

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ



Τμήμα Ηλεκτρονικών Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μοντελοποίηση και προσομοίωση συνδεδεμένων σε τροφοδοσία ηλεκτρικών αυτοκινήτων ως κατανεμημένες πηγές ρύθμισης της συχνότητας ηλεκτρικών δικτύων

Νεοφύτου Νεόφυτος

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Καθηγητής: Σταυρακάκης Γεώργιος (Επιβλέπων)

Καθηγητής: Καλαϊτζάκης Κωνσταντίνος

Επίκουρος Καθηγητής: Κουτρούλης Ευτύχης

Χανιά, Μάρτιος 2015

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο τμήμα Ηλεκτρονικών Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Πολυτεχνείου Κρήτης. Υπεύθυνος κατά την εκπόνηση της διπλωματικής ήταν ο καθηγητής κ. Γεώργιος Σταυρακάκης τον οποίο ευχαριστώ θερμά για την ανάθεση της, καθώς μου δόθηκε η ευκαιρία να ασχοληθώ με ένα πραγματικά ενδιαφέρον θέμα .

Ευχαριστώ επίσης τον κ. Τσικαλάκη Αντώνιο για την σημαντική καθοδήγηση και τις συμβουλές που μου παρείχε κατά την εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά το συμφοιτητή μου Κωνσταντίνο Μπρέλλα για τη συνεργασία που είχαμε για την αποπεράτωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Τέλος ευχαριστώ τον κ.Ανδρέα Πετούση, Ηλεκτρολόγο Μηχανικό, PhD του Διαχειριστή Συστήματος Μεταφοράς Κύπρου για την παροχή όλων των απαραίτητων πληροφοριών που αφορούν την εργασία μου.

Περίληψη

Η ραγδαία ανάπτυξη της τεχνολογίας των ηλεκτρικών οχημάτων και ειδικότερα η διείσδυση τους στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί μια μεγάλη πρόκληση για το τομέα των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Η αξιοποίηση της χωρητικότητας των μπαταριών των διασυνδεδεμένων οχημάτων μπορεί να επιφέρει σημαντικά οφέλη προς τα δίκτυο μέσω της Vehicle to Grid (V2G) λειτουργίας. Η V2G λειτουργία είναι μια διαδικασία που μπορεί να παρέχει υπηρεσίες πρωτεύουσας ρύθμισης συχνότητας στο ηλεκτρικό δίκτυο εκμεταλλευόμενη την συνολική χωρητικότητα ενός στόλου ηλεκτρικών οχημάτων. Στην παρούσα εργασία διερευνάται ο τρόπος συμμετοχής των ηλεκτρικών οχημάτων στην πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας, καθώς και τις επιπτώσεις που επιφέρουν σε αυτήν στα μη διασυνδεδεμένα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Παράλληλα λαμβάνονται υπόψη και οι απαιτήσεις των χρηστών σχετικά με τη φόρτιση των οχημάτων τους. Η V2G διαδικασία μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε με αυξομειώσεις της ισχύος φόρτισης των οχημάτων, είτε με φόρτιση ή εκφόρτιση των συσσωρευτών τους. Έτσι ένας χρήστης ηλεκτρικού οχήματος μπορεί να συμμετάσχει στη V2G διαδικασία είτε κατά τη διάρκεια της φόρτισης του οχήματος του στο σταθμό φόρτισης, είτε με την σύνδεση του οχήματος στο σταθμό φόρτισης χωρίς να επιθυμεί περαιτέρω φόρτιση της μπαταρίας του. Με την αποσύνδεση των ηλεκτρικών οχημάτων από το σημείο σύνδεσής τους στο ηλεκτρικό δίκτυο θα πρέπει η κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας τους να διατηρείται στα επιθυμητά επίπεδα από το χρήστη. Με τη σύνταξη κώδικα στο Matlab έγινε προσομοίωση της αντίδρασης των ηλεκτρικών οχημάτων στις διακυμάνσεις συχνότητας του δικτύου. Επιπρόσθετα, χρησιμοποιώντας το Power World Simulator διενεργήθηκαν προσομοιώσεις για το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας της Κύπρου, προκειμένου να αποδειχθεί η αποτελεσματικότητα της V2G λειτουργίας στην πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας.

Abstract

The rapid development of technology of electric vehicles and in particular their penetration in electricity networks is a major challenge for the area of electric power systems. The utilization of battery capacity of the interconnected vehicles can bring significant benefits to the network via the Vehicle to Grid (V2G) operation. The V2G operation is a process that can provide primary frequency regulation services in the electric network by exploiting the total capacity of a fleet of electric vehicles. This thesis studies the involvement of the electric vehicles in the primary frequency regulation and the effects that bring to it in non-interconnected power systems. Also is taken in consideration the requirements of users for charging their vehicles. The V2G operation can be performed either with fluctuations in charging power of vehicles, or by charging or discharging of the battery. So an electric vehicle user can participate in V2G operation either during the loading of the vehicle to the charging station, or by connecting the vehicle to the charging station without any further demands to charge its battery. By disconnecting electric vehicles from their point of connection to the mains should the charge status of the battery be maintained at the desired level by the user. By writing code in Matlab it is simulated the response of electric vehicles in the frequency fluctuations of the network. Additionally, by using the Power World Simulator, it is performed simulations for the power system of Cyprus in order to demonstrate the effectiveness of V2G operation in the primary frequency regulation.

Πίνακας περιεχομένων

1. Εισαγωγή	8
1.1 Αντικείμενο και σκοπός της διπλωματικής εργασίας.....	8
1.2 Δομή διπλωματικής εργασίας.....	8
2. Ρύθμιση φορτίου-συχνότητας	10
2.1 Εισαγωγή	10
2.2 Βασικά στοιχεία του συστήματος παραγωγής ισχύος	11
2.2.1 Στρόβιλοι	11
2.2.2 Γεννήτριες	12
2.2.3 Ρυθμιστές στροφών.....	14
2.2.3.1 Πρωτεύουσα και δευτερεύουσα ρύθμιση φορτίου-συχνότητας	15
2.2.4 Ρυθμιστής τάσης.....	15
2.3 Στατισμός	16
2.4 Διανομή φορτίου στις μονάδες παραγωγής κατά τη ρύθμιση	17
2.5 Περιοχές ελέγχου και Διασυνδετικές γραμμές	17
2.6 Σφάλμα Ελέγχου Περιοχής (ΣΕΠ)	19
2.7 Αυτορρύθμιση φορτίου	20
2.8 Ευστάθεια Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας	20
2.8.1 Ορισμός Ευστάθειας	20
2.8.2 Κατηγοριοποίηση φαινομένων ευστάθειας στα Σ.Η.Ε	22
2.8.3 Ευστάθεια γωνίας.....	23
2.8.4 Ευστάθεια τάσης	24
2.8.5 Ευστάθεια συχνότητας	24
3. Ηλεκτρικά οχήματα	26
3.1 Εισαγωγή - Η αναγκαιότητα κατασκευής ηλεκτρικών οχημάτων	26
3.2 Κατηγοριοποίηση ηλεκτρικών οχημάτων	27
3.2.1 Υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα (Hybrid Electric Vehicles-HEVs)	27
3.2.2 Επαναφορτιζόμενα Υβριδικά οχήματα (Plug-in Hybrid Electric Vehicles-PHEVs)	28
3.2.3 Ηλεκτρικά οχήματα με χρήση κυψελών καυσίμου (Fuel Cell Electric Vehicles-FCEVs) ...	29
3.2.4 Ηλεκτρικά οχήματα με συσσωρευτές (Battery Electric Vehicles-BEVs)	29
3.3 Χαρακτηριστικά και τεχνολογίες συσσωρευτών ηλεκτρικών οχημάτων	31
3.4 Φόρτιση Ηλεκτρικών Οχημάτων	32
3.4.1 Κατηγορίες φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων.....	32
3.4.2 Επίπεδα ισχύος φόρτισης.....	34
3.5 Καλωδιώσεις φόρτισης	35
3.6 Σταθμοί φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων	36
3.7 V2G λειτουργία	39
3.7.1 Ευφυές Δίκτυο	39
3.8 Περιγραφή της V2G λειτουργίας	40
3.9 Η θέση της V2G λειτουργίας στις αγορές ηλεκτρικής ισχύος και στη παροχή επικουρικών υπηρεσιών	43
3.10 Ενσωμάτωση ηλεκτρικών οχημάτων στη πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας	44

3.11	Πιθανά επιχειρηματικά μοντέλα	46
3.12	Η σημασία του aggregator στη V2G λειτουργία	47
4.	Μοντελοποίηση	50
4.1	Τρόπος λειτουργίας της τεχνολογίας V2G	50
4.2	Μεθόδους ελέγχου V2G	53
4.2.1	Μέθοδος ελέγχου Autonomous Distributed V2G Control (ADC)	54
4.2.1.1	Balance control (BC)	54
4.2.1.2	Smart Charging (SC)	56
4.2.2	Μέθοδος ελέγχου Adaptive droop control	57
4.2.2.1	Battery Soc Holder (BSH)	57
4.2.2.2	Charging With Frequency Regulation (CFR)	60
4.3	Δυναμικό Μοντέλο V2G Ελέγχου του ηλεκτρικού οχήματος	61
4.4	Προσομοίωση.....	62
4.4.1	Σύστημα V2G ελέγχου φόρτισης σε κώδικα Matlab.....	63
4.4.2	Σενάρια και αποτελέσματα Προσομοίωσης	65
5.	Το Σ.Η.Ε της Κύπρου	74
5.1	Γενική περιγραφή της Κύπρου	74
5.2	Γενικά Χαρακτηριστικά Ηλεκτρικού Δικτύου Κύπρου	75
5.3	Η παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας στην Κύπρο	77
5.3.1	Ηλεκτροπαραγωγός σταθμός Βασιλικού	79
5.3.1.1	Η έκρηξη στο Μαρί και η βλάβη στον Ηλεκτροπαραγωγό Σταθμό του Βασιλικού ...	
	81	
5.3.2	Ο Ηλεκτροπαραγωγός σταθμός Δεκέλειας.....	82
5.3.3	Ο Ηλεκτροπαραγωγός σταθμός Μονής	83
5.3.4	Στοιχεία για παραγωγή ηλεκτρισμού με χρήση Α.Π.Ε στην Κύπρο	84
5.4	Σταθμοί φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων στην Κύπρο	85
6.	Λογισμικό προσομοίωσης-Power World Simulator	89
6.1	Γενικά	89
6.2	Δυνατότητες και στοιχεία του προγράμματος	89
6.3	Δημιουργία απλού Σ.Η.Ε στο Power World Simulator	92
6.3.1	Εισαγωγή ζυγού	92
6.3.2	Εισαγωγή Γεννήτριας.....	94
6.3.3	Εισαγωγή γραμμής μεταφοράς εναλλασσόμενου ρεύματος (AC)	98
6.3.4	Εισαγωγή ζυγού φορτίου	101
6.3.5	Εισαγωγή στοιχείου εγκάρσιας αντιστάθμισης άεργου ισχύος	103
6.3.6	Σύνοψη edit mode.....	105
6.3.7	Επίλυση δικτύου στο Power World Simulator (Run Mode)	108
6.4	Το εργαλείο Transient Stability	109
6.4.1	Infinite bus	111
6.4.2	Καθορισμός συμβάντος διαταραχής.....	112
6.4.3	Προσδιορισμός αποτελεσμάτων για προβολή με το πέρας της προσομοίωσης.....	115
6.4.4	Αποτελέσματα προσομοίωσης.....	116
6.4.5	Απεικόνιση αποτελεσμάτων σε μορφή γραφημάτων	117
7.	Μοντέλο Προσομοίωσης	120

7.1 Περιγραφή μοντέλου	120
7.2 Προσομοίωση πραγματικών συμβάντων διαταραχής συχνότητας	124
8. Σύστημα ελέγχου φόρτισης οχημάτων.....	136
9. Προσομοιώσεις	144
10. Συμπεράσματα και προτάσεις για περαιτέρω μελέτη	197
10.1 Συμπεράσματα	197
10.2 Προτάσεις για περαιτέρω μελέτη	198
11. Βιβλιογραφία	199

1. Εισαγωγή

1.1 Αντικείμενο και σκοπός της διπλωματικής εργασίας

Τα ηλεκτρικά οχήματα αποτελούν μια μεγάλη πρόκληση για τα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας καθώς ως παθητικά στοιχεία αποτελούν ένα νέο είδος φορτίου για αυτά και η μεγάλη διείσδυση ηλεκτρικών οχημάτων μπορεί να επιβαρύνει αισθητά το ηλεκτρικό δίκτυο και να επηρεάσει αρνητικά τον ενεργειακό και αναπτυξιακό προγραμματισμό τους. Άρα η αύξηση της ζήτησης σε ένα Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας λόγω της φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων είναι ένας παράγοντας που θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στην ομαλή λειτουργία του δικτύου καθώς επίσης και στο προγραμματισμό των επενδύσεων. Η μεγαλύτερη όμως πρόκληση για το δίκτυο είναι η αξιοποίηση της χωρητικότητας των μπαταριών των ηλεκτρικών οχημάτων κατά τη διάρκεια της φόρτισης τους από αυτό. Ένα ηλεκτρικό όχημα μπορεί να θεωρηθεί ως μια μικρή κινητή μονάδα αποθήκευσης ενέργειας. Έτσι ένας στόλος ηλεκτρικών οχημάτων που διεισδύουν στο ηλεκτρικό δίκτυο σε συνδυασμό με κατάλληλα συστήματα τηλεπικοινωνιών και πληροφοριών μπορεί να παρέχει επικουρικές υπηρεσίες προς το δίκτυο. Η ρύθμιση συχνότητας είναι μια σημαντική υπηρεσία που μπορούν να παρέχουν τα ηλεκτρικά οχήματα, επειδή η διάρκεια της παρεχόμενης υπηρεσίας είναι σύντομη (μερικά λεπτά) και με βάση την αγορά επικουρικών υπηρεσιών μπορεί να παρέχει τις μεγαλύτερες οικονομικές απολαβές στους ιδιοκτήτες των οχημάτων. Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη του τρόπου συμμετοχής των ηλεκτρικών οχημάτων στην πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας του δικτύου, αλλά και των επιπτώσεων του σε αυτήν. Παράλληλα με την συμμετοχή των οχημάτων στην ρύθμιση συχνότητας του ηλεκτρικού δικτύου θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και οι απαιτήσεις φόρτισης των οδηγών.

1.2 Δομή διπλωματικής εργασίας

Η δομή της εργασίας έχει ως εξής :

Στο 2^ο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στη ρύθμιση φορτίου συχνότητας και στον τρόπο που γίνεται στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Για το σκοπό αυτό κρίνεται σκόπιμη η αναφορά στα δυναμικά στοιχεία του συστήματος παραγωγής ισχύος των ηλεκτρικών δικτύων μιας και σχετίζονται άμεσα με τη ρύθμιση συχνότητας. Επιπλέον γίνεται μια σύντομη αναφορά στην ευστάθεια των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας.

Το 3^ο κεφάλαιο περιλαμβάνει τις βασικές τεχνολογίες και τα γνωρίσματα των ηλεκτρικών οχημάτων καθώς και τον τρόπο με τον οποίο συμμετέχουν στην λειτουργία των ηλεκτρικών δικτύων. Γίνεται αναφορά στους σταθμούς και στις βασικές τεχνολογίες φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων. Ιδιαίτερα δίνεται έμφαση στην ανάλυση της V2G (Vehicle to grid) διαδικασίας εστιάζοντας στον τρόπο λειτουργίας μέσω συναθροιστή (aggregator).

Στο 4^ο κεφάλαιο παρουσιάζεται το πλαίσιο της λειτουργίας του V2G ελέγχου για τη συμμετοχή των οχημάτων στην πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας. Γίνεται παρουσίαση και ανάλυση δύο τεχνικών V2G ελέγχου για συμμετοχή των οχημάτων στην πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας οι οποίες συμπεριλαμβάνουν και τις απαιτήσεις φόρτισης των οδηγών. Επιπρόσθετα γίνεται παρουσίαση του μοντέλου V2G ελέγχου του ηλεκτρικού οχήματος που υλοποιήσαμε στο περιβάλλον του Matlab και παρουσιάζονται αποτελέσματα προσομοιώσεων που έγιναν με βάση τις δύο τεχνικές ελέγχου.

Στο 5^ο κεφάλαιο περιλαμβάνονται τα γενικά χαρακτηριστικά του ηλεκτρικού δικτύου της Κύπρου καθώς και τα τεχνικά χαρακτηριστικά των μονάδων παραγωγής των ηλεκτροπαραγωγών σταθμών του νησιού. Επίσης γίνεται αναφορά στα μελλοντικά σχέδια της Αρχής ηλεκτρισμού Κύπρου, όσον αφορά την εγκατάσταση σταθμών φόρτισης σε διάφορα σημεία του νησιού για εξυπηρέτηση των χρηστών των οχημάτων μέσω της υπηρεσίας e-charge.

Στο 6^ο κεφάλαιο γίνεται η περιγραφή του λογισμικού Power World Simulator και αναπαράσταση ενός απλοϊκού δικτύου για να παρουσιάσουμε τα στοιχεία του λογισμικού που χρησιμοποιήσαμε στη παρούσα εργασία. Γίνεται παρουσίαση το εργαλείου Transient Stability το οποίο χρησιμοποιήσαμε για τη προσομοίωση συμβάντων διαταραχών που συμβαίνουν στα Σ.Η.Ε.

Στο κεφάλαιο 7 παρουσιάζεται το μοντέλο που υλοποιήσαμε στο Power World Simulator για να μελετήσουμε την απόκριση συχνότητας του Σ.Η.Ε της Κύπρου σε συμβάντα διαταραχών, με τη συμμετοχή των ηλεκτρικών οχημάτων στην πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας. Επίσης εκτελούνται προσομοιώσεις πραγματικών συμβάντων και γίνεται σύγκριση των προσομοιωμένων αντιδράσεων της συχνότητας με τις πραγματικές.

Το κεφάλαιο 8 περιλαμβάνει τις τροποποιήσεις που κάναμε στο σύστημα ελέγχου φόρτισης οχημάτων που παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 4, για λόγους απλότητας των προσομοιώσεων στο Power World Simulator. Για τη διαπίστωση της ορθής λειτουργίας του εκτελέστηκαν τέσσερα σενάρια προσομοιώσεων.

Στο κεφάλαιο 9 είναι συγκεντρωμένα όλα τα σενάρια και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης που αφορούν την Κύπρο καθώς και ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων. Για κάθε σενάριο προσομοίωσης γίνεται αναλυτική περιγραφή του συμβάντος διαταραχής και παρουσιάζεται το φορτίο των μονάδων του συστήματος την στιγμή του συμβάντος.

Στο κεφάλαιο 10 συνοψίζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα εργασία και δίνονται προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

2. Ρύθμιση φορτίου-συχνότητας

2.1 Εισαγωγή

Η βασική λειτουργία των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας είναι η μετατροπή της ενέργειας που προέρχεται από φυσικούς πόρους σε ηλεκτρική και η μεταφορά της στον τελικό καταναλωτή. Τα Σ.Η.Ε πρέπει να διαθέτουν τον κατάλληλο ηλεκτρολογικό εξοπλισμό για την εξασφάλιση της “καλής” ποιότητας της ηλεκτρικής ισχύος που παρέχουν. Είναι ευρέως γνωστό ότι για τη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιείται η AC τριφασική ισχύς. Κατά τη διάρκεια της μεταφοράς πρέπει να διατηρείται η ισορροπία τόσο της ενεργού όσο και της άεργου ισχύος μεταξύ της παραγωγής και της κατανάλωσης της ηλεκτρικής ισχύος. Όταν αυτή η ισορροπία χαθεί τότε η τάση και η συχνότητα αποκλίνουν από την ονομαστική τους τιμή. Όταν αναφερόμαστε σε “καλή” ποιότητα ηλεκτρικής ισχύος, εννοούμε ότι τόσο η συχνότητα όσο και η τάση βρίσκονται εντός των προκαθορισμένων ορίων ανεξάρτητα από τις τυχαίες μεταβολές του φορτίου και των απρόσμενων συμβάντων στο σύστημα. Είναι προφανές ότι είναι αδύνατον να διατηρηθούν αυτά τα δύο μεγέθη εντός των προκαθορισμένων ορίων χωρίς τη χρήση ενός συστήματος ελέγχου, το οποίο θα ακυρώνει την επίδραση των μεταβολών του φορτίου στο σύστημα και θα διατηρεί την τάση και τη συχνότητα σε αποδεκτά επίπεδα. Παρά το γεγονός ότι η ενεργός και η άεργος ισχύς αλληλεπιδρούν επί της συχνότητας και της τάσης, το πρόβλημα ελέγχου των δύο αυτών μεγεθών μπορεί να διαχωριστεί σε δύο επιμέρους προβλήματα ελέγχου. Η συχνότητα του συστήματος έχει μεγάλη αλληλεξάρτηση με την ενεργό ισχύ και η τάση με την άεργο ισχύ. Επομένως μπορούμε με αρκετά μεγάλη ακρίβεια να θεωρήσουμε ότι αυτό το γενικό πρόβλημα μπορεί να αναλυθεί σε δύο ανεξάρτητα προβλήματα, το πρώτο είναι η ενεργός ισχύς με τη συχνότητα και το δεύτερο η άεργος ισχύς με την τάση. Το πρώτο πρόβλημα ονομάζεται ρύθμιση φορτίου συχνότητας (Load Frequency Control-LFC) και θα μας απασχολήσει περαιτέρω στη συνέχεια. Το σημαντικότερο καθήκον του LFC είναι να διατηρεί σταθερή τη συχνότητα του συστήματος παρά τα τυχαίως μεταβαλλόμενα φορτία του δικτύου. Οι κυριότεροι λόγοι για τους οποίους είναι αναγκαίο η συχνότητα ενός Σ.Η.Ε να διατηρείται σε μια σταθερή τιμή είναι οι εξής:

- Η ταχύτητα περιστροφής των στροβίλων των μονάδων παραγωγής συνδέεται άμεσα με την συχνότητα.
- Αν η ονομαστική συχνότητα λειτουργίας ενός Σ.Η.Ε είναι π.χ. 50 HZ και οι στροβίλοι κινούνται με ταχύτητα που αντιστοιχεί σε συχνότητες κάτω των 47,5 HZ ή παραπάνω από 52,5 HZ, τότε τα πτερύγια των αεροστροβίλων ή των αεριοστροβίλων μπορεί να υποστούν φθορά.
- Η λειτουργία ενός μετασχηματιστή με συχνότητα κάτω από την ονομαστική δεν είναι επιθυμητή. Όταν η τιμή της συχνότητας του συστήματος είναι κάτω από μια συγκεκριμένη τιμή, τότε σε σταθερή τάση η μαγνητική ροή στον πυρήνα αυξάνεται και ο πυρήνας του μετασχηματιστή φτάνει την περιοχή κορεσμού.
- Η συχνότητα σε ένα Σ.Η.Ε σχετίζεται άμεσα με την παραγωγή ισχύος από τις μονάδες παραγωγής. Με μειωμένη συχνότητα η παραγωγή των μονάδων μειώνεται με κίνδυνο τον αποσυνγχρονισμό και τη διακοπή της λειτουργίας τους.

2.2 Βασικά στοιχεία του συστήματος παραγωγής ισχύος

Τη διατήρηση της ισορροπίας μεταξύ παραγωγής και κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και τη διατήρηση της συχνότητας σε ένα Σ.Η.Ε, την αναλαμβάνει το σύστημα παραγωγής ισχύος το οποίο περιλαμβάνει στροβίλους, γεννήτριες, ρυθμιστές στροφών και ρυθμιστές τάσεως. Στις ενότητες που ακολουθούν γίνεται αναφορά στη λειτουργία και τα χαρακτηριστικά των πιο πάνω στοιχείων πλην των ρυθμιστών τάσεως για τους οποίους γίνεται μια σύντομη αναφορά αφού δεν σχετίζονται άμεσα με την ρύθμιση φορτίου-συχνότητας.

2.2.1 Στρόβιλοι

Οι στρόβιλοι είναι μονάδες οι οποίες μετατρέπουν την ενέργεια από το περιβάλλον (πχ ατμός, νερό) σε μηχανική ισχύ (ΔP_m) η οποία τροφοδοτεί με τη σειρά της την ηλεκτρική γεννήτρια. Τα πιο συνηθισμένα είδη στροβίλων είναι: χωρίς επαναθέρμανση, με επαναθέρμανση και υδροστρόβιλοι. Τα δύο πρώτα είδη αναφέρονται στους ατμοστρόβιλους και τους αεριοστρόβιλους. Το κάθε είδος στροβίλου μπορεί να μοντελοποιηθεί βάσει μιας συνάρτησης μεταφοράς.

Οι στρόβιλοι χωρίς επαναθέρμανση είναι συστήματα πρώτης τάξης και μπορούν να μοντελοποιηθούν με την παρακάτω συνάρτηση μεταφοράς:

$$G_{NR}(s) = \frac{\Delta P_m(s)}{\Delta P_v(s)} = \frac{1}{T_{ch}s + 1}$$

Όπου T_{ch} είναι η χρονική καθυστέρηση από τη στιγμή που θα μεταβληθεί το άνοιγμα της βαλβίδας μέχρι να παρατηρηθεί μεταβολή στην παραγόμενη ισχύ και όπου ΔP_v είναι η αλλαγή θέσης κατά το άνοιγμα της βαλβίδας ή των υδατοθυρίδων.

Οι στρόβιλοι με επαναθέρμανση έχουν δύο στάδια πίεσεως, αυτό της χαμηλής και αυτό της υψηλής πίεσεως. Γι' αυτό αποτελούν συστήματα δεύτερης τάξης τα οποία έχουν την εξής συνάρτηση μεταφοράς:

$$G_{NR}(s) = \frac{\Delta P_m(s)}{\Delta P_v(s)} = \frac{F_{hp} T_{rh}s + 1}{(T_{ch}s + 1)(T_{rh}s + 1)}$$

Όπου T_{rh} είναι ο χρόνος αναθέρμανσης της βαθμίδας χαμηλής πίεσεως και F_{hp} ο βαθμός ισχύος της υψηλής πίεσης.

Οι υδροστρόβιλοι είναι συστήματα μη ελάχιστης φάσης, λόγω της αδρανείας του νερού. Σε έναν υδροστρόβιλο η απόκριση της πίεσης του νερού είναι αντίθετη σε σχέση με την αλλαγή του ανοίγματος των υδατοθυρίδων. Αυτό όμως συμβαίνει για λίγο χρονικό διάστημα λόγω αδρανείας του νερού και ακολούθως αποκαθίσταται η ροή και η πίεση παίρνει τις αναμενόμενες τιμές. Τα συστήματα των υδροστροβίλων μπορούν να μοντελοποιηθούν με την παρακάτω συνάρτηση μεταφοράς:

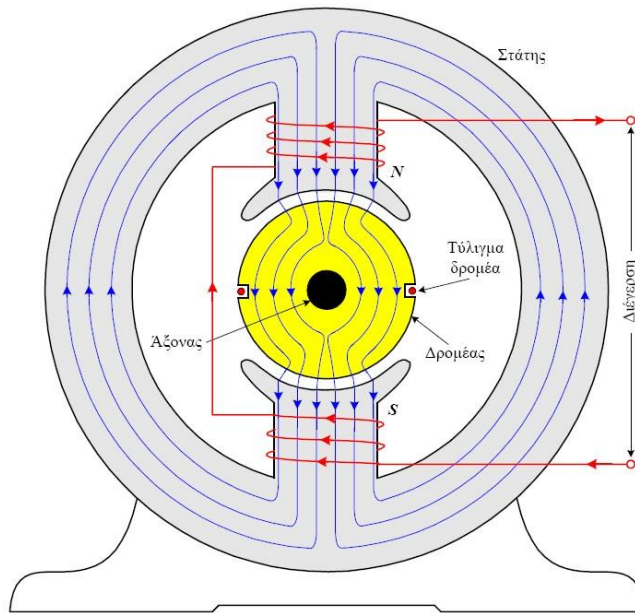
$$G_H(s) = \frac{\Delta P_m(s)}{\Delta P_V(s)} = \frac{-T_w s + 1}{(T_w/2)s + 1}$$

Όπου T_w είναι η υδραυλική χρονική σταθερά.

2.2.2 Γεννήτριες

Οι γεννήτριες είναι ηλεκτρικές μηχανές οι οποίες χρησιμοποιούνται για τη μετατροπή μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική. Αν και στην παρούσα εργασία δεν είναι κρίνεται αναγκαίο να αναφερθούμε στην μετατροπή ισχύος, ας κάνουμε μια σύντομη αναφορά στα βασικά τμήματα των ηλεκτρικών μηχανών και στο τρόπο λειτουργία τους.

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



Εικόνα 2.2.2-1: Εγκάρσια τομή στη στοιχειώδη ηλεκτρική μηχανή. Δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου, όπου διακρίνεται ο στάτης. Οι μαγνητικές γραμμές είναι κάθετες στην επιφάνεια του δρομέα.

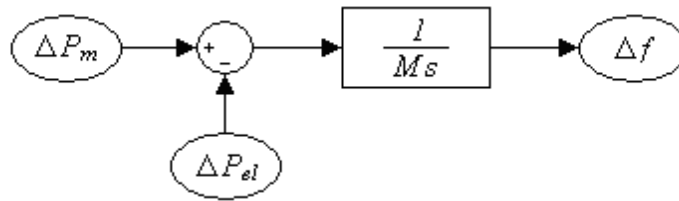
Οι γεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος είναι δύο ειδών:

- οι σύγχρονες γεννήτριες ή εναλλακτήρες και
- οι ασύγχρονες γεννήτριες

Οι σύγχρονες γεννήτριες παράγουν εναλλασσόμενο ρεύμα με συχνότητα ανάλογη της ταχύτητας περιστροφής της μηχανής ενώ η διέγερσή τους τροφοδοτείται με συνεχές ρεύμα. Οι ασύγχρονες γεννήτριες παράγουν εναλλασσόμενο ρεύμα του οποίου η συχνότητα είναι ανεξάρτητη της ταχύτητας περιστροφής και η διέγερσή τους τροφοδοτείται με εναλλασσόμενο ρεύμα. Στους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιούνται πάντοτε σύγχρονες γεννήτριες ενώ οι ασύγχρονες χρησιμοποιούνται σπάνια.

Ταχύτητα περιστροφής γεννήτριας:

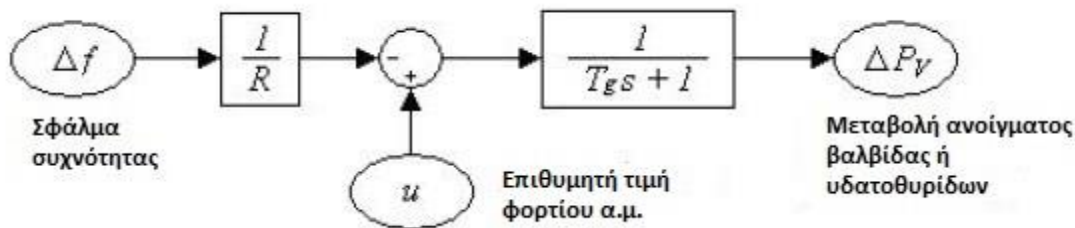
Όπως είναι κατανοητό από τα προαναφερθέντα η ταχύτητα περιστροφής της γεννήτριας αντιστοιχεί στην ηλεκτρική συχνότητα του δικτύου. Για να διατηρείται η συχνότητα του δικτύου σταθερή οι γεννήτριες πρέπει να λειτουργούν κατά τέτοιο τρόπο, έτσι ώστε να διατηρείται ισορροπία μεταξύ παραγωγής και ζήτησης. Όταν συμβαίνει μία αλλαγή φορτίου, η ισχύς που προσφέρει ο στρόβιλος δεν θα είναι πλέον ακριβώς ίση με την ισχύ που παράγει η γεννήτρια. Αυτό το σφάλμα μεταξύ της μηχανικής ΔP_m και της ηλεκτρικής ΔP_{el} ισχύος, αποτυπώνεται στη μεταβολή της ταχύτητας του δρομέα $\Delta \omega_r$, η οποία με τη σειρά της αντιστοιχεί σε ένα σφάλμα συχνότητας Δf . Στην παρακάτω εικόνα γίνεται εμφανής η σχέση μεταξύ της μηχανικής ΔP_m και της ηλεκτρικής ΔP_{el} ισχύος. Όπου M είναι η σταθερά αδράνειας της γεννήτριας.



Εικόνα 2.2.2-2: Μπλοκ διάγραμμα γεννήτριας.

2.2.3 Ρυθμιστές στροφών

Οι ρυθμιστές στροφών είναι μονάδες ελέγχου οι οποίες χρησιμοποιούνται στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας προκειμένου να ανιχνεύουν μεταβολές στη συχνότητα, που πιθανότατα προκλήθηκαν από κάποιες αλλαγές φορτίου και να τις ακυρώνουν. Σε περίπτωση ανίχνευσης σφάλματος στη συχνότητα του δικτύου οι ρυθμιστές στροφών αποστέλλουν κατάλληλα σήματα ρύθμισης στους στροβίλους, προκειμένου να ρυθμίσουν τις βαλβίδες εισαγωγής τους ώστε να εξισωθεί η μηχανική του ροπή με την ηλεκτρική ροπή τη γεννήτριας. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται το σχηματικό διάγραμμα ενός ρυθμιστή στροφών.



Εικόνα 2.2.3-1: Μπλοκ διάγραμμα ενός ρυθμιστή στροφών.

Όπου R είναι η σταθερά ρύθμισης της ταχύτητας του ρυθμιστή και T_g η χρονική καθυστέρηση του τελικού σήματος ρύθμισης που θα αποσταλεί στους στροβίλους.

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

διατηρηθούν οι στροφές και να εξυπηρετηθεί το επιπρόσθετο φορτίο του συστήματος. Ο έλεγχος του ρυθμιστή στροφών τύπου πτώσης, αποτρέπει την επιφόρτιση μίας μόνο γεννήτριας με το επιπλέον φορτίο, το οποίο και μοιράζεται με τις υπόλοιπες μονάδες, με αποτέλεσμα την καλύτερη ευστάθεια του Σ.Η.Ε. Ο ισόχρονος (συχνότητας) τύπος ελέγχου του ρυθμιστή στροφών, χρησιμοποιείται για τη λειτουργία μονάδων οι οποίες είναι απομονωμένες από το σύστημα. Μ' αυτό τον έλεγχο, γίνεται ρύθμιση της συχνότητας σε μία τιμή αναφοράς. Σε περιπτώσεις όπως αυτές των νησιών, αυτός ο τύπος ελέγχου είναι σημαντικός, για να επιτευχθεί η τιμή της συχνότητας στην ονομαστική, ή κοντά σ' αυτήν. Στις περιπτώσεις όμως μεγάλων Σ.Η.Ε., όπου μία μόνο μονάδα έχει ελάχιστη επίδραση στη συχνότητα του δικτύου, ο πλέον χρησιμοποιούμενος τρόπος ελέγχου είναι ο τύπου πτώσης.

2.2.3.1 Πρωτεύουσα και δευτερεύουσα ρύθμιση φορτίου-συχνότητας

Η ρύθμιση φορτίου-συχνότητας χωρίζεται σε δύο τύπους ρύθμισης, αναλόγως του αποτελέσματος που προκύπτει μετά τη διαδικασία διόρθωσης του σφάλματος συχνότητας. Ο πρώτος τύπος ρύθμισης ονομάζεται πρωτεύουσα ρύθμιση φορτίου-συχνότητας και αφήνει πάντα ένα μόνιμο σφάλμα συχνότητας. Όταν μια μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής της γεννήτριας γίνεται αντιληπτή από το φυγοκεντρικό ρυθμιστή που είναι συνδεδεμένος με τον άξονά της (ή από άλλη συσκευή μέτρησης της συχνότητας) τότε ξεκινά η διαδικασία της πρωτεύουσας ρύθμισης. Δηλαδή η μεταβολή αυτή μετατρέπεται είτε σε σήμα-εντολή για τη μετακίνηση της δικλίδας του ατμοστροβίλου, είτε των ρυθμιστικών περυγίων του υδροστροβίλου, ώστε να προσαρμοστεί ανάλογα η μηχανική ισχύς που παράγεται από το στρόβιλο. Επιπρόσθετα μπορεί να ενεργοποιηθεί ο μηχανισμός αλλαγής στροφών του ρυθμιστή. Μετριέται δηλαδή το σφάλμα συχνότητας του συστήματος μετά την πρωτεύουσα ρύθμιση και με μία κατάλληλη στρατηγική ελέγχου αποστέλλονται σήματα που αντιστοιχούν σε μία νέα ταχύτητα αναφοράς κάθε γεννήτριας. Αυτή είναι η δευτερεύουσα ρύθμιση φορτίου-συχνότητας και έχει στόχο να εναρμονίσει την παραγωγή με το φορτίο ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας που είναι είτε αυτόνομο, είτε διασυνδεδεμένο με άλλα συστήματα μέσω μιας ή και περισσότερων διασυνδετικών γραμμών. Με την επίτευξη του ισοζυγίου μεταξύ παραγωγής και φορτίου το σφάλμα συχνότητας εξαλείφεται πλήρως. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι ενώ η πρωτεύουσα ρύθμιση γίνεται από κάθε μονάδα χωριστά, η δευτερεύουσα γίνεται κεντρικά για ένα ολόκληρο σύστημα ή περιοχή.

2.2.4 Ρυθμιστής τάσης

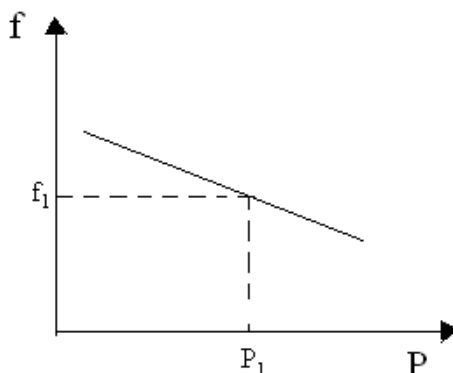
Ένας ρυθμιστής τάσης είναι η μια διάταξη ελέγχου, η οποία κρατά σταθερή (ή σχεδόν σταθερή) την τερματική τάση μιας γεννήτριας μεταβάλλοντας κατάλληλα τη συνεχή τάση που επιβάλλεται στο πεδίο διεγέρσεως. Η συνεχής τάση παρέχεται στο τύλιγμα του πεδίου από το σύστημα διεγέρσεως της σύγχρονης μηχανής. Η ρύθμιση και ο έλεγχος της τάσης απαιτούνται για να εξασφαλίζεται η ευστάθεια της τάσης, αναγκαία προϋπόθεση για τη σύνδεση μιας γεννήτριας σε ένα ΣΗΕ. Σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας η απόκλιση της τάσης από την

κανονική της τιμή λόγω μιας διαταραχής όπως η μεταβολή φορτίου, δεν είναι τόσο κρίσιμη όπως η συχνότητα. Γι' αυτό και οι ανοχές στη ρύθμιση, όπως και στη διακύμανση της τάσεως είναι αρκετά μεγαλύτερες σε αντίθεση με τη συχνότητα, η οποία πρέπει να διατηρείται σε πολύ στενά όρια διακύμανσης.

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιούμε ρυθμιστή τάσης για λόγους ορθότητας των προσομοιώσεων. Γι' αυτό κρίνεται σκόπιμο να μην αναφερθούμε στη λειτουργία και τα χαρακτηριστικά των ρυθμιστών τάσεων.

2.3 Στατισμός

Στατισμός μίας Μονάδας Παραγωγής ονομάζεται το φυσικό εκείνο μέγεθος το οποίο εκφράζει την % μείωση της συχνότητας για 100% αύξηση του φορτίου της Μονάδας. Ο στατισμός, R , ορίζεται ως η αρνητική κλίση της χαρακτηριστικής φορτίου-συχνότητας η οποία προκύπτει από μια δεδομένη ταχύτητα αναφοράς της γεννήτριας.



Διάγραμμα 2.3-1: Χαρακτηριστική φορτίου-συχνότητας.

Με βάση την πιο πάνω καμπύλη ο στατισμός δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$R = -\frac{\Delta f}{\Delta P} \text{ p.u.}$$

Όπου Δf είναι η ανά μονάδα μεταβολή της συχνότητας (ίση με την ανά μονάδα μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα της γεννήτριας) που παραμένει μετά τη λειτουργία της πρωτεύουσας ρύθμισης και ΔP η ανά μονάδα μεταβολή του φορτίου, από την οποία προκλήθηκε η μεταβολή $\Delta \omega$.

Όπως φαίνεται και στο πιο πάνω διάγραμμα η κλίση της χαρακτηριστικής φορτίου-συχνότητας είναι αρνητική, όταν ο στατισμός είναι θετικός σύμφωνα με τον ορισμό του

στατισμού. Αυτό συμβαίνει διότι στην μόνιμη κατάσταση μετά την πρωτεύουσα ρύθμιση που προκύπτει από την αντίδραση του ρυθμιστή στροφών σε κάποια μεταβολή του φορτίου, υπάρχει πάντα ένα μόνιμο σφάλμα. Το σφάλμα αυτό όπως αναφέρθηκε εξαλείφεται μετά με τη δευτερεύουσα ρύθμιση. Ανάλογα με τις τιμές του στατισμού για ορισμένη μεταβολή στην συχνότητα έχουμε:

- Μεγάλος στατισμός: Παρατηρείται μικρή μεταβολή στην παραγωγή.
- Μικρός στατισμός: Παρατηρείται μεγάλη μεταβολή στην παραγωγή.
- Μηδενικός στατισμός: Η συχνότητα δεν επηρεάζεται από τυχόν αλλαγές στο φορτίο.

Κατά τη δευτερεύουσα ρύθμιση ο μηχανισμό αλλαγής στροφών ο οποίος υπάρχει στους ρυθμιστές στροφών, μεταθέτει κατάλληλα την χαρακτηριστική φορτίου-συχνότητας και προσαρμόζει με αυτόν τον τρόπο την παραγόμενη ισχύ. Η μεταβολή της συγκεκριμένης καμπύλης μπορεί να γίνει με δύο τρόπους:

- Αν μεταβληθεί ο στατισμός R , τότε η χαρακτηριστική φορτίου-συχνότητας αλλάζει κλίση.
- Αν μεταβληθεί η ταχύτητα (συχνότητα) αναφοράς μέσω του μηχανισμού αλλαγής στροφών, τότε η χαρακτηριστική μετακινείται παράλληλα διατηρώντας την κλίση της.

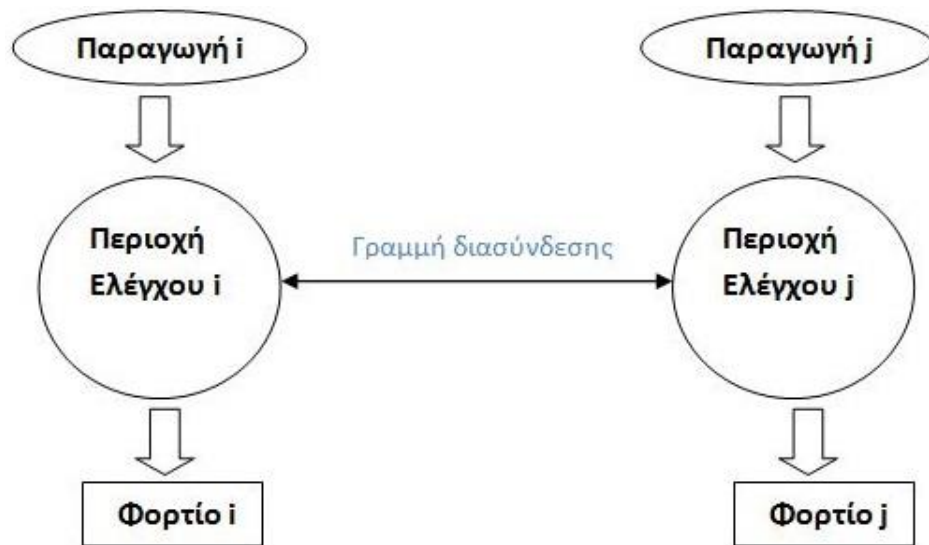
2.4 Κατανομή φορτίου στις μονάδες παραγωγής κατά τη ρύθμιση

Είναι γνωστό ότι σε ένα Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας λειτουργούν πολλές μονάδες παραγωγής ταυτόχρονα (παράλληλα). Όταν υπάρχει ισοζύγιο παραγωγής και ζήτησης οι μονάδες έχουν ίδια συχνότητα και προσφέρουν μία δεδομένη ισχύ. Όταν γίνει μία διαταραχή, όπως για παράδειγμα μια αύξηση φορτίου, τότε οι δρομείς των γεννητριών επιβραδύνονται με αποτέλεσμα να μειωθεί η συχνότητα. Οι ρυθμιστές στροφών ανιχνεύουν το σφάλμα συχνότητας των γεννητριών και αποκρίνονται με κατάλληλα σήματα ρύθμισης προς τους τροβίλους ώστε να αυξηθεί η παραγόμενη ισχύς των γεννητριών. Η ποσότητα του επιπλέον φορτίου που θα επωμιστεί η κάθε γεννήτρια είναι αντιστρόφως ανάλογη του στατισμού της. Μία γεννήτρια με μεγάλο στατισμό θα διατηρηθεί πλησιέστερα προς το ονομαστικό της φορτίο, ενώ μία γεννήτρια με μικρό στατισμό θα έχει μεγαλύτερη απόκλιση από την αρχική φόρτιση.

2.5 Περιοχές ελέγχου και Διασυνδετικές γραμμές

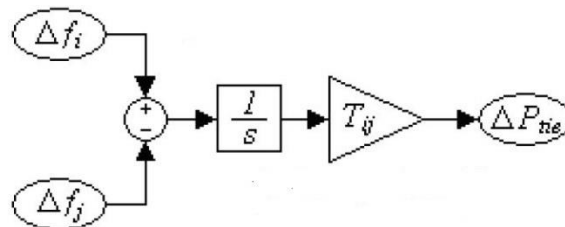
Περιοχή ελέγχου σε ένα Σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας ονομάζουμε τα συστήματα τα οποία είναι κατά το δυνατόν ανεξάρτητα από άποψη ρύθμισης φορτίου συχνότητας και αυτοδύναμα από άποψη φορτίου. Δηλαδή οι ενεργειακές του ανάγκες μπορούν να καλυφθούν εν γένει εντός του συστήματος. Η ρύθμιση συχνότητας σε μία περιοχή ελέγχου αποτελεί συλλογική προσπάθεια όλων των γεννητριών της περιοχής. Τα διασυνδεδεμένα

Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας περιλαμβάνουν περισσότερες από μια περιοχές ελέγχου οι οποίες συνδέονται μεταξύ τους μέσω διασυνδετικών γραμμών. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται ένα διασυνδεδεμένο σύστημα με δύο περιοχές ελέγχου.



Εικόνα 2.5-1: Παράσταση διασυνδεδεμένου συστήματος δύο περιοχών.

Όταν η συχνότητα μεταξύ των δύο περιοχών είναι διαφορετική, τότε γίνεται ανταλλαγή ισχύος μέσω της διασυνδετικής γραμμής που συνδέει τις δύο περιοχές. Μια διασυνδετική γραμμή μπορεί να μοντελοποιηθεί όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 2.5-2: Μπλοκ διάγραμμα μιας διασυνδετικής γραμμής.

Όπου ΔP_{tie} είναι η ανταλλαγή ισχύος μεταξύ των περιοχών i και j , και T_{ij} είναι ο συντελεστής συγχρονισμού της ροής ανάμεσα στις δύο περιοχές. Παρατηρούμε ότι η ανταλλασσόμενη ισχύς είναι το ολοκλήρωμα της διαφοράς συχνότητας μεταξύ των δύο περιοχών. Στην παρούσα εργασία δεν θα μας απασχολήσει η ρύθμιση φορτίου συχνότητας στα διασυνδεδεμένα συστήματα αλλά θα επικεντρωθούμε κυρίως στα μη διασυνδεδεμένα συστήματα όπως αυτό της Κύπρου.

2.6 Σφάλμα Ελέγχου Περιοχής (ΣΕΠ)

Όταν ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας έχει εξωτερική διασύνδεση, τότε μια μεταβολή φορτίου ΔP καλύπτεται εν μέρει από την πρωτεύουσα ρύθμιση και την αυτορρύθμιση του φορτίου, και κατά το υπόλοιπο μέρος από την αύξηση της εισαγόμενης ισχύος ΔP_t . Στην περίπτωση του διασυνδεδεμένου συστήματος έχουμε:

$$\Delta P = -C\Delta f + \Delta P_t$$

Όπου C είναι ο συντελεστής ισχύος που εκφράζει τη ρυθμίζουσα ενέργεια της περιοχής και μετριέται σε MW/Hz.

Στα συστήματα με εξωτερική διασύνδεση η ρύθμιση υπάρχουν τρεις τύποι ρύθμισης φορτίου-συχνότητας ανάλογα με τα ελεγχόμενα μεγέθη. Ο πρώτος ονομάζεται επίπεδος έλεγχος συχνότητας (flat frequency control), κατά τον οποίο ρυθμίζεται μόνο η συχνότητα του συστήματος, ενώ δεν ελέγχεται η διασυνδετική ροή. Αυτό το είδος ελέγχου εφαρμόζεται στα αυτόνομα συστήματα, ενώ έχει εφαρμογή και σε χαλαρά διασυνδεδεμένα συστήματα, η εξωτερική διασύνδεση των οποίων είναι μικρής ισχύος. Αντίθετα, σε στενά διασυνδεδεμένα συστήματα η ροή ισχύος στη διασυνδετική γραμμή πρέπει να ελέγχεται συνεχώς.

Ο δεύτερος τύπος ρύθμισης ονομάζεται επίπεδος έλεγχος διασύνδεσης (flat tie – line control). Σε αυτό το είδος ελέγχου ρυθμίζεται μόνο η ροή της εξωτερικής διασύνδεσης. Η παραγόμενη ισχύς αναπροσαρμόζεται έτσι ώστε να παραμένει σταθερή η ανταλλαγή ισχύος με το εξωτερικό σύστημα, ανεξάρτητα από τις μεταβολές φορτίου στο ένα ή και στα δύο συστήματα. Αυτός ο τύπος ελέγχου έχει εφαρμογή σε συστήματα που είναι συνδεδεμένα με πολύ μεγαλύτερά τους. Το μεγάλο σύστημα σ' αυτή την περίπτωση αναλαμβάνει ουσιαστικά να κρατά τη συχνότητα σταθερή.

Ο τρίτος τύπος ρύθμισης είναι ο σύνθετος έλεγχος με συντελεστή πολώσεως (biased frequency tie – line), ο οποίος είναι ο πιο διαδεδομένος τύπος ρύθμισης φορτίου-συχνότητας για τα συστήματα με εξωτερική διασύνδεση. Ο έλεγχος αυτός περιλαμβάνει δύο μετρήσεις, τόσο της συχνότητας όσο και της διασυνδετικής ροής, οι οποίες χρησιμοποιούνται για να υπολογιστεί το σφάλμα ελέγχου περιοχής (ΣΕΠ ή αλλιώς Area Control Error - ACE):

$$\text{ΣΕΠ} = \Delta P_t - B\Delta f$$

Όπου B είναι ο συντελεστής πολώσεως του σφάλματος της συχνότητας και μετριέται σε MW/Hz. Όταν ο συντελεστής πολώσεως είναι ίσος με τη χαρακτηριστική C της περιοχής στην οποία αναφέρεται, το σφάλμα ελέγχου περιοχής ισούται με την τιμή της μεταβολής φορτίου ΔP στη περιοχή. Στην περίπτωση αυτή η ρύθμιση φορτίου-συχνότητας ενεργοποιείται μόνο για μεταβολές που συμβαίνουν στο εσωτερικό του συστήματος, ενώ παραμένει αδρανής στις εξωτερικές μεταβολές φορτίου. Η τελευταία ιδιότητα είναι εξαιρετικά σημαντική στα διασυνδεδεμένα συστήματα διότι αφενός κάθε σύστημα αναλαμβάνει το δικό του φορτίο και αφετέρου στη μεταβατική περίοδο μετά από μια σοβαρή διαταραχή στο ένα σύστημα, το άλλο συνεχίζει να το ενισχύει μέσω της διασυνδετικής ροής μέχρι να μπορέσει το πρώτο σύστημα να αναλάβει όλο το φορτίο που του αναλογεί.

2.7 Αυτορρύθμιση φορτίου

Το συνολικό φορτίο ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας λόγω της επαγωγικής συνιστώσας του (κινητήρες επαγωγής) εξαρτάται άμεσα από τη συχνότητα. Όταν αυξάνει η συχνότητα, αυξάνεται και το επαγωγικό φορτίο. Αντίθετα όταν μειώνεται η συχνότητα μειώνεται και το επαγωγικό φορτίο. Η εξάρτηση αυτή εκφράζεται από την ευαισθησία του φορτίου ως προς τη συχνότητα ($k_{pf} = \partial P / \partial f$). Αυτή η εξάρτηση προσθέτει μια συνιστώσα αυτορρύθμισης στο σύστημα, δεδομένου ότι όταν αυξάνει το φορτίο, η μείωση της συχνότητας συνεπάγεται μια αντίστοιχη ελάττωση του φορτίου, μειώνοντας συνεπώς την ανάγκη για πρόσθετη παραγωγή.

Στη σχετική ανάλυση, η αυτορρύθμιση εκφράζεται με το συντελεστή αυτορρύθμισης φορτίου D , ο οποίος ορίζεται ως εξής:

$$D = \frac{\Delta P}{\Delta \omega} \text{ α. μ.}$$

Όπου ΔP και $\Delta \omega$ είναι οι ανά μονάδα μεταβολές του φορτίου και της συχνότητας αντίστοιχα. Ο συντελεστής αυτορρύθμισης έχει διαστάσεις αντίστροφου στατισμού. Σημειώνεται, ότι επειδή στη μεταβατική περίοδο της διαταραχής το σφάλμα της συχνότητας είναι πολύ μεγαλύτερο από εκείνο της μόνιμης κατάστασης, η αυτορρύθμιση του φορτίου είναι αποτελεσματικότερη στο μεταβατικό στάδιο.

2.8 Ευστάθεια Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας

2.8.1 Ορισμός Ευστάθειας

Ένα Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας αποτελείται από πολλές διασυνδεδεμένες σύγχρονες γεννήτριες. Οι γεννήτριες αυτές παράγουν την ηλεκτρική ενέργεια η οποία μέσω των γραμμών μεταφοράς καταλήγει στους καταναλωτές. Προκειμένου το σύστημα να λειτουργεί ομαλά οι γεννήτριες θα πρέπει να βρίσκονται μεταξύ τους σε συγχρονισμό, δηλαδή

να περιστρέφονται με την ίδια γωνιακή ταχύτητα. Σε μια τέτοια περίπτωση η κατάσταση του συστήματος θεωρείται ευσταθής. Αντίθετα, αν έστω και μια γεννήτρια επιταχύνεται ή επιβραδύνεται πέρα από τη σύγχρονη ταχύτητα και οδηγείται σε αποσυγχρονισμό η κατάσταση του συστήματος θεωρείται ασταθής. Η μελέτη της ευστάθειας ενός συστήματος έγκειται στον τρόπο με τον οποίο το σύστημα θα αντιδράσει σε μια διαταραχή. Ο τρόπος αυτός εξαρτάται από τον τύπο της διαταραχής. Γενικά υπάρχουν δύο κατηγορίες ευστάθειας : η ευστάθεια μονίμου καταστάσεως και η μεταβατική ευστάθεια. Η ευστάθεια μονίμου καταστάσεως αφορά τις μικρές διαταραχές και καλείται να απαντήσει στο ερώτημα αν μετά από μια μικρή διαταραχή οι γεννήτριες θα επανέλθουν στο αρχικό σημείο λειτουργίας τους ή θα απομακρυνθούν οριστικά από αυτό. Η μεταβατική ευστάθεια αφορά τις σοβαρές διαταραχές (π.χ. βραχυκυκλώματα) και καλείται να απαντήσει στο ερώτημα αν μετά από μια σοβαρή διαταραχή στο δίκτυο αν θα μπορέσουν να ξαναβρεθούν οι γεννήτριες σε κατάσταση συγχρονισμού ή μία τουλάχιστον θα αποσυγχρονιστεί.

“Ευστάθεια ενός Σ.Η.Ε ορίζεται η ικανότητα του συστήματος, για ένα δεδομένο αρχικό σημείο λειτουργίας, να επανέρχεται σε ένα σημείο λειτουργίας (το οποίο είναι και σημείο ισορροπίας) μετά από μια διαταραχή, ώστε το συνολικό σύστημα να παραμένει πρακτικά αμετάβλητο”.

Τα Σ.Η.Ε είναι μη γραμμικά συστήματα και λειτουργούν σε ένα συνεχώς μεταβαλλόμενο περιβάλλον (συνεχείς μεταβολές φορτίων, παραμέτρων κ.α.). Όταν τέτοια συστήματα υφίστανται μια διαταραχή, η ευστάθεια του συστήματος εξαρτάται τόσο από το αρχικό σημείο λειτουργίας όσο και από την φύση της διαταραχής. Τα Σ.Η.Ε υφίστανται κατά την λειτουργία τους, πολλών ειδών διαταραχές. Αυτό μπορεί να αφορά μικρές διαταραχές των οποίων το πιο τυπικό παράδειγμα είναι οι μεταβολές στο φορτίο, οι οποίες συμβαίνουν διαρκώς. Το σύστημα θα πρέπει να μπορεί να προσαρμόζεται σε αυτές τις διαρκείς μεταβολές και να λειτουργεί ικανοποιητικά. Μια δεύτερη κατηγορία διαταραχών είναι οι διαταραχές μεγάλης κλίμακας, στις οποίες περιλαμβάνονται βραχυκυκλώματα σε γραμμές μεταφοράς ή υποσταθμούς, απώλειες μονάδων παραγωγής ή φορτίων. Οι διαταραχές μεγάλης κλίμακας συνήθως οδηγούν σε δομικές αλλαγές του συστήματος λόγω της απομόνωσης των στοιχείων στα οποία παρουσιάστηκε το σφάλμα.

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

2.8.2 Κατηγοριοποίηση φαινομένων ευστάθειας στα Σ.Η.Ε

Η ευστάθεια των Σ.Η.Ε αποτελεί στην πραγματικότητα ένα ενιαίο πρόβλημα. Ωστόσο η πολυπλοκότητα των μηχανισμών αστάθειας δεν επιτρέπει την εύκολη κατανόηση και την μελέτη του προβλήματος αν αντιμετωπιστεί ως ενιαίο. Λόγω της πολυπλοκότητας και της αυξημένης διάστασης του προβλήματος αυτού, βοηθά η θεώρηση κάποιων παραδοχών που το απλοποιούν, έτσι ώστε να αναλύονται συγκεκριμένοι τύποι ευστάθειας με χρήση του ανάλογου επιπέδου λεπτομέρειας στην μοντελοποίηση των διατάξεων του ΣΗΕ. Οι παραδοχές αυτές οδηγούν σε ένα απλοποιημένο μοντέλο του συστήματος, στο οποίο όμως διατηρείται αναλλοίωτη η δυναμική των φαινομένων που ενδιαφέρουν κάθε φορά. Συγκεκριμένα, η μελέτη της ευστάθειας των ΣΗΕ περιλαμβάνει την ανάλυση των φαινομένων τα οποία συνεισφέρουν στη διέγερση των μηχανισμών αστάθειας και στη συνέχεια την επεξεργασία μεθόδων ενίσχυσης της ευσταθούς λειτουργίας του συστήματος. Ανάλογα με τις επιπτώσεις της διαταραχής στο δίκτυο, διακρίνονται η ευστάθεια μικρών και μεγάλων διαταραχών. Η κατηγοριοποίηση των τύπων ευστάθειας βασίζεται στα παρακάτω κριτήρια:

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

Η κατηγοριοποίηση των φαινομένων ευστάθειας των Σ.Η.Ε σύμφωνα με τον Πίνακα Χ, γίνεται βάσει της χρονικής κλίμακας εξέλιξης των φαινομένων και της κινητήριας δύναμης των δυναμικών φαινομένων αστάθειας.

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

Πίνακας 2.8.2-1: Κατηγοριοποίηση φαινομένων ευστάθειας Σ.Η.Ε.

2.8.3 Ευστάθεια γωνίας

Η ευστάθεια γωνίας (Rotor angle stability) αναφέρεται στην ικανότητα των σύγχρονων μηχανών ενός διασυνδεδεμένου συστήματος να παραμένουν σε συγχρονισμό μετά από κάποια διαταραχή. Η ευστάθεια αυτού του είδους εξαρτάται από την ικανότητα αποκατάστασης ισορροπίας μεταξύ της αναπτυσσόμενης ηλεκτρομαγνητικής ροπής και της μηχανικής ροπής. Το πρόβλημα της ευστάθειας γωνίας προϋποθέτει την μελέτη των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων. Οι ταλαντώσεις αυτές συνδέονται με τον τρόπο που μεταβάλλεται η έγχυση ηλεκτρικής ισχύος από την γεννήτρια σε σχέση με την γωνία του δρομέα της. Σε συνθήκες ισορροπίας, η ηλεκτρική και μηχανική ροπή της γεννήτριας είναι ίσες, συνεπώς η ταχύτητα περιστροφής παραμένει σταθερή. Στην περίπτωση όμως μιας διαταραχής, προκαλείται ανισορροπία μεταξύ των δυο ροπών με αποτέλεσμα ο δρομέας να επιταχύνεται ή να επιβραδύνεται. Η μεταβολή αυτή στην ταχύτητα, άρα και στην σχετική ταχύτητα μεταξύ των γεννητριών οδηγεί στην μεταβολή της σχετικής γωνίας. Τελικά η μεταβολή αυτή οδηγεί στην μεταβολή της έγχυσης ισχύος, ή με άλλα λόγια στην μεταφορά μέρους του φορτίου από την μία γεννήτρια στην άλλη. Σημειώνεται ότι η χαρακτηριστική ενεργού ισχύος-γωνίας δρομέα είναι εξόχως μη γραμμική. Εάν ξεπεραστεί ένα συγκεκριμένο όριο, τότε μία αύξηση στη διαφορά των δύο γωνιών συνοδεύεται από μία μείωση της μεταφερόμενης ισχύος, ώστε η γωνιακή διαφορά οδηγείται σε περαιτέρω αύξηση. Η ευστάθεια γωνίας διαχωρίζεται, όπως φαίνεται ανάλογα με το είδος των διαταραχών που μελετώνται. Έτσι έχουμε ευστάθεια γωνίας μικρών και μεγάλων διαταραχών.

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

Η ευστάθεια γωνίας μεγάλων διαταραχών ή μεταβατική ευστάθεια γωνίας σχετίζεται με την ικανότητα του συστήματος να παραμένει σε συγχρονισμό μετά από αρκετά σοβαρές διαταραχές, όπως είναι για παράδειγμα ένα τριφασικό βραχυκύκλωμα σε μία γραμμή μεταφοράς. Η απόκριση ενός δικτύου σε μία τόσο σοβαρή διαταραχή διακρίνεται από μεγάλες μεταβολές των γωνιών δρομέα των γεννητριών, ενώ επηρεάζεται έντονα από τη μη γραμμική χαρακτηριστική ενεργού ισχύος-γωνίας δρομέα. Η μεταβατική ευστάθεια εξαρτάται τόσο από το αρχικό σημείο λειτουργίας του συστήματος όσο και από τη σοβαρότητα της διαταραχής. Το χρονικό διάστημα σε μελέτες ευστάθειας γωνίας είναι συνήθως της τάξης λίγων δευτερολέπτων μετά τη διαταραχή. Ωστόσο, σε περιπτώσεις αρκετά μεγάλων ΣΗΕ το διάστημα αυτό μπορεί να επεκταθεί σε λίγες δεκάδες δευτερολέπτων λόγω της κυριαρχίας των ταλαντώσεων διασυνδέσεων.

2.8.4 Ευστάθεια τάσης

Η ευστάθεια τάσης (Voltage stability) αναφέρεται στην ικανότητα του συστήματος να διατηρεί αποδεκτές τιμές τάσεων σε όλους τους ζυγούς όταν υποβάλλεται σε μία διαταραχή από ένα δεδομένο αρχικό σημείο λειτουργίας. Η αστάθεια τάσης προκαλείται από την απόπειρα του φορτίου (μέσω της δυναμικής του συμπεριφοράς) να αυξήσει την ισχύ που καταναλώνει πέρα από τη φυσική ικανότητα μεταφοράς του συνδυασμένου συστήματος παραγωγής και μεταφοράς. Ένα από τα πιθανά αποτελέσματα μιας τέτοιας διαδικασίας είναι η αποσύνδεση κάποιων γραμμών μεταφοράς και άλλων στοιχείων, λόγω της λειτουργίας των προστασιών, και η διαδοχική αποσύνδεση και άλλων στοιχείων του δικτύου σε δεύτερο χρόνο.

Όπως και στην περίπτωση της ευστάθειας γωνίας, η ευστάθεια τάσης μπορεί να διαχωριστεί σε ευστάθεια μικρών και μεγάλων διαταραχών. Η ευστάθεια τάσης μικρών διαταραχών αναφέρεται στην ικανότητα του συστήματος να διατηρεί αποδεκτά επίπεδα τάσεων σε όλους τους ζυγούς, όταν υπόκειται σε μικρές διαταραχές, όπως είναι για παράδειγμα μία ελάχιστη αύξηση στη ζήτηση ενός συγκεκριμένου φορτίου. Το είδος αυτό της ευστάθειας επηρεάζεται από τις χαρακτηριστικές των φορτίων και τις διατάξεις ελέγχου. Η ευστάθεια τάσης μεγάλων διαταραχών αναφέρεται στην ικανότητα του συστήματος να διατηρεί αποδεκτά επίπεδα τάσεων σε όλους τους ζυγούς, ύστερα από σοβαρές διαταραχές όπως η απώλεια γραμμών και μονάδων παραγωγής. Για τον καθορισμό της ευστάθειας τάσης μεγάλων διαταραχών είναι απαραίτητη η εξέταση της μη γραμμικής απόκρισης του Σ.Η.Ε σε μια χρονική περίοδο, αρκετή για να συμπεριλάβει την απόδοση και την αλληλεπίδραση διατάξεων όπως μηχανές, συστήματα αλλαγής τάσης υπό φορτίο (ΣΑΤΥΦ) και περιοριστές διέγερσης σύγχρονων γεννητριών.

Στις μελέτες ευστάθειας τάσης, το χρονικό διάστημα του ενδιαφέροντος κυμαίνεται από λίγα δευτερόλεπτα έως μερικές δεκάδες λεπτών. Επομένως, τα φαινόμενα ευστάθειας τάσης μπορεί να ανήκουν τόσο στη βραχυπρόθεσμη όσο και στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα. Η βραχυπρόθεσμη ευστάθεια τάσης αναφέρεται στη δυναμική συμπεριφορά των γρήγορων συνιστωσών ενός ΣΗΕ, όπως είναι οι σύγχρονες μηχανές, οι μηχανές επαγωγής (φορτία αλλά και γεννήτριες), τα ηλεκτρονικά ελεγχόμενα φορτία, τους μετατροπείς ισχύος καθώς και στην ανάλυση βραχυκυκλωμάτων κοντά στα φορτία. Από την άλλη πλευρά, στη μακροπρόθεσμη ευστάθεια τάσης επιδρούν βραδύτερες διατάξεις του συστήματος, όπως είναι η βαθμίδα περιορισμού του ρεύματος πεδίου στη μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή μόνιμου καταστάσεως των Συστημάτων Προστασίας Υπερδιεγέρσεως (ΣΠΥ) των σύγχρονων γεννητριών, τα ΣΑΤΥΦ των μετασχηματιστών διανομής, οι αυτόματοι μηχανισμοί ζεύξεως-αποζεύξεως στατών πυκνωτών και τα θερμοστατικά φορτία.

2.8.5 Ευστάθεια συχνότητας

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

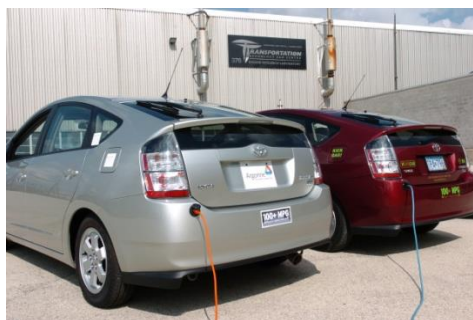
Οι αρκετά μεγάλες μεταβολές φορτίου ή παραγωγής οδηγούν σε μεγάλες διαταραχές της συχνότητας, των ροών ισχύος και των τάσεων και άλλων παραμέτρων οδηγώντας σε ενεργοποίηση διατάξεων προστασίας και ελέγχου, των οποίων η συνεισφορά στην ανάλυση της μεταβατικής ευστάθειας ή της ευστάθειας τάσης θεωρείται αμελητέα. Στις διατάξεις αυτές περιλαμβάνονται οι ατμοπαραγωγοί των ατμοηλεκτρικών μονάδων, καθώς επίσης και τα συστήματα προστασίας που ενεργοποιούνται σε εξαιρετικά κρίσιμες καταστάσεις, όπως είναι για παράδειγμα τα συστήματα προστασίας μαγνητικής ροής (V/Hz limiters) των σύγχρονων γεννητριών. Σημειώνεται ότι οι διατάξεις αυτές ανήκουν κατά κύριο λόγο στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα. Στα μεγάλα διασυνδεδεμένα συστήματα, το ενδιαφέρον σε μελέτες ευστάθειας συχνότητας επικεντρώνεται στις λειτουργικές συνθήκες, οι οποίες δημιουργούνται κατά το φαινόμενο της νησιδοποίησης. Στις περιπτώσεις αυτές, η ευστάθεια εξαρτάται από το εάν και κατά πόσον, κάθε νησιδοποιημένο σύστημα θα φτάσει στο σημείο ισορροπίας με την ελάχιστη δυνατή απόρριψη παραγωγής ή φορτίου (load shedding). Η ευστάθεια συχνότητας προσδιορίζεται περισσότερο από τη συνολική απόκριση της μέσης συχνότητας κάθε νησίδας, παρά από τη σχετική δυναμική κίνηση των στρεφόμενων μηχανών. Σε γενικές γραμμές, τα προβλήματα αστάθειας συχνότητας σχετίζονται με αστοχίες του εξοπλισμού προστασίας, με ανεπιτυχή συνεργασία μεταξύ των διατάξεων ελέγχου και προστασίας, με έλλειψη στρεφόμενης εφεδρείας ή με περίσσεια παραγωγής μετά από νησιδοποίηση.

Όταν συμβεί μια διαταραχή σε ένα Σ.Η.Ε η πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας ενεργοποιείται σε διάστημα δευτερολέπτων και η δευτερεύουσα ρύθμιση διαρκεί για κάποια λεπτά. Τα φαινόμενα ευστάθειας συχνότητας κατατάσσονται στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα, διότι στη διέγερσή τους κυρίαρχο ρόλο διαδραματίζουν ορισμένες αργές συνιστώσες του συστήματος, όπως είναι για παράδειγμα οι στρόβιλοι και οι αντίστοιχοι ρυθμιστές στροφών των μονάδων παραγωγής, καθώς επίσης και τα συστήματα ελέγχου και προστασίας των σύγχρονων γεννητριών.

3. Ηλεκτρικά οχήματα

3.1 Εισαγωγή - Η αναγκαιότητα κατασκευής ηλεκτρικών οχημάτων

Η συστηματική και συνεχώς αυξανόμενη χρήση των οχημάτων με κινητήρες εσωτερικής καύσης τις τελευταίες δεκαετίες συντέλεσαν στην ανάπτυξη δύο ιδιαίτερα σημαντικών προβλημάτων σε παγκόσμιο επίπεδο. Το πρώτο σχετίζεται με τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις



των οχημάτων αυτών και έχει να κάνει με το φαινόμενο του θερμοκηπίου και τη κλιματική αλλαγή. Οι συγκεντρώσεις αέριων ρύπων από τα μεγάλα αστικά κέντρα συμβάλουν στην επικίνδυνη μείωση του προστατευτικού στρώματος της ατμόσφαιρας(τρύπα του όζοντος) και στην δημιουργία όξινης βροχής. Το δεύτερο πρόβλημα σχετίζεται με την ενεργειακή κρίση λόγω εξάντλησης των ορυκτών πόρων. Το πεπερασμένο των

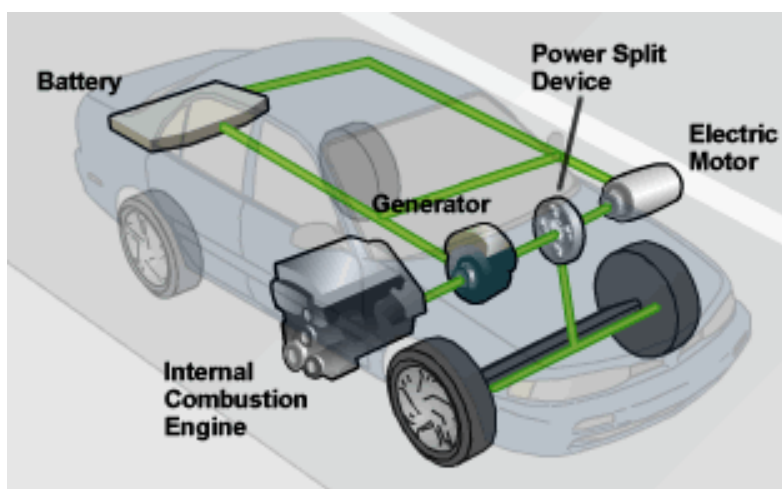
φυσικών αποθεμάτων του αργού πετρελαίου καθιστά την εύρεση λύσεων επιτακτική ανάγκη. Η περιβαλλοντική ευαισθησία και η εξάντληση των ενεργειακών πόρων οδήγησαν τους κατασκευαστές στο σχεδιασμό ηλεκτρικών οχημάτων τα οποία εξασφαλίζουν μηδενική εκπομπή ρύπων, τουλάχιστον κατά τη λειτουργία του οχήματος, και αποδεσμεύει τους χρήστες από τη χρήση υγρών καυσίμων.

Επιπλέον τα ηλεκτρικά οχήματα εκτός από την ιδιότητα του μέσου μεταφοράς αποτελούν και κινητές συσκευές αποθήκευσης ενέργειας καθώς οι μπαταρίες τους φέρουν σημαντικά ποσά ενέργειας. Τα τελευταία χρόνια εκπονούνται διάφορες μελέτες σε ερευνητικό επίπεδο με στόχο την εκμετάλλευση της διείσδυσης των ηλεκτρικών οχημάτων στο ηλεκτρικό δίκτυο. Η αξιοποίηση της ενέργειας των μπαταριών τους κατά την διάρκεια της φόρτισης μπορεί να επιφέρει σημαντικά οφέλη στη λειτουργία του ηλεκτρικού δικτύου. Ο λόγος είναι ότι τα ηλεκτρικά οχήματα μπορούν να λειτουργούν αφενός σαν ελεγχόμενα φορτία και αφετέρου σαν κατανεμημένες πηγές ενέργειας. Έτσι τα οχήματα αυτά μπορούν να θεωρηθούν ως ένα νέο ιδιόμορφο είδος φορτίου το οποίο μπορεί να συμβάλει σημαντικά στη βελτιστοποίηση της λειτουργίας των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας.

3.2 Κατηγοριοποίηση ηλεκτρικών οχημάτων

3.2.1 Υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα (Hybrid Electric Vehicles-HEVs)

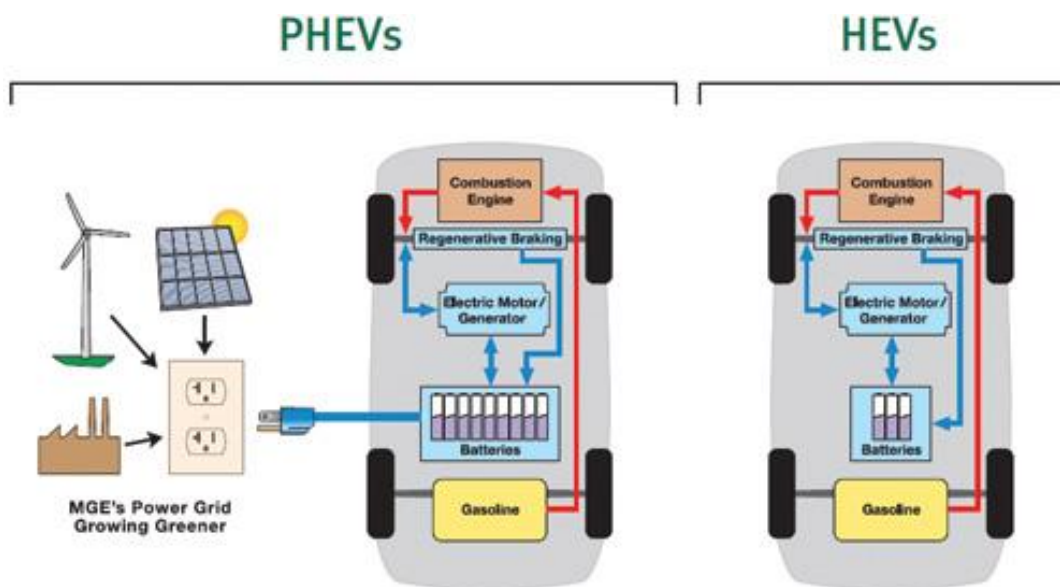
Βασικό χαρακτηριστικό της τεχνολογίας των υβριδικών οχημάτων είναι η ταυτόχρονη χρήση ηλεκτρικού κινητήρα και μηχανής εσωτερικής καύσης η οποία τροφοδοτείται με συμβατικά καύσιμα(βενζίνη ή πετρέλαιο). Λόγω αυτής της ιδιαιτερότητας της υβριδικής τεχνολογίας η λειτουργία των υβριδικών οχημάτων χωρίζεται σε δύο κατηγορίες, την παράλληλη και τη σειριακή. Στην παράλληλη λειτουργία γίνεται χρήση αποκλειστικά είτε του ηλεκτροκινητήρα είτε του κινητήρα εσωτερικής καύσης. Κατά τη σειριακή λειτουργία χρησιμοποιείται μόνον ο ηλεκτροκινητήρας ο οποίος αντλεί ενέργεια από τους συσσωρευτές. Όταν τα αποθέματα ενέργειας των συσσωρευτών τείνουν να εξαντληθούν επιστρατεύεται και ο κινητήρας της Μ.Ε.Κ για τη φόρτιση τους χωρίς να εμπλέκεται στην κίνηση του οχήματος. Τα υβριδικά οχήματα φέρουν συσσωρευτές οι οποίοι φορτίζουν μέσω της αναγεννητικής πέδησης. Συγκεκριμένα μέρος της κινητικής ενέργειας του οχήματος μετατρέπεται σε ηλεκτρική μέσω ηλεκτρικής μηχανής η οποία στο χρονικό διάστημα επιβράδυνσης του οχήματος λόγω φρεναρίσματος λειτουργεί ως γεννήτρια για τη φόρτιση των συσσωρευτών. Τα υβριδικά αυτοκίνητα έχουν χαμηλές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. Ακόμα και αν ληφθούν υπόψη οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα λόγω των ενεργειακών τους απαιτήσεων εντάσσονται στις κατηγορίες οχημάτων με τις χαμηλότερες εκπομπές CO₂ ανά χιλιόμετρο. Στην εικόνα 3.2.1-1 παρουσιάζονται τα βασικά στοιχεία ενός υβριδικού οχήματος.



Εικόνα 3.2.1-1 : Βασικά στοιχεία υβριδικού οχήματος.

3.2.2 Επαναφορτιζόμενα Υβριδικά οχήματα (Plug-in Hybrid Electric Vehicles- PHEVs)

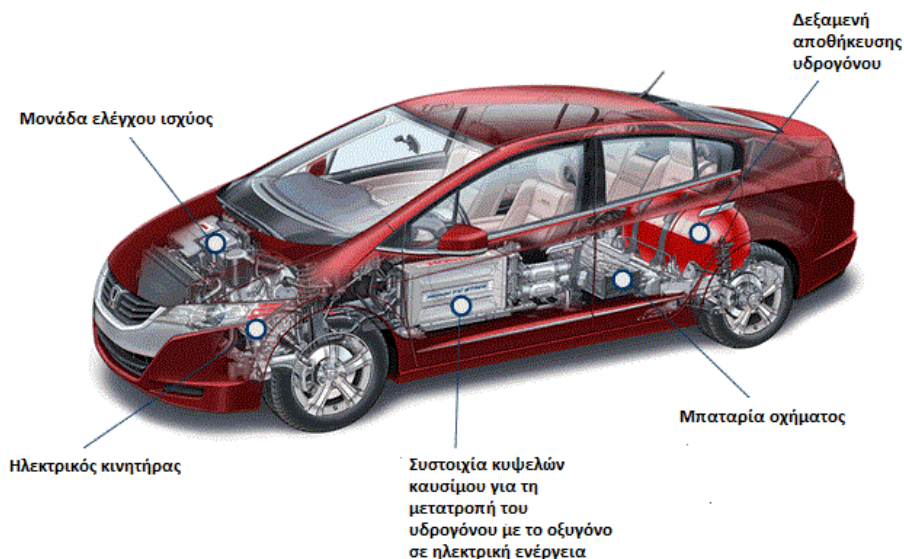
Τα PHEVs αποτελούν εξέλιξη της υβριδικής τεχνολογίας στα οποία ένα μέρος της ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιείται για την κίνηση τους προέρχεται από το δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας ή από κάποια αυτόνομη μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για τη φόρτιση των συσσωρευτών τους. Για τη σύνδεση τους με το δίκτυο ηλεκτρικής παροχής απαιτείται η χρήση ειδικού ακροδέκτη και μια κατάλληλη συσκευή φόρτισης των συσσωρευτών τους (φόρτισης). Τα PHEVs φέρουν συσσωρευτές μεγαλύτερης χωρητικότητας από τα HEVs ώστε να μπορεί να αποθηκεύεται τόσο η ηλεκτρική ενέργεια που εγχέεται από το δίκτυο διανομής όσο και αυτή που παράγεται από το υβριδικό σύστημα λειτουργίας τους. Τα PHEVs συνήθως διακρίνονται σε κατηγορίες ανάλογα με την απόσταση αυτονομίας τους ως αμιγώς ηλεκτρικά οχήματα (π.χ. 20, 40, 60 χιλιόμετρα, κλπ) και με τη χωρητικότητα των συσσωρευτών τους. Η χρήση αυτών των οχημάτων αποτελεί ένα προοδευτικό βήμα για την ηλεκτροκίνηση και ταυτόχρονα επιτυγχάνεται η διεύρυνση του φάσματος των ενεργειακών πηγών που χρησιμοποιούνται για τις οδικές μεταφορές. Από περιβαλλοντικής πλευράς το σημαντικότερο πλεονέκτημα των PHEVs είναι ότι μπορούν να διανύσουν σημαντικές αποστάσεις (από 20 έως 60 χιλιόμετρα) ως αμιγώς ηλεκτρικά οχήματα με συσσωρευτές με αποτέλεσμα τις μηδενικές εκπομπές αερίων ρύπων CO₂. Στην παρακάτω εικόνα βλέπουμε τις βασικές διαφορές των επαναφορτιζόμενων υβριδικών από τα απλά υβριδικά οχήματα.



Εικόνα 3.2.2-1: Σύγκριση τεχνολογίας υβριδικών οχημάτων με των επαναφορτιζόμενων υβριδικών με ηλεκτρική ενέργεια από εξωτερική πηγή.

3.2.3 Ηλεκτρικά οχήματα με χρήση κυψελών καυσίμου (Fuel Cell Electric Vehicles-FCEVs)

Τα ηλεκτρικά οχήματα με χρήση κυψελών καυσίμου ουσιαστικά είναι μια μορφή υβριδικών οχημάτων σειριακής λειτουργίας, τα οποία όμως για τη φόρτιση των συσσωρευτών τους και την τροφοδότηση του ηλεκτρικού κινητήρα χρησιμοποιούν ενεργειακά στοιχεία κυψελών καυσίμου (fuel cells) αντί για Μ.Ε.Κ. Τα FCEVs διαθέτουν ειδική δεξαμενή αποθήκευσης καθαρού υδρογόνου ή υδρογονανθράκων (όπως μεθανόλη, φυσικό αέριο, κλπ). Η αντίστροφη δράση της ηλεκτρόλυσης παράγει ηλεκτρική ενέργεια από την ηλεκτροχημική σύνθεση υδρογόνου και οξυγόνου το οποίο απορροφάται από την ατμόσφαιρα με ταυτόχρονη παραγωγή καθαρού νερού. Τα FCEV εκπέμπουν στο περιβάλλον μόνο υδρατμούς. Η τεχνολογία των οχημάτων αυτών έχει εφαρμοστεί μόνο πιλοτικά, ενώ στην παρούσα δεκαετία δεν προβλέπονται ευρύτερες εφαρμογές της για λόγους που σχετίζονται με το κόστος της, την ασύμφορη ενεργειακή παραγωγή υδρογόνου και τις δυσχέρειες μεταφοράς και διανομής του.

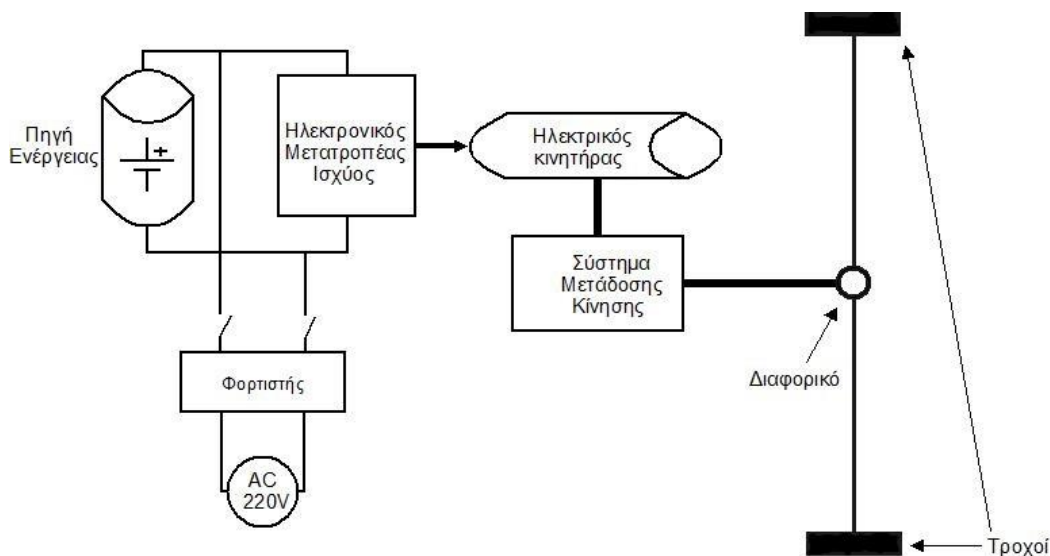


Εικόνα 3.2.3-1: Μοντέλο ηλεκτρικού οχήματος με χρήση κυψελών καυσίμου.

3.2.4 Ηλεκτρικά οχήματα με συσσωρευτές (Battery Electric Vehicles-BEVs)

Τα ηλεκτρικά οχήματα με συσσωρευτές ή αλλιώς αμιγώς ηλεκτρικά οχήματα έχουν ως μοναδική πηγή ενέργειας τους συσσωρευτές οι οποίοι τροφοδοτούν τον ηλεκτροκινητήρα. Με την απουσία κινητήρα εσωτερικής καύσης εξασφαλίζεται η μηδενική εκπομπή αερίων ρύπων

CO₂ καθιστώντας τα BEVs ως το φιλικότερο είδος οχημάτων προς το περιβάλλον. Όπως και στα PHEVs συσσωρευτές φορτίζουν κατά τη σύνδεση του ηλεκτρικού οχήματος με το δίκτυο ή με άλλη εξωτερική μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας αλλά και μέσω της αναγεννητικής πέδησης. Τα BEVs φέρουν συσσωρευτές μεγαλύτερης χωρητικότητας εν συγκρίσει με τα είδη ηλεκτρικών οχημάτων που προαναφέρθηκαν. Αυτό αποτελεί και το μειονέκτημα των BEVs είναι καθώς οι συσσωρευτές είναι ακριβοί, έχουν σημαντικό βάρος και όγκο ενώ χρειάζονται μεγάλο χρόνο επαναφόρτισης. Συγκρινόμενοι με τη δεξαμενή καυσίμου των συμβατικών οχημάτων αντιστοιχούν σε ένα μικρό μέρος της ενεργειακής χωρητικότητάς της. Παρόλα αυτά τα BEVs έχουν πολλά πλεονεκτήματα όπως ευκολία στην κατασκευή, οικονομικά, αθόρυβα, δεν ρυπαίνουν τοπικά, ελάχιστες απαιτήσεις συντήρηση και ανεξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα. Με τη σημερινή εξέλιξη της ηλεκτροκίνησης υπάρχει η δυνατότητα κατασκευής και διάθεσης στην αγορά σύγχρονων BEV με απόσταση αυτονομίας 120 έως 200 χιλιομέτρων. Οι ανάγκες της καθημερινής μετακίνησης καλύπτονται πλήρως με εξαίρεση μόνο των ταξιδιών μεγάλης απόστασης.



Εικόνα 3.2.4-1: Σχηματική απεικόνιση των δομικών στοιχείων ενός αμιγούς ηλεκτρικού οχήματος.

Στην παραπάνω εικόνα παρουσιάζονται τα βασικά τμήματα που συνήθως αποτελούν ένα ηλεκτρικό όχημα τα οποία είναι η πηγή ενέργειας (ή μονάδα αποθήκευσης ενέργειας με φορτιστή), ο ηλεκτρονικός μετατροπέας ισχύος, ο ηλεκτρικός κινητήρας, το σύστημα μετάδοσης κίνησης, το διαφορικό και οι τροχοί του οχήματος.

Στην παρούσα μελέτη μας ενδιαφέρουν τα ηλεκτρικά οχήματα τα οποία έχουν δυνατότητα επαναφόρτισης μέσω του ηλεκτρικού δικτύου διανομής. Όπως ήδη αναφέρθηκε η αξιοποίηση της ενέργειας των μπαταριών τους κατά την διάρκεια της φόρτισης μπορεί να επιφέρει σημαντικά οφέλη στη λειτουργία του ηλεκτρικού δικτύου. Στην επόμενη ενότητα

κρίνεται σκόπιμο να κάνουμε μια σύντομη αναφορά στις κυριότερες τεχνολογίες συσσωρευτών που έχουν αναπτυχθεί μέχρι σήμερα καθώς και τα χαρακτηριστικά τους.

3.3 Χαρακτηριστικά και τεχνολογίες συσσωρευτών ηλεκτρικών οχημάτων

Οι συσσωρευτές των ηλεκτρικών οχημάτων εκτός από πηγές αποτελούν και αποθήκες ενέργειας. Αυτός είναι ο λόγος άλλωστε που τα ηλεκτρικά οχήματα χαρακτηρίζονται συχνά στη βιβλιογραφία ως κινητές συσκευές αποθήκευσης ενέργειας. Η λειτουργία των συσσωρευτών είναι αμφίδρομη αφού μπορούν να μετατρέψουν την ηλεκτρική ενέργεια σε χημική και αντίστροφα. Τις τελευταίες δεκαετίες οι κατασκευαστές μπαταριών εκμεταλλευόμενοι τις τεχνολογικές εξελίξεις καταβάλουν προσπάθεια ώστε να ξεπεραστούν τα μειονεκτήματα όπως το μεγάλο βάρος, ο όγκος και το υψηλό κόστος κατασκευής των μπαταριών που χρησιμοποιούνται στα ηλεκτρικά οχήματα. Οι κυριότερες τεχνολογίες συσσωρευτών που έχουν αναπτυχθεί μέχρι σήμερα είναι οι εξής:

- *Συσσωρευτές μολύβδου οξέος (lead-acid)*: Πρόκειται για συσσωρευτές με ηλεκτρολύτη σε στερεά μορφή. Τα κυριότερα πλεονεκτήματά τους είναι το χαμηλό κόστος, η μεγάλη αξιοπιστία και η σχετικά χαμηλή αυτοεκφόρτιση. Παρόλα αυτά λόγω του μεγάλου βάρους τους έχουν μικρή πυκνότητα ενέργειας. Δεν θεωρούνται κατάλληλες για τα ηλεκτρικά οχήματα καθώς σε περιπτώσεις ταχείας φόρτισης και σχεδόν πλήρους εκφόρτισης μειώνεται σημαντικά ο χρόνος ζωής τους.
- *Συσσωρευτές νικελίου-καδμίου(Ni-Cd)*: Συγκρίνοντας τους με τους συσσωρευτές μολύβδου οξέος έχουν μεγαλύτερη ενεργειακή πυκνότητα και η διάρκεια ζωής τους δεν επηρεάζεται σε περιπτώσεις ταχείας φόρτισης. Δεν επηρεάζονται σημαντικά από τις μεταβολές θερμοκρασίας και έχουν τη δυνατότητα ανάκτησης της χωρητικότητας τους σε περίπτωση που μείνουν αφόρτιστοι για αρκετό χρονικό διάστημα. Σημαντικά μειονεκτήματα αυτών των συσσωρευτών αποτελούν το υψηλό κόστος κατασκευής και η χρήση καδμίου το οποίο πρέπει να περισυλλεχθεί όταν ο κύκλος ζωής της μπαταρίας τελειώσει καθώς μολύνει το περιβάλλον .
- *Συσσωρευτές νικελίου-υδριδίου μετάλλου(Ni-MH)*: Διακρίνονται για τη μεγάλη τους ενεργειακή πυκνότητα (70 Wh/Kg) και τη μεγάλη διάρκεια ζωής. Επιπρόσθετα έχουν χαμηλή εσωτερική αντίσταση και χρησιμοποιούνται κυρίως στα υβριδικά οχήματα όπου σημείωσαν μεγάλη αξιοπιστία και αντοχή. Οι συσσωρευτές Ni-MH έχουν υψηλό κόστος κατασκευής και η απόδοσή τους επηρεάζεται αρνητικά στις υψηλές θερμοκρασίες.

- *Συσσωρευτές ιόντων λιθίου μετάλλου (Li-ion):* Ίσως οι πιο κατάλληλοι συσσωρευτές για ηλεκτρικά οχήματα λόγω της μεγάλης τους ενεργειακής πυκνότητας και διάρκειας ζωής πάντα σε σύγκριση με τις τεχνολογίες συσσωρευτών που αναφέρθηκαν πιο πάνω. Οι συσσωρευτές ιόντων λιθίου κατηγοριοποιούνται με βάση το υλικό κατασκευής της ανόδου. Οι τέσσερις κατηγορίες αυτού του είδους συσσωρευτών είναι : οι συσσωρευτές λιθίου-οξειδίου κοβαλτίου, λιθίου-οξειδίου μαγγανίου, τριών στοιχείων και λιθίου-φωσφορικού σιδήρου (LiFe-PO₄). Το μειονέκτημα τους είναι ότι η απόδοση τους επηρεάζεται αρνητικά στις υψηλές θερμοκρασίες.

Στον παρακάτω πίνακα συνοψίζονται τα χαρακτηριστικά των πιο πάνω συσσωρευτών ανά κατηγορία.

Τύπος Συσσωρευτή	Πυκνότητα Ενέργειας (Wh/Kg)	Ισχύς/Βάρος (W/Kg)	Κόστος Ενέργειας (Wh/€)	Βάθος εκφόρτισης (%)	Τάση Κυττάρου (V)
Lead-Acid	30-40	180	7-18	50-70	2
NiCd	40-60	150	5-10	70-90	1.2
NiMH	30-80	250-1000	2.75	60-70	1.2
Li-ion	100-160	250-340	1.5	80-90	3.7

Πίνακας 3.3-1: Χαρακτηριστικά συσσωρευτών ηλεκτρικών οχημάτων.

3.4 Φόρτιση Ηλεκτρικών Οχημάτων

Οι υποδομές φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων αποτελούν ένα σημαντικό ζήτημα για την ένταξη των ηλεκτρικών οχημάτων στην καθημερινή ρουτίνα. Στην συγκεκριμένη ενότητα θα περιγράψουμε τις κατηγορίες φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων, τις καλωδιώσεις φόρτισης καθώς και τους σταθμούς φόρτισης.

3.4.1 Κατηγορίες φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων

Γενικότερα μπορούμε να μπορούμε να διακρίνουμε δύο κατηγορίες φόρτισης ανάλογα με τη σύνδεση των οχημάτων με τη συσκευή φόρτισης (φορτιστή). Οι κατηγορίες αυτές είναι οι εξής:

- *Ενσύρματη φόρτιση:* Αυτό το είδος φόρτισης γίνεται εξ' επαφής (conductive charge) όπου το όχημα συνδέεται με τη πηγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω ειδικού καλωδίου φόρτισης. Ουσιαστικά το όχημα συνδέεται στη παροχή όπως συνδέονται οι περισσότερες συσκευές στο ηλεκτρικό δίκτυο. Για να καταστεί δυνατή η ορθή

λειτουργία φόρτισης του οχήματος απαιτείται ένα ειδικό σύστημα ελέγχου (ηλεκτρονικό κύκλωμα) το οποίο βρίσκεται τοποθετημένο εντός του ηλεκτρικού οχήματος. Η τεχνολογία ενσύρματης φόρτισης είναι η πιο διαδεδομένη μέχρι σήμερα λόγω του ότι είναι φθηνή, απλή και αρκετά αποδοτική. Από πλευράς ασφάλειας είναι αρκετά ασφαλής λόγω μεθόδων ανίχνευσης σφάλματος. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται ένα ηλεκτρικό όχημα το οποίο φορτίζει στο σταθμό φόρτισης μέσω ενσύρματης σύνδεσης.



Εικόνα 3.4-1: Ενσύρματη σύνδεση ηλεκτρικού οχήματος με το φορτιστή.

- *Επαγωγική φόρτιση:* Η επαγωγική φόρτιση (inductive charge) δεν είναι τόσο διαδεδομένη όσο η ενσύρματη σύνδεση κυρίως λόγω του υψηλού κόστους της. Είναι πιο πολύπλοκη και λιγότερο αποδοτική σε σύγκριση με την ενσύρματη φόρτιση. Αποτελεί μια εναλλακτική μέθοδο φόρτισης η οποία στηρίζεται στην ιδιότητα της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής. Η σύνδεση του οχήματος με την παροχή γίνεται μέσω επαγωγών και όχι εξ' επαφής μέσω ειδικού καλωδίου φόρτισης. Αυτό επιτυγχάνεται με μια ειδική διάταξη όπως αυτή της εικόνας 3.4-2 που μεταφέρει ενέργεια επαγωγικά.



Εικόνα 3.4-2: Διάταξη επαγωγικής φόρτισης ηλεκτρικού οχήματος.



Εικόνα 3.4-3: Συσκευή paddle. Εισάγεται στη θύρα επαναφόρτισης του ηλεκτρικού οχήματος.

Η συσκευή της εικόνας 3.4-3 είναι ουσιαστικά το πρωτεύον τύλιγμα ενός μετασχηματιστή το οποίο περιβάλλεται από ειδικό προστατευτικό κάλυμμα. Η συσκευή paddle εισάγεται στη θύρα επαναφόρτισης του ηλεκτρικού οχήματος και μαζί δημιουργούν μαγνητική ζεύξη. Το ρεύμα που διαπερνά το πρωτεύον τύλιγμα στο εσωτερικό τη συσκευής paddle δημιουργεί μαγνητική ροή η οποία με τη σειρά της δημιουργεί εναλλασσόμενο ρεύμα στο δευτερεύον τύλιγμα το οποίο βρίσκεται στη θύρα επαναφόρτισης. Ακολούθως μέσω ειδικού μετατροπέα AC/DC που βρίσκεται εντός του οχήματος το εναλλασσόμενο ρεύμα μετατρέπεται σε συνεχές για τη φόρτιση των συσσωρευτών. Στην επαγωγική φόρτιση το μεγαλύτερο μέρος των υποδομών φόρτισης και ελέγχου της βρίσκονται εκτός του ηλεκτρικού οχήματος. Τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει η διάταξη αυτή είναι η ικανότητα λειτουργίας κάτω από οποιεσδήποτε συνθήκες [π.χ. νερό, πάγος, σκόνη] ενώ παράλληλα παρέχει ασφάλεια έναντι ηλεκτροπληξίας.

3.4.2 Επίπεδα ισχύος φόρτισης

Οι σταθμοί φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων διαφέρουν μεταξύ τους ανάλογα με το επίπεδο της ισχύος φόρτισης που παρέχουν. Όπως αναφέρθηκε τεχνολογία ενσύρματης σύνδεσης είναι η επικρατέστερη στους σταθμούς φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων. Υπάρχουν σταθμοί με μονοφασική ή τριφασική AC σύνδεση αλλά και σταθμοί με DC σύνδεση. Τα επίπεδα ισχύος φόρτισης είναι τα πιο κάτω:

- *Επίπεδο 1 (slow charging):* Περιλαμβάνει τη μονοφασική AC σύνδεση η οποία ουσιαστικά δεν διαφέρει από ένα απλό ρευματοδότη (πρίζα) οικίας. Η φόρτιση από μονοφασική παροχή είναι αργή και η παρεχόμενη ισχύς είναι συνήθως 3 -7,4 KW.

- *Επίπεδο 2 (semi-fast charging)*: Περιλαμβάνει την τριφασική AC σύνδεση η οποία παρέχει υψηλότερα επίπεδα ισχύος φόρτισης από τη μονοφασική. Η φόρτιση από τριφασική παροχή δίνει τη δυνατότητα μεταφοράς μεγάλης ισχύος χωρίς να απαιτούνται μεγάλες τάσεις και ρεύματα. Η φόρτιση των συσσωρευτών επιτυγχάνεται γρηγορότερα από μια τριφασική παροχή εν συγκρίσει με μια μονοφασική. Η παρεχόμενη ισχύς φόρτισης είναι συνήθως 10 -20 KW.
- *Επίπεδο 3 (fast charging)*: Περιλαμβάνει τις παροχές μέσω των οποίων μπορεί να επιτευχθεί ταχεία φόρτιση. Οι παροχές αυτές μπορεί να είναι μια τριφασική AC σύνδεση ή μια DC σύνδεση. Σε αυτές τις περιπτώσεις απαιτούνται ξεχωριστές εγκαταστάσεις φόρτισης και καλωδίωσης. Η διάρκεια φόρτισης με αυτές τις παροχές είναι λιγότερο από 45 λεπτά με ισχύ φόρτισης συνήθως 40 KW.Στον πίνακα 3.4.2-1 συνοψίζονται τα κυριότερα χαρακτηριστικά κάθε επιπέδου φόρτισης.

Επίπεδο φόρτισης	Απαιτήσεις	Ισχύς φόρτισης	Χρόνος φόρτισης (35KWh μπαταρία)
1	Καμία	3 -7,4 KW	5-12 ώρες
2	Ειδική καλωδίωση	10 -20 KW	2-4 ώρες
3	Ειδική καλωδίωση & εξωτερικός φορτιστής	40 KW	<45 λεπτά

Πίνακας 3.4.2-1: Επίπεδα φόρτισης και βασικά χαρακτηριστικά.

3.5 Καλωδιώσεις φόρτισης

Οι μέχρι σήμερα τεχνολογικές εξελίξεις βοήθησαν στη κατασκευή μιας μεγάλης ποικιλίας καλωδίων φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων. Αυτό ίσως να είναι προβληματικό από τη πλευρά των χρηστών των ηλεκτρικών οχημάτων, καθώς αναμένουν να είναι σε θέση να φορτίζουν τα οχήματά τους σε οποιοδήποτε σταθμό φόρτισης. Από την άλλη πλευρά οι σταθμοί φόρτισης πρέπει να έχουν τη δυνατότητα εγκατάστασης διαφόρων διεπαφών φόρτισης ώστε να μπορούν φιλοξενήσουν διαφορετικά οχήματα. Γι' αυτό το λόγο έχουν αρχίσει κοινές προσπάθειες από τους κατασκευαστές αυτοκινήτων, τις εταιρείες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και τους παραγωγούς ηλεκτρικού εξοπλισμού για τη σύναψη συμφωνίας με σκοπό τη κατασκευή ενός προτύπου για τις διασυνδέσεις φόρτισης ηλεκτρικών

οχημάτων. Τα κυριότερα καλώδια φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων που έχουν κατασκευαστεί μέχρι σήμερα καθώς και τα χαρακτηριστικά τους παρουσιάζονται στον πιο κάτω πίνακα.

Ονομασία βύσματος	Υποστήριξη πολυφασικής φόρτισης	Υποστήριξη DC φόρτισης	Αμφίδρομη επικοινωνία μεταξύ οχήματος και του σημείο φόρτισης	Παρεχόμενη ισχύς φόρτισης
SAE J1772	✗	✗	✓	1.9,19 KW
Mennekes	✓	✗	✓	3,10,20, 30, 43 KW
Walther	✓	✗	✓	3.7,7.4, 11, 14.5,22,43 KW
EDF	✗	✗	✗	3.6,15 KW
Scame-Schneider-Legrand	✓	✗	✓	4,8,27.7 KW
TEPCO/JARI	✗	✓	✓	50 KW

Πίνακας 3.5-1: Τεχνολογίες Καλωδίων σύνδεσης ηλεκτρικών οχημάτων με το δίκτυο και δυνατότητες φόρτισης.

3.6 Σταθμοί φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων

Με την ένταξη των ηλεκτρικών οχημάτων στην καθημερινή ρουτίνα απαιτείται η δημιουργία σταθμών φόρτισης ανάλογα με τη τεχνολογία των μπαταριών τους, το διαθέσιμο από το χρήστη χρόνο φόρτισης και τον τρόπο χρήσης των οχημάτων (χρόνος λειτουργίας, διαθέσιμη αυτονομία κ.λ.π). Πολλές εταιρείες έχουν αρχίσει την εγκατάσταση σταθμών φόρτισης με δίκτυο χρέωσης. Οι σημαντικότερες από αυτές είναι: Elektromotive, Park and Power, Aerovironment Inc., PEP stations, POD Point, Ville de Paris, CirCarLife, Mobi.e, Better Place και Coulomb Technologies. Οι σταθμοί φόρτισης μέχρι στιγμής διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες οι οποίες είναι οι εξής:

- *Ιδιωτικοί σταθμοί φόρτισης με ιδιωτική πρόσβαση:* Αυτή η κατηγορία σταθμών φόρτισης περιλαμβάνει κυρίως τη φόρτιση μέσω οικιακού δικτύου η οποία γίνεται από μονοφασική παροχή με τάση 220 V και η ισχύς φόρτισης είναι επιπέδου 1. Η φόρτιση από ιδιωτικούς χώρους με ιδιωτική πρόσβαση είναι αργή και γίνεται συνήθως τις νυχτερινές ώρες λόγω χαμηλού τιμολογίου κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας. Επίσης οι χρήστες των οχημάτων μπορούν να ανήκουν σε στόλο οχημάτων όπου θα πληρώνει ο καθένας το μερίδιο του.



Εικόνα 3.6-1: Ηλεκτρικό αυτοκίνητο που φορτίζει σε γκαράζ σπιτιού στη California.

- *Ιδιωτικοί σταθμοί φόρτισης με δημόσια πρόσβαση:* Η κατηγορία αυτή αφορά. α) τη δημιουργία σταθμών φόρτισης υποκαθιστώντας ουσιαστικά τα πρατήρια συμβατικών καυσίμων που χρησιμοποιούνται σήμερα κατά κόρον από τους οδηγούς. β) τους σταθμούς φόρτισης σε χώρους στάθμευσης μεγάλων εμπορικών κέντρων και γενικότερα στον εργασιακό χώρο. Οι χρήστες των οχημάτων μπορούν να αξιοποιούν τη χρόνο που είναι παρκαρισμένα τα οχήματά τους για να τα φορτίσουν. Και στις δύο περιπτώσεις ανάλογα με το χρόνο και τις απαιτήσεις φόρτισης του οχήματος υπάρχει και η ανάλογη χρέωση. Το επίπεδο φόρτισης εξαρτάται από τη φύση του χώρου και τις απαιτήσεις του πελάτη. Έτσι μπορούν να δημιουργηθούν σταθμοί όλων των επιπέδων 1-3 (slow, semi-fast και fast charging).



Εικόνα 3.6-2: Χώρος στάθμευσης και φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων σε κατάστημα της εταιρείας Target στο Fremont της California.

- **Δημόσιοι σταθμοί φόρτισης με δημόσια πρόσβαση:** Στις πυκνοκατοικημένες περιοχές των πόλεων είναι δύσκολη πρόσβαση σε σταθμούς φόρτισης με δημόσια πρόσβαση. Για την αντιμετώπιση τέτοιων προβλημάτων ένας τρόπος είναι η δημιουργία σταθμών φόρτισης σε δημόσιους δρόμους. Το επίπεδο ισχύος φόρτισης τέτοιων σταθμών είναι 1 και 2.



Εικόνα 3.6-3: Σταθμός φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων σε δημόσιο δρόμο του San Francisco .

Οι κατασκευή σταθμών φόρτισης με χρήση φωτοβολταϊκών κυττάρων αποτελεί μια σημαντική τεχνολογική εξέλιξη η οποία έχει αρχίσει να εφαρμόζεται σε αρκετές πόλεις του κόσμου. Παρόλα αυτά ο χαμηλός βαθμός απόδοσης των φωτοβολταϊκών κυττάρων, το υψηλό κόστος καθώς και ο κίνδυνος της φθοράς που διατρέχουν είναι πολύ σημαντικά μειονεκτήματα τα οποία μελλοντικά πρέπει να αντιμετωπιστούν. Στην πιο κάτω εικόνα

φαίνεται ένας τέτοιος σταθμός φόρτισης ο οποίος είναι της Toyota που βρίσκεται σε πόλη της Ιαπωνίας και παράγει 1,9 KWh ηλιακής ενέργειας.



Εικόνα 3.6-4: Σταθμός φόρτισης της Toyota με χρήση φωτοβολταϊκών κυττάρων.

Σε ένα επόμενο στάδιο ανάπτυξης της τεχνολογίας το σύνολο των σταθμών φόρτισης θα πρέπει να ελέγχεται από μια κεντρική μονάδα μέσω ειδικού λογισμικού ασύρματης δικτύωσης έτσι ώστε να προλαμβάνονται τυχόν αυξημένες απαιτήσεις ή δυσλειτουργίες της διαδικασίας. Ακόμα οι καταναλωτές θα μπορούν να κλείνουν καλύτερες συμφωνίες για V2G (Vehicle to grid) λειτουργία (πώληση ηλεκτρικής ενέργειας στο κεντρικό δίκτυο). Η V2G λειτουργία παρουσιάζεται και αναλύεται στο επόμενο κεφάλαιο.

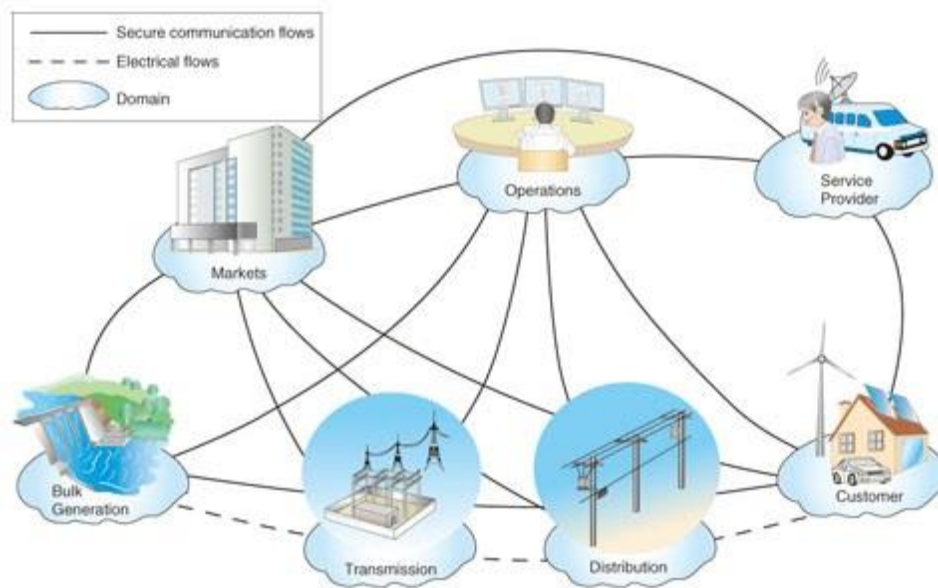
3.7 V2G λειτουργία

3.7.1 Ευφυές Δίκτυο

Η V2G λειτουργία είναι μια τεχνολογία η οποία προκύπτει από τον τρόπο λειτουργίας των ευφυών δικτύων. Έτσι προτού αναλύσουμε τη V2G λειτουργία κρίνεται αναγκαίο να κάνουμε μια αναφορά στα ευφυή δίκτυα. Με τον όρο ευφυές δίκτυο (smart grid) εννοούμε το ηλεκτρικό δίκτυο που ενσωματώνει έξυπνα τη συμπεριφορά και τις δράσεις όλων των χρηστών καταναλωτών ή και παραγωγών ηλεκτρικής ενέργειας στη διεσπαρμένη ανανεώσιμη παραγωγή, με σκοπό να παρέχει ηλεκτρική ενέργεια με υψηλή απόδοση, ασφάλεια και οικονομία. Η ανάγκη υιοθέτησης ευφυών δικτύων προκύπτει λόγω των πολλών προκλήσεων που αντιμετωπίζουν τις τελευταίες δεκαετίες τα Σ.Η.Ε, όπως η απελευθέρωση της αγοράς, η επιτακτική ανάγκη για μεγαλύτερο σεβασμό στο περιβάλλον, η διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, η συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση ενέργειας και πολλοί άλλοι παράγοντες. Το ευφυές δίκτυο εν συγκρίσει με ένα κλασσικό Σ.Η.Ε έχει τα εξής πλεονεκτήματα:

- χρησιμοποιεί ψηφιακές μεθόδους αντί για ηλεκτρομηχανικές
- επιτρέπει την αμφίδρομη επικοινωνία σε πραγματικό χρόνο μεταξύ παραγωγής και κατανάλωσης
- διαθέτει εξελιγμένα ψηφιακά μετρητικά συστήματα σε πολλά σημεία του
- βελτιστοποιεί την αξιοποίηση των ήδη υπαρχόντων εγκαταστάσεων
- παρέχει στους καταναλωτές δυνατότητες πιο ενεργής συμμετοχής, με διάφορες λειτουργίες διαχείρισης από την πλευρά της κατανάλωσης (demand side management), όπως την κατάθεση προσφορών σε διάφορες αγορές (demand-side bidding/DSB)
- έχει τη δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας
- αποτελείται από πολλά μικρότερα μικροδίκτυα (microgrids) και
- χρησιμοποιεί διεσπαρμένες πηγές ενέργειας (distributed energy resources/DERs)

Συνεπώς, το ευφυές δίκτυο είναι μια αναβάθμιση του ηλεκτρικού δικτύου που αξιοποιεί την τεχνολογία της πληροφορίας, για την άμεση ενημέρωση του διαχειριστή αλλά και των καταναλωτών. Τα ηλεκτρικά οχήματα μπορούν να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στις πιο πάνω λειτουργίες των smart grids καθώς με τη V2G λειτουργία μπορούν να λειτουργήσουν ως μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής, παρέχοντας επικουρικές υπηρεσίες στο δίκτυο. Έτσι οι καταναλωτές μπορούν συμμετάσχουν σοβαρά στη διαχείριση του δικτύου από την πλευρά της κατανάλωσης.



Εικόνα 3.7-1: Σχηματική απεικόνιση του τρόπου λειτουργίας ενός ευφυούς δικτύου.

3.8 Περιγραφή της V2G λειτουργίας

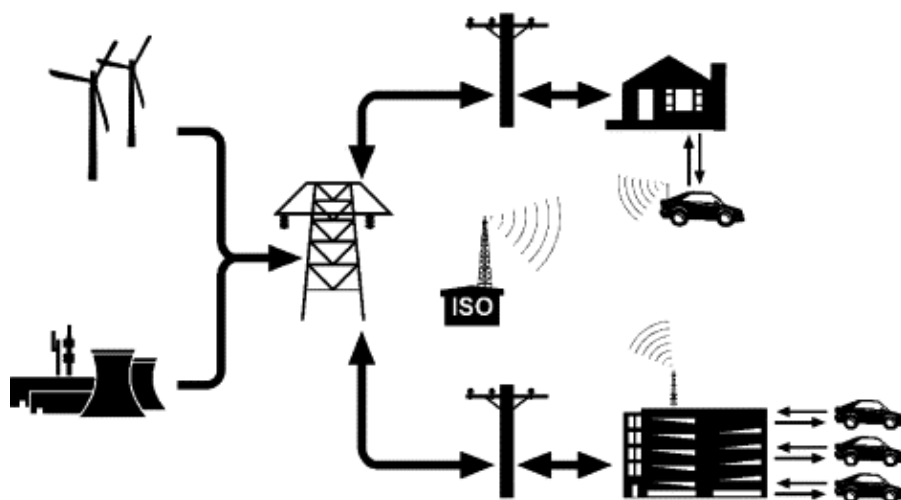
Τα ηλεκτρικά οχήματα όπως έχει ήδη αναφερθεί αποτελούν κινητές συσκευές αποθήκευσης ενέργειας η οποίες εκφορτίζονται κατά τη διάρκεια των μετακινήσεων και φορτίζονται από το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας κατά τη διάρκεια της στάθμευσης τους στο σταθμό φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων. Με τον όρο V2G(vehicle to grid) αναφερόμαστε στη διαδικασία μεταφοράς ενέργειας από την πλευρά των οχημάτων προς την αντίστοιχη του ηλεκτρικού δικτύου, όταν τα ηλεκτρικά οχήματα είναι σταθμευμένα. Η V2G λειτουργία γίνεται με δύο τρόπους ανάλογα με τον τρόπο παροχής ενέργειας προς το δίκτυο. Έτσι έχουμε την αμφίδρομη V2G λειτουργία (bidirectional V2G) κατά την οποία γίνεται αποφόρτιση της μπαταρίας του οχήματος προσφέροντας ισχύ από το όχημα προς το δίκτυο μέσω της παροχής αλλά και την μονής κατεύθυνσης V2G λειτουργία (unidirectional V2G) κατά την οποία γίνεται διαμόρφωση του ρυθμού φόρτισης της μπαταρίας κατά φόρτιση αποκλειστικά από το δίκτυο προς το όχημα. Στην μονής κατεύθυνσης V2G λειτουργία δεν υπάρχει η δυνατότητα η ήδη αποθηκευμένη ενέργεια στο συσσωρευτή να ρεύσει προς το δίκτυο με αποτέλεσμα να παρέχονται μικρότερα ποσά ισχύος άρα και ενέργειας προς αυτό σε σύγκριση με την αμφίδρομη. Παρόλα αυτά για να επιτευχθεί η αμφίδρομη V2G λειτουργία απαιτείται επιπρόσθετος εξοπλισμός όπως ηλεκτρονικά ισχύος που να μπορούν να μετατρέπουν τη συνεχή τάση από το όχημα στην εναλλασσόμενη τάση του δικτύου.Ο εξοπλισμός αυτός δεν υφίσταται στα ήδη υπάρχοντα EVs της αγοράς αλλά και ούτε προβλέπεται στα μοντέλα που πρόκειται να κυκλοφορήσουν σύντομα. Επίσης από πλευράς καταναλωτών πιθανόν να υπάρξει επιφυλακτική στάση απέναντι σε αυτό τον τρόπο V2G λειτουργίας καθώς μπορεί να ανησυχούν για τη φθορά του συσσωρευτή τους, μέσω της συχνής φόρτισης και εκφόρτισης του, κατά την αμφίδρομη V2G λειτουργία. Επομένως για την αντιμετώπιση των πιο πάνω προκλήσεων θεωρείται ότι θα εφαρμοσθεί πρώτα η μονής κατεύθυνσης V2G λειτουργία, έτσι ώστε οι καταναλωτές να αρχίσουν να αποδέχονται την καινούργια ιδέα και τεχνολογία αλλά και οι υπόλοιποι εμπλεκόμενοι φορείς, όπως οι αγορές και οι διαχειριστές των εκάστοτε συστημάτων, να αποκτήσουν την απαραίτητη εμπειρία, ώστε να είναι προετοιμασμένοι για την ευρύτερη διάδοση της αμφίδρομης V2G λειτουργίας.

Προϋποθέσεις για τη συμμετοχή των ηλεκτρικών οχημάτων στη V2G λειτουργία:

Με τη διάδοση της V2G λειτουργίας οι κατασκευαστές των ηλεκτρικών οχημάτων θα πρέπει να αντιμετωπίσουν νέες τεχνολογικές προκλήσεις όσον αφορά την αμφίδρομη επικοινωνία των οχημάτων με το δίκτυο, την ανταλλαγή ισχύος με αυτό και την ενημέρωση του χρήστη για τη πορεία φόρτισης του οχήματος. Καταρχήν τα ηλεκτρικά οχήματα που μπορούν να συμμετάσχουν στη V2G λειτουργία είναι όσα έχουν δυνατότητα σύνδεσης με το δίκτυο, δηλαδή μέχρι στιγμής τα Ηλεκτρικά Οχήματα με Συσσωρευτές (BEVs) ,τα Επαναφορτιζόμενα Υβριδικά οχήματα (PHEVs) και τα ηλεκτρικά οχήματα με χρήση κυψελών καυσίμου (FCEVs) εάν έχουν δυνατότητα σύνδεσης με το δίκτυο. Οι πιο πάνω τύποι ηλεκτρικών οχημάτων για να μπορούν υποστηρίξουν τη V2G λειτουργία πρέπει να πληρούν τις πιο κάτω προϋποθέσεις:

- Τα οχήματα πρέπει να διαθέτουν κατάλληλη σύνδεση με το δίκτυο, που να επιτρέπει τη ροή ενέργειας από το όχημα στο δίκτυο. Στα οχήματα που είναι ικανά να φορτίζονται με AC φόρτιση επαφής και έχουν ήδη ενσωματωμένο (on-board) φορτιστή μπορούν να γίνουν οι απαραίτητες τροποποιήσεις για την υποστήριξη αυτής της λειτουργίας.
- Τα οχήματα πρέπει να μπορούν να δέχονται ένα σήμα ελέγχου από το δίκτυο (το διαχειριστή του δικτύου) και να είναι σε θέση να ανταποκρίνονται σε αυτό σε πραγματικό χρόνο. Το σήμα ελέγχου ISO (Independent System Operator), μπορεί να είναι ένα ραδιοσήμα, ένα σήμα μέσω του δικτύου κινητής τηλεφωνίας, μια απευθείας διαδικτυακή σύνδεση, ή ένα φέρον σήμα στο δίκτυο ισχύος. Σε περίπτωση αυξημένης ζήτησης ο διαχειριστής στέλνει σήμα – αίτηση ταυτόχρονα σε ένα μεγάλο αριθμό οχημάτων ή στον αντίστοιχο διαχειριστή ενός στόλου οχημάτων.
- Σε περίπτωση που το ηλεκτρικό όχημα πουλά υπηρεσίες στο δίκτυο από διαφορετικές θέσεις, πρέπει να είναι εφοδιασμένο με ειδικό ενσωματωμένο μετρητή (έξυπνο μετρητή), ώστε να μπορούν να καθοριστούν οι υπηρεσίες που προσφέρθηκαν και η ισχύς που απορροφήθηκε από κάθε ξεχωριστή θέση φόρτισης. Επίσης ο οδηγός θα πρέπει να γνωρίζει ανά πάσα στιγμή την κατάσταση φόρτισης (State Of Charge/SOC) του συσσωρευτή του, έχοντας τη δυνατότητα να ορίσει το μέγιστο δυνατό βάθος εκφόρτισης, ώστε να μπορεί να καλύψει τις βασικές ανάγκες μεταφοράς του.

Στην εικόνα 3.8-1 απεικονίζεται η ροή η ισχύος και των ασυρμάτων συνδέσεων επικοινωνίας μεταξύ των οχημάτων και του ηλεκτρικού δικτύου κατά τη V2G λειτουργία. Τέλος πρέπει να σημειώσουμε ότι η V2G λειτουργία είναι μία τεχνολογία, καθαρά θεωρητική μέχρι στιγμής, που έχει εφαρμοστεί μόνο σε ερευνητικό επίπεδο στο πανεπιστήμιο του Delaware στις ΗΠΑ, με τη συμμετοχή πολύ λίγων ηλεκτρικών οχημάτων. Ο επικεφαλής ερευνητής αυτής της μελέτης είναι ο Willet Kempton, ο οποίος είχε και την αρχική ιδέα.



Εικόνα 3.8-1 : Ροή της ηλεκτρικής ισχύος και πληροφοριών κατά την εφαρμογή της V2G τεχνολογίας.

3.9 Η θέση της V2G λειτουργίας στις αγορές ηλεκτρικής ισχύος και στη παροχή επικουρικών υπηρεσιών

Ένα σημαντικό κεφάλαιο το οποίο χρήζει μελέτης με τη διάδοση της V2G λειτουργίας είναι σε ποιες αγορές ενέργειας και επικουρικές υπηρεσίες μπορούν να συμμετάσχουν τα ηλεκτρικά οχήματα με σκοπό το οικονομικό όφελος αλλά και τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας του δικτύου. Μέχρι στιγμής οι αγορές ενέργειας στα Σ.Η.Ε κατηγοριοποιούνται ως εξής:

- Αγορά ισχύος βασικού φορτίου
- Αγορά ισχύος φορτίου αιχμής
- Αγορά στρεφόμενων εφεδρειών
- Αγορά διευθέτησης παρεχόμενης και λαμβανόμενης ισχύος (Ρύθμιση συχνότητας και τάσης)

Η ισχύς βάσης παρέχεται συνήθως από τους ηλεκτροπαραγωγούς σταθμούς επί 24ώρου βάσεως και η χρέωση της KWh είναι χαμηλή. Η παροχή ενέργειας γίνεται μέσω μακροπρόθεσμων συμβολαίων για σταθερή παραγωγή και διάθεση σε χαμηλή τιμή. Τα ηλεκτρικά οχήματα δεν έχουν ικανότητα παραγωγής ενέργειας για τη κάλυψη του βασικού φορτίου και επίσης έχουν υψηλό κόστος ανά KWh. Άρα δεν μπορούν να συμμετάσχουν σε αυτή την αγορά με ανταγωνιστικό χαρακτήρα. Επίσης τα σημαντικά πλεονεκτήματα της V2G τεχνολογίας όπως ο γρήγορος χρόνος απόκρισης, το χαμηλό κόστος αναμονής και το μικρό εκμεταλλεύσιμο κεφάλαιο δεν μπορούν να αντισταθμίσουν τις βασικές της αδυναμίες που είναι η περιορισμένη δυνατότητα αποθήκευσης και ο μικρός κύκλος ζωής του χρησιμοποιούμενου εξοπλισμού.

Τα φορτία αιχμής παρουσιάζονται σε ώρες της ημέρας που υπάρχει υψηλή κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, όπως οι καλοκαιρινές μέρες με υψηλή θερμοκρασία. Τα φορτία αυτά διαρκούν συνήθως 3-5h και εξυπηρετούνται από μονάδες παραγωγής που μπορούν να είναι ενεργές για σύντομα χρονικά διαστήματα. Ένας στόλος οχημάτων είναι ικανός να υποστηρίξει τις πιο πάνω απαιτήσεις σε αυτό το χρονικό διάστημα μέσω της V2G λειτουργίας.

Οι στρεφόμενες εφεδρείες στα Σ.Η.Ε αφορούν την ικανότητα παραγωγής πρόσθετης ισχύος σε μικρό χρονικό διάστημα (εντός δέκα λεπτών). Αυτό επιτυγχάνεται με τη λειτουργία κάποιων γεννητριών οι οποίες παράγουν χαμηλά επίπεδα ισχύος (π.χ 1 MW) και όταν υπάρξει μεγαλύτερη ανάγκη αυξάνουν τη παραγωγή τους. Με τον τρόπο αυτό απαλείφεται η ανάγκη συγχρονισμού των γεννητριών στο δίκτυο και υπάρχει άμεσα διαθέσιμη ισχύς για την εξυπηρέτηση του φορτίου. Το κόστος των στρεφόμενων εφεδρειών έχει άμεση σχέση με το χρόνο που αυτές είναι διαθέσιμες και σε περίπτωση που χρησιμοποιηθούν υφίσταται επιπρόσθετο κόστος. Η αγορά στρεφόμενων εφεδρειών γίνεται με συμβόλαια και με χρόνο εξυπηρέτησης συνήθως τη 1 h. Τα ηλεκτρικά οχήματα μπορούν να παρέχουν υπηρεσίες στρεφόμενης εφεδρείας μέσω της V2G λειτουργίας, με το να παραμένουν συνδεδεμένα στο δίκτυο, χωρίς ουσιαστικά να παράγουν πραγματική ενέργεια και να αποφορτίζουν τους

συσσωρευτές τους. Το κόστος φθοράς των συσσωρευτών είναι πολύ περιορισμένο, ενώ τα κέρδη από τη συμμετοχή στην αγορά μπορεί να είναι αρκετά αυξημένα.

Η διευθέτηση παρεχόμενης και λαμβανόμενης ισχύος αφορά την εξασφάλιση της ισορροπίας μεταξύ της παραγόμενης ισχύος και του φορτίου με αποτέλεσμα η τάση και η συχνότητα του δικτύου να διατηρούνται στην ονομαστική τους τιμή. Όταν το φορτίο υπερνικά τη παραγωγή τότε η συχνότητα και η τάση μειώνονται και την ανάκαμψη τους υφίσταται η ανάγκη αύξησης της ισχύος εξόδου των γεννητριών. Αυτή η κατάσταση λειτουργίας των γεννητριών ονομάζεται *regulation up*. Αντίθετα όταν η παραγωγή υπερνικά το εξυπηρετούμενο φορτίο τότε η τάση και η συχνότητα ανεβαίνουν σε υψηλότερα επίπεδα από την ονομαστική τους τιμή με αποτέλεσμα την ανάγκη μείωσης της παραγόμενης ισχύος από τις γεννήτριες. Αυτή η κατάσταση λειτουργίας των γεννητριών ονομάζεται *regulation down*. Οι γεννήτριες που συμπεριλαμβάνονται στα συμβόλαια αυτών των λειτουργιών μπορούν να χρησιμοποιούνται και στις δύο καταστάσεις εφόσον δε συνυπάρχουν. Τα ηλεκτρικά οχήματα είναι σε θέση να συμμετάσχουν στην αγορά ρύθμισης συχνότητας μέσω της V2G λειτουργίας αφού μπορούν να ανταποκριθούν ταχύτατα σε σήματα ρύθμισης και έχουν τη δυνατότητα να πραγματοποιήσουν τόσο άνω ρύθμιση, με την αύξηση της ροής ισχύος προς το δίκτυο ή τη μείωση του ρυθμού φόρτισης των συσσωρευτών τους, όσο και κάτω ρύθμιση, με την αύξηση του ρυθμού φόρτισης των συσσωρευτών τους ή τη μείωση της ροής ισχύος προς το δίκτυο. Ένας συνδυασμός άνω και κάτω ρύθμισης μπορεί να προκαλέσει πολύ μικρή αποφόρτιση του συσσωρευτή, χωρίς να προκαλεί ιδιαίτερα προβλήματα φθοράς όσον αφορά τους κύκλους λειτουργίας του συσσωρευτή.

Στην επόμενη ενότητα δίνουμε έμφαση στον τρόπο συμμετοχής των οχημάτων στην πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας (Primary Frequency Control, PFC), μιας και αυτός είναι στόχος της παρούσας εργασίας.

3.10 Ενσωμάτωση ηλεκτρικών οχημάτων στη πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας

Όπως έχουμε αναφέρει στο κεφάλαιο 2 κατά την πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας όταν ανιχνευθεί μια μεταβολή στη συχνότητα από τους ρυθμιστές στροφών των γεννητριών, τότε αυτοί ενημερώνουν τους στροβίλους με κατάλληλα σήματα-εντολές, για να μεταβάλουν την ισχύ τους ανάλογα με το σφάλμα συχνότητας το δικτύου. Η ρύθμιση αυτή μπορεί να ενισχυθεί μέσω της V2G λειτουργίας, καθώς τα ηλεκτρικά οχήματα είναι ικανά να παρέχουν υπηρεσίες “γρήγορης ρύθμισης”, με αποτέλεσμα το σφάλμα συχνότητας να εξαλείφεται γρηγορότερα και σε μεγαλύτερο βαθμό. Το τελευταίο είναι ιδιαίτερα σημαντικό, καθώς το έργο της δευτερεύουσας ρύθμισης γίνεται ευκολότερο. Τα ηλεκτρικά οχήματα μπορούν να αντιδρούν ταχύτατα σε σήματα ρύθμισης, καθώς το σήμα συχνότητας είναι διαθέσιμο σε οποιοδήποτε σημείο του ηλεκτρικού δικτύου, χωρίς να απαιτείται κάποια πολύπλοκη διαδικασία μετάδοσής του. Έτσι, όταν το σφάλμα συχνότητας είναι αρνητικό τότε σύμφωνα με τη διαδικασία της πρωτεύουσας ρύθμισης η μονάδες παραγωγής θα ξεκινήσουν τη διαδικασία αύξησης της ισχύος εξόδου τους, ταυτόχρονα ο διαχειριστής του συστήματος

στέλνει σήμα-εντολή στα ηλεκτρικά οχήματα ,να μειώσουν το ρυθμό φόρτισης τους ή να εκφορτίσουν τους συσσωρευτές τους με σκοπό να υποστηρίξουν το δίκτυο. Το σήμα-εντολή φτάνει στα οχήματα με ελάχιστη καθυστέρηση της τάξεως των δευτερολέπτων. Αντίστοιχη διαδικασία εκτελείται και όταν το σφάλμα συχνότητας είναι θετικό με αύξηση του ρυθμού φόρτισης των οχημάτων. Επομένως, τα ηλεκτρικά οχήματα είναι ικανά να ανταποκριθούν τόσο σε υπηρεσίες άνω όσο και κάτω ρύθμισης σε μικρό χρονικό διάστημα. Στον παρακάτω πίνακα συνοψίζονται ο τρόπος και οι υπηρεσίες ρύθμισης συχνότητας που παρέχουν τα EVs.

Κατάσταση ανισορροπίας στο Σ.Η.Ε	Φορτίο > Παραγωγής	Φορτίο < Παραγωγής
Πρόσημο σφάλματος συχνότητας	Αρνητικό	Θετικό
Είδος ρύθμισης	Άνω ρύθμιση (Regulation up)	Κάτω ρύθμιση (Regulation down)
Περίπτωση φόρτισης	Μείωση της ροής ισχύος από το δίκτυο	Αύξηση της ροής ισχύος από το δίκτυο
Περίπτωση εκφόρτισης	Ροή ισχύος από τα οχήματα προς το δίκτυο με συγκεκριμένο ρυθμό	-

Πίνακας 3.10-1: Τρόποι παροχής υπηρεσιών ρύθμισης συχνότητας από τα EVs.

Με την αρκετά μεγάλη διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο, είναι αναγκαίο να χρησιμοποιηθεί ένας ενδιάμεσος ελεγκτής για να συντονίζει τα διάφορα συστήματα μεταφοράς ενέργειας των EV, και να λειτουργεί ως μεσάζων μεταξύ του διαχειριστή του συστήματος και των οχημάτων. Ο ελεγκτής αυτός ουσιαστικά θα είναι ένα μοντέλο συναθροιστή(aggregator), που θα διαχειρίζεται ένα στόλο οχημάτων διευκολύνοντας έτσι τη ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ των φορέων εκμετάλλευσης του συστήματος και των ηλεκτρικών οχημάτων. Για το μοντέλο του aggregator θα αναφερθούμε εκτενέστερα στη συνέχεια. Στη εικόνα 3.10-1 βλέπουμε τη ροή ισχύος και των ασύρματων συνδέσεων κατά τη V2G λειτουργία με την ύπαρξη aggregator.

σχέση με τη V2G λειτουργία, είναι η σύναψη συμβολαίων για τη συμμετοχή των ηλεκτρικών οχημάτων στις αγορές που περιγράψαμε στην προηγούμενη ενότητα. Για να κατανοήσουμε καλύτερα τη δεύτερη λειτουργία αυτού του παράγοντα αγοράς πρέπει να αναλογιστούμε ότι η ελάχιστη ποσότητα ισχύος που μπορεί να προσφερθεί για ρύθμιση είναι το 1 MW. Άρα ένα μεμονωμένο όχημα, του οποίου ο συσσωρευτής έχει χωρητικότητα μερικές KWh, δεν θα ήταν ικανό ποτέ να προσφέρει αυτήν την ποσότητα ισχύος. Αν όμως υπάρχει μια επιχείρηση η οποία θα έχει υπό την εποπτεία της ένα στόλο οχημάτων, θα μπορεί να λειτουργεί ως μεσάζοντας και να συμμετάσχει στις διάφορες αγορές, συναθροίζοντας την διαθέσιμη ισχύ ολόκληρου του στόλου.

- *Ο πάροχος υπηρεσιών τεχνολογιών πληροφορικής (Information Technology service provider):* Για να καταστεί δυνατή η ορθότητα της V2G λειτουργίας απαιτείται η ύπαρξη επικοινωνίας κυρίως μεταξύ των ιδιοκτήτων του οχήματος και του aggregator, μεταξύ του aggregator και του διαχειριστή του συστήματος και γενικά μεταξύ των προαναφερθέντων παραγόντων. Τις υπηρεσίες αυτές πιθανόν να τις προσφέρουν εταιρείες πληροφορικής και τηλεπικοινωνιών μέσω δικτύων επικοινωνιών, οι οποίες θα αναλαμβάνουν και τη συντήρησή τους.

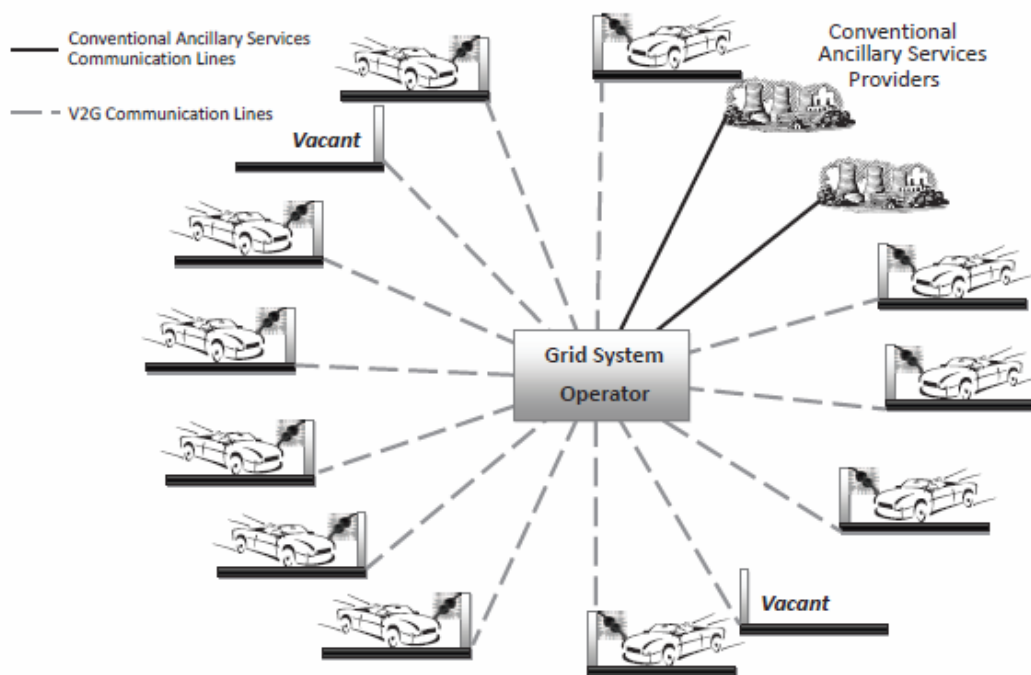
3.12 Η σημασία του aggregator στη V2G λειτουργία

Για να κατανοήσουμε την αναγκαιότητα του συναθροιστή (aggregator) των οχημάτων στη V2G λειτουργία, ας αναφερθούμε αρχικά στην περίπτωση μη ύπαρξης αυτού του παράγοντα αγοράς. Στη περίπτωση αυτή το κάθε όχημα αποτελεί έναν ανεξάρτητο λογαριασμό με την τοπική εταιρεία διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Επίσης για να καταστεί ικανό ένα όχημα για V2G πρέπει να διαθέτει:

- Απαιτούμενες τηλεματικές συνδέσεις ώστε να μπορεί επικοινωνεί με τον TSO παρέχοντας πληροφορίες όπως το προσδιορισμό της θέσης που βρίσκεται, αν είναι συνδεδεμένο σε κάποιο σταθμό φόρτισης ή όχι και την ποσότητα ισχύος που μπορεί να παράσχει.
- Έναν αριθμό IP ο οποίος θα αποτελεί μοναδικό αναγνωριστικό του οχήματος. Αντίστοιχα θα πρέπει να υπάρχει και ένας αριθμός ID για κάθε σταθμό φόρτισης.
- Ενσωματωμένο (on-board) μετρητή ο οποίος θα καταγράφει τη ροή ισχύος και το χρόνο φόρτισης.

Το κάθε όχημα το οποίο φορτίζει σε κάποιο σταθμό φόρτισης έχει τη δυνατότητα συμμετοχής στις διάφορες αγορές, εφόσον ζητηθεί κάτι τέτοιο από το διαχειριστή του συστήματος. Μετά την αποσύνδεση του οχήματος από το σημείο φόρτισης, ο κάτοχος του οχήματος πληρώνεται, ανάλογα με την ένδειξη παρεχόμενης ισχύος προς το δίκτυο, που

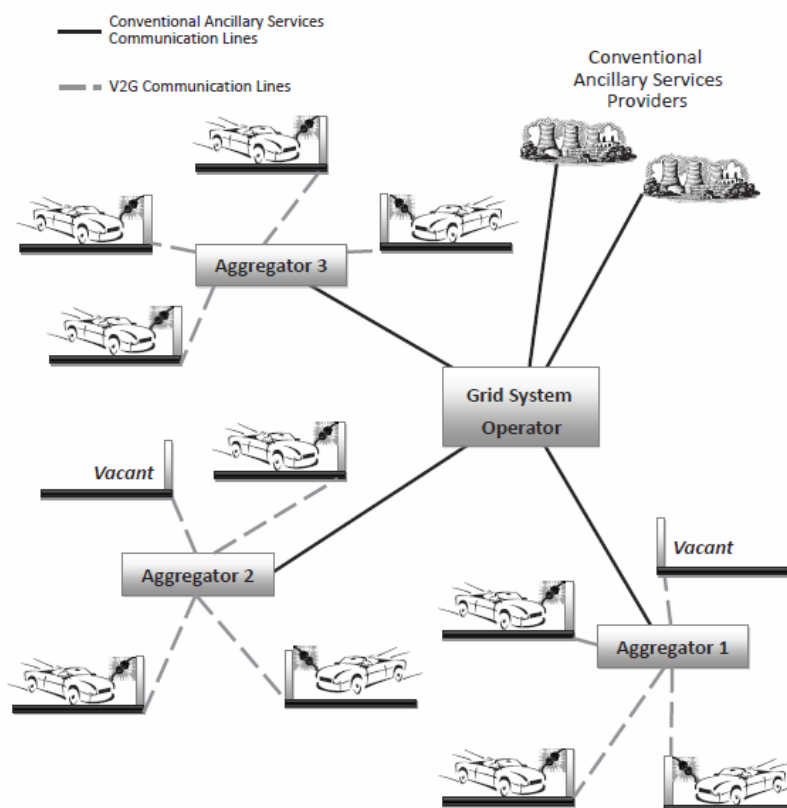
κατέγραψε ο μετρητής. Σε μια τέτοια περίπτωση είναι αρκετά προφανές ότι το έργο του διαχειριστή θα είναι αρκετά χρονοβόρο και δύσκολο, καθώς θα είναι υποχρεωμένος να επιβλέπει τη σύνδεση και αποσύνδεση πάρα πολλών οχημάτων διαφορετικών απαιτήσεων και να ανταμείβει ανάλογα, τους καταναλωτές. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται το μοντέλο της V2G λειτουργίας χωρίς την ύπαρξη aggregator. Όπως παρατηρούμε ο διαχειριστής του συστήματος μεταφοράς έχει υπό τη εποπτεία του τους σταθμούς φόρτισης των οχημάτων και κατά συνέπεια το κάθε όχημα ξεχωριστά, καθώς και τις συμβατικές μονάδες παραγωγής.



Εικόνα 3.12-1: Δομή μοντέλου της V2G λειτουργίας χωρίς την ύπαρξη aggregator.

Επομένως ύπαρξη ενός aggregator κρίνεται αναγκαία για τη συμμετοχή των ηλεκτρικών οχημάτων στις αγορές ενέργειας και στις επικουρικές υπηρεσίες του δικτύου, καθώς άμεση σχέση με τις αγορές αυτές θα έχει ο aggregator και όχι ο χρήστης του οχήματος. Έχοντας υπό την εποπτεία του ένα στόλο οχημάτων θα δημιουργεί ένα αθροιστικό προφίλ μιας εικονικής μονάδας παραγωγής ενέργειας, το οποίο θα εξαρτάται από τον αριθμό των οχημάτων που θα είναι συνδεδεμένα και ικανά για V2G, κάθε ώρα της ημέρας αλλά και από τη διαθέσιμη ισχύ και ενέργεια που μπορεί να παρέχει ο στόλος των οχημάτων. Ο aggregator θα δέχεται σήματα-εντολές από το διαχειριστή του συστήματος μεταφοράς και ακολούθως, θα τις διαβιβάζει στα οχήματα του στόλου που εποπτεύει, όπως αυτός κρίνει πιο συμφέρον ανάλογα με το συγκεντρωτικό προφίλ που έχει δημιουργήσει. Ταυτόχρονα, θα είναι σε θέση να κάνει προσφορές επιπέδου MW ή MWh στις διάφορες αγορές ενέργειας, ενόσω τα ηλεκτρικά οχήματα θα εκτελούν τα προγραμματισμένα τους ταξίδια. Ο aggregator θα είναι υπεύθυνος για τη πληρωμή των κατόχων των οχημάτων, αναλόγως της συμμετοχής τους στις αγορές

ενέργειας, από τα κέρδη που αποκομίζει με τη συμμετοχή του σε αυτές, κρατώντας προφανώς ένα ποσοστό από αυτά για τον εαυτό του. Στην εικόνα 3.12-2 παρατηρούμε ότι ο κάθε aggregator επιβλέπει ένα αριθμό σταθμών φόρτισης και κατά συνέπεια ένα στόλο οχημάτων με μια συνολική ισχύ, την οποία αξιοποιεί προς όφελος του δικτύου ανάλογα με τις εντολές του διαχειριστή του συστήματος.

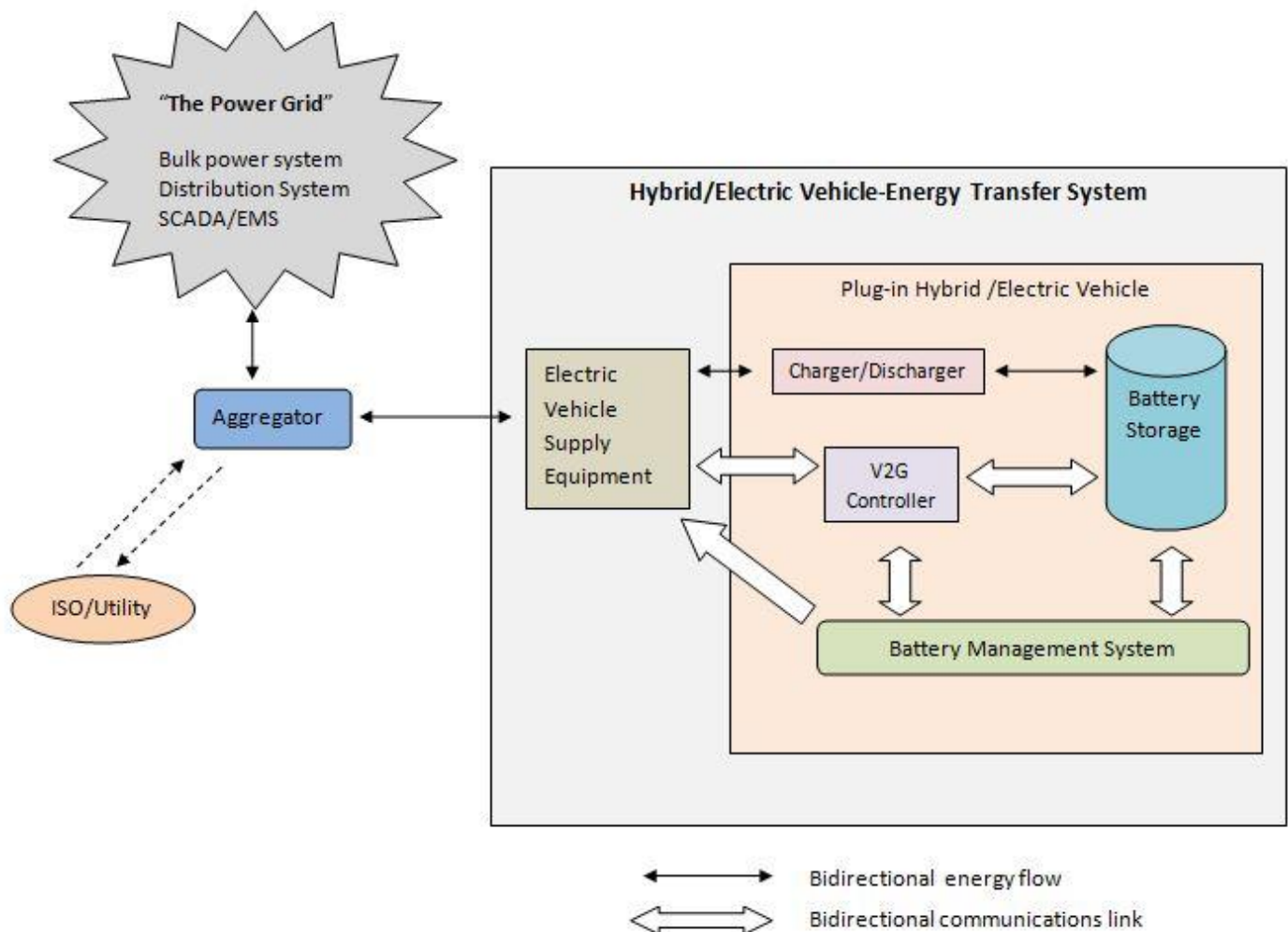


Εικόνα 3.12-2: Δομή μοντέλου της V2G λειτουργίας με την ύπαρξη πολλών και διαφορετικών aggregators.

4. Μοντελοποίηση

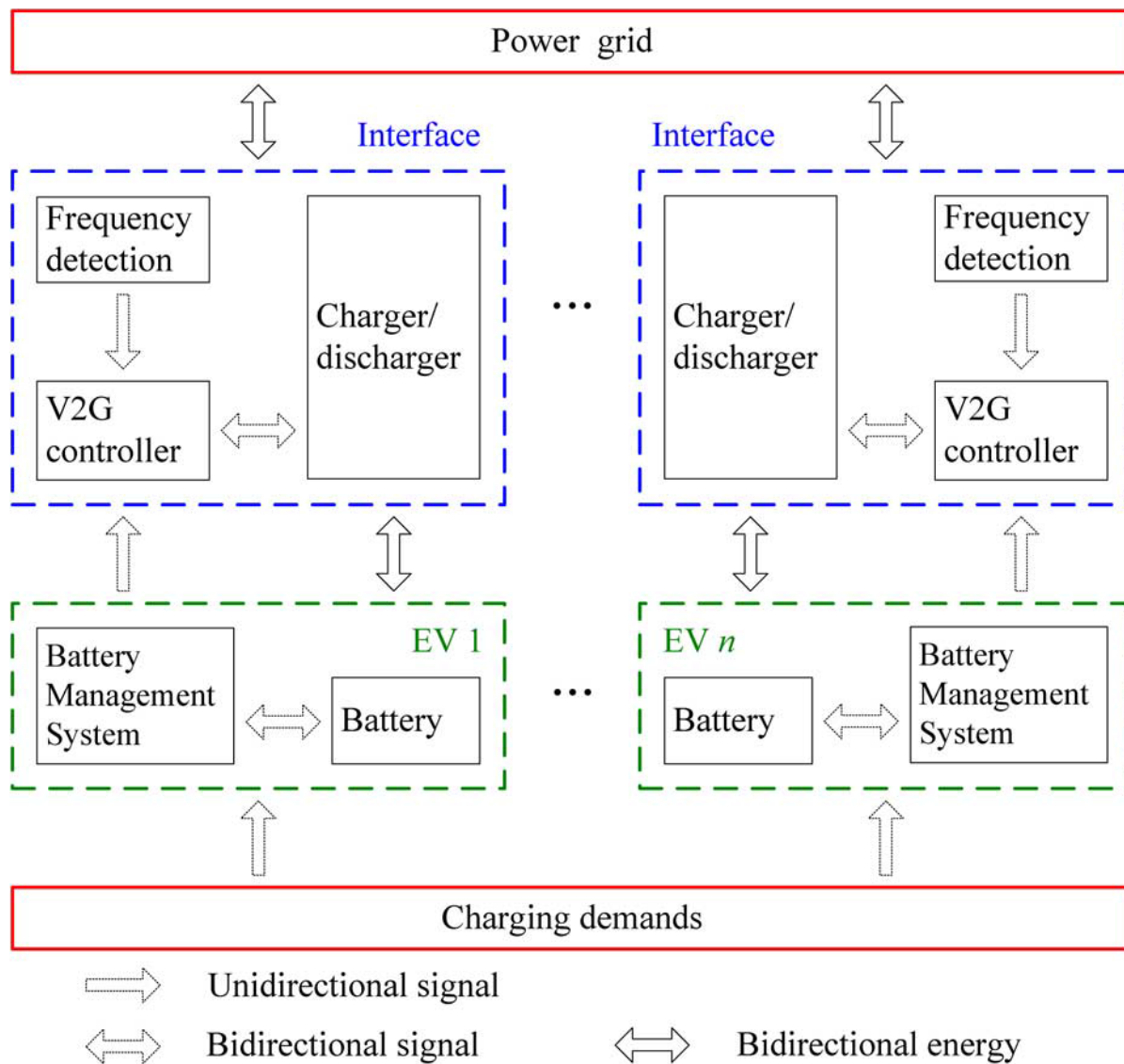
4.1 Τρόπος λειτουργίας της τεχνολογίας V2G

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται ο τρόπος λειτουργίας της τεχνολογίας V2G όταν τα οχήματα είναι συνδεδεμένα στο δίκτυο μέσω ενός συναθροιστή (aggregator). Τα ηλεκτρικά ή υβριδικά οχήματα συνδέονται στο δίκτυο μέσω του ζεύκτη φόρτισης ο οποίος είναι συνδεδεμένος στο μηχανισμό φόρτισης/εκφόρτισης της μπαταρίας τους μέσω του οποίου επιτυγχάνεται η αμφίδρομη ανταλλαγή ισχύος. Επιπρόσθετα ένας ελεγκτής (V2G controller) είναι αναγκαίος στον έλεγχο φόρτισης του οχήματος και να επιβλέπει τη λειτουργία του οχήματος ως κατανεμημένη πηγή ενέργειας. Ο V2G controller παίρνει αποφάσεις σε πραγματικό χρόνο με βάση τη κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας (SOC), τη συχνότητα του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας και του συστήματος διαχείρισης της μπαταρίας (Battery Management System (BMS)).



Εικόνα 4.1-1: Περιγραφή λειτουργίας της V2G τεχνολογίας

Το πιο κάτω σχήμα μας δείχνει το πλαίσιο μέσα στο οποίο λειτουργεί το κάθε όχημα αλλά και όλα τα οχήματα συγκεντρωτικά αλληλεπιδρώντας με το δίκτυο ώστε να συμβάλουν αποτελεσματικά στη πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας.



Εικόνα 4.1-2: Πλαίσιο λειτουργίας V2G ελέγχου για τη συμμετοχή των οχημάτων στην πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας.

Το σύστημα διαχείρισης της μπαταρίας παρακολουθεί την κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας και την υγεία της και παρέχει μια διεπαφή ανάμεσα στην μπαταρία και το υπόλοιπο όχημα συμπεριλαμβανομένου και του φορτιστή επί του οχήματος.

Μια πολύ σημαντική λειτουργία του BMS που το καθιστά απαραίτητο σε κάθε ηλεκτρικό όχημα είναι το ότι δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη-ιδιοκτήτη του οχήματος να ορίζει κάποιες παραμέτρους σχετικά με την φόρτιση της μπαταρίας του οχήματος. Οι παράμετροι αυτοί σχετίζονται με την επιθυμητή στάθμη φόρτισης, το χρονικό διάστημα φόρτισης της μπαταρίας και το μήκος της επόμενης διαδρομής που θα διανύσει το όχημα ώστε η μπαταρία να φορτιστεί με βάση της ανάγκες του. Επιπλέον το σύστημα ή ο οδηγός του οχήματος πρέπει να μπορούν να ορίζουν το μέγιστο βάθος εκφόρτισης της μπαταρίας ώστε να μην εκφορτιστεί σε βαθμό που μπορεί να καταστραφεί. Παρακάτω βλέπουμε ένα πάνελ ελέγχου φόρτισης της Ford το οποίο αντιστοιχεί σε ένα τέτοιο σύστημα ελέγχου της φόρτισης του οχήματος από το χρήστη.



Εικόνα 4.1-3: Πίνακας ελέγχου ρύθμισης φόρτισης της Ford εντός του οχήματος.

Η ραγδαία ανάπτυξη της τεχνολογίας των smartphones μας δίνει τη δυνατότητα να παρακολουθήσουμε και να ελέγξουμε τη κατάσταση φόρτισης του οχήματος και γενικά τη V2G λειτουργία του οχήματος μέσω μιας εφαρμογής σε smartphone όπως φαίνεται στην πιο κάτω εικόνα.



Εικόνα 4.1-4: Στιγμιότυπο από smartphone. Έλεγχος φόρτισης του οχήματος και της V2G λειτουργίας.

4.2 Μεθόδοι ελέγχου V2G

Όπως παρατηρούμε στην εικόνα 4.1-1 η ρύθμιση συχνότητας και η ζητούμενη φόρτιση από το χρήστη-ιδιοκτήτη του οχήματος είναι δύο σημαντικά ζητήματα τα οποία καλείται να αντιμετωπίσει ο αποκεντρωμένος έλεγχος V2G. Από τη πλευρά του ηλεκτρικού δικτύου τα ηλεκτρικά/υβριδικά οχήματα πρέπει να λαμβάνουν μέρος στη ρύθμιση συχνότητας ως κινητές συσκευές αποθήκευσης ενέργειας, ενώ από τη πλευρά των οχημάτων τίθενται κάποιοι παράμετροι που αφορούν την κατάσταση φόρτισης του οχήματος για σκοπούς μεταφοράς. Παρ'όλα αυτά οι χρήστες-ιδιοκτήτες των οχημάτων δίνουν έμφαση περισσότερο στην κατάσταση φόρτισης των οχημάτων παρά στη ρύθμιση συχνότητας του δικτύου. Ωστόσο ο

αποκεντρωμένος έλεγχος V2G πρέπει να βρεί ένα σημείο ισορροπίας μεταξύ της ρύθμισης συχνότητας του ηλεκτρικού δικτύου και των απαιτήσεων των χρηστών.

Ο οδηγός του οχήματος μπορεί να επιλέξει να διατηρήσει την κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας αν η αποθηκευμένη ενέργεια αρκεί για την επόμενη διαδρομή που θα διανύσει το όχημα ή να φορτίσει περαιτέρω την μπαταρία του οχήματος προκειμένου να καλύψει τις ανάγκες του. Στην πρώτη περίπτωση πιθανόν ο οδηγός να επιλέξει να φορτίσει το όχημα του το βράδυ στο σπίτι λόγω χαμηλής χρέωσης της ηλεκτρικής ενέργειας. Η κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας διαφέρει από όχημα σε όχημα, όπως και οι απαιτήσεις των χρηστών. Οι χρήστες-ιδιοκτήτες των οχημάτων μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε δύο τύπους : α) σε αυτούς που θέλουν να διατηρήσουν την αρχική κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας τους και β) σε αυτούς που θέλουν να φορτίσουν περαιτέρω την μπαταρία τους. Στις επόμενες ενότητες παρουσιάζεται η υπάρχουσα μέχρι στιγμής μέθοδος ελέγχου V2G και μια προτεινόμενη μέθοδος ελέγχου από τους διδάκτορες Hui Lui, Zechun Hu, Yonghua Song και Jin Lin οι οποίοι είναι μέλη του Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). Τα πλεονεκτήματα της προτεινόμενης μεθόδου παρουσιάζονται στην ενότητα προσομοίωση.

4.2.1 Μέθοδος ελέγχου Autonomous Distributed V2G Control (ADC)

Ο αυτόνομος καταναεμημένος έλεγχος V2G είναι η υπάρχουσα μέθοδος ελέγχου V2G και σχεδιάστηκε με στόχο την καταστολή του σφάλματος συχνότητας του ηλεκτρικού δικτύου αλλά ταυτόχρονα να ικανοποιήσει τις ανάγκες φόρτισης του χρήστη. Για του χρήστες που θέλουν να προσφέρουν υπηρεσίες ρύθμισης συχνότητας στο δίκτυο αλλά επιθυμούν να διατηρήσουν την αρχική τους SOC η μέθοδος ADC εφαρμόζει την τεχνική Balance Control. Αν οι χρήστες επιθυμούν να φορτίσουν τα οχήματα τους αλλά ταυτόχρονα να συμμετέχουν στη πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας του δικτύου τότε εφαρμόζεται η τεχνική ελέγχου Smart Charging. Ακολουθεί περιγραφή της λειτουργίας των τεχνικών ελέγχου της ADC μεθόδου.

4.2.1.1 Balance control (BC)

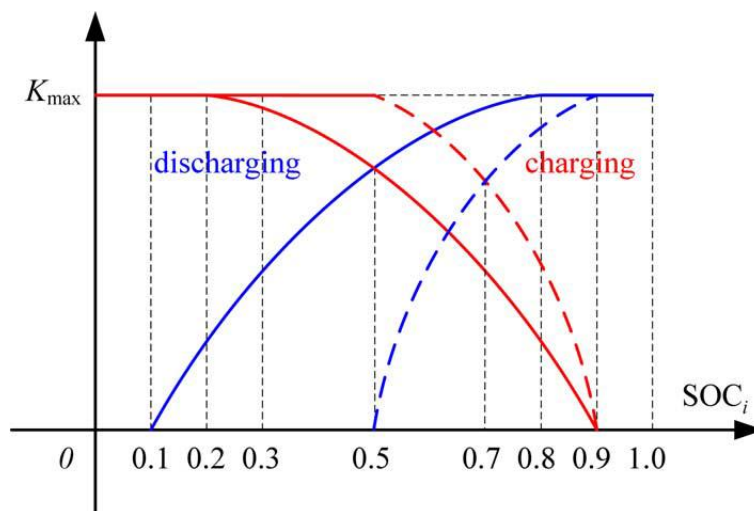
Οι παρακάτω εξισώσεις μας δίνουν την ισχύ που ανταλλάσει το i-οστό όχημα με το δίκτυο από τη πλευρά της μπαταρίας σε χρόνο k.

$$P_{i,k} = \begin{cases} K_{i,k}^c \Delta f_k, & \Delta f_k \geq 0 \\ K_{i,k}^d \Delta f_k, & \Delta f_k < 0 \\ P_{\max}, & K_{i,k}^c \Delta f_k \geq P_{\max} \\ -P_{\max}, & K_{i,k}^d \Delta f_k \leq -P_{\max} \end{cases}$$

Όπως παρατηρούμε η ισχύς αυτή υπολογίζεται με βάση το σφάλμα συχνότητας του δικτύου και ενός συντελεστή κέρδους K . Ο συντελεστής K παίζει σημαντικό ρόλο στη μέθοδο ελέγχου καθώς δείχνει το πόσο θα αντιδράσει το όχημα με το δίκτυο. Ουσιαστικά είναι ο τρόπος με τον οποίο ελέγχουμε την φόρτιση ή εκφόρτιση της μπαταρίας με βάση το σφάλμα συχνότητας του δικτύου. Οι εξισώσεις με τις οποίες υπολογίζεται ο συντελεστής κέρδους K είναι οι εξής:

$$\begin{cases} K_{i,k}^c = K_{\max} \left(1 - \left(\frac{SOC_{i,k} - SOC_i^{\text{low}}}{SOC_i^{\text{max}} - SOC_i^{\text{low}}} \right)^2 \right) \\ K_{i,k}^d = K_{\max} \left(1 - \left(\frac{SOC_{i,k} - SOC_i^{\text{high}}}{SOC_i^{\text{min}} - SOC_i^{\text{high}}} \right)^2 \right) \end{cases}.$$

Όπως φαίνεται από τις πιο πάνω εξισώσεις υπολογίζονται δύο τιμές για το κέρδος K , για κάθε κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας που αντιστοιχεί σε μια χρονική στιγμή k . Η μια τιμή αντιστοιχεί στο συντελεστή εκφόρτισης της μπαταρίας και η άλλη στο συντελεστή φόρτισης. Όταν το σφάλμα συχνότητας είναι αρνητικό χρησιμοποιείται ο συντελεστής εκφόρτισης ενώ όταν είναι θετικό χρησιμοποιείται ο συντελεστής φόρτισης της μπαταρίας. Για τον υπολογισμό του εκάστοτε συντελεστή K πρέπει να ορίσουμε ένα μέγιστο κέρδος K_{\max} όπως και τις παραμέτρους SOC_{\min} , SOC_{low} , SOC_{high} και SOC_{\max} για την κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας. Βάσει αυτών των παραμέτρων και της κατάστασης φόρτισης της μπαταρίας την εκάστοτε χρονική στιγμή k υπολογίζεται το ποσοστό του κέρδους K_{\max} από το οποίο θα καθοριστεί η αντίδραση του οχήματος την επόμενη χρονική στιγμή. Στο παρακάτω γράφημα φαίνονται οι καμπύλες φόρτισης και εκφόρτισης του κέρδους K συναρτήσει της κατάστασης φόρτισης της μπαταρίας (SOC) για αύξηση ή διατήρηση της κατάστασης φόρτισης της μπαταρίας στο 50% και στο 70% της μέγιστης SOC .



Διάγραμμα 4.2.1.1-1: Μέθοδος ελέγχου Balance control.

Η κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας διατηρείται στο 50%(συνεχής καμπύλη) θέτοντας τις παραμέτρους $SOC_{min}=0.1$, $SOC_{low}=0.2$, $SOC_{high}=0.8$ και $SOC_{max}=0.9$. Για διατήρηση της κατάστασης φόρτισης στο 70%(διακεκομμένη καμπύλη) οι αντίστοιχες τιμές των παραμέτρων είναι $SOC_{min}=0.5$, $SOC_{low}=0.5$, $SOC_{high}=0.9$ και $SOC_{max}=0.9$. Με κόκκινο χρώμα οι καμπύλες φόρτισης ενώ με μπλε οι καμπύλες εκφόρτισης. Όπως είναι κατανοητό για κάθε επιθυμητή κατάσταση φόρτισης πρέπει να οι τιμές των παραμέτρων SOC_{min} , SOC_{low} , SOC_{high} και SOC_{max} να αλλάζουν. Ωστόσο είναι αναγκαίο σε ένα σύστημα ελέγχου ο αλγόριθμος να υπολογίζει αυτόματα αυτές τις παραμέτρους.

4.2.1.2 Smart Charging (SC)

Η τεχνική SC χρησιμοποιείται για να καλύψει τη ζητούμενη φόρτιση και να βοηθήσει στη πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας του δικτύου με τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$P_{i,k} = \begin{cases} \frac{K_{max}}{2} \Delta f_k + \frac{P_{max}}{2} & (|K_{max} \Delta f_k| \leq P_{max}) \\ P_{max} & (P_{max} < K_{max} \Delta f_k) \\ 0 & (K_{max} \Delta f_k < -P_{max}) \\ -P_{max} & (\Delta f_k < \Delta f_{min}) \end{cases}$$

Ο έλεγχος αυτός υλοποιείται με το συντελεστή κέρδους K_{max} και το 50% της μέγιστης V2G ισχύος, η τιμή της οποίας έχει να κάνει με το είδος του σταθμού φόρτισης. Ο κάθε σταθμός φόρτισης διαφέρει ως προς την μέγιστη ισχύ που προσφέρει για φόρτιση των οχημάτων. Χρησιμοποιώντας το 50% του συντελεστή κέρδους K πολλαπλασιασμένο με το σφάλμα συχνότητας η τεχνική ελέγχου καταστέλλει τις αποκλίσεις της συχνότητας από την ονομαστική της τιμή. Το 50% της μέγιστης V2G ισχύος δεσμεύεται με σκοπό την επίτευξη της ζητούμενης φόρτισης. Η προγραμματισμένη διάρκεια φόρτισης υπολογίζεται από τη σχέση:

$$t_i^s = \frac{2 (SOC_i^e - SOC_i^{in}) E_i^r}{P_{max}}$$

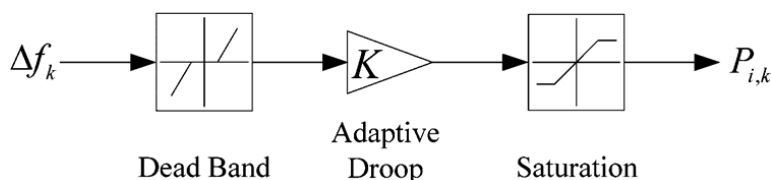
Όπως κατανοούμε από τη πιο πάνω σχέση η προγραμματισμένη διάρκεια φόρτισης είναι ανεξάρτητη από το χρονικό διάστημα σύνδεσης του οχήματος με το σταθμό φόρτισης. Επομένως είναι αβέβαιο αν σε αυτό το χρονικό διάστημα θα επιτευχθεί η ζητούμενη φόρτιση ή όχι. Επιπλέον δεν είναι βέλτιστη η λύση να φορτίζουν όλα τα οχήματα με το 50% της μέγιστης V2G ισχύος. Ο λόγος είναι ότι ο χρόνος σύνδεσης στο σταθμό φόρτισης και η αρχική κατάσταση φόρτισης διαφέρουν για διαφορετικά οχήματα.

4.2.2 Μέθοδος ελέγχου Adaptive droop control

Η μέθοδος αυτή όπως και η ADC αναλαμβάνει δύο τρόπους ελέγχου των οχημάτων που συμμετέχουν στην πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας οι οποίοι έχουν σχέση με την επιθυμία του χρήστη για φόρτιση ή όχι της μπαταρίας του οχήματος. Ο πρώτος τρόπος ελέγχου ονομάζεται Battery Soc Holder(BSH) και έχει να κάνει με τους χρήστες-ιδιοκτήτες των οχημάτων που θέλουν να διατηρήσουν την κατάσταση φόρτισης τους συμμετέχοντας παράλληλα στη πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας του δικτύου. Ο δεύτερος τρόπος ελέγχου αυτής της μεθόδου έχει να κάνει με τους χρήστες που θέλουν να φορτίσουν την μπαταρία του οχήματος τους εντός καθορισμένου χρονικού διαστήματος συμμετέχοντας παράλληλα στην πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας του δικτύου. Αυτός ο τρόπος ελέγχου ονομάζεται Charging with Frequency Regulation(CFR).

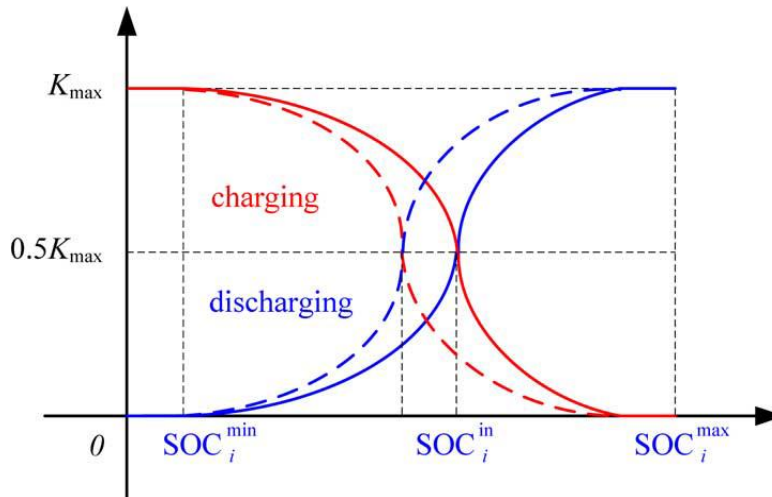
4.2.2.1 Battery Soc Holder (BSH)

Αυτός ο τρόπος ελέγχου σχεδιάστηκε για τα οχήματα που θέλουν να διατηρήσουν την κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας τους συμμετέχοντας ταυτόχρονα στη πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας. Στην πιο κάτω εικόνα φαίνεται τρόπος υλοποίησης του ελέγχου Battery Soc Holder.



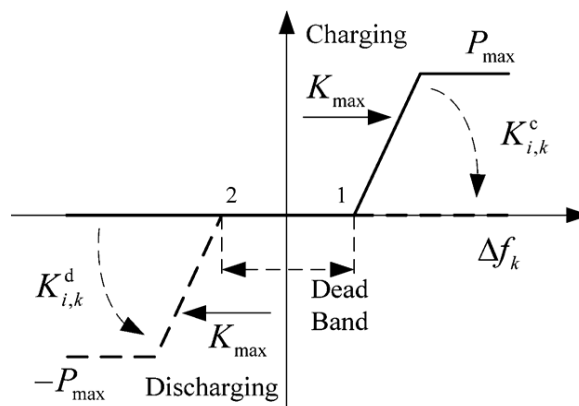
Εικόνα 4.2.2.1-1: Προσαρμοστικός έλεγχος Battery Soc Holder για την ισχύ φόρτισης/εκφόρτισης από τη πλευρά του οχήματος.

Μια νεκρή ζώνη(dead band) είναι αναγκαία για να μειωθεί η πολύ συχνή κατάσταση φόρτισης/εκφόρτισης της μπαταρίας καθώς αν το σφάλμα συχνότητας είναι αμελητέο τα οχήματα δεν πρέπει να αντιδράσουν. Στο τέλος προστίθεται ένας κορεσμός ο οποίος έχει ως σκοπό οι τιμές που λαμβάνει η ισχύς φόρτισης ή εκφόρτισης να είναι σε αποδεκτά όρια από το όχημα αλλά και από το ηλεκτρικό δίκτυο. Η λειτουργία του BSH γίνεται πιο κατανοητή από το γράφημα 4.2.2.1-1.



Γράφημα 4.2.2.1-1: BSH με προσαρμοστικό(adaptive) έλεγχο.

Όταν η απόκλιση συχνότητας του ηλεκτρικού δικτύου παίρνει τιμές έξω από τη καθορισμένη dead band γίνεται ανταλλαγή ισχύος μεταξύ του οχήματος και του δικτύου με σκοπό τη καταστολή της διακύμανσης συχνότητας. Όταν αλλάζει η κατάσταση φόρτισης του οχήματος το κέρδος K περιστρέφεται γύρω από το 0 και το $K_{\max}/2$ προσαρμόζοντας κατάλληλα την ισχύ φόρτισης/εκφόρτισης. Όπως φαίνεται και στο πιο κάτω γράφημα ο προσαρμοστικός έλεγχος του BSH βασίζεται στην κατάσταση φόρτισης του οχήματος την τρέχον χρονική στιγμή και στην αρχική κατάσταση φόρτισης όταν συνδέεται στο δίκτυο. Όταν η στάθμη φόρτισης μπαταρίας την τρέχον χρονική στιγμή είναι μεγαλύτερη από την αρχική ο προσαρμοστικός έλεγχος(adaptive droop) “μπλοκάρει” την αύξηση της κατάστασης φόρτισης της μπαταρίας. Στην αντίθετη περίπτωση ο προσαρμοστικός έλεγχος χρησιμοποιείται για να αυξηθεί η κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας.



Γράφημα 4.2.2.1-2: Προσαρμοστικός έλεγχος του Battery Soc Holder διατήρηση της αρχικής SOC.

Σύμφωνα με το παραπάνω διάγραμμα το κέρδος K υπολογίζεται ως εξής:

1) If $SOC_{i,k} \leq SOC_i^{\min}$, then

$$\begin{cases} K_{i,k}^c = K_{\max} \\ K_{i,k}^d = 0. \end{cases}$$

2) If $SOC_{i,k} \geq SOC_i^{\max}$, then

$$\begin{cases} K_{i,k}^c = 0 \\ K_{i,k}^d = K_{\max}. \end{cases}$$

3) If $SOC_i^{\min} < SOC_{i,k} \leq SOC_i^{\text{in}}$, then

$$\begin{cases} K_{i,k}^c = \frac{1}{2} K_{\max} \left(1 + \sqrt{\frac{SOC_{i,k} - SOC_i^{\text{in}}}{SOC_i^{\min} - SOC_i^{\text{in}}}} \right) \\ K_{i,k}^d = \frac{1}{2} K_{\max} \left(1 - \sqrt{\frac{SOC_{i,k} - SOC_i^{\text{in}}}{SOC_i^{\min} - SOC_i^{\text{in}}}} \right). \end{cases}$$

4) If $SOC_i^{\text{in}} < SOC_{i,k} < SOC_i^{\max}$, then

$$\begin{cases} K_{i,k}^c = \frac{1}{2} K_{\max} \left(1 - \sqrt{\frac{SOC_{i,k} - SOC_i^{\text{in}}}{SOC_i^{\max} - SOC_i^{\text{in}}}} \right) \\ K_{i,k}^d = \frac{1}{2} K_{\max} \left(1 + \sqrt{\frac{SOC_{i,k} - SOC_i^{\text{in}}}{SOC_i^{\max} - SOC_i^{\text{in}}}} \right). \end{cases}$$

Από τις εξισώσεις του προσαρμοστικού ελέγχου και από το γράφημα 4.2.2.1-2 φαίνεται ξεκάθαρα ο τρόπος λειτουργίας του ελέγχου. Όταν η κατάσταση φόρτισης του οχήματος απομακρύνεται αρνητικά από το SOC_{in} το κέρδος K αυξάνεται προκειμένου να επιτευχθεί η επαναφορά της μπαταρίας του οχήματος στην αρχική κατάσταση φόρτισης ενώ όταν η τιμή του SOC απομακρύνεται από το SOC_{in} το κέρδος K μειώνεται ώστε να αποτρέψει την περαιτέρω φόρτιση της μπαταρίας του οχήματος.

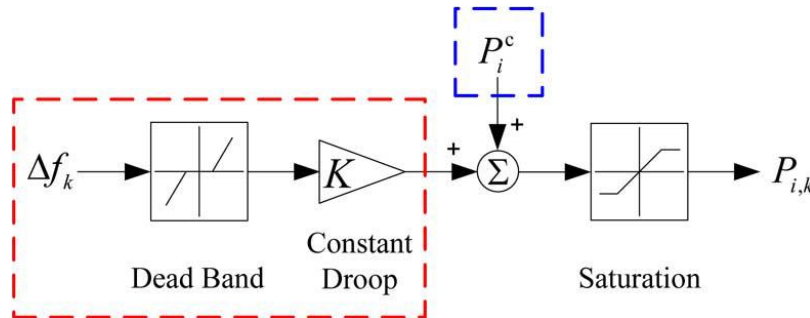
Με βάση τις σχέσεις 1-4 καταλήγουμε στην εξής σημαντική σχέση:

$$K_{i,k}^c + K_{i,k}^d = K_{\max}.$$

Όταν η τρέχον κατάσταση φόρτισης(SOC) έχει μικρότερη τιμή από την αρχική(SOC_{in}) ο συντελεστής K φόρτισης θα πάρει μεγαλύτερες τιμές από το συντελεστή K εκφόρτισης. Σε αυτή τη περίπτωση η ισχύς που απορροφάται από το ηλεκτρικό δίκτυο είναι περισσότερη από αυτή που εγχέεται σε αυτό. Στην αντίθετη περίπτωση όταν κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας έχει μεγαλύτερη τιμή από την αρχική, ο συντελεστής K φόρτισης θα πάρει μικρότερες τιμές από το συντελεστή K εκφόρτισης και τότε περισσότερη ισχύς εγχέεται στο δίκτυο. Με αυτό το τρόπο η ισχύς φόρτισης/εκφόρτισης ρυθμίζεται ώστε να διατηρείται η μπαταρία στην αρχική κατάσταση φόρτισης της.

4.2.2.2 Charging With Frequency Regulation (CFR)

Όταν η αποθηκευμένη ενέργεια του οχήματος δεν αρκεί για την επόμενη διαδρομή ο χρήστης-ιδιοκτήτης του οχήματος θέλει να φορτίσει περαιτέρω τη μπαταρία του οχήματος εντός κάποιου συγκεκριμένου χρονικού διαστήματος. Η τεχνική ελέγχου CFR σχεδιάστηκε για να ικανοποιεί την επιθυμία του χρήστη για φόρτιση του οχήματος αλλά παράλληλα να συμβάλει στη πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας του ηλεκτρικού δικτύου. Στην εικόνα 4.2.2.2-1 βλέπουμε πως υλοποιείται αυτός ο τρόπος ελέγχου. Ο συντελεστής K χρησιμοποιείται για να βελτιώσει την ποιότητα της συχνότητας βασιζόμενος στις αποκλίσεις συχνότητας του ηλεκτρικού δικτύου την εκάστοτε χρονική στιγμή. Σε σύγκριση με το προηγούμενο τρόπο ελέγχου στον CFR χρησιμοποιείται μια προγραμματισμένη ισχύ φόρτισης για να καλύψει τις ανάγκες του χρήστη. Άρα η μπαταρία του οχήματος φορτίζει με μια καθορισμένη ισχύ φόρτισης η οποία μεταβάλλεται ανάλογα με το σφάλμα συχνότητας του δικτύου.

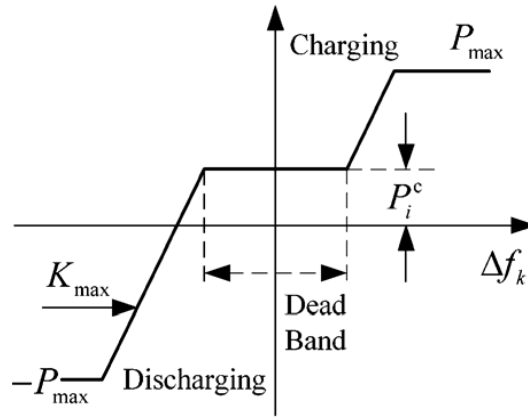


Εικόνα 4.2.2.2-1: Charging With Frequency Regulation(στο κόκκινο πλαίσιο ο έλεγχος πτώσης συχνότητας και στο μπλε πλαίσιο η προγραμματισμένη ισχύς φόρτισης)

Η προγραμματισμένη ισχύς φόρτισης του i-στού οχήματος υπολογίζεται από την πιο κάτω σχέση:

$$P_i^c = (\text{SOC}_i^e - \text{SOC}_i^{\text{in}}) \cdot E_i^r / (t_i^{\text{out}} - t_i^{\text{in}}) .$$

Η προγραμματισμένη ισχύς φόρτισης από τη πλευρά της μπαταρίας με βάση την επιθυμητή SOC του χρήστη ισούται με τη διαφορά της επιθυμητής SOC στο χρόνο αποσύνδεσης του οχήματος με την αρχική SOC του οχήματος όταν αυτό συνδέθηκε στο δίκτυο, πολλαπλασιασμένη με την ονομαστική χωρητικότητα της μπαταρίας σε KWh και διαιρεμένη με τη χρονική διάρκεια που θα είναι συνδεδεμένο το όχημα στο δίκτυο. Στο γράφημα 4.2.2.2-1 παρατηρούμε το τρόπο λειτουργίας του ελέγχου CFR. Όταν το σφάλμα συχνότητας βρίσκεται στη “νεκρή ζώνη” (dead band) το όχημα φορτίζει με τη προγραμματισμένη ισχύ φόρτισης, ενώ όταν το σφάλμα συχνότητας βρίσκεται εκτός της dead band το όχημα φορτίζει και ταυτόχρονα συμβάλει στη πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας με την αυξομείωση της προγραμματισμένης ισχύς φόρτισης.



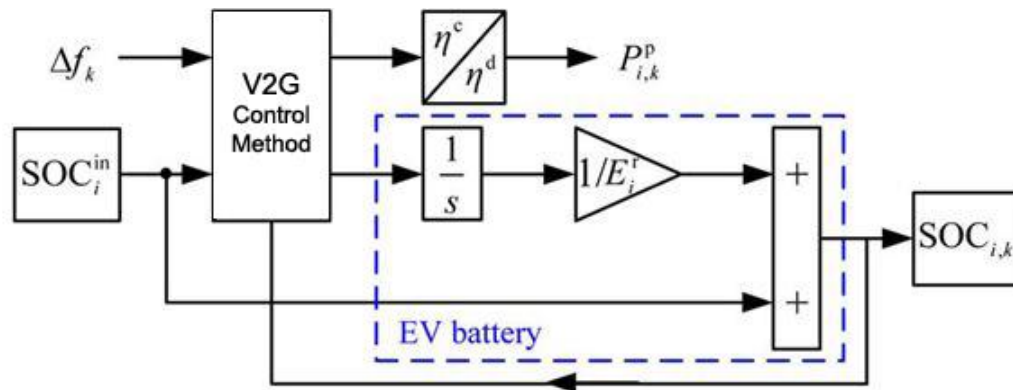
Γράφημα 4.2.2.2-1: CFR με προσαρμοστικό (adaptive) έλεγχο

Λαμβάνοντας υπ' όψιν τις αποδοτικότητες φόρτισης/εκφόρτισης (η^c/η^d) της μπαταρίας του οχήματος και την ισχύ φόρτισης/εκφόρτισης η ισχύς από και προς το δίκτυο στο σημείο σύνδεσης του οχήματος δίνεται από τη πιο κάτω σχέση:

$$P_{i,k}^P = \begin{cases} \frac{P_{i,k}}{\eta^c}, & (P_{i,k} \geq 0) \\ P_{i,k} \cdot \eta^d, & (P_{i,k} < 0). \end{cases}$$

4.3 Δυναμικό Μοντέλο V2G Ελέγχου του ηλεκτρικού οχήματος

Το μοντέλο που χρησιμοποιήσαμε για να αναπαραστήσουμε τη μπαταρία του i-οστού οχήματος μαζί με τη V2G λειτουργία για τη ρύθμιση συχνότητας του δικτύου είναι το ακόλουθο:



Διάγραμμα 4.3-1: Μπλοκ V2G ελέγχου ηλεκτρικού/υβριδικού οχήματος για ρύθμιση συχνότητας.

Το τμήμα που είναι στο πλαίσιο με μπλε διακεκομμένη γραμμή αναπαριστά τη μπαταρία του οχήματος ενώ το υπόλοιπο κομμάτι αναπαριστά τον έλεγχο V2G καθώς και την ισχύ στο σημείο σύνδεσης του οχήματος. Το μπλοκ V2G Control Method ουσιαστικά εκτελεί τη λειτουργία του V2G controller. Ως είσοδο παίρνει το σφάλμα συχνότητας και την τιμή της SOC την εκάστοτε χρονική στιγμή k . Ενώ παράλληλα μπορεί να δέχεται και κάποιες παραμέτρους από το σύστημα διαχείρισης της μπαταρίας, όπως την επιθυμητή κατάσταση φόρτισης SOC_{out}, μέγιστη/ελάχιστη φόρτιση κ.α. Το μπλοκ αυτό εφαρμόζει μια μέθοδο-τεχνική V2G ελέγχου όπως αυτές που προαναφέρθηκαν (Balance Control, Battery Soc Holder και Charging With Frequency Regulation). Στην έξοδο παίρνουμε την ισχύ φόρτισης/εκφόρτισης από τη πλευρά του οχήματος η οποία όταν πολλαπλασιαστεί με τις αποδοτικότητες φόρτισης/εκφόρτισης (η^c/η^d) μας δίνει την ισχύ φόρτισης/εκφόρτισης στο σημείο σύνδεσης του οχήματος με το ηλεκτρικό δίκτυο. Η ισχύς από τη πλευρά του οχήματος ολοκληρώνεται στο χρονικό διάστημα σύνδεσης του οχήματος (plug-in time) μέχρι τη χρονική στιγμή k και ακολούθως διαιρείται με την ονομαστική χωρητικότητα της μπαταρίας σε KWh. Αθροίζοντας το αποτέλεσμα της διαίρεσης με την τιμή της αρχικής κατάστασης φόρτισης SOC_{in} παίρνουμε την SOC του οχήματος τη χρονική στιγμή k .

4.4 Προσομοίωση

Το μοντέλο V2G ελέγχου που περιγράψαμε στην προηγούμενη ενότητα υλοποιήθηκε σε κώδικα στο περιβάλλον του Matlab. Ο κώδικας που αντιπροσωπεύει το μοντέλο αποτελείται συνολικά από τέσσερα αρχεία. Τα δύο αρχεία αφορούν τις συναρτήσεις που υλοποιούν τις μεθόδους ελέγχου Balance Control και Battery Soc Holder. Υπάρχει ένα αρχείο στο οποίο υλοποιήθηκε η συνάρτηση V2G_control η οποία εκτελεί τη λειτουργία του συστήματος ελέγχου και ένα αρχείο στο οποίο γίνεται η δήλωση/υπολογισμός των παραμέτρων του συστήματος, η κλήση της συνάρτησης V2G_control και η απεικόνιση των αποτελεσμάτων σε διαγράμματα. Πιο κάτω γίνεται αναλυτική επεξήγηση της λειτουργίας του κώδικα που αντιπροσωπεύει το σύστημα ελέγχου.

4.4.1 Σύστημα V2G ελέγχου φόρτισης σε κώδικα Matlab

Στο αρχείο Input_data.m γίνεται η δήλωση των παραμέτρων που χρειάζονται για τη λειτουργία του μοντέλου καθώς και ο υπολογισμός των παραμέτρων του συστήματος που αφορούν συνολικά το στόλο των οχημάτων. Οι παράμετροι αυτοί είναι οι εξής:

- EV_number: Αριθμός οχημάτων.
- battery_cap: Χωρητικότητα μπαταρίας (σε KWh).
- SOC_in: Αρχική κατάσταση φόρτισης (σε αμ) του οχήματος τη στιγμή σύνδεσης στο σταθμό φόρτισης.
- SOC_low: Όριο χαμηλής φόρτισης της μπαταρίας (σε αμ) για τη τεχνική ελέγχου Balance Control.
- SOC_high: Όριο υψηλής φόρτισης της μπαταρίας (σε αμ) για τη τεχνική ελέγχου Balance Control.
- SOC_min: Όριο ελάχιστης φόρτισης της μπαταρίας (σε αμ).
- SOC_max: Όριο μέγιστης φόρτισης της μπαταρίας (σε αμ).
- control_method: Αριθμός που δηλώνει το είδος ελέγχου (1 για ADC και 2 για DVC).
- maximum_V2G_droop: Μέγιστη τιμή συντελεστή K (σε KW/HZ).
- Df_min: Ελάχιστη απόκλιση συχνότητας από την ονομαστική της τιμή, για καθορισμό της νεκρής ζώνης (σε HZ).
- max_V2G_power: Μέγιστη ισχύς V2G λειτουργίας (σε KW).
- file_name: Όνομα αρχείου από το οποίο περιέχει το σήμα συχνότητας.
- t_out: Χρόνος αποσύνδεσης του οχήματος από το ηλεκτρικό δίκτυο (σε h).
- SOC_out: Επιθυμητή κατάσταση φόρτισης μετά την αποσύνδεση (σε αμ).
- f: Ονομαστική τιμή συχνότητας ηλεκτρικού δικτύου (σε HZ).
- hc: Βαθμός απόδοσης φόρτισης της μπαταρίας (σε αμ).
- hd: Βαθμός απόδοσης εκφόρτισης της μπαταρίας (σε αμ).
- Td: Καθυστερήση ενεργοποίησης V2G ελεγκτών (σε seconds).
- Er: Συνολική χωρητικότητα σε (KWh) από όλες τις μπαταρίες του στόλου οχημάτων. Υπολογίζεται από τη σχέση $\text{battery_cap} \times \text{EV_number}$.
- Kmax: Μέγιστη συνολικό κέρδος K (σε KW/HZ) για όλο τον στόλο οχημάτων. Υπολογίζεται από τη σχέση $\text{EV_number} \times \text{maximum_V2G_droop}$.
- Pmax: Μέγιστη συνολική ισχύς (σε KW) για όλο το στόλο οχημάτων. Υπολογίζεται από τη σχέση $\text{max_V2G_power} \times \text{EV_number}$.
- Pc: Προγραμματισμένη ισχύς φόρτισης των οχημάτων με τη μέθοδο CFR. Υπολογίζεται από τη σχέση $((\text{SOC_out} - \text{SOC_in}) \times \text{Er}) / \text{t_out}$.

Ακολούθως γίνεται κλήση της συνάρτησης V2G_control η οποία επιστρέφει σε μονοδιάστατους πίνακες το σφάλμα συχνότητας, την κατάσταση φόρτισης των οχημάτων, την ανταλλασσόμενη ισχύ από τη πλευρά των οχημάτων και του δικτύου και το χρόνο προσομοίωσης. Η ανταλλασσόμενη ισχύς από τη πλευρά των οχημάτων αποθηκεύεται σε ένα αρχείο excel για μετέπειτα χρήση.

Η συνάρτηση V2G_control :

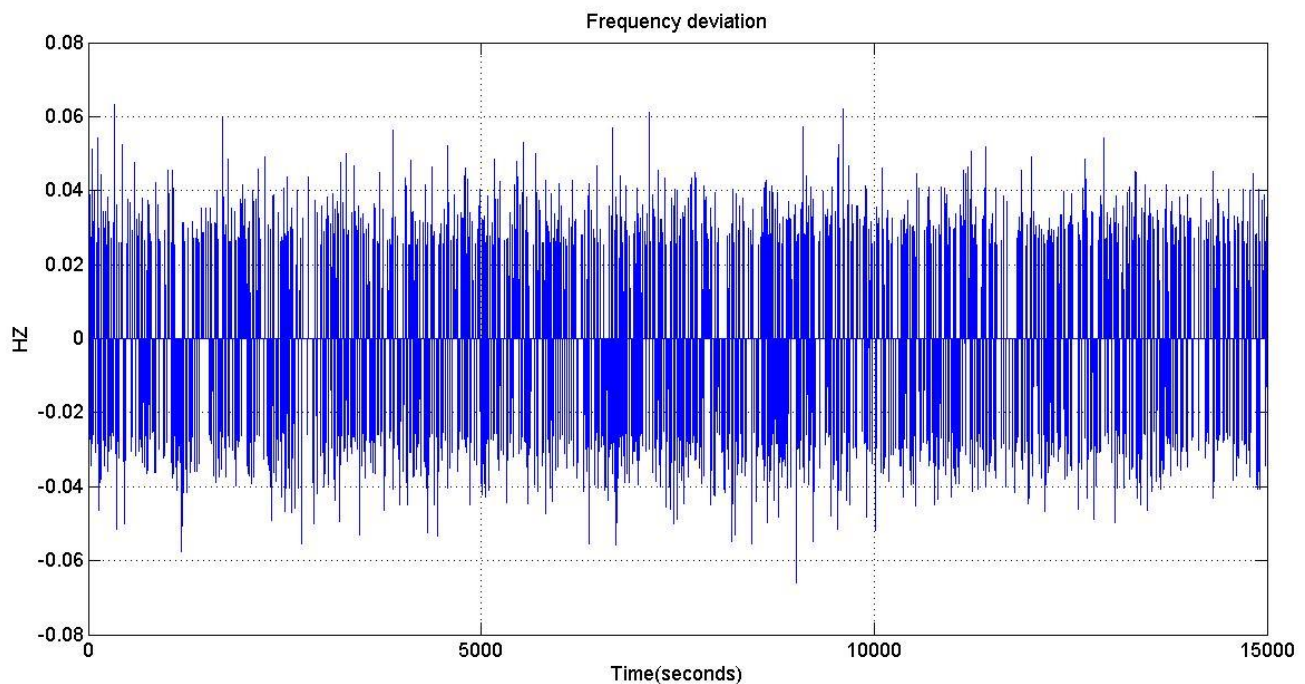
Η συνάρτηση V2G_control προσομοιώνει τη λειτουργία του συστήματος ελέγχου και ανάλογα με το σφάλμα συχνότητας του δικτύου υπολογίζει τις μεταβολές της ισχύος των οχημάτων καθώς και τη κατάσταση φόρτισης τους. Αρχικά η συνάρτηση ελέγχει αν ο χρήστης έχει επιλέξει υπαρκτή για το σύστημα μέθοδο ελέγχου. Αν έχει δώσει στη μεταβλητή control_method τιμή διαφορετική του 1 ή 2 τότε ο κώδικας ειδοποιεί το χρήστη με μήνυμα λάθους, προτείνοντας του να επιλέξει μια από τις δύο μεθόδους (ADC ή DVC). Στη συνέχεια γίνεται διάβασμα του σήματος συχνότητας και της χρονοσειράς του σήματος από το excel αρχείο καθώς και η δήλωση/αρχικοποίηση πινάκων και μεταβλητών που θα χρειαστούν. Στο σήμα εφαρμόζεται μια καθυστέρηση η οποία αντιστοιχεί στο χρόνο που χρειάζεται να φτάσει το σήμα στους ελεγκτές φόρτισης των ηλεκτρικών/υβριδικών οχημάτων. Με ένα for-loop σαρώνουμε τις τιμές του σήματος και εφαρμόζουμε τα εξής :

1. Υπολογίζουμε το σφάλμα συχνότητας.
2. Ελέγχουμε αν η τιμή του σφάλματος συχνότητας είναι εκτός της “νεκρής ζώνης” (dead band) η οποία όπως αναφέρθηκε πιο πάνω χρησιμεύει στο να μειώνει τη πολύ συχνή κατάσταση φόρτισης/εκφόρτισης της μπαταρίας.
3. Ανάλογα με τη μέθοδο ελέγχου που επιλέγεται και τις τιμές των παραμέτρων SOC_in και SOC_out υπολογίζεται η τιμή της V2G ισχύος από τη πλευρά των οχημάτων. Αν η επιλεγμένη μέθοδος είναι η ADC και η επιθυμητή κατάσταση φόρτισης SOC_out είναι η ίδια με την αρχική SOC_in, τότε καλείται η συνάρτηση ADC η οποία υπολογίζει και επιστρέφει το κέρδος K με βάση τις εξισώσεις της τεχνικής Balance Control. Ακολουθώντας το κέρδος K πολλαπλασιάζεται με το σφάλμα συχνότητας του δικτύου για τον υπολογισμό της V2G ισχύος. Αν όμως ο χρήστης επιθυμεί να αυξήσει την αρχική κατάσταση φόρτισης του τότε η τιμή της V2G ισχύος υπολογίζεται με βάση τη τεχνική Smart Charging.
Για την DVC μέθοδο ελέγχου αν ο χρήστης επιθυμεί να διατηρήσει την αρχική SOC τότε καλείται η συνάρτηση DVC η οποία υλοποιεί τη τεχνική Battery SOC Holder. Η DVC επιστρέφει το κέρδος K το οποίο πολλαπλασιάζεται με το σφάλμα συχνότητας για τον υπολογισμό της V2G ισχύος. Στην περίπτωση που ο χρήστης επιθυμεί περεταίρω φόρτιση του οχήματος προστίθεται και η προγραμματισμένη ισχύς φόρτισης. Όταν η SOC φτάσει το επιθυμητό όριο η ισχύς που χρησιμοποιούν τα οχήματα για να φορτιστούν αποδεδειγμένα και στις δύο μεθόδους ελέγχου.
4. Εφαρμογή κορεσμού. Ελέγχουμε αν η τιμή της ισχύος φόρτισης/εκφόρτισης είναι μέσα στα προκαθορισμένα όρια της V2G λειτουργίας ώστε να είναι αποδεκτή και από τα οχήματα και από το ηλεκτρικό δίκτυο.
5. Σε ένα array αποθηκεύουμε τις τιμές της ισχύος φόρτισης/εκφόρτισης σε κάθε επανάληψη δημιουργώντας ένα σήμα ισχύος, του οποίου υπολογίζουμε το ολοκλήρωμα του στο διάστημα τιμών που έχει φτάσει μετά από κάθε επανάληψη. Η τιμή της ολοκλήρωσης του σήματος ισχύος μας δίνει την ενέργεια που ανταλλάσσουν τα οχήματα με το δίκτυο σε βατοδευτερόλεπτα (W·s). Διαιρώντας με το 3600 μετατρέπουμε την ενέργεια σε βατώρες (Wh) την οποία διαιρούμε με την ονομαστική χωρητικότητα της μπαταρίας υπολογίζοντας έτσι το καινούριο SOC σε αμ μέγεθος.

6. Υπολογίζουμε την ισχύ φόρτισης/εκφόρτισης από τη πλευρά του ηλεκτρικού δικτύου με βάση τις αποδοτικότητες φόρτισης/εκφόρτισης της μπαταρίας του οχήματος.

4.4.2 Σενάρια και αποτελέσματα Προσομοίωσης

Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 4.3 το σύστημα ελέγχου πρέπει να επιβλέπει τη λειτουργία του οχήματος ως κατανεμημένη πηγή ενέργειας αλλά ταυτόχρονα να ελέγχει και τη φόρτιση του οχήματος για τη κάλυψη των αναγκών του οδηγού του οχήματος. Προκειμένου να ελέγξουμε την ορθή λειτουργία του συστήματος ελέγχου και από τις δύο πλευρές (ηλεκτρικού δικτύου και οδηγού) δημιουργήσαμε ένα σήμα με τυχαίες τιμές το οποίο θεωρούμε ότι αντιστοιχεί στο σφάλμα συχνότητας του δικτύου και παρουσιάζεται στο γράφημα 4.4.2-1.



Γράφημα 4.4.2-1: Σφάλμα συχνότητας.

Σκοπός είναι να ελέγξουμε αν το σύστημα ελέγχου που υλοποιήσαμε στο περιβάλλον του Matlab μπορεί να μεταβάλει την ισχύ των οχημάτων ανάλογα με τις διακυμάνσεις συχνότητας του ηλεκτρικού δικτύου. Επιλέξαμε σήμα τυχαίων και συχνών μεταβολών για να κατανοήσουμε την ευαισθησία του συστήματος ελέγχου όσον αφορά τη συχνότητα του ηλεκτρικού δικτύου. Επίσης επιλέξαμε χρόνο προσομοίωσης περισσότερο των τεσσάρων ωρών και εκτελέσαμε δύο σενάρια προσομοίωσης ίδια και για τις μεθόδους ελέγχου ADC και DVC, για να παρουσιάσουμε τα πλεονεκτήματα της προτεινόμενης μεθόδου V2G ελέγχου ως προς

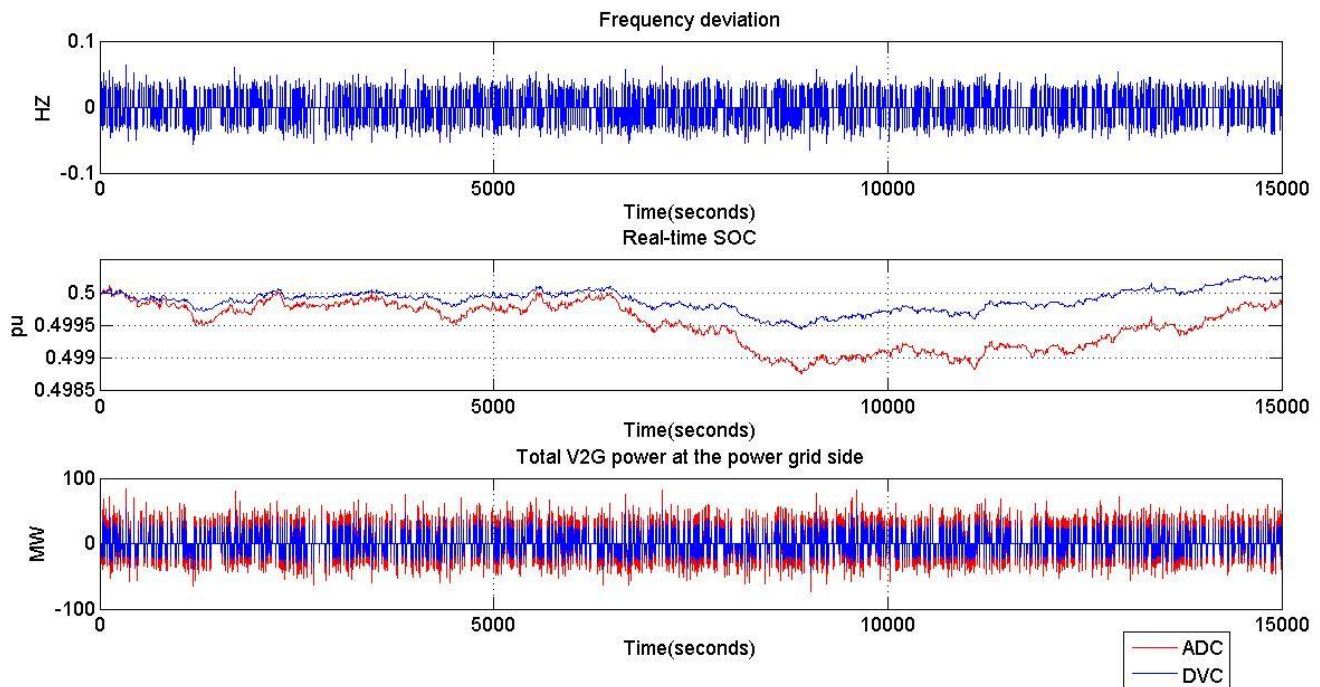
την υπάρχουσα μέθοδο. Αρχικά θεωρούμε ότι έχουμε 15000 οχήματα τα οποία έχουν φόρτιση στο 50% της ονομαστικής χωρητικότητας της μπαταρίας τους και επιθυμούν να διατηρήσουν την κατάσταση φόρτισης που έχουν την στιγμή σύνδεσης στους στο σταθμό φόρτισης. Ακολούθως θεωρούμε ότι τα 15000 οχήματα θέλουν να αυξήσουν τη κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας τους από το 30% στο 70%. Οι παράμετροι του συστήματος ελέγχου παρουσιάζονται στο πίνακα 4.4.2-1.

Παράμετρος	Συμβολισμός	Μονάδα μέτρησης	Τιμή
Αριθμός οχημάτων	EV_number	-	15000
Μέγιστος συντελεστής κέρδους K	max_V2G_droop	KW/HZ	100
Χωρητικότητα μπαταρίας	Battery_cap	KWh	32
Ελάχιστη κατάσταση φόρτισης	SOC_min	αμ	0.1
Μέγιστη κατάσταση φόρτισης	SOC_max	αμ	0.9
Μέγιστη ισχύς V2G	max_V2G_power	KW	7
Dead band συχνότητας	fr_dead_band	HZ	[-0.01 ,0.01]
Αποδοτικότητα φόρτισης/εκφόρτισης	hc/hd	αμ	0.92/0.92
Καθυστέρηση ενεργοποίησης V2G ελεγκτών	Td	sec	4

Πίνακας 4.4.2-1: Παράμετροι συστήματος V2G ελέγχου.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως αρχικά θεωρούμε ότι τα 15000 επιθυμούν να διατηρήσουν την κατάσταση φόρτισης τους στο 50%. Στο γράφημα 4.4.2-2 παρουσιάζεται η κατάσταση φόρτισης των οχημάτων καθώς και η ισχύς που ανταλλάσσουν τα οχήματα με το δίκτυο. Παρατηρούμε ότι και στις δύο μεθόδους ελέγχου τα οχήματα μεταβάλλουν την κατάσταση φόρτισης τους ανάλογα με το σφάλμα συχνότητας του δικτύου με σκοπό την υποστήριξη του στην επαναφορά της συχνότητας στην ονομαστική της τιμή. Συγκρίνοντας τις δύο καμπύλες κατάστασης φόρτισης των δύο μεθόδων ελέγχου παρατηρούμε ότι με τη μέθοδο DVC οι μεταβολές της SOC των οχημάτων γίνονται πιο κοντά στη αρχική σε σύγκριση με τη μέθοδο ADC. Η ισχύς που ανταλλάσσουν τα οχήματα με το δίκτυο ακολουθεί και αυτή πιστά τις μεταβολές της συχνότητας. Παρατηρούμε ότι με τη μέθοδο ελέγχου ADC η ισχύς παίρνει μεγαλύτερες τιμές σε σχέση με την DVC μέθοδο όσον αφορά τη φόρτιση των οχημάτων (θετικό πρόσημο) και μικρότερες τιμές όσον αφορά την εκφόρτιση των οχημάτων (αρνητικό πρόσημο). Αυτό συμβαίνει διότι το ποσοστό του κέρδους K της τεχνικής Balance Control της ADC μεθόδου είναι 81.6% του Kmax για κατάσταση φόρτισης 50%, ενώ για την τεχνική Battery Soc Holder της DVC μεθόδου είναι 50% του Kmax, όπως φαίνεται στο γράφημα

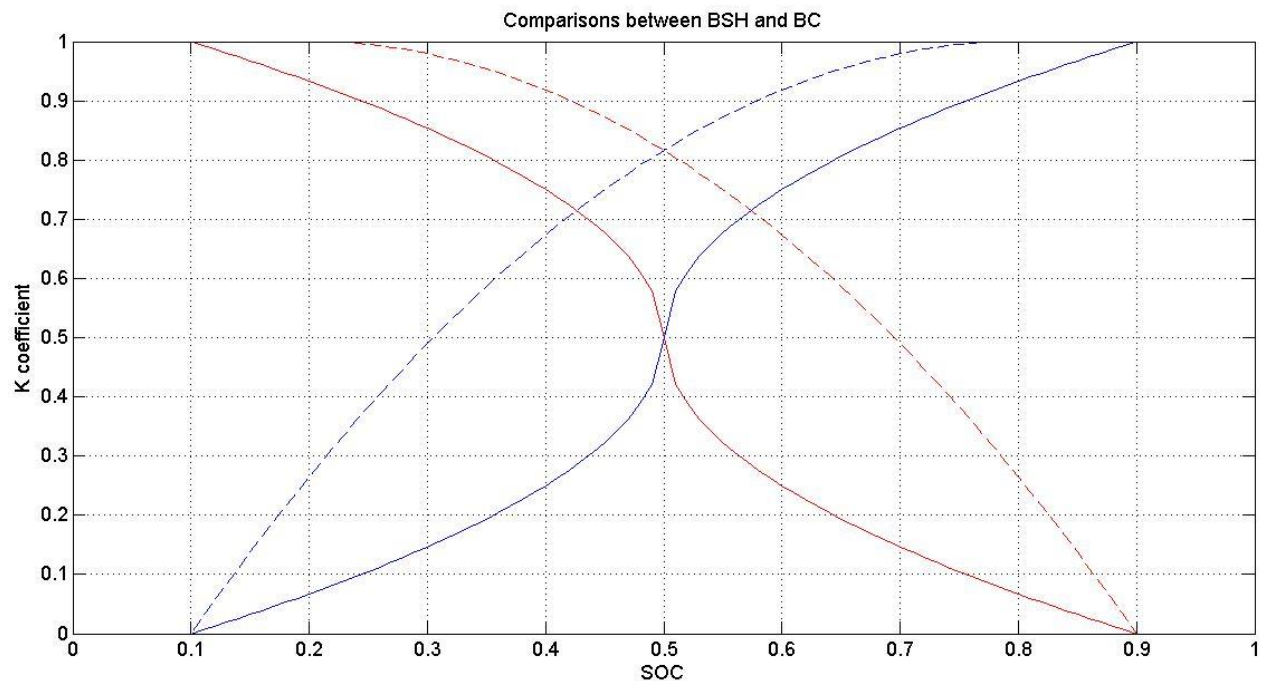
4.4.2-3. Άρα οι συνθήκες προσομοίωσης διαφέρουν στη σύγκριση της τεχνικής Balance Control με την Battery Soc Holder. Επομένως για τις ανάγκες της προσομοίωσης είναι αναγκαίο να θέσουμε μεγαλύτερη μέγιστη τιμή για το κέρδος K της BSH τεχνικής ελέγχου από ότι στη BC. Στον πίνακα 4.4.2-2 παρουσιάζονται οι τιμές του Kmax για τις δύο μεθόδους ελέγχου(ADC και DVC) ώστε να έχουμε ίδιες συνθήκες προσομοίωσης. Οι υπόλοιπες παράμετροι του συστήματος παρέμειναν ως είχαν.



Γράφημα 4.4.2-2: Προσομοίωση για διατήρηση αρχικής SOC με ίδια τιμή κέρδους Kmax.

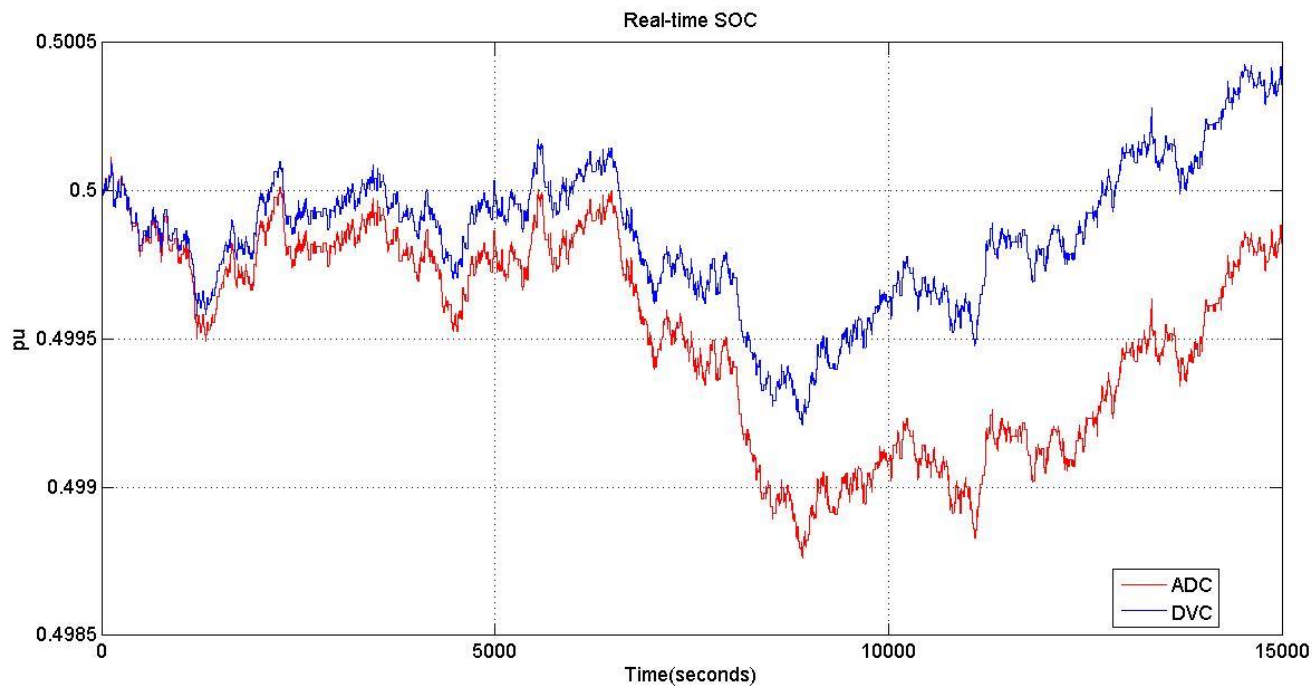
	Διατήρηση αρχικής SOC	Αύξηση αρχικής SOC
Kmax για μέθοδο ελέγχου ADC (KW/HZ)	100	100
Kmax για μέθοδο ελέγχου DVC (KW/HZ)	163	100

Πίνακας 4.4.2-2: Μέγιστος συντελεστής κέρδους K για τις μεθόδους ADC και DVC.

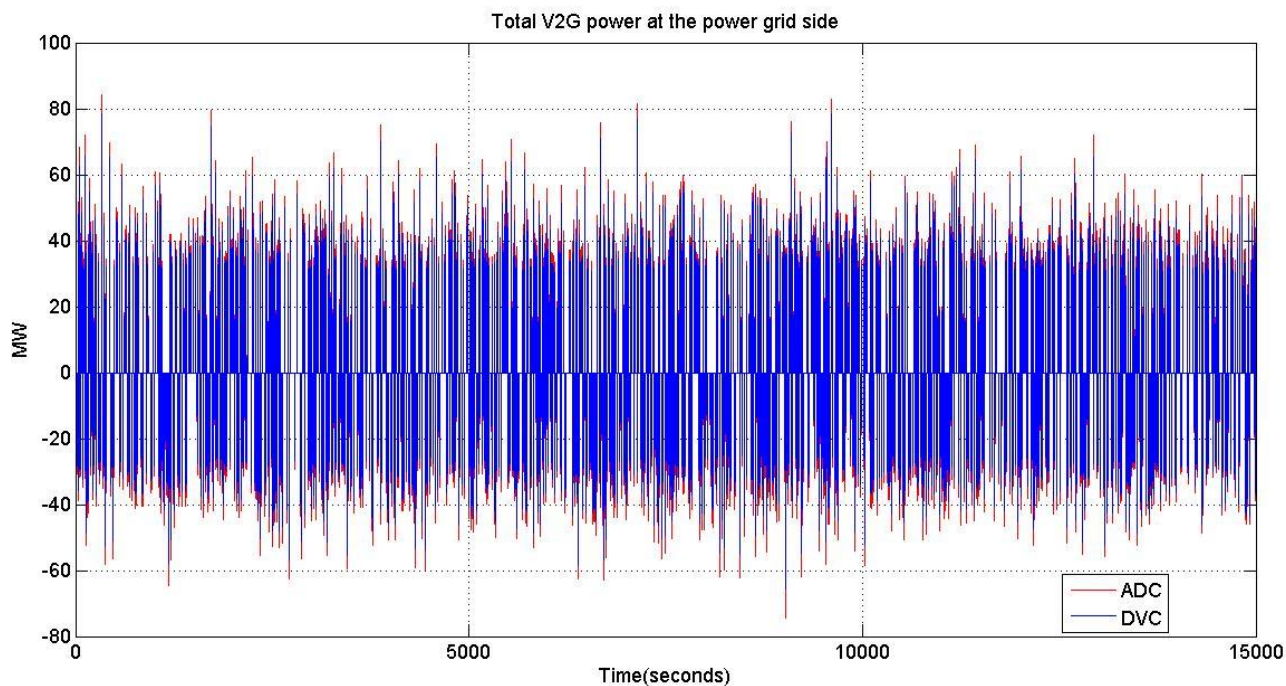


Γράφημα 4.4.2-3: Σύγκριση μεταξύ της τεχνικής ελέγχου BSH και BC ως προς το συντελεστή κέρδους K. Οι συνεχόμενες γραμμές αντιπροσωπεύουν τον έλεγχο BSH και οι διακεκομμένες τον έλεγχο BC.

Εκτελέσαμε ξανά το ίδιο σενάριο προσομοίωσης με μεγαλύτερο K_{max} για την τεχνική ελέγχου Battery Soc Holder ώστε το 50% του K_{max} της τεχνικής αυτής να είναι το 81.6% του K_{max} της τεχνικής Balance Control. Τα αποτελέσματα της κατάστασης φόρτισης των οχημάτων και της ανταλλασσόμενης ισχύς του ηλεκτρικού δικτύου με τα οχήματα φαίνονται στα παρακάτω γραφήματα.



Γράφημα 4.4.2-4: Διατήρηση αρχικής κατάστασης φόρτισης με μεθόδους ελέγχου ADC και DVC.



Γράφημα 4.4.2-5: Ανταλλασσόμενη ισχύς μεταξύ ηλεκτρικού δικτύου και οχημάτων από τη πλευρά του ηλεκτρικού δικτύου με τις μεθόδους ADC και DVC.

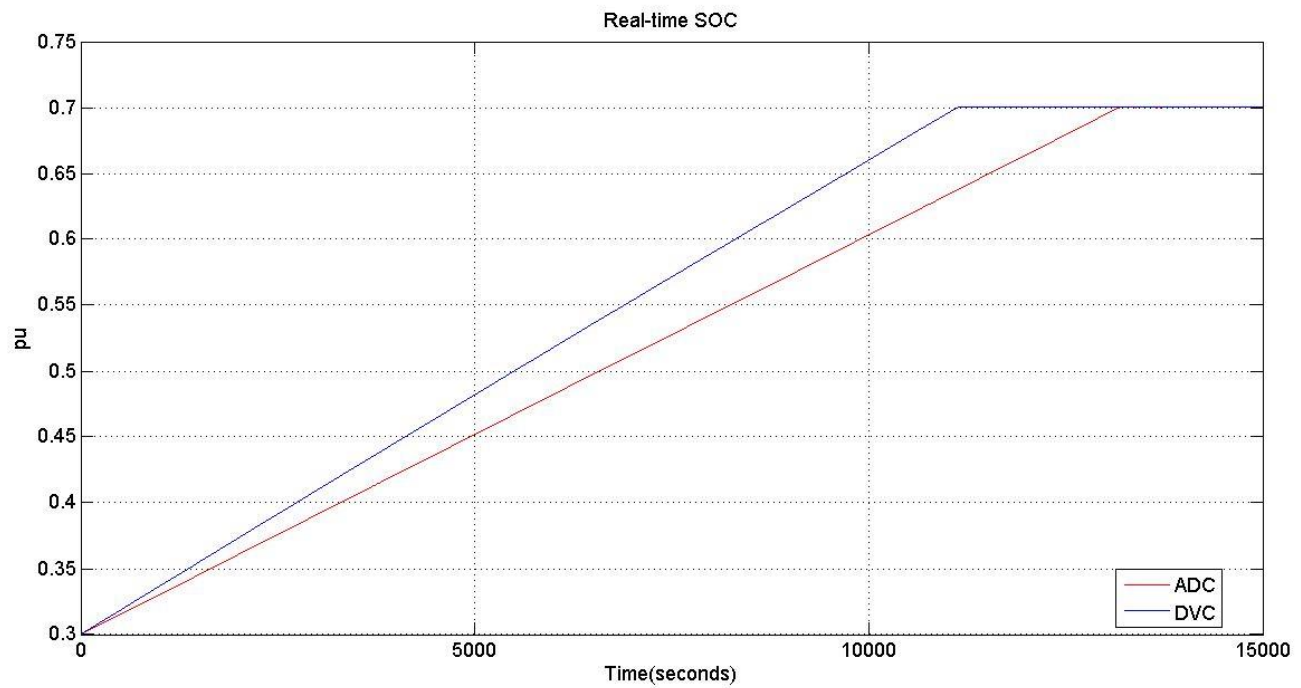
Όπως φαίνεται από τα πιο πάνω αποτελέσματα η κατάσταση φόρτισης των οχημάτων διατηρείται κοντά στο 50% καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Η μέθοδος ελέγχου DVC προσεγγίζει καλύτερα την αρχική κατάσταση φόρτισης των οχημάτων σε σύγκριση με τη μέθοδο ελέγχου ADC και αυτό οφείλεται στο ότι η μέθοδος DVC μπορεί να υπολογίσει την καλύτερη διαφορά μεταξύ κέρδους K φόρτισης και κέρδους K εκφόρτισης ώστε να διατηρηθεί η SOC των οχημάτων πολύ κοντά στο 50%. Αυτό επιβεβαιώνεται αφενός από το γράφημα 4.4.2-4 και αφετέρου από την ανταλλασσόμενη ισχύ του δικτύου με τα οχήματα καθώς με τη μέθοδο DVC οι τιμές φόρτισης και εκφόρτισης προσεγγίζονται καλύτερα σε σχέση με τη μέθοδο ADC, ώστε η διαφορά τους να είναι πολύ πιο κοντά στο 0. Στον πιο κάτω πίνακα συνοψίζονται η μέγιστη τιμή, ελάχιστη τιμή και η RMS του σήματος της ανταλλασσόμενης ισχύος και για τις δύο μεθόδους ελέγχου.

	Μέγιστη τιμή ισχύος (MW)	Ελάχιστη τιμή ισχύος (MW)	Ενεργός τιμή-RMS (MW)
Με ADC control	84,37787	-74,2512	14,56252
Με DVC control	78,59369	-65,6443	13,41158

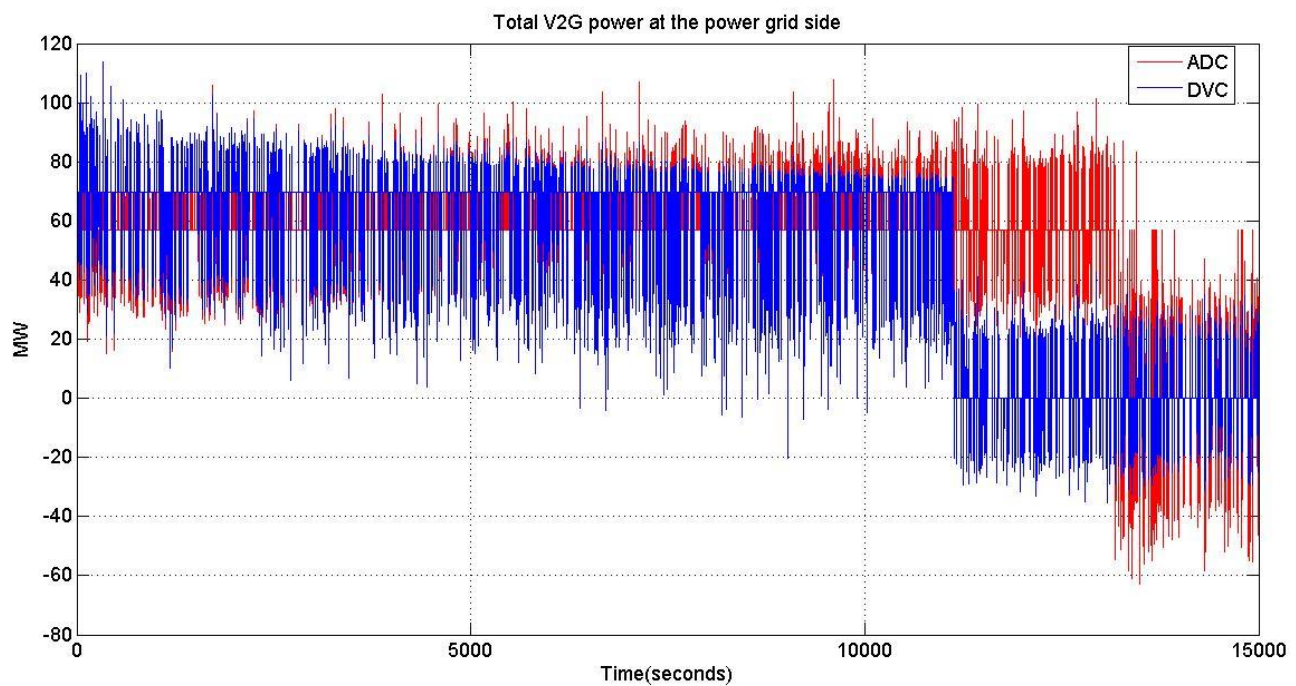
Πίνακας 4.4.2-3: Μέγιστος συντελεστής κέρδους K για τις μεθόδους ADC και DVC.

Σε αυτό το σημείο να αναφέρουμε ότι για τις προσομοιώσεις επιλέξαμε νεκρή ζώνη (dead band) με μικρά όρια δηλαδή τα οχήματα δεν αντιδρούν αν το σφάλμα συχνότητας είναι στο διάστημα $[-0,01,0,01]$. Ο λόγος που επιλέξαμε το συγκεκριμένο διάστημα dead band είναι διότι από το γράφημα 4.4.2-1 βλέπουμε ότι το σφάλμα συχνότητας παίρνει τιμές κάτω από τη μονάδα. Άρα για να παρακολουθήσουμε την αντίδραση των οχημάτων ως προς το σφάλμα συχνότητας επιλέξαμε μικρό dead band. Επίσης αφού έχουμε μικρό σφάλμα για να αντιδράσουν τα οχήματα αισθητά επιλέγουμε και μεγάλο κέρδος K_{max} .

Ακολούθως θεωρούμε ότι τα 15000 οχήματα επιθυμούν να φορτίσουν αυξάνοντας τη κατάσταση φόρτισης τους από το 30% στο 70%. Θεωρούμε ότι τα οχήματα επιθυμούν να φορτίσουν εντός του διαστήματος των τριών ωρών. Έτσι η προγραμματισμένη ισχύς φόρτισης για την τεχνική ελέγχου Charging With Frequency Regulation υπολογίστηκε είναι 69,57 MW. Για τη τεχνική ελέγχου Smart Charging δεν χρειάζεται να υπολογιστεί προγραμματισμένη ισχύς φόρτισης διότι η τεχνική αυτή δεν βασίζεται στην διάρκεια σύνδεσης του οχήματος με το ηλεκτρικό δίκτυο, αλλά στο 50% της μέγιστης ισχύς που μπορεί να παρέχει ο σταθμός φόρτισης. Πιο κάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα της κατάστασης φόρτισης των οχημάτων και της ανταλλασσόμενης ισχύς του ηλεκτρικού δικτύου με τα οχήματα καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης και για τις δύο μεθόδους ελέγχου.



Γράφημα 4.4.2-6: Κατάσταση φόρτισης οχημάτων με τις μεθόδους ADC και DVC.



Γράφημα 4.4.2-7: Ανταλλασσόμενη ισχύς μεταξύ οχημάτων και του ηλεκτρικού δικτύου από τη πλευρά του ηλεκτρικού δικτύου με τις μεθόδους ADC και DVC

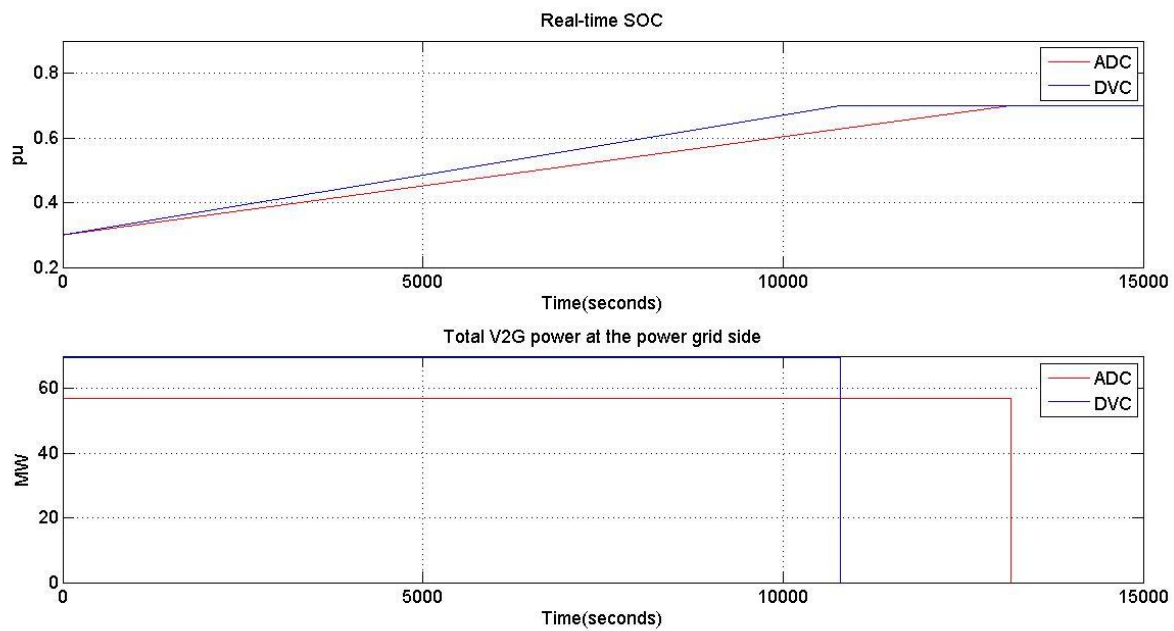
Παρατηρώντας τα πιο πάνω γραφήματα συμπεραίνουμε ότι η επιθυμητή SOC μπορεί να επιτευχθεί και με τις δύο μεθόδους ελέγχου. Οι αυξομειώσεις της ισχύος φόρτισης των οχημάτων γίνονται γύρω από τη καθορισμένη ισχύ φόρτισης των οχημάτων μέχρι η SOC να φτάσει στο επιθυμητό επίπεδο. Ακολούθως και οι δύο τεχνικές ελέγχου αποδεδειγμένα την καθορισμένη ισχύ φόρτισης και οι αυξομειώσεις γίνονται γύρω από το 0. Με τη τεχνική CFR της μεθόδου DVC οι μπαταρίες των οχημάτων φτάνουν στο 70% της ονομαστικής χωρητικότητας τους σε χρόνο 11130 seconds, δηλαδή περίπου 330 seconds μετά από το προγραμματισμένο χρόνο φόρτισης των τριών ωρών. Αυτό προφανώς οφείλεται στο ότι η καμπύλη του σφάλματος συχνότητας είχε αρνητικό μέσο όρο στη διάρκεια αυτή των τριών ωρών με αποτέλεσμα τα οχήματα να χρειαστούν περισσότερο χρόνο για να φορτίσουν. Με τη τεχνική ελέγχου φόρτισης SC της μεθόδου ADC τα οχήματα φτάνουν την επιθυμητή κατάσταση φόρτισης τους στα 13180 seconds δηλαδή 2380 seconds μετά από το προγραμματισμένη ώρα φόρτισης. Άρα οι δύο τεχνικές ελέγχου χρειάστηκαν περισσότερο χρόνο για να φέρουν την SOC στο επιθυμητό από το χρήστη επίπεδο επειδή τα οχήματα παρείχαν υπηρεσίες ρύθμισης συχνότητας στο δίκτυο στο χρονικό διάστημά που ήταν συνδεδεμένα στο σταθμό.

Με βάση τα αποτελέσματα της προσομοίωσης που παρουσιάζονται στα διαγράμματα 4.4.2-6 και 4.4.2-7 καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι ο χρόνος που χρειάζονται τα οχήματα για να φτάσουν την επιθυμητή SOC επηρεάζεται άμεσα από το μέσο όρο του σφάλματος συχνότητας κατά τη διάρκεια που είναι συνδεδεμένα τα οχήματα με το ηλεκτρικό δίκτυο. Συγκεκριμένα αν ο μέσος όρος της καμπύλης σφάλματος συχνότητας είναι αρνητικός τότε αναμένουμε τα οχήματα να φορτίσουν πιο αργά από την καθορισμένη ώρα φόρτισης, ενώ αντίθετα αν το η καμπύλη σφάλματος έχει θετικό μέσο όρο τα οχήματα πιθανόν να φορτίσουν νωρίτερα από τη καθορισμένη ώρα φόρτισης. Σε τέτοιες περιπτώσεις πρέπει να ενημερώνεται ο χρήστης/ιδιοκτήτης του οχήματος ότι το όχημα για να φορτίσει θα χρειαστεί να παραμείνει περισσότερη ώρα συνδεδεμένο στο σταθμό φόρτισης.

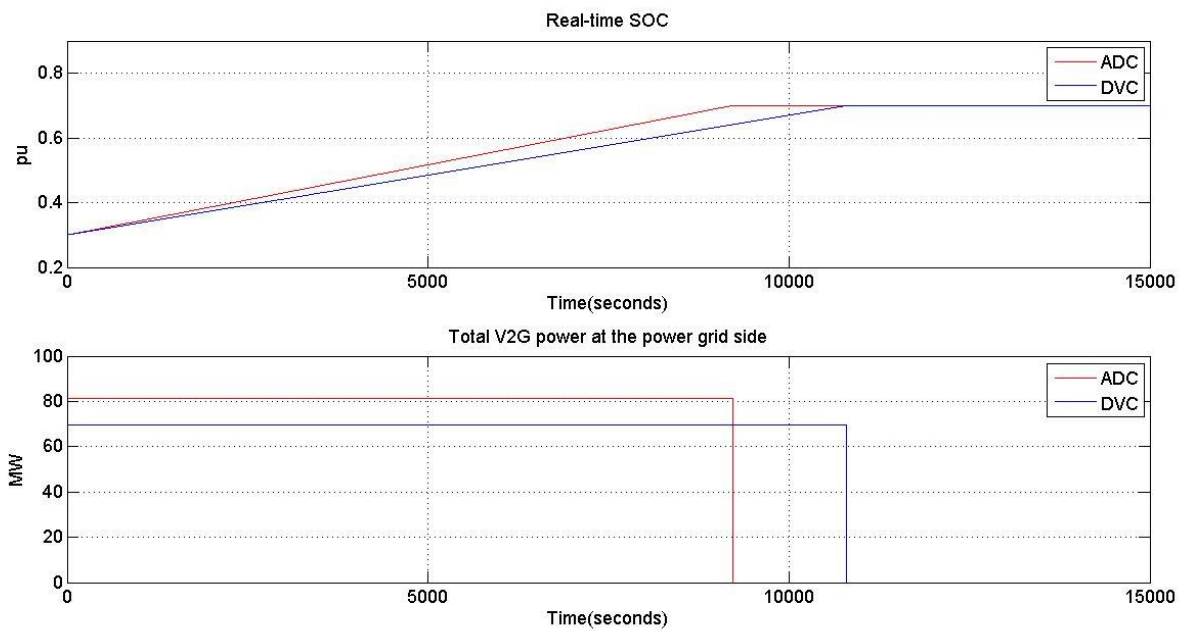
Για να ελέγξουμε λοιπόν ποια από τις δύο μεθόδους ελέγχου είναι πιο αξιόπιστη όσον αφορά τη φόρτιση των οχημάτων σε καθορισμένο χρονικό διάστημα, εκτελέσαμε το ίδιο σενάριο προσομοίωσης αλλά αυτή τη φορά χωρίς σφάλμα συχνότητας. Στο γράφημα 4.4.2-8 παρατηρούμε ότι η μέθοδος ADC αποτυγχάνει να φορτίσει τα οχήματα εντός του καθορισμένου χρονικού ορίου. Αντίθετα η μέθοδος DVC καταφέρνει να φορτίσει τα οχήματα ακριβώς στο χρονικό διάστημα τριών ωρών. Τα αποτελέσματα που απεικονίζονται στο γράφημα 4.4.2-9 είναι για το ίδιο σενάριο προσομοίωσης χωρίς σφάλμα συχνότητας αλλά με μέγιστη ισχύ V2G 10 KW αυτή τη φορά. Όπως παρατηρούμε από το διάγραμμα με τη μέθοδο ADC τα οχήματα φορτίζουν πιο νωρίς από τη καθορισμένη ώρα φόρτισης ενώ με τη μέθοδο DVC η SOC φτάνει στο επιθυμητό από τους χρήστες επίπεδο ακριβώς την ώρα αποσύνδεσης των οχημάτων από το σταθμό φόρτισης. Έτσι η προγραμματισμένη ισχύς φόρτισης αποδεδειγμένα από τα οχήματα την ακριβή χρονική στιγμή που φτάνουν την επιθυμητή κατάσταση φόρτισης.

Το τελικό συμπέρασμα στο οποίο οδηγούμαστε είναι ότι αν έχουμε σχετικά μικρό χρονικό περιθώριο για φόρτιση η μέθοδος ADC δεν είναι αξιόπιστη για να ικανοποιήσει τις ανάγκες φόρτισης του χρήστη, εκτός αν αυξηθεί η μέγιστη ισχύς του σταθμού φόρτισης οχημάτων κάτι το οποίο δεν είναι εφικτό. Άρα το σημαντικό μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι η προγραμματισμένη διάρκεια φόρτισης είναι ανεξάρτητη από την διάρκεια

σύνδεσης του οχήματος με το σταθμό φόρτισης, ενώ η μέθοδος ελέγχου DVC σχεδιάστηκε βασισμένη στη διάρκεια σύνδεσης του οχήματος με το σταθμό φόρτισης.



Γράφημα 4.4.2-8: Ισχύς και κατάσταση φόρτισης οχημάτων χωρίς σφάλμα συχνότητας στο ηλεκτρικό δίκτυο.



Γράφημα 4.4.2-9: Ισχύς και κατάσταση φόρτισης οχημάτων χωρίς σφάλμα συχνότητας στο ηλεκτρικό δίκτυο με αυξημένη ισχύ φόρτισης για τη μέθοδο ελέγχου ADC.

5. Το Σ.Η.Ε της Κύπρου

5.1 Γενική περιγραφή της Κύπρου

Η Κύπρος, επίσημα Κυπριακή Δημοκρατία είναι ανεξάρτητη νησιωτική χώρα της ανατολικής Μεσογείου. Συνορεύει θαλάσσια με την Τουρκία, την Συρία, τον Λίβανο, και την Αίγυπτο. Βρίσκεται ανατολικά της Ελλάδας (Καστελόριζο), νότια της Τουρκίας και δυτικά της Συρίας. Είναι το τρίτο μεγαλύτερο σε έκταση νησί της Μεσογείου μετά τη Σαρδηνία και τη Σικελία. Γεωγραφικά η Κύπρος μπορεί να θεωρηθεί ότι ανήκει στην Νοτιοανατολική Ευρώπη ή στην Νοτιοδυτική Ασία. Ωστόσο, επειδή ιστορικά, πολιτιστικά και οικονομικά η Κύπρος έχει δεσμούς με την Ευρώπη και ιδιαίτερα με την Ελλάδα, θεωρείται μέρος μόνο της Δύσης και της Ευρώπης. Είναι σήμερα το νοτιοανατολικό άκρο της Ευρωπαϊκής Ένωσης αλλά και της Ευρώπης ολόκληρης. Οι κάτοικοι της Κύπρου εντάσσονται με βάση την καταγωγή, τη γλώσσα, την πολιτιστική παράδοση και το θρήσκευμα σε μία από τις δύο κοινότητες που προνοούνται από το Άρθρο 2 του Συντάγματος της Κυπριακής Δημοκρατίας, είτε την Ελληνική είτε την Τουρκική. Η πλειοψηφία των κατοίκων σήμερα, περιλαμβανομένων των τριών αναγνωρισμένων θρησκευτικών ομάδων των Μαρωνιτών, των Αρμενίων και των Λατίνων (Καθολικών), ανήκει κατά 75,5% στην Ελληνοκυπριακή κοινότητα. Στην Κύπρο διαμένει επίσης μεγάλος αριθμός ξένων υπηκόων, οι οποίοι στα τέλη του 2011 συνιστούσαν το 21,4% του πληθυσμού. Ως αποτέλεσμα της εισβολής που διέπραξε η Τουρκία στην Κύπρο το 1974 και της συνεχιζόμενης παράνομης κατοχής του βόρειου τμήματος του νησιού, 200.000 Έλληνες Κύπριοι αναγκάστηκαν να εγκαταλείψουν τις εστίες τους και να καταφύγουν ως πρόσφυγες στα νότια του νησιού. Παράλληλα, οι Τούρκοι Κύπριοι καθώς και μεγάλος αριθμός εποίκων μεταφέρθηκαν στον κατεχόμενο από την Τουρκία βορρά, ο οποίος και ανακηρύχθηκε τελικά μονομερώς ως ανεξάρτητο κράτος το 1983, με την ονομασία "Τουρκική Δημοκρατία της Βόρειας Κύπρου". Η ΤΔΒΚ δεν έχει αναγνωριστεί ως ανεξάρτητη από κανένα κράτος - μέλος του ΟΗΕ πλην της Τουρκίας. Ο πληθυσμός στις περιοχές της Κύπρου υπό τον έλεγχο της Κυπριακής Δημοκρατίας ανερχόταν στο τέλος του 2011 στους 838.897 κατοίκους, μεγάλο μέρος των οποίων (21,4%) αποτελούν ξένοι υπήκοοι. Η Κύπρος είναι το τρίτο μεγαλύτερο νησί της Μεσογείου. Βρίσκεται ανατολικά της Ρόδου, 215 μίλια, και της Κρήτης, νότια των ακτών της Τουρκίας 37 μίλια, δυτικά των Συριακών ακτών 56 μίλια, και βόρεια των ακτών της Αιγύπτου 190 μίλια.



Εικόνα 5.1-1: Γεωγραφική απεικόνιση της Κύπρου.

Επαρχία	Πληθυσμός
Λευκωσία	325.756
Αμμόχωστος	46.452
Λάρνακα	143.367
Λεμεσός	235.056
Πάφος	88.266
Σύνολο	838.897

Πίνακας 5.1-1 : Καταγραφή πληθυσμού ανά επαρχία τη 1/10/2011.

5.2 Γενικά Χαρακτηριστικά Ηλεκτρικού Δικτύου Κύπρου

Σήμερα το μεγαλύτερο ποσοστό της παραγωγής και της διανομής ηλεκτρικής ενέργειας στην Κύπρο γίνεται από την Αρχή ηλεκτρισμού Κύπρου (Α.Η.Κ). Η Α.Η.Κ ιδρύθηκε στις 30 Οκτωβρίου το 1952 και σύμφωνα με τον νόμο «περί αναπτύξεως Ηλεκτρισμού», είχε το δικαίωμα να απαλλοτριώσει τις υπάρχουσες Ηλεκτρικές εταιρίες και να αναλάβει εξ' ολοκλήρου την ευθύνη για την παραγωγή, μεταφορά και διανομή του Ηλεκτρισμού. Στα χρόνια που ακολούθησαν η αύξηση της ζήτησης Ηλεκτρικής ενέργειας από τους καταναλωτές ήταν αλματώδες με συνεπακόλουθο την ανάγκη για την κατασκευή νέων Ηλεκτροπαραγωγικών σταθμών για την κάλυψη των αναγκών. Την ανάπτυξη αυτή μείωσε προσωρινά η τουρκική εισβολή το 1974 με την κατοχή του 37% του εδάφους της Κύπρου. Παρ' όλες τις δυσκολίες και τα προβλήματα που προέκυψαν, η ΑΗΚ με ορθό προγραμματισμό και σκληρή δουλειά κατάφερε την παραπέρα ανάπτυξη και στήριξη του οργανισμού. Μετά την ένταξη της Κύπρου στην Ευρωπαϊκή Ένωση, και με το άνοιγμα της αγοράς Ηλεκτρικής ενέργειας απελευθερώθηκε το 35% της παραγωγής Ηλεκτρικής ενέργειας. Η ΑΗΚ έχασε το μονοπώλιο της παραγωγής, μεταφοράς και διανομής της Ηλεκτρικής ενέργειας στην Κύπρο και αναζητούνται ενδιαφερόμενοι για την εγκατάσταση και λειτουργία νέων μονάδων παραγωγής

Ηλεκτρικής ενέργειας. Το Σ.Η.Ε. της Κύπρου είναι ένα μεγάλο αυτόνομο σύστημα το οποίο έχει συνοπτικά τα εξής χαρακτηριστικά:

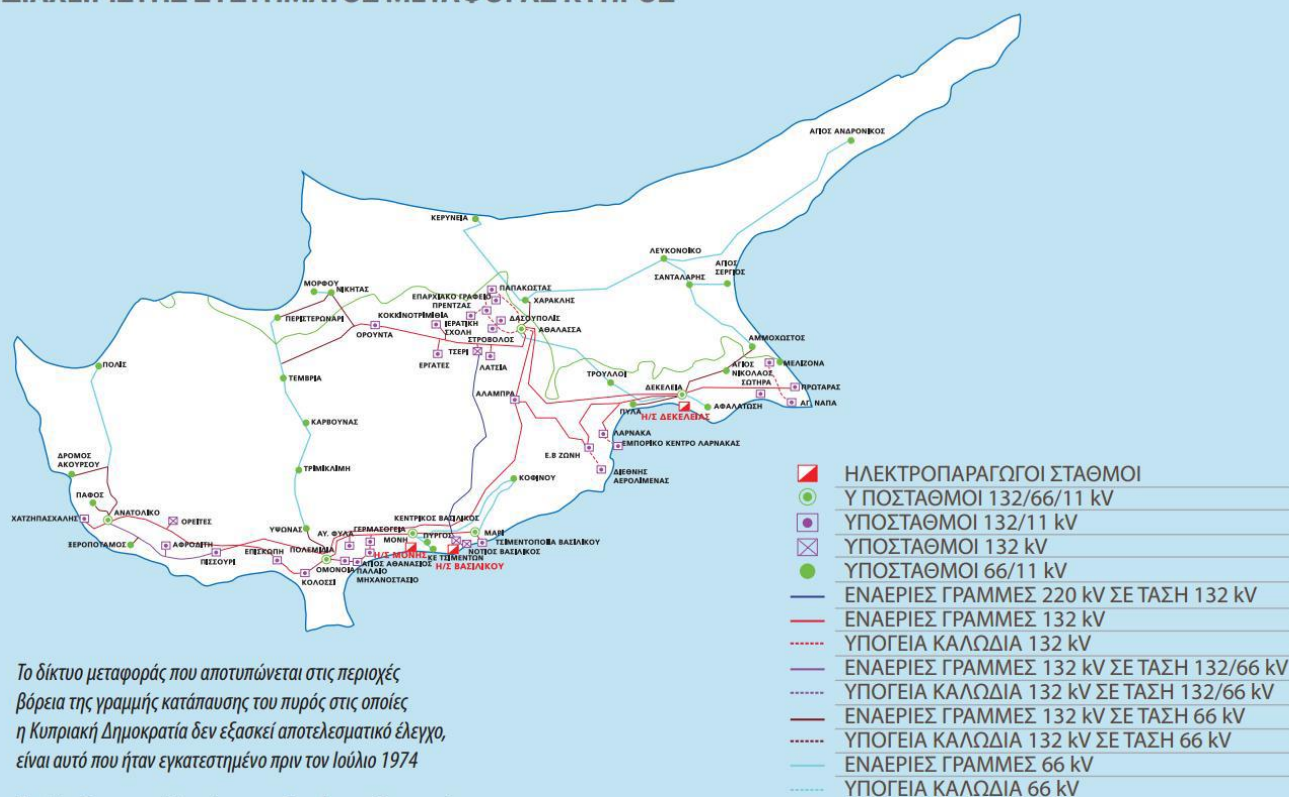
- Περιλαμβάνει τρεις Σταθμούς Παραγωγής και διαθέτει συνολικά 24 εγκατεστημένες συμβατικές μονάδες
- Δίκτυα γραμμών μεταφοράς Υ.Τ. (132 kV) και Μ.Τ. (66 kV και 20 kV)
- 57 Υποσταθμούς Υ.Τ/Μ.Τ
- Αιολικά Πάρκα
- Μεγάλο αριθμό Φ/Β Πάρκων

Το σύνολο της παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας στις περιοχές της Κυπριακής Δημοκρατίας, εκτός αυτών βόρεια της γραμμής κατάπαυσης του πυρός όπου το Κράτος δεν ασκεί αποτελεσματικό έλεγχο, αποτελείται από:

- Τη συνολική ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από τους τρεις Ηλεκτροπαραγωγούς Σταθμούς της ΑΗΚ.
- Την ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από Αυτοπαραγωγούς.
- Την ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από Ανεξάρτητους Παραγωγούς με τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και συμβατικών μονάδων παραγωγής.

Στην Εικόνα 5.2-1 παρουσιάζεται ο χάρτης του Συστήματος Παραγωγής και Μεταφοράς Κύπρου. Στο χάρτη παρουσιάζονται οι τοποθετήσεις και διασύνδεση των ηλεκτροπαραγωγών σταθμών, οι τοποθετήσεις και διασύνδεση των υποσταθμών μεταφοράς καθώς και οι πορείες των γραμμών και καλωδίων μεταφοράς 66kV, 132kV. Στο Χάρτη χρησιμοποιούνται σύμβολα και παραστάσεις σύμφωνα με τις απαιτήσεις του Συνδέσμου Ευρωπαϊών Διαχειριστών Συστήματος Μεταφοράς (ENTSO-E) του οποίου ο ΔΣΜ αποτελεί ιδρυτικό μέλος. Το δίκτυο μεταφοράς που αποτυπώνεται στις περιοχές βορείως της Γραμμής Κατάπαυσης του Πυρός στις οποίες η Κυπριακή Δημοκρατία δεν εξασκεί αποτελεσματικό έλεγχο, είναι αυτό που ήταν εγκατεστημένο πριν τον Ιούλιο του 1974.

ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΤΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΚΥΠΡΟΣ



Εικόνα 5.2-1: Χάρτης Συστήματος Παραγωγής και Μεταφοράς Κύπρου (Πηγή: ΔΣΜΚ).

5.3 Η παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας στην Κύπρο

Η Κύπρος δεν διαθέτει πρωτογενείς πηγές ενέργειας, για αυτό η Αρχή Ηλεκτρισμού Κύπρου (ΑΗΚ) βασίζεται για την παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας αποκλειστικά σε εισαγόμενα καύσιμα, κυρίως μαζούτ. Επί του παρόντος, στις ελεύθερες περιοχές της Κύπρου λειτουργούν τρεις Ηλεκτροπαραγωγοί Σταθμοί της Αρχής Ηλεκτρισμού Κύπρου, των οποίων η ιδιοκτησία και ευθύνη λειτουργίας ανήκει στην Αρχή Ηλεκτρισμού Κύπρου. Επίσης λειτουργεί ένας Αυτοπαραγωγός με εγκατεστημένη ισχύ 11 MW και τέσσερα Αιολικά Πάρκα .

Οι Σταθμοί Παραγωγής είναι:

- Ο Ηλεκτροπαραγωγός σταθμός Βασιλικού.
- Ο Ηλεκτροπαραγωγός σταθμός Δεκέλειας .
- Ο Ηλεκτροπαραγωγός σταθμός Μονής.

Οι τρεις σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας διαθέτουν τα εξής είδη συμβατικών μονάδων :

- Ατμοστροβλικές Μονάδες (Μονάδες βάσης).
- Μηχανές Εσωτερικής Καύσης ή Μ.Ε.Κ. (Μονάδες βάσης, μεσαίου φορτίου).
- Μονάδα Συνδυασμένου Κύκλου (Μονάδες βάσης, μεσαίου φορτίου).
- Αεριοστροβλικές Μονάδες (Μονάδες φορτίου αιχμής).

Στον πίνακα 5.3-1 φαίνονται οι μονάδες καθώς και η εγκατεστημένη ισχύς των σταθμών κατά το έτος 2010. Όπως παρατηρούμε το μεγαλύτερο μέρος της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος του συστήματος βρίσκεται στο σταθμό παραγωγής του Βασιλικού, και προέρχεται από τους 3 ατμοστρόβιλους των 130 MW αλλά και από την μονάδα συνδυασμένου κύκλου. Η συνολική ισχύς του σταθμού είναι 647,5 MW.

Ηλεκτροπαραγωγός σταθμός	Μονάδα Παραγωγής	Ονομαστική Ικανότητα Παραγωγής (MW)	Εγκατεστημένη ισχύς σταθμού παραγωγής (MW)
Βασιλικός	Ατμοστροβλική- TG1	130	647.5
	Ατμοστροβλική- TG2	130	
	Ατμοστροβλική- TG3	130	
	Αεριοστροβλική-GT1	37.5	
	Εγκ. Συνδ. Κύκλου - Αεριοστροβλική -CCPP(GT1)	75	
	Εγκ. Συνδ. Κύκλου - Αεριοστροβλική- CCPP(GT2)	75	
	Εγκ. Συνδ. Κύκλου - Ατμοστροβλική- CCPP(TG1)	80	
Δεκέλεια	Ατμοστροβλική- TG1	60	464.8
	Ατμοστροβλική- TG2	60	
	Ατμοστροβλική- TG3	60	
	Ατμοστροβλική- TG4	60	
	Ατμοστροβλική- TG5	60	
	Ατμοστροβλική- TG6	60	
	Μηχανή Εσωτερικής Καύσης- MEK1	52.4	
	Μηχανή Εσωτερικής Καύσης- MEK2	52.4	
	Ατμοστροβλική-TG1	30	
	Ατμοστροβλική- TG2	30	

Μονή	Ατμοστροβιλική-TG3	30	330
	Ατμοστροβιλική-TG4	30	
	Ατμοστροβιλική-TG5	30	
	Ατμοστροβιλική-TG6	30	
	Αεριοστροβιλική-GT1	37.5	
	Αεριοστροβιλική-GT2	37.5	
	Αεριοστροβιλική-GT3	37.5	
	Αεριοστροβιλική-GT4	37.5	
Συνολική εγκατεστημένη ισχύς των σταθμών της Α.Η.Κ			1452.3

Πίνακας 5.3-1: Μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στο Σ.Η.Ε Κύπρου.

5.3.1 Ηλεκτροπαραγωγός σταθμός Βασιλικού

Ο Ηλεκτροπαραγωγός σταθμός είναι έργο υψηλής τεχνολογίας και αποτελεί το μεγαλύτερο έργο υποδομής που έγινε ποτέ στην Κύπρο. Η σημασία του βασικού αυτού έργου υποδομής είναι στενά συνυφασμένη με την ευρύτερη οικονομική ανάπτυξη της Κύπρου. Ο σταθμός αποτελείται από δύο φάσεις υλοποίησης. Η πρώτη φάση, η οποία περιλαμβάνει και έργα υποδομής για τις επόμενες φάσεις επέκτασης του σταθμού, βρίσκεται σε λειτουργία από το 2000 και για την ανέγερση της δαπανήθηκε το ποσό των 274 εκατομμυρίων ευρώ. Συγκεκριμένα η πρώτη φάση περιλαμβάνει δύο ατμοηλεκτρικές μονάδες παραγωγής 130 MW η κάθε μια, με χρησιμοποιούμενο καύσιμο το μαζούτ και ένα αεριοστρόβιλο ισχύος 38 MW με χρησιμοποιούμενο καύσιμο το ντίζελ. Οι ατμολέβητες της πρώτης φάσης σχεδιάστηκαν με πρόνοια ώστε σε περίπτωση έλλειψης μαζούτ ή μεγάλη αύξηση της τιμής του, σε επίπεδα που θα το καθιστούν μη οικονομικό καύσιμο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, να μετατραπούν σε μονάδες καύσης άνθρακα/μαζούτ. Η δεύτερη φάση βρίσκεται σε λειτουργία από το 2007 και αποτελείται από μια ατμοηλεκτρική μονάδα ισχύος 130 MW, με χρησιμοποιούμενο καύσιμο το μαζούτ. Το τελικό κόστος ανέγερσης της δεύτερης φάσης υπολογιστικό περίπου στα 145 εκατομμύρια ευρώ. Ο σταθμός βρίσκεται σε παραθαλάσσια περιοχή και προμηθεύεται με μαζούτ από δεξαμενόπλοια μέσω υποθαλάσσιων αγωγών μήκους περίπου δύο χιλιομέτρων, οι οποίοι καταλήγουν στο αγκυροβόλιο των πλοίων για την εύκολη εκφόρτωση του καυσίμου. Αντίθετα η προμήθεια του σταθμού με ντίζελ γίνεται με βυτιοφόρα οχήματα από τη ξηρά.

Ο πίνακας 5.3.1-1 παρουσιάζει τα τεχνικά χαρακτηριστικά των ατμοηλεκτρικών μονάδων του Σταθμού Βασιλικού, ενώ ο πίνακας 5.3.1-2 τα χαρακτηριστικά των αεριοστροβιλικών μονάδων αντίστοιχα.

Εγκατεστημένη ισχύς μονάδας (MW)	130
Βαθμός απόδοσης μονάδας (%)	39
Είδος καυσίμου	Μαζούτ
Περιεκτικότητα σε θείο (%)	1
Πίεση ατμού (bar)	140
Θερμοκρασία ατμού (°C)	540
Θερμοκρασία καυσαερίων (°C)	130
Ροή νερού ψύξης (m ³ /s)	6

Πίνακας 5.3.1-1: Τεχνικά χαρακτηριστικά Ατμοηλεκτρικών μονάδων (Πηγή: Α.Η.Κ).

Εγκατεστημένη ισχύς μονάδας (MW)	38
Βαθμός απόδοσης μονάδας (%)	29
Είδος καυσίμου	Ντίζελ (ακάθαρο πετρέλαιο)
Περιεκτικότητα σε θείο (%)	0,2
Ροή αέρα (Nm ³ /h)	480
Θερμοκρασία καυσαερίων (°C)	543

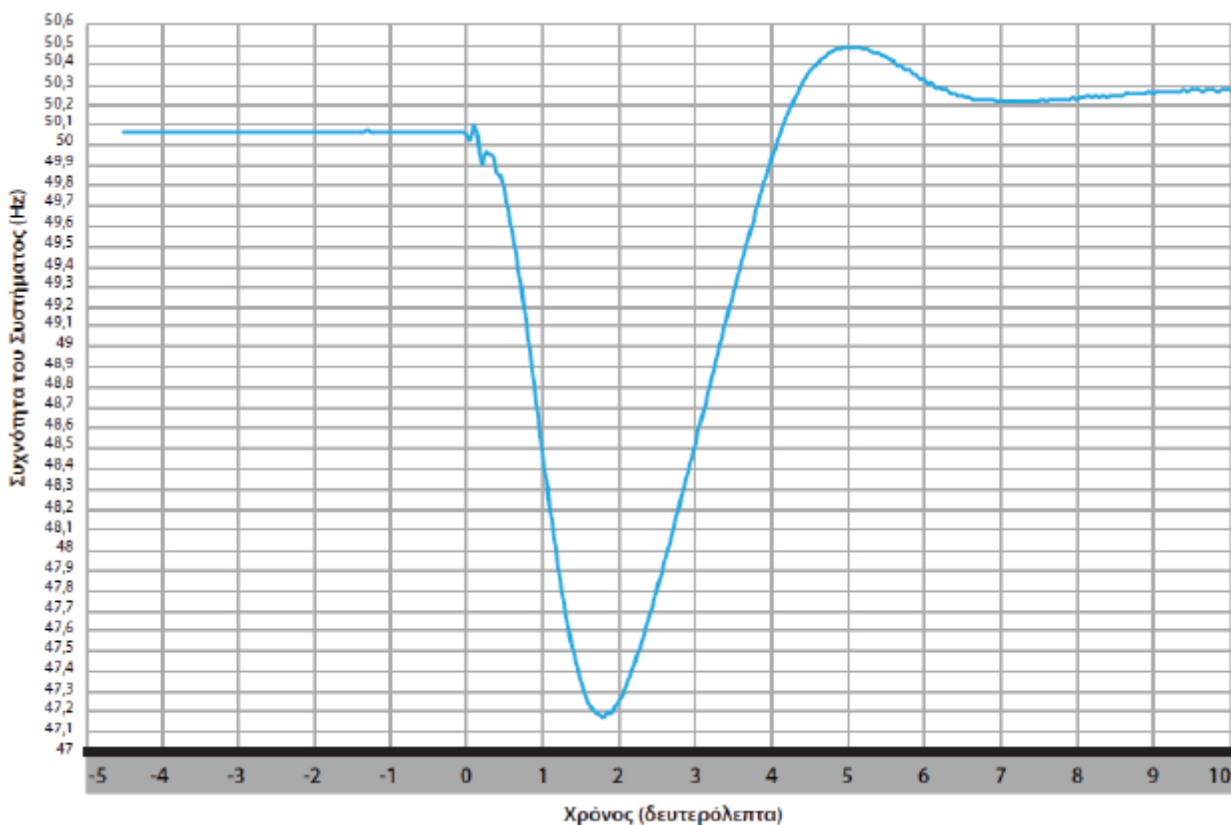
Πίνακας 5.3.1-2: Τεχνικά χαρακτηριστικά Αεριοστροβιλικής μονάδας (Πηγή: Α.Η.Κ).



Εικόνα 5.3.1-1: Ο ΑΗΣ Βασιλικού.

5.3.1.1 Η έκρηξη στο Μαρί και η βλάβη στον Ηλεκτροπαραγωγό Σταθμό του Βασιλικού

Στις 5:40 το πρωί της πρώτης Ιουλίου του 2011 σημειώθηκε μια τεράστια έκρηξη σε ένα φορτίο πυρίτιδας που ήταν αποθηκευμένο στη Ναυτική Βάση Ευάγγελος Φλωράκης στο Μαρί. Η έκρηξη αυτή στοίχισε τη ζωή δεκατριών ατόμων και το τραυματισμό περισσότερων από εξήντα. Από το ωστικό κύμα, που δημιουργήθηκε από την έκρηξη, προκλήθηκαν σοβαρές ζημιές στον γειτονικό Ηλεκτροπαραγωγό Σταθμό Βασιλικού που είχε σαν αποτέλεσμα την ολοκληρωτική αναστολή λειτουργίας του. Συγκεκριμένα τέθηκαν εκτός λειτουργίας οι 3 μονάδες ατμού του Βασιλικού και εκείνη του συνδυασμένου κύκλου. Ως αποτέλεσμα, χάθηκε η δυναμικότητα 793 MW της παραγωγής της ΑΗΚ. Την χρονική στιγμή της βλάβης το συνολικό φορτίο του συστήματος ανερχόταν στα 520 MW, εκ των οποίων τα 320 MW (ποσοστό 63.3%) παραγόταν από τον Ηλεκτροπαραγωγό Σταθμό του Βασιλικού. Λόγω απώλειας της ολικής ισχύος από το σταθμό του Βασιλικού η συχνότητα του συστήματος βυθίστηκε στα 47.17 Hz, με αποτέλεσμα την ενεργοποίηση για πρώτη φορά και των δεκατριών σχεδίων υποσυχνότητας του συστήματος απορρίπτοντας το 60% του συνολικού φορτίου. Επιπρόσθετα το Εθνικό Κέντρο Ενέργειας Κύπρου για σκοπούς περαιτέρω περιορισμού της αυξημένης ζήτησης αποσύνδεσε χειροκίνητα τα φορτία ελεγχόμενων κεντρικών συστημάτων κλιματισμού και υδραντλιών άδρευσης σε ολόκληρη την Κύπρο.



Εικόνα 5.3.1.1-1: Διακύμανση Συχνότητας του Συστήματος κατά τη βλάβη (Πηγή: Ρ.Α.Ε.Κ).

Για την αντιμετώπιση του συμβάντος η Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας ανέλαβε την εγκατάσταση προσωρινών μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Για το σκοπό αυτό η ΑΗΚ συνεργάστηκε στενά με τους ιδιοκτήτες των γεννητριών προσφέροντας τεχνική υποστήριξη και προγραμματισμό. Η Ισραηλινή κυβέρνηση προμήθευσε γεννήτριες με συνολική ισχύ 15 MW και η ελληνική κυβέρνηση προμήθευσε γεννήτριες δυναμικότητας 71.6 MW, δια μέσου της Δημόσιας Εταιρείας Ηλεκτρισμού (ΔΕΗ). Επίσης επήλθε συμφωνία με εταιρεία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που εδρεύει στις τουρκοκρατούμενες περιοχές για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας δυναμικότητας μέχρι 120 MW. Ο Αεριοστρόβιλος δυναμικότητας 38 MW του Ηλεκτροπαραγωγού Σταθμού Βασιλικού επιδιορθώθηκε και τέθηκε σε λειτουργία την 17η Αυγούστου. Η Α.Η.Κ είχε συνάψει συμβόλαια, σύμφωνα με την απόφαση της Ρυθμιστικής Αρχής Ενέργειας Κύπρου, για την εγκατάσταση και λειτουργία προσωρινών Μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας δυναμικότητας 95 MW για περίοδο έξι μηνών. Οι συγκεκριμένες προσωρινές Μονάδες βρίσκονταν σε λειτουργία στους Ηλεκτροπαραγωγούς Σταθμούς Δεκέλειας και Μονής από τα τέλη Αυγούστου. Η Αρχή Ηλεκτρισμού προχώρησε στην επιδιόρθωση του Ηλεκτροπαραγωγού Σταθμού Βασιλικού και προς το σκοπό αυτό είχε συσταθεί μια μεγάλη ομάδα με στόχο τη γρήγορη, ασφαλής και οικονομικά βιώσιμη επαναφορά του Σταθμού σε πλήρη λειτουργία.

5.3.2 Ο Ηλεκτροπαραγωγός σταθμός Δεκέλειας

Ο ηλεκτροπαραγωγός σταθμός της Δεκέλειας Β τέθηκε σε λειτουργία το 1982 και είναι η εξέλιξη του ηλεκτροπαραγωγού σταθμού της Δεκέλειας Α, ο οποίος λειτουργούσε από το 1953 μέχρι το 1994. Αρχικά ο σταθμός λειτούργησε διαθέτοντας μια μονάδα των 60 MW. Σήμερα ο σταθμός της Δεκέλειας αποτελείται από έξι ατμοηλεκτρικές μονάδες των 60 MW η κάθε μια και δύο Μηχανές Εσωτερικής Καύσης (Μ.Ε.Κ) των 50 MW με χρησιμοποιούμενο καύσιμο το μαζούτ. Η πρώτη μονάδα λειτούργησε το 1982 και η τελευταία το 1993. Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς του σταθμού ανέρχεται στα 460 MW και τα τεχνικά χαρακτηριστικά των ατμοηλεκτρικών μονάδων και των Μ.Ε.Κ φαίνονται στους πιο κάτω πίνακες.

Εγκατεστημένη ισχύς μονάδας (MW)	60
Πίεση ατμού-θερμοκρασίας ατμού 510 °C (bar)	87
Θερμική ενέργεια ατμού (kj/kg)	3,415.1
Κατανάλωση θερμότητας (kj/kWh παραγωγής)	9,300
Θερμική απόδοση ατμοστρόβιλου (%)	38.5
Θερμική απόδοση ατμολέβητα (%)	88.7
Ταχύτητα ηλεκτρογεννήτριας (στροφές/λεπτό)	3
Τάση ηλεκτρογεννήτριας (V)	11
Βαθμός απόδοσης ηλεκτρογεννήτριας με $\eta=0.8$ (%)	98.25

Πίνακας 5.3.2-1: Τεχνικά χαρακτηριστικά Ατμοηλεκτρικών μονάδων (Πηγή: Α.Η.Κ).

Εγκατεστημένη ισχύς μονάδας (MW)	52
Τεχνικό ελάχιστο (MW)	25
Θερμικός βαθμός απόδοσης (%)	42,16
Τάση ηλεκτρογεννήτριας (V)	11

Πίνακας 5.3.2-2: Τεχνικά χαρακτηριστικά Μ.Ε.Κ (Πηγή: Α.Η.Κ).

Ο Σταθμός αυτός βρίσκεται στη Νοτιοανατολική ακτή της Κύπρου και τροφοδότηση του με μαζούτ γίνεται μέσω δεξαμενόπλοιων και υποθαλάσσιου αγωγού. Ο σταθμός για την αποθήκευση του καυσίμου μαζούτ διαθέτει οκτώ δεξαμενές χωρητικότητας 12,000 tn η κάθε μια.



Εικόνα 5.3.2-1: Ο ΑΗΣ Δεκέλειας.

5.3.3 Ο Ηλεκτροπαραγωγός σταθμός Μονής

Ο Ηλεκτροπαραγωγός σταθμός της Μονής αποτελείται συνολικά από δέκα μονάδες παραγωγής. Συγκεκριμένα περιλαμβάνει έξι συμβατικές μονάδες των 30 MW η κάθε μία με χρησιμοποιούμενο καύσιμο το μαζούτ και τέσσερις αεριοστροβλικές μονάδες των 37,5 MW, με χρησιμοποιούμενο καύσιμο το ντίζελ. Οι δύο πρώτες μονάδες ατμού λειτούργησαν το 1966 και η τελευταία το 1976. Οι δύο αεριοστρόβιλοι προστέθηκαν στο σύστημα το 1992 και οι άλλοι δύο το 1995, και χρησιμοποιούνται κυρίως για αντιμετώπιση φορτίων αιχμής και για περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης. Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς του σταθμού ανέρχεται στα

330 MW και τα τεχνικά χαρακτηριστικά των αεριοστροβιλικών μονάδων, φαίνονται στον πίνακα 5.3.3-1.

Εγκατεστημένη ισχύς μονάδας (MW)	37.5
Σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 15°C (MW)	37.5
Σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 40°C (MW)	21
Αποδοτικότητα (%)	29.2
Ροή αέρα (tn/h)	480
Κατανάλωση ακάθαρτου πετρελαίου (tn/h)	9
Θερμοκρασία καυσαερίων (°C)	543
Ταχύτητα άξονα ηλε/τριας (στροφές/λεπτό)	3
Τάση (V)	11

Πίνακας 5.3.3-1: Τεχνικά χαρακτηριστικά αεριοστροβιλικής μονάδας (Πηγή: Α.Η.Κ).



Εικόνα 5.3.3-1: Ο ΑΗΣ Μονής.

5.3.4 Στοιχεία για παραγωγή ηλεκτρισμού με χρήση Α.Π.Ε στην Κύπρο

Οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας έχουν αναγνωριστεί διεθνώς ως σημαντικό μέσο για την προώθηση βιώσιμης και αειφόρου ανάπτυξης, για την προστασία του φυσικού περιβάλλοντος, για μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου αλλά ταυτόχρονα και ως μέσο για απεξαρτοποίηση από τα ορυκτά καύσιμα.

Το 2010 στο πλαίσιο των στόχων και δεσμεύσεων της Κυπριακής Δημοκρατίας έναντι της Ευρωπαϊκής Ένωσης για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ ίση με 16% της συνολικής

κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας μέχρι το 2020, είχε θεσπιστεί νομοθεσία για ενθάρρυνση της χρήσης των Α.Π.Ε για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Μέχρι σήμερα φαίνεται ότι υπάρχει μεγάλο ενδιαφέρον από εταιρείες για ανάπτυξη στον τομέα των ΑΠΕ και ειδικότερα για ανέγερση Αιολικών Πάρκων. Λόγω του ενδιαφέροντος αυτού αλλά και στο πλαίσιο των εθνικών στόχων της Δημοκρατίας αναφορικά με την παραγωγή ηλεκτρισμού από ΑΠΕ και λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιαιτερότητες του ηλεκτρικού δικτύου της Κύπρου, ο Διαχειριστής Συστήματος Μεταφοράς έχει προχωρήσει σε ειδική μελέτη που σκοπό έχει τη διερεύνηση της επίδρασης στο ηλεκτρικό σύστημα που θα έχει η εκτεταμένη διείσδυση ηλεκτρικής ενέργειας από την αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας, ιδιαίτερα όσον αφορά στην αξιοπιστία, ασφάλεια και ευστάθεια του συστήματος. Επιπρόσθετα, τα Σχέδια Χορηγιών του Υπουργείου Εμπορίου, Βιομηχανίας και Τουρισμού εξακολουθούν να περιέχουν σημαντικές πρόνοιες και κίνητρα για επενδύσεις στον τομέα αυτό. Οι κύριες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας στην Κύπρο είναι:

- Φωτοβολταϊκά συστήματα: Η παραγωγή ενέργειας από φωτοβολταϊκά συστήματα στην Κύπρο είναι κυρίως από οικιακά φωτοβολταϊκά και από μεγάλα φωτοβολταϊκά πάρκα. Οι αιτήσεις για σύνδεση οικιακών φωτοβολταϊκών στο δίκτυο της Α.Η.Κ ήταν αυξημένες το τελευταίο χρόνο. Το ίδιο συμβαίνει και με τα μεγάλα φωτοβολταϊκά πάρκα μειοδοτικού διαγωνισμού. Τον Μάιο του 2014 η εγκατεστημένη ισχύς από φωτοβολταϊκά συστήματα στην Κύπρο ανερχόταν στα 34 MW.
- Βιοαέριο/Βιομάζα από Κτηνοτροφικά απόβλητα και Σ.Η.Θ: Δεκατρείς σταθμοί παραγωγής βιοαερίου από κτηνοτροφικά απόβλητα λειτουργούν σήμερα στην Κύπρο, παράγοντας ηλεκτρική και θερμική ενέργεια από το 2007. Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς των σταθμών παραγωγής βιοαερίου από κτηνοτροφικά απόβλητα οι οποίοι ήταν συνδεδεμένοι στο δίκτυο της ΑΗΚ το έτος 2013 ήταν 9,7 MW. Το Μάιο του 2014 η εγκατεστημένη ισχύς από τη βιομάζα ανερχόταν στα 10 MW.
- Αιολικά πάρκα: Στην Κύπρο σήμερα υπάρχουν εγκατεστημένα πέντε αιολικά πάρκα (Ορείτες, Αλέξιγρος, Αγία Άννα, Κόση και Καμπί) που βρίσκονται σε πλήρη λειτουργία με εγκατεστημένη ισχύ 146,7 MW.

5.4 Σταθμοί φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων στην Κύπρο

Η ανάπτυξη της ηλεκτροκίνησης στην Κύπρο σήμερα βρίσκεται σε εμβρυακό επίπεδο. Έχουν γίνει κάποια πρώτα βήματα αλλά είναι ελάχιστα ή και μηδαμινά τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα που κυκλοφορούν σήμερα στην Κύπρο, κυρίως ιδιωτικής χρήσης. Επίσης το μεγαλύτερο ποσοστό από αυτά είναι υβριδικής τεχνολογίας και δεν έχουν δυνατότητα επαναφόρτισης μέσω του ηλεκτρικού δικτύου ή άλλης αυτόνομης μονάδας παραγωγής ενέργειας. Μακροπρόθεσμα όμως λόγω των πλεονεκτημάτων που έχουν τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα, της αναμενόμενης πτώσης των τιμών τους αλλά και της τεχνολογικής τους αναβάθμισης σε ότι αφορά τις μπαταρίες και την τεχνολογία φόρτισης, αναμένεται να δημιουργηθούν πολύ ευνοϊκότερες συνθήκες για την αύξηση της ζήτησης τους.

Η Αρχή Ηλεκτρισμού Κύπρου λαμβάνοντας υπόψη τις Ευρωπαϊκές Οδηγίες “European Commission’s White Paper on Transport(2011)” , “Energy Roadmap 2050 (2011)”, “Clean Power for Transport Communication and Directive for the Deployment of Alternative Fuel Infrastructure (2013)” και μελετώντας τις εισηγήσεις της Eurelectric αλλά και της Ευρωπαϊκής Επιτροπής αναφορικά με την οργάνωση της αγοράς και δημιουργία υποδομής Φορτιστών Ηλεκτρικών Οχημάτων σε Δημόσιους Χώρους, Αποφάσισε τη δημιουργία της αρχικής υποδομής σε Παγκύπρια βάση για τη Φόρτιση του Ηλεκτρικού Οχήματος. Με κίνητρο την προώθηση του ηλεκτρικού οχήματος στην Κύπρο και τη δημιουργία νέας αγοράς και υπηρεσιών προς τον Κύπριο καταναλωτή η Α.Η.Κ δημιούργησε την υπηρεσία e-charge. Η υπηρεσία e-charge προσφέρεται από την ΑΗΚ στους κατόχους ηλεκτρικών οχημάτων σε Παγκύπρια βάση. Με αυτή την υπηρεσία οι ιδιοκτήτες ηλεκτρικών οχημάτων θα έχουν πρόσβαση για ασφαλή και αξιόπιστη φόρτιση του οχήματος τους σε Δημόσιους χώρους όπου έχουν ήδη εγκατασταθεί φορτιστές.



Εικόνα 5.4-1: Πρότυπο Σταθμού Φόρτισης e- charge.

Ο κάθε ιδιοκτήτης ηλεκτρικού οχήματος θα πρέπει να αποταθεί σε οποιοδήποτε Κέντρο Εξυπηρέτησης Πελατών της ΑΗΚ για να υπογράψει τη σύμβαση παροχής υπηρεσιών ώστε να παραλάβει τη κάρτα RFID με την οποία θα έχει άμεση πρόσβαση σε όλους τους φορτιστές που τους φορτιστές που έχουν εγκατασταθεί ή θα εγκατασταθούν από την ΑΗΚ στο μέλλον. Ο κάθε χρήστης της υπηρεσίας θα χρεώνεται €25,00 πάγιο, στον πρώτο λογαριασμό και τα τιμολόγια θα αποστέλλονται στους ιδιοκτήτες ηλεκτρικών οχημάτων κάθε διμηνία. Σε περίπτωση απώλειας της κάρτας RFID ή σε περίπτωση που ο ιδιοκτήτης ηλεκτρικού οχήματος επιθυμεί επιπρόσθετη κάρτα, τότε θα αποτείνεται στην Επιχειρησιακή Μονάδα Δικτύων, στα Κεντρικά Γραφεία της ΑΗΚ για επανέκδοση ή έκδοση επιπρόσθετης κάρτας. Το σύστημα φόρτισης ελέγχεται και διαχειρίζεται από την Επιχειρησιακή Μονάδα Δικτύων η οποία παρακολουθεί τη φόρτιση του ηλεκτρικού οχήματος καθ' όλη τη διάρκεια της φόρτισης. Η

φόρτιση γίνεται με τη μέθοδο Mode 3 (αργή και semi-fast φόρτιση) με αμφίδρομη επικοινωνία οχήματος και φορτιστή καθ' όλη την διάρκεια της φόρτισης. Οι ρευματολήπτες που υπάρχουν σε κάθε σταθμό φόρτισης είναι Type 2 σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα και τις υποδείξεις της Ευρωπαϊκής Επιτροπής και της Eurelectric.



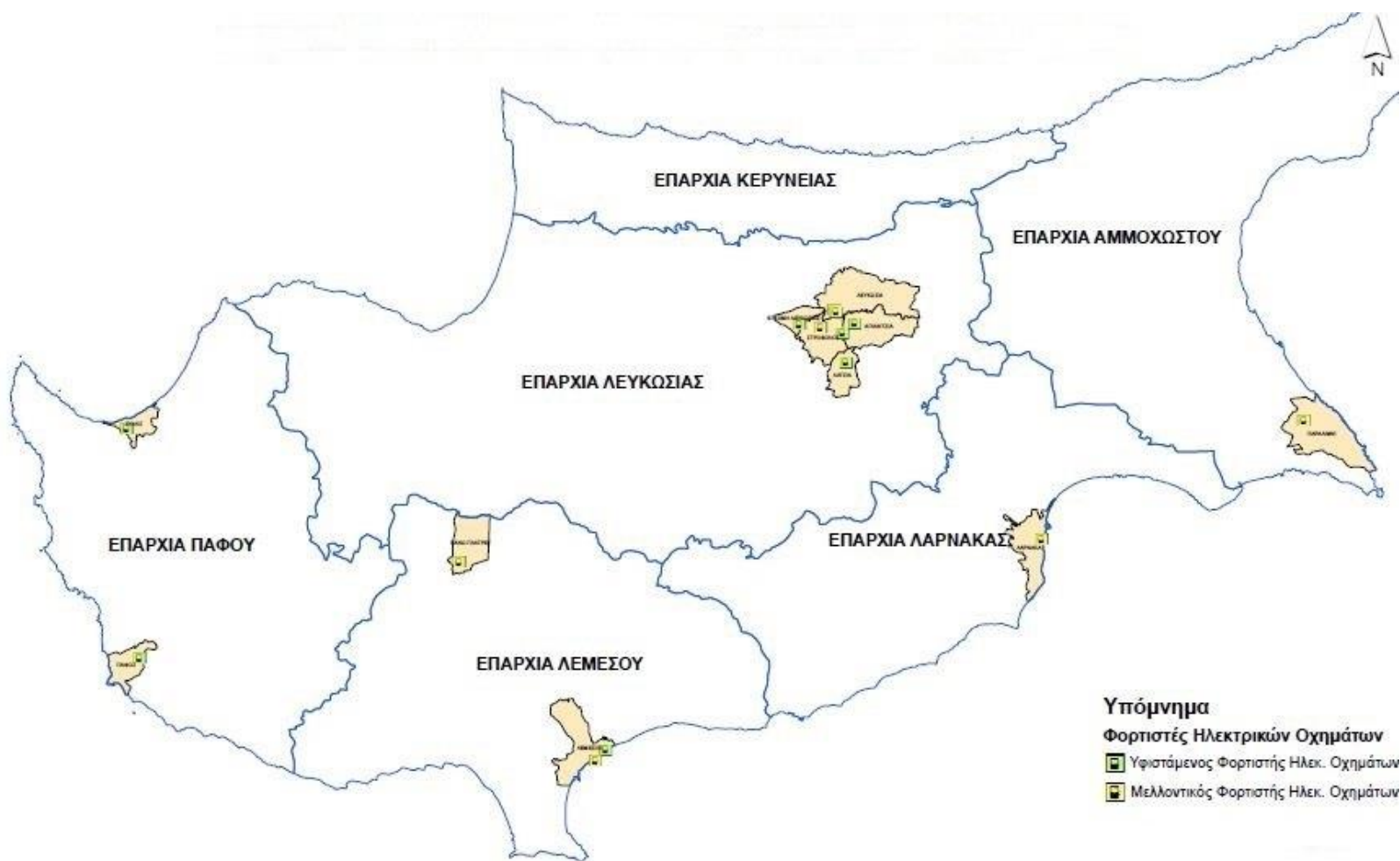
Εικόνα 5.4-2: Ρευματολήπτης τύπου 2 (φόρτιση AC) , 3/7/21Kw.



Εικόνα 5.4-3: Mode 3, Αμφίδρομη επικοινωνία αυτοκινήτου φορτιστή.

Οι σταθμοί φόρτισης που έχουν εγκατασταθεί παρέχουν τη δυνατότητα φόρτισης του ηλεκτρικού οχήματος μέχρι 21kW(3-Ph). Σε κάθε σημείο φόρτισης υπάρχουν δύο (2) ρευματολήπτες φόρτισης και μπορούν να εξυπηρετηθούν ταυτόχρονα δύο οχήματα. Συνολικά οι σταθμοί φόρτισης που θα είναι εγκατεστημένοι στο μέλλον θα είναι σε 15 επιλεγμένα σημεία σε δημόσιους χώρους ώστε να δίνεται η δυνατότητα στο κάτοχο του ηλεκτρικού οχήματος να καλύψει με το όχημα του ολόκληρη τη Κύπρο. Συγκεκριμένα θα έχουν εγκατασταθεί οκτώ (8) σταθμοί φόρτισης στην Επαρχία Λευκωσίας, 2 στη Λεμεσό, 1 στις Πλάτρες, 1 στη Λάρνακα, 1 στον Πρωταρά, 1 στην Πάφο και 1 στη Πόλη Χρυσοχούς. Στον πιο κάτω χάρτη φαίνονται τα σημεία που έχουν εγκατασταθεί ή πρόκειται να εγκατασταθούν φορτιστές ηλεκτρικών οχημάτων στην Κύπρο από την Α.Η.Κ.

Μέχρι στιγμής δεν έχει γίνει κάποια μελέτη η οποία αφορά την εφαρμογή και αξιοποίηση της V2G τεχνολογίας στο ηλεκτρικό δίκτυο της Κύπρου. Βέβαια όπως προαναφέρθηκε η τεχνολογία αυτή δεν έχει εφαρμοστεί ακόμα κάπου στον κόσμο, παρά μόνο σε ερευνητικό επίπεδο. Μια αρχική προσέγγιση του θέματος της V2G λειτουργίας στην Κύπρο γίνεται σε αυτή την εργασία με επίκεντρο τη συχνότητα. Στην παρούσα μελέτη λοιπόν , θα μελετήσουμε τις επιπτώσεις της V2G λειτουργίας με τη διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων στο Σ.Η.Ε της Κύπρου όσον αφορά τη πρωτεύουσα ρύθμιση της συχνότητας συστήματος.



Εικόνα 5.4-4: Υφιστάμενοι και μελλοντικοί φορτιστές ηλεκτρικών οχημάτων στην Κύπρο.

6. Λογισμικό προσομοίωσης-Power World Simulator

6.1 Γενικά

Το Power World Simulator είναι ένα πρόγραμμα προσομοίωσης συστημάτων ισχύος με σκοπό να λύνει ροές ισχύος και προβλήματα οικονομικής κατανομής, σχεδιασμένο έτσι ώστε να είναι ιδιαίτερα αλληλεπιδραστικό και φιλικό προς τον χρήστη. Διαθέτει τις απαραίτητες δυνατότητες να χρησιμοποιηθεί για επιστημονική ανάλυση από έναν μηχανικό αλλά ταυτόχρονα λόγω της ικανότητας αλληλεπίδρασης του με τον χρήστη και της χρήσης γραφικών μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ανάλυση και κατανόηση της λειτουργίας από μη-τεχνικά ακροατήρια. Πρόκειται ουσιαστικά για μια περιεκτική, ικανότατη μηχανή που παρέχει λύση για ροές ισχύος σε ένα σύστημα ικανή να χειριστεί συστήματα μέχρι και 100.000 ζυγών. Ταυτόχρονα επιτρέπει στον χρήστη να παρακολουθεί το σύστημα και τις αλληλεπιδράσεις των στοιχείων που το αποτελούν μέσω χρωματισμένων κινούμενων (animated) μονογραμμικών διαγραμμάτων ενισχυμένων με την δυνατότητα εστίασης και μετακίνησης ή περιήγησης στο εκάστοτε μοντέλο. Τα μοντέλα συστημάτων ισχύος μπορούν να τροποποιηθούν ή να σχεδιαστούν από την αρχή ανάλογα με τις απαιτήσεις του χρήστη με βάση τα χαρακτηριστικά των γραφικών του προγράμματος. Έτσι για παράδειγμα, γραμμές μεταφοράς μπορούν να ανοίξουν ή να κλείσουν, μια νέα γραμμή ή παραγωγή μπορεί να εισαχθεί σε ένα ήδη υπάρχον μοντέλο και νέες ανταλλαγές ισχύος μπορούν να καταρτισθούν απλά με μερικά κλικ του ποντικιού. Η εκτεταμένη χρήση γραφικών και κίνησης αυξάνει κατά πολύ την κατανόηση των 6 χαρακτηριστικών, των προβλημάτων και των περιορισμών ενός μοντέλου ισχύος από τον χρήστη ενώ παράλληλα δίνει και ισοδύναμα κατανοητούς τρόπους αντιμετώπισης αυτών. Το βασικό πακέτο του Power World Simulator, πέρα από την προαναφερθείσα ικανότητα χειρισμού μοντέλων με ζυγούς της τάξεως των 100.000, περιλαμβάνει και τα απαραίτητα εργαλεία για την εκτέλεση ολοκληρωμένης οικονομικής κατανομής φορτίου, οικονομικής ανάλυσης της ανταλλαγής ισχύος μεταξύ περιοχών του μοντέλου, υπολογισμού των παραγόντων συμμετοχής (PTDF), ανάλυσης βραχυκυκλωμάτων και διαταραχών. Επίσης, προσφέρει κάποια επιπρόσθετα εργαλεία (Add-ons) για την βέλτιστη ροή ισχύος, για τη διαθέσιμη ικανότητα μεταφοράς και ένα εργαλείο για τον αυτόματο έλεγχο παραγωγής.

6.2 Δυνατότητες και στοιχεία του προγράμματος

Οι λειτουργίες και τα εργαλεία του προγράμματος προσφέρουν άπειρες δυνατότητες για εις βάθος ανάλυση, μελέτη και απεικόνιση περίπλοκων και μεγάλης κλίμακας συστημάτων ισχύος. Οι σημαντικότερες δυνατότητες του Power World Simulator είναι οι εξής:

- Σχεδιασμός γραμμών μεταφοράς εναλλασσόμενου και συνεχούς ρεύματος. Η σχεδίαση και εξήγηση του τρόπου λειτουργίας των γραμμών γίνεται χρησιμοποιώντας την λειτουργία ανάλυσης αποτελεσμάτων του προγράμματος, μια χρονική προσομοίωση ροής φορτίου ή απλά μια γραφική απεικόνιση του μοντέλου. Αυτό έχει ως συνέπεια να

δίνει στον εκάστοτε μηχανικό το πλεονέκτημα της γρήγορης και ακριβέστερης ανάλυσης κάνοντας έτσι ευκολότερο το έργο του για εξήγηση της λειτουργίας και πολυπλοκότητας τέτοιων συστημάτων ισχύος.

- Λεπτομερής μοντελοποίηση μετασχηματιστών με σύστημα αλλαγής τάσης υπό φορτίο και φάσης, διακοπών, καμπύλων ενεργού και αέργου ικανότητας φόρτισης γεννητριών, καμπυλών κόστους γεννητριών, προγραμμάτων φορτίων, προγραμμάτων ανταλλαγής ισχύος και απομακρυσμένου ελέγχου τάσης ζυγών.
- Ενσωμάτωση αυτόματου ελέγχου παραγωγής περιοχής (Automatic Generation Control- AGC) στην επίλυση ροής φορτίου, προσφέροντας τρεις διαφορετικούς τρόπους ελέγχου: με ένα ζυγό ταλάντωσης, διανεμημένο έλεγχο με πολλαπλούς ζυγούς ταλάντωσης και οικονομική κατανομή του φορτίου. Ακόμη, ο τύπος του ελέγχου AGC είναι δυνατό να διαφέρει από περιοχή σε περιοχή (π.χ. δυνατότητα χρησιμοποίησης της οικονομικής κατανομής φορτίου μόνο στις περιοχές που είναι γνωστές οι πληροφορίες για τις δαπάνες).
- Γραφική απεικόνιση της ροής ισχύος με κινούμενα βέλη στις γραμμές μεταφοράς και απεικόνιση διαγραμμάτων πίττας (pie charts), τα οποία δίνουν την άμεση δυνατότητα υπερφορτίσεων των γραμμών, καθώς η ροή ισχύος φαίνεται ως ποσοστό πλήρους φόρτισης της γραμμής.
- Δυνατότητα αξιολόγησης των τεχνικών πτυχών μιας ανακατανομής (π.χ. ανακατανομή φορτίου) αλλά και της οικονομικής σημασίας της αλλαγής.
- Παρέχονται εργαλεία για τον υπολογισμό ευαίσθητων σημείων, όπως οι παράγοντες διανομής μεταφοράς ισχύος, οι ευαισθησίες ροής στη γραμμή μεταφοράς ή η ευαισθησία των απωλειών.
- Ανάλυση πιθανότητας διαταραχών που βοηθούν στην αναγνώριση προβλημάτων. Η ανάλυση πιθανότητας διαταραχών γίνεται με την εφαρμογή μιας πλήρους ροής φορτίου για κάθε πιθανότητα με αυξανόμενη ακρίβεια. Επιπρόσθετα, καταρτίζονται κατάλογοι ενδεχόμενων διαταραχών και σχετικών παραβιάσεων και δίνεται η δυνατότητα της ευέλικτης επεξεργασίας των καταλόγων ώστε να ικανοποιούνται δεδομένα κριτήρια. Χρησιμοποιώντας το εργαλείο Time Step Simulation μπορεί ο χρήστης να δημιουργήσει πιθανά σενάρια καταστάσεων σε ένα σύστημα κατά χρονικά διαστήματα. Η αντιμετώπιση των περιπτώσεων αυτών βελτιώνει την αντίληψη και κατανόηση του χρήστη πάνω στο σύστημα αλλά και την αντίδρασή του σε τυχαία γεγονότα ή διαταραχές.
- Δυνατότητα προσομοίωσης της αγοράς ενέργειας. Το εργαλείο OPF (Optimal Power Flow) του προγράμματος μας επιτρέπει να προσδιορίσουμε με περιορισμούς ασφάλειας, τοπικά διαφορικά κόστη σε κάθε ζυγό του συστήματος καθορίζοντας έτσι πόσο θα πρέπει να πληρώσουν ή να πληρωθούν οι “παίκτες” του χρηματιστηρίου ηλεκτρικής ενέργειας. Το πρόγραμμα μάς δίνει την δυνατότητα προσδιορισμού της διανομής με ελάχιστο λειτουργικό κόστος, την εισαγωγή περιορισμών αλλά και την προκαθορισμό των επιπτώσεων σε μια συμφόρηση. Επιπλέον έχουμε πρόσβαση στην επίδραση διακοπών ρεύματος, στην μεταβολή του φορτίου και του κόστους καυσίμου πράγμα που βοηθά στην ανάπτυξη κατάλληλης στρατηγικής για τον χειρισμό οποιονδήποτε κεφαλαίων στην αγορά ενέργειας. Με την χρήση του εργαλείου Simulator Time Step Simulation ο χρήστης μπορεί να έχει την κατανομή ισχύος για το

σύστημα για κάποιες ώρες και να διαπιστώσουμε πόσο αλλάζουν οι τιμές με τη ζήτηση ή τις συνθήκες στις οποίες λειτουργεί το σύστημα.

- Πέρα από τη δυνατότητα γραφικής αναπαράστασης, δίνεται και η δυνατότητα παρουσίασης και επεξεργασίας των στοιχείων υπό μορφή πινάκων, σε λογιστικό φύλλο. Οι πίνακες εκτός από τις δυνατότητας ταξινόμησης και αντιγραφής των στοιχείων, αποτελούν ένα εξαιρετικά χρήσιμο εργαλείο για τον έλεγχο των δεδομένων και τυχόν λαθών, που δεν είναι πάντα εύκολο να εντοπιστούν στην γραφική αναπαράσταση.
- Δυνατότητα παρακολούθησης συστήματος σε πραγματικό χρόνο. Το εργαλείο Power World Retriever παρέχει την καλύτερη απεικόνιση για ένα κέντρο ελέγχου, δίνοντας στους χειριστές του συστήματος ισχύος τις σωστές πληροφορίες την σωστή στιγμή βοηθώντας τους έτσι να πάρουν τις κατάλληλες αποφάσεις κατά την εμφάνιση ενός προβλήματος. Το εργαλείο αυτό δίνει στον χρήστη μια κατάσταση του συστήματος σε πραγματικό χρόνο ή ιστορικά στοιχεία καθώς επίσης και διάφορους παραμέτρους του με ταχύτητα και ακρίβεια αυξάνοντας την αντιληπτική ικανότητα του χρήστη-χειριστή.
- Δυνατότητα συνεργασίας με το πρόγραμμα Geographic Information System (GIS).
- Είναι δυνατή η αποθήκευση εγγράφων σε μορφή HTML, και η εκτύπωση υψηλής ευκρίνειας διαγραμμάτων στον εκτυπωτή. Επίσης υποστηρίζεται μια γλώσσα προγραμματισμού που επιτρέπει την αυτοματοποίηση συχνών εργασιών και την οργάνωσή τους, ώστε να διευκολύνεται η παρουσίαση των αποτελεσμάτων.

Για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής χρησιμοποιήθηκε η έκδοση των 12 ζυγών που είναι διαθέσιμη στη ιστοσελίδα του Power World. Το πρόγραμμα χρησιμοποιήθηκε με σκοπό την υλοποίηση ενός αντιπροσωπευτικού μοντέλου των μονάδων παραγωγής και του φορτίου του Σ.Η.Ε της Κύπρου, με σκοπό τη μελέτη της αντίδρασης συχνότητας του συστήματος με τη διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο και κατά συνέπεια την ενσωμάτωση της V2G λειτουργίας σε αυτό. Έτσι δεν χρησιμοποιήθηκαν όλα τα στοιχεία σχεδίασης ενός Σ.Η.Ε που μας παρέχει το Power World αλλά μόνο τα απαραίτητα για την προσομοίωση του μοντέλου. Τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν είναι τα εξής:

- Ζυγοί
- Γεννήτριες
- Γραμμές μεταφοράς
- Φορτία
- Ένας πυκνωτής

Ο τρόπος εισαγωγής των στοιχείων αυτών αλλά και η εισαγωγή των δεδομένων τους περιγράφονται στην ενότητα 6.3. Επίσης χρησιμοποιήθηκαν δυναμικά μοντέλα που αφορούν τις γεννήτριες του συστήματος όπως:

- Το μοντέλο της μηχανής.
- Το μοντέλο του ρυθμιστή τάσης της γεννήτριας.
- Το μοντέλο του ρυθμιστή στροφών της γεννήτριας.

Για την προσομοίωση της αντίδρασης συχνότητας του συστήματος αλλά και την γενική ανάλυση της ευστάθειας του, χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο Transient Stability του οποίου οι βασικές του λειτουργίες περιγράφονται στην ενότητα 6.4.

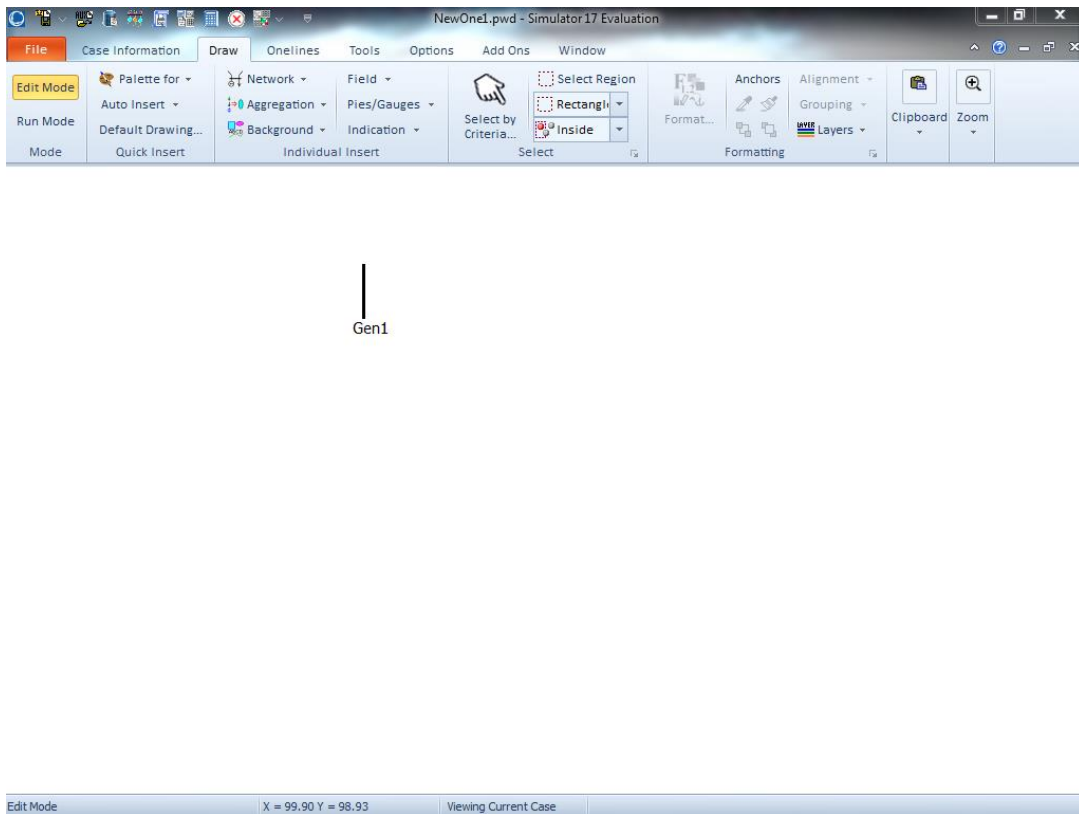
6.3 Δημιουργία απλού Σ.Η.Ε στο Power World Simulator

Στις επόμενες υποενότητες περιγράφουμε τον τρόπο εισαγωγής των στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα μελέτη στο περιβάλλον εργασίας, δημιουργώντας ταυτόχρονα ένα απλό Σ.Η.Ε χωρίς την ύπαρξη μετασχηματιστών και γραμμών συνεχούς ρεύματος. Για να δημιουργήσουμε ένα νέο μοντέλο, επιλέγουμε New Case από το εικονίδιο Power World. Η οθόνη στο φόντο θα γίνει άσπρη, που είναι και το προεπιλεγμένο χρώμα φόντου για ένα νέο Power World μονογραμμικό διάγραμμα. Τα μονογραμμικά διαγράμματα χρησιμοποιούνται στην ανάλυση συστημάτων ενέργειας για να αναπαραστήσουν το πραγματικό τριφασικό σύστημα ενέργειας χρησιμοποιώντας μία μόνο γραμμή για να αναπαραστήσουν κάθε τριφασική συσκευή.

6.3.1 Εισαγωγή ζυγού

Οι ζυγοί χρησιμοποιούνται για να αποτυπώσουν σημεία συνδέσεων στους υποσταθμούς, όπου συνδέονται οι διάφορες συσκευές. Για να εισάγουμε ένα ζυγό (bus) επιλέγουμε από το μενού **Draw,Network,Bus** και τοποθετούμε το ζυγό στην θέση που επιθυμούμε στο μονογραμμικό διάγραμμα.

Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται τοποθετημένος ένας ζυγός στο περιβάλλον εργασίας του λογισμικού.



Εικόνα 6.3.1-1: Τοποθέτηση ενός ζυγού στην επιφάνεια εργασίας.

Ακολούθως εμφανίζεται μια καρτέλα για εισαγωγή των δεδομένων του ζυγού. Τα κυριότερα από αυτά είναι:

- Το όνομα του ζυγού
- Ο αριθμός του ζυγού
- Η μορφή απεικόνισης στην επιλογή Display (μέγεθος, πλάτος, κατεύθυνση), ονομαστική τάση κλπ.

Επίσης πρέπει να δηλωθεί αν ζυγός είναι ταλάντωσης ή αναφοράς. Ένας τουλάχιστον ζυγός του δικτύου πρέπει να οριστεί ως ζυγός ταλάντωσης (slack bus) και να οριστεί η γωνία και η τάση του, συνήθως 1 α.μ με 0°. Για τους υπόλοιπους ζυγούς του δικτύου οι τιμές που ορίζονται για γωνία και τάση δεν έχουν μεγάλη σημασία καθώς οι τιμές αυτές καθορίζονται κατά την επίλυση ροής φορτίου. Στο ζυγό αυτό θα πρέπει οπωσδήποτε να τοποθετηθεί μια γεννήτρια η παραγωγή της οποίας αφήνεται ελεύθερη ώστε να πάρει την τιμή που απαιτείται για τη σύγκλιση της ροής φορτίου. Στην εικόνα 6.3.1-2 βλέπουμε την καρτέλα εισαγωγής δεδομένων του ζυγού.

Bus Options

Bus Number: 1

Bus Name: Gen1

Nominal Voltage: 132.0 kV

Labels ...: no labels

	Number	Name
Area	1	1
Zone	1	1
Owner	1	

Substation: Change

Bus Information: Display Attached Devices Geography Custom

Bus Voltage: 1.0000

Voltage (p.u.): 1.0000

Angle (degrees): 0.000

Bus Voltage Regulator Devices

☒ System Slack Bus

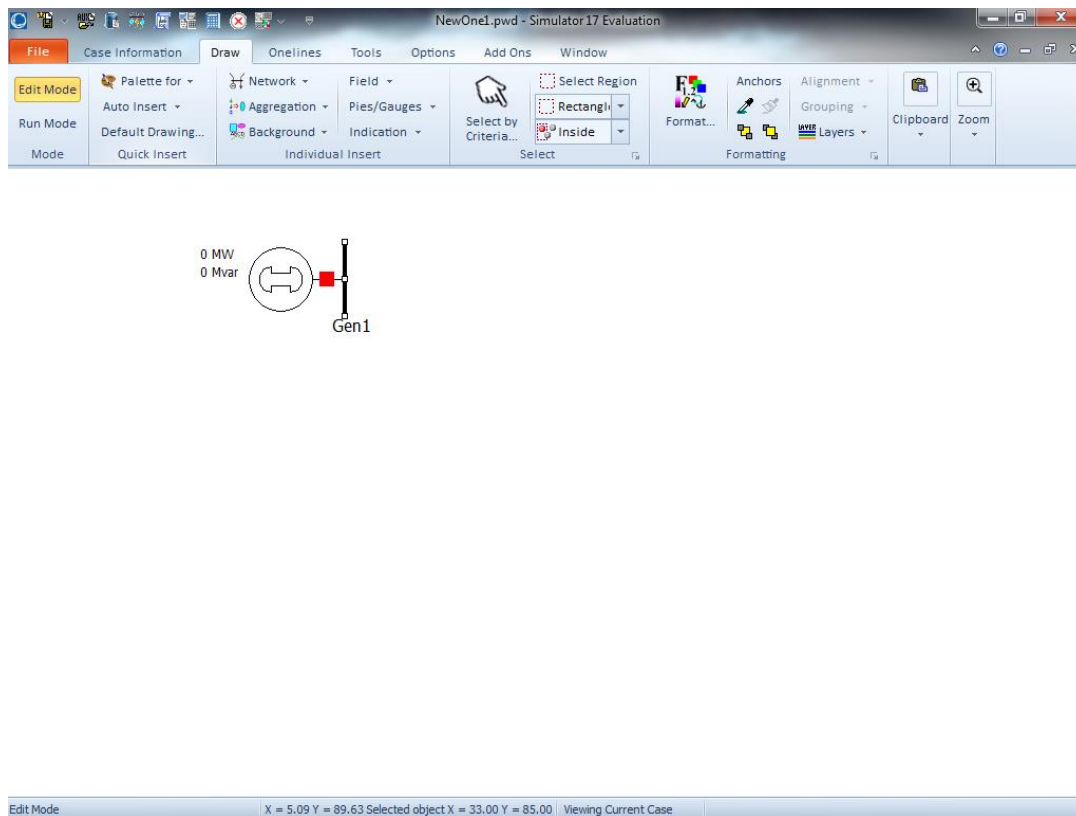
OK Save Cancel

Εικόνα 6.3.1-2: Καρτέλα δήλωσης χαρακτηριστικών του ζυγού (bus).

6.3.2 Εισαγωγή Γεννήτριας

Για την εισαγωγή γεννήτριας επιλέγουμε από το μενού **Draw,Network,Generator** και επιλέγουμε το ζυγό στον οποίο θα τοποθετηθεί η γεννήτρια. Αν θέλουμε να εισάγουμε ανεμογεννήτρια ή γεννήτρια που κινείται με πυρηνική ενέργεια το σχήμα του ρότορα της γεννήτριας μπορεί να μεταβληθεί ανάλογα με τον τύπο της.

Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η τοποθέτηση της γεννήτριας σε ένα ζυγό.



Εικόνα 6.3.2-1: Τοποθέτηση γεννήτριας στο ζυγό.

Μετά τη τοποθέτηση της γεννήτριας εμφανίζεται η καρτέλα εισαγωγής δεδομένων της γεννήτριας. Τα κυριότερα δεδομένα εισαγωγής μιας γεννήτριας είναι:

- Τα όρια παραγωγής της γεννήτριας(ελάχιστη/ μέγιστη παραγωγή).
- Αν η γεννήτρια χρησιμοποιείται από τον αυτόματο έλεγχο παραγωγής (AGC).
- Η παραγωγή ενεργού ισχύος της γεννήτριας.
- Η μορφή απεικόνισης στην επιλογή Display.
- Ο ζυγός στον οποίο συνδέεται η γεννήτρια.
- Το πόσο γρήγορα αλλάζει η παραγωγή της γεννήτριας.
- Ο ζυγός στον οποίο συνδέεται η γεννήτρια.
- Τα όρια μέσα από τα οποία μπορεί να παραλάβει η να παράγει άεργο ισχύ.

Στην εικόνα 6.3.2-2 παρουσιάζεται η καρτέλα εισαγωγής της γεννήτριας καθώς και τα σημαντικότερα στοιχεία τα οποία περιλαμβάνει αυτή.

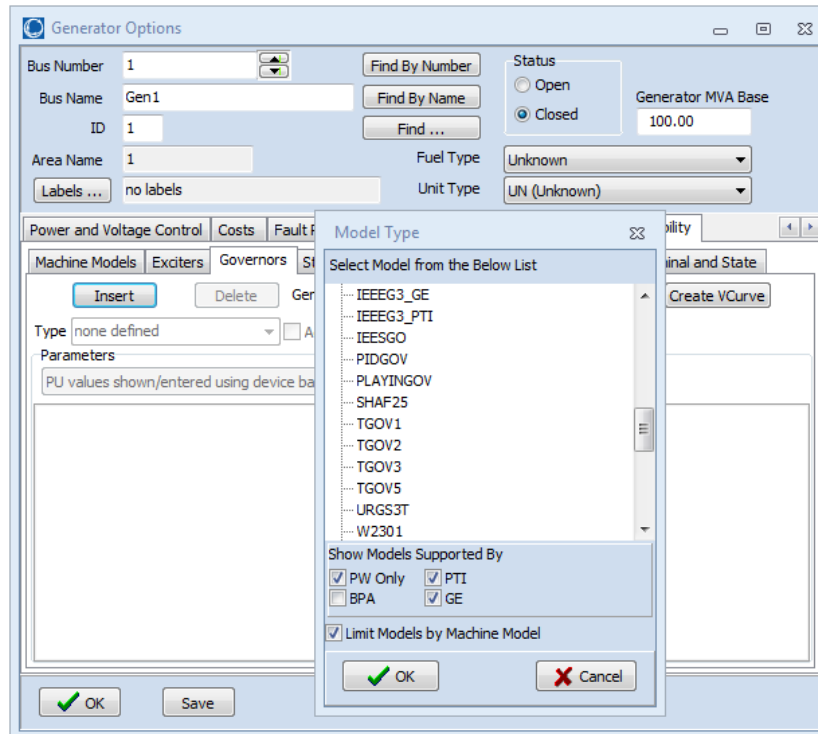
Εικόνα 6.3.2-2: Καρτέλα εισαγωγής στοιχείων γεννήτριας.

Αφού τοποθετήσουμε την γεννήτρια και δηλώσουμε τα παραπάνω δεδομένα, μπορούμε με διπλό κλικ στο εικονίδιο της γεννήτριας να επαναφέρουμε την καρτέλα εισαγωγής για τυχόν διορθώσεις αλλά και από την επιλογή **stability** να δηλώσουμε από τα υπάρχοντα μοντέλα του Power World επιπλέον στοιχεία για τη λειτουργία της γεννήτριας όπως:

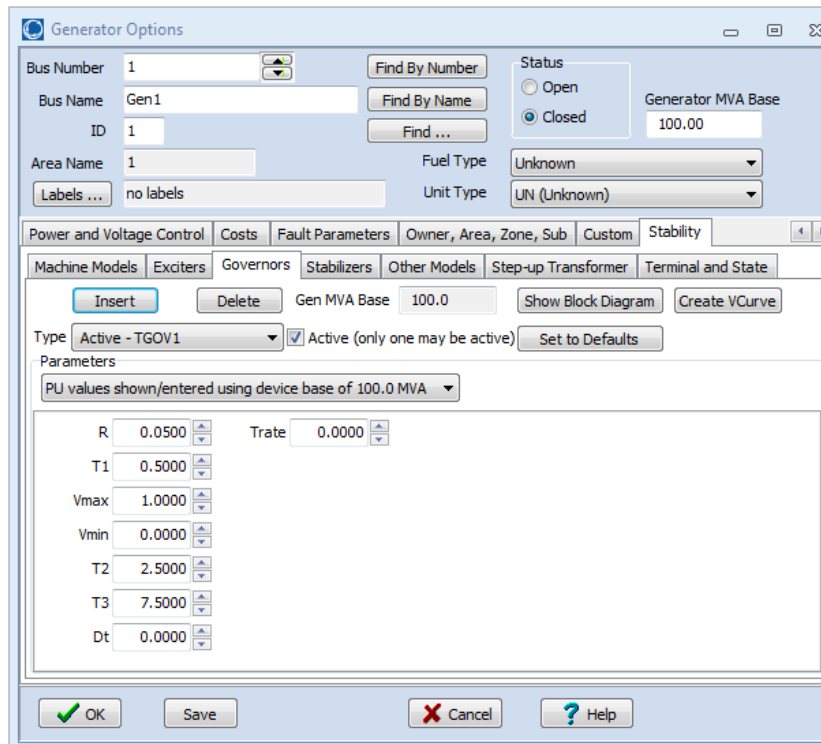
- Το μοντέλο της μηχανής.
- Το μοντέλο του ρυθμιστή τάσης της γεννήτριας.
- Το μοντέλο του ρυθμιστή στροφών της γεννήτριας κ.α.

Για να εισάγουμε τα πιο πάνω μοντέλα επιλέγουμε από το **stability** το στοιχείο που μας ενδιαφέρει (Machine model, Exciter, Governor κλπ) και ακολούθως από την επιλογή **insert** επιλέγουμε ένα από τα default μοντέλα που διαθέτει το Power World Simulator. Ακόμα μπορούν να δηλωθούν οι παράμετροι των παραπάνω μοντέλων οι να τροποποιηθούν οι default παράμετροι.

Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται η εισαγωγή ενός μοντέλου ρυθμιστή στροφών από τα default του Power world, καθώς και οι παράμετροι λειτουργίας του.



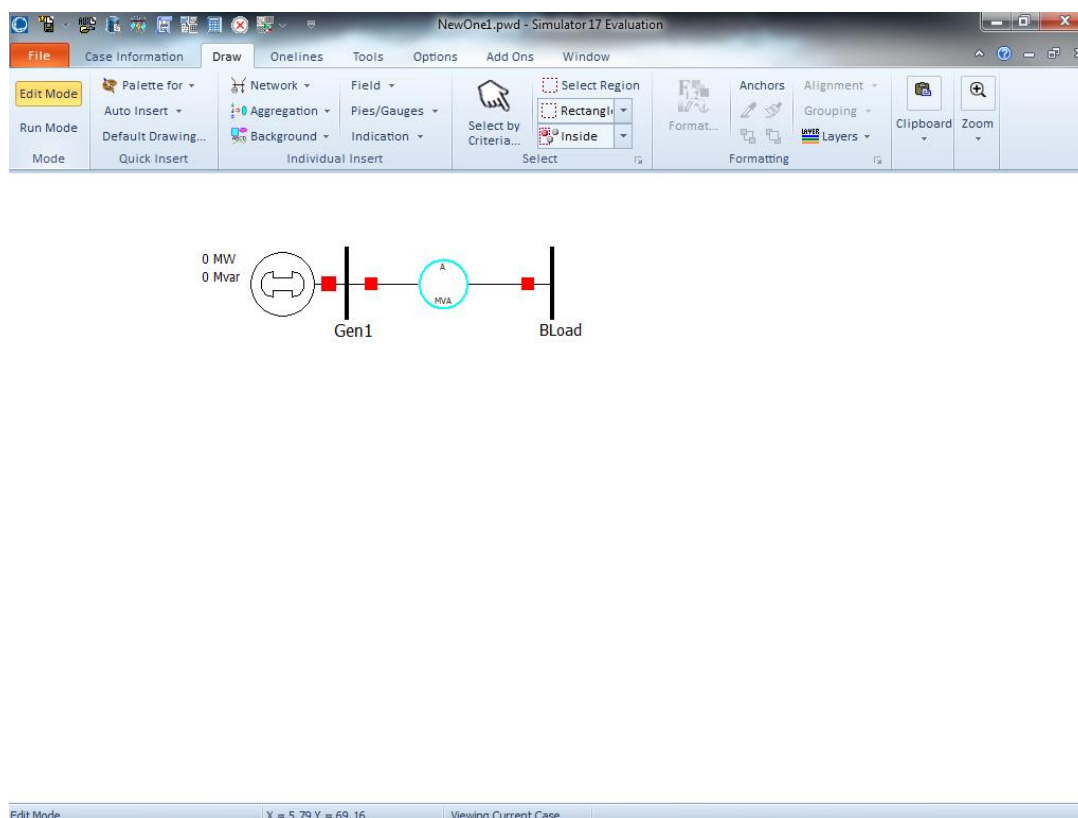
Εικόνα 6.3.2-3 : Εισαγωγή ρυθμιστή στροφών στην γεννήτρια.



Εικόνα 6.3.2-4 : Παράμετροι ρυθμιστή στροφών.

6.3.3 Εισαγωγή γραμμής μεταφοράς εναλλασσόμενου ρεύματος (AC)

Μια γραμμή μεταφοράς συνδέει δύο ζυγούς. Άρα πρέπει πρώτα να εισάγουμε τους δύο ζυγούς τους οποίους θα συνδέσουμε με τη γραμμή μεταφοράς. Για την εισαγωγή μιας AC γραμμής μεταφοράς επιλέγουμε από το μενού **Draw,Network,AC transmission line**. Με το πρώτο αριστερό κλικ επιλέγουμε το ζυγό εκκίνησης της γραμμής. Στην συνέχεια σύρουμε το ποντίκι στην κατεύθυνση που θέλουμε και με αριστερό κλικ κάνουμε αλλαγή κατεύθυνσης της γραμμής. Τέλος με διπλό αριστερό κλικ στο ζυγό άφιξης τελειώνουμε με τη προσθήκη γραμμής στο δίκτυο. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται η προσθήκη μια γραμμής στο δίκτυο.



Εικόνα 6.3.3-1: Προσθήκη γραμμής μεταφοράς εναλλασσόμενου ρεύματος μεταξύ δύο ζυγών.

Με τη προσθήκη της γραμμής στο δίκτυο θα εμφανιστεί η καρτέλα εισαγωγής δεδομένων της γραμμής μεταφοράς. Τα περισσότερα στοιχεία συμπληρώνονται αυτόματα από το πρόγραμμα με βάση τα άκρα της γραμμής όπως αυτά ορίστηκαν κατά τη σχεδίαση της. Ο χρήστης πρέπει να δηλώσει τα εξής στοιχεία :

- Ωμική αντίσταση (R).
- Επαγωγική αντίδραση (X).
- Εγκάρσια χωρητικότητα (B).
- Τα όρια της ροής ισχύος.

- Τη μορφή απεικόνισης της γραμμής.

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται η καρτέλα εισαγωγής δεδομένων της γραμμής.

Εικόνα 6.3.3-2: Καρτέλα προσαρμογής των ιδιοτήτων μιας γραμμής μεταφοράς εναλλασσόμενου ρεύματος.

Ο χρήστης μπορεί να δώσει μηδενικές τιμές στις πιο πάνω παραμέτρους εκτός από την επαγωγική αντίδραση (X) στην οποία πρέπει να δώσει οπωσδήποτε μια μη μηδενική τιμή. Επίσης οι τιμές R,X,B μπορούν να δοθούν είτε συνολικά για όλο το μήκος της γραμμής είτε ανά μονάδα μήκους επιλέγοντας από τη καρτέλα εισαγωγής δεδομένων **Calculate, Impedances, From Per Distance Impedances** και συμπληρώνοντας τη πιο κάτω καρτέλα. Επίσης στην καρτέλα αυτή υπάρχει επιλογή για τη μονάδα μήκους που θέλουμε να χρησιμοποιήσουμε, ανάμεσα σε μίλια και χιλιόμετρα.

Line Per Unit Impedance Calculator

Actual Impedance and Current Limits		Line Length		Per Unit Impedance and MVA Limits	
R (Ohms/mile)	0.021641	Line Length	16.093 miles	R (pu)	0.001999
X (Ohms/mile)	0.026375	When changing convert:	<input checked="" type="radio"/> PU/MVA ---> <input type="radio"/> <--- Electrical	X (pu)	0.002436
B (Mhos/mile)	0.000000 $\times 10^{-6}$	Length Units	<input checked="" type="radio"/> miles <input type="radio"/> kilometers	B (pu)	0.000000
G (Mhos/mile)	0.000000 $\times 10^{-6}$	System Base Values		G (pu)	0.000000
Limit A (Amps)	700	Power Base (MVA)	100.0000	Limit A (MVA)	160.041
Limit B (Amps)	0.000	Voltage Base (kV)	132.000	Limit B (MVA)	0.000
Limit C (Amps)	0.000	Impedance Base (Ohms)	174.240	Limit C (MVA)	0.000
Limit D (Amps)	0.000	Admittance Base (Mhos)	0.00573921	Limit D (MVA)	0.000
Limit E (Amps)	0.000			Limit E (MVA)	0.000
Limit F (Amps)	0.000			Limit F (MVA)	0.000
Limit G (Amps)	0.000			Limit G (MVA)	0.000
Limit H (Amps)	0.000			Limit H (MVA)	0.000
Conductor Type None Specified					
Tower Configuration None Specified					
Calculate PU Impedances From Conductor Type and Tower Configuration					
OK		Help		Cancel	

Εικόνα 6.3.3-3: Τυπική εικόνα αν τα στοιχεία δίνονται ανά μονάδα μήκους.

Το Power World δίνει τη δυνατότητα ελέγχου υπερφορτίσεων των γραμμών μέσω “διαγραμμάτων πίτας” (line flow pie chart), τα οποία δείχνουν πόσο οι γραμμές είναι φορτισμένες σε σχέση με τα όρια μακράς διάρκειας ροής ισχύος τους. Προκειμένου να γίνει σωστά η απεικόνιση θα πρέπει το **Limit A** να είναι συμπληρωμένο και όχι μηδενικό στην καρτέλα εισαγωγής δεδομένων της γραμμής. Για την εισαγωγή του διαγράμματος αυτού κάνουμε διπλό κλικ πάνω στην γραμμή μεταφοράς και αυτο **insert pie chart**. Επιπρόσθετα, μέσα από τον έλεγχο μορφής απεικόνισης του διαγράμματος πίτας, μπορούμε να ορίσουμε το μέγεθος του και να καθορίσουμε ένα ποσοστό φόρτισης της γραμμής μετά από το οποίο θα αλλάζει το χρώμα του διαγράμματος, για να μας προειδοποιεί για την αύξηση φόρτισης της γραμμής, και θα αλλάζει ξανά όταν η φόρτιση της γραμμής ξεπεράσει το 100%.

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται η καρτέλα με τις επιλογές του διαγράμματος πίτας, για τη φόρτιση της γραμμής.

Line/Transformer Flow Pie Chart

From Bus Number: 1 To Bus Number: 2

From Bus Name: Gen1 To Bus Name: BLoad

Circuit: 1 Size: 8.0

MVA Rating: 0.000 Percent: 0.0

☐ Ignore Dynamic Sizing ☐ Always Show Value (Percent)

☐ Ignore Dynamic Open Sizing ☒ Anchored

Style

☐ * Use Online Options ☐ Line Amp, Transf. MVA

☒ Total power (MVA) ☐ Max % Load Cont.

☐ Real power (MW) ☐ PTDF

☐ Reactive power (Mvar)

* recommended setting

View Pie Chart Display Options

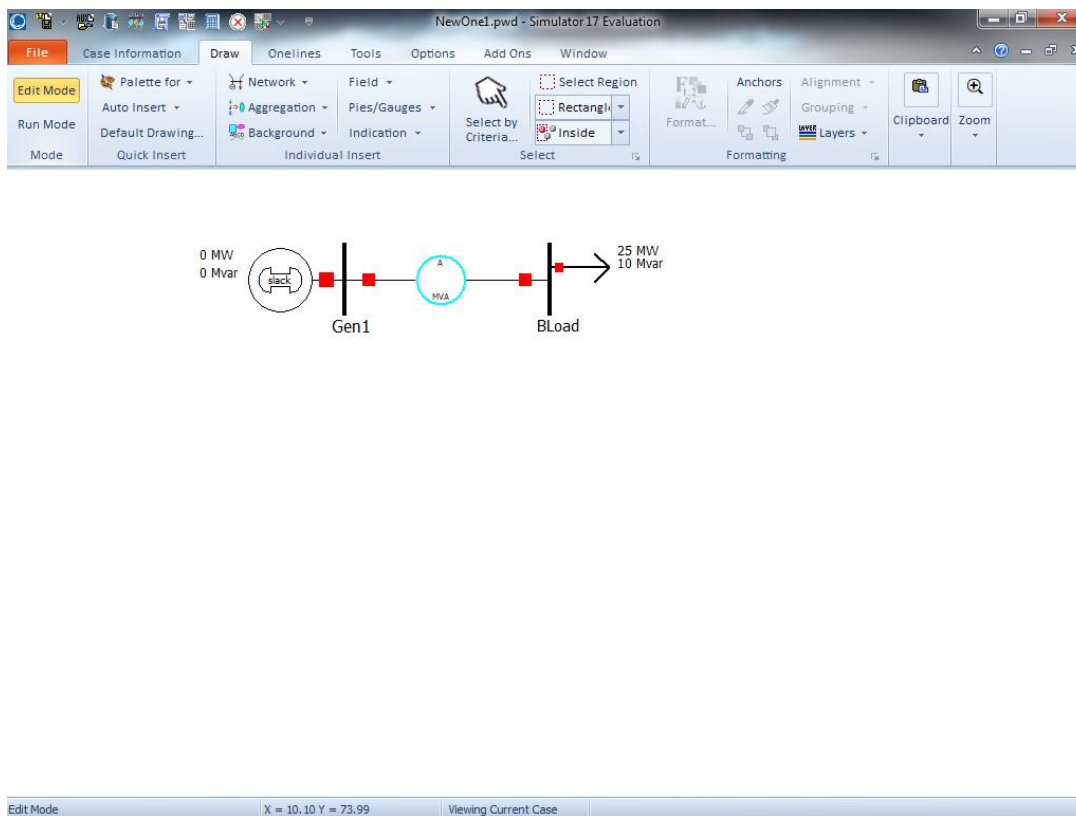
OK Cancel Help

Εικόνα 6.3.3-4 : Επιλογές του διαγράμματος πίτας για τη φόρτιση της γραμμής.

6.3.4 Εισαγωγή ζυγού φορτίου

Για να εισάγουμε ζυγό φορτίου πρέπει καταρχάς να εισάγουμε ένα ζυγό με όμοια διαδικασία με εκείνη που περιγράφηκε πιο πάνω. Ακολούθως επιλέγουμε από το μενού Draw,Network,Load και με αριστερό κλικ επιλέγουμε τον ζυγό στο οποίο θέλουμε να συνδέουμε το φορτίο.

Στην εικόνα 6.3.4-1 παρουσιάζεται η προσθήκη φορτίου στο δίκτυο.



Εικόνα 6.3.4-1: Το δίκτυο μετά από την προσθήκη ενός φορτίου.

Αφού εισάγουμε το φορτίο, εμφανίζεται η καρτέλα εισαγωγής δεδομένων του φορτίου, η οποία παρουσιάζεται στην εικόνα 6.3.4-2. Τα δεδομένα τα οποία εισάγει ο χρήστης είναι τα εξής:

- Το όνομα του φορτίου.
- Το ζυγό στον οποίο συνδέεται το φορτίο.
- Την ενεργό και άεργο ισχύ του.
- Την σύνθετη αντίσταση του.
- Την ένταση του ρεύματος.
- Τη μορφή απεικόνισης του.

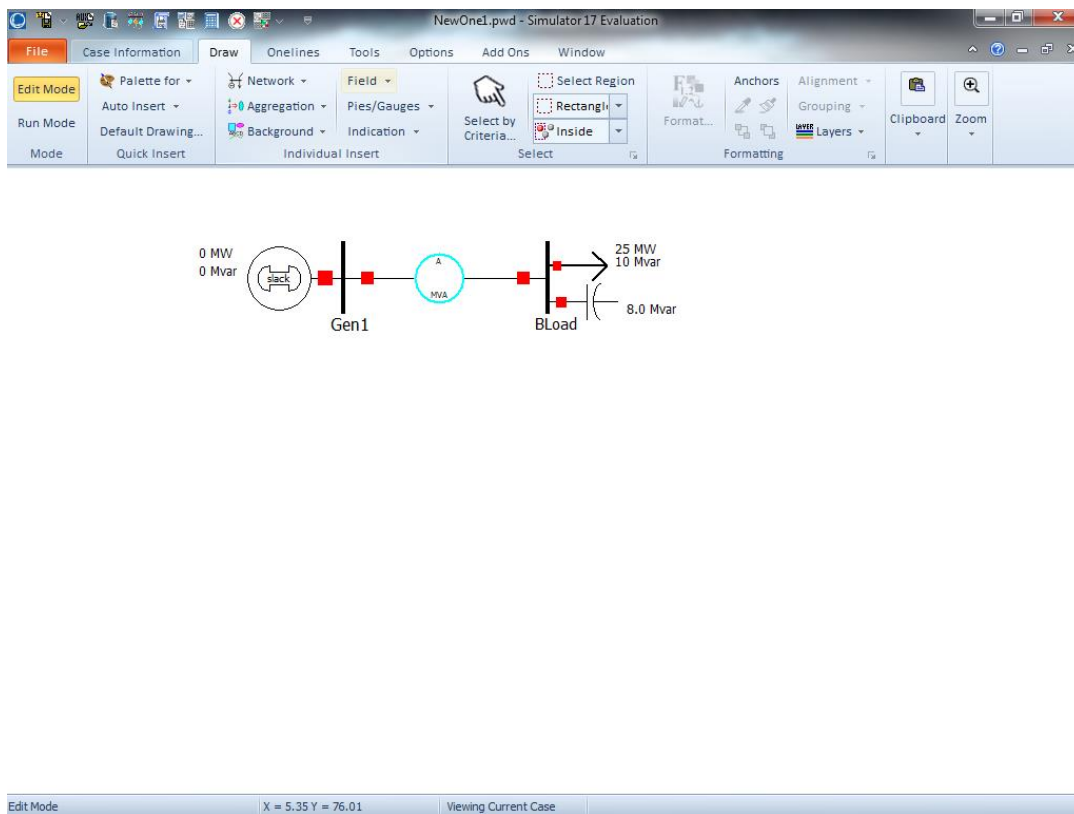
Υπάρχουν τρεις διαφορετικοί τύποι φορτίου, οπότε στην καρτέλα εισαγωγής δεδομένων θα πρέπει να προσδιορίσουμε το τύπο του φορτίου. Οι τύποι φορτίων που υπάρχουν είναι:

- Σταθερής ισχύος (P,Q σταθερά).
- Σταθερού ρεύματος (Σε δύο συνιστώσες ενεργού, άεργου ρεύματος).
- Σταθερής αντίστασης (Από ωμικό και επαγωγικό/χωρητικό χαρακτήρα).

Εικόνα 6.3.4-2: Καρτέλα εισαγωγής στοιχείων φορτίου.

6.3.5 Εισαγωγή στοιχείου εγκάρσιας αντιστάθμισης άεργου ισχύος

Σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιούνται εγκάρσιες αντισταθμίσεις είτε για να παράγουν άεργο ισχύ (πυκνωτές) είτε για να απορροφούν (επαγωγικές αντιδράσεις-πηνία). Συνήθως οι συσκευές αυτές αποτελούνται από συστοιχίες κλιμακούμενης σύνθετης αγωγιμότητας που συνδέονται στο σύστημα με διακριτά βήματα, και οι συσκευές θεωρούνται ενεργές αν έστω και ένα από τα μπλοκ αυτά είναι συνδεδεμένο στο σύστημα. Για να εισαγωγή στοιχείου αντιστάθμισης στο δίκτυο επιλέγουμε από το μενού Draw,Network,Switched Shunt και το εισάγουμε στο ζυγό που θέλουμε πατώντας αριστερό κλικ. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται το δίκτυο μετά την προσθήκη πυκνωτή στο ζυγό φορτίου.



Εικόνα 6.3.5-1: Το δίκτυο μετά τη προσθήκη ενός πυκνωτή.

Μετά την εισαγωγή του στοιχείου εγκάρσιας αντιστάθμισης άεργου ισχύος, εμφανίζεται η καρτέλα εισαγωγής δεδομένων που το αφορούν. Ο χρήστης πρέπει να εισάγει τα εξής δεδομένα:

- Τα στοιχεία τοπολογίας (όπου ανήκει η συσκευή).
- Τα στοιχεία οπτικής απεικόνισης.
- Πόση άεργο ισχύ παράγει ή καταναλώνει, και αν είναι διακριτή. Αν η άεργος ισχύς παράγεται ή καταναλώνεται με διακριτό βήμα, πρέπει να δηλώσουμε τη τιμή του βήματος.

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται η καρτέλα εισαγωγής δεδομένων του πυκνωτή.

Switched Shunt Options

Bus Number: 2 Find By Number

Bus Name: BLoad Find By Name

Shunt ID: 1 Find ...

Labels ... no labels

Area: Change 1 1

Zone: Change 1 1

Substation:

Status: ☐ Open ☒ Closed

Display Parameters Control Parameters Fault Parameters Custom Stability

Nominal Mvar: 8.0

Control Mode: ☒ Fixed ☐ Discrete ☐ Continuous ☐ Bus Shunt (Fixed) ☐ SVC

Control Regulation Settings:

- ☒ Voltage: High Value: 1.00000, Low Value: 0.99000
- ☐ Generator Mvar: Target Value: 1.00000
- ☐ Wind Mvar: Reg. Bus #: 2
- ☐ Custom Control: Var Regulation Sharing: 1.00

Switched Shunts Blocks:

Number of Steps	Mvars per Step
1	8.0

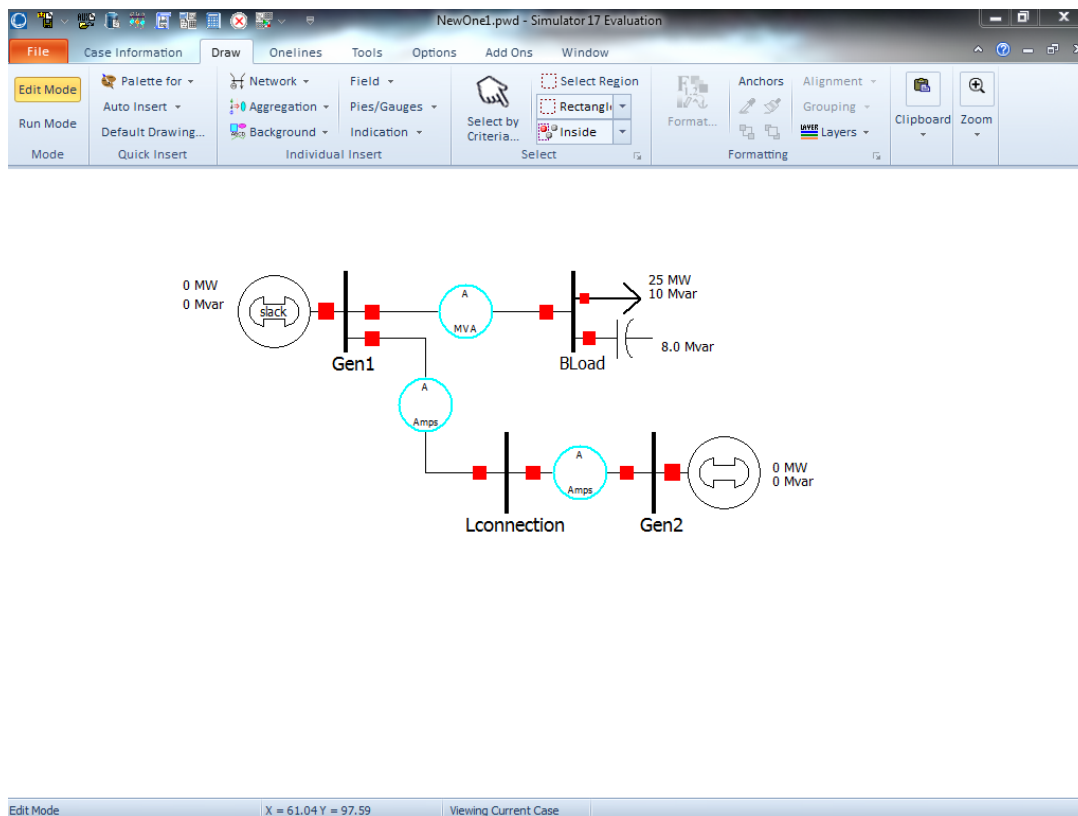
OK Save Cancel Help

Εικόνα 6.3.5-2: Καρτέλα εισαγωγής δεδομένων ενός πυκνωτή.

6.3.6 Σύνοψη edit mode

Έχουμε περιγράψει τον τρόπο εισαγωγής των στοιχείων του Power World Simulator που χρησιμοποιήσαμε στην παρούσα εργασία. Στο δίκτυο που υλοποιήσαμε ως παράδειγμα κατά τις περιγραφές προσθέσαμε ακόμα δύο ζυγούς, δύο AC γραμμές μεταφοράς και μία γεννήτρια.

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται το τελικό δίκτυο του παραδείγματος.

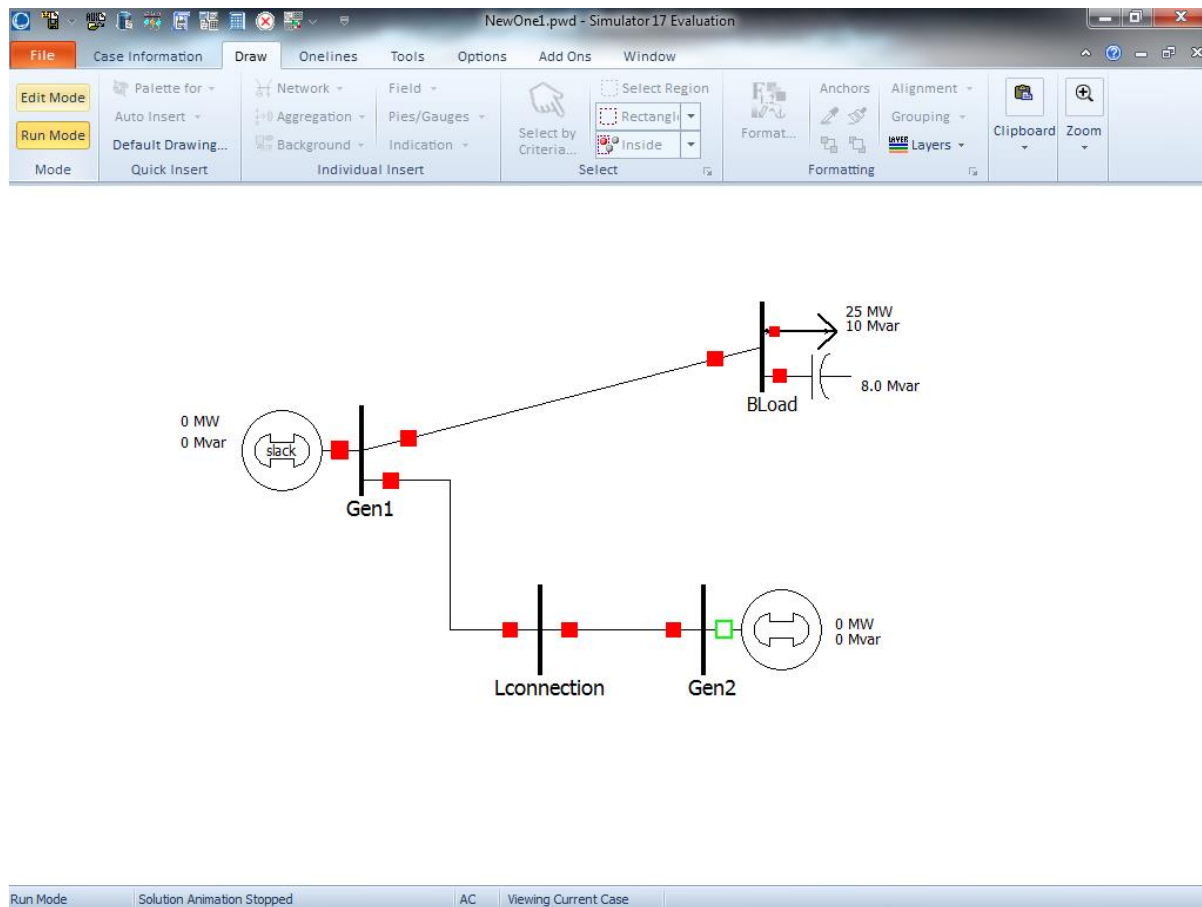


Εικόνα 6.3.6-1: Παράδειγμα δικτύου προσομοίωσης.

Μερικές σημαντικές ιδιότητες του προγράμματος που υπήρξαν ιδιαίτερα χρήσιμες κατά την προσομοίωση είναι οι εξής:

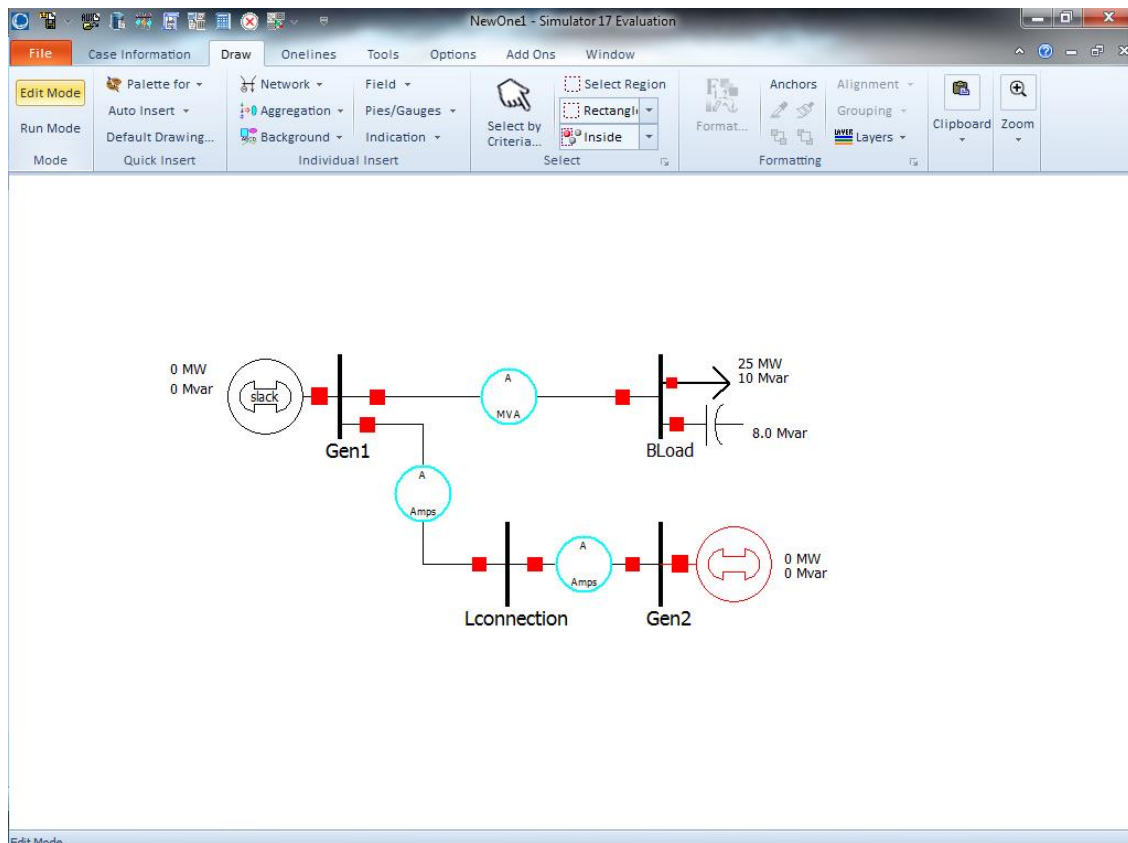
- Οι γεννήτριες, οι μετασχηματιστές, τα φορτία και τα εγκάρσια άεργα στοιχεία μπορούν να προσδεθούν στον εκάστοτε ζυγό στον οποίο συνδέονται. Αυτό μπορεί να γίνει σημειώνοντας την επιλογή **anchored** στην καρτέλα δεδομένων του κάθε στοιχείου.
- Σε οποιοδήποτε στοιχείο του συστήματος έχουμε την δυνατότητα να παρεμβάλλουμε διακόπτες. Ο ρόλος των διακοπών είναι να αποσυνδέουν το στοιχείο ή τη γραμμή μεταφοράς, μετά το από σφάλμα. Όταν οι διακόπτες έχουν κόκκινο χρώμα σημαίνει ότι είναι κλειστοί. Δηλαδή η γραμμή ή το στοιχείο είναι συνδεδεμένα. Όταν οι διακόπτες απεικονίζονται με πράσινο άδειο χρώμα σημαίνει ότι είναι ανοικτοί. Ακόμα, ο χρήστης μπορεί να αλλάζει την κατάσταση του διακόπτη καθώς το πρόγραμμα τρέχει, το οποίο είναι ιδιαίτερα χρήσιμο καθώς φαίνονται αμέσως τα αποτελέσματα στο σύστημα εισαγωγής ή απομόνωσης στοιχείων.

Στην παρακάτω εικόνα βλέπουμε την μετακίνηση των στοιχείων που είναι συνδεδεμένα στον ζυγό BLoad όταν αυτός μετακινηθεί. Επίσης οι διακόπτες που έχουν κόκκινο χρώμα είναι κλειστοί, ενώ ο διακόπτης με άδειο πράσινο είναι ανοικτός.



Εικόνα 6.3.6-2: Μεταφορά/μετατόπιση στο περιβάλλον εργασίας και άνοιγμα διακόπτη.

- Μια άλλη ενδιαφέρουσα ιδιότητα του προγράμματος είναι η δυνατότητα αλλαγής χρώματος των στοιχείων των δικτύου. Αυτό βοηθά το χρήστη να ξεχωρίζει το είδος των μονάδων π.χ. μια γεννήτρια που αναπαριστά μια ατμοστροβλική μονάδα από μια που αναπαριστά μια Μ.Ε.Κ. Για να αλλάξουμε χρώμα σε ένα στοιχείο στο περιβάλλον εργασίας του Power World, επιλέγουμε με δεξί κλικ το στοιχείο και ακολούθως την επιλογή **Format**.

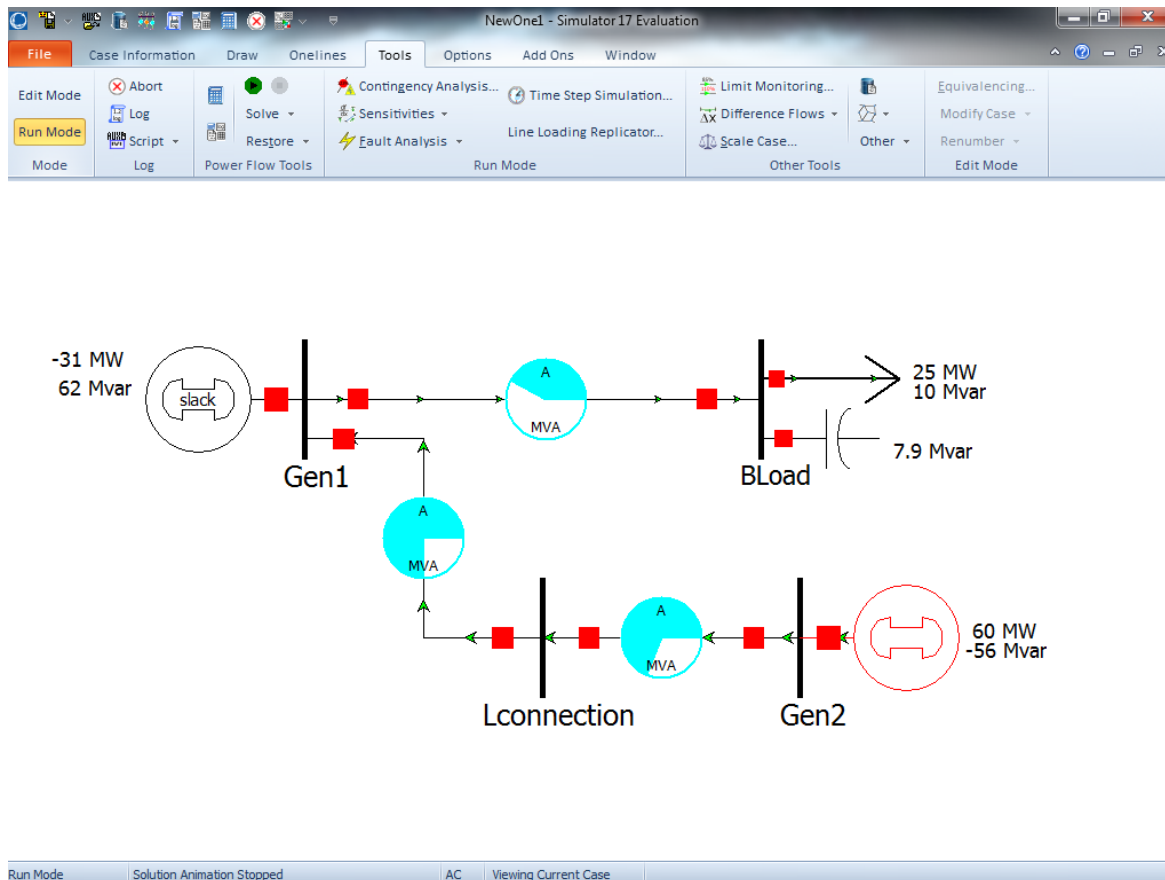


Εικόνα 6.3.6-3: Αλλαγή χρώματος γεννήτριας.

6.3.7 Επίλυση δικτύου στο Power World Simulator (Run Mode)

Αφού υλοποιήσουμε το μοντέλο προσομοίωσης του Σ.Η.Ε στο Power World , περνάμε από τη λειτουργία edit mode στη λειτουργία run mode, από το tab με όνομα mode αριστερά, και επιλέγουμε από το μενού tools,play. Αν υπάρχει κάποιο πρόβλημα στην προσομοίωση, το πρόγραμμα δεν θα τρέξει και θα εμφανιστεί ένα παράθυρο το οποίο ενημερώνει το χρήστη ότι το σύστημα δεν μπορεί να τροφοδοτήσει το φορτίο, γεγονός που το πρόγραμμα ονομάζει black out. Σε τέτοια περίπτωση θα πρέπει να ελεγχθεί ξανά ο σχεδιασμός του συστήματος και τα δεδομένα του κάθε στοιχείου. Όταν δεν υπάρχει σφάλμα στη σχεδίαση του συστήματος, το πρόγραμμα τρέχει κανονικά, και μέσω των βοηθητικών πεδίων καταγράφονται τα πεδία που έχουμε επιλέξει (τάσεις, ισχύς κλπ). Ανοίγοντας και κλείνοντας τους διάφορους διακόπτες, η αυξομειώνοντας τα φορτία ή τις ισχύς των γεννητριών, παρατηρούμε ότι το πρόγραμμα ενώ εξακολουθεί να τρέχει, τις εναλλαγές που συμβαίνουν στο σύστημα, τις υπερφορτίσεις γραμμών κλπ. Σε περίπτωση συνεχόμενης υπερφόρτισης μιας γραμμής μπορεί να έχουμε την απώλεια της. Στην περίπτωση απώλειας μιας γραμμής μεταφοράς ή μιας γεννήτριας , ή υπέρμετρης αύξησης του φορτίου υπάρχει το ενδεχόμενο να παρατηρηθεί διακοπή της λειτουργίας του συστήματος.

Στην παρακάτω εικόνα παρατηρούμε το παράδειγμα προσομοίωσης του δικτύου που υλοποιήσαμε. Τα βέλη μας δείχνουν τη ροή ισχύος στο σύστημα, τα pie chart δείχνουν το ποσοστό φόρτισης των γραμμών σε MVA, ενώ ο ζυγός Gen1 έχει δηλωθεί αυτόματα από το πρόγραμμα ως ζυγός ταλάντωσης (slack bus).

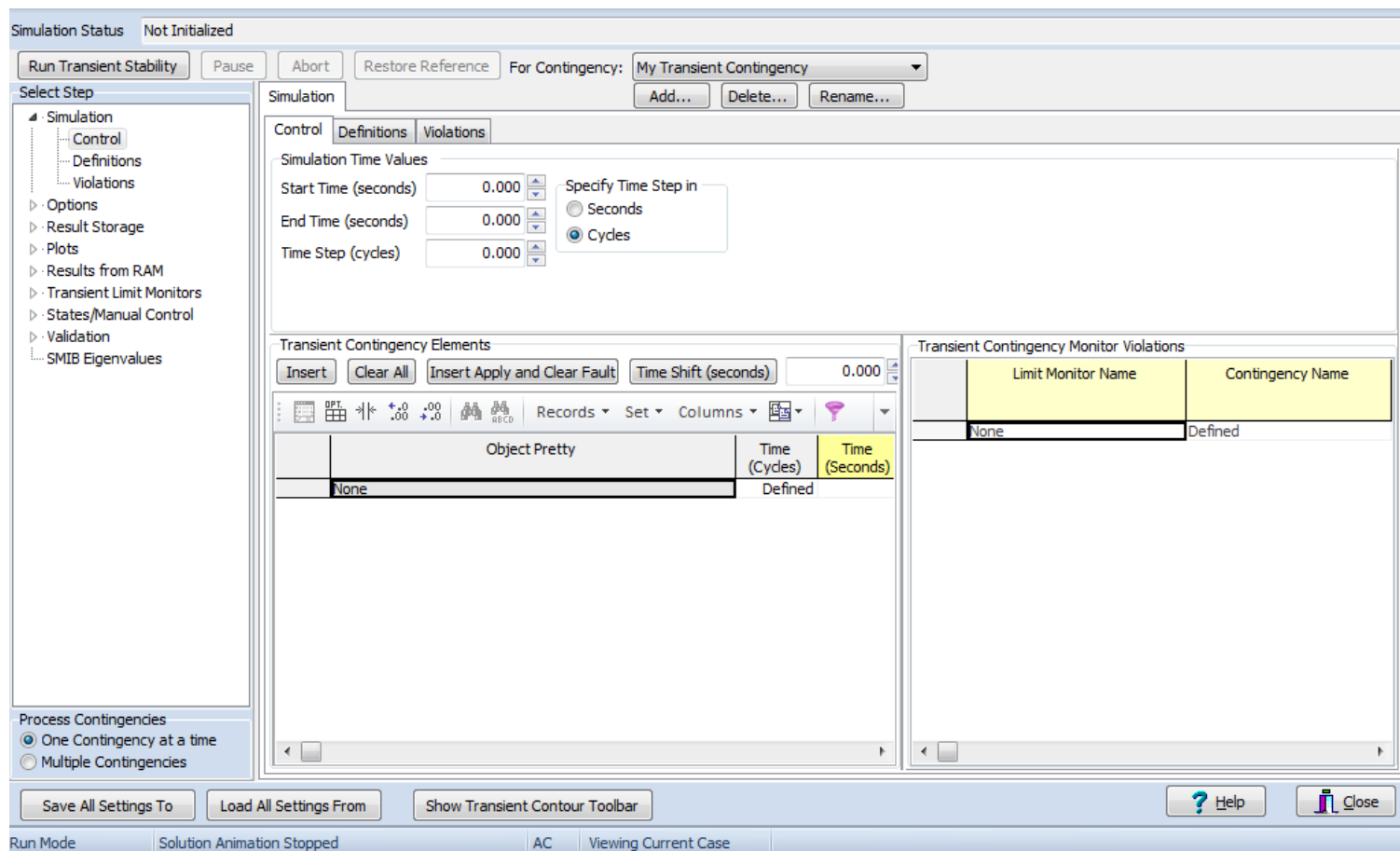


Εικόνα 6.3.7-1: Επίλυση ροής φορτίου.

6.4 Το εργαλείο Transient Stability

Το εργαλείο Transient Stability επιτρέπει την ανάλυση της δυναμικής συμπεριφοράς του συστήματος σε κάποιο σφάλμα που προκλήθηκε στο δίκτυο. Για το σκοπό αυτό το Power World Simulator υποστηρίζει πάνω από εκατό διαφορετικά δυναμικά μοντέλα (μηχανές, ρυθμιστές στροφών, ρυθμιστές τάσης και σταθεροποιητές). Για τα περισσότερα μοντέλα παρέχονται προεπιλεγμένες τιμές παραμέτρων από το πρόγραμμα για εύκολο πειραματισμό. Για να χρησιμοποιήσουμε το εργαλείο αυτό πρέπει πρώτα το πρόγραμμα να βρίσκεται σε

κατάσταση **Run Mode**. Ακολούθως επιλέγουμε τη καρτέλα **Add Ons** και μετά **Transient Stability**. Τότε εμφανίζεται η φόρμα ανάλυσης μεταβατικών φαινομένων των ενδεχόμενων διαταραχών που σχετίζονται με την ευστάθεια του συστήματος. Η φόρμα αυτή παρουσιάζεται στην πιο κάτω εικόνα.



Εικόνα 6.4-1: Φόρμα ανάλυσης μεταβατικών φαινομένων διαταραχών του συστήματος.

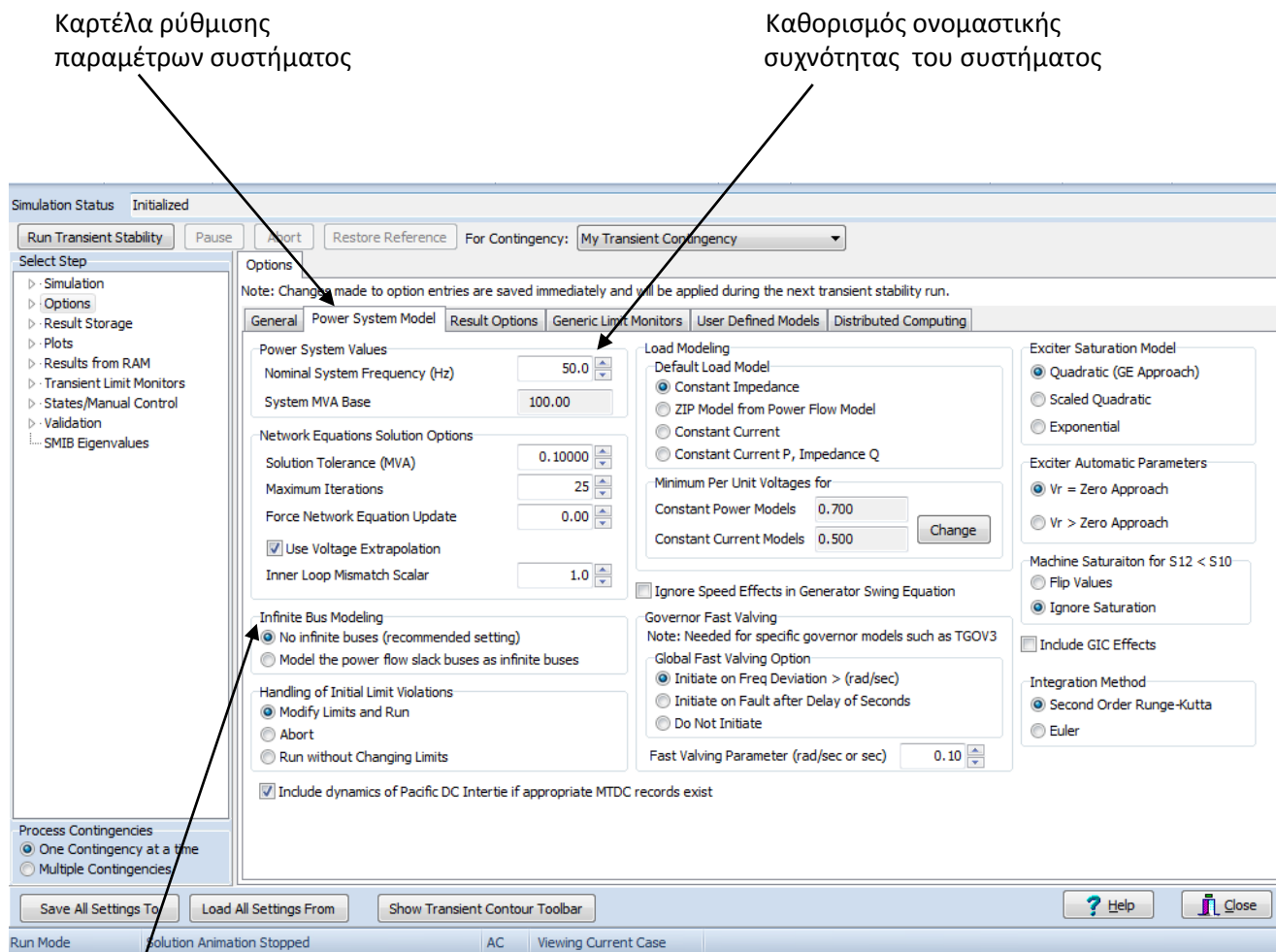
Στην στήλη **Select Step** που βρίσκεται στα αριστερά της πιο πάνω φόρμας υπάρχουν οι καρτέλες χειρισμού του εργαλείου για τη προσομοίωση διαταραχών και την εξαγωγή αποτελεσμάτων. Οι κυριότερες από αυτές είναι:

- Καρτέλα **Simulation**: Χρησιμοποιείται για το καθορισμό του χρόνου έναρξης και λήξης της προσομοίωσης, το χρονικό βήμα, το καθορισμό της διαταραχής και το τρέξιμο της προσομοίωσης.
- Καρτέλα **Options**: Χρησιμοποιείται για το καθορισμό διάφορων παραμέτρων που σχετίζονται με την ευστάθεια του συστήματος, όπως π.χ. η ονομαστική συχνότητα και η βασική ισχύς λειτουργίας (σε MVA).

- Καρτέλα Result Storage: Χρησιμοποιείται για τον καθορισμό μεγεθών αποθήκευσης (ενεργός/άεργος ισχύς, συχνότητα, τάση, ταχύτητα δρομέα γεννήτριας κ.α.) και του χώρου στον οποίο θα αποθηκευθούν.
- Καρτέλα Plots: Χρησιμοποιείται για την απεικόνιση των αποτελεσμάτων σε διαγράμματα.
- Καρτέλα Results from RAM: Χρησιμοποιείται για προβολή των πραγματικών τιμών των μεγεθών κατά τη προσομοίωση και την αποθήκευση τους σε αρχεία excel για μετέπειτα χρήση.

6.4.1 Infinite bus

Προτού αναλύσουμε τη λειτουργία του εργαλείου Transient stability κρίνεται σκόπιμο να αναφερθούμε στην έννοια του “άπειρου” ζυγού (infinite bus). Ένας infinite ζυγός θεωρείται ότι διατηρεί σταθερά τα μεγέθη της τάσης, της συχνότητας και της γωνίας στα ονομαστικά τους επίπεδα. Στα πραγματικά Σ.Η.Ε προφανώς δεν υπάρχει ένας τέτοιος ζυγός, αλλά χρησιμοποιείται στην ανάλυση ευστάθειας των συστημάτων. Η δήλωση ενός τέτοιου ζυγού στο περιβάλλον εργασίας του Power World γίνεται από τη καρτέλα Options που περιγράψαμε στην προηγούμενη ενότητα. Ουσιαστικά με την ενέργεια αυτή το πρόγραμμα θεωρεί το ζυγό ταλάντωσης ως infinite bus. Στην παρούσα εργασία δεν γίνεται χρήση ενός τέτοιου ζυγού καθώς προσπαθούμε να προσομοιώσουμε όσο το δυνατό τις πραγματικές καταστάσεις λειτουργίας του Σ.Η.Ε της Κύπρου. Στην πιο κάτω εικόνα παρουσιάζεται η καρτέλα Options του εργαλείου Transient Stability.



Καρτέλα ρύθμισης
παραμέτρων συστήματος

Καθορισμός ονομαστικής
συχνότητας του συστήματος

Μοντελοποίηση infinite bus

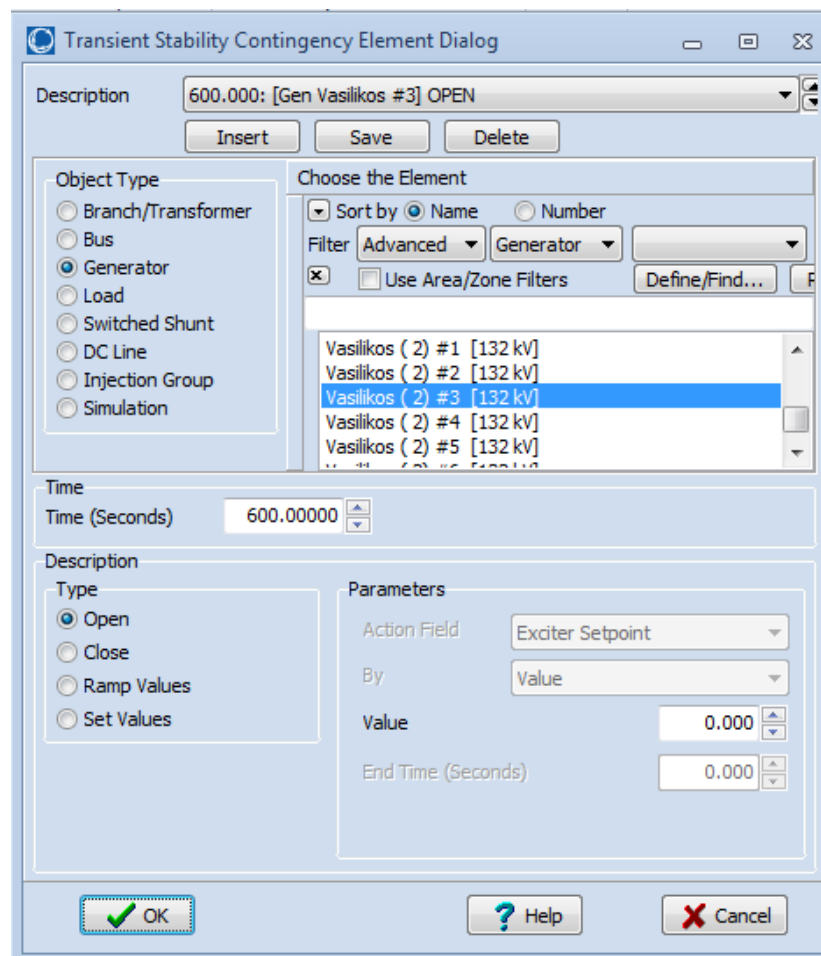
Εικόνα 6.4.1-1: Η καρτέλα “Options” του Transient Stability.

6.4.2 Καθορισμός συμβάντος διαταραχής

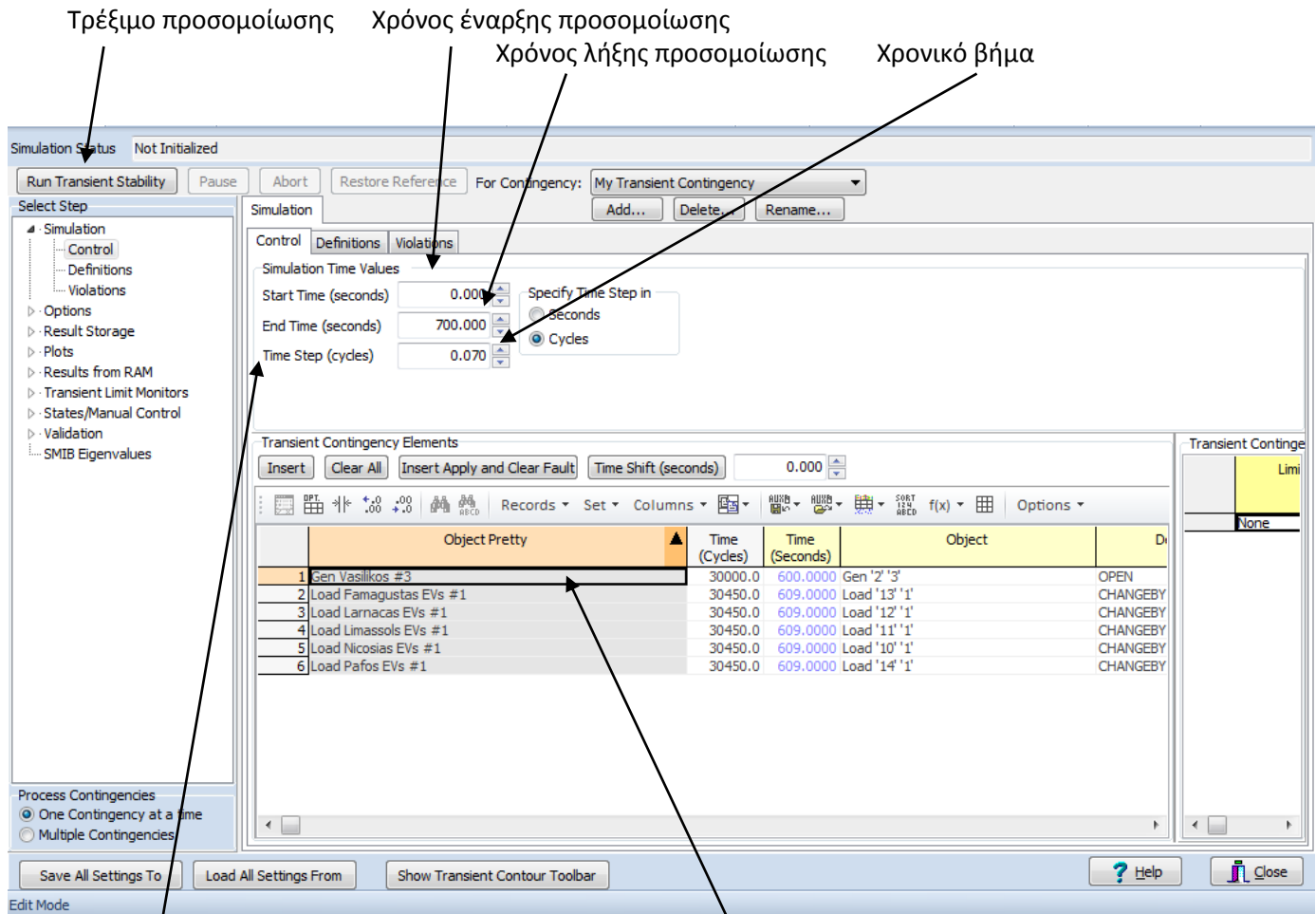
Για να δηλώσουμε ένα συμβάν διαταραχής στο σύστημα στην καρτέλα Simulation με αριστερό κλικ “πατάμε” το κουμπί **Insert**. Ακολούθως εμφανίζεται η καρτέλα εισαγωγής στοιχείου διαταραχής. Από την καρτέλα αυτή καθορίζουμε το είδος του στοιχείου το οποίο θα αφορά το συμβάν από τη στήλη Object Type. Τα κυριότερα στοιχεία ενός Σ.Η.Ε που σχετίζονται με τις διαταραχές ευστάθειας είναι τα εξής:

- Γραμμές Μεταφοράς και Μετασχηματιστές
- Σημεία σύνδεσης (Ζυγοί)
- Γεννήτριες
- Φορτία και Πυκνωτές.

Με τον καθορισμό του στοιχείου διαταραχής στη στήλη Choose the Element στα δεξιά, εμφανίζονται τα ονόματα των ζυγών οι οποίοι περιλαμβάνουν το συγκεκριμένο είδος στοιχείου. Έτσι ο χρήστης καλείται αν επιλέξει τον ζυγό ο οποίος τον ενδιαφέρει. Αν για παράδειγμα στην στήλη Object Type ο χρήστης επιλέξει το στοιχείο Load τότε θα πρέπει να καθορίσει στο πρόγραμμα σε πιο ζυγό φορτίου αναφέρεται για να επιλεγθεί έτσι το συγκεκριμένο φορτίο. Στην καρτέλα αυτή δηλώνεται επίσης και η χρονική στιγμή της διαταραχής (πχ η χρονική στιγμή βλάβης σε μια γεννήτρια) καθώς ο τύπος της διαταραχής από τη στήλη Description. Στην πιο κάτω εικόνας παρουσιάζεται ο τρόπος δήλωσης συμβάντος διαταραχής.



Εικόνα 6.4.2-1 Καρτέλα εισαγωγής στοιχείου διαταραχής.



Εικόνα 6.4.2-2 Η φόρμα ανάλυσης μεταβατικών φαινομένων διαταραχών μετά τη δήλωση συμβάντων διαταραχής στο σύστημα.

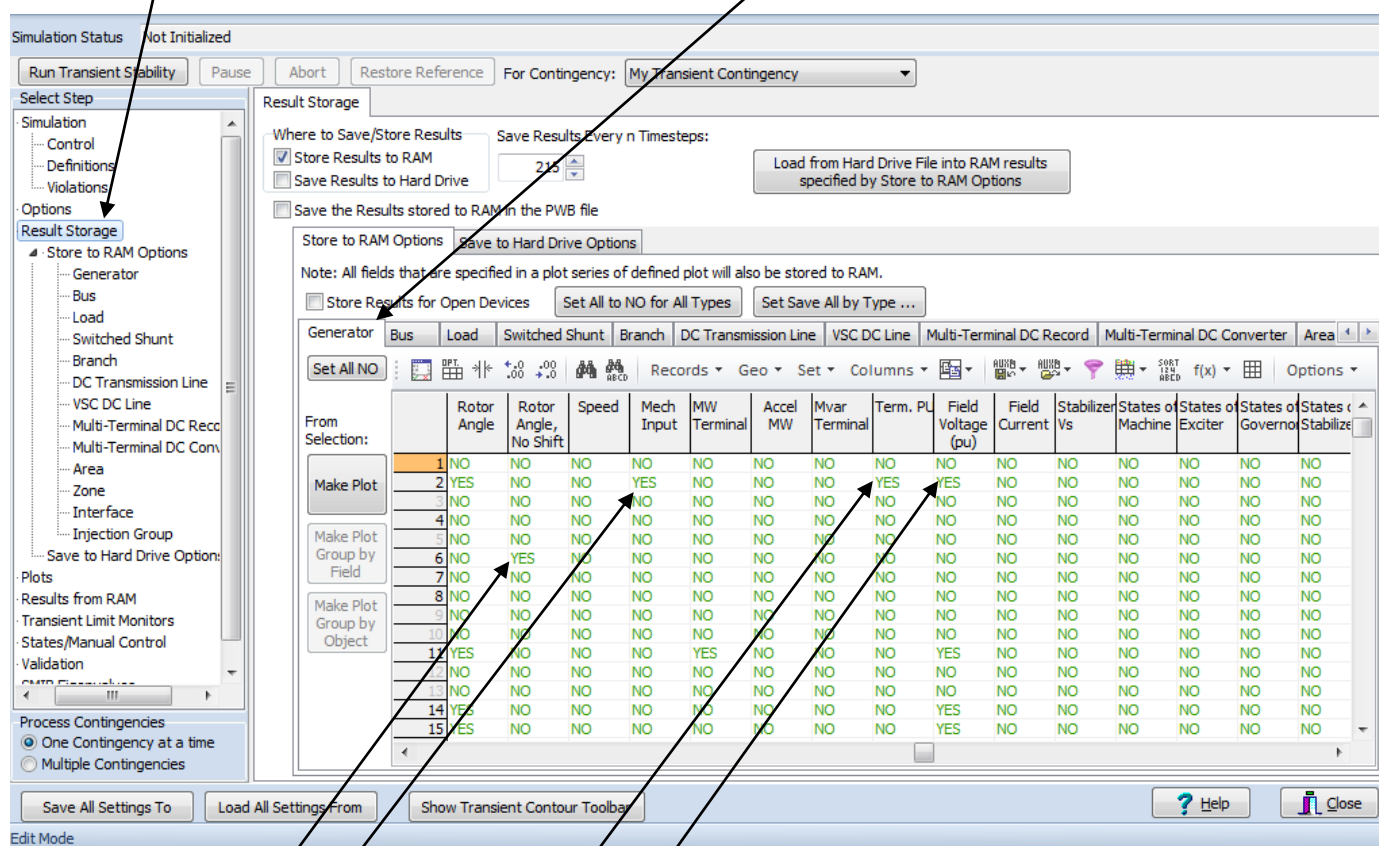
Όπως φαίνεται από την πιο πάνω εικόνα από τη καρτέλα Simulation μπορούμε να τρέξουμε το εργαλείο του προγράμματος από το κουμπί Run Transient Stability. Επίσης αν θέλουμε να επαναφέρουμε την καρτέλα δήλωσης ενός στοιχείου, μπορούμε να το κάνουμε με διπλό αριστερό κλικ στο στοιχείο από τη λίστα “Transient Contingency Elements”.

6.4.3 Προσδιορισμός αποτελεσμάτων για προβολή με το πέρας της προσομοίωσης

Στις περιπτώσεις όπου γίνεται αναπαράσταση της λειτουργίας ενός μεγάλου Σ.Η.Ε. το Transient stability μπορεί να “παράγει” τεράστιες ποσότητες δεδομένων από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Το Power World Simulator παρέχει εύκολους τρόπους για την επιλογή των δεδομένων που ενδιαφέρουν το χρήστη, ώστε να μπορεί να δει αυτά τα αποτελέσματα μετά το “τρέξιμο” της προσομοίωσης και κατόπιν να μπορεί να τα αποθηκεύσει για μετέπειτα χρήση. Η επιλογή των δεδομένων γίνεται με τη χρήση της καρτέλας Result Storage η οποία παρουσιάζεται στην πιο κάτω εικόνα.

Καρτέλα “Result Storage”

Καρτέλα δήλωσης δεδομένων γεννήτριας για αποθήκευση

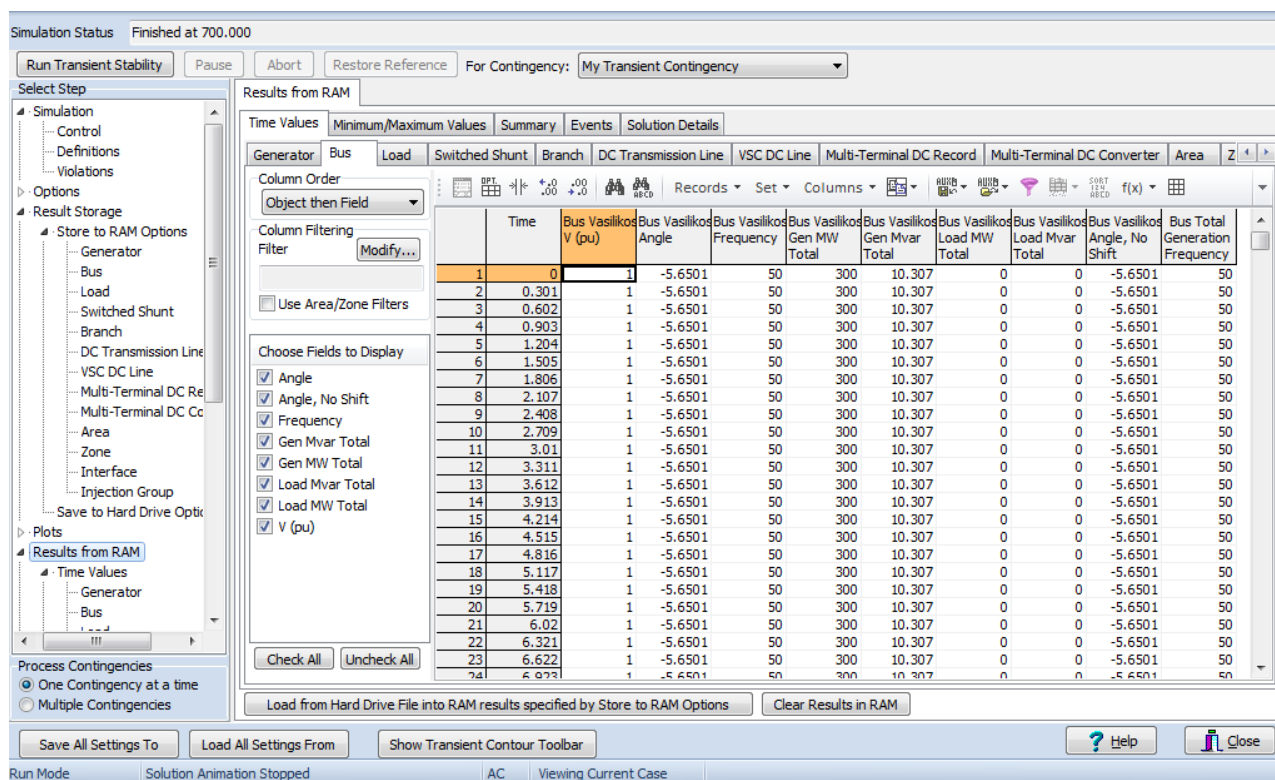


Με διπλό κλικ στα πεδία μπορούμε να δηλώσουμε YES στα μεγέθη που μας ενδιαφέρουν για αποθήκευση.

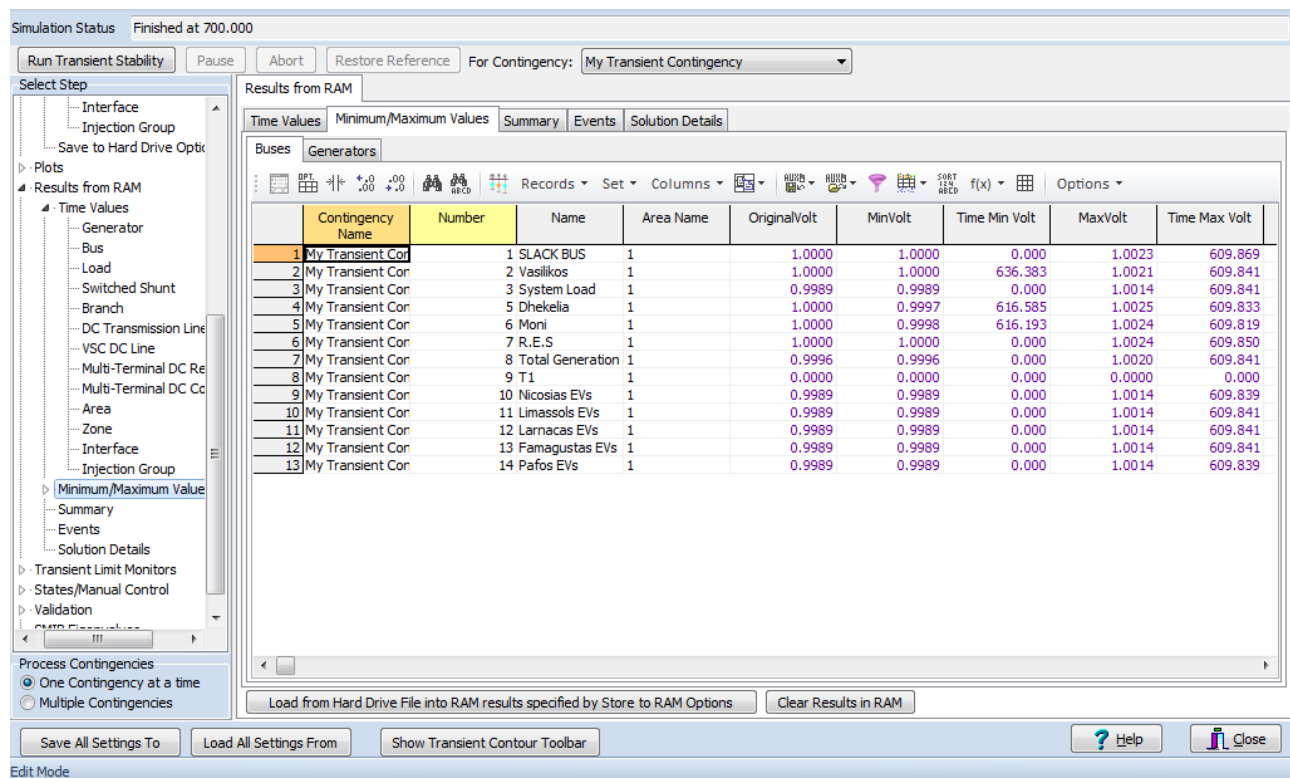
Εικόνα 6.4.3-1 : Η καρτέλα αποθήκευσης αποτελεσμάτων “Results Storage”.

6.4.4 Αποτελέσματα προσομοίωσης

Με το πέρας της προσομοίωσης στην καρτέλα “Results from RAM” προβάλλονται η μέγιστη και ελάχιστη τιμή των επιλεγμένων μεγεθών κατά τη προσομοίωση, καθώς και οι τιμές τους αναλυτικά σε χρονοσειρές ανάλογα με το χρονικό βήμα. Οι τιμές αυτές μπορούν να μεταφερθούν σε άλλα προγράμματα όπως το excel με δεξί κλικ στο πεδίο και ακολούθως **Copy, Paste, Send**. Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μιας προσομοίωσης.



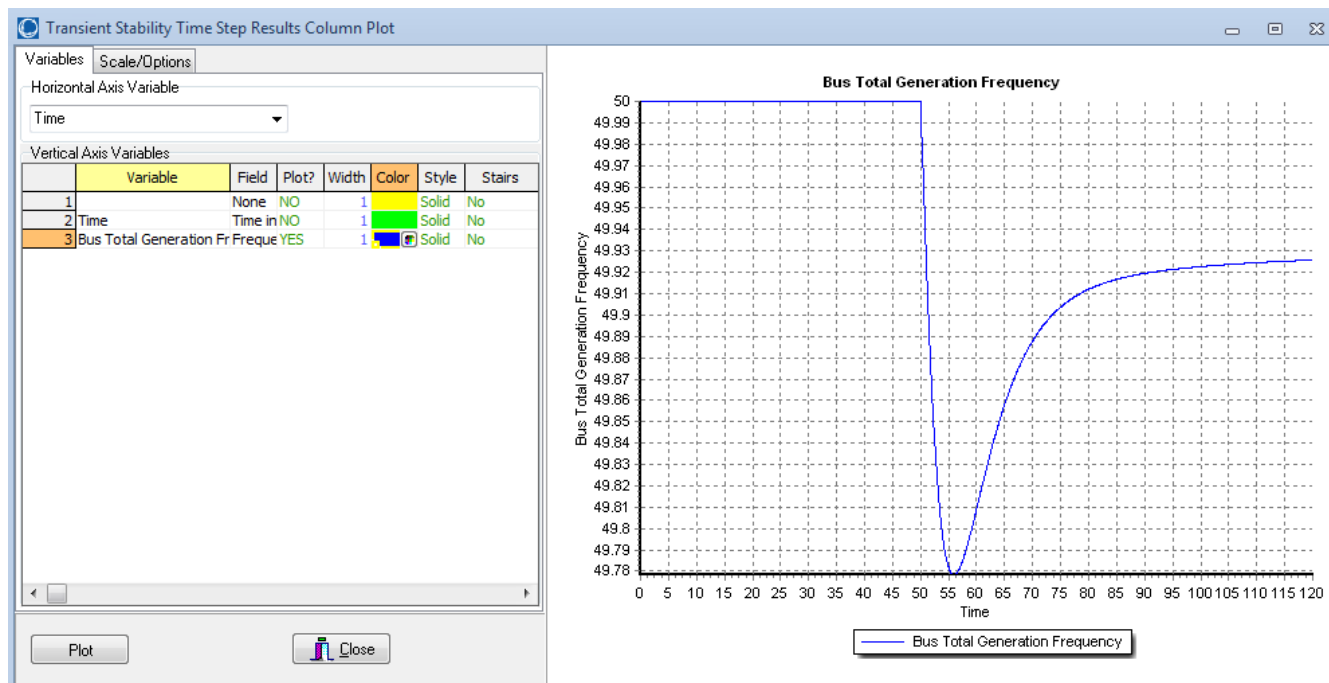
Εικόνα 6.4.4-1: Διάφορα αποτελέσματα για μεγέθη που σχετίζονται με ένα ζυγό σε χρονοσειρές.



Εικόνα 6.4.4-2: Μέγιστη και ελάχιστη τιμή τάσης (σε αμ) των ζυγών του συστήματος.

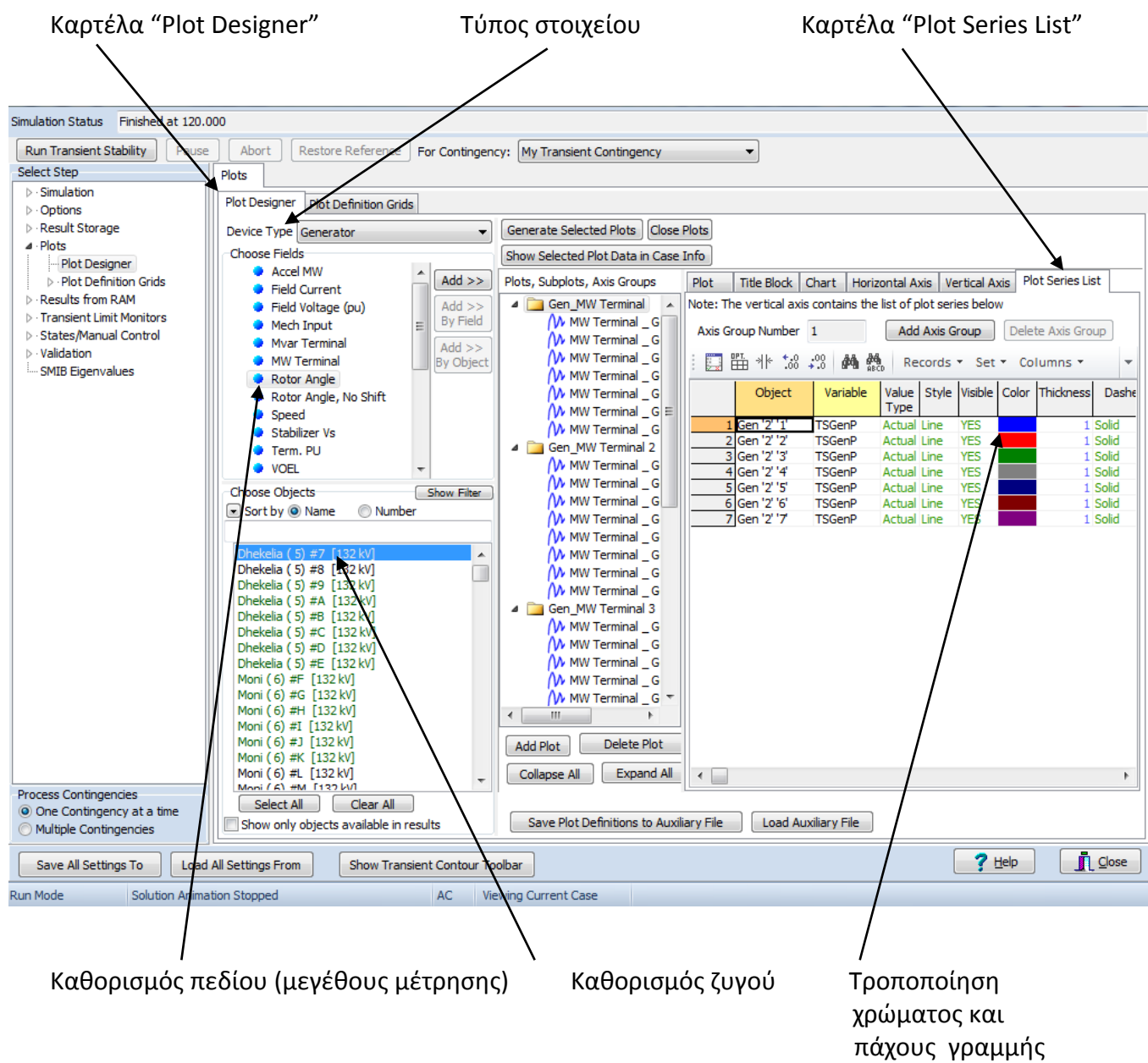
6.4.5 Απεικόνιση αποτελεσμάτων σε μορφή γραφημάτων

Το Transient Stability δίνει στο χρήστη της δυνατότητα απεικόνισης των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης σε μορφή γραφημάτων με εύκολο και γρήγορο τρόπο. Η απεικόνιση των αποτελεσμάτων σε γραφήματα γίνεται με δεξί κλικ στην επιθυμητή στήλη από την καρτέλα “Results from RAM” **Set/Toggle/Columns, Select Columns** και ακολούθως δεξί κλικ και **Plot Columns**. Στην συνέχεια εμφανίζεται ένα παράθυρο με το γράφημα του προεπιλεγμένου μεγέθους σε συνάρτηση με το χρόνο προσομοίωσης. Με δεξί κλικ στο παράθυρο μπορούμε να αποθηκεύσουμε ή να εκτυπώσουμε το γράφημα. Στην εικόνα 6.4.5-1 παρουσιάζεται ένα τυπικό γράφημα της απόκρισης της συχνότητας ενός Σ.Η.Ε σε μια διαταραχή.



Εικόνα 6.4.5-1: Γράφημα με την απόκριση συχνότητας ενός Σ.Η.Ε σε μια διαταραχή.

Ένας άλλος τρόπος απεικόνισης των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης σε μορφή γραφημάτων, είναι ο καθορισμός τους εξ' αρχής από τη καρτέλα "Plots" και η προβολή τους αυτόματα με το πέρας του χρόνου προσομοίωσης. Στην καρτέλα αυτή στη στήλη Device Type επιλέγουμε το είδος του στοιχείου και το μέγεθος το οποίο μας ενδιαφέρει. Με την δήλωση του στοιχείου στη στήλη Choose Objects, εμφανίζονται τα ονόματα των ζυγών οι οποίοι περιλαμβάνουν το συγκεκριμένο είδος στοιχείου. Έτσι ο χρήστης καλείται αν επιλέξει τον ζυγό ο οποίος τον ενδιαφέρει. Αν για παράδειγμα στην στήλη Device Type ο χρήστης επιλέξει το στοιχείο Generator τότε θα πρέπει να καθορίσει στο πρόγραμμα σε πιο ζυγό αναφέρεται για να επιλεγθεί έτσι η συγκεκριμένη γεννήτρια. Αφού κάνουμε την πιο πάνω διαδικασία τότε "πατάμε" το κουμπί **Add >>** στα δεξιά για εισαγωγή του γραφήματος στη λίστα γραφημάτων. Στην καρτέλα "Plot Series List" που βρίσκεται στο τέρμα του παραθύρου δεξιά μπορούμε να καθορίσουμε το χρώμα και το πάχος της καμπύλης του γραφήματος. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται ο τρόπος ρύθμισης της καρτέλας "Plots" για την εξαγωγή γραφημάτων.

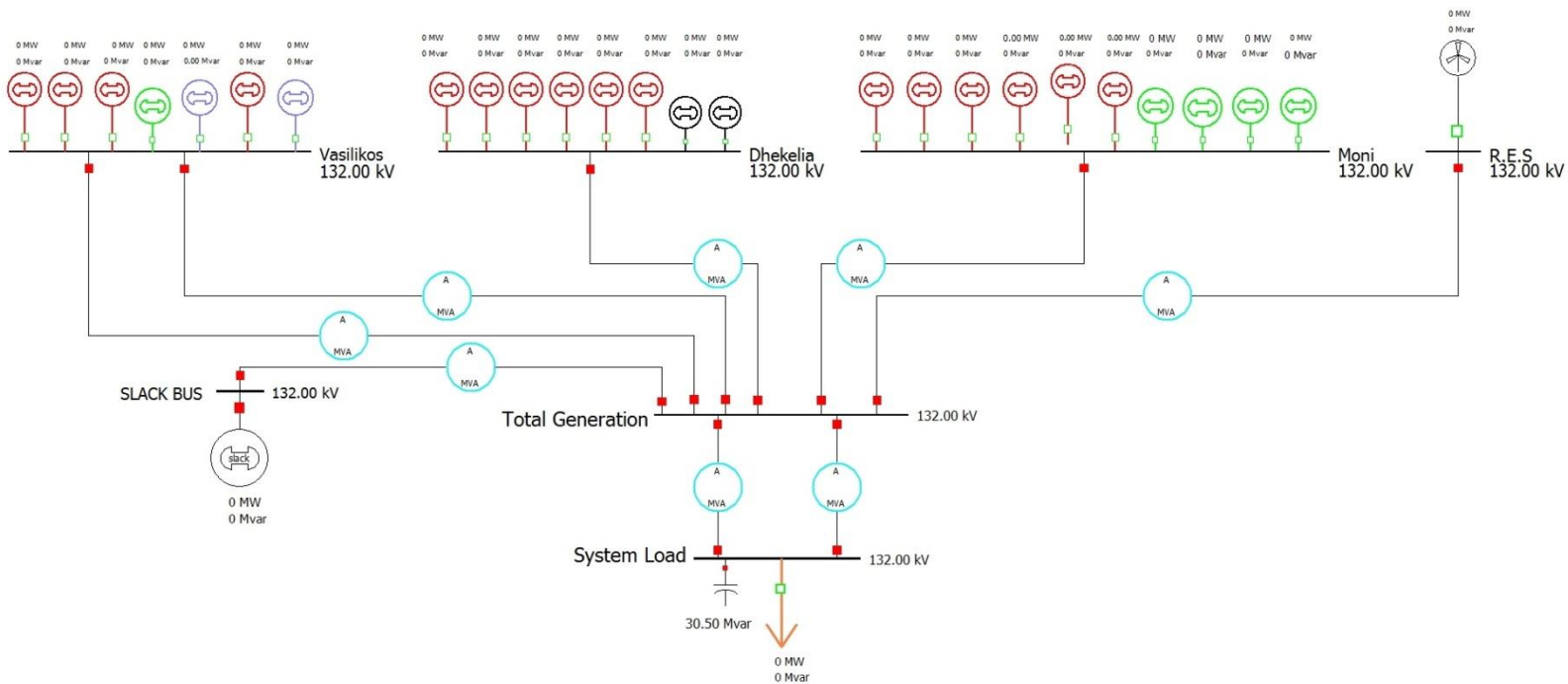


Εικόνα 6.4.5-2: Δημιουργία γραφημάτων μέσω της καρτέλας "Plots".

7. Μοντέλο Προσομοίωσης

7.1 Περιγραφή μοντέλου

Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο προκειμένου να διερευνηθεί η χρήση της τεχνολογίας V2G στη ηλεκτρικό δίκτυο της Α.Η.Κ, υλοποιήσαμε στο Power World Simulator ένα αντιπροσωπευτικό μοντέλο των μονάδων παραγωγής και του φορτίου του συγκεκριμένου Σ.Η.Ε το οποίο απεικονίζεται πιο κάτω:



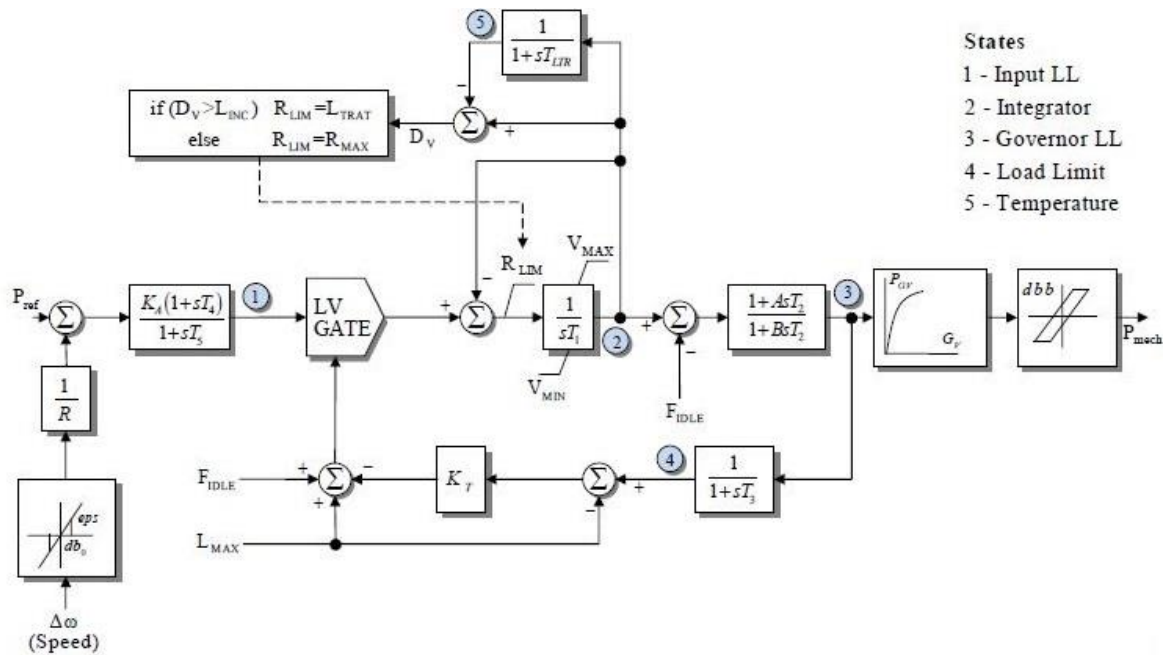
Εικόνα 7.1-1: Αντιπροσωπευτικό μοντέλο παραγωγής-ζήτησης Σ.Η.Ε Κύπρου. Με κόκκινο χρώμα οι ατμοστρόβιλοι, με πράσινο οι αεριοστρόβιλοι, με μωβ οι αεριοστρόβιλοι του συνδυσασμένου κύκλου(στη μέση τους ο ατμοστρόβιλος), με σκούρο μαύρο οι Μ.Ε.Κ και με ελαφρύ μαύρο η παραγωγή ενέργειας από αιολικά πάρκα.

Το μοντέλο αποτελείται από συνολικά επτά ζυγούς. Οι τρεις ζυγοί αντιπροσωπεύουν τους ηλεκτροπαραγωγούς σταθμούς της Α.Η.Κ και ο καθένας φέρει τις μονάδες παραγωγής του κάθε σταθμού. Για τα αιολικά πάρκα της Κύπρου θεωρήσαμε ένα ζυγό με μια ανεμογεννήτρια η οποία αντιπροσωπεύει την συνολική παραγωγή των αιολικών πάρκων του νησιού. Η βιομάζα και η παραγωγή από φωτοβολταϊκά πάρκα δεν λήφθηκαν υπόψη στη παρούσα μελέτη για λόγους απλότητας. Η συνολική παραγωγή ισχύος από κάθε ηλεκτροπαραγωγό σταθμό μεταφέρεται μέσω γραμμής μεταφοράς με ονομαστική ισχύ

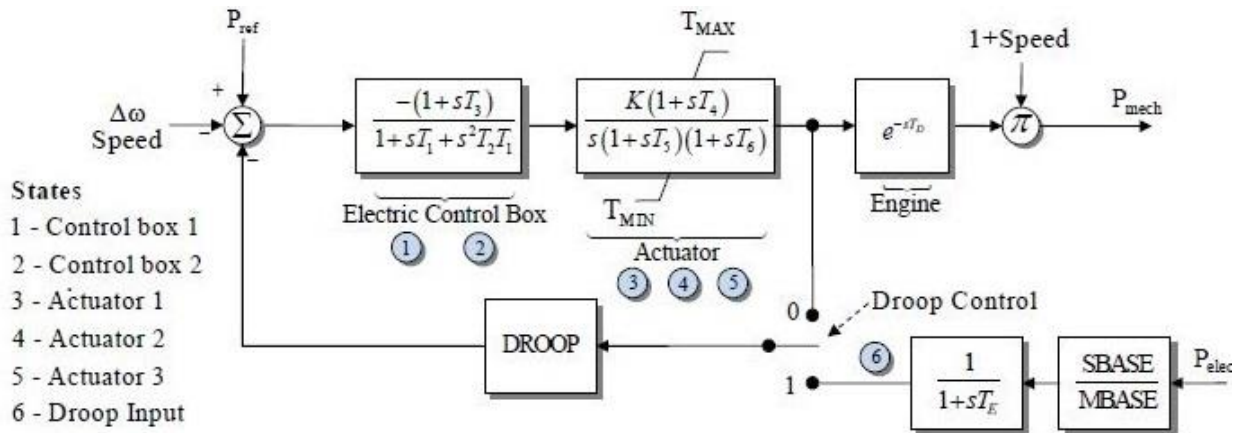
μεταφοράς 600 MVA στο ζυγό Total Generation και αθροίζεται στη συνολική παραγωγή του νησιού. Ακολούθως μεταφέρεται μέσω διπλής γραμμής μεταφοράς όμοιας και στα δύο σκέλη στο ζυγό System Load. Οι δύο παράλληλες γραμμές έχουν ονομαστική ισχύ μεταφοράς 1500 MVA. Ο ζυγός System Load περιλαμβάνει το συνολικό φορτίο του Σ.Η.Ε και ένα πυκνωτή ονομαστικής άεργου 30.5 Mvar, ο οποίος αντιπροσωπεύει το σύνολο των εγκατεστημένων εγκάρσιων πυκνωτών στους υποσταθμούς της Α.Η.Κ. Ο πυκνωτής χρησιμοποιείται ως στοιχείο αντιστάθμισης, για να ρυθμίζει την άεργο ισχύ στο ζυγός System Load ώστε η τάση να διατηρείται όσο πιο κοντά στα 132 KV. Το φορτίο αντιπροσωπεύει τόσο το φορτίο όσο και τις απώλειες των γραμμών μεταφοράς και των μετασχηματιστών του ηλεκτρικού δικτύου. Για την επίλυση της ροής φορτίου στο Power World Simulator είναι αναγκαίος ένας ζυγός slack(ταλάντωσης) τον οποίο συνδέσαμε στο ζυγό Total Generation μέσω γραμμής μεταφοράς η οποία έχει αμελητέα ωμική αντίσταση όπως και οι υπόλοιπες γραμμές μεταφοράς του μοντέλου. Στη παρούσα μελέτη δεν μελετάται η ευστάθεια τάσης του συστήματος, έτσι για τους ζυγούς θεωρήσαμε μια τυπική ονομαστική τάση. Συγκεκριμένα για την ονομαστική τάση των ζυγών θεωρήθηκε η μέση τάση του δικτύου της Α.Η.Κ δηλαδή 132 KV. Για τις γεννήτριες των σταθμών παραγωγής χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο μηχανής GENROU, το οποίο παρέχει μια πολύ καλή προσέγγιση της συμπεριφοράς των σύγχρονων γεννητριών. Αντιπροσωπεύει ένα στερεό ρότορα με τρεις περιελίξεις. Εφόσον η ευστάθεια τάσης δεν μας απασχολεί στην παρούσα μελέτη, για τους ρυθμιστές τάσης των γεννητριών χρησιμοποιήσαμε απλά ένα τυπικό μοντέλο για να είναι πιο ρεαλιστικές οι προσομοιώσεις. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήσαμε το μοντέλο exciter IEEE1 της IEEE. Όσον αφορά τους ρυθμιστές στροφών των ατμοστροβίλων και των Μ.Ε.Κ επιλέξαμε το μοντέλο governor TGOV1 και DEGOV1 αντίστοιχα. Το πρώτο αφορά τη προσομοίωση ενός απλού ρυθμιστή στροφών ατμοστροβίλου και το δεύτερο σχεδιάστηκε για τη προσομοίωση του ρυθμιστή στροφών μιας Μ.Ε.Κ. Αντίστοιχα για τους αεριοστροβίλους χρησιμοποιήσαμε το μοντέλο GAST_GE το οποίο προσομοιώνει τη λειτουργία του ρυθμιστή στροφών ενός αεριοστροβίλου. Στη παρούσα μελέτη δεν κρίνεται αναγκαίο να αναφερθούμε στα χαρακτηριστικά και τον τρόπο λειτουργίας των προαναφερθέντων μοντέλων αλλά μας ενδιαφέρουν τα αποτελέσματα από τη χρήση τους για στις προσομοιώσεις. Για την ανεμογεννήτρια δεν ήταν αναγκαίο να θέσουμε κάποιο μοντέλο μηχανής ή governor επειδή η παραγωγή των αιολικών πάρκων είναι ανεξάρτητη από τις συνθήκες του υπόλοιπου Σ.Η.Ε. Επίσης σε περίπτωση διαταραχής στο ηλεκτρικό δίκτυο οι ανεμογεννήτριες δεν μεταβάλλουν την αρχική παραγωγή τους.

Στις πιο κάτω εικόνες παραθέτουμε τα block diagrams του μοντέλου μηχανής, των ρυθμιστών στροφών και του ρυθμιστή τάσης των γεννητριών.





Εικόνα 7.1-4: Μοντέλο ρυθμιστή στροφών GAST_GE.



Εικόνα 7.1-5: Μοντέλο ρυθμιστή στροφών DEGOV1.

A/A	Ημερομηνία Βλάβης	Ώρα Βλάβης	Απολεσθείσα Μονάδα	Φόρτιση Μονάδας (MW)	Πτώση Συχνότητας (Hz)
1	14-05-14	16:18	DHEK-ST #5	32	49.24
2	12-06-14	22:28	DHEK-ST #6	30	49.60

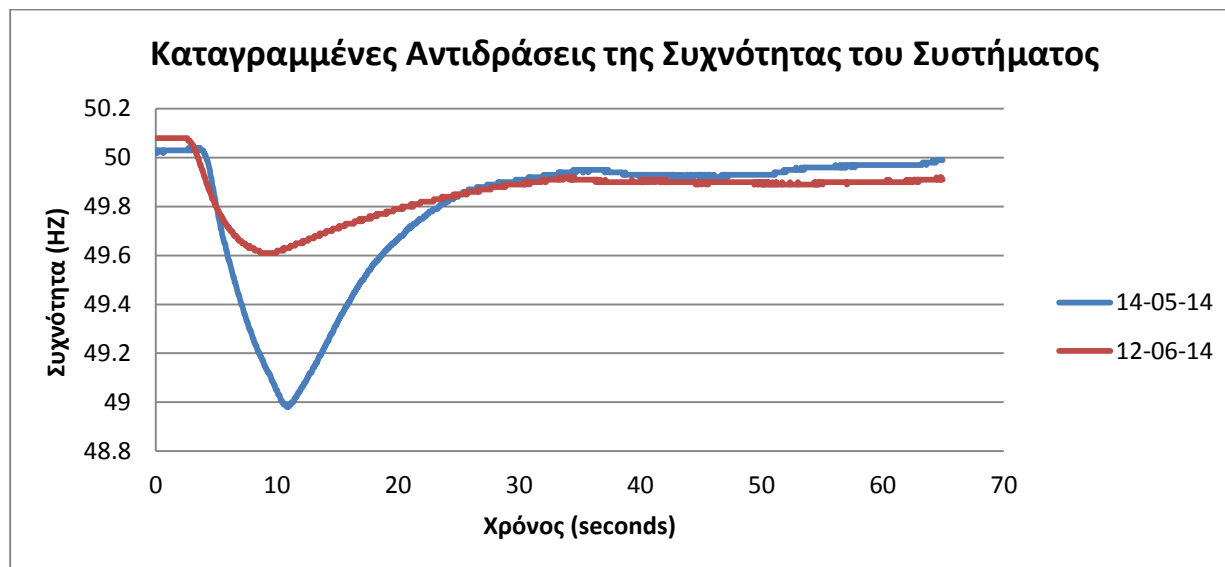
Πίνακας 7.2-1: Συμβάντα διαταραχής συχνότητας στο δίκτυο της Α.Η.Κ (Πηγή: Διαχειριστής Συστήματος Μεταφοράς Κύπρου)

Στον πίνακα 7.2-2 φαίνεται το φορτίο των μονάδων που λειτουργούσαν την στιγμή της διαταραχής. Με πορτοκαλί φόντο η απολεσθείσα μονάδα.

Ηλεκτροπαραγωγός σταθμός	Μονάδα Παραγωγής	Φορτίο Μονάδας (MW)	
		14-05-14	12-06-14
Βασιλικού	Ατμοστροβιλική- TG1	90	120
	Ατμοστροβιλική- TG2	-	116
	Ατμοστροβιλική- TG3	100	-
	Αεριοστροβιλική-GT1	-	-
	Εγκ. Συνδ. Κύκλου - Αεριοστροβιλική-CCPP(GT2)	-	69
	Εγκ. Συνδ. Κύκλου - Ατμοστροβιλική-CCPP(TG1)	-	36
Δεκέλειας	Ατμοστροβιλική- TG3	38	-
	Ατμοστροβιλική- TG4	37	30
	Ατμοστροβιλική- TG5	32	-
	Ατμοστροβιλική- TG6	34	30
Μονής	Ατμοστροβιλική -TG1	17	12
	Ατμοστροβιλική- TG2	17	11
	Ατμοστροβιλική -TG3	17	11
	Ατμοστροβιλική- TG4	17	17
	Ατμοστροβιλική -TG5	17	17
Αιολική Παραγωγή	-	39	37
Συνολικό φορτίο συστήματος		455	506

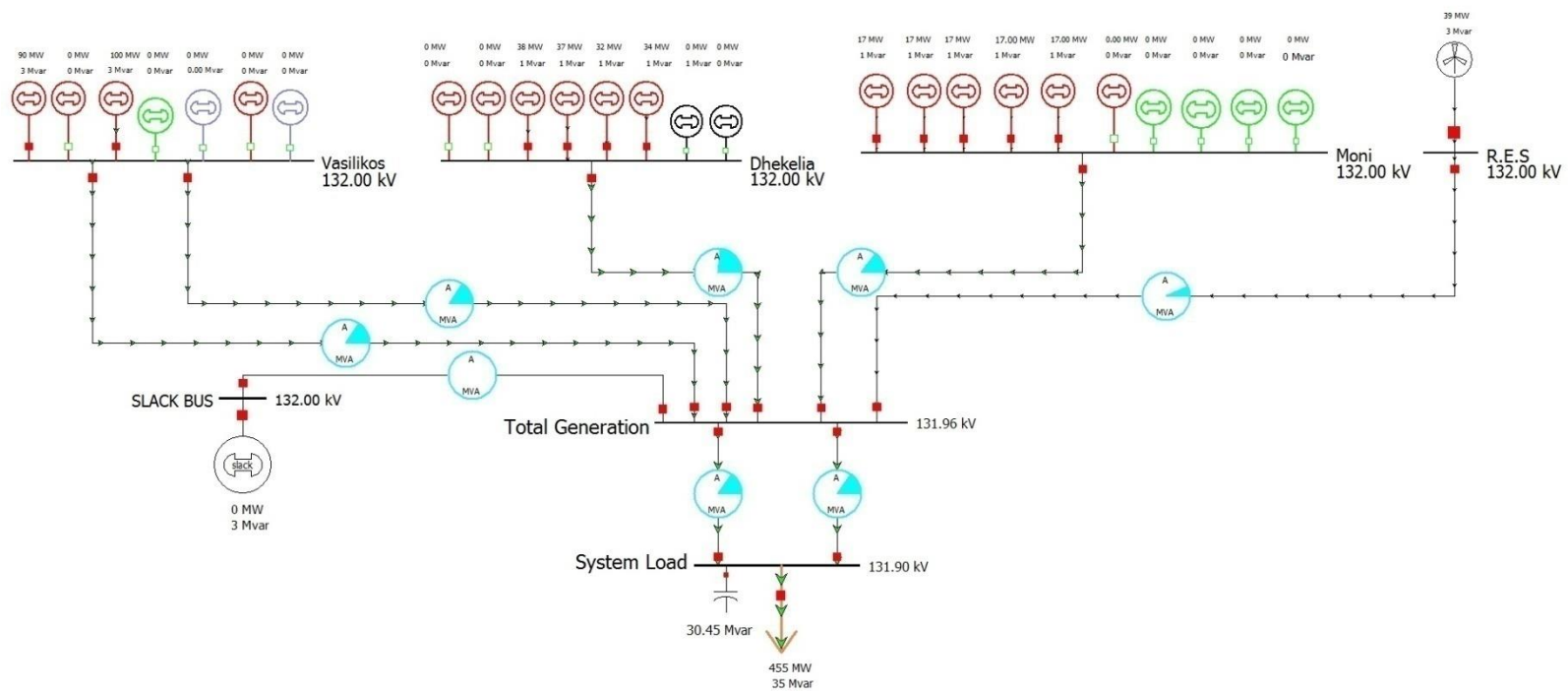
Πίνακας 7.2-2: Σύνθεση και φορτίο μονάδων την ώρα του συμβάντος. Με πορτοκαλί φόντο η απολεσθείσα μονάδα.

Στο παρακάτω γράφημα φαίνονται οι καταγραφόμενες αντιδράσεις της συχνότητας του συστήματος και για τα δύο συμβάντα διαταραχών.

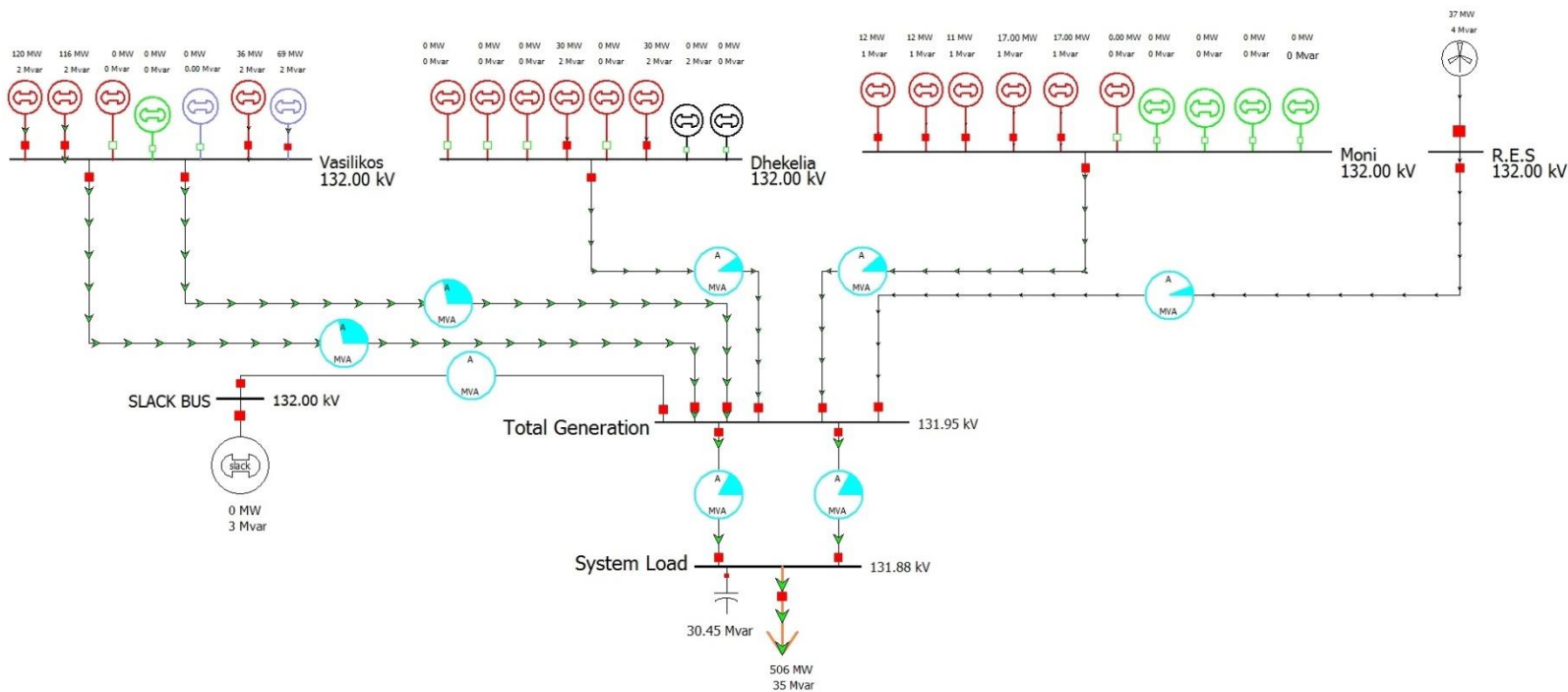


Γράφημα 7.2-1: Καταγραφόμενες αντιδράσεις της συχνότητας του συστήματος μετά από βλάβη μονάδων στις 14-05-14 και 12-06-14 (Πηγή: Διαχειριστής Συστήματος Μεταφοράς Κύπρου)

Για να προσομοιώσουμε τις παραπάνω αντιδράσεις συχνότητας πρώτα ρυθμίσαμε την παραγωγή των μονάδων σύμφωνα με τον πίνακα 7.2-2 καθώς και το φορτίο του συστήματος. Προτού μελετήσουμε το δυναμικά φαινόμενα απαιτείται να χρησιμοποιήσουμε το εργαλείο υπολογισμού ροής φορτίου του Power World Simulator. Στις παρακάτω εικόνες φαίνονται τα αποτελέσματα από την επίλυση ροής φορτίου, οι μονάδες οι οποίες λειτουργούν, το φορτίο των μονάδων καθώς και το συνολικό φορτίο στο ζυγό System Load για τις δύο προσομοιώσεις.

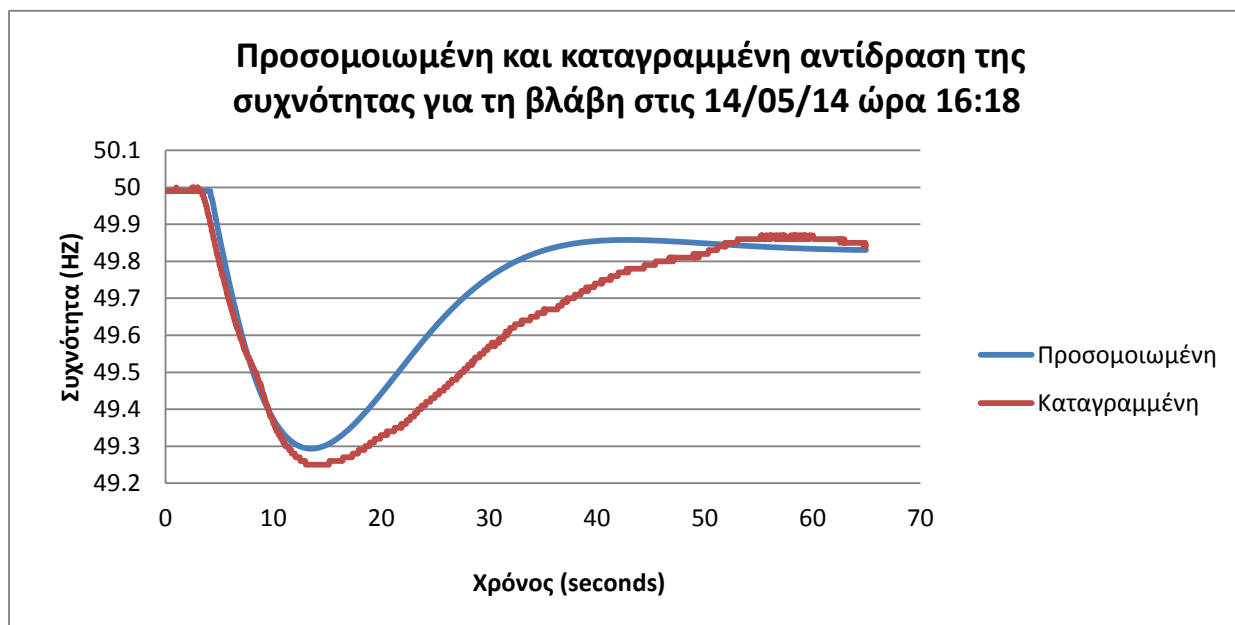


Εικόνα 7.2-1: Μοντέλο προσομοίωσης με το φορτίο μονάδων και υπολογισμένες τις τάσεις ζυγών για τις 14-05-14.



Εικόνα 7.2-2: Μοντέλο προσομοίωσης με το φορτίο μονάδων και υπολογισμένες τις τάσεις ζυγών για τις 12-06-14.

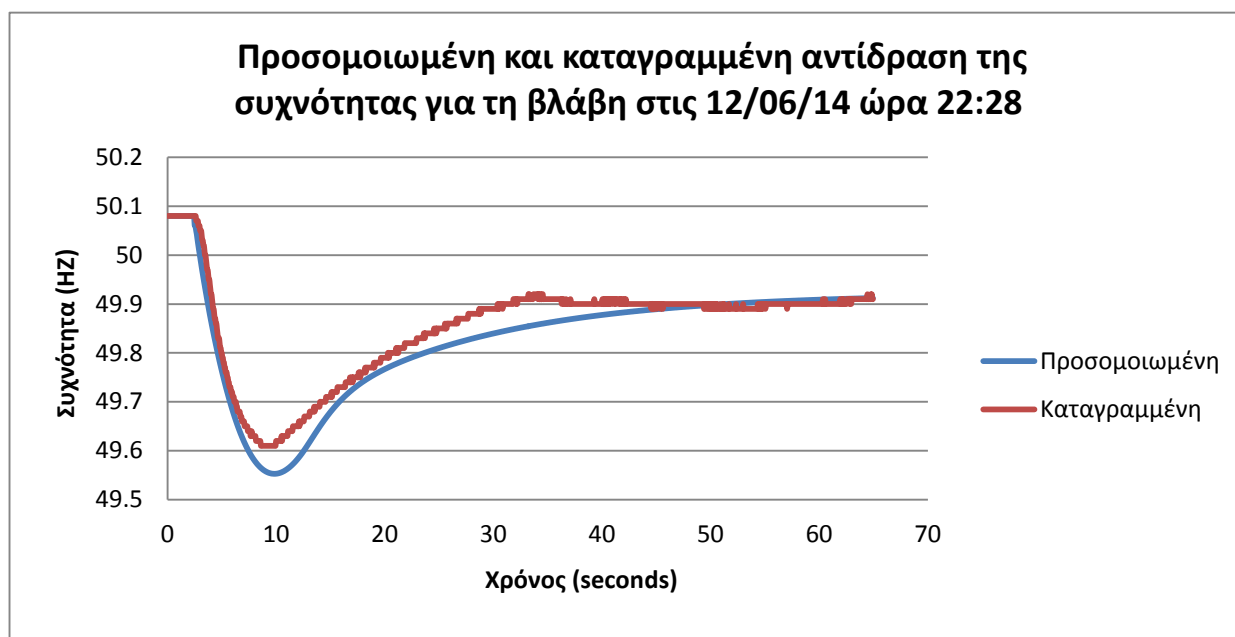
Όπως φαίνεται από τις πιο πάνω εικόνες η γεννήτρια στο ζυγό Slack Bus έχει μηδενική παραγωγή. Αυτό συμβαίνει διότι το άθροισμα των φορτίων των μονάδων ισοδυναμεί με το φορτίο στο ζυγό System Load. Ο ζυγός αυτός χρησιμοποιείται αναγκαστικά για την επίλυση ροής φορτίου στο Power World Simulator και μόνο. Άρα η γεννήτρια στο ζυγό Slack δεν παράγει ούτε απορροφά περίσσια παραγωγή. Με τη βοήθεια του εργαλείου Transient Stability του προγράμματος προσομοιώσαμε τα δύο συμβάντα διαταραχής επαναλαμβάνοντας την διαδικασία προσομοίωσης πολλές φορές, ρυθμίζοντας κάθε φορά τις κατάλληλες παραμέτρους των γεννητριών ώστε να πλησιάσουμε τη μορφή και τις τιμές των πραγματικών καμπυλών συχνότητας. Οι παράμετροι οι οποίες παίζουν σημαντικό ρόλο στην προσομοίωση της αντίδρασης συχνότητας είναι η αδράνεια των γεννητριών (στο μοντέλο GENROU συμβολίζεται με H) ,ο στατισμός R, το κέρδος K των ρυθμιστών στροφών καθώς και οι παράμετροι που αφορούν τη χρονική καθυστέρηση για αλλαγή ταχύτητας των ρυθμιστών στροφών σε περίπτωση μεταβολής της συχνότητας του δικτύου. Οι παράμετροι αυτοί ονομάζονται Time Delays και συμβολίζονται με T1,T2,T3...κ.ο.κ.Τα αποτελέσματα της προσομοιωμένης και της καταγραφωμένης αντίδρασης συχνότητας των δύο συμβάντων διαταραχής παρατίθενται μαζί στα παρακάτω γραφήματα.



Γράφημα 7.2-2: Σύγκριση προσομοιωμένης με καταγραφωμένης αντίδρασης της συχνότητας του συστήματος για το συμβάν διαταραχής στις 14/05/14.

Παρατηρώντας το παραπάνω γράφημα που αφορά το συμβάν στις 14/05/14 συμπεραίνουμε ότι έχουμε πλησιάσει αρκετά τα όρια πτώσης και ανάκαμψης της συχνότητας της καταγραφωμένης καμπύλης. Το χρονικό διάστημα που στο οποίο έγινε η πτώση της

συχνότητας προσεγγίστηκε αρκετά καλά. Αντίθετα το χρονικό διάστημα ανάκαμψης της συχνότητας στη προσομοιωμένη καμπύλη είναι μικρότερο σε σύγκριση με αυτό της καταγραφωμένης καμπύλης. Το προσεγγιστικό σφάλμα αυτό δεν μας απασχολεί καθώς για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Στο επόμενο γράφημα το οποίο αφορά το συμβάν στις 12/06/14 παρατηρούμε ότι έχουμε ακόμα πιο καλή προσέγγιση της καταγραφωμένης αντίδρασης συχνότητας του δικτύου. Σε αυτή τη περίπτωση παρατηρούμε ότι η προσομοιωμένη καμπύλη συχνότητας μοιάζει περισσότερο με την καταγραφωμένη τόσο στα όρια αλλά και στο χρόνο πτώσης και ανάκαμψης της συχνότητας.



Γράφημα 7.2-3: Σύγκριση προσομοιωμένης και καταγραφωμένης αντίδρασης του συστήματος για το συμβάν στις 12/06/14.

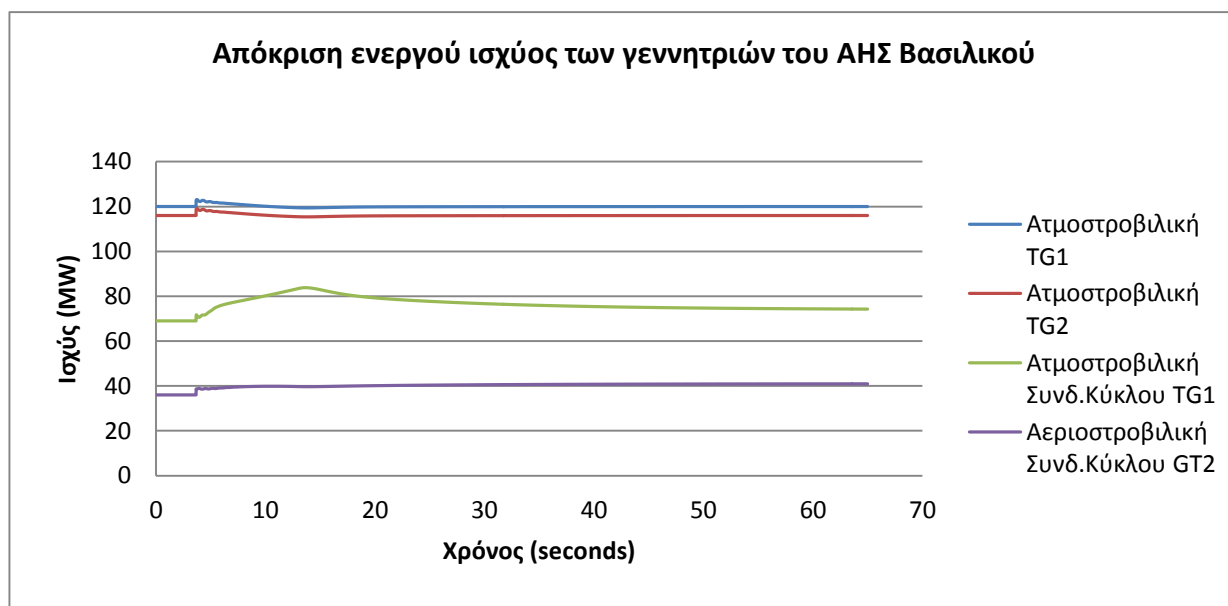
Στον πίνακα 7.2-3 γίνεται μια σύγκριση των τιμών πτώσης και ανάκαμψης της συχνότητας μεταξύ των προσομοιωμένων και καταγραφωμένων καμπυλών των δύο συμβάντων.

Συμβάν	Καμπύλη	Πτώσης συχνότητας (HZ)	Ανάκαμψης συχνότητας (HZ)
14-05-14	Προσομοιωμένη	49,29	49,83
	Καταγραφωμένη	49,25	49,84
12-06-14	Προσομοιωμένη	49,55	49,91
	Καταγραφωμένη	49,61	49,91

Πίνακας 7.2-3: Τιμή πτώσης και ανάκαμψης συχνότητας των προσομοιωμένων και καταγραφωμένων καμπυλών.

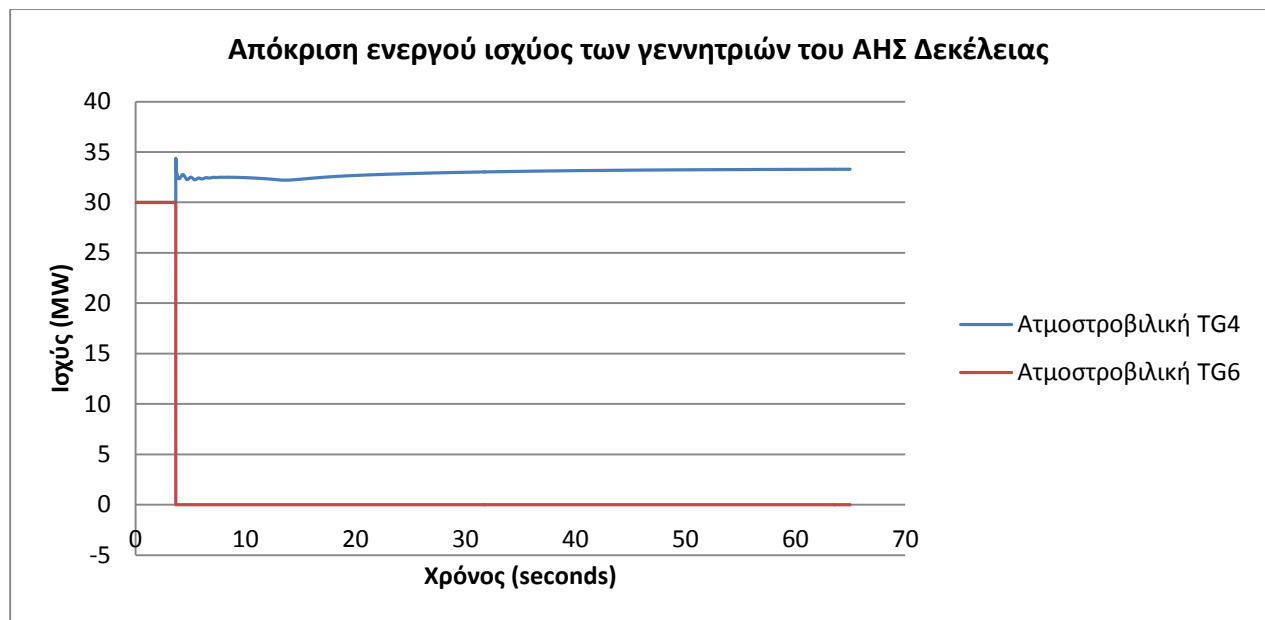
Παρατηρούμε ότι στις καταγραμμένες καμπύλες συχνότητας που μας δόθηκαν από το Διαχειριστή Συστήματος Μεταφοράς, η συχνότητα δεν επανέρχεται στην ονομαστική της τιμή μετά τη ρύθμιση αλλά σε μια χαμηλότερη τιμή. Αυτό συμβαίνει διότι οι καμπύλες αυτές μας δείχνουν την τιμή ανάκαμψης της συχνότητας μετά τη πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας και όχι μετά τη δευτερεύουσα. Το ίδιο παρατηρούμε και στις προσομοιωμένες αντιδράσεις συχνότητας, αφού οι γεννήτριες του Power World Simulator εκτελούν πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας μόνο. Σε ένα πραγματικό δίκτυο, οι μονάδες που εκτελούν τη δευτερεύουσα ρύθμιση, αναλαμβάνουν να επαναφέρουν τη συχνότητα στην ονομαστική της τιμή.

Προκειμένου να κατανοήσουμε τη σχέση της ενεργού ισχύος των γεννητριών και της συχνότητας σε ένα Σ.Η.Ε κρίνεται σκόπιμο να δούμε πως μεταβάλλεται η παραγωγή των μονάδων παραγωγής στο Power World Simulator όταν συμβεί μια διαταραχή στο δίκτυο. Οι πιο κάτω εικόνες αφορούν το δεύτερο συμβάν διαταραχής που περιγράψαμε προηγουμένως και δείχνουν την απόκριση της ενεργού ισχύος των μονάδων των τριών ηλεκτροπαραγωγών σταθμών που λειτουργούσαν την ώρα του συμβάντος.

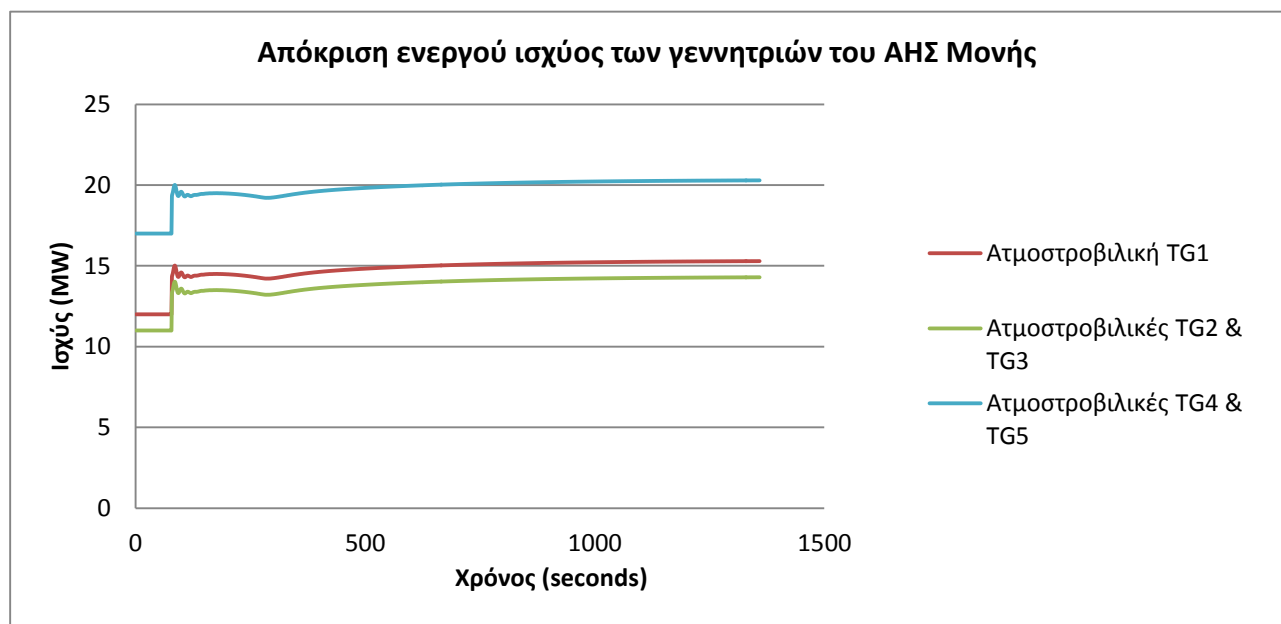


Γράφημα 7.2-4: Μεταβολή ενεργού ισχύος των μονάδων του ΑΗΣ Βασιλικού κατά τη πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας.

Στο παρακάτω γράφημα παρουσιάζεται και η ενεργός ισχύς της απολεσθείσας μονάδας πριν και μετά τη διαταραχή.



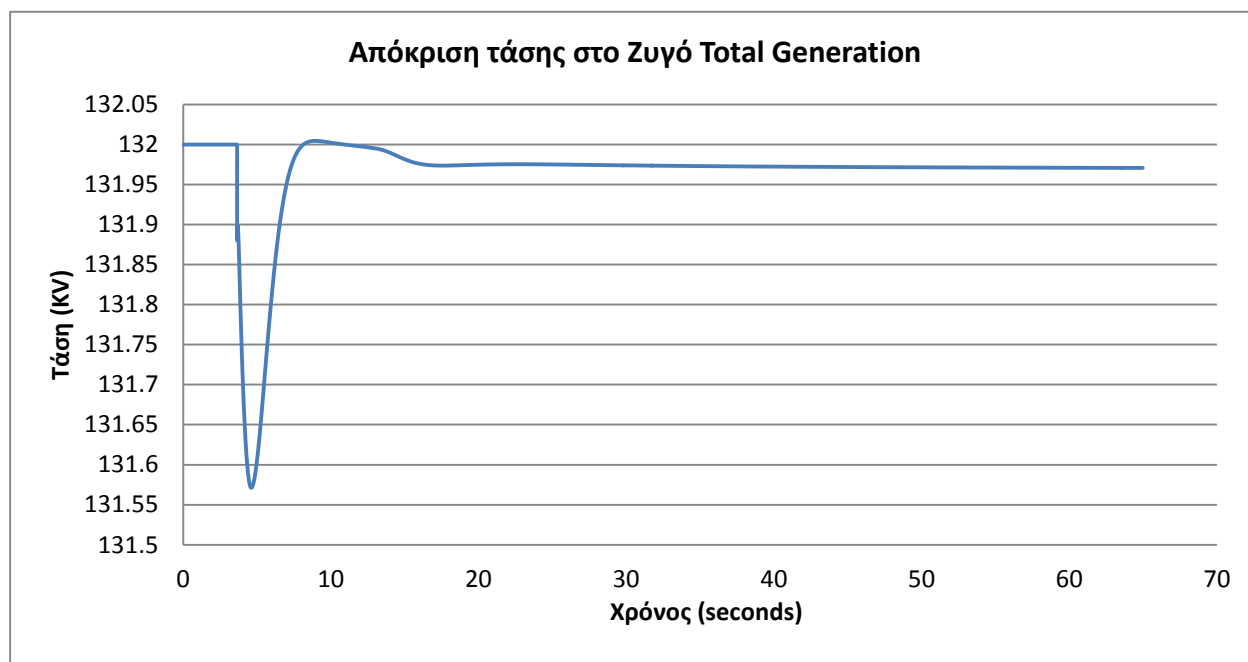
Γράφημα 7.2-5: Μεταβολή ενεργού ισχύος ατμοστροβλικής μονάδας του ΑΗΣ Δεκέλειας κατά τη πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας. Με κόκκινο χρώμα η απολεσθείσα μονάδα.



Γράφημα 7.2-6: Μεταβολή ενεργού ισχύος των μονάδων του ΑΗΣ Μονής κατά τη πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας.

Από τα πιο πάνω διαγράμματα της ισχύος, παρατηρούμε ότι η ισχύς της κάθε γεννήτριας σταθεροποιείται σε μεγαλύτερη τιμή μετά το μεταβατικό φαινόμενο της

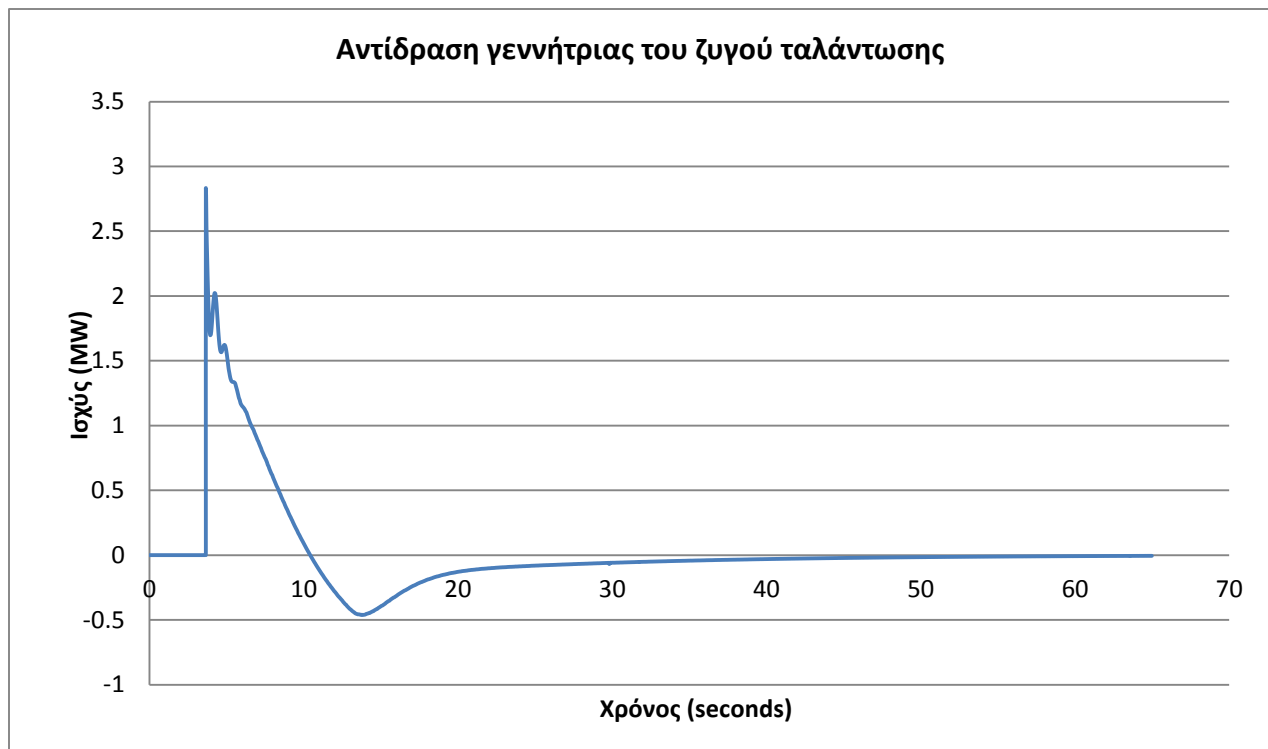
διαταραχής, λόγω επίδρασης των ρυθμιστών στροφών. Οι μονάδες του συστήματος μοιράζονται το φορτίο της απολεσθείσας μονάδας αναλόγως του στατισμού τους. Έτσι γίνεται εμφανής η σχέση της συχνότητας με την ενεργό ισχύ που εγχέουν οι γεννήτριες στο δίκτυο. Οι ταλαντώσεις μικρού πλάτους που παρατηρούνται προτού σταθεροποιηθεί η ισχύς, οφείλονται στις ταλαντώσεις της τάσεως. Στο παρακάτω γράφημα παρουσιάζεται η απόκριση τάσης στο ζυγό Total Generation .



Γράφημα 7.2-7: Απόκριση τάσης στο ζυγό Total Generation πριν και μετά τη διαταραχή.

Στον ζυγό Total Generation παρατηρούμε ότι η τάση πέφτει τη στιγμή της μεταβολής διαταραχής σε μία ελάχιστη τιμή (~131,57 KV) και από εκεί και πέρα, λόγω της επίδρασης του ρυθμιστή τάσης επανέρχεται πολύ κοντά στα 132 KV μετά από κάποια ταλάντωση.

Παρακάτω παρουσιάζεται η απόκριση της ενεργού ισχύος της γεννήτριας στο ζυγό ταλάντωσης (slack bus). Όπως προαναφέρθηκε η γεννήτρια αυτή χρησιμοποιείται για τις ανάγκες της επίλυσης ροής φορτίου στο Power World Simulator. Έχει μηδενική παραγωγή αφού το φορτίο του συστήματος το αναλαμβάνουν αποκλειστικά οι μονάδες παραγωγής των ηλεκτροπαραγωγών σταθμών και τα Α.Π.Ε. Παρατηρούμε ότι η ενεργός ισχύς της γεννήτριας μεταβάλλεται μόνο κατά τη διάρκεια του μεταβατικού φαινομένου και ακολούθως επανέρχεται στο μηδέν αφού το φορτίο της απολεσθείσας μονάδας διανέμεται στις συμβατικές μονάδες του συστήματος.



Γράφημα 7.2-8: Απόκριση ενεργού ισχύος της γεννήτριας στο ζυγό ταλάντωσης (slack bus).

Με βάση τα πιο πάνω αποτελέσματα προσομοιώσεων συμπεραίνουμε ότι το μοντέλο προσομοίωσης είναι κατάλληλα ρυθμισμένο για τις ανάγκες της παρούσας μελέτης. Το επόμενο στάδιο επέκτασης αυτού του μοντέλου είναι η προσθήκη του φορτίου των οχημάτων στο συνολικό φορτίο του συστήματος. Για τις προσομοιώσεις κρίθηκε αναγκαία η επιλογή ενός ποσοστού διείσδυσης οχημάτων στο δίκτυο που να είναι συμβατό με την ονομαστική ικανότητα παραγωγής του συστήματος. Το 2014 στην Κύπρο υπήρχαν εγγεγραμμένα 794,464 οχήματα. Για να αποκτήσουμε μια διαισθητική άποψη για τα ηλεκτρικά οχήματα ως πηγές ενέργειας επιλέξαμε το ως ποσοστό διείσδυσης το 5% των εγγεγραμμένων οχημάτων που υπήρχαν στην Κύπρο κατά το έτος 2014 (39,724 οχήματα) και ότι το κάθε όχημα φέρει μπαταρία ονομαστικής χωρητικότητας 22 KWh. Αν υποθέσουμε ότι όλα τα ηλεκτρικά οχήματα είναι πλήρως φορτισμένα μια φορά την ημέρα και ότι το 80% του ενεργειακού τους δυναμικού είναι διαθέσιμο τότε ως σύνολο τα οχήματα αντιπροσωπεύουν συνολική χωρητικότητα αποθήκευσης ενέργειας ίση με:

$$39,724 \text{ EVs} \times 22 \text{ KWh} \times 0.8 = 699.14 \text{ MWh}$$

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα εγγεγραμμένα οχήματα που υπήρχαν το έτος 2014 ανά επαρχία στις ελεύθερες περιοχές της Κύπρου σύμφωνα με στοιχεία του Τμήματος Οδικών

Μεταφορών της Κυπριακής Δημοκρατίας, καθώς και ο αριθμός των οχημάτων χρησιμοποιήσουμε για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας.

Πόλη-Επαρχία	Αριθμός οχημάτων	Αριθμός οχημάτων για V2G με ποσοστό διείσδυσης στο ηλεκτρικό δίκτυο της Α.Η.Κ 5%
Λευκωσία	308,472	15,424
Λεμεσός	213,307	10,666
Λάρνακα	129,435	6472
Αμμόχωστος	50,809	2540
Πάφος	92,441	4622
Κερύνεια	Κατεχόμενη-Εκτός ηλεκτρικού δικτύου της Α.Η.Κ	
Σύνολο	794,464	39,724

Πίνακας 7.2-3: Εγγεγραμμένα οχήματα Κυπριακής Δημοκρατίας το 2014 και ποσοστό διείσδυσης τους στο δίκτυο.

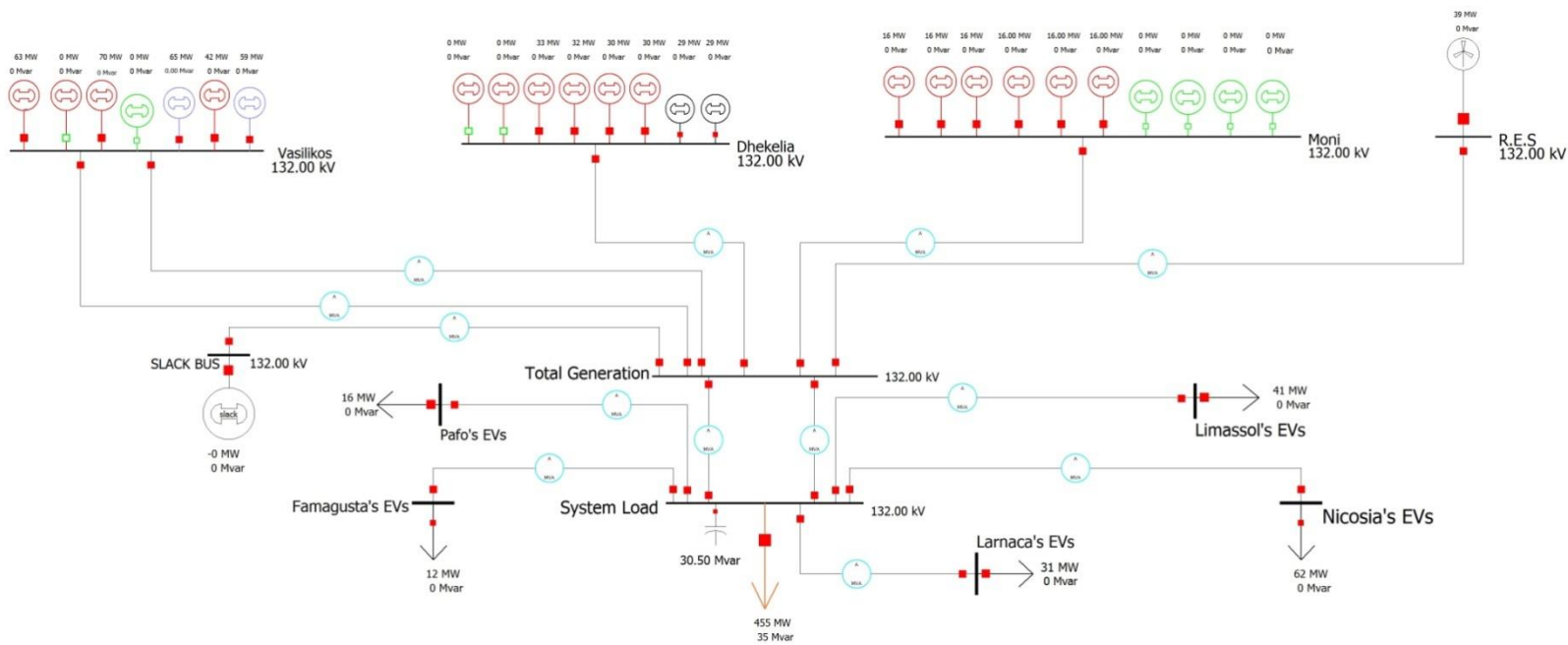
Με τη βοήθεια του Matlab και με τη χρήση κυρίως της συνάρτησης randsample κατανείμαμε τα οχήματα κάθε πόλης σε τέσσερις ομάδες ανάλογα με τις απαιτήσεις φόρτισης των χρηστών οι οποίες καθορίστηκαν ψευδοτυχαία. Με αυτό τον τρόπο δημιουργήσαμε ένα στόλο οχημάτων για τις ανάγκες της προσομοίωσης ο οποίος παρουσιάζεται στον πιο κάτω πίνακα.

Επαρχία	Κατάσταση φόρτισης την ώρα σύνδεσης στον σταθμό φόρτισης SOC _{in} (%)	Επιθυμητή κατάσταση φόρτισης μετά την αποσύνδεση SOC _{out} (%)	Προγραμματισμένη ισχύς φόρτισης για 3 ώρες (KW)	Αριθμός οχημάτων	Συνολική προγραμματισμένη ισχύς για φόρτιση των οχημάτων κάθε επαρχίας (MW)
Λευκωσία	37	80	3.153	7095	56.493
Λευκωσία	24	90	4.840	4473	
Λευκωσία	33	80	3.446	2005	
Λευκωσία	49	90	3.006	1851	
Λεμεσός	35	80	3.300	2667	37.839
Λεμεσός	46	90	3.226	3093	
Λεμεσός	32	90	4.253	1387	
Λεμεσός	39	90	3.740	3519	
Λάρνακα	13	70	4.180	2654	

Λάρνακα	17	90	5.353	1942	28.545
Λάρνακα	29	70	3.006	1036	
Λάρνακα	26	90	4.693	840	
Αμμόχωστος	38	80	3.080	305	11.071
Αμμόχωστος	12	80	4.986	1041	
Αμμόχωστος	15	70	4.033	762	
Αμμόχωστος	21	80	4.326	432	
Πάφος	39	80	3.006	1294	14.633
Πάφος	22	70	3.520	1941	
Πάφος	27	70	3.153	601	
Πάφος	45	80	2.566	786	
Σύνολο					148.581

Πίνακας 7.2-4: Στόλος οχημάτων για τις ανάγκες της προσομοίωσης.

Στην πιο κάτω εικόνα παρουσιάζεται το μοντέλο με την προσθήκη του φορτίου των οχημάτων κάθε επαρχίας.



Εικόνα 7.2-3: Μοντέλο προσομοίωσης με προσθήκη φορτίου οχημάτων κάθε επαρχίας.

Συγκεκριμένα έγινε προσθήκη πέντε ζυγών φορτίου οι οποίοι αντιστοιχούν στα οχήματα κάθε επαρχίας της Κυπριακής Δημοκρατίας. Το κάθε φορτίο αντιπροσωπεύει το σύνολο των σταθμών φόρτισης κάθε επαρχίας. Δεν μας ενδιαφέρει πως λειτουργούν οι σταθμοί φόρτισης στο εσωτερικό τους αλλά ότι στο σύνολο τους αποτελούν ένα “ενεργό” φορτίο το οποίο αλλάζει ανάλογα με τα σήματα που δέχεται από τον aggregator. Οι ζυγοί συνδέονται μέσω όμοιων γραμμών μεταφοράς αμελητέας αντίστασης στο ζυγό System Load. Η τιμή ισχύος των φορτίων των οχημάτων κάθε επαρχίας είναι αυτή που παρουσιάζεται στον πίνακα 7.2-4 διαιρεμένη με την αποδοτικότητα φόρτισης των μπαταριών των οχημάτων ($\eta^c=0.92$).

8. Σύστημα ελέγχου φόρτισης οχημάτων

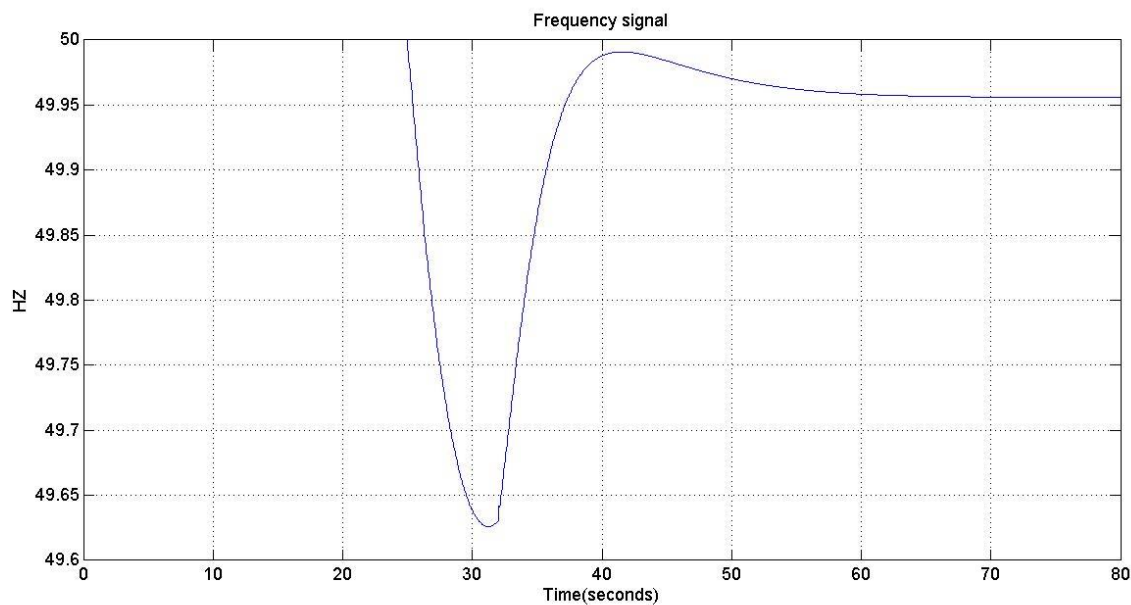
Για τις ανάγκες της προσομοίωσης στο Power World Simulator κρίθηκε αναγκαία η απλοποίηση του συστήματος ελέγχου που περιγράψαμε στο κεφάλαιο 4. Το εργαλείο Transient Stability μας παρέχει τη δυνατότητα μείωσης ή αύξησης των φορτίων του συστήματος σε μια σταθερή τιμή. Η δυνατότητα υλοποίησης και ενσωμάτωσης ελεγκτών όπως το σύστημα ελέγχου φόρτισης οχημάτων δεν υποστηρίζεται από το πρόγραμμα. Όπως θα δούμε στη συνέχεια τα ηλεκτρικά οχήματα κάθε πόλης αποτελούν ένα φορτίο στο σύστημα το οποίο θεωρούμε ότι αλλάζει ανάλογα με τα σήματα ελέγχου που δέχεται. Η μεταβολή του φορτίου των οχημάτων πρέπει να γίνεται με βάση το σφάλμα συχνότητας του δικτύου. Έτσι μια λογική σκέψη για την απλοποίηση του συστήματος ελέγχου φόρτισης είναι η μεταβολή της ισχύος φόρτισης των οχημάτων σε μια σταθερή τιμή ανάλογα με το μέγιστο σφάλμα συχνότητας που προκύπτει από μια διαταραχή στο δίκτυο. Για παράδειγμα αν το φορτίο του συστήματος αυξηθεί τότε εντός ελάχιστου χρονικού διαστήματος η συχνότητα βυθίζεται σε μια ελάχιστη τιμή και μετά αρχίζει να ανακάμπτει με τη διαδικασία της πρωτεύουσας ρύθμισης. Από τη στιγμή που η συχνότητα φτάνει το μέγιστο σφάλμα (ελάχιστη τιμή), θεωρούμε ότι ο διαχειριστής του συστήματος ενημερώνει τους συναθροιστές (aggregators) των οχημάτων και ακολούθως αυτοί ενημερώνουν τους ελεγκτές φόρτισης των οχημάτων πόσο πρέπει να μειώσουν την ισχύ φόρτισης. Αντίστοιχη διαδικασία ακολουθείται και κατά την θετική απόκλιση της συχνότητας από την ονομαστική της τιμή. Η μεταβολή ισχύος φόρτισης υπολογίζεται από το γινόμενο του μέγιστου σφάλματος συχνότητας με ένα σταθερό κέρδος K (KW/HZ). Άρα το σύστημα ελέγχου που θα χρησιμοποιούμε απ’ εδώ και στο εξής για τις προσομοιώσεις θα μας δείχνει πόσο πρέπει να μειωθεί ή να αυξηθεί η ισχύς του φορτίου των οχημάτων κατά τη διαταραχή με σκοπό την βελτιστοποίηση της πρωτεύουσας ρύθμισης συχνότητας του δικτύου. Όταν η συχνότητα του συστήματος ανακάμψει πλήρως ή το σφάλμα της συχνότητας είναι εντός των ορίων της dead band του συστήματος ελέγχου, τα οχήματα θα συνεχίσουν να φορτίζουν με την προγραμματισμένη ισχύ φόρτισης τους.

Επιβεβαίωση λειτουργίας:

Για τις προσομοιώσεις που ακολουθούν χρησιμοποιήθηκε μέγιστο κέρδος K ίσο με 3,2 KW/HZ και νεκρή ζώνη (dead band) το διάστημα $[-0,05 \ 0,05]$ HZ. Οι υπόλοιπες παράμετροι του συστήματος ελέγχου είναι οι ίδιες με τον πίνακα 4.4.2-1 του κεφαλαίου 4. Για τα πρώτα δύο σενάρια προσομοίωσης ως είσοδο στο σύστημα ελέγχου που υλοποιήσαμε στο Matlab θεωρήσαμε ένα σήμα συχνότητας με αρνητικό σφάλμα και ακολούθως για τα υπόλοιπα σενάρια προσομοίωσης θεωρήσαμε σήμα συχνότητας με θετικό σφάλμα. Θέσαμε χρόνο προσομοίωσης 80 δευτερόλεπτα ώστε να μελετήσουμε την απόκριση της ισχύος και της κατάστασης φόρτισης των οχημάτων πριν και μετά το σφάλμα συχνότητας. Στα σενάρια όπου οι χρήστες επιθυμούν να φορτίσουν περαιτέρω τα οχήματα τους θεωρήσαμε ότι επέλεξαν χρόνο φόρτισης τρεις ώρες.

Σενάριο 1 :

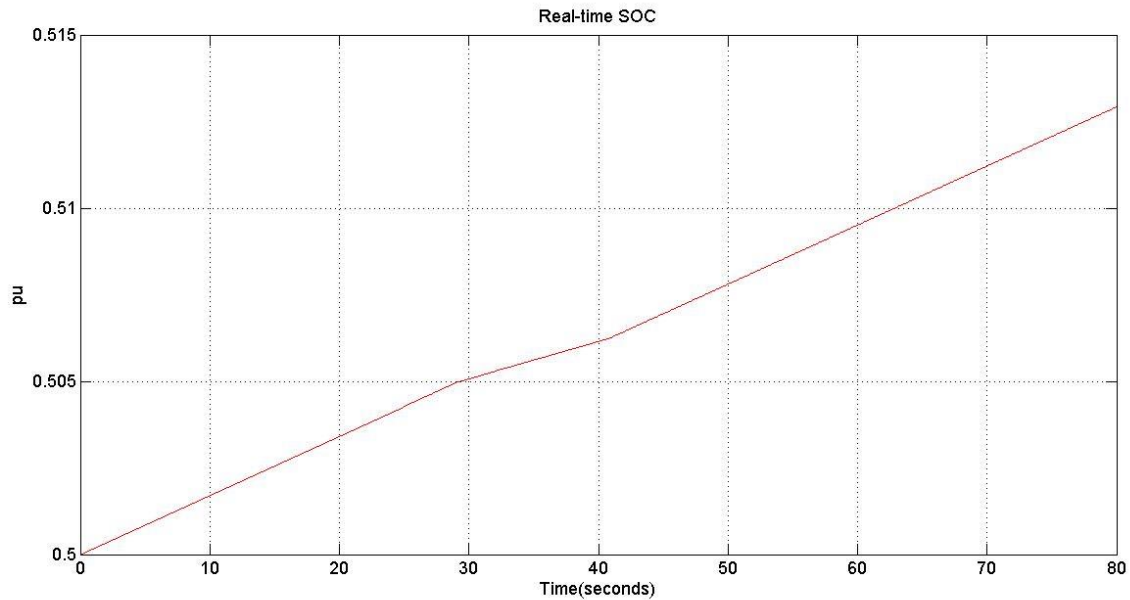
- $SOC_{in}=50\%$ και $SOC_{out}=80\%$



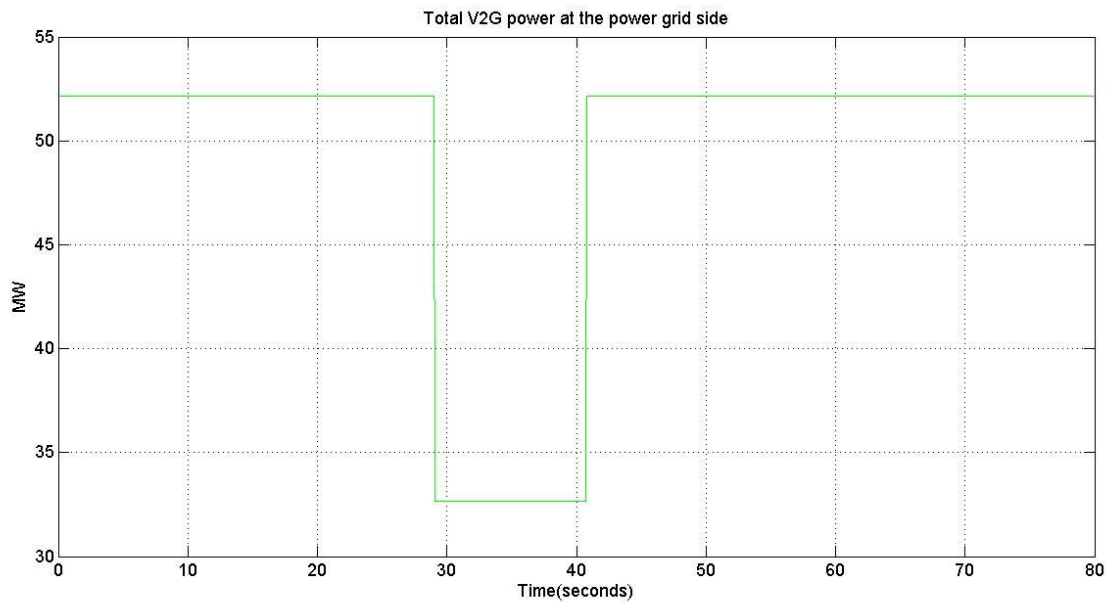
Γράφημα 8-1: Σήμα εισόδου-Απόκριση συχνότητα.

Στο γράφημα 8-2 παρατηρούμε ότι τα οχήματα φορτίζουν καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Αυτό που αλλάζει είναι ο ρυθμός φόρτισης στα 29 seconds διότι μέρος της ισχύος φόρτισης των οχημάτων χρησιμοποιείται για τις ανάγκες του δικτύου. Ο προγραμματισμένος ρυθμός φόρτισης επανέρχεται στα 41 seconds παρόλο που η τιμή της συχνότητας εξακολουθεί να μην είναι η ονομαστική. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το

σφάλμα συχνότητας από τα 41 seconds και μετά είναι εντός των προκαθορισμένων ορίων της ζώνης dead band του συστήματος ελέγχου και έτσι τα οχήματα δεν αντιδρούν στο σφάλμα συχνότητας.



Γράφημα 8-2: Κατάσταση φόρτισης οχημάτων.



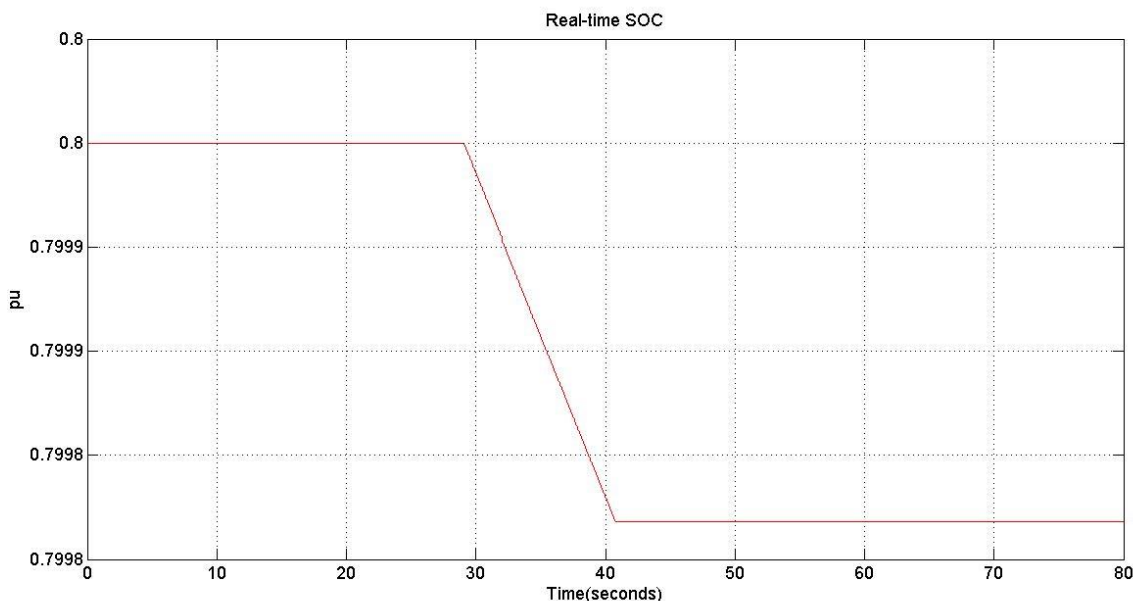
Γράφημα 8-3: Απόκριση ισχύος φόρτισης οχημάτων.

Από το γράφημα της ισχύος φόρτισης φαίνεται ότι τα οχήματα αρχικά φορτίζουν με την προγραμματισμένη ισχύ φόρτισης των 52,17 MW. Στα 29 seconds μειώνουν την ισχύ φόρτισης τους στα 32,66 MW με σκοπό να υποστηρίξουν τις ανάγκες του δικτύου και ακολούθως στα 41 seconds η ισχύς φόρτισης επανέρχεται στην προγραμματισμένη της τιμή, αφού το σφάλμα συχνότητας είναι εντός των ορίων της ζώνης dead band του συστήματος ελέγχου.

Σενάριο 2:

➤ $SOC_{in}=SOC_{out}=80\%$

Το σήμα εισόδου σε αυτό το σενάριο προσομοίωσης είναι το ίδιο με το προηγούμενο σενάριο με τη διαφορά ότι οι χρήστες επιθυμούν να διατηρήσουν της αρχική κατάσταση φόρτισης τους που έχουν την ώρα σύνδεσης τους στο σταθμό φόρτισης. Παρακάτω παρουσιάζεται η απόκριση της κατάστασης φόρτισης και της ισχύος των οχημάτων.

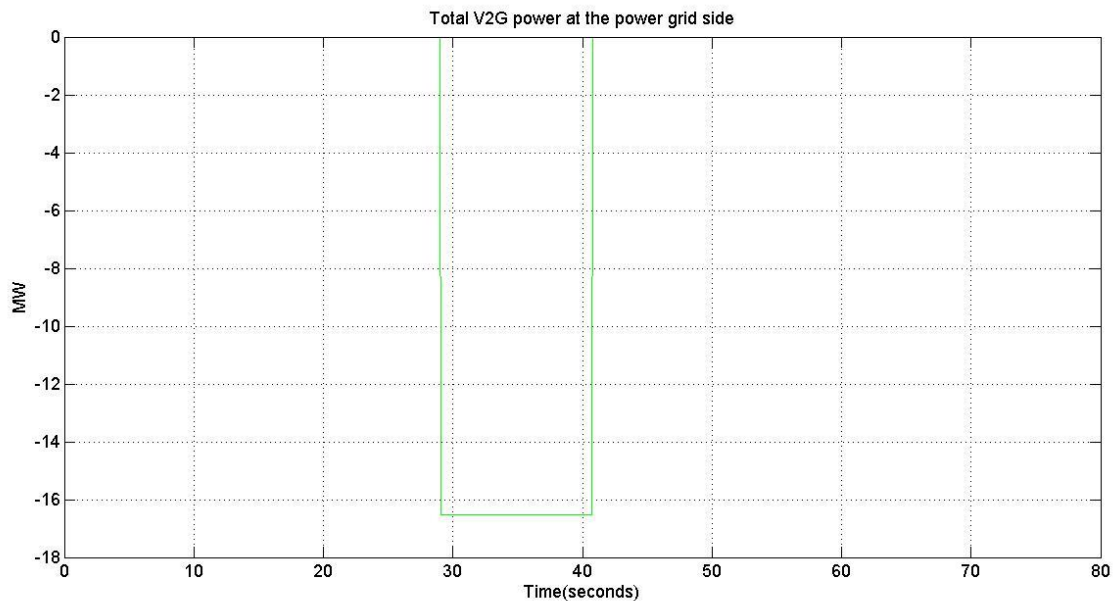


Γράφημα 8-4: Κατάσταση φόρτισης οχημάτων.

Παρατηρούμε ότι τα οχήματα στα 29 seconds εκφορτίζουν με σκοπό να βοηθήσουν την πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας του δικτύου και ακολούθως στα 41 seconds η εκφόρτιση σταματά διότι το σφάλμα συχνότητας είναι εντός των ορίων της ζώνης dead band του συστήματος ελέγχου. Η κατάσταση φόρτισης των οχημάτων σταθεροποιείται σε τιμή κατά 0,02 % μικρότερη της αρχικής, έτσι η εκφόρτιση των οχημάτων θεωρείται αμελητέα. Επομένως ικανοποιείται η επιθυμία των χρηστών για διατήρηση της αρχικής SOC.

Στο παρακάτω γράφημα παρουσιάζεται η απόκριση ισχύος των οχημάτων. Όσο δεν υπάρχει σφάλμα συχνότητας στο δίκτυο τα οχήματα δεν αντιδρούν. Στα 29 seconds φτάνει το

σφάλμα συχνότητας στους ελεγκτές φόρτισης των οχημάτων και τα οχήματα ανταποκρίνονται προσφέροντας ισχύ στο δίκτυο εκφορτίζοντας τους συσσωρευτές τους. Στα 41 seconds τα οχήματα διακόπτουν την ροή ισχύος προς το δίκτυο αφού δεν κρίνεται αναγκαίο να αντιδράσουν στο σφάλμα συχνότητας (ενεργοποίηση dead band συχνότητας).

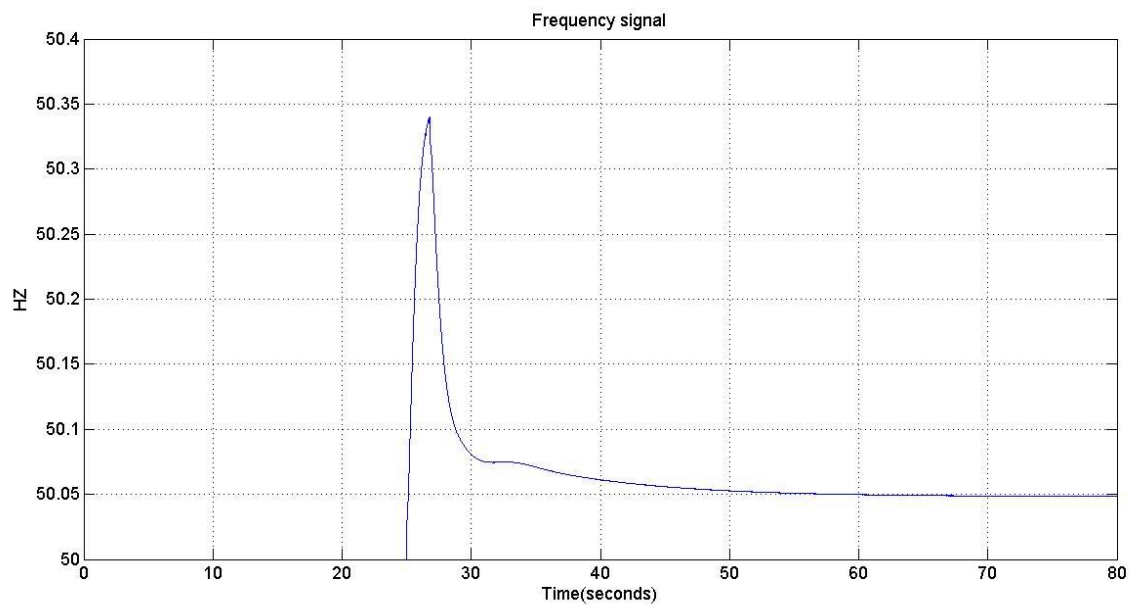


Γράφημα 8-5: Απόκριση ισχύος φόρτισης οχημάτων.

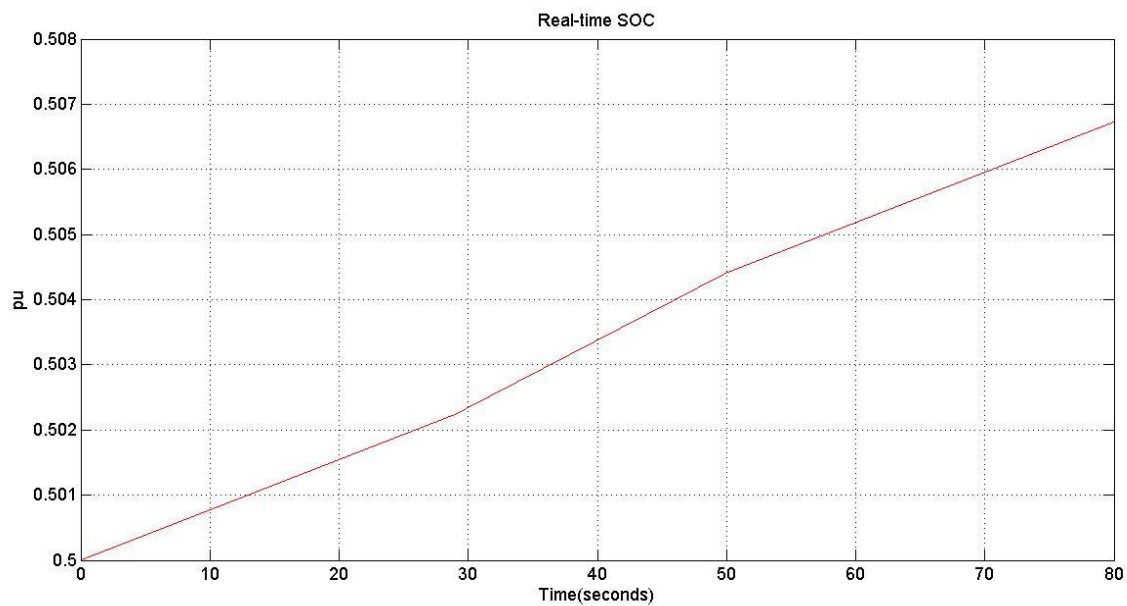
Όπως έχει αναφερθεί προηγουμένως στα σενάρια 3 και 4 ως σήμα εισόδου στο σύστημα ελέγχου χρησιμοποιούμε μια καμπύλη συχνότητας με θετικό σφάλμα ώστε να μελετήσουμε την αντίδραση των οχημάτων και σε αυτή τη περίπτωση διαταραχής. Θεωρούμε ότι οι επιθυμίες για φόρτιση ή διατήρηση της αρχικής SOC των οδηγών είναι οι ίδιες με τα προηγούμενα σενάρια.

Σενάριο 3:

➤ $SOC_{in}=50\%$ και $SOC_{out}=80\%$



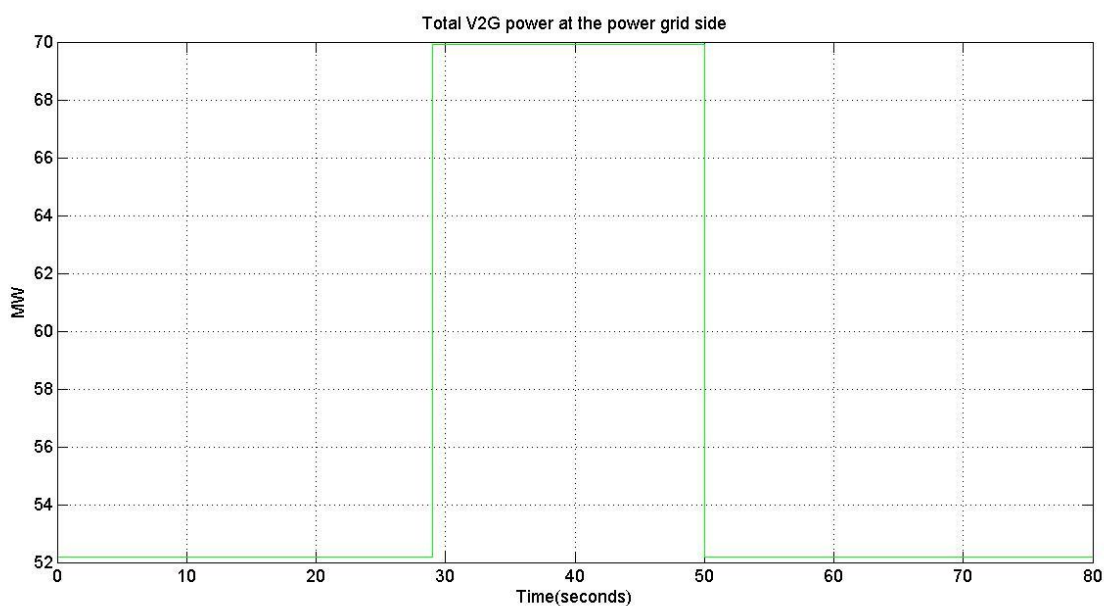
Γράφημα 8-6: Σήμα εισόδου-Απόκριση συχνότητας



Γράφημα 8-7: Κατάσταση φόρτισης οχημάτων.

Από το πιο πάνω γράφημα παρατηρούμε ότι τα οχήματα αρχικά φορτίζουν με ένα προγραμματισμένο ρυθμό φόρτισης μέχρι τα 29 seconds που “αντιλαμβάνονται” τη διαταραχή στη συχνότητα του δικτύου. Ακολούθως ο ρυθμός φόρτισης τους αυξάνεται αφού το σφάλμα συχνότητας είναι θετικό. Περίπου στα 50 seconds επανέρχεται ο προγραμματισμένος ρυθμός φόρτισης των οχημάτων παρόλο που το σφάλμα συχνότητας εξακολουθεί να υφίσταται. Αυτό οφείλεται στο ότι το σφάλμα συχνότητας είναι εντός των ορίων της ζώνης dead band του συστήματος ελέγχου και τα οχήματα δεν αντιδρούν στο συγκεκριμένο εύρος τιμών απόκλισης της συχνότητας.

Τα πιο πάνω αποτελέσματα επιβεβαιώνονται από το γράφημα της ισχύος φόρτισης των οχημάτων. Στα 29 seconds η ισχύς που απορροφούν τα οχήματα αυξάνεται ώστε να ενισχυθεί η πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας του δικτύου. Μόλις το σφάλμα συχνότητας κριθεί αμελητέο από τους ελεγκτές φόρτισης των οχημάτων, τα οχήματα συνεχίζουν να φορτίζουν με την προγραμματισμένη ισχύ φόρτισης.

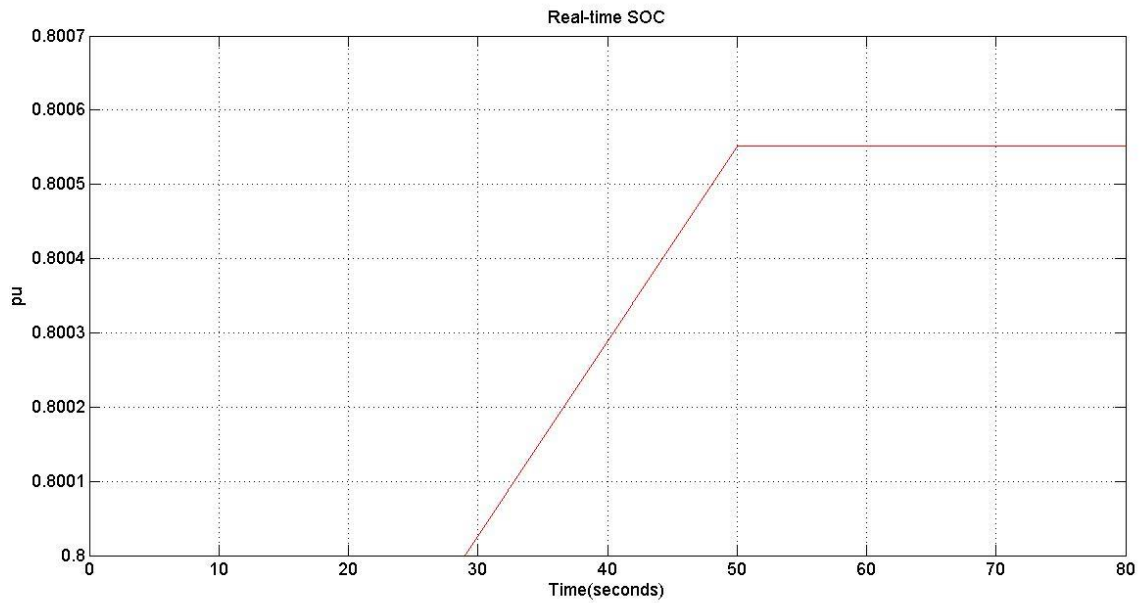


Γράφημα 8-8: Απόκριση ισχύος φόρτισης οχημάτων.

Σενάριο 4:

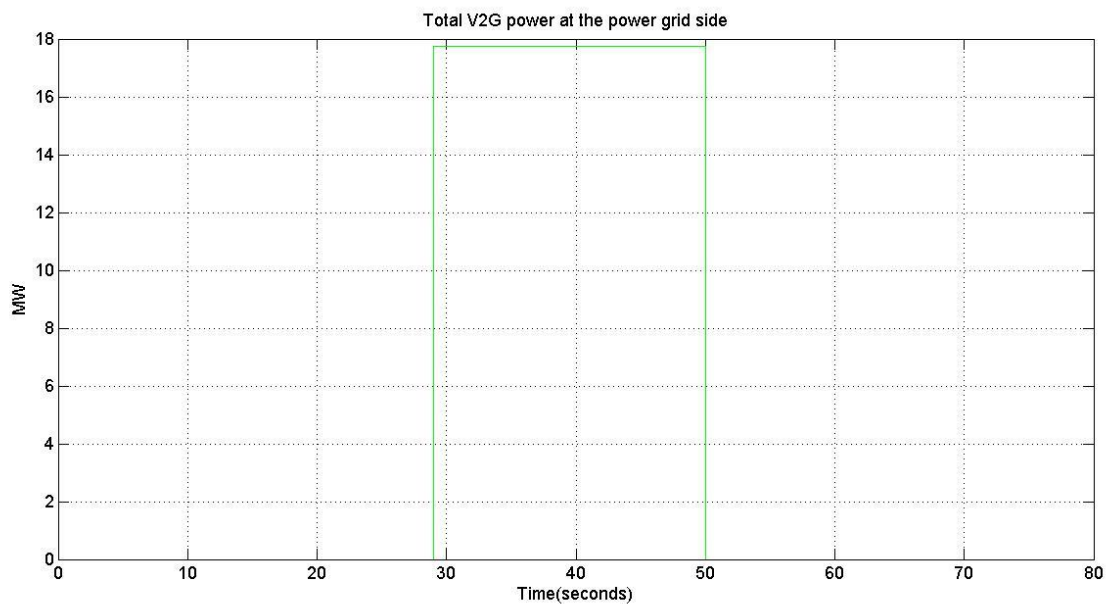
- $SOC_{in}=SOC_{out}=80\%$

Όπως και στο σενάριο 2 το σήμα εισόδου στο σενάριο 4 είναι το ίδιο με αυτό του σεναρίου 3, με τη διαφορά ότι οι χρήστες επιθυμούν να διατηρήσουν της αρχική κατάσταση φόρτισης τους που έχουν την ώρα σύνδεσης τους στο σταθμό φόρτισης. Παρακάτω παρουσιάζονται τα γραφήματα της ισχύος και της κατάστασης φόρτισης των οχημάτων.



Γράφημα 8-9: Κατάσταση φόρτισης οχημάτων.

Παρατηρούμε ότι τα οχήματα στα 29 seconds φορτίζουν με σκοπό να βοηθήσουν την πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας του δικτύου και ακολούθως στα 41 seconds η φόρτιση των οχημάτων σταματά διότι το σφάλμα συχνότητας είναι εντός των ορίων της ζώνης dead band του συστήματος ελέγχου. Η κατάσταση φόρτισης των οχημάτων σταθεροποιείται σε τιμή κατά 0,06 % μεγαλύτερη της αρχικής, έτσι η φόρτιση των οχημάτων θεωρείται αμελητέα. Επομένως ικανοποιείται η επιθυμία των χρηστών για διατήρηση της αρχικής SOC.



Γράφημα 8-10: Απόκριση ισχύος φόρτισης οχημάτων.

Όσον αφορά την απόκριση ισχύος των οχημάτων, παρατηρούμε ότι όσο δεν υπάρχει σφάλμα συχνότητας στο δίκτυο τα οχήματα δεν αντιδρούν. Στα 29 seconds φτάνει το σφάλμα συχνότητας στους ελεγκτές φόρτισης των οχημάτων και τα οχήματα ανταποκρίνονται απορροφώντας ισχύ από το δίκτυο φορτίζοντας τους συσσωρευτές τους. Στα 41 seconds τα οχήματα διακόπτουν την απορρόφηση ενέργειας από το δίκτυο αφού δεν κρίνεται αναγκαίο να αντιδράσουν στο σφάλμα συχνότητας (ενεργοποίηση dead band συχνότητας).

9. Προσομοιώσεις

Προκειμένου να μελετήσουμε την επίδραση που θα έχει στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας της Α.Η.Κ η διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων V2G, εκτελέσαμε διάφορες προσομοιώσεις στο Power World Simulator σε συνδυασμό με το σύστημα ελέγχου που υλοποιήσαμε στο Matlab. Για τις προσομοιώσεις θεωρήσαμε ορθό να χρησιμοποιήσουμε πραγματικά αποσπάσματα φορτίου στις μονάδες παραγωγής που προσομοιώσαμε στο Power World Simulator. Γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιήσαμε αποσπάσματα φορτίου τα οποία μας δόθηκαν από το Διαχειριστή Συστήματος Μεταφοράς Κύπρου. Εκτελέστηκαν τέσσερα σενάρια προσομοίωσης.

Στα σενάρια που προσομοιώσαμε αρχικά θέσαμε στις γεννήτριες το πραγματικό απόσπασμα φορτίου και στο φορτίο του συστήματος (System Load) το συνολικό φορτίο. Εκτελέσαμε την επίλυση ροής φορτίου με τη λειτουργία Run Mode και διαπιστώσαμε ότι το σύστημα λειτουργεί χωρίς κάποιο πρόβλημα. Ακολούθως επιχειρήσαμε να “εισάγουμε” το φορτίο των οχημάτων κάθε επαρχίας στο σύστημα κάποια χρονική στιγμή. Το συνολικό φορτίο των οχημάτων είναι αυτό που παρουσιάζεται στον πίνακα 7.2-4 του κεφαλαίου 7 διαιρεμένο με την αποδοτικότητα φόρτισης των μπαταριών των οχημάτων ($148.581 \text{ MW} / 0.92 \approx 162 \text{ MW}$). Στο σενάριο 1 οι μονάδες αύξησαν την παραγωγή τους για να καλύψουν το επιπρόσθετο φορτίο. Στα υπόλοιπα σενάρια το αποτέλεσμα δεν ήταν αρεστό καθώς η συγκεκριμένη ενέργεια οδήγησε σε ολική σβέση του συστήματος (black out). Αυτό συνέβη διότι η ικανότητα παραγωγής των μονάδων που ήταν σε λειτουργία τη συγκεκριμένη στιγμή δεν αρκούσε ώστε το σύστημα να μπορεί να αναλάβει το φορτίο των οχημάτων. Το γεγονός αυτό αποδεικνύει αυτόματα ότι αν κατά τις βραδινές ώρες που υπάρχει μειωμένη χρέωση στην κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας αν ένα μεγάλο ποσοστό χρηστών επιχειρήσουν να φορτίσουν τα οχήματα τους μια χρονική στιγμή τότε το σύστημα δεν θα μπορεί να αντεπεξέλθει στις απαιτήσεις του συνολικού φορτίου καθώς θα πρέπει να τεθούν σε λειτουργία περισσότερες μονάδες παραγωγής εντός μικρού χρονικού διαστήματος. Για να αποφευχθεί ένα τέτοιο σοβαρό συμβάν στο δίκτυο θα πρέπει να γίνεται πρόβλεψη του φορτίου των οχημάτων και να υπάρχουν συγχρονισμένες γεννήτριες στο δίκτυο με λειτουργία στο τεχνικό τους ελάχιστο, ώστε αν αυξηθεί το φορτίο απότομα να μπορεί το σύστημα παραγωγής να αντεπεξέλθει εντός ολίγων δευτερολέπτων. Ίσως μελλοντικά τη πρόβλεψη του φορτίου των οχημάτων να την

αναλαμβάνουν οι aggregators (συναθροιστές) ενημερώνοντας το Διαχειριστή του συστήματος. Για να αντιμετωπίσουμε το πρόβλημα αυτό στη παρούσα εργασία έπρεπε να τεθούν σε λειτουργία περισσότερες γεννήτριες στο περιβάλλον του Power World Simulator. Όμως σε ένα πραγματικό Σ.Η.Ε η κατανομή φορτίου στις μονάδες παραγωγής γίνεται με βάση το οικονομικό κόστος λειτουργίας των μονάδων. Για να γίνουν πιο ρεαλιστικές οι προσομοιώσεις χρησιμοποιήσαμε συνάρτηση η οποία μας δίνει τη βέλτιστη οικονομική κατανομή φορτίου στις μονάδες από τη Διπλωματική εργασία με τίτλο “Μοντελοποίηση Οικονομικής Λειτουργίας Σταθμών Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας Συνδυασμένου Κύκλου Χανίων και επίπτωση στην Οικονομική λειτουργία του Σ.Η.Ε Κρήτης”. Η συνάρτηση αυτή χρησιμοποιεί τα τεχνικά χαρακτηριστικά των μονάδων παραγωγής ενός Σ.Η.Ε και κατανέμει το φορτίο του συστήματος στις μονάδες με το μικρότερο οικονομικό κόστος λειτουργίας. Ο κώδικας της συγκεκριμένης υπορουτίνας χρησιμοποιεί δεδομένα εισόδου τα οποία περιλαμβάνονται σε ένα αρχείο indat.txt. Το αρχείο indat.txt περιλαμβάνει τα χαρακτηριστικά στοιχεία των θερμικών μονάδων του συστήματος που θα χρησιμοποιηθούν. Ο χρήστης έχει την δυνατότητα αλλαγής των στοιχείων αυτών σύμφωνα με τις ανάγκες των προσομοιώσεων.

Τα στοιχεία αυτά είναι τα εξής:

- Τεχνικό ελάχιστο (σε MW) που μπορεί να λειτουργήσει μια μονάδα.
- Τεχνικό μέγιστο (σε MW) που μπορεί να λειτουργήσει μια μονάδα.
- Κυβικός όρος εξίσωσης κόστους μονάδας (σε kg/MWh^3).
- Τετραγωνικός όρος εξίσωσης κόστους μονάδας (σε kg/MWh^2).
- Γραμμικός όρος εξίσωσης κόστους μονάδας (σε kg/MWh).
- Σταθερός όρος εξίσωσης κόστους μονάδας (σε kg).
- Κόστος καυσίμου για κάθε τύπο μονάδας (σε €/kg-lt).
- Κόστος εκκίνησης μονάδας (σε €).
- Περιθώριο ισχύος ώστε να μην μπορεί να τερματίσει πλήρως την ισχύ της η μονάδα για να υπάρχει ένα μικρό ποσό εφεδρείας (σε MW/h).
- Ο μέγιστος ρυθμός μείωσης ισχύος μιας μονάδας (Down rate, σε MW/h).
- Ο μέγιστος ρυθμός αύξησης ισχύος μιας μονάδας (Up rate, σε MW/h).
- Η διαθεσιμότητα μονάδας. Οι τιμές είναι 0 ή 1 με την τιμή 0 να συμβολίζει την πλήρως διαθέσιμη μονάδα και την τιμή 1 να συμβολίζει τη μη διαθέσιμη μονάδα όπου δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί.
- Ο τύπος μονάδας. Οι μονάδες χωρίζονται ανά τύπο και ανά σταθμό παραγωγής στον οποίο βρίσκονται ανάλογα με το υπό εξέταση σύστημα.
- Ο αύξον αριθμός. Για να γνωρίζουμε τον αριθμό των συμβατικών μονάδων ανάλογα με το υπό εξέταση σύστημα.

Τα πιο πάνω στοιχεία βρίσκονται στους πίνακες του κεφαλαίου 5 και στην Διπλωματική εργασία με τίτλο “Επιπτώσεις στην Οικονομική Λειτουργία των Συστημάτων Ηλεκτρικής

Ενέργειας Κρήτης και Κύπρου λόγω της διασύνδεσής τους”. Στην πιο κάτω εικόνα παρουσιάζεται η μορφή ενός τυπικού αρχείου indat.

File	Edit	Format	View	Help									
30	60	0.0001	0.8552	183	2983	0.359	10	0.02	21	25	0	9	1
30	60	0.0001	0.8552	183	2983	0.359	10	0.02	21	25	0	9	2
30	60	0.0001	0.8552	183	2983	0.359	10	0.02	21	25	0	9	3
30	60	0.0001	0.8552	183	2983	0.359	10	0.02	21	25	0	9	4
30	60	0.0001	0.8552	183	2983	0.359	10	0.02	21	25	0	9	5
30	60	0.0001	0.8552	183	2983	0.359	10	0.02	21	25	0	9	6
25	52	0.0001	0.5802	153.7	833.16	0.359	270	0.01	50	52	0	10	7
25	52	0.0001	0.5802	153.7	833.16	0.359	270	0.01	50	52	0	10	8
60	130	0.0001	0.1954	167	3630	0.359	10	0.02	55	65	0	11	9
60	130	0.0001	0.1954	167	3630	0.359	10	0.02	55	65	0	11	10
60	130	0.0001	0.1954	167	3630	0.359	10	0.02	55	68	0	11	11
18	30	0.0001	6.147	-2.587	4515	0.359	10	0.1	15	27	1	12	12
18	30	0.0001	6.147	-2.587	4515	0.359	10	0.1	15	27	1	12	13
18	30	0.0001	6.147	-2.587	4515	0.359	10	0.1	15	28	1	12	14
18	30	0.0001	6.147	-2.587	4515	0.359	10	0.1	15	28	1	12	15
18	30	0.0001	6.147	-2.587	4515	0.359	10	0.1	15	28	1	12	16
18	30	0.0001	6.147	-2.587	4515	0.359	10	0.1	15	28	0	12	17
4	37.5	0.0001	0.7508	175	2563	0.539	8	0.05	67	40	0	13	18
4	37.5	0.0001	0.7508	175	2563	0.539	8	0.05	67	40	0	13	19
4	37.5	0.0001	0.7508	175	2563	0.539	8	0.05	67	40	0	13	20
4	37.5	0.0001	0.7508	175	2563	0.539	8	0.05	67	40	0	13	21
4	38	0.0001	0.7508	175	2563	0.539	8	0.05	67	40	0	13	22
25	115	0.0001	0.0533	115.01	3893	0.539	440.01	0.02	60	84	0	14	23
25	115	0.0001	0.0533	115.01	3893	0.539	440.41	0.02	60	84	0	14	24

Εικόνα 9-1: Αρχείο Εισόδου indat για το Σ.Η.Ε της Κύπρου.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα σενάρια και τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων. Σε κάθε σενάριο παρουσιάζεται ένας πίνακας ο οποίος περιλαμβάνει τις μονάδες παραγωγής που λειτουργούν και το φορτίο τους, με και χωρίς τη διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο. Με την ένταξη όμως περισσότερων μονάδων στο δίκτυο οι συνθήκες λειτουργίας του δικτύου αλλάζουν. Επομένως δεν θα ήταν λογικό να κάνουμε σύγκριση των αποτελεσμάτων με και χωρίς τα ηλεκτρικά οχήματα στο δίκτυο. Έτσι να εξετάζουμε την απόκριση της συχνότητας σε διαταραχές, με τα οχήματα ως απλό φορτίο στο σύστημα και ακολούθως με τα οχήματα να είναι ικανά να εκτελέσουν την V2G λειτουργία. Δηλαδή το φορτίο των οχημάτων μπορεί να μεταβάλλεται ανάλογα με σήματα που δέχεται από τους aggregators οι οποίοι επικοινωνούν με το Διαχειριστή του συστήματος. Για να έχουμε δίκαια σύγκριση αποτελεσμάτων θεωρούμε ότι δεν έχουμε οχήματα που εκτελούν τη λειτουργία BSH. Παρ’ όλα αυτά στα σενάρια 3 και 4 που η συχνότητα δεν ανακάμπτει ικανοποιητικά με την πρωτεύουσα ρύθμιση εκτελέσαμε προσομοιώσεις και όπου στο δίκτυο υπήρχαν επιπρόσθετα και οχήματα που ήθελαν να διατηρήσουν την αρχική τους SOC για να δούμε τη διαφορά στην ρύθμιση. Τα σενάρια προσομοιώσεων επιλέχτηκαν αναλόγως της διαταραχής συχνότητας που προκαλείται από το συμβάν. Δηλαδή αν σε κάποιο συμβάν η συχνότητα ανακάμπτει πολύ κοντά στην ονομαστική χωρίς τη V2G λειτουργία δεν είναι ανάγκη να εξετάσουμε αυτή τη περίπτωση. Επιπρόσθετα οι

γεννήτριες του Power world Simulator δεν αναλαμβάνουν να επαναφέρουν τη συχνότητα στην ονομαστική της τιμή. Προσομοιώνουν δηλαδή μόνο τη πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας. Έτσι λοιπόν ο χρόνος προσομοίωσης που θέσαμε είναι μέχρι τη στιγμή που η συχνότητα ανακάμπτει σε μια τιμή μετά τη πρωτεύουσα ρύθμιση.

Οι τιμές των παραμέτρων του συστήματος ελέγχου φόρτισης των οχημάτων που χρησιμοποιήσαμε για τις προσομοιώσεις παρουσιάζονται στον πιο κάτω πίνακα:

Παράμετρος	Συμβολισμός	Μονάδα μέτρησης	Τιμή
Αριθμός οχημάτων	EVs_number	-	39,724
Μέγιστος συντελεστής κέρδους K	max_V2G_droop	KW/HZ	1.5
Χωρητικότητα μπαταρίας	Battery_cap	KWh	22
Ελάχιστη κατάσταση φόρτισης	SOC_min	α.μ.	0.1
Μέγιστη κατάσταση φόρτισης	SOC_max	α.μ.	0.9
Μέγιστη ισχύς V2G	max_V2G_power	KW	7
Dead band συχνότητας	fr_dead_band	HZ	[-0.05 , 0.05]
Αποδοτικότητα φόρτισης/εκφόρτισης	hc/hd	α.μ.	0.92/0.92
Καθυστέρηση ενεργοποίησης V2G ελεγκτών	Td	sec	4

Πίνακας 9-1: Παράμετροι συστήματος ελέγχου φόρτισης για τις προσομοιώσεις.

Σενάριο 1

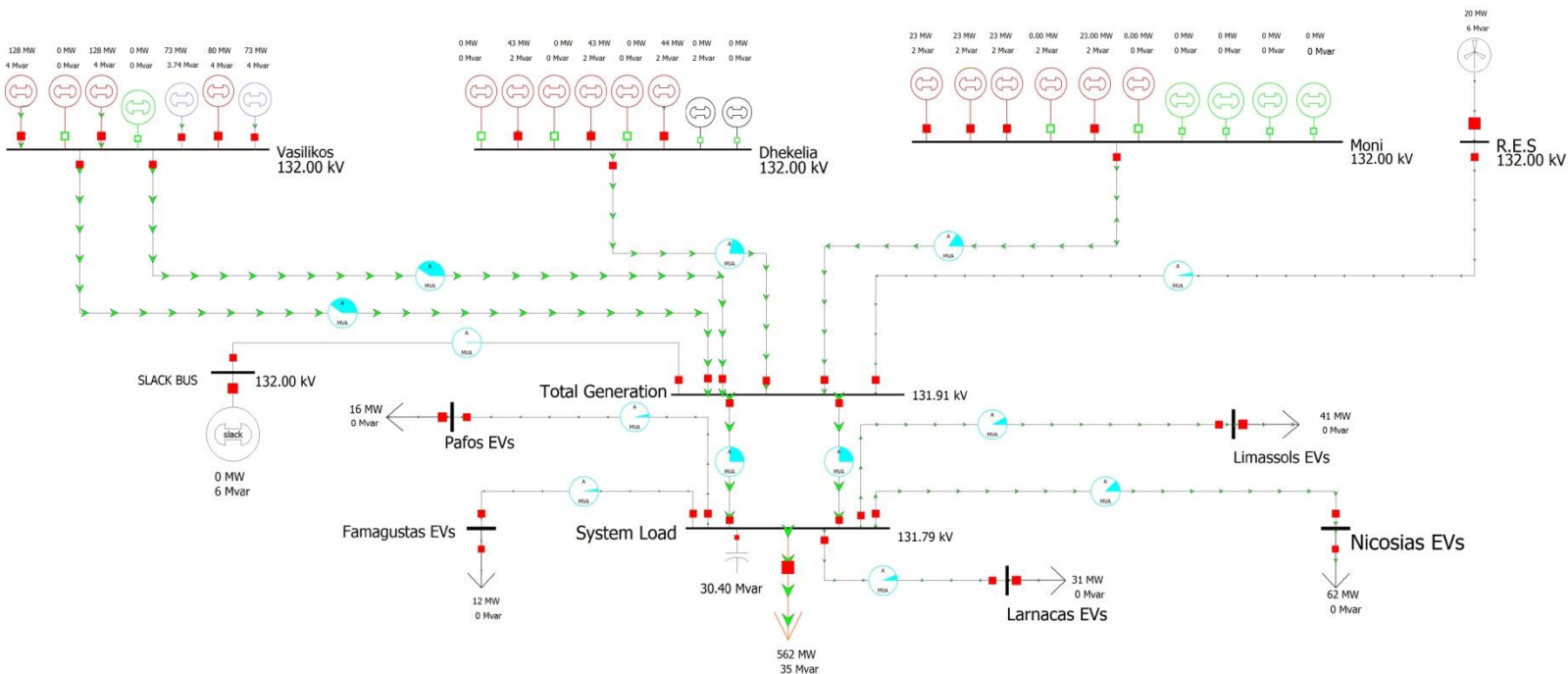
Στο σενάριο αυτό προσομοιώσαμε το συμβάν διαταραχής συχνότητας από απώλεια αεριοστροβλικής μονάδας του Συνδυασμένου Κύκλου του ΑΗΣ Βασιλικού. Στον πιο κάτω πίνακα παρουσιάζεται το απόσπασμα φορτίου στις μονάδες παραγωγής και το εξυπηρετούμενο φορτίο από την αιολική παραγωγή, με και χωρίς τη διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο. Με πορτοκαλί φόντο η απολεσθείσα μονάδα.

<u>Ηλεκτροπαραγωγός σταθμός</u>	<u>Μονάδα Παραγωγής</u>	<u>Φορτίο Μονάδας (MW)</u>	
		<u>Χωρίς τα οχήματα</u>	<u>Με τα οχήματα</u>
	Ατμοστροβλική- TG1	110	128
	Ατμοστροβλική- TG2	-	-

Βασιλικός	Ατμοστροβλική- TG3	110	128
	Αεριοστροβλική-GT1	-	-
	Εγκ. Συνδ. Κύκλου - Αεριοστροβλική -GT1	68	73
	Εγκ. Συνδ. Κύκλου - Αεριοστροβλική-GT2	30	80
	Εγκ. Συνδ. Κύκλου - Ατμοστροβλική-TG1	36	73
Δεκέλεια	Ατμοστροβλική- TG1	-	-
	Ατμοστροβλική- TG2	38	43
	Ατμοστροβλική- TG3	-	-
	Ατμοστροβλική- TG4	44	43
	Ατμοστροβλική- TG5	-	-
	Ατμοστροβλική- TG6	37	44
	Μηχανή Εσωτερικής Καύσης- MEK1	-	-
	Μηχανή Εσωτερικής Καύσης- MEK2	-	-
Μονή	Ατμοστροβλική TG1	17	23
	Ατμοστροβλική TG2	17	23
	Ατμοστροβλική TG3	17	23
	Ατμοστροβλική TG4	-	-
	Ατμοστροβλική TG5	17	23
	Ατμοστροβλική TG6	-	-
	Αεριοστροβλική GT1	-	-
	Αεριοστροβλική GT2	-	-
	Αεριοστροβλική GT3	-	-
	Αεριοστροβλική GT4	-	-
Αιολική Παραγωγή	-	20	20
Σύνολο		562	724

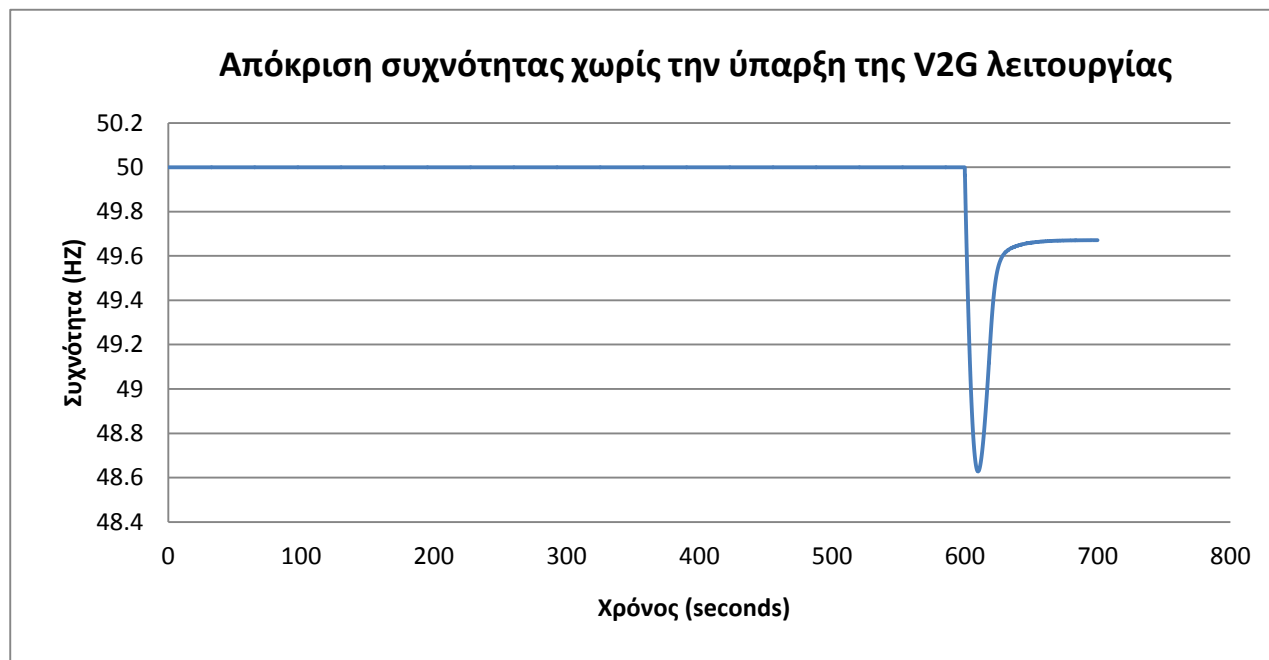
Πίνακας 9-2: Μονάδες και φορτίο μονάδων με και χωρίς την διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο.

Από τον πιο πάνω πίνακα φαίνεται ότι με την ένταξη των οχημάτων στο δίκτυο οι μονάδες παραγωγής θα πρέπει να αυξήσουν την ισχύ που εκχέουν στο δίκτυο ώστε να καλύψουν το επιπλέον φορτίο του συστήματος. Στην πιο κάτω εικόνα φαίνεται η επίλυση ροής φορτίου στο Power World Simulator με τις μονάδες λειτουργίας, το φορτίο του συστήματος (οικιακούς καταναλωτές, εργοστάσια, εμπορικά κέντρα κτλ) και το φορτίο των οχημάτων σε κάθε πόλη.

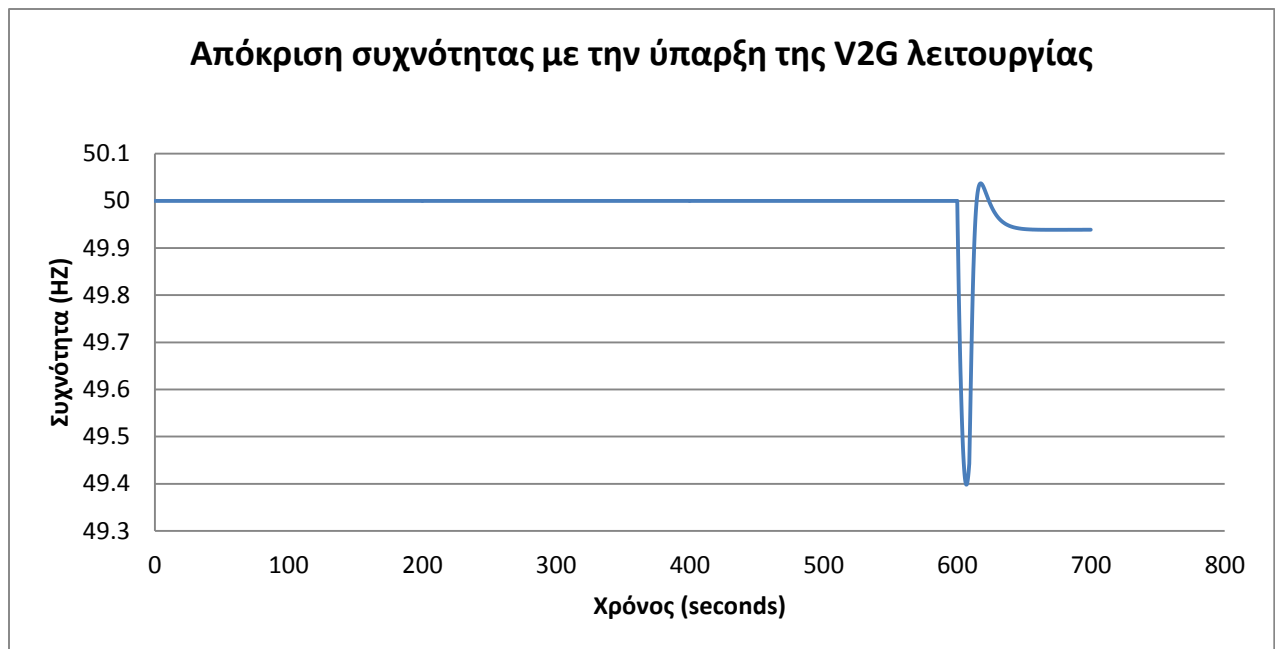


Εικόνα 9-2: Επίλυση ροής φορτίου με τις συνθήκες λειτουργίας του σεναρίου 1.

Στα πιο κάτω γραφήματα παρουσιάζεται η απόκριση της συχνότητας με και χωρίς τη V2G λειτουργία.



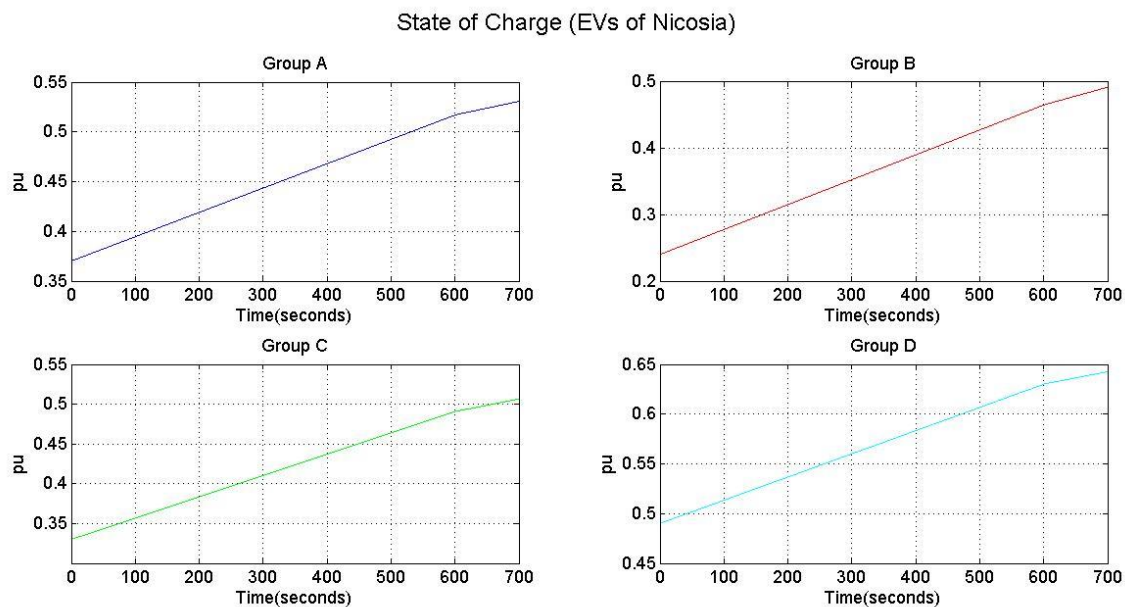
Γράφημα 9-1: Απόκριση συχνότητας πριν και κατά τη διαταραχή χωρίς V2G.



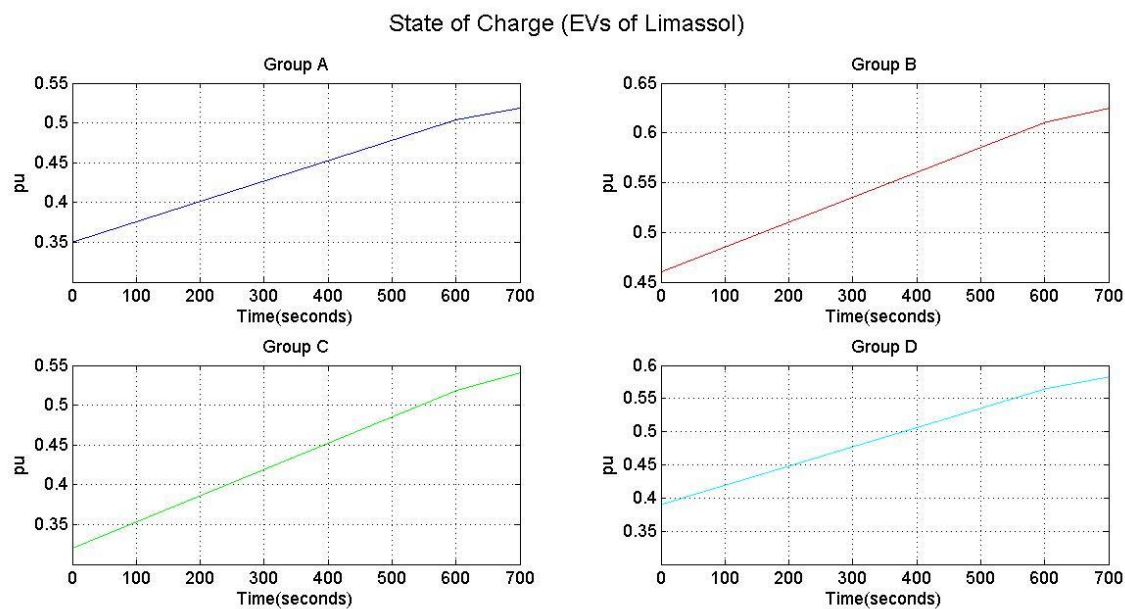
Γράφημα 9-2: Απόκριση συχνότητας πριν και κατά διαταραχή με V2G.

Παρατηρούμε ότι χωρίς τη V2G λειτουργία η συχνότητα μετά τη πρωτεύουσα ρύθμιση σταθεροποιείται στα 49.67 HZ, ενώ με τη V2G λειτουργία στα 49,94 HZ. Το αποτέλεσμα είναι πολύ ικανοποιητικό καθώς με τη V2G λειτουργία η συχνότητα ανακάμπτει πάρα πολύ κοντά στην ονομαστική της τιμή, έτσι το έργο της δευτερεύουσας ρύθμισης θα είναι πολύ πιο εύκολο, από το να μην αντιδρούσαν τα οχήματα στη μεταβολή της συχνότητας. Άρα τα οχήματα συνέβαλαν θετικά στην πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας του δικτύου. Η καμπύλη συχνότητας στην περίπτωση χωρίς V2G είναι πιο ομαλή και δεν έχει ταλαντώσεις, ενώ με τα EVs παρατηρούμε μία μικρή ταλάντωση η οποία εδώ οφείλεται στις ταλαντώσεις της τάσης. Στην πραγματικότητα θα πρέπει να γίνεται κατάλληλη ρύθμιση των παραμέτρων του συστήματος ελέγχου φόρτισης των οχημάτων για να υπάρχουν όσο το δυνατό μικρότερες ταλαντώσεις.

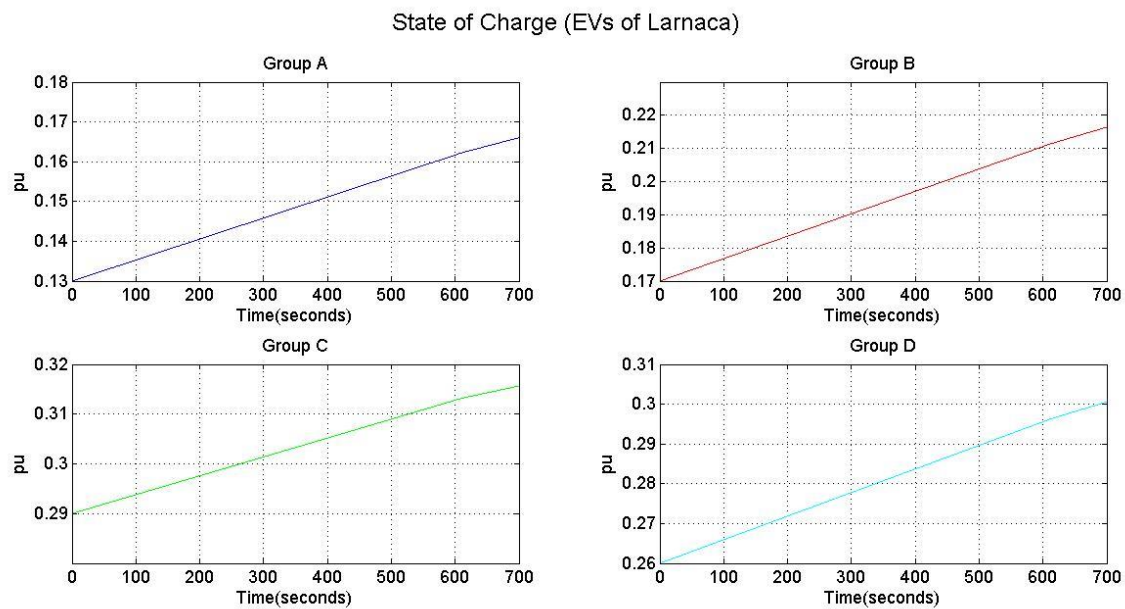
Στις πιο κάτω εικόνες παρουσιάζεται η κατάσταση φόρτισης των οχημάτων κάθε πόλης. Επιλέξαμε την απεικόνιση των διαγραμμάτων με τη χρήση του Matlab καθώς το πρόγραμμα παρέχει καλύτερη ανάλυση στην απεικόνιση των αποτελεσμάτων. Παρατηρούμε ότι όλες οι ομάδες οχημάτων σε όλες τις πόλεις φορτίζουν καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Αυτό που αλλάζει είναι η κλίση των καμπυλών τη στιγμή $t=611$ seconds, η οποία μειώνεται μιας και η ισχύς φόρτισης ελαττώνεται κατά τη διάρκεια της διαταραχής ώστε να ενισχυθεί η πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας του δικτύου. Τα οχήματα αντιδρούν τη χρονική στιγμή $t=611$ seconds δηλαδή τέσσερα δευτερόλεπτα αργότερα από τη στιγμή που γίνεται η βύθιση της συχνότητας στην χαμηλότερη της τιμή. Αυτή η καθυστέρηση στην αντίδραση των οχημάτων αφορά το χρόνο που χρειάζεται να φτάσει το σήμα από το Διαχειριστή του συστήματος στους aggregators κάθε πόλης και ακολούθως στου ελεγκτές φόρτισης των οχημάτων.



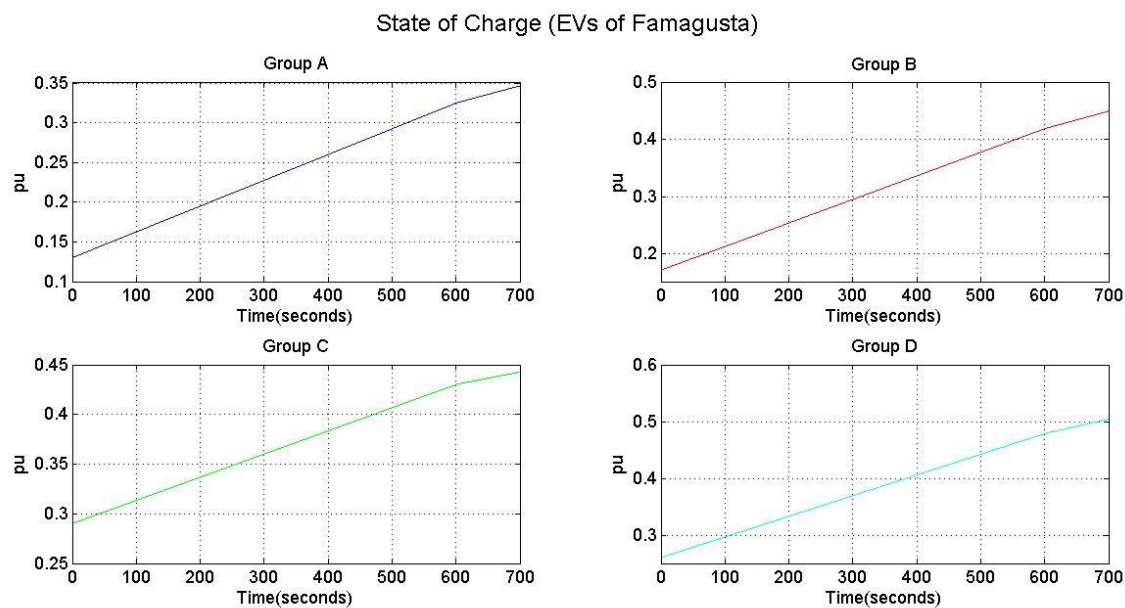
Εικόνα 9-3: Κατάσταση φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων Λευκωσίας.



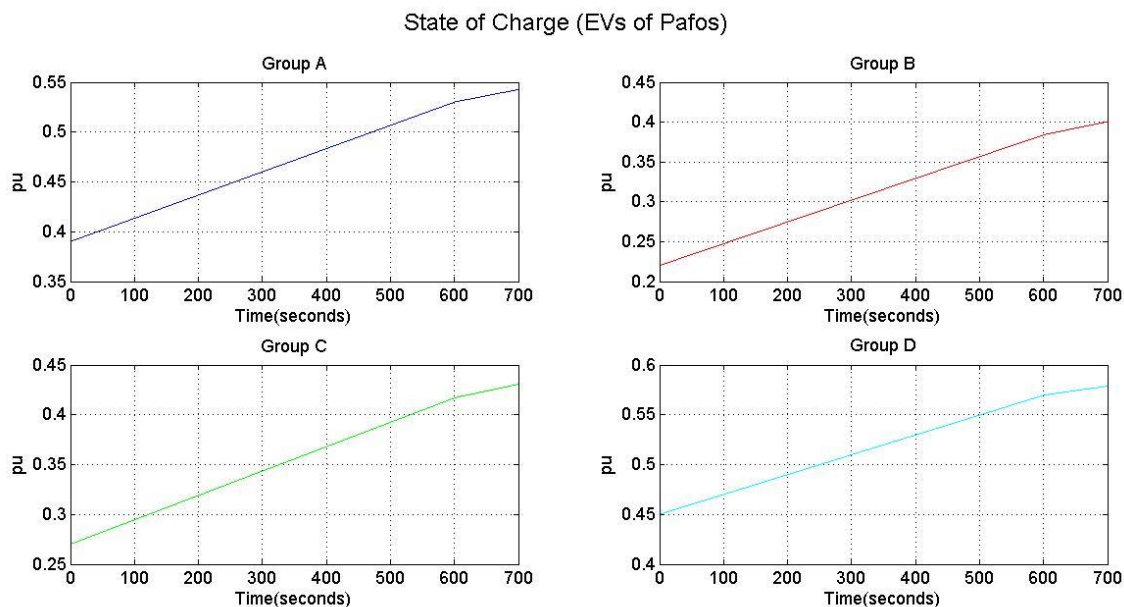
Εικόνα 9-4: Κατάσταση φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων Λεμεσού.



Εικόνα 9-5: Κατάσταση φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων Λάρνακας.

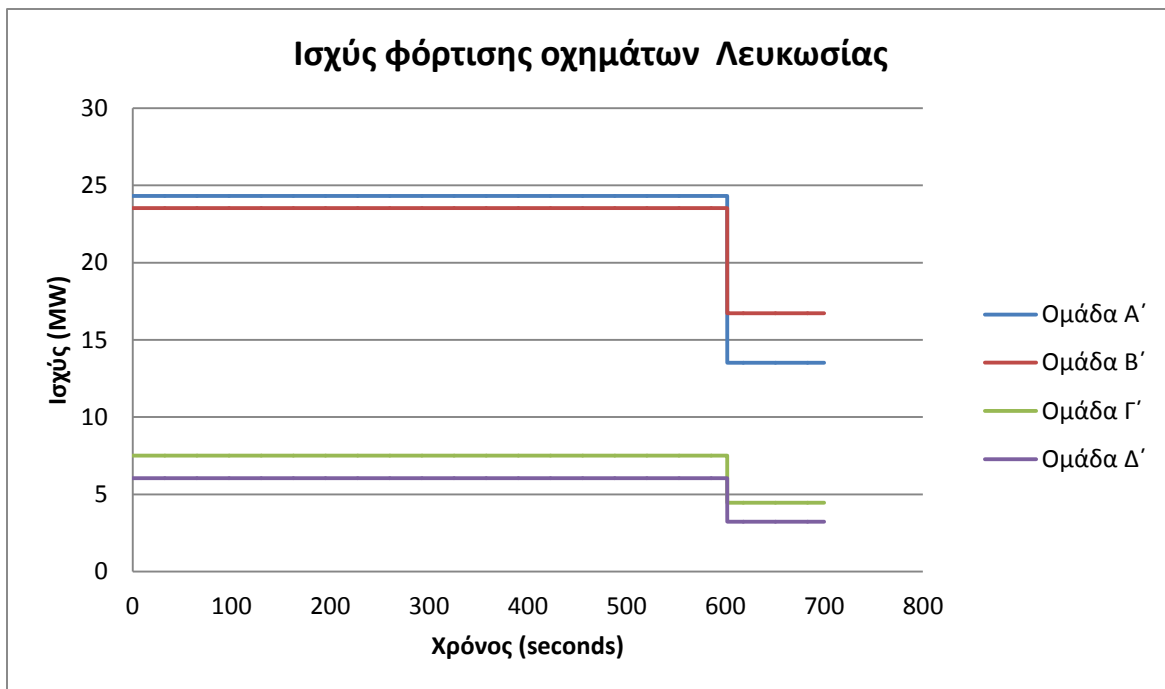


Εικόνα 9-6: Κατάσταση φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων Αμμοχώστου.

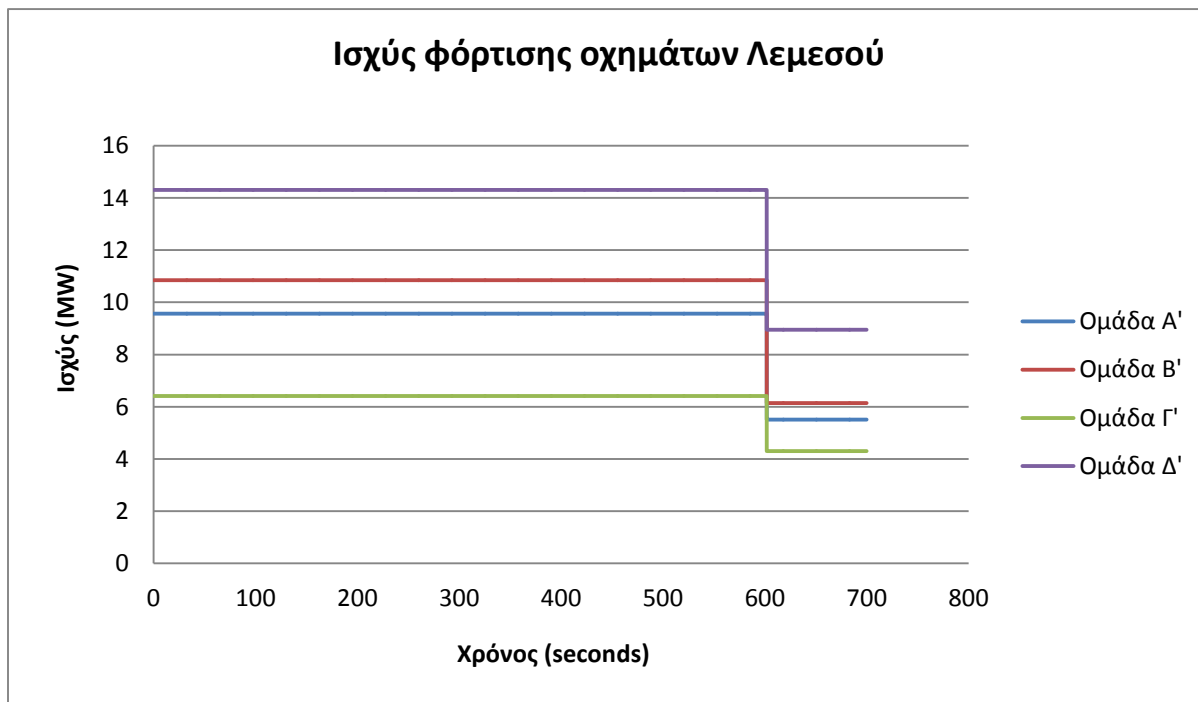


Εικόνα 9-7: Κατάσταση φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων Πάφου.

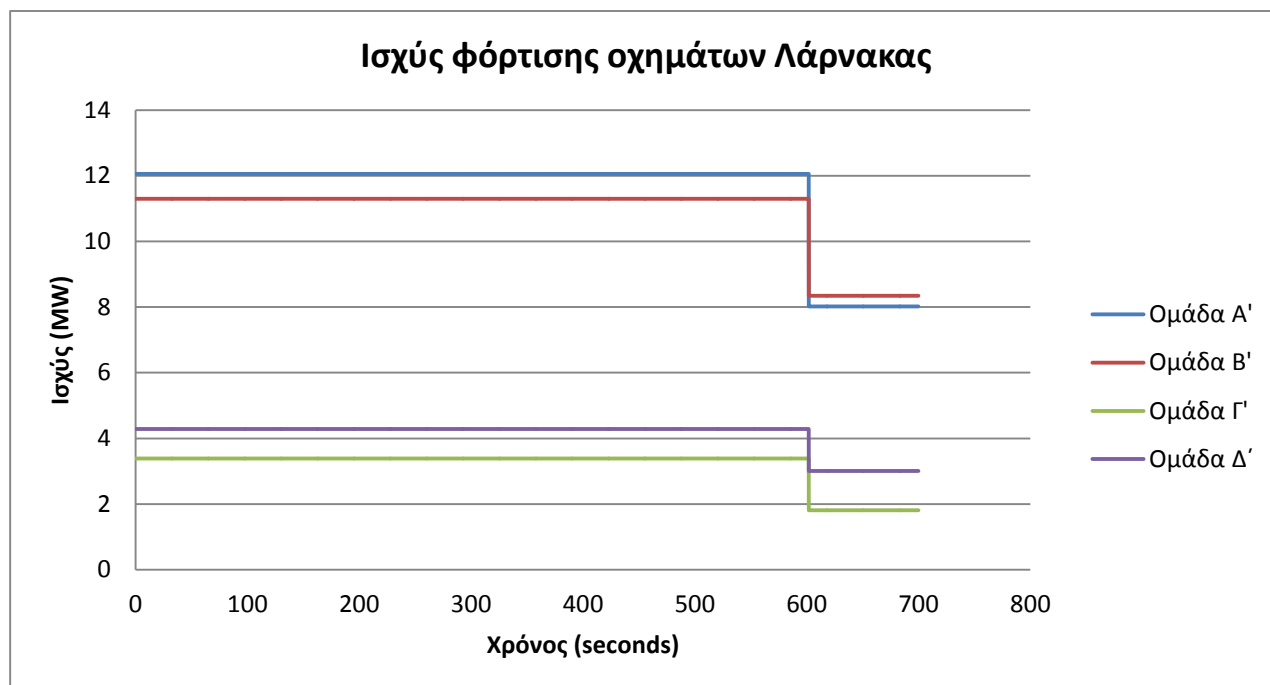
Στα γραφήματα της ισχύος που απεικονίζονται πιο κάτω φαίνεται έντονα η επίδραση που έχει ισχύς που απορροφούν τα οχήματα στην κατάσταση φόρτισης (SOC). Τη στιγμή $t=611$ seconds, (τέσσερα δευτερόλεπτα μετά που φτάνει η συχνότητα στην ελάχιστη της τιμή), η προγραμματισμένη ισχύς φόρτισης των οχημάτων κάθε ομάδας σε όλες τις επαρχίες, πέφτει σε αρκετά χαμηλότερη τιμή ώστε να γίνει πιο εύκολο το έργο του Σ.Η.Ε κατά τη διαδικασία της πρωτεύουσας ρύθμισης και κατά συνέπεια της δευτερεύουσας. Το ποσοστό μείωσης της προγραμματισμένης ισχύος φόρτισης των οχημάτων είναι το ίδιο για όλα τα ηλεκτρικά οχήματα καθώς χρησιμοποιήσαμε σε όλες τις ομάδες την ίδια τιμή στο κέρδος K (KW/HZ).



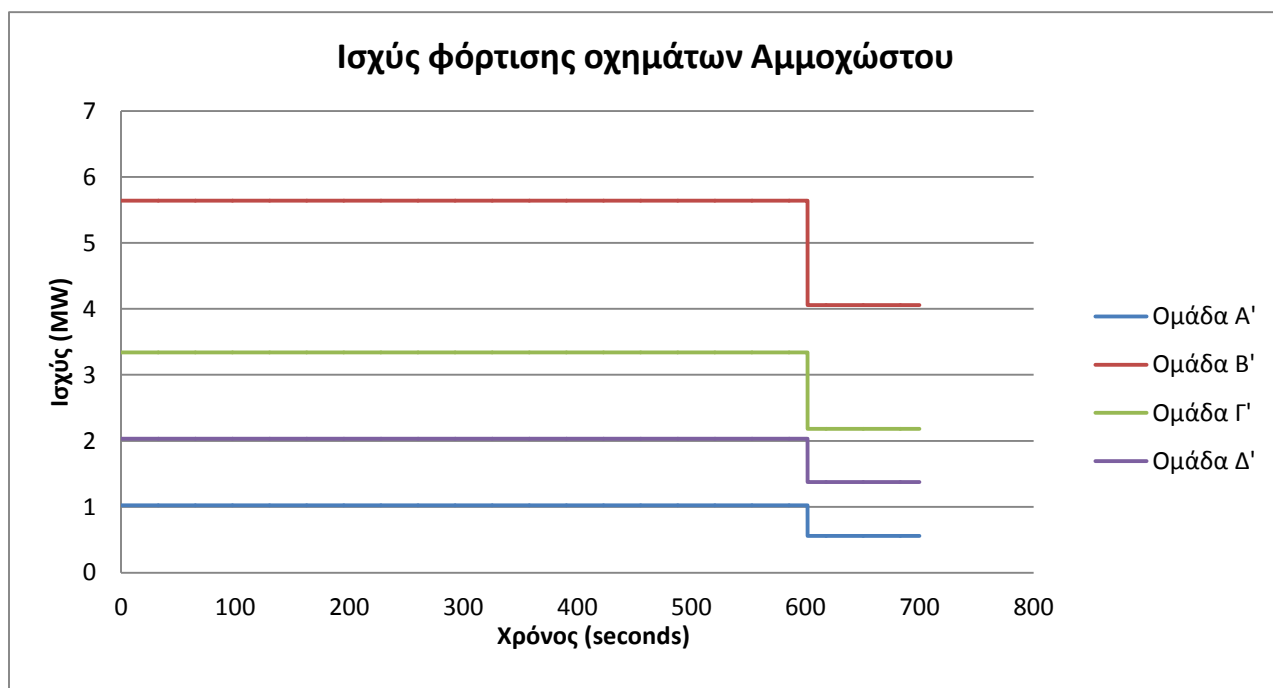
Γράφημα 9-3: Απόκριση ισχύος φόρτισης των οχημάτων της Λευκωσίας από τη πλευρά του δικτύου.



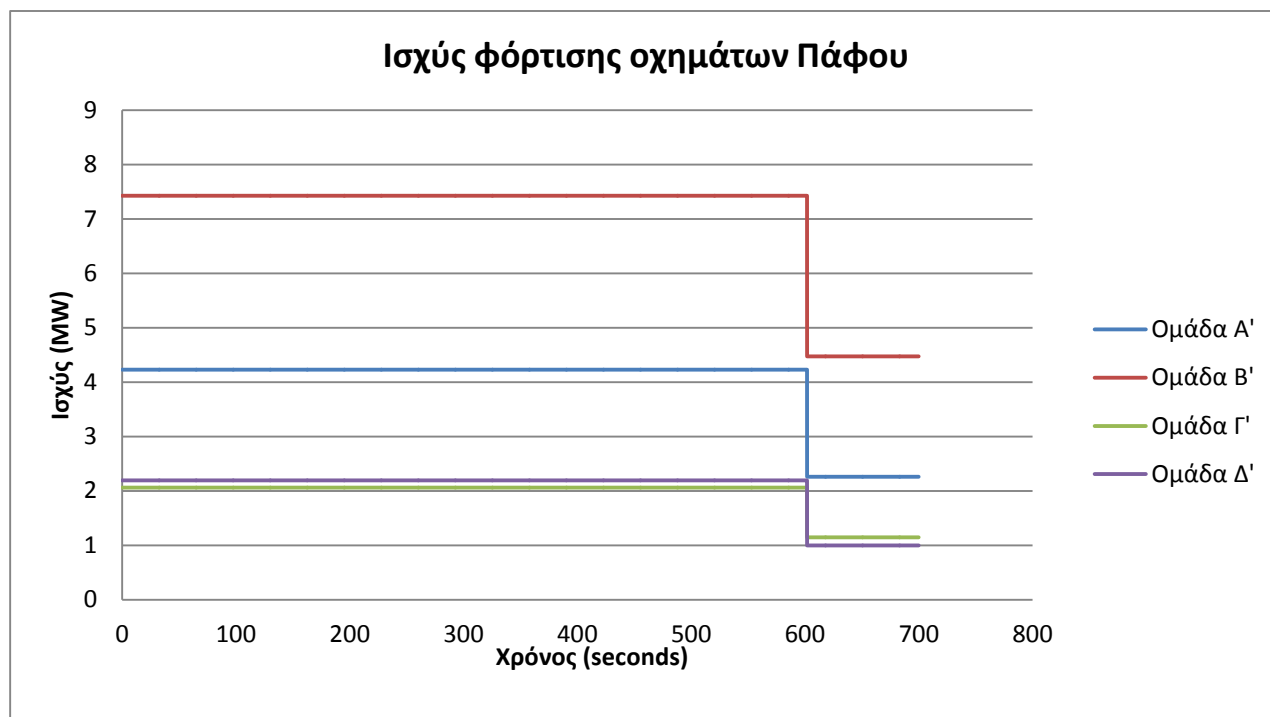
Γράφημα 9-4: Απόκριση ισχύος φόρτισης των οχημάτων της Λεμεσού από τη πλευρά του δικτύου.



Γράφημα 9-5: Απόκριση ισχύος φόρτισης των οχημάτων της Λάρνακας από τη πλευρά του δικτύου.



Γράφημα 9-6: Απόκριση ισχύος φόρτισης των οχημάτων της Αμμοχώστου από τη πλευρά του δικτύου.



Γράφημα 9-7: Απόκριση ισχύος φόρτισης των οχημάτων της Πάφου από τη πλευρά του δικτύου.

Σενάριο 2

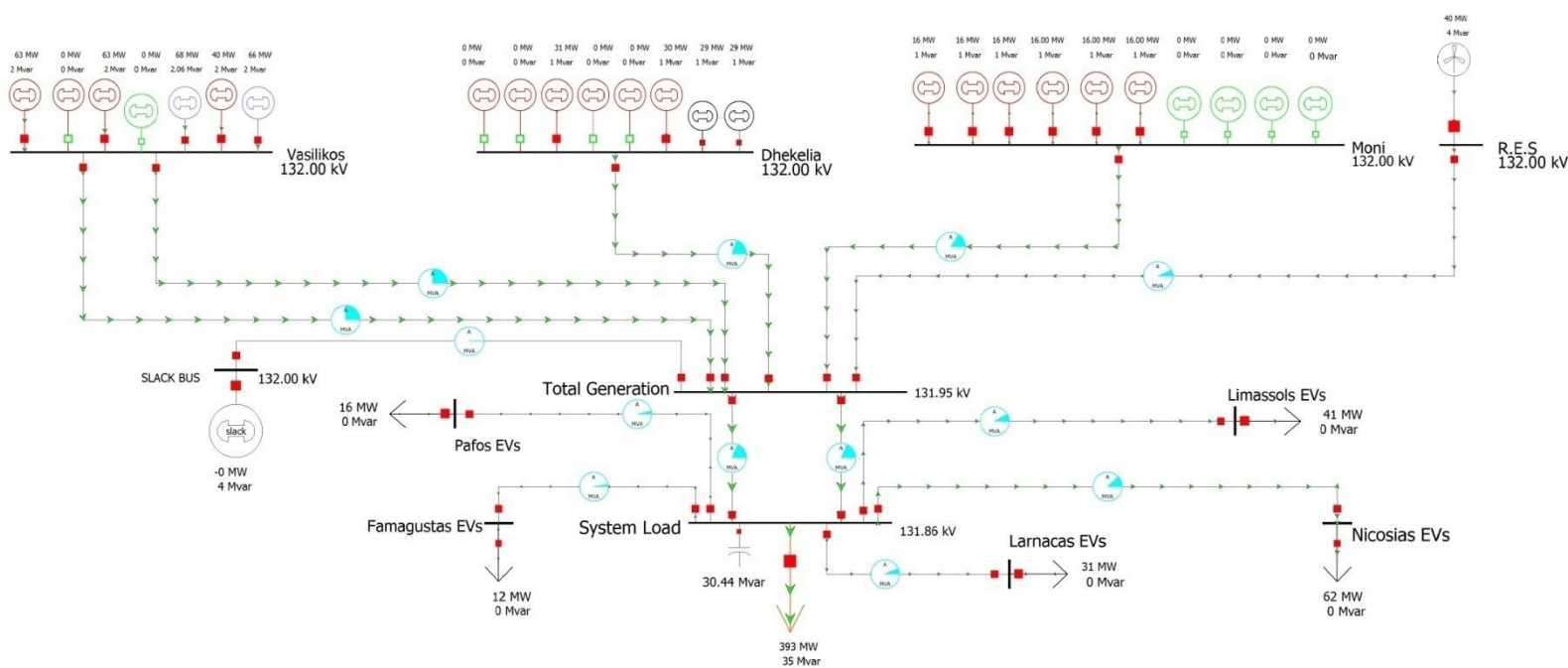
Στο σενάριο αυτό προσομοιώσαμε το συμβάν διαταραχής συχνότητας από απώλεια μιας ατμοστροβιλικής μονάδας του ΑΗΣ Βασιλικού. Στον πιο κάτω πίνακα παρουσιάζεται το απόσπασμα φορτίου στις μονάδες παραγωγής και το εξυπηρετούμενο φορτίο από την αιολική παραγωγή, με και χωρίς τη διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο. Με πορτοκαλί φόντο η απολεσθείσα μονάδα.

<u>Ηλεκτροπαραγωγός σταθμός</u>	<u>Μονάδα Παραγωγής</u>	<u>Φορτίο Μονάδας (MW)</u>	
		<u>Χωρίς τα οχήματα</u>	<u>Με τα οχήματα</u>
Βασιλικός	Ατμοστροβιλική- TG1	90	63
	Ατμοστροβιλική- TG2	-	-
	Ατμοστροβιλική- TG3	89	63
	Αεριοστροβιλική-GT1	-	-
	Εγκ. Συνδ. Κύκλου - Αεριοστροβιλική -GT1	52	68
	Εγκ. Συνδ. Κύκλου -	-	66

	Αεριοστροβιλική-GT2		
	Εγκ. Συνδ. Κύκλου - Ατμοστροβιλική-TG1	51	40
Δεκέλεια	Ατμοστροβιλική- TG1	-	-
	Ατμοστροβιλική- TG2	-	-
	Ατμοστροβιλική- TG3	36	31
	Ατμοστροβιλική- TG4	-	-
	Ατμοστροβιλική- TG5	-	-
	Ατμοστροβιλική- TG6	35	30
	Μηχανή Εσωτερικής Καύσης- MEK1	-	29
	Μηχανή Εσωτερικής Καύσης- MEK2	-	29
Μονή	Ατμοστροβιλική TG1	-	16
	Ατμοστροβιλική TG2	-	16
	Ατμοστροβιλική TG3	-	16
	Ατμοστροβιλική TG4	-	16
	Ατμοστροβιλική TG5	-	16
	Ατμοστροβιλική TG6	-	16
	Αεριοστροβιλική GT1	-	-
	Αεριοστροβιλική GT2	-	-
	Αεριοστροβιλική GT3	-	-
	Αεριοστροβιλική GT4	-	-
Αιολική Παραγωγή	-	40	40
Σύνολο		393	555

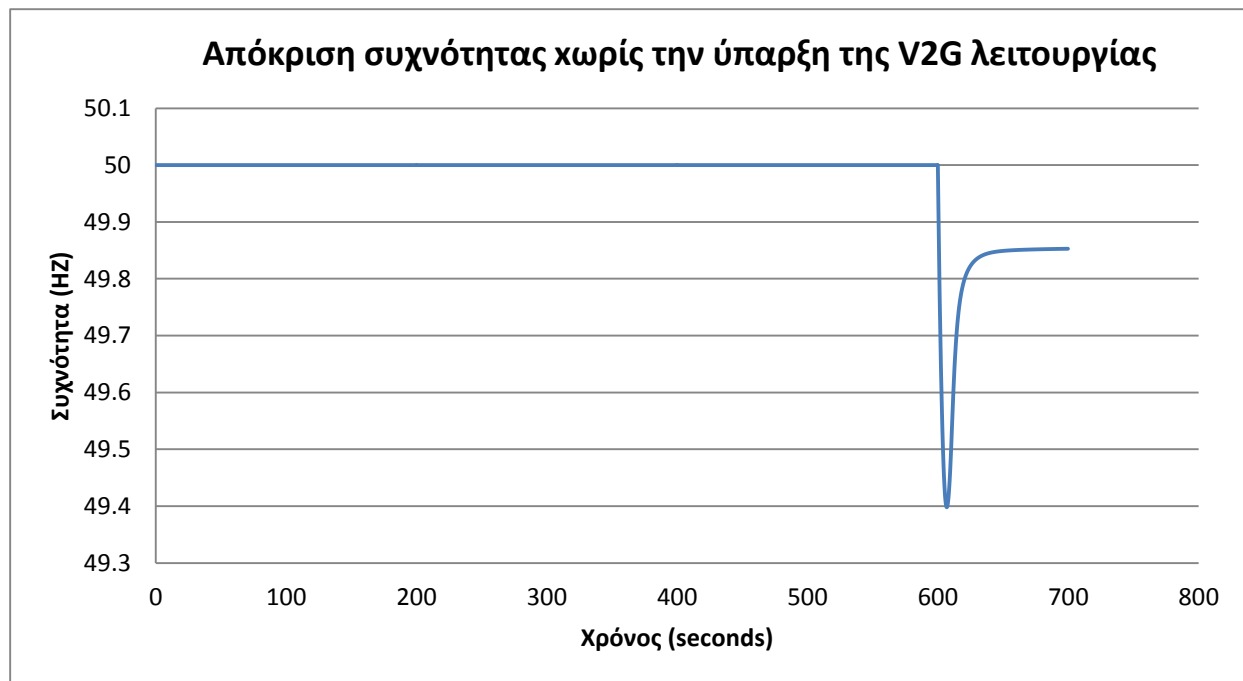
Πίνακας 9-3: Μονάδες και φορτίο μονάδων με και χωρίς την διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο.

Από τον πιο πάνω πίνακα φαίνεται ότι με την ένταξη των οχημάτων στο δίκτυο θα πρέπει να γίνει ένταξη περισσότερων μονάδων ώστε να καλυφτεί το επιπλέον φορτίο στο σύστημα. Παρατηρούμε ότι υπάρχουν μονάδες οι οποίες φορτίζονται λιγότερο μετά την ένταξη των οχημάτων στο δίκτυο. Αυτό συμβαίνει διότι έχει γίνει βέλτιστη οικονομική κατανομή του φορτίου στις μονάδες που ήταν ήδη σε λειτουργία και σε αυτές που εντάχθηκαν στο σύστημα εκ των υστέρων. Στην πιο κάτω εικόνα φαίνεται η επίλυση ροής φορτίου στο Power World Simulator με τις μονάδες λειτουργίας, το φορτίο του συστήματος (οικιακούς καταναλωτές, εργοστάσια, εμπορικά κέντρα κτλ) και το φορτίο των οχημάτων σε κάθε πόλη.

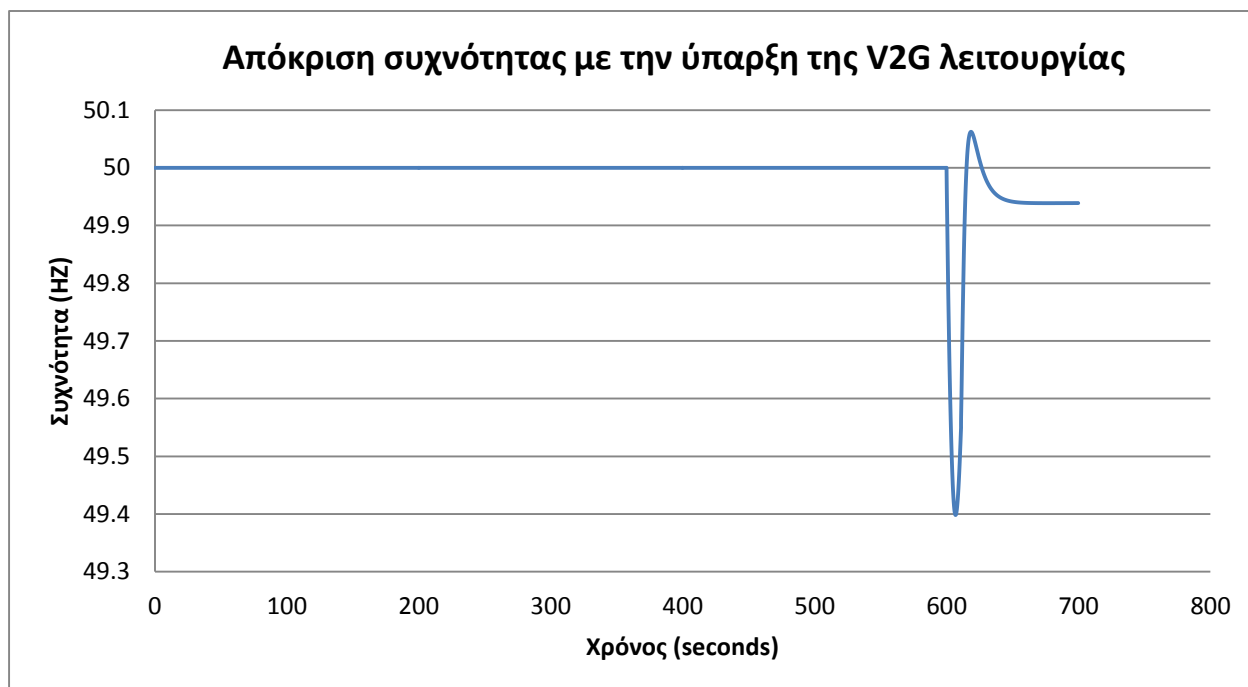


Εικόνα 9-8: Επίλυση ροής φορτίου με τις συνθήκες λειτουργίας του σεναρίου 2.

Στα παρακάτω γραφήματα παρουσιάζεται η απόκριση συχνότητας με και χωρίς την ύπαρξη της V2G λειτουργίας.



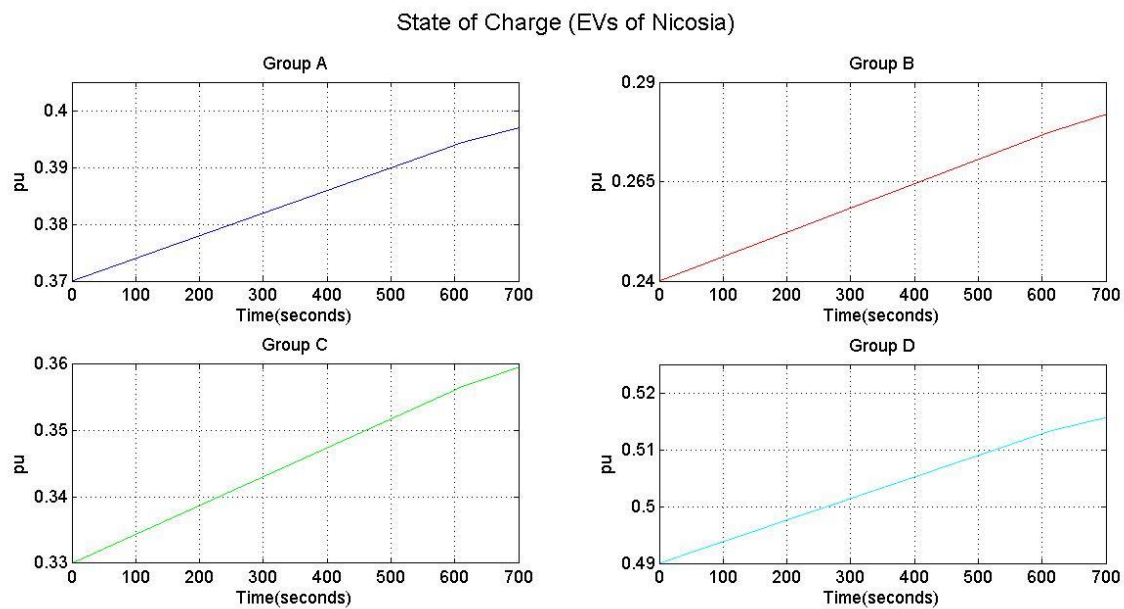
Γράφημα 9-8: Απόκριση συχνότητας πριν και κατά την διαταραχή στο σύστημα χωρίς την ύπαρξη V2G λειτουργίας.



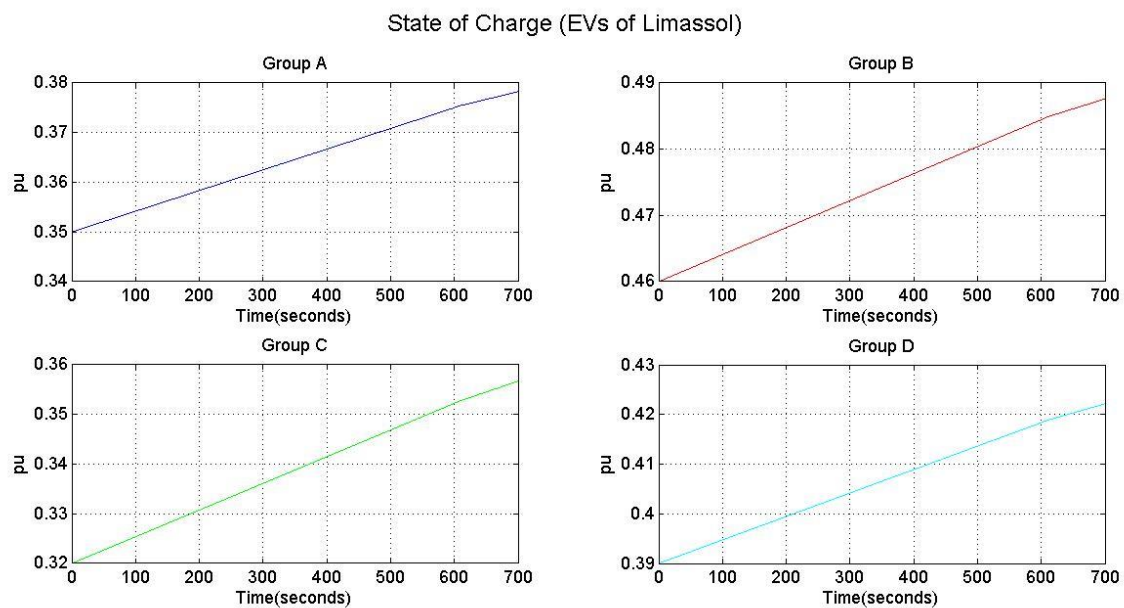
Γράφημα 9-9: Απόκριση συχνότητας πριν και κατά την διαταραχή στο σύστημα με την ύπαρξη V2G λειτουργίας.

Παρατηρούμε ότι χωρίς τη V2G λειτουργία η συχνότητα μετά τη πρωτεύουσα ρύθμιση σταθεροποιείται περίπου στα 49.85 Hz, ενώ με τη V2G λειτουργία στα 49.93 Hz. Τα οχήματα βοήθησαν αρκετά στην πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας του δικτύου. Το αποτέλεσμα από την ενίσχυση της πρωτεύουσας ρύθμισης θα απλοποιήσει τη διαδικασία της δευτερεύουσας ρύθμισης η οποία θα είναι σαφώς πιο σύντομη. Όπως και στο σενάριο 1 η καμπύλη συχνότητας στην περίπτωση χωρίς V2G είναι πιο ομαλή και δεν έχει ταλαντώσεις, ενώ με τα EVs παρατηρούμε μία μικρή ταλάντωση η οποία εδώ οφείλεται στις ταλαντώσεις της τάσης.

Στις πιο κάτω εικόνες παρουσιάζεται η κατάσταση φόρτισης των οχημάτων κάθε πόλης. Παρατηρούμε ότι όλες οι ομάδες οχημάτων σε όλες τις πόλεις φορτίζουν καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Η κλίση των καμπυλών τη στιγμή $t=611$ seconds, μειώνεται αφού η ισχύς φόρτισης ελαττώνεται κατά τη διάρκεια της διαταραχής ώστε να ενισχυθεί η πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας του δικτύου. Σε σύγκριση με το σενάριο 1 ο ρυθμός φόρτισης των οχημάτων μειώνεται λιγότερο κατά τη διαταραχή, καθώς στο σφάλμα συχνότητας είναι μικρότερο.

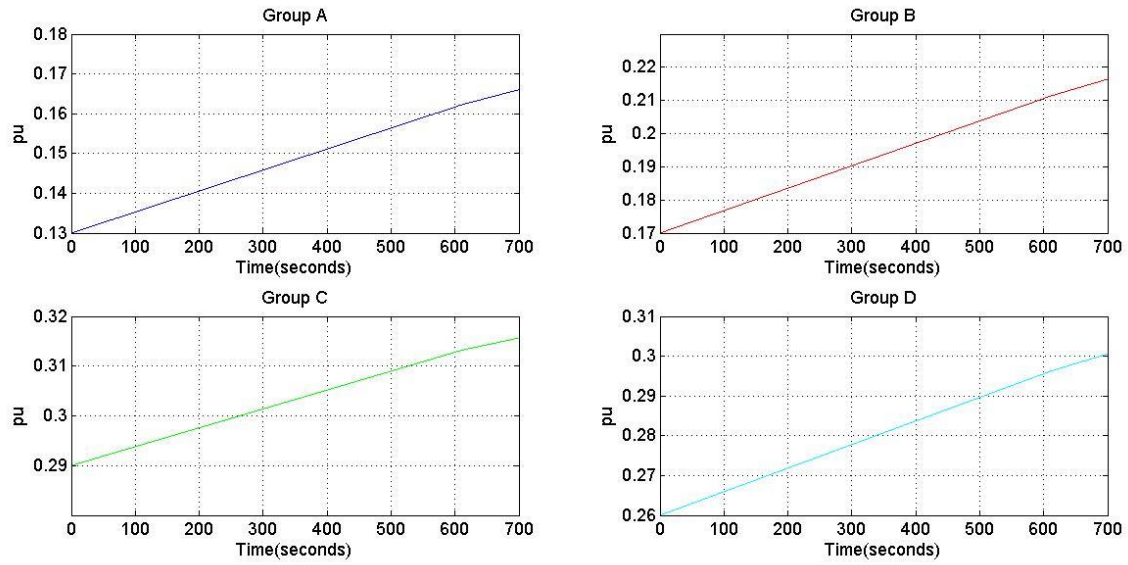


Εικόνα 9-8: Κατάσταση φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων Λευκωσίας.



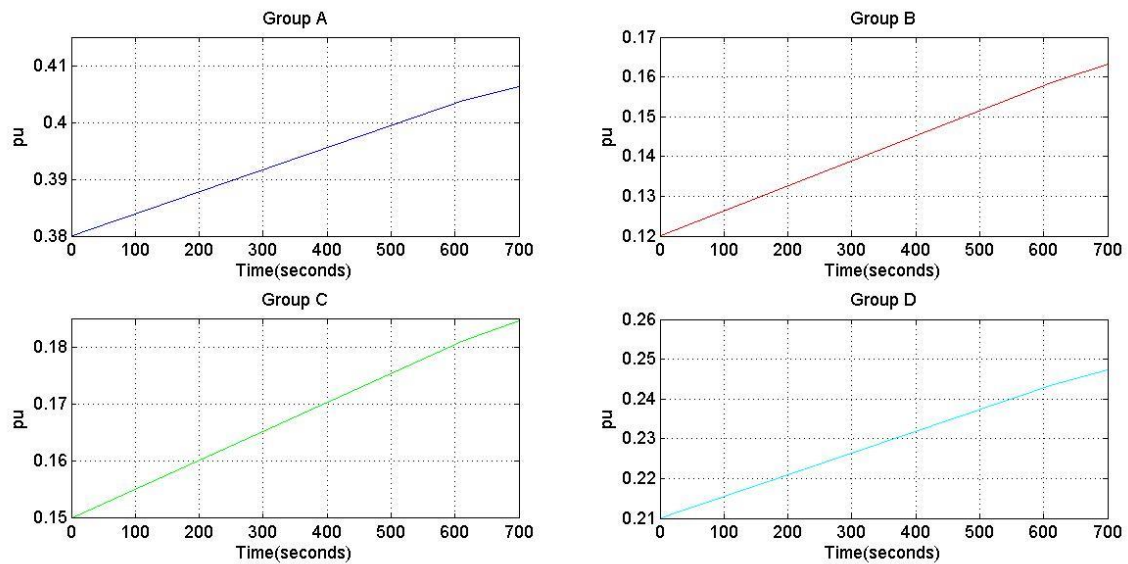
Εικόνα 9-9: Κατάσταση φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων Λεμεσού.

State of Charge (EVs of Larnaca)

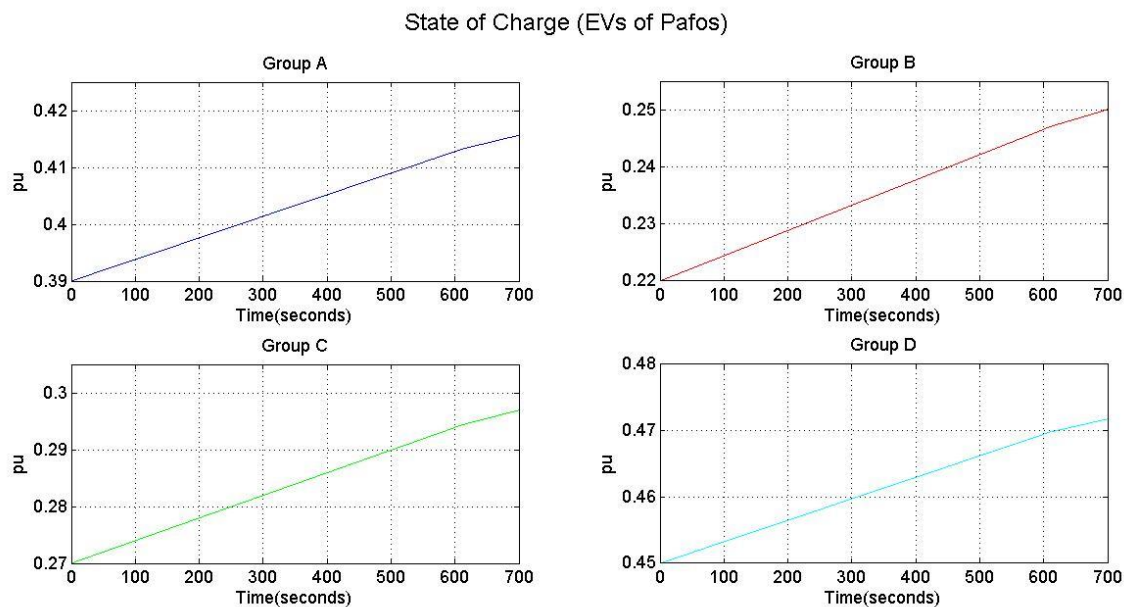


Εικόνα 9-10: Κατάσταση φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων Λάρνακας.

State of Charge (EVs of Famagusta)

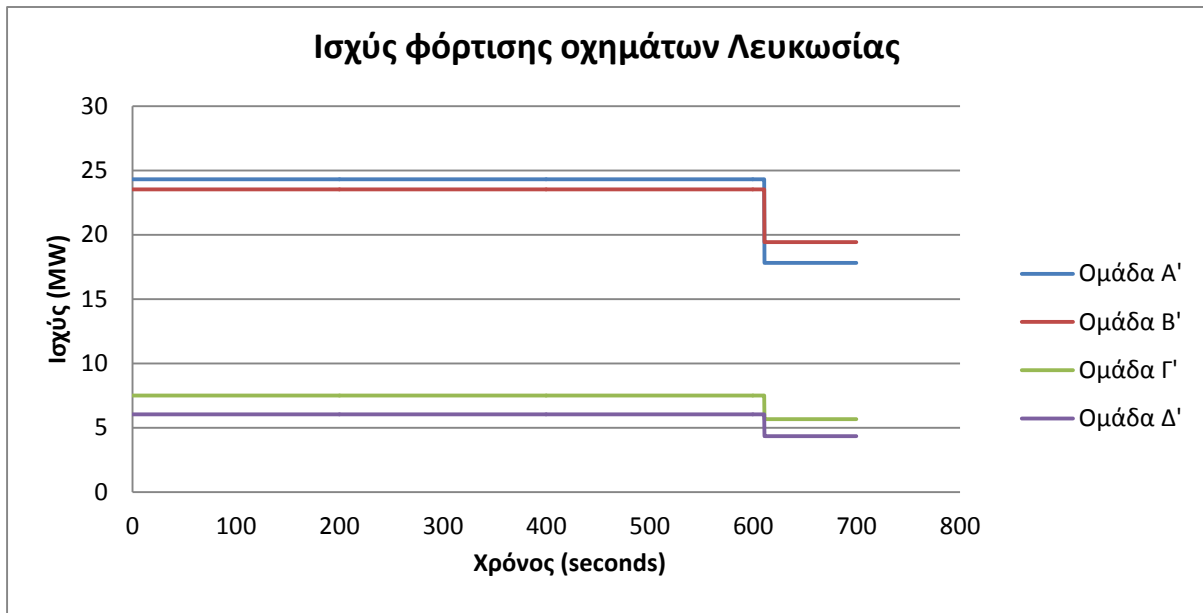


Εικόνα 9-11: Κατάσταση φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων Αμμοχώστου.

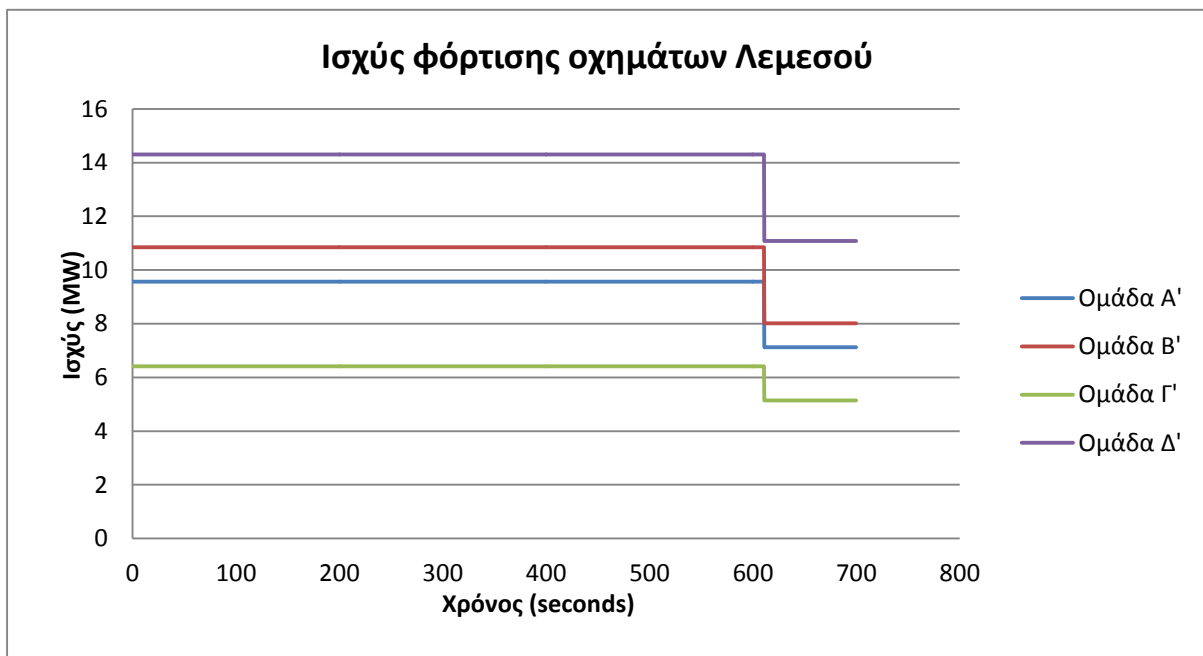


Εικόνα 9-12: Κατάσταση φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων Πάφου.

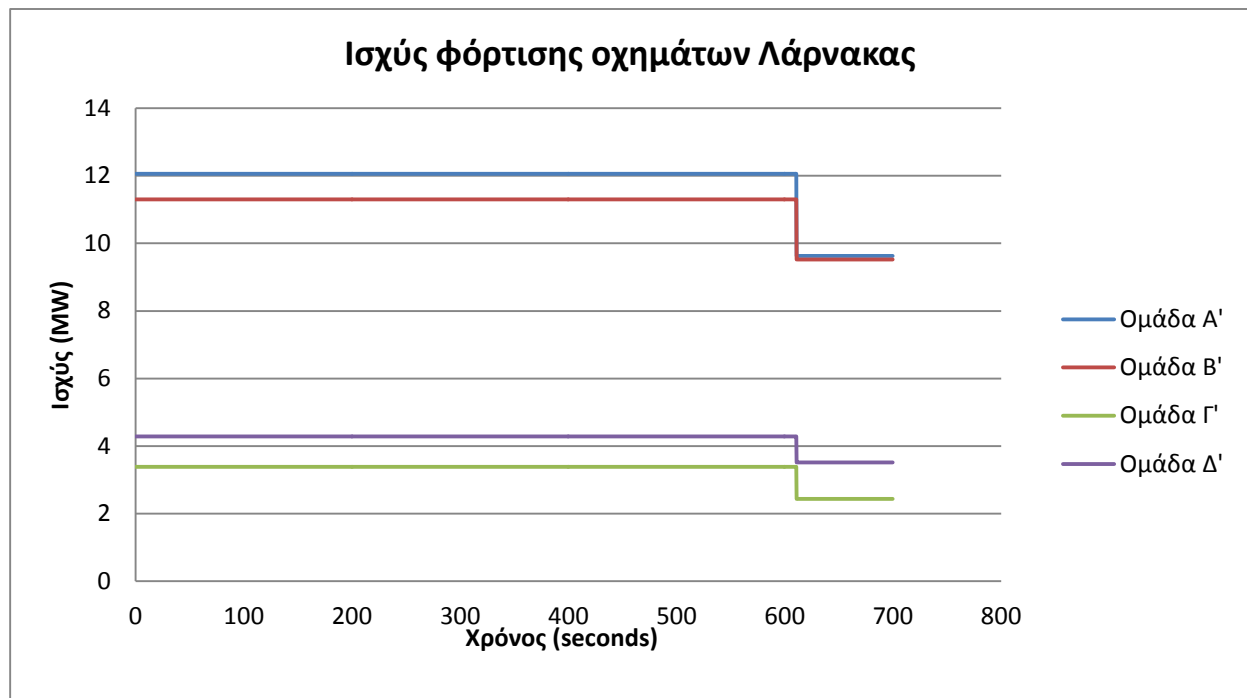
Όπως φαίνεται από τα πιο κάτω διαγράμματα τη στιγμή $t=611$ seconds, (τέσσερα δευτερόλεπτα μετά που φτάνει η συχνότητα στην ελάχιστη της τιμή), η προγραμματισμένη ισχύς φόρτισης των οχημάτων κάθε ομάδας σε όλες τις επαρχίες ελαττώνεται, ώστε να γίνει πιο εύκολο το έργο του Σ.Η.Ε κατά τη διαδικασία της πρωτεύουσας ρύθμισης και κατά συνέπεια της δευτερεύουσας. Σε σύγκριση με το σενάριο 1 η ισχύς φόρτισης των οχημάτων μειώνεται λιγότερο αφού όπως προαναφέρθηκε το σφάλμα συχνότητας (βύθιση καμπύλης) είναι μικρότερο.



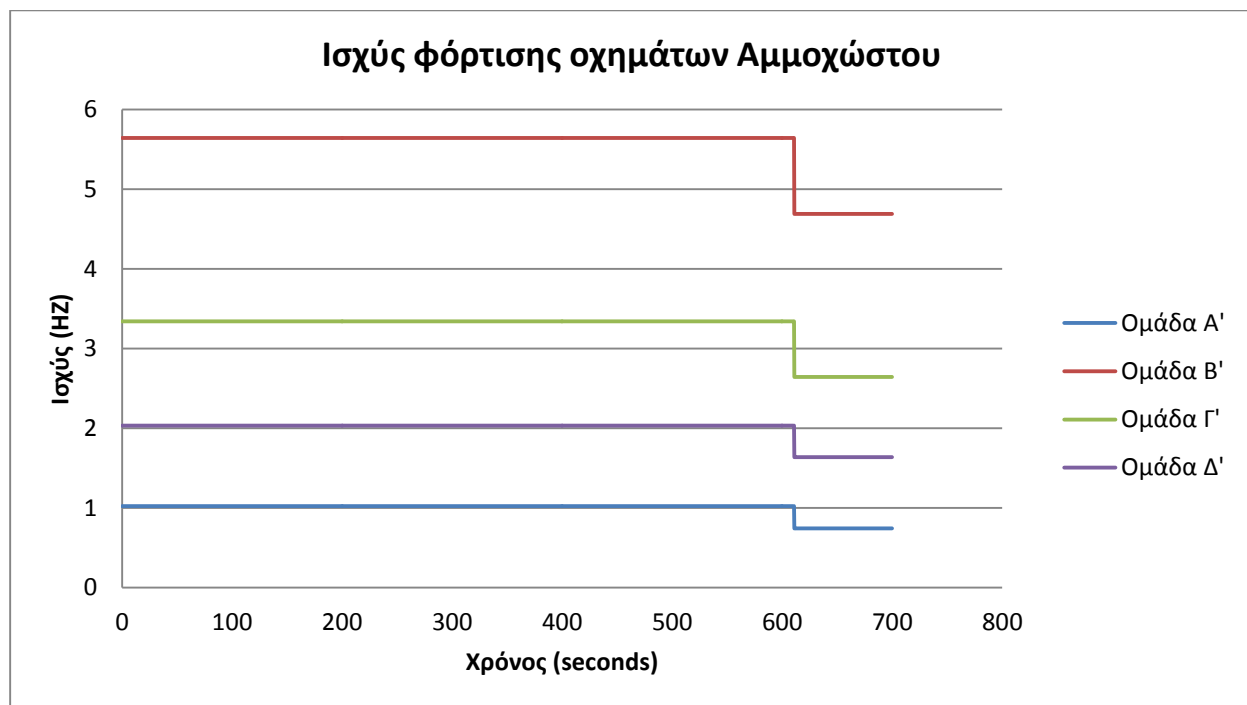
Γράφημα 9-10 : Απόκριση ισχύος φόρτισης των οχημάτων της Λευκωσίας από τη πλευρά του δικτύου.



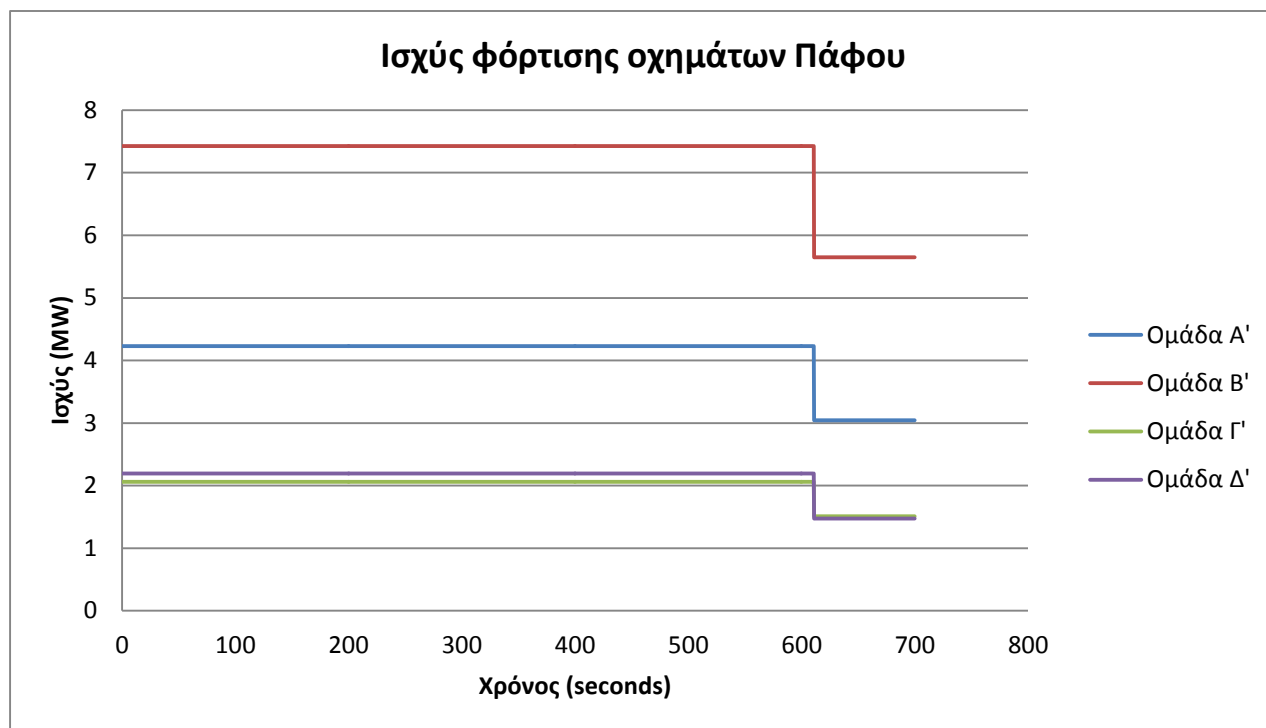
Γράφημα 9-11 : Απόκριση ισχύος φόρτισης των οχημάτων της Λεμεσού από τη πλευρά του δικτύου.



Γράφημα 9-12 : Απόκριση ισχύος φόρτισης των οχημάτων της Λάρνακας από τη πλευρά του δικτύου.



Γράφημα 9-13 : Απόκριση ισχύος φόρτισης των οχημάτων της Αμμοχώστου από τη πλευρά του δικτύου.



Γράφημα 9-14 : Απόκριση ισχύος φόρτισης των οχημάτων της Πάφου από τη πλευρά του δικτύου.

Σενάριο 3

Στο σενάριο αυτό προσομοιώσαμε το συμβάν διαταραχής συχνότητας από θετική μεταβολή του φορτίου του συστήματος. Τη χρονική στιγμή $t=600$ seconds αυξάνουμε το φορτίο στο ζυγό System Load κατά 10%. Αρχικά το φορτίο είναι 1005 MW + 35 MVar και μετά τη διαταραχή γίνεται 1105.5 MW + 35 MVar. Το φορτίο στο ζυγό System Load είναι ήδη υψηλό πριν τη μεταβολή. Έτσι μπορούμε να θεωρήσουμε ότι αντιπροσωπεύει μια στιγμή μιας ημέρας κατά τη θερινή περίοδο, όπου υπάρχει μεγάλη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας. Επίσης η θετική μεταβολή του φορτίου μπορεί να αντιπροσωπεύει μια στιγμή που ο περισσότερος κόσμος ανάβει το σύστημα κλιματισμού, όπως συμβαίνει συνήθως κατά τις θερινές μεσημβρινές ώρες. Στον πιο κάτω πίνακα παρουσιάζεται το απόσπασμα φορτίου στις μονάδες παραγωγής με και χωρίς τη διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο.

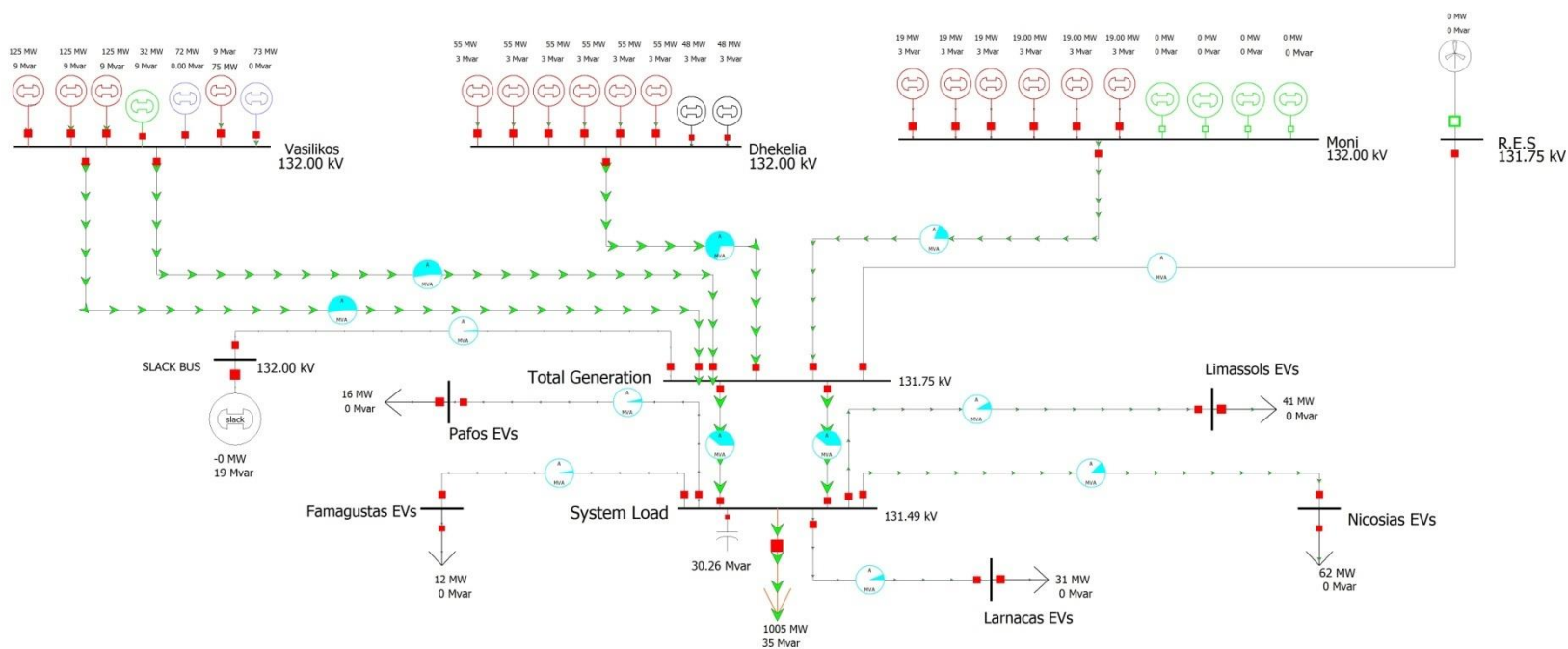
<u>Ηλεκτροπαραγωγός σταθμός</u>	<u>Μονάδα Παραγωγής</u>	<u>Φορτίο Μονάδας (MW)</u>	
		<u>Χωρίς τα οχήματα</u>	<u>Με τα οχήματα</u>
	Ατμοστροβιλική- TG1	127.4	125

Βασιλικός	Ατμοστροβλική- TG2	127.4	125
	Ατμοστροβλική- TG3	127.4	125
	Αεριοστροβλική-GT1	4	32
	Εγκ. Συνδ. Κύκλου - Αεριοστροβλική -GT1	75	75
	Εγκ. Συνδ. Κύκλου - Αεριοστροβλική-GT2	75	70
	Εγκ. Συνδ. Κύκλου - Ατμοστροβλική-TG1	74.7	75
Δεκέλεια	Ατμοστροβλική- TG1	37.799882	55
	Ατμοστροβλική- TG2	37.799882	55
	Ατμοστροβλική- TG3	37.799876	55
	Ατμοστροβλική- TG4	37.799881	55
	Ατμοστροβλική- TG5	37.799882	55
	Ατμοστροβλική- TG6	37.799876	55
	Μηχανή Εσωτερικής Καύσης- MEK1	51.48	48
	Μηχανή Εσωτερικής Καύσης- MEK2	51.48	48
Μονή	Ατμοστροβλική TG1	-	19
	Ατμοστροβλική TG2	-	19
	Ατμοστροβλική TG3	-	19
	Ατμοστροβλική TG4	20.378156	19
	Ατμοστροβλική TG5	20.379713	19
	Ατμοστροβλική TG6	20.380245	19
	Αεριοστροβλική GT1	-	-
	Αεριοστροβλική GT2	-	-
	Αεριοστροβλική GT3	-	-
	Αεριοστροβλική GT4	-	-
Αιολική Παραγωγή		-	-
Σύνολο		1005	1167

Πίνακας 9-4: Μονάδες και φορτίο μονάδων με και χωρίς την διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο.

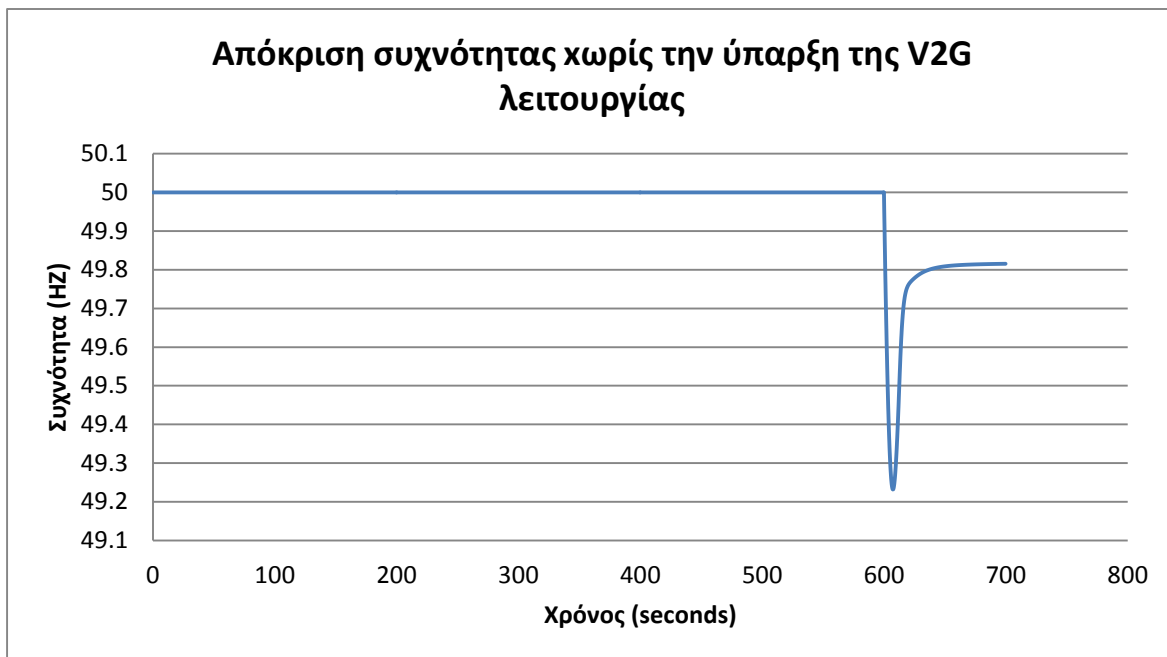
Όπως παρατηρούμε από τον πίνακα 9-4 με την ένταξη των οχημάτων στο δίκτυο θα πρέπει να γίνει ένταξη περισσότερων μονάδων για τη διατήρηση της ισορροπίας μεταξύ παραγωγής και φορτίου. Όπως και στο σενάριο 2 έχει γίνει βέλτιστη οικονομική κατανομή του φορτίου στις μονάδες που ήταν ήδη σε λειτουργία και σε αυτές που εντάχθηκαν στο σύστημα εκ των υστέρων. Στην πιο κάτω εικόνα φαίνεται η επίλυση ροής φορτίου στο Power World Simulator με τις μονάδες λειτουργίας, το φορτίο του συστήματος (οικιακούς καταναλωτές,

εργοστάσια, εμπορικά κέντρα κτλ) στο ζυγό System Load και το φορτίο των οχημάτων σε κάθε πόλη.

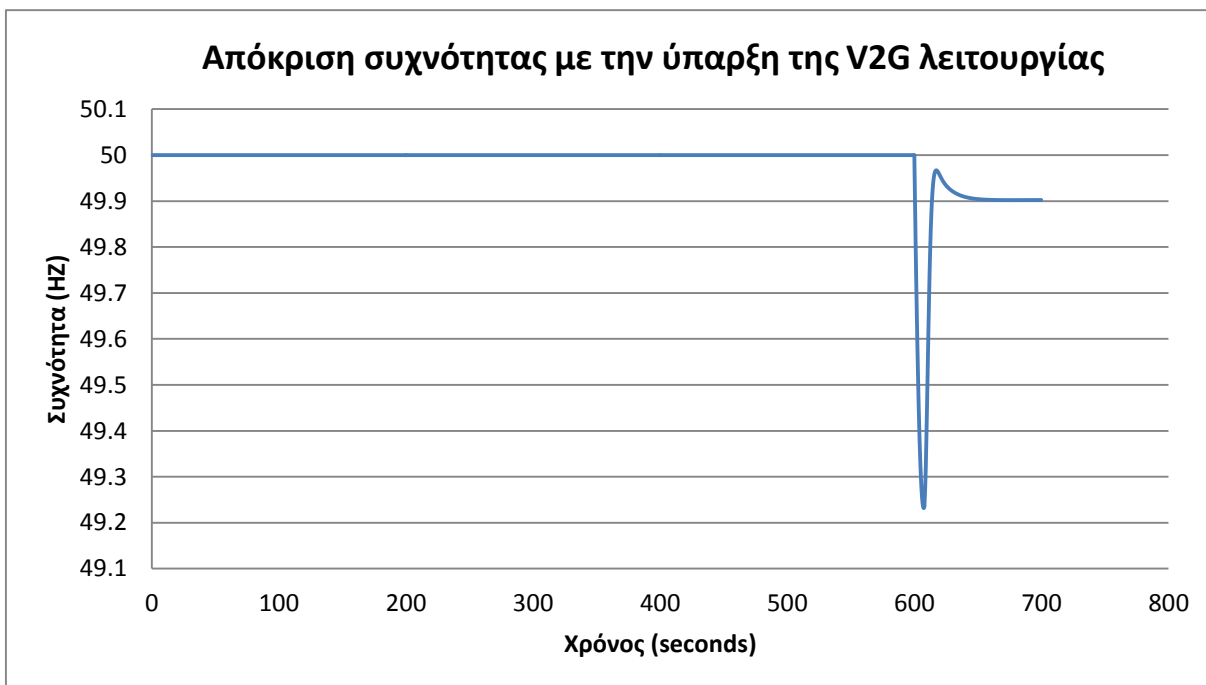


Εικόνα 9-13: Επίλυση ροής φορτίου με τις συνθήκες προσομοίωσης του σεναρίου 3.

Στα παρακάτω γραφήματα παρουσιάζεται η απόκριση συχνότητας με και χωρίς την ύπαρξη της V2G λειτουργίας. Παρατηρούμε ότι χωρίς τη V2G λειτουργία η συχνότητα μετά τη πρωτεύουσα ρύθμιση σταθεροποιείται περίπου στα 49.82 HZ, ενώ με τη V2G λειτουργία στα 49,9 HZ. Άρα τα οχήματα βοήθησαν αρκετά στην πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας του δικτύου. Στην περίπτωση της V2G διαδικασίας παρατηρούμε μία μικρή ταλάντωση η οποία οφείλεται στις ταλαντώσεις της τάσης που προκαλούνται κυρίως από την αντίδραση των οχημάτων τη χρονική στιγμή $t=611$ seconds.

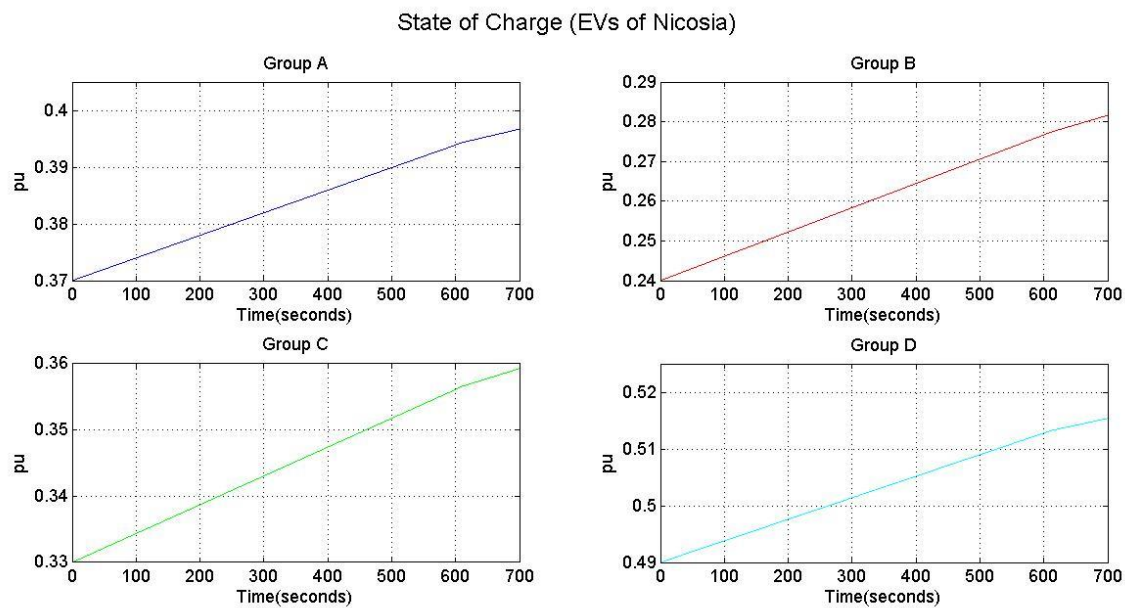


Γράφημα 9-15: Απόκριση συχνότητας πριν και κατά την διαταραχή στο σύστημα χωρίς την ύπαρξη V2G λειτουργίας.

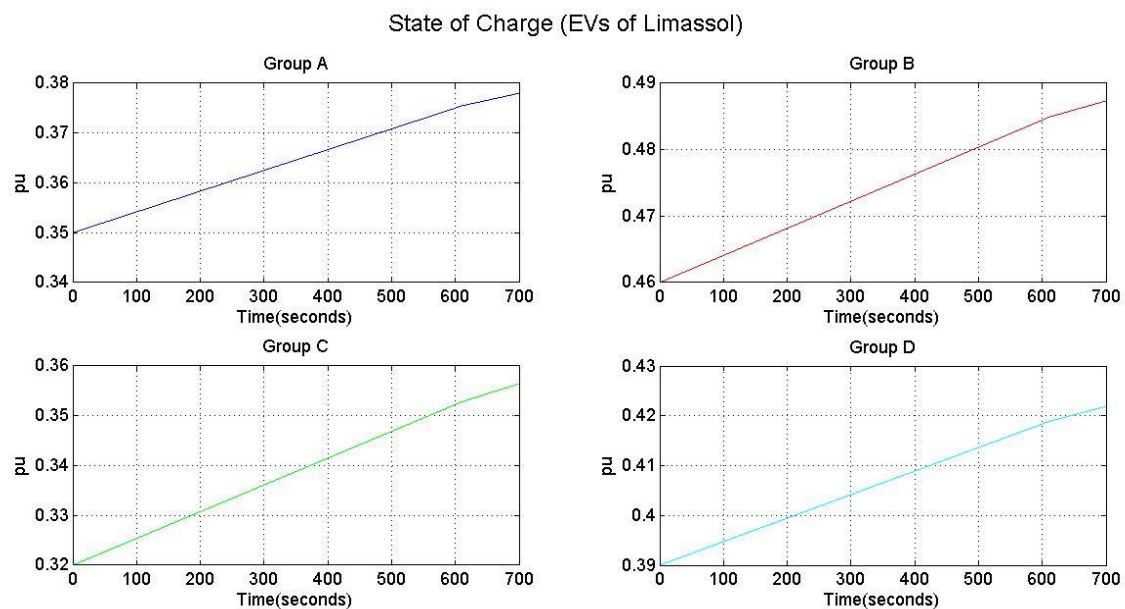


Γράφημα 9-16: Απόκριση συχνότητας πριν και κατά την διαταραχή στο σύστημα με την ύπαρξη V2G λειτουργίας.

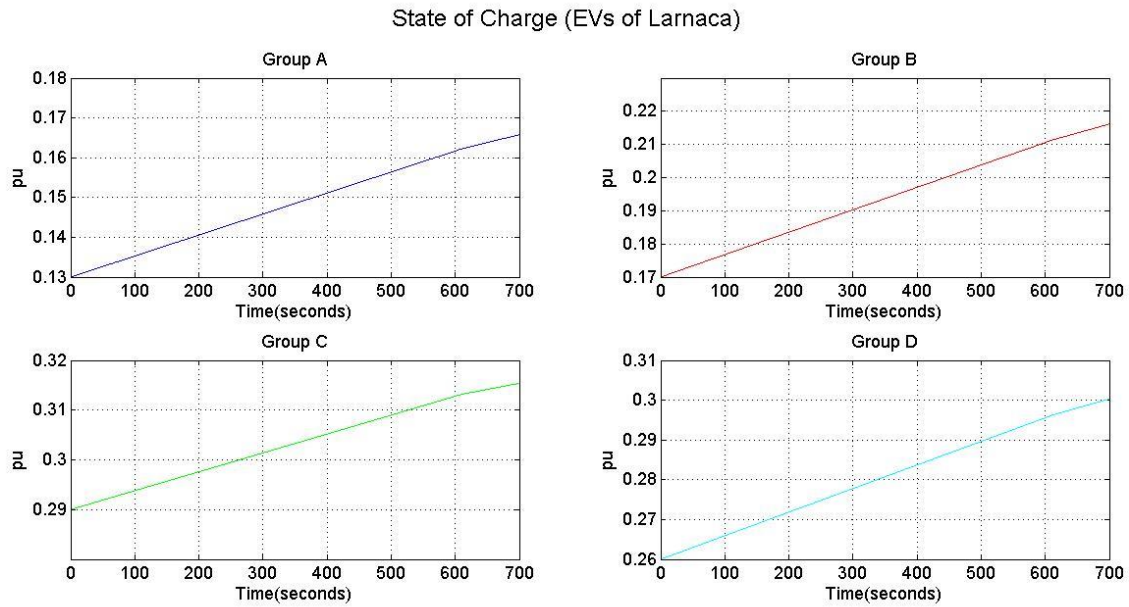
Στις πιο κάτω εικόνες παρουσιάζεται η κατάσταση φόρτισης των οχημάτων κάθε επαρχίας.



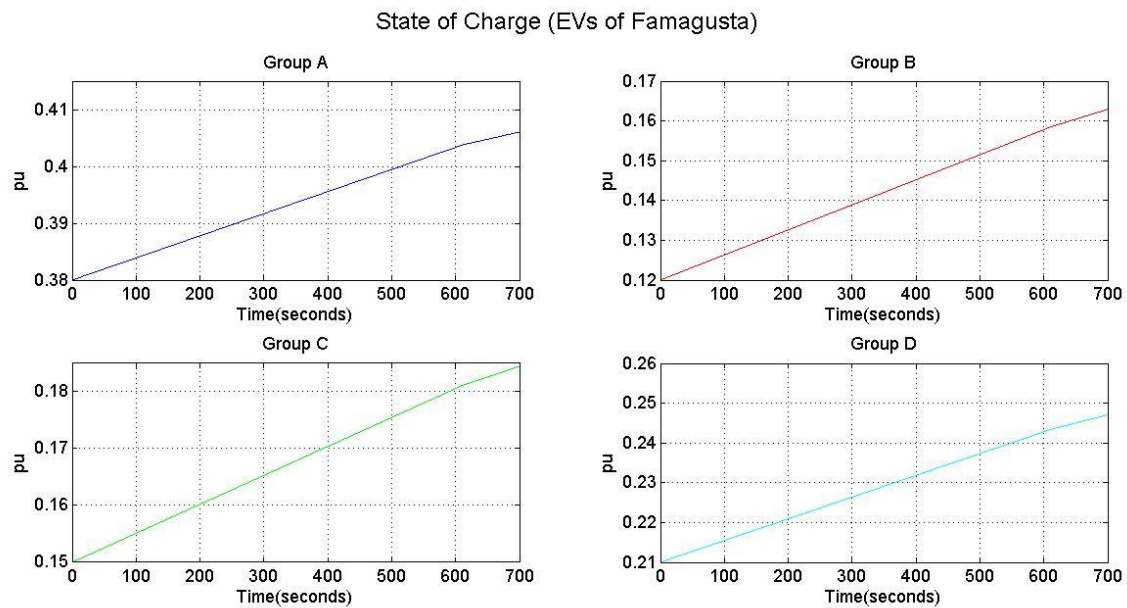
Εικόνα 9-14: Κατάσταση φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων Λευκωσίας.



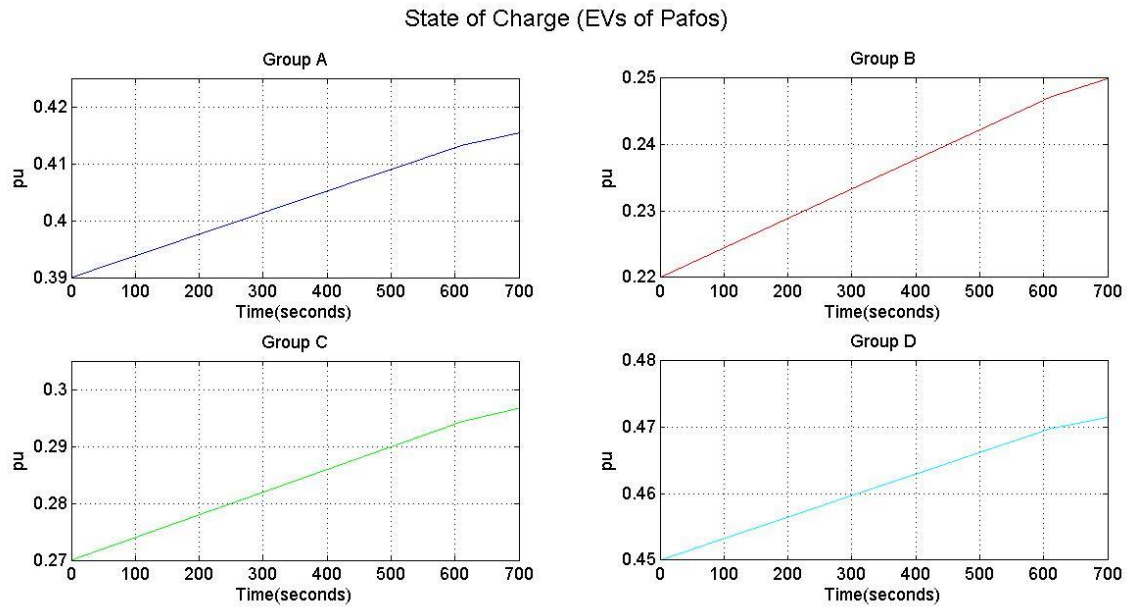
Εικόνα 9-15: Κατάσταση φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων Λεμεσού.



Εικόνα 9-16: Κατάσταση φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων Λάρνακας.



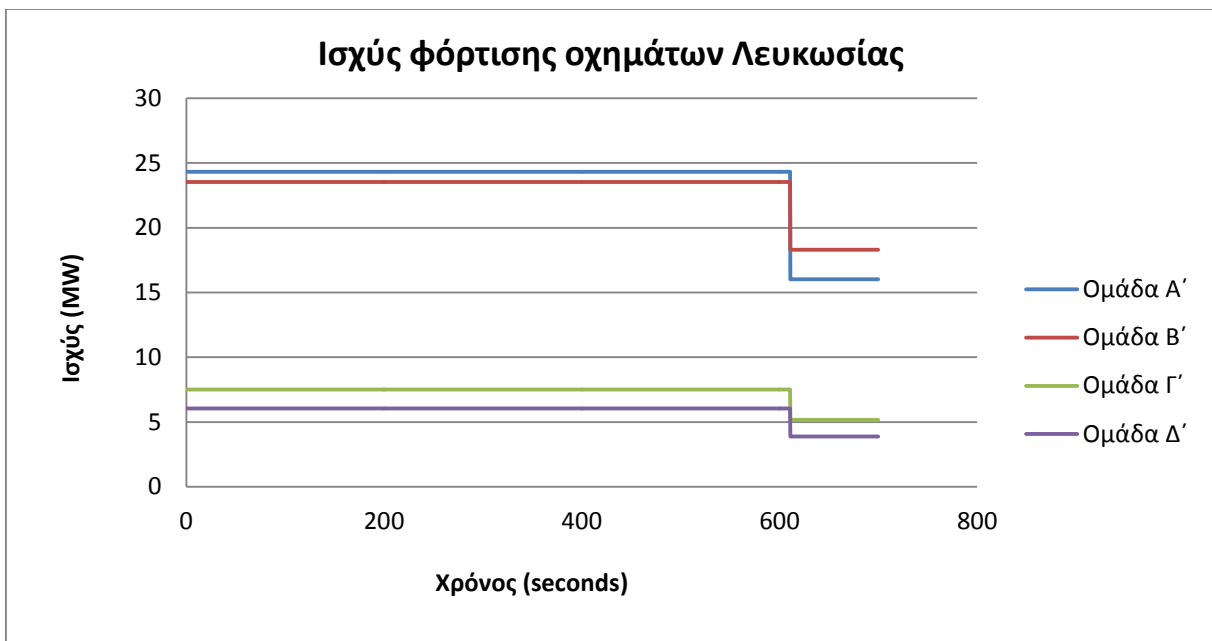
Εικόνα 9-17: Κατάσταση φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων Αμμοχώστου.



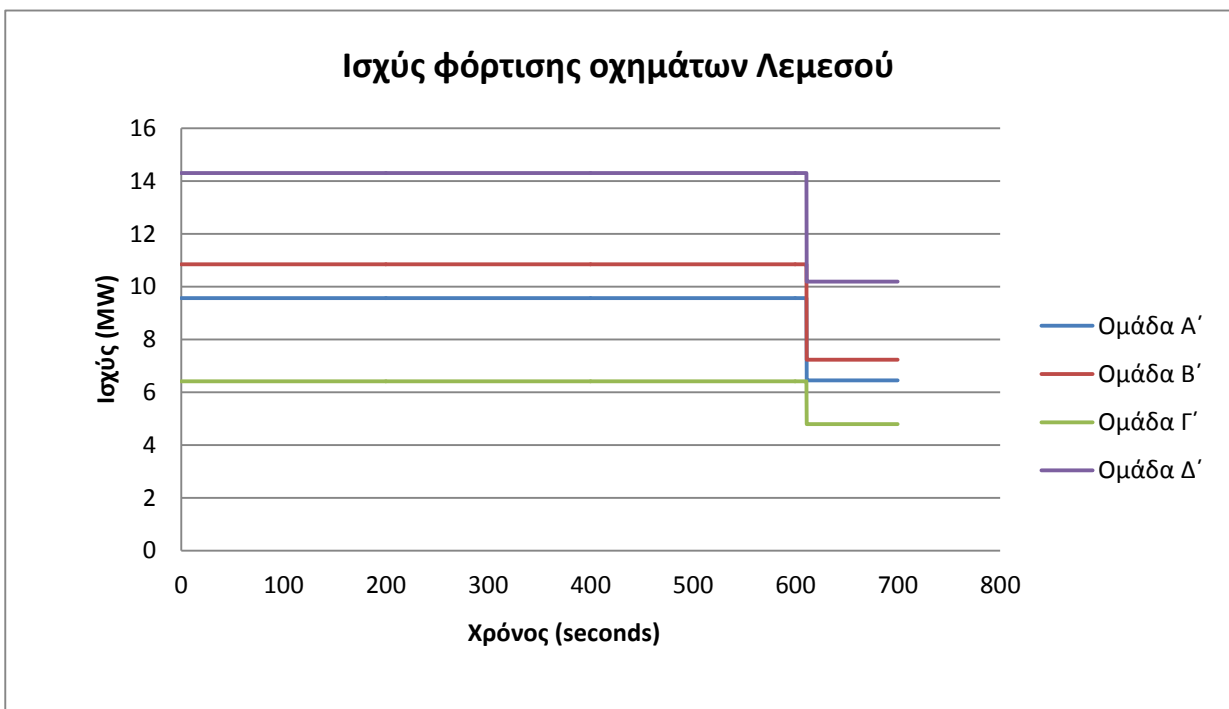
Εικόνα 9-18: Κατάσταση φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων Πάφου.

Παρατηρούμε ότι όλες οι ομάδες οχημάτων σε όλες τις επαρχίες φορτίζουν καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Η κλίση των καμπυλών μειώνεται τη στιγμή $t=611$ seconds σε όλες τις ομάδες οχημάτων, μιας και η ισχύς φόρτισης ελαττώνεται κατά τη διάρκεια της διαταραχής ώστε να ενισχυθεί η πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας του δικτύου. Η μεταβολή της αρχικής κλίσης των καμπυλών είναι η ίδια για όλες τις ομάδες οχημάτων.

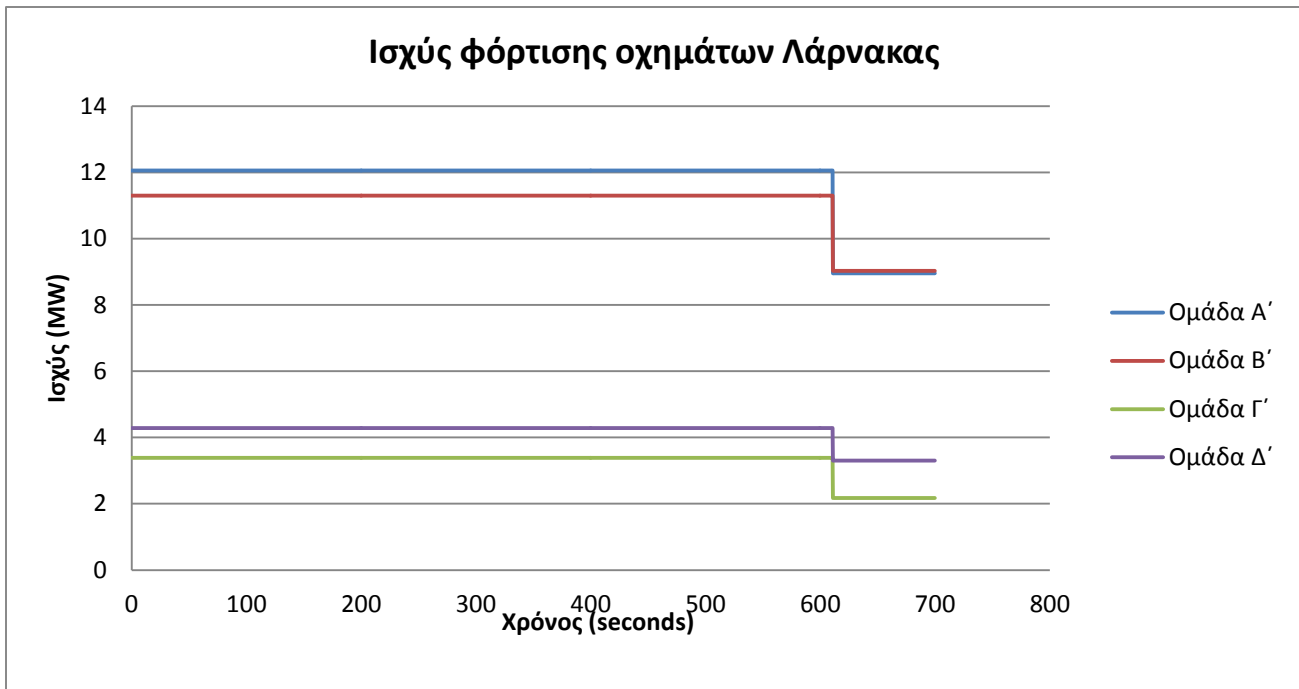
Όπως φαίνεται από τα παρακάτω γραφήματα η ισχύς φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων σε όλες τις επαρχίες τη χρονική στιγμή $t=611$ seconds ελαττώνεται ώστε να ενισχυθεί η πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας και κατά συνέπεια η δευτερεύουσα. Το ποσοστό μείωσης της αρχικής φόρτισης των οχημάτων είναι ίδιο για όλες τις ομάδες φόρτισης καθώς χρησιμοποιούμε την ίδια τιμή στο συντελεστή K (KW/HZ), για όλες τις ομάδες οχημάτων.



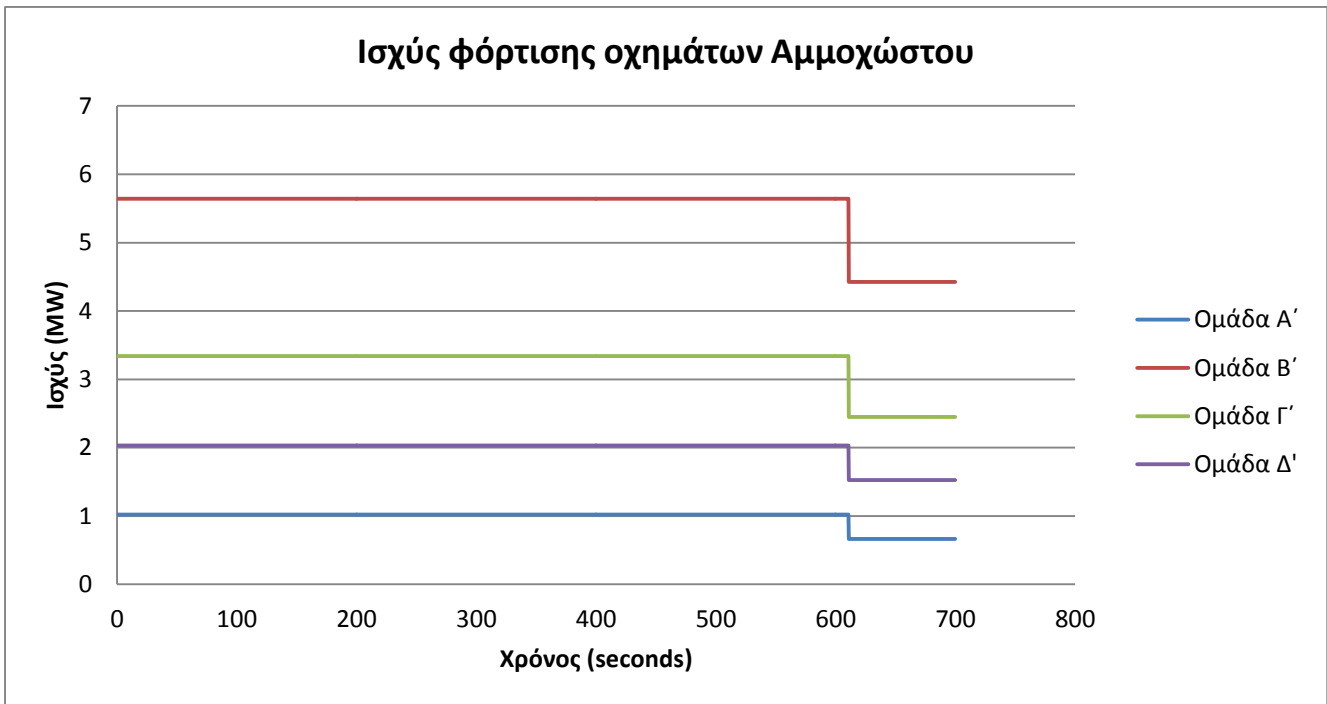
Γράφημα 9-17: Απόκριση ισχύος φόρτισης των οχημάτων της Λευκωσίας από τη πλευρά του δικτύου.



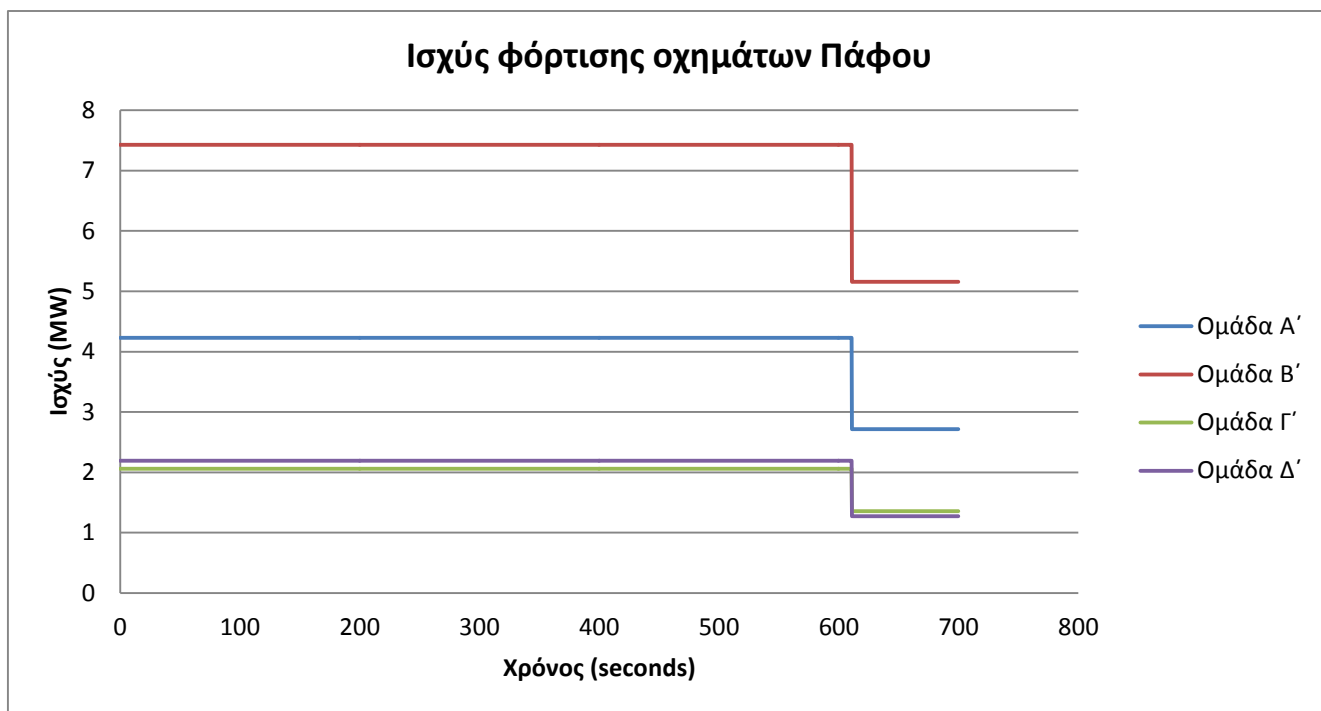
Γράφημα 9-18: Απόκριση ισχύος φόρτισης των οχημάτων της Λεμεσού από τη πλευρά του δικτύου.



Γράφημα 9-19: Απόκριση ισχύος φόρτισης των οχημάτων της Λάρνακας από τη πλευρά του δικτύου.



Γράφημα 9-20: Απόκριση ισχύος φόρτισης των οχημάτων της Αμμοχώστου από τη πλευρά του δικτύου.



Γράφημα 9-21: Απόκριση ισχύος φόρτισης των οχημάτων της Πάφου από τη πλευρά του δικτύου.

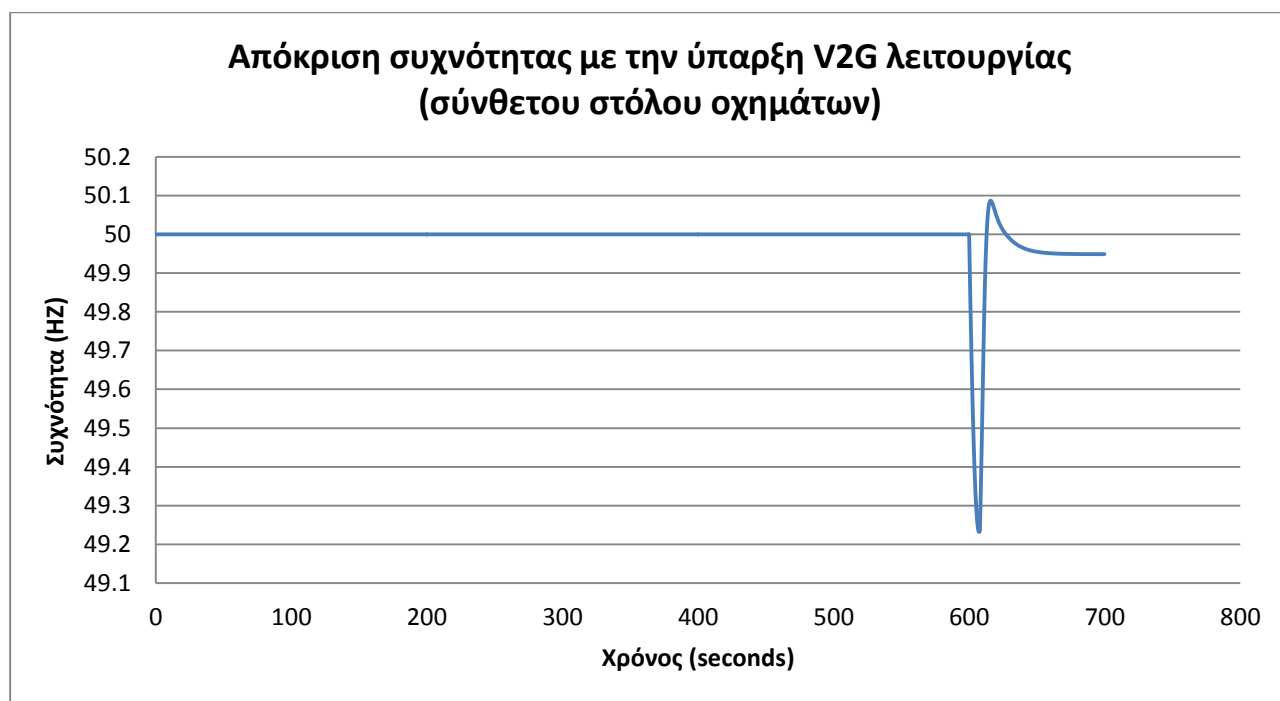
Όπως παρατηρούμε από το γράφημα 9-16 η συχνότητα ανακάμπτει λιγότερο σε σύγκριση με τα σενάρια 1 και 2 όπου η προσέγγιση της ονομαστικής συχνότητας είναι αρκετά ικανοποιητική με τη βοήθεια της V2G λειτουργίας. Έτσι σε αυτήν τη περίπτωση αξίζει να μελετήσουμε και την περίπτωση όπου στο δίκτυο είναι συνδεδεμένα εκτός από τα ηλεκτρικά οχήματα που επιθυμούν να φορτίσουν, ακόμα 25000 οχήματα τα οποία επιθυμούν να διατηρήσουν την αρχική τους SOC αλλά ταυτόχρονα να συμμετέχουν στην πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας του δικτύου. Σε κάθε πόλη θεωρούμε ότι υπάρχουν τέσσερις διαφορετικές ομάδες οχημάτων στις οποίες κατανείμαμε ψευδοτυχαία τα 25000 οχήματα ανάλογα με την κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας τους η οποία καθορίστηκε και αυτή με ψευδοτυχαίο τρόπο με χρήση της `randsample()`. Στον πίνακα 9-5 παρουσιάζεται ο στόλος των οχημάτων που επιθυμούν να διατηρήσουν την αρχική τους SOC συμμετέχοντας παράλληλα στη V2G διαδικασία.

Επαρχία	Κατάσταση φόρτισης την ώρα σύνδεσης στον σταθμό φόρτισης SOC _{in} (%)	Αριθμός οχημάτων
Λευκωσία	86	2000
Λευκωσία	65	1898
Λευκωσία	74	1745
Λευκωσία	52	1857
Λεμεσός	71	1236
Λεμεσός	53	1248
Λεμεσός	89	1265
Λεμεσός	74	1251
Λάρνακα	59	1107
Λάρνακα	82	1157
Λάρνακα	53	1124
Λάρνακα	57	1112
Αμμόχωστος	69	944
Αμμόχωστος	64	990
Αμμόχωστος	58	1039
Αμμόχωστος	66	1027
Πάφος	64	1016
Πάφος	58	1001
Πάφος	65	986
Πάφος	61	997
Σύνολο		25000

Πίνακας 9-4: : Στόλος οχημάτων για V2G που επιθυμούν να διατηρήσουν την αρχική τους SOC.

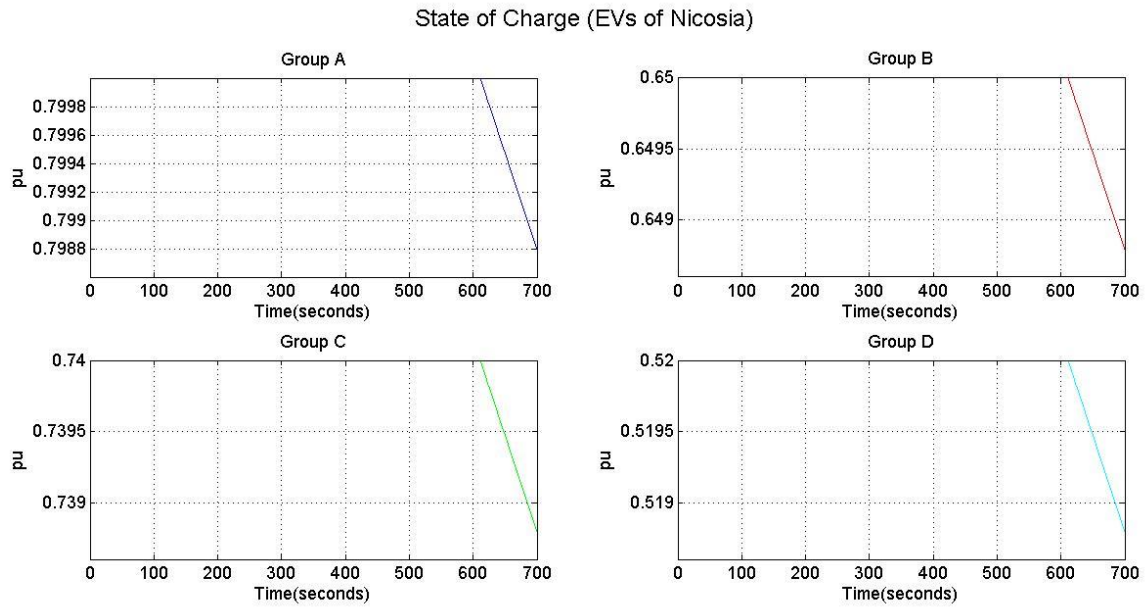
Τα ηλεκτρικά οχήματα αυτής της κατηγορίας παρ' όλο που είναι συνδεδεμένα στο δίκτυο δεν αποτελούν επιπρόσθετο φορτίο για τις μονάδες παραγωγής. Ο λόγος είναι ότι δεν φορτίζουν κατά τη διάρκεια παραμονής τους στο σταθμό φόρτισης, αλλά είναι διαθέσιμα για V2G όταν αυτό καταστεί αναγκαίο. Όταν συμβεί μια διαταραχή στο δίκτυο, όπως η απώλεια μιας μονάδας παραγωγής τότε παρατηρείται αρνητικό σφάλμα στην συχνότητα του συστήματος. Τα ηλεκτρικά οχήματα θα πρέπει να εκφορτίσουν τους συσσωρευτές τους ώστε να ενισχύσουν την πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας του δικτύου. Άρα ένα μέρος του συνολικού φορτίου του συστήματος θα εξυπηρετηθεί από τα ηλεκτρικά οχήματα. Αυτό σημαίνει ότι οι μονάδες παραγωγής θα χρειαστεί να αυξήσουν την παραγωγή τους λιγότερο σε σύγκριση με την περίπτωση που δεν θα υπήρχαν τα οχήματα αυτής της κατηγορίας συνδεδεμένα στο δίκτυο. Ουσιαστικά με αυτή τη διαδικασία το φορτίο του συστήματος παραγωγής μειώνεται για να βοηθηθεί η πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας του δικτύου.

Έτσι λοιπόν την ροή ισχύος από τα ηλεκτρικά οχήματα προς το δίκτυο την μοντελοποιήσαμε ως περεταίρω μείωση του φορτίου των οχημάτων σε μια τέτοιου είδους διαταραχή. Δηλαδή χρησιμοποιήσαμε τις καμπύλες ισχύος που εξάγαμε από το σύστημα ελέγχου που υλοποιήσαμε στο Matlab, για να μειώσουμε αντίστοιχα την ισχύ φόρτισης των οχημάτων στο Power World. Στο παρακάτω γράφημα παρουσιάζεται η απόκριση της συχνότητας του συστήματος για το συμβάν που περιγράψαμε πιο πάνω με την ύπαρξη της V2G, αυτή τη φορά θεωρούμε ότι υπάρχουν συνδεδεμένα στο δίκτυο επιπρόσθετα 25000 οχήματα (V2G) που επιθυμούν να διατηρήσουν την αρχική τους SOC.

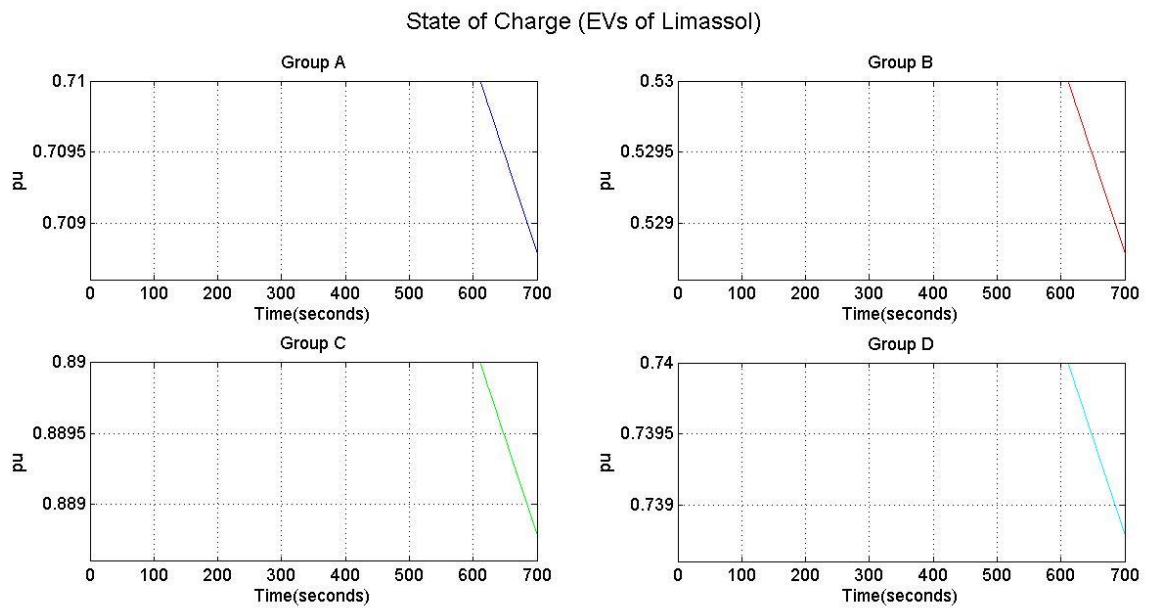


Γράφημα 9-22: Απόκριση συχνότητας πριν και κατά τη διαταραχή με την ύπαρξη V2G λειτουργίας με σύνθετο στόλο οχημάτων.

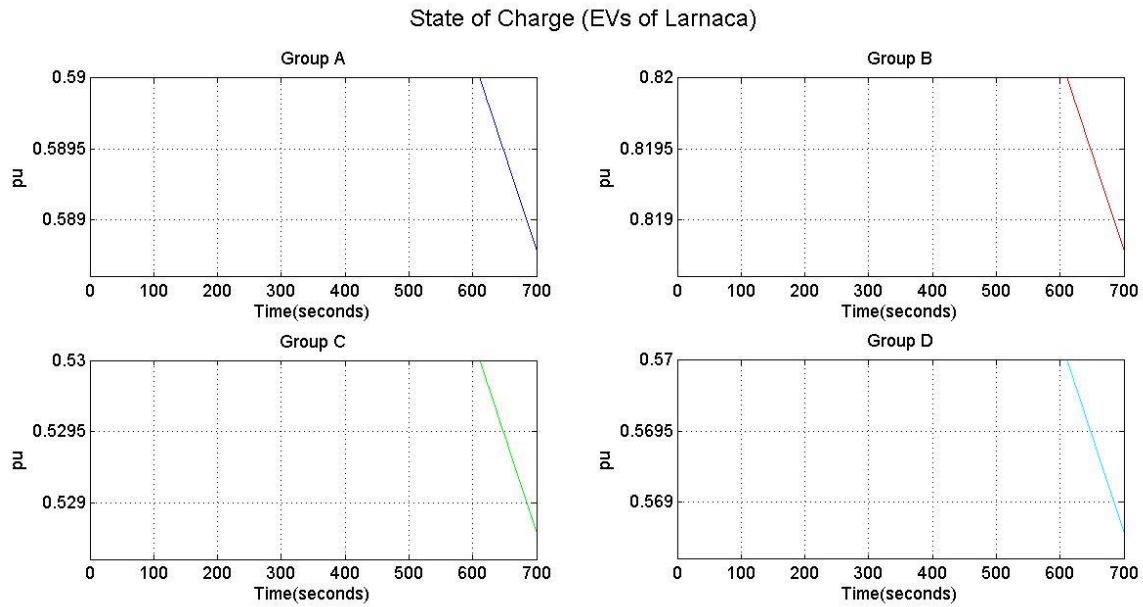
Συγκρίνοντας το αποτέλεσμα που παρουσιάζεται στο παραπάνω γράφημα με το αυτό του γραφήματος 9-16 παρατηρούμε ότι η συχνότητα σταθεροποιείται πολύ πιο κοντά στην ονομαστική της τιμή με την πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας αφού προσεγγίζει τα 49.95 HZ. Αυτό συμβαίνει διότι η V2G διαδικασία ενισχύθηκε με τη συμβολή των οχημάτων που ήταν συνδεδεμένα στο δίκτυο χωρίς να φορτίζουν αλλά λειτούργησαν σαν εφεδρικές πηγές ενέργειας την ώρα της διαταραχής. Με αυτό τον τρόπο το έργο της δευτερεύουσας ρύθμισης γίνεται ακόμα πιο ευκολότερο. Στις εικόνες που ακολουθούν παρουσιάζεται η μεταβολή της κατάστασης φόρτισης των οχημάτων αυτών κατά τη διάρκεια του μεταβατικού φαινομένου που παρατηρείται στην συχνότητα του συστήματος.



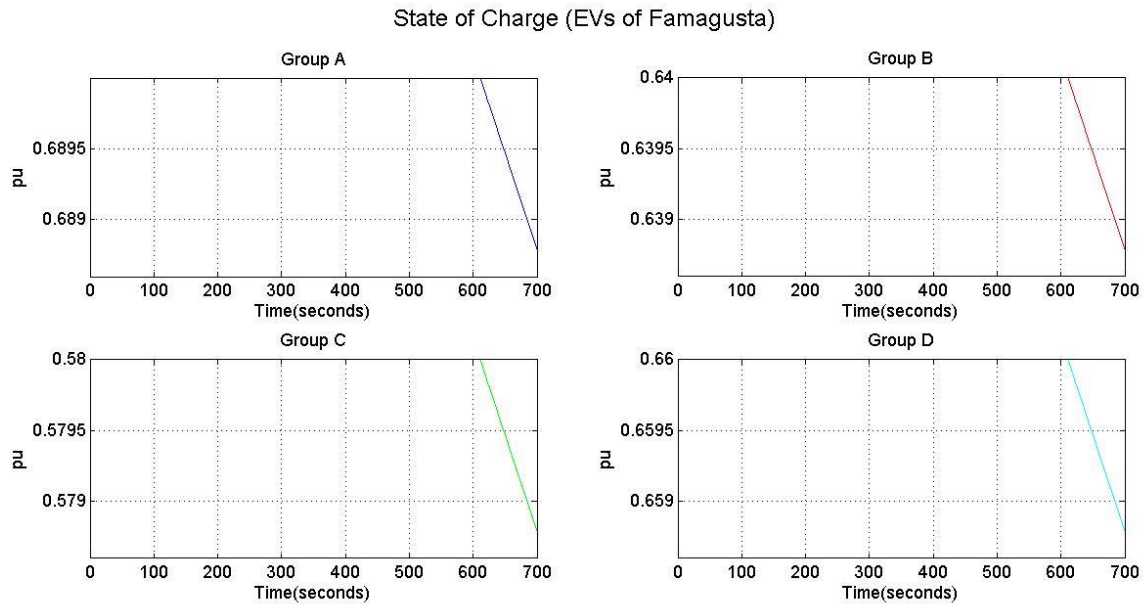
Εικόνα 9-19: Μεταβολή κατάστασης φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων Λευκωσίας.



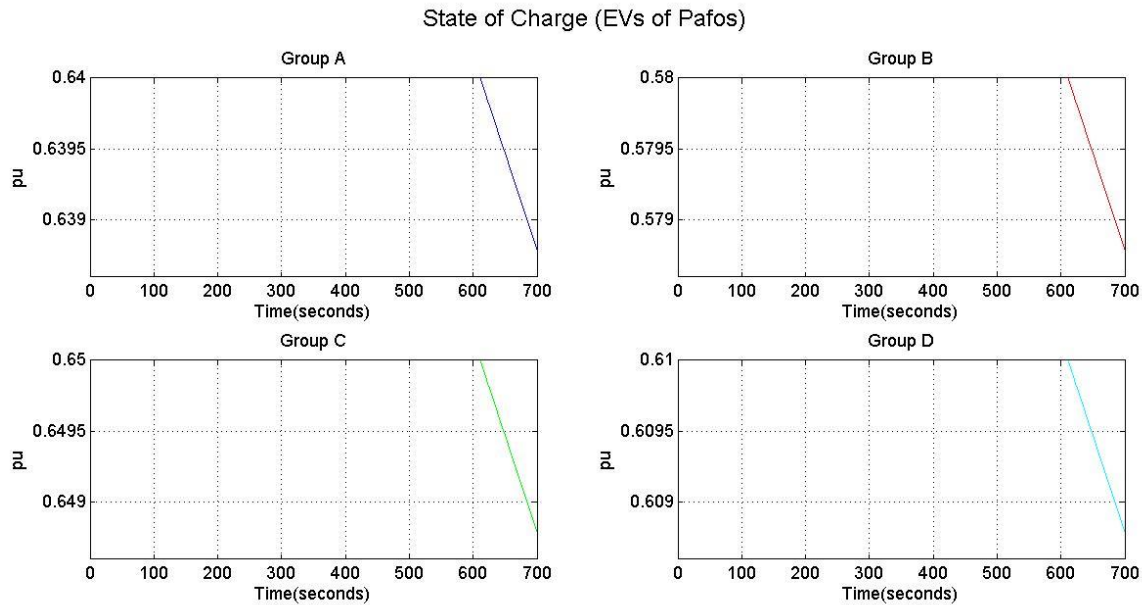
Εικόνα 9-20: Μεταβολή κατάστασης φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων Λεμεσού.



Εικόνα 9-21: Μεταβολή κατάστασης φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων Λάρνακας.



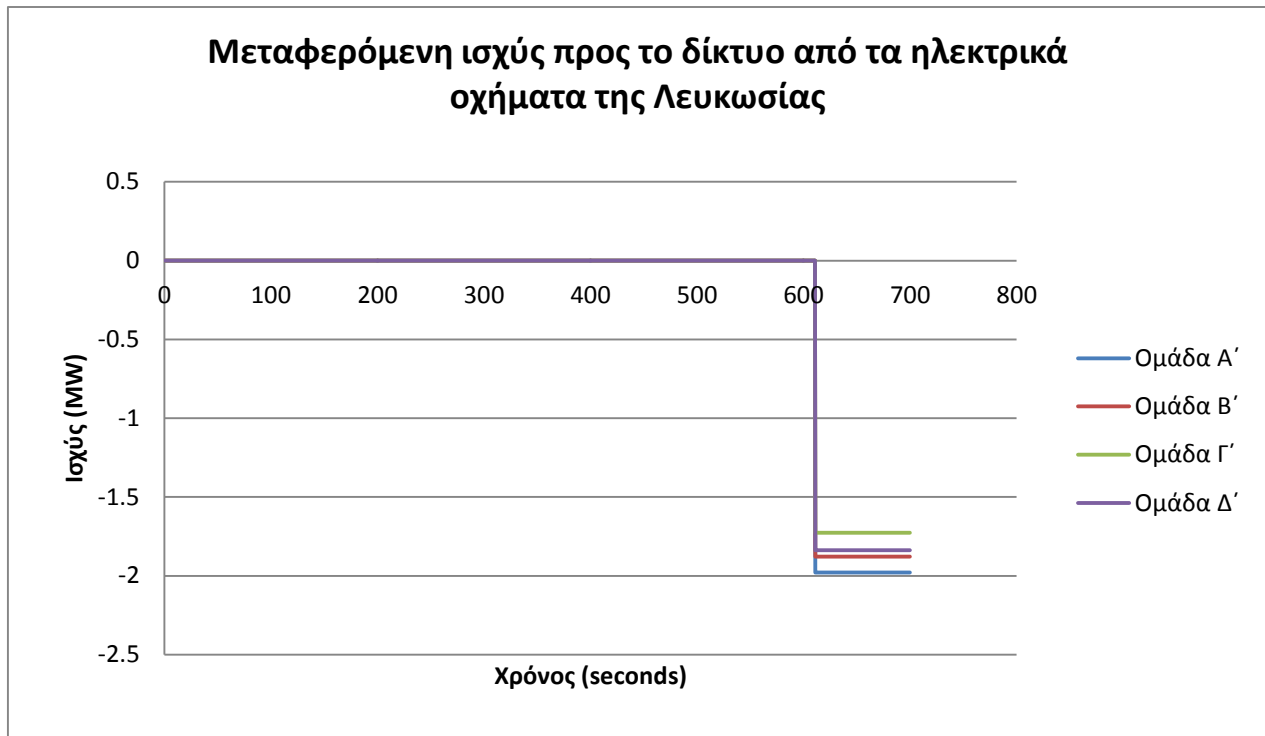
Εικόνα 9-22: Μεταβολή κατάστασης φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων Αμμοχώστου.



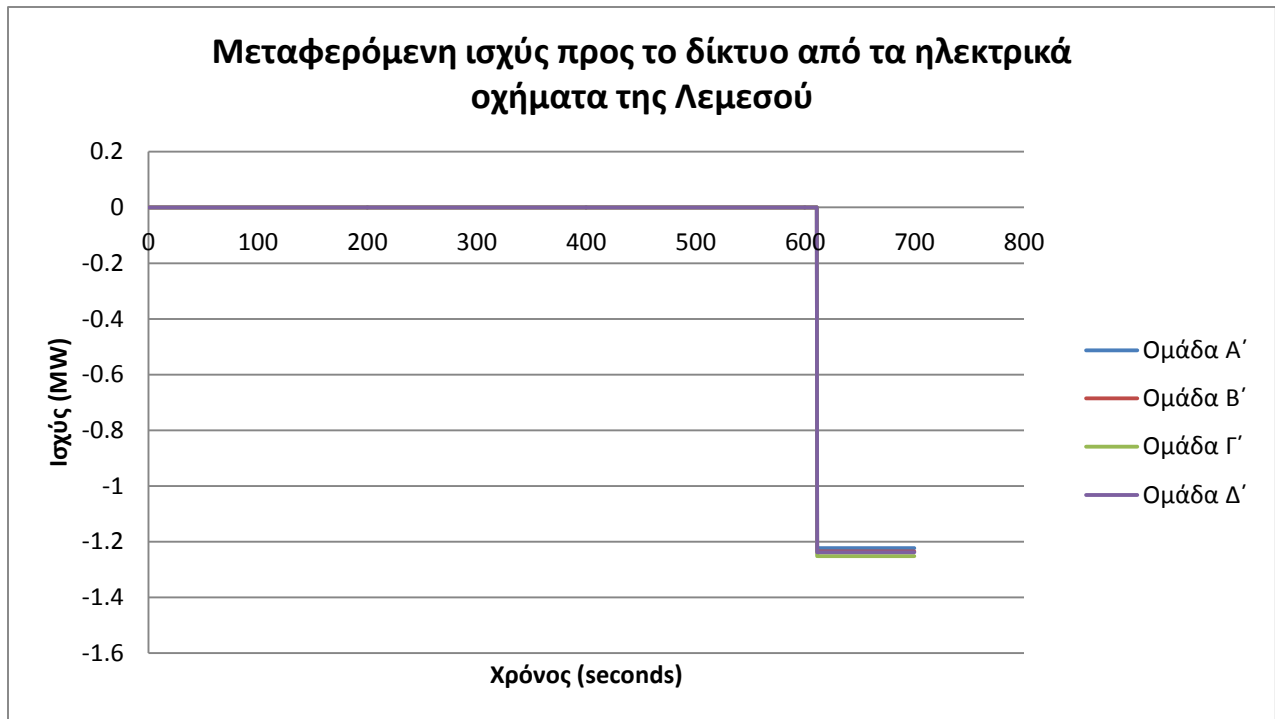
Εικόνα 9-23: Μεταβολή κατάστασης φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων Πάφου.

Από τα πιο πάνω διαγράμματα φαίνεται ότι τα οχήματα εκφορτίζουν κατά τη διάρκεια του μεταβατικού φαινομένου συμμετέχοντας έτσι στη πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας του δικτύου. Το ποσοστό εκφόρτισης των συσσωρευτών των οχημάτων είναι το ίδιο για όλα τα οχήματα καθώς ο συντελεστής K (KW/HZ) είναι ο ίδιος για όλες τις ομάδες οχημάτων. Επίσης παρατηρούμε ότι η εκφόρτιση είναι ελάχιστη σε όλες τις ομάδες οχημάτων σε όλες τις πόλεις. Η SOC κάθε οχήματος μειώθηκε περίπου κατά 0.13 % της ονομαστικής χωρητικότητας των συσσωρευτών. Αυτό σημαίνει ότι η μεταβολή της κατάστασης φόρτισης των οχημάτων είναι αμελητέα έτσι ο χρήστης/ιδιοκτήτης του κάθε οχήματος δεν μπορεί να αντιληφθεί αυτή την ελάχιστη εκφόρτιση της μπαταρίας. Άρα θεωρούμε ότι η επιθυμία των χρηστών για διατήρηση της αρχικής SOC καλύφθηκε.

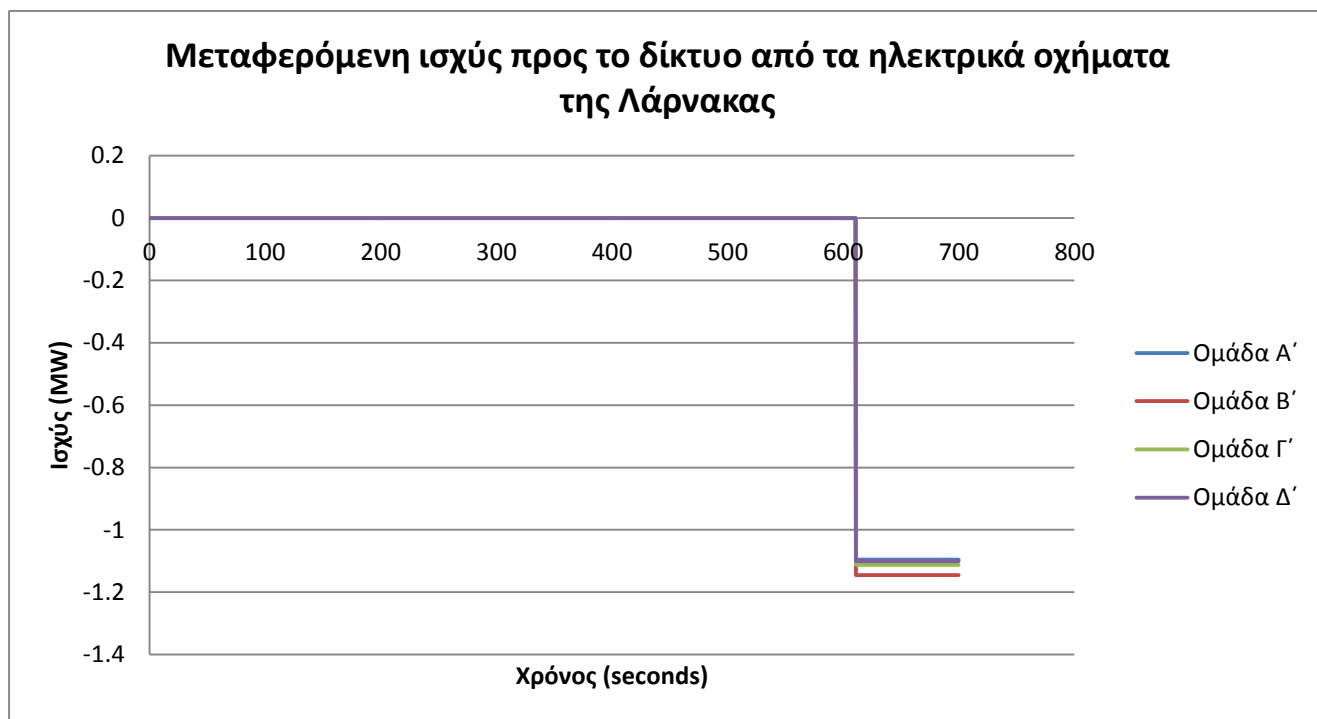
Τα πιο πάνω αποτελέσματα επιβεβαιώνονται από τα γραφήματα της ισχύος των οχημάτων που παρουσιάζονται πιο κάτω. Τη χρονική στιγμή $t=611$ seconds τα οχήματα εκφορτίζουν με σκοπό να υποστηρίξουν το δίκτυο. Η διάρκεια εκφόρτισης διαρκεί όσο και το μεταβατικό φαινόμενο της διαταραχής μέχρι η συχνότητα να ανακάμψει σε κάποια τιμή με τη διαδικασία της πρωτεύουσας ρύθμισης. Η ισχύς που προσφέρει προς το δίκτυο κάθε ομάδα οχημάτων εξαρτάται από τον αριθμό των οχημάτων της συγκεκριμένη ομάδας. Προφανώς η ισχύς εκφόρτισης κάθε οχήματος είναι η ίδια σε όλες τις ομάδες οχημάτων, αφού όλα τα οχήματα αντιδρούν με βάση το σφάλμα συχνότητας και το συντελεστή K (KW/HZ) ο οποίος είναι ο ίδιος για όλα τα οχήματα. Στις περιπτώσεις όπου οι ομάδες έχουν περίπου ίδιο αριθμό οχημάτων, τότε οι ομάδες προσφέρουν περίπου την ίδια ισχύ στο δίκτυο (όπως στα γραφήματα της Λεμεσού, Λάρνακας και Πάφου).



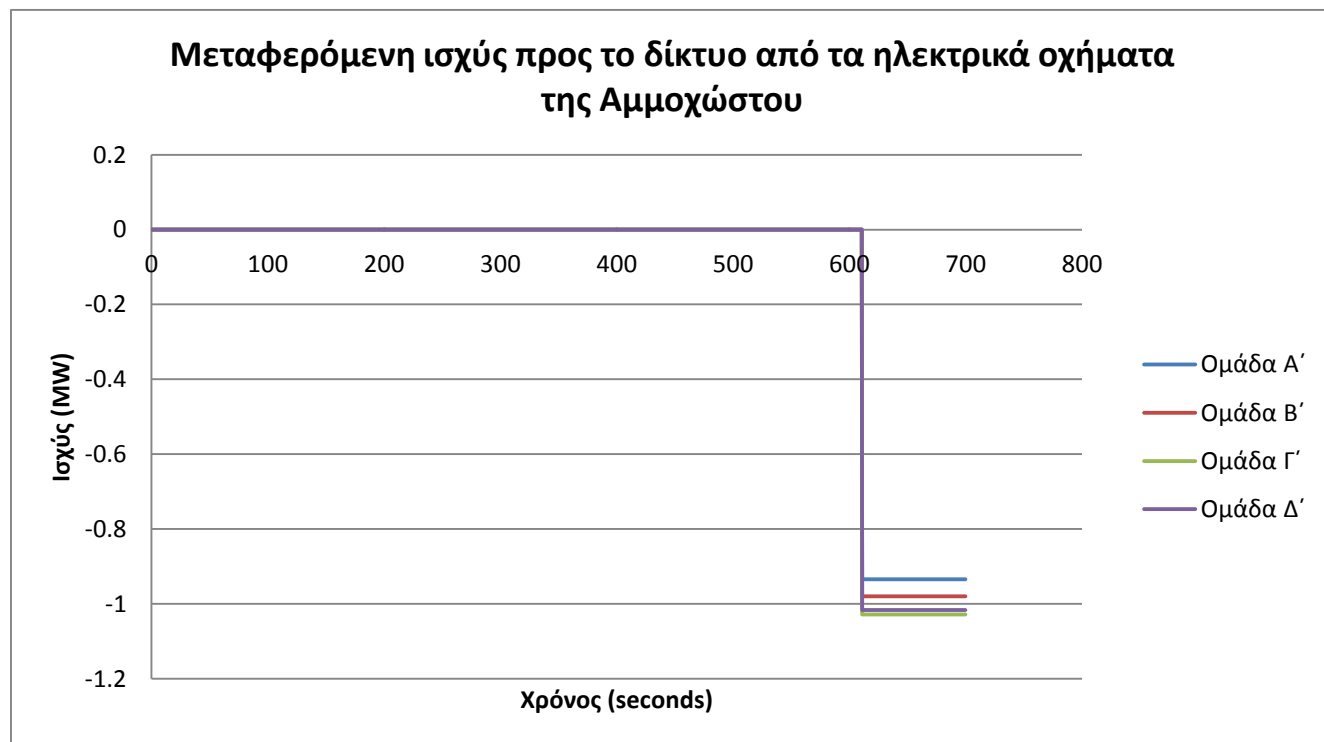
Γράφημα 9-23: Συνολική V2G ισχύς κάθε ομάδας οχημάτων της Λευκωσίας από τη πλευρά του δικτύου.



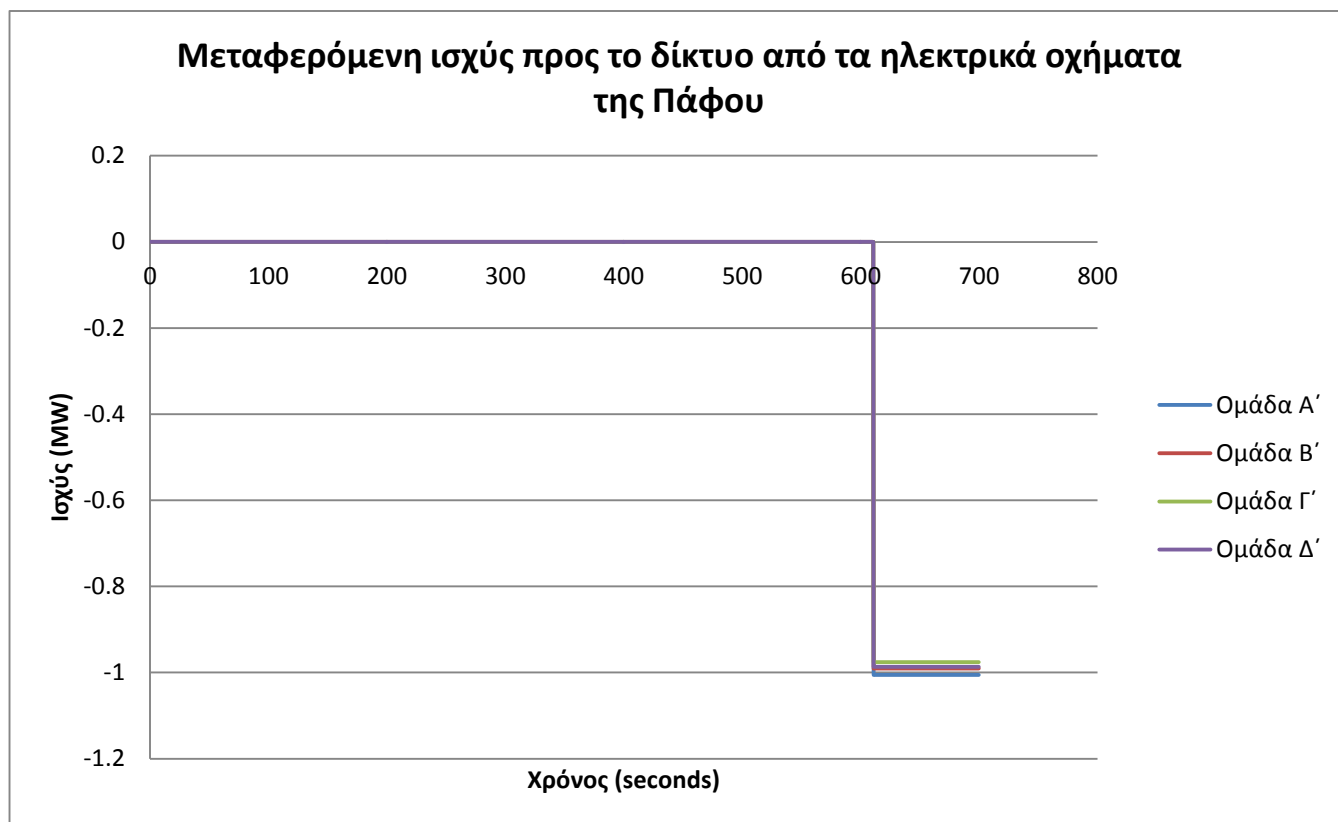
Γράφημα 9-24: Συνολική V2G ισχύς κάθε ομάδας οχημάτων της Λεμεσού από τη πλευρά του δικτύου.



Γράφημα 9-25: Συνολική V2G ισχύς κάθε ομάδας οχημάτων της Λάρνακας από τη πλευρά του δικτύου.



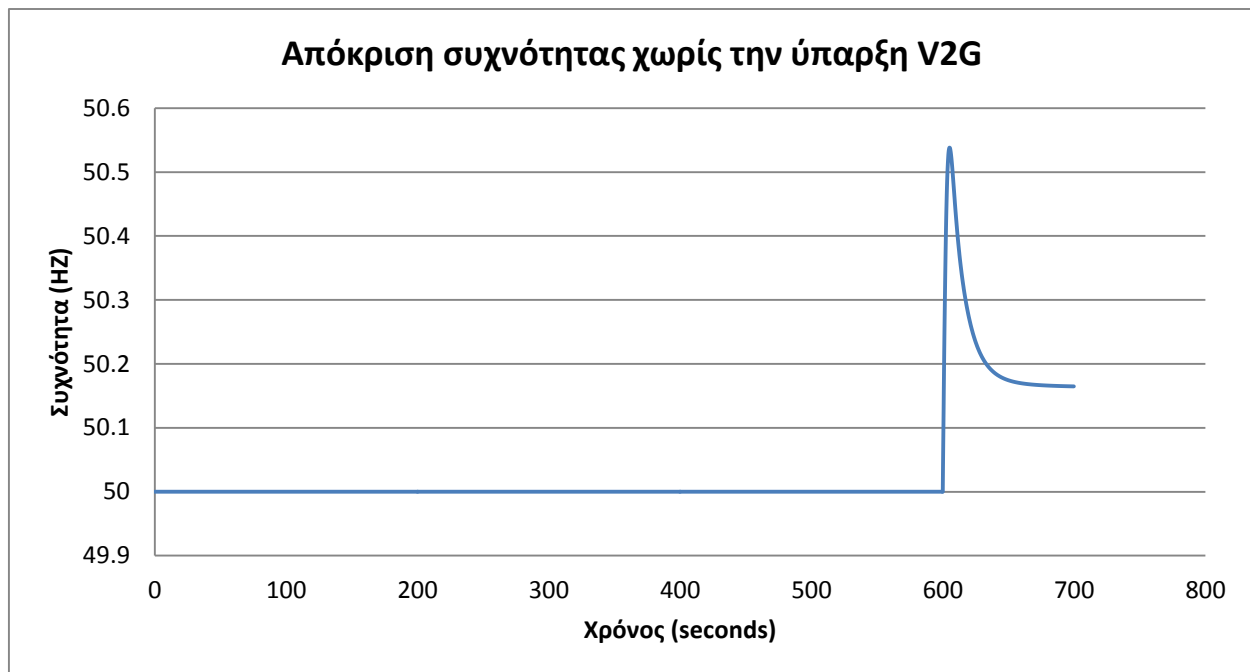
Γράφημα 9-25: Συνολική V2G ισχύς κάθε ομάδας οχημάτων της Αμμοχώστου από τη πλευρά του δικτύου.



Γράφημα 9-26: Συνολική V2G ισχύς κάθε ομάδας οχημάτων της Πάφου από τη πλευρά του δικτύου.

Σενάριο 4

Στα προηγούμενα σενάρια εκτελέσαμε προσομοιώσεις συμβάντων που προκαλούν αρνητικό σφάλμα στη συχνότητα. Ωστόσο σε ένα ηλεκτρικό δίκτυο μπορούν να υπάρξουν και συμβάντα που προκαλούν θετικό σφάλμα στη συχνότητα δικτύου. Παρ' όλο που δεν συμβαίνουν συχνά συμβάντα αύξησης της συχνότητας στα Σ.Η.Ε, κρίνεται σκόπιμο να μελετήσουμε και την αντίδραση των οχημάτων σε μια θετική απόκλιση της συχνότητας από την ονομαστική της τιμή. Έτσι σε αυτό το σενάριο τη χρονική στιγμή $t=600$ seconds μειώνουμε το φορτίο στο ζυγό System Load κατά 10%. Η σύνθεση και το φορτίο των μονάδων είναι ίδια με το σενάριο 3. Το φορτίο στο ζυγό System Load είναι 1005 MW + 35 MVar και τη χρονική στιγμή $t=600$ seconds γίνεται 904.5 MW + 35 MVar. Στα πιο κάτω γραφήματα παρουσιάζεται η απόκριση συχνότητας του συστήματος με και χωρίς την ύπαρξη V2G.



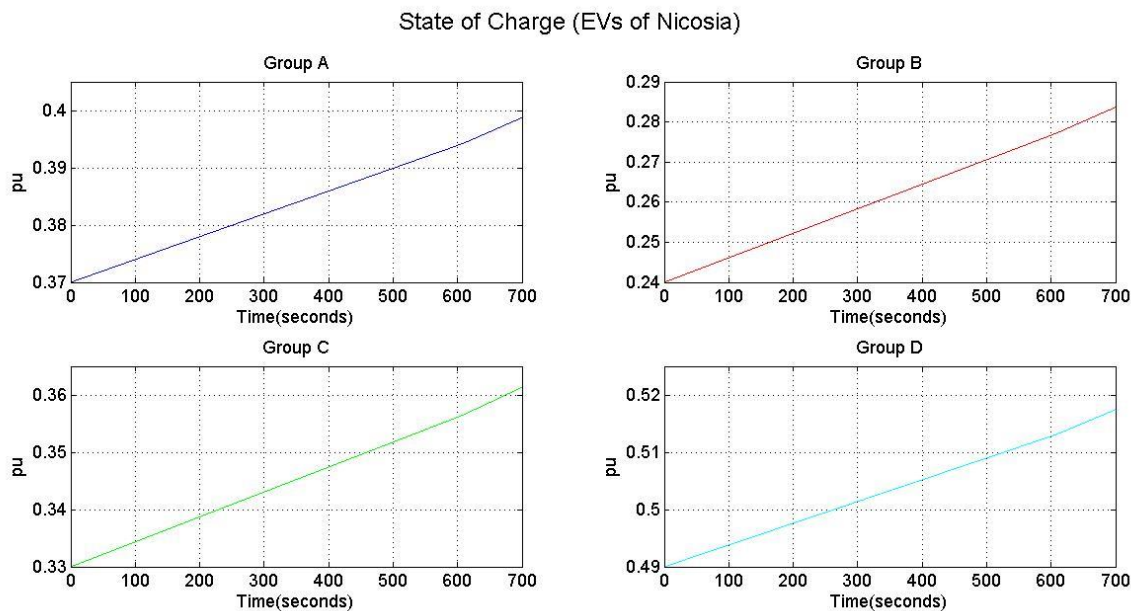
Γράφημα 9-27: Απόκριση συχνότητας πριν και κατά τη διαταραχή χωρίς την ύπαρξη V2G λειτουργίας στο σύστημα.



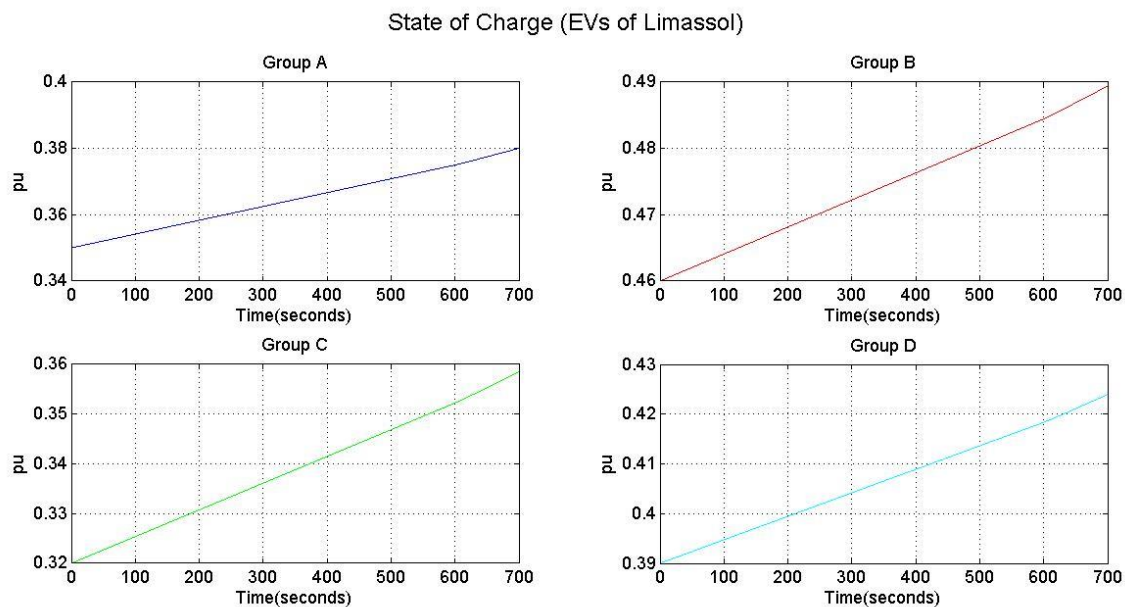
Γράφημα 9-28: Απόκριση συχνότητας πριν και κατά τη διαταραχή με την ύπαρξη V2G λειτουργίας στο σύστημα.

Παρατηρώντας τα πιο πάνω γραφήματα φαίνεται ξεκάθαρα το όφελος της συμμετοχής των ηλεκτρικών οχημάτων στην πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας. Χωρίς την ύπαρξη V2G η συχνότητα σταθεροποιείται στα 50.17 HZ μετά το μεταβατικό φαινόμενο, ενώ με την V2G διαδικασία η συχνότητα σταθεροποιείται στα 50.11 HZ. Άρα τα οχήματα βοήθησαν το δίκτυο κατά τη διαδικασία της πρωτεύουσας ρύθμισης να πλησιάσει περισσότερο την ονομαστική συχνότητα, ώστε να διευκολυνθεί το έργο της δευτερεύουσας.

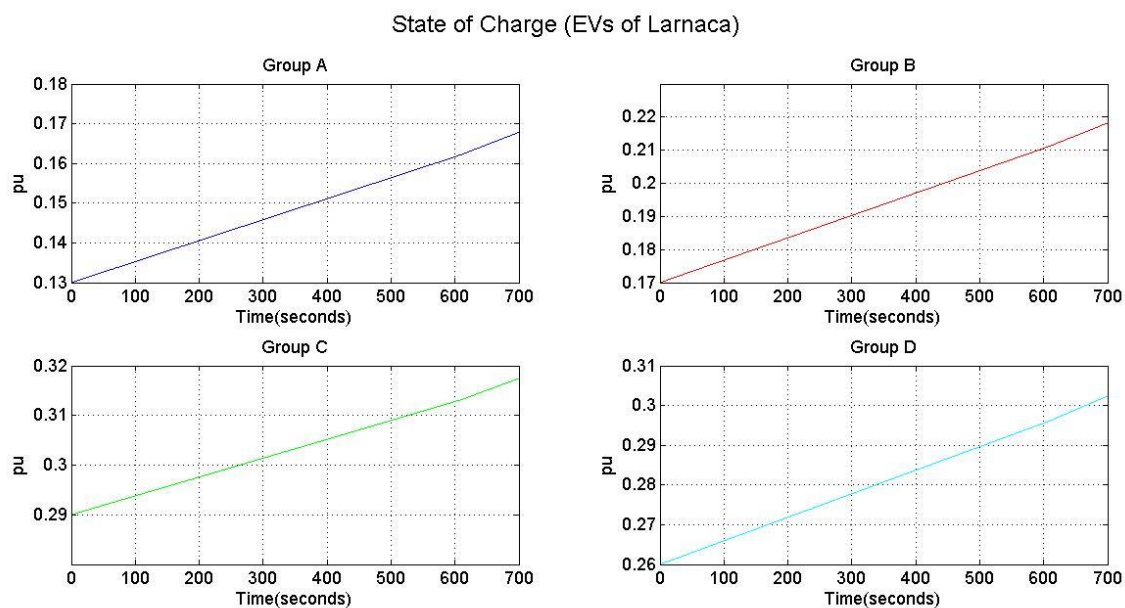
Στις εικόνες που ακολουθούν παρουσιάζονται τα γραφήματα της κατάστασης φόρτισης των οχημάτων. Τα οχήματα φορτίζουν καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Τη χρονική στιγμή $t=609$ seconds τα αντιλαμβάνονται τη διαταραχή στη συχνότητα του δικτύου και αυξάνουν το ρυθμό φόρτισης τους με σκοπό να υποστηρίξουν το δίκτυο. Γι' αυτό παρατηρείται αύξηση στην κλίση των καμπυλών της κατάσταση φόρτισης των οχημάτων κατά τη χρονικό διάστημα της πρωτεύουσας ρύθμισης. Αξίζει να σημειωθεί ότι η αύξηση της κατάστασης φόρτισης είναι πολύ μικρή καθώς χρησιμοποιήσαμε σχετικά μικρή τιμή στο συντελεστή κέρδους K (1.5 KW/HZ). Από τη σκοπιά του κάθε οχήματος ξεχωριστά, μπορούμε να πούμε ότι δεν υπήρξε κάποια σημαντική αντίδραση καθώς η ισχύς φόρτισης τους αυξήθηκε ελάχιστα. Αν όμως μελετήσουμε αυτή την αντίδραση των οχημάτων ως ένα αθροιστικό προφίλ, τα οχήματα αντέδρασαν σημαντικά προς όφελος του δικτύου όπως επιβεβαιώνεται από το γράφημα 9-28.



Εικόνα 9-24: Κατάσταση φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων Λευκωσίας.

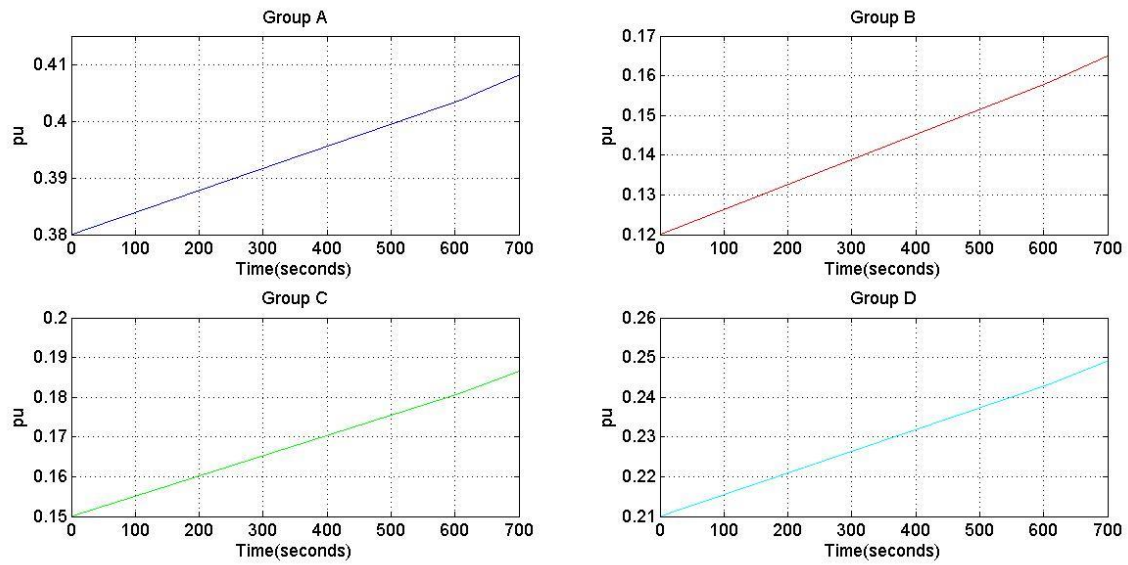


Εικόνα 9-25: Κατάσταση φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων Λεμεσού.



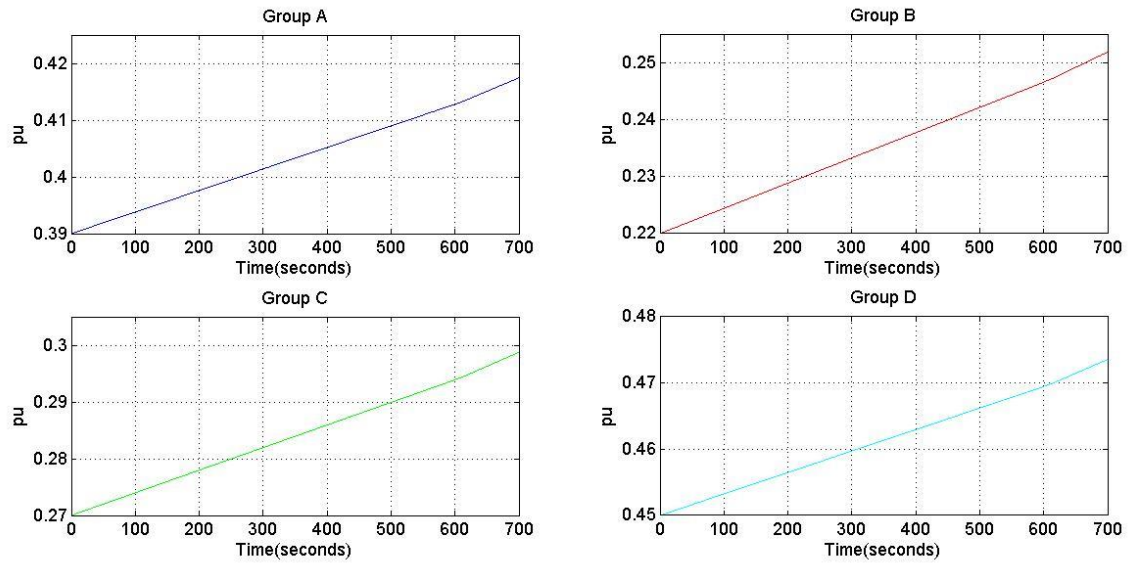
Εικόνα 9-26: Κατάσταση φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων Λάρνακας.

State of Charge (EVs of Famagusta)



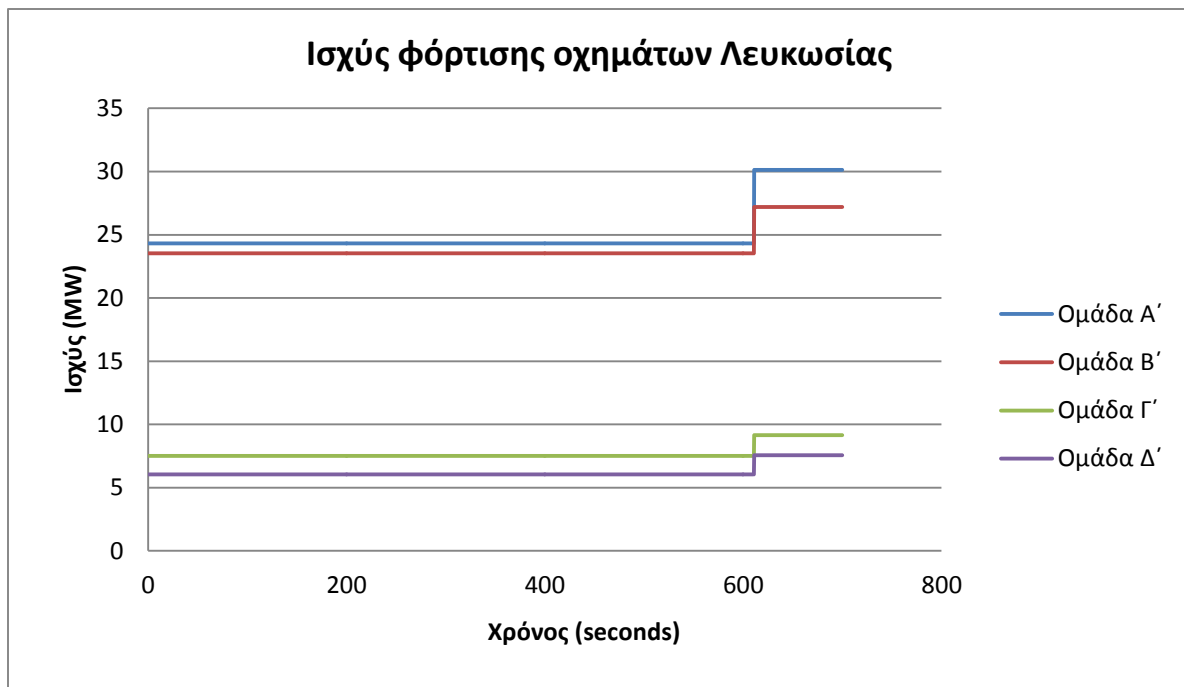
Εικόνα 9-27: Κατάσταση φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων Αμμοχώστου.

State of Charge (EVs of Pafos)

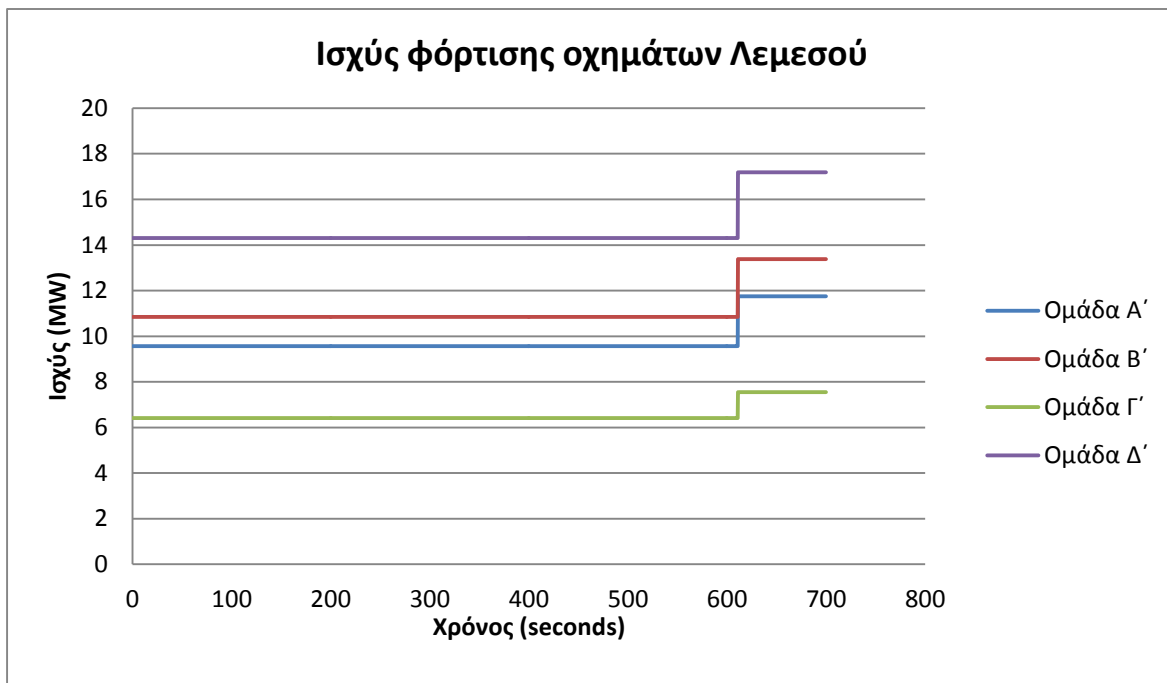


Εικόνα 9-28: Κατάσταση φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων Πάφου.

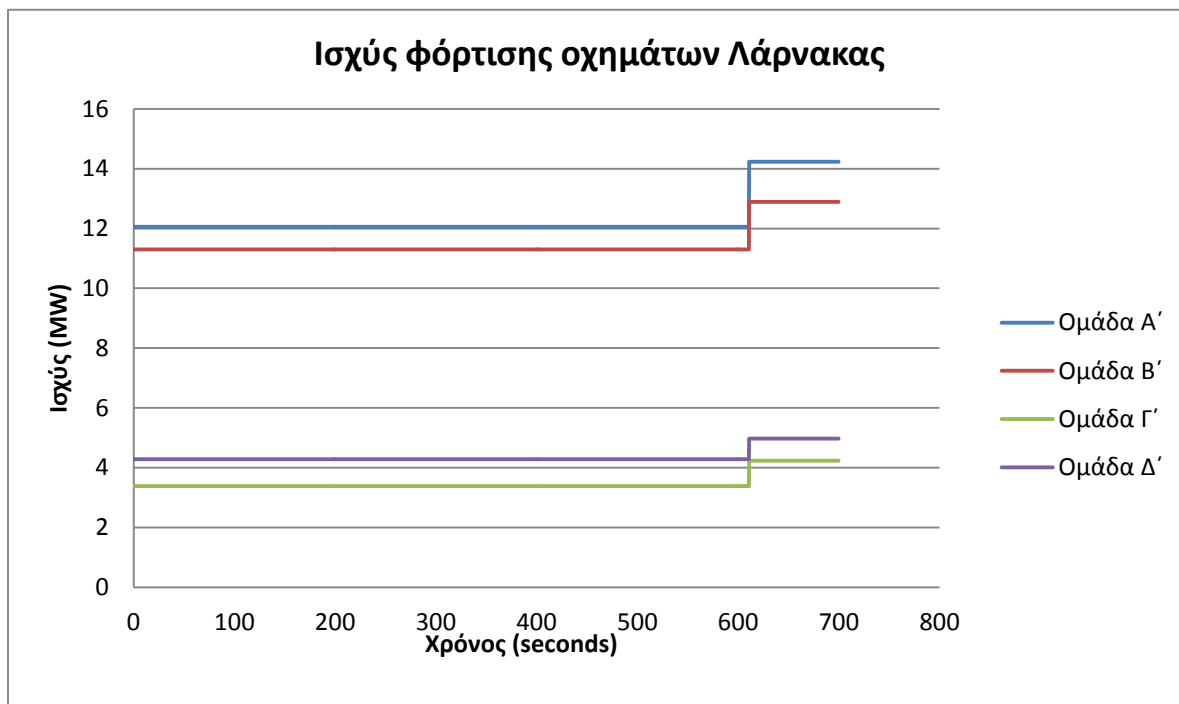
Όπως φαίνεται από τα παρακάτω γραφήματα η ισχύς φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων σε όλες τις επαρχίες αυξάνεται κατά το χρονικό διάστημα της πρωτεύουσας ρύθμισης συχνότητας, ώστε να ενισχυθεί η πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας και κατά συνέπεια η δευτερεύουσα. Το ποσοστό αύξησης της αρχικής φόρτισης των οχημάτων είναι ίδιο για όλες τις ομάδες φόρτισης καθώς χρησιμοποιούμε την ίδια τιμή στο συντελεστή K (KW/HZ), για όλες τις ομάδες οχημάτων.



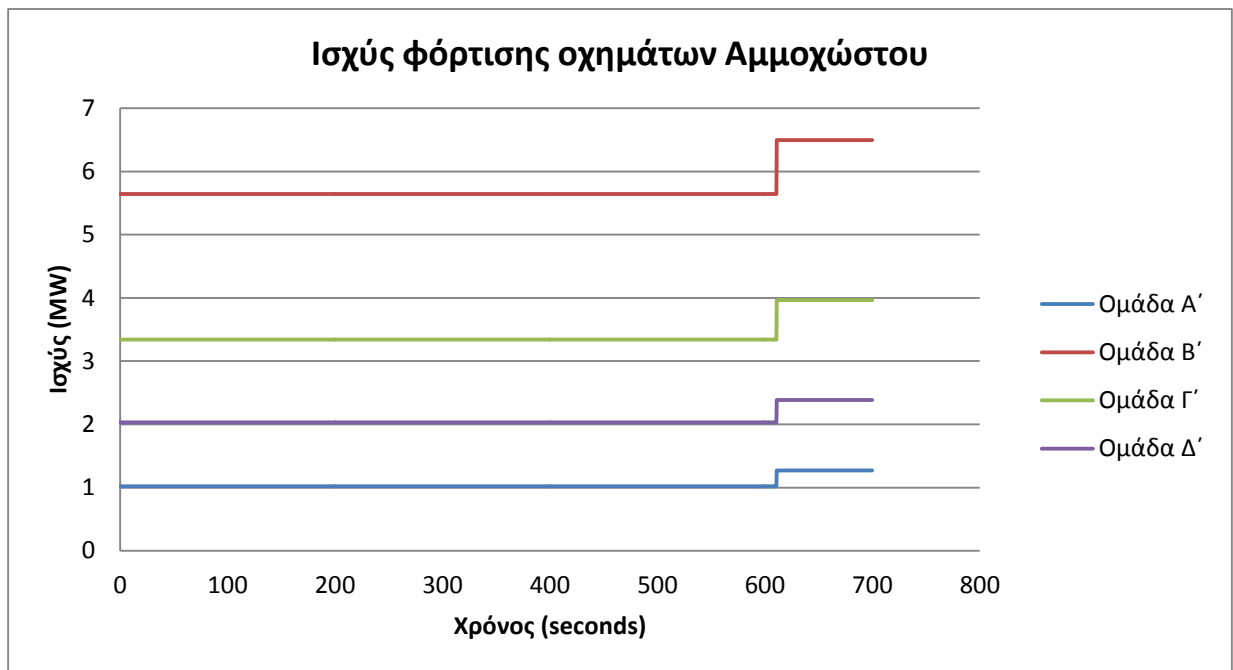
Γράφημα 9-29: Απόκριση ισχύος φόρτισης οχημάτων Λευκωσίας από τη πλευρά του δικτύου.



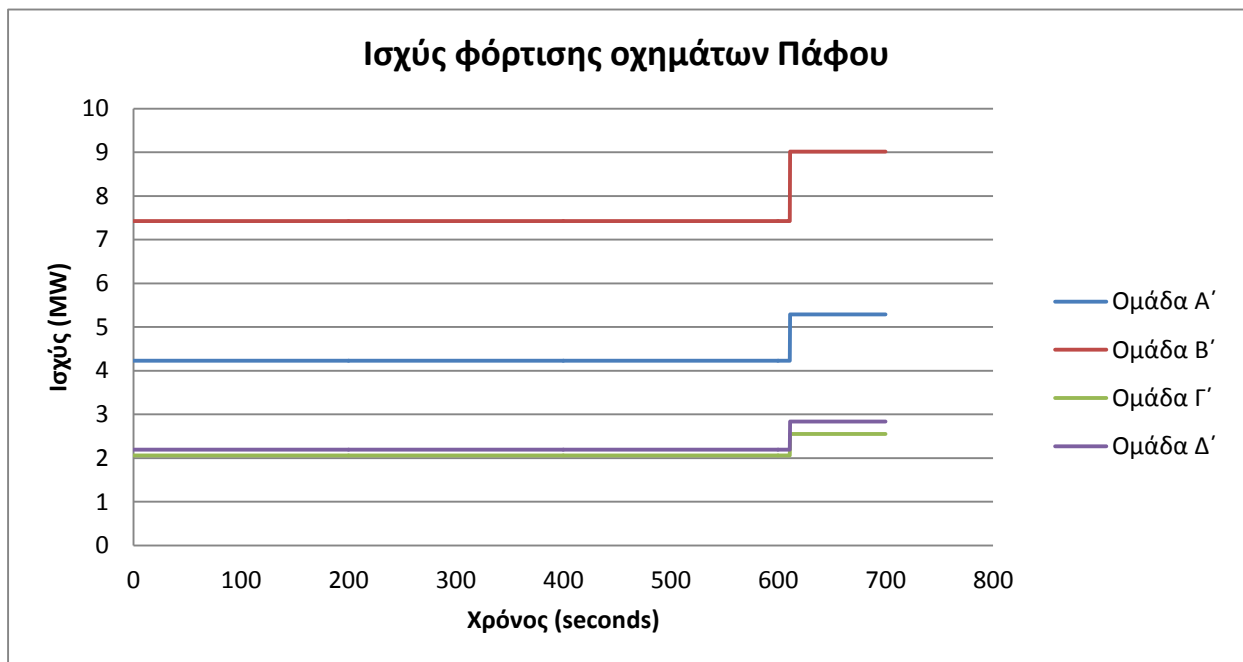
Γράφημα 9-30: Απόκριση ισχύος φόρτισης οχημάτων Λεμεσού από τη πλευρά του δικτύου.



Γράφημα 9-31: Απόκριση ισχύος φόρτισης οχημάτων Λάρνακας από τη πλευρά του δικτύου.

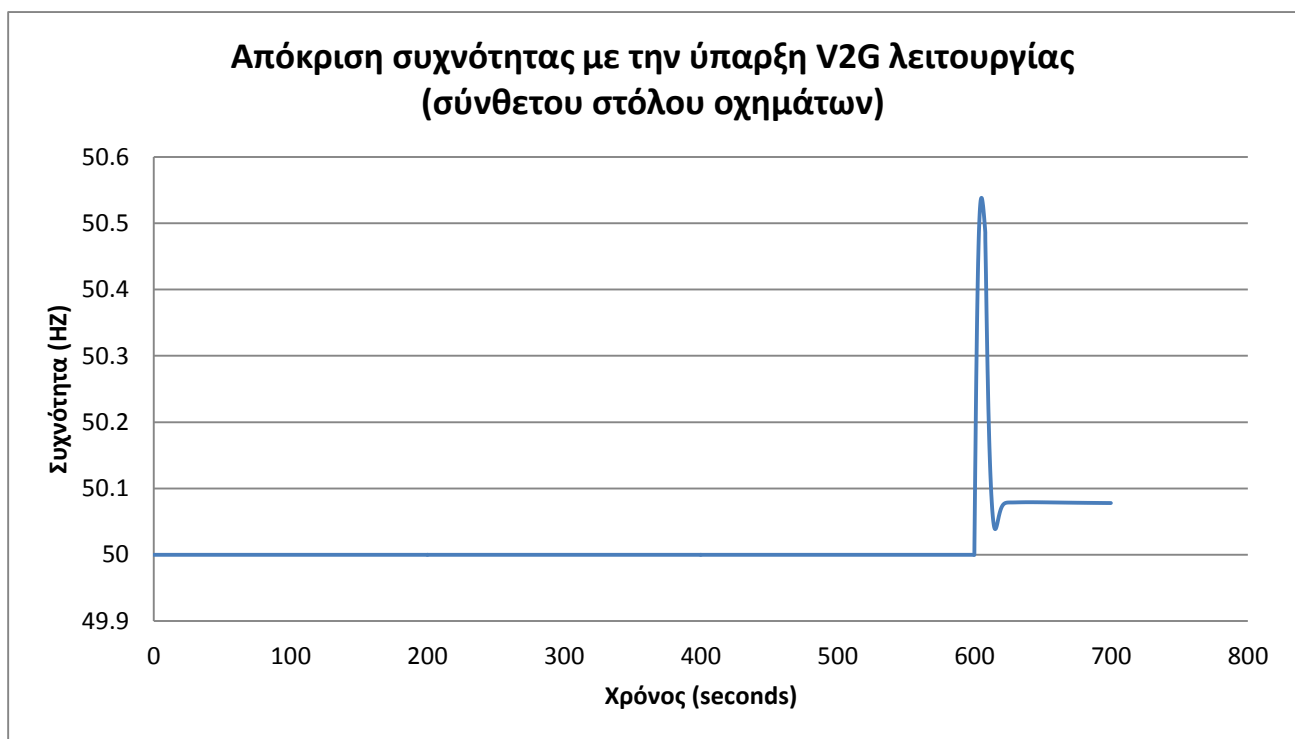


Γράφημα 9-32: Απόκριση ισχύος φόρτισης οχημάτων Αμμοχώστου από τη πλευρά του δικτύου.



Γράφημα 9-33: Απόκριση ισχύος φόρτισης οχημάτων Πάφου από τη πλευρά του δικτύου.

Όπως και στο σενάριο 3 η συχνότητα πλησιάζει λιγότερο την ονομαστική σε σύγκριση με τα σενάρια 1 και 2, όπου η προσέγγιση της ονομαστικής συχνότητας είναι αρκετά ικανοποιητική με τη βοήθεια της V2G λειτουργίας. Έτσι σε αυτήν τη περίπτωση αξίζει να μελετήσουμε και την περίπτωση όπου στο δίκτυο είναι συνδεδεμένα εκτός από τα ηλεκτρικά οχήματα που επιθυμούν να φορτίσουν, ακόμα 25000 οχήματα (Πίνακας 9-4) τα οποία επιθυμούν να διατηρήσουν την αρχική τους SOC αλλά ταυτόχρονα να συμμετέχουν στην πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας του δικτύου. Στο παρακάτω γράφημα παρουσιάζεται η απόκριση συχνότητας με την ύπαρξη V2G στο δίκτυο για το ίδιο συμβάν διαταραχής, αλλά αυτή τη φορά θεωρούμε ότι διεισδύουν στο δίκτυο και τα 25000 οχήματα του πίνακα 9-4.

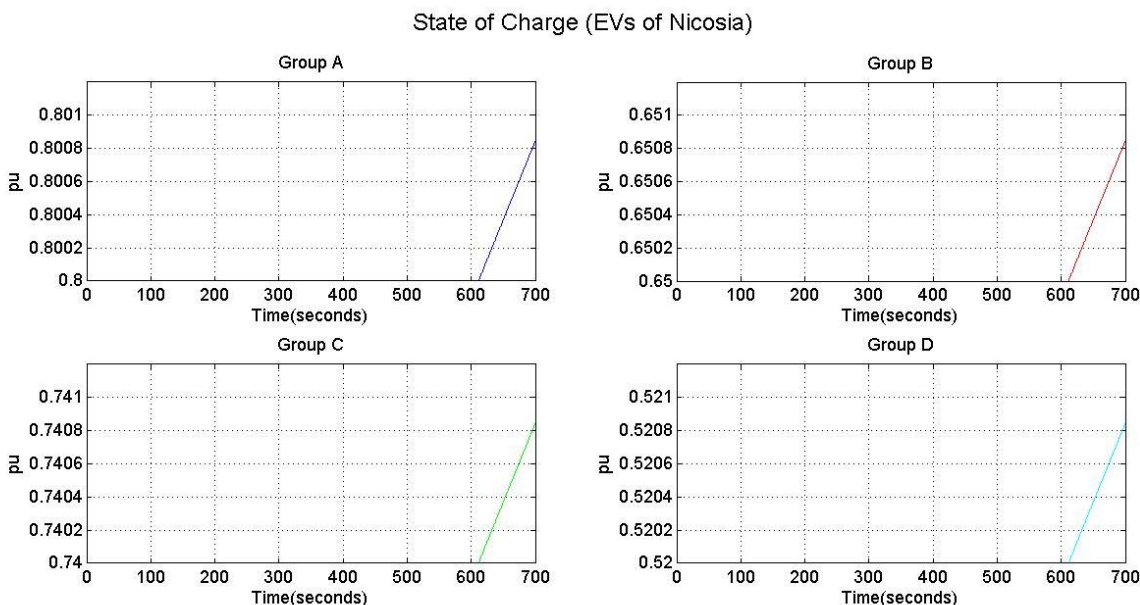


Γράφημα 9-34: Απόκριση συχνότητας πριν και κατά τη διαταραχή με την ύπαρξη V2G λειτουργίας με σύνθετο στόλο οχημάτων.

Συγκρίνοντας το αποτέλεσμα που παρουσιάζεται στο γράφημα 9-34 με αυτό του γραφήματος 9-28 παρατηρούμε ότι η συχνότητα σταθεροποιείται ακόμα πιο κοντά στην ονομαστική της τιμή με την πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας αφού προσεγγίζει τα 50,07 HZ. Όπως και στο σενάριο 3 η V2G διαδικασία ενισχύθηκε με τη συμβολή των οχημάτων που ήταν συνδεδεμένα στο δίκτυο χωρίς να φορτίζουν αλλά λειτούργησαν σαν εφεδρικές πηγές

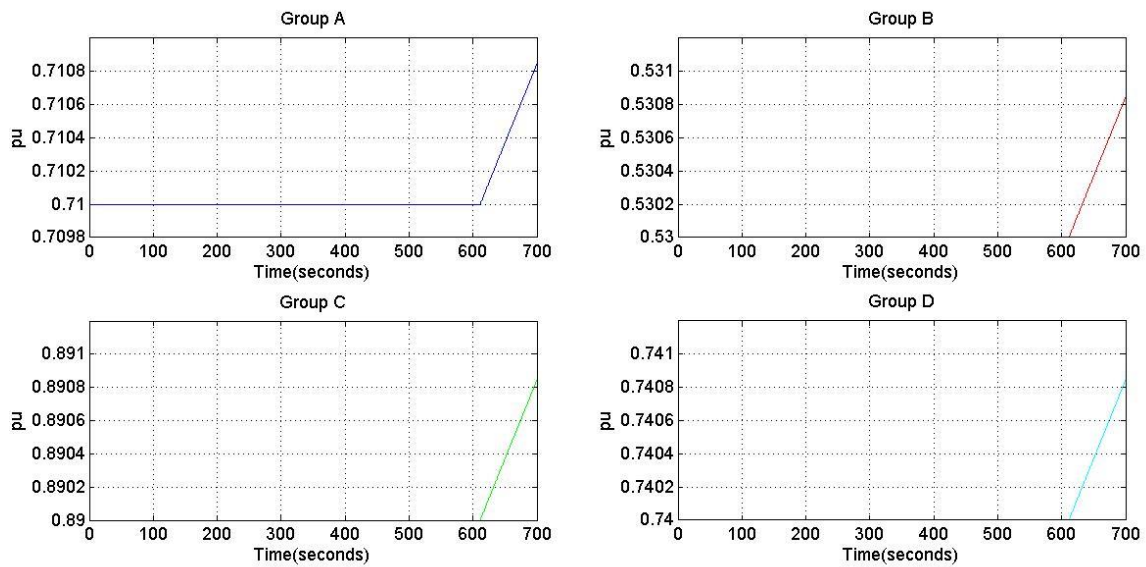
ενέργειας την ώρα της διαταραχής. Παρατηρούμε επίσης μια μικρή ταλάντωση στη συχνότητα η οποία οφείλεται στις ταλαντώσεις τάσεως και στο ότι τα οχήματα απορροφούν μεγάλα ποσά ισχύος για να υποστηρίξουν το δίκτυο κατά τη πρωτεύουσα ρύθμιση. Με αυτό τον τρόπο το έργο της δευτερεύουσας ρύθμισης γίνεται ακόμα ευκολότερο.

Στις εικόνες που ακολουθούν παρουσιάζεται η μεταβολή της κατάστασης φόρτισης των οχημάτων του επιπρόσθετου στόλου στο δίκτυο, κατά το χρονικό διάστημα της διαταραχής. Τη χρονική στιγμή $t=609$ seconds τα οχήματα φορτίζουν συμμετέχοντας με αυτό τον τρόπο στη πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας του δικτύου. Το ποσοστό αύξησης της αρχικής SOC είναι το ίδιο σε όλες τις ομάδες οχημάτων, καθώς χρησιμοποιήσαμε ίδια τιμή στο συντελεστή κέρδους K (1.5 KW/HZ) για όλες τις ομάδες. Παρατηρούμε ότι μετά το τέλος της προσομοίωσης η αρχική κατάσταση φόρτισης των οχημάτων αυξήθηκε κατά 0.082 % της ονομαστικής χωρητικότητας των συσσωρευτών. Άρα η επιθυμία των χρηστών για διατήρηση της αρχικής SOC καλύφθηκε αφού η αύξηση που παρατηρείται στην κατάσταση φόρτισης των οχημάτων θεωρείται αμελητέα.



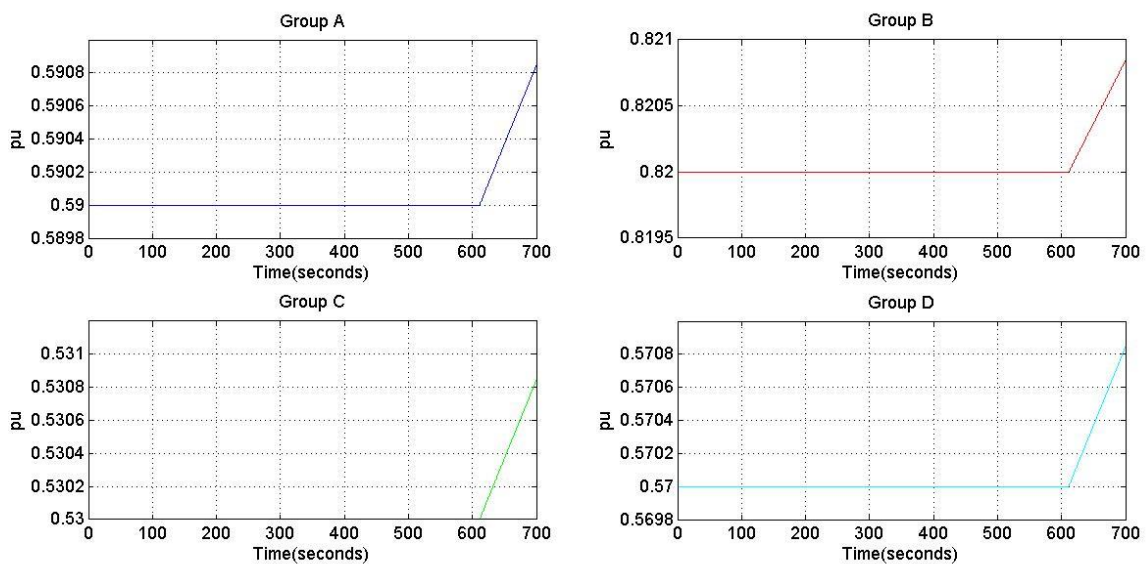
Εικόνα 9-29: Μεταβολή κατάστασης φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων Λευκωσίας.

State of Charge (EVs of Limassol)



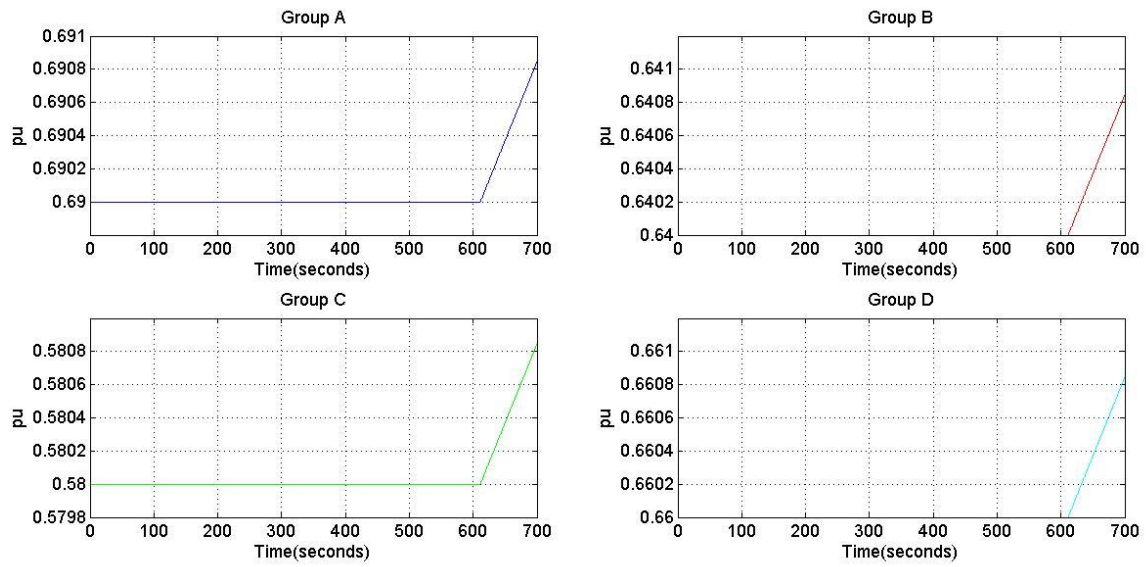
Εικόνα 9-30: Μεταβολή κατάστασης φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων Λεμεσού.

State of Charge (EVs of Larnaca)



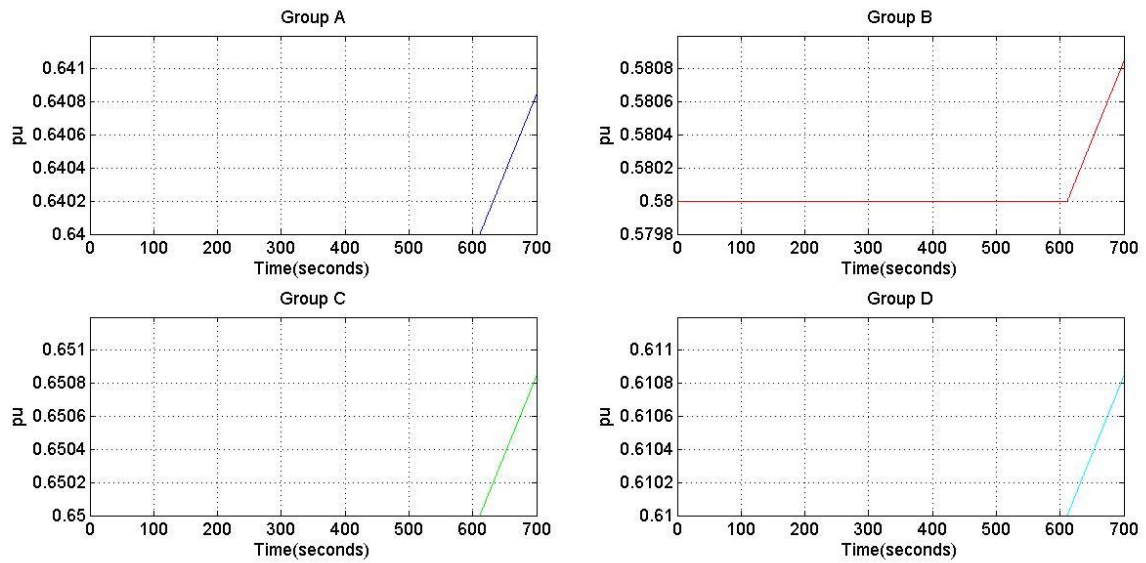
Εικόνα 9-31: Μεταβολή κατάστασης φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων Λάρνακας.

State of Charge (EVs of Famagusta)



Εικόνα 9-32: Μεταβολή κατάστασης φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων Αμμοχώστου.

State of Charge (EVs of Pafos)

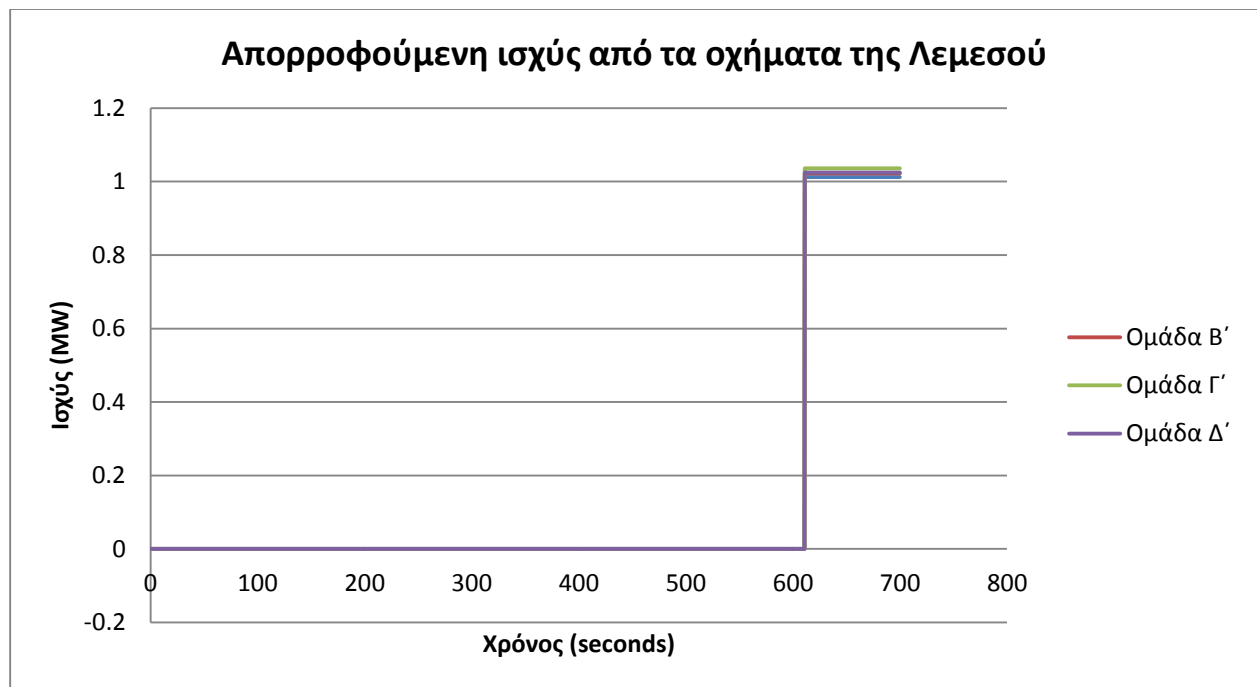


Εικόνα 9-33: Μεταβολή κατάστασης φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων Πάφου.

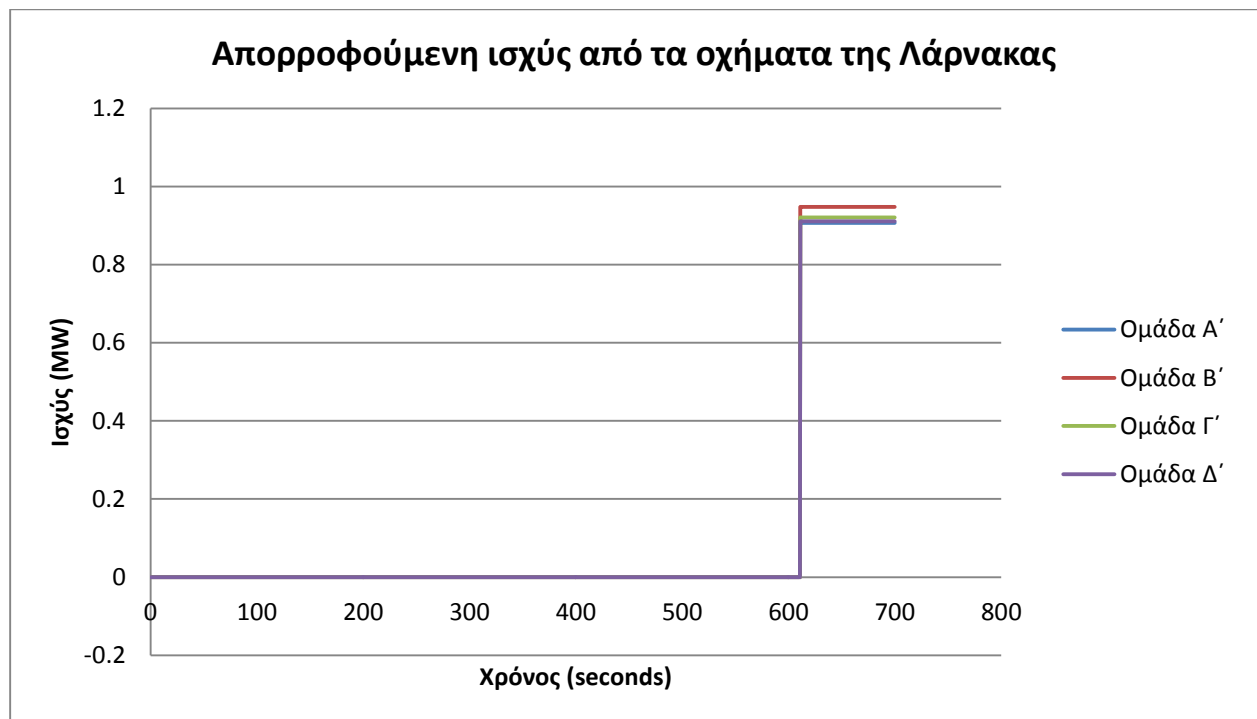
Τα πιο πάνω αποτελέσματα επιβεβαιώνονται από τα γραφήματα της ισχύος φόρτισης των οχημάτων που παρουσιάζονται πιο κάτω. Τα οχήματα τη χρονική στιγμή $t=609$ seconds αντιλαμβάνονται τη διαταραχή στη συχνότητα του δικτύου και φορτίζουν. Η ισχύς που απορροφά από το δίκτυο κάθε ομάδα οχημάτων εξαρτάται από τον αριθμό των οχημάτων της συγκεκριμένη ομάδας. Η ισχύς φόρτισης κάθε οχήματος είναι η ίδια σε όλες τις ομάδες οχημάτων, αφού όλα τα οχήματα αντιδρούν με βάση το σφάλμα συχνότητας και το συντελεστή K (KW/HZ) ο οποίος είναι ο ίδιος για όλα τα οχήματα. Στις περιπτώσεις όπου οι ομάδες έχουν περίπου ίδιο αριθμό οχημάτων, τότε οι ομάδες απορροφούν περίπου την ίδια ισχύ από το δίκτυο (όπως στα γραφήματα της Λεμεσού, Λάρνακας και Πάφου).



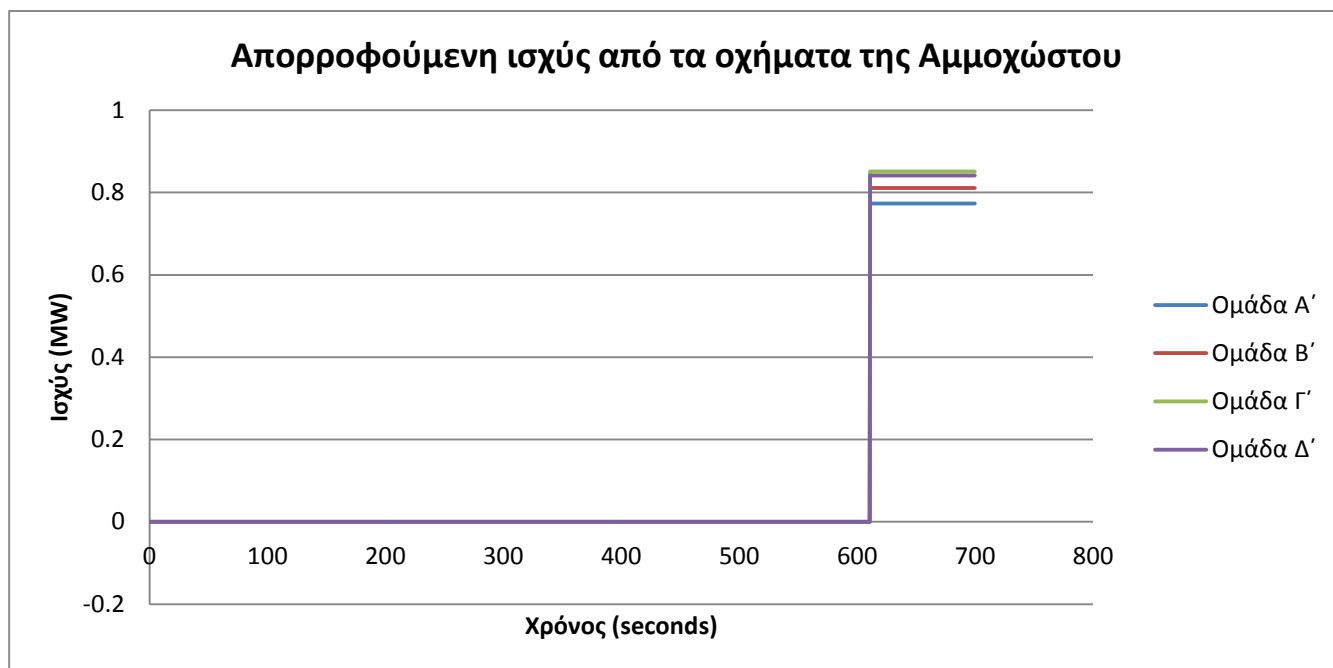
Γράφημα 9-35: Απορροφούμενη ισχύς από τα οχήματα της Λευκωσίας, μετρούμενη από την πλευρά του δικτύου.



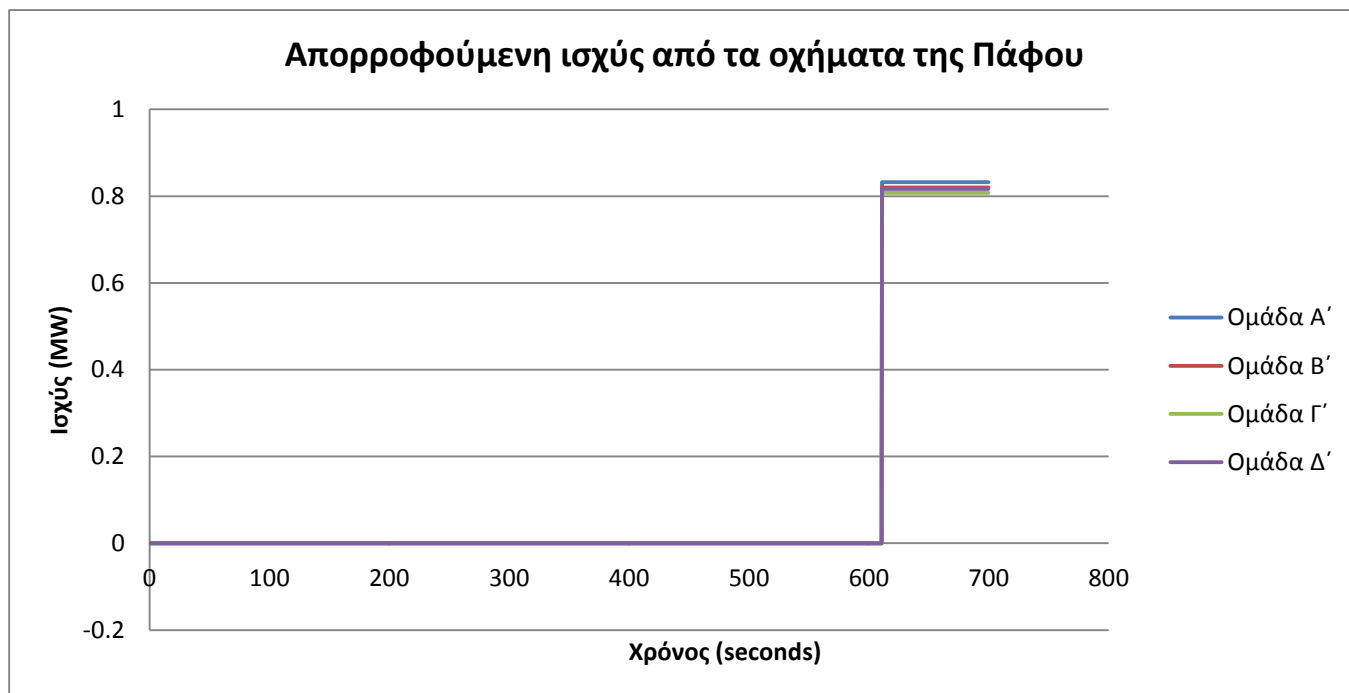
Γράφημα 9-36: Απορροφούμενη ισχύς από τα οχήματα της Λεμεσού, μετρούμενη από την πλευρά του δικτύου.



Γράφημα 9-37: Απορροφούμενη ισχύς από τα οχήματα της Λάρνακας, μετρούμενη από την πλευρά του δικτύου.



Γράφημα 9-38: Απορροφούμενη ισχύς από τα οχήματα της Αμμοχώστου, μετρούμενη από την πλευρά του δικτύου.



Γράφημα 9-39: Απορροφούμενη ισχύς από τα οχήματα της Πάφου, μετρούμενη από την πλευρά του δικτύου.

10. Συμπεράσματα και προτάσεις για περαιτέρω μελέτη

10.1 Συμπεράσματα

Από την εν λόγω διπλωματική προέκυψαν σημαντικά συμπεράσματα για τη χρήση των ηλεκτρικών οχημάτων ως κατανεμημένες πηγές ρύθμισης της συχνότητας στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Πρωταρχικό συμπέρασμα αποτελεί το ότι με τη διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων σε ένα δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας όπως αυτό της Κύπρου θα πρέπει να γίνει ένταξη περισσότερων μονάδων παραγωγής για να εξυπηρετηθεί το επιπρόσθετο φορτίο διαφορετικά θα δημιουργηθεί black out στο σύστημα. Αν κατά τις βραδινές ώρες που υπάρχει μειωμένη χρέωση στην κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας ένα μεγάλο ποσοστό χρηστών επιχειρήσουν να φορτίσουν τα οχήματά τους μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή τότε το σύστημα δεν θα μπορεί να αντεπεξέλθει στις απαιτήσεις του συνολικού φορτίου καθώς θα πρέπει να τεθούν σε λειτουργία περισσότερες μονάδες παραγωγής εντός μικρού χρονικού διαστήματος. Όπως έχουμε αναφέρει και στο κεφάλαιο 9, για να αποφευχθεί ένα τέτοιο σοβαρό συμβάν στο δίκτυο θα πρέπει να γίνεται πρόβλεψη του φορτίου των οχημάτων και να υπάρχουν συγχρονισμένες γεννήτριες στο δίκτυο με λειτουργία στο τεχνικό τους ελάχιστο, ώστε αν αυξηθεί το φορτίο απότομα να μπορεί το σύστημα παραγωγής να αντεπεξέλθει εντός ολίγων δευτερολέπτων. Μια καλή ιδέα είναι ο συναθροιστής (aggregator) οχημάτων κάθε πόλης να μπορεί να προβλέπει με προσεγγιστικό τρόπο τον αριθμό των ηλεκτρικών οχημάτων τα οποία ενδέχεται να συνδεθούν κάποια ώρα του 24ώρου και να ενημερώνουν τον διαχειριστή του συστήματος ώστε να προνοήσει να εντάξει περισσότερες μονάδες παραγωγής στο σύστημα.

Όσον αφορά τον τρόπο συμμετοχής των ηλεκτρικών οχημάτων στην πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας λαμβάνοντας ταυτόχρονα υπόψη και τις απαιτήσεις φόρτισης των χρηστών, είδαμε ότι με τη χρήση κατάλληλων τεχνικών ελέγχου Vehicle to grid (V2G) το δίκτυο μπορεί να εκμεταλλευτεί την χωρητικότητα και την αποθηκευμένη ενέργεια των συσσωρευτών των οχημάτων για το σκοπό αυτό. Έπειτα απλοποιήσαμε τις συγκεκριμένες τεχνικές ελέγχου για χάρη των προσομοιώσεων στο Power World Simulator, όπου εκτελέστηκαν προσομοιώσεις συμβάντων διαταραχής της συχνότητας για το ηλεκτρικό δίκτυο της Κύπρου. Παρατηρήσαμε ότι η συχνότητα μετά τις διάφορες μεταβολές σταθεροποιούνταν σε τιμή εγγύτερη στην ονομαστική των 50Hz, με την ύπαρξη της V2G λειτουργίας στο δίκτυο. Επομένως μπορούμε να πούμε ότι τα ηλεκτρικά οχήματα μπορούν να παίξουν ενεργό ρόλο στην πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας. Αξίζει να σημειωθεί ότι στα γραφήματα της συχνότητας παρατηρήθηκαν μικρού πλάτους ταλαντώσεις διότι τα οχήματα πρόσφεραν σημαντικά ποσά ισχύος στο δίκτυο. Επίσης είδαμε ότι ένας χρήστης ηλεκτρικού οχήματος μπορεί να συμμετάσχει στην V2G λειτουργία και κατά συνέπεια στην πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας του δικτύου, είτε κατά τη φόρτιση του οχήματος του στο σταθμό φόρτισης, είτε απλά συνδέοντας το όχημα του στο δίκτυο. Με αυτό τον τρόπο μπορεί να βελτιωθεί η απόδοση του δικτύου χωρίς να απαιτείται εγκατάσταση νέων μονάδων παραγωγής ή άλλων δαπανηρών μορφών εφεδρείας. Ο χρήστης/ιδιοκτήτης του ηλεκτρικού οχήματος από την άλλη θα πληρώνεται για τις παρεχόμενες υπηρεσίες του στο δίκτυο ή θα έχει την ανάλογη έκπτωση στο τιμολόγιο κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας.

Τέλος, για να είναι βιώσιμη η V2G λειτουργία απαιτείται η ύπαρξη πολλών αμιγώς ηλεκτρικών ή υβριδικών οχημάτων και κατάλληλοι σταθμοί φόρτισης. Για να πραγματοποιηθεί αυτό θα πρέπει να υπάρξουν κίνητρα για τους χρήστες των ηλεκτρικών οχημάτων όπως για παράδειγμα φόρτιση με μειωμένα τιμολόγια. Επίσης πρέπει να αντιμετωπιστεί το θέμα της αυξημένης φθοράς των συσσωρευτών που μπορεί να προκληθεί από τη V2G λειτουργία, λόγω της συχνής φόρτισης και εκφόρτισης τους.

10.2 Προτάσεις για περαιτέρω μελέτη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήσαμε την επίδραση στη πρωτεύουσα ρύθμιση της συχνότητας ενός μη διασυνδεδεμένου συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Θα ήταν πολύ ενδιαφέρουσα μια μελέτη αντίστοιχη για ένα διασυνδεδεμένο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Επίσης προσομοιώθηκαν συμβάντα διαταραχών της συχνότητας από απώλειες μονάδων και μεταβολής φορτίου. Θα μπορούσαν να προσομοιωθούν πραγματικές καμπύλες φορτίου και συμβάντα διαταραχών από απώλειες γραμμών μεταφοράς, ώστε οι προσομοιώσεις να είναι ακόμα πιο κοντά στην πραγματικότητα. Παράλληλα θα ήταν πραγματικά χρήσιμη η τεchnοοικονομική ανάλυση της V2G λειτουργίας προκειμένου να εξεταστεί η οικονομική βιωσιμότητα της μεθόδου. Μια τέτοια ανάλυση θα έδινε σαφή εκτίμηση του πως πρέπει να δομηθούν τα επιχειρηματικά μοντέλα για τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας του όλου συστήματος. Τέλος θα ήταν σημαντικό να μελετηθεί η επίδραση στη διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

11. Βιβλιογραφία

- [1] Sara Kathryn Mullen, «In Plug-In Hybrid Electric Vehicles as a Source of Distributed Frequency Regulation», A dissertation submitted to the faculty of the graduate school of the University of Minnesota, September 2009.
- [2] MERGE (MOBILE ENERGY RESOURCES IN GRIDS OF ELECTRICITY), «SPECIFICATIONS FOR EV-GRID INTERFACING, COMMUNICATION AND SMART METERING TECHNOLOGIES, INCLUDING TRAFFIC PATTERNS AND HUMAN BEHAVIOUR DESCRIPTIONS» 24 August 2010.
- [3] Professor Adrew Gruden, «Vehicle-to-Grid (V2G) Communications», Παρουσίαση, University of Southampton.
- [4] Adrene Briones, James Francfort, Paul Heitmann, Micheal Schey, Steven Schey, John Smart «Vehicle to-Grid (V2G) Power Flow Regulations and Building Codes Review by the AVTA», September 2012.
- [5] Wang Ran, «Design of a V2G Aggregator to Optimize PHEV Charging and Frequency Regulation Control», NANYANG TECHNOLOGICAL UNIVERSITY, April 2012.
- [6] Hui Liu, Member, IEEE, Zechun Hu, Member, IEEE, Yonghua Song, Fellow, IEEE, and Jin Lin, Member, IEEE «Decentralized Vehicle-to-Grid Control for Primary Frequency Regulation Considering Charging Demands», IEEE Transactions on Power Systems, TPWRS-01160-2012.R2, 2013.
- [7] Stavros Stavrinos, *Member IEEE/IET*, Andreas G. Petoussis, *Ph.D.*, Andreas L. Theophanous, Srinivas Pillutla, *Ph.D., Senior Member IEEE* and F. S. Prabhakara, *Ph.D., P.E., Life Member IEEE*, «Development of a Validated Dynamic Model of Cyprus Transmission System».
- [8] YAO ZHANG, «LOAD FREQUENCY CONTROL OF MULTIPLE-AREA POWER SYSTEMS», Bachelor of Electrical Engineering Tsinghua University July, 2007.
- [9] W. Kempton, V. Udo, K. Huber, K. Komara, S. Letendre, S. Baker, D. Brunner, and N. Pearre, “A test of vehicle-to-grid (V2G) for energy storage and frequency regulation in the PJM system,” Univ. Delaware, Newark, DE, 2008.
- [10] Αρχή Ηλεκτρισμού Κύπρου, «ΣΤΑΘΜΟΙ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ», ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑΣ E-CHARGE, Ιούνιος 2014.
- [11] ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΓΡΑΦΕΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ, «ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΑ», Γιώργος Εμμανουηλίδης, Ιούλιος 2011.
- [12] Ανθή Χαραλάμπους, Διευθύντρια Ενεργειακού Γραφείου Κυπρίων Πολιτών, «Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας στην Κύπρο», Παρουσίαση , 27-28 Μαρτίου 2014.
- [13] Αντωνίου Αντώνης, «Επιπτώσεις στην Οικονομική Λειτουργία των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας Κρήτης και Κύπρου λόγω της διασύνδεσής τους», Διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης ,Χανιά, Ιούλιος 2013.

- [14] Θεοδώρου Νικόλας, «Διασύνδεση ΣΗΕ Κύπρου-Κρήτης. Μελέτη στην μόνιμη κατάσταση λειτουργίας», Διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, Ιούλιος 2013.
- [15] ΝΙΚΟΛΑΟΣ Δ. ΝΙΚΟΛΑΚΟΠΟΥΛΟΣ, «Ανασκόπηση τεχνολογίας σύνδεσης οχημάτων στο ηλεκτρικό δίκτυο (Vehicle to Grid - V2G)», Διπλωματική εργασία ΕΜΠ, Αθήνα, Ιούνιος 2012.
- [16] Ευάγγελος Ε. Τσιγγούνης, «Βέλτιστος προγραμματισμός της V2G λειτουργίας των ηλεκτρικών οχημάτων για την παροχή ενέργειας και επικουρικών υπηρεσιών στο δίκτυο», Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα, Μάρτιος 2013.
- [17] ΦΛΟΥΡΗΣ ΑΒΡΑΑΜΗΣ, ΚΩΣΤΑΣ ΧΑΤΖΗΚΥΡΙΑΚΟΥ, «ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΤΗΣ ΚΥΠΡΟΥ ΚΑΙ Η ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΤΟΥ ΕΞΕΛΙΞΗ», Διπλωματική εργασία, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 2013.
- [18] Ιωάννης - Αντώνιος Α. Ντουσάκης, «ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΜΜΕΤΟΧΗΣ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΣΤΗΝ ΠΡΩΤΕΥΟΥΣΑ ΡΥΘΜΙΣΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΜΗ ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ», Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα 2013.
- [19] Ζιώγας Ηλίας, Μιχαλιού Μαρία-Ελένη, «Ρύθμιση Τάσης και Συχνότητας στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας», Πτυχιακή εργασία, ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΕΙΡΑΙΑ, ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ, ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ, ΑΙΓΑΛΕΩ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2014.
- [20] ΚΕΦΑΛΛΩΝΙΤΗΣ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ, ΠΑΡΑΣΚΕΥΟΠΟΥΛΟΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ, « ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΕΛΕΓΚΤΩΝ ΤΑΣΗΣ ΚΑΙ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ ΣΥΓΧΡΟΝΩΝ ΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΩΝΤΑΣ ΜΟΝΤΕΡΝΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ», Πτυχιακή εργασία, ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΕΙΡΑΙΑ, ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ, ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ, ΑΙΓΑΛΕΩ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2011.
- [21] ΑΠΟΣΤΟΛΟΣ Β. ΜΠΕΛΟΚΑΣ, «ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗΣ ΤΩΝ ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΩΣ ΔΙΑΣΠΑΡΜΕΝΩΝ ΜΟΝΑΔΩΝ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΤΩΝ ΚΤΙΡΙΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ GAMS», Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα Μάρτιος 2011.
- [22] Κωνσταντίνος Μπρέλλας, «Μοντελοποίηση Οικονομικής Λειτουργίας Σταθμών Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας Συνδυασμένου Κύκλου Χανίων και επίπτωση στην Οικονομική λειτουργία του ΣΗΕ Κρήτης», Διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Δεκέμβριος 2014.
- [23] Πηγή ΑΗΚ: (<https://www.eac.com.cy>)
- [24] Πηγή Διαχειριστή Συστήματος Μεταφοράς Κύπρου: (http://www.dsm.org.cy/nqcontent.cfm?a_id=1)

- [25] Πηγή διαδικτύου: (<http://agbeat.com/housing-news/new-homes-one-city-must-electric-vehicle-charging-stations/>)
- [26] Πηγή διαδικτύου: (http://www.greencarreports.com/news/1082327_how-to-do-electric-car-chargers-right-new-target-store-in-ca)
- [27] Πηγή διαδικτύου: (http://www.csrwire.com/press_releases/33454-IKEA-Plugs-In-4-Electric-Vehicle-Charging-Stations-in-Costa-Mesa-CA)
- [28] Πηγή διαδικτύου: (<http://franklintnblog.com/2012/06/electric-car-charging-stations-in-franklin-tn/>)
- [29] Πηγή διαδικτύου: (<http://venturebeat.com/2010/08/10/bay-area-soon-to-be-home-to-5050-ev-charging-stations/>)
- [30] Πηγή διαδικτύου: (<http://autogreenmag.com/tag/solar-charging-station/>)
- [31] Πηγή διαδικτύου: (<https://www.ntt-review.jp/archive/ntttechnical.php?contents=ntr201109gls.html>)
- [32] Πηγή διαδικτύου: (<http://www.neuralenergy.info/2009/06/v2g.html>)
- [33] Πηγή διαδικτύου: (http://www.wwindea.org/technology/ch04/de/4_3_4.html)
- [34] Πηγή Power World Simulator: (<http://www.powerworld.com/gloversarmaoverbye>)