



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

**Αλγόριθμοι Βέλτιστου Προγραμματισμού και Αποκεντρωμένης  
Διαχείρισης της V2G λειτουργίας των ηλεκτρικών οχημάτων για  
την ένταξη τους στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Κωνσταντίνος Πανουργίας**

**Επιβλέπων :** Χατζηαργυρίου Νικόλαος  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2014





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

**Αλγόριθμοι Βέλτιστου Προγραμματισμού και Αποκεντρωμένης  
Διαχείρισης της V2G λειτουργίας των ηλεκτρικών οχημάτων για  
την ένταξη τους στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Κωνσταντίνος Πανουργίας**

**Επιβλέπων :** Χατζηαργυρίου Νικόλαος  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 6 Οκτωβρίου 2014.

.....

Χατζηαργυρίου Νικόλαος

.....

Παπαθανασίου Σταύρος

.....

Γεωργιάκης Παύλος

Αθήνα, Οκτώβριος 2014

.....  
Κωνσταντίνος Πανουργίας

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

Copyright © Κωνσταντίνος Πανουργίας , 2014

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 το συγγραφέα.

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

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η στροφή στην πράσινη ενέργεια τα τελευταία χρόνια αποτελεί επιτακτικό αίτημα της εποχής μας. Ένα βασικό μερίδιο της αλλαγής αυτής είναι και ο συστηματικός εξηλεκτρισμός του τομέα των μεταφορών, που καλείται προς αντιμετώπιση των υψηλών τιμών των καυσίμων και του ολοένα και αυξανόμενου ρυθμού εκπεμπόμενων ρύπων στο περιβάλλον. Για τους λόγους αυτούς έχουν αναπτυχθεί δυο τεχνολογίες V2G, για την εξυπηρέτηση των ενεργειακών αναγκών των οχημάτων με τον βέλτιστο οικονομικό τρόπο, διασφαλίζοντας παράλληλα την ομαλή λειτουργία του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας.

Η V2G λειτουργία εκμεταλλεύεται την αποθηκευτική ικανότητα των ηλεκτρικών οχημάτων και την αξιοποιεί για την ανάπτυξη νέων επιχειρηματικών μοντέλων για την παροχή επικουρικών υπηρεσιών ( ρύθμιση συχνότητας ή και στρεφόμενη εφεδρεία ) στους διαχειριστές του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Παράγοντας κλειδί για την βέλτιστη διαχείριση της ενεργειακής λειτουργίας (φόρτιση/εκφόρτιση) των ηλεκτρικών οχημάτων στην διασυνδεδεμένη λειτουργία τους, θα είναι ένας νέος ενεργειακός παίχτης, που θα ονομάζεται “Aggregator”.

Η παρούσα διπλωματική έχει ως πρώτο στόχο να συγκρίνει τις δυο βασικές τεχνολογίες V2G (Vehicle-to-Grid), 1) τη μονόδρομη V2G λειτουργία (Unidirectional V2G, UniV2G) για αποκλειστικά μονόπλευρη ροή ισχύος από το δίκτυο προς το ηλεκτρικό όχημα και 2) την αμφίδρομη V2G λειτουργία (Bidirectional V2G, BiV2G) για αμφίπλευρη ροή ισχύος μεταξύ δικτύου και ηλεκτρικού οχήματος. Για τον σκοπό αυτόν αναπτύχθηκαν δυο ξεχωριστοί αλγόριθμοι για UniV2G και BiV2G προγραμματισμό αντίστοιχα. Στόχος είναι η αξιοποίηση του ποιο αποδοτικού αλγόριθμου από κάποιον κεντρικό διαχειριστή (Aggregator) για τον βέλτιστο προγραμματισμό ενός στόλου ηλεκτρικών οχημάτων για παροχή επικουρικών υπηρεσιών στο δίκτυο (UniV2G/BiV2G), έτσι ώστε να επιτυγχάνεται μέγιστο οικονομικό κέρδος για αυτόν αλλά και τους καταναλωτές.

Ο δεύτερος στόχος είναι η ανάπτυξη κατάλληλων αλγορίθμων για την διαδικασία της κατανομής (Dispatch) με σκοπό τα οχήματα να ακολουθούν το πρόγραμμα που δηλώθηκε την προηγούμενη ημέρα κατά τον V2G προγραμματισμό με χρήση αποκεντρωμένου ελέγχου και παράλληλα να αποκρίνονται με ακρίβεια και αξιοπιστία στα σήματα του Διαχειριστή Συστήματος (παρουσιάζονται δύο μέθοδοι).

Στο κεφάλαιο 1 γίνεται μια περιγραφή της λειτουργίας των αγορών ενέργειας και των επικουρικών υπηρεσιών. Στο κεφάλαιο 2, περιγράφονται αναλυτικά τα βασικά εργαλεία προγραμματισμού που χρησιμοποιήθηκαν. Στο κεφάλαιο 3, αναλύονται οι τεχνολογίες της αμφίδρομης V2G λειτουργίας και της μονόδρομης V2G λειτουργίας. Στο κεφάλαιο 4, καταστρώνονται τα μαθηματικά προβλήματα των UniV2G και BiV2G προγραμματισμών καθώς και οι αλγόριθμοι κατανομής. Στο κεφάλαιο 5, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την επίλυση των δυο V2G προγραμματισμών με χρήση της γλώσσας GAMS, δίνοντας πραγματικά δεδομένα αγορών ηλεκτρικής ενέργειας (ERCOT). Επίσης παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τους αλγόριθμους κατανομής. Τέλος, στο κεφάλαιο 6 αναφέρονται συμπεράσματα από την ανάλυση.

## **ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ**

Ηλεκτρικά οχήματα, aggregator, vehicle-to-grid (V2G), επικοινωνιακές υπηρεσίες, ρύθμιση συχνότητας, στρεφόμενη εφεδρεία, προγραμματισμός, μεγιστοποίηση κέρδους

## ABSTRACT

Switching to green energy in recent years is a strong demand of our time. One major share of this change is the systematic electrification of the transport sector, which is called to deal with high fuel prices and the ever-increasing rate of emission of pollutants into the environment. For these reasons, two technologies have been developed for V2G operation, to serve the energy needs of electric vehicles (EVs) with the best economical manner, while ensuring smooth operation of the electric grid.

The V2G operation exploits the storage capacity of electric vehicles and utilizes to develop new business models for the provision of ancillary services (frequency regulation and/or spinning reserve) to the Electricity System Operator. Key factor for the optimal management of the energy function (charging / discharging) of electric vehicles in interconnected operation will be a new energy player, called "Aggregator".

This dissertation's first scope is to analyze and compare the two main V2G (Vehicle-to-Grid) technologies, 1) the Unidirectional V2G operation (UniV2G) for exclusively one-sided power flow from the grid to the electric vehicle, 2) the Bidirectional V2G operation (BiV2G) for power flow from the grid to the electric vehicle and vice versa. For this purpose two separate algorithms were developed for UniV2G and BiV2G scheduling respectively, in order one of them to be exploited by a central administrator (Aggregator) for optimal scheduling of an EV fleet for ancillary services to the grid (UniV2G/BiV2G), in such a way as to achieve maximum economic profits for him and his consumers.

The second objective is to develop suitable algorithms for the Dispatch process so that electric vehicles will be decentralized controlled to follow the V2G schedule that had been declared the previous day and respond in real time to the regulation signals of the Electricity System Operator (two methods will be presented).

Chapter 1 gives a description of the operation of energy markets and ancillary services. Chapter 2 describes in detail the basic programming tools used. Chapter 3 analyzes the technologies of BiV2G and UniV2G operation. Chapter 4 defines the math problems of the two V2G operations and the dispatch algorithms. Chapter 5 presents the results from solving the two V2G methods using the GAMS programming language, giving data from a real electricity market (ERCOT). It also presents the results of the dispatch algorithms. Finally, Chapter 6 presents conclusions from the analysis.

## **KEY WORDS**

Electric vehicles, aggregator, vehicle-to-grid (V2G), ancillary services, frequency regulation, spinning reserves, scheduling, profit maximization



## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2013-2014 στον τομέα Ηλεκτρικής Ισχύος της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Ε.Μ.Π. Υπεύθυνος κατά την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας ήταν ο Καθηγητής κ. Ν. Χατζηαργυρίου, στον οποίο οφείλω ιδιαίτερες ευχαριστίες για την ανάθεσή της.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Υποψήφιο Διδάκτορα κ. Ευάγγελο Καρφόπουλο για τη συνεχή βοήθεια, τις πολύτιμες συμβουλές και την αμέριστη καθοδήγηση, που μου παρείχε σε όλα τα στάδια ανάπτυξης και συγγραφής της παρούσας εργασίας.

Τέλος, οφείλω να ευχαριστήσω την οικογένεια μου, που με στήριξε με κάθε δυνατό τρόπο, υλικό και ψυχολογικό, καθ' όλη τη διάρκεια της φοιτητικής μου σταδιοδρομίας.

Κωνσταντίνος Πανουργιάς  
Οκτώβριος 2014

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>1</b>	<b>ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ.....</b>	<b>8</b>
1.1	Αγορές ηλεκτρικής ενέργειας .....	8
1.2	Κατηγοριοποίηση της ηλεκτρικής ισχύος.....	10
1.3	Τύποι επικουρικών υπηρεσιών.....	11
1.4	Στρεφόμενη εφεδρεία.....	13
1.5	Πρωτεύουσα Ρύθμιση (Συχνότητας).....	13
1.6	Δευτερεύουσα Ρύθμιση (Συχνότητας) .....	17
<b>2</b>	<b>ΓΕΝΙΚΑ ΕΡΓΑΛΕΙΑ.....</b>	<b>18</b>
2.1	Η γλώσσα GAMS.....	18
2.1.1	Σύνολα.....	20
2.1.2	Παράμετροι και Πίνακες .....	21
2.1.3	Μεταβλητές.....	22
2.1.4	Εξισώσεις .....	24
2.1.5	Μοντέλα.....	26
2.1.6	Η εντολή <i>Solve</i> .....	27
2.1.7	Η εντολή <i>Display</i> .....	27
2.1.8	Βρόχοι στο GAMS .....	28
2.1.9	Η εντολή <i>Loop</i> .....	28
2.1.10	Η εντολή <i>for</i> .....	28
2.1.11	Επικοινωνία του GAMS με το Excel με χρήση του GDX.....	29
2.1.12	Σχόλια .....	30
2.1.13	Έξοδος στο GAMS.....	30
2.2	Η γλώσσα Matlab .....	32
2.2.1	Εισαγωγή στην γλώσσα Matlab .....	33
2.2.2	Διανύσματα και Πίνακες.....	38
2.2.3	M-files ( αρχεία εντολών και αρχεία συναρτήσεων ).....	43
2.2.4	Γραφικά.....	45
2.2.5	Εξειδικευμένες Συναρτήσεις .....	47
2.2.6	Simulink.....	48
<b>3</b>	<b>V2G Λειτουργία.....</b>	<b>50</b>
3.1	Περιγραφή της V2G λειτουργίας.....	50

3.2	Μονόδρομη V2G Λειτουργία (Unidirectional V2G).....	50
3.3	Αμφίδρομη V2G Λειτουργία (Bidirectional V2G).....	51
3.4	Σύγκριση Αμφίδρομης και Μονόδρομης V2G Λειτουργίας .....	52
3.5	Πλεονεκτήματα της V2G λειτουργίας .....	52
3.6	Η ένταξη της V2G λειτουργίας στις Αγορές.....	53
3.7	Το Επιχειρηματικό Μοντέλο της V2G λειτουργίας.....	54
<b>4</b>	<b>Δυναμική Μοντελοποίηση .....</b>	<b>57</b>
4.1	Σκοπός του κεφαλαίου .....	57
4.2	Δυναμική Μοντελοποίηση του Unidirectional V2G προγραμματισμού .....	57
4.3	Δυναμική Μοντελοποίηση του Bidirectional V2G προγραμματισμού.....	64
4.4	Συνοπτική παρουσίαση των δυο τύπων Δυναμικής Μοντελοποίησης για V2G προγραμματισμού.....	70
4.5	Αλγόριθμος Κατανομής (Dispatch) .....	72
4.6	Συνοπτική παρουσίαση του V2G προγραμματισμού και της .....	82
<b>5</b>	<b>Αποτελέσματα Αλγορίθμων.....</b>	<b>83</b>
5.1	Δεδομένα εισόδου των αλγορίθμων.....	83
5.2	Αποτελέσματα αλγορίθμων ημέρας προγραμματισμού για BiV2G και UniV2G .....	88
5.3	Αποτελέσματα αλγορίθμων ημέρας κατανομής (Dispatch).....	90
5.3.1	<i>Αποτελέσματα Αλγόριθμου Φάσης 1. Αποκεντρωμένη ωριαία παρακολούθηση της προσυμφωνηθέντος ισχύος .....</i>	<i>90</i>
5.3.2	<i>Αποτελέσματα της 1<sup>ης</sup> μεθόδου του Αλγόριθμου Φάσης 2, για k-περιοδική ρύθμιση με χρήση Adaptive Droop Control.....</i>	<i>93</i>
5.3.3	<i>Αποτελέσματα της 2<sup>ης</sup> μεθόδου του Αλγόριθμου Φάσης 2, για k-περιοδική ρύθμιση χωρίς Adaptive Droop Control.....</i>	<i>98</i>
<b>6</b>	<b>Σύνοψη και Συμπεράσματα .....</b>	<b>100</b>
	<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΚΑΙ ΔΙΚΤΥΑΚΟΙ ΤΟΠΟΙ.....</b>	<b>102</b>

# 1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ

## 1.1 Αγορές ηλεκτρικής ενέργειας

Η επιβίωση και η ευημερία του σύγχρονου κόσμου βασίζεται στην ηλεκτρική ενέργεια καθώς η πλειονότητα των συσκευών ( οικιακών / βιομηχανικών) λειτουργεί με ηλεκτρικό ρεύμα. Η ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιείται από ένα μεγάλο αριθμό καταναλωτών και έχει ένα ευρύ φάσμα δραστηριοτήτων πολλών εξ αυτών κρίσιμων για την πρόοδο και την ανάπτυξη.

Ανά τον κόσμο η αγορά ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να γενικευθεί στο ακόλουθο απλοποιημένο σύστημα, όπου η ηλεκτρική ενέργεια αντιμετωπίζεται σαν ένα προϊόν το οποίο μπορεί να αγοραστεί και να πωληθεί. Μια ποιο μικροσκοπική εξέταση στις παγκόσμιες αγορές ηλεκτρικής ενέργειας ,αλλά αρκετά γενικευμένη έτσι ώστε να αποφύγουμε τις πολλές διαφοροποιήσεις που προκύπτουν ανά κράτος περιγράφεται στην ακόλουθη παράγραφο.

Η αγορά ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να χωριστεί σε δυο βασικά κομμάτια, την χονδρική αγορά (wholesale market) και την λιανική αγορά (retail market). Την χονδρική αγορά αποτελούν :

1. οι παραγωγοί (producers) και οι εισαγωγείς (importers), οι οποίοι πωλούν την ηλεκτρική ενέργεια που διαθέτουν στη χονδρική αγορά.
2. οι προμηθευτές (retailers) ,οι εξαγωγείς (exporters), οι οποίοι είναι η πιθανοί αγοραστές της διαθέσιμης στη χονδρική αγορά ηλεκτρικής ενέργειας.
3. οι μεγάλοι καταναλωτές που είναι αυτοπρομηθευόμενοι (self-consumers), είναι κυρίως βιομηχανικοί, οι οποίοι για να μηδενίσουν το ενδιάμεσο κόστος του προμηθευτή, αγοράζουν ηλεκτρική ενέργεια απευθείας από τη χονδρική αγορά.

Η διαδικασία της αγοραπωλησίας της ηλεκτρικής ενέργειας στη χονδρική αγορά ονομάζεται Ημερήσιος Ενεργειακός Προγραμματισμός (HEΠ) και ακολουθεί τα εξής βήματα, κάθε ώρα της ημέρας οι παραγωγοί/εισαγωγείς καταθέτουν προσφορές (offers) για συγκεκριμένη ποσότητα ενέργειας , συγκεκριμένη τιμή (πχ €/MWh) και συγκεκριμένη ώρα παράδοσης του επόμενου εικοσιτετράωρου πχ στις 08:00-09:00 της 14/01/2014 καταθέτουν για τις 08:00-09:00 της 15/01/2014. Εφόσον γίνει κατάθεση των προσφορών από τους παραγωγούς/εισαγωγείς δεν μπορεί να αποσυρθεί. Όμοια, οι προμηθευτές, οι εξαγωγείς και οι μεγάλοι καταναλωτές καταθέτουν από την προηγούμενη μέρα τις αναμενόμενες ζητούμενες ποσότητες (bids). Τελικά, η τιμή του συστήματος προκύπτει από τη γραμμική ελαχιστοποίηση του γινομένου της τιμής επί την ποσότητα, με βάση πάντα τους φυσικούς περιορισμούς που θέτει η αγορά. Πρόκειται για μια δημοπρασία στην οποία προτεραιότητα πώλησης έχει αυτός που διαθέτει την απαιτούμενη ζητούμενη ποσότητα στην χαμηλότερη τιμή. Το σημείο, όπου ισορροπεί η προσφορά με τη ζήτηση, αποτελεί την Οριακή Τιμή του Συστήματος ΟΤΣ (marginal price), δηλαδή την τιμή, στην οποία θα πωλήσουν οι παραγωγοί την ενέργεια τους ανεξάρτητα από την ποσότητα που παρέχουν και στην οποία θα αγοράσουν οι προμηθευτές το ποσό της ενέργειας, που είχαν ζητήσει για την εκάστοτε ώρα της ημέρας. Ο Ημερήσιος Ενεργειακός Προγραμματισμός (HEΠ) γίνεται από τον Διαχειριστή της Αγοράς

Ηλεκτρικής Ενέργειας σε συνεργασία με τον Διαχειριστή Συστήματος Μεταφοράς. Ο Διαχειριστής Συστήματος Μεταφοράς ή αλλιώς Ανεξάρτητος Διαχειριστής Συστήματος (Transfer System Operator/TSO ή Independent System Operator/ISO), ο οποίος έχει την πρωταρχική ευθύνη της διατήρησης της ασφάλειας του συστήματος ενέργειας. Λέγεται ανεξάρτητος επειδή σ' ένα ανταγωνιστικό περιβάλλον το σύστημα πρέπει να λειτουργεί με τέτοιο τρόπο ώστε να μην ευνοεί ή αδικεί κάποιον συμμετέχοντα στην αγορά σε βάρος κάποιου άλλου. Ένας ανεξάρτητος λειτουργός έχει συνήθως στην κατοχή του μόνο το υπολογιστικό και τηλεπικοινωνιακό κεφάλαιο που χρειάζεται ώστε να μπορεί να παρακολουθεί και να ελέγχει το σύστημα ενέργειας.

Η διαδικασία της αγοραπωλησίας της ηλεκτρικής ενέργειας στη λιανική αγορά, αποτελείται από :

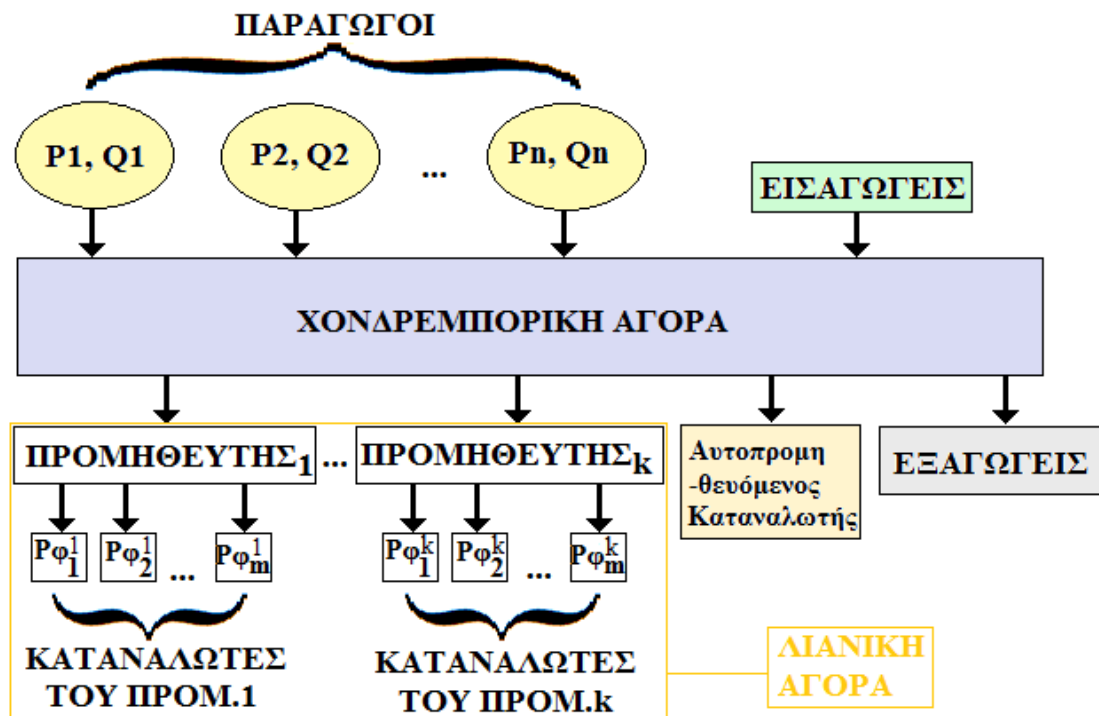
1. τους προμηθευτές, οι οποίοι έχοντας αγοράσει ενέργεια από την χονδρική αγορά την πωλούν στους τελικούς καταναλωτές.
2. τους τελικούς καταναλωτές, οι οποίοι μπορούν να επιλέγουν ελεύθερα ποιά εταιρεία θα τους προμηθεύει με ηλεκτρική ενέργεια.

Οι τιμές τη λιανικής αγοράς τείνουν μακροπρόθεσμα προς την ΟΤΣ, καθώς οι προμηθευτές ανταγωνίζονται μεταξύ τους προσφέροντας χαμηλότερα τιμολόγια στους τελικούς καταναλωτές.

Τέλος σημαντικό ρόλο παίζει και η Ρυθμιστική Αρχή, μια κοινοβουλευτική οργάνωση υπεύθυνη για την εξασφάλιση της σωστής και αποδοτικής λειτουργίας του τομέα της ηλεκτρικής ενέργειας. Ορίζει ή εγκρίνει τους κανόνες της αγοράς της και ερευνά υποθέσεις που σχετίζονται με κατάχρησή της [1],[2].



Εικόνα 1.1.1: Συνολικές καμπύλες προσφοράς-ζήτησης και καθορισμός της Οριακής Τιμής Συστήματος [3]



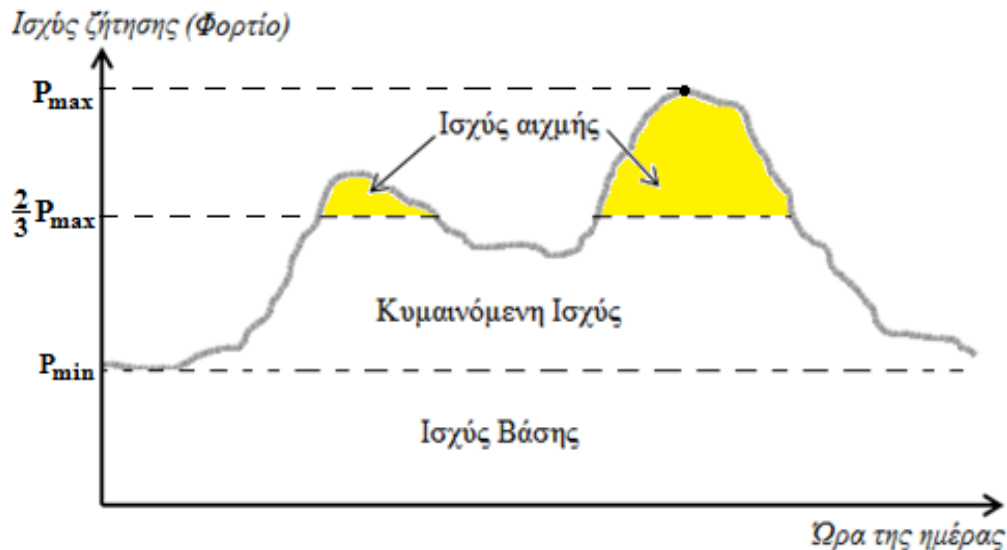
Εικόνα 1.1.2: Σχηματική απεικόνιση της δομής της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας [3]

## 1.2 Κατηγοριοποίηση της ηλεκτρικής ισχύος

Η διάκριση της διαπραγματευόμενης ισχύος σε τρεις διαφορετικές κατηγορίες, είναι αναγκαία για τον ορισμό και την σωστή διαχείριση των επικουρικών υπηρεσιών. Άρα η ισχύς κατηγοριοποιείται σε :

1. **Ισχύς Βάσης (Baseload Power)**, είναι η ισχύς που απαιτείται επί 24ώρου βάσης. Συνήθως προέρχεται από τους μεγάλους σταθμούς παραγωγής ενέργειας, πχ θερμικούς, λιγνιτικούς, πυρηνικούς, μέσω μακροπρόθεσμων συμβολαίων για σταθερή παραγωγή με μικρό κόστος ανά παραγόμενη κιλοβατώρα (kWh). Η **ζώνη βάσης** είναι το φορτίο που βρίσκεται κάτω από το κατώτερο σημείο της καμπύλης.
2. **Ισχύς Αιχμής (Peak Power)**, είναι η ισχύς που παράγεται ή αγοράζεται τις ώρες εκείνες της ημέρας, κατά τις οποίες αναμένεται μεγάλη κατανάλωση ισχύος. Συνήθως, η ενέργεια αυτή παράγεται από σταθμούς, που έχουν την ικανότητα να τίθενται σε λειτουργία και να αποσυνδέονται ταχύτατα, όπως είναι οι τουρμπίνες φυσικού αερίου. Δεδομένου πως η ισχύς αιχμής χρειάζεται μόνο για κάποιες εκατοντάδες ώρες το χρόνο, είναι πιο οικονομικό να προέρχεται από γεννήτριες χαμηλότερου κεφαλαιακού κόστους, ακόμα και αν η προκύπτουσα κιλοβατώρα είναι πιο ακριβή. Η **ζώνη αιχμής** αποτελεί το τμήμα με τις πιο απότομες μεταβολές, τη μικρότερη διάρκεια, και θεωρείται ότι περιλαμβάνει φορτία που υπερβαίνουν τα 2/3 της αιχμής της χρονολογικής καμπύλης φορτίου.

3. **Κυμαινόμενη Ισχύς (Fickle Power)**, είναι η ισχύς στο ενδιάμεσο τμήμα του διαγράμματος καμπύλης φορτίου μεταξύ ζώνης βάσης και ζώνης αιχμής, όπου καλείται **ζώνη κυμαινόμενου φορτίου**, το οποίο μεταβάλλεται σχεδόν καθ' όλη τη διάρκεια της εξεταζόμενης περιόδου. [4]



Εικόνα 1.2.1: Χρονολογική καμπύλη φορτίου [4]

### 1.3 Τύποι επικουρικών υπηρεσιών

Η απαίτηση της ύπαρξης επικουρικών υπηρεσιών προέρχεται από το γεγονός της απώλειας ταύτισης της καμπύλης παραγωγής ενέργειας και της καμπύλης ζήτησης φορτίου. Οι λόγοι που καταστύβουν την ταύτιση αυτή αδύνατη, είναι:

1. Η αδυναμία πρόβλεψης του συνολικού φορτίου, λόγω της άμεσης εξάρτησης του από την ενεργοποίηση/απενεργοποίηση εκατομμυρίων ξεχωριστών ηλεκτρικών συσκευών.
2. Η αδυναμία πρόβλεψης της συνολικής παραγωγής ενέργειας, λόγω απρόβλεπτων βλαβών/αστοχιών του εξοπλισμού και άμεσης εξάρτησης των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας από καιρικές συνθήκες.

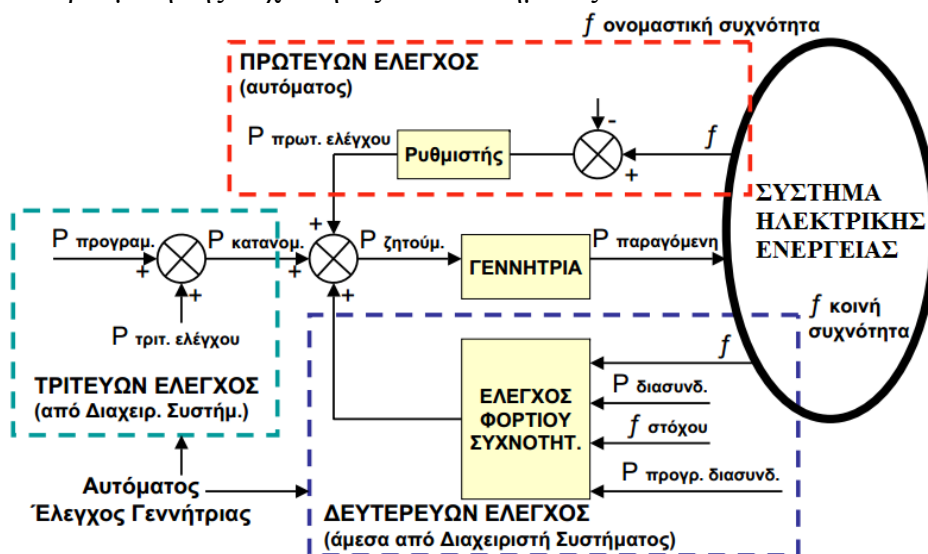
Για την επίλυση του προβλήματος ταύτισης παραγωγής-ζήτησης για την εξασφάλιση της ποιότητας της παραγόμενης ισχύος και την ευστάθεια του συστήματος, κάνουμε χρήση των επικουρικών υπηρεσιών.

Οι επικουρικές υπηρεσίες αποτελούν ηλεκτρική ισχύ, που βρίσκεται σε αναμονή, έτοιμη να προσφερθεί στο σύστημα, για την μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας από τους Σταθμούς Παραγωγής προς τα σημεία κατανάλωσης με ποιότητα παροχής τάσης και εντός ορίων συχνότητας. Ο εποπτικός έλεγχος των επικουρικών υπηρεσιών γίνεται από τον Διαχειριστή του Συστήματος Μεταφοράς ο οποίος καθορίζει ποιές από αυτές θα πρέπει να παρέχονται, πότε και από ποιον. Η παροχή των διαφόρων επικουρικών υπηρεσιών, μπορεί να αποτελεί υποχρέωση των διαφόρων παραγωγών ηλεκτρικής ενέργειας και ως εκ τούτου να μην ανταμείβεται από τον Διαχειριστή του Συστήματος, είτε να υφίστανται ειδικές αγορές, ανάλογης αλλά αρκετά διαφορετικής, λειτουργίας με αυτήν της χονδρικής αγοράς ενέργειας, οπότε και οι διάφοροι παραγωγοί έχουν οικονομικό κίνητρο να τις παρέχουν στον

Διαχειριστή του Συστήματος και ανταγωνίζονται μεταξύ τους για να επιλεγούν από αυτόν. Τα είδη επικουρικών υπηρεσιών, είναι:

- Πρωτεύουσα Ρύθμιση Συστήματος, τοπικά αυτόματη, αποκρίνεται σε χρονικό διάστημα msec για  $\Delta f \geq 200mHz$ . Η σταθεροποίηση της συχνότητας γίνεται σε διάστημα μερικών δευτερολέπτων. Γίνεται μετατροπή, από τον ρυθμιστή στροφών, της μεταβολής της ταχύτητας περιστροφής της γεννήτριας σε σήμα ρύθμισης της παραγόμενης μηχανικής ισχύος του εκάστοτε στροβίλου.
- Δευτερεύουσα Ρύθμιση Συστήματος, κεντρικά τηλερυθμιζόμενη από τον TSO, αποκρίνεται σε χρονικό διάστημα μικρότερο των 10sec και αποκαθιστά το μόνιμο σφάλμα της πρωτεύουσας ρύθμισης. Ο μηδενισμός του σφάλματος γίνεται σε διάστημα μερικών λεπτών. Ακολουθεί την πρωτεύουσα ρύθμιση μετατρέποντας, μέσω των ρυθμιστών στροφών, τα απομένοντα σφάλματα συχνότητας σε σήματα ρύθμισης ταχύτητας των γεννητριών.
- Τριτεύουσα Ρύθμιση και Στρεφόμενη Εφεδρεία, περιοδική ρύθμιση από τον TSO, ανταποκρίνεται σε περιοδικά χρονικά διαστήματα μικρότερα των 15min.
- Τριτεύουσα Μη Στρεφόμενη Εφεδρεία Μονάδας, περιοδική ρύθμιση από τον Διαχειριστή Συστήματος, ανταποκρίνεται σε περιοδικά χρονικά διαστήματα μικρότερα των 15min.
- Στατή Εφεδρεία Μονάδας, περιοδική ρύθμιση από τον Διαχειριστή Συστήματος, ανταποκρίνεται σε περιοδικά χρονικά διαστήματα μικρότερα των 15min.
- Ρύθμιση Τάσης, γίνεται σε περιόδους υψηλής ζήτησης. Γίνεται σε διάστημα κάποιων λεπτών.
- Επανεκκίνηση Συστήματος, γίνεται μετά από διακοπή κάποιου τμήματος του ΣΗΕ (black-out). Γίνεται σε διάστημα κάποιων λεπτών.

Μια απλοποιημένη περιγραφή της Ρύθμισης Συχνότητας του συστήματος δίνεται στην εικόνα 1.1.4, όπου φαίνεται η πρωτεύουσα, δευτερεύουσα και τριτεύουσα ρύθμιση της συχνότητας του συστήματος.



Εικόνα 1.3.1: Τα είδη ρύθμισης συχνότητας [5]



Στην παρούσα διπλωματική, θα αναφερθούμε σε Δευτερεύουσα Ρύθμιση Συχνότητας και στην Στρεφόμενη Εφεδρεία [6], [7].

#### 1.4 Στρεφόμενη εφεδρεία

Η Στρεφόμενη εφεδρεία (spinning reserve) είναι η ικανότητα παραγωγής ισχύς από τις γεννήτριες πάνω από την προκαθορισμένη εν λειτουργία ισχύ έως το όριο της ονομαστικής τους ισχύς. Γενικά,

*Στρεφόμενη Εφεδρεία  $G_i = \text{Ονομαστική Ισχύς } G_i - \text{Ισχύς Λειτουργίας } G_i$   
, όπου  $G_i = i^n$  γεννήτρια*

Η Στρεφόμενη Εφεδρεία βρίσκεται σε αναμονή και μπορεί να κληθεί ανά πάσα στιγμή από το διαχειριστή του δικτύου. Η ονομασία στρεφόμενη προέρχεται από την χρήση γεννητριών οι οποίες είναι συγχρονισμένες με το δίκτυο για να την διαχωρίσει από την μη στρεφόμενη (non-spinning reserve), που περιγράφει την επιπλέον ισχύ, που μπορούν να δώσουν γεννήτριες, οι οποίες δεν είναι συγχρονισμένες με το δίκτυο. Ο λόγος ύπαρξης της είναι η εξυπηρέτηση του φορτίου σε περίπτωση που συμβεί κάποιο αναπάντεχο γεγονός, όπως παράδειγμα η απώλεια κάποιας γεννήτριας του δικτύου. Η ποσότητα στρεφόμενης εφεδρείας (σε MW εφόσον μιλάμε για ισχύ), που απαιτείται κάθε στιγμή μπορεί να εκφράζεται ως ποσοστό επί της ισχύος του φορτίου (της τάξης του 10%), ώστε να καλύπτει αβεβαιότητες της πρόβλεψης φορτίου, είτε μπορεί να συνδέεται με την απαίτηση τήρησης «εφεδρείας της μεγαλύτερης μονάδος», ώστε να μπορεί να αντιμετωπιστεί η απώλεια οποιασδήποτε συμβατικής μονάδος, χωρίς περικοπές φορτίου. Η χρηματική ανταμοιβή της παραγωγικής μονάδας που διαθέτει την εφεδρεία, γίνεται με βάση το χρόνο που είναι διαθέσιμη για χρήση ακόμα και αν δεν κληθεί ποτέ από τον Διαχειριστή του Συστήματος να παράσχει στο δίκτυο ενέργεια. Η κοστολόγηση γίνεται σε MW-h (και όχι MWh, που είναι μονάδα μέτρησης ενέργειας) ανάλογα με την τιμή της MW-h που έχει καθοριστεί για εκείνη την ώρα της ημέρας στην αγορά. Αν η παραπάνω παραγωγική μονάδα κληθεί να παράγει κάποια ποσότητα ενέργειας, θα ανταμειφθεί επιπλέον για την ποσότητα αυτή, με την ΟΤΣ εκείνης της ώρας [5], [6], [7].

#### 1.5 Πρωτεύουσα Ρύθμιση (Συχνότητας)

Η ρύθμιση συχνότητας ή απλώς ρύθμιση (regulation) είναι μια επικουρική υπηρεσία, που σκοπό έχει τη διατήρηση της συχνότητας του δικτύου στα επιτρεπτά επίπεδα (στην Ευρώπη στα 50 Hz, στις ΗΠΑ στα 60 Hz), γεγονός που επιτυγχάνεται με την ισοστάθμιση, κάθε στιγμή, της παραγωγής με τη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας. Ο Διαχειριστής του Συστήματος Μεταφοράς πρέπει να έχει τον άμεσο και αυτόματο έλεγχο των μονάδων που λειτουργούν ως μονάδες ρύθμισης και μάλιστα σε πραγματικό χρόνο, ώστε να είναι ικανός να τους στέλνει σήματα, στα οποία πρέπει να απαντούν σε χρονικό ορίζοντα δευτερολέπτων με την κατάλληλη αύξηση ή μείωση

της ισχύος εξόδου τους. Η πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας, αποτελεί μια πλήρως αποκεντρωμένη αυτόματη ρύθμιση. Ο έλεγχος εφαρμόζεται μέσα σε λίγα msec από την αναγνώριση της διαταραχής στην συχνότητα του ΣΗΕ της τάξης  $\Delta f \geq 200mHz$ . Η αποκατάσταση γίνεται μέσα σε μερικά δευτερόλεπτα διατηρώντας όμως ένα μόνιμο σφάλμα. Η διαδικασία αναλύεται σε βήματα παρακάτω [8]:

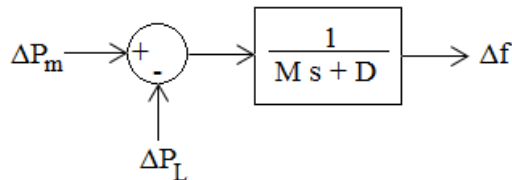
- ❖ Αρχικά έστω ότι ένας στρόβιλος τροφοδοτεί με μηχανική ισχύ μια γεννήτρια η οποία την μετατρέπει σε ηλεκτρική εξυπηρετώντας ένα συγκεκριμένο φορτίο. Θεωρούμε ότι βρίσκεται σε μόνιμη κατάσταση οπότε υπάρχει ισορροπία μεταξύ παραγωγής και ζήτησης.
- ❖ Κάποια στιγμή συμβαίνει μια μεταβολή στο φορτίο, το οποίο μπορεί να οφείλεται είτε σε αύξηση είτε σε μείωση της κατανάλωσης την συγκεκριμένη στιγμή. Οπότε οι καμπύλες παραγωγής και ζήτησης δεν ταυτίζονται, με αποτέλεσμα η μηχανική ισχύς που αποδίδεται στην γεννήτρια να μην είναι ίση με την ηλεκτρική ισχύ που παράγει. Το σφάλμα αυτό έχει ως συνέπεια την μεταβολή της ταχύτητας του δρομέα και άρα της συχνότητας του συστήματος. Το φορτίο που τροφοδοτεί η γεννήτρια συνήθως είναι σύνθετο, αφού εμπεριέχει κινητήρες, ανεμιστήρες, αντλίες κ.α. οπότε μπορούμε να διαχωρίσουμε την μεταβολή της ηλεκτρικής ισχύος ως έξης,

$$\Delta P_e = \Delta P_L + D \Delta f$$

Όπου,

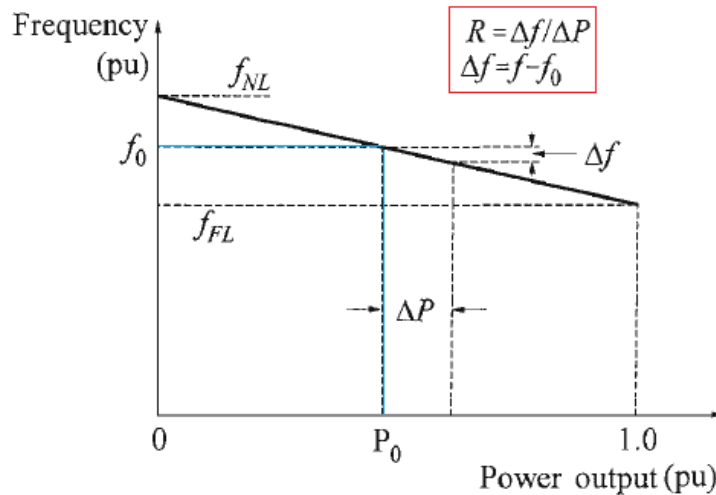
- $\Delta P_e$  , είναι η μεταβολή της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγει η γεννήτρια λόγω της μεταβολής του φορτίου.
- $\Delta P_L$  , είναι η ανεξάρτητη από την συχνότητα συνιστώσα μεταβολής της ζήτησης.
- $\Delta f$  , είναι η εξαρτημένη από την συχνότητα συνιστώσα μεταβολής της ζήτησης.
- $D$  , είναι η σταθερά απόρριψης φορτίου και εκφράζει την ποσοστιαία μεταβολή του φορτίου για μεταβολή κατά 1% της συχνότητας, π.χ.  $D=2$  σημαίνει ότι μια μεταβολή της συχνότητας κατά 1% θα έχει ως αποτέλεσμα την μεταβολή του φορτίου κατά 2%. Τυπικό πεδίο τιμών της  $D$  είναι το διάστημα [1, 2].

Στο κάτω μπλοκ διάγραμμα φαίνεται η σχέση μεταξύ του σφάλματος της μηχανικής  $\Delta P_m$  και της ηλεκτρικής ζήτησης ισχύος  $\Delta P_L$ , με το σφάλμα συχνότητας  $\Delta f$ .



Εικόνα.1.5.1 Μπλοκ Διάγραμμα Γεννήτριας. Όπου  $M$  είναι η σταθερά αδράνειας της γεννήτριας (τυπική τιμή 10s) και  $D$  είναι η σταθερά απόρριψης φορτίου [8].

Την μεταβολή στην συχνότητα αναλαμβάνει να μειώσει ο ρυθμιστής στροφών μαζί με το σύστημα ανάδρασης. Για μια συγκεκριμένη θέση  $(f_0, P_0)$  του ρυθμιστή στροφών (όπου  $f_0$  είναι μια δεδομένη συχνότητα αναφοράς, συνήθως 50Hz και  $P_0$  είναι το φορτίο που καλείται να ικανοποιήσει η γεννήτρια) αντιστοιχεί μια ευθύγραμμη χαρακτηριστική  $f-P$ , της γεννήτριας.



Εικόνα.1.5.2 Χαρακτηριστική  $f-P$  γεννήτριας για θέση  $(f_0, P_0)$  του ρυθμιστή στροφών [8].

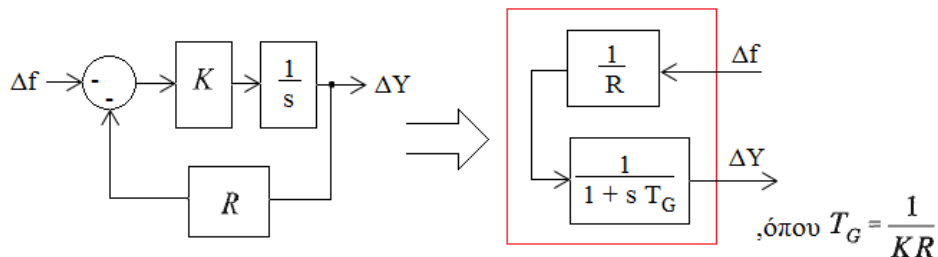
Η κλίση της χαρακτηριστικής καλείται στατισμός και ορίζεται,

$$R = \frac{\Delta f}{\Delta P} = \frac{f_{NL} - f_{FL}}{f_0}$$

Όπου,

- $f_{NL}$ , είναι η συχνότητα της γεννήτριας στην μόνιμη κατάσταση χωρίς φορτίο.
- $f_{FL}$ , είναι η συχνότητα της γεννήτριας στην μόνιμη κατάσταση με πλήρες φορτίο.
- $f_0$ , είναι η ονομαστική συχνότητα της γεννήτριας.

Η μεταβολή  $\Delta f$  γίνεται αντιληπτή από μια συσκευή μέτρησης της συχνότητας της γεννήτριας, η οποία την μετατρέπει σε κατάλληλο σήμα έλεγχου, το οποίο αποστέλλει ως ανάδραση στον ρυθμιστή στροφών.



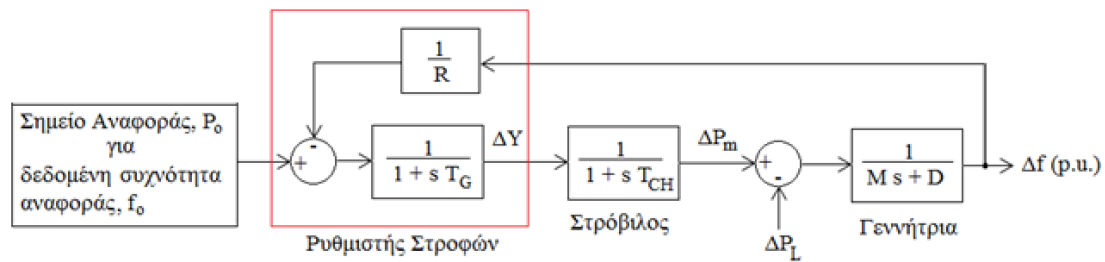
Εικόνα.1.5.3 Απλοποίηση Μπλοκ Διαγράμματος Ελεγκτή, όπου  $T_G = 1/KR$  είναι η σταθερά χρόνου του ρυθμιστή στροφών (τυπική τιμή 0,2s) [8].

Τέλος, ο ρυθμιστή στροφών με χρήση,

- της χαρακτηριστικής  $f-P$  της γεννήτριας,
- του σημείου αναφοράς ( $f_0, P_0$ ) και
- του σήματος ανάδρασης  $\Delta f$ .

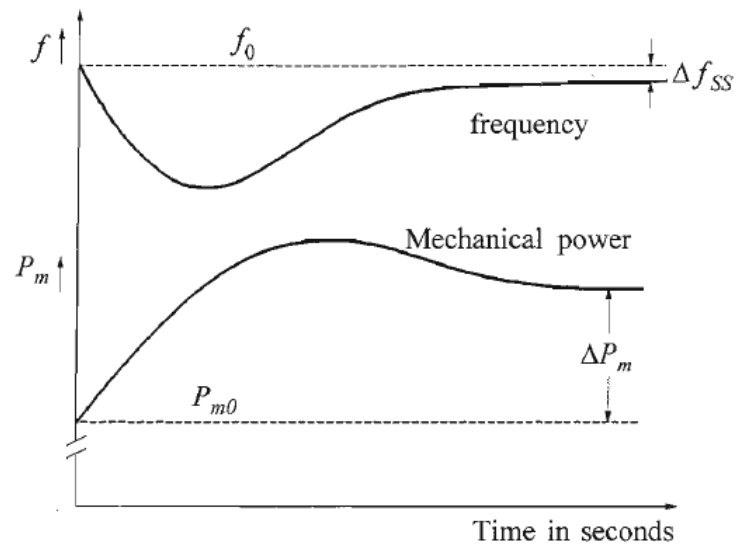
προσαρμόζει κατάλληλα την μηχανική ισχύ που αποδίδει ο στρόβιλος για να μειώσει το σφάλμα συχνότητας.

Το συνολικό μπλοκ διάγραμμα του έλεγχου παρουσιάζεται στην κάτω εικόνα.



Εικόνα.1.5.4. Μπλοκ Διάγραμμα Έλεγχου Στροβίλου-Γεννήτριας, με χρήση Ρυθμιστή Στροφών. Όπου  $T_{CH}$  είναι η σταθερά χρόνου του στρόβιλου (τυπική τιμή 0,3s) [8].

Η απόκριση του πρωτεύοντος ελέγχου μπορεί να είναι άμεση αλλά αφήνει πάντα ένα μόνιμο σφάλμα, το οποίο φαίνεται στην ακόλουθη εικόνα.

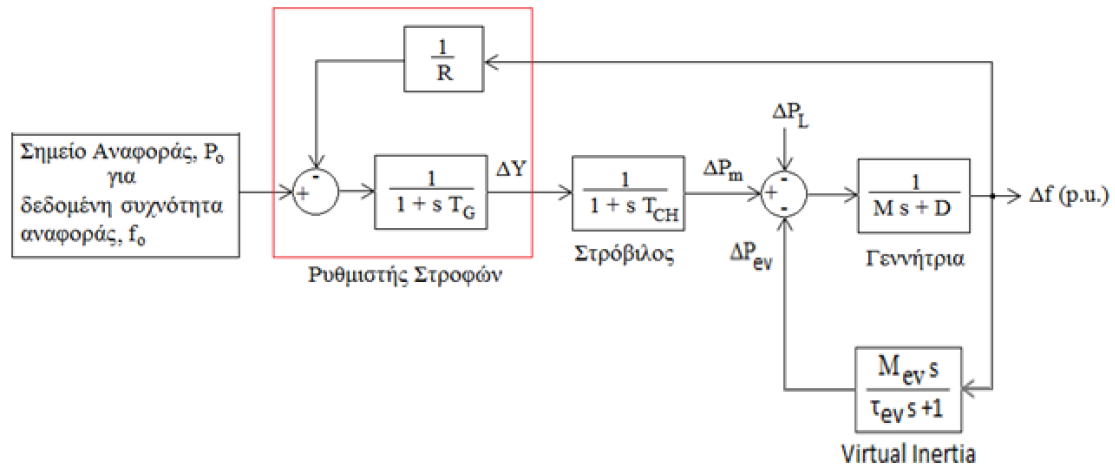


Εικόνα.1.5.5. Απόκριση της μονάδας παραγωγής με χρήση του πρωτεύοντος έλεγχου [8].

Για την προσαρμογή του πρωτεύοντος έλεγχου σε ένα Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας στο οποίο έχουμε προσθέσει ένα σύνολο ηλεκτρικών οχημάτων, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την έννοια της Εικονικής Αδράνειας (Virtual Inertia) [9].

Η **Εικονική Αδράνεια (Virtual Inertia)**, ορίζεται ως η προσέγγιση της αδράνειας της στρεφόμενης μάζας μιας γεννήτριας με χρήση έγχυσης ισχύος η οποία είναι συνάρτηση της παραγωγού της συχνότητας,  $s \Delta f$ .

Στην περίπτωση της V2G λειτουργίας, ο ρόλος της εικονικής αδράνειας προσεγγίζεται από το πλήθος των ηλεκτρικών οχημάτων που βρίσκεται συνδεδεμένο στο δίκτυο κάθε φορά. Ο πλήρης πρωτεύον έλεγχος του δικτύου, με προσθήκη των EVs, ως εικονική αδράνεια φαίνεται στην εικόνα 4.5.6.



Εικόνα.1.5.6. Μπλοκ Διάγραμμα 1<sup>ov</sup> Έλεγχου, με την μέθοδο της Virtual Inertia. [9].

Η αδράνεια του δικτύου προσεγγίζεται αρκετά καλά από την αδράνεια μιας γεννήτριας Diesel με συνάρτηση μεταφοράς,  $\frac{1}{D+sM_{diesel}}$ , ενώ το σύνολο των EVs (Εικονική Αδράνεια) προσεγγίζεται από την συνάρτηση μεταφοράς,  $\frac{M_{ev}s}{\tau_{ev}s+1}$ . Με την μέθοδο αυτή εξασφαλίζεται η ευστάθεια του δικτύου καθώς και η μείωση του μόνιμου σφάλματος ( αλλά όχι ο μηδενισμός του).

## 1.6 Δευτερεύουσα Ρύθμιση (Συχνότητας)

Η πρωτεύουσα ρύθμιση επιτυγχάνει την γρήγορη αποκατάσταση της συχνότητας του Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας διατηρώντας όμως ένα σταθερό μόνιμο σφάλμα. Για τον μηδενισμό του μόνιμου σφάλματος, καλείται η πιο αργή (μερικά δευτερόλεπτα) δευτερεύουσα ρύθμιση. Η υπηρεσία της δευτερεύουσας ρύθμισης χωρίζεται σε αρκετές αγορές σε δύο επιμέρους :

- την **Άνω Ρύθμιση** (regulation up) που σχετίζεται με τη δυνατότητα αύξησης της παραγωγής ενέργειας από ένα επίπεδο βάσης (συχνά αποκαλούμενο επιθυμητό σημείο λειτουργίας, Preferred Operating Point/POP). Η άνω ρύθμιση καλείται όταν το φορτίο είναι μεγαλύτερο της παραγωγής (το οποίο συνεπάγεται την επιβράδυνση των γεννητριών του δικτύου και την αποσταθεροποίηση της συχνότητας). Γενικά,

$$\text{Ζήτηση} > \text{Παραγωγή} \rightarrow \text{Ανω Ρύθμιση} \begin{cases} \text{Μείωση Φορτίου ή} \\ \text{Αύξηση Παραγωγής} \end{cases}$$

- την **Κάτω Ρύθμιση** (regulation down), που αφορά τη μείωση της παραγωγής από το επίπεδο βάσης (Preferred Operating Point/POP). Η κάτω ρύθμιση καλείται όταν η παραγωγή υπερβαίνει τη ζήτηση (το οποίο συνεπάγεται την επιτάχυνση των γεννητριών του δικτύου και την αποσταθεροποίηση της συχνότητας). Γενικά,

$$\text{Παραγωγή} > \text{Ζήτηση} \rightarrow \text{Κάτω Ρύθμιση} \begin{cases} \text{Αύξηση Φορτίου ή} \\ \text{Μείωση Παραγωγής} \end{cases}$$

Η κοστολόγηση των δυο επιμέρους ρυθμίσεων που προαναφέραμε είναι διαφορετική. Σε σύγκριση με τη στρεφόμενη εφεδρεία, η ρύθμιση καλείται πολύ πιο συχνά, πχ μερικές εκατοντάδες φορές την ημέρα, απαιτεί ταχύτερη απόκριση όπως είπαμε παραπάνω και έχει μικρότερη διάρκεια, συνήθως λίγα λεπτά, πχ 5. Η ομοιότητα των δύο αγορών έγκειται στο ότι η ανταμοιβή τους γίνεται τόσο για την ισχύ, που υπάρχει διαθέσιμη ανά πάσα στιγμή ακόμα και αν αυτή δεν χρησιμοποιείται εν τέλει, όσο και για την τελική ενέργεια, που θα διακινηθεί [7], [8].

Στην παρούσα διπλωματική θα παρουσιαστεί ένας τρόπος συνεισφοράς των ηλεκτρικών οχημάτων στην δευτερεύουσα ρύθμιση με αξιοποίηση της V2G λειτουργίας.

## 2 ΓΕΝΙΚΑ ΕΡΓΑΛΕΙΑ

### 2.1 Η γλώσσα GAMS

Το Γενικό Σύστημα Αλγεβρικής Μοντελοποίησης, GAMS (General Algebraic Modeling System) έχει ενσωματώσει ιδέες από θεωρία βάσεων δεδομένων και μαθηματικού προγραμματισμού, δημιουργώντας ένα δομημένο πλαίσιο για την κατάστρωση και επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης γραμμικού, μη γραμμικού και μεικτού ακεραίου προγραμματισμού [10]. Η γλώσσα GAMS σχεδιάστηκε ώστε να:

1. είναι οικία σε οποιονδήποτε έχει κάποια βασική γνώση προγραμματισμού, αφού είναι παρόμοιο με τις συνήθειες γλώσσες προγραμματισμού.
2. είναι υψηλού επιπέδου με μαθηματικοποιημένο συντακτικό στα μέτρα των προβλημάτων βελτιστοποίησης, για την εύκολη διατύπωση μεγάλων και πολύπλοκων μοντέλων.
3. παρέχει απλότητα και ασφάλεια στην τροποποίηση ή/και επέκταση του μοντέλου σχεδιασμού του προγράμματος.

4. είναι ένας διαμεσολαβητής μεταξύ του σωστά διατυπωμένου προβλήματος και των επιλυτών (solvers). Οι επιλυτές αποτελούν έτοιμους αλγορίθμους επίλυσης προβλημάτων βελτιστοποίησης. Το GAMS διαθέτει έναν μεγάλο αριθμό από επιλυτές, τους οποίους ενημερώνει κάθε φορά με τις πιο πρόσφατες και αποδοτικότερες εκδόσεις
5. παρέχει εύκολη επικοινωνία με άλλες γλώσσες προγραμματισμού και προγράμματα, όπως το Excel και το Matlab.

Τα βασικά συστατικά που αποτελούν τη δομή οποιουδήποτε μοντέλου του GAMS, είναι τα παρακάτω:

<i>Inputs (Είσοδος Δεδομένων):</i>
<b>1. Sets-( Σύνολα )</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Declaration</b> – (Δήλωση τους)</li> <li>• <b>Assignment of members</b> – (Καθορισμός των μελών τους)</li> </ul>
<b>2. Data (Parameters, Tables, Scalars) – Δεδομένα (Παράμετροι, Πίνακες, Πίνακες Στοιχείων)</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Declaration</b> – (Δήλωση τους)</li> <li>• <b>Assignment of members</b> – (Καθορισμός των μελών τους)</li> </ul>
<b>3. Variables – (Μεταβλητές)</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Declaration</b> – (Δήλωση τους)</li> <li>• <b>Assignment of members</b> – (Καθορισμός των μελών τους)</li> </ul>
<b>4. Assignment of bounds and/or initial values (optional) - (Καθορισμός των ορίων ή των αρχικών τιμών) (προαιρετικό)</b>
<b>5. Equations – (Εξισώσεις)</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Declaration</b> – (Δήλωση τους)</li> <li>• <b>Definition</b> – (Ορισμός τους)</li> </ul>
<b>6. Model and Solve statements – (Δήλωση Μοντέλου και Επίλυσης)</b>
<b>7. Display statement (optional) – (Προαιρετική Εμφάνιση Δήλωσης)</b>
<i>Outputs (Έξοδος Αποτελεσμάτων):</i>
<b>1. Echo Print – (Αποτύπωση Προγράμματος)</b>
<b>2. Symbol Reference Maps – (Χάρτες Αναφοράς Συμβόλων)</b>
<b>3. Equation Listings – (Λίστα Εξισώσεων)</b>
<b>4. Status Reports – (Αναφορά Κατάστασης)</b>
<b>5. Results – (Αποτελέσματα)</b>

Σε αυτό το σημείο, είναι απαραίτητο να επισημανθούν κάποιες απαραίτητες παρατηρήσεις που αποτελούν και απαραίτους κανόνες του προγράμματος GAMS:

- Η χρήση μιας οποιαδήποτε οντότητας (εξαρτημένη ή ανεξάρτητη, μεταβλητή ή σταθερή) από το μοντέλο του GAMS απαιτεί προηγουμένως την δήλωση της.
- Οι δηλώσεις των οντοτήτων μπορούν να γίνουν σε πολλαπλές γραμμές, να έχουν κενές γραμμές μεταξύ τους, αλλά και να μοιραστούν σε πολλαπλές δηλώσεις ανά γραμμή.

- Η ολοκλήρωση κάθε δήλωσης πρέπει να συνοδεύεται με το σύμβολο ελληνικού ερωτηματικού «;» ('semicolon').
- Ο μεταγλωττιστής ('compiler') GAMS δε διακρίνει κεφαλαία και πεζά γράμματα, έτσι είναι και τα δύο είδη αποδεκτά.
- Τα σχόλια για την τεκμηρίωση των μαθηματικών μοντέλων μπορούν (και είναι το προτιμότερο) να ενσωματωθούν μετά από τις δηλώσεις των οντοτήτων ή μετά από οποιαδήποτε γραμμή αρχίζει με έναν αστερίσκο (\*).
- Η δημιουργία μιας οντότητας αποτελείται από τα εξής δύο στάδια: *Πρώτον*, την δήλωση ('declaration'), ώστε το πρόγραμμα να αντιληφτεί την ύπαρξη της, συνδέοντας την με το όνομα που θα της καθορίσουμε. *Δεύτερον*, την ανάθεση ή καθορισμό ('assignment'), με την οποία η οντότητα παίρνει μια συγκεκριμένη τιμή ή μια μορφή.
- Η δήλωση και ανάθεση των εξισώσεων στο GAMS πρέπει να γίνονται πάντα ξεχωριστά. Για όλες τις άλλες οντότητες, υπάρχει η επιλογή των δηλώσεων και αναθέσεων στην ίδια δήλωση ή χωριστά.
- Τα ονόματα που δίνονται στις οντότητες του μοντέλου πρέπει να αρχίζουν με γράμμα και μπορούν να ακολουθηθούν μέχρι 31 οποιοδήποτε χαρακτήρες ή ψηφία.
- Όλες οι γραμμές δεν είναι μέρος της γλώσσας GAMS. Δύο ειδικά σύμβολα, ο αστερίσκος «\*» και το σύμβολο δολαρίου «\$» μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην πρώτη θέση σε μια γραμμή για να δείξει μια μη-γλωσσική γραμμή.

### 2.1.1 Σύνολα

Οι λέξεις "Set" και "Sets" αποτελούν δεσμευμένες λέξεις του GAMS για τη δήλωση των συνόλων σε οποιοδήποτε μοντέλο του GAMS. Γενικά, η σύνταξη στο GAMS για τα απλά στατικά σύνολα (τα στοιχεία τους δεν αλλάζουν κατά την εκτέλεση του προγράμματος) είναι η ακόλουθη:

```
SET Set_Name Optional_Explanatory_Text
 / first_Set_Element_Name Optional_Explanatory_Text
 second_Set_Element_Name Optional_Explanatory_Text
 ...
 /;
```

Παρακάτω δίνεται ένα παράδειγμα δήλωσης ενός συνόλου με μία εντολή sets:

$$A = \{a1, a2, a3, a4\} \xrightarrow{\text{GAMS}} \text{Sets } A \text{ Optional\_Explanatory\_Text } /a1, a2, a3, a4/;$$

Είναι δυνατός ο ορισμός δυναμικών συνόλων που θα περιέχουν κάποια από τα στοιχεία ενός δεδομένου στατικού συνόλου. Τα στοιχεία αυτών των συνόλων μπορούν να αλλάξουν κατά την εκτέλεση του προγράμματος. Τα δυναμικά σύνολα ορίζονται πάντα ως υποσύνολα ήδη ορισμένων συνόλων. Επιπλέον μπορούν να ορισθούν πολυδιάστατα σύνολα για την αντιστοίχιση στοιχείων που ανήκουν σε



διαφορετικά σύνολα. Παρακάτω δίνεται ένα παράδειγμα δυσδιάστατου συνόλου, για τη μοντελοποίηση των έγκυρων μεταβάσεων ενός δικτύου με κόμβους  $K_1$  έως  $K_4$ :

$$\{K_{12}, K_{13}, K_{24}, K_{34}\} \xrightarrow{GAMS} \left\{ \begin{array}{l} \text{Sets} \\ K \text{ Synolo komvon} / K1 * K4/ \\ \text{Pairs}(K, K) \text{ Antistoixisi} /K1. K2, K1. K3, K2. K4, K3. K4/; \end{array} \right.$$

Το Επεξηγηματικό Κείμενο ('Explanatory\_Text') δεν πρέπει να υπερβαίνει τους 254 χαρακτήρες και πρέπει για κάθε στοιχείο που περιγράφει να βρίσκεται στην ίδια γραμμή. Το κείμενο μπορεί να περιέχει ειδικούς χαρακτήρες όπως κάθετους, κόμματα ή ελληνικά ερωτηματικά με την προϋπόθεση ότι βρίσκεται μέσα σε αποστρόφους.

Ο αστερίσκος «\*» παίζει έναν ειδικό ρόλο στους ορισμούς συνόλων. Χρησιμοποιείται για την αποφυγή επίπονης δακτυλογράφησης μιας ακολουθίας στοιχείων ενός συνόλου. Ο αριθμός αριστερά από το αστερίσκο πρέπει να είναι μικρότερος από τον αριθμό στα δεξιά. Οποιοσδήποτε μη αριθμητικές διαφορές ή άλλες ασυνέπειες προκαλούν λάθη, ενώ είναι εφικτό δύο ή και παραπάνω σύνολα να δηλωθούν από κοινού.

## 2.1.2 Παράμετροι και Πίνακες

Τα δεδομένα μας στο GAMS μπορούν να είναι Παράμετροι, Πίνακες δύο ή περισσότερων διαστάσεων ή Πίνακες-Στοιχείων.

- Παράμετροι

Οι λέξεις "Parameter" και "Parameters" αποτελούν δεσμευμένες λέξεις του GAMS για τη δήλωση των παραμέτρων σε οποιοδήποτε μοντέλο του GAMS. Γενικά, η σύνταξη στο GAMS για μια δήλωση Παραμέτρου είναι:

```
Parameters
Parameter_Name (set dependency) Optional_Explanatory_Text
/ first_Set_Element_Name Associated_Value,
Second_Set_Element_Name Associated_Value,
... /;
```

Στην θέση 'Parameter\_Name' θέτουμε το όνομα της παραμέτρου. Η αρχικοποίηση μιας παραμέτρου απαιτεί έναν σύνολο στοιχείων, κάθε ένα από τα οποία αποτελείται από μια ετικέτα και μια τιμή. Οι κάθετοι '/' πρέπει να χρησιμοποιηθούν στην αρχή και στο τέλος του συνόλου στοιχείων και τα κόμματα πρέπει να χωρίζουν τα στοιχεία που εισήχθησαν σε μια γραμμή. Το σύμβολο '=' ή το 'κενό' μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να χωρίσει τις ετικέτες από τις αντίστοιχες τιμές τους.

- Πίνακες

Οι λέξεις “table ” και “tables” αποτελούν δεσμευμένες λέξεις του GAMS για τη δήλωση των πινάκων σε οποιοδήποτε μοντέλο του GAMS. Για δύο ή περισσότερες διαστάσεις προτιμώνται οι πίνακες από τις παραμέτρους για την εισαγωγή δεδομένων. Γενικά, η σύνταξη για μια δήλωση πίνακα είναι:

```
Table Table_Name (Set i, Set j...) Optional_Explanatory_Text
                set_j_element_1  set_j_element_2
set_i_element_1  value_11        value_12
set_i_element_2  value_21        value_22;
```

Στην θέση ‘Table\_Name’ θέτουμε το όνομα του πίνακα στο GAMS. Το σύνολο i και το σύνολο j αποτελούν τις ετικέτες των σειρών και των στηλών του πίνακα αντίστοιχα. Στην θέση ‘Optional\_Explanatory\_Text’ μπορούμε να γράψουμε σχόλια για τον πίνακα.

- Πίνακες Στοιχείου

Οι λέξεις “Scalar ” και “Scalars” αποτελούν δεσμευμένες λέξεις του GAMS για τη δήλωση των πινάκων-στοιχείων σε οποιοδήποτε μοντέλο του GAMS. Χρησιμοποιείται για να δηλώσει και να εισάγει τις αρχικές συνθήκες σε μια παράμετρο του GAMS με μηδενική διάσταση. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχει ακριβώς ένας αριθμός που συνδέεται με την παράμετρο. Γενικά, η σύνταξη στο GAMS για μια δήλωση πίνακα στοιχείο είναι:

```
Scalars
Scalar1_Name Optional_Explanatory_Text / Numerical_Value /
Scalar2_Name Optional_Explanatory_Text / Numerical_Value /
... ;
```

Στην θέση ‘Scalar\_Name’ θέτουμε το όνομα του πίνακα στοιχείου. Στην θέση ‘Optional\_Explanatory\_Text’ μπορούμε να γράψουμε σχόλια για τον πίνακα και ακολουθεί η τιμή του ( ‘Numerical\_Value’ ) πάντα αναμεσα σε ‘/’.

### 2.1.3 Μεταβλητές

Οι λέξεις “Variable” και “Variables” αποτελούν δεσμευμένες λέξεις του GAMS για τη δήλωση των μεταβλητών σε οποιοδήποτε μοντέλο του GAMS και αναφέρονται στις λεγόμενες μεταβλητές απόφασης ή αλλιώς στις μεταβλητές προς βελτιστοποίηση. Οι μεταβλητές είναι γενικά άγνωστες μέχρι να λυθεί το μοντέλο.

Μια σημαντική διαφορά μεταξύ των δηλώσεων μεταβλητής και παραμέτρου είναι ότι στη δήλωση μεταβλητής δεν μπορούν να δηλωθούν αρχικές τιμές. Έτσι, τα πολύ μεγάλα μοντέλα μπορούν να κατασκευαστούν χρησιμοποιώντας έναν μικρό αριθμό μεταβλητών.

Μία μεταβλητή μπορεί να ορισθεί χωρίς δείκτες. Αλλιώς, γίνεται αναφορά πλέον σε ένα διάνυσμα μεταβλητών.

Γενικά, η σύνταξη στο GAMS για μια δήλωση Μεταβλητών είναι:

```
Variable type
First_Variable_Name (set_dependency) Optional_Explanatory_Text
second_Variable_Name (set_dependency) Optional_Explanatory_Text
...;
```

Μετά την ονοματοδοσία της μεταβλητής ακολουθούν οι διαστάσεις της μεταβλητής και σχόλια όσο το δυνατόν περιγραφικότερα ενώ η εντολή τερματίζεται με το σύμβολο ``;``. Τα προγράμματα σε GAMS πρέπει πάντα να διαθέτουν μια μεταβλητή για την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης.

Υπάρχουν πέντε βασικοί τύποι μεταβλητών:

Λέξη Κώδικα	Τύπος Μεταβλητής	Κατώτατο Όριο	Ανώτατο Όριο	Περιγραφή
<b>Free</b>	ελεύθερη	- ∞	+∞	Χωρίς περιορισμούς. Τα προκαθορισμένα όρια μπορούν να αλλαχθούν από το χρήστη
<b>Positive</b>	θετική	0	+ ∞	Δεν επιτρέπονται αρνητικές τιμές. Το προκαθορισμένο ανώτατο όριο μπορεί να αλλαχθεί από το χρήστη
<b>Negative</b>	αρνητική	- ∞	0	Δεν επιτρέπονται θετικές τιμές. Το προκαθορισμένο κατώτατο όριο μπορεί να αλλαχθεί από το χρήστη
<b>Binary</b>	δυναδική	0	1	Διακριτή μεταβλητή που παίρνει τιμή '0' ή '1'
<b>Integer</b>	ακέραιη	0	100	Διακριτή μεταβλητή που παίρνει ακέραιες τιμές μεταξύ των ορίων. Ο χρήστης μπορεί να αλλάξει τα προκαθορισμένα όρια.

Εάν δεν επιλέξουμε τον τύπο της μεταβλητής μας τότε το GAMS προκαθορίζει την μεταβλητή ως ελεύθερη, δηλαδή χωρίς όρια. Μεγάλη προσοχή πρέπει να δοθεί στις πράξεις με μεταβλητές που έχουν όρια π.χ. διαίρεση με το μηδέν.

Κάθε μεταβλητή στο GAMS έχει επτά τιμές συσχετιζόμενες με κάθε συνδυασμό δεικτών. Ο χρήστης έχει πρόσβαση στις τιμές αυτές με την προσθήκη της κατάλληλης κατάληξης στο τέλος του ονόματος της μεταβλητής.

Οι καταλήξεις καθώς και η τιμές στις οποίες αντιστοιχούν δίνονται στον ακόλουθο πίνακα.

Εντολή	Σκοπός
<b>.lo</b>	Το κατώτερο όριο της μεταβλητής
<b>.up</b>	Το ανώτερο όριο της μεταβλητής.
<b>.fx</b>	Η καθορισμένη τιμή της μεταβλητής. Απόδοση τιμής στο .fx θέτει τα ανώτερα και κατώτερα όρια ίσα με αυτή τη τιμή.
<b>.l</b>	Η τρέχουσα τιμή της μεταβλητής. Δέχεται νέες τιμές κατά τη διάρκεια εκτέλεσης του κώδικα.
<b>.m</b>	Η οριακή τιμή της μεταβλητής. Δέχεται νέες τιμές κατά τη διάρκεια εκτέλεσης του κώδικα.
<b>.scale</b>	Ο συντελεστής κλίμακας της μεταβλητής. Χρησιμοποιείται κυρίως σε προβλήματα μη-γραμμικού προγραμματισμού.
<b>.prior</b>	Η σειρά προτεραιότητας διακλάδωσης της μεταβλητής. Χρησιμοποιείται μόνο σε μοντέλα Μικτού Ακέραιου Προγραμματισμού.

## 2.1.4 Εξισώσεις

Οι λέξεις “Equation” και “Equations” αποτελούν δεσμευμένες λέξεις του GAMS για τη δήλωση των εξισώσεων. Ως εξίσωση στο GAMS νοείται ο ορισμός οποιουδήποτε είδους περιορισμού [11]. Μία δήλωση εξίσωσης έχει την παρακάτω μορφή:

```
Equations
First_Equation_Name (set_dependency) Optional_Explanatory_
Text
Second_Equation_Name (set_dependency) Optional_Explanatory_
Text
...;
```

Μετά την ονοματοδοσία της Εξίσωσης ακολουθεί το επεξηγηματικό κείμενο καταλήγοντας με το ελληνικό ερωτηματικό σύμβολο. Ο Τύπος των Εξισώσεων, γίνεται μετά την δήλωση του ονόματος τους ως εξής :

```
Equation_Name (set_dependency) $Optional_Logical_Condition ..
Left_Equation_Terms Equation_Type Right_Equation_Terms;
```

Δηλώνεται εκ νέου το όνομα της Εξίσωσης ακολουθούμενο πάντα από δύο τελείες "." πριν την έναρξη της άλγεβρας. Οι δύο τελείες "'..'" μεταξύ του ονόματος της εξίσωσης και της άλγεβρας είναι υποχρεωτικές. Το Αριστερό μέλος της εξίσωσης αποτελεί τον αλγεβρικό τύπο της, ενώ το Δεξιό αποτελεί την μαθηματική έκφραση που μπορεί να περιλαμβάνει παραμέτρους και μεταβλητές. Η εντολή τερματίζει με το σύμβολο ";"'. Μεταξύ των δύο παραστάσεων παρεμβάλλεται ένα σύμβολο που δηλώνει τον τύπο της σχέσης μεταξύ τους και μπορεί να είναι ένα από τα παρακάτω:

Τύπος σχέσης	Σκοπός
<b>=E=</b> ('Equality')	το αριστερό μέρος πρέπει να είναι ίσο με το δεξί.
<b>=G=</b> ('Greater or equal')	το αριστερό μέρος πρέπει να είναι μεγαλύτερο ή ίσο από το δεξί.
<b>=L=</b> ('Lower or equal')	το αριστερό μέρος πρέπει να είναι μικρότερο ή ίσο από το δεξί.
<b>=N=</b> ('None')	καμία σχέση δεν επιβάλλεται μεταξύ αριστερού και δεξιού μέρους. Αυτός ο τύπος εξίσωσης χρησιμοποιείται σπάνια.

Δύο αλγεβρικές μορφές που χρησιμοποιούνται συχνά στην έκφραση περιορισμών είναι:

- το άθροισμα, με δεσμευμένη λέξη "sum" στο GAMS και γενικές μορφές αναπαράστασης

$$\text{Sum}(j, x(i, j)) \leftrightarrow \text{Sum}(\text{σύνολο δεικτών, παράσταση}) \leftrightarrow \sum_j x_{ij}$$

$$\text{Sum}((i, j), c(i, j) * x(i, j)) \leftrightarrow \text{Sum}(\text{σύνολο δεικτών, παράσταση}) \leftrightarrow \sum_i \sum_j c_{ij} x_{ij}$$

Χρησιμοποιείται για να υπολογίσει το άθροισμα για μια περιοχή ενός συνόλου.

- το γινόμενο, με δεσμευμένη λέξη "prod" στο GAMS και γενική μορφή αναπαράστασης

$$\text{Prod}(j, x(i, j)) \leftrightarrow \text{Prod}(\text{σύνολο δεικτών, παράσταση}) \leftrightarrow \prod_j x_{ij}$$

$$\text{Prod}((i, j), c(i, j) * x(i, j)) \leftrightarrow \text{Prod}(\text{σύνολο δεικτών, παράσταση}) \leftrightarrow \prod_i \prod_j c_{ij} x_{ij}$$

Αν το σύνολο δεικτών απαιτεί κόμμα για να εκφραστεί τότε το σύνολο θα πρέπει να είναι σε παρένθεση. Η παράσταση προς άθροιση ή πολλαπλασιασμό μπορεί να είναι μια οποιαδήποτε μαθηματική έκφραση.

- smin((i, j), x(i, j))**: Ελάχιστη τιμή με χρήση δεικτών ελέγχου. Χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της μικρότερης τιμής της x(i, j) σε μια περιοχή συνόλου (i, j).
- smax((i, j), x(i, j))**: Μέγιστη τιμή με χρήση δεικτών ελέγχου. Χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της μέγιστης τιμής της x(i, j) σε μια περιοχή συνόλου (i, j).

## 2.1.5 Μοντέλα

Οι λέξεις “model” και “models” αποτελούν δεσμευμένες λέξεις του GAMS για τη δήλωση του μοντέλου προς επίλυση. Ως μοντέλο στο GAMS θεωρούμε μια οποιαδήποτε είδους συλλογή εξισώσεων και χρησιμοποιείτε για να οργανώσει τις εξισώσεις σε ομάδες ώστε να είναι έτοιμες προς επίλυση [11]. Μία δήλωση μοντέλου έχει την παρακάτω μορφή:

```
Model Model_Name Optional_Explanatory_Text /Model_Contents/;
```

Μετά την ονοματοδοσία του Μοντέλου μπορούμε προαιρετικά να παρεμβάλουμε ένα επεξηγηματικό κείμενο. Ακολουθώς, αναφέρουμε τα περιεχόμενα του Μοντέλου, δηλαδή οι ονομασίες των εξισώσεων που θα μοντελοποιηθούν, πάντα μεταξύ ‘/’. Αν θέλουμε το μοντέλο να περιλαμβάνει όλες τις δηλωμένες εξισώσεις, αρκεί ο συμβολισμός ‘all’. Η εντολή τελειώνει με το ελληνικό ερωτηματικό ‘;’.

Σε κάθε μοντέλο είναι δυνατό να δηλωθούν από το χρήστη κάποια χαρακτηριστικά για το μοντέλο με τη μορφή αριθμητικών τιμών. Τα χαρακτηριστικά αυτά μπορούν να δώσουν πληροφορίες για τα αποτελέσματα που θα δώσει ο επιλυτής, είτε για κάποιες επιλογές που θα χρησιμοποιηθούν κατά τη διαδικασία επίλυσης. Στον κάτω Πίνακα γίνεται αναφορά μόνο σε όσα χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα μελέτη:

Εντολή	Σκοπός
<b>'decimals'</b>	Παίρνει τιμές από 0 έως 8. Αντιπροσωπεύει το πλήθος των δεκαδικών ψηφίων ενός πραγματικού αριθμού, που θα εμφανίζονται στην έξοδο. Η προεπιλογή είναι 3 δεκαδικά.
<b>'reslim'</b>	Η επιλογή αυτή (resources limit) προκαλεί τον τερματισμό της διαδικασίας επίλυσης, μόλις χρησιμοποιηθούν οι μονάδες, που έχουν καθοριστεί και επιστρέφονται οι τρέχουσες τιμές. Οι μονάδες είναι πραγματικά δευτερόλεπτα για τα PCs, ή CPU δευτερόλεπτα για μεγαλύτερους υπολογιστές. Η προεπιλογή είναι 1000 δευτερόλεπτα.
<b>'iterlim'</b>	Η επιλογή αυτή (iteration limit) ορίζει το όριο των επαναλήψεων, που μπορούν να πραγματοποιηθούν για την επίλυση του μοντέλου. Η προεπιλογή είναι 2 εκατομμύρια επαναλήψεις.

Με το GAMS μπορούν να λυθούν διάφοροι τύποι προβλημάτων. Οι τύποι αυτοί παρουσιάζονται παρακάτω.

Τύποι Προβλημάτων – Επιλυτές (Solvers) Μοντέλων του GAMS	Περιγραφή
<b>LP : Linear Programming - Γραμμικός Προγραμματισμός</b>	Δεν περιλαμβάνει μη γραμμικούς όρους ή διακριτές (δυαδικές ή ακέραιες) μεταβλητές στο μοντέλο.
<b>NLP : Non-Linear Programming - Μη Γραμμικός Προγραμματισμός</b>	Περιλαμβάνει μη γραμμικούς όρους, που περιέχουν μόνο τις ομαλές συναρτήσεις του μοντέλου, αλλά χωρίς διακριτές μεταβλητές.
<b>DNLP : Discontinuous Non-Linear</b>	Μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι μη-ομαλοί

<b>Programming – Ασυνεχής Μη Γραμμικός Προγραμματισμός</b>	μη-γραμμικοί όροι, όχι όμως οι διακριτές μεταβλητές
<b>MIP : Mixed Integer Programming – Μικτός Ακέραιος Προγραμματισμός</b>	Περιλαμβάνει διακριτές μεταβλητές, όχι όμως μη-γραμμικούς όρους.
<b>RMIP : Relaxed Mixed Integer Programming - Χαλαρός Μικτός Ακέραιος Προγραμματισμός</b>	Περιέχονται δυαδικές και ακέραιες μεταβλητές υπό τον όρο να παίρνουν τιμές μεταξύ των ορίων τους.
<b>MINLP : Mixed Integer Nonlinear Programming - Μικτός Ακέραιος Μη Γραμμικός Προγραμματισμός</b>	Περιέχονται μη-ομαλοί μη-γραμμικοί όροι και διακριτές μεταβλητές.
<b>RMINLP : Relaxed Mixed Integer Nonlinear Programming - Χαλαρός Μικτός Ακέραιος Μη Γραμμικός Προγραμματισμός</b>	Σε σχέση με το MINLP, περιέχει δυαδικές και ακέραιες μεταβλητές υπό περιορισμούς.
<b>MPEC: Mathematical Programs with Equilibrium Constraints – Μαθηματικά Προγράμματα με Περιορισμούς Ισοροπίας.</b>	
<b>MCP : Mixed Complementarily Problem - Μικτό πρόβλημα συμπληρωματικότητας.</b>	
<b>CNS : Constrained Nonlinear System - Μη γραμμικό σύστημα με περιορισμούς.</b>	

### 2.1.6 Η εντολή Solve

Η λέξη “solve” αποτελεί δεσμευμένη λέξη του GAMS που χρησιμοποιείται για την διαδικασία επίλυσης ενός μοντέλου. Όταν το GAMS δει αυτή την εντολή ψάχνει τον κατάλληλο Επιλυτή (‘Solver’) από τη βιβλιοθήκη του, ώστε να βρει τον τύπο που ταιριάζει στην εφαρμογή. Το GAMS παίζει το ρόλο του μεσολαβητή στο πρόβλημα [11]. Γενικά μια δήλωση solve για ένα μοντέλο στο GAMS είναι:

```
Solve Model_Name Using_Model_Type Maximizing/Minimizing
Equation_Name;
```

Μετά την εντολή solve γράφουμε το όνομα του Μοντέλου, το οποίο έχει δηλωθεί από πριν και επιλύεται κάνοντας χρήση (‘Using’) έναν από τους τύπους του Μοντέλου (‘Model Type’), μεγιστοποιώντας ή ελαχιστοποιώντας (‘Maximizing/Minimizing’) την Αντικειμενική Συνάρτηση (‘EquationName’).

### 2.1.7 Η εντολή Display

Για πληροφορίες σχετικά με την τιμή κάποιου στοιχείου ο χρήστης μπορεί να δώσει την εντολή Display που έχει την παρακάτω μορφή:

```
Display data_name ; ,όπου data_name μπορεί να είναι παράμετρος ή μεταβλητή.
```

Για την προβολή κάποιας από τις επτά τιμές μιας μεταβλητής ο χρήστης πρέπει να προσθέσει στο τέλος του ονόματος την αντίστοιχη κατάληξη. Η εντολή τερματίζεται με το σύμβολο “;”.

### 2.1.8 Βρόχοι στο GAMS

Το GAMS διαθέτει τις εντολές “loop” και “for”, οι οποίες χρησιμοποιούνται για επαναληπτικές διαδικασίες [11].

### 2.1.9 Η εντολή Loop

Με τη χρήση της εντολής ‘Loop’ (‘βρόχος’), καθίσταται δυνατή η εκτέλεση μιας σειράς υπολογισμών για τα στοιχεία ενός συνόλου. Η σύνταξη της εντολής στο GAMS είναι η ακόλουθη:

```
Loop ( sets_to_vary , Statement_to_execute ) ;
```

Όπου:

- ‘sets\_to\_vary’ είναι τα σύνολα των στοιχείων
- ‘statement\_to\_execute’ είναι η εντολή, η οποία με χρήση των δεικτών ( indices ) των συνόλων στοιχείων καθορίζει τους επαναλαμβανόμενους υπολογισμούς.

### 2.1.10 Η εντολή for

Η γενική σύνταξη μιας δήλωσης βρόχου ‘for’ είναι η εξής:

```
for ( scalar name = startvalue to endvalue , statements; );
```

Όπου:

- ‘scalarname’ είναι το όνομα της παραμέτρου, της οποίας η τιμή θα αλλάζει συνεχώς με σταθερό βήμα,
- ‘startvalue’ είναι η αρχική τιμή που θα λάβει η παράμετρος,
- ‘endvalue’ είναι η τελική της τιμή και όπου θα σταματήσουν οι υπολογισμοί,
- ‘statements’ είναι οι δηλώσεις στις οποίες εμπεριέχεται η εκάστοτε τιμή της παραμέτρου.



### 2.1.11 Επικοινωνία του GAMS με το Excel με χρήση του GDX

Το εργαλείο GDX (Gams Data Exchange) μας δίνει την δυνατότητα ανταλλαγής δεδομένων μεταξύ GAMS και Excel. Το GDX διαβάζει ή αποθηκεύει σε ένα GDX αρχείο τις τιμές των παραμέτρων, των μεταβλητών και των εξισώσεων που χρησιμοποιούνται σε ένα μοντέλο GAMS. Αυτό το αρχείο είναι ένα ενδιάμεσο αρχείο το οποίο κάθε φορά μετασχηματίζεται από το GDX σε αρχείο δεδομένων του GAMS ή σε αρχείο Excel έτσι ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάγνωση δεδομένων για ένα πρόγραμμα στο GAMS ή για την εγγραφή σε ένα αρχείο Excel αντίστοιχα [11].

Μέσω του εργαλείου 'GDXXRW.exe' γίνεται η μεταφορά από το GAMS στο Excel και μέσω των εντολών 'execute\_unload' και 'execute' το αντίστροφο. Πρώτα, πρέπει να δημιουργηθεί το ενδιάμεσο αρχείο, το οποίο πρέπει να έχει το ίδιο όνομα με το αρχείο excel αλλά με κατάληξη '.gdx', και να οριστεί εάν πρόκειται για αρχείο ανάγνωσης ή εγγραφής. Έπειτα δηλώνονται οι τύποι των στοιχείων, που πρόκειται να αναγνωστούν/εγγραφούν ('par'=parameter, 'var'=variable κτλ), καθώς και το επιθυμητό εύρος κελιών (πχ A1:A11 και B1:B11) του αρχείου excel, 'file\_name.xls'.

Τέλος, με την εντολή load ή unload γίνεται σαφές εάν το GAMS θα λάβει ή θα δώσει δεδομένα αντίστοιχα στο Excel [11]. Η σύνταξη για τις δύο αυτές λειτουργίες φαίνεται παρακάτω:

#### *GAMS → Excel*

```
$CALL GDXXRW.EXE file_name.xls  
par=parameter_name1 rng=A1:A11  
par=parameter_name2 rng=B1:B11  
...  
$GDXIN file_name.gdx  
$LOAD parameter_name1 parameter_name2  
$GDXIN
```

#### *Excel → GAMS*

```
execute_unload 'file_name.gdx'  
parameter_name1 parameter_name2;  
execute 'gdxxrw.exe  
file_name.gdx  
par= parameter_name1 rng=A1:A11  
par= parameter_name2 rng=B1:B11  
... '
```

### 2.1.12 Σχόλια

Ένα σχόλιο ('comment') είναι ένα επεξηγηματικό κείμενο, που δεν υποβάλλεται σε επεξεργασία και δεν διατηρείται από τον υπολογιστή [11]. Υπάρχουν τρεις τρόποι:

- Μια γραμμή με χαρακτήρα αστερίσκο "\*" στην αρχή της. Όλοι οι υπόλοιποι χαρακτήρες της γραμμής μετά τον αστερίσκο αγνοούνται αλλά τυπώνονται στο αρχείο output.
- Μπορούμε να γράψουμε σχόλια μετά από τις δηλώσεις των οντοτήτων, εντός των ορίων που καθορίζει το GAMS.
- Χρήση των ειδικών οριοθετών ('blocks'), που αναγκάζουν το GAMS να αγνοήσει ένα ολόκληρο τμήμα του προγράμματος. Η αρχή του σχολίου πρέπει να ξεκινάει στην πρώτη γραμμή με τη φράση '\$ontext' και να καταλήγει με τη φράση '\$offtext'.

Η επιλογή μεταξύ των τριών τροπών είναι θέμα προτίμησης.

### 2.1.13 Έξοδος στο GAMS

Η έξοδος από μια εφαρμογή του GAMS παράγεται σε ένα αρχείο το οποίο μπορεί να διαβαστεί χρησιμοποιώντας οποιοδήποτε συντάκτη κειμένων. Η έξοδος, που δημιουργείται κατά τη διάρκεια του αρχικού ελέγχου του προγράμματος, καλείται σύνταξη ('Compilation') [11]. Περιέχει τα εξής μέρη:

Σύνταξη (Compilation)	
<b>Αποτύπωση του προγράμματος</b>	Βρίσκεται στο πρώτο μέρος του αρχείου εξόδου και αποτελεί ένα αντίγραφο του αρχείου εισόδου, όπου απαριθμούνται οι γραμμές εντολών του αρχείου εισόδου.
<b>Αναφορά σφαλμάτων</b>	Βρίσκεται στο δεύτερο μέρος του αρχείου εξόδου και αποτελεί την αναφορά ανίχνευσης σφαλμάτων σύνταξης, εκτέλεσης και επίλυσης του μοντέλου. Στο GAMS, τα λάθη αναφέρονται με τρόπο κατανοητό συμπεριλαμβανομένων σαφών προτάσεων για την διόρθωση τους. Όλα τα λάθη σημειώνονται με τέσσερις αστερίσκους «****» στην αρχή κάθε γραμμής στη λίστα εξόδου. Μετά την ανίχνευση του λάθους, πρέπει να γίνει η διόρθωση του και στην συνέχεια να γίνει η επανάληψη για την επίλυση του μοντέλου. Δεν μπορεί να λυθεί ένα μοντέλο ή να αποθηκευτεί ένα αρχείο εάν τα λάθη που έχουν ανιχνευθεί δεν έχουν λυθεί.
<b>Χάρτης αναφοράς συμβόλων</b>	Αποτελείται από τις εντολές δηλώσεων συνόλων, παραμέτρων, πινάκων, μεταβλητών, εξισώσεων, μοντέλων, αρχείων εξόδου κλπ σε αλφαβητική σειρά, ομαδοποιημένες ανάλογα με τον τύπο τους. Ο χάρτης αυτός είναι μια χρήσιμη παράμετρος του προγράμματος με πρακτική σημασία για εκείνους τους χρήστες, που εξετάζουν ένα μοντέλο που είναι φτιαγμένο από άλλον και θέλει να κάνει αλλαγές σε αυτό. Ο χάρτης αναφοράς συμβόλων μπορεί να εισαχθεί με την

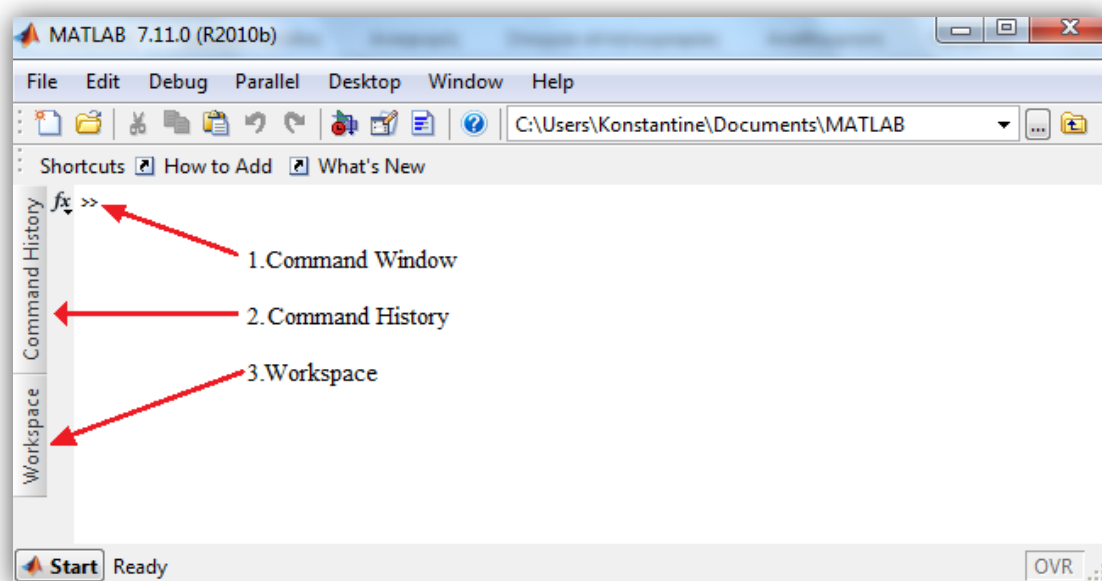
	είσοδο μιας γραμμής που περιέχει το σύμβολο '\$onsymxref' στην αρχή του προγράμματος.
<b>Λίστα Εξισώσεων</b>	Παρουσιάζει με τρόπο αναλυτικό όλες τις εξισώσεις οι οποίες έχουν δηλωθεί στο αρχείο εισαγωγής. Συνήθως αναγράφονται σε μορφή μπλοκ, δηλαδή, σε κάθε μπλοκ αναγράφονται οι εξισώσεις υπολογισμού μιας συγκεκριμένης οντότητας για κάθε χρονική στιγμή ή κάθε διαφορετικό διάστημα. Όλοι οι όροι που εξαρτώνται από τις μεταβλητές οι οποίες περιέχονται στην εκάστοτε εξίσωση πηγαίνουν στο αριστερό μέρος ('Left Hand Side' – LHS), και οι σταθεροί όροι στο δεξί μέρος ('Right Hand Side' – RHS) της κάθε εξίσωσης. Συνήθως, οι πρώτες τρεις εξισώσεις παρουσιάζονται σε κάθε μπλοκ. Αν είναι παραπάνω από τρεις, τότε παραλείπονται οι υπόλοιπες και απλώς επισημαίνεται ο ακριβής αριθμός τους. Υπάρχει, φυσικά, η δυνατότητα ο χρήστης να ορίσει τον ελάχιστο αριθμό αναγραφής εξισώσεων για κάθε μπλοκ με χρήση της εντολής: <code>Option limrow = r</code> ; (με r, τον ελάχιστο επιθυμητό αριθμό εξισώσεων μπλοκ).
<b>Λίστα Μεταβλητών</b>	Παρουσιάζει την αριθμητική τιμή των συντελεστών της κάθε μεταβλητής που εμφανίζεται σε κάθε περιορισμό-εξίσωση και ταξινομούνται κατά στήλη μπροστά από το όνομα της εξίσωσης όπου η εκάστοτε μεταβλητή εμφανίζεται. Σε κάθε μπλοκ μεταβλητών αναγράφονται οι τρεις πρώτες καταχωρήσεις για κάθε μεταβλητή, μαζί με τα όρια και τα επίπεδα τιμών. Υπάρχει, φυσικά, η δυνατότητα ο χρήστης να ορίσει τον ελάχιστο αριθμό αναγραφής στηλών για κάθε μπλοκ μεταβλητών με χρήση της εντολής: <code>Option limcol = c</code> ; (με c, τον ελάχιστο επιθυμητό αριθμό εξισώσεων μπλοκ). Επίσης αναγράφεται και το εύρος τιμών τις οποίες μπορεί να λάβει η κάθε μεταβλητή οι οποίες μπορεί να κυμαίνονται από απείρως αρνητικό ('- Minus Infinity'), μηδέν (0), γύρω από το μηδέν ('eps') έως και απείρως θετικό ('+ Plus Infinity') ή να είναι απροσδιόριστες ('Undefined'), μη διαθέσιμες ('Not Available') κλπ.
<b>Στατιστικά Μοντέλου</b>	Παρέχουν πληροφορίες για το μέγεθος και τη γραμμικότητα του μοντέλου. Υπολογίζεται ο συνολικός αριθμός των μπλοκ των εξισώσεων και μεταβλητών, ο αντίστοιχος αριθμός των μονών εξισώσεων και μεταβλητών, ο αριθμός των μη μηδενικών στοιχείων και ο χρόνος εκτέλεσης του προγράμματος:
<b>Περίληψη επίλυσης</b>	Αναγράφεται μια σύντομη περίληψη της επίλυσης του προγράμματος του GAMS: <ul style="list-style-type: none"> <li>• το Όνομα του Μοντέλου και των Μεταβλητών Απόφασης,</li> <li>• το Είδος και την Κατεύθυνση της Επίλυσης,</li> <li>• το Όνομα της Επίλυσης και τον αριθμό της γραμμής όπου ξεκινά η επίλυση,</li> <li>• η Βέλτιστη τιμή της Αντικειμενικής Συνάρτησης,</li> <li>• ο Πραγματικός Χρόνος και ο Μέγιστος Επιτρεπτός Χρόνος</li> </ul>

### Επίλυσης

- ο Πραγματικός και ο Μέγιστος Επιτρεπτός Αριθμός Επαναλήψεων Επίλυσης
- η Κατάσταση της Επίλυσης ('Solver Status'), δηλαδή αν η επίλυση ολοκληρώθηκε κανονικά ('normal completion'), αν οι επαναλήψεις διακόπηκαν (iteration interrupted'), αν ο χρόνος επίλυσης τελείωσε, αν ο επιλυτής δεν είναι ικανός να βρει λύσεις ('non carable'), αν η επίλυση διεκόπη από το χρήστη κλπ
- η Κατάσταση του Μοντέλου ('Model Status'), δηλαδή αν οι τιμές που προέκυψαν είναι βέλτιστες ('optimal'), τοπικά βέλτιστες, απεριόριστες ('unbounded'), ακατόρθωτες (infeasible'), τοπικά ακατόρθωτες, ενδιάμεσα ακατόρθωτες, ακέραιες, ενδιάμεσα μη ακέραιες, άγνωστες λόγω κάποιου λάθους ('unknown'), καμία λύση

## 2.2 Η γλώσσα Matlab

Το Matlab ( MATrix LABoratory ) δημιουργήθηκε από τον C.Moler αρχικά σαν εργαλείο διαχείρισης των βιβλιοθηκών FORTRAN: LINPACK (γραμμική άλγεβρα) και EISPACK (ιδιοτιμές – ιδιοδιανύσματα). Εξελίχτηκε σε ποιο σύνθετο πακέτο γραμμένο σε C, C++ και από τότε εξελίσσεται συνεχώς. Πλέον, αποτελεί ένα σύγχρονο ολοκληρωμένο λογισμικό πακέτο σχεδιασμένο για υπολογιστική επίλυση μαθηματικών προβλημάτων. Η αυστηρή δομή της γλώσσας που κρύβει μέσα του το Matlab βοηθάει στην αποσφαλμάτωση του εκτελούμενο προγράμματος, παρέχοντας σημαντική ασφάλεια στον προγραμματιστή. Παράλληλα, η παροχή ενός μεγάλου αριθμού έτοιμων βιβλιοθηκών για την υλοποίηση πολύπλοκων εφαρμογών, το καθιστούν στα καλύτερα της κατηγορίας του [12], [13], [14].



Εικόνα 2.1 : Παράθυρο έναρξης του Matlab ( Έκδοση 7.11).

Στην εικόνα 2.1 φαίνεται το παράθυρο έναρξης του Matlab, τα σημαντικότερα σημεία αυτού του παραθύρου είναι :

1. Το **παράθυρο εντολών** (Command Window). Σ' αυτό το παράθυρο μπορούμε να εισάγουμε και να εκτελέσουμε εντολές μετά την *προτροπή* (prompt) `>>`. Τα αποτελέσματα των εντολών είναι προεπιλεγμένα από το Matlab να τυπώνονται επίσης στο παράθυρο αυτό.
2. Το **παράθυρο ιστορικών εντολών** (Command History). Σ' αυτό το παράθυρο μπορούμε να δούμε όλες τις εντολές που έχουν εκτελεστεί μέχρι εκείνη την χρονική στιγμή.
3. Το **παράθυρο χώρου εργασίας** (Workspace). Σ' αυτό το παράθυρο μπορούμε να δούμε όλα τα δεδομένα (και τις τιμές τους ) που εισάγονται ή δημιουργούνται κατά την εκτέλεση του προγράμματος μας. Επίσης, υπάρχει δυνατότητα άμεσης γραφικής αναπαράστασης κάποιου επιλεγμένου δεδομένου. Η χρήση του είναι πολύ σημαντική στην αποσφαλμάτωση του προγράμματος. Τέλος, μπορούμε να εισάγουμε τιμές από κάποιο εξωτερικό αρχείο και να αλλάζουμε χειροκίνητα τιμές των δεδομένων μας.

## 2.2.1 Εισαγωγή στην γλώσσα Matlab

Οι βασικές αλγεβρικές, λογικές και σχεσιακές πράξεις για χρήση του Matlab ως μια απλή αριθμομηχανή δίνονται στον ακόλουθο πίνακα :

Σύμβολο	Πράξη	Παράδειγμα
<b>Αλγεβρικοί Τελεστές</b>		
+	Πρόσθεση	<pre>&gt;&gt; 1+4 ans =      5</pre>
-	Αφαίρεση	<pre>&gt;&gt; 2.14-1 ans =      1.14</pre>
*	Πολλαπλασιασμός	<pre>&gt;&gt; 4*5 ans =      20</pre>
/	Διαίρεση	<pre>&gt;&gt; 9/1.4 ans =     6.428571429</pre>
^	Ύψωση σε δύναμη	<pre>&gt;&gt; 3^5 ans =     243</pre>
<b>Σχεσιακοί Τελεστές</b>		
<	μικρότερος	<pre>&gt;&gt; 2&lt;7 ans =      1</pre>
>	μεγαλύτερος	<pre>&gt;&gt; 3&gt;9 ans =      0</pre>
<=	μικρότερος ή ίσος	<pre>&gt;&gt; 6&gt;=6</pre>

>=	μεγαλύτερος ή ίσος	ans = 1 >> 4<=3 ans = 0
==	ίσος	>> 3+1==4 ans = 1
~=	άνισος	>> 3~=1 ans = 1
<b>Λογικοί Τελεστές</b>		
&	λογικό και ( <b>and</b> )	>> p=1; >> q=2;
	λογικό ή ( <b>or</b> )	>> p & q ans = 0
~	λογικό όχι ( <b>not</b> )	>> p   q ans = 1
xor	λογικό αποκλειστικό ή ( <b>xor</b> )	>> ~p ans = 0
all	αληθής αν όλα τα στοιχεία διανύσματος είναι μη μηδενικά	>> u=[1 2 3 4 5];  >> all(u) ans = 1
any	αληθής αν ένα στοιχείο διανύσματος δεν είναι μηδέν	>> any(u) ans = 1
&&	λογικό και μικρού κυκλώματος	
	λογικό ή μικρού κυκλώματος	

Η προτεραιότητα των αλγεβρικών πράξεων στο Matlab όπως και στις περισσότερες γνωστές γλώσσες προγραμματισμού (C,C++,Visual Basic) ακολουθούν τους συνήθεις κανόνες για την σειρά εκτέλεσης των πράξεων :

1. Προτεραιότητα έχουν οι πράξεις μέσα σε παρενθέσεις, από μέσα προς τα έξω.
2. Μετά εκτελούνται οι υψώσεις σε δύναμη.
3. Ακολουθούν οι πολλαπλασιασμοί και οι διαιρέσεις, από αριστερά προς τα δεξιά.
4. Τέλος εκτελούνται οι προσθέσεις και αφαιρέσεις, από αριστερά προς τα δεξιά.

Κάποιες άλλες σημαντικές πληροφορίες για την σωστή χρήση του Matlab συνοψίζονται στον ακόλουθο πίνακα :

Σύμβολο	Σχόλιο	Παράδειγμα
=	Εκχώρηση τιμής σε μεταβλητή.	>> x=2 x = 2
;	Ερωτηματικό (ποιο γνωστό ως semicolon) Αν δεν θέλουμε να εμφανίζεται στο παράθυρο εργασίας το αποτέλεσμα μιας εντολής γράφουμε στο τέλος της εντολής το ";" . Αν θέλουμε να δούμε στο παράθυρο εργασίας την τιμή μιας ενεργής μεταβλητής, τότε γράφουμε απλώς το όνομά της.	>> x=1;  >> x ans = 1

,	Το κόμμα μπορεί να διαχωρίζει διαφορετικές εντολές στην ίδια γραμμή.	>> x=1,y=2;sum=x+y x = 1 sum = 3
%	Το χρησιμοποιούμε για να γράψουμε σχόλια στον κώδικα μας.	>> a=2 % a is 2 a = 2
<b>a+bi</b> ή <b>a+bj</b>	Ορισμός των μιγαδικών αριθμών, όπου a,b είναι πραγματικοί αριθμοί και το i συμβολίζει τη φανταστική μονάδα : $i = \sqrt{-1}$ . Ο συζυγής ενός μιγαδικού αριθμού z είναι ο z'. Οι πράξεις των μιγαδικών αριθμών δηλώνονται στην Matlab όπως και στους πραγματικούς.	>> z1=1+2i z1 = 1.0000 + 2.0000i >> z2= z1' z2 = 1.0000 - 2.0000i >> z1+z2 ans = 2.0000 + 0.0000i
<b>ans</b>	Προεπιλεγμένη μεταβλητή που εκχωρείται το αποτέλεσμα μιας εντολής. Η μεταβλητή αυτή ανακυκλώνεται κάθε φορά που δίνουμε εντολή το αποτέλεσμα της οποίας δεν εκχωρείται σε κάποια άλλη μεταβλητή.	>> x=10;x-5 ans = 5 >> ans^2 ans = 25
<b>eps</b>	Η σχετική ακρίβεια κινητής υποδιαστολής της MATLAB, δηλαδή η απόσταση του 1 από τον αμέσως επόμενο αριθμό που διακρίνει η MATLAB.	>> 1+eps ans = 1
<b>Inf</b> ή <b>inf</b>	Έχει δεσμευτεί για να δηλώνει το $+\infty$	>> 1/0 ans = Inf
<b>NaN</b> ή <b>nan</b>	Παριστάνει ένα μη αριθμό (not a number). Αυτός μπορεί να προκύψει από πράξεις όπως οι 0/0 και $inf - inf$ .	>> 1/-0 ans = -Inf
<b>quit</b> ή <b>exit</b>	Για την έξοδο από το πρόγραμμα αρκεί να πληκτρολογήσουμε μια από τις δυο εντολές στο παράθυρο εντολών.	>> quit ή >> exit
<b>who</b>	Μας πληροφορεί για το ποιες μεταβλητές έχουν οριστεί στο χώρο εργασίας.	>> a=2; >> who Your variables are: a
<b>whos</b>	Μας πληροφορεί για το ποιες μεταβλητές έχουν οριστεί στο χώρο εργασίας, την διάσταση, τον τύπο και τον χώρο μνήμης που καταλαμβάνουν στην RAM.	>> a=2; >> whos Name Size Bytes Class a 1x1 8 double
<b>help</b>	Μας πληροφορεί on-line για τον σκοπό οποιασδήποτε εντολής ή συνάρτησης.	>> help who WHO List current variables. WHO lists the variables in the current workspace.
<b>lookfor</b>	Το χρησιμοποιούμε για να βρούμε μια εντολή της οποίας δεν γνωρίζουμε το όνομα.	>> lookfor 'matrix inverse' inv - Matrix inverse.
<b>clear</b>	Το χρησιμοποιούμε για διαγραφή όλων των ενεργών μεταβλητών ή συγκεκριμένων.	>> clear ή >> clear x
<b>clc</b>	Εκτελεί καθαρισμό του παραθύρου εργασίας, δεν διαγράφει τις μεταβλητές.	>> clc

<b>diary</b>	Το χρησιμοποιούμε για αποθήκευση όλων των πληροφοριών της εργασίας μας σε ένα αρχείο filename.txt .	>> diary filename.txt >> εντολές ... >> εντολές >> diary filename.txt
<b>load</b>	Το χρησιμοποιούμε για φόρτωση από αρχείο των μεταβλητών εργασίας.	>> load filename
<b>save</b>	Το χρησιμοποιούμε για αποθήκευση σε αρχείο των μεταβλητών εργασίας.	>> save filename
<b>format compact</b>  και  <b>format loose</b>	Το χρησιμοποιούμε για εξοικονόμηση χώρου. Με την εντολή format compact παίρνουμε πυκνή απεικόνιση αφού οι ενδιάμεσες κενές γραμμές παραλείπονται.  Με την εντολή format loose επανερχόμαστε στην αραιή απεικόνιση.	>> v=1  ans = 1  >> format compact >> v=1 ans = 1
<b>format long</b>  και  <b>format short</b>	Η MATLAB εμφανίζει 4 σημαντικά ψηφία μετά την υποδιαστολή. Με την εντολή format long μας δίνει 15 σημαντικά ψηφία.  Με την εντολή format short ή απλώς format μπορούμε να επανέλθουμε στην προεπιλογή των 4 σημαντικών ψηφίων μετά την υποδιαστολή.	>> x=1.2345000012*10^6 x = 1.2345e+006  >> format long >> x x = 1.2345000012e+006

Η Matlab είναι case sensitive, δηλαδή για την ονοματοδοσία των μεταβλητών κάνει διάκριση μεταξύ κεφαλαίων και μικρών γραμμάτων. Για τα ονόματα μεταβλητών ισχύουν οι πιο κάτω κανόνες:

1. Το όνομα αρχίζει με γράμμα (του αγγλικού αλφαβήτου).
2. Το όνομα περιέχει μόνο γράμματα, αριθμούς και υποπαύλες (*underscore*).
3. Δεν χρησιμοποιούνται ονόματα που έχουν δεσμευτεί από τη MATLAB (π.χ. συναρτήσεις βιβλιοθήκης και εργαλειοθηκών).
4. Προτιμούνται μικρά ονόματα για πρακτικούς λόγους αν και δεν υπάρχει περιορισμός στο μήκος των ονομάτων.

Η MATLAB είναι εφοδιασμένη με αρκετές συναρτήσεις βιβλιοθήκης οι οποίες περιλαμβάνουν τις λογαριθμικές, τις εκθετικές, τις τριγωνομετρικές, τις υπερβολικές και άλλες. Στον πίνακα φαίνονται οι κυριότερες από αυτές :

Συνάρτηση	Ερμηνεία
<b>sin</b>	ημίτονο
<b>cos</b>	συνημίτονο
<b>tan</b>	εφαπτομένη
<b>asin</b>	τόξο ημιτόνου
<b>acos</b>	τόξο συνημιτόνου
<b>atan</b>	τόξο εφαπτομένης
<b>exp</b>	εκθετική συνάρτηση
<b>log</b>	φυσικός λογάριθμος
<b>log10</b>	λογάριθμος με βάση το 10
<b>abs</b>	απόλυτη τιμή
<b>sqrt</b>	τετραγωνική ρίζα



<b>mod</b>	προσημασμένο υπόλοιπο διαίρεσης (modulus)
<b>rem</b>	υπόλοιπο διαίρεσης
<b>round</b>	στρογγύλευση στον πλησιέστερο ακέραιο
<b>ceil</b>	στρογγύλευση στον αμέσως μεγαλύτερο ακέραιο
<b>floor</b>	στρογγύλευση προς το μείον άπειρο
<b>fix</b>	στρογγύλευση προς το μηδέν

Με την εντολή **help elfun** η MATLAB μας δίνει τον κατάλογο των στοιχειωδών μαθηματικών συναρτήσεων (elementary math functions).

Τέλος η Matlab διαθέτει εντολές έλεγχου και επανάληψης, οι όποιες δίνουν την δυνατότητα να δημιουργήσουμε ελεγχόμενες δομές ή επαναλαμβανόμενους βρόχους. Οι εντολές αυτές είναι:

Εντολή	Σχόλιο	Παράδειγμα
<b>for</b> index = values program statements <b>end</b>	Επαναλαμβάνει μία ομάδα εντολών συγκεκριμένο αριθμό φορών.	for n=1:10 x(n)=sin(n*pi/10) end
<b>while</b> expression program statements <b>end</b>	Όταν δεν γνωρίζουμε ακριβώς πόσες φορές θα γίνει η επανάληψη τότε μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την εντολή while αντί της for.	for x=1:10 n = 1 ; while log(n) < x n = n+1; end end
<b>if</b> relation_1 program statements <b>elseif</b> relation_2 program statements <b>else</b> program statements <b>end</b>	Επιτρέπει να ελέγξουμε αν μια (ή περισσότερες) συνθήκες ισχύουν και να εκτελέσουμε σε κάθε περίπτωση την επιθυμητή ακολουθία εντολών και πράξεων.	if m=1 m=m+1; elseif m=2 m=m+2; else m=0; end
<b>switch</b> switch_expression <b>case</b> value_1 program statements <b>case</b> value_2 program statements <b>otherwise</b> program statements <b>end</b>	Μας δίνει τη δυνατότητα να επιλέξουμε για εκτέλεση μια ομάδα εντολών από άλλες πιθανές ομάδες.	m = '1'; switch (m) case '1' m=m+1; case '2' m=m+2; otherwise m=0; end

Με την εντολή **break** μεταφέρουμε τον έλεγχο στην πρώτη εντολή μετά το τελικό end του βρόχου στον οποίο χρησιμοποιείται. Έτσι αν έχουμε εγκιβωτισμένους βρόχους ο έλεγχος περνά στον επόμενο (εξωτερικό βρόχο). Η εντολή break ορίζεται μόνο μέσα σε βρόχους for και while.

Η εντολή **return** είναι παρόμοια εντολή που μπορεί να χρησιμοποιηθεί εναλλακτικά και εκτός βρόχων for και while.

Η εντολή **continue** μεταβιβάζει τον έλεγχο στην επόμενη επανάληψη ενός βρόχου for ή while χωρίς να εκτελεστούν οι εναπομένουσες εντολές του βρόχου.

Συνήθως αυτές οι εντολές χρησιμοποιούνται στα M-files και όχι στην προτροπή του Matlab.

## 2.2.2 Διανύσματα και Πίνακες

Στις αρχικές εκδόσεις της Matlab κάθε μεταβλητή ήταν ένας δισδιάστατος πίνακας, δηλαδή  $m \times n$ , πίνακας με (μιγαδικούς) αριθμούς διπλής ακριβείας. Τα διανύσματα και οι αριθμοί ήταν απλώς ειδικές περιπτώσεις δηλαδή  $1 \times n$  ή  $n \times 1$  και  $1 \times 1$  πίνακες αντίστοιχα. Από την έκδοση 4, η Matlab δέχεται επιπλέον  $n$ -διάστατους πίνακες καθώς και άλλους τύπους δεδομένων. Οι τύποι δεδομένων περιλαμβάνουν τις δομές (structures), τις τάξεις (classes) και τους πίνακες κελιών (cell arrays), οι οποίοι είναι πίνακες με στοιχεία όχι αναγκαστικά του ίδιου τύπου (πχ πρώτο στοιχείο αριθμός, δεύτερο στοιχείο αλφαριθμητικό(string), τρίτο διάνυσμα κοκ).

Βασικοί ορισμοί δισδιάστατων πινάκων :

Τύπος	Σχόλιο	Παράδειγμα
Δισδιάστατο $1 \times n$ Διάνυσμα γραμμή	$u = [u_1, \dots, u_n]$	<pre>&gt;&gt; a=[ -3, 4, 0] a = -3 4 0</pre>
Δισδιάστατο $n \times 1$ Διάνυσμα στήλη	$u = [u_1, \dots, u_n]^T$	<pre>&gt;&gt; b=[1; 2; -4; 3] b = 1 2 -4 3</pre>
Δισδιάστατος $n \times m$ πίνακας	$A = [a_{ij}] = \begin{bmatrix} a_{11} & \dots & a_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \dots & a_{nm} \end{bmatrix}$	<pre>&gt;&gt; A=[1,2,3,4; 1,0,1,0; -1,2,-2,1; 4,1,0,0] A = 1 2 3 4 1 0 1 0 -1 2 -2 1 4 1 0 0</pre>
Δισδιάστατος $n \times m$ πίνακας με βήματα $b_1, \dots, b_n$ .	$A = \begin{bmatrix} a_{11} & \dots & a_{11} + m * b_1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \dots & a_{n1} + m * b_n \end{bmatrix}$	<pre>&gt;&gt; B=[1:1:5;2:2:10;3:3:15] B = 1 2 3 4 5 2 4 6 8 10 3 6 9 12 15</pre>

Πράξεις και συναρτήσεις δισδιάστατων πινάκων :

Σύμβολο	Σχόλιο	Παράδειγμα
$A'$ Ανάστροφος πίνακας του δισδιάστατου $n \times m$ πίνακα $A$	$A^T = [a_{ji}] = \begin{bmatrix} a_{11} & \dots & a_{n1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{1m} & \dots & a_{nm} \end{bmatrix}$  Αν τα στοιχεία του $A$ είναι μιγαδικοί τότε : $A'$ = ο αναστροφοσυζυγής του $A$ $A.'$ = μόνο ο ανάστροφος του $A$ $A.''$ = μόνο ο συζυγής του $A$	<pre>&gt;&gt; a=[-3 4 ]; &gt;&gt; A=[1 2 3;1 0 4];  &gt;&gt; a' ans = -3 4  &gt;&gt; A' ans = 1 1 2 0 3 4</pre>

<p><math>A + B</math> και <math>a + b</math></p> <p><math>A, B \in \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^n</math> <math>a, b \in \mathbb{R}^n</math></p>	<p>Πρόσθεση πινάκων ή διανυσμάτων. <u>Προσοχή.</u> Οι διαστάσεις τους πρέπει πάντα να ταιριάζουν, δηλαδή</p> $[n \times m] + [n \times m] = [n \times m]$ <p>Το <math>ij</math>-στοιχείο του <math>C = A + B</math> είναι :</p> $[c_{ij}] = [a_{ij}] + [b_{ij}]$	<pre>&gt;&gt; A=[1 2;1 0]; &gt;&gt; B=[1 3;1 4]; &gt;&gt; C=A+B C =     2    5     2    4  &gt;&gt; a=[-3 4 ]; &gt;&gt; b=[3 1 ]; &gt;&gt; c=a+b  c =     0    5</pre>
<p><math>A - B</math> και <math>a - b</math></p> <p><math>A, B \in \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^n</math> <math>a, b \in \mathbb{R}^n</math></p>	<p>Αφαίρεση πινάκων ή διανυσμάτων. <u>Προσοχή.</u> Οι διαστάσεις τους πρέπει πάντα να ταιριάζουν, δηλαδή</p> $[n \times m] - [n \times m] = [n \times m]$ <p>Το <math>ij</math>-στοιχείο του <math>C = A - B</math> είναι :</p> $[c_{ij}] = [a_{ij}] - [b_{ij}]$	<pre>&gt;&gt; A=[1 2;1 0]; &gt;&gt; B=[1 3;1 4]; &gt;&gt; C=A-B C =     0   -1     0   -4  &gt;&gt; a=[-3 4 ]; &gt;&gt; b=[3 1 ]; &gt;&gt; c=a-b  c =    -6    3</pre>
<p><math>A * B</math> ή <math>A * b</math> ή εσωτερικό γινόμενο <math>a^T * b</math> ή εξωτερικό γινόμενο <math>a * b^T</math></p>	<p>Πολλαπλασιασμός πινάκων ή διανυσμάτων. <u>Προσοχή.</u> Οι διαστάσεις τους πρέπει πάντα να ταιριάζουν, δηλαδή</p> $[n \times m] * [m \times k] = [n \times k]$ <p>Το <math>ij</math>-στοιχείο του <math>C = A * B</math> είναι :</p> $[c_{ij}] = [a_{i1} \ \dots \ a_{im}] * \begin{bmatrix} b_{1j} \\ \vdots \\ b_{mj} \end{bmatrix} = \sum_{p=1}^m a_{ip} b_{pj}$	<pre>&gt;&gt; A=[1 2;1 0]; &gt;&gt; B=[1 3;1 4]; &gt;&gt; C=A*B C =     3    11     1     3  &gt;&gt; b=[3; 1]; &gt;&gt; c=A*b  c =     4     6</pre>
<p><math>A + c</math>  <math>A - c</math>  <math>A * c</math>  <math>A^c</math></p> <p>,όπου <math>c \in \mathbb{R}</math>: σταθερά</p>	<p>Πράξεις πινάκων με μια σταθερά.</p> <p>Το <math>ij</math>-στοιχείο του <math>C = A + c</math> είναι :</p> $[c_{ij}] = [a_{ij}] + c$ <p>Το <math>ij</math>-στοιχείο του <math>C = A - c</math> είναι :</p> $[c_{ij}] = [a_{ij}] - c$ <p>Το <math>ij</math>-στοιχείο του <math>C = A * c</math> είναι :</p> $[c_{ij}] = [a_{ij}] * c$ <p>Το <math>C = A^c</math> είναι :</p> $C = A * \dots * A, c\text{-πολλαπλασιασμοί}$	<pre>&gt;&gt; A=[1 2;1 0]; &gt;&gt; c=2; &gt;&gt; C=A+c C =     3    4     3    2  &gt;&gt; C=A-c C =    -1    0    -1   -2  &gt;&gt; C=A*c C =     2    4     2    0  &gt;&gt; C=A^c C =     3    2     1    2</pre>

<p><b>Αριστερή Διαίρεση</b></p> <p><math>A \setminus b</math></p>	<p>Δίνει την λύση του συστήματος <math>Ax = b</math>.  <u>Παρατήρηση.</u>  Χρησιμοποιείτε για ποιο γρήγορο υπολογισμό του <math>A^{-1}</math>, αντί της <math>inv(A)</math>.  Δηλαδή, <math>x = A \setminus b</math>, όπου <math>b = [1 \dots 1]^T</math>.</p>	<pre>&gt;&gt; A=[1 1 1;1 0 2;       0 2 1]; &gt;&gt; b =[6; 7; 7]; &gt;&gt; (A\b)'</pre> <pre>ans =       1      2      3</pre>
<p><b>Δεξιά Διαίρεση</b></p> <p><math>A/b</math></p>	<p>Δίνει την λύση του συστήματος <math>xA = b</math>.</p>	<pre>&gt;&gt; A=[1 1 1;1 0 2;       0 2 1]; &gt;&gt; b =[6; 7; 7]; &gt;&gt; b'/A</pre> <pre>ans = 5.6667 0.3333 0.6667</pre>
<p><b>Χειρισμός δισδιάστατου <math>n \times m</math> πίνακα A</b></p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>το <math>A(i, j)</math> μας δίνει το στοιχείο <math>a_{ij}</math> του πίνακα A.</li> <li>το <math>A(:, j)</math> μας δίνει την <math>j</math>-στήλη του πίνακα A.</li> <li>το <math>A(i, :)</math> μας δίνει την <math>i</math>-γραμμή του πίνακα A.</li> <li>το <math>A(m:n, k:l)</math> μας δίνει τον υποπίνακα <math>m</math> έως <math>n</math> και τις στήλες <math>k</math> έως <math>l</math>.</li> <li>το <math>A(end, :)</math> μας δίνει την τελευταία γραμμή του A.</li> <li>το <math>A(:, end)</math> μας δίνει την τελευταία στήλη του A.</li> <li>το <math>A(end, 1:3:6)</math> μας δίνει το διάνυσμα που περιέχει το <math>1^o</math>, το <math>3^o</math> και το <math>6^o</math> στοιχείο της τελευταίας γραμμής του A (δεδομένου ότι ο A έχει 6 στήλες).</li> <li>το <math>A(:)</math> είναι το διάνυσμα που περιέχει όλα τα στοιχεία του A κατά στήλη, από την <math>1^η</math> μέχρι την τελευταία γραμμή.</li> <li>το <math>A(:) = b</math> γεμίζει τον A με τα στοιχεία του b. Ο A διατηρεί την μορφή του.</li> </ol>	<pre>&gt;&gt; A=[ 1 2 3; 1 1 2]; &gt;&gt; A(1,2)</pre> <pre>ans =       2</pre> <pre>&gt;&gt; A(:,2)</pre> <pre>ans =       2       1</pre> <pre>&gt;&gt; A(1,:) ans =       1      2      3</pre> <pre>&gt;&gt; A(1:2,2:3)</pre> <pre>ans =       1      2       1      2</pre> <pre>&gt;&gt; A(end,:) ans =       1      1      2</pre> <pre>&gt;&gt; A(:,end) ans =       3       2</pre> <pre>&gt;&gt; A(:)'</pre> <pre>ans =       1      2      3      1      1      2</pre> <pre>&gt;&gt; b = [1 2 3 4 5 6]'; &gt;&gt; A(:)=b A =       1      2      3       4      5      6</pre>
<p><b>Συνένωση δισδιάστατου <math>n \times m</math> Πινάκων</b></p>	<p>Έστω <math>A \in \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^m</math> και <math>B \in \mathbb{R}^k \times \mathbb{R}^l</math></p> <ol style="list-style-type: none"> <li><math>C = [A \ B] = [A \ B]</math></li> <li><math>C = [A; B] = \begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix}</math></li> <li><math>C = [A \ B; B \ A] = \begin{bmatrix} A &amp; B \\ B &amp; A \end{bmatrix}</math></li> </ol>	<pre>&gt;&gt; A=[1 2; 3 4]; &gt;&gt; B=[5 6; 7 8]; &gt;&gt; C=[A B]</pre> <pre>C =       1      2      5      6       3      4      7      8</pre> <pre>&gt;&gt; D=[A;B]</pre> <pre>D =       1      2       3      4       5      6       7      8</pre> <pre>&gt;&gt; E=[ A B; B A]</pre> <pre>E =       1      2      5      6       3      4      7      8       5      6      1      2       7      8      3      4</pre>

<p><b>Πράξεις κατά στοιχεία</b>  <b>δισδιάστατο</b>  <b>ν n × m</b>  <b>Πινάκων</b></p>	<p>Έστω <math>A, B \in \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^m</math> και <math>c \in \mathbb{R}</math>: σταθερά</p> <p>1. <math>A * B =</math></p> $\begin{bmatrix} a_{11} * b_{11} & \dots & a_{1m} * b_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} * b_{n1} & \dots & a_{nm} * b_{nm} \end{bmatrix}$ <p>2. <math>A./B =</math></p> $\begin{bmatrix} \frac{a_{11}}{b_{11}} & \dots & \frac{a_{1m}}{b_{1m}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{a_{n1}}{b_{n1}} & \dots & \frac{a_{nm}}{b_{nm}} \end{bmatrix}$ <p>3. <math>A.\backslash B = B./A</math></p> <p>4. <math>C = c.^A =</math></p> $\begin{bmatrix} c^{a_{11}} & \dots & c^{a_{1m}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ c^{a_{n1}} & \dots & c^{a_{nm}} \end{bmatrix}$ <p>5. <math>D = A.^B =</math></p> $\begin{bmatrix} b_{11}^{a_{11}} & \dots & b_{1m}^{a_{1m}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{n1}^{a_{n1}} & \dots & b_{nm}^{a_{nm}} \end{bmatrix}$ <p><u>Παρατήρηση.</u>  Τα διανύσματα είναι υποπεριπτώσεις των άνω, δηλαδή</p> $a * b = \begin{bmatrix} a_{11} * b_{11} \\ \vdots \\ a_{n1} * b_{n1} \end{bmatrix}, \quad a./b = \begin{bmatrix} \frac{a_{11}}{b_{11}} \\ \vdots \\ \frac{a_{n1}}{b_{n1}} \end{bmatrix},$ $a.\backslash b = b./a, \quad a.^c = \begin{bmatrix} c^{a_{11}} \\ \vdots \\ c^{a_{n1}} \end{bmatrix},$ $a.^b = \begin{bmatrix} b_{11}^{a_{11}} \\ \vdots \\ b_{n1}^{a_{n1}} \end{bmatrix}$	<pre>&gt;&gt; a=[1 2 3 4]; &gt;&gt; b=[2 4 6 8];  &gt;&gt; a.*b ans =     2  8 18 32  &gt;&gt; a./b ans =     0.5 0.5 0.33 0.25  &gt;&gt; a.\b ans =     2  2  2  2  &gt;&gt; 2.^a ans =     2  4  8 16  &gt;&gt; a.^b ans =     1 16 729 65536  &gt;&gt; A=[1 1; 2 2]; &gt;&gt; B=[3 1; 1 3];  &gt;&gt; A.*B ans =     3  1     2  6  &gt;&gt; A./B ans =     0.3333 1.0000     2.0000 0.6667  &gt;&gt; A.\B ans =     3.0000 1.0000     0.5000 1.5000  &gt;&gt; 2.^B ans =     8  2     2  8  &gt;&gt; A.^B ans =     1  1     2  8</pre>
<p><b>det(A)</b></p>	<p><math>det(A) =  A  =</math> ορίζουσα του A</p>	<pre>&gt;&gt; A=[1 2;1 4]; &gt;&gt; det(A) ans =     2</pre>
<p><b>A<sup>-1</sup></b>  <b>Αντίστροφος</b>  <b>πίνακας του</b>  <b>δισδιάστατου</b></p>	<p><math>A^{-1} =</math> αντίστροφος <math>n \times n</math> πίνακα A.  Υπάρχει αν <math>det(A) \neq 0</math> τότε</p> $A^{-1} = \left( \frac{1}{det(A)} \right) * \begin{bmatrix} M_{11} & \dots & M_{n1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ M_{1m} & \dots & M_{nm} \end{bmatrix}$	<pre>&gt;&gt; A=[1 2;1 4]; &gt;&gt; Inv_A=inv(A) ans =     2  -0.5    -1  -0.5</pre>

<b><math>n \times n</math> πίνακα A</b>	όπου $M_{ij} = (-1)^{i+j} * [\text{υποορίζουσα του } a_{ji}]$	Χρησιμοποιείτε σπάνια λόγο χαμηλής ακριβείας και μεγάλου υπολογιστικού χρόνου.
<b>Ιδιοτιμές και ιδιοδιανύσματα <math>n \times n</math> πίνακα A</b>	Οι ρίζες της εξίσωσης $ \lambda I - A  = 0$  $I = \begin{bmatrix} 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 1 \end{bmatrix}$ <p>Αν θέλουμε και τα ιδιοδιανύσματα του A τότε γράφουμε <math>[P,V]=\text{eig}(A)</math>, όπου η διαγώνιος του V έχει τις ιδιοτιμές του A και ο P έχει σαν στήλες τα ιδιοδιανύσματα</p>	<pre>&gt;&gt; A= [ 1 2; 3 4]; &gt;&gt; eig(A) ans=     -0.3723      5.3723 &gt;&gt; [P,V]=eig(A) P =     -0.8246    -0.4160      0.5658    -0.9094 V =     -0.3723         0          0     5.3723</pre>
<b>Στοιχειώδεις Πίνακες</b>	<p><b>eye(n, m):</b> πίνακας με 1 στη κύρια διαγώνιο και 0 αλλού</p> <p><b>zeros(n, m):</b> μηδενικός πίνακας</p> <p><b>ones(n, m):</b> πίνακας με 1 σε όλες τις θέσεις</p> <p><b>rand(n, m):</b> ομοιόμορφα ψευδό-τυχαίος πίνακας. Τα στοιχεία του παίρνουν τιμές από 0 έως 1.</p>	<pre>&gt;&gt; eye(3,3) ans =      1     0     0      0     1     0      0     0     1 &gt;&gt; zeros(3,3) ans =      0     0     0      0     0     0      0     0     0 &gt;&gt; ones(3,3) ans =      1     1     1      1     1     1      1     1     1 &gt;&gt; rand(2) ans =     0.9355    0.0579     0.9169    0.3529</pre>
<b>Βασικές Συναρτήσεις Πινάκων</b>	<p><b>max</b> διάνυσμα μέγιστων στοιχείων κάθε στήλης</p> <p><b>min</b> διάνυσμα ελάχιστων στοιχείων κάθε στήλης</p> <p><b>diag</b> διαγώνιος πίνακας ή η διαγώνιος πίνακα!</p> <p><b>triu</b> άνω τριγωνικό μέρος πίνακα</p> <p><b>tril</b> κάτω τριγωνικό μέρος πίνακα</p> <p><b>size</b> μέγεθος πίνακα</p> <p><b>length</b> η μεγαλύτερη διάσταση πίνακα</p> <p><b>norm</b> νόρμα πίνακα</p> <p><b>trace</b> ίχνος πίνακα</p>	<pre>&gt;&gt; A= [1 3 0;9 4 2]; &gt;&gt; length(A) ans =      3 &gt;&gt; size(A) ans =      2     3 &gt;&gt; max(A) ans =      9     4     2 &gt;&gt; min(A) ans =      1     3     0 &gt;&gt; trace(A(1:2,1:2)) ans =      5 &gt;&gt; rank(A) ans =      2 &gt;&gt; norm(A) ans =     10.2768 &gt;&gt; poly(A(1:2,1:2)) ans =</pre>

	<p><b>rank</b> βαθμός πίνακα</p> <p><b>poly</b> χαρακτηριστικό πολυώνυμο τετραγωνικού πίνακα</p>	<pre> 1   -5  -23 &gt;&gt; tril(A) ans =     1     0     0     9     4     0 &gt;&gt; triu(A) ans =     1     3     0     0     4     2 </pre>
<p><b>Βασικές Συναρτήσεις Διανυσμάτων</b></p>	<p><b>max</b> μέγιστο στοιχείο διανύσματος</p> <p><b>min</b> ελάχιστο στοιχείο διανύσματος</p> <p><b>length</b> μήκος διανύσματος</p> <p><b>sort</b> ταξινόμηση σε αύξουσα σειρά</p> <p><b>sum</b> άθροισμα στοιχείων</p> <p><b>prod</b> γινόμενο στοιχείων</p> <p><b>norm</b> νόρμα διανύσματος</p> <p><b>median</b> διάμεσος</p> <p><b>mean</b> μέση τιμή</p> <p><b>std</b> τυπική απόκλιση</p>	<pre> &gt;&gt; a=[3 3.4 2.5 -7 4]; &gt;&gt; min(a) ans =            -7 &gt;&gt; max(a) ans =            4 &gt;&gt; length(a) ans =            5 &gt;&gt; b=sort(a) b=            -7  2.5  3  3.4  4 &gt;&gt; sum(a) ans =            5.9000 &gt;&gt; prod(a) ans =            -714 &gt;&gt; mean(a) ans =            1.1800 </pre>

### 2.2.3 M-files ( αρχεία εντολών και αρχεία συναρτήσεων )

Ο καλύτερος τρόπος δημιουργίας μεγάλων και πολύπλοκων προγραμμάτων στην Matlab είναι με την χρήση αρχείων "m-files" τα οποία έχουν το επίθεμα .m (πχ. script.m). Τα m-files που δημιουργεί ο χρήστης συμπληρώνουν τις συναρτήσεις βιβλιοθήκης της Matlab που είναι επίσης m-files. Τα m-files διακρίνονται σε :

1. **Αρχεία script ή αρχεία εντολών** (script m-files or command files) τα οποία δεν έχουν ορίσματα εισόδου και εξόδου αλλά εκτελούν μια ακολουθία εντολών σε μεταβλητές του χώρου εργασίας.
2. **Αρχεία συναρτήσεων** (function m-files) τα οποία περιλαμβάνουν μια γραμμή ορισμού συνάρτησης, δέχονται ορίσματα εισόδου και επιστρέφουν μεταβλητές εξόδου, και των οποίων οι εσωτερικές μεταβλητές είναι τοπικές (εκτός αν δηλωθούν ως ολικές με την εντολή global).

Τόσο τα αρχεία script όσο και τα αρχεία συναρτήσεων:

- Δημιουργούνται ξεχωριστά με το συντάκτη της MATLAB, τον οποίο μπορούμε να ανοίξουμε με την εντολή **>> edit** .

Για δημιουργία νέου αρχείου: **File** → **New** → **M-file**

Για άνοιγμα υπάρχοντος αρχείου: **File** → **Open**

- Πρέπει να βρίσκονται στον φάκελο εργασίας (working directory) ή στον φάκελο (directory) της MATLAB ή στον δρόμο αναζήτησης (research path) της MATLAB.
- Μπορούν να καλούν άλλα m-files ή ακόμα τον ίδιο τον εαυτό τους (αναδρομικά m-files).

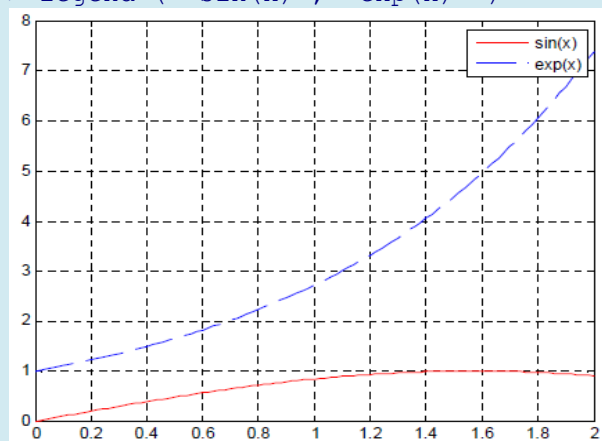
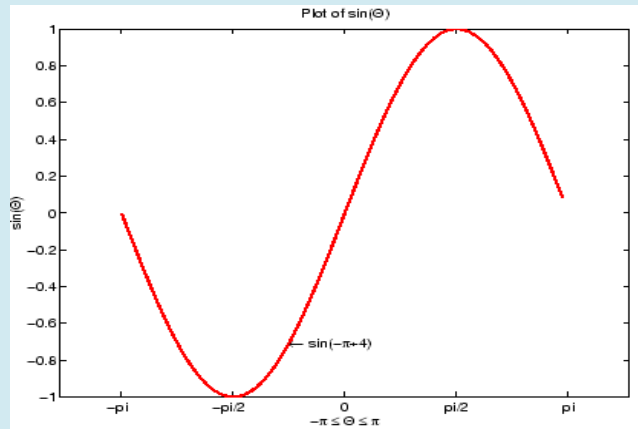
m-file	Σχόλιο	Παράδειγμα
<p><b>script-m-files</b></p>	<p>Περιέχουν μια ακολουθία εντολών της Matlab. Οι εντολές αυτές μπορούν να εκτελεστούν αν γράψουμε το όνομα του αρχείου (χωρίς το επίθεμα .m),  <code>&gt;&gt; script_name</code>  , είτε απευθείας από τον editor.</p> <p>Τα script files είναι χρήσιμα για την εισαγωγή δεδομένων (π.χ. μεγάλων πινάκων) και για την επανάληψη μεγάλων ακολουθιών εντολών για διαφορετικά δεδομένα.</p>	<p>Φτιάχνουμε script-file με όνομα <code>linear_equation1</code>, το οποίο λύνει μια εξίσωση της μορφής <math>Ax=b</math>.</p>  <p>Καλούμε το script από το workspace  <code>&gt;&gt; linear_equation1</code>  matrix A is  A =  1 0 1  4 1 0  2 0 5  vector b is  b =  1  2  3  solution of Ax=b is  x =  0.6667  -0.6667  0.3333</p>
<p><b>function m-files</b></p>	<p>Περιέχουν μια ακολουθία εντολών της Matlab οι οποίες δέχονται μεταβλητές εισόδου (πχ. in1, in2) και υπολογίζουν νέες μεταβλητές εξόδου (πχ. out1, out2).</p> <p><u><b>Δομή function m-file :</b></u>  <code>function[out1,out2,...]= f_name(in1,in2,...)</code>  % ΣΧΟΛΙΑ (προαιρετικά)  % f_name, περίληψη της συνάρτησης.  % Ανάλυση της λειτουργίας της συνάρτησης.</p> <p>Ακολουθία εντολών (program statements):  1. <b>Προκαταρκτικές εντολές</b>  1.1 Δηλώσεις σταθερών , πινάκων , ...  1.2 Πράξεις  1.3 Κλήση υποσυναρτήσεων  2. <b>Υπολογισμός των εξόδων</b>  out1=...  out2=...</p> <p><code>end</code></p> <p><u><b>Παρατήρηση.</b></u>  Γενικά για την ονομασία μιας m-συνάρτησης ακολουθούμε τους κανόνες ονοματολογίας που ισχύουν και για τις μεταβλητές.</p>	<pre>function [s,p]=s_p(x1,x2)  %function % [s,p] = s_p(x1, x2) % % Η συνάρτηση s_p % υπολογίζει το άθροισμα % % και το γινόμενο δυο % % αριθμών. % Είσοδοι : x1, x2, x3 % Έξοδοι : s=x1+x2 %          p =x1*x2 % s = x1+x2; p = x1*x2;  % Τέλος του s_p.m  end</pre>

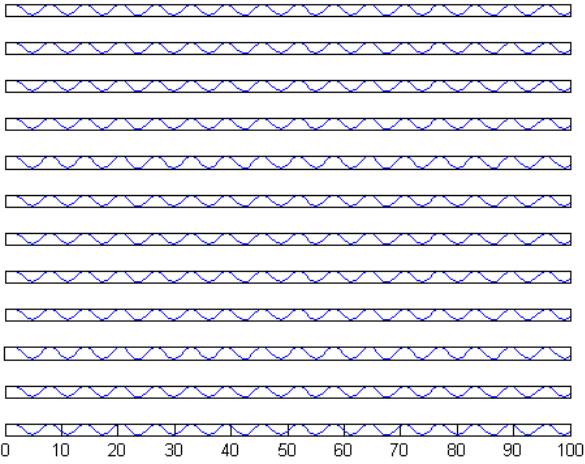
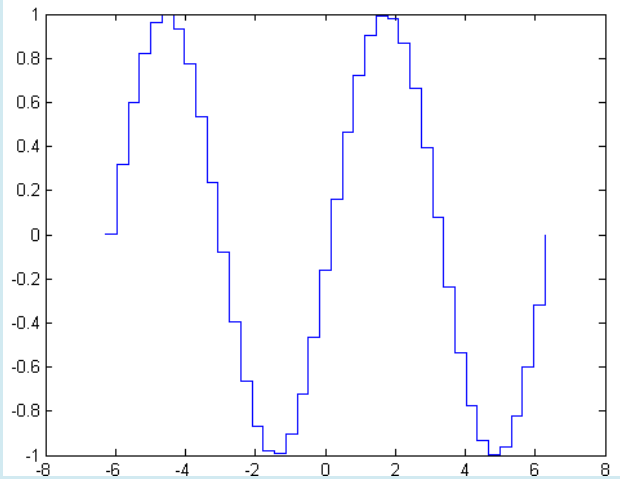


## 2.2.4 Γραφικά

Η Matlab είναι εφοδιασμένη με αρκετές συναρτήσεις για εύκολο σχεδιασμό διαγραμμάτων, επίπεδων καμπυλών, τρισδιάστατων επιφανειών, ισουψών, παραμετρικών δισδιάστατων αλλά και τρισδιάστατων καμπυλών κα. Οι σημαντικότερες εξ αυτών συνοψίζονται στον κάτω πίνακα.

Εντολή	Σχόλιο	Παράδειγμα
<b>plot(x,y)</b>	<b>plot</b> Δημιουργεί το γράφημα του y συναρτήσει του x	<pre>&gt;&gt; x = -pi:.1:pi; &gt;&gt; y = sin(x); &gt;&gt; set(gca,'XTick',-pi:pi/2:pi); &gt;&gt; set(gca,'XTickLabel',{'-pi','pi/2','0','pi/2','pi'}); &gt;&gt; xlabel('-\pi \leq \Theta \leq \pi'); &gt;&gt; ylabel('sin(\Theta)'); &gt;&gt; title('Plot of sin(\Theta)'); &gt;&gt; text(-pi/4,sin(-pi/4),'\leftarrow sin(-\pi\div4)',...         'HorizontalAlignment','left') &gt;&gt; set(p,'Color','red','LineWidth',2) &gt;&gt; p = plot(x,y)</pre>
	<b>title</b> Προσθήκη τίτλου	
	<b>xlabel</b> Προσθήκη ετικέτας στον οριζόντιο άξονα	
	<b>ylabel</b> Προσθήκη ετικέτας στον κατακόρυφο άξονα	
	<b>legend</b> Προσθήκη λεζάντας	
	<b>text</b> Προσθήκη κειμένου στη θέση $(x_i, y_i)$	
	<b>grid</b> Δημιουργία πλέγματος	
	<b>figure</b> Άνοιγμα (άλλου) παραθύρου γραφικών	<pre>&gt;&gt; x=0:0.02:2; &gt;&gt; y=sin(x); &gt;&gt; z=exp(x); &gt;&gt; plot(x,y,'r',x,z,'--') &gt;&gt; grid &gt;&gt; legend('sin(x)','exp(x)')</pre>
	<b>hold</b> Πάγωμα του τρέχοντος παραθύρου γραφικών για το σχεδιασμό και άλλων καμπυλών.	



<p><b>subplot(m,n,p)</b></p>	<p>Μας επιτρέπει να βάλουμε πολλά γραφήματα στο ίδιο παράθυρο γραφικών.</p> <p>Διαμερίζει το παράθυρο γραφικών σε <math>m \times n</math> υποπαράθυρα και τοποθετεί το επόμενο γράφημα στη θέση <math>p</math>.</p>	<pre>figure for i=1:12     subplot(12,1,i)     plot (sin(1:100)*10^(i-1))     set(gca,'xtick',[],'ytick',[]) end set(gca,'xtickMode','auto')</pre> 
<p><b>stairs(x,y)</b></p>	<p>Δημιουργεί το διακριτό γράφημα του <math>y</math> συναρτήσεως του <math>x</math>.</p>	<pre>&gt;&gt; x = linspace(-2*pi,2*pi,40); &gt;&gt; stairs(x,sin(x))</pre> 
<p><b>Άλλες βασικές συναρτήσεις αναπαράστασης γραφικών</b></p>	<p><b>loglog:</b> Λογαριθμική γραφική.  <b>semilogx:</b> Λογαριθμικός άξονας x, γραμμικός άξονας y.  <b>semilogy:</b> Λογαριθμικός άξονας y, γραμμικός άξονας x.  <b>polar:</b> Πολική γραφική παράσταση.  <b>mesh:</b> 3-D γραφική πλέγματος.  <b>contour:</b> Ισοϋψής γραφική παράσταση.  <b>bar:</b> Γραφική παράσταση στηλών.</p>	


## 2.2.5 Εξειδικευμένες Συναρτήσεις

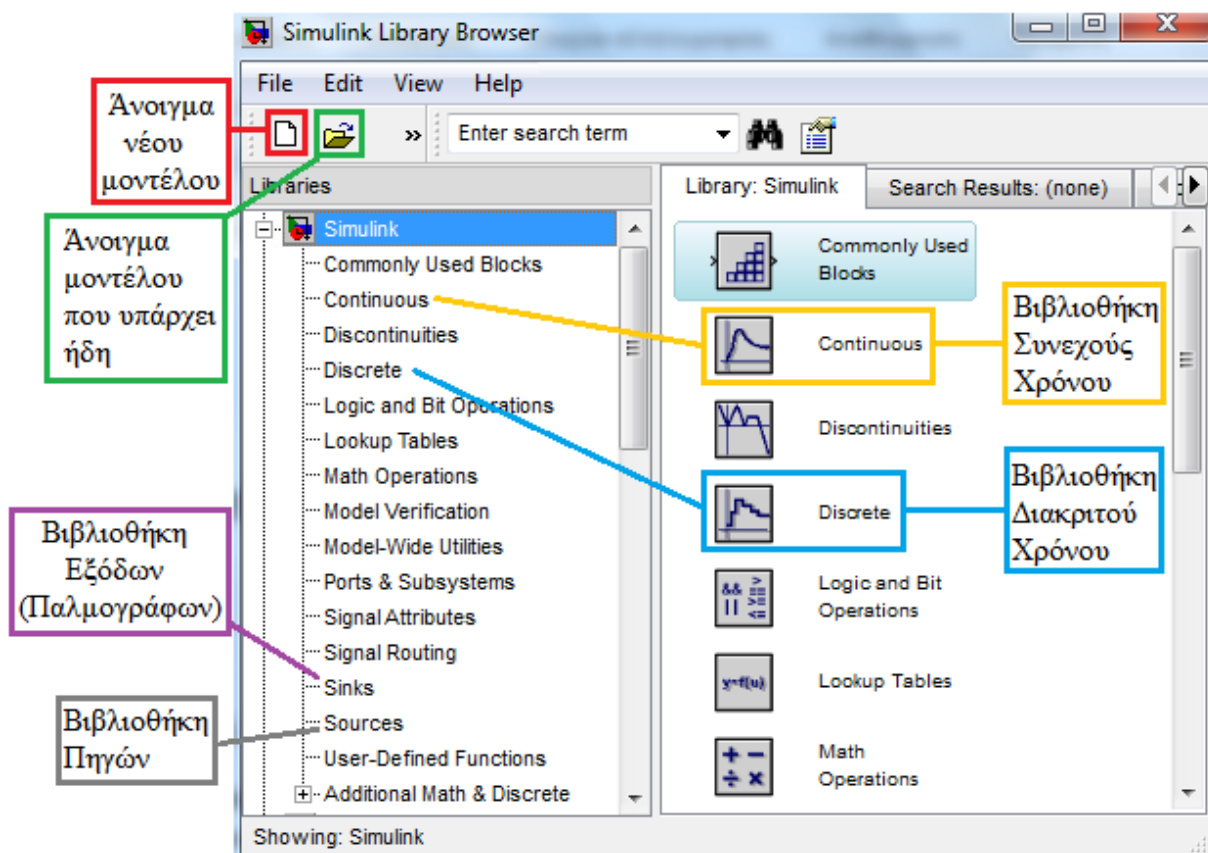
Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκαν και κάποιες πιο εξειδικευμένες συναρτήσεις από αυτές που αναφέρθηκαν στις προηγούμενες ενότητες. Οι συναρτήσεις αυτές παρατίθενται στον επόμενο πίνακα.

Εντολή	Σχόλιο	Παράδειγμα
<b>xlsread</b>	Διαβάζουμε τα δεδομένα μας από ένα αρχείο Microsoft office excel	<pre>&gt;&gt;B=xlsread('C:\User\name.xls',A,'A2:C4');</pre> <p>Διαβάζουμε απο το sheet A του αρχείου <code>name.xls</code> που βρίσκεται στο path '<code>C:\User\</code> τα στοιχεία '<code>A2:C4</code>' και τον εκχωρούμε στον B.</p>
<b>xlswrite</b>	Γράφουμε τα αποτελέσματα μας σε ένα αρχείο Microsoft office excel	<pre>&gt;&gt;B=xlswrite('C:\User\name.xls',A,'A2:C4');</pre> <p>Γράφουμε τον πίνακα B τα στοιχεία '<code>A2:C4</code>' από το sheet A του αρχείου <code>name.xls</code> που βρίσκεται στο path '<code>C:\User\</code>.</p>
<b>fmincon</b>	<p>Λύνει το πρόβλημα ελαχιστοποίησης</p> $\min_x f(x)$ <p>,όπου</p> <p><math>f(x)</math>= συνάρτηση κόστους</p> <p>και περιορισμοί:</p> $Ax \leq b$ $A_{eq}x = b_{eq}$ $lb \leq x \leq ub$ <p><math>A \in \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^k</math>  <math>A_{eq} \in \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^m</math>  <math>b, b_{eq}, lb, ub \in \mathbb{R}^n</math></p>	<p>Έστω η συνάρτηση myfun ( δηλαδή myfun.m ):</p> <pre>function f = myfun(x,y) f = -x(1)*x(2)*x(3)+y; end</pre> <pre>&gt;&gt; A = [-1 -2 -2; 1 2 2]; &gt;&gt; b = [0; 72]; &gt;&gt; x0 = [10; 10; 10]; % Αρχικό Σημείο &gt;&gt; [x,fval]=fmincon(@ (x)myfun(x,0),x0,A,b);</pre> <p>x =</p> <pre>24.0000 12.0000 12.0000</pre> <p>fval =</p> <pre>-3.4560e+03</pre>
<b>vertcat</b>	<p>Έστω</p> $A = [\vec{a}_1 \dots \vec{a}_{n1}],$ $A \in \mathbb{R}^{n1} \times \mathbb{R}^{m1}$ $B = [\vec{b}_1 \dots \vec{b}_{n2}],$ $B \in \mathbb{R}^{n2} \times \mathbb{R}^{m2}$ <p>,τότε</p> $C = \text{vertcat}(A,B)$ $= \begin{bmatrix} \vec{a}_1 & \dots & \vec{a}_{n1} \\ \vec{b}_1 & \dots & \vec{b}_{n2} \end{bmatrix}$ $\vec{a}_j \in \mathbb{R}^{n1} \times \mathbb{R}^1$ $\vec{b}_j \in \mathbb{R}^{n2} \times \mathbb{R}^1$	<pre>&gt;&gt; A= [ 17 24; 23 5]; &gt;&gt; B = [ 800 100; 300 500];</pre> <pre>&gt;&gt; C = vertcat(A,B)</pre> <p>C =</p> <pre>17 24 23 5 800 100 300 500</pre>

## 2.2.6 Simulink

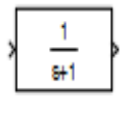







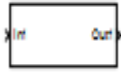


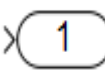


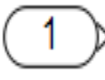

Το Simulink αποτελεί ίσως το ισχυρότερο διαθέσιμο εργαλείο για την ανάλυση και σύνθεση δυναμικών συστημάτων. Το Toolbox αυτό δίνει την δυνατότητα προσομοίωσης γραμμικών και μη-γραμμικών συστημάτων συνεχούς ή διακριτού χρόνου όπως επίσης και υβριδικών συστημάτων (συνδυασμό υποσυστημάτων συνεχούς και διακριτού χρόνου) [14] ,[15].

Η ενεργοποίηση του Simulink γίνεται είτε με το πάτημα του κουμπιού  στην πάνω μπάρα του παραθύρου έναρξης είτε πληκτρολογώντας στο command window την εντολή Simulink. Με την ενεργοποίηση του Simulink εμφανίζεται η βιβλιοθήκη του Simulink, η οποία φαίνεται στην εικόνα 2.2.



Εικόνα 2.2.1 : Παράθυρο βιβλιοθήκης του Simulink.

Για την δημιουργία πληθώρας και μεγάλης πολυπλοκότητας συστημάτων, το Simulink διαθέτει ένα μεγάλο πλήθος κατηγοριών (π.χ. συνεχούς χρόνου , διακριτού χρόνου ,πηγές κλπ). Η κάθε κατηγορία αποτελείτε από μπλοκ (blocks) δηλαδή υποσυστήματα που επιτελούν διάφορες διεργασίες, σε αρκετές περιπτώσεις ρυθμιζόμενες από τον χρήστη. Επειδή το πλήθος των μπλοκ είναι μεγάλο θα αναφερθούμε σε αυτά που χρησιμοποιήθηκαν για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής.

Κατηγορία	Όνομα	Σχήμα	Λειτουργία
Συνεχούς Χρόνου	Transfer Function		Περιγραφή Συστήματος με Συνάρτηση Μεταφοράς
	Integrator Limited		Το ολοκλήρωμα του Σήματος εισόδου
	Transport Delay		Προσθέτει στο Σήμα εισόδου μια σταθερή καθυστέρηση/προήγηση
Ασυνεχούς Χρόνου	Saturation		Κόβει από το Σήμα εισόδου τις τιμές που υπερβαίνουν τα άνω και τα κάτω όρια που ορίζουμε
Lookup Tables	Lookup Table		Κάνει 1-1 αντιστοίχιση του Σήματος εισόδου σε τιμές Σήματος εξόδου με την χρήση ενός ορισμένου πίνακα
Μαθηματική Τελεστής	Gain		Πολλαπλασιασμός Σήματος εισόδου με μια σταθερά
	Product		Γινόμενο Σημάτων εισόδου
	Sum		Άθροιση Σημάτων εισόδου
Ports & Subsystems	Subsystem		Δημιουργία υποσυστήματος
Έξοδοι (Sinks)	Scope		Απεικόνιση του σήματος εισόδου ως προς τον χρόνο
	To Workspace		Αποθήκευση Τιμών του Σήματος Εισόδου στον Χώρο Εργασίας
	Out1		Θύρα εξόδου, διεπαφή των υποσυστημάτων
Πηγές (Sources)	Clock		Εισαγωγή χρόνου προσομοίωσης
	Constant		Δημιουργία μιας σταθεράς
	In1		Θύρα εισόδου, διεπαφή των υποσυστημάτων
	Signal Builder		Δημιουργία Σήματος

### 3 V2G Λειτουργία

#### 3.1 Περιγραφή της V2G λειτουργίας

Με τον όρο V2G (Vehicle to Grid) λειτουργία θεωρούμε την διαδικασία της μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας μεταξύ των ηλεκτρικών οχημάτων ( Electrical Vehicles ή εν συντομία EVs) και του δικτύου (Grid), με το οποίο είναι διασυνδεδεμένα. Τα EVs μπορούμε να τα προσεγγίσουμε αρχικά ως συσσωρευτές (συμβατική θεώρηση), οι οποίοι εκφορτίζονται κατά την διάρκεια των ταξιδιών (με σκοπό την κάλυψη των απαιτήσεων σε ηλεκτρομηχανική μετατροπή των κινητήρων τους) και φορτίζουν κατά την διάρκεια που είναι σταθμευμένα (σε σύνδεση με το δίκτυο).



Εικόνα 3.1.1 Ροή Ισχύος Συμβατικής Θεώρησης των EVs [16]

Με βάση αυτήν την πρώτη θεώρηση εισάγουμε ένα νέο είδος φορτίου στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας, των οποίων η επίδραση θα έχει ένα σημαντικό αρνητικό αντίκτυπο στην εξασφάλιση των ποιότητας και της ευστάθειας των υπηρεσιών τους. Άρα, καλούμαστε να βρούμε τρόπους ένταξης των EVs, με τους οποίους τα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας διατηρούν ή ακόμα καλύτερα βελτιώνουν τα ποιοτικά τους χαρακτηριστικά και ταυτόχρονα παρέχουν πλεονεκτήματα στους χρήστες και κίνητρα αγοράς για την απόκτηση όλο και μεγαλύτερου μέρους της μηχανοκίνητης αγοράς. Για την κάλυψη των απαιτήσεων αυτών έχουν αναπτυχτεί δυο τεχνολογίες, τις οποίες θα περιγράψουμε και θα αναλύσουμε στις επόμενες ενότητες. Οι τεχνολογίες αυτές είναι η Αμφίδρομη V2G Λειτουργία (Bidirectional V2G) και η Μονόδρομη V2G Λειτουργία (Unidirectional V2G) [17], [19], [20], [21].

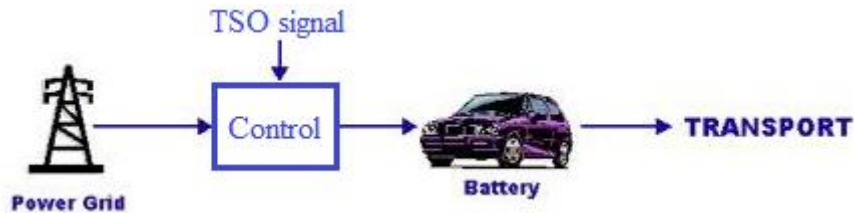
#### 3.2 Μονόδρομη V2G Λειτουργία (Unidirectional V2G)

Η Μονόδρομη V2G Λειτουργία (εν συντομία UniV2G) είναι η αποκλειστική ροή ισχύος από τα EVs προς το δίκτυο. Τα EVs είναι πιο κοντά στην συμβατική θεώρηση με την βασική διαφορά ότι η φόρτιση τους γίνεται προγραμματισμένα παρέχοντας επικουρικές υπηρεσίες στο δίκτυο. Οι επικουρικές υπηρεσίες που προσφέρει η UniV2G είναι [19]:

- Κάτω Ρύθμιση (Regulation Down), δηλαδή ο συσσωρευτής του EV αυξάνει την Ισχύ Φόρτισης του πάνω από το βέλτιστο σημείο λειτουργίας (POP) έτσι ώστε το δίκτυο να βλέπει μεγαλύτερο φορτίο από το βέλτιστο προκαθορισμένο. Η διαδικασία της κάτω ρύθμισης γίνεται άμεσα με σήματα ελέγχου από τον Διαχειριστή Δικτύου (TSO) στην περίπτωση όπου η παραγωγή μας είναι μεγαλύτερη της ζήτησης.

- Άνω Ρύθμιση (Regulation Up), δηλαδή ο συσσωρευτής του EV μειώνει την Ισχύ Φόρτισης του κάτω από το βέλτιστο σημείο λειτουργίας (POP) έτσι ώστε το δίκτυο να βλέπει μικρότερο φορτίο. Τα EVs δεν μπορούν να δώσουν ισχύ στο δίκτυο άρα το μέγιστο επίπεδο κάτω ρύθμισης είναι τα 0MW δηλαδή η αποκοπή τους από το δίκτυο. Η διαδικασία της άνω ρύθμισης γίνεται άμεσα με σήματα ελέγχου από τον Διαχειριστή Δικτύου (TSO) στην περίπτωση όπου η παραγωγή μας είναι μικρότερη της ζήτησης.

Μια απλή περιγραφή της UniV2G Λειτουργίας φαίνεται στην εικόνα 3.2.1.



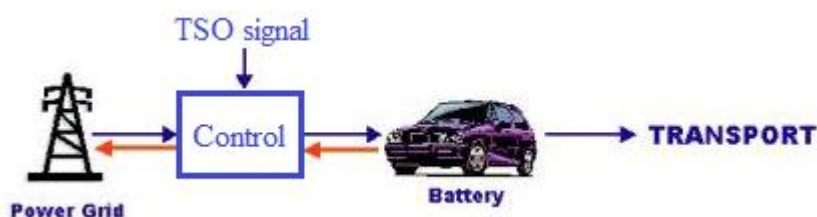
Εικόνα 3.2.1 Ροή Ισχύος Unidirectional V2G Λειτουργίας [18]

### 3.3 Αμφίδρομη V2G Λειτουργία (Bidirectional V2G)

Η Αμφίδρομη V2G Λειτουργία (εν συντομία BiV2G) είναι η αμφίδρομη ροή ισχύος μεταξύ των EVs και του δικτύου. Τα EVs μπορούν να φορτίζονται και να εκφορτίζονται προγραμματισμένα παρέχοντας επικουρικές υπηρεσίες στο δίκτυο χωρίς να επηρεάζονται οι απαιτήσεις φόρτισης των χρηστών για τα ταξίδια τους. Οι επικουρικές υπηρεσίες που προσφέρει η BiV2G είναι [20]:

- Κάτω Ρύθμιση (Regulation Down), δηλαδή ο συσσωρευτής του EV αυξάνει την Ισχύ Φόρτισης του πάνω από το βέλτιστο σημείο λειτουργίας (Preferred Operating Point ή εν συντομία POP) έτσι ώστε το δίκτυο να βλέπει μεγαλύτερο φορτίο από το βέλτιστο προκαθορισμένο. Η διαδικασία της κάτω ρύθμισης γίνεται άμεσα με σήματα ελέγχου από τον Διαχειριστή Δικτύου (TSO) στην περίπτωση όπου η παραγωγή μας είναι μεγαλύτερη της ζήτησης.
- Άνω Ρύθμιση (Regulation Up), δηλαδή ο συσσωρευτής του EV λειτουργεί ως πηγή τροφοδοτώντας το δίκτυο με ισχύ. Το μέγιστο επίπεδο άνω ρύθμισης θα είναι αρνητικό και θα εξαρτάται από την στάθμη φόρτισης (State Of Charge – SOC) του συσσωρευτή “πηγή”, για παράδειγμα αν η μπαταρία μας είναι πλήρως φορτισμένη μπορούμε να έχουμε την μέγιστη εκφόρτιση ενώ αν η μπαταρία μας είναι άδεια τότε το μέγιστο επίπεδο θα είναι τα 0MW, αποκοπή από το δίκτυο. Η διαδικασία της άνω ρύθμισης γίνεται άμεσα με σήματα ελέγχου από τον Διαχειριστή Δικτύου (TSO) στην περίπτωση όπου η παραγωγή μας είναι μικρότερη της ζήτησης.
- Στρεφόμενη Εφεδρεία (Spinning Reserve), ικανότητα παραγωγής επιπλέον ισχύος σε περίπτωση που κριθεί αναγκαία από το δίκτυο, η τιμή της βρίσκεται από την αφαίρεση της ισχύος άνω ρύθμισης από την παραγόμενη ισχύ σε κάποια χρονική στιγμή  $t$ .

Μια απλή περιγραφή της BiV2G Λειτουργίας φαίνεται στην εικόνα 3.3.1.



Εικόνα 3.3.1 Ροή Ισχύος Bidirectional V2G Λειτουργίας [18]

### 3.4 Σύγκριση Αμφίδρομης και Μονόδρομης V2G Λειτουργίας

Παρατηρούμε ότι η UniV2G λειτουργία έχει περιορισμένες δυνατότητες σε σχέση με την Bi-V2G λειτουργία, λόγω της αδυναμίας εκφόρτισης των EVs προς το δίκτυο. Αυτή η αδυναμία εκφόρτισης οδηγεί σε μείωση των συναλλαγών ισχύος, κάτι το οποίο έχει άμεσο αντίκτυπο την μείωση του κέρδους από την παροχή επικουρικών υπηρεσιών. Έχει αποδειχθεί ότι το οικονομικό κέρδος της UniV2G είναι τέσσερις φορές μικρότερο από το κέρδος της BiV2G λειτουργίας. Παρά την αδυναμία της V2G λειτουργίας θα είναι η πρώτη που θα εφαρμοστεί, καθώς [19], [20], [22]:

- δεν απαιτείται επιπρόσθετος εξοπλισμός, που θα χρειαζόταν στην περίπτωση όπου η εκφόρτιση των EVs στο δίκτυο ήταν δυνατή,
- δεν καταπονούνται οι συσσωρευτές των EVs από συχνές εκφορτίσεις παρά, μόνο από τις προβλεπόμενες για τα ταξίδια,
- εντάσσει τους καταναλωτές ομαλά στις νέες ιδέες και τεχνολογίες,
- δίνει περιθώρια προετοιμασίας και απόκτησης εμπειρίας για την διεύρυνση της V2G λειτουργίας και το πέρασμα στην BiV2G Λειτουργία.

Επομένως, η υιοθέτηση της σαν ένα αρχικό μεταβατικό στάδιο ( με σκοπό το πέρασμα στην BiV2G) φαίνεται ένα αρκετά πιθανό σενάριο.

### 3.5 Πλεονεκτήματα της V2G λειτουργίας

Η V2G λειτουργία προσφέρει αρκετά πλεονεκτήματα, μερικά εκ των οποίων είναι [23], [24]:

1. Γέμισμα Κοιλιάδας (Valley filling), δηλαδή εξομάλυνση του φορτίου του δικτύου έτσι ώστε να είναι όσο το δυνατόν σταθερότερο για την ευκολότερη εξυπηρέτηση από το δίκτυο. Το valley filling γίνεται κατανέμοντας την φόρτιση των EVs κατά τέτοιο τρόπο ώστε να εξαλειφθούν οι διακυμάνσεις της ζήτησης.



2. Κάλυψη της ισχύος αιχμής (peak shaving). Το peak shaving γίνεται σε περιπτώσεις ακραίας αύξησης της ζήτησης, όπου απαιτείται η παραγωγή επιπλέον ενέργειας. Τα EVs αντικαθιστούν τις ειδικές μηχανές παραγωγής (peakers) για την κάλυψη του φορτίου αιχμής. Οι peakers, λειτουργούν μόνο περιστασιακά και για το λόγο αυτό, δεν μπορούν να είναι οικονομικά βιώσιμες εάν δεν πωλούν την ενέργεια που παράγουν με υψηλή τιμή, άρα έχουμε σημαντική εξοικονόμηση από την αντικατάστασή τους. Το peak shaving γίνεται μόνο σε BiV2G λειτουργία.
3. Προσφορά επικουρικών υπηρεσιών.
4. Προσφορά οικονομικών κερδών στον ιδιοκτήτη ενός ηλεκτρικού οχήματος.
5. Γλιτώνει τα ηλεκτρικά δίκτυα από την ανάγκη για δημιουργία καινούργιων μονάδων είτε παραγωγής ενέργειας είτε αποθήκευσης ενέργειας.
6. Είναι φιλική προς το περιβάλλον.

### **3.6 Η ένταξη της V2G λειτουργίας στις Αγορές**

Τα EVs είναι ασύμφορα για την αγορά της ισχύος βάσης λόγω του υψηλού κόστους ανά kWh. Επίσης, με την παρούσα τεχνολογία τα EVs δεν είναι κατάλληλα ούτε για την αγορά της ισχύος αιχμής, αν και υπάρχουν αρκετές μελλοντικές προοπτικές. Όμως, οι αγορές των επικουρικών υπηρεσιών μπορούν να είναι οι καταλληλότερες για τα EVs που θα έχουν V2G λειτουργία [22], [24]. Ποιο συγκεκριμένα,

- η αγορά της ρύθμισης συχνότητας, μπορεί να είναι προσοδοφόρα για τα EVs, που θα εκτελούν V2G λειτουργία, καθώς αυτά θα μπορούν να πληρώνονται για την παροχή άνω και κάτω ρύθμισης. Τα EVs είναι κατάλληλα γιατί μπορούν να ανταποκριθούν πολύ γρήγορα στα σήματα ρύθμισης του TSO και έχουν τη δυνατότητα να πραγματοποιήσουν τόσο άνω ρύθμιση, με την αύξηση της ροής ισχύος προς το δίκτυο (μόνο BiV2G) ή τη μείωση του ρυθμού φόρτισης των συσσωρευτών τους (BiV2G/UniV2G), όσο και κάτω ρύθμιση, με την αύξηση του ρυθμού φόρτισης των συσσωρευτών τους (BiV2G/UniV2G) ή τη μείωση της ροής ισχύος προς το δίκτυο (BiV2G/UniV2G). Ένας συνδυασμός άνω και κάτω ρύθμισης τελικά προκαλεί πολύ μικρή αποφόρτιση του συσσωρευτή, χωρίς να προκαλεί ιδιαίτερα προβλήματα φθοράς αναφορικά με τους κύκλους λειτουργίας του συσσωρευτή.
- η αγορά της στρεφόμενης εφεδρείας, μπορεί να είναι προσοδοφόρα για τα EVs, που θα εκτελούν V2G λειτουργία, καθώς αυτά θα μπορούν να πληρώνονται ως στρεφόμενη εφεδρεία για πολλές ώρες, απλά με το να παραμένουν συνδεδεμένα στο δίκτυο, χωρίς ουσιαστικά να παράγουν πραγματική ενέργεια και να αποφορτίζουν τους συσσωρευτές τους. Αυτό σημαίνει, πως θα πληρώνονται απλά για να είναι έτοιμα να προσφέρουν ενέργεια, όποτε αυτό χρειασθεί, κάτι το οποίο σε σωστά διαμορφωμένα

δίκτυα δεν είναι συχνό φαινόμενο (πχ στο σύστημα PJM των ΗΠΑ η στρεφόμενη εφεδρεία κλήθηκε μέσα σε ολόκληρο το έτος 2001 μόλις 38 φορές, με μέγιστη διάρκεια 28 λεπτά ) [25]. Το κόστος λοιπόν που σχετίζεται με τη φθορά του συσσωρευτή είναι πολύ περιορισμένο, ενώ τα κέρδη από τη συμμετοχή στην αγορά μπορεί να είναι αρκετά αυξημένα.

Τέλος, αξίζει να τονίσουμε πως δεν πρέπει να υποτιμούμε καθόλου αυτές τις αγορές, καθώς ο TSO της Καλιφόρνιας των ΗΠΑ, η CAISO με εγκατεστημένη ισχύ το 2010 περίπου στα 70 GW, ξοδεύει από 1 με 3 εκατομμύρια δολάρια καθημερινά για την υπηρεσία της ρύθμισης [17].

### 3.7 Το Επιχειρηματικό Μοντέλο της V2G λειτουργίας

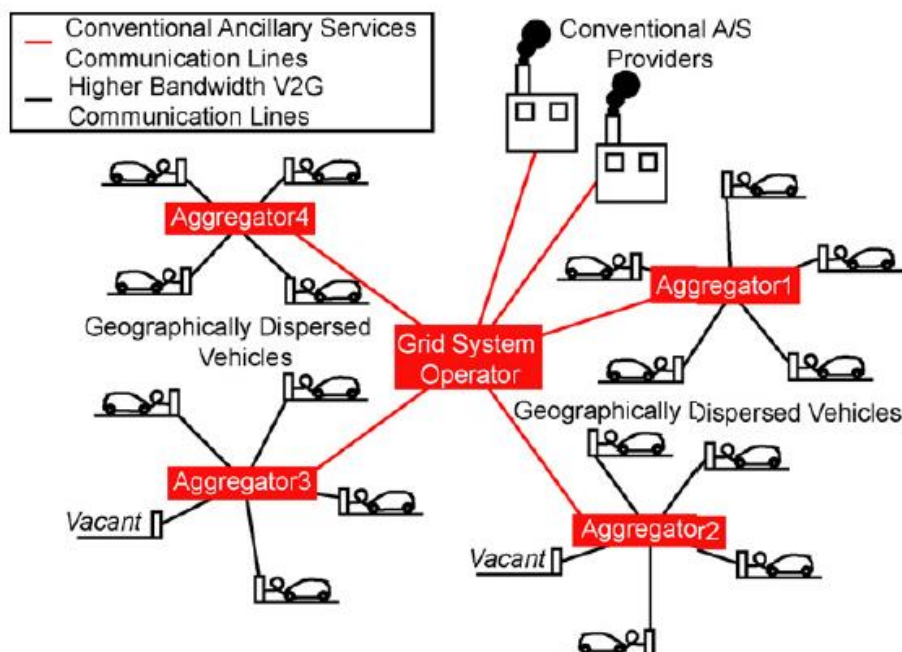
Το πιο πιθανό μοντέλο της V2G λειτουργίας και το οποίο χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική είναι το μοντέλο συναθροιστή-παρόχου των EVs (Electric Vehicle Supplier-Aggregator ή εν συντομία EVS-A), δεδομένης της μέχρι στιγμής λειτουργίας των αγορών. Η δημιουργία αυτής της νέας αγοράς εισαγάγει κάποιους νέους παράγοντες [26]:

- **Ο συναθροιστής-πάροχος των ηλεκτρικών οχημάτων** (Electric Vehicle Supplier-Aggregator/EVS-A), είναι ο προμηθευτής ηλεκτρικής ενέργειας των EVs κατόχων, μέσω ενός συμβολαίου, το οποίο θα ισχύει για πολλά πιθανά σημεία φόρτισης. Άρα ο χρήστης δεν περιορίζεται τοπικά όσον αφορά την φόρτιση του οχήματός του, αλλά μπορεί να φορτίζει τον συσσωρευτή του οχήματός του από διαφορετικούς σταθμούς φόρτισης, παραμένοντας όμως στον ίδιο προμηθευτή και έχοντας τις ίδιες χρεώσεις. Επίσης ο aggregator, καλείται να λειτουργήσει ως μεσάζοντας ενός στόλου EVs και των διαφόρων αγορών που θα συμμετέχει. Η λειτουργία αυτή προέρχεται από την αδυναμία συμμετοχής ενός μεμονωμένου EV (τάξης ισχύος kW) στις χονδρικές αγορές ενέργειας και επικουρικών υπηρεσιών (τάξης ισχύος MW).
- **Ο ιδιοκτήτης του οχήματος**, είναι ο τελικός καταναλωτής ενέργειας και ποτέ δεν τον λαμβάνουμε υπόψη μας ως παραγωγό, ακόμα και αν στέλνει ενέργεια πίσω στο δίκτυο (BiV2G) .
- **Ο ιδιοκτήτης του συσσωρευτή**, είναι είτε ο ίδιος ο ιδιοκτήτης του οχήματος που κατά κόρων συμβαίνει μέχρι στιγμής, καθιστώντας πολύ μεγάλο το κόστος αγοράς ενός EV, είτε κάποιος από τους υπόλοιπους παράγοντες που εμπλέκονται έχοντας την ευθύνη της σωστής λειτουργίας της μπαταρίας καθώς και της άμεσης αντικατάστασης της σε περίπτωση φθοράς. Η δεύτερη περίπτωση καθιστά το κόστος των EVs σημαντικά χαμηλότερο, άρα προσιτό σε ευρύτερο καταναλωτικό κοινό και είναι αυτή που θα υιοθετήσουμε στη συνέχεια της εργασίας όταν θα αναφερόμαστε στο μοντέλο μας.
- **Ο πάροχος υπηρεσιών πληροφορικής** (Information Technology/IT service provider), είναι κάποια (ή κάποιες) εταιρία με κατάλληλη εμπειρία στο τομέα της πληροφορικής και των τηλεπικοινωνιών. Ο ρόλος της είναι η διακίνηση πληροφοριών μεταξύ των EVs με τον EVS-A, του EVS-A με τον TSO και των

EVS-A ,TSO με τις αγορές. Αυτή η ανταλλαγή πληροφοριών πρέπει να γίνεται σε πραγματικό χρόνο και με μεγάλη ακρίβεια

- **Ο ιδιοκτήτης της υποδομής φόρτισης.** Η πρώτη περίπτωση είναι η υποδομή να ανήκει σε κάποιον οικιακό καταναλωτή για προσωπική χρήση. Μια δεύτερη περίπτωση είναι η υποδομή φόρτισης να ανήκει σε κάποια επιχείρηση για την διευκόλυνση των εργαζομένων και των πελατών της. Τέλος, θα μπορούσε να ανήκει και σε κάποιον σταθμό φόρτισης είτε δημόσιο, όπου ιδιοκτήτης καλείται ο Διαχειριστής του Συστήματος (Distribution System Operator ή εν συντομία DSO), είτε ιδιωτικό όπου ιδιοκτήτης καλείται η εταιρεία παροχής της υπηρεσίας.

Στο μοντέλο EVS-A, ο aggregator θα αποτελεί προς τις αγορές μια εικονική μονάδα παραγωγής. Δηλαδή θα φαίνεται σαν ένας παραγωγός, με συνολική διαθέσιμη ισχύ ισοδύναμη με το άθροισμα των διαθέσιμων ισχύων των συνδεδεμένων EVs του στόλου που αντιπροσωπεύει. Άρα θα εξαρτάται άμεσα από τον αριθμό των οχημάτων που είναι συνδεδεμένα αλλά και ικανά για V2G λειτουργία κατά το χρονικό διάστημα που μας ενδιαφέρει. Από την πλευρά των οχημάτων, ο aggregator θα δέχεται σήματα από τον διαχειριστή του συστήματος όπως κάθε άλλη μονάδα παραγωγής και θα τα μετατρέπει σε εντολές ανάλογα με την συνολική διαθέσιμη ισχύ που έχει υπολογίσει ότι θα έχει την συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Οι εντολές αυτές θα στέλνονται στα EVs για την εκπλήρωση των απαιτήσεων του aggregator προς τις αγορές (ρύθμιση και στρεφόμενη εφεδρεία). Έτσι γίνεται δυνατή η ένταξη των οχημάτων στις αγορές (τάξης ισχύος MW), ικανοποιώντας παράλληλα και τις ενεργειακές απαιτήσεις των EVs.

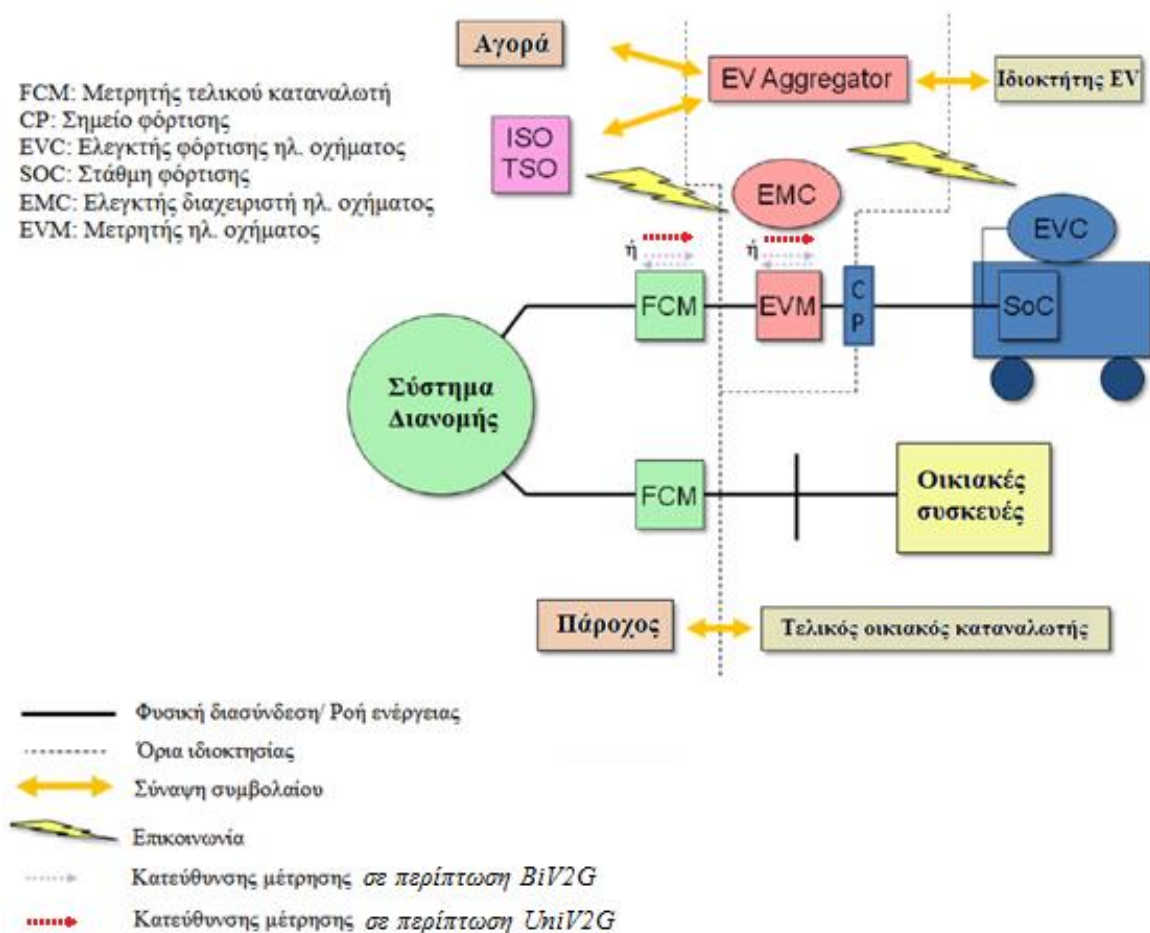


Εικόνα 3.4.1: Δομή του μοντέλου συναθροιστή-παρόχου (EVS-A) [27]

Το ρόλο ενός aggregator μπορεί να αναλάβει [17]:

- ο διαχειριστής του συστήματος διανομής ηλεκτρικής ενέργειας (DSO).
- μια εταιρεία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.
- μια κατασκευαστική εταιρία ηλεκτρικών οχημάτων.
- ένας πάροχος κινητής.
- μία ξεχωριστή επιχείρηση.

Ο Aggregator, θα είναι ο πλήρης αποδέκτης των κερδών από τη συμμετοχή στις αγορές, παρέχοντας στους κατόχους EVs ,εγγύηση φθοράς συσσωρευτή και χαμηλότερη τιμολόγηση φόρτισης. Στην εικόνα 3.6 φαίνεται ένα απλοποιημένο διάγραμμα ροής ενέργειας, πληροφοριών και χρημάτων κατά την V2G λειτουργία (UniV2G ή BiV2G) σε ένα μοντέλο συναθροιστή-παρόχου (EVS-A).



Εικόνα 3.5.1: Ροή ενέργειας, πληροφοριών και χρημάτων κατά τη V2G λειτουργία (UniV2G ή BiV2G) στο μοντέλο συναθροιστή-παρόχου (EVS-A) [26]

## 4 Δυναμική Μοντελοποίηση

### 4.1 Σκοπός του κεφαλαίου

Ο σκοπός του κεφαλαίου αυτού είναι η περιγραφή με την χρήση μαθηματικών σχέσεων των αλγορίθμων των δυο τεχνολογιών V2G (BiV2G και UniV2G) , μια εκ των οποίων θα χρησιμοποιεί ο aggregator για την βέλτιστη παροχή επικουρικών υπηρεσιών προς το δίκτυο. Άρα, καλούμαστε να ορίσουμε τα προβλήματα βελτιστοποίησης των δυο αυτών περιπτώσεων. Τα προβλήματα αυτά έχουν ως στόχο την μεγιστοποίηση του οικονομικού κέρδους του aggregator, υπό τους περιορισμούς που εισάγει η εκάστοτε τεχνολογία, οι απαιτήσεις των οδηγών αλλά και οι απαιτήσεις του διαχειριστή του συστήματος. Κάνουμε τις εξής παραδοχές,

1. οι επικουρικές υπηρεσίες και οι αντίστοιχες αγορές τους θεωρούνται ξεχωριστές, έτσι ώστε να επιτρέπεται στον aggregator να παρέχει τις προσφορές άνω και κάτω ρύθμισης ασύμμετρα.
2. υπάρχει δυνατότητα συνδυασμού των περιόδων φόρτισης και των περιόδων παροχής υπηρεσιών των EVs.
3. η σύμβαση ροής ενέργειας θα είναι η ακόλουθη, ροη από το δίκτυο προς το όχημα θεωρείται θετική, ενώ ροή από το όχημα προς το δίκτυο θεωρείται αρνητική.
4. για την περιγραφή του προβλήματος της UniV2G κάνουμε χρήση του επιχειρηματικού μοντέλου EVS-A που αναπτύξαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο.
5. θεωρούμε ως μονάδα μέτρησης της ενέργειας την kWh και της ισχύος το kW. Άρα, οι τιμές θα δίνονται σε χρηματικές μονάδες ανά kW και ανά kWh αντίστοιχα με ακρίβεια ενός δεκαδικού ψηφίου.

Επειδή θέλουμε το πρόβλημα εκτός από επιλύσιμο να είναι και γρήγορα αποκρίσιμο στις επόμενες ενότητες θα κάνουμε αρκετές παραδοχές με σκοπό την γραμμικοποίηση του. Στις ακόλουθες δυο ενότητες θα αναπτυχθούν ξεχωριστά οι αλγόριθμοι για τις δυο τεχνολογίες V2G.

Επίσης θα αναπτυχθούν δυο διαφορετικοί αλγόριθμοι για την διαδικασία της κατανομής (Dispatch), δηλαδή του τρόπου με τον οποίο τα οχήματα αποκρίνονται σε πραγματικό χρόνο στα σήματα ρύθμισης του TSO, χωρίς να αποκλίνουν σημαντικά από το σημείο βέλτιστης λειτουργίας του Aggregator [19], [20], [28], [29].

### 4.2 Δυναμική Μοντελοποίηση του Unidirectional V2G προγραμματισμού

Απαραίτητο στοιχείο για την ανάπτυξη του μοντέλου μας είναι η γνώση της διακινούμενης ποσότητας ισχύος  $FP_i(t)$  (Final Power Draw) από το δίκτυο προς κάποιο όχημα  $i$ , σε κάποια χρονική στιγμή  $t$ . Όμως η πραγματική διακινούμενη ποσότητα ισχύος  $FP_i(t)$ , εξαρτάται από το σήμα ρύθμισης  $RS$  του διαχειριστή συστήματος που δίνεται σε πραγματικό χρόνο. Άρα δεν είναι δυνατόν να προβλεφτεί

με ακρίβεια, εφόσον τα σήματα ελέγχου **RS** του TSO δεν είναι γνωστά από πριν. Συνεπώς, αυτό που μπορούμε να κάνουμε είναι μια εκτίμηση, δηλαδή να βρούμε την αναμενόμενη διακινούμενη ποσότητα ισχύος  $E\{FP_i(t)\}$  ως συνάρτηση των:

- $POP_i(t)$ , είναι το σημείο βέλτιστης λειτουργίας του  $i^{ov}$  οχήματος για τη χρονική στιγμή  $t$ .
- $E\{RU_i(t)\}$ , είναι η αναμενόμενη διακινούμενη ποσότητα ισχύος για άνω ρύθμιση του  $i^{ov}$  οχήματος για τη χρονική στιγμή  $t$ .
- $E\{RD_i(t)\}$ , είναι η αναμενόμενη διακινούμενη ποσότητα ισχύος για κάτω ρύθμιση του  $i^{ov}$  οχήματος για τη χρονική στιγμή  $t$ .

Η χρονική διάρκεια των συμβολαίων ισχύος στις περισσότερες αγορές επικουρικών υπηρεσιών είναι μία ώρα. Επομένως, η αριθμητική τιμή της ισχύος θα είναι ίση με αυτή της ενέργειας, οπότε μπορούμε να μιλάμε είτε για kW (MW) είτε για kWh (MWh) χωρίς σφάλμα της γενικότητας. Οι αναμενόμενες ποσότητες ρύθμισης  $E\{RU_i(t)\}$ ,  $E\{RD_i(t)\}$  εκτιμώνται βάση ειδικά επεξεργασμένων ιστορικών δεδομένων. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, αρκούμαστε στην προσέγγιση των ποσοτήτων της κάθε υπηρεσίας σαν ένα ποσοστό της συνολικής μέγιστης διαθέσιμης ισχύος. Δηλαδή,

$$E\{RU_i(t)\} = MnAP_i(t) \times ExU(t) \quad (1)$$

$$E\{RD_i(t)\} = MxAP_i(t) \times ExD(i, t) \quad (2)$$

,όπου

- $MxAP_i(t)$ , είναι η μέγιστη διαθέσιμη ποσότητα ισχύος για κάτω ρύθμιση του  $i^{ov}$  οχήματος για τη χρονική στιγμή  $t$ .
- $MnAP_i(t)$ , είναι η μέγιστη διαθέσιμη ποσότητα ισχύος για άνω ρύθμιση του  $i^{ov}$  οχήματος για τη χρονική στιγμή  $t$ .
- $ExU(t)$ , είναι το αναμενόμενο ποσοστό άνω ρύθμισης που θα ζητήσει ο διαχειριστής συστήματος την χρονική στιγμή  $t$ .
- $ExD(t)$ , είναι το αναμενόμενο ποσοστό κάτω ρύθμισης που θα ζητήσει ο διαχειριστής συστήματος την χρονική στιγμή  $t$ .

Άρα λαμβάνοντας υπόψη την σύμβαση που έγινε για τα πρόσημα ροής ισχύος/ενέργειας, θα ισχύει:

$$E\{FP_i(t)\} = E\{RD_i(t)\} + POP_i(t) - E\{RU_i(t)\} \xrightarrow{(1),(2)} E\{FP_i(t)\} = MxAP_i(t) \times ExD(t) + POP_i(t) - MnAP_i(t) \times ExU(t) \quad (3)$$

,όπου  $t \in [1, 24]$  εφόσον οι εκτιμήσεις μας γίνονται για τις ώρες μιας ημέρας. Είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι για UniV2G θα ισχύει πάντα:  $E\{FP_i(t)\} \geq 0$

Για τον υπολογισμό των αναμενόμενων ποσοστών ρύθμισης κάνουμε χρήση του τύπου  $\bar{X} = \sum_{-\infty}^{+\infty} x \cdot \Pr[x]$ , όπου  $\bar{X}$  είναι η αναμενόμενη τιμή μιας τυχαίας

διακριτής μεταβλητής  $X$ ,  $x$  είναι οι διαφορές πιθανές τιμές της τυχαίας μεταβλητής  $X$  και  $\Pr[x]$  η πιθανότητα να εμφανιστεί η τιμή  $x$ . Το σήμα ρύθμισης  $RS$  που στέλνει ο διαχειριστής δικτύου στον aggregator, θεωρούμε ότι είναι η διακριτή συνάρτηση,

$$RS(k): k \rightarrow \begin{cases} [RS_{min}, 0], & \text{πεδίο τιμών σήματος άνω ρύθμισης} \\ [0, RS_{max}], & \text{πεδίο τιμών σήματος κάτω ρύθμισης} \end{cases}$$

, όπου ο  $k$  είναι ο χρόνος μεταξύ 2 διαδοχικών σημάτων ρύθμισης και είναι διάφορος του χρόνου  $t$ . Για την παρούσα διπλωματική εργασία οι τιμές του  $k$  θεωρούνται 5sec, στην πραγματικότητα η τιμή του  $k$  καθορίζεται από τον εκάστοτε Διαχειριστή Συστήματος, πχ για το σύστημα της California  $k=4s$ , για το σύστημα του Texas  $k=30s$ . Για την διατήρηση της γραμμικότητας του προβλήματος γίνεται η παραδοχή σταθερότητας των ποσοστών  $ExU(t)$ ,  $ExD(t)$  για μια ώρα. Άρα,

$$\bullet \quad \overline{E\{RU\}} = \sum_{RS_{min}}^0 RS \cdot \Pr[RS] \xrightarrow{ExU = \frac{\overline{E\{RU\}}}{\sum_{RS_{min}}^0 RS}} ExU = \frac{\sum_{RS_{min}}^0 RS \cdot \Pr[RS]}{\sum_{RS_{min}}^0 RS} \quad (4)$$

$$\bullet \quad \overline{E\{RD\}} = \sum_0^{RS_{max}} RS \cdot \Pr[RS] \xrightarrow{ExD = \frac{\overline{E\{RD\}}}{\sum_0^{RS_{max}} RS}} ExD = \frac{\sum_0^{RS_{max}} RS \cdot \Pr[RS]}{\sum_0^{RS_{max}} RS} \quad (5)$$

Σύμφωνα με το μοντέλο EVS-A, ο aggregator μπορεί να είναι μια δημόσια υπηρεσία ή μία ανεξάρτητη επιχείρηση, η οποία έχει υπό την επίβλεψη της έναν σταθερό στόλο από ηλεκτρικά οχήματα. Έστω ότι το πλήθος του στόλου είναι  $N$ . Ο aggregator συνάπτει συμβόλαιο με τους οδηγούς για την συγκατάθεση τους όσον αφορά την χρήση του συσσωρευτή τους για UniV2G λειτουργία, παραχωρώντας του όλα τα κέρδη από τις αγορές επικουρικών υπηρεσιών. Το συμβόλαιο εξασφαλίζει στους οδηγούς σταθερή χρέωση φόρτισης  $Mk$  του οχήματος τους με σαφώς μειωμένη τιμή από αυτή του απλού τελικού καταναλωτή. Τα έσοδα  $In$  του aggregator προέρχονται από δυο πηγές,

1. από την παροχή άνω και κάτω ρύθμισης στο δίκτυο και
2. από την πώληση ενέργειας στους ιδιοκτήτες των ηλεκτρικών οχημάτων.

Επομένως, το ημερήσιο εισόδημα του aggregator θα είναι,

$$In = \sum_{t=1}^{24} (PRu(t) \times Ru(t) + PRd(t) \times Rd(t)) + Mk \times \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^{24} (E\{FP_i(t)\}) \quad (6)$$

, όπου

- $Ru(t)$ , είναι η συνολική διαθέσιμη ισχύ του στόλου του aggregator για άνω ρύθμιση την ώρα  $t$ . Άρα,

$$Ru(t) = \sum_{i=1}^N MnAP_i(t) \quad (7)$$

- $Rd(t)$ , είναι η συνολική διαθέσιμη ισχύ του στόλου του aggregator για κάτω ρύθμιση την ώρα  $t$ . Άρα,

$$Rd(t) = \sum_{i=1}^N MxAP_i(t) \quad (8)$$

- $PRu(t)$ , είναι η προβλεπόμενη τιμή αγοράς για άνω ρύθμιση την ώρα  $t$ , η οποία γίνεται η παραδοχή ότι είναι διαθέσιμη στον aggregator.
- $PRd(t)$ , είναι η προβλεπόμενη τιμή αγοράς για κάτω ρύθμιση την ώρα  $t$ , η οποία γίνεται η παραδοχή ότι είναι διαθέσιμη στον aggregator.

Στο δεξιό μέλος της εξίσωσης (6), ο πρώτος όρος του αθροίσματος αντιστοιχεί στα έσοδα από την συμμετοχή στις αγορές ρύθμισης ενώ ο δεύτερος στα έσοδα από την πώληση ενέργειας στους κατόχους των EVs. Τα ημερήσια έξοδα του aggregator  $C$  προέρχονται από το κόστος αγοράς της ενέργειας που παρέχεται σε δεύτερη φάση στα EVs (χονδρεμπορική αγορά). Λοιπά έξοδα, θεωρούνται ανεξάρτητα της συμμετοχής των EVs στις αγορές ρύθμισης και αμελούνται. Οπότε,

$$C = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^{24} (E\{FP_i(t)\} \times P(t)) \quad (9)$$

Τελικά, το ημερήσιο κέρδος του aggregator  $Prof$  θα είναι η διαφορά εσόδων-εξόδων,

$$Prof = In - C = \sum_{t=1}^{24} (PRu(t) \times Ru(t) + PRd(t) \times Rd(t)) + Mk \times \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^{24} (E\{FP_i(t)\}) - \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^{24} (E\{FP_i(t)\} \times P(t)) \quad (10)$$

Η συνάρτηση ημερήσιου κέρδους του aggregator (10) αποτελεί την αντικειμενική συνάρτηση (objective function) του προβλήματος βελτιστοποίησης για UniV2G λειτουργία. Δηλαδή είναι η συνάρτηση που θέλουμε να μεγιστοποιήσουμε λαμβάνοντας τις βέλτιστες τιμές των παραμέτρων  $POP_i(t)$ ,  $MxAP_i(t)$  και  $MnAP_i(t)$ , οι οποίες καλούνται μεταβλητές απόφασης (decision variables) του προβλήματος βελτιστοποίησης (οι παράμετροι περιέχονται στους όρους  $EFP_i(t)$ ,  $Ru(t)$ ,  $Rd(t)$ ).



Για να ολοκληρωθεί το πρόβλημα του UniV2G προγραμματισμού, μένει να εισάγουμε τους περιορισμούς που θα πρέπει να λάβει υπόψη, κατά την επίλυση, ο aggregator. Οι περιορισμοί αυτοί είναι :

### 1. Περιορισμοί συσσωρευτή για τον UniV2G προγραμματισμό.

*Περιορισμός 1.* Άνω όριο ενέργειας που μπορεί να υπάρχει αποθηκευμένο την ώρα  $t$  στον συσσωρευτή του  $i^{ov}$  οχήματος:

$$(MxAP_i(t) + POP_i(t)) \times Comp_i(t) \times Ef_i + SOC_i(t) \leq Mc_i, \quad \forall i \quad (11)$$

*Περιορισμός 2.* Κάτω όριο ενέργειας που μπορεί να υπάρχει αποθηκευμένο την ώρα  $t$  στον συσσωρευτή του  $i^{ov}$  οχήματος:

$$(POP_i(t) - MnAP_i(t)) \times Comp_i(t) \times Ef_i + SOC_i(t) \geq 0, \quad \forall i \quad (12)$$

*Περιορισμός 3.* Συνολικό άνω όριο ενέργειας που μπορεί να υπάρχει αποθηκευμένο μέχρι την ώρα  $t$  στον συσσωρευτή του  $i^{ov}$  οχήματος:

$$\sum_{t=1}^{time} (E\{FP_i(t)\} \times Comp_i(t)) \times Ef_i + SOC_i(1) - \sum_{t=1}^{time} Trips_i(t) \leq Mc_i, \quad \forall i, time \quad (13)$$

*Περιορισμός 4.* Συνολικό κάτω όριο ενέργειας που μπορεί να υπάρχει αποθηκευμένο μέχρι την ώρα  $t$  στον συσσωρευτή του  $i^{ov}$  οχήματος:

$$\sum_{t=1}^{time} (E\{FP_i(t)\} \times Comp_i(t)) \times Ef_i + SOC_i(1) - \sum_{t=1}^{time} Trips_i(t) \geq 0, \quad \forall i, time \quad (14)$$

όπου,

- $Ef_i$ , είναι η απόδοση (efficiency) του συσσωρευτή του  $i^{ov}$  οχήματος.
- $Mc_i$ , είναι η μέγιστη χωρητικότητα ενέργειας του συσσωρευτή του  $i^{ov}$  οχήματος, εκφράζεται σε kWh και καθορίζεται από τον κατασκευαστή του.
- $SOC_i(t)$ , είναι η στάθμη φόρτισης (State of Charge) του συσσωρευτή του  $i^{ov}$  οχήματος, δηλαδή η διαθέσιμη ενέργεια, που υπάρχει κάθε ώρα  $t$  στον συσσωρευτή του  $i^{ov}$  οχήματος.
- $Comp_i(t)$ , είναι μια παράμετρος που εκφράζει το ποσοστό ενέργειας που θα είναι διαθέσιμο την ώρα  $t$  στον aggregator από το  $i^o$  όχημα, αν αναχωρήσει μη προγραμματισμένα την ώρα  $t$  [30]. Το  $Comp_i$  δίνεται από την σχέση:

$$Comp_i(t) = \frac{1}{1 - Dep_i(t)} \quad (15)$$

όπου  $Dep_i(t)$ , είναι η πιθανότητα μιας μη προγραμματισμένης αναχώρησης του  $i^{ov}$  οχήματος την ώρα  $t$ . Η  $Dep_i$  μπορεί να υπολογιστεί με κάποιο είδος στατιστικής επεξεργασίας των οδηγικών προφίλ που έχουμε από ιστορικά δεδομένα.

- $Trips_i(t)$ , είναι η ενέργεια που καταναλώθηκε από το  $i^o$  όχημα για οδήγηση την ώρα  $t$ . Το  $Trips_i$  δίνεται από την σχέση:

$$Trips_i(t) = \begin{cases} DoT_i(t) \times (TC \text{ of EV model}) & , \text{αν το EV είναι σε ταξίδι} \\ 0 & , \text{αν το EV είναι σταθμευμένο} \end{cases} \quad (16)$$

όπου,  $DoT_i$ , είναι η απόσταση που θα διανύσει το  $i^o$  όχημα για το ταξίδι του την ώρα  $t$ . Ενώ,  $TC \text{ of EV model}$ , είναι η τυπική κατανάλωση του μοντέλου του οχήματος που κάνει το ταξίδι, είναι σταθερή και δίνεται από τον κατασκευαστή. Θεωρούμε ότι ο οδηγός κάνει δυο προγραμματισμένα ταξίδια κάθε μέρα ένα το πρωί, από το σπίτι για τη δουλειά και ένα το απόγευμα, από τη δουλειά στο σπίτι. Τα μη προγραμματισμένα ταξίδια εκπίπτουν στην χρήση της παραμέτρου  $Comp_i$ .

- $time \in [1, 24]$ , είναι ώρες της ημέρας.
- $i \in [1, \dots, N]$ , προσδιορίζει το όχημα στο οποίο αναφερόμαστε.

## 2. Περιορισμοί ηλεκτρικής σύνδεσης για τον UniV2G προγραμματισμό.

*Περιορισμός 5.* Άνω όριο ισχύος, που μπορεί να διαρρεύσει μέσω του σημείου σύνδεσης (feeder) του  $i^{ov}$  οχήματος με το δίκτυο διανομής την ώρα  $t$ :

$$MxAP_i(t) + POP_i(t) \leq MP_i(t), \quad \forall i \quad (17)$$

,όπου

- $MP(i, t)$ , είναι η μέγιστη τιμή ισχύος που μπορεί να διακινηθεί από το σημείο διασύνδεσης (feeder) του  $i^{ov}$  οχήματος την ώρα  $t$ .

*Περιορισμός 6.* Κάτω όριο ισχύος, που μπορεί να διαρρεύσει μέσω του σημείου σύνδεσης (feeder) του  $i^{ov}$  οχήματος με το δίκτυο διανομής την ώρα  $t$ :

$$POP_i(t) - MnAP_i(t) \geq 0, \quad \forall i \quad (18)$$

*Περιορισμοί 7,8,9.* Για UniV2G και σύμφωνα με την σύμβαση που κάναμε για την ροή ισχύος ,πρέπει πάντα να ισχύουν:

$$POP_i(t) \geq 0, \forall i \quad (19)$$

$$MxAP_i(t) \geq 0, \forall i \quad (20)$$

$$MnAP_i(t) \geq 0, \forall i \quad (21)$$

## 3. Περιορισμοί οδήγησης για τον UniV2G προγραμματισμό.

*Περιορισμοί 10,11,12.* Μη διαθεσιμότητα του  $i^{ov}$  οχήματος για UniV2G λειτουργία την ώρα  $t$  όταν το όχημα βρίσκεται σε ταξίδι.

$$POP_i(t) \times (1 - Plug_i(t)) = 0 \quad (22)$$

$$MxAP_i(t) \times (1 - Plug_i(t)) = 0 \quad (23)$$

$$MnAP_i(t) \times (1 - Plug_i(t)) = 0 \quad (24)$$

όπου,

- $Plug_i(t)$ , είναι μια παράμετρος που εκφράζει αν το όχημα μας είναι σε ταξίδι, άρα μη διαθέσιμο ή είναι σταθμευμένο και διαθέσιμο για V2G λειτουργία. Το  $Plug_i$  δίνεται από την σχέση:

$$Plug_i(t) = \begin{cases} 0, & \text{αν } Trips_i(t) \neq 0 \\ 1, & \text{αν } Trips_i(t) = 0 \end{cases} \quad (25)$$

Περιορισμός 13. Απαίτηση των οδηγών για πλήρη φόρτιση του συσσωρευτή τους πριν το 1<sup>ο</sup> ταξίδι της ημέρας ( σπίτι → δουλειά ).

$$SOC_i(1) = SOC_i(T + 1) = Mc_i \quad (26)$$

όπου,

- $T$ , είναι η ώρα της ημέρας, δηλαδή  $T = 24$

Περιορισμός 14. Απαίτηση των οδηγών για επαρκή στάθμη φόρτισης του συσσωρευτή τους πριν από κάθε ταξίδι καθ'όλη την διάρκεια της ημέρας, πχ για το 2<sup>ο</sup> ταξίδι της ημέρας (δουλειά → σπίτι ).

$$SOC_i(t + 1) = SOC_i(t) - Trips_i(t) + E\{FP_i(t)\} \times Ef_i \times Comp_i(t) \quad (26)$$

$$SOC_i(1) - \sum_{t=1}^T Trips_i(t) + Ef_i \times \sum_{t=1}^T (E\{FP_i(t)\} \times Comp_i(t)) = Mc_i \quad (27)$$

#### 4. Περιορισμοί δικτύου διανομής για τον UniV2G προγραμματισμό.

Περιορισμός 15. Απαίτηση του δικτύου για αποτροπή της φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων κατά τις ώρες της αιχμής.

$$\sum_{i=1}^N POP_i(t) \leq \frac{MxL - L(t)}{MxL - MnL} \times \sum_{i=1}^N (MP_i(t) \times plug_i(t)), \quad \forall i, t \quad (28)$$

,όπου

- $L(t)$ , είναι το προβλεπόμενο καθαρό φορτίο την ώρα  $t$ , δηλαδή το προβλεπόμενο φορτίο μείον την προβλεπόμενη παραγωγή από ΑΠΕ (η οποία έχει προτεραιότητα πάντα όσον αφορά την κάλυψη του φορτίου).
- $MxL$ , είναι το μέγιστο προβλεπόμενο καθαρό φορτίο κατά τη διάρκεια της ημέρας.
- $MnL$ , είναι το ελάχιστο προβλεπόμενο καθαρό φορτίο κατά τη διάρκεια της ημέρας.

Η σχέση (28) αποτρέπει τον aggregator από την φόρτιση του στόλου του, σε περιόδους αιχμής εξασφαλίζοντας ένα είδος peak shaving. Για μικρή διείσδυση ηλεκτρικών οχημάτων, ο περιορισμός αυτός μπορεί να θεωρηθεί αρκετός.

### 4.3 Δυναμική Μοντελοποίηση του Bidirectional V2G προγραμματισμού

Η μοντελοποίηση του BiV2G προγραμματισμού θα γίνει προσθετικά στο είδη ανεπτυγμένο μοντέλο του UniV2G προγραμματισμού, λαμβάνοντας υπόψη ότι η διακινούμενη ποσότητα ισχύος  $FP_i(t)$  μπορεί να πάρει και αρνητικές τιμές αφού πλέον τα οχήματα μπορούν να τροφοδοτούν το δίκτυο με ενέργεια. Θα αρκεστούμε στην περιγραφή μόνο των νεοεισαχθέντων όρων, αφού η περιγραφή των υπολοίπων έχει γίνει στην προηγούμενη ενότητα.

Η αναμενόμενη διακινούμενη ποσότητα ισχύος  $E\{FP_i(t)\}$  θα εξαρτάται τώρα και από την αναμενόμενη ποσότητα ισχύος για στρεφόμενη εφεδρεία, οπότε η εξίσωση (3) γίνεται:

$$E\{FP_i(t)\} = E\{RD_i(t)\} + POP_i(t) - E\{RU_i(t)\} - E\{RR_i(t)\} \Rightarrow$$

$$EFP_i(t) =$$

$$MxAP_i(t) \times ExD(t) + POP_i(t) - MnAP_i(t) \times ExU(t) - RsRP_i(t) \times ExR(t) \quad (29)$$

,όπου οι επιπλέον όροι που χρησιμοποιήσαμε είναι

- $E\{RR_i(t)\}$ , είναι η αναμενόμενη διακινούμενη ποσότητα ισχύος για στρεφόμενη εφεδρεία του  $i^{ov}$  οχήματος για τη χρονική στιγμή  $t$ . Αρκούμαστε στην προσέγγιση:

$$E\{RR_i(t)\} = RsRP_i(t) \times ExR(t) \quad (30)$$

- $RsRP_i(t)$ , είναι η μέγιστη διαθέσιμη ποσότητα ισχύος για στρεφόμενη εφεδρεία του  $i^{ov}$  οχήματος για τη χρονική στιγμή  $t$ .
- $ExR(t)$ , είναι το αναμενόμενο ποσοστό στρεφόμενης εφεδρείας που θα ζητήσει ο διαχειριστής συστήματος την χρονική στιγμή  $t$ . Το σήμα ζήτησης στρεφόμενης εφεδρείας από τον TSO, ορίζεται ως η διακριτή συνάρτηση,  $RRS(k): k \rightarrow [RRS_{min}, 0]$ , δηλαδή έχει μόνο αρνητικές τιμές. Οπότε ο υπολογισμός της  $ExR(t)$  προκύπτει κατά τα γνωστά,

$$\overline{E\{RR\}} = \sum_{RRS_{min}}^0 RRS \cdot Pr[RRS] \xrightarrow{ExR = \frac{\overline{E\{RR\}}}{\sum_{RRS_{min}}^0 RRS}} ExR = \frac{\sum_{RRS_{min}}^0 RRS \cdot Pr[RRS]}{\sum_{RRS_{min}}^0 RRS} \quad (31)$$

Το εισόδημα  $In$  του aggregator διαμορφώνεται από τις εξής πηγές:

1. από την παροχή ρύθμισης και στρεφόμενης εφεδρείας στο δίκτυο,
2. από την πώληση ενέργειας στους ιδιοκτήτες των ηλεκτρικών οχημάτων και
3. από την πώληση ενέργειας στο δίκτυο.

άρα η εξίσωση (6) γίνεται:

$$\begin{aligned}
 In = & \sum_{t=1}^{24} (PRu(t) \times Ru(t) + PRd(t) \times Rd(t) + PRr(t) \times Rr(t)) \\
 & + Mk \times \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^{24} \left( E\{FP_i(t)\} \times \frac{1 - \text{sgn}(E\{FP_i(t)\})}{2} \right) \\
 & + \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^{24} \left( \frac{\text{sgn}(E\{FP_i(t)\}) - 1}{2} \times E\{FP_i(t)\} \times P(t) \right) \quad (32)
 \end{aligned}$$

,όπου οι επιπλέον όροι που χρησιμοποιήσαμε είναι

- $\text{sgn}(x) = \begin{cases} 1, & x > 0 \\ -1, & x < 0 \end{cases}$ , η χρήση του γίνεται στον 2<sup>ο</sup> όρο της εξίσωσης (32) για να ληφθούν υπόψη ως έσοδα μόνο οι ώρες που τα οχήματα στον αγοράζουν ενέργεια από τον aggregator ( $E\{FP_i(t)\} > 0$ ) και στον 3<sup>ο</sup> όρο της εξίσωσης (32) για να ληφθούν υπόψη ως έσοδα μόνο οι ώρες που τα οχήματα δίνουν στο δίκτυο ενέργεια ( $E\{FP_i(t)\} < 0$ ).
- $P(t)$ , είναι η προβλεπόμενη τιμή της ενέργειας (της χονδρεμπορικής αγοράς) την ώρα  $t$ , η οποία γίνεται η παραδοχή ότι είναι διαθέσιμη στον aggregator.
- $PRr_i(t)$ , είναι η προβλεπόμενη τιμή της στρεφόμενης εφεδρείας την ώρα  $t$ , η οποία γίνεται η παραδοχή ότι είναι διαθέσιμη στον aggregator.
- $Rr(t)$ , είναι η συνολική διαθέσιμη ισχύ του στόλου του aggregator για στρεφόμενη εφεδρεία την ώρα  $t$ . Άρα,

$$Rr(t) = \sum_{i=1}^N RsRP_i(t) \quad (33)$$

Στο δεξιό μέλος της εξίσωσης (33), ο πρώτος όρος του αθροίσματος αντιστοιχεί στα έσοδα από την συμμετοχή στις αγορές ρύθμισης και στρεφόμενης εφεδρείας, ο δεύτερος στα έσοδα από την πώληση ενέργειας στους κατόχους των EVs (χονδρεμπορική αγορά) και ο τρίτος στα έσοδα από την πώληση ενέργειας στο δίκτυο (χονδρεμπορική αγορά). Στα ημερήσια έξοδα του aggregator  $C$  εκτός από το κόστος αγοράς της ενέργειας που παρέχεται στα EVs (χονδρεμπορική αγορά), προστίθεται

και το κόστος φθοράς των συσσωρευτών μόνο κατά την εκφόρτιση τους για συμμετοχή στην BiV2G λειτουργία, οπότε:

$$C = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^{24} \left( E\{FP_i(t)\} \times P(t) \times \frac{1 - \text{sgn}(E\{FP_i(t)\})}{2} \right) + \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^{24} \left( \frac{\text{sgn}(E\{FP_i(t)\}) - 1}{2} \times E\{FP_i(t)\} \times DC_i \right) \quad (34)$$

,όπου οι επιπλέον όροι που χρησιμοποιήσαμε είναι

- η χρήση του  $\text{sgn}(x) = \begin{cases} 1, & x > 0 \\ -1, & x < 0 \end{cases}$ , γίνεται στον 1<sup>ο</sup> όρο της εξίσωσης (34) για να ληφθεί υπόψη το κόστος του aggregator από την χονδρεμπορική αγορά ενέργειας και στον 2<sup>ο</sup> όρο της εξίσωσης (34) για να ληφθούν υπόψη ως κόστη μόνο οι ώρες που τα οχήματα δίνουν στο δίκτυο ενέργεια.
- $DC_i$ , είναι το κόστος φθοράς του  $i^{ov}$  συσσωρευτή από την εκφόρτιση 1kWh. Ο υπολογισμός του βασίζεται στον τύπο

$$DC_i = \left( 0,042 \times \frac{BatC_i}{5000} \right) + \left( \frac{1 - Ef_i^2}{Ef_i} \times Mk \right) \quad (35)$$

Ο 1<sup>ος</sup> όρος του αθροίσματος (35) είναι ο τύπος των S.Peterson, J.Apt και J.Whitacre [31], [32] για το κόστος φθοράς ανά kWh, όπου με  $BatC_i$  θεωρείται το κόστος αντικατάστασης του  $i^{ov}$  συσσωρευτή ανά kWh.

Ο 2<sup>ος</sup> όρος εξασφαλίζει ότι το κόστος προσμετρείται βάση της ισχύος που εκφορτίζεται πριν τον φορτιστή (feeder) και όχι μετά, σε διαφορετική περίπτωση το κόστος θα ήταν μικρότερο λόγω της απόδοσης ( $Ef_i$ ) του φορτιστή άρα θα υπήρχε κέρδος από την πλευρά του aggregator εις βάρος του ιδιοκτήτη του οχήματος.

Τελικά, το ημερήσιο κέρδος του aggregator **Prof** θα είναι,

$$\mathbf{Prof} = \mathbf{In} - \mathbf{C} =$$

$$\begin{aligned} & \sum_{t=1}^{24} (\mathbf{PR}u(t) \times \mathbf{R}u(t) + \mathbf{PR}d(t) \times \mathbf{R}d(t) + \mathbf{PR}r(t) \times \mathbf{R}r(t)) \\ & + \mathbf{M}k \times \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^{24} \left( E\{\mathbf{FP}_i(t)\} \times \frac{1 - \mathbf{sgn}(E\{\mathbf{FP}_i(t)\})}{2} \right) \\ & + \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^{24} \left( \frac{\mathbf{sgn}(E\{\mathbf{FP}_i(t)\}) - 1}{2} \times E\{\mathbf{FP}_i(t)\} \times \mathbf{P}(t) \right) \\ & - \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^{24} \left( E\{\mathbf{FP}_i(t)\} \times \mathbf{P}(t) \times \frac{1 - \mathbf{sgn}(E\{\mathbf{FP}_i(t)\})}{2} \right) \\ & - \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^{24} \left( \frac{\mathbf{sgn}(E\{\mathbf{FP}_i(t)\}) - 1}{2} \times E\{\mathbf{FP}_i(t)\} \times \mathbf{DC}_i \right) \end{aligned}$$

$$\Rightarrow \mathbf{Prof} =$$

$$\begin{aligned} & \sum_{t=1}^{24} (\mathbf{PR}u(t) \times \mathbf{R}u(t) + \mathbf{PR}d(t) \times \mathbf{R}d(t) + \mathbf{PR}r(t) \times \mathbf{R}r(t)) \\ & + \mathbf{M}k \times \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^{24} (E\{\mathbf{FP}_i(t)\}) \\ & - \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^{24} (E\{\mathbf{FP}_i(t)\} \times \mathbf{P}(t)) \\ & - \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^{24} \left( \frac{\mathbf{sgn}(E\{\mathbf{FP}_i(t)\}) - 1}{2} \times E\{\mathbf{FP}_i(t)\} \times \mathbf{DC}_i \right) \quad (36) \end{aligned}$$

Όπως και στην περίπτωση για UniV2G έτσι και τώρα, η συνάρτηση ημερήσιου κέρδους του aggregator (36) αποτελεί την αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος βελτιστοποίησης για BiV2G λειτουργία. Οι μεταβλητές απόφασης θα είναι οι παράμετροι  $\mathbf{POP}_i(t)$ ,  $\mathbf{MxAP}_i(t)$ ,  $\mathbf{MnAP}_i(t)$  και  $\mathbf{RsRP}_i(t)$  (οι παράμετροι περιέχονται στους όρους  $E\mathbf{FP}_i(t)$ ,  $\mathbf{R}u(t)$ ,  $\mathbf{R}d(t)$ ,  $\mathbf{R}r(t)$ ).

Οι περιορισμοί του προβλήματος BiV2G είναι:

## 1. Περιορισμοί συσσωρευτή για τον BiV2G προγραμματισμό.

*Περιορισμός 1.* Άνω όριο ενέργειας που μπορεί να υπάρχει αποθηκευμένο την ώρα  $t$  στον συσσωρευτή του  $i^{ov}$  οχήματος:

$$(MxAP_i(t) + POP_i(t)) \times Comp_i(t) \times Ef_i + SOC_i(t) \leq Mc_i, \quad \forall i \quad (37)$$

*Περιορισμός 2.* Κάτω όριο ενέργειας που μπορεί να υπάρχει αποθηκευμένο την ώρα  $t$  στον συσσωρευτή του  $i^{ov}$  οχήματος:

$$(POP_i(t) - MnAP_i(t) - RsRP_i(t) - \rho_i(t)) \times Comp_i(t) \times Ef_i + SOC_i(t) \geq 0, \forall i \quad (38)$$

*Περιορισμός 3.* Συνολικό άνω όριο ενέργειας που μπορεί να υπάρχει αποθηκευμένο μέχρι την ώρα  $t$  στον συσσωρευτή του  $i^{ov}$  οχήματος:

$$\sum_{t=1}^{time} (E\{FP_i(t)\} \times Comp_i(t) - \rho_i(t)) \times Ef_i + SOC_i(1) - \sum_{t=1}^{time} Trips_i(t) \leq Mc_i, \forall i, time \quad (39)$$

*Περιορισμός 4.* Συνολικό κάτω όριο ενέργειας που μπορεί να υπάρχει αποθηκευμένο μέχρι την ώρα  $t$  στον συσσωρευτή του  $i^{ov}$  οχήματος:

$$\sum_{t=1}^{time} (E\{FP_i(t)\} \times Comp_i(t) - \rho_i(t)) \times Ef_i + SOC_i(1) - \sum_{t=1}^{time} Trips_i(t) \geq 0, \forall i, time \quad (40)$$

## 2. Περιορισμοί ηλεκτρικής σύνδεσης για τον BiV2G προγραμματισμό.

*Περιορισμός 5.* Άνω όριο ισχύος, που μπορεί να διαρρεύσει μέσω του σημείου σύνδεσης (feeder) του  $i^{ov}$  οχήματος με το δίκτυο διανομής την ώρα  $t$ :

$$MxAP_i(t) + POP_i(t) \leq MP_i(t), \quad \forall i \quad (41)$$

*Περιορισμός 6.* Κάτω όριο ισχύος, που μπορεί να διαρρεύσει μέσω του σημείου σύνδεσης (feeder) του  $i^{ov}$  οχήματος με το δίκτυο διανομής την ώρα  $t$ :

$$POP_i(t) - MnAP_i(t) \geq -MP_i(t), \quad \forall i \quad (42)$$

*Περιορισμοί 7,8,9,10,11.* Για BiV2G και σύμφωνα με την σύμβαση που κάναμε για την ροή ισχύος ,πρέπει πάντα να ισχύουν:

$$POP(i, t) - MnAP(i, t) - RsRPi(i, t) \geq -MP(i, t), \quad \forall i \quad (43)$$

$$POP(i, t) \geq -MP(i, t), \forall i \quad (44)$$



$$MxAP_i(t) \geq 0, \forall i \quad (45)$$

$$MnAP_i(t) \geq 0, \forall i \quad (46)$$

$$RsRP_i(t) \geq 0, \forall i \quad (47)$$

- $\rho_i(t)$ , είναι η απώλεια ενέργειας της μπαταρίας, επειδή θεωρούμε ότι είναι μη ιδανική. Δίνεται από την σχέση (Ο ορισμός του  $Deg_i$  δίνεται σε επομένη ενότητα):

$$\rho_i(t) = \frac{Deg(i, t) \cdot 1 - Ef_i^2}{DC_i \cdot Ef_i} \quad (48)$$

### 3. Περιορισμοί οδήγησης για τον BiV2G προγραμματισμό.

Περιορισμοί 12,13,14,15. Μη διαθεσιμότητα του  $i^{ov}$  οχήματος για BiV2G λειτουργία την ώρα  $t$  όταν το όχημα βρίσκεται σε ταξίδι.

$$POP_i(t) \times (1 - Plug_i(t)) = 0 \quad (49)$$

$$MxAP_i(t) \times (1 - Plug_i(t)) = 0 \quad (50)$$

$$MnAP_i(t) \times (1 - Plug_i(t)) = 0 \quad (51)$$

$$RsRP_i(t) \times (1 - Plug_i(t)) = 0 \quad (52)$$

Περιορισμός 16. Απαίτηση των οδηγών για πλήρη φόρτιση του συσσωρευτή τους πριν το 1<sup>ο</sup> ταξίδι της ημέρας ( σπίτι → δουλειά ).

$$SOC_i(1) = SOC_i(T + 1) = Mc_i \quad (53)$$

Περιορισμός 17. Απαίτηση των οδηγών για επαρκή στάθμη φόρτισης του συσσωρευτή τους πριν από κάθε ταξίδι καθ'όλη την διάρκεια της ημέρας, πχ για το 2<sup>ο</sup> ταξίδι της ημέρας (δουλειά → σπίτι ).

$$SOC_i(1) - \sum_{t=1}^T Trips_i(t) + Ef_i \times \sum_{t=1}^T (E\{FP_i(t)\} \times Comp_i(t) - \rho_i(t)) = Mc_i \quad (54)$$

### 4. Περιορισμοί δικτύου διανομής για τον BiV2G προγραμματισμό.

Περιορισμός 18. Απαίτηση του δικτύου για αποτροπή της φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων κατά τις ώρες της αιχμής.

$$\sum_{i=1}^N POP_i(t) \leq \frac{MxL - L(t)}{MxL - MnL} \times \sum_{i=1}^N (MP_i(t) \times plug_i(t)), \quad \forall i, t \quad (55)$$

## 5. Περιορισμοί κόστους φθοράς μπαταρίας για τον BiV2G προγραμματισμό.

Η σχέση (36) που μας δίνει την αντικειμενική συνάρτηση για τον BiV2G προγραμματισμό δεν είναι γραμμική εφόσον στον 4<sup>ο</sup> όρο περιέχεται η συνάρτηση  $sgn(x)$ . Άρα χρειαζόμαστε την εισαγωγή μιας βοηθητικής παραμέτρου για την εξασφάλιση της γραμμικότητας του προβλήματος. Ορίζουμε αυτή την παράμετρο ως,

$$\begin{aligned}
 Deg_i(t) &= \\
 &= \frac{sgn(E\{FP_i(t)\}) - 1}{2} \times (POP_i(t) - MnAP_i(t) \times ExU(t) - RsRP_i(t) \times ExR(t)) \times \frac{DC_i \times Comp_i(t)}{Ef_i} \\
 &= \begin{cases} 0 & , \text{εάν } E\{FP_i(t)\} > 0 \\ (POP_i(t) - MnAP_i(t) \times ExU(t) - RsRP_i(t) \times ExR(t)) \times \frac{DC_i \times Comp_i(t)}{Ef_i} & , \text{εάν } E\{FP_i(t)\} \leq 0 \end{cases} \quad (56)
 \end{aligned}$$

Οπότε η αντικειμενική συνάρτηση γίνεται,

$$\begin{aligned}
 (36) \stackrel{(55)}{\implies} Prof &= \\
 &= \sum_{t=1}^{24} (PRu(t) \times Ru(t) + PRd(t) \times Rd(t) + PRr(t) \times Rr(t)) \\
 &+ Mk \times \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^{24} (E\{FP_i(t)\}) \\
 &- \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^{24} (E\{FP_i(t)\} \times P(t)) \\
 &- \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^{24} Deg_i(t) \quad (57)
 \end{aligned}$$

Περιορισμοί<sub>16,17</sub>. Οι περιορισμοί αυτοί διατηρούν την ισοδυναμία των σχέσεων (36) και (56) μετά την αντικατάσταση του μη γραμμικού όρου.

$$Deg_i(t) \geq 0 \quad (58)$$

$$Deg_i(t) \geq (POP_i(t) - MnAP_i(t) \times ExU(t) - RsRP_i(t) \times ExR(t)) \times \frac{DC_i \times Comp_i(t)}{Ef_i} \quad (59)$$

### 4.4 Συνοπτική παρουσίαση των δυο τύπων Δυναμικής Μοντελοποίησης για V2G προγραμματισμού

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται συνοπτικά σε μια παράλληλη αντιστοίχιση οι ορισμοί των δυο προβλημάτων που παρουσιάσαμε στις δυο προηγούμενες ενότητες [19], [20], [28], [29].

Πρόβλημα BiV2G Προγραμματισμού	Πρόβλημα UniV2G Προγραμματισμού Πάντα, $E\{FP_i(t)\} \geq 0$
<i>Αντικειμενική Συνάρτηση</i>	
$Prof = \sum_{t=1}^{24} (PRu(t) \times Ru(t) + PRd(t) \times Rd(t) + PRr(t) \times Rr(t))$ $+ Mk \times \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^{24} (E\{FP_i(t)\})$ $- \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^{24} (E\{FP_i(t)\} \times P(t))$ $- \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^{24} Deg_i(t)$	$Prof = \sum_{t=1}^{24} (PRu(t) \times Ru(t) + PRd(t) \times Rd(t))$ $+ Mk \times \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^{24} (E\{FP_i(t)\})$ $- \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^{24} (E\{FP_i(t)\} \times P(t))$
<b>1. Περιορισμοί συσσωρευτή</b>	
$(MxAP_i(t) + POP_i(t)) \times Comp_i(t) \times Ef_i + SOC_i(t) \leq Mc_i, \quad \forall i$	
$(POP_i(t) - MnAP_i(t) - RsRP_i(t) - \rho_i(t)) \times Comp_i(t) \times Ef_i + SOC_i(t) \geq 0, \forall i$	$(POP_i(t) - MnAP_i(t)) \times Comp_i(t) \times Ef_i + SOC_i(t) \geq 0, \forall i$
$\sum_{t=1}^{time} (E\{FP_i(t)\} \times Comp_i(t) - \rho_i(t)) \times Ef_i + SOC_i(1) - \sum_{t=1}^{time} Trips_i(t) \leq Mc_i, \quad \forall i, time$	$\sum_{t=1}^{time} (E\{FP_i(t)\} \times Comp_i(t)) \times Ef_i + SOC_i(1) - \sum_{t=1}^{time} Trips_i(t) \leq Mc_i, \quad \forall i, time$
$\sum_{t=1}^{time} (E\{FP_i(t)\} \times Comp_i(t) - \rho_i(t)) \times Ef_i + SOC_i(1) - \sum_{t=1}^{time} Trips_i(t) \geq 0, \quad \forall i, time$	$\sum_{t=1}^{time} (E\{FP_i(t)\} \times Comp_i(t)) \times Ef_i + SOC_i(1) - \sum_{t=1}^{time} Trips_i(t) \geq 0, \quad \forall i, time$
<b>2. Περιορισμοί ηλεκτρικής σύνδεσης</b>	
$MxAP_i(t) + POP_i(t) \leq MP_i(t), \quad \forall i$	
$POP_i(t) - MnAP_i(t) \geq -MP_i(t), \quad \forall i$	$POP_i(t) - MnAP_i(t) \geq 0, \quad \forall i$ $POP_i(t) \geq 0, \quad \forall i$
$POP_i(t) - MnAP_i(t) - RsRP_i(t) \geq -MP_i(t), \quad \forall i$	
$POP_i(t) \geq -MP_i(t), \quad \forall i$	
$MxAP_i(t) \geq 0, \quad \forall i$	
$MnAP_i(t) \geq 0, \quad \forall i$	
$RsRP_i(t) \geq 0, \quad \forall i$	
<b>3. Περιορισμοί οδήγησης</b>	
$POP_i(t) \times (1 - Plug_i(t)) = 0$	
$MxAP_i(t) \times (1 - Plug_i(t)) = 0$	
$MnAP_i(t) \times (1 - Plug_i(t)) = 0$	
$RsRP_i(t) \times (1 - Plug_i(t)) = 0$	
$SOC_i(1) = SOC_i(T + 1) = Mc_i$	
$SOC_i(1) - \sum_{t=1}^T Trips_i(t) + Ef_i \times \sum_{t=1}^T (E\{FP_i(t)\} \times Comp_i(t) - \rho_i(t)) = Mc_i$	$SOC_i(1) - \sum_{t=1}^T Trips_i(t) + Ef_i \times \sum_{t=1}^T (E\{FP_i(t)\} \times Comp_i(t)) = Mc_i$

#### 4. Περιορισμοί δικτύου διανομής

$$\sum_{i=1}^N POP_i(t) \leq \frac{MxL - L(t)}{MxL - MnL} \times \sum_{i=1}^N (MP_i(t) \times plug_i(t)), \forall i, t$$

#### 5. Περιορισμοί κόστους φθοράς μπαταρίας

$$Deg_i(t) \geq 0$$

$$Deg_i(t) \geq (POP_i(t) - MnAP_i(t) \times ExU(t) - RsRP_i(t) \times ExR(t)) \times (DC_i \times Comp_i(t)) / Ef_i$$

#### Ορισμοί

- $time \in [1, 24]$ , είναι ώρες της ημέρας και  $i \in [1, \dots, N]$ , είναι δείκτης που προσδιορίζει το όχημα στο οποίο αναφερόμαστε.
- $E\{FP_i(t)\}$ , είναι η αναμενόμενη διακινούμενη ποσότητα ενέργειας του  $i^{ov}$  οχήματος για τη χρονική στιγμή  $t$ .
- $E\{RD_i(t)\}$ , είναι η αναμενόμενη διακ. ποσότητα ισχύος για άνω ρύθμιση του  $i^{ov}$  οχήματος για τη χρονική στιγμή  $t$ .
- $E\{RD_i(t)\}$ , είναι η αναμενόμενη διακ. ποσότητα ισχύος για κάτω ρύθμιση του  $i^{ov}$  οχήματος για τη χρονική στιγμή  $t$ .
- $E\{RR_i(t)\}$ , είναι η αναμενόμενη διακ. ποσότητα ισχύος για στρεφόμενη εφεδρεία του  $i^{ov}$  οχήματος για τη χρονική στιγμή  $t$ .
- $POP_i(t)$ , είναι το σημείο βέλτιστης λειτουργίας του  $i^{ov}$  οχήματος για τη χρονική στιγμή  $t$ .
- $MxAP_i(t)$ , είναι η μέγιστη διαθέσιμη ποσότητα ισχύος για κάτω ρύθμιση του  $i^{ov}$  οχήματος για τη χρονική στιγμή  $t$ .
- $MnAP_i(t)$ , είναι η μέγιστη διαθέσιμη ποσότητα ισχύος για άνω ρύθμιση του  $i^{ov}$  οχήματος για τη χρονική στιγμή  $t$ .
- $RsRP_i(t)$ , είναι η μέγιστη διαθέσιμη ποσότητα ισχύος για στρεφόμενη εφεδρεία του  $i^{ov}$  οχήματος για τη χρονική στιγμή  $t$ .
- $ExU(t)$ , είναι το αναμενόμενο ποσοστό άνω ρύθμισης που θα ζητήσει ο διαχειριστής συστήματος την χρονική στιγμή  $t$ .
- $ExD(t)$ , είναι το αναμενόμενο ποσοστό κάτω ρύθμισης που θα ζητήσει ο διαχειριστής συστήματος την χρονική στιγμή  $t$ .
- $ExR(t)$ , είναι το αναμενόμενο ποσοστό στρεφόμενης εφεδρείας που θα ζητήσει ο διαχειριστής συστήματος την χρονική στιγμή  $t$ .
- $Ru(t)$ , είναι η συνολική διαθέσιμη ισχύ του στόλου του aggregator για άνω ρύθμιση την ώρα  $t$ .
- $Rd(t)$ , είναι η συνολική διαθέσιμη ισχύ του στόλου του aggregator για κάτω ρύθμιση την ώρα  $t$ .
- $PRu(t)$ , είναι η προβλεπόμενη τιμή αγοράς για άνω ρύθμιση την ώρα  $t$ .
- $PRd(t)$ , είναι η προβλεπόμενη τιμή αγοράς για κάτω ρύθμιση την ώρα  $t$ .
- $PRr(t)$ , είναι η προβλεπόμενη τιμή αγοράς για στρεφόμενη εφεδρεία την ώρα  $t$ .
- $Ef_b$ , είναι η απόδοση (efficiency) του συσσωρευτή του  $i^{ov}$  οχήματος.
- $Mc_i$ , είναι η μέγιστη χωρητικότητα ενέργειας του συσσωρευτή του  $i^{ov}$  οχήματος.
- $SOC_i(t)$ , είναι η στάθμη φόρτισης του συσσωρευτή του  $i^{ov}$  οχήματος την ώρα  $t$ .
- $Comp_i(t)$ , είναι μια παράμετρος που εκφράζει το διαθέσιμο ποσοστό ενέργειας του  $i^{ov}$  οχήματος στον aggregator την ώρα  $t$ , αν αναχωρήσει μη προγραμματισμένα την ώρα  $t$ .
- $Trips_i(t)$ , είναι η ενέργεια που καταναλώθηκε από το  $i^o$  όχημα για οδήγηση την ώρα  $t$ .
- $Deg_i(t)$ , είναι μια παράμετρος που χρησιμοποιείται για γραμμικοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης του BiV2G προγραμματισμού.
- $DC_i$ , είναι το κόστος φθοράς του  $i^{ov}$  συσσωρευτή από την εκφόρτιση 1kWh.
- $Plug_i(t)$ , είναι μια παράμετρος που εκφράζει αν το  $i^o$  όχημα είναι σε ταξίδι την ώρα  $t$  (0), αν είναι plug-in για V2G (1).
- $\rho_i(t)$ , είναι η απώλεια ενέργειας της μπαταρίας, επειδή θεωρούμε ότι είναι μη ιδανική.

### 4.5 Αλγόριθμος Κατανομής (Dispatch)

Ο aggregator με την χρήση κάποιων εκ των δυο μεθόδων για V2G προγραμματισμό κάνει μια εκτίμηση του σημείου βέλτιστης λειτουργίας  $POP_i(t)$  των οχημάτων, άρα και του δικού του βέλτιστου σημείου λειτουργίας σαν μια θεωρητική συμβατική μονάδα παραγωγής, με διαθέσιμη παραγωγή την ώρα  $t$  ίση με  $POP_{aggr}(t) = \sum_i POP_i(t)$ . Ο aggregator υποβάλει προσφορά με την διαθέσιμη παραγωγή ισχύος μια ημέρα πριν ώστε να γίνει ο Ημερήσιος Προγραμματισμός

Ενέργειας από τον Διαχειριστή της Αγοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας σε συνεργασία με τον Διαχειριστή Συστήματος Μεταφοράς (TSO). Αν τελικά η προσφορά γίνει δεκτή, τότε ο aggregator καλείται να διαθέσει την ισχύ την ημέρα της κατανομής στις συμφωνηθέντες ποσότητες. Η κατανομή αυτή γίνεται σε πραγματικό χρόνο και χωρίζεται σε δυο φάσεις :

**Φάση 1. Αποκεντρωμένη ωριαία παρακολούθηση της προσυμφωνηθέντος ισχύος**

Κάθε ώρα της ημέρας κατανομής ο aggregator τρέχει έναν αλγόριθμο παρακολούθησης της προσυμφωνηθέντος ισχύος  $POP_{aggr}^{forecast}(t)$ , κατανέμοντας βέλτιστα την ισχύ φόρτισης/εκφόρτισης των οχημάτων του στόλου, δηλαδή το  $POP_i(t)$ . [32]. Ο αλγόριθμος τρέχει κάθε ώρα  $t$  για  $v$  επαναλήψεις, όπου σε κάθε επανάληψη ακολουθούνται τα εξής βήματα:

**Βημα.1** Υπολογίζει το σήμα ελέγχου  $p^v(t)$  (virtual price),

$$p^v(t) = \gamma * \left( \sum_{i=1}^{N_{ev}} \{X_{chi}^{v-1}(t) - X_{dchi}^{v-1}(t)\} - POP_{aggr}^{forecast}(t) \right), \gamma \in (0,1) \subset \mathbb{R}$$

Όπου  $X_{chi}^{v-1}(t) \geq 0$  και  $X_{dchi}^{v-1}(t) \geq 0, \forall i, t$ .

Η μεταβλητή  $X_{chi}^{v-1}(t)$  είναι ίση με την απόλυτη τιμή της φόρτισης του  $i^{ov}$  οχήματος για την χρονική στιγμή  $t$ , όπως προέκυψε από την επίλυση του προβλήματος παρακολούθησης στον προηγούμενο  $v-1$  κύκλο. Αν το  $i^o$  όχημα δεν φορτίζει την χρονική στιγμή  $t$  τότε  $X_{chi}^{v-1}(t) = 0$ .

Η μεταβλητή  $X_{dchi}^{v-1}(t)$  είναι ίση με την απόλυτη τιμή της εκφόρτισης του  $i^{ov}$  οχήματος για την χρονική στιγμή  $t$ , όπως προέκυψε από την επίλυση του προβλήματος παρακολούθησης στον προηγούμενο  $v-1$  κύκλο. Αν το  $i^o$  όχημα δεν εκφορτίζει την χρονική στιγμή  $t$  τότε  $X_{dchi}^{v-1}(t) = 0$ .

Για τον πρώτο κύκλο οι μεταβλητές  $X_{chi}^1(t)$  και  $X_{dchi}^1(t)$  θεωρούνται μηδενικές  $\forall i, t$  άρα :

$$v = 1 \rightarrow p^1(t) = -\gamma * POP_{aggr}^{forecast}(t)$$

Το  $\gamma$  επηρεάζει την ταχύτητα σύγκλισης του αλγόριθμου, για την εκτέλεση του αλγόριθμου πήραμε τιμή 0,01.

**Βημα.2** Λύνει για κάθε όχημα το Πρόβλημα βέλτιστης παρακολούθησης του  $POP_{aggr}^{forecast}(t)$  και υπολογίζει τα  $X_{chi}^v(t), X_{dchi}^v(t)$ . Το πρόβλημα βέλτιστης παρακολούθησης ορίζεται ως εξής :

$$[X_{chi}^v(t), X_{dchi}^v(t)] = \min_{X_{chi}^v(t), X_{dchi}^v(t)} \{ f_i^v(t, X_{chi}^v, X_{dchi}^v, X_{chi}^{v-1}, X_{dchi}^{v-1}) \}$$

Όπου  $f_i^v$  είναι η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος και ορίζεται ,

$$f_i^v(t, X_{chi_i}^v, X_{dchi_i}^v, X_{chi_i}^{v-1}, X_{dchi_i}^{v-1}) = \sum_{t=1}^{24} \left\{ \begin{array}{l} p^v(t) * (X_{chi_i}^v(t) - X_{dchi_i}^v(t)) \\ + \frac{1}{2} (X_{chi_i}^v(t) - X_{chi_i}^{v-1}(t))^2 \\ + \frac{1}{2} (X_{dchi_i}^v(t) - X_{dchi_i}^{v-1}(t))^2 \end{array} \right\}$$

Οι τεχνικοί περιορισμοί που πρέπει να ικανοποιούνται είναι :

Ισοτικοί Περιορισμοί:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{t=1}^{24} \{X_{chi_i}^v(t) - X_{dchi_i}^v(t)\} = \sum_{t=1}^{24} Trip_i^v(t) \\ Trip_i^v(t) * (X_{chi_i}^v(t) - X_{dchi_i}^v(t)) = 0 \end{array} \right. , \forall i, t$$

Ανισοτικοί Περιορισμοί :

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 \leq Mc_i + \sum_{\tau=1}^t \{X_{chi_i}^v(\tau) - X_{dchi_i}^v(\tau)\} - \sum_{\tau=1}^t Trip_i^v(\tau) \leq Mc_i \\ 0kW \leq X_{chi_i}^v(t) \leq 7.2kW \\ 0kW \leq X_{dchi_i}^v \leq 7.2kW \end{array} \right. , \forall i, t$$

**Βημα.3** Υπολογίζει το σφάλμα,

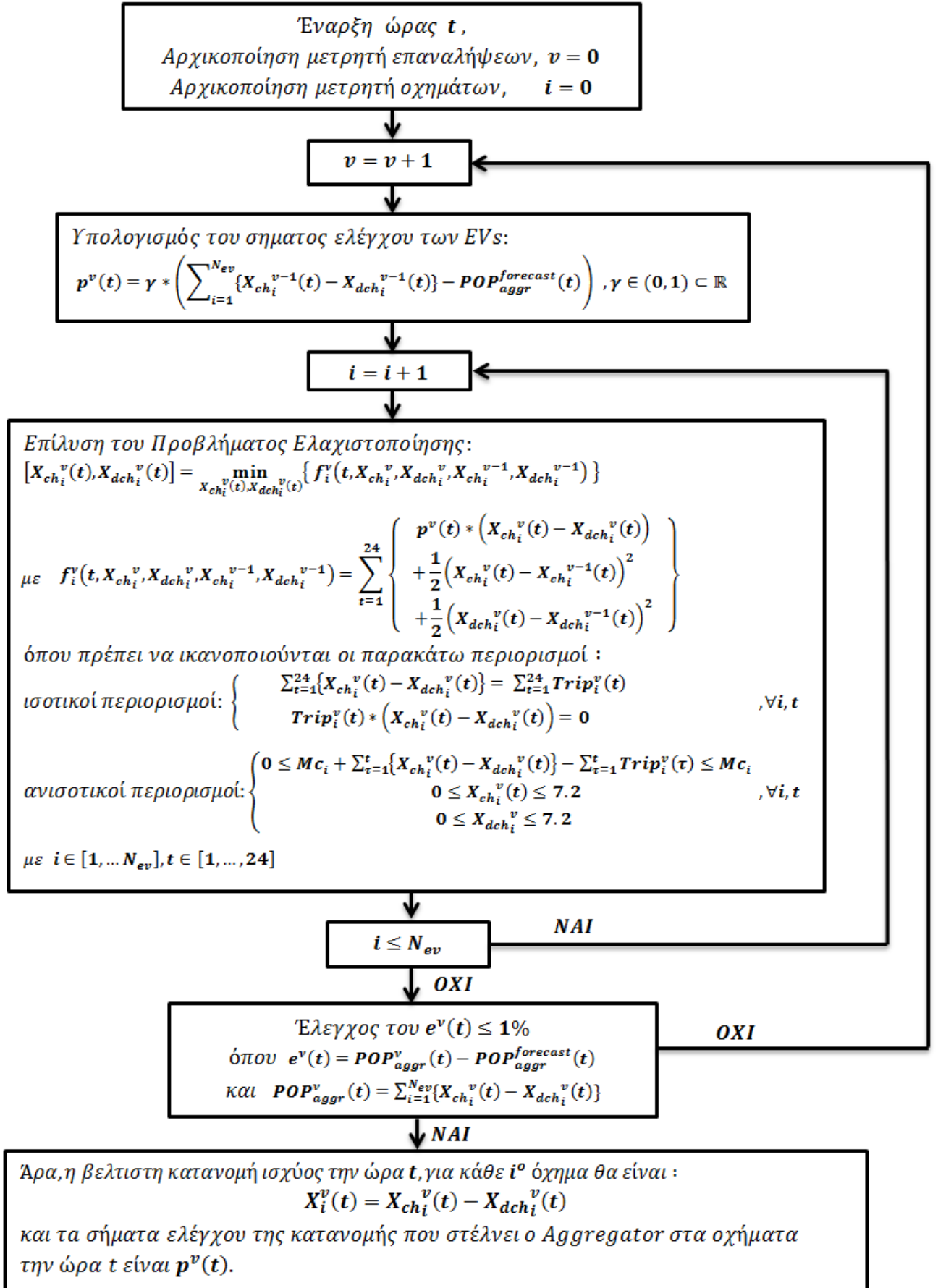
$$e^v(t) = POP_{aggr}^v(t) - POP_{aggr}^{forecast}(t)$$

Όπου  $POP_{aggr}^v(t)$  είναι η καμπύλη εξόδου του αλγόριθμου για τον ν-κύκλο και είναι ίση με,  $POP_{aggr}^v(t) = \sum_{i=1}^{N_{ev}} \{X_{chi_i}^v(t) - X_{dchi_i}^v(t)\}$ . Σκοπός του αλγόριθμου είναι η ταύτιση της καμπύλης αυτής με την καμπύλη  $POP_{aggr}^{forecast}(t)$ .

Αν το σφάλμα  $e^v(t)$  είναι μεγαλύτερο του 1% τότε μεταβαίνουμε στον νέο ν+1-κυκλο και επαναλαμβάνουμε το Βημα.1 και το Βημα.2 για τις νέες τιμές των  $X_{chi_i}^v(t), X_{dchi_i}^v(t)$ . Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι το σφάλμα να ικανοποιεί την απαίτηση  $e^v(t) \leq 1\%$ .

**Βημα.4** Ο αλγόριθμος έχει συγκλίνει και ο Aggregator στέλνει το σήμα ελέγχου  $p^v(t)$  στα οχήματα τα οποία ρυθμίζουν το σημείο λειτουργίας τους στο  $X_i^v(t) = X_{chi_i}^v(t) - X_{dchi_i}^v(t)$ . Η Διαδικασία επαναλαμβάνεται την επόμενη ώρα.

Αν και ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε υπολογίζει τις τιμές για όλο το 24ωρο, χρήσιμη πληροφορία περιέχει μόνο η ώρα  $t$ , δηλαδή εκείνη η ώρα στην αρχή της οποίας καλείτε ο αλγόριθμος. Όλη η υπόλοιπη πληροφορία υπολογίζεται αναγκαστικά επειδή είναι μέρος της λύσης του προβλήματος παρακολούθησης αλλά μένει αχρησιμοποίητη. Στην εικόνα 4.5.1 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής του αλγόριθμου της Φάσης1.



Εικόνα 4.5.1: Διάγραμμα ροής αλγόριθμου κατανομής για την Φάση 1 [32].

## Φάση 2. $k$ -περιοδική ρύθμιση με χρήση των σημάτων $RS(k)$ του TSO

Σε περιοδικά χρονικά διαστήματα  $k$ , ο TSO στέλνει σήματα ελέγχου στα οχήματα για την παροχή επικουρικών υπηρεσιών. Το  $k$  είναι μια παράμετρος χρόνου διαφορετική από το  $t$  και ορίζεται ως το χρονικό διάστημα μεταξύ δυο σημάτων ελέγχου. Η τιμή του εξαρτάται από το δίκτυο στο οποίο εξετάζουμε κάθε φορά, για την παρούσα διπλωματική θα θεωρήσουμε ότι τα οχήματα δέχονται σήματα έλεγχου κάθε 5min (γρήγορη δευτερεύουσα ρύθμιση), δηλαδή  $k = 5 * 60 = 300sec$ . Άρα τα οχήματα δέχονται  $3600/300=12$  σήματα κάθε ώρα. Για τον έλεγχο της φάσης 2 παρουσιάζονται δυο διαφορετικοί τρόποι προσέγγισης.

### 1<sup>ος</sup> Τρόπος. Αποκεντρωμένος έλεγχος με Adaptive Droop Control

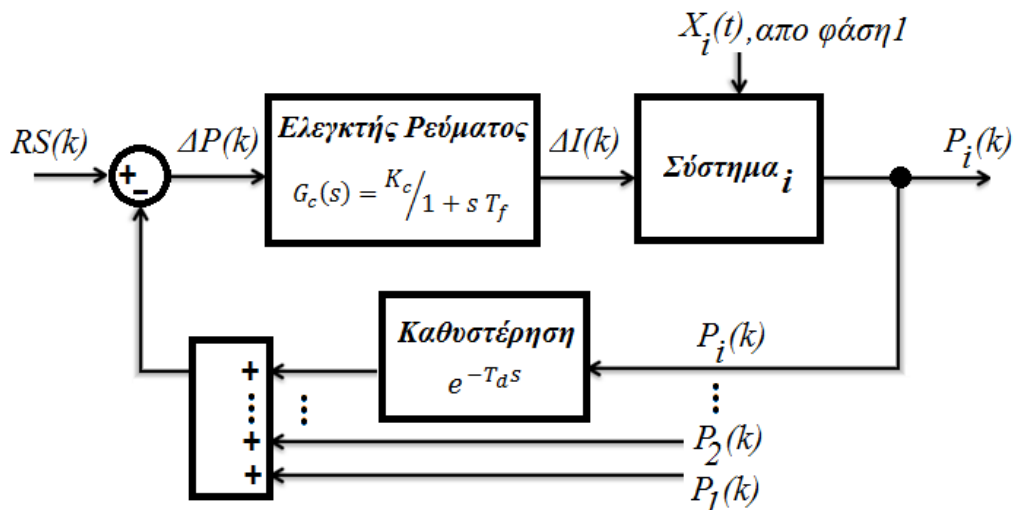
Ο έλεγχος είναι δυναμικός και αποκεντρωμένος, η διαδικασία είναι η εξής:

- I. Κάθε 5min καταφθάνει ένα σήμα ελέγχου  $RS(k)$  στα οχήματα από τον TSO, το σήμα αυτό είναι σε MW και αποτελεί την είσοδο την οποία επιθυμούμε να παρακολουθήσουμε. Η σύμβαση που ακολουθούμε για το RS είναι,

$$RS(k) = \begin{cases} < 0, & \text{o TSO ζητάει άνω ρύθμιση} \\ = 0, & \text{o TSO δεν ζητάει ρύθμιση} \\ > 0, & \text{o TSO ζητάει κάτω ρύθμιση} \end{cases}$$

- II. Η παρακολούθηση του σήματος εισόδου γίνεται με τον συνδυασμό δυο ελέγχων,

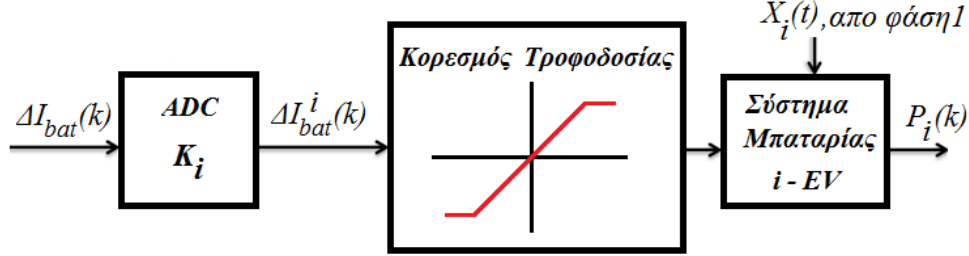
1. έναν κλασικό έλεγχο [33], με χρήση ενός ελεγκτή με ανάδραση εξόδου της μορφής,  $G_c(s) = \frac{K_c}{1 + s T_f}$ , όπου  $K_c$ : κέρδος και  $T_f$ : σταθερά χρόνου



Εικόνα 4.5.2: Μπλοκ διάγραμμα κλασικού ελέγχου. Όπου το  $RS(k)$  είναι σε MW. Ο ελεγκτής ρεύματος μεταβάλλει το ρεύμα ανάλογα με το σφάλμα ισχύος  $\Delta P_i$ .



2. έναν προσαρμοστικό έλεγχο, με την μέθοδο Adaptive Droop Control (ADC). Με την μέθοδο αυτή η φόρτιση/εκφόρτιση του οχήματος ελέγχεται από μια απολαβή  $K_i$  η οποία εξαρτάται άμεσα από το SOC που έχει το όχημα στο ξεκίνημα της ώρας  $t$ , δηλαδή το  $SOC_i(t)$  [34].



Εικόνα 4.5.3: Μπλοκ διάγραμμα ADC για EV.

Ο έλεγχος γίνεται με την βοήθεια των διαγραμμάτων  $K_i - SOC_i(t)$  ανά μια ώρα, ο υπολογισμός τους γίνεται με χρήση της εξίσωσης καμπύλης φόρτισης,

$$K_i^\varphi = \begin{cases} 0, & SOC_i(k) \geq SOC_i^{max} \\ \frac{1}{2} K_{max} \left( 1 - \sqrt{\frac{SOC_i(k) - SOC_i(t)}{SOC_i^{max} - SOC_i(t)}} \right), & SOC_i(t) \leq SOC_i(k) \leq SOC_i^{max} \\ \frac{1}{2} K_{max} \left( 1 + \sqrt{\frac{SOC_i(k) - SOC_i(t)}{SOC_i^{min} - SOC_i(t)}} \right), & SOC_i^{min} \leq SOC_i(k) \leq SOC_i(t) \\ K_{max}, & SOC_i(k) \leq SOC_i^{min} \end{cases}$$

και της εξίσωσης καμπύλης εκφόρτισης,

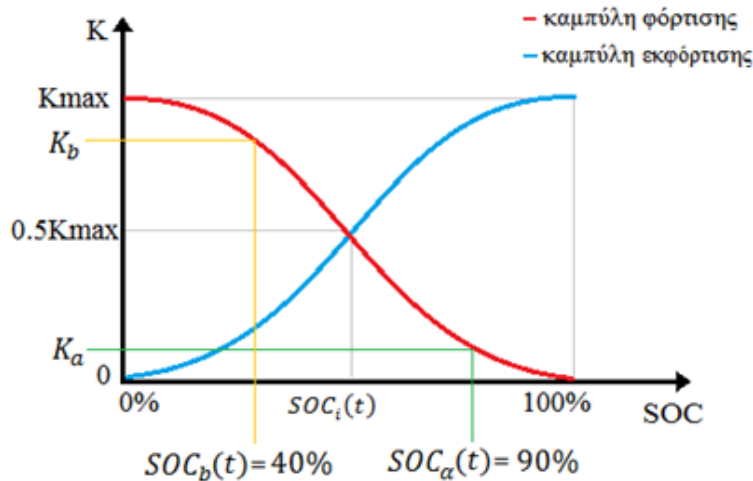
$$K_i^\varepsilon = \begin{cases} K_{max}, & SOC_i(k) \geq SOC_i^{max} \\ \frac{1}{2} K_{max} \left( 1 + \sqrt{\frac{SOC_i(k) - SOC_i(t)}{SOC_i^{max} - SOC_i(t)}} \right), & SOC_i(t) \leq SOC_i(k) \leq SOC_i^{max} \\ \frac{1}{2} K_{max} \left( 1 - \sqrt{\frac{SOC_i(k) - SOC_i(t)}{SOC_i^{min} - SOC_i(t)}} \right), & SOC_i^{min} \leq SOC_i(k) \leq SOC_i(t) \\ 0, & SOC_i(k) \leq SOC_i^{min} \end{cases}$$

όπου, πρέπει να ισχύει  $K_i^\varphi + K_i^\varepsilon = K_{max}$

Με την μέθοδο αυτή ο ρυθμός φόρτισης του EV καθίσταται ανάλογος του επίπεδου φόρτισης της μπαταρίας του. Για παράδειγμα, αν η είσοδος μας είναι θετική δηλαδή καλούνται τα οχήματα να φορτίσουν, τότε κάνοντας χρήση της μεθόδου ADC, παρατηρούμε ότι για ένα EV-α με  $SOC_a(t) = 90\%$  και για ένα EV-b με  $SOC_b(t) = 40\%$  θα ισχύει:

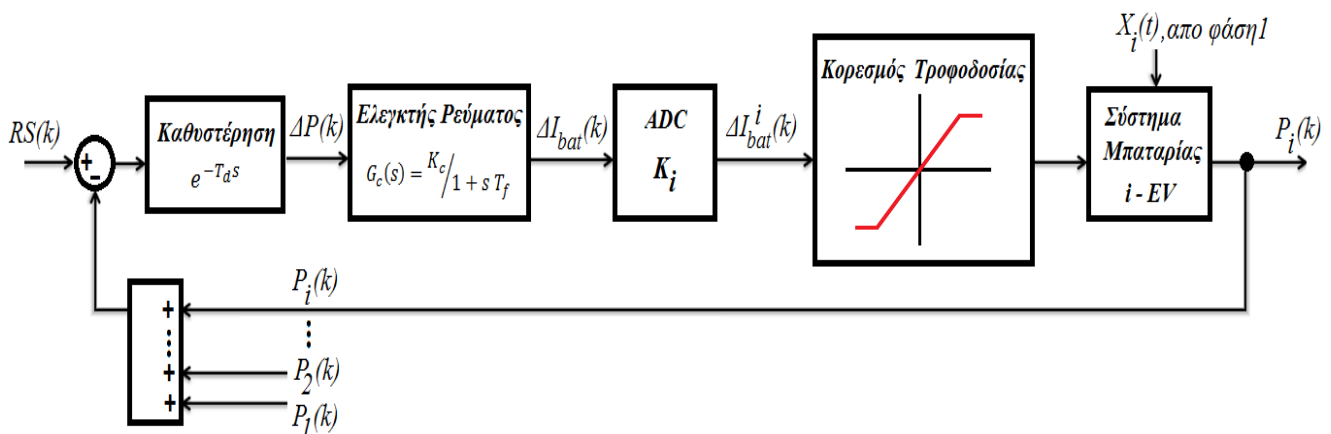
$$K_a < K_b$$

,όπου  $K_i$  είναι το κέρδος που δίνει η μέθοδος Adaptive Droop Control (ADC) για το EV- $i$  και  $i = a, b$ .



Εικόνα 4.5.4: Οι καμπύλες φόρτισης (κόκκινο) και εκφόρτισης (μπλε) της μεθόδου ADC για τον υπολογισμό του κέρδους  $K_i$  του  $i$ -EV.

Η συνολική διαδικασία ελέγχου της μπαταρίας φαίνεται στο ακόλουθο μπλοκ διάγραμμα,



Εικόνα 4.5.5: Μπλοκ διάγραμμα Φάσης 2 ( $1^{ος}$  Τρόπος) αποκεντρωμένου ελέγχου του  $i^{00}$ -EV για παροχή δευτερεύουσας ρύθμισης.  $\Delta I_{bat}$  είναι η μεταβολή του ρεύματος στην μπαταρία..

Ο αποκεντρωμένος έλεγχος με ADC παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα και προτείνεται σε σχετική βιβλιογραφία, όμως η αποκατάσταση του μόνιμου σφάλματος της πρωτεύουσας ρύθμισης γίνεται με σημαντική καθυστέρηση (όπως θα δούμε στο επόμενο κεφάλαιο). Άρα απαραίτητη προϋπόθεση για να υπάρχει αξιόπιστη εφαρμογή της μεθόδου είναι η χρήση τεχνολογίας υψηλών ταχυτήτων για τις επικοινωνίες ελέγχου. Αν και η επιστήμη των τηλεπικοινωνιών (ICT) έχει κάνει άλματα και υπάρχουν ήδη τεχνολογίες με πολύ μικρούς χρόνους απόκρισης ( π.χ. η τεχνολογία 4G με καθυστέρηση σήματος μικρότερη του 20msec) που θα μπορούσαν να υποστηρίξουν τον ADC έλεγχο, μια τέτοια επιλογή θα χρειαζόταν έρευνα που ξεφεύγει από τους σκοπούς της εργασίας μας. Οπότε αντί να μελετήσουμε της τεχνολογίες επικοινωνιών προτείνουμε μια δεύτερη μέθοδο ελέγχου η οποία αποκρίνεται σε δυο βήματα.

**2<sup>ος</sup> Τρόπος. Αποκεντρωμένος έλεγχος με χρήση Adaptive Droop Control το οποίο λαμβάνει υπόψη κάθε  $k$ -χρονική στιγμή μια εκτίμηση των  $k$ -χρονικών διαστημάτων που απομένουν σε κάθε όχημα για V2G λειτουργία.**

Η διαδικασία είναι η έξης:

- I. Ανά  $k$  χρονικά διαστήματα καταφθάνει ένα σήμα ελέγχου  $RS(k)$  στα οχήματα από τον TSO, το σήμα αυτό είναι σε **α.μ.** και αποτελεί την είσοδο που επιθυμούμε να παρακολουθήσουμε. Η σύμβαση που ακολουθούμε για το RS είναι,

$$RS(k) = \begin{cases} < 0, & \text{ο TSO ζητάει άνω ρύθμιση} \\ = 0, & \text{ο TSO δεν ζητάει ρύθμιση} \\ > 0, & \text{ο TSO ζητάει κάτω ρύθμιση} \end{cases}$$

- II. Η παρακολούθηση του σήματος εισόδου γίνεται σε δυο βήματα,

[1<sup>ο</sup> Βήμα]:

α) Υπολογίζονται οι πραγματικές μέγιστες διαθέσιμες ποσότητες για κάτω και άνω ρύθμιση για κάθε  $i^o$ -όχημα την χρονική στιγμή  $k$  (δηλαδή τα πραγματικά  $MxAP_i^r(k)$  και  $MnAP_i^r(k)$ ) θεωρώντας ότι  $RS(k) = 0$ ,

$$MnAP_i^r(k) = \min(|Mc_i - \alpha|, |\beta|) * plug_i(k) \quad \text{και} \quad MxAP_i^r(k) = \min(|\alpha|, |\beta|) * plug_i(k)$$

όπου,

- $plug_i(k)$ , είναι 0 αν το  $i^o$ -όχημα την χρονική στιγμή  $k$  δεν είναι συνδεδεμένο για V2G διαφορετικά είναι 1.
- $\alpha = (Mc_i - SOC_i(k)) * \frac{60}{k} - Ef_i * X_i(k)$ , περιορισμός της κατάστασης της μπαταρίας την  $k^{\eta}$  χρονική στιγμή για το  $i^o$  όχημα. Διαιρούμε με το  $\frac{k \text{ min}}{60 \text{ min/h}} = \frac{k}{60} h$ , για να μετατρέψουμε τις kWh σε kW ( $Power [kW] = Energy [kWh]/time [h]$ ). Επίσης όταν και μόνον όταν οι μεταβλητές είναι σε μονάδες μέτρησης ισχύος (kW), τότε η τιμή τους είναι η ίδια είτε αναφέρεται στην  $k$  χρονική στιγμή είτε στην αντίστοιχη ώρα, π.χ.  $X_i(t) = X_i(k)$ , με  $k \in [t, t + 1]$  και  $t \in [1, 24]$ .
- $\beta = FPL - X_i(k)$ , περιορισμός παροχής ισχύος της τροφοδοσίας.  $FPL$ , είναι η μέγιστη ισχύς που μπορεί να περάσει από την τροφοδοσία.

Τα  $X_i(k)$  είναι τα βέλτιστα σημεία λειτουργίας των οχημάτων όπως προέκυψαν από τον αλγόριθμο της φάσης 1.

β) Υπολογίζουμε το σήμα ρύθμισης σε MW ή kW,

$$RS_{MW}(k) = \begin{cases} RS(k) * MnAP_{aggr}^{forecast}(k), & RS(k) < 0 \\ 0, & RS(k) = 0 \\ RS(k) * MxAP_{aggr}^{forecast}(k), & RS(k) > 0 \end{cases}$$

Σαν  $MnAP_{aggr}^{forecast}(k)$ ,  $MxAP_{aggr}^{forecast}(k)$  θεωρούμε τις εκτιμώμενες τιμές για άνω και κάτω ρύθμιση αντίστοιχα, οι οποίες προέκυψαν την ημέρα προγραμματισμού και βάση των οποίων ο TSO αποστέλλει το σήμα ρύθμισης.

γ) Υπολογίζουμε το κέρδος του Adaptive Droop Control την  $k^{\eta}$  χρονική στιγμή για κάθε  $i^o$  όχημα,

$$K_i(k) = \begin{cases} \frac{TSN_i(k)}{CPA_i(k)} * \frac{MnAP_i^r(k)}{MnAP_{aggr}^{forecast}(t)}, & RS(k) < 0 \\ 0, & RS(k) = 0 \\ \left(1 - \frac{TSN_i(k)}{CPA_i(k)}\right) * \frac{MxAP_i^r(k)}{MxAP_{aggr}^{forecast}(k)}, & RS(k) > 0 \end{cases}$$

όπου,

$TSN_i(k)$ , είναι ίσο με τον αριθμό των  $k$ -χρονικών διαστημάτων που χρειάζεται να φορτίσει το  $i^o$  όχημα την  $k^{\eta}$  χρονική στιγμή ώστε η στάθμη της μπαταρίας του να είναι στο 100% (δηλαδή ίση με  $Mc_i$ ).

Υπολογίζεται ως εξής,  $TSN_i(k) = \frac{|Mc_i - SOC_i(k)| * 60}{FPL} \in \mathbb{N}$

$CPA_i(k)$ , είναι ίσο με τον αριθμό των  $k$ -χρονικών διαστημάτων που έχει διαθέσιμα για V2G λειτουργία το  $i^o$  όχημα την  $k^{\eta}$  χρονική στιγμή.

Υπολογίζεται ως εξής,  $CPA_i(k) = \sum_{\delta=k}^{60 \cdot 24} \{plug_i(\delta)\} \in \mathbb{N}$

δ) Υπολογίζεται η επιπλέον ποσότητα ισχύος που ανταλλάσει το κάθε όχημα την  $k^{\eta}$  χρονική στιγμή λόγω των σημάτων ρύθμισης  $RS_{MW}(k)$  του TSO (σε kW),

$$PD_i(k) = \begin{cases} K_i(k) * RS_{MW}(k), & RS(k) \neq 0 \\ 0, & RS(k) = 0 \end{cases}$$

[2<sup>o</sup> Βήμα]:

Υπολογίζεται το σφάλμα παρακολούθησης του  $RS_{MW}(k)$  από τον στόλο του Aggregator,  $\Delta RS^0(k) = RS_{MW}(k) - \sum_{i=1}^{N_{ev}} PD_i^0(k)$ , όπου  $PD_i^0(k) = PD_i(k)$

και βάση αυτού δημιουργούμε μια αναδρομική σχέση μέσω της οποίας ενημερώνεται η έξοδος του κάθε οχήματος,

$$PD_i^v(k) = \begin{cases} PD_i^{v-1}(k) + \left(\frac{PD_i^{v-1}(k)}{\sum_{i=1}^{N_{ev}} PD_i^{v-1}(k)}\right) * \Delta RS^{v-1}(k), & \Delta RS^{v-1}(k) \neq 0 \\ 0, & \Delta RS^{v-1}(k) = 0 \end{cases}$$

και υπολογίζεται το νέο σφάλμα  $\Delta RS^v(k)$ ,

$$\Delta RS^v(k) = RS_{MW}(k) - \sum_{i=1}^{N_{ev}} PD_i^v(k)$$

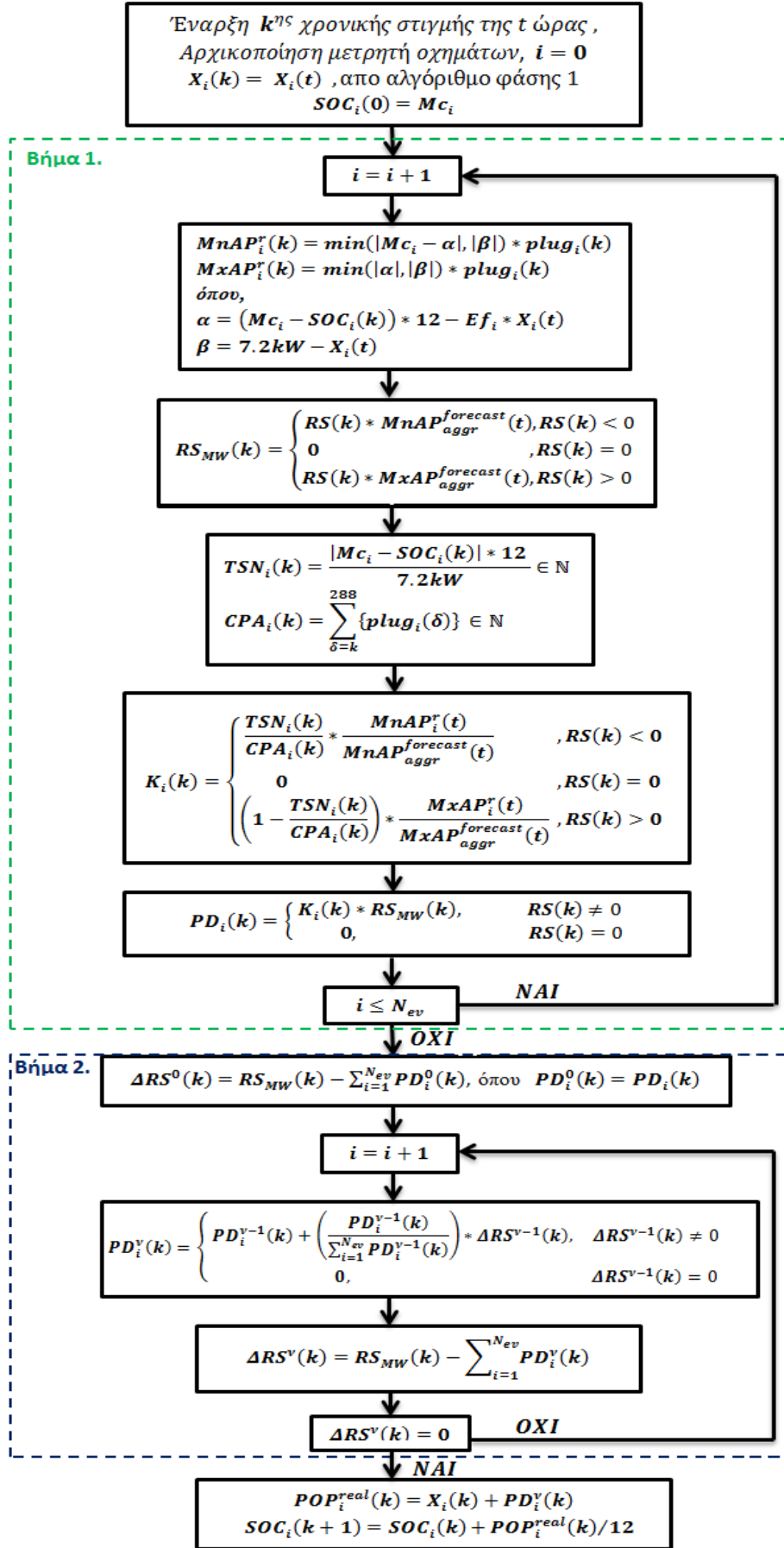
Όταν το  $\Delta RS^v(k)$  γίνει ίσο με το μηδέν μετά από  $v$  επαναλήψεις τότε το 2<sup>o</sup> Βήμα έχει συγκλίνει στις τελικές τιμές  $PD_i^v(k)$ . Άρα το  $i^o$  όχημα την  $k^{\eta}$  χρονική στιγμή θα έχει τελικό σημείο λειτουργίας,  $POP_i^{real}(k) = X_i(k) + PD_i^v(k)$  ενώ η στάθμη φόρτισης την  $(k+1)^{\eta}$  χρονική στιγμή θα είναι,

$$SOC_i(k+1) = SOC_i(k) + POP_i^{real}(k) * \frac{k}{60}$$

Στην παρούσα εργασία θεωρούμε ότι:

- $Ef_i = 0.9$  (συντελεστής απόδοσης τροφοδοσίας),
- $FPL = 7.2kW$  (μέγιστη παροχή ισχύος τροφοδοσίας)
- τα  $k$ -χρονικά διαστήματα θεωρούνται 5λεπτά, δηλαδή ο TSO στέλνει σήμα ρύθμισης κάθε 5 λεπτά.

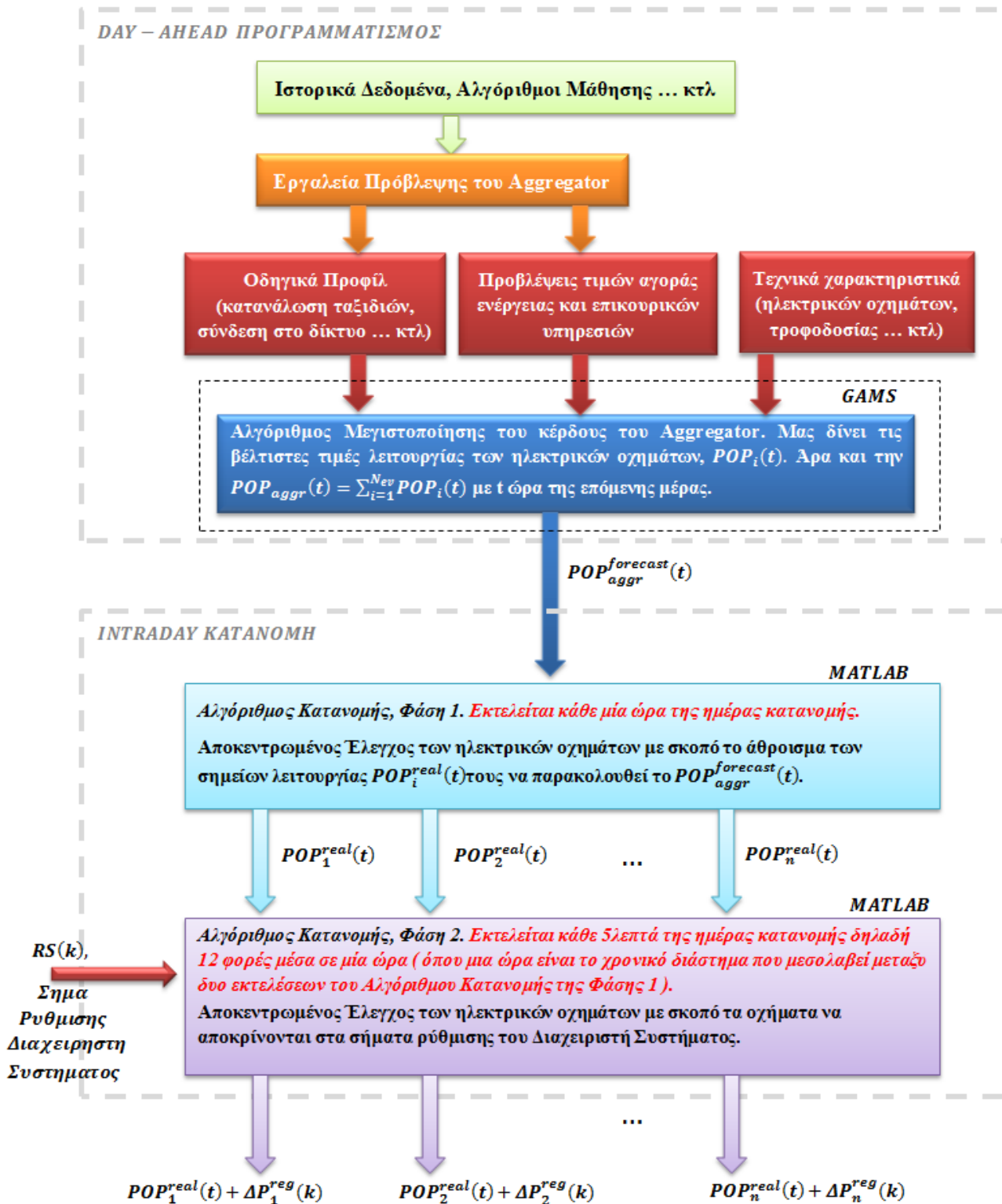
Στην εικόνα 4.5.6 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής του αλγόριθμου της Φάσης 2 όπως υλοποιήθηκε με τον 2<sup>o</sup> Τρόπο που μόλις περιγράφηκε.



Εικόνα 4.5.6: Διάγραμμα ροής αλγόριθμου κατανομής για την Φάση 2 (2<sup>ος</sup> Τρόπος).

## 4.6 Συνοπτική παρουσίαση του V2G προγραμματισμού και της κατανομής

Στην ενότητα αυτή γίνεται μια προσπάθεια να παρουσιαστούν συγκεντρωμένα όσα αναπτύχθηκαν στις προηγούμενες ενότητες.



Εικόνα 4.6.1: Συγκεντρωτικό Διάγραμμα ροής για την φάση του V2G προγραμματισμού και της κατανομής, υπό την προϋπόθεση ότι η προσφορά του Aggregator έχει γίνει δέκτη από τον TSO.

## 5 Αποτελέσματα Αλγορίθμων

Στο κεφάλαιο αυτό εξετάζουμε την αποτελεσματικότητα των αλγορίθμων που αναπτύχθηκαν στο κεφάλαιο 4. Στην 1<sup>η</sup> ενότητα κάνουμε σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ των τεχνολογιών BiV2G και UniV2G, εξετάζοντας τους αντίστοιχους αλγορίθμους προγραμματισμού της επόμενης ημέρας που θα κάνει χρήση ο aggregator για την πώληση επικουρικών υπηρεσιών με το βέλτιστο δυνατό κέρδος. Στην 2<sup>η</sup> ενότητα εξετάζουμε τον αλγόριθμο κατανομής ο οποίος θα λειτουργεί σε πραγματικό χρόνο κατά την ημέρα την οποία καλείται ο aggregator να παράσχει την υπηρεσία, λαμβάνοντας σήματα που του αποστέλλει ο διαχειριστής του συστήματος μεταφοράς (TSO).

### 5.1 Δεδομένα εισόδου των αλγορίθμων

Τα δεδομένα εισόδου των αλγορίθμων προέρχονται από:

- δεδομένα που προέκυψαν για τα προφίλ των οδηγών των ηλεκτρικών οχημάτων με χρήση προγράμματος που αναπτύχθηκε σε περιβάλλον MATLAB.
- δεδομένα του διαχειριστή συστήματος μεταφοράς της πολιτείας του Τέξας των ΗΠΑ, ERCOT (Electric Reliability Council Of Texas).

Η επιλογή της πολιτείας του Τέξας των ΗΠΑ έγινε λόγω της μεγάλης προσπάθειας διείσδυσης των ηλεκτρικών οχημάτων στην πολιτεία του Τέξας και των βοηθητικών μέτρων στήριξης αυτής της προσπάθειας αυξάνοντας την πιθανότητα εφαρμογής της V2G λειτουργίας στο εγγύς μέλλον. Επίσης η αγορά του Τέξας υποστηρίζει την παροχή υπηρεσιών Demand-Response, δηλαδή υπηρεσιών από την πλευρά του φορτίου.

Τα δεδομένα εισόδου είναι:

#### a. Προβλέψεις ωριαίων τιμών ηλεκτρικής ενέργειας για την επόμενη μέρα.

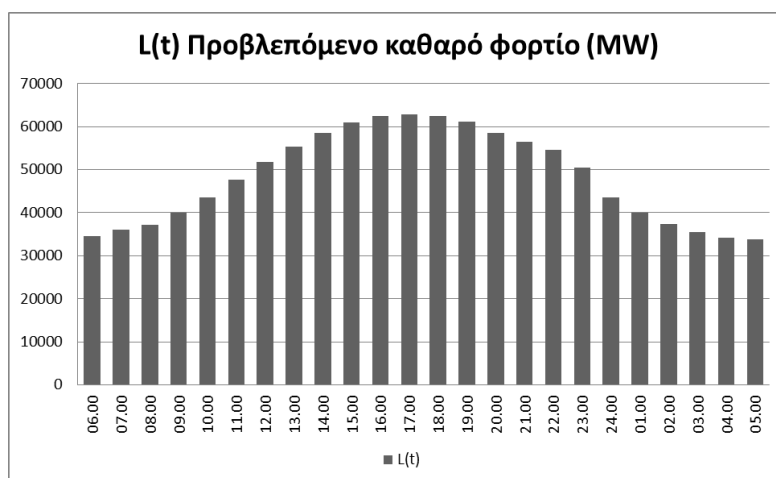
Στον πίνακα 5.1 δίνονται οι προβλεπόμενες τιμές ενέργειας και των διαφόρων επικουρικών υπηρεσιών για κάθε ώρα της ημέρας προγραμματισμού, καθώς και τα αντίστοιχα αναμενόμενα ποσοστά ζήτησης των επικουρικών υπηρεσιών, έτσι όπως προέκυψαν μετά από στατιστική επεξεργασία ιστορικών δεδομένων. Οι προβλεπόμενες τιμές ενέργειας και επικουρικών υπηρεσιών, θεωρούμε ότι υπολογίζονται με χρήση κάποιου εργαλείου πρόβλεψης από τον aggregator. Για την υλοποίηση των προσομοιώσεων πήραμε πραγματικά δεδομένα κάνοντας την παραδοχή ότι προέρχονται από το εργαλείο πρόβλεψης του Aggregator.

t (hour)	Ωρα της επόμενης μέρας	P, Προβλεπόμενη Τιμή Ενέργειας (pu)	ExU, Αναμενόμενο Ποσοστό Άνω Ρύθμισης	PRU, Προβλεπόμενη Τιμή για Άνω Ρύθμιση (pu)	ExD, Αναμενόμενο Ποσοστό Κάτω Ρύθμισης	PRD, Προβλεπόμενη Τιμή για Κάτω Ρύθμιση (pu)	ExR, Αναμενόμενο Ποσοστό Στρεφόμενης Εφεδρείας (Μόνο για BiV2G)	PRR, Προβλεπόμενη Τιμή για Στρεφόμενη Εφεδρεία (pu)
1	06.00	0,085377	0,44	0,115875	1	0,450185	0,08	0,088667
2	07.00	0,086201	0,23	0,115875	0,99	1	0,08	0,1
3	08.00	0,086201	0,13	0,193125	0,97	0,738007	0,08	0,1
4	09.00	0,122224	0,34	0,179992	0,82	0,450185	0,001	0,155333
5	10.00	0,17023	0,71	0,115875	0,98	0,492005	0,1	0,222667
6	11.00	0,157836	0,56	0,218617	0,85	0,430504	0,001	0,191333
7	12.00	0,181876	0,61	0,309	0,53	0,482165	0,001	0,224333
8	13.00	0,189777	0,57	0,503283	0,61	0,492005	0,001	0,333333
9	14.00	0,22977	0,32	0,464658	0,54	0,520295	0,001	0,533
10	15.00	0,349897	0,12	0,965624	0,78	0,681427	0,001	0,833333
11	16.00	1	0,99	0,870993	0,32	0,99754	0,001	0,833333
12	17.00	0,863696	0,96	1	0,46	0,803198	0,001	1
13	18.00	0,466317	0,89	0,579374	0,84	0,861009	0,001	1
14	19.00	0,349897	0,92	0,463499	0,96	0,570726	0,001	0,733333
15	20.00	0,191275	0,01	0,801468	0,6	0,462485	0,001	0,733333
16	21.00	0,169182	0,45	0,64774	0,62	0,391144	0,001	0,673667
17	22.00	0,141135	0,67	0,387408	0,64	0,615006	0,001	0,221667
18	23.00	0,108706	0,87	0,193125	0,59	0,696187	0,001	0,119333
19	24.00	0,094552	0,79	0,193125	0,85	0,450185	0,001	0,165
20	01.00	0,085639	0,96	0,38625	0,45	0,492005	0,001	0,166667
21	02.00	0,079274	0,98	0,1545	0,32	0,457565	0,001	0,088667
22	03.00	0,066579	0,95	0,115875	0,34	0,450185	0	0,088333
23	04.00	0,066841	0,93	0,115875	0,24	0,618696	0	0,083
24	05.00	0,066841	0,23	0,115875	0,81	0,505535	0	0,085

Πίνακας 5.1.1. Προβλεπόμενες τιμές και αναμενόμενα ποσοστά επικουρικών υπηρεσιών για την ημέρα του προγραμματισμού.

### b. Προβλέψεις Καθαρού Φορτίου, L(t).

Στην εικόνα 5.1 δίνονται οι προβλέψεις για το καθαρό φορτίο της ημέρας προγραμματισμού, δηλαδή το συνολικό προβλεπόμενο φορτίο της επόμενης μέρας όπου έχουμε αφαίρεση την προβλεπόμενη παραγωγή από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ), δίνοντας τους προτεραιότητα στην κάλυψη του φορτίου.

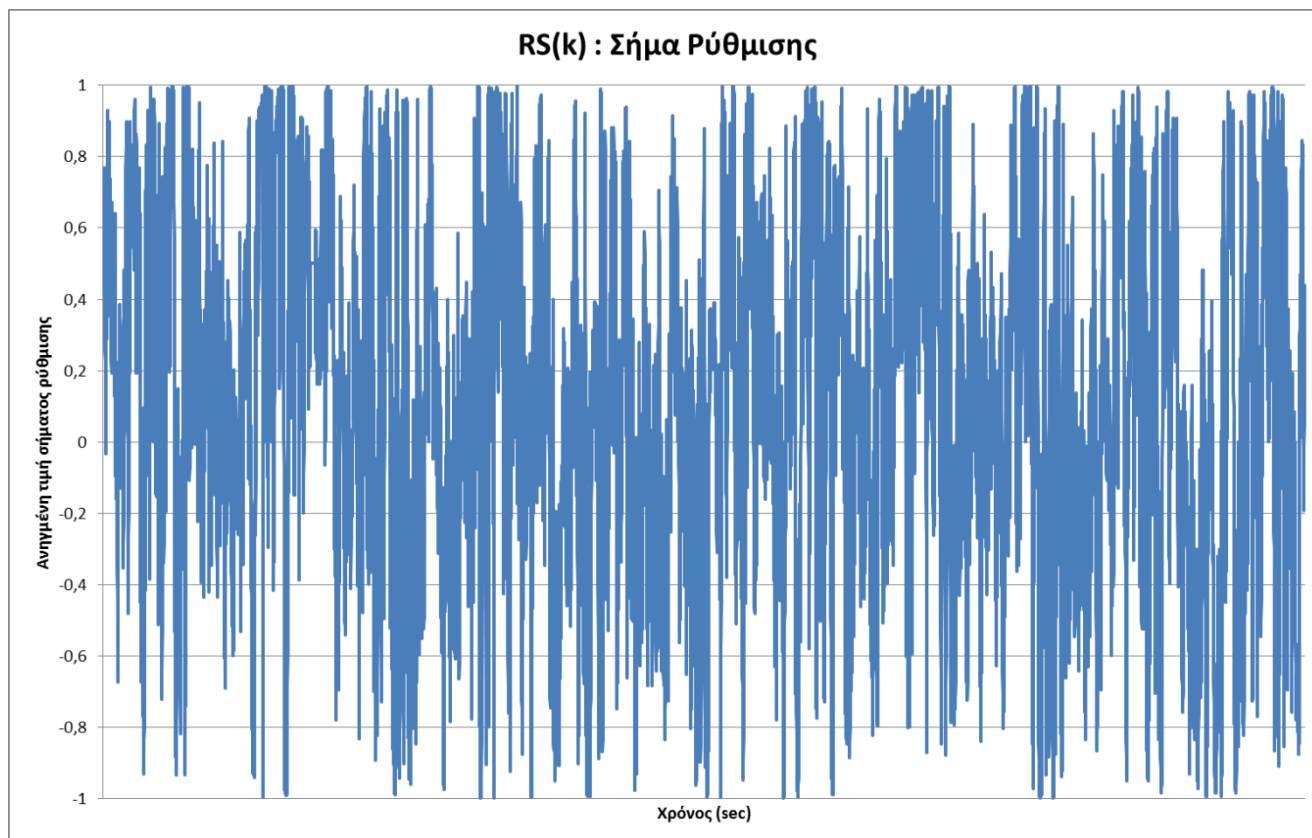


Εικόνα 5.1.1. Καθαρό Προβλεπόμενο Φορτίο, L(t).



### c. Προβλέψεις σήματος ρύθμισης, $RS(k)$ .

Επειδή τα ιστορικά δεδομένα δεν δημοσιοποιούνται κάναμε χρήση του πραγματικού σήματος ρύθμισης, που έστειλε ο διαχειριστής του συστήματος της Καλιφόρνια (CaISO) κατά το πρώτο παγκόσμιο πείραμα V2G λειτουργίας από το πανεπιστήμιο του Delaware. Το σήμα φαίνεται στην εικόνα 5.2. ενώ στον πίνακα 5.2 φαίνονται κάποια βασικά χαρακτηριστικά του.



Εικόνα 5.1.2. Σήμα ρύθμισης  $RS(k)$ .

Χαρακτηριστικά του σήματος ρύθμισης $RS(k)$ της εικόνας 5.2.	
<b>Διάρκεια Σήματος</b>	12 μέρες ή $12 \cdot 24 = 288$ ώρες ή $12 \cdot 24 \cdot 3600 = 1036800$ sec
<b>Χρόνος μεταξύ δυο διαδοχικών τιμών</b>	30 sec
<b>Μέσος Όρος Σήματος</b>	$0,1247 > 0$ , θετικός άρα ο TSO ζητά περισσότερο ρύθμιση προς τα κάτω.

Πίνακας 5.1.2. Χαρακτηριστικά του σήματος ρύθμισης,  $RS(k)$ .

#### d. Χαρακτηριστικά του Φορτιστή.

Τα χαρακτηριστικά κάθε φορτιστή (feeder) είναι γνωστά από τον aggregator, παρέχοντας του ένα άνω όριο φόρτισης (ή κάτω όριο εκφόρτισης). Για τις προσομοιώσεις, θεωρήσαμε ότι οι σταθμοί φόρτισης έχουν όμοια χαρακτηριστικά με τον εμπορικό φορτιστή EVSE-CS της εταιρείας Aero Vironment Inc, του οποίου η χρήση είναι ευρέως διαδεδομένη στην περιοχή του Τέξας. Τα χαρακτηριστικά του φορτιστή φαίνονται στον Πίνακα 5.3. Για την απόδοση φόρτισης/εκφόρτισης θεωρήσαμε ένα ποσοστό της τάξης του 90% είναι αρκετά ρεαλιστικό.

Χαρακτηριστικά Φορτιστή	
Ρεύμα Εξόδου	30A
Μέγιστη Ισχύς	± 7,2 kW

Πίνακας 5.1.3. Χαρακτηριστικά του Σταθμού Φόρτισης που χρησιμοποιήθηκαν της προσομοιώσεις.

#### e. Τιμή πώλησης ενέργειας και χρέωση αντικατάστασης συσσωρευτή.

Ο aggregator θεωρούμε ότι χρεώνει της οδηγούς κατά την φόρτιση των οχημάτων της, με τιμή 0,01 \$/kWh, η οποία παραμένει σταθερή όλη την ημέρα. Η επιλογή της τιμής φόρτισης έγινε με σκοπό την παροχή κινήτρων της οδηγούς και είναι μικρότερη από κάθε χρέωση ενέργειας στην περιοχή του Τέξας.

Το κόστος αντικατάστασης συσσωρευτή της ενδιαφέρει μόνο στην περίπτωση της BiV2G λειτουργίας και το θεωρούμε ότι είναι ίσο με 200 \$/kWh.

#### f. Προβλέψεις των προφίλ των οδηγών.

Ο aggregator θεωρούμε ότι διαθέτει τα χαρακτηριστικά στοιχεία του οχήματος κάθε οδηγού (τύπος οχήματος, χωρητικότητα, κατανάλωση ... κτλ). Το πλήθος καθώς και τα χαρακτηριστικά των ηλεκτρικών οχημάτων που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση δίνονται στον Πίνακα 5.4.

Κατασκευαστής, Μοντέλο	Πλήθος	Χωρητικότητα συσσωρευτή (kWh)	Κατανάλωση ενέργειας (kWh/km)
Tesla Roadster	500	53	0,127
Th!nk City	2000	26	0,157
BMW Mini-E	2000	30	0,14
Mitsubishi i-MiEV	2500	16	0,125
Nissan Leaf	3000	24	0,21

Πίνακας 5.1.4. Χαρακτηριστικά των ηλεκτρικών οχημάτων που χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις.

Επίσης, θεωρούμε ότι ο aggregator διαθέτει ένα εργαλείο πρόβλεψης των οδηγικών προφίλ των κατόχων ηλεκτρικών οχημάτων, κάνοντας χρήση των χαρακτηριστικών του στόλου και των διαθέσιμων ιστορικών δεδομένων. Οι προβλέψεις γίνονται ανά οδηγό και δίνουν πληροφορίες σχετικά με:

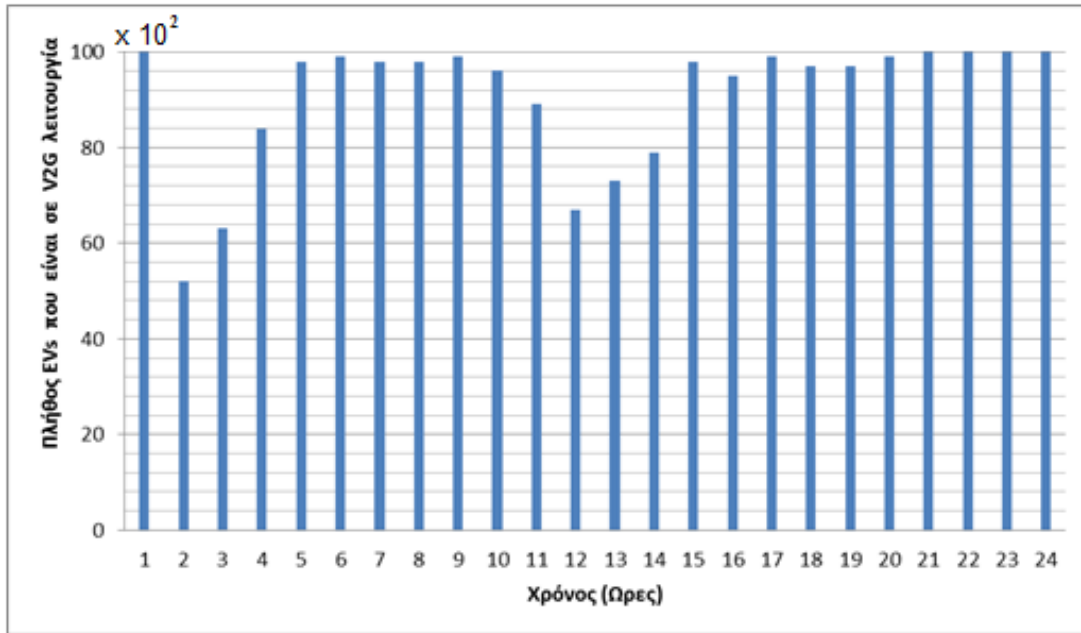
- τον αριθμό των ταξιδιών κατά την ημέρα προγραμματισμού,
- τις ώρες εκκίνησης και επιστροφής του κάθε ταξιδιού, καθώς και την διάρκεια τους κατά την ημέρα προγραμματισμού,
- την κατανάλωση των ταξιδιών.

Τελικά, ο aggregator λαμβάνοντας υπόψη της προβλέψεις αυτές με κάποιο ποσοστό απροσδιοριστίας (π.χ. κάποιο μη προγραμματισμένο ταξίδι), μπορεί να υπολογίσει τις ώρες που είναι διαθέσιμο το κάθε όχημα για V2G λειτουργία και την στάθμη φόρτισης (SOC) ανά ώρα του κάθε συσσωρευτή.

Στα πλαίσια της εργασίας αυτής δημιουργήθηκε ένα πρόγραμμα σε περιβάλλον MATLAB για την δημιουργία τυχαίων οδηγικών σεναρίων, θεωρώντας ότι τα δεδομένα αυτά προέκυψαν από το εργαλείο πρόβλεψης του aggregator. Για την δημιουργία των σεναρίων θεωρήσαμε ότι η ημέρα προγραμματισμού είναι μια συνηθισμένη εργάσιμη μέρα της οποίας τα χαρακτηριστικά συνοψίζονται στον Πίνακα 5.5.

Οδηγική συμπεριφορά κατά την Ημέρα Προγραμματισμού	
<b>06:00 – 09:00</b>	Χρονικό διάστημα εντός του οποίου θεωρούμε ότι τα οχήματα μας θα αναχωρήσουν για το πρώτο τους ταξίδι (Σπίτι → Δουλειά).
<b>10:00 – 15:00</b>	Χρονικό διάστημα εντός του οποίου θεωρούμε ότι τα οχήματα μας φτάνουν στην δουλειά και συνδέονται σε V2G λειτουργία. Η πιθανότητα μετά την σύνδεση κάποιου οχήματος να αναχώρηση ξανά, εντός του διαστήματος αυτού, λαμβάνεται ίση με 10%.
<b>16:00 – 19:00</b>	Χρονικό διάστημα εντός του οποίου θεωρούμε ότι τα οχήματα μας θα αναχωρήσουν για το δεύτερο τους ταξίδι (Δουλειά → Σπίτι).
<b>20:00 – 03:00</b>	Χρονικό διάστημα εντός του οποίου θεωρούμε ότι τα οχήματα μας επιστρέφουν στο σπίτι και συνδέονται σε V2G λειτουργία. Η πιθανότητα μετά την σύνδεση κάποιου οχήματος να αναχώρηση ξανά, εντός του διαστήματος αυτού, λαμβάνεται ίση με 20%.
<b>03:00 – 05:00</b>	Χρονικό διάστημα εντός του οποίου θεωρούμε ότι τα οχήματα μας συνδέονται σε V2G λειτουργία και δεν υπάρχει πιθανότητα αναχώρησης.

*Πίνακας 5.1.5. Χαρακτηριστικά της ημέρας προγραμματισμού σχετικά με την οδηγική συμπεριφορά, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις.*

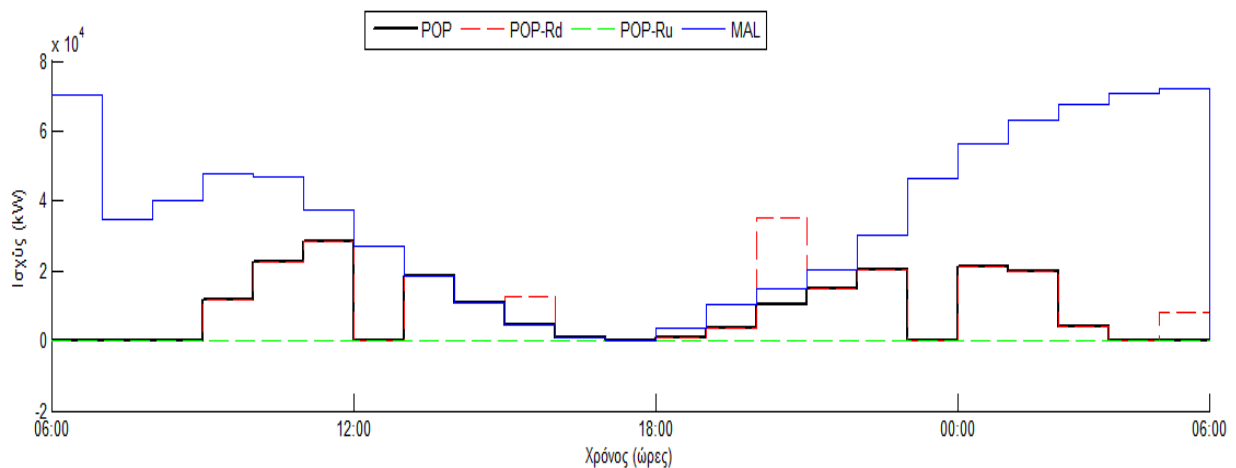


Εικόνα 5.1.3. Πλήθος ηλεκτρικών οχημάτων (EVs) τα οποία είναι διαθέσιμα για V2G λειτουργία, όπως προέκυψαν από το πρόγραμμα δημιουργίας οδηγικών σεναρίων της MATLAB.

## 5.2 Αποτελέσματα αλγορίθμων ημέρας προγραμματισμού για BiV2G και UniV2G

Παίρνοντας ως δεδομένα εισόδου, τα δεδομένα που παρουσιάστηκαν προηγουμένως στην ενότητα 5.1 για στόλο 10000 ηλεκτρικών οχημάτων, ο αλγόριθμος ημερήσιου προγραμματισμού για UniV2G μας δίνει τα διαγράμματα που φαίνονται στην εικόνα 5.2.1. Στα διαγράμματα αυτά απεικονίζονται:

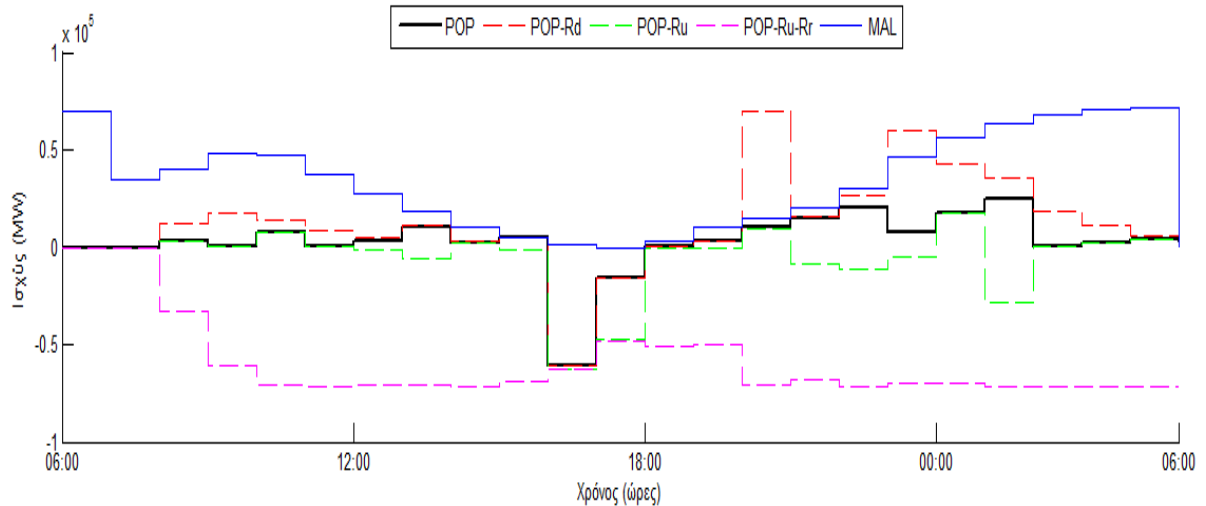
- Η 24ωρη πρόβλεψη του σημείου λειτουργίας  $POP_{aggr}^{forecast}(t)$  για την επόμενη ημέρα.
- Η  $MAL(t) = \sum_{i=1}^{N_{ev}} \left( \frac{MxL-L(t)}{MxL-MnL} \right) \times \sum_{i=1}^N (MP_i(t) \times plug_i(t))$ , όπου είναι η 24ωρη πρόβλεψη του επιτρεπτού άνω ορίου φόρτισης των οχημάτων για την επόμενη ημέρα, λόγω περιορισμών του δικτύου διανομής.
- Η 24ωρη πρόβλεψη της μέγιστης ισχύος  $POP_{aggr}^{forecast} - R_d$ , που μπορεί να απορροφήσει ο Aggregator την επόμενη ημέρα, αποκρινόμενος σε σήματα κάτω ρύθμιση του TSO.
- Η 24ωρη πρόβλεψη της μέγιστης ισχύος  $POP_{aggr}^{forecast} - R_u$ , που μπορεί να δώσει ο Aggregator την επόμενη ημέρα, αποκρινόμενος σε σήματα άνω ρύθμιση του TSO.



Εικόνα 5.2.1. Διαγράμματα UniV2G για  $POP_{aggr}$ ,  $POP_{aggr} - R_d$ ,  $POP_{aggr} - R_u$  και  $MAL$  για τιμές PRU και PRD που δίνονται από τον πίνακα 1.

Όμοια, με χρήση των δεδομένων εισόδου που παρουσιάστηκαν στην ενότητα 5.1 για στόλο 10000 ηλεκτρικών οχημάτων, ο αλγόριθμος ημερήσιου προγραμματισμού για BiV2G μας δίνει τα διαγράμματα που φαίνονται στις εικόνες 5.2.2. Στα διαγράμματα αυτά απεικονίζονται:

- Η 24ωρη πρόβλεψη του σημείου λειτουργίας  $POP_{aggr}^{forecast}(t)$  για την επόμενη ημέρα.
- Η  $MAL(t) = \sum_{i=1}^N \left( \frac{MxL-L(t)}{MxL-MnL} \right) \times \sum_{i=1}^N (MP_i(t) \times plug_i(t))$ , όπου είναι η 24ωρη πρόβλεψη του επιτρεπτού άνω ορίου φόρτισης των οχημάτων για την επόμενη ημέρα, λόγω περιορισμών του δικτύου διανομής.
- Η 24ωρη πρόβλεψη της μέγιστης ισχύος  $POP_{aggr}^{forecast} - R_d$ , που μπορεί να απορροφήσει ο Aggregator την επόμενη ημέρα, αποκρινόμενος σε σήματα κάτω ρύθμιση του TSO.
- Η 24ωρη πρόβλεψη της μέγιστης ισχύος  $POP_{aggr}^{forecast} - R_u$ , που μπορεί να δώσει ο Aggregator την επόμενη ημέρα, αποκρινόμενος σε σήματα άνω ρύθμιση του TSO.
- Η 24ωρη πρόβλεψη της μέγιστης ισχύος  $POP_{aggr}^{forecast} - R_u - R_r$ , που μπορεί να δώσει ο Aggregator την επόμενη ημέρα, αποκρινόμενος στα σήματα άνω ρύθμιση και στρεφόμενης εφεδρείας του TSO.



Εικόνα 5.2.2. Διαγράμματα BiV2G για  $POP_{agg}$ ,  $POP_{agg} - R_d$ ,  $POP_{agg} - R_u$ ,  $POP_{agg} - R_u - R_r$  και MAL για τιμές PRU και PRD που δίνονται από τον πίνακα 1.

Το κέρδος του Aggregator για κάθε μια περίπτωση παρουσιάζεται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 5.2.1 με τρόπο που μας βοηθά να κάνουμε σύγκριση των αποτελεσμάτων των δυο τεχνολογιών V2G και να βγάλουμε τα συμπεράσματά μας.

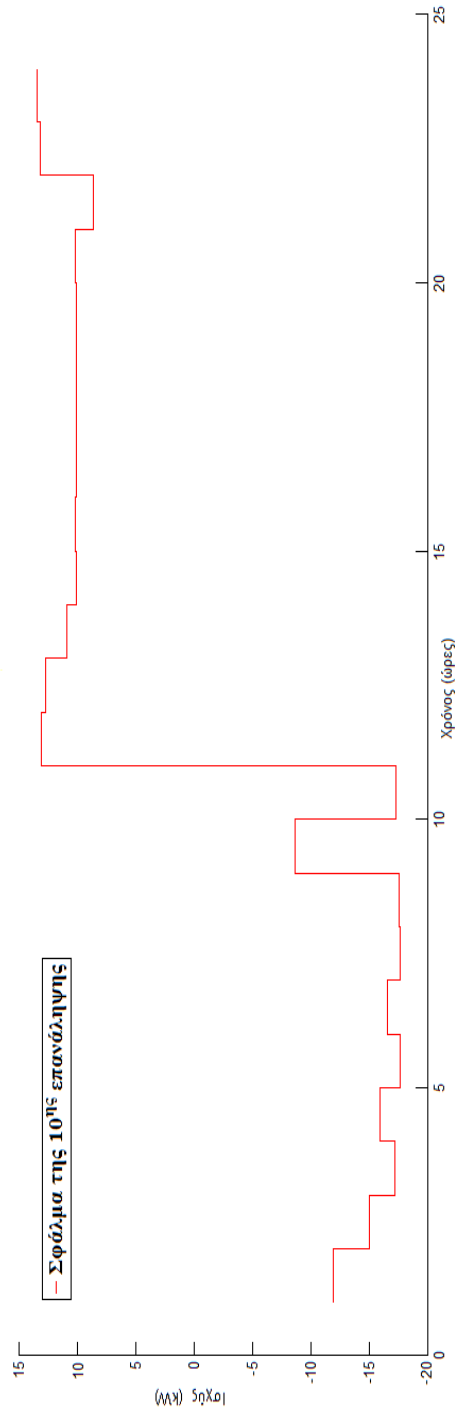
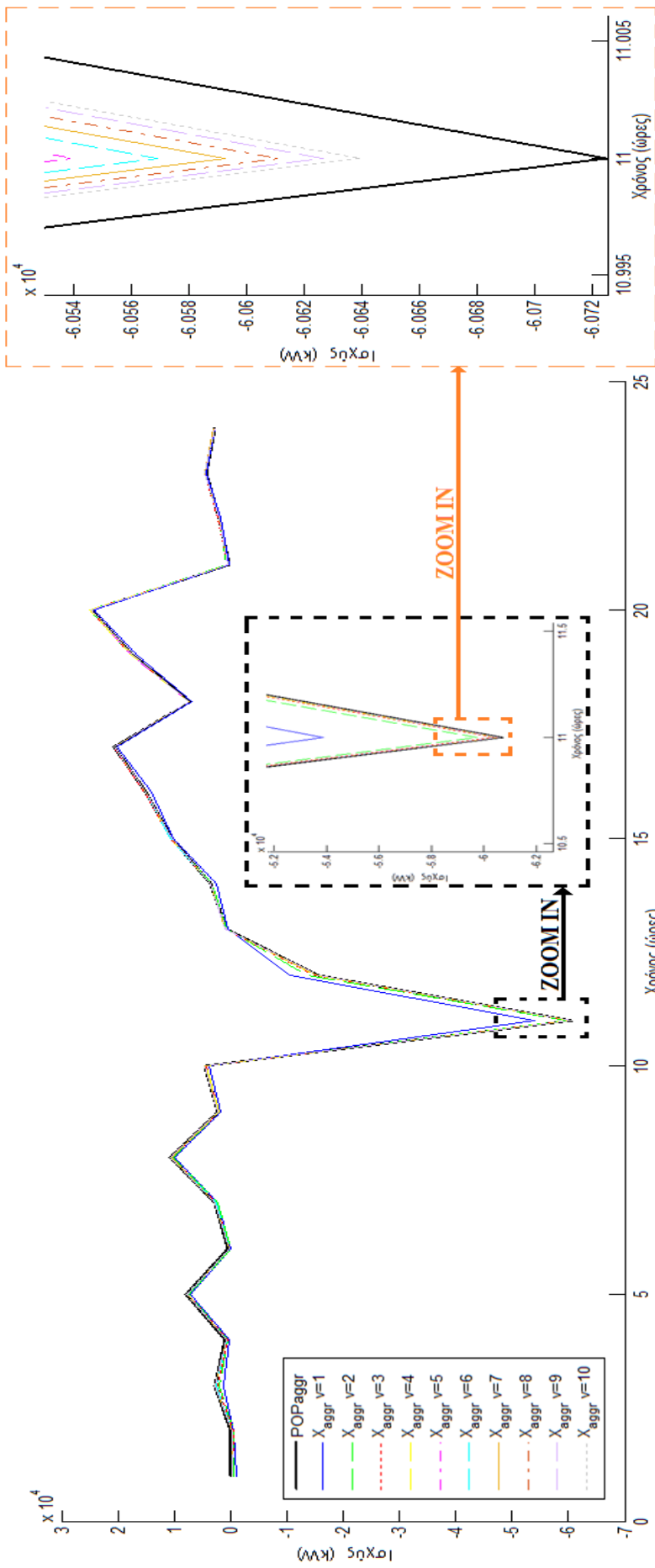
	Ημερήσια Κέρδη του Aggregator για UniV2G, [\$]	Ημερήσια Κέρδη του Aggregator για BiV2G, [\$]
Οι τιμές πώλησης των υπηρεσιών άνω και κάτω ρύθμισης είναι διαφορετικές (PRU, PRD) και δίνονται από τον Πίνακα 5.1.	<b>2659.3</b>	<b>27925,1</b>

Πίνακας 5.2.1. Συγκριτικός πίνακας ημερήσιου κέρδους του Aggregator σχετικά με UniV2G και BiV2G λειτουργία αντίστοιχα.

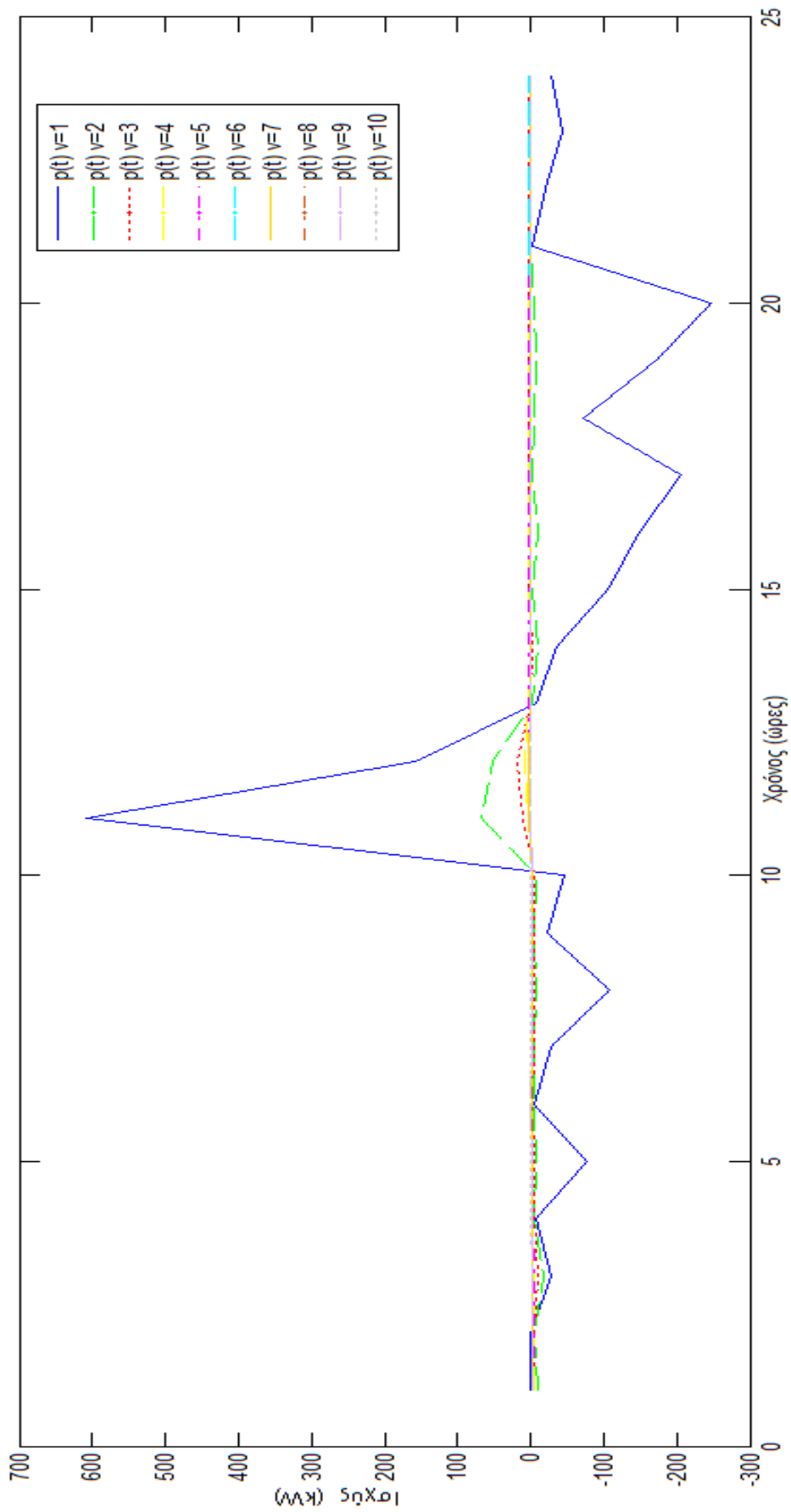
### 5.3 Αποτελέσματα αλγορίθμων ημέρας κατανομής (Dispatch)

Μετά την επίλυση του V2G Προγραμματισμού και την αποδοχή της προσφοράς του Aggregator από τον Διαχειριστή Συστήματος μια ημέρα πριν. Ο Aggregator καλείται να παρέχει την προσυμφωνηθείσα καμπύλη ζήτησης. Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αλγορίθμων κατανομής με την σειρά που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο.

#### 5.3.1 Αποτελέσματα Αλγόριθμου Φάσης 1. Αποκεντρωμένη ωριαία παρακολούθηση της προσυμφωνηθέντος ισχύος



Εικόνα 5.3.1. Αλγόριθμος κατανομής για την Φάση 1. Βλέπουμε ότι ο αλγόριθμος κατανέμει τα  $X_i(t)$  κατάλληλα μετά από δέκα επαναλήψεις  $n$  ( $n=1,2,\dots,10$ ), έτσι ώστε το άθροισμα τους να δίνει  $X_{aggr}(t) = \sum_{i=1}^{N_{ev}} X_i(t)$  που τείνει στο  $POP_{aggr}^{forecast}(t)$ . Όπως βλέπουμε το σφάλμα της  $10^{th}$  επανάληψης είναι μικρότερο από 15kW.

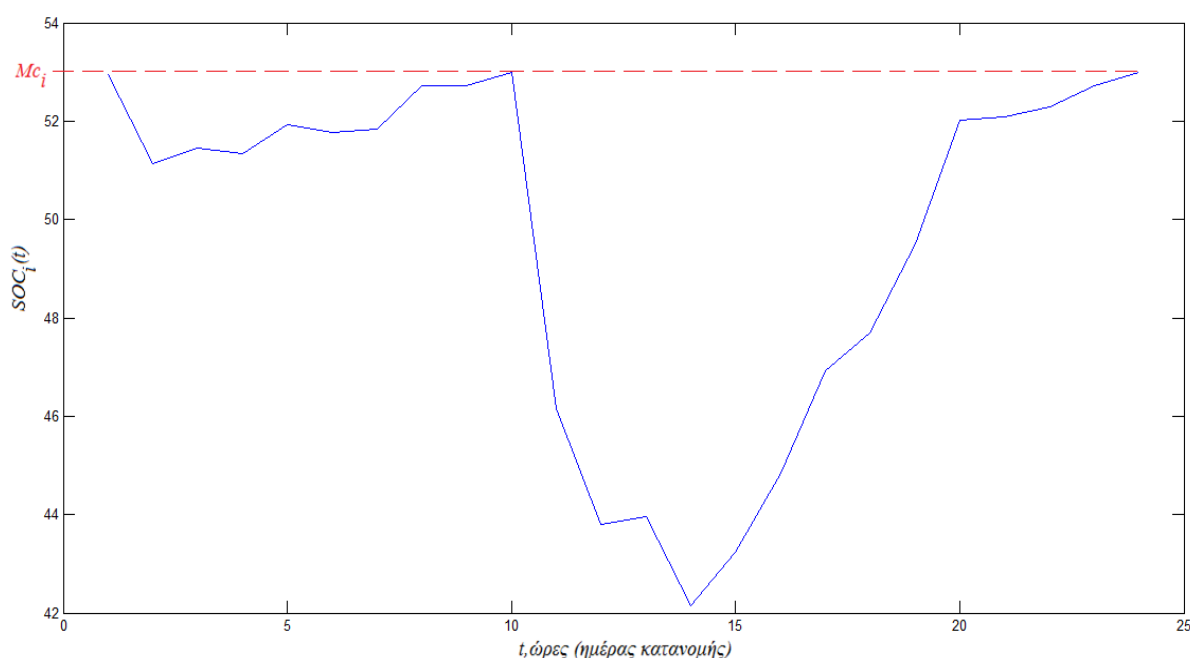


Εικόνα 5.3.2. Το διάγραμμα μας δείχνει πως μεταβάλλεται το σήμα ελέγχου (virtual price),  $p^v(t)$  σε κάθε επανάληψη. Βλέπουμε αρχικά η μεταβολές στις πρώτες επαναλήψεις είναι μεγάλες αλλά καθώς ο αλγόριθμος συγκλίνει στην λύση του, το σήμα ελέγχου μηδενίζεται.



Από τις εικόνες 5.3.1 και 5.3.2 παρατηρούμε τα αποτελέσματα του αλγόριθμου κατανομής για την φάση1 για μία τυχαία ώρα  $t$ . Βλέπουμε ότι ο αλγόριθμος τρέχει στην αρχή κάθε ώρας και υπολογίζει μετά από μερικές επαναλήψεις (~10) την βέλτιστη κατανομή ισχύος που πρέπει να γίνει στα οχήματα,  $X_i^{ev}(t)$  καθώς και το σήμα ελέγχου  $p(t)$  που πρέπει να στείλει ο Aggregator, ώστε η συνολική ισχύς να ταυτίζεται με αυτή που είχε δηλωθεί την προηγούμενη ημέρα,  $POP_{aggr}^{forecast}(t)$ . Επίσης πρέπει να σημειωθεί ότι παρόλο που ο αλγόριθμος κάθε ώρα υπολογίζει τις κατανομές και τα σήματα ελέγχου όλων των ωρών της ημέρας κατανομής, **η σημαντική πληροφορία βρίσκεται μόνο στην τρέχουσα ώρα** ενώ τα υπόλοιπα αποτελούν άχρηστη πληροφορία.

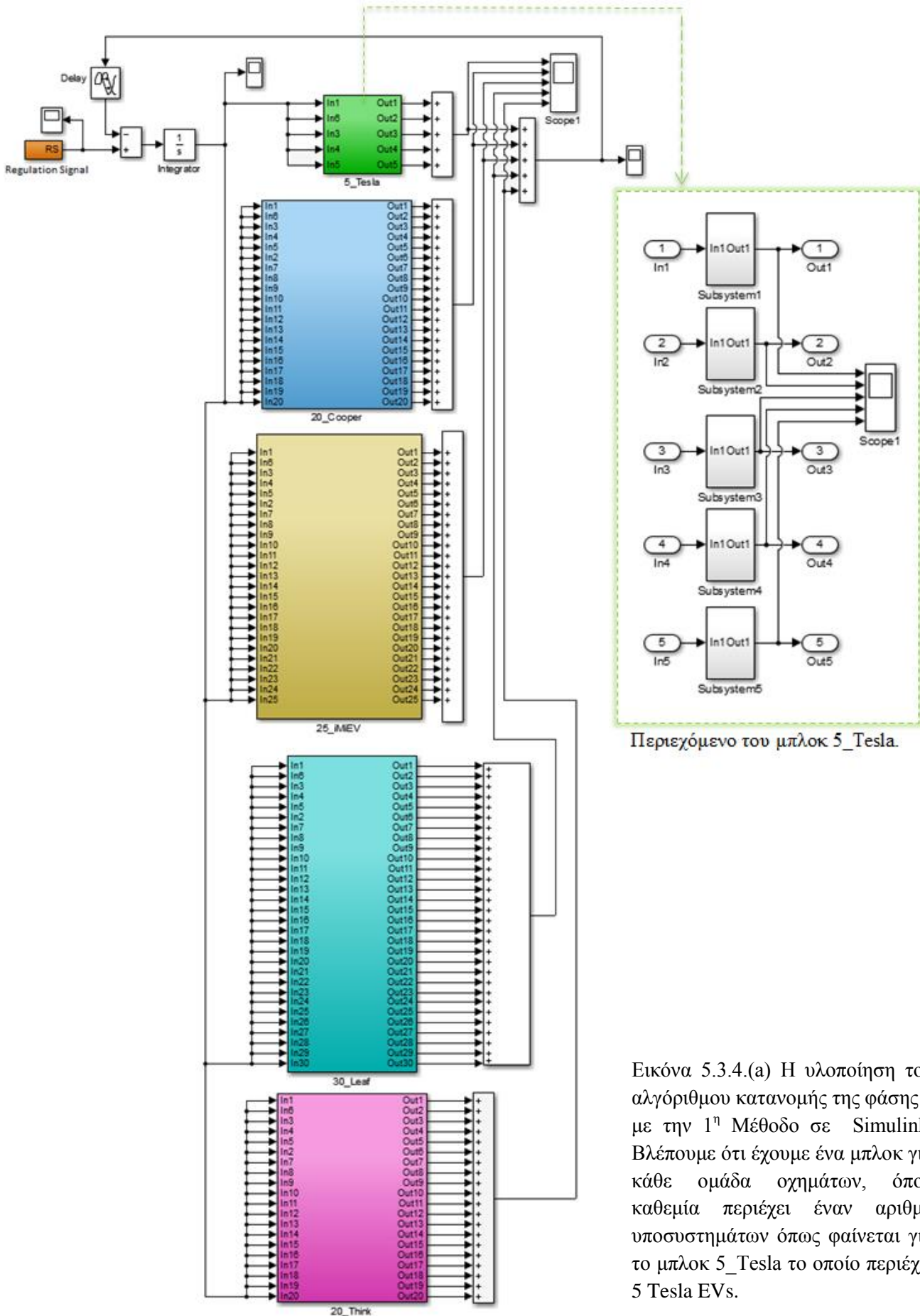
Η στάθμη φόρτισης  $SOC_i(t)$  ενός τυχαίου οχήματος φαίνεται στην εικόνα 5.3.3. Παρατηρούμε απότομη πτώση της στάθμης στα διαστήματα όπου το όχημα είναι αποσυνδεδεμένο από το δίκτυο και εκτελεί ταξίδι ενώ κατά την διάρκεια της V2G λειτουργίας η στάθμη μεταβάλλεται ομαλά λόγω του αποκεντρωμένου ελέγχου.



Εικόνα 5.3.3. Στάθμη φόρτισης τυχαίου ηλεκτρικού οχήματος (χωρίς να λάβουμε υπόψη τα σήματα ρύθμισης του Διαχειριστή Συστήματος).

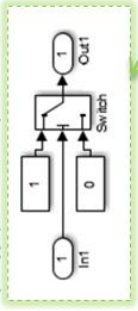
### 5.3.2 Αποτελέσματα της 1<sup>ης</sup> μεθόδου του Αλγόριθμου Φάσης 2

Ο αλγόριθμος πραγματοποιήθηκε στο περιβάλλον Simulink της Matlab και παρουσιάζεται στις εικόνες 5.3.4.(a) και 5.3.4.(b), όπου αναλύονται όλα τα μπλοκ που αναπτύχθηκαν. Στην συνέχεια, στις εικόνες 5.3.5 - 5.3.7 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

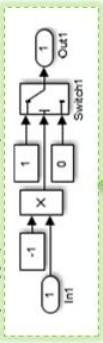


Εικόνα 5.3.4.(α) Η υλοποίηση του αλγορίθμου κατανομής της φάσης 2 με την 1<sup>η</sup> Μέθοδο σε Simulink. Βλέπουμε ότι έχουμε ένα μπλοκ για κάθε ομάδα οχημάτων, όπου καθεμία περιέχει έναν αριθμό υποσυστημάτων όπως φαίνεται για το μπλοκ 5\_Tesla το οποίο περιέχει 5 Tesla EVs.

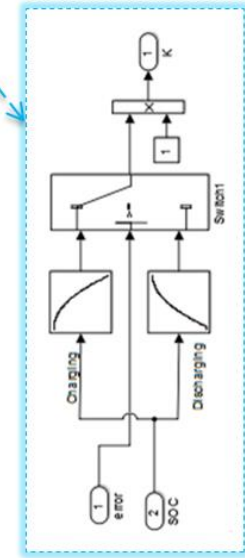
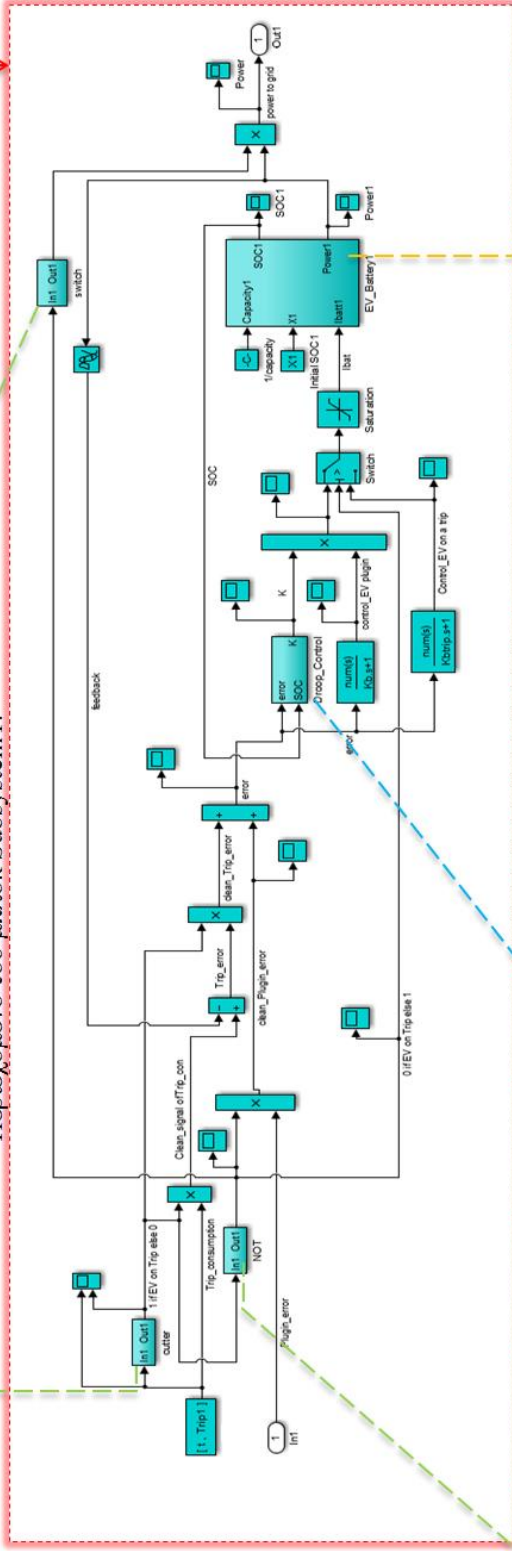
Περιεχόμενο του μπλοκ switch.



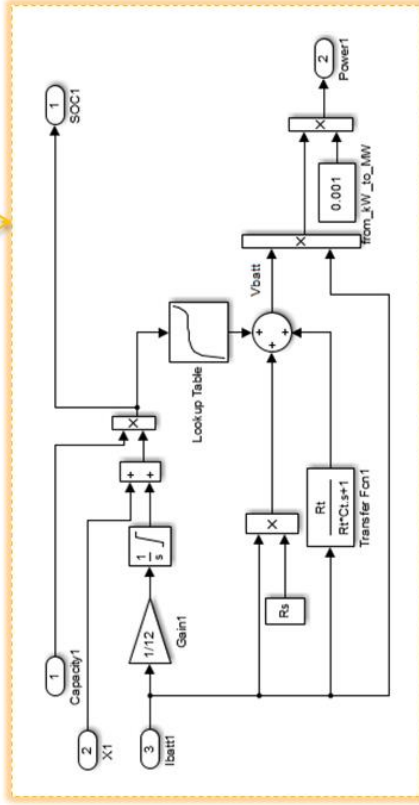
Περιεχόμενο του μπλοκ cutter.



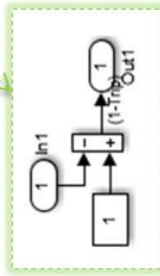
Περιεχόμενο του μπλοκ Subsystem 1.



Περιεχόμενο του μπλοκ Droop\_Control.

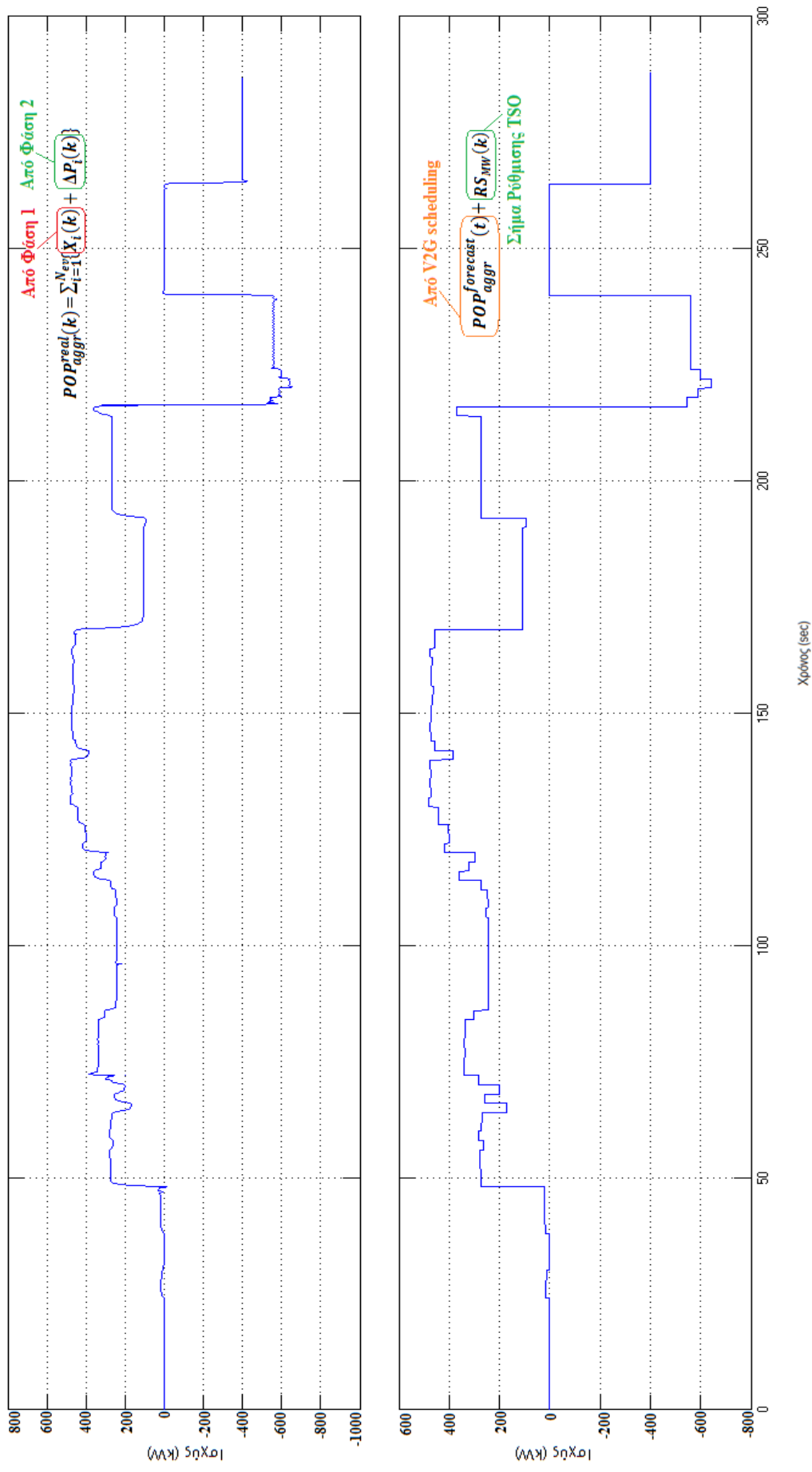


Περιεχόμενο του μπλοκ EV\_Battery1.

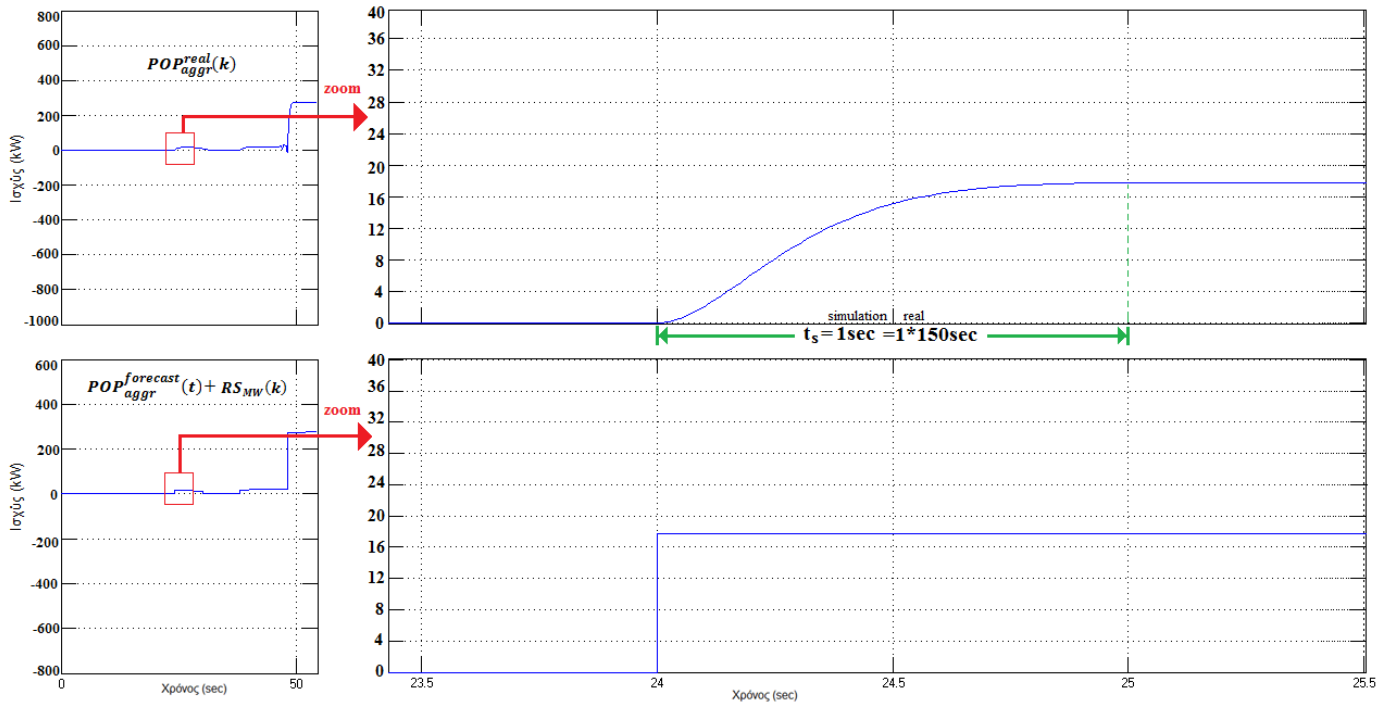


Περιεχόμενο του μπλοκ NOT.

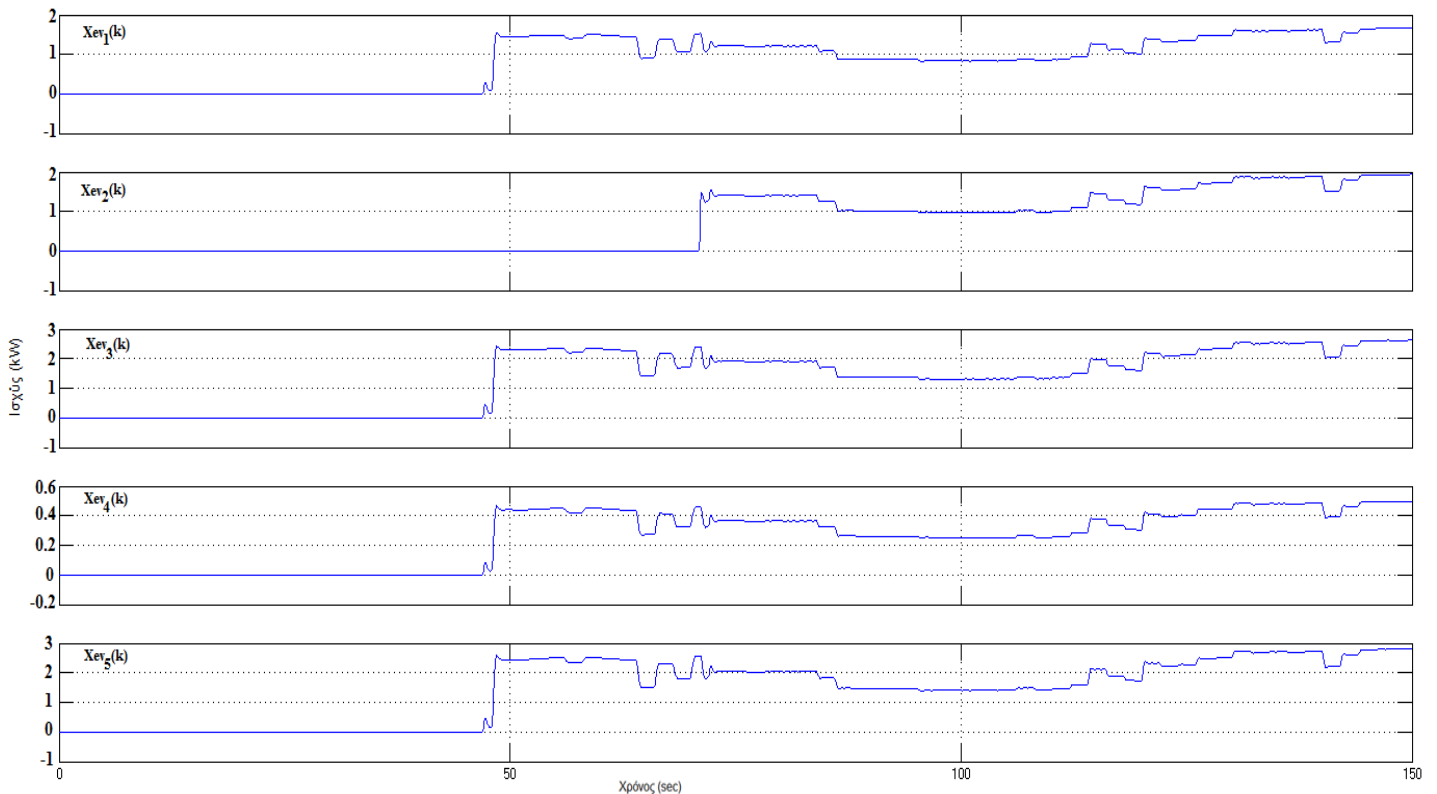
Εικόνα 5.3.4. (b) Η υλοποίηση του αλγόριθμου κατανομής της φάσης 2 με την 1<sup>η</sup> Μέθοδο σε Simulink. Ανάλυση του μπλοκ Subsystem, το οποίο προσομοιώνει την λειτουργία του οχήματος καθ' όλη την ημέρα κατανομής.



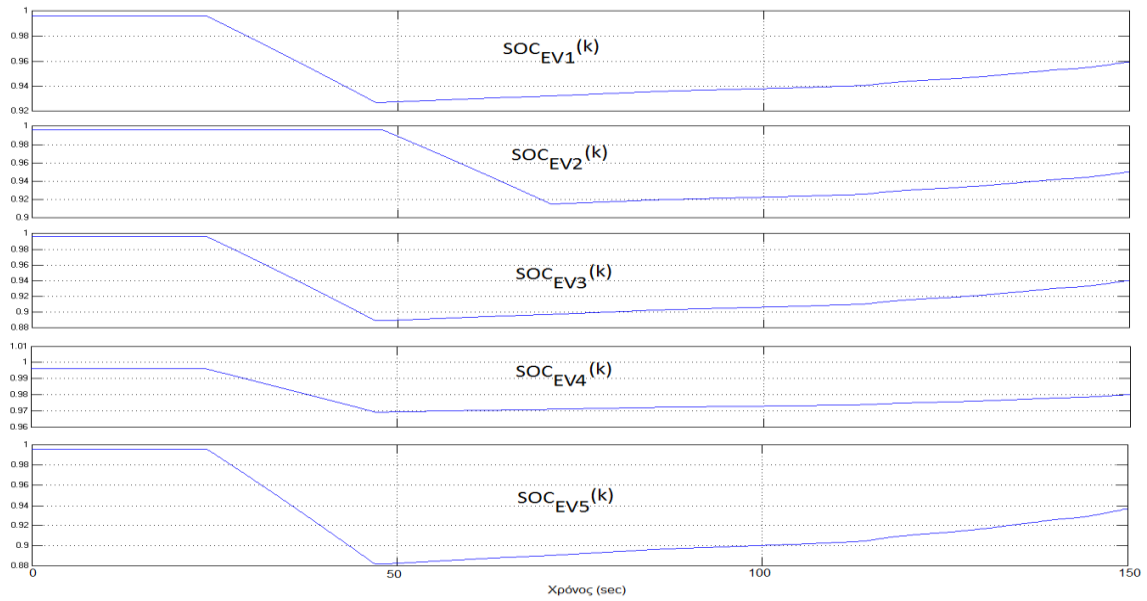
Εικόνα 5.3.5. Στην 1<sup>ο</sup> διαγραμμα βλέπουμε την πραγματική απόκριση ισχύος του Aggregator της ημέρας κατανομής, όπου ανά 5 λεπτά έρχονται σήματα ρύθμισης RS(k) από τον Διαχειριστή Συστήματος. Στο 2<sup>ο</sup> διάγραμμα φαίνεται η ιδανική απόκριση που θα είχαμε αν η σύγκλιση του αλγορίθμου δεν είχε μεγάλη καθυστέρηση. Έχουμε θεωρήσει ότι για χρόνο προσομοίωσης 2sec αντιστοιχούν 5 πραγματικά λεπτά, άρα τα 24sec προσομοίωσης είναι 1ώρα της ημέρας κατανομής.



Εικόνα 5.3.6. Παρατηρούμε ότι ο χρόνος αποκατάστασης είναι ίσος με  $t_s = 0.6sec$  επειδή για χρόνο προσομοίωσης 2 sec αντιστοιχούν  $5*60=300$  πραγματικά sec, ο πραγματικός χρόνος αποκατάστασης είναι  $t_s = 1 * (300/2) = 150sec$  δηλαδή  $2\frac{1}{2}$  λεπτά.



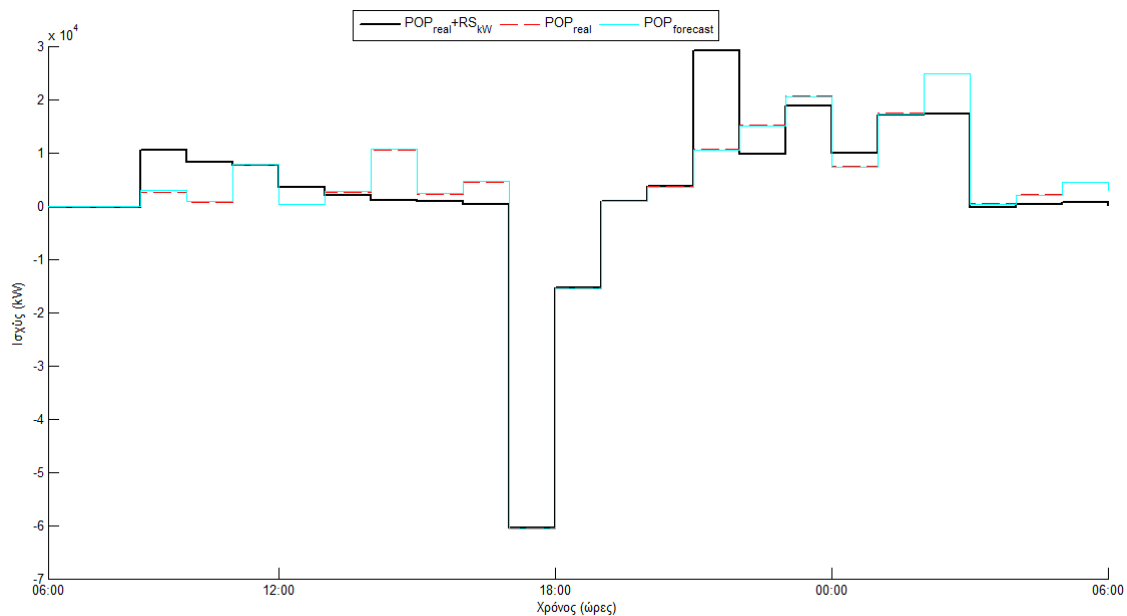
Εικόνα 5.3.7. Πραγματική Ισχύς Εξόδου των 5 πρώτων οχημάτων (Tesla) τις πρώτες 6 ώρες της ημέρας κατανομής. Έχουμε θεωρήσει ότι για χρόνο προσομοίωσης 2sec αντιστοιχούν 5 πραγματικά λεπτά, άρα τα 24sec προσομοίωσης είναι 1ώρα της ημέρας κατανομής.



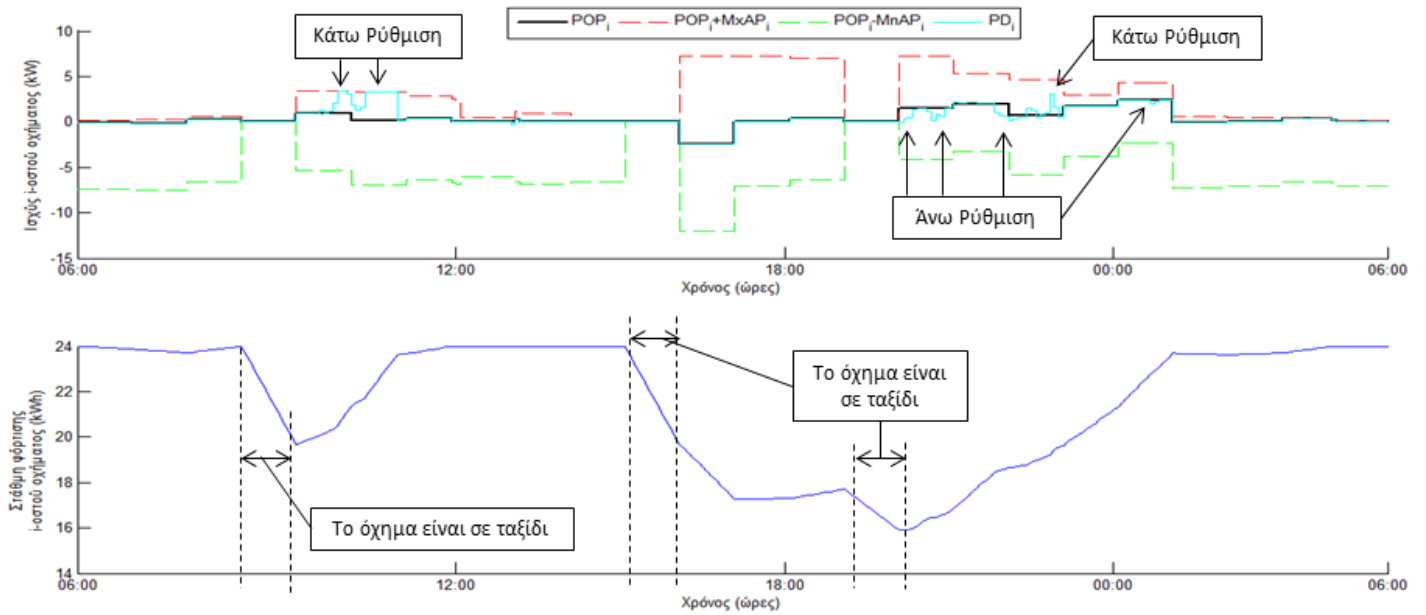
Εικόνα 5.3.8. Πραγματική στάθμη φόρτισης των 5 πρώτων οχημάτων (Tesla) τις πρώτες 6 ώρες της ημέρας κατανομής. Έχουμε θεωρήσει ότι για χρόνο προσομοίωσης 2sec αντιστοιχούν 5 πραγματικά λεπτά, άρα τα 24sec προσομοίωσης είναι 1ώρα της ημέρας κατανομής.

### 5.3.3 Αποτελέσματα της 2<sup>ης</sup> μεθόδου του Αλγόριθμου Φάσης 2

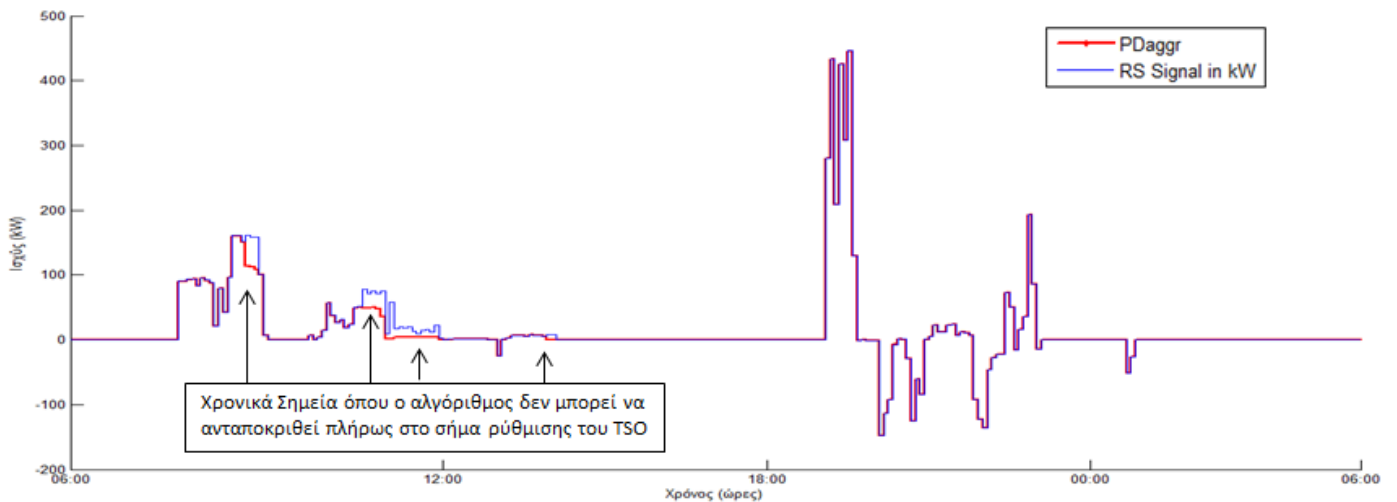
Ο αλγόριθμος πραγματοποιήθηκε με χρήση της γλώσσας Matlab. Τα αποτελέσματα του αλγόριθμου παρουσιάζονται στις εικόνες 5.3.8. και 5.3.10.



Εικόνα 5.3.8. Διάγραμμα προσυμφωνημένης βέλτιστης λειτουργίας (POPforecast) του Aggregator για όλες τις ώρες της ημέρας κατανομής, από GAMS. Διάγραμμα βέλτιστης λειτουργίας (POPreal) του Aggregator χωρίς σήματα ρύθμισης για όλες τις ώρες της ημέρας κατανομής, από Αλγόριθμο Κατανομής-Φάση1. Διάγραμμα βέλτιστης λειτουργίας (POPreal+RS) του Aggregator λαμβάνοντας υπόψη τα σήματα ρύθμισης για όλες τις ώρες της ημέρας κατανομής, από Αλγόριθμο Κατανομής (Φάση 1 και Φάση2 με χρήση της 2<sup>ης</sup> Μεθόδου).



Εικόνα 5.3.9. Πραγματική ισχύς εξόδου και πραγματική στάθμη φόρτισης τυχαίου οχήματος για όλες τις ώρες της ημέρας κατανομής με χρήση του αλγόριθμου κατανομής (Φάση 1 και Φάση2 με χρήση της 2<sup>ης</sup> Μεθόδου).



Εικόνα 5.3.10. Το διάγραμμα μας δείχνει το σήμα  $RS(k)$  σε kW ενώ το  $PD_{aggr}(k) = \sum_{i=1}^{N_{ev}} PD_i(k)$  είναι η μεταβολή που κάνει ο Aggregator γύρω από το  $X_{aggr}(t) = \sum_{i=1}^{N_{ev}} X_i(t)$  ανά  $k$  σε πραγματικό χρόνο για να ανταποκριθεί στο σήμα  $RS(k)$  που του αποστέλλει ο Διαχειριστής. Παρατηρούμε ότι σε ορισμένα σημεία τα οχήματα δεν μπορούν να μεταβάλλουν το σημείο λειτουργίας τους όσο χρειάζεται για να ταυτιστούν με το σήμα ρύθμισης, αλλά προσπαθούν να την προσεγγίσουν όσο το δυνατόν καλύτερα.

Η μεταβολή  $PD_{aggr}(k) = \sum_{i=1}^{N_{ev}} PD_i(k)$  που πρέπει να κάνει ο Aggregator κάθε  $k$  χρονικά διαστήματα γύρω από το βέλτιστο σημείο λειτουργίας του,  $X_{aggr}(t) = \sum_{i=1}^{N_{ev}} X_i(t)$ , πρέπει να ανταποκρίνεται στο σήμα RS του διαχειριστή. Το σήμα RS σε kW θα είναι,

$$RS_{kW}(k) = \begin{cases} RS(k) * MxAP_{aggr}^{forecast}(k) \\ RS(k) * MnAP_{aggr}^{forecast}(k) \end{cases}$$

,όπου  $RS(k)$  είναι σε ανά μονάδα και τα  $MxAP_{aggr}^{forecast}(k)$ ,  $MnAP_{aggr}^{forecast}(k)$  είναι σε kW και είναι σταθερά για τα  $k$  της αντίστοιχης ώρας. Άρα ο διαχειριστής ζητάει ισχύ με βάση της εκτιμούμενες τιμές και όχι τις πραγματικές. Όμως λαμβάνοντας υπόψη τα πραγματικά περιθώρια ρύθμισης, τα οποία δεν μπορούμε να γνωρίζουμε από πριν, ο Aggregator δεν μπορεί να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις του Διαχειριστή σε κάθε σημείο. Στα σημεία όπου δεν είναι δυνατή η ταύτιση η μεταβολή είναι τέτοια ώστε το σφάλμα να είναι το ελάχιστο δυνατό, όπως βλέπουμε και στην εικόνα 5.3.10.

## 6 Σύνοψη και Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία μελετήσαμε τις δυο κατηγορίες V2G λειτουργίας των ηλεκτρικών οχημάτων. Στην UniV2G λειτουργία τα συνδεδεμένα στο δίκτυο οχήματα μπορούν να λειτουργούν μόνο ως φορτία, ενώ στην BiV2G τα οχήματα μπορούν να λειτουργούν και σαν μικρές μονάδες παραγωγής.

Στην συνέχεια, υιοθετώντας κάθε φορά μια από τις δυο V2G λειτουργίες, αναπτύξαμε δυο αλγόριθμους V2G προγραμματισμού. Έναν εκ των δυο αλγόριθμων θα χρησιμοποιεί ο Aggregator μια ημέρα πριν (Ημέρα Προγραμματισμού – Day Ahead Scheduling), για να επιλύει το πρόβλημα μεγιστοποίησης του κέρδους του. Η λύση του προβλήματος μας δίνει τις βέλτιστες ποσότητες ισχύος που θα πρέπει να πάρει ο Aggregator από το δίκτυο (ή και να δώσει στο δίκτυο αν μιλάμε για BiV2G) ικανοποιώντας μια πληθώρα περιορισμών έτσι ώστε να αυξήσει τα ημερήσια κέρδη του. Το πρόβλημα μεγιστοποίησης είναι διαφορετικό για UniV2G και για BiV2G και η διαφορά αυτή προέρχεται από την διαφορετική φιλοσοφία των δυο λειτουργιών, η οποία εισέρχεται τόσο στους περιορισμούς όσο και στην ίδια την αντικειμενική συνάρτηση.

Για την σύγκριση των δυο λειτουργιών υλοποιήθηκαν οι δυο αλγόριθμοι στην γλώσσα GAMS και εξετάστηκαν τα αποτελέσματα τους θέτοντας ίδια δεδομένα εισόδου. Παρατηρήσαμε, όπως ήταν αναμενόμενο, ότι η BiV2G δίνει περίπου 10 φορές μεγαλύτερο ημερήσιο κέρδος από την UniV2G λόγω της ικανότητας να παρέχει περισσότερες και με μεγαλύτερο εύρος τιμών επικουρικές υπηρεσίες.

Στο υπόλοιπο μισό της εργασίας θεωρήθηκε ότι η προσφορά που υπέβαλε ο Aggregator κατά τον ημερήσιο προγραμματισμό έγινε δεκτή από τον διαχειριστή του συστήματος. Άρα, ο Aggregator καλείται σε πραγματικό χρόνο (Ημέρα Κατανομής – Dispatch Day), να δώσει τις προσυμφωνηθέντες ποσότητες. Για τον σκοπό αυτό αναπτύχθηκε ένα πακέτο αλγορίθμων και η διαδικασία της κατανομής χωρίστηκε σε δυο φάσεις.



Στην 1<sup>η</sup> φάση, ένας αλγόριθμος τρέχει κάθε ώρα της ημέρας κατανομής επιλύοντας ένα πρόβλημα βέλτιστου αποκεντρωμένου έλεγχου του στόλου των ηλεκτρικών οχημάτων, με σκοπό την παρακολούθηση της προσυμφωνηθείσας λειτουργίας του Aggregator.

Για την 2<sup>η</sup> φάση, ο αλγόριθμος πρέπει να τρέχει περιοδικά (π.χ. κάθε 5 λεπτά) την ημέρα κατανομής ακριβώς μετά τον αλγόριθμο της φάσης 1, υπολογίζοντας τα νέα σημεία λειτουργίας των οχημάτων λαμβάνοντας υπόψη τα σήματα ρύθμισης που στέλνει ο διαχειριστής του δικτύου. Για την 2<sup>η</sup> φάση αναπτύχθηκαν δυο μέθοδοι υλοποίησης.

Στην 1<sup>η</sup> μέθοδο της 2<sup>ης</sup> φάσης εφαρμόστηκε αποκεντρωμένος έλεγχος με συνδυασμό κλασικού και προσαρμοστικού ελέγχου (Adaptive Droop Control). Ο Διαχειριστής αποστέλλει τα σήματα ρύθμισης τα οποία προωθεί ο Aggregator στα οχήματα σαν σφάλμα του συστήματος από την κατάσταση σωστής λειτουργίας, έτσι τα οχήματα αντιδρούν με σκοπό τον μηδενισμό του (Κλασικός Έλεγχος). Η απόκριση του κάθε οχήματος προσαρμόζεται βάση της στάθμης της μπαταρίας τους, η λειτουργία αυτή γίνεται σε πραγματικό χρόνο με την υιοθέτηση ενός προσαρμοστικού ελεγκτή σε κάθε όχημα (Προσαρμοστικός Έλεγχος). Η μέθοδος αυτή αν και προτείνεται από την βιβλιογραφία, έχει σημαντικό χρόνο καθυστέρησης (2½ λεπτά) όπως παρατηρήθηκε από τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις. Το πρόβλημα αυτό μπορεί να αμεληθεί με την χρήση τηλεπικοινωνιών τρίτης γενιάς (πχ 4G), παρόλα αυτά προτείνεται μια δεύτερη μέθοδος η οποία συγκλίνει σε 2 βήματα, καθιστώντας την λιγότερο εξαρτώμενη από την ταχύτητα των σημάτων επικοινωνίας.

Στην 2<sup>η</sup> μέθοδο της 2<sup>ης</sup> φάσης εφαρμόστηκε αποκεντρωμένος έλεγχος χωρίς την χρήση αποκεντρωμένου έλεγχου. Ο Διαχειριστής αποστέλλει τα σήματα ρύθμισης τα οποία μετατρέπει ο Aggregator σε σήματα ισχύος λαμβάνοντας υπόψη τα πραγματικά περιθώρια ρύθμισης που έχει το κάθε όχημα (1<sup>ο</sup> Βήμα). Άρα η προσαρμογή της ισχύος του κάθε οχήματος γίνεται από τα σήματα που αποστέλλει ο Aggregator κάθε 5 λεπτά καθιστώντας την χρήση προσαρμοστικών ελεγκτών περιττή. Μετά την αποστολή των σημάτων τα οχήματα προσαρμόζουν την ισχύ τους για την παροχή της επιθυμητής υπηρεσίας (2<sup>ο</sup> Βήμα).

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΚΑΙ ΔΙΚΤΥΑΚΟΙ ΤΟΠΟΙ

[1] Daniel S. Kirschen and Goran Strbac, Fundamentals of Power System Economics, Wiley Interscience, 2004, ISBN: 0-470—84572-4

[2] Steven Stoft, Power System Economics: Designing Markets for Electricity, Wiley Interscience, 2002, ISBN: 0-471-15040-1

[3] Arthur Mazer, Electric Power Planning for Regulated and Deregulated Market, Wiley Interscience, 2007, ISBN: 978-0-470-11882-5

[4] Ε. Λεκάτσας, «Η Αγορά Ηλεκτρισμού στην Ελλάδα Ρυθμιστικό Πλαίσιο, Ανταγωνισμός και Ασφάλεια Εφοδιασμού», Ημερίδα: Η σημερινή θέση και το μέλλον της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα, Αθήνα 2009

[5] Β. Παπαδιάς, Γ. Κονταξής «Ηλεκτρική Οικονομία», Εκδόσεις Ε.Μ.Π, Αθήνα 2003

[6] Κυριάκος Ζιζάς «Η συμβολή των Υδροηλεκτρικών Σταθμών στις Επικουρικές Υπηρεσίες Διασυνδεδεμένου Συστήματος», Προσυνεδριακή Εκδήλωση ΤΕΕ και του Περιφερειακού Τμήματος Ηπείρου, Μάρτιος 2009

[7] Α. Αντωνιάδης «Τρόποι εκκαθάρισης αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας - Εφαρμογή στο ηλεκτρικό δίκτυο της Κρήτης», διπλωματική εργασία, Ε.Μ.Π, Αθήνα 2012

[8] Δ. Χατζηγιάννης «Μελέτη υπολογισμού οριακής τιμής συστήματος και τιμών εκκαθάρισης επικουρικών υπηρεσιών», διπλωματική εργασία, Ε.Μ.Π, Θεσσαλονίκη 2009

[9] R. Rosenthal, “GAMS-A user’s guide”, [Online]. Διαθέσιμο: <http://www.gams.com/docs/document.htm>, 19/12/2012

[10] Mathworks, “Getting started with Matlab”, [Online]. Διαθέσιμο: <http://www.mathworks.com/help/matlab/index.html>, 2014

[11] Mathworks, “Matlab Programming Fundamentals”, [Online]. Διαθέσιμο: <http://www.mathworks.com/help/matlab/index.html>, 2014

[12] Ε. Παπαδόπουλος «Εγχειρίδιο MATLAB SIMULINK», Εκδόσεις Ε.Μ.Π, Αθήνα 2012

[13] Γ. Συρκος, Ι. Κούκος «Εισαγωγή στη Σχεδίαση Συστημάτων Ελέγχου με το Matlab», Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα 2005, ISBN: 960-91339-3-2

[14] <http://www.udel.edu/V2G/conventionalview.html>, 27/11/2012

- [15] W. Kempton, J. Tomic, S. Letendre, A. Brooks, T. Lipman, —Vehicle-to-Grid Power: Battery, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles as Resources for Distributed Electric Power in California, California Air Resources Board, California Environmental Protection Agency, Ιούνιος 2001
- [16] <http://www.udel.edu/V2G/V2Gconcept.html>, 27/11/2012
- [17] E. Sortomme, M.A. El-Sharkawi, "Optimal Charging Strategies for Unidirectional Vehicle-to-Grid," Smart Grid, IEEE Transactions vol.2, no.1, Μάρτιος 2011
- [18] Δ. Sortomme, M.A. El-Sharkawi, "Optimal Scheduling of Vehicle-to-Grid Energy and Ancillary Services," Smart Grid, IEEE Transactions, vol.3, no.1, Μάρτιος 2012
- [19] W. Kempton, J. Tomic, "Vehicle-to-grid power fundamentals: Calculating capacity and net revenue," J. Power Sources, vol. 144, no. 1, 1 Ιουνίου 2005
- [20] W. Kempton, T. Kubo, «Electric-drive vehicles for peak power in Japan», Energy Policy, Volume 28, Issue 1, 1 Ιανουαρίου 2000
- [21] C. Guille, G. Gross, —A conceptual framework for the vehicle-to-grid (V2G) implementation, Energy Policy, Volume 37, Issue 11, Νοέμβριος 2009
- [22] C. D. White, K. M. Zhang, —Using vehicle-to-grid technology for frequency regulation and peak-load reduction, Journal of Power Sources, Volume 196, Issue 8, 15 Απριλίου 2011
- [23] PJM, <http://www.pjm.com/markets-and-operations/ancillaryservices/synchronized-service.aspx>, 29/11/2012
- [24] M. Rivier, T. Gomez, R. Cossent, I. Momber, —New actors and business models for the integration of EV in power systems, Deliverable 5.1, Project MERGE, 4 Φεβρουαρίου 2011
- [25] C. Quinn, D. Zimmerle, T. Bradley, —The effect of communication architecture on the availability, reliability, and economics of plug-in hybrid electric vehicle-to-grid ancillary services, Journal of Power Sources, Volume 195, Issue 5, 1 Μαρτίου 2010
- [26] A. Brooks, S. Thesen, "PG&E and Tesla Motors: Vehicle to Grid demonstration and evaluation program", Proc. EVS-23, 2007
- [27] J.J. Escudero-Garzas, A. Garcia-Armada, G. Seco-Granados, "Fair Design of Plug-in Electric Vehicles Aggregator for V2G Regulation," IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol.61, no.8, Οκτώβριος 2012
- [28] D. Dallinger, D. Krampe, M. Wietschel, "Vehicle-to-grid regulation reserves based on a dynamic simulation of mobility behavior," IEEE Trans. Smart Grid, vol. 2, no. 2, Ιούνιος 2011

- [29] S. B. Peterson, J. F. Whitacre, J. Apt, “The economics of using plug-in hybrid electric vehicle battery packs for grid storage,” *J. Power Sources*, vol. 195, no. 8, Αύγουστος 2009
- [30] S. B. Peterson, J. Apt, J. F. Whitacre, “Lithium-ion battery cell degradation resulting from realistic vehicle and vehicle-to-grid utilization,” *J. Power Sources*, vol. 195, no. 8, 10 Νοεμβρίου 2009
- [31] P.C. Kundur, *Power System Stability and Control*, New York, Toronto: McGraw-Hill, 1994
- [32] Mohammadreza F. M. Arani, Student Member, IEEE, Yasser. A. Ibrahim-Mohamed, Senior Member, IEEE, and Ehab F. El-Saadany, Senior Member, IEEE, “Analysis and Mitigation of the Impacts of Asymmetrical Virtual Inertia,” *IEEE PES Transactions on Power Systems*, NOV 2013
- [33] Lingwen Gan, Ufuk Topcu, and Steven H. Low, “Optimal Decentralized Protocol for Electric Vehicle Charging,” *IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS*, VOL. 28, NO. 2, MAY 2013
- [34] “Σύγχρονα Συστήματα Αυτομάτου Ελέγχου”, Richard C. Dorf, Robert H. Bishop, 11<sup>η</sup> Έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα.
- [35] 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