



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΜΜΕΤΟΧΗΣ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΣΤΗΝ  
ΠΡΩΤΕΥΟΥΣΑ ΡΥΘΜΙΣΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΜΗ ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ  
ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ιωάννης - Αντώνιος Α. Ντουσάκης

Επιβλέπων : Νικόλαος Δ. Χατζηαργυρίου  
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2013





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΜΜΕΤΟΧΗΣ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΣΤΗΝ  
ΠΡΩΤΕΥΟΥΣΑ ΡΥΘΜΙΣΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΜΗ ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ  
ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ιωάννης - Αντώνιος Α. Ντουσάκης

**Επιβλέπων :** Νικόλαος Δ. Χατζηαργυρίου  
Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 15<sup>η</sup> Ιουλίου 2013.

.....

Χατζηαργυρίου Νικόλαος  
Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....

Παπαθανασίου Σταύρος  
Επικ. Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....

Γεωργιάκης Πάυλος  
Λέκτορας Ε.Μ.Π

Αθήνα, Ιούλιος 2013

.....

Ιωάννης – Αντώνιος Α. Ντουσάκης

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Ιωάννης – Αντώνιος Α. Ντουσάκης, 2013

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

# Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στον τομέα Ηλεκτρικής Ισχύος της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών του ΕΜΠ και ειδικότερα στο εργαστήριο Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας.

Υπεύθυνος κατά την εκπόνηση της διπλωματικής ήταν ο καθηγητής κ. Νικόλαος Χατζηαργυρίου στον οποίο οφείλω ιδιαίτερες ευχαριστίες για την ανάθεσή της, καθώς μέσα από το συγκεκριμένο θέμα μου δόθηκε η ευκαιρία να ασχοληθώ με έναν πραγματικά ενδιαφέροντα ερευνητικό τομέα.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά και από καρδιάς τον υποψήφιο διδάκτορα κ. Ευάγγελο Καρφόπουλο για τη συνεχή βοήθεια, την άμεση ανταπόκριση και την υποδειγματική καθοδήγηση καθ' όλη τη διάρκεια ανάπτυξης και συγγραφής της παρούσας εργασίας. Με την ευκαιρία θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου και στον κ. Εμμ. Βουμβουλάκη ο οποίος με τις άριστες τεχνικές του γνώσεις με βοήθησε στην υλοποίηση συγκεκριμένων μερών της εργασίας.

Κλείνοντας θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στην οικογένειά μου για την αμέριστη εμπιστοσύνη και συμπαράσταση που μου έδειξε όλα αυτά τα χρόνια καθώς και σε όλους τους φίλους και συμφοιτητές μου, για τις αξέχαστες στιγμές και εμπειρίες που βιώσαμε κατά τη διάρκεια των φοιτητικών μας χρόνων.

*Ιωάννης Αντώνιος Ντουσάκης*

*Αθήνα, Ιούλιος 2013*

## Περίληψη

Ο έλεγχος Vehicle to Grid (V2G) είναι μία στρατηγική που δυνητικά μπορεί να εφαρμόζεται σε σταθμούς φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων και έχει τη δυνατότητα να προσφέρει υπηρεσίες πρωτεύουσας ρύθμισης συχνότητας στο ηλεκτρικό δίκτυο. Στην παρούσα εργασία διερευνούμε τις επιπτώσεις από τη συμμετοχή των ηλεκτρικών οχημάτων στη ρύθμιση συχνότητας για μη διασυνδεδεμένα συστήματα, λαμβάνοντας υπ' όψιν τόσο τις ανάγκες του δικτύου όσο και τις απαιτήσεις των χρηστών σχετικά με τη φόρτιση των οχημάτων τους. Όταν ένας χρήστης ηλεκτρικού οχήματος σταθμεύει και συνδέει το όχημά του στο δίκτυο, εξετάζονται δύο περιπτώσεις. Στην πρώτη, το όχημα είναι επαρκώς φορτισμένο κατά τον χρήστη και κατά συνέπεια δεν έχει την απαίτηση να το παραλάβει με υψηλότερη στάθμη φόρτισης (State of Charge - SOC). Η τεχνική ελέγχου Battery SOC Holder φροντίζει έτσι ώστε η ενέργεια της μπαταρίας να διατηρείται κοντά στην αρχική της τιμή ενώ παράλληλα την αξιοποιεί για ρύθμιση συχνότητας. Στην δεύτερη περίπτωση, το όχημα δεν είναι επαρκώς φορτισμένο και κατά συνέπεια ο χρήστης έχει την απαίτηση να το παραλάβει με υψηλότερη στάθμη φόρτισης. Εκεί εφαρμόζεται η τεχνική ελέγχου Charging with Frequency Regulation κατά την οποία το όχημα ρυθμίζει την ισχύ με την οποία φορτίζει υποστηρίζοντας κατά αυτόν τον τρόπο το δίκτυο. Διενεργούνται προσομοιώσεις σε ένα απλό, μη διασυνδεδεμένο ηλεκτρικό δίκτυο για διάφορες καταστάσεις λειτουργίας προκειμένου να δειχθεί η αποτελεσματικότητα των τεχνικών ελέγχου.

Λέξεις κλειδιά: Ηλεκτρικό όχημα, πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας, μπαταρία, στάθμη φόρτισης, Eurostag, επικουρικές υπηρεσίες

# Abstract

Vehicle to grid (V2G) control is a strategy that can be potentially applied in electric vehicle charging stations and can provide frequency regulation services for the power system. In this thesis it is investigated which are the consequences of the participation of electric vehicles in frequency regulation for decentralized systems, taking into consideration both the needs of the power system and the demands of EV users regarding the charging of their vehicles. When an EV user parks and plugs the vehicle in there are two particular cases that are examined. In the first case, the vehicle is sufficiently charged so the user does not demand to receive the vehicle with higher state of charge (SOC). The Battery SOC holder control strategy is applied to maintain the battery energy around its initial value along with adaptive frequency droop control. In the second case, the vehicle is not sufficiently charged, so the user demands to receive it with higher state of charge. Then, a charging method, called Charging with Frequency Regulation is applied in order to regulate the charging power in time, supporting in this way the power system. Simulations are conducted for a simple decentralized power system for various operation points in order to show the effectiveness of these control strategies.

Key words: Electric vehicle, primary frequency regulation, battery, state of charge, Eurostag, ancillary services

## Πίνακας περιεχομένων

1. Εισαγωγή .....	10
1.1. Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας.....	10
1.2. Στόχος.....	10
1.3. Οργάνωση του τόμου.....	10
2.1. Δυναμικά στοιχεία ενός ηλεκτρικού δικτύου .....	12
2.1.1. Στρόβιλοι .....	12
2.1.2. Γεννήτριες .....	13
2.1.3. Ρυθμιστές στροφών .....	14
2.2. Στατισμός.....	14
2.3. Παράλληλη λειτουργία μονάδων παραγωγής .....	16
2.4. Αυτορρύθμιση φορτίου .....	16
2.5. Περιοχές Ελέγχου.....	17
2.6. Δευτερεύουσα Ρύθμιση Φορτίου-Συχνότητας.....	16
2.7. Συστήματα Διεγέρσεως και Ρυθμιστές Τάσεως .....	20
2.8. Ευστάθεια ΣΗΕ.....	20
3. Συμμετοχή ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο .....	24
3.1. Εισαγωγή .....	24
3.2. Συμμετοχή των ηλεκτρικών οχημάτων στις αγορές ενέργειας και επικουρικών υπηρεσιών .....	24
3.3. Οικονομικά – Επιχειρηματικά Μοντέλα .....	27
4. Μοντελοποίηση.....	29
4.1. Δυναμικό Μοντέλο Συσσωρευτή.....	29
4.2. Πλαίσιο Λειτουργίας.....	31
4.3. Υπάρχουσα μέθοδος ελέγχου V2G.....	34
4.4. Έλεγχος με τη μέθοδο Adaptive Droop Control.....	35
4.5. Προσομοιώσεις .....	37
5. Eurostag.....	54
5.1. Γενικά.....	54
5.2. Λειτουργία .....	54
5.3 Μοντέλα.....	57
5.4. Επιπλέον στοιχεία του Eurostag .....	58
5.4.1. Μοντέλα οριζόμενα από τον χρήστη - Model editor.....	58



5.4.2.	Network Editor - Σχηματική απεικόνιση του δικτύου .....	59
5.4.3.	Post-Processor - Ανάλυση αποτελεσμάτων.....	59
6.	Προσομοιώσεις.....	61
6.1.	Δίκτυο προσομοίωσης.....	61
6.2.	Battery SOC Holder .....	68
6.3.	Battery Charging with Frequency Regulation.....	79
6.4.	Σύνθετη περίπτωση.....	89
7.	Συμπεράσματα – Περαιτέρω μελέτη .....	98

# 1. Εισαγωγή

## 1.1. Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται το θέμα της ενεργής ένταξης ηλεκτρικών οχημάτων στα σύγχρονα μη διασυνδεδεμένα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας. Ανάλογα με τις συνθήκες του δικτύου, τα φορτία που πρέπει να εξυπηρετηθούν αλλά και τη διαθέσιμη παραγωγή, ερευνούμε τον ρόλο που μπορούν να παίξουν τα ηλεκτρικά οχήματα μέσω μίας ειδικά σχεδιασμένης τεχνικής ελέγχου η οποία ρυθμίζει το εάν το όχημα θα απορροφήσει ή θα προσφέρει ισχύ στο δίκτυο, σε τι ποσότητα και για πόση χρονική διάρκεια.

## 1.2. Στόχος

Στόχος της διπλωματικής εργασίας, είναι να εξετάσει τις επιπτώσεις μίας τέτοιας τεχνικής ελέγχου τόσο ως προς το δίκτυο και την ποιότητα ισχύος όσο και ως προς τους χρήστες των ηλεκτρικών οχημάτων.

## 1.3. Οργάνωση του τόμου

Στο κεφάλαιο 2 θα αναφερθούμε συνοπτικά στη ρύθμιση φορτίου συχνότητας καθώς και στο με ποιον τρόπο πραγματοποιείται στα σύγχρονα δίκτυα. Παράλληλα θεωρείται σκόπιμη και μία σύντομη αναφορά στα δυναμικά στοιχεία ενός ηλεκτρικού δικτύου, μιας και θα μελετηθούν στα επόμενα κεφάλαια. Στο κεφάλαιο 3 θα αναφερθούμε στη συμμετοχή των ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο, δηλαδή στην λειτουργία V2G (Vehicle to Grid), εστιάζοντας στον τρόπο λειτουργίας μέσω συναθροιστή (aggregator). Στο κεφάλαιο 4 θα περιγράψουμε τα δυναμικά μοντέλα της μπαταρίας και του συναθροιστή και θα εκτελέσουμε προσομοιώσεις, προκειμένου να επαληθεύσουμε ότι το μοντέλο που εφαρμόσαμε λειτουργεί ευνοϊκότερα ως προς τις απαιτήσεις του χρήστη του οχήματος σε σχέση με άλλες τεχνικές ελέγχου. Στο κεφάλαιο 5 γίνεται περιγραφή του λογισμικού Eurostag, μιας και το χρησιμοποιούμε προκειμένου να ελέγξουμε τις τεχνικές ελέγχου σε ένα απλό δίκτυο. Αυτό περιγράφεται αναλυτικά στο κεφάλαιο 6, όπου περιλαμβάνονται πολλές διαφορετικές περιπτώσεις λειτουργίας και διαφορετικές μεταβολές φορτίου, έτσι ώστε να καλυφθούν όσες περισσότερες περιπτώσεις γίνεται. Στο κεφάλαιο 7 συνοψίζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν και δίνονται προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

## 2. Ρύθμιση φορτίου συχνότητας

Τα σύγχρονα συστήματα ενέργειας έχουν ως βασική λειτουργία αφενός να μετατρέπουν την ενέργεια που προέρχεται από φυσικούς πόρους σε ηλεκτρική και αφετέρου να την μεταφέρουν στον τελικό καταναλωτή. Ο τελικός καταναλωτής μπορεί να είναι από ένα μεγάλο εργοστάσιο μέχρι μία απλή κατοικία και έχει συγκεκριμένες απαιτήσεις όσον αφορά την ποιότητα της ηλεκτρικής ισχύος, προκειμένου να εξασφαλιστεί η σωστή λειτουργία των διαφόρων συσκευών.

Ως γνωστόν για την μεταφορά της ηλεκτρικής ισχύος στο δίκτυο χρησιμοποιείται εναλλασσόμενο ρεύμα (AC) και κατά συνέπεια η μεταφερόμενη ισχύς έχει ενεργή και άεργη συνιστώσα. Και για τις δύο όμως, πρέπει να υπάρχει κάθε στιγμή ισοζύγιο ισχύος στο σύστημα, πράγμα το οποίο σημαίνει ότι η παραγόμενη ισχύς (ενεργός και άεργος) πρέπει να είναι ακριβώς ίση με αυτήν που καταναλώνεται συνολικά στο σύστημα. Προκειμένου να επιτευχθεί αυτή η ισορροπία πρέπει να εξετάζουμε δύο χαρακτηριστικά μεγέθη: τη συχνότητα και την τάση. Όταν κάποιο από τα δύο, αποκλίνει από την ονομαστική τιμή στα διάφορα σημεία του δικτύου παρατηρούμε διάφορα μεταβατικά φαινόμενα μέχρις ότου το σύστημα να βρεθεί σε κάποιο νέο σημείο ισορροπίας. Όταν αναφερόμαστε σε «καλή» ποιότητα ηλεκτρικής ισχύος, εννοούμε ότι τόσο η συχνότητα όσο και η τάση βρίσκονται εντός των προκαθορισμένων ορίων καθ' όλη τη διάρκεια της λειτουργίας του συστήματος.

Παρόλα αυτά, οι χρήστες του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, μεταβάλλουν κάθε στιγμή το συνολικό φορτίο κατά ένα στοχαστικό τρόπο, με αποτέλεσμα να είναι αδύνατον για ένα σύστημα να διατηρήσει τη συχνότητα και την τάση εντός των ορίων χωρίς να υπάρχει κάποιο είδος δυναμικού ελέγχου. Σε αυτήν την περίπτωση τα μεγέθη αυτά θα ακολουθούσαν τις μεταβολές και τις διακυμάνσεις του φορτίου. Για αυτόν το λόγο, είναι απαραίτητη η 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.

Όπως είπαμε στο σύστημα ηλεκτρικής ισχύος υπάρχει τόσο ενεργός όσο και άεργος συνιστώσα, οι οποίες αλληλεπιδρούν τόσο στην τάση όσο και στη συχνότητα. Παρόλα αυτά η ενεργός ισχύς έχει μεγάλη αλληλεξάρτηση με τη συχνότητα και η άεργος ισχύς με την τάση. 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 συναντάται στην βιβλιογραφία υπό τον όρο «Ρύθμιση φορτίου συχνότητας» ή αλλιώς «Load Frequency Control» (LFC). Το κυριότερο καθήκον αυτού του τύπου ελέγχου, είναι να κρατήσει σταθερή τη συχνότητα, παρά τα τυχαίως μεταβαλλόμενα φορτία του δικτύου.

## 2.1. Δυναμικά στοιχεία ενός ηλεκτρικού δικτύου

Η εξισορρόπηση παραγόμενης ισχύος και φορτίου και η διατήρηση της επιθυμητής συχνότητας σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται με τους ρυθμιστές στροφών των γεννητριών, οι οποίοι ελέγχουν τη μηχανική ισχύ που παράγεται από τις κινητήριες μηχανές (τους στροβίλους). Οι ρυθμιστές στροφών μπορεί να θεωρηθούν σαν μηχανισμοί ελέγχου είτε της συχνότητας, είτε της ισχύος. Αν μια γεννήτρια τροφοδοτεί ένα απομονωμένο φορτίο, ο ρυθμιστής στροφών λειτουργεί ελέγχοντας τη συχνότητα. Αν η γεννήτρια συνδέεται σε ένα μεγάλο σύστημα, η ταχύτητα περιστροφής της είναι δεσμευμένη από τη συχνότητα του συστήματος και ο ρυθμιστής στροφών ελέγχει την παραγόμενη ισχύ.

Σε αυτό το σημείο θεωρείται σκόπιμη μία αναφορά στα δυναμικά χαρακτηριστικά των βασικών στοιχείων ενός τυπικού συστήματος παραγωγής ισχύος. Ένα τέτοιο σύστημα περιλαμβάνει στροβίλους, γεννήτριες και ρυθμιστές στροφών.

### 2.1.1. Στρόβιλοι

Τα διάφορα είδη στροβίλων (ατμοστρόβιλος, αεριοστρόβιλος, υδροστρόβιλος) είναι μονάδες οι οποίες μετατρέπουν την ενέργεια από το περιβάλλον (πχ ατμός, νερό) σε μηχανική ισχύ ( $\Delta P_m$ ) η οποία τροφοδοτεί με τη σειρά της την ηλεκτρική γεννήτρια. Συνήθως συναντώνται 3 είδη στροβίλων: χωρίς επαναθέρμανση, με επαναθέρμανση και υδροστρόβιλοι. Κάθε είδος έχει τη δική του συνάρτηση μεταφοράς και μπορεί να μοντελοποιηθεί με βάση αυτήν.

Οι στρόβιλοι χωρίς επαναθέρμανση είναι συστήματα πρώτης τάξης. Υπάρχει μία χρονική καθυστέρηση ( $T_{ch}$ ) από τη στιγμή που θα μεταβληθεί το άνοιγμα της βαλβίδας μέχρι να παρατηρηθεί μεταβολή στην παραγόμενη ισχύ. Επομένως η συνάρτηση μεταφοράς μπορεί να πάρει την εξής μορφή:

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

Όπου  $\Delta P_V$  είναι η αλλαγή στο άνοιγμα της βαλβίδας ή των υδατοθυρίδων.

Οι στρόβιλοι με επαναθέρμανση είναι δεύτερης τάξης συστήματα, μιας και έχουν δύο στάδια, αυτό της χαμηλής και αυτό της υψηλής πίεσεως. Σε αυτά τα συστήματα η συνάρτηση μεταφοράς είναι η εξής:

$$G_R(s) = \frac{\Delta P_m(s)}{\Delta P_V(s)} = \frac{F_{hp} T_{rh} s + 1}{(T_{ch} s + 1)(T_{rh} s + 1)}$$

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

Οι υδροστρόβιλοι είναι συστήματα μη ελάχιστης φάσης, λόγω της αδρανείας του νερού. Σε έναν υδροστρόβιλο η απόκριση της πίεσης σε μία αλλαγή του ανοίγματος των υδατοθυρίδων έχει μεταβατικά αντίθετο αποτέλεσμα από το αναμενόμενο. Δηλαδή για θετική μεταβολή του ανοίγματος θα αναμέναμε αντίστοιχη αύξηση της πίεσης, όμως αυτό που παρατηρούμε στην πραγματικότητα είναι μία προσωρινή μείωση της πίεσης. Αυτό όπως είπαμε οφείλεται στην αδράνεια του νερού και για αυτόν το λόγο, μετά από κάποιο χρονικό διάστημα, αποκαθίσταται η ροή και η πίεση παίρνει τις αναμενόμενες τιμές. Η συνάρτηση μεταφοράς λοιπόν ενός υδροστροβίλου είναι η εξής:

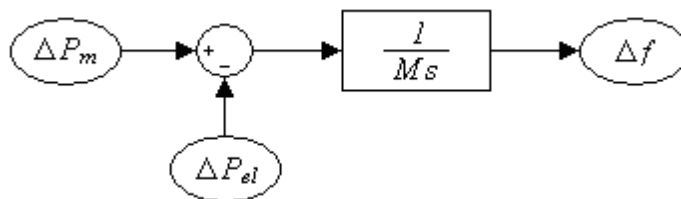
$$G_H(s) = \frac{\Delta P_m(s)}{\Delta P_V(s)} = \frac{-T_w s + 1}{(T_w/2)s + 1}$$

Όπου  $T_w$  είναι η υδραυλική χρονική σταθερά

## 2.1.2. Γεννήτριες

Μία ηλεκτρική γεννήτρια μετατρέπει τη μηχανική ισχύ που της προσέφερε ο στρόβιλος στον άξονα της σε ηλεκτρική. Στην παρούσα εργασία βέβαια, είναι σκόπιμο να παραλείψουμε λεπτομέρειες που αφορούν στην μετατροπή της ισχύος και να εστιάσουμε κατά κύριο λόγο στην ταχύτητα περιστροφής της γεννήτριας, που αντιστοιχεί και στην ηλεκτρική συχνότητα του δικτύου. Όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως, τα ηλεκτρικά δίκτυα πρέπει να λειτουργούν κατά τέτοιο τρόπο, έτσι ώστε να διατηρείται ισορροπία μεταξύ παραγωγής και ζήτησης.

Την στιγμή που 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  $\Delta P_m$  και της ηλεκτρικής  $\Delta P_e$  ισχύος, αποτυπώνεται στη μεταβολή της ταχύτητας του δρομέα  $\Delta \omega_r$ , η οποία με τη σειρά της αντιστοιχεί σε ένα σφάλμα συχνότητας  $\Delta f$ . Η σχέση μεταξύ του  $\Delta P_m$  και του  $\Delta f$  αποτυπώνεται στην παρακάτω εικόνα, όπου  $M$  είναι η σταθερά αδράνειας της γεννήτριας.



Εικόνα 1 - Μπλοκ διάγραμμα γεννήτριας

### 2.1.3. Ρυθμιστές στροφών

Οι ρυθμιστές στροφών είναι μονάδες ελέγχου οι οποίες χρησιμοποιούνται στα συστήματα ισχύος προκειμένου να ανιχνεύουν μεταβολές στη συχνότητα, που πιθανότατα προκλήθηκαν από κάποιες αλλαγές φορτίου και να τις ακυρώνουν. Αυτό το πραγματοποιούν μεταβάλλοντας κατάλληλα τα σήματα εισόδου των στρόβιλων, τους «ενημερώνουν» δηλαδή για το πόση επιπλέον ή λιγότερη ισχύ θα πρέπει να παράξουν. Ο ρυθμιστής στροφών διαθέτει δύο τύπους ρυθμίσεων:

- Μία 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). Η μεταβολή αυτή μετατρέπεται είτε σε σήμα-εντολή για τη μετακίνηση της δικλείδας του ατμοστρόβιλου, είτε των ρυθμιστικών πτερυγίων του υδροστρόβιλου, ώστε να προσαρμοστεί ανάλογα η μηχανική ισχύς που παράγεται από το στρόβιλο. Η διαδικασία αυτή αποτελεί την πρωτεύουσα ρύθμιση.
- Συμπληρωματικά μπορεί να ενεργοποιηθεί ο μηχανισμός αλλαγής στροφών του ρυθμιστή. Μετρίεται 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.

## 2.2. Στατισμός

Μία ορισμένη θέση του μηχανισμού αλλαγής στροφών (δηλαδή μια δεδομένη ταχύτητα αναφοράς) αντιστοιχεί σε μία ευθύγραμμη χαρακτηριστική φορτίου συχνότητας. Η αρνητική κλίση της εν λόγω καμπύλης ονομάζεται στατισμός της μονάδας και ορίζεται από την παρακάτω σχέση:

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

Όπου:

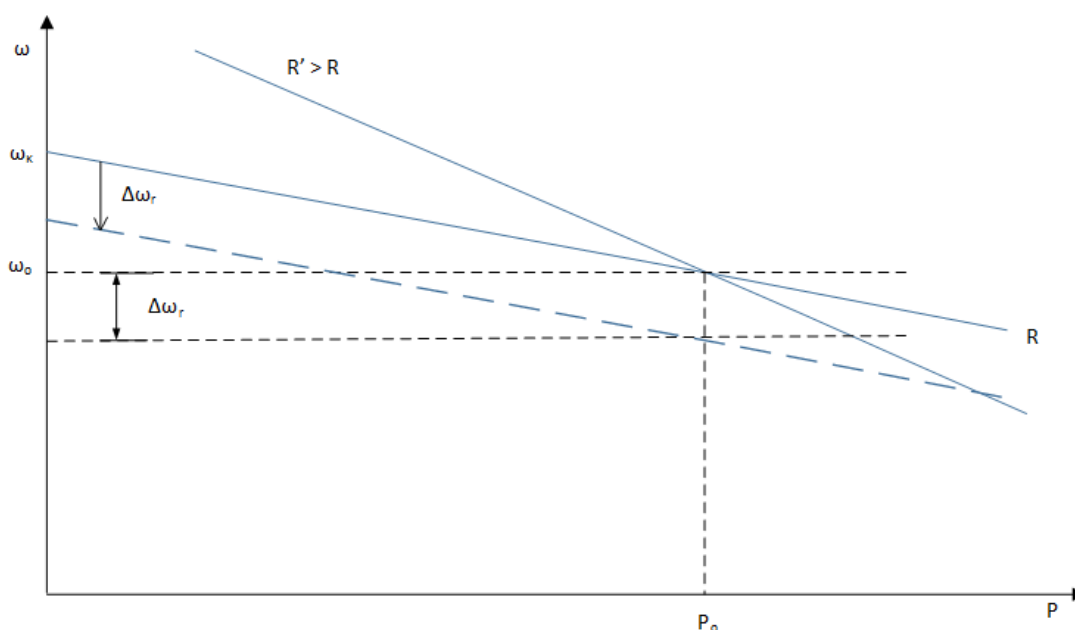
- $\Delta\omega$  είναι η ανά μονάδα μεταβολή της συχνότητας (ίση με την ανά μονάδα μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα της γεννήτριας) που παραμένει μετά τη λειτουργία της πρωτεύουσας ρύθμισης.
- $\Delta P$  η ανά μονάδα μεταβολή του φορτίου, από την οποία προκλήθηκε η μεταβολή  $\Delta\omega$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

Ο στατισμός μετρίεται σε ποσοστό επί τοις εκατό. Για παράδειγμα στατισμός 4% σημαίνει ότι εάν το φορτίο μεταβληθεί κατά 1 α.μ. (όσο δηλαδή η ονομαστική ισχύς της γεννήτριας) η συχνότητα θα μεταβληθεί κατά 4% (2Hz αν η ονομαστική είναι

50Hz). Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η χαρακτηριστική φορτίου συχνότητας μιας μονάδας παραγωγής. Όπως φαίνεται και στο σχήμα η κλίση της χαρακτηριστικής είναι αρνητική, όταν ο στατισμός είναι θετικός σύμφωνα με τον ορισμό του στατισμού. Αυτό συμβαίνει διότι παρά τη λειτουργία του ρυθμιστή στροφών, κάθε μεταβολή φορτίου αφήνει πάντα ένα μόνιμο σφάλμα συχνότητας. Έτσι εάν η μεταβολή φορτίου  $\Delta P$  είναι θετική (δηλαδή έχουμε αύξηση φορτίου), η συχνότητα θα μειωθεί που σημαίνει ότι η μεταβολή  $\Delta \omega$  θα είναι αρνητική. Μία τέτοια χαρακτηριστική φορτίου συχνότητας μπορεί να μεταβληθεί με δύο τρόπους:

- Αν μεταβληθεί ο στατισμός  $R$ , η χαρακτηριστική φορτίου συχνότητας στρέφεται γύρω από το σημείο λειτουργίας  $\omega_0$ ,  $P_0$ . (ο στατισμός αλλάζει την κλίση)
- Αν μεταβληθεί η ταχύτητα (συχνότητα) αναφοράς μέσω του μηχανισμού αλλαγής στροφών, η χαρακτηριστική μετακινείται παράλληλα διατηρώντας την κλίση της.

Όπως είναι προφανές, εάν μία μονάδα έχει μικρό στατισμό, τότε για σχετικά μικρή μεταβολή συχνότητας μεταβάλλει σημαντικά το φορτίο της. Μία τέτοια μονάδα λέγεται ρυθμίζουσα, γιατί συμβάλλει καθοριστικά στη ρύθμιση της συχνότητας. Αντίθετα, μονάδες με μεγάλους στατισμούς μεταβάλλουν ελάχιστα το φορτίο τους και γι' αυτό αποκαλούνται μονάδες βάσης.



Διάγραμμα 1 - Στατισμός

## 2.3. Παράλληλη λειτουργία μονάδων παραγωγής

Σε αυτήν την ενότητα θα αναφερθούμε στην παράλληλη λειτουργία γεννητριών από τη σκοπιά της επίδρασης στη συχνότητα και στην ενεργό ισχύ. Σε ένα πραγματικό δίκτυο λειτουργούν πολλές μονάδες παραγωγής ταυτόχρονα. Όταν το σύστημα βρίσκεται σε κάποια κατάσταση ισορροπίας 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. Τα συστήματα ελέγχου των γεννητριών αντιλαμβάνονται αυτήν τη μείωση και αποκρίνονται αυξάνοντας την παραγόμενη ισχύ. Το επιπλέον αυτό φορτίο θα επωμιστούν οι γεννήτριες ανάλογα με τον στατισμό τους. 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.

## 2.4. Αυτορρύθμιση φορτίου

Το συνολικό φορτίο ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας λόγω της επαγωγικής συνιστώσας του εξαρτάται άμεσα από τη συχνότητα. Έτσι όταν αυξάνει η συχνότητα, αυξάνει και το επαγωγικό φορτίο και αντίστροφα. Γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι αυτή η εξάρτηση προσθέτει μία 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.

Ορίζεται ο συντελεστής αυτορρύθμισης φορτίου  $D$ , ο οποίος ορίζεται ως εξής:

$$D = \frac{\Delta P}{\Delta \omega} p.u.$$

Όπου  $\Delta P$  και  $\Delta \omega$  είναι οι ποσοστιαίες (κανονικοποιημένες) μεταβολές φορτίων και συχνότητας. Ο συντελεστής αυτορρύθμισης έχει διαστάσεις αντίστροφου στατισμού. Επειδή στη μεταβατική περίοδο της διαταραχής (π.χ. μετά από κάποια μεταβολή φορτίου) το σφάλμα συχνότητας είναι πολύ μεγαλύτερο από εκείνο της μόνιμης κατάστασης, η αυτορρύθμιση φορτίου είναι αποτελεσματικότερη στο μεταβατικό στάδιο.

## 2.5. Δευτερεύουσα Ρύθμιση Φορτίου-Συχνότητας

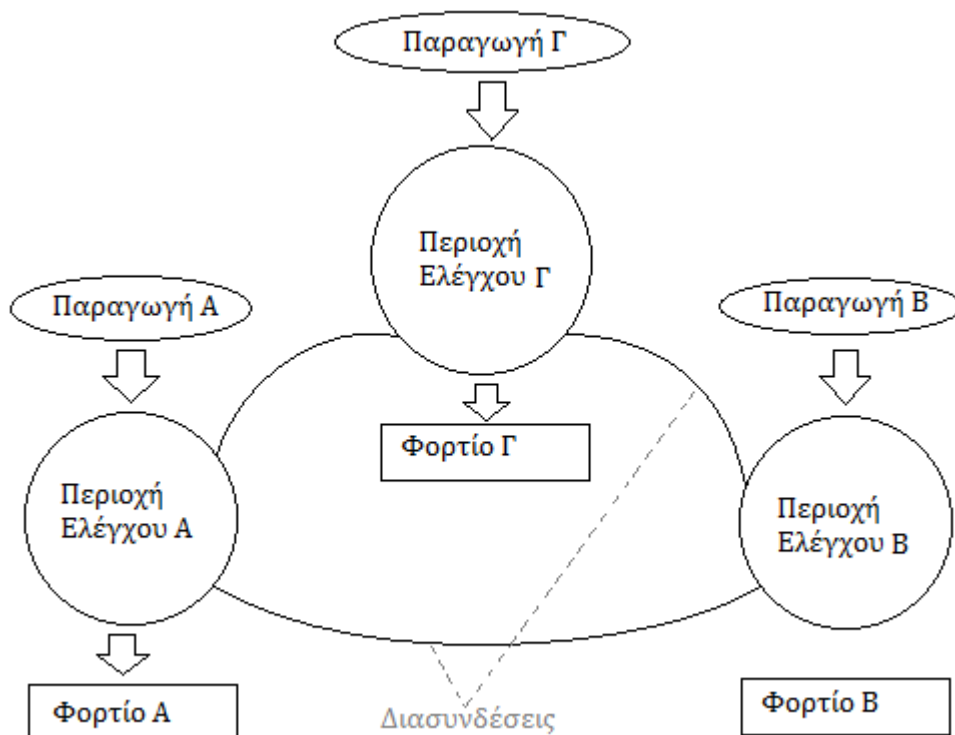
Αν και στην παρούσα εργασία δεν θα ασχοληθούμε με δευτερεύουσα ρύθμιση, κρίνεται σκόπιμο να γίνει μία σύντομη περιγραφή. Όπως αναφέρθηκε η πρωτεύουσα ρύθμιση αφήνει πάντα ένα μόνιμο σφάλμα συχνότητας, το οποίο καλείται να



διορθώσει η δευτερεύουσα ρύθμιση. Η δευτερεύουσα ρύθμιση, 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 διασυνδεδετικών γραμμών. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι ενώ η πρωτεύουσα ρύθμιση γίνεται από κάθε μονάδα χωριστά, η δευτερεύουσα γίνεται κεντρικά για ένα ολόκληρο σύστημα ή περιοχή.

## 2.6. Περιοχές Ελέγχου

Αν και στην παρούσα εργασία δεν θα ασχοληθούμε με διασυνδεδεμένα συστήματα, για λόγους πληρότητας κρίνεται σκόπιμη μία σύντομη αναφορά. Περιοχή ελέγχου συστήματος λοιπόν, ονομάζεται το σύστημα ή το τμήμα του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, το οποίο είναι κατά το δυνατόν ανεξάρτητο από άποψη ρύθμισης φορτίου συχνότητας και αυτοδύναμο 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. Μια περιοχή ελέγχου, μπορεί να λειτουργήσει αυτόνομα ή να έχει διασυνδέσεις με άλλα γειτονικά συστήματα. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται ένα διασυνδεδεμένο σύστημα.



Εικόνα 2 – Παράσταση διασυνδεδεμένου συστήματος τριών περιοχών

Ελεγχόμενο διασυνδεδεμένο σύστημα ή απλά διασύνδεση, είναι το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας που περιλαμβάνει περισσότερες από μια περιοχές ελέγχου διασυνδεδεμένες μεταξύ τους, η κάθε μία από τις οποίες ρυθμίζει μόνη της την παραγωγή της για να αντιμετωπίζει τις μεταβολές των φορτίων της μέσω ενός κεντρικού συστήματος ρύθμισης φορτίου συχνότητας. Οι ροές στις διασυνδετικές γραμμές γίνονται βάσει προγράμματος, κατά τρόπο που να προκύπτει όφελος για όλα τα συνεργαζόμενα συστήματα (περιοχές).

## Σφάλμα ελέγχου περιοχής (ΣΕΠ)

Όταν μία περιοχή ελέγχου ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας έχει εξωτερική διασύνδεση, τότε μία μεταβολή φορτίου  $\Delta P$  καλύπτεται εν μέρει από την πρωτεύουσα ρύθμιση και την αυτορρύθμιση του φορτίου της περιοχής και κατά το υπόλοιπο μέρος από την αύξηση της εισαγόμενης ισχύος  $\Delta P_t$ . Επομένως για διασυνδεδεμένα συστήματα ισχύει:

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

Όπου  $\Delta P_t = P_t - P_{t0}$ , με  $P_t$  η πραγματικά εισαγόμενη ισχύς και  $P_{t0}$  η προγραμματισμένη εισαγωγή ισχύος στην περιοχή. Με  $C$  συμβολίζουμε τη ρυθμίζουσα ενέργεια της περιοχής, η οποία είναι μία ποσότητα που εκφράζει το αντίστροφο του στατισμού και μετριέται σε MW/Hz. Ουσιαστικά δείχνει το πώς αντιδρά το σύστημα στις αλλαγές της συχνότητας.

Ανάλογα με τα ελεγχόμενα μεγέθη διακρίνονται τρεις τύποι ρύθμισης φορτίου συχνότητας:

- Επίπεδος έλεγχος συχνότητας (flat frequency control)
- Επίπεδος έλεγχος διασύνδεσης (flat tie-line control)
- Σύνθετος έλεγχος με συντελεστή πολώσεως (biased frequency tie-line control)

Όταν εφαρμόζεται επίπεδος έλεγχος συχνότητας, ρυθμίζεται μόνο η συχνότητα του συστήματος, ενώ δεν ελέγχεται η διασυνδετική ροή. Όταν έχουμε επίπεδο έλεγχο διασύνδεσης ρυθμίζεται μόνο η ροή της εξωτερικής διασύνδεσης ενώ το ρόλο του ρυθμιστή της συχνότητας αναλαμβάνει συνήθως το πιο ισχυρό σύστημα.

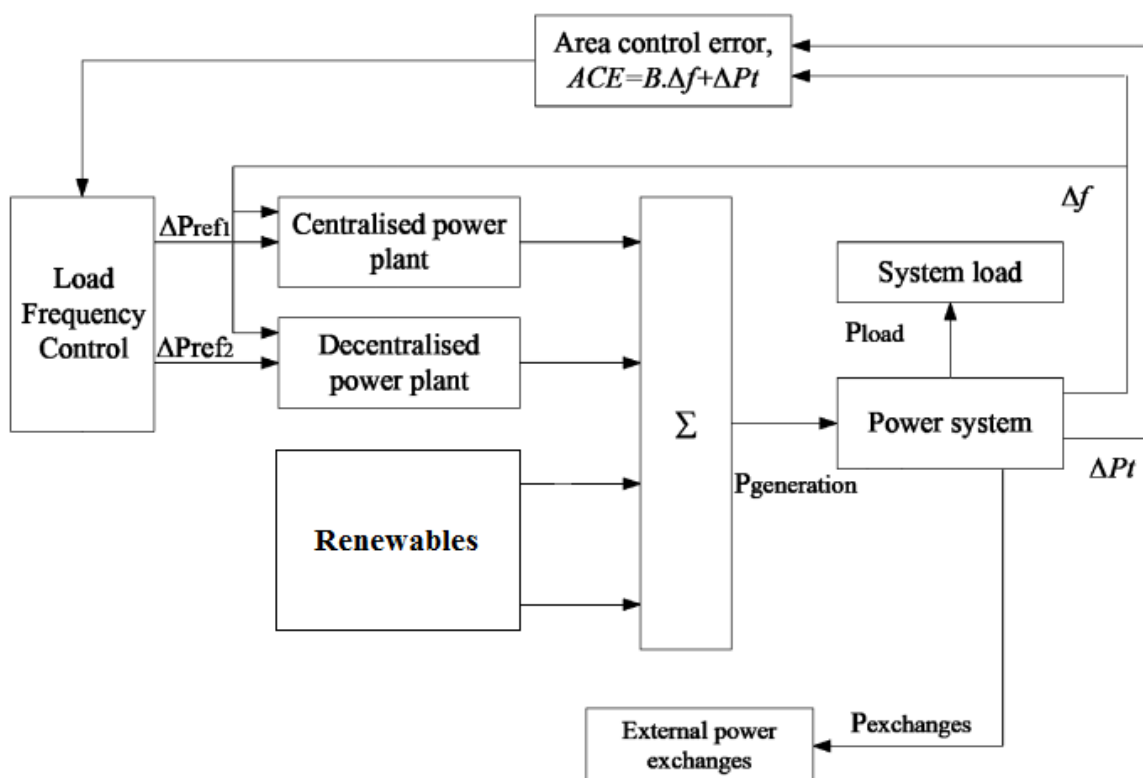
Ο έλεγχος με συντελεστή πολώσεως είναι ο πιο διαδεδομένος τύπος ρύθμισης φορτίου συχνότητας για τα συστήματα με εξωτερική διασύνδεση. Υπάρχουν δύο μετρήσεις, τόσο της συχνότητας όσο και της διασυνδετικής ροής οι οποίες από κοινού δημιουργούν το σφάλμα ελέγχου περιοχής (ΣΕΠ ή αλλιώς Area Control Error - ACE).

$$\Sigma E\Pi = \Delta P_t - B\Delta f$$

Όπου  $B$  ο συντελεστής πολώσεως (bias) του σφάλματος της συχνότητας. Όταν ο συντελεστής πολώσεως  $B$  είναι ίσος με τη χαρακτηριστική ρυθμίζουσα ενέργεια  $C$  της περιοχής, το σφάλμα ελέγχου περιοχής λαμβάνει την τιμή της μεταβολής του φορτίου στην περιοχή. Στην περίπτωση αυτή η ρύθμιση ενεργοποιείται μόνο για μεταβολές που συμβαίνουν στο εσωτερικό του συστήματος ενώ παραμένει αδρανής στις εξωτερικές μεταβολές του φορτίου. Η τελευταία αυτή ιδιότητα είναι ιδιαίτερα σημαντική για δύο λόγους:

- Κάθε σύστημα αναλαμβάνει σε τελική ανάλυση το δικό του φορτίο
- Στην μεταβατική περίοδο, μετά από κάποια σοβαρή διαταραχή το υπόλοιπο σύστημα συνεχίζει να ενισχύει την περιοχή που έχει το πρόβλημα μέσω της διασυνδεδετικής ροής μέχρι να μπορέσει να αναλάβει το φορτίο που της αναλογεί. Έτσι ελαχιστοποιούνται οι επιπτώσεις αυτής της διαταραχής στην ποιότητα της ηλεκτρικής ισχύος.

Με βάση λοιπόν όλα τα παραπάνω παραθέτουμε το παρακάτω σχήμα το οποίο περιγράφει τον τρόπο λειτουργίας των σύγχρονων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας όσον αφορά τη ρύθμιση συχνότητας.



Εικόνα 3 – Ρύθμιση Φορτίου Συχνότητας

## 2.7. Συστήματα Διεγέρσεως και Ρυθμιστές Τάσεως

Όπως είδαμε σε προηγούμενη ενότητα, οι ρυθμιστές στροφών είναι επιφορτισμένοι να ελέγχουν την ταχύτητα περιστροφής των αξόνων των γεννητριών και κατά προέκταση την ενεργό παραγωγή τους και τη συχνότητα του συστήματος. Με αντίστοιχο τρόπο ο αυτόματος ρυθμιστής τάσεως μιας γεννήτριας αναλαμβάνει να διατηρεί κατά το δυνατόν σταθερή την τάση στους τερματικούς ζυγούς της μεταβάλλοντας κατάλληλα τη συνεχή τάση που επιβάλλεται στο πεδίο διεγέρσεως. Η τελευταία τάση παρέχεται στο τύλιγμα του πεδίου από το σύστημα διεγέρσεως της σύγχρονης μηχανής.

Η τάση είναι μέγεθος πιο ευαίσθητο στις μεταβολές του φορτίου από τη συχνότητα, αλλά και η απόκλισή της από την κανονική τιμή είναι λιγότερο κρίσιμη για τη λειτουργία του συστήματος, από την απόκλιση της συχνότητας. 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. Επίσης, ενώ η συχνότητα επαναφέρεται στην κανονική τιμή της με τη δευτερεύουσα ρύθμιση, στην περίπτωση της τάσεως δεν απαιτείται κάτι παρόμοιο.

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιούμε ρυθμιστή τάσεως προκειμένου να γίνουν ρεαλιστικές προσομοιώσεις, χωρίς όμως να γίνεται αναφορά στην λειτουργία του και τα χαρακτηριστικά του, μιας και δεν αποτελεί αντικείμενο της παρούσας εργασίας.

## 2.8. Ευστάθεια ΣΗΕ

### 2.8.1. Ορισμός

Σε αυτό το σημείο κρίνεται σκόπιμη μία σύντομη αναφορά στην ευστάθεια των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, με δεδομένο ότι αποτελεί βασική παράμετρο κατά τον σχεδιασμό τους. Η ευστάθεια των ΣΗΕ ορίζεται από την ικανότητα του συστήματος, για ένα δεδομένο αρχικό σημείο λειτουργίας, να επανακτά ένα αποδεκτό σημείο λειτουργίας μετά από μία διαταραχή, η οποία οδηγεί τις περισσότερες μεταβλητές του συστήματος κοντά στα όρια τους, ώστε το συνολικό σύστημα να παραμένει πρακτικά αμετάβλητο.

Ένα Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας είναι ένα μη-γραμμικό σύστημα το οποίο λειτουργεί σε ένα συνεχώς μεταβαλλόμενο περιβάλλον, καθώς τα φορτία, η παραγωγή των γεννητριών και οι συνθήκες λειτουργίας τους συστήματος μεταβάλλονται συνεχώς. Έτσι όταν ένα ΣΗΕ υπόκειται σε μία διαταραχή, η ευστάθεια του εξαρτάται από τις αρχικές συνθήκες λειτουργίας και από το είδος της διαταραχής.

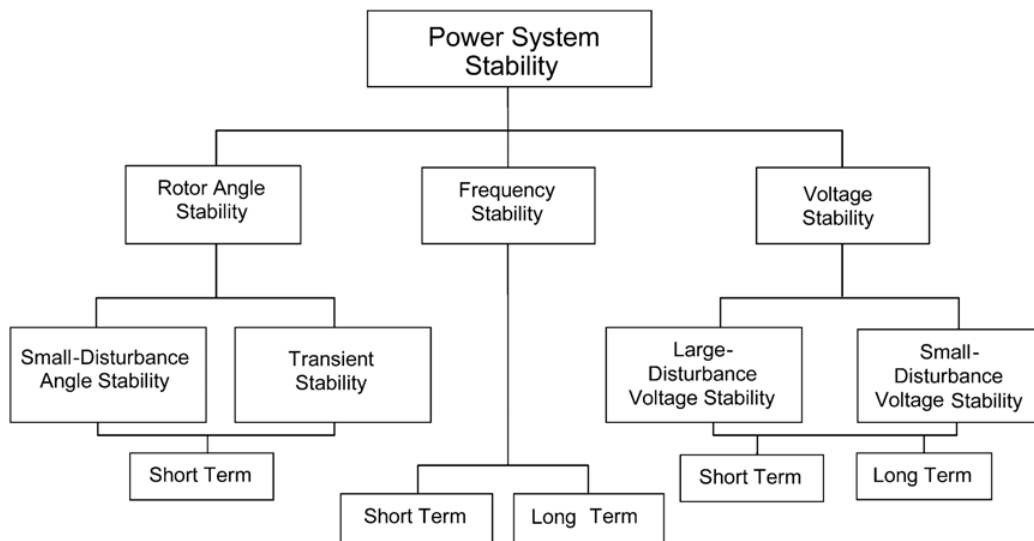
Στις περιπτώσεις αυτές θα πρέπει το εξεταζόμενο σύστημα να διαθέτει την ικανότητα της άμεσης προσαρμογής στις εκάστοτε λειτουργικές συνθήκες. Επίσης είναι επιθυμητή η αντοχή του συστήματος σε ιδιαίτερα κρίσιμες διαταραχές, όπως είναι για παράδειγμα ένα βραχυκύκλωμα σε μία γραμμή μεταφοράς ή η απώλεια μίας μεγάλης μονάδας παραγωγής.

Εάν το δίκτυο αποκριθεί ευσταθώς μετά από μία διαταραχή, θα οδηγηθεί σε ένα νέο σημείο ισορροπίας, στο οποίο θα διατηρηθεί η ακεραιότητα του δικτύου. Ένα πλήθος γεννητριών και φορτίων πιθανόν να αποσυνδεθούν από το δίκτυο είτε εξαιτίας της απομόνωσης του εξοπλισμού που συνδέεται με το σφάλμα είτε λόγω σκόπιμης απόρριψης ορισμένων διατάξεων προκειμένου να διατηρηθεί η συνέχεια της λειτουργίας του υπόλοιπου συστήματος. Εάν 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 ΣΗΕ

Η μελέτη ευστάθειας των ΣΗΕ διευκολύνεται σημαντικά εάν διαχωριστούν τα φαινόμενα της ευστάθειας σε κατάλληλες κατηγορίες. Η κατηγοριοποίηση της ευστάθειας ΣΗΕ γίνεται με βάση:

- τον φυσικό χαρακτήρα της αστάθειας, με βάση την μεταβλητή του συστήματος στην οποία μπορεί να παρατηρηθεί η αστάθεια
- το μέγεθος της διαταραχής, το οποίο επηρεάζει την μέθοδο υπολογισμού και πρόβλεψης της ευστάθειας
- τις συσκευές, τις διαδικασίες και τη χρονική έκταση που πρέπει να ληφθούν υπόψη για να αξιολογηθεί η ευστάθεια.



Εικόνα 4 – Κατηγοριοποίηση φαινομένων ευστάθειας ΣΗΕ

### 2.8.3. Ευστάθεια γωνίας

Η ευστάθεια γωνίας δρομέα (Rotor angle stability) αναφέρεται στην ικανότητα των σύγχρονων μηχανών ενός διασυνδεδεμένου συστήματος να παραμείνουν σε συγχρονισμό κάτω από συνθήκες κανονικής λειτουργίας και μετά από μία διαταραχή. Αυτό εξαρτάται από την ικανότητα να συντηρήσει ή να αποκαταστήσει την ισορροπία μεταξύ ηλεκτρομαγνητικής και μηχανικής ροπής της κάθε σύγχρονης μηχανής στο σύστημα. Η αστάθεια που μπορεί να προκύψει εκδηλώνεται στη μορφή των αυξανόμενων ταλαντώσεων γωνίας κάποιων γεννητριών που οδηγούν στην απώλεια του συγχρονισμού με άλλες γεννήτριες.

Στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, υπάρχει ένα σημείο ισορροπίας ανάμεσα στην εισερχόμενη μηχανική ροπή και στην εξερχόμενη ηλεκτρομαγνητική ροπή κάθε γεννήτριας. Έτσι η ταχύτητα της γεννήτριας παραμένει σταθερή. Αν για κάποιο λόγο η ισορροπία του συστήματος διαταραχθεί, τότε η ταχύτητα της μηχανής θα μεταβληθεί (επιτάχυνση ή επιβράδυνση). Αν η ταχύτητα μίας μηχανής είναι μεγαλύτερη από την ταχύτητα μίας άλλης μηχανής, θα έχει σαν αποτέλεσμα την μεταφορά φορτίου από την πιο αργή μηχανή στην πιο γρήγορη. Αυτό οδηγεί τελικά στην μείωση της διαφοράς της ταχύτητας και συνεπώς της γωνιακής διαφοράς μεταξύ των μηχανών.

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 τάσεις σε όλους τους ζυγούς του συστήματος κάτω από κανονικές συνθήκες λειτουργίας και όταν υπάρχει μία διαταραχή. Η αστάθεια τάσης προκαλείται από την απόπειρα του φορτίου να αυξήσει την ισχύ που καταναλώνει πέρα από τη φυσική ικανότητα μεταφοράς του συνδυασμένου συστήματος παραγωγής και μεταφοράς. Αστάθεια μπορεί να συμβαίνει στη μορφή μιας σταδιακής πτώσης ή αύξησης της τάσης σε κάποιους ζυγούς. Ο κύριος παράγοντας που προκαλεί αστάθεια τάσης είναι η ανικανότητα του συστήματος να διατηρήσει ένα σωστό ισοζύγιο της άεργου ισχύος.

Γενικά, η ευστάθεια τάσης εξαρτάται από την ικανότητα του συστήματος να διατηρεί ή να αποκαθιστά την ισορροπία μεταξύ της παραγωγής και της κατανάλωσης ισχύος των φορτίων. Η αστάθεια τάσης ενός συστήματος μπορεί να διαρκέσει από μερικά δευτερόλεπτα έως και μερικές δεκάδων λεπτών.

## 2.8.5. Ευστάθεια συχνότητας

Η ευστάθεια συχνότητας αναφέρεται στην ικανότητα του δικτύου να διατηρεί σταθερή την συχνότητά του μετά από μία σοβαρή διαταραχή του δικτύου, που έχει σαν αποτέλεσμα ανισορροπία ανάμεσα στην παραγωγή και το φορτίο. 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. Η 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.

Σε μεγάλα διασυνδεδεμένα συστήματα ισχύος, η περίπτωση αστάθειας συχνότητας συχνά σχετίζεται με τον διαχωρισμό του συστήματος σε επί μέρους απομονωμένα συστήματα. Σε αυτή την περίπτωση η ευστάθεια εξαρτάται από την ικανότητα κάθε απομονωμένου συστήματος να βρεθεί σε μία κατάσταση ισορροπίας με τη μικρότερη δυνατή απώλεια φορτίου. Γενικά, τα προβλήματα ευστάθειας της συχνότητας σχετίζονται με ανεπάρκεια στον συντονισμό ελέγχου ή στον προστατευτικό εξοπλισμό. Σε απομονωμένα συστήματα, αστάθεια συχνότητας θα μπορούσε να προκαλέσει οποιαδήποτε διαταραχή που οδηγούσε σε μεγάλη απώλεια φορτίου ή παραγωγής.

Η ευστάθεια συχνότητας, κατατάσσεται και σε δύο επιπλέον υποκατηγορίες, την βραχυπρόθεσμη και την μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα. Η κατάταξη αυτή γίνεται γιατί κατά τις μεταβολές της συχνότητας, οι χαρακτηριστικοί χρόνοι των διαδικασιών και των συσκευών που ενεργοποιούνται από μερικά κλάσματα του δευτερολέπτου, όπως στην περίπτωση χαμηλής συχνότητας η απόρριψη φορτίου (load shedding) και τα συστήματα ελέγχου και προστασίας των γεννητριών, έως και μερικά λεπτά στην περίπτωση των ρυθμιστών τάσης.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα βραχυπρόθεσμης αστάθειας συχνότητας είναι ο σχηματισμός ενός υποτροφοδοτούμενου απομονωμένου συστήματος με ανεπαρκή απόρριψη φορτίου έτσι ώστε η πτώση της συχνότητας να προκαλέσει κατάρρευση στο σύστημα μέσα σε λίγα δευτερόλεπτα. Αντίστοιχα, πιο περίπλοκες καταστάσεις στις οποίες η αστάθεια συχνότητας προκαλείται από συστήματα ελέγχου υπερτάχυνσης αμοστροβίλων αποτελεί μακροπρόθεσμο φαινόμενο αστάθειας συχνότητας. Τέτοια φαινόμενα διαρκούν από μερικά δευτερόλεπτα έως μερικά λεπτά.

Κατά τη διάρκεια ταλαντώσεων της συχνότητας, το πλάτος της τάσης των ζυγών συστήματος μπορεί να υπόκειται σε μεγάλες μεταβολές, ειδικά στις περιπτώσεις απομονωμένου συστήματος με προστασία υποσυχνότητας μέσω αποκοπής φορτίου, που μειώνει το φορτίο του συστήματος. Η αλλαγή του πλάτους της τάσης, που μπορεί να είναι μεγαλύτερη από την αλλαγή της συχνότητας, επηρεάζει το ισοζύγιο φορτίου-παραγωγής.



## 3. Συμμετοχή ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο

### 3.1. Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια, η τεχνολογία των ηλεκτρικών οχημάτων (Electric Vehicles, EVs) αναπτύσσεται ραγδαία, τόσο για περιβαλλοντικούς λόγους όσο και για λόγους ενεργειακής ασφάλειας και αυτονομίας. Με δεδομένο το γεγονός ότι τα περισσότερα



οχήματα σύμφωνα με μελέτες είναι σταθμευμένα για πάνω από το 95% του χρόνου, η αξιοποίηση της ενέργειας των μπαταριών τους μπορεί να συνεισφέρει σημαντικά στη λειτουργία του ηλεκτρικού δικτύου. Έτσι, πέρα από την θεώρηση των ηλεκτρικών οχημάτων σαν ένα συμβατικό φορτίο, αναπτύσσεται η άποψη της

θεώρησης των οχημάτων αυτών ως ένα νέο ιδιόμορφο είδος φορτίου το οποίο μπορεί να έχει πολύ σημαντικές επιπτώσεις στον τρόπο προγραμματισμού και λειτουργίας της παραγωγής. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα ηλεκτρικά οχήματα μπορούν να λειτουργούν αφενός σαν ελεγχόμενα φορτία και αφετέρου σαν κινητές συσκευές αποθήκευσης ενέργειας. Η εφαρμογή του λεγόμενου V2G (vehicle to grid), το οποίο επιτυγχάνει αμφίδρομη ροή ισχύος ανάμεσα στα οχήματα και το δίκτυο θα φέρει νέες εφαρμογές για την βέλτιστη λειτουργία των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας.

### 3.2. Συμμετοχή των ηλεκτρικών οχημάτων στις αγορές ενέργειας και επικουρικών υπηρεσιών

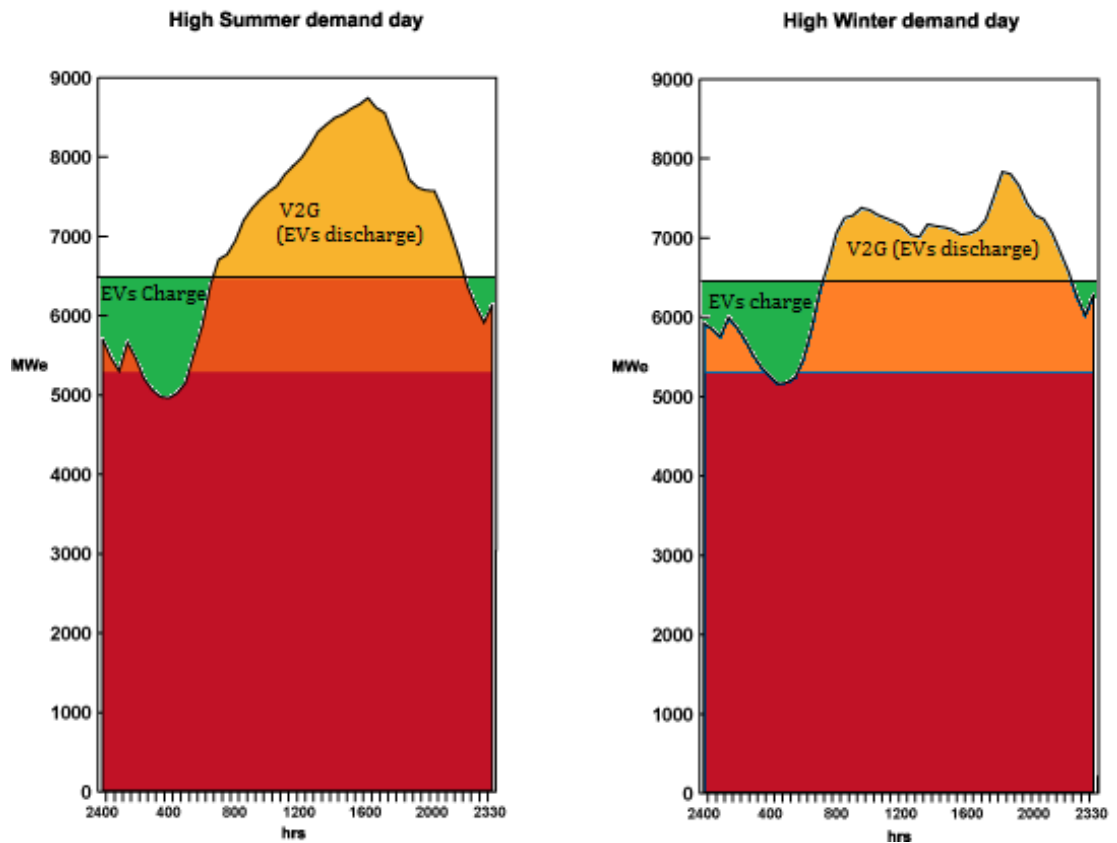
Η έως τώρα βιβλιογραφία έχει ασχοληθεί με το γενικότερο θέμα της αξιοποίησης των ηλεκτρικών οχημάτων στο ηλεκτρικό δίκτυο με αρκετές παραλλαγές οι οποίες όμως εν κατακλείδι κατηγοριοποιούνται σε τέσσερις βασικές υπηρεσίες:

- *Συνεισφορά στην ισχύ βάσης:*  
Τα ηλεκτρικά οχήματα δεν είναι τα πλέον κατάλληλα για παραγωγή ισχύος βάσης σε ανταγωνιστική τιμή, μιας και αφενός η χωρητικότητα των μπαταριών είναι περιορισμένη και αφετέρου το κόστος ανά KWh είναι σχετικά υψηλό.



- *Συνεισφορά στην ισχύ αιχμής:*  
 Η συμμετοχή στην αγορά της ισχύος αιχμής φαίνεται δυνητικά βιώσιμη για τα ηλεκτρικά οχήματα, ιδιαίτερα αν λάβει κανείς υπ' όψιν την εξέλιξη της τεχνολογίας των συσσωρευτών και την αναμενόμενη μαζική παραγωγή τους.

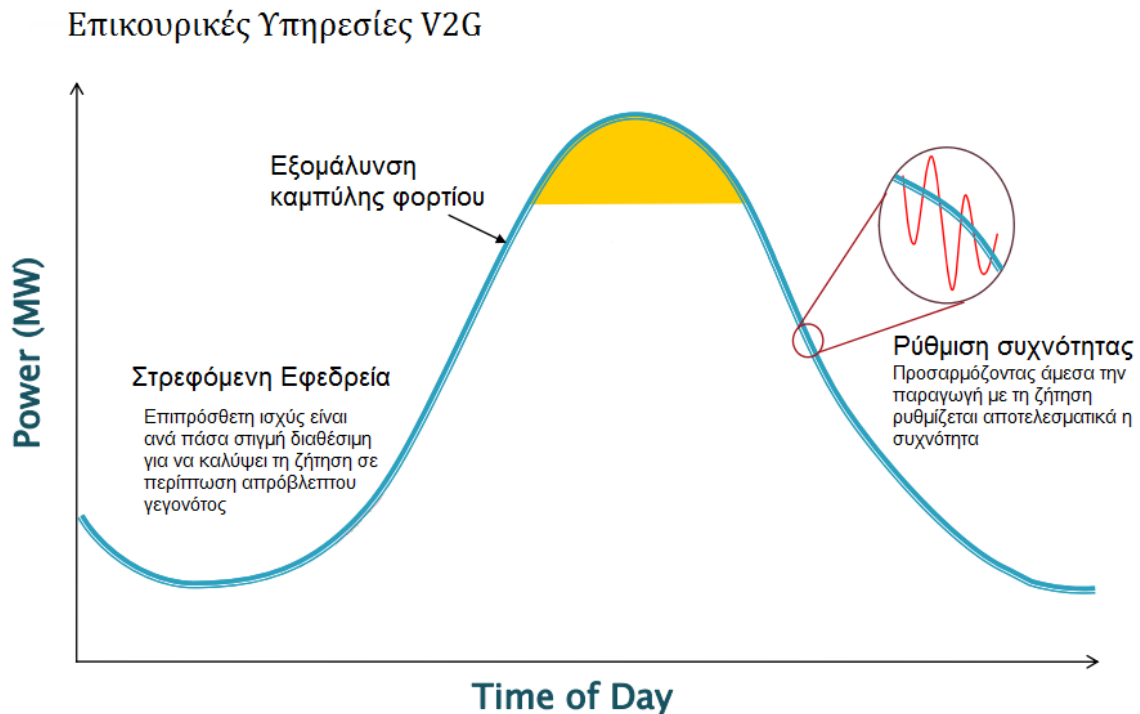
### Load curves for Typical electricity grid



Διάγραμμα 2 – Συνεισφορά στην ισχύ αιχμής για δύο εποχές του χρόνου

- *Παροχή στρεφόμενης εφεδρείας:*  
 Η εν λόγω αγορά μπορεί να είναι επικερδής για τα συμμετέχοντα στην V2G λειτουργία οχήματα, καθώς λόγω των τεχνικών τους χαρακτηριστικών (ταχεία παροχή ισχύος με μικρό κόστος αναμονής), είναι τα πλέον ιδανικά.
- *Ρύθμιση συχνότητας:*  
 Τα ηλεκτρικά οχήματα, όπως αναφέραμε και παραπάνω μπορούν να ανταποκριθούν ταχύτατα σε σήματα ρύθμισης. Έχουν τη δυνατότητα να πραγματοποιήσουν τόσο άνω ρύθμιση (με την αύξηση της ροής ισχύος προς το δίκτυο ή τη μείωση του ρυθμού φόρτισης των μπαταριών τους) όσο και κάτω ρύθμιση (με την μείωση της ροής ισχύος προς το δίκτυο ή

αύξηση του ρυθμού φόρτισης των μπαταριών). Ένας συνδυασμός άνω και κάτω ρύθμισης τελικά προκαλεί πολύ μικρή αποφόρτιση της μπαταρίας, χωρίς να προκαλεί ιδιαίτερα προβλήματα φθοράς όσον αφορά τους κύκλους λειτουργίας του συσσωρευτή. Η υπηρεσία ρύθμισης καλείται καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας και όχι κατ' ανάγκην τις ώρες αυξημένου φορτίου, μιας και εναλλαγές στο φορτίο και κατά συνέπεια στη συχνότητα υπάρχουν κάθε χρονική στιγμή.



Διάγραμμα 3 – Επικουρικές υπηρεσίες V2G

Από τις παραπάνω επικουρικές υπηρεσίες ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχει η έρευνα της συμμετοχής των ηλεκτρικών οχημάτων στην πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας (Primary Frequency Control, PFC). Αυτό συμβαίνει γιατί το σήμα συχνότητας είναι διαθέσιμο σε οποιοδήποτε σημείο του ηλεκτρικού δικτύου, χωρίς να απαιτείται κάποια πολύπλοκη διαδικασία μετάδοσής του. Στην παρούσα εργασία λοιπόν, εστιάζουμε στον τρόπο συμμετοχής των ηλεκτρικών οχημάτων EVs στην πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας, λαμβάνοντας υπόψη διάφορες παραμέτρους που έχουν να κάνουν αφενός με τις επιθυμίες του οδηγού – ιδιοκτήτη του οχήματος και αφετέρου με το ίδιο το δίκτυο. Όταν η εναπομένουσα ενέργεια της μπαταρίας βρίσκεται σε χαμηλά επίπεδα, τότε ο ιδιοκτήτης θα επιθυμεί να την φορτίσει σε αποδεκτά επίπεδα, ενώ όταν είναι επαρκώς φορτισμένη τότε κατά κανόνα θα προτιμήσει να την κρατήσει στα ίδια επίπεδα φόρτισης. Επομένως ο έλεγχος που θα εφαρμόσουμε στα οχήματα πρέπει να έχει τρία σκέλη. Πρώτον, τον έλεγχο της ισχύος που εισρέει ή εκρέει από τα οχήματα ανάλογα με τη συχνότητα, δεύτερον τη δυνατότητα να μπορεί το όχημα να διατηρεί την κατάσταση φόρτισής του (State Of

Charge, SOC) χωρίς να παύει να συμμετέχει ενεργά στην πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας και τρίτον τη δυνατότητα να φορτίζει το όχημα με τον τρόπο που επιθυμούμε.

### 3.3. Οικονομικά – Επιχειρηματικά Μοντέλα

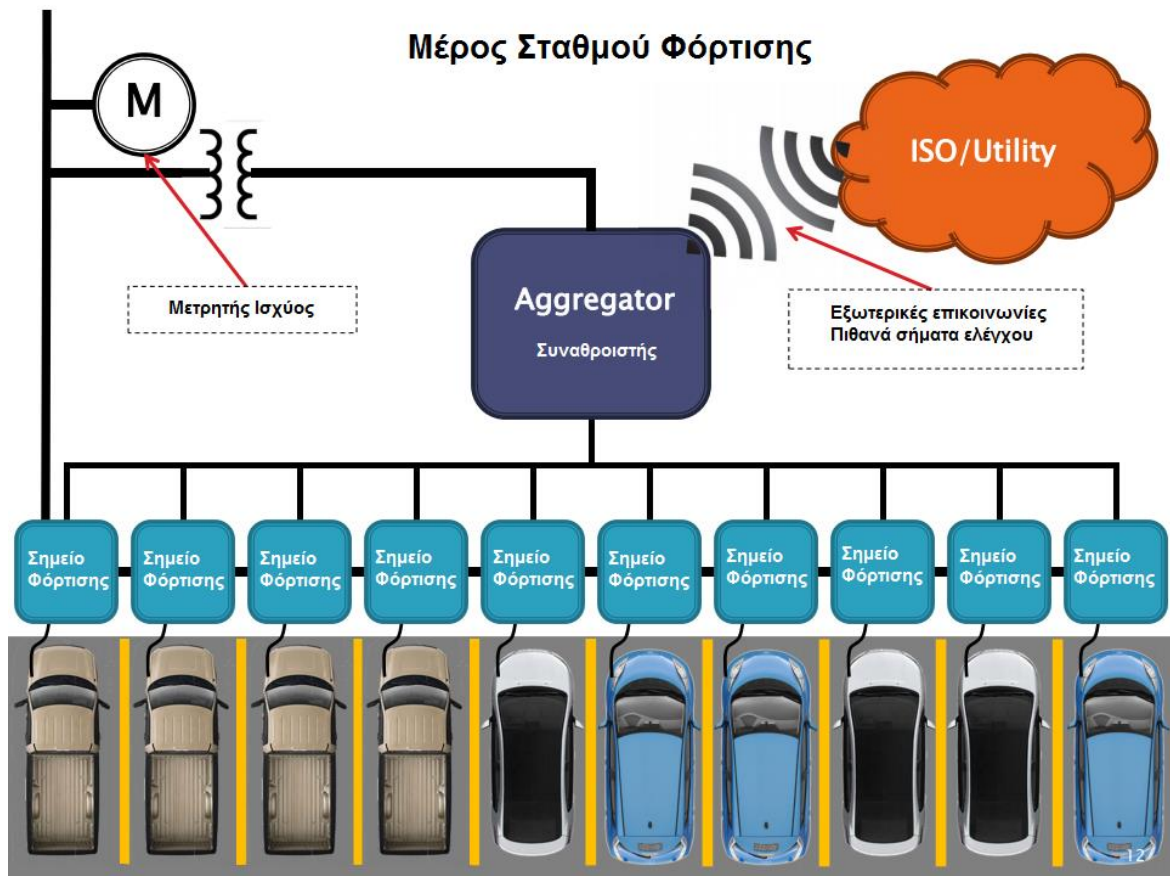
Σχετικά με την οικονομική βιωσιμότητα της τεχνολογίας V2G έχουν αναπτυχθεί διάφορα επιχειρηματικά μοντέλα. Αφού περιγράψαμε προηγουμένως τις αγορές, στις οποίες θα μπορούσε να ευδοκιμήσει η V2G λειτουργία μένει τώρα να απαντηθεί πρώτον ποιες μορφές μπορεί να έχουν οι επιχειρήσεις εκείνες, που θα εκμεταλλεύονται και θα αξιοποιούν τη V2G λειτουργία, και δεύτερον ποιος θα είναι ο τρόπος, που θα εξασφαλίζουν την κερδοφορία τους αλλά και τι έξοδα θα καλούνται να πληρώνουν. Πριν περιγράψουμε συνοπτικά τα διάφορα πιθανά σενάρια, κρίνεται σκόπιμο να αναφερθούμε στους πιο βασικούς παράγοντες της αγοράς που θα εμφανιστούν με την υιοθέτηση της V2G λειτουργίας. Έτσι έχουμε:

- *Τον ιδιοκτήτη – χρήστη του οχήματος:*  
Για την αγορά, θεωρείται πάντοτε τελικός καταναλωτής ενέργειας και όχι παραγωγός, ακόμη και αν μέσα από τη συμμετοχή του στη λειτουργία V2G προσφέρει ενέργεια πίσω στο δίκτυο.
- *Τον ιδιοκτήτη της υποδομής φόρτισης:*  
Μία υποδομή φόρτισης μπορεί να είναι από μία απλή οικιακή παροχή για την φόρτιση του ηλεκτρικού οχήματος, ή σε πιο σύνθετες περιπτώσεις να είναι ένας ολόκληρος σταθμός φόρτισης με ικανότητα να καλύψει πολλά οχήματα ταυτόχρονα.
- *Τον πάροχο - συναθροιστή (EV supplier – aggregator) των ηλεκτρικών οχημάτων:*  
Πρόκειται για τον παράγοντα κλειδί και εκτελεί δύο λειτουργίες ταυτόχρονα. Από τη μία συνάπτει συμβόλαια με τους ιδιοκτήτες-χρήστες των οχημάτων για την φόρτιση των οχημάτων τους και από την άλλη συνάπτει συμβόλαια για τις αγορές ρύθμισης συχνότητας, στρεφόμενης εφεδρείας ή/και ισχύος αιχμής. Ο λόγος ύπαρξης ενός aggregator είναι ζωτικής σημασίας διότι για παράδειγμα, στις περισσότερες από τις αγορές που αναφέρθηκαν παραπάνω, η ελάχιστη ποσότητα ισχύος που μπορεί να προσφερθεί για ρύθμιση είναι το 1MW. Γίνεται λοιπόν αντιληπτό, ότι ένα μεμονωμένο αυτοκίνητο του οποίου η ισχύς είναι της τάξεως κάποιων KW, δεν θα μπορούσε να συμμετέχει. Αντίθετα μία επιχείρηση, που θα έχει υπό την εποπτεία της ένα στόλο οχημάτων, θα μπορεί να λειτουργήσει ως μεσάζοντας, συναθροίζοντας τη διαθέσιμη ισχύ ολόκληρου του στόλου.

Συγκεκριμένα για τον συναθροιστή (aggregator) πρέπει να αναφερθεί ότι πρόκειται για το πιο πιθανό μοντέλο της V2G λειτουργίας, δεδομένης της μέχρι στιγμής λειτουργίας των αγορών ενέργειας και επικουρικών υπηρεσιών, αλλά και των υπάρχουσών υποδομών επικοινωνίας. Σύμφωνα με αυτό το μοντέλο, άμεση σχέση με τις αγορές θα έχει ο aggregator και όχι ο κάτοχος του οχήματος. Από τη μία πλευρά, ο aggregator θα συγκεντρώνει τα προφίλ των οχημάτων που έχει υπό τον έλεγχο του, ώστε να δημιουργεί ένα αθροιστικό προφίλ μιας εικονικής μονάδας παραγωγής ενέργειας. Αυτό το συγκεντρωτικό προφίλ, θα εξαρτάται από το πόσα οχήματα αναμένεται να είναι συνδεδεμένα και ικανά για V2G κάθε ώρα της ημέρας αλλά και από το τι περιορισμοί υπάρχουν όσον αφορά στη διαθέσιμη ισχύ και ενέργεια.

Από την άλλη πλευρά, θα δέχεται τα σήματα-εντολές από το διαχειριστή του συστήματος μεταφοράς όπως κάθε άλλη συμβατική μονάδα και εν συνεχεία, θα διαβιβάζει αυτές τις εντολές στο κάθε όχημα, όπως αυτός κρίνει πιο συμφέρον ανάλογα με το συγκεντρωτικό προφίλ που έχει δημιουργήσει. Έτσι, θα είναι σε θέση να κάνει προσφορές επιπέδου MW ή MWh στις διάφορες αγορές, ενόσω τα διάφορα EVs εκτελούν τα προγραμματισμένα τους ταξίδια.

Τα κέρδη, που αποκομίζει ο aggregator από τη συμμετοχή του στις διάφορες αγορές, θα τα μοιράζει στους ιδιοκτήτες των οχημάτων αναλόγως της συμμετοχής τους σε αυτές, κρατώντας προφανώς ένα ποσοστό για τον εαυτό του.

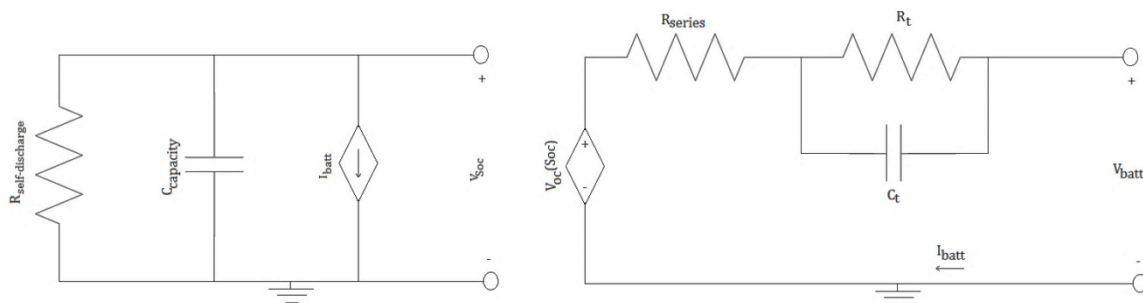


Εικόνα 5 – Λειτουργία συναθροιστή (aggregator)

## 4. Μοντελοποίηση

### 4.1. Δυναμικό Μοντέλο Συσσωρευτή

Το μοντέλο που χρησιμοποιήσαμε για να αναπαραστήσουμε την μπαταρία είναι μία προέκταση του μοντέλου Thevenin, το οποίο είναι το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο μοντέλο μπαταρίας βασισμένο σε στοιχεία ηλεκτρικών κυκλωμάτων. Το μειονέκτημα του μοντέλου Thevenin είναι ότι δεν δίνει τη δυνατότητα για ακριβή μέτρηση της κατάστασης φόρτισης (SOC) του συσσωρευτή. Η προέκταση του μοντέλου αυτού, η οποία εικονίζεται παρακάτω είναι ένας συνδυασμός του κλασικού μοντέλου Thevenin με ένα run-time μοντέλο το οποίο μπορεί να μας παρέχει ανά πάσα στιγμή την κατάσταση φόρτισης καθώς και να προσομοιώσει με ακρίβεια τα δυναμικά χαρακτηριστικά της μπαταρίας.



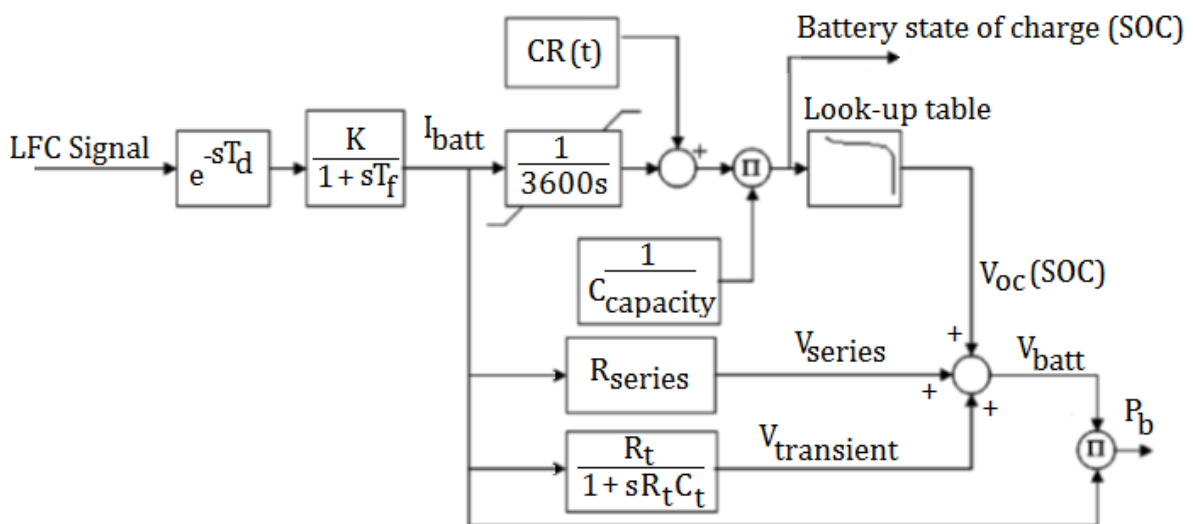
Εικόνα 6 - Δυναμικό Μοντέλο Συσσωρευτή

Το αριστερό κομμάτι περιλαμβάνει την  $R_{self-discharge}$  η οποία αναπαριστά την εκφόρτιση της μπαταρίας της όταν δεν χρησιμοποιείται για μεγάλο χρονικό διάστημα, το  $C_{capacity}$  που είναι η συνολική χωρητικότητα της μπαταρίας και μία πηγή ρεύματος. Το φορτίο που είναι αποθηκευμένο ανά πάσα στιγμή στον πυκνωτή  $C_{capacity}$  αυξάνεται ή μειώνεται ανάλογα με το πρόσημο του ρεύματος που με τη σειρά του σημαίνει φόρτιση ή εκφόρτιση της μπαταρίας. Κατά αυτόν τον τρόπο, η τάση που παίρνουμε κάθε στιγμή στα άκρα του αριστερού κυκλώματος αντιπροσωπεύει την κατάσταση φόρτισης.

Στο δεξί κομμάτι περιλαμβάνεται η αντίσταση σειράς  $R_{series}$  η οποία προσομοιώνει τις απώλειες, και οι  $R_t$ ,  $C_t$  που είναι η μεταβατική αντίσταση και χωρητικότητα αντίστοιχα και προσομοιώνουν τα διάφορα δυναμικά χαρακτηριστικά της μπαταρίας. Το  $V_{oc}(V_{soc})$  είναι η τάση ανοικτού κυκλώματος της μπαταρίας και εξαρτάται από την κατάσταση φόρτισης (Soc – State of charge). Έτσι για μία συγκεκριμένη στάθμη φόρτισης, αντιστοιχεί μία συγκεκριμένη τάση, η οποία μπορεί

να δίνεται σε πίνακες (look-up tables). Η τελική τάση εξόδου στους ακροδέκτες της μπαταρίας είναι η τάση  $V_{batt}$ .

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο η σύνδεση στο δίκτυο δεν γίνεται από μεμονωμένα οχήματα, αλλά από σταθμούς που διαχειρίζονται τη συνολική ισχύ των σταθμευμένων οχημάτων. Έτσι λοιπόν προκύπτει η ανάγκη για ένα συγκεντρωτικό μοντέλο του συναθροιστή (aggregator) για τις μπαταρίες των ηλεκτρικών οχημάτων. Αυτό κατασκευάζεται έτσι, ώστε να αποκρίνεται στο LFC (Load Frequency Control) σήμα εισόδου που λαμβάνει, μεταβάλλοντας την ισχύ εξόδου αναλόγως. Το μπλοκ διάγραμμα ενός τέτοιου γενικού συγκεντρωτικού μοντέλου, το οποίο δέχεται το σήμα και μεταβάλλει ανάλογα την ισχύ εξόδου, λαμβάνοντας υπόψη τη συνολική χωρητικότητα αλλά και την εκάστοτε στιγμιαία κατάσταση φόρτισης SOC (state of charge) της μπαταρίας εικονίζεται παρακάτω.



Εικόνα 7 - Μπλοκ Διάγραμμα Συστήματος Ελέγχου

Αρχικά το μοντέλο δέχεται το σήμα ελέγχου, αφού πρώτα εφαρμοστεί μία καθυστέρηση, η οποία έχει να κάνει με τον χρόνο που απαιτείται μέχρι να φτάσει το σήμα στους ελεγκτές φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων. Στη συνέχεια περνάει από ένα φίλτρο, το οποίο έχει σταθερά χρόνου  $T_f$  και κέρδος  $K$ .

Στην έξοδο του συγκεκριμένου μπλοκ εμφανίζεται το νέο ρεύμα της μπαταρίας  $I_{batt}$  το οποίο χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της τελικής ισχύος. Ταυτόχρονα για να γίνει σωστός υπολογισμός της τάσης εξόδου πρέπει να ληφθούν υπόψη τόσο η χωρητικότητα της μπαταρίας, όσο και η κατάσταση φόρτισής της (SOC). Για αυτόν το λόγο υπάρχουν τα αντίστοιχα μπλοκ, τα οποία μεταβάλλουν την κατάσταση

φόρτισης και κατά συνέπεια την τάση εξόδου, ανάλογα με το πρόσημο και την ένταση του ρεύματος  $I_{batt}$ . Για θετικό πρόσημο ρεύματος, η μπαταρία φορτίζει, επομένως αυξάνεται η τάση και το SOC ενώ αντίστοιχα για αρνητικό πρόσημο ρεύματος, η μπαταρία εκφορτίζει και επομένως μειώνεται σταδιακά η τάση εξόδου και το SOC.

Ο συντελεστής  $K$  είναι αυτός που δείχνει πόσο έντονα θα αντιδράσει η ισχύς των ηλεκτρικών οχημάτων στη μεταβολή της συχνότητας. Μικρό  $K$  σημαίνει ότι για μια δεδομένη μεταβολή συχνότητας, τα ηλεκτρικά οχήματα θα μεταβάλλουν λίγο την ισχύ τους. Αντίθετα μεγάλο  $K$  σημαίνει ότι για μια δεδομένη μεταβολή συχνότητας, τα ηλεκτρικά οχήματα θα μεταβάλλουν πολύ την ισχύ τους.

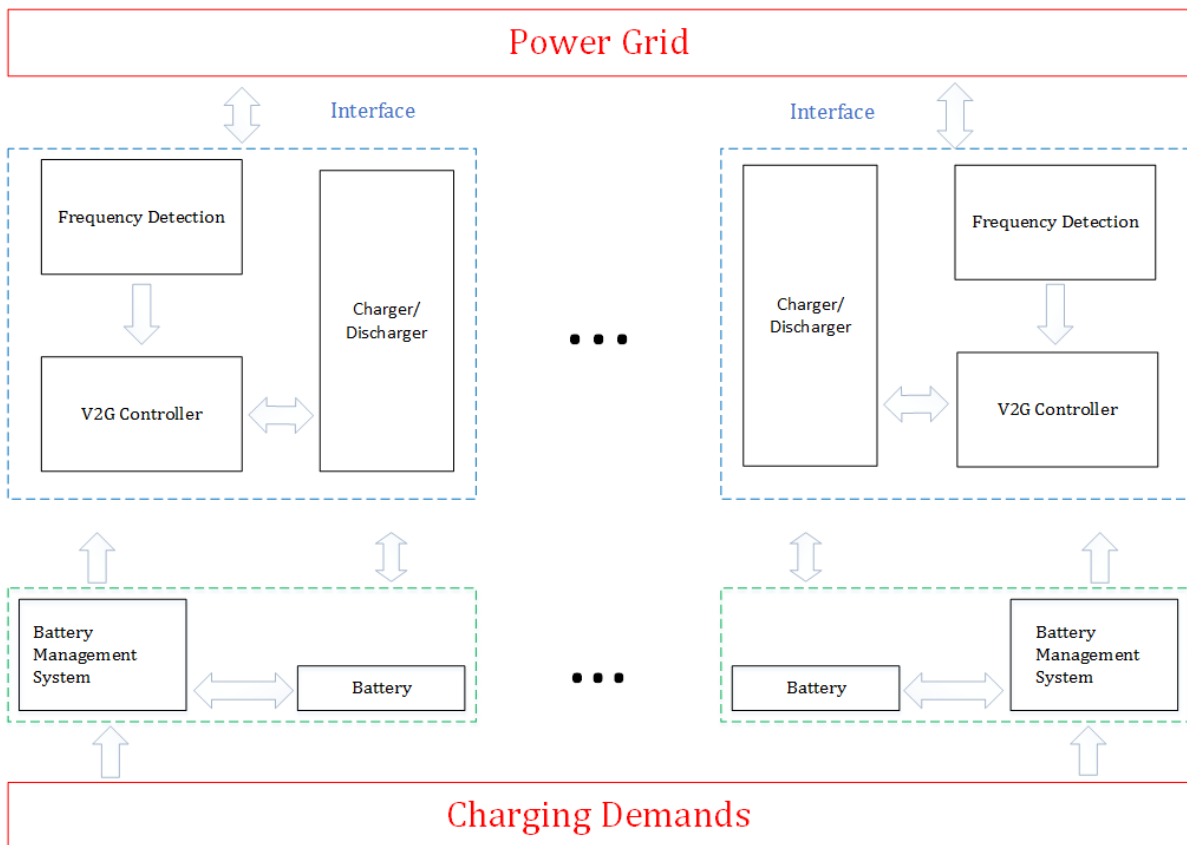
Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα μελετήσουμε διάφορες τεχνικές ελέγχου στις οποίες το  $K$  δεν θα είναι σταθερό για όλες τις συνθήκες λειτουργίας αλλά θα μεταβάλλεται με σκοπό να επιτύχει μία βέλτιστη λειτουργία, τόσο για τον ίδιο το συσσωρευτή και κατά συνέπεια για το όχημα και τον ιδιοκτήτη του, όσο και για τη συνεισφορά του στο δίκτυο.

## 4.2. Πλαίσιο Λειτουργίας

Στο σχήμα 1 απεικονίζεται το πλαίσιο μέσα στο οποίο μπορεί να λειτουργήσει αποτελεσματικά το σύστημα πρωτεύουσας ρύθμισης συχνότητας με τη συμβολή των ηλεκτρικών οχημάτων. Όταν αυτά είναι συνδεδεμένα στο δίκτυο (plugged-in) μέσω ενός συναθροιστή - aggregator, η αμφίδρομη ανταλλαγή ισχύος μπορεί να επιτυγχάνεται μέσω του μηχανισμού φόρτισης / εκφόρτισης της μπαταρίας τους.

Η συχνότητα του συστήματος ανιχνεύεται σε πραγματικό χρόνο από το αντίστοιχο μπλοκ και τροφοδοτείται στον ελεγκτή (V2G controller) ο οποίος λαμβάνει κατάλληλες αποφάσεις με δεδομένα τη συχνότητα και την κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας. Οι αποφάσεις αυτές στέλνονται στον μηχανισμό φόρτισης ή εκφόρτισης, ο οποίος ελέγχει την ανταλλαγή ισχύος μεταξύ δικτύου και οχήματος, έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί η διακύμανση της συχνότητας αλλά ταυτόχρονα να επιτευχθεί και ο στόχος φόρτισης που πιθανότατα έχει τεθεί από τον χρήστη.





Εικόνα 8 - Το πλαίσιο λειτουργίας αποκεντρωμένου ελέγχου V2G που συμμετέχει στην πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας.

Όπως παρατηρούμε και στο σχήμα, είναι απαραίτητο να υπάρχει σε κάθε μεμονωμένο όχημα ένα σύστημα ελέγχου στο οποίο ο χρήστης θα μπορεί να εισάγει διάφορες παραμέτρους σχετικά με την διαχείριση του συστήματος της μπαταρίας.

Για παράδειγμα ο χρήστης πρέπει να μπορεί να θέτει παραμέτρους σχετικά με τη φόρτιση, όπως το μήκος της επόμενης απόστασης που θα θέλει να διανύσει ή την επιθυμητή στάθμη φόρτισης που θέλει να έχει το όχημά του μετά από κάποιο συγκεκριμένο χρονικό διάστημα και ίσως ένα όριο ασφάλειας που έχει να κάνει για κάποια έκτακτη ανάγκη. Αυτό εξασφαλίζει την προστασία των μπαταριών αλλά και την σωστή εξυπηρέτηση των χρηστών-ιδιοκτητών των οχημάτων.

Επίσης πρέπει να θέσουμε κάποια όρια για την ένταξη ή όχι των οχημάτων στο δίκτυο. Τα όρια αυτά έχουν να κάνουν τόσο με τα χαρακτηριστικά της εκάστοτε μπαταρίας, όσο και με τις ρυθμίσεις που έχει επιλέξει ο οδηγός. Σε κάποιες περιπτώσεις, είναι δυνατόν η μπαταρία του V2G οχήματος να «στεγνώσει» να εκφορτιστεί δηλαδή σε επιζήμιο βαθμό. Γι' αυτό πρέπει ο οδηγός ή το σύστημα να έχει τη δυνατότητα να ορίσει το μέγιστο δυνατό βάθος εκφόρτισης, ώστε και η μπαταρία του να μένει «υγιής» και ο χρήστης να μπορεί να καλύψει τις βασικές ανάγκες του μεταφοράς.



Παρακάτω βλέπουμε μια τέτοια υλοποίηση, ένα πάνελ ελέγχου που μπορεί να ρυθμίζεται είτε φυσικά, είτε μέσω δικτύου, είτε μέσω εφαρμογής για smart phones.



Εικόνα 9 - Πάνελ ρύθμισης φόρτισης εντός του οχήματος



Εικόνα 10 - Στιγμιότυπα από εφαρμογές για smartphones

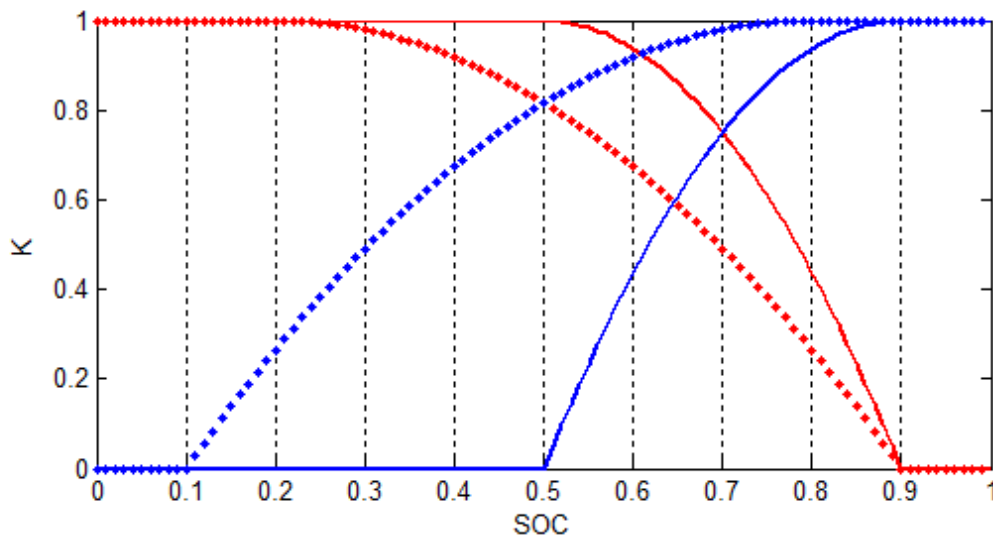
### 4.3. Υπάρχουσα μέθοδος ελέγχου V2G

Αυτή η μέθοδος ρυθμίζει τον συντελεστή  $K$  με δεδομένα τη συχνότητα και την κατάσταση φόρτισης του οχήματος (SOC), με αποτέλεσμα να διατηρεί το SOC του οχήματος γύρω στο 50%. Για να αλλάξει αυτό το σημείο ισορροπίας πρέπει να θέσουμε νέες τιμές για τα  $SOC^{max}$ ,  $SOC^{min}$ ,  $SOC^{high}$ ,  $SOC^{low}$ . Επομένως η καμπύλη σχηματίζεται από τις εξής εξισώσεις:

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

όπου:

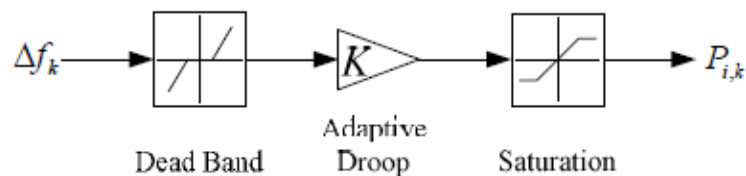
$$\begin{cases} K_{i,k}^c = K_{max} \left( 1 - \left( \frac{SOC_{i,k} - SOC_i^{low}}{SOC_i^{max} - SOC_i^{low}} \right)^2 \right) \\ K_{i,k}^d = K_{max} \left( 1 - \left( \frac{SOC_{i,k} - SOC_i^{high}}{SOC_i^{min} - SOC_i^{high}} \right)^2 \right) \end{cases}$$



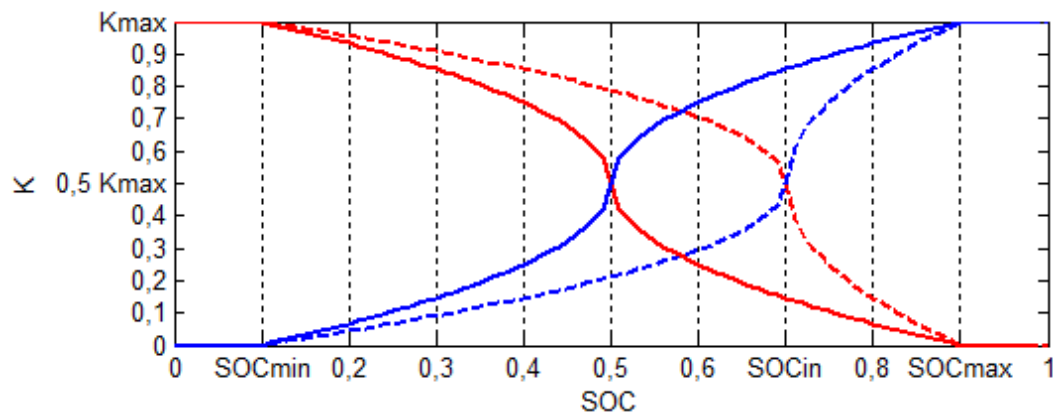
**Διάγραμμα 4** - Έλεγχος SOC μπαταρίας. Το SOC διατηρείται γύρω στο 0.5 στη διακεκομμένη καμπύλη [ $SOC^{max}=0.9$ ,  $SOC^{min}=0.1$ ,  $SOC^{high}=0.8$ ,  $SOC^{low}=0.2$ .], ενώ στο 0.7 για τη συνεχή καμπύλη [ $SOC^{max}=0.9$ ,  $SOC^{min}=0.5$ ,  $SOC^{high}=0.9$ ,  $SOC^{low}=0.5$ .]. Αιτία προφανώς είναι η αλλαγή των ορίων SOC. Με κόκκινο χρώμα είναι οι καμπύλες φόρτισης, ενώ με μπλε οι καμπύλες εκφόρτισης.

## 4.4. Έλεγχος με τη μέθοδο Adaptive Droop Control

Για τα ηλεκτρικά οχήματα που θέλουν να διατηρήσουν την κατάσταση φόρτισης που είχαν πριν συνδεθούν στο δίκτυο εφαρμόζουμε διαφορετικό τύπου ελέγχου, τέτοιο ώστε να τείνει να επαναφέρει το SOC της μπαταρίας στην τιμή που είχε αρχικά ( $SOC_{in}$ ). Προκειμένου να υλοποιηθεί αυτό το είδος ελέγχου πρέπει να εισάγουμε μία νεκρή ζώνη (dead band) για να αποφευχθεί η πολύ συχνή αλλαγή της κατάστασης φόρτισης/εκφόρτισης καθώς και έναν κορεσμό ο οποίος θα φροντίζει ώστε οι τιμές που λαμβάνει η ισχύς εισόδου ή εξόδου να είναι αποδεκτές τόσο από το όχημα όσο και από το ηλεκτρικό δίκτυο. Σε αντίθεση με το μοντέλο που περιγράψαμε προηγουμένως, εδώ υπάρχει μεγαλύτερη ευελιξία στο να ρυθμίσουμε το  $K$  για διαφορετικά  $SOC_{in}$ , πράγμα που μας διευκολύνει ιδιαίτερα αφού χρειάζεται να λάβουμε υπόψη μόνο αυτήν την παράμετρο και όχι τις τέσσερις παραμέτρους [ $SOC^{max}$ ,  $SOC^{min}$ ,  $SOC^{high}$ ,  $SOC^{low}$ ] που χρησιμοποιήσαμε στο προηγούμενο μοντέλο.



Εικόνα 11 - Adaptive (προσαρμοζόμενος) έλεγχος Battery Soc Holder



Διάγραμμα 5 - Προσαρμοστικός έλεγχος ο οποίος διατηρεί το SOC στο 0.7, όσο δηλαδή το  $SOC_{in}$ . Με κόκκινο χρώμα είναι οι καμπύλες φόρτισης, ενώ με μπλε οι καμπύλες εκφόρτισης.

Παρατηρώντας το διάγραμμα μπορούμε εύκολα να κατανοήσουμε τον τρόπο λειτουργίας του ελέγχου. Για παράδειγμα, εάν είμαστε σε κατάσταση φόρτισης που απεικονίζεται από την κόκκινη καμπύλη, δηλαδή  $\Delta f > 0$ , παρατηρούμε ότι όσο απομακρυνόμαστε από το  $SOC_{in}$  το κέρδος  $K$  μειώνεται έντονα προκειμένου να αποτρέψει το όχημα, από το να φορτιστεί παραπάνω, ενώ όμοια όταν η τιμή του SOC

πέσει αρκετά χαμηλότερα από το  $SOC_{in}$  το  $K$  παίρνει απότομα μεγάλη τιμή, προκειμένου να επιτρέψει την ταχεία επαναφορά της μπαταρίας του οχήματος στην επιθυμητή κατάσταση φόρτισης.

Οι καμπύλες σε αυτόν τον τρόπο ελέγχου, σχηματίζονται από τις εξής εξισώσεις:

1.

$$SOC_{i,k} \leq SOC_i^{min}$$

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

2.  $SOC_{i,k} \geq SOC_i^{max}$

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

3.  $SOC_i^{min} < SOC_{i,k} < SOC_i^{in}$

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

4.  $SOC_i^{in} < SOC_{i,k} < SOC_i^{max}$

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

Πολύ σημαντική παρατήρηση σε αυτόν τον τύπο ελέγχου είναι ότι :

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

Επομένως, όσο πιο μικρή είναι η τιμή του K κατά την εκφόρτιση, τόσο μεγαλύτερη θα είναι κατά την φόρτιση για ένα δεδομένο SOC. Γι αυτόν το λόγο, η αναμενόμενη συμπεριφορά είναι η απορροφούμενη ισχύς από το δίκτυο να είναι περισσότερη από την εγχεόμενη. Έτσι η κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας θα πάει υψηλότερες τιμές. Προφανώς στην αντίστροφη περίπτωση η εγχεόμενη ισχύς θα είναι περισσότερη από την απορροφούμενη, με αποτέλεσμα η κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας να πάρει χαμηλότερες τιμές. Έτσι είναι ξεκάθαρο το πώς αυτός ο τρόπος ελέγχου συμβάλλει αποτελεσματικά στην διατήρηση της κατάστασης φόρτισης στα επιθυμητά επίπεδα.

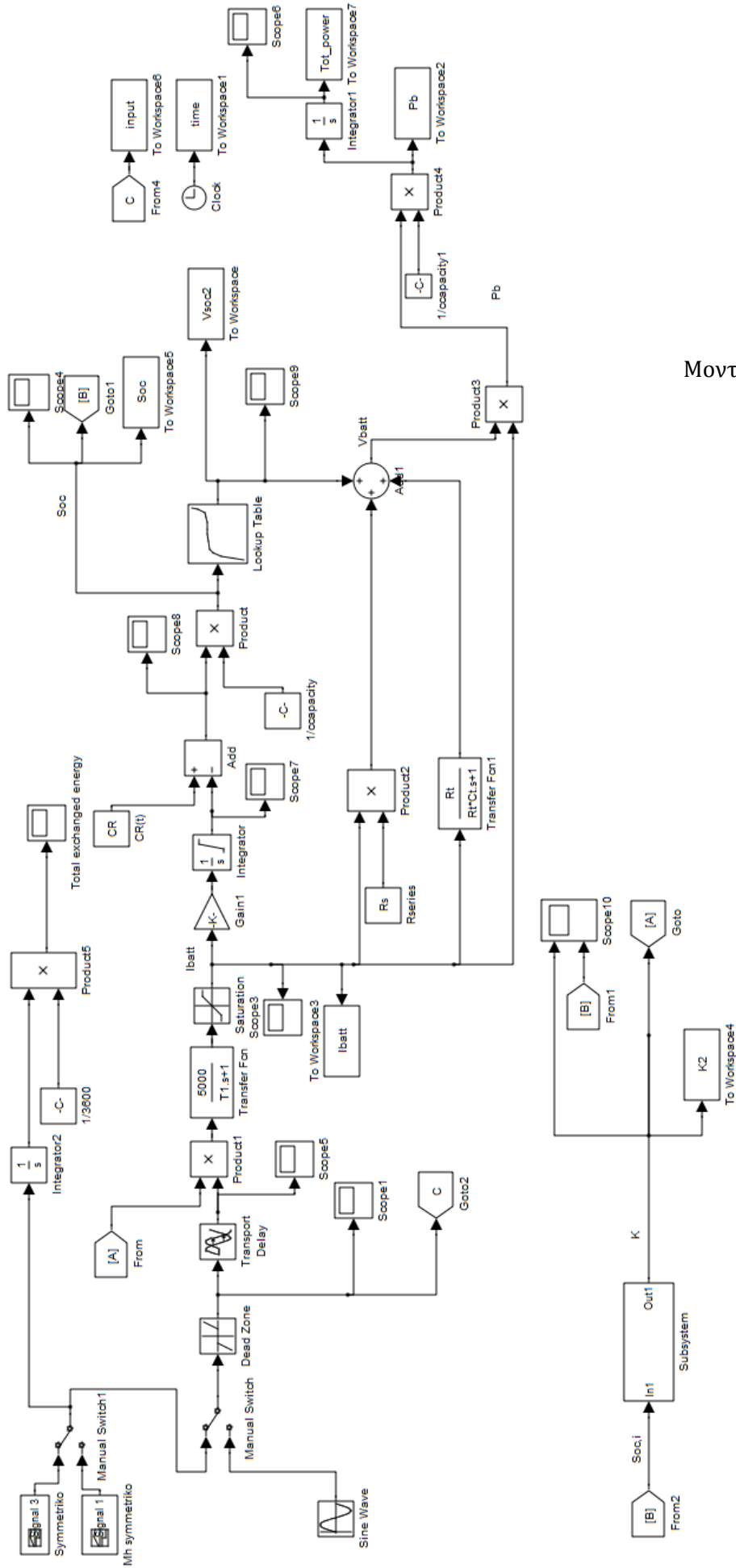
## 4.5. Προσομοιώσεις

Χρησιμοποιώντας το Matlab και με βάση το μοντέλο της μπαταρίας που περιγράψαμε σε προηγούμενο κεφάλαιο, εκτελέσαμε διάφορες προσομοιώσεις για να επαληθεύσουμε την ορθή λειτουργία του συστήματος ελέγχου, πάντα σε αντιπαράθεση με τον κλασικό τρόπο ελέγχου. Σήμα εισόδου είναι η συχνότητα, για την οποία πήραμε διάφορα πιθανά σενάρια, ενώ σήμα εξόδου είναι αφενός η ισχύς και αφετέρου η κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας. Οι παράμετροι που χρησιμοποιήσαμε στο μοντέλο έχουν τις εξής τιμές:

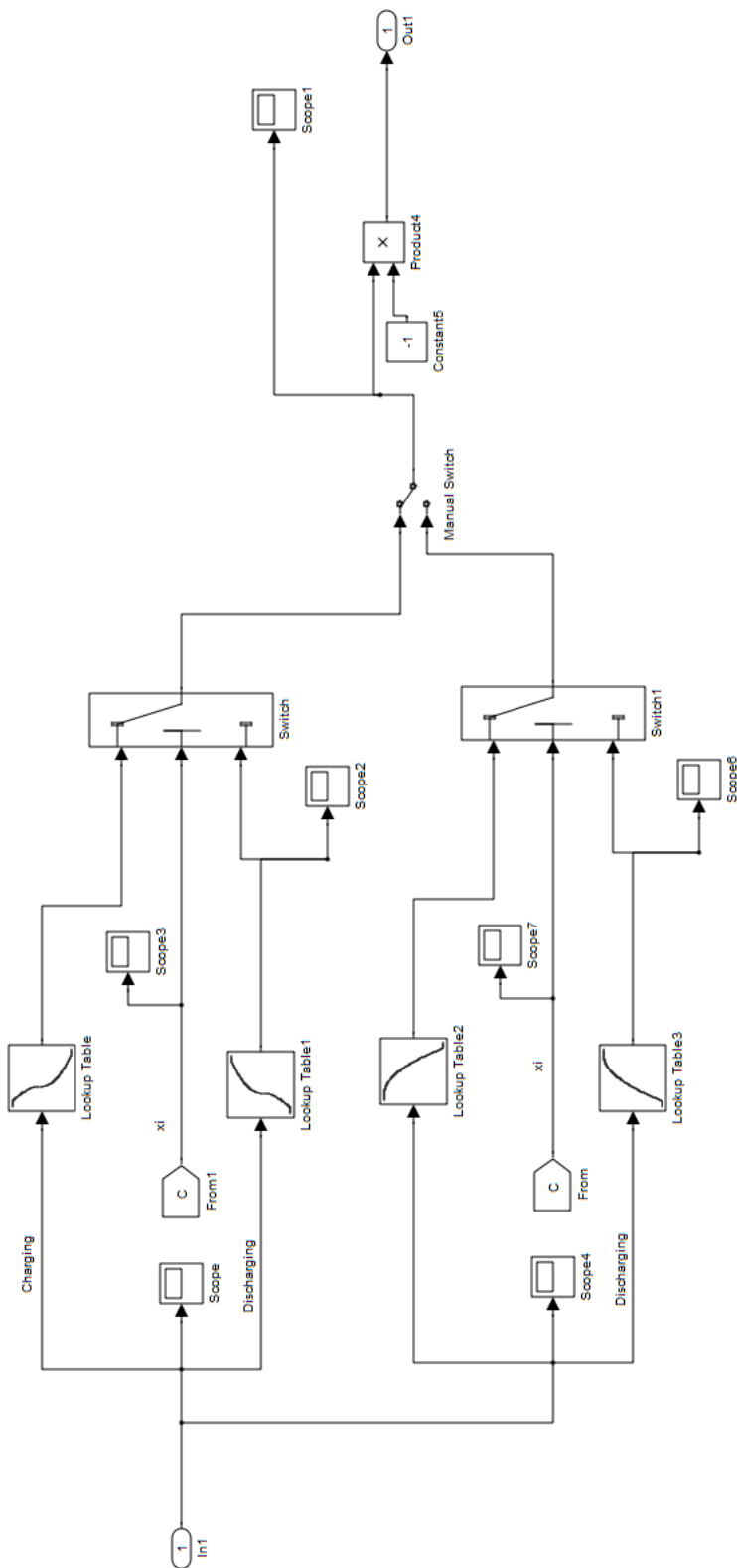
Παράμετρος	Τιμή
Αριθμός συνδεδεμένων οχημάτων	10
Χωρητικότητα μπαταρίας (KWh)	32KWh ανά όχημα
Μέγιστη Ισχύς (kW)	7KW
Μέγιστο K	500A / Hz
Maximum SOC	90%
Minimum SOC	10%

Πίνακας 1 - Παράμετροι μοντέλου Matlab

Στις επόμενες σελίδες παραθέτουμε το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε στο Simulink:



Μοντέλο Simulink



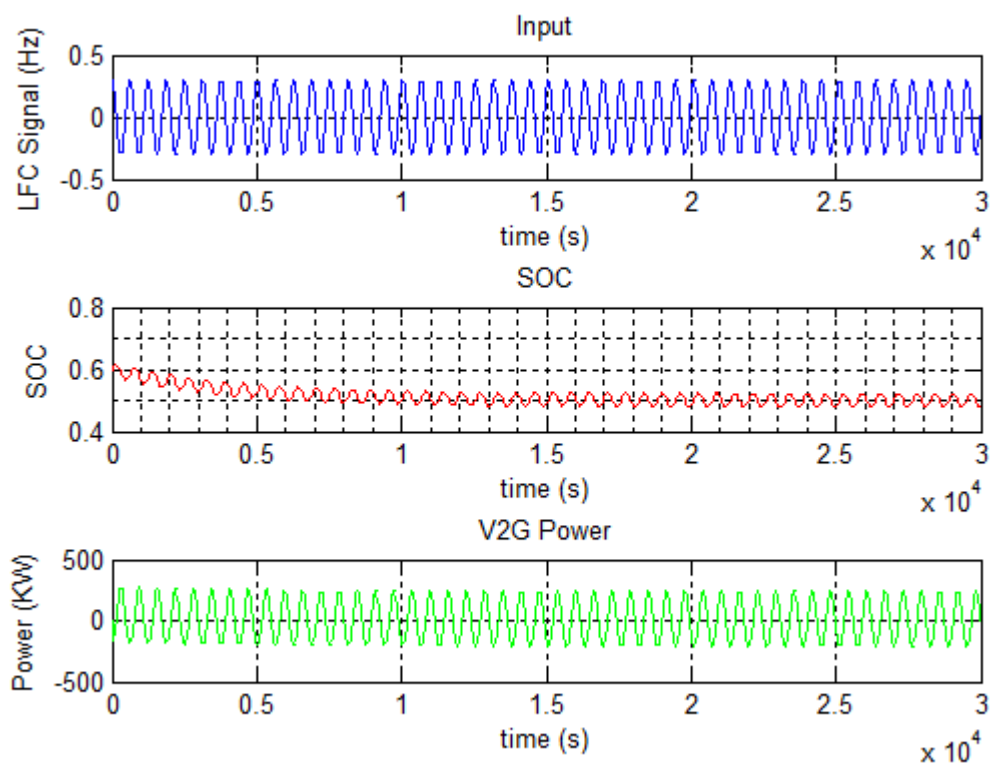
Υποσύστημα υπολογισμού του κέρδους  $K$  και για τους δύο τρόπους ελέγχου.

Ακολουθεί ένας συγκεντρωτικός πίνακας με τα σενάρια των προσομοιώσεων, για διάφορα σήματα εισόδου, SOC<sub>in</sub>, επιθυμητά SOC. Για κάθε σενάριο βλέπουμε για όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης το σήμα εισόδου, το SOC καθώς και την ισχύ που ανταλλάσει το όχημα με το δίκτυο.

Αριθμός Σεναρίου	Σήμα εισόδου	SOC <sub>in</sub>	Επιθυμητό SOC
1	Ημιτονοειδές	60%	60%
2	Ημιτονοειδές	40%	65%
3	Ημιτονοειδές	70%	35%
4	Τυχαίο - μη συμμετρικό	60%	60%
5	Τυχαίο - μη συμμετρικό	40%	65%
6	Τυχαίο - μη συμμετρικό	70%	35%
7	Τυχαίο - συμμετρικό	60%	60%
8	Τυχαίο - συμμετρικό	40%	65%
9	Τυχαίο - συμμετρικό	70%	35%

Πίνακας 2 - Σενάρια προσομοιώσεων

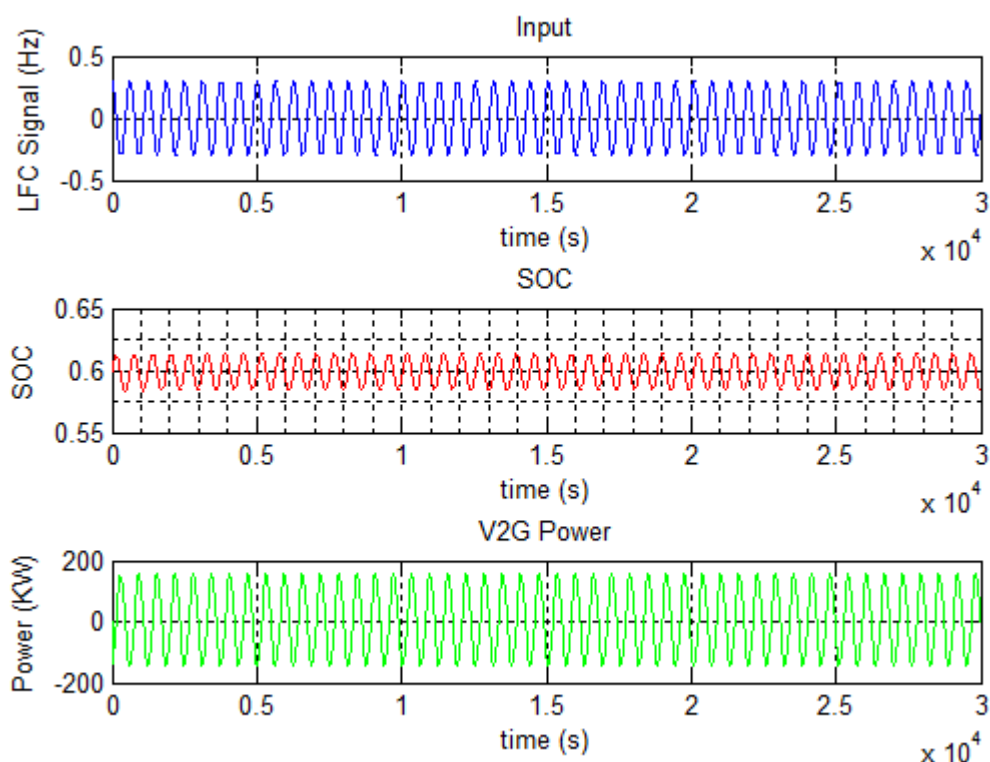
### Σενάριο 1



Διάγραμμα 6 - Χωρίς adaptive droop control



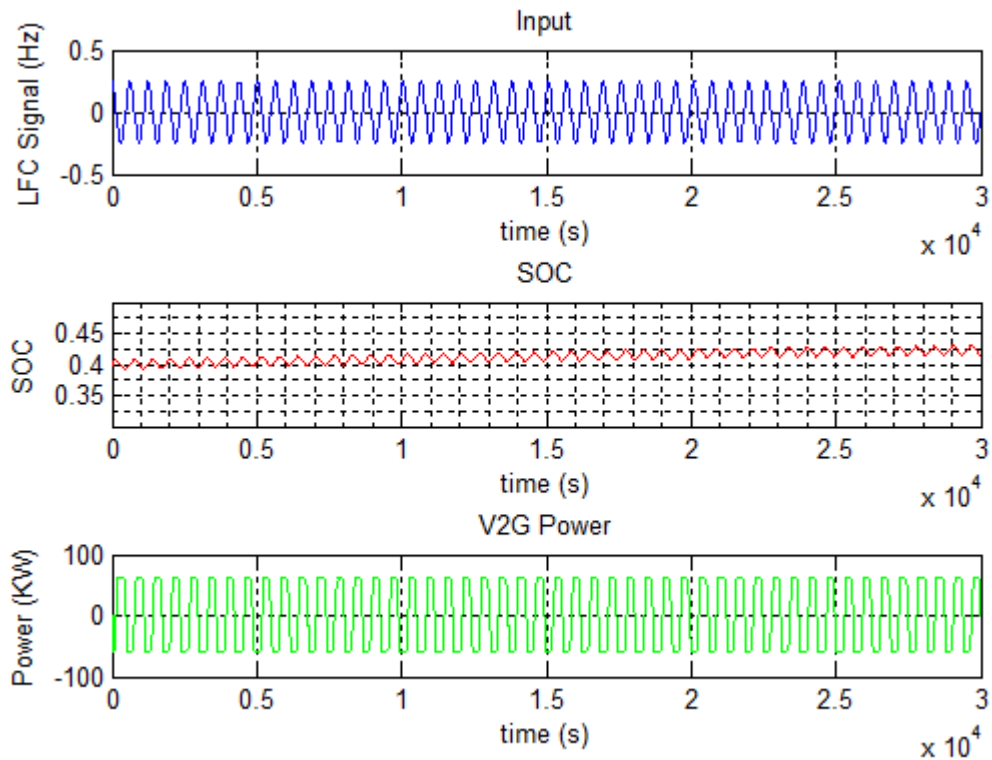
Παρατηρούμε ότι ενώ έχουμε ένα απόλυτα συμμετρικό σήμα, στην πρώτη μέθοδο η κατάσταση φόρτισης οδηγείται προς το 50% μιας και με αυτή τη μέθοδο ελέγχου δεν είναι εύκολη η δυνατότητα ρύθμισης του επιθυμητού SOC σε τιμή διαφορετική από την αρχικά προκαθορισμένη μέσω των ορίων SOC (δηλαδή το 50%).



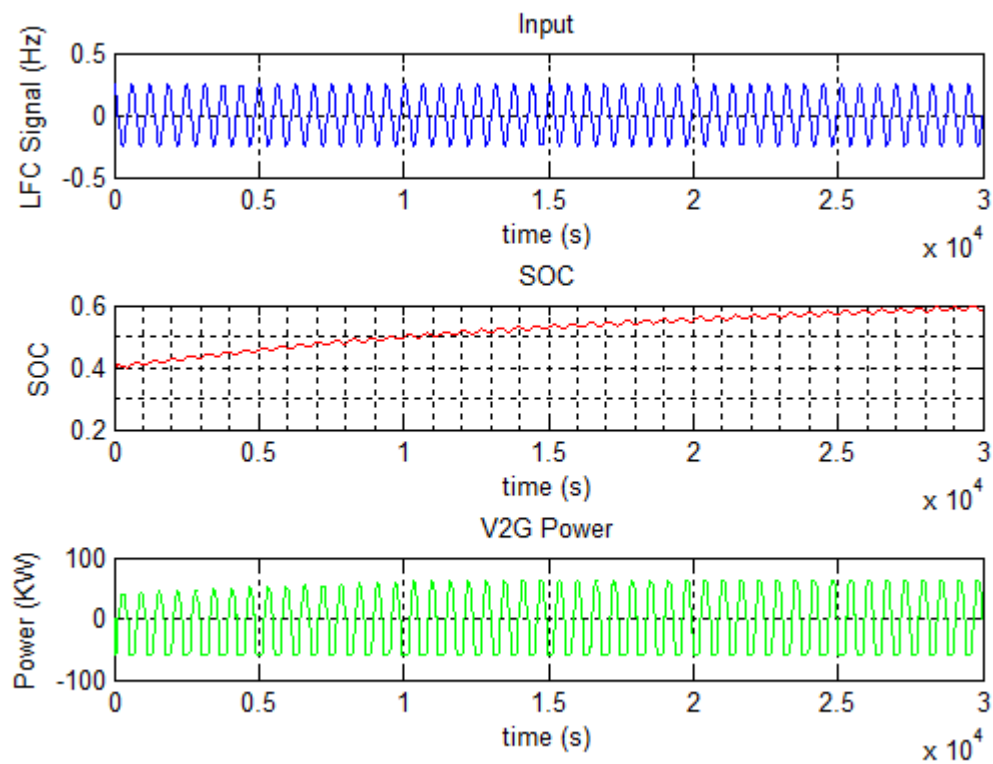
Διάγραμμα 7 - Με adaptive droop control

Αντίθετα με την προηγούμενη παρατηρούμε ότι με adaptive droop έλεγχο το SOC διατηρείται πάντα κοντά στην επιθυμητή τιμή, δηλαδή το 60%. Έτσι ενώ συμμετέχει ενεργά στη ρύθμιση της συχνότητας, ικανοποιείται και η απαίτηση του ιδιοκτήτη-χρήστη του οχήματος σχετικά με την διατήρηση της στάθμης φόρτισης. Επίσης, η ισχύς ακολουθεί πιστά την κυματομορφή της μεταβολής της συχνότητας, πράγμα το οποίο σημαίνει ότι τα οχήματα έχουν σχετικά άμεση απόκριση και μπορούν έτσι να υποστηρίξουν το δίκτυο όταν αυτό κριθεί απαραίτητο.

## Σενάριο 2



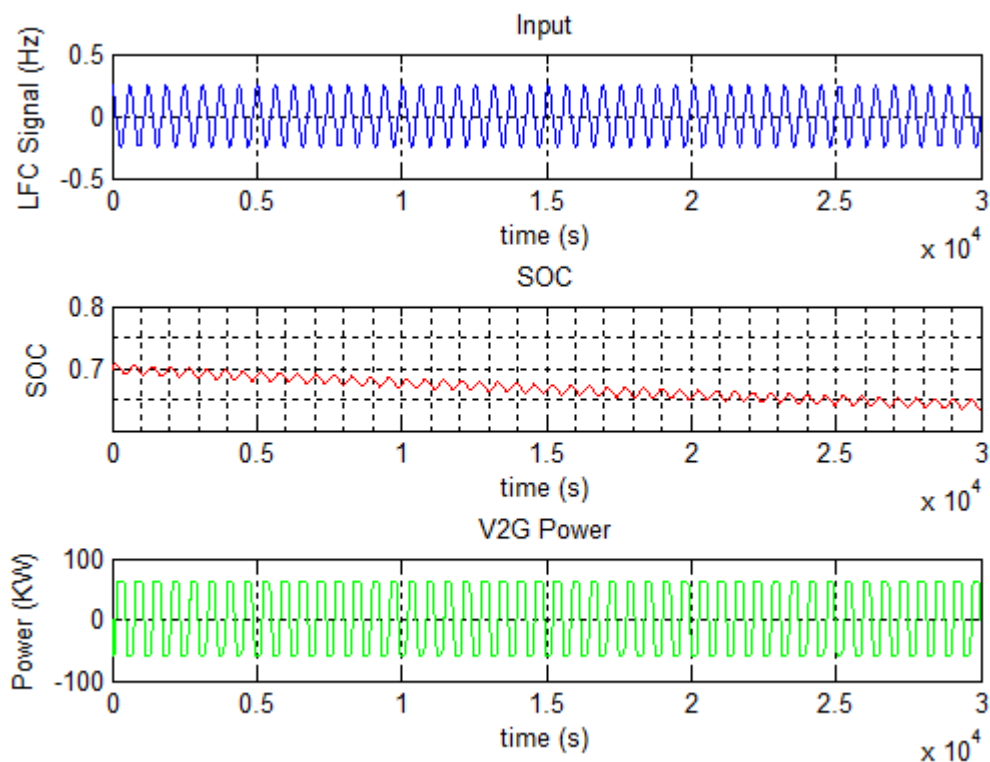
Διάγραμμα 8 - Χωρίς adaptive droop control



Διάγραμμα 9 - Με adaptive droop control

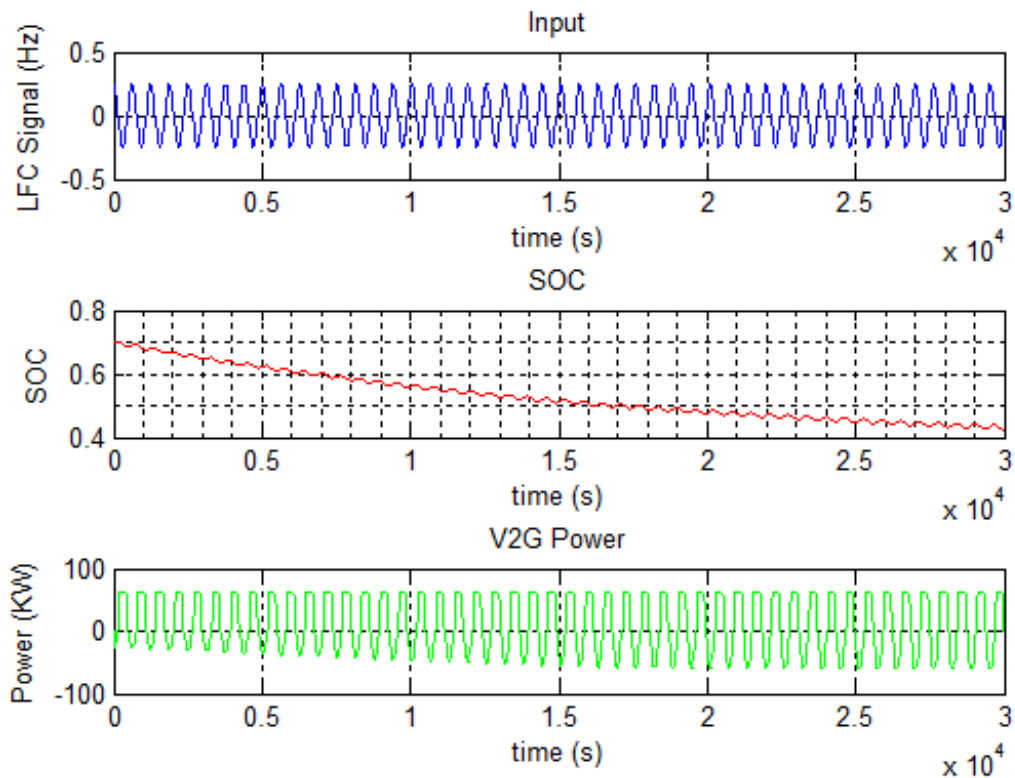
Στα παραπάνω διαγράμματα βλέπουμε ξεκάθαρα την αξία της προτεινόμενης τεχνικής ελέγχου. Στην πρώτη περίπτωση η κατάσταση φόρτισης αυξάνεται ελάχιστα και προφανώς δεν ικανοποιούνται οι απαιτήσεις του χρήστη του οχήματος. Αντίθετα, με έλεγχο adaptive droop η κατάσταση φόρτισης καταλήγει στο 60%, πολύ κοντά δηλαδή στην τιμή που είχε ορίσει ο χρήστης. Όσον αφορά την ισχύ παρατηρούμε και στις δύο περιπτώσεις παρόμοια συμπεριφορά αλλά και στις δύο περιπτώσεις η ισχύς είναι χαμηλότερη από το σενάριο 1, μιας και τα οχήματα χρησιμοποιούν μέρος αυτής της ισχύος προκειμένου να φορτιστούν.

### Σενάριο 3



Διάγραμμα 10 - Χωρίς adaptive droop control

Εδώ να αναφέρουμε αρχικά ότι το συγκεκριμένο σενάριο δεν είναι ρεαλιστικό, μιας και οι χρήστες των οχημάτων δεν έχει κάποιο ιδιαίτερο νόημα να θέλουν να εκφορτιστούν τα οχήματά τους. Παρόλα αυτά αξίζει να το μελετήσουμε προκειμένου να δούμε και να κατανοήσουμε τη λειτουργία του συστήματος ελέγχου. Εδώ παρατηρούμε ότι με την υπάρχουσα τεχνική ελέγχου η κατάσταση φόρτισης πλησιάζει το 60% στο τέλος του χρόνου της προσομοίωσης. Η ισχύς ακολουθεί τη μεταβολή τη συχνότητας χωρίς κάτι αξιοσημείωτο.

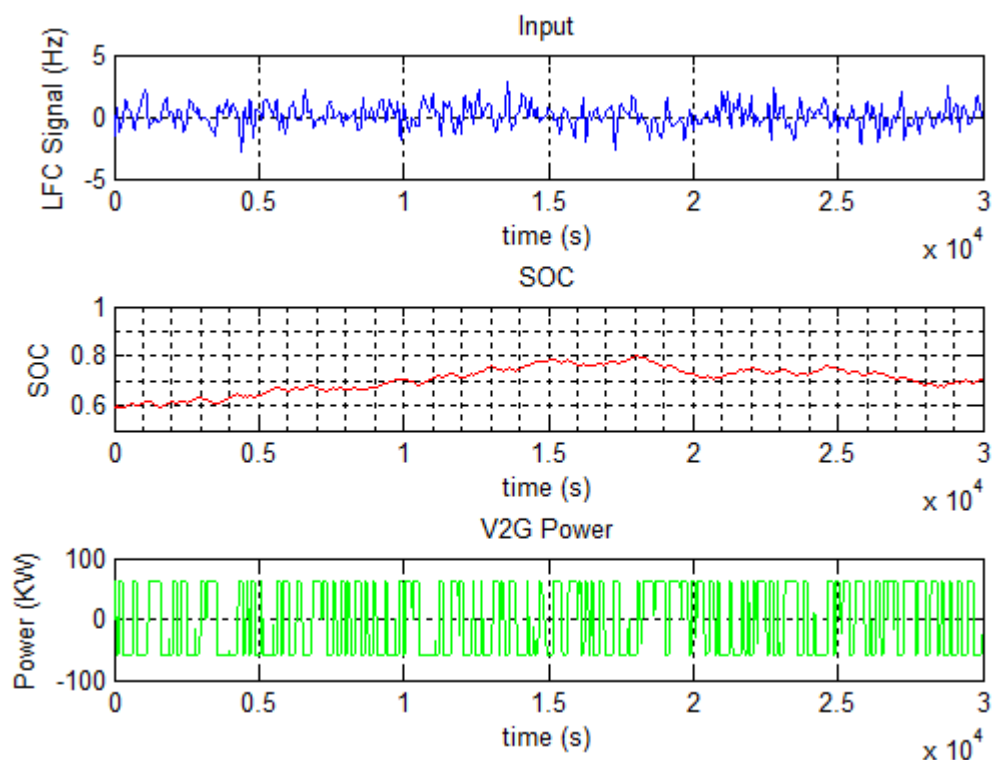


Διάγραμμα 11 - Με adaptive droop control

Με τον έλεγχο adaptive droop παρατηρούμε ότι η κατάσταση φόρτισης μειώνεται πολύ πιο έντονα και καταλήγει στο 44% στο τέλος του χρόνου προσομοίωσης. Επομένως είναι πολύ πιο κοντά στην τιμή που είχε ορίσει ο χρήστης του οχήματος (35%), πράγμα που σημαίνει ότι ικανοποιήθηκε η απαίτησή του για εκφόρτιση του οχήματος. Η ισχύς παρατηρούμε ότι κατά το αρχικό κομμάτι της προσομοίωσης είναι περισσότερο θετική παρά αρνητική, το οποίο σημαίνει ότι σε εκείνο το χρόνο το όχημα προσέφερε περισσότερη ενέργεια στο δίκτυο, παρά απορρόφησε από αυτό. Αυτό είναι απόλυτα λογικό και δικαιολογεί τη σταδιακή μείωση της στάθμης φόρτισης.

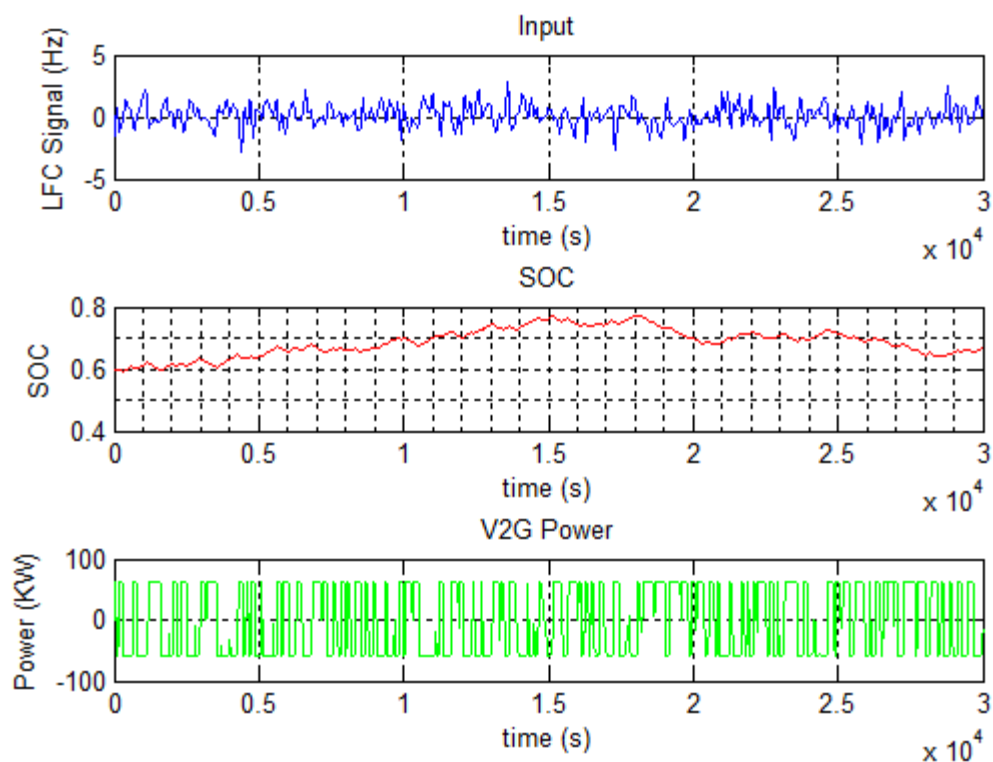
Σημείωση: Στα σενάρια που ακολουθούν κρίνεται σκόπιμο να αναφερθεί και η συνολική ενέργεια που απορρόφησαν ή προσέφεραν στο δίκτυο τα οχήματα, μιας και είναι αξιοσημείωτο μέγεθος το οποίο θα βοηθήσει σημαντικά στο να βγάλουμε ορθά συμπεράσματα. Για αυτόν το λόγο στα διαγράμματα που ακολουθούν υπάρχει και η τιμή της συνολικής ενέργειας.

### Σενάριο 4



Διάγραμμα 12 - Χωρίς adaptive droop control

Συνολική ενέργεια που απορρόφησαν τα EVs = 20,62 KWh.

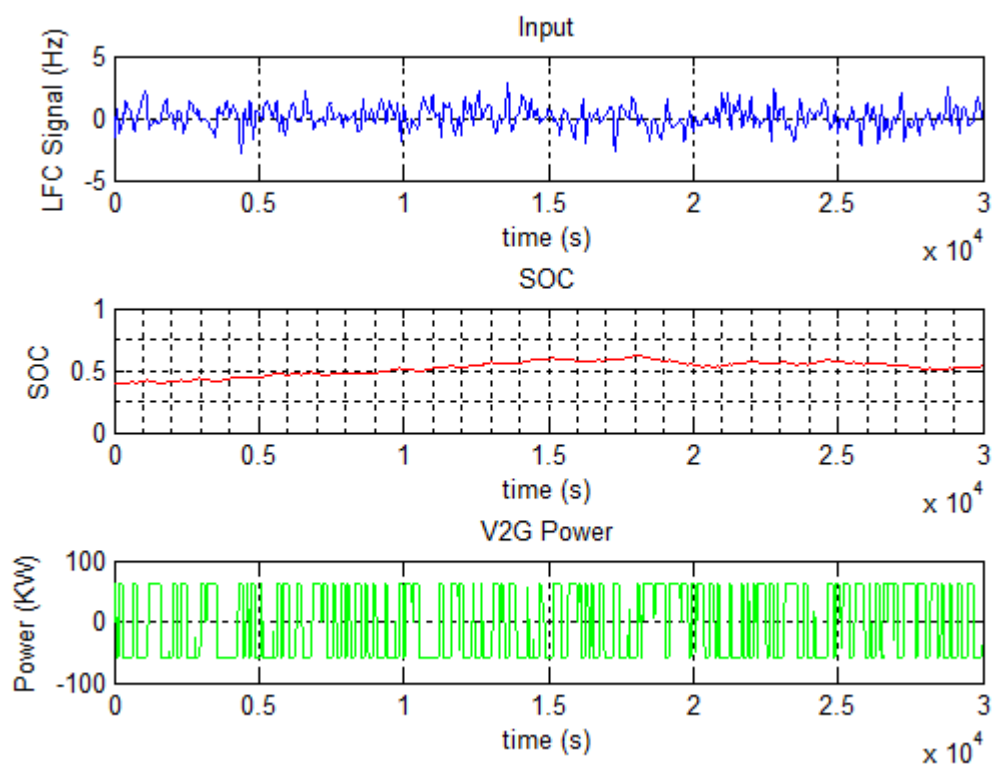


Διάγραμμα 13 - Με adaptive droop control

Συνολική ενέργεια που απορρόφησαν τα EVs = 10,03 KWh.

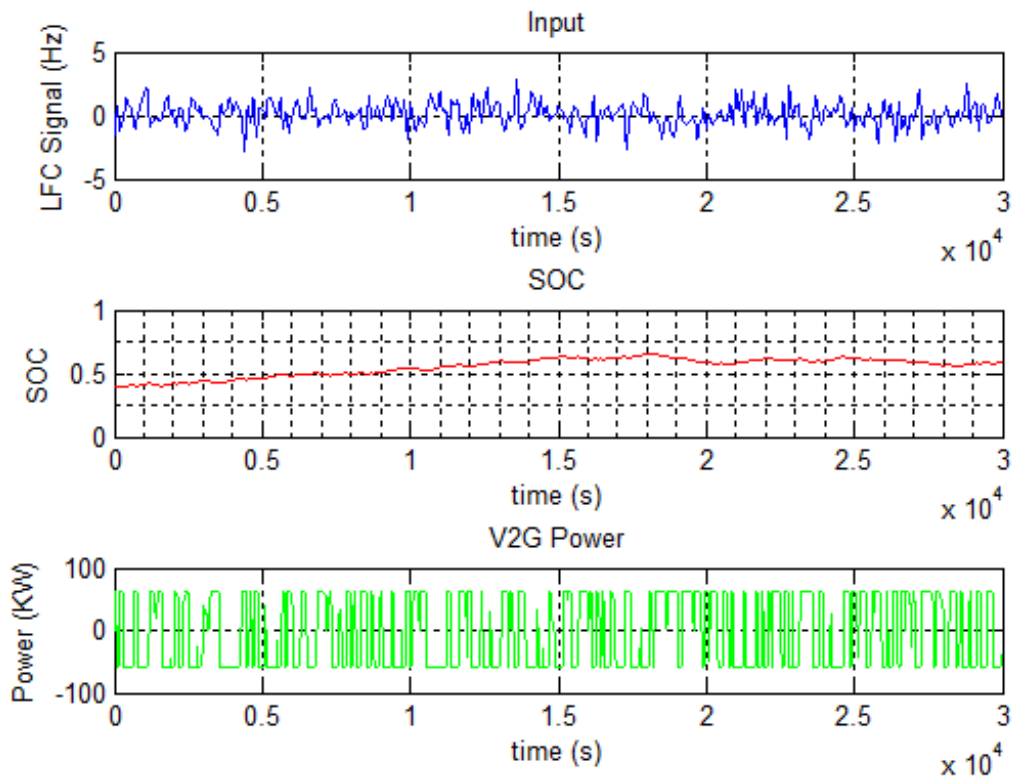
Από τα παραπάνω διαγράμματα μπορούμε να εξάγουμε πολύ χρήσιμα συμπεράσματα. Αρχικά παρατηρούμε ότι με adaptive έλεγχο, η τελική κατάσταση φόρτισης (SOC) αποκλίνει αισθητά λιγότερο από την επιθυμητή τιμή που ορίσαμε εξαρχής, δηλαδή το 60%. Αν βέβαια μελετήσουμε και τις ενδιάμεσες τιμές, πέρα από την τελική θα δούμε ότι καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης η δεύτερη περίπτωση ήταν πιο κοντά στο 60%. Παρόλα αυτά, σε καμία από τις δύο περιπτώσεις δεν διατηρείται στο 60%, καθώς ο μέσος όρος του σήματος εισόδου είναι θετικός, δηλαδή  $\Delta f > 0$ . Επομένως τα οχήματα «υποχρεώνονται» να φορτίσουν προκειμένου να βοηθήσουν στην επαναφορά της συχνότητας στα επιθυμητά όρια. Παρόλα αυτά, παρατηρούμε ότι με adaptive έλεγχο, απορρόφησαν λιγότερες από τις μισές κιλοβατώρες σε σύγκριση με την πρώτη περίπτωση. Η ισχύς ακολουθεί το σήμα της συχνότητας και έχει αντίστοιχη κυματομορφή.

### Σενάριο 5



Διάγραμμα 14 - Χωρίς adaptive droop control

Συνολική ενέργεια που απορρόφησαν τα EVs =28.27 KWh

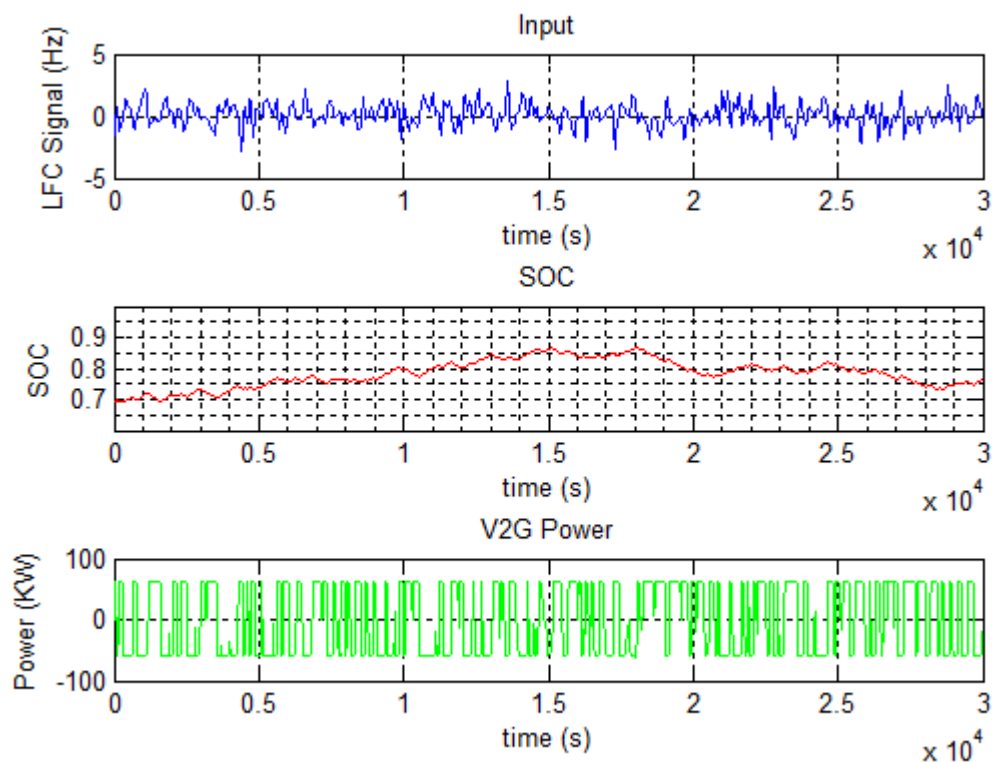


Διάγραμμα 15 - Με adaptive droop control

Συνολική ενέργεια που απορρόφησαν τα EVs = 44.84 KWh

Και σε αυτό το σενάριο παρατηρούμε ότι με έλεγχο adaptive droop, κάθε στιγμή η κατάσταση φόρτισης είναι πιο κοντά στην επιθυμητή. Στην δεύτερη περίπτωση παρατηρούμε ότι η τελική τιμή του SOC είναι υψηλότερη, πράγμα που οφείλεται στην επιπλέον ενέργεια που απορρόφησαν τα ηλεκτρικά οχήματα. Η ισχύς και εδώ αποκρίνεται άμεσα στο σήμα της συχνότητας.

## Σενάριο 6

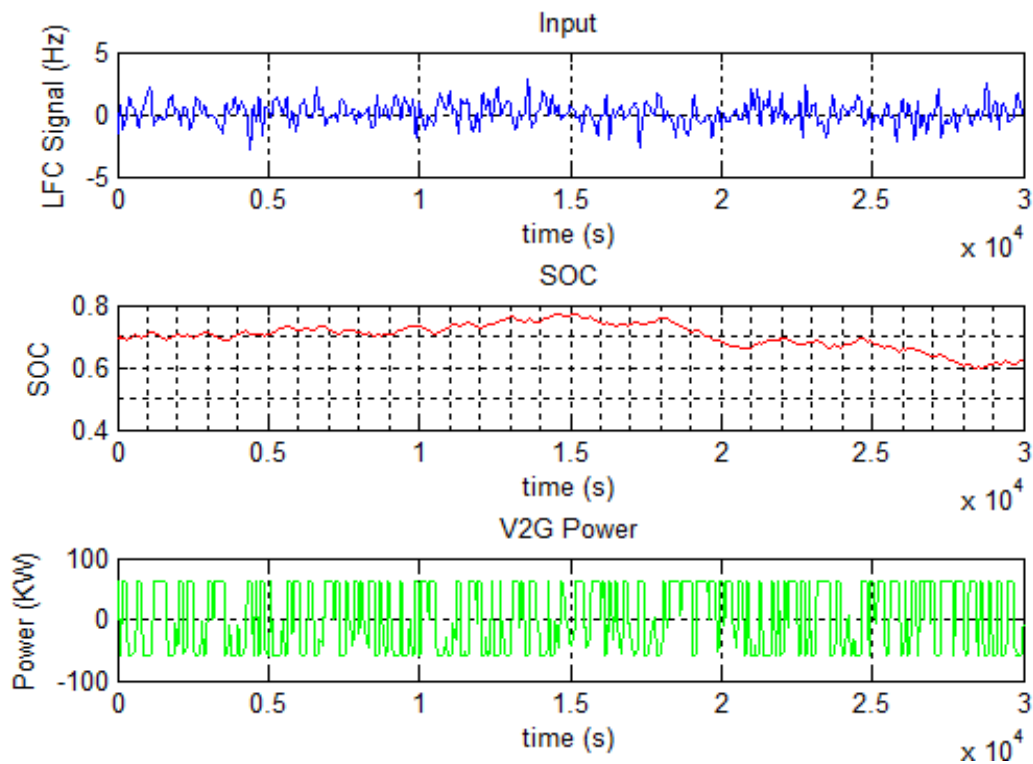


Διάγραμμα 16 - Χωρίς adaptive droop control

Συνολική ενέργεια που απορρόφησαν τα EVs = 8,69 KWh

Συγκρίνοντας με το διάγραμμα της επόμενης σελίδας, παρατηρούμε, ότι ενώ ουσιαστικά ζητάμε να αποφορτιστεί το όχημα, έχουμε τελικά αντίθετο αποτέλεσμα δηλαδή φόρτιση, λόγω του θετικού μέσου όρου του σήματος εισόδου. Αντίθετα στην επόμενη περίπτωση, παρατηρούμε ότι το όχημα αποφορτίστηκε, προσφέροντας ενέργεια στο δίκτυο όπως ήταν αναμενόμενο. Αυτό φαίνεται ξεκάθαρα και από τη συνολική ενέργεια στις δύο περιπτώσεις (απορρόφηση 8,69KWh στην πρώτη και έγχυση 29,4KWh στην δεύτερη. Παρόλα αυτά, δεν επιτεύχθηκε η επιθυμητή τιμή (35%) και υπάρχει απόκλιση περίπου 70%. Στην προηγούμενη περίπτωση η απόκλιση ήταν 114%, οπότε συμπεραίνουμε ότι με adaptive έλεγχο επιτυγχάνονται σε αισθητά μεγαλύτερο βαθμό οι στόχοι που θέτουμε σχετικά με την στάθμη φόρτισης του οχήματος κατά την έξοδο από το δίκτυο.

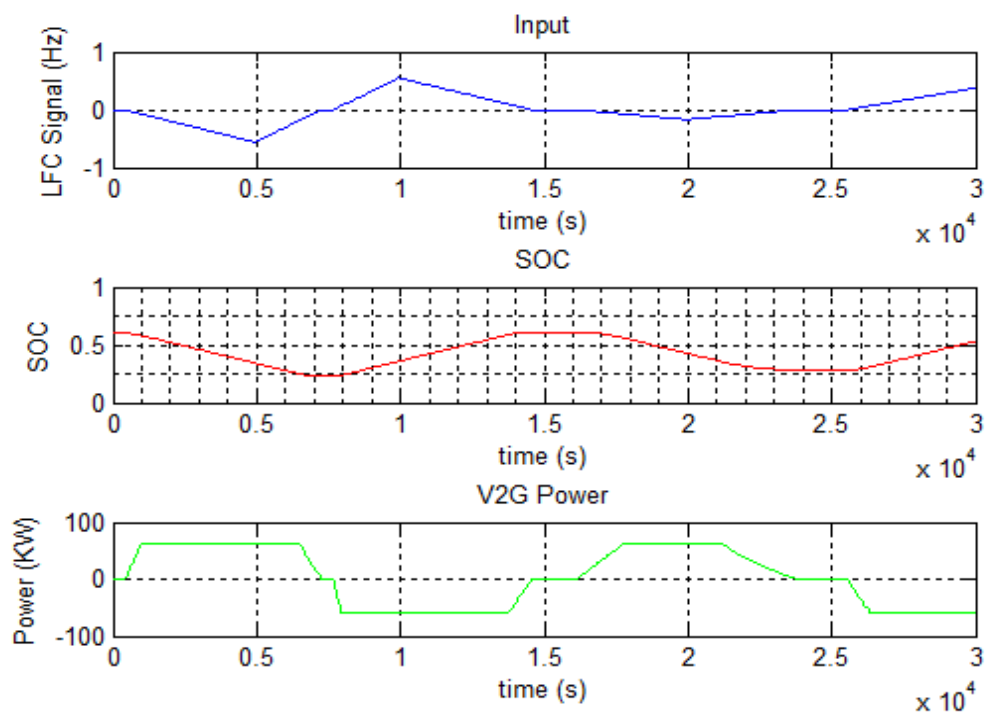




Διάγραμμα 17 - Με adaptive droop control

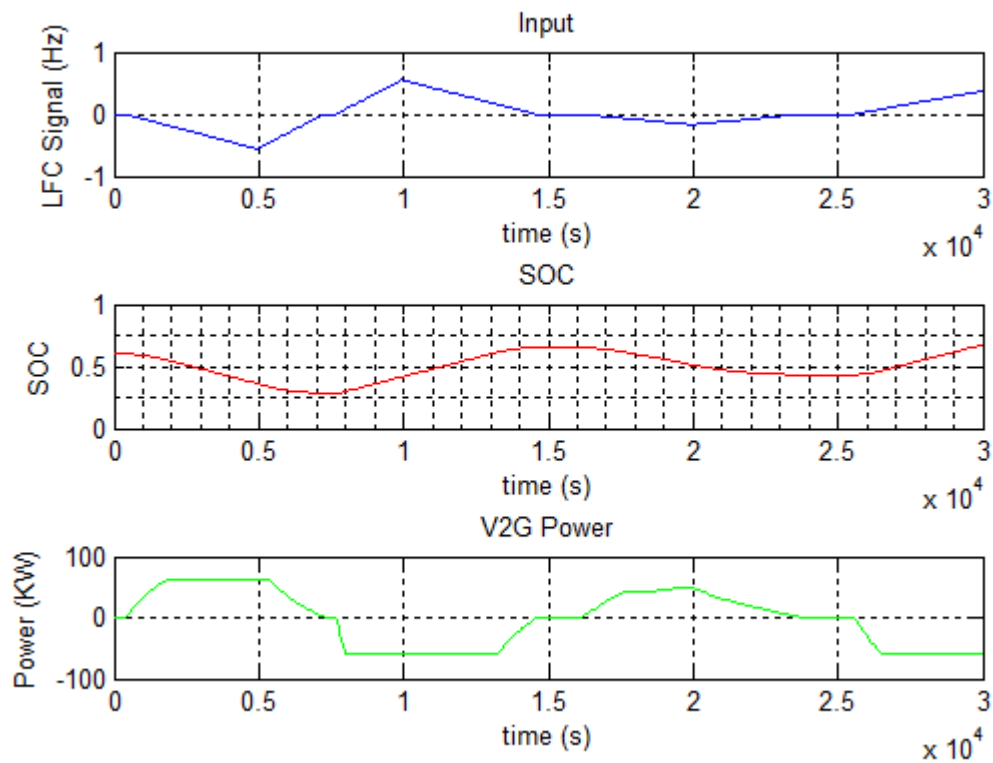
Συνολική ενέργεια που προσέφεραν τα EVs = 29,4 KWh.

### Σενάριο 7



Διάγραμμα 18 - Χωρίς adaptive droop control

Συνολική ενέργεια που προσέφεραν τα EVs = 26,6 KWh.

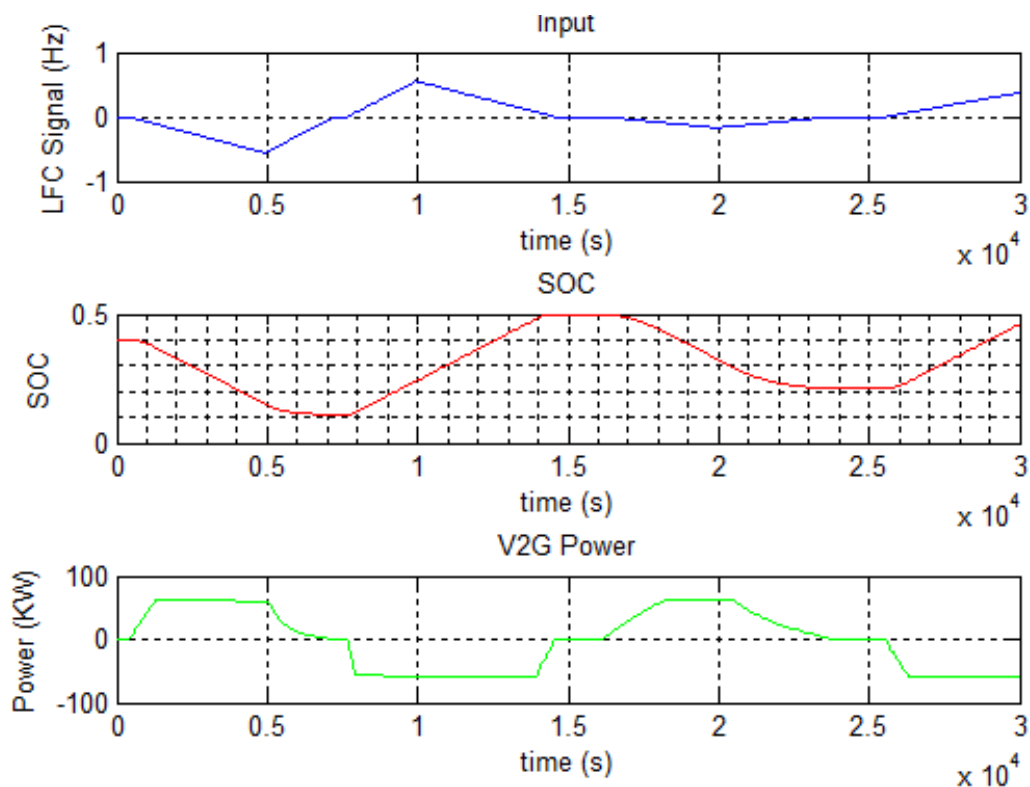


Διάγραμμα 19 - Με adaptive droop control

Συνολική ενέργεια που απορρόφησαν τα EVs = 15,5 KWh.

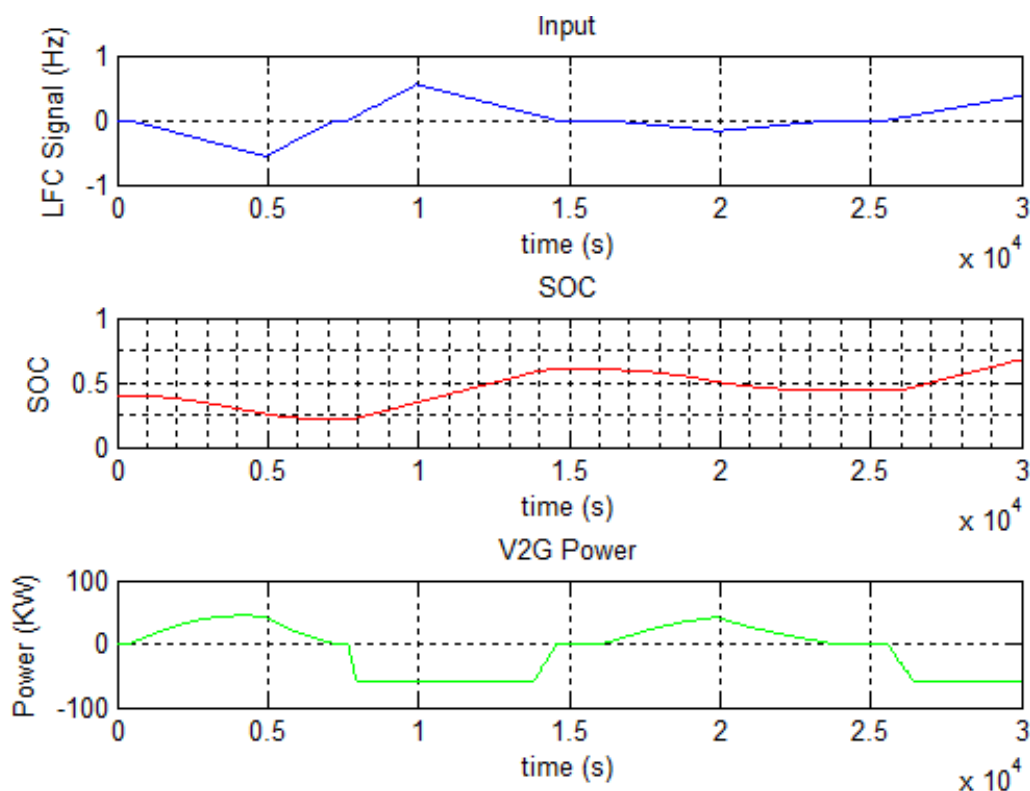
Σε αυτό το σενάριο γίνεται απόλυτα κατανοητή η λειτουργία του adaptive ελέγχου. Παρατηρούμε ότι ενώ το σήμα εισόδου έχει μέσο όρο μηδέν, υπάρχει μεγάλη διαφορά στην ενέργεια που αντάλλαξαν τα ηλεκτρικά οχήματα με το δίκτυο. (Έγχυση 26,6 KWh στην πρώτη περίπτωση και απορρόφηση 15,5 KWh στη δεύτερη) Αυτό συμβαίνει γιατί στην πρώτη περίπτωση το SOC τείνει να επανέλθει στο 50% ενώ στη δεύτερη τείνει να διατηρηθεί γύρω από το 60%, με αποτέλεσμα να υπάρχει μικρότερη ανταλλαγή ισχύος με το δίκτυο. Η επιθυμία του χρήστη του οχήματος ικανοποιείται στη δεύτερη περίπτωση, ενώ το όχημα δεν παύει να συνεισφέρει στις ανάγκες του δικτύου.

### Σενάριο 8



Διάγραμμα 20 - Χωρίς adaptive droop control

Συνολική ενέργεια που απορρόφησαν τα EVs = 10,35 KWh.

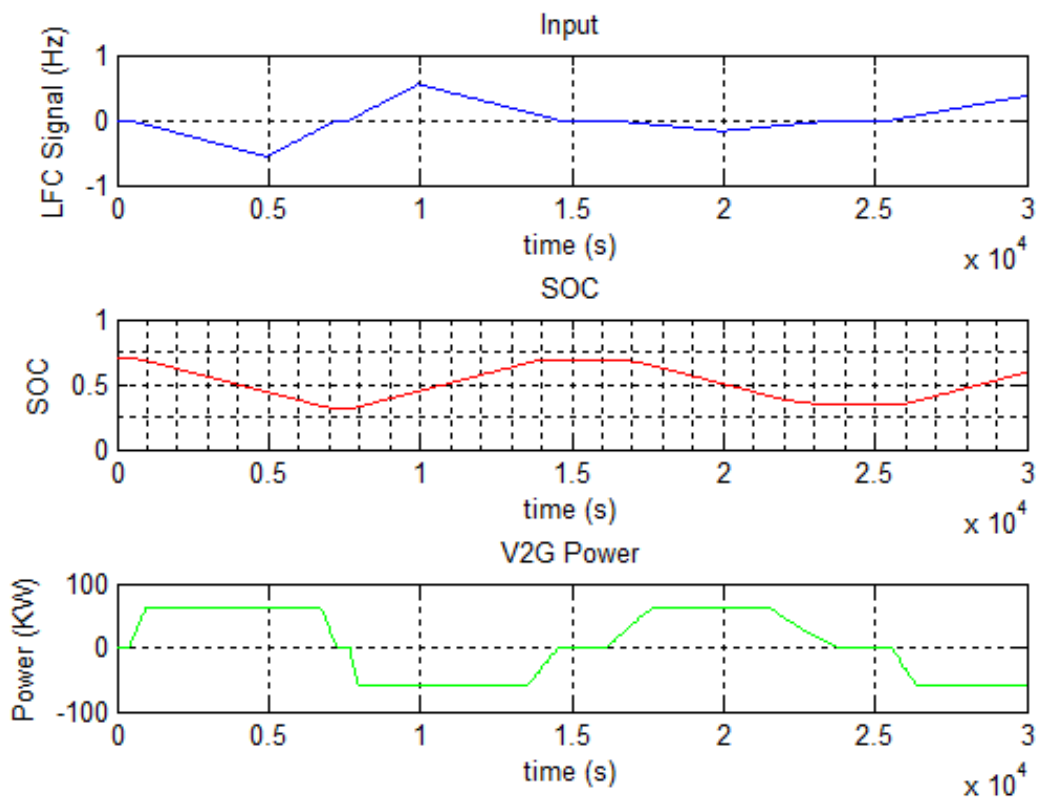


Διάγραμμα 21 - Με adaptive droop control

Συνολική ενέργεια που απορρόφησαν τα EVs = 73,59KWh.

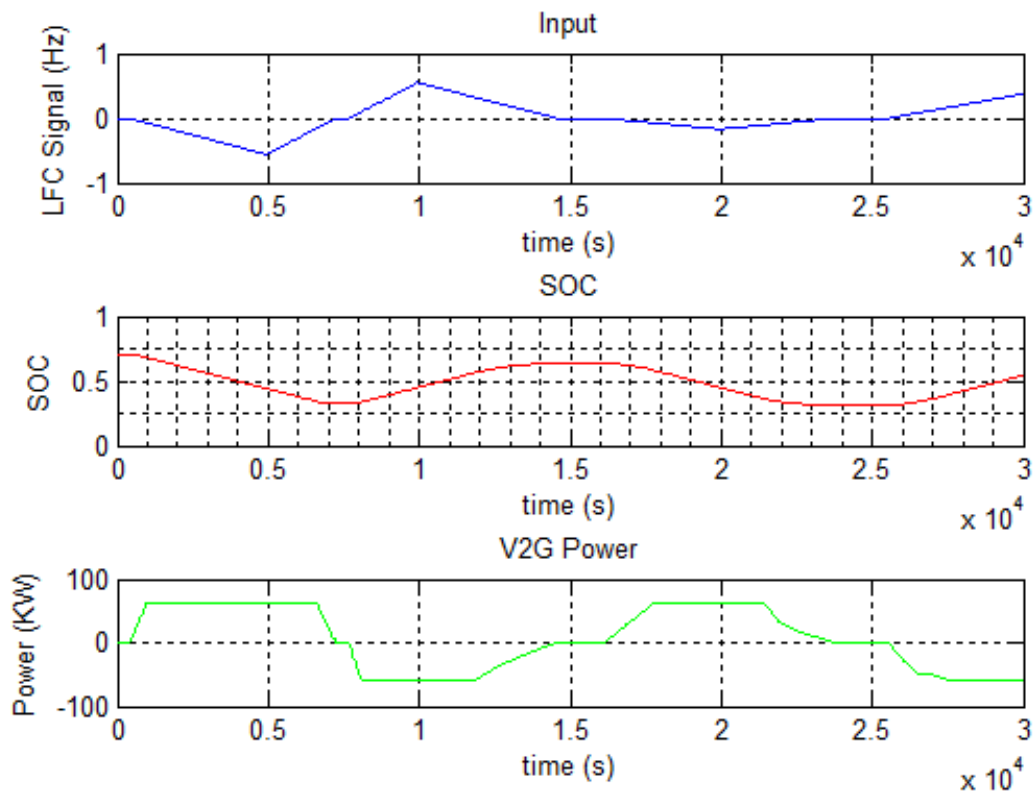
Εδώ παρατηρούμε ότι στην πρώτη περίπτωση αυξήθηκε ελάχιστα η κατάσταση φόρτισης, ενώ στη δεύτερη περίπτωση είχαμε αισθητή αύξηση και μάλιστα προσέγγισε με εξαιρετική ακρίβεια την επιθυμητή τιμή, που ήταν 65%. Γι' αυτόν το λόγο υπάρχει και αυτή η τεράστια διαφορά στην ανταλλαγή ενέργειας με το δίκτυο. Η ισχύς εμφανίζει διαφορές στα δύο διαγράμματα κυρίως στα θετικά της κομμάτια (εκφόρτιση οχημάτων), μιας και στην πρώτη περίπτωση η ισχύς που προσφέρουν τα οχήματα είναι σχεδόν ίδια με αυτή που απορροφούν ενώ στη δεύτερη η ισχύς που προσφέρουν είναι πολύ μικρότερη από την ισχύ που απορροφούν.

### Σενάριο 9



Διάγραμμα 22 - Χωρίς adaptive droop control

Συνολική ενέργεια που προσέφεραν τα EVs = 38,01 KWh



Διάγραμμα 23 - Με adaptive droop control

Συνολική ενέργεια που προσέφεραν τα EVs =51,12 KWh

Εδώ έχουμε ένα ακόμη ενδιαφέρον σενάριο, στο οποίο είναι εμφανής η επίδραση του adaptive droop control. Η ενέργεια που αντάλλαξαν με το δίκτυο διαφέρει περίπου 30% ενώ η τελική κατάσταση φόρτισης διαφέρει ελάχιστα λόγω του πλήθους των οχημάτων. Παρατηρούμε ότι με τον πρώτο τρόπο ελέγχου το τελικό SOC είναι περίπου 67% ενώ με τον δεύτερο τρόπο ελέγχου είναι 54%, αισθητά πιο κοντά στην επιθυμητή τιμή που ήταν 35%.

## 5. Eurostag

### 5.1. Γενικά

Για τη μοντελοποίηση του Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας, την επίλυση των ροών φορτίου και των προσομοιώσεων των διαταραχών χρησιμοποιείται το λογισμικό Eurostag, το οποίο εξειδικεύεται σε προσομοιώσεις που αφορούν ΣΗΕ. Το λογισμικό Eurostag, είναι προϊόν που δημιουργήθηκε από την εταιρεία Electricite de France & Tractebel, με σκοπό την βελτιστοποίηση της αποτελεσματικότητας των επενδύσεων και την ελαχιστοποίηση του κόστους.

### 5.2. Λειτουργία

Προκειμένου να γίνει ορθή και σε βάθος ανάλυση όλων των κρίσιμων φαινομένων στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας το EUROSTAG εμπεριέχει τα παρακάτω υπολογιστικά εργαλεία:

- Υπολογισμός ροών φορτίου: Ουσιαστικά επιλύεται το δίκτυο για την μόνιμη κατάσταση. Αποτελεί το πρώτο βήμα για την εκτέλεση οποιασδήποτε προσομοίωσης.
- Δυναμική ανάλυση: Γίνεται προσομοίωση μιας μεγάλης ποικιλίας συμβάντων στο δίκτυο, αλλαγές στην τοπολογία του ή και εντολές προς διακόπτες.
- Υπολογισμός κρίσιμων χρόνων εκκαθάρισης σφαλμάτων: υπολογίζεται αυτόματα ο χρόνος εκκαθάρισης των διαφόρων σφαλμάτων που μπορεί να συμβούν στο δίκτυο, προκειμένου να εξασφαλιστεί η ευστάθεια.

Ανεξαρτήτως από το είδος των διαταραχών που σημειώνονται και το μέγεθος του συστήματος, το EUROSTAG δείχνει τη συμπεριφορά του ηλεκτρικού συστήματος μέχρι αυτό να επιστρέψει σε σταθερή κατάσταση, με ακρίβεια που ορίζεται από το χρήστη. Ο επαναληπτικός αλγόριθμος που χρησιμοποιεί το EUROSTAG είναι μεταβλητού βήματος, με ελάχιστο και μέγιστο βήμα, που καθορίζονται επίσης από το χρήστη. Μετά το πέρας των προσομοιώσεων, λαμβάνουμε το σύνολο της πληροφορίας που αφορά το σύστημα είτε σε μορφή διαγράμματος είτε σε μορφή πίνακα για ευκολότερη μετέπειτα επεξεργασία.

Η χρήση του EUROSTAG , επιτρέπει την μελέτη μεγάλων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας , για μεγάλες χρονικές περιόδους , χωρίς την ανάγκη αλλαγής του αρχικού μοντέλου του συστήματος. Πιο κάτω παρατίθενται μερικά τυπικά παραδείγματα της χρήσης του EUROSTAG , που αφορούν την μελέτη ενός ΣΗΕ:

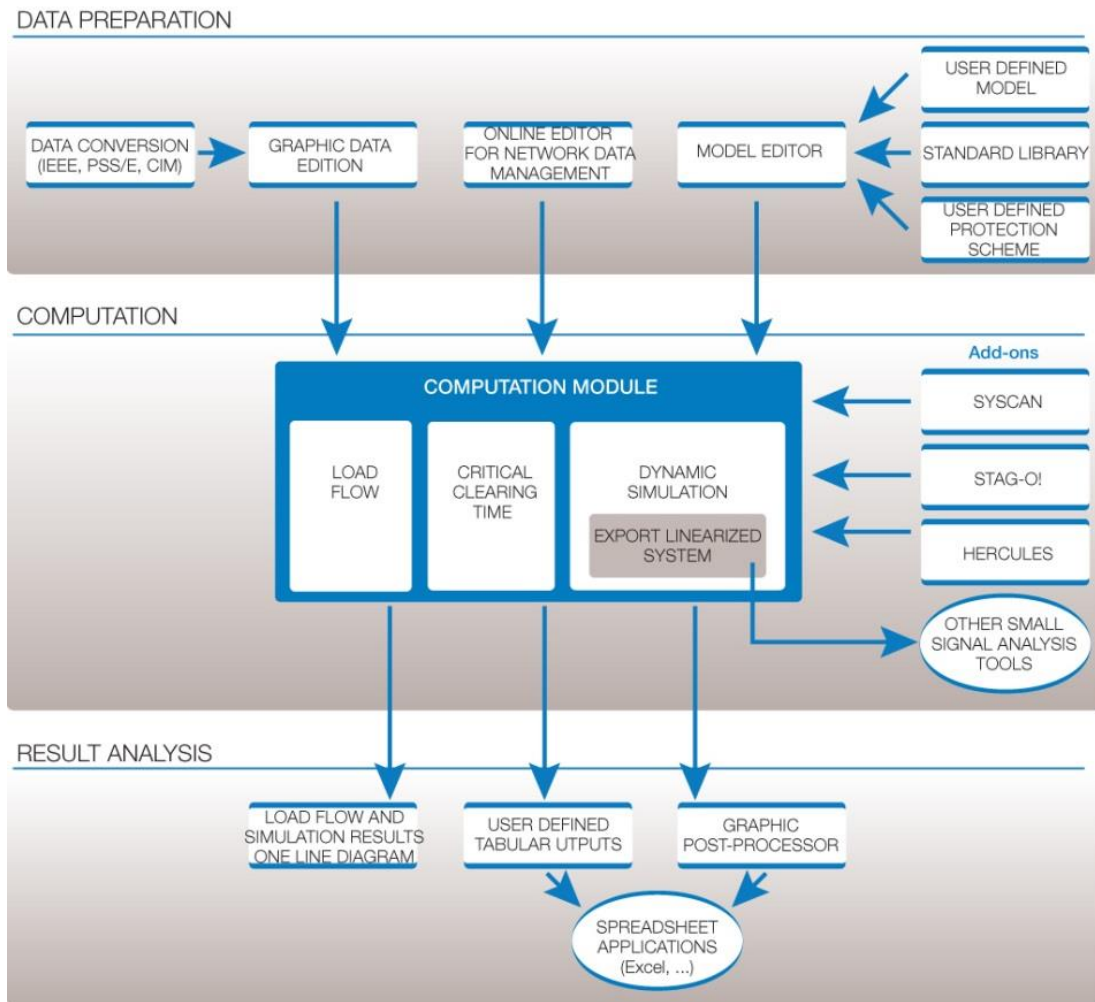
1. Έλεγχος της δυνατότητας διατήρησης συγχρονισμού, μετά από διάφορες διαταραχές.
2. Διαμόρφωση στρατηγικών σε δίκτυα, σε περιπτώσεις απόρριψης φορτίου.

3. Μελέτη της συμπεριφοράς του δικτύου, κάτω από ασταθείς συνθήκες (προληπτική ασφάλεια).
4. Μελέτη της συμπεριφοράς του δικτύου, κάτω από ακραίες ή έκτακτες συνθήκες, π.χ. κατάρρευση τάσης , απώλεια συγχρονισμού , επανασυγχρονισμό κ.τ.λ.
5. Μελέτη της δυναμικής ευστάθειας των μηχανών με την δυνατότητα ρυθμίσεων, καθώς και προσαρμογή του συστήματος μετάδοσης τους, γύρω από συγκεκριμένο λειτουργικό σημείο του συστήματος.
6. Σχεδιασμός και ρύθμιση των τοπικών συστημάτων ελέγχου (ρυθμιστές στρωφών GOV και τάσης AVR, καθώς και έλεγχος των λήψεων των μετασχηματιστών TAPS).
7. Σχεδιασμός και καθορισμός των συστημάτων προστασίας σταθμών παραγωγής και δικτύων διανομής.

Όπως προαναφέρθηκε το EUROSTAG βασίζεται σε έναν επαναληπτικό αλγόριθμο με χρονομεταβλητό βήμα και είναι κατάλληλο για την μελέτη βραχυπρόθεσμων, αλλά και μακροπρόθεσμων μεταβατικών φαινομένων. Έτσι, οι μελέτες μεταβατικής ευστάθειας (φαινόμενα που διαρκούν από μερικά msec έως μερικά δευτερόλεπτα) , καθώς και οι μακροπρόθεσμες δυναμικές μελέτες (αλλαγές που συμβαίνουν σε ένα διάστημα από μερικά δευτερόλεπτα έως κάποιες ώρες), καλύπτονται από την ίδια προσομοίωση.

Το EUROSTAG χωρίζεται στα ακόλουθα πέντε βασικά μέρη:

1. Από ένα πρόγραμμα ροής φορτίου (load flow), του οποίου τα αποτελέσματα χρησιμοποιούνται ως σημείο αναφοράς στην προσομοίωση.
2. Από ένα διαδραστικό προσομοιωτή, που επιτρέπει στον χρήστη να απεικονίζει τις διάφορες μεταβλητές, αλλά και να επεμβαίνει στη διαδικασία κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης.
3. Από ένα γραφικό προ-επεξεργαστή, που επιτρέπει την εισαγωγή νέων μοντέλων χρησιμοποιώντας σχήματα μπλοκ διαγραμμάτων.
4. Από ένα γραφικό επεξεργαστή, ο οποίος χρησιμοποιείται για την ανάλυση των αποτελεσμάτων, μετά το πέρας της προσομοίωσης.
5. Από ένα τμήμα για την αξιοποίηση των αποτελεσμάτων, (μέσω παραμετρικού προσδιορισμού φίλτρων και δημιουργίας πινάκων).



Εικόνα 12 – Πλατφόρμα Eurostag

Ιδιαίτερη σημασία στην τεχνική περιγραφή του λογισμικού EUROSTAG , έχει ο τρόπος με τον οποίο εισάγονται τα δεδομένα στο μοντέλο. Αυτό γίνεται με την δημιουργία και τον χειρισμό, τριών τύπων αρχείων:

1. Του αρχείου **.ech**, που περιλαμβάνει την τοπολογία του δικτύου με τους ζυγούς τάσεων (και τις παραγόμενες ή καταναλισκόμενες ισχύς τους), τις γραμμές μεταφοράς του ρεύματος, τους μετασχηματιστές , τους πυκνωτές αντιστάθμισης, τα φορτία του συστήματος και τις σύγχρονες γεννήτριες των ηλεκτροπαραγωγών σταθμών. Τα ηλεκτρικά οχήματα (EVs) παρίστανται με την μορφή φορτίου, το οποίο ανταλλάσει άεργο ισχύ ή ενεργό ισχύ με το δίκτυο.
2. Του αρχείου **.dta**, που περιλαμβάνει τόσο τα χαρακτηριστικά, όσο και τους ρυθμιστές στροφών και τάσης των σύγχρονων γεννητριών του συστήματος, καθώς και τους ελεγκτές που ρυθμίζουν το ρυθμό φόρτισης των μπαταριών των ηλεκτρικών οχημάτων. Τα ηλεκτρικά οχήματα στο αρχείο **.dta**, αναφέρονται ως μηχανές επαγωγής.
3. Του αρχείου **.seq**, που περιλαμβάνει τις διαταραχές που ενδέχεται να προκληθούν στο σύστημα, π.χ η αλλαγή του φορτίου σε έναν κόμβο, καθώς και τις παραμέτρους που ορίζουν την ακρίβεια της επαναληπτικής μεθόδου, που χρησιμοποιείται κατά την διάρκεια των προσομοιώσεων.



## 5.3 Μοντέλα

Το Eurostag προσφέρει μία πληθώρα από μοντέλα συσκευών και ελεγκτών που απαρτίζουν ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Τα μοντέλα αυτά μπορούν είτε να χρησιμοποιηθούν απευθείας ή να τροποποιηθούν χρησιμοποιώντας ένα γραφικό περιβάλλον μοντελοποίησης το οποίο παράγει αυτόματα τις αντίστοιχες εξισώσεις που το περιγράφουν. Το Eurostag προσφέρει μία μεγάλη βιβλιοθήκη από υψηλής πιστότητας μοντέλα στοιχείων που απαρτίζουν ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, τόσο στους τομείς παραγωγής και μεταφοράς όσο και στον τομέα της κατανάλωσης.

Ειδικότερα:

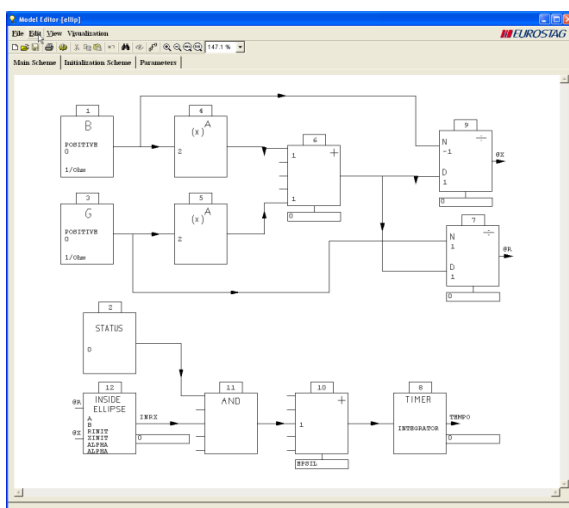
- Παραγωγή: αναπαρίστανται σύγχρονες μηχανές, ασύγχρονες μηχανές, injectors και μετατροπείς ισχύος . Συγκεκριμένα:
  - Οι σύγχρονες μηχανές μοντελοποιούνται με βάση το μοντέλο Park, όπου ο δρομέας των μηχανών παριστάνεται από τέσσερα ισοδύναμα ελίγματα. Μοντελοποιείται επίσης ο μαγνητικός κορεσμός και στους δύο άξονες. Αναφορικά με την μηχανική κίνηση των γεννητριών , οι κινήσεις του δρομέα καθορίζονται από την εξίσωση στρεφομένων μαζών, που συνδέει τη διαφορά ανάμεσα σε μηχανική και ηλεκτρική ροπή με την μεταβολή στην ταχύτητα περιστροφής. Τα χαρακτηριστικά της γεννήτριας καθορίζονται εξωτερικά (αντιδράσεις και σταθερές χρόνου) ή εσωτερικά (αμοιβαίες επαγωγές και αντιστάσεις), ανάλογα με το τι θα επιλέξει ο χρήστης.
  - Οι μηχανές επαγωγής μπορούν να μοντελοποιηθούν σύμφωνα με την πλήρη ή την απλοποιημένη αναπαράσταση, στην οποία η δυναμική συμπεριφορά της μαγνητικής ροής του δρομέα υπολογίζεται υποθέτοντας τον τύπο διπλού κλωβού.
  - Τέλος, οι μετατροπείς (converters) είναι σχεδιασμένοι να μοντελοποιούν μετατροπείς πηγής τάσεως, ικανούς να τροφοδοτούν και να ρυθμίζουν τη συχνότητα σε ένα απομονωμένο δίκτυο χωρίς κάποια σύγχρονη μηχανή ή άπειρο ζυγό.
- Μεταφορά: περιλαμβάνονται τα στοιχεία που αφορούν το δίκτυο μεταφοράς και διανομής, συμπεριλαμβανομένων και πιο νέων τεχνολογιών όπως τα συστήματα HVDC.
  - Συνδέσεις συνεχούς ρεύματος μπορούν να μοντελοποιηθούν στο Eurostag προκειμένου να προσομοιωθούν πολυτεμαχικά συστήματα HVDC. Το DC σύστημα αποτελείται κυρίως από δύο μέρη: τους μετατροπείς με τους αντίστοιχους ελεγκτές και το δίκτυο DC.
  - Υπάρχουν διάφοροι τύποι μετασχηματιστών, όπως οι απλοί μετασχηματιστές, οι αυτομετασχηματιστές και οι μετασχηματιστές με taps, με πλήρη μοντέλα που λαμβάνουν υπ' όψιν τις απώλειες σιδήρου

και χαλκού, τον κορεσμό, τις τάσεις βραχυκύκλωσης και τους λόγους μετασχηματισμού.

- Η δυνατότητα μοντελοποίησης ασύμμετρων συστημάτων προσφέρει τη δυνατότητα να μελετηθούν και να αναλυθούν οι δυναμικές συμπεριφορές ανεξάρτητα από τον αριθμό των ασύμμετρων διαταραχών.
- **Κατανάλωση:** περιλαμβάνονται διάφοροι προκαθορισμένοι τύποι φορτίου, τους οποίους μπορεί ο χρήστης να χρησιμοποιήσει ως έχουν ή να τους τροποποιήσει.
  - Μπορούν να οριστούν συγκεκριμένα μοντέλα συμπεριφοράς φορτίων ή υποφορτίων μιας συγκεκριμένης περιοχής (για παράδειγμα, βιομηχανικό, οικιακό κτλ.) τα οποία εφαρμόζονται είτε σε κάποιο συγκεκριμένο κόμβο, είτε σε μία περιοχή είτε σε ολόκληρο το δίκτυο.
  - Ταυτόχρονα υπάρχει η δυνατότητα μοντελοποίησης στρεφόμενων φορτίων, χρησιμοποιώντας τα ήδη υπάρχοντα μοντέλα ασύγχρονων μηχανών.
- **Συστήματα προστασίας:** περιλαμβάνονται διάφοροι τύποι προστασίας, οι οποίοι βασίζονται είτε σε μετρήσεις στο δίκτυο, είτε υλοποιούν κάποια συγκεκριμένη τεχνική προστασίας, η οποία ορίζεται από τον χρήστη.

## 5.4. Επιπλέον στοιχεία του Eurostag

### 5.4.1. Μοντέλα οριζόμενα από τον χρήστη - Model editor

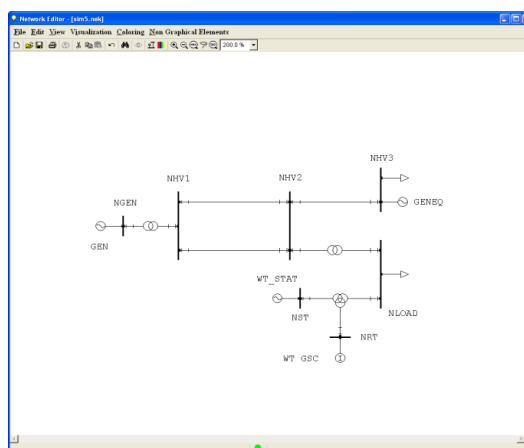


Εικόνα 13 - Model Editor

Το ενσωματωμένο model editor δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να κατασκευάσει τα δικά του μοντέλα (που στο EUROSTAG ονομάζονται Macroblocks) όπως ελεγκτές, προστασίες κτλ, με γραφικό και διαδραστικό τρόπο χωρίς να υπάρχει ανάγκη για συγγραφή κώδικα ή debugging. Τα προαναφερόμενα μοντέλα αποθηκεύονται σε ειδική βιβλιοθήκη, η οποία εξαρχής περιέχει και μερικά άλλα τυποποιημένα μοντέλα (IEEE, SVC, HVDC κ.τ.λ.).

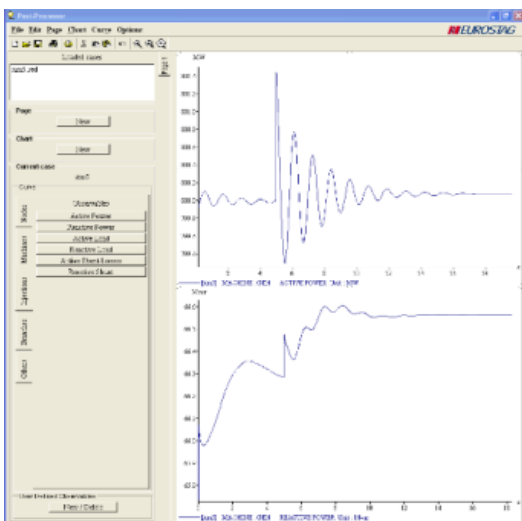
## 5.4.2. Network Editor - Σχηματική απεικόνιση του δικτύου

Το Network Editor επιτρέπει στον χρήστη να σχεδιάσει μία σχηματική απεικόνιση του δικτύου που επιθυμεί να προσομοιώσει, ενώ παράλληλα του δίνει τη δυνατότητα να έχει πρόσβαση σε όλες τις παραμέτρους των στοιχείων που το απαρτίζουν. Από το ίδιο module μπορεί να τρέξει άμεσα την ροή φορτίου και να δει τα αποτελέσματα στην οθόνη.



Εικόνα 14 - Network Editor

## 5.4.3. Post-Processor - Ανάλυση αποτελεσμάτων

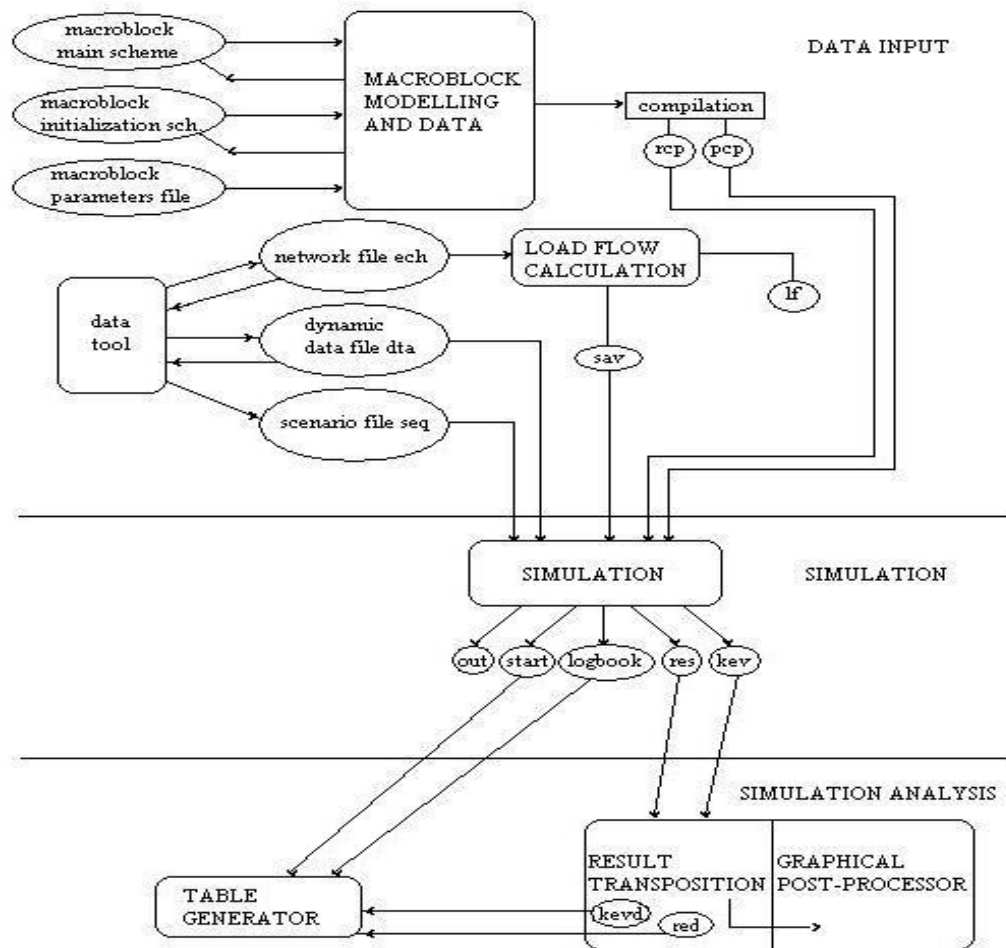


Εικόνα 15 - Post Processor

Το module «**Post-Processor**» περιλαμβάνει τη λειτουργία της επεξεργασίας των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων. Οποιαδήποτε μεταβλητή ή παράμετρος που χρησιμοποιήθηκε στο πρόβλημα, ανεξάρτητα εάν υπήρχε ήδη στα έτοιμα μοντέλα ή εάν την εισήγαγε ο χρήστης, μπορεί να αποδοθεί σε κάποιο διάγραμμα με προδιαγραφές που ορίζει ο χρήστης.

Ταυτόχρονα δίνει τη δυνατότητα για εξαγωγή των αποτελεσμάτων σε πίνακες (tabular output), προκειμένου να μπορεί να έχει ο χρήστης μία πιο σύνθετη σκοπιά στα δεδομένα που προέκυψαν. Λόγω των παραπάνω λοιπόν, διευκολύνεται και απλοποιείται η ανάλυση και η παρουσίαση των αποτελεσμάτων.

Συμπερασματικά λοιπόν, το ολοκληρωμένο πακέτο λογισμικού Eurostag απεικονίζεται στο παρακάτω διάγραμμα:



Εικόνα 16 - Πλατφόρμα Eurostag με τους διάφορους τύπους αρχείων

Όπως παρατηρούμε και από το σχήμα, το EUROSTAG χρησιμοποιώντας το αρχείο .ech, σαν το κύριο αρχείο δεδομένων, το οποίο εμπεριέχει την αναπαράσταση του ηλεκτρικού δικτύου, μπορεί κατ' ευθείαν να διεξάγει τον υπολογισμό της ροής φορτίου στο σύστημα. Τα αποτελέσματα της ροής φορτίου, παρουσιάζονται στο αρχείο .if του EUROSTAG, από το οποίο μπορεί να τα δει ο χρήστης. Μετά το πέρας του υπολογισμού της ροής φορτίου, δημιουργείται το αρχείο .sav (το οποίο περιέχει τα αποτελέσματα της ροής φορτίου, για εσωτερική όμως χρήση από το πρόγραμμα).

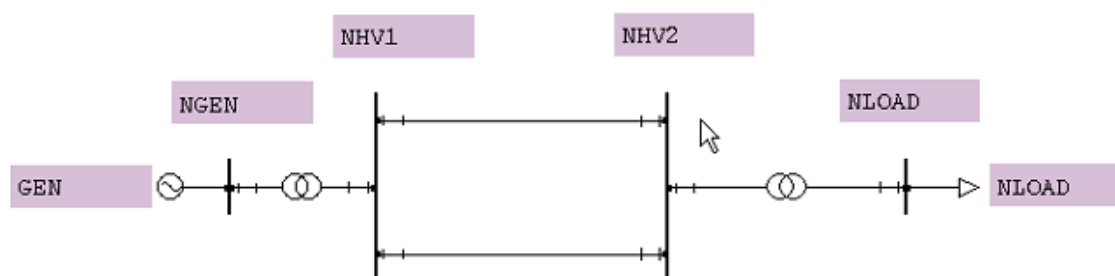
Στην συνέχεια το EUROSTAG , χρησιμοποιεί τα αρχεία .sav, .dta και .seq, λαμβάνοντας υπ' όψιν και τα αρχεία .rcp και .pcp , για να προσομοιώσει την λειτουργία του συστήματος. Εδώ θα πρέπει να αναφερθεί ότι τα αρχεία .rcp και .pcp , δημιουργούνται μέσω του model editor (macroblock editor), αφού προηγουμένως γίνει μεταγλώττιση (compilation), των ρυθμιστών στροφών και τάσης ή άλλων ελεγκτών που έχουν δημιουργηθεί εκεί.

Μετά το πέρας της προσομοίωσης, τα ακατέργαστα αποτελέσματα της αποθηκεύονται στα αρχεία .kev και .res, όπου στην συνέχεια γίνονται κατεργασμένα αποτελέσματα (αρχεία .kevд και .red αντίστοιχα) , τα οποία παρουσιάζονται μέσω του γραφικού επεξεργαστή (υπό μορφή διαγραμμάτων) και μέσω του τμήματος δημιουργίας πινάκων, με την βοήθεια των αρχείων .start και .logbook. Στο αρχείο .out περιέχονται τα δυναμικά δεδομένα του αρχείου .dta, καθώς και μια περίληψη της προσομοίωσης, μαζί με τα μηνύματα σφαλμάτων, τα οποία πιθανότητα συνέβησαν κατά την εκτέλεση της επαναληπτικής μεθόδου.

## 6. Προσομοιώσεις

### 6.1. Δίκτυο προσομοίωσης

Προκειμένου να ελέγξουμε την επίδραση της τεχνικής ελέγχου που παρουσιάσαμε στο κεφάλαιο 4 στο ηλεκτρικό δίκτυο θεωρούμε το παρακάτω απλό παράδειγμα το οποίο αποτελείται από μία σύγχρονη γεννήτρια, έναν μετασχηματιστή ανύψωσης, δύο παράλληλες γραμμές μεταφοράς, έναν μετασχηματιστή με ΣΑΤΥΦ (Σύστημα αλλαγής τάσης υπό φορτίο) και ένα φορτίο.

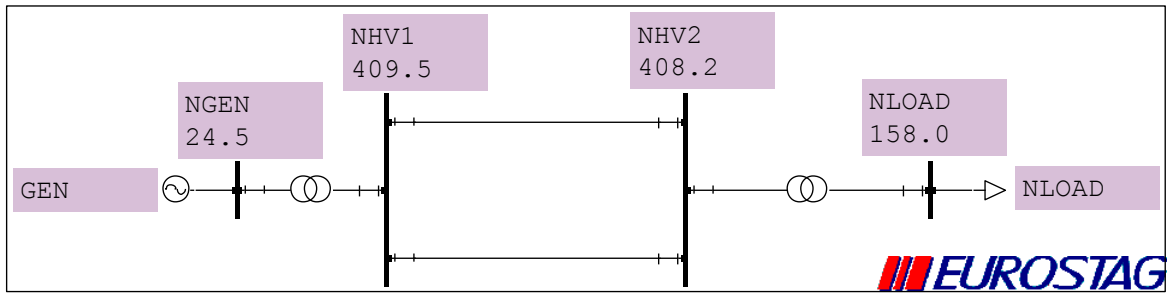


Εικόνα 17 - Δίκτυο προσομοίωσης

Η σύγχρονη γεννήτρια είναι ονομαστικής ισχύος 550 MW και ονομαστικής τάσεως 24KV. Ο μετασχηματιστής NGEN-NHV1 είναι σταθερού λόγου και ονομαστικής ισχύος 1300MVA. Οι δύο παράλληλες γραμμές μεταφοράς είναι όμοιες με ονομαστική ισχύ μεταφοράς 1000 MVA η κάθε μία. Ο δεύτερος μετασχηματιστής είναι εξοπλισμένος με ΣΑΤΥΦ ονομαστικής ισχύος 1000 MVA και ρυθμισμένος έτσι ώστε να διατηρεί την τάση στο ζυγό NLOAD ίση με 158KV. Το φορτίο που είναι συνδεδεμένο στον τελευταίο είναι ίσο με  $S_L=300MW + 50MVA_r$ .

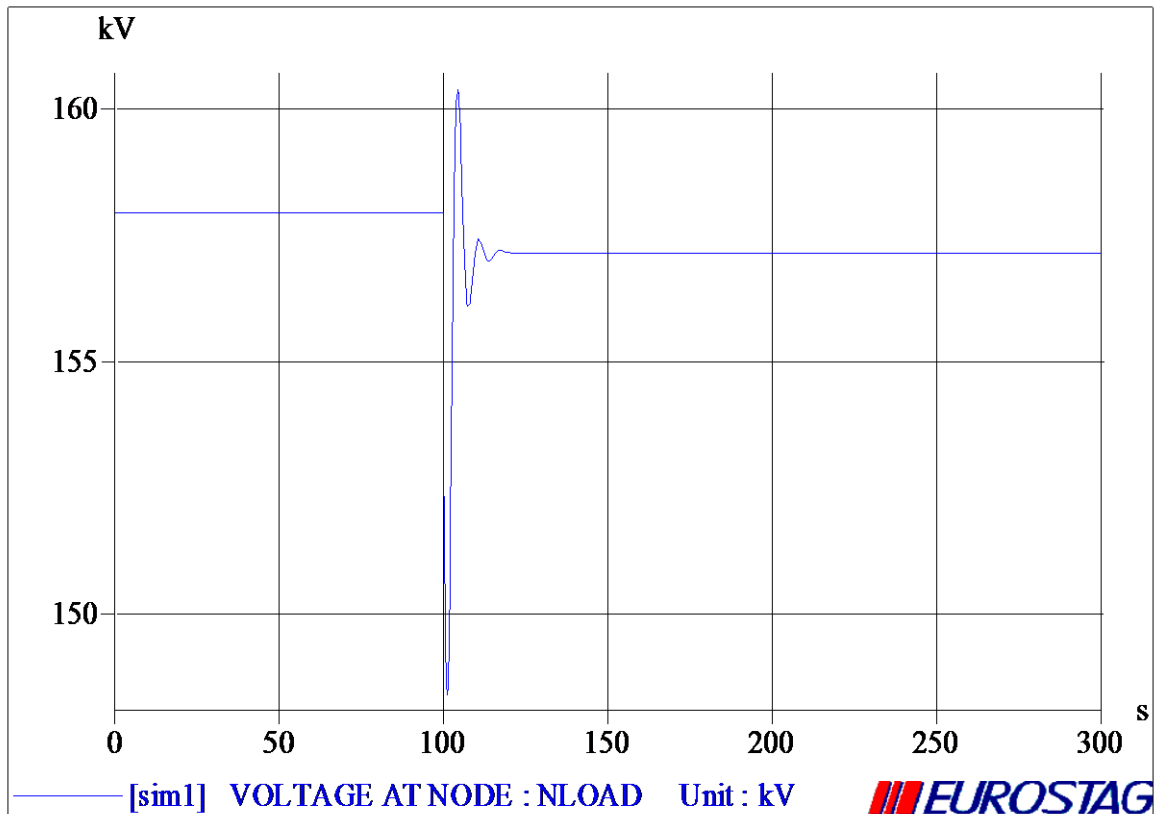
Σε αυτό το ηλεκτρικό δίκτυο τόσο το φορτίο όσο και οι απώλειες των γραμμών και των μετασχηματιστών τροφοδοτούνται αποκλειστικά από τη γεννήτρια, η οποία έχει τον ρόλο του ρυθμιστή της τάσης και της συχνότητας.

Προτού μελετήσουμε τα δυναμικά φαινόμενα απαιτείται να χρησιμοποιήσουμε το εργαλείο υπολογισμού ροής φορτίου του Eurostag. Έτσι προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα:



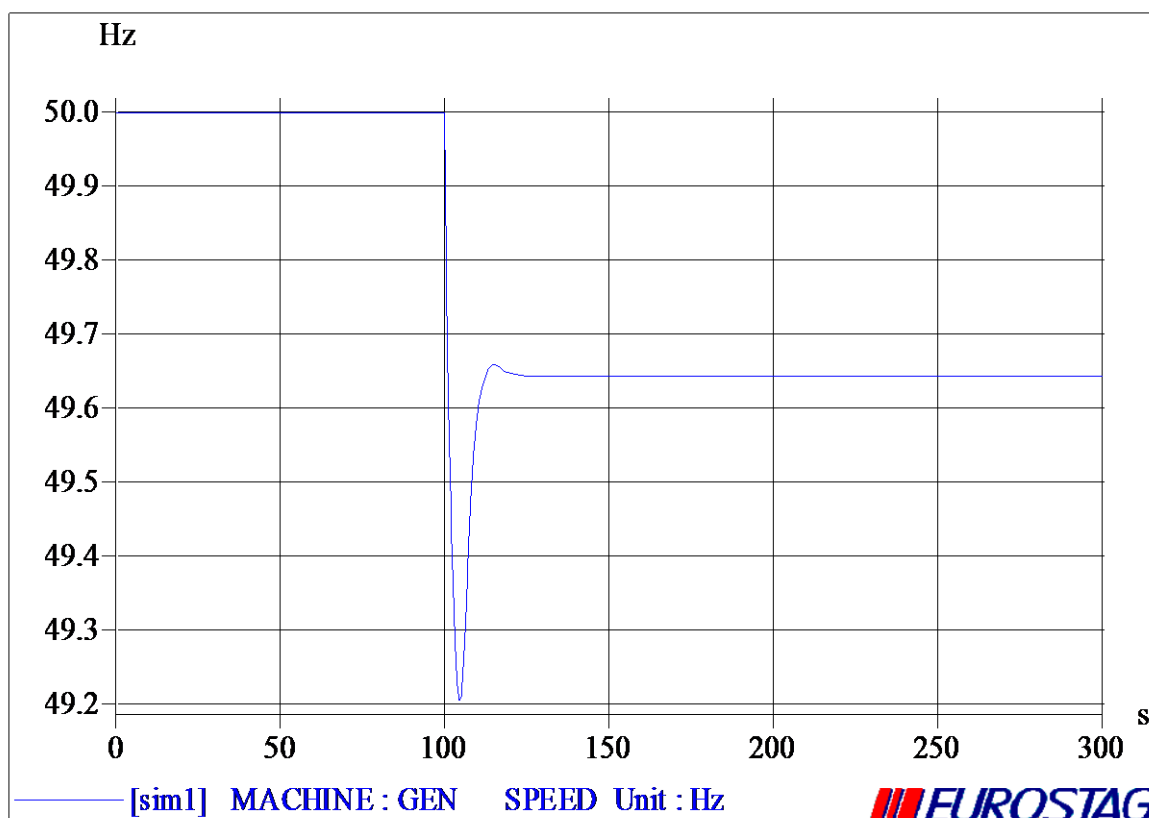
Εικόνα 18 - Δίκτυο προσομοίωσης με υπολογισμένες τις τάσεις των ζυγών

Προκειμένου να ελέγξουμε την απόκριση του συστήματος σε μεταβολές του φορτίου εκτελούμε μία προσομοίωση για μεταβολή+30% της ενεργής ισχύος του φορτίου. Επομένως το νέο φορτίο είναι  $S_L=890\text{MW}+50\text{MVA}_r$ . Στα παρακάτω διαγράμματα φαίνεται η απόκριση της συχνότητας, της τάσης και της ισχύος της γεννήτριας.



Στον κόμβο NLOAD που βρίσκεται το φορτίο παρατηρούμε ότι η τάση πέφτει τη στιγμή της μεταβολής του φορτίου σε μία ελάχιστη τιμή (~147KV) και από εκεί και πέρα, λόγω της επίδρασης του ρυθμιστή τάσης επανέρχεται στα 154 KV μετά από κάποιες ταλαντώσεις.

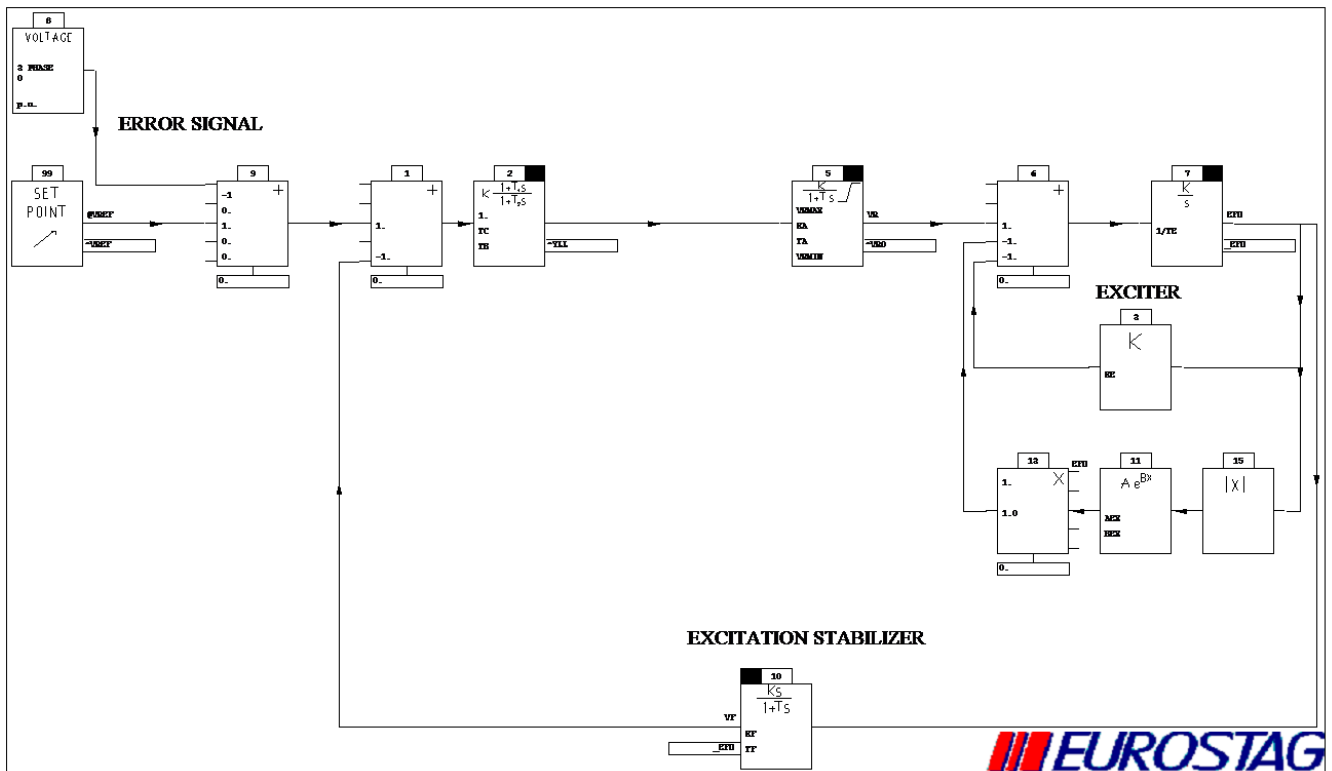
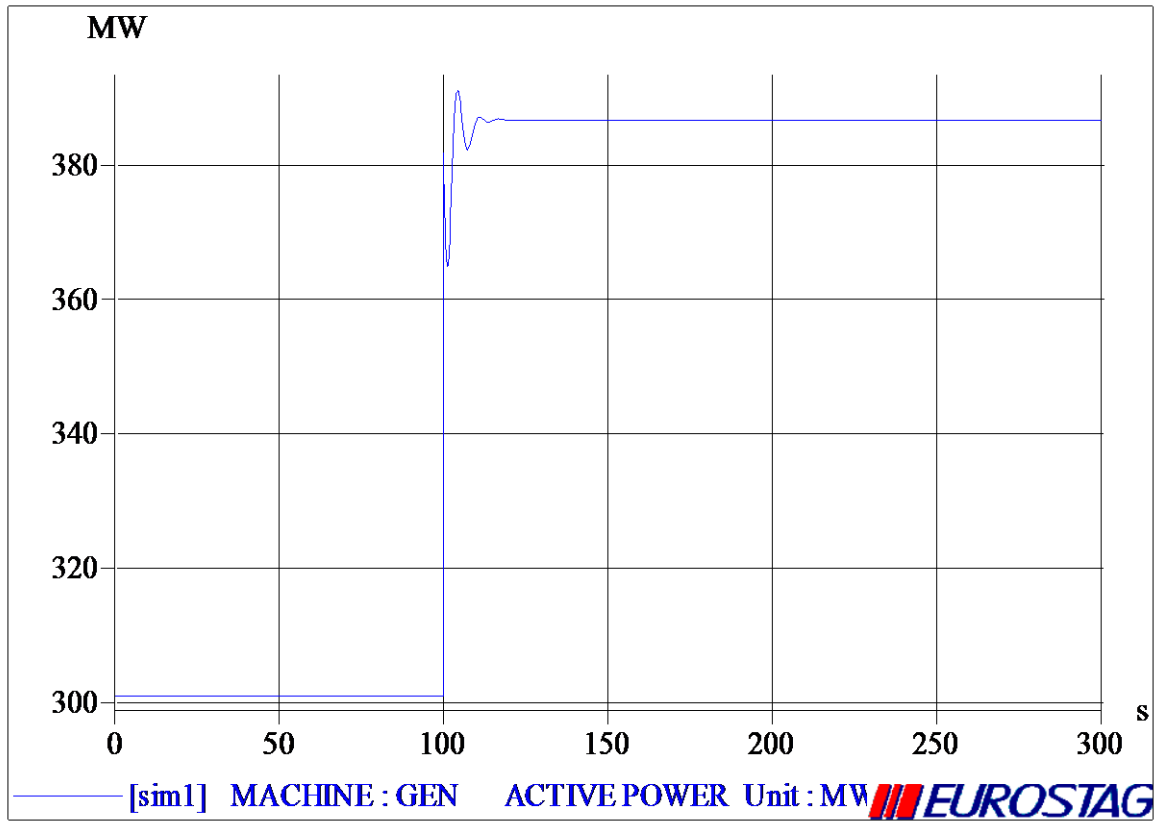
Στο χρόνο  $t=100s$  πραγματοποιείται η μεταβολή φορτίου. Παρατηρούμε μία μεταβατική πτώση της συχνότητας περίπου στα 49,13Hz και κατόπιν σταθεροποίηση της συχνότητας γύρω από τα 49,63Hz. Το μεταβατικό αυτό φαινόμενο έχει διάρκεια περίπου 25 δευτερόλεπτα.



Όπως αναμέναμε, η συχνότητα δεν επανέρχεται στα 50Hz αλλά σταθεροποιείται σε χαμηλότερη τιμή. Αυτό συμβαίνει διότι η γεννήτρια κάνει πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας μόνο. Σε ένα πραγματικό δίκτυο, οι μονάδες που εκτελούν τη δευτερεύουσα ρύθμιση, θα αναλάμβαναν να επαναφέρουν τη συχνότητα στα 50Hz.

Στο διάγραμμα της ισχύος, όπως φαίνεται στην επόμενη σελίδα, παρατηρούμε παρόμοια κυματομορφή και αντίστοιχη διάρκεια του μεταβατικού φαινομένου. Έτσι γίνεται εμφανής η σχέση της συχνότητας με την ενεργό ισχύ που εγχέει η γεννήτρια στο δίκτυο. Παρατηρούμε επίσης ότι η ισχύς κάνει μία ταλάντωση μικρού πλάτους προτού σταθεροποιηθεί, πράγμα που οφείλεται στις ταλαντώσεις της τάσεως.

Για λόγους πληρότητας παραθέτουμε και τα Macroblocks (μπλοκ διαγράμματα) του ρυθμιστή τάσης και ρυθμιστή στροφών της συγκεκριμένης γεννήτριας καθώς και τις τιμές των παραμέτρων τους.

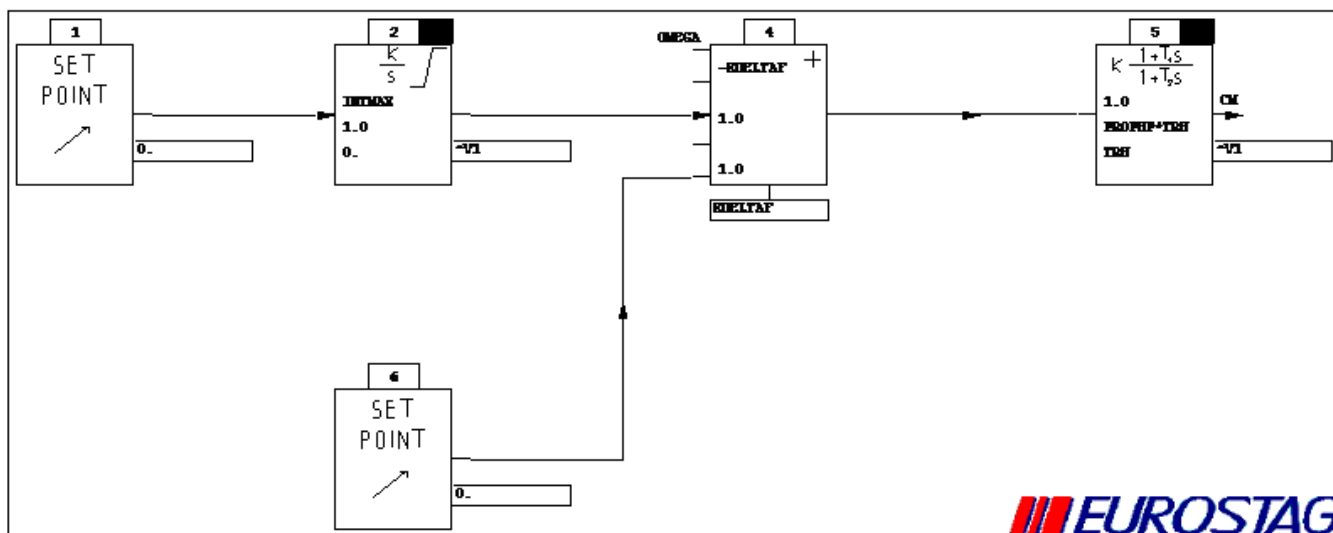


Εικόνα 19 - Ρυθμιστής Τάσης



	Set 1
AEX	0.003300
BEX	1.303000
KA	50.000000
KE	0.000000
KF	0.200000
TA	0.050000
TB	1.000000
TC	1.000000
TE	1.000000
TF	1.000000
VRMAX	3.500000
VRMIN	-3.500000

Πίνακας 3 - Παράμετροι του ρυθμιστή τάσης



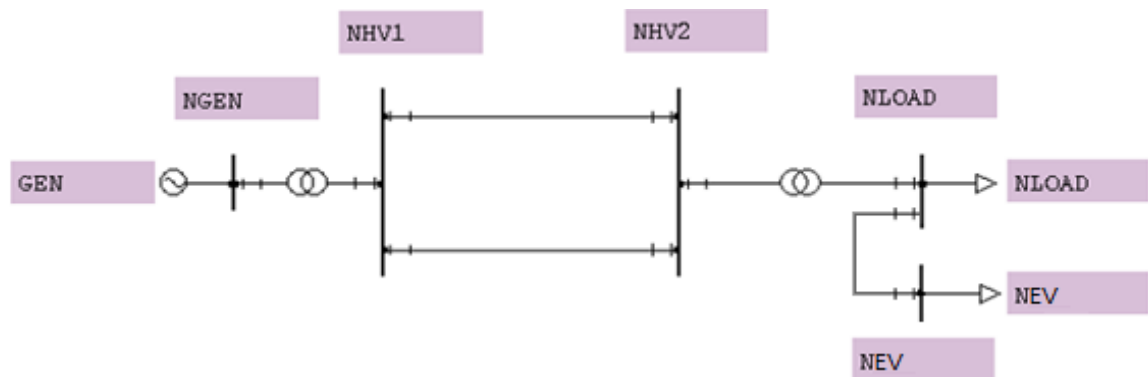
Εικόνα 20 - Ρυθμιστής Στροφών

	Set 1
INTMAX	1.100000
KDELTA	25.000000
PROPHP	0.300000
TRH	10.000000

Πίνακας 4 - Παράμετροι του ρυθμιστή στροφών

Το δίκτυο στο οποίο εφαρμόσαμε τις προσομοιώσεις είναι το απλό δίκτυο του προηγούμενου κεφαλαίο με την προσθήκη του κόμβου NEV ο οποίος συνδέεται με τον κόμβο NLOAD μέσω μίας γραμμής όμοιας με τις υπόλοιπες γραμμές του δικτύου.

Ο κόμβος NEV αντιπροσωπεύει στην πραγματικότητα έναν σταθμό φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων. Για τις προσομοιώσεις δεν μας ενδιαφέρει πώς λειτουργεί στο εσωτερικό του ο σταθμός. Θεωρείται ως ένα «ενεργό» φορτίο, δηλαδή φορτίο που μπορεί να μεταβάλλεται ανάλογα με τα σήματα ελέγχου που δέχεται.



Εικόνα 21 - Δίκτυο που περιλαμβάνει τον κόμβο NEV των ηλεκτρικών οχημάτων

Το σύστημα ελέγχου μοντελοποιημένο στο Eurostag βρίσκεται στην επόμενη σελίδα. Οι τιμές των παραμέτρων του μοντέλου δίνονται στον παρακάτω πίνακα:

	Ερμηνεία	Τιμή παραμέτρου
Ccap	Χωρητικότητα μπαταρίας (KAh)	0,142
K	Μέγιστος συντελεστής κέρδους (KA/Hz)	15
OMEGAREF	Συχνότητα αναφοράς ανά μονάδα	1
RSERIES	Αντίσταση σειράς (Ω)	0,01
RTCT	Μεταβατική Αντίσταση * Μεταβατική χωρητικότητα (Ω*F)	0,001
RTT	Μεταβατική Αντίσταση(Ω)	0,001
TD	Καθυστέρηση ενεργοποίησης V2G (s)	3,5
TDEL	Βοηθητική παράμετρος (s)	0,1
TF	Σταθερά χρόνου του φίλτρου της μπαταρίας(s)	50
VEHNUM	Αριθμός οχημάτων	10.000
VITA	Συντελεστής πόλωσης συχνότητας (MW/Hz)	200

Πίνακας 5 - Παράμετροι μοντέλου Eurostag

Επίσης σε αυτό το στάδιο θεωρούμε ότι στον σταθμό συνδέονται 10.000 οχήματα με ίδια χαρακτηριστικά και ίδια κατάσταση φόρτισης. Τα χαρακτηριστικά των οχημάτων δίνονται στον παρακάτω πίνακα:

	Τιμή παραμέτρου
Αριθμός Οχημάτων	10.000
Χωρητικότητα μπαταρίας (KWh)	30
Dead Band συχνότητας (Hz)	[-0,05 , 0,05]
Μέγιστη Ισχύς V2G (KW)	7
Μέγιστη κλίση καμπύλης (KW/Hz)	67,5

Πίνακας 6 - Παράμετροι που αφορούν τα οχήματα



## 6.2. Battery SOC Holder

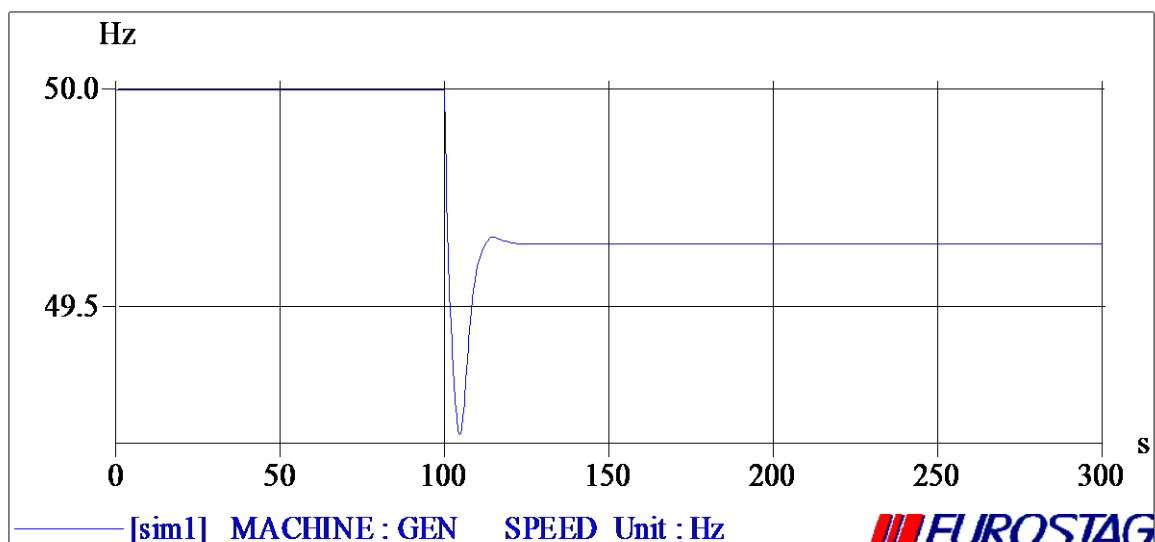
Προκειμένου να μελετήσουμε την επίδραση που θα έχει στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας η διείσδυση ηλεκτρικών οχημάτων V2G, εκτελέσαμε διάφορες προσομοιώσεις στο EUROSTAG έτσι ώστε να καλυφθούν όσο το δυνατόν περισσότερες καταστάσεις λειτουργίας. Συγκεκριμένα για τα οχήματα που συνδέονται στο δίκτυο χωρίς να επιθυμούν φόρτιση, μελετήσαμε τη συμβολή τους σε μία έντονη μεταβολή του φορτίου του δικτύου κατά +30% και κατά -30%. Τα μεγέθη που μας ενδιαφέρουν είναι η συχνότητα, η μεταφερόμενη ισχύ από ή προς το δίκτυο καθώς και η μεταβολή της κατάστασης φόρτισης της μπαταρίας.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, αρχικά μελετάμε την απόκριση του συστήματος για μία μεταβολή +30% του φορτίου στον κόμβο NLOAD. Η μεταβολή αυτή συμβαίνει τη χρονική στιγμή  $t=100s$  όπου το φορτίο από  $S_L = 300MW + 50MVar$  γίνεται  $S_L = 390MW + 50MVar$ . Μελετήθηκαν δύο διαφορετικές περιπτώσεις όσον αφορά την κατάσταση φόρτισης των οχημάτων,  $Soc_{in}=60\%$  και  $Soc_{in}=80\%$ . Σύμφωνα με το σχεδιασμό της τεχνικής ελέγχου, αναμένουμε να δούμε ότι για τη συγκεκριμένη μεταβολή, τα EVs προσφέρουν ισχύ προκειμένου να ενισχύσουν το δίκτυο να ανταποκριθεί στη ζήτηση. Όσο μεγαλύτερη η κατάσταση φόρτισης  $Soc_{in}$  τόσο πιο μεγάλη ισχύ αναμένουμε να προσφέρουν.

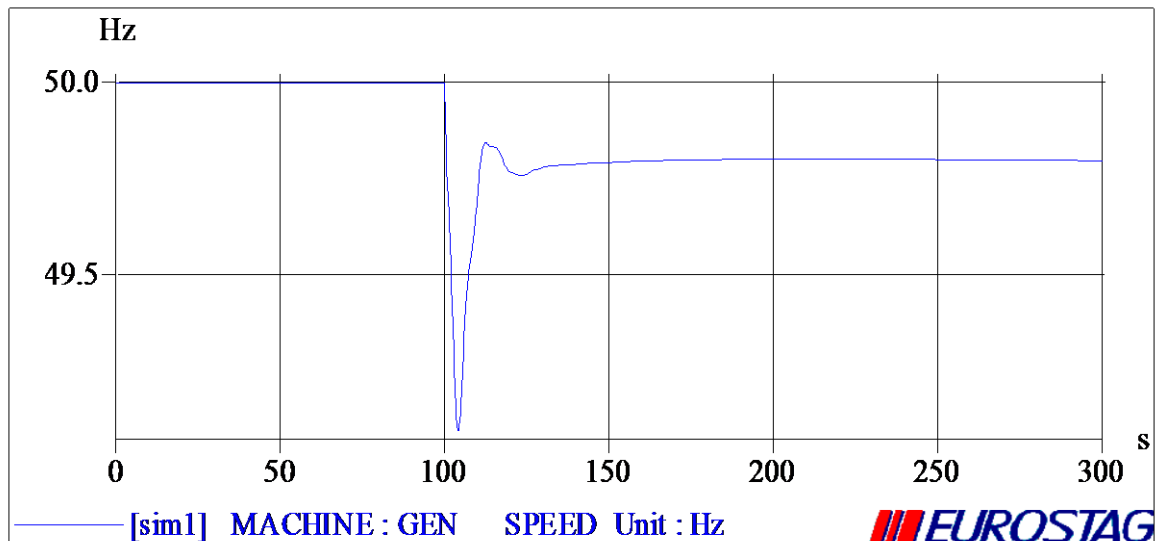
Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης είναι τα εξής:

### 1. Συχνότητα

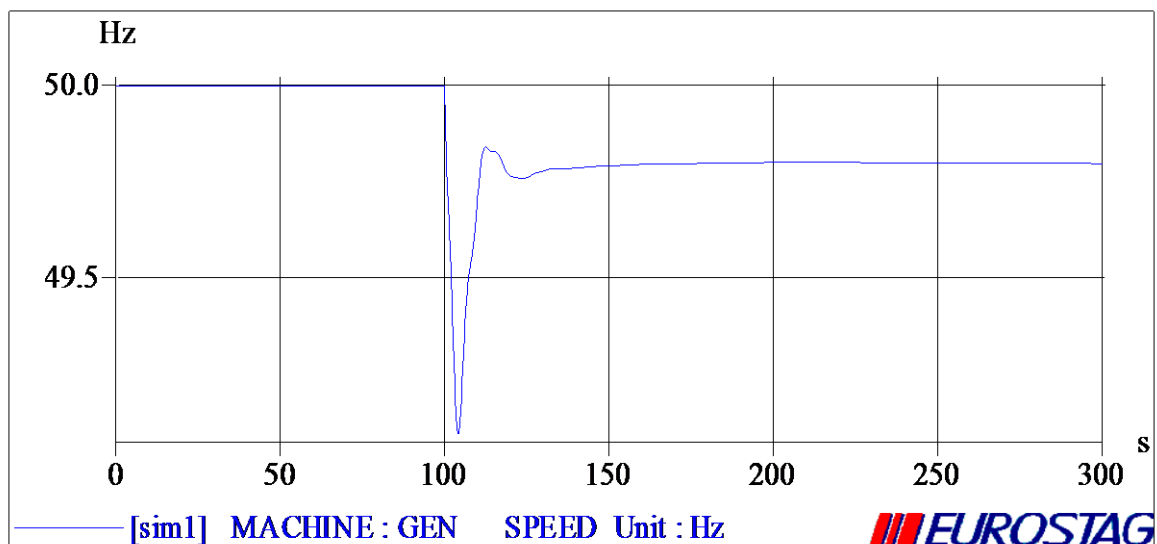
- Χωρίς EVs



- $SoC_{in}=60\%$



- $SoC_{in} 80\%$

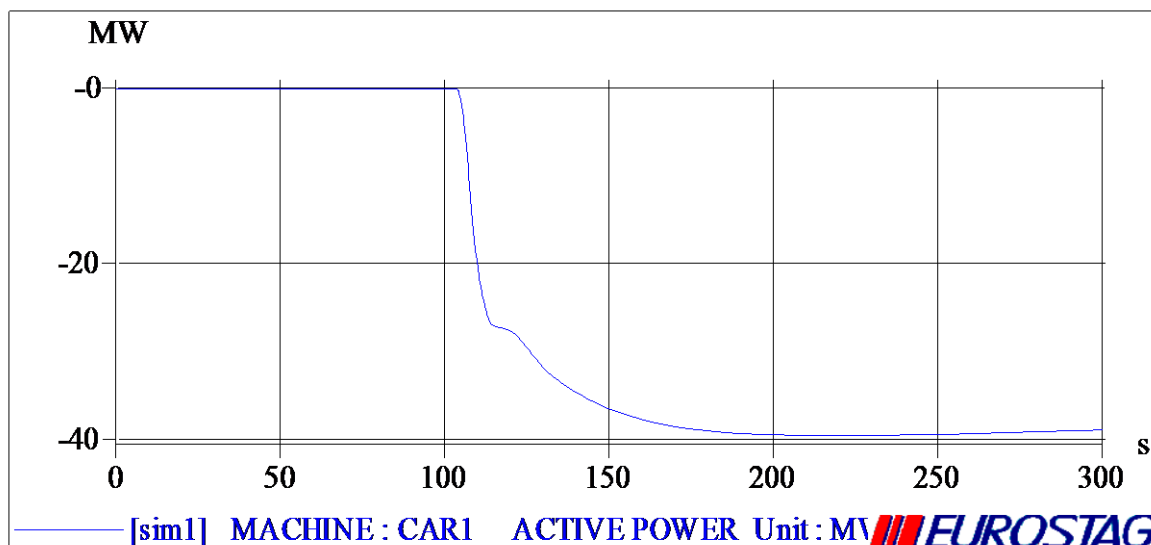


Παρατηρούμε ξεκάθαρα ότι η ύπαρξη και η συμμετοχή ηλεκτρικών οχημάτων στην πρωτεύουσα ρύθμιση της συχνότητας επιφέρει σημαντικά οφέλη. Χωρίς τα ηλεκτρικά οχήματα η συχνότητα σταθεροποιείται στα 49,6 Hz ενώ με τα ηλεκτρικά οχήματα περίπου στα 49,8Hz. Έτσι το έργο της δευτερεύουσας ρύθμισης θα είναι ακόμη πιο εύκολο, με αποτέλεσμα η συνολική ποιότητα ισχύος στο δίκτυο να είναι αισθητά βελτιωμένη. Σχετικά με τις ταλαντώσεις, η περίπτωση χωρίς EVs είναι πιο ομαλή και δεν έχει ταλαντώσεις, ενώ με τα EVs παρατηρούμε μία μικρή ταλάντωση η οποία οφείλεται στη ρύθμιση των παραμέτρων του συστήματος ελέγχου φόρτισης των οχημάτων. Επιλέχθηκαν οι συγκεκριμένες τιμές γιατί έτσι η συχνότητα σταθεροποιείται σε τιμή πολύ κοντά στην ονομαστική ενώ παράλληλα η ταλάντωση που εμφανίζεται είναι σχεδόν αμελητέα.

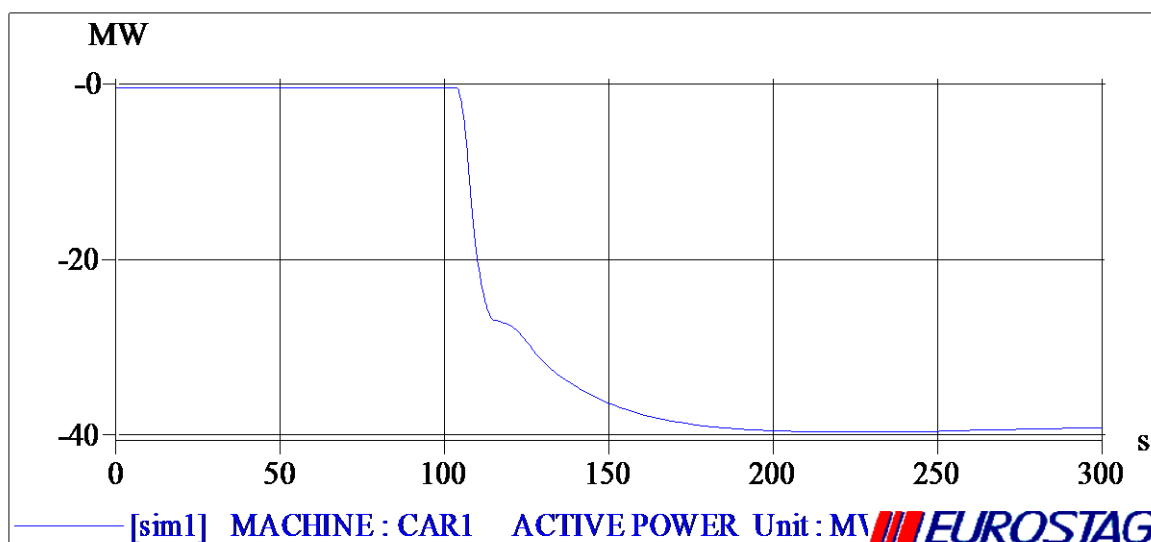
Η συμπεριφορά του συστήματος ελέγχου δεν διαφοροποιείται αισθητά για τις διαφορετικές καταστάσεις φόρτισης.

## 2. Ισχύς

- $SoC_{in}=60\%$



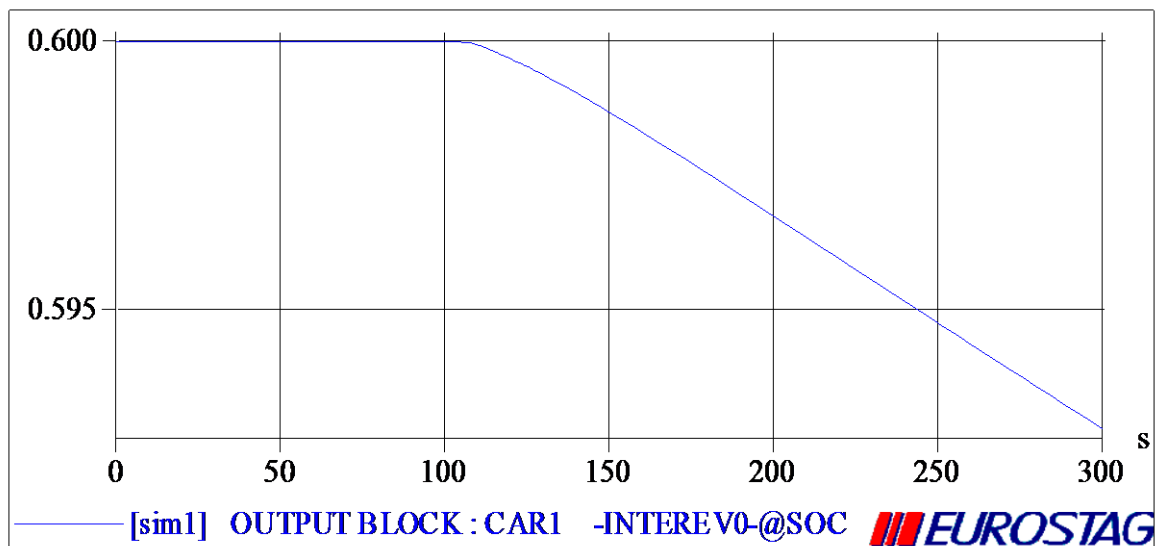
- $SoC_{in}=80\%$



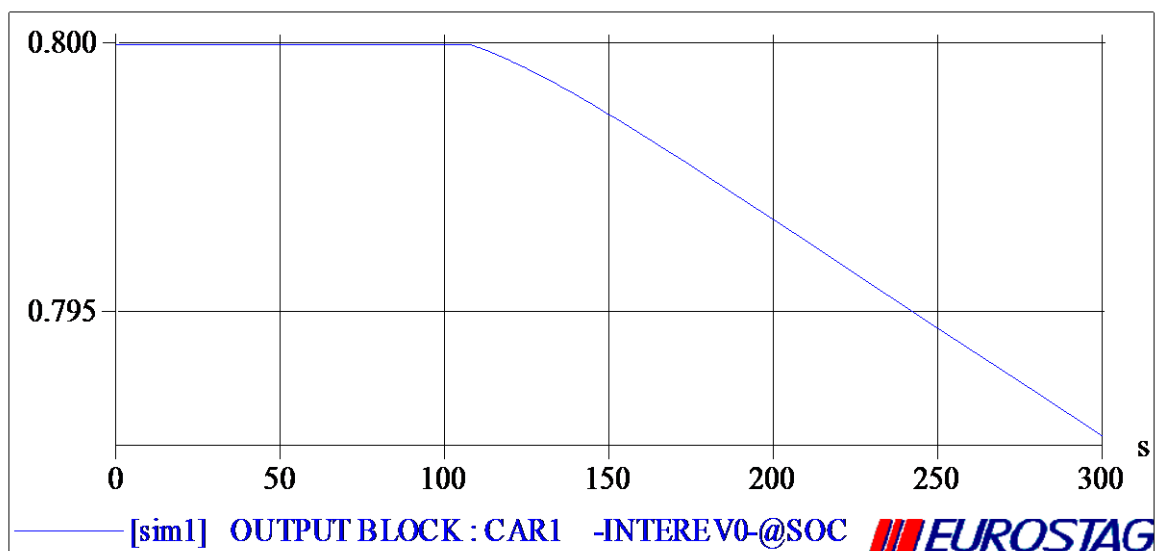
Η ισχύς που προσφέρουν τα οχήματα στο δίκτυο ακολουθεί τις παραπάνω πανομοιότυπες κυματομορφές, οι οποίες με τη σειρά τους ακολουθούν τις μεταβολές της συχνότητας. Παρατηρούμε ότι και στις δύο περιπτώσεις τα οχήματα προσφέρουν σχεδόν 40MW στη μόνιμη κατάσταση, υποστηρίζοντας με αυτόν τον τρόπο τις ανάγκες του δικτύου. Παρατηρούμε επίσης ότι προς το τέλος του χρόνου προσομοίωσης η ισχύς που προσφέρουν αρχίζει να μειώνεται. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι καθώς το όχημα απομακρύνεται από την επιθυμητή κατάσταση φόρτισης (SOC) (καθώς εκφορτίζεται) συμμετέχει όλο και λιγότερο στη ρύθμιση της συχνότητας.

### 3. Soc

- Soc<sub>in</sub>=60%



- Soc<sub>in</sub>=80%



Στα παραπάνω διαγράμματα φαίνεται ότι μετά τη στιγμή της μεταβολής του φορτίου, τα οχήματα αρχίζουν και προσφέρουν μέρος της αποθηκευμένης ενέργειας στο δίκτυο και κατά συνέπεια η κατάσταση φόρτισής τους μειώνεται σταδιακά. Τα παραπάνω διαγράμματα είναι πανομοιότυπα μιας και η ισχύς που προσφέρουν στο δίκτυο είναι σχεδόν ίδια (παραπάνω διάγραμμα) και επομένως η μεταβολή στην κατάσταση φόρτισής τους θα είναι και αυτή ίδια.

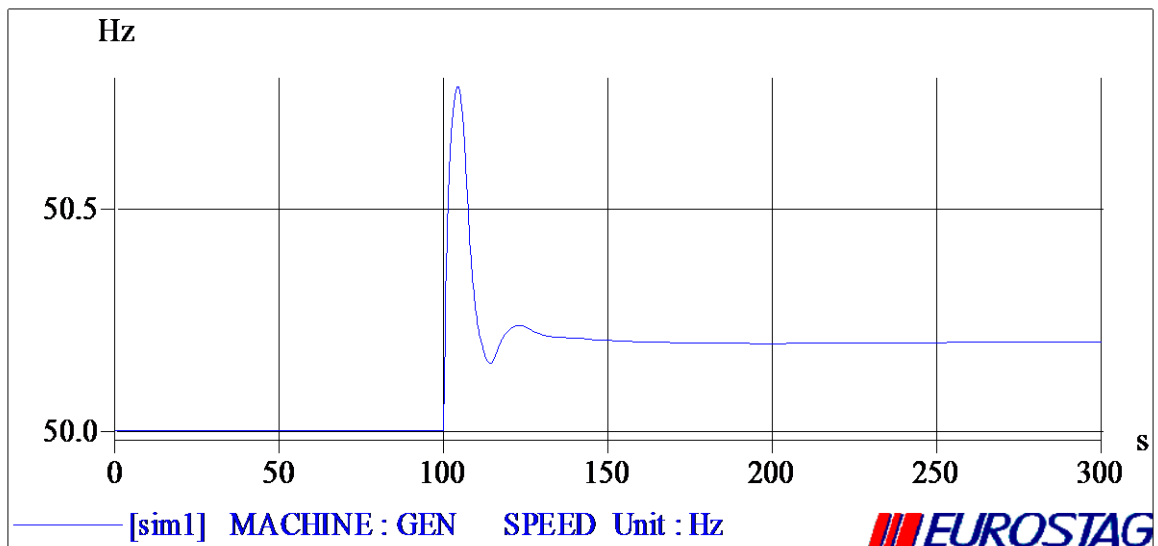
Στη συνέχεια εξετάσαμε την απόκριση του συστήματος για μεταβολή φορτίου - 30% στον κόμβο NLOAD. Δηλαδή το φορτίο από  $S_L = 300\text{MW} + 50\text{MVA}_r$  έγινε  $S_L = 210\text{MW} + 50\text{MVA}_r$ .

# 1. Συχνότητα

- Χωρίς Evs



- $SoC_{in}=60\%$





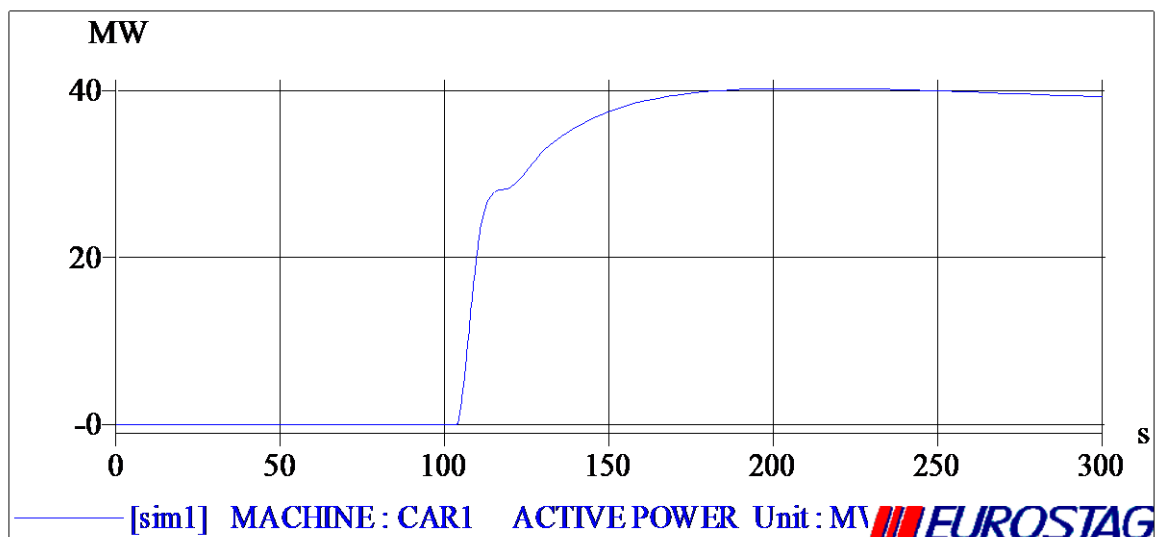
- $SoC_{in}=80\%$



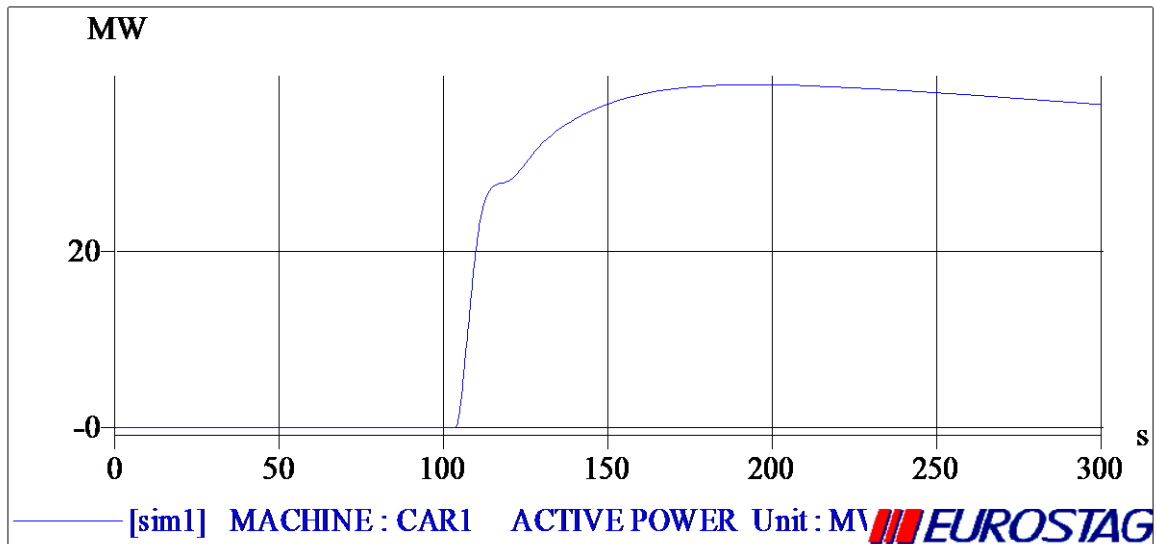
Όπως και στην προηγούμενη μεταβολή φορτίου, όταν τα ηλεκτρικά οχήματα συμμετέχουν στη ρύθμιση, η συχνότητα σταθεροποιείται σε τιμή πολύ πιο κοντά στην ονομαστική των 50Hz. Κατά συνέπεια είναι πολύ πιο εύκολο για τις μονάδες που κάνουν δευτερεύουσα ρύθμιση, να επαναφέρουν τη συχνότητα στην ονομαστική τιμή.

## 2. Ισχύς

- $SoC_{in}=60\%$



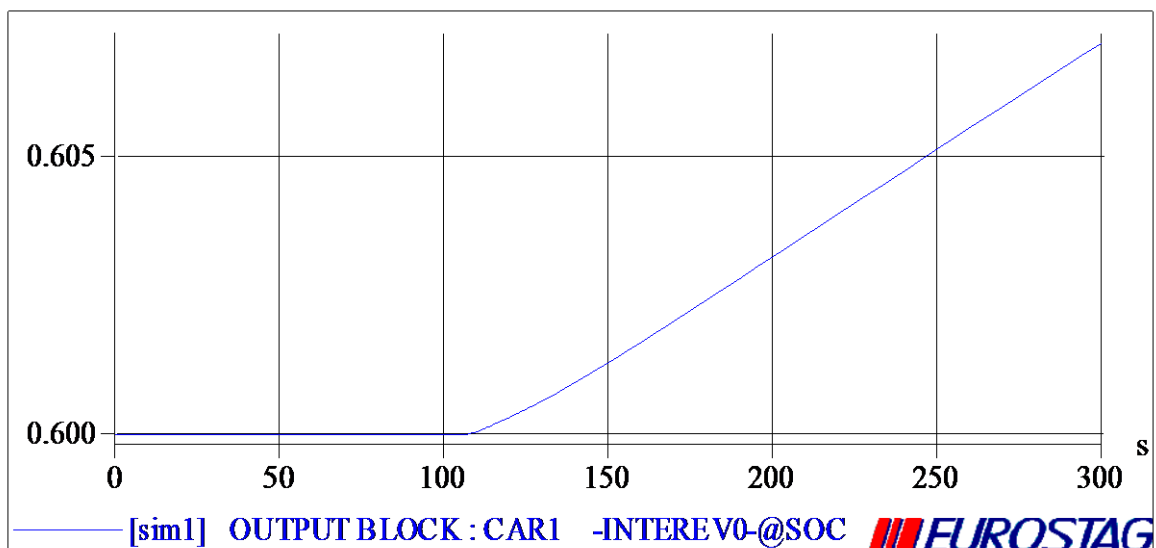
- $SoC_{in}=80\%$



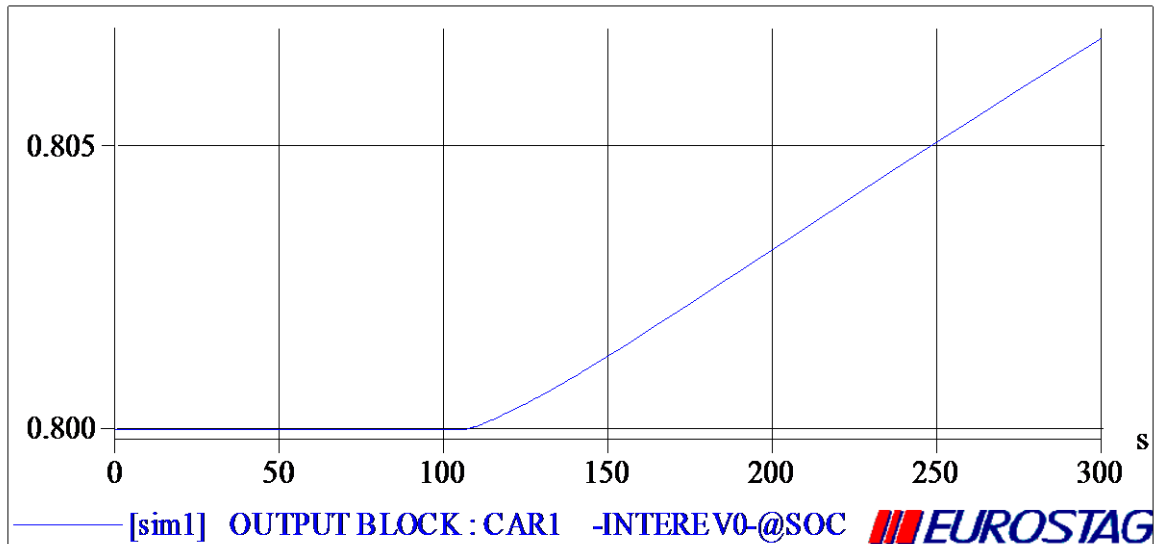
Η ισχύς που απορροφούν τα οχήματα από το δίκτυο ακολουθεί τις παραπάνω πανομοιότυπες κυματομορφές, οι οποίες με τη σειρά τους ακολουθούν τις μεταβολές της συχνότητας. Παρατηρούμε ότι και στις δύο περιπτώσεις τα οχήματα απορροφούν σχεδόν 40MW στη μόνιμη κατάσταση, αξιοποιώντας με αυτόν τον τρόπο το «περίσσειμα» ισχύος. Παρατηρούμε επίσης ότι προς το τέλος του χρόνου προσομοίωσης η ισχύς που απορροφούν αρχίζει να μειώνεται. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι καθώς το όχημα απομακρύνεται από την επιθυμητή κατάσταση φόρτισης (SOC) (καθώς φορτίζει) συμμετέχει όλο και λιγότερο στη ρύθμιση της συχνότητας.

### 3. SOC

- $SoC_{in}=60\%$



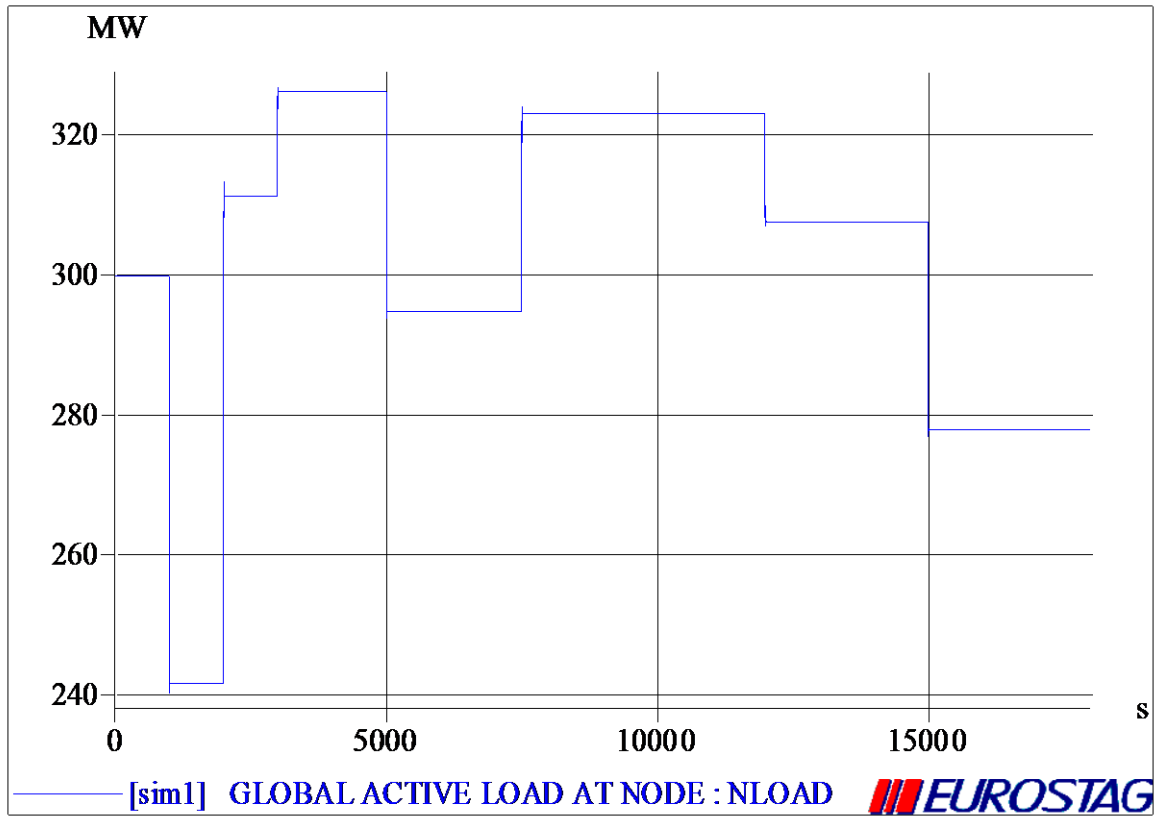
- Soc<sub>in</sub>=80%



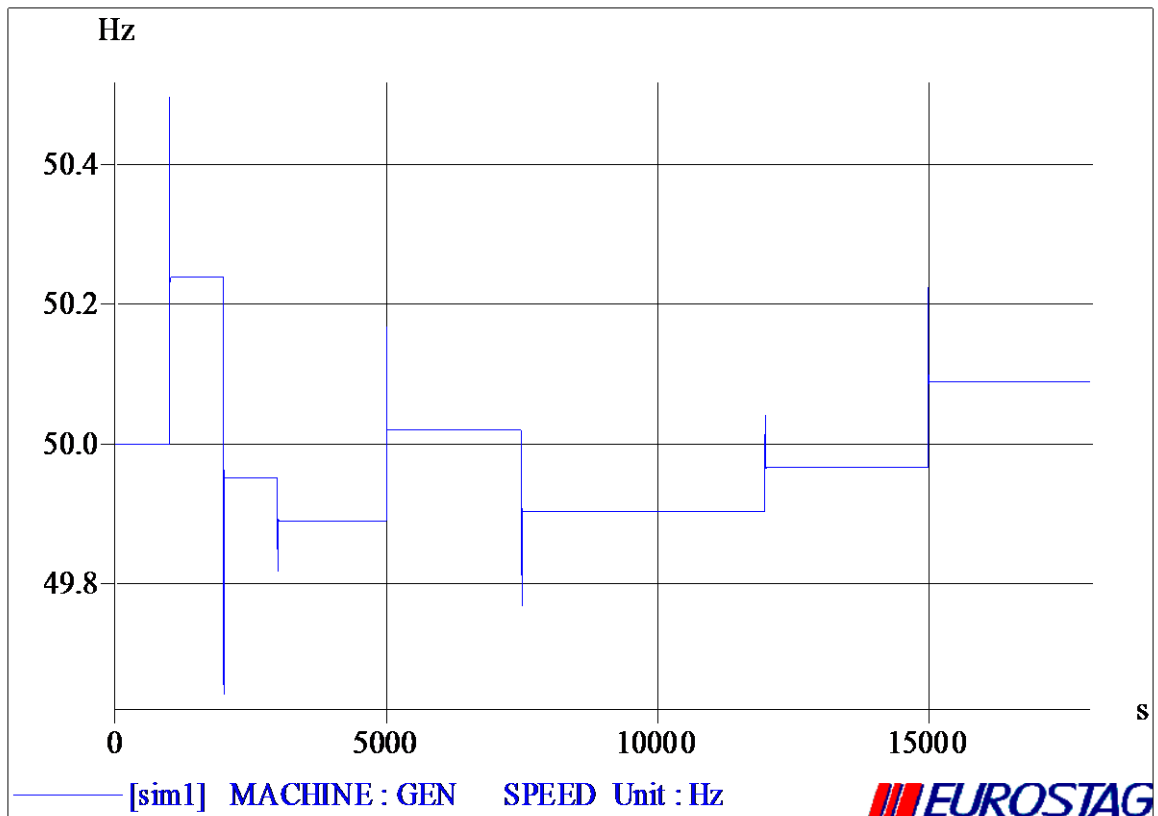
Στα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε ότι τα οχήματα φορτίζουν, αφού απορροφούν ισχύ από το δίκτυο, και κατά συνέπεια η κατάσταση φόρτισής τους (SOC) αυξάνεται.

Να σημειώσουμε σε αυτήν τη φάση, ότι αν και φαίνεται παράδοξο που ενώ ο χρήστης του οχήματος επέλεξε να διατηρηθεί η κατάσταση φόρτισης του οχήματός του στην αρχική της τιμή (δηλαδή να μην φορτίσει ή εκφορτίσει), αυτή μεταβλήθηκε είτε θετικά είτε αρνητικά. Αυτό συμβαίνει επειδή οι μεταβολές φορτίου που προσομοιώσαμε στο κεφάλαιο αυτό είναι μονόπλευρες (μόνο αύξηση ή μόνο μείωση) μιας και αυτό που θέλαμε να δείξουμε είναι η συνεισφορά στη ρύθμιση συχνότητας. Παρακάτω θα δούμε ότι σε μία πιο ρεαλιστική μεταβολή φορτίου, η κατάσταση φόρτισης του οχήματος τείνει να μείνει κοντά στην αρχική της τιμή.

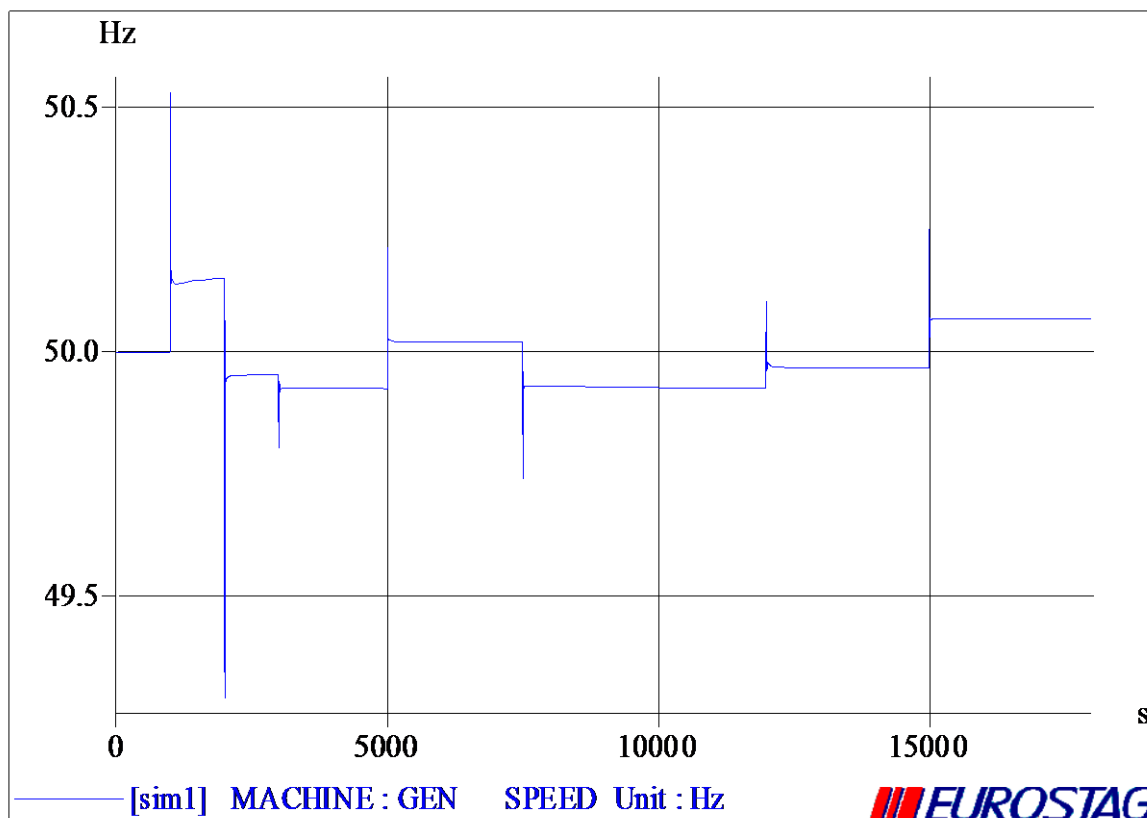
Αφού μελετήσαμε τη μεταβατική απόκριση αυτής της τεχνικής ελέγχου, θεωρείται σκόπιμο να εκτελέσουμε μία προσομοίωση μεγαλύτερης διάρκειας και με περισσότερες μεταβολές φορτίου, έτσι ώστε να πλησιάζει περισσότερο τις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας. Η μεταβολή φορτίου που εφαρμόσαμε στον κόμβο NLOAD φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα.



Αρχικά μελετήσαμε την περίπτωση όπου δεν υπάρχουν ηλεκτρικά οχήματα. Το διάγραμμα της συχνότητας απεικονίζεται παρακάτω.



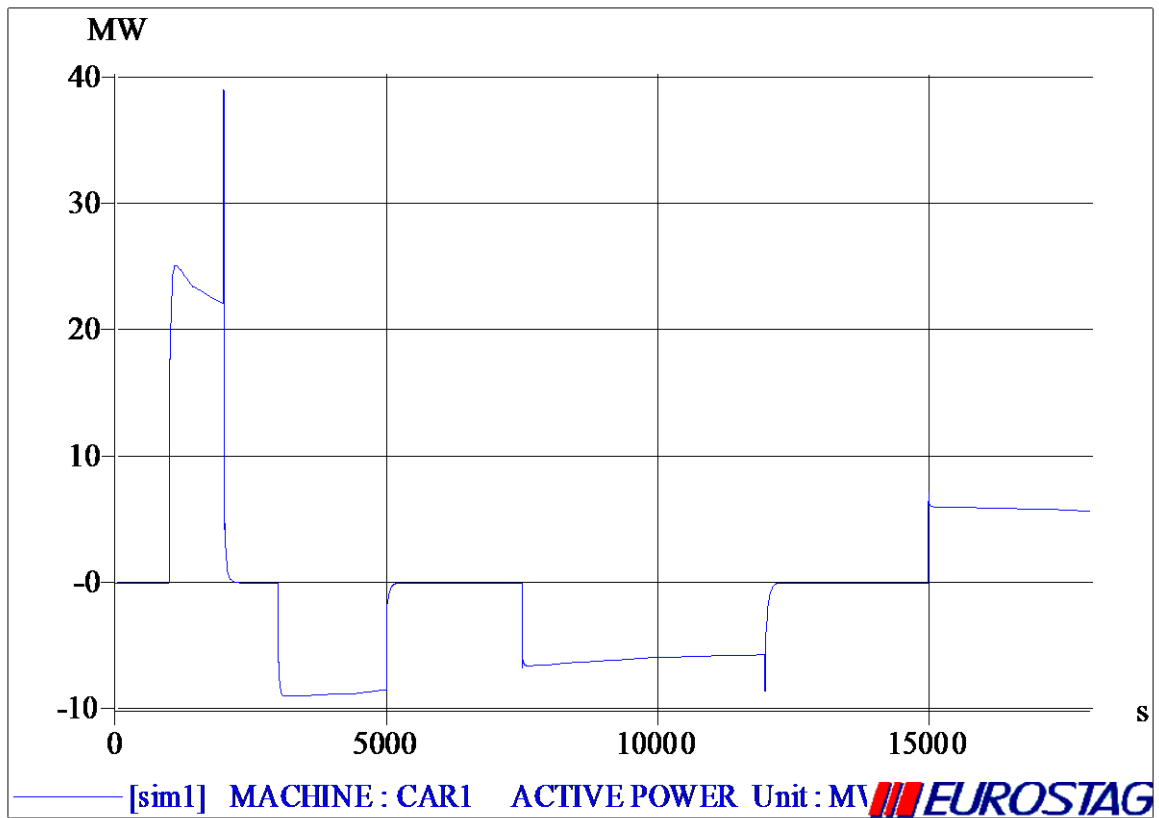
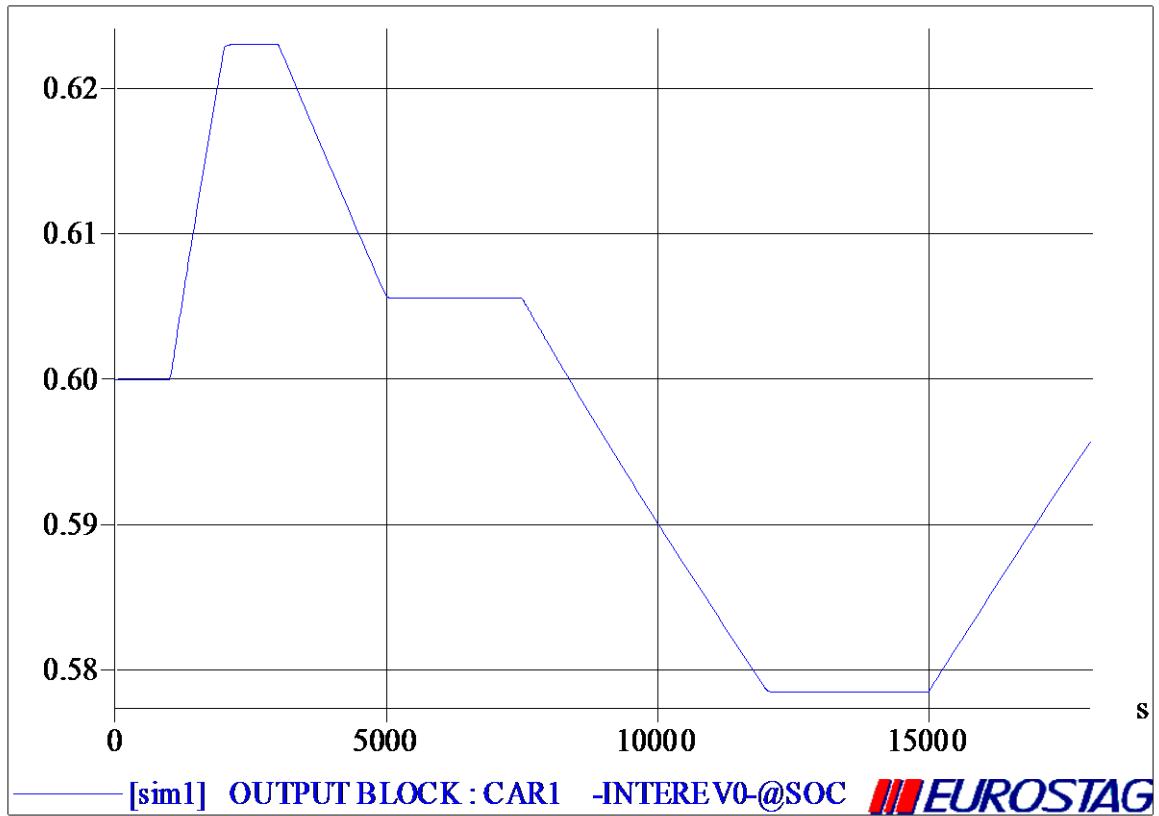
Παρατηρούμε ότι μετά από κάθε μεταβολή φορτίου ακολουθεί ένα μεταβατικό φαινόμενο κατά το οποίο η συχνότητα παίρνει μία ελάχιστη ή μέγιστη τιμή και στη συνέχεια σταθεροποιείται σε μία συγκεκριμένη τιμή. Παρακάτω έχουμε το ίδιο διάγραμμα, αυτή τη φορά όμως στη ρύθμιση της συχνότητας συμμετέχει και ο σταθμός φόρτισης των οχημάτων με  $SOC_{in}=60\%$ .



Η διαφορά στην ένταση των μεταβατικών φαινομένων είναι αισθητά μικρότερη, δηλαδή η συχνότητα κάθε χρονική στιγμή είναι αρκετά πιο κοντά στην ονομαστική των 50Hz σε σύγκριση με την προηγούμενη περίπτωση. Γίνεται έτσι εμφανής η συμβολή των ηλεκτρικών οχημάτων στην πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας.

Από την πλευρά των οχημάτων τώρα, πρέπει να μελετήσουμε εάν και κατά πόσο επηρεάστηκε η κατάσταση φόρτισής τους (SOC), μιας και αποτελεί σημαντικό παράγοντα για τους χρήστες των εν λόγω οχημάτων. Παρακάτω λοιπόν βλέπουμε πώς μεταβάλλεται η κατάσταση φόρτισης κατά τη διάρκεια του χρόνου προσομοίωσης. Παρατηρούμε ότι η τελική κατάσταση φόρτισης  $SOC_{out}$  διαφέρει μόνο 0,5% από την αρχική που ήταν 60%. Επομένως μπορούμε να πούμε ότι η επιθυμία των χρηστών να διατηρηθεί η κατάσταση φόρτισης των οχημάτων τους στο 60% καλύφθηκε.

Βέβαια, αυτό εξαρτάται και από τις ανάγκες του δικτύου κατά τη διάρκεια της παραμονής των οχημάτων στο σταθμό φόρτισης. Παρόλα αυτά όμως, όπως δείξαμε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, όταν η καμπύλη φορτίου έχει μέσο όρο μηδέν ή σχεδόν μηδέν τότε η διατήρηση της αρχικής κατάστασης φόρτισης επιτυγχάνεται απόλυτα.

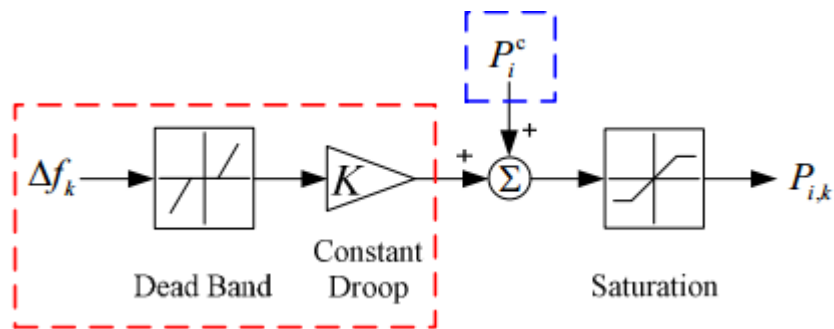


Στο παραπάνω διάγραμμα απεικονίζεται η ισχύς που προσφέρουν (αρνητικό πρόσημο) ή απορροφούν (θετικό πρόσημο) τα ηλεκτρικά οχήματα από το δίκτυο. Υπάρχουν σημεία της καμπύλης όπου η ισχύς είναι μηδέν παρόλο που υπάρχει

σφάλμα συχνότητας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το σφάλμα της συχνότητας είναι μικρότερο από  $\pm 0.05\text{Hz}$  και κατά συνέπεια τα ηλεκτρικά οχήματα δεν αντιδρούν (dead band).

### 6.3. Battery Charging with Frequency Regulation

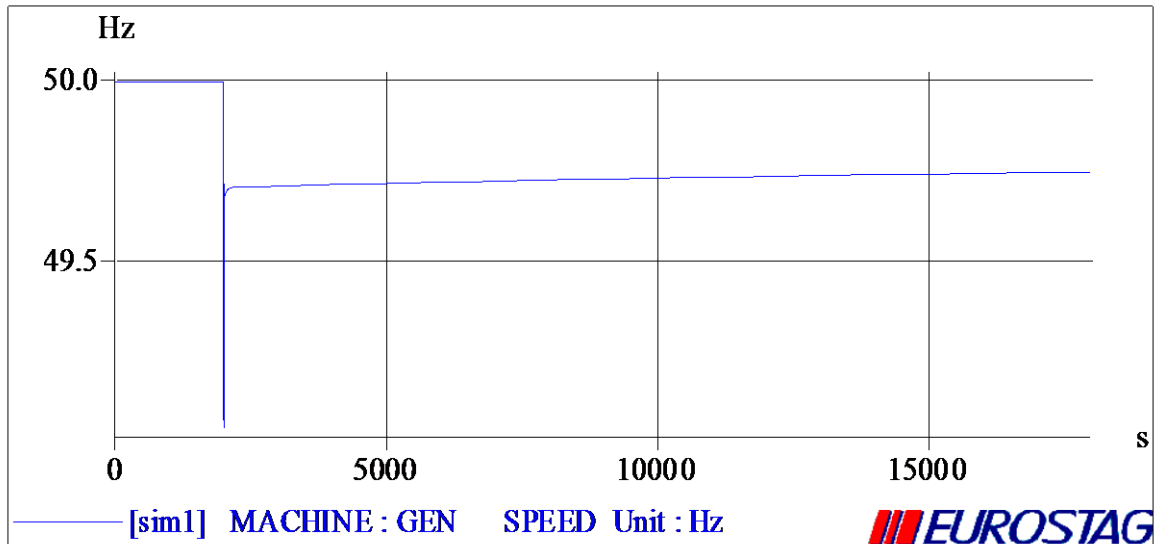
Σύμφωνα με αυτή την τεχνική ελέγχου, ο χρήστης του οχήματος επιθυμεί να φορτίσει εντός κάποιου συγκεκριμένου χρονικού ορίου. Επομένως η μπαταρία του οχήματος φορτίζει με μία δεδομένη ισχύ ενώ παράλληλα συμμετέχει στη ρύθμιση συχνότητας αυξομειώνοντας αυτήν την ισχύ. Σε αντίθεση με την προηγούμενη μέθοδο οι αυξομειώσεις της ισχύος γίνονται γύρω από την προγραμματισμένη ισχύ φόρτισης και όχι γύρω από το μηδέν.



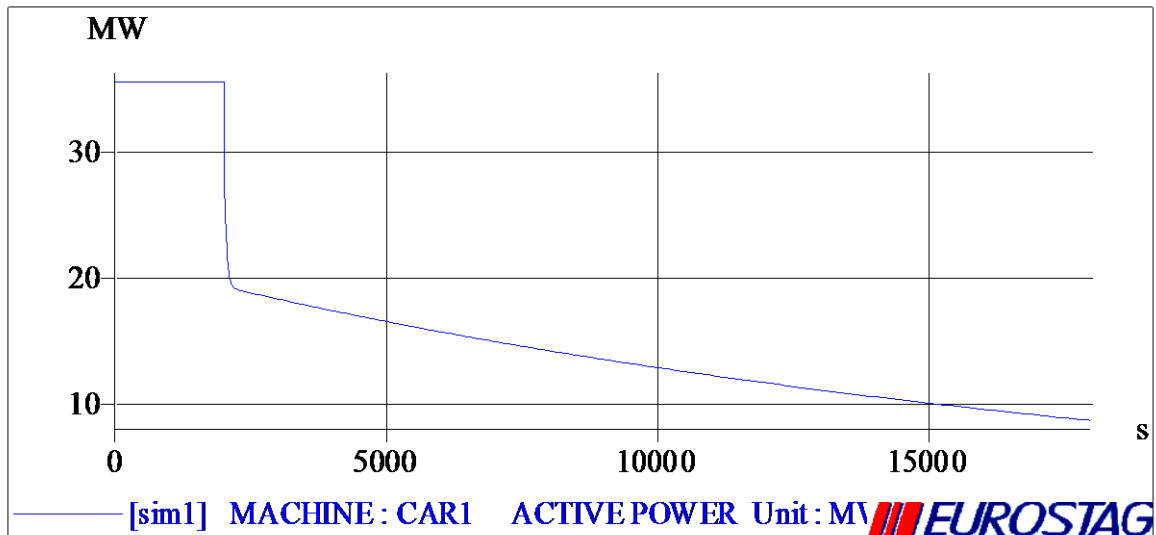
Εικόνα 22 - Μπλοκ διάγραμμα τεχνικής ελέγχου CFR

Για τις προσομοιώσεις που ακολουθούν θεωρήσαμε προγραμματισμένη ισχύ φόρτισης τα 35MW, το 50% δηλαδή της συνολικής ονομαστικής ισχύος των οχημάτων. Μελετήσαμε τις ίδιες δύο περιπτώσεις για μεταβολή +30% και -30% του φορτίου στον κόμβο NLOAD για δύο διαφορετικές περιπτώσεις  $SOC_{in}$  και  $SOC_{out}$ . Στην πρώτη περίπτωση το όχημα συνδέεται στο σταθμό με  $SOC_{in}=30\%$  και επιθυμεί να εξέλθει με  $SOC_{out}=80\%$  και στη δεύτερη συνδέεται με  $SOC_{in}=40\%$  και επιθυμεί να εξέλθει με  $SOC_{out}=70\%$ . Προκειμένου να δούμε εάν και κατά πόσο φορτίζει το όχημα, θέσαμε τον χρόνο προσομοίωσης στις 5 ώρες = 18000 sec.

- Για μεταβολή φορτίου +30%
  - $SOC_{in}=30\%$  με  $SOC_{out}=80\%$

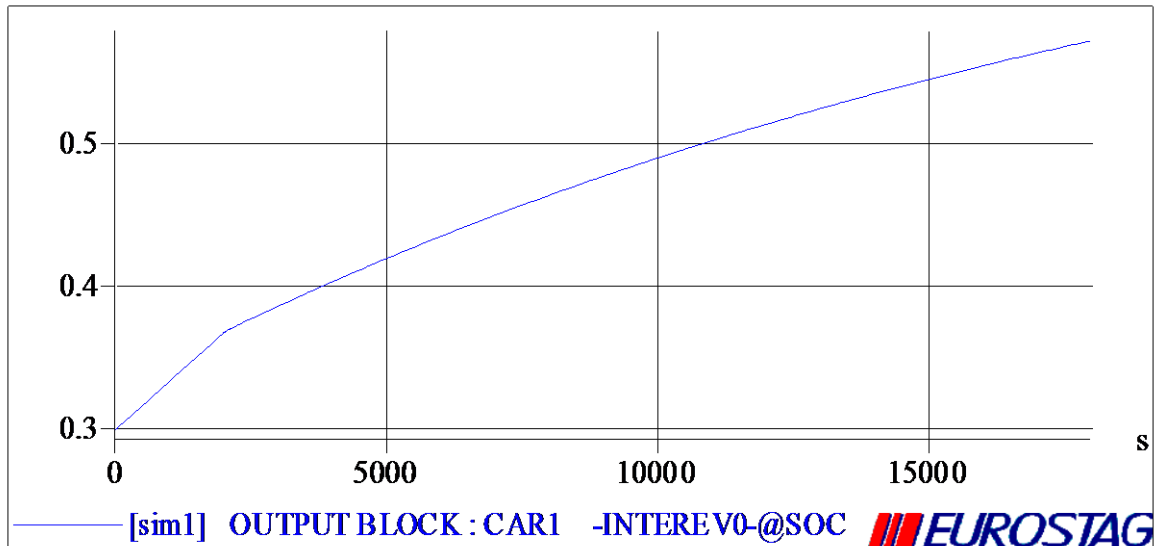


Παρατηρούμε ότι μετά το μεταβατικό φαινόμενο η συχνότητα προσεγγίζει όλο και πιο πολύ την ονομαστική της τιμή. Αυτό συμβαίνει γιατί η ισχύς που απορροφούν τα οχήματα για την φόρτισή τους μειώνεται καθώς αυξάνεται η κατάσταση φόρτισής τους με απώτερο σκοπό να πλησιάσουν την επιθυμητή κατάσταση φόρτισης.



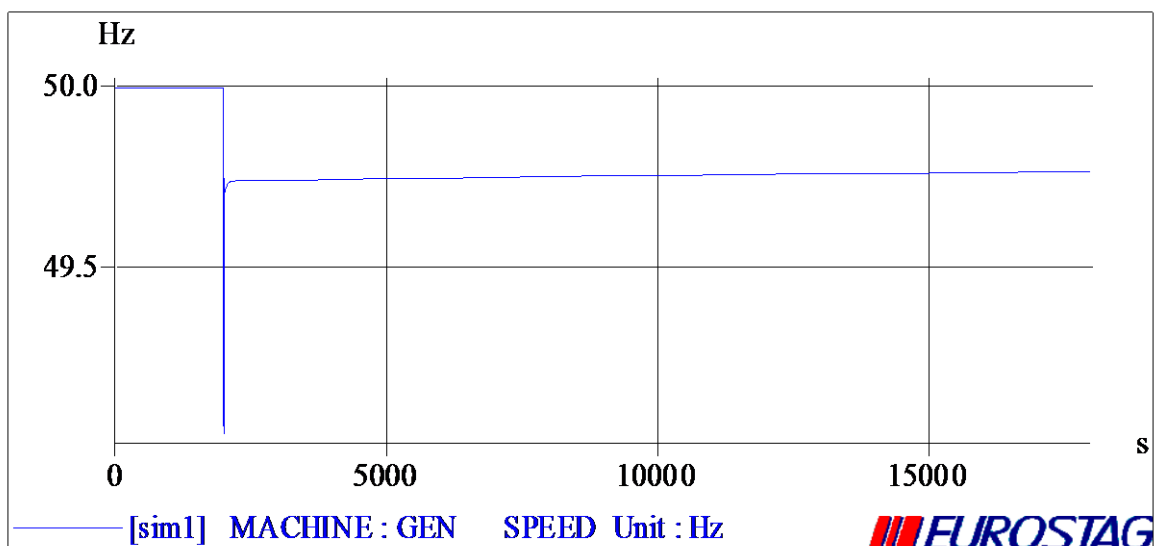
Η ισχύς που απορροφούν τα οχήματα ξεκινάει από τα 35MW (προγραμματισμένη φόρτιση). Από τη στιγμή της μεταβολής του φορτίου, τα ηλεκτρικά οχήματα αντιλαμβάνονται την πτώση της συχνότητας και αμέσως μειώνουν την ισχύ με την οποία φορτίζουν προκειμένου να υποστηρίξουν τις ανάγκες του δικτύου. Καθώς φορτίζουν η ισχύς που απορροφούν συνεχίζει να μειώνεται λόγω του ότι πλησιάζουν την επιθυμητή κατάσταση φόρτισης, και κατά συνέπεια το κέρδος  $K$  μειώνεται.



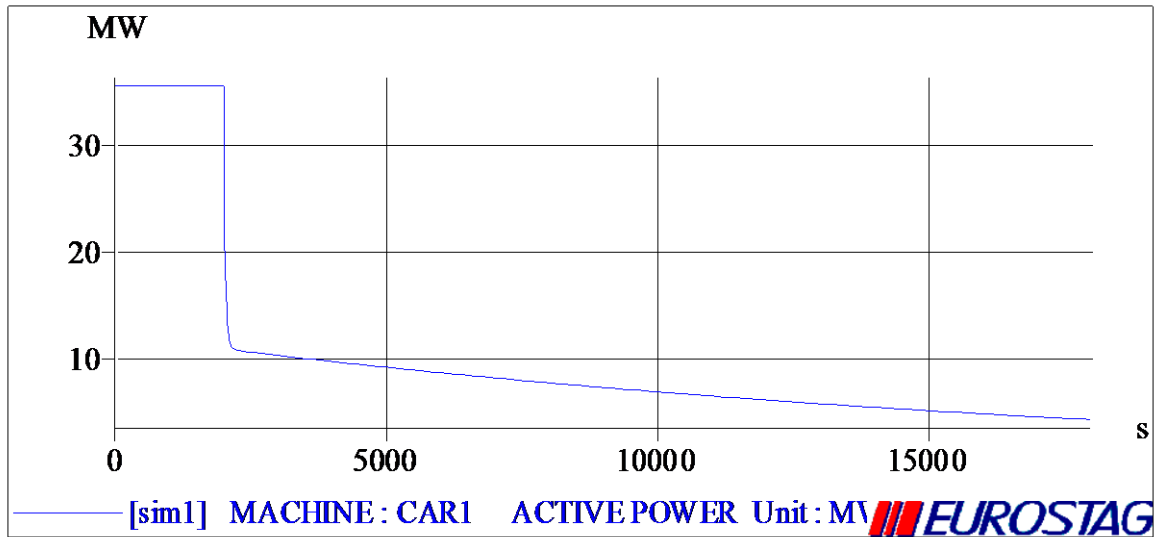


Παρατηρούμε ότι το όχημα φορτίζει καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Αυτό που αλλάζει τη στιγμή  $t=2000s$  είναι η κλίση της καμπύλης, η οποία μειώνεται μιας και η ισχύς φόρτισης ελαττώνεται σημαντικά. Αξιοσημείωτο είναι επίσης το γεγονός πως το κομμάτι της καμπύλης από  $t=2000s$  και έπειτα δεν είναι ευθύγραμμο μιας και καθώς το όχημα φορτίζει και η κατάσταση φόρτισης πλησιάζει την επιθυμητή, δηλαδή το 80%, η κλίση της καμπύλης ελαττώνεται.

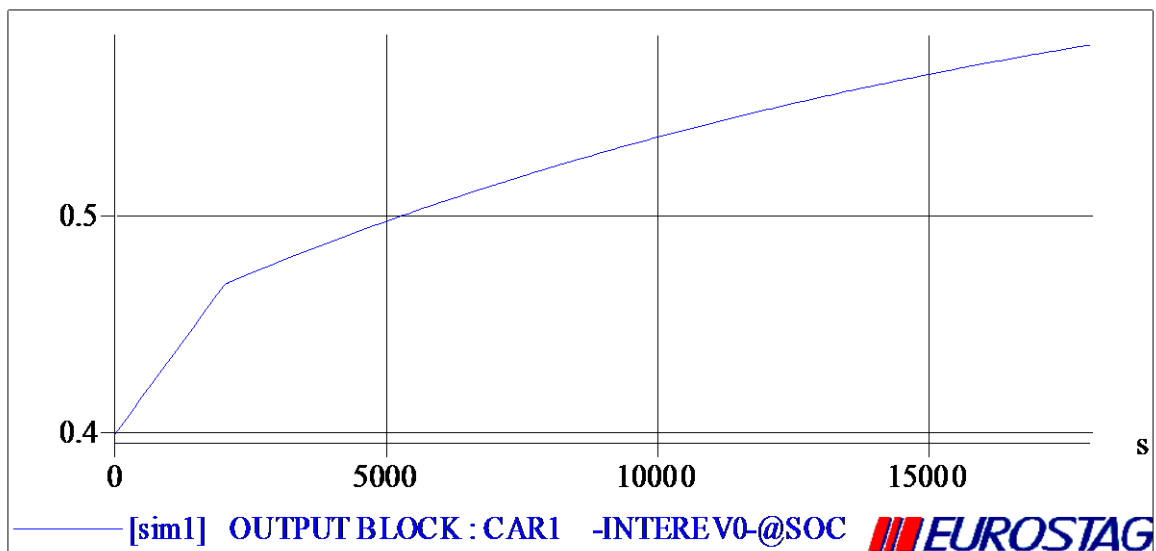
- $SOC_{in}=40\%$  με  $SOC_{out}=70\%$



Το διάγραμμα της συχνότητας δεν παρουσιάζει κάποια σπουδαία μεταβολή σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση. Η διαφορά είναι ότι η συχνότητα σταθεροποιείται σε χαμηλότερη τιμή σε σχέση με πριν, μιας και τα ηλεκτρικά οχήματα συμμετέχουν λιγότερο στη ρύθμιση. Αυτό οφείλεται στην κατάσταση φόρτισής τους, η οποία είναι πιο κοντά στην επιθυμητή (70%) και επομένως το κέρδος  $K$  λαμβάνει μικρότερες τιμές.



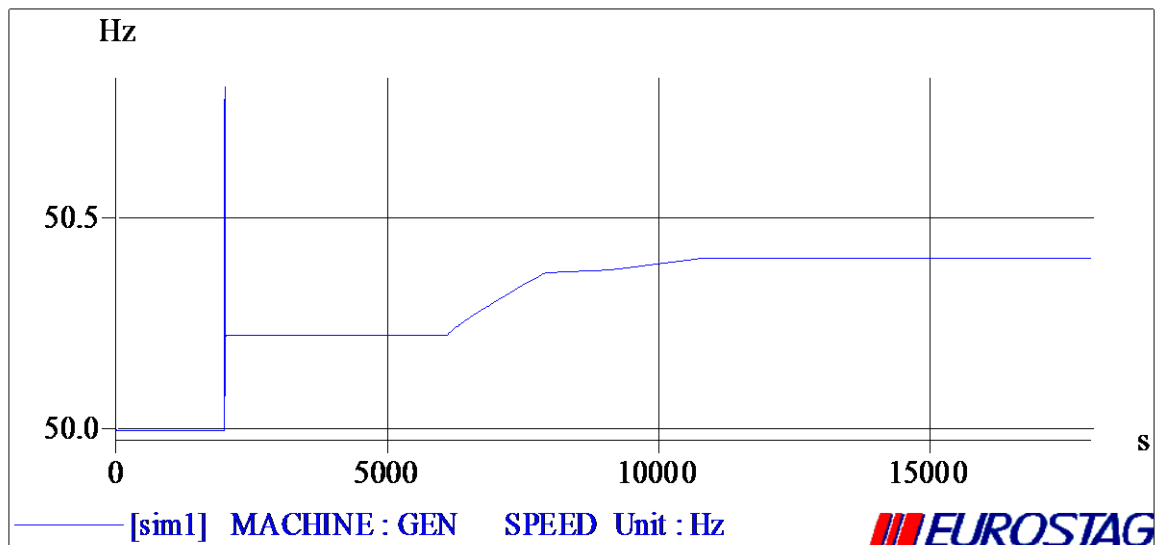
Στο διάγραμμα της ισχύος φαίνεται πιο έντονα η επίδραση που έχει η κατάσταση φόρτισης (SOC) στην ισχύ που απορροφούν τα οχήματα. Τη στιγμή  $t=2000s$ , όπου γίνεται η μεταβολή του φορτίου, η ισχύς πέφτει από τα 35MW περίπου στα 11MW και στη συνέχεια συνεχίζει να μειώνεται λόγω του ότι η κατάσταση φόρτισης προσεγγίζει την επιθυμητή.



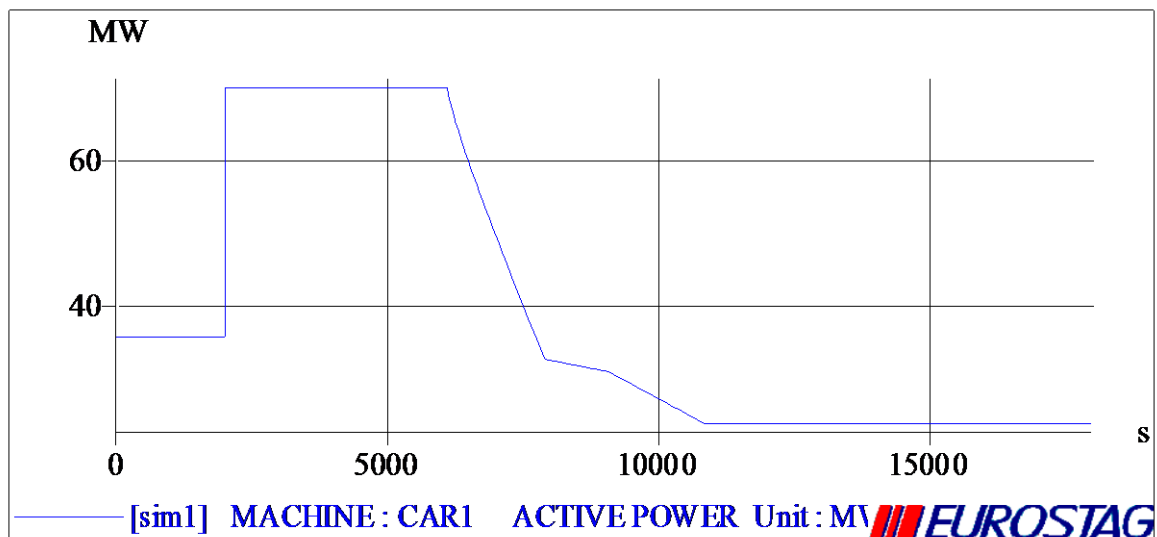
Παρατηρούμε και σε αυτήν την περίπτωση ότι το όχημα φορτίζει καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Αυτό που αλλάζει τη στιγμή  $t=2000s$  είναι η κλίση της καμπύλης, η οποία μειώνεται μιας και η ισχύς φόρτισης ελαττώνεται σημαντικά. Εδώ είναι πιο ορατό το γεγονός πως το κομμάτι της καμπύλης από  $t=2000s$  και έπειτα δεν είναι ευθύγραμμο μιας και καθώς το όχημα φορτίζει και η κατάσταση φόρτισης πλησιάζει την επιθυμητή, δηλαδή το 70%, η κλίση της καμπύλης ελαττώνεται.

### Για μεταβολή φορτίου -30%

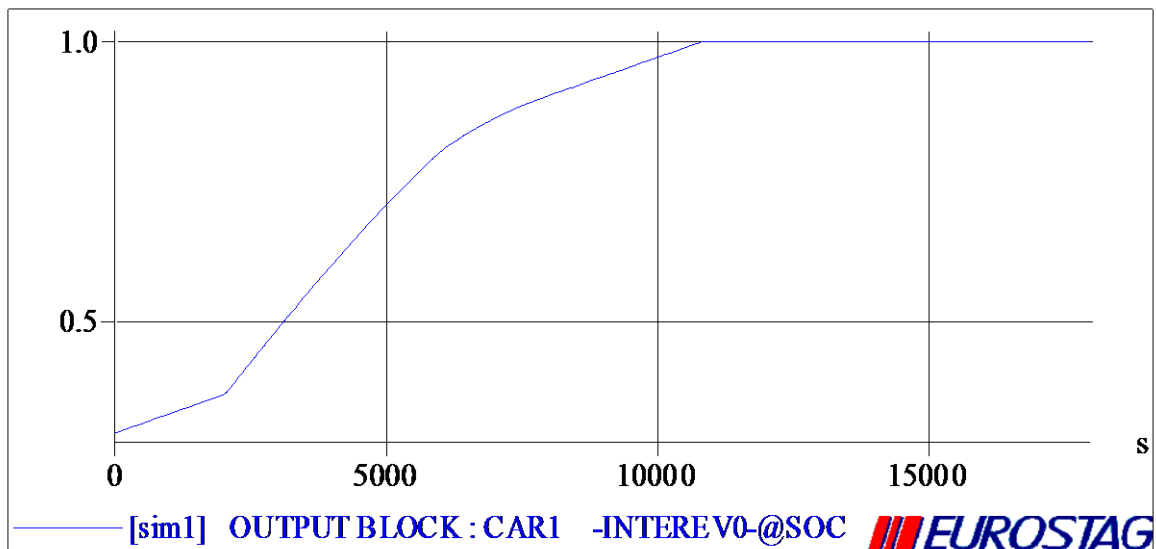
- $SOC_{in}=30\%$  με  $SOC_{out}=80\%$



Σε αυτήν την περίπτωση το διάγραμμα συχνότητας είναι αρκετά πιο σύνθετο. Αρχικά παρατηρούμε ένα μεταβατικό φαινόμενο όμοιο με αυτά που είδαμε στα προηγούμενα κεφάλαια, στη συνέχεια περίπου στο χρόνο  $t=6000s$  παρατηρούμε ότι η συχνότητα αυξάνεται σχεδόν γραμμικά και στη συνέχεια σταθεροποιείται σε κάποια υψηλότερη τιμή. Εφόσον η μεταβολή του φορτίου είναι αρνητική, τα ηλεκτρικά οχήματα για να υποστηρίξουν το δίκτυο, πρέπει να απορροφήσουν επιπλέον ισχύ πέραν των αρχικών 35MW. Εν τω μεταξύ όμως, τα οχήματα πλησιάζουν στο 100% της φόρτισης και κατά συνέπεια δεν μπορούν να συνεχίζουν να απορροφούν την ίδια ποσότητα ισχύος. Επομένως η συχνότητα ανεβαίνει και σταθεροποιείται σε κάποια υψηλότερη τιμή, η οποία είναι ίση με την τιμή που θα σταθεροποιούνταν εξ' αρχής εάν δεν είχαμε συμμετοχή των ηλεκτρικών οχημάτων στην πρωτεύουσα ρύθμιση.

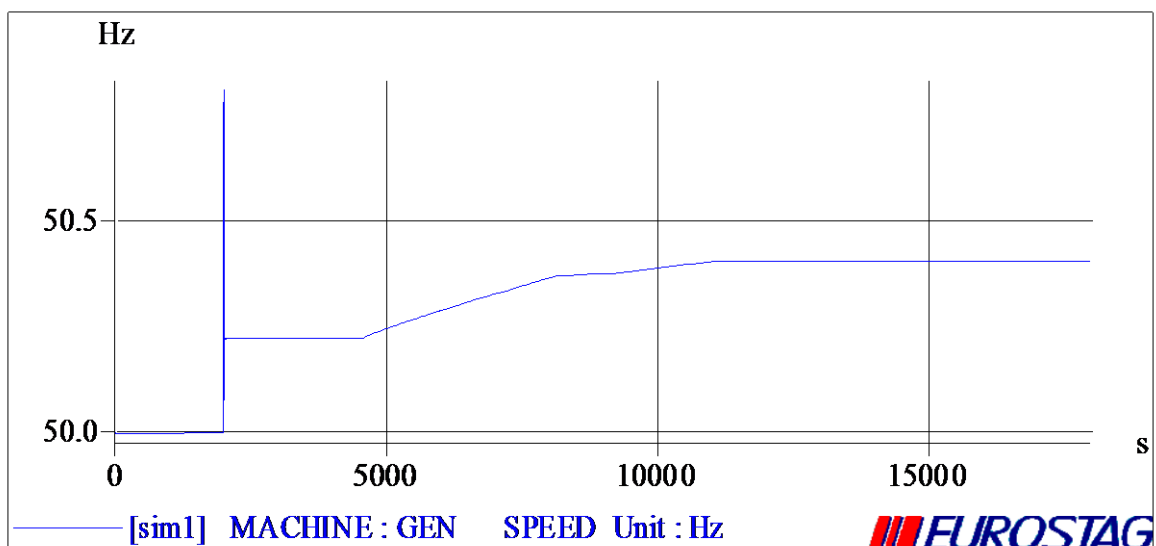


Σε αυτό το διάγραμμα είναι πιο εύκολα αντιληπτά τα όσα αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο. Αρχικά τα οχήματα φορτίζουν με την προγραμματισμένη ισχύ των 35MW. Μόλις αντιληφθούν την μεταβολή του φορτίου, αυξάνουν την ισχύ που απορροφούν στη μέγιστη δυνατή τιμή της που είναι τα 70MW. Περίπου στα 6000s τα οχήματα αρχίζουν και προσεγγίζουν την επιθυμητή τιμή φόρτισης, οπότε η απορροφούμενη από το δίκτυο ισχύς αρχίζει και μειώνεται. Στον χρόνο  $t=8000s$  παρατηρούμε ότι αλλάζει η κλίση της καμπύλης και τείνει να γίνει επίπεδη. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι σε εκείνο το σημείο, η κατάσταση φόρτισης είναι πολύ κοντά στην επιθυμητή (80%). Στη συνέχεια, η καμπύλη ξαναπαίρνει αρνητική κλίση και μηδενίζεται, αφού τα οχήματα έπιασαν το 100% της κατάστασης φόρτισης.

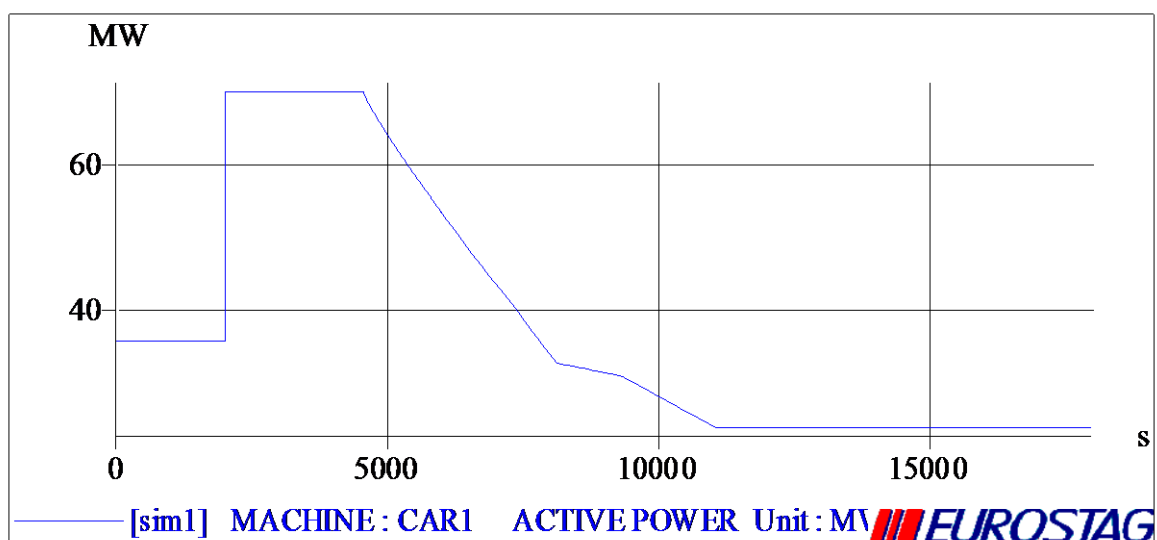


Σε αυτό το διάγραμμα μπορούμε να παρατηρήσουμε πολλές μεταβολές της κλίσης. Η πρώτη οφείλεται στη μεταβολή φορτίου και από εκεί και πέρα οι αλλαγές οφείλονται στο ότι η κατάσταση φόρτισης προσεγγίζει την επιθυμητή και την ξεπερνάει. Κοντά στην επιθυμητή τιμή φόρτισης το κέρδος  $K$  διατηρείται σταθερό και για αυτόν το λόγο παρατηρούμε μία γραμμικότητα κοντά στην τιμή  $Soc = 0.8$ .

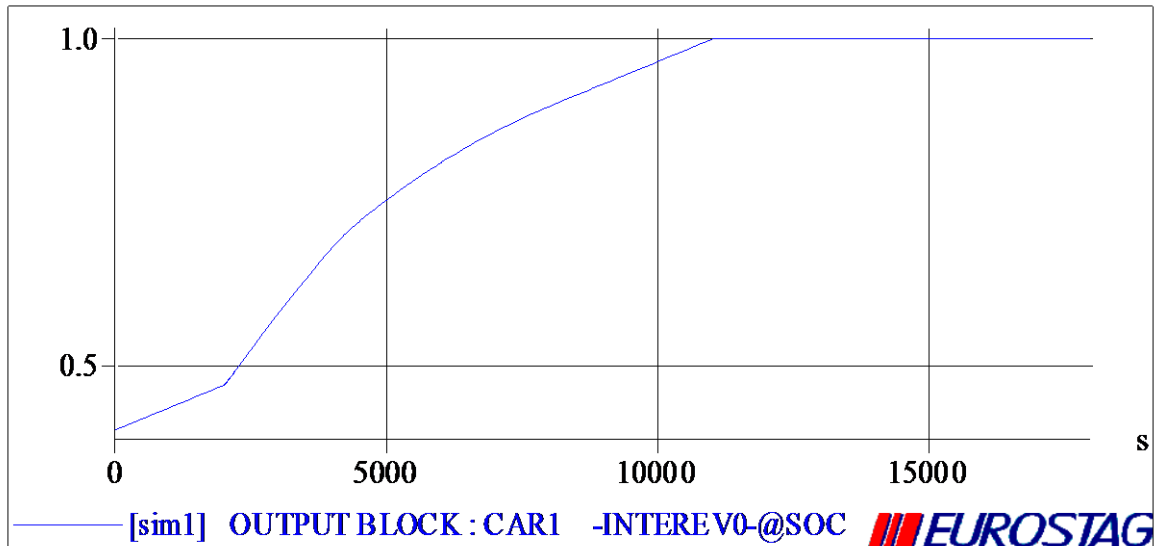
- $SOC_{in}=40\%$  με  $SOC_{out}=70\%$



Σε σύγκριση με το προηγούμενο διάγραμμα παρατηρούμε ότι μετά το μεταβατικό φαινόμενο η συχνότητα παραμένει σταθερή για λιγότερο χρόνο (μέχρι περίπου τα 4500s ενώ στο προηγούμενο μέχρι τα 6000s), ενώ το γραμμικό τμήμα της καμπύλης όπου η συχνότητα αυξάνεται διαρκεί περισσότερο. Αυτό συμβαίνει γιατί η επιθυμητή τιμή φόρτισης είναι 70% και η αρχική 40% και επομένως ο χρόνος που χρειάζεται για να την επιτύχει είναι μικρότερος. Η ισχύς που απορροφούν αρχίζει και μειώνεται από τα 4500s καθώς προσεγγίζουν την επιθυμητή τιμή φόρτισης με αποτέλεσμα η συχνότητα να αυξάνεται. Τελικά σταθεροποιούνται στην ίδια συχνότητα, η οποία είναι ίση με την τιμή που θα σταθεροποιούνταν εξ' αρχής εάν δεν είχαμε συμμετοχή των ηλεκτρικών οχημάτων στην πρωτεύουσα ρύθμιση.

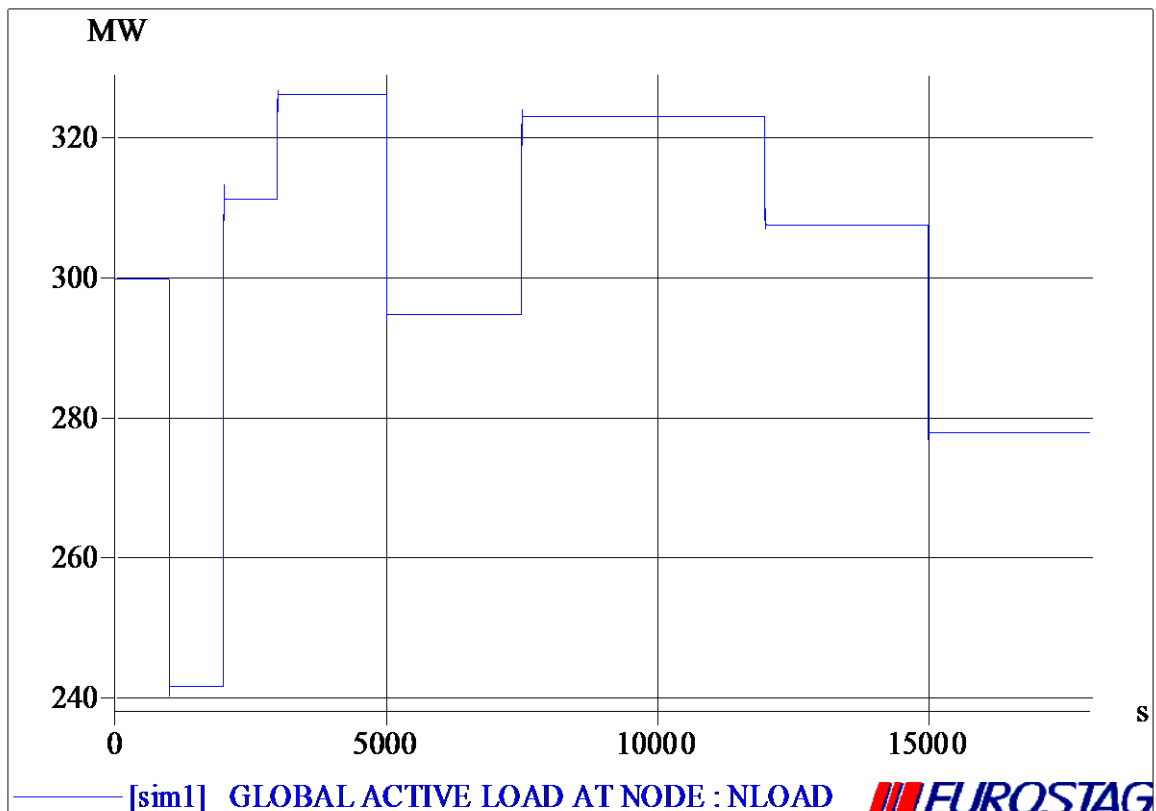


Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, τα οχήματα αρχικά φορτίζουν με την προγραμματισμένη ισχύ των 35MW. Στη συνέχεια, μόλις αντιληφθούν την αύξηση της συχνότητας αυξάνουν την ισχύ που απορροφούν μέχρι τη μέγιστη δυνατή, δηλαδή τα 70MW. Από εκεί και πέρα, η ισχύς αρχίζει και μειώνεται με σχεδόν σταθερό ρυθμό μέχρι τη στιγμή  $t=7500s$  όπου η κλίση της μειώνεται σημαντικά και τείνει να γίνει επίπεδη. Εκεί είναι το σημείο που η κατάσταση φόρτισης πλησιάζει πολύ κοντά στην επιθυμητή τιμή (70%). Μόλις απομακρυνθεί από το εν λόγω σημείο η κλίση αυξάνεται και πάλι και η ισχύς συνεχίζει να μειώνεται μέχρις ότου μηδενιστεί, που σημαίνει ότι τα οχήματα φορτίστηκαν πλήρως (100%).

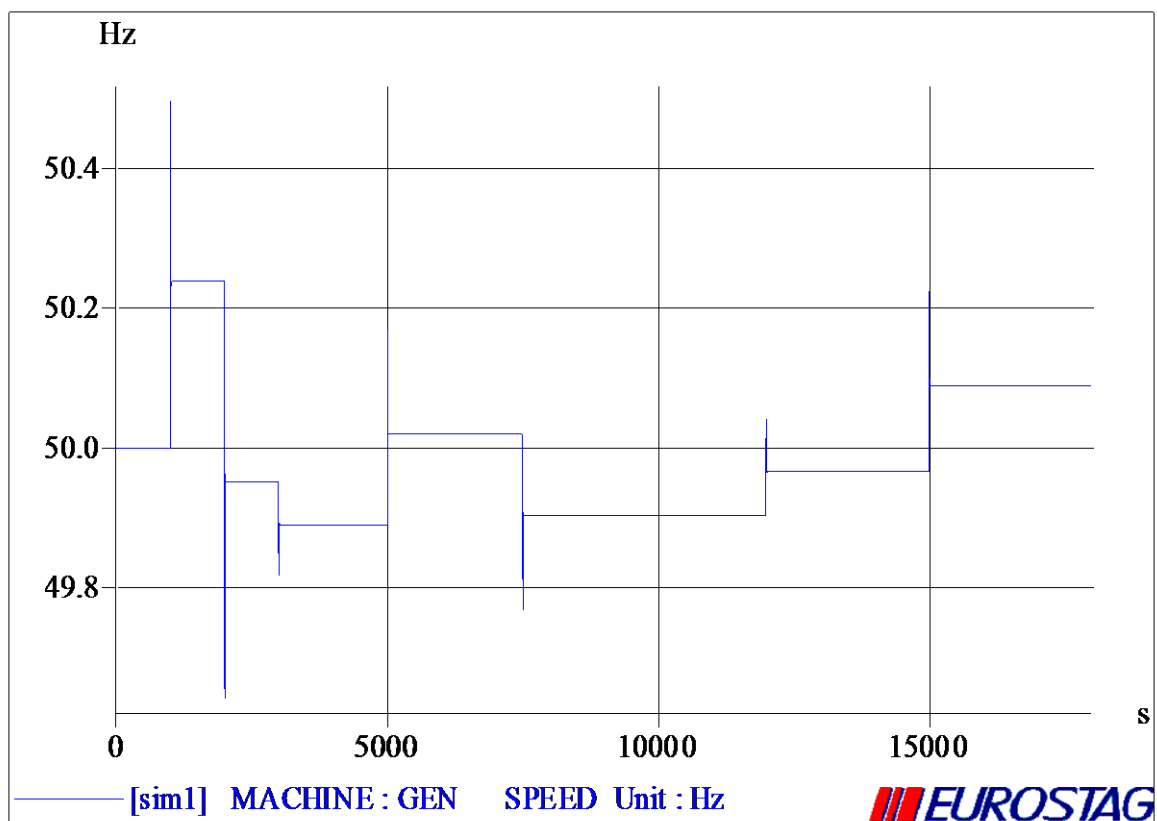


Όμοια με πριν, παρατηρούμε ότι η κλίση της καμπύλης αλλάζει στη διάρκεια της προσομοίωσης. Η πρώτη αλλαγή οφείλεται στην μεταβολή του φορτίου και από εκεί και πέρα παρατηρούμε ότι η κλίση συνεχώς μειώνεται καθώς πλησιάζουμε την επιθυμητή τιμή φόρτισης (70%). Για Soc =0.7 μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι η καμπύλη είναι γραμμική, μιας και το κέρδος K για τιμές κοντά στην επιθυμητή είναι σταθερό.

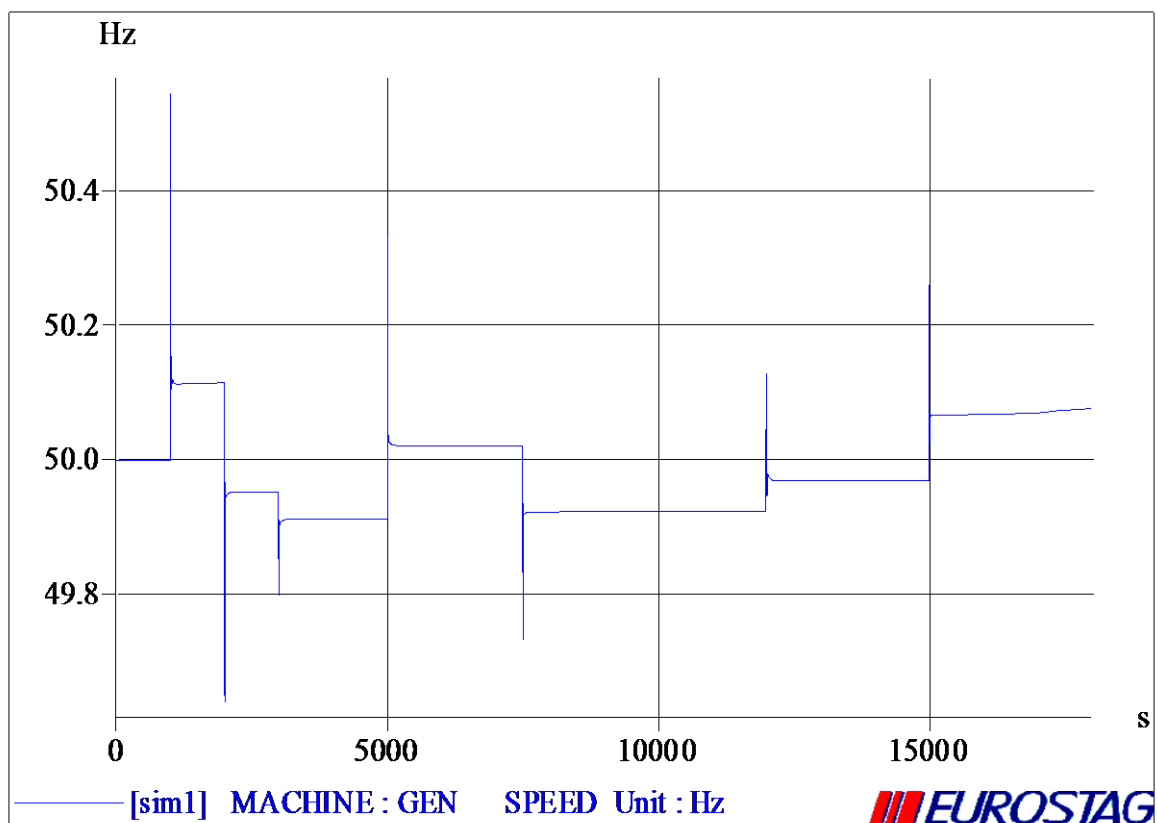
Αφού μελετήσαμε τη μεταβατική απόκριση αυτής της τεχνικής ελέγχου, θεωρείται σκόπιμο όπως και στην προηγούμενη περίπτωση να εκτελέσουμε μία προσομοίωση μεγαλύτερης διάρκειας και με περισσότερες μεταβολές φορτίου, έτσι ώστε να πλησιάζει περισσότερο τις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας. Η μεταβολή φορτίου που εφαρμόσαμε στον κόμβο NLOAD φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα.



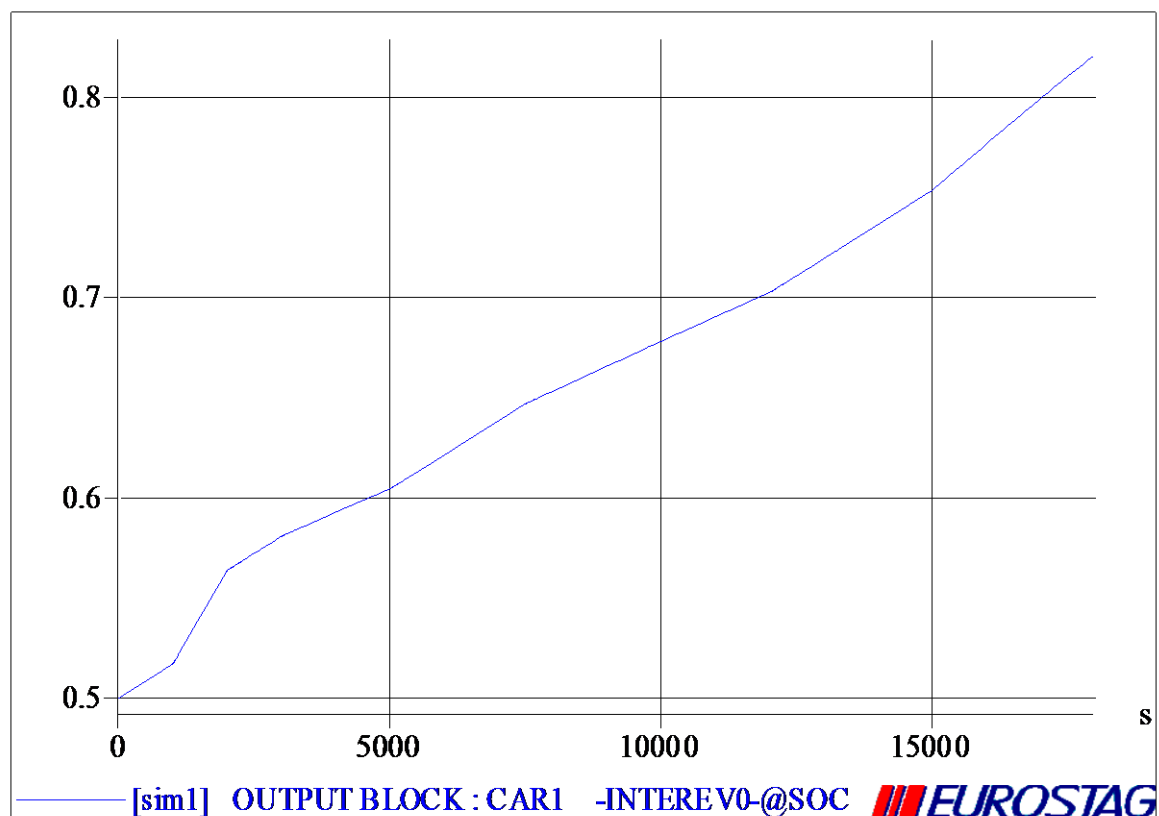
Η απόκριση συχνότητας χωρίς τη συμμετοχή ηλεκτρικών οχημάτων παρατίθεται ξανά παρακάτω έτσι ώστε να είναι εύκολη η σύγκριση.



Με τη συμμετοχή ηλεκτρικών οχημάτων με  $SOC_{in} = 50\%$ ,  $SOC_{out} = 80\%$  και προγραμματισμένη ισχύ φόρτισης 18MW λαμβάνουμε το παρακάτω διάγραμμα.



Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση υπάρχει διαφορά στην ένταση των μεταβατικών φαινομένων. Σε κάθε ενδιάμεσο στάδιο η συχνότητα σταθεροποιείται σε τιμή εγγύτερη προς την ονομαστική των 50Hz.



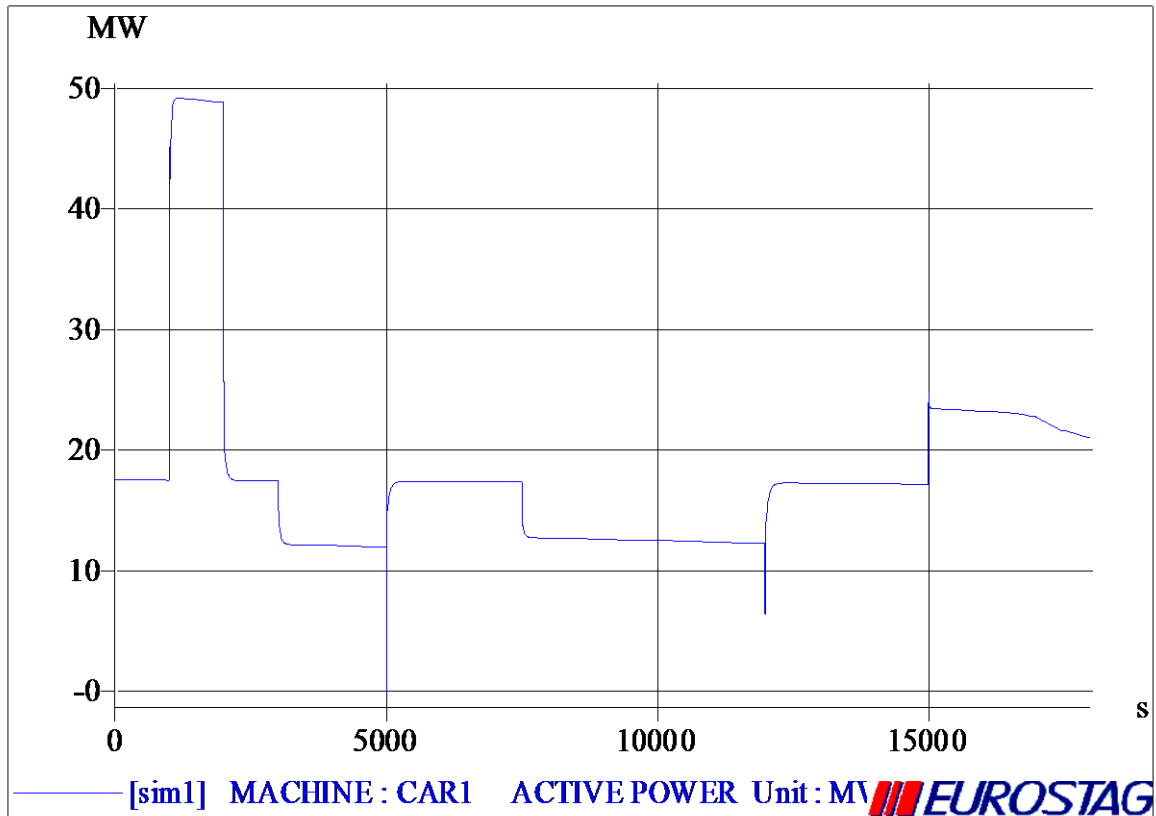
Παρατηρούμε ότι τα οχήματα φορτίζουν καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Αυτό που αλλάζει σε πολλά σημεία είναι ο ρυθμός φόρτισης, ανάλογα με την τιμή της συχνότητας την αντίστοιχη χρονική στιγμή. Έτσι όσο υψηλότερη είναι η συχνότητα από την ονομαστική της τιμή, τόσο πιο έντονα φορτίζουν οι μπαταρίες των οχημάτων, υποστηρίζοντας κατά αυτόν τον τρόπο το δίκτυο. Αντίθετα όταν η συχνότητα είναι χαμηλότερη από την ονομαστική τιμή τα οχήματα ελαττώνουν το ρυθμό φόρτισης έτσι ώστε να μην επιβαρύνουν επιπλέον το δίκτυο.

Σε αυτό το σημείο να σημειώσουμε ότι η προγραμματισμένη ισχύς των 18 MW υπολογίσθηκε έτσι ώστε εάν τα οχήματα δεν συμμετείχαν στη ρύθμιση συχνότητας αλλά ήταν απλώς ένα φορτίο στο δίκτυο να επαρκεί για να τα φορτίσει από το 50% στο 80% μέσα σε 5 ώρες.

Για να αυξηθεί η κατάσταση φόρτισης 30% απαιτείται ενέργεια ίση με το 30% των 30KWh που είναι η χωρητικότητα της μπαταρίας, δηλαδή 9KWh ανά όχημα, μέσα σε 5 ώρες για 10.000 οχήματα. Άρα:

$$\frac{9KWh \times 10.000 \text{ vehicles}}{5h} = 18MW$$





Από το διάγραμμα της ισχύος φαίνεται ξεκάθαρα η ενεργή συμμετοχή των ηλεκτρικών οχημάτων στη ρύθμιση. Όπως και στην τεχνική ελέγχου Battery SOC Holder υπάρχουν σημεία στα οποία η ισχύς είναι σταθερή και ίση με 18MW παρόλο που υπάρχει σφάλμα συχνότητας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το σφάλμα συχνότητας είναι μικρότερο από 0,05 Hz.

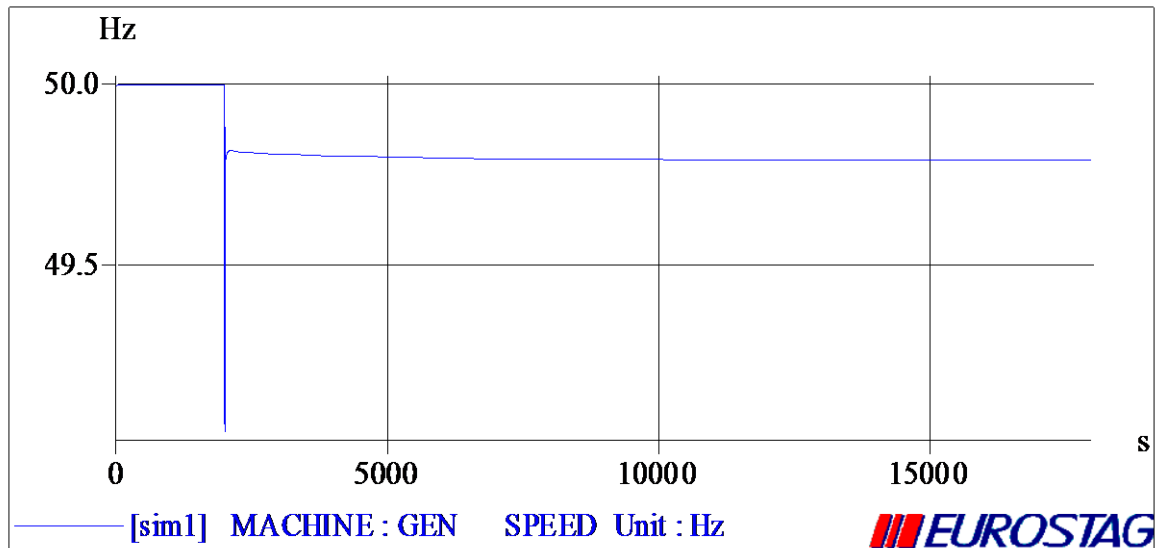
## 6.4. Σύνθετη περίπτωση

Οι περιπτώσεις που μελετήθηκαν παραπάνω κατέστησαν σαφές τον τρόπο λειτουργίας της συγκεκριμένης μεθόδου ελέγχου καθώς και το όφελος που μπορεί να προσφέρει η συνεισφορά των ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο. Παρόλα αυτά σε έναν πραγματικό σταθμό φόρτισης, θα είχαμε οχήματα με διαφορετικά  $Soc_{in}$  καθώς και διαφορετικά επιθυμητά  $Soc_{out}$ . Επίσης τα ηλεκτρικά οχήματα που θα είναι σταθμευμένα στον εν λόγω σταθμό φόρτισης μπορεί είτε να επιθυμούσαν τη φόρτισή τους κατά τη διάρκεια παραμονής τους στον σταθμό είτε απλώς τη διατήρηση της ίδιας κατάστασης φόρτισης. Επομένως είναι απαραίτητο να μελετήσουμε την περίπτωση κατά την οποία τα οχήματα που βρίσκονται στον σταθμό έχουν μια ετερογένεια αφενός όσον αφορά τα  $Soc_{in}$  και  $Soc_{out}$  και αφετέρου όσον αφορά την επιθυμία ή μη για φόρτιση.

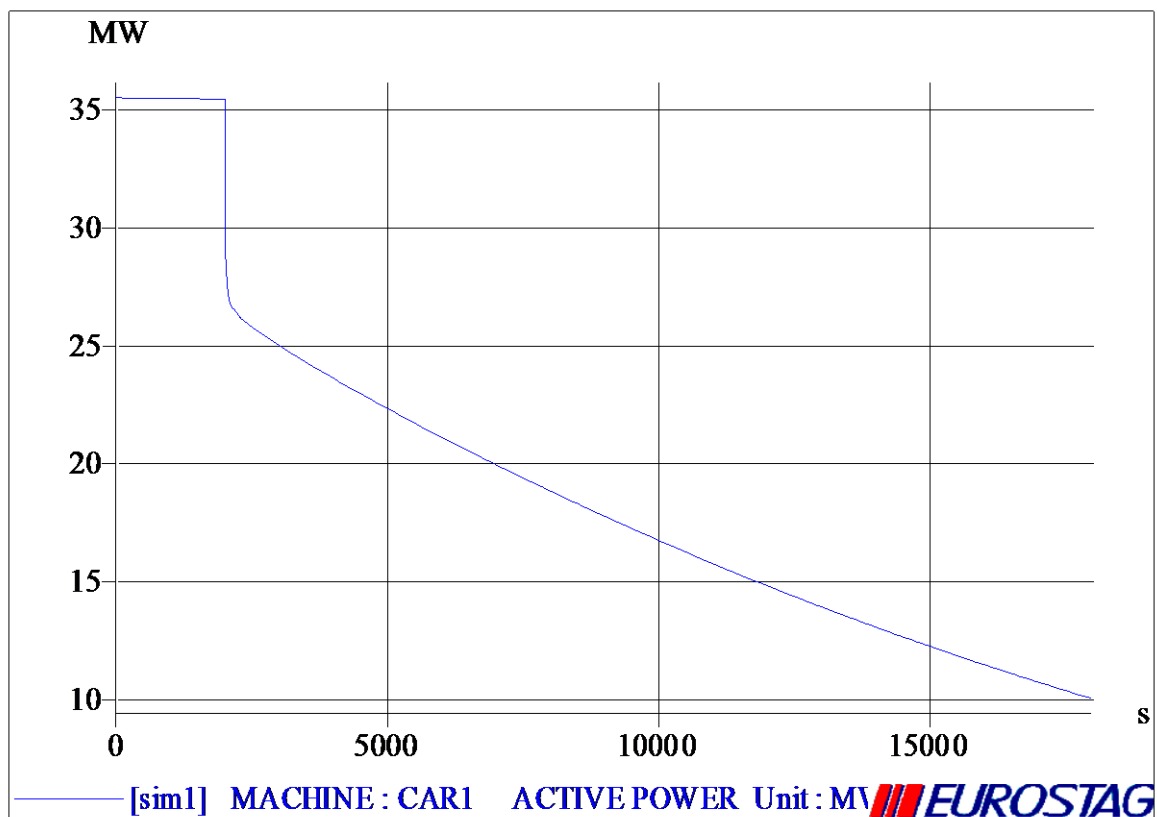
Για να προσεγγίσουμε αυτήν την περίπτωση στο Eurostag θεωρούμε «ομάδες» οχημάτων με ίδια χαρακτηριστικά, τα οποία είναι συνδεδεμένα στον ίδιο κόμβο. Για κάθε μία από αυτές τις ομάδες μπορούμε να ορίσουμε διαφορετικά  $Soc_{in}$  και  $Soc_{out}$ ,

διαφορετικό αριθμό αυτοκινήτων που την απαρτίζουν και κατά συνέπεια διαφορετική ονομαστική ισχύ.

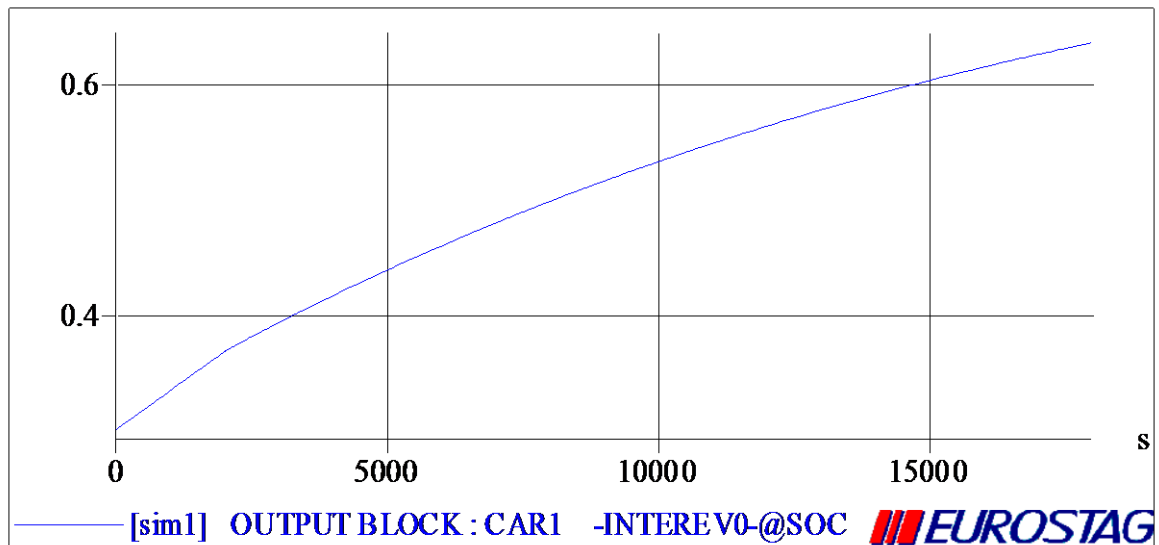
Για την προσομοίωση αυτή θεωρήσαμε ότι έχουμε 10.000 οχήματα που βρίσκονται και θέλουν να παραμείνουν στο 60% της φόρτισης και 10.000 οχήματα τα οποία βρίσκονται στο 30% και επιθυμούν να φθάσουν το 80%. Μελετήσαμε την απόκριση σε μία μεταβολή φορτίου +30% στον κόμβο NLOAD. Τα αποτελέσματα είναι τα εξής:



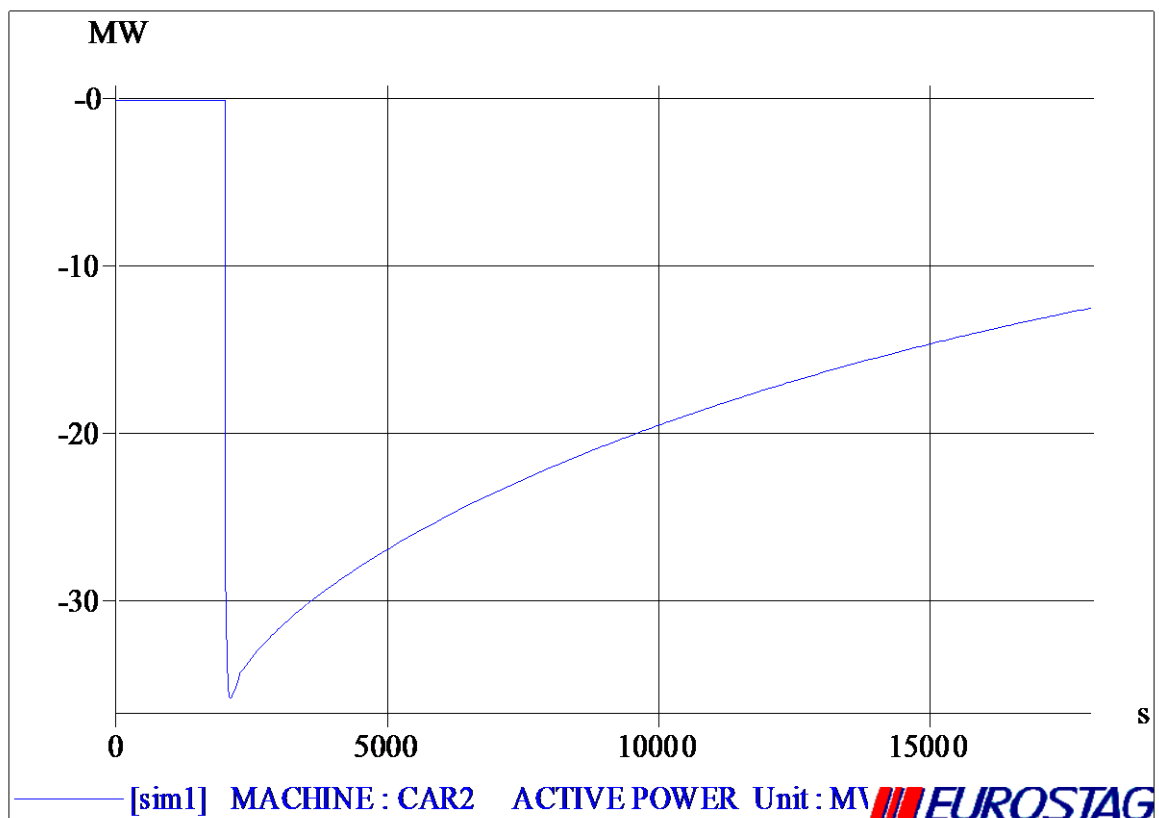
Η συχνότητα ακολουθεί την τυπική καμπύλη που είδαμε και στα προηγούμενα παραδείγματα χωρίς κάτι το ιδιαίτερο.



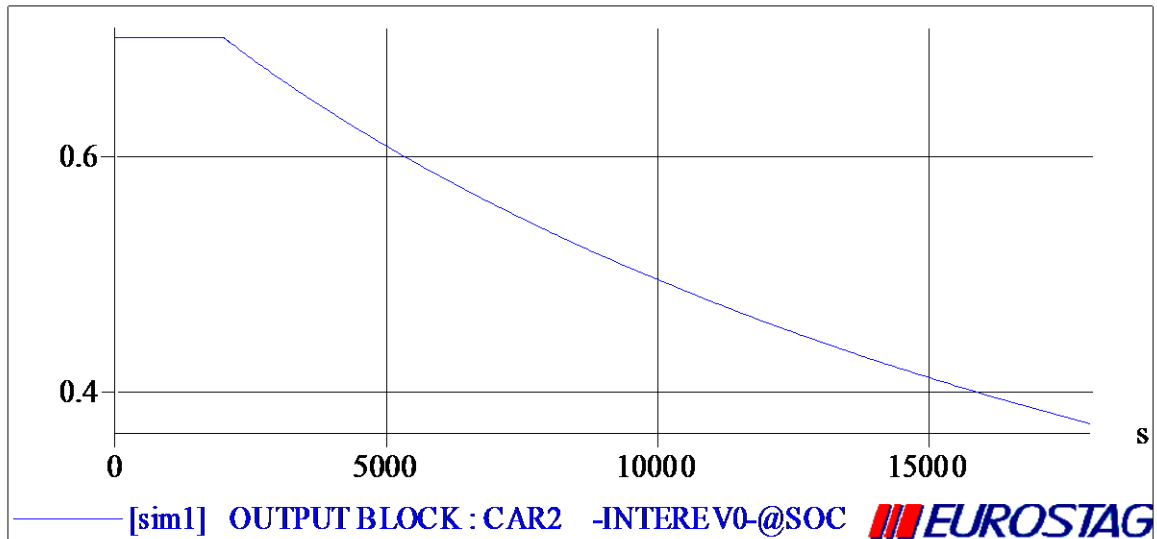
Η ισχύς με την οποία φορτίζει η ομάδα οχημάτων που ακολουθεί την τεχνική ελέγχου CFR (Charging with Frequency Regulation) μειώνεται απότομα τη στιγμή της μεταβολής του φορτίου και στη συνέχεια συνεχίζει να μειώνεται ομαλά καθώς περνάει ο χρόνος. Αυτό συμβαίνει γιατί προσεγγίζει την επιθυμητή στάθμη φόρτισης.



Η κατάσταση φόρτισης των οχημάτων της ομάδας αυτής αυξάνεται με ρυθμό ο οποίος συνεχώς μειώνεται καθώς προσεγγίζει την επιθυμητή τιμή. Επομένως η καμπύλη δεν είναι ευθύγραμμη αλλά η κλίση της μειώνεται καθώς περνάει ο χρόνος.



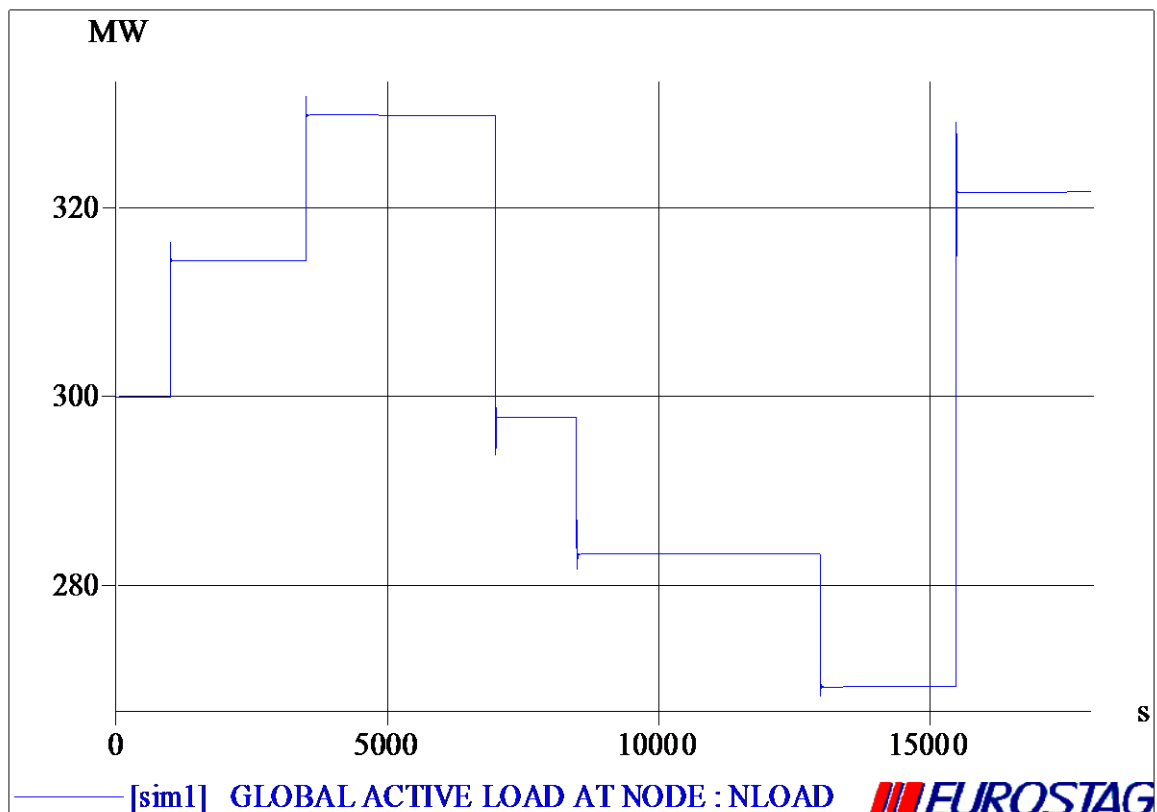
Η ισχύς που προσφέρουν στο δίκτυο τα οχήματα της ομάδας που εφαρμόζει την τεχνική ελέγχου Battery SOC Holder αυξάνεται τη στιγμή της μεταβολής του φορτίου και στη συνέχεια μειώνεται καθώς αυτά εκφορτίζουν.



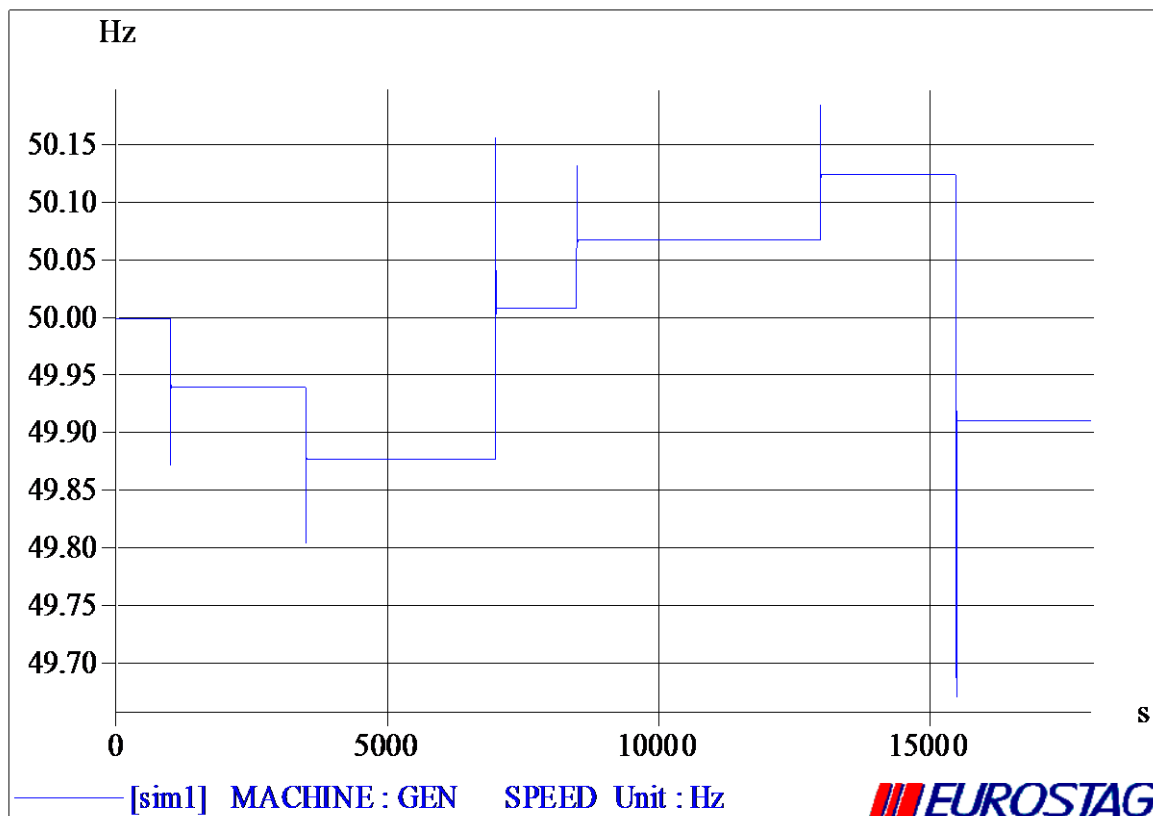
Η κατάσταση φόρτισης των οχημάτων της δεύτερης ομάδας μειώνεται με το χρόνο, καθώς τα οχήματα προσφέρουν ισχύ στο δίκτυο. Ο ρυθμός με τον οποίο εκφορτίζονται μειώνεται κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, καθώς η κατάσταση φόρτισης απομακρύνεται από την επιθυμητή τιμή.

Μία μεταβολή σαν αυτήν που περιγράψαμε παραπάνω αν και μας βοηθάει να κατανοήσουμε τον τρόπο λειτουργίας δεν είναι αρκετά ρεαλιστική. Προφανώς σε ένα πραγματικό δίκτυο κατά τη διάρκεια πέντε ωρών το φορτίο μεταβάλλεται συνεχώς. Για αυτόν το λόγο θα εφαρμόσουμε μία κάπως πιο σύνθετη μεταβολή στο φορτίο του κόμβου NLOAD και θα παρατηρήσουμε πώς αποκρίνεται το σύστημά μας.

Η μεταβολή του φορτίου που εφαρμόσαμε δίνεται στο παρακάτω διάγραμμα. Να σημειώσουμε εδώ ότι ο μέσος όρος του φορτίου είναι λίγο παραπάνω από την αρχική του τιμή.

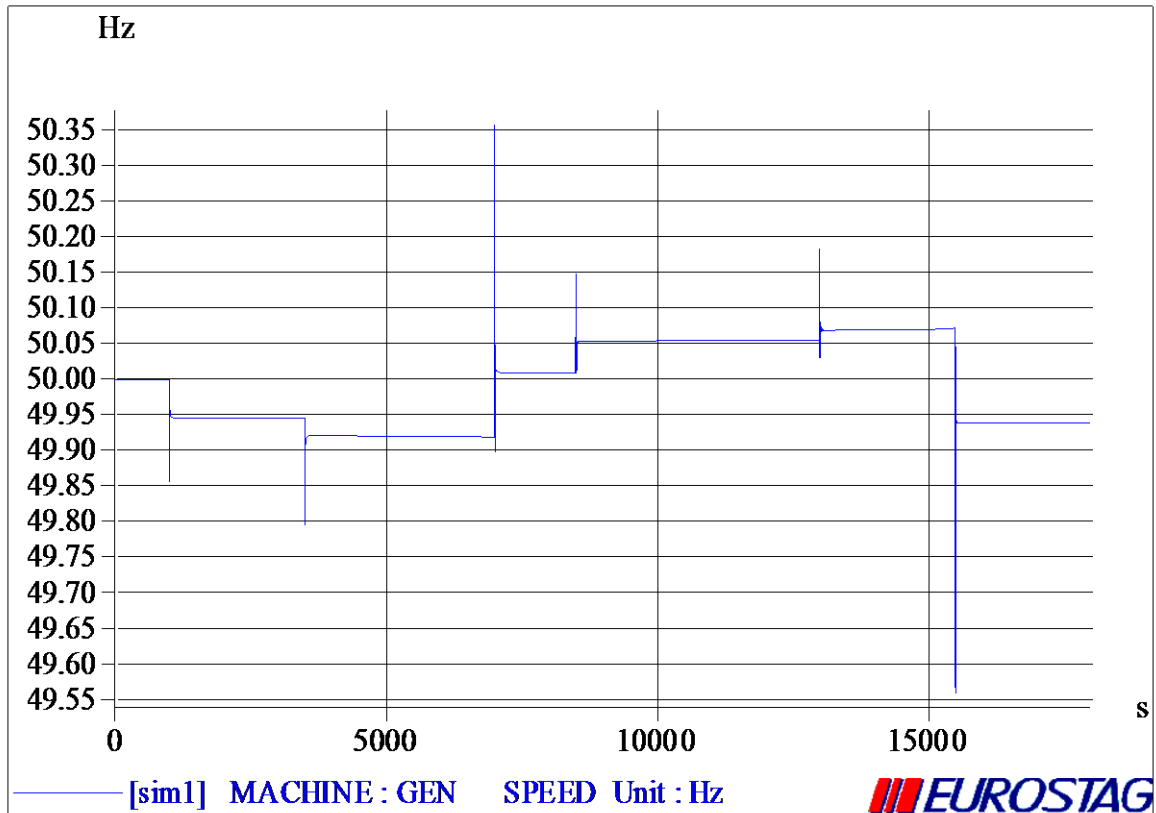


Αρχικά εκτελούμε την προσομοίωση για την περίπτωση που δεν υπάρχουν καθόλου ηλεκτρικά οχήματα στο δίκτυο. Το διάγραμμα της συχνότητας που προέκυψε είναι το παρακάτω:



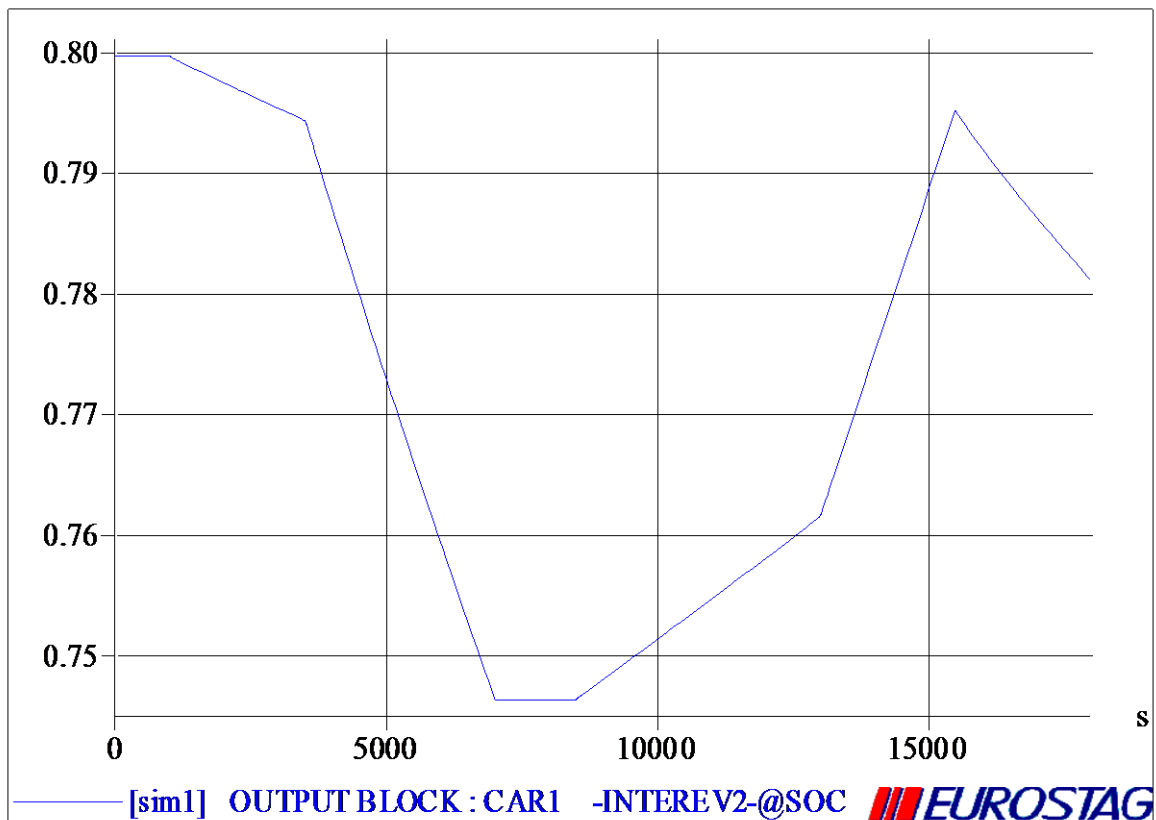
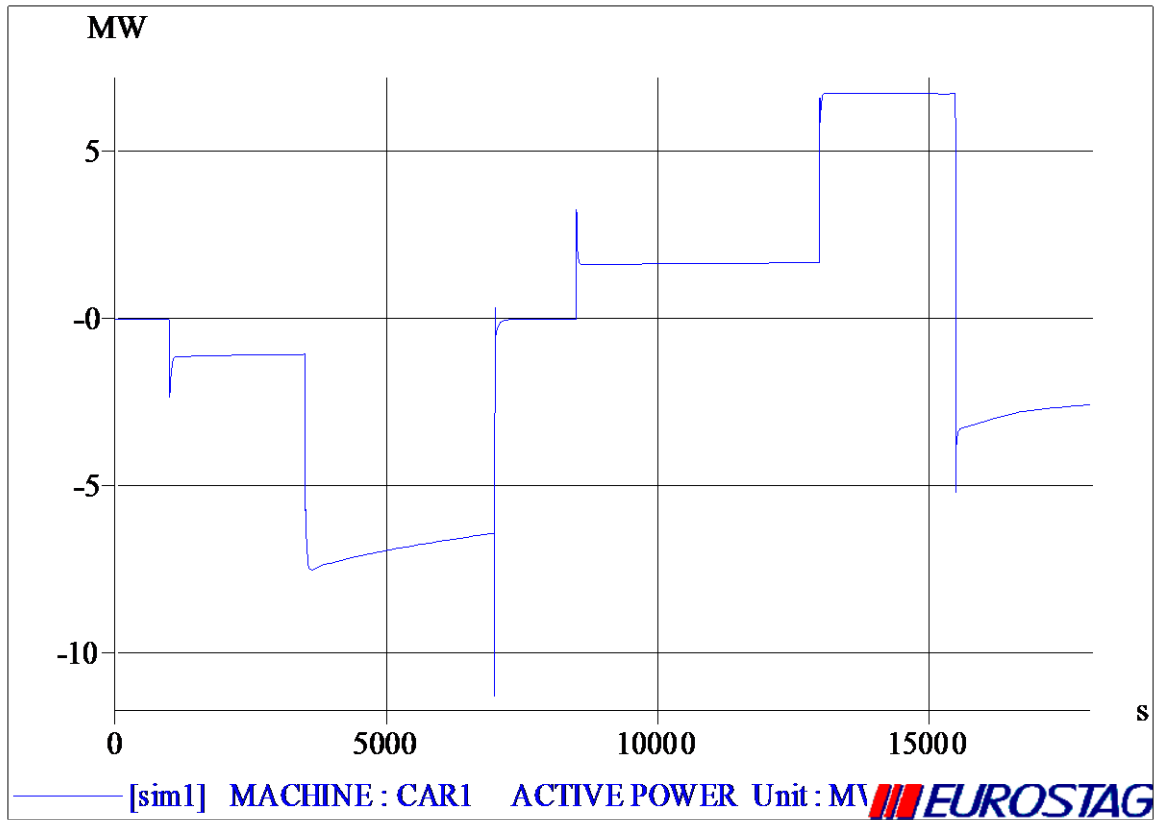
Όπως έχουμε δει και στις προηγούμενες περιπτώσεις μετά από κάθε μεταβολή φορτίου ακολουθεί ένα μεταβατικό φαινόμενο και στη συνέχεια σταθεροποιείται η συχνότητα σε κάποια τιμή.

Συνδέουμε και πάλι δύο ομάδες οχημάτων στο δίκτυο. Αυτήν τη φορά κάθε ομάδα αποτελείται από 5000 οχήματα. Η πρώτη ομάδα εφαρμόζει τη λειτουργία Battery SOC Holder και η επιθυμητή κατάσταση φόρτισης είναι ρυθμισμένη στην τιμή 80% ενώ η δεύτερη είναι σε λειτουργία Charging with Frequency Regulation με  $SOC_{in}=50\%$  και  $SOC_{out} = 80\%$ . Η προγραμματισμένη ισχύς φόρτισης είναι 9MW αφού έχουμε τα μισά οχήματα σε σύγκριση με την προηγούμενη περίπτωση. Εφαρμόσαμε την ίδια μεταβολή φορτίου στον κόμβο NLOAD και το διάγραμμα συχνότητας που προέκυψε από την προσομοίωση είναι το εξής:

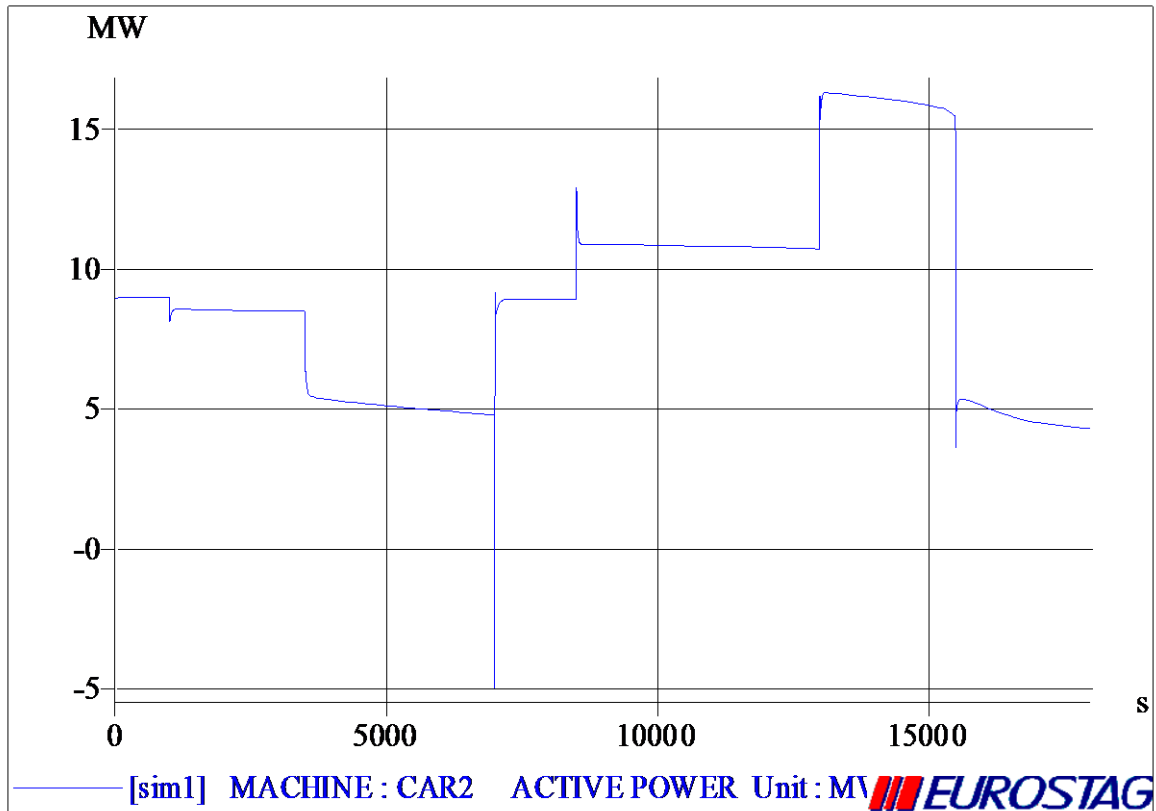


Σε σύγκριση με το προηγούμενο διάγραμμα παρατηρούμε τις εξής διαφορές. Οι μεταβατικές μεταβολές της συχνότητας είναι εντονότερες, δηλαδή οι στιγμιαίες τιμές της συχνότητας κατά τη χρονική στιγμή που λαμβάνει χώρα μία έντονη μεταβολή φορτίου αποκλίνουν περισσότερο από την ονομαστική τιμή των 50Hz. Έχουμε όμως το επιπλέον όφελος ότι τα οχήματα θα φορτίσουν, επομένως η ισχύς που πρέπει να προσφέρει η γεννήτρια ανά πάσα στιγμή είναι μεγαλύτερη από πριν. Παρόλα αυτά όμως, αν παρατηρήσει κανείς το διάγραμμα θα δει ότι οι ενδιάμεσες σταθερές τιμές της συχνότητας είναι πιο κοντά στην ονομαστική τιμή σε σύγκριση με την προηγούμενη περίπτωση. Επομένως συνολικά το δίκτυο ωφελείται από τη συμμετοχή των ηλεκτρικών οχημάτων.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχουν και οι υπόλοιπες καμπύλες των δύο ομάδων ηλεκτρικών οχημάτων. Στο παρακάτω διάγραμμα βλέπουμε την ισχύ που προσφέρει και απορροφά η πρώτη ομάδα. Παρατηρούμε ότι η ισχύς ακολουθεί τις μεταβολές της συχνότητας και αποκρίνεται αντίστοιχα. Η ύπαρξη κομματιών της καμπύλης που δεν είναι ευθύγραμμο οφείλεται στο γεγονός ότι εκείνη τη χρονική περίοδο η κατάσταση φόρτισης του οχήματος απομακρύνεται από την επιθυμητή και τα οχήματα προσπαθούν να μειώσουν την ανταλλαγή ισχύος με το δίκτυο. Στα κομμάτια που η ισχύς είναι μηδενική ενώ υπάρχει σφάλμα συχνότητας έχει ενεργοποιηθεί το dead band το οποίο δεν επιτρέπει στα οχήματα να αντιδράσουν, μιας και η τιμή της συχνότητας είναι πολύ κοντά στην ονομαστική.



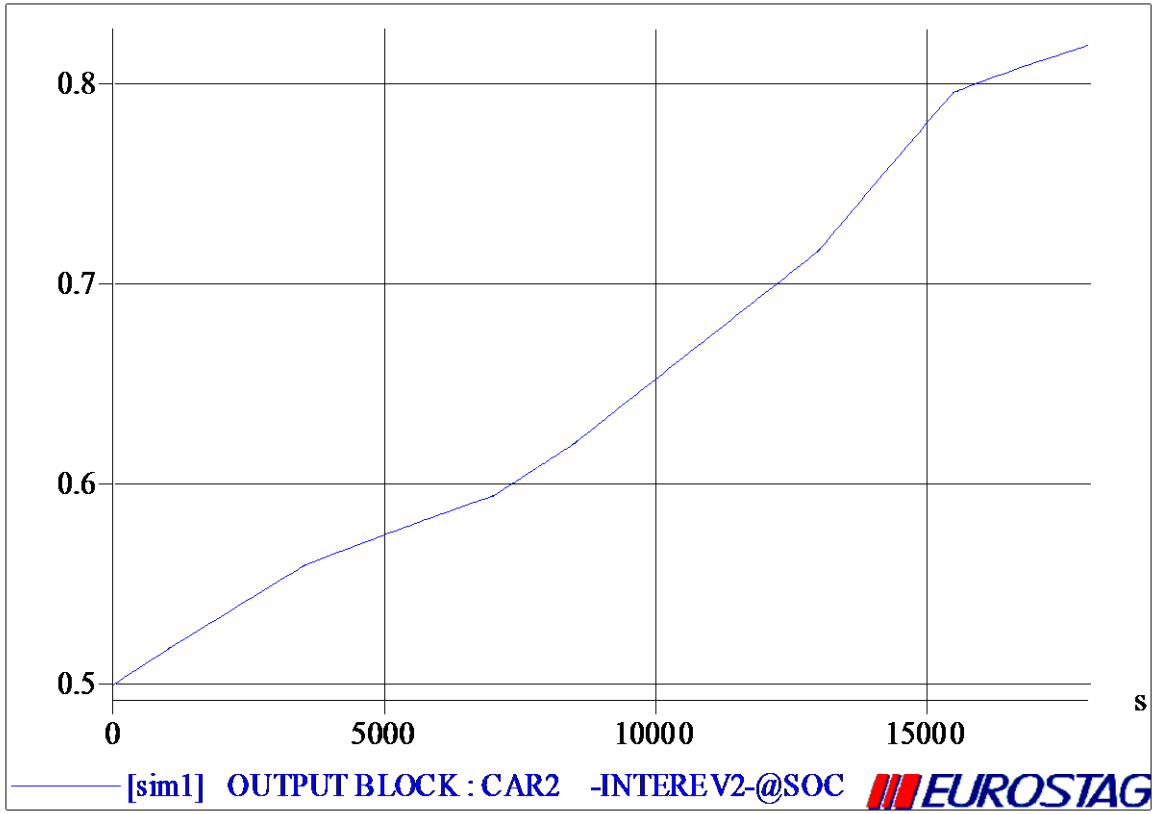
Η κατάσταση φόρτισης αλλάζει ρυθμό φόρτισης ή εκφόρτισης κάθε φορά που μεταβάλλεται η συχνότητα προσπαθώντας έτσι να υποστηρίξει τις ανάγκες του δικτύου. Η τελική τιμή είναι πολύ κοντά στην επιθυμητή, πράγμα που οφείλεται στο γεγονός ότι η μεταβολή του φορτίου είχε μέσο όρο κοντά στην αρχική τιμή του. Στο κομμάτι που έχει μηδενική κλίση έχει ενεργοποιηθεί το dead band.



Σε αυτό το διάγραμμα ισχύος της δεύτερης ομάδας οχημάτων μπορούμε να παρατηρήσουμε πολλά ενδιαφέροντα σημεία. Αρχικά τα οχήματα φορτίζουν με 9MW και στη συνέχεια μεταβάλλουν την ισχύ τους μετά από κάθε μεταβολή του φορτίου και κατά συνέπεια της συχνότητας. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το σημείο για  $t=7500s$  στο οποίο παρατηρούμε ότι ενώ έχουμε την επιθυμία να φορτίσουν τα οχήματα, η ανάγκη του δικτύου είναι τόσο μεγάλη που αναγκάζονται να προσφέρουν για ελάχιστα δευτερόλεπτα ισχύ στο δίκτυο.

Στο επόμενο διάγραμμα βλέπουμε την κατάσταση φόρτισης της δεύτερης ομάδας οχημάτων. Παρατηρούμε ότι τα οχήματα φορτίζουν σχεδόν καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης με εναλλασσόμενο ρυθμό φόρτισης, ανάλογα με την εκάστοτε τιμή της συχνότητας. Η τελική τιμή της κατάστασης φόρτισης είναι πολύ κοντά στην επιθυμητή 80%. Αυτό οφείλεται και πάλι στο γεγονός ότι το φορτίο του κόμβου NLOAD μεταβάλλεται με τέτοιο τρόπο ώστε ο μέσος όρος του να είναι περίπου ίσος με την αρχική του τιμή.





## 7. Συμπεράσματα – Περαιτέρω μελέτη

### Σύνοψη - Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήσαμε την συμβολή των ηλεκτρικών οχημάτων στην πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας. Στο κεφάλαιο 2 περιγράψαμε συνοπτικά τα στοιχεία που απαρτίζουν ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και τον τρόπο που πραγματοποιείται η ρύθμιση φορτίου συχνότητας. Στο κεφάλαιο 3 αναφερθήκαμε στον τρόπο με τον οποίο τα ηλεκτρικά οχήματα μπορούν να συμμετάσχουν στο δίκτυο, ποιες επικουρικές υπηρεσίες θα μπορούσαν δυνητικά να προσφέρουν καθώς και ποιο οικονομικό μοντέλο θα μπορούσε να εφαρμοστεί. Στο κεφάλαιο 4 περιγράψαμε το μοντέλο του συσσωρευτή και του συναθροιστή (aggregator). Παράλληλα παρουσιάστηκαν αποτελέσματα προσομοιώσεων στα οποία φαίνεται εμφανώς το πλεονέκτημα της τεχνικής ελέγχου adaptive droop control όσον αφορά την κατάσταση φόρτισης των οχημάτων. Στο κεφάλαιο 5 περιγράψαμε την πλατφόρμα λογισμικού Eurostag, καθώς την χρησιμοποιούμε για να προσομοιώσουμε ένα απλό ηλεκτρικό δίκτυο. Τέλος, τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων παρουσιάζονται αναλυτικά στο κεφάλαιο 6, έτσι ώστε να καλυφθούν όσο το δυνατόν περισσότερες περιπτώσεις λειτουργίας.

Η τεχνική ελέγχου adaptive droop control είναι σχεδιασμένη έτσι ώστε για συμμετρικές ή σχεδόν συμμετρικές μεταβολές συχνότητας να τείνει να επαναφέρει την κατάσταση φόρτισης του οχήματος στην τιμή που έχουμε ορίσει. Όπως αποδείχθηκε από τα διάφορα σενάρια προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν στο κεφάλαιο 4, η συγκεκριμένη τεχνική ελέγχου έχει συγκριτικό πλεονέκτημα σε σχέση με την υπάρχουσα τεχνική ελέγχου στην οποία δεν υπάρχει δυνατότητα ρύθμισης της επιθυμητής κατάστασης φόρτισης (SOC). Αξίζει εδώ να αναφερθεί ότι το πλεονέκτημα αυτό το είχε για όλα τα σενάρια που εξετάσαμε, επομένως μπορούμε να γενικεύσουμε και να συμπεράνουμε ότι σε κάθε περίπτωση, με την συγκεκριμένη τεχνική ελέγχου η κατάσταση φόρτισης του οχήματος θα αποκλίνει λιγότερο σε σχέση με την άλλη περίπτωση.

Όσον αφορά τη συμπεριφορά της μεθόδου ως προς το δίκτυο, προέκυψαν και πάλι ενδιαφέροντα συμπεράσματα. Μέσα από πολλές προσομοιώσεις και δοκιμές καταλήξαμε στο συμπέρασμα ότι τα ηλεκτρικά οχήματα μπορούν να παίξουν ενεργό ρόλο στην πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας. Μελετήσαμε δύο τεχνικές ελέγχου, την Battery Soc Holder και την Charging with Frequency Control. Στην πρώτη τα οχήματα επιθυμούν τη διατήρηση της κατάστασης φόρτισης που είχαν τη στιγμή που συνδέθηκαν στο δίκτυο ενώ στη δεύτερη, τα οχήματα επιθυμούν τη φόρτισή τους χωρίς όμως να πάψουν να συμμετέχουν ενεργά στη ρύθμιση συχνότητας.

Παρατηρήσαμε ότι και για τις δύο τεχνικές η συχνότητα μετά τις διαφορές μεταβολές σταθεροποιούνταν σε τιμή εγγύτερη στην ονομαστική των 50Hz. Κατά αυτόν τον τρόπο μπορούμε να πούμε ότι η ποιότητα της ισχύος βελτιώθηκε

σημαντικά. Πρέπει να επισημάνουμε ότι με τις συγκεκριμένες τιμές παραμέτρων παρατηρήθηκε και μία πολύ μικρού πλάτους ταλάντωση που οφείλεται στο γεγονός ότι τα οχήματα προσφέρουν σημαντική ισχύ στο δίκτυο. Για άλλες τιμές παραμέτρων αυτή η ταλάντωση μπορούσε να εξαλειφθεί, αλλά τα οχήματα θα προσέφεραν μικρότερη ισχύ στο δίκτυο.

Παρατηρήσαμε ότι για σχεδόν συμμετρικό φορτίο, φορτίο δηλαδή του οποίου ο μέσος όρος να είναι σχεδόν ίσος με το αρχικό φορτίο τα οχήματα που είναι ρυθμισμένα για διατήρηση της κατάστασης φόρτισης παραμένουν ικανοποιητικά κοντά στην επιθυμητή τιμή. Το ίδιο συμβαίνει και για τα οχήματα που είναι ρυθμισμένα για φόρτιση.

Χάρη σε αυτό το σύστημα λοιπόν ο χρήστης του οχήματος μπορεί να επιλέξει εάν επιθυμεί να φορτίσει το όχημά του ή απλώς να το συνδέσει στο δίκτυο. Το δίκτυο από την άλλη έχει επιπλέον διαθέσιμη ισχύ την οποία μπορεί να χρησιμοποιεί προκειμένου οι διακυμάνσεις ισχύος και τα μεταβατικά φαινόμενα για τις υπόλοιπες μονάδες του δικτύου να είναι μικρότερες. Έτσι εκμεταλλευόμενοι την πληθώρα αυτοκινήτων και κατά συνέπεια της διαθέσιμης ισχύος, μπορεί να γίνει ορθότερος προγραμματισμός και κατά συνέπεια το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας θα λειτουργεί πιο αποδοτικά χωρίς να απαιτείται η εγκατάσταση νέων μονάδων ή η διατήρηση δαπανηρών μορφών εφεδρείας. Είναι μία καθαρή μορφή ενέργειας που μπορεί να προσφέρεται τοπικά (πχ χώροι στάθμευσης μεγάλων πόλεων) και κατά συνέπεια απολαμβάνει τα πλεονεκτήματα της διεσπαρμένης παραγωγής.

Όσον αφορά τη βιωσιμότητα της μεθόδου, μπορούμε να πούμε ότι για να έχει νόημα η εφαρμογή της πρέπει να υπάρχουν αρκετά περισσότερα αμιγώς ηλεκτρικά ή υβριδικά οχήματα καθώς και κατάλληλοι σταθμοί φόρτισης. Για να πραγματοποιηθεί αυτό θα πρέπει να υπάρξουν κίνητρα για τους χρήστες των οχημάτων όπως για παράδειγμα φόρτιση με μειωμένα τιμολόγια, καθώς και για τις εταιρίες που θα αναλάβουν τη σύνδεση με το δίκτυο, όπως για παράδειγμα δωρεάν παραχώρηση χώρου κ.ά.

## Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί μία πρώτη ανάλυση της συμβολής που θα έχουν τα ηλεκτρικά οχήματα εφόσον συμμετέχουν στο δίκτυο μέσω της λειτουργίας V2G (Vehicle to Grid). Καλύφθηκαν πολλές περιπτώσεις λειτουργίας, για διάφορες μεταβολές φορτίου και διάφορες καταστάσεις φόρτισης. Παρόλα αυτά υπάρχουν προτάσεις για περαιτέρω έρευνα, η οποία θα εμβαθύνει ακόμη περισσότερο στον τομέα αυτό.

Πιο συγκεκριμένα δεν μελετήθηκε η επίδραση που έχει η τοπολογία του δικτύου στη λειτουργία της όλης μεθόδου. Το δίκτυο πάνω στο οποίο πραγματοποιήσαμε τις προσομοιώσεις είναι σχετικά απλό και ίσως να μην ανταποκρίνεται στα περισσότερα πραγματικά ηλεκτρικά δίκτυα. Για παράδειγμα θα μπορούσε να μελετηθεί στο ηλεκτρικό δίκτυο της Κρήτης (μη διασυνδεδεμένο), τοποθετώντας διάφορους

σταθμούς οχημάτων σε διάφορα σημεία του δικτύου. Παράλληλα θα μπορούσαν αν προσομοιωθούν πραγματικές καμπύλες φορτίου έτσι ώστε οι προσομοιώσεις να είναι πιο κοντά στην πραγματικότητα. Έχει ενδιαφέρον να μελετηθεί τόσο η επίδραση των ήδη υπάρχουσων γεννητριών και ρυθμιστών στο δίκτυο καθώς και η επίδραση στη διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Είναι αυτονόητο ότι εκτός από τη μελέτη μη διασυνδεδεμένων συστημάτων, θα ήταν πολύ χρήσιμη και η αντίστοιχη μελέτη διασυνδεδεμένων συστημάτων.

Παράλληλα θα ήταν πραγματικά ενδιαφέρουσα μία οικονομοτεχνική ανάλυση του συστήματος που περιγράψαμε προκειμένου να βρεθούν οι βασικοί παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται η οικονομική βιωσιμότητά του. Μία ανάλυση ευαισθησίας γύρω από αυτούς τους παράγοντες θα ξεκαθάριζε το τοπίο και θα μας έδινε σαφή εκτίμηση του πώς ακριβώς πρέπει να δομηθεί το επιχειρηματικό μοντέλο προκειμένου να λειτουργεί το όλο σύστημα κατά βέλτιστο τρόπο.

Ως προς την πλευρά του ίδιου του οχήματος, μία ενδιαφέρουσα μελέτη θα ήταν η ανάλυση της φθοράς των συσσωρευτών κατά τη σύνδεσή και παραμονή τους στο δίκτυο με ρυθμό φόρτισης που αυξομειώνεται συνεχώς. Επίσης μπορεί να ερευνηθεί μία τεχνική ελέγχου που συνδυάζει τις δύο που αναλύσαμε στην παρούσα εργασία (Battery SOC Holder και Charging with Frequency Regulation). Το όχημα, δηλαδή, να φορτίζει μέχρι την επιθυμητή τιμή του και στη συνέχεια να μπαίνει σε λειτουργία SOC Holder έτσι ώστε να διατηρεί την κατάσταση φόρτισης.

Τέλος θα ήταν σημαντική και η έρευνα στο κομμάτι της ευστάθειας του δικτύου, η μελέτη δηλαδή τόσο φαινομένων ευστάθειας μικρών διαταραχών όσο και φαινομένων μεταβατικής ευστάθειας. Έτσι θα μπορούμε να ελέγξουμε εάν και κατά πόσο η ύπαρξη ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο μπορεί να βοηθήσει σε ακραίες περιπτώσεις (απώλεια μονάδων ή γραμμών)

## 8. Βιβλιογραφία

- [1] YAO ZHANG, «Load frequency control of multiple-area power systems» Tsinghua University, July 2007
- [2] Hongming Yang, Member, IEEE, C.Y. Chung, Senior Member, IEEE, Junhua Zhao, Member, IEEE «Application of Plug-in Electric Vehicles to Frequency Regulation Based on Distributed Signal Acquisition via Limited Communication», IEEE PES Transactions on Power Systems
- [3] A.A. Pesarán and T. Markel, National Renewable Energy Laboratory, H.S. Tatariá, General Motors Corporation, D. Howell, U.S. Department of Energy «Battery Requirements for Plug-In Hybrid Electric Vehicles – Analysis and Rationale», Conference Paper [NREL/CP-540-42240], July 2009
- [4] Sekyung Han, Student Member, IEEE, Soohee Han, Member, IEEE, and Kaoru Sezaki, Member, IEEE «Development of an Optimal Vehicle-to-Grid Aggregator for Frequency Regulation», IEEE TRANSACTIONS ON SMART GRID, VOL. 1, NO. 1, JUNE 2010
- [5] David Dallinger, Daniel Krampe, and Martin Wietschel, « Vehicle-to-Grid Regulation Reserves Based on a Dynamic Simulation of Mobility Behavior», IEEE TRANSACTIONS ON SMART GRID, VOL. 2, NO. 2, JUNE 2011
- [6] P. Mitra G.K. Venayagamoorthy, «Wide area control for improving stability of a power system with plug-in electric vehicles», Published in IET Generation, Transmission & Distribution, 2010
- [7] IRC Report, Assessment of Plug-in Electric Vehicle Integration with ISO/RTO Systems, March 2010
- [8] Quantification of the increase in the amount of renewable power sources, namely wind power, that can be safely integrated in some EU countries, merge WP 3, task 3.3, part iii of deliverable d3.2
- [9] Theodore Bohn, Principle Engineer, Argonne National Laboratory, « Plug-in Electric Vehicle (PEV) Standards, Upcoming PEVs/Features, Charging System Overview» , Electric Vehicle Winter 2012 Quarterly Discussion Webinar February 27, 2012
- [10] Liu, Hui; Hu, Zechun; Song, Yonghua; Lin, Jin;, « Decentralized Vehicle-to-grid Control for Primary Frequency Regulation Considering Charging Demands», IEEE Transactions on Power Systems, TPWRS-01160-2012.R2, 2013
- [11] Chenye Wu, Student Member, IEEE, Hamed Mohsenian-Rad, Member, IEEE, Jianwei Huang, Member, IEEE, and Juri Jatskevich, Senior Member, IEEE « PEV-Based Combined Frequency and Voltage Regulation for Smart Grid»
- [12] Thomas B. Gage, Development and Evaluation of a Plug-in HEV with Vehicle-to-Grid Power Flow, AC Propulsion, 2003

- [13] Δημήτρης Γρ. Αθανασόπουλος, «Ανάλυση αξιοπιστίας και ασφάλειας λειτουργίας συστημάτων παροχής Ηλεκτρικής ισχύος σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις», Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ 2012
- [14] Στέφανος Α. Μπαρος, «Εκτίμηση Δυναμικής και Στατικής Ασφάλειας του Ελληνικού Διασυνδεδεμένου ΣΗΕ υπό μεγάλη διείσδυση ΑΠΕ σύμφωνα με το εθνικό σχέδιο δράσης για το 2020, Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ 2011
- [15] Ευάγγελος Ε. Τσιγγούνης, «Βέλτιστος προγραμματισμός της V2G λειτουργίας των ηλεκτρικών οχημάτων για την παροχή ενέργειας και επικουρικών υπηρεσιών στο δίκτυο», Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ 2013
- [16] Δημήτριος Ν. Παπαϊκονόμου, «Μοντελοποίηση Ανεμογεννήτριας Μεταβλητής Ταχύτητας με Γεννήτρια Επαγωγής Διπλής Τροφοδότησης», Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ 2010
- [17] Κ. Βουρνάς, Β.Κ. Παπαδιάς, Κ. Ντελκίς «Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας – έλεγχος και ευστάθεια συστήματος», Εκδόσεις συμμετρία, 2011
- [18] E. Sortomme, and M. A. El-Sharkawi, "Optimal scheduling of vehicle to grid energy and ancillary services," IEEE Trans. on Smart Grid, vol.3, no.1, pp.351-359, Mar. 2012
- [19] E. Sortomme, and M. A. El-Sharkawi, "Optimal charging strategies for unidirectional vehicle-to-grid," IEEE Trans. Smart Grid, vol.2, no.1 pp. 131-138, Mar. 2011.
- [20] R. C. Green II, L. Wang, and M. Alam, "The impact of plug-in hybrid electric vehicles on distribution networks: A review and outlook," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 15, no. 1, pp. 544-553, Jan. 2011.
- [21] 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.
- [22] H. Bevrani, Robust power system frequency control. New York: Springer-Verlag, 2009.
- [23] I. Cvetkovic, T. Thacker, D. Dong, G. Francis, V. Podosinov, D. Boroyevich, F. Wang, R. Burgos, G. Skutt, and J. Lesko, "Future home uninterruptible renewable energy system with vehicle-to-grid technology," in Energy Conversion Congress and Exposition, 2009. ECCE 2009. IEEE, sept. 2009, pp. 2675 -2681.