους μέγιστα. Έτσι ένα ενδεχόμενο σφάλμα θα είναι πιο δύσκολο να καλυφθεί μόνο από την αύξηση παραγωγής των συμβατικών μονάδων αναδεικνύοντας τη συνεισφορά των ηλεκτρικών αυτοκινήτων στο δίκτυο.

Πιο συγκεκριμένα, τα ποσοστά στα οποία λειτουργούν οι γεννήτριες σε σχέση με τα τεχνικά τους μέγιστα και η καθαρή ισχύς που παράγουν για τον μήνα Αύγουστο παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.6

Πίνακας 4.6

Operating point (August)			
	Gas turbine	Steam turbine	Diesel turbine
Power Generation percentage	0,54	0,97	0,91
Generated Power(MW)	227,4264	198,85	137,7376
Multipliers	0,514	0,25	0,185
Upper Limit (MW)	193,7336	6,15	13,6224
Lower Limit (MW)	-172,4264	-69,85	-62,7376
Total Load in Crete (MW)	564,014		

Η συνεισφορά του κάθε τύπου γεννήτριας στην συνολική ισχύ του συστήματος προσομοιώθηκε στο μαθηματικό μοντέλο με ένα πολλαπλασιαστή στην έξοδο της κάθε τεχνολογίας. Ο πολλαπλασιαστής υπολογίζεται ως το πηλίκο της εγκατεστημένης ισχύς της γεννήτριας δια την συνολική εγκατεστημένη ισχύ του συστήματος.

Το κατά πόσο μία γεννήτρια δύναται να αυξήσει ή να μειώσει την ισχύ της σε περίπτωση που απαιτηθεί, εξαρτάται από το σημείο λειτουργίας που βρίσκεται σε μία δεδομένη στιγμή, σε σύγκριση με το τεχνικό της μέγιστο

ή ελάχιστο. Για την εισαγωγή αυτού του χαρακτηριστικού στο μαθηματικό μοντέλο του Σχήματος 4.21 εφαρμόστηκαν κάποιοι περιοριστές (limiters) έτσι ώστε να μην επιτρέπουν τις γεννήτριες να αυξομειώνουν την ισχύ τους σε τιμές που ξεπερνούν τα τεχνικά τους όρια.

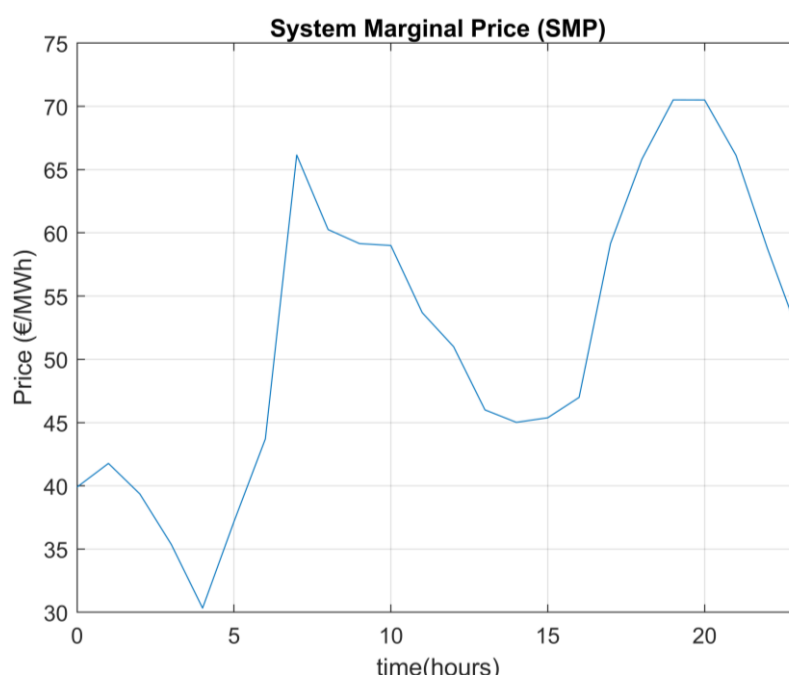
Για παράδειγμα, για τον υπολογισμό του άνω περιοριστή (upper limiter) των Gas turbines αφαιρείται η ισχύς τεχνικού μεγίστου (Πίνακας 4.4) από την ισχύ του σημείου λειτουργίας (Πίνακας 4.6). Έτσι προκύπτει ότι, $421,16 - 227,4264 = 193,7336$. Αυτό σημαίνει ότι οι gas turbines μπορούν να αυξήσουν την ισχύ τους το πολύ κατά 193,7336 MW.

Παρομοίως, για τον υπολογισμό του κάτω περιοριστή (lower limiter) των Gas turbines, αφαιρείται η ισχύς του τεχνικού ελαχίστου από την ισχύ του σημείου λειτουργίας. Έτσι προκύπτει ότι, $55 - 227,4264 = -172,4264$. Οι gas turbines δηλαδή, μπορούν να μειώσουν την ισχύ τους το πολύ κατά 172,4264 MW.

Με τον ίδιο τρόπο υπολογίζονται και οι υπόλοιπες τιμές των περιοριστών.

5. Αποτελέσματα Προσομοιώσεων

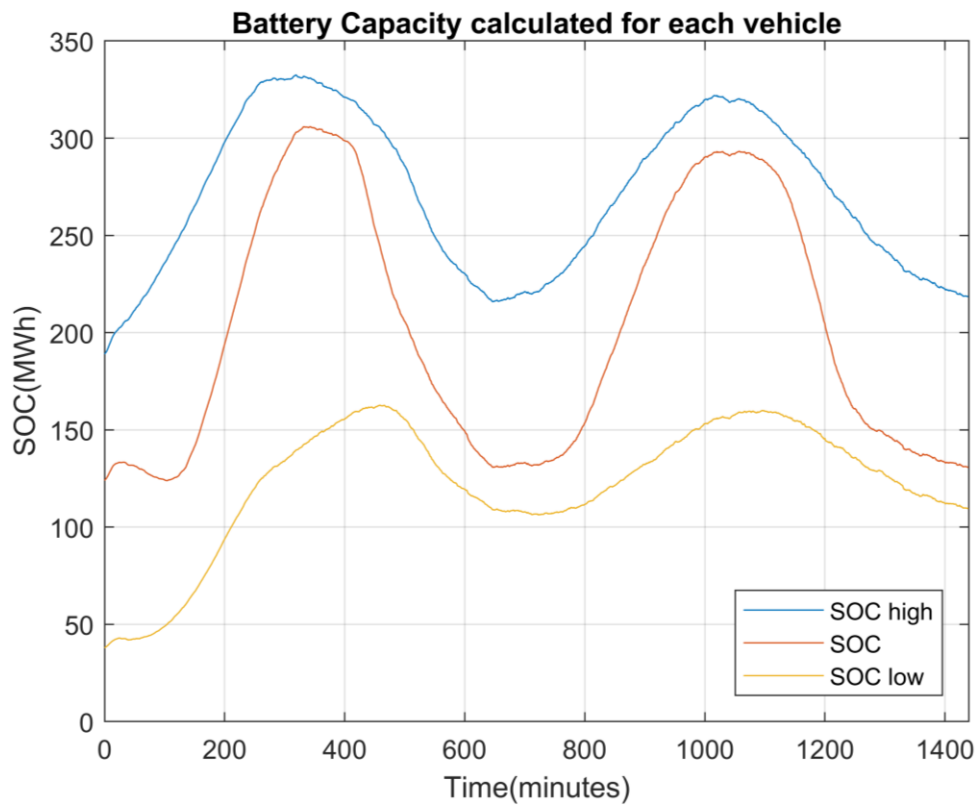
Αρχικά πρέπει να αναφερθεί ότι οι προσομοιώσεις έγιναν πάνω στο σύστημα της Κρήτης, τον μήνα Αύγουστο, σύμφωνα με τα τεχνικά χαρακτηριστικά που δόθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Επίσης η οριακή τιμή του συστήματος (ΟΤΣ) σε €/MWh που χρησιμοποιήθηκε για τους υπολογισμούς του βέλτιστου SOC σε βάθος 24ωρου παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.1



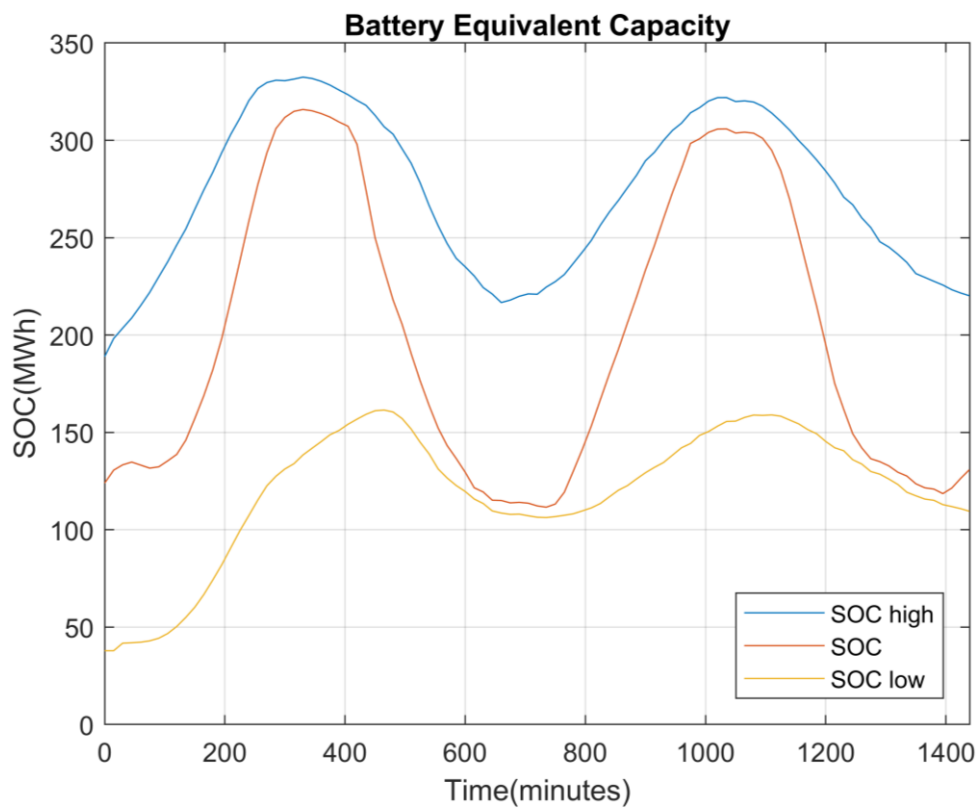
Σχήμα 5.1: Διακύμανση της οριακής τιμής συστήματος σε ένα 24ώρο

5.1 Προσομοίωση σταθμών φόρτισης

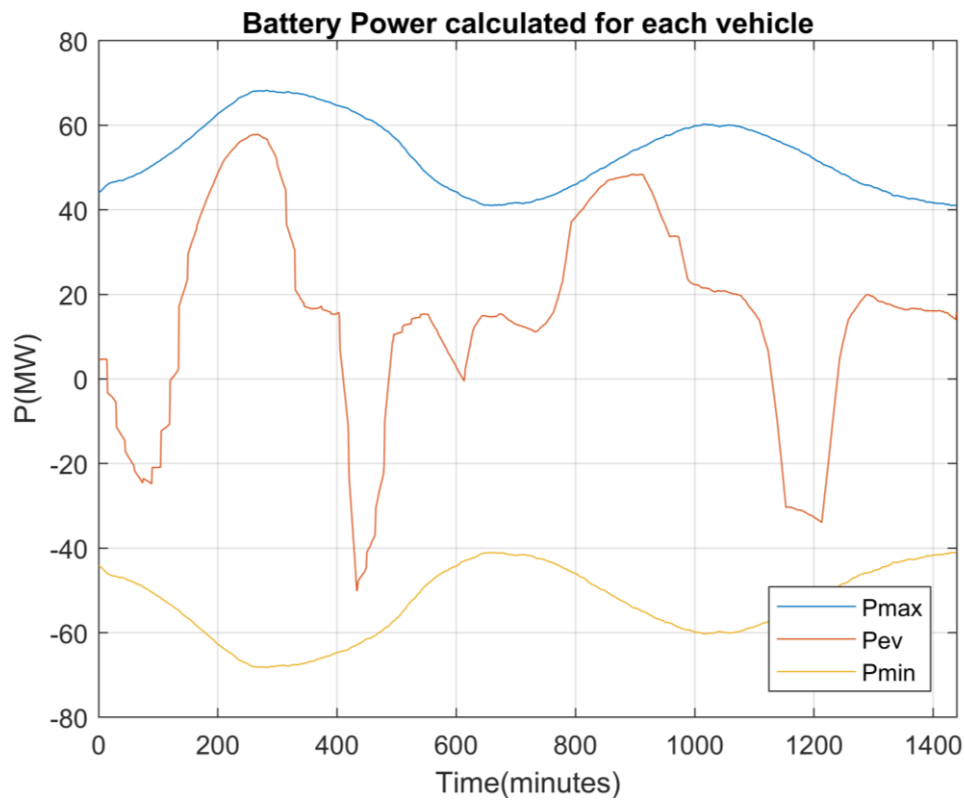
Υπολογίζεται ότι έως το 2030, το 10% περίπου των συνολικών οχημάτων που κυκλοφορούν στην Κρήτη θα είναι ηλεκτρικά. Αυτό σημαίνει ότι περίπου 50 χιλιάδες ηλεκτρικά οχήματα θα βρίσκονται διαθέσιμα μέχρι εκείνη την στιγμή. Θεωρώντας ότι ένα 40% αυτών των οχημάτων θα συμμετέχει στην στήριξη συχνότητας, έγινε προσομοίωση της συμπεριφοράς 20 χιλιάδων ΗΑ σε βάθος 24ωρου. Τα παρακάτω σχήματα παρουσιάζουν την διακύμανση του SOC και της ισχύος, υπολογιζόμενα τόσο με την αργή (υπολογισμός κάθε ΗΑ ξεχωριστά) όσο και με την γρήγορη μέθοδο (υπολογισμός μόνο του ισοδύναμου ΗΑ). Τα αποτελέσματα είναι αρκετά κοντά μεταξύ τους, με την διαφορά ότι η προσομοίωση με την πρώτη μέθοδο διήρκεσε περίπου 55 λεπτά, ενώ με την δεύτερη μόλις 257 δευτερόλεπτα ή 4.3 λεπτά.



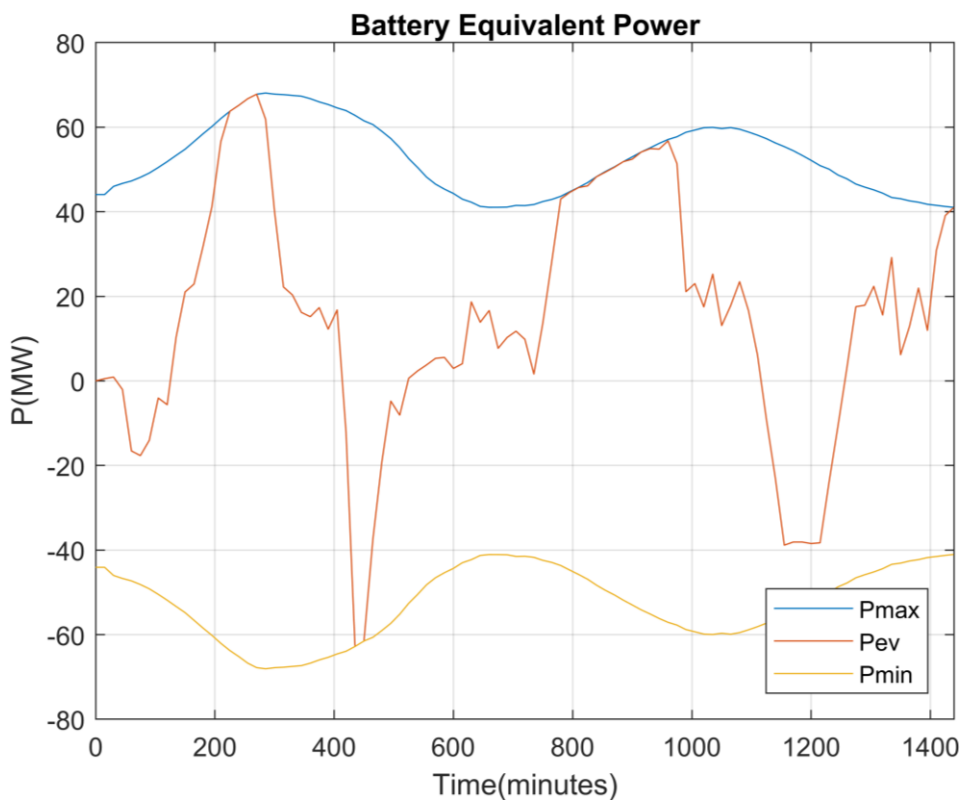
Σχήμα 5.2: Αθροιστικά αποτελέσματα της διακύμανσης του SOC για κάθε όχημα ξεχωριστά



Σχήμα 5.3: Αποτελέσματα διακύμανσης του SOC στο ισοδύναμο μοντέλο μπαταρίας



Σχήμα 5.4: Αθροιστικά αποτελέσματα της διακύμανσης της ισχύος για κάθε όχημα ξεχωριστά

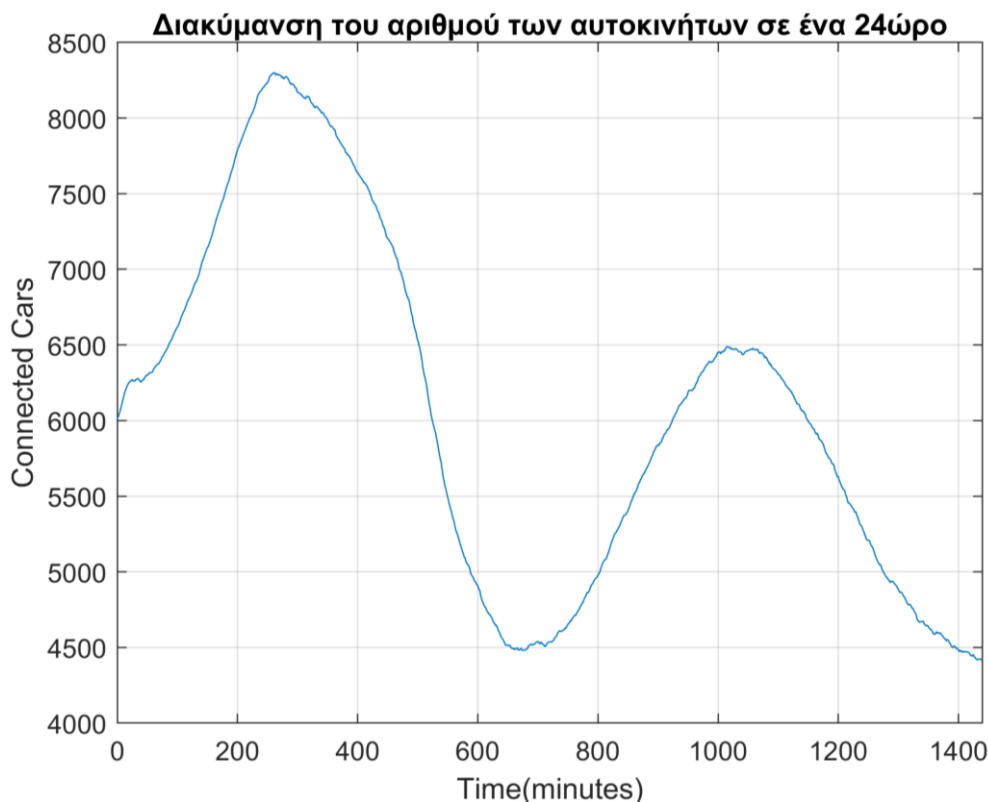


Σχήμα 5.5: Αποτελέσματα διακύμανσης της ισχύος στο ισοδύναμο μοντέλο μπαταρίας

Συγκρίνοντας το Σχήμα 5.1 με τα Σχήματα 5.4 και 5.5 παρατηρούμε ότι η στα σημεία όπου η ΟΤΣ αυξάνεται, υπάρχει μείωση στην ισχύ, ενώ στα σημεία όπου η ΟΤΣ μειώνεται η ισχύς αυξάνεται. Δηλαδή, η συνάρτηση βελτιστοποίησης που κατασκευάστηκε, φαίνεται ότι καταφέρνει να υπολογίσει τον βέλτιστο δυνατό τρόπο φόρτισης σύμφωνα με τις παραμέτρους, τους περιορισμούς και τα όρια της μπαταρίας.

Στο Σχήμα 5.4 παρουσιάζεται η διακύμανση του αριθμού των συνολικών ΗΑ στο 24ώρο σύμφωνα με τις κατανομές αφίξεων και παραμονής που χρησιμοποιήθηκαν. Όπως φαίνεται, το μεγαλύτερο πλήθος ταυτόχρονα συνδεδεμένων ΗΑ εμφανίζεται τις βραδινές ώρες, κάτι απόλυτα λογικό, καθώς τότε τα οχήματα στην πλειονότητά τους, βρίσκονται σταθμευμένα και φορτίζουν στο σπίτι.

Άλλο ένα συμπέρασμα που μπορεί να εξαχθεί, είναι ότι από το 600^ο λεπτό, όπου παρατηρείται πτώση του συνολικού αριθμού των συνδεδεμένων οχημάτων, φαίνεται αντίστοιχη πτώση στα αντίστοιχα όρια της ισχύς και του SOC.

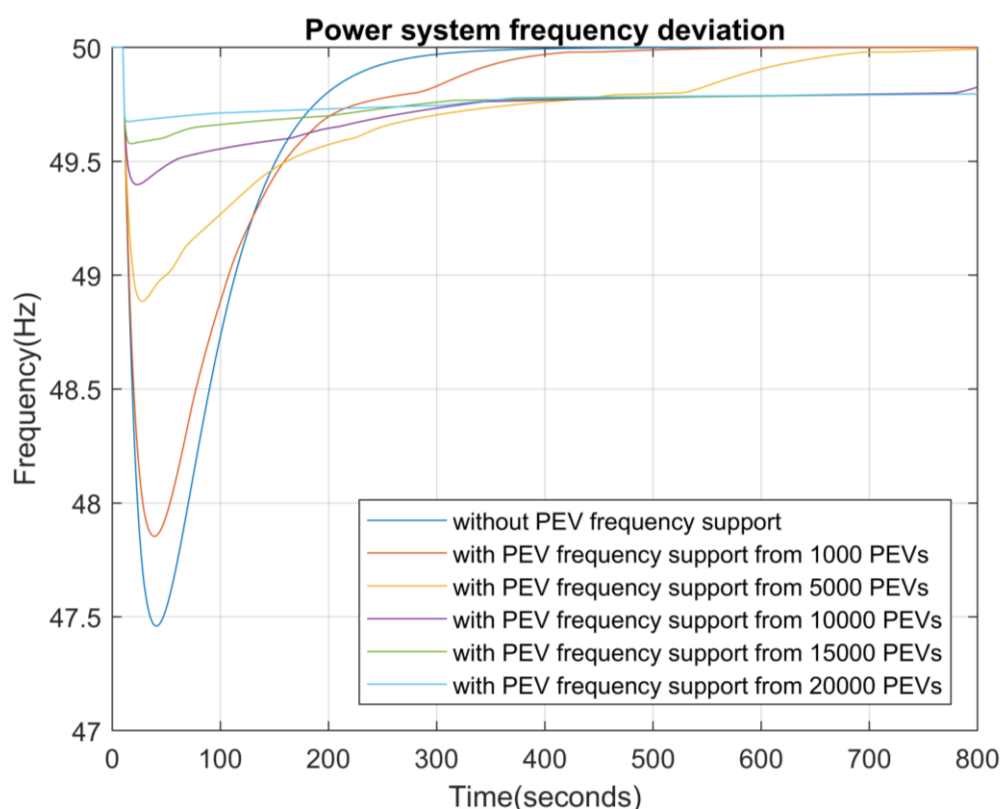


Σχήμα 5.6: Διακύμανση του συνολικού αριθμού ταυτόχρονα συνδεδεμένων ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο

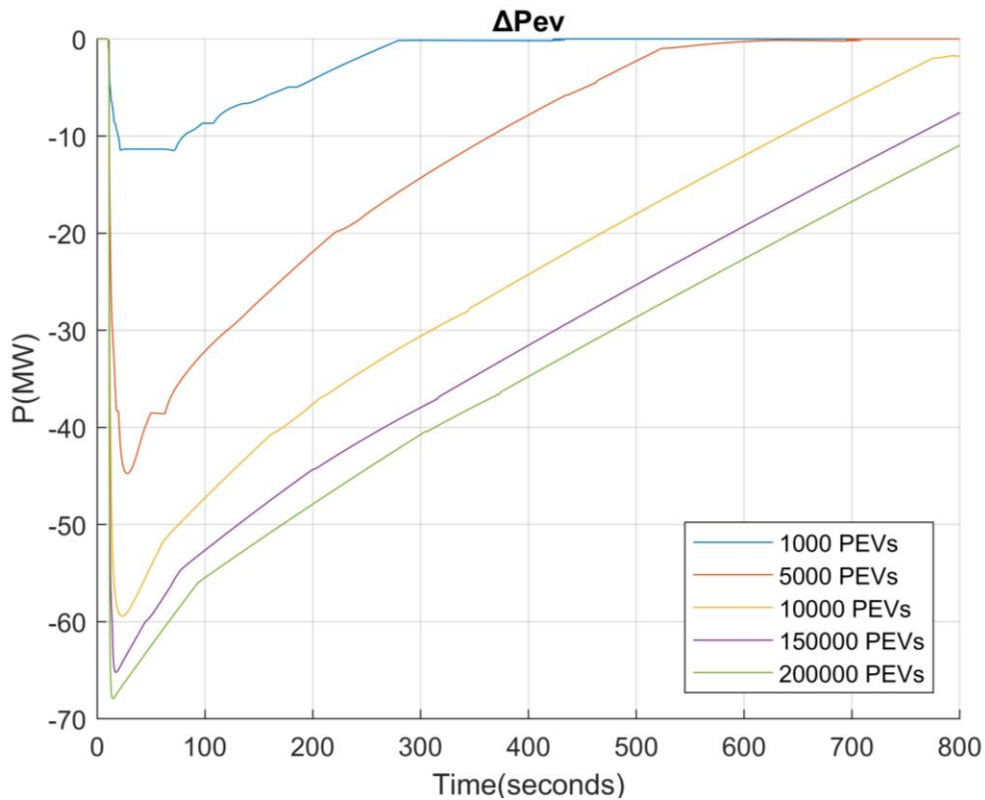
5.2 Αύξηση ηλεκτρικών οχημάτων σε σταθερή μεταβολή φορτίου

Σε αυτή την υποενότητα θα μελετήσουμε την συμπεριφορά του δικτύου σε μία απότομη αύξηση φορτίου της τάξεως των 75 MW και πως τα ηλεκτρικά οχήματα συνεισφέρουν ανάλογα με το πλήθος τους.

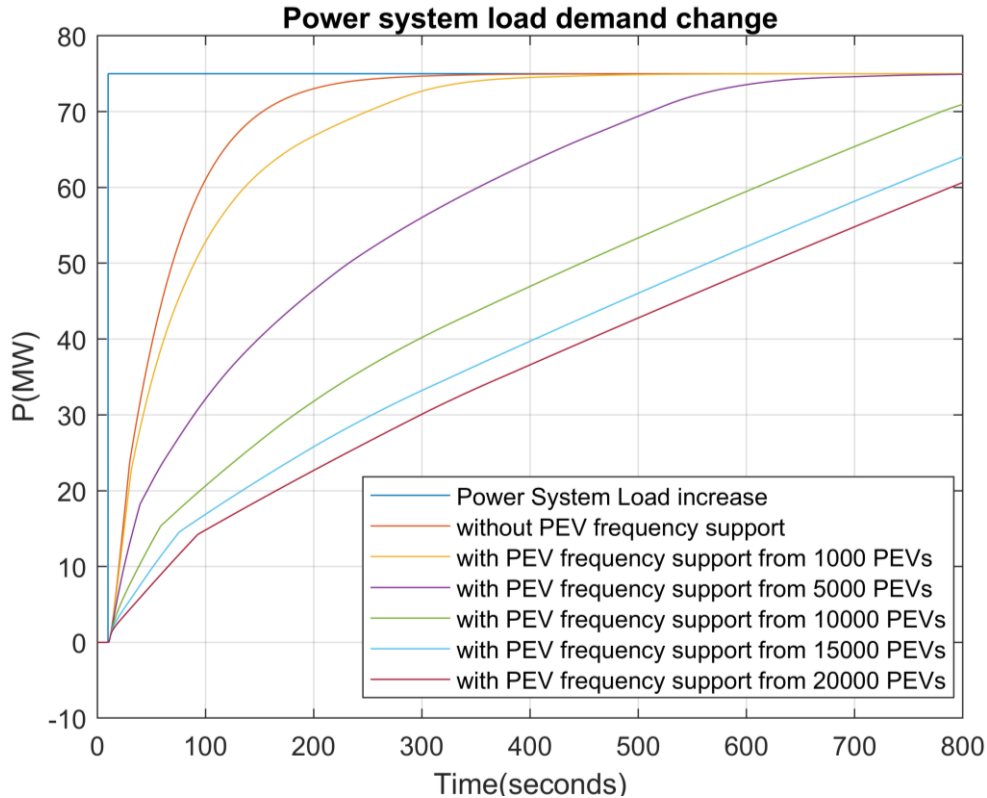
Στο Σχήμα 5.7 φαίνεται η μεταβολή της συχνότητας για την συγκεκριμένη διαταραχή. Συνήθως, για βύθιση συχνότητας κάτω από τα 47.5 Hz οι γεννήτριες αποσυνδέονται και έχουμε αποσυγχρονισμό του συστήματος. Έτσι, στην περίπτωση αυτής της διαταραχής και χωρίς στήριξη από τα ΗΑ το σύστημα θα έβγαινε εκτός λειτουργίας. Αυξάνοντας το πλήθος των ταυτόχρονα συνδεδεμένων οχημάτων από τα 1000 έως τα 20000 παρατηρούμε όπως είναι αναμενόμενο όλο και μικρότερη βύθιση στην συχνότητα. Στο Σχήμα 5.8 φαίνεται η μεταβολή της ισχύος που παρέχεται στο δίκτυο από τα ΗΑ, ανάλογα με το πλήθος τους. Σημειώνεται πως την στιγμή του σφάλματος τα ΗΑ έχουν επαρκές SOC ώστε να μην χρειαστεί να γίνει συμβιβασμός στην παρεχόμενη ισχύ.



Σχήμα 5.7: Βύθιση της συχνότητας ανάλογα με το πλήθος των ηλεκτρικών οχημάτων που συμμετέχουν στην στήριξη



Σχήμα 5.8: Μεταβολή της ισχύος που παρέχουν τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα ανάλογα με το πλήθος τους

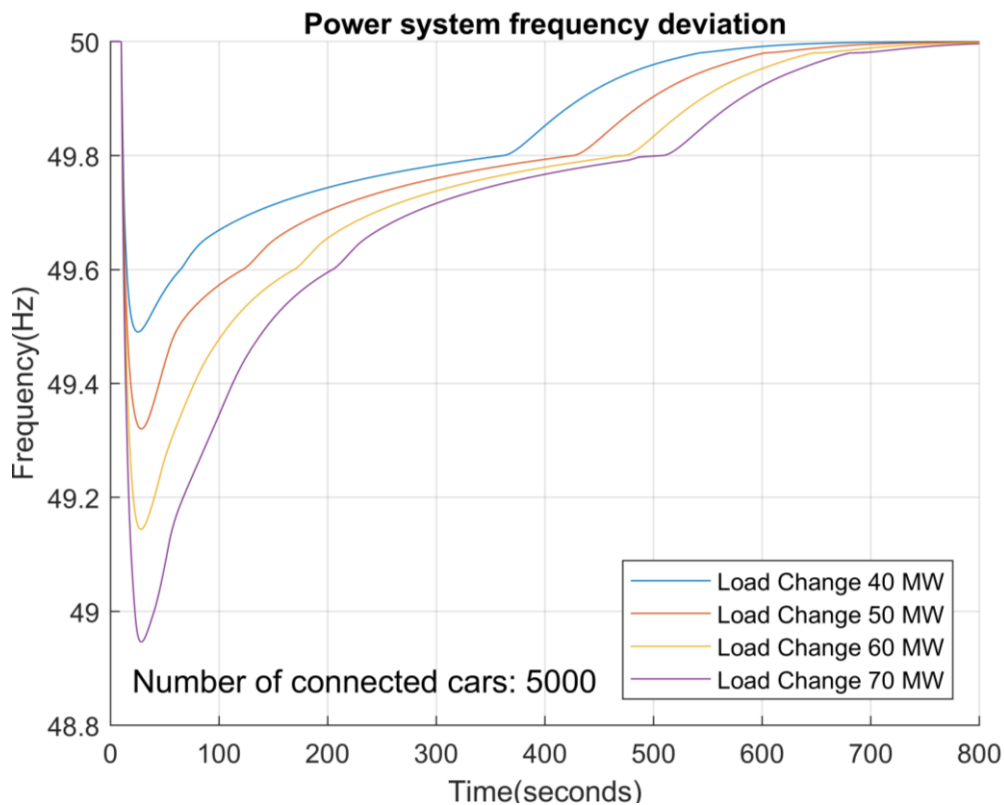


Σχήμα 5.9: Παραγωγή ισχύος από της γεννήτριες ανάλογα με το πλήθος των οχημάτων που βοηθούν

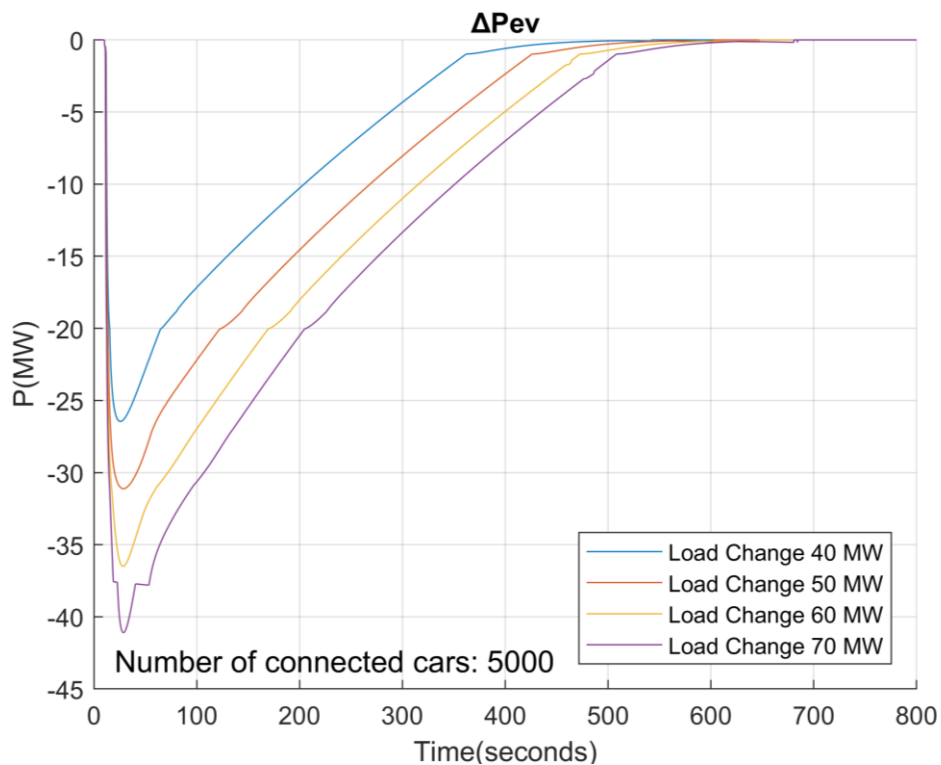
Στο Σχήμα 5.9 φαίνεται η μεταβολή της παραγωγής των γεννητριών (ΔP_g) ανάλογα με την συνεισφορά των ηλεκτρικών οχημάτων. Όσο περισσότερα οχήματα είναι συνδεδεμένα, τόσο μεγαλύτερη είναι η ισχύς που στέλνουν στο δίκτυο (Σχήμα 5.8). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, οι γεννήτριες να αυξάνουν την παραγωγή τους με ομαλότερο τρόπο, ανάλογα πάντα με το πλήθος των οχημάτων που βοηθούν.

5.3 Απόκριση σταθερού πλήθους οχημάτων ανάλογα με την μεταβολή του φορτίου

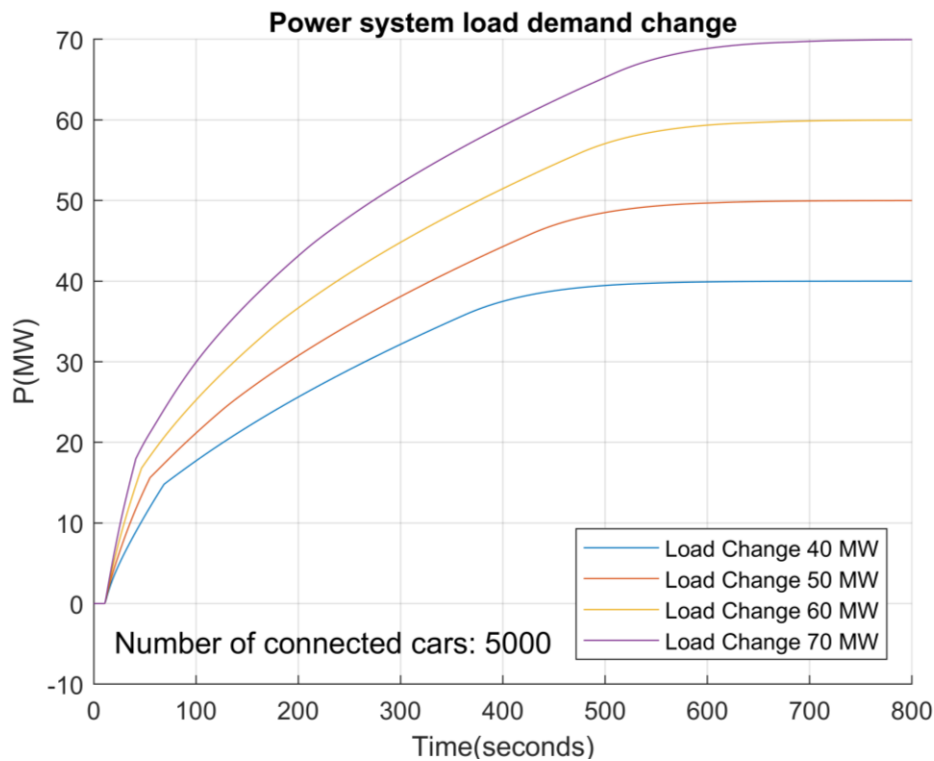
Στο Σχήμα 5.10 φαίνεται η βύθιση της συχνότητας ανάλογα με το μέγεθος της διαταραχής που συμβαίνει στο δίκτυο. Σε όλες τις περιπτώσεις διαταραχής, το πλήθος των συνδεδεμένων οχημάτων είναι σταθερό και ίσο με 5000. Αν και το πλήθος είναι σταθερό, τα ΗΑ δίνουν διαφορετική ισχύ ανάλογα με το μέγεθος της μεταβολής. Έτσι για μικρές μεταβολές που δεν επηρεάζουν την συχνότητα σημαντικά δεν υπάρχει λόγος παροχής μεγάλης βοήθειας από τα ΗΑ. Έχει οριστεί ότι η μέγιστη διαθέσιμη ισχύς (λαμβάνοντας υπόψη και τα όρια του SOC) θα παρέχετε στο δίκτυο από τα ΗΑ, όταν η μεταβολή της συχνότητας Δf ξεπεράσει τα ± 2 Hz. Αυτή η λειτουργία φαίνεται πιο ξεκάθαρα στο Σχήμα 5.11. Όσο μεγαλύτερη είναι η διαταραχή τόσο περισσότερο αντιδράει το σύστημα των ηλεκτρικών οχημάτων δίνοντας όλο και μεγαλύτερη ισχύ. Τέλος, στο Σχήμα 5.12 παρατηρούμε, όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, την αύξηση της παραγωγής της ισχύος ανάλογα με το μέγεθος της μεταβολής του φορτίου.



Σχήμα 5.10: Βύθιση της συχνότητας σε διαφορετικές μεταβολές φορτίου, με την βοήθεια σταθερού αριθμού συνδεδεμένων οχημάτων



Σχήμα 5.11: Μεταβολή της ισχύος που παρέχουν τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα ανάλογα με το μέγεθος της διαταραχής

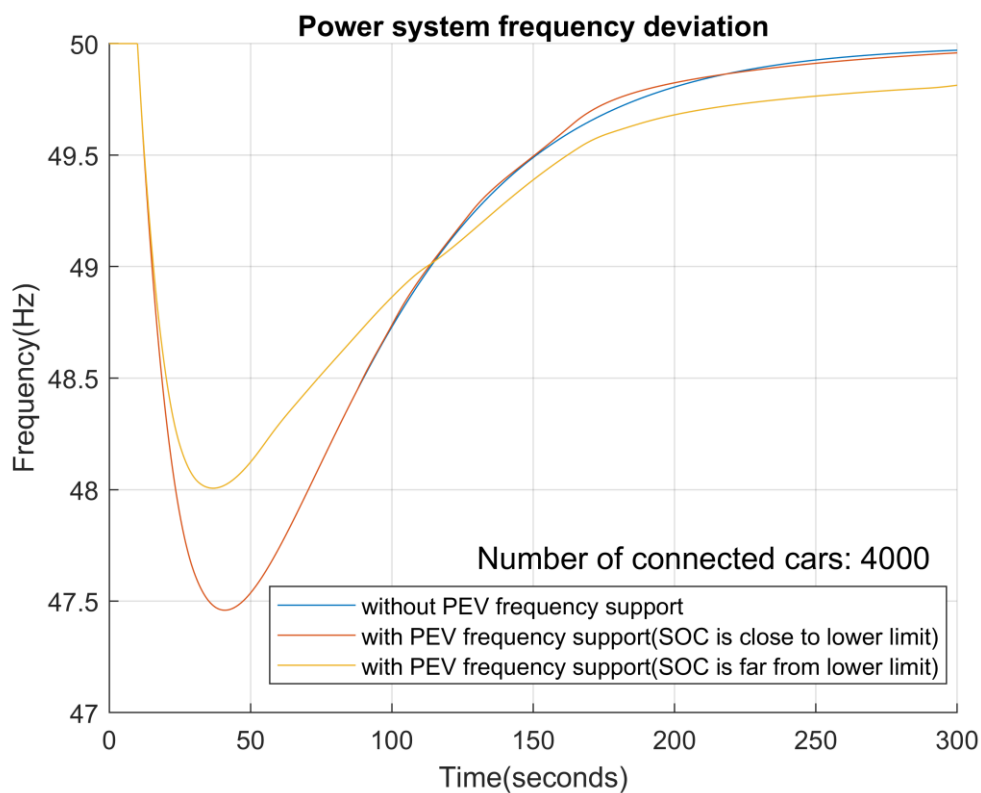


Σχήμα 5.12: Παραγωγή ισχύος από τις γεννήτριες ανάλογα με το μέγεθος της διαταραχής

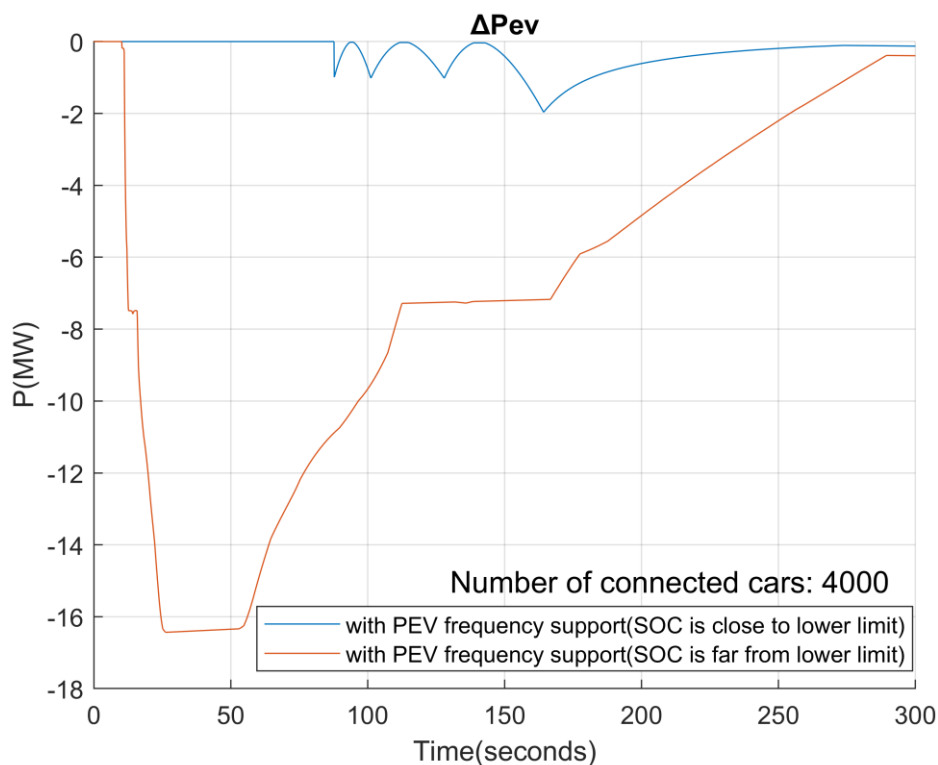
5.4 Απόκριση σταθερού πλήθους οχημάτων ανάλογα με το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας

Όπως έχει αναφερθεί ήδη, εκτός από την απόκλιση της συχνότητας από την ονομαστική τιμή, εξίσου σημαντικό ρόλο παίζει και η απόσταση του SOC από τα άνω και κάτω όρια της μπαταρίας. Για την συγκεκριμένη προσομοίωση χρησιμοποιήθηκαν 4000 ηλεκτρικά αυτοκίνητα για την στήριξη συχνότητας σε μία διαταραχή των 75 MW. Στην πρώτη περίπτωση το SOC είναι πολύ κοντά στο κατώτατο όριο (SOC_{low}) ενώ στην δεύτερη βρίσκεται μακριά από αυτό. Στην συγκεκριμένη περίπτωση σημασία έχει το κάτω όριο διότι κατά την απότομη αύξηση του φορτίου τα ΗΑ θα χρειαστεί να δώσουν ισχύ προς το δίκτυο μειώνοντας έτσι την στάθμη του SOC. Στο Σχήμα 5.13 παρατηρούμε ότι παρόλο που και στις δύο περιπτώσεις έχουμε την ίδια δυναμική σε ισχύ, (ίδιος αριθμός ηλεκτρικών οχημάτων) στην πρώτη περίπτωση πρακτικά δεν υπάρχει καμία στήριξη συχνότητας. Αυτό συμβαίνει διότι το SOC είναι πολύ κοντά στο κατώτατο όριο με αποτέλεσμα ο fuzzy ελεγκτής να μειώνει κατά πολύ την παρεχόμενη ισχύ των ηλεκτρικών οχημάτων.

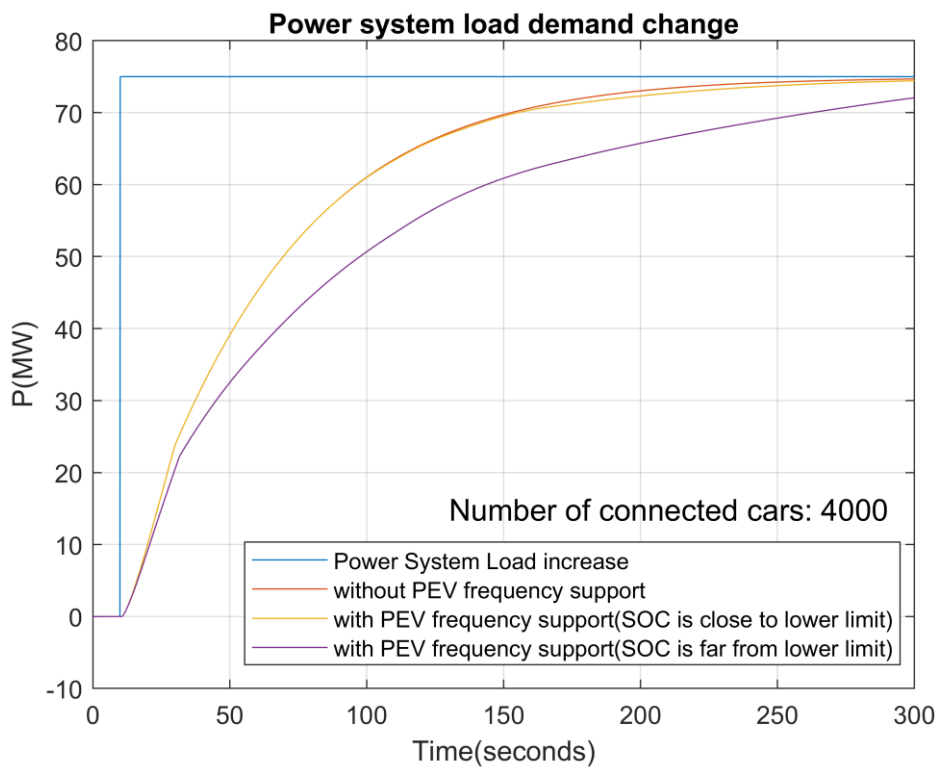
Στο Σχήμα 5.14 φαίνεται ότι όταν το SOC βρίσκεται πολύ στο SOC_{low} , μεταφέρει μηδενική ισχύ. Στην συνέχεια όταν απομακρυνθεί λίγο, μεταφέρει κάποια ποσότητα ισχύος στο δίκτυο οπότε η στάθμη πέφτει και πλησιάζει πάλι στο SOC_{low} , έτσι η ισχύς μηδενίζεται ξανά κ.ο.κ. Αυτός είναι ο λόγος που παρατηρείται αυτή η ταλάντωση στην πρώτη περίπτωση σε αντίθεση με την δεύτερη όπου η ισχύς μεταφέρεται ελεύθερα χωρίς περιορισμό από το SOC. Τέλος στο Σχήμα 5.15, όπου απεικονίζεται η παραγωγή ισχύος των γεννητριών, φαίνεται πάλι η πολύ μικρή βοήθεια των ΗΑ στην πρώτη περίπτωση σε σχέση με την δεύτερη.



Σχήμα 5.13: Βύθιση της συχνότητας ανάλογα με την ικανότητα στήριξης των ηλεκτρικών αυτοκινήτων, που εξαρτάται από την στάθμη του SOC



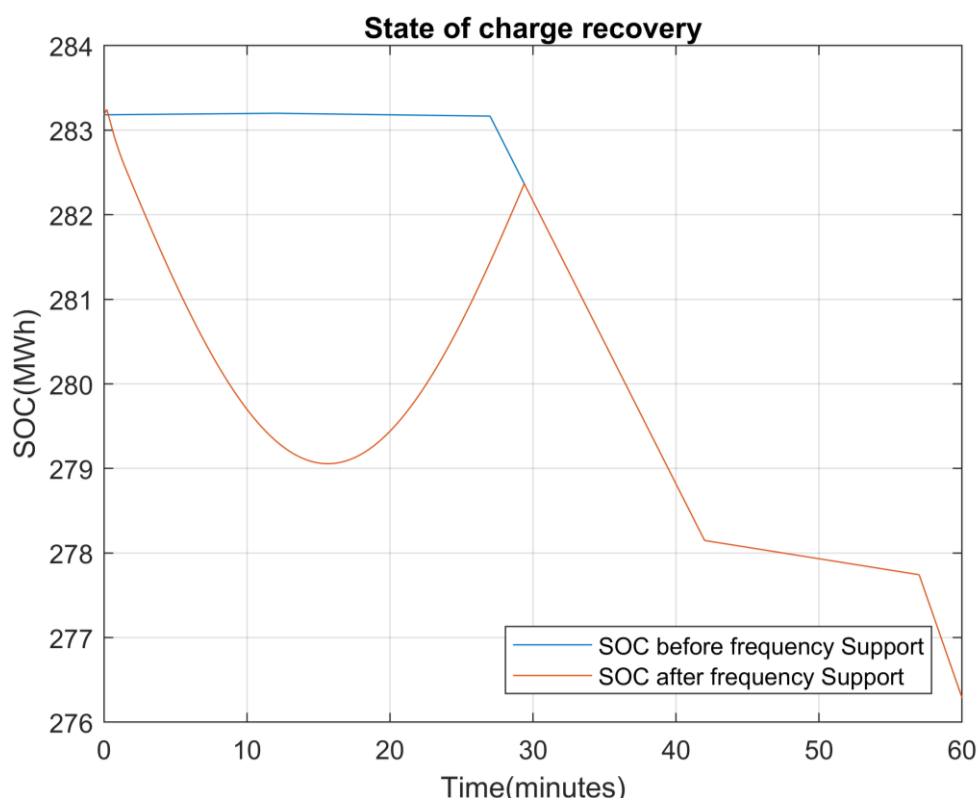
Σχήμα 5.14: Μεταβολή της ισχύος που παρέχουν τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα ανάλογα με την στάθμη του SOC



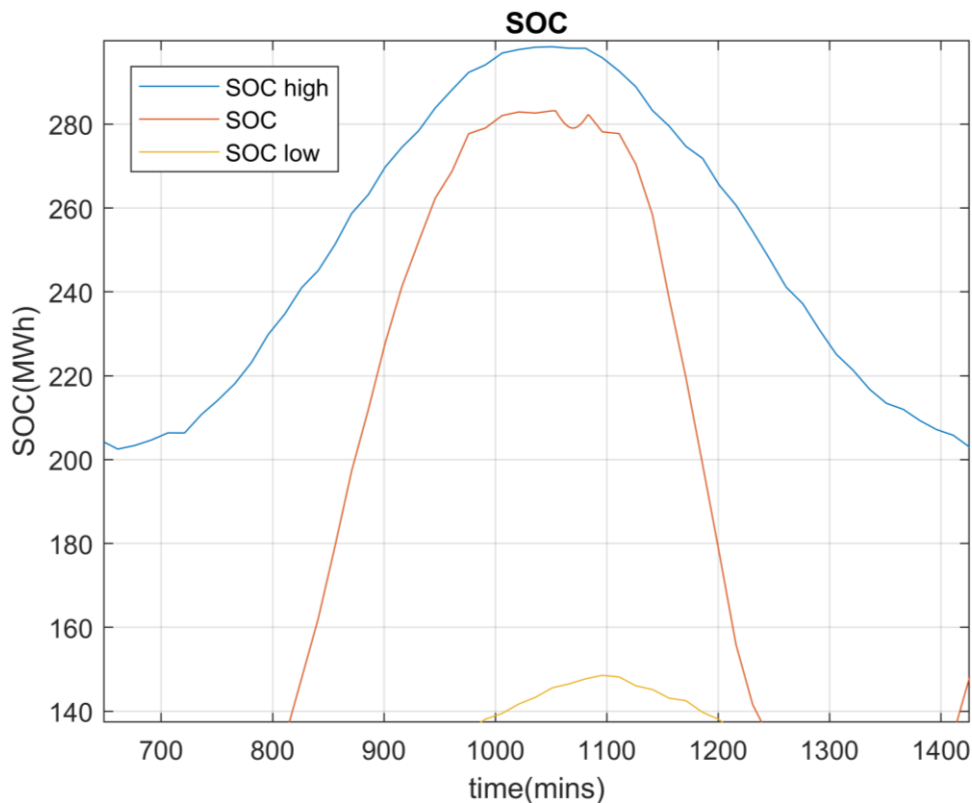
Σχήμα 5.15: Παραγωγή ισχύος από τις γεννήτριες ανάλογα με την βοήθεια στήριξης από τα ηλεκτρικά οχήματα

5.5 Επαναφορά του επιπέδου φόρτισης της μπαταρίας μετά την στήριξη συχνότητας

Η παροχή ισχύος από τα ηλεκτρικά οχήματα στο δίκτυο, έχει ως αποτέλεσμα την μείωση του συνολικού SOC. Όταν τελειώσει η στήριξη θα πρέπει το SOC να επανέλθει στις προηγούμενες τιμές του ακολουθώντας την προϋπολογισμένη τροχιά που προέκυψε από την συνάρτηση βελτιστοποίησης. Έτσι με την βοήθεια ενός I ελεγκτή, που αθροίζει το συνολικό σφάλμα, αυξάνεται σταδιακά η ισχύς που απορροφούν τα ΗΑ επαναφέροντας το SOC στις προηγούμενες τιμές του. Η επαναφορά του, γίνεται σε βάθος μισής ή μίας ώρας έτσι ώστε να μην υπάρχουν απότομες διαταραχές στο δίκτυο λόγω των γρήγορων αυξομειώσεων της ισχύος. Στο Σχήμα 5.16 φαίνεται η επαναφορά του SOC με τον τρόπο που περιεγράφηκε παραπάνω, για ένα σφάλμα το λεπτό 1054. Στο Σχήμα 5.17 φαίνεται επίσης η επαναφορά του SOC μαζί με το άνω και κάτω όριο στην μεγεθυμένη εικόνα της συνολικής διακύμανσης.



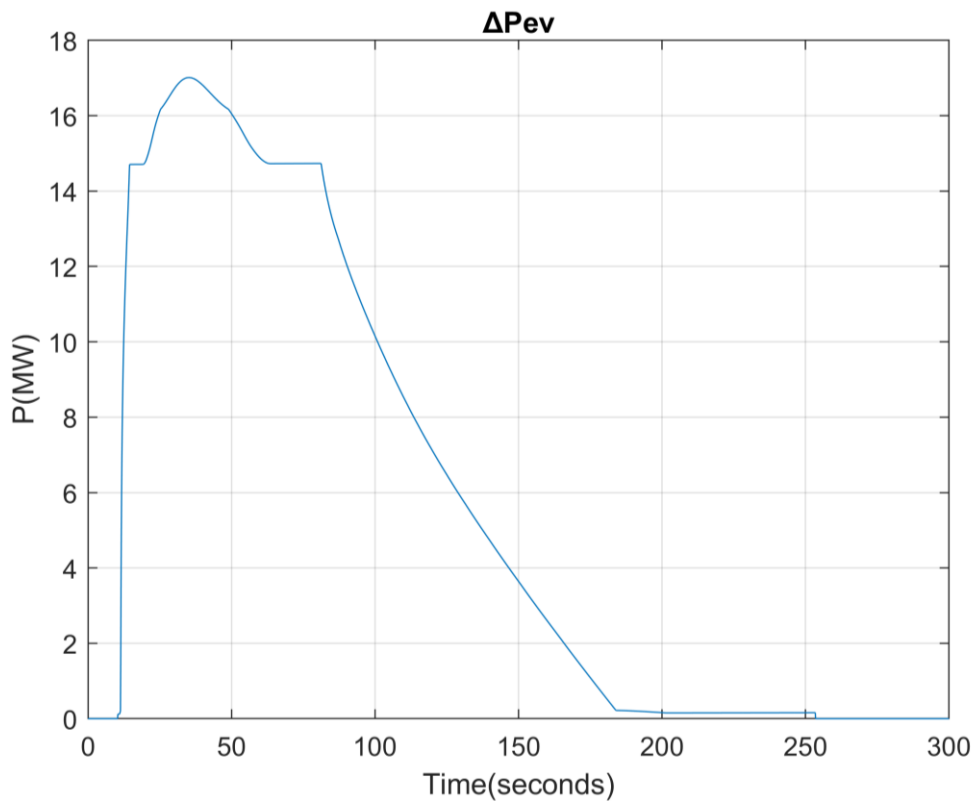
Σχήμα 5.16: SOC πριν και μετά την στήριξη συχνότητας από τα ηλεκτρικά οχήματα



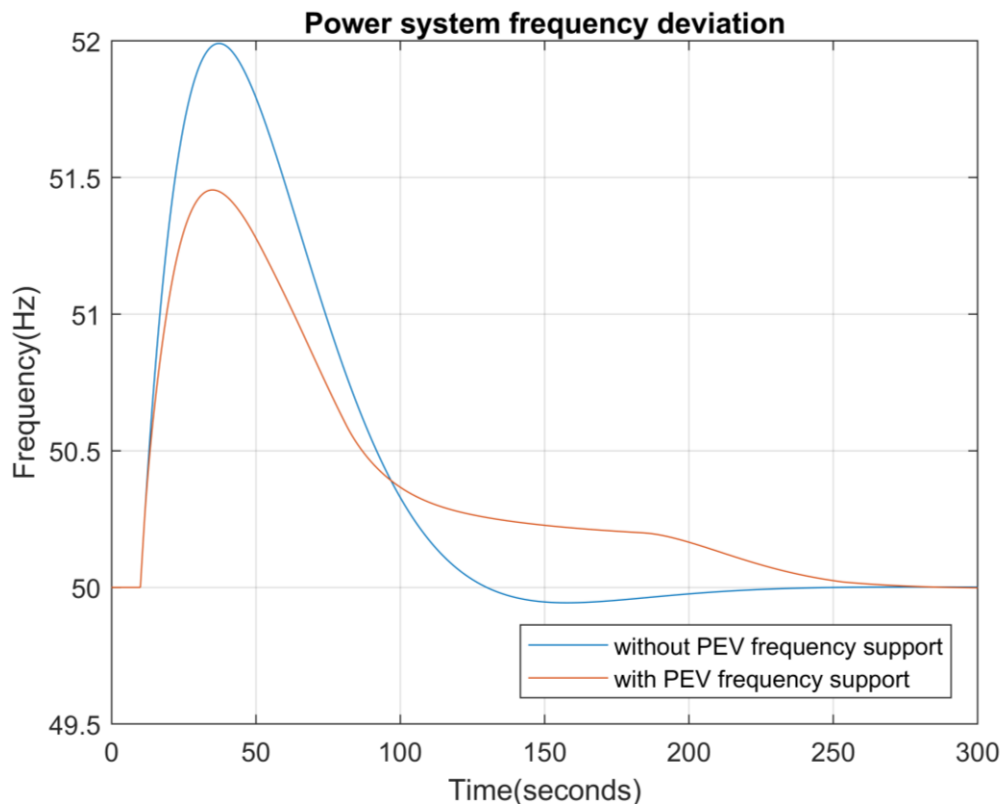
Σχήμα 5.17: Διακύμανση του SOC μετά την στήριξη συχνότητας

5.6 Απόκριση ηλεκτρικών οχημάτων σε μείωση φορτίου

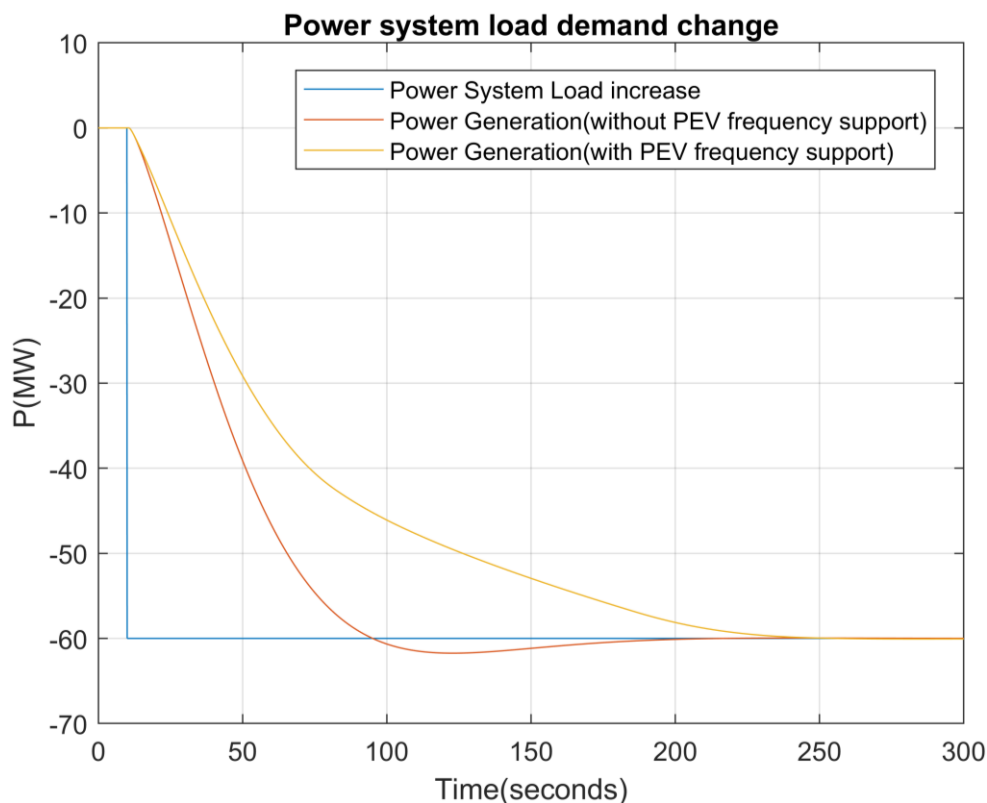
Στην συγκεκριμένη υποεννότητα θα παρουσιάσουμε την απόκριση των ηλεκτρικών οχημάτων σε μία απότομη μείωση φορτίου. Επειδή σε μία μείωση φορτίου απαιτείται αύξηση της ισχύος των ηλεκτρικών οχημάτων για να απορροφήσουν ένα μέρος της διαταραχής, επιλέγεται το σφάλμα να γίνει την στιγμή 750 λεπτά (12,5 ώρες), όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.5, έτσι ώστε να υπάρχει περιθώριο για αύξηση της ισχύος. Εφαρμόζοντας λοιπόν μία απότομη μείωση φορτίου της τάξεως των 60 MW, τα ηλεκτρικά οχήματα αντιδρούν αυξάνοντας την κατανάλωση ισχύος, απορροφώντας με αυτό τον τρόπο ισχύ από το δίκτυο (Σχήμα 5.18). Στο Σχήμα 5.19 φαίνεται η ανύψωση της συχνότητας και το πως περιορίζεται στην περίπτωση που συμμετέχουν τα ΗΑ, ενώ στο Σχήμα 5.20 φαίνεται η μείωση της παραγόμενης ισχύος των γεννητριών. Σημειώνεται ότι την στιγμή της διαταραχής, στο δίκτυο ήταν συνδεδεμένα 4300 οχήματα.



Σχήμα 5.18: Αύξηση της ισχύος που απορροφούν τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα



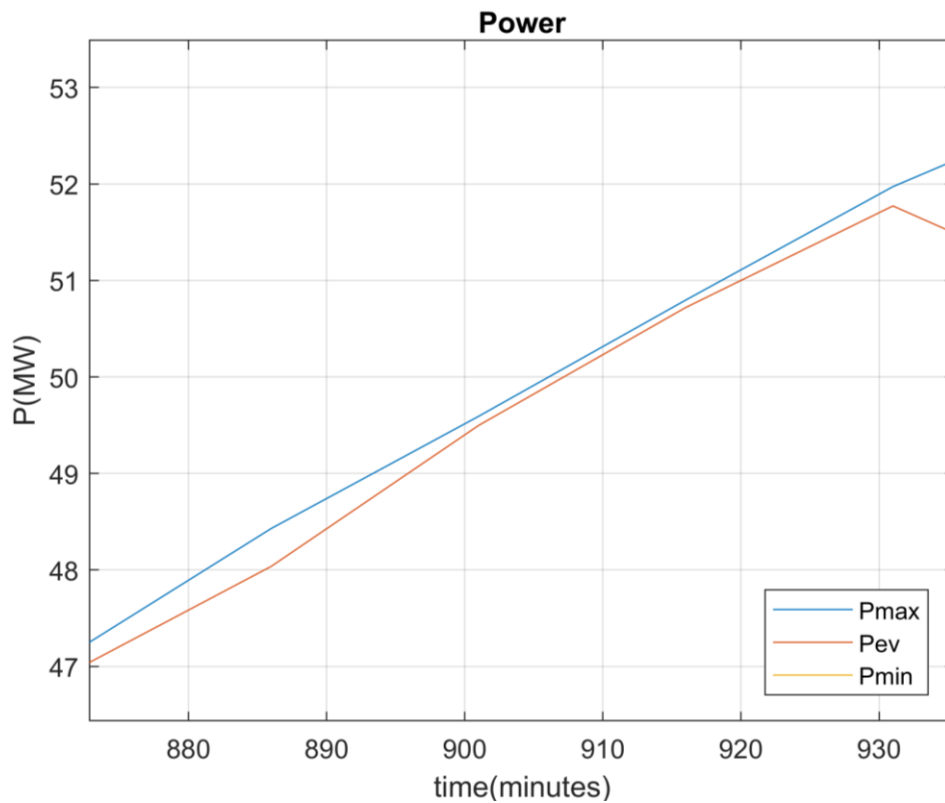
Σχήμα 5.19: Αύξηση της συχνότητας με και χωρίς την βοήθεια των ηλεκτρικών οχημάτων



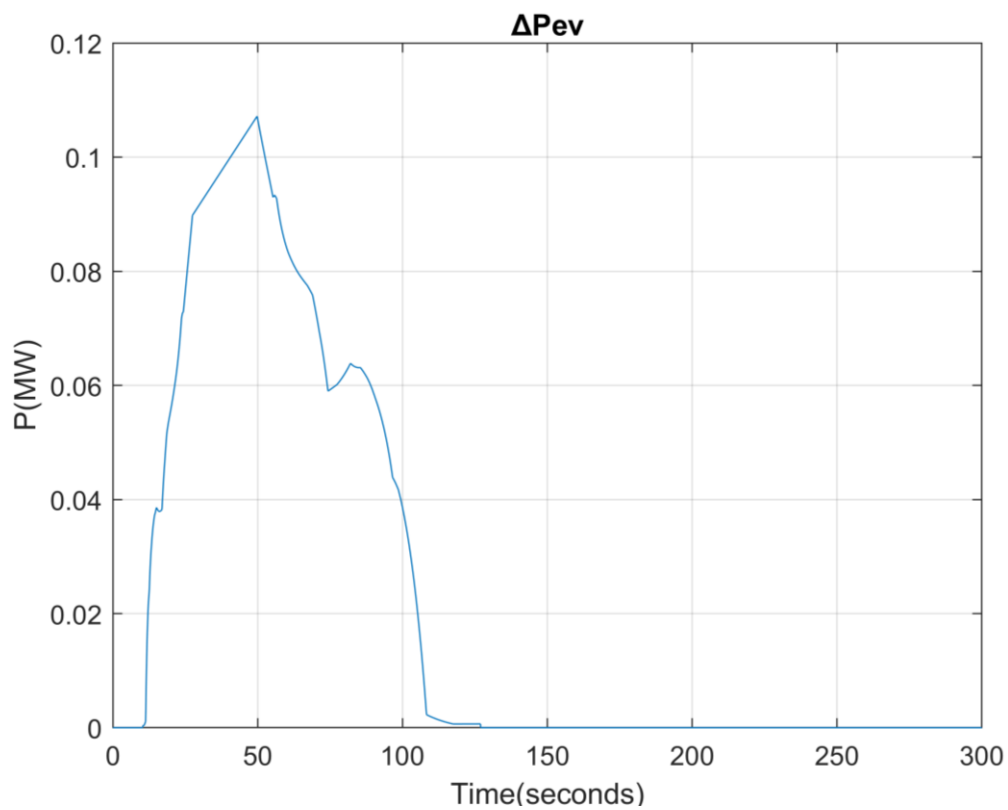
Σχήμα 5.20: Μείωση της παραγωγής των γεννητριών με και χωρίς την βοήθεια των ηλεκτρικών οχημάτων

5.7 Απόκριση ηλεκτρικών οχημάτων σε ανεπάρκεια ισχύος

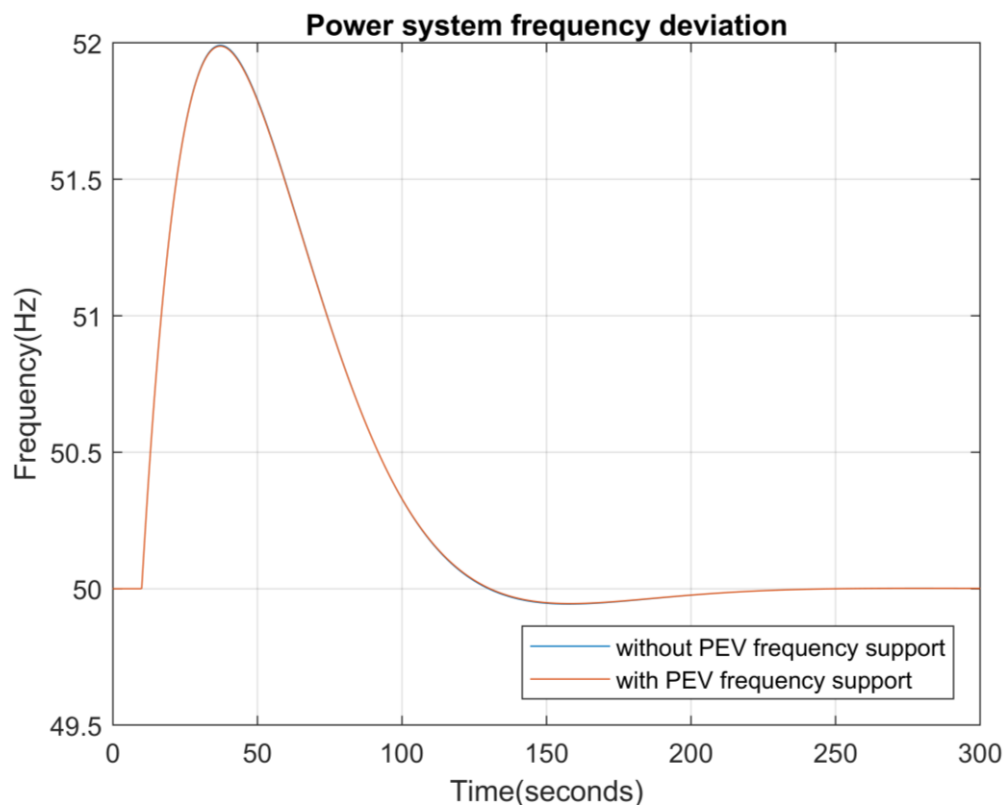
Στην προηγούμενη περίπτωση, αν αλλάξουμε την στιγμή της διαταραχής από το 750^ο λεπτό, στο 900^ο λεπτό (15^η ώρα), όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.21 (μεγέθυνση του Σχήματος 5.5), η ισχύς που απορροφούν τα ΗΑ είναι ήδη μέγιστη. Έτσι, σε μία μείωση φορτίου 60 MW τα ΗΑ δεν μπορούν να απορροφήσουν παραπάνω ισχύ. Στο Σχήμα 5.22 φαίνεται ότι κατά την προσπάθεια στήριξης, η μέγιστη ισχύ που μπορεί να δώσει φτάνει μόλις τα 107 kW. Με τόσο λίγη ισχύ, υπάρχει ελάχιστη έως μηδαμινή στήριξη συχνότητας (Σχήμα 5.23).



Σχήμα 5.21: Η ισχύς των ηλεκτρικών οχημάτων την στιγμή του σφάλματος (900^ο λεπτό)



Σχήμα 5.22: Μικρή αύξηση της ισχύος που απορροφούν τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα από το δίκτυο

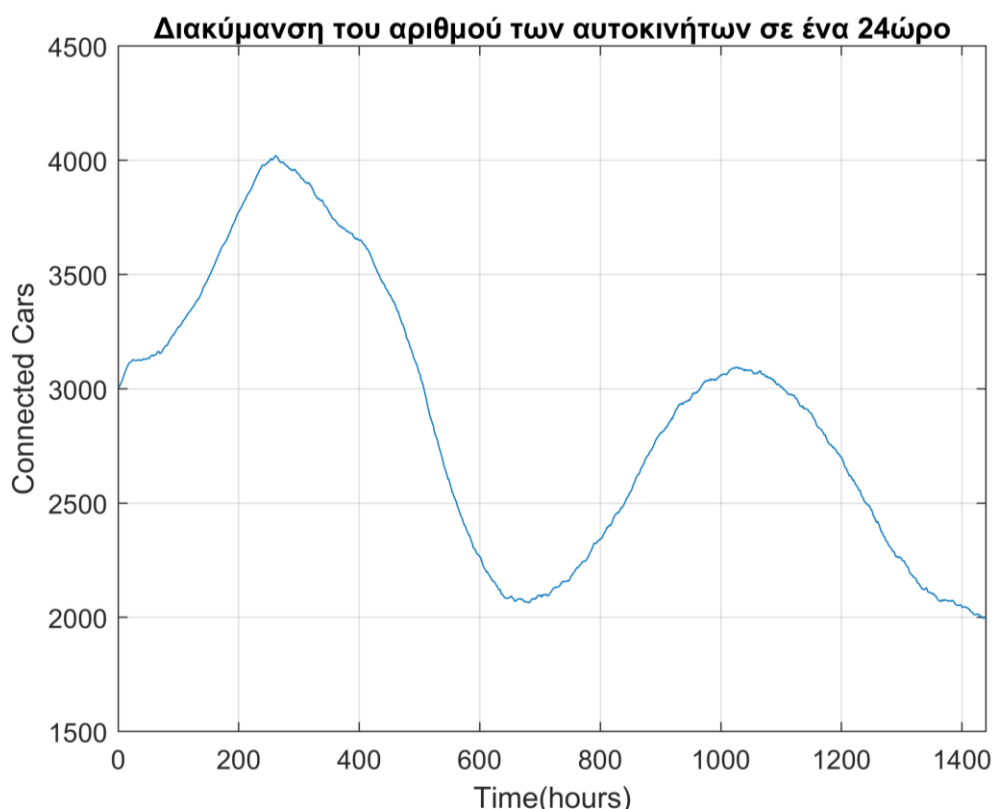


Σχήμα 5.23: Αύξηση της συχνότητας με και χωρίς την βοήθεια των ηλεκτρικών οχημάτων (μηδενική στήριξη συχνότητας)

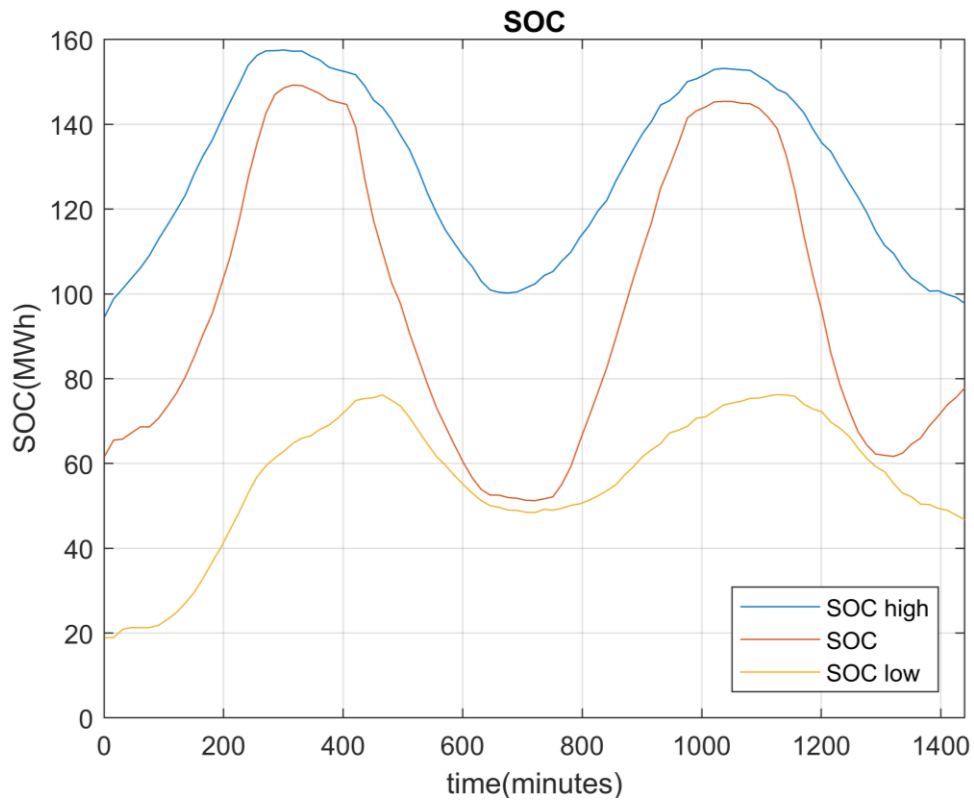
5.8 Απόκριση Ηλεκτρικών Οχημάτων σε περιπτώσεις υπερύψωσης συχνότητας

Στο παράδειγμα της Κρήτης, λόγω των συγκεκριμένων τιμών των γεννητριών και του σημείου λειτουργίας, δεν υπήρχε overshoot της συχνότητας. Επειδή όμως έχει ενδιαφέρον να παρουσιάσουμε τι γίνεται σε τέτοιες περιπτώσεις μοντελοποιήθηκε ένα διαφορετικό ΣΗΕ όπου στην προσπάθεια στήριξης της συχνότητας χωρίς την βοήθεια των ΗΑ, δημιουργείται overshoot.

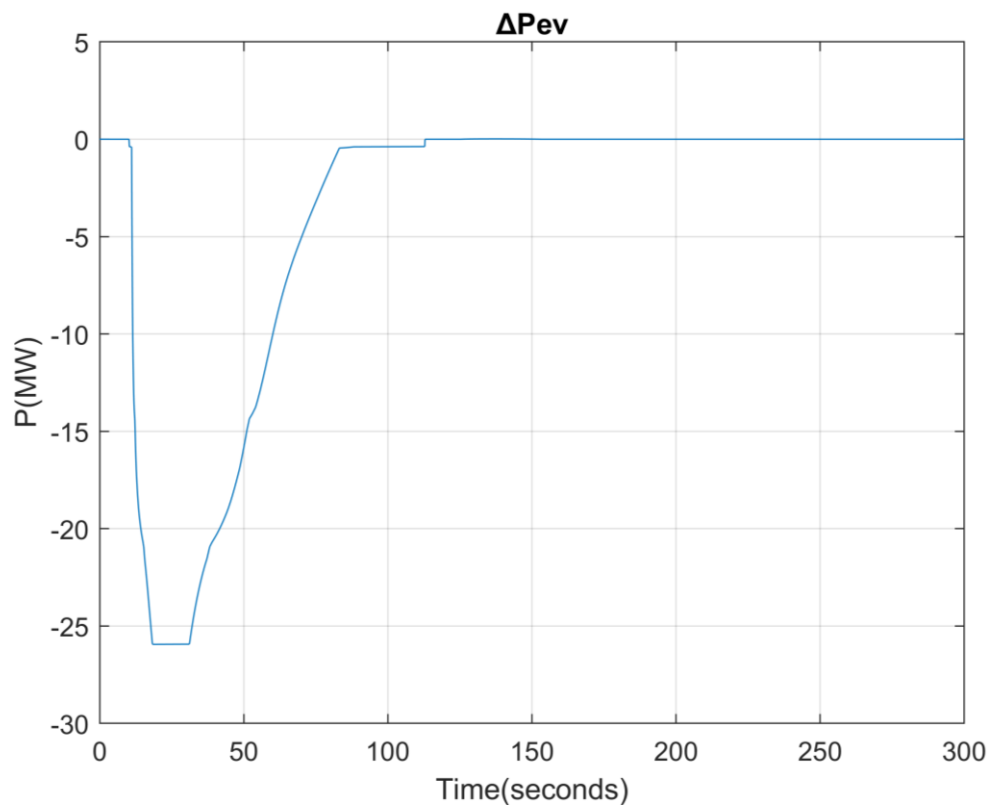
Για τις παρακάτω προσομοιώσεις χρησιμοποιήθηκε ένα σύστημα με συνολικά 10000 ηλεκτρικά οχήματα. Το Σχήμα 5.24 δείχνει τον αριθμό των συνδεδεμένων οχημάτων κάθε στιγμή στο 24ωρο. Η διακύμανση του SOC φαίνεται στο Σχήμα 5.25. Αν συμβεί μία αύξηση φορτίου το λεπτό 900, υπάρχει πολύ μεγάλο περιθώριο για μείωση του SOC. Έτσι, τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα δίνουν όση ισχύ μπορούν στο δίκτυο (Σχήμα 5.26) εξαλείφοντας το overshoot της συχνότητας (Σχήμα 5.27) και της παραγωγής ισχύος των γεννητριών (Σχήμα 5.28)



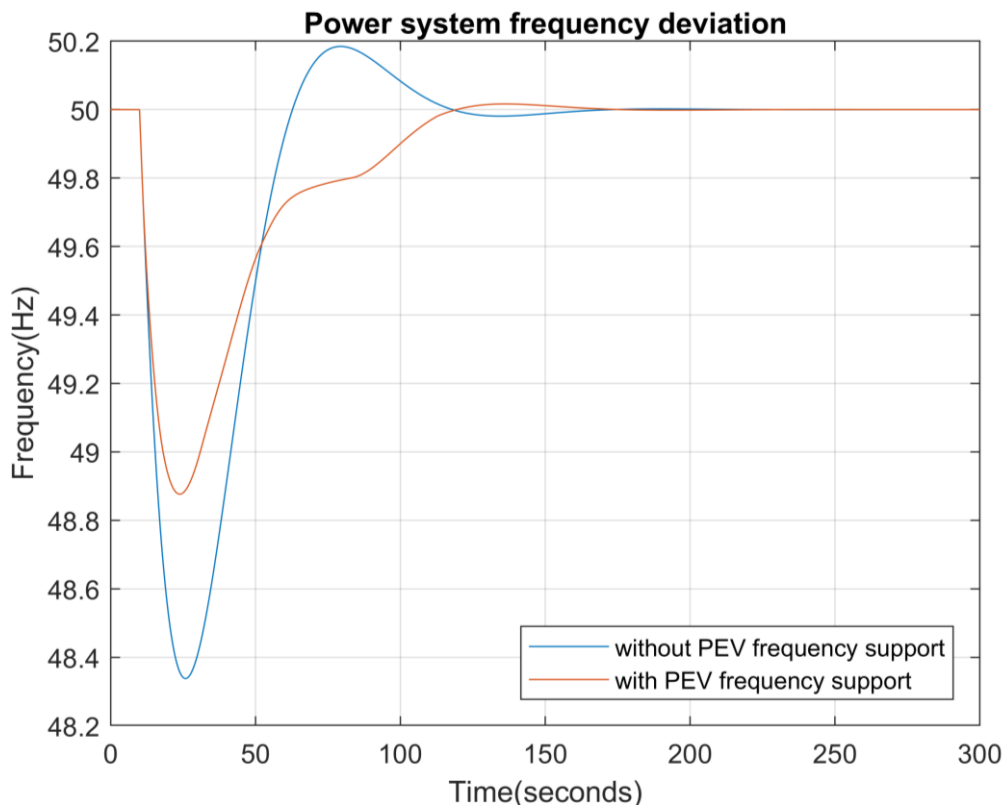
Σχήμα 5.24: Διακύμανση του συνολικού αριθμού ταυτόχρονα συνδεδεμένων ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο



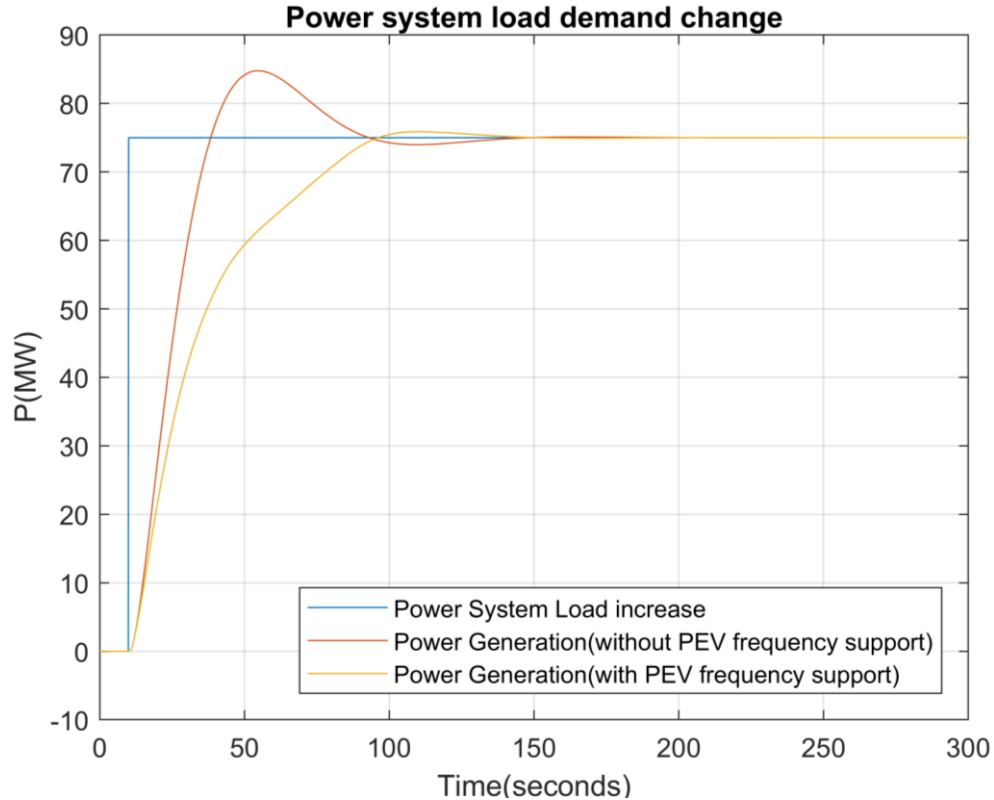
Σχήμα 5.25: Διακύμανση του SOC στο ισοδύναμο μοντέλο μπαταρίας



Σχήμα 5.26: Μεταβολή της ισχύος που παρέχουν τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα



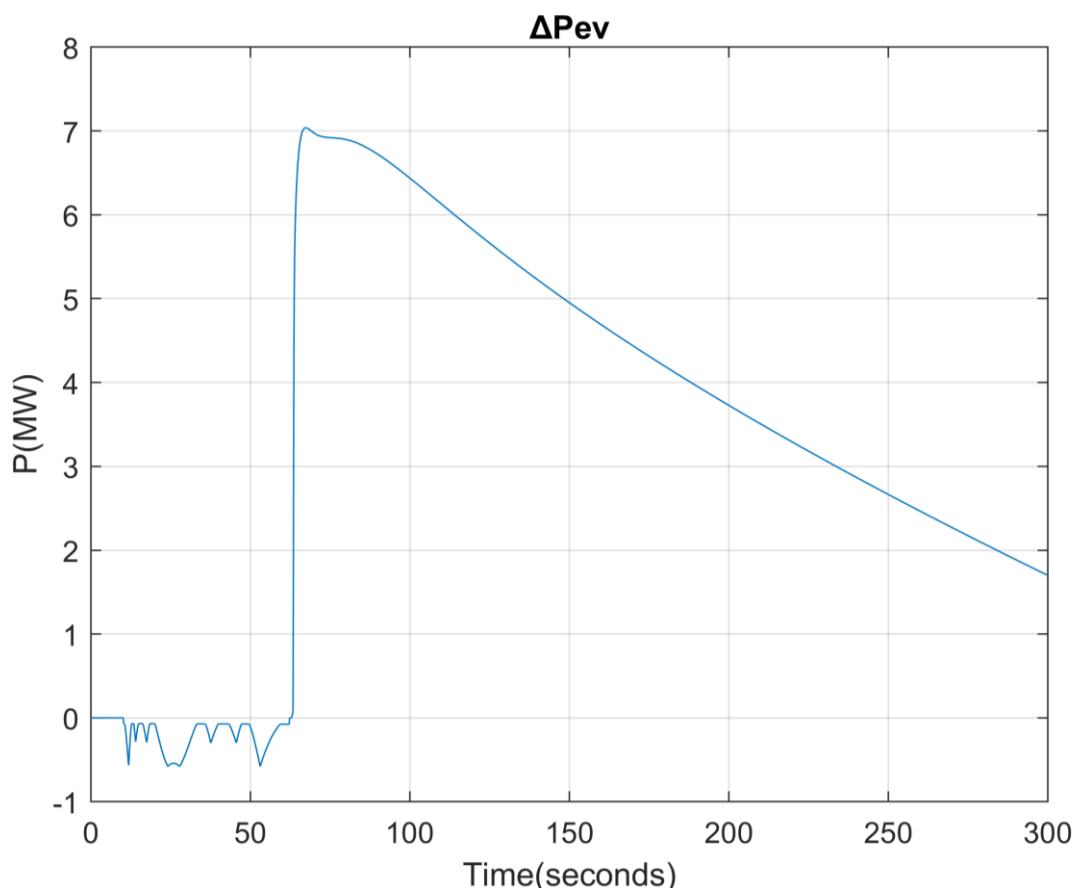
Σχήμα 5.27: Βύθιση της συχνότητας με και χωρίς την στήριξη των ηλεκτρικών οχημάτων



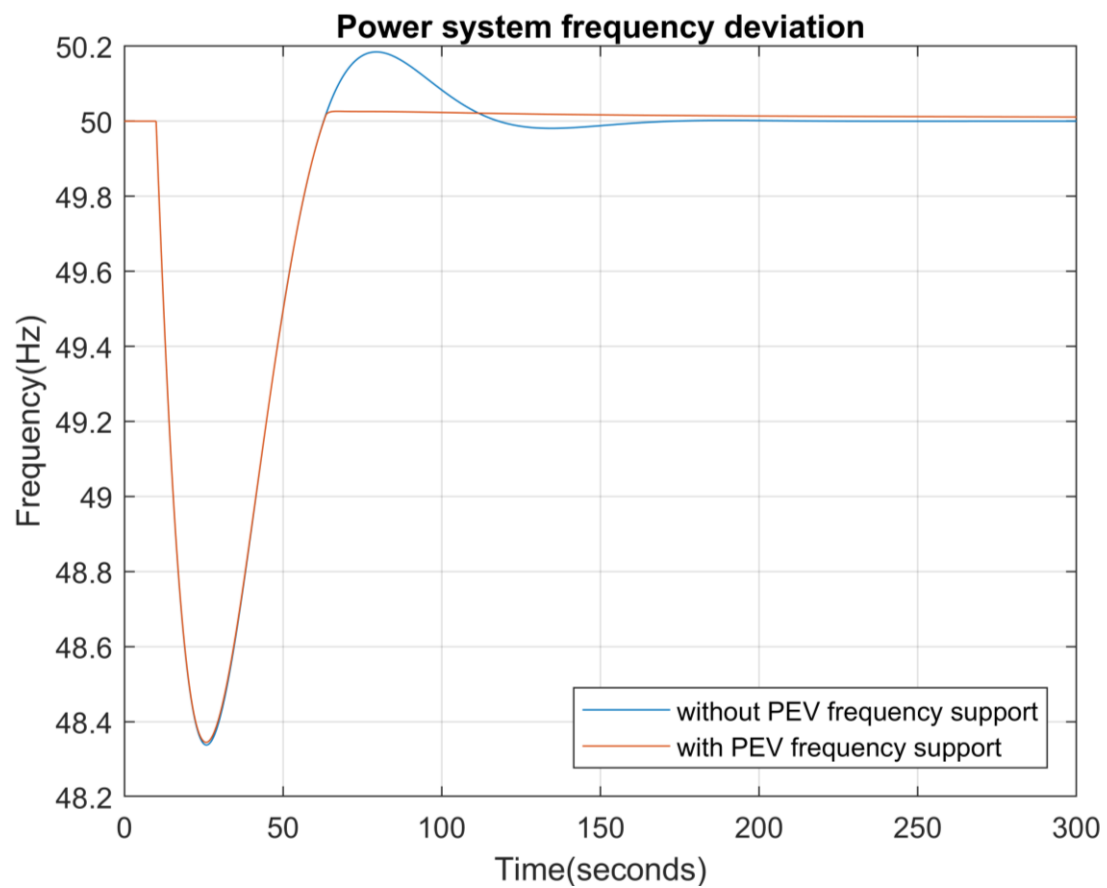
Σχήμα 5.28: Αύξηση της παραγόμενης ισχύος με και χωρίς την στήριξη των ηλεκτρικών οχημάτων

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.25, για μία διαταραχή το λεπτό 650, το SOC βρίσκεται πολύ κοντά στο κάτω όριο. Αυτό σημαίνει ότι κατά την βύθιση της συχνότητας δεν μπορεί να δοθεί επαρκής ποσότητα ισχύος στο δίκτυο. Κατά την διάρκεια όμως που υπάρχει υπερύψωση της συχνότητας, απαιτείται αύξηση της απορρόφησης ισχύος από τα ηλεκτρικά οχήματα τα οποία μπορούν να ανταποκριθούν.

Για το συγκεκριμένο παράδειγμα έχει επιλεγθεί, όπως και προηγουμένως, ως τιμή για μέγιστη παροχή ισχύος η βύθιση συχνότητας κατά 2 Hz. Στην περίπτωση όμως της ανύψωσης συχνότητας, έχει τεθεί η τιμή 0.1 Hz. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι σε ανύψωση συχνότητας μεγαλύτερη του 0.1 Hz τα ΗΑ απορροφούν την μέγιστη ισχύ που μπορούν να απορροφήσουν, περιορίζοντας αισθητά με αυτό τον τρόπο, ακόμα και ένα μικρό overshoot. Στο Σχήμα 5.29 φαίνεται η αδυναμία παροχής ισχύος κατά την βύθιση συχνότητας και η μεγάλη απορρόφηση κατά την ανύψωσή της. Δηλαδή, αν και η βύθιση της συχνότητας δεν μπορεί να ελαττωθεί, η ανύψωση (overshoot) εξαλείφεται σχεδόν ολοκληρωτικά (Σχήμα 5.30).



Σχήμα 5.29: Μεταβολή της ισχύος που παρέχουν τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα



Σχήμα 5.30: Βύθιση της συχνότητας με και χωρίς την στήριξη των ηλεκτρικών οχημάτων

6. Συμπεράσματα-Προτάσεις

6.1 Συνολική ανασκόπηση της διπλωματικής εργασίας

Στην παρούσα διπλωματική προσομοιώθηκε η λειτουργία ενός συστήματος στήριξης συχνότητας, με την βοήθεια ηλεκτρικών οχημάτων, για το ηλεκτρικό δίκτυο της Κρήτης. Η μοντελοποίηση και η προσομοίωση υλοποιήθηκαν εξ' ολοκλήρου στο λογισμικό MATLAB. Με βάση την ιστοσελίδα του ΑΔΜΗΕ χρησιμοποιήθηκαν πραγματικές τιμές, για το σύστημα της Κρήτης, ως προς το πλήθος και το είδος των γεννητριών, τα τεχνικά τους χαρακτηριστικά, τα σημεία λειτουργίας κ.α. Ρεαλιστικά δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν επίσης και στις κατανομές αφίξεων και παραμονής των οχημάτων σε διαφορετικούς προορισμούς, καθώς και στα τεχνικά χαρακτηριστικά των μπαταριών. Με αυτό τον τρόπο, το μοντέλο που αναπτύχθηκε είναι ικανό να κάνει μία πολύ ρεαλιστική πρόβλεψη στήριξης συχνότητας, βασιζόμενο σε πραγματικά δεδομένα.

Αρχικά, μοντελοποιήθηκε η συμπεριφορά των ΗΑ στην διάρκεια ενός 24ωρου. Έγινε δηλαδή, η προσομοίωση των αφίξεων και των αναχωρήσεων, καθώς και του τρόπου φόρτισης ανάλογα με την τιμή της κιλοβατώρας και τα χαρακτηριστικά της κάθε μπαταρίας. Τα αθροιστικά αποτελέσματα των χαρακτηριστικών αυτών δίνουν μία αναλυτική περιγραφή μίας εικονικής μπαταρίας που συνδέεται στο σύστημα με στόχο την στήριξη του δικτύου, όταν κριθεί αναγκαίο.

Στην συνέχεια μελετήθηκε το σενάριο στήριξης συχνότητας ανάλογα με τα διαθέσιμα οχήματα που βρίσκονται συνδεδεμένα. Από τα αποτελέσματα φάνηκε η μεγάλη συνεισφορά τους, ακόμα και με σχετικά μικρή συμμετοχή ηλεκτρικών οχημάτων. Έπειτα μελετήθηκε η απόκριση σταθερού πλήθους ΗΑ σε διαφορετικές μεταβολές φορτίου. Όπως προκύπτει από τους υπολογισμούς, όσο μεγαλύτερη είναι η διαταραχή τόσο μεγαλύτερη βοήθεια παρείχαν τα οχήματα. Τέλος, μελετήθηκαν κάποια οριακά σενάρια ως προς την ανεπάρκεια διαθέσιμης ενέργειας και ισχύος. Από αυτές τις προσομοιώσεις φάνηκε ο τρόπος που το σύστημα των ΗΑ αποκρίνεται έτσι ώστε να μένει εντός των επιτρεπτών ορίων λειτουργίας, παρέχοντας παράλληλα όση ισχύ μπορεί να διαθέσει.

Το τελευταίο κομμάτι που υλοποιήθηκε και παρουσιάστηκε, ήταν το σύστημα επαναφοράς του SOC μετά το πέρας της στήριξης, σε μία

προσπάθεια να αναπληρώσει σε βάθος χρόνου την χαμένη ενέργεια της μπαταρίας.

Συμπεραίνουμε ότι η στήριξη συχνότητας από σταθμούς ηλεκτρικών οχημάτων δεν είναι μόνο κάτι εφικτό αλλά και κάτι αναγκαίο για το μέλλον των ηλεκτρικών δικτύων. Ένα μοντέλο σαν αυτό που παρουσιάστηκε στην εν λόγω διπλωματική, μπορεί να προβλέψει αποτελεσματικά την ικανότητα στήριξης της συχνότητας από τα ΗΑ ανά πάσα στιγμή και με πολύ καλή ακρίβεια. Κάτι τέτοιο, θα μπορούσε να βοηθήσει στην αντιμετώπιση των προκλήσεων που θα προκύψουν, τόσο από την μαζική έλευση των ηλεκτρικών οχημάτων τα επόμενα χρόνια, όσο και από την ανάγκη μεγαλύτερων συστημάτων αποθήκευσης για την κάλυψη της ζήτησης και της μεγαλύτερης διείσδυσης των ΑΠΕ.

6.2 Προτάσεις για μελλοντική συνέχεια της δουλειάς

Το σύστημα που προτείνεται στην συγκεκριμένη διπλωματική είναι ένα μοντέλο πρόβλεψης της ικανότητας στήριξης συχνότητας. Μια επέκταση αυτής της δουλειάς θα μπορούσε να ήταν η μελέτη της διαδικασίας κατά την οποία η μεταβολή της ισχύος της συνολικής μπαταρίας που προκύπτει από το μοντέλο, κατανέμεται στα επιμέρους ΗΑ. Στην διπλωματική αποδείξαμε ότι μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε με μεγάλη ακρίβεια έναν αθροιστή (ισοδύναμη μπαταρία) που αντιδράει στις μεταβολές τις συχνότητας μεταβάλλοντας την συνολική ισχύ των αυτοκινήτων. Κατά την υλοποίηση στην πράξη όμως, συμβαίνει κάτι διαφορετικό. Τα πρώτα δευτερόλεπτα όπου λειτουργεί ο πρωτεύων έλεγχος δεν έχει επίδραση ο αθροιστής, αλλά κάθε ΗΑ ξεχωριστά. Μετά από κάποια δευτερόλεπτα και όσο πλησιάζουμε προς τον δευτερεύον έλεγχο, ο αθροιστής σιγά σιγά αναλαμβάνει μεγαλύτερο ρόλο. Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να γίνει κατανομή της ισχύος στα επιμέρους οχήματα. Ο τρόπος που θα γίνεται αυτή η κατανομή, με βάση τα χαρακτηριστικά και τους περιορισμούς του κάθε ΗΑ, είναι ένα κομμάτι που θέλει αρκετή επιμέρους μελέτη.

Επίσης, κατά την πρακτική υλοποίηση θα χρειαστεί μία επιπλέον μελέτη των υποδομών που απαιτούνται για την κατασκευή του συστήματος. Για παράδειγμα, μελέτη του τηλεπικοινωνιακού συστήματος που χρειάζεται, των σφαλμάτων που προκύπτουν, τις ενδεχόμενες καθυστερήσεις που εισάγονται αλλά και το πως όλα αυτά μπορούν να επηρεάσουν την αξιοπιστία του συστήματος.

7. Πηγές

1. Βιβλίο “Ανάλυση Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας” κ. Νικόλαος Α. Βοβός, κ. Γαβριήλ Γιαννακόπουλος, Εκδόσεις ΖΗΤΗ
2. Βιβλίο “Εισαγωγής στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας” κ. Βουρνάς, κ. Κονταξής, Εκδόσεις ΣΥΜΜΕΤΡΙΑ
3. Βιβλίο “Έλεγχος και Ευστάθεια Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας” κ. Νικόλαος Α. Βοβός, κ. Γαβριήλ Γιαννακόπουλος, Εκδόσεις ΖΗΤΗ
4. [Load Frequency Control of Single Area System](#)
5. [U.S. Energy Information Administration, “Use of Energy Explained. Energy Used for transportation”](#)
6. [International Energy Agency, “Global EV Outlook 2019”](#)
7. [Primary secondary and tertiary frequency control](#)
8. Ζιώγας Ηλίας, Μιχαλιού Μαρία-Ελένη “Ρύθμιση Τάσης και Συχνότητας στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας”, Διπλωματική Εργασία, Τ.Ε.Ι Πειραιά, Σχολή Τεχνολογικών εφαρμογών, Τμήμα Ηλεκτρολογίας
9. Αντώνιος Καρακούσης “Μετάβαση στο Ευφρές Ηλεκτρικό δίκτυο και Ανάπτυξη του Ευφρούς Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας”, Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών
10. Δημητρίου Ι. Κρεμπενιού “Βέλτιστος Σχεδιασμός Αποκατάστασης Βλαβών και Προγραμματισμός Μικροδικτύου για την Ενίσχυση της Ελαστικότητας ενός ΣΗΕ”, Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών
11. Φροσινού Γ. Ασημίνα “Σύνθεση Μοντέλου Ηλεκτρικού Οχήματος και προσομοίωση στο MATLAB”, Διπλωματική Εργασία, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών
12. [Ευρωπαϊκός Οργανισμός Περιβάλλοντος: “Ηλεκτρικά οχήματα: η πορεία προς ένα βιώσιμο σύστημα κινητικότητας”](#)
13. [Ευρωπαϊκός Οργανισμός Περιβάλλοντος: “Ηλεκτρικά οχήματα: μία έξυπνη επιλογή για το περιβάλλον”](#)
14. [North American Electric Reliability Corporation, Reliability Guideline “Application Guide for Modeling Turbine-Governor and Active Power-Frequency Controls in Interconnection-Wide Stability Studies”](#)
15. [Clean Energy Ministerial: “EV30@30 Campaign”](#)

16. [Γ. Καμπούρης, ΑΔΜΗΕ “Διασύνδεση Κρήτης: Σχεδιασμός & Οδικός χάρτης Υλοποίησης”](#)
17. [Fiat Chrysler and Italian grid operator Terna partner on V2G trials](#)
18. [Work has begun at Mirafiori on the FCA-ENGIE V2G Pilot Project](#)
19. [Ηλεκτρικό Αυτοκίνητο, Βικιπαίδεια](#)
20. [Σταύρος Κομηνέας, Ευάγγελος Χαρμανδάρης, Βιβλίο: “Μαθηματική Μοντελοποίηση: Μία σπουδή στις φυσικές επιστήμες”](#)
21. [Κυριάκος Ζίζας, “ Η συμβολή των Υδροηλεκτρικών Σταθμών στις Επικουρικές Υπηρεσίες Διασυνδεδεμένου Συστήματος”](#)
22. [Electric Vehicle Database](#)
23. [Ασαφής Λογική, Διάλεξη Πανεπιστημίου Πατρών](#)
24. [Ασαφής Λογική, Διάλεξη Πανεπιστημίου Ιωαννίνων](#)
25. Γκούμας Στράτος, Ασαφής Λογική “ Βασικές αρχές και θεωρία. Ανάπτυξη εφαρμογής της λειτουργίας ενός air condition με το λογισμικό Matlab 2013”
26. [Κατσαπρακάκης, Δ. 2015. “Σύνθεση Ενεργειακών Συστημάτων, Κεφάλαιο 2: Συμβατικοί σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.”](#)
27. [Δ. Μίχος ΕΔΛΕΣ/ΔΕΣΜΗΕ, Α. Νέρης ΔΣΣ/ΔΕΣΜΗΕ “Συνεισφορά Αιολικών Σταθμών στην Ρύθμιση Φορτίου-Συχνότητας” ΗΜΕΡΙΔΑ «Τεχνικές απαιτήσεις για αιολικούς σταθμούς» 16 Δεκεμβρίου 2010](#)
28. [MathWorks fmincon function](#)
29. [Τρόποι φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων](#)
30. Αντωνίου Αντώνης “Επιπτώσεις στην Οικονομική Λειτουργία των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας Κρήτης και Κύπρου λόγω της διασύνδεσής τους”, Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών
31. [Τύποι μπαταριών που χρησιμοποιούνται σε ηλεκτρικά οχήματα](#)
32. [Οριακή Τιμή Συστήματος, Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας \(ΡΑΕ\)](#)