



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

Έλεγχος μετατροπών σε εφαρμογές ταχυφορτιστών ηλεκτρικών οχημάτων

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΙΣΑΒΕΛΛΑ Δ. ΚΟΥΚΟΥΛΑ

Επιβλέπων : Αντώνιος Αντωνόπουλος
Επίκουρος καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2021



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

Έλεγχος μετατροπών σε εφαρμογές ταχυφορτιστών ηλεκτρικών οχημάτων

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΙΣΑΒΕΛΛΑ Δ. ΚΟΥΚΟΥΛΑ

Επιβλέπων : Αντώνιος Αντωνόπουλος

Επίκουρος καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 12^η Οκτωβρίου 2021.

.....

Αντώνιος Αντωνόπουλος
Επίκουρος καθηγητής ΕΜΠ

.....

Αντώνιος Κλαδάς Καθηγητής
ΕΜΠ

.....

Σταύρος Παπαθανασίου
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2021

.....

Ισαβέλλα Δ. Κουκουλά

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

Copyright © Ισαβέλλα Δ. Κουκουλά, 2021

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Περίληψη

Στόχος αυτής της εργασίας είναι η υλοποίηση μιας διάταξης ελέγχου ενός φορτιστή η οποία να επικοινωνεί με το όχημα με βάση ένα εμπορικό πρότυπο και να τροποποιεί κατάλληλα την έξοδο ανάλογα με τις απαιτήσεις του οχήματος.

Για τον λόγο αυτό αρχικά μελετήθηκαν τα διάφορα διεθνή πρότυπα φόρτισης και επιλέχθηκε η υλοποίηση της επικοινωνίας με βάση το πρωτόκολλο CHAdeMO. Η υλοποίηση της επικοινωνίας ελέγχθηκε με την χρήση ενός LaunchPad F280049C της σειράς C2000 της Texas Instruments για το σύστημα ελέγχου του φορτιστή και ενός Arduino CANBed V1 της Logan Labs για την πλευρά του οχήματος.

Για την υλοποίηση του ελέγχου χρησιμοποιήθηκε μια διάταξη Dual Active Bridge, η οποία είχε υλοποιηθεί στο εργαστήριο στο πλαίσιο προηγούμενης διπλωματικής εργασίας. Προκειμένου να γίνει αυτό ερευνήθηκαν οι τρόποι ελέγχου μιας διάταξης Dual Active Bridge και η διάταξη προσομοιώθηκε με την βοήθεια κατάλληλου λογισμικού.

Τέλος υλοποιήθηκε το συνολικό σύστημα φόρτισης που περιλάμβανε την επικοινωνία με το όχημα με βάση το εμπορικό πρότυπο και τον έλεγχο της πειραματικής διάταξης.

Λέξεις κλειδιά: ηλεκτρικά οχήματα, ταχυφορτιστής, CHAdeMO, μετατροπέας DC/DC, μικροεπεξεργαστής

Abstract

The aim of this thesis is the implementation of a charger control device that communicates with the vehicle, based on a commercial standard, and is able to properly adjust its output based on the vehicle's requests.

Therefore we initially studied the available international standards and decided to implement the communication based on the CHAdeMO standard. The implementation of the communication was verified using a LaunchPad F280049C from the Texas Instruments C2000 series on the charger side and an Arduino CANBed V1 from Logan Labs on the car side.

For the implementation of the control a Dual Active Bridge converter was used, which was designed and implemented in an earlier thesis work. In order to do so we investigated the possible ways of controlling a Dual Active Bridge converter and run the control simulations with the help of appropriate simulation software.

Finally the complete charging system including the communication with the vehicle and the control of the experimental device was implemented and tested.

Key – words: electric vehicles, fast-charger, CHAdeMO, DC/DC converter, microprocessor

Ευχαριστίες

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Αντώνιο Αντωνόπουλο, ο οποίος μου έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα, καθώς και για την βοήθεια του καθ' όλη τη διάρκεια της διπλωματικής μου εργασίας.

Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω τον διδάκτορα Χρήστο Λουκά, ο οποίος ήταν εκεί για να με βοηθήσει να και να μου λύσει οποιαδήποτε απορία ή δυσκολία εμφανιζόταν.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαιτέρως τον υπεύθυνο του εργαστηρίου κ. Παναγιώτη Ζαννή, για την βοήθεια του στο εργαστήριο.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου που με στηρίζει σε όλη την διάρκεια της ζωής μου και με βοηθά να ακολουθήσω τα όνειρά μου.

Περιεχόμενα

Περίληψη	5
Περιεχόμενα	8
Εισαγωγή	10
Διάρθρωση εργασίας	
Κεφάλαιο 1, Ηλεκτρικά οχήματα και φόρτιση	11
Κατηγορίες ηλεκτρικών οχημάτων	11
Φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων	12
Επίδραση ηλεκτρικών οχημάτων	12
Κατηγοριοποίηση της φόρτισης	12
Επίπεδα φόρτισης	13
Πρότυπα για την φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων	14
Σύνδεση φορτιστή με το όχημα	16
Βύσματα	17
Πρότυπα επικοινωνίας	18
Συνολική επισκόπηση προτύπων φόρτισης	19
Επισκόπηση εμπορικών φορτιστών	19
Βαθμωτή σχεδίαση	21
Διαδικασία φόρτισης	21
Μπαταρίες και τρόποι φόρτισης	22
Επίδραση της φόρτισης στην μπαταρία	23
Τοπολογία ενός φορτιστή	23
Τοπολογία ενός σταθμού φόρτισης	27
Κινητοί σταθμοί φόρτισης (MCS)	29
Κεφάλαιο 2, Το πρότυπο φόρτισης CHADEMO	31
Δημοτικότητα του CHAdEMO	31
Κύρια χαρακτηριστικά του CHAdEMO	32
Τεχνικά χαρακτηριστικά	32
Ανάλυση του προτύπου	33
Τοπολογία του φορτιστή	33
Καταστάσεις λειτουργίας του φορτιστή	35
Διάγραμμα ροής του φορτιστή	36

Ψηφιακή επικοινωνία	38
Κεφάλαιο 3, Υλοποίηση της επικοινωνίας σύμφωνα με το πρωτόκολλο CHAdEMO	39
Τεχνικά χαρακτηριστικά του υλικού	39
Διευκρινίσεις σχετικά με την υλοποίηση	39
Περιγραφή της υλοποίησης	40
Ομαλή λειτουργία	41
Λειτουργία σφάλματος	43
Κεφάλαιο 4, Βασικές Αρχές Λειτουργίας του Κυκλώματος Ισχύος Φορτιστή Βασισμένου στην Τοπολογία Dual Active Bridge (DAB)	47
Κατηγορίες ελέγχου	47
Βασική αρχή λειτουργίας	47
Ανάλυση των μεθόδων ελέγχου της διάταξης	49
Κύρια ζητήματα	55
Πιθανές λύσεις	56
Κεφάλαιο 5, Πειραματικό μέρος	57
Μετρήσεις	57
Συμπεράσματα εργαστηριακών δοκιμών	58
Κεφάλαιο 6, Συμπεράσματα εργασίας και προτάσεις για το μέλλον	61
Βιβλιογραφία	63

Εισαγωγή

Στην παρούσα εργασία μελετάται η υλοποίηση μιας διάταξης ελέγχου ενός ταχυφορτιστή, η οποία επικοινωνεί με το όχημα με βάση ένα εμπορικό πρότυπο και τροποποιεί κατάλληλα την έξοδο ανάλογα με τις απαιτήσεις του οχήματος.

Διάρθρωση της εργασίας

Στο **Κεφάλαιο 1** γίνεται μια επισκόπηση της διαδικασίας φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων και αναλύονται τα διάφορα διεθνή πρότυπα φόρτισης, τα οποία περιλαμβάνουν προδιαγραφές για όλα τα στοιχεία της φόρτισης (επίπεδο τάσης εξόδου, επίπεδο ισχύος εξόδου, τρόπος σύνδεσης με το όχημα, τρόπος επικοινωνίας με το όχημα, τοπολογία ενός φορτιστή, τοπολογία ενός σταθμού φόρτισης κλπ).

Στο **Κεφάλαιο 2** αναλύεται το πρωτόκολλο CHAdeMO. Τα κύρια χαρακτηριστικά του, η τοπολογία του και η μοντελοποίηση της λειτουργίας σε συνδυασμό με τα μηνύματα που ανταλλάσσονται μεταξύ οχήματος και φορτιστή.

Στο **Κεφάλαιο 3** παρουσιάζεται η υλοποίηση της επικοινωνίας και τα αποτελέσματα σε διάφορες δοκιμές λειτουργίας.

Στο **Κεφάλαιο 4** μελετούνται οι τρόποι ελέγχου μιας διάταξης Dual Active Bridge και γίνεται μια ανάλυση των κύριων ζητημάτων που επηρεάζουν την λειτουργία της διάταξης.

Στο **Κεφάλαιο 5** παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα και τα συμπεράσματα που προκύπτουν από αυτά.

Στο **Κεφάλαιο 6** παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την εργασία και οι προτάσεις για το μέλλον.

Κεφάλαιο 1

Ηλεκτρικά οχήματα και είδη φόρτισης

Στις μέρες μας είναι εμφανείς οι αρνητικές επιπτώσεις των διαρκώς αυξανόμενων εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα από την καύση ορυκτών καυσίμων. Κλιματική αλλαγή, μόλυνση του αέρα, εξάντληση των διαθέσιμων κοιτασμάτων και διαρκής αύξηση της τιμής της ενέργειας. Τα φαινόμενα αυτά δεν περάνε απαρατήρητα και πολλές χώρες καταβάλλουν προσπάθεια ώστε να μειώσουν τις εκπομπές άνθρακα και να μεταβούν σε μια καθαρότερη ενέργεια. Στον τομέα της παραγωγής ενέργειας εγκαθίστανται μονάδες παραγωγής από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ανεμογεννήτριες, φωτοβολταϊκά), ενώ στον τομέα των μεταφορών δίνονται κίνητρα για την αγορά ηλεκτρικών αυτοκινήτων. Στην Ευρώπη το 2019 το 11% των πωλήσεων αφορούσε ηλεκτρικά οχήματα, ενώ το 2020 το 25% των πωλήσεων στην Ευρώπη αφορούσε ηλεκτρικά οχήματα. [1]

Κατηγορίες Ηλεκτρικών αυτοκινήτων

Τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα μπορούν να χωριστούν σε δύο βασικές κατηγορίες τα αμιγώς υβριδικά οχήματα (Hybrid EV, HEV) και τα οχήματα με δυνατότητα εξωτερικής φόρτισης (Plug-in EV, PEV).

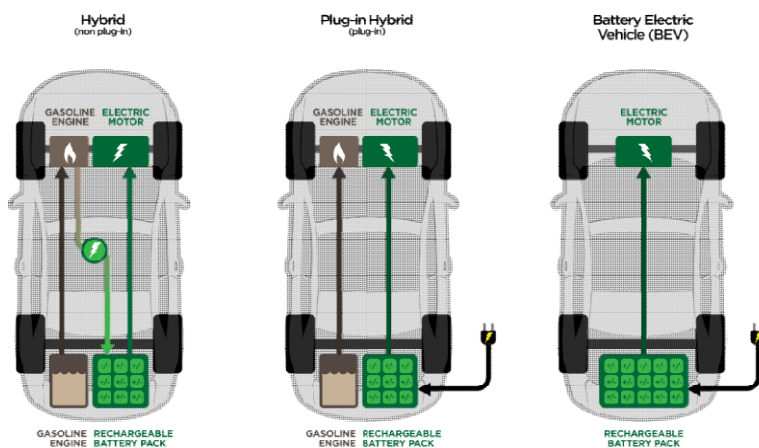
Ένα υβριδικό αυτοκίνητο έχει δύο κινητήριες μονάδες αντί για μία, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.1. Ένα συμβατικό αυτοκίνητο κινείται από έναν κινητήρα εσωτερικής καύσης και ένα ηλεκτρικό όχημα από έναν ηλεκτροκινητήρα. Ένα υβριδικό μοντέλο χρησιμοποιεί έναν συνδυασμό και των δύο. Κατά τη μετακίνηση χρησιμοποιεί τον κινητήρα εσωτερικής καύσης ή λειτουργεί παράλληλα με τον ηλεκτροκινητήρα, μειώνοντας σημαντικά την κατανάλωση καυσίμου, εξοικονομώντας ενέργεια ή ακόμα και ανακτώντας ενέργεια σε συγκεκριμένες συνθήκες (πχ εκκίνηση, φρενάρισμα). Ένα αμιγώς υβριδικό δεν έχει υποδοχή για να φορτίσει με βύσμα τη μπαταρία του. Αναπαράγει την ενέργεια χρησιμοποιώντας τον κινητήρα εσωτερικής καύσης ή με τη βοήθεια του έξυπνου συστήματος ανάκτησης ενέργειας.

Τα οχήματα με δυνατότητα εξωτερικής φόρτισης (PEV) μπορούν να διακριθούν σε δύο υποκατηγορίες τα Plug-in υβριδικά οχήματα (Plug-in Hybrid EV, PHEV) και τα αμιγώς ηλεκτρικά οχήματα (Battery EV, BEV).

Ένα plug-in υβριδικό(PHEV) λειτουργεί ακριβώς όπως ένα αμιγώς υβριδικό, με εξαίρεση ότι έχει μεγαλύτερη μπαταρία και προσφέρει επιπλέον τη δυνατότητα φόρτισης από εξωτερική πηγή.

Ένα αμιγώς ηλεκτρικό όχημα (BEV) διαθέτει μόνο έναν ηλεκτροκινητήρα και μπαταρίες, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.1. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα μηδενικές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα.

Ένα αμιγώς ηλεκτρικό όχημα ανεφοδιάζεται με επαναφόρτιση των μπαταριών χρησιμοποιώντας ηλεκτρική ενέργεια από το δίκτυο ή άλλα συστήματα διανομής [2].



Εικόνα 1.1 Τύποι ηλεκτρικών οχημάτων [3]

Φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων

Μια από τις κυριότερες προκλήσεις των ηλεκτρικών οχημάτων είναι η αυτονομία. Στο πέρασμα των χρόνων οι κατασκευαστές αυτοκινήτων χρησιμοποιούν μπαταρίες μεγαλύτερης χωρητικότητας προκειμένου να αυξήσουν την αυτονομία του οχήματος [4]. Αυτό όμως έρχεται σε σύγκρουση με την δεύτερη μεγαλύτερη απαίτηση των χρηστών που είναι η γρήγορη επαναφόρτιση. Η μεγαλύτερη χωρητικότητα των μπαταριών δημιουργεί την ανάγκη φόρτισης με μεγαλύτερη ισχύ προκειμένου να μην αυξηθεί σημαντικά ο χρόνος φόρτισης.

Μια εναλλακτική στην φόρτιση μέσω κάποιου φορτιστή είναι η αντικατάσταση της μπαταρίας με μια πλήρως φορτισμένη. Η εναλλακτική αυτή είναι γνωστή ως «Battery swapping».

Μερικά πλεονεκτήματα αυτής της τακτικής είναι η ταχύτητα «φόρτισης» από την πλευρά του χρήστη και η ελεγχόμενη φόρτιση των μπαταριών, καθώς φορτίζονται από τον σταθμό αλλαγής [5]. Ωστόσο τίθεται το ζήτημα της συμβατότητας λόγω της διαφορετικότητας των μπαταριών στα διάφορα οχήματα [6]. Ένα ακόμα μειονέκτημα είναι ότι απαιτούνται να υπάρχουν πολλαπλάσιες μπαταρίες σε σχέση με τα ηλεκτρικά οχήματα. [7].

Η νεοσύστατη εταιρία Ampel υλοποιεί την τεχνική «Battery swapping» στην Καλιφόρνια της Αμερικής και με τα αυτοματοποιημένα μηχανήματα που χρησιμοποιεί είναι σε θέση να αλλάξει την μπαταρία σε μόλις 10 λεπτά. [8]. Με έσοδα 160 εκατομμύρια δολάρια μοιάζει να έχει δυνατότητες να καθιερώσει αυτή την εναλλακτική φόρτισης.[9]

Επίδραση ηλεκτρικών αυτοκινήτων.

Συνήθως τα περισσότερα αυτοκίνητα είναι παρκαρισμένα το 90% του χρόνου. Αυτή την παρατήρηση προσπαθεί να αξιοποιήσει η τεχνολογία Vehicle 2 Grid (V2G). Η τεχνολογία αυτή προβλέπει αμφίδρομη ροή ισχύος ανάμεσα στο όχημα και το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας.[10]

Αν η φόρτιση των ηλεκτρικών αυτοκινήτων διαχειρίζεται σε μεγάλη κλίμακα, οι μπαταρίες των οχημάτων μπορούν να συμβάλλουν ως προσωρινές μονάδες αποθήκευσης ενέργειας και να συμμετάσχουν στην ρύθμιση του συστήματος. Έτσι μπορούν να λειτουργήσουν ως επικουρική πηγή ενέργειας σε ώρες αιχμής και να οδηγήσουν σε μείωση απωλειών και πτώσεων τάσης στις γραμμές του δικτύου διανομής [5]. Επιπλέον μπορούν να συμβάλλουν στην ρύθμιση της αέργου ισχύος και να προσφέρουν επικουρικές υπηρεσίες στο δίκτυο.

Ωστόσο υπάρχουν ακόμα αρκετές προκλήσεις που πρέπει να ληφθούν υπόψη όπως η διάρκεια ζωής των μπαταριών και οι περιορισμένες υποδομές φόρτισης [11]. Επιπλέον, οι φορτιστές μπορεί να αυξήσουν σημαντικά την στιγμιαία ζήτηση δημιουργώντας σημαντικά προβλήματα στο σύστημα διανομής όπως: αποκλίσεις τάσης και υπερφόρτωση μετασχηματιστών [12]. Αυτά τα ζητήματα μπορούν να αντιμετωπιστούν μέσω ενός έξυπνου και ελεγχόμενου τρόπου φόρτισης.[5]

Κατηγοριοποίηση φόρτισης

Οι φορτιστές μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με βάση:

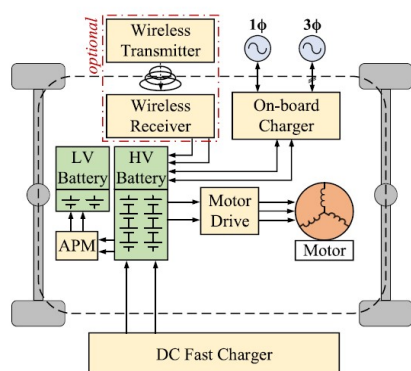
- τον τύπο τάσης που παρέχουν στην έξοδο (AC/DC)
- το επίπεδο ισχύος που της εξόδου
- το αν ο φορτιστής είναι εξωτερικός του αυτοκινήτου (On board/Off board)
- σχετικά με την ροή ισχύος (μονόδρομος ή αμφίδρομος)
- ανάλογα με τον τρόπο μεταφοράς ενέργειας σε αγώγιμο (conductive) ή επαγωγικό (inductive)

Ο αγώγιμος τρόπος φόρτισης απαιτεί φυσική διασύνδεση ανάμεσα στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας και το όχημα. Προς αυτό τον σκοπό χρησιμοποιούνται αποκλειστικά καλώδια με ειδικούς συνδέσμους. Αντίθετα οι επαγωγικοί φορτιστές δεν χρησιμοποιούν καλώδια αλλά μεταφέρουν την ενέργεια μέσω ηλεκτρομαγνητικού πεδίου [10]. Αυτό προσφέρει πλεονεκτήματα ως προς την άνεση της χρήσης και την ασφάλεια, ανεξάρτητα από τον καιρό, όμως μέχρι στιγμής η δυνατότητα μεταφερόμενης ισχύος είναι περιορισμένη [5].

Ο φορτιστής μονόδρομης ροής ισχύος περιορίζει τις απαιτήσεις σε υλικό και απλοποιεί τα θέματα σύνδεσης και τείνει να έχει μειωμένη φθορά στην μπαταρία. Αντίθετα ο φορτιστής αμφίδρομης ροής ισχύος μπορεί εκτός από το να απορροφά και να εγχέει ισχύ στο δίκτυο, συμβάλλοντας στην ομαλή λειτουργία του [13]. Το παραπάνω είναι γνωστό και ως λειτουργία V2X το οποίο είναι μια ομαδοποίηση των εννοιών Vehicle to a home (V2H), Vehicle to a building (V2B), Vehicle to a load (V2L) και Vehicle to a grid (V2G), δηλαδή το όχημα παρέχει υπηρεσίες σε ένα σπίτι, ένα κτήριο, ένα φορτίο ή στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας.

Οι φορτιστές εντός του οχήματος έχουν περιορισμένη ισχύ λόγω περιορισμένων μεγέθους και βάρους [14]. Μπορούν να είναι αγωγιμοί ή επαγωγικοί. Αντίθετα οι εξωτερικοί φορτιστές δεν έχουν τέτοιους περιορισμούς και μπορούν να επιτύχουν πολύ μεγάλα επίπεδα ισχύος εξόδου.

Στην Εικόνα 1.2 βλέπουμε που συνδέεται κάθε τύπος φορτιστή σε σχέση με το σύστημα του αυτοκινήτου. Τυπικά το σύστημα του αυτοκινήτου περιλαμβάνει τον εσωτερικό φορτιστή (on board charger), το σύστημα βοηθητικής ισχύος (auxiliary power module, APM), τον αντιστροφέα του κινητήρα και προαιρετικά μια διάταξη για επαγωγική φόρτιση. Η αγωγή φόρτιση μπορεί να είναι AC μονοφασική ή τριφασική στον εσωτερικό φορτιστή ή DC απευθείας στην μπαταρία.



Εικόνα 1.2 Σχηματική αναπαράσταση ηλεκτρικού οχήματος [15]

Επίπεδα φόρτισης

Ανάλογα με την ισχύ εξόδου έχουμε 3 επίπεδα φόρτισης, που μπορούν να αντιστοιχούν είτε σε AC είτε σε DC φόρτιση, ωστόσο η DC φόρτιση συνήθως είναι μόνο ταχεία (Level 3). Τα επίπεδα αυτά αντιστοιχούν σε μια παλαιότερη έκδοση του προτύπου SAE J1772, είναι όμως ενδεικτικά των πιθανών επιπέδων φόρτισης.

Level 1 (Αργή φόρτιση): Έχει το μικρότερο επίπεδο ισχύος εξόδου (τυπικά μέχρι 2kW) και για αυτό αποτελεί τον πιο αργό τρόπο φόρτισης. Δεν απαιτείται ειδικός εξοπλισμός για την σύνδεση του οχήματος στο δίκτυο. Προορίζεται για οικιακή χρήση και η φόρτιση γίνεται από τον εσωτερικό φορτιστή του αυτοκινήτου (on board). Χρησιμοποιεί συνήθως μονοφασική παροχή και για αυτό δεν χρησιμοποιείται στην Ευρώπη και στην Κίνα.

Level 2 (Κανονική φόρτιση): Είναι το πιο διαδεδομένο επίπεδο ισχύος AC φόρτισης. Μπορεί να έχει μέγιστη ισχύ ως 22kW. Απαιτείται ειδικός εξοπλισμός για την σύνδεση του οχήματος στο δίκτυο. Η φόρτιση τυπικά διαρκεί μερικές ώρες για αυτό και χρησιμοποιείται κυρίως για φόρτιση κατά τη διάρκεια της νύχτας. Προορίζεται για οικιακή ή εταιρική φόρτιση και η φόρτιση γίνεται από τον εσωτερικό φορτιστή του αυτοκινήτου (on board).

Level 3 (Γρήγορη φόρτιση): Έχει τα υψηλότερα επίπεδα ισχύος και η φόρτιση διαρκεί από μερικά λεπτά ως λίγες ώρες. Στην AC φόρτιση η ισχύς εξόδου μπορεί να φτάσει μέχρι τα 43,5kW, ενώ στην DC μπορεί να έχει μέγιστη ισχύ 350kW ή και ακόμα μεγαλύτερη αν πρόκειται για υπερταχυφορτιστή (Extreme Fast Charging XFC). Η φόρτιση γίνεται από εξωτερικό φορτιστή (off board). Απαιτείται ειδικός εξοπλισμός για την σύνδεση στο δίκτυο, ο οποίος συνήθως μοιάζει σε μέγεθος με τις αντλίες των βενζινάδικων. Προορίζεται για δημόσια χρήση σε σταθμούς φόρτισης ή βενζινάδικα.

Πρότυπα για την φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων

Τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα πρότυπα σχετικά με την φόρτιση ηλεκτρικών αυτοκινήτων είναι αυτά που καθορίζονται από τους οργανισμούς SAE, IEC και GB/T, τα οποία ορίζουν τις προδιαγραφές για έναν σταθμό φόρτισης συμπεριλαμβανόμενης της επικοινωνίας, της σύνδεσης, της ασφάλειας και της τοπολογίας της εγκατάστασης [16]. Τα πρότυπα IEC χρησιμοποιούνται κυρίως σε χώρες της Ευρώπης. Τα πρότυπα SAE υιοθετούνται κυρίως στις Η.Π.Α. Τα πρότυπα GB/T χρησιμοποιούνται κυρίως στην Κίνα.

Λαμβάνοντας υπόψη τον τύπο της τάσης (DC, μονοφασικό ή τριφασικό AC), το επίπεδο τάσης (για AC σε εύρος μεταξύ 110V (1Φ) έως 480V (3Φ)), την παρουσία ή απουσία γείωσης και γραμμών ελέγχου που επιτρέπουν έναν μονόδρομο ή αμφίδρομο διάλογο μεταξύ του σταθμού φόρτισης και του EV και την παρουσία και τη θέση προστασίας συσκευής, το πρότυπο IEC 61851-1 ορίζει 4 είδη φόρτισης.

Mode 1: (Σύνδεση σε οικιακή πρίζα χωρίς προστασία) το ηλεκτρικό όχημα συνδέεται σε μια τυπική πρίζα ενός δικτύου παροχής εναλλασσόμενου ρεύματος, χρησιμοποιώντας ένα καλώδιο και ένα βύσμα, και κανένα από τα δύο δεν είναι εφοδιασμένο με καμία πρόσθετη επαφή ελέγχου ή βοηθητική επαφή.

Οι ονομαστικές τιμές για το ρεύμα και την τάση δεν πρέπει να υπερβαίνουν:

-16 A και 250 V AC, μονοφασικό,

-16 A και 480 V AC, τριφασικό.

Mode 2: (Σύνδεση σε οικιακή πρίζα με προστασία) το ηλεκτρικό όχημα συνδέεται σε μια τυπική πρίζα ενός δικτύου τροφοδοσίας AC που χρησιμοποιεί έναν εξοπλισμό τροφοδοσίας εναλλασσόμενου ρεύματος με καλώδιο και βύσμα, με σύστημα ελέγχου και σύστημα προστασίας από ηλεκτροπληξία τοποθετημένο ανάμεσα στο βύσμα και το όχημα.

Οι ονομαστικές τιμές για το ρεύμα και την τάση δεν πρέπει να υπερβαίνουν:

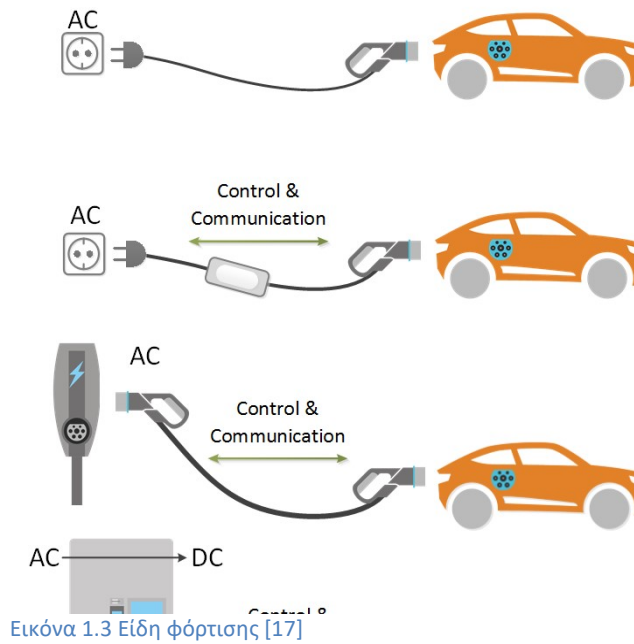
-Μονοφασικό 32 A και 250 V AC

-Τριφασικό 32 A και 480 V AC.

Mode 3: (Σύνδεση σε εξειδικευμένη πρίζα με προστασία) το ηλεκτρικό όχημα συνδέεται σε εξοπλισμό παροχής εναλλασσόμενου ρεύματος μόνιμα συνδεδεμένο σε δίκτυο τροφοδοσίας εναλλασσόμενου ρεύματος, με σύστημα ελέγχου που εκτείνεται από τον εξοπλισμό τροφοδοσίας εναλλασσόμενου ρεύματος έως το ηλεκτρικό όχημα.

Mode 4: (DC φόρτιση) το ηλεκτρικό όχημα συνδέεται σε δίκτυο παροχής εναλλασσόμενου ρεύματος ή συνεχούς ρεύματος που χρησιμοποιεί εξοπλισμό τροφοδοσίας DC, με σύστημα ελέγχου που εκτείνεται από τον εξοπλισμό τροφοδοσίας DC ηλεκτρικού ρεύματος έως το ηλεκτρικό όχημα.

Στην Εικόνα 1.3 βλέπουμε μια οπτική απεικόνιση των παραπάνω ειδών φόρτισης.



Εικόνα 1.3 Είδη φόρτισης [17]

Στα είδη φόρτισης Mode 2, Mode 3, Mode 4 πρέπει να παρέχονται οι ακόλουθες λειτουργίες ελέγχου από τον εξοπλισμό παροχής ηλεκτρικού ρεύματος:

- Συνεχής έλεγχος συνέχειας του προστατευτικού αγωγού.
- Επαλήθευση ότι το ηλεκτρικό όχημα είναι σωστά συνδεδεμένο με τον εξοπλισμό παροχής ηλεκτρικού ρεύματος.
- Ενεργοποίηση της τροφοδοσίας του ηλεκτρικού αυτοκίνητου εφόσον έχει εγκατασταθεί η κατάλληλη κατάσταση.
- Απενεργοποίηση της τροφοδοσίας του ηλεκτροκίνητου μετά το πέρας της φόρτισης ή σε περίπτωση σφάλματος.
- Ενημέρωση του οχήματος σχετικά με το μέγιστο επιτρεπόμενο ρεύμα.

Από ένα DC σύστημα φόρτισης (Mode 4) πρέπει να παρέχονται επιπλέον:

- παροχή συνεχούς τάσης και ρεύματος στο ηλεκτρικό όχημα,
- μέτρηση ρεύματος και τάσης,
- συγκράτηση/απελευθέρωση ζεύκτη οχήματος-φορτιστή,
- κλείδωμα του ζεύκτη,
- αξιολόγηση συμβατότητας,
- δοκιμή μόνωσης πριν από τη φόρτιση,
- προστασία από υπέρταση στην μπαταρία,
- επαλήθευση τάσης σύνδεσης οχήματος πριν το κλείδωμα του ζεύκτη,
- ακεραιότητα κυκλώματος ελέγχου σε περίπτωση σφάλματος,
- δοκιμή βραχυκυκλώματος πριν από τη φόρτιση,
- απενεργοποίηση από τον χρήστη,
- προστασία υπερφόρτωσης για παράλληλους αγωγούς (υπό όρους λειτουργία),
- προστασία από προσωρινή υπέρταση,
- έκτακτη διακοπή λειτουργίας.

Στον Πίνακα 1.1 παρατίθεται μια σύνοψη των βασικών τρόπων φόρτισης σύμφωνα με τα διάφορα πρότυπα. Παρατηρούμε μια διαφοροποίηση στα επίπεδα τάσης των διαφορετικών προτύπων, η οποία αντικατοπτρίζει τις διαφορετικές τάσεις λειτουργίας των δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας ανά τον κόσμο. Το κύριο συμπέρασμα που εξάγουμε από τον Πινάκα 1.1 είναι ότι πάρα τις διαφοροποιήσεις ένας φορτιστή εναλλασσόμενης τάσης χρησιμοποιεί τον εσωτερικό φορτιστή του οχήματος και η μέγιστη ισχύς εξόδου δεν υπερβαίνει τα 43kW. Αντίθετα οι φορτιστές συνεχούς τάσης είναι εξωτερικοί του οχήματος και έτσι μπορούν να έχουν αρκετά μεγαλύτερη τάση εξόδου ως και 400kW. Επειδή ο χρόνος φόρτισης καθορίζεται από το επίπεδο ισχύος, μεγαλύτερη ισχύς εξόδου συνεπάγεται ταχύτερη φόρτιση.

Πρωτόκολλο	Επίπεδο τάσης [V]	Μέγιστο ρεύμα [A]	Μέγιστη ισχύς [kW]	Θέση φορτιστή
SAE Standards				
AC Level 1	1ϕ 120	16	1.92	On board
AC Level 2	1ϕ 208/240	80	19.2	On board
DC Power Level 1	Up to 1000	80	80	Off board
DC Power Level 2	Up to 1000	400	400	Off board
IEC Standard				
AC Mode 1	1ϕ 250 3ϕ 480	16	7.68	On board
AC Mode 2	1ϕ 250 3ϕ 480	32	15.36	On board
AC Mode 3	1ϕ 250 3ϕ 480	63	43	On board
DC Mode 4	Up to 920	380	350	Off board
CHAdeMO Standard				
DC Rapid Charging	Up to 500 (v 1.0) Up to 1000 (v 2.0)	125 (v 1.0) 400 (v 2.0)	400	Off board
GB/T Standard				
AC Mode 1	1ϕ 250	8	2	On board
AC Mode 2	1ϕ 250	16	4	On board
AC Mode 3	1ϕ 250 3ϕ 440	63	43	On board
DC Mode 4	Up to 1000	250	187.5	Off board
Tesla				
Tesla Supercharger	Up to 410	330	135	Off board

Πίνακας 1.1 Σύνοψη των βασικών τρόπων φόρτισης σύμφωνα με τα διάφορα πρότυπα.

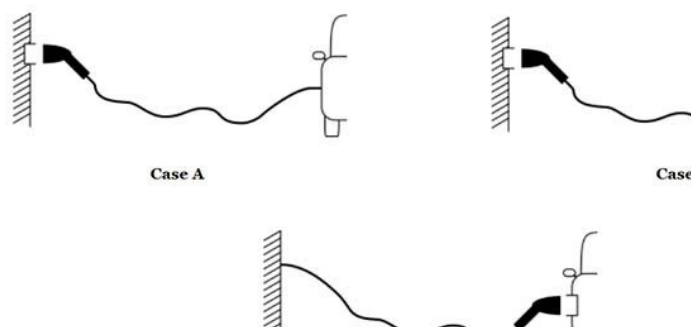
Σύνδεση φορτιστή με το όχημα

Όπως αναφέραμε παραπάνω τα διεθνή πρότυπα πέρα από τα επίπεδα φόρτισης παρέχουν και συγκεκριμένες προδιαγραφές για την σύνδεση του φορτιστή με το όχημα. Σύμφωνα με το πρότυπο IEC 61851-1 μπορούμε να διακρίνουμε την σύνδεση σε 3 κατηγορίες ανάλογα με το αν το καλώδιο φόρτισης είναι μονίμως συνδεδεμένο στο όχημα, στο φορτιστή ή σε κανένα από τα δύο. Όπως φαίνεται Εικόνα 1.4 έχουμε:

Case A: σύνδεση ενός ηλεκτρικού αυτοκινήτου στο δίκτυο τροφοδοσίας με ένα βύσμα και ένα καλώδιο μόνιμα συνδεδεμένο στο όχημα

Case B: σύνδεση ενός ηλεκτρικού οχήματος σε δίκτυο τροφοδοσίας με ένα καλώδιο αποσπώμενο και στα δύο άκρα

Case C: σύνδεση EV σε δίκτυο τροφοδοσίας που χρησιμοποιεί μόνιμο καλώδιο και κονέκτορα οχήματος προσαρτημένο στο σταθμό φόρτισης EV.



Εικόνα 1.4 Τύποι σύνδεσης φορτιστή [18]

Βύσματα

Τα βύσματα των φορτιστών βασίζονται στα πρότυπα SAE J1772 για την Αμερική, IEC 62196 για την Ευρώπη και GB/T 20234 για την Κίνα. Επιπλέον υπάρχουν και συστήματα φόρτισης σύμφωνα το πρότυπο φόρτισης CHAdeMO που είχε προταθεί από τον σύνδεσμο Ιαπωνικών κατασκευαστών οχημάτων. Αντίστοιχα, η εταιρία παραγωγής ηλεκτρικών οχημάτων Tesla Motors διαθέτει επίσης το δικό της ιδιόκτητο πρότυπο, για το οποίο δεν μοιράζεται λεπτομέρειες [19].

Ανάλογα με το είδος της παροχής έχουμε την παρακάτω κατηγοριοποίηση:

AC 1φ: Αυτού του είδους η φόρτιση συνηθίζεται κυρίως στην Αμερική όπου χρησιμοποιείται βύσμα IEC 62196 Type 1 το οποίο ταυτίζεται με το SAE J1772. Εικόνα 1.5.a

AC 3φ: Χρησιμοποιείται βύσμα IEC 62196 Type 2 για την Ευρώπη ή κάποιο άλλο βασισμένο σε αυτό όπως το SAE J3068 για την Αμερική και το GB/T 20234 AC για την Κίνα. Εικόνα 1.5.b

DC: Ορίζονται 4 βασικές υποδοχές σύμφωνα με το πρότυπο IEC 62196

AA γνωστή και ως CHAdeMO, που χρησιμοποιείται διεθνώς, Εικόνα 1.5.f

BB γνωστή και ως GB/T 20234 DC, που χρησιμοποιείται στην Κίνα, Εικόνα 1.5.g

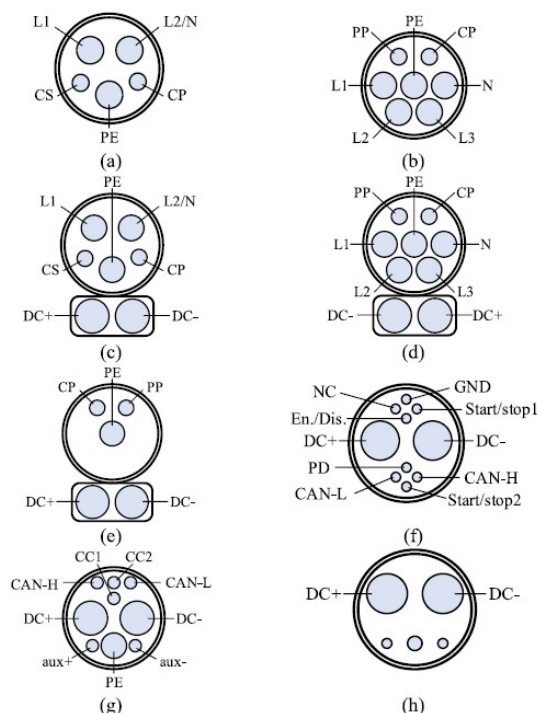
EE γνωστή και ως CCS Combo1, που χρησιμοποιείται στην Αμερική, Εικόνα 1.5.c

FF γνωστή και ως CCS Combo2, που χρησιμοποιείται στην Ευρώπη, Εικόνα 1.5.d

Επιπλέον υπάρχει και υποδοχή του Tesla supercharger που χρησιμοποιείται διεθνώς, Εικόνα 1.5.h

Στην Εικόνα 1.5 βλέπουμε τα βύσματα σύμφωνα με τα πρωτοκόλλα (a) SAE J1772, (b) IEC 62196-2 Type 2, (c) SAE/IEC DC Combo 1, (d) SAE/IEC DC Combo 2, (e) SAE/IEC DC Combo (με δυνατότητα μόνο DC φόρτισης), (f) CHAdeMO, (g) GB/T 20234-3, (h) Tesla supercharger.

Διακρίνονται οι γραμμές ισχύος AC (L1/2/3), ουδετέρου (N), ελέγχου Control Switch (CS), ελέγχου Control Pilot (CP), γείωσης Protected Earth (PE), ελέγχου Proximity Pilot (PP), γραμμές ισχύος DC (DC+/-), γείωσης (GND), επικοινωνίας Control Area Network (CAN-H/L), βοηθητικής παροχής (aux+/-), ελέγχου Proximity Detection (PD), χωρίς σύνδεση (NC).



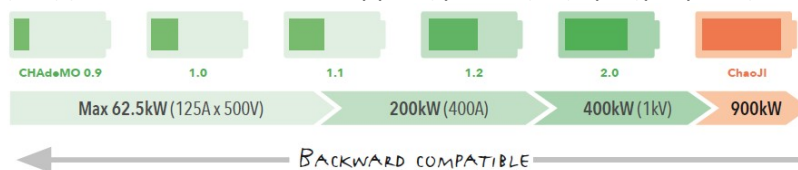
Εικόνα 1.5 Τύποι βυσμάτων ηλεκτρικών οχημάτων [15]

Πρότυπα επικοινωνίας

Όπως φαίνεται και από την Εικόνα 1.5 διαφορετικά βύσματα έχουν διαφορετικά σήματα ελέγχου και επικοινωνίας. Αξίζει λοιπόν να αναφερθούμε στα διαφορετικά πρωτόκολλα ελέγχου και επικοινωνίας που έχει κάθε πρότυπο.

Εστιάζοντας στην DC φόρτιση έχουμε 3 κύρια συστήματα φόρτισης: System A (γνωστό ως CHAdeMO), System B (γνωστό ως GB/T), System C (γνωστό ως CCS).

Παρατηρούμε ότι οι φορτιστές CCS έχουν το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό ότι ενοποιούν την AC και την DC φόρτιση σε ένα βύσμα. Στα πλαίσια την ενοποίησης αξίζει να αναφέρουμε ότι το CHAdeMO στην καινούργια του έκδοση CHAdeMO 3.0 (η οποία αναπτύσσεται με την υποστήριξη των κυβερνήσεων Κίνας και Ιαπωνίας) προτείνει έναν οικουμενικό φορτιστή με βύσμα ChaoJI το οποίο θα είναι συμβατό με όλα τα υπάρχοντα πρότυπα CHAdeMO, GB/T και CCS. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.6 η εξέλιξη του CHAdeMO είναι συμβατή με όλες τις προηγούμενες εκδόσεις του προτύπου.



Εικόνα 1.6 Εξέλιξη του CHAdeMO [20]

Το πρότυπο IEC 61851-23 καθορίζει τις προδιαγραφές για ένα σύστημα dc φόρτισης σε ότι αφορά το φυσικό επίπεδο, το επίπεδο της εφαρμογής και το εύρος της τάσης εξόδου. Το πρότυπο IEC 61851-24 περιγράφει την διαδικασία ψηφιακής επικοινωνίας ανάμεσα στο όχημα και στο φορτιστή.

Για την υλοποίηση της επικοινωνίας σε φυσικό επίπεδο οι φορτιστές CHAdeMO και GB/T χρησιμοποιούν Controlled Area Network (CAN) μέσω αποκλειστικών κυκλωμάτων ψηφιακής επικοινωνίας σύμφωνα με το ISO 11898-1. Τα κανάλια αυτά αντιστοιχούν τα pin CAN-H/L του βύσματος. Οι φορτιστές CCS χρησιμοποιούν power line communication (PLC) βασισμένη στο Homeplug Green PHY™ μέσω του κυκλώματος control pilot. Παρόλο που αυτού του είδους η επικοινωνία δεν συνηθίζεται στην αυτοκινητοβιομηχανία, είναι διαδεδομένη σε εφαρμογές ευφυών δικτύων [21].

Για την υλοποίηση της επικοινωνίας σε επίπεδο εφαρμογής οι φορτιστές CHAdeMO και GB/T χρησιμοποιούν το πρωτόκολλο Controlled Area Network (CAN), ενώ οι φορτιστές CCS το πρωτόκολλο IPV6.

Στον Πίνακα 1.2 συνοψίζονται οι διαφοροποιήσεις σε ότι αφορά την επικοινωνία ενός DC φορτιστή.

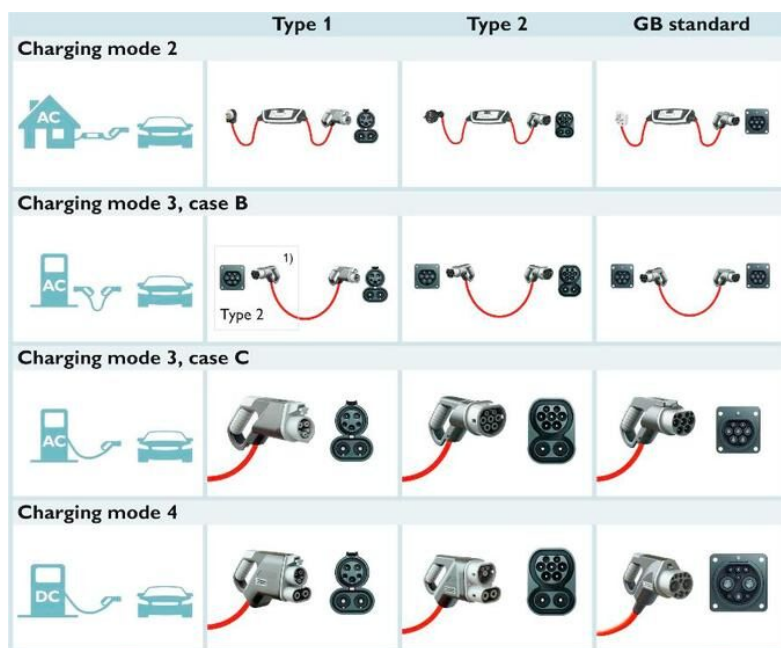
Σύστημα	Φυσικό επίπεδο	Επίπεδο εφαρμογής	Πρωτόκολλο εφαρμογής	Ταχύτητα επικοινωνίας	Μορφή δεδομένων
CHAdeMO	CAN 2.0	CAN	CHAdeMO	500 Kbps	Standard CAN 11 bit identifier
GB/T	CAN 2.0	CAN	GB/T27930	250 Kbps	Extended CAN 29 bit identifier
CCS	PLC	IPV6	ISO 15118-2	- (IPV6)	Efficient XML Interchange (EXI) format

Πίνακας 1.2 Σύγκριση προτύπων επικοινωνίας για DC φορτιστή

Στο [22] γίνεται μια σύγκριση των πρωτοκόλλων με βάση το αν χρησιμοποιείται τρόπος επικοινωνίας διαδεδομένος στην αυτοκινητοβιομηχανία, την ευκολία υλοποίησης, το πλήθος των παραμέτρων, το κόστος και τον τύπο φόρτισης που υποστηρίζει. Με βάση αυτή τη σύγκριση το GB/T27930 λαμβάνει τη μεγαλύτερη βαθμολογία ακολουθούμενο από το CHAdeMO, με τελευταίο το ISO 15118-2.

Συνολική επισκόπηση προτύπων φόρτισης

Στην Εικόνα 1.7 βλέπουμε την σύνδεση του φορτιστή με το όχημα για διάφορα είδη φόρτισης και βύσματα σύμφωνα με τα πρότυπα IEC 62196-2 Type 1, IEC 62196-2 Type 2 και GB/T



1) The Type 1 standard does not call for a charging plug within the infrastructure. In Europe an "adapter" charging cable is used here, which consists of a Type 1 charging plug in the vehicle and a Type 2 charging plug in the infrastructure.

Εικόνα 1.7 Επισκόπηση προτύπων λειτουργίας [23]

Επισκόπηση εμπορικών φορτιστών

Έχοντας αναλύσει τα διάφορα πρότυπα φόρτισης αξίζει να δούμε τα χαρακτηριστικά διάφορων εμπορικών φορτιστών με έμφαση στην δυνατότητα DC φόρτισης, όπως συνοψίζονται στον Πίνακα 1.3.

Μοντέλο	Υποστηριζόμενα πρότυπα	Ονομαστική ισχύς εξόδου [kW]	Τάση εισόδου [V]	Τάση εξόδου [V]	Μέγιστο ρεύμα εξόδου [A]	Απόδοση [%]
ABB Terra 54	CCS 2	50	400 V _{AC} 3 ϕ	200-920 V _{DC}	125 A _{DC}	94
	CHAdemo	50	400 V _{AC} 3 ϕ	150-500 V _{DC}	125 A _{DC}	94
	AC Type 2	22 / 43	400 V _{AC} 3 ϕ	400 V _{AC}	63 A _{AC}	94
ABB Terra HP	CCS 1	350	480 V _{AC} 3 ϕ	150 – 920 V _{DC}	500 A _{DC}	95
	CHAdemo	350	480 V _{AC} 3 ϕ	150 – 920 V _{DC}	200 A _{DC}	95
Tritium Veefil RT	CCS 1	175	400 V _{AC} 3 ϕ	200 - 920 V _{DC}	350 A _{DC}	98
	CCS 2	175	480 V _{AC} 3 ϕ	200 - 920 V _{DC}	350 A _{DC}	98
	CHAdemo	175	400 / 480 V _{AC} 3 ϕ	200 - 920 V _{DC}	200 A _{DC}	98
Tritium Veefil PK	CCS 2	350	480 V _{AC} 3 ϕ	200 - 920 V _{DC}	500 A _{DC}	98
	CHAdemo	350	480 V _{AC} 3 ϕ	200 - 920 V _{DC}	200 A _{DC}	98
Tesla Supercharger	Supercharger	135	480 V _{AC} 3 ϕ	50 - 410 V _{DC}	330 A _{DC}	92
EVTec Espresso & Charge	AC Type 2	22 / 43	400 V _{AC} 3 ϕ	400 V _{AC}	63 A _{AC}	93
	CCS 2	20k - 150kW	400 V _{AC} 3 ϕ	170 - 940 V _{DC}	50 - 400 A _{DC}	93
	CHAdemo	20k - 150kW	400 V _{AC} 3 ϕ	170 - 940 V _{DC}	50 - 400 A _{DC}	93
EFAECE-QC45	CCS 2 & CHAdemo	50	480 V _{AC} 3 ϕ	50 - 500 V _{DC}	120 A _{DC}	98
Delta Ultra Fast	CCS 2 & CHAdemo	200	400 V _{AC} 3 ϕ	200 - 1000 V _{DC}	500 A _{DC}	95
PHIHONG DC 180 Series	CCS 1	180	480 V _{AC} 3 ϕ	150 - 950 V _{DC}	200 A _{DC}	94
	CCS 2	180	400 V _{AC} 3 ϕ	150 - 950 V _{DC}	200 A _{DC}	94
	CHAdemo	180	400 V _{AC} 3 ϕ	150 - 500 V _{DC}	120 A _{DC}	94
	GB/T	180	400 V _{AC} 3 ϕ	150 - 750 V _{DC}	250 A _{DC}	94

Πίνακας 1.3 Σύγκριση εμπορικών DC φορτιστών [24-32]

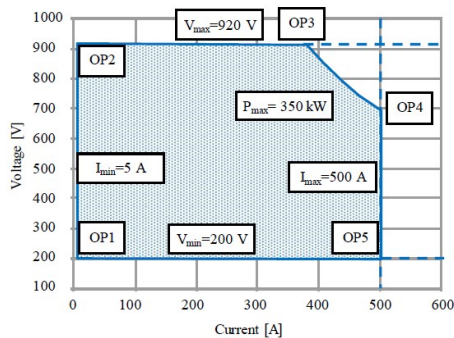
Παρατηρούμε ότι οι φορτιστές συνήθως διαθέτουν εξόδους συμβατές με περισσότερα από ένα πρότυπα, προκειμένου να μπορούν να εξυπηρετήσουν την πλειονότητα των ηλεκτρικών αυτοκινήτων. Λόγω της διαφορετικότητας των προδιαγραφών κάθε προτύπου βλέπουμε μια διαφοροποίηση στα χαρακτηριστικά του. Επιπλέον αρκετές εταιρίες προσφέρουν λύσεις σε μια γκάμα επιπέδων ισχύος και τάσεων εξόδου. Προκειμένου να έχουν αποδοτική λειτουργία σε όλες

τις καταστάσεις λειτουργίας συχνά χρησιμοποιείται μια βαθμωτή σχεδίαση, δηλαδή ένας φορτιστής υλοποιείται από πολλά όμοια στάδια μικρότερης ισχύος ή/και τάσης

Βαθμωτή σχεδίαση

Στην βιβλιογραφία υπάρχουν αρκετές μελέτες σχετικά με την λειτουργία συστημάτων μετατροπής ενέργειας αποτελούμενα από πολλαπλούς όμοιους μετατροπείς συνδεδεμένους σε σειρά ή παράλληλα. Αυτού του είδους τα συστήματα έχουν πολλαπλά πλεονεκτήματα όπως: αυξημένη αξιοπιστία, μειωμένη καταπόνηση των στοιχείων, βελτιωμένη διαχείριση της θερμότητας, απόδοση σε μικρό φορτίο, ευκολία επέκτασης.[33],[34]

Ένας φορτιστής μπορεί να λειτουργεί σε ένα μεγάλο εύρος τάσεων και ρευμάτων όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.8. Μια βαθμωτή σχεδίαση συμβάλλει στο να έχει υψηλή απόδοση σε όλα τα διαφορετικά σημεία λειτουργίας (OP1,OP2,OP3,OP4,OP5)



Εικόνα 1.8 Διάγραμμα περιοχών λειτουργίας [35]

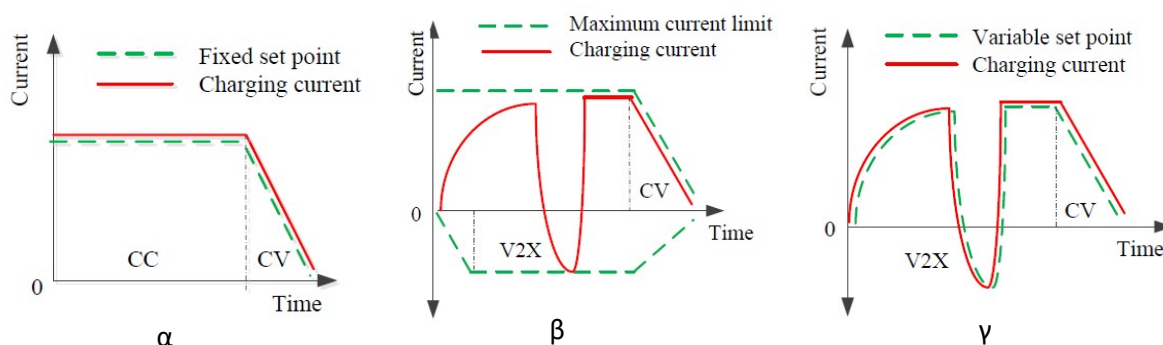
Διαδικασία φόρτισης

Η διαδικασία φόρτισης ακολουθεί μια σειρά βημάτων που ορίζονται από το πρωτόκολλο φόρτισης. Ανεξάρτητα από το πρότυπο επικοινωνίας η διαδικασία φόρτισης ακολουθεί μια κοινή λογική. Η ακολουθία φόρτισης συνήθως ξεκινά με μια χειραψία, δοκιμή της μόνωσης και ανταλλαγή των μέγιστων παραμέτρων φόρτισης μεταξύ του οχήματος και το φορτιστή. Εάν πληρούνται όλα τα απαιτούμενα κριτήρια, το όχημα κλείνει τον επαφέα του και αρχίζει η φόρτιση. Κατά την διάρκεια της διαδικασίας φόρτισης, το όχημα και ο φορτιστής ανταλλάσσουν πληροφορίες σχετικά με το επιθυμητό ρεύμα και την τάση αναφοράς. Επιπλέον, το σύστημα διαχείρισης της μπαταρίας του οχήματος (Battery Management System) ενημερώνει τον φορτιστή για την κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας (SoC) και άλλες χρήσιμες πληροφορίες. Η όλη διαδικασία φόρτισης διαχειρίζεται από τον φορτιστή με βάση έναν αλγόριθμο φόρτισης σε καθορισμένο χρονικό διάστημα, φροντίζοντας παράλληλα και για την κατάλληλη διαχείριση των σφαλμάτων. Όταν η μπαταρία φθάνει σε μια προκαθορισμένη κατάσταση φόρτισης SoC, το όχημα δίνει σήμα στο φορτιστή για να τερματίσει τη φόρτιση μειώνοντας το ρεύμα φόρτισης στο μηδέν. Το όχημα τότε αποσυνδέεται από το φορτιστή ανοίγοντας το DC επαφέα του. [31]

Στην συμβατική μορφή φόρτισης το όχημα θέτει μια επιθυμητή τιμή ρεύματος φόρτισης και ο φορτιστής φροντίζει να την παρέχει, Εικόνα 1.9α. Στην δυναμική φόρτιση το όχημα μπορεί είτε να φορτίζει είτε να εκφορτίζει. Η δυναμική φόρτιση μπορεί να υλοποιηθεί με δύο τρόπους:

1. Το όχημα στέλνει πληροφορίες σχετικά με το μέγιστο ρεύμα φόρτισης και εκφόρτισης ανάλογα με την κατάσταση της μπαταρίας (SoC, θερμοκρασία κλπ). Αν το μέγιστο ρεύμα εκφόρτισης είναι μηδέν σημαίνει ότι δεν μπορεί να επιτευχθεί λειτουργία V2X. Ο φορτιστής μπορεί να επιλέξει να παράγει στην έξοδο οπουδήποτε ρεύμα ανάμεσα στα επιτρεπτά όρια. Εικόνα 1.9β
2. Η αναφορά του ρεύματος μπορεί να πάρει είτε θετικές είτε αρνητικές τιμές και να αντιστοιχεί σε ρεύμα φόρτισης ή εκφόρτισης αντίστοιχα. Εικόνα 1.9γ.

Στην Εικόνα 1.9 φαίνεται μια σχηματική απεικόνιση του ρεύματος φόρτισης στις διάφορες μορφές φόρτισης.



Εικόνα 1.9 διάγραμμα φόρτισης (α) χωρίς δυνατότητα V2G (β),(γ) με δυνατότητα V2G [36]

Μπαταρίες και τρόποι φόρτισης.

Οι μπαταρίες των ηλεκτρικών αυτοκινήτων είναι συνήθως μπαταρίες ιόντων λιθίου, με την Ασία να παράγει την πλειονότητα των μπαταριών ιόντων λιθίου που χρησιμοποιούνται στα ηλεκτρικά αυτοκίνητα. Η Panasonic έχει το 40% της συνολικής παραγωγής, ακολουθούμενη από την CALT, η οποία ηγείται της επένδυσης στην Κίνα, κατέχοντας το 23% της αγοράς και την LG Chem με 18% [37].

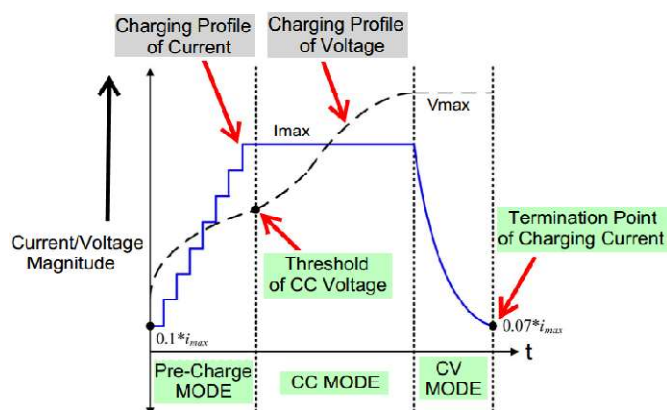
Οι πιθανοί τρόποι φόρτισης μιας μπαταρίας είναι:

- Σταθερή τάση (CV): Ο φορτιστής είναι στην πράξη ένα απλό τροφοδοτικό συνεχούς τάσης
- Σταθερό ρεύμα (CC): Οι φορτιστές σταθερού ρεύματος μεταβάλλουν την τάση που εφαρμόζουν στην μπαταρία για να διατηρήσουν μια σταθερή ροή ρεύματος, μηδενίζοντας όταν η τάση φτάσει στο επίπεδο πλήρους φόρτισης. Αυτός ο σχεδιασμός χρησιμοποιείται συνήθως για μπαταρίες νικελίου-καδμίου και νικελίου-μετάλλου.
- Taper Current: Είναι μια μη ελεγχόμενη φόρτιση και υπάρχει σοβαρός κίνδυνος καταστροφής των μπαταριών λόγω υπερφόρτισης. Ενδείκνυται μόνο για Sealed Lead Acid (SLA) μπαταρίες.
- Pulse Current: Η φόρτιση γίνεται με παλμούς μεταβλητού πλάτους συνήθως ανά 1 δευτερόλεπτο. Κατά την διάρκεια της διαδικασίας φόρτισης ανάμεσα στους παλμούς φόρτισης παρεμβάλλουμε μικρούς παλμούς αποφόρτισης της τάξης των 20 έως 30 χιλιοστών του δευτερολέπτου που επιτρέπουν την σταθεροποίηση των χημικών διαδικασιών της μπαταρίας. Αυτό δίνει την δυνατότητα στη χημική αντίδραση να συμβαδίζει με το ρυθμό εισαγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας.
- Trickle Charge: Σχεδιάστηκε για να αντισταθμίσει την αυτό-αποφόρτιση της μπαταρίας. Πρόκειται για φόρτιση μακράς διάρκειας με σταθερό ρεύμα. Ο ρυθμός φόρτισης μεταβάλλεται ανάλογα με την αποφόρτιση. Δεν είναι κατάλληλο για μπαταρίες που φθείρονται λόγω υπερφόρτισης πχ NiMH ή λιθίου. [38]

Οι μπαταρίες λιθίου είναι περισσότερο ευαίσθητες ως προς την τάση σε σχέση με το ρεύμα. Η φόρτιση μπαταριών λιθίου είναι γενικώς παρόμοια με την φόρτιση μπαταριών μολύβδου οξέος. Η βασική διαφορά είναι ότι οι μπαταρίες λιθίου έχουν μεγαλύτερη τάση ανά κύτταρο, ενώ επίσης χρειάζονται μεγαλύτερη ακρίβεια στην ανίχνευση πλήρους φόρτισης, καθώς οι μπαταρίες λιθίου δεν είναι ανθεκτικές στην υπερφόρτιση.

Ο πιο διαδεδομένος τρόπος φόρτισης μπαταριών ιόντων λιθίου ακολουθεί την λογική Constant Current/Constant Voltage (CC/CV), που είναι ένας συνδυασμός των φορτίσεων υπό σταθερό ρεύμα και υπό σταθερή τάση, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.10. Αρχικά το ρεύμα αυξάνει μέχρι να φτάσει μια προκαθορισμένη τιμή. Μόλις το ρεύμα φτάσει στην επιθυμητή τιμή CC η τάση της μπαταρίας αυξάνει με το επίπεδο φόρτισης (SoC). Το οποίο οδηγεί σε αύξηση της απορροφώμενης ισχύος. Με αυτό τον τρόπο η μπαταρία μπορεί να φτάσει γρήγορα στο 80% SoC. Μόλις η φόρτιση περάσει στο CV στάδιο, το ρεύμα και η απορροφώμενη ισχύς μειώνονται σταδιακά. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να

αποφεύγεται ο κίνδυνος υπερφόρτισης, με σημαντική όμως μείωση ταυτόχρονα στον ρυθμό φόρτισης.[5]



Εικόνα 1.10 Διάγραμμα φόρτισης [5]

Επίδραση της φόρτισης στην μπαταρία

Οι ταχυφορτιστές μπορούν να επιταχύνουν την μείωση της διάρκειας ζωής των μπαταριών σε οχήματα με μπαταρίες Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide (NMC). Ωστόσο, τα συστήματα διαχείρισης μπαταριών στα οχήματα έχουν ρυθμιστεί να περιορίζουν το επίπεδο ισχύος που λαμβάνουν προκειμένου να αποτρέψουν την επιταχυνόμενη μείωση της διάρκειας ζωής των μπαταριών. Επομένως, ο αντίκτυπος της ταχείας φόρτισης εξαρτάται επίσης από αυτά τα όρια.

Σύμφωνα με τη μελέτη [39] τα μοντέλα EV με μπαταρίες NMC έχουν όρια ισχύος φόρτισης DC που εμποδίζουν το ρυθμό φόρτισης C-rate να υπερβεί κατά πολύ το 1C. Το C-rate είναι ένα μέτρο του ρυθμού με τον οποίο αποφορτίζεται μια μπαταρία σε σχέση με την μέγιστη χωρητικότητα. Ρυθμός 1C σημαίνει ότι το ρεύμα εκφόρτισης θα αποφορτίσει ολόκληρη την μπαταρία σε 1 ώρα.[40]

Για παράδειγμα στο Jaguar I-Pace η πρόσθετη μείωση της διάρκειας ζωής των μπαταριών περιορίζεται σε περίπου 3% σε 300 κύκλους όταν χρησιμοποιείται υπερταχυφορτιστής (με ισχύ εξόδου 350kW ή και μεγαλύτερη). Αυτό αντιστοιχεί σε μείωση της διάρκειας ζωής της μπαταρίας ως και 10% περισσότερο από την αντίστοιχη μείωση που θα προέκυπτε από 300 κύκλους φόρτισης σε μη υπερταχυφορτιστή. Συνεπώς, η τακτική ταχεία και υπερταχεία φόρτιση μειώνει περαιτέρω τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας, αλλά αυτό περιορίζεται λόγω των συστημάτων διαχείρισης της μπαταρίας.

Τοπολογία ενός φορτιστή

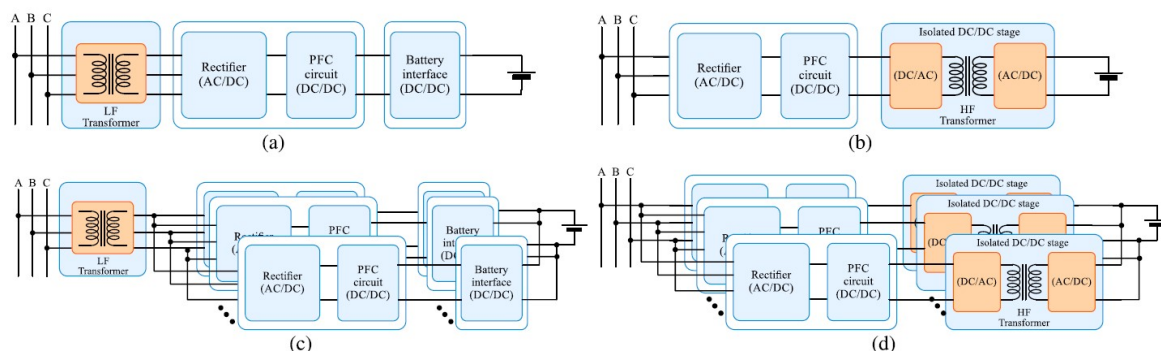
Ένας φορτιστής συνήθως αποτελείται από ένα στάδιο ανόρθωσης της τάσης AC/DC που διασφαλίζει αποδεκτή ποιότητα ισχύος στην πλευρά του δικτύου (Power factor correction, PFC) και ένα στάδιο ρύθμισης της τάσης εξόδου. Η τοπολογία των σταδίων ανόρθωσης της τάσης AC/DC και ρύθμισης της τάσης εξόδου DC/DC διαφοροποιείται ανάλογα με την ροή της ισχύος (μονόδρομη ή αμφίδρομη).

Τα συστήματα ηλεκτρικής φόρτισης θα πρέπει να παρέχουν απομόνωση ανάμεσα στο δίκτυο και το όχημα. Δεδομένου ότι η μπαταρία του οχήματος δεν είναι γειωμένη, διατηρώντας την απομόνωση το σύστημα φόρτισης δεν επηρεάζει την προστασία που έχει σχεδιαστεί για την μπαταρία. Η γαλβανική απομόνωση πέρα από την ασφάλεια, δίνει την δυνατότητα πολλαπλοί φορτιστές να συνδεθούν παράλληλα. Η γαλβανική απομόνωση μπορεί να επιτευχθεί με 2 τρόπους:

- Ο πρώτος είναι η χρήση μετασχηματιστή χαμηλής συχνότητας πριν από το στάδιο του ανορθωτή. Σε αυτή την περίπτωση οι μη απομονωμένοι μετατροπείς DC/DC έχουν απλή δομή, υψηλή απόδοση, μικρό κόστος και μέγεθος. Όμως το συνολικό κόστος θα είναι αυξημένο λόγω του μετασχηματιστή χαμηλής συχνότητας.

- Ο δεύτερος είναι η χρήση υψίσυχνου μετασχηματιστή DC/DC με γαλβανική απομόνωση. Τα βασικά πλεονεκτήματα είναι η δυνατότητα προσαρμογής της τάσης και το μικρότερο μέγεθος της διάταξης σε σχέση με όταν χρησιμοποιείται μετασχηματιστής χαμηλής συχνότητας.[41]

Στην εικόνα 1.11 φαίνεται η τοπολογία του φορτιστή (a) με μετασχηματιστή χαμηλής συχνότητας και (b) με υψίσυχνο μετασχηματιστή και οι αντίστοιχες τοπολογίες όταν ο φορτιστής αποτελείται από πολλαπλά τμήματα (c) με μετασχηματιστή χαμηλής συχνότητας και (d) με υψίσυχνο μετασχηματιστή συνδεδεμένα παράλληλα.



Εικόνα 1.11 Τοπολογία φορτιστή [41]

Στην συνέχεια αναλύονται οι επιμέρους τοπολογίες που χρησιμοποιούνται α. στο στάδιο ανόρθωσης, β. στο στάδιο μετατροπής DC/DC με γαλβανική απομόνωση και γ. στο στάδιο μετατροπής DC/DC χωρίς γαλβανική απομόνωση.

A. Στάδιο ανόρθωσης (AC/DC)

Το στάδιο αυτό αποτελεί την διεπαφή ανάμεσα στο δίκτυο και τον φορτιστή. Οι απαιτήσεις για αυτό το στάδιο είναι υψηλή ποιότητα ισχύος και στις δύο πλευρές, η οποία επιτυγχάνεται με διαμόρφωση του ρεύματος εισόδου και της τάσης εξόδου.

1. Μονόδρομη ροή ισχύος:

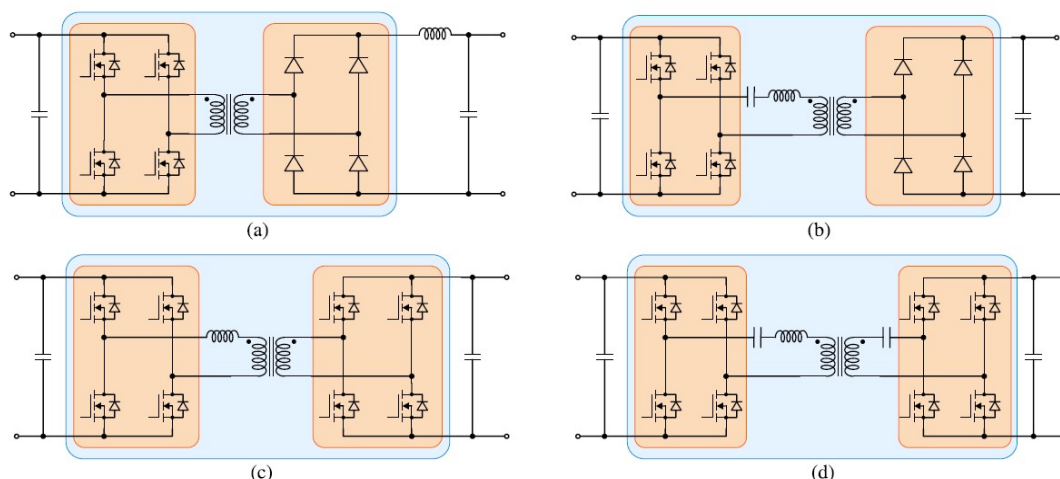
Αν δεν απαιτείται αμφίδρομη ροή ισχύος μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας μετατροπέας Vienna. Ένα βασικό μειονέκτημα αυτής της διάταξης είναι ο περιορισμένη δυνατότητα ελέγχου της αέργου ισχύος [41].

2. Αμφίδρομη ροή ισχύος:

Η πιο συνηθισμένη επιλογή, εξαιτίας της απλότητας της διάταξης και του ελέγχου, καθώς και της διαθεσιμότητας χαμηλού κόστους IGBT με ικανοποιητικά επίπεδα ρεύματος και τάσης, είναι ο τριφασικός μετατροπέας PWM με LCL φίλτρο στην είσοδο. Αυτού του είδους ο μετατροπέας έχει τάση εξόδου μεγαλύτερη από την πολική τάση εισόδου. Χρησιμοποιεί 6 διακόπτες, δημιουργεί μικρή αρμονική παραμόρφωση στο ρεύμα εισόδου, έχει δυνατότητα αμφίδρομης ροής ισχύος και επιτρέπει ευρύ περιθώριο ελέγχου του συντελεστή ισχύος.

Μια εναλλακτική επιλογή είναι ο μετατροπέας Neutral-Point-Clamped (NPC). Αυτός ο μετατροπέας επιτρέπει την χρήση στοιχείων χαμηλότερης τάσης με μειωμένες απώλειες διακοπής σε αποδεκτό κόστος. Επιπλέον έχει πολύ χαμηλή αρμονική παραμόρφωση. Στο [42] παρουσιάζεται το πρωτότυπο ενός σταθμού φόρτισης 30kW με NPC στο στάδιο AC/DC, το οποίο επιτυγχάνει πολύ μικρή αρμονική παραμόρφωση στην AC πλευρά. Ένα μειονέκτημα αυτής της διάταξης είναι ο αυξημένος αριθμός διακοπτικών στοιχείων σε σχέση με ένα τριφασικό μετατροπέα PWM.

B. Στάδιο ρύθμισης τάσης εξόδου (DC/DC) με γαλβανική απομόνωση



Εικόνα 1.12 Τοπολογίες DC/DC σταδίου με γαλβανική απομόνωση (α) Shift Full Bridge (PSFB) (b) μετατροπέας LLC (c) Dual Active Bridge (d) μετατροπέας CLLC [41]

1. Μονόδρομη ροή ισχύος:

Η πιο απλή επιλογή είναι η χρήση ενός μετατροπέα Phase Shift Full Bridge (PSFB). Εικόνα 1.12a. Όταν ο μετατροπέας λειτουργεί με έλεγχο PWM έχει την δυνατότητα έναυσης των διακοπών υπό μηδενική τάση (Zero Voltage Switching ZVS) [43]. Τα βασικά μειονεκτήματα αυτής της διάταξης είναι απώλειες σβέσης, οι αυξημένες απώλειες των διόδων και ο συντονισμός LCL της επαγωγής σκέδασης του μετασχηματιστή, με τις παρασιτικές χωρητικότητες των ανάστροφα πολωμένων διόδων και της επαγωγής της εξόδου. Για να μειωθεί αυτό το φαινόμενο μπορούν να χρησιμοποιηθούν κυκλώματα απόσβεση (snubber). [41]

Μια εναλλακτική επιλογή είναι η χρήση LLC μετατροπέα συντονισμού. Εικόνα 1.12b. Η έξοδος ρυθμίζεται αλλάζοντας την διακοπτική συχνότητα ανάλογα με το φορτίο. Αυτός ο μετατροπέας αξιοποιεί το ρεύμα μαγνήτισης για να επιτύχει ZVS και κατά τη σβέση, επιτυγχάνοντας μειωμένες απώλειες σβέσης και μειωμένες απώλειες στο μετασχηματιστή. Ωστόσο διαθέτει περιορισμένη δυνατότητα ελέγχου υπό ZVS σε περίπτωση μικρού φορτίου [44].

2. Αμφίδρομη ροή ισχύος:

Η πιο συνηθισμένη επιλογή, εξαιτίας της απλότητας της διάταξης και της δυνατότητας ZVS, είναι η χρήση μετατροπέα Dual Active Bridge (DAB). Εικόνα 1.12c. Ο μετατροπέας αυτός προσφέρει υψηλή απόδοση, δυνατότητα ανύψωσης και υποβιβασμού και μειωμένη καταπόνηση των διακοπτικών στοιχείων [45-49]. Σε αυτό τον μετατροπέα ο έλεγχος της μεταφερόμενης ισχύος γίνεται μέσω της διαφοράς φάσης μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος με την επαγωγή σκέδασης του μετασχηματιστή να λειτουργεί ως το στοιχείο μεταφοράς της ισχύος. Ένας φορτιστής θα πρέπει να είναι σε θέση να λειτουργεί σε ένα μεγάλο εύρος τάσεων, το οποίο μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένη άεργο ισχύ και αδυναμία επίτευξης ZVS. Αυτό επιφέρει σχεδιαστικές προκλήσεις καθώς μια μεγάλη επαγωγή σκέδασης προσφέρει μεγάλο εύρος ZVS αλλά αυξάνει την άεργο ισχύ και αντίστροφα [50]. Προκειμένου να έχουμε υψηλή απόδοση σε ένα ευρύ φάσμα τάσεων, διάφορες σύνθετες τεχνικές ελέγχου έχουν προταθεί, όπως η διαμόρφωση Dual Phase Shift (DPS), η οποία προσθέτει έναν επιπλέον βαθμό ελευθερίας στο duty cycle και μπορεί να ελαχιστοποιήσει την καταπόνηση ρεύματος στους διακόπτες [51]. Η διαμόρφωση Triple Phase Shift (TPS) αποτελεί γενίκευση της DPS προσθέτοντας έναν ακόμα βαθμό ελευθερίας και επιτυγχάνοντας ακόμα μεγαλύτερα εύρη λειτουργίας υπό ZVS και βελτιωμένη απόδοση [52],[53].

Μια άλλη παραλλαγή του παραπάνω μετατροπέα είναι ο CLLC μετατροπέας. Εικόνα 1.12d. Εξαιτίας της συμμετρίας του κυκλώματος, ο μετατροπέας αυτός παρέχει τα ίδια κέρδη τάσης και με στις δύο κατευθύνσεις ροής ισχύος, το οποίο μειώνει την πολυπλοκότητα του ελέγχου [54]. Χρειάζεται μικρότερη επαγωγή σκέδασης σε σχέση με τον DAB, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα μειωμένη άεργο ισχύ στο κύκλωμα [55]. Ωστόσο έχει περιορισμένες δυνατότητες όσον αφορά το εύρος της τάσης εξόδου [56].

Στον Πίνακα 1.4 παρουσιάζεται μια συνοπτική σύγκριση των παραπάνω τοπολογιών.

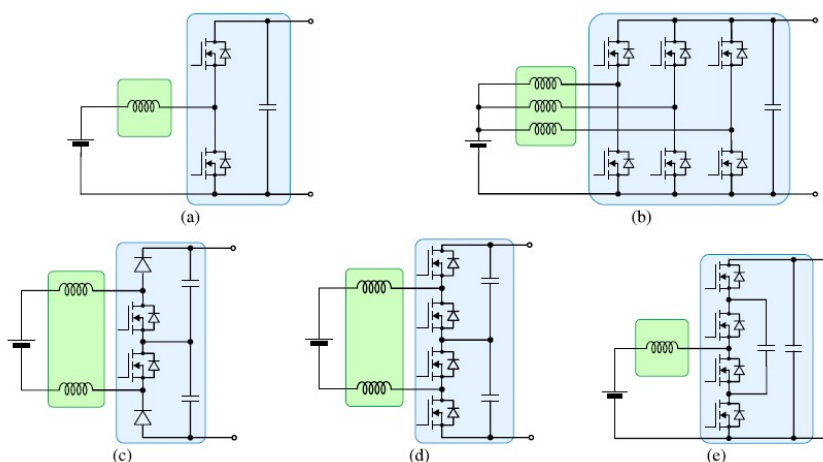
Μετατροπέας	Διακόπτες/ Δίοδοι	Αμφίδρομος	Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα
PSFB	4/4	Όχι	• Απλότητα ελέγχου • Μεγάλο εύρος εξόδου - Μεγάλες απώλειες στους διακόπτες του πρωτεύοντος και τις διόδους του δευτερεύοντος - Δυσκολία επίτευξης ZVS με μικρό φορτίο εξόδου
LLC	4/4	Όχι	• Μειωμένο άεργο ρεύμα • ZVS στο πρωτεύον και ZCS στο δευτερεύον - Περιορισμένη δυνατότητα ελέγχου - Δυσκολία επίτευξης υψηλής απόδοσης και ZVS σε ένα ευρύ φάσμα εξόδου
DAB	8/0	Ναι	• Ευρύ φάσμα εξόδου - Έμφυτο άεργο ρεύμα - Ανάγκη συμβιβασμού ανάμεσα στην άεργο ισχύ και την συνθήκη ZVS
CLLC	8/0	Ναι	• Μειωμένο άεργο ρεύμα • Μεγάλο εύρος εξόδου - Περιορισμένη δυνατότητα ελέγχου υπό ευρύ φάσμα εξόδου

Πίνακας 1.4 Συνοπτική σύγκριση των παραπάνω τοπολογιών

Σε πολλές περιπτώσεις ο στόχος είναι η ελαχιστοποίηση αριθμού των διακοπτικών στοιχείων. Ένας τρόπος να επιτευχθεί αυτό είναι η χρήση των αντίστοιχων τοπολογιών ημιγέφυρας των παραπάνω τοπολογιών όπως ο μετατροπέας LLC ημιγέφυρας [57] και ο μετατροπέας Dual Half Bridge (DHB) [58]. Αυτού του είδους οι μετατροπείς έχουν μειωμένα διακοπτικά στοιχεία και συνεπώς μειωμένο κόστος. Ωστόσο έχουν αυξημένη καταπόνηση ρεύματος στα διακοπτικά στοιχεία και λιγότερους βαθμούς ελευθερίας.

Γ. Στάδιο ρύθμισής τάσης εξόδου (DC/DC) χωρίς γαλβανική απομόνωση

Σε αυτού του είδους τους μετατροπείς οι διατάξεις αμφίδρομης ροής έχουν συνήθως υψηλότερη απόδοση σε σχέση με τις αντίστοιχες μονόδρομης, ενώ επιπλέον δεν έχουν πιο σύνθετο έλεγχο από αυτές [16].



Εικόνα 1.13 Τοπολογίες DC/DC σταδίου χωρίς γαλβανική απομόνωση (α) Μετατροπέας Buck (b) Πολυφασικός μετατροπέας buck (c) μονόδρομος μετατροπέας buck 3^{ωv} επιπέδων. (d) αμφίδρομος μετατροπέας buck 3^{ωv} επιπέδων. (e) Μετατροπέας Buck 3^{ωv} επιπέδων με αιωρούμενους πυκνωτές [41]

Σε περίπτωση που η τάση εξόδου του σταδίου ανόρθωσης είναι μεγαλύτερη από την τάση της μπαταρίας μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας μετατροπέας τύπου Buck. Εικόνα 1.13a. Είναι η απλούστερη τοπολογία σε μη απομονωμένο μετατροπέα DC/DC, όμως η ισχύς εξόδου είναι περιορισμένη.

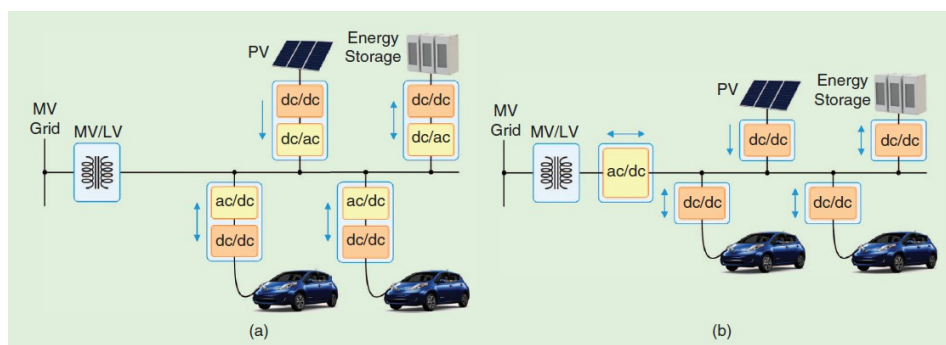
Προκειμένου να αυξήσουμε τις δυνατότητες μεταφοράς ρεύματος και να μειώσουμε την κυμάτωση του ρεύματος, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε έναν πολυφασικό buck μετατροπέα. Εικόνα 1.13b. Μια άλλη τοπολογία είναι ένας μετατροπέας Buck τριών επιπέδων. Εικόνα 1.13c (μονόδρομης ροής ισχύος), Εικόνα 1.13d (αμφίδρομης ροής ισχύος). Αυτός προσφέρει μειωμένη αρμονική παραμόρφωση σε σχέση με την απλή εκδοχή του, ενώ παράλληλα έχει μειωμένη κυμάτωση ρεύματος [59]. Σε σχέση με ένα διφασικό Buck μετατροπέα έχει αυξημένη απόδοση. Ωστόσο ο μετατροπέας Boost τριών επιπέδων δεν μπορεί να παραλληλιστεί εύκολα, εξαιτίας των μεγάλων κυκλοφορούντων ρευμάτων [60].

Τέλος υπάρχει και ο Buck τριών επιπέδων με αιωρούμενους πυκνωτές, Εικόνα 1.13e ο οποίος χρησιμοποιεί μικρότερη επαγωγή σε σχέση με τον απλό Buck. Επιπλέον μπορεί εύκολα να επιτύχει μεγάλη ισχύ εξόδου μέσω παράλληλων κλάδων. Ωστόσο η σχεδίαση προστασίας βραχυκύκλωσης είναι μια πρόκληση εξαιτίας των αιωρούμενων πυκνωτών [61].

Τοπολογία ενός σταθμού φόρτισης

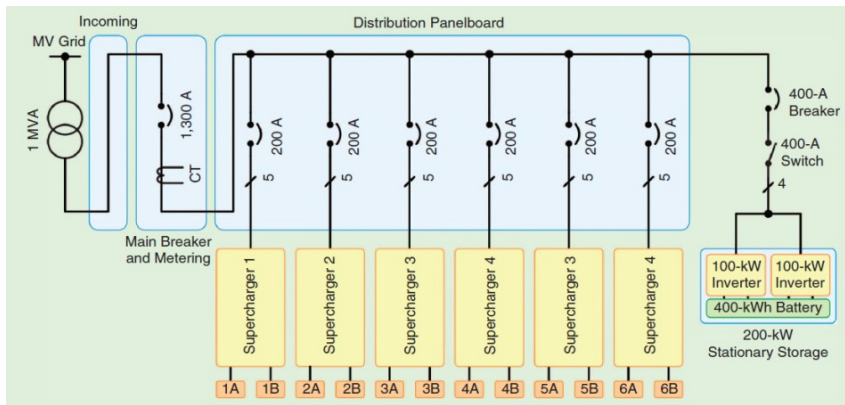
Όπως σε ένα βενζινάδικο πολλά οχήματα ανεφοδιάζονται ταυτόχρονα έτσι και σε έναν σταθμό φόρτισης θα πρέπει να υπάρχει η δυνατότητα πολλά οχήματα να φορτίζουν ταυτόχρονα. Αν ένας σταθμός φόρτισης τροφοδοτείται από ένα δίκτυο μέσης τάσης τότε πολλαπλοί φορτιστές να είναι συνδεδεμένοι μετά τον μετασχηματιστή υποβιβασμού στο ίδιο υποδίκτυο. Το υποδίκτυο αυτό μπορεί να είναι εναλλασσόμενης ή σταθερής τάσης. Στην Εικόνα 1.14. φαίνεται μια σχηματική αναπαράσταση για (α) AC και (β) DC υποδίκτυο.

Το υποδίκτυο αυτό μπορεί επίσης να περιλαμβάνει μονάδες αποθήκευσης ενέργειας ή/και φωτοβολταϊκή παραγωγή. Η ενσωμάτωση ΑΠΕ σε συνδυασμό με την εκμετάλλευση της τεχνολογίας V2G προσθέτει παραγωγή στον σταθμό και μετριάξει τις απαιτούμενες χρεώσεις. Επιτρέπει επίσης την ανταλλαγή ισχύος μεταξύ του σταθμού φόρτισης και του δικτύου και, ως εκ τούτου, παρέχει βοηθητικές υπηρεσίες στο δίκτυο, συμπεριλαμβανομένης της μετατόπισης φορτίου και ρύθμιση συχνότητας, υποστήριξη αέργου ισχύος για ρύθμιση τάσης. [31]



Εικόνα 1.14 τοπολογία σταθμού φόρτισης (α) με AC υποδίκτυο (β) με DC υποδίκτυο [31]

Η AC σύνδεση είναι η πιο διαδεδομένη σύνδεση σε σταθμούς φόρτισης ηλεκτρικών αυτοκινήτων. Ένα παράδειγμα τέτοιου σταθμού είναι ο σταθμός Tesla supercharger στο Mountain View της Καλιφόρνια, ο οποίος περιλαμβάνει 6 ταχυφορτιστές και μια μονάδα αποθήκευσης 400kW, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.15.



Εικόνα 1.15 τοπολογία σταθμού φόρτισης Tesla supercharger στο Mountain View της Καλιφόρνια [31]

Στα πλεονεκτήματα ενός AC διασυνδεδεμένου σταθμού περιλαμβάνονται: η διαθεσιμότητα και ωριμότητα της τεχνολογίας του μετατροπέα, των διακοπών και των διατάξεων προστασίας και τα καθιερωμένα πρότυπα και πρακτικές για την διανομή εναλλασσομένου ρεύματος. Το κυριότερο μειονέκτημα είναι η ανάγκη πολλαπλών AC/DC μετατροπών (για να διασύνδεση DC φορτίων, DC παραγωγής και DC αποθήκευσης με το AC δίκτυο). Αυτό μειώνει την απόδοση του συστήματος και αυξάνει την πολυπλοκότητα, καθώς κάθε στάδιο μετατροπής χρειάζεται τα δικά του φίλτρα, μετρήσεις και έλεγχο. Επιπλέον τα AC δίκτυα έχουν μεγαλύτερες προκλήσεις ως προς τον έλεγχο σε σχέση με τα DC δίκτυα, καθώς πρέπει να διαχειριστούν την άεργο ισχύ και τον συγχρονισμό των αντιστροφών. [32]

Η DC διασύνδεση από την άλλη μειώνει τα στάδια μετατροπής AC/DC όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1.14 και είναι απαλλαγμένη από θέματα διαχείρισης αέργου και συγχρονισμού με το δίκτυο. Τα μειωμένα στάδια μετατροπής οδηγούν σε μικρότερο συνολικό κόστος, ενώ παράλληλα έχουμε βελτιωμένη απόδοση. Επιπλέον διευκολύνει την σύνδεση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και μονάδων αποθήκευσης. Η παράλληλη φόρτιση πολλαπλών οχημάτων μπορεί να προκαλέσει μεγάλες μεταβολές στην ζήτηση. Για τον λόγο αυτό η συμπερίληψη μιας μονάδας αποθήκευσης ενέργειας στον σταθμό φόρτισης μπορεί να έχει σημαντικά πλεονεκτήματα, καθώς ο ιδιοκτήτης του σταθμού μπορεί να ρυθμίσει το προφίλ ζήτησης και να αποφύγει τις ακριβές χρεώσεις μιας πολλή υψηλής ζήτησης. Μελέτες έχουν δείξει ότι αξιοποιώντας την διαφοροποίηση της απορροφώμενης ισχύος σε σχέση με το επίπεδο φόρτισης η ζήτηση ισχύος είναι σημαντικά μικρότερη από την ονομαστική [31]. Στο [62] αναπτύχθηκε ένα πρωτότυπο σταθμού φόρτισης το οποίο είχε πολύ καλές επιδόσεις σε ότι αφορά την μείωση της μέγιστης ζήτησης ισχύος.

Παρά τα οφέλη υπάρχουν ωστόσο και μειονεκτήματα. Η ύπαρξη ανορθωτή υψηλή ισχύος θέτει αυστηρές προδιαγραφές για την διασύνδεση στο δίκτυο. Επιπλέον παρόλο που υπάρχουν διαθέσιμες συσκευές προστασίας για DC δίκτυα χαμηλής τάσης, όπως ασφάλειες διακόπτες και ρελέ, δεν υπάρχουν ακόμα καθιερωμένα πρότυπα για τον συντονισμό της προστασίας ενός DC συνδεδεμένου σταθμού φόρτισης. Ο συντονισμός της προστασίας είναι μια σύνθετη συνάρτηση της γείωσης, του είδους του σφάλματος, της τοπολογίας του συστήματος και πολλών ακόμα. Αυτό το πρόβλημα γίνεται ακόμα πιο εμφανές αν οι φορτιστές είναι αμφίδρομης ροής ισχύος. Επειδή το DC σύστημα έχει περιορισμένη αδράνεια, είναι ευαίσθητο σε διαταραχές και μπορεί να γίνει ασταθές χωρίς εκκαθάριση του σφάλματος. Συνεπώς η ταχύτητα ανίχνευσης σφάλματος και η απομόνωση είναι καθοριστικής σημασίας. Μελέτες σε υπάρχοντα DC μικροδίκτυα διανομής μπορούν να δώσουν τις κατευθυντήριες γραμμές για τον συντονισμό της προστασίας ενός τέτοιου σταθμού. Τέλος χρειάζεται να εγκατασταθούν μετρητές για την μέτρηση της παραγωγής ΑΠΕ και την κατανάλωση των φορτιστών. Παρόλο που υπάρχουν τέτοιοι φορτιστές διαθέσιμοι δεν υπάρχουν καθιερωμένες διαδικασίες ελέγχου της ακρίβειάς τους [16].

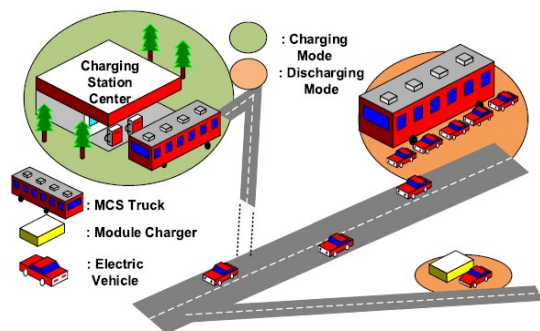
Στον Πίνακα 1.5 συνοψίζεται η σύγκριση AC/DC διασύνδεσης.

Παράγοντας	AC συνδεδεμένο σύστημα	DC συνδεδεμένο σύστημα
Τεχνολογική ωριμότητα	Υψηλή	Χαμηλή
Διαθεσιμότητα	Υψηλή	Χαμηλή
Περιπλοκότητα διατάξεων προστασίας	Χαμηλή	Υψηλή
Στάδια μετατροπής ac/dc	Πολλά	Λίγα
Απόδοση	Χαμηλή	Υψηλή
Περιπλοκότητα ελέγχου	Υψηλή	Χαμηλή
Πρότυπα για την μέτρηση	Ναι	Όχι
Λειτουργία υπό βλάβη δικτύου	Όχι	Ναι
Κόστος	Υψηλό	Χαμηλό

Πίνακας 1.5 Περίληψη της σύγκρισης AC/DC διασύνδεσης

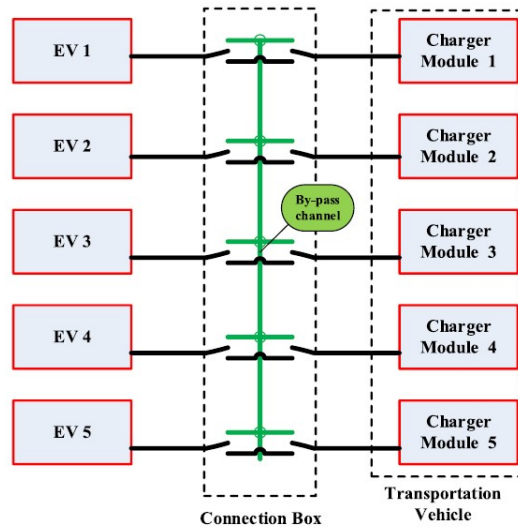
Κινητοί σταθμών φόρτισης (MCS)

Μια εναλλακτική λύση στους σταθμούς γρήγορης φόρτισης είναι να υπάρχει ένα σύστημα κινητών σταθμών φόρτισης (MCS) με μεγάλη χωρητικότητα αποθήκευσης [32]. Ο MCS φορτίζεται από υποσταθμούς και λόγω της δυνατότητας αποθήκευσης μπορεί να συμβάλει στην χρονική ομαλοποίηση της κατανομής της ζήτησης. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα ενός MCS είναι ο μειωμένος χρόνος αναμονής για φόρτιση [63].



Εικόνα 1.16 Αναπαράσταση κινητού σταθμού φόρτισης [64]

Στο [64] προτείνεται ένας MCS που παρέχει γρήγορη φόρτιση όπου χρειάζεται σε μια συγκεκριμένη περιοχή γύρω από τον κύριο υποσταθμό φόρτισης, οποίος απεικονίζεται στην Εικόνα 1.16. Ο MCS από 5 μονάδες φόρτισης και αποθήκευσης και μεταφέρεται σε ένα φορτηγό. Κάθε μονάδα είναι σε θέση να μετράει τα επίπεδα αποθήκευσης και να επικοινωνεί με την κεντρική μονάδα ελέγχου ώστε να συντονίζονται οι διαδικασίες φόρτισης και εκφόρτισης των διαφόρων μονάδων. Η σύνδεση ανάμεσα στα οχήματα και τις μονάδες φόρτισης γίνεται μέσω ενός κιβωτίου διασύνδεσης, το οποίο εξασφαλίζει ένα προς ένα σύνδεση ανάμεσα στο όχημα και την μονάδα φόρτισης, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.17. Επιπλέον αν μια μονάδα φόρτισης είναι εκτός λειτουργίας μπορεί να αλλάξει την εσωτερική σύνδεση και η φόρτιση να συνεχιστεί απρόσκοπτα από την πλευρά του οχήματος.



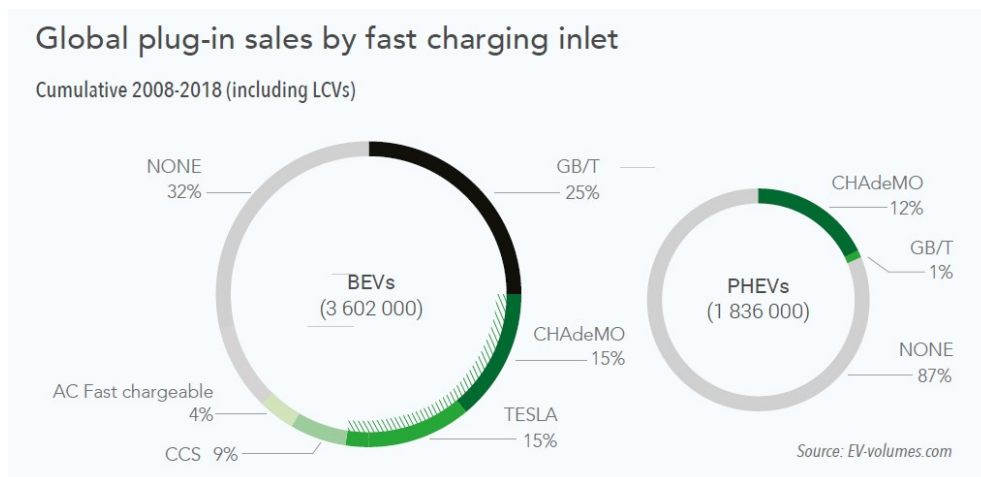
Εικόνα 1.17 Τοπολογία κινητού σταθμού φόρτισης [64]

Κεφάλαιο 2

Το πρότυπο φόρτισης CHADEMO

Το CHAdeMO (Charge de Move) είναι ένα διεθνώς αναγνωρισμένο πρότυπο φόρτισης το οποίο αναπτύχθηκε το 2010 από τον συνεταιρισμό των Toyota Motor Company (Toyota), Nissan Motor Company (Nissan), Mitsubishi Motors Corporation (Mitsubishi Motors), Fuji Heavy Industries Ltd. (Fuji Heavy Industries) και Tokyo Electric Power Company INC (TEPCO) [65]. Εκείνη την περίοδο η δυνατότητα ταχείας φόρτισης αποτελούσε αναγκαία προϋπόθεση για την μεγαλύτερη διείσδυση ηλεκτρικών οχημάτων στην αγορά. Το όνομα προήλθε από το γαλλικό «Charge de Move» το οποίο μεταφράζεται «let's charge and move» και παραπέμπει στο ιαπωνικό «let's have some tea», υπονοώντας ότι το όχημα μπορεί να φορτίσει στο χρόνο που αντιστοιχεί στο να πιείς ένα τσάι. Ο αρχικός στόχος ήταν να μπορεί να φορτίσει οχήματα στο 80% της χωρητικότητας της μπαταρίας μέσα σε λιγότερο από 30 λεπτά.[21] Το πρότυπο συνεχίζει να εξελίσσεται με την νέα του εκδοχή CHAdeMO 3.0 προβλέπει μέγιστη ισχύ 500kW και μέγιστο ρεύμα 600A.[66]

Δημοτικότητα του CHAdeMO



Εικόνα 2.1 Κατανομή ηλεκτρικών οχημάτων με βάση το είδος φόρτισης[20]

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.1 ένα σημαντικό ποσοστό των συνολικών οχημάτων που έχουν πωληθεί στο διάστημα 2008-2018 δεν διαθέτει δυνατότητα γρήγορης φόρτισης.

Στην κατηγορία BEV 15% των συνολικών οχημάτων έχει είσοδο CHAdeMO και ένα επιπλέον 15% των συνολικών οχημάτων είναι Tesla τα οποία είναι συμβατά με το CHAdeMO με την βοήθεια κατάλληλου μετατροπέα. Άρα ένα 30% των συνολικών οχημάτων είναι συμβατό με φορτιστές CHAdeMO.

Στην κατηγορία PHEV 12% των συνολικών οχημάτων έχει είσοδο CHAdeMO, το οποίο αποτελεί σχεδόν το σύνολο των PHEV που έχουν δυνατότητα ταχείας φόρτισης.

Συνολικά περίπου 1.3 εκατομμύρια οχήματα PEV μπορούν να εξυπηρετηθούν από φορτιστή CHAdeMO [67].

Το CHAdeMO υπήρξε πρωτοπόρος σε ότι αφορά την DC φόρτιση, τόσο στην αρχική μορφή του όσο και όταν εισήγαγε την δυνατότητα λειτουργίας V2X στην έκδοση. Για το λόγο αυτό είναι αρκετά δημοφιλές τόσο εμπορικά όσο και σε ερευνητικό επίπεδο. Το CHAdeMO έχει χρησιμοποιηθεί λόγω της δημοτικότητας του σε πολλές ερευνητικές διατάξεις. Στο [68] αναπτύχθηκε λογισμικό (software) το οποίο χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο CHAdeMO για να προσομοιώσει την επικοινωνία σε διαφορετικά σενάρια φόρτισης. Στο [69] επιλέχθηκε το πρωτόκολλο CHAdeMO για την ανάπτυξη διεπαφής της μονάδας BMS του οχήματος με τον φορτιστή προκειμένου να επιτευχθεί λειτουργία V2G. Στο [70] αναπτύχθηκε ένα εργαλείο το οποίο δίνει την δυνατότητα DC φόρτισης σε ηλεκτρικά

οχήματα. Στο [71] προτείνεται ένας σταθμός DC φόρτισης σύμφωνα με το πρότυπο CHAdEMO, ο οποίος τροφοδοτείται από φωτοβολταϊκή παραγωγή.

Κύρια χαρακτηριστικά του CHAdEMO

- Ασφάλεια: Το CHAdEMO επιβάλλει αυστηρές οδηγίες για το σχεδιασμό φορτιστών που εγγυώνται την ηλεκτρική ασφάλεια σε οποιοσδήποτε συνθήκες λειτουργίας.
- Πρόβλεψη για το μέλλον: Το CHAdEMO είναι έτοιμο για τις λειτουργίες των ευφύων δικτύων μέσω της ικανότητας φόρτισης διπλής κατεύθυνσης. Είναι επίσης συμβατό με οποιοσδήποτε τοπικές ή προαιρετικές λειτουργίες πέρα από τη φόρτιση.
- Εύκολη εφαρμογή: Το πρωτόκολλο λειτουργεί με επικοινωνία CAN, το οποίο χρησιμοποιείται στο ενσωματωμένο δίκτυο επικοινωνίας όλων των ηλεκτρικών οχημάτων, καθιστώντας την ενσωμάτωσή του με το υπόλοιπο αυτοκίνητο εύκολη και αξιόπιστη.
- Ομοιομορφία: Ο σύνδεσμος CHAdEMO είναι πανομοιότυπος σε όλο τον κόσμο και είναι ένα αυτόνομο βύσμα που μπορεί να είναι με ή χωρίς βύσμα AC. Εξοικονομεί κόστος για τους κατασκευαστές ηλεκτρικών οχημάτων και επιτρέπει σε διηπειρωτικά ταξίδια ηλεκτρικών οχημάτων.[72]

Τεχνικά χαρακτηριστικά

Προστασία μπαταρίας

Ο ταχυφορτιστής ελέγχει το ρεύμα εξόδου σύμφωνα με το αίτημα ρεύματος φόρτισης από το όχημα μέσω επικοινωνίας CAN σε πραγματικό χρόνο. Αυτός ο μηχανισμός επιτρέπει διαφορετική φόρτιση ανάλογα με την απόδοση της μπαταρίας και το περιβάλλον χρήσης. Για να γίνει αυτό, το CHAdEMO καθορίζει τις απαιτήσεις για την απόδοση απόκρισης, τον κυματισμό ρεύματος, τον κυματισμό τάσης και την ακρίβεια μέτρησης του ρεύματος και της τάσης.[73]

Προστασία από ηλεκτροπληξία

- Ο μετασχηματιστής απομόνωσης στο εσωτερικό του φορτιστή διαχωρίζει το σύστημα εναλλασσόμενου ρεύματος στην πλευρά εισόδου και το σύστημα DC στην πλευρά εξόδου, επομένως, η πλευρά εξόδου είναι ένα μη γειωμένο σύστημα και η ηλεκτροπληξία μπορεί να αποφευχθεί εάν προκύψει σφάλμα διαρροής γείωσης σε μια εκ των γραμμών DC.
- Μια συσκευή παρακολούθησης ρεύματος διαρροής είναι εγκατεστημένη στην πλευρά DC καθώς και στην πλευρά AC και απενεργοποιεί την ισχύ εισόδου στο φορτιστή μόλις εντοπιστεί ρεύμα διαρροής.

Ασφαλής έλεγχος φόρτισης

• Σε ορισμένες περιπτώσεις, ενδέχεται να παρουσιαστεί δυσλειτουργία κατά τη φόρτιση στο επίπεδο του οχήματος και του φορτιστή. Δύο γραμμές επικοινωνίας (σήμα CAN και σήμα ελέγχου) από το όχημα στο φορτιστή είναι σε θέση να στείλουν ένα σήμα σε περίπτωση που εντοπιστεί δυσλειτουργία στην πλευρά του οχήματος. Με αυτόν τον τρόπο, η φόρτιση θα σταματήσει ακόμη και αν μια γραμμή επικοινωνίας έχει σπάσει. Ο συνδυασμός αναλογικών σημάτων με την ψηφιακή επικοινωνία βελτιώνει το επίπεδο ασφάλειας ως εξής:

1. Αποτρέπει την εσφαλμένη έναρξη της φόρτισης, λόγω δυσλειτουργίας στο σύστημα ψηφιακού ελέγχου.
2. Μπορεί να επιβεβαιωθεί ότι και τα δύο συστήματα ελέγχου στο όχημα και τον φορτιστή λειτουργούν σωστά σε κάθε βήμα της λειτουργίας.
3. Όταν χαθεί το αναλογικό σήμα, η φόρτιση θα διακοπεί αμέσως. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα, η διακοπή λειτουργίας να μπορεί να επιτευχθεί γρηγορότερα από ότι αν είχαμε μόνο τη μετάδοση ψηφιακού σήματος.

- Όταν πέσει ο συζεύκτης του οχήματος, η αποσύνδεση του καλωδίου γείωσης και του καλωδίου ελέγχου προκαλεί απενεργοποίηση κάθε σήματος ελέγχου, γεγονός που σταματά αμέσως την έξοδο DC, έτσι ώστε να σταματήσει το ηλεκτρικό τόξο. [74]

Αλληλένδετη σύνδεση

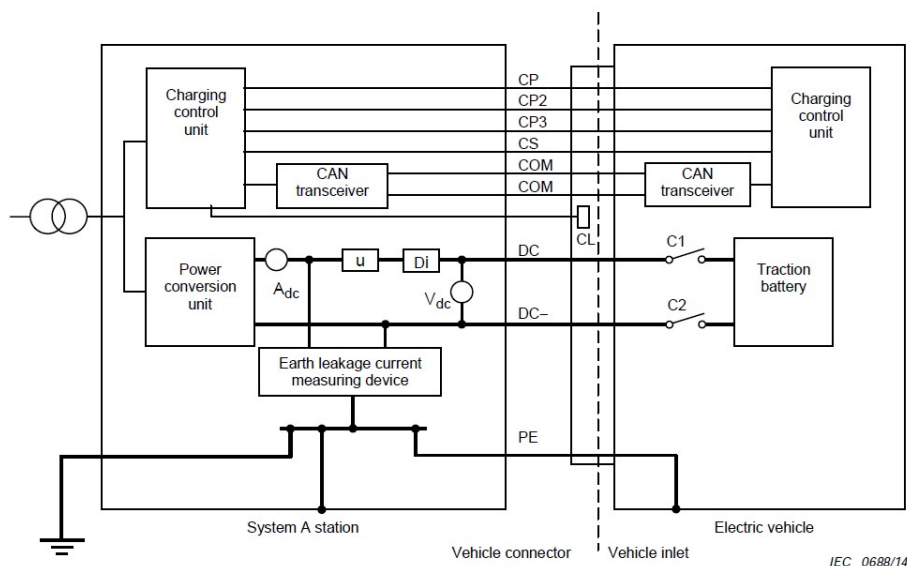
- Δεδομένου ότι η ισχύς ελέγχου παρέχεται σε επαφές του οχήματος μέσω του φορτιστή, οι επαφές του οχήματος δεν κλείνουν ποτέ και υπάρχει μηδενική τάση, εκτός εάν συνδεθεί ο ζεύκτης στο όχημα.
- Ο αυτόματος έλεγχος ασφαλείας πριν από τη φόρτιση είναι μια δοκιμή που πραγματοποιείται πριν από κάθε φόρτιση για τον έλεγχο της μόνωσης του κυκλώματος και του βραχυκυκλώματος μεταξύ του φορτιστή και των επαφών ηλεκτρικού οχήματος.
- Κατά τη διάρκεια της φόρτισης, ο ζεύκτης του οχήματος κλειδώνεται στην είσοδο του οχήματος μέσω ενός μηχανικού μανδάλου και ο μηχανικός μάνδαλος κλειδώνεται από μια ηλεκτρική κλειδαριά. Μόλις ολοκληρωθεί η φόρτιση, η ηλεκτρική κλειδαριά απελευθερώνεται αφού επιβεβαιωθεί η τάση στο βύσμα του οχήματος. Εάν η τάση δεν πέσει σε επίπεδο ασφαλείας, η κλειδαριά δεν θα απελευθερωθεί.

Ανάλυση του προτύπου

Στο IEC 61851-23 περιγράφεται η εκδοχή CHAdeMO 1.0 με μέγιστη τάση εξόδου $500V_{DC}$. Αυτό το σύστημα είναι κατάλληλο για φόρτιση επιβατικών οχημάτων και ελαφρών φορτηγών.

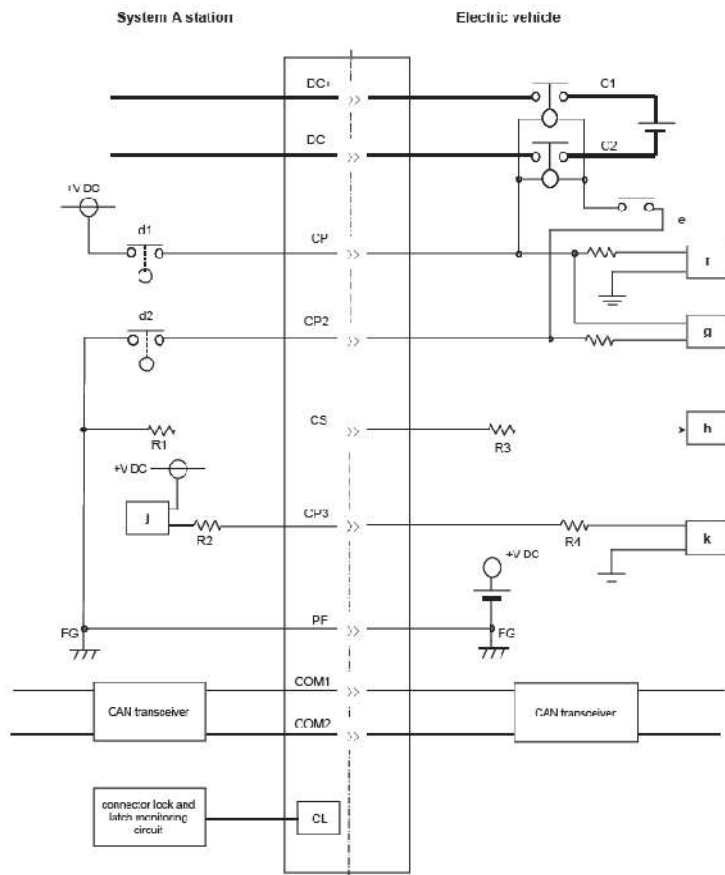
Τοπολογία του φορτιστή

Στο IEC 61851-23 περιγράφεται η σχηματική αναπαράσταση του φορτιστή, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.2. Για πιο αναλυτικές πληροφορίες σχετικά με το πρότυπο CHAdeMO μπορεί κανείς να ανατρέξει και στο JIS/TSD0007.



Εικόνα 2.2 Τοπολογία φορτιστή CHAdeMO [76]

Στην Εικόνα 2.3 βλέπουμε τις συνδέσεις ανάμεσα στο σύστημα φόρτισης και το όχημα.



Εικόνα 2.3 Λεπτομέρεια τοπολογίας φορτιστή CHAdEMO [76]

Στον Πίνακα 2.1 παρατίθεται η επεξήγηση των συμβόλων:

	Σύμβολο	Επεξήγηση
Σύστημα φόρτισης	Di	Συσκευή πρόληψης αντίστροφου ρεύματος (π.χ. δίοδος: κάθοδος στην πλευρά του οχήματος, άνοδος στην πλευρά του σταθμού)
	d1	Διακόπτης στο CP για τον έλεγχο των σημάτων έναρξης/διακοπής φόρτισης από το σταθμό στο όχημα
	d2	Διακόπτης στο CP2 για τον έλεγχο των σημάτων έναρξης/διακοπής φόρτισης από το σταθμό στο όχημα
	j	Συσκευή ανίχνευσης σήματος για ανίχνευση αν το όχημα είναι έτοιμο/μη έτοιμο να δεχθεί ενέργεια
	V _{dc}	Συσκευή μέτρησης τάσης
	A _{dc}	Συσκευή μέτρησης ρεύματος
	u	Συσκευή προστασίας από βραχυκύκλωμα (π.χ. ασφάλεια περιορισμού ρεύματος)
	R1	Αντιστάτης
	R2	Αντιστάτης
	+V DC	Τροφοδοσία DC στις επαφές του ηλεκτρικού οχήματος
Ηλεκτρικό όχημα	C1,C2	Διακόπτης αποσύνδεσης για D.C. γραμμές τροφοδοσίας (επαφές EV)
	e	Ρελέ για την ενεργοποίηση των επαφών EV
	f	Συσκευή ανίχνευσης σημάτων για ανίχνευση της κατάστασης του d1
	g	Συσκευή ανίχνευσης σημάτων για ανίχνευση της κατάστασης του d2
	h	Συσκευή ανίχνευσης σήματος για ανίχνευση σύνδεσης /αποσύνδεσης του ζεύκτη του οχήματος
	k	Διακόπτης για να δώσει σήμα για την έναυση / διακοπή της φόρτισης
	R3	Αντιστάτης

Καλώδια και τερματικά	R4	Αντιστάτης
	+V DCE	Τροφοδοσία DC στο όχημα
	DC+	Τροφοδοσία DC (θετικό)
	DC-	Τροφοδοσία DC (αρνητικό)
	CP	Καλώδιο ελέγχου που υποδεικνύει την κατάσταση έναρξης/διακοπής του σταθμού
	CP2	Καλώδιο ελέγχου που υποδεικνύει την κατάσταση έναρξης/διακοπής του σταθμού
	CS	Πιλοτικό καλώδιο που υποδεικνύει την κατάσταση σύνδεσης ζεύξης οχήματος
	CP3	Καλώδιο ελέγχου που επιβεβαιώνει ότι το όχημα είναι έτοιμο για φόρτιση
Ζεύκτης οχήματος	COM1 COM2	Ζεύγος γραμμών σήματος για ψηφιακή επικοινωνία
	PE	Προστατευτικός αγωγός μεταξύ του σταθμού και του οχήματος για την ανίχνευση του πρώτου D.C. σφάλματος γης
	CL	Μηχανισμός ασφάλισης και ασφάλισης του ζεύκτη

Εικόνα 2.1 Επεξήγηση των συμβόλων στις Εικόνες 2.2,2.3

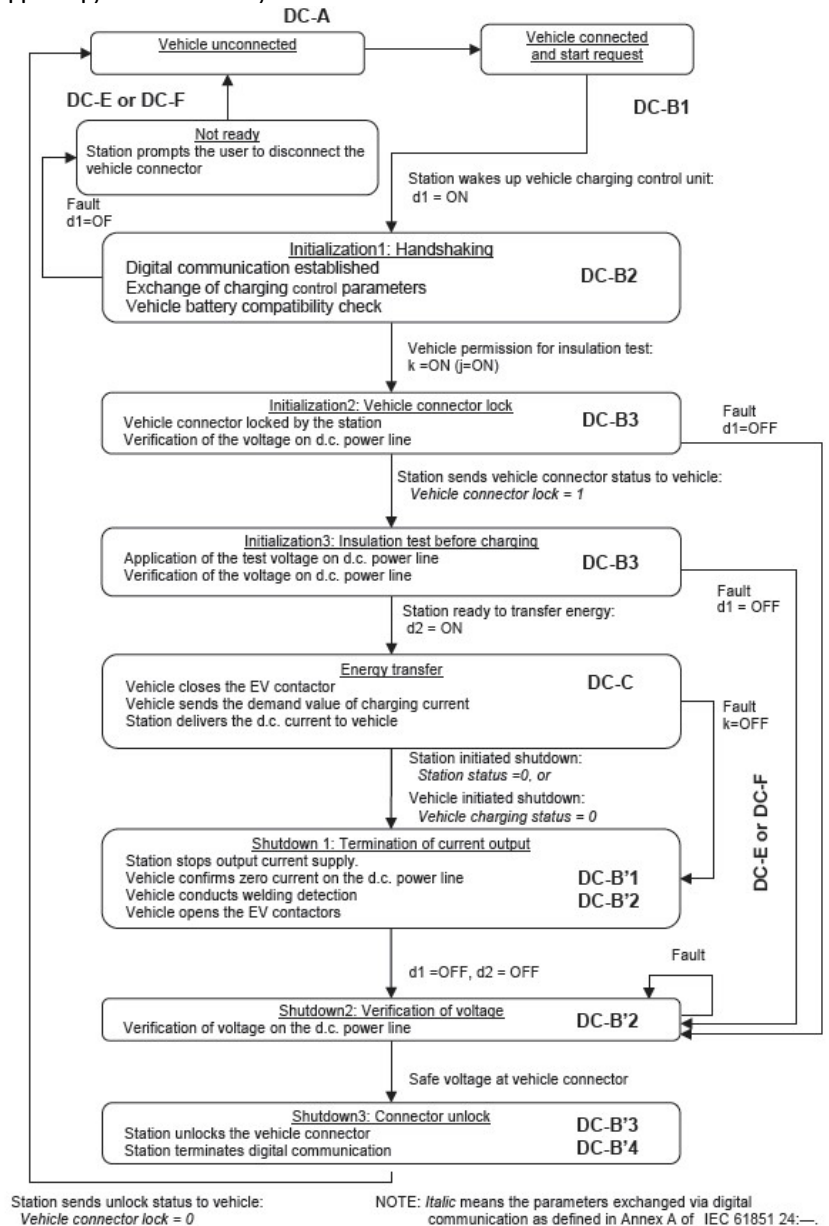
Καταστάσεις λειτουργίας φόρτισης

Στον Πίνακα 2.2 περιγράφονται οι πιθανές καταστάσεις του συστήματος φόρτισης.

Κατάσταση		Όχημα συνδεδεμένο	Επαφή οχήματος	Δυνατότητα φόρτισης	Περιγραφή
A	Μη συνδεδεμένο	Όχι	Ανοικτή	Όχι	Όχημα μη συνδεδεμένο
B1	Αρχικοποίηση	Ναι	Ανοικτή	Όχι	Το όχημα είναι συνδεδεμένο, δεν έχει καταστεί επικοινωνία
B2		Ναι	Ανοικτή	Όχι	Καθιερώθηκε η επικοινωνία, ο ζεύκτης δεν έχει κλειδώσει ακόμα
B3		Ναι	Ανοικτή	Όχι	Ο ζεύκτης είναι κλειδωμένος / Δοκιμή μόνωσης
C	Μεταφορά ενέργειας	Ναι	Κλειστή	Ναι	Όχημα έτοιμο να δεχτεί ενέργεια (δεν απαιτείται εξαερισμός εσωτερικού χώρου φόρτισης)
D		Ναι	Κλειστή	Ναι	Όχημα έτοιμο να δεχτεί ενέργεια (απαιτείται εξαερισμός εσωτερικού χώρου φόρτισης)
B1'	Τερματισμός λειτουργίας	Ναι	Κλειστή	Ναι	Η φόρτιση ολοκληρώθηκε, η επαφή του οχήματος είναι κλειστή
B2'		Ναι	Ανοικτή	Όχι	Η επαφή του οχήματος άνοιξε, ο ζεύκτης είναι κλειδωμένος
B3'		Ναι	Ανοικτή	Όχι	Ο ζεύκτης απασφάλισε, διατηρείται ακόμα επικοινωνία
B4'		Ναι	Ανοικτή	Όχι	Η επικοινωνία ολοκληρώθηκε
E	Σφάλμα	Ναι	Ανοικτή	Όχι	Ο φορτιστής DC αποσυνδέθηκε από το όχημα / ο φορτιστής DC αποσυνδέθηκε από το βοηθητικό σύστημα, απώλεια ισχύος στο φορτιστή DC ή βραχυκύκλωμα καλώδιο για έλεγχο αναφοράς.
F	Δυσλειτουργία	Ναι	Ανοικτή	Όχι	Άλλο πρόβλημα φορτιστή DC

Διάγραμμα ροής του φορτιστή

Στην Εικόνα 2.4 φαίνεται το διάγραμμα ροής του φορτιστή. Πάνω στα βέλη αναγράφονται οι μεταβάσεις των αναλογικών εισόδων και εξόδων και οι παράμετροι που ανταλλάσσονται μέσω της ψηφιακής επικοινωνίας.

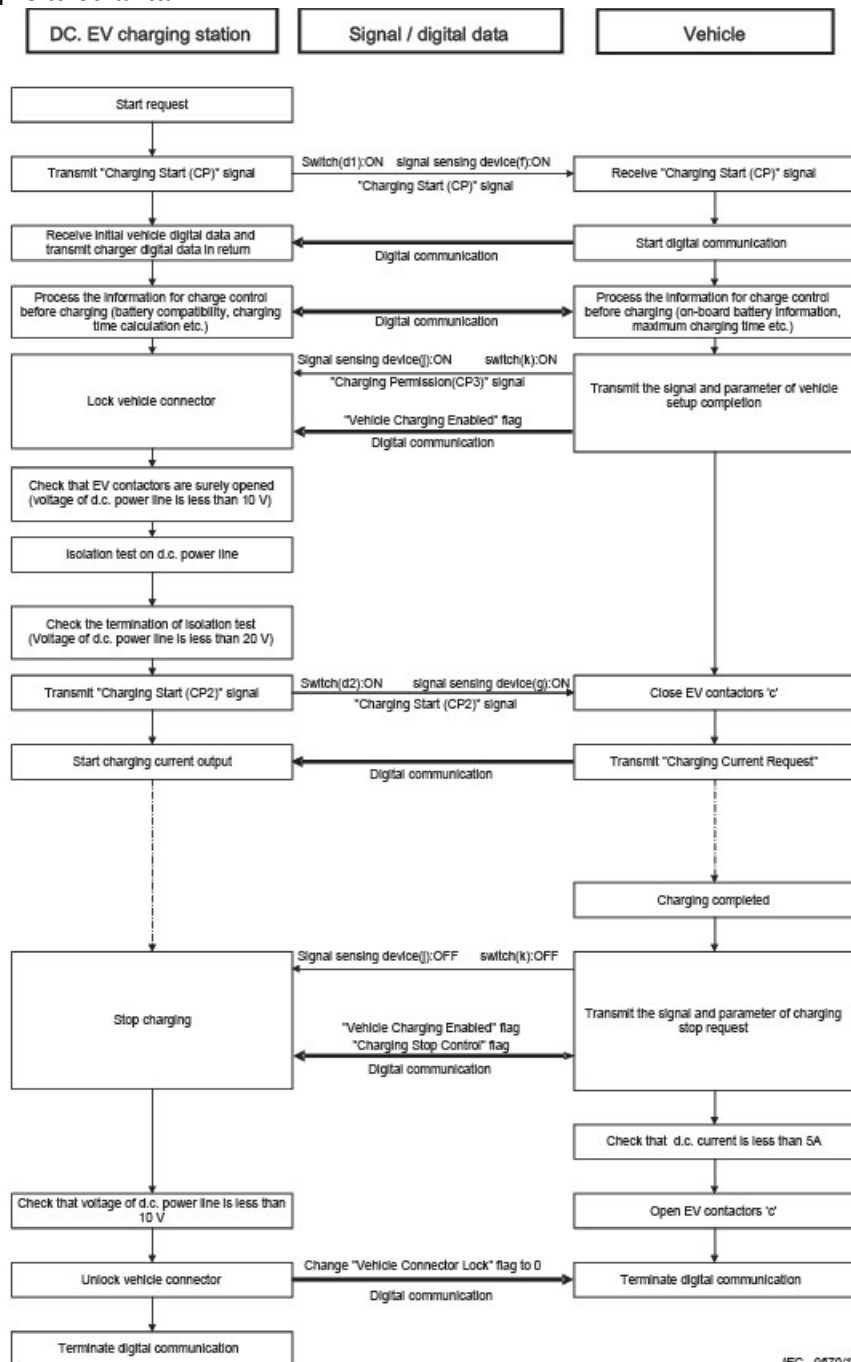


Εικόνα 2.4 Διάγραμμα ροής φορτιστή CHAdeMO [60]

Η διαδικασία φόρτισης ξεκινά όταν ένα όχημα συνδεθεί στο σύστημα φόρτισης. Ο φορτιστής ενεργοποιεί την ακολουθία φόρτισης με μια χειραψία, όπου ανταλλάσσονται οι παράμετροι φόρτισης και ελέγχεται η συμβατότητα. Ο φορτιστής και η μπαταρία είναι συμβατοί, αν η επιθυμητή τάση της μπαταρίας είναι μικρότερη από την μέγιστη δυνατή τάση εξόδου του φορτιστή. Στην περίπτωση ασυμβατότητας το σύστημα φόρτισης ενημερώνει τον χρήστη και η διαδικασία δεν συνεχίζει. Αν το όχημα και ο φορτιστής είναι συμβατά ο ζεύκτης οχήματος κλειδώνει και πραγματοποιείται η δοκιμή της μόνωσης μεταξύ του οχήματος και το φορτιστή. Ο έλεγχος μόνωσης επιβεβαιώνει ότι δεν υπάρχει βραχυκύκλωμα ή ανωμαλίες σφάλματος γης στο σύστημα, οι οποίες μπορεί να έχουν προκληθεί από την γήρανση ή την κατάχρηση του βύσματος σύνδεσης. Εάν πληρούνται όλα τα απαιτούμενα κριτήρια, το όχημα κλείνει τον επαφή του και αρχίζει η φόρτιση.

Στη διάρκεια της διαδικασίας φόρτισης, το όχημα και ο φορτιστής ανταλλάσσουν πληροφορίες σχετικά με το επιθυμητό ρεύμα και τάση αναφοράς. Όταν δοθεί σήμα λήξης είτε από το όχημα, είτε από τον φορτιστή, είτε λόγω σφάλματος, ξεκινά η διαδικασία τερματισμού. Το ρεύμα εξόδου μηδενίζεται σταδιακά. Μόλις το ρεύμα μηδενιστεί ανοίγει ο επαφέας του οχήματος. Έπειτα, όταν ο φορτιστής διαπιστώσει αποδεκτή τάση στην έξοδο απασφαλίζει την ζεύξη και με το που το όχημα το αντιληφθεί ολοκληρώνεται η επικοινωνία. Το όχημα αποσυνδέεται και το σύστημα φόρτισης περιμένει το επόμενο όχημα. Αν παρουσιαστεί κάποιο πρόβλημα σε κατάσταση που δεν υπάρχει ροή ρεύματος το σύστημα αρκεί ο φορτιστής να διαπιστώσει αποδεκτή τάση στην έξοδο, ώστε να απασφαλίσει την ζεύξη και με το που το όχημα το αντιληφθεί ολοκληρώνεται η επικοινωνία. Το όχημα αποσυνδέεται και το σύστημα φόρτισης περιμένει το επόμενο όχημα.

Στην Εικόνα 2.5 φαίνεται το διάγραμμα ροής του φορτιστή και το οχήματος που περιλαμβάνει και την επικοινωνία

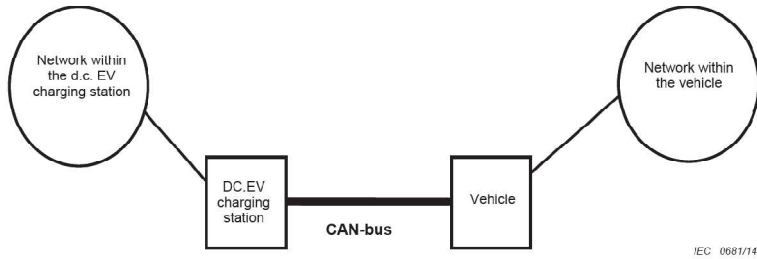


IEC 0070/14

Εικόνα 2.5 Διάγραμμα ροής και επικοινωνίας φορτιστή CHAdeMO [77]

Ψηφιακή επικοινωνία

Η ψηφιακή επικοινωνία γίνεται μέσω CAN-bus με βάση το πρότυπο ISO 11898-1 and ISO 11898-2 και τα extension bit (12-19 bit) δεν χρησιμοποιούνται. Ο ρυθμός μετάδοσης είναι 500 kbps και τα μηνύματα στέλνονται κάθε $100\text{ ms} \pm 10\%$. Στην Εικόνα 2.6 φαίνεται μια αναπαράσταση της επικοινωνίας.



Εικόνα 2.6 Απεικόνιση της επικοινωνίας στο πρότυπο CHAdeMO [77]

Κεφάλαιο 3

Υλοποίηση της επικοινωνίας σύμφωνα με το πρωτόκολλο CHAdEMO

Για την πειραματική υλοποίηση χρησιμοποιήθηκε ένα LaunchPad F280049C της σειράς C2000 της Texas Instruments για το σύστημα ελέγχου του φορτιστή και ένα Arduino CANBed V1 της Logan Labs για την πλευρά του οχήματος. Η διαφορετικότητα στις πλακέτες επιλέχθηκε ώστε να ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις που είχαμε από το κάθε σύστημα. Το σύστημα ελέγχου του φορτιστή θα ελέγχει και μια διάταξη μετατροπέα DC/DC για να ρυθμίζει την τάση εξόδου, για αυτό χρειάζεται μια πλακέτα με αρκετές εξόδους PWM και αναλογικές εισόδους για την μέτρηση τάσεων και ρευμάτων στο μετατροπέα. Το σύστημα του αυτοκινήτου θέλουμε να έχει απλό τρόπο επικοινωνίας με το χρήστη ώστε να μπορούμε μέσω αυτού να ρυθμίζουμε την αναφορά του φορτιστή.

Τεχνικά χαρακτηριστικά του υλικού

Το LaunchPad F280049C της σειράς C2000 είναι μια πλακέτα ανάπτυξης χαμηλού κόστους της Texas Instruments. Διαθέτει πληθώρα περιφερειακών συμπεριλαμβανομένων τριών 12-bit Analog to Digital Converters (ADC) και ενσωματωμένης διεπαφής CAN. Έχει επεξεργαστή 100MHz και 256 KB Flash. Η ταχύτητα του επεξεργαστή μας επιτρέπει επαρκή ακρίβεια για έλεγχο διαφοράς φάσης σε παλμοσειρά συχνότητας 100kHz.[78]

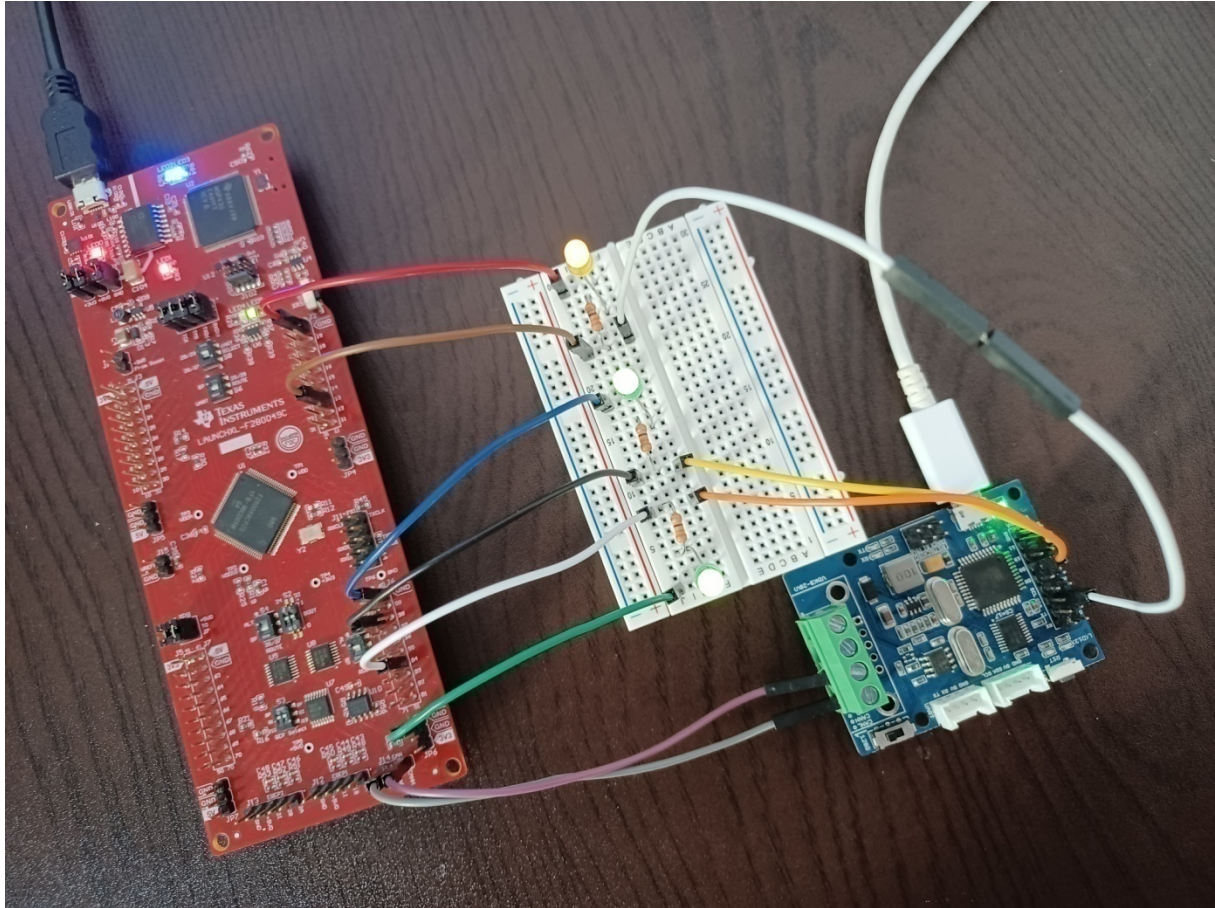
Το CANBed V1 έχει μικροελεγκτή Atmega32U4 με Arduino Leonardo bootloader στο εσωτερικό του. Διαθέτει 32KB Flash και 2,5KB RAM. Η συχνότητα λειτουργίας είναι 16MHz. Χρησιμοποιεί τσιπ MCP2515 ως CAN ελεγκτή και τσιπ MCP2551 ως CAN δέκτη, σύμφωνα με το πρωτόκολλο CAN 2.0.[79]

Διευκρινήσεις σχετικά με την υλοποίηση

Προκειμένου να μπορούμε να βλέπουμε τις αλλαγές, η κλίμακα του χρόνου για την ανταλλαγή μηνυμάτων προσαρμόστηκε στο 1sec αντί για 100 msec. Επιπλέον για λόγους απλότητας τα αναλογικά σήματα ελέγχου αντικαταστάθηκαν με ψηφιακά στα οποία προσθέσαμε και ενδεικτική λυχνία LED προκειμένου να παρακολουθούμε την κατάσταση τους κατά την διάρκεια της εκτέλεσης. Τέλος δεν έχει υλοποιηθεί η δοκιμή απομόνωσης, ωστόσο έχει προβλεφθεί σαν στάδιο της φόρτισης.

Προκειμένου να έχουμε μια αναλυτική εικόνα της διαδικασίας της φόρτισης, καταγράψαμε μέσω της σειριακής επικοινωνίας του υπολογιστή με το Arduino, διάφορες χρήσιμες πληροφορίες, όπως το στάδιο φόρτισης και τις παραμέτρους που ανταλλάσσονται μεταξύ οχήματος και φορτιστή.

Αξίζει να σημειώσουμε ότι, σύμφωνα με το IEC 61851-23, κατά την διαδικασία της φόρτισης ο μέγιστος ρυθμός μεταβολής του αιτήματος ρεύματος είναι 20A/sec, δηλαδή μεταβολή μέχρι 2A ανάμεσα σε δύο διαδοχικά μηνύματα. Κατά την διαδικασία του τερματισμού ο μέγιστος ρυθμός μεταβολής του αιτήματος ρεύματος είναι 200A/sec, δηλαδή μεταβολή μέχρι 20A ανάμεσα σε δύο διαδοχικά μηνύματα. Στην υλοποίηση μας επιλέξαμε ρυθμό μείωσης της αναφορά ρεύματος κατά τον τερματισμό 20A/sec, δηλαδή μείωση κατά 2A ανά μήνυμα.



Εικόνα 3.1 Εικόνα της πειραματικής διάταξης

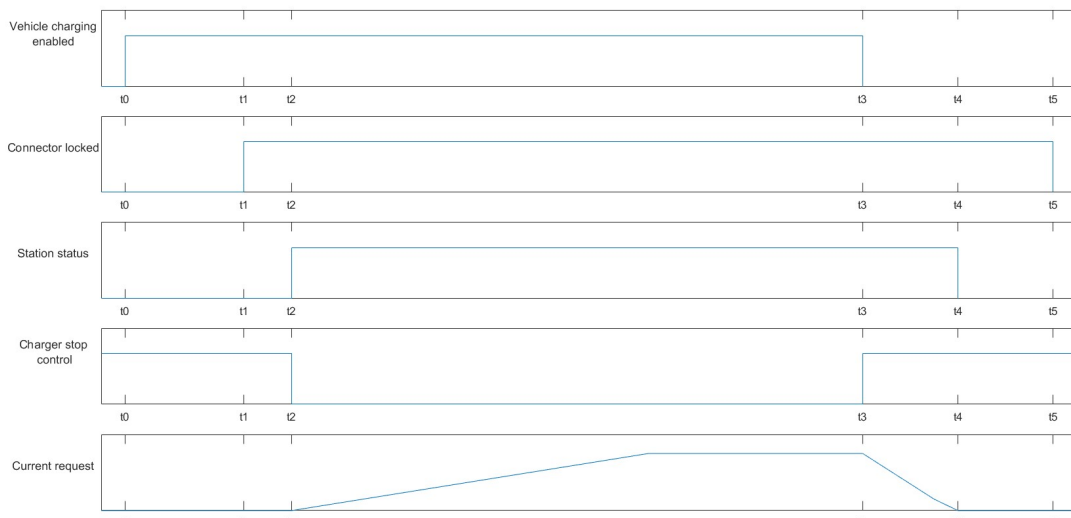
Στην Εικόνα 3.1, βλέπουμε τις δύο πλακέτες που αντιστοιχούν στο φορτιστή (αριστερά) και το όχημα (δεξιά). Οι δύο πλακέτες συνδέονται μέσω CAN (μοβ και γκρι καλώδια). Στο breadboard είναι τοποθετημένα τα 3 led που αντιστοιχούν στους διακόπτες k, d2,d1 από πάνω προς τα κάτω όπως φαίνονται στην εικόνα.

Περιγραφή της υλοποίησης

Η διαδικασία ξεκινά με τον φορτιστή να ενεργοποιεί την έξοδο Out 1 που αντιστοιχεί σε κλείσιμο του διακόπτη d1. Ανάβει το led που αντιστοιχεί στο d1. Το όχημα αντιλαμβάνεται το σήμα αφύπνισης μέσω της εισόδου του In 1 και ξεκινά την διαδικασία για την φόρτιση, στέλνοντας τις παραμέτρους του. Ο φορτιστής τις λαμβάνει και στην συνέχεια στέλνει τις δικές του παραμέτρους. Εφόσον υπάρχει συμβατότητα το όχημα στέλνει μέσω της ψηφιακής επικοινωνίας το σήμα «Vehicle charging enabled», ενώ παράλληλα ενεργοποιεί την έξοδο Out 1 που αντιστοιχεί στο διακόπτη k. Ανάβει το led που αντιστοιχεί στο k. Ο φορτιστής το αντιλαμβάνεται και στέλνει σήμα «Connector locked» μέσω της ψηφιακής επικοινωνίας. Σε αυτό το σημείο θα γίνει η δοκιμή απομόνωσης, όταν υλοποιηθεί σε φυσικό κύκλωμα. Μετά από αυτό το στάδιο ο φορτιστής είναι έτοιμος να παρέχει ισχύ και για αυτό ενεργοποιεί την έξοδο Out 2 που αντιστοιχεί στο διακόπτη d2. Ανάβει το led που αντιστοιχεί στο d2. Το όχημα αντιλαμβάνεται το σήμα μέσω της εισόδου In 2 και μπορεί να κλείσει τον επαφέα, ενεργοποιώντας την έξοδο Out 2 . Θέτει τη σημαία «Vehicle status» στο μηδέν, ώστε να το αντιληφθεί και ο φορτιστής μέσω της ψηφιακής επικοινωνίας. Μόλις ο φορτιστής το αντιληφθεί, ο φορτιστής θέτει τα σήματα «Station status» σε charging και «Charger stop control» σε false, τα σήματα αυτά μεταφέρονται μέσω της ψηφιακής επικοινωνίας οπότε ξεκινά η διαδικασία μεταφοράς ισχύος. Το όχημα αυξάνει προοδευτικά την αναφορά ρεύματος μέχρι μια προκαθορισμένη τιμή. Μόλις δοθεί σήμα τερματισμού είτε επειδή ο φορτιστής έθεσε το σήμα «Charger stop control» σε true, είτε επειδή το όχημα έθεσε το σήμα «Normal stop request» σε true,

το όχημα μειώνει με γρήγορο ρυθμό το ρεύμα αναφοράς στο μηδέν. Μόλις ο φορτιστής επιβεβαιώσει μηδενικό ρεύμα εξόδου θέτει το σήμα «Station status» σε standby και ενημερώνει το όχημα μέσω της παραμέτρου «Output Current» που μεταφέρεται μέσω της ψηφιακής επικοινωνίας. Όταν το όχημα δει το μηδενικό ρεύμα εξόδου ανοίγει τον επαφέα και περιμένει από τον φορτιστή να τερματίσει την επικοινωνία. Ο φορτιστής από τν πλευρά του ελέγχει την τάση εξόδου και μόλις επιβεβαιώσει μηδενική τάση ξεκλειδώνει τον ζεύκτη και στέλνει σήμα «Connector unlocked» μέσω της ψηφιακής επικοινωνίας. Μόλις αυτό το σήμα ληφθεί από το όχημα η επικοινωνία ολοκληρώνεται.

Στην Εικόνα 3.2 βλέπουμε το συγχρονισμό των διαφόρων σημάτων που μεταφέρονται μέσω της ψηφιακής επικοινωνίας.



Εικόνα 3.2 Συγχρονισμός των διαφόρων σημάτων που μεταφέρονται μέσω της ψηφιακής επικοινωνίας.

Ομαλή λειτουργία

Παρακάτω βλέπουμε τις καταγραφές που πήραμε σχετικά με την φόρτιση στην περίπτωση ομαλής λειτουργίας με τερματισμό από τον φορτιστή.

```
13:17:06.375 -> Starting Chademo process.
13:17:06.468 -> Sent parameters to EVSE. Waiting.
13:17:06.982 -> Charging current request 0 A
13:17:07.640 -> Station status: standby
13:17:07.640 -> Connector unlocked
13:17:07.640 -> Charger stop control is set true
13:17:07.734 -> Setting begin charge request.
13:17:07.734 -> Vehicle charging enabled
13:17:08.015 -> Charging current request 0 A
13:17:09.000 -> Charging current request 0 A
13:17:10.028 -> Charging current request 0 A
13:17:11.018 -> Charging current request 0 A
13:17:12.012 -> Charging current request 0 A
13:17:12.995 -> Connector locked
13:17:12.995 -> Charging current request 0 A
13:17:13.088 -> Closing contactor
13:17:14.018 -> Charging current request 0 A
13:17:14.630 -> Station status: charging
13:17:14.630 -> Charger stop control is set false
```

Κεφάλαιο 3, Υλοποίηση της επικοινωνίας σύμφωνα με το πρωτόκολλο CHADEMO

```
13:17:15.006 -> Charging current request 1 A
13:17:16.050 -> Charging current request 2 A
13:17:17.041 -> Charging current request 3 A
13:17:18.032 -> Charging current request 4 A
13:17:19.028 -> Charging current request 5 A
13:17:20.019 -> Charging current request 6 A
13:17:21.059 -> Charging current request 7 A
13:17:22.034 -> Charging current request 8 A
13:17:23.028 -> Charging current request 9 A
13:17:24.052 -> Charging current request 10 A
13:17:25.039 -> Charging current request 11 A
13:17:26.057 -> Charging current request 12 A
13:17:27.051 -> Charging current request 13 A
13:17:28.063 -> Charging current request 14 A
13:17:29.094 -> Charging current request 15 A
13:17:30.086 -> Charging current request 15 A
13:17:31.081 -> Charging current request 15 A
13:17:32.074 -> Charging current request 15 A
13:17:33.066 -> Charging current request 15 A
13:17:34.109 -> Charging current request 15 A
13:17:34.629 -> Charger stop control is set true
13:17:34.629 -> EVSE requests we stop charging.
13:17:34.629 -> Setting current request to zero.
13:17:34.629 -> Vehicle charging disabled
13:17:35.101 -> Charging current request 13 A
13:17:36.090 -> Charging current request 11 A
13:17:37.083 -> Charging current request 9 A
13:17:38.121 -> Charging current request 7 A
13:17:39.114 -> Charging current request 5 A
13:17:40.106 -> Charging current request 3 A
13:17:41.100 -> Charging current request 1 A
13:17:42.126 -> Charging current request 0 A
13:17:42.647 -> Station status: standby
13:17:42.788 -> Opening contactor
13:17:43.120 -> Charging current request 0 A
13:17:44.099 -> Charging current request 0 A
13:17:45.131 -> Charging current request 0 A
13:17:46.112 -> Charging current request 0 A
13:17:46.616 -> Connector unlocked
13:17:46.803 -> Stopping chademo process.
```

Παρακάτω βλέπουμε τις καταγραφές σχετικά με την φόρτιση στην περίπτωση ομαλής λειτουργίας με τερματισμό από το όχημα.

```
13:21:01.209 -> Starting Chademo process.
13:21:01.301 -> Sent parameters to EVSE. Waiting.
13:21:01.819 -> Charging current request 0 A
13:21:02.575 -> Setting begin charge request.
13:21:02.575 -> Vehicle charging enabled
13:21:02.812 -> Charging current request 0 A
13:21:03.791 -> Charging current request 0 A
13:21:04.831 -> Charging current request 0 A
13:21:05.820 -> Charging current request 0 A
13:21:06.814 -> Charging current request 0 A
13:21:07.809 -> Connector locked
```

Κεφάλαιο 3, Υλοποίηση της επικοινωνίας σύμφωνα με το πρωτόκολλο CHADEMO

```
13:21:07.809 -> Charging current request 0 A
13:21:07.903 -> Closing contactor
13:21:08.831 -> Charging current request 0 A
13:21:09.445 -> Station status: charging
13:21:09.445 -> Charger stop control is set false
13:21:09.822 -> Charging current request 1 A
13:21:10.816 -> Charging current request 2 A
13:21:11.856 -> Charging current request 3 A
13:21:12.853 -> Charging current request 4 A
13:21:13.835 -> Charging current request 5 A
13:21:14.826 -> Charging current request 6 A
13:21:15.866 -> Charging current request 7 A
13:21:16.843 -> Charging current request 8 A
13:21:17.870 -> Charging current request 9 A
13:21:18.850 -> Charging current request 10 A
13:21:19.842 -> Charging current request 11 A
13:21:20.860 -> Charging current request 12 A
13:21:21.853 -> Charging current request 13 A
13:21:22.880 -> Charging current request 14 A
13:21:23.856 -> Charging current request 15 A
13:21:24.880 -> Charging current request 15 A
13:21:25.872 -> Charging current request 15 A
13:21:26.901 -> Charging current request 15 A
13:21:26.995 -> Normal stop request flag is set true
13:21:26.995 -> Car requests we stop charging
13:21:26.995 -> Setting current request to zero.
13:21:26.995 -> Vehicle charging disabled
13:21:27.879 -> Charging current request 13 A
13:21:28.445 -> Charger stop control is set true
13:21:28.902 -> Charging current request 11 A
13:21:29.896 -> Charging current request 9 A
13:21:30.888 -> Charging current request 7 A
13:21:31.916 -> Charging current request 5 A
13:21:32.899 -> Charging current request 3 A
13:21:33.927 -> Charging current request 1 A
13:21:34.915 -> Charging current request 0 A
13:21:35.910 -> Charging current request 0 A
13:21:36.939 -> Charging current request 0 A
13:21:37.456 -> Station status: standby
13:21:37.595 -> Opening contactor
13:21:37.926 -> Charging current request 0 A
13:21:38.922 -> Charging current request 0 A
13:21:39.943 -> Charging current request 0 A
13:21:40.937 -> Charging current request 0 A
13:21:41.456 -> Connector unlocked
13:21:41.597 -> Stopping chademo process.
```

Λειτουργία σφάλματος

Πέραν της ομαλής λειτουργίας κατά την οποία δεν προκύπτει κανένα σφάλμα, φροντίσαμε για την κατάλληλη ανταπόκριση του φορτιστή σε καταστάσεις σφάλματος.

Οι καταστάσεις σφάλματος περιλαμβάνουν ανίχνευση σφάλματος στην πλευρά του οχήματος και ανίχνευση σφάλματος στην πλευρά του φορτιστή.

Από την πλευρά του οχήματος ανιχνεύονται τα ακόλουθα σφάλματα:

- υπέρταση της μπαταρίας
- υπόταση της μπαταρίας,
- πολύ υψηλή θερμοκρασία στην μπαταρία,
- απόκλιση ρεύματος και απόκλιση τάσης,
- λάθος θέση στο λεβιέ (όχι σε θέση παρκαρίσματος)
- και σφάλμα στο σύστημα φόρτισης.

Από την πλευρά του φορτιστή ανιχνεύονται τα ακόλουθα σφάλματα:

- αστοχία στην λειτουργία του φορτιστή
- σφάλμα στο σύστημα φόρτισης
- ασυμβατότητα μπαταρίας.

Παρακάτω βλέπουμε τις καταγραφές σχετικά με την φόρτιση στην περίπτωση ανίχνευσης σφάλματος από τον φορτιστή κατά την διάρκεια μεταφοράς ενέργειας.

```
13:27:52.965 -> Starting Chademo process.
13:27:53.058 -> Sent parameters to EVSE. Waiting.
13:27:53.201 -> Charging current request 0 A
13:27:53.338 -> Setting begin charge request.
13:27:53.338 -> Vehicle charging enabled
13:27:54.226 -> Charging current request 0 A
13:27:55.207 -> Charging current request 0 A
13:27:56.200 -> Charging current request 0 A
13:27:57.210 -> Charging current request 0 A
13:27:58.245 -> Charging current request 0 A
13:27:59.238 -> Connector locked
13:27:59.238 -> Charging current request 0 A
13:27:59.332 -> Closing contactor
13:28:00.231 -> Charging current request 0 A
13:28:01.222 -> Station status: charging
13:28:01.222 -> Charger stop control is set false
13:28:01.222 -> Charging current request 1 A
13:28:02.263 -> Charging current request 2 A
13:28:03.255 -> Charging current request 3 A
13:28:04.243 -> Charging current request 4 A
13:28:05.233 -> Charging current request 5 A
13:28:06.268 -> Charging current request 6 A
13:28:07.254 -> Charging current request 7 A
13:28:08.243 -> Charging current request 8 A
13:28:09.270 -> Charging current request 9 A
13:28:10.259 -> Charging current request 10 A
13:28:11.298 -> Charging current request 11 A
13:28:12.289 -> Charging current request 12 A
13:28:13.227 -> Charger stop control is set true
13:28:13.227 -> EVSE reports fault. Aborting.
13:28:13.227 -> Setting current request to zero.
13:28:13.227 -> Vehicle charging disabled
13:28:13.274 -> Charging current request 10 A
13:28:14.300 -> Charging current request 8 A
13:28:15.287 -> Charging current request 6 A
13:28:16.277 -> Charging current request 4 A
13:28:17.319 -> Charging current request 2 A
13:28:18.313 -> Charging current request 0 A
```

Κεφάλαιο 3, Υλοποίηση της επικοινωνίας σύμφωνα με το πρωτόκολλο CHADEMO

```
13:28:19.305 -> Charging current request 0 A
13:28:20.301 -> Charging current request 0 A
13:28:21.287 -> Charging current request 0 A
13:28:22.320 -> Charging current request 0 A
13:28:23.301 -> Charging current request 0 A
13:28:24.343 -> Charging current request 0 A
13:28:20.301 -> Charging current request 0 A
13:28:21.287 -> Charging current request 0 A
13:28:22.320 -> Charging current request 0 A
13:28:23.301 -> Charging current request 0 A
13:28:24.343 -> Charging current request 0 A
13:28:25.330 -> Charging current request 0 A
13:28:26.319 -> Charging current request 0 A
13:28:27.308 -> Charging current request 0 A
13:28:28.331 -> Charging current request 0 A
13:28:29.232 -> Station status: standby
13:28:29.325 -> Charging current request 0 A
13:28:29.371 -> Opening contactor
13:28:30.318 -> Charging current request 0 A
13:28:31.357 -> Charging current request 0 A
13:28:32.349 -> Charging current request 0 A
13:28:33.200 -> Connector unlocked
13:28:33.340 -> Charging current request 0 A
13:28:33.386 -> Stopping chademo process.
```

Παρακάτω βλέπουμε τις καταγραφές σχετικά με την φόρτιση στην περίπτωση ανίχνευσης σφάλματος από το όχημα κατά την διάρκεια μεταφοράς ενέργειας.

```
13:24:32.380 -> Starting Chademo process.
13:24:32.476 -> Sent parameters to EVSE. Waiting.
13:24:32.523 -> Charging current request 0 A
13:24:32.758 -> Setting begin charge request.
13:24:32.758 -> Vehicle charging enabled
13:24:33.512 -> Charging current request 0 A
13:24:34.549 -> Charging current request 0 A
13:24:35.531 -> Charging current request 0 A
13:24:36.522 -> Charging current request 0 A
13:24:37.560 -> Charging current request 0 A
13:24:38.505 -> Connector locked
13:24:38.552 -> Charging current request 0 A
13:24:38.646 -> Closing contactor
13:24:39.530 -> Charging current request 0 A
13:24:39.625 -> Station status: charging
13:24:39.625 -> Charger stop control is set false
13:24:40.567 -> Charging current request 1 A
13:24:41.547 -> Charging current request 2 A
13:24:42.536 -> Charging current request 3 A
13:24:43.574 -> Charging current request 4 A
13:24:44.573 -> Charging current request 5 A
13:24:45.558 -> Charging current request 6 A
13:24:46.584 -> Charging current request 7 A
13:24:47.559 -> Charging current request 8 A
13:24:48.585 -> Charging current request 9 A
13:24:49.578 -> Charging current request 10 A
13:24:50.602 -> Charging current request 11 A
... ..
```

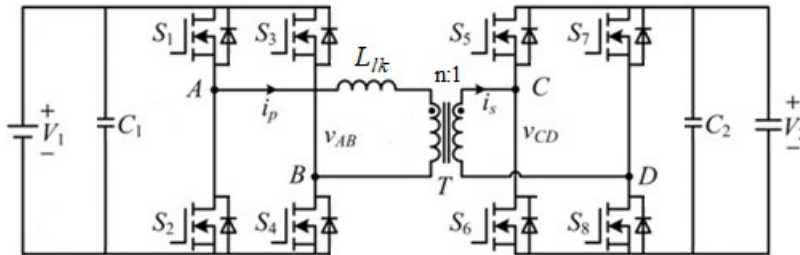
Κεφάλαιο 3, Υλοποίηση της επικοινωνίας σύμφωνα με το πρωτόκολλο CHADEMO

```
13:24:51.074 -> Fault: High battery temperature!
13:24:51.074 -> Detected fault!
13:24:51.074 -> Setting current request to zero.
13:24:51.074 -> Vehicle charging disabled
13:24:51.594 -> Charging current request 9 A
13:24:51.641 -> Charger stop control is set true
13:24:52.574 -> Charging current request 7 A
13:24:53.613 -> Charging current request 5 A
13:24:54.602 -> Charging current request 3 A
13:24:55.590 -> Charging current request 1 A
13:24:56.627 -> Charging current request 0 A
13:24:57.620 -> Charging current request 0 A
13:24:58.601 -> Charging current request 0 A
13:24:59.638 -> Charging current request 0 A
13:25:00.630 -> Charging current request 0 A
13:25:01.623 -> Charging current request 0 A
13:25:02.614 -> Charging current request 0 A
13:25:03.646 -> Charging current request 0 A
13:25:04.623 -> Charging current request 0 A
13:25:05.659 -> Charging current request 0 A
13:25:06.655 -> Charging current request 0 A
13:25:07.649 -> Charging current request 0 A
13:25:08.644 -> Station status: standby
13:25:08.644 -> Charging current request 0 A
13:25:08.771 -> Opening contactor
13:25:09.665 -> Charging current request 0 A
13:25:10.658 -> Charging current request 0 A
13:25:11.652 -> Charging current request 0 A
13:25:12.648 -> Connector unlocked
13:25:12.648 -> Charging current request 0 A
13:25:12.789 -> Stopping chademo process.
```

Κεφάλαιο 4

Βασικές Αρχές Λειτουργίας του Κυκλώματος Ισχύος Φορτιστή Βασισμένου στην Τοπολογία Dual Active Bridge (DAB)

Ο απομονωμένος μετατροπέας DAB μετατρέπει την συνεχή τάση σε υψίσυχνη εναλλασσόμενη τάση στην είσοδο του μετασχηματιστή και μετά ανορθώνει την υψίσυχνη εναλλασσόμενη τάση πάλι σε συνεχή. Η διάταξη ενός μετατροπέα DAB φαίνεται στην Εικόνα 4.1.



Εικόνα 4.1 Διάταξη DAB.

Ο μετατροπέας DAB έχει πολλά πλεονεκτήματα όπως: ευρύ φάσμα ZVS για όλους τους διακόπτες ισχύος σε μεγάλη ποικιλία φορτίου, αμφίδρομο έλεγχο ροής ισχύος και συμμετρική αρχιτεκτονική στην τοπολογία.[80]

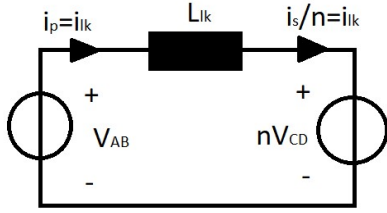
Κατηγορίες ελέγχου

1. Έλεγχος με PWM: Ο ελεγχόμενος από PWM μετατροπέας χρησιμοποιεί τεχνική διαμόρφωσης εύρους παλμού για να ρυθμίσει την τάση εξόδου του μετατροπέα, ρυθμίζοντας έτσι την ισχύ. Η τάση εξόδου του μετατροπέα ελέγχεται από το εύρος παλμού (duty cycle) του σήματος PWM των διακοπών ισχύος. Οι διακόπτες της μίας γέφυρας (S_1 - S_4) ρυθμίζονται ώστε να μετατρέψουν την συνεχή τάση σε εναλλασσόμενη και οι διακόπτες της άλλης γέφυρας (S_5 - S_8) τίθενται OFF ώστε το ρεύμα να άγεται μόνο μέσω των διόδων λειτουργώντας ως παθητική ανόρθωση. Στην αντίθετη φορά ροής της ισχύος γίνεται η αντίστοιχη διαδικασία από την άλλη πλευρά. Αυτού του είδους ο έλεγχος είναι εύκολος να υλοποιηθεί αλλά έχει κακή δυναμική συμπεριφορά. Η εναλλασσόμενη τάση εξόδου μπορεί μόνο να είναι μικρότερη από την συνεχή τάση εισόδου της ημιγέφυρας, το οποίο οδηγεί σε περιορισμένο εύρος τάσης εξόδου.[81]
2. Έλεγχος μέσω διαφοράς φάσης: Το κύριο χαρακτηριστικό αυτού του τύπου μετατροπέα είναι η ύπαρξη σχετικά μεγαλύτερης επαγωγής διαρροής σε σύγκριση με τους άλλους μετατροπείς. Η ισχύς εξόδου εξαρτάται από τη διαφορά φάσης μεταξύ των δύο τάσεων που προκαλούνται στα άκρα της επαγωγής διαρροής, v_{AB} και v_{CD} . Αν το εύρος του παλμού για τις δύο ενεργές γέφυρες ρυθμιστεί στο 50%, η ισχύς θα μεταφερθεί από το V_1 στο V_2 όταν η φάση της v_{AB} προηγείται της v_{CD} και η ισχύς θα αντιστραφεί όταν η φάση της v_{AB} υστερεί σε σχέση με την v_{CD} . Αυτή η μέθοδος αποτελεί τον συμβατικό έλεγχο διαφοράς φάσης γνωστό και ως Simple Phase Shift (SPS). Επιπλέον, το εύρος του παλμού για τις δύο ενεργές γέφυρες μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για τη βελτίωση της απόδοσης των μετατροπέων DAB.

Βασική αρχή λειτουργίας

Η μεταφορά ισχύος σχετίζεται με τη μορφή των v_{AB} και v_{CD} , και τη διαφορά φάσης μεταξύ των δύο τάσεων v_{AB} και v_{CD} . Αν θεωρήσουμε ιδανικούς διακόπτες, αγνοήσουμε τις απώλειες, αγνοήσουμε τον κλάδο μαγνήτισης του μετασχηματιστή και τα μη γραμμικά φαινόμενα, παίρνουμε το απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα ανηγμένο στο πρωτεύον του μετασχηματιστή, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.2.

Κεφάλαιο 4, Βασικές Αρχές Λειτουργίας του Κυκλώματος Ισχύος Φορτιστή Βασισμένου στην Τοπολογία Dual Active Bridge (DAB)



Εικόνα 4.2 Απλοποιημένη διάταξη DAB.

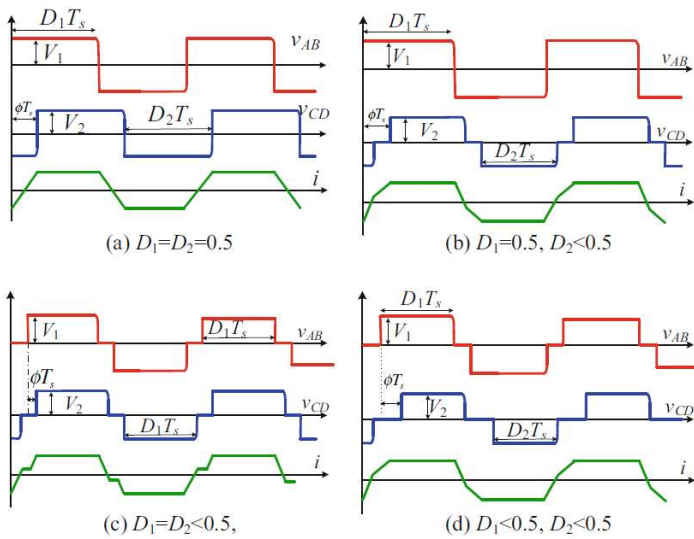
$$\text{Οι πιθανές τιμές της τάσης } V_{AB} = \begin{cases} +V_1, & S_1, S_4 = ON, S_2, S_3 = OFF \\ 0, & (S_1, S_3 = ON, S_2, S_4 = OFF) \text{ ή } (S_2, S_4 = ON, S_1, S_3 = OFF) \\ -V_1, & S_2, S_3 = ON, S_1, S_4 = OFF \end{cases}$$

Αντίστοιχα οι πιθανές τιμές της τάσης

$$nV_{CD} = \begin{cases} +nV_2, & S_5, S_8 = ON, S_6, S_7 = OFF \\ 0, & (S_5, S_7 = ON, S_6, S_8 = OFF) \text{ ή } (S_6, S_8 = ON, S_5, S_7 = OFF) \\ -nV_2, & S_6, S_7 = ON, S_5, S_8 = OFF \end{cases}$$

Η Εικόνα 4.3 δείχνει ενδεικτικές βασικές κυματομορφές λειτουργίας σε τέσσερις διαφορετικές στρατηγικές ελέγχου για μετατροπέα DAB τροφοδοσίας δύο επιπέδων.

Σε αυτό το σχήμα, T_s είναι η περίοδος μεταγωγής, και τα D_1 και D_2 είναι το duty cycle για τις δύο γέφυρες. Το $D_1 T_s$ είναι η διάρκεια του επιπέδου υψηλής τάσης για την v_{AB} σε μια διακοπτική περίοδο και το $D_2 T_s$ είναι η διάρκεια του επιπέδου υψηλής τάσης για την v_{CD} σε μια διακοπτική περίοδο.



Εικόνα 4.3 ενδεικτικές κυματομορφές. [80]

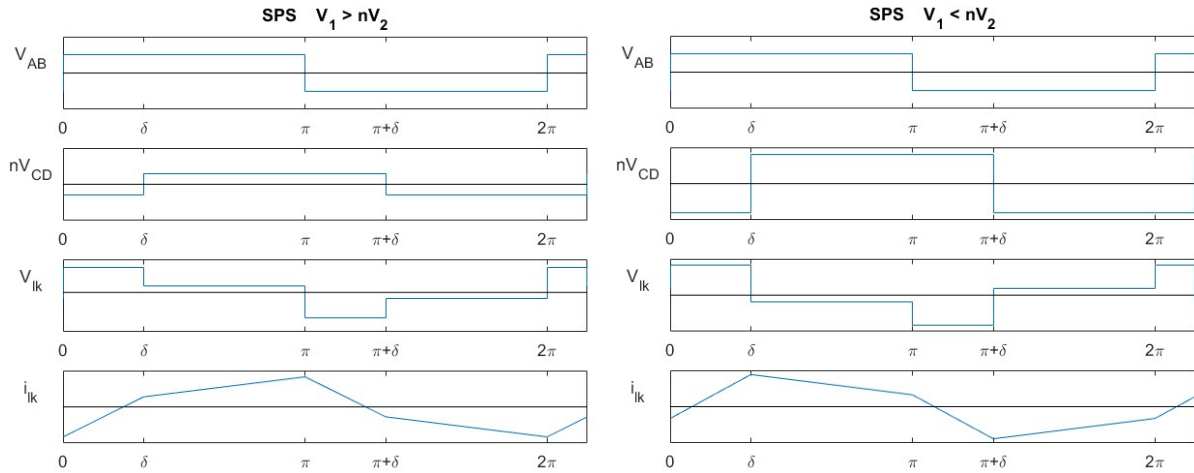
Παρατηρούμε ότι υπάρχουν 3 μεταβλητές ελέγχου D_1, D_2, ϕ . Ανάλογα με το πόσες από αυτές αφήνουμε να μεταβάλλονται μπορούμε να έχουμε 4 κατηγορίες ελέγχου.

- Αν $D_1=D_2=0.5$ έχουμε 1 μεταβλητή ελέγχου, την διαφορά φάσης ϕ . Αυτός ο έλεγχος ονομάζεται Simple phase shift (SPS)
- Αν $D_1=0.5, D_2<0.5$ ή $D_1<0.5, D_2=0.5$ έχουμε 2 μεταβλητές ελέγχου, την διαφορά φάσης ϕ και το εύρος παλμού D_2 ή D_1 αντίστοιχα. Αυτός ο έλεγχος ονομάζεται Extended phase shift (EPS)
- Αν $D_1=D_2<0.5$ έχουμε 2 μεταβλητές ελέγχου, την διαφορά φάσης ϕ και το εύρος παλμού $D=D_1=D_2$. Αυτός ο έλεγχος ονομάζεται Double phase shift (DPS)
- Αν $D_1, D_2<0.5$ έχουμε 3 μεταβλητές ελέγχου, την διαφορά φάσης ϕ και τα εύρη παλμών D_1, D_2 , ανεξάρτητα μεταξύ τους. Αυτός ο έλεγχος ονομάζεται Triple phase shift (TPS)

Ανάλυση των μεθόδων ελέγχου της διάταξης

A. Simple phase shift (SPS):

Δεν υπάρχει επίπεδο μηδενικής τάσης στις δύο κυματομορφές τάσης, και $D_1 = D_2 = 0.5$. Δεδομένου ότι τα D_1 και D_2 είναι σταθερές, η μεταφορά ισχύος σχετίζεται μόνο με τη διαφορά φάσης δ . Κατά συνέπεια, αυτή η μέθοδος ελέγχου έχει μόνο ένα τον βαθμό ελευθερίας ελέγχου. Αυτό το είδος ελέγχου είναι κατάλληλο για εφαρμογές όπου η τάσεις εισόδου και εξόδου είναι γενικά σταθερές. Στον SPS τα σήματα για τους διακόπτες S_1 και S_4 ταυτίζονται. Τα σήματα για τους αντίστοιχους διακόπτες πρωτεύοντος και δευτερεύοντος (S_1, S_5 κλπ) έχουν διαφορά φάσης δ . Αυτός ο έλεγχος είναι απλός στην υλοποίηση. Στα διαγράμματα της Εικόνας 4.4 βλέπουμε τις κυματομορφές αυτού του ελέγχου.



Εικόνα 4.4 Κυματομορφές SPS

Η ισχύς εξόδου δίνεται από τον τύπο:

$$P = \frac{nV_1V_2 \cdot \delta(\pi - \delta)}{2\pi^2 f_s L_{lk}} \quad (4.1)$$

και η μέγιστη ισχύς εξόδου είναι:

$$P_{max} = \frac{nV_1V_2}{8f_s L_{lk}} \quad (4.2)$$

Η μέγιστη καταπόνηση ρεύματος είναι:

$$I_{max} = \frac{1}{4n\pi f_s L_{lk}} [-(\pi - 2\delta)nV_2 - \pi V_1] \quad (4.3)$$

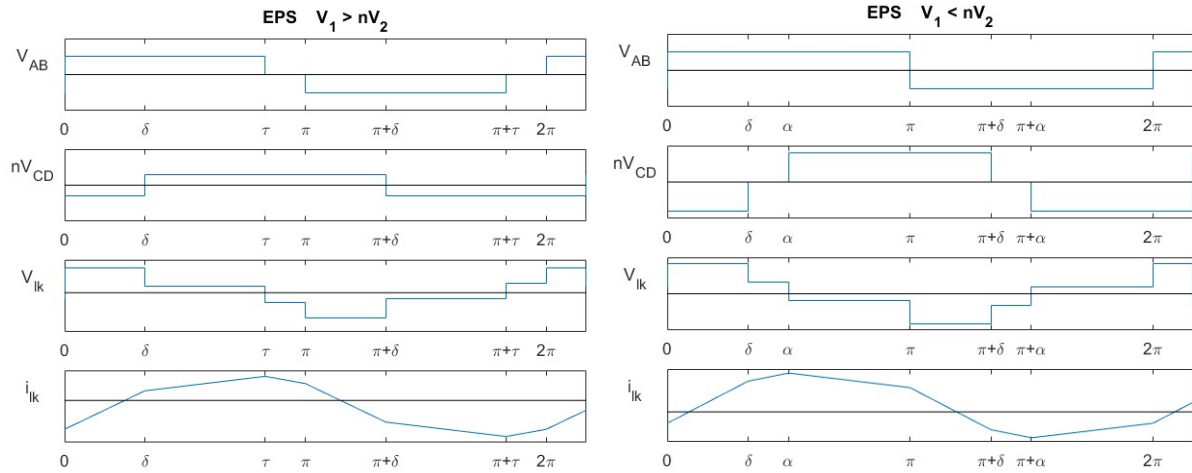
Όταν $V_1 \neq nV_2$, υπάρχει ρεύμα που ρέει μέσα στον μετασχηματιστή ακόμα και όταν η διαφορά φάσης είναι 0. Αυτό το ρεύμα συνεισφέρει στην άεργο ισχύ του κυκλώματος. Στο [82] αποδεικνύεται ότι για δεδομένη τιμή επαγωγής σκέδασης το μέγιστο ρεύμα δεν αλλάζει σημαντικά με την αλλαγή της ισχύος.

B. Extended Phase shift (EPS):

Ο έλεγχος EPS χρησιμοποιεί το εύρος παλμού της μιας γέφυρας για να μειώσει την αναντιστοιχία μεταξύ των δύο τάσεων V_1, nV_2 . Επειδή το εύρος παλμού δεν μπορεί να είναι μεγαλύτερο από 1/2, όταν η V_1 είναι μεγαλύτερη από τη nV_2 , το εύρος παλμού στην πλευρά V_1 πρέπει να ρυθμιστεί. Ωστόσο, όταν η V_1 είναι μικρότερη από τη nV_2 , το εύρος παλμού στην πλευρά V_2 πρέπει να ρυθμιστεί. Κατά συνέπεια, ο έλεγχος EPS πρέπει να ανταλλάξει τη λογική των PWM υπό διαφορετικές τάσεις εισόδου και η μετάβαση μεταξύ των δύο περιπτώσεων δεν μπορεί να επιτευχθεί ομαλά. Η γέφυρα στη πλευρά της μεγάλης τάσης οδηγείται ώστε να παράγει παλμό εξόδου τριών επιπέδων με εύρος τ ενώ η άλλη πλευρά παράγει τετραγωνικό παλμό με εύρος 50% της περιόδου. Η μεταφερόμενη ισχύς ελέγχεται από τη διαφορά φάσης ϕ και το εύρος τ . Αυτός ο έλεγχος επιτρέπει μεγαλύτερο εύρος ZVS σε σχέση με τον απλό έλεγχο φάσης, οδηγώντας σε αυξημένη απόδοση. Ενώ ταυτόχρονα χρησιμοποιούνται πιο αποδοτικά τα ημιαγωγικά στοιχεία.

Κεφάλαιο 4, Βασικές Αρχές Λειτουργίας του Κυκλώματος Ισχύος Φορτιστή Βασισμένου στην Τοπολογία Dual Active Bridge (DAB)

Επιπρόσθετα έχει μεγαλύτερη ευελιξία ελέγχου της ισχύος εξόδου [81]. Στα διαγράμματα της Εικόνας 4.5 φαίνονται οι κυματομορφές αυτού του ελέγχου. Επισημαίνεται ότι: $\alpha = \pi + \delta - \tau$.



Εικόνα 4.5 Κυματομορφές EPS

Η ισχύς εξόδου δίνεται από τον τύπο:

$$P = \frac{nV_1V_2}{4\pi^2 f_s L_{lk}} \cdot (2\delta\tau - 2\delta^2 - \tau^2 + \tau\pi) \quad (4.4)$$

και η μέγιστη ισχύς εξόδου είναι:

$$P_{max} = \frac{nV_1V_2}{8f_s L_{lk}} \quad (4.5)$$

Η μέγιστη καταπόνηση ρεύματος είναι:

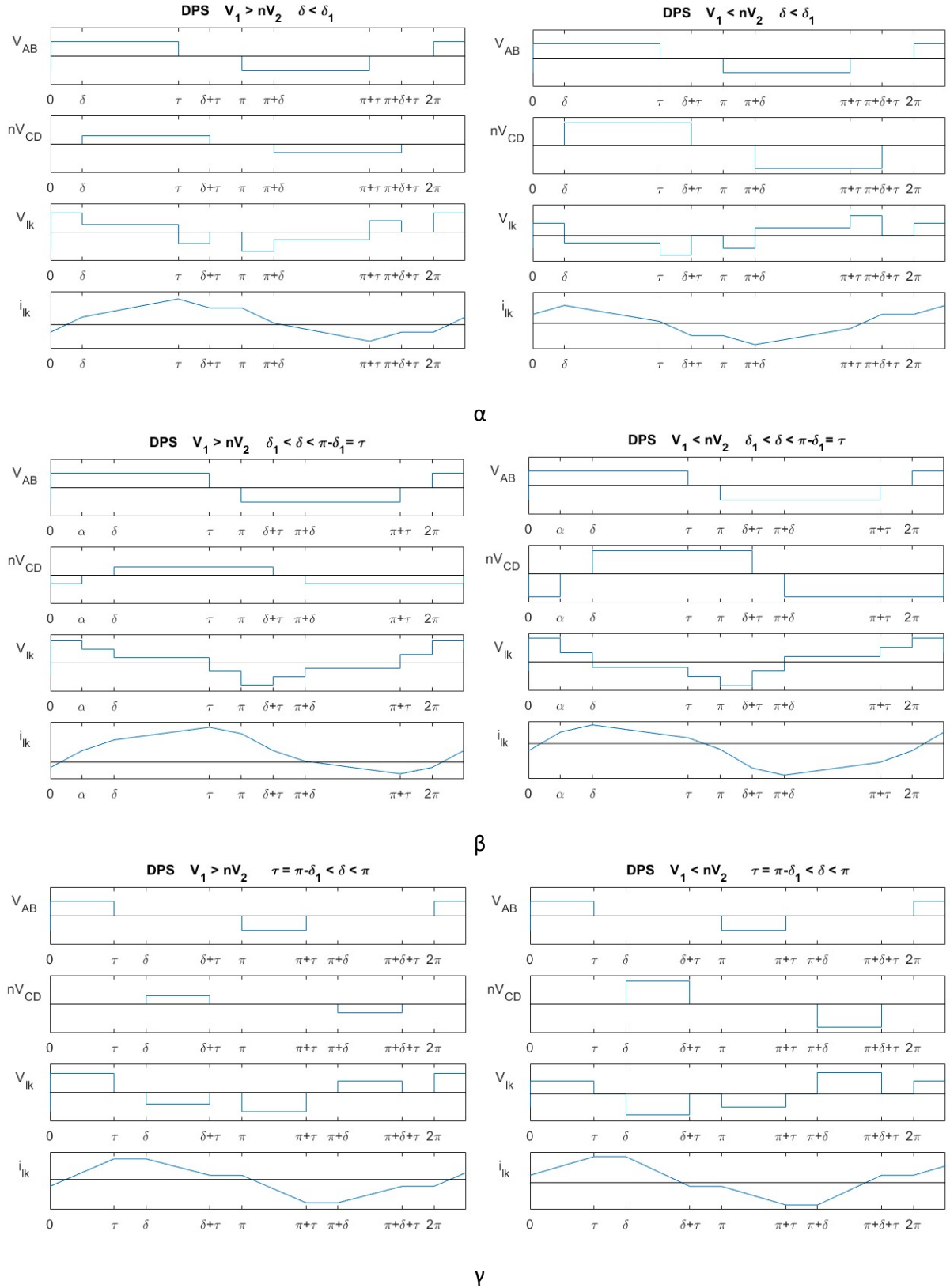
$$I_{max} = \frac{1}{4\pi f_s L_{lk}} \cdot \begin{cases} -(\pi - 2\delta)nV_2 - \tau V_1, & V_1 > nV_2 \\ -(\tau - 2\delta)nV_2 - \pi V_1, & V_1 < nV_2 \end{cases} \quad (4.6)$$

C. Dual phase shift (DPS):

Τα D_1 και D_2 είναι και τα δύο μεταβλητά με τον περιορισμό το D_1 να είναι ίσο με το D_2 . Στο DPS εισάγεται ένας επιπλέον βαθμός ελέγχου με την προσθήκη εσωτερικής διαφοράς φάσης δ_1 ανάμεσα στις δύο ημιγέφυρες (S_{1-2}, S_{3-4} για το πρωτεύον και αντίστοιχα για το δευτερεύον), οπότε η εναλλασσόμενη τάση πρωτεύοντος και δευτερεύοντος είναι τώρα τριών επιπέδων αντί για δύο, με εύρος υψηλής τάσης $\tau = \pi - \delta_1$. Η μεταφερόμενη ισχύς ελέγχεται από τη διαφορά φάσης ϕ και από το εύρος τ . Όταν απαιτείται μειωμένη ισχύς εξόδου το δ_1 πρέπει να αυξηθεί και το ϕ να μειωθεί. Με την ίδια διαφορά φάσης με το SPS, το DPS προσφέρει ένα εύρος ισχύων εξόδου, το οποίο αυξάνει την ευελιξία του ελέγχου. Ωστόσο η μέγιστη δυνατή ισχύς εξόδου είναι η ίδια και για τις δύο περιπτώσεις. Το DPS έχει μειωμένο μέγιστο ρεύμα για την ίδια ισχύ εξόδου και μειωμένη άεργο ισχύ, το οποίο οδηγεί σε αυξημένη απόδοση. Επιπλέον έχει μικρότερη κυμάτωση τάσης. Ωστόσο το να ελέγχονται οι δύο διαφορετικές διαφορές φάσεις από δύο διαφορετικούς PI ελεγκτές δεν είναι πρακτικό στην πράξη [82].

Στα διαγράμματα της Εικόνας 4.6 παρουσιάζονται οι κυματομορφές αυτού του ελέγχου όταν (α) $\delta < \delta_1$, (β) $\delta_1 < \delta < \pi - \delta_1$, (γ) $\pi - \delta_1 < \delta < \pi$. Επισημαίνεται ότι $\alpha = \delta + \tau - \pi$.

Κεφάλαιο 4, Βασικές Αρχές Λειτουργίας του Κυκλώματος Ισχύος Φορτιστή Βασισμένου στην Τοπολογία Dual Active Bridge (DAB)



Εικόνα 4.6 Κυματομορφές DPS

Η ισχύς εξόδου δίνεται από τον τύπο:

$$P = \frac{nV_1V_2}{4\pi^2 f_s L_{lk}} \cdot \begin{cases} \delta(2\pi - 2\delta_1 - \delta), & 0 \leq \delta \leq \delta_1 \\ 2\delta(\pi - \delta) - \delta_1^2, & \delta_1 \leq \delta \leq \pi - \delta_1 \\ (\pi - \delta_1)^2, & \pi - \delta_1 \leq \delta \leq \pi \end{cases} \quad (4.7)$$

και η μέγιστη καταπόνηση ρεύματος είναι:

$$I_{max} = \frac{1}{4n\pi f_s L_{lk}} [-(\pi - \delta_1 - 2\delta)nV_2 - (\pi - \delta_1)V_1] \quad (4.8)$$

και η μέγιστη ισχύς εξόδου είναι:

$$P_{max} = \frac{nV_1 V_2}{8f_s L_{lk}} \quad (4.9)$$

Υπό την συνθήκη $\pi - \delta_1 \leq \delta \leq \pi$, η ισχύς εξόδου μπορεί να ρυθμιστεί μόνο με βάση το εύρος του παλμού και η διαφορά φάσης να τεθεί σε μια σταθερή τιμή.

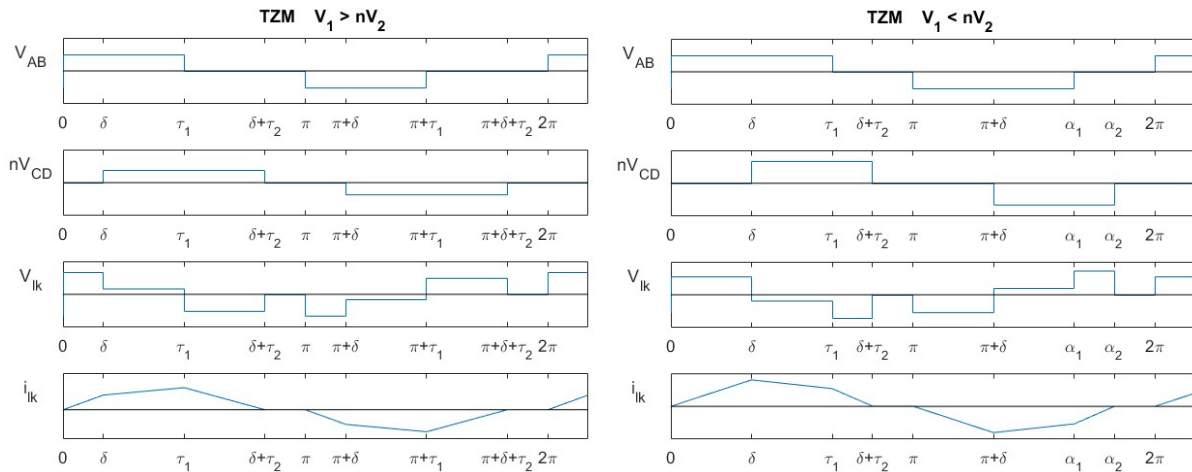
D. Triple phase shift (TPS):

Στον έλεγχο με 3 βαθμούς ελευθερίας, τα D_1, D_2 είναι μεταβλητά και μικρότερα του 0.5. Οι μεταβλητές D_1, D_2 και δ μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο σχήμα ελέγχου για την επίτευξη διαφορετικών στόχων ελέγχου ανάλογα με την τάση εισόδου, την τάση εξόδου και το φορτίο.

Η κατηγορία αυτή μπορεί να χωριστεί σε διάφορες υποκατηγορίες.

Αν η μορφή του ρεύματος στο πηνίο είναι τραπεζοειδής έχουμε Trapezoidal Modulation (TZM), αν η μορφή του ρεύματος είναι τριγωνική έχουμε Triangular Modulation (TRM), ενώ μπορούμε να έχουμε και πιο γενικευμένο έλεγχο με Unified Triple Phase Shift (UPS).

Trapezoidal Modulation (TZM): Αυτός ο έλεγχος έχει μοναδικά πλεονεκτήματα, όπως μηδενική άεργος ισχύς, μεταγωγή ZCS και προσαρμοσима duty cycles όταν οι τάσεις δεν ταυτίζονται. Οι διακόπτες S_3, S_4, S_5, S_6 μπορούν να επιτύχουν ZVS ενώ οι διακόπτες S_1, S_2, S_7, S_8 όχι [80]. Με την τραπεζοειδή διαμόρφωση επιτυγχάνεται καλή απόδοση μετατροπέα. Αυτό συμβαίνει επειδή λειτουργούν τα κυκλώματα πλήρους γέφυρας με μεγάλους κύκλους λειτουργίας και έχει ως αποτέλεσμα χαμηλότερο ρεύμα RMS από την τριγωνική διαμόρφωση. Η μεταγωγή υπό μηδενικό ρεύμα (ZCS) εμφανίζεται για τέσσερις διακόπτες και ZVS για τους υπόλοιπους τέσσερις, συνεπώς αναμένονται μειωμένες απώλειες μεταγωγής σε σύγκριση με τη διαμόρφωση μετατόπισης φάσης. Στα διαγράμματα της Εικόνας 4.7 παρουσιάζονται οι κυματομορφές αυτού του ελέγχου. Επισημαίνεται ότι $\alpha_1 = \pi + \tau_1$, $\alpha_2 = \pi + \delta + \tau_2$



Εικόνα 4.7 Κυματομορφές TZM

Η ισχύς εξόδου δίνεται από τον τύπο:

$$P = \frac{V_1}{f_s L_{lk}} (\tau_1^2 V_1 - (\tau_1 - \delta)^2 nV_2), \text{ όπου } \tau_2 = \frac{V_1}{nV_2} \tau_1 \quad (4.10)$$

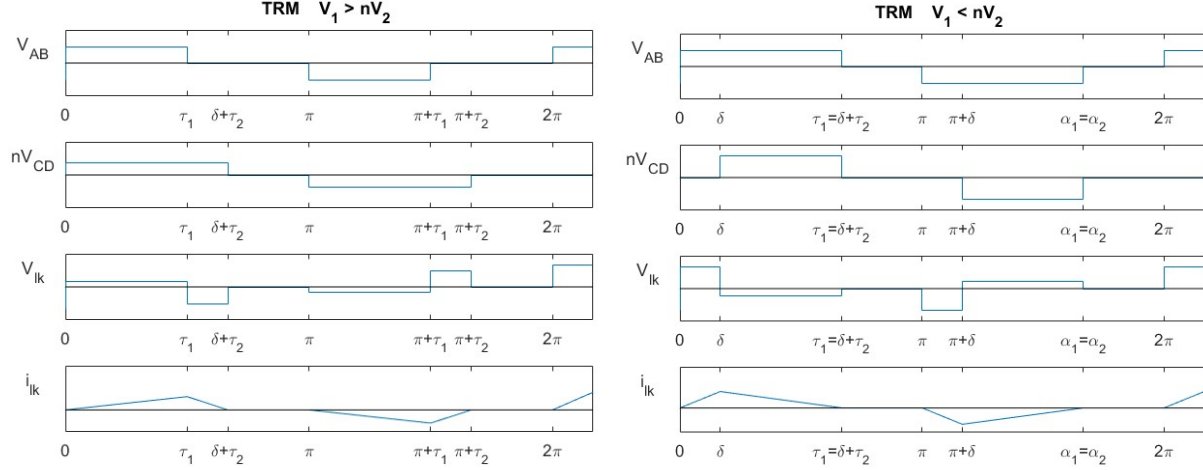
και η μέγιστη ισχύς εξόδου είναι:

$$P_{max} = \frac{V_1^2 (nV_2)^2}{4f_s L_{lk} (V_1^2 + nV_2 V_1 + (nV_2)^2)} \quad (4.11)$$

Κεφάλαιο 4, Βασικές Αρχές Λειτουργίας του Κυκλώματος Ισχύος Φορτιστή Βασισμένου στην Τοπολογία Dual Active Bridge (DAB)

Triangular Modulation (TRM): Αυτού του είδους ο έλεγχος ενδείκνυται όταν οι τάσεις V_1, nV_2 διαφέρουν σημαντικά. Αυτή η μέθοδος επιτρέπει την εφαρμογή του ZCS στην πλευρά χαμηλής τάσης, η οποία είναι επιθυμητή για χαμηλές απώλειες μεταγωγής, υψηλή ταχύτητα μεταγωγής [83].

- Η διαμόρφωση TRM μπορεί να ταυτίζεται με μια TZM όπου η διαφορά φάσης είναι 0. Στα διαγράμματα της Εικόνας 4.8 βλέπουμε τις κυματομορφές αυτού του ελέγχου.



Εικόνα 4.8 Κυματομορφές TRM περίπτωση 1

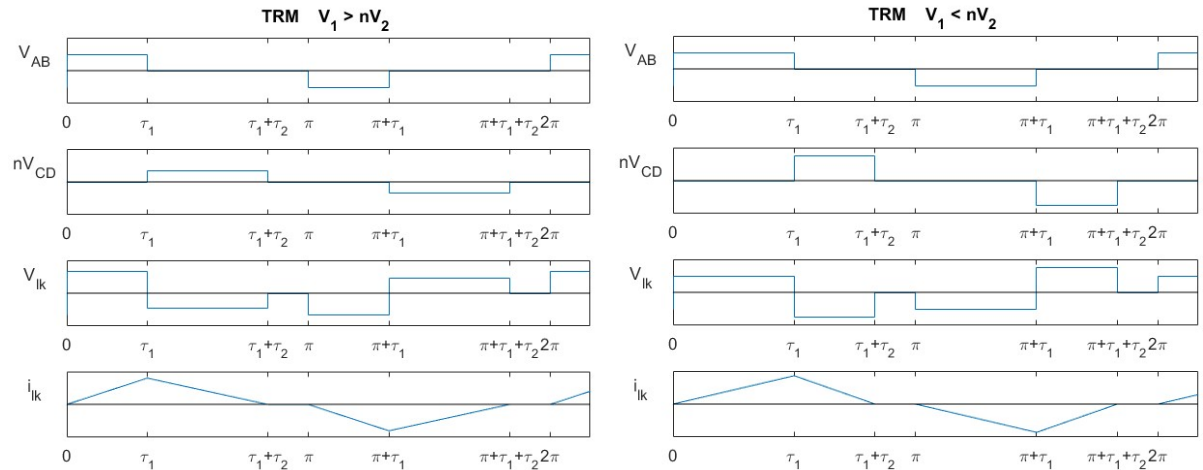
Σε αυτή την περίπτωση η ισχύς εξόδου δίνεται από τον τύπο:

$$P = \frac{V_1}{f_s L_{lk}} (\tau_1^2 V_1 - \tau_1^2 n V_2), \text{ όπου } \tau_2 = \frac{V_1}{n V_2} \tau_1 \quad (4.12)$$

και η μέγιστη ισχύς εξόδου είναι:

$$P_{max} = \begin{cases} \frac{(nV_2)^2 (V_1 - nV_2)}{4f_s L_{lk} V_1}, & V_1 > nV_2 \\ \frac{V_1^2 (nV_2 - V_1)}{4f_s L_{lk} nV_2}, & V_1 < nV_2 \end{cases} \quad (4.13)$$

- Η διαμόρφωση TRM μπορεί να ακολουθεί μια διαφοροποιημένη λογική όπου οι τάσεις V_{AB}, V_{CD} δεν είναι ποτέ ταυτόχρονα θετικές. Αυτού του είδους η τριγωνοειδής διαμόρφωση μπορεί ενδείκνυται και όταν δεν υπάρχει μεγάλη αναντιστοιχία μεταξύ των τάσεων. Ωστόσο έχει μεγαλύτερες τιμές ρεύματος για την ίδια ισχύ εξόδου σε σχέση με τον συμβατικό έλεγχο διαφοράς φάσης. Γεγονός το οποίο συνεπάγεται αυξημένες απώλειες. Για τον λόγο αυτό η μέθοδος αυτή είναι κατάλληλη μόνο για εφαρμογές μικρής ισχύος [84]. Στα διαγράμματα της Εικόνας 4.9 παρουσιάζονται οι κυματομορφές αυτού του ελέγχου.



Εικόνα 4.9 Κυματομορφές TRM περίπτωση 2

Κεφάλαιο 4, Βασικές Αρχές Λειτουργίας του Κυκλώματος Ισχύος Φορτιστή Βασισμένου στην Τοπολογία Dual Active Bridge (DAB)

Σε αυτή την περίπτωση η ισχύς εξόδου δίνεται από τον τύπο:

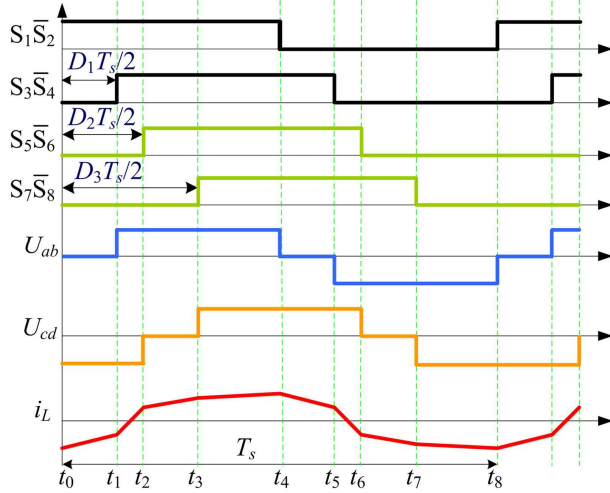
$$P = \frac{V_1 \tau_1^2}{f_s L_{lk}} \quad (4.14)$$

και η μέγιστη ισχύς εξόδου είναι:

$$P_{max} = \frac{V_1^2 (nV_2)^2}{4f_s L_{lk} (V_1 + nV_2)^2} \quad (4.15)$$

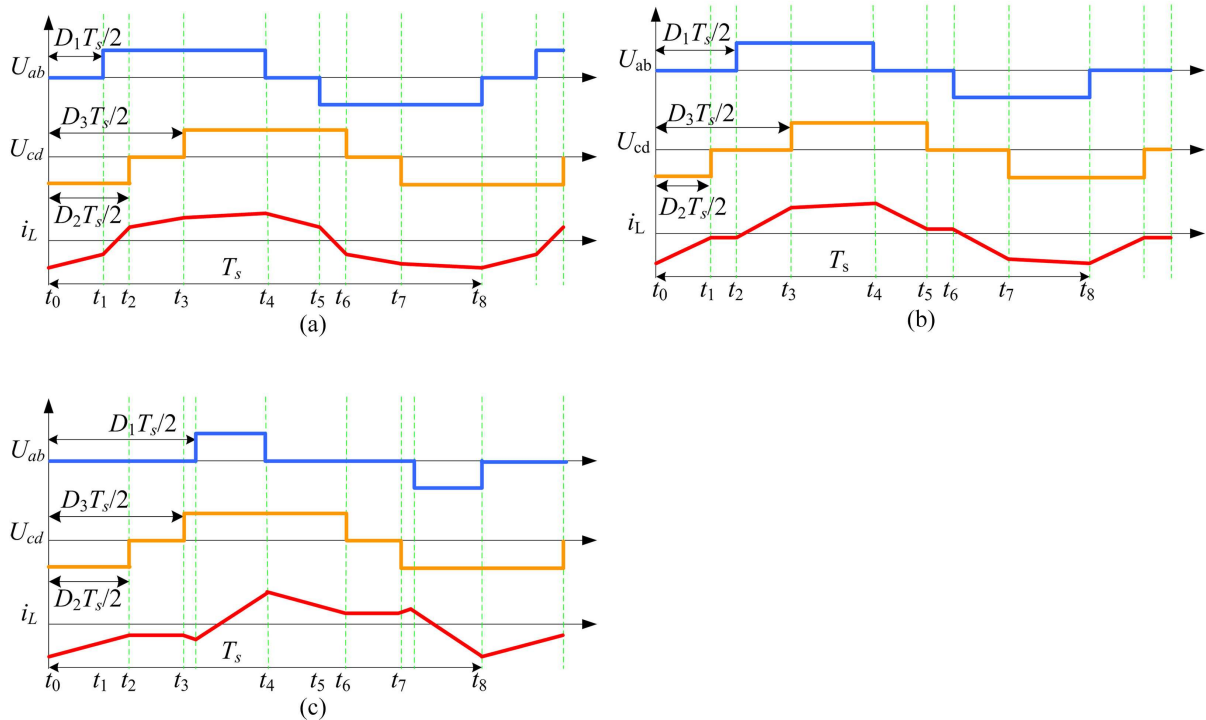
Unified Triple Phase Shift (UPS):

Στο διάγραμμα της Εικόνας 4.10 ορίζονται οι 3 μεταβλητές που αντιστοιχούν σε χρονικές μετατοπίσεις στα σήματα ελέγχου των διακοπών.



Εικόνα 4.10 Σήματα ελέγχου UPS [85]

Στα διαγράμματα της Εικόνας 4.11 βλέπουμε τις κυματομορφές αυτού του ελέγχου όταν: (a) $0 \leq D_1 \leq D_2 \leq D_3 \leq 1$, (b) $0 \leq D_2 \leq D_1 \leq D_3 \leq 1$, (c) $0 \leq D_2 \leq D_3 \leq D_1 \leq 1$.



Εικόνα 4.11 Οι κυματομορφές του UPS έλεγχου όταν. (a) $0 \leq D_1 \leq D_2 \leq D_3 \leq 1$. (b) $0 \leq D_2 \leq D_1 \leq D_3 \leq 1$. (c) $0 \leq D_2 \leq D_3 \leq D_1 \leq 1$. [85]

Η ισχύς εξόδου δίνεται από τον τύπο:

$$P = \frac{nT_s V_1 V_2}{8L_{lk}} \begin{cases} 2(-D_1 + D_2 + D_3 - D_1^2 - D_2^2 - D_3^2 + D_1 D_2 + D_1 D_3) (D_1 \leq D_2 \leq D_3 \leq 1) \\ 2(-D_1 + D_2 + D_3 + D_1 D_3 - D_3^2 - D_1 D_2) (D_2 \leq D_1 \leq D_3 \leq 1) \\ 2(-D_1 + D_2 + D_3 + D_1^2 - D_1 D_2 - D_1 D_3) (D_2 \leq D_3 \leq D_1 \leq 1) \end{cases} \quad (4.16)$$

και η μέγιστη καταπόνηση ρεύματος είναι:

$$I_{MAX} = \frac{T_s V_2}{8L_{lk}} 2[D_2 + D_3 - 1 + \frac{V_1}{nV_2} (1 - D_1)] \quad (4.17)$$

και η μέγιστη ισχύς εξόδου είναι:

$$P_{max} = \frac{nV_1 V_2}{8f_s L_{lk}} \quad (4.18)$$

Αν ορίσουμε κατάλληλα τα D_1, D_2, D_3 οι τύποι (4.16-4.18) καταλήγουν στους τύπους (4.1-4.9) που ορίσαμε παραπάνω.

A. Για SPS ισχύει $D_1 = 0, D_3 = D_2 = \frac{\delta}{\pi}$.

B. Για τον EPS ισχύει: $D_1 = 0, D_2 = \frac{\delta}{\pi}, D_3 = \frac{\pi - \tau - \delta}{\pi}$ αν $nV_2 > V_1$
ή $D_1 = \frac{\pi - \tau}{\pi}, D_2 = D_3 = \frac{\delta + \pi - \tau}{\pi}$ αν $V_1 > nV_2$

C. Για τον DPS ισχύει: $D_1 = \frac{\delta_1}{\pi}, D_2 = \frac{\delta}{\pi}, D_3 = D_2 + D_1$

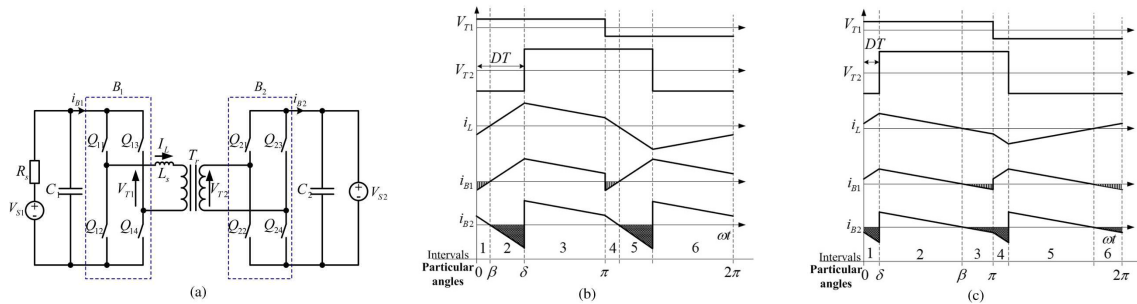
Κύρια ζητήματα

1. Εύρος ZVS:

Όλοι οι διακόπτες μετατροπέων λειτουργούν υπό ήπια μεταγωγή, όταν η μηδενική διέλευση του i_{lk} είναι εντός του χρονικού διαστήματος όπου οι V_{AB} και nV_{CD} έχουν αντίθετες πολικότητες. Το εύρος ZVS του μετατροπέα DAB εξαρτάται από το φορτίο, την τάση εισόδου και την τάση εξόδου [86]. Η επίτευξη του ZVS είναι ιδιαίτερα δύσκολη όταν ο μετατροπέας λειτουργεί με μικρό φορτίο. Συνήθως το ZVS για όλους τους διακόπτες μπορεί να επιτευχθεί μόνο όταν η τάση V_1 ισούται με nV_2 , ενώ το εύρος ZVS του μετατροπέα είναι περιορισμένο σε άλλες περιπτώσεις [87].

2. Άεργος ισχύς και καταπόνηση ρεύματος:

Η άεργος ισχύς είναι έμφυτη στην κλασική διαμόρφωση διαφοράς φάσης και είναι ο κύριος λόγος για τα υψηλά μέγιστα ρεύματα και τις αυξημένες απώλειες [82].



Εικόνα 4.12 (a) διάταξη DAB (b) κυματομορφές λειτουργίας υπό μεγάλο φορτίο (c) κυματομορφές λειτουργίας υπό μικρό φορτίο [88]

Σε μετατροπέα DAB, η μη ενεργή ισχύς συμβάλλει σημαντικά στις απώλειες αγωγής των MOSFET και τις μαγνητικές απώλειες. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.12, το ρεύμα εισόδου i_{B1} στον μετατροπέα DAB δεν είναι σε φάση με την κύρια τάση V_{T1} σε μια ορισμένη περίοδο. Το ίδιο συμβαίνει και στο ρεύμα εξόδου i_{B2} και της δευτερεύουσας τάσης V_{T2} . [88]

Πιθανές λύσεις

Μια πιθανή λύση είναι η τροποποίηση της τοπολογίας. Στο [89] προτείνεται μια τροποποίηση στην διάταξη του DAB και μέθοδος για ομαλές μεταγωγές γνωστές ως soft-switch, η οποία ελαχιστοποιεί την αναντιστοιχία των τάσεων. Για να το πετύχει αυτό αξιοποιεί το κύκλωμα συντονισμού της διάταξης. Εναλλακτικά πρέπει να τροποποιηθεί η μέθοδος ελέγχου.

Προκειμένου να αυξηθεί το εύρος του ZVS προτείνεται στο [86] η τεχνική **EPS**. Ο έλεγχος αυτής της διάταξης μπορεί να βελτιστοποιηθεί ώστε να επιτευχθεί ένας συγκεκριμένος στόχος. Στο [90] αναλύονται οι απώλειες της διάταξης και με βάση αυτή την ανάλυση, προτείνεται ένας αλγόριθμος προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες με χρήση EPS. Από την άλλη, στο [91] προτείνεται μια τεχνική ώστε να επιτευχθεί μεγάλο εύρος ZVS ακολουθώντας την μέθοδο EPS. Αυτή η τεχνική επιτρέπει την μείωση των απωλειών αγωγής και βελτίωση της απόδοσης.

Προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η άεργος ισχύς προτάθηκε αρχικά στο [82] η τεχνική **DPS**. Τα δυναμικά χαρακτηριστικά και η μεταφερόμενη ισχύς του DPS αναλύονται στα [92],[93]. Στο [94] αναλύονται τα χαρακτηριστικά της μεταγωγής των διακοπών υπό DPS και γίνεται μια προσπάθεια βελτιστοποίησης της απόδοσης του μετατροπέα με έλεγχο DPS για όλο το εύρος λειτουργίας. Από την άλλη, στο [51] μελετάται η καταπόνησης ρεύματος της διάταξης και για την βελτιστοποίηση αυτής προτείνεται η τεχνική DPS. Αποδεικνύεται επίσης ότι μια τέτοια στρατηγική οδηγεί σε βελτίωση της απόδοσης, χωρίς όμως να πετυχαίνει την βέλτιστη απόδοση σε όλο το εύρος λειτουργίας. Στο [95] γίνεται μια ανάλυση του DPS με στόχο την επίτευξη υψηλής απόδοσης και ZVS. Σε αυτή την ανάλυση γίνεται μια σύγκριση των αποτελεσμάτων αν βελτιστοποίηση γίνει με στόχο την ελαχιστοποίηση της άεργου, του μέγιστου ρεύματος ή του rms ρεύματος. Από αυτή καταλήγει ότι η ελαχιστοποίηση της άεργου έχει συγκριτικά την χειρότερη απόδοση από τις 3. Αντίθετα, η βελτιστοποίηση ως προς το μέγιστο ρεύμα φαίνεται να έχει τα καλύτερα χαρακτηριστικά.

Οι τεχνικές EPS,DPS έχουν 2 βαθμούς ελευθερίας καθώς χρησιμοποιούν 2 μεταβλητές ελέγχου. Προκειμένου να επιτευχθούν συγκεκριμένες απαιτήσεις μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε λύσεις με **3 μεταβλητές ελέγχου** ή και **υβριδικές λύσεις** που συνδυάζουν διαφορετικές μεθόδους ελέγχου. Στο [96] γίνεται μια ανάλυση της ελαχιστοποίησης των απωλειών αγωγής (rms ρεύματος) για έλεγχο με 3 βαθμούς ελευθερίας. Αν και αυτή η βελτιστοποίηση δεν λαμβάνει υπόψη τις ιδιότητες μεταγωγής, η ομαλή μεταγωγή μπορεί να επιτευχθεί όταν δεν λειτουργεί υπό μικρό φορτίο. Στο [97] μελετάται η βελτιστοποίηση της απόδοσης υπό μικρό φορτίο χρησιμοποιώντας ένα τροποποιημένο σχήμα τριγωνικής διαμόρφωσης. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει ο τρόπος δημιουργίας των σημάτων ελέγχου καθώς προτείνεται μια τεχνική μασκαρίσματος των παραγόμενων σημάτων ελέγχου, η οποία μειώνει την υπολογιστική πολυπλοκότητα.

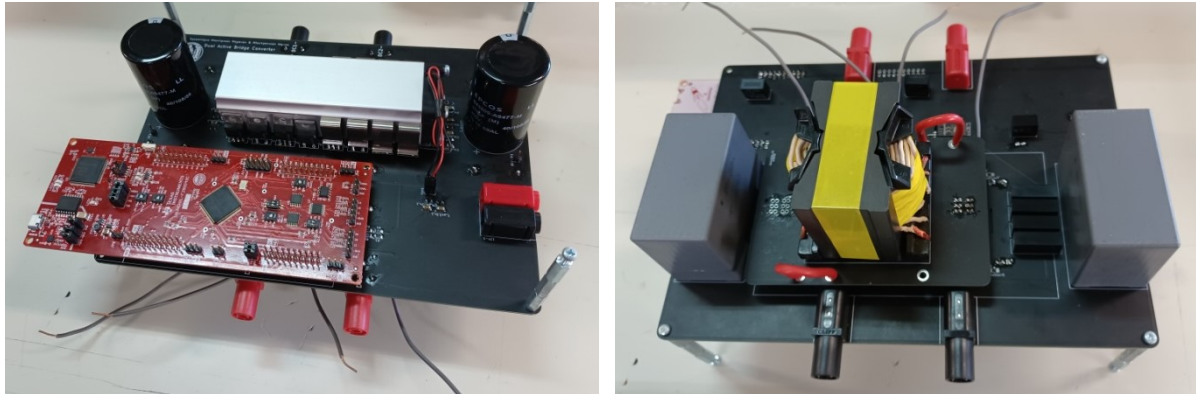
Ένα ενοποιημένο μοντέλο τριών μεταβλητών όπως αυτό που μελετάται στο [85] μπορεί να χρησιμοποιηθεί προκειμένου να μελετηθεί και να ελαχιστοποιηθεί η καταπόνηση ρεύματος, με έναν τρόπο που να είναι εύκολο υλοποιηθεί σε πραγματικό χρόνο. Αντίστοιχα, στο [98] χρησιμοποιείται ένα ενοποιημένο μοντέλο τριών μεταβλητών ελέγχου προκειμένου να μελετηθεί και να ελαχιστοποιηθεί το άεργο ρεύμα. Παρόλο που δεν επιτυγχάνει την ολικά βέλτιστη λύση, αποτελεί μια εύκολη τεχνική προκειμένου να μειωθεί το άεργο ρεύμα. Στο [53] χρησιμοποιείται επίσης ένα ενοποιημένο μοντέλο τριών μεταβλητών ελέγχου προκειμένου να μελετηθεί και να ελαχιστοποιηθεί η καταπόνηση ρεύματος, το οποίο ταυτόχρονα επιτυγχάνει και συνθήκες ομαλής μεταγωγής για όλους τους διακόπτες.

Στο [83] προτείνεται μια υβριδική μέθοδος διαμόρφωσης προκειμένου να επιτευχθεί υψηλή απόδοση σε μεγάλο εύρος τάσης. Συνδυάζεται η τραπεζοειδής διαμόρφωση όταν δεν υπάρχει μεγάλη αναντιστοιχία στις τάσεις με τριγωνοειδή διαμόρφωση όταν υπάρχει. Ωστόσο κάτι τέτοιο έχει αυξημένη υπολογιστική δυσκολία. Αντίστοιχα, στο [87] προτείνεται μια υβριδική μέθοδος τραπεζοειδούς και τριγωνοειδούς διαμόρφωσης προκειμένου να επιτευχτεί ομαλή μεταγωγή σε όλο το εύρος λειτουργίας. Εναλλακτικά, στο [84] προτείνεται μια υβριδική μέθοδος ελέγχου με συνδυασμό τροποποιημένης τριγωνικής διαμόρφωσης σε χαμηλές ισχύς εξόδου και κλασικής διαμόρφωσης διαφοράς φάσης, προκειμένου να διευρυνθεί το εύρος ισχύων εξόδου της διάταξης.

Κεφάλαιο 5

Πειραματικό μέρος

Για την υλοποίηση του ελέγχου χρησιμοποιήθηκε μια διάταξη Dual Active Bridge, η οποία είχε σχεδιαστεί από τον Ελευθέριο Κοντοδίνα στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας «Υλοποίηση μετατροπέα Dual Active Bridge για σταθμό ταχείας φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων». Στην Εικόνα 5.1 φαίνεται η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήσαμε.



Εικόνα 5.1 Εικόνες της πειραματικής διάταξης Dual Active Bridge άνω και κάτω όψη

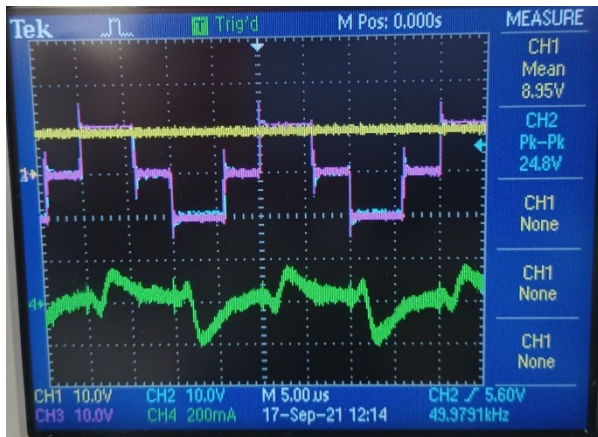
Επειδή η διάταξη είναι πειραματική επιλέξαμε να υλοποιήσουμε ένα έλεγχο PWM, λόγω της απλότητας του ελέγχου. Συγκεκριμένα η γέφυρα στην πλευρά του πρωτεύοντος είναι ενεργή, δηλαδή λαμβάνει σήματα ελέγχου ενώ η γέφυρα στην πλευρά του δευτερεύοντος είναι παθητική, δηλαδή το ρεύμα άγεται από τις διόδους με βάση την πολικότητα του.

Η τάση στο πρωτεύον του μετασχηματιστή είναι τριών επιπέδων και τα μηδενικά διαστήματα μπορούν να μεταβληθούν με βάση τις παραμέτρους που λαμβάνει ο φορτιστής από το όχημα. Αυτός ο έλεγχος είναι ανοιχτού βρόγχου καθώς ο φορτιστής δεν προσαρμόζει την έξοδο του με βάση αντίστοιχες μετρήσεις, αποτελεί όμως ένα πρώτο βήμα στην προσπάθεια υλοποίησης ενός συστήματος φόρτισης που να αλληλεπιδρά με το όχημα και να προσαρμόζει την έξοδο ανάλογα με τις απαιτήσεις.

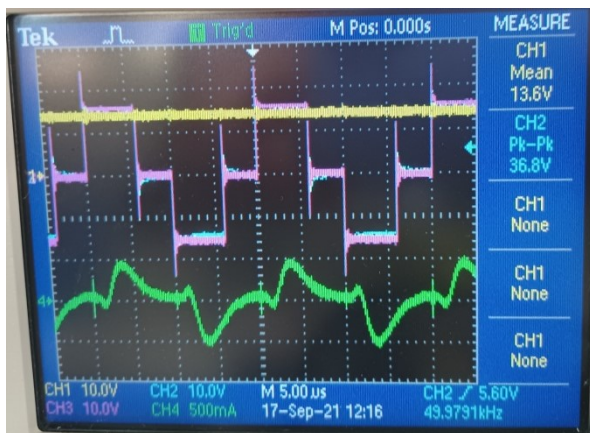
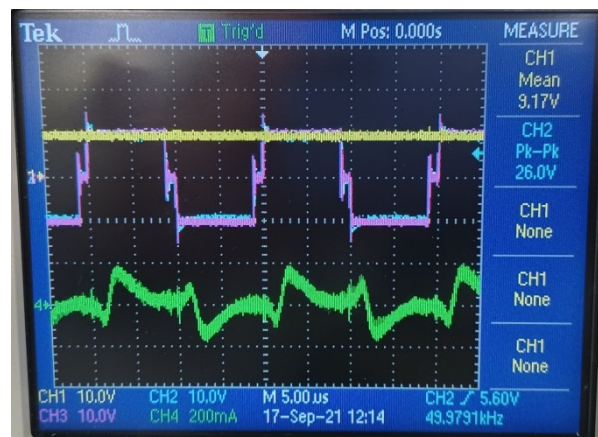
Μετρήσεις

Στις παρακάτω μετρήσεις βλέπουμε με κίτρινο την συνεχή τάση εξόδου, με ροζ και γαλάζιο την τάση στο πρωτεύον και δευτερεύον του μετασχηματιστή αντίστοιχα και με πράσινο το εναλλασσόμενο ρεύμα στο μετασχηματιστή. Για τις διάφορες τιμές της εισόδου έχουμε μια μέτρηση με εύρος παλμού (duty cycle) 60% (αριστερά) και μια με duty cycle 90% (δεξιά). Η συχνότητα τέθηκε στα 50kHz.

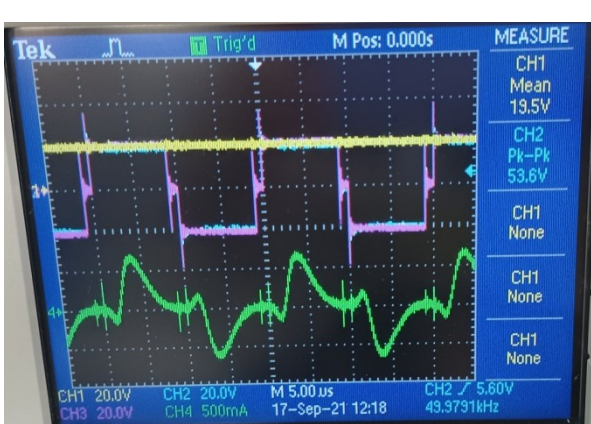
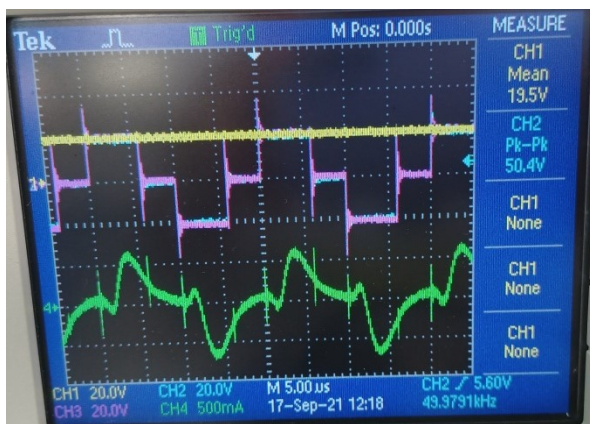
Οι μετρήσεις έγιναν για τάση εισόδου 10, 15 και 20V, η τιμή του ρεύματος εισόδου του τροφοδοτικού ήταν 0.1, 0.2 και 0.25 A αντίστοιχα.



Εικόνα 5.2 Κυματομορφές υπό τάση εισόδου 10 V ρεύμα εισόδου 0.1A



Εικόνα 5.3 Κυματομορφές υπό τάση εισόδου 15 V ρεύμα εισόδου 0.2A



Εικόνα 5.4 Κυματομορφές υπό τάση εισόδου 20 V ρεύμα εισόδου 0.25A

Συμπεράσματα εργαστηριακών δοκιμών

Επειδή η γέφυρα στην πλευρά του δευτερεύοντος είναι παθητική, η τάση εξόδου είναι αρκετά κοντά στην τάση εισόδου. Οι δοκιμές έγιναν με αρκετά χαμηλή τάση, συνεπώς επειδή η διάταξη διαθέτει έναν αρκετά μεγάλο πυκνωτή εξόδου, η διαφοροποίηση της dc τάσης εξόδου ήταν ανεπαίσθητη με την αλλαγή του duty cycle.

Κατά τη μεταγωγή των διακοπών εμφανίζεται ένα μεταβατικό φαινόμενο το οποίο αποσβαίνεται αρκετά γρήγορα. Η προσωρινή υπερύψωση της τάσης φτάνει κατά απόλυτη τιμή μέχρι περίπου το 90% της τάσης εξόδου στην μετάβαση προς το 0, και μέχρι περίπου το 50% της τάσης εξόδου στην μετάβαση στο μέγιστο.

Κατά την διάρκεια αυτού του μεταβατικού υπάρχει αναντιστοιχία στις τάσεις πρωτεύοντος και δευτερεύοντος, η οποία οδηγεί σε απότομη αύξηση στο ρεύμα μικρής διάρκειας, η οποία γίνεται εντονότερη με την αύξηση της τάσης εισόδου. Βέβαια βλέπουμε ότι η μείωση του duty cycle μπορεί να μειώσει τα μεταβατικά φαινόμενα που παρουσιάζονται κατά την μεταγωγή των διακοπών.

Στις μετρήσεις είναι ιδιαίτερα εμφανής η μη ιδανικότητα της διάταξης, κυρίως στην μορφή του ρεύματος. Προκειμένου ο ελεγκτής να λειτουργήσει με πιο σύνθετο έλεγχο, θα πρέπει αυτή η μη ιδανικότητα να μελετηθεί και να προσομοιωθεί, ώστε να μπορεί να έχει την αναμενόμενη λειτουργία. Αυτού του είδους η μελέτη ξεφεύγει από τα πλαίσια αυτής της εργασίας.

Κεφάλαιο 6

Συμπεράσματα εργασίας και προτάσεις για το μέλλον

Στόχος αυτής της εργασίας ήταν η υλοποίηση μιας διάταξης ελέγχου ενός ταχυφορτιστή, η οποία να επικοινωνεί με το όχημα με βάση ένα εμπορικό πρότυπο και να τροποποιεί κατάλληλα την έξοδο ανάλογα με τις απαιτήσεις του οχήματος.

Στην προσπάθεια να το πετύχουμε αυτό, κληθήκαμε να αντιμετωπίσουμε πολλές προκλήσεις.

Προκειμένου να υλοποιήσουμε την επικοινωνία χρειάστηκε όχι μόνο να κατανοήσουμε την διαδικασία της φόρτισης και τα μηνύματα που ανταλλάσσονται, αλλά και το πώς λειτουργεί ένας δίαυλος CAN, ώστε να ελέγχουμε την ορθότητα της υλοποίησης.

Προκειμένου να μπορέσουμε να ελέγξουμε την διάταξη του Dual Active Bridge αξιοποιήσαμε τόσο προσομοιώσεις στον υπολογιστή όσο και εργαστηριακές δοκιμές. Οι εργαστηριακές δοκιμές απαιτούσαν ιδιαίτερη προσοχή. Σε περίπτωση που η λειτουργία της διάταξης δεν ήταν η επιθυμητή, απαιτούνταν εμπεριστατωμένη διερεύνηση ώστε να προσδιοριστεί η αιτία του προβλήματος και να βρεθεί μια λύση.

Το τελικό αποτέλεσμα είναι ένα καλό πρώτο βήμα στην προσπάθεια υλοποίησης μιας διάταξης ελέγχου ενός ταχυφορτιστή υπάρχουν όμως αρκετά θέματα για περαιτέρω διερεύνηση.

1. Υλοποίηση δυνατότητας V2G

Το πρότυπο που χρησιμοποιήσαμε για την υλοποίηση της επικοινωνίας ήταν η αρχική έκδοση του CHAdeMO και δεν είχε δυνατότητα αμφίδρομης ροής ισχύος. Θα ήταν χρήσιμο ο φορτιστής να διαθέτει αυτή την δυνατότητα, λόγω των πολλών πλεονεκτημάτων της τεχνολογίας V2G.

2. Υλοποίηση ενός διαφορετικού προτύπου επικοινωνίας

Παρόλο που η διαδικασία της φόρτισης ακολουθεί σε γενικές γραμμές παρόμοια λογική σε όλα τα πρότυπα, η υλοποίηση της επικοινωνίας έχει προκλήσεις. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον θα παρουσίαζε μια προσπάθεια υλοποίησης του προτύπου CCS, καθώς χρησιμοποιεί επικοινωνία μέσω Power Line Communication

3. Έλεγχος τριών μεταβλητών

Ο έλεγχος που εφαρμόσαμε ήταν έλεγχος PWM με μοναδική μεταβλητή έλεγχου του εύρους παλμού της τάσης στο πρωτεύον του μετασχηματιστή. Στην συνέχεια αξίζει να δοκιμαστεί ένας έλεγχος με 3 μεταβλητές έλεγχου (εύρος παλμού στο πρωτεύον και δευτερεύον του μετασχηματιστή και διαφορά φάσης μεταξύ αυτών) ώστε να έχουμε περισσότερα περιθώρια ρύθμισης της εξόδου.

4. Βελτιστοποίηση του ελέγχου

Ο έλεγχος που εφαρμόσαμε δεν ήταν βελτιστοποιημένος. Προκειμένου να γίνει κάτι τέτοιο θα πρέπει να μελετηθεί η μη ιδανικότητα της διάταξης, να μοντελοποιηθεί και να ληφθεί υπόψη στον έλεγχο.

5. Έλεγχος ρεύματος

Ο έλεγχος που εφαρμόσαμε ήταν ανοιχτού βρόγχου. Ένας φορτιστής όμως θα πρέπει να είναι σε θέση να ελέγχει το ρεύμα εξόδου σε κλειστό βρόγχο, ώστε να μπορέσει να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις του οχήματος.

6. Έλεγχος πολλαπλών μετατροπών συνδεδεμένων σε σειρά ή παράλληλα

Οι δοκιμές που κάναμε έγιναν σε έναν μετατροπέα DC/DC. Στην πράξη όμως, λόγω της βαθμωτής σχεδίασης που χρησιμοποιείται, ο ελεγκτής θα πρέπει να είναι σε θέση να ελέγχει πολλαπλούς όμοιους μετατροπείς συνδεδεμένους παράλληλα ή σε σειρά και να φροντίζει να συγχρονίζει κατάλληλα τα σήματα ελέγχου.

Βιβλιογραφία

- [1] "2020 (September) Europe: Car Sales and Market Analysis - Car Sales Statistics", *Car Sales Statistics*, 2021. [Online]. Available: <https://www.best-selling-cars.com/europe/2020-september-europe-car-sales-and-market-analysis/>.
- [2] R. Raff, V. Golub, D. Pelin and D. Topić, "Overview of charging modes and connectors for the electric vehicles," 2019 7th International Youth Conference on Energy (IYCE), 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/IYCE45807.2019.8991586.
- [3] "Types of Electric Vehicles", *Nova Scotia Power*, 2021. [Online]. Available: <https://www.nspower.ca/your-home/energy-products/electric-vehicles/types>.
- [4] N. Hussein and A. Massoud, "Electric Vehicle Fast Chargers: Futuristic Vision, Market Trends and Requirements," 2019 2nd International Conference on Smart Grid and Renewable Energy (SGRE), 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/SGRE46976.2019.9020974.
- [5] S. Habib, M. M. Khan, F. Abbas, L. Sang, M. U. Shahid and H. Tang, "A Comprehensive Study of Implemented International Standards, Technical Challenges, Impacts and Prospects for Electric Vehicles," in *IEEE Access*, vol. 6, pp. 13866-13890, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2812303.
- [6] Ç. A. Ğ. L. A. DERİCİOĞLU, E. M. R. A. K. YİRİK, E. R. D. E. M. ÜNAL, M. E. H. M. E. T. U. Ğ. R. A. Ş. CUMA, B. U. R. A. K. ONUR, and M. E. H. M. E. T. TÜMAY, "A review of charging technologies for commercial electric vehicles," *INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCES ON AUTOMOTIVE AND TECHNOLOGY*, 2018. <http://dx.doi.org/10.15659/ijaat.18.01.892>
- [7] N. Aayog, *HANDBOOK of ELECTRIC VEHICLE CHARGING INFRASTRUCTURE IMPLEMENTATION*, 1st ed. 2021.
- [8] R. Baldwin, "Startup Ample Is Working on 10-Minute Battery Swapping for Electric Vehicles", *Car and Driver*, 2021. [Online]. Available: <https://www.caranddriver.com/news/a35717014/ample-battery-swapping-station/>.
- [9] S. O'Kane, "Ample raises \$160 million on the promise of battery swapping", *The Verge*, 2021. [Online]. Available: <https://www.theverge.com/2021/8/23/22634461/ample-battery-swapping-electric-vehicles>.
- [10] T. A. Skouras, P. K. Gkonis, C. N. Ilias, P. T. Trakadas, E. G. Tsampasis, and T. V. Zahariadis, "Electrical Vehicles: Current State of the Art, Future Challenges, and Perspectives," *Clean Technologies*, vol. 2, no. 1, pp. 1–16, 2020. <https://doi.org/10.3390/cleantechnol2010001>
- [11] Q.-S. Jia and T. Long, "A review on charging behavior of electric vehicles: Data, model, and control," *Control Theory and Technology*, vol. 18, no. 3, pp. 217–230, 2020. <https://doi.org/10.1007/s11768-020-0048-8>
- [12] X. Zhou et al., "The current research on electric vehicle," 2016 Chinese Control and Decision Conference (CCDC), 2016, pp. 5190-5194, doi: 10.1109/CCDC.2016.7531925.

- [13] M. Yilmaz and P. T. Krein, "Review of Battery Charger Topologies, Charging Power Levels, and Infrastructure for Plug-In Electric and Hybrid Vehicles," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, no. 5, pp. 2151-2169, May 2013, doi: 10.1109/TPEL.2012.2212917.
- [14] X. Gong and J. Rangaraju, "Taking charge of electric vehicles – both in the vehicle and on the grid." Texas Instruments, Jun-2020.
- [15] A. Khaligh and M. D'Antonio, "Global Trends in High-Power On-Board Chargers for Electric Vehicles," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 68, no. 4, pp. 3306-3324, April 2019, doi: 10.1109/TVT.2019.2897050.
- [16] M. C. Falvo, D. Sbordone, I. S. Bayram and M. Devetsikiotis, "EV charging stations and modes: International standards," 2014 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 2014, pp. 1134-1139, doi: 10.1109/SPEEDAM.2014.6872107.
- [17] "EV charging Modes: Deltrix Chargers," Deltrix Chargers | EV Charging Solutions, 26-Nov-2019. [Online]. Available: <https://deltrixchargers.com/about-emobility/charging-modes>
- [18] S. Arar, "The Four EV Charging Modes in the IEC 61851 Standard", *ALL ABOUT CIRCUITS*, 2020. [Online]. Available: <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/four-ev-charging-modes-iec61851-standard/>.
- [19] S. Rajagopalan, A. Maitra, J. Halliwell, M. Davis and M. Duvall, "Fast charging: An in-depth look at market penetration, charging characteristics, and advanced technologies," 2013 World Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS27), 2013, pp. 1-11, doi: 10.1109/EVS.2013.6914945.
- [20] *CHAdEMO brochure*. 2019.
- [21] B Jar, N Watson, A Miller, "Rapid EV chargers: implementation of a charger," EEA Conference & Exhibition 2016, 22-24 June, Wellington
- [22] A. Dhianeshwar, P. Kaur and S. Nagarajan, "EV: Communication Infrastructure Management System," 2016 First International Conference on Sustainable Green Buildings and Communities (SGBC), 2016, pp. 1-6, doi: 10.1109/SGBC.2016.7936090.
- [23] "E- Mobility Education Kits for Learning EV Charging", *PHOENIX CONTACT*, 2019. [Online]. Available: <https://blog.phoenixcontact.com/marketing-sea/tag/e-mobility/>.
- [24] "Terra 54 multi-standard DC charging station", *Library.e.abb.com*, 2019. [Online]. Available: https://library.e.abb.com/public/9f72c044f8ab4ff29c5ae0eb915c0843/4EVC901707-LFEN_Terra%2054_11_19.pdf.
- [25] "Terra HP high power charging UL", *Library.e.abb.com*, 2020. [Online]. Available: https://library.e.abb.com/public/ffebef28c136483990435f79fb17d67b/ABB_Terra-HP_UL_G2_Data-SheetR5.pdf.
- [26] "RT175-S/175kW Specifications", *Tritiumcharging.com*, 2020. [Online]. Available: https://tritiumcharging.com/wp-content/uploads/2020/11/TRI125.DTA_.009_RT175s-Specification.pdf.

- [27] "PK350/350kW Specifications", *Tritiumcharging.com*, 2020. [Online]. Available: https://tritiumcharging.com/wp-content/uploads/2020/11/TRI105.DTA_.002_Veefil-PK350-Specifications.pdf.
- [28] "espresso&charge 4 in 1", *Evtec.ch*. [Online]. Available: https://www.evtec.ch/application/files/6216/1204/2063/factsheet_espressocharge_4in1_en.pdf.
- [29] "UFC 200 Ultra Fast Charger", *Deltaww.com*. [Online]. Available: <https://www.deltaww.com/en-US/products/EV-Charging/5691>.
- [30] "DS Series 90kw 120kw 150kw 180kw Free Standing DC FastCharger", *Phihong.com*. [Online]. Available: https://www.phihong.com/admin/uploads/DS_Series_90kw_120kw_150kw_180kw_Free_Standing_DC_FastCharger.pdf.
- [31] S. Srdic and S. Lukic, "Toward Extreme Fast Charging: Challenges and Opportunities in Directly Connecting to Medium-Voltage Line," in *IEEE Electrification Magazine*, vol. 7, no. 1, pp. 22-31, March 2019, doi: 10.1109/MELE.2018.2889547.
- [32] D. Ronanki, A. Kelkar, and S. S. Williamson, "Extreme fast charging technology—prospects to enhance sustainable electric transportation," *Energies*, vol. 12, no. 19, p. 3721, 2019. <https://doi.org/10.3390/en12193721>
- [33] Y. Huang and C. K. Tse, "Circuit Theoretic Classification of Parallel Connected DC–DC Converters," in *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, vol. 54, no. 5, pp. 1099-1108, May 2007, doi: 10.1109/TCSI.2007.890631.
- [34] W. Chen, X. Ruan, H. Yan and C. K. Tse, "DC/DC Conversion Systems Consisting of Multiple Converter Modules: Stability, Control, and Experimental Verifications," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 24, no. 6, pp. 1463-1474, June 2009, doi: 10.1109/TPEL.2009.2012406.
- [35] C. Suarez and W. Martinez, "Fast and Ultra-Fast Charging for Battery Electric Vehicles – A Review," 2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2019, pp. 569-575, doi: 10.1109/ECCE.2019.8912594.
- [36] G. R. C. Mouli, J. Kaptein, P. Bauer and M. Zeman, "Implementation of dynamic charging and V2G using Chademo and CCS/Combo DC charging standard," 2016 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), 2016, pp. 1-6, doi: 10.1109/ITEC.2016.7520271.
- [37] "Driving into 2025: The future of electric vehicles," J.P. Morgan, 10-Oct-2018. [Online]. Available: <https://www.jpmorgan.com/insights/research/electric-vehicles>.
- [38] Battery chargers and charging methods. [Online]. Available: <https://www.mpoweruk.com/chargers.htm>.
- [39] S. Mothilal Bhagavathy, H. Budnitz, T. Schwanen, and M. McCulloch, "Impact of charging rates on electric vehicle battery life," *Findings*, 2021. <https://doi.org/10.32866/001c.21459>
- [40] MIT Electric Vehicle Team, *A Guide to Understanding Battery Specifications*. 2008.

- [41] H. Tu, H. Feng, S. Srdic and S. Lukic, "Extreme Fast Charging of Electric Vehicles: A Technology Overview," in *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 5, no. 4, pp. 861-878, Dec. 2019, doi: 10.1109/TTE.2019.2958709.
- [42] T. Kang, C. Kim, Y. Suh, H. Park, B. Kang and D. Kim, "A design and control of bi-directional non-isolated DC-DC converter for rapid electric vehicle charging system," 2012 Twenty-Seventh Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2012, pp. 14-21, doi: 10.1109/APEC.2012.6165792.
- [43] D. S. Gautam, F. Musavi, W. Eberle and W. G. Dunford, "A Zero-Voltage Switching Full-Bridge DC-DC Converter With Capacitive Output Filter for Plug-In Hybrid Electric Vehicle Battery Charging," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, no. 12, pp. 5728-5735, Dec. 2013, doi: 10.1109/TPEL.2013.2249671.
- [44] I. Lee, "Hybrid DC–DC Converter With Phase-Shift or Frequency Modulation for NEV Battery Charger," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 63, no. 2, pp. 884-893, Feb. 2016, doi: 10.1109/TIE.2015.2477345.
- [45] Sangtaek Han and D. Divan, "Bi-directional DC/DC converters for plug-in hybrid electric vehicle (PHEV) applications," 2008 Twenty-Third Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2008, pp. 784-789, doi: 10.1109/APEC.2008.4522810.
- [46] C. Mi, H. Bai, C. Wang and S. Gargies, "Operation, design and control of dual H-bridge-based isolated bidirectional DC–DC converter", *IET Power Electronics*, vol. 1, no. 4, p. 507-517, 2008. Available: 10.1049/iet-pel:20080004
- [47] R. J. Ferreira, L. M. Miranda, R. E. Araújo and J. P. Lopes, "A new bi-directional charger for vehicle-to-grid integration," 2011 2nd IEEE PES International Conference and Exhibition on Innovative Smart Grid Technologies, 2011, pp. 1-5, doi: 10.1109/ISGTEurope.2011.6162770.
- [48] H. van Hoek, M. Neubert and R. W. De Doncker, "Enhanced Modulation Strategy for a Three-Phase Dual Active Bridge—Boosting Efficiency of an Electric Vehicle Converter," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, no. 12, pp. 5499-5507, Dec. 2013, doi: 10.1109/TPEL.2013.2251905.
- [49] L. Xue, Z. Shen, D. Boroyevich, P. Mattavelli and D. Diaz, "Dual Active Bridge-Based Battery Charger for Plug-in Hybrid Electric Vehicle With Charging Current Containing Low Frequency Ripple," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, no. 12, pp. 7299-7307, Dec. 2015, doi: 10.1109/TPEL.2015.2413815.
- [50] A. Rodríguez, A. Vázquez, D. G. Lamar, M. M. Hernando and J. Sebastián, "Different purpose design strategies and techniques to improve the performance of a Dual Active Bridge with phase-shift control," 2014 IEEE 15th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL), 2014, pp. 1-10, doi: 10.1109/COMPEL.2014.6877204.
- [51] B. Zhao, Q. Song, W. Liu and W. Sun, "Current-Stress-Optimized Switching Strategy of Isolated Bidirectional DC–DC Converter With Dual-Phase-Shift Control," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 10, pp. 4458-4467, Oct. 2013, doi: 10.1109/TIE.2012.2210374.

- [52] F. Krismer and J. W. Kolar, "Efficiency-Optimized High-Current Dual Active Bridge Converter for Automotive Applications," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 59, no. 7, pp. 2745-2760, July 2012, doi: 10.1109/TIE.2011.2112312.
- [53] J. Huang, Y. Wang, Z. Li and W. Lei, "Unified Triple-Phase-Shift Control to Minimize Current Stress and Achieve Full Soft-Switching of Isolated Bidirectional DC–DC Converter," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 63, no. 7, pp. 4169-4179, July 2016, doi: 10.1109/TIE.2016.2543182.
- [54] J. Jung, H. Kim, M. Ryu and J. Baek, "Design Methodology of Bidirectional CLLC Resonant Converter for High-Frequency Isolation of DC Distribution Systems," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, no. 4, pp. 1741-1755, April 2013, doi: 10.1109/TPEL.2012.2213346.
- [55] S. Zhao, Q. Li, F. C. Lee and B. Li, "High-Frequency Transformer Design for Modular Power Conversion From Medium-Voltage AC to 400 VDC," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 33, no. 9, pp. 7545-7557, Sept. 2018, doi: 10.1109/TPEL.2017.2774440.
- [56] W. Chen, P. Rong and Z. Lu, "Snubberless Bidirectional DC–DC Converter With New CLLC Resonant Tank Featuring Minimized Switching Loss," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, no. 9, pp. 3075-3086, Sept. 2010, doi: 10.1109/TIE.2009.2037099.
- [57] Peiwen He and A. Khaligh, "Design of 1 kW bidirectional half-bridge CLLC converter for electric vehicle charging systems," 2016 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), 2016, pp. 1-6, doi: 10.1109/PEDES.2016.7914445.
- [58] Hui Li, Danwei Liu, F. Z. Peng and Gui-Jia Su, "Small Signal Analysis of A Dual Half Bridge Isolated ZVS Bi-directional DC-DC converter for Electrical Vehicle Applications," 2005 IEEE 36th Power Electronics Specialists Conference, 2005, pp. 2777-2782, doi: 10.1109/PESC.2005.1582026.
- [59] P. J. Grbović, P. Delarue, P. Le Moigne and P. Bartholomeus, "A Bidirectional Three-Level DC–DC Converter for the Ultracapacitor Applications," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, no. 10, pp. 3415-3430, Oct. 2010, doi: 10.1109/TIE.2009.2038338.
- [60] S. Dusmez, A. Hasanzadeh and A. Khaligh, "Comparative Analysis of Bidirectional Three-Level DC–DC Converter for Automotive Applications," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 5, pp. 3305-3315, May 2015, doi: 10.1109/TIE.2014.2336605.
- [61] Z. Zhang et al., "High-Efficiency Silicon Carbide (SiC) Converter Using Paralleled Discrete Devices in Energy Storage Systems," 2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2019, pp. 2471-2477, doi: 10.1109/ECCE.2019.8912733.
- [62] D. Sbordone, I. Bertini, B. Di Pietra, M. Falvo, A. Genovese and L. Martirano, "EV fast charging stations and energy storage technologies: A real implementation in the smart micro grid paradigm", *Electric Power Systems Research*, vol. 120, pp. 96-108, 2015. doi: 10.1016/j.epsr.2014.07.033
- [63] Shun-Neng Yang, Hsiao-Wei Wang, C. Gan and Y. Lin, "Mobile Charging Station service in smart grid networks," 2012 IEEE Third International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm), 2012, pp. 412-417, doi: 10.1109/SmartGridComm.2012.6486019.

- [64] M. O. Badawy et al., "Design and Implementation of a 75-kW Mobile Charging System for Electric Vehicles," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 52, no. 1, pp. 369-377, Jan.-Feb. 2016, doi: 10.1109/TIA.2015.2469775.
- [65] "TEPCO : Press Release | Establishment of CHAdeMO Association", *Tepco.co.jp*, 2010. [Online]. Available: <https://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/10031501-e.html>.
- [66] "CHAdeMO 3.0 released: the first publication of ChaoJi, the new plug harmonised with China's GB/T", *Chademo Association*, 2020. [Online]. Available: <https://www.chademo.com/chademo-3-0-released/>.
- [67] "CHAdeMO vehicle stats", *Chademo Association*, 2019. [Online]. Available: <https://www.chademo.com/chademo-vehicle-stats/>.
- [68] D. Anil and P. Sivraj, "Electric Vehicle Charging Communication Test-bed following CHAdeMO," 2020 11th International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies (ICCCNT), 2020, pp. 1-7, doi: 10.1109/ICCCNT49239.2020.9225625.
- [69] S. Rumale, H. A. Ashkar, T. Kerner, F. Koya and M. Eitzenberger, "Design and Implementation of an On-Board Vehicle CHAdeMO Interface for Vehicle-to-Grid Applications," 2020 IEEE International Conference on Power Electronics, Smart Grid and Renewable Energy (PESGRE2020), 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/PESGRE45664.2020.9070445.
- [70] C. Kidder, P. Alemeida, and J. Rickard, "EVTV CHAdeMO Fast Charging Kit For Electric Vehicles." EVTV LLC, Cape Girardeau, Apr-2015.
- [71] V. K. Pathipati, N. A. Azeez and S. S. Williamson, "Standalone DC level-1 EV Charging using pv/Grid infrastructure, MPPT algorithm and CHAdeMO protocol," IECON 2015 - 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2015, pp. 005408-005414, doi: 10.1109/IECON.2015.7392951.
- [72] "Technology Overview – Chademo Association", *Chademo.com*. [Online]. Available: <https://www.chademo.com/technology/technology-overview/>.
- [73] T. Anegawa, "Characteristics of CHAdeMO Quick Charging System", *World Electric Vehicle Journal*, vol. 4, no. 4, pp. 818-822, 2010. doi: 10.3390/wevj4040818.
- [74] T. Anegawa, "Safety Design of CHAdeMO Quick Charging System", *World Electric Vehicle Journal*, vol. 4, no. 4, pp. 855-859, 2010. Available: 10.3390/wevj4040855
- [75] *Electric Vehicle Conductive Charging System—Part 1: General Requirements*, Standard IEC 61851-1:2017, Feb. 2017, pp. 1–287.
- [76] *Electric Vehicle Conductive Charging System—Part 23: DC Electric Vehicle Charging Station*, Standard IEC 61851-23:2014, Mar. 2014, pp. 1–159.
- [77] *Electric Vehicle Conductive Charging System—Part 24: Digital Communication Between A D.C. EV Charging Station and an Electric Vehicle for Control of D.C. Charging*, Standard IEC 61851-24:2014, Mar. 2014, pp. 1–63.

- [78] "C2000™ Piccolo™ F28004x Series LaunchPad™ Development Kit", *Ti.com*, 2020. [Online]. Available: https://www.ti.com/lit/ug/spruii7b/spruii7b.pdf?ts=1632891348498&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F.
- [79] S. Lo, "CANBED V1 - Longan Docs", *Docs.longan-labs.cc*. [Online]. Available: <https://docs.longan-labs.cc/1030008/>.
- [80] D. Sha and G. Xu, *High-Frequency Isolated Bidirectional Dual Active Bridge DC–DC Converters with Wide Voltage Gain*, pp. 1-46, 2018. doi: 10.1007/978-981-13-0259-6_1
- [81] B. Zhao, Q. Yu and W. Sun, "Extended-Phase-Shift Control of Isolated Bidirectional DC–DC Converter for Power Distribution in Microgrid," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 27, no. 11, pp. 4667-4680, Nov. 2012, doi: 10.1109/TPEL.2011.2180928.
- [82] H. Bai and C. Mi, "Eliminate Reactive Power and Increase System Efficiency of Isolated Bidirectional Dual-Active-Bridge DC–DC Converters Using Novel Dual-Phase-Shift Control," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 23, no. 6, pp. 2905-2914, Nov. 2008, doi: 10.1109/TPEL.2008.2005103.
- [83] F. Krismer, S. Round and J. W. Kolar, "Performance optimization of a high current dual active bridge with a wide operating voltage range," 2006 37th IEEE Power Electronics Specialists Conference, 2006, pp. 1-7, doi: 10.1109/pesc.2006.1712096.
- [84] H. Zhou and A. M. Khambadkone, "Hybrid Modulation for Dual-Active-Bridge Bidirectional Converter With Extended Power Range for Ultracapacitor Application," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 45, no. 4, pp. 1434-1442, July-aug. 2009, doi: 10.1109/TIA.2009.2023493.
- [85] N. Hou, W. Song and M. Wu, "Minimum-Current-Stress Scheme of Dual Active Bridge DC–DC Converter With Unified Phase-Shift Control," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 31, no. 12, pp. 8552-8561, Dec. 2016, doi: 10.1109/TPEL.2016.2521410.
- [86] G. G. Oggier, R. Leidhold, G. O. Garcia, A. R. Oliva, J. C. Balda and F. Barlow, "Extending the ZVS operating range of dual active bridge high-power DC-DC converters," 2006 37th IEEE Power Electronics Specialists Conference, 2006, pp. 1-7, doi: 10.1109/pesc.2006.1712142.
- [87] Ying Cui, R. Hou, P. Malysz and A. Emadi, "Improved combined modulation strategy for dual active bridge converter in electrified vehicles," 2017 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), 2017, pp. 101-107, doi: 10.1109/ITEC.2017.7993254.
- [88] H. Wen, W. Xiao and B. Su, "Nonactive Power Loss Minimization in a Bidirectional Isolated DC–DC Converter for Distributed Power Systems," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 61, no. 12, pp. 6822-6831, Dec. 2014, doi: 10.1109/TIE.2014.2316229.
- [89] L. Zhu, "A Novel Soft-Commutating Isolated Boost Full-Bridge ZVS-PWM DC–DC Converter for Bidirectional High Power Applications," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 21, no. 2, pp. 422-429, March 2006, doi: 10.1109/TPEL.2005.869730.

- [90] G. G. Oggier, G. O. García and A. R. Oliva, "Switching Control Strategy to Minimize Dual Active Bridge Converter Losses," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 24, no. 7, pp. 1826-1838, July 2009, doi: 10.1109/TPEL.2009.2020902.
- [91] G. Oggier, G. O. García and A. R. Oliva, "Modulation strategy to operate the dual active bridge DC-DC converter under soft switching in the whole operating range," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 26, no. 4, pp. 1228-1236, April 2011, doi: 10.1109/TPEL.2010.2072966.
- [92] H. Bai, Z. Nie and C. C. Mi, "Experimental Comparison of Traditional Phase-Shift, Dual-Phase-Shift, and Model-Based Control of Isolated Bidirectional DC-DC Converters," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 25, no. 6, pp. 1444-1449, June 2010, doi: 10.1109/TPEL.2009.2039648.
- [93] B. Zhao, Q. Song and W. Liu, "Power Characterization of Isolated Bidirectional Dual-Active-Bridge DC-DC Converter With Dual-Phase-Shift Control," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 27, no. 9, pp. 4172-4176, Sept. 2012, doi: 10.1109/TPEL.2012.2189586.
- [94] B. Zhao, Q. Song and W. Liu, "Efficiency Characterization and Optimization of Isolated Bidirectional DC-DC Converter Based on Dual-Phase-Shift Control for DC Distribution Application," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 28, no. 4, pp. 1711-1727, April 2013, doi: 10.1109/TPEL.2012.2210563.
- [95] M. Kim, M. Rosekeit, S. Sul and R. W. A. A. De Doncker, "A dual-phase-shift control strategy for dual-active-bridge DC-DC converter in wide voltage range," 8th International Conference on Power Electronics - ECCE Asia, 2011, pp. 364-371, doi: 10.1109/ICPE.2011.5944548.
- [96] F. Krismer and J. W. Kolar, "Closed Form Solution for Minimum Conduction Loss Modulation of DAB Converters," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 27, no. 1, pp. 174-188, Jan. 2012, doi: 10.1109/TPEL.2011.2157976.
- [97] T. Hirose, M. Takasaki and Y. Ishizuka, "A Power Efficiency Improvement Technique for a Bidirectional Dual Active Bridge DC-DC Converter at Light Load," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 50, no. 6, pp. 4047-4055, Nov.-Dec. 2014, doi: 10.1109/TIA.2014.2327147.
- [98] B. Zhao, Q. Song, W. Liu, G. Liu and Y. Zhao, "Universal High-Frequency-Link Characterization and Practical Fundamental-Optimal Strategy for Dual-Active-Bridge DC-DC Converter Under PWM Plus Phase-Shift Control," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 30, no. 12, pp. 6488-6494, Dec. 2015, doi: 10.1109/TPEL.2015.2430934.