



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

**Βελτιστοποίηση κόστους και ποιότητας ζωής των μπαταριών
συστήματος V2G μέσω χρήσης Ενισχυτικής Μηχανικής
Μάθησης**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΝΤΩΝΙΟΣ Μ ΒΑΛΜΑΣ

Επιβλέπων : Εμμανουήλ Βαρβαρίγος
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2021



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Βελτιστοποίηση κόστους και ποιότητας ζωής των μπαταριών συστήματος V2G μέσω χρήσης Ενισχυτικής Μηχανικής Μάθησης

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΝΤΩΝΙΟΣ Μ ΒΑΛΜΑΣ

Επιβλέπων : Εμμανουήλ Βαρβαρίγος

Καθηγητής Ε.Μ.Π

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 9^η Σεπτεμβρίου 2021

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2021

.....

Εμμανουήλ Βαρβαρίγος

Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....

Θεοδώρα Βαρβαρίγου

Καθηγήτρια Ε.Μ.Π

.....

Συμεών Παπαβασιλείου

Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....

Αντώνιος Μ. Βαλμάς

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

Copyright © Αντώνιος Βαλμάς, 2021

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματική είναι η βελτιστοποίηση του ελεγχόμενου συστήματος αμφίδρομης φόρτισης ως προς το κόστος φόρτισης αλλά και τη φθορά που προκαλείται στην μπαταρία. Αρχικά γίνεται εισαγωγή στην έννοια των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, στη φύση τους καθώς και τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα που έχουν. Ύστερα παρουσιάζουμε τη μορφή της αγοράς ενέργειας και πως αυτή έχει τη δυνατότητα ρύθμισης και ελέγχου των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Επιπλέον, κάνουμε μια μικρή εισαγωγή στη λειτουργία των ηλεκτρικών οχημάτων, στους λόγους φθοράς των μπαταριών τους καθώς και στους τρόπους που αυτή μπορεί να μειωθεί μέσα από ελεγχόμενα συστήματα φόρτισης όπως το σύστημα έξυπνου φορτιστή, και τα συστήματα αμφίδρομης φόρτισης. Ολοκληρώνουμε την εισαγωγή μας αναφέροντας την ενισχυτική μάθηση και συγκεκριμένα τη λειτουργία δύο βασικών αλγορίθμων: τη βαθιά Q-μάθηση και τη διπλή βαθιά Q-μάθηση. Παρουσιάζουμε την υλοποίηση του περιβάλλοντος μας, η οποία έχει ως στόχο την απλοποίηση της διαδικασίας αποφάσεων δίνοντας στο σύστημα τη δυνατότητα να πάρει αποφάσεις για το σύνολο του πάρκινγκ και όχι για κάθε όχημα ξεχωριστά. Με τον τρόπο αυτό έχουμε τη δυνατότητα εφαρμογής τους αλγορίθμου μας σε οποιοδήποτε πάρκινγκ ανεξάρτητα από τον αριθμό των εισερχόμενων οχημάτων. Για το παραπάνω περιβάλλον δημιουργούμε τρεις πολιτικές: Μια πολιτική έξυπνου φορτιστή, μια απλοποιημένη πολιτική αμφίδρομης φόρτισης και μια βελτιστοποιημένη πολιτική αμφίδρομης φόρτισης κάνοντας χρήση του αλγορίθμου διπλής βαθιάς Q-μάθησης. Τέλος, συγκρίνουμε τα αποτελέσματα των τριών αυτών διαφορετικών πολιτικών προκειμένου να συμπεράνουμε αν η ενισχυτική μάθηση μπορεί να συμβάλει στη βελτιστοποίηση του V2G συστήματος.

Λέξεις-κλειδιά: Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, Αγορά ηλεκτρικής ενέργειας, Αγορά της επόμενης ημέρας, Ενδοημερήσια αγορά, Ηλεκτρικά οχήματα, Φθορά μπαταρίας, Συστήματα ελεγχόμενης φόρτισης, Έξυπνος φορτιστής, Αμφίδρομη φόρτιση, Ενισχυτική μάθηση, Βαθιά Q-μάθηση, Διπλή βαθιά Q-μάθηση, Μαρκοβιανή διαδικασία απόφασης, Βελτιστοποίηση

Abstract

The purpose of this thesis is to optimize the controlled two-way charging system (V2G) in terms of charging costs and damage caused to the battery. Firstly, we introduce the concept of renewable energy sources, their nature as well as the advantages and disadvantages they have. Then we present the energy market and how it has the ability to regulate and control the renewable energy sources. In addition, we make a brief introduction to the operation of electric vehicles, the reasons for the wear of their batteries and the ways in which it can be reduced through controlled charging systems such as the smart charger system (V1G), and two-way charging systems (V2G, V2V etc.). We conclude our introduction by mentioning reinforcement learning and in particular the operation of two basic algorithms: deep Q-learning and double deep Q-learning. We present the implementation of our environment, which aims to simplify the decision process by enabling the system to make decisions for the entire parking lot and not for each vehicle separately. In this way we have the ability to apply our algorithm in any parking lot regardless of the number of incoming vehicles. For the above environment we create three policies: A smart charger policy, a simplified two-way charging policy and an optimized two-way charging policy using the double deep Q-learning algorithm. Finally, we compare the results of these three different policies in order to conclude whether reinforcement learning can contribute to the optimization of the V2G system.

Keywords: Renewable energy sources, Electric energy market, Day ahead market, intraday market, Electrical vehicles (EV), Battery degradation, Controlled charging Systems, V1G, V2G, V2V, Smart charger, Two-way charging, Reinforcement learning, Deep Q-learning, Double Deep Q-learning, Markov decision process, Optimization

Ευχαριστίες

Η διπλωματική αυτή εργασία σηματοδοτεί την ολοκλήρωση ενός σημαντικού επιτεύγματός στην ζωή μου, την ολοκλήρωση των προπτυχιακών μου σπουδών. Επομένως σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω μερικούς ανθρώπους, οι οποίοι με βοήθησαν, ο καθένας με το δικό του τρόπο, για να φτάσω μέχρι εδώ.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Εμμανουήλ Βαρβαρίγο, ο οποίος μου έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθώ με το συναρπαστικό αυτό θέμα, καθώς και την βοήθεια του καθ' όλη τη διάρκεια της διπλωματικής μου εργασίας. Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω τον διδάκτορα Γεώργιο Τσαούσογλου, ο οποίος ήταν εκεί για να με βοηθήσει να ξεκαθαρίσω το θέμα στο μυαλό μου και να μου λύσει οποιαδήποτε απορία ή δυσκολία εμφανιζόταν. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την υποψήφια διδάκτορα Αικατερίνη Μητροπούλου, η οποία με βοήθησε με όλες τις απορίες μου πάνω στα νευρωνικά δίκτυα και την μηχανική μάθηση.

Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους μου, Ισαβέλλα Κουκουλά, Παναγιώτη Λουλάκη και Ιωσήφ-Γεώργιο Παναγιωτόπουλο για την βοήθεια τους και την συμπαράσταση τους σε δυσκολίες που εμφανίστηκαν κατά την διάρκεια των σπουδών μου. Επιπλέον θα ήθελα να τους ευχαριστήσω και για όλες τις καλές στιγμές και όλα τα γέλια που είχαμε μαζί.

Πάνω από όλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου. Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον αδελφό μου Νικόλαο Βαλμά για τις συμβουλές που μου έδινε για τις σπουδές μου. Θα ήθελα, επίσης, να ευχαριστήσω την αδελφή μου Στεφανή Βαλμά που με βοήθησε να βρω τα πατήματα για να συνεχίσω την καριέρα μου. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου Μιχαήλ Βαλμά και Ευτυχία Μαλταμπέ, οι οποίοι ήταν κοντά μου σε όλες μου τις

Περιεχόμενα

Περίληψη	5
Abstract	7
Ευχαριστίες	9
Κατάλογος Εικόνων.....	13
Εισαγωγή.....	14
Αντικείμενο της εργασίας	15
Δομή διπλωματικής	16
Κεφάλαιο 1, Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.....	18
Εισαγωγή.....	19
Η σημασία της ανανεώσιμης ενέργειας.....	19
Είδη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας	21
Κεφάλαιο 2, Αγορά ηλεκτρικής ενέργειας	26
Εισαγωγή.....	27
Στόχοι των αγορών ηλεκτρικής ενέργειας.....	27
Η δομή αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας.....	28
Κεφάλαιο 3, Ηλεκτρικά οχήματα	40
Εισαγωγή.....	41
Είδη ηλεκτρικών οχημάτων	41
Φθορά μπαταριών ιόντων λιθίου.....	46
Είδη φορτιστών ηλεκτρικών οχημάτων.....	48
Τεχνολογίες ελεγχόμενης φόρτισης	49
Κεφάλαιο 4, Ενισχυτική Μάθηση	54
Εισαγωγή.....	55
Βασικές έννοιες.....	55
Βασική λειτουργία	57
Deep Q-Learning	60
DDQN	61
Κεφάλαιο 5, Περιβάλλον	64
Εισαγωγή.....	65
Κατάσταση	65
Δράση.....	71

Μετάβαση.....	71
Reward	77
Καμπύλη τιμής ενέργειας	80
Σύνολο Παρατήρησης.....	80
Πολιτικές.....	82
Κεφάλαιο 6, Αποτελέσματα.....	86
Εισαγωγή.....	87
Πειράματα	87
Συμπεράσματα.....	100
Επόμενα βήματα.....	100
Πηγαίος κώδικας.....	101
Βιβλιογραφία	102

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1: Η δομή της Ουκρανικής αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας	29
Εικόνα 2: Καμπύλη ζήτησης αποθεμάτων.....	34
Εικόνα 3 Μια απλοποιημένη αναπαράσταση των εσωτερικών στοιχείων ενός πλήρους ηλεκτρικού οχήματος.....	42
Εικόνα 4 Μια απλοποιημένη αναπαράσταση των εσωτερικών στοιχείων ενός υβριδικού οχήματος	44
Εικόνα 5 Μια απλοποιημένη αναπαράσταση των εσωτερικών στοιχείων ενός οχήματος με κυψέλες καυσίμου.....	45
Εικόνα 6 Ποιοτική καμπύλη φθοράς διαθέσιμης χωρητικότητας της μπαταρίας ιόντων λιθίου ως συνάρτηση του χρόνου.....	47
Εικόνα 7 Σχηματική αναπαράσταση του παραδείγματος με το χωράφι	56
Εικόνα 8 Γενική σχηματική αναπαράσταση της ενισχυτικής μάθησης.....	56
Εικόνα 9 Σχηματική αναπαράσταση ενός on-policy αλγορίθμου	58
Εικόνα 10 Σχηματική αναπαράσταση ενός off-policy αλγορίθμου	58
Εικόνα 11 Σχηματική αναπαράσταση ενός offline αλγορίθμου.....	59
Εικόνα 12 Καμπύλη φόρτιση/αποφόρτισης την χρονική στιγμή $t=0$	67
Εικόνα 13 καμπύλη φόρτισης/αποφόρτισης την χρονική στιγμή $t=4$, με $BC_{4,1} = 85KWh$	68
Εικόνα 14 Διάγραμμα εμβαδών των καμπυλών φόρτισης/αποφόρτισης για ένα όχημα.....	76
Εικόνα 15 Φθορά μπαταρίας ως συνάρτηση των κύκλων φόρτισης με διαφορετικούς ρυθμούς φόρτισης	78
Εικόνα 16 Ημερολογιακή φθορά μπαταρίας σε διάφορα επίπεδα φόρτισης και θερμοκρασίας	79
Εικόνα 17 Σχηματική αναπαράσταση της δομής του νευρωνικού δικτύου.....	84
Εικόνα 18 Διάγραμμα κατανομής των οχημάτων στο παρκινγκ.....	88
Εικόνα 19 καμπύλες συναλλαγών για τις τρεις πολιτικές.....	89
Εικόνα 20 καμπύλες κόστους για τις τρεις πολιτικές	91
Εικόνα 21 καμπύλη φθοράς λόγω χρήστης της μπαταρίας για τις τρεις πολιτικές.....	93
Εικόνα 22 καμπύλες ημερολογιακής φθοράς για τις τρεις πολιτικές.....	95
Εικόνα 23 διάγραμμα υπερφορτισμένων οχημάτων για τις τρεις πολιτικές.....	97
Εικόνα 24 διάγραμμα c_rate για τις τρεις πολιτικές.....	99

Εισαγωγή

Αντικείμενο της εργασίας

Η παρακάτω ανάλυση έχει ως σκοπό τη βελτιστοποίηση της μεθόδου φόρτισης Vehicle-2-Grid (V2G) σε ένα χώρο στάθμευσης δεδομένης χωρητικότητας.

Η λύση μας βασίζεται πάνω στη λύση που αναφέρεται στο (Vandael, Claessens, Hommelberg, Holvoet, & Decoinck, 2013). Στην αναφορά αυτή, οι συγγραφείς προσπαθούν να λύσουν το πρόβλημα της έξυπνης φόρτισης με έναν εύκολα επεκτάσιμο τρόπο. Αρχικά περιορίζουν το πρόβλημα μεταξύ δύο καμπυλών φόρτισης: της καμπύλης που θα ακολουθούσε το όχημα αν άρχιζε να φορτίζει με το που συνδεόταν στον σταθμό φόρτισης μέχρι το επιθυμητό επίπεδο φόρτισης και της καμπύλης που η φόρτιση θα ξεκινήσει τέτοια χρονική στιγμή έτσι ώστε να φτάσει στο επιθυμητό επίπεδο φόρτισης την επιθυμητή χρονική στιγμή αναχώρησης. Οι καμπύλες αυτές περικλείουν πλήρως όλες τις πορείες φόρτισης του οχήματος. Αθροίζοντας όλες τις καμπύλες των οχημάτων μεταξύ τους λαμβάνουν τη συνολική καμπύλη φόρτισης του χώρου στάθμευσης. Έτσι μπορούν να πάρουν αποφάσεις για τη φόρτιση των οχημάτων συνολικά παίρνοντας μόνο μία βέλτιστη απόφαση ανά βήμα. Η δρομολόγηση της ενέργειας για κάθε όχημα γίνεται με βάση προτεραιότητες, οι οποίες ανατίθενται σε κάθε όχημα σύμφωνα με τις ανάγκες του. Με την παραπάνω προσέγγιση το πρόβλημα γίνεται ανεξάρτητο από τον αριθμό των οχημάτων που ικανοποιεί το σύστημα. Τέλος, κάνοντας χρήση ενός αλγορίθμου δυναμικού προγραμματισμού βρίσκουν τη βέλτιστη λύση.

Εκμεταλλευόμενοι την παραπάνω προσέγγιση, προσπαθούμε να τη γενικεύουμε σε ένα σύστημα Vehicle-2-Grid. Δημιουργούμε δηλαδή ένα παρόμοιο ζευγάρι καμπυλών, οι οποίες όμως παίρνουν υπόψιν τη δυνατότητα αποφόρτισης των οχημάτων. Οι καμπύλες αυτές βοηθάνε όπως και παραπάνω στον περιορισμό του προβλήματος. Επιπλέον, χρησιμοποιούμε ένα ζευγάρι προτεραιοτήτων για κάθε όχημα, μια για φόρτιση και μια για αποφόρτιση, προκειμένου να μπορούμε να χειριστούμε τη δρομολόγηση της ενέργειας και για τις δύο περιπτώσεις. Ο υπολογισμός των προτεραιοτήτων αυτών γίνεται βάσει των καμπυλών για κάθε όχημα έτσι ώστε να δημιουργήσουμε μια τόσο ποσοτική όσο και χρονική εξάρτηση μεταξύ αυτών και των οχημάτων. Επιπλέον, εντείνουμε τη χρονική εξάρτηση των προτεραιοτήτων συνδέοντας τις με τον εναπομένοντα χρόνο παραμονής του οχήματος. Όμως σε κάθε βήμα μπορούμε είτε να φορτίσουμε είτε μόνο να αποφορτίσουμε. Αυτό έχει ως συνέπεια να μην μπορούμε να εγγυηθούμε για την πλήρη ικανοποίηση των αναγκών των οχημάτων, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις όπου κάποια οχήματα έχουν ανάγκη για φόρτιση και άλλα έχουν ανάγκη για αποφόρτιση. Εισάγουμε επομένως το σύστημα Vehicle-2-Vehicle, καλύπτοντας το μέρος των αναγκών που δεν μπορεί να ικανοποιηθεί από το δίκτυο μέσω ανταλλαγών μεταξύ οχημάτων. Τέλος, εισάγουμε στην ανταμοιβή του περιβάλλοντός μας τη φθορά της μπαταρίας, τόσο λόγω χρήσης όσο και την ημερολογιακή, προκειμένου η λύση μας να μην επικεντρώνεται μόνο στη μείωση του κόστους φόρτισης αλλά να εγγυάται και την σωστή μεταχείριση της μπαταρίας του οχήματος.

Σε αντίθεση με το παραπάνω, αντιμετωπίζουμε το πρόβλημα μας με τη βοήθεια ενός νευρωνικού δικτύου κάνοντας χρήση του αλγορίθμου διπλής βαθιάς Q-μάθησης. Επίσης, δημιουργούμε άλλους δύο αφελείς αλγορίθμους προκειμένου να μπορούμε να βαθμολογήσουμε την απόδοση του νευρωνικού δικτύου. Ο πρώτος είναι μια απλή υλοποίηση ενός έξυπνου φορτιστή και ο δεύτερος γενικεύει τον πρώτο προσδίδοντας του τη δυνατότητα και για αποφόρτιση.

Πρέπει να σημειωθεί ότι η διπλωματική αυτή δε στοχεύει στη δημιουργία κάποιας έτοιμης εμπορικής λύσης με V2G, αλλά μόνο προσπαθεί να ερευνήσει αν μια προσέγγιση μέσω ενισχυτικής μάθησης δίνει κάποια καλύτερη λύση στο πρόβλημα από τις συμβατικές μεθόδους προσέγγισης (αφελείς αλγόριθμοι).

Δομή διπλωματικής

Αναλυτικά η δομή της διπλωματικής περιγράφεται παρακάτω:

- **Κεφάλαιο 1, Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας:** Γίνεται μια μικρή εισαγωγή στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και τη σημασία τους για την καταπολέμηση της κλιματικής αλλαγής. Επιπλέον, παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα σε σύγκριση με τους παραδοσιακούς τρόπους παραγωγής ενέργειας και αναφέρονται συνοπτικά τα διάφορα είδη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.
- **Κεφάλαιο 2, Αγορά ηλεκτρικής ενέργειας:** Παρουσιάζονται αναλυτικά η δομή και η λειτουργία του χρηματιστηρίου ενέργειας καθώς και τα βασικά οφέλη ενός τέτοιου συστήματος για τον τομέα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.
- **Κεφάλαιο 3, Ηλεκτρικά οχήματα:** Αναφέρονται τα πιο σημαντικά συστήματα φόρτισης αυτοκινήτων, πως αυτά εφαρμόζονται και τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του καθενός. Συγκεκριμένα γίνεται εκτενής αναφορά στο σύστημα Vehicle-2-Grid (V2G) και Vehicle-2-Vehicle (V2V), με τα οποία θα ασχοληθούμε περισσότερο στη συνέχεια.
- **Κεφάλαιο 4, Ενισχυτική μάθηση:** Γίνεται μια περιγραφή της Μαρκοβιανής Διαδικασίας Αποφάσεων και του αλγορίθμου της Ενισχυτικής Μάθησης. Τέλος, παρουσιάζεται συνοπτικά ο αλγόριθμος *Ενισχυτική Μάθησης* Deep Q Learning και η παραλλαγή του Double Deep Q Learning.
- **Κεφάλαιο 5, Περιβάλλοντα:** Παρουσιάζεται η υλοποίηση του περιβάλλοντος για τον πράκτορα της ενισχυτικής μάθησης. Επιπλέον, παρουσιάζονται δύο αφελείς αλγόριθμοι, οι οποίοι θα χρησιμοποιηθούν για να παρέχουν μια μέθοδο σύγκρισης της απόδοσης του Q δικτύου.
- **Κεφάλαιο 6, Αποτελέσματα:** Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εκπαιδευμένης πολιτικής του Q δικτύου καθώς και γίνεται σύγκριση αυτών με τους αφελείς αλγορίθμους που αναφέρθηκαν στο 5^ο κεφάλαιο.

Κεφάλαιο 1, Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Εισαγωγή

Με τις επιπτώσεις της συνεχούς αύξησης της θερμοκρασίας του πλανήτη, λόγω του φαινομένου του θερμοκηπίου, να είναι ολοένα και πιο εμφανείς, η συζήτηση για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας γίνεται μέρα με τη μέρα ολοένα και πιο επίκαιρη και επιτακτική. Ως ανανεώσιμη ενέργεια ονομάζουμε την ενέργεια από φυσικά ανανεώσιμες διαδικασίες. Οι διαδικασίες αυτές είναι πρακτικά ατελείωτες αλλά μπορούν να προσφέρουν περιορισμένη ποσότητα ενέργειας ανά μονάδα χρόνου. Οι πιο συνηθισμένες μορφές ανανεώσιμης ενέργειας είναι η ηλιακή, η αιολική, η υδροηλεκτρική, η γεωθερμική και η βιομάζα.

Η σημασία της ανανεώσιμης ενέργειας

Ακόμα και σήμερα η χρήση ορυκτών καύσιμα είναι ευρεία για τη θέρμανση, την ηλεκτροδότηση των κατοικιών και την τροφοδότηση των οχημάτων. Η χρήση των συμβατικών αυτών καυσίμων είναι βολική για την ικανοποίηση των αναγκών του ανθρώπου, λόγω της εύκολης εξαγωγής της αποθηκευμένης σε αυτά υψηλής πυκνότητας ενέργειας. Όμως η διαθεσιμότητα τους είναι αρκετά περιορισμένη στο πλανήτη μας και η ταχύτητα αναπλήρωσης τους είναι σημαντικά μικρότερη από την ταχύτητα με την οποία εξαντλούνται, με αποτέλεσμα την ολική εξάντληση τους στο κοντινό μέλλον.

Βέβαια, ακόμα και αν υπήρχαν απεριόριστα αποθέματα ορυκτών καυσίμων, η συνεχής χρήση τους θα αποτελούσε πάλι κίνδυνο για τη ζωή στο πλανήτη. Με την καύση των συμβατικών καυσίμων απελευθερώνονται τα λεγόμενα αέρια του θερμοκηπίου τα οποία παγιδεύουν την ηλιακή θερμότητα και συμβάλλουν στην κλιμάκωση του φαινομένου του θερμοκηπίου. Επιπλέον, άλλα κατάλοιπα από τη χρήση συμβατικών καυσίμων, τα οποία καταλήγουν στον αέρα, έδαφος ή το νερό, συμβάλλουν στη δημιουργία επιπρόσθετων επιπτώσεων για το περιβάλλον και τον άνθρωπο. Η μόλυνση του αέρα έχει ως αποτέλεσμα την πρόκληση άσματος σε ένα μεγάλο μέρος του αστικού πληθυσμού. Η όξινη βροχή από το θεϊκό οξύ και τα οξειδία του αζώτου προκαλούν ζημιές σε φυτά, ψάρια καθώς και αρχαιολογικούς χώρους. Τέλος, τα οξειδία του αζώτου συμβάλλουν στη δημιουργία της αιθαλομίχλης

Τα πλεονεκτήματα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας

Η ευρεία χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας μπορεί να αποτρέψει όλους τους παραπάνω κινδύνους λόγω των ιδιαίτερων πλεονεκτημάτων τους.

Αρχικά μια από τις πιο σημαντικές ιδιότητες των ανανεώσιμες πηγών ενέργειας είναι το σχεδόν μηδενικό αποτύπωμα άνθρακα. Εφόσον η ενέργεια προέρχεται από την εκμετάλλευση φυσικών φαινομένων και όχι την καύση ορυκτών καυσίμων τόσο η παραγωγή παραπροϊόντων όσο και η ανάγκη για την προσθήκη συστημάτων φιλτραρίσματος είναι σχεδόν μηδενική

Επιπλέον, η υιοθέτηση ενός διαφορετικού μέσου παραγωγής ενέργειας βοηθά στη διαφοροποίηση του ενεργειακού τομέα. Με αποτέλεσμα την αύξηση της ασφάλειας, αξιοπιστίας και ανεξαρτησία του ενεργειακού δικτύου

Ακόμα, όπως αναφέραμε και στον ορισμό, οι πηγές αυτές παρόλη την περιορισμένη ροή ενέργειας που μπορούν να προσφέρουν, αυτή είναι σταθερή, σε μεγάλες κλίμακες, και πρακτικά άεναη. Έτσι, μειώνεται η ανάγκη για εύρεση νέων εκμεταλλεύσιμων μορφών ενέργειας καθώς και η αναζήτηση νέων τεχνικών εκμετάλλευσης των νέων αυτών μορφών.

Τέλος, οι μικρότερες απαιτήσεις σε εξοπλισμό καθώς και στη συντήρησή του, συμβάλλουν στη σημαντική μείωση των εξόδων παραγωγής ενέργειας. Επιπλέον στις περισσότερες μορφές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας το μέσο είναι ευρέως διαθέσιμο (αιολική, ηλιακή, υδροηλεκτρική) και δεν απαιτείται επένδυση σε υποδομή για τη μεταφορά του (π.χ. πετρέλαιο, φυσικό αέριο, λιγνίτης)

Τα μειονεκτήματα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας

Τα πλεονεκτήματα των ανανεώσιμων ενέργειας είναι πολλά, όμως η ανανεώσιμη ενέργεια έχει μερικά πολύ σημαντικά μειονεκτήματα σε σύγκριση με τον συμβατικό τρόπο παραγωγής ενέργειας

Πρώτα απ' όλα, η στροφή σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι σχετικά πρόσφατη πρωτοβουλία. Με αποτέλεσμα οι τεχνολογίες να μην έχουν προλάβει να αναπτυχθούν σε βαθμό τέτοιο ώστε να γίνει η εκμετάλλευση των πηγών αυτών σε βιομηχανικό επίπεδο. Επομένως, τα αρχικά κόστη σε έρευνα, σχεδιασμό και εγκατάσταση να είναι σχετικά αυξημένα σε σύγκριση με τις συμβατικές, οι οποίες έχουν οικονομικότερες και πιο εύκολα κλιμακούμενες λύσεις. Προκειμένου να αντιμετωπιστεί ο όγκος της αρχικής επένδυσης, έχουν προταθεί διάφορα οικονομικά κίνητρα, όπως μείωση φόρων,

Επιπλέον, ενώ σε μεγάλες κλίμακες η διαθεσιμότητα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι υψηλή και σταθερή, σε τοπικό επίπεδο οι πηγές αυτές δεν είναι πάντα διαθέσιμες. Κάποιες περιοχές μπορεί να έχουν συνεχή, ενώ άλλες λιακάδα, κάποιες να έχουν υψηλές ταχύτητες ανέμων κοκ. Ακόμα ακραία καιρικά φαινόμενα, όπως κυκλώνες, δεν είναι εύκολα εκμεταλλεύσιμα. Επομένως βλέπουμε ότι οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας εξαρτώνται σημαντικά από τις εξωτερικές συνθήκες, κάτι που δεν ισχύει για τις συμβατικές πηγές.

Ακόμα λόγω της παραπάνω εξάρτησης και λόγω της μη σταθερής ροής κάποιων ανανεώσιμων πηγών, υπάρχει μεγάλη ανάγκη για αποθήκευση ενέργειας. Ενώ σήμερα υπάρχουν τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας, έχουν υψηλό κόστος ειδικά για μεγάλης κλίμακας εγκαταστάσεις ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Βέβαια, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η αποθηκευτική ικανότητα τους αυξάνεται όσο η τεχνολογία προχωράει και οι μπαταρίες γίνονται φθηνότερες μέρα με τη μέρα.

Τέλος, κάθε χώρα έχει τη δική της γεωγραφία, κλίμα, τοπογραφία, χλωρίδα κ.α. Το γεγονός αυτό κάνει κάθε τοπίο ξεχωριστό, όμως επίσης σημαίνει ότι κάποιες τοποθεσίες είναι πιο κατάλληλες για ανανεώσιμες εγκαταστάσεις από άλλες. Για παράδειγμα, ένα λιβάδι με άπλετο ανοιχτό χώρο είναι ιδανικό για την εγκατάσταση κάποιου αιολικού ή ηλιακού πάρκου. Αντίθετα, το αστικό τοπίο, με τις σκιές από τα ψηλά κτήρια δεν είναι τόσο ιδανικό. Παρ' όλ' αυτά, υπάρχουν τρόποι που ο καθένας μπορεί να εκμεταλλευτεί κάποια μορφή ανανεώσιμης ενέργειας είτε άμεσα, πχ μικρές αιολικές γεννήτριες ή έμμεσα μέσω της συμμετοχής σε κάποια λύση σε επίπεδο κοινότητας.

Κοιτάζοντας τη γενική εικόνα, τα πλεονεκτήματα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, υπερτερούν σε σύγκριση με τα μειονεκτήματά τους. Η μετάβαση σε ανανεώσιμες λύσεις παραγωγής ενέργειας σε προσωπικό, επιχειρησιακό ή κρατικό επίπεδο δε θα συμβάλει απλά στη μείωση των εξόδων για την παραγωγή ενέργειας αλλά ταυτόχρονα θα προωθήσει έναν καθαρότερο και πιο υγιεινό περιβάλλον για το μέλλον.

Είδη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας

Ως ανανεώσιμη πηγή ενέργειας ορίζουμε κάθε μορφή εκμεταλλεύσιμης ενέργειας που ανανεώνεται φυσικά και περιλαμβάνει πηγές όπως τον ήλιο, τον αέρα, τη βροχή, τις παλίρροιες, τα κύματα, την γεωθερμία κ.α.

Αιολική

Αιολική ενέργεια ορίζεται ως η χρήση του ανέμου για την παραγωγή μηχανικού έργου μέσω ανεμογεννητριών για την περιστροφή ηλεκτρικών γεννητριών για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η αιολική ενέργεια είναι μια δημοφιλής, βιώσιμη πηγή ενέργειας, η οποία έχει πολύ μικρή επίπτωση στο περιβάλλον σε σύγκριση με τα ορυκτά καύσιμα.

Ο άνεμος είναι μια διακοπτόμενη πηγή ενέργειας, η οποία δεν μπορεί να παράγει ηλεκτρισμό ούτε να αποστέλλεται κατόπιν ζήτησης. Παρέχει επίσης μεταβλητή ισχύ, η οποία είναι σταθερή συνολικά από έτος σε έτος, χωρίς δηλαδή σημαντικές διακυμάνσεις αλλά ποικίλλει σε μικρότερα χρονικά διαστήματα. Επομένως, πρέπει να χρησιμοποιείται μαζί με άλλες πηγές ηλεκτρικής ενέργειας ή να αποθηκεύεται με σκοπό την παροχή αξιόπιστης και συνεχούς τροφοδοσίας.

Για τη μετατροπή την αιολικής ενέργειας σε ηλεκτρική χρησιμοποιούνται οι λεγόμενες ανεμογεννήτριες. Η ανεμογεννήτρια είναι μια αιολική μηχανή που μετατρέπει τον άνεμο από κινητική ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια. Η κατασκευή της αποτελείται από μια στήλη κάθετη προς το έδαφος και από μια τουρμπίνα στην κορυφή της. Οι ανεμογεννήτριες μπορεί να περιστρέφονται πάνω σε οριζόντιο ή κάθετο άξονα. Η πρώτη περίπτωση είναι η πιο συχνή αλλά και η πιο παλιά. Οι ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα παράγουν λιγότερη ενέργεια και είναι λιγότερο συχνές.

Η σημερινή τεχνολογία βασίζεται σε ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα 2 ή 3 πτερυγίων. Όταν εντοπιστεί μια ανεμώδης περιοχή για την αξιοποίηση του αιολικού της δυναμικού τοποθετούνται μερικές δεκάδες ανεμογεννήτριες, οι οποίες απαρτίζουν ένα «αιολικό πάρκο». Προφανώς, προκύπτουν πλεονεκτήματα από την ομαδοποίηση των ανεμογεννητριών σε μια ανεμώδη τοποθεσία, όπως το μειωμένο κόστος ανάπτυξης της τοποθεσίας, οι απλοποιημένες συνδέσεις σε γραμμές μεταφοράς και η εύκολη πρόσβαση για τον έλεγχο λειτουργίας και τη συντήρηση. Οι ανεμογεννήτριες τοποθετούνται κατά βάση σε χερσαίες περιοχές λόγω του μειωμένου κόστους εγκατάστασης και της ευκολίας πρόσβασης σε αυτές. Όμως η δυνατότητα για μεγαλύτερη εγγύτητα σε μεγάλα παράκτια μητροπολιτικά κέντρα, ώστε να μειωθεί το κόστος μεταφοράς της ενέργειας, έδωσε τη δυνατότητα στην ανάπτυξη υπεράκτιων αιολικών πάρκων. Στην παραπάνω στροφή βοήθησε και η σταθερότητα των ανέμων στις παράκτιες περιοχές λόγω της σχεδόν μηδαμινής παρεμπόδισης τους από εμπόδια.

Η αιολική ενέργεια αποτελεί έναν από τους πιο σημαντικούς παράγοντες στις αγορές ενέργειας, αποτελώντας το 4,8% της παγκόσμιας χρήσης ηλεκτρικής ενέργειας και παρέχοντας το 14% της ηλεκτρικής ενέργειας στην Ευρωπαϊκή Ένωση.

Όμως η μορφή αυτή ανανεώσιμης ενέργειας έχει μερικά μειονεκτήματα. Αρχικά πολλοί είναι αυτοί που ενοχλούνται από την αλλαγή του τοπίου που επιφέρουν οι ανεμογεννήτριες καθώς και τον θόρυβο που εισάγουν στο περιβάλλον. Επιπλέον, οι ανεμογεννήτριες απειλούν πουλιά και νυχτερίδες, σκοτώνοντας εκατοντάδες χιλιάδες ετησίως, απώλειες οι οποίες είναι λιγότερες μεν από αυτές λόγω πρόσκρουσης σε γυαλί ή άλλους κινδύνους όπως η καταστροφή των βιότοπων, αλλά αρκετές για να επιζητηθεί λύση.

Υδροηλεκτρική

Υδροηλεκτρική ενέργεια ορίζεται ως η χρήση της πτώσης του νερού ή της ταχέως κίνησης του για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Για αιώνες ο άνθρωπος εκμεταλλεύεται αυτή τη μορφή ενέργειας μέσω της κατασκευής φραγμάτων προκειμένου να ελέγξει τη ροή του. Η υδροηλεκτρική ενέργεια είναι η μεγαλύτερη πηγή ανανεώσιμης ενέργειας.

Η υδροηλεκτρική ενέργεια αποτελεί μια βιώσιμη μορφή ανανεώσιμης ενέργειας, η διαθεσιμότητα της οποίας μπορεί να προβλεφθεί με αρκετή ακρίβεια καθώς δεν επηρεάζεται σημαντικά από περιστασιακά καιρικά φαινόμενα αλλά εξαρτάται από το ετήσιο κλίμα της περιοχής, το οποίο παραμένει γενικά σταθερό ανά τα χρόνια. Έτσι αποτελεί μια πολύ καλή λύση για την αντικατάσταση πολλών συμβατικών μέσων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Ο παραδοσιακός τρόπος παραγωγής υδροηλεκτρικής ενέργειας γίνεται σε φράγματα όπου κατάλληλα σχεδιασμένα κανάλια στην άκρη του φράγματος οδηγούν το νερό πάνω σε πτερύγια, τα οποία με τη σειρά τους, όπως και στην αιολική, περιστρέφουν μια ηλεκτρική γεννήτρια με αποτέλεσμα τη δημιουργία ηλεκτρικού ρεύματος. Όμως τα τελευταία χρόνια έχουν προταθεί νέοι τρόποι εκμετάλλευσης των θαλασσών ως μέσου παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Οι πιο σημαντικοί από αυτούς στοχεύουν στην εκμετάλλευση των παλιρροιών ή ακόμα και των απλών κυμάτων ως μέσα παραγωγής ενέργειας. Παρ' όλ' αυτά η συνολική παραγωγή ενέργεια για αυτές παραμένει ακόμα χαμηλά σε ποσοστά μικρότερα από το 1% της συνολική παραγωγή ανανεώσιμης ενέργειας.

Αν και η υδροηλεκτρική ενέργεια θεωρείται μια εξολοκλήρου καθαρή μορφή ενέργειας, η οποία ανανεώνεται από τη βροχή και το χιόνι, έχει κάποια σημαντικά μειονεκτήματα. Αρχικά τα φράγματα μπορούν να αναστατώσουν τα οικοσυστήματα στα ποτάμια και στις γύρω περιοχές του φράγματος προκαλώντας ζημιές στην πανίδα της περιοχής καθώς και αναγκάζει τη μετακίνηση των τοπικών πληθυσμών. Ακόμα η συγκέντρωση νεκρών οργανισμών στον βυθό της τεχνητής λίμνης έχει ως αποτέλεσμα την έκλυση μεθανίου, λόγω της διαδικασίας της αποσύνθεσης, το οποίο είναι ένα από τα κυριότερα αέρια του θερμοκηπίου.

Ηλιακή

Ηλιακή ενέργεια ονομάζεται η χρήση της ηλιακής ακτινοβολίας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η μορφή αυτή της ενέργειας, παρόλο που μέσω της φωτοσύνθεσης, είναι ο δομικός λίθος για τη δημιουργία και τη διατήρηση της ζωής στον πλανήτη μας, αποτελεί σχετικά νέο τρόπο παραγωγής ενέργειας.

Η ηλιακή ενέργεια όπως η αιολική εξαρτάται σημαντικά από τις καιρικές συνθήκες και οι εγκαταστάσεις είναι αρκετά ευάλωτες σε ακραία καιρικά φαινόμενα. Ακόμα επειδή η ατμόσφαιρα απορροφά ένα σημαντικό μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας όταν ο ήλιος βρίσκεται χαμηλά στον ορίζοντα η ηλιακή ενέργεια είναι πρακτική λύση μόνο για τις περιοχές κοντά στον ισημερινό. Τέλος, λόγω της περιστροφής της Γης γύρω από τον εαυτό της η ηλιακή ενέργεια είναι διαθέσιμη μόνο κατά τη διάρκεια της ημέρας με αποτέλεσμα τη δημιουργία ανάγκης για αποθήκευση ενέργειας, όπως στην αιολική.

Κύριος τρόπος παραγωγής ενέργειας είναι τα φωτοβολταϊκά, τα οποία με τη βοήθεια των ημιαγωγών και του φωτοβολταϊκού φαινομένου μετατρέπουν την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία του ήλιου σε ηλεκτρική ενέργεια. Όμως πέρα από τους ηλιακούς συλλέκτες υπάρχουν και άλλοι τρόποι για την

εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας. Τα εργοστάσια συμπυκνωμένης ηλιακή ενέργεια (CSP) χρησιμοποιούν καθρέφτες που αντανακλούν και συγκεντρώνουν τη θερμότητα του ήλιου μετατρέποντας την πρακτικά σε θερμική ενέργεια, η οποία είναι εύκολα αξιοποιήσιμη και μετατρέψιμη σε ηλεκτρική. Μια πιο απλή εφαρμογή της παραπάνω αρχής είναι ο ηλιακός θερμοσίφωνας, ο οποίος μετατρέπει την ηλιακή ενέργεια σε θερμική ενέργεια για τη θέρμανση του νερού της ύδρευσης. Παρόλες τις πολύ εντυπωσιακές λύσεις της, η ηλιακή ενέργεια αποτελεί μόλις το 2% της συνολικής παραγωγής ανανεώσιμης ενέργειας.

Όπως όλες οι κατηγορίες ανανεώσιμης ενέργειας έτσι και η ηλιακή έχει τα μειονεκτήματά της. Αρχικά το αρχικό κόστος για τη δημιουργία ηλιακού πάρκου ή κάποιας μικρής εγκατάστασης για οικιακή χρήση είναι σχετικά υψηλή, καθώς η κατασκευή είναι σχετικά ακριβή. Επιπλέον, τόσο τα φωτοβολταϊκά όσο και οι καθρέφτες απαιτούν συνεχή συντήρηση καθώς το παραμικρό στρώμα σκόνης μειώνει σημαντικά την απόδοση της εγκατάστασης. Τέλος, συγκεκριμένα για τα φωτοβολταϊκά, η φύση του ρεύματος που παράγουν είναι συνεχής, το οποίο δεν είναι συμβατό με το εναλλασσόμενο ρεύμα που χρησιμοποιούν τα μοντέρνα αστικά κέντρα. Έτσι απαιτείται μετατροπή σε εναλλασσόμενο, το οποίο με τη σειρά του εισάγει περισσότερες απώλειες.

Βιομάζα

Βιομάζα είναι η ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, η οποία προέρχεται από τη δημιουργία καυσίμων όπως αιθανόλη μέσα από την επεξεργασία φυτών και καρπών. Όπως και η ηλιακή η βιομάζα αποτελεί μια αρκετά ελαστική μορφή ενέργειας, κατάλληλη για την τροφοδότηση αμαξιών, για τη θέρμανσή οικιών και την παραγωγή ηλεκτρισμού.

Η βιομάζα μπορεί να δημιουργηθεί μέσω της επεξεργασίας οποιουδήποτε φυτού ή αποβλήτου. Βέβαια, κάθε πρώτη ύλη απαιτεί διαφορετική επεξεργασία. Οι πιο διάσημες πρώτες ύλης για τη δημιουργία βιομάζας είναι το σπαρτά με ταχύ ανάπτυξη, όπως το καλαμπόκι, παραπροϊόντα της ξυλείας ή απόβλητα φάρμας.

Όμως και εδώ υπάρχουν σημαντικές ανησυχίες. Για παράδειγμα, η παραγωγή βιομάζας από καλαμπόκια παρεμβαίνει στην αγορά τροφίμων αυξάνοντας έτσι τη χρήση βλαβερών τεχνικών στη γεωργία που έχουν οδηγήσει στη δημιουργία τοξικής άγλης και άλλων περιβαλλοντολογικών βλαβών. Επιπλέον, η μεταφορά ξυλείας σε μεγάλες αποστάσεις προκειμένου αυτή να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ενέργειας δείχνει να είναι μη-κερδοφόρα. Τέλος, η συνολική απασχόληση εργατών και μηχανημάτων φαίνεται να υπερβαίνει τη συνολική εξαγόμενη ενέργεια οδηγώντας σε μια διαδικασία με αρνητικό ενεργειακό αποτύπωμα.

Γεωθερμία

Γεωθερμική ενέργεια ορίζεται η χρήση της εσωτερικής θερμότητας της Γης για παραγωγή ηλεκτρισμού ή θέρμανση οικιών ή της ύδρευσης. Η μορφή αυτή της ενέργειας δεν είναι καινούργια έννοια καθώς σε χώρες με αυξημένη ηφαιστειακή δραστηριότητα, η χρήση της ήταν αρκετά διαδεδομένη.

Σε βιομηχανική κλίμακα, γίνεται χρήση πηγαδιών για τη μεταφορά της θερμότητας από υπόγειες αποθήκες καυτού νερού και ατμού στη επιφάνεια και ύστερα την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Σε

μικρότερη κλίμακα, γεωθερμικές αντλίες χρησιμοποιούν τη διαφορά της θερμοκρασίας του υπεδάφους για είτε θέρμανση είτε ψύξη.

Η γεωθερμική ενέργεια είναι πάντα διαθέσιμη, σε σύγκριση με την ηλιακή ή την αιολική, καθώς εκμεταλλεύεται την πρακτικά άενη θερμότητα του υπεδάφους της Γης. Όμως η δημιουργία πηγαδιών έχει ως αποτέλεσμα την έκλυση υδρόθειου από το έδαφος, το οποίο έχει ιδιαίτερα κακή οσμή.

Κεφάλαιο 2, Αγορά ηλεκτρικής ενέργειας

Εισαγωγή

Η ανάγκη για την καταπολέμηση της απρόβλεπτης φύσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας καθώς και την ανάγκη για αποκέντρωση της παραγωγής και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας, δημιουργήθηκαν οι αγορές ηλεκτρικής ενέργειας (Electricity Markets).

Στόχοι των αγορών ηλεκτρικής ενέργειας

Γενικά, ο κύριος στόχος των αγορών ηλεκτρικής ενέργειας είναι να παρέχουν αξιόπιστη ηλεκτρική ενέργεια με το μικρότερο δυνατό κόστος στους καταναλωτές. Ο στόχος αυτός μπορεί να χωριστεί σε δύο υπό-στόχους.

Ο πρώτος αφορά τη βραχυπρόθεσμη απόδοση: τη βέλτιστη εκμετάλλευση των διαθέσιμων πόρων. Παρόλο που αυτό ακούγεται περίπλοκο, λόγω του μεγάλου αριθμού διαθέσιμων πόρων, της τιμολόγησης του κάθε πόρου, και των περιορισμών του συστήματος, ο στόχος αυτός μπορεί να επιτευχθεί μέσω άμεσης βελτιστοποίησης, δεδομένου ότι η τιμολόγηση κάθε πόρου είναι αντικειμενικά ορθή. Όμως αυτό δεν ισχύει στην πράξη. Ως αποτέλεσμα, η λύση στο πρόβλημα της βελτιστοποίησης να μην είναι πλήρης. Παρόλα αυτά λόγω της διαφάνειας και της αναζήτησης μια άμεσης βέλτιστης λύσης, αξίες που διέπουν όπως είπαμε πριν την αγορά ηλεκτρικής ενέργειας, τέτοιες λάθος εκτιμήσεις μπορούν να αναγνωριστούν και να διορθωθούν.

Ο δεύτερος αφορά τη μακροπρόθεσμη απόδοση: την εγγύηση ότι η αγορά παρακινεί κατάλληλα για μακροπρόθεσμες επενδύσεις. Αυτό αποδεικνύεται να είναι ο πιο δύσκολος στόχος αλλά ταυτόχρονα και ο πιο σημαντικός στόχος της αγοράς. Στη θεωρία αποδοτικές μακροπρόθεσμες επενδύσεις προκύπτουν από τις σωστές τιμές της αγοράς, όμως αυτό περιπλέκεται μέσω της απαίτησης για αξιοπιστία. Η αξιοπιστία προαπαιτεί την ύπαρξη εφεδρικού φορτίου για την εξισορρόπηση της προσφοράς και της ζήτησης. Η αξιοπιστία, ενώ σε άλλες αγορές δεν παίζει τόσο σημαντικό ρόλο, στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί καίριο ρόλο καθώς οι καταναλωτές δεν μπορούν εύκολα να εκφράσουν την προτίμηση ως προς αυτή. Γι' αυτό γεννιέται η ανάγκη για την ύπαρξη ενός ρυθμιστή, ο οποίος θα εγγυάται ότι η προτίμηση για της αξιοπιστία εκφράζεται με τον σωστό τρόπο. Μια προσέγγιση βασίζεται στις τιμές σημείων (spot prices), οι οποίες μπορούν, βέβαια, να αυξάνονται λόγω έλλειψης προσφοράς. Με την ύπαρξη αυτών των αυξήσεων των τιμών λόγω έλλειψης προσφοράς ενθαρρύνονται περισσότερο οι μακροπρόθεσμες επενδύσεις. Επιπλέον, ενθαρρύνεται η δημιουργία μιας ακόμα αγοράς, της αγοράς χωρητικότητας. Όλες αυτές οι λύσεις οδηγούν σε σταθερά μειούμενες τιμές του ηλεκτρικού ρεύματος για τον καταναλωτή και η ολοένα μεγαλύτερη ανάγκη για καλύτερες και μεγαλύτερες μακροπρόθεσμες επενδύσεις.

Βέβαια, υπάρχουν και άλλοι δευτερεύον λόγοι όπως απλότητα, διαφάνεια και δικαιοσύνη.

Οι αγορές ηλεκτρικής ενέργειας είναι υποχρεωτικά περίπλοκες, λόγω της περίπλοκης φύσης των μηχανικών και οικονομικών προβλημάτων που πρέπει να επιλυθούν. Παρόλα αυτά οι σχεδιαστές των αγορών αυτών θα πρέπει να κρατάνε το σχέδιο αυτών όσο το δυνατόν απλούστερο. Περίπλοκα στοιχεία θα πρέπει να προστίθενται μόνο αν αυτά είναι απαραίτητα και αν βέβαια ακολουθούν τις βασικές αρχές της αγοράς.

Επιπλέον, οι αγορές ηλεκτρικής ενέργειας έχουν μεγάλο βαθμό διαφάνειας. Οι κανονισμοί, η λειτουργία τους και η διαδικασία αποφάσεων είναι δημόσια διαθέσιμα. Τα δεδομένα είναι διαθέσιμα στο κοινό σε πραγματικό χρόνο, ενώ ταυτόχρονα αυτά επιθεωρούνται σε μηνιαία, τετραμηνιαία ή ετήσια βάση. Η διαφάνεια αυτή βοηθάει στην αναγνώριση προβλημάτων και στην υποστήριξη της αποδοτικής λειτουργίας και των επενδύσεων.

Τέλος, οι αγορές ηλεκτρικής ενέργειας είναι δίκαιες λόγω της ανεξαρτησίας των λειτουργιών τους και επειδή η ιεραρχία περιλαμβάνει εκπροσώπους όλων των συμμετεχόντων.

Η δομή αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας

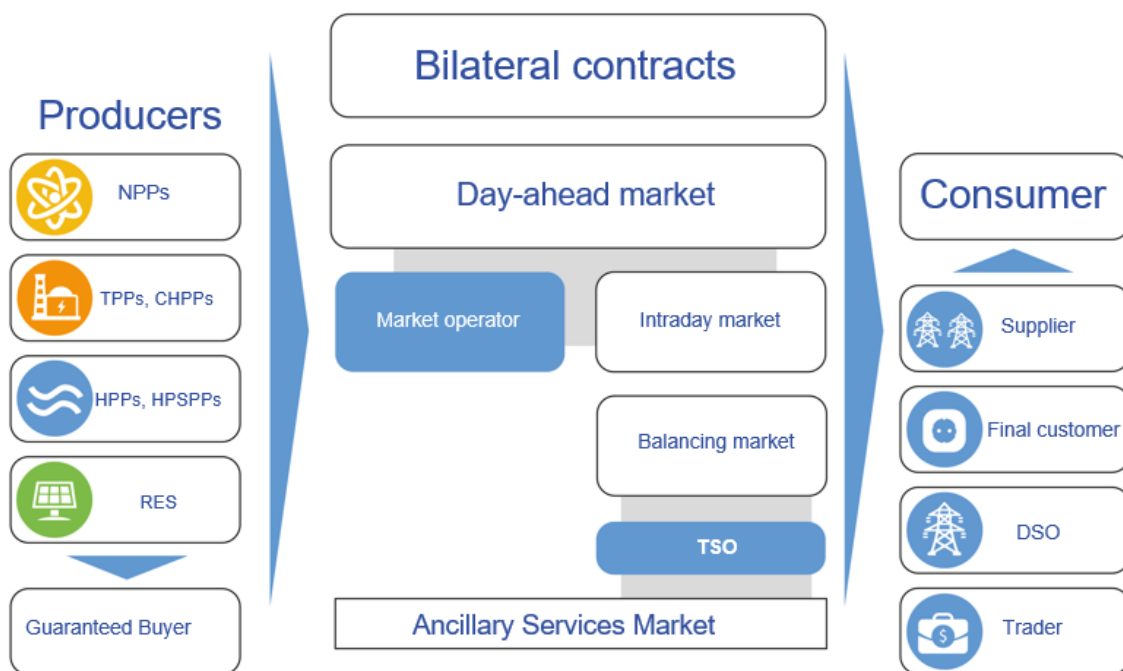
Μια αγορά θα πρέπει να λύσει πολλές προκλήσεις. Αρχικά τόσο το δίκτυο μεταφοράς όσο και τα μέσα παραγωγής έχουν ορισμένα φυσικά όρια. Τα φυσικά αυτά όρια θα πρέπει να γίνουν σεβαστά προκειμένου να αποφευχθούν ζημιές στον εξοπλισμό μεταφοράς ή παραγωγής αντίστοιχα. Επιπλέον, τόσο η προσφορά όσο και η ζήτηση διέπεται από αβεβαιότητα. Η ζήτηση μεταβάλλεται με προβλέψιμο και απρόβλεπτο τρόπο και το ίδιο ισχύει για την προσφορά στις διακοπτόμενες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (αιολική, ηλιακή). Όλα τα παραπάνω θα πρέπει η αγορά να μπορεί να τα αντιμετωπίσει. Τέλος, η προσφορά και η ζήτηση πρέπει να είναι ισορροπημένες κάθε στιγμή, αλλά μεγάλο μέρος της ζήτησης δεν ανταποκρίνεται στην τιμή, καθιστώντας πιο δύσκολο να εκκαθαριστεί η αγορά.

Παρόλο που η αγορά είναι συγκεντρωτική, εξαρτάται από τις αποκεντρωμένες αποφάσεις όλων των συμμετεχόντων. Ο συγκεντρωτικός αυτό χαρακτήρας της εκκαθάρισης και της διευθέτησης επιτρέπει στο διαχειριστή του συστήματος να καλύψει τις ανάγκες της αξιοπιστίας και της απόδοσης.

Η βελτιστοποίηση της αγοράς επόμενης ημέρας και της ενδοημερήσιας αγοράς απαιτεί σύγχρονες τεχνικές βελτιστοποίησης και ισχυρό υπολογιστικό υλικό. Οι προτιμήσεις και οι περιορισμοί εκφράζονται με έναν πιο αφηρημένο τρόπο προκειμένου να μπορεί να γίνει αποδοτικά και σωστά η βελτιστοποίηση του συστήματος και να επιταχθεί το υψηλότερο κέρδος. Βέβαια, με την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών καθώς και της προόδου των νέων τεχνικών βελτιστοποίησης επέτρεψε την πιο ρεαλιστική και πιο καλή βελτιστοποίηση των διαθέσιμων πόρων.

Τα δύο κύρια στοιχεία της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας είναι η αγορά επόμενης ημέρας και η ενδοημερήσια αγορά, οι οποίες συνολικά αποφασίζουν για την τιμή της αγοράς. Στην αγορά της επόμενης ημέρας, οι συμμετέχοντες υποβάλλουν προσφορές και ζητήσεις για ενέργεια για κάθε ώρα της επόμενης ημέρας. Το αποτέλεσμα αποτελεί το πρόγραμμα της επόμενης ημέρας για την παραγωγή προκειμένου να καλυφθεί η ζήτηση μαζί με τιμές για κάθε ώρα και τοποθεσία. Επιπλέον, το αποτέλεσμα είναι οικονομικά, αλλά όχι φυσικά, δεσμευτικό. Η αγορά της επόμενης ημέρας επιτρέπει στους συμμετέχοντες να ελέγξουν αποδοτικά την παραγωγή, όσο σχεδιάζουν για την επόμενη ημέρα αντισταθμίζοντας παράλληλα τις πιο ασταθείς πραγματικές τιμές. Η ενδοημερήσια αγορά είναι μια περιορισμένη ασφάλειας αγορά, βασισμένη στις προσφορές τιμών, η οποία αγορά διεκπεραιώνεται κάθε τουλάχιστον 5 λεπτά καθ' όλη της διάρκεια της ημέρας. Το αποτέλεσμα της παραπάνω διαδικασίας είναι η αποδοτική φυσική δρομολόγηση των πόρων μαζί με μια πεντάλεπτη τιμή για κάθε τοποθεσία.

Η συνολική δομή μίας αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας φαίνεται σχηματικά στην Εικόνα 1.



Εικόνα 1: Η δομή της Ουκρανικής αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας

Αγορά επόμενης ημέρας

Η αγορά επόμενης ημέρας είναι μια μεν εθελοντική αλλά οικονομικά δεσμευτική διαδικασία. Οι συμμετέχοντες υποβάλουν της προσφορές για αγορά και πώληση ενέργειας και υπηρεσιών έκτακτης ανάγκης. Κάθε μέρα στην αρχή της ημέρας ο διαχειριστής του συστήματος δημοσιεύει την κατάσταση του συστήματος, προβλέψεις και άλλες πληροφορίες για την επόμενη ημέρα. Οι συμμετέχοντες έχουν ένα χρονικό διάστημα προκειμένου να υποβάλουν τις προσφορές τους. Μετά από την υποβολή και την επεξεργασία των προσφορών εξάγεται το αποτέλεσμα της αγοράς επόμενης ημέρας, τα οποία βοηθούν χειριστές αλλά και συμμετέχοντες προκειμένου να μπορούν να προγραμματίσουν καλύτερα και πιο αποδοτικά την παραγωγή της επόμενης ημέρας.

Μια προσφορά ενός παραγωγού εκφράζεται σε τρία μέρη: κόστος εκκίνησης, ελάχιστο κόστος παραγωγής, μια καμπύλη προσφοράς ενέργειας. Το κόστος εκκίνησης δηλώνει το κόστος της εκκίνησης της παραγωγής. Το ελάχιστο κόστος παραγωγής δείχνει το ελάχιστο βιώσιμο κόστος για τη λειτουργία της γεννήτριας στη χαμηλότερη δυνατή παραγωγή της. Τέλος, η καμπύλη προσφοράς είναι μια καμπύλη αύξουσας προσφοράς που ορίζεται από έως και 10 ζεύγη τιμής-ποσότητας, αντικατοπτρίζει δηλαδή το οριακό μοναδιαίο κόστος για την παραγωγή ενέργειας σε επίπεδα μεγαλύτερα από το μικρότερο δυνατό.

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα των τριμερών προσφορών είναι ότι επιτρέπουν κάθε πηγή ενέργειας να εκφράζει την υποβόσκουσα οικονομική δομή της. Αυτό δίνει τη δυνατότητα για αποδοτικότερη δέσμευση των πόρων σε ανταγωνιστικές διαδικασίες. Σε μη-ανταγωνιστικές διαδικασίες, κανόνες αποτρέπουν την υπερίσχυση του δυνατότερου. Κάποιοι αρχικοί σχεδιασμοί επέτρεπαν μόνο την καμπύλη προσφοράς ενέργειας. Τότε ο κάθε παραγωγός θα έπρεπε να συμπεριελάμβανε τόσο το κόστος

εκκίνησης όσο και το ελάχιστο κόστος παραγωγής στην προσφορά, βασισμένος πάνω στις προσδοκίες πως οι πόροι θα προγραμματιστούν. Βέβαια αυτές οι προβλέψεις συχνά θα αποδεικνυόντουσαν λανθασμένες. Επιπλέον, για να αποφευχθεί το παιχνίδι των τιμών με αυτά τα δύο μεγέθη, ορίζονται όρια για τις τιμές τους.

Επιπλέον, η αγορά επόμενης ημέρας επιτρέπει για εικονικές προσφορές δηλαδή για προσφορές που δεν προέρχονται από κάποιον παραγωγό. Ο λόγος της δυνατότητας αυτής είναι να ενισχυθεί η εξισορρόπηση μεταξύ της αγοράς επόμενης ημέρας και την ενδοημερήσιας αγοράς. Για παράδειγμα, ένας συμμετέχων περιμένοντας μεγαλύτερες τιμές της ηλεκτρικής ενέργειας για την ενδοημερήσια αγορά, μπορεί να αγοράσει στην αγορά επόμενης ημέρας και να πουλήσει την ενέργεια αυτή στην ενδοημερήσια αγορά συμβάλλοντας μείωση της απόκλισης της τιμής μεταξύ των δύο αγορών.

Οι εικονικές προσφορές επιτρέπουν επίσης στους παραγωγούς να προσφέρουν τη συνολική οικονομική εικόνα ενός πόρου στην αγορά επόμενης ημέρας χωρίς να περιορίζουν την ικανότητα τους να πουλήσουν την ενέργεια όπου αναμένεται αυτή να έχει την καλύτερη τιμή. Για παράδειγμα, ένα παραγωγός που αναμένει υψηλότερη τιμή στην ενδοημερήσια αγορά μπορεί να προσφέρει τον πόρο με κάποιο κόστος στην αγορά επόμενης ημέρας για να συμμετέχει στον προγραμματισμό και ταυτόχρονα να αγοράσει με μια εικονική προσφορά, έτσι ώστε να μεταφέρει την πώληση στην ενδοημερήσια αγορά

Η αγορά επόμενης ημέρας λύνει ένα μεγάλο πρόβλημα βελτιστοποίησης, προκειμένου να καθορίσει τις ποσότητες που διαπραγματεύονται και τις τιμές. Ο στόχος είναι η μεγιστοποίηση των κερδών ως προσφοράς από τους έμπορους με την επιφύλαξη των περιορισμών του δικτύου και των πόρων. Στην απλούστερη περίπτωση, κάθε παραγωγός έχει μια άνω φραγμένη αύξουσα καμπύλη, κάθε καταναλωτής έχει μια καμπύλη κάτω φραγμένη φθίνουσα καμπύλη και όλοι οι περιορισμοί στους πόρους είναι γραμμικοί. Το πρόβλημα τότε είναι κυρτό και η βελτιστοποίηση του είναι αρκετά τυπική. Κάθε προμηθευτής πουλάει, μεγιστοποιώντας τα κέρδη του για κάθε ώρα και τοποθεσία, λαμβάνοντας υπόψη τις τιμές και τους φυσικούς περιορισμούς, και κάθε αγοραστής αγοράζει μεγιστοποιώντας τα κέρδη του για κάθε ώρα και τοποθεσία, δεδομένων των τιμών και των περιορισμών.

Οι τελικές τιμές είναι γεωγραφικά οριακές τιμές, οι οποίες αναπαριστούν το επιπρόσθετο κόστος που απαιτεί η παραγωγή μιας μεγαβατόρας (MWh) σε μία γεωγραφική ενότητα μια συγκεκριμένη ώρα. Αυτές οι γραμμικές τιμές χρησιμοποιούνται για τον διακανονισμό. Οι παραγωγοί πληρώνονται την τιμή επί την ποσότητα που παρέχουν, και οι καταναλωτές πληρώνουν την τιμή επί την ποσότητα που αγόρασαν.

Όμως η επίλυση του πραγματικού προβλήματος βελτιστοποίησης στην αγορά επόμενης ημέρας δεν είναι τόσο απλή υπόθεση. Υπάρχουν πολλές μη-κυρτότητες που πρέπει να αντιμετωπιστούν (κόστος εκκίνησης, κόστος ελάχιστης ενέργειας). Ως αποτέλεσμα, η βελτιστοποίηση αυτή είναι ένα πρόβλημα προγραμματισμού μικτών ακεραίων (mixed-integer programming problem). Ευτυχώς, το υλικό και το λογισμικό για την επίλυση τέτοιων προβλημάτων συνεχίζει να βελτιώνεται, επιτρέποντας τη λύση πιο περίπλοκων μοντέλων με λιγότερες υποθέσεις και απλοποιήσεις. Συχνά, βέβαια, το πρόβλημα είναι σχεδόν κυρτό τουλάχιστον γύρω από το βέλτιστο. Παρόλα αυτά, ενδέχεται να μην υπάρχει ικανή λύση για την κατάλληλη υποστήριξη του δικτύου. Επομένως, κατά τη διάρκεια της ημέρας υπάρχει η πιθανότητα κάποιος παραγωγός να μην παράγει αρκετή ενέργεια και οι εφεδρικές υπηρεσίες θα πρέπει να καλύψουν τη διαφορά αυτή. Ευτυχώς, τέτοιες παρεμβάσεις δεν είναι τόσο συνηθισμένες, το οποίο υποδηλώνει ότι παρόλες τις μη-κυρτότητες που υπάρχουν, δεν προκαλούν σημαντικές διαταραχές.

Μετά από τη δημοσίευση των αποτελεσμάτων της αγοράς επόμενης ημέρας κάθε συμμετέχον πρέπει να ενημερώσει και να υποβάλει το ισχύον σχέδιο λειτουργίας για τις επόμενες 7 ημέρες. Η διαδικασία αυτή είναι υποχρεωτική και βοηθά στην πρόβλεψη συνθηκών λειτουργίας των συμμετεχόντων. Αλλαγές στο σχέδιο αυτό επιτρέπονται μέχρι μία ώρα πριν από την αναφερθείσα ώρα λειτουργίας. Σχέδια καταθέτουν και οι υπηρεσίες μεταφοράς προκειμένου να αναφερθούν προσχεδιασμένες ή έκτακτες διακοπές ρεύματος.

Τέλος, ο διαχειριστής του συστήματος χρησιμοποιεί τα ισχύον σχέδια λειτουργίας προκειμένου να επιβεβαιώσει την επαρκή και αξιόπιστη κάλυψη των αναγκών για κάθε ώρα σε κάθε τοποθεσία. Επιπλέον, ο διαχειριστής του συστήματος αναλύει την ασφάλεια μετάδοσης και εξετάζει αν υπάρχει κάποια παρέμβαση των περιορισμών. Αν υπάρχει κάποια τέτοια παράβαση, για να μην παρεμβαίνει στην αγορά, ο διαχειριστής συστήματος περιμένει όσο το δυνατόν περισσότερο προτού προβεί σε κάποια δέσμευση για την αποφυγή της. Αυτές οι δεσμεύσεις είναι σπάνιες στην πράξη, επειδή ο σκοπός είναι να διασφαλιστεί η αξιοπιστία με ελάχιστες παρεμβολές στην αγορά.

Περίοδος προσαρμογής

Η περίοδος προσαρμογής εκτείνεται μεταξύ της οριστικοποίησης του προγράμματος της επόμενης ημέρας και 1 ώρα πριν από την κάθε κανονισμένη λειτουργία, όπου κάθε συμμετέχον έχει τη δυνατότητα να αναφέρει οποιαδήποτε αλλαγή στο ισχύον σχέδιο του. Με τις ενημερώσεις αυτές ο διαχειριστής του συστήματος ξανά-ελέγχει την ανάλυση της ασφάλειας του δικτύου και προβαίνει σε κινήσεις έτσι ώστε να εγγυηθεί η ασφάλεια λειτουργίας του. Κατά τη διάρκεια της περιόδου προσαρμογής, ο διαχειριστής του συστήματος επίσης δεσμεύει επιπλέον υπηρεσίες έκτακτης ανάγκης αν αυτές απαιτούνται λόγω κάποια σημαντικής αλλαγής στο πρόγραμμα της ημέρας.

Ενδοημερήσια Αγορά

Η ενδοημερήσια αγορά καθορίζει τη δέσμευση των πόρων και την τιμολόγηση της ενέργειας για την τρέχουσα ημέρα. Η ενδοημερήσια αγορά είναι υποχρεωτική. Οι παραγωγοί απαιτούνται να έχουν μια καμπύλη προσφοράς ενέργειας ή για αυτόνομους σχεδιασμούς απαιτείται ένα πρόγραμμα παραγωγής. Το πρόγραμμα παραγωγής καθορίζει την ανά πέντε λεπτά παραγωγή του πόρου.

Οι καταναλωτές επιπλέον μπορούν να υποβάλουν τις προσφορές τους. Η καμπύλη κατανάλωσης έχει την ίδια μορφή με την καμπύλη προσφοράς παραγωγής ενέργειας, όμως είναι φθίνουσα: λιγότεροι ενδιαφέρονται να αγοράσουν ενέργεια σε υψηλές τιμές. Αυτή η καμπύλη ζήτησης παίζει σημαντικό ρόλο στην εξισορρόπηση ζήτησης και προσφοράς.

Κάθε 5 λεπτά, ο διαχειριστής του συστήματος συγκεντρώνει τις καμπύλες παραγωγής και κατανάλωσης καθώς και την τρέχουσα κατάσταση του συστήματος και εκτελεί τον τελικό αλγόριθμο για την απόφαση της δρομολόγησης των πόρων, σεβόμενος τους περιορισμούς ασφαλείας. Το αποτέλεσμα είναι η παραγωγή τιμών για κάθε πόρο. Η ενδοημερήσια αγορά παράγει την ελάχιστου κόστους λύση για τη διευθέτηση της ζήτησης και της προσφοράς.

Όμως τα παραπάνω υποθέτουν μια ιδανική κατάσταση του συστήματος. Σε πραγματικό χρόνο, η αγορά ενέργειας γίνεται ένα πολύ περίπλοκο και σοβαρό πρόβλημα, αφού ο διαχειριστής του συστήματος έχει

λιγότερες επιλογές: οι άμεσα διαθέσιμοι πόροι είναι περιορισμένοι και η ικανότητα των πόρων αυτών να αντιδράσουν φράσσεται από την ταχύτητα αντίδρασή τους. Επομένως, απαιτείται μια αγορά μετρίασης της ενέργειας. Μια λύση στο πρόβλημα αυτό είναι η εκτέλεση της διαδικασίας διευθέτησης των πόρων δύο φορές. Στην πρώτη μόνο με τους αυστηρά απαραίτητους περιορισμούς και ύστερα μια δεύτερη με το σύνολο των περιορισμών. Η λύση της πρώτης εκτέλεσης χρησιμοποιείται για των προσδιορισμών των τιμών αναφοράς. Έτσι στη δεύτερη λύση, η καμπύλη προσφοράς ενέργειας φράσσεται από την υψηλότερη τιμή αναφοράς της πρώτης λύσης.

Ένας περιορισμός θεωρείται απαραίτητος αν ικανοποιεί τα παρακάτω

- Η αγορά δεν είναι πολύ επικεντρωμένη στην είσοδο του περιορισμού
- Η αγορά δεν είναι πολύ επικεντρωμένη στην έξοδο του περιορισμού
- Κανένας παραγωγός δεν μπορεί να παραβεί τον περιορισμό με ατομική προσπάθεια

Η συγκέντρωση της αγοράς μετριέται βάση του δείκτη Herfindahl–Hirschmann. Το μερίδιο κάθε παραγωγού είναι σταθμισμένο βάση της παραμέτρου ολίσθησης, η οποία δείχνει την επίδραση του παραγωγού στον περιορισμό. Ένας παραγωγός θα πρέπει να έχει επίδραση μεγαλύτερη από ένα κατώφλι προκειμένου να συμπεριληφθεί στον υπολογισμό. Η λίστα των ασήμαντων περιορισμών υπολογίζεται και δηλώνεται καθημερινά.

Όταν ένας περιορισμός του δικτύου ηλεκτροδότησης παραβιαστεί, ο αλγόριθμος θα δεσμεύσει αντίθετης φοράς ηλεκτρικό ρεύμα προκειμένου να αντισταθμίσει την παραβίαση. Η αδυναμία αντιμετώπισης του προβλήματος μπορεί να οδηγήσει κάποιον παραγωγό στην αύξηση των τιμών σε κάποιον μη σημαντικό περιορισμό προκειμένου να εξασφαλίσει υψηλό κέρδος. Η αυτόματη αντιμετώπιση από το σύστημα προλαμβάνει τέτοιες κινήσεις αύξησης της τιμής. Επιπλέον, σημειώνεται ότι αλλαγές σε τιμές ή δεσμεύσεις προκύπτουν μόνο όταν ένας μη σημαντικός περιορισμός δεσμευτεί.

Η ενδοημερήσια αγορά, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, είναι οικονομικά και φυσικά δεσμευτική. Οι πόροι πρέπει να ακολουθούν τις αποφάσεις της διευθέτησης. Η μη-τήρηση, προφανώς πέρα από κάποια όρια ανοχής, έχει ως αποτέλεσμα την επιβολή κυρώσεων λόγω μη συμμόρφωσης. Η ανοχή είναι υψηλότερη για διακοπτόμενες πηγές ενέργειας όπως ηλιακή ή αιολική, και χαμηλότερη για τις υπόλοιπες οι οποίες θεωρούνται σταθερές πηγές ενέργειας, όπως το φυσικό αέριο.

Αν δεν υπήρχε αβεβαιότητα για την προσφορά και τη ζήτηση, τότε η ενδοημερήσια αγορά δε θα ήταν απαραίτητη. Οι συμμετέχοντες θα μπορούσαν να παράγουν ιδανικά σχέδια λειτουργίας στην αγορά της επόμενης ημέρας, τα οποία δε θα απαιτούσαν αλλαγές. Η ομορφιά της ενδοημερήσιας αγοράς είναι ότι επιτρέπει τους συμμετέχοντες να κάνουν αποδοτικές αλλαγές όσο η αβεβαιότητα φθίνει. Η ενδοημερήσια αγορά αποτελεί, επομένως, ένα αποδοτικό μέσο για την εξάλειψη αποκλίσεων από την αγορά επόμενης ημέρας.

Τέλος, για να ξεκαθαρίσουμε την αλληλεπίδραση μεταξύ της αγοράς επόμενης ημέρας και της ενδοημερήσιας αγοράς παρουσιάζεται το εξής παράδειγμα. Ένας πόρος χωρίς κάποιο σημαντικό μερίδιο της αγοράς υποβάλει μια τριμερή προσφορά στην αγορά επόμενης ημέρας προκειμένου να δρομολογηθεί. Το αποτέλεσμα της αγοράς επόμενης ημέρας είναι οικονομικά δεσμευτικό. Δεν υπάρχουν αλλαγές για τον συγκεκριμένο πόρο κατά τη διάρκεια της ημέρας, επομένως η προσφορά του παραμένει αναλλοίωτη και διευθετείται στην ενδοημερήσια αγορά. Το κίνητρο της προσφοράς αυτής της ευκαμψίας στην ενδοημερήσια αγορά είναι να επιτευχθούν έξτρα κέρδη από τις συναλλαγές. Μπορεί

να απαιτηθεί από τον πόρο να παράγει περισσότερο όταν η τιμή ξεπεράσει τα ελάχιστα κόστη και λιγότερο όταν είναι λιγότερο από τα ελάχιστα, με αποτέλεσμα τη δημιουργία κερδών.

Υπηρεσίες έκτακτης ανάγκης

Οι αγορές ηλεκτρικής ενέργειας απαιτούν διάφορων ειδών εφεδρικά αποθέματα, τα οποία στο σύνολο τους ονομάζονται υπηρεσίες έκτακτης ανάγκης, για την εξισορρόπηση της προσφοράς της προσφορά και της ζήτησης κάθε δευτερόλεπτο και την ικανοποίηση όλων των περιορισμών. Τα πιο συνηθισμένα είναι τρία: η δυνατότητα ρύθμισης του δικτύου, αποθέματα απόκρισης και η έξτρα διαθεσιμότητα των τρέχων πόρων. Τα είδη υπηρεσιών είναι διαφορετικά για κάθε αγορά, οι διαφορές αυτές πηγάζουν από τις διαφορετικές ανάγκες και τα διαφορετικά χαρακτηριστικά της κάθε αγοράς. Η ρύθμιση του δικτύου είναι η ταχύτερη σε χρόνο απόκρισης υπηρεσία, έχοντας τη δυνατότητα απόκρισης σε δευτερόλεπτα προκειμένου να διατηρηθεί η συχνότητα του δικτύου. Τα αποθέματα απόκρισης μπορούν να χρησιμοποιηθούν εντός δέκα λεπτών. Τέλος, η επιπλέον διαθέσιμη αχρησιμοποίητη ενέργεια των τρέχων πόρων μπορεί να ανταποκριθεί εντός 30 λεπτών. Η ποσότητα και τα είδη των υπηρεσιών έκτακτης ενέργειας, τα οποία απαιτούνται για την εξασφάλιση αξιοπιστίας, εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά του ηλεκτρικού δικτύου, όπως τα είδη των πόρων.

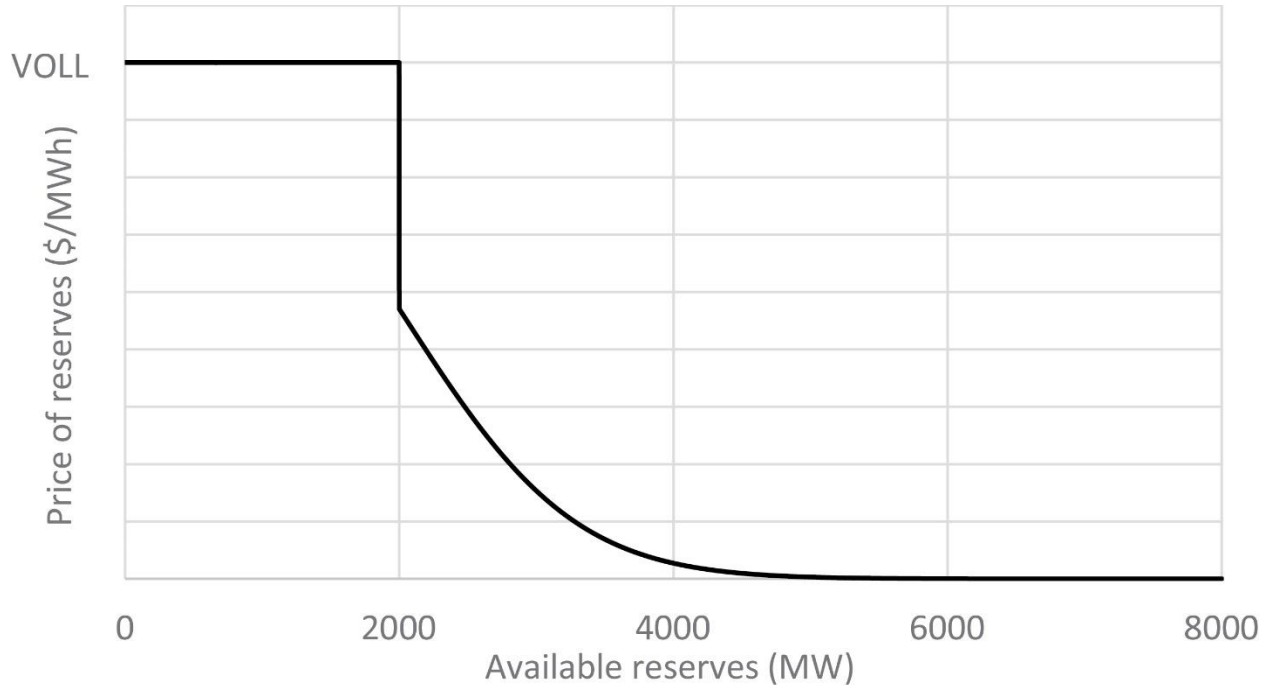
Για να διατηρηθεί η συχνότητα στα αναμενόμενα πλαίσια, αναλύεται η συχνότητας φορτίου τακτικά. Το αποτέλεσμα της ανάλυσης αυτής είναι η αποστολή εντολής για ρύθμιση της συχνότητας προς τα πάνω, κάτω ή την εφαρμογή αποθεμάτων απόκρισης προκειμένου να διατηρηθεί η τιμή της.

Όταν μια μεγάλη γεννήτρια σταματήσει, τότε η ρύθμιση προσπαθεί να αντιμετωπίσει την ξαφνική πτώση της συχνότητας. Παράλληλα τα αποθέματα απόκρισης αυξάνουν τη συμμετοχή τους και ταυτόχρονα γίνεται εκμετάλλευση της επιπλέον διαθεσιμότητας των πόρων. Ακόμα, λόγω της αδράνειας, ο τερματισμός μιας μεγάλης γεννήτριας προκαλεί μια σταδιακή πτώση, η οποία πρέπει να αντισταθμιστεί από τα αποθέματα.

Τα αποθέματα είναι σφικτά συνδεδεμένα με την αγορά ηλεκτρικής ενέργειας. Η αγορά επόμενης ημέρας βελτιστοποιεί την αγορά τόσο ενέργειας αλλά και αποθεμάτων. Επιπλέον, σε μερικά συστήματα η βελτιστοποίηση αυτή γίνεται και στην ενδοημερήσια αγορά. Η έξτρα αυτή βελτιστοποίηση ενισχύει την επιλογή και την τιμολόγηση των κατάλληλων αποθεμάτων κατά τη διάρκεια της ημέρας.

Τιμές ανεπάρκειας

Η αποστολή της σωστής τιμής πραγματικού χρόνου είναι κρίσιμη για να ενθαρρυνθεί η αποδοτική συμπεριφορά στην ενδοημερήσια αγορά, αλλά και πιο μακροπρόθεσμες αποφάσεις όπως επενδύσεις. Σε φυσιολογικές συνθήκες, η τιμή προκύπτει είτε από το ελάχιστο κόστος της προσφοράς ή τη μέγιστη τιμή της ζήτησης. Όμως, σε περιπτώσεις ανεπάρκειας, όταν ο διαχειριστής του συστήματος έχει περιορισμένα αποθέματα να καλύψει της ενεργειακή ισορροπία, η αξία των αποθεμάτων, και στη συνέχεια η τιμή της ενέργειας, θα πρέπει να αντικατοπτρίζουν την αξία, την οποία δημιουργούν σε πραγματικό χρόνο προκειμένου να αποφευχθεί κάποια ζημιά λόγω έλλειψης φορτίου. Η οριακή αξία των αποθεμάτων είναι ίσο με την αξία της ελλείπουσας ενέργειας σε περιπτώσεις ακραίας ανεπάρκειας, ενώ μειώνεται όσο η ανεπάρκεια μειώνεται, όταν δηλαδή η πιθανότητα έλλειψης ενέργειας είναι μικρότερη. Η καμπύλη της τιμής αυτής φαίνεται στην Εικόνα 2.



Εικόνα 2: Καμπύλη ζήτησης αποθεμάτων

Οι τιμές ανεπάρκειας είναι η διοικητική προσέγγιση, η οποία χρησιμοποιείται για να εκφραστεί η προτίμηση των καταναλωτών για αξιοπιστία. Όσο μεγαλώνει η τιμή ανεπάρκειας τόσο πιο ισχυρή το κίνητρο για επένδυση στην κατασκευή περισσότερων παραγωγικών μονάδων. Επιπλέον, ενθαρρύνεται η ανάγκη για ύπαρξη απόκρισης σε μεγάλη ζήτηση για να αποφευχθούν υψηλές τιμές, το οποίο είναι ο κύριος λόγος εμφάνισης φαινομένων ανεπάρκειας.

Χωρίς τον μηχανισμό των τιμών ανεπάρκειας, οι τιμές των αποθεμάτων και της ενέργειας θα ήταν πολύ χαμηλές σε μια περίοδο ανεπάρκειας, λόγω των κανονισμών οι οποίοι θα μετρίαζαν τη δύναμη της αγοράς. Όμως, η εξάρτηση στη δύναμη της αγοράς στην πλευρά της προσφοράς ενέργειας να αυξήσει τις τιμές της ενέργειας σε περιόδους ανεπάρκειας είναι μια κακή λύση. Με τις τιμές ανεπάρκειας μια γεννήτρια μπορεί να προσφέρει ενέργεια στο ελάχιστο κόστος, να δρομολογηθεί αποδοτικά στην ενδοημερήσια αγορά και να τιμολογηθεί με τρόπο που αντικατοπτρίζει την αξία της σε περίοδο ανεπάρκειας. Τέλος, ο μηχανισμός αυτό βοηθάει τον διαχειριστή του συστήματος να βελτιστοποιήσει την ενεργεία και τα αποθέματα στην ενδοημερήσια αγορά.

Προθεσμιακές συμβάσεις

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, τα κύρια μέρη της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας είναι η αγορά επόμενης ημέρας και η ενδοημερήσια αγορά. Αυτές οι αγορές αποτελούν την βάση για την αποδοτική δρομολόγηση των πόρων και σε πραγματικό χρόνο την δέσμευσή τους βάση των πιο πρόσφατων πληροφοριών. Επιπλέον παρέχουν ένα πλαίσιο για προθεσμιακές συμβάσεις. Και οι δύο αγορές επιτρέπουν στους συμμετέχοντες να δηλώνουν προθεσμιακές συναλλαγές, οι οποίες στη συνέχεια διευθετούνται από τον διαχειριστή του συστήματος.

Οι προθεσμιακές συμβάσεις επιτρέπουν στους συμμετέχοντες της αγοράς να διαχειριστούν καλύτερα το ρίσκο. Η δυνατότητα διαχείρισης του ρίσκου είναι απαραίτητη για τη σταθερότητα της αγοράς. Οι αγορές καταρρέουν όταν δίνεται η δυνατότητα σε σημαντικούς συμμετέχοντες να αθετήσουν τις υποσχέσεις τους. Η ενεργειακή κρίση της περιόδου 2000-1 στην Καλιφόρνια είναι ένα πολύ αντιπροσωπευτικό παράδειγμα. Στην Καλιφόρνια, οι ελλιπείς κανόνες της αγοράς εμπόδισαν τις μεγάλες επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας να συμμετέχουν σε προθεσμιακές συμβάσεις. Οι επιχειρήσεις αυτές είχαν υποχρεώσεις να ικανοποιούν τη ζήτηση ενέργειας σε σταθερές τιμές, όμως αντιμετώπιζαν δυνητικά ασταθείς τιμές. Επομένως, όταν μια παρατεταμένη περίοδος διακοπής ρεύματος προκάλεσε την ξαφνική αύξηση των τιμών στην Καλιφόρνια, οι μη-αντισταθμισμένες αυτές επιχειρήσεις αθέτησαν τα συμβόλαια τους και η αγορά κατέρρευσε. Με τις προθεσμιακές συμβάσεις, οι επιχειρήσεις αυτές θα μπορούσαν να αγοράσουν ενέργεια εκ των προτέρων προκειμένου να παραμείνουν συνεπείς στις υποχρεώσεις τους.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, ένα πλεονέκτημα της τιμολόγησης ανεπάρκειας είναι, η ενθάρρυνση των καταναλωτών να υπογράψουν συμβόλαια για την ενέργεια που χρειάζονται εκ των προτέρων. Η προθεσμιακές συμβάσεις, δηλαδή, προσφέρουν ένα αντίβαρο ενάντια στις ασταθείς τιμές πραγματικού χρόνου. Με άλλα λόγια, μειώνουν το κίνδυνο των τιμών. Έτσι ο καταναλωτής φράσσεται από τις προθεσμιακές συμβάσεις με τους παραγωγούς και οι παραγωγοί καλύπτουν τη θέση αυτή μέσω της παραγωγής και τις συμβάσεις για καύσιμο. Με τον τρόπο αυτό, το συνολικό ρίσκο της αγοράς μειώνεται και όλοι οι συμμετέχοντες έχουν κάποια μορφή φράχτη, είτε οικονομικού είτε φυσικού.

Ένα δεύτερο πλεονέκτημα των προθεσμιακών συμβάσεων είναι η βελτίωση του κινήτρου υποβολής προσφορών. Αρχικά, για να μειωθεί το ρίσκο, οι συμμετέχοντες έχουν το κίνητρο να υποβάλλουν μια προθεσμιακή σύμβαση, η οποία θα συμβαδίζει με τις ενδεχόμενες ανάγκες. Αυτό συμβαίνει καθώς οι τιμές γίνονται ολοένα και πιο ασταθείς όσο πιο κοντά πλησιάζουμε στην προγραμματισμένη ώρα και οι επιλογές για την εξισορρόπηση της αγοράς περιορίζονται. Επομένως, οι καμπύλες ζήτησης και προσφοράς να γίνονται πιο απότομες. Για παράδειγμα, η ακραία τιμή ανεπάρκειας (όπως είδαμε στην Εικόνα 2) προκύπτει μόνο σε πραγματικό χρόνο όταν οι πόροι εμφανίζουν σημαντική ανεπάρκεια. Οι προθεσμιακές συμβάσεις που συμβαδίζουν με τις ενδεχόμενες ανάγκες βοηθούν στην αποφυγή των απότομων αυτών καταστάσεων. Επιπλέον, οι συμμετέχοντες της αγοράς μπαίνουν στην ενδοημερήσια αγορά με πιο ισορροπημένες ανάγκες και έχουν μικρότερο κίνητρο να ασκήσουν πίεση μέσω της αγοραστικής τους δύναμης. Σε μια δημοπρασία για την τελική τιμή ενέργειας, οι πωλητές έχουν το κίνητρο να προσφέρουν παραπάνω από την οριακή τιμή και οι αγοραστές να προσφέρουν σε μικρότερη από την αντίστοιχη οριακή τιμή. Όμως, ένας συμμετέχων, ο οποίος μπαίνει στην ενδοημερήσια αγορά με μια ισορροπημένη θέση δεν έχει κανένα κίνητρο να υπερεκτιμήσει ή να υποεκτιμήσει αντίστοιχα. Συνεπώς, οι προθεσμιακές συμβάσεις προκαλούν στους συμμετέχοντες να υποβάλουν προσφορές, οι οποίες είναι πιο συνεπείς στις πραγματικές προτιμήσεις τους, βελτιώνοντας έτσι την αποδοτικότητα του αποτελέσματος της αγοράς.

Η πράξη επιβεβαιώνει τα παραπάνω πλεονεκτήματα των προθεσμιακών συμβάσεων. Οι φυσικοί αγοραστές, αυτοί με υποχρεώσεις ικανοποίησης φορτίου, και οι φυσικοί παραγωγοί, οι γεννήτριες, έχουν ισχυρή τάση να ασχολούνται με το εμπόριο για τη διαχείριση του κινδύνου. Τυπικά, το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας είναι προσυμφωνημένο σε συμβάσεις πριν από την αγορά επόμενης ενέργειας, σε μηνιαία, ετήσια ή πολυετείς προθεσμιακές συμβάσεις και ένα μικρότερο κομμάτι συναλλάσσεται σε ασταθείς πραγματικού χρόνου τιμές. Αυτό, βέβαια, δεν υπονομεύει τη σημασία της αγοράς επόμενης ημέρας και της ενδοημερήσιας αγοράς, καθώς προσφέρουν τα θεμέλια, όπου οι προθεσμιακές

συμβάσεις στηρίζονται. Οι προθεσμιακές συναλλαγές προβλέπουν την αναμενόμενη τιμή στην αγορά επόμενης ημέρας με τον ίδιο τρόπο που η αγορά επόμενης ημέρας προβλέπει την αναμενόμενη τιμή στην ενδοημερήσια αγορά. Η διαιτησία, αυτή, μεταξύ αγορών οδηγεί τις προβλέψεις αυτές πιο κοντά στις αναμενόμενες τιμές που παρατηρούνται στην ενδοημερήσια αγορά. Επιπλέον, η αγορά επόμενης ημέρας και η ενδοημερήσια αγορά προσφέρουν έναν αποδοτικό τρόπο, ειδικά για μικρότερους συμμετέχοντες, να μεταβάλλουν τις προβλέψεις αυτές. Αυτό είναι σημαντικό καθώς μετριάζει το πλεονέκτημα που θα κατέχει ο κυρίαρχος κατεστημένος φορέας λόγω του ελέγχου ενός μεγάλου όγκου πόρων.

Τα πλεονεκτήματα των προθεσμιακών συμβάσεων ενισχύονται από διαφανείς προθεσμιακές αγορές. Ένα πλεονέκτημα που προκύπτει από αυτό είναι ότι ο διαχειριστής διευθετεί διμερείς συναλλαγές. Παρόλο που οι όροι των συναλλαγών δεν είναι δημόσια διαθέσιμοι, παρακολουθούνται από τον διαχειριστή του συστήματος και την αγορά. Σε μερικές αγορές, διοργανώνονται διαφανείς δημοπρασίες προκειμένου να εγκαθιδρυθούν λιανικές τιμές για καταναλωτές οι οποίοι δεν έχουν επιλέξει κάποιον προμηθευτή. Διαφανείς προθεσμιακές τιμές ενθαρρύνουν την είσοδο στη λιανεμπόριο και την ισχυροποίηση τόσο της λιανικής αλλά και της χονδρικής ανταγωνιστικότητας.

Ωστόσο, η έλλειψη μίας αποδοτικής και ρευστής αγοράς, οι προθεσμιακές συμβάσεις μπορεί να αποτελέσει τρόπο αποθάρρυνσης της εισόδου ανταγωνισμού από κάποιον κυρίαρχο κατεστημένο φορέα, όπως έγινε στη Μεγάλη Βρετανία. Όμως, η πηγή του προβλήματος αυτού φάνηκε να ήταν η αδύναμη φύση της εγκατεστημένης αγοράς ενέργειας και όχι του μηχανισμού των προθεσμιακών συμβάσεων.

Δικαιώματα εσόδων συμφορήσεων

Μία προθεσμιακή αγορά που οργανώνεται από τον διαχειριστή του συστήματος είναι η αγορά δικαιωμάτων εσόδων συμφόρησης. Ο διαχειριστής συστήματος διεξάγει εξαμηνιαίες και μηνιαίες δημοπρασίες για δικαιώματα εσόδων συμφόρησης από σημείο σε σημείο. Αυτές οι δημοπρασίες επιτρέπουν στους συμμετέχοντες να αντισταθμίσουν τον κίνδυνο συμφόρησης. Μια γεννήτρια στον κόμβο A που πουλάει ενέργεια σε φορτίο στον κόμβο B μπορεί να αγοράσει ένα δικαίωμα εισόδων συμφόρησης από το A στο B και να εξαλείψει τον κίνδυνο συμφόρησης. Ο κάτοχος του δικαιώματος καταβάλλει τα έσοδα της κυκλοφοριακής συμφόρησης κατά τη διάρκεια της ημέρας από την πηγή στον προορισμό. Παρόλο που υπάρχει μεγάλος αριθμός τέτοιων δικαιωμάτων, στην πράξη το πρόβλημα μπορεί να αντιμετωπιστεί επειδή μόνο ένα μικρό υποσύνολο γραμμών αντιμετωπίζει σημαντική συμφόρηση. Επομένως, αυτό το περιορισμένο σύνολο γραμμών αποτελεί το κύριο αντικείμενο προσήλωσης προκειμένου να αντιμετωπιστεί ο κίνδυνος συμφόρησης.

Αγορά χωρητικότητας

Ορισμένες αγορές ηλεκτρικής ενέργειας περιλαμβάνουν μια μακροπρόθεσμη επενδυτική αγορά χωρητικότητας. Η αγορά χωρητικότητας συντονίζει νέες επενδύσεις και αποσύρσεις για να διασφαλίσει ότι υπάρχουν επαρκείς πόροι για την αξιόπιστη κάλυψη του φορτίου. Άλλες αγορές είναι οι αγορές μόνο για ενέργεια. Μια αγορά μόνο για ενέργεια βασίζεται αποκλειστικά στις τιμών από την αγορά επόμενης ημέρας και την ενδοημερήσια αγορά ώστε να προκαλέσει επαρκείς επενδύσεις σε πόρους για να

ανταποκριθεί αξιόπιστα στο φορτίο. Η πρόκληση με μια αγορά μόνο για ενέργεια είναι ότι χρειάζονται συνήθως αρκετά χρόνια για την οικοδόμηση νέων παραγωγών. Εάν οι πόροι καταστούν ανεπαρκείς, μπορεί να υπάρχουν μερικές καλές επιλογές για την αντιμετώπιση του ελλείμματος στον διαθέσιμο χρόνο. Μια αγορά χωρητικότητας μπορεί να χρησιμεύσει ως ασφαλιστήριο συμβόλαιο και συσκευή συντονισμού για την καλύτερη βελτιστοποίηση των επενδύσεων, τόσο σε χρόνο όσο και σε τοποθεσία.

Οι αγορές χωρητικότητας αρχικά δεν ήταν καλά σχεδιασμένες. Οι πρώτες αγορές παρείχαν ένα μέσο για τις γεννήτριες να εξασφαλίσουν κάποια επιπλέον έσοδα, αλλά προσέφεραν μικρή αξία για τους καταναλωτές. Υπήρχαν δύο βασικά προβλήματα. Πρώτον, οι πρώτες αγορές οργανώθηκαν ως αγορές ενέργειας, αλλά η χωρητικότητα χρησιμοποιούνταν μόνο βραχυπρόθεσμα, έτσι ώστε η καμπύλη προσφοράς να είναι 0 για την υπάρχουσα χωρητικότητα και στη συνέχεια ουσιαστικά κάθετη. Στην άλλη πλευρά της αγοράς, η ζήτηση είναι μια σταθερή απαίτηση που επιβάλλεται στο φορτίο. Έτσι, η διαμόρφωση των τιμών είναι αρκετά κακή, καθώς η αγορά προσπαθεί να διασχίσει μια κάθετη καμπύλη ζήτησης με μια κάθετη καμπύλη προσφοράς. Η τιμή εκκαθάρισης είναι 0 ή το ανώτατο όριο τιμών και το κίνητρο άσκησης ισχύος στην αγορά είναι σοβαρό. Δεύτερον, οι πρώτες αγορές καθόρισαν το προϊόν κακώς, με βάση κυρίως την υπάρχουσα χωρητικότητα και όχι κάτι που σχετίζεται με την αξιοπιστία της. Λόγω αυτών των αδυναμιών, οι πρώτες αγορές χωρητικότητας έκαναν κάτι περισσότερο από τη μεταφορά ενός μάλλον αυθαίρετου χρηματικού ποσού από το φορτίο στις γεννήτριες.

Οι σύγχρονες αγορές χωρητικότητας διορθώνουν τα δύο βασικά ελαττώματα. Πρώτον, η αγορά χωρητικότητας διεξάγεται αρκετά χρόνια πριν από την παράδοση. Αυτό σημαίνει ότι η νέα είσοδος μπορεί να ανταγωνιστεί την υπάρχουσα προσφορά και το κόστος της νέας εισόδου μπορεί να ορίσει την τιμή στις αναπτυσσόμενες αγορές. Αυτό βελτιώνει σημαντικά τη διαμόρφωση των τιμών. Δεύτερον, το προϊόν ορίζεται σωστά ως η ικανότητα προσφοράς ενέργειας κατά την έλλειψη. Η ενέργεια κατά την έλλειψη είναι το προϊόν που συμβάλλει στην αξιοπιστία. Με αυτήν την προσέγγιση, οι καταναλωτές επιλέγουν μια μορφή για ενέργεια κατά τις περιόδους έλλειψης. Το προϊόν είναι τόσο φυσικό όσο και οικονομικό. Οι πόροι μπορούν να προσφέρουν μόνο χωρητικότητα σύμφωνα με τη φυσική τους ικανότητα να παρέχουν ενέργεια κατά τη διάρκεια της έλλειψης. Αυτό εγγυάται ότι υπάρχουν επαρκείς πόροι για την αντιμετώπιση των απότομων αυξομειώσεων του συστήματος. Η χρηματοοικονομική συνιστώσα είναι μια επιλογή κλήσης για ενέργεια σε περιόδους έλλειψης αποθεματικών, όταν ξεκινά η τιμολόγηση της ανεπάρκειας. Η υποχρέωση ενός προμηθευτή να παρέχει ενέργεια κατά τη διάρκεια ανεπαρκειών ακολουθεί το φορτίο. Δηλαδή, ένας προμηθευτής που έχει μερίδιο 10% της χωρητικότητας που αγοράζεται με φορτίο έχει την υποχρέωση να παρέχει το 10% της ενέργειας κατά τη διάρκεια ανεπάρκειας.

Το προϊόν χωρητικότητας που ορίζεται με αυτόν τον τρόπο αντισταθμίζει πλήρως το φορτίο από τις τιμές ανεπάρκειας. Επιπλέον, διατηρεί τα ισχυρά κίνητρα απόδοσης για τις γεννήτριες, οι οποίες βλέπουν και αισθάνονται την υψηλή τιμή ανεπάρκειας στο πλαίσιο που επηρεάζει τις αποφάσεις, ένα χαρακτηριστικό που ονομάζεται πληρωμή για απόδοση. Μια γεννήτρια που παρέχει περισσότερα από το μερίδιό της πληρώνεται σε τιμή ανεπάρκειας για κάθε περισσότερη μεγαβατόρα και χρεώνεται με τιμή ανεπάρκειας για κάθε λιγότερη μεγαβατόρα. Επιπλέον, το προϊόν παρέχει όλα τα οφέλη της προθεσμιακής σύμβασης. Ο κίνδυνος μειώνεται, καθώς το φορτίο είναι πλήρως αντισταθμισμένο και ο εφοδιασμός έχει τη χωρητικότητά του και τα καύσιμα συστέλλονται ως φυσική αντιστάθμιση. Επιπλέον, η υποχρέωση θέτει τη γεννήτρια σε μια σχεδόν ισορροπημένη θέση που εισέρχεται στην ενδοημερήσια αγορά, μειώνοντας σημαντικά τα κίνητρα για άσκηση ισχύος στην αγορά υπό συνθήκες ανεπάρκειας. Οι προμηθευτές

λαμβάνουν μια σταθερή πληρωμή χωρητικότητας για όλες τις ώρες αντί για τα εξαιρετικά ευμετάβλητα ενοίκια ανεπάρκειας που θα λάβουν σε μια αγορά μόνο για ενέργεια χωρίς προθεσμιακή σύμβαση.

Το κύριο πλεονέκτημα των αγορών χωρητικότητας είναι ο συντονισμός των επενδύσεων σε πόρους και η ισχυρότερη εγγύηση επαρκών πόρων. Ωστόσο, οι αγορές είναι δύσκολο να σχεδιαστούν και να λειτουργήσουν. Ένα πράγμα είναι σαφές: η περίπτωση των αγορών χωρητικότητας είναι ισχυρότερη σε περιοχές με μεγαλύτερες επενδυτικές προκλήσεις και περισσότερους περιορισμούς στην τοποθεσία. Ωστόσο, τόσο η χωρητικότητα όσο και τα μοντέλα της αγοράς μόνο για ενέργεια εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από καλά οργανωμένες αγορές ενέργειας και από ένα σταθερό κανονιστικό πλαίσιο για την προώθηση αποτελεσματικών επενδύσεων.

Κεφάλαιο 3, Ηλεκτρικά οχήματα

Εισαγωγή

Με την αυξανόμενη ανάγκη εύρεσης για πράσινες λύσεις σε όλους τους τομείς της καθημερινότητας του ανθρώπου, τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα δίνουν αντιπροσωπεύουν μια πάρα πολύ ελκυστική λύση της αυτοκινητοβιομηχανία για τον τομέα της μετακίνησης. Η ηλεκτρική αυτοκινητοβιομηχανία μεγαλώνει με ταχύς ρυθμούς, λόγω μεγαλύτερης προσφοράς επιλογών, των χαμηλότερων τιμών, των επιχορηγήσεων και των συνεχής βελτίωσης της τεχνολογίας των μπαταριών. Ως ηλεκτρικό όχημα ορίζεται το όχημα το οποίο κάνει χρήση ενός ηλεκτρικού κινητήρα αντί για έναν συμβατικό κινητήρα βενζίνης/πετρελαίου. Ο ηλεκτρικό κινητήρας τροφοδοτείται από επαναφορτιζόμενες μπαταρίες, οι οποίες μπορούν να επαναφορτιστούν μέσω του συνηθισμένου οικιακού ρεύματος.

Είδη ηλεκτρικών οχημάτων

Υπάρχουν τρία κύρια είδη ηλεκτρικών οχημάτων, τα οποία διαφέρουν στα συστήματα κίνησης προκειμένου να ικανοποιήσουν διαφορετικές οδηγικές ανάγκες. Τα είδη είναι: οχήματα με κυψέλες καυσίμου, οχήματα ηλεκτρικής μπαταρίας και υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα.

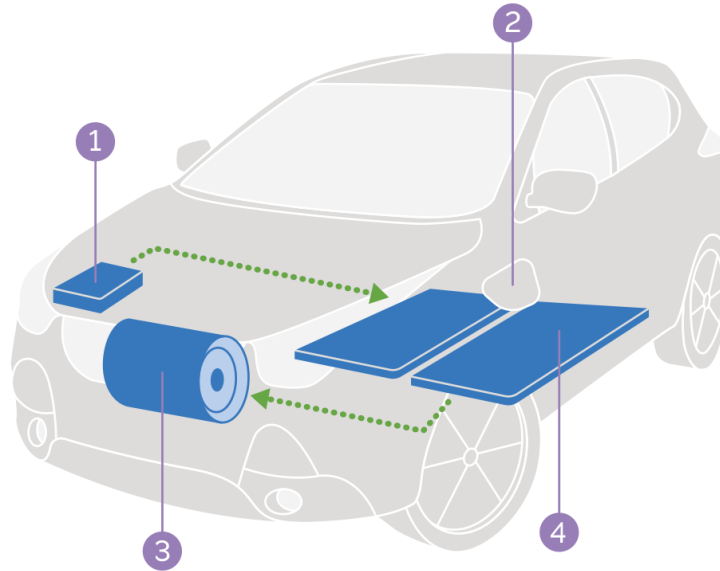
Οχήματα ηλεκτρικής μπαταρίας

Τα οχήματα ηλεκτρικής μπαταρίας ή πλήρως ηλεκτρικά οχήματα είναι όλα τα οχήματα, τα οποία δεν χρησιμοποιούν βενζίνη ή πετρέλαιο, αλλά αντίθετα έχουν μια μεγάλη ηλεκτρική μπαταρία, η οποία τροφοδοτεί έναν ή περισσότερους ηλεκτρικούς κινητήρες. Επί του παρόντος, τα πλήρως ηλεκτρικά οχήματα έχουν αυτονομία από 130 μέχρι 500 χιλιόμετρα, με τα νέα μοντέλα να διαφημίζουν ολοένα και μεγαλύτερη αυτονομία. Πέρα από την ανεξαρτησία των οχημάτων από τα συμβατικά βενζινάδικα, απαιτούν πολύ λιγότερη συντήρηση σε σύγκριση με συμβατικά οχήματα λόγω του πιο απλού συστήματος κίνησης.

Τα πλεονεκτήματα των πλήρως ηλεκτρικών οχημάτων είναι:

- Είναι αθόρυβα
- Μεγάλη επιτάχυνση
- Φορτίζουν οπουδήποτε υπάρχει φορτιστής
- Είναι συνήθως εξοπλισμένα με τελευταίας τεχνολογίας συστήματα
- Μικρότερο κόστος λειτουργίας και συντήρησης
- Μηδενικοί ρίποι
- Επιχορηγήσεις, φορολογική ελάφρυνση

Επί του παρόντος, τα περισσότερα πλήρως ηλεκτρικά αυτοκίνητα λειτουργούν με επαναφορτιζόμενες μπαταρίες λιθίου, οι οποίες είναι μικρές σε μέγεθος και έχουν υψηλή ενεργειακή πυκνότητα. Φορτίζονται, κατά το πλείστον, μέσω εξωτερικών πηγών ενέργειας, οι οποίες μπορεί να είναι τόσο απλές όσο μια συνηθισμένη οικιακή πρίζα. Ο ενσωματωμένος φορτιστής του οχήματος μετατρέπει το εισερχόμενο εναλλασσόμενο ρεύμα σε συνεχές ρεύμα για την φόρτιση της μπαταρίας. Η ενέργεια μεταφέρεται στον ηλεκτρικό κινητήρα, ο οποίος με τη σειρά του κινεί τις ρόδες του οχήματος. Τα κύρια εσωτερικά στοιχεία ενός ηλεκτρικού οχήματος είναι:



Εικόνα 3 Μια απλοποιημένη αναπαράσταση των εσωτερικών στοιχείων ενός πλήρους ηλεκτρικού οχήματος

1. **Ενσωματωμένος φορτιστής:** Μετατρέπει το εισερχόμενο εναλλασσόμενο ηλεκτρικό ρεύμα σε συνεχές ρεύμα για την φόρτιση της μπαταρίας.
2. **Θύρα φόρτισης:** Επιτρέπει στο όχημα να συνδεθεί σε κάποια εξωτερική πηγή ενέργειας για να φορτίσει την μπαταρία
3. **Ηλεκτρικός Κινητήρας:** Τροφοδοτείται από την μπαταρία και κινεί το όχημα
4. **Μπαταρία:** Συνήθως είναι τοποθετημένη κάτω από τις θέσεις των επιβατών, για να προσφέρει καλύτερη κατανομή του βάρους του οχήματος, και τροφοδοτεί τον ηλεκτρικό κινητήρα. Οι μπαταρίες αυτές μπορεί να φτάσουν τις 100 kWh χωρητικότητα.

Ένα από τα μεγαλύτερα αρνητικά στοιχεία των ηλεκτρικών οχημάτων είναι το αρχικό κόστος, το οποίο είναι σημαντικά μεγαλύτερο από τα συμβατικά οχήματα. Όμως η πληθώρα επιχορηγήσεων και φόρο-ελαφρύνσεων βοηθούν στην μείωση της διαφοράς αυτής και επιτρέπουν στους οδηγούς να αναβαθμίσουν την οδηγική τους εμπειρία στην τελευταία λέξη της τεχνολογίας. Επιπλέον η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας για την φόρτιση ενός ηλεκτρικού οχήματος είναι η μισή, ή ακόμα λιγότερο, της αντίστοιχης σε βενζίνη για την κάλυψη της ίδια απόστασης. Ακόμα η συντήρηση των ηλεκτρικών οχημάτων είναι αρκετά περιορισμένη και η φθορά της μπαταρίας είναι σχετικά μικρή με τις περισσότερες μπαταρίες να φτάνουν στο τέλος της ζωής τους μετά από 8 με 10 χρόνια.

Τα ηλεκτρικά οχήματα μπορούν να φορτίσουν είτε μέσω του οικιακού δικτύου είτε μέσω εξειδικευμένων σταθμών φόρτισης (ταχυφορτιστές). Όμως πέρα από την άμεση φόρτιση του οχήματος, ένα μέρος της φόρτισης γίνεται κατά την κίνηση του μέσω μια διαδικασίας που μετατρέπει την κινητική ενέργεια του οχήματος μέσω της πέδησης του οχήματος σε ενέργεια, η οποία είναι γνωστή ως αναγεννητική πέδηση,

Σταθμοί φόρτισης μπορούν να εγκατασταθούν στο σπίτι των οδηγών, σε χώρους στάθμευσης, σε χώρους εργασίας καθώς και άλλα σημεία με έντονη κίνηση οχημάτων.

Υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα

Τα υβριδικά οχήματα προσφέρουν δύο ανεξάρτητους τρόπους κίνησης: ηλεκτρικό και συμβατικό, ακόμα και σε μεγάλες ταχύτητες. Με μικρότερες μπαταρίες από τα πλήρως ηλεκτρικά οχήματα, στην ηλεκτρική λειτουργία έχουν αυτονομία της τάξεως των 30 με 90 χιλιομέτρων, κατά την οποία δεν παράγουν εκπομπές αερίων. Όταν το όχημα χρησιμοποιήσει πλήρως το φορτίο της μπαταρίας, αλλάζει σε συμβατική λειτουργία και συμπεριφέρεται όπως ένα οποιοδήποτε πλήρως συμβατικό όχημα. Τα οχήματα αυτά είναι ιδανικά για την μετακίνηση μέσα στην πόλη όπου οι μετακινήσεις δεν ξεπερνούν τα 50 χιλιόμετρα και δεν απαιτείται η συμβατική λειτουργία τους.

Τα πλεονεκτήματα των υβριδικών οχημάτων είναι:

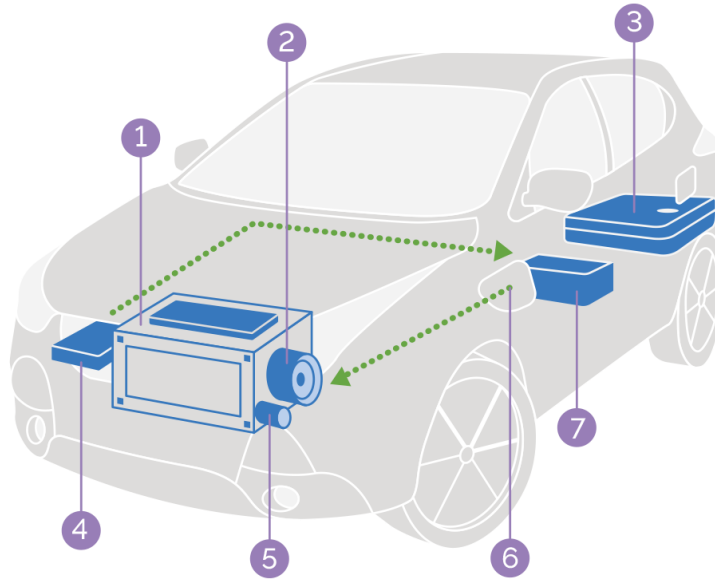
- Είναι αθόρυβα (σε ηλεκτρική κίνηση)
- Έχουν μεγάλη επιτάχυνση (σε ηλεκτρική κίνηση)
- Φορτίζουν γρηγορότερα από τα πλήρως ηλεκτρικά λόγω της μικρότερης μπαταρίας
- Μειώνεται η ανάγκη για επίσκεψη σε βενζινάδικο
- Έχουν μοντέρνο εξοπλισμό
- Έχουν λιγότερα κόστη λειτουργίας από τα συμβατικά
- Μειωμένη εκπομπή ρίπων
- Επιχορηγήσεις, φορολογικές ελαφρύνσεις
- Η συμβατική λειτουργία δίνει την δυνατότητα για μεγάλης απόστασης ταξίδια

Η αλλαγή λειτουργία από ηλεκτρική σε συμβατική δεν είναι αισθητή, όμως χάνετε η χαρακτηριστική μεγάλη επιτάχυνση της ηλεκτρικής λειτουργίας. Κάποια υβριδικά οχήματα τρέχουν ταυτόχρονα σε συμβατική και ηλεκτρική λειτουργία, κάνοντας συνεχώς αλλαγές μεταξύ των δύο λειτουργιών μέχρι τα αποθέματα ηλεκτρικής ενέργειας να εξαντληθούν.

Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα των υβριδικών οχημάτων είναι ότι η καθημερινή μετακίνηση μέσα στην πόλη μπορεί να γίνει σε ηλεκτρική λειτουργία για αποστάσεις μέχρι 30 χιλιόμετρα, ενώ ταυτόχρονα έχουν την δυνατότητα για εμβέλεια μεγαλύτερη από 500 χιλιόμετρα με την συμβατική λειτουργία. Επιπλέον δεδομένου ότι υπάρχει η δυνατότητα φόρτισης σε σταθμούς φόρτισης σε δημόσιους χώρους ή στους χώρους εργασίας, η εμβέλεια της ηλεκτρικής λειτουργίας πρακτικά διπλασιάζεται.

Τα κύρια εσωτερικά στοιχεία ενός υβριδικού οχήματος είναι:

1. **Συμβατική μηχανή:** Βοηθά τον ηλεκτρικό κινητήρα σε μεγάλες ταχύτητες και κινεί το όχημα όταν το φορτίο της μπαταρίας έχει εξαντληθεί
2. **Ηλεκτρικός κινητήρας:** Τροφοδοτείται από την μπαταρία και κινεί το όχημα ακόμα και σε μεγάλες ταχύτητες
3. **Ντεπόζιτο:** Είναι μικρότερο σε σύγκριση με αυτό των συμβατικών οχημάτων
4. **Ενσωματωμένος Φορτιστής:** Μετατρέπει το εισερχόμενο εναλλασσόμενο ρεύμα σε συνεχές ρεύμα για την φόρτιση της μπαταρίας
5. **Ηλεκτρική γεννήτρια:** Συλλέγει ενέργεια από την αναγεννητική πέδηση για την φόρτιση της μπαταρίας εν κινήσει
6. **Θύρα φόρτισης:** Επιτρέπει στο όχημα να συνδεθεί με μια εξωτερική πηγή ρεύματος για την φόρτιση της μπαταρίας
7. **Μπαταρία:** Είναι συνήθως μικρή με χωρητικότητα 8-16 KWh και τροφοδοτεί τον ηλεκτρικό κινητήρα



Εικόνα 4 Μια απλοποιημένη αναπαράσταση των εσωτερικών στοιχείων ενός υβριδικού οχήματος

Το κόστος των υβριδικών οχημάτων είναι μεγαλύτερο από τα συμβατικά οχήματα όμως και εδώ υπάρχουν επιχορηγήσεις και φόρο-ελαφρύνσεις, τα οποία βοηθούν στην μείωση της διαφοράς του αρχικού αυτού κόστους.

Όμως λόγω της συμβατικής τους λειτουργίας, τα υβριδικά οχήματα χρειάζονται την ίδια συντήρηση με τα συμβατικά οχήματα. Επιπλέον η αναγεννητική πέδηση βοηθάει στην μείωση της φθοράς των φρένων. Τέλος λόγω του μικρότερου κόστους του ηλεκτρικού ρεύματος, όσο περισσότερο γίνεται η χρήση της ηλεκτρικής λειτουργίας τόσο περισσότερο μειώνεται η διαφορά τιμής με τα συμβατικά.

Οχήματα με κυψέλες καυσίμου

Ένα όχημα με κυψέλες καυσίμου κινείται με ηλεκτρισμό, η παραγωγή του οποίου γίνεται με διαφορετικό τρόπο από τα πλήρως ηλεκτρικά οχήματα. Το σύστημα κίνησης του περιλαμβάνει μια πληθώρα από κυψέλες τοποθετημένα σε στοίβα, στα οποία αντιδράει χημικά το αέριο υδρογόνο, ένα από τα πιο συνηθισμένα στοιχεία στο σύμπαν, από την δεξαμενή του αυτοκινήτου με το οξυγόνο από την ατμόσφαιρα με αποτέλεσμα την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Οι κυψέλες καυσίμου έχουν αυτονομία από 500 μέχρι 650 χιλιόμετρα και μπορούν να ανατροφοδοτηθούν μέσα σε 5 λεπτά σε σταθμούς τροφοδοσίας υδρογόνου, οι οποίοι γίνονται ολοένα και πιο διαδεδομένοι.

Τα πλεονεκτήματα των οχημάτων κυψελών καυσίμου είναι:

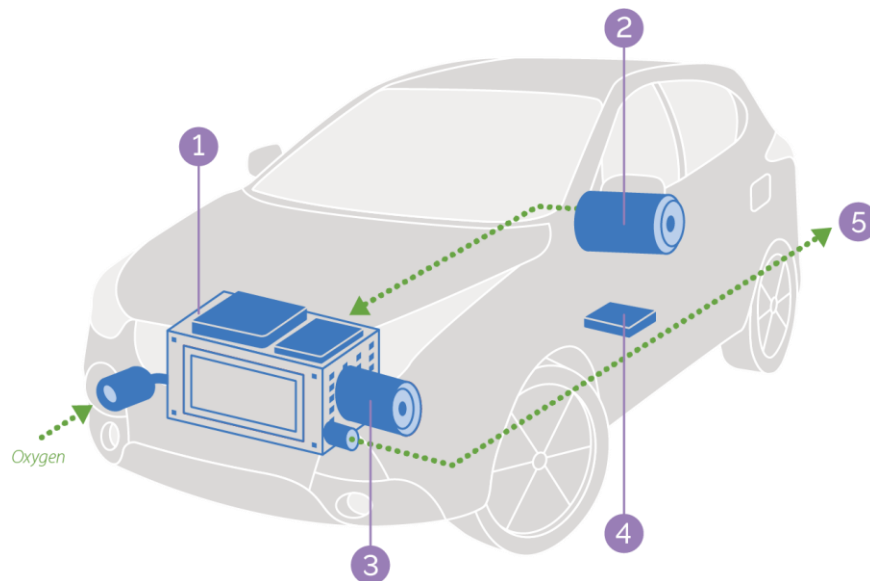
- Μεγάλη επιτάχυνση όπως τα πλήρως ηλεκτρικά οχήματα
- Έχουν μοντέρνο εξοπλισμό
- Μικρά κόστη συντήρησης
- Μηδενικοί ρίποι (Οι ρίποι είναι κυριολεκτικά νερό)
- Γρήγορη ανατροφοδότηση
- Επιχορηγήσεις, φορολογικές ελαφρύνσεις
- Μεγάλα προνόμια από τους κατασκευαστές (δωρεάν συντήρηση / καύσιμο)

Τα οχήματα με κυψέλες καυσίμου κινούνται με πεπιεσμένο αέριο υδρογόνο, το οποίο τροφοδοτεί τις ενσωματωμένες στοιβαγμένες κυψελίδες καυσίμου, τα οποία δεν το καίνε αλλά αντίθετα μετατρέπουν την χημική ενέργεια του καυσίμου σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω του αντίστροφου φαινομένου της ηλεκτρόλυσης. Η ενέργεια αυτή κινεί το ηλεκτρικό κινητήρα του οχήματος. Δεν υπάρχουν επιβλαβείς ρίποι και το μόνο παραπροϊόν της διαδικασίας αυτή είναι το καθαρό νερό.

Η κατασκευή μιας κυψέλης καυσίμου είναι παρόμοια με αυτή μιας μπαταρίας. Το υδρογόνο εισέρχεται στην άνοδο, όπου έρχεται σε επαφή με έναν καταλύτη, ο οποίος προάγει τον διαχωρισμό των ατόμων υδρογόνου σε ηλεκτρόνια και πρωτόνια. Τα ηλεκτρόνια συγκεντρώνονται από τον αγώγιμο συλλέκτη ρεύματος, ο οποίος είναι συνδεδεμένος στο υψηλής τάσης ηλεκτρικό δίκτυο του οχήματος, τροφοδοτώντας την ενσωματωμένη μπαταρία ή τον κινητήρα, ο οποίος με την σειρά κινεί το όχημα. Το κύκλωμα κλείνει με τα ηλεκτρόνια να επιστρέφουν πίσω στις κυψέλες καυσίμου προκειμένου να πραγματοποιηθεί η αντίδραση υδρογόνου-οξυγόνου και να παραχθεί το μοναδικό προϊόν της διαδικασίας, νερό.

Τα κύρια εσωτερικά στοιχεία ενός οχήματος με κυψέλες καυσίμου είναι:

- **Στοιβα κυψελών καυσίμου:** Ένα συνονθύλευμα από πολλές κυψέλες καυσίμου, οι οποίες συνδυάζουν το οξυγόνο με το υδρογόνο για την παραγωγή ρεύματος και ενέργειας για τον ηλεκτρικό κινητήρα.
- **Ντεπόζιτο:** Το αέριο υδρογόνο είναι αποθηκευμένο σε δεξαμενές ενισχυμένες με ίνες άνθρακα για να παρέχει καύσιμο στην στοιβα κυψελών καυσίμου.
- **Ηλεκτρικός κινητήρας:** Κινεί το όχημα χρησιμοποιώντας ενέργεια από την στοιβα κυψελών καυσίμου
- **Μπαταρία:** Συλλέγει ενέργεια από την αναγεννητική πέδηση και προσφέρει έξτρα ενέργεια στον ηλεκτρικό κινητήρα
- **Εξάτμιση:** Το παραπροϊόν της αντίδρασης που γίνεται στην στοιβα κυψελών καυσίμου είναι ατμό νερού, οι οποίες εκπέμπονται μέσω της εξάτμισης



Εικόνα 5 Μια απλοποιημένη αναπαράσταση των εσωτερικών στοιχείων ενός οχήματος με κυψέλες καυσίμου

Και εδώ το κόστος του οχήματος είναι μεγαλύτερο από το αντίστοιχο συμβατικό. Όμως όπως και στα προηγούμενα, υπάρχουν επιχορηγήσεις και φόρο-ελαφρύνσεις, οι οποίες βοηθούν στην μείωση της διαφοράς αυτής. Επιπλέον στο παραπάνω βοηθάει και η μικρότερη τιμή του υδρογόνου ως καύσιμο σε σύγκριση με τα συμβατικά καύσιμα.

Φθορά μπαταριών ιόντων λιθίου

Μια μπαταρία ιόντων λιθίου είναι ένα είδος επαναφορτιζόμενης μπαταρίας. Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου χρησιμοποιούνται ευρέως σε φορητές ηλεκτρονικές συσκευές και ηλεκτρικά οχήματα. Η μπαταρία αποτελείται από μια τυλιγμένη στοίβα υλικών που όταν ξετυλίγονται έχουμε μήκος μερικών μέτρων. Η στοίβα αποτελείται από:

- Την κάθοδο (θετικό ηλεκτρόδιο)
- Την άνοδο (αρνητικό ηλεκτρόδιο)
- Το διαχωριστικό
- Τον συλλέκτη ρεύματος
- Τον ηλεκτρολύτη

Η αποφόρτιση της μπαταρίας είναι ουσιαστικά η μετάβαση από μια ασταθή κατάσταση σε μια πιο σταθερή κατάσταση. Η άνοδος αποτελεί την ασταθής κατάσταση για τα ιόντα λιθίου. Φορτίζοντας την μπαταρία, τα ιόντα λιθίου αναγκάζονται να μετακινηθούν από την κάθοδο στην άνοδο. Μια κατάλληλη μεταφορά για το παραπάνω φαινόμενο είναι δύο μπαλόνια τα οποία συνδέονται με μια βαλβίδα. Ο αέρας μπορεί να αναγκαστεί να συγκεντρωθεί σε ένα από τα δυο μπαλόνια, αποθηκεύοντας δυναμική ενέργεια, όμως φυσικά το σύστημα θέλει να εξισορροπήσει.

Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου χρησιμοποιούν μια ένωση λιθίου ως το υλικό της καθόδου και, στις περισσότερες περιπτώσεις, γραφίτη για την άνοδο. Ένα δίκτυ περιέχει καταλύτες που προάγουν την εισαγωγή ιόντων λιθίου. Στρώματα γραφίτη «κρατούν» τα ιόντα λιθίου όταν φορτίζεται η μπαταρία. Το κελί περιέχει επίσης συνδετικά ώστε όλα να μην καταρρεύσουν.

Μια μπαταρία που μπορεί να κρατήσει μόνο το 70-80% της αρχικής της δυνατότητας θεωρείται ότι έχει φτάσει στο τέλος της ζωής της. Μπαταρίες σε κινητή τηλέφωνα αναμένονται να φτάσουν το παραπάνω κατώφλι μετά από 2 με 3 χρόνια χρήσης. Μια μπαταρία ενός ηλεκτρικού οχήματος έχει συνήθως προσδόκιμο ζωής τουλάχιστον 10 χρόνια. Ενώ μπαταρίες που χρησιμοποιούνται στην ηλεκτροδότηση έχουν την δυνατότητα να αντέξουν παραπάνω από 20 χρόνια.

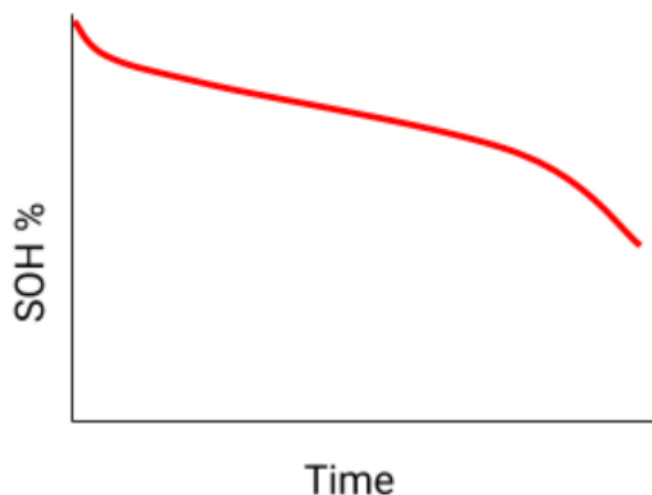
Η μπαταρία μπορεί να χάσει το διαθέσιμο φορτίο με δύο τρόπους

1. Μέσω δευτερευόντων αντιδράσεων ένα μέρος των διαθέσιμων ιόντων λιθίου κολλάνε στο διαχωριστικό μεταξύ ανόδου και καθόδου. Τα ιόντα αυτά μετά την παραπάνω αντίδραση δεν μπορούν να αποκολληθούν, πάρα μόνο μέσω εργαστηριακής επεξεργασίας της μπαταρίας.
2. Διαρροές οι οποίες οφείλονται στην θερμοκρασία, στην τάση και στην χημεία της μπαταρίας.

Οι παράγοντες που επιταχύνουν την γήρανση της μπαταρίας είναι οι παρακάτω:

- **Θερμοκρασία:** Όταν η θερμοκρασία της μπαταρίας αυξάνεται, υπάρχει αυξημένη πιθανότητα της καταστροφής των στοιχείων της μπαταρίας. Με άλλα λόγια, έχουμε αυξημένο μεταβολισμό των ιόντων λιθίου
- **Τάση:** Όταν δημιουργείται μεγαλύτερη διαφορά τάσης μεταξύ των ηλεκτροδίων, αυτό σημαίνει ότι χρειαζόμαστε μεγαλύτερο ρυθμό αντιδράσεων για τα ιόντα λιθίου που συμμετέχουν όπως αυτά διασχίζουν το διαχωριστικό κάλυμμα. Ο αυξημένος αυτός ρυθμός αντιδράσεων συμβάλει στην μεγαλύτερη χρήση και επομένως φθορά της μπαταρίας. Επομένως σε όσο υψηλότερη κατάσταση φόρτισης βρίσκεται η μπαταρία, τόσο περισσότερο φθείρεται.
- **Χημεία:** Διαφορετικά υλικά έχουν διαφορετικές παρενέργειες στην λειτουργία της μπαταρίας. Χαμηλότερης ποιότητας υλικά επιφέρουν μεγαλύτερο αριθμό ανεπιθύμητων αντιδράσεων και επομένως μεγαλύτερη πτώση της διαθέσιμης χωρητικότητας της μπαταρίας
- **Χρόνος:** Ένας μεγάλος παράγοντας στην φθορά της μπαταρίας είναι ο χρόνος. Οι κύκλοι φόρτισης και αποφόρτισης έχουν την τάση να φθείρουν την μπαταρία. Επιπλέον ακόμα και όταν δεν χρησιμοποιείται το πέρασ του χρόνου φθείρει την διαθέσιμη χωρητικότητα της μπαταρίας.

Η φθορά μιας μπαταρίας ιόντων λιθίου δεν είναι γραμμική. Αντίθετα η καμπύλη φθοράς εμφανίζει μια αρχική έντονη πτώση στην υγεία της μπαταρίας και ύστερα αυτή συνεχίζει να μειώνεται με έναν σταθερό και ήπιο ρυθμό. Προς το τέλος της ζωής της μπαταρίας παρατηρείται μια τελευταία έντονη πτώση στην διαθέσιμη χωρητικότητα της μπαταρίας, όπως φαίνεται στην Εικόνα 6. Ευτυχώς η τελική αυτή απότομη πτώση στην υγεία της μπαταρίας ιόντων λιθίου έχει παρατηρηθεί να συμβαίνει κοντά στο τέλος της ζωής της μπαταρίας ή, στις περισσότερες περιπτώσεις, μετά από αυτό.



Εικόνα 6 Ποιοτική καμπύλη φθοράς διαθέσιμης χωρητικότητας της μπαταρίας ιόντων λιθίου ως συνάρτηση του χρόνου

Είδη φορτιστών ηλεκτρικών οχημάτων

Υπάρχουν τρία κύρια είδη φορτιστών για ηλεκτρικά οχήματα – ταχύς, γρήγοροι και αργοί. Οι κατηγορίες αυτές αναπαριστούν την εξαγόμενη ισχύ, και ως αποτέλεσμα την ταχύτητα φόρτισης. Επομένως ο κάθε φορτιστή χαρακτηρίζεται από την δυνατή παραγόμενη ισχύ σε kW.

Ταχυφορτιστές

Οι ταχυφορτιστές είναι ο γρηγορότερος τρόπος φόρτισης ενός ηλεκτρικού οχήματος, και συνήθως είναι τοποθετημένοι σε σταθμούς εξυπηρέτησης αυτοκινητιστών σε αυτοκινητόδρομους, ή σε κεντρικές τοποθεσίες. Οι φορτιστές παρέχουν μεγάλης ισχύος συνεχές ή εναλλασσόμενο ρεύμα προκειμένου να μειωθεί ο χρόνος φόρτισης του οχήματος το περισσότερο δυνατό.

Ανάλογα με το ηλεκτρικό όχημα, το μέσο όχημα μπορεί να φορτίσει στο 80% σε μόλις 20 λεπτά, όμως τα καινούργια ηλεκτρικά οχήματα μπορεί να χρειαστούν μέχρι 1 ώρα, σε έναν συνηθισμένο ταχυφορτιστή των 50kW. Για να μειωθεί η φθορά της μπαταρίας το όχημα θα μειώσει την ταχύτητα φόρτισης όσο η μπαταρία φτάνει το μέγιστο δυνατό σημείο φόρτισης.

Υπάρχουν διαφορετικά είδη ταχυφορτιστών, τα οποία διαφέρουν στην παραγόμενη ισχύ καθώς και στο αν χρησιμοποιούν συνεχές ή εναλλασσόμενο ρεύμα.

Ταχυφορτιστές συνεχούς ρεύματος

Προσφέρουν ισχύ στα 50 kW, χρησιμοποιούν είτε το πρωτόκολλο φόρτισης CHAdeMO ή το CCS. Είναι το πιο συνηθισμένο είδος ταχυφορτιστή για την τελευταία δεκαετία. Έχουν την δυνατότητα φόρτισης του οχήματος μέχρι το 80% μέσα σε 20 με 60 λεπτά ανάλογα με το μέγεθος της μπαταρίας του οχήματος.

Υπερ-ταχυφορτιστές συνεχούς ρεύματος

Προσφέρουν ισχύ τουλάχιστον 100 kW. Οι συνηθισμένες τιμές τους ισχύος είναι 100, 150 και 350 kW. Αποτελούν την νέα γενιά φορτιστών, έχοντας την δυνατότητα να κρατάνε μειωμένους τους χρόνους φόρτισης πάρα την αυξανόμενη χωρητικότητα των ηλεκτρικών μπαταριών.

Για συμβατά οχήματα ο χρόνος πλήρους φόρτισης είναι 20 με 40 λεπτά, ακόμα και για μοντέλα οχημάτων με μεγάλες σχετικά μπαταρίες. Οι φορτιστές αυτοί μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για οχήματα τα οποία δεν είναι σχεδιασμένα να δέχονται τέτοια μεγέθη ισχύς, περιορίζοντας την έξοδο τους έτσι ώστε να συμβαδίζει με τους περιορισμούς του οχήματος. Και πάλι εδώ χρησιμοποιούνται τα πρωτόκολλα CHAdeMO και CCS για τον έλεγχο της φόρτισης του οχήματος.

Ταχυφορτιστές εναλλασσόμενου ρεύματος

Προσφέρουν ισχύ 43 kW (τριφασική 63 A). Ο φορτιστής εναλλασσόμενου ρεύματος έχουν την δυνατότητα φόρτισης οχήματος στο 80% σε 20 με 40 λεπτά, ανάλογα με την μπαταρία του οχήματος και την αρχική κατάσταση της μπαταρίας. Οι φορτιστές αυτοί προϋποθέτουν την ύπαρξη κατάλληλου μετατροπέα εναλλασσόμενου σε συνεχές ρεύμα ενσωματωμένου στο όχημα, προκειμένου να μπορεί να φορτίσει η μπαταρία.

Γρήγοροι φορτιστές

Οι γρήγοροι φορτιστές έχουν δυνατότητα ισχύος 7 με 22 kW. Η πλειονότητα των φορτιστών παρέχουν εναλλασσόμενο ρεύμα, ενώ μια μικρή μερίδα φορτιστών χρησιμοποιούν συνεχές ρεύμα με δυνατότητα ισχύος 25 kW και χρησιμοποιούν τα γνωστά πρωτόκολλα φόρτισης (CHAdeMO, CCS)

Η ταχύτητα φόρτισης διαφέρει από φορτιστή σε φορτιστή, ανάλογα με τις δυνατότητες του καθενός και το μέγεθος μπαταρίας του οχήματος. Ένας φορτιστής των 7 kW, ο οποίος αποτελεί το πιο συνηθισμένο είδος γρήγορου φορτιστή, μπορεί να φορτίσει ένα συμβατό όχημα με μια 40 kWh μπαταρία σε 4 με 6 ώρες, ενώ ένας των 22 kW μπορεί να το πετύχει σε 1 με 2 ώρες. Γρήγοροι φορτιστές συνήθως είναι τοποθετημένοι σε χώρους στάθμευσης, σουπερμάρκετ ή χώρους αναψυχής, όπου αναμένεται το όχημα να είναι σταθμευμένο περισσότερο από 1 ώρα.

Βέβαια ένας σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει την ταχύτητα φόρτισης είναι οι περιορισμοί του ίδιου του οχήματος. Αν το όχημα δεν είναι συμβατό με τις υψηλές δυνατότητες ενός γρήγορου φορτιστή αυτός θα προσαρμοστεί στη χαμηλότερη επιτρεπτή από το όχημα ισχύ.

Αργοί φορτιστές

Οι περισσότεροι αργοί φορτιστές έχουν μέση δυνατότητα ισχύος 3 kW με μερικούς να έχουν την δυνατότητα μέχρι και 6 kW. Οι χρόνοι φόρτισης διαφέρουν και κυμαίνονται μεταξύ 6 και 12 ωρών για έναν μέσο φορτιστή των 3 kW.

Οι αργοί φορτιστές είναι μια πάρα πολύ συνηθισμένη μέθοδος φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων, η οποία χρησιμοποιείται από κατόχους τέτοιων οχημάτων, για φόρτιση στην κατοικία. Όμως, οι αργοί αυτοί φορτιστές δεν περιορίζονται μόνο για χρήση στο σπίτι, καθώς συναντιούνται σε χώρους εργασίας καθώς και σε πολλά σημεία στην πόλη. Λόγω των αυξημένων χρόνων φόρτισης σε σύγκριση με τους γρήγορους φορτιστές, χάνουν σιγά σιγά την δημοτικότητα τους.

Τεχνολογίες ελεγχόμενης φόρτισης

Αντίθετα με τις περισσότερες επαναφορτιζόμενες συσκευές που ξεκινούν να φορτίζουν όταν συνδέονται σε κάποια πηγή ενέργειας και σταματούν όταν η μπαταρία έχει γεμίσει, η ελεγχόμενη φόρτιση προσφέρει ευελιξία στον τρόπο φόρτισης του οχήματος, προσφέροντας πλεονεκτήματα για το ηλεκτρικό δίκτυο (μειώνοντας λειτουργικά κόστη) και τον ιδιοκτήτη του οχήματος (μειώνοντας τα κόστη φόρτισης).

Υπάρχουν δύο τύποι ελεγχόμενης φόρτισης: μίας κατεύθυνσης (V1G) και αμφίδρομη (V2G, V2V κα).

V1G

Η V1G επιτρέπει στην ροή της ισχύος από το δίκτυο να μεταβάλλεται κατά την διάρκεια της φόρτισης του οχήματος. Η ροή ισχύος μπορεί να επηρεαστεί από έναν απλό χρονομετρητή, ένα σήμα τιμής από τον χειριστή του δικτύου, ή πιο περίπλοκους κανόνες βασισμένοι στην κατάσταση του δικτύου ηλεκτροδότησης.

Η ανάπτυξη μιας τέτοιας τεχνολογίας είναι σημαντική λόγω των παρακάτω. Αρχικά, με το έλεγχο της ροής ισχύος μπορεί να επιτευχθεί καλύτερη εκμετάλλευση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, οι οποίες θεωρούνται ασταθείς και μη προβλέψιμες ως προς την παραγόμενη ισχύ τους. Επιπλέον με το

αυξανόμενο αριθμό ηλεκτρικών οχημάτων θα πρέπει να υπάρχει η δυνατότητα για την αυξομείωση της προσφοράς ηλεκτρικής ενέργειας προς τους σταθμούς φόρτισης προκειμένου να αποφευχθούν φαινόμενα ανεπάρκειας ή υπερφόρτισης του δικτύου, τα οποία θα προκαλούσαν ξαφνική αύξηση στην τιμή της ενέργειας.

Τα ηλεκτρικά οχήματα είναι πρακτικά μπαταρίες με ρόδες επομένως είναι λογική να χρησιμοποιηθούν προκειμένου να σταθεροποιηθεί το δίκτυο και όχι να αποσταθεροποιηθεί. Δεδομένου ότι τα ηλεκτρικά οχήματα παραμένουν συνδεδεμένα στους σταθμούς φόρτισης πολύ περισσότερη ώρα απ' ότι χρειάζονται για να φορτίσουν. Αυτό επιτρέπει στην δρομολόγηση της φόρτισης του οχήματος την χρονική στιγμή που αυτό θα γίνει αποδοτικότερα, από άποψης τόσο κόστους άλλα και κατάστασης δικτύου. Φορτίζοντας σε περιόδους χαμηλής ζήτησης είναι πολύ πιο φιλικό προς το δίκτυο.

Όμως μόνο φορτίζοντας το οχήματα σε περιόδους χαμηλής ζήτησης μπορεί να μην είναι αρκετό για την σταθεροποίηση του δικτύου.

V2G

Η V2G λειτουργεί με παρόμοιο τρόπο, όμως η ισχύς έχει και την δυνατότητα να ρέει από το όχημα προς το δίκτυο, βοηθώντας στην ανακούφιση της πίεσης του δικτύου ιδιαίτερα σε ώρες αιχμής.

Συνήθως, ο μέσος σταθμός φόρτισης V2G έχει δυνατότητα φόρτισης 10 kW, αρκετή για οικιακή φόρτιση ή φόρτιση στο χώρο εργασίας. Οι σταθμοί αυτοί χρησιμοποιούν συνεχές ρεύμα καθώς με τον τρόπο αυτό μπορεί να παρακαμφθεί ο ενσωματωμένος μιας κατεύθυνσης φορτιστής του οχήματος. Παρόλο που υπάρχουν και λύσεις με εναλλασσόμενο ρεύμα δεν έχει βρεθεί κάποιος ενιαίος τρόπος αντιμετώπισης.

Επί του παρόντος, κατασκευαστές οχημάτων συμβατών με το πρωτόκολλο CHAdeMO έχουν ξεπεράσει άλλους κατασκευαστές οχημάτων φέρνοντας στην αγορά μοντέλα συμβατά με το V2G. Η δυνατότητα υποστήριξης της V2G μεθόδου έχει γίνει πραγματικότητα με περισσότερους κατασκευαστές να εντάσσονται στην επανάσταση αυτή με οχήματα συμβατά στη V2G.

Η παραπάνω μέθοδος έχει σημαντικά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με την V1G μέθοδο.

- Μείωση του λειτουργικού κόστους των ηλεκτρικών οχημάτων. Φορτίζοντας σε περιόδους χαμηλής ζήτησης, όπου οι τιμές είναι χαμηλότερες, και αποφορτίζοντας σε περιόδους υψηλής ζήτησης, όπου οι τιμές είναι υψηλότερες, έχει ως αποτέλεσμα την μείωση σημαντικά των εξόδων φόρτισης.
- Τα ηλεκτρικά οχήματα αποκτούν ένα έξτρα ρόλο πέρα από μέσο μετακίνησης, τον ρόλο του ρυθμιστή του δικτύου.
- Επιτυγχάνεται με μεγαλύτερη ευκολία η σταθεροποίηση του ηλεκτρικού δικτύου. Με την επιλογή όχι μόνο της φόρτισης των οχημάτων τα οχήματα μπορούν να προσφέρουν την μπαταρία τους με μεγαλύτερη ελευθερία προς το δίκτυο επιτυγχάνοντας καλύτερη σταθεροποίηση αυτού.

Ωστόσο η πιο έντονη χρήση της μπαταρίας έχει δημιουργήσει αρκετό αντίλογο. Δύο πρόσφατες μελέτες εξερεύνησαν διαφορετικά στοιχεία της V2G: μια πειραματική μελέτη εξέτασε την επίδραση της αμφίδρομης ροής ενέργειας στις εμπορικές μπαταρίες ιόντων λιθίου, μεγιστοποιώντας το κέρδος του ιδιοκτήτη, ενώ η άλλη μελέτη, η οποία βασίστηκε σε προσομοιώσεις, εξέτασε την ιδέα της χρήση της V2G ως ένα εργαλείο για να ρυθμίσει τις συνθήκες ανάπαυσης μιας μπαταρίας προκειμένου να βελτιωθεί η μακροζωία της. Παρόλο που οι μπαταρίες που εξετάστηκαν ήταν παρόμοιες, η κάθε μία μελέτη οδηγήθηκε σε διαφορετικό αποτέλεσμα. Η πρώτη συμπέρανε ότι η V2G μέθοδος θα ήταν

επιζήμια για την απόδοση των μπαταριών, μειώνοντας την διάρκεια ζωής της μπαταρίας σε λιγότερο από πέντε χρόνια και αυξάνοντας την απώλεια χωρητικότητας κατά 75% σε μια περίοδο 18 μηνών. Αντίθετα η δεύτερη υποστήριξε ότι μέσω έξυπνης εφαρμογής της V2G μεθόδου θα μπορούσε να επιτευχθεί μείωση της φθοράς της μπαταρίας σε επίπεδο χωρητικότητας και ισχύος ενός ηλεκτρικού οχήματος κατά 9.1% και 12.1% αντίστοιχα.

Οι ερευνητές μετά από τα παραπάνω αποτελέσματα συνεργάστηκαν προκειμένου να παρέχουν σε μια από κοινού έρευνα μια καθαρή απάντηση για το πως η ζωή μιας μπαταρίας μπορεί να επεκταθεί. Μέσω αυτής της κοινής έρευνας επιβεβαίωσαν ότι η βιωσιμότητα της V2G μεθόδου διέπεται από την φθορά της μπαταρίας. Καθώς οι μπαταρίες ιόντων λιθίου γερνούν και υφίστανται κύκλους φόρτισης, χάνουν τόσο τη χωρητικότητα φόρτισης όσο και την ικανότητα ισχύος, γεγονός που με τη σειρά του αναγκάζει ένα όχημα με μπαταρία να γίνει λιγότερο αποδοτικό και ικανό να ταξιδεύει μικρότερες αποστάσεις μεταξύ φορτίσεων. Πολλές από τις τρέχων μελέτες για την V2G προσομοιώνουν της μπαταρίες χωρίς να παίρνουν υπόψιν τους την φθορά τους, ένας παράγοντας με σημαντικό οικονομικό και ρυθμιστικό ρόλο για τους καταναλωτές και τους κατασκευαστές. Επιπλέον η μελέτη έδειξε ότι, ενώ τα τρέχον μοντέλα V2G αποδεικνύονται σημαντικά επιζήμια για την ζωή μια μπαταρίας, βελτιστοποιημένα συστήματα V2G, σχεδιασμένα να δουλέψουν πιο υπεύθυνα και αποδοτικά προκειμένου να μειώσουν την φθορά της μπαταρίας, μπορεί να είναι βιώσιμα, κερδοφόρα και ικανά για την επέκταση της διάρκειας της ζωής της μπαταρίας.

V2V

Η V2V αποτελεί ειδική κατηγορία της V2G μεθόδου. Η κύρια διαφορά των δύο μεθόδων είναι ότι στη V2V η συναλλαγή ενέργειας γίνεται μεταξύ δυο οχημάτων και όχι μεταξύ οχήματος και δικτύου. Με αυτό τον τρόπο, η φόρτιση γίνεται γρηγορότερα και πιο αποδοτικά.

Υπάρχουν δύο τρόποι φόρτισης V2V:

1. Φόρτιση μέσω AC, η οποία προϋποθέτει ότι και τα δύο οχήματα έχουν ενσωματωμένους διπλής κατεύθυνσης φορτιστές προκειμένου να μπορούν να μετατρέψουν το συνεχές σε εναλλασσόμενο και στη συνέχεια το εναλλασσόμενο σε συνεχές. Η μέθοδος αυτή αν και ακολουθεί την συνηθισμένη πορεία της φόρτισης ενός οχήματος δεν είναι ιδιαίτερα αποδοτική λόγω των πολλών μετατροπών που πρέπει να γίνουν. Αρχικά το συνεχές ρεύμα της μπαταρίας του οχήματος-φορτιστή πρέπει να μετατραπεί σε εναλλασσόμενο. Αυτό στη συνέχεια μεταφέρεται στο όχημα-στόχος και μετατρέπεται από εναλλασσόμενο σε συνεχές προκειμένου να φορτίσει την μπαταρία του άλλου οχήματος. Οι δύο αυτές, φαινομενικά άσκοπες, μετατροπές εισάγουν μεγάλες απώλειες για το σύστημα. Βέβαια πολλά από τα οχήματα είναι ήδη εξοπλισμένα με ενσωματωμένους φορτιστές κάνοντας την ευκολότερα υλοποιήσιμη.
2. Φόρτιση μέσω DC, η οποία προϋποθέτει ότι υπάρχει άμεσος τρόπος σύνδεσης μεταξύ των δύο μπαταριών των οχημάτων φορτιστή και στόχου παρακάμπτοντας τους ενσωματωμένους φορτιστές, αν αυτοί φυσικά υπάρχουν. Η μέθοδος αυτή είναι πολύ αποδοτική καθώς δεν απαιτεί σχεδόν κανένα ενδιάμεσο στοιχείο για την μεταφορά φορτίου μεταξύ των οχημάτων. Όμως η παράκαμψη του ενσωματωμένου φορτιστή δεν είναι απλή υπόθεση και σίγουρα χρειάζεται ξεχωριστή διαδικασία από τους κατασκευαστές ηλεκτρικών οχημάτων έτσι ώστε αυτή να ενσωματωθεί στα οχήματα. Το

εμπόδιο αυτό κάνει την μέθοδο αυτή λιγότερο ελκυστική για τώρα λόγω της έλλειψης του κατάλληλου εξοπλισμού.

Όμως και οι δύο μέθοδοι προσφέρουν ένα πολύ σημαντικό προτέρημα. Μαζί με το V2G προσφέρουν μεγαλύτερη ευελιξία στο τρόπο με τον οποίο ένας χώρος στάθμευσης με φορτιστές, χειρίζεται τα οχήματα. Η V2V εισάγει την συνεργασία μέσα στο παιχνίδι, αυξάνοντας την απόδοση της V2G. Για παράδειγμα σε περιπτώσεις υψηλής ζήτησης όπου κάποια οχήματα έχουν δρομολογηθεί να αποχωρήσουν πριν αυτή η ζήτηση μειωθεί, το V2V δίνει μια προσωρινή λύση φορτίζοντας τα, από το διαθέσιμο φορτίο του χώρου στάθμευσης, μεταθέτοντας την ανάγκη για αγορά ενέργειας για μερικές ώρες όπου η ζήτηση προβλέπεται να είναι μικρότερη.

Η V2V δεν είναι η μόνη τεχνολογία που έχει να κάνει με ανταλλαγή ενέργειας. Υπάρχουν και άλλες τέτοιες μεθοδολογίες όπως η V2B, στην οποία ανταλλάσσει ενέργεια το όχημα με το κτήριο, το οποίο μπορεί να είναι κάποιο δημόσιο κτήριο ή ένα γραφείο, ή η V2H στην οποία ανταλλάσσει ενέργεια το όχημα με το σπίτι του ιδιοκτήτη.

Κεφάλαιο 4, Ενισχυτική Μάθηση

Εισαγωγή

Η ενισχυτική μάθηση είναι μια μέθοδος μηχανικής μάθησης, στην οποία ο πράκτορας μαθαίνει να κάνει συγκεκριμένες κινήσεις σε ένα περιβάλλον, οι οποίες τον οδηγούν στην μέγιστη επιβράβευση. Το επιτυγχάνει αυτό μέσω της εξερεύνησης και της εκμετάλλευσης της γνώσης, μαθαίνει δηλαδή με επαναλαμβανόμενες δοκιμές μεγιστοποίηση της ανταμοιβής.

Παρακάτω παρουσιάζεται μία αναλογία για την καλύτερη κατανόηση της ενισχυτικής μάθησης

Ας φανταστούμε ότι βρισκόμαστε σε ένα άγνωστο χωράφι στην μέση του βραδιού χωρίς φώτα χωρίς κανέναν πυρσό ή σπίρτο. Υπάρχουν τρύπες και πέτρες στο χωράφι αυτό, την τοποθεσία των οποίων δεν γνωρίζουμε. Υπάρχει μόνο ένας απλός κανόνας, αν πέσεις σε τρύπα ή χτυπήσεις κάποια πέτρα πρέπει να ξεκινήσουμε από την αρχή.

- Ξεκινάμε να προχωράμε τυφλά, μετρώντας μόνο τα βήματα που έχουμε κάνει. Μετά από κάποιον αριθμό βημάτων πέφτουμε σε μία τρύπα. Κερδίζουμε ανταμοιβή τόση όσα και τα βήματα που κάναμε.
- Ξεκινάμε πάλι από την αρχή αλλά ένα βήμα πριν φτάσουμε στην τρύπα, αλλάζουμε κατεύθυνση για να αποφύγουμε την τρύπα, Μετά από την αλλαγή κατεύθυνσης προχωράμε ευθεία και ύστερα από μερικά βήματα χτυπάμε μια πέτρα. Η ανταμοιβή μας τώρα είναι μεγαλύτερη από πριν καθώς κάναμε περισσότερα βήματα. Η διαδρομή αυτή επομένως μας φαίνεται καλύτερη από την προηγούμενη και θα την προτιμήσουμε στο μέλλον.
- Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι να μην μπορούμε με κάποια αλλαγή κατεύθυνσης σε οποιοδήποτε σημείο της διαδρομής μας να ξεπεράσουμε την διαδρομή με τα μέγιστα βήματα.

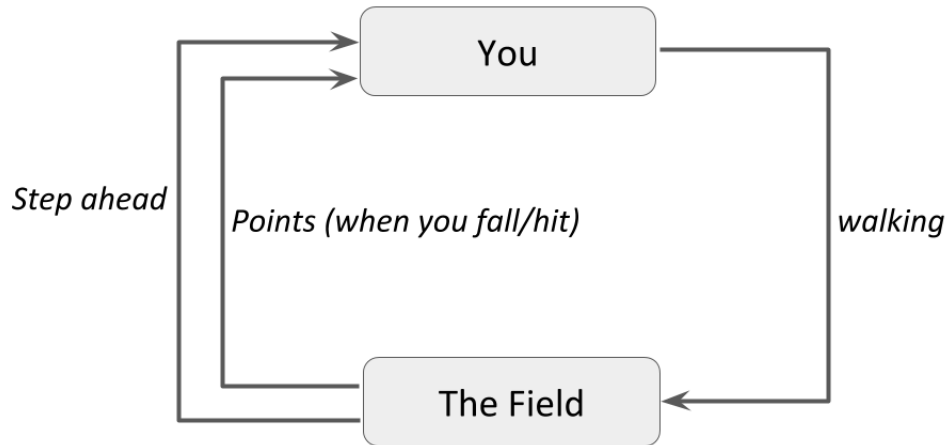
Η τελική μας τακτική είναι αυτή, η οποία μας οδηγεί στη διαδρομή με τα περισσότερα βήματα.

Βασικές έννοιες

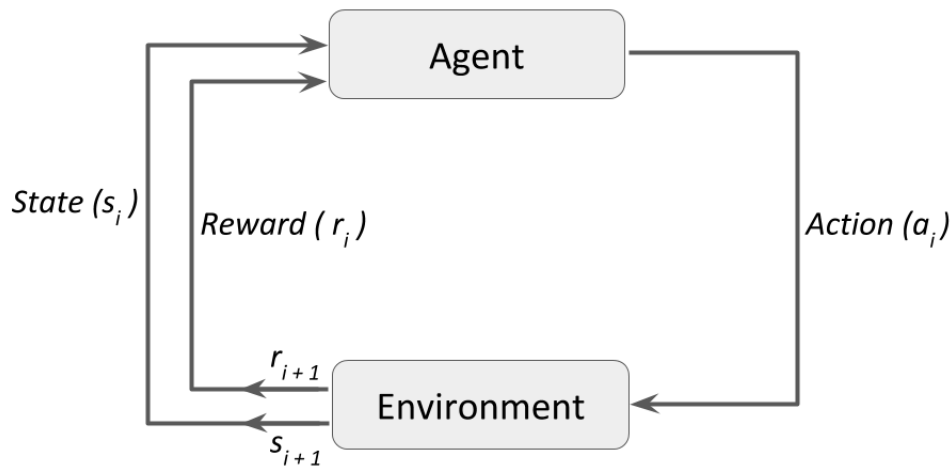
Στο προηγούμενο παράδειγμα ο **πράκτορας** ήταν εμείς που προσπαθούμε να διασχίσουμε το χωράφι, το οποίο είναι το **περιβάλλον** μας. Το περπάτημα είναι η **δράση** του **πράκτορα** πάνω στο **περιβάλλον**. Η απόσταση που έχει διασχίσει ο **πράκτορας** λειτουργεί ως η **ανταμοιβή**. Ο **πράκτορας** προσπαθεί να εκτελέσει τις **δράσεις** του με τέτοιο τρόπο ώστε να μεγιστοποιηθεί η **ανταμοιβή**. Με αυτό τον τρόπο, λειτουργεί και η ενισχυτική μάθηση με λίγα λόγια. Παρακάτω φαίνεται η σχηματική αναπαράσταση του προηγούμενου παραδείγματος (Εικόνα 7) καθώς και μια αναπαράσταση (Εικόνα 8) της γενικής μεθόδου της ενισχυτικής μάθησης

Επομένως μερικές βασικές έννοιες της ενισχυτικής μάθησης είναι:

- **Πράκτορας:** Μια υποθετική οντότητα, η οποίας εκτελεί δράσεις σε ένα περιβάλλον προκειμένου να κερδίσει κάποια ανταμοιβή.
- **Δράση (a):** Το σύνολο όλων των πιθανών κινήσεων που ο πράκτορας μπορεί να κάνει
- **Περιβάλλον (e):** Ένα σενάριο το οποίο ο πράκτορας πρέπει να αντιμετωπίσει
- **Κατάσταση (s):** Η παρούσα κατάσταση στην οποία βρίσκεται ο πράκτορας στο περιβάλλον



Εικόνα 7 Σχηματική αναπαράσταση του παραδείγματος με το χωράφι



Εικόνα 8 Γενική σχηματική αναπαράσταση της ενισχυτικής μάθησης

- **Ανταμοιβή (R):** Ένα νούμερο το οποίο επιστρέφεται από τον περιβάλλον στον πράκτορα προκειμένου να βαθμολογηθεί η τελευταία κίνηση του πράκτορα
- **Πολιτική (π):** Η στρατηγική που ακολουθεί ο πράκτορας προκειμένου να αποφασίσει την επόμενη του δράση βασισμένος πάνω στην παρούσα κατάσταση.
- **Παράγοντας έκπτωσης (γ):** Παίρνει τιμές από το 0 μέχρι το 1 και χρησιμοποιείται για την μείωση της σημασίας μια ανταμοιβής όσο η δράση που την προκάλεσε απομακρύνεται από το παρόν. Όσο η

τιμή αυτή πλησιάζει το 1 τόσο περισσότερο ο πράκτορας ενδιαφέρεται για απομακρυσμένες χρονικά ανταμοιβές, ενώ όσο πλησιάζει το 0 τόσο περισσότερο ο πράκτορας ενδιαφέρεται μόνο για βραχυπρόθεσμες τιμές

- **Επεισόδιο:** Αποτελεί την βασική μονάδα μέτρησης χρόνου στη ενισχυτική μάθηση. Κάθε επεισόδιο ξεκινάει μετά από το πέρας κάποιου άλλου και τελειώνει όταν το περιβάλλον φτάσει σε κάποια τερματική κατάσταση (πχ χτυπήσαμε πέτρα ή βρεθήκαμε σε τρύπα).
- **Τιμή (V):** Η αναμενόμενη μειωμένη μακροπρόθεσμη ανταμοιβή, σε αντίθεση με την βραχυπρόθεσμη ανταμοιβή R. Η τιμή ορίζεται ως $V_{\pi}(s)$, δηλαδή ως η αναμενόμενη μακροπρόθεσμη ανταμοιβή της παρούσας κατάστασης s υπό την πολιτική π .
- **Q-τιμή ή τιμή-δράσης (Q):** Η Q-τιμή είναι παρόμοια με την **Τιμή**, εκτός από το γεγονός ότι αυτή δέχεται μια έξτρα παράμετρο, την παρούσα δράση a . Επομένως αυτή ορίζεται ως η μακροπρόθεσμη ανταμοιβή της παρούσας κατάστασης s , έχοντας εκτελέσει την δράση a υπό την πολιτική π ($Q_{\pi}(s, a)$).

Βασική λειτουργία

Υπάρχουν τρεις διαφορετικές προσεγγίσεις για την υλοποίηση ενός αλγορίθμου ενισχυτικής μάθησης.

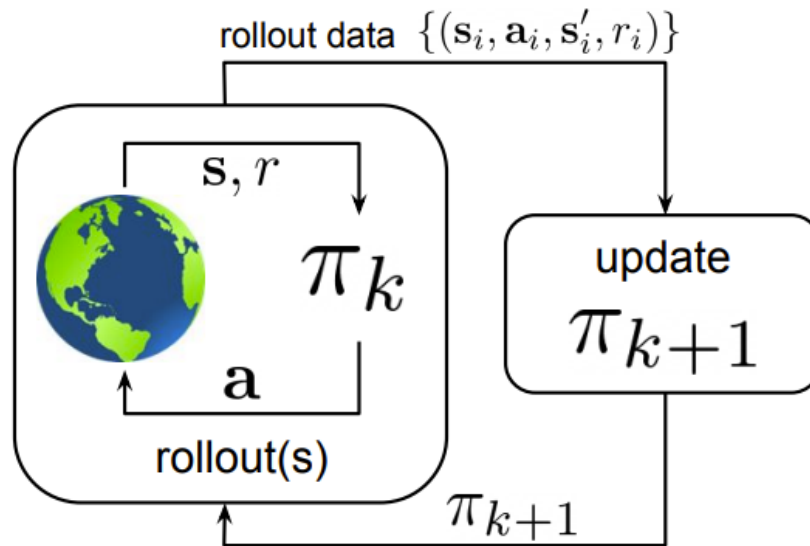
- **Βασισμένος στην τιμή:** Σε μια μέθοδος ενισχυτικής μάθησης βασισμένης στη τιμή V, ο πράκτορας προσπαθεί να μεγιστοποιήσει την συνάρτηση τιμής $V(s)$. Όπως ορίστηκε προηγουμένως, η $V_{\pi}(s)$ είναι η αναμενόμενη μακροπρόθεσμη ανταμοιβή της παρούσας κατάστασης s υπό την πολιτική π . Επομένως, η $V(s)$ είναι η τιμή της ανταμοιβής, την οποία ο πράκτορας περιμένει να κερδίσει στο μέλλον ξεκινώντας από την κατάσταση s

$$V_{\pi}(s) = E_{\pi}[P_{t+1} + \gamma R_{t+2} + \gamma^2 R_{t+3} + \dots | S_t = s]$$

- **Βασισμένος στην πολιτική:** Σε μια μέθοδο ενισχυτικής μάθησης βασισμένης στη πολιτική π , ο πράκτορας προσπαθεί να καταλήξει σε μια πολιτική τέτοια ώστε κάθε δράση της σε κάθε κατάσταση να είναι η βέλτιστη, προκειμένου να κερδίσουν την μέγιστη ανταμοιβή στο μέλλον. Σε αυτή τη μέθοδο η συνάρτησης τιμής δεν εμπλέκεται. Μία πολιτική π αποφασίζει για επόμενη κίνηση a σε κάθε κατάσταση s . Υπάρχουν τρεις τύποι μεθόδων βασισμένων στην πολιτική:
 - **On-Policy:** Συνήθως οι εμπειρίες του πράκτορα συλλέγονται χρησιμοποιώντας την τελευταία έκδοση της εκπαιδευμένης πολιτικής και μετά ύστερα χρησιμοποιείται αυτή η εμπειρία προκειμένου να βελτιωθεί η ίδια η πολιτική. Επομένως σε μια τέτοια μέθοδο η πολιτική ανανεώνεται με δεδομένα που συλλέχθηκαν από την ίδια. Η παρούσα πολιτική βελτιστοποιείται και ταυτόχρονα χρησιμοποιείται για την απόφαση των δράσεων πάνω στο περιβάλλον. Με λίγα λόγια

Πολιτική συμπεριφοράς == Πολιτική για την απόφαση δράσεων

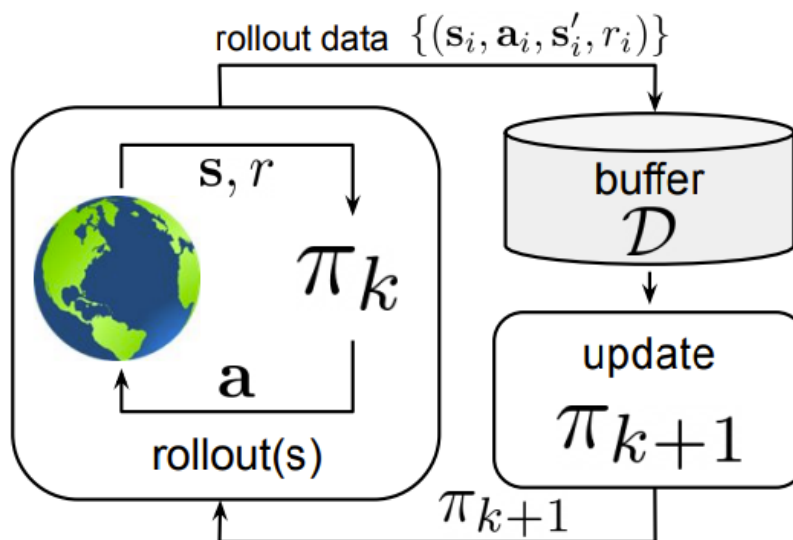
Η πολιτική που είναι υπεύθυνη για την συλλογή δεδομένων για την ανανέωση της πολιτικής ονομάζεται **πολιτική συμπεριφοράς**



Εικόνα 9 Σχηματική αναπαράσταση ενός on-policy αλγορίθμου

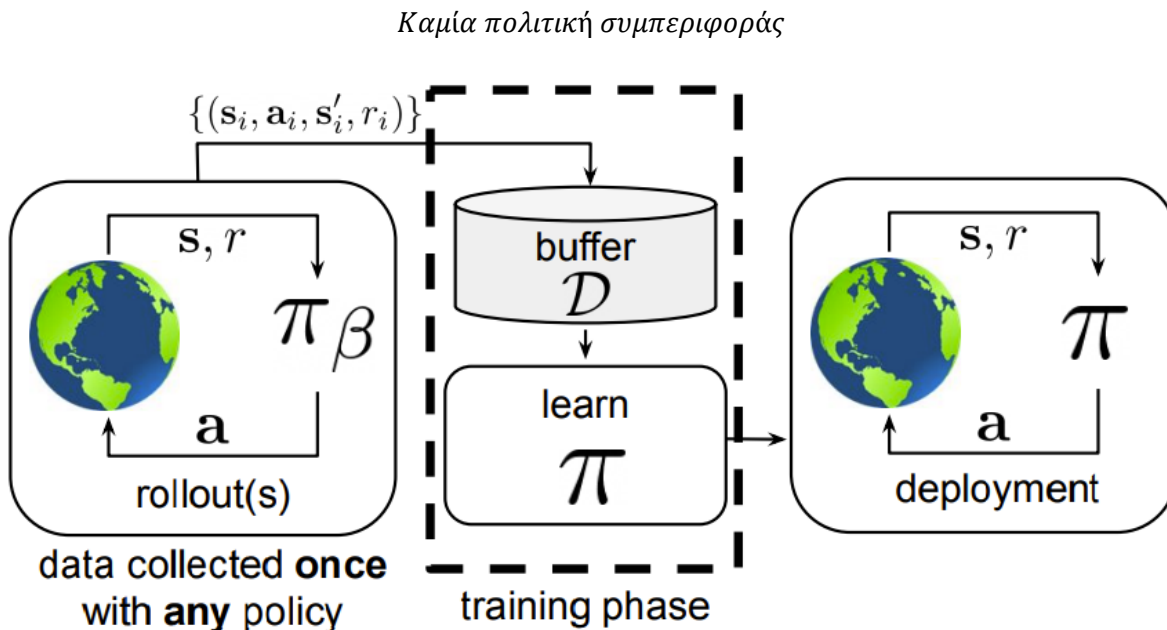
- **Off-Policy:** Σε αυτή τη μέθοδο η εμπειρία του πράκτορα προστίθεται σε λίστα δεδομένων, η οποία ονομάζεται λίστα αναπαραγωγής, και σε κάθε επανάληψη η νέα πολιτική συλλέγει νέα δεδομένα για την λίστα αυτή. Επομένως η λίστα αναπαραγωγής καταλήγει να έχει δεδομένα από όλες τις πολιτικές μέχρι τώρα και όλα αυτά τα δεδομένα χρησιμοποιούνται για να ανανεωθεί η νέα πολιτική. Με τον τρόπο αυτό, παλιότερα δεδομένα συμμετέχουν στην ανανέωση της πολιτικής, αυξάνοντας την αποδοτικότητα, επειδή δεν χρειάζεται να συλλέξουμε πολλά δεδομένα σε κάθε αλλαγή της πολιτικής.

Πολιτική συμπεριφοράς \neq Πολιτική για την απόφαση δράσεων



Εικόνα 10 Σχηματική αναπαράσταση ενός off-policy αλγορίθμου

- **Offline:** Σε αυτή τη μέθοδο χρησιμοποιούνται προϋπάρχοντα δεδομένα χωρίς την ανάγκη για συλλογή νέων δεδομένων. Ο πράκτορας δεν έχει πλέον την δυνατότητα να αλληλοεπιδρά με το περιβάλλον και να συλλέγει επιπλέον μεταβάσεις χρησιμοποιώντας την **πολιτική συμπεριφοράς**. Δίνεται στον αλγόριθμο, επομένως, μια στατική λίστα από δεδομένα, μέσω της οποίας πρέπει να μάθει την βέλτιστη πολιτική.



Εικόνα 11 Σχηματική αναπαράσταση ενός offline αλγορίθμου

- **Βασισμένος στο μοντέλο:** Σε μια μέθοδος ενισχυτικής μάθησης βασισμένης στο μοντέλο, δημιουργείται ένα εικονικό μοντέλο για κάθε περιβάλλον, και ο πράκτορας μαθαίνει να εκτελεί δράσεις στο συγκεκριμένο αυτό περιβάλλον. Εφόσον το μοντέλο διαφέρει από περιβάλλον σε περιβάλλον, δεν υπάρχει μοναδική λύση ή αλγόριθμος για αυτό το είδος.
- **Βασισμένος στην Q-τιμή:** Η τεχνική αυτή βασίζεται σε μια συνάρτηση η οποία ονομάζεται συνάρτηση Q. Η συνάρτηση αυτή ($Q_\pi(s, a)$), όπως είδαμε παραπάνω, ορίζεται ως η αναμενόμενη μακροπρόθεσμη ανταμοιβή της παρούσας κατάστασης s , έχοντας εκτελέσει την δράση a υπό την πολιτική π . Ορίζουμε την βέλτιστη συνάρτηση Q ($Q_*(s, a)$) ως η μέγιστη ανταμοιβή η οποία μπορεί να επιτευχθεί ξεκινώντας από την κατάσταση s , παίρνοντας την δράση a και ακολουθώντας την βέλτιστη πολιτική από εκεί και πέρα. Η βέλτιστη Q συνάρτηση υπακούει στην παρακάτω εξίσωση βελτιστότητας Bellman

$$Q_*(s, a) = E[R + \gamma \max_{a'} Q_*(s', a')]$$

Το παραπάνω σημαίνει ότι η μέγιστη ανταμοιβή από μία κατάσταση s και μια δράση a είναι το άθροισμα της ακόλουθης ανταμοιβής και της ανταμοιβής (πολλαπλασιασμένης με τον παράγοντα έκπτωσης γ) που επιτυγχάνεται αν ακολουθήσουμε την βέλτιστη πολιτική από εκεί και πέρα, μέχρι το τέλος του επεισοδίου. Η μέση τιμή υπολογίζεται τόσο πάνω στην κατανομή των ακόλουθων ανταμοιβών αλλά και των επόμενων πιθανών καταστάσεων s' .

Η βασική ιδέα πίσω από την μέθοδο αυτή είναι να χρησιμοποιηθεί η εξίσωση βελτιστότητας Bellman ως μια επαναληπτική ανανέωση

$$Q_{i+1}(s, a) \leftarrow E[R + \gamma \max_{a'} Q_i(s', a')]$$

και μπορεί να αποδειχθεί ότι αυτή η διαδικασία συγκλίνει στη βέλτιστη Q συνάρτηση

$$Q_i \rightarrow Q_*, \quad i \rightarrow \infty$$

Deep Q-Learning

Για τα περισσότερα προβλήματα είναι μη-πρακτική η αναπαράσταση της συνάρτησης Q ως έναν πίνακα που περιέχει τιμές για κάθε συνδυασμό από καταστάσεις s και δράσεις a . Αντίθετα εκπαιδεύουμε ένα εργαλείο προσέγγισης της συνάρτησης, όπως ένα νευρωνικό δίκτυο, με παραμέτρους θ , προκειμένου να προσεγγίσει της Q-τιμές δηλαδή $Q(s, a; \theta) \approx Q_*(s, a)$. Αυτό μπορεί να γίνει με την ελαχιστοποίηση της παρακάτω συνάρτησης απώλειας σε κάθε βήμα i :

$$L_i(\theta_i) = E_{s,a,r,s' \sim \rho(\cdot)} \left[(y_i - Q(s, a; \theta_i))^2 \right], \text{ όπου } y_i = r + \gamma \max_{a'} Q(s', a'; \theta_{i-1})$$

Εδώ το y_i ονομάζεται χρονική διαφορά στόχος και η διαφορά $y_i - Q$ ονομάζεται η χρονική διαφορά σφάλμα. Το ρ αναπαριστά την κατανομή της μετάβασης s, a, r, s' , η οποία έχει συλλεχθεί από το περιβάλλον.

Σημειώνεται ότι οι παράμετροι της προηγούμενης επανάληψης θ_{i-1} είναι σταθερές και μη ανανεωμένες. Στην πράξη χρησιμοποιείται μια στατική εικόνα των παραμέτρων του δικτύου μερικές επαναλήψεις στο παρελθόν αντί για την τελευταία επανάληψη. Η στατική εικόνα αυτή ονομάζεται δίκτυο στόχος.

Ο αλγόριθμος Q-μάθηση είναι ένας off-policy αλγόριθμος, ο οποίος μαθαίνει για την άπληστη πολιτική $a = \max_a Q(s, a; \theta)$, ενώ χρησιμοποιεί διαφορετικές **πολιτικές** για την δράση στο περιβάλλον και για την συλλογή δεδομένων αντίστοιχα. Η πολιτική με την οποία αλληλοεπιδρά με το περιβάλλον είναι συνήθως μια ε-άπληστη πολιτική, η οποία επιλέγει την άπληστη δράση, την δράση δηλαδή με την μεγαλύτερη αναμενόμενη ανταμοιβή, με πιθανότητα $1 - \varepsilon$ και μία τυχαία δράση με πιθανότητα ε προκειμένου να εγγυηθεί μια καλή κάλυψη του χώρου κατάστασης-δράσης.

Αναπαραγωγή εμπειρίας

Προκειμένου να αποφευχθεί ο πλήρης υπολογισμός της απώλειας της DQN, αυτός μπορεί να ελαχιστοποιηθεί με την χρήση της στοχαστικής κλίσης. Αν η απώλεια υπολογίζεται χρησιμοποιώντας μόνο την τελευταία μετάβαση τότε αυτό καταλήγει σε απλή Q-μάθηση.

Όμως η παραπάνω λύση παρουσιάζει αστάθειες. Επομένως έγινε η εισαγωγή μια νέας μεθόδου, της **αναπαραγωγής εμπειρίας**. Σε κάθε επανάληψη συλλογής δεδομένων, η μετάβαση αποθηκεύεται σε μια κυκλική λίστα, την λίστα αναπαραγωγής. Μετά κατά τη διάρκεια της εκπαίδευσης, αντί να χρησιμοποιούνται οι τελευταίες μεταβάσεις για τον υπολογισμό της απώλειας και της παραγώγου, υπολογίζονται με την χρήση ενός μικρού υποσυνόλου από μεταβάσεις της λίστας. Αυτό έχει δύο πλεονεκτήματα

- Καλύτερη απόδοση δεδομένων κάνοντας χρήση της ίδιας μετάβασης για παραπάνω από μια ανανεώσεις
- Καλύτερη σταθερότητας κάνοντας χρήση μεταβάσεων, οι οποίες δεν έχουν κάποια συσχέτιση μεταξύ τους

Παρακάτω παραθέτουμε τον αλγόριθμο της βαθιάς Q-μάθησης με αναπαραγωγή εμπειρίας.

Algorithm 1 Deep Q-Learning

```

1: Initialize replay memory D
2: Initialize action-value function Q with random weight  $\theta$ 
3: Initialize target action-value function  $\hat{Q}$  with weights  $\theta^- = \theta$ 
4: for episode = 1 to M do
5:   Initialize state  $s_1$ 
6:   for  $t = 1$  to T do
7:     Following  $\epsilon$ -greedy policy, select  $a_t = \begin{cases} \text{a random action, with probability } \epsilon \\ \operatorname{argmax}_a Q(\varphi(s_t), a; \theta), \text{ otherwise} \end{cases}$ 
8:     Execute action  $a_t$  and observe reward  $r_t$  and new state  $s_{t+1}$ 
9:     Store transition  $(s_t, a_t, r_t, s_{t+1})$  in D
10:    Sample random minibatch of transitions  $(s_j, a_j, r_j, s_{j+1})$  from D
11:    Set  $y_j = \begin{cases} r_j, \text{ if episode terminates at step } j + 1 \\ r_j + \gamma \max_{a'} \hat{Q}(s_{j+1}, a'; \theta^-), \text{ otherwise} \end{cases}$ 
12:    Perform a gradient descent step on  $(y_j - Q(s_j, a_j; \theta))^2$ 
13:    Every C steps reset  $\hat{Q} = Q$ , i.e., set  $\theta^- = \theta$ 
14:   end
15: end

```

Όμως η βαθιά Q-μάθηση παρουσιάζει ένα σημαντικό πρόβλημα. Συγκεκριμένα ο όρος $\max_{a'} Q_*(s', a')$ στον υπολογισμό της Q συνάρτησης, παίρνοντας το μέγιστο των υπερεκτιμημένων τιμών, λαμβάνεται έμμεσα η εκτίμηση της μέγιστης τιμής. Αυτή η συστηματική υπερεκτίμηση παρουσιάζει μια μεροληψία μεγιστοποίησης στη μάθηση. Επιπλέον επειδή η Q-μάθηση περιλαμβάνει εκμάθηση εκτιμήσεων από εκτιμήσεις μια τέτοια υπερεκτίμηση μπορεί να είναι προβληματική.

DDQN

Η λύση στο παραπάνω πρόβλημα της βαθιάς Q-μάθησης είναι η χρήση δύο ξεχωριστών εργαλείων προσέγγισης για τις Q-τιμές (διπλή βαθιά Q-μάθηση), κάθε ένα από τα οποία χρησιμοποιείται για την ανανέωση του άλλου. Χρησιμοποιώντας αυτά τα ανεξάρτητα εργαλεία, μπορεί να επιτευχθεί η αμερόληπτη εκτίμηση των Q-τιμών των επιλεγμένων δράσεων χρησιμοποιώντας τον αντίθετο εκτιμητή. Άρα αποφεύγεται η μεροληψία μεγιστοποίησης, με την αποσύμπλεξη των ανανεώσεων από τις μεροληπτικές εκτιμήσεις.

Παρακάτω παραθέτουμε τον αρχικό αλγόριθμο της διπλής βαθιάς Q-μάθησης

Algorithm 2 Double Q-Learning

```

1: Initialize  $Q^A, Q^B, s$ 
2: repeat
3:     Choose  $a$ , based on  $Q^A(s, -)$  and  $Q^B(s, -)$ , observe  $r, s'$ 
4:     Choose (e.g., random) either UPDATE (A) or UPDATE (B)
5:     if UPDATE (A) then
6:         Define  $a^* = \operatorname{argmax}_a Q^A(s', a)$ 
7:          $Q^A(s, a) \leftarrow Q^A(s, a) + a(s, a)(r + \gamma Q^B(s', a^*) - Q^A(s, a))$ 
8:     else if UPDATE (B) then
9:         Define  $b^* = \operatorname{argmax}_a Q^B(s', a)$ 
10:         $Q^B(s, a) \leftarrow Q^B(s, a) + a(s, a)(r + \gamma Q^A(s', b^*) - Q^B(s, a))$ 
11:    end if
12:     $s \leftarrow s'$ 
13: until end

```

Ο αρχικός αλγόριθμος διπλής βαθιάς Q-μάθησης χρησιμοποιεί δυο ανεξάρτητες εκτιμήσεις Q^A και Q^B . Με πιθανότητα 0,5, χρησιμοποιείται η εκτίμηση Q^A για τον προσδιορισμό της βέλτιστης δράσης αλλά αυτή χρησιμοποιείται για να ανανεώσει το Q^B . Αντίστοιχα για το υπόλοιπα 0,5, χρησιμοποιείται η εκτίμηση Q^B για τον προσδιορισμό της βέλτιστης δράσης αλλά αυτή χρησιμοποιείται για να ανανεώσει το Q^A . Με το τρόπο αυτό αποκτούμε έναν αμερόληπτο εκτιμητή για την εκτίμηση της Q-τιμής και την μείωση της μεροληψίας

Κεφάλαιο 5, Περιβάλλον

Εισαγωγή

Η παρακάτω λύση στοχεύει στην βελτιστοποίηση ενός συστήματος V2G σε πάρκινγκ με την χρήση ενισχυτικής βαθιάς μάθησης, ως προς το συνολικό κόστος φόρτισης/αποφόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων αλλά και την ποιότητα ζωής των μπαταριών τους (Φθορά λόγω κύκλων φόρτισης και λόγω επιπέδου φόρτισης).

Όπως παρουσιάζουμε παρακάτω, αντιμετωπίζουμε το πρόβλημα παίρνοντας αποφάσεις συνολικά για το πάρκινγκ, οι οποίες μετέπειτα μεταφράζονται ως ενέργειες για κάθε αμάξι ξεχωριστά. Η προσέγγιση αυτή μας επιτρέπει να επιλύσουμε το πρόβλημα μας μέσω βαθιάς Q μάθησης (DQN) κρατώντας τη δομή του δικτύου μας απλή και ανεξάρτητη του μεγέθους του προβλήματος

Αρχικά θα παρουσιάσουμε το πρόβλημα ως μια μαρκοβιανή διαδικασία αποφάσεων

Κατάσταση

Η κατάσταση μας περιλαμβάνει τα χαρακτηριστικά του παρκινγκ, το ηλεκτρικά οχήματα καθώς και την καμπύλη τιμής ενέργειας. Αναλυτικά:

Parking: Το παρκινγκ έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- **Χωρητικότητα:** Το πάρκινγκ έχει περιορισμένο αριθμό θέσεων N . Την χρονική στιγμή t έχουμε $N_{αμάξια}(t) \leq N$ οχήματα. Σε περίπτωση που το πάρκινγκ είναι γεμάτο και έχουμε άφιξη οχήματος, αυτό απορρίπτεται.
- **Σταθμός Φόρτισης:** Ο κάθε σταθμός έχει την δυνατότητα να φορτίζει ένα αμάξι με μέγιστο ρυθμό P_+ (KW) και να το αποφορτίζει με μέγιστο ρυθμό P_- (KW)

Καμπύλη Τιμής Ενέργειας: Η καμπύλη τιμής-ενέργειας. Χρησιμοποιούμε τα δεδομένα από την αγορά της επόμενης ημέρας $C(t)$ σε ευρώ ανά MWh. Δεχόμαστε ότι η πρόβλεψη της επόμενης μέρας είναι ακριβής και ότι η συμμετοχή του παρκινγκ δεν επηρεάζει την τιμή ως σημαντικό φορτίο/παραγωγός.

Ηλεκτρικά Οχήματα: Κάθε ηλεκτρικό όχημα $i \in [1, N_{αμάξια}(t)]$ που βρίσκεται σταθμευμένο στο πάρκινγκ έχει την χρονική στιγμή t τις παρακάτω παραμέτρους:

- $B_C(t, i)$: η αποθηκευμένη ενέργεια της μπαταρίας (σε KWh)
- $B_T(i)$: η επιθυμητή τελική ενέργεια της μπαταρίας (σε KWh)
- $B_S(i)$: η χωρητικότητα της μπαταρίας
- $T(i)$: ο χρόνος παραμονής στο parking (σε ώρες)
- $T_{el}(t, i)$: ο χρόνος για τον οποίο έχει παραμείνει το όχημα στο parking (σε ώρες)

$$T_{el}(t, i) \leq T(i), \forall t, i$$
- $t_{arr}(i)$: η χρονική στιγμή την οποία το αυτοκίνητο έφτασε στο πάρκινγκ (μετρημένη σε ώρες από τα μεσάνυχτα της παρούσας ημέρας)
- $E_{max}(i), E_{min}(i)$: η μέγιστη και ελάχιστη ενέργεια που μπορεί να έχει η μπαταρία (σε KWh)
- $p_+(t, i), p_-(t, i)$: Οι προτεραιότητες φόρτισης και αποφόρτισης αντίστοιχα

Με βάση τους περιορισμούς τόσο του οχήματος (B_T, B_C, T_{el}, T) όσο και των δυνατοτήτων του σταθμού φόρτισης (P_+, P_-) ορίζουμε τις παρακάτω παραμέτρους για το όχημα:

- $\Delta E_{+max}(t, i)$: Η μέγιστη θετική μεταβολή ενέργειας για την μετάβαση $t \rightarrow t + 1$ (σε KWh)
- $\Delta E_{+min}(t, i)$: Η ελάχιστη θετική μεταβολή ενέργειας για την μετάβαση $t \rightarrow t + 1$ (σε KWh)
- $\Delta E_{-max}(t, i)$: Η μέγιστη αρνητική μεταβολή ενέργειας για την μετάβαση $t \rightarrow t + 1$ (σε KWh)
- $\Delta E_{-min}(t, i)$: Η ελάχιστη αρνητική μεταβολή ενέργειας για την μετάβαση $t \rightarrow t + 1$ (σε KWh)

Παραδοχές

Στο σημείο αυτό θα παραθέσουμε όλες τις παραδοχές που έχουμε πάρει προκειμένου να απλοποιήσουμε τον πρόβλημα μας:

- Όλα τα οχήματα θεωρούμε ότι έρχονται και φεύγουν από το παρκινγκ (ή τουλάχιστον ξεκινούν και ολοκληρώνουν αντίστοιχα της φόρτιση τους) σε ακέραια πολλαπλάσια των ωρών.
- Το παρκινγκ δεν δέχεται κανένα όχημα μετά τις 20:00, ενώ όσα οχήματα βρίσκονται ήδη στο παρκινγκ πριν από αυτό το όριο έχουν την δυνατότητα να παραμείνουν μέχρι και μία ώρα πριν τα μεσάνυχτα (23:00).
- Το κάθε επεισόδιο ξεκινάει στις 00:00 κάθε μέρα με το παρκινγκ άδειο
- Όλα τα οχήματα έχουν κοινά τα εξής: $B_S(i), E_{max}(i), E_{min}(i)$, δηλαδή όλα τα οχήματα διαθέτουν την ίδια μπαταρία με τις ίδιες δυνατότητες φόρτισης και αποφόρτισης.
- Η αρχική φθορά των μπαταριών όλων των οχημάτων όταν έρχονται στο παρκινγκ είναι μηδενική και η φθορά, την οποία δέχονται κατά την φόρτιση/αποφόρτιση δεν λαμβάνεται υπόψιν στην μέγιστη δυνατή χωρητικότητα της μπαταρίας. Επομένως η μπαταρία όλων των οχημάτων έχει πάντα τις μέγιστες δυνατότητες της.
- Όλα τα αμάξια μεταξύ τους είναι συνδεδεμένα με σύστημα V2V για την κάλυψη αναγκών που δεν μπορούν να ικανοποιηθούν άμεσα από το δίκτυο.
- Όλες οι μεταφορές ενέργειας θεωρούνται ιδανικές, δηλαδή δεν έχουμε απώλειες κατά την φόρτιση και αποφόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων

Καμπύλη Φόρτισης / Αποφόρτισης

Για κάθε όχημα μπορούμε να σχεδιάσουμε τις παρακάτω καμπύλες. Έστω όχημα ($i = 1$) με:

$$B_T(1) = 60 \text{ KWh}, \quad P_- = 10 \text{ KW}, \quad P_+ = 15 \text{ KW},$$

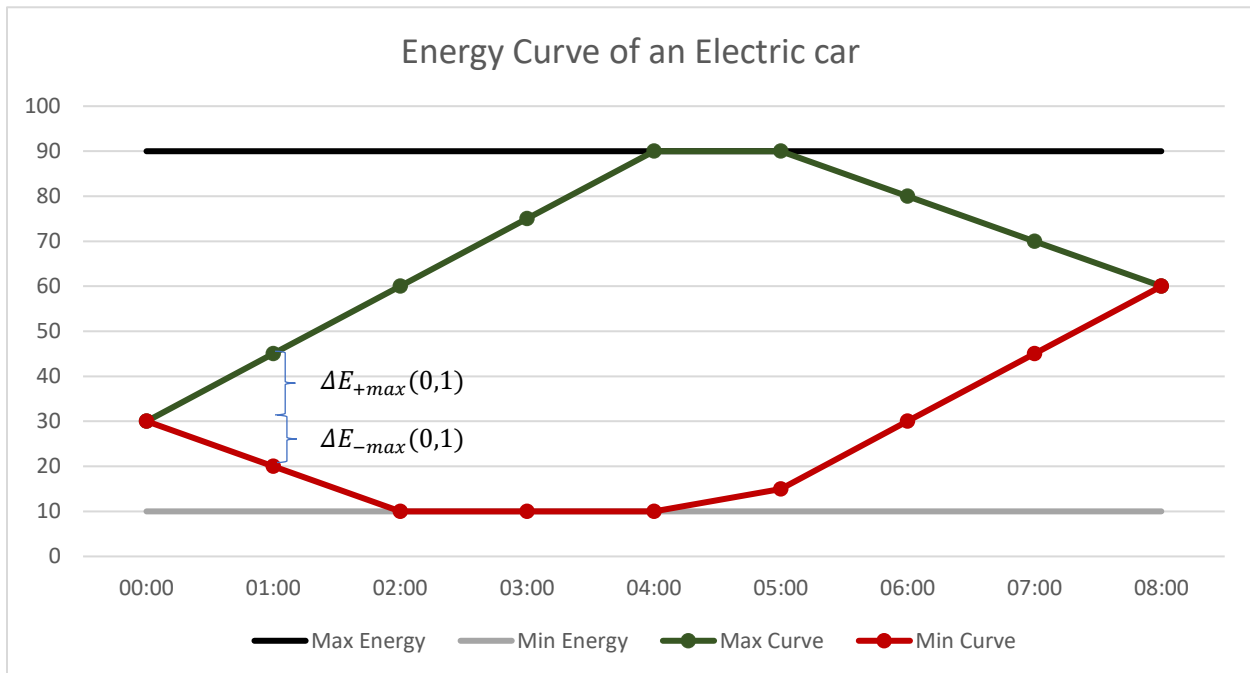
$$E_{+max} = 90 \text{ KWh}, \quad E_{-min} = 10 \text{ KWh}, \quad T(i) = 8 \text{ ώρες}$$

Για την χρονική στιγμή $t = 0$ με $B_C(0, 1) = 30 \text{ KWh}$ η καμπύλη του οχήματος είναι η εξής:

	E_{max}	E_{min}	$B_{C+}(t, 1)$	$B_{C-}(t, 1)$	$B_C(t, 1)$
00:00	90	10	30	30	30
01:00	90	10	20	45	
02:00	90	10	10	60	
03:00	90	10	10	75	
04:00	90	10	10	90	
05:00	90	10	15	90	
06:00	90	10	30	80	
07:00	90	10	45	70	
08:00	90	10	60	60	

$$\Delta E_{+max}(0, 1) = 15 \text{ KWh}, \quad \Delta E_{+min}(0, 1) = 0 \text{ KWh},$$

$$\Delta E_{-max}(0, 1) = 10 \text{ KWh}, \quad \Delta E_{-min}(0, 1) = 0 \text{ KWh}$$



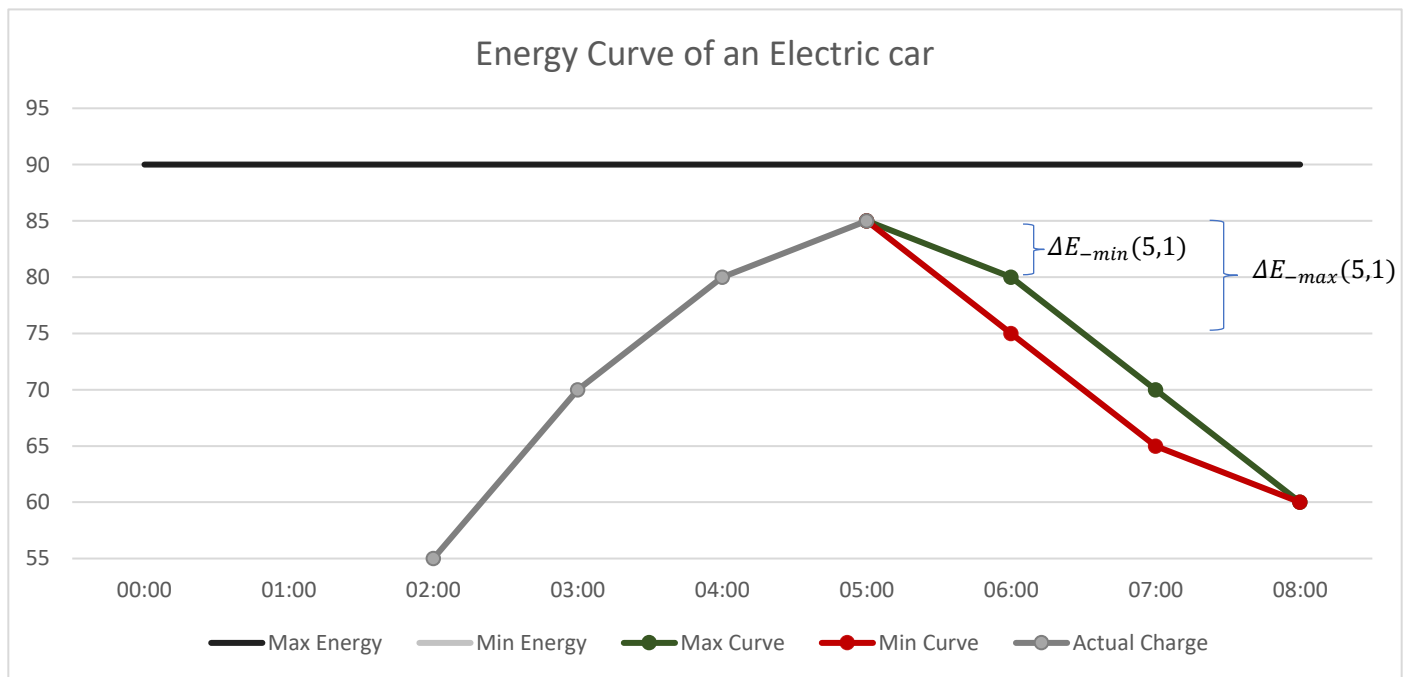
Εικόνα 12 Καμπύλη φόρτιση/αποφόρτισης την χρονική στιγμή $t=0$

Έστω ότι μετά από 4 μεταβάσεις το όχημα έχει $B_C(4,1) = 85 \text{ KWh}$ τότε η παραπάνω καμπύλη γίνεται:

	E_{max}	E_{min}	$B_{C+}(t,1)$	$B_{C-}(t,1)$	$B_C(t,1)$
00:00	90	10	30	30	30
01:00	90	10	20	45	40
02:00	90	10	10	60	55
03:00	90	10	10	75	80
04:00	90	10	10	90	85
05:00	90	10	85	85	85
06:00	90	10	80	75	
07:00	90	10	70	65	
08:00	90	10	60	60	

$$\Delta E_{+max}(5,1) = 15 \text{ KWh}, \quad \Delta E_{+min}(5,1) = 0 \text{ KWh},$$

$$\Delta E_{-max}(5,1) = 10 \text{ KWh}, \quad \Delta E_{-min}(5,1) = 0 \text{ KWh}$$



Εικόνα 13 καμπύλη φόρτισης/αποφόρτισης την χρονική στιγμή $t=4$, με $B_C(4,1) = 85 \text{ KWh}$

Οι δύο καμπύλες εκφράζουν την περίπτωση μέγιστης φόρτισης (**Min Curve** $B_{C+}(t, i)$) και την περίπτωση μέγιστης αποφόρτισης (**Max Curve** $B_{C-}(t, i)$). Με τις παραπάνω καμπύλες μπορούμε να περικλύσουμε όλες τις δυνατές καμπύλες φόρτισης/αποφόρτισης του οχήματος, οι οποίες καταλήγουν στη φόρτιση στόχος $B_T(i)$.

Επομένως αθροίζοντας όλες τις παραπάνω καμπύλες για κάθε αμάξι καταλήγουμε με την αντίστοιχη συγκεντρωτική καμπύλη του πάρκινγκ. Όμως επειδή το κάθε αμάξι αποχωρεί από το πάρκινγκ χρονική στιγμή ανεξάρτητη από όλα τα υπόλοιπα αμάξια η συγκεντρωτική αυτή καμπύλη δεν είναι κυρτή για κάθε t αλλά μόνο για την χρονική στιγμή $t + 1$. Επομένως θα την μελετάμε μόνο για την επόμενη χρονική στιγμή

Επομένως μπορούμε να περιγράψουμε τα σημεία των καμπυλών την χρονική στιγμή $t + 1$ μέσω των εξής μεταβλητών: $\Delta E_{+max}(t), \Delta E_{+min}(t), \Delta E_{-max}(t), \Delta E_{-min}(t)$, οι οποίες προκύπτουν από το άθροισμα των αντίστοιχων μεταβλητών του κάθε ηλεκτρικού οχήματος.

$$\begin{aligned} \Delta E_{+max}(t) &= \sum_{i=1}^{N_{αμάξια}(t)} \Delta E_{+max}(t, i), & \Delta E_{+min}(t) &= \sum_{i=1}^{N_{αμάξια}(t)} \Delta E_{+min}(t, i), \\ \Delta E_{-max}(t) &= \sum_{i=1}^{N_{αμάξια}(t)} \Delta E_{-max}(t, i), & \Delta E_{-min}(t) &= \sum_{i=1}^{N_{αμάξια}(t)} \Delta E_{-min}(t, i) \end{aligned}$$

Οι «min» ονομάζονται **έκτακτες ανάγκες** καθώς πρέπει σε κάθε μετάβαση να ικανοποιηθούν τουλάχιστον αυτές και οι «max» ονομάζονται **μέγιστες ανάγκες** καθώς σε κάθε μετάβαση δεν μπορούμε να έχουμε μεγαλύτερη μεταβολή από αυτές, λόγω των περιορισμών φόρτισης/αποφόρτισης του πάρκινγκ και των οχημάτων. Επιπλέον μέσω των παραπάνω μεταβλητών μπορούμε να ορίσουμε τις μέγιστες και ελάχιστες συναλλαγές ενέργειας με το δίκτυο.

V2V

Η παραπάνω ομαδοποίηση όλων των οχημάτων κάτω από μια κοινή καμπύλη φόρτισης/αποφόρτισης και εν τέλει μια τελική απόφαση εμφανίζει ορισμένα προβλήματα. Σε περίπτωση εμφάνισης οποιαδήποτε έκτακτης ανάγκης το πάρκινγκ θα πρέπει να εκτελέσει δράση τέτοια που να την ικανοποιεί. Για παράδειγμα, αν έχουμε έκτακτη ανάγκη για φόρτιση θα πρέπει υποχρεωτικά να αγοράσουμε ενέργεια και αντίστοιχα να πουλήσουμε σε περίπτωση ανάγκης για αποφόρτιση. Αυτός ο περιορισμός μπορεί να αποδειχθεί καταστροφικός για το πάρκινγκ, σε περίπτωση που το πάρκινγκ οδηγηθεί στο να εκτελέσει κάποια ασύμφορη δράση (π.χ. αγορά σε περίοδο ανεπάρκειας, πώληση σε περίοδο χαμηλής ζήτησης). Επιπλέον αν εμφανιστούν ταυτόχρονα και τα δύο είδη έκτακτων αναγκών, δηλαδή κάποια οχήματα πρέπει να αποφορτίσουν και κάποια πρέπει να φορτίσουν, δεν υπάρχει καμία δράση που ένα V2G σύστημα μπορεί να εκτελέσει προκειμένου να τις ικανοποιήσει. Καθώς σε κάθε βήμα μπορούμε μόνο να αγοράσουμε ή να πουλήσουμε ενέργεια. Επομένως, ενδεχομένως πολλά οχήματα θα παρέμεναν με ανικανοποίητες ανάγκες.

Για όλους αυτούς τους παραπάνω λόγους αποφασίζουμε να εγκαταστήσουμε σύστημα V2V μεταξύ όλων των οχημάτων στο πάρκινγκ, το οποίο θα είναι υπεύθυνο για την ικανοποίηση των αναγκών των οχημάτων, ανεξάρτητα από την κύρια δράση του πάρκινγκ. Με τον τρόπο αυτό, το πάρκινγκ μπορεί να επικεντρωθεί στην καλύτερη βελτιστοποίηση του κόστους φόρτισης καθώς και της μεταχείρισης της μπαταρίας των οχημάτων. Βέβαια, η αντιμετώπιση αυτή δεν εξαλείφει πλήρως την ανάγκη για περιορισμούς στη δράση του περιβάλλοντος. Σε περίπτωση που το πάρκινγκ δεν έχει το διαθέσιμο φορτίο, είτε για φόρτιση (όλα τα οχήματα έχουν χαμηλά επίπεδα φόρτισης) ή για αποφόρτιση (όλα τα οχήματα έχουν υψηλά επίπεδα φόρτισης), το περιβάλλον θα αναγκαστεί να ικανοποιήσει τις έκτακτες ανάγκες άμεσα από το δίκτυο, αλλά μια τέτοια περίπτωση είναι λιγότερο πιθανή.

Αναλυτικά οι περιορισμοί αυτοί παρουσιάζονται παρακάτω:

Διαστήματα αγοράς/πώλησης

Μέσω των παραπάνω μεγεθών μπορούμε να περιορίσουμε τα μεγέθη αγοράς και πώλησης ενέργειας έτσι ώστε ανά πάσα στιγμή να μπορούμε να ικανοποιήσουμε όλες τις ανάγκες στο παρκινγκ μας, είτε άμεσα, μέσω αγοράς ή πώλησης ενέργειας στο δίκτυο, είτε έμμεσα μέσω ανταλλαγής ενέργειας μεταξύ των οχημάτων (V2V)

Για την αγορά ενέργειας ορίζουμε το διάστημα: $[\Delta E_{+min}(t), \Delta E_{+max}(t)]$, δηλαδή χρειαζόμαστε τουλάχιστον τόση ενέργεια όσο η ελάχιστη ανάγκη φόρτισης και το πολύ τόση ενέργεια όσο η μέγιστη ανάγκη φόρτισης. Εφόσον τα οχήματα έχουν την δυνατότητα ανταλλαγής ενέργειας μέσω V2V, μπορούμε να προσθέσουμε την ελάχιστη ενέργεια αποφόρτισης ως διαθέσιμη ενέργεια για φόρτιση οχημάτων. Με τον τρόπο αυτό μειώνουμε τις ανάγκες για αγορά ενέργειας και ταυτόχρονα καλύπτουμε τις ανάγκες των οχημάτων για κάθε χρονική στιγμή t . Άρα $[\Delta E_{+min}(t) - \Delta E_{-min}(t), \Delta E_{+max}(t) - \Delta E_{-min}(t)]$ (**διάστημα αγοράς**).

Αντίστοιχα για την πώληση ορίζουμε το διάστημα: $[\Delta E_{-min}(t) - \Delta E_{+min}(t), \Delta E_{-max}(t) - \Delta E_{+min}(t)]$ (**διάστημα πώλησης**)

Άρα θεωρώντας ότι με αρνητικό πρόσημο συμβολίζουμε την πώληση ενέργειας, ενώνουμε τα παραπάνω διαστήματα: $[\Delta E_{+min}(t) - \Delta E_{-max}(t), \Delta E_{+max}(t) - \Delta E_{-min}(t)]$. Το διάστημα αυτό εκφράζει όλες τις δυνατές συναλλαγές ενέργειας με το δίκτυο για το σύνολο του παρκινγκ (**διάστημα συναλλαγών**).

Θέτουμε

$$\Delta E_{new}^{upper}(t) = \Delta E_{+max}(t) - \Delta E_{-min}(t), \quad \Delta E_{new}^{lower}(t) = \Delta E_{+min}(t) - \Delta E_{-max}(t)$$

$$\Delta E_{new}^{thresh}(t) = \Delta E_{+min}(t) - \Delta E_{-min}(t)$$

Τέλος προκειμένου οι αποφάσεις μας να μετατρέπονται σε απόφαση για κάθε όχημα χρειαζόμαστε κάποιο είδος συστήματος κατανομής. Άρα κάθε αμάξι έχει προτεραιότητες φόρτισης και αποφόρτισης $p_+(t, i)$ και $p_-(t, i)$, οι οποίες θα καθορίζουν σε κάθε μετάβαση την κατανομή αυτή.

Δράση

Η κίνηση που μπορούμε να κάνουμε είναι μία, να αγοράσουμε και να πουλήσουμε ενέργεια. Με την βοήθεια όμως του **διαστήματος συναλλαγών** που ορίσαμε προηγουμένως μπορούμε να ορίσουμε μια πιο αφηρημένη κίνηση, δηλαδή ένα νούμερο από το $\Delta E_{new}^{lower}(t)$ μέχρι το $\Delta E_{new}^{upper}(t)$, το οποίο ύστερα θα μεταφραστεί σε είτε αγορά ή πώληση ενέργειας ανάλογα με τις ανάγκες του παρκινγκ. Έτσι ορίζουμε:

Συντελεστής αναλογίας $\gamma \in [0, 1]$: Εκφράζει την συναλλαγή με το δίκτυο μέσω της σχέσης

$$\Delta E_{new}(t) = \Delta E_{new}^{lower}(t) + \left(\Delta E_{new}^{upper} - \Delta E_{new}^{lower}(t) \right) * \gamma \quad (1)$$

Όπου $\Delta E_{new}(t)$ η ενέργεια που κερδίζουμε από το δίκτυο (θετικό πρόσημο => αγορά) ή χάνουμε προς αυτό (αρνητικό πρόσημο => πώληση)

Μετάβαση

Για την μετάβαση από την χρονική στιγμή t στην χρονική στιγμή $t + 1$ με **συντελεστή αναλογίας γ** έχουμε:

Υπολογίζουμε αρχικά την ενέργεια που θα αγοράσουμε ή θα πωλήσουμε μέσω της σχέσης (1)

Η κατανομή της ενέργειας στα οχήματα γίνεται μέσα από 3 στάδια.

1. **Προσδιορισμός κύριας δράσης του πάρκινγκ:** Για κάθε μετάβαση μπορούμε να κάνουμε μόνο ένα είδος συναλλαγής με το δίκτυο (**αγορά ή πώληση**). Άρα μπορούμε είτε να αυξήσουμε την συνολική ενέργεια του παρκινγκ είτε να την μειώσουμε. Επιπλέον εφόσον κάθε σταθμός φόρτισης υποστηρίζει σύστημα V2V τότε μπορούμε να μεταφέρουμε ενέργεια μεταξύ των οχημάτων για να ικανοποιήσουμε όποια **έκτακτη ανάγκη** υπάρχει. Μετά την ικανοποίηση όλων των **έκτακτων αναγκών** η περίσσεια ενέργεια θα πρέπει να κατανομηθεί σύμφωνα με τις προτεραιότητες (όπως θα δούμε παρακάτω) στα υπόλοιπα οχήματα. Το πρόσημο της περίσσειας ενέργειας δηλώνει την **κύρια δράση του πάρκινγκ**, δηλαδή τον τρόπο κατανομής (**φόρτιση ή αποφόρτιση**). Επομένως το $\Delta E_{new}^{thresh}(t)$ δηλώνει την ελάχιστη συναλλαγή που χρειάζεται να κάνουμε προκειμένου να ικανοποιηθούν οι **έκτακτες ανάγκες** χωρίς να έχουμε περίσσεια ενέργεια και η κύρια δράση μπορεί να οριστεί ως:

- a. Φόρτιση: Αν $\Delta E_{new}(t) \in$ **διάστημα αγοράς**
- b. Αποφόρτιση: Αν $\Delta E_{new}(t) \in$ **διάστημα πώλησης**

Επίσης το $\Delta E_{new}^{thresh}(t)$ ισούται με το αντίθετο της περίσσειας ενέργειας που θα προκύψει μετά την ικανοποίηση των **έκτακτων αναγκών**, δηλαδή την έξτρα αρνητική ή θετική ενέργεια που χρειαζόμαστε προκειμένου οι έκτακτες ανάγκες να είναι ισορροπημένες (τόση ανάγκη για φόρτιση, όσο και για αποφόρτιση)

2. **Ικανοποίηση έκτακτων αναγκών:** Οι έκτακτες ανάγκες των οχημάτων ικανοποιούνται άμεσα χωρίς την χρήση του συστήματος κατανομής (προτεραιότητες). Οι ανάγκες αυτές ικανοποιούνται είτε μέσω V2V είτε μέσω της συναλλαγής που έγινε με το δίκτυο
3. **Δρομολόγηση περίσσειας ενέργειας:** Εφόσον έχουμε ικανοποιήσει τις έκτακτες ανάγκες και έχουμε βρει την κύρια δράση του παρκινγκ τότε μπορούμε να δρομολογήσουμε την περίσσεια ενέργεια στα αυτοκίνητα, τα οποία έχουν την ίδια ανάγκη με την δράση του παρκινγκ, δηλαδή αν η κύρια δράση

του πάρκινγκ είναι φόρτιση τότε θα φορτίσουμε μόνο όσα οχήματα χρειάζονται φόρτισης, Ανάγκες αποφόρτισης θα ικανοποιηθούν μέσω του V2V. Αντίστοιχα για την αποφόρτιση

Επομένως πρέπει να υπολογίσουμε τον **συντελεστή φόρτισης**, δηλαδή τον λόγο της ενέργειας από την συναλλαγή συν την περίσσεια ενέργεια από την ικανοποίηση των **έκτακτων αναγκών** $-\Delta E_{new}^{thresh}(t)$ προς την αντίστοιχη μέγιστη ανάγκη συν την περίσσεια ενέργεια από την ικανοποίηση των **έκτακτων αναγκών** $-\Delta E_{new}^{thresh}(t)$. Άρα υπολογίζουμε τον **συντελεστή φόρτισης** ως συνάρτηση της ενέργειας που αγοράσαμε ή πουλήσαμε, των έκτακτων αναγκών $\Delta E_{-min}(t)$ και $\Delta E_{+min}(t)$ και των μέγιστων μεταβολών $\Delta E_{-max}(t)$ και $\Delta E_{+max}(t)$:

$$a(t) = \begin{cases} \frac{\Delta E_{new}(t) - \Delta E_{new}^{thresh}(t)}{\Delta E_{+max}(t) - \Delta E_{+min}(t)}, & \text{αν } \Delta E_{new}(t) > \Delta E_{new}^{thresh}(t) \\ 0, & \text{αν } \Delta E_{new}(t) = \Delta E_{new}^{thresh}(t) \\ \frac{\Delta E_{new}(t) - \Delta E_{new}^{thresh}(t)}{\Delta E_{-max}(t) - \Delta E_{-min}(t)}, & \text{αν } \Delta E_{new}(t) < \Delta E_{new}^{thresh}(t) \end{cases} \quad (2)$$

$$a(t) \in [-1, 1]$$

Μετάβαση για το αμάξι i

Λόγω των παραπάνω περιορισμών σε οποιαδήποτε απόφαση μπορούμε να ικανοποιήσουμε όλες τις έκτακτες ανάγκες για όλα τα οχήματα είτε άμεσα μέσω της συναλλαγής με το δίκτυο είτε έμμεσα μέσω του συστήματος V2V με οχήματα με την αντίθετη ανάγκη.

Θέτουμε ως έκτακτες και μέγιστες ανάγκες του κάθε οχήματος i για την χρονική στιγμή t την αντίστοιχη ανάγκη με βάση τον συντελεστή φόρτισης (θετικός => ανάγκες φόρτισης, αρνητικός => ανάγκες αποφόρτισης). Αντίστοιχα κάνουμε και για τις προτεραιότητες του.

$$\Delta E_{max}(t, i) = \begin{cases} \Delta E_{+max}(t, i), & \text{αν } a(t) > 0 \\ 0, & \text{αν } a(t) = 0, \\ \Delta E_{-max}(t, i), & \text{αν } a(t) < 0 \end{cases} \quad \Delta E_{min}(t, i) = \begin{cases} \Delta E_{+min}(t, i), & \text{αν } a(t) > 0 \\ 0, & \text{αν } a(t) = 0 \\ \Delta E_{-min}(t, i), & \text{αν } a(t) < 0 \end{cases}$$

$$\Delta E_{max}(t) = \begin{cases} \Delta E_{+max}(t), & \text{αν } a(t) > 0 \\ 0, & \text{αν } a(t) = 0, \\ \Delta E_{-max}(t), & \text{αν } a(t) < 0 \end{cases} \quad p(t, i) = \begin{cases} p_+(t, i), & \text{αν } a(t) > 0 \\ 0, & \text{αν } a(t) = 0 \\ p_-(t, i), & \text{αν } a(t) < 0 \end{cases}$$

Υπολογίσουμε τους βεβαρημένους συντελεστές προτεραιοτήτων που θα χρησιμοποιηθούν παρακάτω

$$\overline{p_{\Delta E}}(t) = \frac{\sum_{i=1}^{N_{\alpha\mu\acute{\alpha}\xi\iota\alpha}(t)} (\Delta E_{max}(t, i) - \Delta E_{min}(t, i)) * p_+(t, i)}{\Delta E_{max}(t) - \sum_{i=1}^{N_{\alpha\mu\acute{\alpha}\xi\iota\alpha}} \Delta E_{min}(t, i)}$$

Η τιμή του όρου, αυτού σε περίπτωση που ο παρονομαστής ισούται με το 0, δεν έχει σημασία καθώς είτε δεν υπάρχει καμία ανάγκη (έκτακτη ή μέγιστη) για την συγκεκριμένη απόφαση (φόρτιση ή αποφόρτιση) είτε υπάρχουν και όλες οι έκτακτες συμπίπτουν με τις μέγιστες, δηλαδή καλύπτονται χωρίς την ανάγκη του συστήματος μας κατανομής ενέργειας

$$\begin{aligned} \Delta E_{max}(t) - \sum_{i=1}^{N_{\alpha\mu\acute{\alpha}\xi\iota\alpha}} \Delta E_{min}(t, i) &= 0 \Rightarrow \\ \Delta E_{max}(t) &= \sum_{i=1}^{N_{\alpha\mu\acute{\alpha}\xi\iota\alpha}} \Delta E_{min}(t, i) \Rightarrow \\ \sum_{i=1}^{N_{\alpha\mu\acute{\alpha}\xi\iota\alpha}} \Delta E_{max}(t, i) &= \sum_{i=1}^{N_{\alpha\mu\acute{\alpha}\xi\iota\alpha}} \Delta E_{min}(t, i) \end{aligned}$$

Εφόσον όλες οι ανάγκες κάθε οχήματος είναι θετικοί αριθμοί και $\Delta E_{max}(t, i) \geq \Delta E_{min}(t, i) \forall t, i$. τότε

$$\Delta E_{max}(t, i) = \Delta E_{min}(t, i) \geq 0$$

■

Υπολογίζουμε για κάθε όχημα τον **συντελεστή φόρτισης** $a(i)$, ο οποίος υπολογίζεται από τον γενικό **συντελεστή φόρτιση** $a(2)$ του παρκινγκ, και τον **συντελεστή πλεονάσματος** r , ο οποίος δηλώνει την περίσσεια ενέργεια που προέκυψε από την παρακάτω δρομολόγηση.

$$\begin{aligned} a(t, i) &= \begin{cases} a(t) * (1 + p(t, i) - \overline{p_{\Delta E}}), & \text{αν } a(t) \neq 0 \\ 0, & \text{αν } a(t) = 0 \end{cases} \\ r(t, i) &= \begin{cases} a(t, i) - 1, & \text{αν } a(t, i) > 1 \\ a(t, i) + 1, & \text{αν } a(t, i) < -1 \\ 0, & \text{αλλιώς} \end{cases} \end{aligned}$$

Τέλος ικανοποιούμε τις **έκτακτες ανάγκες** κάθε οχήματος καθώς και πραγματοποιούμε την δρομολόγηση της φόρτισης/αποφόρτισης κάθε οχήματος βάση της προτεραιότητας του.

$$\Delta E_{thresh}(t, i) = \Delta E_{+min}(t, i) - \Delta E_{-min}(t, i)$$

$$B_C(t + 1, i) = B_C(t, i) + (\Delta E_{max}(t, i) - \Delta E_{min}(t, i)) * (a(t, i) - r(i, t)) + R(t, i - 1) + \Delta E_{thresh}(t, i)$$

$$R(t, i) = (\Delta E_{max}(t, i) - \Delta E_{min}(t, i)) * r(i, t), \quad \mu\epsilon R(t, 0) = 0$$

$$T_{el}(t + 1, i) = T_{el}(t, i) + 1, \quad \mu\epsilon T_{el}(t_{arr}(i), i) = 0$$

Αφού έχουμε υπολογίσει την νέα ενεργειακή στάθμη της μπαταρίας του οχήματος πρέπει να υπολογίσουμε τις μεταβλητές της επόμενης ενεργειακής κατάστασης του οχήματος:

$$B_{C+}(t+1, i) = \min \left(\begin{array}{c} B_C(t+1, i) + P_+ * (1h), \\ E_{max}, \\ B_T(i) + (T(i) - T_{el}(t+1, i) * P_-) \end{array} \right)$$

$$B_{C-}(t+1, i) = \max \left(\begin{array}{c} B_C(t+1, i) - P_- * (1h), \\ E_{min}, \\ B_T(i) - (T(i) - T_{el}(t+1, i) * P_+) \end{array} \right)$$

$$\Delta E_{+max}(t+1, i) = \max \left(\begin{array}{c} E_+(t+1, i) - B_C(t+1, i), \\ 0 \end{array} \right)$$

$$\Delta E_{+min}(t+1, i) = \max \left(\begin{array}{c} B_C(t+1, i) - E_+(t+1, i), \\ 0 \end{array} \right)$$

$$\Delta E_{-max}(t+1, i) = \max \left(\begin{array}{c} E_-(t+1, i) - B_C(t+1, i), \\ 0 \end{array} \right)$$

$$\Delta E_{-min}(t+1, i) = \max \left(\begin{array}{c} B_C(t+1, i) - E_-(t+1, i), \\ 0 \end{array} \right)$$

Απόδειξη για τον παράγοντα $\overline{p_{\Delta E}}(t)$

Θέλουμε η ενέργεια να κατανεμηθεί με βάση τις προτεραιότητες των αυτοκινήτων. Πολλαπλασιάζοντας τον **συντελεστή φόρτισης a** με τον όρο $p(t, i)$ επιτυγχάνουμε μια κατανομή βασισμένη στις προτεραιότητες των οχημάτων. Όμως ο πολλαπλασιασμός αυτός έχει ως αποτέλεσμα να δώσουμε λιγότερη ενέργεια στα οχήματα απ' ότι διαθέτουμε καθώς ο συντελεστής προτεραιότητας είναι μικρότερος από την μονάδα. Επομένως μπορούμε να προσθέσουμε έναν όρο k στην προτεραιότητα p για να αντισταθμίσουμε αυτό το λάθος. Άρα ψάχνουμε για έναν συντελεστή k που θα μας διαβεβαιώνει ότι η συνολική ενέργεια που δρομολογήσαμε είναι ίση με την ενέργεια που διαθέτουμε: (Για $a(t) = 0$ η λύση είναι προφανής)

$$\sum_{i=1}^{N_{\alpha\mu\acute{\alpha}\xi\iota\alpha}} a(t) * (p_+(t, i) + k_+) * (\Delta E_{max}(t, i) - \Delta E_{min}(t, i)) = a(t) * (\Delta E_{max}(t) - \Delta E_{min}(t)) \xrightarrow{a(t) \neq 0}$$

$$\sum_{i=1}^{N_{\alpha\mu\acute{\alpha}\xi\iota\alpha}} (p(t, i) + k) * (\Delta E_{max}(t, i) - \Delta E_{min}(t, i)) = (\Delta E_{max}(t) - \Delta E_{min}(t)) \Rightarrow$$

$$k * (\Delta E_{max}(t) - \Delta E_{min}(t)) + \sum_{i=1}^{N_{\alpha\mu\acute{\alpha}\xi\iota\alpha}} (p(t, i) * (\Delta E_{max}(t, i) - \Delta E_{min}(t, i))) = (\Delta E_{max}(t) - \Delta E_{min}(t)) \Rightarrow$$

$$\sum_{i=1}^{N_{\alpha\mu\acute{\alpha}\xi\iota\alpha}} (p(t, i) * (\Delta E_{max}(t, i) - \Delta E_{min}(t, i))) = (1 - k) * (\Delta E_{max}(t) - \Delta E_{min}(t)) \Rightarrow$$

$$k = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N_{\alpha\mu\acute{\alpha}\xi\iota\alpha}} (p(t, i) * (\Delta E_{max}(t, i) - \Delta E_{min}(t, i)))}{(\Delta E_{max}(t) - \Delta E_{min}(t))}$$

■

Εξήγηση συντελεστή $R(t, i)$

Αυτή όμως η διαδικασία εμφανίζει ένα άλλο πρόβλημα. Το $a(t, i)$ έχει τώρα πεδίο τιμών το $[-2, 2]$ καθώς

$$\begin{cases} 0 \leq p_+(t, i) \leq 1 \\ 0 \leq \overline{p_{+\Delta E}}(t) \leq 1 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} 1 \leq 1 + p_+(t, i) \leq 2 \\ -1 \leq -\overline{p_{+\Delta E}}(t) \leq 0 \end{cases} \Rightarrow 0 \leq 1 + p_+(t, i) - \overline{p_{+\Delta E}}(t) \leq 2$$

Εφόσον το a είναι πεδίο τιμών το $[-1, 1]$ τότε και ο συντελεστής $a(t, i)$ έχει πεδίο τιμών $[-2, 2]$

Άρα υπάρχει περίπτωση να ξεφύγουμε από τα όρια φόρτισής και αποφόρτισης αντίστοιχα.

Επομένως το πλεόνασμα αυτό ενέργειας το αποθηκεύουμε ως περίσσεια (R) και το προσθέτουμε στο επόμενο αμάξι. Για να μην χρειαστούμε παραπάνω από ένα πέρασμα για να κατανειμούμε όλη την περίσσεια ενέργεια στα αμάξια, τα ταξινομούμε με βάση την απόλυτη τιμή του συντελεστή $a(t, i)$ κατά φθίνουσα σειρά και τα ανανεώνουμε με την σειρά αυτή. Με το τρόπο αυτό είμαστε σίγουροι ότι το τελικό όχημα σίγουρα θα επιστρέψει 0 περίσσεια ενέργεια

Έστω ότι εκτελούμε φόρτιση του οχήματος i και έχουμε περίσσεια ενέργεια $R(t, i - 1) > 0$

Αν $a(t, i) \geq 1$ τότε θα έχουμε περίσσεια ενέργεια $R(t, i) \geq R(t, i - 1)$

Όμως όλα τα οχήματα δεν γίνεται να έχουν συντελεστή μεγαλύτερο του ενός καθώς τότε η συνολική ενέργεια που θα κατανεμηθεί δεν θα ισούται με την συνολική που διαθέτουμε, αλλά θα ήταν μεγαλύτερη. Επομένως για κάποια οχήματα θα ισχύει:

$$1 - \frac{R(t, i-1)}{\Delta E_{+max}(t, i) - \Delta E_{+min}(t, i)} \leq a(t, i) < 1 \text{ τότε } R(t, i - 1) > R(t, i) \geq 0$$

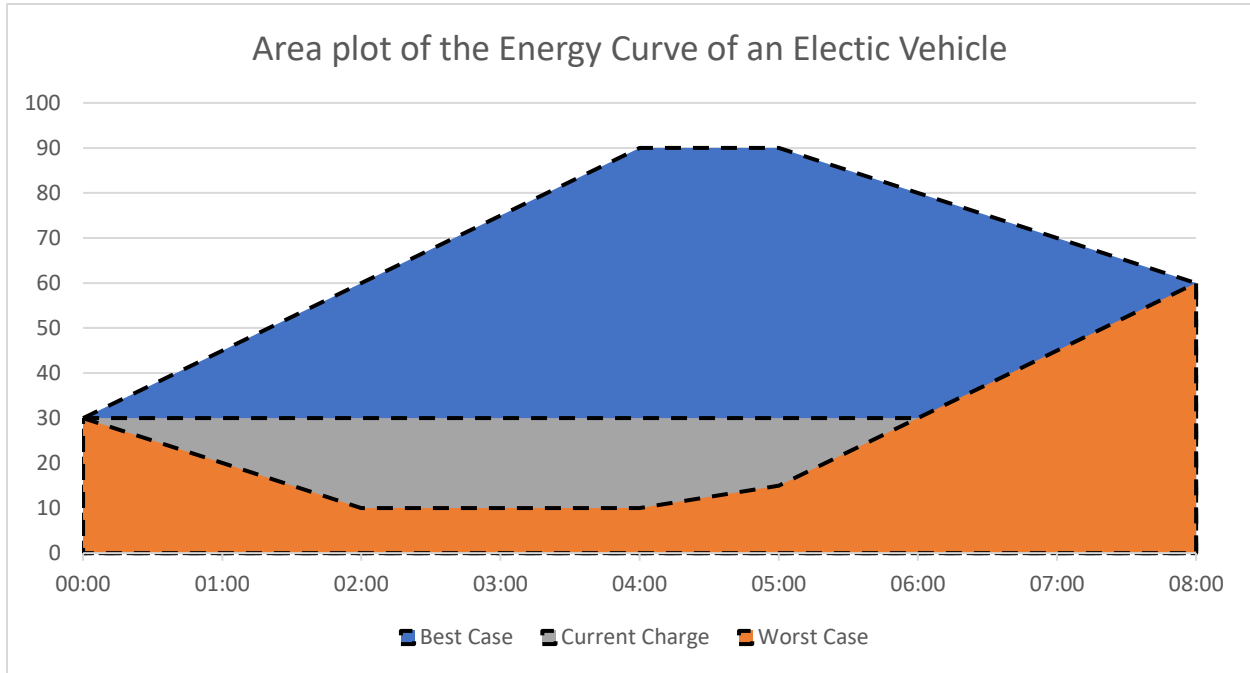
Έως που για κάποιο από τα οχήματα θα ισχύει $R(t, i) = 0$ και για όλα τα επόμενα αμάξια θα ισχύει το ίδιο καθώς $a(t, j) < a(t, i), \forall j > i$

Ο μηδενισμός της περιπτώσεως ενέργειας θα συμβαίνει πάντα καθώς αν δεν συνέβαινε θα σήμαινε ότι παραδώσαμε περισσότερη ενέργεια από 'τι διαθέταμε

■

Ανανέωση προτεραιοτήτων οχημάτων

Τέλος πρέπει να ανανεωθούν οι προτεραιότητες των οχημάτων. Επιλέγουμε να βασίσουμε τις προτεραιότητες των οχημάτων πάνω στις καμπύλες φόρτισης/αποφόρτισης προκειμένου να δούμε μια άμεση εξάρτηση μεταξύ της κατάστασης του οχήματος και των προτεραιοτήτων του.



Εικόνα 14 Διάγραμμα εμβαδών των καμπυλών φόρτισης/αποφόρτισης για ένα όχημα

Αρχικά βρίσκουμε τις καμπύλες **Best Case** και **Worst Case** κάνοντας διαδοχικές ανανεώσεις για τις συναρτήσεις B_{C+} και E_- θέτοντας κάθε φορά $B_C(t, i) = B_{C+}(t, i)$ και $B_C(t, i) = B_{C-}(t, i)$ αντίστοιχα.

Υπολογίζουμε το εμβαδόν την περιοχής που περικλείεται από τις καμπύλες **Best Case** και **Worst Case** (μπλε + γκρι περιοχή) και το ονομάζουμε A_{total}

Ύστερα σχεδιάζουμε την ευθεία $y = B_C(t, i)$ (γραμμή **Current Charge**) και βρίσκουμε το εμβαδόν του A_{total} το οποίο βρίσκεται κάτω από την γραμμή **Current Charge** (γκρι περιοχή) (A_-). Ονομάζουμε το υπόλοιπο εμβαδό (μπλε περιοχή) A_+

Επιπλέον θέλουμε οι προτεραιότητες να λαμβάνουν υπόψιν τους και διάρκεια για την οποία θα παραμείνει το όχημα στο παρκινγκ ακόμα, προκειμένου να δώσουμε μεγαλύτερη προτεραιότητα στα οχήματα που ετοιμάζονται για αναχώρηση. Άρα θέτουμε όρο:

$$T_p(t, i) = \max(T(i) - T_{el}(t + 1, i) - 1, 1)$$

Ορίζουμε

$$p_-(t + 1, i) = \frac{1}{T_p(t, i)} * \frac{A_-}{A_{total}}, \quad p_+(t + 1, i) = \frac{1}{T_p(t, i)} * \frac{A_+}{A_{total}}$$

Σε περίπτωση που $A_{total} = 0$ τότε θα ισχύει $E_+(t + 1, i) = E_-(t + 1, i) = E$

$$\text{Αν } E < B_C(t+1, i) \text{ τότε } p_-(t+1, i) = \frac{1}{T_P(t, i)}, \quad p_+(t+1, i) = 0$$

$$\text{Αν } E > B_C(t+1, i) \text{ τότε } p_-(t+1, i) = 0, \quad p_+(t+1, i) = \frac{1}{T_P(t, i)}$$

$$\text{Αν } E = B_C(t+1, i) \text{ τότε } p_-(t+1, i) = \frac{0.5}{T_P(t, i)}, \quad p_+(t+1, i) = \frac{0.5}{T_P(t, i)}$$

Reward

Στόχος μας είναι η ελαχιστοποίηση κόστους φόρτισης των οχημάτων καθώς και η βελτιστοποίηση της μεταχείρισης της μπαταρίας. Επομένως για τον υπολογισμό μας θα χρησιμοποιήσουμε 3 μεγέθη:

- $C_p(t)$: Το κόστος αγοράς/πώλησης ενέργειας την χρονική στιγμή t

$$C_p(t) = \Delta E_{new}(t) * \frac{C(t)}{1000} * 100$$

- $D_C(t)$: Η συνολική φθορά της μπαταρίας λόγω κύκλων φόρτισης

Μια μπαταρία λιθίου φτάνει το τέλος της ζωής της όταν χάσει το 20% της χωρητικότητας της. Επομένως για διαφορετικούς ρυθμούς φόρτισης/αποφόρτισης έχουμε μια μπαταρία λιθίου έχει μέσο χρόνο ζωής:

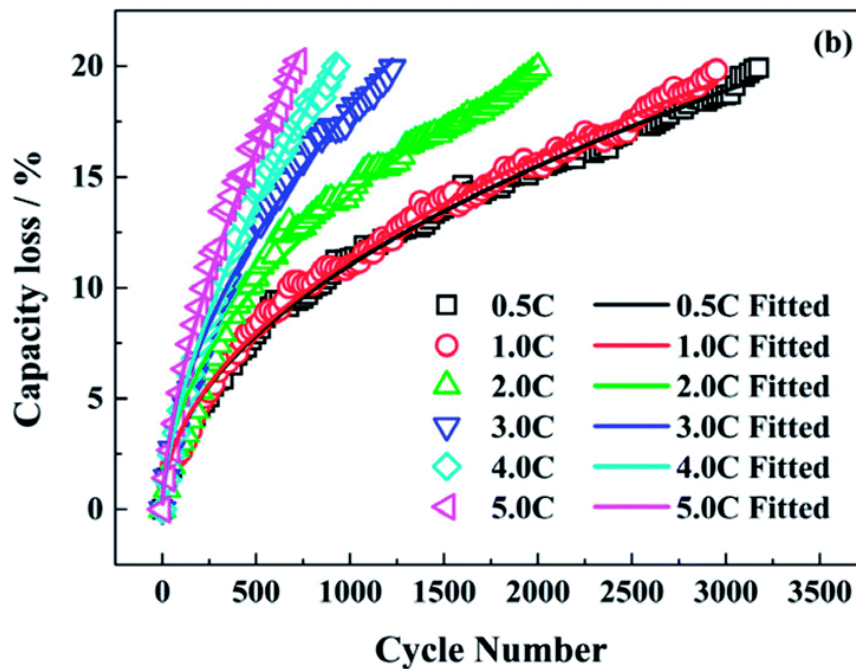
ΡΥΘΜΟΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ (C-RATE)	0,5	1	2
ΣΥΝΟΛΙΚΟΙ ΚΥΚΛΟΙ ΖΩΗΣ	4000	2875	2000

Ως C-rate ορίζουμε την ισχύ που πρέπει να δώσουμε (ή να πάρουμε) με την οποία μια μπαταρία μπορεί να φορτίσει (ή να αποφορτίσει αντίστοιχα) μέσα μία ώρα. Επομένως ρυθμός 1C δηλώνει ότι η μπαταρία φορτίζει από το 0% στο 100% σε μία ώρα, ρυθμό 0.5C δηλώνει ότι φορτίζει σε 2 ώρες κοκ.

Επειδή το κάθε μας βήμα είναι ανά μία ώρα δεν μπορούμε να ξεπεράσουμε το ρυθμούς μεγαλύτερους από 1C. Επιπλέον για μικρά C-rates η φθορά λόγω κύκλων φόρτισης εμφανίζει γραμμική συμπεριφορά, επομένως μπορούμε να την προσεγγίσουμε ως μια γραμμική συνάρτηση.

$$\Delta E(t, i) = B_C(t+1, i) - B_C(t, i)$$

$$D_C(t, i) = \begin{cases} 5 * 10^{-5} * \frac{\Delta E(t, i)}{B_S(i)} + 1.8 * 10^{-5}, & \Delta E(t, i) > 0, \\ 0, & \Delta E(t, i) \leq 0 \end{cases}, \quad [2]$$



Εικόνα 15 Φθορά μπαταρίας ως συνάρτηση των κύκλων φόρτισης με διαφορετικούς ρυθμούς φόρτισης

Ο παραπάνω τύπος μας δίνει την ποσοστιαία πτώση σε χωρητικότητα της μπαταρίας για κάθε αμάξι λόγω cycle degradation. Άρα συνολικά:

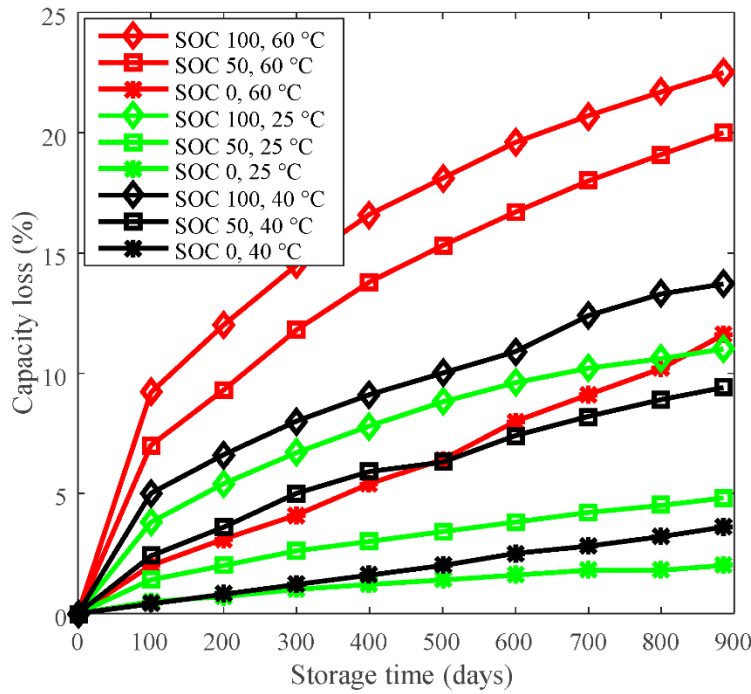
$$D_C(t) = \left(\sum_{i=0}^{N_{\text{αμάξια}}} D_C(t, i) \right) * batteryCost(euro/KWh) * 100$$

Δηλαδή σε κάθε μετάβαση έχουμε ένα «έξτρα» κόστος για την φθορά που προκαλέσαμε

- $D_A(t)$: Η συνολική φθορά της μπαταρίας λόγω του χρόνου παραμονής σε κάποιο επίπεδο φόρτισης (ημερολογιακή φθορά μπαταρίας). Δεχόμαστε ότι οι μπαταρίες των οχημάτων είναι σε θερμοκρασία 40 βαθμών Κελσίου καθ' όλη την διάρκεια της παραμονής τους στο παρκινγκ.

Μετά από 900 ημέρες σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο φόρτισης οι μπαταρίες έχουν υποστεί την παρακάτω πτώση χωρητικότητας:

ΕΠΙΠΕΔΟ ΦΟΡΤΙΣΗΣ (%)	0	50	100
ΠΟΣΟΣΤΙΑΙΑ ΠΤΩΣΗ ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ (%)	2	6,5	11



Εικόνα 16 Ημερολογιακή φθορά μπαταρίας σε διάφορα επίπεδα φόρτισης και θερμοκρασίας

Βλέπουμε επομένως ότι η ημερολογιακή φθορά εξαρτάται γραμμικά από το επίπεδο φόρτισης. Επομένως μπορούμε να την προσεγγίσουμε ως:

$$D_A(t, i) = \frac{0.045}{0.5} * \frac{1}{900 * 24} * \left(\frac{\Delta E(t, i)}{2} + B_C(t, i) \right) + 0.02, \quad [2]$$

Θεωρούμε ως επίπεδο φόρτισης για κάθε όχημα το μέσο επίπεδο φόρτισης σε κάθε μονόωρο βήμα. Ο παραπάνω τύπος μας δίνει την ποσοστιαία πτώση σε χωρητικότητα της μπαταρίας για κάθε αμάξι λόγω ημερολογιακής φθοράς. Άρα συνολικά:

$$D_A(t) = \left(\sum_{i=0}^{N_{\text{αμάξια}}} D_A(t, i) \right) * \text{batteryCost}(\text{euro/KWh}) * 100$$

Δηλαδή σε κάθε μετάβαση έχουμε ένα «έξτρα» κόστος για την φθορά που προκαλέσαμε

Τέλος ο υπολογισμός του κέρδους της μετάβασης υπολογίζεται ως εξής: $R(t) = C_P(t) + D_C(t) + D_A(t)$

Καμπύλη τιμής ενέργειας

Προκειμένου να μπορούμε να προβλέψουμε την συμπεριφορά του πάρκινγκ καθώς να μπορούμε να βελτιστοποιήσουμε την δρομολόγηση της φόρτισης και αποφόρτισης χρειαζόμαστε μια καμπύλη τιμής ενέργειας, δηλαδή μια καμπύλη κόστους ενέργειας (€/MWh), με δυνατότητα πρόβλεψης της τιμής στο μέλλον. Επομένως επιλέξαμε την καμπύλη από την αγορά της επόμενης ημέρας. Η επιλογή αυτή μας βοηθάει να έχουμε την προβλεπόμενη τιμή για τις επόμενες 24 ώρες το οποίο είναι όσο χρειαζόμαστε καθώς κανένα όχημα δεν μπορεί να βρίσκεται στο πάρκινγκ παραπάνω από 24 ώρες. Όμως με την επιλογή αυτή, δεχόμαστε ότι η πραγματική τιμή της ενέργειας ισούται, ή τουλάχιστον παραμένει σχεδόν ίδια, με την προβλεπόμενη από την αγορά της επόμενης ημέρας. Η υπόθεση αυτή είναι σωστή για την μέση περίπτωση, όμως σε περιπτώσεις στέρσης οι τιμές αυτές μπορεί να απέχουν πολύ η μία από την άλλη.

Ως καμπύλη τιμής ενέργειας για τα πειράματά μας επιλέξαμε την καμπύλη τιμής ενέργειας του ελληνικού χρηματιστηρίου ενέργειας από τους μήνες Νοέμβριο 2020 μέχρι και τον Ιούλιο του 2021.

Σύνολο Παρατήρησης

Η κατάσταση που ορίσαμε περιέχει πολλές μεταβλητές, κάποιες από τις οποίες δεν χρειαζόμαστε, ενώ δεν περιέχει κάποιες άλλες, οι οποίες υπολογίζονται με βάση των μεταβλητών της κατάστασης. Η ενισχυτική μάθηση μας επιτρέπει να ορίσουμε ένα νέο υποσύνολο της κατάστασης μας το οποίο ονομάζεται **σύνολο παρατήρησης**, το οποίο περιέχει αυστηρά μόνο μεταβλητές της κατάστασης και μεταβλητές που προκύπτουν άμεσα από αυτές. Το σύνολο αυτό μας βοηθάει να ορίσουμε ένα μικρότερο πιο περιεκτικό σύνολο μεταβλητών το οποίο θα βοηθήσει τους πράκτορές μας να πάρουν καλύτερες αποφάσεις.

Επομένως καταλήξαμε στο παρακάτω σύνολο 33 μεταβλητών:

ΘΕΣΗ	ΜΕΤΑΒΛΗΤΗ	ΣΥΜΒΟΛΟ	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ
0	Μέγιστος συντελεστής	$\alpha_M(t+1)$	$\begin{cases} \frac{\Delta E_{new}^{upper}(t+1)}{\Delta E_{+max}(t+1)}, & \Delta E_{new}^{upper}(t+1) > 0 \\ 0, & \Delta E_{new}^{upper}(t+1) = 0 \\ \frac{\Delta E_{new}^{upper}(t+1)}{\Delta E_{-max}(t+1)}, & \Delta E_{new}^{upper}(t+1) < 0 \end{cases}$
1	Συντελεστής κατωφλίου	$\tau(t+1)$	$\begin{cases} \frac{\Delta E_{new}^{thresh}(t)}{\Delta E_{+max}(t)}, & \text{αν } \Delta E_{+min}(t) > \Delta E_{-min}(t) \\ 0, & \text{αν } \Delta E_{+min}(t) = \Delta E_{-min}(t) \\ \frac{\Delta E_{new}^{thresh}(t)}{\Delta E_{-max}(t)}, & \text{αν } \Delta E_{+min}(t) < \Delta E_{-min}(t) \end{cases}$

2	Ελάχιστος συντελεστής	$a_m(t+1)$	$\begin{cases} \frac{\Delta E_{new}^{lower}(t+1)}{\Delta E_{+max}(t+1)}, & \Delta E_{new}^{lower}(t+1) > 0 \\ 0, & \Delta E_{new}^{lower}(t+1) = 0 \\ \frac{\Delta E_{new}^{lower}(t+1)}{\Delta E_{-max}(t+1)}, & \Delta E_{new}^{lower}(t+1) < 0 \end{cases}$
3 – 14	Ζήτηση ενέργειας	$[C(t+1) \dots C(t+12)]$	Χρησιμοποιούμε τις τιμές από το Day Ahead market διαιρεμένο δια 100
15 – 26	Κατάσταση πάρκινγκ	$[V(t+1) \dots V(t+12)]$	Ο αριθμός αμαξιών στο πάρκινγκ για τις επόμενες 12 ώρες διαιρεμένο δια N
27	Μέγιστη δυνατή αύξηση ενέργειας	$\Delta E_{+max}^{norm}(t+1)$	$\Delta E_{+max}^{norm}(t+1) = \frac{\Delta E_{+max}(t+1)}{P_+ * N}$
28	Ελάχιστη δυνατή αύξηση ενέργειας	$\Delta E_{+min}^{norm}(t+1)$	$\Delta E_{+min}^{norm}(t+1) = \frac{\Delta E_{+min}(t+1)}{P_+ * N}$
29	Μέγιστη δυνατή μείωση ενέργειας	$\Delta E_{-max}^{norm}(t+1)$	$\Delta E_{-max}^{norm}(t+1) = \frac{\Delta E_{-max}(t+1)}{P_- * N}$
30	Ελάχιστη δυνατή μείωση ενέργειας	$\Delta E_{-min}^{norm}(t+1)$	$\Delta E_{-min}^{norm}(t+1) = \frac{\Delta E_{-min}(t+1)}{P_- * N}$
31	Η μέση προτεραιότητα φόρτισης	$\bar{p}_+(t+1)$	$\bar{p}_+(t+1) = \frac{\sum_{i=0}^{N_{αμαξια}} p_+(t+1, i)}{N_{αμαξια}}$
32	Η μέση προτεραιότητα αποφόρτισης	$\bar{p}_-(t+1)$	$\bar{p}_-(t+1) = \frac{\sum_{i=0}^{N_{αμαξια}} p_-(t+1, i)}{N_{αμαξια}}$

Επιπλέον όπως βλέπουμε προσπαθούμε όλες οι μεταβλητές μας να είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά στο σύνολο (0,1). Η μείωση των μεγεθών των τιμών μας βοηθάει στο να μην αγνοηθούν μεταβλητές με μικρό μέγεθος σε σύγκριση με άλλες μεταβλητές. Ακόμα βοηθάει στην επιτάχυνση την μάθησης του νευρωνικού μας δικτύου που θα παρουσιάσουμε παρακάτω

Πολιτικές

Προκειμένου να μελετήσουμε καλύτερα το περιβάλλον μας και να βρούμε την βέλτιστη πολιτική δράσεων δημιουργήσαμε 3 διαφορετικές πολιτικές: πολιτική έξυπνου φορτιστή, πολιτική V2G, πολιτική βελτιστοποιημένου V2G.

Πολιτική έξυπνου φορτιστή

Αρχικά υλοποιήσαμε έναν έξυπνο φορτιστή, ο οποίος θα αλληλοεπιδρά με το περιβάλλον, ως το βασικό μας μέτρο σύγκρισης προκειμένου να μπορούμε να δούμε αν το V2G μπορεί όντως να αντικαταστήσει τον παραδοσιακό φορτιστή τόσο σε επίπεδο εξοικονόμησης χρημάτων αλλά και σε απόδοση φόρτισης. Εδώ να σημειώσουμε ότι λόγω του τρόπου υλοποίησης του περιβάλλοντος μας, ο έξυπνος φορτιστής θα έχει και την δυνατότητα αποφόρτισης των οχημάτων είτε μέσω V2V είτε μέσω του δικτύου (V2G), δυνατότητα που δεν έχουν οι έξυπνοι φορτιστές. Η υλοποίηση που έχουμε φτιάξει προσπαθεί να αποφύγει την επιλογή της δυνατότητας αυτής αλλά αυτό δεν είναι πάντα εφικτό. Βέβαια όπως θα δούμε στα πειράματά μας παρακάτω, οι περιπτώσεις αυτές είναι λίγες και παίζουν πολύ μικρό ρόλο στην συνολική απόδοση του φορτιστή, με αποτέλεσμα να μπορούμε να τις αγνοήσουμε.

Η υλοποίηση που ακολουθήσαμε είναι η εξής:

- Αρχικά θέτουμε την τιμή κατωφλίου C_{th} , δηλαδή την τιμή την οποία θεωρούμε ότι υποδεικνύει το όριο μεταξύ μεγάλης και μικρής ζήτησης. Στην υλοποίηση μας θέτουμε την τιμή αυτή ως τα 50 €/MWh
- Ύστερα από την κατάσταση του περιβάλλοντος μας ενδιαφέρουν τα παρακάτω μεγέθη:

$$C(t+1), \quad \alpha_M(t+1), \quad \tau(t+1), \quad a_m(t+1)$$
- Με βάση αυτά αποφασίζουμε την δράση μας:

$$\gamma = \begin{cases} \tau(t+1), & C(t+1) \geq C_{th} \\ a_M(t+1) - (a_M(t+1) - \tau(t+1)) * \left(\frac{C(t+1)}{C_{th}} \right), & C(t+1) < C_{th} \end{cases}$$

Με τον παραπάνω τύπο επιτυγχάνουμε τα παρακάτω:

- Για τιμές ενέργειας μεγαλύτερες ή ίσες του κατωφλίου παίρνουμε την δράση ίση με τον συντελεστή κατωφλίου, δηλαδή τέτοια ώστε μόνο να ικανοποιήσουμε της ελάχιστες ανάγκες του πάρκινγκ.
- Για τιμές ενέργειας μικρότερες του κατωφλίου αφαιρούμε από τον μέγιστο συντελεστή (μέγιστη δυνατή φόρτιση/αγορά) την διαφορά μεταξύ του μέγιστου συντελεστή και του συντελεστή κατωφλίου έχοντας πολλαπλασιάσει πρώτα όμως την διαφορά με τον λόγο τιμής-κατωφλίου. Με τον τρόπο αυτό πλησιάζουμε περισσότερο στον μέγιστο συντελεστή όσο η τιμή πέφτει και αντίστοιχα πλησιάζουμε στον συντελεστή κατωφλίου όσο περισσότερο πλησιάζουμε στην τιμή κατωφλίου.

Τα παραπάνω βήματα επαναλαμβάνονται σε κάθε επανάληψη του αλγορίθμου.

Ο παραπάνω αλγόριθμος δεν είναι τέλειος καθώς χρησιμοποιεί ένα μικρό σύνολο των μεταβλητών από το σύνολο παρατήρησης. Συνεπώς δεν έχει προνοεί για κάποια απότομη αύξηση ή μείωση της τιμής αλλά ενδιαφέρεται μόνο για την παρούσα κατάσταση του πάρκινγκ και την τιμή της καμπύλης τιμής ενέργειας.

Επιπλέον η συνάρτηση για την απόφαση, λαμβάνει την τιμή ενέργειας και την τιμή κατωφλίου ως απόλυτα μεγέθη και όχι ως σχετικά στην διάρκεια μια ημέρας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ο αλγόριθμος να μην παρουσιάζει την συμπεριφορά ενός ρεαλιστικού έξυπνου φορτιστή.

Σε ημέρες με υψηλή ζήτηση καθ' όλη την διάρκεια της ημέρας, ο φορτιστής θα επιλέγει συνεχώς τον συντελεστή κατωφλίου ως απόφαση, δηλαδή θα μιλάμε για έναν πολύ απλό φορτιστή και όχι για έναν έξυπνο φορτιστή.

Αντίθετά σε ημέρες έντονη χαμηλή ζήτηση ο φορτιστής θα επιλέγει μεγάλες τιμές για τον συντελεστή με αποτέλεσμα να υπερφορτίζει τα οχήματα, γεγονός το οποίο θα πρέπει να αντισταθμιστεί με ανταλλαγή ενέργειας μεταξύ των οχημάτων (V2V) είτε ακόμα και με το δίκτυο (πώληση).

Πολιτική V2G

Ύστερα υλοποιήσαμε μια πολιτική την οποία μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε άμεσα για σύγκριση με την βελτιστοποιημένη μας πολιτική V2G. Η πολιτική αυτή στοχεύει στην χρήση του συστήματος V2G για την μείωση του κόστους καθώς και την καλύτερη εκμετάλλευση της λειτουργικότητας του περιβάλλοντος.

Η υλοποίηση που ακολουθήσαμε είναι η εξής:

- Αρχικά θέτουμε την τιμή κατωφλίου C_{th} , δηλαδή την τιμή την οποία θεωρούμε ότι υποδεικνύει το όριο μεταξύ μεγάλης και μικρής ζήτησης. Στην υλοποίηση μας θέτουμε την τιμή αυτή ως τα 50 €/MWh
- Ύστερα από την κατάσταση του περιβάλλοντος μας ενδιαφέρουν τα παρακάτω μεγέθη:

$$C(t+1), \quad \alpha_M(t+1), \quad \tau(t+1), \quad a_m(t+1)$$
- Με βάση αυτά αποφασίζουμε την δράση μας:

$$\gamma = \begin{cases} a_m(t+1) - (a_m(t+1) - \tau(t+1)) * e^{1 - \frac{C(t+1)}{C_{th}}}, & C(t+1) \geq C_{th} \\ a_m(t+1) - (a_m(t+1) - \tau(t+1)) * \left(\frac{C(t+1)}{C_{th}}\right), & C(t+1) < C_{th} \end{cases}$$

Με τον παραπάνω τύπο επιτυγχάνουμε τα παρακάτω:

- Για τιμές ενέργειας μεγαλύτερες ή ίσες του κατωφλίου προσπαθούμε να δημιουργήσουμε μια αύξουσα φραγμένη συνάρτηση όπως κάναμε με την 2^η περίπτωση. Έτσι χρησιμοποιούμε πολλαπλασιάζουμε την διαφορά του ελάχιστου συντελεστή με το συντελεστή κατωφλίου με μια εκθετική μειούμενη συνάρτηση ως προς το κόστος της τιμής. Συνεπώς η δράση μας για την πολιτική V2G είναι γραμμένη μεταξύ του a_m και του $\tau(t+1)$, το οποίο είναι ακριβώς αυτό που θέλουμε.
- Για τιμές ενέργειας μικρότερες του κατωφλίου ισχύει το ίδιο με την πολιτική έξυπνου φορτιστή.

Τα παραπάνω βήματα επαναλαμβάνονται σε κάθε επανάληψη του αλγορίθμου.

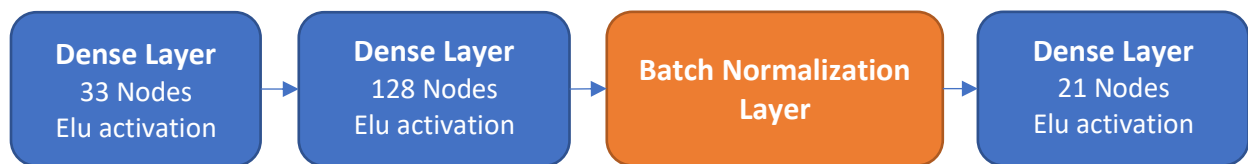
Ο παραπάνω αλγόριθμος όπως και η προηγούμενη πολιτική αποτελεί μια απλοποιημένη μορφή της λύσης. Αποτελεί μια απλή υλοποίηση της μεθοδολογίας «πουλάω ψηλά, αγοράζω χαμηλά». Οι μεταβλητές που χρησιμοποιεί είναι λίγες και αρκετά περιοριστικές προκειμένου να κάνει οποιαδήποτε

πρόβλεψη. Παρ' όλα αυτά, όπως θα δούμε στα πειράματα, ο περιορισμός αυτός δεν περιορίζει σημαντικά την ποιότητα των αποτελεσμάτων. Ακόμα η εκθετική συνάρτηση που χρησιμοποιήθηκε εισάγει μια μη-γραμμική συνάρτηση για τον πρώτο κλάδο της συνάρτησης ενώ ο άλλος κλάδος παραμένει γραμμικός. Η ανομοιομορφία αυτή μπορεί να οδηγήσει στον αλγόριθμο να προτιμάει την αποφόρτιση από την φόρτιση, δηλαδή για παρόμοια αναλογίας τιμών ενέργειας εκατέρωθεν της τιμής κατωφλίου να έχουμε μεγαλύτερη απόφαση αποφόρτισης από' τι φόρτισης.

Πολιτική βελτιστοποιημένου V2G

Σε αυτή τη πολιτική αναθέσαμε σε ένα νευρωνικό δίκτυο τον καθορισμό του αλγορίθμου υλοποίησης και βελτιστοποίησης του V2G συστήματος μας. Ως αλγόριθμο ενισχυτικής μάθησης επιλέξαμε τον **DDQN** για την απλότητα του, τις δυνατότητες τους για την επίλυση προβλημάτων καθώς και την καλύτερη απόδοση του σε σύγκριση με τον απλό **DQN**. Όμως ένα πρόβλημα που αντιμετωπίζουμε με την αυτή την επιλογή είναι η διακριτή φύση των αποφάσεων που προσφέρει ο DDQN, δηλαδή το γ μπορεί να πάρει πλέον μόνο διακριτές τιμές. Προκειμένου να το λύσουμε αυτό ορίζουμε N δράσεις τις οποίες αριθμούμε από το 0 μέχρι το $N-1$. Σε κάθε βήμα με αριθμό απόφασης $0 \leq K \leq N - 1, K \in \mathbf{N}$ υπολογίζουμε το γ ως:

$$\gamma = K * \frac{1}{N - 1}$$



Εικόνα 17 Σχηματική αναπαράσταση της δομής του νευρωνικού δικτύου

Στην Εικόνα 17 φαίνεται η σχηματική αναπαράσταση του δικτύου που χρησιμοποιήσαμε. Η δομή του είναι αρκετά απλή προκειμένου να αποφύγουμε φαινόμενα υπερμάθησης και δυσκολίας σύγκλισης. Τα μπλε τετράγωνα αντιπροσωπεύουν γραμμικά επίπεδα, με τα χαρακτηριστικά του κάθε επιπέδου να αναγράφονται παρακάτω (αριθμό νευρώνων, συνάρτηση ενεργοποίησης). Το πορτοκαλί αντιπροσωπεύει ένα επίπεδο ομαλοποίησης προκειμένου να κρατάμε την εκπαίδευση του νευρωνικού υπό έλεγχο από τυχόν αστάθειες, και απότομες αυξήσεις των παραμέτρων του.

Χρησιμοποιήσαμε την βιβλιοθήκη tensorflow για την υλοποίηση του αλγορίθμου DDQN, ενώ οι παραμέτρους αρχικοποίησης για τον αλγόριθμο πάρθηκαν από την βιβλιοθήκη Stable-Baselines3.

Ως αρχικά βήματα για να αρχικοποιηθεί η μνήμη του DDQN χρησιμοποιήθηκαν δείγματα από την εκτέλεση του πράκτορα V2G. Με τον τρόπο αυτό, δίνουμε στο δίκτυο μας μια αρχική καλή προσέγγιση στο πρόβλημα την οποία έχει την δυνατότητα να βελτιστοποιήσει και να την εξερευνήσει.

Κεφάλαιο 6, Αποτελέσματα

Εισαγωγή

Αρχικά ας δούμε πως εκπαιδεύσαμε το νευρωνικό μας δίκτυο. Ύστερα παραθέτουμε τα διαγράμματα από τα πειράματά μας. Θεωρούμε ότι όλα τα οχήματα έχουν μια 60 kWh μπαταρία και οι σταθμοί φόρτισης μπορούν να την φορτίσουν/αποφορτίσουν πλήρως σε μία ώρα (60 kW)

Εκπαίδευση

Για την εκπαίδευση χρησιμοποιήσαμε δεδομένα του Day Ahead Market του ελληνικού χρηματιστηρίου ενέργειας από 11-2020 μέχρι 07-2021.

Για την κατανομή της εισροής των αμαξιών δημιουργήσαμε μια απλή κανονική κατανομή ελεγχόμενη από μια ημιτονοειδής συνάρτηση (2 περίοδοι), της οποίας οι μέγιστες τιμές λαμβάνεται στις 6:00 το πρωί και στις 18:00 το απόγευμα.

$$\sinDist(t) = \frac{1}{2} \sin\left(2 * PI * \frac{t}{12}\right) + \frac{1}{2}$$

$$newCars(t) = Normal(10 * \sinDist(t), 2 * \sinDist(t))$$

Όπου $Normal(\mu, \sigma)$ μια γεννήτρια τυχαίων τιμών πάνω σε κανονική κατανομή με μέση τιμή μ και διασπορά σ

Επιπλέον θεωρήσαμε ότι το παρκινγκ δεν δέχεται πλέον αμάξια μετά της 20:00 το βράδυ όμως όλα τα αμάξια που έφτασα στο παρκινγκ πριν από τις 20:00 έχουν την δυνατότητα να παραμείνουν μέχρι τα μεσάνυχτα (λήξη επεισοδίου). Έτσι σε κάθε αρχή της ημέρας ξεκινάμε με το πάρκινγκ να είναι άδειο (αρχή επεισοδίου)

Τέλος ανακατεύουμε ανά ημέρα τα δεδομένα του ελληνικού χρηματιστηρίου προκειμένου να μειώσουμε την υπερμάθηση. Δηλαδή τα δεδομένα κάθε ημέρας παραμένουν τα ίδια με την ίδια σειρά αλλά οι ημέρες μεταξύ τους έχουν αλλάξει σειρά

Validation

Προκειμένου να αξιολογήσουμε την απόδοση του νευρωνικού δικτύου, ανά 8*30 επεισόδια εκπαίδευσης τρέχουμε το νευρωνικό για 10 επεισόδια σε νέο περιβάλλον με τα δεδομένα ζήτησης ενέργειας στην αρχική τους κατάσταση. Ως μετρική χρησιμοποιούμε το μέσο επιστρεπτέο κέρδος, όπου κέρδος εννοούμε το αποτέλεσμα της συνάρτησης που ορίσαμε στην ενότητα που περιγράφουμε το κέρδος.

Συνολικά εκπαιδεύουμε το νευρωνικό μας για $30 * 200$ επεισόδια

Πειράματα

Προκειμένου να μπορούμε καλύτερα να διακρίνουμε την συμπεριφορά του νευρωνικού και των dummy πρακτόρων παραθέτουμε παρακάτω τα αποτελέσματα μόνο για τις πρώτες πέντε ημέρες της διαδικασίας

Διαγράμματα

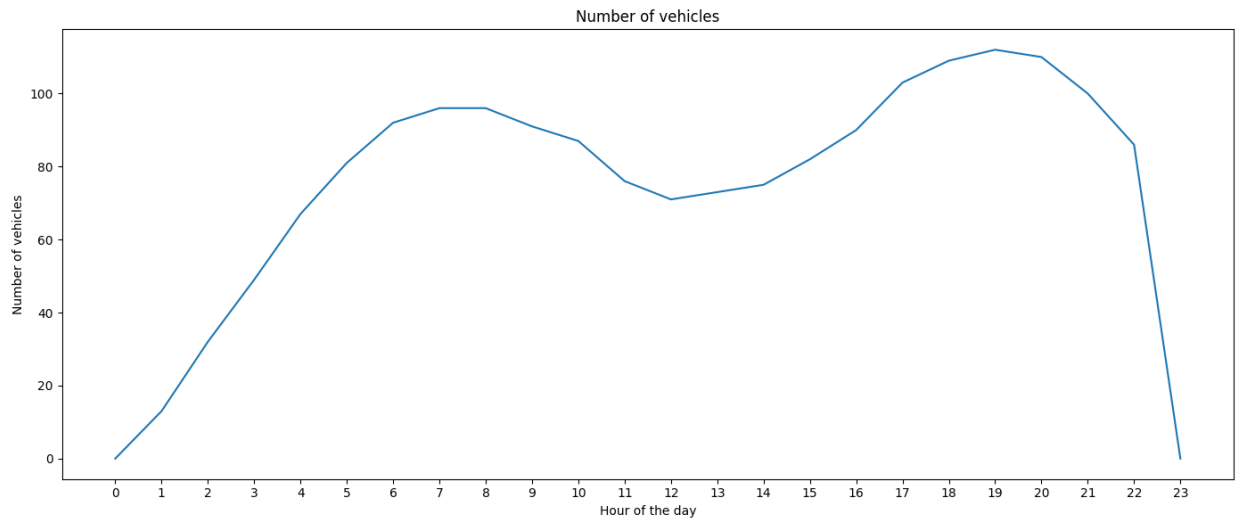
Εξάγουμε 7 διαφορετικά διαγράμματα.

1. Διάγραμμα του συνολικού αριθμού αυτοκινήτων που βρίσκονται στο πάρκινγκ ανά ώρα
2. Διάγραμμα του κόστους ανά ώρα $C_p(t)$
3. Διάγραμμα του cycle degradation $D_C(t)$
4. Διάγραμμα του age degradation $D_A(t)$
5. Διάγραμμα συχνότητας για την συμπεριφορά του πράκτορα ως προς το C_{rate} . Ως C_{rate} ορίζουμε την ισχύ που χρειάζεται ένα όχημα για να φορτίσει από το 0 στο 100% μέσα σε μία ώρα. Μετράμε για κάθε μετάβαση το C_{rate} για κάθε αμάξι. Παραλείπουμε την τιμή στο 0 προκειμένου να έχουμε καλύτερη ευκρίνεια για τις άλλες τιμές.
6. Θεωρούμε ως υπερφορτισμένα ένα αμάξι του οποίου η μπαταρία έχει ξεπεράσει το 50% φόρτισης. Μετράμε πόσο χρόνο κάθε αμάξι παραμένει σε μια τέτοια κατάσταση και αναπαριστούμε τα νούμερα αυτά σε διάγραμμα συχνότητας
7. Αναλυτικό διάγραμμα συναλλαγών.
Περιέχει την καμπύλη ζήτησης από το Day Ahead Market. Πάνω σε αυτό σημειώνουμε με πράσινο χρώμα τις αγορές ενέργειας, με κόκκινο τις πωλήσεις και με γκρι την καμία συναλλαγή. Το εμβαδό των σημείων αναπαριστούν τον όγκο της συναλλαγής σε euro cents.

Παρακάτω παρουσιάζουμε τα διαγράμματα 1, 2, 3, 4 και 6 για μια τυχαία ημέρα κατά την διάρκεια ενός πλήρως κύκλου των δεδομένων μας και τα 5 και 7 για το συνολικό όγκο των διαγραμμάτων.

Κατανομή οχημάτων

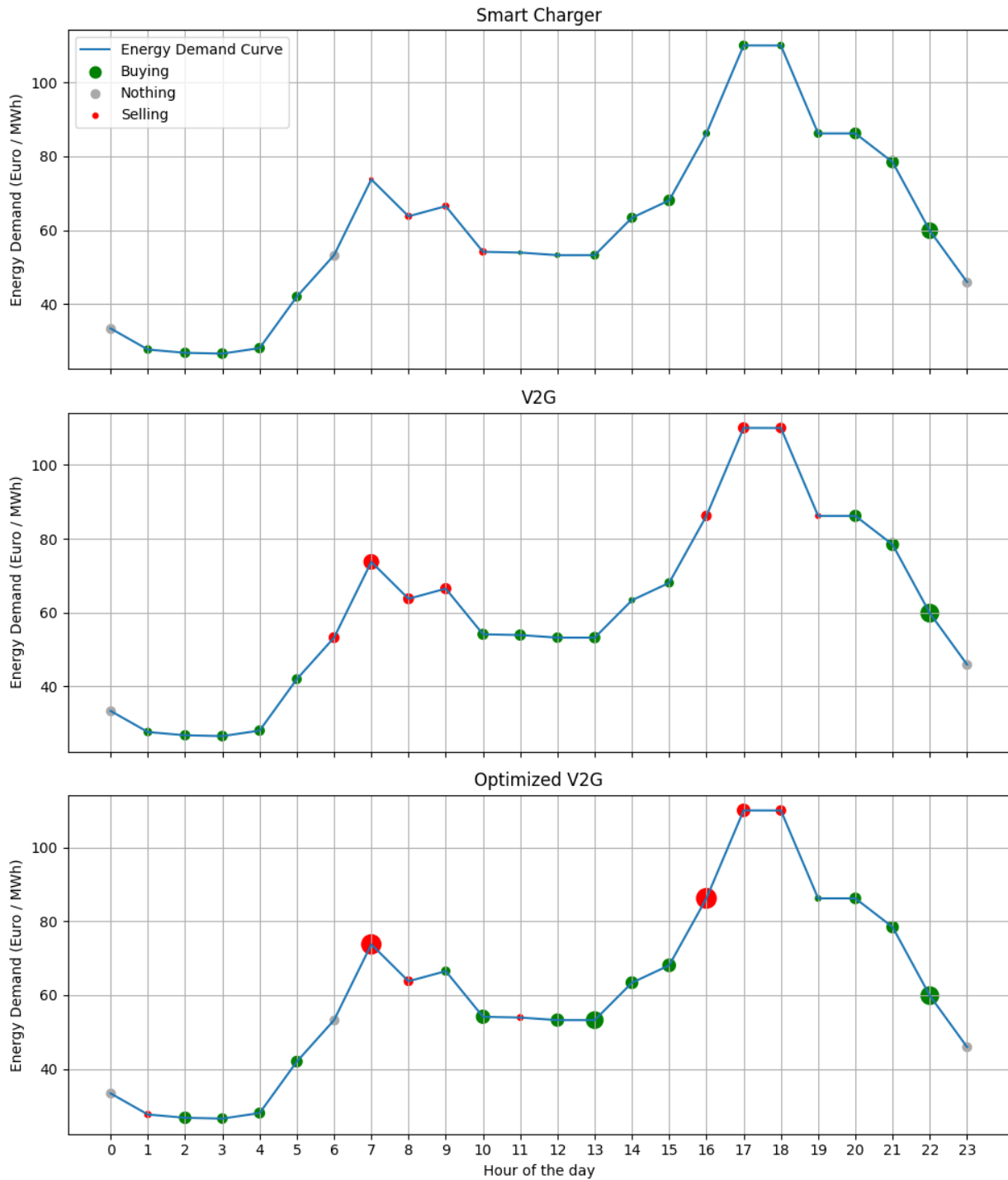
Για να είμαστε σίγουροι ότι η σύγκριση είναι αντικειμενική, δημιουργούμε μια στατική κατανομή αυτοκινήτων και την περνάμε ως input σε όλους τους πράκτορες μας.



Εικόνα 18 Διάγραμμα κατανομής των οχημάτων στο πάρκινγκ

Όπως περιγράψαμε και προηγουμένως η κατανομή έχει δύο μέγιστα ένα στις 6 το πρωί και ένα στις 6 το απόγευμα. Μετά τις 8 το απόγευμα παρατηρούμε μια απότομη πτώση στα οχήματα καθώς πλέον το πάρκινγκ δεν δέχεται άλλες αφίξεις, με αποτέλεσμα ο αριθμός των οχημάτων να μειώνεται σημαντικά ώρα με την ώρα

Καμπύλη συναλλαγών



Εικόνα 19 καμπύλες συναλλαγών για τις τρεις πολιτικές

Η καμπύλη ενέργειας-τιμής όπως βλέπουμε παρουσιάζει δύο μέγιστα ένα στις 7 το πρωί και ένα μεταξύ 5 και 6 το απόγευμα. Η πρώτη μέγιστη τιμή φτάνει μέχρι τα 80 €/MWh ενώ η δεύτερη ξεπερνάει τα 110

€/MWh. Οι πρώτες ώρες της ημέρας παρουσιάζουν μικρή ζήτηση ενώ η ζήτηση μεταξύ των δύο μεγίστων είναι σχετικά αυξημένη. Στο τέλος της ημέρας βλέπουμε η ζήτηση να πέφτει αρκετά ραγδαία έως ότου αυτή φτάσει τα επίπεδα των πρωινών ωρών.

Η συμπεριφορά των πολιτικών για αυτή τη τυχαία μέρα είναι αρκετά ενδιαφέρουσα:

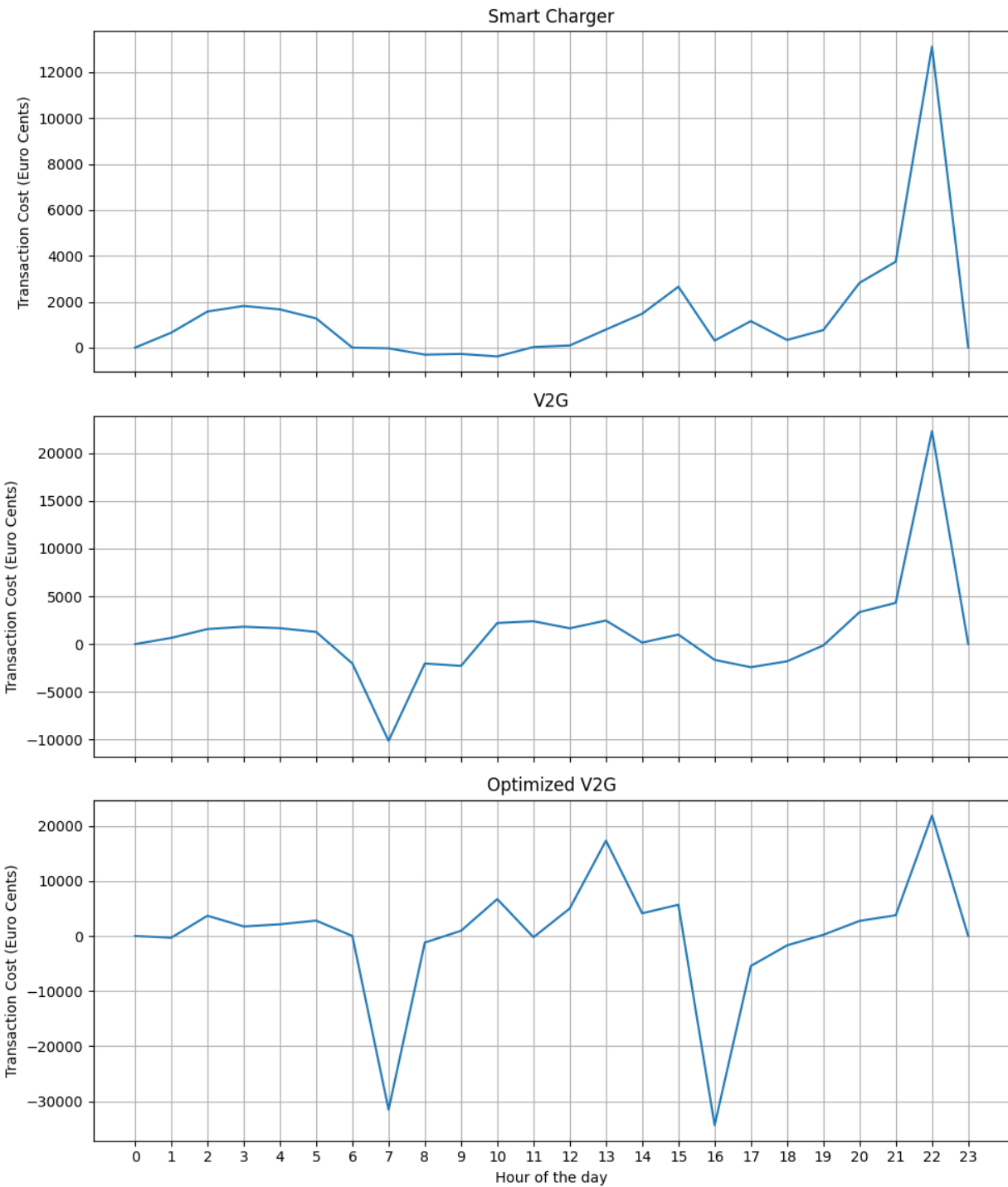
Αρχικά βλέπουμε ότι η πολιτική του έξυπνου φορτιστή εκμεταλλεύεται την αρχική μειωμένη ζήτηση ενέργειας φορτίζοντας αρκετά έντονα τα οχήματα που βρίσκονται στο πάρκινγκ. Όταν η ζήτηση αυξάνεται για την πρώτη φορά στην ημέρα και ξεπερνάει την τιμή κατωφλίου (50 €/MWh), βλέπουμε ότι η πολιτική εκτελεί την κίνηση που υποδεικνύει ο συντελεστής κατωφλίου. Όμως η ζήτηση, στη συνέχεια, δεν πέφτει κάτω από την τιμή κατωφλίου, το οποίο αναγκάζει την πολιτική να επιλέγει ως κίνηση τον συντελεστή κατωφλίου, το οποίο στην αρχή την αναγκάζει να πουλήσει ένα μικρό κομμάτι της ενέργειας και στη συνέχεια, με την άφιξη νέων οχημάτων, να αγοράσει, ακόμα και σε περιόδους υψηλής ζήτησης, κάτι το οποίο μπορεί να αποδειχτεί επιζήμιο για το πάρκινγκ σε περίπτωση ανεπάρκειας του δικτύου.

Σε αντίθεση, η πολιτική V2G παρουσιάζει μια πιο ελεγχόμενη συμπεριφορά. Οι πρώτες κινήσεις της είναι όμοιες με αυτές της προηγούμενης πολιτικής, όμως όταν η ζήτηση αυξάνεται βλέπουμε ότι η πολιτική πουλάει εκμεταλλευόμενη την υψηλή αυτή ζήτηση. Η πολιτική εφαρμόζει ικανοποιητικά τον αλγόριθμο της. Βλέπουμε ότι πουλάει όταν η ζήτηση αυξάνεται ενώ αγοράζει όταν η ζήτηση μειώνεται. Η κίνηση αυτή, την ξεχωρίζει από την απλή πολιτική του έξυπνου φορτιστή, βελτιώνοντας τα κέρδη της πολιτικής και μεγιστοποιώντας τις ευκαιρίες εκμετάλλευσης της καμπύλης κόστους-ενέργειας.

Τέλος βλέπουμε ότι η βελτιστοποιημένη πολιτική V2G έχει τον μεγαλύτερο έλεγχο, με την πώληση της ενέργειας να είναι σύντομη και έντονη έτσι ώστε να αφήσει χρόνο προκειμένου να φορτίσει τα οχήματα με αργό ρυθμό μειώνοντας την φθορά της μπαταρίας. Όπως και στην προηγούμενη πολιτική, έχουμε μια έντονη πώληση στις 7 το πρωί και 3 συνεχόμενες πωλήσεις στις 4, 5 και 6 το απόγευμα.

Επιπλέον πρέπει να σημειώσουμε ότι και οι 3 πολιτικές εμφανίζουν ένα μεγάλο έλλειμα ενέργειας στο τέλος της ημέρας το οποίο αναγκάζονται να ικανοποιήσουν αγοράζοντας ένα μεγάλο ποσό ενέργειας από το δίκτυο. Αυτό στην προκειμένη περίπτωση δεν είναι αρνητικό καθώς η ζήτηση έχει πέσει σημαντικά αυτές τις ώρες, όμως μεγάλες μη-ελεγχόμενες συναλλαγές με το δίκτυο μπορεί να αποδειχτούν μοιραίες για την αποδοτικότητα του πάρκινγκ.

Καμπύλη κόστους



Εικόνα 20 καμπύλες κόστους για τις τρεις πολιτικές

Στις καμπύλες κόστους βλέπουμε αναλυτικά τα έσοδα και τα έξοδα κάθε πολιτικής.

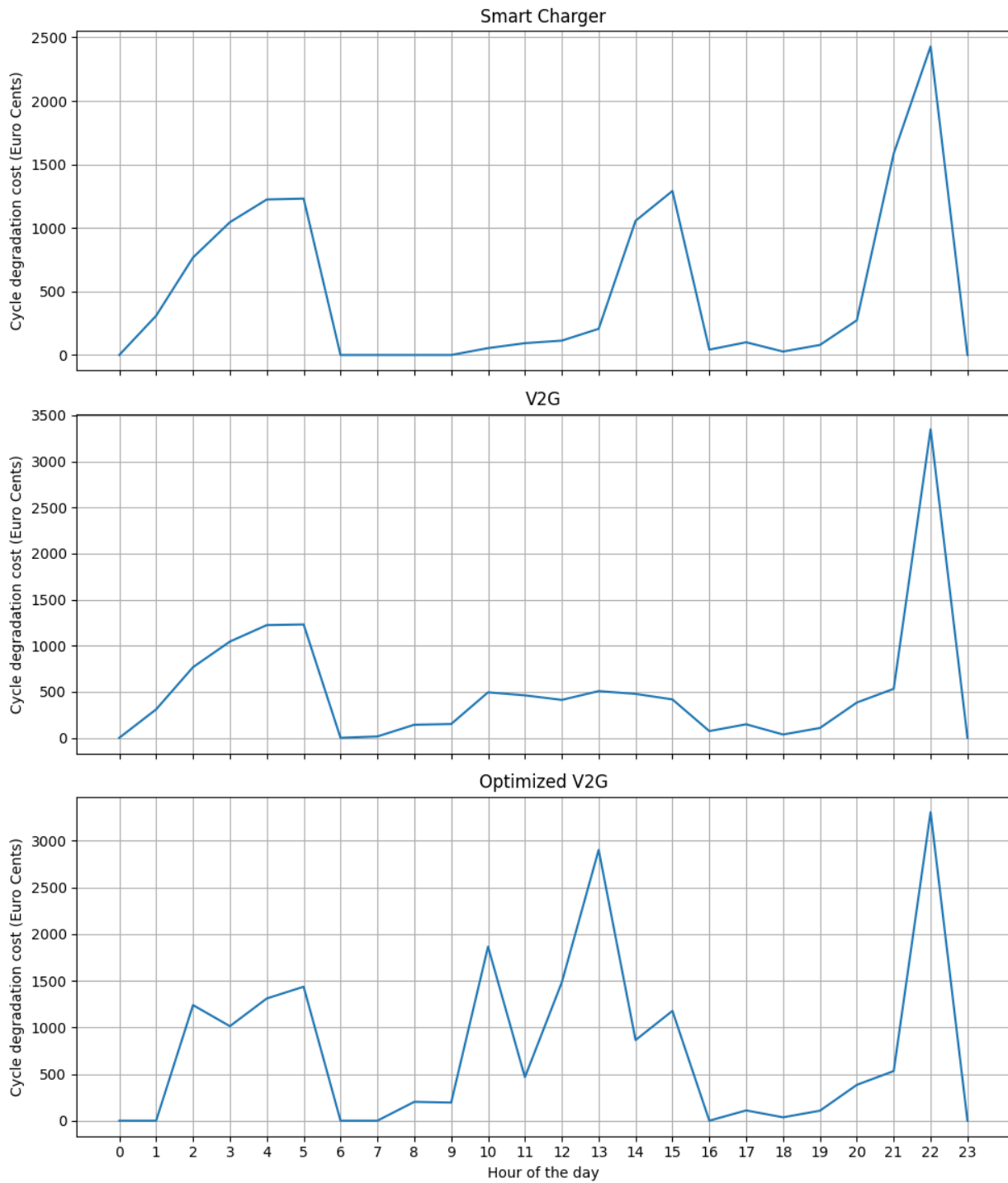
Για την πολιτική του έξυπνου φορτιστή βλέπουμε ότι έχουμε κυρίως έξοδα (αγορά ενέργειας) τα οποία είναι σε γενικές γραμμές μικρά σε μέγεθος. Εξαίρεση αποτελεί η τελευταία συναλλαγή η οποία ξεπερνάει τα 12.000 €.

Η πολιτική V2G παρουσιάζει μια πιο ελεγχόμενη και ισορροπημένη καμπύλη κόστους, εμφανίζοντας αγορές και πωλήσεις ενέργειας. Οι περίοδοι πωλήσεων είναι μικρές και όχι τόσο έντονες δείχνοντας την ομαλή φύση της πολιτικής. Τέλος, και εδώ η τελευταία συναλλαγή είναι αρκετά αυξημένη.

Τέλος, η πολιτική βελτιστοποιημένης V2G εμφανίζει την μεγαλύτερη ένταση συναλλαγών, με τις αγορές και τις πωλήσεις να ξεπερνούν διαρκώς τα 20.000 €. Βλέπουμε όμως ότι οι πωλήσεις είναι πολύ πιο έντονες καθώς η φθορά της μπαταρίας λόγω κύκλων φόρτισης λαμβάνεται μόνο κατά την φόρτιση.

Επομένως βλέπουμε ότι η βελτιστοποιημένη πολιτική έχει ισχυρή προδιάθεση προς την αποφόρτιση των οχημάτων. Γι' αυτό προσπαθεί να τα φορτίσει πριν από μεγάλες αυξήσεις της ζητήσεως προκειμένου να μεγιστοποιήσει το κέρδος της, ένα χαρακτηριστικό, το οποίο δεν εμφανίζουν οι άλλες δύο πολιτικές.

Καμπύλη φθοράς λόγω χρήσης της μπαταρίας



Εικόνα 21 καμπύλη φθοράς λόγω χρήσης της μπαταρίας για τις τρεις πολιτικές

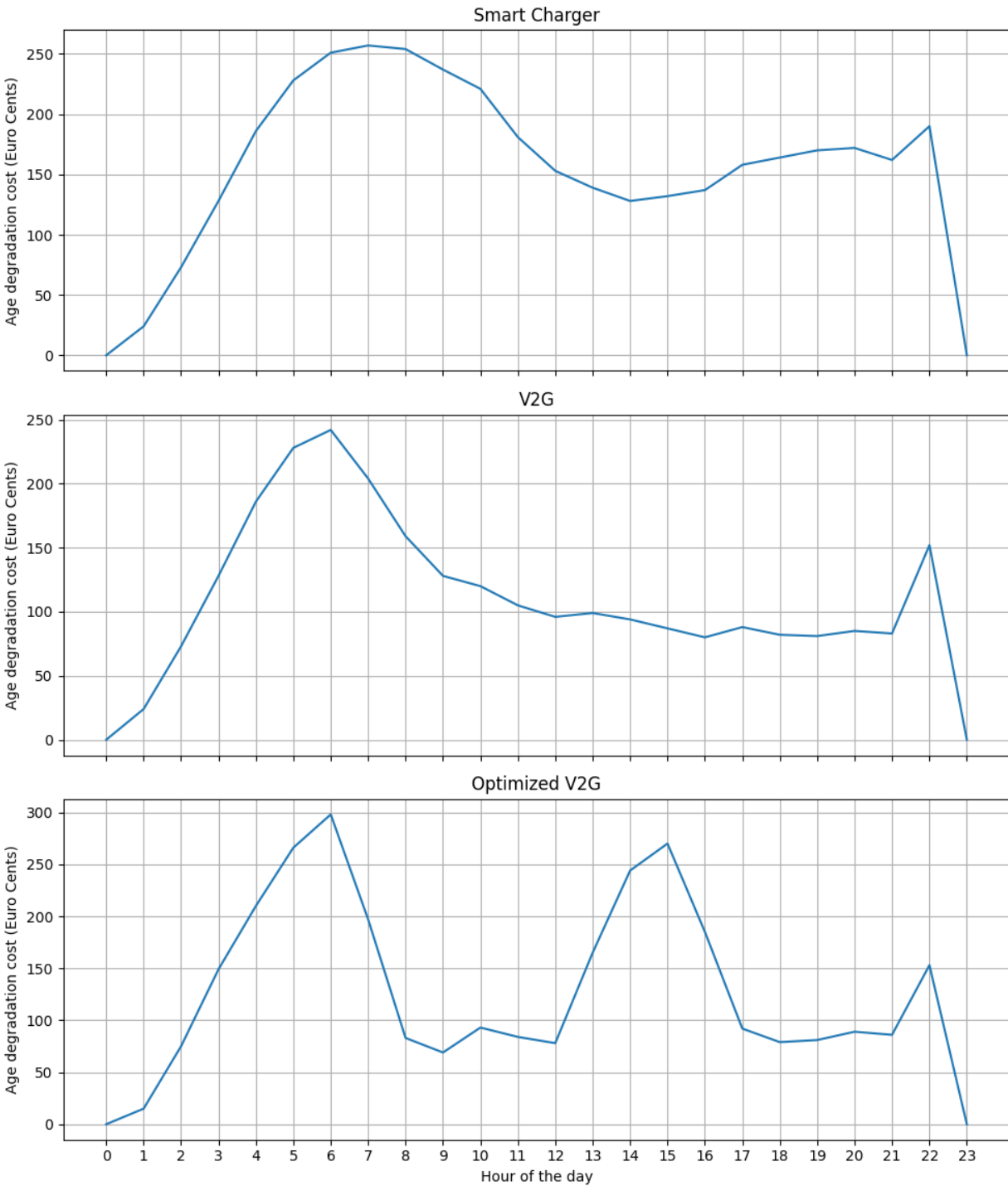
Η καμπύλη φθοράς χρήσης της μπαταρίας μας δίνει μια καλύτερη εικόνα για την αποδοτικότητα κάθε αλγορίθμου.

Όπως είδαμε και προηγουμένως η πολιτική του έξυπνου φορτιστή δεν είναι ιδιαίτερα έντονη παρουσιάζοντας επομένως μικρή χρήση της μπαταρίας. Η φθορά παραμένει μικρή καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας. Βέβαια, παρατηρούμε επιπλέον μια έντονη αύξηση στο τέλος της ημέρας, η οποία δεν είναι εμφανής στις άλλες δυο πολιτικές που υποδεικνύει την μη ελεγχόμενη φύση της πολιτικής.

Για την πολιτική V2G η εικόνα της φθοράς είναι καλύτερη, καθώς ενώ έχουμε έντονες συναλλαγές και προς τις δυο κατευθύνσεις η φθορά παραμένει χαμηλά. Στο μεγαλύτερο μέρος της ημέρας η φθορά παραμένει κάτω από τις 1000 μονάδες.

Η βελτιστοποιημένη πολιτική V2G, από την άλλη, παρουσιάζει μια πολύ πιο έντονη εικόνα. Βλέπουμε ότι η χρήση της μπαταρίας είναι αρκετά έντονη και αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η πολιτική προσπαθεί να μεγιστοποιήσει το κέρδος, σεβόμενη τους περιορισμούς. Επομένως, αφού έχουμε μεγάλες πωλήσεις ενέργειας θα πρέπει να έχουμε και μεγαλύτερες αγορές ενέργειας το οποίο αν δεν γίνει σωστά, οδηγεί σε αύξηση της φθοράς της μπαταρίας. Βέβαια από το διάγραμμα ενώ έχουμε μερικές υψηλές αυξήσεις της φθοράς η μέση τιμή της παραμένει σχετικά χαμηλά, το οποίο δείχνει ότι η πολιτική δεν αγνοεί πλήρως την φθορά της μπαταρίας

Καμπύλη ημερολογιακής φθοράς της μπαταρίας



Εικόνα 22 καμπύλες ημερολογιακής φθοράς για τις τρεις πολιτικές

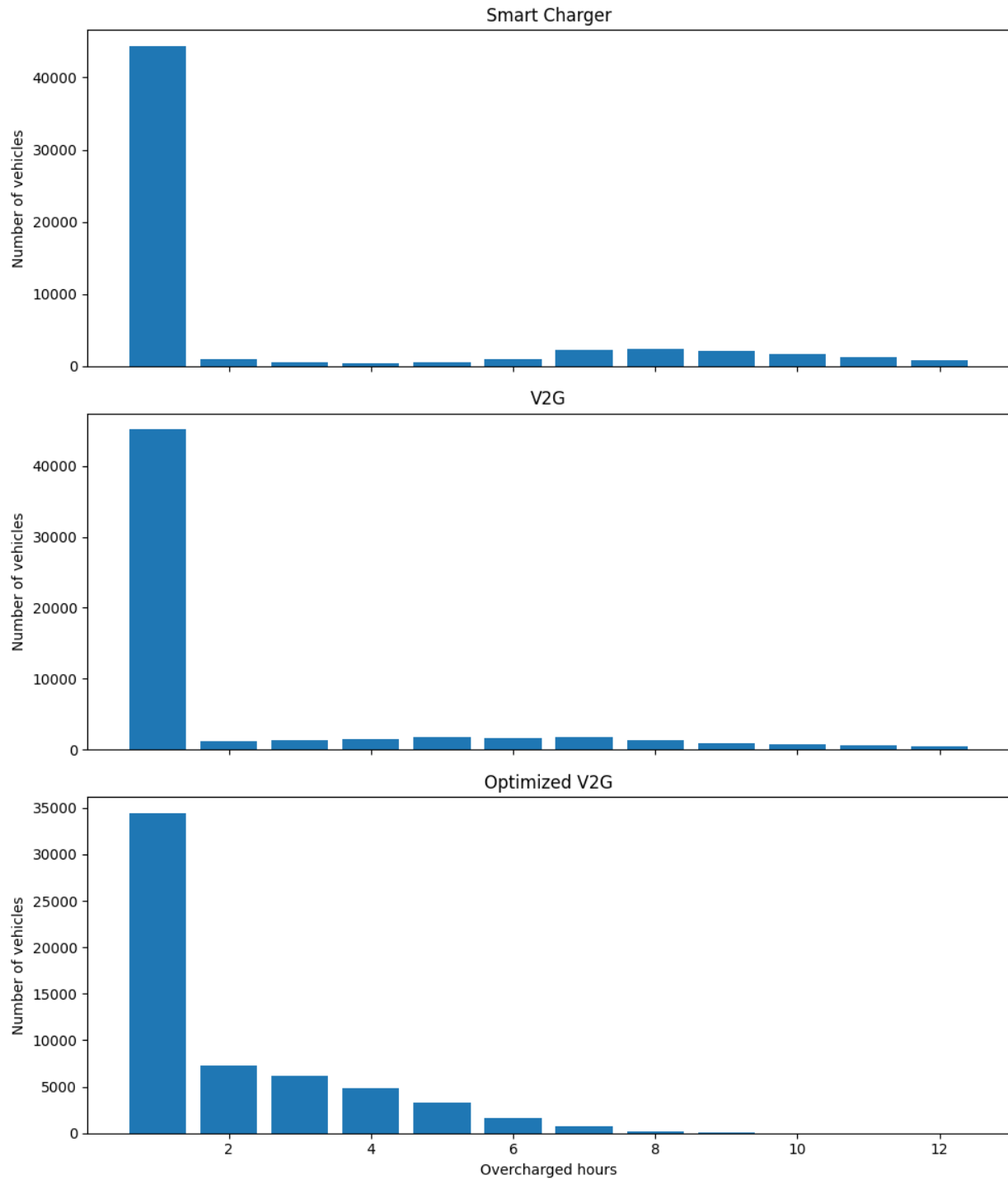
Η καμπύλη ημερολογιακής φθοράς μας δίνει μια διαφορετική οπτική του προβλήματος: Πως κάθε πολιτική λαμβάνει υπόψιν την μακροπρόθεσμη φθορά της μπαταρίας.

Αρχικά η καμπύλη της πολιτικής έξυπνου φορτιστή φαίνεται να μοιάζει αρκετά με την καμπύλη κατανομής των οχημάτων. Αυτό υποδεικνύει ότι η πολιτική δεν λαμβάνει καθόλου υπόψιν της ημερολογιακή φθορά, έτσι και αλλιώς όπως είδαμε στο μεγαλύτερο μέρος την ημέρας οι κινήσεις τις ήταν περιορισμένες. Επομένως η ημερολογιακή φθορά παραμένει υψηλή καθώς τα οχήματα παραμένουν για μεγάλα χρονικά διαστήματα σε υψηλά επίπεδα φόρτισης.

Η καμπύλη της πολιτικής V2G ενώ στην αρχή μοιάζει αρκετά με την προηγούμενη πολιτική βλέπουμε ότι μετά το πέρας της πρώτης μέγιστης ζήτησης, η φθορά μειώνεται και παραμένει σε σχετικά χαμηλά επίπεδα. Σε αυτό συμβάλλει η αποφόρτιση των οχημάτων κατά την διάρκεια της δεύτερης αύξησης της ζήτησης.

Η καμπύλη της πολιτικής βελτιστοποιημένης V2G παρουσιάζει αρκετά υψηλά ακρότατα, τα οποία οφείλονται στην αναζήτηση του μέγιστου κέρδους από την πολιτική. Συγκεκριμένα, η πολιτική λίγο πριν την αύξηση της ζήτησης, φορτίζει τα οχήματα. Στη συνέχεια, όταν η ζήτηση αυξάνεται, η πολιτική αμέσως τα αποφορτίζει μεγιστοποιώντας το κέρδος και ελαχιστοποιώντας τη ημερολογιακή φθορά, εφόσον τα επαναφέρει σε χαμηλά επίπεδα φόρτισης. Επομένως παρόλο τις μεγαλύτερες στιγμιαίες τιμές ημερολογιακές φθοράς, σε μακροπρόθεσμο επίπεδο η φθορά παραμένει χαμηλή και βέλτιστη.

Διάγραμμα υπερφορτισμένων οχημάτων



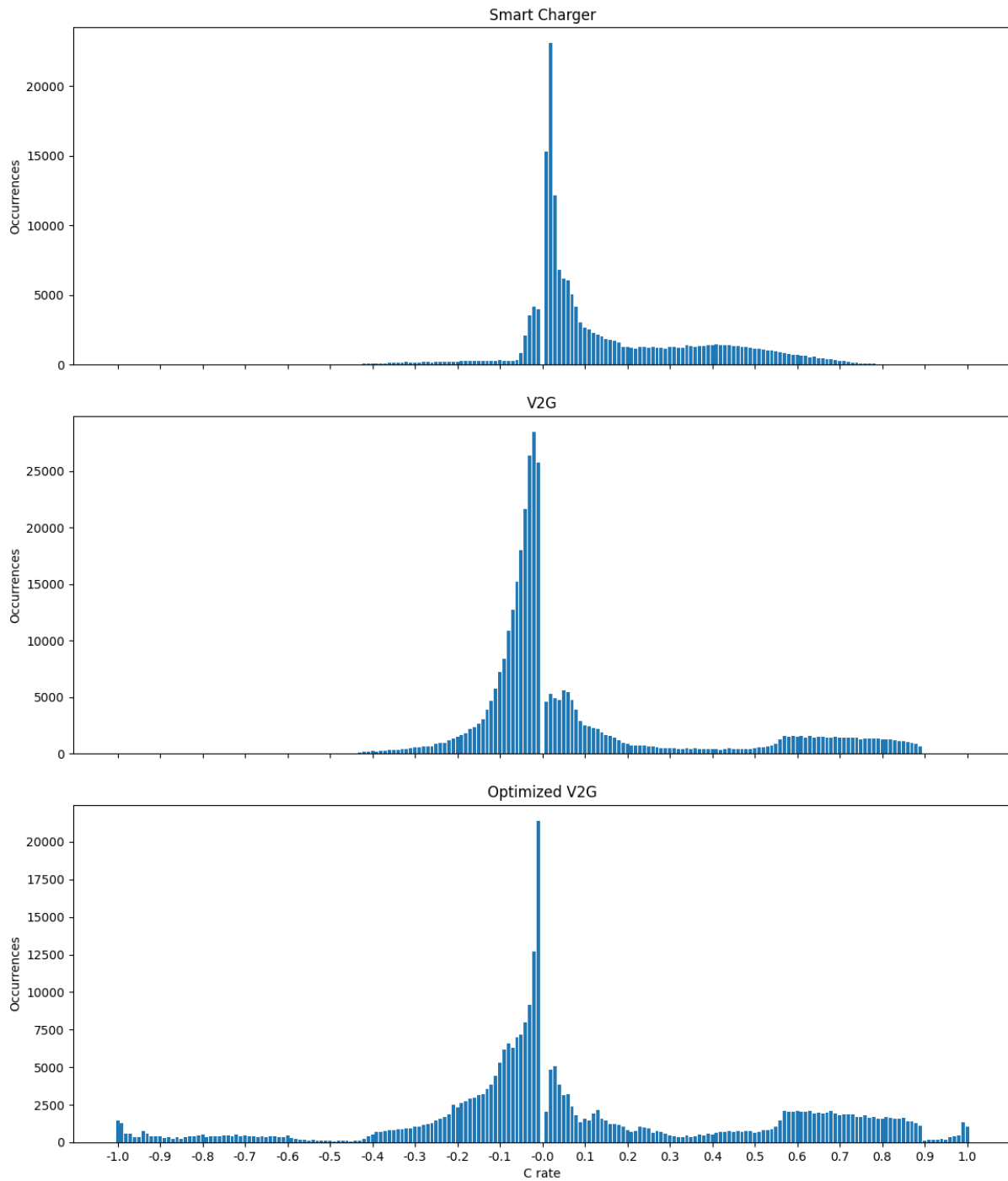
Εικόνα 23 διάγραμμα υπερφορτισμένων οχημάτων για τις τρεις πολιτικές

Το διάγραμμα μας δίνει τον αριθμό των οχημάτων, τα οποία παρέμειναν σε αυξημένα επίπεδα φόρτισης καθώς και το χρόνο για τον οποίο έμειναν σε αυτό.

Αρχικά όπως είδαμε και προηγουμένως η πολιτική του έξυπνου φορτιστή αφήνει πολλά οχήματα σε αυξημένα επίπεδα φόρτισης, παρατηρώντας μια μεγάλη συγκέντρωση οχημάτων στο διάστημα ωρών [6, 10]. Αρκετά από τα οχήματα να εμφανίζονται και στη μπάρα των 12 ωρών. Αυτό δείχνει μεγάλη παραμέληση των οχημάτων ως προς την ημερολογιακή φθορά, το οποίο μπορεί να αποδειχθεί μοιραίο για την μπαταρία ενός οχήματος.

Λίγο καλύτερη φαίνεται να είναι η εικόνα για την πολιτική V2G, της οποίας τα περισσότερα υπερφορτισμένα οχήματα φαίνεται να συγκεντρώνονται στο διάστημα [4, 9], το οποίο είναι μεν βελτίωση αλλά και πάλι θα μπορούσε να ήταν και καλύτερο. Και εδώ έχουμε οχήματα τα οποία ήταν υπερφορτισμένα για περισσότερες από 10 ώρες.

Τέλος για η πολιτική βελτιστοποιημένης V2G εμφανίζει την καλύτερη εικόνα. Τα περιστατικά υπερφόρτισης φαίνεται να ακολουθούν μια εκθετικά μειούμενη καμπύλη ως προς τις ώρες, το οποίο υποδεικνύει τον έλεγχο της πολιτικής πάνω στην ημερολογιακή φθορά των οχημάτων. Παρατηρούμε μια συγκέντρωση στο διάστημα [1, 6], το οποίο είναι πολύ καλύτερο από τις προηγούμενες πολιτικές. Ακόμα, σε αντίθεση, με τις άλλες δύο πολιτικές δεν παρατηρούνται οχήματα με παραπάνω από 9 ώρες υπερφόρτισης.

Διάγραμμα C_{rate} Εικόνα 24 διάγραμμα c_{rate} για τις τρεις πολιτικές

Τέλος τα διαγράμματα c_{rate} μας δείχνουν μια άλλη οπτική στη φθορά της μπαταρίας λόγω της χρήσης της.

Αρχικά η πολιτική έξυπνου φορτιστή όπως ήταν αναμενόμενο εμφανίζει κυρίως θετικά c_{rate} , τα οποία δεν ξεπερνούν το 0.8, κάτι το οποίο υποδεικνύει την μικρή φθορά λόγω χρήσης της μπαταρίας. Οι αρνητικές τιμές του c_{rate} είναι αρκετά πιο περιορισμένες.

Η πολιτική V2G εμφανίζει ένα ενδιαφέρον προφίλ μετρήσεων. Βλέπουμε ότι τα αρνητικά c_{rate} είναι μεν αυξημένα σε σύγκριση με την πρώτη πολιτική, όμως τα θετικά βλέπουμε μια συγκέντρωση στο διάστημα $[0.6, 0.9]$ το οποίο είναι η συνηθισμένη απαίτηση των οχημάτων για φόρτιση. (Τα οχήματα συνήθως φτάνουν στο πάρκινγκ με την μπαταρίας τους στο 20 – 30% και επιθυμούν να τη φορτίσουν μέχρι το 80 – 90%)

Η βελτιστοποιημένη πολιτική του V2G εμφανίζει μια παρόμοια εικόνα με την προηγούμενη πολιτική. Σημαντικές διαφορές είναι οι ακραίες τιμές -1 και 1 c_{rate} , οι οποία χρησιμοποιούνται προκειμένου να πουληθεί γρήγορα ενέργεια (βελτιστοποίηση κέρδους) και έντονη αγορά ενέργειας για προετοιμασία του πάρκινγκ για πώληση (βελτιστοποίηση ημερολογιακής φθοράς) αντίστοιχα.

Συμπεράσματα

Η χρήση ενισχυτικής μάθησης για την βελτιστοποίηση του συστήματος V2G είναι αρκετά ενθαρρυντικά, καθώς φαίνεται ξεκάθαρα η βελτιστοποίηση τόσο του κέρδους όσο και της χρήσης της μπαταρίας, με την πολυπλοκότητα του δικτύου να παραμένει χαμηλή.

Βέβαια η σχετικά μεγαλύτερη φθορά της μπαταρίας λόγω χρήσης, δείχνει τις αδυναμίες της υλοποίησης, καθώς το δίκτυο προσπαθεί να θυσιάσει μια από τις παραμέτρους βελτιστοποίησης προκειμένου να πετύχει μεγαλύτερη συνολική αύξηση της ανταμοιβής.

Επόμενα βήματα

Στην παραπάνω μας ανάλυση δεν καταφέραμε να καλύψουμε όλες τις πιθανές πτυχές του προβλήματος και για αυτό παραθέτουμε κάποια από τα σημαντικά βήματα που θα μπορούσαν να γίνουν:

- Η συνάρτηση ανταμοιβής δείχνει να μην μπορεί να περιγράψει ικανοποιητικά την φύση του προβλήματος, επειδή οι δύο περιπτώσεις (φόρτιση και αποφόρτιση) διαφέρουν πάρα πολύ στον τρόπο που αξιολογούνται. Η φόρτιση αξιολογείται από το δίκτυο πάρα πολύ αρνητικά, το οποίο δεν είναι πάντα ορθό καθώς τα οχήματα πρέπει κάποια στιγμή να φορτίσουν, και η αποφόρτιση αξιολογείται υπερβολικά θετικά, το οποίο προσθέτει μια θετική προδιάθεση του δικτύου προς την αποφόρτιση. Μια συνάρτηση που θα μπορούσε να βαθμολογήσει με έναν συνεχή τρόπο τις δύο αυτές περιπτώσεις θα συνέβαλε σημαντικά στην εξάλειψη της δυσκολίας αξιολόγησης της κάθε απόφασης.
- Τα οχήματα θα έπρεπε να μπορούν να έρχονται οποιαδήποτε στιγμή της ημέρας και όχι σε ακέραια πολλαπλάσια της ώρας. Επιπλέον ένα πάρκινγκ έχει οχήματα μικρού (< 4 ώρες), μεσαίου (4 – 12 ώρες) και μεγάλου (> 12 ώρες) χρόνου στάθμευσης. Στην διπλωματική εμβαθύνουμε μόνο στη δεύτερη κατηγορία οχημάτων. Θα ήταν ενδιαφέρον να δούμε αν παρόμοια λύση επιδέχονται και οι άλλες κατηγορίες οχημάτων.
- Επιπλέον η χρήση του V2V είναι αναγκαία για την παραπάνω υλοποίηση του περιβάλλοντος. Όμως η χρήση του σύστημα V2V δεν είναι πάντα πρακτική. Ως επόμενο βήμα θα μπορούσε να μελετηθεί

αν, χωρίς να χάσουμε το χαρακτηριστικό της ανεξαρτησίας από το μέγεθος του πάρκινγκ, μπορούμε να εξαλείψουμε την χρήση του.

- Ο υπολογισμός των προτεραιοτήτων απαιτεί τον υπολογισμό της νέας καμπύλης φόρτισης / αποφόρτισης για κάθε όχημα σε κάθε μετάβαση. Η βελτιστοποίηση αυτής της διαδικασίας θα βοηθούσε στην μείωση του χρόνου εκπαίδευσης και την δυνατότητα αύξησης της πολυπλοκότητας του δικτύου.
- Ένα άλλο κομμάτι, το οποίο αυτή η διπλωματική δεν εμβάθυνε είναι η πιο λεπτομερής λειτουργία της μπαταρίας και των ηλεκτρονικών στοιχείων της. Η καλύτερη μελέτη των μπαταριών του οχήματος θα μας επέτρεπε στην πρόβλεψη της κατάστασης της (θερμοκρασία, τάση, ένταση ρεύματος), τα οποία θα μας έδιναν μια καλύτερη συνάρτηση φθοράς της μπαταρίας

Πηγαίος κώδικας

Η υλοποίηση του περιβάλλοντος και των αλγορίθμων έγινε σε Python 3.8 και έγινε η χρήση της βιβλιοθήκης TensorFlow για τον αλγόριθμο ενισχυτικής μάθησης DDQN.

Όλος ο πηγαίος κώδικας είναι ανεβασμένος στη πλατφόρμα GitHub σε δημόσιο αποθετήριο κώδικα: <https://github.com/antoniosValmas/V2G-Predictor>

Βιβλιογραφία

- Argue, C. (2021, July 5). *What can 6,000 electric vehicles tell us about EV battery health?* Ανάκτηση από GEOTAB: <https://www.geotab.com/blog/ev-battery-health/>
- Armstrong, J. A., & Hamrin, J. (2000). *U.S. Export Council for Renewable Energy*. United States Export Council for Renewable Energy.
- Cramton, P. (2017). Electricity market design. Στο *Oxford Review of Economic Policy* (σσ. 589-612). Oxford university press.
- Electric Car Overview*. (2021, July 3). Ανάκτηση από DriveClean: <https://driveclean.ca.gov/electric-car-overview>
- EV connector types*. (2021, July 6). Ανάκτηση από Zap map: <https://www.zap-map.com/charge-points/connectors-speeds/>
- Greenblatt, J., Cong, Z., & Saxena, S. (2019). *Quantifying the Potential of Electric Vehicles to Provide Electric Grid Benefits in the MISO Area*.
- Introduction to electric cars*. (2021, July 3). Ανάκτηση από The green age: <https://www.thegreenage.co.uk/tech/introduction-to-electric-cars/>
- Introduction to Reinforcement Learning*. (2021, July 17). Ανάκτηση από DataCamp: <https://www.datacamp.com/community/tutorials/introduction-reinforcement-learning>
- Levine, S., Kumar, A., Tucker, G., & Fu, J. (2020). *Offline Reinforcement Learning: Tutorial, Review, .*
- Nunez, C. (2019, January 30). *RENEWABLE ENERGY 101*. Ανάκτηση από National Geographic: <https://www.nationalgeographic.com/environment/article/renewable-energy>
- Renewable energy explained*. (2021, June 20). Retrieved from U.S. Energy Information Administration: <https://www.eia.gov/energyexplained/renewable-sources/>
- Sun, S., Guan, T., Cheng, X., Zuo, P., Gao, Y., Du, C., & Yin, G. (2018). *Accelerated aging and degradation mechanism of LiFePO₄/graphite batteries cycled at high discharge rates*. RSC Advances.
- Sun, Y., Saxena, S., & Pecht, M. (2018). *Derating Guidelines for Lithium-Ion Batteries*. Energies.
- TensorFlow*. (2021, July 17). Ανάκτηση από Introduction to RL and Deep Q Networks: https://www.tensorflow.org/agents/tutorials/0_intro_rl
- Thoubboron, K. (2021, June 27). *Advantages and disadvantages of renewable energy*. Ανάκτηση από energysage: <https://news.energysage.com/advantages-and-disadvantages-of-renewable-energy/>
- Tromly, K. (2001). *Renewable Energy: An Overview*. United States.
- (2019). *Understanding degradation of battery life-time is key to successful vehicle-to-grid systems*. European Commission.

Vandael, S., Claessens, B., Hommelberg, M., Holvoet, T., & Deconinck, G. (2013). *A Scalable Three-Step Approach for Demand Side Management of Plug-in Hybrid Vehicles*. IEEE Transactions on Smart Grid.

Vehicle-to-grid: everything you need to know. (2021, July 6). Ανάκτηση από virta:
<https://www.virta.global/vehicle-to-grid-v2g>

What is smart charging and what does it mean for the energy system? (2021, July 6). Ανάκτηση από virta: <https://www.virta.global/blog/what-is-smart-charging>