



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

Μελέτη smart-grids

**(Μελέτη της συνεισφοράς της V2G τεχνολογίας στις επικουρικές υπηρεσίες
καθώς και ο αντίκτυπος που έχουν τα EVs στο μικροδίκτυο.)**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

των

Γεώργιου Κοκολάκη & Ευάγγελου Κοκολάκη

Επιβλέποντες : Γεώργιος Σταμούλης,
Καθηγητής Πανεπιστημίου Θεσσαλίας

Ελευθέριος Τσουκαλάς,
Καθηγητής Πανεπιστημίου Θεσσαλίας

Βόλος, Φεβρουάριος 2016



**UNIVERSITY OF THESSALY
POLYTECHNIC SCHOOL
DEPARTMENT OF ELECTRICAL
AND COMPUTER ENGINEERING**

Study of smart-grids

**(Study of the V2G technology contribution to ancillary services and the
impact of the EVs in microgrid.)**

THESIS

by

George Kokolakis & Evangelos Kokolakis

Supervisors : George Stamoulis,
Professor at University of Thessaly

Eleutherios Tsoukalas,
Professor at University of Thessaly

Volos, February 2016



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

**UNIVERSITY OF THESSALY
POLYTECHNIC SCHOOL
DEPARTMENT OF ELECTRICAL
AND COMPUTER ENGINEERING**

Μελέτη smart-grids

(Μελέτη της συνεισφοράς της V2G τεχνολογίας στις επικουρικές υπηρεσίες καθώς και ο αντίκτυπος που έχουν τα EVs στο μικροδίκτυο.)

Study of smart-grids

(Study of the V2G technology contribution to ancillary services and the impact of the EVs in microgrid.)

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

των

Γεώργιου Κοκολάκη & Ευάγγελου Κοκολάκη

Επιβλέποντες : Γεώργιος Σταμούλης,
Καθηγητής Πανεπιστημίου Θεσσαλίας

Ελευθέριος Τσουκαλάς,
Καθηγητής Πανεπιστημίου Θεσσαλίας

Εγκρίθηκε από την διμελή εξεταστική επιτροπή 7 Μαρτίου 2016

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

Γεώργιος Σταμούλης
Καθηγητής Π.Θ.

Ελευθέριος Τσουκαλάς
Καθηγητής Π.Θ.

2/3/2016

(Υπογραφή)

Γεώργιος Ι. Κοκολάκης

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Π.Θ

(Υπογραφή)

Ευάγγελος Ι. Κοκολάκης

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Π.Θ

Copyright © Γεώργιος Ι. Κοκολάκης & Ευάγγελος Ι. Κοκολάκης, 2016.

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 τους συγγραφείς.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τους συγγραφείς και δεν πρέπει να ερμηνευθούν ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Πολυτεχνείου Θεσσαλίας.

Περίληψη

Οι αυξανόμενες ανησυχίες για την ενεργειακή ασφάλεια, αξιοπιστία και τα οικονομικά οφέλη εντείνουν το ενδιαφέρον των χωρών γύρω από τις τεχνολογίες που έχουν να κάνουν με τα ευφυή δίκτυα μέρος των οποίων αποτελούν τα μικροδίκτυα, τα EVs, οι συσσωρευτές και οι επικουρικές υπηρεσίες, δηλαδή ότι σχετίζεται με την τεχνολογία οχημάτων στο πλέγμα (V2G), στα οποία και δίνεται ιδιαίτερη μνεία στην παρούσα διπλωματική. Στη συνέχεια εστιάζουμε στην παρουσίαση του προβλήματος ρύθμισης τάσης και συχνότητας μεσώ μία εκτενούς αναφορά σχεδόν σε όλα τα κύρια στοιχεία ενός τέτοιου συστήματος. Παρουσιάζεται επίσης ένα παράδειγμα μικροδικτύου που ενσωματώνει στην κατανομημένη παραγωγή του τα ηλεκτρικά οχήματα. Όστε εν τέλει να οδηγηθούμε στις επιπτώσεις των PEVs στο μικροδίκτυο αυτό για τα διαφορετικά επίπεδα διείσδυσης και για τις διαφορετικές παραμέτρους ελέγχου, με σκοπό να επισημανθούν οι προϋποθέσεις που απαιτούνται για την τεχνολογία οχημάτων στο πλέγμα (Vehicle-to-Grid Technology).

Λέξεις κλειδιά: Ευφυές Δίκτυο, Μικροδίκτυο, V2G-G2V Τεχνολογία, Ξύρισμα Αιχμής, Πλήρωση Κοιλιάδας, Συναθροιστής, Ηλεκτρικά Οχήματα (EV), Οχήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας τροφοδοτούμενα από Εξωτερική Πηγή (PEVs), DC γρήγορη φόρτιση, Επικουρικές Υπηρεσίες, Ηλεκτρονικά Ισχύος, Αντιστροφέας, Διαμόρφωση Πλάτους Παλμού (PWM), Ρύθμιση Συχνότητας, Ρύθμιση Τάσης.

Abstract

Increasing concerns about energy security, reliability and economic benefits increase the interest of the countries about the technologies that have to do with Smart Grids, part of them are: the microgrids, the EVs, batteries and ancillary services, in another words anything related to vehicle to grid technology (V2G), in which special mention in this thesis is given. Afterwards we focus on the presentation of the voltage regulation problem and frequency via one extensive report on almost all main elements of such a system. Also we present an example of a microgrid that incorporates the distributed generation of electric vehicles. In order to lead to the impact of PEVs in microgrid at different levels of penetration for the different control parameters with the aim of identifying the conditions that are needed for vehicle technology in the grid (Vehicle-to-Grid Technology).

Key words: Smart Grid, microgrid, V2G-G2V Technology, Peak Shaving, Valley Filling, Aggregator, Electrical Vehicles (EVs), Plug-In-EVs (PEVs), DC Fast Charging, Ancillary Services, Power Electronics, Inverter, Pulse Width Modulation (PWM), Frequency Regulation, Voltage Regulation.

Ευχαριστίες

Dedicated to my family and friends...

*“If something is important enough,
even if the odds are against you,
you should still do it.” – Elon Musk.*

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Περίληψη	7
Abstract	8
Ευχαριστίες	10
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	14
Το όραμα και η στρατηγική του μελλοντικού δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας	14
1.1 Εισαγωγή στα Ευφυή Δίκτυα Ηλεκτροδότησης (Smart Grids)	14
1.1.2 Τα τρία κύρια συστήματα ταξινόμησης του Smart Grid.	16
1.1.3 Αφηρημένο Μοντέλο του Smart Grid και οι εμπλεκόμενοι φορείς	19
1.1.4 Προσδοκώμενα οφέλη των Smart Grids.	21
1.2 Οι κατευθυντήριες οδοί των Smart Grids	21
1.3 Τα θεμέλια στοιχεία του Ευρωπαϊκού οράματος για το Smart Grid	27
1.4 Οι φιλόδοξες αλλαγές στην ενεργειακή πολιτική της Ευρώπης και οι συνέπειες που θα φέρουν με την σειρά τους στο το ευφύες δίκτυο	34
1.4.1 Η φιλόδοξη Γερμανική πολιτική	36
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	41
Παραγωγή ενέργειας σε ευφυή δίκτυα και νέα πρότυπα δικτύων	41
2.1 Εισαγωγή	41
2.2 Κεντρικοποιημένη και Αποκεντρωμένη Παραγωγή	42
2.2.1 Απώλειες σε γραμμές μεταφοράς	45
2.3 Παραγωγή Ενέργειας	49
2.4 Σύστημα Μεταφοράς	52
2.5 Σύστημα Διανομής	52
2.6 Μερικά Νέα Πρότυπα Δικτύων	53
2.6.1 Μικροδίκτυα	53
2.6.1.1 Σύνδεση του Μικροδικτύου στο Κεντρικό Δίκτυο	56
2.6.2 Τεχνολογίες V2G-G2V και τα EVs ως μέρος του δικτύου	58
2.6.2.1 Τρόποι αξιοποίησης των EVs στο δίκτυο	61
2.6.2.2 Τι ισχύει σήμερα για V2G από ερευνητικής σκοπιάς	61
2.6.2.3 V2G και Peak Shaving	62
2.6.2.4 V2G και Valley filling	64
2.6.2.5 Περιορισμοί στην υιοθέτηση της V2G τεχνολογίας	65
2.6.2.6 Ο Ρόλος του aggregator	68
2.6.2.7 Η V2G λειτουργία από Επιχειρηματικής σκοπιά	70
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	73
Ηλεκτρικά Οχήματα	73
3.1 Εισαγωγή	73
3.2 Η ιστορική εξέλιξη των ηλεκτρικών οχημάτων	74
3.3 Κατηγορίες των Ηλεκτρικών Οχημάτων	79
3.3.1 Ηλεκτρικά οχήματα με συσσωρευτές (Battery Electric	80
3.3.2 Υβριδικά Ηλεκτρικά Οχήματα (Hybrid Electric Vehicles/HEVs)	81
3.3.3 Επαναφορτιζόμενα Υβριδικά Οχήματα με Ηλεκτρική Ενέργεια από Εξωτερική Πηγή (Plug-in Hybrid Electric Vehicles /PHEVs)	83

3.3.4 Ηλεκτρικά Οχήματα με Ενεργειακά Στοιχεία (Fuel Cell Electric Vehicles/FCEVs)	85
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	86
Τεχνολογίες και χαρακτηριστικά συσσωρευτών	86
4.1 Δομή και επεξήγηση της λειτουργίας των συσσωρευτών	86
4.2 Αρχή λειτουργίας συσσωρευτών	87
4.2.1 Διαδικασία εκφόρτισης	88
4.2.2 Διαδικασία φόρτισης	89
4.3 Χαρακτηριστικά μεγέθη συσσωρευτών και τα γνωστότερα είδη τους	89
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	107
Φόρτιση Ηλεκτρικών Οχημάτων	107
5.1 Κατηγορίες φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων	107
5.2 Πρότυπα DC Fast Charging– CHAdeMO, CCS, SAE Combo, Tesla Supercharger	109
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6	123
Διάρθρωση της αγοράς και τιμολόγηση της ηλεκτρικής ενέργειας	123
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7	127
Επικουρικές υπηρεσίες	127
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8	132
Ημιαγωγικά στοιχεία ισχύος	132
8.1 Εισαγωγή	132
8.2 Διακοπτική λειτουργία	132
8.3 Κυκλώματα προστασίας (snubbers ή αποσβεστήρες)	133
8.4 Άλλες διατάξεις προστασίας	133
8.5 Φίλτρα	133
8.6 Από το εργαστήριο στην αγορά	133
8.7 Δίοδοι ισχύος	134
8.8 Οικογένεια των τρανζίστορ (BJT, MOSFET ισχύος, IGBT, SIT)	135
8.10 Τα επίπεδα ισχύος και οι αντίστοιχες διακοπτικές συχνότητες	140
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9	141
Διαχείριση Ενέργειας και ηλεκτρονικά ισχύος	141
9.1 Ηλεκτρονικά Ισχύος και βασικές κατηγορίες μετατροπέων ισχύος	141
9.2 Συνεχή και εναλλασσόμενα μεγέθη	142
9.3 Ημιτονοειδής μορφή και ενεργός (RMS) τιμή	143
9.4 Ανάλυση Fourier και αρμονικές	143
9.5 Ισχύς	144
9.6 Ισχύς και αρμονικές – Συντελεστές ισχύος	145
9.7 Συνέπειες αρμονικών και λόγος αρμονικής παραμόρφωσης	146
9.8 Αναλυτές ισχύος και φάσματα πλάτους	147

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10	148
Βασικές τοπολογίες αντιστροφών (μετατροπέων DC-AC)	148
10.1 Εισαγωγή και βασικές έννοιες για τους αντιστροφείς	148
10.4 Πολυεπίπεδοι αντιστροφείς	152
10.5 Μονοφασικός αντιστροφέας Push- Pull	153
10.6 Τριφασικός αντιστροφέας σε συνδεσμολογία γέφυρας.	154
10.7 Φίλτρο LC εξόδου αντιστροφέα	161
10.7.2 Φίλτρο LC	163
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 11	165
Διαμόρφωση εύρους ή διάρκειας (Pulse Width Modulation)	165
11.1 Εισαγωγή	165
11.2 Διαμόρφωση εύρους παλμών σε αντιστροφέα ημιγέφυρας	167
11.2.1 Ανάπτυξη μεθόδου και ορισμός μεγεθών	167
11.2.2 Ανάλυση αρμονικού περιεχομένου	169
11.2.3 Υπερδιαμόρφωση	173
11.3 Διαμόρφωση εύρους παλμων σε τριφασικούς αντιστροφείς πηγής τάσης	176
11.3.1 Ανάπτυξη μεθόδου	176
11.3.2 Ανάλυση αρμονικού περιεχομένου	179
11.3.3 Υπερδιαμόρφωση σε τριφασικό αντιστροφέα	181
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 12	183
Οι επιπτώσεις της ελεγχόμενης εισόδου των επαναφορτιζόμενων Ηλεκτρικών Οχημάτων με Ηλεκτρική Ενέργεια από Εξωτερική Πηγή (Plug-In EVs) στα μικρό-δίκτυα	183
12.1 Εισαγωγή	183
12.2 Έλεγχος συχνότητας και τάσης στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας γενικά.	185
12.2.1 Ρύθμιση συχνότητας-πραγματικής ισχύος.	185
12.2.3 Αντιστοίχιση ελέγχων συμβατικού ΣΗΕ με τους ελέγχους μικροδικτύου.	189
12.3 Μοντέλο μικροδικτύου	190
12.4 Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης	193
12.5 Συμπεράσματα και μελλοντική έρευνα	199
ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	200

Κεφάλαιο 1

Το όραμα και η στρατηγική του μελλοντικού δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας

1.1 Εισαγωγή στα Ευφυή Δίκτυα Ηλεκτροδότησης (Smart Grids)

Παραδοσιακά, ο όρος πλέγμα ή δίκτυο (**grid**) χρησιμοποιείται για ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας το οποίο μπορεί να υποστηρίξει όλες ή μερικές από τις ακόλουθες τέσσερα λειτουργίες:

1. Την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.
2. Την μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.
3. Τη διανομή ηλεκτρικής ενέργειας.
4. Τον έλεγχο του ηλεκτρικής ενέργειας.

Ένα ευφυές δίκτυο (**SG-Smart Grid**), έχει διάφορες ονομασίες όπως ευφυές δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας/ισχύος, ευφυές δίκτυο, **intelligrid**, **futuregrid**, **intergrid**, ή **intragrid**, είναι μια αναβάθμιση και βελτίωση του υπάρχοντος δικτύου, του 20ου αιώνα. Τα παραδοσιακά δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιούνται συνήθως για να μεταφέρουν ηλεκτρική ενέργεια από μερικές κεντρικές γεννήτριες σε ένα μεγάλο αριθμό χρηστών/πελατών. Στο αντίποδα, ένα ευφυές δίκτυο χρησιμοποιεί αμφίδρομη ροή ηλεκτρικής ενέργειας και πληροφορίας για να δημιουργήσει ένα αυτοματοποιημένο, καταναμημένο και προηγμένο δίκτυο διανομής ενέργειας. Η αρχική έννοια του ευφυούς δικτύου ξεκίνησε με την ιδέα ανάπτυξης προηγμένων υποδομών μέτρησης (**AMI-Advanced Metering Infrastructure**), με στόχο τη βελτίωση της διαχείρισης από την πλευρά της ζήτησης και της ενεργειακής απόδοσης, καθώς και την κατασκευή ενός αξιόπιστου δικτύου που θα έχει την δυνατότητα αυτοίασης και προστασίας έναντι κακόβουλων δολιοφθορών και φυσικών καταστροφών (**black-outs**). Ο Πίνακας 1.1 παρουσιάζει μια σύντομη σύγκριση μεταξύ του παραδοσιακού υφιστάμενου δικτύου και ενός SG.

Αξιοποιώντας τις σύγχρονες τεχνολογίες για την άμεση πληροφόρηση, το SG είναι ικανό να παρέχει ενέργεια με πιο αποτελεσματικούς τρόπους και ταυτόχρονα έχει την δυνατότητα να ανταποκρίνεται σε ευρύ φάσμα συνθηκών και γεγονότων. Σε γενικές γραμμές, ένα SG θα μπορούσε να ανταποκριθεί και να επέμβει σε γεγονότα που συμβαίνουν οπουδήποτε στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, όπως στα σημεία παραγωγής ενέργειας, στο στάδιο της μεταφοράς, διανομής, και της κατανάλωσης και να προσαρμοστεί ανάλογα με το εκάστοτε πρωτόκολλο διαχείρισης. Για παράδειγμα το SG μπορεί αυτόματα να αλλάξει τη ροή της ενέργειας και να την ανακατευθύνει ώστε να υπάρξει σωστή ανάκτηση της στην περίπτωση δυσλειτουργίας ενός μετασχηματιστή μέσης τάσεως η οποία μπορεί να λάβει χώρα σε ένα καταναμημένο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας.

Υφιστάμενο δίκτυο	Smart Grid
Ηλεκτρομηχανικό	Ψηφιακό
Μονόδρομη επικοινωνία	Αμφίδρομη επικοινωνία
Κεντρικοποιημένη παραγωγή	Κατανεμημένη Παραγωγή
Λίγοι αισθητήρες	Αισθητήρες σε όλη την έκταση
Χειροκίνητος Έλεγχος	Αυτόματος Έλεγχος
Χειροκίνητη Ανάκαμψη	Αυτοθεραπευόμενο
Δυσλειτουργίες και blackouts	Προσαρμοσίμο και ομαδοποιημένο
Περιορισμένος έλεγχος	Διάχυτος έλεγχος
Λίγες επιλογές των πελατών	Πολλές επιλογές των πελατών

Πίνακας 1.1: Μια σύντομη σύγκριση μεταξύ του υφιστάμενου δικτύου και το Smart Grid.

Πιο συγκεκριμένα, το SG μπορεί να θεωρηθεί ως ένα ηλεκτρικό σύστημα που χρησιμοποιεί πληροφορίες, αμφίδρομα, κάνοντας χρήση διαφόρων τεχνολογιών ασφάλειας σε επίπεδο επικοινωνίας, αξιοποιώντας ένα είδος υπολογιστικής νοημοσύνης με ένα ολοκληρωμένο τρόπο διαμόρφωσης σε όλη την διαδικασία από την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και στην μετάδοση, στους υποσταθμούς, τη διανομή και την κατανάλωση για να επιτευχθεί ένα σύστημα που θα είναι διαφανές, ασφαλές, αξιόπιστο, ανθεκτικό, αποτελεσματικό, και βιώσιμο. Αυτή η περιγραφή καλύπτει όλο το φάσμα του συστήματος παραγωγής ενέργειας από την παραγωγή ως τους τελικούς αποδέκτες της.

Συνοψίζοντας το ιδανικό SG είναι ένα όραμα. Είναι μια χαλαρή ενσωμάτωση συμπληρωματικών επιμέρους συστατικών στοιχείων, υποσυστημάτων, λειτουργιών και υπηρεσιών, σύμφωνα με τον εποπτικό διάχυτο έλεγχο από ένα εξαιρετικά ευφυή σύστημα διαχείρισης και ελέγχου. Δεδομένου της ευρείας έρευνας γύρω από το θέμα των ευφών δικτύων (SG), διάφοροι ερευνητές που έχουν ασχοληθεί, κατά καιρούς, με το συγκεκριμένο θέμα, θα μπορούσαν ο καθένας εύκολα με την σειρά του να εκφράσει διαφορετικά οράματα για το μέλλον των SG ανάλογα με τον τρόπο που ο καθένας εστιάζει πάνω σε αυτήν την καινούργια τεχνολογία ξεδιπλώνοντας διαφορετικές προοπτικές.

Στο επόμενο υποκεφάλαιο του παρόντος κεφαλαίου θα αναφερθούμε συνοπτικά στα τρία βασικά συστήματα του SG, τα οποία κοιτώντας τα από τεχνικής απόψεως είναι τα εξής:

- Ευφύες σύστημα υποδομών
- Ευφύες σύστημα διαχείρισης
- Ευφύες σύστημα προστασίας

1.1.2 Τα τρία κύρια συστήματα ταξινόμησης του Smart Grid.

Τα Smart Grids από τεχνικής απόψεως, χωρίζονται σε τρία μεγάλα συστήματα: στις **ευφύεις υποδομές**, στα **ευφυή συστήματα διαχείρισης** και στα **ευφυή συστήματα προστασίας**.

1. **Σύστημα ευφυούς υποδομής:** Το σύστημα ευφυούς υποδομής είναι η ενέργεια, οι πληροφορίες και οι επικοινωνιακές υποδομές πίσω από το SG (Smart Grid). Υποστηρίζει αμφίδρομη ροή, τόσο ηλεκτρικής ενέργειας όσο και πληροφοριών. Εδώ αξ σημειωθεί ότι είναι εύκολο να κατανοηθεί η έννοια της «αμφίδρομης ροής πληροφοριών.» «Η Αμφίδρομη ροή ηλεκτρικής ενέργειας» σημαίνει ότι η μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας δεν είναι πια μονής κατεύθυνσης. Για παράδειγμα, στο παραδοσιακό πλέγμα ισχύος, η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται από τις εγκαταστάσεις ηλεκτροπαραγωγής, στη συνέχεια μεταφέρεται μέσω του δικτύου μεταφοράς, στο δίκτυο διανομής, και τελικά παραδίδεται στους καταναλωτές. Σε ένα SG (Smart Grid), η ηλεκτρική ενέργεια μπορεί επίσης να επιστραφεί πίσω στο δίκτυο από τους ίδιους τους καταναλωτές. Για παράδειγμα, οι καταναλωτές/χρήστες θα είναι σε θέση να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιώντας ηλιακούς συλλέκτες στα σπίτια τους και να την επιστρέφουν πίσω στο δίκτυο, ή μέσω των ηλεκτρικών οχημάτων μπορούν να παρέχουν ισχύ για να βοηθήσουν στην εξισορρόπηση των φορτίων μέσω του "ξυρίματος αιχμής" (**peak shaving**) δηλαδή αποστολή ισχύος πίσω στο δίκτυο όταν η ζήτηση είναι υψηλή, θα αναφερθούμε σε αυτό αργότερα σε επόμενο κεφάλαιο. Αυτή η ροή προς τα πίσω είναι σημαντική. Για παράδειγμα, μπορεί να είναι εξαιρετικά χρήσιμη σε ένα μικροδίκτυο (**microgrid**), που έχει «κρεμάσει» λόγω των διακοπών ρεύματος. Το μικροδίκτυο (microgrid) μπορεί να λειτουργήσει, ακόμη και σε ένα μικρότερο βαθμό, με τη βοήθεια της ενέργειας που τροφοδοτείται πίσω, από τους πελάτες. Τέλος η ευφυής υποδομή χωρίζεται σε τρία υποσυστήματα: **το ευφύες υποσύστημα ενέργειας**, **το ευφύες υποσύστημα πληροφοριών**, και **το ευφύες υποσύστημα επικοινωνίας**.

- Το **ευφύες υποσύστημα ενέργειας:** είναι υπεύθυνο για την προηγμένη παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας, την παράδοση, και την κατανάλωση της.
- Το **ευφύες υποσύστημα πληροφοριών:** είναι υπεύθυνο για τις προηγμένες πληροφορίες μετρήσεων, παρακολούθησης και διαχείρισης στο πλαίσιο του SG (Smart Grid).
- Το **ευφύες υποσύστημα επικοινωνίας:** είναι υπεύθυνο για την συνδεσιμότητα στην επικοινωνία, για την δυνατότητα μετάδοσης της

πληροφορίας μεταξύ των συστημάτων, των συσκευών και των εφαρμογών στα πλαίσια του SG (Smart Grid).

Σημειώστε ότι ο λόγος διαχωρισμού σε υποσύστημα πληροφοριών και σε επικοινωνιακό υποσύστημα έγινε για να είναι ευκολότερος ο χειρισμός εάν λάβουμε υπόψη την σχετική πολυπλοκότητα ενός SG (Smart Grid) δηλαδή ενός συστήματος συστημάτων.

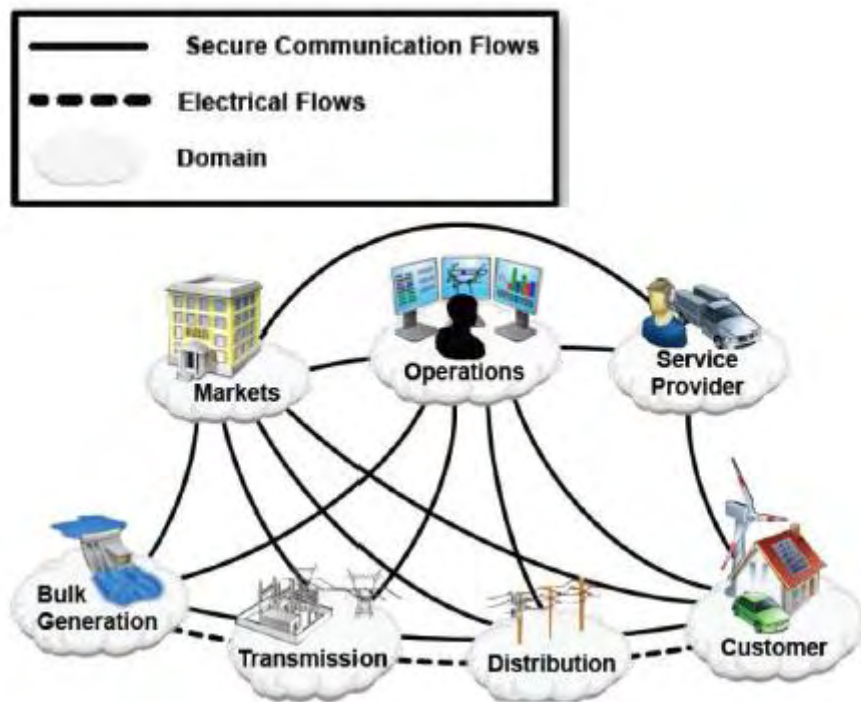
2. **Ευφύες σύστημα διαχείρισης:** Το ευφύες σύστημα διαχείρισης είναι το υποσύστημα σε ένα SG (Smart Grid) που παρέχει προηγμένες υπηρεσίες διαχείρισης, ελέγχου και λειτουργίας. Ο βασικός λόγος για τον οποίο μπορεί ένα SG (Smart Grid) να φέρει επανάσταση στο δίκτυο είναι γιατί φέρει ένα σωρό από λειτουργίες που βασίζονται πάνω στην ευφυή υποδομή του. Με την ανάπτυξη νέων εφαρμογών διαχείρισης και υπηρεσιών που μπορούν να αξιοποιήσουν την τεχνολογία και την δυνατότητα αναβαθμίσεων του, λόγω της προηγμένης υποδομής του, το δίκτυο θα συνεχίσει να γίνεται όλο και «πιο έξυπνο». Το ευφύες σύστημα διαχείρισης εκμεταλλεύεται την έξυπνη υποδομή για την επιδίωξη των διαφόρων προηγμένης διαχείρισης στόχων. Μέχρι στιγμής, οι περισσότεροι των στόχων αυτών είναι σχετικοί με την βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης και το ισοζύγιο της προσφοράς και της ζήτησης, τον έλεγχο των εκπεμπόμενων ρύπων, τη μείωση του κόστους λειτουργίας, και την μεγιστοποίηση της χρησιμότητας.
3. **Ευφύες σύστημα προστασίας:** Το ευφύες σύστημα προστασίας είναι το υποσύστημα σε ένα SG (Smart Grid) που παρέχει προηγμένη ανάλυση αξιοπιστίας για το πλέγμα, την προστασίας από αποτυχία του, καθώς επίσης παρέχει ασφάλεια και υπηρεσίες προστασίας της ιδιωτικότητας. Με την αξιοποίηση της ευφούς υποδομής, το SG (Smart Grid) οφείλει όχι μόνο να υλοποιήσει ένα εξυπνότερο σύστημα διαχείρισης, αλλά και να παρέχει ένα πιο έξυπνο σύστημα προστασίας το οποίο να μπορεί πιο αποτελεσματικά και αποδοτικά να υποστηρίξει μηχανισμούς προστασίας από βλάβες, θέματα ασφάλειας (σχετικά με τις διευθύνσεις στον κυβερνοχώρο), και να διατηρήσει το απόρρητο.



Σχήμα 1.1: Το σχήμα δείχνει την λεπτομερή ταξινόμηση των τριών αυτών μεγάλων συστημάτων.

1.1.3 Αφηρημένο Μοντέλο του Smart Grid και οι εμπλεκόμενοι φορείς

Προκειμένου να συνειδητοποιήσουν αυτό το νέο πρότυπο πλέγματος, το Εθνικό Ινστιτούτο Προτύπων και Τεχνολογίας (**NIST-National Institute of Standards and Technology**) παρέχει ένα εννοιολογικό μοντέλο (όπως φαίνεται στο **Σχήμα 1.2**), που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως σημείο αναφοράς για τα διάφορα μέρη του ηλεκτρικού συστήματος, όπου λαμβάνει χώρα το πρότυπο ενός SG. Αυτό το εννοιολογικό μοντέλο διαιρεί το SG σε επτά τομείς. Κάθε τομέας περιλαμβάνει έναν ή περισσότερους παράγοντες ενός SG, συμπεριλαμβανομένων των συσκευών, των συστημάτων ή των προγραμμάτων που λαμβάνουν αποφάσεις και ανταλλάσσουν πληροφορίες που είναι αναγκαίες για την εκτέλεση των εφαρμογών. Οι σύντομες περιγραφές των τομέων και των παραγόντων δίνονται στον **Πίνακα 1.2**. Να σημειωθεί ότι το Εθνικό Ινστιτούτο Προτύπων και Τεχνολογίας (NIST) προτείνει αυτό το μοντέλο σύμφωνα με τις διαφορετικές οπτικές γωνίες όλων όσων εμπλέκονται στο SG.



Σχήμα 1.2: Αφηρημένο μοντέλο του Smart Grid από την NIST.

Τομέας	Ρόλος εμπλεκόμενων
Καταναλωτές	Οι τελικοί καταναλωτές, παράγουν, αποθηκεύουν και διαχειρίζονται μέρος της ενέργεια.
Αγορές	Οι διαχειριστές και οι εμπλεκόμενοι στις αγορές ενέργειας.
Πάροχοι υπηρεσιών	Οι οργανισμοί που παρέχουν υπηρεσίες και εφαρμογές στους καταναλωτές.
Διαχειριστές Δικτύου	Οι διαχειριστές διακίνησης της ηλεκτρικής ενέργειας.
Χονδρική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας	Οι παραγωγοί ηλεκτρικής ενέργειας στην χονδρική αγορά. Επίσης συχνά αποθηκεύουν ενέργεια για μελλοντική διανομή.
Μεταφορά	Οι φέροντες της χονδρικής ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις, επιφορτισμένοι με την αποθήκευση και την παραγωγή της.
Διανομή	Οι διανομείς της ενέργειας από και προς τους καταναλωτές, επιφορτισμένοι με την αποθήκευση και την παραγωγή της.

Πίνακας 1.1: Τομείς και οι ρόλοι των εμπλεκόμενων στο SG βάσει του αφηρημένου μοντέλου του NIST.

1.1.4 Προσδοκώμενα οφέλη των Smart Grids.

Τα προσδοκώμενα οφέλη και οι απαιτήσεις ενός SG (Smart Grid) είναι τα ακόλουθα:

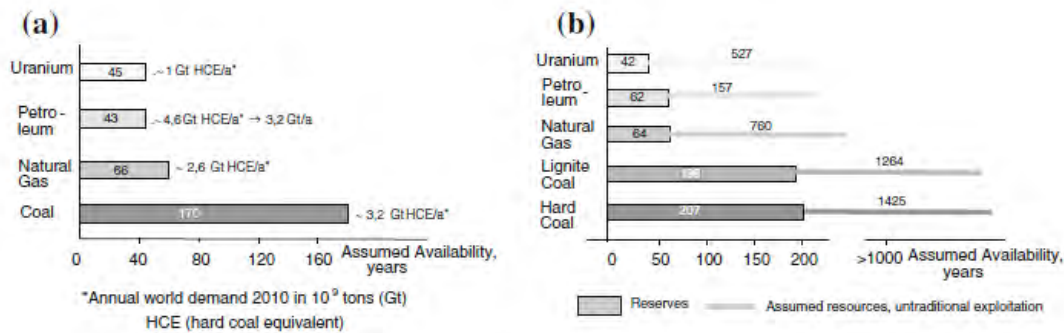
1. Βελτίωση στην αξιοπιστία και στην ποιότητα ισχύος.
2. Βελτιστοποίηση της χρησιμοποίησης των εγκαταστάσεων, με σκοπό την αποφυγή κατασκευής back-up μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας εν ώρα φορτίου αιχμής.
3. Ενίσχυση της ικανότητας και της αποτελεσματικότητας των υφιστάμενων δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας.
4. Βελτίωση της ανθεκτικότητας σε περίπτωση βλάβης.
5. Ενεργοποίηση προληπτικής συντήρησης και αποκρίσεων αυτοίασης όταν έχουμε διαταραχές στο σύστημα.
6. Διευκόλυνση στην επέκταση της ανάπτυξης και ενσωμάτωσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε αυτό.
7. Δυνατότητα φιλοξενίας κατανεμημένων πηγών ενέργειας.
8. Αυτοματοποιημένη συντήρηση και λειτουργία.
9. Μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου μέσω της χρήσης ηλεκτρικών οχημάτων και νέων πηγών ενέργειας.
10. Η μείωση της κατανάλωσης πετρελαίου, μειώνοντας την ανάγκη για αναποτελεσματική παραγωγή ενέργειας κατά τις περιόδους αιχμής.
11. Προσφέρει ευκαιρίες για τη βελτίωση της ασφάλειας του δικτύου.
12. Διευκολύνει τη μετάβαση προς τα plug-in ηλεκτρικά οχήματα και τις νέες μεθόδους αποθήκευσης της ενέργειας.
13. Αυξάνει τις επιλογές των καταναλωτών.
14. Εμφανίζονται νέα προϊόντα, υπηρεσίες και αγορές.

1.2 Οι κατευθυντήριες οδοί των Smart Grids

Η αποτελεσματική μεταφορά και διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί θεμελιώδη προϋπόθεση για την αειφόρο ανάπτυξη και την ευημερία σε όλο τον κόσμο. Ωστόσο, ο κόσμος θα πρέπει να αντιμετωπίσει μεγάλες προκλήσεις σε αυτόν τον τομέα στην διάρκεια του 21ο αιώνα.

Οι κυριότερες προκλήσεις που χρειάζεται να επιλυθούν στην Ευρωπαϊκή Ένωση είναι οι εξής:

- η μείωση της διαθεσιμότητας των ορυκτών και πυρηνικών πρωτογενών πηγών ενέργειας (**PES**)
- η ραγδαία αύξηση των τιμών,
- η εξάρτηση κατά 70% της Κεντρικής Ευρώπης από τη εισαγωγή PES (**Primary Energy Sources**),
- ο αυξανόμενος περιβαλλοντικός αντίκτυπος των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου.

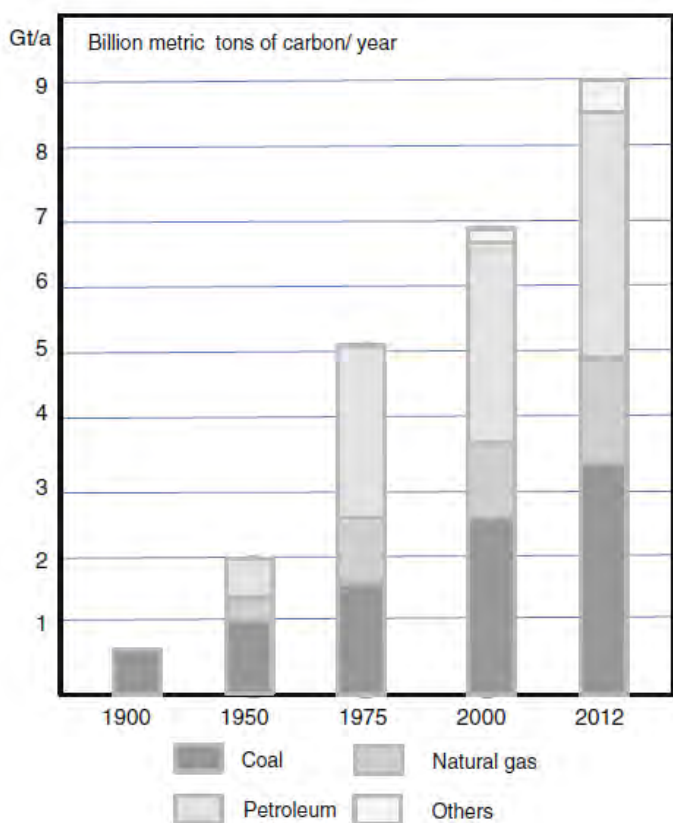


Σχήμα 1.3: Οι προσδοκίες αποθεμάτων για τις πρωτογενείς πηγές ενέργειας καθώς και η ετήσια παγκόσμια ζήτηση.

Οι προσδοκίες όσον αφορά τον αριθμό των ετών από την παραγωγή πυρηνικών και ορυκτών PES που δεν έχουν ακόμα εξορυχθεί, σύμφωνα με το πιο αισιόδοξο σενάριο για τα προβλεπόμενα αποθέματα απεικονίζεται στο **Σχήμα 1.3**. Αυτά τα δεδομένα βασίζονται στις σημερινές γνώσεις μας σχετικά με τα γεωλογικά χαρακτηριστικά των εκάστοτε περιοχών και τη τρέχουσα παγκόσμια ζήτηση. Γίνεται φανερό από τα αποτελέσματα που προκύπτουν βάσει δύο διαφορετικών πηγών δείχνουν να συμφωνούν με τα αποθέματα τα οποία είναι εκμεταλλεύσιμα σε γνωστές περιοχές. Η κύρια διαφορά μεταξύ των σχημάτων συνίσταται στη διαφοροποίηση μεταξύ των γνωστών αποθεμάτων και της αναμενόμενης αύξησης της εκμετάλλευσης των πόρων από τις μη παραδοσιακές τεχνολογίες (π.χ. υδραυλική ρωγμάτωση των πετρωμάτων με σκοπό την εκμετάλλευση του φυσικού αερίου).

Ωστόσο, και οι δύο αναφορές υπογραμμίζουν ότι η διαθεσιμότητα των πυρηνικών και των ορυκτών πρωτογενών πηγών ενέργειας (PES) είναι περιορισμένη. Αναμένεται ότι η ζήτηση για PES θα αυξηθεί σημαντικά μέχρι 2050 (και ειδικότερα αν λάβουμε υπόψη μας την ταχεία οικονομική ανάπτυξη των χωρών της Ασίας και χώρες της Νότιας Αμερικής), που αυτό με τη σειρά του, θα προκαλέσει μικρότερη διαθεσιμότητα των παραδοσιακών πηγών ενέργειας. Είναι σαφές ότι και τα δύο, τα ορυκτά καύσιμα αλλά και το ουράνιο είναι μη-ανανεώσιμοι ενεργειακοί πόροι, και τα αποθέματα τους μειώνονται με ταχείς ρυθμούς.

Επιπλέον, η παραγωγή και η χρήση των ορυκτών καυσίμων εγείρει τις περιβαλλοντικές ανησυχίες σχετικά με τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 1.4**.



Σχήμα 1.4: Ετήσιες εκπομπές άνθρακα ανάλογα με τον τύπο καυσίμου.

Μια παγκόσμια κινητοποίηση προς την παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές είναι για τον παραπάνω λόγο, ο βέλτιστος τρόπος για να ανταποκριθούμε στις συνεχώς αυξανόμενες μελλοντικές ενεργειακές ανάγκες.

Κατά συνέπεια, η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει θέσει φιλόδοξους στόχους για το έτος 2020 ώστε να:

- ελαττώσει την κατανάλωση ενέργειας κατά 20% λαμβάνοντας υπόψη την πιο αποτελεσματική διαχείριση και χρήση της ενέργειας,
- μείωση των εκπομπών CO₂ κατά 20% και,
- να διασφαλίσει ότι το 20% της πρωτογενούς ενέργειας που παράγεται προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (**RES-Renewable Energy Resources**)

SET-plan	2020		2030	
	Energy, % ^a	Power, GW ^b	Energy, %	Power, GW
Wind	11	180	18	300
Photovoltaic	3	125	14	665
Concentrating solar thermal power	1.6 ^c	1.8	5.5 ^c	4.6
Hydro (large plants)	8.7	108	8.3	112
Hydro (small plants)	1.6	18	1.6	19
Waves	0.8	10	1.1	16
Bio fuel	4.7	30	5.3	190
Cogeneration heat and power	18	185	21	235
Sum	59.4	657.8	75.8	1542

^a Related to the annual consumption

^b Installed power

^c Partly imported from Northern Africa

Πίνακας 1.3: Οι δυνατές προοπτικές που προσφέρονται από τις RES και CHP για την Ευρώπη.

Στην Ευρωπαϊκή Ένωση, περίπου το 40% των πρωτογενών πηγών ενέργειας (**PES**) που χρησιμοποιείται επί του παρόντος εφαρμόζεται για τη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. (Το υπόλοιπο 60% χρησιμοποιείται για τη μεταφορά, τη θέρμανση κ.λπ.)

Με την ηλεκτρική ενέργεια μας δίνεται η δυνατότητα, να την παράγουμε από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως η αιολική ενέργεια, η ηλιακή ενέργεια, τα βιοκαύσιμα και η υδροηλεκτρική ενέργεια. Κατά συνέπεια, η ηλεκτρική ενέργεια θα πρέπει να στηρίζει το κύριο μέρος της παραγωγής της σε ανανεώσιμες πηγές έχοντας ετήσιο ποσοστό >30% έως το 2020. Όλα τα κράτη μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης έχουν θέσει τους ατομικούς τους στόχους για την υποστήριξη αυτής της κοινής στρατηγική για το 2020.

Το 2006, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή δημοσίευσε το " Στρατηγικό Σχέδιο Ενεργειακών Τεχνολογιών " (**SET plan-Strategic Energy Technology plan**), το οποίο επισημαίνει τη δυναμική των διαφόρων κατηγοριών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (**RES**) καθώς και το πώς μπορεί να υπάρξει συνδυασμός των μονάδων παραγωγής θερμότητας και ηλεκτρισμού (**CHP-Cogeneration of Heat and Power plants**), το οποίο επίσης ευνοεί την αύξηση της ενεργειακής απόδοσης. Στον **Πίνακα 1.3** συνοψίζονται τα δεδομένα του σχεδίου SET.

Αυτό το σχέδιο επίσης περιλαμβάνει στοιχεία σχετικά με την εισαγωγή ενέργειας από ηλιοθερμικούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στη Βόρεια Αφρική, το οποίο ανταποκρίνεται στο όραμα του Desertec¹. Το 2020 οι εγκατεστημένες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (**RES**) και η ισχύς από τον συνδυασμό των μονάδων παραγωγής θερμότητας και ηλεκτρισμού (**CHP**) θα υπερβαίνουν την τρέχουσα εγκατεστημένη χωρητικότητα ισχύος, του διασυνδεδεμένου συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας της Ηπειρωτικής Ευρώπης (πρώην **UCTE-Union for the Co-ordination of Transmission of Electricity** στα

¹ Το Desertec ήταν ένα έργο μεγάλης κλίμακας που υποστηρίχθηκε από τον ομώνυμο οργανισμό σε κοινοπραξία με το Dii (Desertec industrial initiative) που δημιουργήθηκε στην Γερμανία ως μια μία εταιρία περιορισμένης ευθύνης (ΕΠΕ). Το έργο αυτό στόχευε στη δημιουργία ενός παγκοσμίου σχεδίου για τις ανανεώσιμες πηγές βασισμένο στην έννοια της αξιοποίησης της αιωφόρου ενέργειας, από περιοχές όπου οι ανανεώσιμες πηγές βρίσκονται σε αφθονία και η μεταφορά της γίνεται μέσω ενός δικτύου υψηλής τάσης προς τους υποσταθμούς. Από όλες της διαθέσιμες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, δίνει μεγαλύτερη έμφαση στην εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργεια που συναντάται σε περίσσια στις ερήμου του πλανήτη.

ελληνικά: Ένωση για τη Διαχείριση της Μετάδοσης Ηλεκτρικής Ενέργειας). Το ποσοστό της εξάρτησης, της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από τις ανανεώσιμες πηγές είναι ανάλογες με τις καιρικές συνθήκες που επικρατούν, υπολογίζεται από την αναλογία της ενέργειας (E) και της εγκατεστημένη ισχύος (P), και είναι χειρότερη για τα φωτοβολταϊκά (PV) και καλύτερη για τα βιοκαύσιμα και των συνδυασμένων μονάδων παραγωγής θερμότητας και ηλεκτρισμού (CHP).

Η ανάγκη εκσυγχρονισμού των ευρωπαϊκών δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας βασίζεται πρώτα απ' όλα στην ένταξη βιωσιμότερων πόρων παραγωγής, κυρίως στις ευμετάβλητες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, και δευτερευόντως στην αυξανόμενη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας και στην εγκαθίδρυση μιας διευρωπαϊκής αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Στο πλαίσιο όλων αυτών, παρουσιάζονται μεγάλες προκλήσεις, επισημαίνοντας κυρίως, την ουσιαστική ανάγκη για καινοτομίες στον τομέα αυτόν.

Το όραμα για τα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας του μέλλοντος αναπτύχθηκε από μια ευρωπαϊκή ομάδα εμπειρογνομόνων στο πλαίσιο της πλατφόρμας τεχνολογίας “Ευφυή Δίκτυα” μεταξύ 2005 και 2008, και τρία θεμελιώδη έγγραφα δημοσιεύθηκαν ως αποτέλεσμα.

Ο ορισμός του Ευφυούς Δικτύου παρουσιάζεται στο έγγραφο στρατηγικής και ανάπτυξης ως εξής:

Το Ευφύες Δίκτυο είναι ένα δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας που μπορεί να ενσωματώσει ευφύως τις ενέργειες όλων των χρηστών που συνδέονται σε αυτό όπως γεννήτριες, καταναλωτές και εκείνοι που είναι και τα δύο, προκειμένου να παρέχετε αποδοτικά βιώσιμη, οικονομική και ασφαλή ηλεκτρική ενέργεια.

Ένα Ευφύες Δίκτυο κάνει χρήση καινοτόμων προϊόντων και υπηρεσιών, συμπεριλαμβανομένου την ευφυή παρακολούθηση, τον έλεγχο, τις τεχνολογίες επικοινωνιών και τέλος την αυτοίαση, ώστε να:

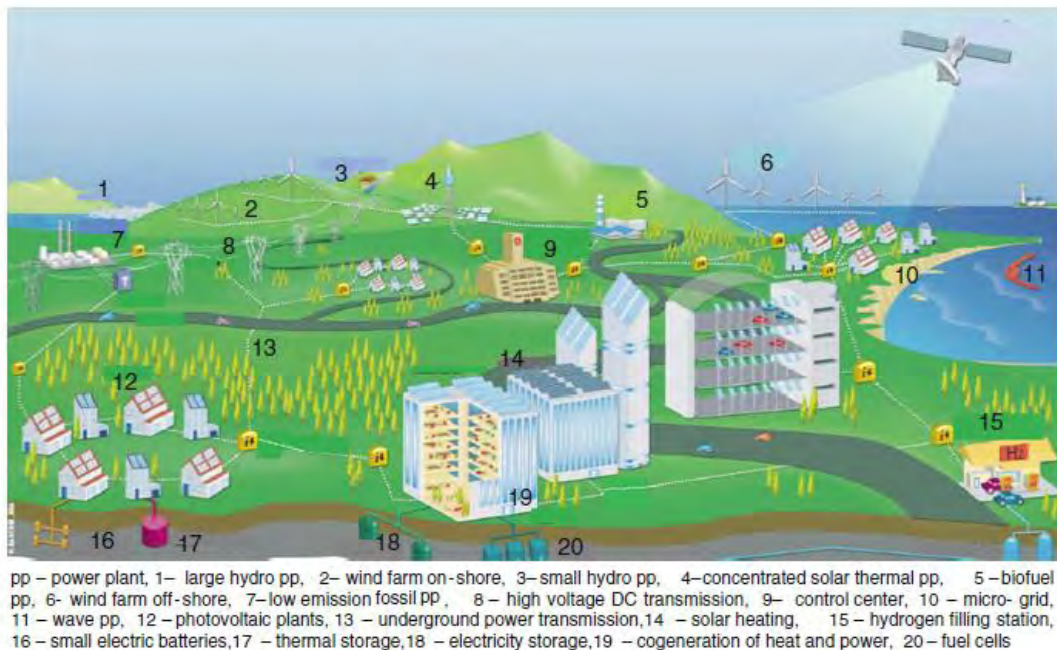
- δίνει την δυνατότητα στο δίκτυο να ενσωματώσει χρήστες με νέες απαιτήσεις σε ενέργεια (scaling = κλιμάκωση)
- διευκολύνει τη σύνδεση και την λειτουργία διάφορων τύπων γεννητριών όλων των μεγεθών
- ενισχύει την αποτελεσματικότητα των λειτουργιών του δικτύου
- επιτρέπει στους καταναλωτές ηλεκτρικής ενέργειας να συμμετέχουν ενεργά στη βελτιστοποίηση της λειτουργίας του συστήματος
- παρέχει στους καταναλωτές περισσότερες πληροφορίες και επιλογές, με τέτοιο ώστε να εξασφαλίζουν μία πιο ασφαλή παροχή ηλεκτρικής ενέργειας
- βελτιώνει τη λειτουργία της αγοράς ενέργειας και των παρεχόμενων υπηρεσιών προς τους καταναλωτές
- μειώνει σημαντικά τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις τού συστήματος παροχής ηλεκτρικής ενέργειας στο σύνολο του
- παρέχει κατά την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας, ενισχυμένα επίπεδα αξιοπιστίας, ποιότητας και ασφάλειας.

Κατά συνέπεια, το Smart Grid υποστηρίζει την εισαγωγή νέων εφαρμογών, με εκτεταμένες επιπτώσεις: στην παροχή των δυνατοτήτων για την ασφαλή και ελεγχόμενη ένταξη των περισσότερων ανανεώσιμων και ιδιαίτερα ευμετάβλητων πηγών ενέργειας (ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες), καθώς και των νέων κατηγοριών χρηστών του δικτύου, όπως τα ηλεκτρικά οχήματα και οι αντλίες θερμότητας. Παρέχει ηλεκτρική ενέργεια με μεγαλύτερη ασφάλεια, αποτελεσματική και ακριβής χρέωση, προσφέροντας ένα αξιόπιστο και προηγμένο σύστημα αυτοματοποίησης ελέγχου και επιτήρησης των λειτουργιών, με την επιπλέον δυνατότητα αυτοίασης μετά από βλάβες. Τέλος επιτρέπει στους καταναλωτές να είναι καλύτερα ενημερωμένοι σχετικά με τη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας και να συμμετέχουν ενεργά, στην αγορά από πλευρά της ζήτησης δίνοντας ανάδραση μέσω των δυναμικών τιμολογίων.

Το όραμα αυτό θα οδηγήσει σε νέα προϊόντα, διαδικασίες και υπηρεσίες, στη βελτίωση της αποδοτικότητας σε βιομηχανική κλίμακα και στη χρήση καθαρότερων πηγών ενέργειας, παρέχοντας παράλληλα το προβάδισμα στην Ευρώπη όσο αναφορά την παγκόσμια αγορά. Την ίδια στιγμή, εξασφαλίζει την ασφάλεια των υποδομών συμβάλλοντας έτσι στη βελτίωση της καθημερινής ζωής των πολιτών. Όλα αυτά κάνουν τα Smart Grids να αποτελούν ένα ορόσημο για την προσπάθεια της Ευρωπαϊκής στρατηγικής για την επίτευξη της μεγαλύτερης οικονομίας στον κόσμο βασισμένη στην γνώση.

1.3 Τα θεμέλια στοιχεία του Ευρωπαϊκού οράματος για το Smart Grid

Η παροχή ηλεκτρικής ενέργειας του μέλλοντος θα διαμοιράζεται από κεντρικούς σταθμούς παραγωγής ενέργειας και από κατανεμημένους ενεργειακούς πόρους (**DER-Distributed Energy Resources**). Και στις δυο περιπτώσεις θα μπορούν να αξιοποιηθούν οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (**RES**), κάποιες από τις οποίες ίσως να είναι ασταθείς ή διαλείπουσες στην παραγωγή τους προς το δίκτυο (για παράδειγμα οι αιολικοί σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, οι οποίοι θα μπορούσαν να αποτελούν μέρος ενός συστήματος DER ή θα μπορούσαν να δημιουργήσουν ένα αυτόνομο κεντρικό σταθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, το ίδιο εύκολα). Η παραγωγή μέσω DER τείνει να έχει μια πολύ μικρότερη παραγωγή ενέργειας από τις παραδοσιακές μορφές παραγωγής της, αλλά σε μεγαλύτερη κλίμακα το φαινόμενο αντισταθμίζεται. Επιπλέον, η τοποθέτηση των πηγών πιο κοντά στους χρήστες, θα μειώσει τις απώλειες ενέργειας που οφείλονται στη μετάδοση του ρεύματος σε μεγάλες αποστάσεις. Το **Σχήμα 1.5** παρουσιάζει μια εικόνα για το πώς η παροχή ρεύματος θα μπορούσε να φαντάζει στο μέλλον.



Σχήμα 1.5: Η παροχή ηλεκτρικής ενέργειας του μέλλοντος-το όραμα.

Εν τέλει, το Smart Grids θα συνδυάσει τις υπάρχουσες τεχνολογίες, βελτιωμένες και ενημερωμένες με καινοτόμες λύσεις. Τα μελλοντικά δίκτυα θα βασίζονται στην υπάρχουσα υποδομή των δικτύων, αλλά θα επιτρέπουν να εφαρμοστούν νέες λειτουργικότητες στο σύστημα, όπως η παρακολούθηση και προστασία του, τα μικρό-δίκτυα (**Microgrids**) και εικονικές μονάδες παραγωγής (**Virtual Power Plants**). Η κεντροποιημένη παραγωγή που υφίσταται στις μέρες μας, θα εξακολουθήσει να διαδραματίζει σημαντικό ρόλο, αλλά πολλοί περισσότεροι παράγοντες θα εμπλέκονται πλέον, στην παραγωγή, τη μεταφορά, τη

διανομή και τη λειτουργία του συστήματος, συμπεριλαμβανομένων των τελικών καταναλωτών.

Με βάση τις ανωτέρω εκτιμήσεις, τα θεμέλια του οράματος συνοψίζονται ως εξής:

1. Στη δημιουργία μιας πληθώρας (“**toolbox**”) από δοκιμασμένες τεχνικές λύσεις που μπορούν να αναπτυχθούν γρήγορα και αποτελεσματικά με χαμηλό κόστος, επιτρέποντας στο υπάρχον δίκτυο να δεχθεί εισροές ενέργειας από καταναλωτές ενεργειακών πόρων (**DER**), χωρίς να παραβιάζονται τα κρίσιμα όρια λειτουργίας (όπως ο έλεγχος της τάσης, η ευκολία αντικατάστασης του εξοπλισμού όταν παρασταθεί ανάγκη ή τεχνικό πρόβλημα και η ικανότητα για τον έλεγχο της ροής της ισχύος).
2. Καθιέρωση δυνατοτήτων διεπαφής που θα επιτρέψουν νέους σχεδιασμούς του δικτυακού εξοπλισμού και νέες ρυθμίσεις στον αυτοματισμό/έλεγχο, οι οποίοι θα διασυνδέονται με επιτυχία στο υπάρχοντα, παραδοσιακό εξοπλισμό του δικτύου.
3. Εξασφάλιση της εναρμόνισης των ρυθμιστικών μέτρων και των εμπορικών πλαισίων στην Ευρώπη, για να διευκολυνθούν οι διασυνοριακές συναλλαγές και των δύο, δηλαδή των υπηρεσιών ηλεκτρικής ενέργειας και του δικτύου (όπως για παράδειγμα η ενέργεια που βρίσκεται σε απόθεμα, όπως η υδροηλεκτρική ενέργεια στις σκανδιναβικές χώρες), διασφαλίζοντας και καλύπτοντας ένα ευρύ φάσμα καταστάσεων λειτουργίας που μπορούν να προκύψουν.
4. Θέσπιση κοινών τεχνικών προδιαγραφών και πρωτοκόλλων, επιτρέποντας την ανάπτυξη εξοπλισμού από κάθε επιλεγόμενο κατασκευαστή χωρίς το φόβο του εγκλωβισμού σε ιδιόκτητες προδιαγραφές. Αυτό ισχύει για τους εξοπλισμούς του δικτύου, τα συστήματα μέτρησης και ελέγχου, όπως και για τις αρχιτεκτονικές, σε θέματα αυτοματισμού.
5. Ανάπτυξη πληροφοριακών, υπολογιστικών και τηλεπικοινωνιακών συστημάτων που επιτρέπουν στις επιχειρήσεις να αξιοποιήσουν καινοτόμες υπηρεσίες για να βελτιώσουν της αποτελεσματικότητάς τους και να βελτιώσουν την εμπειρία του χρήστη/καταναλωτή.

Η δημιουργία της πρώτης θεμελιώδους προϋπόθεσης, δηλαδή της “εργαλειοθήκης”, είναι εφικτή μόνο αν συνδυαστούν οι άλλες τέσσερις βασικές προϋποθέσεις. Η εργαλειοθήκη είναι ουσιαστικά μια επισκόπηση των καινοτόμων λύσεων, και είναι υψίστης σημασίας για την ιδέα που ονομάζεται ευφυές δίκτυο ή Smart Grid. Δύο σημαντικές τάσεις που μπορούν να παρατηρηθούν στην ανάπτυξη του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας είναι οι εξής:

Περισσότερες Μεταδόσεις

Οι αυξανόμενες απαιτήσεις μετάδοσης στις απελευθερωμένες αγορές, που προκύπτουν από την απελευθέρωση των εμπορικών δραστηριοτήτων ενέργειας, και σε ορισμένες χώρες, από την απεριόριστη τροφοδοσία της ευμετάβλητης αιολικής ενέργειας ζορίζουν τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας και προκαλούν συχνή συμφόρηση στη διαθέσιμη χωρητικότητα του δικτύου μεταφοράς. Οι υπάρχουσες γραμμές του δικτύου μεταφοράς πρέπει να αντέξουν μεγαλύτερα φορτία από ό,τι στο παρελθόν.

Ενεργή κατανομή

Ένα όλο και μεγαλύτερο μερίδιο της ηλεκτρικής ενέργειας θα παράγεται σε κατανεμημένο επίπεδο. Τα κατανεμημένα δίκτυα θα γίνουν ενεργά και θα πρέπει να δέχονται αμφίδρομη ροή ηλεκτρικής ενέργειας. Εν μέρει, οι πτυχές αυτές θα οδηγήσουν σε χαμηλότερη χρησιμοποίηση του δικτύου μετάδοσης. Ωστόσο, και οι δύο τάσεις θα οδηγήσουν σε εξαιρετικά ευμετάβλητες ροές φορτίων σε όλα τα επίπεδα του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.

Η εργαλειοθήκη ή το ρεπερτόριο των λειτουργιών θα πρέπει να παρέχει τα μέσα που επιτρέπουν την αντιμετώπιση των σχετικών προκλήσεων με ένα οικονομικό και ευέλικτο τρόπο, και δύο διαφορετικές εργαλειοθήκες πρέπει να είναι εγκατεστημένες, μια για τη μετάδοση και μία για την κατανομή όπως απεικονίζεται στο **Σχήμα 1.6** και **Σχήμα 1.7**, αντίστοιχα.

Στο επίπεδο μεταφοράς απαιτούνται οι εξελιγμένες τεχνολογίες ώστε να ενισχυθεί η χωρητικότητα του δικτύου και να εξασφαλιστεί η ορθή λειτουργία, στις περιπτώσεις συμφόρησης, με έξυπνο και ευέλικτο τρόπο. Μια κατάσταση ονομάζεται συμφόρηση αν τα N-1 κριτήρια (βλέπε παρακάτω), δεν μπορούν να ικανοποιηθούν σύμφωνα με την παρατηρούμενη ροή φορτίου μέσω του δικτύου.

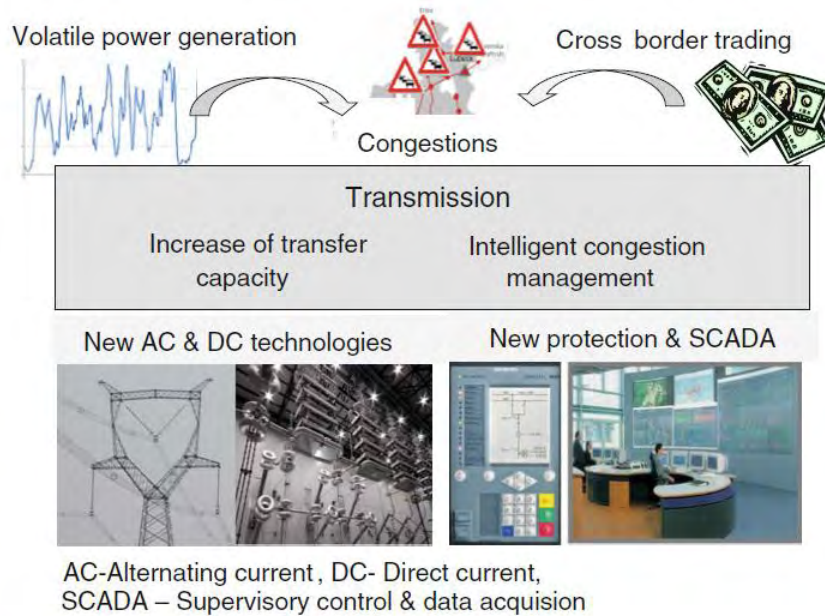
Η πλειονότητα των αλλαγών θα λάβουν χώρα σε κατανεμημένο επίπεδο. Η ολοένα αυξανόμενη παραγωγή ενέργειας με κατανεμημένο τρόπο θα επηρεάσει σημαντικά τη χωρητικότητα του δικτύου καθώς και τις ποιοτικές παραμέτρους της παρεχόμενης ισχύος. Σύμφωνα με τον ορισμό του ευφυούς δικτύου (**Smart Grid**) η αλληλεπίδραση των λειτουργιών του δικτύου και των δραστηριοτήτων της αγοράς θα αναγκάσουν τη βελτιστοποίηση της ενίσχυσης του κατανεμημένου δικτύου. Κατά συνέπεια, μια επικοινωνιακή υποδομή θα πρέπει να διεισδύσει προς τα κάτω, στη χαμηλή τάση σε επίπεδο καταναλωτή ώστε να κάνει αυτού του είδους την αλληλεπίδραση εφικτή. Εξελιγμένες τεχνολογίες στην πληροφόρηση και στις επικοινωνία (**ICT-Information and Communication Technologies**) θα είναι το κλειδί για:

- εξελιγμένη αυτοματοποίηση σε κατανεμημένο επίπεδο ώστε να διασφαλιστεί η ποιοτικότερη παροχή ενέργειας,
- συντονισμένη διαχείριση της ενέργειας που καλύπτει την παραγωγή, την αποθήκευση και τη ζήτηση στο πλαίσιο των εικονικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής (**VPP-Virtual Power Plants**),
- παροχή νέων υπηρεσιών μέτρησης στους καταναλωτές, δίνοντας κίνητρα και μεθόδους για την αποδοτικότερη χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας.
 - με χρήση δυναμικής τιμολόγησης,
 - με την επικοινωνία και ανταλλαγή, σε πραγματικό χρόνο, πληροφοριών προς τους τελικούς καταναλωτές,
 - με την απεικόνιση των τρεχουσών τιμών, της ενεργειακής απαιτήσεως τους και τις αντίστοιχες χρεώσεις.

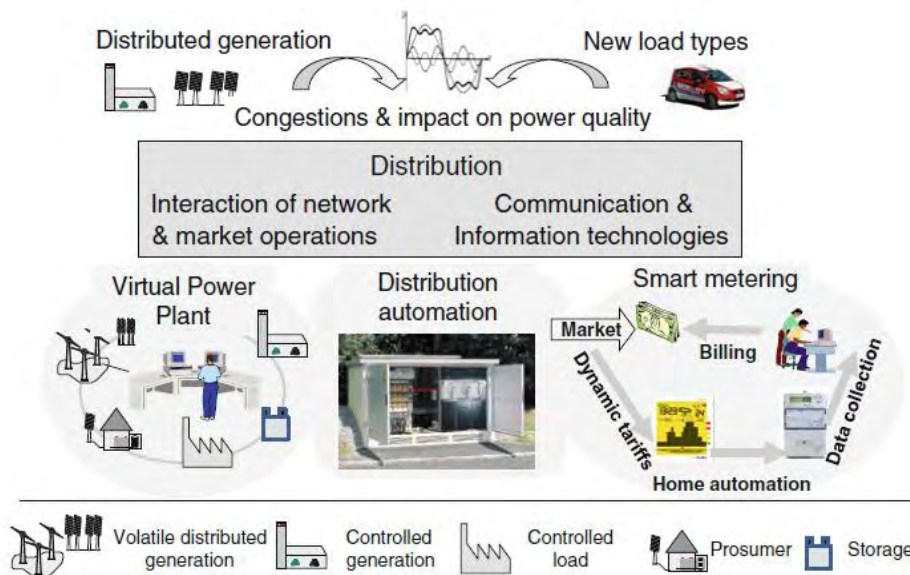
Οι άλλες δύο πτυχές, δηλαδή το VPP και το Smart Metering προσφέρουν ευελιξία για:

- προσαρμογή της ζήτησης στη χαμηλού κόστους διαθέσιμη ενέργεια,
- προσαρμογή της ροής φορτίου στη διαθέσιμη χωρητικότητα του δικτύου.

Οι πτυχές αυτές είναι άμεσα συνδεδεμένες με την αγορά και μπορούν να υποστηρίξουν τις λειτουργίες του δικτύου. Στα πλαίσια του ευφυούς δικτύου (Smart Grid), η αγορά και οι λειτουργίες που επιτελούνται εντός του δικτύου επηρεάζουν το ένα το άλλο, με αμοιβαίο τρόπο. Σε μεγάλης κλίμακας περιβάλλοντα παραγωγής ευμετάβλητης ενέργειας, είναι υποχρεωτικό να συντονίσουν οι συνθήκες του δικτύου και οι απαιτήσεις της αγοράς με έναν έξυπνο και αποδοτικό τρόπο.



Σχήμα 1.6: Προκλήσεις του Smart Grid, το toolbox και οι λύσεις για το δίκτυο μεταφοράς



Σχήμα 1.7: Προκλήσεις του Smart Grid, το toolbox και οι λύσεις για το δίκτυο μεταφοράς.

Ο κύριος στόχος αυτών των λύσεων είναι η ενσωμάτωση των ευμετάβλητων **RES** στο ενεργειακό δίκτυο, χωρίς καμία απώλεια στην ποιότητα της παρεχόμενης τάσης, στην αξιοπιστία (δηλαδή το N-1 κριτήριο) και στην ασφάλεια.

Οι τρέχουσες προσεγγίσεις για την ικανοποίηση των N-1 κριτηρίων παρουσιάζονται στο **Σχήμα 1.8**, θα πρέπει επίσης να διασφαλίζεται υπό ενδεχόμενες αλλαγές των συνθηκών η εύρυθμη λειτουργία του δικτύου. Το κριτήριο N-1 ορίζεται ως εξής:

Ένα δίκτυο πληρεί το κριτήριο υπ' αριθμόν (N-1) αν αυτό επιβιώσει της αστοχίας κάποιας συσκευής που βρισκόταν εν λειτουργία χωρίς απαράδεκτους περιορισμούς, σε μία αρχική κατάσταση, τεχνικά εφικτή και λειτουργικά λογική.

Το **Σχήμα 1.8** παρουσιάζει το συνολικό σύστημα ενέργειας από αριστερά προς τα δεξιά με την ένδειξη των επιπέδων τάσης. Ωστόσο, η υψηλή τάση (**HV-High Voltage**) και έξτρα υψηλή τάση (**EHV-Extra High Voltage**) ορίζονται με άλλον τρόπο σε διαφορετικές περιοχές του κόσμου. Στις περισσότερες χώρες το **HV** ορίζεται στο διάστημα μεταξύ 100 και 220 kV. Ωστόσο στην Ιαπωνία, το επίπεδο τάσης στα 66 kV ορίζεται ως **HV**. Επίπεδα τάσης από 230 kV έως 765 kV ανήκουν στην κατηγορία της έξτρα υψηλής τάσης.

Από την άλλη πλευρά, οι ονομαστικές τάσεις του συστήματος μετάδοσης που χρησιμοποιούνται στην Ηπειρωτική Ευρώπη είναι της τάξης 220 και 400 kV (ή 380 kV), όπου ορίζονται και οι δύο, ως έξτρα υψηλή τάση. Κατά συνέπεια, η έξτρα υψηλή τάση (**EHV**) στην ηπειρωτική Ευρώπη ξεκινά από τα 220 kV, κάτω από το όριο που χρησιμοποιείται, για παράδειγμα, στις ΗΠΑ. Το επίπεδο της υπερυψηλής τάσης (**UHV-Ultra High Voltage**) έχει οριστεί να κυμαίνεται στα ± 800 kV σε DC ρεύμα και 1000-1200 kV σε AC. Τα επίπεδα τάσης που χρησιμοποιούνται συνήθως φαίνονται στον **Πίνακα 1.4**.

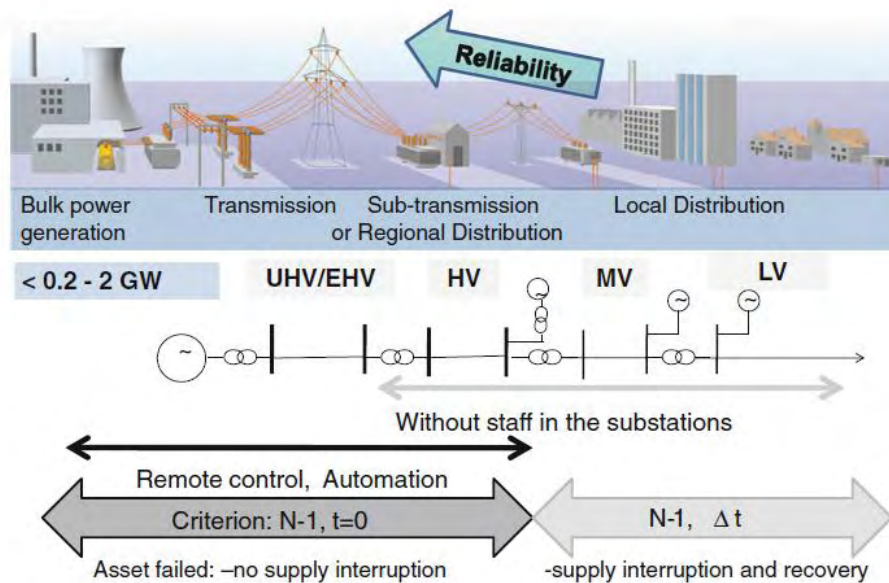
Ultra high UHV	Extra high EHV	High HV	Medium MV	Low LV
>800 kV	≥ 220 to <800 kV	>65 to <220 kV	≥ 1 to <65 kV	0.1 to <1 kV

Πίνακας 1.4 Επίπεδα τάσης.

Σύμφωνα με το **Σχήμα 1.8** η ροή του ρεύματος περιγράφεται ως εξής:

- Ο κύριος όγκος των μονάδων παραγωγής τροφοδοτούν το δίκτυο μεταφοράς το οποίο λειτουργεί κανονικά με
 - έξτρα υψηλή τάση που κυμαίνεται στα επίπεδα, π.χ. 220, 400 (380) kV στην ηπειρωτική Ευρώπη, (και 275 kV στο Ηνωμένο Βασίλειο), 220, 330, 500 και 750 kV στο Ενιαίο Σύστημα Ισχύος της Ρωσίας/ Ολοκληρωμένο Σύστημα τροφοδοσίας (**UPS= Unified Power System of Russia / IPS = Integrated Power System**), 230, 345, 500 και 765 kV στις ΗΠΑ,

- Η υπερυψηλή τάση των ± 800 kV για DC και 1.000 με 1.200 kV για AC είναι νέες τεχνολογίες που έχουν αναπτυχθεί και είναι έτοιμες για τις παγκόσμιες αγορές.
- Το δίκτυο μεταφοράς μεταφέρει την ενέργεια σε υποσταθμούς μεταφοράς λειτουργώντας στα επίπεδα τάσης HV δηλαδή 66-110-150 kV. Τα μεγάλα βιομηχανικά δίκτυα μπορούν να συνδεθούν απ' ευθείας στα δίκτυα μεταφοράς. Η Ηπειρωτική Ευρώπη χρησιμοποιεί την ονομαστική υψηλή τάση των 110 kV.
- Οι υποσταθμοί υψηλής τάσης του δικτύου επιτελούν τρεις διεργασίες:
 - Μετατροπή της HV σε επίπεδα μέσης τάσης (MV-Medium Voltage κυμαίνονται σε 6, 10, 20, 30, 35 kV) για την διανομή της ενέργειας στις εκάστοτε περιοχές,
 - Τροφοδοτούν τα βιομηχανικά δίκτυα και
 - διασυνδέουν τους περιφερειακούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στο εύρος των ~ 20 -200 MW.
- Τα MV δίκτυα εκτελούν παρόμοια καθήκοντα, αλλά εδώ το εύρος των σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι μικρότερο, από δεκάδες kW έως 10-20 MW.
- Οι ακροδέκτες των μετασχηματιστών MV/LV τροφοδοτούν απευθείας τα δίκτυα χαμηλής τάσης (LV-Low Voltage). Σύμφωνα με τα παγκόσμια πρότυπα η ονομαστική



Σχήμα 1.8 Το σύστημα παραγωγής ενέργειας και οι συνθήκες λειτουργίας

χαμηλή τάση (LV) θεωρείται εκείνη των 400 V, αν και σε σπάνιες περιπτώσεις, υπάρχουν περιοχές που χρησιμοποιούν ακόμη τα 200 V. Τα δίκτυα χαμηλής τάσης τροφοδοτούν νοικοκυριά, μικρές επιχειρήσεις, διοικητικά κτίρια, κτίρια που σχετίζονται με το εμπόριο καθώς και αγροτικές και αστικές περιοχές. Επιπλέον, τα δίκτυα χαμηλής τάσης (LV) είναι υποχρεωμένα να συνδέονται με μικρούς παραγωγούς ηλεκτρικής ενέργειας. Συχνά, οι εν λόγω παραγωγοί είναι και καταναλωτές, και έτσι εισήχθη ένας νέος όρος ο “prosumer” (συνδυασμός των αγγλικών λέξεων **producer** και **consumer**).

Όπως γίνεται φανερό από το **Σχήμα 1.8**, η αξιοπιστία του δικτύου θα πρέπει να αυξάνεται αναλογικά όσο η παραγωγή ισχύος μεγαλώνει.

Τα δίκτυα υψηλής τάσης (HV), έξτρα υψηλής τάσης (EHV) και τα υπερυψηλής τάσης (UHV) μπορούν να ελέγχονται και να εποπτεύονται πλήρως, εξ' αποστάσεως και τα σχήματα προστασίας έχουν την δυνατότητα να προσφέρουν κύρια και εφεδρική προστασίας.

Στο επίπεδο των υποσταθμών υψηλής τάσης (HV), έξτρα υψηλής τάσης (EHV) και υπερυψηλής τάσης (UHV) το κριτήριο N-1 πρέπει να είναι πλήρως διασφαλισμένο. Αυτό σημαίνει ότι η απρόσκοπτη λειτουργία του δικτύου θα πρέπει να συνεχιστεί χωρίς καμία χρονική καθυστέρηση μετά από την εμφάνιση οποιασδήποτε δυσλειτουργίας που μπορεί να προκληθεί σε μεμονωμένα μέρη του συστήματος και να απενεργοποιηθούν, είτε πρόκειται για μια γεννήτρια ενός σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, είτε μια γραμμή, είτε για κάποιο μετασχηματιστή, ή ζυγό κ.λπ..

Τα τοπικά δίκτυα διανομής στο επίπεδο της μέσης και χαμηλής τάσης (MV και LV) εξασφαλίζουν το N-1 κριτήριο με καθυστέρηση. Η παροχή διακόπτεται για ορισμένο χρονικό διάστημα (~ 1 h), το οποίο απαιτείται για τον εντοπισμό και την αντικατάσταση ή τον διαχωρισμό του κομματιού του δικτύου που προκάλεσε το πρόβλημα. Μετά από αυτές τις ενέργειες η παροχή θα πρέπει να επανέλθει στην κανονική της λειτουργία και χωρίς κάποιο περιορισμό.

Τέλος, όλες οι προαναφερθείσες προσεγγίσεις για το ευφυές δίκτυο (Smart Grid) μπορούν να αναπτυχθούν και να παρουσιαστούν, στους φορείς εκμετάλλευσης των ηλεκτρικών δικτύων, στους χρήστες του δικτύου αλλά και σε άλλους ενδιαφερόμενους που σχετίζονται με την ηλεκτρική ενέργεια ως κίνητρο για περισσότερες επενδύσεις με τέτοιο τρόπο, ώστε όλοι να έχουν οικονομικό όφελος. Κατά συνέπεια, προκειμένου να καταστούν τα Smart Grids οικονομικά εφικτά, θα πρέπει να υπάρξει μια αλλαγή εις βάθος, για παράδειγμα, από τα υφιστάμενα νομικά, ρυθμιστικά και εμπορικά πλαίσια. Επιπλέον, τα πρότυπα για τον καθορισμό των διεπαφών μεταξύ των εξαρτημάτων του συστήματος θα διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο.

1.4 Οι φιλόδοξες αλλαγές στην ενεργειακή πολιτική της Ευρώπης και οι συνέπειες που θα φέρουν με την σειρά τους στο το ευφυές δίκτυο

Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή είναι ο εμπνευστής του οράματος για το ευφυές δίκτυο και όλες τις σχετικές ιδέες που παρουσιάστηκαν παραπάνω. Ορισμένες χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης έχουν καθιερώσει μερικούς εξαιρετικά φιλόδοξους στόχους που έρχονται πάντα σε συμφωνία με τις ριζικές αλλαγές στις ενεργειακές πολιτικές τους. Ωστόσο, αυτές οι αλλαγές έχουν συνέπειες σε ότι έχει σχέση με το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας εν γένει, καθώς και τα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας σε όλα τα επίπεδα. Η καθιέρωση των ευφύων δικτύων θα συνοδεύεται από τεχνολογικές και νομοθετικές προκλήσεις που θα πρέπει να τηρούνται στα πλαίσια των διασυνδεδεμένων συστημάτων ηλεκτρισμού της Ευρώπης.

Οι διαχειριστές δικτύων μεταφοράς της Δυτικής και της Κεντρικής Ευρώπης έχουν καθιερώσει το Ευρωπαϊκό Δίκτυο Διαχειριστών Συστήματος Μεταφοράς για την Ηλεκτρική Ενέργεια, (**ENTSO-E** -European Network of Transmission System Operators for Electricity), το οποίο αποτελείται από πέντε σύγχρονα συστήματα μετάδοσης, διασυνδεδεμένα με DC συνδέσεις:

- το ηπειρωτικό Ευρωπαϊκό δίκτυο μεταφοράς (RG CE—Region Continental Europe, πρώην UCTE),
- το δίκτυο μεταφοράς του Ηνωμένου Βασιλείου (RG UK),
- το σκανδιναβικό δίκτυο μεταφοράς (RG Nordic),
- το δίκτυο των χωρών της Βαλτικής (RG Baltic, σύγχρονο με το UPS / IPS),
- το δίκτυο της Ιρλανδίας (RG Ireland).

Όντας ο κορμός της διαχείρισης του συστήματος μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας σε Ευρωπαϊκό επίπεδο, η ENTSO-E έχει σαν αποστολή της να προάγει τις σημαντικές πτυχές της ενεργειακής πολιτικής σε αντιπαράθεση πάντα με τις σημαντικές προκλήσεις που γεννιούνται όπως:

- Η ασφάλεια, η οποία χρειάζεται συντονισμένες, αξιόπιστες και ασφαλείς λειτουργίες του δικτύου μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.
- Η επάρκεια, η οποία προωθεί την ανάπτυξη ενός διασυνδεδεμένου ευρωπαϊκού δικτύου και επενδύει σε ένα σύστημα βιώσιμης ενέργειας.
- Η αγορά, η οποία προσφέρει μια βάση για την αγορά γενικότερα προτείνοντας και εφαρμόζοντας πλαίσια τυποποίησης και ενοποίησης της αγοράς καθώς επίσης παρέχοντας διαφάνεια έτσι ώστε να διευκολυνθεί η υλοποίηση μιας ανταγωνιστικής και πραγματικά πανευρωπαϊκής κλίμακας αγοράς, χονδρικού και λιανικού εμπορίου.
- Η βιωσιμότητα, η οποία διευκολύνει την ασφαλή υλοποίηση της νέας γενιάς πηγών, ειδικότερα αυξάνοντας τα ποσοστά παραγωγής ενέργειας από τις ανανεώσιμες πηγές μπορεί να επιτευχθεί ο στόχος της ΕΕ για την μείωση των επιπτώσεων που οδηγούν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου.

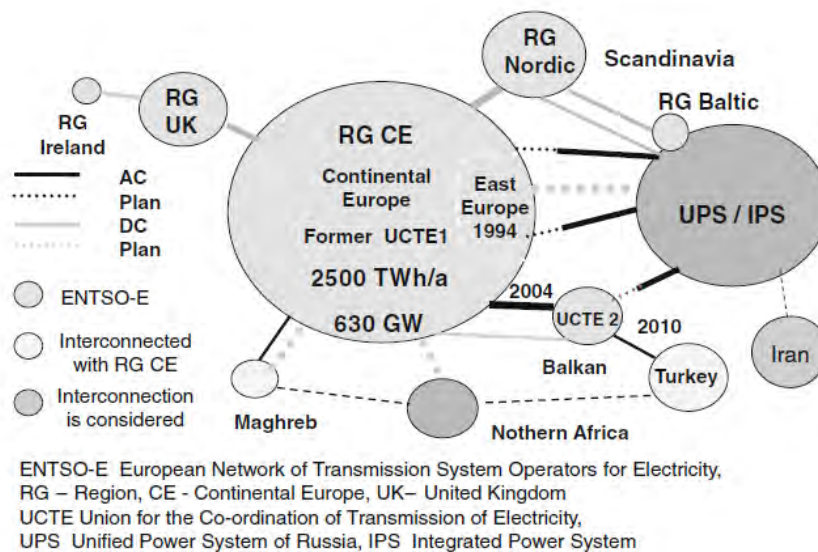
Το δίκτυο μετάδοσης της ηπειρωτικής Ευρώπης (RG CE) είναι το μεγαλύτερο διασυνδεδεμένο σύστημα συγχρονισμένης μετάδοσης στον κόσμο, που εξυπηρετεί 450 εκατομμύρια ανθρώπους, με ετήσια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας στα 2.500 TWh. Περιέχει ένα εγκατεστημένο σταθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με δυναμικότητα περίπου στα 630 GW και 230.000 χλμ. εναέριων γραμμών μεταφοράς (400/220 kV).

Το δίκτυο μεταφοράς επεκτάθηκε από την Ανατολική Γερμανία καθώς και από το κεντρικό δίκτυο μεταφοράς ορισμένων Ανατολικών Ευρωπαϊκών χωρών το 1994 το οποίο συνδέθηκε εκ νέου με τις χώρες των Βαλκανίων το 2004 (μετά τον πόλεμο στην πρώην Γιουγκοσλαβία). Το δίκτυο είναι διασυνδεδεμένο και συγχρονισμένο με τα συστήματα ενέργειας των χωρών του Μαγκρέμπ (χώρες της Βόρειας Αφρικής) και, από το 2010, με την Τουρκία. Το μεγαλύτερο διασυνδεδεμένο σύστημα σύγχρονης μετάδοσης που συνορεύει με την ENTSO-E είναι το UPS/IPS.

Το UPS/IPS ακόμα δεν επικοινωνεί με τα πλέγματα του ENTSO-E (εκτός από μία αδύναμη σύνδεση υψηλής τάσης DC στο Nordel). Οι ισχυρές γραμμές AC των 750 kV τερματίζουν στην Πολωνία, στην Ουγγαρία και στη Βουλγαρία, αλλά δεν χρησιμοποιούνται για να διασυνδεθούν σύγχρονα μεταξύ τους. Μόνο μία γραμμή των 750 kV από την δυτική Ουκρανία (Zapadno Ukrainskaja) προς την Ουγγαρία (Albertirsa) είναι σε λειτουργία. Μερικοί ουκρανικοί σταθμοί παραγωγής είναι συγχρονισμένα αποσυνδεδεμένοι από το UPS/IPS, και έτσι ώστε αυτή η γραμμή να χρησιμοποιείται για τη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας από το "νησί Μπέρστιν" (Burstyn Island) στην Ουκρανία από και προς την Ουγγαρία.

Το **Σχήμα 1.9** παρουσιάζει τις σχέσεις των ευρωπαϊκών συστημάτων ενέργειας, όπου το μέγεθος των κυκλικών περιοχών σχετίζεται με την δυναμικότητα των εγκατεστημένων συστημάτων ενέργειας.

Το κλείσιμο του βρόχου της Βορείου Αφρικής (NA) από τις χώρες του Μαγκρέμπ στην Τουρκία έχει προγραμματιστεί εδώ και πολλά χρόνια. Ωστόσο, διάφορα προβλήματα δυναμικής σταθερότητας εμπόδισαν τη διασύνδεση του με το σύστημα της Κεντρικής Ευρώπης μέχρι τώρα.



Σχήμα 1.9 Το Ευρωπαϊκό σύστημα ενέργειας και οι διασυνδέσεις του.

1.4.1 Η φιλόδοξη Γερμανική πολιτική

Το γερμανικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας δομεί το μεγαλύτερο μέρος του RG CE και είναι ενσωματωμένο στη μέση του διασυνδεδεμένου δικτύου μεταφοράς. Οι διασυνδέσεις προς όλα τα γειτονικά συστήματα βρίσκονται σε λειτουργία. Επιπλέον, στη Γερμανία έχει επιτευχθεί το υψηλότερο επίπεδο αξιοπιστίας στην παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε όλο τον κόσμο.

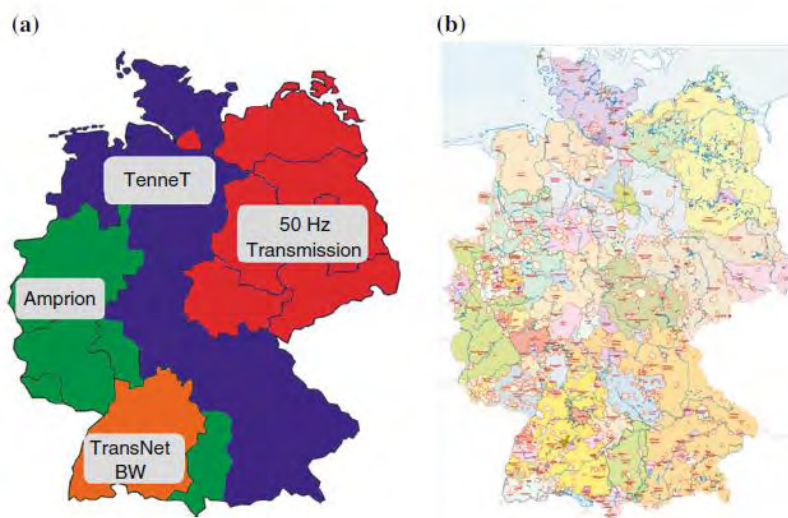
Η γερμανική κυβέρνηση έχει θέσει τους πιο φιλόδοξους στόχους όσον αφορά τη θεμελιώδη αλλαγή της ενεργειακής της πολιτικής, που ονομάζεται “Energiewende”. Στο πλαίσιο αυτής, το γερμανικό παράδειγμα επιλέχθηκε για να παρουσιάσει τις ιδιαίτερες συνέπειες που μπορεί να έχει η όλη φιλοσοφία του ευφυούς δικτύου καθώς και να δώσει τις τεχνικές λύσεις που θα επιτρέψουν να διατηρηθεί σε υψηλό επίπεδο η ποιότητα της ισχύος υπό τις νέες συνθήκες.

Το γερμανικό σύστημα μεταφοράς λειτουργεί με τέσσερις διαχειριστές στο σύστημα μεταφοράς του (TSO) αποδίδοντας τέσσερις περιοχές ελέγχου, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 1.10a**. Τα επίπεδα τάσης των υποκειμένων δικτύων είναι 110, 30, 20, 10 και 0.4 kV. Περίπου 850 φορείς εκμετάλλευσης του δικτύου δραστηριοποιούνται σε αυτόν τον τομέα (**Σχήμα1.10b**).

Ο ιδιαίτερος ρόλος της Γερμανίας παγκοσμίως, στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να χαρακτηριστεί από τρεις ειδικές πτυχές:

Πρώτον, η Γερμανία έχει θέσει τους πιο προκλητικούς στόχους για την ανάπτυξη του ενεργειακού της μείγματος. Έχει προγραμματίσει τα ποσοστά ανάπτυξης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (RES) με βάση την ετήσια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας ως εξής:

- 2011 19% — με 10% από ευμετάβλητες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (αέρας, ήλιος)
- 2020 35% — με 22% από ευμετάβλητες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας
- 2030 50% — με 35% από ευμετάβλητες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας
- 2050 80% — με 50% από ευμετάβλητες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας



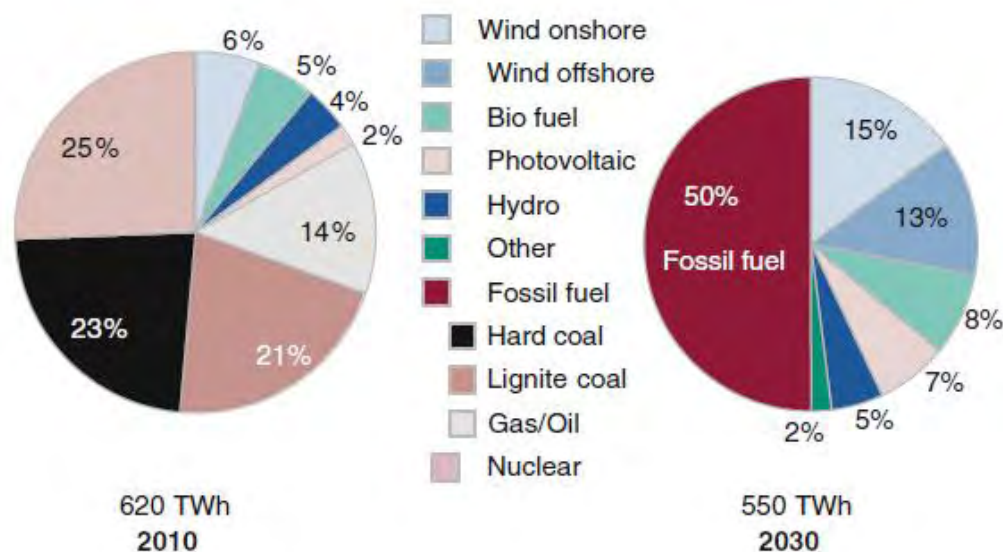
Σχήμα. 1.10: (α) Οι φορείς εκμετάλλευσης του δικτύου μεταφοράς. (β) Τα 850 δίκτυα διανομής στη Γερμανία

Το **Σχήμα 1.11** σχήμα παρουσιάζει την ανάμειξη της πρωτογενούς ενέργειας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στη Γερμανία για το έτος 2010 καθώς και μία αντίστοιχη εικόνα για την αναμενόμενη ανάμειξη της πρωτογενούς ενέργειας στο **2B** σενάριο για το 2030.

Δεύτερον, η Γερμανία έχει προγραμματίσει το κλείσιμο όλων των σταθμών πυρηνικής ενέργειας έως το 2022. Η πυρηνική ενέργεια κάλυπτε περίπου το 25% της ετήσιας κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας το 2010. Οι σταθμοί πυρηνικής ενέργειας είναι καλά κατανομημένοι σε ολόκληρη τη Γερμανία και βρίσκονται κοντά στα κέντρα φόρτου. Κατά συνέπεια, θα συμβεί μια σημαντική αποδιάρθρωση τόσο στον τομέα της παραγωγής ενέργειας όσο και στα κέντρα φόρτου, γεγονός που οδηγεί με την σειρά του στην απαίτηση για μία ισχυρή ενίσχυση του δικτύου μεταφοράς από τη μία πλευρά, και την ανάπτυξη της περιφερειακής παραγωγής στα δίκτυα διανομής από την άλλη.

Τρίτον, προβλέπεται μια σημαντική μείωση της ετήσιας ζήτησης πράγμα που οφείλεται κυρίως στην βελτίωση της αποτελεσματικότητας στον τρόπο χρήσης της ενέργειας. Την ίδια στιγμή, ωστόσο, υπάρχει μια σημαντική ανάπτυξη σε ό,τι αφορά τη σύνδεση των νέων τύπων καταναλωτών, όπως των ηλεκτρικών κινούμενων (6 εκατομμύρια έχουν προγραμματιστεί για το 2030), τις αντλίες θερμότητας και προβλέπονται αρκετές άλλες συσκευές στο μέλλον.

Οι κύριες προκλήσεις μιας τέτοιας στρατηγικής ανάπτυξης βρίσκονται στην ασάθεια ενός σημαντικού μεριδίου της παραγωγής ενέργειας καθώς επίσης και στην γεωγραφική κατανομή των κέντρων φόρτου που βρίσκονται κυρίως στην κεντρική/νότια Γερμανία ενώ η κύρια ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας βρίσκεται στο Βορρά.



Σχήμα 1.11 Η ενεργειακή ανάμειξη του 2010 και οι αναπτυξιακοί στόχοι της Γερμανίας για το 2030.

Το 2010, η κατανομή του φορτίου και η ηλεκτροπαραγωγή στη Γερμανία ήταν λίγο ή πολύ εναρμονισμένες. Κατά κανόνα, οι μεγάλης κλίμακας μονάδες παράγωγής βρίσκονταν κοντά στα κέντρα φόρτου.

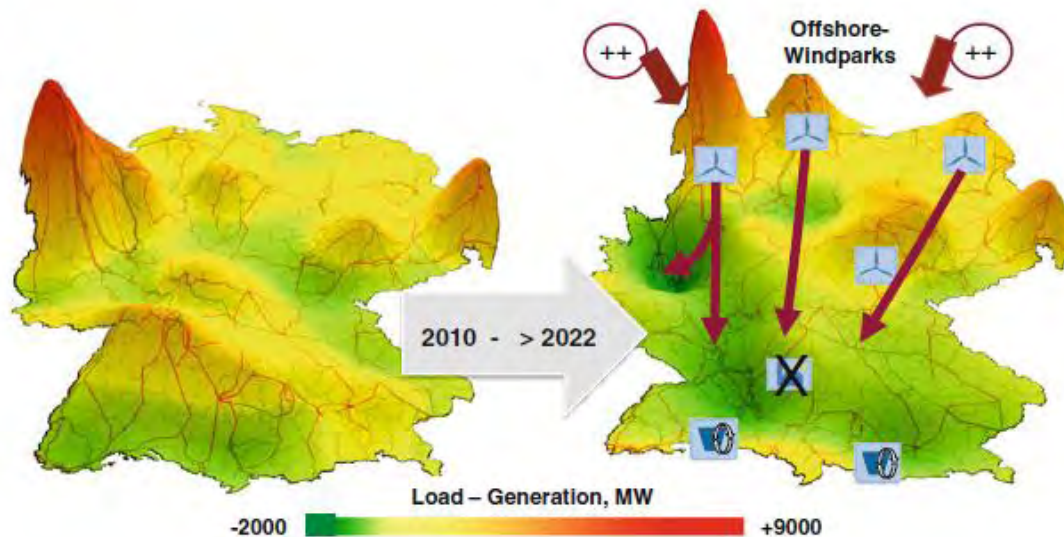
Περίπου το 10% του φορτίου αιχμής των 80 GW μπορούσαν να καλυφθούν από τους πυρηνικούς σταθμούς της Νότιας Γερμανίας. Ωστόσο όταν κλείσει, η εδαφική αναλογία της παραγωγής σε σχέση με το φορτίο θα αλλάξει σημαντικά. Το **Σχήμα 1.11** παρουσιάζει αυτές τις αλλαγές συγκρίνοντας τα έτη 2010 με αυτές από το επερχόμενο 2022.

Η αυξανόμενη εδαφική ανισορροπία του φορτίου και της παραγωγής μπορεί να λυθεί με δύο τρόπους:

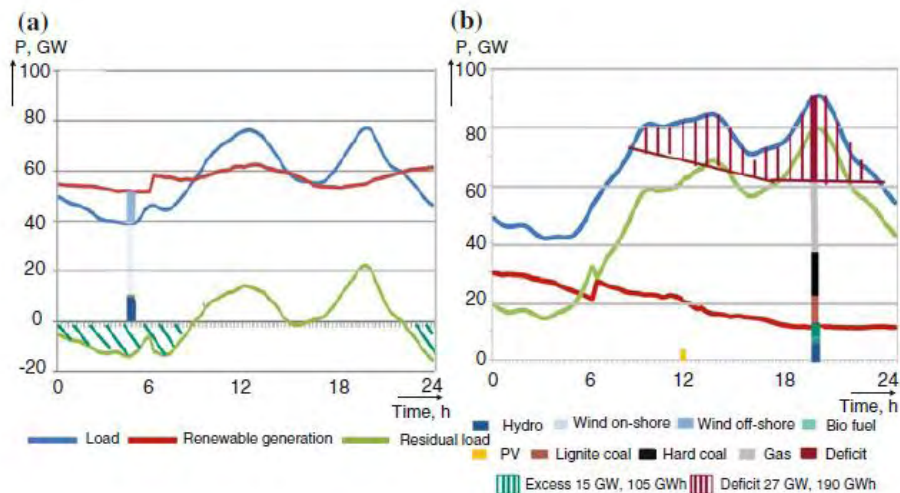
1. Βελτίωση της του δικτύου ηλεκτροδότησης για την μαζική μεταφορά ισχύος από τον Βορρά προς τον Νότο,
2. Ανάπτυξη διάσπαρτων μονάδων παραγωγής που να συνδέονται με τα δίκτυα διανομής.

Με αυτόν τον τρόπο, η Γερμανία με τους φιλόδοξους στόχους τους έχει να παίζει το ρόλο του προοδευτικού πρωτοπόρου όσον αφορά την εξέλιξη των δικτύων μεταφοράς και διανομής σε ευφυή.

Επιπλέον, τα προβλήματα μεταβλητότητας που προκύπτουν πρέπει να επιλυθούν. Ο προγραμματισμός της ενεργειακής ανάμειξης στα διαγράμματα όπως φαίνεται στο **Σχήμα 1.11** είναι μία προσέγγιση μόνο, έτσι λοιπόν πρέπει να εμπλουτιστεί από ένα αναλυτικό προφίλ για την παραγωγή και το φόρτο για το εξεταζόμενο έτος (εδώ το 2030). Αυτή η ανάλυση έχει γίνει με την παραδοχή ότι μέχρι το 2030 η ετήσια καθαρή κατανάλωση θα



Σχήμα 1.12 Η ανάπτυξη της αναλογίας του φορτίου και της παραγωγής στη Γερμανία.



Σχήμα 1.13 Σε ακραίες καιρικές συνθήκες, η μέγιστη (α) και η ελάχιστη (β) παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από RES.

αποτελείται από την ζήτηση του 44.8% από την βιομηχανία, 24% από τις επιχειρηματικές/εμπορικές υπηρεσίες, 23,4% από τα νοικοκυριά και 7,8% από τις μεταφορές (συμπεριλαμβανομένης της παραγωγής από την ηλεκτροκίνηση και το υδρογόνο). Κάθε ομάδα φόρτου ακολουθεί συγκεκριμένο προφίλ, το οποίο είναι διαφορετικό για τα Σαββατοκύριακα, τις εργάσιμες ημέρες και τις εποχές. Το άθροισμα όλων των διαφορετικών προφίλ φορτίου πρέπει να καλύπτεται από την παραγωγή ενέργειας κάθε δευτερόλεπτο του έτους.

Τα τυπικά προφίλ του 1/4^{ου} του χρόνου των ομάδων φόρτου και των διάφορων κατηγοριών παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές (RES) αναλύθηκαν για πολλά χρόνια από το Ινστιτούτο Fraunhofer για τα Συστήματα Αιολικής Ενέργειας στο Kassel και τα αποτελέσματα που προέκυψαν προσαρμόστηκαν στους Γερμανικούς στόχους για το 2030.

Το προφίλ του συνολικού φορτίου είχε συμπληρωθεί με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη συνεισφορά από τις ανανεώσιμες πηγές για κάθε 1/4 του έτους. Με αυτόν τον τρόπο, το φορτίο και οι αναλογίες ενέργειας από τις ανανεώσιμες πηγές καθορίστηκαν στις 35040 του 1/4^{ου} του χρόνου, τιμές που έρχονται σε συμφωνία με την προγραμματισμένη ενεργειακή ανάμειξη της Γερμανίας για το έτος 2030. Το **Σχήμα 1.13** παρουσιάζει δύο ακραίες ημέρες του ετήσιου φόρτου — διάγραμμα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας — μία με το μέγιστο και μία με το ελάχιστο της παραγωγής από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Παρουσιάζεται το μέγιστο των RES στην αριστερή πλευρά: οι ανανεώσιμες πηγές μπορούν να καλύψουν έως το 90% του ημερήσιου προφίλ φορτίου. Επιπλέον, ένα πλεόνασμα μέχρι τα 15 GW ισχύος, με μια ποσότητα 105 GWh ενέργειας εμφανίζεται πάνω από 9 ώρες κατά την περίοδο χαμηλού φόρτου.

Στη δεξιά πλευρά του διαγράμματος, η ελάχιστη κάλυψη του προφίλ φορτίου από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας μπορεί να πέσει στο 16%. Αυτό σημαίνει ότι κατά τη διάρκεια της περιόδου αιχμής φορτίου έως 77 GW πρέπει να καλυφθούν από τις παραδοσιακές πηγές, όταν η μέγιστη διαθέσιμη ισχύς των πηγών ορυκτών καυσίμων περιορίζεται στα 50 GW (65 GW εγκατεστημένη παραγωγική ικανότητα που μειώνεται κατά 15 GW αν υπολογίσουμε και τις απώλειες του δικτύου, την εφεδρεία και την ανάγκη για αποσύνδεση για γίνονται εργασίες συντήρησης). Κατά συνέπεια, υπάρχει ένα έλλειμμα κοντά στα 27 GW, για μέγιστη ισχύ και 190 GWh έλλειμα ενέργειας κατά τη διάρκεια 14 ωρών που πρέπει να καλυφθεί από περισσότερη εγκατεστημένη ηλεκτρική ενέργεια μέσω ορυκτών καυσίμων ή χρησιμοποιώντας άλλες πηγές όπως μονάδες αποθήκευσης, ή με προσαρμοστική μείωση της ζήτησης ή/και την εισαγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Η στρατηγική των ευφυών δικτύων αποτελείται από έναν ευφυή συντονισμό των συνδεδεμένων χρηστών του συστήματος ενέργειας με την έννοια ότι το φορτίο και η παραγωγή πρέπει να ισορροπηθεί, ακόμα και σε ακραίες καταστάσεις, από μία περιορισμένη σε όγκο διαθεσιμότητα ηλεκτροπαραγωγής μέσω ορυκτών καυσίμων. Η φιλόδοξη Γερμανική πολιτική για την ανάπτυξη του τομέα της ενέργειας την καθιστά ως μια χώρα όπου τα ευφυή δίκτυα πρέπει να εισαχθούν ως κορυφαία προτεραιότητα της. Ένα πλήθος νέων τεχνολογικών λύσεων πρέπει να δημιουργηθούν για να αντιμετωπίσουν τις ανάλογες προκλήσεις.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

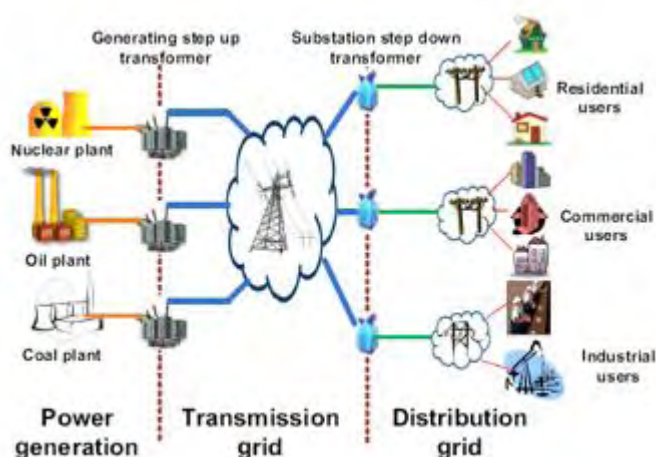
Παραγωγή ενέργειας σε ευφυή δίκτυα και νέα πρότυπα δικτύων

2.1 Εισαγωγή

Οι αμφίδρομες ροές τόσο της ηλεκτρικής ενέργειας όσο και των πληροφοριών θέτουν τα θεμέλια για την υποδομή του SG (Smart Grid). Αυτή η ευφυής υποδομή μπορεί να υποδιαιρεθεί σε ευφύες υποσύστημα ενέργειας, ευφύες υποσύστημα πληροφοριών και σε ευφύες υποσύστημα επικοινωνίας, αντίστοιχα.

Το παραδοσιακό ηλεκτρικό δίκτυο εκ φύσεως είναι μίας μόνο κατεύθυνσης. Η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται συχνά σε λίγους κεντρικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής από ηλεκτρομηχανολογικές γεννήτριες, η οποίες λειτουργούν κυρίως από τη δύναμη του τρεχούμενου νερού ή από θερμό-κινητήρες οι οποίοι τροφοδοτούνται με ενέργεια μέσω χημικών καύσεων ή μέσω της πυρηνικής ενέργεια. Προκειμένου να επωφεληθούν από τις οικονομίες κλίμακος, οι εγκαταστάσεις παραγωγής είναι συνήθως αρκετά μεγάλες και βρίσκονται μακριά από τις πυκνό-κατοικημένες περιοχές. Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια αναβιβάζεται για να φτάσει σε υψηλότερη τάση έτσι ώστε να επιτευχθεί η μετάδοση της πάνω στο δίκτυο ηλεκτροδότησης.

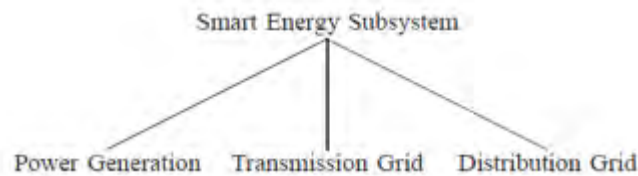
Το δίκτυο ηλεκτροδότησης μεταφέρει την ενέργεια σε μεγάλες αποστάσεις μέχρι τους υποσταθμούς. Κατά την άφιξη της στο ηλεκτρικό υποσταθμό, η ενέργεια θα «υποβιβαστεί» από το επίπεδο τάσης μεταφοράς σε αυτό του επιπέδου διανομής. Καθώς η ενέργεια βγαίνει από τον υποσταθμό, εισέρχεται στο δίκτυο διανομής. Τελικά, κατά την άφιξη της στο



Σχήμα 2.1: Ένα παράδειγμα ενός παραδοσιακού δικτύου ενέργειας.

σημείο χρήσης, η ενέργεια υποβιβάζεται και πάλι από την τάση διανομής στην απαιτούμενη τάση(εις) για να καλυφθούν οι ανάλογες ανάγκες τις κάθε υπηρεσίας. Το Σχήμα 2.1 δείχνει ένα παράδειγμα του παραδοσιακού ηλεκτρικού δικτύου.

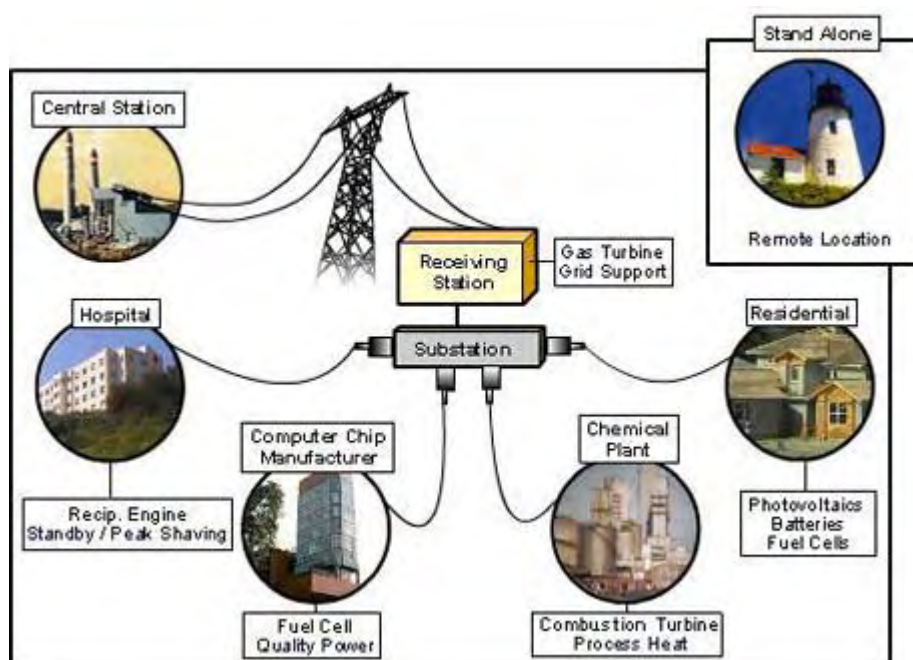
Σε αντίθεση με το παραδοσιακό ηλεκτρικό δίκτυο, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και ο τρόπος κατανομή της ροής σε ένα ευφυές δίκτυο είναι πιο ευέλικτα. Για παράδειγμα, το δίκτυο διανομής μπορεί επίσης να είναι σε θέση να παράγει ηλεκτρική ενέργεια με τη χρήση ηλιακών συλλεκτών ή ανεμογεννητριών. Σε αυτήν την έρευνα, θα διαιρέσουμε το υποσύστημα ενέργειας σε αυτά της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, στο δίκτυο ηλεκτροδότησης και στο δίκτυο διανομής. Το **Σχήμα 2.2** δείχνει μια ταξινόμηση του έργου σχετικά με το υποσύστημα έξυπνης ενέργειας.



Σχήμα 2.2: Ταξινόμηση της λειτουργίας του ευφυούς ενεργειακού υποσυστήματος.

2.2 Κεντριοποιημένη και Αποκεντρωμένη Παραγωγή

Είναι γεγονός, πως οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (**Α.Π.Ε.**) δύναται να συμβάλλουν στην ενεργειακή ενίσχυση ενός Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας (**Σ.Η.Ε.**). Οι όροι που χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν τη δομή ενός ηλεκτρικού συστήματος είναι η Κεντριοποιημένη και η Αποκεντρωμένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Συγκεκριμένα οι όροι αυτοί, αφενός μεν προσδιορίζουν τη γεωγραφική θέση των ηλεκτροπαραγωγικών μονάδων (ανεξαρτήτως είδους) συγκριτικά με τα σημεία ζήτησης-κατανάλωσης, αφετέρου δε είναι ενδεικτικοί του μεγέθους των μονάδων. Αναλυτικότερα, ο όρος Κεντριοποιημένη παραγωγή (**Centralized Power Generation**) περιγράφει τις περιπτώσεις μεγάλων κεντρικών ηλεκτροπαραγωγικών σταθμών (με εγκατεστημένη ισχύ μεγαλύτερη των 50MW συνήθως), οι οποίοι συνήθως εγκαθίστανται μακριά από τις αστικές περιοχές για περιβαλλοντικούς λόγους. Σε αυτές τις περιπτώσεις η μεταφορά της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας στα σημεία κατανάλωσης πραγματοποιείται μέσω του δικτύου μεταφοράς (400kV και 150kV). Αντίθετα, στην Αποκεντρωμένη παραγωγή (**Decentralized - Distributed Power Generation**), οι σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας κατασκευάζονται πλησίον των θέσεων ζήτησης και αποσκοπούν στην τοπική εξυπηρέτηση των φορτίων. Οι μονάδες αυτές είναι συνήθως μικρότερες του 1MW και συνδέονται σε δίκτυα Μέσης Τάσης ή ακόμα και Χαμηλής Τάσης εφόσον η ισχύς τους είναι μικρότερη των 100kW. Τέλος, οι ηλεκτροπαραγωγικοί σταθμοί με εγκατεστημένη ισχύ από 1 έως και 50MW μπορούν να συνδεθούν τόσο στην Υψηλή όσο και στη Μέση Τάση. Η τελική απόφαση είναι αποτέλεσμα συγκερασμού μεταξύ τεχνοοικονομικών μελετών και αποφάσεων που αφορούν την στρατηγική ανάπτυξης των δικτύων.

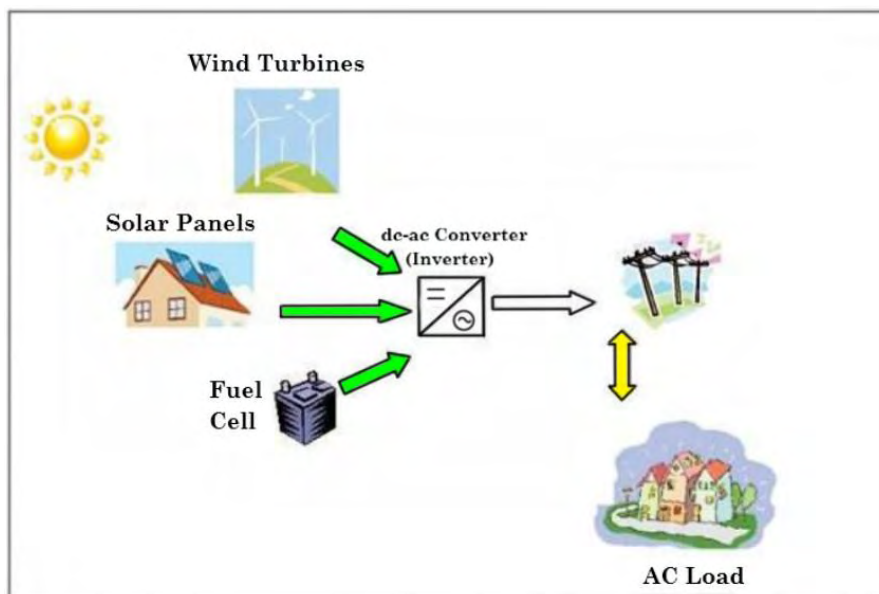


Σχήμα 2.3: Υποσταθμός, μονάδα ενός Μικροδικτύου.

Σύμφωνα με τους προαναφερθέντες συλλογισμούς, οι ηλεκτροπαραγωγικές μονάδες Α.Π.Ε., λόγω της σχετικά μικρής εγκατεστημένης ισχύος τους, μπορούν να θεωρηθούν στο σύνολό τους ως Αποκεντρωμένη παραγωγή. Από την άλλη πλευρά όμως, τα αιολικά πάρκα, τα μεγάλα φωτοβολταϊκά συστήματα και οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί, εγκαθίστανται κατά κοινή πρακτική σε αραιοκατοικημένες και μη αστικές περιοχές για λόγους επάρκειας χώρου, περιβαλλοντικών περιορισμών και κυρίως καλύτερης εκμετάλλευσης της Α.Π.Ε. Αυτό έχει ως συνέπεια, τα διερχόμενα πλησίον των περιοχών αυτών δίκτυα να είναι ασθενή, με αποτέλεσμα να απαιτείται η ενίσχυσή τους ή η κατασκευή νέων, προκειμένου να καταστεί δυνατή η σύνδεση των παραπάνω ηλεκτροπαραγωγικών μονάδων σε αυτά. Συνεπώς, οι παραπάνω μονάδες δεν μπορούν να θεωρηθούν ως Αποκεντρωμένη παραγωγή, εφόσον η ισχύς τους δεν καταναλώνεται τοπικά. Υιοθετώντας λοιπόν το συμπέρασμα αυτό, οι παραπάνω μονάδες μπορούν να θεωρηθούν καταχρηστικά ως Κεντρικοποιημένη παραγωγή, ενώ, επιπρόσθετα, μόνο οι ηλεκτροπαραγωγικοί σταθμοί Α.Π.Ε. που εγκαθίστανται πλησίον των φορτίων (Μέσης ή Χαμηλής Τάσης) μπορούν να θεωρηθούν ως Αποκεντρωμένη παραγωγή. Συχνά οι σταθμοί αυτοί αποκαλούνται κατανεμημένοι ή ακόμα και μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής (**Dispersed Power Generation Systems**).

Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί, πως μολονότι η χρήση κεντρικοποιημένων σταθμών Εναλλακτικών Πηγών Ενέργειας είναι δυνατόν να συνδράμει στην ενεργειακή ενίσχυση του ηλεκτρικού συστήματος, η μεγάλη απόσταση των μονάδων αυτών από τα σημεία κατανάλωσης έχει ως αποτέλεσμα το υψηλό επίπεδο φόρτισης των γραμμών μεταφοράς και διανομής, με άμεσο συνεπακόλουθο την καταπόνηση των τελευταίων, λόγω των αυξημένων ηλεκτρικών απωλειών. Αντίθετα, η χρησιμοποίηση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, με τη μορφή μικρών μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής, δύναται να

συμβάλλει καθοριστικά στη μείωση των απωλειών και στην εξοικονόμηση ενέργειας. Στις διεσπαρμένες μονάδες ηλεκτροπαραγωγής συμπεριλαμβάνεται ένα ευρύ φάσμα τεχνολογιών με τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας να διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο, ιδιαίτερα σε χώρες όπου οι γεωγραφικές και κλιματολογικές συνθήκες το ευνοούν. Σημειώνεται ότι, σε ορισμένες περιπτώσεις, η δυνατότητα τοπικής κάλυψης του φορτίου ή ενός μέρους αυτού από Αποκεντρωμένες μονάδες παραγωγής, με τη χρησιμοποίηση Α.Π.Ε., επιτρέπει στις επιχειρήσεις διανομής ηλεκτρικής ενέργειας να αντιμετωπίσουν τις αυξανόμενες ενεργειακές απαιτήσεις με μικρό κόστος. Αυτός ο τρόπος εξυπηρέτησης τοπικών φορτίων αποτελεί τη βασική φιλοσοφία πάνω στην οποία έχουν δομηθεί νεοεμφανιζόμενα ηλεκτρικά συστήματα, τα οποία ονομάζονται Μικροδίκτυα (**Microgrids**). Τα συστήματα αυτά είναι συστήματα διανομής Μέσης ή Χαμηλής Τάσης στα οποία είναι διασυνδεδεμένες μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής, φορτία καθώς επίσης και διατάξεις αποθήκευσης ενέργειας στα οποία δίνεται ιδιαίτερο βάρος παρακάτω.



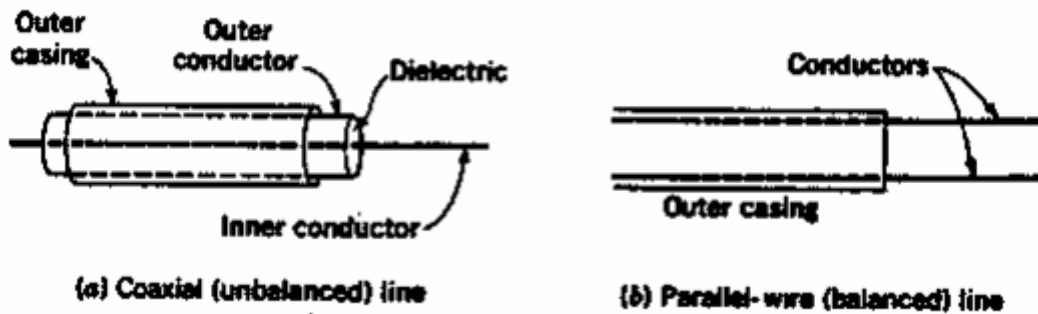
Σχήμα 2.4: Τρόποι διασύνδεσης Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας σε ένα παραδοσιακά δομημένο ηλεκτρικό σύστημα, με υπηρεσίες ελέγχου .

Ένα από τα βασικά μέληματα των επιχειρήσεων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας είναι η μεγιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης μέσω της ελαχιστοποίησης των απωλειών του Σ.Η.Ε. Είναι γνωστό ότι η (ηλεκτρική) απόσταση των μονάδων παραγωγής από τα σημεία κατανάλωσης, το επίπεδο φόρτισης των γραμμών μεταφοράς και διανομής, είναι οι σημαντικότεροι παράγοντες που καθορίζουν το ποσό των ενεργειακών απωλειών. Επιπρόσθετα, εφόσον οι απώλειες είναι τετραγωνική συνάρτηση της έντασης του ρεύματος, οι μεγαλύτερες απώλειες εμφανίζονται κατά τη χρονική περίοδο του μέγιστου φορτίου. Η προσεκτική μελέτη των παραπάνω στοιχείων, αποδεικνύει ότι η μερική ή ολική τροφοδότηση τοπικών φορτίων με το μοντέλο της διεσπαρμένης παραγωγής μπορεί να συμβάλλει στη μείωση των ηλεκτρικών απωλειών και στην εξοικονόμηση ενέργειας, διότι

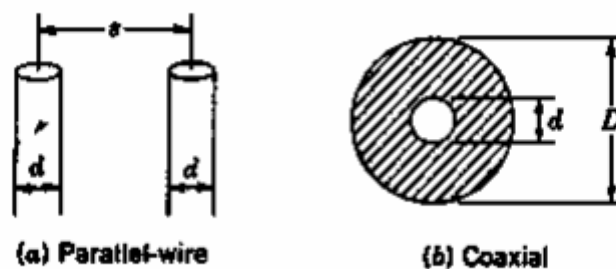
με τον τρόπο αυτό μειώνεται η μεταφερόμενη ενέργεια μέσω των γραμμών μεταφοράς και διανομής. Επιπλέον, περιορίζονται οι δαπάνες επέκτασης και ενίσχυσης των δικτύων μεταφοράς και διανομής.

2.2.1 Απώλειες σε γραμμές μεταφοράς

Τύποι απωλειών. Υπάρχουν τρεις τρόποι με τους οποίους μπορεί να υπάρξει απώλεια ενέργειας πριν αυτή φτάσει στο φορτίο, όταν εφαρμοστεί σε μια γραμμή μεταφοράς, αυτοί είναι : **ακτινοβολία**, **θέρμανση αγωγού** και **θέρμανση διηλεκτρικού**. Υπάρχουν απώλειες λόγω ακτινοβολίας καθώς η γραμμή μεταφοράς μπορεί να συμπεριφέρεται σαν μια κεραία αν η απόσταση των αγωγών είναι κατά εκτίμηση ένα κλάσμα του μήκους κύματος. Αυτό εμφανίζεται περισσότερο στις παράλληλες γραμμές παρά στις ομοαξονικές γραμμές.



Σχήμα 2.5: Γραμμές μεταφοράς.



Σχήμα 2.6: Γεωμετρία γραμμής μεταφοράς.

Οι απώλειες λόγω ακτινοβολίας είναι δύσκολο να εκτιμηθούν και κανονικά μετρούνται αντί να υπολογίζονται. Αυξάνονται με την συχνότητα για οποιαδήποτε γραμμή μεταφοράς και τελικά τερματίζουν την χρησιμότητα της γραμμής για κάποια υψηλή συχνότητα. Η

θέρμανση αγωγού ή απώλεια I^2R , είναι ανάλογη του ρεύματος και επομένως αντιστρόφως ανάλογη με την χαρακτηριστική αντίσταση. Επίσης αυξάνεται με την συχνότητα λόγω του επιδερμικού φαινομένου². Η θέρμανση διηλεκτρικού είναι ανάλογη της τάσης που υπάρχει στο διηλεκτρικό και επομένως αντιστρόφως ανάλογη της χαρακτηριστικής αντίστασης για κάθε μεταδιδόμενη ισχύς. Αυξάνεται με την συχνότητα (για στερεές διηλεκτρικές γραμμές) γιατί βαθμιαία χειροτερεύουν οι ιδιότητες με την αύξηση της συχνότητας για οποιοδήποτε διηλεκτρικό μέσο. Ωστόσο για τον αέρα, η θέρμανση διηλεκτρικού παραμένει αμελητέα. Καθώς οι δυο τελευταίες απώλειες είναι ανάλογες του μήκους, συνήθως συνδυάζονται και δίνονται από τους κατασκευαστές σε διαγράμματα εκφρασμένα σε decibels ανά 100 μέτρα. Πρακτικά για ομοαξονικές γραμμές στο 1GHz, αυτές οι απώλειες ποικίλουν έως το πολύ 200 dB/100 m για στερεό διηλεκτρικό, εύκαμπτη γραμμή 6-mm, και τουλάχιστον 0.94 dB/100 m για άκαμπτη, με διηλεκτρικό τον αέρα γραμμή 127 mm.

Παράγοντας ταχύτητας. Η ταχύτητα του φωτός και όλων των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων εξαρτάται από το μέσο που μεταδίδονται. Είναι πολύ κοντά στα 3×10^8 m/s στο κενό και μικρότερη σε $v = \frac{v_c}{\sqrt{k}}$ όλα τα άλλα μέσα. Η ταχύτητα του φωτός σε ένα μέσο δίνεται ως :

Όπου:

v = ταχύτητα στο μέσο

v_c = ταχύτητα του φωτός στο κενό

k = διηλεκτρική σταθερά του μέσου (1 για το κενό και κοντά στο 1 για τον αέρα)

Ο παράγοντας ταχύτητας για μια διηλεκτρική ουσία, και επομένως για ένα καλώδιο, είναι ο λόγος μείωσης της ταχύτητας και έτσι δίνεται ως :

$$v_f = \frac{1}{\sqrt{k}}$$

² Επιδερμικό φαινόμενο (Φυσ.). Φαινόμενο που συνίσταται στην ανομοιογενή κατανομή της πυκνότητας του εναλλασσόμενου ηλεκτρικού ρεύματος στους συμπαγείς αγωγούς. Έχει παρατηρηθεί ότι όταν ένας αγωγός διαρρέεται από υψίσυχο εναλλασσόμενο ρεύμα, η πυκνότητα ρεύματος είναι μεγάλη στην επιφάνειά του, ενώ εσωτερικά είναι σημαντικά μικρότερη. Ουσιαστικά, τα κινούμενα φορτία διέρχονται από έναν εξωτερικό φλοιό, πάνω στην επιφάνεια του αγωγού, με συνέπεια την αύξηση της αντίστασης αυτού, όσο μεγαλώνει η συχνότητα του ρεύματος.

Οι διηλεκτρικές σταθερές των υλικών που χρησιμοποιούνται συνήθως στις γραμμές μεταφοράς ποικίλουν από 1.2 έως 2.8, για παράγοντες ταχύτητας από 0.9 έως 0.6. Επίσης, επειδή $v = f\lambda$ και f είναι σταθερά, το μήκος κύματος λ μειώνεται και αυτό με έναν λόγο που ισούται με τον παράγοντα ταχύτητας.

Σε κάθε γενική ομάδα ή τύπο γραμμών μεταφοράς υπάρχει μια εκπληκτική ποικιλία από διάφορα είδη, που χρησιμοποιούνται σε διάφορες εφαρμογές. Μια αναζήτηση σε ένα εγχειρίδιο κατασκευαστή είναι ιδιαίτερα ενθαρρυντική. Παρουσιάζει, όπως φαίνεται και στον πίνακα για έναν αριθμό γραμμών, τις διαφορετικές μορφές των γραμμών και συνδέσμων, μαζί με τα χαρακτηριστικά, τις βαθμολογίες και τις εφαρμογές τους. Οι γραμμές μπορεί να είναι άκαμπτες ή εύκαμπτες, εναέριες ή γεμάτες με διάφορα διηλεκτρικά, με λείους ή με ραβδώσεις αγωγούς ανάλογα με τις συνθήκες. Επίσης είναι διαθέσιμες διαφορετικές διαμέτροι και ιδιότητες. Οι εύκαμπτες γραμμές φυσικά πλεονεκτούν έναντι των άκαμπτων, καθώς μπορούμε να τις λυγίσουμε ώστε να ακολουθήσουν οποιαδήποτε φυσική μορφή και είναι πιο εύκολη η αποθήκευση και μεταφορά τους. Αντίθετα, οι άκαμπτες γραμμές μπορούν γενικά να μεταφέρουν πολύ μεγαλύτερη ισχύ, και είναι πιο εύκολο να χρησιμοποιήσουμε για διηλεκτρικό τον αέρα από το να τις γεμίσουμε με στερεό διηλεκτρικό. Αυτό είναι σημαντικό, ειδικά για μεγάλη ισχύ, καθώς όλα τα στερεά διηλεκτρικά έχουν σημαντικά μεγαλύτερες απώλειες από ότι ο αέρας, ειδικά όσο αυξάνονται οι συχνότητες.

TABLE 7-1 Selected Transmission Lines (Coaxial Unless Otherwise Stated)

IAN TYPE NO.	OUTSIDE DIAMETER, mm	Z_0 , ohms	DIELECTRIC MATERIAL	VELOCITY FACTOR	ATTENUATION PER METER, dB		AVERAGE POWER RATING, kW		NOTES
					@ 100 MHz	@ 1 GHz	@ 100 MHz	@ 1 GHz	
RG-58C/U	5.0	53.5	PE ^a	0.66	0.18	0.72	0.18	0.05	Small flexible
RG-213/U	10.3	52.0	PE ^a	0.66	0.08	0.28	0.68	0.19	Medium flexible
RG-218/U	22.1	52.0	PE ^a	0.66	0.03	0.14	2.0	0.50	(previously RG-8/U) Large LA ^b , HP ^c
RG-11A/U	10.5	75.0	PE ^a	0.66	0.08	0.28	0.68	0.19	(previously RG-17A/U) Medium flexible, video
RG-85A/U	39.8	75.0	PE ^a	0.66	0.03	0.14	2.0	0.50	Large LA ^b , HP ^c , armored
RG-55B/U	8.4	53.5	PE ^a	0.66	0.15	0.56	0.18	0.05	Small, microwave
RG-211A/U	18.5	50.0	PTFE ^d	0.70	0.10	0.39	22.0	5.5	(previously RG-5B/U) High temperature, semiflexible
(1/8 in)	22.2	50.0	PTFE ^d pins	0.81	0.01	0.04	4.8	1.6	Rigid Essentially air dielectric,
(3/16 in)	79.4	50.0	PTFE ^d pins	0.81	0.003	0.01	52	17	Rigid with PTFE ^d separating pins
(5/16 in)	155.6	75.0	PTFE ^d pins	0.81	0.001	0.005 ^e	150	46 ^f	Rigid at regular intervals
(12-50)	12.7	50.0	PTFE ^d spiral	0.81	0.03	0.09	24	7	Air dielectric, flexible
RG-57A/U	15.9	95.0	PE ^a	0.66					Twin conductor, flexible
		300.0	Foam PE ^a	0.82	0.04 ^g				Twin lead, flexible

^a Polyethylene.
^b Low attenuation.
^c High power.
^d Polytetrafluoroethylene (Teflon).
^e At 900 MHz.
^f Approximately.
^g Maximum frequency is 150 MHz.

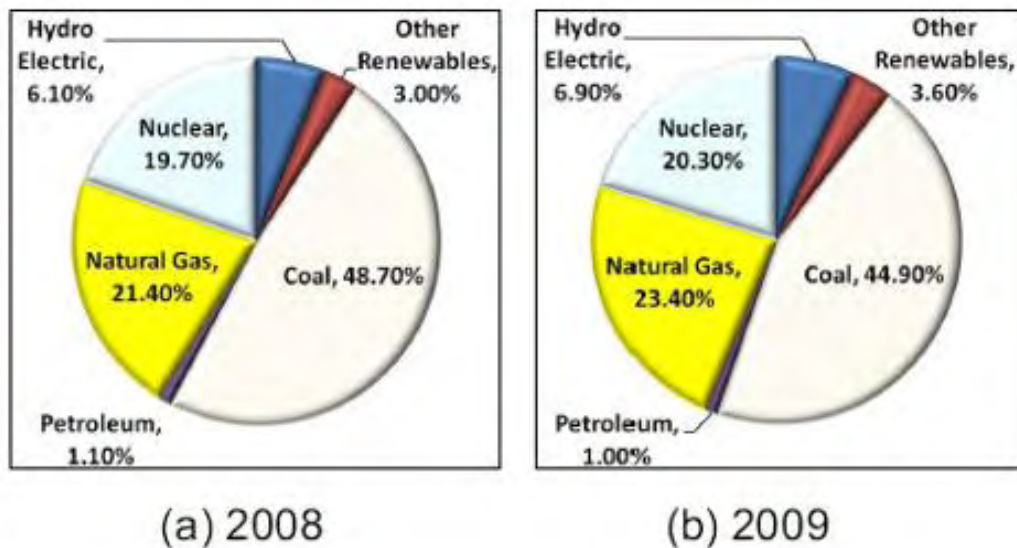
Πίνακας 2.1: Επιλεγμένες γραμμές μεταφοράς (ομοαξονικές αν δεν ορίζεται διαφορετικά).

Type	Characteristic impedance, (ohms)	Velocity factor	Outside dia. (in.)	Picofarads per foot
RG-8/U	52	0.66	0.41	29.5
RG-9/U	51	0.66	0.42	30.0
RG-11/U	75	0.66	0.41	20.6
RG-17/U	52	0.66	0.87	29.5
RG-58/U	54	0.66	0.20	28.5
RG-59/U	73	0.66	0.24	21.0
RG-174/U	50	0.66	0.10	30.8
hard line	50	0.81	0.50	25.0
(¹ / ₂ -inch)	75	0.81	0.50	16.7
hard line	50	0.81	0.75	25.0
(³ / ₄ -inch)	75	0.81	0.75	16.7

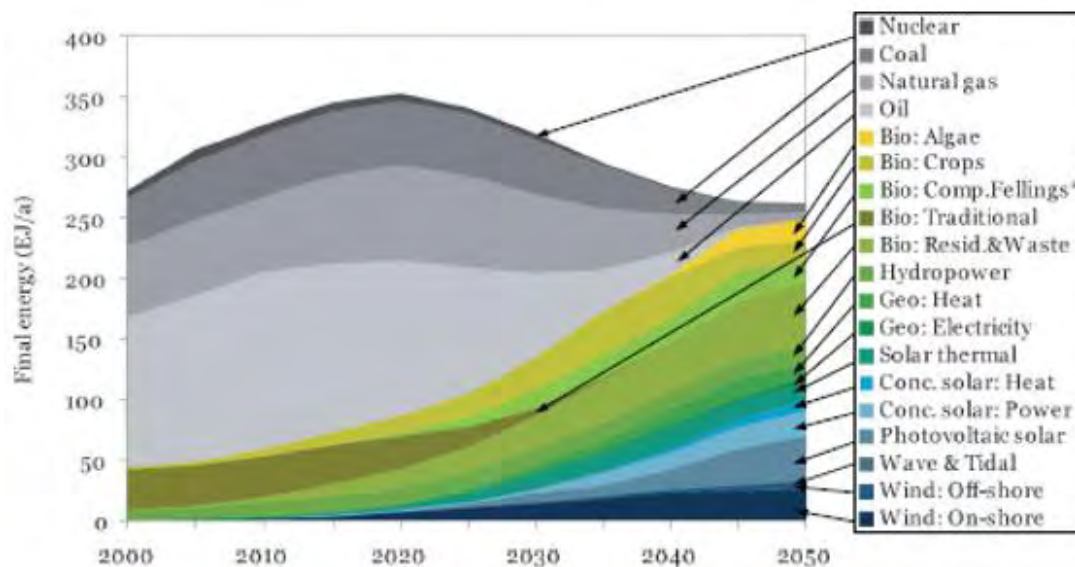
Πίνακας 2.2: Χαρακτηριστικά των προκατασκευασμένων ομοαξονικών καλωδίων.

2.3 Παραγωγή Ενέργειας

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι η διαδικασία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από άλλες μορφές ενέργειας, όπως το φυσικό αέριο, τον άνθρακα, την πυρηνική ενέργεια, τον ήλιο και τον άνεμο. Κατά τη διάρκεια των δεκαετιών του 1820 και στις αρχές του 1830, ο Βρετανός επιστήμονας Michael Faraday ανακάλυψε τις θεμελιώδεις αρχές της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να παραχθεί από την κίνηση ενός βρόχου από σύρμα ή ενός δίσκου από χαλκό ανάμεσα στους πόλους ενός μαγνήτη, μια αρχή που εξακολουθεί να χρησιμοποιείται ακόμη και σήμερα. Υπάρχουν πολλές πηγές ενέργειας που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Το **Σχήμα 2.7** δείχνει την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας των ΗΠΑ από διάφορες πηγές για τα έτη 2008 και 2009. Καθώς τα ορυκτά καύσιμα εξαντλούνται και γενικά τείνουν να γίνονται όλο και πιο ακριβά, αναμένεται ότι η ανανεώσιμη ενέργεια θα διαδραματίσουν ένα πολύ σημαντικό ρόλο στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στο μέλλον. Το **Σχήμα 2.8** δείχνει την προβλεπόμενη παγκόσμια ζήτηση-παραγωγή ενέργειας ανάλογα με την πηγή ενέργειας.



Σχήμα 2.7: Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ανάλογα με το είδος καυσίμου για τις Η.Π.Α.



Σχήμα 2.8: Τα παγκόσμια ενεργειακά αποθέματα ανάλογα με το είδος του καυσίμου.

Σε αντίθεση με την παραγωγή ενέργειας σε ένα παραδοσιακό δίκτυο ηλεκτροδότησης, η έξυπνη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας καθίσταται δυνατή, εάν υποστηρίζονται οι τεχνολογίες της αμφίδρομης ροής ηλεκτρικής ενέργειας και πληροφοριών. Ένα βασικό παράδειγμα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας η οποία στηρίζεται στο ευφυές δίκτυο θα οδηγήσει στην παραγωγή ενέργεια με καταναμημένο τρόπο (**DG-Distributed Generation**). Η καταναμημένη παραγωγή ενέργειας εκμεταλλεύεται την χρήση του συστήματος των καταναμημένων ενεργειακών πηγών (**DER-distributed Energy Resource**) (π.χ. φωτοβολταϊκά και μικρές ανεμογεννήτριες, στόλους ηλεκτρικών αυτοκινήτων), τα οποία είναι συχνά, μικρής κλίμακας ηλεκτρογεννήτριες (συνήθως έχουν εύρος μεταξύ των 3 KW έως 10 MW), προκειμένου να βελτιώσει την ποιότητα ισχύος και την αξιοπιστία του δικτύου. Για παράδειγμα, ένα μικρό-δίκτυο, είναι μια τοπική ομαδοποίηση των γεννητριών ηλεκτρικής ενέργειας και των φορτίων, τα οποία μπορούν να αποσυνδεθούν από το μακροδίκτυο έτσι ώστε οι καταναμημένες γεννήτριες να συνεχίσουν να τροφοδοτούν τους καταναλωτές σε αυτό το μικροδίκτυο χωρίς την ανάγκη λήψης ενέργειας από το εξωτερικό δίκτυο.

Έτσι, η διαταραχή στο μακροδίκτυο μπορεί να απομονωθεί και με αυτόν τον τρόπο να βελτιωθεί η ποιότητα παροχής της ηλεκτρικής ενέργειας. Ένα σύστημα ενέργειας που βασίζεται σε ένα μεγάλο αριθμό από μικρές αλλά αξιόπιστες καταναμημένες γεννήτριες ενέργειας, μπορεί να λειτουργήσει με την ίδια αξιοπιστία και με χαμηλότερο περιθώριο παραγωγικής ικανότητας από ένα σύστημα εξίσου αξιόπιστο με αυτό των μεγάλων γεννητριών.

Ωστόσο, η εφαρμογή των καταναμημένων γεννητριών (DG(s)) στην πράξη δεν είναι μια εύκολη υπόθεση και αυτό οφείλεται σε διάφορους παράγοντες. Κατ' αρχάς, οι καταναμημένη παραγωγή περιλαμβάνει μεγάλης κλίμακας υλοποιήσεις για την παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, όπως η ηλιακή και η αιολική, των οποίων η απόδοση υπόκειται, σε μεγάλες μεταβολές. Σε γενικές γραμμές, τα προφίλ παραγωγής που προκύπτουν από αυτές τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και τα προφίλ ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας είναι κάθε άλλο παρά ίσα. Ως εκ τούτου, η αποτελεσματική

αξιοποίηση της κατανεμημένης παραγωγής κατά τρόπον ώστε, να είναι εν γνώσει μας το γεγονός της διακύμανσης της απόδοσης τους από τις ανανεώσιμες πηγές, είναι σημαντικό. Δεύτερον, το σύνθητες λειτουργικό κόστος της κατανεμημένης παραγωγής για να παραχθεί μία μονάδα ηλεκτρικής ενέργειας, είναι υψηλό σε σύγκριση με αυτό της παραδοσιακής μεγάλης κλίμακας κεντροποιημένης ηλεκτροπαραγωγής με καύση. Λαμβάνοντας υπόψη τα δυνητικά οφέλη της κατανεμημένης παραγωγής για την ποιότητα της ηλεκτρικής ενέργειας, είναι απαραίτητη μια συστηματική έρευνα για το πώς να ισορροπήσουμε το υψηλό επενδυτικό κόστος και την αξιόπιστη παροχή ισχύος.

Αν και μπορούμε να δούμε μόνο μια περιορισμένη διείσδυση της κατανεμημένης παραγωγής ενέργειας στο σημερινό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, το μελλοντικό ευφυές δίκτυο αναμένεται να υιοθετήσει ένα μεγάλο αριθμό από κατανεμημένες γεννήτριες για να σχηματιστεί ένα πολύ πιο αποκεντρωμένο ηλεκτρικό σύστημα ενέργειας. Αυτό μπορεί να προκύψει από το παρόν σύστημα μέσα από τρία στάδια:

1. Με την προσαρμογή των κατανεμημένων γεννητριών στο ισχύον σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας.
2. Με την εισαγωγή ενός αποκεντρωμένου συστήματος από συνεργαζόμενες κατανεμημένες γεννήτριες στο κεντρικό-ποιημένο σύστημα παραγωγής.
3. Με την παροχή της περισσότερης ενέργειας από τις κατανεμημένες γεννήτριες και μόνο ένα περιορισμένο ποσό ενέργειας από την κεντρική παραγωγή.

Να σημειωθεί πως ο σχηματισμός ενός συστήματος για κατανεμημένη παραγωγή ενέργειας επιτρέπει στους χρήστες να αναπτύξουν τις δικές τους γεννήτριες. Επίσης η μεγάλη κλίμακας ανάπτυξη της κατανεμημένης παραγωγής θα αλλάξει την μεθοδολογία σχεδιασμού του υφιστάμενου παραδοσιακού δικτύου ηλεκτροδότησης, στο οποίο οι γεννήτριες είναι συνδεδεμένες με το δίκτυο μεταφοράς (βλέπε **Σχήμα 2.1**).

Η περαιτέρω δημιουργία και ανάπτυξη της κατανεμημένης παραγωγής οδηγεί σε μια νέα έννοια, πιο συγκεκριμένα μιλάμε για μία εικονική μονάδα παραγωγής ενέργειας (**VPP-Virtual Power Plant**), που διαχειρίζεται μια μεγάλη ομάδα από κατανεμημένες γεννήτριες συνολικής χωρητικότητας συγκρίσιμη με εκείνη μίας συμβατικής μονάδας ηλεκτροπαραγωγής. Αυτό το σύμπλεγμα των κατανεμημένων γεννητριών συλλογικά διαχειρίζεται από έναν κεντρικό ελεγκτή. Η συντονισμένη αυτή κατάσταση λειτουργίας προσφέρει επιπλέον οφέλη, όπως την δυνατότητα να προσφερθεί ηλεκτρική ενέργεια όταν έχουμε αιχμή φορτίου ή ηλεκτροπαραγωγή φορτίου εν γνώσει μας (**load-aware**) για ένα σύντομο χρονικό διάστημα. Μια τέτοιου είδους εικονική μονάδα παραγωγής ενέργειας (**VPP**) μπορεί να αντικαταστήσει μία συμβατική μονάδα παραγωγής ενέργειας, παρέχοντας παράλληλα υψηλότερη απόδοση και μεγαλύτερη ευελιξία. Να σημειωθεί ότι η μεγαλύτερη ευελιξία επιτρέπει στο σύστημα να αντιδρά καλύτερα στις διακυμάνσεις. Ωστόσο, μία εικονική μονάδα παραγωγής (**VPP**) είναι ένα πολύ σύνθετο σύστημα που απαιτεί περίπλοκες μεθόδους βελτιστοποίησης, ελέγχου και ασφαλούς επικοινωνίας.

Επιπλέον, πρόσφατα η ενσωμάτωση της τεχνολογίας οχήματος στο πλέγμα (**V2G-Vehicles-to-Grid**) (αναλύεται παρακάτω) και το εικονικό σύστημα παραγωγής ενέργειας (**VPP**) μπορούν να συνδυαστούν ώστε να προκύψει μίας νέας μορφής **VPP**.

2.4 Σύστημα Μεταφοράς

Από την πλευρά της μεταφοράς ενέργειας, παράγοντες όπως οι προκλήσεις που δημιουργούνται λόγω της υποδομής (οι αυξανόμενες απαιτήσεις φορτίου και η γρήγορη γήρανση των εξαρτημάτων) και οι καινοτόμες τεχνολογίες (νέα υλικά, προηγμένα ηλεκτρονικά ισχύος, και τεχνολογίες επικοινωνιών) προωθούν την ανάπτυξη των ευφυών δικτύων μεταφοράς. Το ευφυές δίκτυο ηλεκτροδότησης μπορεί να θεωρηθεί ως ένα ολοκληρωμένο σύστημα που λειτουργικά αποτελείται από τρεις διαδραστικές συνιστώσες: τα ευφυή κέντρα ελέγχου, τα ευφυή δίκτυα μεταφοράς, και τους ευφυείς υποσταθμούς.

Με βάση τα υπάρχοντα κέντρα ελέγχου, τα μελλοντικά ευφυή κέντρα ελέγχου θα επιτρέπουν πολλά νέα χαρακτηριστικά, όπως τις αναλυτικές δυνατότητες για ανάλυση, την παρακολούθηση, και την απεικόνιση του δικτύου. Εννοιολογικά, τα ευφυή δίκτυα μεταφοράς ενέργειας μπορούν να χτιστούν πάνω στην υφιστάμενη υποδομή ηλεκτροδότησης. Ωστόσο, η εμφάνιση νέων τεχνολογιών (π.χ. νέα υλικά, ηλεκτρονικά, αισθητήρια, επικοινωνιακά, υπολογιστές, και η επεξεργασία σήματος) μπορούν να βοηθήσουν τη βελτίωση της αξιοποίησης της ενέργειας, της ποιότητας ισχύος, και το σύστημα ασφαλείας και αξιοπιστίας, έτσι ώστε να προωθηθεί η ανάπτυξη μιας νέας αρχιτεκτονικής πλαισίου για τα δίκτυα μεταφοράς.

Το όραμα του ευφυούς υποσταθμού είναι χτισμένο πάνω στις ολοκληρωμένες τεχνολογίες αυτοματισμού των υποσταθμών. Αν και η βασική σύνθεση των υποσταθμών υψηλής τάσης δεν έχει αλλάξει πολύ όλα αυτά τα χρόνια, από την άλλη ο εξοπλισμός παρακολούθησης μετρήσεων και εξοπλισμός ελέγχου έχουν υποστεί μια ριζική αλλαγή τα τελευταία χρόνια. Στα κύρια χαρακτηριστικά ενός ευφυούς υποσταθμού θα πρέπει να περιλαμβάνονται η ψηφιοποίηση, ο αυτοματισμός, ο συντονισμός, και η αυτοίαση. Υποστηρίζοντας αυτές τις δυνατότητες, ένας ευφυής υποσταθμός είναι σε θέση να αντιδρά ταχέως και να παρέχει αυξημένη ασφάλεια στους χρήστες. Εν συντομία, με μια κοινή ψηφιοποιημένη πλατφόρμα, στο ευφυές δίκτυο μεταφοράς είναι δυνατό να επιτρέψει μεγαλύτερη ευελιξία όσον αφορά τον έλεγχο και τη λειτουργία, επιτρέποντας την ενσωμάτωση νοημοσύνης, και να προωθηθεί η ανθεκτικότητα και η βιωσιμότητα του πλέγματος.

2.5 Σύστημα Διανομής

Για το δίκτυο διανομής, το σημαντικότερο πρόβλημα είναι το πώς θα παραδοθεί η ενέργεια έτσι ώστε να επιτευχθεί η όσο τον δυνατόν καλύτερη εξυπηρέτηση των τελικών χρηστών. Ωστόσο, καθώς ακόμα περισσότερες καταναλωμένες γεννήτριες θα ενσωματώνονται με τον καιρό μέσα στο ευφυές καταναλωμένο δίκτυο, αυτό, από τη μία πλευρά, θα αυξήσει την ευελιξία του συστήματος για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και από την άλλη πλευρά, θα κάνει τον έλεγχο ροής της ενέργειας πολύ πιο περίπλοκο, που αυτό με τη σειρά του, καθιστά αναγκαία την έρευνα για ευφυέστερους μηχανισμούς διανομής της ενέργειας και παράδοσης στους τελικούς καταναλωτές.

Ένα ενδιαφέρον ερευνητικό έργο έγινε από τους **Takuno et al.** [61]. Ο Takuno et al., πρότεινε δύο ειδών συστήματα διανομής ενέργειας στο σπίτι, στα οποία οι πληροφορίες προστίθεται στην ηλεκτρική ενέργεια αυτή καθαυτή και ύστερα η ηλεκτρική ενέργεια διανέμεται σύμφωνα με τις πληροφορίες αυτές. Το πρώτο είναι ένα σύστημα κυκλωματικής μεταγωγής που βασίζεται στο σύστημα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας με εναλλασσόμενο

ρεύμα (ac), και το άλλο είναι ένα σύστημα κατανομής φορτίων συνεχούς ρεύματος (dc) μέσω πακέτων ενέργειας. Να σημειωθεί ότι το πακετάρισμα της ενέργειας είναι μια ενδιαφέρουσα, αλλά δύσκολη δουλειά, δεδομένου ότι απαιτεί συσκευές υψηλής μεταγωγής ισχύος. Έρευνες έχουν δείξει ότι η επαφή πύλης του καρβιδίου του πυριτίου στα τρανζίστορ επίδρασης πεδίου (**FET-Field Effect Transistor**) τους δίνει την δυνατότητα να μπορούν να διαμορφώσουν τα πακέτα ηλεκτρικής ενέργειας [60]. Ως εκ τούτου, το σύστημα που προτείνεται στο [61] έχει τη δυνατότητα ενός ευφυούς δρομολογητή ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα, το παρεχόμενο ρεύμα που προέρχεται από τις πηγές ενέργειας χωρίζεται σε διάφορες μονάδες ωφέλιμου φορτίου. Μια κεφαλίδα στην αρχή και μία στην «ουρά» συνδέονται με τη μονάδα (Unit) για να σχηματιστεί έτσι ένα πακέτο ηλεκτρικής ενέργειας. Όταν ο δρομολογητής λαμβάνει τα πακέτα, τα ταξινομεί σύμφωνα με τις διευθύνσεις στις κεφαλίδες και στη συνέχεια τα αποστέλλει στα αντίστοιχα φορτία. Με την χρήση πακέτων ενέργειας, η παρεχόμενη ενέργεια ρυθμίζεται εύκολα, ελέγχοντας απλά τον αριθμό των πακέτων που αποστάληκαν. Επιπροσθέτως, πολλές ηλεκτρικές συσκευές στο σπίτι οδηγούνται από dc ρεύμα και για αυτό τον λόγο έχουν ενσωματωμένα κυκλώματα μετατροπής ενέργειας για επιτευχθεί έτσι η μεταγωγή της ac τάση εισόδου. Με αυτόν τον τρόπο, η διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας που είναι βασισμένη στο dc ρεύμα είναι εφικτή. Αυτά τα συστήματα θα κάνουν τα συστήματα διανομής ισχύος στο σπίτι, πιο αποτελεσματικά και πιο εύκολα στον έλεγχο της ροής της ενέργειας.

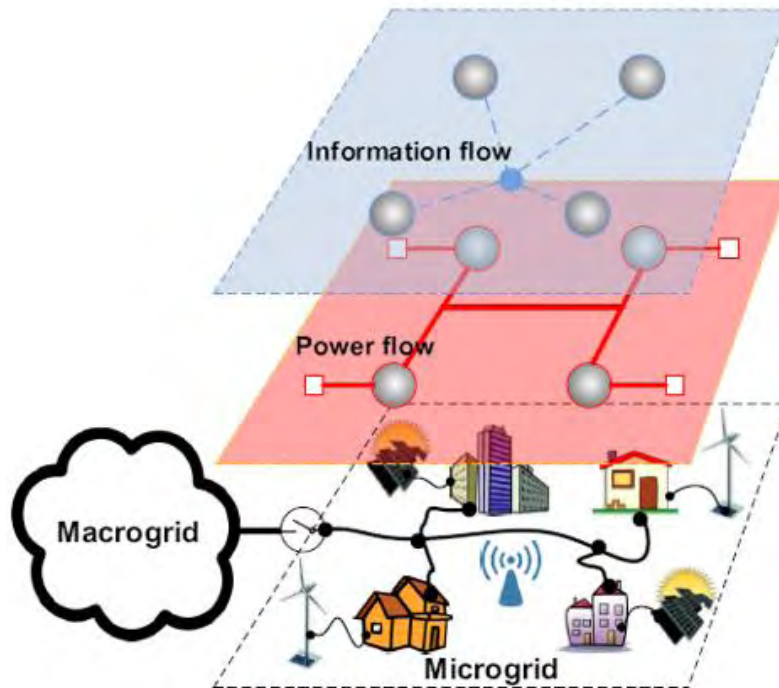
2.6 Μερικά Νέα Πρότυπα Δικτύων

Στο σημείο αυτό, περιγράφουμε δύο από τα πιο σημαντικά νέα παραδείγματα που έχουν να κάνουν με το δίκτυο, τα οποία επωφελούνται από τις τεχνολογίες του ευφυούς συστήματος ενέργειας και επίσης προωθούν την περαιτέρω ανάπτυξη του ευφυούς δικτύου αυτά είναι τα **μικροδίκτυα** και η **V2G-G2V τεχνολογία**. Αυτά τα δύο παραδείγματα θεωρούνται ευρέως ως τα σημαντικά συστατικά του μελλοντικού ευφυούς δικτύου. Σημειώστε ότι αυτά τα δύο παραδείγματα επίσης θα επωφεληθούν και από άλλες τεχνολογίες του ευφυούς δικτύου, αυτό θα μπορέσει να γίνει ξεκάθαρο καθώς θα το εξηγήσουμε στις παρακάτω ενότητες.

2.6.1 Μικροδίκτυα

Η καταναεμημένη παραγωγή προωθεί την ανάπτυξη ενός νέου προτύπου πλέγματος, που ονομάζεται μικροδίκτυο, το οποίο θεωρείται ως ένας από τους ακρογωνιαίους λίθους του μελλοντικού ευφυούς δικτύου. Προσπαθώντας να καλυφθούν τα ζητήματα που έχουν να κάνουν με την αποδοτική λειτουργία γεννητριών συμβατικών καυσίμων, την χρησιμοποίηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, την μείωση των απωλειών μεταφοράς και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας σε συνδυασμό με την αύξηση της αξιοπιστίας, τα μικροδίκτυα αποτελούν ένα μοντέλο έρευνας που μπορεί να συμβάλλει καθοριστικά στην εξέλιξη των ενεργειακών συστημάτων. Άρα η οργανική εξέλιξη του ευφυούς δικτύου αναμένεται να έρθει μέσω της ενσωμάτωσης των μικροδικτύων με μια απλή τοποθέτηση και στην άμεση λειτουργία τους.

Τα μικροδίκτυα είναι ηλεκτρικά συστήματα με τουλάχιστον μία κατακεντρωμένη παραγωγή (**DG-Distributed Generation**) και φορτία, που έχουν την ικανότητα να λειτουργούν αυτόνομα και απομονωμένα (**island**) εντός του δικτύου διανομής αν χρειασθεί. Επειδή η παραγωγή ορισμένων DG είναι αβέβαιη απαιτείται η χρήση

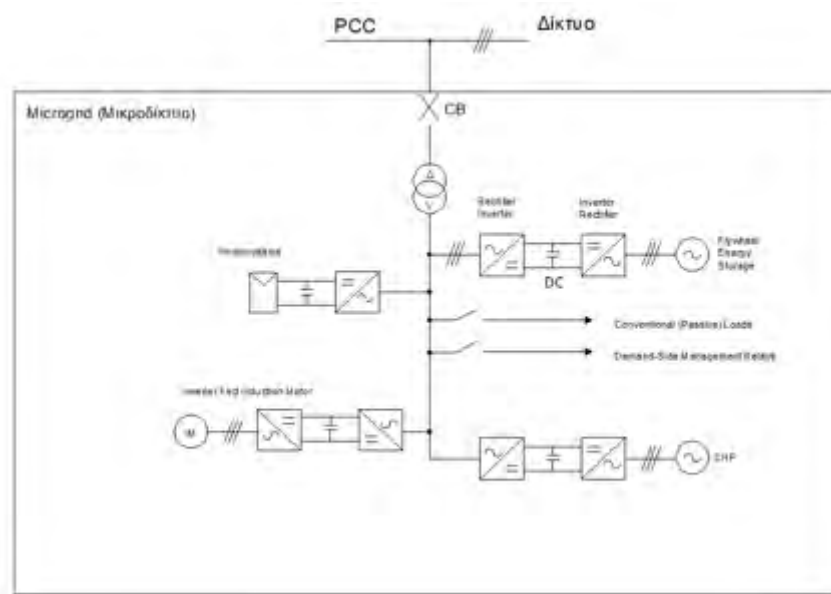


Σχήμα 2.9: Ένα παράδειγμα μικροδικτύου: Το χαμηλότερο στρώμα δείχνει την φυσική δομή του μικροδικτύου, συμπεριλαμβάνοντας τέσσερα κτήρια, δύο αιολικές γεννήτριες, δύο ηλιακά πάνελ και ένα ασύρματο σημείο πρόσβασης (AP-Access Point). Τα κτήρια αυτά και οι γεννήτριες ανταλλάσσουν ενέργεια μέσω γραμμών ισχύος (powerlines). Επιπλέον ανταλλάσσουν πληροφορίες μέσω ενός ασύρματου δικτύου ενός σημείου πρόσβασης (AP). Το επάνω μπλε στρώμα παρουσιάζει την ροή πληροφορίας εντός του μικροδικτύου και το μεσαίο κόκκινο στρώμα την ροή ισχύος.

κατακεντρωμένες μονάδες αποθήκευσης ενέργειας. Μέσα στα μικροδίκτυα τα φορτία και οι πηγές μπορούν να συνδεθούν και να αποσυνδεθούν καθώς και το μικροδίκτυο να αποσυνδέεται από το υπόλοιπο ηλεκτρικό δίκτυο με την ελάχιστη διαταραχή στα τοπικά φορτία. Αυτή η εκούσια τοπικότητα των παραγωγών και των φορτίων έχει τη δυνατότητα να μας παρέχει μια υψηλότερη τοπική αξιοπιστία από αυτήν που παρέχεται από το σύστημα ενέργειας στο σύνολό του. Να σημειωθεί ότι παρόλο που οι χρήστες δεν θα αποκτούν ενέργεια από έξω, όταν θα βρίσκονται στην τοπική κατάσταση του μικροδικτύου, θα μπορούν να ανταλλάσσουν ακόμα, κάποιες πληροφορίες με το μακροδίκτυο (**macrogrid**). Για παράδειγμα, μπορεί να θέλουν να γνωρίζουν την κατάσταση του μακροδικτύου (**macrogrid**) έτσι ώστε να μπορούν να αποφασίσουν κατά πόσο θα πρέπει να επανασυνδεθούν με το μακροδίκτυο (**macrogrid**), τότε χρειάζεται συγχρονισμός μεταξύ τους πριν κλείσει ο διακόπτης για να αποκτήσουν ενέργεια από την εταιρεία παροχής ηλεκτρικού ρεύματος. Το **Σχήμα 2.9** δείχνει ένα παράδειγμα για το πώς μοιάζει ένα μικροδίκτυο.

Ένα τυπικό μικροδίκτυο αποτελείται από διάφορες μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, συνολικής ισχύος μέχρι λίγα MW. Ο σχεδιασμός του μικροδικτύου είναι

ανεξάρτητος από το κεντρικό δίκτυο, ωστόσο όπως προαναφέραμε μπορεί να υπάρχει διασύνδεση με αυτό, για ανταλλαγή ενέργειας.



Σχήμα 2.10: -Τυπικό παράδειγμα μικροδικτύου, με φωτοβολταϊκά, γεννήτρια συμπαραγωγής ηλεκτρισμού-θερμότητας, κινητήρα επαγωγής και σφόνδυλο υψηλής αδράνειας για την αποθήκευση της ενέργειας, όλα ελεγχόμενα με ηλεκτρονικούς αντιστροφείς ισχύος. Το μικροδίκτυο συνδέεται με το κεντρικό δίκτυο μέσω μετασχηματιστή.

Τυπικές πηγές ενός μικροδικτύου είναι οι γεννήτριες ντίζελ ή φυσικού αερίου, συμπαραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και ζεστού νερού (γεννήτριες, μικροστρόβιλοι), οι ανεμογεννήτριες, τα φωτοβολταϊκά, οι κυψέλες καυσίμου, οι γεωθερμικοί και οι ηλιοθερμικοί σταθμοί, τα μικρά υδροηλεκτρικά, οι μονάδες που χρησιμοποιούν ως πρώτη ύλη βιομάζα, βιοντίζελ, και οποιαδήποτε άλλη πηγή ενέργειας. Νέες μελέτες όπως αυτές του **Lawrence Berkeley National Laboratory** αποδεικνύουν πως και τα ηλεκτρικά οχήματα ή στόλοι ηλεκτρικών οχημάτων (EVs) μπορούν να συμπεριληφθούν στα μικροδίκτυα ως καταναλωτές παραγωγής παρέχοντας οφέλη τόσο οικονομικά όσο περιβαλλοντικά έχοντας σχεδόν μηδενική παραγωγή ρύπων CO₂.

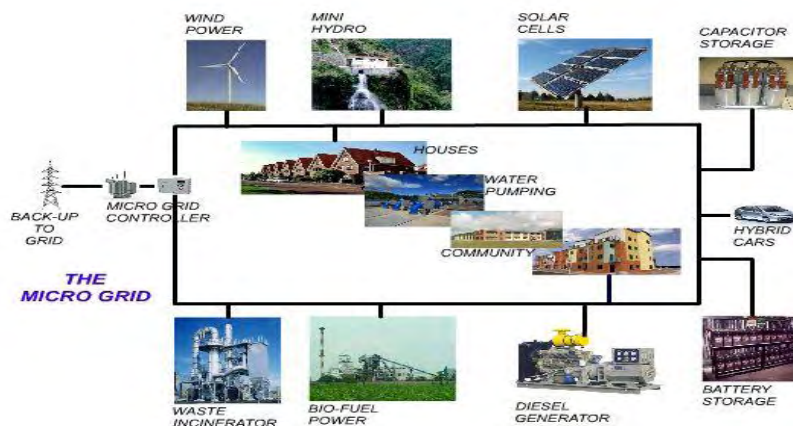
Ένα μικροδίκτυο μπορεί να εγκατασταθεί εκεί όπου υπάρχει διαθέσιμη μια από τις παραπάνω φυσικές πηγές ενέργειας και να καλύπτει τις καταναλώσεις της περιοχής που εγκαθίσταται. Η κλίμακα του μικροδικτύου ποικίλει, από μια οικία που χρησιμοποιεί ένα υβριδικό σύστημα φωτοβολταϊκών και γεννήτριας ντίζελ ή βιοκαυσίμων ακόμα ίσως και κάποιου τύπου EV, ένα νοσοκομείο που χρησιμοποιεί κυψέλες καυσίμου ή κάποιον ειδικά διαμορφωμένο χώρο στάθμευσης ηλεκτρικών οχημάτων σε συνδυασμό με κάποια στατική αποθήκευση της ενέργειας (π.χ. συσσωρευτών) για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και ζεστού νερού, μέχρι και μια πόλη που τροφοδοτείται από σταθμούς βιομάζας, γεννήτριες ντίζελ και αιολικά πάρκα.

Μια συνδυασμένη χρήση των νέων τεχνολογιών συμπαραγωγής και ανανεώσιμων πηγών, θα μπορούσε ίσως να κάνει την τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας στο μικροδίκτυο ανταγωνιστική αυτής των κεντρικών δικτύων. Η αξιόπιστη λειτουργία ενός μικροδικτύου,

συνεπάγεται εκτός από την κάλυψη των απαιτήσεων ενεργού και αέργου ισχύος, και τη συνεχή ρύθμιση της τάσης και της συχνότητας αυτού. Παράλληλα θα πρέπει να περιλαμβάνει όλες τις διατάξεις προστασίας από σφάλματα, βραχυκυκλώματα ή διαρροές.

2.6.1.1 Σύνδεση του Μικροδικτύου στο Κεντρικό Δίκτυο

Ένα μικροδίκτυο μπορεί να έχει δυνατότητα διασύνδεσης με το κεντρικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Σε μια τέτοια παραλληλισμένη λειτουργία είναι δυνατή η ανταλλαγή ενέργειας. Παροχή πλεονάζουσας ενέργειας σ' αυτό, ή απορρόφηση ενέργειας όταν οι μονάδες του μικροδικτύου δεν επαρκούν να καλύψουν τη ζήτηση. Ακόμη σε περίπτωση μόνιμα διασυνδεδεμένης λειτουργίας είναι δυνατή η αξιόπιστη τροφοδότηση του μικροδικτύου από τις δικές του μονάδες σε περίπτωση κατάρρευσης του κεντρικού δικτύου. Δεδομένης της μικρής ισχύος των περισσότερων μονάδων ενός μικροδικτύου, η παραγωγή και διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας είναι προτιμότερο να γίνεται στην χαμηλή τάση καθώς δεν απαιτείται η μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις. Το μέγεθος δηλαδή των μονάδων παραγωγής είναι ουσιαστικά αυτό που καθορίζει την στάθμη λειτουργίας. Το μέγεθός του συνολικότερα, μονάδων παραγωγής και φορτίων, καθορίζει εξάλλου και τον τρόπο διασύνδεσής του με άλλα μικροδίκτυα ή με το κεντρικό δίκτυο, στην μέση ή στην χαμηλή τάση. Προφανώς μεγάλη ισχύς απαιτεί διασύνδεση στη μέση τάση. Πρέπει να τονιστεί ότι σε περιπτώσεις παραλληλισμένης λειτουργίας με το κεντρικό δίκτυο, αυτό που πρωτίστως επιδιώκεται είναι να μην προκαλεί



Σχήμα 2.11: Σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης, το μικροδίκτυο θα λειτουργεί ως ηλεκτρικά απομονωμένο και ανεξάρτητο του κύριου δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας, και θα μπορεί να εξυπηρετήσει τα κρίσιμα φορτία με την τοπική παραγωγή.

το μικροδίκτυο προβλήματα. Η τάση θα πρέπει να ανταποκρίνεται ποιοτικά στις προδιαγραφές του δικτύου, το ποσό της απορροφούμενης ενέργειας δεν θα πρέπει να ξεπερνά τις απαιτήσεις που έχει ένας τυπικός καταναλωτής.

Ένας άλλος τρόπος με τον οποίο θα μπορούσε να λειτουργήσει παράλληλα το μικροδίκτυο με το κεντρικού δικτύου είναι ρυθμιζόταν το έτσι ώστε να μπορεί να υποστηρίξει το κεντρικό δίκτυο όταν υπάρχει ανάγκη ρύθμισης, π.χ. να παρέχει ή να απορροφά ενεργό ή άεργο ισχύ όταν απαιτείται, ακόμη και σε μικρά χρονικά διαστήματα. Στην δεύτερη αυτή περίπτωση απαιτείται προφανώς και μια μορφή επικοινωνίας μεταξύ των κέντρων ελέγχου μικροδικτύου (**Microgrid Controllers**) και του κεντρικού δικτύου. Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζονται όλα τα στοιχεία που απαρτίζουν ένα σύγχρονο μικροδίκτυο καθώς επίσης και η διασύνδεση του με το κύριο δίκτυο μέσω ενός κέντρου ελέγχου μικροδικτύου το οποίο είναι υπεύθυνο για την τήρηση των προδιαγραφών για τις διάφορες υπηρεσίες που παρέχονται από και προς το κάθε δίκτυο.

Και πάλι νέες τεχνολογίες υπόσχονται πολλά στην διαχείριση των μεταβατικών φαινομένων. Για την κάλυψη υψηλών αιχμών ζήτησης (π.χ. εκκίνηση μεγάλων κινητήρων, ψυγείων) και την αποθήκευση περισευούμενης ενέργειας, ένα μικροδίκτυο, ιδιαίτερα όταν βρίσκεται σε απομονωμένη λειτουργία, μπορεί να χρησιμοποιεί ενέργεια που αποθηκεύεται σε υπερπυκνωτές, μηχανές υψηλής στρεφόμενης αδράνειας (flywheels), συσσωρευτές ή με τη μορφή δυναμικής ενέργειας μέσω συμπιεστών αέρα ή αντλιοσταμειωτικών συστημάτων. Η τελευταία δε τεχνική μπορεί να εφαρμοστεί σε περιοχές όπου αιολικά ή ηλιακά πάρκα βρίσκονται κοντά σε θάλασσα ή λίμνη, οπότε και αποθηκεύουν την περισευούμενη ενέργεια που παράγουν, αντλώντας νερό σε ταμειυτήρες υψηλότερης στάθμης. Στη συνέχεια όταν χρειάζεται ενέργεια οι αντλητικοί κινητήρες χρησιμοποιούνται ως γεννήτριες, παρέχοντας ισχύ στο μικροδίκτυο. Πρέπει να τονιστεί ότι ένας πολύπλοκος έλεγχος ενός τέτοιου συστήματος με την παρούσα διαθέσιμη τεχνολογία απαιτεί την χρησιμοποίηση ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος, για τη διασύνδεση των περισσότερων πηγών ενέργειας του μικροδικτύου με τους ζυγούς. Είτε η παραγόμενη ισχύς είναι διαρκώς μεταβαλλόμενη όπως στην περίπτωση των φωτοβολταϊκών και ανεμογεννητριών, είτε ελεγχόμενη όπως των υδροηλεκτρικών σταθμών και των ντιζελογεννητριών, η διοχέτευση αυτής μέσω ηλεκτρονικών μετατροπέων κάνει εφικτό τον έλεγχο των πιο σημαντικών μεγεθών αυτής, δηλαδή της τάσης και της συχνότητας, μέσω της ροής ενεργού και άεργου ισχύος. Το βασικότερο στοιχείο ενός μικροδικτύου είναι συνήθως ένας ηλεκτρονικός αντιστροφέας ισχύος, ο οποίος ελέγχει και το ισοζύγιο ισχύος στο μικροδίκτυο. Αυτό μπορεί να γίνεται είτε με την οδήγηση μιας ελεγχόμενης γεννήτριας, είτε με την διαχείριση συσσωρευτών ή μικροστροβίλων, είτε με τον έλεγχο των ηλεκτρονικών ισχύος των άλλων μικρομονάδων παραγωγής ενέργειας.

2.6.2 Τεχνολογίες V2G-G2V και τα EVs ως μέρος του δικτύου

Καθώς τα ορυκτά καύσιμα μειώνονται και γενικά τείνουν να γίνουν ακριβότερα, τα πλήρως ηλεκτρικά οχήματα ή τα plug-in (απλής τοποθέτησης και άμεσης λειτουργίας) υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα θα γίνονται όλο και πιο δημοφιλή. Στη συνέχεια, χρησιμοποιούμε τον όρο EV (Electric Vehicle) ή αλλιώς ηλεκτρικό όχημα για να παρουσιάσουμε και τα δύο, το πλήρες ηλεκτρικό όχημα και το plug-in υβριδικό ηλεκτρικό όχημα. Η ευρεία χρήση και ανάπτυξη των ηλεκτρικών οχημάτων (EVs) μας οδηγεί σε δύο νέες έννοιες, πιο συγκεκριμένα στην έννοια του πλέγματος προς τα οχήματα (**G2V - Grid-to-Vehicle**) και στην έννοια των οχημάτων προς στο πλέγμα (**V2G-Vehicle-to-Grid**).

Στο G2V, τα ηλεκτρικά οχήματα συχνά κινούνται με αποθηκευμένη ηλεκτρική ενέργεια, αρχικά από μια εξωτερική πηγή ενέργειας, και για αυτό τον λόγο πρέπει να φορτίζονται οι συσσωρευτές μετά την εξάντληση και την πλήρη αποφόρτιση τους. Αυτή η τεχνολογία είναι εννοιολογικά πολύ απλή. Ωστόσο, από τη σκοπιά του πλέγματος, ένα από τα πιο σημαντικά ζητήματα της χρήσης της ιδέας του G2V είναι ότι η λειτουργία φόρτισης μας οδηγεί σε ένα σημαντικό νέο φορτίο, που επωμίζεται το ήδη υπάρχον δίκτυο διανομής. Το οποίο μπορεί να επιβαρυνθεί αισθητά με τη μελλοντική μεγάλη διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων, επηρεάζοντας έτσι αρνητικά τον ενεργειακό και αναπτυξιακό προγραμματισμό τους. Στη βιβλιογραφία, πολλές εργασίες έχουν μελετήσει τον αντίκτυπο που θα έχουν τα ηλεκτρικά οχήματα για το ηλεκτρικό δίκτυο.

Από την βιβλιογραφία επισημαίνεται ότι η υπάρχουσα υποδομή του δικτύου διανομής, στο Βορειοδυτικό Ειρηνικό είναι σε θέση να υποστηρίξει ένα 50% της διείσδυσης των ηλεκτρικών οχημάτων με ένα προφίλ ευφούς φόρτισης στα 120V, το οποίο ισοδυναμεί με περίπου 21.6% του στόλου οχημάτων ελαφρού τύπου. Αυτό το επίπεδο της διείσδυσης υπερβαίνει την γνωστή μας ικανότητα των υφιστάμενων πόρων παραγωγής, που είναι περίπου 18%. Τονίζονται επίσης ότι σοβαρά προβλήματα (π.χ. σημαντική υποβάθμιση της απόδοσης του συστήματος ισχύος και της αποτελεσματικότητας του, και ακόμη και υπερφόρτωση του) μπορούν να προκύψουν από την υψηλού επιπέδου διείσδυση των ασυντόνιστων φορτίων (και κατ'επέκταση των φορτίσεων).

Μία λύση για να μετριαστεί ο αντίκτυπος των ηλεκτρικών οχημάτων για το δίκτυο είναι η βελτιστοποίηση του προφίλ φόρτισης τους. Με άλλα λόγια, θα πρέπει να κρατηθεί η ανώτατη ζήτηση ισχύος (αιχμιακή ζήτηση φορτίου) όσο το δυνατόν χαμηλότερη, λαμβάνοντας υπόψη την επιπλέον ενέργεια που καταναλώνεται από τη φόρτιση των οχημάτων. Αυτό μπορεί να γίνει με μία συντονισμένη λειτουργία φόρτισης των διαφορετικών ηλεκτρικών οχημάτων, έτσι ώστε να μην χρειάζεται να φορτίζονται όλα μαζί την ίδια χρονική στιγμή. Για παράδειγμα, έχει δείχθει ότι η συντονισμένη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων μπορεί να βελτιώσει τις απώλειες ισχύος και τις διακυμάνσεις της τάσης εξομαλύνοντας την μέγιστη ισχύ.

Στο V2G, τα ηλεκτρικά οχήματα μπορούν να προσφέρουν ένα νέο τρόπο για την αποθήκευση και την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας. Το V2G δίνει την δυνατότητα στα ηλεκτρικά οχήματα που είναι ενεργά, να μπορούν να επικοινωνούν με το δίκτυο ώστε να είναι σε θέση να δίνουν ηλεκτρική ενέργεια στο δίκτυο, όταν είναι σταθμευμένα και συνδεδεμένα με το δίκτυο. Έτσι η ένταξη των EVs στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας διατηρεί ή και βελτιώνει ακόμα, τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του δικτύου και ταυτόχρονα παρέχει πλεονέκτημα στους χρήστες και κίνητρα αγοράς για την απόκτηση όλο και μεγαλύτερου μέρους της μηχανοκίνητης αγοράς.

Για την κάλυψη των απαιτήσεων αυτών, έχουν αναπτυχθεί δύο τεχνολογίες. Πρώτη είναι η **μονόδρομη V2G λειτουργία (Unidirectional V2G)** τεχνολογία και η δεύτερη και πιο σύνθετη, η **αμφίδρομη V2G λειτουργία (Bidirectional V2G)**.

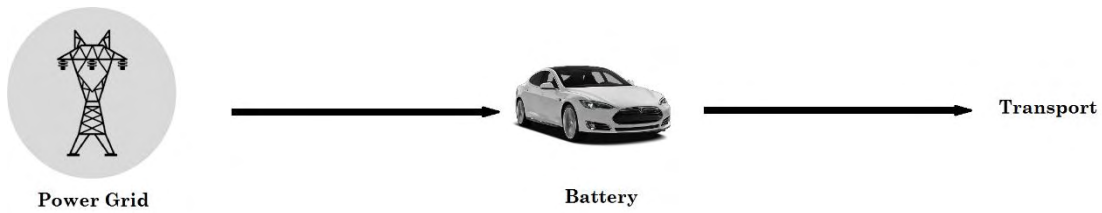
1. Στην **μονόδρομη V2G λειτουργία (UniV2G)** η ροή ισχύος γίνεται αποκλειστικά από τα EVs προς το δίκτυο. Τα EVs με αυτό τον τρόπο πλησιάζουν πιο πολύ την συμβατική θεώρηση, με την ειδοποιός διαφορά ότι η φόρτιση τους γίνεται προγραμματισμένα παρέχοντας επικουρικές υπηρεσίες στο δίκτυο, όπως είναι η **κάτω ρύθμιση (Regulation Down)** και η **άνω ρύθμιση (Regulation Down)**.

Στην **κάτω ρύθμιση**, ο συσσωρευτής του EV αυξάνει την ισχύ φόρτισης του πάνω από το βέλτιστο σημείο λειτουργίας (**POP**) έτσι ώστε να φαίνεται στο δίκτυο μεγαλύτερο φορτίο από το προκαθορισμένο βέλτιστο. Η διαδικασία για την κάτω ρύθμιση πραγματοποιείται άμεσα, από τον Διαχειριστή του Δικτύου (**TSO**) με σήματα ελέγχου. Όλο αυτό λαμβάνει χώρα στην περίπτωση που η παραγωγή μας είναι μεγαλύτερη της ζήτησης.

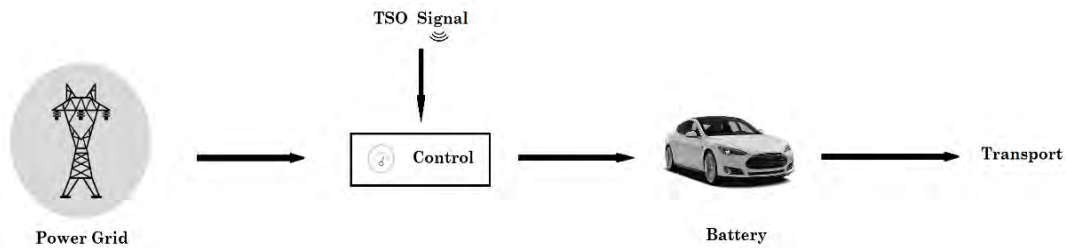
Στον αντίποδα, η **άνω ρύθμιση** πραγματοποιείται ως εξής. Ο συσσωρευτής του οχήματος EV μειώνει την ισχύ φόρτισης του κάτω από το βέλτιστο σημείο λειτουργίας (**POP**) έτσι ώστε το δίκτυο να εμφανίζεται μικρότερο φορτίο. Επειδή είναι μονόδρομη V2G λειτουργία, τα EVs δεν μπορούν να δώσουν ισχύ στο δίκτυο άρα το max επίπεδο κάτω ρύθμισης είναι τα 0MW, με άλλα λόγια αποκοπή τους από το δίκτυο. Η διαδικασία πραγματοποιείται με αντίστοιχο τρόπο όπως και η **άνω ρύθμιση**, με σήματα ελέγχου από τον Διαχειριστή Δικτύου με την διαφορά ότι συμβαίνει όταν η παραγωγή μας είναι μικρότερη της ζήτησης.

2. Στην **αμφίδρομη V2G λειτουργία (BiV2G)** η ροή ισχύος γίνεται αμφίδρομα μεταξύ των EVs και του δικτύου. Τα EVs έχουν την δυνατότητα να φορτίζουν και να εκφορτίζουν προγραμματισμένα παρέχοντας επικουρικές υπηρεσίες στο δίκτυο χωρίς να υπάρχει επιβάρυνση των χρηστών στις καθημερινές διαδρομές τους. Όπως και η **UniV2G**, έτσι και η **αμφίδρομη V2G λειτουργία** προσφέρει και **κάτω ρύθμιση** αλλά και **άνω ρύθμιση** καθώς και **στρεφόμενη εφεδρεία (Spinning Reserve)** σαν επικουρικές υπηρεσίες. Για την **κάτω ρύθμιση** ισχύουν ότι και παραπάνω.

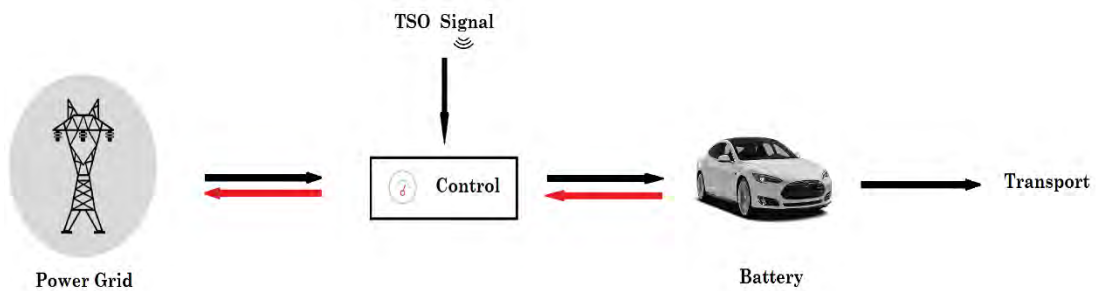
Στην **άνω ρύθμιση**, ο συσσωρευτής του EV λειτουργεί ως πηγή τροφοδοτώντας με ισχύ το δίκτυο. Το μέγιστο επίπεδο άνω ρύθμισης θα είναι αρνητικό και θα εξαρτάται από την **στάθμη φόρτισης (State Of Charge – SOC)** του συσσωρευτή-πηγή. Αν για παράδειγμα, η μπαταρία μας είναι φορτισμένη πλήρως μπορούμε να έχουμε την μέγιστη εκφόρτιση, ενώ αν η μπαταρία μας είναι άδεια τότε το μέγιστο επίπεδο θα είναι τα 0MW, που σημαίνει, αποκοπή από το δίκτυο. Επιπλέον προσφέρεται η δυνατότητα για **στρεφόμενη εφεδρεία**. Δηλαδή η ικανότητα παραγωγής επιπλέον ισχύος σε περίπτωση που κριθεί αναγκαία από τις απαιτήσεις του δικτύου. Η τιμή της υπολογίζεται από την αφαίρεση της ισχύος **άνω ρύθμισης** από την παραγόμενη ισχύ σε κάποια χρονική στιγμή t.



Σχήμα 2.12: Ροή ενέργειας κατά τη συμβατική θεώρηση.



Σχήμα 2.13: Μονόδρομη V2G λειτουργία (UniV2G).



Σχήμα 2.14: Αμφίδρομη V2G λειτουργία (BiV2G).

Παρόλα αυτά η μονής κατεύθυνσης V2G λειτουργία θεωρείται ότι θα εφαρμοσθεί πρώτη καθώς για την έγχυση ενέργειας πίσω στο δίκτυο απαιτείται επιπρόσθετος εξοπλισμός (κυρίως ηλεκτρονικά ισχύος), ο οποίος δεν υφίσταται στα ήδη υπάρχοντα EVs της αγοράς αλλά και ούτε προβλέπεται στα μοντέλα που πρόκειται να κυκλοφορήσουν σύντομα. Επίσης, πολλοί καταναλωτές μπορεί να μην είναι πρόθυμοι να επιτρέψουν την αποφόρτιση των συσσωρευτών τους για σκοπούς διαφορετικούς από αυτόν της μετακίνησής τους, ή να ανησυχούν για τη φθορά του συσσωρευτή τους, μέσω της συχνής φόρτισης και εκφόρτισης του, κατά την αμφίδρομη V2G λειτουργία.

Επομένως, ένας λογικός τρόπος αντιμετώπισης των παραπάνω προκλήσεων είναι η εφαρμογή πρώτα της μονής κατεύθυνσης V2G λειτουργίας, κατά την οποία οι καταναλωτές θα αρχίσουν να αποδέχονται την καινούργια ιδέα και τεχνολογία αλλά και οι υπόλοιποι εμπλεκόμενοι φορείς, όπως οι αγορές και οι διαχειριστές των εκάστοτε συστημάτων, θα αποκτήσουν την απαραίτητη εμπειρία, ώστε να είναι προετοιμασμένοι για την ευρύτερη διάδοση της V2G λειτουργίας αμφίδρομης ροής ισχύος.

2.6.2.1 Τρόποι αξιοποίησης των EVs στο δίκτυο

Η χρησιμότητα της αξιοποίησης της V2G λειτουργίας, για την καλύτερη εκμετάλλευση και των EVs έρχεται να επαληθευτεί από έρευνα που αποκαλύπτει ότι **στις ΗΠΑ** το αυτοκίνητο οδηγείται μόνο μία ώρα την ημέρα κατά μέσο όρο. Με άλλα λόγια, αυτά τα αυτοκίνητα είναι σταθμευμένα τις περισσότερες φορές χωρίς να κάνουν τίποτα.

Υπάρχουν τρεις σημαντικές ρυθμίσεις σχετικά με τον τρόπο διανομής:

1. Ένα υβριδικό όχημα ή ένα κυψελών καυσίμου, παράγει ενέργεια από αποθηκευμένα καύσιμα, χρησιμοποιεί τη γεννήτρια του για να παραγάγει ενέργεια σαν υποστήριξη για τις ώρες που υπάρχει υψηλή χρήση ηλεκτρική ενέργειας. Τα οχήματα αυτά χρησιμεύουν ως ένα καταναμημένο σύστημα παραγωγής ενέργειας από συμβατικά ορυκτά καύσιμα ή από υδρογόνο.
2. Μία φορτισμένη μπαταρία ή ένα υβριδικό όχημα το οποίο είναι συνδεδεμένο στο δίκτυο μπορεί να χρησιμοποιεί την πλεονάζουσα χωρητικότητα της επαναφορτιζόμενης μπαταρίας για να παραγάγει ενέργεια σαν υποστήριξη για τις ώρες που υπάρχει υψηλή χρήση ηλεκτρική ενέργειας. Αυτά τα οχήματα στη συνέχεια μπορούν να επαναφορτιστούν κατά τη διάρκεια των ωρών που το φορτίο αιχμής έχει ολοκληρωθεί, εννοείται με χαμηλότερη τιμολόγηση. Τα οχήματα αυτά χρησιμεύουν ως ένα καταναμημένο αποθηκευτικό σύστημα μέσω των μπαταριών, για την αποθήκευση της ενέργειας.
3. Ένα ηλιακό όχημα το οποίο χρησιμοποιεί την πλεονάζουσα παραγωγική ικανότητα για την παροχή ενέργειας στο δίκτυο ηλεκτροδότησης, όταν η μπαταρία είναι φορτισμένη πλήρως. Τα οχήματα αυτά χρησιμεύουν ως ένα μικρό καταναμημένο σύστημα από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Τα οχήματα που θα είναι εν τέλει ικανά να υποστηρίξουν τη V2G λειτουργία πρέπει να πληρούν τρεις ακόμα προϋποθέσεις:

1. να διαθέτουν κατάλληλη σύνδεση με το δίκτυο, που να επιτρέπει τη ροή ενέργειας από το όχημα στο δίκτυο
2. να μπορούν να δέχονται ένα σήμα ελέγχου από το δίκτυο και να είναι σε θέση να ανταποκρίνονται σε αυτό σε πραγματικό χρόνο
3. να διαθέτουν ένα ψηφιακό μετρητικό σύστημα, ικανό για ακριβείς μετρήσεις

2.6.2.2 Τι ισχύει σήμερα για V2G από ερευνητικής σκοπιάς

Μέχρι στιγμής, οι ερευνητές επικεντρώθηκαν στη σύνδεση μεταξύ των μπαταριών και του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας, την εγκυρότητα του συστήματος V2G, τις εφικτές υπηρεσίες, τα περιβαλλοντικά και τα κοινωνικά οφέλη τις νέες αγορές και την υλοποίηση του συστήματος. Επί του παρόντος υπάρχουν επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας που έχουν επιχειρήσει δοκιμές πάνω στην τεχνολογία του V2G. Για παράδειγμα, η Pacific Gas and Electric Company προσπάθησε να μετατρέψει έναν αριθμό από απλά υβριδικά, εταιρικά

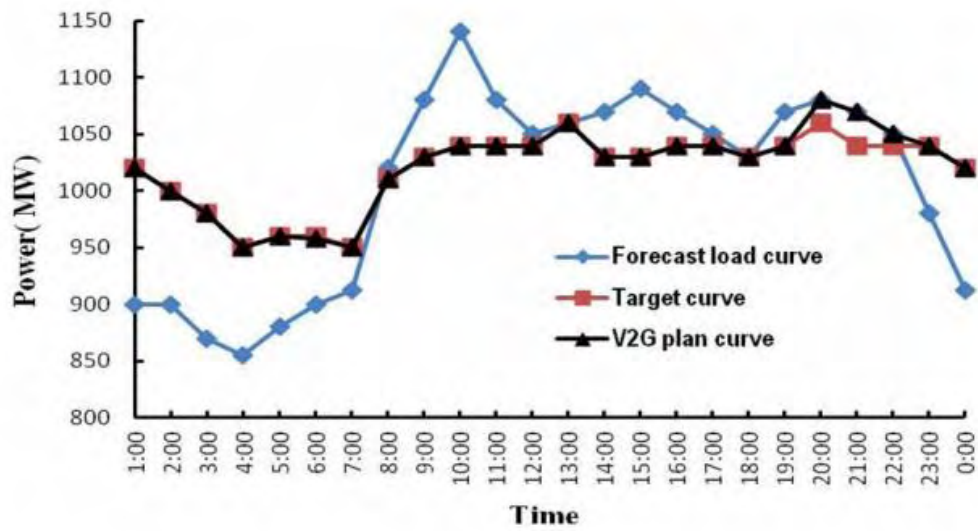
Prius της Toyota σε υβριδικά που μπορούν να συνδεθούν με το V2G σύστημα της πανεπιστημιούπολης της Google. Η Xcel Energy εκτέλεσε την πρώτη μεγάλη εθνική δοκιμή ενός συστήματος V2G με ενεργοποιημένα ηλεκτρικά οχήματα στο Boulder του Κολοράντο, ως μέρος του διεθνώς αναγνωρισμένου έργου SmartGridCity.

Σημειώστε ότι το G2V και το V2G δεν είναι πλήρως διαχωρισμένες έννοιες στο όραμα ενός ευφυούς δικτύου. Για παράδειγμα, η δυνατότητα του V2G με ενεργά ηλεκτρικά οχήματα χρησιμοποιείται συχνά για να παρέχει τη απαραίτητη ενέργεια που χρειάζεται για να βοηθήσει στην εξισορρόπηση φορτίων μέσω "ξυρίσματος αιχμής" (peak shaving) (αποστολή ενέργειας πίσω στο πλέγμα όταν η ζήτηση είναι υψηλή), αλλά και για την «πλήρωση κοιλάδας» (Valley filling) (φόρτιση όταν η ζήτηση είναι χαμηλή). Ως εκ τούτου, ένα βασικό ερώτημα είναι το πώς μπορούν να καθοριστούν οι κατάλληλες ώρες φόρτισης και αποφόρτισης όλης της ημέρας. Μια απόπειρα να επιλυθεί το πρόβλημα ήταν χρησιμοποιηθεί ένας δυαδικός αλγόριθμος βελτιστοποίησης πλήθους σωματιδίων για να αναζητηθούν βέλτιστες λύσεις που μεγιστοποιούν το κέρδος για τους ιδιοκτήτες οχημάτων ενώ ικανοποιεί τους περιορισμούς τόσο του συστήματος όσο και των ιδιοκτητών των οχημάτων. Να σημειωθεί ότι η βελτιστοποίησης πλήθους σωματιδίων είναι ένας επαναληπτικός στοχαστικός βέλτιστος αλγόριθμος. Η αναζήτηση λύσης που πραγματοποιείται έχει στοχαστική φύση που επιτρέπει στον αλγόριθμο να υπερπηδήσει τα προβλήματα μη γραμμικότητας, μη διαφόρισης και ασυνέχειας.

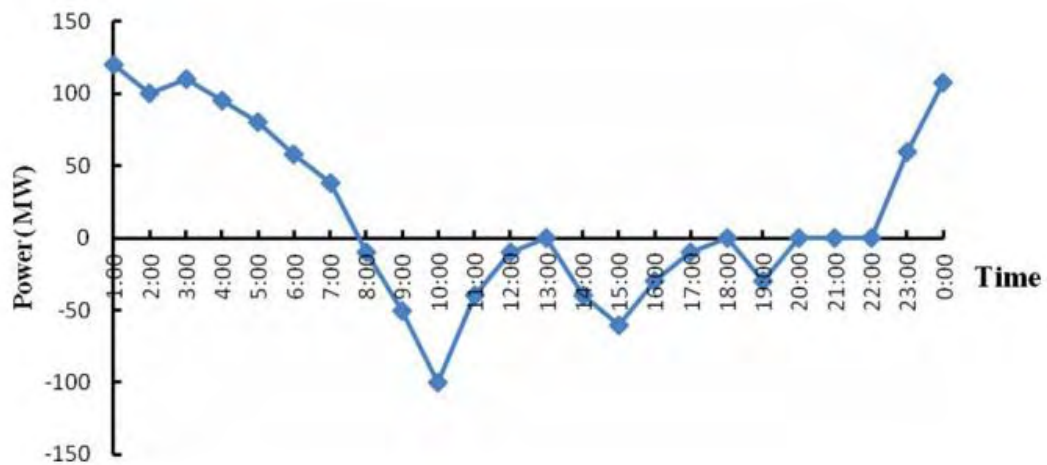
2.6.2.3 V2G και Peak Shaving

Η ζήτηση ηλεκτρική ενέργειας κατά τη διάρκεια μιας ημέρας μπορεί να αυξηθεί δραματικά, ειδικά κατά τις ζεστές μέρες του καλοκαιριού, όταν δηλαδή γίνεται ευρεία χρήση συσκευών, όπως τα κλιματιστικά. Αυτές οι περίοδοι, συχνά απαιτούν την παραγωγή ενέργειας από ειδικές μονάδες, γνωστών και ως peakers για την κάλυψη ακριβώς του φορτίου αιχμής. Οι μονάδες αυτές, εξ' ορισμού, λειτουργούν μόνο περιστασιακά και για το λόγο αυτό, δεν μπορούν να είναι οικονομικά βιώσιμες εάν δεν πωλούν την ενέργεια που παράγουν με υψηλή τιμή.

Για το λόγο αυτό, είναι πολύ σημαντικό για τους σχεδιαστές και τους διαχειριστές των ηλεκτρικών δικτύων να μπορέσουν να μειώσουν τις αιχμές του φορτίου. Το peak shaving αποσκοπεί στην ομαλοποίηση της καμπύλης του φορτίου, κατά την οποία μπορούν να προκύψουν σημαντικά οικονομικά οφέλη. Ένας τρόπος να γίνει αυτή η ομαλοποίηση είναι μέσω της στρατηγικής απόκριση ζήτησης (**demand response**), όπου οι τελικοί καταναλωτές εν προκειμένω μειώνουν τη ζήτηση ενέργειας σε συγκεκριμένες ώρες, λόγω συνήθως κάποιου οικονομικού κινήτρου. Αυτή τη λογική μπορούν να ακολουθήσουν και τα ηλεκτρικά οχήματα. Προφανώς το peak shaving από τα EVs είναι δυνατό μόνο κατά τη BiV2G λειτουργία



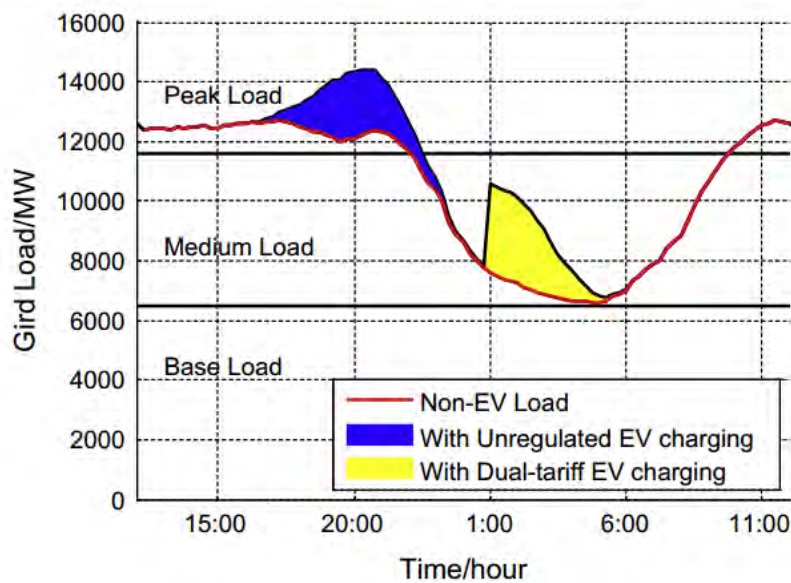
Σχήμα 2.15: Σύγκριση του φορτίου ηλεκτρικής ενέργειας πριν και μετά την το peak shaving.



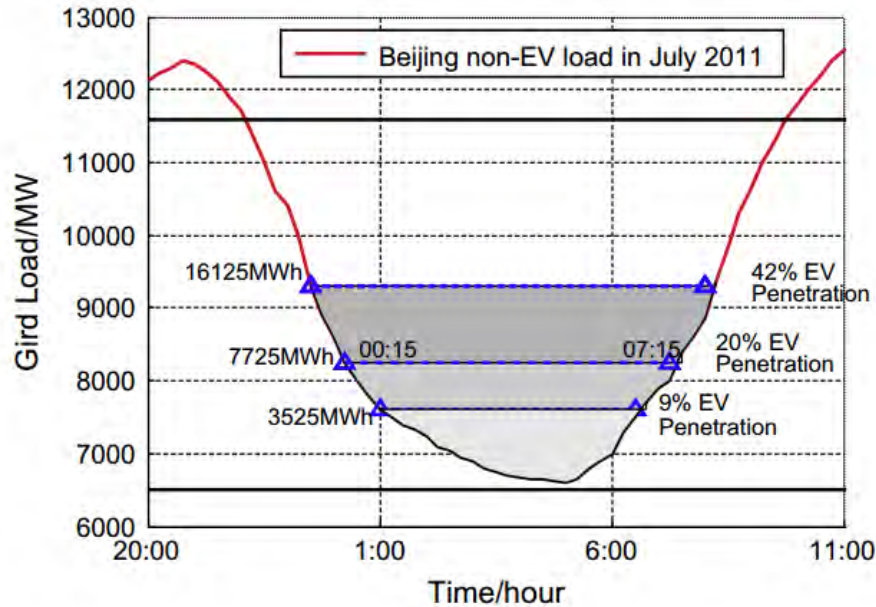
Σχήμα 2.16: Κατανομή της ηλεκτρικής ενέργειας των EVs στο V2G. Όπου θετική τιμή σημαίνει φόρτιση και η αρνητική τιμή σημαίνει εκφόρτισης.

2.6.2.4 V2G και Valley filling

Εάν στόλος ηλεκτρικών οχημάτων, ο οποίος λειτουργεί ως φορτίο είναι αρκετά μεγάλος, μπορεί να παίξει σημαντικό ρόλο όσον αφορά το **valley filling**. Το valley filling είναι η εξομάλυνση του φορτίου του δικτύου έτσι ώστε να είναι όσο τον δυνατόν σταθερότερο, νε σκοπό την ευκολότερη εξυπηρέτηση των αναγκών από το δίκτυο. Η σωστή κατανομή των φορτίσεων των EVs εξαλείφουν τις μεγάλες διακυμάνσεις στην ζήτηση. Αυτό είναι αρκετά σημαντικό για το ηλεκτρικό δίκτυο, καθώς η εξυπηρέτηση ενός σταθερού και επίπεδου φορτίου είναι πολύ πιο εύκολη και απλή υπόθεση από ότι ενός κυμαινόμενου. Το **valley filling** μπορεί να επιτευχθεί και χωρίς V2G λειτουργία, απλώς με κάποιο κίνητρο νυχτερινής χρέωσης. Βέβαια, τα αποτελέσματα είναι πολύ καλύτερα κατά το V2G, καθώς τότε οι ιδιοκτήτες των οχημάτων θα έχουν μεγαλύτερο κέρδος, αφού ταυτόχρονα θα παίρνουν μέρος και στις αγορές επικουρικών υπηρεσιών.



Σχήμα2.17: Επιπτώσεις της φόρτισης EV στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας από δύο αυτόνομες στρατηγικές φόρτισης.



Σχήμα 2.18: Τέλεια καμπύλη φόρτισης πλήρωσης του valley-filling διαπερνάται από διαφορετικές αναλογίες εισχώρησης EVs.

2.6.2.5 Περιορισμοί στην υιοθέτηση της V2G τεχνολογίας

Σταδιακή υιοθέτηση της BiV2G τεχνολογία

Αν και η V2G λειτουργία απασχολεί την επιστημονική κοινότητα έντονα τα τελευταία χρόνια, πρόκειται για μια ιδέα που βρίσκεται σε πολύ πρώιμο στάδιο και μάλλον θα αργήσει να την δούμε να εφαρμόζεται στην πράξη σε μαζικό-εμπορικό επίπεδο. Για να φτάσουμε στην υιοθέτηση αυτής της τεχνολογίας, έτσι όπως την μελετήσαμε, πρέπει πρώτα να περάσουμε από τα 3 προηγούμενα στάδια όσον αφορά στη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων.

1. Το πρώτο στάδιο αναφέρεται στη **μη ελεγχόμενη φόρτιση (dumb charging)**, όπου ο οδηγός συνδέει το όχημα του και το φορτίζει οποτεδήποτε αυτό είναι δυνατό μέχρι να γεμίσει εντελώς το συσσωρευτή του, αδιαφορώντας για τις συνέπειες.
2. Το δεύτερο στάδιο προβλέπει τη **χειροκίνητη ελεγχόμενη φόρτιση**, όπου θα υπάρχει μια επλεκτικότητα του οδηγού για την ώρα ή/και του ρυθμού της φόρτισης, ο οποίος θα θέλει να εκμεταλλευτεί μειωμένες χρεώσεις ενέργειας.
3. Κατά το τρίτο στάδιο της **ελεγχόμενης** ή αλλιώς **έξυπνης φόρτισης (controlled/smart charging)**, οι εξελιγμένες δυνατότητες επικοινωνίας και ελέγχου του EV από την πλευρά του δικτύου θα του επιτρέπουν να φορτίζουν το κάθε όχημα ανάλογα με τις ανάγκες και τους στόχους του ικανοποιώντας παράλληλα τις ανάγκες του δικτύου αλλά και τις οδηγικές απαιτήσεις του ιδιοκτήτη.

Μετά την επιτυχή δοκιμασία όλων των παραπάνω σταδίων, θα έχει έρθει η ώρα για την υιοθέτηση της **BiV2G** λειτουργίας με την αμφίδρομη ροή ισχύος. Αυτό διότι, υπάρχουν

πολλά θέματα που πρέπει να αντιμετωπιστούν προτού καταστεί δυνατή η εφαρμογή του **BiV2G** τεχνολογίας.

Τροχοπέδη η φθορά στους συσσωρευτές των EVs

Το βασικότερο από αυτά τα θέματα, που πρέπει να αντιμετωπιστούν είναι η αυξημένη φθορά στους συσσωρευτές των οχημάτων, που προκαλεί η V2G λειτουργία. Εάν ένα όχημα συμμετέχει μόνο στις αγορές επικουρικών υπηρεσιών, τότε η φθορά στο συσσωρευτή του είναι μικρότερη από ότι αν συμμετέχει και στην αγορά ενέργειας για την κάλυψη της αιχμής. Αυτό εξηγείται αν σκεφτούμε ότι πρώτον η στρεφόμενη εφεδρεία καλείται πολύ σπάνια και δεύτερον ότι στη ρύθμιση η τελική ενέργεια που εκφορτίζεται προσεγγίζει το μηδέν, εφόσον μακροπρόθεσμα τα ποσά που ζητούνται για επάνω και κάτω ρύθμιση είναι συμμετρικά. Αντίθετα, για την εξυπηρέτηση του φορτίου αιχμής απαιτείται μεγάλο ποσό ενέργειας να εκφορτιστεί από το συσσωρευτή, γεγονός που αυξάνει το βάθος εκφόρτισης του (**depth of discharge/DOD**). Κοινή διαπίστωση για όλες τις διαφορετικές τεχνολογίες του συσσωρευτή είναι ότι υπάρχει αυξημένη φθορά με την αύξηση του βάθους εκφόρτισης.

Τα αυξημένα κόστη που προέρχονται από τη φθορά των συσσωρευτών μπορεί να καταστήσουν τη V2G λειτουργία μη οικονομικά βιώσιμη ή ελάχιστα επικερδή, ώστε να ασχοληθούν οι ιδιοκτήτες των οχημάτων. Οι μέρες που αναμένεται κέρδος για τον ιδιοκτήτη μειώνονται, όσο το κόστος λόγω της φθοράς μεγαλώνει. Σήμερα, για έναν τέτοιο συσσωρευτή το κόστος αντικατάστασης του είναι περίπου στα 5.000\$. Παρόλα αυτά, προβλέπεται ότι στο μέλλον το κόστος αυτό, θα μειωθεί με την εξέλιξη της τεχνολογίας των συσσωρευτών και τη μαζική παραγωγή τους, εάν τα ποσοστά διείσδυσης των ηλεκτρικών οχημάτων είναι μεγάλα.

Οι απώλειες ενέργειας κατά την φόρτιση & εκφόρτιση

Σημαντικό θέμα που φέρει βελτίωσης είναι η ελαχιστοποίηση του ποσοστού των απωλειών, από την βασική λειτουργία των EVs που δεν είναι άλλη, από την φόρτιση και εκφόρτιση. Παραδείγματος χάρη, εάν το δίκτυο θέλει να αποθηκεύσει 5 kWh σε έναν συσσωρευτή και να τις χρησιμοποιήσει αργότερα, πρέπει να λάβει υπόψιν του, ότι θα υπάρξουν απώλειες πρώτον κατά τη μετατροπή της AC τάσης σε DC, δεύτερον κατά την αποθήκευση αυτής της ενέργειας και τρίτον για την εκ νέου μετατροπή της DC τάσης του συσσωρευτή σε AC του δικτύου. Όλη αυτή η διαδικασία με τις υπάρχουσες τεχνολογίες υπολογίζεται ότι έχει μια απόδοση της τάξης του 70 με 80%. Επομένως από τις αρχικές 5 kWh το δίκτυο θα πάρει πίσω 3,5 με 4 kWh, γεγονός που ίσως να κάνει ασύμφορη την V2G λειτουργία.

Πολυπλοκότητα στην επικοινωνία

Η ανάγκη για συνεννόηση πολλών διαφορετικών παραγόντων με συχνά αντικρουόμενα οικονομικά συμφέροντα και μάλιστα σε πραγματικό χρόνο και από διαφορετικές τοποθεσίες, εισάγει μεγάλη πολυπλοκότητα στην όλη διαδικασία. Η πρόκληση αυτή αναμένεται να αντιμετωπιστεί κατά ένα βαθμό με την ύπαρξη των **aggregators** (θα γίνει αναφορά παρακάτω), που θα λειτουργούν ως μεσάζοντες μεταξύ των διαφόρων παραγόντων και σιγά σιγά θα αποκτήσουν την απαραίτητη τεχνογνωσία και εμπειρία.

Πρόβλεψης της οδηγικής συμπεριφοράς

Ένας δευτερεύον παράγοντας, που μπορεί να πλήξει την αξιοπιστία της V2G λειτουργίας είναι η απρόβλεπτη συμπεριφορά των οδηγών. Αν και κάτι τέτοιο δεν παίζει σημαντικό ρόλο, όταν μιλάμε για μεγάλο αριθμό ηλεκτρικών οχημάτων είναι απαραίτητο να γίνουν στατιστικές μελέτες για τις ώρες χρήσης των οχημάτων, για τα διανυόμενα χιλιόμετρα ή για τα έκτακτα και μη προγραμματισμένα ταξίδια. Μία σαφής υπεροχή για την υιοθέτηση της V2G λειτουργίας έχουν στόλοι οχημάτων με πιο αυστηρά προγραμματισμένα ταξίδια, όπως πχ τα οχήματα στο parking ενός αεροδρομίου, τα σχολικά ή τα λεωφορεία σταθερής τροχιάς.

Πιθανές αναβαθμίσεις στο δίκτυο

Ένα ζήτημα που χρίζει μελέτης, για την ασφαλή εφαρμογή της V2G λειτουργίας είναι οι πιθανές αναβαθμίσεις και ενισχύσεις που θα πρέπει να γίνουν στο δίκτυο, αυξάνοντας έτσι το συνολικό κόστος, που σχετίζεται έμμεσα με το V2G. Όταν χιλιάδες ή εκατομμύρια ηλεκτρικά οχήματα συνδεδεμένα στη χαμηλή τάση του δικτύου διανομής στέλνουν πίσω ενέργεια, πρέπει να μελετηθεί η επίδραση τους στα διάφορα στοιχεία του δικτύου, όπως πχ οι μετασχηματιστές.

Κορεσμός της αγοράς

Ακόμα και αν όλα τα παραπάνω θέματα καταφέρουν να λυθούν και η V2G λειτουργία καταφέρει να εφαρμοσθεί επιτυχώς, υπάρχει το αναπόφευκτο πρόβλημα του κορεσμού της αγοράς. Συγκεκριμένα, εξετάζεται η επιρροή, που θα είχε μια μεγάλη διείσδυση ηλεκτρικών οχημάτων στην αγορά της ενέργειας για την κάλυψη της αιχμής και στις αγορές των επικουρικών υπηρεσιών της ρύθμισης και της στρεφόμενης εφεδρείας. Βασική αρχή της ανταγωνιστικής οικονομίας είναι ότι ***εάν η προσφορά ενός προϊόντος αυξηθεί πολύ, χωρίς την ανάλογη αύξηση της ζήτησης για το προϊόν αυτό, η τιμή πώλησης του θα μειωθεί***. Εν προκειμένω, όσο μεγαλύτερα είναι τα επίπεδα εισχώρησης των ηλεκτρικών οχημάτων στη V2G αγορά, τόσο μεγαλύτερες ποσότητες ενέργειας και ισχύος θα είναι διαθέσιμες για τις αγορές, χωρίς ανάλογη αύξηση της ζήτησης. Αποτέλεσμα λοιπόν είναι η αναμενόμενη μείωση των τιμών και συνεπώς των εσόδων και της απόσβεσης κεφαλαίου ανά ηλεκτρικό όχημα, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει ακόμα και σε μη βιωσιμότητα της λειτουργίας.

2.6.2.6 Ο Ρόλος του aggregator

V2G λειτουργία χωρίς την ύπαρξη aggregator

Το πιο απλό μοντέλο διαβάθμισης του δικτύου είναι αυτό, στο οποίο το κάθε όχημα αποτελεί έναν ανεξάρτητο λογαριασμό, με την τοπική εταιρία διανομής ενέργειας. Απαραίτητη προϋπόθεση που λαμβάνεται υπόψη είναι ότι το όχημα διαθέτει την δυνατότητα τηλεμετρίας μαζί με τις κατάλληλες διασυνδέσεις που απαιτούνται, ώστε να λαμβάνει σήματα απευθείας από τον TSO και να αποκρίνεται σε αυτά ταχύτατα, για να μπορεί να προσδιορίσει την θέση, να κάνει εκτίμηση της ισχύος που μπορεί να παράσχει, και αν είναι συνδεδεμένο σε κάποιο σταθμό φόρτισης ή όχι.

Η επιχειρηματική αξιοποίηση αυτού του σχήματος, προϋποθέτει την ύπαρξη ενός αριθμού IP για κάθε όχημα ή κάποιου αντίστοιχου μοναδικού αναγνωριστικού και αντίστοιχα ενός ID για κάθε σταθμό φόρτισης. Τέλος, κάνουμε την υπόθεση πως κάθε τέτοιο όχημα φέρει ενσωματωμένο μετρητή ώστε να καταγράφει το χρόνο και τη ροή ισχύος.

Για όση, λοιπόν, ώρα το όχημα είναι σταθμευμένο και συνδεδεμένο σε κάποιο σταθμό, έχει τη δυνατότητα να συμμετέχει στις διάφορες αγορές και να ανταποκρίνεται σε αυτές, όταν κάτι τέτοιο ζητείται από το διαχειριστή. Κατά την αποσύνδεση του οχήματος, ο ενσωματωμένος μετρητής καταγράφει το ποσό της ισχύος που απαιτήθηκε συνολικά από το δίκτυο. Και περιοδικά (προσυμφωνημένο χρονικό διάστημα) η συνολική αξία των υπηρεσιών που προσέφερε το όχημα, θα αποδίδεται στον ιδιοκτήτη του.

Παρόλο που το μοντέλο αυτό του δικτύου δείχνει απλό, έχει κάποιους εγγενείς περιορισμούς, που δεν θα του επιτρέψουν να κλιμακώσει.

Καθώς ο αριθμός των EVs θα μεγαλώνει με την πάροδο του χρόνου, ο διαχειριστής του δικτύου θα είναι υποχρεωμένος να επιβλέπει συνεχώς τη σύνδεση και την αποσύνδεση συνεχώς αυξανόμενων οχημάτων, με μοναδικές απαιτήσεις και ιδιαιτερότητες το καθένα και να τα ανταμείβει ανάλογα την κάθε ενέργεια με την εκάστοτε τιμή, γεγονός που το κάνει, ένα σύνθετο και δύσκολο επικοινωνιακό και εποπτικό έργο.

Μια άλλη όψη του ίδιου νομίσματος αποτελεί η V2H λειτουργία (**Vehicle to Home**) η οποία είναι μία παραλλαγή της παραπάνω περίπτωσης. Στη V2H λειτουργία, το όχημα δεν συνεισφέρει ούτε ενεργειακά, ούτε και με την παροχή υπηρεσιών στο δίκτυο, αλλά αντίθετα προσφέρει ενέργεια στο σπίτι, εννοώντας τον τελικό οικιακό καταναλωτή.

Η φιλοσοφία αυτής της παραλλαγής έχει ως εξής: έστω ότι το συμβόλαιο μεταξύ προμηθευτή και τελικού καταναλωτή προβλέπει νυχτερινό τιμολόγιο, είναι δυνατόν το όχημα να φορτίζει το συσσωρευτή του κατά τις ώρες, που η τιμή της ενέργειας είναι χαμηλή και να αποδίδει αυτήν την ενέργεια για την κάλυψη των αναγκών του ίδιου του σπιτιού κατά τις ώρες, που η τιμή αυτή είναι υψηλή. Παρόλο που η λειτουργία αυτή του οχήματος, ως οικιακή γεννήτρια καταφέρνει να μειώσει τα έξοδα του σπιτιού για ηλεκτρική ενέργεια, θα πρέπει να επιβλέπεται και να ελέγχεται από ένα σύστημα διαχείρισης ενέργειας, κάτι που θα απαιτεί μια μεγαλύτερη επένδυση. Η βιωσιμότητα αυτής ιδέας εκρέει από τις ώρες που είναι παρκαρισμένο το όχημα στο σπίτι, από την φθορά του συσσωρευτή, αλλά και από το ποσοστό κέρδους που προκύπτει από την τιμή της

ενέργειας κατά το νυχτερινό τιμολόγιο σε σχέση με την τιμή κατά τη διάρκεια της υπόλοιπης ημέρας.

V2G λειτουργία με την ύπαρξη aggregator

Σύμφωνα με αυτό το μοντέλο, το οποίο είναι πιο πιθανό στην υλοποίηση του, άμεση σχέση με τις αγορές δεν θα έχει ο ιδιοκτήτης του οχήματος αλλά ο aggregator. Ο aggregator θα αποτελέσει τον μεσάζοντα, μεταξύ του διαχειριστή του δικτύου και του τελικού καταναλωτή. Έτσι ο aggregator επωμίζεται να συγκεντρώνει τα προφίλ των οχημάτων που έχει υπό τον έλεγχο του, ώστε να δημιουργεί ένα αθροιστικό προφίλ μιας εικονικής μονάδας παραγωγής ενέργειας (**Cluster**). Το προφίλ θα καθορίζεται από τον αριθμό των συνδεδεμένων και ικανών οχημάτων για V2G υπηρεσίες για κάθε ώρα της ημέρας και από το τι περιορισμοί υπάρχουν όσον αφορά στη διαθέσιμη ισχύ και ενέργεια. Επιπλέον ο aggregator θα πρέπει να είναι ικανός να λαμβάνει τα σήματα-εντολές από το διαχειριστή του συστήματος μεταφοράς όπως κάθε άλλη συμβατική μονάδα και εν συνεχεία, θα διαβιβάζει αυτές τις εντολές στο κάθε όχημα, όπως αυτός κρίνει σύμφωνα με το αθροιστικό προφίλ που έχει δημιουργήσει. Έτσι, θα είναι σε θέση να κάνει προσφορές επιπέδου MW ή MWh στις διάφορες αγορές, κάτι που τα EVs με το πρώτο μοντέλο, αδυνατούν να κάνουν.

Τον ρόλο του aggregator μπορεί να έχουν:

1. ο διαχειριστής του συστήματος διανομής ηλεκτρικής ενέργειας (**DSO**), αποκτώντας έτσι βελτιωμένη ευστάθεια και αξιοπιστία του δικτύου του.
2. μια εταιρεία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, που δραστηριοποιείται ούτως ή άλλως στην αγοραπωλησία ενέργειας ή/και την προσφορά επικουρικών υπηρεσιών μεγαλώνοντας έτσι το εύρος των δραστηριοτήτων της.
3. μια κατασκευαστική εταιρία ηλεκτρικών οχημάτων που αποκτά έτσι μια συνεχή πελατειακή σχέση με τον αγοραστή του οχήματος.
4. ένας πάροχος κινητής τηλεφωνίας, που διαχειρίζεται το δίκτυο τηλεπικοινωνίας για τη μετάδοση της V2G πληροφορίας και αποκτά κέρδη μέσω της σύναψης πολλών μικρών αυτοματοποιημένων συναλλαγών.
5. μία ξεχωριστή επιχείρηση, που θα ασχολείται αποκλειστικά με αυτόν τον τομέα.

Ο aggregator, θα είναι ο κύριος αποδέκτης των κερδών από τη συμμετοχή στις αγορές, παρέχοντας στους ιδιοκτήτες των EVs, εγγύηση φθοράς συσσωρευτή και χαμηλότερη τιμολόγηση φόρτισης.

Συνοψίζοντας ο aggregator θα αποτελέσει προς τις αγορές μια εικονική μονάδα παραγωγής. Δηλαδή θα φαίνεται σαν παραγωγός, με συνολική διαθέσιμη ισχύ ισοδύναμη με το άθροισμα των διαθέσιμων ισχύων συνδεδεμένων EVs του στόλου που αντιπροσωπεύει. Άρα θα εξαρτάται άμεσα από τον αριθμό των οχημάτων που είναι συνδεδεμένα αλλά και ικανά για V2G λειτουργία κατά το χρονικό διάστημα που μας ενδιαφέρει. Έτσι γίνεται δυνατή η ένταξη των οχημάτων στις αγορές ενέργειας, τάξης ισχύος MW, ικανοποιώντας παράλληλα και τις ενεργειακές απαιτήσεις των EVs.

2.6.2.7 Η V2G λειτουργία από Επιχειρηματικής σκοπιά

Οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη

Όπως καταδείξαμε προηγουμένως η εξοικείωση και η υιοθέτηση της V2G λειτουργίας μπορεί να αποφέρει οικονομικό κέρδος στον ιδιοκτήτη του EV, μέσω της συμμετοχής του σε συγκεκριμένες αγορές, όπου έχει γίνει ήδη αναφορά παραπάνω. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την γρηγορότερη αποπληρωμή της επένδυσης ενός αρχικά ακριβότερου αυτοκινήτου. Η μείωση στο χρόνο απόσβεσης, θα βοηθήσει περαιτέρω τη διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων στις μεταφορές. Κάτι τέτοιο είναι θεμιτό αφού, τα ηλεκτρικά οχήματα έχουν σαφώς πιο οικολογική συμπεριφορά από τα αντίστοιχα συμβατικά.

Χάρην της BiV2G λειτουργίας τα ηλεκτρικά δίκτυα δεν χρειάζεται να επωμιστούν την κατασκευή καινούργιων μονάδων παραγωγής ενέργειας, που θα ήταν απαραίτητα εάν υπάρξει μια μεγάλη διείσδυση ηλεκτρικών οχημάτων, τα οποία θα συμπεριφέρονται μόνο ως φορτία. Γλιτώνοντας υψηλά ποσοστά εκπομπών ρυπογόνων αέριων ρύπων.

Αποφεύγεται ακόμα η δημιουργία αποθηκευτικών διατάξεων μεγάλης κλίμακας, που κοστίζουν πολύ ακριβά αφού στην ουσία το κόστος ενός EV μετατίθεται στον οδηγό. Ήδη υπάρχοντα εργοστάσια μπορούν να αποσυρθούν και τη θέση τους να πάρουν τα οχήματα, αφού θα είναι ικανά να ομαλοποιούν τη ζήτηση και να μην υπάρχει τόσο μεγάλη ανάγκη για *peakers*. Μονάδες που λειτουργούσαν για την παροχή επικουρικών υπηρεσιών στο δίκτυο επίσης μπορεί να αντικατασταθούν από τα EVs.

Μια άλλη ενδιαφέρουσα περίπτωση είναι όταν ο aggregator είναι και ιδιοκτήτης των συσσωρευτών των οχημάτων, που έχει υπό τον έλεγχο του. Ο κάτοχος του EV δεν θα πληρώνεται τότε με βάση την ενέργεια που παρέχει αλλά θα του παρέχεται δωρεάν αντικατάσταση του συσσωρευτή και πολύ φτηνή φόρτιση. Αυτό το μοντέλο έχει το πλεονέκτημα πως ο κάτοχος του οχήματος δεν έχει πλέον να ανησυχεί για τη φθορά που υφίσταται ο συσσωρευτής και επομένως για τη συντήρησή του. Το παραπάνω μοντέλο, θα μπορούσε να εφαρμοστεί επιτυχώς από εταιρίες που δραστηριοποιούνται στο λεγόμενο «σύστημα ανταλλασσόμενου συσσωρευτή» (**swapping batteries system**). Το σύστημα αυτό αντικαθιστά την έννοια της φόρτισης του αποφορτισμένου συσσωρευτή με την έννοια της αντικατάστασης του με έναν άλλον, πλήρως φορτισμένο. Το κάθε όχημα δεν διαθέτει το δικό του συσσωρευτή, αλλά «κάποιον» συσσωρευτή, τον οποίο είναι ικανό με έναν αυτοματοποιημένο και γρήγορο τρόπο διάρκειας λίγων λεπτών, να αντικαταστήσει στους ειδικά διαμορφωμένους σταθμούς. Οι εταιρίες λοιπόν αυτές, που διαθέτουν ένα μεγάλο stock συσσωρευτών θα μπορούν να προσφέρουν υπηρεσίες στο δίκτυο, αποτελώντας ένα είδος aggregator συσσωρευτών και όχι οχημάτων, μοντέλο μάλιστα πιο ελαστικό, καθώς απαιτούνται πολύ λιγότερες υποδομές τηλεπικοινωνιών, λόγω της συγκέντρωσης όλης της διαθέσιμης ισχύος στον ίδιο χώρο. Μια τέτοια εταιρία, η Better Place Inc. δραστηριοποιείται ήδη σε αρκετές χώρες παγκοσμίως (Ισραήλ, ΗΠΑ, Δανία, Ολλανδία, Κίνα κ.α) έχοντας κατασκευάσει τις απαραίτητες υποδομές, χωρίς όμως να προσφέρει V2G υπηρεσίες.

Τέλος, μία ακόμα περίπτωση άξια αναφοράς είναι η εξής: ο συσσωρευτής του οχήματος κάποια στιγμή θα καταστεί αναποτελεσματικός για τις οδηγικές απαιτήσεις του οχήματος λόγω της φθοράς του, που αναπόφευκτα θα επέλθει από την καθημερινή φόρτιση και εκφόρτιση του. Παρόλα αυτά, αυτό δεν σημαίνει ότι δεν θα μπορούσε να αποδειχθεί

χρήσιμος για άλλες λειτουργίες, πέραν της οδήγησης. Ένας aggregator θα μπορούσε να συλλέγει αυτούς τους χρησιμοποιημένους συσσωρευτές προσφέροντας τους μία δεύτερη ζωή (**second life batteries**) με σκοπό να παρέχει υπηρεσίες στο δίκτυο, όπως κατά την περίπτωση του V2G. Τότε μιλάμε βέβαια για B2G (**Battery to Grid**). Το συγκριτικό πλεονέκτημα μίας τέτοιας μορφής aggregator με τον κλασικό V2G aggregator είναι η συγκέντρωση όλης της διαθέσιμης ισχύος σε ένα χώρο, αλλά και η απουσία περιορισμών, που έχουν να κάνουν με τις απαιτήσεις των οδηγών για ελάχιστη φόρτιση ή προγραμματισμένα ταξίδια. Βέβαια, η αποδοτικότητα και οι δυνατότητες ενός συσσωρευτή σε αυτήν την περίπτωση είναι σαφώς μειωμένες εν σχέση με έναν καινούργιο, γεγονός που περιορίζει και την οικονομική βιωσιμότητα ενός τέτοιου εγχειρήματος. Διάφορες έρευνες όμως αποδεικνύουν ότι μία τέτοια περίπτωση aggregator μπορεί να είναι οικονομικά προσοδοφόρα.

Όλα τα παραπάνω έχουν όχι μόνο οικονομικά οφέλη για τα δίκτυα αλλά περιβαλλοντικά και κοινωνικά. Η V2G λειτουργία μπορεί να προσφέρει νέες θέσεις εργασίας τόσο στο ερευνητικό τομέα αφού προωθεί την έρευνα τόσο γύρω από τα ηλεκτρικά οχήματα όσο και γύρω από γεωτονικά επιστημονικά πεδία, όπως είναι η τεχνολογία των συσσωρευτών και των τηλεπικοινωνιών, ενώ επίσης προβάλλει την ιδέα της εξυπνότερης και αποδοτικότερης διαχείριση της ενέργειας και των φυσικών πόρων.

Νέοι παράγοντες στην αγοράς

Με την υιοθέτηση της V2G λειτουργίας θα εμφανιστούν νέοι παράγοντες στην αγορά, ο καθένας με τον δικό του ρόλο. Αυτοί είναι οι εξής:

1. **Ο ιδιοκτήτης του οχήματος:** Θεωρείται πάντοτε ο τελικός καταναλωτής ενέργειας και ποτέ παραγωγός, ακόμα και αν συμμετέχει στη V2G λειτουργία και στέλνει ενέργεια πίσω στο δίκτυο. Αυτό έχει γίνει σαφές όταν εισαγάγαμε την έννοια του συναθροιστή (aggregator).
2. **Ο ιδιοκτήτης του συσσωρευτή:** Επειδή για το υψηλό κόστος των ηλεκτρικών οχημάτων ευθύνεται κατά κύριο λόγο ο συσσωρευτής, έχει προταθεί να διαχωριστεί το κόστος ενός EV από αυτό του συσσωρευτή, με σκοπό η αγορά ενός ηλεκτρικού οχήματος να γίνει πιο ελκυστική στο καταναλωτικό κοινό. Η ιδιοκτησία, η εγγύηση και ο έλεγχος της λειτουργίας του συσσωρευτή μπορεί να είναι το αντικείμενο, οποιουδήποτε από τους υπόλοιπους παράγοντες που εμπλέκονται στη V2G λειτουργία, ή μίας ξεχωριστής επιχείρησης, ασχολούμενης μόνο με αυτόν τον τομέα. Τέλος, ο ιδιοκτήτης του συσσωρευτή μπορεί να είναι και ο ίδιος ο ιδιοκτήτης του οχήματος, όπως συμβαίνει μέχρι στιγμής.
3. **Ο ιδιοκτήτης της υποδομής φόρτισης:** Μπορεί να είναι ένας οικιακός καταναλωτής ρεύματος, που αγοράζει κάποια υποδομή φόρτισης για το ηλεκτρικό του όχημα, μπορεί να είναι μια οποιαδήποτε επιχείρηση, που θέλει να δώσει στους εργαζομένους της ή/και στους πελάτες της τη δυνατότητα να συνδέουν το όχημα τους στο δίκτυο, ή μπορεί η υποδομή αυτή να βρίσκεται σε κάποιο σταθμό φόρτισης (το ανάλογο του βενζινάδικου για τα ηλεκτρικά οχήματα) είτε δημόσιο, είτε ιδιωτικό. Εάν βρίσκεται σε δημόσιο χώρο και με δημόσια πρόσβαση, τότε υπάγεται στη διαδικασία της διανομής με το διαχειριστή του συστήματος (Distribution System

Operator/DSO) να είναι ο ιδιοκτήτης, εναλλακτικά ανήκει σε μια ιδιωτική εταιρία που προσφέρει τις υπηρεσίες της, με συγκεκριμένα συμβόλαια που ορίζει αυτή.

4. **Ο συναθροιστής-πάροχος των ηλεκτρικών οχημάτων (Electric Vehicle Supplier-Aggregator/EVS-A):** Πρόκειται για τον παράγοντα κλειδί, όσον αφορά την υιοθέτηση της V2G λειτουργίας και η λειτουργία του είναι διπλή. Από τη μία, είναι ο προμηθευτής, ο οποίος πουλά ηλεκτρική ενέργεια στον ιδιοκτήτη του οχήματος, μέσω ενός συμβολαίου, το οποίο θα ισχύει για πολλά πιθανά σημεία φόρτισης. Η καινοτομία, όσον αφορά αυτή τη μορφή συμβολαίου, είναι ότι δεν περιορίζονται τοπικά αλλά αντίθετα, ικανοποιούν την επιθυμία των ιδιοκτητών ηλεκτρικών οχημάτων να μπορούν να φορτίζουν τους συσσωρευτές τους σε διαφορετικούς σταθμούς φόρτισης, παραμένοντας όμως στον ίδιο προμηθευτή και έχοντας τις ίδιες χρεώσεις. Ο δεύτερος ρόλος ενός aggregator, που έχει και μεγαλύτερη σχέση με τη V2G λειτουργία, προέρχεται από την αδυναμία ενός μεμονωμένου EV να συμμετάσχει απευθείας στις χονδρικές αγορές ενέργειας και επικουρικών υπηρεσιών. Για παράδειγμα, στις περισσότερες αγορές, η ελάχιστη ποσότητα ισχύος που μπορεί να προσφερθεί για ρύθμιση είναι το 1 MW. Γίνεται αντιληπτό, ότι ένα μόνο αυτοκίνητο, του οποίου ο συσσωρευτής είναι της τάξης των μερικών kW, δεν θα μπορούσε ποτέ να προσφέρει αυτήν την ποσότητα. Αντίθετα, μία επιχείρηση, που θα έχει υπό την εποπτεία της ένα στόλο οχημάτων, θα μπορεί να λειτουργεί ως μεσάζοντας και να συμμετάσχει στις διάφορες αγορές, συναθροίζοντας την διαθέσιμη ισχύ ολόκληρου του στόλου.
5. **Ο πάροχος υπηρεσιών τεχνολογιών πληροφορικής (Information Technology/IT service provider):** Όπως είδαμε προηγουμένως, κατά την υιοθέτηση της V2G λειτουργίας απαιτείται η διακίνηση ενός μεγάλου όγκου πληροφοριών σε πραγματικό χρόνο και με μεγάλη ακρίβεια. Υπό από αυτήν την έννοια, οι πάροχοι IT υπηρεσιών μπορούν να λειτουργήσουν ως σύνδεσμος μεταξύ των διαφόρων παραγόντων, όπως πχ μεταξύ του ιδιοκτήτη του οχήματος και του EVS-A, μεταξύ του EVS-A και του διαχειριστή του συστήματος, ή συνδέοντας όλους τους προαναφερθέντες παράγοντες με την αγορά ηλεκτρικής ενέργειας. Είναι λοιπόν πιθανό, εταιρίες με εμπειρία και τεχνογνωσία στον τομέα της πληροφορικής και των τηλεπικοινωνιών να βρουν πρόσφορο έδαφος για την παροχή υπηρεσιών τηλεματικής ή τη συντήρηση των δικτύων επικοινωνίας κ.α.

Κεφάλαιο 3

Ηλεκτρικά Οχήματα

3.1 Εισαγωγή

Ως ηλεκτρικό όχημα (**Electric Vehicle / EV**) ορίζουμε κάθε όχημα, το οποίο για την προώθηση του χρησιμοποιεί ηλεκτρική ενέργεια μέσω ενός ή περισσότερων ηλεκτρικών κινητήρων, αντί της συνήθους πρακτικής, που επιβάλλει μία μηχανή εσωτερικής καύσης. Παρόλη την ύπαρξη διαφορετικών κατηγοριών ηλεκτρικών οχημάτων, π.χ. τραινών, μοτοσυκλετών, πλοίων, αεροπλάνων κτλ., στην παρούσα εργασία θα περιορίσουμε τον όρο «ηλεκτρικά οχήματα» αποκλειστικά και μόνο στα ηλεκτρικά αυτοκίνητα. Αν και υπάρχουν διαφορετικά είδη EVs με διαφορετικές αρχές λειτουργίας, κοινό χαρακτηριστικό όλων είναι η ύπαρξη συσσωρευτών, οι οποίοι αποθηκεύουν ενέργεια, την οποία και αποδίδουν μετά στον ηλεκτροκινητήρα, που θα καλύψει τουλάχιστον ένα μέρος της απαιτούμενης ροπής για την κίνηση των τροχών. Υπάρχουν και άλλες μορφές αποθήκευσης της απαραίτητης αυτής ενέργειας, όπως π.χ. τα συστήματα σφονδύλων (flywheels), τα οποία όμως δεν είναι πολύ

συνηθισμένα και δεν θα μας απασχολήσουν εδώ. Όταν η αποθηκευμένη ενέργεια τελειώσει λόγω της κατανάλωσης της για την κίνηση του οχήματος ή/και άλλων λειτουργιών, που θα εξετάσουμε αργότερα, υπάρχει είτε η δυνατότητα ανανέωσης της μέσω της κατάλληλης σύνδεσης του ηλεκτρικού οχήματος σε κάποια πηγή ενέργειας, π.χ. το ηλεκτρικό δίκτυο, είτε η παραγωγή της πάνω στο ίδιο το όχημα. Ο έλεγχος του ηλεκτροκινητήρα γίνεται πλέον σε όλα τα EVs με ηλεκτρονικά ισχύος. Το βασικό πλεονέκτημα των σύγχρονων ηλεκτρικών αυτοκινήτων συγκρινόμενα με τα συμβατικά βενζινοκίνητα και πετρελαιοκίνητα είναι το γεγονός ότι είναι πιο «καθαρά», υπό την έννοια ότι επιβαρύνουν πολύ λιγότερο το περιβάλλον. Οι εκπομπές καυσαερίων και ιδιαιτέρως CO₂ όταν αυτά κινούνται είναι μηδενικές και εν δυνάμει μπορεί να είναι μηδενικές και κατά την παραγωγή της απαιτούμενης για την κίνηση τους ηλεκτρικής ενέργειας, με την προϋπόθεση πως αυτή προέρχεται από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ). Εξίσου μηδενικός είναι και παραγόμενος θόρυβος τους, αλλά και οι ανάγκες τους σε λάδια, φίλτρα και νερό. Ο ηλεκτροκινητήρας και τα ηλεκτρονικά ισχύος, που χρησιμοποιούνται είναι αρκετά αξιόπιστα, ενώ μειώνουν την ενεργειακή εξάρτηση από άλλες χώρες, καθώς η ηλεκτρική ενέργεια είναι εγχώρια παραγόμενη. Επιπλέον, όπως θα δούμε παρακάτω με λεπτομέρεια, μπορούν υπό προϋποθέσεις να προσφέρουν σημαντικά οφέλη στα ηλεκτρικά συστήματα καιστη διεύθυνση των ΑΠΕ σε αυτά. Βασικά μειονεκτήματά τους εν συγκρίσει με τα συμβατικά αυτοκίνητα είναι προς το παρόν τα εξής:

1. το υψηλό κόστος τους,
2. η μικρότερη αυτονομία τους λόγω ανεπάρκειας των συσσωρευτών,
3. το μεγάλο βάρος και ο μεγάλος όγκος των συσσωρευτών,
4. οι μικρότερες αποδόσεις τους,
5. η μεγάλη διάρκεια φόρτισης τους
6. και τέλος η δυσκολία πρόσβασης σε φορτιστές.

3.2 Η ιστορική εξέλιξη των ηλεκτρικών οχημάτων

Η ιδέα του ηλεκτρικού αυτοκινήτου δεν είναι σημερινή. Στην πραγματικότητα, τα ηλεκτροκίνητα οχήματα έχουν μια μακρόχρονη ιστορία που ξεκινά στα μέσα του 19ου αιώνα, ταυτόχρονα περίπου με την εμφάνιση των συμβατικών οχημάτων. Η εφεύρεση τους αποδίδεται σε διάφορους ανθρώπους, καθώς δεν είναι σίγουρο για το ποιος τα πρώτο-εφηύρε. Τα πρώτα πειραματικά μοντέλα αναπτύχθηκαν τις δεκαετίες 1830-50 κυρίως στην Ευρώπη, ανέπτυσαν ταχύτητες έως και 10 km/ώρα. Αρχικά δεν έπεισαν το κοινό και πέρασαν στην αφάνεια τα πρώτα χρόνια, λόγω των προβλημάτων που αντιμετώπιζαν, με σημαντικότερο ζήτημα όλων αυτών την χρήση συσσωρευτών μίας χρήσεως. Σημαντική ώθηση στην περαιτέρω έρευνα δόθηκε στις δεκαετίες 1860-70, όταν και υπήρξε μεγάλη βελτίωση της τεχνολογίας των συσσωρευτών, όπως π.χ. η εφεύρεση των επαναφορτιζόμενων συσσωρευτών οξέως-μολύβδου (**lead-acid battery**). Όταν λίγα χρόνια μετά, άρχισε η εμπορική διάθεση τους, έλαβαν μεγάλης αποδοχής από τους καταναλωτές και στις δύο πλευρές του Ατλαντικού. Μέχρι τότε, οι υπάρχοντες τρόποι αυτοκίνησης ήταν τα ατμοκίνητα και τα βενζινοκίνητα αμάξια. Τα ηλεκτροκίνητα, παρά την περιορισμένη ταχύτητα και αυτονομία τους, πρώτον δεν προκαλούσαν το θόρυβο, τη μυρωδιά και τις δονήσεις που σχετιζόνταν με τα βενζινοκίνητα, δεύτερον ο ηλεκτροκίνητηρας εκκινούσε πολύ ευκολότερα από το βενζινοκίνητηρα, που τότε εκκινούσε χειρωνακτικά, μέσω μανιβέλας και τρίτον δεν απαιτούσαν αλλαγές στις ταχύτητες, γεγονός που διευκόλυνε σημαντικά την οδήγηση. Ούτε βέβαια τα ατμοκίνητα αμάξια απαιτούσαν αλλαγή ταχυτήτων, αλλά έπασχαν αφενός από μεγάλο χρόνο εκκίνησης, έως και 45 λεπτά τα κρύα πρωινά και αφετέρου από περιορισμένη αυτονομία μέχρι να ξανά-χρησιμοποιούν νερό. Έτσι λοιπόν, η δημοτικότητα των ηλεκτρικών αυτοκινήτων, που χρησιμοποιούνταν κυρίως ως αυτοκίνητα πόλης καλύπτοντας μικρές σχετικά αποστάσεις, αυξανόταν συνεχώς, καταφέρνοντας στις αρχές του 20ου αιώνα να κατέχουν το ίδιο μερίδιο αγοράς με τους ανταγωνιστές τους, τα



Εικόνα 3.1: La Jamais Contente ήταν το πρώτο όχημα που κατάφερε να επιτύχει ταχύτητα μεγαλύτερη των 100 Km/h. Ήταν ηλεκτρικό και το ρεκόρ επετεύχθη μεταξύ 29 Απριλίου με 1 Μαΐου του 1899. Το αμάξιωμα ήταν κατασκευασμένο από κράμα αλουμινίου, βολφραμίου και μαγνησίου.

οχήματα εσωτερικής καύσης και τα ατμοκίνητα. Μάλιστα, το ποσοστό τους στην Αμερική είχε φτάνει στο 38%.

Επιπλέον, αρκετές ήταν οι διακρίσεις των ηλεκτρικών αυτοκινήτων σε επίπεδο διαγωνισμών και ρεκόρ, με αξιοσημείωτο το όχημα του Camille Jenatzy με το όνομα “Jamais Contente” (ποτέ ικανοποιημένη στα γαλλικά), το οποίο εν έτει 1899 ήταν το πρώτο όχημα, που ξεπερνούσε την ταχύτητα των 100km/ώρα.

Παρόλη την αρχική επιτυχία των ηλεκτρικών αυτοκινήτων, με αποκορύφωμα την δεκαετία 1910-1920 όπου η ζήτηση ήταν στο ζενίθ της, μία σειρά από ιστορικά γεγονότα κατά τον 20ο αιώνα άρχισαν να ανακόπτουν την ανοδική τους πορεία προς όφελος των αυτοκινήτων με μηχανή εσωτερικής καύσης (ΜΕΚ).

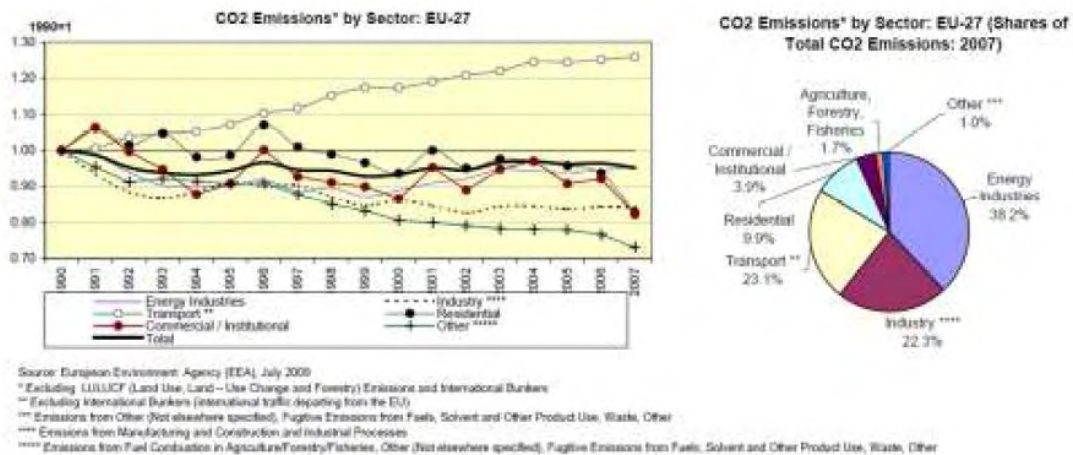
- Η έντονη αστικοποίηση, η ανάλογη αύξηση του μεγέθους των πόλεων και η διάνοιξη δρόμων για την βελτίωση του υπεραστικού οδικού δικτύου, απαιτούσε από τα μεταφορικά μέσα ολοένα και μεγαλύτερη αυτονομία, κάτι στο οποίο τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα εξαρχής υστερούσαν.
- Η ανακάλυψη μεγάλων κοιτασμάτων πετρελαίου κυρίως στη Β. Αμερική είχε ως άμεσο επακόλουθο την μείωση της τιμής του, προσφέροντας έτσι στο μέσο καταναλωτή, μια πιο οικονομική εναλλακτική για την μετακίνηση του, εκείνη των ΜΕΚ.
- Επιπροσθέτως η εφεύρεση της εξάτμισης και της μίζας κατέστησαν τα οχήματα με μηχανή εσωτερικής καύσης αφενός πιο οικονομικά και αποδοτικά και αφετέρου πιο φιλικά στο χρήστη.
- Το κερασάκι στην τούρτα στην όλο και μειωμένη δημοτικότητα των ηλεκτρικών αυτοκινήτων ήρθε να δώσει η έναρξη της μαζικής παραγωγής από τον Henry Ford του βενζινοκίνητου T-Model κατά τη δεκαετία του 1910 στις ΗΠΑ, γεγονός που σιγά σιγά κατέστησε την παραγωγή ηλεκτροκίνητων οχημάτων μη οικονομικά βιώσιμη.

Ενδεικτικά, η τιμή των τελευταίων οχημάτων κυμαινόταν μεταξύ 500 και 1000 δολαρίων, ενώ εκείνη την περίοδο τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα στοιχίζαν κοντά στα 2000 δολάρια.



Εικόνα 3.2: Ford Model T (κοινώς γνωστό και ως Tin Lizzie, T-Model Ford, Model T, ή T) παρήχθη το διάστημα 1908 έως το 1927.

Για όλους τους παραπάνω λόγους, σιγά σιγά η παγκόσμια αυτοκινητοβιομηχανία στράφηκε σχεδόν εξολοκλήρου στα αυτοκίνητα με ΜΕΚ, με κάποιες ελάχιστες εξαιρέσεις, όπως π.χ. στη Βρετανία, όπου διατηρήθηκε μέχρι τα τέλη του αιώνα μεγάλος στόλος ηλεκτρικών οχημάτων για τη διανομή γάλακτος, ψωμιού και αλληλογραφίας. Τέλος, θα ήταν σωστό να αναφερθεί πως δεν ήταν μόνο αυτοί οι λόγοι που οδήγησαν στην εξαφάνιση των ηλεκτρικών οχημάτων. Αρκετές ισχυρές εταιρείες πετρελαιοειδών της εποχής, όπως η Mobil, πολέμησαν και υπονόμευσαν κατά καιρούς την υιοθέτηση των ηλεκτρικών αυτοκινήτων, λόγω του φόβου ότι η συνεπακόλουθη ανεξάρτηση από το πετρέλαιο θα έθιγε τα συμφέροντά τους και θα έπληττε την κερδοφορία τους.



Σχήμα 3.1: Ο τομέας των μεταφορών κατά το έτος 2007 στην ΕΕ των 27 ήταν υπεύθυνος για το 23,1% των εκπομπών CO₂, δεύτερο μεγαλύτερο ποσοστό ανά τομέα. Επιπλέον, από το 1990 και μετά είναι ο τομέας που παρουσιάζει τη μεγαλύτερη αύξηση στις εκπομπές CO₂.

Η πετρελαϊκή κρίση της δεκαετίας του 1960-1970 και η ανησυχία για την αύξηση των τιμών του πετρελαίου σε συνδυασμό, με το πρόβλημα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης από τα αυτοκίνητα στα αστικά κέντρα που είχε αρχίσει να γίνεται έντονα ορατό, συντέλεσαν σε μία αναζωπύρωση του ενδιαφέροντος για τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα.

Οι πρώτες σοβαρές προσπάθειες από πλευράς της πολιτείας για την ανάπτυξη και υιοθέτηση της ηλεκτροκίνησης γίνονται στις αρχές του 1990 με την πολιτεία της California να εκδίδει την εντολή ZEV (Zero Emission Vehicle Mandate) σύμφωνα με την οποία μέχρι το 1998 το 2% του συνολικού στόλου των οχημάτων, που κυκλοφορούν στην πολιτεία θα πρέπει να είναι μηδενικής εκπομπής ρύπων, ενώ μέχρι το 2003 το ποσοστό αυτό πρέπει να έχει ανέρθει στο 10%.

Οι μεγάλες αυτοκινητοβιομηχανίες ξεκινούν προγράμματα ανάπτυξης ηλεκτρικών οχημάτων, όπως το EV1 της General Motors, το οποίο ήταν ένα ηλεκτρικό αυτοκίνητο που κατασκευάστηκε από τον αμερικανικό όμιλο αυτοκινήτων της General Motors, μεταξύ του 1996 και του 1999. Υπήρξε το πρώτο αμιγώς ηλεκτροκίνητο όχημα μαζικής παραγωγής της σύγχρονης ιστορίας, που παρήχθη από κατασκευαστή αυτοκινήτων μεγάλου όγκου παραγωγής, αντί από εταιρεία μικρού βεληνεκούς. Παράλληλα, ήταν και το πρώτο μοντέλο που είχε σχεδιαστεί από την General Motors εξ αρχής ως αποκλειστικά ηλεκτροκίνητο, μια παράμετρος που του έδωσε και το όνομά του (EV1 = Electric Vehicle 1 / Ηλεκτρικό Όχημα1).



Εικόνα 3.3: General Motors EV1 κατά τη διάρκεια επαναφόρτισης.

Ακολουθούν και άλλες εταιρίες, παράγοντας υβριδικά ή αμιγώς ηλεκτρικά αυτοκίνητα όπως η Toyota με τα μοντέλα Prius και RAV4-EV, η Honda με το EVPlus, η Ford με το Ranger Pickup EV κ.α. Παρόλα αυτά, οι στόχοι δεν φαίνεται να επιτυγχάνονται και τα πράγματα χειροτερεύουν όταν το 2002 οι εταιρίες G.M Daimler Chrysler κινούνται νομικά και κερδίζουν τη δίκη ενάντια στην πολιτεία της California όσον αφορά στην εντολή ZEV. Μάλιστα η General Motors ανακοινώνει ότι θα αποσύρει όλα τα μοντέλα του EV1 λόγω αδυναμίας παροχής ανταλλακτικών. Ως αποτέλεσμα η εντολή ZEV γίνεται πιο ελαστική, δίνοντας περιθώρια στις αυτοκινητοβιομηχανίες μέχρι το 2018. Παρόλα αυτά, η συνεχής αύξηση της τιμής του πετρελαίου τα τελευταία χρόνια και τα επακόλουθα ιστορικά χαμηλά ποσοστά που παρουσιάζουν οι πωλήσεις συμβατικών αυτοκινήτων παγκοσμίως σε συνδυασμό με την επιδείνωση του φαινομένου του θερμοκηπίου δεν άφησε ανεπηρέαστα τα ισχυρά κράτη και φυσικά την ΕΕ.

Έτσι, τον Μάρτιο του 2007 το Ευρωπαϊκό Συμβούλιο ενέκρινε μια ολοκληρωμένη προσέγγιση για την κλιματική και ενεργειακή πολιτική με στόχο την καταπολέμηση της αλλαγής του κλίματος και την αύξηση της ενεργειακής ασφάλειας της ΕΕ, ενισχύοντας παράλληλα την ανταγωνιστικότητα της και την μετατροπή της σε μια ιδιαίτερα αποδοτική από ενεργειακής άποψης οικονομία χαμηλών εκπομπών άνθρακα. Οι απαιτήσεις που υιοθετήθηκαν από τους αρχηγούς κρατών και κυβερνήσεων είναι γνωστές ως στόχοι "20-20-20" και είναι οι εξής:

- Μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά τουλάχιστον 20% κάτω από τα επίπεδα του 1990,
- 20% της κατανάλωσης ενέργειας της ΕΕ να προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και τέλος,
- μείωση κατά 20% στη χρήση πρωτογενούς ενέργειας σε σύγκριση με τα προβλεπόμενα επίπεδα μέσω της βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης.
-

Επιπλέον, πέραν των στόχων 20-20-20, κατά τη διάσκεψη των Ηνωμένων Εθνών για την κλιματική αλλαγή που έγινε το 2009 στην Κοπεγχάγη, οι χώρες που αντιπροσωπεύουν πάνω από το 80% των παγκόσμιων εκπομπών υπέγραψαν τη «Συμφωνία της Κοπεγχάγης» με την οποία κατέστη σαφές ότι η υπερθέρμανση του πλανήτη πρέπει να διατηρηθεί κάτω από 2ο C ώστε να αποφευχθούν οι επικίνδυνες επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής. Για να γίνει πραγματικότητα αυτό, θα πρέπει να

οδηγηθούμε σε μια οικονομία χαμηλών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Όλα αυτά συντέλεσαν ώστε να υπάρξει κινητήριος δύναμη για την περαιτέρω έρευνα και υιοθέτηση των ηλεκτρικών οχημάτων κατά την τελευταία δεκαετία.

Στην ΕΕ σήμερα, 17 από τα 27 κράτη μέλη εισπράττουν φόρους από τα ΙΧ, που σχετίζονται με τις εκπομπές CO₂ και 15 από τα 27 προσφέρουν φορολογικές ελαφρύνσεις για την αγορά και την κυκλοφορία ηλεκτρικών αυτοκινήτων. Πιο συγκεκριμένα, στο Βέλγιο υπάρχει 30% έκπτωση στο φόρο αγοράς ενός ηλεκτρικού οχήματος, στην Κύπρο δίνεται επιχορήγηση 700€, ενώ στην Πορτογαλία τα αμιγώς ηλεκτροκίνητα αυτοκίνητα απαλλάσσονται εντελώς από το τέλος ταξινόμησης. Στη Νορβηγία, τα EVs μπορούν να κινούνται στις λεωφορειολωρίδες, ενώ στην Αγγλία σε ορισμένα σημεία μπορούν να παρκάρουν χωρίς χρέωση. Στη Γαλλία και συγκεκριμένα στο Παρίσι, από το 2011 έχει αναπτυχθεί το σύστημα ενοικίασης ηλεκτρικών αυτοκινήτων “Autolib” διαχειριζόμενο από την Bolloré. Το σύστημα αυτό είναι παρόμοιο με εκείνο της ενοικίασης ποδηλάτων, στο οποίο μπορεί κανείς να πάρει ένα EV, τα οποία ονομάζονται “Bluecars”, από τους πολλούς υπάρχοντες σταθμούς μέσα στην πόλη, να το χρησιμοποιήσει για να φτάσει στον προορισμό του και να το αφήσει σε κάποιον άλλον σταθμό με πολύ μικρή χρέωση.

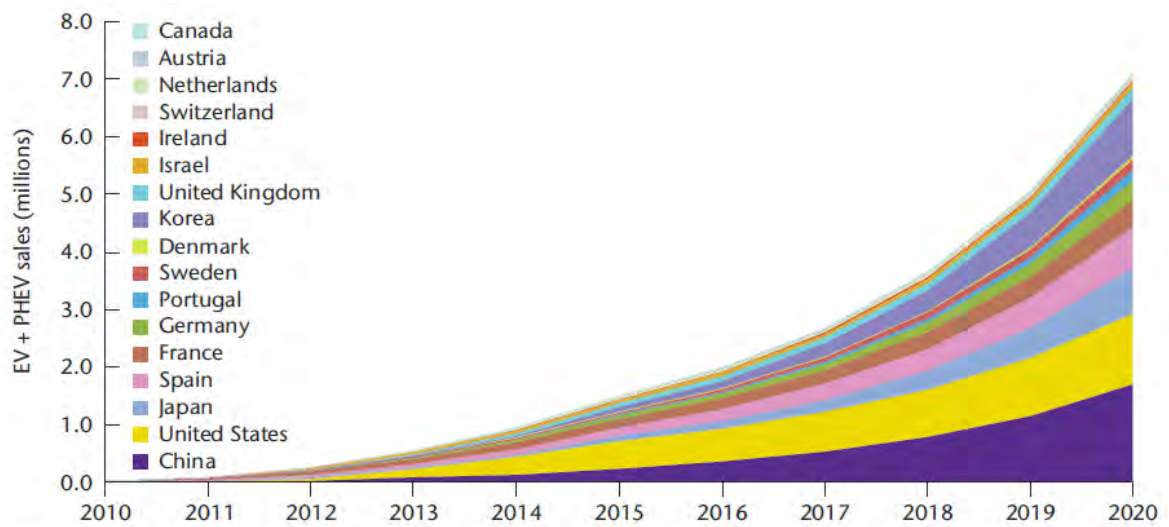
Στην Ελλάδα, τα ηλεκτροκίνητα και υβριδικής τεχνολογίας αυτοκίνητα δεν υπόκεινται σε τέλος ταξινόμησης και απαλλάσσονται δια βίου από τα τέλη κυκλοφορίας μέχρι πρότινος (δηλαδή την στιγμή που γράφεται η παρούσα διπλωματική εργασία), όπου το όριο παραγόμενων εκπομπών CO₂ δεν θα πρέπει να ξεπερνά το όριο των 90γρμ/χλμ, ενώ επίσης εξαιρούνται των περιοριστικών μέτρων κυκλοφορίας (δακτύλιος), όπου αυτά εφαρμόζονται.

Μεγάλα ερευνητικά προγράμματα που σχετίζονται άμεσα με τα EVs αναπτύσσονται με τη χρηματοδότηση της ΕΕ, όπως πχ το πρόγραμμα MERGE (Mobile Energy Resources in Grids of Electricity), που σκοπό έχει να μελετήσει τις επιπτώσεις των EVs στα ευρωπαϊκά συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ) και να προτείνει λύσεις ώστε αυτά να είναι προετοιμασμένα και να επωφεληθούν από τον επικείμενο εξηλεκτρισμό των οχημάτων.

Τέλος, μεγάλη είναι και η συμβολή στην διάδοση της ηλεκτροκίνησης στο ευρύ κοινό από την νεοσυσταθείσα εταιρία **Tesla Motors**. Η **Tesla Motors** είναι μια αμερικάνικη εταιρία που ιδρύθηκε το 2003, με τωρινό επικεφαλής τον Elon Musk, η οποία ασχολείται με τον σχεδιασμό και την κατασκευή πολυτελών και μη, ηλεκτρικών οχημάτων και συστημάτων μετάδοσης καθώς και με την αποθήκευση ενέργειας. Επιπλέον εφαρμόζει στα οχήματα της σύγχρονες τεχνολογίες (αυτόματη οδήγηση) για μια πιο ασφαλή οδηγική εμπειρία για τον χρήστη.

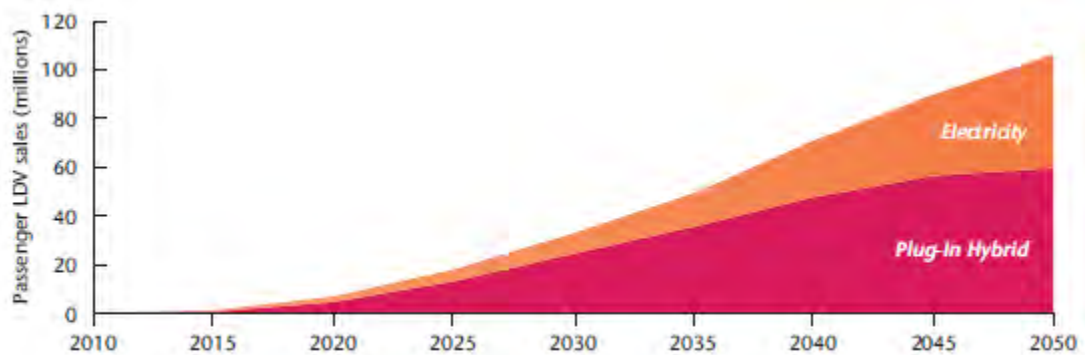


Εικόνα 3.4: Tesla Roadster το πρώτο εξολοκλήρου ηλεκτρικό Sport αυτοκίνητο που έκανε ευρέως γνωστή την Tesla Motors, Inc..



Source: IEA data.

Σχήμα 3.2: Διεθνείς στόχοι πωλήσεων ηλεκτρικών και υβριδικών οχημάτων μέχρι το 2020.



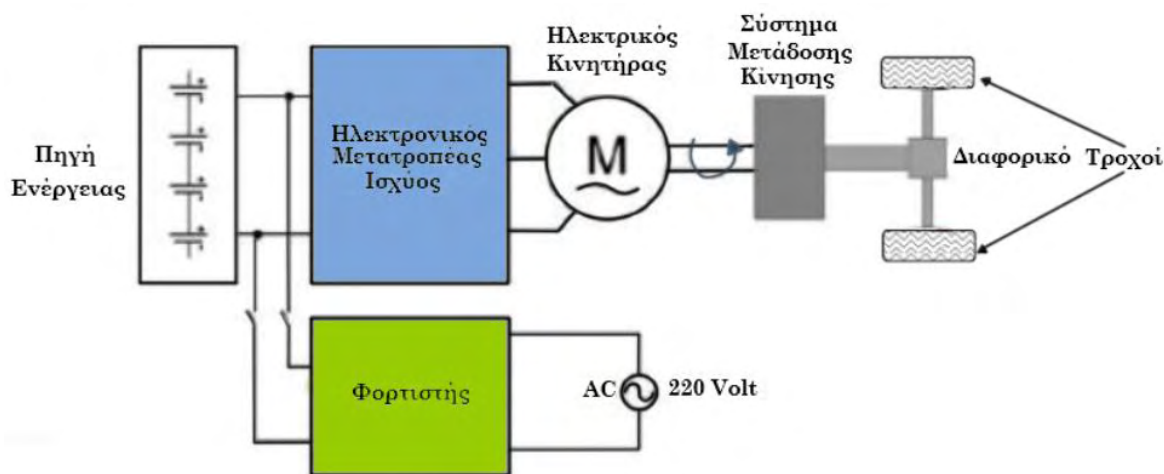
Source: IEA 2010.

Σχήμα 3.3: Διεθνείς στόχοι πωλήσεων ηλεκτρικών και υβριδικών οχημάτων μέχρι το 2050.

3.3 Κατηγορίες των Ηλεκτρικών Οχημάτων

Τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα είναι μία μεγάλη οικογένεια αυτοκινήτων, η οποία συνήθως διακρίνεται στις βασικές κατηγορίες που αναλύονται στα παρακάτω υποκεφάλαια.

3.3.1 Ηλεκτρικά οχήματα με συσσωρευτές (Battery Electric Vehicles/BEVs)



Σχήμα 3.4: Βασικά δομικά στοιχεία ενός BEV.

Είναι, θα λέγαμε, τα πιο «καθαρόαιμα» ηλεκτρικά αυτοκίνητα, αφού η μοναδική πηγή ενέργειας που χρησιμοποιούν είναι χημικής φύσεως (χημική ενέργεια), η οποία αποθηκεύεται σε επαναφορτιζόμενους συσσωρευτές, οι οποίοι με την σειρά τους τροφοδοτούν τον ηλεκτροκινητήρα του οχήματος. Επομένως τα **BEVs** δε χρειάζονται κάποιο κινητήρα εσωτερικής καύσης. Οι συσσωρευτές φορτίζονται κατά τη σύνδεση του οχήματος με το δίκτυο ή με άλλη εξωτερική μονάδα ηλεκτροπαραγωγής (π.χ. φωτοβολταϊκά, ανεμογεννήτριες) μέσω κατάλληλου ρευματοδότη.

Ένας άλλος εναλλακτικός τρόπος φόρτισης είναι η αναγεννητική πέδηση (**regenerative braking**), η οποία βοηθάει στην φόρτιση των μπαταριών καθώς τα οχήματα βρίσκονται εν κινήσει. Μέσω της αναγεννητικής πέδησης (**regenerative braking**), ένα μέρος της κινητικής ενέργειας του οχήματος μετατρέπεται σε ηλεκτρική, μέσω της ηλεκτρικής μηχανής, που για όσο χρόνο διαρκεί το φρενάρισμα λειτουργεί ως γεννήτρια, φορτίζοντας έτσι τους συσσωρευτές.

Τα στοιχεία που κάνουν ολοένα και πιο ελκυστικά αυτά τα οχήματα είναι το γεγονός ότι, κατά την κίνηση τους εκπέμπουν μηδενικούς ρύπους και οι ραγδαίες εξελίξεις που υπάρχουν στον τομέα των συσσωρευτών. Για παράδειγμα, η ανακάλυψη των νέων μπαταριών Ιόντων Λιθίου (**Lithium Ion**) που έχουν μεγαλύτερη ισχύ και ενεργειακή πυκνότητα, μπορεί να οδηγήσει σε μεγαλύτερη επιτάχυνση του οχήματος καθώς και σε μεγαλύτερη αυτονομία της μπαταρίας. Όλα τα παραπάνω έχουν οδηγήσει αρκετές εταιρίες να κυκλοφορήσουν ή αναμένεται να κυκλοφορήσουν BEVs στην αγορά των ΙΧ. Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι το Nissan Leaf με 22.000 πωλήσεις παγκοσμίως μέχρι το Φεβρουάριο του 2012 και αυτονομία έως και 169 km σύμφωνα με τον κατασκευαστή, το Mitsubishi i-MiEV, το πολυτελές Tesla Roadster κ.α

Η απόσταση αυτονομίας τους έχει βελτιωθεί αρκετά και πλέον κυμαίνεται από 120 έως 200 χιλιόμετρα, ικανοποιώντας έτσι τις ανάγκες μετακίνησης του μέσου ανθρώπου μέσα στην πόλη. Έτσι τα BEVs θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν καλύτερα από ότι μέχρι

σήμερα που χρησιμοποιούνται ως βοηθητικά οχήματα στα αεροδρόμια, σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις, σε γήπεδα γκολφ κ.α. λόγω της μικρής σχετικά αυτονομίας τους.

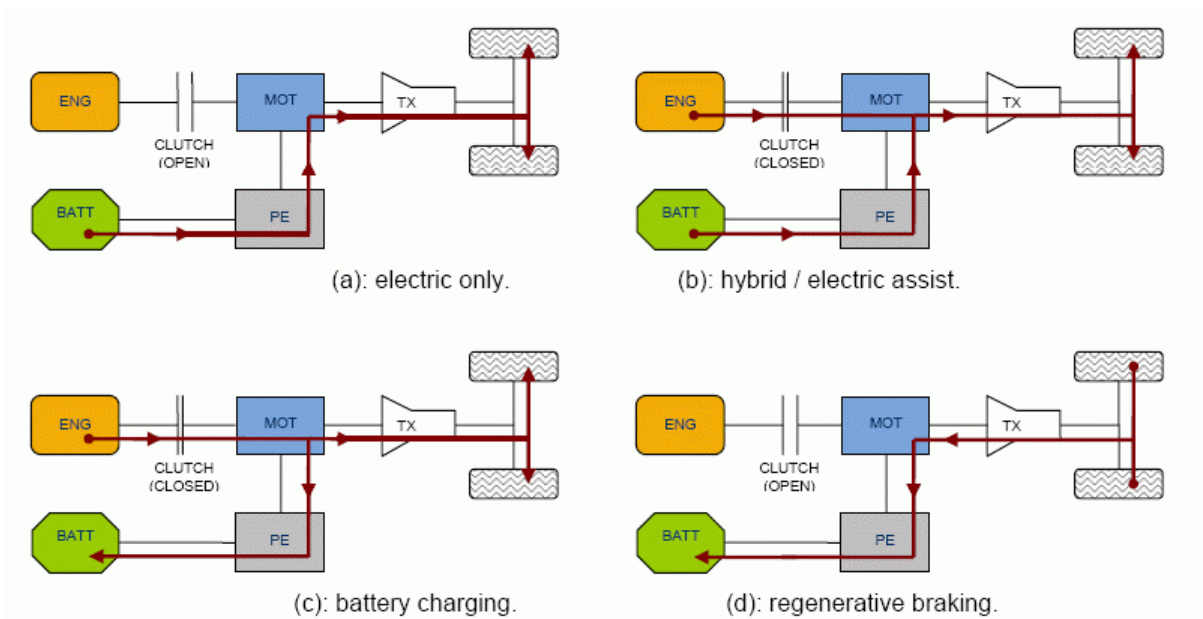
3.3.2 Υβριδικά Ηλεκτρικά Οχήματα (Hybrid Electric Vehicles/HEVs)

Είναι η πιο γνωστή κατηγορία αυτή, που προς το παρόν απολαμβάνει τη μεγαλύτερη εμπορική επιτυχία στην αγορά των ΙΧ ηλεκτρικών οχημάτων. Τα οχήματα αυτά έχουν δύο συμπληρωματικά συστήματα οδήγησης, ένα βενζινοκινητήρα με μια δεξαμενή καυσίμων, και έναν ηλεκτρικό κινητήρα, με τους συσσωρευτές και τους ελεγκτές του. Αυτό τους επιτρέπει να έχουν αυτονομία ίση ή ακόμα και μεγαλύτερη σε ορισμένες περιπτώσεις, από αυτήν των συμβατικών αυτοκινήτων. Οι συσσωρευτές που φέρουν είναι κατά κανόνα μικρότερης χωρητικότητας από αυτές των BEVs, ενώ χρησιμοποιούν και αυτά την αναγεννητική πέδηση. Εν συγκρίσει με τα βενζινοκίνητα αυτοκίνητα, οι εκπομπές CO₂ αν και δεν είναι μηδενικές είναι πολύ χαμηλότερες και η τιμή αγοράς τους αν και ελαφρώς μεγαλύτερη, θεωρείται πλέον ανταγωνιστική. Τα HEVs δεν μπορούν να επαναφορτιστούν από το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Συνήθως η φόρτιση των μπαταριών γίνεται μετατρέποντας τον ηλεκτρικό κινητήρα σε γεννήτρια, με τη βοήθεια του βενζινοκινητήρα, όταν δεν απαιτείται ηλεκτρική ενέργεια για τη μετακίνηση του οχήματος.

Εδώ όμως οφείλουμε να κάνουμε μία διάκριση μεταξύ των υβριδικών σειριακής, παράλληλης και σειριακής- παράλληλης λειτουργίας. Στην **παράλληλη λειτουργία**, η πρόωση του οχήματος εξασφαλίζεται κάθε στιγμή είτε αποκλειστικά από τον ηλεκτροκινητήρα, είτε αποκλειστικά από τον κινητήρα εσωτερικής καύσης, οι οποίοι λειτουργούν ανεξάρτητα ο ένας από τον άλλον και υπάρχει η δυνατότητα επιλογής του ενός από τους δύο. Ένα από τα πρώτα υβριδικά αυτοκίνητα που χρησιμοποιούν αυτή την τεχνολογία είναι το Honda Insight. Κατά τη **σειριακή λειτουργία** η πρόωση του οχήματος επιτυγχάνεται αποκλειστικά και μόνον από τον ηλεκτροκινητήρα, ο οποίος λαμβάνει την απαραίτητη ενέργεια από τους συσσωρευτές. Όταν η αποθηκευμένη ενέργεια κοντεύει να τελειώσει, αναλαμβάνει δράση η μηχανή εσωτερικής καύσης, η οποία απλώς τροφοδοτεί με ενέργεια τους συσσωρευτές χωρίς ποτέ να εμπλέκεται άμεσα στη διαδικασία της πρόωσης.

Τα αυτοκίνητα που χρησιμοποιούν αυτήν την τεχνολογία, όπως το Opel Ampera (γνωστό και ως Chevrolet Volt στις ΗΠΑ) ονομάζονται συχνά και ηλεκτρικά οχήματα εκτεταμένης αυτονομίας (Extended Range Electric Vehicles/EREVs) διότι ουσιαστικά χρησιμοποιούν τη ΜΕΚ ως μία εφεδρική επέκταση της εμβέλειάς τους. Η σειριακή-παράλληλη λειτουργία είναι στην ουσία όπως η παράλληλη λειτουργία με το επιπλέον χαρακτηριστικό ότι η ΜΕΚ μπορεί τώρα να φορτίζει τους συσσωρευτές. Το Toyota Prius χρησιμοποιεί αυτήν την

τεχνολογία. Όλες οι παραπάνω λειτουργίες γίνονται πιο κατανοητές κοιτώντας την παρακάτω εικόνα:



Σχήμα 3.5: Δυνατές διατάξεις υβριδικών οχημάτων.

Πρέπει να σημειωθεί ότι με την πάροδο του χρόνου όλο και περισσότερα οχήματα τείνουν να χαρακτηρίζονται ως υβριδικά, αν και πολλά από αυτά δεν ανήκουν στην κατηγορία των πλήρως υβριδικών αυτοκινήτων αλλά έχουν ενσωματώσει διάφορες μικροϋβριδικές εφαρμογές. Μία σημαντική παράμετρος που χαρακτηρίζει τη λειτουργία τους είναι ο συντελεστής υβριδοποίησης. Ο οποίος υπολογίζεται ως ο λόγος της ισχύος του ηλεκτροκινητήρα (ή των ηλεκτροκινητήρων) και της συνολικής ισχύος του οχήματος (άθροισμα της ισχύος του θερμικού κινητήρα και του ηλεκτροκινητήρα ή των ηλεκτροκινητήρων). Έχει προταθεί ο εξής διαχωρισμός των **HEV** στις ακόλουθες τρεις υποκατηγορίες σύμφωνα με τα αντίστοιχα λειτουργικά χαρακτηριστικά τους:

- **Μικροϋβριδικά (Micro Hybrid):** Είναι αυτά που διαθέτουν τη λειτουργία της αυτόματης κράτησης (διακοπής λειτουργίας) και επανεκκίνησης του κινητήρα (stop and start). Διαθέτουν ηλεκτροκινητήρα με ισχύ ίση με 4kW - 6kW, συντελεστή υβριδοποίησης ενδεικτικά ίσο με 5% ενώ αναμένεται μία εκτιμώμενη βελτίωση της κατανάλωσης ίση με 5% - 7%.
- **Ελαφρώς Υβριδικά (Mild Hybrid):** Είναι αυτά που διαθέτουν τη λειτουργία της αυτόματης κράτησης και επανεκκίνησης και, επιπρόσθετα, τη συμμετοχή του ηλεκτροκινητήρα στην προώθηση και την ανάκτηση ενέργειας. Διαθέτουν ηλεκτροκινητήρα (ή ηλεκτροκινητήρες) με ισχύ ίση με 10kW - 15kW, συντελεστή υβριδοποίησης ενδεικτικά ίσο με 10% ενώ αναμένεται μία εκτιμώμενη βελτίωση της κατανάλωσης ίση με 12% - 18%.

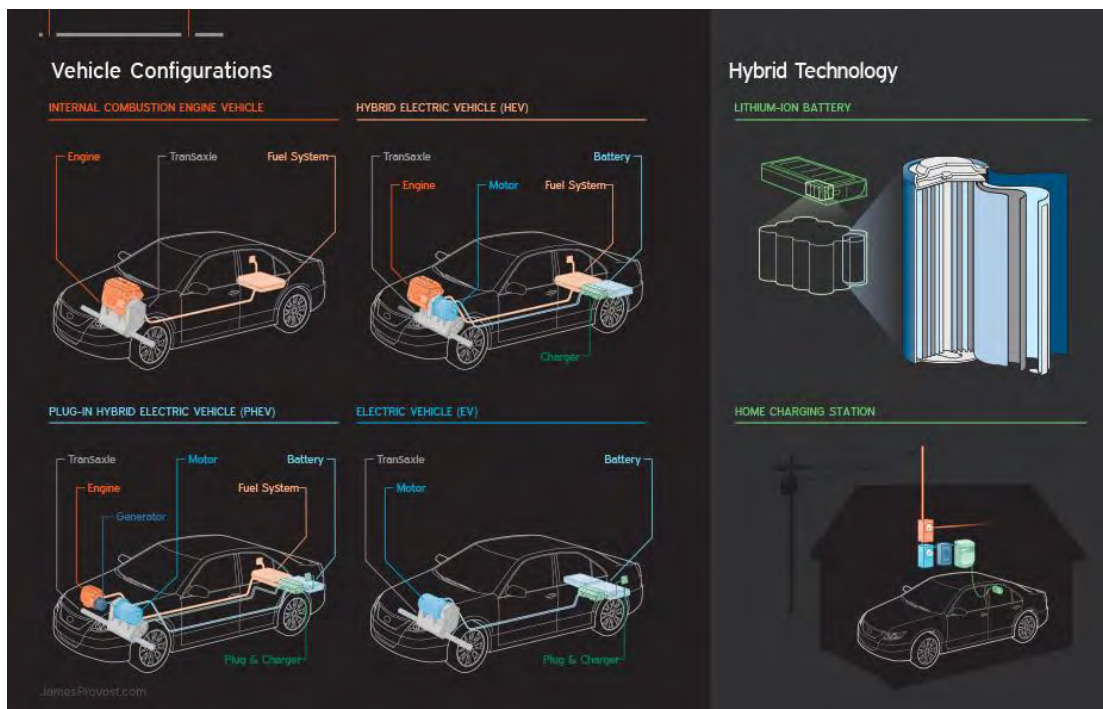
- **Πλήρως Υβριδικά (Full Hybrid):** Είναι αυτά που διαθέτουν τη λειτουργία της αυτόματης κράτησης και επανεκκίνησης, τη συμμετοχής του ηλεκτροκινητήρα στην προώθηση, την ανάκτηση ενέργειας και, επιπρόσθετα, έχουν τη δυνατότητα να κινούνται ως αμιγώς ηλεκτρικά (EV Mode). Διαθέτουν ηλεκτροκινητήρα (ή ηλεκτροκινητήρες) με ισχύ ίση με 30kW - 50kW, συντελεστή υβριδοποίησης ενδεικτικά ίσο με 25% ενώ αναμένεται μία εκτιμώμενη βελτίωση της κατανάλωσης ίση με 20% - 25%.

Οι κατασκευαστές αυτοκινήτων και η Διεθνής Ομοσπονδία Αυτοκινήτου είναι σύμφωνοι με την παραπάνω διάκριση των υβριδικών οχημάτων στις τρεις υποκατηγορίες.

3.3.3 Επαναφορτιζόμενα Υβριδικά Οχήματα με Ηλεκτρική Ενέργεια από Εξωτερική Πηγή (Plug-in Hybrid Electric Vehicles /PHEVs)

Πρόκειται για μία τεχνολογία, εξέλιξη της υβριδικής. Τα οχήματα αυτά χρησιμοποιούν επαναφορτιζόμενες μπαταρίες, ή κάποιο άλλο μηχάνημα αποθήκευσης ενέργειας, που μπορούν να επανέλθουν σε πλήρη φόρτιση συνδέοντάς τα με το δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Με τη χρήση αυτών των οχημάτων δημιουργείται ένα πολύ σημαντικό βήμα προς την κατεύθυνση της ηλεκτροκίνησης και επιτυγχάνεται η διεύρυνση του φάσματος των ενεργειακών πηγών που χρησιμοποιούνται για τις οδικές μεταφορές. Τα **PHEVs** είναι συνήθως εφοδιασμένα με συσσωρευτές μεγαλύτερης χωρητικότητας από τα απλά **HEVs**, για να μπορεί να αποθηκεύεται τόσο η ηλεκτρική ενέργεια, που εγχέεται από την εξωτερική πηγή όσο και αυτή, που παράγεται πάνω στο όχημα (ΜΕΚ και αναγεννητική πέδηση). Για το σκοπό αυτό, θα πρέπει να διαθέτουν ένα ειδικό ακροδέκτη για τη σύνδεσή τους στο δίκτυο ηλεκτρικής παροχής και μία κατάλληλη συσκευή για τη φόρτιση των συσσωρευτών τους (φορτιστής). Ένα σημαντικό μέρος ή ακόμα και το σύνολο της συνήθους καθημερινής κίνησης αυτών των οχημάτων μπορεί να επιτευχθεί τοπικά με μηδενικές εκπομπές ρύπων CO₂, διότι μπορούν να κινούνται σε σημαντικές αποστάσεις (από 20 έως 60 χιλιόμετρα) ως αμιγώς ηλεκτροκίνητα με συσσωρευτές. Η λύση αυτή συνδυάζει με τον καλύτερο τρόπο τα οφέλη της ηλεκτροκίνησης για τις αστικές μετακινήσεις εξαλείφοντας το πρόβλημα της αυτονομίας που αντιμετωπίζουν τα υπόλοιπα ηλεκτρικά οχήματα (**BEVs**) και χωρίς να απαιτούνται εκτεταμένες εγκαταστάσεις δικτύων φόρτισης, διότι οι χρήστες μπορούν να χρησιμοποιούν τα συμβατικά πρατήρια καυσίμων για τον ανεφοδιασμό τους όταν αυτό απαιτείται. Τα ήδη υπάρχοντα **HEVs** με τις κατάλληλες προσθήκες και τροποποιήσεις μπορούν να αναβαθμιστούν σε **PHEVs**.

Οι κατασκευαστές αυτοκινήτων και η Διεθνής Ομοσπονδία Αυτοκινήτου έχουν συμφωνήσει ότι, για να χαρακτηριστεί ένα όχημα ως **PHEV**, θα πρέπει να διαθέτει όλες τις λειτουργίες που αναφέρονται προηγούμενα για τα Πλήρως Υβριδικά Οχήματα (Full Hybrid) και επιπρόσθετα, να έχει τη δυνατότητα να συνδέεται στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας για να του παρέχεται άμεσα η ηλεκτρική ενέργεια που απαιτείται για την κίνησή του ως αμιγώς ηλεκτροκίνητο όχημα.



Εικόνα 3.5: Το διάγραμμα παρουσιάζει τα σημεία κλειδιά των εξαρτημάτων, των διαφορετικών τύπων οχημάτων: 1) ΜΕΚ, 2)Υβριδικό Ηλεκτρικό Όχημα (HEV), 3) Επαναφορτιζόμενα Υβριδικά Οχήματα με φόρτιση από εξωτερική πηγή (PHEV), 4) Ηλεκτρικά οχήματα (EV).

Audi A3 Sportback e-tron

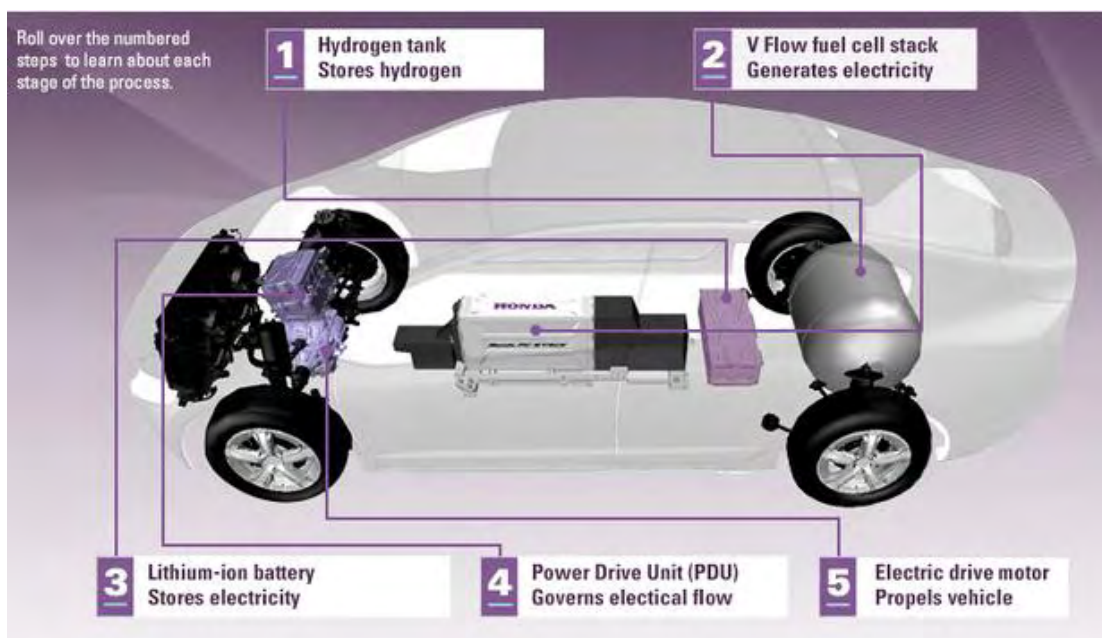
Drivetrain - hybrid components



Εικόνα 3.6: Βασικά στοιχεία ενός PHEV. Το όχημα που παρουσιάζεται είναι το Audi A3 e-tron PHEV του μοντέλο του 2015.

3.3.4 Ηλεκτρικά Οχήματα με Ενεργειακά Στοιχεία (Fuel Cell Electric Vehicles/FCEVs)

Τα FCEVs είναι στην ουσία μία μορφή υβριδικών ηλεκτροκίνητων οχημάτων σειριακής λειτουργίας, τα οποία όμως για την τροφοδότηση του ηλεκτροκινητήρα και τη φόρτιση των συσσωρευτών τους χρησιμοποιούν ενεργειακά στοιχεία κυψελών καυσίμου (fuel cells) αντί για κινητήρα εσωτερικής καύσης. Η αντίστροφη δράση της ηλεκτρόλυσης παράγει ηλεκτρική ενέργεια από την ηλεκτροχημική σύνθεση υδρογόνου και οξυγόνου με ταυτόχρονη παραγωγή καθαρού νερού. Το χρησιμοποιούμενο καύσιμο είναι καθαρό υδρογόνο ή υδρογονάνθρακες (όπως μεθανόλη, φυσικό αέριο, κλπ.) τα οποία αποθηκεύονται σε ειδική δεξαμενή ή ακόμα μπορεί να παράγονται επί των οχημάτων. Η ηλεκτροχημική σύνθεση υδρογόνου και οξυγόνου (που απορροφάται από την ατμόσφαιρα) παράγει ηλεκτρική ενέργεια εκπέμποντας στο περιβάλλον μόνο υδρατμούς. Η τεχνολογία των οχημάτων αυτών έχει εφαρμοστεί μόνο πιλοτικά, ενώ στην παρούσα δεκαετία δεν προβλέπονται ευρύτερες εφαρμογές της για λόγους που σχετίζονται με το κόστος της, την ασύμφορη ενεργειακά παραγωγή υδρογόνου και τις δυσχέρειες μεταφοράς και διανομής του. Μακροπρόθεσμα αποτελεί μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία, διότι μπορεί να οδηγήσει στην κατασκευή οχημάτων τοπικής μηδενικής ρύπανσης και μεγάλης απόστασης αυτονομίας ενώ η δυνατότητα αθόρυβης και καθαρής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από αυτά τα οχήματα ίσως επιτρέψει τη χρησιμοποίησή τους και ως κινητές εγκαταστάσεις ηλεκτροπαραγωγής. Τα FCEVs μπορούν να αναβαθμιστούν σε PHEVs, με την προσθήκη επιπλέον εξοπλισμού, ο οποίος θα τους επιτρέψει τη σύνδεση τους με το ηλεκτρικό δίκτυο.



Εικόνα 3.7: Απεικόνιση του Honda FCX Clarity Ηλεκτρικού αυτοκινήτου FCEV.

Κεφάλαιο 4

Τεχνολογίες και χαρακτηριστικά συσσωρευτών

4.1 Δομή και επεξήγηση της λειτουργίας των συσσωρευτών

Όπως έγινε φανερό στην προηγούμενη ενότητα, κεντρικό ρόλο για την κίνηση όλων των ηλεκτρικών αυτοκινήτων, ανεξαρτήτως του είδους τους, παίζει το σύστημα των συσσωρευτών. Αν και γίνεται χρήση των όρων συσσωρευτής ή μπαταρία, η βασική ηλεκτροχημική μονάδα είναι το στοιχείο. Ένας συσσωρευτής αποτελείται από ένα ή περισσότερα στοιχεία τα οποία συνδέονται μεταξύ τους ανάλογα με την επιθυμητή χωρητικότητα ή την επιθυμητή τάση εξόδου, σε σειρά ή παράλληλα.

Ένα στοιχείο αποτελείται από τρία βασικά μέρη:

1. **Την άνοδο ή το αρνητικό ηλεκτρόδιο:** το οποίο δίνει ηλεκτρόνια στο εξωτερικό κύκλωμα και είναι αυτό που οξειδώνεται (αποβάλλει ηλεκτρόνια) κατά την ηλεκτροχημική αντίδραση.
2. **Την κάθοδο ή θετικό ηλεκτρόδιο:** το οποίο δέχεται ηλεκτρόνια από το εξωτερικό κύκλωμα και ανάγεται (προσλαμβάνει ηλεκτρόνια) κατά την ηλεκτροχημική αντίδραση.
3. **Τον ηλεκτρολύτη:** ο οποίος χρησιμοποιείται ως μέσο για τη μεταφορά των ηλεκτρονίων στο εσωτερικό του στοιχείου μεταξύ ανόδου και καθόδου. Ο ηλεκτρολύτης είναι συνήθως ένα υγρό, όπως νερό ή κάποιος άλλος διαλύτης, με διαλυμένα άλατα, οξέα ή αλκάλια, που μεταδίδει την ιοντική αγωγιμότητα. Μερικοί συσσωρευτές χρησιμοποιούν στερεούς ηλεκτρολύτες, οι οποίοι είναι ιοντικοί αγωγοί στη θερμοκρασία λειτουργίας του στοιχείου.

Όπως γίνεται κατανοητό, τα δύο ηλεκτρόδια, της ανόδου και καθόδου, δεν έρχονται ποτέ σε επαφή, αλλά είναι ηλεκτρικώς συνδεδεμένα μεταξύ τους μέσω του ηλεκτρολύτη.

Οι πιο επωφελής συνδυασμοί των υλικών της ανόδου και της καθόδου είναι εκείνοι που θα δώσουν υψηλή τάση στο στοιχείο και θα είναι οι ελαφρύτεροι. Ωστόσο τέτοιοι συνδυασμοί μπορεί να μην είναι πάντα πρακτικοί εξαιτίας διαφόρων παραγόντων, όπως η αντίδραση του υλικού με άλλα υλικά του στοιχείου, η πόλωση, η δυσκολία στο χειρισμό και το υψηλό κόστος.

Η άνοδος επιλέγεται έχοντας υπόψη τις ακόλουθες ιδιότητες: αποτελεσματικότητα ως αναγωγικό μέσο (δηλαδή να προκαλεί αναγωγή, ενώ η ίδια οξειδώνεται), υψηλή απόδοση αμπερωρίων (Ah/g, πρακτική μονάδα μέτρησης του ηλεκτρικού φορτίου, εκφράζει την ποσότητα ηλεκτρικού φορτίου που μεταφέρεται από έναν αγωγό όταν διαρρέεται από ρεύμα έντασης ενός αμπερ σε χρόνο μίας ώρας), καλή αγωγιμότητα, σταθερότητα, ευκολία κατασκευής και χαμηλό κόστος. Κατάλληλα υλικά που έχουν χρησιμοποιηθεί έως τώρα ως αρνητικά ηλεκτρόδια είναι το υδρογόνο, ο ψευδάργυρος και το λίθιο.

Η κάθοδος πρέπει να είναι ένας αποτελεσματικός οξειδωτικός παράγοντας (δηλαδή να προκαλεί οξείδωση, ενώ η ίδια ανάγεται), να είναι σταθερή όταν έρχεται σε επαφή με τον ηλεκτρολύτη και να έχει ικανοποιητική τάση λειτουργίας. Το οξυγόνο μπορεί να

χρησιμοποιηθεί απευθείας από ατμοσφαιρικό αέρα που έχει εισέλθει μέσα στο στοιχείο, όπως συμβαίνει στους συσσωρευτές ψευδαργύρου-αέρα. Βέβαια, τα πιο συνηθισμένα υλικά για την κάθοδο είναι μεταλλικά οξειδία, ενώ για ειδικά συστήματα συσσωρευτών χρησιμοποιούνται αλογόνο, θείο και τα οξειδία του και άλλα χημικά συστατικά που περιέχουν οξυγόνο και υδρογόνο ενωμένα με κάποιο άλλο χημικό στοιχείο.

Τέλος, ο ηλεκτρολύτης πρέπει να έχει καλή ιοντική αγωγιμότητα, αλλά να μην είναι ηλεκτρικά αγώγιμος, καθώς τότε θα δημιουργούνταν εσωτερικά βραχυκυκλώματα. Επίσης, σημαντικό είναι ο ηλεκτρολύτης να μην αντιδρά με τα ηλεκτρόδια, να μην επηρεάζεται από τη θερμοκρασία, να είναι ασφαλής και χαμηλού κόστους. Οι περισσότεροι ηλεκτρολύτες είναι υδατικά διαλύματα, αλλά υπάρχουν σημαντικές εξαιρέσεις, όπως για παράδειγμα οι «θερμικές μπαταρίες» ή οι συσσωρευτές με λίθιο στην άνοδο, όπου ο ηλεκτρολύτης είναι τήγμα άλατος ή άλλοι μη υδατικοί ηλεκτρολύτες οι οποίοι χρησιμοποιούνται για την αποφυγή αντίδρασης με την άνοδο.

Χωρικά, τα ηλεκτρόδια της ανόδου και της καθόδου είναι ηλεκτρικά απομονωμένα στα στοιχεία της μπαταρίας για να αποφεύγονται τα εσωτερικά βραχυκυκλώματα, αλλά περιβάλλονται από τον ηλεκτρολύτη. Σε πρακτικούς σχεδιασμούς των στοιχείων, υπάρχει μηχανισμός που διαχωρίζει τα δύο ηλεκτρόδια, με το διαχωριστή να είναι διαπερατός από τον ηλεκτρολύτη για να διατηρείται η ιοντική αγωγιμότητα. Επίσης, ηλεκτρικοί αγωγοί με δομή πλέγματος μπορούν να προστεθούν στα ηλεκτρόδια για να μειώσουν την εσωτερική αντίσταση.

Κάθε στοιχείο μπορεί να κατασκευασθεί σε διάφορες διατάξεις και σχήματα (κυλινδρικό, επίπεδο, πρισματικό) και για αυτό τα ηλεκτρόδια και ο ηλεκτρολύτης κατασκευάζονται με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να χωρούν στο επιθυμητό σχήμα του στοιχείου του συσσωρευτή. Τα στοιχεία στη συνέχεια σφραγίζονται με διάφορους τρόπους για την αποφυγή διαρροής ή ξήρανσης των υλικών τους. Μερικά είναι εξοπλισμένα με συσκευές εξαερισμού ή άλλα μέσα που επιτρέπουν στα συγκεντρωμένα αέρια να διαφύγουν. Η κατασκευή των ηλεκτροχημικών στοιχείων ολοκληρώνεται με κατάλληλα κιβώτια ή δοχεία, με μέσα σύνδεσης του ακροδέκτη και με τη σήμανσή τους.

4.2 Αρχή λειτουργίας συσσωρευτών

Ο συσσωρευτής ή μπαταρία είναι μια συσκευή που μετατρέπει τη χημική ενέργεια που περιέχεται στο ενεργό υλικό του, απευθείας σε ηλεκτρική, μέσω μιας ηλεκτροχημικής αντίδρασης οξειδοαναγωγής³. Αυτός ο τύπος αντίδρασης περιλαμβάνει τη μεταφορά ηλεκτρονίων από το ένα υλικό στο άλλο μέσω ενός ηλεκτρικού κυκλώματος. Η διεργασία

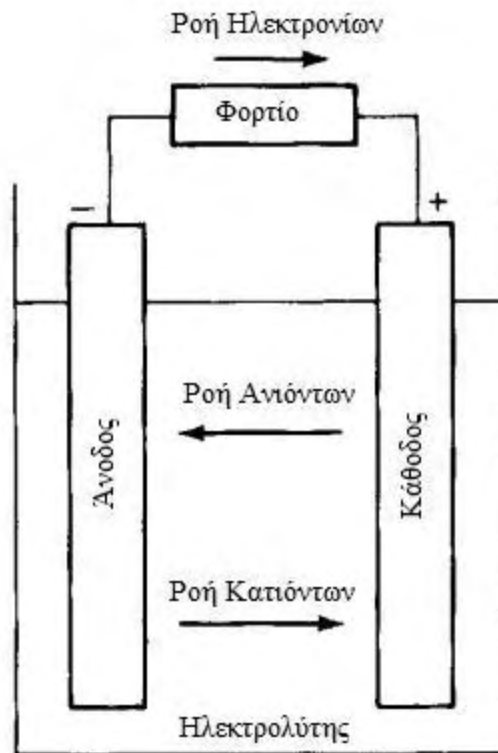
³ Ο όρος οξειδοαναγωγή περιγράφει όλες τις χημικές αντιδράσεις κατά τις οποίες τα άτομα των στοιχείων που συμμετέχουν αλλάζουν αριθμό οξείδωσης. Αριθμός οξείδωσης ή βαθμίδα οξείδωσης ή τυπικό σθένος ενός στοιχείου είναι :

- το ηλεκτρικό φορτίο που αποκτά το άτομο όταν σχηματίζει με ένα άλλο στοιχείο ιοντικό δεσμό,

- το "φαινομενικό φορτίο" που αποκτά το άτομο του όταν ενώνεται ομοιοπολικά με άτομο άλλου στοιχείου και τα κοινά ζεύγη ηλεκτρονίων αποδοθούν στο ηλεκτραρνητικότερο απ' αυτά. Η διαδικασία της οξειδοαναγωγής μπορεί να γίνεται σχετικά απλά και γρήγορα, όπως η οξείδωση του άνθρακα από το οξυγόνο προς διοξείδιο του άνθρακα, ή μπορεί να είναι μια πολύπλοκη διαδικασία, όπως η οξείδωση της γλυκόζης στους οργανισμούς, η οποία επιτυγχάνεται μέσω πολύπλοκων διεργασιών μεταφοράς ηλεκτρονίων. Γενικά ισχύει: α) **Οξείδωση ενός στοιχείου είναι η αποβολή ηλεκτρονίων από αυτό.** β) **Αναγωγή ενός στοιχείου είναι η πρόσληψη ηλεκτρονίων από αυτό.**

αυτή μπορεί να συνεχίζεται έως ότου διακοπεί το κύκλωμα ή κάποιο από τα αντιδρώντα στοιχεία εκλείψει. Καθώς η αντίδραση οξειδοαναγωγής στους συσσωρευτές γίνεται ηλεκτροχημικά, δεν υπόκειται στους περιορισμούς του κύκλου Carnot που διέπονται από το δεύτερο νόμο της θερμοδυναμικής, με αποτέλεσμα οι μπαταρίες να έχουν υψηλότερη ενεργειακή απόδοση μετατροπής. Στις περιπτώσεις των επαναφορτιζόμενων συστημάτων, οι συσσωρευτές φορτίζονται ξανά, ακολουθώντας την αντίστροφη διαδικασία.

4.2.1 Διαδικασία εκφόρτισης



Σχήμα 4.1: Απλή απεικόνιση της διαδικασίας εκφόρτισης ενός στοιχείου.

Όταν το ηλεκτροχημικό στοιχείο είναι συνδεδεμένο με ένα εξωτερικό φορτίο, ηλεκτρόνια ρέουν μέσω του εξωτερικού φορτίου από την άνοδο, η οποία οξειδώνεται προς την κάθοδο, όπου δέχεται τα ηλεκτρόνια. Το ηλεκτρικό κύκλωμα ολοκληρώνεται με τον ηλεκτρολύτη και τη ροή ανιόντων (αρνητικών ιόντων) και κατιόντων (θετικών ιόντων) προς την άνοδο και την κάθοδο, αντίστοιχα.



Σχήμα 4.2: Απλή απεικόνιση της διαδικασίας φόρτισης ενός (επαναφορτιζόμενου) στοιχείου

4.2.2 Διαδικασία φόρτισης

Κατά τη διάρκεια της επαναφόρτισης ενός επαναφορτιζόμενου στοιχείου, η ροή του ρεύματος (ροή των ηλεκτρονίων) αντιστρέφεται, η οξείδωση λαμβάνει χώρα στο θετικό ηλεκτρόδιο (άνοδος) και αυτό που ανάγεται τώρα είναι το αρνητικό ηλεκτρόδιο (κάθοδος). Καθώς εξορισμού, η άνοδος είναι το ηλεκτρόδιο στο οποίο γίνεται η οξείδωση και η κάθοδος το ηλεκτρόδιο στο οποίο γίνεται η αναγωγή, το θετικό ηλεκτρόδιο είναι τώρα η άνοδος και το αρνητικό η κάθοδος.

4.3 Χαρακτηριστικά μεγέθη συσσωρευτών και τα γνωστότερα είδη τους

Αν εξετάσουμε προσεκτικά από πού πηγάζουν τα μειονεκτήματα των ηλεκτρικών αυτοκινήτων, συμπεραίνουμε ότι όλα σχετίζονται με τους περιορισμούς, που επιβάλουν οι συσσωρευτές. Για το λόγο αυτό, είναι αρκετά σημαντικό να κάνουμε μία μικρή επισκόπηση των χαρακτηριστικών τους και των ειδών τους. Μια συστοιχία συσσωρευτών που προορίζεται για ένα ηλεκτρικό όχημα θα πρέπει να έχει μερικά από τα εξής χαρακτηριστικά (υψηλή πυκνότητα ενέργειας, μεγάλο κύκλο ζωής, απουσία φαινομένων επίδρασης των προηγούμενων φορτίσεων/εκφορτίσεων στην απόδοση της μπαταρίας, υψηλό βαθμό απόδοσης, χαμηλό κόστος, υψηλή απόδοση φόρτισης/εκφόρτισης, μεγάλο εύρος λειτουργίας μεταξύ χαμηλών και υψηλών θερμοκρασιών, καλό βαθμό θερμοκρασίας αποθήκευσης, χαμηλή εσωτερική αντίσταση, δυνατότητα ανακύκλωσης κ.α.)

Τα κύρια στοιχεία που μας ενδιαφέρουν και εξετάζουμε και αποτελούν συνάμα, τα χαρακτηριστικά του εκάστοτε συσσωρευτή, δίνοντας μας τη δυνατότητα να συγκρίνουμε και να επιλέγουμε τον κατάλληλο συσσωρευτή για κάθε εφαρμογή είναι τα εξής :

- **Τάση (V):** Η διαφορά δυναμικού που παρατηρείται μεταξύ του θετικού και του αρνητικού ηλεκτροδίου ονομάζεται τάση του ηλεκτροχημικού στοιχείου ή του συσσωρευτή. Η μονάδα μέτρησης της τάσης είναι τα Volts (V). Η τιμή της τάσης εξαρτάται από τη χημική σύνθεση των ηλεκτροδίων, τη συγκέντρωση των υλικών των ηλεκτροδίων και τη θερμοκρασία. Η τάση ανοιχτοκύκλωσης (open circuit voltage) ενός πλήρως φορτισμένου συσσωρευτή μπορεί να είναι λίγο μεγαλύτερη της τάσης αναφοράς. Η τάση βραχυκύκλωσης (closed circuit voltage) αντικατοπτρίζει την τάση του συσσωρευτή υπό φορτίο.
- **Εσωτερική αντίσταση:** Η εσωτερική αντίσταση της μπαταρίας συνήθως διαφέρει στη φόρτιση και την εκφόρτιση (χαμηλότερη στην εκφόρτιση και υψηλότερη στη φόρτιση). Εξαρτάται από τη χημική σύσταση της μπαταρίας και επηρεάζεται από τη θερμοκρασία, το μέγεθος της μπαταρίας, την ηλικία της και το ρεύμα εκφόρτισης. Είναι απαραίτητο η εσωτερική αντίσταση κάθε συσσωρευτή να είναι σημαντικά μικρότερη της αντίστασης του φορτίου. Διαφορετικά, καθώς αυξάνεται η εσωτερική αντίσταση του συσσωρευτή, η απόδοση του συσσωρευτή μειώνεται ενώ και η θερμική του ευστάθεια ελαττώνεται, διότι η ενέργεια που παρέχει η μπαταρία μετατρέπεται σε θερμότητα.
- **Μέγιστο συνεχές ρεύμα εκφόρτισης:** Είναι το μέγιστο ρεύμα με το οποίο μπορεί να εκφορτίζεται ένας συσσωρευτής συνεχόμενα. Αυτό το όριο συνήθως χρησιμοποιείται από τους κατασκευαστές ώστε να αποφευχθούν υπερβολικοί ρυθμοί εκφόρτισης οι οποίοι θα δημιουργούσαν πρόβλημα στον συσσωρευτή.
- **Χωρητικότητα (ampere-hour ή για συντομία Ah):** Οι συσσωρευτές χαρακτηρίζονται από την χωρητικότητά τους, δηλαδή την ποσότητα ηλεκτρικού φορτίου που μπορούν να αποθηκεύσουν. Ως χωρητικότητα μιας μπαταρίας θεωρείται η ποσότητα των ελεύθερων ηλεκτρικών φορτίων που παράγονται από το ενεργό υλικό του αρνητικού ηλεκτροδίου και καταναλώνονται από το ενεργό υλικό του θετικού ηλεκτροδίου. Η μονάδα μέτρησης της χωρητικότητας είναι το Coulomb (C), επειδή όμως το 1 Coulomb είναι μικρή μονάδα, χρησιμοποιούνται τα Αμπερώρια (1 Ah=3600C). Το Αμπερώριο είναι πρακτική μονάδα μέτρησης του ηλεκτρικού φορτίου και εκφράζει τη ποσότητα ηλεκτρικού φορτίου που μεταφέρεται από ένα αγωγό όταν διαρρέεται από ρεύμα έντασης ενός αμπερ σε χρόνο μιας ώρας. Για παράδειγμα, αν η χωρητικότητα ενός συσσωρευτή είναι 10Ah, αυτό σημαίνει ότι ο συσσωρευτής μπορεί να παρέχει ρεύμα έντασης 1A για 10 ώρες ή 2A για 5 ώρες κ.ο.κ. .

Παρόλα αυτά, οι πραγματικές δυνατότητες αποθήκευσης ενέργειας ενός συσσωρευτή μπορεί να αποκλίνουν από την «ονομαστική» χωρητικότητα, καθώς η χωρητικότητα εξαρτάται από την ποσότητα των ενεργών υλικών του συσσωρευτή. Ένα πολύ μικρό ηλεκτροχημικό στοιχείο έχει μικρότερη χωρητικότητα από ένα μεγαλύτερο στοιχείο ίδιας χημικής σύστασης. Επίσης, η χωρητικότητα επηρεάζεται από τις συνθήκες εκφόρτισης όπως είναι ο ρυθμός εκφόρτισης (μεγάλος ρυθμός εκφόρτισης συνεπάγεται μικρή χωρητικότητα συσσωρευτή), το ρεύμα εκφόρτισης, τη τάση, την ηλικία της και τη θερμοκρασία.

- **Πυκνότητα ενέργειας:** Μετριέται σε Wh/kg ή σε Wh/l και υποδηλώνει την ενέργεια, που μπορεί να αποθηκευτεί στο συσσωρευτή ανά μονάδα μάζας ή όγκου. Αποτελεί

χαρακτηριστικό της χημικής σύστασης του συσσωρευτή και της συσκευασίας. Καθορίζει, σε συνεργασία με την ενεργειακή κατανάλωση του οχήματος, το βάρος του συσσωρευτή που απαιτείται για να επιτευχθεί η απαιτούμενη απόδοση. Μεγάλη πυκνότητα ενέργειας συνεπάγεται και μεγάλη αυτονομία.

- **Πυκνότητα ισχύος:** Μετριέται σε W/kg ή σε W/l και υποδηλώνει τη μέγιστη ισχύ, που μπορεί να προσφέρει ένας συσσωρευτής ανά μονάδα μάζας ή όγκου. Ισχύει για συγκεκριμένη περίοδο φόρτισης/εκφόρτισης και καθορίζει τις επιδόσεις στο όχημα (επιτάχυνση, τελική ταχύτητα), όταν το μέγεθος αυτό είναι μεγάλο.
- **Διάρκεια ζωής:** Μετριέται σε κύκλους και υποδηλώνει τις δυνατές επαναφορτίσεις του συσσωρευτή. Σημαντικό ρόλο στον καθορισμό αυτού του μεγέθους επίσης παίζει το βάθος εκφόρτισης.
- **Βαθμός απόδοσης:** Οι απώλειες ενέργειας και ισχύος κατά την εκφόρτιση ή τη φόρτιση εμφανίζονται με τη μορφή απώλειας τάσης. Έτσι, η απόδοση του συσσωρευτή κατά την εκφόρτιση ή τη φόρτιση μπορεί να οριστεί ως ο λόγος της τάσης λειτουργίας του συσσωρευτή προς τη θερμοδυναμική του τάση. Η θερμοδυναμική τάση ορίζεται ως η τάση ανοιχτού κυκλώματος του συσσωρευτή σε θερμοκρασία 25°C και πίεση 1atm.
- **Κόστος:** Μετριέται σε €/kWh και πολλαπλασιασμένο επί την αποθηκευτική ικανότητα ενός συγκεκριμένου συσσωρευτή μας δίνει το κόστος κεφαλαίου του. Το κόστος αυτό μπορεί να προέρχεται από τις απαραίτητες πρώτες ύλες, τη συναρμολόγηση του συσσωρευτή κ.α.
- **Ζητήματα ασφάλειας:** Μας ενδιαφέρει η ασφάλης για την υγεία των επιβατών λειτουργία του συσσωρευτή, τόσο σε κανονικές συνθήκες κίνησης και στάθμευσης (να μην εκτίθενται π.χ. σε πιητικά υγρά) όσο και σε έκτακτες συνθήκες, π.χ. κατά την περίπτωση σύγκρουσης του οχήματος.

Για την όσο το δυνατόν καλύτερη κάλυψη των παραπάνω απαιτήσεων έχουν αναπτυχθεί πολλές τεχνολογίες, οι κυριότερες από τις οποίες είναι:

- Συσσωρευτές μολύβδου-οξέος (**Lead-acid**)
- Συσσωρευτές νικελίου-καδμίου (**Ni-Cd**)
- Συσσωρευτές νικελίου-μετάλλου-υδριδίου (**Ni-MH**)
- Συσσωρευτές ιόντων λιθίου (**Li-ion**) και λιθίου-πολυμερών (**LiM-Polymer**)
- Συσσωρευτές τηγμένων αλάτων (**ZEBRA**)

Συσσωρευτές Μολύβδου-Οξέος (lead-acid)

Οι συσσωρευτές μολύβδου-οξέως αποτελούν τις πιο διαδεδομένες μπαταρίες του εμπορίου. Υπάρχουν δύο ειδών μπαταρίες: οι μπαταρίες εκκίνησης και οι μπαταρίες βαθιάς εκφόρτισης. Οι εναλλάκτες των αυτοκινήτων είναι σχεδιασμένοι με τέτοιο τρόπο ώστε να προσφέρουν υψηλούς ρυθμούς φόρτισης στην μπαταρία, σε αντίθεση με τις μπαταρίες βαθιάς εκφόρτισης οι οποίες απαιτούν φόρτιση πολλαπλών σταδίων (**multi-stage charging**). Για τις μπαταρίες μολύβδου-οξέως συνιστάται, να μην πέφτουν χαμηλότερα από το 50% της χωρητικότητάς τους καθώς αυτό συντελεί στη μείωση της ζωής τους. Επιπρόσθετα, οι συσσωρευτές αυτού του τύπου απαιτούν συνεχή επιθεώρηση του επιπέδου ηλεκτρολυτών και περιστασιακή αντικατάσταση του νερού, το οποίο εξατμίζεται κατά τη διάρκεια του φυσιολογικού κύκλου φόρτισης.

Η μεγάλο μέρος των ηλεκτρικών οχημάτων χρησιμοποιεί τις μπαταρίες μολύβδου-οξέως λόγω της εξελιγμένης τεχνολογίας τους, της υψηλής διαθεσιμότητας τους και του χαμηλού κόστους τους. Όπως και οι υπόλοιπες μπαταρίες, ο τρόπος της κατασκευής, της χρήσης και της ανακύκλωσής τους επηρεάζουν ως ένα βαθμό το περιβάλλον. Οι συσσωρευτές βαθιάς εκφόρτισης είναι ακριβοί και έχουν μικρότερη διάρκεια ζωής από ότι το ίδιο το όχημα, με αποτέλεσμα να θέλουν συχνά αντικατάσταση. Η αντικατάσταση αυτή, συνήθως γίνεται ανά 3 χρόνια. Η μπαταρίες αυτές είναι ογκώδεις, το οποίο φαίνεται από το γεγονός ότι σε εφαρμογές ηλεκτρικών οχημάτων, οι μπαταρίες καταλήγουν να κατέχουν ένα τεράστιο ποσοστό της τάξης του 25-50% της συνολικής μάζας του οχήματος. Όπως όλες οι μπαταρίες, έχουν αρκετά μικρότερη ενεργειακή πυκνότητα σε σύγκριση με τα καύσιμα πετρελαίου, συνήθως 30-40 Wh/kg. Η απόδοση (70-75%) και η ικανότητα αποθήκευσης της τρέχουσας γενιάς μπαταριών μολύβδου-οξέως βαθιάς εκφόρτισης μειώνονται με τη μείωση της θερμοκρασίας. Μάλιστα, σε ιδιαίτερα υψηλές θερμοκρασίες η απόδοση μπορεί να μειωθεί έως και 40%. Οι νέες εξελίξεις στην απόδοση, τη χωρητικότητα, το υλικό κατασκευής, την ασφάλεια, την τοξικότητα και την αντοχή είναι δυνατό να επιτρέπουν σε αυτά τα μοναδικά χαρακτηριστικά να εφαρμοστούν και σε ηλεκτρικά οχήματα κανονικού μεγέθους.

Κατασκευαστικές λεπτομέρειες:

Σχεδόν το 60% του βάρους των συσσωρευτών μολύβδου-οξέος είναι μολύβδο. Ανάλογα με την εφαρμογή για την οποία προορίζονται, καθορίζονται ο σχεδιασμός, το μέγεθος, οι ποσότητες και οι τύποι των υλικών που θα χρησιμοποιηθούν κατά την κατασκευή τους ή συστατικά του, και αποτελούν τη βασικότερη χρήση του μολύβδου παγκοσμίως.

Η χημική σύσταση των συσσωρευτών μολύβδου-οξέος είναι διοξειδίο μολύβδου ως το ενεργό υλικό του θετικού ηλεκτροδίου και μεταλλικός μολύβδος σε μία μεγάλης επιφάνειας πορώδη δομή για το ενεργό υλικό του αρνητικού ηλεκτροδίου. Ο ηλεκτρολύτης είναι διάλυμα θεικού οξέος. Καθώς ο συσσωρευτής εκφορτίζεται και τα δύο ηλεκτρόδια μετατρέπονται σε θεικό μολύβδο. Η διαδικασία αντιστρέφεται κατά τη διάρκεια της φόρτισης.

Τα ηλεκτρόδια των συσσωρευτών μολύβδου-οξέος είναι σε μορφή πλακών. Κάθε πλάκα είναι σε πλέγμα για να συγκρατούνται μηχανικά τα ενεργά υλικά αλλά και να άγεται ο ηλεκτρισμός μεταξύ των ενεργών υλικών και των πόλων του συσσωρευτή. Η μηχανική στήριξη θα μπορούσε να γίνει μέσω μη μεταλλικών υλικών, όπως πολυμερή, κεραμικά, καουτσούκ κ.λπ., εσωτερικά των πλακών, όμως τα υλικά αυτά δεν άγουν τον ηλεκτρισμό. Το πιο συνηθισμένο υλικό για το πλέγμα των πλακών είναι τα κράματα μολύβδου. Ο καθαρός μολύβδος είναι γενικά πολύ μαλακός για να χρησιμοποιηθεί ως κύριο υλικό του πλέγματος, και έτσι, γίνεται πιο σκληρός με την προσθήκη συνηθέστερα αντιμονίου. Η ποσότητα του αντιμονίου κυμαίνεται μεταξύ 5% και 12% του βάρους, ανάλογα τη διαθεσιμότητα και το κόστος του αντιμονίου, και με τάση για περαιτέρω μείωσή του, στο 1.5% με 2%, με σκοπό τη ελαχιστοποίηση της συντήρησης της μπαταρίας (προσθήκη νερού). Καθώς μειώνεται το ποσοστό του αντιμονίου στο πλέγμα, για να αποφευχθεί η ευθραυστότητά του, προστίθενται άλλα υλικά όπως θείο, χαλκός, αρσενικό, σελήνιο, τελλούριο αλλά και συνδυασμοί τους. Μία δεύτερη κατηγορία πλέγματος είναι τα κράματα μολύβδου με ασβέστιο ή άλλα αλκαλικά στοιχεία. Αυτά τα κράματα αρχικά χρησιμοποιήθηκαν σε εφαρμογές στις τηλεπικοινωνίες.

Το απλούστερο ηλεκτροχημικό στοιχείο αποτελείται από ένα αρνητικό ηλεκτρόδιο, ένα θετικό ηλεκτρόδιο και ένα διαχωριστή ανάμεσά τους. Συνήθως, τα πιο πρακτικά

ηλεκτροχημικά στοιχεία μολύβδου-οξέος αποτελούνται από 3 έως 30 πλάκες (ηλεκτρόδια) και τους διαχωριστές ανάμεσα. Ο διαχωριστής χρησιμοποιείται για να απομονώσει ηλεκτρικά κάθε πλάκα από το αντίθετο πιο κοντινό ηλεκτρόδιο. Ταυτόχρονα, πρέπει να είναι αρκετά πορώδης για να επιτρέπει τη μεταφορά οξέος μέσα και έξω από τις πλάκες.

Το ποσοστό της αυτοεκφόρτισης του συσσωρευτή μολύβδου-οξέος, δηλαδή της απώλειας χωρητικότητας (φόρτισης) όταν δεν υπάρχει εξωτερικό φορτίο, είναι αρκετά μεγάλο αλλά μπορεί να μειωθεί αισθητά συμπεριλαμβάνοντας κατά τη σχεδίαση των συσσωρευτών συγκεκριμένα χαρακτηριστικά. Ο μολύβδος και το διοξείδιο του μολύβδου είναι θερμοδυναμικά ασταθή σε διαλύματα θεικού οξέος και σε κατάσταση ανοιχτοκύκλωσης αντιδρούν με τον ηλεκτρολύτη. Το οξυγόνο αναμειγνύεται στο θετικό ηλεκτρόδιο ενώ το υδρογόνο στο αρνητικό. Η αυτοεκφόρτιση του αρνητικού ηλεκτροδίου είναι γενικά ταχύτερη από του θετικού, στο οποίο είναι μικρότερη από 10% ανά ημέρα στους 25°C. Η αυτοεκφόρτιση των συσσωρευτών μολύβδου-οξέος εξαρτάται από τη θερμοκρασία και μπορεί να περιοριστεί αν η αποθήκευση των συσσωρευτών γίνεται σε θερμοκρασίες μεταξύ 5 και 15°C.

Συνοπτικά:

Πλεονεκτήματα

- (+) Φθηνοί και απλοί στην κατασκευή.
- (+) Αξιόπιστη και ώριμη τεχνολογία, αφού αναπτύσσονται για περισσότερο από 140 χρόνια.
- (+) Διαθέσιμοι σε πολλές ποσότητες και μεγέθη (λιγότερο από 1 έως περισσότερα από 10.000 αμπερώρια).
- (+) Χαμηλή εσωτερική αντίσταση.
- (+) Ικανότητα λειτουργίας σε υψηλά ρεύματα, κατάλληλη για εκκίνηση μηχανών.
- (+) Αποτελούν το περισσότερο ανακυκλωμένο προϊόν στον κόσμο.
- (+) Ανθεκτικοί σε υπερφορτίσεις.
- (+) Αρκετά καλή απόδοση σε χαμηλές και υψηλές θερμοκρασίες.
- (+) ηλεκτρικώς αποτελεσματικοί/ικανότητα ανάκαμψης της αποδοτικότητάς τους πάνω από 70%.
- (+) Υψηλή τάση του ηλεκτροχημικού στοιχείου, μεγαλύτερη από 2V.
- (+) εύκολη ένδειξη της κατάστασης φόρτισης.
- (+) καλή διατήρηση της φόρτισης σε διακοπόμενη λειτουργία.
- (+) διατίθενται για συντήρηση.

Μειονεκτήματα

- (-) Έχουν χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα.
- (-) Σχετικά λίγοι κύκλοι ζωής (50-300 κύκλοι).
- (-) Μεγάλη αποθήκευση ενώ είναι εκφορτισμένοι, μπορεί να οδηγήσει σε μόνιμη πόλωση των ηλεκτροδίων.
- (-) Είναι πιθανό να δημιουργηθεί θερμική διαφυγή σε περίπτωση εσφαλμένης φόρτισης
- (-) Όχι κατάλληλοι για ταχεία φόρτιση.
- (-) Έχουν τεράστιο βάρος και όγκο.
- (-) Δύσκολη κατασκευή πολύ μικρών μεγεθών.
- (-) Η παραγωγή υδρογόνου μπορεί να αποτελέσει κίνδυνο ανάφλεξης.

Συσσωρευτές Νικελίου-Καδμίου (Nickel-Cadmium - Ni-Cd)

Αυτό το είδος συσσωρευτών χρησιμοποιείται συνήθως σε εφαρμογές όπου απαιτείται ταχεία φόρτιση και όχι αργή. Η ενεργειακή τους πυκνότητα κυμαίνεται από 45 έως 80 Wh/kg. Στην πραγματικότητα, είναι οι μόνες μπαταρίες που αποδίδουν καλά κάτω από αντίξοες συνθήκες. Η περιοδική πλήρης φόρτιση είναι πολύ σημαντική για τους συσσωρευτές νικελίου-καδμίου, αφού σε αντίθετη περίπτωση είναι πιθανό να δημιουργηθούν μεγάλοι κρύσταλλοι στις πλάκες, με αποτέλεσμα η μπαταρία να χάσει της απόδοσή της.

Κατασκευαστικές λεπτομέρειες:

Όλα τα συστήματα συσσωρευτών νικελίου-καδμίου έχουν την ίδια χημική σύσταση. Η θετική πλάκα ηλεκτροδίου αποτελείται από οξυ-υδροξείδιο νικελίου και η αρνητική πλάκα από κάδμιο. Ανάμεσά τους υπάρχει ένας διαχωριστής που είναι ένα λεπτό πορώδες μονωτικό φύλλο. Ο αλκαλικός ηλεκτρολύτης είναι υδροξείδιο του καλίου. Κατά την εκφόρτιση, το οξυ-υδροξείδιο του νικελίου μεταπίπτει σε υδροξείδιο του νικελίου με τη συμμετοχή νερού και το κάδμιο σε υδροξείδιο του καδμίου. Κατά τη φόρτιση συμβαίνει η αντίστροφη διαδικασία. Ο ηλεκτρολύτης δεν μεταβάλλεται κατά την εκφόρτιση ή τη φόρτιση με αποτέλεσμα να μην αποτελεί δείκτη της κατάστασης φόρτισης του συσσωρευτή, όπως συμβαίνει στις μπαταρίες μολύβδου-οξέος.

Οι συσσωρευτές νικελίου-καδμίου μπορούν να κατασκευαστούν με βαλβίδα εκτόνωσης της πίεσης που αναπτύσσεται στο εσωτερικό τους από αέρια, χωρίς όμως αυτό να είναι απαραίτητο στοιχείο της κατασκευής τους.

Στην περίπτωση όπου δεν χρησιμοποιηθεί βαλβίδα πίεσης, οι συσσωρευτές νικελίου-καδμίου είναι σφραγισμένοι και δεν απαιτούν καθόλου συντήρηση παρά μόνο επαναφόρτιση.

Πιο αναλυτικά, οι συσσωρευτές νικελίου-καδμίου κλειστού τύπου μπορούν να επαναφορτίζονται με υψηλό ρυθμό μέσα σε διάστημα μιας ώρας κάτω από ελεγχόμενες συνθήκες. Μερικοί έχουν την ικανότητα να επαναφορτιστούν μέσα σε 3 με 5 ώρες χωρίς ειδικές συνθήκες, ενώ όλοι φορτίζονται πλήρως σε 14 ώρες. Είναι ιδιαίτερα αξιοσημείωτοι για την λειτουργία τους σε χαμηλές θερμοκρασίες (λειτουργούν περίπου από τους -40°C), ενώ σε υψηλές θερμοκρασίες μπορούν να λειτουργήσουν έως τους 50°C και σε κάποιες περιπτώσεις έως και τους 70°C . Η διάρκεια ζωής τους ξεπερνά τους 500 κύκλους φόρτισης ή διαφορετικά μπορούν να λειτουργήσουν ως εφεδρική πηγή ενέργειας για 5 με 7 χρόνια.

Οι συσσωρευτές νικελίου-καδμίου που προορίζονται για βιομηχανική χρήση περιέχουν περίπου 6% κάδμιο και αυτοί που προορίζονται για οικιακή χρήση περίπου 18%. Το κάδμιο είναι τοξικό μέταλλο με αποτέλεσμα να πρέπει οι συσσωρευτές νικελίου-καδμίου να απορρίπτονται σωστά μετά το τέλος της ζωής τους. Στην Αμερική, μέρος της αρχικής τιμής του συσσωρευτή αποτελεί κάποιου είδους «προκαταβολή» για τη σωστή απόρριψή του στο τέλος της χρήσης του. Στην Ευρωπαϊκή Ένωση, οι πωλήσεις των συσσωρευτών νικελίου-καδμίου επιτρέπονται μόνο για ιατρική χρήση, για συστήματα συναγερμών, για φωτισμό έκτακτης ανάγκης και για φορητές συσκευές ισχύος.

Ανάλογα με τη μέθοδο κατασκευής των πλακών των ηλεκτροδίων, οι συσσωρευτές νικελίου-καδμίου διακρίνονται σε **δύο βασικούς τύπους**:

Ο πρώτος τύπος συσσωρευτή καλείται rocket plate (πλάκα με θυλάκια), διότι το ενεργό υλικό των ηλεκτροδίων είναι τοποθετημένο μέσα σε διάτρητες θήκες από χάλυβα,

ενώ ο δεύτερος τύπος συσσωρευτή ονομάζεται sintered plate (πεφρυγμένη πλάκα) και στη μέθοδο αυτή, το ενεργό υλικό των ηλεκτροδίων περιέχεται σε μια πεφρυγμένη πλάκα.

Συσσωρευτές νικελίου-καδμίου pocket plate

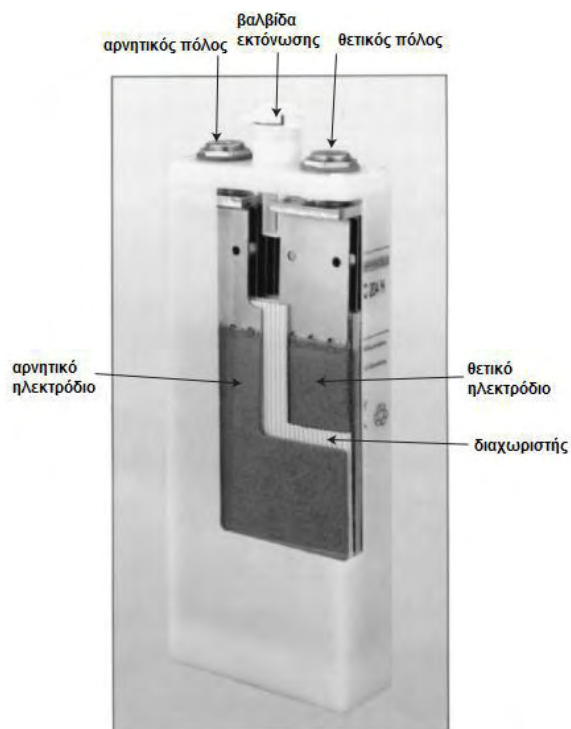
Ο συγκεκριμένος τύπος συσσωρευτή νικελίου-καδμίου είναι ο παλαιότερος από όλες τις δομές που είναι διαθέσιμες σήμερα. Κατασκευάζεται σε τρία διαφορετικά πάχη πλάκας αναλόγως την εφαρμογή για την οποία προορίζεται και σε διάφορες τιμές χωρητικότητας που μπορεί να κυμαίνονται από 5Ah έως περισσότερα από 1200Ah. Για υψηλή απόδοση και μεγάλο ρυθμό εκφόρτισης χρησιμοποιούνται λεπτές πλάκες, έτσι ώστε να υπάρχει μέγιστη έκθεση της επιφάνειας της πλάκας ανά όγκο ενεργού υλικού. Για εκφορτίσεις μεγάλης διάρκειας (μικρός ρυθμός εκφόρτισης), χρησιμοποιούνται οι πιο παχιές πλάκες για να επιτευχθεί μέγιστος όγκος ενεργού υλικού ανά μονάδα επιφάνειας της πλάκας. Το ενδιάμεσο πάχος της πλάκας χρησιμοποιείται σε συσσωρευτές για εφαρμογές που απαιτούν εναλλαγή μεταξύ μεγάλου και μικρού ρυθμού εκφόρτισης.

Ο συσσωρευτής rocket plate είναι ιδιαίτερα αξιόπιστος, σταθερός, έχει μεγάλη διάρκεια ζωής και μπορεί να λειτουργήσει αποτελεσματικά σε σχετικά υψηλό ρυθμό εκφόρτισης και σε μεγάλο εύρος θερμοκρασιών. Επίσης, διατηρεί πολύ καλά την κατάσταση φόρτισης με αποτέλεσμα να μπορεί να αποθηκευτεί για μεγάλα χρονικά διαστήματα, είτε φορτισμένος είτε εκφορτιστος, χωρίς να παρουσιάσει κάποια μεταβολή. Τέλος, είναι ανθεκτικός σε μηχανική κακοδιαχείριση και ηλεκτρική κακή χρήση, όπως είναι η υπερφόρτιση και η βραχυκύκλωση.

Σε κάποιες εφαρμογές, οι συσσωρευτές νικελίου-καδμίου εμφανίζουν το φαινόμενο μνήμης. Το φαινόμενο μνήμης των επαναφορτιζόμενων συσσωρευτών προκαλεί στους συσσωρευτές να «κρατούν» λιγότερη φόρτιση. Πιο συγκεκριμένα, οι συσσωρευτές χάνουν μέρος της χωρητικότητάς τους εάν δεν εκφορτίζονται πλήρως πριν από την επαναφόρτίσή τους, καθώς τείνουν να «θυμούνται» την μικρότερη χωρητικότητα στην οποία επαναφορτίστηκαν. Ωστόσο, το φαινόμενο μνήμης δεν παρατηρείται στον τύπο rocket plate των συσσωρευτών νικελίου-καδμίου.

Το κόστος των συγκεκριμένων συσσωρευτών είναι χαμηλότερο από οποιονδήποτε άλλο αλκαλικό συσσωρευτή, αλλά υψηλότερο από το κόστος των επαναφορτιζόμενων συσσωρευτών μολύβδου-οξέος.

Χρησιμοποιούνται σε πληθώρα εφαρμογών, κυρίως βιομηχανικής χρήσης, αλλά και σε οικιακές, στρατιωτικές και διαστημικές εφαρμογές. Αρχικά, οι συσσωρευτές νικελίου-καδμίου rocket plate κατασκευάστηκαν για εφαρμογές κίνησης και από τότε μέχρι σήμερα χρησιμοποιούνται ιδιαίτερα στους σιδηροδρόμους και σε εγκαταστάσεις μέσων μαζικής μεταφοράς σε όλο τον κόσμο. Σχεδόν το 40% του συνόλου των συσσωρευτών νικελίου-καδμίου βιομηχανικού τύπου χρησιμοποιείται στο φωτισμό και στον κλιματισμό των βαγονιών, σε εφεδρικά και έκτακτης ανάγκης συστήματα, όπως φρένα έκτακτης ανάγκης, μηχανισμούς ανοίγματος των θυρών και εφεδρική πηγή ενέργειας σιδηροδρομικών σταθμών και στα συστήματα επικοινωνίας, σήμανσης και ελέγχου της σιδηροδρομικής κυκλοφορίας. Στις σταθερές εφαρμογές, χρησιμοποιούνται σε πίνακες ελέγχου, στις τηλεπικοινωνίες και σε UPSs.



Εικόνα 4.1: Συσσωρευτής νικελίου-καδμίου τύπου rocket plate με βαλβίδα εκτόνωσης πίεσης.

Συσσωρευτής νικελίου-καδμίου sintered plate

Οι συσσωρευτές νικελίου καδμίου τύπου sintered plate αναπτύχθηκαν αργότερα από τους rocket plate με αποτέλεσμα να παρουσιάζουν βελτιωμένα χαρακτηριστικά, τα οποία φαίνονται στον παρακάτω πίνακα. Έχουν κατά περίπου 50% υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα από τους rocket plate, μπορούν να κατασκευαστούν με αρκετά λεπτότερη δομή, με μικρότερη εσωτερική αντίσταση, ενώ έχουν καλύτερη απόδοση σε χαμηλές θερμοκρασίες. Η απόδοσή τους δεν επηρεάζεται εύκολα από αλλαγές στο φορτίο κατά την εκφόρτιση ή από αλλαγή της θερμοκρασίας. Γενικά, οι συσσωρευτές νικελίου-καδμίου τύπου sintered plate έχουν τα περισσότερα πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν οι rocket plate, αλλά έχουν μεγαλύτερο κόστος.

Οι sintered plate συσσωρευτές παρουσιάζουν το φαινόμενο μνήμης, που περιγράφηκε προηγουμένως. Εντούτοις, το φαινόμενο αυτό μπορεί να εξαλειφθεί σε ένα κύκλο ζωής της μπαταρίας. Αρχικώς, θα πρέπει να εκφορτιστεί πλήρως κάθε ηλεκτροχημικό στοιχείο του συσσωρευτή ώστε να εκφορτιστούν τα ενεργά υλικά του και στη συνέχεια να φορτιστεί κάθε πλάκα κάθε ηλεκτροχημικού στοιχείου έως ότου να υπερφορτιστούν όλα τα στοιχεία.

Εξαιτίας των πολύ καλών χαρακτηριστικών τους, οι μπαταρίες πεφρυγμένης πλάκας νικελίου-καδμίου χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές που απαιτούν υψηλής ισχύς εκφόρτιση όπως είναι οι τουρμπίνες των αεροσκαφών, η εκκίνηση μηχανών diesel και άλλες φορητές και στρατιωτικές εφαρμογές. Η μπαταρία λειτουργεί πολύ καλά όταν απαιτείται μεγάλη ισχύς και γρήγορη επαναφόρτιση. Επίσης, σε πολλές εφαρμογές οι συγκεκριμένοι συσσωρευτές προτιμούνται έναντι άλλων συστημάτων επαναφορτιζόμενων συσσωρευτών χάρη στο μικρό τους μέγεθος και βάρος και στις μικρές απαιτήσεις για συντήρηση. Τέλος,

η αύξηση της τάσης τους με το τέλος της φόρτισης είναι άλλο ένα χρήσιμο χαρακτηριστικό τους.

Συνοπτικά:

Πλεονεκτήματα

- (+) Ταχεία επαναφόρτιση.
- (+) Καθόλου συντήρηση.
- (+) Καλή διάρκεια αποθήκευσης σε οποιαδήποτε κατάσταση φόρτισης.
- (+) Μεγάλη διάρκεια ζωής.
- (+) Πολύ καλή απόδοση υπό φορτίο.
- (+) Υψηλή απόδοση σε χαμηλές θερμοκρασίες.

Μειονεκτήματα

- (-) Είναι επιρρεπής στο φαινόμενο μνήμης⁴.
- (-) Έχουν χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα.
- (-) Υψηλότερο κόστος συγκριτικά με τους μολύβδου-οξέος.
- (-) Χαμηλή διατήρηση φόρτισης.

- (-) Δεν είναι φιλικό προς το περιβάλλον, αφού περιέχουν τοξικά μέταλλα (κάδμιο).
- (-) Χαμηλή χωρητικότητα συγκριτικά με ανταγωνιστικά συστήματα συσσωρευτών.
- (-) Δεν είναι ανθεκτικοί σε υπερφορτίσεις.
- (-) Προτιμώνται οι κλειστού τύπου μολύβδου-οξέος για χρήση σε υψηλές θερμοκρασίες.

Συσσωρευτές Νικελίου-μετάλλου-υδριδίου (Nickel-metal-hydride - Ni-Mh)

Οι συσσωρευτές Νικελίου-μετάλλου-υδριδίου θεωρούνται μια σχετικά ώριμη τεχνολογία. Αν και έχουν μικρότερη απόδοση (60-70%) στη φόρτιση και την εκφόρτιση από τους τελευταίους, έχουν το πλεονέκτημα της πολύ υψηλής ενεργειακής πυκνότητας (30-80 Wh/kg), διπλάσια από αυτή των συσσωρευτών μολύβδου-οξέος και περίπου 40% μεγαλύτερη από αυτή των συσσωρευτών νικελίου-καδμίου. Όταν χρησιμοποιούνται σωστά, μπορούν να έχουν εξαιρετικά μεγάλη διάρκεια ζωής.

⁴ Πρόκειται για μια παρενέργεια που παρουσιάζεται στις επαναφορτιζόμενες μπαταρίες και λαμβάνει χώρα, όταν ο χρήστης τις φορτίζει σε άτακτα χρονικά διαστήματα, διακεκομμένα και χωρίς να έχουν αποφορτιστεί εντελώς. Το πρόβλημα εντοπίζεται στα υλικά, από τα οποία αποτελείται η μπαταρία, και τα οποία, αν παραμείνουν ανενεργά για κάποιο χρονικό διάστημα, κρυσταλλοποιούνται, δεσμεύοντας μόνιμα στη δομή του υλικού τους τα ελεύθερα ηλεκτρόνια, τα οποία δεν μπορούν πλέον να μετακινηθούν από την κάθοδο στην άνοδο. Όταν λοιπόν μία μπαταρία, για μεγάλα χρονικά διαστήματα, δεν αποφορτίζεται εντελώς, τότε τα ηλεκτρόνια, που δεν έχουν κινηθεί, ενσωματώνονται και δημιουργούν οξείδια, τα οποία καθιστούν τις πλάκες ανενεργές. Το πρόβλημα ονομάστηκε «φαινόμενο μνήμης», για να υπενθυμίσει στους χρήστες ότι η μπαταρία «θυμάται» την κακή της χρήση και εκδικείται.

Κατασκευαστικές λεπτομέρειες:

Ανεξάρτητα από το μέγεθός τους και τη χρήση για την οποία προορίζονται, η χημική τους σύσταση και η αρχή λειτουργίας τους είναι κοινές. Κατά την εκφόρτιση της μπαταρίας, το ενεργό υλικό του θετικού ηλεκτροδίου είναι οξυ-υδροξείδιο νικελίου, όπως και στους συσσωρευτές νικελίου-καδμίου, και το αρνητικό ενεργό υλικό είναι υδρογόνο σε μορφή υδριδίου μετάλλου. Αυτό το μεταλλικό κράμα έχει τη δυνατότητα να απορροφά και να απορρίπτει υδρογόνο εναλλάξ, καθώς η μπαταρία φορτίζεται και εκφορτίζεται. Το κύριο συστατικό του ηλεκτρολύτη είναι ένα υδατικό διάλυμα υδροξειδίου του καλίου. Οι περισσότεροι συσσωρευτές NiMH είναι κλειστού τύπου (σφραγισμένοι) και μόνο ένα μικρό μέρος του ηλεκτρολύτη χρησιμοποιείται. Το υπόλοιπο απορροφάται από τον διαχωριστή και τα ηλεκτρόδια.

Φορητοί συσσωρευτές νικελίου- μετάλλου υδριδίου κλειστού τύπου

Οι επαναφορτιζόμενοι συσσωρευτές νικελίου-υδριδίου μετάλλου κλειστού τύπου έχουν τεχνολογία αντίστοιχη με αυτή των συσσωρευτών νικελίου-καδμίου κλειστού τύπου. Η κύρια διαφορά τους έγκειται στο ότι οι συσσωρευτές NiMH χρησιμοποιούν υδρογόνο απορροφημένο σε μεταλλικό κράμα για το ενεργό υλικό του αρνητικού ηλεκτροδίου, στη θέση του καδμίου των συσσωρευτών νικελίου- καδμίου. Το ηλεκτρόδιο του μεταλλικού υδριδίου έχει μεγαλύτερη ενεργειακή πυκνότητα από το ηλεκτρόδιο του καδμίου, με αποτέλεσμα η ποσότητα του ενεργού υλικού του αρνητικού ηλεκτροδίου των NiMH να είναι λιγότερη. Έτσι, μένει περισσότερος όγκος για το θετικό ηλεκτρόδιο, κάτι που οδηγεί σε υψηλότερη χωρητικότητα και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής. Επιπλέον, οι NiMH λόγω της απουσίας του καδμίου είναι περισσότερο φιλικό προς το περιβάλλον και δεν δημιουργούν ιδιαίτερα προβλήματα κατά την απόρριψή τους στο τέλος της χρήσης τους.

Κατά την εκφόρτιση, τα περισσότερα χαρακτηριστικά λειτουργίας των δύο τύπων συσσωρευτών είναι παρόμοια. Αντίθετα, κατά τη φόρτιση, και ιδιαίτερα τη γρήγορη φόρτιση, τα χαρακτηριστικά τους διαφέρουν. Οι μετάλλου υδριδίου είναι λιγότερο ανεκτικοί στην υπερφόρτιση και χρειάζονται έλεγχο της αποκοπής της φόρτισης.

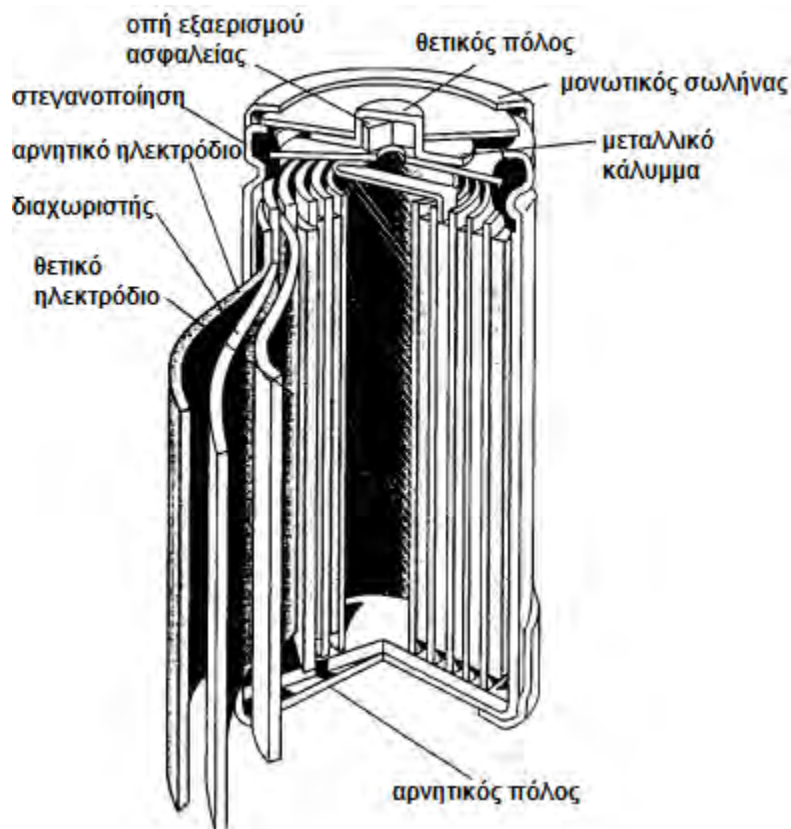
Τα τελευταία χρόνια, η ειδική ενέργεια και η ενεργειακή πυκνότητα των μπαταριών NiMH έχει αυξηθεί πάνω από 35% χάρη σε βελτιώσεις στο θετικό και αρνητικό ηλεκτρόδιο. Ταυτόχρονα, βελτιώσεις έχουν γίνει και στους κύκλους ζωής των NiMH. Χάρη στην υψηλή ενεργειακή τους πυκνότητα και σε άλλα συγκρίσιμα χαρακτηριστικά τους, οι συσσωρευτές νικελίου-υδριδίου μετάλλου αντικαθιστούν τους συσσωρευτές νικελίου-καδμίου σε υπολογιστές, κινητά τηλέφωνα και άλλα καταναλωτικά ηλεκτρονικά προϊόντα, με εξαίρεση ίσως στις εφαρμογές που παίζει μεγάλο ρόλο το κόστος. Ωστόσο, και οι NiMH με τη σειρά τους, αντικαθίστανται σε πολλές εφαρμογές από τους επαναφορτιζόμενους συσσωρευτές ιόντων λιθίου, οι οποίοι έχουν ακόμα μεγαλύτερη ενεργειακή πυκνότητα και ειδική ενέργεια.

Οι συσσωρευτές NiMH κλειστού τύπου κατασκευάζονται σε διατάξεις κυλινδρικές, πρισματικές και κουμπιού. Τα ηλεκτρόδιά τους σχεδιάζονται σε πορώδεις δομές και με μεγάλη επιφάνεια έτσι ώστε να έχουν μικρή εσωτερική αντίσταση και τη δυνατότητα να παρέχουν υψηλού τύπου λειτουργία.

Μία αντιστρέψιμη πτώση της τάσης και της χωρητικότητας μπορεί να εμφανιστεί στους συσσωρευτές νικελίου-υδριδίου μετάλλου κλειστού τύπου, όταν εκφορτίζονται μερικώς και επαναφορτίζονται συνεχώς, χωρίς τη μεσολάβηση μιας πλήρους εκφόρτισης. Αυτό, όπως έχει ήδη αναφερθεί είναι γνωστό ως φαινόμενο μνήμης. Η μπαταρία μπορεί να επανέλθει στην αρχική της χωρητικότητα μετά από λίγους πλήρεις κύκλους φόρτισης/εκφόρτισης. Το φαινόμενο μνήμης συμβαίνει διότι μόνο ένα μέρος του ενεργού υλικού φορτίζεται και επαναφορτίζεται, με αποτέλεσμα το μέρος που μένει ανεπηρέαστο για αρκετούς κύκλους να υπόκειται σε αλλαγές των φυσικών χαρακτηριστικών του και αύξηση της αντίστασής του.

Ο κύκλος ζωής μια μπαταρίας νικελίου-μετάλλου υδριδίου κλειστού τύπου επηρεάζεται από διάφορες συνθήκες:

1. Θερμοκρασία κατά τη διάρκεια της φόρτισης και της εκφόρτισης
2. Βάθος εκφόρτισης
3. Ρεύμα φόρτισης και εκφόρτισης
4. Μέθοδος φόρτισης
5. Κακή χρήση: υπερφόρτιση και υπερεκφόρτιση
6. Συνθήκες αποθήκευσης και διάρκεια αποθήκευσης



Εικόνα 4.2: Κυλινδρική διάταξη συσσωρευτή νικελίου-μετάλλου υδριδίου κλειστού τύπου.

Μια τυπική επαναφορτιζόμενη μπαταρία NiMH κλειστού τύπου σε θερμοκρασία δωματίου (20°C) μπορεί να επιτύχει 500 κύκλους ζωής, παρέχοντας σε κάθε κύκλο τουλάχιστον το 80% της χωρητικότητάς της. Γενικά, για τη βέλτιστη και μέγιστη διάρκεια ζωής, οι συσσωρευτές NiMH πρέπει να λειτουργούν κοντά σε θερμοκρασία δωματίου.

Συσσωρευτές νικελίου-υδριδίου μετάλλου βιομηχανικού τύπου και πρόωσης

Οι συσσωρευτές νικελίου-μετάλλου υδριδίου είναι το κυρίαρχο προηγμένο σύστημα συσσωρευτών που χρησιμοποιείται στα ηλεκτρικά και υβριδικά οχήματα, καθώς έχουν τα καλύτερα συνολικά χαρακτηριστικά που απαιτούνται σε τέτοιου τύπου εφαρμογές.

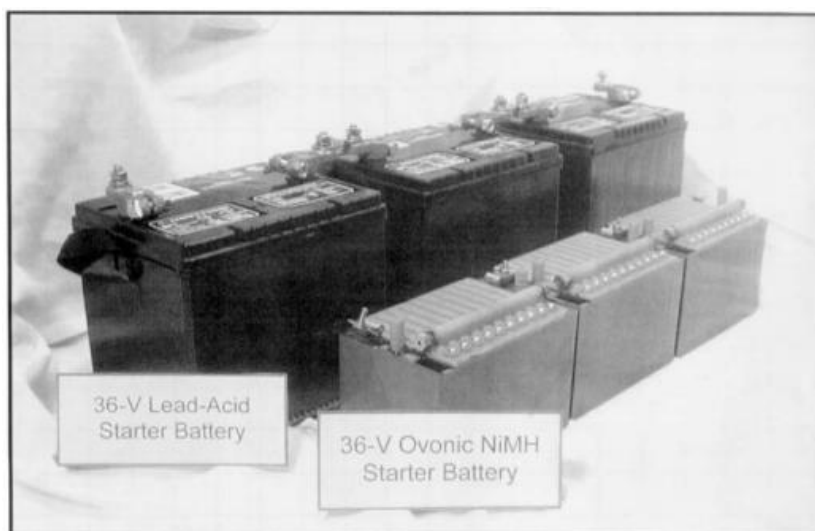
Τα χαρακτηριστικά που καθιέρωσαν τους συσσωρευτές NiMH στην αγορά των ηλεκτρικών και υβριδικών οχημάτων, εκτός από την ενέργεια, την ισχύ, τους κύκλους ζωής και τις θερμοκρασίες λειτουργίας, αναφέρονται παρακάτω:

1. Ποικιλία στα μεγέθη των στοιχείων (από 0.3 έως 250Ah)
2. Ασφαλή λειτουργία σε υψηλή τάση (320+ V)
3. Εξαιρετική ενέργεια και ισχύς κατ' όγκο
4. Επιλογή κυλινδρικών ή πρισματικών διατάξεων
5. Ασφάλεια κατά τη φόρτιση και την εκφόρτιση και ανοχή σε υπερφόρτιση ή υπερεκφόρτιση
6. Δεν απαιτούν συντήρηση
7. Πολύ καλές θερμικές ιδιότητες
8. Απλά και οικονομικά ηλεκτρονικά κυκλώματα ελέγχου
9. Υλικά φιλικά προς το περιβάλλον και ανακυκλώσιμα

Άλλο ένα πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό που βοήθησε τους συσσωρευτές NiMH να κυριαρχήσουν στα ηλεκτρικά και υβριδικά αυτοκίνητα είναι η ανάκτηση ενέργειας από την πέδηση. Η ενέργεια αυτή παρέχεται στην μπαταρία με πολύ υψηλή ισχύ (περίπου 500W/kg) με αποτέλεσμα τα περισσότερα συστήματα μπαταριών να μην μπορούν να την απορροφήσουν. Αντιθέτως, οι συσσωρευτές NiMH είναι ικανοί να απορροφούν την ενέργεια από την πέδηση κάτω από ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασιών και κατάστασης φόρτισης.

Οι συσσωρευτές νικελίου-μετάλλου υδριδίου χρησιμοποιούνται και σε βιομηχανικές εφαρμογές, ενώ εξετάζεται και η δυνατότητά τους να αντικαταστήσουν τους επαναφορτιζόμενους συσσωρευτές μολύβδου-οξέος στις εφαρμογές SLI.

Γενικά, για την περαιτέρω εμπορευματοποίηση των επαναφορτιζόμενων συσσωρευτών νικελίου-μετάλλου υδριδίου πρέπει να βελτιστοποιηθεί η ισχύς τους στις χαμηλές θερμοκρασίες (-30°C) και να μειωθεί το αρχικό τους κόστος.



Εικόνα 4.3: Σύγκριση όγκου 36V μπαταριών μολύβδου-οξέος SLI και NiMH για εκκίνηση αυτοκινήτου.

Συνοπτικά:

Πλεονεκτήματα

- (+) Υψηλότερη χωρητικότητα από τους νικελίου-καδμίου.
- (+) Μεγάλος τυπικός κύκλος ζωής: 3000.
- (+) Κλειστού τύπου, καμία συντήρηση.
- (+) Χωρίς κάδμιο, μικρά περιβαλλοντικά προβλήματα.
- (+) Ικανότητα γρήγορης επαναφόρτισης.
- (+) Περισσότερο ασφαλείς, σε σχέση με άλλες μπαταρίες, σε περίπτωση ατυχήματος.
- (+) Μεγάλη διάρκεια αποθήκευσης σε οποιαδήποτε κατάσταση φόρτισης.

Μειονεκτήματα

- (-) Χαμηλότερη ικανότητα σε υψηλά ρεύματα από τους νικελίου-καδμίου.
- (-) Μέτριο φαινόμενο μνήμης.
- (-) Χαμηλή διατήρηση φόρτισης. Έχουν υψηλό ρυθμό αυτοεκφόρτισης, περίπου 50% περισσότερο από τους νικελίου-καδμίου.
- (-) Υψηλότερο κόστος αρνητικών ηλεκτροδίων. Είναι περίπου 20% πιο ακριβές από τις νικελίου καδμίου.
- (-) Η απόδοση μειώνεται εάν είναι αποθηκευμένοι σε μέρος με υψηλές θερμοκρασίες.

Συσσωρευτές Ιόντων Λιθίου (lithium ion)

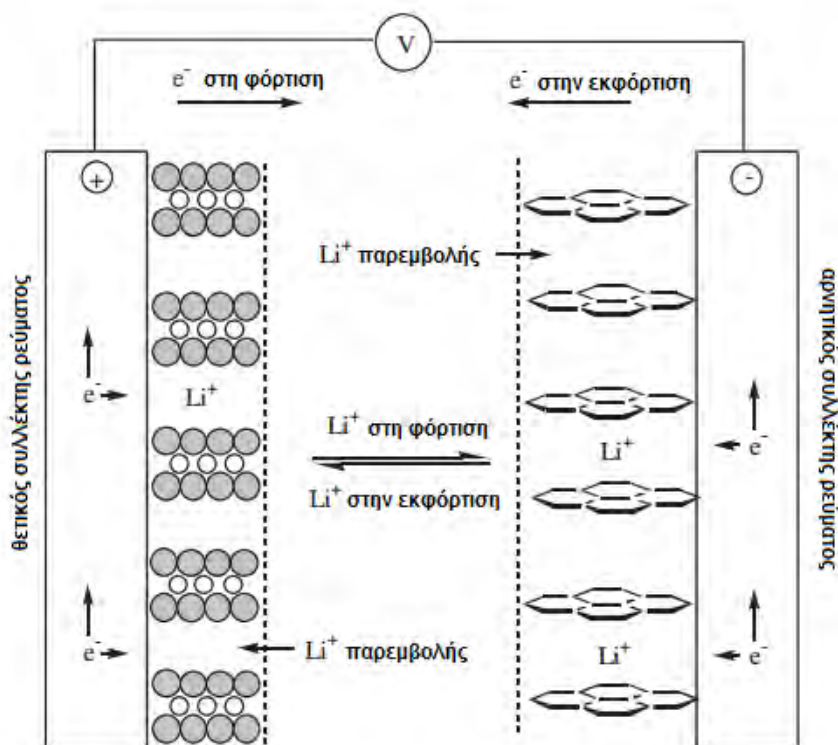
Οι συσσωρευτές ιόντων λιθίου, οι οποίοι είναι γνωστοί για τη χρήση τους σε φορητούς υπολογιστές και σε άλλα ηλεκτρονικά είδη, κυριαρχούν πλέον στην ανάπτυξη των ηλεκτρικών οχημάτων. Τα ενεργά υλικά ενός συσσωρευτή ιόντων λιθίου είναι μεταλλικό οξείδιο λιθίου για την άνοδο και ενώσεις γραφίτη για την κάθοδο. Χάρη σε αυτή τη χημική

ούσταση καταφέρνουν να έχουν τεράστια ενεργειακή πυκνότητα, της τάξης των 200 Wh/kg, καλή πυκνότητα ισχύος και τέλος μεγάλη απόδοση φόρτισης και εκφόρτισης της τάξης του 80-90%. Ταυτόχρονα, όμως, παρουσιάζουν και διάφορα μειονεκτήματα.

Κατασκευαστικές λεπτομέρειες:

Τα ενεργά υλικά των ηλεκτροδίων ενός συσσωρευτή ιόντων λιθίου είναι μεταλλικό οξείδιο λιθίου για το θετικό ηλεκτρόδιο και ενώσεις γραφίτη (άνθρακα) για το αρνητικό ηλεκτρόδιο. Τα υλικά αυτά είναι συνδεδεμένα με ένα μεταλλικό φύλλο συλλογής ρεύματος με συνδετικό υλικό και με ένα αγωγίμο αραιωτικό, συνήθως μαύρο άνθρακα ή γραφίτη μεγάλης επιφάνειας. Τα ηλεκτρόδια μονώνονται ηλεκτρικά με τη βοήθεια μικροπορώδους πολυαιθυλενικού ή πολυπροπυλενικού διαχωριστικού φύλλου, το οποίο περιέχει υγρό ηλεκτρολύτη και ένα στρώμα πολυμερών σε μορφή gel ή ένα στρώμα στερεού ηλεκτρολύτη, ανάλογα με τον τύπο του συσσωρευτή.

Συνήθη υλικά για το θετικό ηλεκτρόδιο είναι το οξείδιο λιθίου-κοβαλτίου και το οξείδιο λιθίου-μαγγανίου με συλλέκτη ρεύματος φύλλα αλουμινίου. Οι πρώτες μπαταρίες που εμφανίστηκαν στην αγορά χρησιμοποιούσαν οξείδιο λιθίου-κοβαλτίου το οποίο έχει καλή ηλεκτρική συμπεριφορά, παρασκευάζεται εύκολα, έχει καλές ιδιότητες ασφαλείας και μένει αρκετά ανεπηρέαστο από την υγρασία και κατά τις διάφορες διεργασίες. Το οξείδιο λιθίου-μαγγανίου χρησιμοποιήθηκε αργότερα ως υλικό του θετικού ηλεκτροδίου προσφέροντας χαμηλότερο κόστος και βελτιωμένη απόδοση. Για το αρνητικό ηλεκτρόδιο συνήθως χρησιμοποιείται γραφίτικος άνθρακας με συλλέκτη ρεύματος από χαλκό.



Σχήμα 4.3: Σχηματική απεικόνιση της ηλεκτροχημικής διεργασίας που λαμβάνει χώρα σε ένα στοιχείο ιόντων λιθίου.

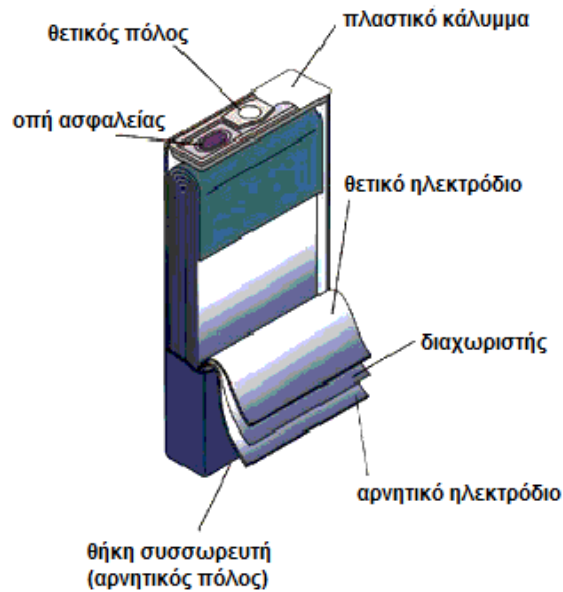
Η υψηλή ειδική ενέργεια (περίπου 150 Wh/kg) και ενεργειακή πυκνότητα (περίπου 400Wh/L) των συσσωρευτών ιόντων λιθίου, τους καθιστά μία από τις καλύτερες επιλογές σε εφαρμογές όπου το βάρος και ο όγκος αποτελούν σημαντικά κριτήρια επιλογής. Επιπλέον, οι συγκεκριμένοι συσσωρευτές έχουν χαμηλό ρυθμό αυτοεκφόρτισης (περίπου 2% με 8% ανά μήνα), πολλούς κύκλους φόρτισης /εκφόρτισης (περισσότερους από 1000 κύκλους ζωής) και μπορούν να λειτουργήσουν σε ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασιών (φόρτιση: -20°C με +60°C, εκφόρτιση: -40°C με +65°C). Συσσωρευτές με μόνο ένα ηλεκτροχημικό στοιχείο, τυπικά δίνουν τάση από 2.5V έως 4.2V, περίπου τρεις φορές μεγαλύτερη από την τάση που δίνουν τα στοιχεία νικελίου-καδμίου και νικελίου-μετάλλου υδριδίου, με αποτέλεσμα να απαιτούνται λιγότερα ηλεκτροχημικά στοιχεία για να παραχθεί η ίδια τάση από ένα συσσωρευτή ιόντων λιθίου.

Ένα από τα μειονεκτήματα των συσσωρευτών ιόντων λιθίου είναι ότι αλλοιώνονται όταν εκφορτίζονται κάτω από τα 2V και ότι μπορεί να έχουν διαφυγή αερίων όταν υπερφορτίζονται, καθώς δεν διαθέτουν κάποιο χημικό μηχανισμό για τον έλεγχο της υπερφόρτισης. Συνήθως, οι συσσωρευτές ιόντων λιθίου έχουν κυκλώματα και μηχανικές συσκευές αποσύνδεσης για να προστατεύονται από υπερφορτίσεις, υπερεκφορτίσεις και θερμοκρασιακές συνθήκες εκτός των ορίων λειτουργίας τους. Επιπλέον, οι συγκεκριμένοι συσσωρευτές χάνουν μόνιμα τη χωρητικότητά τους όταν εκτίθενται σε αυξημένες θερμοκρασίες (65°C), αν και με μικρότερο ρυθμό από αυτόν των συσσωρευτών νικελίου-καδμίου και νικελίου-μετάλλου υδριδίου.

Οι πιο αξιοσημείωτες προκλήσεις για την ευρύτερη χρήση των μπαταριών ιόντων λιθίου σχετίζονται είτε με τη σταθερότητά τους σε υψηλές θερμοκρασίες είτε με θέματα ασφαλείας. Αν και οι συσσωρευτές ιόντων λιθίου μπορούν να εκτεθούν σε υψηλές θερμοκρασίες για σύντομο διάστημα, όπως για παράδειγμα στους 70°C, ο ρυθμός αλλοίωσής τους είναι σημαντικός ήδη από τους 60°C περίπου. Οι συσσωρευτές ιόντων λιθίου είναι γενικά ασφαλείς και μόνο σε περίπτωση υπερφόρτισης ή σύνθλιψης μπορεί να παρουσιαστεί διαφυγή αερίων. Ωστόσο να τονιστεί ότι για να συμβεί διαφυγή αερίων εξαιτίας υπερφόρτισης, η μπαταρία πρέπει να φορτιστεί περισσότερο από το 200% της ονομαστικής χωρητικότητάς της.

Τα προβλήματα αυτά (υπερφόρτιση, υπερεκφόρτιση, όρια θερμοκρασίας) έχουν σε μεγάλο βαθμό επιλυθεί με την ενσωμάτωση κυκλωμάτων προστασίας στους συσσωρευτές.

Έχουν κατασκευαστεί κυλινδρικοί και πρισματικοί συσσωρευτές ιόντων λιθίου. Για μικρά μεγέθη (λιγότερα από 4Ah), η πιο συχνή δομή είναι η κυλινδρική με σπειροειδής περιέλιξη των ηλεκτροδίων, ενώ για μεγάλα μεγέθη η πιο συχνή δομή είναι η πρισματική διάταξη με επίπεδες πλάκες. Οι συσσωρευτές ιόντων λιθίου κατασκευάζονται στην κατάσταση εκφόρτισης και για το λόγο αυτό πρέπει να φορτίζονται πριν από την πρώτη χρήση.



Εικόνα 4.4: Σχηματική αποτύπωση ενός πρισματικού στοιχείου ιόντων λιθίου.

Συνοπτικά:

Πλεονεκτήματα

- (+) Κλειστού τύπου, δεν απαιτείται συντήρηση.
- (+) Πολλοί κύκλοι ζωής
- (+) Λειτουργία σε ευρύ φάσμα θερμοκρασιών.
- (+) Μεγάλος χρόνος αποθήκευσης.
- (+) Χαμηλός ρυθμός αυτοεκφόρτισης.
- (+) Ικανότητα γρήγορης φόρτισης.
- (+) Ικανότητα εκφόρτισης σε μεγάλα ρεύματα και μεγάλη ισχύ.
- (+) Υψηλή απόδοση ενέργειας.
- (+) Υψηλή ειδική ενέργεια και ενεργειακή πυκνότητα.
- (+) Δεν παρουσιάζουν φαινόμενα μνήμης.

Μειονεκτήματα

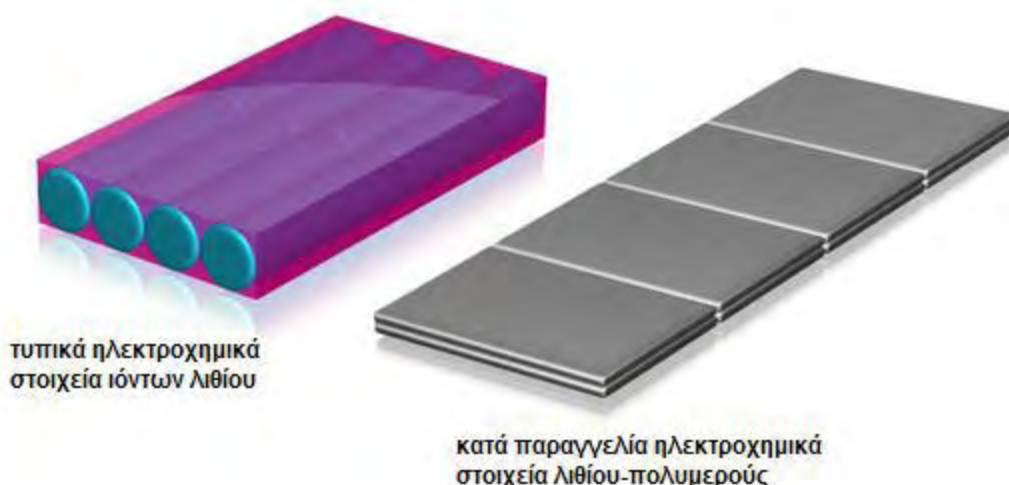
- (-) Χρειάζεται κύκλωμα προστασίας.
- (-) Απώλεια χωρητικότητας και θερμική διαφυγή κατά την υπερφόρτιση.
- (-) Χημική αλλοίωση σε υψηλές θερμοκρασίες.
- (-) Σχετικά ακριβοί στην παραγωγή. Το κόστος τους είναι περίπου 40% μεγαλύτερο από αυτό των συσσωρευτών νικελίου-καδμίου.
- (-) Δεν αποτελούν ακόμη μια ώριμη τεχνολογία, καθώς διάφορες αλλαγές στα μέταλλα και τους χημικούς συνδυασμούς επηρεάζουν τα αποτελέσματά τους.
- (-) Διαφυγή αερίων ή θερμική διαφυγή αν συνθλιβούν.
- (-) οι κυλινδρικού τύπου συνήθως έχουν χαμηλότερη πυκνότητα ισχύος από τους νικελίου καδμίου ή νικελίου-μετάλλου υδριδίου.

Συσσωρευτές ιόντων λιθίου πολυμερών (Li-Po)

Οι συσσωρευτές λιθίου-πολυμερούς (LiPO) παρέχουν τα χαρακτηριστικά λειτουργίας των συσσωρευτών ιόντων λιθίου (Li-ion), συμπεριλαμβανομένης της υψηλής ειδικής ενέργειας και ενεργειακής πυκνότητας, σε μια λεπτή δομή. Χρησιμοποιούν τα ίδια ενεργά υλικά με τους κυλινδρικούς ή πρισματικούς συσσωρευτές ιόντων λιθίου, έχουν όμως επίπεδα συνδεδεμένα ηλεκτρόδια που επιτρέπουν την κατασκευή λεπτών ηλεκτροχημικών στοιχείων, τα οποία είναι συσκευασμένα μεταξύ τους σε μία ταινία, σε αντίθεση με τις μεταλλικές ή αλουμινένιες θήκες κελιών των συσσωρευτών Li-ion.

Μία ιδιαίτερα ελκυστική ιδιότητα των μπαταριών LiPO είναι ότι έχουν μεγάλη αντοχή σε φυσική καταπόνηση. Σύμφωνα με κατασκευαστές, ακόμα και όταν είναι φορτισμένες ή υπερφορτισμένες, μπορούν να υποστούν μηχανικό τρύπημα χωρίς να εκδηλώσουν έκρηξη ή φωτιά.

Μια άλλη σημαντική ιδιότητα των συσσωρευτών λιθίου-πολυμερούς είναι ότι οι κατασκευαστές μπορούν να δώσουν σχεδόν οποιοδήποτε σχήμα επιθυμούν στην μπαταρία. Επιπλέον, παρουσιάζουν χαρακτηριστικά επιθυμητά στις εμπορικές εφαρμογές όπως χαμηλή αυτοεκφόρτιση, μεγάλη διάρκεια αποθήκευσης και την ικανότητα να αντέχουν με ασφάλεια φυσική ή ηλεκτρική κακή χρήση. Λόγω όλων αυτών των πλεονεκτημάτων και του χαμηλότερου κόστους κατασκευής συγκριτικά με τους συσσωρευτές ιόντων λιθίου, οι λιθίου-πολυμερούς παράγονται σε μεγάλο βαθμό και χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο σε κινητά τηλέφωνα, PDAs (Personal Digital Assistant), μικρά GPS και laptops. Επίσης, μπορούν να αποτελέσουν την επόμενη γενιά μπαταριών για ηλεκτρικά οχήματα. Το κόστος ενός ηλεκτρικού αυτοκινήτου με τέτοιου τύπου μπαταρία παραμένει ιδιαίτερα υψηλό σε σχέση με το κόστος ενός βενζινοκίνητου ή πετρελαιοκίνητου αυτοκινήτου, αλλά καθώς αυξάνεται η παραγωγή και εξελίσσεται η τεχνολογία, το κόστος των συσσωρευτών λιθίου-πολυμερούς θα μειωθεί. Η Hyundai Motor Company χρησιμοποιεί τέτοιες μπαταρίες σε κάποια από τα ηλεκτρικά της μοντέλα αυτοκινήτων, ενώ τον Οκτώβριο του 2010, ένα Audi A2 κάλυψε απόσταση 600 χιλιομέτρων χωρίς επαναφόρτιση της λιθίου-πολυμερούς μπαταρίας του.



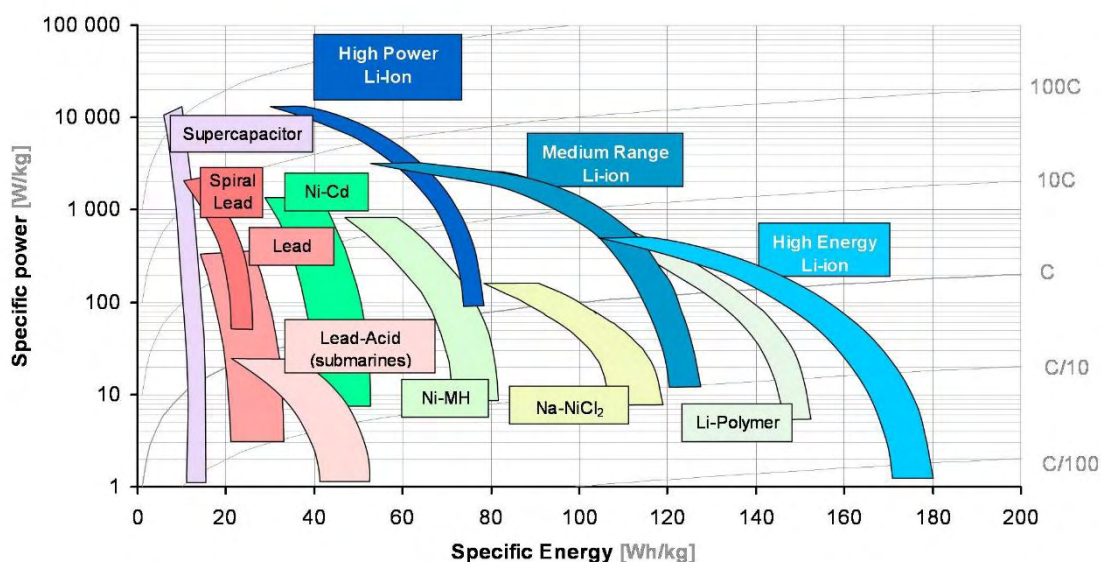
Εικόνα 4.5: Σύγκριση όγκου συσσωρευτών ιόντων λιθίου και λιθίου- πολυμερούς.

Συσσωρευτές τηγμένων αλάτων (ZEBRA)

Οι συσσωρευτές **ZEBRA** (Na-NiCl₂) ξεκίνησαν να χρησιμοποιούνται σχετικά πρόσφατα. Εφευρέθηκαν το 1985 και το 2009 ήταν υπό κατασκευή για περισσότερο από 20 χρόνια. Ο συσσωρευτής zebra λειτουργεί στους 245°C και χρησιμοποιεί τετηγμένο νάτριο για το αρνητικό ηλεκτρόδιο, ενώ το θετικό ηλεκτρόδιο είναι νικέλιο κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης και χλωριούχο νικέλιο κατά τη φόρτιση. Αρκετές αυτοκινητοβιομηχανίες χρησιμοποιούν τα τελευταία χρόνια τους συσσωρευτές Zebra στα ηλεκτρικά οχήματα που κατασκευάζουν. Το 2011, οι ταχυδρομικές υπηρεσίες των Η.Π.Α. ανακοίνωσαν ότι δοκιμάζουν πλήρως ηλεκτρικά κινούμενα vans για τις παραδόσεις των δεμάτων, ένα από τα οποία χρησιμοποιεί συσσωρευτή Zebra.

Όταν οι συσσωρευτές Zebra δε χρησιμοποιούνται, συνήθως διατηρούνται μονίμως σε υψηλή θερμοκρασία έτσι ώστε να παραμένει το νάτριο λιωμένο και να είναι έτοιμοι για χρήση. Εάν σταματήσει η λειτουργία τους και αφεθούν να στερεοποιηθούν, η αναθέρμανσή τους διαρκεί περίπου 12 ώρες έως ότου να φθάσουν στην επιθυμητή θερμοκρασία και να είναι πλήρως φορτισμένοι. Μετά την παύση της λειτουργίας μιας πλήρως φορτισμένης μπαταρίας Zebra, αυτή χάνει αρκετή από την ενέργειά της και στερεοποιείται μέσα σε 3 με 4 ημέρες.

Όπως φαίνεται και από το διάγραμμα που ακολουθεί, τι καλύτερες επιδόσεις μέχρι στιγμής τις πετυχαίνει η τεχνολογία ιόντων λιθίου και είναι γενικά αυτή που προτιμάται στα τελευταία μοντέλα των ηλεκτρικών οχημάτων. Τα δύο πιο σημαντικά μειονεκτήματα των συσσωρευτών ιόντων λιθίου είναι το, προς το παρόν, υψηλό τους κόστος και τα σοβαρά ζητήματα ασφαλείας σε υψηλές θερμοκρασίες.



Σχήμα 4.4: Χαρακτηριστικά απόδοσης των κυριότερων τύπων συσσωρευτών.

Κεφάλαιο 5

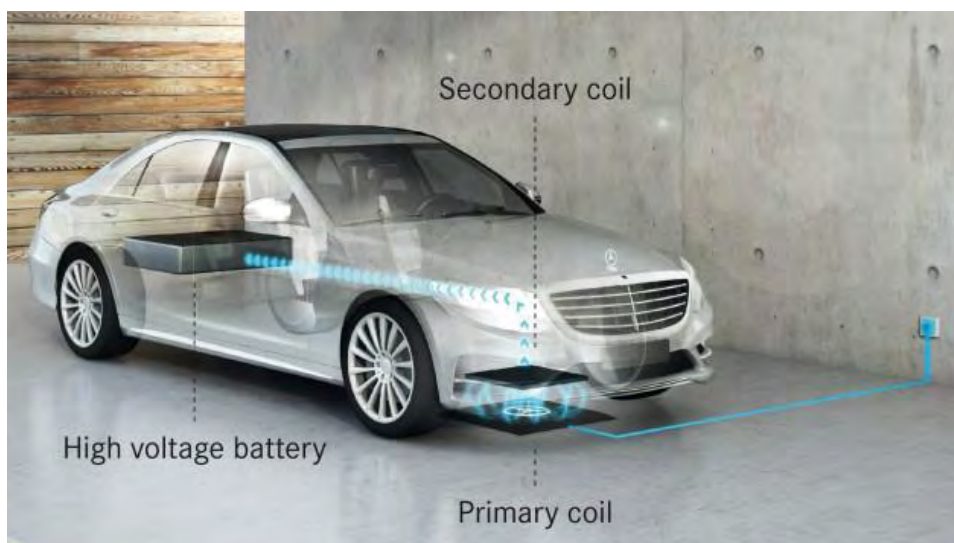
Φόρτιση Ηλεκτρικών Οχημάτων

5.1 Κατηγορίες φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων

Αρχικά, οι κατηγορίες φόρτισης διακρίνονται σε δύο, ανάλογα με το αν υπάρχει φυσική επαφή μεταξύ φορτιστή και οχήματος. Έτσι προκύπτουν τα εξής είδη:

- **τη φόρτιση με επαφή (conductive charging)**, όπου για τη μετάδοση της ισχύος απαιτείται η φυσική σύνδεση μεταξύ της μπαταρίας και του σταθμού φόρτισης, όπως γίνεται και με τις περισσότερες ηλεκτρικές συσκευές. Χρειάζονται, δηλαδή, καλώδια και βύσματα για τη σύνδεση του ηλεκτρικού οχήματος με το σταθμό φόρτισης. Το μεγαλύτερο μέρος των κυκλωμάτων φόρτισης και ελέγχου είναι ενσωματωμένο επάνω στο όχημα (on-board). Η ανάγκη αυτή για σύνδεση μέταλλο-με-μέταλλο μεταξύ του οχήματος και της συσκευής φόρτισης είναι που κάνει αυτή τη μέθοδο λιγότερη δημοφιλή. Η σύνδεση δεν είναι αυτοματοποιημένη και η διαδικασία αφήνει περιθώρια λάθους κυρίως ανθρώπινου, λόγω των καλωδίων, με αποτέλεσμα να υπάρχουν αυξημένες πιθανότητες για την πρόκληση κάποιου ατυχήματος.
- **τη φόρτιση με επαγωγή (inductive charging)**. Κατά την επαγωγική φόρτιση, μεταφέρεται εναλλασσόμενη ισχύς μέσω της μαγνητικής σύζευξης δύο τυλιγμάτων, με το ένα να βρίσκεται στην πλευρά της παροχής (φορτιστής) και το άλλο στην πλευρά της κατανάλωσης (όχημα). Έτσι η ισχύς ρέει από το πρωτεύον στο δευτερεύον, όπως ακριβώς και σε ένα μετασχηματιστή 2 τυλιγμάτων. Καθώς ο συσσωρευτής του οχήματος λειτουργεί με DC τάση και μπορεί να φορτίσει μόνο με DC ρεύμα, το εναλλασσόμενο ρεύμα εξόδου του δευτερεύοντος τυλιγματος πρέπει να ανορθωθεί, με κατάλληλη διάταξη, πριν καταλήξει στον συσσωρευτή.

Οι επαγωγικοί φορτιστές έχουν τα περισσότερα κυκλώματα φόρτισης και ελέγχου εκτός του οχήματος, και επικοινωνούν με αυτό μέσω υπερύθρων ή ραδιοσυχνοτήτων.



Εικόνα 5.1: Απεικόνιση επαγωγικής φόρτισης.

Παρόλο που η διαδικασία της επαγωγικής φόρτισης είναι πιο αυτοματοποιημένη, δεν περιέχει καλώδια και είναι γενικά πιο ασφαλής, προτιμάται η φόρτιση με επαφή, καθώς έχει μικρότερη περιπλοκότητα και κόστος, ενώ επιτρέπει τη διέλευση ενέργειας με μικρότερες απώλειες. Παρόλα αυτά στο χώρο της ασύρματης φόρτισης γίνονται πρόοδοι με μια από τις πιο επικρατέστερες τεχνολογίες να είναι το WiTricity (**Highly Resonant Wireless Power Transfer with Safe, Efficient, and over Distance**).

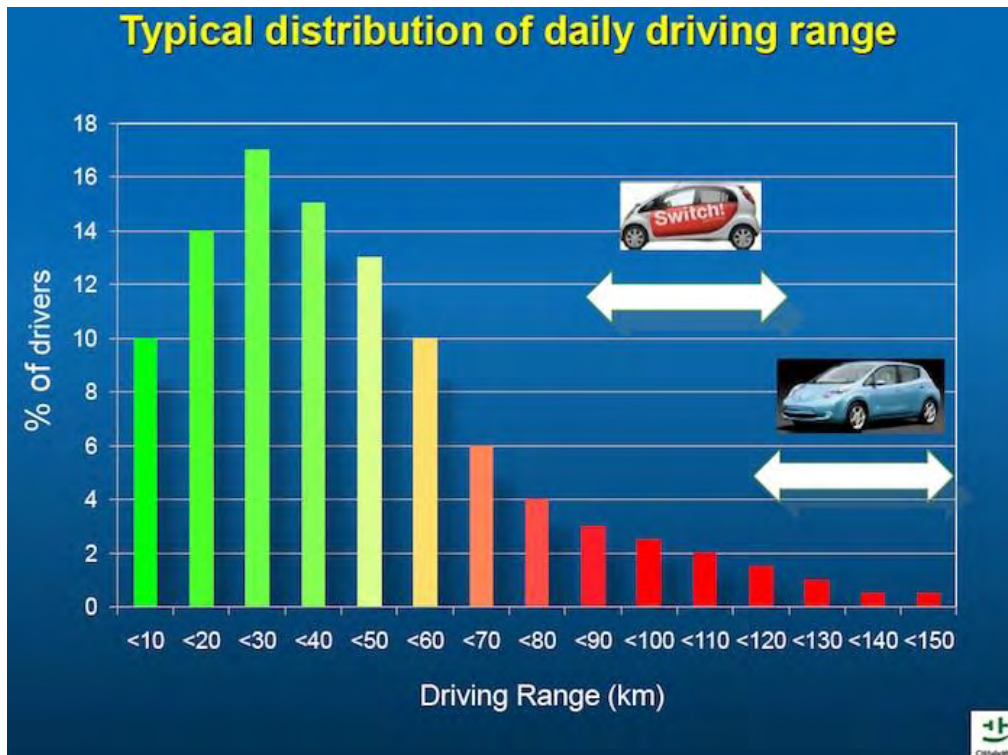
Μια άλλη κατηγοριοποίηση των μορφών φόρτισης γίνεται με βάση με την παρεχόμενη ισχύ. Στην Ευρώπη έχει επικρατήσει ο διαχωρισμός σε 3 επίπεδα (levels)

- **Level 1:** το πρώτο επίπεδο περιλαμβάνει τη μονοφασική AC φόρτιση, η οποία συναντιέται στην πλειονότητα των συνηθισμένων οικιακών ρευματοδοτών και παρέχει ισχύ η οποία είναι σχετικά χαμηλή σε σύγκριση με την χωρητικότητα του συσσωρευτή. Μια τυπική τιμή της παρεχόμενης ισχύος κυμαίνεται στα 3 kW, πράγμα που σημαίνει ότι ένας συσσωρευτής 35 kWh θα φόρτιζε σε περίπου 12 ώρες.
- **Level 2:** το επίπεδο αυτό περιλαμβάνει τη μονοφασική AC φόρτιση, η οποία όμως πραγματοποιείται μέσω ειδικών εγκαταστάσεων και καλωδιώσεων, καθώς τα ρεύματα είναι υψηλότερα σε σχέση με τα οικιακά. Επιπλέον, στο επίπεδο αυτό συγκαταλέγεται και η τριφασική AC φόρτιση, η οποία όμως απαιτεί πρόσβαση σε μία τριφασική παροχή και μπορεί να παρέχει υψηλότερα επίπεδα φόρτισης από ότι η μονοφασική. Τα συνηθισμένα επίπεδα της ισχύος είναι 10-20 kW και ο συσσωρευτής των 35kWh θα φόρτιζε τώρα σε περίπου 2 με 4 ώρες.
- **Level 3:** το επίπεδο αυτό περιλαμβάνει οποιαδήποτε φόρτιση μέσω της οποίας μπορεί να επιτευχθεί γρήγορη φόρτιση (**Fast Charging**), με υψηλές τιμές ισχύος. Αυτό συμβαίνει επειδή η χρήση των τριών φάσεων αντί για μίας επιτρέπει την μετάδοση περισσότερης ισχύος χωρίς την αύξηση του ρεύματος ή της τάσης. Η τριφασική φόρτιση επιπέδου 3 μπορεί να χρησιμοποιηθεί εξίσου καλά σε DC φόρτιση, όσο και AC τριφασική φόρτιση. Και στις δύο περιπτώσεις απαιτούνται ξεχωριστές εγκαταστάσεις φόρτισης και καλωδίωσης. Τα επίπεδα της ισχύος, που εμπίπτουν σε αυτό το επίπεδο της γρήγορης φόρτισης είναι μεγαλύτερα ή ίσα των 40 kW, που μπορούν να φορτίσουν τον προαναφερθέντα συσσωρευτή σε λιγότερο από 45 λεπτά.

5.2 Πρότυπα DC Fast Charging– CHAdeMO, CCS, SAE Combo, Tesla Supercharger

Η τεχνολογία της γρήγορη φόρτιση (Fast Charging) καθιστά τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα πιο φιλικά, λόγω του εφησυχασμού που προσφέρει η τεχνολογία στον χρήστη. Ο χρήστης γνωρίζει, πλέον ότι μπορεί να επαναφορτίσει το όχημα του γρήγορα και να αναπτύξει μεγαλύτερες ταχύτητες, μετατρέποντας τις διαδρομές σε ρουτίνα. Γίνεται πλέον φανερό ότι οι ιδιοκτήτες αυτοκινήτων με τεχνολογία Fast Charging, αισθάνονται πιο άνετα κάνοντας μεγάλες διαδρομές γνωρίζοντας ότι υπάρχουν αρκετοί σταθμοί φόρτισης Fast Charging παρέχοντάς τους την επιθυμητή ενέργεια για την ολοκλήρωση του ταξιδιού σε εξίσου μικρό χρονικό διάστημα, όσο ενός οχήματος εσωτερικής καύσης.

Ενώ το Fast Charging είναι συχνά περιττό, επειδή το βέλτιστο ποσοστό φόρτισης ποικίλλει ανάλογα με το σενάριο χρήσης που ο οδηγός αντιμετωπίζει καθημερινά, σίγουρα είναι βολικό το γεγονός ότι σταθμοί γρήγορης φόρτισης δίνουν μια σχεδόν πλήρη επαναφόρτιση του οχήματος, σε λιγότερο από μία ώρα. Σε αντίθεση με τα αυτοκίνητα 6 KW, με συστήματα φόρτισης level 2 (30-40 Km οδηγικής αυτονομίας ανά μία ώρα φόρτισης), ο ταχύτερος ρυθμός φόρτισης της Fast Charging τεχνολογίας (50 KW ή περισσότερο) μπορεί να παρέχει 160 ή περισσότερα χιλιόμετρα οδηγικής αυτονομίας ανά μία ώρα φόρτισης. Ένα σωστά δομημένο δίκτυο γρήγορης φόρτισης, διαθέσιμο στον χρήστη ανα πάσα στιγμή, θα ήταν αρκετά πιστικός λόγος, να κάνει την λύση των ηλεκτρικών αυτοκινήτων πιο ελκυστική από ό,τι η επιλογή, των άλλων διαθέσιμων τρόπων μετακίνησης, και να οδηγήσει σε υψηλότερα ποσοστά υιοθέτησης του νέου πιο φιλικού προς το περιβάλλον, τρόπου μετακίνησης.



Εικόνα 5.2: Τυπικές καθημερινές ανάγκες οδήγησης.

Επιπλέον σε ορισμένες περιπτώσεις , οι οδηγοί ηλεκτρικών αυτοκινήτων μπορούν να πραγματοποιήσουν πραγματικά μεγάλα οδικά ταξίδια – διαλύοντας το αρνητικό στερεότυπο , ότι τα ηλεκτρικά οχήματα περιορίζονται σε μικρές διαδρομές και ότι είναι κατάλληλα για δρομολόγια γύρω από το σπίτι.

Δυστυχώς, ενώ η τεχνολογία γρήγορης φόρτισης (Fast Charging) των ηλεκτρικών αυτοκινήτων ήταν διαθέσιμη το 2011 και είχε παρουσιαστεί στα μοντέλα ηλεκτρικών οχημάτων Nissan Leaf, Mitsubishi i-MiEV, η CHAdeMO υποδομές φόρτισης δεν εξαπλώθηκε πολύ γρήγορα. Μερικές αυτοκινητοβιομηχανίες πίεσαν ενάντια στην ανάπτυξη του πρότυπου CHAdeMO επειδή δεν ήταν βασισμένο στα πρότυπα που είχε καθιερώσει η SAE (**Society of Automotive Engineers**). Το πρότυπο CHAdeMO συναναπτύχθηκε από την TEPCO και τις ιαπωνικές αυτοκινητοβιομηχανίες. Αντί λοιπόν της υιοθέτησης του CHAdeMO, το SAE (Society of Automotive Engineers) ανεπτυξε το δικό του πρότυπο γρήγορης φόρτισης (**Combo Charging System**). Με την σειρά της η εταιρία Tesla Motors ανέπτυξε ένα ιδιόκτητο σύστημα ταχείας φόρτισης (**Supercharger**), και οι Κινέζοι ανέπτυξαν ένα διαφορετικό πρότυπο γρήγορη φόρτιση.

Τα προκύπτοντα αποτελέσματα βέβαια ήταν τα εξής:

- Η υιοθέτηση και η εξοικείωση της Fast Charging τεχνολογία καθυστερεί, συγκριτικά με το πόσο πιο γρήγορα θα μπορούσε να συμβεί.
- Η είσοδος της ηλεκτροκίνησης ως τρόπος μετακίνησης ίσως καθυστερήσει λόγω της αργής ανάπτυξης υποδομών γρήγορη φόρτισης.
- Από το 2015 υπάρχουν τρία (ή και τέσσερα) πρότυπα γρήγορης φόρτισης, σε διαφορετικά στάδια ανάπτυξης και υιοθέτησης τους στην αγορά, προκαλώντας ένα πονοκέφαλο στον επίδοξο αγοραστή αλλά και στους οδηγούς ηλεκτρικών αυτοκινήτων. Το πρόβλημα παρουσιάζεται στο γεγονός ότι ο χρήστης δεν μπορεί απλά να πάει στο πλησιέστερο σταθμό γρήγορης φόρτισης, αλλά θα πρέπει να βρει, αυτόν που είναι συμβατό με το αυτοκίνητό του.

Συνοψίζοντας αυτό λοιπόν που έχουμε εν έτη 2015, είναι μία μάχη για το πιο επικρατέστερο πρότυπο γρήγορης φόρτισης και τους καταναλωτές ανάμεσα, μην ξέροντας πιο πρότυπο να ακολουθήσουν, μιας και υπολείπονται των τεχνολογικών λεπτομερειών.

Ευτυχώς κάποιες από τις αυτοκινητοβιομηχανίες φαίνεται να εξομαλύναν αυτήν την ασυμβατότητα των πρότυπων γρήγορης φόρτισης αναπτύσσοντας σταθμούς φόρτισης που αναγνωρίζουν πολλαπλά πρωτοκόλλα και διεπαφές.



Μία άλλη λύση θα ήταν προσαρμογείς για την ενοποίηση των διάφορων προτύπων (**multiple competing fast charging standards adapters**), για να καταστήσει δυνατή η ταχεία φόρτιση από ένα κατά τα άλλα ασύμβατο σταθμό φόρτισης. Παρόλο που η εταιρία Tesla Motors έχει διαθέσιμο ένα τέτοιο προσαρμογέα για την μετατροπή από CHAdeMO-σε-Tesla διεπαφή, φαίνεται πως η λύση των προσαρμογέων μπορεί να έχει περιορισμένη δημοτικότητα λόγω της υψηλής δαπάνης και της πολυπλοκότητας ανάπτυξης σταθμών φόρτισης με χρήση διπλού πρωτοκόλλου.

Αυτό που τελικά οφείλει να επιτευχθεί προς συμφέρον του χρήστη είναι α) η πανταχού παρούσα ύπαρξη σταθμών γρήγορης φόρτισης, β) με ένα ενιαίο πρωτόκολλο γρήγορης φόρτισης. Όπως δηλαδή ήδη συμβαίνει με τα οχήματα εσωτερικής καύσης με ένα ενιαίο πρότυπο για τα ακροφύσια αντλιών βενζίνης.

Επίπεδο φόρτισης & Αποτελεσματική ταχύτητα ταξιδιού.

Πριν εμβαθύνουμε στα πρότυπα της γρήγορης φόρτισης, θα κάνουμε μια μικρή ανασκόπηση για ποιο λόγο θεωρείται σημαντική και θα ανατρέξουμε σε κάποιες βασικές ορολογίες.

Η γρήγορη φόρτιση με συνεχές ρεύμα DC (**highest powered**) είναι το γρηγορότερο σύστημα φόρτισης ηλεκτρικών αυτοκινήτων που έχουμε στην διάθεση μας έως σήμερα. Ο σταθμός φόρτισης παρέχει ένα υψηλής ισχύος συνεχές ρεύμα, της τάξης των 120 KW, στην μπαταρία του αυτοκινήτου παρακάμπτοντας οποιοδήποτε άλλο εξοπλισμό φόρτισης στο αυτοκίνητο.

SAE International [®] SAE Charging Configurations and Ratings Terminology			
AC level 1 (SAE J1772™) 	PEV includes on-board charger	*DC Level 1	EVSE includes an off-board charger
	120V, 1.4 kW @ 12 amp 120V, 1.9 kW @ 16 amp		200-450 V DC, up to 36 kW (80 A)
	Est. charge time:		Est. charge time (20 kW off-board charger):
	PHEV: 7hrs (SOC* - 0% to full)		PHEV: 22 min. (SOC* - 0% to 80%)
	BEV: 17hrs (SOC - 20% to full)		BEV: 1.2 hrs. (SOC - 20% to 100%)
AC level 2 (SAE J1772™) 	PEV includes on-board charger (see below for different types)	*DC Level 2	EVSE includes an off-board charger
	240 V, up to 19.2 kW (80 A)		200-450 V DC, up to 90 kW (200 A)
	Est. charge time for 3.3 kW on-board charger		Est. charge time (45 kW off-board charger):
	PEV: 3 hrs (SOC* - 0% to full)		PHEV: 10 min. (SOC* - 0% to 80%)
	BEV: 7 hrs (SOC - 20% to full)		BEV: 20 min. (SOC - 20% to 80%)
	Est. charge time for 7 kW on-board charger	*DC Level 3 (TBD)	EVSE includes an off-board charger
	PEV: 1.5 hrs (SOC* - 0% to full)		200-600V DC (proposed) up to 240 kW (400 A)
	BEV: 3.5 hrs (SOC - 20% to full)		Est. charge time (45 kW off-board charger):
	Est. charge time for 20 kW on-board charger		BEV (only): <10 min. (SOC* - 0% to 80%)
	PEV: 22 min. (SOC* - 0% to full)		
BEV: 1.2 hrs (SOC - 20% to full)			
*AC Level 3 (TBD)	> 20 kW, single phase and 3 phase		
*Not finalized Voltages are nominal configuration voltages, not coupler ratings Rated Power is at nominal configuration operating voltage and coupler rated current Ideal charge times assume 90% efficient chargers, 150W to 12V loads and no balancing of Traction Battery Pack			
Notes: 1) BEV (25 kWh usable pack size) charging always starts at 20% SOC, faster than a 1C rate (total capacity charged in one hour) will also stop at 80% SOC instead of 100% 2) PHEV can start from 0% SOC since the hybrid mode is available.			
			Developed by the SAE Hybrid Committee ver. 031611
Copyright SAE 2011			

Εικόνα 5.3: SAE Charging Configurations and Ratings terminology.

Ορισμένοι αποκαλούν αυτό το είδος φόρτισης ως "Level 3", επειδή η φυσιολογική ταχύτητα φόρτισης που γενικά χρησιμοποιείται, στην πλειονότητα αποκαλείται Level 2. Όμως και τα δύο ονόματα είναι εσφαλμένα.

Αυτό λοιπόν που ευρέως αποκαλείται "Level 2" ονομάζεται στην πραγματικότητα "AC Level 2" και καλύπτει μονοφασική AC φόρτιση σε ποσοστό μέχρι και 20 KW της ισχύος. Στην πράξη επί του παρόντος, τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα υποστηρίζουν υψηλότερους ρυθμούς που κυμαίνονται στα 10 KW περίπου, αλλά το δημόσιο δίκτυο φόρτισης υποστηρίζει γενικά μόνο τα 6 KW.

Στην ουσία η γρήγορη φόρτιση DC στην οποία γίνεται λόγος δεν είναι Level 3", αλλά " DC Level 2 " με ρυθμούς τροφοδοσίας μέχρι τα 90 KW .

Αυτό όμως που καθίσταται σημαντικό είναι οι χρόνοι επαναφόρτισης που σημειώνονται στο διάγραμμα.

Όσο μεγαλύτερη είναι η ισχύς της φόρτισης, τόσο πιο γρήγορα το αυτοκίνητο μπορεί να επαναφορτιστεί. Με άλλα λόγια, φόρτιση υψηλής ισχύος μπορεί να δώσει πιο αποτελεσματικές ταχύτητες - γιατί μπορείς να αξιοποιήσεις το όχημα σου ενεργά για περισσότερες ώρες, ανά ώρα φόρτισης. Συνοπτικά παρουσιάζονται τα ποσοστά ηλεκτρικής φόρτισης του αυτοκινήτου, δηλαδή πόσο αργά ή γρήγορα, ποιες είναι οι αναγκες μας και για ποιο λόγο την χρειαζόμαστε.

- 6 KW: μας δίνουν 20-25 μίλια ανά ώρα φόρτισης (τυπικό AC Level2)
- 50 KW: μας δίνουν αυτονομία που κυμαίνεται στα 120 μίλια ανά ώρα φόρτισης (CHAdeMO, CCS)
- Και τέλος τα 120 KW: μας δίνουν αυτονομία που κυμαίνεται στα 300 μίλια ανά ώρα φόρτισης (Tesla Supercharger)

Λαμβάνοντας όλα αυτά υπόψη μας, Ένα οδικό ταξίδι με ένα ηλεκτρικό αυτοκίνητο θα είναι πολύ πιο ευχάριστο και αξιόπιστο με 300 και ίσως περισσότερα μίλια οδηγικής αυτονομίας ανά ώρα φόρτισης, από τα αρχικά 20 μίλια.

DC πρότυπα για την τεχνολογία Fast Charging - CHAdeMO, CCS, Supercharger, China

IEC DC Charging Systems				
	System A CHAdeMO (Japan)	System B GB/T (PRC)	System C	
			COMBO1 (US)	COMBO2 (DE)
Connector				
Vehicle Inlet				
Communication Protocol	CAN		PLC	

Εικόνα 5.4: IEC DC Συστήματα φόρτισης.

Gasoline car	Affordable electric car	Affordable EV, Fast charge	Tesla Model S, Supercharger
350 miles range gained per 5 minutes	80 miles range gained per 3.5 hours charging	64 miles range gained per 30 minutes charging	about 300 miles range gained per hour charging
or 4200 miles range gained per hour of charging	or 23 miles range gained per hour of charging	or 128 miles range gained per hour of charging	

Πίνακας 5.1: Συγκριτικό πίνακας της αυτονομία των διάφορων οχημάτων.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, υπάρχουν τουλάχιστον τέσσερα DC συστήματα γρήγορης φόρτισης που χρησιμοποιούνται σήμερα από τους κατασκευαστές ηλεκτρικών αυτοκινήτων. Η εικόνα που παρουσιάζεται παραπάνω έχει τέσσερις διαφορετικές υποδοχές, χωρίς καν να συμπεριληφθεί ο Tesla Supercharger επειδή υπάρχουν δύο παραλλαγές της ComboChargingSystem υποδοχής φόρτισης.

Στην παρούσα στιγμή τα κορυφαία αυτοκίνητα για κάθε τύπο φόρτισης είναι τα εξής:

- CHAdeMO – Nissan Leaf
- CCS – BMW i3
- Supercharger – Tesla Model S
- China GB/T – ?

Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά ο κάθε τύπος φόρτισης.

CHAdeMO – (Nissan, Mitsubishi, Kia)





Εικόνα 5.5 (πάνω και κάτω): Υποδοχές για φόρτιση μέσω του προτύπου CHAdeMO.

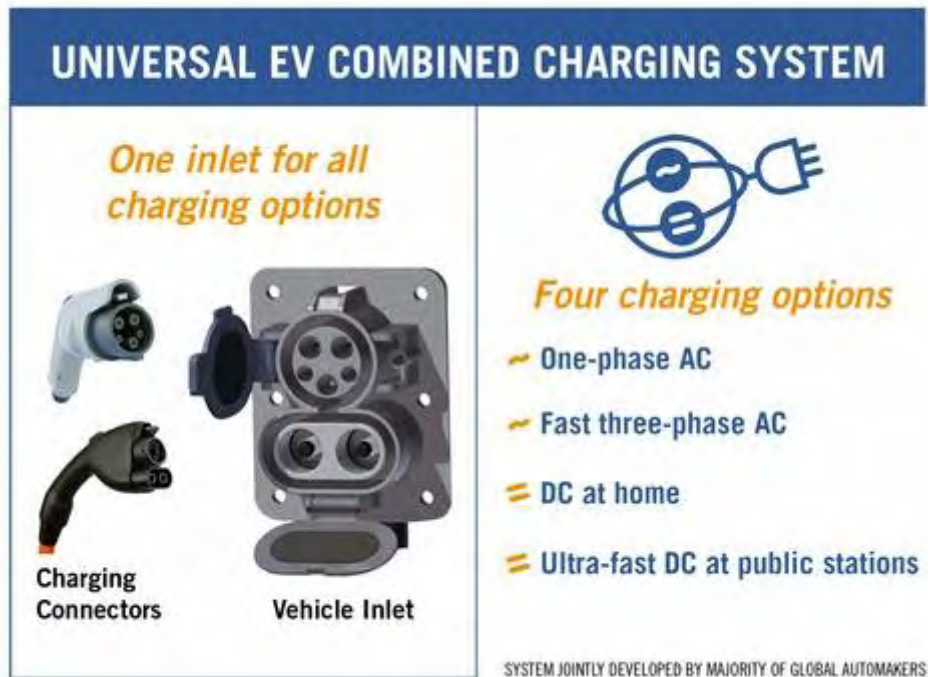
CHAdeMO είναι η εμπορική ονομασία μιας γρήγορης μεθόδου φόρτισης για ηλεκτρικά οχήματα με χρήση μπαταριών η οποία προσφέρει έως και 62,5 kW συνεχούς ρεύματος υψηλής τάσης μέσω ενός ειδικού ηλεκτρικού συνδετήρα. Προτάθηκε ως παγκόσμιο πρότυπο της βιομηχανίας από την ομώνυμη ένωση εταιριών.

Ορίστηκε από τη CHAdeMO Association και έχει επικεντρωθεί στο να αυξήσει τις εγκαταστάσεις ταχείας φόρτισης (**quick-charger**) σε όλο τον κόσμο καθώς και να τυποποιήσει την διαδικασία φόρτισης των οχημάτων. Η CHAdeMO σχηματίστηκε από την Tokyo Electric Power Company, Nissan, Mitsubishi και Fuji Heavy Industries (κατασκευαστής των αυτοκινήτων Subaru). Η Toyota αργότερα εντάχθηκε ως πέμπτο εκτελεστικό μέλος του. Η λέξη CHAdeMO είναι μια συντομογραφία του “CHArge de MOve”, που ισοδυναμεί με “charge for moving” (“φορτίζουμε για κινούμαστε”). Το όνομα είναι ένα λογοπαίγνιο της Ιαπωνικής φράσης “O Cha demo ikaga desuka», που στα αγγλικά μεταφράζεται ως “How about some tea?” δηλαδή “Τι θα λέγατε για φλιτζάνι τσάι;”, αναφερόμενο στο ελάχιστο χρόνο που χρειάζεται ένα αυτοκίνητο για να φορτίσει.

Η CHAdeMO είναι μια μορφή συνεχούς γρήγορης φόρτισης, υψηλής τάσης (έως 500V DC) υψηλού ρεύματος (125 A) αυτοκινήτων γρήγορη φόρτιση μέσω ενός συνδετήρα γρήγορη φόρτιση JARI DC. Η υποδοχή καθορίζεται από το πρότυπο JEVS (Japan Electric Vehicle Standard) G105-1993 από το Ινστιτούτο Οχημάτων και Ερευνών της Ιαπωνίας (**Japan Automobile Research Institute**) Ο σύνδεσμος περιλαμβάνει δύο μεγάλα pins για το συνεχές ρεύμα, καθώς και άλλα pins για να φέρουν τις συνδέσεις CAN-BUS.

Επειδή οι θύρες CHAdeMO (CHAdeMO ports) δεν υποστηρίζουν φόρτιση για εναλλασσόμενο ρεύμα, τα αυτοκίνητα πρέπει να διαθέτουν δύο θύρες φόρτισης - μία για το Level 2 AC, και μια δεύτερη για την CHAdeMO.

Συνδυαστικό Σύστημα Φόρτισης SAE (Combo Charging System = CCS) - (BMW, η GM, VW, και άλλες αυτοκινητοβιομηχανίες)



Εικόνα 5.6 (πάνω και κάτω): Universal EV Combined Charging System.

Όταν επιφορτίστηκε με την ανάπτυξη ενός συστήματος ταχείας φόρτισης, η επιτροπή του SAE J1772 πήρε ουσιαστικά το υπάρχον καλώδιο J1772 και του πρόσθεσε δύο μεγάλα pins για υψηλής ισχύος DC ρεύματα. Το επάνω μέρος είναι το σύνηθες βύσμα J1772 που χρησιμοποιείται στις ΗΠΑ, και το κάτω τμήμα είναι οι δύο ακίδες ισχύος DC.

Μερικοί από τους λόγους που οδήγησαν την επιτροπή του J1772 στην ανάπτυξη του CCS προτύπου είναι οι παρακάτω:

- Ένιαία εισόδου φόρτισης για την υποστήριξη αργή και γρήγορη φόρτιση (έναντι των δύο που απαιτούνται για CHAdeMO)
- Χρησιμοποιεί πρωτόκολλα διαχείρισης των έξυπνων δικτύων (**Smart Grids**) για τον έλεγχο της φόρτισης
- Ίδια υποδοχή εξυπηρετεί πολλαπλούς σκοπούς

Ο πρώτος λόγος και πλεονέκτημα, επιτρέπει στους κατασκευαστές αυτοκινήτων μεγαλύτερη ελευθερία σχεδιασμού, απαιτώντας μόνο μία τρύπα στην επιφάνεια του αυτοκινήτου (ή, μια μικρότερη τρύπα) για την επαναφόρτιση. Επίσης το καλώδιο φόρτισης είναι ελαφρύτερο από εκείνο του CHAdeMO, και πιο εύκολο στη χρήση.

Το δεύτερο σημείο - δείτε την παραπάνω εικόνα με την ένδειξη "IEC DC Συστήματα φόρτισης" - έχει να κάνει με το πρωτόκολλο ελέγχου μεταξύ του αυτοκινήτου και του σταθμού φόρτισης. Θα γίνει αναφορά για αυτό πιο κάτω, αλλά το CCS χρησιμοποιεί PLC για την εν λόγω επικοινωνία, ενώ το CHAdeMO χρησιμοποιεί CAN. Το CAN είναι ένα πρωτόκολλο δεδομένων που χρησιμοποιείται μεταξύ των συστατικών μερών, μέσα στο αυτοκίνητο, ενώ το PLC είναι μέρος των πρωτοκόλλων των έξυπνων δικτύων.

Tesla Supercharger



Εικόνα 5.7: Σταθμός φόρτισης Tesla Supercharger.

Το σύστημα Tesla Supercharger χρησιμοποιεί μια απλή θύρα, χρησιμοποιώντας ένα κομψό λεπτό καλώδιο και βύσμα φόρτισης, υποστηρίζοντας κάθε πιθανή κατάσταση φόρτισης που μπορεί κανείς να σκεφτεί:

Η κινητή μονάδα φόρτισης Tesla έρχεται με αντάπτορες για κάθε είδους ρευματοδότη, από 120 V και 12 A (NEMA 5-20), μέχρι 240 V και 50 A ρεύματος (NEMA 14-50).


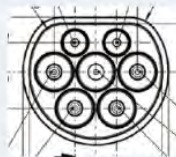

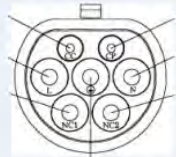
Μέσω ενός προσαρμογέα, μπορεί να συνδεθεί με σταθμούς φόρτισης J1772 .

Σε ένα σταθμό Supercharger (όπως απεικονίζεται ανωτέρω) μπορεί να λάβει DC γρήγορη φόρτιση με ρυθμό που φτάνει τα 120 KW

Αυτό σημαίνει ότι ένας ιδιοκτήτης Tesla Model S ή Model X μπορεί να χρησιμοποιήσει την τεχνολογία ταχείας φόρτισης (Fast Charging) παρέχοντας του ένα ευρύ φάσμα επιλογών για πολλαπλές καταστάσεις σύνδεσης.

Η Tesla Motors πωλεί επίσης ένα add-on προσαρμογέα επιτρέποντας στους ιδιοκτήτες των μοντέλων Model S / X να επαναφορτίζουν και σε σταθμό τύπου CHAdeMO. Όμως η Tesla Motors δεν πωλεί κάποιου είδους προσαρμογέα που να επιτρέπει στους ιδιοκτήτες των CHAdeMO ή CCS αυτοκινήτων για την επαναφόρτιση τους σε σταθμούς Supercharger. Έτσι προφανώς διατηρεί, το ανταγωνιστικό πλεονέκτημα έναντι των άλλων προτύπων όσο αναφορά τις επιδόσεις, δίνοντας ένα προβάδισμα για την καθολική καθιέρωση του.

China's fast charging system(s)

	IEC 62196-2:2010			GB 20234.2-2011
	Type1-U.S	Type 2-Germany	Type 3-Italy	China
Phase	Single phase	Single/Three phase	Single phase	Single phase (Three phase reserved)
Current	32A(80A U.S)	70A/63A	16A,32A/32A	16A,32A
Voltage	250V	480V	250V,250V/500V	250V/400V
Pin & interlock	5-pin, mechanical lock	7-pin, electronic lock	4-pin, 5-pin	7-pin, mechanical lock (optional electronic lock)
Control pilot pin	Two short pins	One short pin, one long pin		Two short pins
Male & female pin		Plug: male Vehicle connector: female		Plug: male Vehicle connector: male
Dimensions				

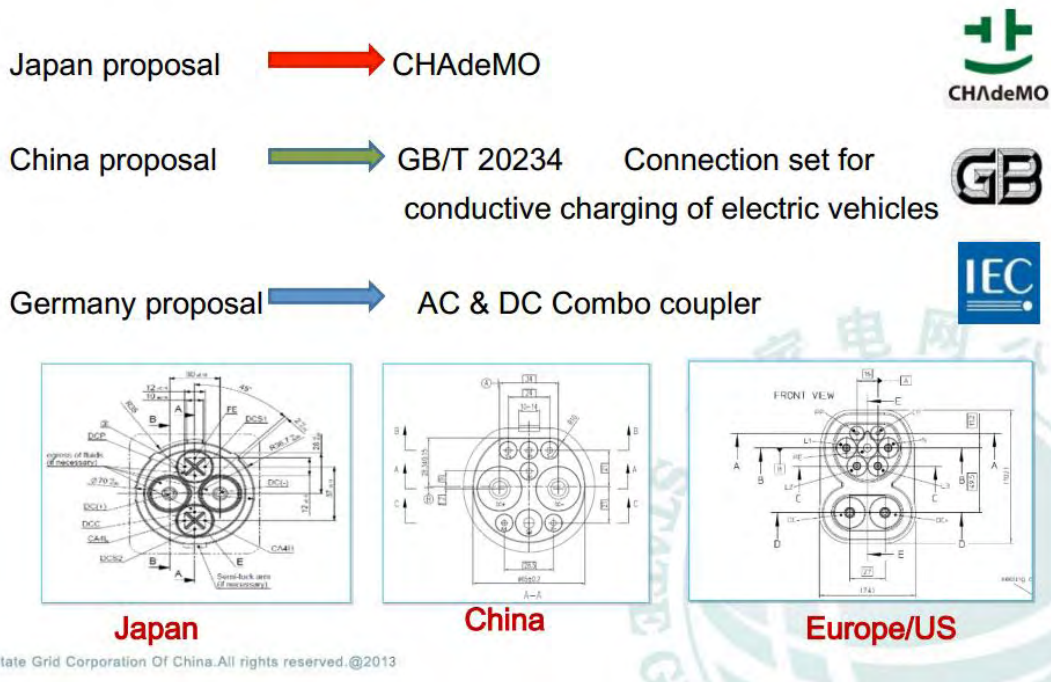
➤ Communication Protocol

	International:	China:
Physical layer	PLC	CAN BUS
Link/Network layer	IP Based	CAN

➤ PWM pilot control

	International:	China:
EVSE side	Voltage detection	Current detection

Εικόνα 5.8 (πάνω και κάτω): Τεχνικά χαρακτηριστικά για το σύστημα ταχυφόρτισης της Κίνας.



Εικόνα 5.9: Πληροφορίες για την δομή των διάφορων υποδοχέων.

Ούτε η Ευρώπη αλλά ούτε και η Κίνα είχε ένα ενιαίο πρότυπο για τις θύρες φόρτισης, είτε για μέτριας ταχύτητας AC (6 kilowatt) ή για υψηλότερης ταχύτητας AC ή DC. Οι παραπάνω πληροφορίες είναι από τις αρχές του 2014, και δείχνουν ότι ενώ η Κίνα έχει υιοθετήσει μια υποδοχή διατηρώντας το ίδιο σχήμα όπως η ευρέως χρησιμοποιούμενη υποδοχή στην Ευρώπη, εφάρμοσε ένα διαφορετικό πρωτόκολλο ελέγχου. (CAN αντί του PLC)

Οι πληροφορίες που παρουσιάζονται εδώ, καλύπτουν μόνο AC φόρτισης κανονικής ταχύτητας, και όχι DC γρήγορης φόρτισης.

AC Fast Charging



Εικόνα 5.10: Renault ZOE κατά την φόρτιση του.

Ενώ η "Level 3 AC" εμφανίζεται στο γράφημα ως απροσδιόριστη, υπάρχουν τουλάχιστον δύο τριφασικές υλοποιήσεις φόρτισης τύπου AC ηλεκτρικών αυτοκινήτων σε επίπεδα ισχύος άνω των 20 KW.

Το Renault ZOE (φαίνεται παραπάνω) υποστηρίζει μονοφασική AC φόρτιση 3 KW και τριφασική φόρτιση AC της τάξης των 42 KW. Αυτό γίνεται χάριν του συστήμα φόρτισης της Renault εν ονόματι Chameleon. Χρησιμοποιεί τις περιελίξεις του κινητήρα ως μέρος του κυκλώματος φόρτισης, που επιτρέπει στο αυτοκίνητο να διαχειριστεί το ανορθωμένο υψηλό εναλλασσόμενο ρεύμα AC μετατρέποντας το σε χαμηλότερο DC για τη φόρτιση της μπαταρίας.

Η Renault πραγματοποίησε τεστ αντοχής του ZOE το Μάιο του 2012 και πέτυχε να διανύσει αθροιστικά, 1.000 μίλια σε διάστημα 24 ωρών, ενώ υποβλήθηκε σε 18 γρήγορες φορτίσεις. Η ευρωπαϊκή έκδοση του Smart Electric Drive υποστηρίζει 22 KW τριφασικού ρεύματος γρήγορης φόρτισης. Αυτό δεν υποστηρίζεται από την αμερικανική έκδοση του εν λόγω αυτοκινήτου - τριφασικό AC είναι σύνηθες φαινόμενο στην Ευρώπη, αλλά σπάνιο στις ΗΠΑ. Υπάρχει μια σημαντική διάκριση μεταξύ της DC γρήγορης φόρτισης και της αντιστοιχης AC. Με την DC γρήγορη φόρτιση, ο σταθμός φόρτισης περιέχει τον ανορθωτή (το gizmo για τη μετατροπή AC σε DC). Έτσι εξηγείται το μεγάλο μέγεθος των DC σταθμών γρήγορη φόρτιση, καθώς είναι λόγω, του μεγέθους του εν λόγω ανορθωτή, σε συνδυασμό με τον εξοπλισμό ψύξης που απαιτείται. Με την γρήγορη φόρτιση AC, η ανόρθωση/μετατροπή από DC σε AC γίνεται επί του οχήματος.

Powerline Communication (PLC)

Ο σκοπός της τεχνικής αυτής ήταν να χρησιμοποιήσει τις ηλεκτρικές γραμμές μεταφοράς ως επικοινωνιακό μέσο ώστε να παρέχει ένα δίκτυο επικοινωνιών όπως το Διαδίκτυο, αλλά ταυτόχρονα να υποστηρίζει τις κλασσικές υπηρεσίες που σχετίζονται με τη διανομή ενέργειας, π.χ. έλεγχο φορτίου και απομακρυσμένη ανάγνωση μετρητών. Η τεχνολογία PLC, ουσιαστικά περιλαμβάνει το δίκτυο μεταφοράς μέσης τάσης (MT) καθώς και το δίκτυο διανομής χαμηλής τάσης (XT). Οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στο PLC είναι κυρίως στενού εύρους ζώνης (narrowband -NB) που λειτουργούν σε χαμηλές συχνότητες (μερικά kHz) και ευρυζωνικές (broadband - BB) που λειτουργούν σε υψηλές συχνότητες (εκατοντάδες MHz). Τα σήματα δεδομένων μεταδίδονται με υψηλή ταχύτητα (2-3Mbps) μέσω του PLC. Σε ένα τυπικό PLC δίκτυο, οι έξυπνοι μετρητές συνδέονται στο συγκεντρωτή δεδομένων μέσω ηλεκτρικών γραμμών μεταφοράς και τα δεδομένα μεταφέρονται στο κέντρο δεδομένων με τεχνολογίες κυψελωτών δικτύων. Για παράδειγμα, οποιαδήποτε ηλεκτρική συσκευή, όπως ένας έξυπνος μετρητής με βάση πομποδέκτη, μπορεί να συνδεθεί στη γραμμή μεταφοράς και να χρησιμοποιηθεί για να μεταφέρει τα δεδομένα των μετρήσεων σε μια κεντρική τοποθεσία. Τα πρωτόκολλα πρόσβασης μέσου που χρησιμοποιούνται στην PLC υποδομή βασίζονται στις τοπολογίες master-slave αστέρα, δακτυλίου με σκυτάλη, αρτηρίας με TDM και την Aloha ή CSMA-CD τεχνική.

Το PLC μπορεί να θεωρηθεί μια υποσχόμενη τεχνολογία για τις εφαρμογές των έξυπνων δικτύων εξαιτίας του γεγονότος ότι η υπάρχουσα υποδομή μειώνει το κόστος εγκατάστασης μιας επικοινωνιακής υποδομής. Οι προσπάθειες προτυποποίησης στα PLC δίκτυα, η αποδοτικότητα ως προς το κόστος, η παρουσία τους παντού και η ευρέως διαθέσιμη υποδομή των PLC είναι οι λόγοι που το κάνουν δυνατό και δημοφιλές. Βέβαια, το στοιχείο της ασφάλειας είναι κρίσιμο. Η αξιοπιστία, ο έλεγχος ταυτότητας-αυθεντικότητας, η ακεραιότητα, η παρέμβαση του χρήστη είναι μερικά από τα κρίσιμα θέματα στις επικοινωνίες των έξυπνων δικτύων.

Η χρήση σε οικιακά δίκτυα (HAN) είναι η μεγαλύτερη εφαρμογή για την PLC τεχνολογία. Ακόμη, μπορεί να φανεί κατάλληλη σε αστικές περιοχές για εφαρμογές όπως έξυπνες μετρήσεις, παρακολούθηση και έλεγχος, μιας και η PLC υποδομή καλύπτει ήδη τις περιοχές που είναι στο εύρος της επικράτειας υπηρεσιών των εταιριών κοινής ωφελείας. Παρόλα αυτά, το PLC αντιμετωπίζει προβλήματα εξασθένησης, θορύβου και παραμόρφωσης, που συναντώνται στις RF επικοινωνίες όταν υλοποιούνται μέσω των καλωδίων ηλεκτρικής ενέργειας. Μιας και οι ηλεκτρικές γραμμές δεν είχαν αρχικά σχεδιαστεί για μετάδοση δεδομένων, πρέπει να αντιμετωπιστεί ένας αριθμός σημαντικών θεμάτων και προκλήσεων στο PLC.

- Διαφορετική αντίσταση και κατάσταση καναλιού
- Μη-λευκός θόρυβος στη φύση
- Εξασθένηση εξαρτώμενη από τη συχνότητα που σχετίζεται με τη θέση των εξόδων (outlets), τις γεωγραφικά διαφορετικές δομές καλωδίωσης και τον αριθμό/τύπο των συνδεδεμένων ηλεκτρικών συσκευών
- Αλλαγή φάσης (από μονοφασική σε τριφασική και vice versa) μεταξύ εσωτερικών και εξωτερικών αρχιτεκτονικών.

Γενικά, οι ηλεκτρικές γραμμές μεταφοράς ως μέσο μετάδοσης είναι αντίξοο και θορυβώδες περιβάλλον που κάνει δύσκολη τη μοντελοποίηση του καναλιού. Το χαρακτηριστικό του χαμηλού εύρους ζώνης (20Kbps για δίκτυα σε επίπεδο γειτονιάς (Neighborhood area networks) περιορίζει την PLC τεχνολογία ως προς τις εφαρμογές που χρειάζονται

μεγαλύτερο εύρος. Επιπλέον, η τοπολογία του δικτύου, ο αριθμός και τύπος των συνδεδεμένων συσκευών στις ηλεκτρικές γραμμές, η απόσταση καλωδίωσης μεταξύ πομπού και δέκτη, όλα επηρεάζουν δυσμενώς την ποιότητα του σήματος που μεταδίδεται πάνω από τις γραμμές. Η ευαισθησία του PLC στις διαταραχές και η εξάρτηση από την ποιότητα του σήματος είναι τα μειονεκτήματα που το καθιστούν ακατάλληλο για μεταφορά δεδομένων. Ωστόσο, έχουν προταθεί υβριδικές λύσεις στις οποίες η PLC τεχνολογία συνδυάζεται με άλλες, δηλαδή GPRS ή GSM, για την παροχή πλήρους συνδεσιμότητας.

HomePlug Phy

Το πρωτόκολλο PLC χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της γρήγορης φόρτισης στα συστήματα CCS είναι HomePlug PHY. Τα σήματα αποστέλλονται μέσω του τμήματος J1772 του υποδοσχεά - το PLC σημαίνει Power Line Control, είναι δηλαδή σήματα δεδομένων που αποστέλλονται μέσω γραμμών εναλλασσόμενου ρεύματος.

Η γρήγορη φόρτιση DC (DC Fast Charge) έχει πιο βεβαρημένη επικοινωνία καθώς έχει να διαχειριστεί πράγματα, όπως η τάση στον συσσωρευτή, το ρυθμό φόρτισης, πότε να σταματά.

Η διαμάχη για την DC γρήγορη φόρτιση

Η χρήση πολλαπλών πρωτοκόλλων γρήγορης φόρτισης δεν είναι κάτι ευχάριστο για τον κλάδο των ηλεκτρικών οχημάτων. Αναγκάζει τον κόσμο σε μια μακρο-οικονομικά άσχημη θέση στην οποία, ξοδεύονται περισσότερα χρήματα από ό,τι είναι απαραίτητο για την υποστήριξη πολλαπλών πρωτοκόλλων φόρτισης. Για παράδειγμα, η Tesla Motors δαπανά πολλά χρήματα για την οικοδόμηση ενός ιδιόκτητου δικτύου φόρτισης που μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο από τους ιδιοκτήτες της Tesla Motors, ενώ την ίδια στιγμή οι φορείς εκμετάλλευσης δικτύων φόρτισης δαπανούν εξίσου μεγάλα χρηματικά ποσά για την δημιουργία σταθμών γρήγορης φόρτισης για τα άλλα πρωτόκολλα. Ως εκ τούτου, δαπανώνται δύο φορές περισσότερα χρήματα, όταν θα αρκούσαν τα μισά για την δημιουργία τους.

Σε κάθε περίπτωση, προηγουμένως συζητήθηκε μια θεωρητική αιτιολόγηση πίσω από την επιτροπή του SAE, αρνούμενη να εγκρίνει το πρότυπο CHAdeMO ως πρωτόκολλο για γρήγορη φόρτιση. Ορισμένοι πιστεύουν ότι οι αυτοκινητοβιομηχανίες είχαν τρομάξει από το τολμηρό σχέδιο της Nissan με το Leaf, και χρησιμοποίησαν την επιτροπή του SAE J1772 για να καθυστερήσει την δημιουργία αυτού του προτύπου για Fast Charging με αποτέλεσμα, δικαιολογημένα, να περιοριστεί η αξία της ιδέας του Leaf.

Έστω και αν αυτό δεν αληθεύει, είναι αλήθεια ότι το CHAdeMO έχει ένα τεράστιο προβάδισμα έναντι του συστήματος ταχείας φόρτισης CCS. Υπάρχουν πολύ περισσότεροι σταθμοί CHAdeMO σε όλο τον κόσμο από ότι CCS, και πολύ περισσότερα αυτοκίνητα CHAdeMO από ότι εκείνα που χρησιμοποιούν σαν πρότυπο το CCS.

Η Tesla Motors κερδίζει γρήγορα έδαφος σχετικά με τους αριθμούς των πωλήσεων του Nissan Leaf (CHAdeMO). Καθώς η παραγωγή του Model X μοντέλο έχει ξεκινήσει, το ποσοστό αυτό αναμένεται να επιταχυνθεί επειδή η Tesla συνήθως έχει μεγαλύτερες πωλήσεις από ότι το Nissan Leaf. Ως εκ τούτου, μπορούμε να αναμένουμε σύντομα, οι συνολικές πωλήσεις των Supercharger συμβατών αυτοκινήτων να υπερβούν το σύνολο των πωλήσεων εκείνων που είναι συμβατά με την CHAdeMO ή CCS τεχνολογία.



Εικόνα 5.11: Κεντρικός σταθμός φόρτισης της Tesla Motors.

Τώρα που εισέρχονται στο χώρο της ηλεκτροκίνησης και άλλες εταιρίες, με μοντέλα όπως BMW's i3, VW's e-Golf, GM's Spark EV καθώς και άλλες με CCS-συμβατά αυτοκίνητα, οι αριθμοί για την τεχνολογία CCS αρχίζουν να μεγαλώνουν. Το μεγάλο ερώτημα είναι αν CHAdeMO θα συνεχίσει να προπορεύεται, ή αν ο απόλυτος αριθμός των αυτοκινήτων πίσω από την CCS τεχνολογία θα είναι σε θέση να αντικαταστήσει εκείνη της CHAdeMO, ή αν η Tesla Motors θα παρασύρει και τις δύο;

Το πρόβλημα με αυτό είναι ότι η αγορά εγκλωβίζεται σε μια πολυδιάστατη διαμάχη για το επικρατέστερο πρωτόκολλο γρήγορης φόρτισης. Μέχρι να υπάρξει ένα ενιαίο πρότυπο γρήγορης φόρτισης, οι χρήστες θα είναι σε σύγχυση κάθε φορά που θα καταφθάνουν σε έναν σταθμό για το αν μπορούν να τον χρησιμοποιήσουν, λόγω ασυμβατοτήτων.

Κεφάλαιο 6

Διάρθρωση της αγοράς και τιμολόγηση της ηλεκτρικής ενέργειας

Αρχικά πρέπει να τονίσουμε πως η ευημερία, η ανάπτυξη και η επιβίωση του σύγχρονου τρόπου ζωής μας, βασίζεται στην ηλεκτρική ενέργεια, εφόσον η πλειοψηφία των συσκευών που χρησιμοποιούμε στην καθημερινότητά μας λειτουργεί με ηλεκτρική ενέργεια. Παρόλο τον κοινό γνώμονα, δηλαδή την ηλεκτρική ενέργεια η αγοράς ενέργειας διαφοροποιούνται τόσο στον τρόπο λειτουργίας τους, όσο και στον ορισμό και την ονοματολογία των διαφόρων μεγεθών και υπηρεσιών. Έχουν να καλύψουν ανάγκες διαφορετικών ειδών καταναλωτών.

Σε επίπεδο Ευρωπαϊκής Ένωσης γίνεται μια προσπάθεια για ομοιομορφία των αγορών με κάποιες οδηγίες που έχουν εκδοθεί (πχ οι οδηγίες 96/92/ΕΚ, 2003/54/ΕΚ, 2009/72/ΕΚ), αλλά αυτή η προσπάθεια δεν έχει ακόμα ολοκληρωθεί.

Παρόλα αυτά, θα ασχοληθούμε και θα περιγράψουμε με απλοποιημένο τρόπο την αγορά ηλεκτρικής ενέργειας, όπου η ηλεκτρική ενέργεια αντιμετωπίζεται σαν προϊόν καθώς και παράγοντες, και υπηρεσίες των ξεχωριστών, απελευθερωμένων αγορών ηλεκτρικής ενέργειας, που είναι αρκετά βασικά και κοινά στις διάφορες χώρες.

Η γενική λειτουργία της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας συνοψίζεται στην εφοδιαστική αλυσίδα του προϊόντος «ηλεκτρισμός». Η αγορά ηλεκτρικής ενέργειας διαχωρίζεται κατά κύριο λόγο σε δύο βασικά μέρη **α)** την χονδρική αγορά (**wholesale market**) και **β)** την λιανική αγορά (**retail market**).

Έτσι η χονδρική αγορά ενέργειας ιεραρχείται ως εξής:

1. Τον αρχικό κρίκο αποτελούν οι παραγωγοί (**producers**) και οι εισαγωγείς (**importers**), οι οποίοι πωλούν την ηλεκτρική ενέργεια που διαθέτουν στη χονδρική αγορά (**wholesale market**).
2. Οι πιθανοί αγοραστές που απαρτίζονται από τους προμηθευτές (**retailers**) και οι εξαγωγείς (**exporters**) που αντιπροσωπεύουν το άθροισμα των πελατών στην χονδρική αγορά.
3. Οι αυτοπρομηθευόμενοι καταναλωτές (**self-consumers**) κυρίως από τον βιομηχανικό περιβάλλον, οι οποίοι για να μειώσουν στο ελάχιστο το κόστος του μεσάζοντα – προμηθευτή, αγοράζουν ηλεκτρική ενέργεια απευθείας από την χονδρική αγορά.

Η διαδικασία της αγοραπωλησίας της ηλεκτρικής ενέργειας είναι μια δημοπρασία στην οποία προτεραιότητα πώλησης έχει αυτός που διαθέτει την απαιτούμενη ζητούμενη ποσότητα στην χαμηλότερη τιμή.

Πιο συγκεκριμένα η αγοραπωλησία της ενέργειας στην χονδρική αγορά ονομάζεται Ημερήσιος Ενεργειακός Προγραμματισμός (**HEΠ**) και γίνεται από το Διαχειριστή Δικτύου Μεταφοράς ή αλλιώς Ανεξάρτητος Διαχειριστής Συστήματος (**Transfer System Operator/ TSO** ή **Independent System Operator/ISO**), ο οποίος είναι επιφορτισμένος με την ευθύνη για την απρόσκοπτη και με ασφάλεια, μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας.

Είναι επίσης ανεξάρτητος επειδή σ' ένα ανταγωνιστικό περιβάλλον το σύστημα θα πρέπει να λειτουργεί αντικειμενικά και ισοτίμα για όλους. Ο Διαχειριστής Δικτύου Μεταφοράς έχει συνήθως το υπολογιστικό και τηλεπικοινωνιακό φόρτο που χρειάζεται ώστε να μπορεί να παρακολουθήσει και να ελέγξει το σύστημα ενέργειας.

Κατά την διαδικασία του Ημερήσιου Ενεργειακού Προγραμματισμού (HEP) συμβαίνουν τα εξής με σειρά: Ημερησίως για κάθε ώρα οι παραγωγοί/εισαγωγείς καταθέτουν προσφορές (**Offers**) για συγκεκριμένη ποσότητα ενέργειας, σε συγκεκριμένη τιμή (νόμισμα ανά MWh, πχ €/MWh) και για συγκεκριμένη ώρα παράδοσης, του επόμενου 24ώρου. Οι προσφορές που κατατίθενται έχουν δεσμευτικό χαρακτήρα, δηλαδή εφόσον γίνουν δεν μπορούν να αποσυρθούν. Ομοίως, οι προμηθευτές, οι εξαγωγείς και οι μεγάλοι καταναλωτές καταθέτουν κι αυτοί από την προηγούμενη μέρα τις αναμενόμενες ζητούμενες ποσότητες (**Bids**).

Τελικά, η τιμή του συστήματος προκύπτει από την γραμμική ελαχιστοποίηση του γινομένου της τιμής επί την ποσότητα, με βάση πάντα τους φυσικούς περιορισμούς που θέτει η αγορά.

Το σημείο, όπου ισορροπεί η προσφορά με τη ζήτηση, αποτελεί την Οριακή Τιμή του Συστήματος ΟΤΣ (**marginal price**), δηλαδή την τιμή, στην οποία θα πωλήσουν οι παραγωγοί την ενέργεια τους ανεξάρτητα από την ποσότητα που παρέχουν και στην οποία θα αγοράσουν οι προμηθευτές το ποσό της ενέργειας, που είχαν ζητήσει για την εκάστοτε ώρα της ημέρας.

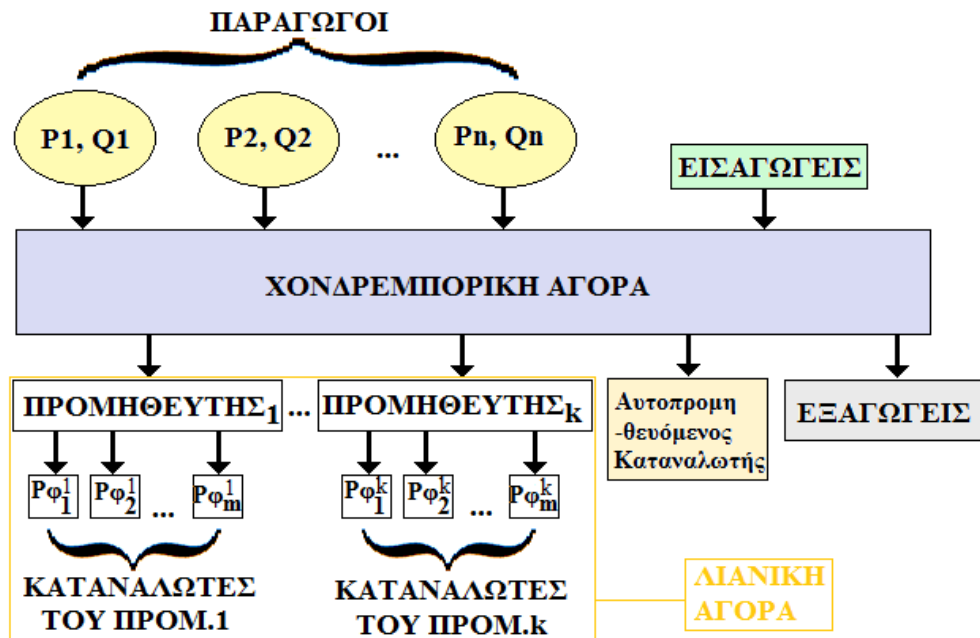
Το δεύτερο τμήμα της αγοράς, η λιανική, αποτελείται από τους:

1. Προμηθευτές, οι οποίοι με την σειρά τους έχοντας αγοράσει ηλεκτρική ενέργεια από την χονδρική αγορά, την πωλούν στους τελικούς αποδέκτες (δηλαδή τους καταναλωτές).
2. και τέλος τους τελικούς καταναλωτές, οι οποίοι μπορούν να επιλέγουν ελεύθερα ποια εταιρεία θα τους προμηθεύει με ηλεκτρική ενέργεια.

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



Σχήμα 6.1: Συνολικές καμπύλες προσφοράς-ζήτησης και καθορισμός ΟΤΣ.



Σχήμα 6.2: Σχηματική απεικόνιση της δομής της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

Παρόλο που η χονδρική αγορά ενέργειας είναι μία και μοναδική, η διάκριση της είναι αναγκαία για την διαχείριση των επικουρικών υπηρεσιών. Άρα είτε η διαπραγματευόμενη ενέργεια πρόκειται να καλύψει ανάγκες του φορτίου βάσης, είτε ανάγκες του φορτίου αιχμής, προχωρούμε σε μία διάκριση η οποία είναι:

❖ Ισχύς Βάσης

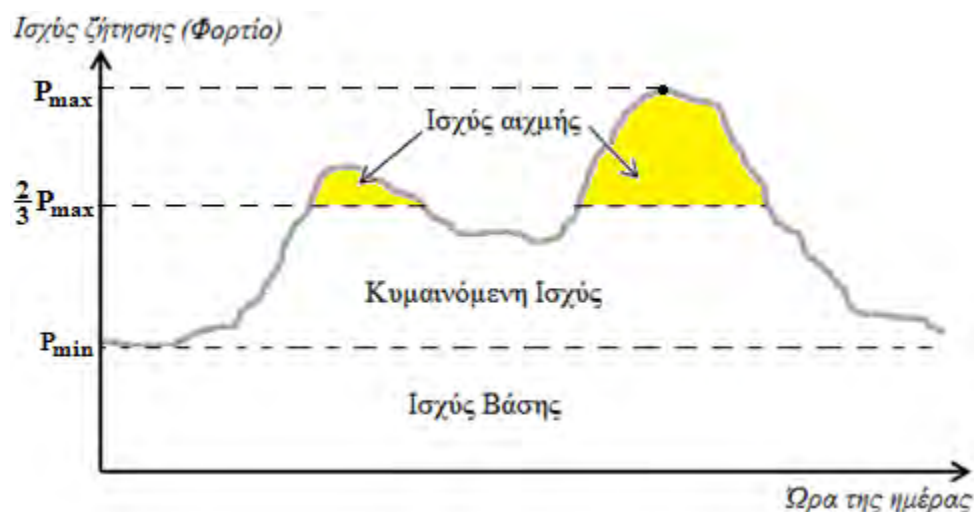
Η ισχύς βάσης φορτίου (**baseload power**) ονομάζεται, η ισχύς εκείνη, που απαιτείται επί 24ώρου βάσης. Συνήθως προέρχεται από τους μεγάλους σταθμούς παραγωγής ενέργειας, πχ θερμικούς, λιγνιτικούς, πυρηνικούς, μέσω μακροπρόθεσμων συμβολαίων για σταθερή παραγωγή με μικρό κόστος ανά παραγόμενη κιλοβατώρα (kWh). Η ζώνη βάσης είναι το φορτίο που βρίσκεται κάτωθεν από το ελάχιστο σημείο της καμπύλης.

❖ Ισχύς Αιχμής

Η ισχύς αιχμής (**peak power**) παράγεται ή αγοράζεται τις ώρες εκείνες της ημέρας, κατά τις οποίες αναμένεται μεγάλη κατανάλωση ισχύος, όπως για παράδειγμα σε περιόδους ακραίων φυσικών φαινομένων, καύσωνες ή βαρυχειμωνιές. Συνήθως, οι σταθμοί που παράγουν την ενέργεια αυτή, έχουν την ικανότητα να τίθενται σε λειτουργία και να αποσυνδέονται ταχύτατα, όπως είναι οι τουρμπίνες φυσικού αερίου. Δεδομένου πως η ισχύς αιχμής χρειάζεται μόνο για κάποιες εκατοντάδες ώρες το χρόνο, είναι οικονομικότερο να προέρχεται από γεννήτριες χαμηλότερου κεφαλαιακού κόστους, ακόμα και αν η προκύπτουσα kWh είναι πιο ακριβή. Η **ζώνη αιχμής** αποτελεί το τμήμα με τις πιο απότομες μεταβολές, τη μικρότερη διάρκεια, και θεωρείται ότι περιλαμβάνει φορτία που ξεπερνούν τα 2/3 της αιχμής της καμπύλης φορτίου ως προς το χρόνο.

❖ Κυμαινόμενη ισχύς

Κυμαινόμενη ισχύς (Fickle Power) ονομάζεται η ισχύς που εμφανίζεται στο ενδιάμεσο τμήμα του διαγράμματος της καμπύλης φορτίου μεταξύ, ζώνης βάσης και ζώνης αιχμής, όπου και καλείται ζώνη κυμαινόμενου φορτίου, το οποίο μεταβάλλεται σχεδόν καθ' όλη την διάρκεια της εξεταζόμενης περιόδου.



Σχήμα 6.3: Ισχύς βάσης είναι η ζώνη κάτω από το κατώτερο σημείο της χρονολογικής καμπύλης φορτίου. Ισχύς αιχμής είναι η ζώνη, η οποία περιλαμβάνει φορτία, που υπερβαίνουν τα 2/3 της αιχμής. Ενδιάμεσα βρίσκεται η ζώνη κυμαινόμενου φορτίου.

Κεφάλαιο 7

Επικουρικές υπηρεσίες

Επικουρικές Υπηρεσίες (ΕΥ) είναι οι υπηρεσίες που απαιτούνται για τη μεταφορά και τη διασφάλιση της ποιότητας παροχής της ηλεκτρικής ενέργειας (δηλ. τη διατήρηση της τάσης και της συχνότητας εντός αυστηρά προκαθορισμένων ορίων) μέσω του Συστήματος από τα σημεία έγχυσης στα σημεία κατανάλωσης. Η απαίτηση της ύπαρξης τέτοιων υπηρεσιών πηγάζει από το γεγονός, ότι η καμπύλη παραγωγής ενέργειας, με εκείνη της καμπύλη ζήτησης για την παροχή φορτίου δεν μπορούν να ταυτιστούν καθώς επηρεάζονται από πιθανότητες παραμέτρους. Αυτό που κάνει την ταύτιση των δύο καμπυλών να μοιάζει αδύνατη, πηγάζει από τους εξής λόγους:

1. Από την μεριά της παραγωγής, η ενέργεια που μπορεί να προσφερθεί δεν μπορεί να προβλεφθεί με απόλυτη ακρίβεια, για λόγους που έχουν να κάνουν με διάφορες απρόβλεπτες βλάβες και αστοχίες που συμβαίνουν στον εξοπλισμό. Επίσης η είσοδος των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) στη παραγωγή, έχει το μειονέκτημα, ότι η ενέργεια που εισέρχεται στο δίκτυο είναι μεταβαλλόμενη και εξαρτημένη άμεσα από τις καιρικές συνθήκες, που επικρατούν την κάθε χρονική στιγμή.
2. Παρομοίως από την μεριά των καταναλωτών, το συνολικό φορτίο δεν είναι δυνατόν να προβλεφθεί επακριβώς, καθώς αυτό καθορίζεται από την ενεργοποίηση και την απενεργοποίηση εκατομμυρίων ξεχωριστών ηλεκτρικών συσκευών.

Οι επικουρικές υπηρεσίες χρησιμοποιούνται σε αυτές τις περιπτώσεις για την εξισορρόπηση της παραγωγής και της ζήτησης, με σκοπό την εξασφάλιση της ποιότητας της παραγόμενης ισχύος για την ευστάθεια του συστήματος. Αποτελούν δηλαδή ηλεκτρική ισχύ, που βρίσκεται σε αναμονή, έτοιμη να προσφερθεί στο σύστημα, για την μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας από τους σταθμούς παραγωγής προς τα σημεία κατανάλωσης, με ποιότητα παροχής τάσης και εντός των προκαθορισμένων ορίων συχνότητας.

Στο μονοπωλιακό περιβάλλον η παροχή των παραπάνω υπηρεσιών αποτελούσε υποχρέωση της κάθετα ολοκληρωμένης επιχείρησης, η οποία είχε τον έλεγχο λειτουργίας του Συστήματος και όφειλε να συμμορφώνεται προς συγκεκριμένους κανονισμούς για τη διατήρηση των περιθωρίων ασφάλειας και αξιοπιστίας στη λειτουργία του. Η μετάβαση στις ανταγωνιστικές αγορές ηλεκτρικής ενέργειας κατέστησε τις επικουρικές υπηρεσίες προϊόν διαπραγμάτευσης.

Οι διάφοροι παραγωγοί έχουν οικονομικό κίνητρο να τις παρέχουν στον Διαχειριστή Δικτύου Μεταφοράς (TSO) και ανταγωνίζονται μεταξύ τους για να επιλεγούν από αυτόν. Η παροχή λοιπόν αυτών των υπηρεσιών τείνει να είναι υποχρέωση των διαφόρων παραγωγών ηλεκτρικής ενέργειας και ως εκ τούτου να μην ανταμείβεται από τον Διαχειριστή Δικτύου Μεταφοράς.

Λεδομένου ότι κάθε Σύστημα έχει ιδιαιτερότητες σε ότι αφορά τη χρήση των επικουρικών υπηρεσιών από τον αντίστοιχο Διαχειριστή, δημιουργήθηκε μία πληθώρα διαφορετικών αντιλήψεων και μοντέλων διαχείρισης των υπηρεσιών αυτών.

Λόγω της διασύνδεσης των Συστημάτων των επιμέρους κρατών, προέκυψε η ανάγκη να δοθούν σαφείς τεχνικοί ορισμοί των διαφόρων τύπων επικουρικών υπηρεσιών, προκειμένου να καταστεί δυνατή η εμπορική τους εκμετάλλευση.

Ο ελληνικός Κώδικας Διαχείρισης Συστήματος και Συναλλαγών Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΚΔΣΣΗΕ) βασιζόμενος στο πρότυπο του ENTSO-E προβλέπει τις εξής ΕΥ:

Οι επικουρικές υπηρεσίες διακρίνονται σε:

Πρωτεύουσα Ρύθμιση και Εφεδρεία (Primary Reserve)

Ως Πρωτεύουσα Ρύθμιση Συστήματος ορίζεται η συλλογική αυτόματη διορθωτική αντίδραση των μονάδων παραγωγής και των φορτίων στις αποκλίσεις της πραγματικής συχνότητας του Συστήματος από τη συχνότητα αναφοράς, με την οποία επιδιώκεται η εξισορρόπηση της συνολικής παραγωγής με τη συνολική απορρόφηση ενέργειας και η σταθεροποίηση της συχνότητας εντός τριάντα (30) δευτερολέπτων από την εκδήλωση διαταραχής της συχνότητας. Η ρύθμιση αυτή μπορεί να μην επαναφέρει τη συχνότητα στο επίπεδο της συχνότητας αναφοράς. Ειδικότερα, η αυτόματη διορθωτική αντίδραση είναι το αποτέλεσμα της αυτόματης ρύθμισης της ενεργού ισχύος εξόδου των μονάδων ανάλογα με το στατισμό του ρυθμιστή φορτίου. Εφεδρεία Πρωτεύουσας Ρύθμισης (εφ' εξής, "Πρωτεύουσα Εφεδρεία") είναι η θετική ή αρνητική μεταβολή της παραγόμενης ενεργού ισχύος της μονάδας ως αυτόματη αντίδραση του ρυθμιστή στροφών, προκειμένου να λαμβάνει χώρα η Πρωτεύουσα Ρύθμιση Συστήματος εντός τριάντα (30) δευτερολέπτων από την εκδήλωση διαταραχής της συχνότητας, για απόκλιση της συχνότητας από τη συχνότητα αναφοράς ίση με ± 200 mHz.

Δευτερεύουσα Ρύθμιση και Εφεδρεία (Secondary Reserve)

Ως Δευτερεύουσα Ρύθμιση Συστήματος ορίζεται η ρύθμιση η οποία είναι το αποτέλεσμα κεντρικής λειτουργίας του Αυτόματου Ελέγχου Παραγωγής (ΑΕΠ) από τον Διαχειριστή Δικτύου Μεταφοράς, μέσω της οποίας τηλερυθμίζεται η παραγωγή ενεργού ισχύος των μονάδων παραγωγής, εφόσον η ρύθμιση μπορεί να λαμβάνει χώρα σε χρονικό διάστημα από δέκα (10) δευτερόλεπτα έως δεκαπέντε (15) λεπτά από την ενεργοποίησή της. Η ρύθμιση αυτή επιδιώκει την ελαχιστοποίηση του Σφάλματος Ελέγχου Περιοχής (**Area Control Error, ACE**), το όριο ανοχής του οποίου καθορίζεται από τον Διαχειριστή του Συστήματος. Εφεδρεία Δευτερεύουσας Ρύθμισης (ομοίως και "Δευτερεύουσα Εφεδρεία") συνιστά το περιθώριο θετικής ή αρνητικής μεταβολής της παραγόμενης ενεργού ισχύος της μονάδας με συγκεκριμένο ρυθμό μέσω τηλερυθμίσεώς της από την κεντρική λειτουργία του ΑΕΠ, ώστε να λαμβάνει χώρα η Δευτερεύουσα Ρύθμιση Συστήματος, εφόσον αυτό το περιθώριο μεταβολής είναι πλήρως διαθέσιμο εντός δεκαπέντε (15) λεπτών από την ενεργοποίηση της Δευτερεύουσας Ρύθμισης Συστήματος. Εύρος Δευτερεύουσας Ρύθμισης είναι το διάστημα μεταξύ του ελαχίστου και του μεγίστου επιπέδου της ενεργού ισχύος της μονάδας παραγωγής που δύναται να καθορίζεται από την τηλερυθμία.

Τριτεύουσα Ρύθμιση και Εφεδρεία (Tertiary Reserve)

Ως Τριτεύουσα Ρύθμιση Συστήματος ορίζεται η ρύθμιση η οποία λαμβάνει χώρα περιοδικά, με περίοδο ολίγων λεπτών την οποία καθορίζει ο Διαχειριστής του Συστήματος, προκειμένου να αποκατασταθεί το επίπεδο Δευτερεύουσας Εφεδρείας Συστήματος, εφόσον αυτό έχει μεταβληθεί ως αποτέλεσμα της λειτουργίας της Δευτερεύουσας Ρύθμισης Συστήματος. Η ρύθμιση αυτή αφορά στη μεταβολή της ενεργού ισχύος των συγχρονισμένων μονάδων ή την εκκίνηση μονάδων που βρίσκονται εκτός λειτουργίας (offline), έπειτα από

σχετική εντολή του Διαχειριστή του Συστήματος, με κριτήριο την ελαχιστοποίηση της συνολικής δαπάνης έγχυσης ενέργειας. Εφεδρεία Τριτεύουσας Ρύθμισης (ομοίως και "Τριτεύουσα Εφεδρεία") συνιστά το περιθώριο μεταβολής της παραγόμενης ενεργού ισχύος της μονάδας στο χρονικό διάστημα μεταξύ ενενήντα (90) δευτερολέπτων και δεκαπέντε (15) λεπτών μετά από σχετική εντολή, ώστε να λαμβάνει χώρα η Τριτεύουσα Ρύθμιση Συστήματος. Αυτό το περιθώριο καθορίζεται βάσει των μέγιστων ρυθμών ανόδου και καθόδου ισχύος εξόδου κάθε μονάδας.

Τριτεύουσα Ρύθμιση και Στρεφόμενη Εφεδρεία (Tertiary Spinning Reserve)

Ως Τριτεύουσα Στρεφόμενη Εφεδρεία Μονάδας ορίζεται η Εφεδρεία Τριτεύουσας Ρύθμισης Μονάδας, η οποία είναι συγχρονισμένη στο Σύστημα.

Τριτεύουσα Μη Στρεφόμενη Εφεδρεία (Tertiary Non Spinning Reserve)

Ως Τριτεύουσα Μη Στρεφόμενη Εφεδρεία Μονάδας ορίζεται η Εφεδρεία Τριτεύουσας Ρύθμισης Μονάδας, η οποία είναι μη συγχρονισμένη στο Σύστημα.

Στατή Εφεδρεία Μονάδας

Ως **Στατή Εφεδρεία Μονάδας** ορίζεται η μέγιστη ποσότητα Ενεργού Ισχύος την οποία μπορεί να διαθέσει στο Σύστημα μία **μη συγχρονισμένη Μονάδα**, εντός χρονικού διαστήματος **από 20 λεπτά έως 4 ώρες** μετά την έκδοση Εντολής Κατανομής συγχρονισμού της Μονάδας. Ο προγραμματισμός παροχής της υπηρεσίας αυτής διενεργείται από το Διαχειριστή του Συστήματος προκειμένου να γίνεται δυνατή η Ρύθμιση Συχνότητας και Ενεργού Ισχύος εν όψει απρόβλεπτων διαταραχών της ισορροπίας του φορτίου του Συστήματος. Η συγκεκριμένη ρύθμιση πραγματοποιείται σε πραγματικό χρόνο κατά τη διάρκεια της Ημέρας Κατανομής.

Ρύθμιση Τάσης

Η Επικουρική Υπηρεσία της Ρύθμισης Τάσης του Συστήματος αποσκοπεί στη διατήρηση της τάσης του συστήματος μέσα στα όρια κανονικής λειτουργίας τα οποία σύμφωνα με τον κώδικα Διαχείρισης του Συστήματος και Συναλλαγών Ηλεκτρικής Ενέργειας είναι τα εξής:

- 380 kV έως 420 kV στο σύστημα μεταφοράς 400 kV,
- 142.5 kV έως 162 kV στο σύστημα μεταφοράς 150 kV.

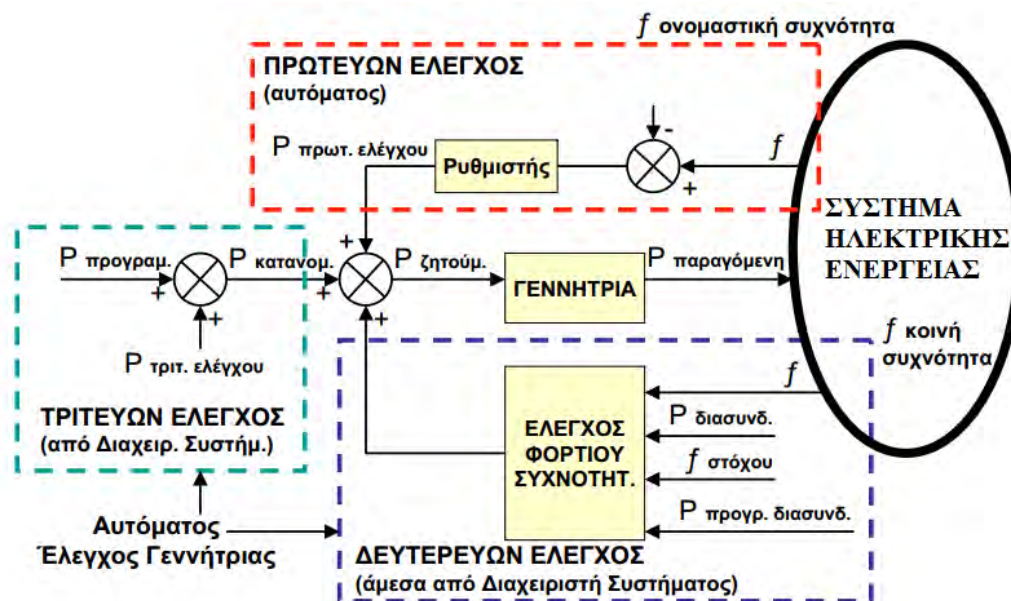
Για την επίτευξη του παραπάνω στόχου, το Σύστημα απαιτεί την ύπαρξη επαρκούς ποσότητας στατικής και δυναμικής εφεδρείας Άεργου Ισχύος, ενώ υπεύθυνος για τη ρύθμιση της τάσης είναι ο Διαχειριστής του Συστήματος. Ο έλεγχος της τάσης επιτυγχάνεται με τα εξής μέσα:

- Με τη χρήση μέσων του Συστήματος, όπως είναι η αλλαγή της σχέσης των τυλιγμάτων των μετασχηματιστών, η χρήση ηλεκτρονικών συστημάτων αντιστάθμισης και η ενεργοποίηση ή η απενεργοποίηση αυτεπαγωγών και πυκνωτών,

- Με την αλλαγή της θέσης των μεταγωγέων των Μετασχηματιστών των Μονάδων,
- Με την αξιοποίηση της δυνατότητας που παρέχουν οι Μονάδες

Επανεκκίνηση Συστήματος

Η Επικουρική Υπηρεσία Επανεκκίνησης παρέχεται από προκαθορισμένες Μονάδες Επανεκκίνησης μετά από γενική ή μερική διακοπή της λειτουργίας του Συστήματος (black-out). Οι μονάδες αυτές δεν απαιτούν τροφοδότηση από εξωτερική πηγή ισχύος για να επανεκκινήσουν και έχουν τη δυνατότητα να εγχύσουν ενέργεια στο Σύστημα **εντός μίας ώρας** από τη στιγμή που έλαβε χώρα το σφάλμα ή εντός 15 λεπτών εάν πρόκειται για Υδροηλεκτρικούς Σταθμούς.



Σχήμα 7.1: Απλοποιημένη παρουσίαση της ρύθμισης συχνότητας, όπου διακρίνονται η πρωτεύουσα, δευτερεύουσα και τριτεύουσα ρύθμιση της συχνότητας στο σύστημα.

Στρεφόμενη εφεδρεία

Στρεφόμενη εφεδρεία (spinning reserve) είναι η διαφορά μεταξύ της ονομαστικής ισχύος των εν λειτουργία γεννητριών από την ισχύ εξόδου τους και αποτελεί ουσιαστικά την επιπλέον παραγωγική ικανότητα, που βρίσκεται σε αναμονή και μπορεί να κληθεί ανά πάσα στιγμή από το διαχειριστή του δικτύου [24]. Ονομάζεται στρεφόμενη διότι οι γεννήτριες που παρέχουν στρεφόμενη εφεδρεία είναι ήδη συγχρονισμένες στο δίκτυο, παρόλο που στρέφονται με ταχύτητα χαμηλότερη της ονομαστικής τους. Υπάρχει και η μη στρεφόμενη (non-spinning reserve), που περιγράφει την επιπλέον ισχύ, που μπορούν να δώσουν γεννήτριες, οι οποίες δεν είναι συγχρονισμένες με το δίκτυο. Ο προβλεπόμενος χρόνος αντίδρασης της στρεφόμενης εφεδρείας καθορίζεται από τον εκάστοτε TSO και είναι συνήθως της τάξης λίγων λεπτών, πχ 10 λεπτών. Ο λόγος ύπαρξης της είναι η εξυπηρέτηση του φορτίου σε περίπτωση που συμβεί κάποιο αναπάντεχο γεγονός, όπως

παράδειγμα η απώλεια κάποιας γεννήτριας του δικτύου. Η ποσότητα στρεφόμενης εφεδρείας (σε MW

εφόσον μιλάμε για ισχύ), που απαιτείται κάθε στιγμή μπορεί να εκφράζεται ως ποσοστό επί της ισχύος του φορτίου (πχ της τάξης του 10%), ώστε να καλύπτει αβεβαιότητες της πρόβλεψης φορτίου, είτε μπορεί να συνδέεται με την απαίτηση τήρησης «εφεδρείας της μεγαλύτερης μονάδος», ώστε να μπορεί να αντιμετωπιστεί η απώλεια οποιασδήποτε συμβατικής μονάδος, χωρίς περικοπές φορτίου. Η χρηματική ανταμοιβή της εφεδρείας, σε όποιες αγορές αυτή προβλέπεται, γίνεται με βάση το χρόνο που είναι διαθέσιμη για χρήση. Επί παραδείγματι, μια γεννήτρια 1 MW που κρατείται σε εφεδρεία για 1 ώρα, ακόμα και αν δεν κληθεί ποτέ από τον TSO να παράσχει στο δίκτυο ενέργεια, θα πληρωθεί για μία MW-h (και όχι MWh, που είναι μονάδα μέτρησης ενέργειας) ανάλογα με την τιμή της MW-h που έχει καθοριστεί για εκείνη την ώρα της ημέρας στην αγορά. Εάν τώρα, η παραπάνω γεννήτρια κληθεί να παράγει και κάποια ποσότητα ενέργειας, θα ανταμειφθεί επιπλέον για την ποσότητα αυτή, και μάλιστα με την ΟΤΣ εκείνης της ώρας, όπως αυτή θα έχει διαμορφωθεί στη χονδρική αγορά ενέργειας.

Ρύθμιση συχνότητας

Η ρύθμιση συχνότητας ή απλώς ρύθμιση (**regulation**) είναι μια επικουρική υπηρεσία, που σκοπό έχει τη διατήρηση της συχνότητας του δικτύου στα επιτρεπτά επίπεδα (στην Ευρώπη στα 50 Hz, στις ΗΠΑ στα 60 Hz), γεγονός που επιτυγχάνεται με την ισοστάθμιση, κάθε στιγμή, της παραγωγής με τη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας. Ο Διαχειριστής του Συστήματος Μεταφοράς πρέπει να έχει τον άμεσο και αυτόματο έλεγχο των μονάδων που λειτουργούν ως μονάδες ρύθμισης και μάλιστα σε πραγματικό χρόνο, ώστε να είναι ικανός να τους στέλνει σήματα, στα οποία πρέπει να απαντούν σε χρονικό ορίζοντα δευτερολέπτων με την κατάλληλη αύξηση ή μείωση της ισχύος εξόδου τους. Η υπηρεσία αυτή χωρίζεται σε αρκετές αγορές σε δύο επιμέρους: Την άνω ρύθμιση (**regulation up**) που σχετίζεται με τη δυνατότητα αύξησης της παραγωγής ενέργειας από ένα επίπεδο βάσης (συχνά αποκαλούμενο

επιθυμητό σημείο λειτουργίας, **Preferred Operating Point/POP**) και την κάτω ρύθμιση (**regulation down**), που αφορά τη μείωση της παραγωγής από το ίδιο επίπεδο βάσης.

Όταν το φορτίο είναι μεγαλύτερο από την παραγωγή, τότε οι λειτουργούσες στο δίκτυο γεννήτριες επιβραδύνονται, γεγονός που καταδεικνύει πως υπάρχει ανάγκη για περισσότερη ισχύ, οπότε για τη σταθεροποίηση της συχνότητας καλείται η άνω ρύθμιση. Στην αντίθετη περίπτωση, όταν δηλαδή η παραγωγή υπερβαίνει τη ζήτηση, οι γεννήτριες του δικτύου τείνουν να επιταχυνθούν, οπότε καλείται η κάτω ρύθμιση με τη μείωση της παραγόμενης ισχύος από τις μονάδες ρύθμισης. Οι δύο επιμέρους υπό-υπηρεσίες κοστολογούνται εν γένει διαφορετικά. Σε σύγκριση με τη στρεφόμενη εφεδρεία, η ρύθμιση καλείται πολύ πιο συχνά, πχ μερικές εκατοντάδες φορές την ημέρα, απαιτεί ταχύτερη απόκριση όπως είπαμε παραπάνω και έχει μικρότερη διάρκεια, συνήθως λίγα λεπτά, πχ 5. Η ομοιότητα των δύο αγορών έγκειται στο ότι η ανταμοιβή τους γίνεται τόσο για την ισχύ, που υπάρχει διαθέσιμη ανά πάσα στιγμή ακόμα και αν αυτή δεν χρησιμοποιείται εν τέλει, όσο και για την τελική ενέργεια, που θα διακινηθεί.

Κεφάλαιο 8

Ημιαγωγικά στοιχεία ισχύος

8.1 Εισαγωγή

Τα **ηλεκτρονικά ισχύος** είναι η εφαρμογή των ηλεκτρονικών στερεάς κατάστασης (ημιαγωγικά στοιχεία) για τον έλεγχο και την μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας (οι σχετικές διατάξεις δε, καλούνται και μετατροπείς ισχύος). Επίσης αναφέρεται σαν αντικείμενο έρευνας στην ηλεκτρονική και στην ηλεκτρολογία, η οποία ασχολείται με το σχεδιασμό, τον έλεγχο, τους υπολογισμούς και την ενσωμάτωση των μη γραμμικών, χρονικά μεταβαλλόμενων και ενεργειακής επεξεργασίας ηλεκτρονικών συστημάτων που αλλάζουν δυναμικά με γρήγορους ρυθμούς. Οι προαναφερθείσες διατάξεις έχουν ιδιαίτερα πλεονεκτήματα σε σχέση με παλαιότερες ηλεκτρομηχανικής λογικής (π.χ. σύστημα Ward-Leonard) καθώς έχουν μικρότερο όγκο/βάρος/κόστος, υψηλότερη απόδοση, μεγαλύτερη ακρίβεια και ταχύτητα ελέγχου και μικρότερες απαιτήσεις συντήρησης. Από την άλλη παρουσιάζουν και συγκεκριμένα μειονεκτήματα με το κύριο να αφορά την εισαγωγή ανώτερων αρμονικών, γεγονός που έχει ποικίλα αρνητικά αποτελέσματα (αύξηση απωλειών, αύξηση άεργης ισχύος, ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές κ.α.). Όσον αφορά την ιστορική διαδρομή, η αφετηρία θα πρέπει να αναζητηθεί πίσω στην ανάπτυξη του ανορθωτή ατμών υδραργύρου (1900), με ειδική αναφορά στην εφεύρεση του τρανζίστορ (1947). Ουσιαστικά όμως η «επανάσταση» των ηλεκτρονικών ισχύος ξεκινά με την εφεύρεση του θυρίστορ (thyristor) (1956). Τα θυρίστορ ήταν ο αδιαμφισβήτητος κυρίαρχος της αγοράς για σημαντικό χρονικό διάστημα. Έπρεπε να περάσουν πάνω από δύο δεκαετίες μέχρι την ανάπτυξη νέων στοιχείων που μπορούσαν να αμφισβητήσουν την πρωτοκαθεδρία τους, αρχικά σε περιορισμένες εφαρμογές και σταδιακά σε όλο και περισσότερες. Μια βασική κατηγοριοποίηση μας δίνει τρεις διαφορετικές οικογένειες στοιχείων:

1. τις διόδους ισχύος
2. τα στοιχεία που ανήκουν στην οικογένεια των τρανζίστορ (BJT, MOSFET ισχύος, IGBT, SIT κ.α.)
3. τα στοιχεία που ανήκουν στην οικογένεια των θυρίστορ (SCR, TRIAC, GTO, IGCT κ.α.)

8.2 Διακοπτική λειτουργία

Θα πρέπει να γίνει μια βασική διευκρίνιση που αφορά την συμπεριφορά όλων των στοιχείων στα ηλεκτρονικά ισχύος. Σε αντίθεση με την συνήθη λογική στην μικροηλεκτρονική που αφορά κυρίως λειτουργία στην γραμμική περιοχή, στα ηλεκτρονικά ισχύος τα στοιχεία λειτουργούν ως ηλεκτρονικοί διακόπτες: βρίσκονται είτε σε κατάσταση αγωγής (ON) είτε σε κατάσταση αποκοπής (OFF). Για αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται και οι όροι ηλεκτρονικοί διακόπτες ή διακόπτες στερεάς κατάστασης (εφόσον εκτελούν διακοπτική λειτουργία αλλά δεν έχουν κινούμενα μέρη).

Ένας βασικός διαχωρισμός βάσει του βαθμού ελέγχου δίνει επίσης τρεις βασικές κατηγορίες:

1. τα μη ελεγχόμενα στοιχεία (δίοδοι)

2. τα μερικώς ελεγχόμενα (SCR)
3. τα πλήρως ελεγχόμενα (GTO, MOSFET ισχύος, IGBT κ.α.).

Τα χαρακτηριστικά ενδιαφέροντος στους ηλεκτρονικούς διακόπτες ισχύος είναι τα γενικά χαρακτηριστικά που ενδιαφέρουν σε κάθε διακόπτη, δηλαδή η τάση που μπορεί να δεχθεί (ορθά ή ανάστροφα) χωρίς να καταρρεύσει, το μέγιστο ρεύμα αγωγής και αποκοπής, το ορθό και ανάστροφο ρεύμα διαρροής, οι χρόνοι απόκρισης, η μέγιστη δυνατή διακοπτική συχνότητα και η αντοχή σε απότομες μεταβολές τάσης και ρεύματος.

8.3 Κυκλώματα προστασίας (snubbers ή αποσβεστήρες)

Για την προστασία των ηλεκτρονικών διακοπών χρησιμοποιούνται κυκλώματα προστασίας που είναι γνωστά με τον όρο snubbers (αποσβεστήρες). Τα κυκλώματα αυτά συνήθως αποτελούνται από παθητικά στοιχεία (αντιστάσεις, πυκνωτές, πηνία) και διόδους. Τα κυκλώματα προστασίας δεν εμπίπτουν αυστηρά στην περιοχή των ηλεκτρονικών ισχύος, πλην όμως στην πράξη η χρήση τους είναι συχνά απαραίτητη. Η ανάγκη χρήσης κυκλωμάτων προστασίας (καθώς και η πολυπλοκότητά τους) είναι ένα πρόσθετο στοιχείο αξιολόγησης των διατάξεων ηλεκτρονικών ισχύος. Γενικά, η χρήση των snubber μειώνει τις διακοπτικές απώλειες αλλά όχι τις συνολικές απώλειες (κάποιες από τις διακοπτικές απώλειες «μεταφέρονται» στα snubber).

8.4 Άλλες διατάξεις προστασίας

Πέρα από τα κυκλώματα προστασίας, μια πρακτική υλοποίηση διατάξεων ηλεκτρονικών ισχύος μπορεί να περιλαμβάνει και άλλες διατάξεις προστασίας (θωράκιση για παρεμβολές, ασφάλειες προστασίας, συστήματα ψύξης κλπ).

8.5 Φίλτρα

Ένα πρόσθετο στοιχείο αξιολόγησης των διατάξεων ηλεκτρονικών ισχύος είναι και τα απαιτούμενα φίλτρα. Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 1.1, το κυριότερο μειονέκτημα των μετατροπέων ισχύος είναι οι ανεπιθύμητες αρμονικές. Για την απομάκρυνσή τους και γενικά για την καλύτερη λειτουργία των μετατροπέων ισχύος χρησιμοποιούνται φίλτρα (παθητικά και ενεργητικά) τα οποία συνδέονται στην είσοδο ή στην έξοδο τους. Με τον όρο «παθητικά φίλτρα» περιγράφονται κυκλωματικές διατάξεις (πηνία και πυκνωτές) με συγκεκριμένη συνδεσμολογία ώστε να προκύπτει μεγάλη αντίσταση σε ορισμένες συχνότητες και συνεπώς η αποκοπή τους. Με τον όρο «ενεργητικά φίλτρα» περιγράφονται διατάξεις που έχουν την ιδιότητα να μηδενίζουν τις «διαταραχές» που δημιουργούνται από την λειτουργία των μετατροπέων ισχύος, συνεισφέροντας κάθε στιγμή άλλες ίσες και αντίθετες από τις υπάρχουσες.

8.6 Από το εργαστήριο στην αγορά

Ο τομέας των ηλεκτρονικών ισχύος είναι σε άμεση επαφή με την πρακτική εφαρμογή (την «αγορά») και είναι χαρακτηριστικό ότι μεγάλα επιτεύγματα αλλά και νέα στοιχεία έχουν προκύψει από τα ερευνητικά εργαστήρια εταιρειών και όχι από ακαδημαϊκούς ερευνητές (π.χ. το GTO από την General Electric, το IGCT από τις ABB και Mitsubishi κ.λπ.). Συνεπώς, τα διάφορα στοιχεία (και η τεχνολογία τους) αποτελούν και εμπορικά προϊόντα

και ως εκ τούτου η απήχηση/εισαγωγή/ευρεία χρήση κάθε στοιχείου σε πρακτικές εφαρμογές δεν ταυτίζεται με την ημερομηνία της βασικής εφεύρεσης και ούτε καν με την εισαγωγή στην αγορά των πρώτων εκδοχών. Ένα άλλο σημαντικό στοιχείο είναι ότι η γενική κατηγορία (ο τύπος) περιλαμβάνει προφανώς όλα τα διαφορετικά «μοντέλα» αυτής της οικογένειας, τα οποία όμως έχουν διαφορετικά τεχνικά χαρακτηριστικά μεταξύ τους. Παράλληλα, νέες (βελτιωμένες) εκδοχές υπαρκτών τύπων αλλά και νέα στοιχεία προτείνονται κατά καιρούς. Συνεπώς κάθε αυστηρή παράθεση χαρακτηριστικών για κάθε κατηγορία ή μια συγκριτική εξέτασή τους είναι αναπόφευκτο να είναι (ή σε σύντομο χρόνο να γίνει) ανακριβής. Τέλος, όσον αφορά το κόστος, αυτό προφανώς ποικίλει με τον κατασκευαστή και, κυρίως, τα τεχνικά χαρακτηριστικά, ενώ προφανώς βαίνει μειούμενο με την πάροδο του χρόνου.




8.7 Δίοδοι ισχύος

Οι διόδους έχουν δύο ακροδέκτες: την άνοδο (Α) και την κάθοδο (Κ). Η βασική αρχή λειτουργίας μιας διόδου είναι ότι αυτή άγει όταν η τάση στην άνοδο είναι μεγαλύτερη από την τάση στην κάθοδο (η διάσχυση τότε είναι ορθά πολωμένη).

Οι διόδους ισχύος χωρίζονται σε τρεις βασικές κατηγορίες:

1. τις διόδους γενικού σκοπού (ή διόδους δικτύου) κατάλληλες για μεγάλες τάσεις και ρεύματα αλλά όχι για μεγάλες συχνότητες (εξ ου και ο χαρακτηρισμός «δικτύου» καθώς συνίσταται η επιλογή τους για εφαρμογές που απαιτούν την λειτουργία των διόδων στην συχνότητα του δικτύου)
2. τις διόδους Schottky με κύριο χαρακτηριστικό την μικρότερη πτώση τάσης κατά την αγωγή και την υψηλή απόδοση σε μικρές στάθμες τάσης και ρεύματος
3. τις διόδους ταχείας αποκατάστασης με δυνατότητα λειτουργίας σε υψηλές διακοπτικές συχνότητες

Στην γενικότερη οικογένεια των διόδων προφανώς συμπεριλαμβάνονται και άλλα είδη (διόδους Zener, φωτοδιόδους κ.α.)

Δίοδος γενικού σκοπού	Δίοδος Schottky	Δίοδος ταχείας αποκατάστασης
		

Πίνακας 8.1 Ορισμένα από τα κυκλωματικά σύμβολα για τα βασικά στοιχεία της οικογένειας των διόδων ισχύος.

8.8 Οικογένεια των τρανζίστορ (BJT, MOSFET ισχύος, IGBT, SIT)

BJT

Τα διπολικά τρανζίστορ επαφής (Bipolar Junction Transistor ή BJT) είναι γνωστά ως ενισχυτές σήματος, αλλά μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σε διατάξεις ισχύος. Τα BJTs έχουν τρεις ακροδέκτες: την βάση (B, από το Base), τον εκπομπό (E, από το Emitter) και τον συλλέκτη (C, από το Collector). Είναι διατάξεις ελεγχόμενες από ρεύμα (για να μείνουν σε αγωγή πρέπει το ρεύμα βάσης να είναι μεγαλύτερο από ένα όριο) και γνωρίζουν μικρή εφαρμογή σε διατάξεις ισχύος. Η ευκολία έναυσης και αποκοπής με εφαρμογή και απομάκρυνση ενός σήματος στη βάση κάνει το στοιχείο αυτό προτιμότερο για μετατροπές σε πλήθος εφαρμογών. Το μεγαλύτερο μειονέκτημα των BJTs είναι ότι δεν μπορούν να υφίστανται αντιστροφες τάσεις πάνω από μερικές δεκάδες Volt, κάτι που αποκλείει τις εφαρμογές διαμόρφωσης ισχύος εναλλασσόμενου ρεύματος, εκτός αν χρησιμοποιηθεί διόδος σε σειρά. Η ταχύτητα λειτουργίας των BJTs είναι περίπου δέκα φορές μεγαλύτερη από ότι των θυρίστορ, αλλά η μέγιστη ισχύς τους είναι πολύ μικρότερη. Είναι το ταχύτερο στοιχείο των ηλεκτρονικών ισχύος με αρκετές εφαρμογές σε χαμηλής ισχύος αντιστροφείς και μετατροπείς DC/DC.

MOSFET ισχύος

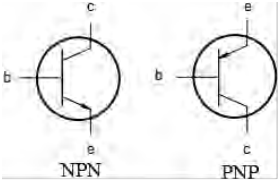
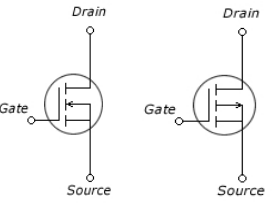
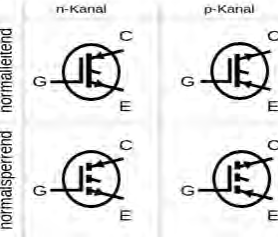
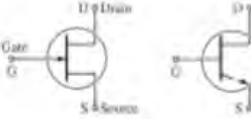
Από την οικογένεια των τρανζίστορ μεγάλη εφαρμογή σε διατάξεις ισχύος γνωρίζουν τα IGBT και τα MOSFET ισχύος. Τα MOSFET ισχύος (τρανζίστορ μεταλλικών οξειδίων ημιαγωγών με επίδραση πεδίου ή Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) είναι διατάξεις ελεγχόμενες από τάση επίσης με τρεις ακροδέκτες που ονομάζονται πύλη (G, από το Gate), πηγή (S, από το Source) και υποδοχή (D, από το Drain). Ο έλεγχος της ροής ρεύματος γίνεται μέσω σήματος τάσης στην πύλη. Συνήθως τα MOSFET βρίσκονται σε αποκοπή μέχρι την εφαρμογή κατάλληλου σήματος, αλλά υπάρχει και μία ειδική κατηγορία των στοιχείων αυτών που συμπεριφέρονται αντιστροφα. Το κύριο πλεονέκτημα των MOSFET είναι η μεγάλη συχνότητα λειτουργίας τους που ξεπερνά τα 100kHz, αλλά η ισχύς τους περιορίζεται σε μερικά kWatts. Για αυτή την ισχύ όμως έχουν προτιμότερα χαρακτηριστικά από άλλα στοιχεία, όπως ο μικρός χρόνος έναυσης και σβέσης. Λόγω της υψηλής ταχύτητας είναι κατάλληλα για εφαρμογές διαμόρφωσης εύρους παλμού (PWM), διακοπτικά τροφοδοτικά, επαγωγική θέρμανση, ηλεκτροσυγκόλληση και φωτισμό φθορισμού με υψηλή συχνότητα, ειδικά μάλιστα για φορητές συσκευές και οχήματα.

IGBT

Τα IGBT (διπολικά τρανζίστορ με μονωμένη πύλη (Insulated Gate Bipolar Transistor) έχουν επίσης τρεις ακροδέκτες με παρόμοια ονομασία με αυτούς των BJT (πύλη-εκπομπός-συλλέκτης) αλλά ελέγχονται από τάση, όπως τα MOSFET. Αποτελούν ένα συνδυασμό των BJT και MOSFET ισχύος ώστε να παραχθεί ένα στοιχείο με ανώτερη απόδοση σε συγκεκριμένες εφαρμογές και έχουν σε μεγάλο ποσοστό αντικαταστήσει τα BJT στις διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος. Η λειτουργία του IGBT στηρίζεται στην αγωγή του με την εφαρμογή θετικής τάσης στην πύλη, ενώ με την αφαίρεση της συμβαίνει σβέση. Η συχνότητα λειτουργίας ενός τυπικού IGBT είναι μέχρι περίπου 50kHz και η μέγιστη ισχύς που μπορεί να χειριστεί είναι μικρότερη από μερικές εκατοντάδες kWatts. Βρίσκει ίδιες εφαρμογές με το BJT, αλλά με καλύτερα χαρακτηριστικά. Συνήθεις εφαρμογές είναι μετατροπείς DC/DC και αντιστροφείς (inverters). Εδώ να σημειωθεί ότι και άλλα στοιχεία έχουν αναπτυχθεί που ανήκουν στην οικογένεια των τρανζίστορ (π.χ. SITs) τα οποία όμως ακόμα γνωρίζουν ελάχιστη εφαρμογή.

SIT

Το SIT (Static Induction Transistor) θεωρείται το ανάλογο του JFET (Junction Field-Effect Transistor) στα ηλεκτρονικά ισχύος. Τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του είναι αντιστοιχα με αυτά του MOSFET με τη διαφορά ότι μπορεί να ελέγξει μεγαλύτερη ισχύ σε μικρότερη συχνότητα λειτουργίας. Έτσι το SIT τοποθετείται μεταξύ του MOSFET και του BJT από πλευράς ισχύος και συχνότητας λειτουργίας. Ένα σημαντικό μειονέκτημα του SIT είναι η μεγάλη πτώση τάσης σε κατάσταση αγωγής και η μικρή ικανότητα αντοχής σε αντιστροφή τάση. Το SIT όπως είπαμε δεν απαντάται συχνά σε διατάξεις, αλλά βρίσκεται εφαρμογή στην επαγωγική θέρμανση και σε άλλες διατάξεις ισχύος που απαιτούν μεγάλη ταχύτητα λειτουργίας.

BJT	Power MOSFET	IGBT	SIT
 <p style="text-align: center;">NPN PNP</p>	 <p style="text-align: center;">N-channel MOSFET P-channel MOSFET</p>		

Πίνακας 8.2 Ορισμένα από τα κυκλωματικά σύμβολα για τα βασικά στοιχεία της οικογένειας των τρανζίστορ.

8.9 Οικογένεια των θυρίστορ (SCR, TRIAC, GTO, IGCT)

SCR

Τα θυρίστορ στην απλούστερη μορφή τους λέγονται και ελεγχόμενοι ανορθωτές πυριτίου (Silicon Controlled Rectifiers ή SCR) και έχουν τους δύο ακροδέκτες ανόδου (A) και καθόδου (K) όπως μια διόδος με την προσθήκη όμως και ενός τρίτου ακροδέκτη που ονομάζεται πύλη (G). Μπορεί να χειριστεί ισχύ από δεκάδες W μέχρι MW, την μεγαλύτερη ισχύ από όλα τα άλλα ημιαγωγικά στοιχεία και με συχνότητα λειτουργίας μέχρι 10 kHz. Για να μεταβεί ένα θυρίστορ σε κατάσταση αγωγής πρέπει να είναι ορθά πολωμένο (η τάση ανόδου να είναι μεγαλύτερη από την τάση καθόδου) και να δεχτεί κατάλληλο παλμό στην πύλη του. Η οβέση γίνεται αντιστοιχα με την διόδο. Συνεπώς ένα SCR είναι ένα μερικώς ελεγχόμενο στοιχείο (ελέγχεται η έναυση αλλά όχι η οβέση του). Παρόλα αυτά, με προσθήκη ενός κατάλληλου κυκλώματος οβέσης είναι δυνατή η κατασκευή ενός πλήρως ελεγχόμενου διακόπτη με χρήση θυρίστορ (για παράδειγμα ένα δεύτερο θυρίστορ μπορεί να χρησιμοποιηθεί ώστε να παράσχει τάση στην κάθοδο του πρώτου, ελέγχοντας έτσι την οβέση του). Τέτοιες διατάξεις έχουν το μειονέκτημα του πρόσθετου κόστους για την κατασκευή τους αλλά και την επίτευξη χαμηλότερης διακοπτικής συχνότητας σε σχέση με τα νεότερα στοιχεία (MOSFET, IGBT). Έτσι παρόλο που χρησιμοποιούνταν ευρέως σε

πληθώρα εφαρμογών μέχρι σχετικά πρόσφατα (π.χ. έλεγχο DC μηχανών), η χρήση τους περιορίστηκε με την εισαγωγή και ευρεία χρήση των νεότερων στοιχείων.

TRIAC

Ειδική αναφορά πρέπει να γίνει στα αμφίδρομα τριαδικά θυρίστορ ή TRIAC που ισοδυναμούν με δύο αντιπαράλληλα συνδεδεμένα θυρίστορ (χρησιμοποιούνται για έλεγχο δύο κατευθύνσεων). Η ονομασία υποδηλώνει ότι το στοιχείο έχει 3 ακροδέκτες και μπορεί να χειριστεί εναλλασσόμενο ρεύμα. Επιτρέπει τη διέλευση ρεύματος και προς τις δύο κατευθύνσεις χωρίς διάκριση, ενώ η αγωγή ή όχι του ρεύματος ελέγχεται με σήμα στην πύλη. Η μέγιστη ισχύς που μπορεί να διαμορφώσει φτάνει σε αρκετές δεκάδες kWatt. Κύρια εφαρμογή είναι ο έλεγχος εναλλασσόμενου ρεύματος σε διατάξεις για έλεγχο φωτισμού, θερμοκρασίας ή μικρών κινητήρων, όπως ανεμιστήρων. Είναι το μοναδικό ημιαγωγίμο στοιχείο που μπορεί πραγματικά να χειριστεί εναλλασσόμενο ρεύμα. Το κύριο μειονέκτημα του είναι ότι δεν μπορεί να χειρισθεί μεγάλη ισχύ και γι' αυτό σε τέτοιες περιπτώσεις συνήθως χρησιμοποιούνται τα δύο αντιπαράλληλα θυρίστορ.

GTO και IGCT

Τα θυρίστορ με σβέση από την πύλη (Gate Turn Off Thyristor ή GTO) αποτελούν μετεξέλιξη των απλών SCR με την διαφορά ότι η σβέση τους μπορεί να ελεγχθεί από τον ακροδέκτη-πύλη με αρνητικό παλμό (μπορεί να το θέσει σε αποκοπή), κάτι που επιτυγχάνεται με ειδική διαμόρφωση των ημιαγωγίμων στρωμάτων στη φάση της κατασκευής. Η σχεδίαση μετατροπών με GTO είναι απλούστερη από ότι για το θυρίστορ. Έχουν όμως μειονεκτήματα όπως την ανάγκη χρήσης κυκλωμάτων προστασίας (snubbers) και τον όχι τόσο στιβαρό έλεγχο. Τα χαρακτηριστικά ισχύος και συχνότητας των GTO βρίσκονται μεταξύ αυτών των θυρίστορ και αυτών των τρανζίστορ. Τυπικές εφαρμογές τους είναι μετατροπές DC/DC, αντιστροφείς και ανορθωτές. Βελτίωση του GTO μπορεί να θεωρηθεί το ολοκληρωμένο θυρίστορ με μεταγωγή από την πύλη (Integrated Gate Commutated Thyristor ή IGCT). Τα στοιχεία αυτά (IGCTs) μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην πλειοψηφία των εφαρμογών χωρίς να απαιτούν κυκλώματα προστασίας, επιτυγχάνουν μεγαλύτερη διακοπτική συχνότητα και γνωρίζουν αυξανόμενη χρήση σε διατάξεις ισχύος. Αξίζει να σημειωθεί ότι έχουν αναπτυχθεί και άλλα στοιχεία που ανήκουν στην ευρύτερη οικογένεια των θυρίστορ (π.χ. MCT και MTO) με την χρήση τους όμως να είναι ιδιαίτερα περιορισμένη, έως ανύπαρκτη, προς το παρόν.

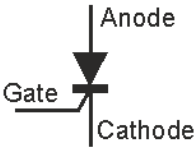
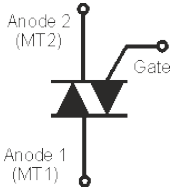
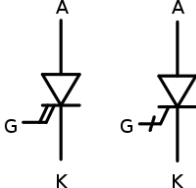
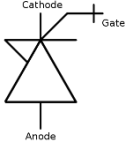
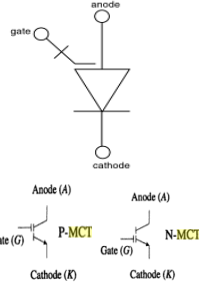
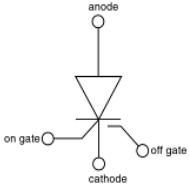
MCT

Το MCT (MOS Controlled Thyristor) είναι ο συνδυασμός ενός GTO με δύο MOSFET. Το πρώτο MOSFET χρησιμοποιείται για την έναυση του GTO και το δεύτερο για την σβέση του. Το πλεονέκτημα του συνδυασμού των τριών αυτών στοιχείων σε ένα στοιχείο είναι ότι η έναυση επιτυγχάνεται με μικρότερη ισχύ και με μεγαλύτερη ταχύτητα. Η συχνότητα λειτουργίας του MCT μπορεί να φτάσει μέχρι περίπου 20kHz, οπότε είναι συγκρίσιμο με ένα τυπικό IGBT, αλλά το MCT πλεονεκτεί έναντι του IGBT στην μικρή πτώση τάσης σε αγωγή. Το μειονέκτημα του MCT είναι η μικρότερη ικανότητα αντοχής σε αντιστροφή τάση, αλλά θεωρείται ότι έχει τη δυνατότητα να αντικαταστήσει άλλα στοιχεία και να καλύψει μεγάλο εύρος εφαρμογών.

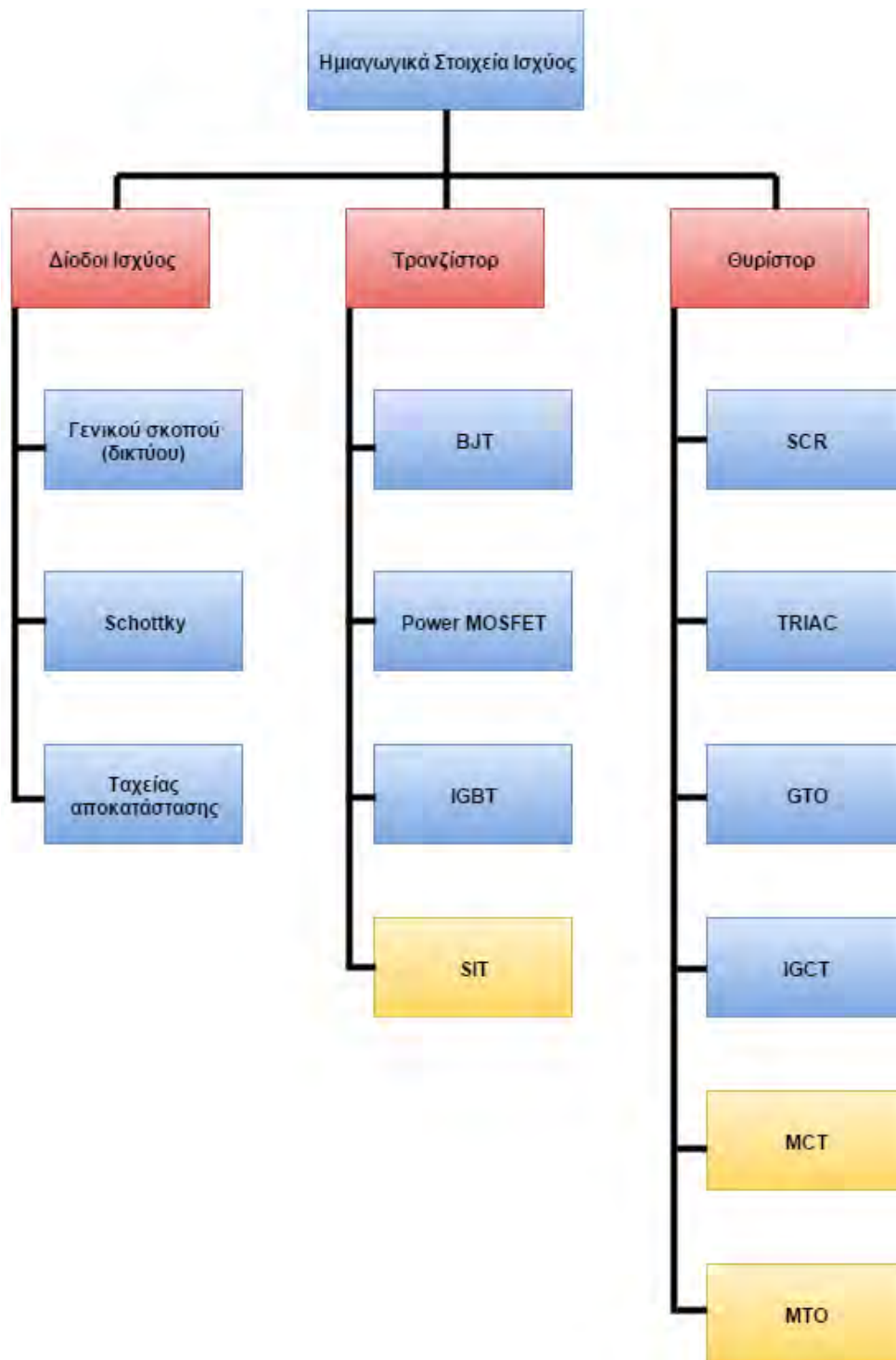
MTO

Το MTO (MOS Turn-off thyristor) είναι αρκετά όμοιο από πολλές απόψεις με το MCT και το IGCT. Σε αντίθεση με άλλα στοιχεία ισχύος το MTO είναι στοιχείο τεσσάρων ακροδεκτών δηλαδή εκτός από τους κύριους ακροδέκτες ισχύος, υπάρχουν δύο ακροδέκτες πύλης, ένα για την έναυση και ένας για την σβέση. Σε ένα MTO συμπεριλαμβάνεται ένα

GTO, το οποίο είναι υπεύθυνο για την έναυση και την αγωγή και ένα MOSFET το οποίο χρησιμοποιείται μόνο κατά την αποκοπή/σβέση.

SCR	TRIAC	GTO	IGCT	MCT	MTO
					

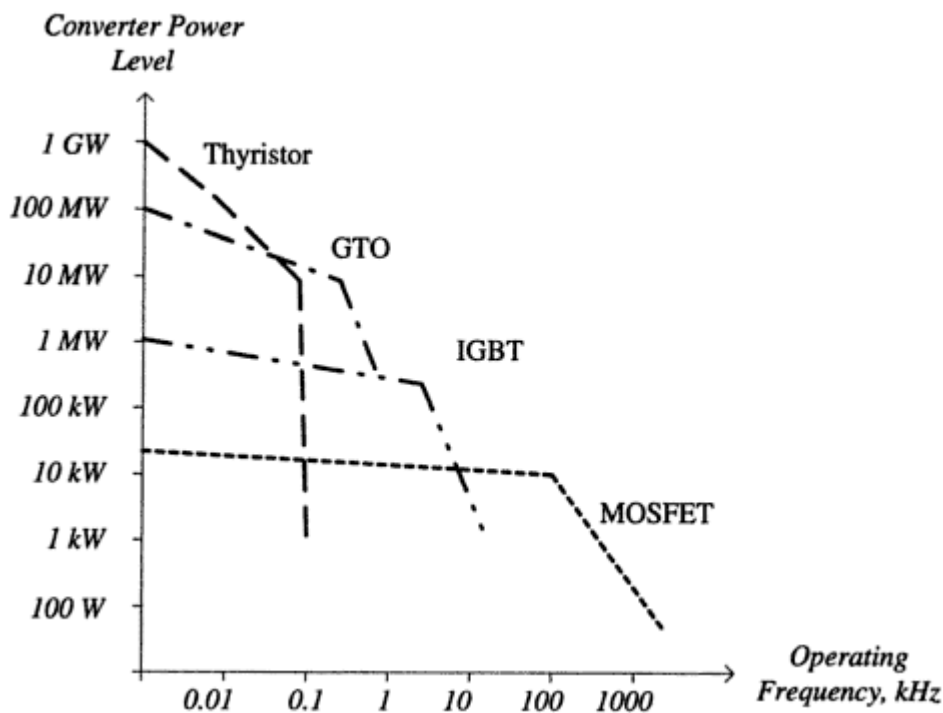
Πίνακας 8.3 Ορισμένα από τα κυκλωματικά σύμβολα για τα βασικά στοιχεία της οικογένειας των θυρίστορ καθώς και κάποιον πιο σπάνια χρησιμοποιούμενων, προς το παρόν (π.χ. MCT, MTO).



Σχήμα 8.1: Οι οικογένειες των βασικών ημιαγωγικών στοιχείων. Με κίτρινο χρώμα είναι τα νέα στοιχεία τα οποία όμως ακόμα γνωρίζουν ελάχιστη εφαρμογή.

8.10 Τα επίπεδα ισχύος και οι αντίστοιχες διακοπτικές συχνότητες

Η κατάλληλη επιλογή των ημιαγωγικών στοιχείων για κάθε εφαρμογή γίνεται με βάση τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους, κυρίως την διακοπτική συχνότητα και την στάθμη τάσης και ρεύματος (ή αλλιώς την ισχύ) που μπορούν να διαχειριστούν. Μία αυστηρή κατάταξη δεν είναι δυνατή καθώς οι κατασκευαστές συνεχίζουν να αναπτύσσουν νέα προϊόντα με βελτιωμένα χαρακτηριστικά. Ο γενικός κανόνας, με βάση τα βασικά στοιχεία και την χρήση τους σε εφαρμογές, είναι ότι τα δύο άκρα καταλαμβάνονται από τα θυρίστορ (πολύ υψηλή ισχύ και χαμηλή διακοπτική συχνότητα) και τα MOSFET ισχύος (χαμηλή ισχύ και πολύ υψηλή διακοπτική συχνότητα) με τα υπόλοιπα στοιχεία να καταλαμβάνουν τον ενδιάμεσο χώρο. Στο **Σχήμα 8.2** συνοψίζεται ότι προαναφέρθηκε. Είναι σαφές ότι τα θυρίστορ κυριαρχούν στην περιοχή της υπέρ-υψηλής ισχύς για σχετικά χαμηλές συχνότητες. Το GTO είναι το αμέσως επόμενο στοιχείο όταν πρόκειται για την δυνατότητα χειρισμού της ισχύος που εκτείνεται σε συχνότητες μερικών εκατοντάδων Hz. Το IGBT κατέχει την περιοχή της μέσης ισχύος έχοντας την ικανότητα να λειτουργεί σε σχετικά υψηλές συχνότητες, και τελικά τα MOSFET που εκτείνουν την λειτουργία τους στις περιοχές των υψηλών συχνοτήτων για σχετικά χαμηλά επίπεδα ισχύος. Η τάση για τα επόμενα χρόνια είναι να επεκτείνουν την περιοχή ισχύος των GTO προς τα επίπεδα αυτά των θυρίστορ. Ενώ ταυτόχρονα τα IGBT θα συνεχίσουν να επεκτείνουν την ικανότητα ισχύος τους προς τα επίπεδα αυτά των GTO με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη διακοπτική συχνότητα.



Σχήμα 8.2: Τα επίπεδα ισχύος και οι αντίστοιχες διακοπτικές συχνότητες για τα διάφορα ημιαγωγικά στοιχεία.

Κεφάλαιο 9

Διαχείριση Ενέργειας και ηλεκτρονικά ισχύος

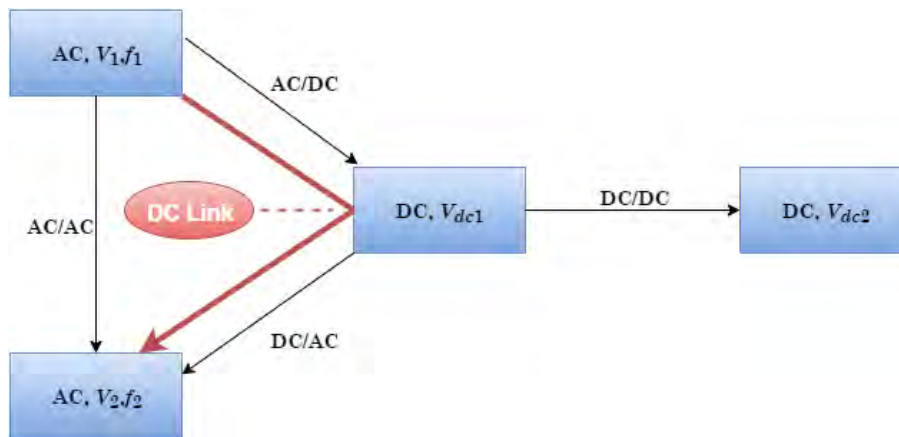
9.1 Ηλεκτρονικά Ισχύος και βασικές κατηγορίες μετατροπών ισχύος

Τα **ηλεκτρονικά ισχύος** είναι η εφαρμογή των ηλεκτρονικών στερεάς κατάστασης για τον έλεγχο και την μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας. Επίσης αναφέρεται σαν αντικείμενο έρευνας στην ηλεκτρονική και στην ηλεκτρολογία, η οποία ασχολείται με το σχεδιασμό, τον έλεγχο, τους υπολογισμούς και την ενσωμάτωση των μη γραμμικών, χρονικά μεταβαλλόμενων και ενεργειακής επεξεργασίας ηλεκτρονικών συστημάτων που αλλάζουν δυναμικά με γρήγορους ρυθμούς.

Οι **μετατροπείς ισχύος** έχουν ως στόχο την διαχείριση της παρεχόμενης ενέργειας από την πηγή προς το εκάστοτε φορτίο, ώστε να παρέχεται η απαιτούμενη ενέργεια προς αυτό και να μη σπαταλιέται. Με την χρήση του όρου «διαχείριση» υπογραμμίζεται αρχικά το γεγονός ότι οι διατάξεις αυτές δεν παράγουν ισχύ αλλά την διαχειρίζονται, έχοντας και τις σχετικές απώλειες όπως κάθε τέτοια διάταξη. Επίσης οι **μετατροπείς** επιτελούν τον έλεγχο στο μικροδίκτυο όπως και σε όλες σχεδόν τις διατάξεις ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και μη (Ανεμογεννήτριες, Φωτοβολταϊκά, στόλοι από EVs κλπ.). Οι ηλεκτρονικοί μετατροπείς ισχύος είναι μια κατηγορία ηλεκτρικών κυκλωμάτων που μετατρέπουν την ηλεκτρική ενέργεια από ένα επίπεδο τάσης, ρεύματος και συχνότητας σε ένα άλλο επίπεδο, με την χρήση ημιαγωγικών στοιχείων ισχύος. Παραδείγματος χάριν μέσω αυτών η παραγόμενη τάση από τις ΑΠΕ, μετατρέπεται είτε σε συνεχή άλλης στάθμης είτε σε εναλλασσόμενη ελεγχόμενου πλάτους και συχνότητας. Γεγονός είναι ότι χωρίς τα ηλεκτρονικά ισχύος θα ήταν πολύ δύσκολος ο έλεγχος όλων των πηγών ηλεκτρικής ενέργειας.

Τα συστήματα μετατροπής ενέργειας μπορούν να ταξινομηθούν ανάλογα με το είδος της εισόδου-εξόδου και σύμφωνα με την λειτουργία μετατροπής τους στα εξής:

1. μετατροπείας AC τάσης σε DC τάση (rectifier ή ανορθωτής)
2. μετατροπείας DC τάσης σε AC τάση (inverter ή αντιστροφές)
3. μετατροπείας AC τάσης σε AC τάση με διαφορετικά χαρακτηριστικά (ελεγκτές ή AC ρυθμιστές ή κυκλομετατροπείς)
4. μετατροπείας DC τάσης σε DC τάση με διαφορετικά χαρακτηριστικά (κατατημητές ή ψαλιδιστές)



Σχήμα 9.1 Οικογένειες ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος κατηγοριοποιημένες σύμφωνα με την λειτουργία μετατροπής τους.

Πιο αναλυτικά και σύμφωνα με το **Σχήμα 9.1** διακρίνουμε τις εξής περιπτώσεις:

AC/DC, (rectifier ή ανορθωτής) μετατροπέας εναλλασσόμενης τάσης V_1 σε συνεχή V_{dc1} .

DC/AC, (inverter ή αντιστροφέας) μετατροπέας συνεχούς τάσης V_{dc1} σε εναλλασσόμενη V_2 .

AC/AC, (AC-to-AC converter) απευθείας μετατροπέας εναλλασσόμενης τάσης κατά πλάτος ($V_1 \rightarrow V_2$) και συχνότητα ($f_1 \rightarrow f_2$).

DC/DC, (DC-to-DC converter) μετατροπέας συνεχούς τάσης ($V_{dc1} \rightarrow V_{dc2}$) από ένα επίπεδο σε άλλο, μικρότερο ή μεγαλύτερο ανάλογα με την τοπολογία του μετατροπέα.

AC/AC με DC Link, (AC-to-AC converter) μετατροπέας εναλλασσόμενης τάσης κατά πλάτος ($V_1 \rightarrow V_2$) και συχνότητα ($f_1 \rightarrow f_2$), όπου η εναλλασσόμενη τάση αρχικά υφίσταται ανόρθωση ($V_1 \rightarrow V_{dc1}$) και ακολούθως αντιστροφή ($V_{dc1} \rightarrow V_2$).

9.2 Συνεχή και εναλλασσόμενα μεγέθη

Ένα μέγεθος (π.χ. η τάση) καλείται συνεχές όταν δεν λαμβάνει ετερόσημες τιμές. Αντίστοιχα, όταν λαμβάνει ετερόσημες τιμές, καλείται εναλλασσόμενο. Δεν θα πρέπει να γίνεται σύγχυση μεταξύ ενός σταθερού συνεχούς μεγέθους και ενός απλά συνεχούς. Στην περίπτωση που ένα μέγεθος έχει σταθερή τιμή τότε είναι και συνεχές. Δεν ισχύει όμως το αντίθετο (δηλαδή, κάθε συνεχές μέγεθος δεν είναι αναγκαστικά σταθερό). Άλλη συνήθης παρανόηση που πρέπει να αποφεύγεται είναι η σύγχυση μεταξύ εναλλασσόμενου και ημιτονοειδώς μεταβαλλόμενου μεγέθους. Ένα ημιτονοειδώς μεταβαλλόμενο μέγεθος είναι προφανώς εναλλασσόμενο αλλά δεν ισχύει το αντίστροφο (δηλαδή, κάθε εναλλασσόμενο μέγεθος δεν είναι αναγκαστικά ημιτονοειδώς μεταβαλλόμενο).

9.3 Ημιτονοειδής μορφή και ενεργός (RMS) τιμή

Η βασική εναλλασσόμενη τάση στις ηλεκτρικές εφαρμογές (η τάση δικτύου) είναι ημιτονοειδώς μεταβαλλόμενη. Σε ισοδύναμη παράσταση με στρεφόμενο διάνυσμα, αυτό σημαίνει ότι η τιμή της τάσης κάθε στιγμή προκύπτει ως η τεταγμένη ενός σημείου που αντιστοιχεί στην κορυφή ενός διανύσματος σταθερού μήκους που στρέφεται αριστερόστροφα με μια συγκεκριμένη ταχύτητα (που συνδέεται προφανώς με την περίοδο του σήματος). Το μήκος του διανύσματος ισοδυναμεί με την μέγιστη τιμή που μπορεί να πάρει η τάση (όταν το διάνυσμα πέσει πάνω στον άξονα των τεταγμένων). Η γωνία που σχηματίζει κάθε φορά το διάνυσμα με τον οριζόντιο άξονα καλείται και φάση και συμβολίζεται συνήθως με φ . Συνεπώς η τεταγμένη της κορυφής (δηλαδή η στιγμιαία τιμή της φάσης) προκύπτει ως το γινόμενο του πλάτους επί του ημιτόνου της φάσης.

Ο μαθηματικός ορισμός των παραπάνω (ή αλλιώς η ημιτονοειδής μορφή) για ένα μέγεθος X δίνεται παρακάτω:

$$x = X_0 \sin \varphi = X_0 \sin(\omega t) = X_0 \sin(2\pi t) = X_0 \sin\left(\frac{2\pi}{T} t\right) \quad (1)$$

Όπου X_0 το πλάτος (η μέγιστη τιμή) του X , ω η γωνιακή του συχνότητα (η ταχύτητα περιστροφής του στρεφόμενου διανύσματος), f η συχνότητα, T η περίοδος, φ η φάση. Στην περίπτωση της τάσης του δικτύου (στην Ελλάδα), το πλάτος της τάσης είναι (περίπου) 325 Volts και η συχνότητα 50 Hz. Προφανώς ούτε η μέση τιμή (που είναι μηδέν), ούτε η μέγιστη τιμή μπορούν να δώσουν μια σαφή εικόνα της φυσικής σημασίας του μεγέθους. Έτσι χρησιμοποιείται η ενεργός τιμή (ή RMS τιμή). Το φυσικό νόημα αυτού του μεγέθους είναι ότι αντιπροσωπεύει την ισοδύναμη τιμή μιας συνεχούς τάσης. Για να αξιολογηθεί η ισοδυναμία επιλέγεται η απλούστερη προσέγγιση: η θέρμανση μιας αντίστασης. Έτσι, ενεργός τιμή μιας εναλλασσόμενης τάσης θεωρείται η τιμή που θα πρέπει να έχει μια σταθερή τάση για να θερμάνει έναν αγωγό (μία ωμική αντίσταση) ισόποσα με την εναλλασσόμενη (προφανώς όταν κάθε τάση συνδέεται στα άκρα του αγωγού).

Σε μαθηματικό επίπεδο, η RMS τιμή ενός περιοδικού μεγέθους X ορίζεται ως:

$$X_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt} \quad (2), \quad \text{όπου } x \text{ η στιγμιαία τιμή του μεγέθους}$$

Όταν το μέγεθος αυτό είναι της μορφής (1) τότε η επίλυση της (2) δίνει:

$$X_{rms} = \frac{X_0}{\sqrt{2}} \quad (3)$$

από όπου και προκύπτει η γνωστή τιμή των 230 V για την τάση δικτύου στην Ελλάδα.

9.4 Ανάλυση Fourier και αρμονικές

Σύμφωνα με την βασική θεωρία της ανάλυσης Fourier, οποιαδήποτε περιοδική συνάρτηση μπορεί να παρασταθεί ως άθροισμα διαφορετικών ημιτονοειδών (και συνημιτονοειδών) συναρτήσεων που προστίθενται στην μέση τιμή του σήματος. Για την ακριβή προσέγγιση της αρχικής περιοδικής συνάρτησης είναι πιθανόν να απαιτηθούν άπειροι όροι στο άθροισμα ενώ ορισμένοι από αυτούς μπορεί να έχουν μηδενικό πλάτος. Σε

κάθε περίπτωση, οι ημιτονοειδείς συναρτήσεις που θα απαιτηθούν θα έχουν συχνότητες που θα είναι ακέραια πολλαπλάσια μιας βασικής συχνότητας που καλείται θεμελιώδης. Οι ημιτονοειδείς αυτές συναρτήσεις καλούνται αρμονικές (διακρίνονται μεταξύ τους με χρήση του αύξοντα αριθμού τους, δηλαδή η δεύτερη αρμονική έχει συχνότητα διπλάσια της πρώτης, η τρίτη τριπλάσια, η τέταρτη τετραπλάσια κ.ο.κ.) με την πρώτη αρμονική να καλείται και θεμελιώδης. Δεδομένου ότι οι εφαρμογές ηλεκτρονικών ισχύος αφορούν την μετατροπή της τάσης σε μια περιοδική μεν αλλά μη αμιγώς ημιτονοειδής μορφή, η χρήση αυτών των διατάξεων θα έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση αρμονικών είτε στην τάση είτε στο ρεύμα (είτε και στα δύο). Το πρόβλημα που τίθεται είναι τι συμβαίνει σε αυτή την περίπτωση με την ισχύ.

9.5 Ισχύς

Η ισχύ είναι ένα φυσικό μέγεθος που εκφράζει την δυνατότητα παραγωγής έργου (ή αλλιώς η ενέργεια στην μονάδα χρόνου). Όσον αφορά τα ηλεκτρικά μεγέθη, ορίζεται η στιγμιαία ισχύς ως το γινόμενο τάσης και έντασης κάθε στιγμή ($p=v \cdot i$) το οποίο όμως δεν έχει κάποια ιδιαίτερη φυσική σημασία στα εναλλασσόμενα μεγέθη.

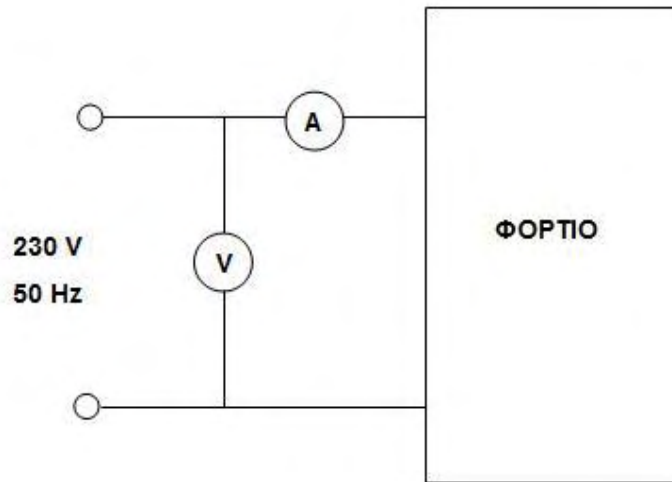
Έτσι χρησιμοποιείται η μέση τιμή της ισχύος ή μέση ισχύς ή πραγματική ισχύς ως:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) \cdot i(t) dt \quad (4)$$

Στην περίπτωση που η τάση ασκείται πάνω σε έναν ωμικό καταναλωτή, δεν εισέρχεται διαφορά φάσης μεταξύ των στρεφόμενων διανυσμάτων τάσης και έντασης και συνεπώς οι στιγμιαίες τιμές είναι πάντα ομόσημες. Όταν όμως η τάση ασκείται σε μη ωμικές καταναλώσεις (πηγία, πυκνωτές) τότε παρατηρείται διαφορά φάσης μεταξύ τάσης και ρεύματος, η οποία γενικώς συμβολίζεται με φ (όπου $\varphi = \varphi_v - \varphi_i$). Η σημασία αυτού θα γίνει προφανής αν παρατηρηθεί καλύτερα η (4). Η μέση ισχύς προκύπτει ως το εμβαδόν που περικλείει η καμπύλη που προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό (σημείο προς σημείο) των καμπυλών τάσης και ρεύματος. Συνεπώς όταν δεν υπάρχει διαφορά φάσης μεταξύ τους, οι τιμές τάσης και ρεύματος θα είναι πάντα ομόσημες και το γινόμενό τους θετικό. Η ισχύς που προκύπτει τότε από την επίλυση της (4) θα είναι η μέγιστη δυνατή τιμή και μάλιστα (για μονοφασικό φορτίο) ισούται με $P = V_{rms} I_{rms}$, όπου V_{rms} και I_{rms} οι RMS τιμές τάσης και ρεύματος. Αν όμως υπάρχει διαφορά φάσης, τότε για κάποια χρονικά διαστήματα το γινόμενο τάσης και ρεύματος θα είναι αρνητικό. Συνεπώς το εμβαδόν που θα περικλείει τώρα η καμπύλη της στιγμιαίας ισχύς θα είναι μικρότερο από ότι στην προηγούμενη περίπτωση (αφού θα υπάρχει και αρνητικό μέρος) κατά έναν συντελεστή που εξαρτάται από την διαφορά φάσης. Ο συντελεστής αυτός ισούται με $\cos\varphi$ (όπου φ η διαφορά φάσης μεταξύ τάσης και ρεύματος) και η μέση ισχύς σε αυτή την περίπτωση (για μονοφασικό φορτίο) θα είναι $P = V_{rms} I_{rms} \cos\varphi$. Αντίστοιχα ισχύουν για τριφασικό φορτίο με την προσθήκη του συντελεστή 3 και χρήση των πολικών μεγεθών. Προφανώς για αμιγώς ωμικό φορτίο θα ισχύει $\varphi=0 \Rightarrow \cos\varphi=1$.

Για να γίνει πιο κατανοητή η σημασία αυτού του γεγονότος ας θεωρήσουμε ένα φορτίο που έχει συνδεθεί στο δημόσιο δίκτυο όπως φαίνεται στην **Σχήμα 9.2**. Αν συνδεθούν κατάλληλα όργανα μέτρησης όπως φαίνεται στην **Σχήμα 9.2** τότε μπορεί να μετρηθεί η ενεργός τιμή της τάσης και του ρεύματος. Το γινόμενο αυτών όμως δεν θα δώσει την ισχύ που αποδίδει το φορτίο (καθώς αυτή προκύπτει μετά την εφαρμογή του συντελεστή $\cos\varphi$). Αν υποθεθεί π.χ. ότι $\cos\varphi=0.8$ και η ενεργός τιμή του ρεύματος μετριέται ίση με 5 A, αυτό θα σημαίνει ότι το φορτίο θα απαιτεί να τροφοδοτηθεί με 5 A ώστε να αποδώσει ισχύ (έργο)

που αντιστοιχεί σε 4 A. Το πρόβλημα αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό στις ηλεκτρολογικές εφαρμογές καθώς επιφέρει ποικίλα αρνητικά αποτελέσματα και για να αντιμετωπισθεί συνδέονται κατάλληλα στοιχεία (πυκνωτές ή πηνία) ώστε να αντισταθμίσουν την επίδραση των αντίστοιχων στοιχείων του φορτίου. Το ερώτημα που προκύπτει είναι: τι θα συμβεί στην περίπτωση που εμφανίζονται αρμονικές στην τάση ή και στο ρεύμα;



Σχήμα9.2 Ένα φορτίο συνδεδεμένο στο δίκτυο.

9.6 Ισχύς και αρμονικές – Συντελεστές ισχύος

Όπως αναφέρθηκε στις προηγούμενες παραγράφους, η χρήση διατάξεων ηλεκτρονικών ισχύος θα έχει ως αποτέλεσμα την εισαγωγή αρμονικών στην τάση ή στο ρεύμα ή στην τάση και στο ρεύμα. Συνεπώς θα ισχύει:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T (V_0 + \sum_{h=1}^{\infty} V_h \cos(h\omega t - \phi_{vh})) \cdot (I_0 + \sum_{h=1}^{\infty} I_h \sin(h\omega t - \phi_{ih})) dt \quad (5)$$

όπου h η αντίστοιχη αρμονική. Ισχύει επίσης:

$$\int_0^T (V_0 + \sum_{n=1}^{\infty} V_n \cos(n\omega t - \phi_{vn})) \cdot (I_0 + \sum_{m=1}^{\infty} I_m \sin(m\omega t - \phi_{im})) = \begin{cases} 0, & n \neq m \\ \frac{V_n I_n}{2} \cos(\phi_{vn} - \phi_{in}) & n = m \end{cases} \quad (6)$$

Η φυσική σημασία της (6) είναι ότι στην μέση ισχύ συνεισφέρουν μόνο οι αρμονικές που υπάρχουν και στην τάση και στο ρεύμα. Εδώ είναι χρήσιμο να τονιστεί το εξής: η ενεργός τιμή ενός σήματος X που περιέχει αρμονικές προκύπτει ως η συνισταμένη των ενεργών τιμών των αρμονικών δηλαδή:

Γενικά:

$$X_{rms} = \sqrt{X_0 + \sum_{h=1}^{\infty} X_h^2} \quad \xrightarrow{\text{Συμμετρικό X δηλαδή } X_0 = 0} X_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} X_h^2} \quad (7)$$

Ας επανέλθουμε στην περίπτωση του φορτίου που συνδέεται στο δημόσιο δίκτυο (Εικόνα 2.1) μόνο που αυτή την φορά ας υποθεθεί ότι εντός του φορτίου υπάρχει διάταξη ηλεκτρονικών ισχύος η οποία έχει ως αποτέλεσμα την παρουσία διαταραχών, και άρα αρμονικών, στο AC συμμετρικό ρεύμα. Τα όργανα μέτρησης θα καταγράψουν την ενεργό τιμή της τάσης και του ρεύματος. Ας υποθεθεί ακόμα, ότι πέραν της διάταξης των ηλεκτρονικών ισχύος, το φορτίο δεν περιέχει μη ωμικές καταναλώσεις (δηλαδή πηνία ή πυκνωτές). Η συνθήκη αυτή ισοδυναμεί με $\cos\varphi=1$. Η ενεργός τιμή του ρεύματος που θα μετρηθεί όμως, σύμφωνα με την (7), θα είναι η συνισταμένη των ενεργών τιμών όλων των αρμονικών. Σύμφωνα με την (6), στην πραγματική ισχύ θα συνεισφέρει μόνο η ενεργός τιμή της πρώτης αρμονικής του ρεύματος αφού στην τάση υπάρχει μόνο η πρώτη αρμονική. Συνεπώς και πάλι το φορτίο θα απαιτεί μεγαλύτερο ρεύμα από αυτό που αντιστοιχεί στην πραγματική ισχύ (έργο) που αποδίδει. Για παράδειγμα ας υποθεθεί ότι στο ρεύμα υπάρχει η πρώτη αρμονική με ενεργό τιμή 4 A και η τρίτη αρμονική με ενεργό τιμή 3 A. Η ενεργός τιμή του ρεύματος σύμφωνα με την (7) θα προκύψει ίση με $\sqrt{4^2 + 3^2} = 5$ A. Η μέση ισχύς όμως θα προκύψει ως το γινόμενο των 230V επί των 4 A (που είναι η ενεργός τιμή της θεμελιώδης αρμονικής του ρεύματος).

Γενικά λοιπόν ισχύει:

$$P = V_{rms} I_{1,rms} \cos\varphi = -V_{rms} I_{rms} \cos\varphi \cdot \frac{I_{1,rms}}{I_{rms}} \quad (8)$$

και όπως φαίνεται από τον παραπάνω τύπο, ορίζονται πλέον οι ακόλουθοι συντελεστές:

- (1) ο συντελεστής ισχύος μετατόπισης που σχετίζεται με την διαφορά φάσης τάσης-ρεύματος και ισούται με $\text{pf}_{\text{disp}} = \cos\varphi$
- (2) ο συντελεστής ισχύος παραμόρφωσης που σχετίζεται με την παρουσία αρμονικών στο ρεύμα (και άρα την παραμόρφωσή του) και ισούται με $\text{pf}_{\text{dist}} = \frac{I_{1,rms}}{I_{rms}}$
- (3) ο συνολικός ή πραγματικός συντελεστής ισχύος που ισούται με $\text{pf}_{\text{true}} = \text{pf}_{\text{disp}} \cdot \text{pf}_{\text{dist}}$

Πρέπει να σημειωθεί ότι στην περίπτωση που δεν υπάρχουν αρμονικές τότε $\text{pf}_{\text{dist}}=1$ και άρα $\text{pf}_{\text{true}}=\cos\varphi$. Αυτό έχει οδηγήσει στο να αποκαλείται καταχρηστικά «συντελεστής ισχύος» ο συντελεστής ισχύος παραμόρφωσης σε διατάξεις όπου $\text{pf}_{\text{dist}}=1$.

9.7 Συνέπειες αρμονικών και λόγος αρμονικής παραμόρφωσης

Η παρουσία αρμονικών είναι ένα ιδιαίτερα αρνητικό φαινόμενο. Η προφανής συνέπεια είναι η απαίτηση για μεγαλύτερο ρεύμα από το αναγκαίο και συνεπώς η ανάγκη υπερδιαστασιολόγησης. Πρόσθετες συνέπειες περιλαμβάνουν ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές σε άλλα στοιχεία, υπερθέρμανση και καταστροφή τυλιγμάτων, εσφαλμένες λειτουργίες διακοπών και κυκλωμάτων προστασίας κ.α. Ως μέτρο της παρουσίας των αρμονικών χρησιμοποιείται ευρέως ο λόγος αρμονικής παραμόρφωσης (Total Harmonic Distortion ratio ή THD) που για το ρεύμα ορίζεται ως:

$$THD_1 = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_{hrms}^2}}{I_{1,rms}} = 100 \cdot \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_{hrms}^2}}{I_{1,rms}} \% \quad (9)$$

Ενώ ισχύουν ακόμα:

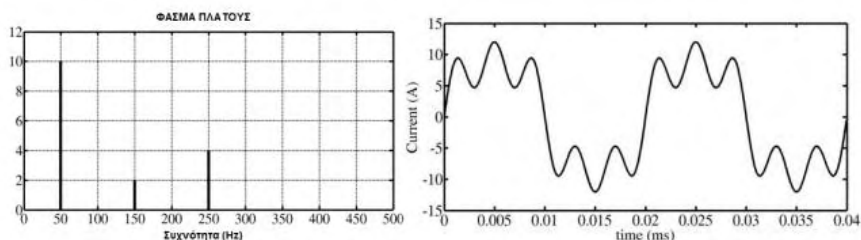
$$I_{rms} = I_{1rms}\sqrt{1 + (THD_1)^2} \quad (10)$$

$$pf_{dist} = \frac{1}{\sqrt{1+(THD_1)^2}} \quad (11)$$

Παρόμοιοι με τον THD λόγοι μπορεί να ορισθούν για τις περιττές αρμονικές, για έναν αριθμό από τις αρμονικές με την μεγαλύτερη επίδραση, για όσες αρμονικές έχουν πλάτος μεγαλύτερο ενός κατώτατου ποσοστού σε σχέση με την θεμελιώδη κ.ο.κ. Οι αρνητικές συνέπειες των αρμονικών σε συνδυασμό με την συνεχώς αυξανόμενη χρήση διατάξεων ηλεκτρονικών ισχύος έχουν οδηγήσει στην θέσπιση κανονισμών και ορίων για την επίδραση των αρμονικών (συνηθέστερα με όρια που αφορούν τον λόγο THD). Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι στην περίπτωση που υπάρχουν αρμονικές στην τάση και στο ρεύμα τότε ορίζονται αντίστοιχοι λόγοι για την τάση και η ανάλυση είναι σχετικά πιο περίπλοκη.

9.8 Αναλυτές ισχύος και φάσματα πλάτους

Για την μέτρηση της επίδρασης των αρμονικών μπορούν να χρησιμοποιηθούν ειδικές συσκευές (αναλυτές ισχύος) που έχουν την δυνατότητα αυτόματα να παρέχουν πληροφορίες για το αρμονικό περιεχόμενο ενός μετρούμενου μεγέθους. Τα αποτελέσματα μπορεί να εμφανίζονται σε μορφή λίστας ή και φάσματος. Με τον όρο «φάσμα» εννοείται ένα διάγραμμα που εμφανίζει τις σχετικές πληροφορίες στο πεδίο της συχνότητας, δηλαδή ένα γράφημα που στον οριζόντιο άξονα εμφανίζονται οι συχνότητες και στον κάθετο το σχετικό μέγεθος (π.χ. πλάτος ή γωνία). Για παράδειγμα το φάσμα πλάτους που απεικονίζεται στην **Σχήμα 9.3** (για την κυματομορφή ρεύματος στο δεξιό μέρος της εικόνας) δείχνει την παρουσία της πρώτης αρμονικής (50 Hz) με πλάτος 10, της τρίτης (150 Hz) με πλάτος 2 και της πέμπτης (250 Hz) με πλάτος 4.



Σχήμα 9.3: Ένα απλό παράδειγμα φάσματος πλάτους και της μετρούμενη κυματομορφή.

Κεφάλαιο 10

Βασικές τοπολογίες αντιστροφών (μετατροπών DC-AC)

10.1 Εισαγωγή και βασικές έννοιες για τους αντιστροφείς

Στην παρούσα διπλωματική ως μετατροπέας ενέργειας θα χρησιμοποιηθεί ο μετατροπέας DC-AC άρα καθίσταται απαραίτητη η ανάλυση του. Για τους DC-AC μετατροπείς χρησιμοποιείται συνήθως ο όρος «αντιστροφέας» ή inverter. Γενικά ως αντιστροφέας ονομάζεται ένας ηλεκτρονικός μετατροπέας μιας πηγής συνεχούς τάσης ή ρεύματος σε μια εναλλασσόμενη μονοφασική ή τριφασική (**inverters**). Με τους μετατροπείς αυτούς παρέχεται η δυνατότητα μεταβολής τόσο του πλάτους όσο και της συχνότητας της κυματομορφής εξόδου είτε αυτή είναι τάση είτε αυτή είναι ρεύμα. Ανάλογα με το είδος της πηγής εισόδου οι αντιστροφείς μπορούν να διαιρεθούν σε δύο κυρίως κατηγορίες:

1. Μετατροπείς DC-AC που μπορούν να τροφοδοτούνται από πηγή συνεχούς τάσης (**Voltage Source Inverter ή VSI**).
2. Μετατροπείς DC-AC που μπορούν να τροφοδοτούνται από πηγή συνεχούς ρεύματος (**Current Source Inverters ή CSI**).

Οι πρώτοι δέχονται μια DC τάση στην είσοδο ενώ οι δεύτεροι ένα DC ρεύμα. Η συνεχής τάση που τροφοδοτεί έναν αντιστροφέα μπορεί να προέρχεται από έναν συσσωρευτή ή από μια πηγή ενέργειας.

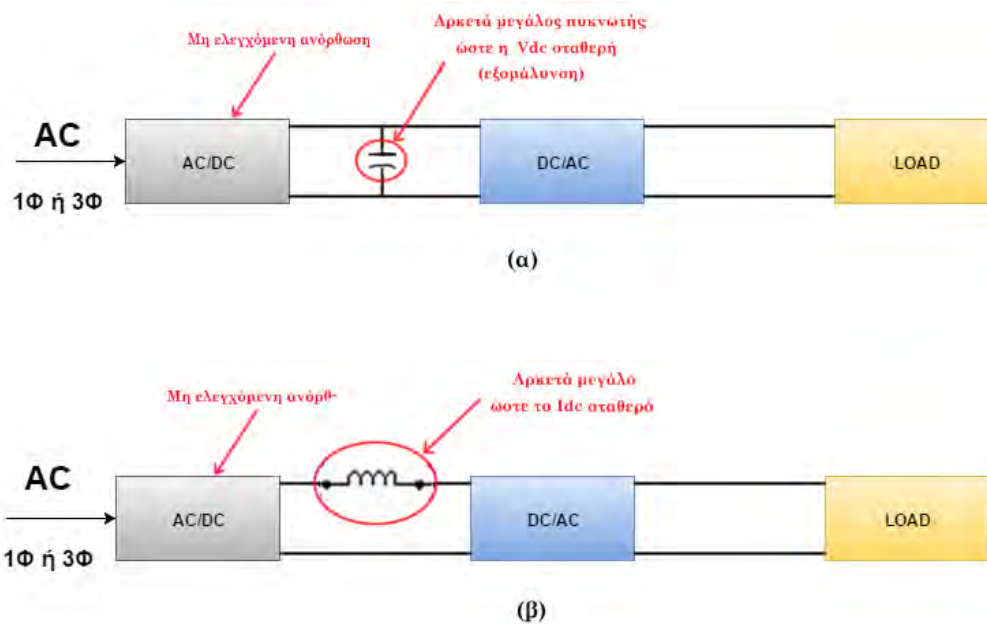
Αν υποθεθεί ότι η αφαιρηία είναι μια μονοφασική ή τριφασική AC τάση η οποία ανορθώνεται μέσω της χρήσης μιας μη ελεγχόμενης διάταξης, (στις περισσότερες βιομηχανικές εφαρμογές παρέχεται ένα ανορθωτικό σύστημα που αποτελείται είτε από διόδους είτε από θυρίστορ) τότε αν στην έξοδο της ανόρθωσης συνδεθεί (παράλληλα) ηλεκτρολυτικός πυκνωτής κατάλληλης χωρητικότητας (συνήθως μεγάλης χωρητικότητας) μπορεί να προκύψει μια dc σταθερή τάση η οποία εφαρμόζεται στους ακροδέκτες εισόδου του αντιστροφέα. Αντίθετα, αν στην έξοδο της ανόρθωσης συνδεθεί πηνίο κατάλληλης αυτεπαγωγής τότε μπορεί να προκύψει ένα dc σταθερό ρεύμα.

Ως ελεγχόμενα ημιαγωγικά διακοπτικά στοιχεία ισχύος μπορούν να χρησιμοποιηθούν στοιχεία των οποίων ελέγχεται μόνο η έναυση (πχ θυρίστορ) ή στοιχεία των οποίων ελέγχεται τόσο η έναυση όσο και η σβέση (πχ MOSFET, IGBT, GTO θυρίστορ). Η dc σταθερή τάση ή το dc σταθερό ρεύμα μπορούν να τροφοδοτήσουν έναν αντιστροφέα ελεγχόμενο από τάση ή έναν αντιστροφέα ελεγχόμενο από ρεύμα αντίστοιχα, όπως φαίνεται στην **Σχήμα 10.1**, ώστε αυτός με την σειρά του να μεταφέρει την ισχύ στο φορτίο. Στην συνέχεια η συχνότητα στην έξοδο του αντιστροφέα καθορίζεται από το ρυθμό έναυσης και σβέσης των ελεγχόμενων ημιαγωγικών στοιχείων και επομένως παρέχεται η δυνατότητα ρύθμισης αυτής μέσω του κυκλώματος παλμοδότησης. Η διακοπτική λειτουργία του αντιστροφέα όμως έχει, συνήθως, ως αποτέλεσμα μη ημιτονοειδείς κυματομορφές τάσης και ρεύματος στην έξοδό του. Το φιλτράρισμα των ανώτερων αρμονικών στην έξοδο του αντιστροφέα δεν είναι εύκολο, ειδικά στην περίπτωση κατά την οποία η συχνότητα των ανώτερων αρμονικών μεταβάλλεται και βρίσκεται κοντά στη συχνότητα της βασικής αρμονικής της τάσης εξόδου του. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να αυξάνεται το βάρος, ο όγκος και το κόστος του αντιστροφέα.

Όμως παρόλο το γεγονός πως οι αντιστροφείς μερικές φορές μπορούν να αποτελέσουν ένα αρκετά ακριβό εξάρτημα, δεν γίνεται να μην σκεφτούμε την τεράστια χρησιμότητα τους, γεγονός που με την σειρά του μας οδηγεί σε μία πλειάδα εφαρμογών σε πολλές περιοχές όπως είναι:

1. τα συστήματα ελέγχου των στροφών ή της ροπής ηλεκτρικών μηχανών.
2. τα συστήματα αδιάλειπτης παροχής ισχύος (UPS).
3. τα συστήματα επαγωγικής θέρμανσης.
4. τα συστήματα ανανεώσιμων πηγών ηλεκτρικής ενέργειας.
5. τα συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.
6. τα συστήματα διόρθωσης του συντελεστή ισχύος.

Ωστόσο παρόλο που όπως προαναφέρθηκε υπάρχουν δύο κατηγορίες αντιστροφέων (VSI και CSI) οι αντιστροφείς ελεγχόμενοι από ρεύμα (CSI) έχουν ακόμα περιορισμένη εφαρμογή στα περισσότερα πεδία χρήσης (αν και κερδίζουν έδαφος έναντι των VSI) και για αυτό η ανάλυση στην συνέχεια θα επικεντρωθεί στους αντιστροφείς που ελέγχονται από τάση. Για λόγους συντομίας στην συνέχεια θα χρησιμοποιείται απλά ο όρος «αντιστροφέας» και θα εννοείται ο αντιστροφέας ελεγχόμενος από τάση (VSI).



Σχήμα 10.1: Βασικά διαγράμματα λειτουργίας για (α) αντιστροφείς ελεγχόμενους από τάση και (β) αντιστροφείς ελεγχόμενους από ρεύμα.

Τα τρία βασικά είδη αντιστροφέων είναι:

1. Οι αντιστροφείς σε συνδεσμολογία ημιγέφυρας (με δύο ελεγχόμενα ημιαγωγικά διακοπτικά στοιχεία).
2. Οι αντιστροφείς σε συνδεσμολογία πλήρους γέφυρας (με τέσσερα ελεγχόμενα ημιαγωγικά διακοπτικά στοιχεία).
3. Οι Push-Pull αντιστροφείς.

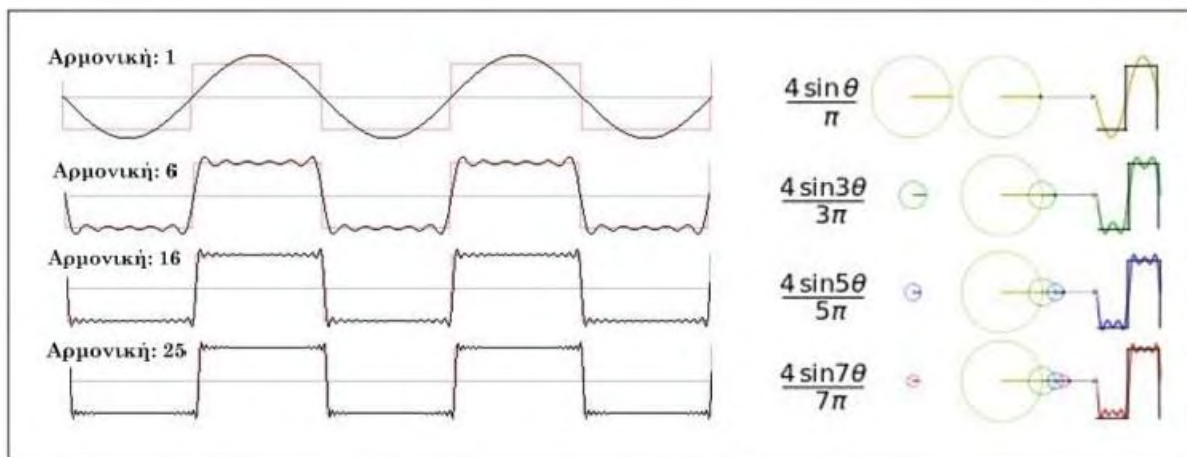
Επιπλέον κατηγοριοποίηση μπορεί να προκύψει σε σχέση πάντα με τα επιμέρους στοιχεία τους όπως:

- Το αριθμό επιπέδων/σκελών.
- Το αριθμό των φάσεων (Μονοφασικός ή Τριφασικός αντιστροφέας).
- Αν η έξοδος είναι μονοπολική (εναλλασσόμενη) ή διπολική.

τότε μπορούμε να αναφερθούμε και σε άλλους αντιστροφείς όπως στους τριφασικούς αντιστροφείς με έξι ελεγχόμενα ημιαγωγικά διακοπτικά στοιχεία κ.ά.

Η ιδανική λειτουργία για έναν αντιστροφέα είναι η μετατροπή μιας σταθερής dc τάσης σε ac τάση αμιγώς ημιτονοειδούς μορφής. Πρακτικά, το ζητούμενο είναι η κυματομορφή της εναλλασσόμενης τάσης να είναι μια καλή προσέγγιση της ημιτονοειδούς μορφής και όχι 100% ημιτονοειδή (καλύτερη προσέγγιση απαιτεί αύξηση κόστους όπως προαναφέρθηκε παραπάνω και γενικά είναι περισσότερο αναγκαία όσο η ισχύς ανεβαίνει). Για χαμηλές ισχύς μπορεί να γίνει δεκτή ακόμα και τετραγωνική ac τάση εξόδου. Ένα «καθαρό» ημίτονο δεν περιέχει ανώτερες αρμονικές παρά μόνο την θεμελιώδη. Αντίθετα, μια τετραγωνική μορφή έχει μεγάλο αρμονικό περιεχόμενο.

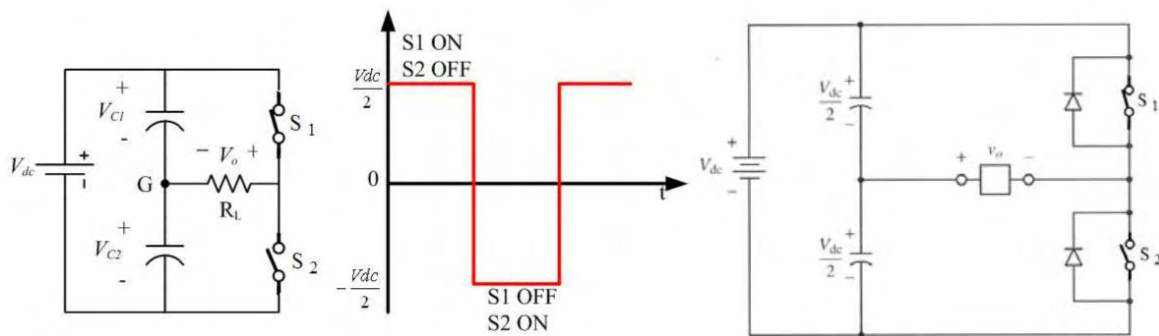
Μια σχηματική αναπαράσταση της αναγκαίας αύξησης του αρμονικού περιεχομένου μπορεί να βρεθεί στα σχήματα της **Σχήμα 10.2**. Προφανώς το επιθυμητό είναι η ελάττωση της παρουσίας των αρμονικών η οποία επιτυγχάνεται με καλύτερη προσέγγιση της αμιγώς ημιτονοειδούς μορφής. Προς αυτόν τον σκοπό, πέρα από την χρήση φίλτρων, ελέγχεται η διαμόρφωση του εύρους των παλμών ώστε αυτοί να προσομοιάζουν στην ημιτονοειδή μορφή (δηλαδή, σε μια απλουστευμένη εξήγηση, να είναι μικρότερης διάρκειας προς τα άκρα των ημιπεριόδων και μεγαλύτερη διάρκειας προς το μέσο των ημιπεριόδων), όλα αυτά όμως θα αναλυθούν αρκετά στις επόμενες ενότητες.



Σχήμα 10.2: Προοδευτική προσέγγιση της τετραγωνικής μορφής με αύξηση του αρμονικού περιεχομένου.

10.2 Μονοφασικός αντιστροφέας ημιγέφυρας (Single-Phase half bridge inverter)

Η βασική τοπολογία του αντιστροφέα ημιγέφυρας φαίνεται στην **Σχήμα 10.3**. Οι δύο πυκνωτές χρησιμοποιούνται ώστε να επιτευχθεί ισομοιρασμός της τάσης εισόδου. Συνεπώς η τάση εξόδου μπορεί να είναι ίση με το μισό της τάσης εισόδου (με πολικότητα που αλλάζει ανάλογα με το ποιος διακόπτης είναι ON) και με έλεγχο της σειράς και του χρόνου ενεργοποίησης των διακοπών η τάση εξόδου θα είναι ένας τετραγωνικός παλμός με συγκεκριμένη RMS τιμή (**Σχήμα 10.3**). Αν το φορτίο είναι επαγωγικό τότε θα πρέπει να προστεθούν διόδοι προστασίας παράλληλα στους διακόπτες (**Σχήμα 10.3**). Αυτή είναι και η γενική λογική σχεδιασμού των αντιστροφέων.



Σχήμα 10.3: Το βασικό κύκλωμα του μονοφασικού αντιστροφέα ημιγέφυρας, η τάση εξόδου και η συνηθισμένη προσέγγιση με σύνδεση διόδων για την προστασία των διακοπών.

Τα βασικά μειονεκτήματα της μονοφασικού αντιστροφέα ημιγέφυρας είναι τα εξής:

1. Απαιτούνται δύο πυκνωτές μέσης λήψης.
2. Το πλάτος της τάσης εξόδου έχει την μισή τιμή της τάσης εισόδου.
3. Δεν είναι δυνατό να σχηματιστούν διαστήματα μηδενικής τάσης στην κυματομορφή. της τάσης εξόδου για μη ωμικά φορτία.

10.3 Μονοφασικός αντιστροφέας πλήρους γέφυρας (Single-Phase full bridge inverter)

Η βασική τοπολογία για έναν μονοφασικό αντιστροφέα πλήρους γέφυρας φαίνεται στην **Σχήμα 10.4**. Αποτελείται από δύο ημιγέφυρες. Ο αντιστροφέας πλήρους γέφυρας αποδίδει διπλάσια ισχύ σε σχέση με τον αντιστροφέα ημιγέφυρας για την ίδια τάση εισόδου. Αντιστροφή, στην περίπτωση που ένας αντιστροφέας πλήρους γέφυρας αποδίδει ίδια ισχύ με έναν αντιστροφέα ημιγέφυρας, τότε το ρεύμα εξόδου και το ρεύμα που διαρρέει τους διακόπτες θα είναι το μισό σε σχέση με τα αντίστοιχα στην περίπτωση του αντιστροφέα ημιγέφυρας.

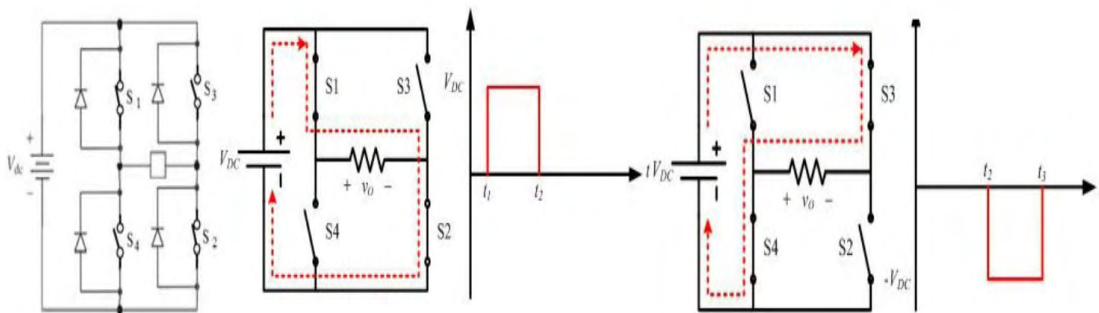
Η βασική λειτουργία του αντιστροφέα γέφυρας έχει ως εξής:

Οι ελεγχόμενοι ημιαγωγικοί διακόπτες αναβοσβήνουν σε διαγώνια ζευγάρια

1. S_1 - S_2 ON: $V_{out}=V_{dc}$
2. S_3 - S_4 ON: $V_{out}=-V_{dc}$
3. S_1 - S_3 ή S_2 - S_4 ON: $V_{out}=0$

και δεν επιτρέπεται να είναι όλοι οι διακόπτες ON ταυτόχρονα.

Μια σχηματική επεξήγηση για τις φάσεις 1 και 2 δίνεται στην **Σχήμα 10.4**. Για την φάση 3, όταν το άνω ή το κάτω ζεύγος διακοπών είναι ON, το φορτίο είναι παράλληλα συνδεδεμένο σε βραχυκύκλωμα οπότε $V_{out}=0$. Το ίδιο αποτέλεσμα θα προκύψει αν S_1 - S_2 - S_3 - S_4 OFF. Συνεπώς ελέγχοντας την σειρά και τον χρόνο ενεργοποίησης των διακοπών, είναι δυνατό να παραχθεί μια ac τάση στην έξοδο με συγκεκριμένη RMS τιμή.



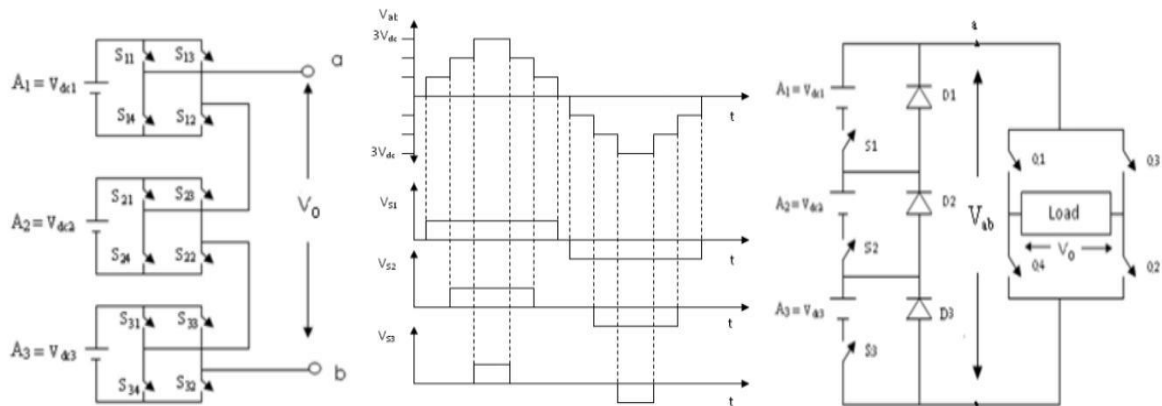
Σχήμα 10.4: Μονοφασικός αντιστροφέας πλήρους γέφυρας. Οι ελεγχόμενοι ημιαγωγικοί διακόπτες αναβοσβήνουν σε διαγώνια ζευγάρια δηλαδή όταν τα S_1 και S_2 άγουν το S_3 και S_4 είναι σε αποκοπή και το αντίθετο. Συνεπώς στο φορτίο εμφανίζεται από V_{DC} έως $-V_{DC}$.

Όταν το φορτίο είναι καθαρά ωμικό, τότε και το ρεύμα έχει παρόμοια μορφή με την τάση και οι αντιπαράλληλες διόδους δεν έχουν ενεργό ρόλο στη λειτουργία του κυκλώματος. Στην περίπτωση όμως που το φορτίο είναι επαγωγικής φύσης τα πράγματα είναι διαφορετικά. Ας υποθέσουμε ότι άγουν τα S_1 και S_2 . Όταν σβήσουν αυτά και έρθουν σε αγωγή τα S_3 και S_4 , η πολικότητα της τάσης πάνω στο φορτίο θ' αλλάξει, το ρεύμα όμως θα συνεχίσει να ρέει με την ίδια φορά, λόγω της καθυστέρησης που εισάγει το επαγωγικό φορτίο. Για το διάστημα μέχρι το μηδενισμό του ρεύματος αυτό θα ρέει μέσω των δύο παράλληλα συνδεδεμένων διόδων με τα διακοπτικά στοιχεία S_3 και S_4 αντιστοίχα (**Σχήμα 10.4**), επιστρέφοντας ενέργεια. Στο αρμονικό περιεχόμενο στην έξοδο ενός τέτοιου είδους αντιστροφέα, εμφανίζονται η βασική αρμονική και ανώτερες αρμονικές σε συχνότητες που είναι μονά ακέραια πολλαπλάσια της συχνότητας της βασικής αρμονικής.

10.4 Πολυεπίπεδοι αντιστροφείς

Οι πολυεπίπεδοι αντιστροφείς είναι ουσιαστικά περισσότεροι του ενός αντιστροφείς κατάλληλα συνδεδεμένοι ώστε να προσφέρουν περισσότερα επίπεδα στην τάση εξόδου. Έτσι αν π.χ. χρησιμοποιηθούν τρεις αντιστροφείς τότε θα μπορούν να προσφέρουν τέσσερα επίπεδα στην τάση εξόδου (δηλαδή 3 θετικές και 3 αρνητικές στάθμες τάσης καθώς και την μηδενική) όπως φαίνεται στην **Σχήμα 10.5**. Όσον αφορά τις πηγές εισόδου αυτές μπορεί να είναι διαφορετικές ή να χρησιμοποιηθούν πυκνωτές (όπως στην **Σχήμα 10.5**) για να

ισομοιραστεί η τάση από μία πηγή. Διαφορετικές παραλλαγές στον σχεδιασμό επίσης μπορεί να εφαρμοσθούν (Σχήμα 10.5). Η προσθήκη περισσότερων σταθμών στην τάση εξόδου σημαίνει ότι μπορεί να επιτευχθεί (με κατάλληλο έλεγχο των διακοπών) μια κυματομορφή εξόδου που να προσεγγίζει καλύτερα την ημιτονοειδή μορφή.



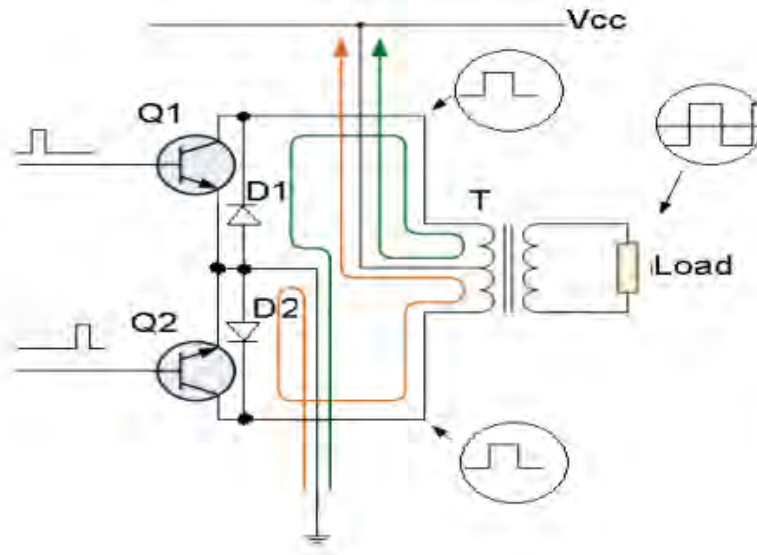
Σχήμα 10.5: Ένας αντιστροφέας τριών επιπέδων, οι σχετικές κυματομορφές και μια παραλλαγή στον σχεδιασμό. Και στις δύο περιπτώσεις ισχύει $A_1=A_2=A_3$.

10.5 Μονοφασικός αντιστροφέας Push- Pull

Η τοπολογία του αντιστροφέα Push-Pull (Σχήμα 10.6) απαιτεί ένα μετασχηματιστή με μεσαία λήψη στο πρωτεύον τυλίγμα. Οι διακόπτες Q1, Q2 μπορεί να είναι n-channel BJTs, MOSFETs, IGBTs, GTOs ή θυρίστορ ανάλογα με την απαιτούμενη ισχύ εξόδου. Οι διόδοι D1, D2 ονομάζονται διόδοι ελεύθερης διέλευσης και χρησιμοποιούνται για προστασία των διακόπτες Q1, Q2 από υπερτάσεις. Ένας αντιστροφέας Push-Pull μπορεί να λειτουργήσει με διαμόρφωση PWM ή με τετραγωνική κυματομορφή οι οποίες ταυτίζονται με εκείνες των αντιστροφέων ημιγέφυρας και με αυτούς της πλήρους γέφυρα. Στον αντιστροφέα Push-Pull είναι δύσκολο να αποφευχθεί ο dc κορεσμός⁵ του μετασχηματιστή. Το ρεύμα εξόδου, το οποίο είναι το ρεύμα στο δευτερεύον του μετασχηματιστή, είναι ένα αργά μεταβαλλόμενο ρεύμα στη θεμελιώδη συχνότητα της τάσης εξόδου και μπορεί να υποτεθεί σταθερό κατά τη διάρκεια του χρονικού διαστήματος μετάβασης. Όταν συμβαίνει μία μετάβαση, το ρεύμα μεταβαίνει από το ένα μισό στο άλλο μισό του πρωτεύοντος τυλιγματος. Απαιτείται πολύ καλή μαγνητική σύζευξη μεταξύ των δύο αυτών μισών τυλιγμάτων, με σκοπό τη μείωση της ενέργειας που σχετίζεται με την αυτεπαγωγή διαρροής των δύο πρωτεύοντων τυλιγμάτων. Η ενέργεια αυτή θα καταναλωθεί στους διακόπτες ή σε κυκλώματα snobbier που χρησιμοποιούνται για την προστασία των διακοπών. Αυτό είναι ένα γενικό φαινόμενο που σχετίζεται με όλους τους μετατροπείς (ή αντιστροφείς) με απομόνωση, όπου το ρεύμα σε ένα από τα τυλίγματα εξαναγκάζεται σε μηδενισμό με κάθε μετάβαση. Το φαινόμενο αυτό είναι πολύ σημαντικό στη σχεδίαση τέτοιων μετατροπέων. Σ' έναν αντιστροφέα Push-Pull με διαμόρφωση PWM για την παραγωγή ημιτονοειδούς εξόδου (αντίθετα με εκείνους που χρησιμοποιούνται σε dc τροφοδοτικά διακοπτικού τύπου), ο μετασχηματιστής πρέπει

⁵ Κορεσμός προκαλείται όταν οι παλμοί δεν είναι απόλυτα συμμετρικοί.

να είναι σχεδιασμένος για τη θεμελιώδη συχνότητα της τάσης εξόδου. Το κύριο πλεονέκτημα του συγκεκριμένου αντιστροφέα είναι ότι σε καμία χρονική στιγμή δεν άγουν περισσότεροι από ένας διακόπτες σε σειρά. Αυτό είναι σημαντικό σε περιπτώσεις όπου η είσοδος είναι μία πηγή χαμηλής τάσης, επομένως πτώσεις τάσεις σε περισσότερα από ένα διακοπτικά στοιχεία θα είχαν σαν αποτέλεσμα σημαντική μείωση της ενεργειακής του απόδοσης.

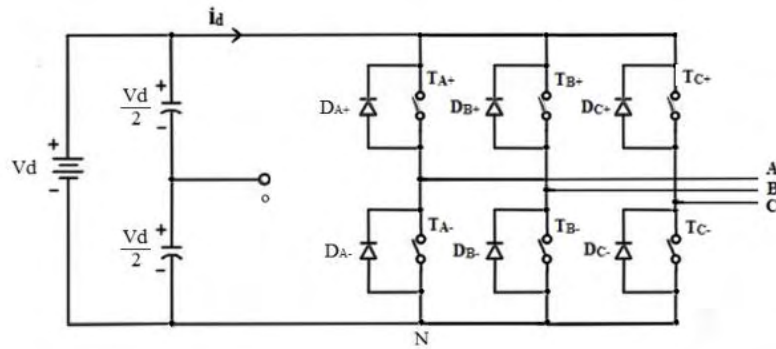


Σχήμα 10.6: Τοπολογία μονοφασικού αντιστροφέα Push- Pull.

10.6 Τριφασικός αντιστροφέας σε συνδεσμολογία γέφυρας.

Όσον αφορά τους τριφασικούς αντιστροφείς, η προφανής προσέγγιση είναι τρεις μονοφασικοί αντιστροφείς (ημιγέφυρας ή γέφυρας) που συνδέονται στην ίδια είσοδο για να δώσουν τις 3 διαφορετικές φάσεις. Η συνηθέστερη σύνδεση είναι σε συνδεσμολογία γέφυρας (Σχήμα 10.7). Η τροφοδοσία ενός τριφασικού φορτίου θα μπορούσε βέβαια να γίνει και από τρεις ανεξάρτητους μονοφασικούς αντιστροφείς πλήρους γέφυρας, οι οποίοι θα υπακούν στους νόμους των τριφασικών συστημάτων (κάθε αντιστροφέας παράγει μια έξοδο μετατοπισμένη κατά τέτοιο τρόπο ώστε οι τρεις έξοδοι να παρουσιάζουν φασική διαφορά 120°). Παρά το γεγονός ότι μια τέτοια τοπολογία θα ήταν ικανή να τροφοδοτήσει ένα τριφασικό φορτίο, η επιτακτική ανάγκη για ύπαρξη τριφασικού μετασχηματιστή εξόδου ή ξεχωριστής πρόσβασης σε κάθε μια από τις τρεις φάσεις του φορτίου, υποβαθμίζει τη χρήση της σε πρακτικό επίπεδο. Επιπρόσθετα, για μονοφασικούς αντιστροφείς πλήρους γέφυρας απαιτούνται συνολικά δώδεκα διακόπτες σε αντίθεση με τους έξι διακόπτες του τριφασικού αντιστροφέα.

Η εφαρμογή των τριφασικών αντιστροφέων σε εφαρμογές μέσης και μεγάλης ισχύος προτιμώνται σε αντίθεση με τις εφαρμογές μικρής ισχύος όπου είναι συνηθισμένη η χρήση των μονοφασικών αντιστροφέων. Πιο συγκεκριμένα η χρήση των τριφασικών αντιστροφέων είναι πολύ διαδεδομένη σε εφαρμογές όπως συστήματα αδιάκοπης τροφοδοσίας ισχύος και συστήματα οδήγησης κινητήρων για την τροφοδοσία τριφασικού φορτίου.



Σχήμα 10.7: Κυκλωματικό διάγραμμα τριφασικού συμβατικού αντιστροφέα σε συνδεσμολογία γέφυρας με τροφοδοσία συνεχούς dc τάσης.

Όπως προαναφέρθηκε και στην αρχή αυτής της υποενότητας στο **Σχήμα 10.7** παρουσιάζεται ο τριφασικός αντιστροφέας ο οποίος είναι μία τοπολογία η οποία αποτελείται από τρεις αντιστροφείς ημιγέφυρας συνδεδεμένους εν παραλλήλω, με αποτέλεσμα η έξοδος κάθε φάσης, ξεχωριστά, να περιγράφεται από τις αρχές λειτουργίας του μονοφασικού αντιστροφέα ημιγέφυρας, όπως περιγράφηκε παραπάνω. Οι κυματομορφές της τάσης εξόδου των τριών αντιστροφέων ημιγέφυρας σε σχέση με το ουδέτερο υποθετικό σημείο “ο” είναι ίδιες με μια μετατόπιση φάσης 120° μεταξύ τους. Επομένως, για τον αντιστροφέα αυτόν ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις:

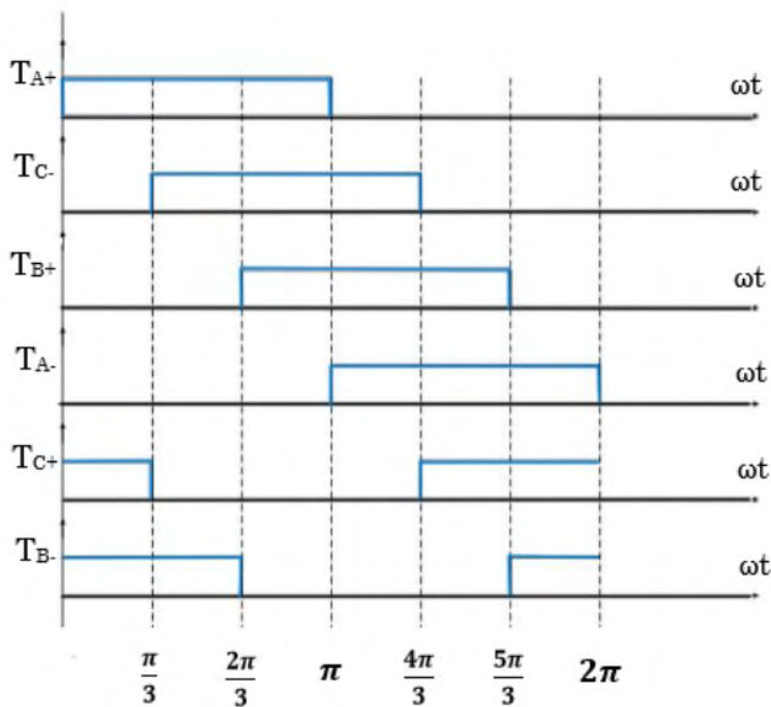
$$\begin{aligned}
 V_{A_o}(\omega t) &= V_{B_o}(\omega t - 120^\circ) = V_{C_o}(\omega t - 240^\circ) \\
 V_{AB}(\omega t) &= V_{A_o}(\omega t) - V_{B_o}(\omega t) \\
 V_{BC}(\omega t) &= V_{B_o}(\omega t) - V_{C_o}(\omega t) \\
 V_{CA}(\omega t) &= V_{C_o}(\omega t) - V_{A_o}(\omega t) \quad (1)
 \end{aligned}$$

Η έξοδος κάθε φάσης, δηλαδή κάθε μονοφασικού αντιστροφέα ημιγέφυρας, εξαρτάται μόνο από τη dc τάση εισόδου V_d και την κατάσταση αγωγής ή μη των διακοπών. Παρατηρούμε επίσης πως η τάση εξόδου είναι ανεξάρτητη από το ρεύμα εξόδου του φορτίου.

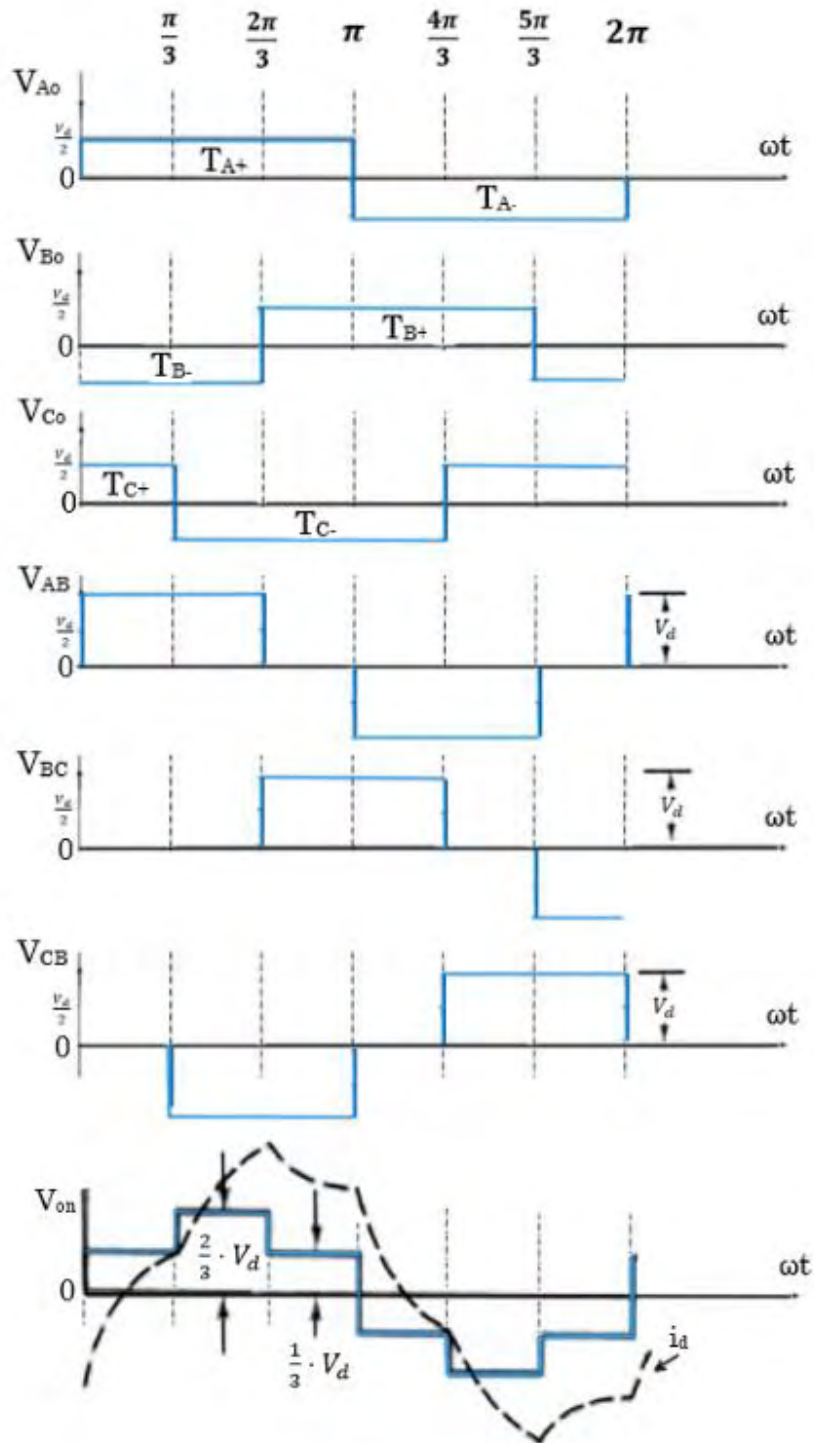
Για να γίνει ξεκάθαρη η λειτουργία του τριφασικού αντιστροφέα δύο επιπέδων παρουσιάζεται στη συνέχεια ένα παράδειγμα όπου οι διακόπτες (T_{A+}, T_{B-}) παλμοδοτούνται με παλμούς έναυσης διάρκειας π . Η λειτουργία ενός τριφασικού αντιστροφέα δύο επιπέδων μπορεί να διαιρεθεί σε χρονικά διαστήματα, που είναι ανάλογα του αριθμού των διακοπών που χρησιμοποιούνται. Αυτό σημαίνει ότι αν οι κυματομορφές εξόδου του αντιστροφέα είναι γνωστές, τότε μπορεί να βρεθούν και οι παλμοί έναυσης των διακοπών ή αντίθετα αν οι παλμοί έναυσης των διακοπών είναι γνωστοί, τότε μπορούν να βρεθούν οι τάσεις εξόδου του αντιστροφέα, ανεξάρτητα με το είδος του φορτίου, το οποίο μπορεί να είναι ισορροπημένο ή μη και να έχει οποιοδήποτε συνδυασμό αντίστασης, αυτεπαγωγής και

χωρητικότητα. Όπως δείχνει και το **Σχήμα 10.7**, ο τριφασικός αντιστροφέας έχει έξι διακόπτες, επομένως τα χρονικά διαστήματα στα οποία μπορεί να χωριστεί η λειτουργία του αντιστροφέα είναι και αυτά έξι. Κάθε χρονικό διάστημα λειτουργίας έχει διάρκεια $\frac{\pi}{3}$, σε μια περίοδο η οποία διαρκεί 2π .

Στο **Σχήμα 10.8** παρουσιάζονται οι παλμοί έναυσης των διακοπών (T_{A+}, T_{B-}). Οι παλμοί έναυσης είναι διάρκειας π , επομένως οι παλμοί των πολικών τάσεων εξόδου του αντιστροφέα [$V_{AB}(\omega t)$, $V_{BC}(\omega t)$, $V_{CA}(\omega t)$] έχουν εύρος $\frac{2\pi}{3}$. Όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 10.7**, για να λειτουργεί ομαλά ο τριφασικός αντιστροφέας δεν πρέπει να άγουν ταυτόχρονα οι διακόπτες των ζευγών (T_{A+}, T_{A-}), (T_{B+}, T_{B-}), (T_{C+}, T_{C-}), γιατί σε αντίθετη περίπτωση έχουμε βραχυκύκλωμα. Στην εξεταζόμενη περίπτωση, όπου οι παλμοί έναυσης έχουν διάρκεια π , τα παραπάνω ζεύγη πρέπει να οδηγούνται από συμπληρωματικούς παλμούς



Σχήμα 10.8: Παλμοί έναυσης εύρους π για τριφασικό αντιστροφέα.



Σχήμα 10.9: Σύνθεση των τάσεων εξόδου κατά τη λειτουργία με τετραγωνική κυματομορφή τάσης ενός παλμού ανά ημιπερίοδο.

Για να επιτευχθούν οι κυματομορφές που εμφανίζονται στο **Σχήμα 10.9** θα πρέπει σε κάθε χρονικό διάστημα, τα οποία είναι έξι συνολικά, και για κάθε περίοδο μια κατάλληλη αλληλουχία διακοπών να άγει, ακολουθώντας πάντα τους περιορισμούς που αναφέρθηκαν παραπάνω.

Αναλυτικότερα, στο πρώτο χρονικό διάστημα $[0, \frac{\pi}{3}]$ άγουν οι διακόπτες (T_{A+} , T_{C+} , T_{B-}), στο δεύτερο χρονικό διάστημα $[\frac{\pi}{3}, \frac{2\pi}{3}]$ άγουν οι διακόπτες (T_{A+} , T_{C-} , T_{B-}), στο τρίτο χρονικό

διάστημα $[\frac{2\pi}{3}, \pi]$ άγουν οι διακόπτες (T_{A+}, T_{C-}, T_{B+}), στο τέταρτο χρονικό διάστημα $[\pi, \frac{4\pi}{3}]$ άγουν οι διακόπτες (T_{C-}, T_{A-}, T_{B+}) και στο πέμπτο χρονικό διάστημα $[\frac{4\pi}{3}, \frac{5\pi}{3}]$ άγουν οι διακόπτες (T_{C+}, T_{A-}, T_{B+}) ενώ τέλος στο έκτο χρονικό διάστημα $[\frac{5\pi}{3}, 2\pi]$ άγουν οι διακόπτες (T_{C+}, T_{A-}, T_{B-}).

Παρατηρώντας τον παραπάνω πίνακα εξάγονται κάποια σημαντικά συμπεράσματα. Σε κάθε χρονικό διάστημα λειτουργίας άγουν πάντοτε 3 διακόπτες, δύο από τους πάνω (T_{A+}, T_{B+}, T_{C+}) και ένας από τους κάτω διακόπτες (T_{A-}, T_{B-}, T_{C-}) ή το αντιστροφο. Για την ορθή λειτουργία του αντιστροφέα δεν πρέπει να άγουν ταυτόχρονα οι τρεις πάνω ή οι τρεις κάτω διακόπτες. Επιπρόσθετα, σύμφωνα με την αλληλουχία των διακοπών δεν υπάρχει χρονικό διάστημα λειτουργίας στο οποίο να άγει ταυτόχρονα ένα εκ των ζευγών (T_{A+}, T_{A-}), (T_{B+}, T_{B-}), (T_{C+}, T_{C-}) κάτι το οποίο είναι απολύτως λογικό αν σκεφθούμε ότι αυτά τα ζευγάρια τα παλμοδοτούμε συμπληρωματικά.

Κάθε περιοδικό σήμα συνεχούς χρόνου μπορεί να γραφτεί ως σειρά απείρων όρων ημιτονοειδών σημάτων, σύμφωνα με τη θεωρία Fourier. Με αυτό τον τρόπο, κάθε περιοδικό σήμα μπορεί να πάρει την παρακάτω μορφή αναπτύγματος:

$$F(t) = a_0 + \sum_{m=1}^{\infty} \alpha_m \cdot \cos\left(\frac{2\pi mt}{T}\right) + \sum_{m=1}^{\infty} b_m \cdot \sin\left(\frac{2\pi mt}{T}\right) \quad (2)$$

Όπου:

$$\alpha_0 = \frac{1}{T} \int_{+0}^{t_0+T} F(t) dt$$

$$\alpha_m = \frac{2}{T} \int_{+0}^{t_0+T} F(t) \cdot \cos\left(\frac{2\pi mt}{T}\right) dt \quad (3)$$

$$b_m = \frac{2}{T} \int_{+0}^{t_0+T} F(t) \cdot \sin\left(\frac{2\pi mt}{T}\right) dt \quad (4)$$

Η έξοδος της φασικής τάσης του τριφασικού αντιστροφέα δύο επιπέδων πρόκειται για έναν τετραγωνικό παλμό που αποτελεί μια περιοδική συνάρτηση. Η περίοδος του τετραγωνικού αυτού παλμού, είναι ίση με 2π . Η συνάρτηση $F(t)$ για τη συγκεκριμένη περίπτωση δίνεται από τον τύπο:

$$F(t) = V_0 = \begin{cases} \frac{V}{2}, & 0 \leq t \leq \pi \\ -\frac{V}{2}, & \pi \leq t \leq 2\pi \end{cases} \quad (5)$$

Επιπλέον σύμφωνα με τα παραπάνω περί αναπτύγματος των περιοδικών σημάτων σε σειρές Fourier καταλήγουμε πως η φασική τάση εξόδου του τριφασικού αντιστροφέα μπορεί να γραφτεί υπό τη μορφή σειράς Fourier ως εξής:

$$V_{A_o} = \sum_{m=1,3,5,7}^{\infty} \frac{2V}{m\pi} \cdot \sin(m\omega t) \quad (6.a)$$

$$V_{B_o} = \sum_{m=1,3,5,7}^{\infty} \frac{2V}{m\pi} \cdot \sin(m(\omega t - 120^\circ)) \quad (6.β)$$

$$V_{C_o} = \sum_{m=1,3,5,7}^{\infty} \frac{2V}{m\pi} \cdot \sin(m(\omega t - 240^\circ)) \quad (6.γ)$$

Όσον αφορά τις πολικές τάσεις εξόδου του τριφασικού αντιστροφέα ισχύουν οι ακόλουθες σχέσεις:

$$V_{AB} = \sum \hat{V}_{AB,m} \sin(m(\omega t + 30^\circ)) \quad (7)$$

Όπου:

$\hat{V}_{AB,m}$ = πλάτος της m-οστής αρμονικής συνιστώσας της πολικής τάσης V_{AB} .

Υπολογίζουμε:

$$\begin{aligned} \hat{V}_{AB,m} &= \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \cdot \sin(m\omega t) d\omega t = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(\omega t) \cdot \sin(m\omega t) d\omega t = \\ &= \frac{4}{\pi} \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{2}} f(\omega t) \cdot \sin(m\omega t) d\omega t = \frac{4}{\pi} \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{2}} V \cdot \sin(m\omega t) d\omega t = \\ &= \frac{4V}{\pi} \cdot \cos\left(\frac{m\pi}{6}\right) \quad (8) \end{aligned}$$

Όπως παρατηρούμε, για $m=3(2k-1)$, με $k \in N$ η παραπάνω σχέση δίνει, $\hat{V}_{AB,m} = 0$. Αυτό σημαίνει ότι οι τριπλές, περιττές αρμονικές συνιστώσες (δηλαδή, $m = 3, 9, 15, 21, 27, \dots$) των πολικών τάσεων εξόδου του τριφασικού αντιστροφέα έχουν μηδενική τιμή. Επομένως, στο φάσμα συχνοτήτων θα εμφανίζονται μόνο οι αρμονικές $m=1, 5, 7, 11, \dots$

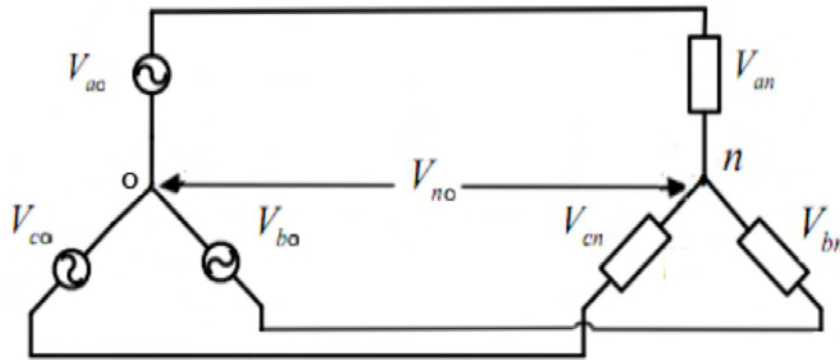
Η πολική τάση εξόδου του αντιστροφέα επομένως δίνεται από τη σχέση:

$$V_{AB} = \sum_{m=1,5,7,11}^{\infty} \frac{4V}{m\pi} \cdot \cos\left(\frac{m\pi}{6}\right) \cdot \sin(m(\omega t + 30^\circ)) \quad (9.a)$$

$$V_{BC} = \sum_{m=1,5,7,11}^{\infty} \frac{4V}{m\pi} \cdot \cos\left(\frac{m\pi}{6}\right) \cdot \sin(m(\omega t + 30^\circ - 120^\circ)) \quad (9.β)$$

$$V_{CA} = \sum_{m=1,5,7,11}^{\infty} \frac{4V}{m\pi} \cdot \cos\left(\frac{m\pi}{6}\right) \cdot \sin(m(\omega t + 30^\circ - 240^\circ)) \quad (9.γ)$$

Οι τριφασικές θεμελιώδεις και αρμονικές συνιστώσες είναι συμμετρικές και παρουσιάζουν μεταξύ τους διαφορά φάσης 120° . Αν ο ουδέτερος κόμβος “n” ενός συνδεδεμένου σε αστέρα τριφασικού φορτίου είναι ενωμένος με τον κόμβο αναφοράς “ο”, τότε οι φασικές τάσεις του φορτίου είναι οι V_{Ao} , V_{Bo} , V_{Co} που δίνονται από τις σχέσεις (6.α),(6.β),(6.γ) αντίστοιχα. Για φορτίο με απομονωμένο ουδέτερο κόμβο το ισοδύναμο κύκλωμα του αντιστροφέα θα είναι το παρακάτω:



Σχήμα 10.10: Το ισοδύναμο κύκλωμα ενός αντιστροφέα που τροφοδοτεί φορτίο συνδεδεμένο σε αστέρα έχοντας ένα απομονωμένο ουδέτερο κόμβο.

Από το κύκλωμα αυτό μπορούν να εξαχθούν οι παρακάτω εξισώσεις που αφορούν τις φασικές τάσεις του αντιστροφέα και τις τάσεις σε σχέση με τον κόμβο αναφοράς “ο” που δημιουργείται από τον χωρικό καταμεριστή της εισόδου:

$$V_{ao} = V_{an} + V_{no} \quad (10.α)$$

$$V_{bo} = V_{bn} + V_{no} \quad (10.β)$$

$$V_{co} = V_{cn} + V_{no} \quad (10.γ)$$

Για συμμετρικό φορτίο ισχύει ότι $V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0$ και έτσι, προσθέτοντας τις παρακάτω εξισώσεις, παίρνουμε:

$$3V_{no} + 0 = V_{ao} + V_{bo} + V_{co} \quad (11)$$

$$V_{no} = \frac{1}{3}(V_{ao} + V_{bo} + V_{co}) \quad (12)$$

Τελικά, αντικαθιστώντας τη (12) στις (10.α),(10.β) και (10.γ) παίρνουμε για τις φασικές τάσεις του αντιστροφέα:

$$V_{an} = \frac{2}{3}V_{ao} - \frac{1}{3}V_{bo} - \frac{1}{3}V_{co} \quad (13.α)$$

$$V_{bn} = \frac{2}{3}V_{bo} - \frac{1}{3}V_{ao} - \frac{1}{3}V_{co} \quad (13.β)$$

$$V_{cn} = \frac{2}{3}V_{co} - \frac{1}{3}V_{ao} - \frac{1}{3}V_{bo} \quad (13.γ)$$

Οι φασικές αυτές τάσεις του φορτίου με απομονωμένο ουδέτερο κόμβο, μπορούν να περιγραφούν είτε με σειρές Fourier είτε να κατασκευαστούν γραφικά, όπως φαίνεται στην τελευταία κυματομορφή του **Σχήματος 10.9**. Μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι αυτή είναι μια τετραγωνική κυματομορφή της οποίας η θεμελιώδη συνιστώσα είναι μετατοπισμένη φασικά κατά 30° σε σχέση με την αντίστοιχη πολική τάση. Για την ακρίβεια, οι φασικές τάσεις V_{an} και V_{ao} , που αφορούν φορτίο με απομονωμένο και συνδεδεμένο ουδέτερο κόμβο αντίστοιχα, είναι οι ίδιες, με τη διαφορά ότι στην πρώτη περίπτωση απουσιάζουν οι αρμονικές συνιστώσες τρίτης τάξης και τα πολλαπλάσια αυτών.

Να τονίσουμε τελικά πως η ενεργός ισχύς εξόδου, προερχόμενη μόνο από τη βασική αρμονική συνιστώσα της τάσης και του ρεύματος εξόδου, ισούται με:

$$P_o = 3P_p = 3\tilde{V}_{Ao1} \cdot \tilde{I}_{Ao1} \cdot \cos \phi_1 \quad (14)$$

Όπου:

P_p = είναι η ενεργός τιμή ισχύος της φάσης εξόδου.

\tilde{V}_{Ao1} = είναι η ενεργός τιμή της βασικής αρμονικής της φασικής τάσης εξόδου.

\tilde{I}_{Ao1} = είναι η ενεργός τιμή της βασικής αρμονικής του φασικού ρεύματος εξόδου.

ϕ_1 = είναι η διαφορά φάσης μεταξύ των βασικών αρμονικών της φασικής τάσης και του φασικού ρεύματος εξόδου.

Στο επόμενο υποκεφάλαιο ακολουθεί μια θεωρητική ανάλυση της λειτουργίας του τριφασικού φίλτρου LC, μιας συσκευής που συναντάμε σε ένα κύκλωμα ισχύος.

10.7 Φίλτρο LC εξόδου αντιστροφέα

10.7.1 Εισαγωγή

Ένα βασικό πρόβλημα που υφίσταται σχεδόν σε κάθε σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας είναι η υποβάθμιση της ποιότητας της παρεχόμενης ηλεκτρικής ισχύος από την ύπαρξη αρμονικών συνιστωσών πέρα από την θεμελιώδη. Γενικά οι αρμονικές χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

1. αρμονικές τάσεως
2. αρμονικές ρεύματος.

Οι αρμονικές ρεύματος οφείλονται κατά κύριο λόγο στην ύπαρξη αρμονικών στην παρεχόμενη τάση. Ένας σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει το αρμονικό περιεχόμενο του ρεύματος είναι το είδος του φορτίου. Δηλαδή το αρμονικό περιεχόμενο του ρεύματος μεταβάλλεται ανάλογα με το αν το φορτίο είναι ωμικό, επαγωγικό ή χωρητικό. Από την άλλη πλευρά οι αρμονικές τάσεως παράγονται κυρίως από τροφοδοτικά που παράγουν μη ημιτονοειδή κυματομορφή τάσεως ή στη μη γραμμική λειτουργία των διατάξεων όπως ο αντιστροφέας ή ο μετατροπέας ανύψωσης τάσης. Παρακάτω, αναφέρονται μερικές από τις συνέπειες ύπαρξης αρμονικών:

- Οι αρμονικές τάσεως μπορούν να προκαλέσουν επιπρόσθετη θέρμανση σε σύγχρονους κινητήρες και γεννήτριες.
- Οι αρμονικές τάσεως που παρουσιάζουν υψηλές αιχμές μπορούν να προκαλέσουν βλάβες στη μόνωση των καλωδίων και των πυκνωτών.
- Οι αρμονικές τάσεως μπορούν να προκαλέσουν τη δυσλειτουργία των ηλεκτρονικών διατάξεων ή κυκλωμάτων τα οποία χρησιμοποιούν τη κυματομορφή τάσεως για συγχρονισμό.
- Οι αρμονικές ρεύματος στα τυλίγματα του κινητήρα μπορούν να προκαλέσουν ηλεκτρομαγνητική παρενόχληση. Αυτό έχει ως συνέπεια να παράγονται αντιροπές στον κινητήρα και ως εκ τούτου να επιβραδύνεται. Επίσης, οι αρμονικές ρεύματος προκαλούν επιπλέον θέρμανση των τυλιγμάτων του κινητήρα και αύξηση θερμικών απωλειών. Αποτέλεσμα είναι η μείωση της απόδοσης του κινητήρα.
- Οι αρμονικές ρεύματος που ρέουν διαμέσου των καλωδίων μπορούν να προκαλέσουν υψηλότερα επίπεδα θερμοκρασίας πέραν του κανονικού που δημιουργείται από την θεμελιώδη συνιστώσα του ρεύματος.
- Οι αρμονικές ρεύματος που ρέουν διαμέσου ενός μετασχηματιστή μπορούν να προκαλέσουν υψηλότερα επίπεδα θερμοκρασίας στον πυρήνα του από αυτά που θα δημιουργούσε μόνη της η θεμελιώδης συνιστώσα.
- Συντονισμένα ρεύματα, τα οποία δημιουργούνται από αρμονικές ρεύματος και από τις διάφορες τοπολογίες φίλτρων σε κυκλώματα ισχύος, μπορούν να προκαλέσουν αστάθεια τάσης πυκνωτών ή αστοχία ασφαλειών σε κάποιο ηλεκτρικό κύκλωμα.

Κάθε περιοδική κυματομορφή μπορεί μαθηματικά να χαρακτηριστεί ως η υπέρθεση μιας θεμελιώδους συνιστώσας και μιας σειράς αρμονικών συνιστωσών. Οι συνιστώσες αυτές μπορούν να διαχωριστούν και να επεξεργαστούν ξεχωριστά αν εφαρμόσουμε τη θεωρία σειρών Fourier στη περιοδική αυτή κυματομορφή. Κάθε αρμονική συνιστώσα έχει συχνότητα που είναι ακέραιο πολλαπλάσιο της συχνότητας της θεμελιώδους συχνότητας.

Σε κάθε διάταξη ισχύος είναι απαραίτητη η ποιοτική γνώση του αρμονικού περιεχομένου της τάσης και του ρεύματος. Υπάρχει μια πληθώρα μεθόδων με τις οποίες είναι δυνατόν να καθοριστεί η ποσότητα των αρμονικών συνιστωσών. Η πιο διαδεδομένη μέθοδος είναι η THD (Total Harmonic Distortion). Πρόκειται για ένα συγκριτικό μέγεθος, το οποίο μας δίνει πληροφορίες για την έκταση του πλάτους των ανωτέρων αρμονικών συνιστωσών σε σχέση με το πλάτος της θεμελιώδους συνιστώσας. Τα παραπάνω περιγράφονται από τον τύπο:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} H_n^2}}{H_1} \quad (15)$$

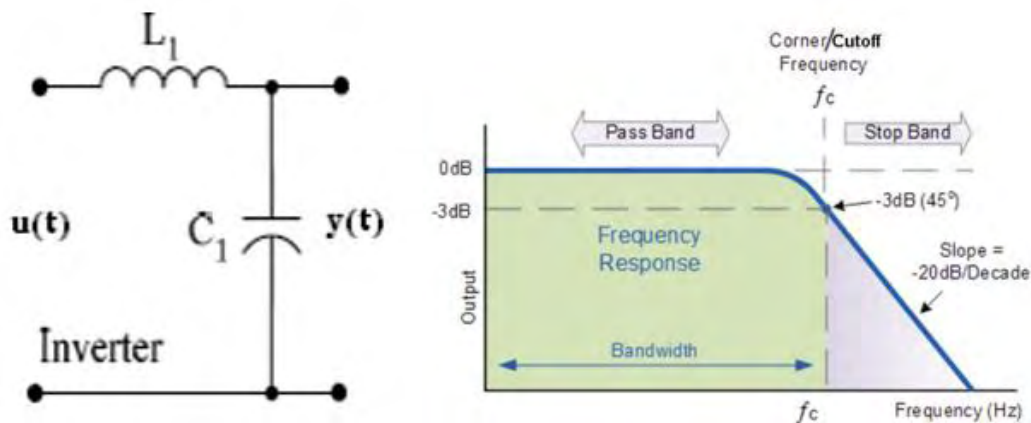
όπου,

H_1 είναι το πλάτος της θεμελιώδους αρμονικής συνιστώσας στη συχνότητα ω_0 και H_n είναι το πλάτος της εκάστοτε αρμονικής στη συχνότητα $n\omega_0$ (n είναι ακέραιος αριθμός). Έχει υπολογισθεί ότι για την ορθή λειτουργία ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, της κλίμακας αυτού που εξετάζουμε στην πειραματική μας διάταξη, πρέπει η THD να είναι μικρότερη του 5% όσο αφορά το ρεύμα και μικρότερη από 4% όσο αφορά την τάση.

Τέλος η ανάγκη για την εξάλειψη των αρμονικών από μία διάταξη είναι πολύ σημαντική για αυτό το πρώτο μας όπλο σε αυτή την προσπάθεια θα αποτελέσει η παλμοσειρά SPWM (Sinusoidal Pulse width modulation) που θα ελέγχει τα ηλεκτρονικά στοιχεία ισχύος του αντιστροφέα μας και θα αναλυθεί σε επόμενο κεφάλαιο. Το δεύτερο όπλο μας αποτελεί η χρήση ενός LC φίλτρου, όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 10.11**.

10.7.2 Φίλτρο LC

Όπως προαναφέρθηκε, κατά τον σχεδιασμό των φίλτρων είναι αδήριτη ανάγκη οι κυματομορφές στην έξοδο του φίλτρου να παρουσιάζουν **THD < 5%**. Υπάρχουν πολλές κατηγορίες είδη φίλτρων (πχ ενεργά και παθητικά) που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ανάλογα με τις περιστάσεις. Ένας απλός και συνηθισμένος τύπος φίλτρου που τοποθετείται στην έξοδο του αντιστροφέα είναι το βαθυπερατό φίλτρο (Low Pass Filter) ή φίλτρο LC. Η τοπολογία ενός βαθυπερατού φίλτρου φαίνεται στο **Σχήμα10.11**. Πρόκειται για μια εντελώς απλή τοπολογία η οποία περιλαμβάνει μια αυτεπαγωγή πηνίου L και μια χωρητικότητα πυκνωτή C . Η λειτουργία του βαθυπερατού φίλτρου βασίζεται στο γεγονός ότι επιτρέπει την διέλευση των χαμηλών συχνοτήτων και αποτρέπει την διέλευση των υψηλών συχνοτήτων κάτι που φαίνεται από την συνάρτηση μεταφοράς του φίλτρου στο **Σχήμα10.11**. Σε επίπεδα τάσης αυτό σημαίνει ότι το φίλτρο LC επιτρέπει τη διέλευση της βασικής αρμονικής συνιστώσας και ένα μικρό μέρος των ανώτερων αρμονικών, με αποτέλεσμα να μειώνεται ο συντελεστής THD.



Σχήμα 10.11: Αριστερά απεικονίζεται η τοπολογία του βαθυπερατού φίλτρου (Low Pass Filter), όπου $u(t)$ είναι η εισοδος του φίλτρου και $y(t)$ η έξοδος. Δεξιά βρίσκεται το διάγραμμα της συνάρτησης μεταφοράς ενός τέτοιου φίλτρου.

Στο **Σχήμα10.11** παρατηρούμε πως η συχνότητα αποκοπής (**Corner/Cutoff Frequency**) του βαθυπερατού φίλτρου συμβολίζεται με f_c . Το φίλτρο ουσιαστικά αποκόπτει κάθε συχνότητα η οποία είναι μεγαλύτερη από την συχνότητα αποκοπής. Ο τύπος από τον οποίο υπολογίζεται η συχνότητα αποκοπής είναι:

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (16)$$

Κεφάλαιο 11

Διαμόρφωση εύρους ή διάρκειας (Pulse Width Modulation)

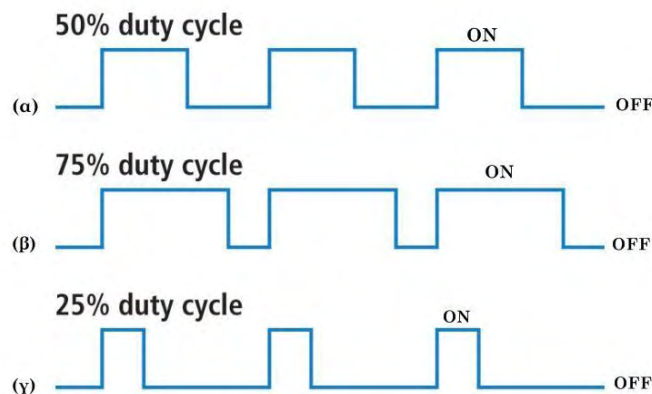
11.1 Εισαγωγή

Η μέθοδος διαμόρφωσης εύρους ή διάρκειας παλμών (Pulse Width Modulation-PWM) μας παρέχει την δυνατότητα της μεταφοράς πληροφορίας μέσω μιας σειράς από παλμούς. Η πληροφορία η οποία μεταφέρεται βρίσκεται «κρυμμένη» στο πλάτος αυτών των παλμών και καθορίζει ουσιαστικά την ποσότητα της ισχύος που φθάνει σε ένα φορτίο. Η διαμόρφωση PWM είναι μια τεχνική διαμόρφωσης η οποία παράγει παλμούς μεταβλητού πλάτους ώστε να αναπαρασταθεί το πλάτος ενός σήματος ή κύματος. Οι πιο διαδεδομένες χρήσεις της συγκεκριμένης τεχνικής εδράζονται στην μεταφορά ηλεκτρικής ισχύος, σε ρυθμιστές τάσης (voltage regulators) καθώς και σε εφαρμογές ενίσχυσης ήχου.

Η τεχνική διαμόρφωσης εύρους παλμών χρησιμοποιείται για να αυξομειώσουμε την συνολική ισχύ που προσφέρουμε σε ένα φορτίο χωρίς να χρησιμοποιήσουμε ωμικές αντιστάσεις. Αποφεύγουμε δηλαδή με αυτή την μέθοδο τις ωμικές απώλειες που συνεπάγεται η χρήση ωμικών αντιστάσεων. Ο κανόνας που διέπει την όλη διαδικασία είναι πως η συνολική ισχύς που μεταφέρεται στο φορτίο είναι ευθέως ανάλογη του βαθμού εργασίας (duty cycle) της παλμοσειράς. Ως βαθμό εργασίας ορίζουμε τον λόγο της χρονικής διάρκειας όπου ο παλμός έχει τιμή λογικού 1, t , προς την περίοδο της παλμοσειράς, T . Δηλαδή (για να δοθεί ως ποσοστό επί τοις εκατό, κάτι που είναι ευρέως διαδεδομένο):

$$d = \frac{t}{T} \cdot 100 \quad (1)$$

Το παρακάτω **Σχήμα 11.1** δείχνει παλμοσειρές PWM για διάφορους βαθμούς εργασίας:



Σχήμα 11.1: Παλμοσειρές PWM για βαθμό εργασίας (duty cycle) α) 50%, β) 75%, γ) 25%.

Συστήματα που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της ηλεκτρικής ισχύος (όπως αντιστροφείς για παράδειγμα) που λειτουργούν με PWM υψηλής συχνότητας υλοποιούνται με την χρήση ημιαγωγικών διακοπτικών στοιχείων (πχ. IGBT, GTO).

Υπάρχουν δύο διακριτές καταστάσεις την παλμοσειράς (ON (λογικό 1) και OFF (λογικό 0)). Με αυτό τον τρόπο, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για το άνοιγμα και το κλείσιμο των διακοπτικών ηλεκτρονικών στοιχείων (ουσιαστικά πραγματοποιούν έλεγχο των διακοπών) και κατά συνέπεια για τον έλεγχο της τάσης στο φορτίο. Το σημαντικό συγκριτικό πλεονέκτημα της χρησιμοποίησης των ημιαγωγικών διακοπτικών στοιχείων είναι η μηδενική πτώση τάσης (ιδανικά) κατά την διάρκεια την περίοδο αγωγής και μη αγωγής. Μπορούμε εύκολα λοιπόν να έχουμε την επιθυμητή τάση στο φορτίο μας απλά χρησιμοποιώντας PWM με κατάλληλο βαθμό εργασίας.

Οι σημαντικότερες από τις πολλές διαφορετικές τεχνικές διαμόρφωσης εύρους παλμών που έχουν προταθεί, είναι:

1. Μονοπαλμική διαμόρφωση εύρους παλμού (**Single PWM**)
2. Πολυπαλμική διαμόρφωση εύρους παλμού (**Multiple PWM**)
3. Ημιτονοειδής διαμόρφωση εύρους παλμών (**Sinusoidal Pulse Width Modulation-SPWM**).
4. Τροποποιημένη ημιτονοειδής διαμόρφωση εύρους παλμού (**Modified SPWM-MSPWM**)

επίσης ενδεικτικά παρακάτω βρίσκονται μερικές ακόμη πιο προηγμένες τεχνικές διαμόρφωσης:

1. PWM για την εξάλειψη συγκεκριμένων αρμονικών (**Selected Harmonic Elimination PWM-SHE-PWM**).
2. PWM για την ελαχιστοποίηση της κυμάτωσης που παρουσιάζει το ρεύμα (**Minimum Ripple Current PWM**).
3. PWM για έλεγχο του ρεύματος σε βρόχο υστέρησης (**Hysteresis Band Current Control PWM**).
4. Ημιτονοειδής PWM με στιγμιαίο έλεγχο στο ρεύμα (**Sinusoidal PWM with Instantaneous Current Control**).
5. PWM με διανύσματα κατάστασης του αντιστροφέα (**Space Vector PWM-SVPWM**).
6. Τυχαία PWM (**Random PWM**).

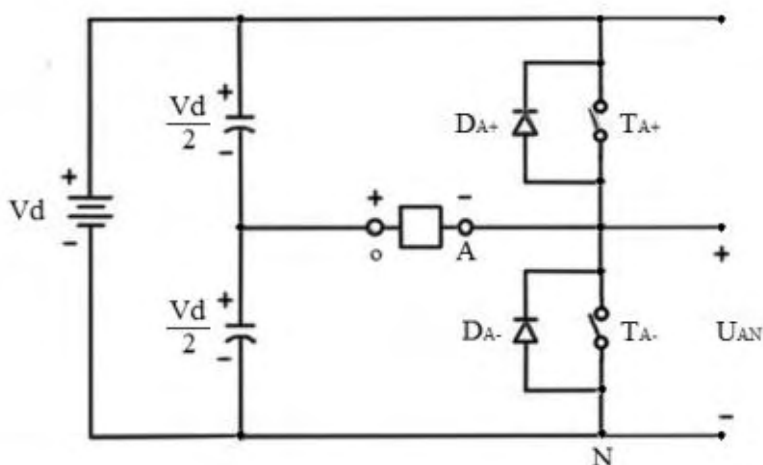
Από τις παραπάνω τεχνικές, στη συνέχεια θα αναλυθεί η πιο αντιπροσωπευτική και συνηθέστερα χρησιμοποιούμενη μέθοδος, η SPWM (Sinusoidal PWM) για τον έλεγχο του αντιστροφέα. Οι σπουδαιότεροι λόγοι οι οποίοι μας οδήγησαν σε αυτή την επιλογή είναι:

1. Οι έξοδοι προσεγγίζουν καλύτερα τις ημιτονικές μορφές (που είναι και οι επιθυμητές) ενώ παράλληλα, το ρεύμα εξόδου παρουσιάζει σχετικά χαμηλή κυμάτωση.
2. Παρέχεται η δυνατότητα απόλυτου ελέγχου της τιμής της τάσης εξόδου του αντιστροφέα.
3. Το αρμονικό περιεχόμενο στην έξοδο είναι ελάχιστο.

11.2 Διαμόρφωση εύρους παλμών σε αντιστροφή ημιγέφυρας

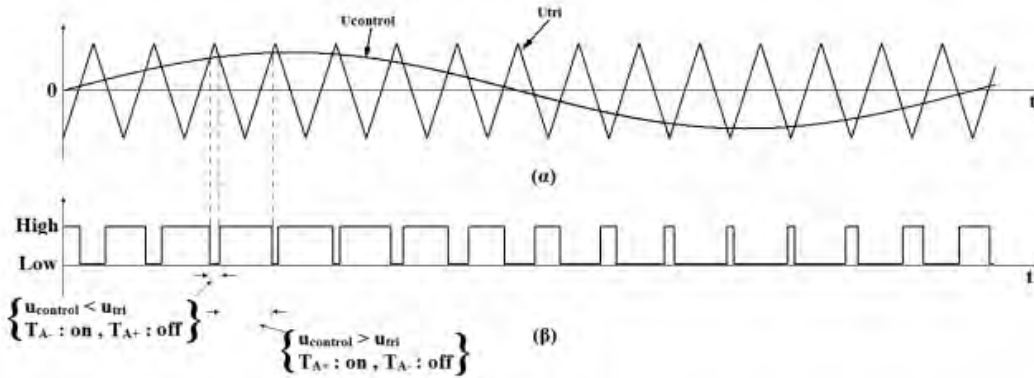
11.2.1 Ανάπτυξη μεθόδου και ορισμός μεγεθών

Το **Σχήμα 11.2** που ακολουθεί είναι το κυκλωματικό διάγραμμα του αντιστροφέα ημιγέφυρας διακοπτικού τύπου, ο οποίος αποτελεί την βασική μονάδα από την οποία προκύπτουν οι υπόλοιπες διατάξεις αντιστροφέων, όπως ο μονοφασικός και ο τριφασικός αντιστροφέας. Για λόγους ευκολίας, υποθέτουμε ότι στο κύκλωμα του σχήματος, το σημείο 'ο' της DC τάσης εισόδου είναι διαθέσιμο, αν και στους περισσότερους αντιστροφείς δεν χρειάζεται και δεν είναι απαραίτητο.



Σχήμα 11.2: Αντιστροφέας ημιγέφυρας.

Η βασική ιδέα της διαμόρφωσης εύρους παλμών ενός αντιστροφέα ισχύος είναι η σύγκριση ενός σήματος χαμηλής συχνότητας, το οποίο ονομάζουμε σήμα αναφοράς και η συχνότητά του αποτελεί την επιθυμητή συχνότητα της τάσης εξόδου, με ένα υψίσυχνο σήμα το οποίο ονομάζουμε σήμα φορέα. Το αποτέλεσμα της σύγκρισης χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της κατάστασης των διακοπτικών στοιχείων. Για την παραγωγή μιας ημιτονοειδούς τάσης εξόδου σε μια επιθυμητή συχνότητα, συγκρίνεται ένα ημιτονοειδές σήμα, το οποίο αποτελεί το σήμα αναφοράς, με μια τριγωνική κυματομορφή που αποτελεί το σήμα φορέα. Η συχνότητα της τριγωνικής κυματομορφής καθορίζει την συχνότητα μετάβασης του αντιστροφέα και διατηρείται γενικά σταθερή, όπως και το πλάτος της. Στο **Σχήμα 11.3.α** φαίνονται το σήμα αναφοράς που συμβολίζεται με $u_{control}$ και το σήμα φορέα που συμβολίζεται με u_{tri} , ενώ στο **Σχήμα 11.3.β** φαίνεται το αποτέλεσμα που προκύπτει από την σύγκρισή τους. Όταν το ημίτονο είναι μεγαλύτερο από το τρίγωνο τότε προκύπτει λογική στάθμη High, ενώ όταν είναι μικρότερο προκύπτει λογική στάθμη Low.



Σχήμα 11.3 Διαμόρφωση εύρους παλμών. Στο σχήμα 11.3.α φαίνονται το σήμα αναφοράς που συμβολίζεται με $u_{control}$ και το σήμα φορέα που συμβολίζεται με u_{tri} , ενώ στο σχήμα 11.3.β φαίνεται το αποτέλεσμα που προκύπτει από την σύγκρισή τους.

Πριν από την εξέταση της συμπεριφοράς της διαμόρφωσης PWM, είναι απαραίτητο να οριστούν μερικοί όροι.

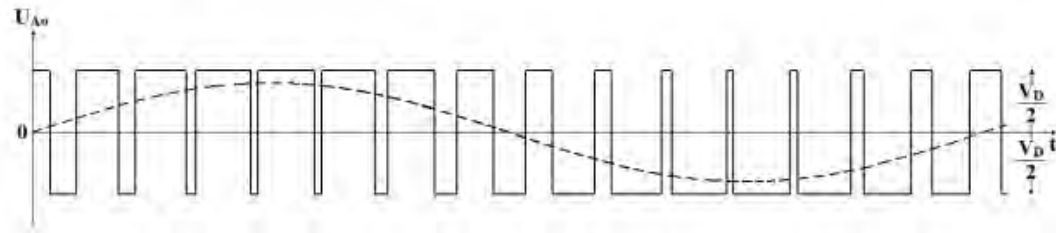
1. f_s : είναι η **συχνότητα μετάβασης ή φέρουσα συχνότητα** (switching/ carrier frequency), καθορίζει την συχνότητα της τριγωνικής κυματομορφής u_{tri} , η οποία με την σειρά της καθορίζει την συχνότητα με την οποία αλλάζουν κατάσταση οι διακόπτες του αντιστροφέα.
2. f_1 : είναι η συχνότητα της κυματομορφής αναφοράς (ημιτονικό σήμα). Το σήμα/κυματομορφή αναφοράς $u_{control}$ χρησιμοποιείται για τη διαμόρφωση της σχετικής διάρκειας αγωγής και έχει την επιθυμητή συχνότητα f_1 . Η τάση εξόδου του αντιστροφέα δεν θα είναι μια τέλεια ημιτονοειδής κυματομορφή, αλλά θα περιέχει ανώτερες αρμονικές της f_1 .
3. $m_a = \frac{\hat{V}_{control}}{\hat{V}_t}$: ονομάζεται συντελεστής διαμόρφωσης πλάτους (amplitude modulation ratio) όπου $\hat{V}_{control}$ είναι το πλάτος του σήματος αναφοράς (ημίτονο στην περίπτωση μας) και \hat{V}_t το πλάτος του τριγωνικού σήματος το οποίο διατηρείται γενικά σταθερό.
4. $m_f = \frac{f_s}{f_1}$: είναι ο λόγος της συχνότητας της τριγωνικής κυματομορφής του φορέα προς τη συχνότητα της κυματομορφής αναφοράς (ημίτονο) και ονομάζεται συντελεστής διαμόρφωσης συχνότητας (frequency modulation ratio) ή κανονικοποιημένη συχνότητα φορέα, όπου f_s και f_1 ορίστηκαν προηγουμένως.

Στον αντιστροφέα ημιγέφυρας του **Σχήματος 11.2** οι διακόπτες T_{A+} και T_{A-} , ελέγχονται με βάση την σύγκριση των $u_{control}$ και u_{tri} και προκύπτει η τάση εξόδου U_{A_0} ανεξάρτητα από την φορά του ρεύματος εξόδου i_o :

- Για $u_{control} > u_{tri} \rightarrow T_{A+}$ είναι on , $U_{A_0} = \frac{1}{2}V_d$
- Για $u_{control} < u_{tri} \rightarrow T_{A-}$ είναι on , $U_{A_0} = -\frac{1}{2}V_d$

Εφόσον οι δύο διακόπτες δεν είναι ποτέ ταυτόχρονα ανοιχτοί, η τάση εξόδου U_{A_0} κυμαίνεται μεταξύ δύο τιμών, $\frac{V_d}{2}$ και $-\frac{V_d}{2}$. Στο **Σχήμα 11.4** φαίνεται η τάση εξόδου U_{A_0} η

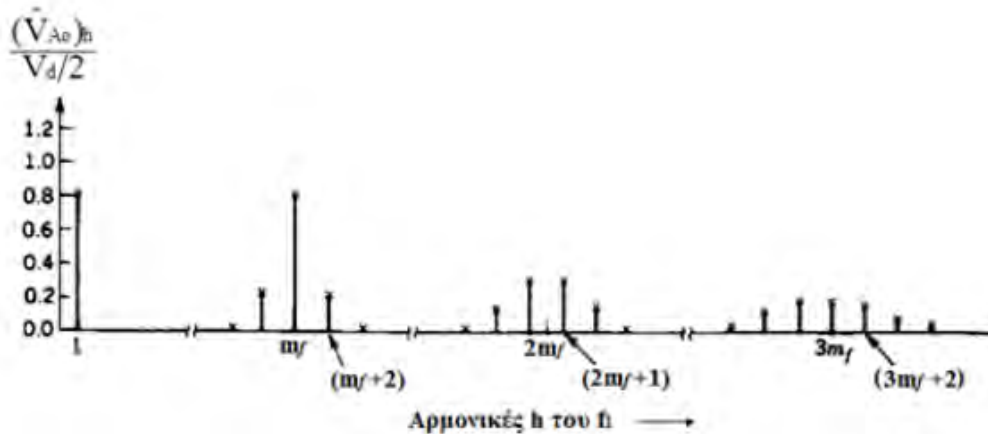
οποία προκύπτει για $m_a=0.8$ και $m_f=15$. Στο ίδιο σχήμα φαίνεται με διακεκομμένη γραμμή η θεμελιώδης συχνότητά της.



Σχήμα 11.4: Η τάση εξόδου U_{Ao} η οποία προκύπτει για $m_a=0.8$ και $m_f=15$ και κυμαίνεται μεταξύ δύο τιμών, $\frac{V_d}{2}$ και $-\frac{V_d}{2}$.

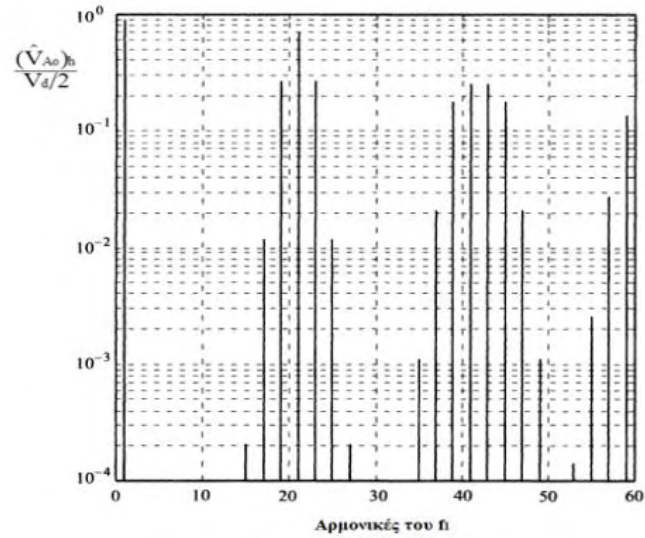
11.2.2 Ανάλυση αρμονικού περιεχομένου

Στο Σχήμα 11.5 φαίνεται το φάσμα συχνοτήτων της τάσης εξόδου U_{Ao} , όπου σχεδιάζονται οι αρμονικές τάσεις, κανονικοποιημένες ως προς $\frac{V_d}{2}$, οι οποίες έχουν σημαντικά πλάτη.



Σχήμα 11.5 Αρμονικό περιεχόμενο τάσης εξόδου U_{Ao} αντιστροφέα ημιγέφυρας ($m_a=0.8$, $m_f=15$).

Στο Σχήμα 11.6 φαίνεται το φάσμα συχνοτήτων της τάσης εξόδου U_{Ao} , για διαφορετικούς συντελεστές διαμόρφωσης, όπου σχεδιάζονται όλες οι αρμονικές τάσεις κανονικοποιημένες ως προς $\frac{V_d}{2}$, ανεξαρτήτως πλάτους, σε λογαριθμική κλίμακα.

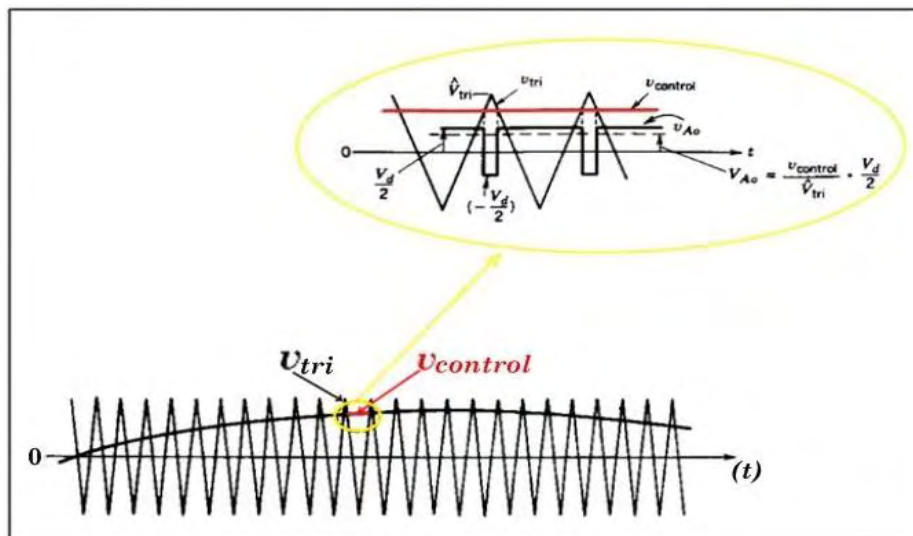


Σχήμα 11.6: Αρμονικό περιεχόμενο τάσης εξόδου αντιστροφέα ημιγέφυρας ($m_a=0.9$, $m_f=21$).

Τα παραπάνω σχήματα, για $m_a \leq 1$, αναδεικνύουν τρία σημαντικά σημεία:

(1) Το πλάτος της θεμελιώδους συχνότητας $(\hat{U}_{A_o})_1$ είναι m_a φορές το $\frac{V_d}{2}$.

Εάν θεωρήσουμε ότι ο συντελεστής m_f είναι πολύ μεγάλος, δηλαδή η συχνότητα του τριγωνικού σήματος είναι πολύ μεγαλύτερη από την συχνότητα του ημιτονοειδούς σήματος αναφοράς, τότε μπορούμε με αρκετή ακρίβεια να υποθέσουμε ότι η τιμή του ημιτόνου μεταβάλλεται πολύ λίγο κατά την διάρκεια μιας περιόδου μετάβασης, έτσι ώστε να μπορεί να θεωρηθεί σταθερή. Αυτό φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 11.7 Ημιτονοειδής διαμόρφωση PWM με μεγάλο m_f .

Θεωρώντας σταθερή την τιμή του $u_{control}$ κατά την διάρκεια μιας περιόδου μετάβασης $T_s = \frac{1}{f_s}$, μπορεί να αποδειχθεί ότι η μέση τάση εξόδου U_{Ao} στο διάστημα της περιόδου αυτής εξαρτάται από τον λόγο του $u_{control}$ προς τη \hat{V}_{tri} για δεδομένη V_d σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο:

$$V_{Ao} = \frac{u_{control}}{\hat{V}_{tri}} \cdot \frac{V_d}{2}, \quad u_{control} \leq \hat{V}_{tri} \quad (2)$$

Η σχέση 2 δείχνει το πως η «στιγμαία» μέση τιμή της U_{Ao} , δηλαδή στην διάρκεια μιας περιόδου μετάβασης, μεταβάλλεται από μια περίοδο μετάβασης στην επόμενη. Αυτή η «στιγμαία» μέση τιμή είναι ίδια με την θεμελιώδη συνιστώσα της U_{Ao} . Με το επιχείρημα αυτό μπορούμε να καταλάβουμε τον λόγο για τον οποίο το σήμα αναφοράς $u_{control}$ επιλέγεται ημιτονοειδές, ώστε να παράγεται ημιτονοειδής τάση εξόδου με λιγότερες αρμονικές.

Αν θεωρήσουμε ότι η ημιτονοειδής μεταβολή της τάσης ελέγχου στην συχνότητα $f_1 = \frac{\omega_1}{2\pi}$, η οποία είναι η επιθυμητή θεμελιώδης συχνότητα της εξόδου του αντιστροφέα:

$$u_{control} = \hat{U}_{control} \sin \omega_1 t, \quad \text{όπου } \hat{U}_{control} \leq \hat{V}_{tri}$$

Χρησιμοποιώντας την παραπάνω σχέση σε συνδυασμό με την σχέση 2 και τα προηγούμενα επιχειρήματα που δείχνουν ότι η θεμελιώδης συνιστώσα $(u_{Ao})_1$ μεταβάλλεται ημιτονοειδώς και σε φάση με το $u_{control}$ προκύπτει:

$$(u_{Ao})_1 = \frac{\hat{U}_{control}}{\hat{V}_t} \cdot \sin(\omega_1 t) \cdot \frac{V_d}{2} = m_a \cdot \sin(\omega_1 t) \cdot \frac{V_d}{2} \quad (3)$$

Επομένως το πλάτος της θεμελιώδους συνιστώσας προκύπτει από την παρακάτω σχέση:

$$(\hat{U}_{Ao})_1 = m_a \cdot \frac{V_d}{2} \quad (4)$$

Η σχέση αυτή δείχνει ότι σε μια ημιτονοειδή διαμόρφωση PWM το πλάτος της θεμελιώδους συνιστώσας της τάσης εξόδου μεταβάλλεται γραμμικά με τον m_a , υπό την προϋπόθεση ότι $m_a \leq 1$. Για τον λόγο αυτό, η περιοχή του m_a από 0 έως 1 αναφέρεται ως γραμμική περιοχή.

(2) Οι αρμονικές της τάσης εξόδου του αντιστροφέα εμφανίζονται ως πλευρικές ζώνες, με κέντρο την συχνότητα μετάβασης και τις πολλαπλάσιές της.

Θεωρητικά, οι συχνότητες στις οποίες εμφανίζονται οι αρμονικές μπορούν να εκφραστούν ως:

$$f_h = (jm_f \pm k)f_1 \quad (5)$$

δηλαδή η αρμονική τάξη h αντιστοιχεί στην k -τάξης πλευρική ζώνη της, j -φορές το συντελεστή διαμόρφωσης συχνότητας m_f : $h = j(m_f) \pm k$, όπου η θεμελιώδης συχνότητα αντιστοιχεί στο $h=1$. Για περιττές τιμές του j , οι αρμονικές υπάρχουν μόνο για άρτιες τιμές του k . Για άρτιες τιμές του j , οι αρμονικές υπάρχουν μόνο για περιττές τιμές του k .

Στον πίνακα του σχήματος 11.8 καταγράφονται οι κανονικοποιημένες αρμονικές $\frac{(\sigma_{A_0})_h}{\frac{V_d}{2}}$ ως συνάρτηση του συντελεστή διαμόρφωσης m_a , θεωρώντας $m_f \geq 9$. Για ένα συντελεστή διαμόρφωσης συχνότητας $m_f \geq 9$, που συμβαίνει σχεδόν πάντα εκτός από πολύ υψηλές απαιτήσεις ισχύος, τα πλάτη των αρμονικών είναι σχεδόν ανεξάρτητα από το m_f , αν και ο m_f καθορίζει τις συχνότητες στις οποίες εμφανίζονται. Στον πίνακα φαίνονται μόνο εκείνες οι αρμονικές με σημαντικά πλάτη, για τιμές του j μέχρι $j=4$.

$h \backslash m_a$	0.2	0.4	0.6	0.8	1
1	0.2	0.4	0.6	0.8	1
m_f	1.242	1.15	1.006	0.818	0.601
$m_f \pm 2$	0.016	0.061	0.131	0.220	0.318
$m_f \pm 4$					0.018
$2 \cdot m_f \pm 1$	0.190	0.326	0.370	0.314	0.181
$2 \cdot m_f \pm 3$		0.024	0.071	0.139	0.212
$2 \cdot m_f \pm 5$				0.013	0.033
$3 \cdot m_f$	0.335	0.123	0.083	0.171	0.113
$3 \cdot m_f \pm 2$	0.044	0.139	0.203	0.176	0.062
$3 \cdot m_f \pm 4$		0.012	0.047	0.104	0.157
$3 \cdot m_f \pm 6$				0.016	0.044
$4 \cdot m_f \pm 1$	0.163	0.157	0.008	0.105	0.068
$4 \cdot m_f \pm 3$	0.012	0.070	0.132	0.115	0.009
$4 \cdot m_f \pm 5$			0.034	0.084	0.119
$4 \cdot m_f \pm 7$				0.017	0.050

Σχήμα 11.8 Ο γενικευμένος πίνακας για μεγάλο m_f ($m_f \geq 9$) που δίνει τον συντελεστή με τον οποίο πρέπει να πολλαπλασιαστεί το V_{in} ή V_d ώστε να προκύψει το πλάτος u_{A_0} της αντίστοιχης αρμονικής.

(3) Ο συντελεστής m_f πρέπει να είναι περιττός ακέραιος.

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως καθώς και φαίνεται στα **σχήματα 11.5** και **11.6**, όπου ο συντελεστής m_f είναι περιττός, οι περιττές πλευρικές αρμονικές γύρω από περιττά πολλαπλάσια του m_f καθώς και οι άρτιες πλευρικές αρμονικές γύρω από άρτια πολλαπλάσια του m_f είναι μηδενικές. Η επιλογή μιας περιττής ακέραιας τιμής για τον m_f έχει ως αποτέλεσμα μια περιττή συμμετρία $[f(-t) = -f(t)]$, όπως επίσης μια συμμετρία μισού κύματος με την αρχή του χρόνου $[f(t) = -f(t+T_s/2)]$. Επομένως, υπάρχουν μόνο περιττές αρμονικές, ενώ οι άρτιες αρμονικές εξαφανίζονται από την κυματομορφή U_{A_0} . Το γεγονός αυτό στην ανάλυση Fourier ερμηνεύεται ως ότι, μόνο οι συντελεστές της σειράς των ημιτόνων είναι διάφοροι του μηδενός, ενώ αυτοί της σειράς των συνημιτόνων είναι μηδενικοί.

Η επιλογή της συχνότητας μετάβασης επομένως και του συντελεστή διαμόρφωσης συχνότητας m_f είναι ένα αρκετά κρίσιμο ζήτημα οπότε απαιτείται περαιτέρω εξέταση. Οι αρμονικές με υψηλή συχνότητα φιλτράρονται σχετικά ευκολότερα από τις αρμονικές με χαμηλή συχνότητα. Άρα, είναι επιθυμητή η χρήση όσο το δυνατό υψηλότερων συχνοτήτων μετάβασης. Από την άλλη μεριά οι απώλειες μετάβασης στους διακόπτες του αντιστροφέα αυξάνουν ανάλογα προς την συχνότητα μετάβασης f_s . Επομένως, στις περισσότερες εφαρμογές, η συχνότητα μετάβασης επιλέγεται είτε χαμηλότερη των 6 kHz

είτε υψηλότερη των 20 kHz, ώστε να είναι πάνω από την ακουστική περιοχή συχνοτήτων. Αν η βέλτιστη συχνότητα μετάβασης (με βάση τη συνολική απόδοση του συστήματος) προκύψει κάπου στην περιοχή από 6 έως 20 kHz, τότε τα μειονεκτήματα της αύξησής της στα 20 kHz αντισταθμίζονται συχνά από το πλεονέκτημα ότι δεν υπάρχει ακουστικός θόρυβος για f_s των 20 kHz ή μεγαλύτερη. Επομένως, σε εφαρμογές των 50 ή 60 Hz, όπως είναι τα AC-κινητήρια συστήματα (όπου η θεμελιώδης συχνότητα εξόδου του μετατροπέα μπορεί να απαιτείται να είναι μέχρι 200 Hz), ο συντελεστής διαμόρφωσης συχνότητας m_f μπορεί να είναι 9 ή ακόμη μικρότερος για συχνότητες μετάβασης μικρότερες των 2 kHz. Από την άλλη μεριά, ο m_f θα είναι μεγαλύτερος από 100 για συχνότητες μετάβασης μεγαλύτερες των 20 kHz. Οι επιθυμητές σχέσεις μεταξύ του σήματος τριγωνικής κυματομορφής και του σήματος της τάσης αναφοράς καθορίζονται από το πόσο μεγάλος είναι ο m_f . Στην εξέταση που γίνεται εδώ, η τιμή $m_f=21$ αντιμετωπίζεται ως όριο μεταξύ μεγάλων και μικρών τιμών του, αν και η επιλογή της είναι κάπως αυθαίρετη. Επιπλέον θεωρείται ότι ο συντελεστής διαμόρφωσης πλάτους m_a βρίσκεται στην γραμμική περιοχή.

Μικρός m_f ($m_f \leq 21$)

- (1) **Συγχρονισμένη διαμόρφωση PWM.** Για μικρές τιμές του m_f , το σήμα της τριγωνικής κυματομορφής και το σήμα ελέγχου πρέπει να είναι συγχρονισμένα μεταξύ τους. Η συγχρονισμένη διαμόρφωση PWM απαιτεί ακέραια τιμή του m_f . Ο λόγος για τον οποίο χρησιμοποιείται η συγχρονισμένη διαμόρφωση PWM είναι ότι η ασύγχρονη διαμόρφωση PWM (όπου ο m_f δεν είναι ακέραιος) έχει ως αποτέλεσμα υποαρμονικές της θεμελιώδους συχνότητας, οι οποίες είναι τελείως ανεπιθύμητες στις περισσότερες εφαρμογές. Αυτό σημαίνει ότι η συχνότητα της τριγωνικής κυματομορφής μεταβάλλεται με την επιθυμητή συχνότητα του αντιστροφέα, για παράδειγμα αν η συχνότητα εξόδου του αντιστροφέα και συνεπώς η συχνότητα του $u_{control}$ είναι 55.82 Hz και $m_f = 18$, η συχνότητα της τριγωνικής κυματομορφής θα πρέπει να είναι ακριβώς $18 \cdot 55.8 = 1.004,4$ Hz.
- (2) **Ο συντελεστής m_f πρέπει να είναι περιττός ακέραιος.** Ειδικά για τριφασικό αντιστροφή, ο m_f πρέπει να είναι περιττός ακέραιος για να εμφανίζονται μόνο περιττές αρμονικές και να εξαφανίζονται οι άρτιες.

Μεγάλος m_f ($m_f \geq 21$)

Τα πλάτη των υποαρμονικών που οφείλονται σε ασύγχρονη διαμόρφωση PWM είναι μικρά, όταν οι τιμές του m_f είναι μεγάλες. Επομένως, σε μεγάλες τιμές του m_f , μπορεί να χρησιμοποιηθεί η ασύγχρονη διαμόρφωση PWM, όπου η συχνότητα της τριγωνικής κυματομορφής διατηρείται σταθερή, ενώ η συχνότητα του $u_{control}$ μεταβάλλεται, έχοντας ως αποτέλεσμα μη ακέραιες τιμές του m_f (εφόσον αυτές είναι μεγάλες). Ωστόσο, αν ο αντιστροφέας τροφοδοτεί ένα φορτίο, όπως ο AC-κινητήρας, οι υποαρμονικές στη μηδενική ή κοντά στη μηδενική συχνότητα, παρά το ότι έχουν μικρό πλάτος, θα έχουν ως αποτέλεσμα μεγάλα ρεύματα, τα οποία είναι τελείως ανεπιθύμητα. Επομένως η ασύγχρονη διαμόρφωση PWM πρέπει να αποφεύγεται.

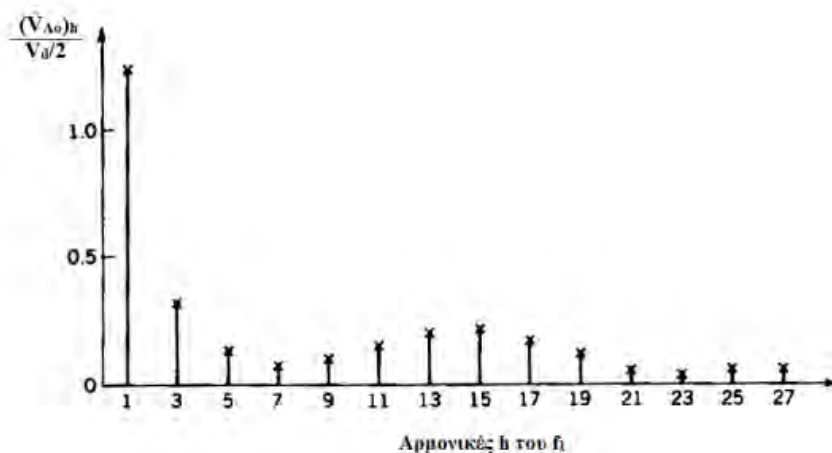
11.2.3 Υπερδιαμόρφωση

Η ανάλυση που προηγήθηκε είχε ως βασική προϋπόθεση την λειτουργία της μεθόδου SPWM στην γραμμική περιοχή, δηλαδή για συντελεστή διαμόρφωσης πλάτους $m_a \leq 1$, όπου το πλάτος της θεμελιώδους συνιστώσας της τάσης εξόδου μεταβάλλεται γραμμικά με τον

m_a και οι αρμονικές ωθούνται σε μια περιοχή υψηλών συχνοτήτων γύρω από την συχνότητα μετάβασης και τις πολλαπλάσιές της. Τα χαρακτηριστικά αυτά είναι ιδιαίτερα επιθυμητά, ωστόσο προκύπτει το μειονέκτημα ότι το μέγιστο δυνατό πλάτος της θεμελιώδους συνιστώσας δεν είναι τόσο υψηλό όσο είναι επιθυμητό. Η περαιτέρω αύξηση του πλάτους της θεμελιώδους συνιστώσας της τάσης εξόδου προϋποθέτει ο m_a να αυξηθεί πέρα από την τιμή 1, οδηγώντας σε αυτό που ονομάζεται υπερδιαμόρφωση. Η εφαρμογή της μεθόδου SPWM με υπερδιαμόρφωση έχει τις παρακάτω συνέπειες:

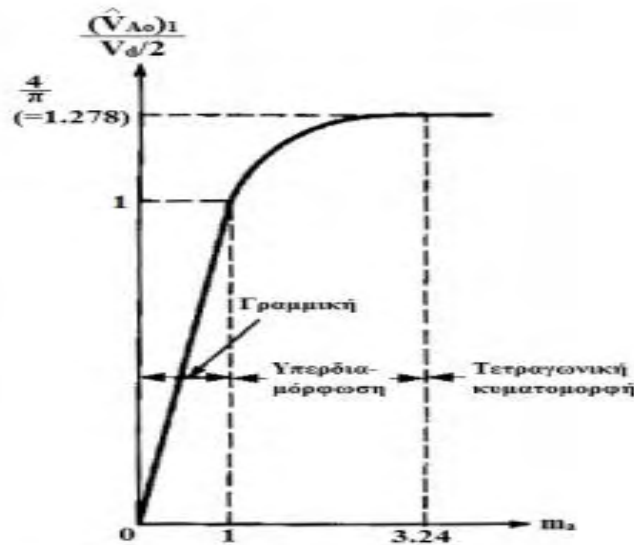
1. Η τάση εξόδου περιέχει περισσότερες αρμονικές στις πλευρικές ζώνες σε σύγκριση με την γραμμική περιοχή, ενώ οι αρμονικές που υπερσυχύουν στην γραμμική περιοχή μπορεί να μην υπερσυχύουν κατά την υπερδιαμόρφωση.
2. Το πλάτος της θεμελιώδους συνιστώσας της τάσης εξόδου δεν μεταβάλλεται γραμμικά με τον συντελεστή διαμόρφωσης m_a . Επιπλέον, ακόμα και για λογικές τιμές του συντελεστή διαμόρφωσης m_f , το πλάτος εξαρτάται από τον m_f , σε αντίθεση με την γραμμική περιοχή όπου το πλάτος μεταβάλλεται γραμμικά με τον m_a και ανεξάρτητα από τον m_f .

Στο **Σχήμα 11.9** φαίνεται το φάσμα συχνοτήτων της τάσης εξόδου U_{Ao} , για λειτουργία στην περιοχή της υπερδιαμόρφωσης, όπου σχεδιάζονται οι αρμονικές τάσεις, κανονικοποιημένες ως προς $\frac{V_d}{2}$. Παρατηρούμε την έντονη παρουσία αρμονικών σε αρκετά χαμηλές συχνότητες με αποτέλεσμα την αύξηση του συνολικού αρμονικού περιεχομένου της τάσης εξόδου.



Σχήμα 11.9 Αρμονικό περιεχόμενο τάσης εξόδου U_{Ao} με υπερδιαμόρφωση ($m_a=2.5$, $m_f=15$).

Στο **Σχήμα 11.10** παρουσιάζεται η εξάρτηση του πλάτους της θεμελιώδους συνιστώσας της τάσης εξόδου από τον συντελεστή διαμόρφωσης πλάτους m_a για τις διάφορες περιοχές λειτουργίας.



Σχήμα 11.10 Μεταβολή του πλάτους της θεμελιώδους συνιστώσας με τον m_a για αντιστροφή ημιγέφυρας ($m_f=15$).

- Για m_a στο διάστημα $\Delta[0, 1]$: Βρισκόμαστε στη γραμμική περιοχή όπου η θεμελιώδης συνιστώσα μεταβάλλεται γραμμικά με τον λόγο διαμόρφωσης πλάτους. Το πλάτος της θεμελιώδους συνιστώσας του αντιστροφέα είναι:

$$(\hat{U}_{Ao})_1 = m_a \cdot \frac{V_d}{2}$$

Το πλεονέκτημα της λειτουργίας σε γραμμική περιοχή είναι ότι ωθεί τις αρμονικές σε υψηλές συχνότητες γύρω από τη συχνότητα μετάβασης f_s και τις πολλαπλασιάσει της. Με την χρήση ενός σχετικά μικρού φίλτρου μπορούν εύκολα να αποκοπούν. Το μειονέκτημα είναι ότι η μέγιστη ($m_a=1$) ενεργός πολική τιμή της θεμελιώδους τάσης περιορίζεται από ένα άνω όριο.

- Για m_a στο διάστημα $\Delta[1, 3.24]$: Σε αυτή την περίπτωση έχουμε υπερδιαμόρφωση καθώς το πλάτος των τάσεων ελέγχου επιτρέπεται να υπερβαίνει το πλάτος της τριγωνικής κυματομορφής. Εξαλείφεται, με λίγα λόγια, η γραμμικότητα μεταξύ τάσης εισόδου και της ενεργού πολικής τάσης \hat{V}_{Ao} . Σε αυτή τη μορφή λειτουργίας λοιπόν, το πλάτος της θεμελιώδους συνιστώσας της τάσης δεν αυξάνεται γραμμικά με την τιμή του m_a . Η σχέση μεταξύ του πλάτους της θεμελιώδους συνιστώσας και του m_a εξαρτάται από τον λόγο διαμόρφωσης συχνότητας m_f και η κυματομορφή που προκύπτει είναι μια ενδιάμεση μορφή ανάμεσα σε SPWM και τετραγωνικό παλμό. Σύμφωνα με το σχήμα προκύπτει το συμπέρασμα ότι στην περιοχή υπερδιαμόρφωσης ισχύει η σχέση:

$$\frac{V_d}{2} < (V_{Ao})_1 < \frac{4}{\pi} \cdot \frac{V_d}{2}, \quad \text{για } 1 < m_a < 3.24$$

- Για $m_a > 3.24$: Εδώ η αύξηση του λόγου m_a δεν συνεπάγεται καθόλου αύξηση του πλάτους της θεμελιώδους συνιστώσας της τάσης και έχουμε εκφυλισμό από κυματομορφή με διαμόρφωση PWM σε τετραγωνική κυματομορφή, ενώ ισχύει:

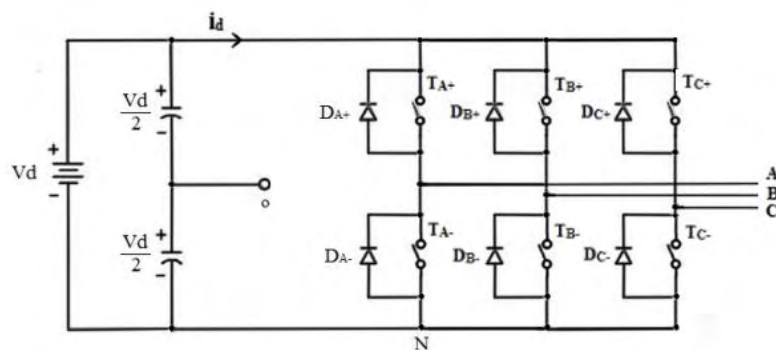
$$\frac{(\hat{V}_{A_0})_1}{\frac{V_d}{2}} = 1.278$$

Ο συντελεστής διαμόρφωσης m_a λοιπόν είναι πολύ σημαντικό μέγεθος, αφενός γιατί καθορίζει το πλάτος της φασικής τάσης του μετατροπέα, και αφετέρου γιατί διαχωρίζει τις προηγούμενες περιοχές λειτουργίας.

11.3 Διαμόρφωση ευρους παλμών σε τριφασικούς αντιστροφείς πηγής τάσης

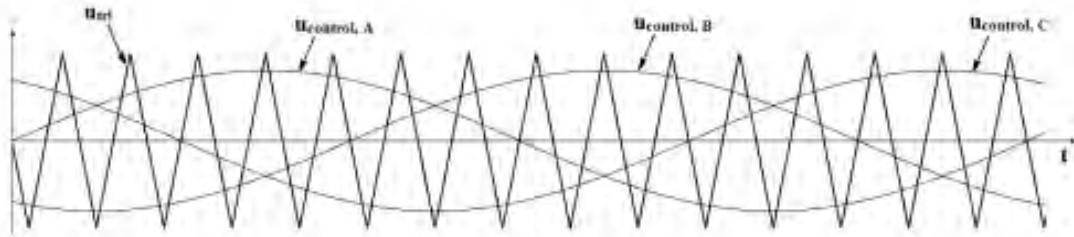
11.3.1 Ανάπτυξη μεθόδου

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη ενότητα σε εφαρμογές μικρής ισχύος είναι συνηθισμένη η χρήση μονοφασικών αντιστροφών, ενώ αντίθετα σε εφαρμογές μέσης και μεγάλης ισχύος προτιμώνται τριφασικοί αντιστροφείς. Ένα παράδειγμα ενός κυκλωματικού διαγράμματος ενός συμβατικού τριφασικού αντιστροφέα φαίνεται στο **Σχήμα 11.11**. Από την τοπολογία του κυκλώματος συμπεραίνουμε ότι ο τριφασικός αντιστροφέας προκύπτει από την βασική μονάδα αντιστροφέα ημιγέφυρας, στον οποίον έχουν προστεθεί άλλα δύο σκέλη (δηλαδή δύο δεξιά μέρη ενός αντιστροφέα ημιγέφυρας). Το καθένα από τα τρία σκέλη αντιστοιχεί σε μία από τις τρεις φάσεις του. Η έξοδος του κάθε σκέλους, ως προς τον αγωγό που φέρει την αρνητική dc τάση, εξαρτάται από την dc τάση εισόδου V_d και την κατάσταση των διακοπών.

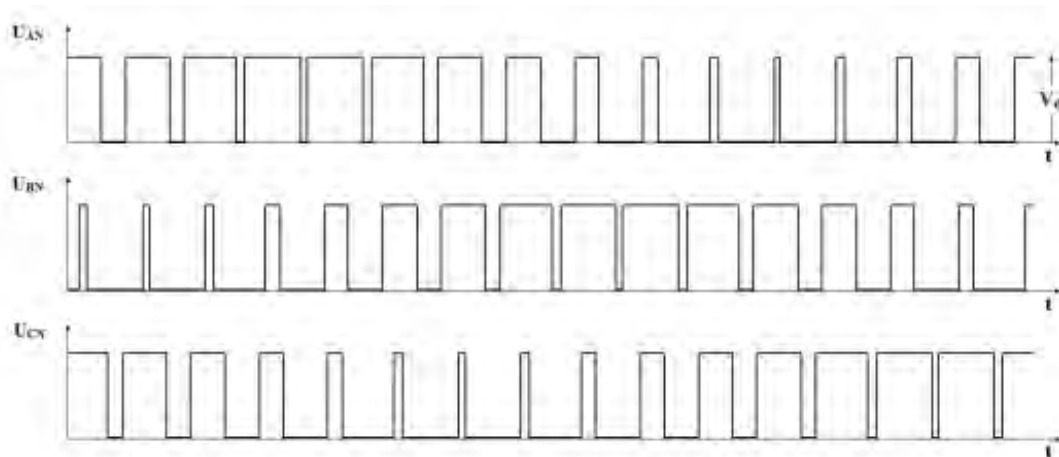


Σχήμα 11.11: Κυκλωματικό διάγραμμα τριφασικού συμβατικού αντιστροφέα σε συνδεσμολογία γέφυρας με τροφοδοσία συνεχούς dc τάσης.

Όπως με τον αντιστροφέα ημιγέφυρας, έτσι και με τον τριφασικό αντιστροφέα με διαμόρφωση εύρους παλμών στόχος είναι η μορφοποίηση και ο έλεγχος των τριφασικών τάσεων εξόδου κατά πλάτος και συχνότητα, με μια ουσιαστικά σταθερή τάση εισόδου V_d . Ακολουθώντας την βασική ιδέα της διαμόρφωσης PWM για αντιστροφείς, η επίτευξη συμμετρικών τριφασικών τάσεων εξόδου σε έναν τριφασικό αντιστροφέα με ημιτονοειδή διαμόρφωση SPWM, προϋποθέτει την σύγκριση του ίδιου σήματος φορέα, δηλαδή της υψηλής συχνότητας τριγωνικής κυματομορφής, με τρία ημιτονοειδή σήματα ελέγχου, τα οποία χαρακτηρίζονται από διαφορά φάσης 120° μεταξύ τους. Τα σήματα αυτά φαίνονται στο **Σχήμα 11.12.α**.



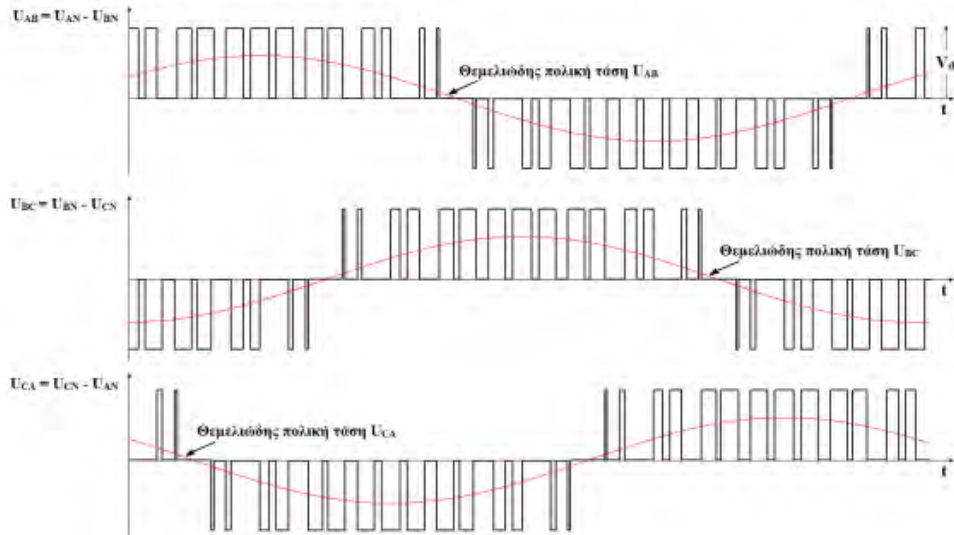
Σχήμα 11.12.α Σήματα για την εφαρμογή διαμόρφωσης PWM σε τριφασικό αντιστροφέα.



Σχήμα 11.12.β Τάση εξόδου σε καθένα από τα σκέλη του αντιστροφέα ως προς N .

Στο σχήμα 11.12.β φαίνεται η τάση εξόδου σε καθένα από τα σκέλη του αντιστροφέα U_{AN} , U_{BN} και U_{CN} στις οποίες παρατηρούμε ότι έχει προστεθεί μια dc συνιστώσα, ως αποτέλεσμα της μέτρησης των τάσεων αυτών σε σχέση με τον αγωγό που φέρει την αρνητική dc τάση. Η πολική τάση εξόδου που προκύπτει από την διαφορά των παραπάνω τάσεων έχει ως αποτέλεσμα την απαλοιφή της dc συνιστώσας όπως φαίνεται στο **Σχήμα 11.12.γ**.

Αγνοώντας την dc συνιστώσα, που όπως είδαμε απαλείφεται στην πολική τάση εξόδου, σύμφωνα με την ανάλυση που έγινε για το πλάτος της θεμελιώδους συνιστώσας της τάσης εξόδου για τον αντιστροφέα ημιγέφυρας στην γραμμική περιοχή λειτουργίας ($m_a \leq 1$), η



Σχήμα 11.12.γ Πολική τάση εξόδου τριφασικού αντιστροφέα με διαμόρφωση PWM.

Θεμελιώδης συνιστώσα της τάσης εξόδου σε κάθε σκέλος του τριφασικού αντιστροφέα θα έχει την παρακάτω μορφή:

$$\mathbf{u}_{AN} = (\hat{U}_{AN})_1 \sin(\omega_1 t) = m_\alpha \cdot \frac{V_d}{2} \cdot \sin(\omega_1 t) \quad (6.a)$$

$$\mathbf{u}_{BN} = (\hat{U}_{BN})_1 \sin\left(\omega_1 t - \frac{2\pi}{3}\right) = m_\alpha \cdot \frac{V_d}{2} \cdot \sin\left(\omega_1 t - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (6.b)$$

$$\mathbf{u}_{CN} = (\hat{U}_{CN})_1 \sin\left(\omega_1 t + \frac{2\pi}{3}\right) = m_\alpha \cdot \frac{V_d}{2} \cdot \sin\left(\omega_1 t + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (6.γ)$$

Με βάση τα παραπάνω η θεμελιώδης συνιστώσα των πολικών τάσεων στην έξοδο του τριφασικού αντιστροφέα προκύπτει ως εξής:

$$\mathbf{u}_{AB} = \mathbf{u}_{AN} - \mathbf{u}_{BN} = \sqrt{3}m_\alpha \cdot \frac{V_d}{2} \cdot \sin\left(\omega_1 t + \frac{\pi}{6}\right) \quad (7.a)$$

$$\mathbf{u}_{BC} = \mathbf{u}_{BN} - \mathbf{u}_{CN} = \sqrt{3}m_\alpha \cdot \frac{V_d}{2} \cdot \sin\left(\omega_1 t - \frac{\pi}{2}\right) \quad (7.b)$$

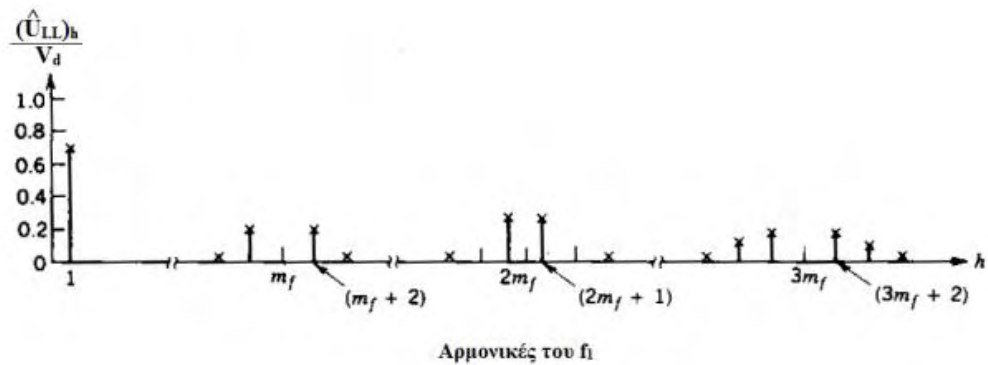
$$\mathbf{u}_{CA} = \mathbf{u}_{CN} - \mathbf{u}_{AN} = \sqrt{3}m_\alpha \cdot \frac{V_d}{2} \cdot \sin\left(\omega_1 t + \frac{5\pi}{6}\right) \quad (7.γ)$$

Επομένως, η rms τιμή της πολικής τάσης εξόδου στην θεμελιώδη συχνότητα μπορεί να γραφεί ως εξής:

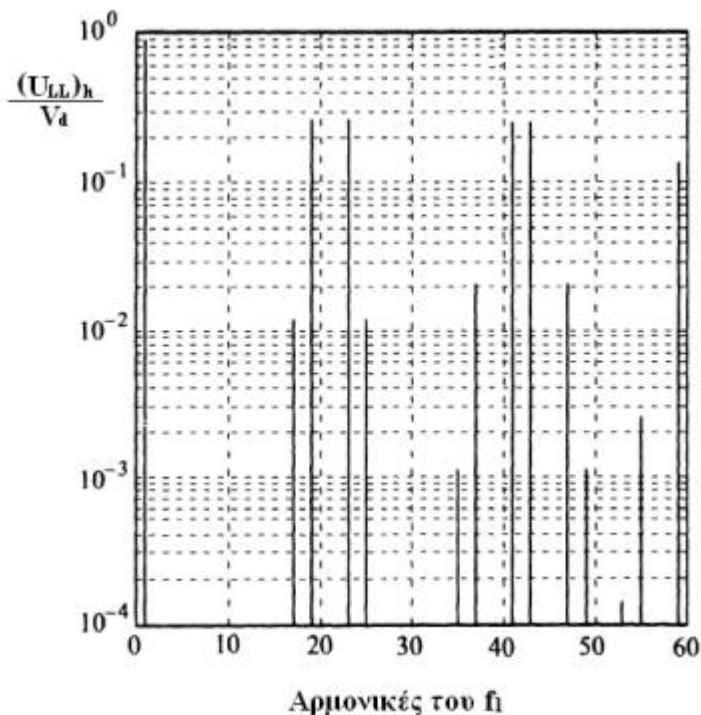
$$U_{LL} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} m_\alpha \cdot V_d = \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} m_\alpha \cdot V_d = 0.612m_\alpha \cdot V_d \quad , \text{για } (m_\alpha \leq 1) \quad (8)$$

11.3.2 Ανάλυση αρμονικού περιεχομένου

Στο **Σχήμα 11.13** φαίνεται το φάσμα συχνοτήτων της πολικής τάσης εξόδου U_{LL} , όπου σχεδιάζονται οι αρμονικές τάσεις, κανονικοποιημένες ως προς V_d , οι οποίες έχουν σημαντικά πλάτη.



Σχήμα 11.13: Αρμονικό περιεχόμενο πολικής τάσης εξόδου τριφασικού αντιστροφέα ($m_a=0.8$, $m_f=15$).



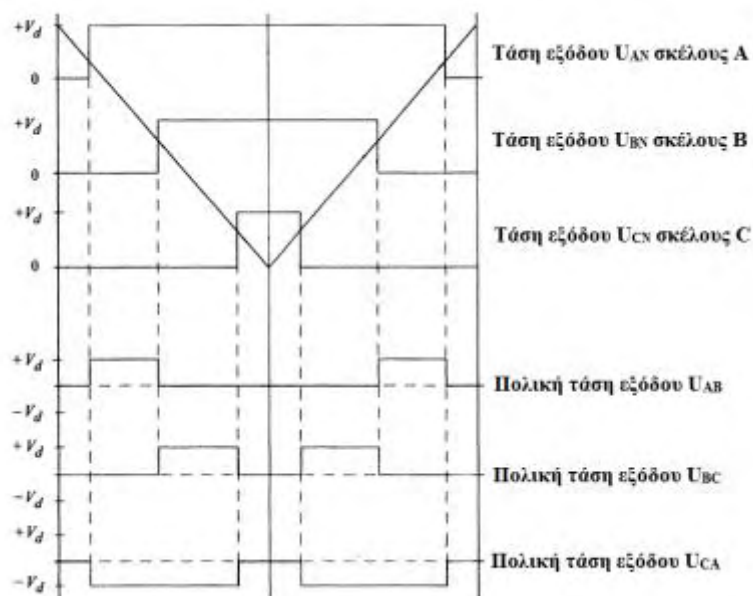
Σχήμα 11.14: Αρμονικό περιεχόμενο πολικής τάσης εξόδου τριφασικού αντιστροφέα ($m_a=0.9$, $m_f=21$).

Στο **Σχήμα 11.14** φαίνεται και πάλι το φάσμα συχνοτήτων της πολικής τάσης εξόδου U_{LL} , για διαφορετικούς συντελεστές διαμόρφωσης, όπου σχεδιάζονται όλες οι αρμονικές τάσεις κανονικοποιημένες ως προς V_d , ανεξαρτήτως πλάτους, σε λογαριθμική κλίμακα.

Από τα παραπάνω σχήματα μπορούμε εύκολα να διακρίνουμε ότι κάποιες από τις κύριες αρμονικές στην έξοδο του αντιστροφέα ημιγέφυρας έχουν εξαλειφθεί από την πολική τάση του τριφασικού αντιστροφέα. Συγκεκριμένα προκύπτει:

- (1) Εξάλειψη της αρμονικής στην συχνότητα του σήματος φορέα, δηλαδή για συντελεστή διαμόρφωσης συχνότητας m_f , καθώς και των αρμονικών στα περιττά πολλαπλάσιά του m_f . Σύμφωνα με την ανάλυση που έγινε για τον αντιστροφέα ημιγέφυρας, στην έξοδο οποιουδήποτε σκέλους του τριφασικού αντιστροφέα εμφανίζονται μόνο οι περιττές αρμονικές ως πλευρικές ζώνες, με κέντρο τον m_f και τα πολλαπλάσιά του, με την προϋπόθεση ότι ο m_f είναι περιττός. Θεωρώντας την αρμονική στο m_f , η διαφορά φάσης αυτής μεταξύ των U_{AN} και U_{BN} είναι $(120 \cdot m_f)^\circ$. Για m_f περιττό και πολλαπλάσιο του 3, αυτή η διαφορά φάσης θα ισοδυναμεί με μηδέν ή πιο συγκεκριμένα με ένα πολλαπλάσιο των 360° (ή αλλιώς 2π). Επειδή $U_{AB} = U_{AN} - U_{BN}$, η διαφορά αυτή έχει ως αποτέλεσμα την εξάλειψη της αρμονικής αυτής, η οποία κατά συνέπεια δεν εμφανίζεται στην πολική τάση εξόδου U_{AB} . Το ίδιο ισχύει για τις αρμονικές στα περιττά πολλαπλάσια του m_f .

Πέρα από την μαθηματική ερμηνεία, με την βοήθεια του **Σχήματος 11.15** μπορούμε διαισθητικά να κατανοήσουμε την εξάλειψη των αρμονικών στο m_f και τα περιττά του πολλαπλάσια. Στο σχήμα αυτό βλέπουμε τα αποτελέσματα της διαμόρφωσης εύρους παλμών στον τριφασικό αντιστροφέα, στην διάρκεια μιας περιόδου μετάβασης. Παρατηρούμε ότι σε κάθε περίοδο του σήματος φορέα, συμβαίνουν δύο εναλλαγές παλμών στην πολική τάση εξόδου. Ξεκάθαρα λοιπόν η διακοπτική συχνότητα της πολικής τάσης εξόδου είναι διπλάσια αυτής του σήματος φορέα, οπότε είναι αναμενόμενη η καταστολή των αρμονικών στα περιττά πολλαπλάσια του m_f .



Σχήμα 11.15 Αποτελέσματα διαμόρφωσης εύρους παλμών στη διάρκεια μιας περιόδου μετάβασης.

- (2) Εξάλειψη των αρμονικών των πλευρικών ζωνών οι οποίες αντιστοιχούν σε πολλαπλάσια του 3. Η εξήγηση ακολουθεί τον προηγούμενο συλλογισμό, δηλαδή οι φασικές γωνίες των αρμονικών αυτών περιστρέφονται με πολλαπλάσια του 2π για όλα τα σκέλη, συνεπώς είναι οι ίδιες για όλα τα σκέλη, οπότε εξαλείφονται και δεν εμφανίζονται στην πολική τάση εξόδου. Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε στα

παραπάνω σχήματα, εμφανίζονται οι αρμονικές $m_f \pm 2$ και $m_f \pm 4$ στην πρώτη ομάδα αρμονικών ενώ στην ίδια ομάδα οι αρμονικές $m_f \pm 6$ δεν υπάρχουν επειδή το 6 είναι πολλαπλάσιο του 3. Παρόμοια στην δεύτερη ομάδα αρμονικών εμφανίζονται οι αρμονικές $2m_f \pm 1$, $2m_f \pm 5$ και $2m_f \pm 7$.

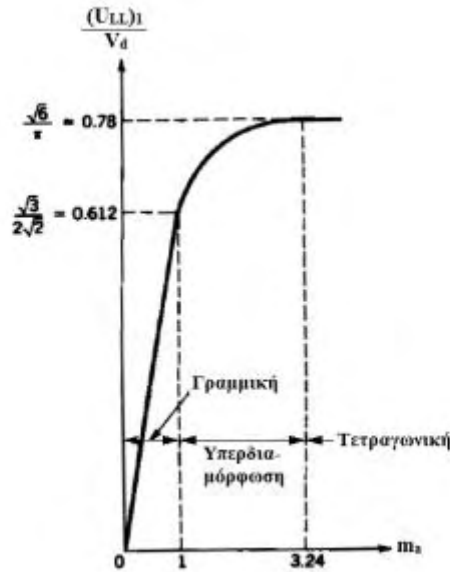
Στον πίνακα του **Σχήματος 11.16** καταγράφονται οι κανονικοποιημένες αρμονικές $\left(\frac{U_{LL}h}{V_d}\right)$ ως συνάρτηση του συντελεστή διαμόρφωσης m_a , όπου $(U_{LL})_h$ είναι οι ενεργές τιμές (rms) των αρμονικών τάσεων. Συγκεκριμένα καταγράφονται οι αρμονικές με σημαντικό πλάτος έως και το τέταρτο πολλαπλάσιο του συντελεστή διαμόρφωσης συχνότητας.

h \ m_a	0.2	0.4	0.6	0.8	1
1	0.122	0.245	0.367	0.490	0.612
$m_f \pm 2$	0.010	0.037	0.080	0.135	0.195
$m_f \pm 4$				0.005	0.011
$2 \cdot m_f \pm 1$	0.116	0.200	0.227	0.192	0.111
$2 \cdot m_f \pm 5$				0.008	0.020
$3 \cdot m_f \pm 2$	0.027	0.085	0.124	0.108	0.038
$3 \cdot m_f \pm 4$		0.007	0.029	0.064	0.096
$4 \cdot m_f \pm 1$	0.100	0.096	0.005	0.064	0.042
$4 \cdot m_f \pm 5$			0.021	0.051	0.073
$4 \cdot m_f \pm 7$				0.010	0.030

Σχήμα 11.16: Ο γενικός πίνακας με τις αρμονικές της U_{LL} για μεγάλο m_f που δίνει τον συντελεστή με τον οποίο πρέπει να πολλαπλασιαστεί το V_d ώστε να προκύψει το πλάτος της αντίστοιχης αρμονικής για τους τριφασικούς αντιστροφείς για m_f αρκετά μεγάλο, περιττό και πολλαπλάσιο του 3.

11.3.3 Υπερδιαμόρφωση σε τριφασικό αντιστροφή

Η εφαρμογή της μεθόδου SPWM με υπερδιαμόρφωση για τον τριφασικό αντιστροφή, έχει παρόμοια χαρακτηριστικά με την εφαρμογή της για τον αντιστροφή ημιγέφυρας. Έτσι και στην περίπτωση του τριφασικού αντιστροφή το πλάτος της τάσης της θεμελιώδους συνιστώσας της πολικής τάσης εξόδου δεν μεταβάλλεται γραμμικά με τον συντελεστή διαμόρφωσης m_a , ενώ για αρκετά μεγάλες τιμές του m_a η κυματομορφή της τάσης εξόδου εκφυλίζεται από κυματομορφή με διαμόρφωση PWM σε τετραγωνική κυματομορφή. Τα παραπάνω φαίνονται στο **Σχήμα 11.17**, όπου σχεδιάζεται η ενεργός τιμή της θεμελιώδους συνιστώσας της πολικής τάσης εξόδου του τριφασικού αντιστροφή $(U_{LL})_1$, κανονικοποιημένη ως προς την DC τάση V_d , ως συνάρτηση του m_a .



Σχήμα 11.17: Μεταβολή της κανονικοποιημένης rms τιμής $(U_{LL})_1$, ως προς V_d , συναρτήσει του m_a ($m_f = 15$).

Από το παραπάνω σχήμα προκύπτει το συμπέρασμα ότι στην περιοχή υπερδιαμόρφωσης ισχύει η σχέση:

$$\frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} \approx 0.612 < (V_{LL})_1 < \frac{\sqrt{6}}{\pi} \approx 0.78 \quad , \text{για } 1 < m_a < 3.24$$

Επιπλέον στην περιοχή υπερδιαμόρφωσης σε σχέση με την γραμμική περιοχή, εμφανίζονται περισσότερες αρμονικές πλευρικών ζωνών με κέντρο τις συχνότητες των αρμονικών του m_f και των πολλαπλασίων του. Ωστόσο, οι κύριες αρμονικές μπορεί να μην έχουν τόσο μεγάλο πλάτος, όσο στην γραμμική περιοχή. Για τον λόγο αυτό, η απώλεια ισχύος στο φορτίο εξαιτίας των αρμονικών συχνοτήτων μπορεί να μην είναι τόσο υψηλή στην περιοχή υπερδιαμόρφωσης όσο υποδηλώνεται από την παρουσία πρόσθετων αρμονικών πλευρικών ζωνών. Ανάλογα με την φύση του φορτίου και τη συχνότητα μετάβασης, οι απώλειες που οφείλονται σ' αυτές τις αρμονικές στην υπερδιαμόρφωση μπορεί να είναι αρκετά μικρότερες από εκείνες της γραμμικής περιοχής.

Κεφάλαιο 12

Οι επιπτώσεις της ελεγχόμενης εισόδου των επαναφορτιζόμενων Ηλεκτρικών Οχημάτων με Ηλεκτρική Ενέργεια από Εξωτερική Πηγή (Plug-In EVs) στα μικρό-δίκτυα

12.1 Εισαγωγή

Τα κρατικά σχέδια και αυτά της βιομηχανίας για την αύξηση της ενεργειακής ασφάλειας, της βιωσιμότητας και της ανθεκτικότητας, απαιτούν μία σταθερή και αξιόπιστη ένταξη των ανανεώσιμων πόρων καθώς και την αποτελεσματική χρήση της δυνατότητας αποθήκευσης της καταναεμημένης ενέργειας που παρέχεται από την τεχνολογία του οχήματος στο πλέγμα (V2G). Τα μικρό-δίκτυα λοιπόν προτάθηκαν ως ένας αποτελεσματικός τρόπος για να ικανοποιήσουν τις ανάγκες αυτές. Η έννοια του μικρό-δικτύου έχει οριστεί ως μια συνάθροιση των φορτίων και των μικρό-πηγών έτσι ώστε να λειτουργεί ως ένα ενιαίο σύστημα, το οποίο θεωρείται ως μία ενιαία ελεγχόμενη μονάδα σε σχέση με το υπόλοιπο πλέγμα του δικτύου. Διάφορα είδη πηγών ισχύος, όπως η αιολική, η ηλιακή, η γεωθερμική, και τα ορυκτά καύσιμα, μπορούν να συμμετέχουν στην παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας, στα μικρό-δίκτυα.

Τα διαλείποντα χαρακτηριστικά των ανανεώσιμων μορφών ενέργειας, καθώς επίσης και οι διαταραχές όπως η απρογραμμάτιστη «απομόνωση» του μικρό-δικτύου από το κύριο πλέγμα, μπορεί να προκαλέσει ζητήματα σταθερότητας, και ως εκ τούτου ο αποτελεσματικός έλεγχος και η διαχείριση των πολλαπλών πηγών ενέργειας και των συσκευών αποθήκευσης καθίσταται κρίσιμος.

Το παρόν κεφάλαιο εξετάζει την ρύθμιση της τάσης και της συχνότητας σε ένα μικρό-δίκτυο, και εστιάζει συγκεκριμένα στο ρόλο της τεχνολογίας V2G στην ρύθμιση του μικρό-δικτύου. Οι μικρές αδράνειες των μικρό-δικτύων κάνουν το πρόβλημα της ρύθμισης ακόμα πιο απαιτητικό, ειδικά κατά τη διάρκεια της «απομόνωσης». Η «απομόνωση» μπορεί να συμβεί λόγω κάποιας προγραμματισμένης διακοπής της λειτουργίας, για παράδειγμα, για λόγους συντήρησης, αλλά και από απρόσμενες βλάβες στο κύριο πλέγμα ή στο μικρό-δίκτυο. Χωρίς το κατάλληλο βραχυπρόθεσμο έλεγχο, σημαντικές διακυμάνσεις στην συχνότητα και την τάση μπορούν να προκληθούν από μια ανισορροπία μεταξύ της προσφοράς και της ζήτησης ενέργειας. Η σταθερή λειτουργία υπό αυτές τις απροσδόκητες αστοχίες είναι ζωτικής σημασίας για εφαρμογές όπου η διατήρηση των κρίσιμων φορτίων είναι σημαντική για την προστασία ή την ασφάλεια, και οι τεχνολογία V2G θα μπορούσε να βοηθήσει στην επίτευξη αυτού του στόχου.

Η εργασία αυτή είναι το σημείο τομής των δύο ταχέως εξελισσόμενων τεχνολογιών: τα V2G και τα μικρό-δίκτυα. Ο αντίκτυπος της ενσωμάτωσης οχημάτων στο πλέγμα, σε μεγάλη κλίμακα, έχει λάβει μεγάλης προσοχής στη βιβλιογραφία. Οι ερευνητές έχουν δείξει ότι η υφιστάμενη ικανότητα παραγωγής εύκολα μπορεί να φιλοξενήσει άμεσα τη διείσδυση των plug-in ηλεκτρικών οχημάτων (PEVs), εάν η φόρτιση των PEVs ελέγχεται προσεκτικά. Το πιο σημαντικό είναι ότι, η V2G τεχνολογία θα μπορούσε να αυξήσει την ενσωμάτωση των ανανεώσιμων μορφών ενέργειας στο δίκτυο, να μειώσει της εκπομπές ρύπων, να βοηθήσει τις επικουρικές υπηρεσίες όπως είναι η ρύθμιση συχνότητας/ τάσης, η στρεφόμενη εφεδρεία και η ζήτηση ισχύος κατά της περιόδους αιχμής (peak power), προσφέροντας με αυτόν τον τρόπο πολλά οικονομικά οφέλη. Για να επιτευχθούν αυτοί οι

στόχοι, οι ερευνητές έχουν προτείνει και αναλύσει διαφορετικά σχήματα ελέγχου. Τεχνικές ελέγχου για άλλα ελέγξιμα φορτία όπως είναι τα θερμοστατικά ελεγχόμενα φορτία ή άλλες πηγές όπως τα φωτοβολταϊκά συστήματα θα μπορούσαν να επηρεάσουν επίσης τα συστήματα V2G.

Αυτές οι προσεγγίσεις ελέγχου των V2G επικεντρώνονται κυρίως στο πρόβλημα χρονοπρογραμματισμού στο πλαίσιο των μεγάλων δικτύων. Τέτοιες βέλτιστες τεχνικές προγραμματισμού συνήθως είναι επικεντρωμένες περισσότερο στην απόδοση με βάση ένα χρονικό ορίζοντα και έτσι είναι πολύ πιθανό να μην τα καταφέρνουν αρκετά γρήγορα στις αιφνίδιες διακοπές, το οποίο είναι ένα θέμα ζωτικής σημασίας για τη ρύθμιση των μικρό-δικτύων. Η σπουδαιότητα της ρύθμισης του μικρό-δικτύου αναγνωρίστηκε από την αρχή και οι ερευνητές πρότειναν διάφορες μεθόδους ελέγχου, όπως τον «έλεγχο στατισμού» (**droop control**) ή τον ολοκληρωτικό έλεγχο των μετατροπέων (**integral control of inverters**), ακόμα κι αν αυτές οι παλαιότερες μέθοδοι δεν λάμβαναν ρητά υπόψη τους την V2G τεχνολογία. Κατά συνέπεια, οι δύο κλάδοι αναπτύχθηκαν αρχικά ανεξάρτητα. Πρόσφατες εργασίες, ωστόσο, άρχισαν να παίρνουν τα PEVs υπόψη και να προτείνουν μεθόδους ελέγχου για την φόρτιση/εκφόρτιση με βάση τα χαρακτηριστικά πτώσης για τον αποκεντρωμένο έλεγχο της συχνότητας και της τάσης. Αυτές οι αποκεντρωμένες τεχνικές ελέγχου έχουν επίσης έρθει σε σύγκριση με τις αντίστοιχες κεντροποιημένες προσεγγίσεις.

Ωστόσο, η σχέση μεταξύ του επιπέδου διείσδυσης των PEVs (π.χ., η αναλογία της ενέργειας από τα PEVs προς την συνολική παραγωγή ενέργειας) και της ρύθμισης της απόδοσης εξακολουθεί να είναι ένα ανοικτό ερώτημα για έρευνα.

Στην εργασία αυτή αναλύουμε την επίδραση του επιπέδου διείσδυσης των PEVs στις επιδόσεις της ρύθμισης σε ένα θεωρητικό στρατιωτικό μικρό-δίκτυο. Το Αμερικάνικο Υπουργείο Άμυνας (DoD- Department of Defense) εξετάζει το ενδεχόμενο των μικρό-δικτύων ως μια λύση για την αντιμετώπιση των αναγκών του, για τη βελτίωση της ενεργειακής ασφάλειας του και την αξιοπιστία των στρατιωτικών βάσεων του. Αυτό το ενδιαφέρον για τα στρατιωτικά μικρό-δίκτυα παρουσιάζεται παραδειγματικά από το πρόγραμμα του SPIDERS (Smart Power Infrastructure Demonstration for Energy Reliability and Security), που έχει ως στόχο να επιδείξει την πρώτη ολοκληρωμένη εγκατάσταση υπό την επίβλεψη του αμερικάνικου υπουργείου άμυνα ενός ασφαλούς μικρό-δικτύου ικανού να «απομονωθεί» από το κύριο πλέγμα. Τέτοιου είδους μικρό-δίκτυα αναμένεται να αυξηθούν την απόδοση και την ανθεκτικότητα ολόκληρου του πλέγματος τόσο κατά την λειτουργία κατά την οποία είναι συνδεδεμένα με αυτό (**grid-connected**) όσο και κατά την λειτουργία «απομόνωσης» τους από αυτό (**islanded operation**), κάνοντας πιο αποτελεσματική την χρήση των ανανεώσιμων και μη, πηγών ενέργειας και την κατανομημένη δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας που παρέχονται από την τεχνολογία V2G.

Προς αυτή την κατεύθυνση, έχουμε δημιουργήσει ένα μοντέλο μικρό-δικτύου που είναι αντιπροσωπευτικό της αρχιτεκτονικής που εξετάστηκε στο πρόγραμμα SPIDERS. Το μοντέλο παραμετροποιείται ώστε να αντικατοπτρίζει τα χαρακτηριστικά του Camp Smith, HI, την εγκατάσταση που απευθύνεται στο πρόγραμμα SPIDERS, και τους μακροπρόθεσμους στόχους του στρατού σχετικά με τη διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και τη μείωση στην κατανάλωση καυσίμου. Το μοντέλο εμπλουτίζεται από αλγόριθμους ισχύος, συχνότητα και αλγόριθμους ελέγχου τάσης που έχουν να κάνουν με τους αντιστροφείς (**inverters**) που συνδέουν τις μικρό-πηγές (**microsources**) με το μικρό-δίκτυο, καθώς επίσης και αλγόριθμους ελέγχου φόρτισης/εκφόρτισης για τα PEVs. Χρησιμοποιώντας αυτό το μοντέλο, μπορούμε να μελετήσουμε τον αντίκτυπο των PEVs στο μικρό-δίκτυο από την σκοπιά της ρύθμισης της τάσης και της συχνότητας.

Το υπόλοιπο του παρόντος κεφαλαίου είναι οργανωμένο ως εξής. Πρώτα αναλύονται θεωρητικά οι έλεγχοι συχνότητας και τάσης στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας

(συμβατικά δίκτυα και έπειτα στα μικροδίκτυα). Δεύτερον δίνεται περιγραφή του μοντέλου του μικροδικτύου που εξετάζεται στην παρούσα μελέτη. Τρίτον περιγράφεται το σενάριο που εξετάζεται, μαζί με τις μετρήσεις απόδοσης και τους στόχους. Τέλος παρουσιάζονται και συζητούνται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης καθώς τα συμπεράσματα.

12.2 Έλεγχος συχνότητας και τάσης στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας γενικά.

Τα ηλεκτρονικά συστήματα είναι ικανά να εργάζονται χωρίς κεντρικό έλεγχο. Αυτό επιτυγχάνεται με τα δύο συστήματα ελέγχου που διαθέτει κάθε στροβιλογεννήτρια, δηλαδή τον έλεγχο πραγματικής ισχύος-συχνότητας **P-f** και τον έλεγχο άεργου ισχύος-τάσης **Q-V**. Οι προηγούμενοι έλεγχοι μαζί με την φυσική ρύθμιση του φορτίου εξαναγκάζουν τις γεννήτριες μίας περιοχής να μοιράζονται το φορτίο. Οι δύο βρόχοι αναλύονται στην συνέχεια.

12.2.1 Ρύθμιση συχνότητας-πραγματικής ισχύος.

Σε ένα σύστημα ισχύος, υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας, οι γεννήτριες του συστήματος συγχρονισμένες μεταξύ τους παράγουν από κοινού την ισχύ η οποία κάθε στιγμή ισούται με την ισχύ που καταναλώνεται από τα φορτία και τις απώλειες των γραμμών μεταφοράς, οι οποίες αντιστοιχούν σε ένα μικρό ποσοστό της συνολικής καταναλισκόμενης ισχύος. Με δεδομένο ότι η ηλεκτρική ενέργεια δεν αποθηκεύεται κάπου στο σύστημα σε ηλεκτρική ή άλλη μορφή, ο ρυθμός της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας θα πρέπει να είναι ίσος με τον ρυθμό κατανάλωσης της σε κάθε χρονική στιγμή. Αν δεν υπάρχει ισορροπία, η διαφορά θα προστίθεται ή θα αφαιρείται από την αποθηκευμένη κινητική ενέργεια των στρεφόμενων δρομέων των μηχανών. Καθώς η κινητική ενέργεια εξαρτάται από την ταχύτητα περιστροφής της γεννήτριας, κάθε διαταραχή στην ισορροπία ισχύος θα μεταφράζεται σε απόκλιση της ταχύτητας περιστροφής και κατ' επέκταση της συχνότητας του συστήματος, η οποία είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την πρώτη. Αν στιγμιαία η παραγόμενη ισχύς από τις γεννήτριες πλεονάζει της ισχύος του φορτίου, η ταχύτητα περιστροφής (και η συχνότητα) θα αυξηθεί καθώς η διαφορά θα μετατραπεί σε κινητική ενέργεια. Ο ρυθμός αύξησης της ταχύτητας (και της συχνότητας) θα εξαρτάται από το ποσό της πλεονάζουσας παραγόμενης ενεργού ισχύος και από την ροπή αδράνειας του συνόλου του περιστρεφόμενου εξοπλισμού. Όλοι οι κινητήρες που κατά το συγκεκριμένο χρονικό διάστημα τροφοδοτούνται από το δίκτυο θα επιταχυνθούν με αποτέλεσμα να συναντήσουν μεγαλύτερες ροπές φορτίου και έτσι να απορροφούν μεγαλύτερη ισχύ από το δίκτυο. Αυτή η αύξηση της απορροφώμενης ισχύος θα ισοσκελίσει μετά από κάποιο χρόνο την μείωση του φορτίου που ήταν η αιτία της διαταραχής και το σύστημα θα ισορροπήσει σε μία νέα συχνότητα με αυξημένη τιμή, αφού όλες οι στρεφόμενες μάζες θα έχουν επιταχυνθεί σε μία τελική ταχύτητα στην οποία όση ισχύς παράγεται, απορροφάται. Το αντίθετο, δηλαδή επιβράδυνση και ισορροπία σε χαμηλότερη συχνότητα, θα συμβεί σε περίπτωση που η παραγόμενη ισχύς υπολείπεται της ισχύος φορτίου.

Η διατήρηση της συχνότητας του συστήματος εντός στενών ορίων σε σχέση με την ονομαστική τιμή είναι επιβεβλημένη για την σωστή λειτουργία των φορτίων, των μονάδων παραγωγής και γενικά για την διευκόλυνση στον έλεγχο της καλής λειτουργίας του

συστήματος ισχύος. Συνήθως τα όρια αυτά είναι για τα σημερινά συστήματα +0.05Hz. Καθώς το φορτίο του συστήματος συνεχώς αλλάζει, είναι αναγκαίο η ισχύς που παράγεται συνεχώς να ρυθμίζεται έτσι ώστε κάθε διαφορά μεταξύ παραγόμενης ισχύος και καταναλισκόμενης ισχύος συνεχώς να μηδενίζεται. Η ρύθμιση ανάγεται έτσι σε παρακολούθηση του φορτίου από τις γεννήτριες με συνεχή προσαρμογή της παραγόμενης ισχύος όταν οι συνθήκες αλλάζουν. Εφόσον η συχνότητα αποτελεί τον δείκτη της ισορροπίας ενεργού ισχύος στο σύστημα, χρησιμοποιείται σαν το σήμα ελέγχου (με ελάχιστη τιμή συνήθως $\pm 0.5\text{Hz}$) στον αυτόματο έλεγχο για να προκαλέσει την αυτόματη κατάλληλη ρύθμιση της παροχής της μηχανικής ισχύος.

Ο βασικός ρόλος της αυτόματης ρύθμισης φορτίου-συχνότητας είναι γενικά η εξισορρόπηση παραγωγής και φορτίου και επιτελείται με τον ρυθμιστή στροφών των μονάδων παραγωγής. Η πρωτεύουσα ρύθμιση (**primary frequency control**) επαναφέρει αρχικά την συχνότητα κοντά στην ονομαστική τιμή. Με την επίδραση του στατισμού (droop) του ρυθμιστή στροφών τους, οι διάφορες γεννήτριες παραλαμβάνουν την κάθε μεταβολή φορτίου κατά αναλογία με την δυναμικότητα τους και την θέση τους στο σύστημα. Η ταχύτητα της αντίδρασης περιορίζεται από τις σταθερές χρόνου των ίδιων των ρυθμιστών στροφών, των στροβίλων και του συστήματος ισχύος. Ανάλογα με τον τύπο του στροβίλου η ταχύτητα απόκρισης κυμαίνεται μεταξύ 2 έως και 20 δευτερόλεπτα. Τυπική τιμή χρησιμοποιούμενου στατισμού συχνότητας είναι το 4% για μεταβολή της ισχύος 1p.u. (η από κάτω Σχέση). Για αυτήν την στροβιλογεννήτρια ισχύει συνεπώς:

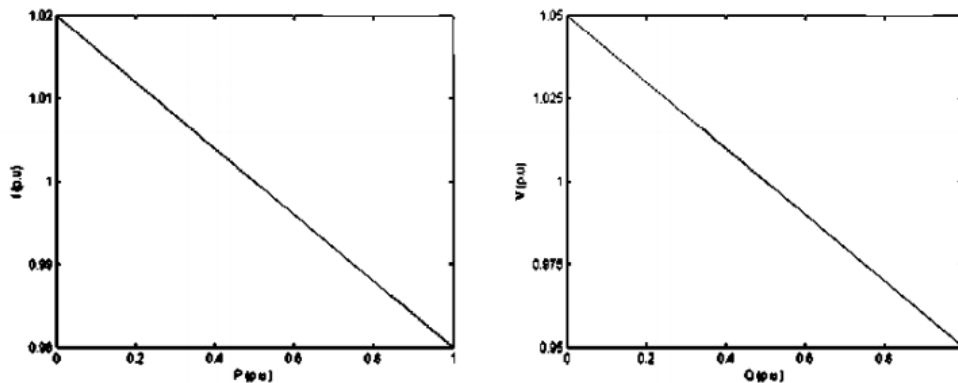
$$R = \frac{0.04 \cdot 50}{1} = 2 \text{ Hz/p.u. MW}$$

Έτσι για μία μεταβολή φορτίου 0.05 puMW θα προκληθεί μία τελική μεταβολή συχνότητας: $2 \times 0.05 = 0.1\text{Hz}$.

Η δευτερεύουσα ρύθμιση συχνότητας (**secondary frequency control**) αναλαμβάνει την ακριβή ρύθμιση της συχνότητας και με ολοκληρωτικό έλεγχο την επαναφέρει στην ονομαστική τιμή εξαλείφοντας τυχόν στατικό σφάλμα από την πρωτεύουσα ρύθμιση. Αυτός ο βρόγχος ελέγχου είναι πιο αργός από την πρωτεύουσα ρύθμιση και λαμβάνει χώρα όταν η πρωτεύουσα ρύθμιση έχει τελειώσει. Ο χρόνος αποκατάστασης μπορεί να είναι της τάξης του ενός λεπτού. Οι δύο αυτοί βρόγχοι ελέγχου έχουν σαν βάση για τον έλεγχο το σφάλμα της συχνότητας, το οποίο μπορεί να μετρηθεί τοπικά σε κάθε σταθμό παραγωγής.

Ένα μεγάλο διασυνδεδεμένο σύστημα συνήθως περιλαμβάνει διάφορες περιοχές ελέγχου. Ως περιοχή ελέγχου νοείται κάθε τμήμα του συστήματος στο οποίο όλες οι γεννήτριες που υπάρχουν υφίστανται τις ίδιες μεταβολές συχνότητας Δf , δηλαδή οι γεννήτριες ταλαντεύονται σαν ένα ενιαίο σύνολο το οποίο έχει αυτοδυναμία από την άποψη της κάλυψης του φορτίου του. Σε ένα τέτοιο σύστημα, ο δευτερεύων έλεγχος αναλαμβάνει επίσης να επαναφέρει την ροή ενεργού ισχύος διαμέσου των γραμμών διασύνδεσης των περιοχών ελέγχου στις συμφωνημένες τιμές, ύστερα από κάθε μεταβολή φορτίου. Αυτό γιατί κατά την πρωτεύουσα ρύθμιση, όταν συμβαίνει μεταβολή στο φορτίο μίας περιοχής ελέγχου, συμμετέχουν με τον ρυθμιστή στροφών τους και οι μονάδες των γειτονικών περιοχών. Άλλωστε αυτό είναι και το πλεονέκτημα της διασύνδεσης διαφορετικών περιοχών μεταξύ τους, που είναι η υποστήριξη της κάθε περιοχής από τις γειτονικές της κυρίως κατά τις περιόδους διαταραχών και μεταβολών αλλά και κατά την κανονική λειτουργία. Μια παραμένουσα διαφορά στην ισχύ διαμέσου των γραμμών διασύνδεσης θα σήμαινε ότι μία περιοχή θα έπρεπε να υποστηρίξει την γειτονική της με ισχύ μεγαλύτερη

από την συμφωνημένη επί μονίμου βάσεως. Η δευτερεύουσα ρύθμιση με ολοκληρωτικό έλεγχο εξαλείφει την όποια παραμένουσα διαφορά.



Σχήμα 12.1: Τυπικές χαρακτηριστικές ενεργού ισχύος-συχνότητας και άεργου ισχύος-τάσης σύγχρονων μηχανών διασυνδεδεμένου συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.

Τέλος, η οικονομική κατανομή του φορτίου μεταξύ των γεννητριών θα μπορούσε να θεωρηθεί ως μία τριτεύουσα ρύθμιση συχνότητας (**tertiary frequency control**). Κάποιο κέντρο ελέγχου στέλνει εντολές στις μονάδες μέσω διαύλων επικοινωνίας και η κατανομή του φορτίου ανάμεσα στις μονάδες βελτιστοποιείται. Το κέντρο ελέγχου λαμβάνει περιοδικά (κάθε πέντε λεπτά) τις παραγωγές των μονάδων και αν αυτές διαφέρουν από τις υπολογισθείσες ως βέλτιστες, εντολοδοτεί τις μονάδες να προσαρμόσουν την παραγωγή τους ανάλογα. Η βελτιστοποίηση που γίνεται από τον κεντρικό έλεγχο λαμβάνει υπόψη της πολλά κριτήρια που μπορεί να έχουν οικονομικό ή τεχνικό χαρακτήρα.

12.2.2 Ρύθμιση τάσης-άεργου ισχύος.

Το δεύτερο σημαντικό μέγεθος σε ένα σύστημα ισχύος που χρησιμοποιείται σαν σήμα ελέγχου είναι η τάση. Η ανάγκη ελέγχου της τάσης προκύπτει από τους παρακάτω λόγους:

- Λόγω της αύξησης της τιμής των καυσίμων είναι ανάγκη οι απώλειες του συστήματος να ελαχιστοποιούνται.
- Λόγω της αύξησης της μεταφοράς της ηλεκτρικής ισχύος μέσω των γραμμών μεταφοράς, απαιτεί έλεγχος της άεργου ισχύος για αποκατάσταση του ορίου μεταβατικής ευστάθειας.
- Λόγω της αύξησης της χρήσης ηλεκτρονικών συσκευών υπάρχει απαίτηση για βελτιωμένη ποιότητα παροχής ηλεκτρικής ενέργειας.
- Λόγω της αυξανόμενης χρήσης συνεχούς ρεύματος για μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας δημιουργήθηκε η απαίτηση ελέγχου της άεργου ισχύος στους μετατροπείς για σταθεροποίηση της τάσης και διευκόλυνση της διαδικασίας μεταγωγής.
- Ο έλεγχος άεργου ισχύος συνδέεται με τις αρμονικές που παράγονται από κάποια φορτία αλλά και τους ελεγχόμενους στατικούς αντισταθμιστές.

Η διαφορά σε σχέση με το σήμα ελέγχου της συχνότητας είναι πως η συχνότητα είναι ενιαία σε όλο το σύστημα ενώ η τάση είναι συνδεδεμένη με το δίκτυο, την ανάπτυξη του και τα στοιχεία που το απαρτίζουν. Η τιμή της, έτσι εξαρτάται άμεσα από την θέση στο δίκτυο και η ρύθμιση της μπορεί να γίνει μόνο τοπικά σε ένα ζυγό ή μία περιοχή του δικτύου. Οποιαδήποτε συσκευή συνδέεται στο σύστημα ισχύος είναι σχεδιασμένη να

λειτουργεί σε συγκεκριμένη ονομαστική τιμή τάσης και απόκλιση από την τιμή αυτή έχει ως συνέπεια η απόδοση της να μην είναι η αναμενόμενη και ο χρόνος ζωής της να μειώνεται. Αυτό δημιουργεί την ανάγκη ελέγχου της τάσης, αλλά η ρύθμιση της δεν χρειάζεται να γίνεται εντός πολύ στενών ορίων όπως συμβαίνει με την συχνότητα. Δηλαδή, ενώ η συχνότητα ρυθμίζεται με ακρίβεια $\pm 0.1\%$, η ρύθμιση της τάσης γίνεται με ακρίβεια $\pm 1\%$.

Επίσης η εξάρτηση που παρουσιάζουν τα φορτία από την τάση είναι μεγαλύτερη από την εξάρτηση από την συχνότητα, όμως αποκλίσεις της τάσης από τις ονομαστικές τιμές σε διάφορες θέσεις του δικτύου δεν είναι τόσο κρίσιμες όσο οι αποκλίσεις συχνότητας στην λειτουργία του όλου συστήματος. Γι' αυτό όπως ήδη αναφέρθηκε, η ανοχή στην ρύθμιση της τάσης σε ένα ζυγό του δικτύου είναι μεγάλη σε σχέση με την ανοχή στην απόκλιση συχνότητας. Επίσης, ενώ η συχνότητα επαναφέρεται στην ονομαστική τιμή της με την δευτερεύουσα ρύθμιση κάτι ανάλογο δεν εφαρμόζεται στην τάση αφού σφάλμα τάσης στην μόνιμη κατάσταση είναι αποδεκτό και αυτό εξαλείφει την ανάγκη για ολοκληρωτικό έλεγχο.

Επειδή το δίκτυο σχηματίζεται κυρίως από επαγωγικές και χωρητικές αντιδράσεις οι οποίες ανάλογα με τις επικρατούσες συνθήκες φόρτισης εναλλάσσονται στον πρωτεύοντα ρόλο (επαγωγικός ή χωρητικός συντελεστής), η τάση σε ένα ζυγό εξαρτάται από την έγχυση άεργου ισχύος στον ζυγό αυτό. Η ρύθμιση της τάσης, επιτυγχάνεται λοιπόν με την παραγωγή ή απορρόφηση άεργου ισχύος σε επιλεγμένα σημεία του δικτύου, χρησιμοποιώντας τις διεγέρσεις των σύγχρονων μηχανών, πυκνωτές ή πηνία, ηλεκτρονικούς αντισταθμιστές άεργου ισχύος και Μ/Σ με δυνατότητα αλλαγής τάσης (tap changer).

Συγκεκριμένα για τις γεννήτριες, ο αυτόματος ρυθμιστής τάσης μέσω του κέρδους του παρέχει την δυνατότητα επιμερισμού της άεργης ισχύος που θα πρέπει να παραχθεί ύστερα από μία μεταβολή της τάσης σε ένα ζυγό στην περιοχή των γεννητριών αυτών. Τυπική τιμή χρησιμοποιούμενης χαρακτηριστικής άεργου ισχύος-τάσης ακροδεκτών είναι 10% μεταβολή τάσης για 1 p.u. άεργου ισχύος (**Σχήμα 12.1**). Η παραγόμενη όμως ισχύς θα είναι μεγαλύτερη στις γεννήτριες που είναι κοντύτερα δικτυακά στο σημείο που μεταβλήθηκε η τάση. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να μην επιμερίζεται η άεργος ισχύς ανάλογα με την δυναμικότητα των γεννητριών. Ακόμη, επειδή η ελεγχόμενη τάση είναι αυτή των ακροδεκτών ή κάποιου πλησιέστερου σημείου του δικτύου, η τάση σε κάποιο ζυγό απομακρυσμένο από τις γεννήτριες μπορεί να παραμείνει σε μη αποδεκτά επίπεδα. Για τους λόγους αυτούς, υπάρχει σε κάθε γεννήτρια η δυνατότητα να μετατοπίζεται η χαρακτηριστική άεργου ισχύος-τάσης προσαρμόζοντας την τάση αναφοράς με δευτερεύοντα έλεγχο. Μπορεί λοιπόν να γίνει αναδιανομή της άεργου ισχύος ή να διατηρείται η παραγωγή άεργου ισχύος κάποιας γεννήτριας σε σταθερή τιμή. Για να αποφευχθεί να στέλνονται οι τιμές αναφοράς τάσης από το κέντρο ελέγχου ως αποτέλεσμα βέλτιστης ροής φορτίου, το δίκτυο χωρίζεται σε ζώνες που καθεμία περιλαμβάνει ζυγούς των οποίων η τάση μεταβάλλεται ομοιόμορφα. Σε κάθε ζώνη επιλέγεται ένα σημείο ο έλεγχος του οποίου ανατίθεται σε συγκεκριμένη γεννήτρια. Στόχος είναι να διατηρείται η τάση του επιλεγέντος σημείου στη επιθυμητή τιμή και η παραγωγή άεργου ισχύος κάθε γεννήτριας να είναι κατά αναλογία με την δυναμικότητα της.

Μεταξύ των διαύλων ελέγχου, δηλαδή, ενεργού ισχύος-συχνότητας και άεργου ισχύος-τάσης υπάρχει αμοιβαία εξάρτηση, η οποία είναι πάντα παρούσα σε μεγαλύτερο ή μικρότερο βαθμό ανάλογα με τις επικρατούσες συνθήκες στο σύστημα. Κατά την διάρκεια μεγάλων μεταβολών παρατηρείται σημαντική σύζευξη μεταξύ των δύο βρόγχων για δύο κυρίως λόγους:

- Καθώς μεταβάλλεται το μέτρο της τάσης του ζυγού, μεταβάλλεται και το πραγματικό φορτίου του ζυγού, λόγω της εξάρτησης του από την τάση.
- Καθώς μεταβάλλεται το μέτρο της τάσης του ζυγού, μεταβάλλονται και οι συντελεστές χρονισμού των γραμμών που συνδέονται στο ζυγό και άρα μεταβάλλεται και η πραγματική ισχύς που μεταφέρουν.

Αντίθετα μικρή μεταβολή της τάσης σε ένα σημείο του δικτύου προκαλεί μικρή μεταβολή της παραγόμενης ή αναρροφώμενης ισχύος και η μεταβολή της συχνότητας-γωνίας επιδρά ελάχιστα και στην άεργο ισχύ. Η αλληλεξάρτηση παραμένει σε αυτήν την περίπτωση σε χαμηλά επίπεδα χάρη σε δύο λόγους:

- Οι διαφορές γωνιών μεταξύ των ζυγών διατηρούνται σε μικρές τιμές οπότε η επίδραση της γωνίας στην άεργη ισχύ παραμένει ασθενής.
- Η αυτόματη ρύθμιση τάσης είναι πολύ πιο ταχύτερη από την αυτόματη ρύθμιση στροφών λόγω των μηχανικών σταθερών αδράνειας που παρουσιάζει ο βρόγχος P-f. Έτσι μπορούμε να υποθέσουμε ότι η μεταβατική περίοδος του βρόγχου Q-V έχει ουσιαστικά περάσει πριν αρχίσει την δράση του βρόγχου P-f.

12.2.3 Αντιστοίχιση ελέγχων συμβατικού ΣΗΕ με τους ελέγχους μικροδικτύου.

Η ευσταθής αυτόνομη λειτουργία του μικροδικτύου απαιτεί κατάλληλο έλεγχο των ροών ενεργού και άεργου ισχύος και κατά συνέπεια διατήρηση των διακυμάνσεων της συχνότητας και της τάσης εντός επιτρεπτών ορίων όπως αυτά ορίστηκαν στο προηγούμενο υποκεφάλαιο. Θα πρέπει να εξασφαλιστεί ο επιθυμητός επιμερισμός του φορτίου μεταξύ των μικροπηγών κάθε φορά που τα διάφορα φορτία συνδέονται και αποσυνδέονται από το δίκτυο. Η ίδια φιλοσοφία ελέγχου που ακολουθείται για το συμβατικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, θα ήταν επιθυμητό να μεταφερθεί στην λειτουργία του μικροδικτύου.

Όπως περιγράφηκε πιο πάνω, ο έλεγχος συχνότητας επιτρέπει σε κάθε γεννήτρια στο σύστημα να μοιράζεται το φορτίο ενεργού ισχύος με τις υπόλοιπες με βάση την δική της χαρακτηριστική ενεργού ισχύος-συχνότητας (στατισμοσ-droop). Όμοια, για την περίπτωση του μικροδικτύου η συχνότητα χρησιμοποιείται ως το μέσο επικοινωνίας μεταξύ των μονάδων, οι οποίες δεν χρειάζονται άλλου είδους διασύνδεση επικοινωνίας σε πρώτο επίπεδο μεταξύ τους παρά μόνο το ίδιο το δίκτυο. Οι απαραίτητες μετρήσεις γίνονται τοπικά και ο έλεγχος έχει τοπικό χαρακτήρα (peer-to-peer). Μόνο για τον τριτεύοντα έλεγχο, ο οποίος εξασφαλίζει απλώς την βελτιστοποίηση της παραγωγής των μονάδων και δεν σχετίζεται με την παρακολούθηση της χρονικής μεταβολής του φορτίου από αυτές, χρειάζεται η εγκατάσταση γραμμών επικοινωνίας μεταξύ των μονάδων και του κέντρου ελέγχου του συστήματος, χωρίς όμως ιδιαίτερες απαιτήσεις ταχύτητας. Ο έλεγχος αυτός για το μικροδίκτυο αποτελεί τον εποπτικό έλεγχο του κεντρικού ελεγκτή.

Όσον αφορά τον έλεγχο της τάσης θα ήταν επιθυμητό να γίνεται κυρίως από τις ίδιες τις μικροπηγές παραγωγής όπως στην περίπτωση μας μέσω των PEVs, με την χρησιμοποίηση τεχνικών αντιστοιχών με αυτές που περιγράφηκαν για τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας με σύγχρονες μηχανές. Θα πρέπει να εξασφαλιστεί η στήριξη της τάσης δεδομένου ότι τα φορτία στο δίκτυο χαμηλής τάσης ανήκουν σε τελικούς καταναλωτές.

12.3 Μοντέλο μικροδικτύου

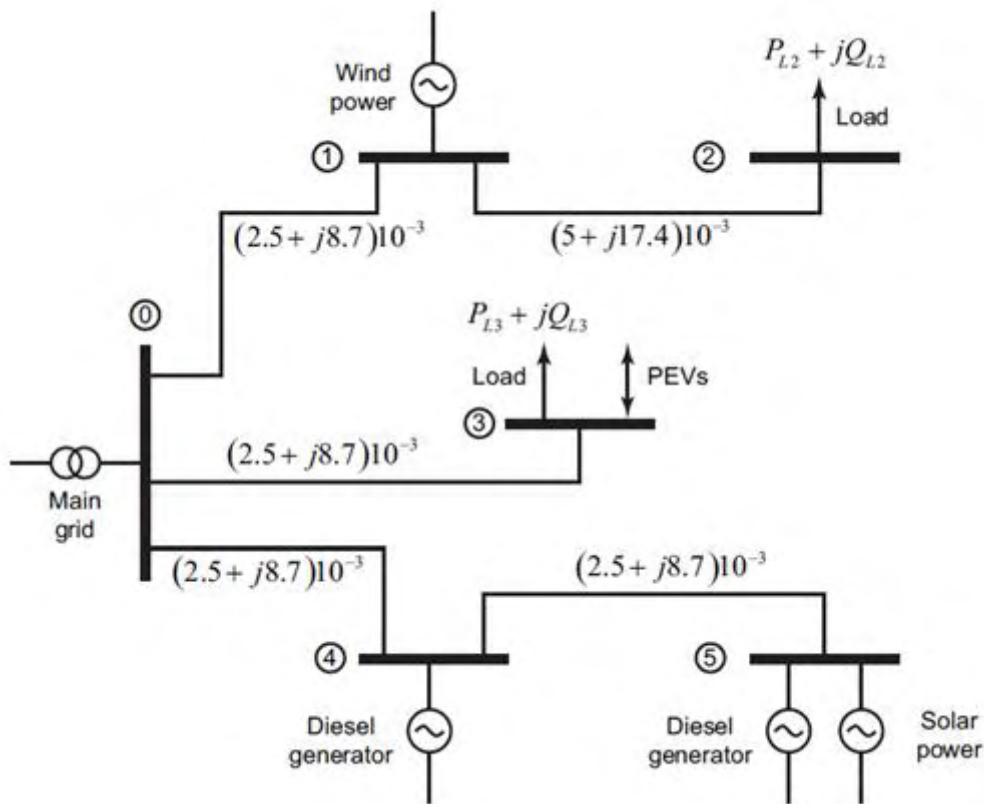
Το μικροδίκτυο που εξετάζεται στο παρόν έγγραφο είναι υιοθετημένο από το επιχειρησιακό πρόγραμμα SPIDERS. Μια απλοποιημένη διάταξη του, φαίνεται στο **Σχήμα 12.2**, αποτελείται από τρεις τροφοδότες, με δύο ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, δύο συμβατικές μικροπηγές (microsources) και δύο φορτία που θεωρούνται ότι είναι κρίσιμα και για αυτό το λόγο θα πρέπει να τροφοδοτούνται με ρεύμα ανά πάσα στιγμή. Επιπλέον, μια συλλογή/στόλος από PEVs θεωρούνται ρητώς πως έχουν την ικανότητα να ενεργούν ως φορτίο και ως πηγή ενέργειας.

Πολλές μορφές καταναμημένης ηλεκτροπαραγωγής συνδέονται στο ac κορμό του πλέγματος μέσω αντιστροφών (inverters). Για τους σκοπούς αυτού του παραδείγματος, υποθέτουμε ότι οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και τα PEVs είναι συνδεδεμένα με το δίκτυο μέσω αντιστροφών (inverters), και ως εκ τούτου, οι ιδιότητες τους παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον.

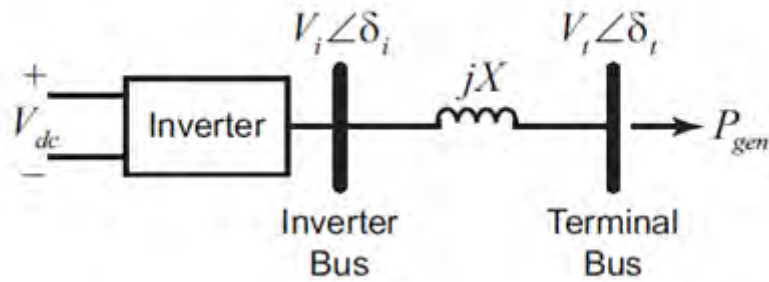
Ένα μοντέλο για τη διασύνδεση του μετατροπέα στο πλέγμα απεικονίζεται στο **Σχήμα 12.3**. Οι πρωταρχικοί στόχοι ενός αντιστροφέα είναι να ρυθμίσει το μέγεθος της τάσης V_t στο τερματικό ζυγό και την ενεργό ισχύ που παραδίδεται στο πλέγμα P_{gen} . Αυτό επιτυγχάνεται με τον έλεγχο του δείκτη διαμόρφωσης m του αντιστροφέα, ο οποίος ελέγχει αποτελεσματικά το μέγεθος της τάσης του αντιστροφέα V_i μέσω της σχέσης

$$V_i = m \frac{V_{dc}}{V_{base}} \quad (1)$$

και η γωνία πυροδότησης του αντιστροφέα, που καθορίζει ουσιαστικά τη γωνία φάσης δ_i .



Σχήμα 12.2: Παράδειγμα του μικροδικτύου SPIDERS.



Σχήμα 12.3: Το μοντέλο διεπαφής του αντιστροφέα με το δίκτυο.

Στην παρούσα διπλωματική εξετάζεται ο έλεγχος των αντιστροφέων που βασίζεται στην χρήση ενός βρόχου κλειδώματος φάσης (**PLL**) για να διασφαλίσει τον συγχρονισμό στη ac τάση. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιείται η στρατηγική ελέγχου του μετατροπέα που πρότειναν ο Hiskens και ο Fleming. Τα χαρακτηριστικά αυτού του ελεγκτή δίνονται από το ακόλουθο σύνολο των διαφορικών-αλγεβρικών εξισώσεων:

$$\begin{aligned}
 \dot{m} &= K_1(V_{set} - V_t) \\
 \dot{\theta} &= K_2(P_s - P_{gen}) \\
 \dot{x} &= K_3(\delta_t - \delta_p) \\
 \delta_p &= \omega_p \\
 0 &= V_i - \frac{mV_{dc}}{V_{base}} \\
 0 &= \theta - (\delta_i - \delta_p) \\
 0 &= x - (\omega_p - K_4\theta) \\
 0 &= P_{gen} - \frac{V_i V_t}{X} \cdot \sin(\delta_i - \delta_t)
 \end{aligned} \tag{2}$$

Οι δύο πρώτες εξισώσεις στην (2) αντιστοιχούν στον ολοκληρωτικό έλεγχο του V_t και του P_{gen} , όπου V_{set} και P_{set} είναι συγκεκριμένες τιμές για το V_t και P_{gen} , αντίστοιχα. Η τρίτη και τέταρτη είναι εξισώσεις που περιγράφουν τα χαρακτηριστικά του PLL, οι οποίες περιλαμβάνουν επίσης ολοκληρωτικό έλεγχο, αλλά επίσης και απόσβεση λόγω του όρου $K_4\theta$ στον ορισμό της μεταβλητής x . Η μεταβλητή δ_p αντιπροσωπεύει την γωνία φάσης του PLL, και την παράγωγο του χρόνου, το ω_p μας παρέχει μία εκτίμηση της απόκλισης από την πραγματική συχνότητα του συστήματος από την ονομαστική. Η έκτη και η έβδομη από τις εξισώσεις καθορίζουν τις μεταβλητές θ και x , αντίστοιχα. Τέλος, η τελευταία εξίσωση στην (2) δίνει την ενεργό ισχύ που παραδίδεται στο δίκτυο.

Σε αυτή τη μελέτη, η (2) χρησιμοποιείται ως μοντέλο σε όλους τους αντιστροφέις, δηλαδή, και για τα δύο, τις ανανεώσιμες πηγές και τα PEVs. Εκτός από την (2), οι εξισώσεις για τις ανανεώσιμες πηγές έχουν εμπλουτιστεί με το ακόλουθο εξωγενή στοιχείο εισόδου για την ονομαστική τιμή της ισχύος.

$$P_{set} = P_{ren}(t) \quad (3)$$

όπου P_{ren} είναι η διαθέσιμη ισχύς από την ανανεώσιμη πηγή τη χρονική στιγμή t . Χρησιμοποιώντας όλη τη διαθέσιμη ισχύ από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας εξασφαλίζεται η μέγιστη αξιοποίηση τους. Η παραγωγή από ανανεώσιμες πηγές αναμένεται να αλλάζει ανάλογα και σύμφωνα με το

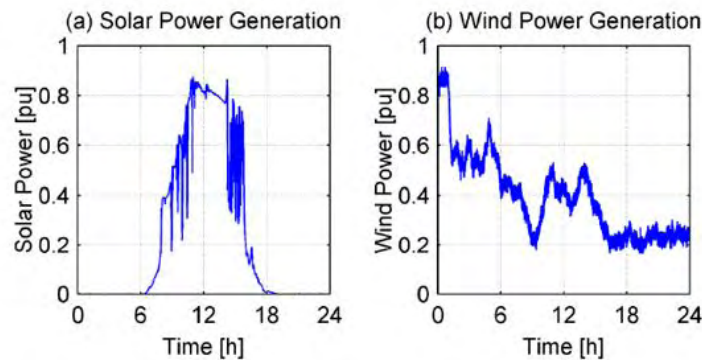
$$P_{ren}(t) = \begin{cases} P_{wind}^0 - \alpha_{wind}t, & \text{για αιολική ισχύ} \\ P_{solar}^0 - \alpha_{solar}t, & \text{για ηλιακή ισχύ} \end{cases} \quad (4)$$

Οι κλίσεις α_{wind} και α_{solar} είναι υπολογισμένες με βάση τη μέγιστη πτώση που παρατηρήθηκε στα δεδομένα όπως φαίνεται στο **Σχήμα 12.4**.

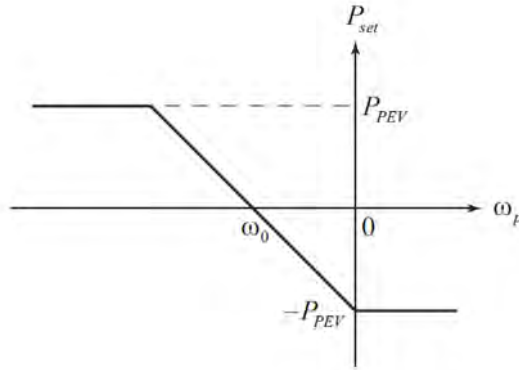
Για τα PEVs, η (2) εμπλουτίζεται με την ακόλουθη εξίσωση ονομαστικής τιμής της ισχύος:

$$P_{set} = \begin{cases} -P_{PEV}, & \omega_p \geq 0 \\ \frac{P_{PEV}}{\omega_0} \cdot (\omega_p - \omega_0), & 2\omega_0 < \omega_p < 0 \\ P_{PEV}, & \omega_p \leq 2\omega_0 \end{cases} \quad (5)$$

που έχει μια χαρακτηριστική πτώση με κορεσμό. Η P_{PEV} είναι η μέγιστη συνολική ισχύς από τα PEV, αντιπροσωπεύοντας το επίπεδο διεύθυνσης των PEVs, και μια αρνητική τιμή δηλώνει την φόρτιση, όπου το ω_0 είναι μία αρνητική παράμετρος ελέγχου που καθορίζει την κρίσιμη συχνότητα με την οποία τα PEVs πρέπει να στραφούν από τη λειτουργία φόρτισης στην λειτουργία εκ φόρτισης ή το αντίστροφο. Η εξίσωση ελέγχου πτώσης παρουσιάζεται στο **Σχήμα 12.5**.



Σχήμα 12.4: Παράδειγμα ενός προφίλ από πηγές ανανεώσιμης ενέργειας στην περιοχή της Χαβάης.



Σχήμα 12.5: Διάγραμμα ελέγχου στατισμού (droop control) για το PEV.

Τέλος, οι γεννήτριες ντιζελ υποτίθεται ότι διαθέτουν μια ενσωματωμένη ρύθμιση της τερματικής τάσης μέσω του ελέγχου της αέργου ισχύος ως εξής:

$$Q = K_Q(V_2 - V_1) \quad (6)$$

Η ενεργός ισχύς από τις γεννήτριες ντιζελ καθορίζονται από τα επιθυμητά επίπεδα ηλεκτροπαραγωγής και δεν είναι αντικείμενο ενδιαφέροντος ο έλεγχος στο πλαίσιο της χρονικής κλίμακας.

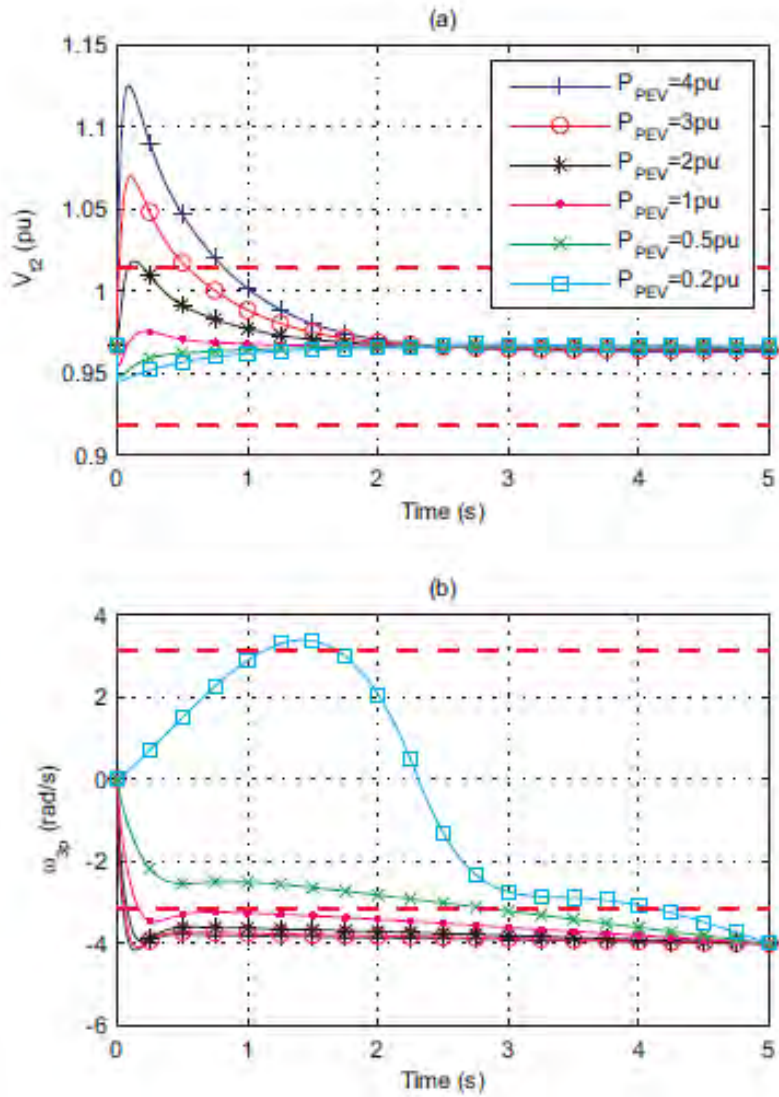
12.4 Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης

Το μοντέλο το μικροδικτύου που περιγράφεται παραπάνω προσομοιώνεται για ένα σενάριο όπου υπάρχει «απομόνωση» του από το κύριο πλέγμα. Αρχικά, το σύστημα υποθέτουμε ότι βρίσκεται σε σταθερή κατάσταση, με όλα τα οχήματα φορτισμένα με τη μέγιστη ισχύ. Την χρονική στιγμή $t_0 = 0$, το μικροδίκτυο αποσυνδέεται από το κεντρικό δίκτυο και τα προκύπτοντα μεταβατικά φαινόμενα προσομοιώνονται για 5 δευτερόλεπτα. Οι παράμετροι του μοντέλου συνοψίζονται στον **Πίνακα 12.1**. Οι παράμετροι αυτές επιλέχθηκαν να αντικατοπτρίζουν τα χαρακτηριστικά του Camp Smith, HI, τη στοχευμένη εγκατάσταση του προγράμματος SPIDERS, και τους μακροπρόθεσμους στόχους του στρατού σχετικά με τη διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (διείσδυση 25% μέχρι το 2025) και μείωση στην κατανάλωση καυσίμου (μείωση κατά 20% μέχρι το 2015). Το επίπεδο διείσδυσης των PEVs το οποίο συμβολίζεται P_{PEV} και η παράμετρος ελέγχου της συχνότητας των PEVs η οποία συμβολίζεται με ω_0 ποικίλει για να διερευνηθούν οι επιπτώσεις τους σχετικά με την απόδοση.

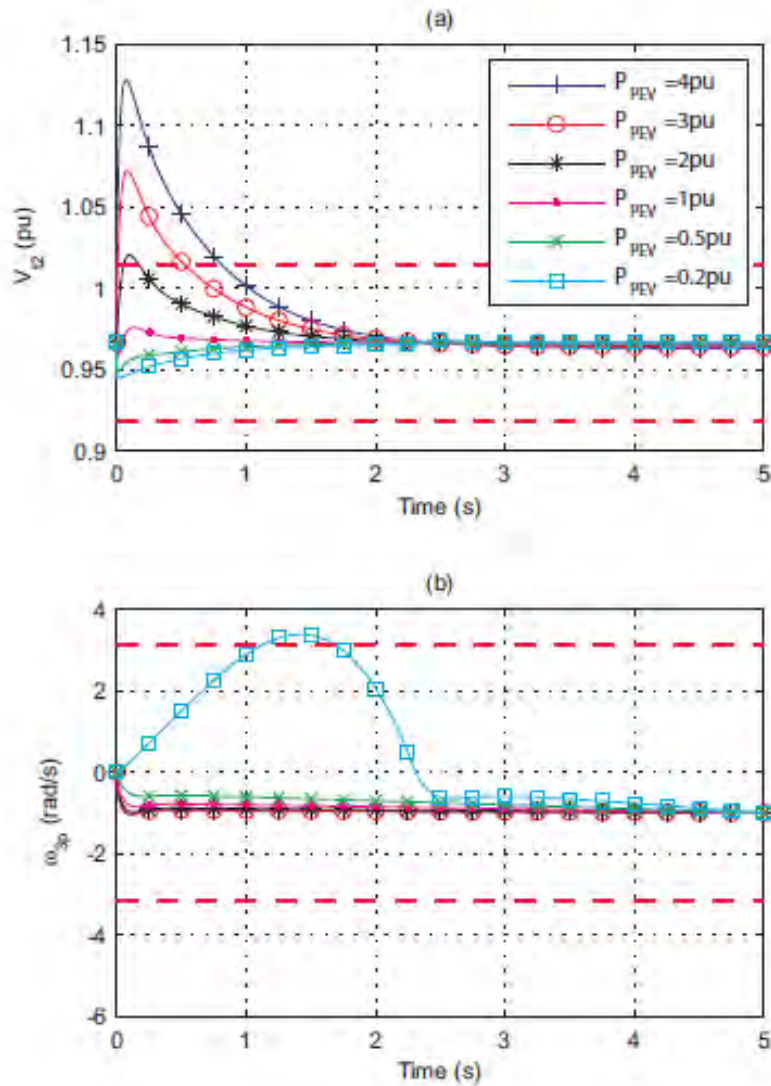
MODEL PARAMETERS			
parameter	value	parameter	value
K_1	10	P_{G4}	2
K_2	20	P_{G5}	2
K_3	20	P_{base}	1 MVA
K_4	10	V_{base}	4 kV
X	0.2	a_{wind}	0.04
V_{set}	1	a_{solar}	0.01
P_{L2}	4.2	P_{wind}^0	1
Q_{L2}	0.5	P_{solar}^0	1.5
P_{L3}	1.8	K_Q	0.01
Q_{L3}	0.2	V_{dc}	480 V

Πίνακας 12.1: Πίνακας με τις παραμέτρους του μοντέλου του μικροδικτύου.

Οι μετρήσεις απόδοσης επιλέχθηκαν ως η απόκλιση τάσης στο τερματικό 2 από την τιμή σταθερής κατάστασης και η απόκλιση συχνότητας του μικροδικτύου, όπως φαίνεται από τα PEVs από την ονομαστική τους τιμή. Οι στόχοι των επιδόσεων που θέσαμε είναι να διατηρηθεί η απόκλιση της τάσης εντός του 5% και η απόκλιση συχνότητας στο 0.5 Hz ή ισοδύναμα π rad/s.



Σχήμα 12.6: Η επίδραση του βαθμού εισχώρησης των PEVs στο (a) η τάση στο τερματικό 2 και (b) η συχνότητα του μικροδικτύου όπως φαίνεται από τα PEVs για $\omega_0 = -4$ rad/s. Οι διακεκομμένες οριζόντιες γραμμές αντιπροσωπεύουν τα αντίστοιχα επιθυμητά όρια απόδοσης.



Σχήμα 12.7: Η επίδραση του βαθμού εισχώρησης των PEVs στο (a) η τάση στο τερματικό 2 και (b) η συχνότητα του μικροδικτύου όπως φαίνεται από τα PEVs για $\omega_0 = -1$ rad/s. Οι διακεκομμένες οριζόντιες γραμμές αντιπροσωπεύουν τα αντίστοιχα επιθυμητά όρια απόδοση.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης συνοψίζονται για τα διάφορα επίπεδα διείσδυσης των PEVs στα Σχήμα 12.6 και Σχήμα 12.7 για $\omega_0 = -4$ rad/s και $\omega_0 = -1$ rad/s, αντίστοιχα. Με βάση αυτά τα αποτελέσματα, τα ακόλουθα μπορούν να συναφθούν.

Το Σχήμα 12.6.α δείχνει ότι αυξάνοντας τα επίπεδα διείσδυσης των PEVs αυξάνεται και η μεταβατική απόκλιση από την τιμή τάσης στην σταθερή κατάσταση, επηρεάζοντας αρνητικά την προσπάθεια μας για ρύθμιση της τάσης. Για P_{PEV} στα 3p.u. ή άνω, η απόκλιση τάσης δεν μπορεί να διατηρήσει το επιθυμητό όριο του 5% κατά τη διάρκεια την μεταβατική απόκριση. Ως εκ τούτου, χωρίς αλλαγές στη στρατηγική ελέγχου, οι στόχοι της ρύθμισης της τάσης θέτουν ένα ανώτατο όριο για το επίπεδο διείσδυσης των PEVs.

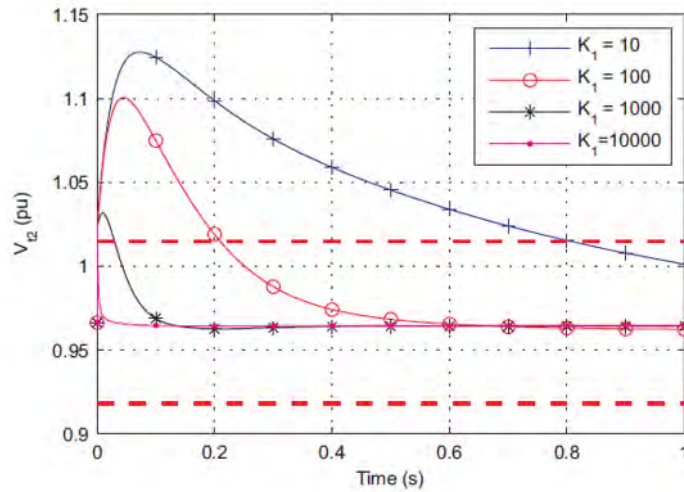
Μια σύγκριση των Σχήμα 12.6.β με το Σχήμα 12.7.β αποκαλύπτει ότι μειώνοντας το ω_0 κατά μέγεθος αυξάνεται η απόδοση όσον αφορά την ρύθμιση της συχνότητας, δεδομένου

ότι οδηγεί σε μικρότερη απόκλιση συχνότητας. Επίσης αυξάνεται η ευρωστία, καθώς η απόδοση της ρύθμισης συχνότητας γίνεται λιγότερο ευαίσθητη στο επίπεδο διείσδυσης των PEVs. Αυτή η βελτίωση στην απόδοση και την ευρωστία επιτυγχάνεται για $P_{PEV} = 0,5$ p.u. και άνω. Όταν το P_{PEV} είναι 0.2 p.u., για παράδειγμα, η μεταβατική απόκριση συχνότητας παραβιάζει τα επιθυμητά όρια ανεξάρτητα από το εύρος τιμών που έχουν θεωρηθεί για το ω_0 σε αυτή τη μελέτη (δηλαδή, από -4 έως -1 rad/s). Αυτό συμβαίνει διότι το μικροδίκτυο παρέχει ισχύ στο κύριο δίκτυο στην περίπτωση αυτή, πριν συμβεί η «απομόνωση» και μετά την «απομόνωση», τα PEVs δεν είναι σε θέση να απορροφήσουν την πλεονάζουσα παραγωγή ενέργειας, επειδή είναι ήδη φορτισμένα στο μέγιστο επίπεδο ισχύος. Τα PEVs δεν μπορούν να ρυθμίσουν τη συχνότητα μέχρι να πέσει επαρκώς η παραγωγή από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Αυτό το παράδειγμα δείχνει ότι υπάρχει επίσης ένα κατώτερο όριο για το επίπεδο διείσδυσης των PEVs για να επιτύχουμε μία υγιή λειτουργία του μικροδικτύου.

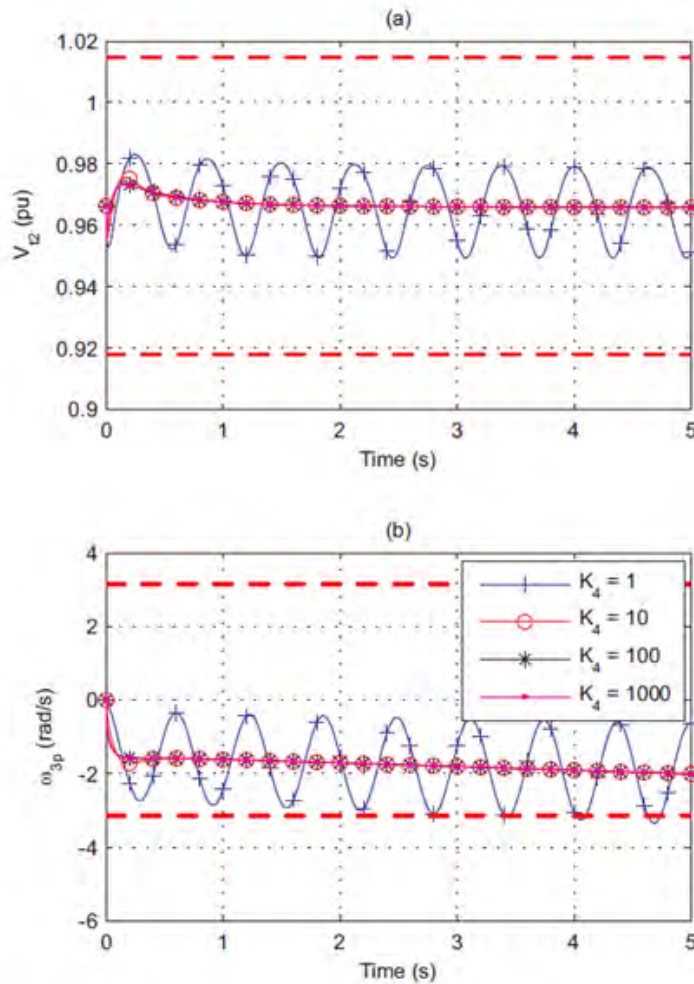
Το **Σχήμα 12.6.β** και το **Σχήμα 12.7.β** δείχνουν ότι η σταδιακή μείωση στην παραγωγή από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας προκαλεί μια σταδιακή πτώση στην συχνότητα, ο ρυθμός της οποίας εξαρτάται από τον λόγο P_{PEV} / ω_0 . Καθώς αυτός ο λόγος μειώνεται κατά μέγεθος, ο ρυθμός πτώσης της συχνότητας αυξάνεται κατά μέγεθος. Ως εκ τούτου, ο λόγος P_{PEV}/ω_0 θα πρέπει να σχεδιαστεί κατά τέτοιο τρόπον ώστε ο ρυθμός αλλαγής της συχνότητας να είναι αρκετά αργός για να δώσει στους πιο αργούς ελεγκτικούς μηχανισμούς (που δεν θεωρούνται σε αυτήν την μελέτη) αρκετό χρόνο για να αντιδράσουν πριν επιτευχθούν τα όρια για την μέγιστη συχνότητα απόκλισης.

Μια σύγκριση του **Σχήματος 12.6.α** και του **Σχήματος 12.7.α** δείχνει ότι το αποτέλεσμα του ω_0 στην απόδοση της ρύθμισης της τάσης είναι αμελητέα. Κατά συνέπεια, η αρνητική επίδραση της αύξησης του P_{PEV} για ρύθμιση της τάσης δεν μπορεί να μειωθεί χρησιμοποιώντας το ω_0 . Για να ανταπεξέλθει στο αυξημένο P_{PEV} , ο ελεγκτής του αντιστροφέα (inverter) πρέπει να ξαναρυθμιστεί. Συγκεκριμένα, το αυξημένο P_{PEV} απαιτεί την αύξηση στο συνολικό κέρδος ελέγχου της τάσης K_1 για τα PEVs. Το **Σχήμα 12.8** παρουσιάζει την επίδραση ενός εύρους τιμών του K_1 για την απόδοση του πάνω στην μεταβατική τάση. Όπως φαίνεται στο σχήμα, πολύ μεγάλα κέρδη είναι απαραίτητα για να μπορούν να φέρουν γρήγορα την τάση μέσα στα επιθυμητά όρια. Αυτό δείχνει ότι ο σχεδιασμός του ελέγχου μπορεί να συνδέεται με τα επίπεδα διείσδυσης των PEVs, το οποίο είναι ένα σημαντικό ζήτημα εάν η λειτουργία plug-and-play είναι επιθυμητή. Σημειώστε, ωστόσο, ότι το K_1 δεν έχει καμία επίδραση στην αρχική άνοδο της τάσης την χρονική στιγμή $t = 0$ όταν η σύνδεση στο πλέγμα έχει χαθεί, καθώς το K_1 επηρεάζει την τάση δυναμικά και όχι στατικά. Αξιίζει επίσης να σημειωθεί ότι η επίδραση της παραμέτρου ελέγχου των PEVs, K_4 στην απόδοση των μετρήσεων. Συγκεκριμένα, εάν το K_4 είναι πολύ χαμηλό, μπορεί να προκαλέσει ανεπιθύμητες ταλαντώσεις τόσο στην τάση όσο και στην συχνότητα (**Σχήμα. 12.9**), καθώς αυτή η παράμετρος παρέχει απόσβεση για τη χαρακτηριστική αλληλεπίδραση μεταξύ το P_{gen} του ελεγκτή και τη χαρακτηριστική του PLL. Ωστόσο, πάνω από μια ορισμένη τιμή του K_4 , οι μετρήσεις απόδοσης δεν είναι πλέον ευαίσθητες σε αυτή την παράμετρο.

Τέλος, οι υπόλοιπες παράμετροι ελέγχου των αντιστροφέων (inverter) των PEVs, K_2 και K_3 αναλύθηκαν επίσης, για τιμές που κυμαίνονται από 1 έως 1000, αλλά από τις μετρήσεις απόδοσης διαπιστώθηκε ότι ήταν ανεπηρέαστες στις αλλαγές που θεωρήθηκαν.



Σχήμα 12.8: Η επίπτωση του K_1 του αντιστροφέα PEV στις χαρακτηριστικές της τάσης στο τερματικό 2 για $P_{PEV} = 4$ p.u. και $\omega_0 = -1$ rad/s.



Σχήμα 12.8: Η επίπτωση του K_4 του αντιστροφέα PEV (a) στην τάση στο τερματικό 2 και (b) στην συχνότητα του μικροδικτύου από την πλευρά των PEVs για $P_{PEV} = 1$ p.u. και $\omega_0 = -2$ rad/s.

12.5 Συμπεράσματα και μελλοντική έρευνα

Η παρούσα διπλωματική εξετάζει το πρόβλημα ρύθμισης της τάσης και της συχνότητας στα μικροδίκτυα και επικεντρώνεται στον αντίκτυπο που έχει η ρύθμιση αυτή στην τεχνολογία όχημα-προς-πλέγμα (**V2G**). Ειδικότερα, τα χαρακτηριστικά φαινόμενα που συμβαίνουν και οφείλονται στους ελεγκτές των αντιστροφών (**inverters**) εντός των πρώτων δευτερόλεπτων από την στιγμή της διαταραχής παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Ένα μοντέλο μικροδικτύου έχει αναπτυχθεί έτσι ώστε να είναι αντιπροσωπευτικό ενός προβλεπόμενου στρατιωτικού μικροδικτύου, και οι προσομοιώσεις ανέλαβαν να εξετάσουν το ρόλο των PEVs στον έλεγχο της τάσης και της συχνότητας στο μικροδίκτυο αμέσως μόλις η σύνδεση του με το κεντρικό δίκτυο κοπεί.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης δείχνουν ότι πιθανώς υπάρχει ένα φάσμα από επίπεδα διείσδυσης των PEVs, για τα οποία η τάση και η συχνότητα σε ένα μικρό-δίκτυο μπορούν να ρυθμιστούν ικανοποιητικά από τα PEVs. Όταν το επίπεδο διείσδυσης των PEVs είναι κάτω από αυτό το φάσμα, η ρύθμιση συχνότητας μπορεί να πάσχει, ενώ όταν το επίπεδο διείσδυσης των PEVs είναι πάνω από αυτό το φάσμα, τότε η ρύθμιση τάσης μπορεί να πάσχει. Στην τελευταία περίπτωση, η ρύθμιση της τάσης μπορεί να βελτιωθεί εάν είναι εφικτή μια επαναρύθμιση του ελεγκτή του αντιστροφέα (**inverter**).

Αυτή η εργασία εξετάζει μόνο μία συγκεκριμένη αρχιτεκτονική ελέγχου και μελετά την ευαισθησία των προβλημάτων ρύθμισης της τάσης και της συχνότητας στις παραμέτρους του ελέγχου.

Άλλες αρχιτεκτονικές ελέγχου μπορεί να αποδώσουν διαφορετικά αποτελέσματα. Μια συγκριτική μελέτη των προσεγγίσεων διαφορετικών αρχιτεκτονικών ελέγχου θα μπορούσε να αποτελέσει συνέχεια της έρευνας αυτής.

Ενδεικτική Βιβλιογραφία

- [1] M. Bellis, "History of electric Vehicles", [Online]. _διαθέσιμο:
<http://inventors.about.com/od/estartinventions/a/History-Of-Electric-Vehicles.htm>
- [2] "Nissan LEAF now available in all 50 states", Green Car Congress,
[Online]. _Διαθέσιμο: <http://www.greencarcongress.com/2012/02/leaf-20120301.html>,
- [3] https://en.wikipedia.org/wiki/La_Jamais_Contente
- [4] <http://www.ypeka.gr/Default.aspx?tabid=446>
- [5] https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A0%CF%81%CF%89%CF%84%CF%8C%CE%BA%CE%BF%CE%BB%CE%BB%CE%BF_%CF%84%CE%BF%CF%85_%CE%9A%CE%B9%CF%8C%CF%84%CE%BF
- [6] <https://en.wikipedia.org/wiki/Autolib%27>
- [7] <http://www.tanea.gr/autonea/parousiasi/article/5316438/poia-montela-den-plhrwnoyn-telh-kykloforias/>
- [8] https://en.wikipedia.org/wiki/Tesla_Motors
- [9] <http://www.computerworld.com/article/2850882/flurry-of-hydrogen-fuel-cell-cars-challenge-all-electric-vehicles.html>
- [10] http://newscience.ul.com/wp-content/uploads/2014/04/Safety_Considerations_of_Wireless_Charger_for_Electric_Vehicles.pdf
- [11] <http://www.opengov.gr/minenv/wp-content/uploads/downloads/2012/01/texniki-ekthesi.pdf>
- [12] <https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%91%CE%BC%CF%80%CE%B5%CF%81%CF%8E%CF%81%CE%B9%CE%BF>
- [13] [Reducing Energy Costs with Peak Shaving in Industrial Environments](#)
[Speaker : Phillip Yeung](#)
- [14] [Asia Pacific Business Development](#)
- [15] [Power Monitoring & Control](#)
- [16] [Smart grids and electric vehicles:Made for each other?Discussion Paper No. 2012-02](#)
- [17] [Publicly funded research, development and demonstration projects on electric and plug-in vehicles in Europe, Alyona Zubaryeva, Christian Thiel 2013](#)
- [18] [Evaluating Electric Vehicle Charging Impacts and Customer Charging Behaviors-Experiences from Six Smart Grid Investment Grant Projects – U.S Department of Energy](#)
- [19] <http://www.fueleconomy.gov/feg/evtech.shtml>
- [20] http://www.tva.gov/environment/technology/car_vehicles.htm
- [21] <http://electricvehicles.caa.ca/types-of-electric-vehicles/>
- [22] <http://www.mitsubishi-motors.com/en/spirit/technology/library/phev.html>
- [23] [State of the Plug-in Electric Vehicle Market, EV Market Outlook, July 25, 2013](#)
- [24] http://web.mit.edu/evt/summary_battery_specifications.pdf
- [25] http://batteryuniversity.com/learn/article/battery_definitions
- [26] <http://pvcadrom.pveducation.org/BATTERY/capacity.htm>
- [27] http://en.wikipedia.org/wiki/Electric_vehicle_battery#Lead-acid

- [28] http://batteryuniversity.com/learn/article/whats_the_best_batte
- [29] M. Bellis, “History of electric Vehicles”, [Online]. _ διαθέσιμο: <http://inventors.about.com/od/estartinventions/a/History-Of-Electric-Vehicles.htm>
- [30] **Vehicle-to-Grid (V2G) Power Flow Regulations and Building Codes Review by the AVTA**
- [31] The State of the Art of Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles By C. C. Chan, Fellow IEEE
- [32] PJM, <http://www.pjm.com/markets-and-operations/ancillaryservices/synchronized-service.aspx>, 29/11/2012
- [33] https://en.wikipedia.org/wiki/Depth_of_discharge
- [34] Handbook of Batteries, Third Edition
- [35] https://en.wikipedia.org/wiki/Electric_vehicle_battery
- [36] <http://www.rae.gr/old/codes/proposal/V1/CodeV1-2.pdf>
- [37] http://library.tee.gr/digital/m2380/m2380_zizas1.pdf
- [38] <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=6529206>
- [39] [http://www.dae.tsinghua.edu.cn/publish/dae/4364/20101220102833065470806/7\)%20Optimal%20decentralized%20valley-filling%20charging%20strategy%20for%20electric%20vehicles.pdf](http://www.dae.tsinghua.edu.cn/publish/dae/4364/20101220102833065470806/7)%20Optimal%20decentralized%20valley-filling%20charging%20strategy%20for%20electric%20vehicles.pdf)
- [40] <http://www.udel.edu/V2G/ArticlesandPapers.html>
- [41] Green Paper “Towards a European strategy for security of energy supply” European Communities 2001.
- [42] https://de.wikipedia.org/wiki/Fossile_Energie#Vorr.C3.A4tehttps://www.leifiphysik.de/themenbereiche/energieentwertung/ausblick#Reichweite (June 2013).
- [43] www.leifiphysik.de/themenbereiche/energieentwertung/ausblick#Reichweite (June 2013).
- [44] https://en.wikipedia.org/wiki/File:Global_Carbon_Emissions.svg (June 2013).
- [45] A European Strategic Energy Technology Plan. Technology Map. Commission of the European Communities. SEC(2007)1510, Brussels 22.11.2007 http://ec.europa.eu/energy/technology/set_plan/set_plan_en.htm (February 2013).
- [46] White Paper: Clean Power from Deserts—The DESERTEC concept for Energy, Water and Climate security. Trans-Mediterranean Renewable Energy Cooperation, Hamburg, March 2008 (www.desertec.org).
- [47] <http://www.smartgrids.eu/documents/vision.pdf> (February 2013).
- [48] http://www.smartgrids.eu/documents/SmartGrids_SDD_FINAL_APRIL2010.pdf (February 2013).
- [49] Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie. Studie 12/10. Energieszenarien für ein Energiekonzept der Bundesregierung.
- [50] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau erneuerbarer Energien in Deutschland. Leitszenario 2009. <http://www.erneuerbare-energien.de/user-service/mediathek/downloads/detailansicht/artikel/leitszenario-2009-langfristszenarien-und-strategien-fuer-den-ausbau-erneuerbarerenergien-in-deutschland-unter-beruecksichtigung-der-europaeischen-u/> (January 2014).
- [52] European Project Web2Energy. Deliverable 6.1. Benefit report. December 2012. www.web2energy.com (February 2013).

- [53] Διπλωματική Εργασία Θεοφάνη Ι. Αραβανή, «Μελέτη και κατασκευή διάταξης διασύνδεσης φωτοβολταϊκής γεννήτριας με το ηλεκτρικό δίκτυο χαμηλής τάσης», Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών, Φεβρουάριος 2012.
- [54] [Χατζηαργυρίου Νίκος, «Συμβολή της Διεσπαρμένης Παραγωγής στην Εξοικονόμηση Ενέργειας», πρακτικά Ημερίδας με θέμα «Εξοικονόμηση Ενέργειας», Αθήνα, 3 Νοεμβρίου, 2006.
- [55] N. Hatziargyriou, N. Jenkins, G. Strbac, J. A. Pecos Lopez, J. Ruela, A. Engler, J. Oyarzabal, G. Kariniotakis, A. Amorin: “Microgrids - Large Scale Integration of Microgeneration to Low Voltage Grids”, Cigre 2006 Technical Exhibition, 28 August - 1 September, Paris (France).
- [56] N. D. Hatziargyriou, A. P. Sakis Meliopoulos: “Distributed Energy Sources: Technical Challenges”, IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, 27 - 31 January 2002, Vol. 2, pp. 1017 - 1022.).
- [57] http://www.engineersedge.com/instrumentation/coaxial_cable_connectors_assemblies_review_9894.htm).
- [58] Διπλωματική Εργασία «ΜΕΛΕΤΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΟΥ ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΟΥ », ΘΩΜΑΣ Α. ΑΛΕΞΟΠΟΥΛΟΣ.
- [59] Michael Stadler, Chris Marnay, Maximilian Kloess, Gonçalo Cardoso, Gonçalo Mendes, Afzal Siddiqui, Ratnesh Sharma, Olivier Mégel, and Judy Lai(2012). “Optimal Planning and Operation of Smart Grids with Electric Vehicle Interconnection”, [Lawrence Berkeley National Laboratory](#), ISSN 0733-9402 / e-ISSN - 1943-7897.
- [60] T. Takuno, M. Koyama, and T. Hikihara. In-home power distribution systems by circuit switching and power packet dispatching. IEEE SmartGridComm’10, pages 427–430, 2010.
- [61] T. Takuno, T. Hikihara, T. Tsuno, and S. Hatsukawa. HF gate drive circuit for a normally-on SiC JFET with inherent safety. 13th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE2009), pages 1–4, 2009.
- [62] Στέφανος Ν. Μανιάς, Ηλεκτρονικά Ισχύος, Συμπεών, 2007.
- [63] Στέφανος Ν. Μανιάς, Αθανάσιος Καλετοάνος, Βιομηχανικά Ηλεκτρονικά, Συμπεών, 2003 [3] Bimal K. Bose, Modern Power Electronics and AC Drives, Prentice-Hall, 2002.
- [64] Muhammad H. Rashid, Power Electronics - Circuits, Devices and Applications, Third Edition, Prentice Hall, 2004.
- [65] D. Graham Holmes, Thomas A. Lipo, Pulse Width Modulation for Power Converters – Principles and Practice, Wiley-IEEE Press, 2003.
- [66] Ned Mohan, Tore M.Undeland, William P.Robbins, ‘Power Electronics: Converters, Applications and Design’, Wiley Edition (2003).
- [67] Εμμανουήλ Τατάκης, ‘Διαλέξεις μαθήματος Ηλεκτρονικά στοιχεία ισχύος και Βιομηχανικές εφαρμογές’, <https://eclass.upatras.gr/modules/announcements/announcements.php>.
- [68] Andrzej M. Trzynadlowski, ‘Introduction to Modern Power Electronics’ Wiley Editions (2010).
- [69] http://en.wikipedia.org/wiki/LC_circuit.
- [70] Στέφανος Μανιάς, “Ηλεκτρονικά Ισχύος”, Εκδόσεις Συμπεών (2000).

- [71] Ευάγγελος Λ. Καρφόπουλος, 'Ανάλυση και σύγκριση αντιστροφών πηγής τάσεως πολλαπλών επιπέδων', Διπλωματική εργασία (2005).
- [72] https://en.wikipedia.org/wiki/Pulse-width_modulation.
- [73] <http://protorit.blogspot.gr/2013/01/power-electronic-converter-pwm-inverters.html>.
- [74] Ned Mohan, Tore M.Undeland, William P.Robbins, 'Power Electronics: Converters, Applications and Design', Wiley Edition (2003).
- [75] Andrzej M. Trzynadlowski, 'Introduction to Modern Power Electronics' Wiley Editions (2010).
- [76] Κωνσταντίνος Δ.Κορακίτης 'Εφαρμογή Μοντελοποιημένου Προβλεπτικού PQ Ελέγχου για τη Διασύνδεση Τριφασικού Αντιστροφέα στο Δίκτυο Ηλεκτρικής Ενέργειας', Διπλωματική εργασία (2010).
- [77] Josheph A. Edminister, Ηλεκτρικά Κυκλώματα, Εκδόσεις ΕΣΠΙ 1980.
- [78] Κ.Α. Καρυμπακα, Γενική Ηλεκτρονική τόμος Α', Θεσσαλονίκη 2001.
- [79] Κ.Α. Καρυμπακα, Γενική Ηλεκτρονική τόμος Β', Θεσσαλονίκη 2001.
- [80] Π. Μαλατέστας- Ηρ. Βυλιώτης, Εργαστηριακές Ασκήσεις Ηλεκτρονικών Ισχύος, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη 2004.
- [81] Στ. Μανιας, Ηλεκτρονικά Ισχύος, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα 2007.
- [82] Στ. Μανιας, Α Καλετσάνος, Βιομηχανικά Ηλεκτρονικά, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα 2001.
- [83] Ι. Κιοσκερίδης, Ηλεκτρονικά Ισχύος, Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ, 2008
- [84] Bill Drury ,Control Techniques Drives and Controls Handbook, Published by The Institution of Electrical Engineers, London, UK.
- [85] Enrique Acha,V.G. Agelidis, O. Anaya-Lara and T.J.E. Miller, Power Electronic Control in Electrical Systems, Puplished by Newnes (2002).
- [86] M.Rashid,«Ηλεκτρονικά Ισχύος. Κυκλώματα, εξαρτήματα & εφαρμογές», Ε κδόσεις ΙΩΝ, 2010.
- [87] Tulga Ersal, Changsun Ahn, Ian A. Hiskens, *Fellow, IEEE*, Huei Peng, and Jeffrey L. Stein, Impact of Controlled Plug-In EVs on Microgrids: A Military Microgrid Example
- [88] Σ. Μανιάς, «Ηλεκτρονικά Ισχύος», Εκδόσεις ΣΥΜΕΩΝ, 2014.
- [89] N.Mohan,T.M.Undeland,W.P.Robbins,“Εισαγωγή στα ηλεκτρονικά ισχύος. Ανάλυση, σχεδίαση και εφαρμογές των ηλεκτρονικών μετατροπών ισχύος», Εκδόσ εις ΤΖΙΟΛΑ, 2010.
- [90] K. H. Sueker, “Power Electronics Design: A practitioner’s Guide”, Elsevier, 2005.
- [91] N. Mohan, “First Courses on Power Electronics and Drives”, MNPERE, 2003.
- [92] A. I. Maswood, “The Power Diode” στο “Power Electronics Handbook” (M. H. Rashid ed, 3rd edition), Butterworth- Heinemann, 2010.
- [93] M. G. Simoes, “Power Bipolar Transistors” στο “Power Electronics Handbook” (M. H. Rashid ed, 3rd edition), Butterworth-Heinemann, 2010.
- [94] V. Subrahmanyam, “Thyristor Control of Electric Drives”, Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, 1988.
- [95] P. C. Sen, “Thyristor DC Drives”, Wiley, 1981.
- [96] Λήμμα «Ανάλυση Φουριέ» στην Βικιπαιδεια,http://el.wikipedia.org/wiki/Ανάλυση_Φουριέ
- [97] Λήμμα «Σειρές Φουριέ» στην Βικιπαιδεια,http://el.wikipedia.org/wiki/Σειρές_Φουριέ

- [98] Xi Fang, Student Member, IEEE, Satyajayant Misra, Member, IEEE, Guoliang Xue, Fellow, IEEE, and Dejun Yang, Student Member, IEEE, Smart Grid – The New and Improved Power Grid: A Survey
- [99] F. Rahimi and A. Ipakchi. Demand response as a market resource under the smart grid paradigm. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 1(1):82–88, 2010.
- [100] National Institute of Standards and Technology. NIST framework and roadmap for smart grid interoperability standards, release 1.0, http://www.nist.gov/public_affairs/releases/upload/smartgrid_interoperability_final.pdf. January 2010.
- [101] M. J. Neely, A. S. Tehrani, and A. G. Dimakis. Efficient algorithms for renewable energy allocation to delay tolerant consumers. *IEEE SmartGridComm'10*, pages 549–554, 2010.
- [102] [H. Nikkhajoei and R. H. Lasseter. Microgrid protection. *IEEE Power Engineering Society General Meeting'07*, pages 1–6, 2007.