



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

TESLA MOTORS – ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΗΣΗ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ

Διπλωματική Εργασία

Αυφαντόπουλος Κωνσταντίνος

Χουσιάδας Γεώργιος

Επιβλέπων Καθηγητής:

Τσουκαλάς Ελευθέριος

Βόλος 2018



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

TESLA MOTORS – ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΗΣΗ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ

Διπλωματική Εργασία

Αυφαντόπουλος Κωνσταντίνος

Χουσιάδας Γεώργιος

Επιβλέπων Καθηγητής:

Τσουκαλάς Ελευθέριος

Βόλος 2018



UNIVERSITY OF THESSALY

SCHOOL OF ENGINEERING

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING

**TESLA MOTORS – ELECTRICAL MOBILITY
AND MECHANICAL OPERATION**

Diploma Thesis

Ayfantopoulos Konstantinos

Chousiadas Georgios

Supervisor:

Tsoukalas Eleutherios

Volos 2018

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε θερμά τους επιβλέποντες καθηγητές μας, κ. Τσουκαλά Ελευθέριο, κ. Βαβουγιό Διονύσιο και κ. Μπαργιώτα Δημήτριο για την εμπιστοσύνη που επέδειξαν στα πρόσωπά μας, για την εξαιρετική συνεργασία ,την συνεχή καθοδήγηση και τις ουσιώδεις υποδείξεις και παρεμβάσεις τους. Επίσης τους οφείλουμε ένα τεράστιο «ευχαριστώ» γιατί με την εμπύχωση και την υποστήριξή τους μας διευκόλυναν στην εκπόνηση της διπλωματικής μας εργασίας.

Θα θέλαμε να εκφράσουμε την εκτίμηση μας στους φίλους μας και τους συμφοιτητές μας, για όλες τις υπέροχες αλλά και τις δύσκολες στιγμές που μοιραστήκαμε κατά την διάρκεια των προπτυχιακών σπουδών μας.

Τέλος, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τις οικογένειες μας για την απεριόριστη βοήθεια τους,την τεράστια υπομονή τους και την συνεχή ψυχολογική τους υποστήριξη όλα αυτά τα χρόνια των σπουδών μας.

Η σελίδα αυτή έχει μείνει σκόπιμα λευκή.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την μηχανολογική λειτουργία των αμιγώς ηλεκτρικών αυτοκινήτων της εταιρείας Tesla καθώς επίσης και την εύρυθμη λειτουργία των μοντέλων της. Η εργασία εκπονήθηκε στο τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας.

Σκοπός είναι η μελέτη και η παρουσίαση της ηλεκτροκίνησης και της μηχανολογικής λειτουργίας των ηλεκτρικών αυτοκινήτων που κατασκευάζονται από την Tesla Motors.

Αρχικά γίνεται μια εκτενής αναφορά στην ιστορία, των ηλεκτρικών οχημάτων – αυτοκινήτων από τις απαρχές της εμφάνισης τους μέχρι τις αρχές του 21ου αιώνα που εμφανίστηκε η Tesla στο χώρο της ηλεκτροκίνησης. Στη συνέχεια γίνεται ανάλυση των ειδών που διαθέτουν είτε κινητήρα εσωτερικής καύσης είτε ηλεκτροκινητήρα είτε και τα δύο (υβριδικά) ενώ καταλήγει στην απλή αναφορά των βασικών μερών των καθαρών ηλεκτρικών αυτοκινήτων.

Στο επόμενο κεφάλαιο γίνεται λεπτομερής ανάλυση των βασικών μερών ενός αμιγώς ηλεκτρικού αυτοκινήτου με σαφή διαχωρισμό στην μπαταρία και στον ηλεκτροκινητήρα. Επεξηγείται εις βάθος για ποιον λόγο οι μπαταρίες ιόντων λιθίου έχουν κυριαρχήσει στην αγορά και κατ'επέκταση στην ηλεκτροκίνηση και για ποιους λόγους προτιμήθηκε από την Tesla η συγκεκριμένη τεχνολογία με τον ηλεκτρολύτη του οξειδίου αργιλίου κοβαλτίου νικελίου λιθίου. Κατόπιν εξηγεί γιατί η εταιρεία επέλεξε ως ηλεκτροκινητήρα των τριφασικό επαγωγικό, τον τρόπο λειτουργίας τους και τα είδη τους. Μετά γίνεται ανάλυση των ηλεκτρονικών μερών των αμαξωμάτων της εταιρείας, βασικές μονάδες για την εύρυθμη λειτουργία τους που περιλαμβάνει τον DC/DC μετατροπέα, τον DC/AC αντιστροφέα κ.α.

Τέλος γίνεται εκτενής αναφορά στα μοντέλα της Tesla, με πλήρη ανάλυση στις διάφορες εκδόσεις καθώς επίσης και στα δομικά μέρη που το καθένα χρησιμοποιεί. Γνωστοποιείται η λειτουργία του αυτόματου πιλότου και τα είδη των μπαταριών όπως και μηχανών που το καθένα χρησιμοποιεί.

ABSTRACT

This diploma thesis deals with the mechanical functionality of Tesla's pure electric carriages and the smooth operation of its' models. The assignment was developed in the Department of Electrical and Computer Engineering at the University of Thessaly.

The aim is to study and present the electrical mobility and the mechanical operation of electric carriages manufactured by Tesla Motors.

Initially, an extensive reference is made to the history of electric vehicles - cars at the beginning of their appearance until the beginning of the 21st century when Tesla Motors appeared in the field of electric mobility. Then an analysis is being made about the items that they have which are either an internal combustion engine or an electric motor or both (hybrids), resulting in a simple referenceto the basic parts of pure electric cars.

In the next chapter a detailed analysis of the basic parts of a pure electric car takes place, with clear separation in the battery and in the electric motor. It explains in depth why lithium-ion batteries have dominated the market, and therefore, in the field of the electric mobility and why Tesla preferred these batteries with the lithium nickel cobalt aluminum oxide electrolyte. Then it explains why the company chose the three-phase induction motor as its primary electric motor, the way those modules work and their types. After that, the electronic parts of the company's carriages are being analyzed, basic modules for their proper operation, including the DC/DC converter, the DC/AC inverter and so on.

Finally, the Tesla models are extensively referenced, with full analysis of the various and different versions as well as of the structural parts which they use. Autopilot, the battery types and the induction motors are being known with specification of each version.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	vi
ABSTRACT.....	vii
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ.....	viii
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.....	1
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.....	2
ΤΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟ.....	2
2.1 Τι είναι το ηλεκτρικό αυτοκίνητο.....	2
2.2 Η ιστορία της ηλεκτροκίνησης.....	2
2.2.1. Τα πρώτα βήματα στην ηλεκτροκίνηση.....	3
2.2.2. Τα πρώτα ηλεκτρικά αυτοκίνητα.....	4
2.2.3. Η χρυσή εποχή των ηλεκτρικών αυτοκινήτων.....	5
2.2.4. Περίοδος παρακμής των ηλεκτρικών αυτοκινήτων (1910-1960).....	6
2.2.5. Αναζωπύρωση ενδιαφέροντος για τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα.....	8
2.3 Σύγχρονα ηλεκτρικά αυτοκίνητα με δυνατότητα οδικής	
κυκλοφορίας.....	12
2.3.1. Τα αμιγώς ηλεκτρικά αυτοκίνητα (BEV).....	14
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.....	16
Η ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΤΗΣ TESLA MOTORS.....	16
3.1 Οι μπαταρίες	17
3.1.1. Οι χημείες των μπαταριών Li-ion.....	18
3.1.2. Η βιομηχανία των μπαταριών Li-ion.....	21
3.1.3. Οι ιδιότητες των μπαταριών Li-ion.....	22
3.1.4. Άλλες τεχνολογίες μπαταριών στην ηλεκτροκίνηση.....	25

3.2 Οι ηλεκτροκινητήρες της εταιρίας.....	29
3.2.1. Τα μέρη ενός επαγωγικού κινητήρα.....	30
3.2.2. Ο τρόπος λειτουργίας ενός επαγωγικού κινητήρα.....	35
3.2.3. Απώλειες ενέργειας στον επαγωγικό κινητήρα.....	39
3.2.4. Λειτουργία του επαγωγικού κινητήρα ως γεννήτρια.....	40
3.3 Τα ηλεκτρονικά.....	42
3.3.1. Ο τριφασικός αντιστροφέας inverter.....	43
3.3.2. Ο μετατροπέας DC/DC.....	47
3.3.3. Ο μετατροπέας AC/DC.....	50
3.4 Το σύστημα διαχείρισης ενέργειας.....	52
3.4.1. Εξοικονόμηση ενέργειας μέσω του μηχανισμού πέδησης.....	57
3.5 Φόρτιση της μπαταρίας.....	59
3.5.1. Σταθμοί υπερφόρτισης και αλλαγής μπαταρίας.....	59
3.5.2. Τεχνική ανάλυση κατά τη φόρτιση της μπαταρίας.....	62
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.....	65
ΤΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΤΗΣ TESLA MOTORS.....	65
4.1 Η πρώτη γενιά.....	66
4.2 Η δεύτερη γενιά.....	72
4.3 Η τρίτη γενιά.....	81
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.....	86
ΕΠΙΛΟΓΟΣ.....	86
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	87

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η Tesla Motors είναι αμερικανική αυτοκινητοβιομηχανία, η οποία από τις αρχές του 21^{ου} αιώνα σχεδιάζει, παράγει και πουλάει αμιγώς ηλεκτρικά αυτοκίνητα. Τα ηλεκτρικά ή αλλιώς πράσινα οχήματα δεν είναι κάτι καινούριο. Ήδη από τις απαρχές της αυτοκίνησης, οι κατασκευαστές προσπαθούσαν να δημιουργήσουν λειτουργικά ηλεκτρικά οχήματα όσο το δυνατόν πιο οικονομικά και αποδοτικά.

Η ηλεκτρική ενέργεια, οικολογική και φιλική στο περιβάλλον, συνυπήρχε με τον βενζινοκινητήρα από τις πρώτες στιγμές της αυτοκίνησης, τότε που έκανε τα πρώτα δειλά βήματά της. Η ανάγκη όμως για την προστασία του περιβάλλοντος και για τη μείωση της εκπομπής ρύπων από τη χρήση των μηχανών εσωτερικής καύσης είναι ο σημαντικότερος λόγος που η διεθνής αυτοκινητοβιομηχανία έχει στραφεί στην αξιοποίηση της ηλεκτρικής ενέργειας για την κίνηση των οχημάτων. Καθοριστικός παράγοντας στην στροφή αυτή είναι και η προσπάθεια να περιορισθεί η εξάρτηση μας από τα ορυκτά καύσιμα.

Το μέλλον της αυτοκίνησης θέλει τα οχήματα να είναι πιο φιλικά για το περιβάλλον, χρησιμοποιώντας εναλλακτική πηγή ενέργειας. Η αναζωπύρωση του ενδιαφέροντος για την ηλεκτροκίνηση έφερε σε πρώτο στάδιο υβριδικές προτάσεις με το πάντρεμα ηλεκτρικού και βενζινοκίνητου αυτοκινήτου. Στο πρόσφατο παρελθόν, καθώς η εξέλιξη της τεχνολογίας βοήθησε στη δημιουργία δυνατότερων ηλεκτροκινήτων και συσσωρευτών που εξασφαλίζουν υψηλότερες επιδόσεις και διαθέτουν μεγαλύτερη αυτονομία, η δημιουργία αμιγώς ηλεκτρικών αυτοκινήτων κατέστησε την ηλεκτροκίνηση συνυφασμένη με την αυτοκίνηση.

Πολλές αυτοκινητοβιομηχανίες πλέον παρουσιάζουν τις δικές τους προτάσεις για το ηλεκτρικό αυτοκίνητο είτε σε μορφή concept είτε προωθώντας τα στην αγορά. Η Tesla Motors όμως με την καινοτόμο τεχνολογία που ανέπτυξε στα αμιγώς ηλεκτρικά μοντέλα που διέθεσε πρόσφατα στην αγορά, δείχνει τις δυνατότητες και τον δρόμο για την επόμενη γενιά των ηλεκτρικών οχημάτων και ενδεχομένως της ίδιας της αυτοκίνησης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΤΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟ

2.1 Τι είναι το ηλεκτρικό αυτοκίνητο

Ηλεκτρικό αυτοκίνητο ονομάζεται το όχημα που χρησιμοποιεί για την κίνηση του αποκλειστικά ηλεκτρική ενέργεια η οποία είναι συνήθως αποθηκευμένη σε συστοιχίες μπαταριών. Οι μπαταρίες που είναι η κυρία πηγή ενέργειας των ηλεκτρικών αυτοκινήτων είναι συνήθως επαναφορτιζόμενες και χρησιμοποιούνται για να τροφοδοτήσουν ηλεκτρικές μηχανές είτε απευθείας, είτε μέσω μετατροπέων, οι οποίοι με τη σειρά τους κινούν τον άξονα του αυτοκινήτου ή απευθείας τις ρόδες.

Αυτό που διαφοροποιεί τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα από τα συμβατικά οχήματα είναι η χρήση αποκλειστικά ηλεκτρικών κινητήρων και όχι μηχανών εσωτερικής καύσης. Δεν πρέπει να συγχέεται το ηλεκτρικό αυτοκίνητο με το υβριδικό αφού το τελευταίο χρησιμοποιεί ηλεκτρικούς κινητήρες σε συνδυασμό όμως με μηχανές εσωτερικής καύσης που είτε φορτίζουν τις μπαταρίες είτε συμβάλλουν απευθείας στην κίνηση σε συνδυασμό με τη φόρτιση.

2.2 Η ιστορία της ηλεκτροκίνησης

Το ηλεκτρικό αυτοκίνητο παρόλο που αποτελεί για πολλούς μια σύγχρονη έννοια για την οποία γίνεται ιδιαίτερος λόγος τα τελευταία χρόνια, διαθέτει μια πλούσια ιστορία 100 και πλέον χρόνων η οποία είναι συνυφασμένη με τη δημιουργία του συμβατικού αυτοκινήτου (μηχανές εσωτερικής καύσεως).

Η ιστορία ξεκινά στις αρχές του 19ου αιώνα και η αρχή της ηλεκτροκίνησης αποδίδεται σε διαφορετικούς και σημαντικούς ανθρώπους της εποχής. Με τη δημιουργία της πρώτης μπαταρίας (1800 Alessandro Volta) [1], είχαν μπει τα θεμέλια για τη δημιουργία του πρώτου ηλεκτροκινητήρα και οι πρώτες προσπάθειες αφορούσαν εφευρέσεις με δοκιμαστικό χαρακτήρα και έγιναν από ανθρώπους με διαφορετικό υπόβαθρο και διαφορετική εθνικότητα.

Στην πορεία των χρόνων η ηλεκτροκίνηση ήταν πάντα μια πρόταση που απασχολούσε και ήταν έτοιμη να αναλάβει το ρόλο της στην ιστορία του αυτοκινήτου. Έπειτα από κάθε

ενεργειακή και περιβαλλοντική κρίση, το ηλεκτρικό αυτοκίνητο βρίσκονταν στο προσκήνιο και ήταν έτοιμο να αναδείξει τα ποικίλα πλεονεκτήματά του.

Τα τελευταία χρόνια έκανε μια δυναμική επανεμφάνιση, η οποία βάζει τα θεμέλια για ένα λαμπρό μέλλον. Η εξέλιξη των μπαταριών και της τεχνολογίας έδωσαν το έναυσμα για μια μαζική παρουσίαση προτάσεων από πολλές αυτοκινητοβιομηχανίες. Η κατηγορία στην οποία οι εταιρείες παρουσιάζουν αρκετές προτάσεις, είναι αυτή των μικρών οχημάτων, κατάλληλων για κίνηση μέσα στην πόλη. Τα επίπεδα αυτονομίας άλλωστε καλύπτουν τα δεδομένα για χρήση εντός αστικής περιοχής. Από την άλλη, η παρουσίαση πολυτελών ηλεκτρικών οχημάτων και οχημάτων με υψηλές επιδόσεις άφησε να αναδειχθούν οι δυνατότητες της ηλεκτροκίνησης και να αποτελέσουν έναν βασικό ανταγωνιστή για τα οχήματα με μηχανές εσωτερικής καύσης. Ακόμη, ενδέχεται να αποτελέσουν και μια νέα αρχή για το μέλλον της αυτοκίνησης η οποία δεν θα εξαρτάται αποκλειστικά από το πετρέλαιο [2].

2.2.1. Τα πρώτα βήματα στην ηλεκτροκίνηση

Το 1827, ο Ούγγρος Anyos Jedlik δημιουργεί ένα πρώτο μοντέλο ηλεκτρικού κινητήρα και το τοποθετεί σε ένα πολύ μικρό όχημα [3]. Το 1831, ο Αμερικανός φυσικός Joseph Henry στη προσπάθεια κατανόησης του ηλεκτρομαγνητισμού, κατασκευάζει τον πρώτο ηλεκτροκινητήρα. Εμπνευσμένος από τη μελέτη του Joseph Henry, στις αρχές του 1834 ο Αμερικάνος Thomas Davenport κατασκευάζει έναν ηλεκτρικό (dc) κινητήρα, τον πρώτο επι Αμερικανικού εδάφους, με μπαταρίες. Ένα από τα πρώτα πρακτικά και πιο επιτυχημένα οχήματα οφείλεται και στον σκωτσέζο Robert Davidson το 1842. Είχε προηγηθεί το 1837 από τον ίδιο η κατασκευή ηλεκτρικού μοτέρ [4]. Μεταξύ 1832 και 1839 πιστώνεται στον επίσης σκωτσέζο Robert Anderson η δημιουργία ακόμη ενός ηλεκτρικού οχήματος με μπαταρίες [5]. Τέλος, το 1851 ο Αμερικανός Charles Grafton Page κατασκευάζει ένα όχημα 10 τόνων που έφτανε τη ταχύτητα των 30 χλμ/ώρα με σκοπό τη μεταφορά ατόμων από τη Ουάσινγκτον στη Βαλτιμόρη. Αν και η διαδρομή έγινε, τα προβλήματα που δημιουργήθηκαν στις μπαταρίες ήταν άμεσα.

Οι παραπάνω πρωτόλειες δημιουργίες αν και σημαντικές για την εποχή παρουσίαζαν ένα πολύ βασικό μειονέκτημα: οι μπαταρίες που χρησιμοποιούνταν για να κινήσουν τα οχήματα δεν επαναφορτιζόνταν. Η λύση της επαναφόρτισης επετεύχθη το 1859 όταν ο Γάλλος Gaston Plante ανακαλύπτει το στοιχείο μολύβδου-ξέως (Pb-Acid). Ο Camille Alphonse Faure, ένας επίσης Γάλλος επιστήμονας, βελτίωσε τον σχεδιασμό της μπαταρίας το 1881,

γεγονός που αύξησε σημαντικά την ικανότητα των εν λόγω μπαταριών και οδήγησε άμεσα στην κατασκευή τους σε βιομηχανική κλίμακα. Οι επαναφορτιζόμενοι συσσωρευτές είναι πλέον γεγονός και η ιστορία των ηλεκτρικών οχημάτων ξεκινά [6][7].

2.2.2. Τα πρώτα ηλεκτρικά αυτοκίνητα

Στη στροφή του 19^{ου} προς τον 20^ο αιώνα, τα ηλεκτρικά οχήματα άρχισαν να κερδίζουν την προσοχή εφευρετών και κατασκευαστών. Ένα από τα πρώτα ηλεκτροκίνητα δίκυκλα, τέθηκε το 1867 στην Παγκόσμια Έκθεση στο Παρίσι από την αυστριακή εφευρέτη Franz Kravogl, αλλά κρίθηκε αναξιόπιστο για να κυκλοφορήσει στο δρόμο. Μια ακόμη εκδοχή, αυτή τη φορά με τρεις τροχούς, δοκιμάστηκε κατά μήκος ενός δρόμου στο Παρίσι τον Απρίλιο του 1881 από τον Γάλλο εφευρέτη Gustave Trouve [8].

Ο Thomas Parker, ο οποίος ήταν υπεύθυνος για τις καινοτομίες, όπως το ηλεκτρικό μετρό του Λονδίνου, το εναέριο τραμ στο Λίβερπουλ και στο Μπέρμιγχαμ, κατασκεύασε το πρώτο ηλεκτρικό αυτοκίνητο παραγωγής στο Λονδίνο το 1884, χρησιμοποιώντας τις δικές του ειδικά σχεδιασμένες επαναφορτιζόμενες, μεγάλης χωρητικότητας μπαταρίες. Το μεγάλο ενδιαφέρον του Parker για την κατασκευή των πιο αποδοτικών οχημάτων αλλά και οι επιπτώσεις της ρύπανσης στο Λονδίνο των οδήγησαν να πειραματιστεί με τα ηλεκτρικά οχήματα. Η παραγωγή του αυτοκινήτου ήταν στα χέρια της εταιρείας Elwell-Parker, που ιδρύθηκε το 1882 για την κατασκευή και πώληση των ηλεκτρικών τραμ. Η εταιρεία συγχωνεύθηκε με άλλους ανταγωνιστές της το 1888 για να σχηματίσουν την Electric Contractive Corporation. Η εν λόγω εταιρεία είχε μια σχεδόν μονοπωλιακή θέση στη βρετανική αγορά ηλεκτρικών αυτοκινήτων στη δεκαετία του 1890 [9].

Παρατηρούμε ότι η Γαλλία και το Ηνωμένο Βασίλειο ήταν οι πρώτες χώρες που υποστηρίχτηκε η ευρεία ανάπτυξη των ηλεκτρικών οχημάτων, ενώ το πρώτο ηλεκτρικό αυτοκίνητο στη Γερμανία κατασκευάστηκε από το μηχανικό Andrea Flocken το 1888. Τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα κατείχαν πολλά ρεκόρ ταχύτητας και απόστασης, πριν την υπεροχή των κινητήρων εσωτερικής καύσης. Μεταξύ των πιο αξιοσημείωτων από αυτά, είναι το βελγικό αεροδυναμικό όχημα Jamais Contente του Camille Jenatzy (29 Απριλίου του 1899), που έσπασε το φράγμα των 100 χλμ/ώρα. Επίσης αξιοσημείωτη ήταν η σχεδίαση και κατασκευή ενός all-wheel drive ηλεκτρικού αυτοκινήτου από τον Ferdinand Porsche, που τροφοδοτείται από ένα κινητήρα σε κάθε τροχό, το οποίο επίσης έσπασε πολλά ρεκόρ [10].

Οι Η.Π.Α. άρχισαν να δίνουν προσοχή σε ηλεκτρικά οχήματα όταν οι Ευρωπαίοι είχαν κάνει ήδη χρήση ηλεκτρικών τρίκυκλων, ποδήλατων και αυτοκινήτων για σχεδόν 15 χρόνια.

Το πρώτο αμερικανικό ηλεκτρικό αυτοκίνητο αναπτύχθηκε το 1890-91 από τον William Morrison και ήταν ένα βαγόνι έξι θέσεων ικανό να φτάνει ταχύτητα 14 μίλια ανά ώρα (23 km/h). Το 1899, ο Thomas Edison παρουσιάζει ένα ηλεκτρικό όχημα κινούμενο από αλκαλικές μπαταρίες. Το 1895 γίνεται ο πρώτος αγώνας αυτοκινήτων στις Η.Π.Α και νικητής αναδεικνύεται ένα ηλεκτρικό αυτοκίνητο (electrobat II), ενώ το 1896 η Electric Car.Co παρουσιάζει ηλεκτροκίνητα ταξί στους δρόμους της Νέας Υόρκης. Η εταιρεία Andrew Riker επίσης το 1896, ξεκινά την παραγωγή ηλεκτρικών αυτοκινήτων. Μέσα στα επόμενα τρία χρόνια ο αριθμός των ηλεκτρικών αυτοκινήτων στις ΗΠΑ είχε αυξηθεί κατά πολύ [3].

2.2.3. Η χρυσή εποχή των ηλεκτρικών αυτοκινήτων

Τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα αποτελούσαν την προτιμώμενη επιλογή για τις μετακινήσεις περί τα τέλη του 19^{ου} αιώνα και τις αρχές του 20^{ου} έναντι των βενζινοκίνητων οχημάτων και των ατμοκίνητων. Ήταν γεγονός ότι λόγω των τεχνολογικών περιορισμών η τελική ταχύτητα των πρώτων ηλεκτρικών αυτοκινήτων περιοριζόταν σε περίπου 32 χλμ/ώρα.

Παρά την αργή τους όμως ταχύτητα, τα ηλεκτρικά οχήματα είχαν μια σειρά από πλεονεκτήματα σε σχέση με τους ανταγωνιστές τους (βενζινοκίνητα και ατμοκίνητα) ώστε να δικαιολογείται αυτή τους η υπεροχή. Αρχικά πλεονεκτούσαν σε επίπεδο άνεσης και ευκολίας της λειτουργίας τους, αφού παρείχαν μια εύκολη διαδικασία εκκίνησης του κινητήρα με τη χρήση ενός διακόπτη έναντι της χειροκίνητης (μανιβέλα) των βενζινοκίνητων. Τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα δεν απαιτούσαν αλλαγές ταχυτήτων. Είναι γεγονός ότι και τα ατμοκίνητα αυτοκίνητα δεν είχαν επίσης καμία αλλαγή ταχυτήτων, μειονεκτούσαν όμως λόγω των μεγάλων χρόνων εκκίνησης έως και 45 λεπτά σε χαμηλές θερμοκρασίες. Επίσης η έλλειψη θορύβου, καπνού, μυρωδιάς και δόνησης που παρουσίαζαν τα βενζινοκίνητα οχήματα τότε, έδιναν ακόμη ένα προβάδισμα στα ηλεκτρικά αυτοκίνητα τα οποία ήταν αρεστά σε ανθρώπους υψηλών κοινωνικών τάξεων. Πράγματι τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα βρήκαν δημοτικότητα σε εύπορους πελάτες που τα χρησιμοποιούσαν ως αυτοκίνητα πόλης, αφού η μικρή αυτονομία εκεί δεν ήταν πρόβλημα. Τέλος, το μη κατάλληλο και περιορισμένο οδικό δίκτυο εκτός αστικών κέντρων έκανε τα ηλεκτροκίνητα οχήματα να έχουν υπεροχή έναντι των άλλων τύπων αυτοκινήτου στην αστική μετακίνηση.

Το ενδιαφέρον λοιπόν για τα ηλεκτροκίνητα οχήματα θα αυξηθεί σημαντικά στα τέλη της δεκαετίας του 1890 και στις αρχές του 1900. Στο Λονδίνο, ο Walter C. Bersey σχεδίασε και εισήγαγε στους δρόμους του Λονδίνου το 1897, τα πρώτα 15 ηλεκτρικά ταξί. Την ίδια

χρονιά στη Νέα Υόρκη μια εταιρεία έθεσε σε κυκλοφορία 12 ηλεκτρικά ταξί και μέσα σε ένα χρόνο αριθμούσε ήδη 62 [3].

Το 1911, το πρώτο υβριδικό αυτοκίνητο κυκλοφόρησε από τη Woods Motor Vehicle Company of Chicago. Ήταν όμως μια εμπορική αποτυχία, καθώς αποδείχθηκε πολύ αργό σε σχέση με την τιμή του και πολύ δαπανηρό στην συντήρηση του [11][12]. Η αποδοχή των ηλεκτρικών αυτοκινήτων αρχικά εμποδίστηκε από την έλλειψη υποδομών ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά από το 1912, πολλά σπίτια συνδέθηκαν με την ηλεκτρική ενέργεια, επιτρέποντας έτσι μια απότομη αύξηση της δημοτικότητας τους.

Η αρχή του 20^{ου} αιώνα βρίσκει τις ΗΠΑ με το 40% των αμερικανικών αυτοκινήτων νατροφοδοτούνταν με ατμό, το 38% από ηλεκτρική ενέργεια και το 22% από τη βενζίνη. Σχεδόν 34.000 χιλιάδες ηλεκτρικά αυτοκίνητα καταγράφηκαν στις Ηνωμένες Πολιτείες και η Αμερική έγινε η χώρα όπου τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα είχαν κερδίσει την ευρύτερη αποδοχή του κοινού. Οι πωλήσεις ηλεκτρικών αυτοκινήτων κορυφώθηκαν στις αρχές της δεκαετίας του 1910 [13].

Για να ξεπεραστεί το περιορισμένο εύρος λειτουργίας των ηλεκτρικών οχημάτων, καθώς και η έλλειψη υποδομών επαναφόρτισης, μια υπηρεσία ανταλλαγής μπαταριών τέθηκε για πρώτη φορά σε εφαρμογή το 1896 από την Hartford Electric Light Company σε συνεργασία με την General Vehicle Company. Ο ιδιοκτήτης αγόραζε το όχημα από τη General Vehicle Company (θυγατρική της General Electric Company) χωρίς μπαταρία και η ηλεκτρική ενέργεια αγοράζονταν από την Hartford Electric Light Company μέσω μιάς επαναφορτιζόμενης μπαταρίας. Η υπηρεσία αυτή παρεχόταν μεταξύ 1910-1924 και κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της καλύφθηκαν πάνω από 6.000.000 μίλια. Αρχίζοντας το 1917 μια παρόμοια επιτυχημένη υπηρεσία λειτούργησε στο Σικάγο για τους ιδιοκτήτες που επίσης θα μπορούσαν να αγοράσουν το όχημα χωρίς τις μπαταρίες [14].

2.2.4. Περίοδος παρακμής των ηλεκτρικών αυτοκινήτων (1910-1960)

Παρά την επιτυχία που απολάμβαναν τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα τα πρώτα χρόνια του 20ου αιώνα, μια σειρά από γεγονότα συνέβαλαν στο να ξεκινήσει η πτώση τους στο μερίδιο αγοράς του αυτοκινήτου.

Η αρχή έγινε το 1908 με την άφιξη στην αγορά του βενζινοκίνητου αυτοκινήτου Ford Model T. Το αυτοκίνητο εκείνη την εποχή αποτελούσε ένα προϊόν πολυτελείας για λίγους ωστόσο το Model T με τιμή που δεν ξεπερνούσε τα 850 δολάρια (έναντι 2000+ οι τιμές των

ανταγωνιστών) κατάφερε να καταλάβει ένα πολύ σημαντικό μερίδιο αγοράς και να βάλει τις χαμηλότερες τάξεις στην αγορά του αυτοκινήτου.

Σε συνέχεια αυτού του γεγονότος το 1912, ο Charles Kettering χάρη στην ανακάλυψη της ηλεκτρικής μίζας διευκόλυνε την εκκίνηση των βενζινοκίνητων αυτοκινήτων που μέχρι τότε γίνονταν με τη χρήση της μανιβέλας. Ο θόρυβος δε που εξέπεμπαν μειώθηκε αισθητά με τη χρήση της εξάτμισης, που είχε εφεύρει το 1897 ο Hiram Percy Maxim.

Το μεγάλο βήμα ωστόσο έγινε το 1913 όταν ο Henry Ford σχεδίασε τη μαζική παραγωγή αυτοκινήτων του Model T, με αποτέλεσμα το κόστος παραγωγής να μειωθεί κατά πολύ και να κατασκευάζονται πολύ μεγαλύτερος αριθμός οχημάτων σε ταχύτερο διάστημα απ' ότι αυτών των ηλεκτροκίνητων. Οι τιμές των μαζικώς παραγόμενων βενζινοκίνητων αυτοκινήτων έπεσαν προς τα κάτω ενώ οι τιμές των παρόμοιων ηλεκτρικών οχημάτων συνέχισαν να αυξάνονται. Το 1912, ένα ηλεκτρικό αυτοκίνητο έφτασε να πωλείται σε σχεδόν διπλάσια τιμή από την τιμή ενός αυτοκινήτου με βενζίνη [15][5].

Επιπλέον, η ανακάλυψη μεγάλων αποθεμάτων πετρελαίου μείωσε το κόστος της βενζίνης, οδήγησε στην ευρεία διαθεσιμότητα της και αναζωπύρωσε το ενδιαφέρον των καταναλωτών για τα βενζινοκίνητα οχήματα αφού η λειτουργία τους θα ήταν οικονομικότερη για μεγάλες αποστάσεις.

Στις αρχές της δεκαετίας του 1920, η μαζική διάνοιξη οδικού δικτύου πέρα από τα αστικά κέντρα έκανε τα ηλεκτρικά οχήματα υποδεέστερα έναντι των βενζινοκίνητων για την κάλυψη μακρινών αποστάσεων λόγω των χαμηλών ταχυτήτων και της μικρής αυτονομίας. Επίσης, σε αγροτικές περιοχές οι κάτοικοι είχαν μεγαλύτερη ευκολία πρόσβασης σε σταθμούς ανεφοδιασμού καυσίμων ενώ πολλοί δεν διέθεταν καν ηλεκτρισμό. Τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα περιορίζονταν πλέον σε αστική χρήση λόγω της αργής ταχύτητας (όχι περισσότερο από 24-32 km/h) και της χαμηλής αυτονομίας (χιλιόμετρα 50-65) ενώ τα αυτοκίνητα βενζίνης ήταν πλέον σε θέση να ταξιδέψουν πιο μακριά και πιο γρήγορα από τα αντίστοιχα ηλεκτρικά. Η μεταστροφή αυτή επήλθε και στην Ευρώπη με αποτέλεσμα τη σταδιακή εξαφάνιση των ηλεκτρικών οχημάτων μέχρι το 1935 [13].

Εξαιτίας των προαναφερθέντων λόγων που συνέβαλαν στη παρακμή τους, οι περισσότερες εταιρείες σταμάτησαν την παραγωγή ηλεκτρικών αυτοκινήτων σε κάποιο σημείο στη δεκαετία του 1910. Το ηλεκτρικό αυτοκίνητο βρισκόταν σε μια περίοδο κάμψης χωρίς ουσιαστικά να εμφανίζεται κάποιο ενδιαφέρον για την εξέλιξή του. Η αφθονία της βενζίνης και η χαμηλή τιμή της όλο εκείνο το χρονικό διάστημα, όπως και η συνεχής εξέλιξη των μηχανών εσωτερικής καύσης δεν άφηναν περιθώρια για πειραματισμούς [2].

Έπειτα από το τέλος του πρώτου παγκοσμίου πολέμου, η γραμμή παραγωγής των ηλεκτρικών οχημάτων περιορίστηκε σε ειδικά οχήματα όπως ταξί, φορτηγά και οχήματα εμπορικών μεταφορών όπου το περιορισμένο εύρος τους δεν δημιουργούσε σημαντικά προβλήματα. Τα περνοφόρα ανυψωτικά οχήματα ήταν ηλεκτροκίνητα όταν εισήχθησαν από την εταιρία Yale το 1923 [16]. Στην Ευρώπη και ειδικά στο Ηνωμένο Βασίλειο, τα αυτοκίνητα διανομής γάλακτος στα σπίτια ήταν κατά πλειοψηφία ηλεκτροκίνητα [17]. Ηλεκτρικά αμαξάκια του γκολφ παρήχθησαν την ίδια περίοδο από την εταιρία Lektro [18].

Από το 1920, η πρώιμη ακμή των ηλεκτρικών αυτοκινήτων είχε περάσει και το 1930 μια δεκαετία αργότερα, η ηλεκτρική αυτοκινητοβιομηχανία είχε ουσιαστικά εξαλειφθεί. Στα χρόνια που ακολούθησαν δεν παρουσιάστηκε σημαντική ανάκαμψη στη χρήση των ηλεκτρικών αυτοκινήτων. Κάποιες Ευρωπαϊκές χώρες πειραματιστήκαν με ηλεκτρικά αυτοκίνητα όπως τα βρετανικά οχήματα για το γάλα και το γαλλικό αυτοκίνητο της κατασκευαστικής εταιρίας αεροσκαφών Breguet, αλλά σε γενικές γραμμές, ενώ η ανάπτυξη των μηχανών εσωτερικής καύσης (internal combustion engine) προχώρησε με γρήγορους ρυθμούς, αυτή των ηλεκτρικών οχημάτων παρέμεινε στάσιμη.

Στα τέλη του 1950, ο Henney Coachworks και η Εθνική Ένωση Electric Company - κατασκευαστές των μπαταριών exide - σχημάτισαν μια κοινοπραξία για την παραγωγή ενός νέου ηλεκτρικού αυτοκινήτου, το Henney kilowatt, βασισμένο στο γαλλικό μοντέλο της Renault Dauphine. Το αυτοκίνητο παρήχθη σε εκδόσεις των 36 volt και 72 volt. Τα μοντέλα 72-volt είχαν τελική ταχύτητα που πλησιάζε τα 96 χλμ/ώρα (60 mph) και μπορούσαν να ταξιδέψουν για περίπου μία ώρα με μία μόνο φόρτιση. Παρά τις βελτιωμένες επιδόσεις του σε σχέση με τα προηγούμενα ηλεκτρικά αυτοκίνητα, οι καταναλωτές το βρήκαν πάρα πολύ ακριβό σε σύγκριση με τα βενζινοκίνητα αυτοκίνητα εκείνης της εποχής και η παραγωγή έληξε το 1961[5].

2.2.5. Αναζωπύρωση ενδιαφέροντος για τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα

Από τα μέσα της δεκαετίας του 1960 ξεκινά μια αναζωπύρωση του ενδιαφέροντος προς τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα που θεωρείται και ως η δεύτερη περίοδος εξέλιξης της ηλεκτροκίνησης.

Στις προηγούμενες δεκαετίες ο κινητήρας εσωτερικής καύσης ήταν τελικά αυτός που κυριάρχησε και αυτό γιατί αν και ο ηλεκτρισμός ήταν από τη πρώτη στιγμή πιο καθαρός και εύκολος στη λειτουργία του, αφού δεν απαιτούσε συστήματα όπως η μετάδοση και σίγουρα είχε λιγότερα τεχνικά προβλήματα, ήταν πάντα εκτεθειμένος στην αδυναμία της τεχνολογίας

να αποθηκεύσει την ηλεκτρική ενέργεια σε μεγάλες ποσότητες με μικρό βάρος. Η καύση παραγών πετρελαιοειδών είχε σαφές πλεονέκτημα γιατί ήταν αρκετά αποδοτική, υπήρχε σε μεγάλες ποσότητες και γενικά ήταν εύκολη στη διαχείριση της.

Ο κινητήρας εσωτερικής καύσης όμως, είχε και έχει ένα πολύ μεγάλο μειονέκτημα, συμβάλλει στην αύξηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, Για τον λόγο αυτό στα τέλη της δεκαετίας του 60' το Κογκρέσο των Ηνωμένων Πολιτειών ξεκινάει ρυθμίσεις για τη μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης που άρχιζε πλέον να γίνεται ορατή λόγω της ευρείας χρήσης των βενζινοκίνητων οχημάτων. Παράλληλα και η πετρελαϊκή κρίση του 1973 που απέφερε μεγάλη αύξηση της τιμής του πετρελαίου και το εμπάργκο που ακολούθησε, ξαναέφερε στο προσκήνιο τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα και αποφασίζονται κονδύλια που αφορούν την εξέλιξη τους [2].

Από τα μέσα του 20^{ου} αιώνα παρουσιάστηκαν προτάσεις που κρίθηκαν σημαντικές και έβαλαν τα θεμέλια για τη μετέπειτα εξέλιξη της ηλεκτροκίνησης η οποία ξεκινά στις αρχές της δεκαετίας του 1990 και φτάνει έως σήμερα. Το 1959, η American Motors Corporation (AMC) και η Sonotone Corporation ανακοίνωσαν μια κοινή ερευνητική προσπάθεια για να εξετάσουν την παραγωγή ενός ηλεκτρικού αυτοκινήτου που τροφοδοτείται από μια «αυτόφορτιζόμενη» μπαταρία [19]. Η AMC είχε τη φήμη της καινοτομίας σε οικονομικά αυτοκίνητα, ενώ η Sonotone είχε την τεχνολογία για την κατασκευή μπαταριών νικελίου-καδμίου, η οποία θα μπορούσε να επαναφορτιστεί γρήγορα και ζύγιζε λιγότερο από τις παραδοσιακές εκδόσεις των μπαταριών μολύβδου-οξέος [20]. Την ίδια χρονιά, η βιομηχανία Nu-Way παρουσίασε ένα πειραματικό ηλεκτρικό αυτοκίνητο με ένα μονοκόμματο πλαστικό σώμα που επρόκειτο να αρχίσει την παραγωγή στις αρχές του 1960 [19]. Στα μέσα του 1960 λίγα σχέδια ηλεκτρικών αυτοκινήτων παρουσιάστηκαν όπως το 1965 το ηλεκτρικό αυτοκίνητο πόλης Scottish Aviation Scamp και το 1966 μία ηλεκτρική έκδοση του βενζινοκίνητου αυτοκινήτου της General Motors το Electrovair [21][22]. Το 1967, η American Motors Corporation συνεργάζεται με την Gulton για να αναπτύξουν μια νέα μπαταρία στη βάση του λιθίου και ένα σύστημα ελέγχου ταχύτητας που σχεδιάστηκε από τον Victor Wouk. Επίσης με μπαταρία νικελίου-καδμίου τέθηκε σε λειτουργία το 1969 το ηλεκτρικό αυτοκίνητο στέισον βαγκόν Rambler American καθώς και τα πειραματικά Amitron και Electron [23]. Το 1971 ένα ηλεκτρικό αυτοκίνητο πήρε τη μοναδική διάκριση να γίνει το πρώτο επανδρωμένο όχημα που θα οδηγηθεί στη Σελήνη. Είχε την ονομασία Lunar Roving Vehicle και αναπτύχθηκε για πρώτη φορά κατά τη διάρκεια της αποστολής Apollo 15 και προσγειώθηκε στη Σελήνη. Επίσης το «Moon buggy» αναπτύχθηκε από την

εταιρία Boeing και την Delco Electronics (θυγατρική της General Motors) και είχε έναν κινητήρα συνεχούς ρεύματος σε κάθε τροχό και ένα ζευγάρι μη-επαναφορτιζόμενων συσσωρευτών 36V κατασκευασμένων από ασήμι, ψευδάργυρο και υδροξείδιο του καλίου [24].

Από το τέλος της δεκαετίας του 1970 το ενδιαφέρον για τα ηλεκτροκίνητα οχήματα ατόνησε ξανά αφού η κρίση του πετρελαίου για τους περισσότερους αποτελούσε παρελθόν. Ωστόσο από τις αρχές της δεκαετίας του 1990 ξεκίνησε και πάλι μια μεταστροφή στα φιλικά προς το περιβάλλον οχήματα. Παρόλο που δεν υπήρχε μεγάλο αγοραστικό ενδιαφέρον για τα ηλεκτρικά οχήματα, το Τμήμα Ενέργειας των Η.Π.Α. διέθεσε μεγάλα κονδύλια για έρευνα και ανάπτυξη πάνω στη βελτίωση της τεχνολογίας των μπαταριών και κατ'επέκταση των ηλεκτρικών και υβριδικών αυτοκινήτων.

Την ίδια εποχή, πολλές αυτοκινητοβιομηχανίες άρχισαν να διερευνούν επιλογές για οχήματα εναλλακτικού καυσήμου, συμπεριλαμβανομένων των ηλεκτρικών αυτοκινήτων. Από το 1988, ο πρόεδρος της General Motors εξέφρασε το ενδιαφέρον να ξεκινήσει η δημιουργία ενός ηλεκτρικού αυτοκινήτου. Έτσι η General Motors επεξεργάστηκε την ιδέα της κατασκευής ενός ηλεκτρικού αυτοκινήτου, του Electrovette που βασίστηκε στο βενζινοκίνητο μοντέλο της Chevrolet Chevette. Το 1990, στο Los Angeles Auto Show, ο Roger Smith, πρόεδρος της GM ανακοίνωσε ότι η εταιρία θα κατασκευάσει ηλεκτρικά αυτοκίνητα προς πώληση στο κοινό.

Το ενδιαφέρον για τη μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης εκδηλώνεται σε παγκόσμιο επίπεδο και σε συνέδριο που πραγματοποιήθηκε το 1992 στο Ρίο της Βραζιλίας αποφασίζονται μέτρα από 154 χώρες για τη κλιματική αλλαγή. Στη συνέχεια θεσπίζονται και τα πρώτα μέτρα από την Ευρωπαϊκή ένωση για πιο «καθαρά» αυτοκίνητα [2].

Το 1990 στη Καλιφόρνια περνά ο νόμος που θέλει το 2% των οχημάτων που κυκλοφορούν έως το 1998 και το 10% των οχημάτων μέχρι το 2003 να είναι μηδενικών ρύπων. Η υπηρεσία California Air Resources Board (CARB), ξεκίνησε μια πολιτική για πιο αποδοτικά οχήματα, χαμηλότερων εκπομπών ρύπων, με απώτερο στόχο τα οχήματα με μηδενικές εκπομπές όπως τα ηλεκτρικά οχήματα. Ανταποκρινόμενες οι αυτοκινητοβιομηχανίες ανέπτυξαν ηλεκτρικά μοντέλα, όπως το Chrysler TEVan, το Ford Ranger EV φορτηγό, το GM EV1, το Chevrolet S10 EV φορτηγό, το Honda EVPlus hatchback, το Nissan Altra EV και το Toyota RAV4 EV. Η CARB τελικά κατηγόρησε τις αυτοκινητοβιομηχανίες για υπονόμευση της πολιτικής της, ότι δηλαδή ήθελαν να συνεχίσουν να πωλούν αυτοκίνητα στην προσοδοφόρα αγορά της Καλιφόρνιας και δεν προωθούσαν επαρκώς τα ηλεκτρικά οχήματα τους, προκειμένου να δημιουργήσουν την

εντύπωση ότι οι καταναλωτές δεν ενδιαφέρονται για τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα ενώ παράλληλα συσπείρωναν τους εκπροσώπους του πετρελαϊκού κλάδου σε έντονη διαμαρτυρία κατά των εντολών της CARB. Μάλιστα η General Motors με μια ασυνήθιστη κίνηση, δεν επέτρεπε στους καταναλωτές να αγοράζουν το ηλεκτρικό μοντέλο GM EV1 αλλά αντίθετα καλούνταν να υπογράψουν μισθώσεις, πράγμα που σημαίνει ότι τα αυτοκίνητα έπρεπε να επιστραφούν στην GM στο τέλος της περιόδου μίσθωσης, χωρίς δικαίωμα εξαγοράς ακόμα και αν ήθελαν οι αγοραστές. Η Chrysler, η Toyota και μια ομάδα αντιπροσώπων της GM μήνυσε την CARB στο ομοσπονδιακό δικαστήριο, που οδήγησε στην τελική στείρωση της CARB και στην κατάργηση το 2003 της ρύθμισης που αφορούσε τη παραγωγή αυτοκινήτων με μηδενικούς ρύπους στη Καλιφόρνια.

Καθ'όλη τη δεκαετία του 1990, το ενδιαφέρον για οικονομικά ή φιλικά προς το περιβάλλον αυτοκίνητα μειώθηκε ανάμεσα στους Αμερικανούς, οι οποίοι στραφήκαν σε γρήγορα ενεργοβόρα οχήματα, τα οποία ήταν από οικονομικής άποψης προσιτά χάρη στις χαμηλότερες τιμές της βενζίνης. Οι Αμερικανικές αυτοκινητοβιομηχανίες επέλεξαν να εστιάσουν τις γραμμές παράγωγής τους γύρω από SUV οχήματα με τα οποία απολάμβαναν μεγαλύτερα περιθώρια κέρδους από τα μικρότερα αυτοκίνητα που προτιμώνται σε μέρη όπως η Ευρώπη ή η Ιαπωνία. Το 1999, το υβριδικό αυτοκίνητο Honda Insight έγινε το πρώτο υβριδικό που πωλούνταν στη Βόρεια Αμερική μετά το ελάχιστο γνωστό υβριδικό Woods του 1917.

Η ενεργειακή κρίση της 10ετίας του 2000 επανέφερε ανανεωμένο ενδιαφέρον για τα υβριδικά και ηλεκτρικά αυτοκίνητα. Αρκετές αυτοκινητοβιομηχανίες άρχισαν να παράγουν νέα πρωτότυπα ηλεκτρικά αυτοκίνητα, καθώς οι καταναλωτές ζητούσαν αυτοκίνητα που θα τους ελευθέρωναν από τις διακυμάνσεις των τιμών του πετρελαίου. Επιπλέον ο υπερπληθυσμός που αντιμετωπίζουν μεγάλες πόλεις παγκοσμίως με τα προβλήματα που συνεπάγονται, ανάγκασαν τα σχεδιαστικά κέντρα των αυτοκινητοβιομηχανιών να παρουσιάζουν πρωτότυπα οχήματα πόλης, να εξελίσσουν με αυτό το τρόπο την ηλεκτροκίνηση και να παρουσιάζουν προτάσεις για τη μελλοντική κίνηση σε αστικά περιβάλλοντα [2].

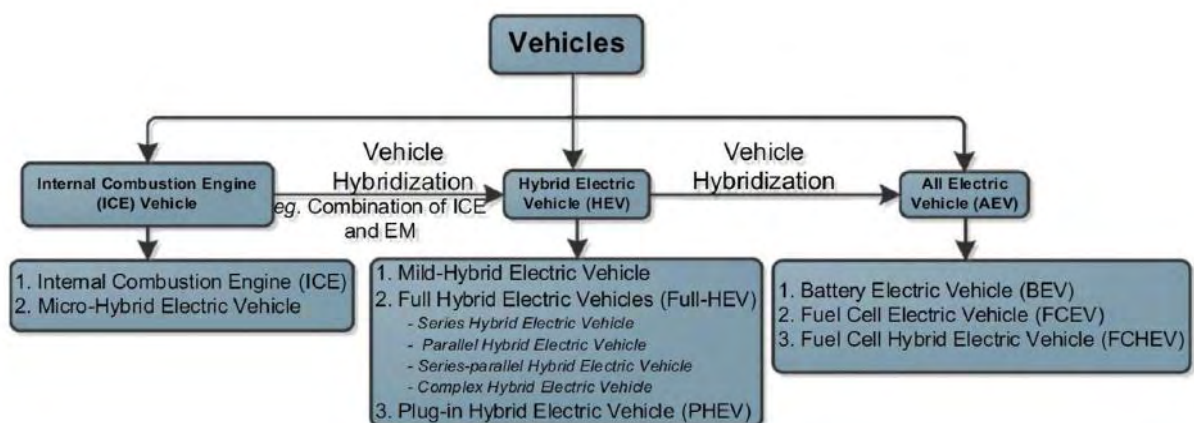
Τα περισσότερα ηλεκτρικά οχήματα στον κόσμο χρησιμοποιήθηκαν για δρόμους χαμηλής ταχύτητας όπως οι γειτονιές, neighborhood electric vehicles (NEVs) με δυνατότητα ταχύτητας 25 μιλίων/ώρα (45χιλ/ώρα). Σύμφωνα με την Pike Research οι δύο μεγαλύτερες αγορές NEV το 2011 ήταν οι Ηνωμένες Πολιτείες και η Γαλλία. Συνολικά 200.000 χαμηλής ταχύτητας μικρά ηλεκτρικά αυτοκίνητα πωλήθηκαν στην Κίνα το 2013, τα περισσότερα από τα οποία τροφοδοτούνταν από μπαταρίες μολύβδου-οξέος. Μικρά

ηλεκτρικά αυτοκίνητα κατασκευάζονταν στην Ευρώπη όπως το Νορβηγικό Kewet, (από το 1991 που αντικαταστάθηκε από τον Buddy το 2008) και το Think Ccity της επίσης της Νορβηγικής Think Global που ξεκίνησε το 2008, η παραγωγή του διακόπηκε λόγω οικονομικών δυσκολιών, επανεκκινήθηκε στη Φινλανδία το Δεκέμβριο του 2009 μέχρι το 2011 που πτώχευσε η εταιρία. Ο νέος ιδιοκτήτης της Think Global έχει προγραμματίσει να ξαναρχίσει η παραγωγή στις αρχές του 2012 με ένα εκλεπτυσμένο μοντέλο Think City [25].

2.3 Σύγχρονα ηλεκτρικά αυτοκίνητα με δυνατότητα οδικής κυκλοφορίας

Στις αρχές του 21^{ου} αιώνα και υπό το βάρος της άμεσης αντιμετώπισης των επιπτώσεων της αλόγιστης χρήσης των συμβατικών αυτοκινήτων, η στροφή στην ηλεκτροκίνηση και σε φιλικό περιβαλλοντικό προσανατολισμό αποτελεί πλέον επιτακτική ανάγκη και ξεκινά η πραγματική αναβίωση του ηλεκτρικού αυτοκινήτου. Πολλές προτάσεις γύρω από την ηλεκτροκίνηση αρχίζουν να εμφανίζονται καθώς η εξέλιξη που έχει πραγματοποιηθεί γύρω από την αυτονομία, τη διαδικασία φόρτισης και τις επιδόσεις, είναι μεγάλη και τα αποτελέσματα είναι πλέον άξια προσοχής.

Στο σχήμα 2.1 περιγράφονται όλα τα είδη σύγχρονων ηλεκτρικών αυτοκινήτων. Από αριστερά ξεκινώντας, πρόκειται για τα οχήματα καυσίμου τα οποία διαθέτουν τον παραδοσιακό κινητήρα εσωτερικής καύσης. Μια υποκατηγορία αυτών ήταν τα micro-hybrid τα οποία διέθεταν ένα σύστημα start-stop. Όταν το αμάξι ακιντοποιούνταν η μηχανή εσωτερικής καύσης έσβινε, ενώ όταν ο οδηγός πατούσε το γκάζι η μηχανή ξεκινούσε. Η υβριδοποίηση αυτών γέννησε στη συνέχεια τα υβριδικά οχήματα. Εδώ γίνεται και πιο ξεκάθαρη η διαφορά υβριδικών και αμιγώς ηλεκτρικών οχημάτων.



Σχήμα 2.1 - Κατηγορίες ηλεκτρικών αυτοκινήτων [26]

Τα υβριδικά έπειτα, χωρίζονται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες, στα Mild-Hybrid Electric Vehicle στα Full Hybrid Electric Vehicles και στα Plug-in Hybrid Electric Vehicle. Τα Mild-Hybrid αρχικά έφεραν μια οικονομία καυσίμου της τάξης του 30%. Το βασικό τους όμως μειονέκτημα ήταν ότι ο ηλεκτροκινητήρας δεν μπορούσε να λειτουργήσει αυτόνομα μόνος του, διότι μοιραζόταν τον ίδιο άξονα με τον κινητήρα εσωτερικής καύσης. Το πρόβλημα ξεπεράστηκε όμως με τα Full-HEV, τα οποία έδωσαν υψηλές αποδόσεις, σε συνδυασμό με καλύτερη οικονομία καυσίμου που έφτασε εως και το 40%. Αυτά τα οχήματα κινούνταν με ένα συνδυασμό κινητήρα εσωτερικής καύσης (ICE) και ενός ηλεκτρικού κινητήρα, που μπορούσαν να δουλέψουν αυτόνομα ή και μαζί. Η κίνηση στους τροχούς δινόταν με έναν από τους δύο κινητήρες κάθε φορά. Η ηλεκτρική μπαταρία που διέθεται, μπορούσε να φορτιστεί με ποικίλους τρόπους. Είτε με τη λειτουργία της ηλεκτρικής γεννήτριας η οποία δούλευε όσο το όχημα κινούνταν με τον κινητήρα εσωτερικής καύσης, είτε μετατρέποντας την κινητική ενέργεια σε ηλεκτρική μέσω των φρένων. Η τελευταία κατηγορία είναι τα PHEV. Ο τρόπος λειτουργίας ενός PHEV με ένα Full-HEV δεν διαφέρει πολύ. Η μεγάλη διαφορά είναι ο τρόπος φόρτισης της μπαταρίας όπου πλέον μπορούσε να γίνει απευθείας από μια πηγή ηλεκτρικής ενέργειας. Όταν η μπαταρία εκφορτίζεται το PHEV δουλεύει όπως ακριβώς ένα υβριδικό HEV με τη μηχανή εσωτερικής καύσης να αναλαμβάνει το ρόλο της πρωτογενούς πηγής ενέργειας.

Τα αμιγώς ηλεκτρικά οχήματα (All Electric Vehicle - AEV), είναι οχήματα τα οποία χρησιμοποιούν χημική ενέργεια αποθηκευμένη σε επαναφορτιζόμενες μπαταρίες. Δεν διαθέτουν μηχανή εσωτερικής καύσης ή δεξαμενή καυσίμου και λειτουργούν σε ένα πλήρως ηλεκτρικό σύστημα μετάδοσης που τροφοδοτείται από μπαταρίες. Όλη η ισχύς που χρειάζεται καλύπτεται αποκλειστικά από τις μπαταρίες, οι οποίες με τη σειρά τους φορτίζονται από πηγές ηλεκτρικής ενέργειας. Και αυτά χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες, τα Battery Electric Vehicle (BEV), τα Fuel Cell Electric Vehicle (FCEV) και τα Fuel Cell Hybrid Electric Vehicle (FCHEV). Τα BEV διαθέτουν μια μεγάλη μπαταρία αποτελούμενη από πολλά κελιά, η οποία τροφοδοτεί τον ηλεκτροκινητήρα. Τα FCEV πολύ παρόμοια με τα BEV αλλά αντί για τη μπαταρία, βασική πηγή ενέργειας είναι μία στοίβα κελιών καυσίμου υδρογόνου. Τέλος τα FCHEV, τα οποία αποτελούν και την εξέλιξη των FCEV, χρησιμοποιούν και ένα βοηθητικό σύστημα αποθήκευσης ενέργειας για την υποστήριξη των κελιών καυσίμου (όπως υπερ-πυκνωτές).

Ωστόσο δύο γεγονότα συνέβαλαν καθοριστικά στην αύξηση του ενδιαφέροντος που βλέπουμε σήμερα για τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα με δυνατότητες οδικής κυκλοφορίας. Το πρώτο γεγονός ήταν η παραγωγή του Toyota Prius που κυκλοφόρησε στην Ιαπωνία το 1997

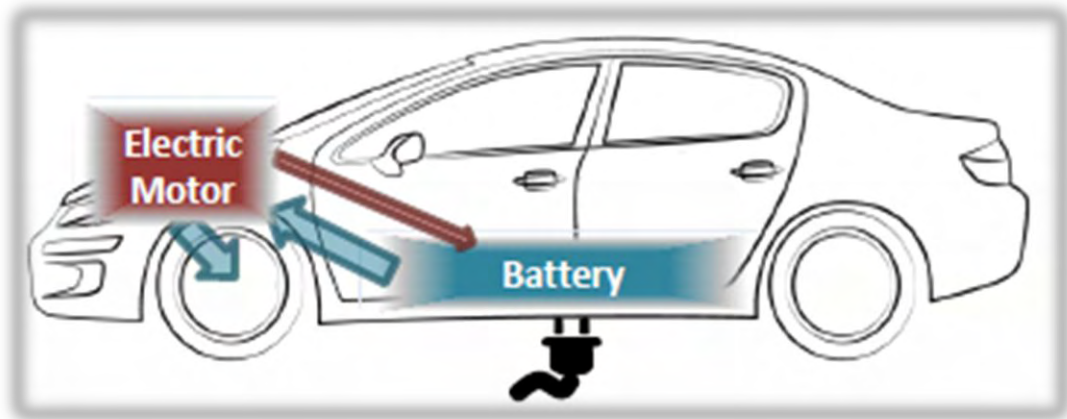
και έγινε το πρώτο υβριδικό ηλεκτρικό όχημα HEV μαζικής παραγωγής παγκοσμίως με επιδόσεις ίδιες με τα συμβατικά αυτοκίνητα της εποχής του. Για να γίνει το Prius πραγματικότητα, η Toyota χρησιμοποίησε μια μπαταρία νικελίου υδριδίου μετάλλων (Ni-MH), η τεχνολογία της οποίας υποστηρίχθηκε από το τμήμα ενέργειας των Η.Π.Α. Αυτό το μοντέλο έφερε την επανάσταση και ανακυρήχθηκε σε πρωτοπόρο αυτοκίνητο του 21^{ου} αιώνα. Σε χαμηλές και μεσαίες ταχύτητες μπορούσε να κινηθεί αποκλειστικά με ηλεκτρική ενέργεια και καθώς η ανάγκη για ισχύ αυξανόταν χρησιμοποιούνταν η δύναμη του κινητήρα της βενζίνης. Το 2012 η εταιρία κυκλοφόρησε την επόμενη γενιά, το Toyota Prius Plug-in Hybrid [2].

Το καθοριστικό όμως γεγονός που συνέβαλε στην αναμόρφωση των ηλεκτρικών οχημάτων, ήταν η ανακοίνωση το 2006 από μια εταιρία κατασκευής ηλεκτρικών αυτοκινήτων την Tesla Motors, ότι θα ξεκινήσει να παράγει ένα πολυτελές αμιγώς ηλεκτρικό spor αυτοκίνητο το Roadster. Το Tesla Roadster ήταν το πρώτο αμιγώς ηλεκτρικό αυτοκίνητο με μπαταρία ιόντων λιθίου (Li-ion), που θα μπορούσε να διανύσει 244 μίλια με μία μόνο φόρτιση. Η καινοτομία της Tesla ήταν ότι κυκλοφόρησε την ιδέα του πρώτου BEV (Battery Electric Vehicle) με μεγάλη αυτονομία [27].

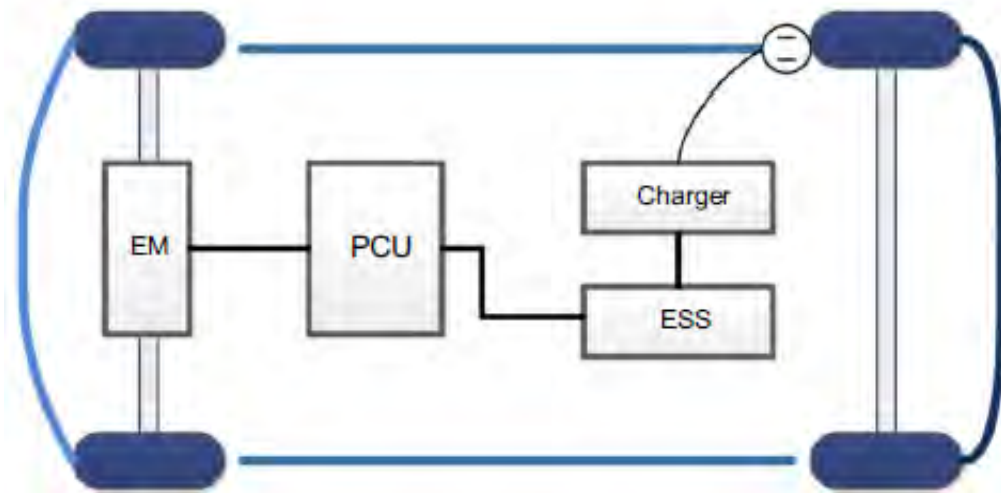
2.3.1. Τα αμιγώς ηλεκτρικά αυτοκίνητα (BEV):

Τα σχήματα 2.2 και 2.3 δείχνουν τα βασικά μέρη τα οποία αποτελούν ένα BEV. Αυτά είναι:

- Το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας (ESS – Energy Storage System):
Στα BEV το ESS είναι αποκλειστικά μια μεγάλη σε διαστάσεις μπαταρία (σχήμα 2.2) σε συνδυασμό με ένα σύστημα διαχείρισης ενέργειας BMS (Battery Management System).
- Ο ηλεκτροκινητήρας (EM – Electric Motor):
Αυτός που κινεί το όχημα. Υπάρχουν διάφορα είδη τριφασικού ACκινητήρα.
- Η Μονάδα Ελέγχου Ισχύος (PCU – Power Control Unit):
Αποτελείται από DC/DC Converters και έναν DC/AC Inverter.
- Το σύστημα φόρτισης (Charger):
Είναι το σύστημα που αναλαμβάνει εξολοκλήρου τη φόρτιση της μπαταρίας.



Σχήμα 2.2 –BEV [28]

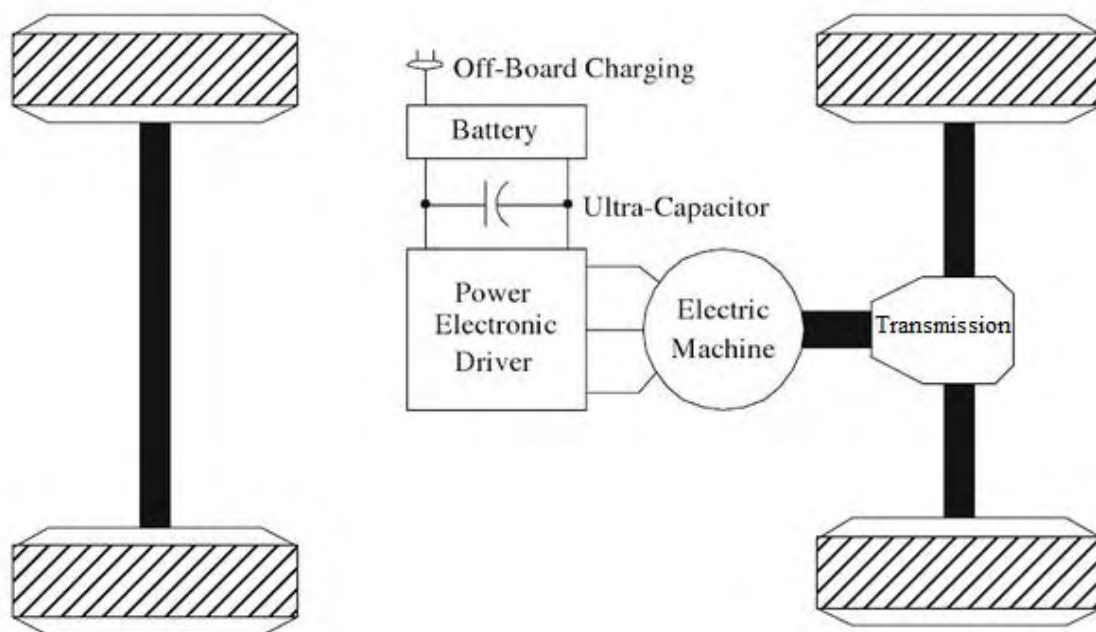


Σχήμα 2.3 - Η αρχιτεκτονική ενός BEV [26]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Η ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΤΗΣ TESLA MOTORS

Στην σημερινή εποχή και στο προσεχές μέλλον, τα οχήματα εσωτερικής καύσης (ICE Vehicles) ολοένα και χάνουν έδαφος. Οι δύο νέοι τύποι τεχνολογιών ηλεκτροκίνησης που έχουν φέρει την επανάσταση και καινοτομούν είναι τα BEV και τα FCEV. Και οι δύο τύποι μοιράζονται κάποια κοινά χαρακτηριστικά, όπως μηδενικές εκπομπές ρύπων, αθόρυβη λειτουργία, ηλεκτρικό σύστημα μετάδοσης της κίνησης, ομαλή επιτάχυνση και υψηλή ροπή. Αυτό όμως που ξεχώρισε τα BEV από τα FCEV και έκανε την Tesla Motors να πρωτοστατήσει ήταν ότι τα αμιγώς ηλεκτρικά αυτοκίνητα της εταιρίας, δεν υστερούσαν σε τίποτα σε σχέση με τα είδη εξελιγμένα οχήματα εσωτερικής καύσης της εποχής. Στόχος μάλιστα της εταιρίας ήταν να κάνει τα BEV μοντέλα της ακόμη καλύτερα από τα υπάρχοντα αυτοκίνητα εσωτερικής καύσης [29].



Σχήμα 3.1 – Η τοπολογία ενός BEV της Tesla [30]

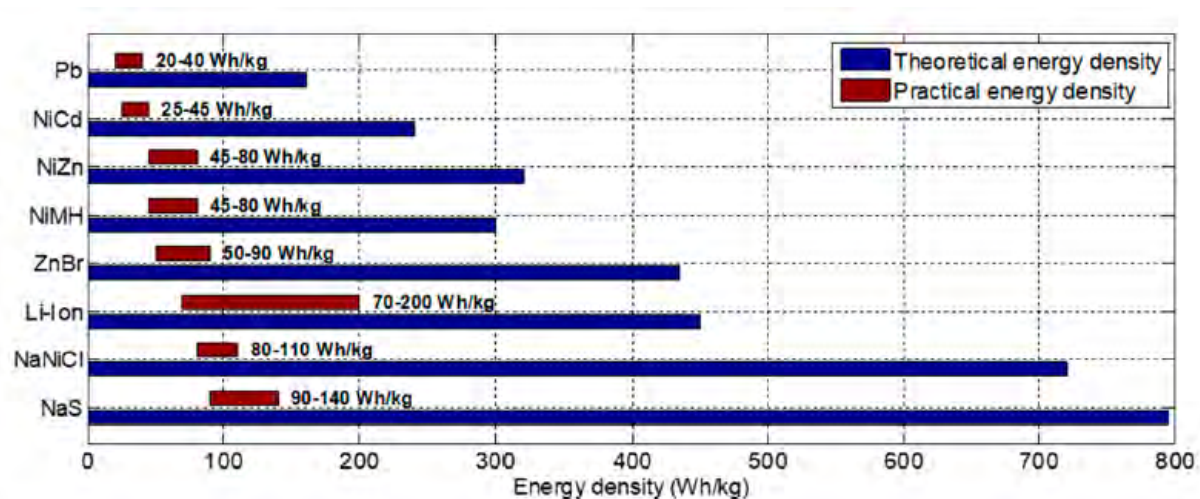
Στο σχήμα 3.1 παρουσιάζεται η τοπολογία ενός αμιγώς ηλεκτρικού αυτοκινήτου της εταιρίας. Απαρτίζεται από τη μπαταρία, τον οδηγό ηλεκτρονικών ισχύος (Power Electronic Driver) και τέλος τον ηλεκτροκινητήρα. Ο υπερ-πυκνωτής αυτός παρέχει την απαραίτητη υψηλή πυκνότητα ισχύος για το κύκλωμα, ενώ η μπαταρία παρέχει την υψηλή πυκνότητα ενέργειας. Τόσο ο υπερ-πυκνωτής όσο και η μπαταρία, δίνουν ενέργεια στον κινητήρα και

στον αντιστροφέα (inverter, θα επεξηγηθεί παρακάτω) κατά την επιτάχυνση, ενώ από την άλλη γεμίζουν με ενέργεια κατά τη διαδικασία του φρεναρίσματος. Η μεγάλης τάσης μπαταρία είναι υπεύθυνη όχι μόνο για την τροφοδοσία του AC ηλεκτροκινητήρα, αλλά και για τροφοδότηση μεγάλων φορτίων όπως είναι ο κλιματισμός του αμαξιού, καθώς και του δικτύου χαμηλής τάσης [31]. Για αυτήν την κατανομή ενέργειας, υπεύθυνο είναι το σύστημα διαχείρισης ενέργειας. Τα κύρια συστατικά ενός BEV είναι:

1. Ο κινητήρας (Electric Machine).
2. Η μπαταρία (Battery).
3. Τα ηλεκτρονικά (Inverter, DC/DC converter AC/DC converter, ή γενικά converters).
4. Το σύστημα διαχείρισης ενέργειας (Energy Management System), ένα σύστημα που διαχειρίζεται τη ροή της συνολικής, από διάφορες πηγές, ενέργειας στο σύστημα [28].

3.1 Οι μπαταρίες

Τα ηλεκτρικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας αποτελούν στοιχείο κλειδί για την επιτυχία της ηλεκτροκίνησης. Η τεχνολογική εξέλιξη των μπαταριών ιόντων λιθίου (Li-ion) ήταν πολύ ωφέλιμη για αυτήν αλλά η πρόοδος δεν ήταν τόσο γρήγορη όσο αναμενόταν. Η ισχύς, η ενέργεια, η διάρκεια ζωής και το κόστος των μπαταριών ιόντων λιθίου είναι σημαντικοί παράμετροι για τον καθορισμό της λειτουργικότητας των ηλεκτρονικών αμαξιών. Η διαχείριση της θερμοκρασίας των μπαταριών αυτών αποτελεί πρόκληση εξαιτίας της λειτουργίας τέτοιων συστημάτων, σε ψηλές και χαμηλές θερμοκρασίες που επιταχύνει τη γήρανση καθώς και την απόδοση [32][33]. Όμως η ανάπτυξη πιο προηγμένων χημικά τεχνολογιών, όπως λιθίου-θείου (lithium-sulfur) και μετάλλου-αέρα (metal-air), επισκίασαν ως ένα βαθμό τις μπαταρίες ιόντων λιθίου. Παρόλα αυτά η μετουσίωση των ενώσεων αυτών από το πειραματικό στάδιο, σε μπαταρίες πραγματικού μεγέθους (ESS) παίρνει πολύ χρόνο, ίσως περισσότερο και από δέκα χρόνια [34][35]. Η παρακάτω γραφική παράσταση (σχήμα 3.2) παρουσιάζει τις μετρήσεις σε θεωρητικό και πρακτικό επίπεδο αναφορικά με την πυκνότητα ενέργειας για τους διαφορετικούς τύπους μπαταριών. Οι ιόντων λιθίου έχουν την υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα στην πράξη σε σχέση με τις υπόλοιπες. Η θεωρητική ενεργειακή πυκνότητα αναφέρεται σε αναλυτικούς υπολογισμούς βασισμένους στα χαρακτηριστικά των υλικών και συνυπολογίζεται βάση της μέγιστης δυνατότητας της εκάστοτε χημείας. Από την άλλη όμως η πρακτική ενεργειακή πυκνότητα αναφέρεται σε πραγματικές μετρήσεις ενέργειας



Σχήμα 3.2 – Θεωρητική και πρακτική ενεργειακή πυκνότητα [36]

που δίνουν τα ολοκληρωμένα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας. Παρόλο που οι μπαταρίες είναι στο επίκεντρο, οι υπερ-πυκνωτές (ultra-capacitors) είναι ικανοί να τις πλησιάσουν σε επίπεδο χρησιμότητας και ευκολίας εφαρμογής [37]. Ωστόσο εξαιτίας της χαμηλής ενεργειακής πυκνότητας ενός υπερ-πυκνωτή, αυτό τους καθιστά κατάλληλους για χρήση βραχυπρόθεσμων εφαρμογών υψηλής ισχύος. Ο συνδυασμός υπερ-πυκνωτών με τις μπαταρίες, όπως στα FCHEV [26], είναι μια πολύ καλή προσέγγιση αλλά πολύ δύσκολη να φέρει τα επιθυμητά αποτελέσματα καθώς τα συστήματα αυτά γίνονται πολύ πολύπλοκα (σε επίπεδο ελέγχου κ.α) [38].

3.1.1. Οι χημείες των μπαταριών Li-ion

Όπως προαναφέρθηκε το λίθιο είναι το πιο ελπιδοφόρο μέταλλο, σε σχέση με τα υπόλοιπα, για την κατασκευή της χημείας των μπαταριών. Εκτός του γεγονότος ότι είναι ευρέως διαθέσιμο και μη τοξικό, είναι πολύ ελαφρύ και εξαιρετικά αγωγίμο. Αυτό το βασικό πλεονέκτημα έναντι των άλλων χημικών ενώσεων, επιτρέπουν στις μπαταρίες με βάση το λίθιο, να αποθηκεύουν μεγάλα ποσά ενέργειας. Παρόλα αυτά το λίθιο είναι ιδιαίτερα αντιδραστικό, οπότε αποτελεί πρόκληση η κατασκευή ασφαλή κελιών βάσει του στοιχείου αυτού. Η αντιμετώπιση της προϋποθέτει τη μη χρήση του μετάλλου λιθίου, αλλά ενώσεων που είναι ικανές να δώσουν ιόντα του (Li^+). Τα ιόντα αυτά μεταφέρονται μεταξύ δύο ηλεκτροδίων σε μία αναστρέψιμη χημική αντίδραση.

Τα τέσσερα κύρια στοιχεία μίας μπαταρίας Li-ion είναι η κάθοδος, η άνοδος, ο ηλεκτρολύτης και ο διαχωριστής. Κατά τη διάρκεια της φόρτισης, τα ιόντα λιθίου μετακινούνται από τη κάθοδο, μέσω του ηλεκτρολύτη στην άνοδο και ακολουθούν την αντίστροφη διαδρομή κατά την εκφόρτιση. Οι σημερινές μπαταρίες που υπάρχουν στην

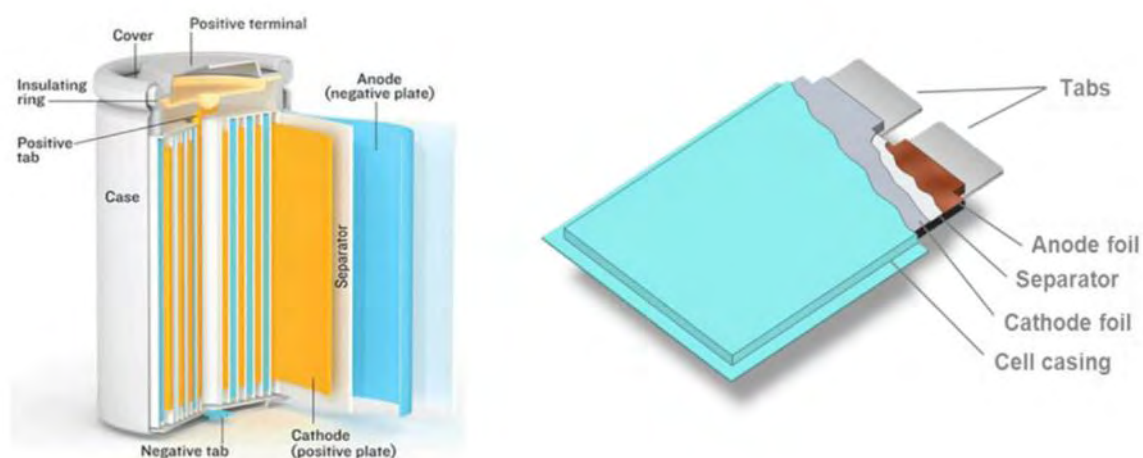
αγορά, έχουν δανειστεί το όνομά τους «ιόντων λιθίου», λόγω της συνεισφοράς του ιόντος στη διαδικασία που προαναφέρθηκε. Μερικές από τις ενώσεις (μέταλλα οξειδίου λιθίου) που χρησιμοποιούνται για να δώσουν το ιόν του λιθίου είναι : οξείδιο κοβαλτίου λιθίου (LCO ή Lithium Cobalt Oxide), οξείδιο μαγγανίου λιθίου (LMO ή Lithium Manganese Oxide), φωσφορικό σίδηρο λιθίου (LFP ή Lithium Iron Phosphate), οξείδιο αργιλίου κοβαλτίου νικελίου λιθίου (NCA ή Lithium Nickel Cobalt Aluminum Oxide) και οξείδιο του κοβαλτίου νικελίου μαγγανίου λιθίου (NMC ή Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide). Οι ποικιλίες των παραπάνω οδηγούν σε σημαντικές διαφορές στα χαρακτηριστικά μιας μπαταρίας [39]. Οι προαναφερθείσες ενώσεις παρουσιάζουν πολύ μεγαλύτερη σύνθετη αντίσταση (εμπέδηση) σε σύγκριση με το μέταλλο λιθίου, λόγω χαμηλότερης αγωγιμότητας και συντελεστή διάχυσης. Αυτός ο περιορισμός ξεπερνιέται με την ανάμειξη «σκόνης» ένωσης λιθίου με ένα αγωγίμο υλικό άνθρακα. Πιο αναλυτικά, ένας διαλύτης και ένα συνδετικό υλικό χρησιμοποιούνται για να διαμορφώσουν την κάθοδο, η οποία είναι προσκολλημένη σε ένα λεπτό φύλλο αλουμινίου. Το υλικό της ανόδου είναι ο γραφίτης αν και μερικοί κατασκευαστές μπαταριών χρησιμοποιούν ανόδους χωρίς γραφίτη όπως τιτανικό λίθιο (LTO ή Lithium Titanate) [40]. Η διαδικασία κατασκευής της ανόδου είναι πολύ παρόμοια με αυτή της καθόδου, όμως στη περίπτωση της πρώτης το κράμα προσκολλάται σε φύλλο χαλκού. Το φύλλο αλουμινίου της καθόδου και το φύλλο χαλκού της ανόδου καταλήγουν στα άκρα του κελιού μπαταρίας.

Ο ηλεκτρολύτης είναι ένα μίγμα άλατος λιθίου και οργανικών διαλυτών. Τα κοινά άλατα λιθίου περιλαμβάνουν εξαφθοροφωσφορικό λίθιο (LiPF₆), υπερχλωρικό λίθιο (LiClO₄) και εξαφθοροβενζυλικό λίθιο (LiAsF₆). Ο οργανικός διαλύτης είναι ζωτικής σημασίας για την αύξηση της κινητικότητας των ιόντων λιθίου και επομένως ένας παράγοντας κλειδί για την απόδοση της μπαταρίας. Οι πιο κοινοί οργανικοί διαλύτες περιέχουν αιθυλικό-μεθύλιο-άνθρακα, διμέθυλο-άνθρακα, διαίθυλο-άνθρακα, προπυλένιο-άνθρακα και αιθυλένιο-άνθρακα. Ειδικά όταν ένα κελί κατασκευάζεται αλλά δεν είναι τόσο ανθεκτικό, όπως στην περίπτωση των μπαταριών πολυμερούς-ιόντων-λιθίου, όπου προστίθεται ένα gel ηλεκτρολύτη στον ήδη υπάρχον ηλεκτρολύτη, για την αποφυγή διαρροής.

Ο διαχωριστής είναι ένα στοιχείο ασφαλείας μεταξύ της ανόδου και της καθόδου, αποτρέποντας το να έρθουν σε άμεση επαφή. Για παράδειγμα σε περίπτωση βραχυκύκλωσης της μπαταρίας τα ιόντα θα μπορούσαν να διαπεράσουν μαζικά το διαχωριστή. Τα πιο κοινά υλικά ενός διαχωριστή είναι πολυαιθυλένιο και πολυπροπυλένιο. Στην περίπτωση όπου το κελί θερμοανθεκτικό υπερβολικά, το οποίο είναι σημάδι θερμικής διαφυγής, αυτά τα υλικά λιώνουν και κλείνουν τις μικρο-πορώδεις ιδιότητες του διαχωριστή

και εμποδίζουν έτσι τη ροή των ιόντων. Η συμπεριφορά αυτή καταστρέφει ανεπανόρθωτα το κελί αλλά αποφεύγει μεγάλες αρνητικές συνέπειες. Επιπλέον τα κελιά ιόντων λιθίου περιλαμβάνουν περαιτέρω λειτουργίες ασφαλείας και στοιχεία όπως: συστατικά που δυναμώνουν το μηχανική λειτουργία του κελιού, μονωτές στις άκρες των ηλεκτροδίων όπου συμβαίνουν τα περισσότερα βραχυκυκλώματα και αεραγωγούς που εκτονώνουν την πίεση [41].

Υπάρχουν δύο είδη κελιών αυτών των μπαταριών, ο κυλινδρικός σχηματισμός και ο σχηματισμός στοιβάς, όπως φαίνονται στο παρακάτω σχήμα 3.3. Στη διαμόρφωση του



Σχήμα 3.3 – Διαμόρφωση μπαταριών Li-ion [42]

σχηματισμού στοιβάς, η κάθοδος η άνοδος και ο διαχωριστής περικλείονται σε μία πολυστρωματική μεμβράνη (cell casing). Στην κυλινδρική διαμόρφωση τα στρώματα τυλίγονται και σφραγίζονται μέσα σε ένα μεταλλικό κουτί. Και οι δύο διαμορφώσεις χρησιμοποιούνται για τη παραγωγή διαφορετικού μεγέθους κελιών. Παρόλα αυτά κάποια μεγέθη είναι τα πιο κοινά στην αγορά. Όσον αφορά τη κυλινδρική διαμόρφωση, το κελί τύπου 18650 (18 χιλιοστά διάμετρο και 65 χιλιοστά ύψος) χρησιμοποιείται ευρέως [42].

Για τη υπεύθυνη και ασφαλή χρήση των κελιών ιόντων λιθίου, απαιτείται ένα σύστημα διαχείρισης της μπαταρίας (BMS ή Battery Management System), για την παρακολούθηση και διαχείριση βασικών λειτουργικοτήτων και επιδόσεων, όπως για παράδειγμα η τάση, το ρεύμα, η κατάσταση φόρτισης (SOC ή State Of Charge), η κατάσταση υγείας (SOH ή State Of Health) καθώς και η θερμοκρασία. Ένα BMS είναι εξολοκλήρου κατασκευασμένο από σετ τρανζίστορ (transistor) [43][44].

3.1.2. Η βιομηχανία των μπαταριών Li-ion

Το σχήμα 3.4 δείχνει τη διαδικασία παραγωγής της μπαταρίας ιόντων λιθίου, από τις πρώτες ύλες μέχρι τις τελικές εφαρμογές. Αυτή η παραγωγική αλυσίδα δείχνει ότι το πεδίο κατασκευής μιας τέτοιας μπαταρίας απασχολεί ένα μεγάλο αριθμό βιομηχανιών συμπεριλαμβανομένης της βιομηχανία εξόρυξης προκειμένου να αποκτηθούν οι πρώτες ύλες, της βιομηχανίας ανόργανης χημείας για την απόκτηση των ενεργών υλικών καθόδου με την απαιτούμενη καθαρότητα, της βιομηχανίας οργανικής χημείας που είναι υπεύθυνη για την κατασκευή του ηλεκτρολύτη, της βιομηχανίας της πολυμερούς χημείας αρμόδια



Σχήμα 3.4 – Γραμμή παραγωγής [41]

για τη κατασκευή του διαχωριστή και του συνδετικού υλικού, της βιομηχανίας μετάλλου για το περίβλημα της μπαταρίας καθώς και για τα λεπτά φύλλα ηλεκτροδίων και τέλος της βιομηχανίας ηλεκτρονικών για την υλοποίηση του συστήματος διαχείρισης της μπαταρίας. Η διαφοροποίηση της Tesla έναντι των άλλων κατασκευαστών ηλεκτρικών μπαταριών έγκειται στο γεγονός ότι παράγει μπαταρίες βασισμένες στη δικιά της γραμμή παραγωγής. Η εταιρία χρησιμοποιεί τις πρώτες ύλες που χρησιμοποιούν όλοι, αλλά παράγει μονή της τα συστατικά των κελιών και τεχνικές σχεδίασης μπαταριών με στόχο να εξοπλίσει τα ηλεκτρικά της οχήματα.

Οι κυρίαρχες εταιρίες στην πρώτη και δεύτερη βαθμίδα σε παγκόσμιο επίπεδο είναι συγκεντρωμένες σε λίγες χώρες: στην Ιαπωνία (Panasonic, Sony), στην Κορέα (Samsung, LG), στην Κίνα (ATL) και τέλος στις Η.Π.Α. (Tesla, Johnson Controls, A123 Systems). Μέχρι πρόσφατα η Ανατολική Ασία είχε μακράν ηγετικό ρόλο στη παραγωγή της πρώτης και δεύτερης βαθμίδας, αλλά μια σημαντική αλλαγή επέφερε το εργοστάσιο Gigafactory της Tesla στη Nevada. Η Tesla αναμένεται να παράγει γύρω στο 30% της παγκόσμιας παραγωγής μπαταριών ιόντων λιθίου το 2020. Οι περισσότεροι κατασκευαστές που προαναφέρθηκαν δεν είναι εντελώς αφοσιωμένοι στην κατασκευή τέτοιων μπαταριών όπως η Tesla[45][46][47][48][49][50].

3.1.3. Οι ιδιότητες των μπαταριών Li-ion

Τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά μιας μπαταρίας είναι η «ειδική» ενέργεια, η ισχύς, η ανθεκτικότητα και η ασφάλεια. Ως «ειδική» ενέργεια καλείται η ενέργεια ανα μονάδα βάρους. Η «ειδική» ενέργεια μιας μπαταρίας ιόντων λιθίου εξαρτάται από τον τύπο της καθόδου που χρησιμοποιεί και από τα υλικά που απαρτίζουν την άνοδο, καθώς και από τις nano και micro δομές αυτών. Τα ενεργά υλικά του κελιού επηρεάζουν σε ένα μικρό ποσοστό το συνολικό βάρος του, όπως επίσης και ο σχεδιασμός του. Οι σημερινές μπαταρίες Li-ion καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα «ειδικής» ενέργειας από 90 έως 250 Wh/kg (watt hour per kilogram). Οι NCA μπαταρίες έχουν καλύτερη ενεργειακή απόδοση έναντι των LFP μπαταριών. Η «ειδική» ενέργεια είναι ένα από τα κύρια κριτήρια ανάπτυξης των μπαταριών αυτών. Από την άλλη πλευρά, η μέγιστη ισχύς που μπορεί μια τέτοια μπαταρία να εφοδιάσει εξαρτάται από την τάση της, την πυκνότητα ιόντων λιθίου, την στερεά ενδιάμεση κατάσταση ηλεκτρολυτών (SEI ή Solid Electrolyte Interphase), τον συντελεστή εμπέδησης των ηλεκτροδίων και την αγωγιμότητα αυτών. Οι απαιτήσεις σε ισχύ, εξαρτώνται από την εκάστοτε εφαρμογή και είναι καθοριστικές για την επιλογή της μπαταρίας.

Επόμενη σημαντική ιδιότητα μιας μπαταρίας είναι η ανθεκτικότητάς της. Η γήρανση της μπαταρίας συμβαίνει σε όλες τις συνθήκες και ανάλογα με τη χρήση της κάθε φορά. Σε σκληρά περιβάλλοντα λειτουργίας της, όπως σε χαμηλές ή υψηλές θερμοκρασίες, η υπερφόρτιση, η σε μεγάλο βαθμό εκφόρτιση καθώς και η φόρτιση σε πολύ υψηλά επίπεδα, μειώνουν τη διάρκεια ζωής της. Ως εκ τούτου οι μπαταρίες μπορούν να υποστούν δύο είδη γήρανσης, την χρονολογική γήρανση και τη γήρανση μέσω χρήσης. Σχετικά με την χρονολογική γήρανση αυτή εμφανίζεται ακόμη και αν η μπαταρία είναι σε αχρησία και οφείλεται κυρίως στις συνθήκες του περιβάλλοντος. Όσον αφορά τη γήρανση μέσω της χρήσης, αυτή προκαλείται από το συνδυασμό ακραίων καταστάσεων φόρτισης και εκφόρτισης με την χρονολογική γήρανση. Πρακτικά η γήρανση προκαλείται εξαιτίας της απώλειας του λιθίου και των ενεργών υλικών των ηλεκτροδίων και ως εκ τούτου παρατηρείται μείωση της χωρητικότητας και απώλεια ισχύος. Η απώλεια των δύο παραπάνω οφείλεται σε παράγοντες όπως η διάλυση, η δομική καταστροφή και η απομόνωση των σωματιδίων [51]. Από την πλευρά του πελάτη το πιο σημαντικό για αυτόν είναι το πόση ενέργεια μπορεί να τον τροφοδοτήσει, προτού η απόδοση της πέσει στο 80% της αρχικής. Αυτό προφανώς εξαρτάται από τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής. Η λεπτομερής κατανόηση των μηχανισμών γήρανσης στη χημεία των μπαταριών ανοίγει το δρόμο για το σχεδιασμό νέων εξελιγμένων μπαταριών με μεγαλύτερη διάρκεια ζωής.

Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου παρουσιάζουν μια τεχνολογική πρόκληση όταν πρόκειται για την ασφάλεια επειδή εμπεριέχουν λίθιο, οξυγόνο και έναν εύφλεκτο ηλεκτρολύτη. Έτσι αυτές έχουν βρει ήδη χρήση σε ευαίσθητες εφαρμογές, όπως είναι οι μεταφορές, οδικές και αεροπορικές. Ζητήματα ασφαλείας των μπαταριών αυτών διερευνούνται εκτενώς και η πρόκληση δεν είναι μόνο το πώς θα γίνουν αυτές ασφαλέστερες σε ένα εύρος εφαρμογών αλλά το πώς θα βελτιωθούν σε τομείς όπως ενέργεια και ισχύς, χωρίς να διακυβεύεται η ασφάλεια. Αν ένα κελί υπερθερμανθεί, είτε λόγω παρατεταμένης υπερφόρτισης είτε λόγω βραχυκυκλώματος, σε βαθμό αποσύνθεσης του οξειδίου του μετάλλου του, τότε η μπαταρία μπορεί να τυλιχτεί στις φλόγες λόγω αντίδρασης του οξυγόνου που απελευθερώνεται με το λίθιο [52][53][54]. Οι δικλείδες ασφαλείας στη λειτουργία της μπαταρίας, αφορούν τρία επίπεδα. Το πρώτο σχετίζεται με την επικινδυνότητα των χημικών ενώσεων της, το δεύτερο έχει να κάνει με το σχεδιασμό του κελιού-κελιών και το τρίτο αφορά τη σωστή διαχείριση μέσω του BMS. Ως προς το σχεδιασμό το κελιού, με τη σωστή επιλογή των δομικών στοιχείων και των λειτουργιών που ενσωματώνονται σε αυτό, μπορούν να αποφευχθούν βραχυκυκλώματα μεταξύ ανόδου-καθόδου, ανεξάρτητα από τη γήρανση ή κάποιο ατύχημα. Τέλος, το BMS μπορεί να είναι αποτελεσματικό σε περιπτώσεις αποφυγής υπερφόρτισης και βραχυκυκλωμάτων, μέσω ελέγχου της τάσης και του ρεύματος, παρέχοντας ασφαλείς συνθήκες λειτουργίας.

Το σχήμα 3.5 συνοψίζει τα κύρια χαρακτηριστικά των διαθέσιμων μπαταριών Li-ion στο εμπόριο [55][56]. Η LCO ήταν η πρώτη χημεία που διατέθηκε στο εμπόριο το 1991, η κάθοδός της είναι φτιαγμένη από οξείδιο κοβαλτίου λιθίου (LiCoO_2) και η άνοδος της από γραφίτη (C6). Η υψηλή «ειδική» ενέργεια 150 – 190 Wh/kg και η τεχνολογική ωριμότητα καθιστούν τις μπαταρίες LCO δημοφιλή επιλογή για κινητά ηλεκτρονικά. Η αντοχή της από 500 – 1000 πλήρους κύκλους το οποίο μεταφράζεται ημερολογιακά σε λίγα χρόνια ζωής, το οποίο είναι αποδεκτό για τέτοιου είδους ηλεκτρονικά. Κύριο μειονέκτημα της είναι η ασφάλεια, εξαιτίας της θερμικής αστάθειας του κοβαλτίου οξειδίου. Η θερμική διαφυγή μπορεί να συμβεί στους 150 C° [57].

Η LMO κυκλοφόρησε για πρώτη φορά στο εμπόριο το 1996. Η κάθοδος της αποτελείται από οξείδιο μαγγανίου λιθίου (LiMn_2O_4), αποτελούμενη από μία τρισδιάστατη δομή (spinel), το οποίο ευνοεί τη ροή του ιόντος στο ηλεκτρόδιο, με αποτέλεσμα τη χαμηλή εσωτερική αντίσταση. Επιπλέον η κάθοδος αποτελείται από γραφίτη. Έχει μεγαλύτερη διάρκεια ζωής από ότι η LCO, με το εύρος της να κυμαίνεται από 1000 – 1500 κύκλους αλλά διαθέτει χαμηλότερη πυκνότητα ενέργειας, με «ειδική» ενέργεια 100-140 Wh/kg. Εξαιτίας της υψηλής θερμικής σταθερότητας του οξειδίου του μαγγανίου, η μπαταρία LMO

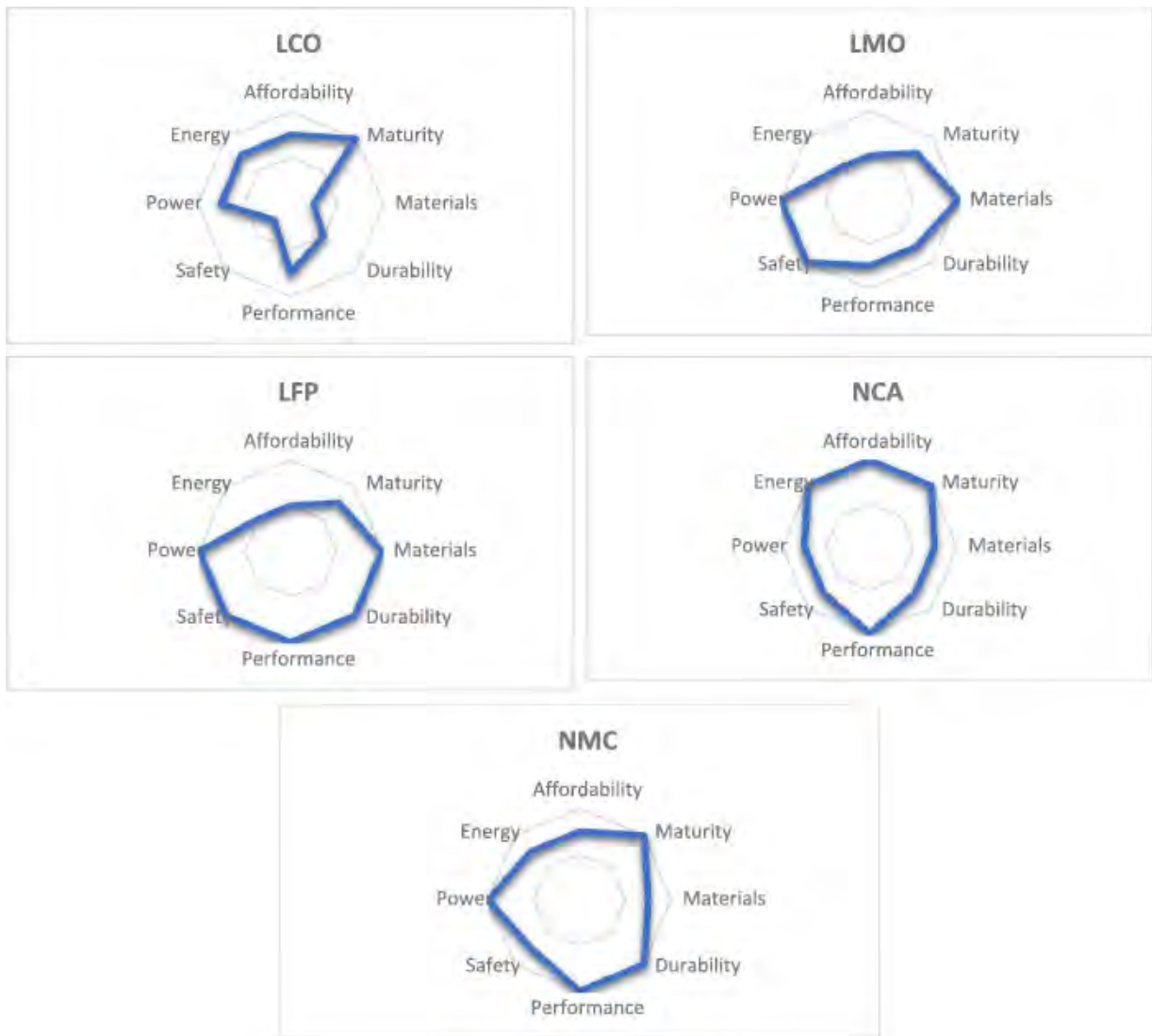
είναι ασφαλέστερη. Η θερμική διαφυγή συμβαίνει περίπου στους 250 C°. Επιπροσθέτως είναι αρκετά φιλική στο περιβάλλον αφού δε περιέχει κοβάλτιο.

Η χημεία LFP διαθέτει κάθοδο από φωσφορικό σίδηρο λιθίου (LiFePO₄), ενώ χρησιμοποιεί ως υλικό ανόδου το γραφίτη. Κυκλοφόρησε στην αγορά το 1999 και σύντομα θεωρήθηκε μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία λόγω της ανθεκτικότητας, της ασφάλειας και της εξάρτισής της από άφθονα υλικά, φιλικά προς το περιβάλλον. Οι μπαταρίες αυτές αντέχουν έως και 2000 πλήρεις κύκλους, ενώ οι προβλέψεις της βιομηχανίας για μεγαλύτερη διάρκεια ζωής είναι αρκετά ρεαλιστικές. Η χημεία LFP λειτουργεί σε ένα ευρύ φάσμα φόρτισης (SOC της τάξης 15 – 100%) και το κελί εμφανίζει σταθερή τάση σε αυτό το εύρος, το οποίο συνεπάγεται σταθερή απόδοση. Η «ειδική» της ενέργεια ανέρχεται στα 90 – 140 Wh/kg, σχετικά χαμηλή σε σύγκριση με τις άλλες χημείες. Αυτή η χημεία έχει τεράστια δυνατότητα για χρήση σε συστήματα τροφοδοσίας, συνδεδεμένη τόσο εκτός όσο και εντός δικτύου.

Η κάθοδος της χημείας NMC αποτελείται από οξείδιο του κοβαλτίου νικελίου μαγγανίου λιθίου (LiNiMnCoO₂) και η άνοδος της από γραφίτη. Έχει υψηλή «ειδική» πυκνότητα εύρους 140 – 200 Wh/kg με μεγάλη διάρκεια ζωής 1000 – 2000 κύκλους. Οι αναλογίες νικελίου μαγγανίου και κοβαλτίου ποικίλουν ώστε να επηρεάσουν τα χαρακτηριστικά της μπαταρίας, δίνοντας λύσεις ειδικά για συγκεκριμένες εφαρμογές [58]. Αυξάνοντας την ποσότητα του νικελίου, αυξάνεται και η «ειδική» ενέργεια, ενώ με την αύξηση της ποσότητας του μαγγανίου, αυξάνεται η ισχύς. Αν και κυκλοφόρησαν πρώτη φορά το 2004 κυριαρχούν στα ηλεκτρικά και υβριδικά αμάξια ενώ έχουν ευρεία χρήση σε κινητά ηλεκτρονικά, ηλεκτρικά εργαλεία και ιατρικές συσκευές.

Τέλος, η χημεία NCA παρουσιάστηκε το 1999, με την κάθοδο της κατασκευασμένη από οξείδιο αργιλίου κοβαλτίου νικελίου λιθίου (LiNiCoAlO₂) και την άνοδο της από γραφίτη. Τυπικά οι κάθοδοι της χημείας αυτής, χρησιμοποιούν ένα μίγμα 80% νικελίου, 15% κοβαλτίου και 5% αλουμίνιο. Σε σύγκριση με την χημεία LCO, η εξάρτιση της από το κοβάλτιο είναι μικρότερη. Οι μπαταρίες NCA έχουν εξαιρετικά μεγάλη «ειδική» ενέργεια, πιο μεγάλη από τις NMC, της τάξης των 200 – 250 Wh/kg, διαθέτουν υψηλή ισχύ και μπορούν να αντέξουν 1000 – 1500 πλήρεις κύκλους. Το πιο σημαντικό είναι ότι αυτή η τεχνολογία χρησιμοποιείται από την Tesla στα ηλεκτρικά της αυτοκίνητα. Η Tesla φιλοδοξεί να κυριαρχήσει στην αγορά παράγοντας μαζικά τέτοιες μπαταρίες σε συνεργασία με την Panasonic, φτάνοντας την ετήσια παραγωγή στις 35 GWh (Giga watt hours), ικανά να τροφοδοτήσουν 500.000 ηλεκτρικά αυτοκίνητα το 2020. Η εταιρία δουλεύει συνεχώς πάνω στη βελτίωση της τεχνολογίας αυτής και σε συνδυασμό με την μαζική παραγωγή, θα πετύχει

πτώση στη τιμή της μπαταρίας και σαν επακόλουθο στην συνολική τιμή του ηλεκτρικού αυτοκινήτου [58].



Σχήμα 3.5 – Τα κύρια χαρακτηριστικά των μπαταριών Li-ion [55][56][60]

3.1.4. Άλλες τεχνολογίες μπαταριών στην ηλεκτροκίνηση

Το 1990 το πρόγραμμα California Zero Emission Vehicle (ZEV) υπέδειξε ότι τα αυτοκίνητα τα οποία θα πωλούνταν το 1998 και το 2003 θα έπρεπε να έχουν εκπομπή ρύπων 2 και 10% αντίστοιχα. Για την επίτευξη αυτού του στόχου, προτάθηκαν ποικίλες τεχνολογίες μπαταριών ως πηγή ενέργειας για τα ηλεκτρικά οχήματα. Οι χημείες αυτών των τεχνολογιών περιελάμβαν τις μπαταρίες μολύβδου οξέως (lead-acid), τις νικελίου καδμίου (nickel-cadmium), τις νικελίου μετάλλου υδριδίου (nickel-metal-hydrid), τις χλωριούχου νικελίου νατρίου (sodium-nickel-chloride) και έπειτα τις ιόντων λιθίου, με την κάθε τεχνολογία να έχει τα δικά της πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Στο τέλος του προηγούμενου αιώνα ο

ανταγωνισμός των παραπάνω τεχνολογιών σταμάτησε όταν η General Motors επέλεξε τη τεχνολογία νικελίου μετάλλου υδριδίου (NiMH) για να εξοπλίσει το ηλεκτρικό της όχημα EV-1. Στη συνέχεια, στις αρχές του 21^{ου} αιώνα εταιρίες όπως η Toyota και η Honda χρησιμοποίησαν και αυτές για τα υβριδικά (HEV) τους οχήματα την ίδια τεχνολογία (NiMH). Εώς το 2011 η τεχνολογία που κυριαρχεί σε όλα τα υβριδικά οχήματα παραμένει η NiMH. Έπειτα το φαινόμενο του θερμοκηπίου σε συνδυασμό με την προοπτική της μείωσης των ορυκτών πόρων τα επόμενα χρόνια, ανάγκασαν τους κατασκευαστές να στραφούν στην κατασκευή Plug-In υβριδικών (PHEV), με απώτερο σκοπό την κατασκευή και ανάπτυξη των αμιγώς ηλεκτρικών αυτοκινήτων (BEV). Οι απαιτήσεις για μεγαλύτερη ενεργειακή πυκνότητα επανέφεραν τις μπαταρίες ιόντων λιθίου στο προσκήνιο [61].

- Μολύβδου οξέως (pb-acid): Οι μπαταρίες μολύβδου οξέως όσον αφορά το κόστος κατασκευής τους είναι με διαφορά οι φθηνότερες. Εξαιτίας της χαμηλής ενεργειακής πυκνότητας που διαθέτουν, επιλέγονται για εφαρμογές στην ηλεκτροκίνηση όπου η κάλυψη μεγάλων αποστάσεων και το βάρος είναι μικρότερης σημασίας έναντι του κόστους. Χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις micro-hybrid ή ηλεκτρικά scooter. Το βασικό τους μειονέκτημα έγκειται στο γεγονός ότι δεν έχουν περιθώρια βελτίωσης, καθώς κάτι τέτοιο θα αύξανε το κόστος κατασκευής τους. Άλλα μειονεκτήματα τους είναι η περιορισμένη διάρκεια ζωής καθώς και η περιορισμένη δυναμική αποδοχή φόρτισης τους κατά τη χρήση (Dynamic Charge Acceptance ή DCA), όπως για παράδειγμα η δυναμική φόρτιση μέσω του συστήματος πέδησης. Διάφορες εξελίξεις που έγιναν τα τελευταία χρόνια επέτρεψαν τη χρήση τους και σε mild-hybrid και full-hybrid οχήματα. Οι μπαταρίες μολύβδου οξέως είναι διαθέσιμες με υγρό ηλεκτρολύτη ή με έναν ηλεκτρολύτη απορροφημένο σε ίνες γυαλιού διατεταγμένες σε επίπεδο σχήμα. Για το σύστημα start-stop, ο άνθρακας προστίθεται στο αρνητικά ενεργό υλικό ούτως ώστε να αυξήσει τη DCA.

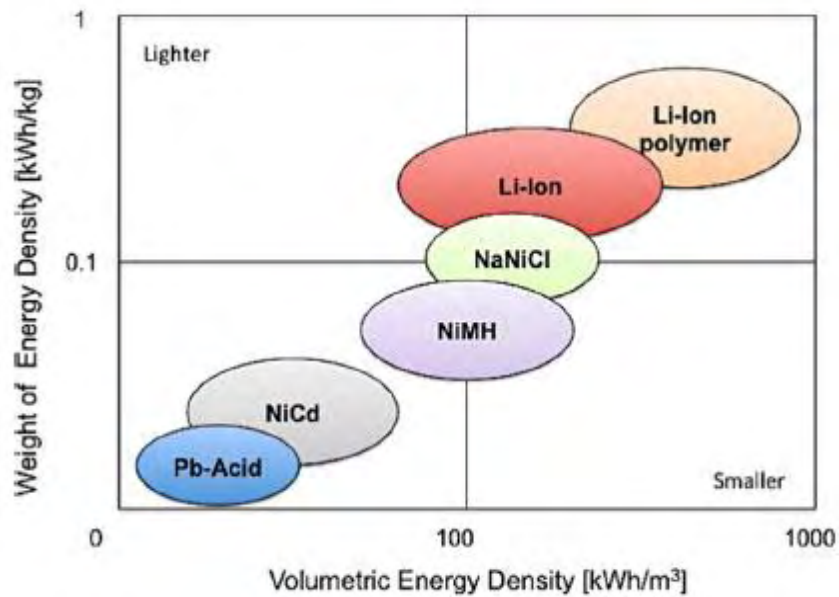
Στα πλεονεκτήματα τους συγκαταλέγονται το χαμηλό κόστος κατασκευής, η εσωτερική ασφάλεια και τα υψηλά ποσοστά ανακυκλωσιμότητας (με τιμή ανω του 95% υψηλότερη από όλες τις άλλες τεχνολογίες μπαταριών). Πάρα το μεγάλο βάρος τους τέτοιου ίδους μπαταρίες αποτελούν υποσχόμενη επιλογή για μελλοντική ανάπτυξη. Μικρά μεγέθη των μπαταριών μολύβδου οξέως χρησιμοποιούνται ευρέως σαν βοηθητικές, σε κάθε ηλεκτροκίνητο όχημα που διαθέτει μπαταρία υψηλής τάσης. Ο βασικότερος λόγος είναι αυτός της ασφάλειας, αφού σε περίπτωση ατυχήματος η αρχική μπαταρία αποσυνδέεται από το ηλεκτρικό σύστημα και τη

θέση της παίρνει η βοηθητική. Τέλος είναι υπεύθυνη για την τροφοδοσία λειτουργιών SLI (Starting Lighting Ignition) [62].

- Νικελίου καδμίου (NiCd): Οι μπαταρίες νικελίου καδμίου παρουσιάζουν ελαφρώς μεγαλύτερη ενεργειακή πυκνότητα σε σχέση τις μπαταρίες μολύβδου οξέως και σημαντικά υψηλότερη πυκνότητα ισχύος, με το κόστος όμως να αυξάνεται σε μεγάλο βαθμό. Οι απαιτήσεις ως προς την ασφάλεια πληρούνται αλλά από οικολογικής άποψης είναι πολύ επικίνδυνες λόγω της χρήσης του καδμίου. Από τεχνικής άποψης εξαιτίας της ωριμότητας τους περιορίζονται και αυτές όπως και οι μολύβδου οξέως σε βοηθητικό ρόλο. Ωστόσο οι μπαταρίες νικελίου καδμίου δεν αναμένεται να κυριαρχίσουν στην ηλεκτροκίνηση αν συνυπολογιστούν η ενεργειακή πυκνότητα και τα κόστη. Τέλος από όλες τις τεχνολογίες οι νικελίου καδμίου διαθέτουν το μεγαλύτερο μέσο όρο ζωής (1500 κύκλους) ενώ η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει οριοθετήσει τη χρήση τους (εξαιτίας της χρήσης του καδμίου) [63].
- Νικελίου μετάλλου υδριδίου (NiMH): Οι μπαταρίες αυτές αποτελούν μία περαιτέρω εξέλιξη των μπαταριών νικελίου καδμίου με στόχο να δημιουργήσουν μια μπαταρία χωρίς τη χρήση του τοξικού καδμίου αλλά διατηρώντας ταυτόχρονα τα πλεονεκτήματά τους. Οι NiMH μπορούν να εναλλαχθούν με τις NiCd αφού η τάση των κελιών τους καθώς και οι καμπύλες φόρτισης και εκφόρτισης είναι πανομοιότυπες. Διαθέτουν διπλάσια ενεργειακή πυκνότητα από ότι οι νικελίου καδμίου και ιδιαίτερα εξαιτίας της υψηλής πυκνότητας ισχύος (μεγαλύτερη από 1000W/kg) και της επαρκούς διάρκειας ζωής, τις καθιέρωσαν κυρίαρχες στην παγκόσμια αγορά των υβριδικών ηλεκτρικών αυτοκινήτων. Από άποψη ασφάλειας η χρήση τους σε οχήματα δεν είναι επικριτική. Αυτή η τεχνολογία χρησιμοποιείται στα υβριδικά αυτοκίνητα πολλών εταιριών όπως της Toyota, της Honda, της Lexus και πολλών ακόμη. Η έρευνα στις μπαταρίες νικελίου μετάλλου υδριδίου είναι περιορισμένη. Οι κατασκευαστές αυτοκινήτων χρησιμοποιούν αυτές τις μπαταρίες σε μεγάλες ποσότητες για τα υβριδικά τους οχήματα και πιθανόν να συνεχίσουν να το κάνουν για τα επόμενα χρόνια. Ωστόσο λίγοι ειδικοί περιμένουν να δούν την ευρεία χρήση αυτής της τεχνολογίας μπαταριών σε αμιγώς ηλεκτρικά αυτοκίνητα ή σε plug-in υβριδικά, εξαιτίας του υψηλού κόστους των υλικών κατασκευής τους. Μακροπρόθεσμα, οι νικελίου μετάλλου υδριδίου φαίνεται να μη μπορούν να ανταγωνιστούν τις μπαταρίες ιόντων λιθίου [64].

- Χλωριούχου νατρίου νικελίου (NaNiCl_2): Οι μπαταρίες αυτές καλούνται επίσης ως ZEBRA (Zero Emission Battery Research Activities) και είναι φτιαγμένες από υγρό νάτριο στη θερμοκρασία λειτουργίας και ένα στερεό κεραμικό ηλεκτρολύτη ο οποίος λειτουργεί και ως διαχωριστής. Το κύριο μειονέκτημά τους είναι η υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας τους (περίπου 300°C) και απαιτούν καλή μόνωση. Μία ψύξη σε θερμοκρασία περιβάλλοντος δημιουργεί θερμομηχανική καταπόνηση στον κεραμικό ηλεκτρολύτη (εάν ο ηλεκτρολύτης σπάσει το κελί είναι πλέον άχρηστο). Άλλα γνωστά προβλήματα αυτής της τεχνολογίας είναι η περιορισμένη δυνατότητα ισχύος εξαιτίας της υψηλής εσωτερικής αντίστασης και της αυτό-εκφόρτισης της τάξεως του 10-15% κάθε μέρα, έτσι ώστε να διατηρήσει το επιθυμητά επίπεδα θερμοκρασίας. Παρόλα αυτά οι μπαταρίες ZEBRA είναι μία ενδιαφέρουσα επιλογή για χρήση υπηρεσιών παράδοσης εντός πόλεως. Σχετικά με τη χρήση αυτών σε ηλεκτροκίνητα οχήματα αυτή είναι εξαιρετικά δύσκολη, εξαιτίας της χαμηλής ημερήσιας απόστασης που μπορεί να καλύψει ένα τέτοιο όχημα καθώς και ανάγκης ύπαρξης ενός συστήματος για την αντιστάθμιση των θερμικών απωλειών. Το κόστος για την κατασκευή ενός τέτοιου συστήματος είναι περίπου ανάλογο με το αντίστοιχο των μπαταριών ιόντων λιθίου. Η έρευνα πάνω σε αυτές τις μπαταρίες είναι περιορισμένη καθώς μόνο δύο εταιρίες τις αναπτύσσουν παγκοσμίως. Οι εταιρίες αυτές φαίνεται να εστιάζουν περισσότερο στη χρήση τους σε στατικές εφαρμογές και όχι σε εφαρμογές της ηλεκτροκίνησης. Για τις εφαρμογές της ηλεκτροκίνησης ωστόσο, οι προοπτικές των μπαταριών ιόντων λιθίου είναι καλύτερες αφού κερδίζουν σε κόστος, ενεργειακή πυκνότητα αλλά και στην ευκολία χρήσης τους [64].

Στα παρακάτω σχήματα και πιο συγκεκριμένα στο σχήμα 3.6 παρουσιάζεται η ενεργειακή πυκνότητα που αποδίδουν τα διάφορα είδη μπαταριών που χρησιμοποιούνται στην ηλεκτροκίνηση, ενώ στο σχήμα 3.7 αναγράφονται οι τιμές ειδικής ενέργειας που παρέχουν, οι κύκλοι ζωής τους και τέλος η ενεργειακή τους απόδοση.



Σχήμα 3.6 – Η απόδοση της ενεργειακής πυκνότητας των μπαταριών [34]

	<i>Specific energy</i> (Wh/kg)	<i>No. of cycles</i>	<i>Energy efficiency (%)</i>	<i>Losses due to heating</i>
Pb-acid	40	500	82.5	n.a.
NiCd	60	1350	72.5	n.a.
NiMH	70	1350	70.0	n.a.
Li-ion	125	1000	90.0	n.a.
NaNiCl	125	1000	92.5	7.2%

Σχήμα 3.7 – Ιδιότητες των μπαταριών [63]

3.2 Οι ηλεκτροκινητήρες της εταιρίας

Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου αποτελούν ένα μέσο αποτελεσματικής τροφοδοσίας και σύμφωνα με τις έρευνες που παρουσιάστηκαν αποτελούν την καλύτερη αλλά και πιο ασφαλή επιλογή για την κατασκευή ενός ηλεκτρικού αυτοκινήτου. Οι μπαταρίες τροφοδοτούν την μηχανή κι αυτή με την σειρά της καταναλώνει αυτήν την ενέργεια παράγοντας ροπή η οποία μεταφράζεται σε κίνηση. Οι μηχανές όμως που είτε χρησιμοποιούνται σε ελαφριά και ήπιας κατασκευής αμαξίδια όπως το ηλεκτρικό αμαξίδιο του γκόλφ είτε σε μεγάλα αμαξώματα όπως είναι τα EV επιβατικά της Tesla, χωρίζονται σε δύο κατηγορίες. Στους κινητήρες συνεχούς ρεύματος (DCmotors) και στους κινητήρες

εναλλασσόμενου ρεύματος (ACmotors) ή αλλιώς επαγωγικούς κινητήρες (induction motors). Οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος χωρίζονται σε δύο υποκατηγορίες. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν οι πιο παλιοί που περιέχουν μια μικροσυσκευή η οποία επιτρέπει την ροή ρεύματος μεταξύ των κινούμενων μερών και των ακίνητων συρμάτων (brushed DC motors). Στην δεύτερη κατηγορία ανήκουν οι σχετικά νεότεροι (1960) οι οποίοι αντικατέστησαν την μικροσυσκευή ή αλλιώς ψήκτρα με ηλεκτρονικά στερεάς κατάστασης όπως δίοδοι ημιαγωγών, τρανζίστορ, ολοκληρωμένα κυκλώματα κ.α. (brushless DC motors) [65].

Σύμφωνα με την εταιρεία Tesla και με τον επικεφαλής της ομάδας των μηχανικών τους, Wally Rippe, ένα μέγεθος και είδος κινητήρα δεν ταιριάζει με όλα. Σύμφωνα με τα λεγόμενα του “Θα περίμενε κανείς ότι με την πάροδο του χρόνου και με τις τόσες θαυμάσιες ανακαλύψεις κάποιο μοντέλο κινητήρα θα είχε κυριαρχήσει”. Υποστηρίζει ότι στον οδυνηρό κόσμο των οχημάτων που χρησιμοποιούν ως καύσιμο τις ορυκτές πηγές οι κινητήρες και σε λειτουργικό επίπεδο αλλά και σε επίπεδο φυσικής υπόστασης δεν είναι ίδιοι. Καταλήγει πως δεν υπάρχει κανένας καλύτερος τύπος κινητήρα από έναν άλλο αλλά η καλύτερη επιλογή είναι το τι ταιριάζει στις προσωπικές απαιτήσεις του καθενός δηλαδή στο κόστος, στην απόδοση και γενικότερα στη λειτουργική θεώρηση του κάθε κατασκευαστή. Για το μέλλον ανέφερε πως σύμφωνα με την ήδη υπάρχουσα τεχνολογία και τις επιστημονικές θεωρήσεις που έχουν υπολογιστεί για την εξέλιξή της, το μόνο σίγουρο είναι ότι και τα δύο είδη θα κυριαρχίσουν (Induction motor και Brushless DC motors).

Σε προσωπικό επίπεδο και για την εταιρεία στην οποία δουλεύει, την Tesla , για κάποια μοντέλα τονίζει ότι δεν υπάρχει πάλι κάποιος κανόνας τον οποίο ακολούθησαν τυφλά. Τόνισε όμως πως οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος ταιριάζουν αρκετά στα ημι-υβριδικά και καθαρά υβριδικά αμάξια λόγω της πολύ καλής απόδοσης και μετρημένης κατανάλωσης ενέργειας που παρέχουν. Από την άλλη για τα καθαρά ηλεκτρικά αμάξια (EV), μερικά τα οποία και σχεδίασε, πιστεύει πως οι επαγωγικοί κινητήρες ταιριάζουν καλύτερα αφού δεν είναι μόνο αποδοτικοί στην εξ’ολοκλήρου χρήση ρεύματος από αμαξώματα αλλά και όπως φαίνεται έχουν τεράστια αντοχή σε βάθος χιλιομέτρων. Δεν αποκλείεται να χρησιμοποιηθεί και ένας συνδυασμός αυτών των δύο υιοθετώντας τα δυνατά τους χαρτιά και απεμπολώνοντας τα κακώς κείμενα [66].

3.2.1. Τα μέρη ενός επαγωγικού κινητήρα

Ένας επαγωγικός κινητήρα (AC motor) όμοια με έναν κινητήρα συνεχούς (DC motor) αποτελείται από το σταθερό μέρος του που ονομάζεται στάτης και από το περιστρεφόμενο

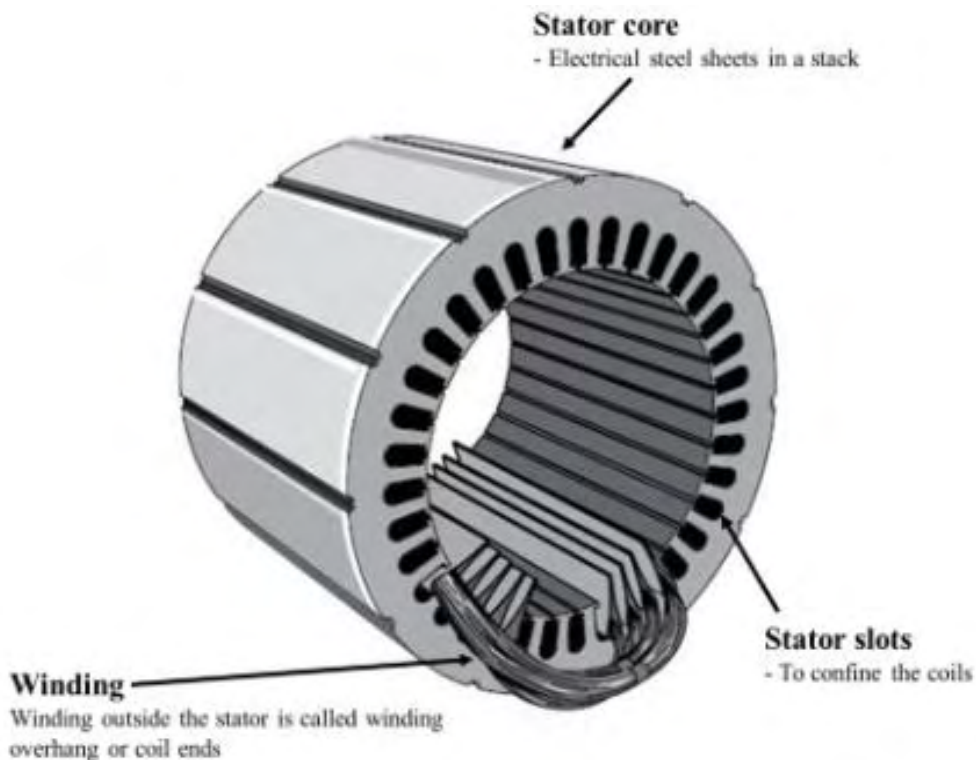
μέρος του που καλείται ρότορας. Ωστόσο ο επαγωγικός ως προς τον συνεχές κινητήρα διαφέρει στις εξής πτυχές:

- 1) Στην εγγενή κατασκευή του στάτη.
- 2) Στην απουσία μετατροπέα ο οποίος αλλάζει περιοδικά τη κατεύθυνση του ρεύματος μεταξύ του στάτη και του εξωτερικού κυκλώματος.
- 3) Στην ύπαρξη ομοιόμορφων μικρών κενών αέρα.
- 4) Πρακτικά σχεδόν πάντα σταθερή η ταχύτητα του ρότορα.

Ο επαγωγικός κινητήρας συγκροτείται από δύο ηλεκτρομαγνητικά μέρη όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, από το στάτη και τον ρότορα. Αντίστοιχα τα δύο αυτά μέρη αποτελούνται από δύο κυκλώματα. Το ηλεκτρικό κύκλωμα, το οποίο είναι συνήθως κατασκευασμένο από μονωμένο χαλκό ή συνηθέστερα από σπείρες αλουμινίου (τυλίγματα) και είναι αρμόδιο για τη μεταφορά του ρεύματος. Το μαγνητικό κύκλωμα, κατασκευασμένο από πολλά στρώματα χάλυβα πυριτίου, υπεύθυνο για τη μεταφορά της μαγνητικής ροής.

Ο στάτης είναι το εξωτερικό σταθερό κομμάτι της μηχανής το οποίο αποτελείται από:

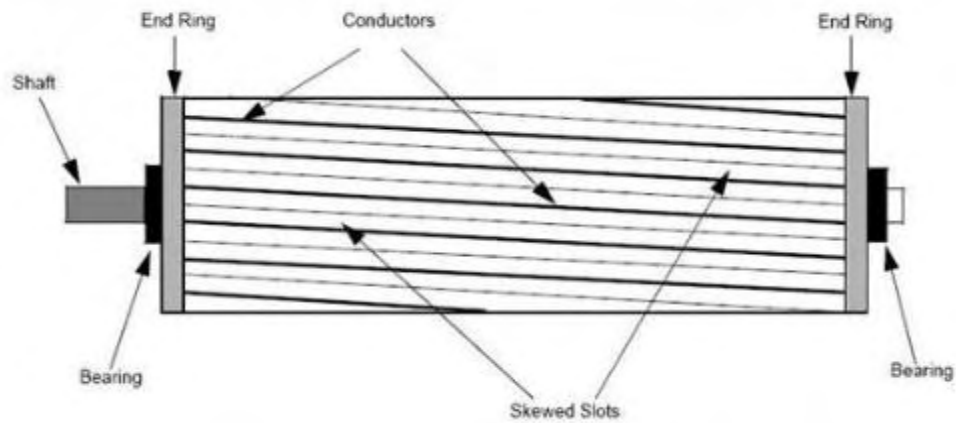
- Το εξωτερικό κυλινδρικό πλαίσιο του κινητήρα ή του ζυγού, που είναι κατασκευασμένο είτε από συγκολλημένες στρώσεις χάλυβα, είτε από χυτευμένο σίδηρο, είτε τέλος από κράμα αλουμινίου.
- Τη μαγνητική διαδρομή, η οποία περιλαμβάνει μια ομάδα (σετ) χαλύβδινων στρωμάτων πυριτίου με σχισμές, που αποτελούν τον πυρήνα του στάτη. Αυτός συμπίεζεται μέσα στον κυλινδρικό χώρο του εξωτερικού σκελετού. Είναι κατασκευασμένος κατά αυτόν τον τρόπο με σκοπό τη μείωση των δινορευμάτων που προκαλούν απώλειες ενέργειας και υπερθέρμανση της μηχανής.
- Μία ομάδα μονωμένων ηλεκτρικά τυλιγμάτων (σπειρών ή πλεξούδων), τοποθετημένη στις σχισμές των στρωμάτων του πυρήνα του στάτη όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 3.8. Η περιοχή της εγκάρσιας τομής των τυλιγμάτων αυτών πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη ούτως ώστε να παρέχει την απαιτούμενη ισχύ στον κινητήρα. Για έναν τριφασικό κινητήρα απαιτούνται 3-σετ τυλιγμάτων, ένα για κάθε φάση, συνδεδεμένα είτε σε συνδεσμολογία αστέρα (Y) είτε σε τριγώνου (Δ) [67][68].



Σχήμα 3.8 – Η μορφή του στάτη [68]

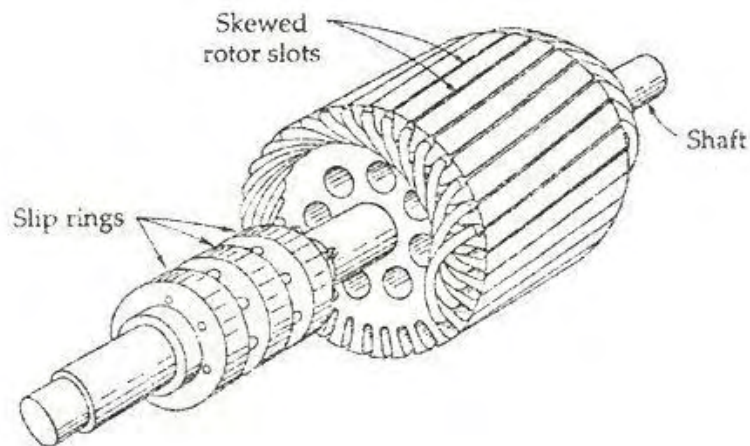
Ο ρότορας όπως ήδη αναφέρθηκε είναι το στρεφόμενο μέρος του επαγωγικού κινητήρα. Αποτελείται και αυτός από μία ομάδα (σετ) στρώσεων χάλυβα πυριτίου με σχισμές, που συμπιέζονται μεταξύ τους για να διαμορφώσουν το μαγνητικό και το ηλεκτρικό κύκλωμα. Το ηλεκτρικό κύκλωμα του ρότορα διαφέρει ανάλογα με την κατασκευή του. Υπάρχουν δύο είδη ανάλογα με τη φύση της κατασκευής.

- Ο βραχυκυκλωμένος ρότορας (squirrel cage rotor), είναι αποτελούμενος από ένα σύνολο ραβδών χαλκού ή αλουμινίου, που εισάγονται στις σχισμές και είναι συνδεδεμένες στο τέλος ενός δακτυλίου (end ring) για κάθε άκρο του ρότορα. Οι ράβδοι αλουμινίου συνήθως χυτεύονται εντός των σχισμών του ρότορα, μία διαδικασία που κάνει τη κατασκευή αυτή δύσκολη. Ακόμη και αν οι ράβδοι του ρότορα αλουμινίου έρχονται σε απευθείας επαφή με τα στρώματα χάλυβα, πρακτικά όλο το ρεύμα που ρέει εντός του ρότορα περνά αποκλειστικά μέσα από τις ράβδους και όχι στα στρώματα χάλυβα. Η μορφή ενός τέτοιου τύπου ρότορα παρουσιάζεται στο σχήμα 3.9.



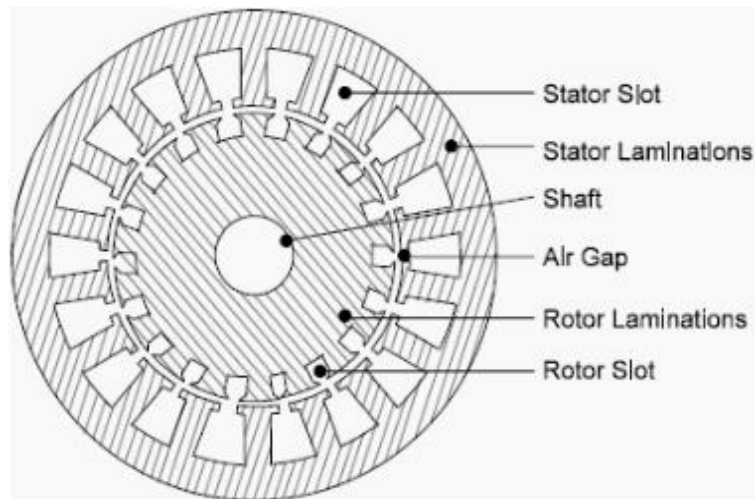
Σχήμα 3.9 – Η μορφή του squirrel cage ρότορα [69]

- Ο τυλιγμένος ρότορας (wound rotor) αποτελείται από τρία σετ μονωμένων τυλιγμάτων που συνδέονται σε τρεις δακτυλίους ολίσθησης (slip rings) πλαισιωμένους πάνω στον άξονα (shaft), όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 3.10. Οι εξωτερικές συνδέσεις των τυλιγμάτων του ρότορα στους τρεις δακτυλίους γίνονται μέσω επαφών άνθρακα, οι οποίες στηρίζονται στους δακτυλίους με τη βοήθεια μηχανισμών ελατηρίου [70]. Εξαιτίας της παρουσίας αυτών των δακτυλιδίων, οι κινητήρες που χρησιμοποιούν τυλιγμένο ρότορα λέγονται και slip rings motors [67].



Σχήμα 3.10 – Η μορφή του wound ρότορα [71]

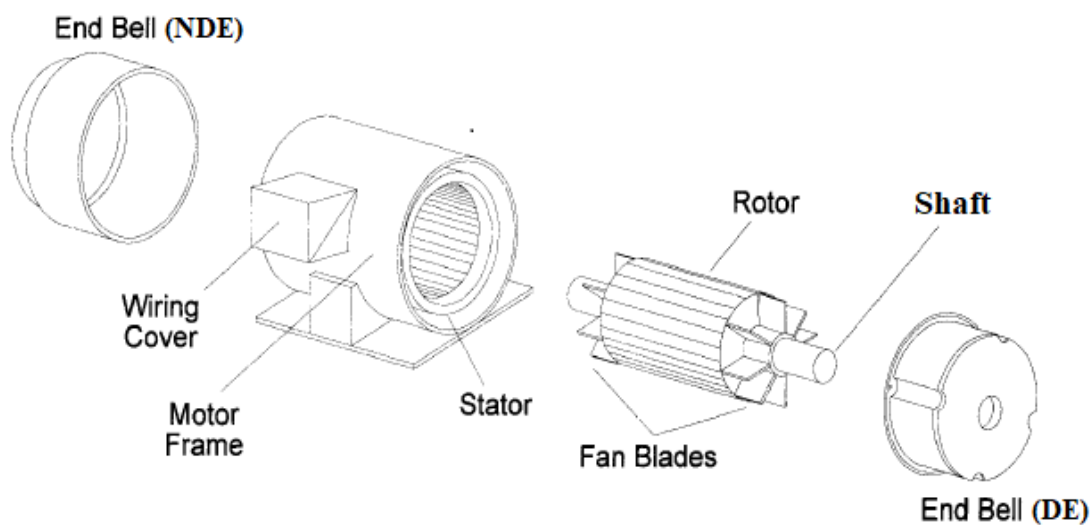
Στην παρακάτω σχήμα 3.11 παρουσιάζεται η όψη της διατομής ενός απλού επαγωγικού κινητήρα.



Σχήμα 3.11 – Τα στρώματα του στάτη και του ρότορα [67]

Τα υπόλοιπα μέρη που συνιστούν έναν επαγωγικό ηλεκτρικό κινητήρα είναι:

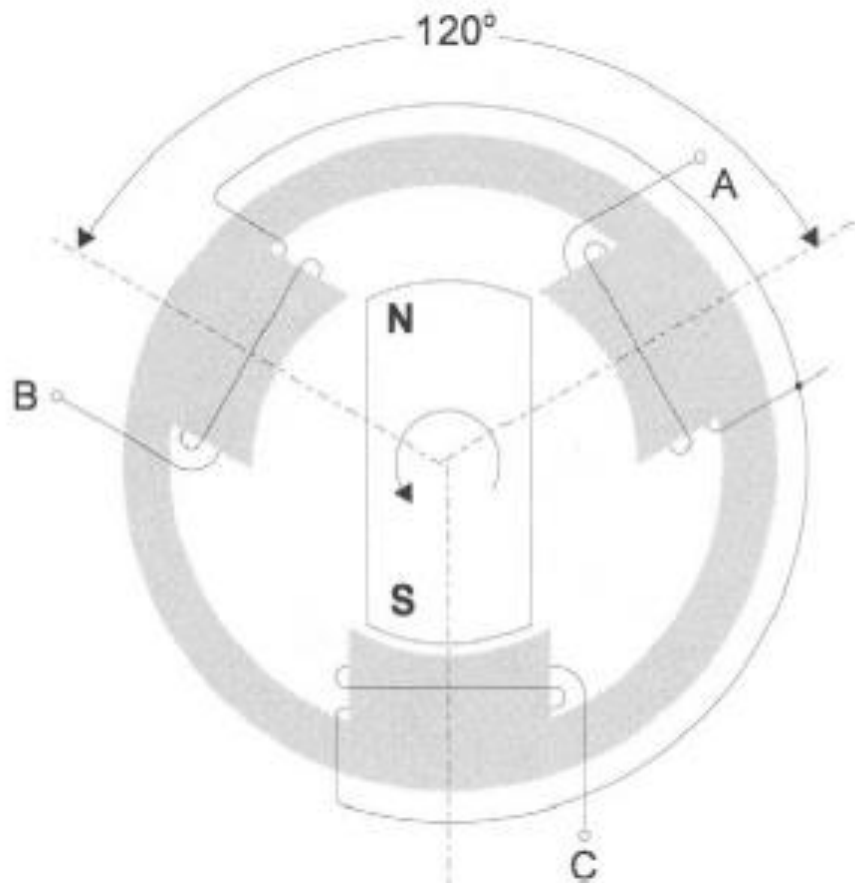
- 1) Δύο φλάτζες που βρίσκονται στα άκρα για την υποστήριξη των δύο ρουλεμάν, μία στο άκρο οδήγησης (drive-end ή DE) και μία στο άλλο άκρο «όχι» οδήγησης (non drive-end ή NDE).
- 2) Δύο ρουλεμάν για την υποστήριξη του περιστρεφόμενου άξονα (DE και NDE).
- 3) Ένας άξονας από χάλυβα για τη μετάδοση της ροπής στο φορτίο.
- 4) Ανεμιστήρες ψύξης (fan blades) που βρίσκονται στα DE και NDE προκειμένου να παρέχουν ενισχυμένη ψύξη στο στάτη και στο ρότορα.
- 5) Τέλος, ένα κουτί στο πάνω μέρος ή στα πλάγια (βάση του σχήματος 3.12) στο οποίο εισάγεται το τριφασικό ρεύμα.



Σχήμα 3.12 – Η λεπτομερής συναρμολόγηση ενός επαγωγικού κινητήρα [67]

3.2.2. Ο τρόπος λειτουργίας ενός επαγωγικού κινητήρα

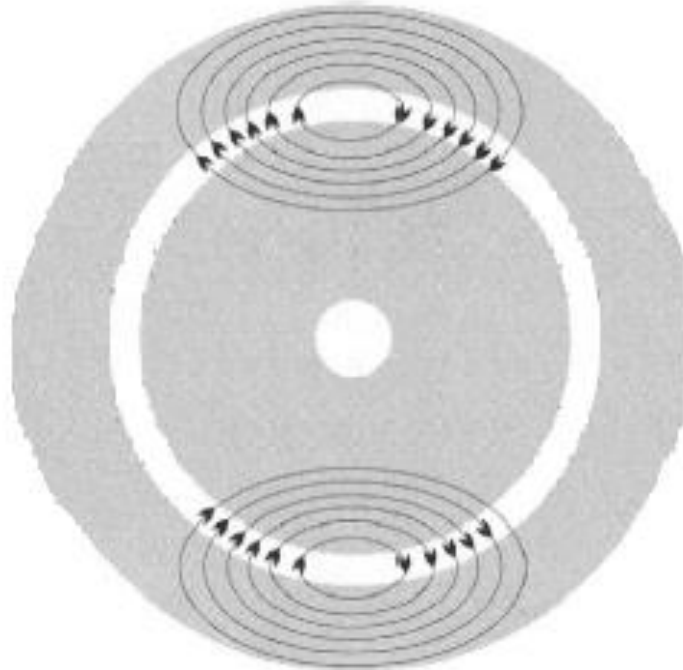
Αρχικά όταν ένα ρεύμα ρέει μέσω ενός αγωγού (conductor) προκαλεί το σχηματισμό ενός μαγνητικού πεδίου. Πιο συγκεκριμένα ο κανόνας του δεξιόστροφου κοχλία δίνει τη φορά του μαγνητικού, με τον αντίχειρα να δείχνει την φορά του ρεύματος και τα δάκτυλα τη κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου. Επομένως όταν μία τριφασική πηγή τροφοδοσίας συνδεθεί στους ακροδέκτες του στάτη ενός επαγωγικού κινητήρα, τριφασικό εναλλασσόμενο ρεύμα ρέει στα τυλίγματα του. Αυτά τα ρεύματα όπως προαναφέρθηκε δημιουργούν ένα μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο το οποίο στρέφεται στο εσωτερικό του στάτη. Η ταχύτητα περιστροφής του μαγνητικού πεδίου είναι σε συγχρονισμό με τη συχνότητα της ηλεκτρικής ισχύος που προσφέρεται στο στάτη και ονομάζεται σύγχρονη ταχύτητα. Το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο του στάτη παρουσιάζεται στο σχήμα 3.13.



Σχήμα 3.13 – Στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο στο στάτη [67]

Για να δημιουργηθεί ροή ρεύματος στο ρότορα θα πρέπει πρώτα να δημιουργηθεί μια τάση στα άκρα των ραβδών του ρότορα. Αυτή η τάση προκαλείται από το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο που δημιουργεί το ρεύμα του στάτη. Η περιστρεφόμενη μαγνητική ροή

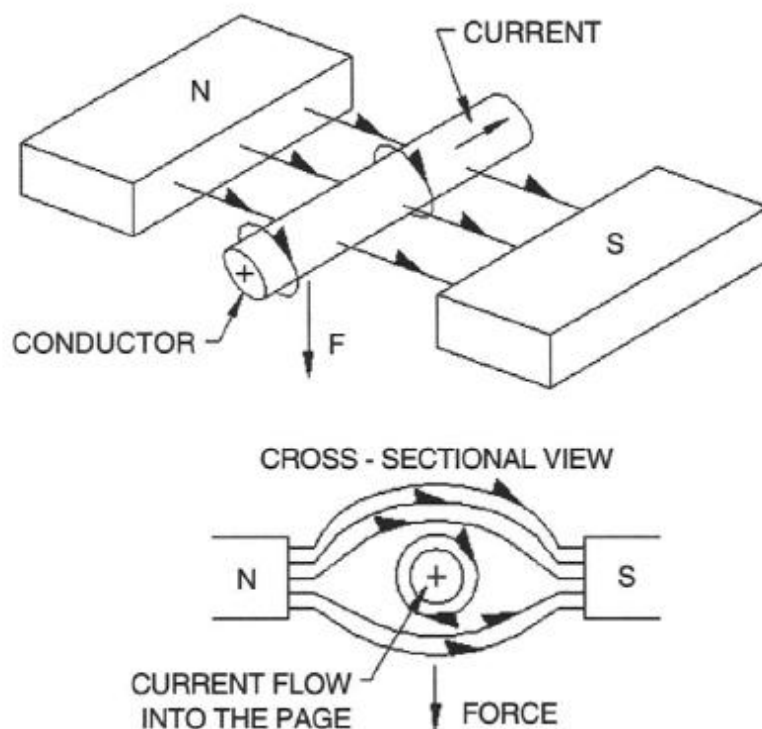
του στάτη, η οποία περιστρέφεται με σύγχρονη ταχύτητα, προσπερνάει το υλικό του στάτη και κατά μήκος του διάκενου του αέρα μεταξύ στάτη και ρότορα και διαπερνά το υλικό του ρότορα όπως φαίνεται στο σχήμα 3.14. Καθώς το μαγνητικό πεδίο στρέφεται οι



Σχήμα 3.14 – Κατανομή της μαγνητικής ροής σε ένα διπολικό κινητήρα [67]

γραμμές της μαγνητικής ροής κόβουν κάθετα τους αγωγούς του ρότορα όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.15, με αποτέλεσμα την εμφάνιση τάσης στα άκρα τους λόγω του φαινομένου του Faraday. Αυτή η τάση εξαρτάται από το ρυθμό μεταβολής της μαγνητικής ροής ($E_{επ} = -d\Phi/dt$).

Από τη στιγμή που οι αγωγοί του ρότορα είναι βραχυκυκλωμένοι στα δύο άκρα, τότε το ρεύμα (επαγωγικό) που ρέει δημιουργεί το δικό του μαγνητικό πεδίο, το οποίο λόγω του κανόνα του Lenz αντιδρά στο στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο του στάτη, με αποτέλεσμα τη δημιουργία περιστροφικής δύναμης. Η κατεύθυνση της δύναμης αυτής όπως φαίνεται στο σχήμα 3.15 τείνει να μειώσει τις αλλαγές στο μαγνητικό πεδίο του στάτη, που σημαίνει ότι ο ρότορας θα επιταχύνει για να ακολουθήσει την κατεύθυνση τις περιστρεφόμενης ροής.



Σχήμα 3.15 – Η δύναμη στο ρευματοφόρο αγωγό του ρότορα [72]

Κατά την εκκίνηση του κινητήρα και ενώ ο ρότορας είναι ακίνητος, η μαγνητική ροή του στάτη διαπερνά το ρότορα με σύγχρονη ταχύτητα και προκαλεί την υψηλότερη τάση στο ρότορα και κατά συνέπεια το υψηλότερο ρεύμα. Καθώς ο ρότορας αρχίζει να επιταχύνει προς τη κατεύθυνση του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου, ο ρυθμός μεταβολής της μαγνητικής ροής ελαττώνεται, άρα και η επαγωγική τάση και το επαγωγικό ρεύμα ελαττώνονται αναλογικά.

Στη περίπτωση που ο κινητήρας λειτουργεί χωρίς φορτίο, τότε όταν η ταχύτητα του ρότορα πλησιάσει τη σύγχρονη ταχύτητα η επαγωγική τάση τείνει να μηδενιστεί. Εάν γίνει ίση με τη σύγχρονη ταχύτητα τότε δεν υπάρχει μεταβολή της μαγνητικής ροής στο ρότορα με αποτέλεσμα η επαγωγική τάση και το επαγωγικό ρεύμα να μηδενίζονται. Πρακτικά αυτό είναι αδύνατον να συμβεί λόγω των τριβών που αναπτύσσονται στα ρουλεμάν, άρα η ταχύτητα στρέψης του ρότορα θα είναι λίγο μικρότερη για να δικαιολογείται η ροπή στρέψης που πρέπει να εμφανίζεται για να εξουδετερώσει τις τριβές. Για να στραφεί ο ρότορας ώστε να παρχθεί ροπή, πρέπει να υπάρχει ρεύμα σε αυτόν άρα θα πρέπει η ταχύτητα περιστροφής του ρότορα να διαφέρει από τη σύγχρονη ταχύτητα (μεγαλύτερη ή μικρότερη).

Η ταχύτητα στρέψης του ρότορα ονομάζεται ταχύτητα ολίσθησης. Κατά συνέπεια οι επαγωγικοί ηλεκτροκινητήρες συχνά αναφέρονται ως ασύγχρονοι κινητήρες επειδή η ταχύτητα του ρότορα δεν είναι σε συγχρονισμό με τη περιστρεφόμενη ταχύτητα της μαγνητικής ροής του στάτη. Το ποσό της ολίσθησης καθορίζεται από τη ροπή του φορτίου, όπου η ροπή απαιτείται για να περιστραφεί ο άξονας του ρότορα.

Όσο αυξάνεται η ροπή του φορτίου στον άξονα, η ολίσθηση αυξάνεται, άρα αυξάνεται η πυκνότητα των δυναμικών γραμμών που τέμνουν τον ρότορα με αποτέλεσμα να αυξάνεται η επαγωγική τάση άρα αυξάνεται και η ροπή στρέψης του ρότορα. Τυπικά η ολίσθηση s κυμαίνεται μεταξύ του 1% χωρίς φορτίο και 6% με πλήρες φορτίο. Η σχέση που δίνει την ολίσθηση είναι:

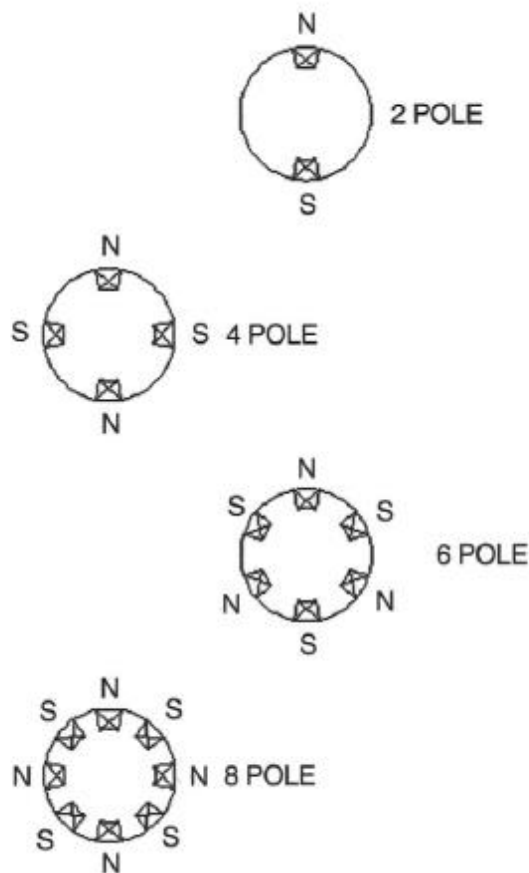
$$s = \frac{(n_0 - n)}{n_0}$$

Όπου n_0 = σύγχρονη ταχύτητα (στρεφόμενου μαγν. πεδίου του στάτη) στροφές/λεπτό

n = πραγματική ταχύτητα στρέψης του ρότορα στροφές/λεπτό

s = ολίσθηση

Ένας κινητήρας με ένα μόνο σέτ τυλιγμάτων για κάθε φάση στο στάτη όπως αναπτύχθηκε παραπάνω (σχήμα 3.13), περιγράφεται ως διπολικός κινητήρας επειδή το περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο περιλαμβάνει δύο στρεφόμενους πόλους, ένα βόρειο (N) και ένα νότιο (S). Εάν τα τρία τυλίγματα του στάτη αναδιαταχθούν για να χωρέσουν στις μισές σχισμές του, τότε θα δημιουργηθεί χώρος για ακόμη τρία τυλίγματα στο άλλο μισό των σχισμών. Ως αποτέλεσμα αυτού δημιουργείται στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο με τέσσερις πόλους (2 βόρειους και δύο νότιους) και οι κινητήρες αυτοί ονομάζονται τετραπολικόι κινητήρες. Σύμφωνα με τους μηχανικούς της, η Tesla χρησιμοποιεί τετραπολικούς επαγωγικούς ασύγχρονους ηλεκτροκινητήρες. Επομένως, αυξάνοντας τα σέτ των τυλιγμάτων του στάτη αυξάνονται και οι πόλοι. Ανάλογα με τις απαιτήσεις κάθε φορά, αλλάζοντας τον αριθμό των πόλων αλλάζει και η στρεφόμενη μαγνητική ροή του στάτη. Όσο αυξάνεται ο αριθμός των πόλων ελαττώνεται ο αριθμός των περιστροφών του μαγνητικού πεδίου του στάτη ανα λεπτό. Για παράδειγμα σε διπολικό κινητήρα, οι στροφές/λεπτό είναι 3000, σε τετραπολικό είναι 1500, ενώ σε έναν εξαπολικό κινητήρα είναι 1000. Στο παρακάτω σχήμα 3.16 φαίνονται ενδεικτικά τέσσερα είδη κινητήρων με βάση των αριθμό των πόλων τους.



Σχήμα 3.16 – Είδη κινητήρων με βάση τον αριθμό των πόλων [72]

3.2.3. Απώλειες ενέργειας στον επαγωγικό κινητήρα

Όσον αφορά την αποδοτικότητα ενός τέτοιου κινητήρα δυστυχώς τα προβλήματα που προπήρχαν σχετικά με τη διαχείριση της ενέργειας κατά την κατανάλωση αλλά και κατά την τροφοδοσία του κινητήρα δεν περιορίστηκαν.

Υπολογίσιμο μέρος της ηλεκτρικής ενέργειας που παρέχεται στον κινητήρα δεν μετατρέπεται σε χρήσιμη μηχανική ενέργεια αλλά σύμφωνα με την επιστήμη της θερμοδυναμικής, μετατρέπεται σε θερμότητα εκτός του κινητήρα. Αυτή η μορφή είναι άχρηστη και δεν μπορεί να μετατραπεί εκ νέου σε νέα μορφή. Υπάρχουν τέσσερα διαφορετικά είδη απωλειών, όταν πρόκειται για την λειτουργία του κινητήρα: η ηλεκτρική, η μαγνητική, η μηχανική και η τυχαία. Όλα τα σύγχρονα ηλεκτρικά αμάξια συμπεριλαμβανομένων αυτών της Tesla, εφαρμόζουν κάποιους τρόπους για να περιορίσουν τις παραπάνω απώλειες. Αυτό το πετυχαίνουν με τη χρήση ποιοτικών υλικών (όπως χάλυβας σιδήρου) καθώς επίσης και με τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού.

Οι ηλεκτρικές απώλειες αντιπροσωπεύονται από τον τύπο: $P_{\text{losses}} = I^2 \times R$, όπου I το ηλεκτρικό ρεύμα που εφοδιάζεται ο κινητήρας και R η αντίσταση των αγωγών (στα τυλίγματα). Αυτές οι απώλειες πολλαπλασιάζονται κατά την χρήση του κινητήρα, αφού μόνο τότε υπάρχει φορτίο στον κινητήρα και όπως είναι γνωστό από τη φυσική το φορτίο με το ρεύμα είναι κατά προσέγγιση ποσά ανάλογα. Σχεδιαστικά οι απώλειες αυτές μπορούν να μειωθούν, αυξάνοντας τη διατομή των αγωγών του στάτη και του ρότορα για να μειωθεί η αντίσταση R (αφού $R = \rho \times l / s$, όπου ρ ειδική αντίσταση υλικού, l το μήκος και s η διατομή του).

Μαγνητικές απώλειες συμβαίνουν στον χάλυβα σιδήρου (λόγω φαινομένου μαγνητικής υστέρησης) στα δύο προαναφερθέντα μέρη του κινητήρα. Εδώ η λύση είναι εξίσου σχεδιαστική καθώς απαιτείται αύξηση της διατομής του στάτη, ενώ στον ρότορα, χρήση λεπτότερων και βελτιωμένων υλικών προς αποφυγή σχηματισμού δινορευμάτων.

Οι μηχανικές απώλειες από την άλλη οφείλονται στο γεγονός της τριβής του ρουλεμάν, στη χρήση του εξαερισμού (ανεμιστήρων) καθώς και στις απώλειες λόγω αντιστάσεων του αέρα κατά τη περιστροφή του άξονα του ρότορα. Η λύση σε αυτόν τον τομέα είναι δύσκολο να επιτευχθεί καθώς απαιτείται χρήση διαφορετικών υλικών και διαφορετικού τύπου ρουλεμάν, ώστε να μην επιτυγχάνεται τέτοια τριβή. Η χρήση όμως διαφορετικού τύπου ρουλεμάν επιδεινώνει ή εμφανίζει νέα προβλήματα, τεχνικά πιο σοβαρά συγκρητικά με τα αντίστοιχα της τριβής. Ένας ακόμα τρόπος επίλυσης των παραπάνω προβλημάτων είναι ο σχεδιασμός και η τοποθέτηση βελτιωμένου συστήματος εξαερισμού στο εσωτερικό του κινητήρα.

Τέλος, οι τυχαίες απώλειες σχετίζονται με: τη διαφυγή μαγνητικής ροής, τυχαίες ανωμαλίες στον αέρα που βρίσκεται μέσα στον κινητήρα, μηχανικές ατέλειες κατά την διάρκεια λειτουργίας του, βλάβες στην ομοιόμορφη κατανομή του ρεύματος καθώς επίσης και μη σταθερή πυκνότητα ροής. Διορθώνονται με βέλτιστο σχεδιασμό και προσεκτική κατασκευή του επαγωγικού κινητήρα [73][74].

3.2.4. Λειτουργία του επαγωγικού κινητήρα ως γεννήτρια

Ο τριφασικός επαγωγικός κινητήρας μπορεί να λειτουργήσει και ως γεννήτρια αν μεταβληθούν οι αποδόσεις κάποιων μερών του, από εξωτερικούς φυσικά παράγοντες.

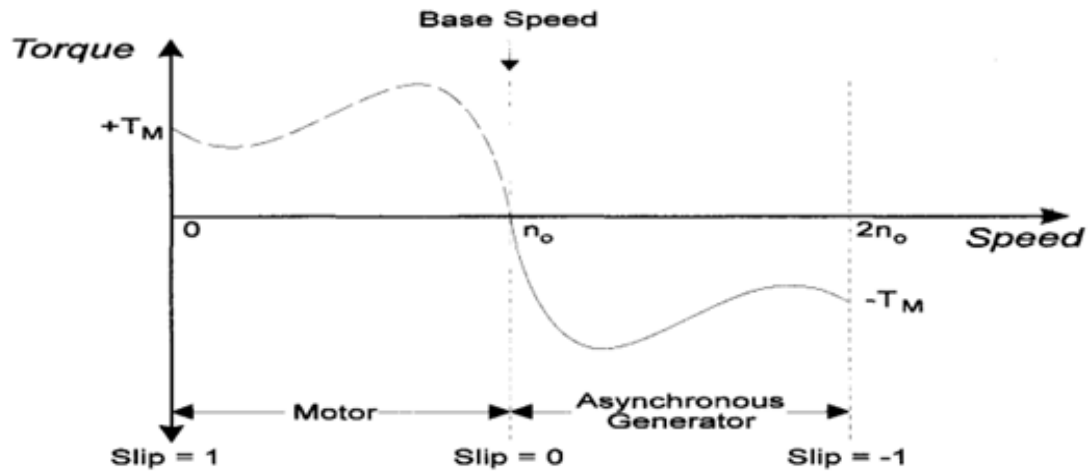
Όπως έχει αναλυθεί, η απόδοση του τριφασικού επαγωγικού ηλεκτροκινητήρα εξαρτάται άρρηκτα από την ταχύτητα των στροφών του, η οποία εκτείνεται από το μηδέν μέχρι την ονομαστική του ταχύτητα στη συχνότητα των 50Hz. Η απόδοση αυτή, η οποία τεχνικά δεν είναι κακή, τον καθιστά κινητήρα ο οποίος μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική

με ορισμένες αναπόφευκτες απώλειες οι οποίες αναλύθηκαν στην προηγούμενη υποενότητα.

Για να γίνει πιο σαφές θα πρέπει ο επαγωγικός κινητήρας να λειτουργεί πάντοτε σε ταχύτητα (ταχύτητα των στροφών του) χαμηλότερη από την ονομαστική σύγχρονη ταχύτητα του. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της απαίτησης για μικρή ολίσθηση, ώστε να εξασφαλιστεί η ύπαρξη επαρκούς ροπής, προκειμένου να ξεπεραστούν οι απώλειες τριβής μεταξύ των εσωτερικών οργάνων καθώς επίσης και οι απώλειες λόγω αέρα. Αν όμως με κάποιο τρόπο, κατά κύριο λόγο με βοήθεια εξωτερικού παράγοντα, μεταβληθεί η ταχύτητα του ρότορα n σε σημείο που να μην υπάρχει η μικρή ολίσθηση s που ειπώθηκε (να γίνει ίση με την ονομαστική σύγχρονη ταχύτητα n_0) τότε λόγω του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου το ρεύμα στον ρότορα και η ροπή εξόδου γίνονται μηδέν. Αν όμως πάλι η ταχύτητα του ρότορα n , πάλι εξαιτίας κάποιων εξωτερικών μέσων, αυξηθεί πάνω από το ορισμένο όριο τότε εκείνος θα τρέξει ταχύτερα από το περιστρεφόμενο πεδίο του στάτη και οι αγωγοί του ρότορα θα τέμνουν ξανά τις γραμμές της μαγνητικής ροής [65][67]. Η επαγόμενη τάση επανεμφανίζεται στον ρότορα αλλά αυτή την φορά έχει αντίθετη κατεύθυνση από ότι προηγουμένως, που η ταχύτητά του ήταν μικρότερη από την ονομαστική σύγχρονη ταχύτητα.

Σύμφωνα με τον νόμο του Lenz για την ηλεκτρεγερτική δύναμη (Εεπ), το παραπάνω οδηγεί σε ρεύματα που έχουν φορά αντίθετη, εν συγκρίσει με την αρχική μορφή, ενώ η ισχύς ρέει στην αντίθετη κατεύθυνση από τον κινούμενο ρότορα (δηλαδή προς τον στάτη) και άρα το ρεύμα που διαρρέει το στάτη έχει αντίθετη φορά από την αρχική, με αποτέλεσμα να φορτίζεται η μπαταρία. Έτσι όταν η ταχύτητα της μηχανής ξεπερνά την σύγχρονη ονομαστική ταχύτητα τότε ο κινητήρας λειτουργεί ως γεννήτρια.

Η παραπάνω διαδικασία μπορεί να περιγραφεί καλύτερα με το διάγραμμα ροπής σε συνάρτηση με την ταχύτητα στο σχήμα 3.17. Πιο συγκεκριμένα φαίνεται πως μόλις η ταχύτητα ξεπεράσει την ονομαστική τιμή n_0 (base speed) τότε η ροπή γίνεται αρνητική, δηλαδή αλλάζει κατεύθυνση και υπάρχει παραγωγή ρεύματος. Είναι σημαντικό και πρέπει να ειπωθεί ότι μόλις η ταχύτητα της μηχανής φτάσει την ονομαστική τιμή (n_0 στο σχήμα), τότε και η ροπή αλλά και η ολίσθηση (slip) μηδενίζονται [67].



Σχήμα 3.17 – Μετάβαση από τη λειτουργία κινητήρα σε λειτουργία γεννήτριας [67]

3.3 Τα ηλεκτρονικά

Από τα τέλη του 19^{ου} αιώνα μέχρι τα μέσα του 20^{ου}, η μετατροπή συνεχούς DC σε εναλλασσόμενο AC υλοποιούνταν με χρήση περιστροφικών μετατροπέων ή σετ μηχανών γεννητριών (Motor Generator). Στις αρχές του 20^{ου}, σωλήνες κενού και αγωγοί γεμισμένοι με αέριο άρχισαν να χρησιμοποιούνται ως διακόπτες (switches) στα κυκλώματα αντιστροφέα. Ο πιο αναγνωρίσιμος τύπος σωλήνα ήταν το thyatron. Οι πρώτοι AC-DC μετατροπείς χρησιμοποιούσαν ένα επαγωγικό ή σύγχρονο κινητήρα εναλλασσομένου ρεύματος απευθείας συνδεδεμένο σε μια γεννήτρια, έτσι ώστε ο μετατροπέας της γεννήτριας ανέστρεφε τις συνδέσεις τις ακριβώς τις κατάλληλες στιγμές ώστε να παραχθεί συνεχές DC. Έπειτα μια εξέλιξη ήταν ο σύγχρονος μετατροπέας, στον οποίο συνδιάστηκαν οι περιελίξεις κινητήρα και γεννήτριας σε έναν οπλισμό, με δακτυλίους ολίσθησης στο ένα άκρο και έναν μετατροπέα στο άλλο άκρο και μόνο ένα πλαίσιο πεδίου. Με ένα σετ MG το συνεχές μπορεί να θεωρηθεί ότι παράγεται ξεχωριστά από το εναλλασσόμενο, ενώ με έναν σύγχρονο μετατροπέα με μία έννοια το συνεχές που παράγεται μπορεί να θεωρηθεί ως “μηχανικά διορθωμένο” εναλλασσόμενο.

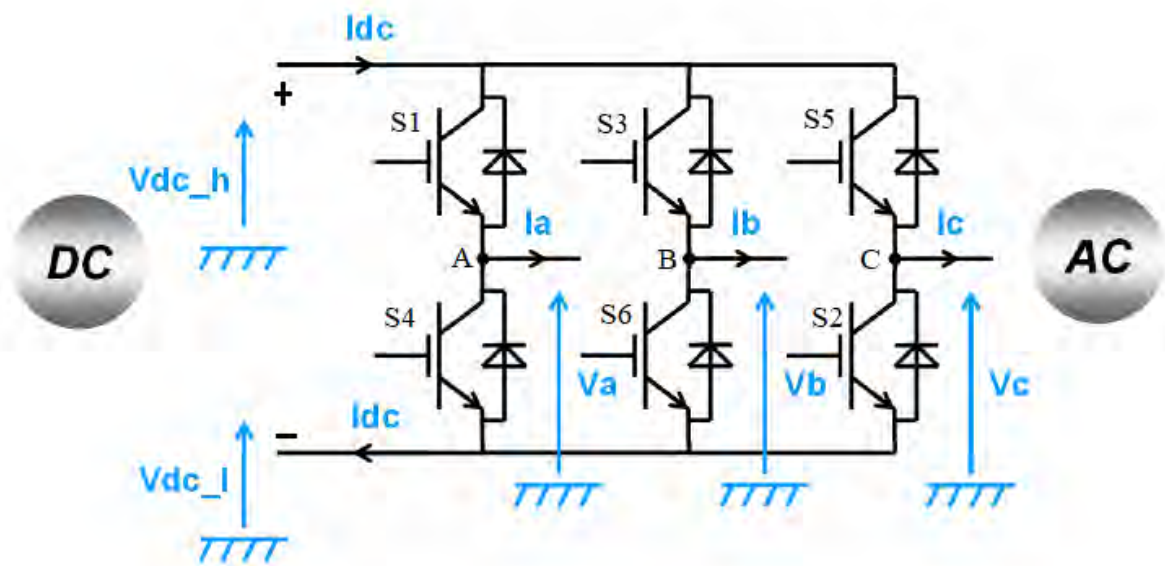
Τα παραπάνω συστήματα σετ GM και περιστροφικών μετατροπέων, με την κατάλληλη βοήθεια και εξοπλισμό μπορούν να λειτουργήσουν και ανάποδα, δηλαδή κάνοντας το συνεχές εναλλασσόμενο DC-AC. Ως εκ τούτου ο αντιστροφέας inverter, είναι ένας ανεστραμμένος μετατροπέας. Έργο του είναι να μετατρέπει ένα συνεχές σήμα εισόδου, σε συμμετρικό εναλλασσόμενο σήμα εξόδου επιθυμητού εύρους και συχνότητας. Με

διαφορετικές τιμές DC εισόδων και κρατώντας σταθερό το gain του inverter, παίρνουμε διαφορετικές εξόδους. Από την άλλη με σταθερές τιμές εισόδου, αλλάζοντας το gain του inverter και πιο συγκεκριμένα διαμορφώνοντας τους παλμούς (pulse mode) μέσα στον inverter, παίρνουμε διαφορετικές εξόδους. Το κέρδος gain του inverter είναι ο ρυθμός μεταβολής της εξόδου προς την είσοδο, η γνωστή συνάρτηση μεταφοράς. Οι κυματομορφές της τάσης εξόδου ενός ιδανικού inverter είναι ημιτονοειδείς. Στην πραγματικότητα όμως είναι μη-ημιτονοειδείς και περιέχουν αρμονικές. Για εφαρμογές μικρής και μεσαίας ισχύος, οι παλμοί ή σχεδόν παλμοί σαν έξοδοι είναι αποδεκτοί. Για εφαρμογές πολύ υψηλής ισχύος όμως, απαιτούνται οι λίγο παραμορφωμένες ημιτονοειδείς. Οι αρμονικές στις εξόδους, μπορούν να ελαχιστοποιηθούν ή να μειωθούν σημαντικά με τη χρήση διακοπτών (switches), που η κατασκευή τους βασίζεται στη χρήση transistor [75].

3.3.1. Ο τριφασικός αντιστροφέας inverter

Ο τριφασικός αντιστροφέας inverter χρησιμοποιείται ελεύως για εφαρμογές υψηλής ισχύος (high power applications). Ο τριφασικός τετραγωνικού παλμού αντιστροφέας χρησιμοποιείται για να παράγει ισορροπημένες τριφασικές AC εξόδους με επιθυμητή συχνότητα. Όμως, όπως προαναφέρθηκε οι αρμονικές των τάσεων 3^{ου}, 5^{ου} και γενικά περιττού βαθμού παραμορφώνουν την έξοδο (Harmonic Distortion). Αυτές οι παραμορφώσεις είναι πολύ δύσκολο να εξαληφθούν. Υπάρχουν κάποια άλλα είδη inverter όπως ο pulse width modulation (PWM), ο οποίος μπορεί να παράγει υψηλότερης ποιότητας έξοδο.

Στο σχήμα 3.18 φαίνεται η κυκλωματική μορφή ενός τριφασικού inverter. Αποτελείται από 6 διακόπτες (switches), ο κάθε διακόπτης αποτελείται από ένα transistor και μία δίοδο. Υπάρχουν τρία πόδια, το καθένα έχει δύο διακόπτες έναν επάνω έναν κάτω και δίνει την κάθε φάση. Τα τρανζίστορ αυτά μπορεί να είναι MOSFET ή IGBT. Η Tesla Motors χρησιμοποιεί IGBT στον inverter των μοντέλων της Roadster, S και X, ενώ στο νέο της μοντέλο 3 χρησιμοποιεί MOSFET. Τα IGBT (Insulated-Gate-Bipolar-Transistor) είναι ένας συνδυασμός MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor-Field-Effect-Transistor) και BJT (Bipolar-Junction-Transistor). Χρησιμοποιούνται κυρίως για εφαρμογές ηλεκτρονικών ισχύος (power-electronics) λόγω κάποιων συγκεκριμένων χαρακτηριστικών που διαθέτουν όπως μεγάλα ρεύματα φορτίου (επαγωγικά φορτία), μικρή αντίσταση κα. Εξασφαλίζουν ένα επίπεδο μόνωσης μεταξύ του control που γίνεται από το MOS και του ρεύματος που διαρρέει το BJT. Το control τρανζίστορ είναι το MOS, αυτό ανοιγοκλείνει το BJT που περνάει το ρεύμα.



Σχήμα 3.18 – Τριφασικός inverter [31]

Υπάρχουν δύο conduction mode για τη λειτουργία του τριφασικού inverter του σχήματος 3.18:

1) 180 μοίρες conduction mode

Σε αυτό το mode λειτουργίας, ο κάθε διακόπτης (switch) μεταβιβάζει για μισό κύκλο (180 μοίρες). Κάθε στιγμή 3 διακόπτες είναι ON. Όταν ο S1 είναι ON, ο κόμβος A συνδέεται στον θετικό πόλο της μπαταρίας και την ίδια στιγμή ο S4 είναι OFF. Αντίστροφα, όταν ο S4 είναι ON, ο κόμβος A είναι συνδεδεμένος στον αρνητικό πόλο της μπαταρίας. Αυτοί οι συνδυασμοί είναι ίδιοι για τους S3,S6 (κόμβος B) και S5,S2 (κόμβος C). Υπάρχουν έξι πιθανοί συνδυασμοί modes σε ένα κύκλο, με τον κάθε κύκλο να διαρκεί 60 μοίρες. Πιο αναλυτικά:

Mode	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₆
1 st	ON	OFF	OFF	OFF	ON	ON
2 nd	ON	ON	OFF	OFF	OFF	ON
3 rd	ON	ON	ON	OFF	OFF	OFF
4 th	OFF	ON	ON	ON	OFF	OFF
5 th	OFF	OFF	ON	ON	ON	OFF
6 th	OFF	OFF	OFF	ON	ON	ON

Σχήμα 3.19 – 180 μοιρών [75]

2) 120 μοίρες conduction mode

Σε αυτό το mode, μόνο δύο διακόπτες μεταβιβάζουν την ίδια στιγμή. Ένας από τους πάνω και ένας από τους κάτω. Κάθε διακόπτης μεταβιβάζει για 120 μοίρες μιας πλήρους περιόδου των 360 μοιρών της τάσης εξόδου. Το κάθε σήμα στην είσοδο gate του κάθε διακόπτη διαρκεί 120 μοίρες. Υπάρχουν έξι υπο-διαστήματα των 60 μοιρών το καθένα. Η συμπεριφορά του inverter σε ένα κύκλο έχει ως εξής:

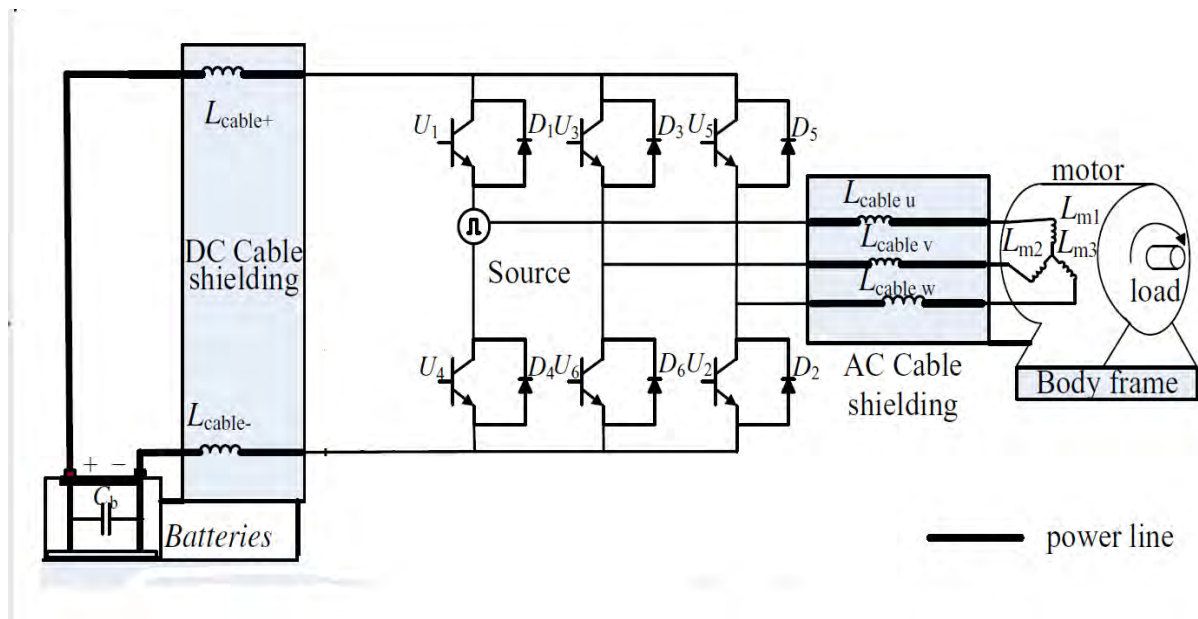
Mode	S1	S2	S3	S4	S5	S6
1 st	ON	OFF	OFF	OFF	OFF	ON
2 nd	ON	ON	OFF	OFF	OFF	OFF
3 rd	OFF	ON	ON	OFF	OFF	OFF
4 th	OFF	OFF	ON	ON	OFF	OFF
5 th	OFF	OFF	OFF	ON	ON	OFF
6 th	OFF	OFF	OFF	OFF	ON	ON

Σχήμα 3.20 – 120 μοιρών [75]

Έπειτα και στις δύο περιπτώσεις, σχεδιάζονται οι γραφικές των τάσεων για τις τρεις φάσεις (V_{a0} V_{b0} V_{c0}) και τέλος υπολογίζονται οι γραφικές εξόδου για κάθε φάση (V_a V_b V_c), ανάλογα πάντα με τη συνδεσμολογία που έχει το τριφασικό σύστημα στο φορτίο LOAD. Από τα παραπάνω συμπεριέεται ότι για το mode των 180 μοιρών, οι έξοδοι (των τάσεων) είναι πιο ακριβείς σε σχέση με αυτές των 120 μοιρών. Στις 120 μοίρες υπάρχει ένας νεκρός χρόνος (dead-time) ανάμεσα στους δύο διακόπτες (switches) του ενός ποδιού, ενώ στις 180 δεν απαιτείται νεκρός χρόνος. Επίσης συμπεραίνεται ότι η συνολική παραμόρφωση αρμονικών (Total Harmonic Distortion) είναι περίπου ίδια για τις δύο αυτές περιπτώσεις.

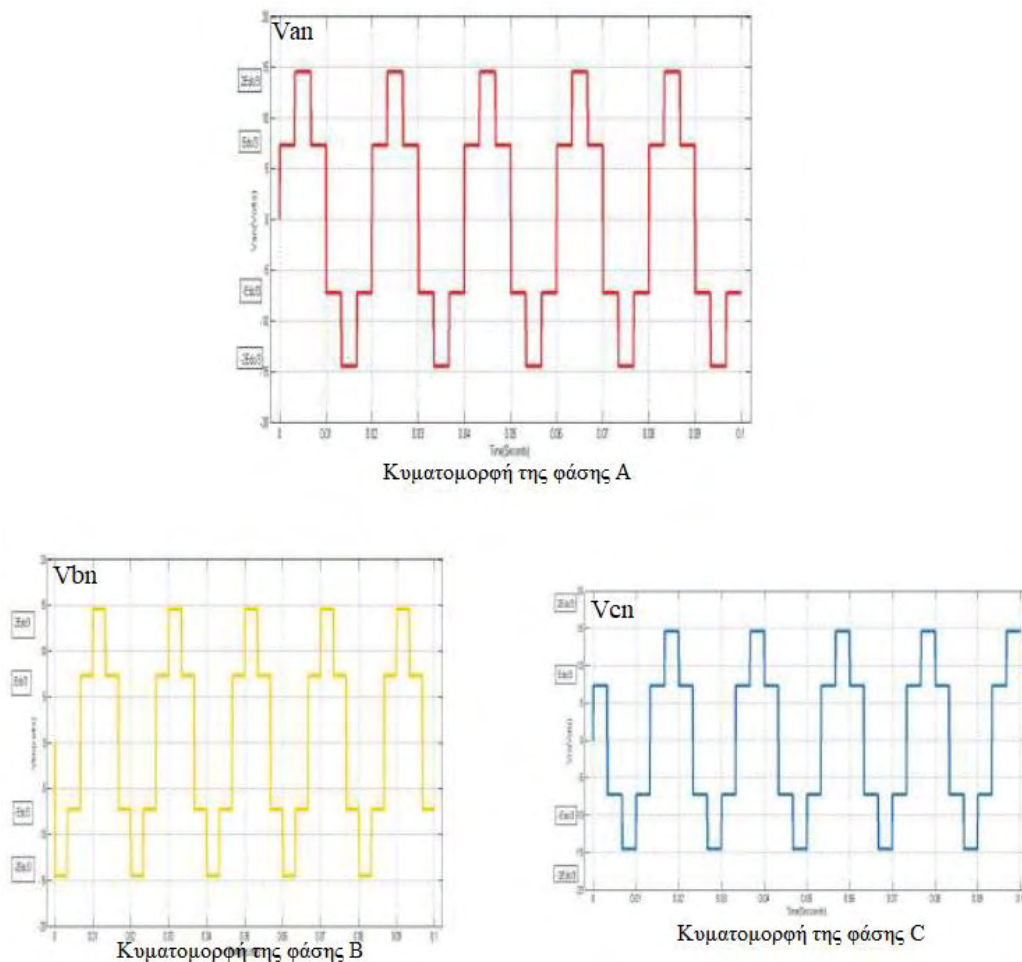
Στο σχήμα 3.21 φαίνεται αναλυτικά ο τρόπος που το κύκλωμα του τριφασικού inverter οδηγεί ένα φορτίο (LOAD). Στη προκειμένη περίπτωση φορτίου, πρόκειται για τον τριφασικό επαγωγικό κινητήρα του οχήματος. Η συνδεσμολογία σε έναν τέτοιο ηλεκτροκινητήρα είναι σε τρίγωνο (Y). Ο πυκνωτής C_b αποτελεί ένα φίλτρο για την προστασία της μπαταρίας ιόντων λιθίου. Το σύμβολο που μοιάζει με τον παλμό, είναι το στάδιο PWM που αναφέρθηκε και πιο πάνω. Το PWM έχει να κάνει με την είσοδο DC.

Δίνοντας παλμούς εισόδου απο την DC μπαταρία και απλά αυξομειώνοντας την συχνότητα των παλμών κάθε φορά, πετυχαίνουμε καλύτερο AC σήμα στην έξοδο.



Σχήμα 3.21 – Σύστημα οδήγησης [76]

Ακολουθεί ένα παράδειγμα του παραπάνω συστήματος για το conduction-mode 180 μοιρών. Επειδή υπάρχει συνδεσμολογία τριγώνου έχουμε και τον ουδέτερο ακροδέκτη n. Άρα από απλούς μαθηματικούς υπολογισμούς: $V_{ao} = V_{an} + V_{no}$ (1) $V_{bo} = V_{bn} + V_{no}$ (2) $V_{co} = V_{cn} + V_{no}$ (3), όπου ο (όμικρον θεωρούμε το μέσω της μπαταρίας σπάζοντας τη σε $V_{dc}/2$ και $V_{dc}/2$). Με πρόσθεση των τριών εξισώσεων κατά μέλη (απαλοίφεται ο όρος $V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0$) άρα $V_{ao} + V_{bo} + V_{co} = 3 * V_{no} \Rightarrow V_{no} = (V_{ao} + V_{bo} + V_{co})/3$ (4). Και τώρα από τις σχέσεις (1)(2)(3) και με αντικατάσταση της (4) λύνοντας, βρίσκουμε την τάση εξόδου για την κάθε φάση V_{an} V_{bn} V_{cn} όπως φαίνεται στο σχήμα 3.22.

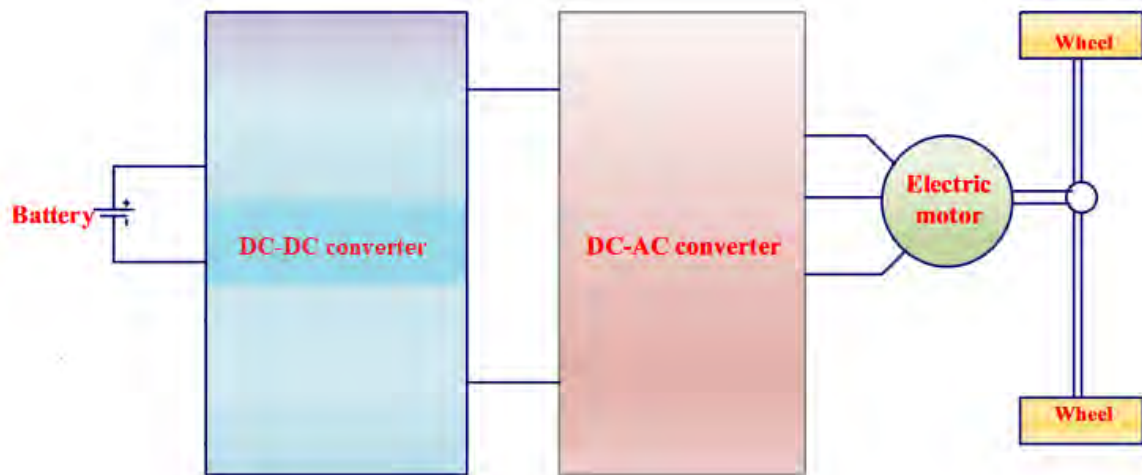


Σχήμα 3.22 – Γραφικές φάσεων εξόδου [75]

3.3.2. Ο μετατροπέας DC/DC

Προκειμένου να απαλειφθούν οι απώλειες σε όλα τα παραπάνω στάδια κυκλωμάτων hardware, η εταιρία χρησιμοποιεί κάποιους μετατροπείς. Και μιλώντας για απώλειες πιο συγκεκριμένα, υπάρχουν δύο είδη απωλειών:

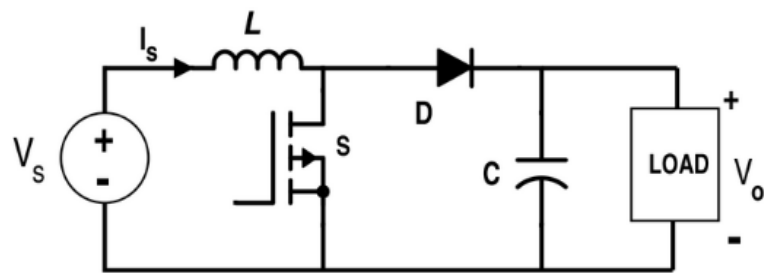
- α) Οι απώλειες στον μετατροπέα (αντιστροφέα inverter), όπου υπάρχουν απώλειες μεταβίβασης (conduction losses) και απώλειες διακοπών (switching losses).
- Β) Οι απώλειες στον ηλεκτροκινητήρα, όπου υπάρχουν απώλειες χαλκού (copper losses), απώλειες στο πυρήνα (core losses) και τέλος απώλειες στη μηχανή (mechanical losses) κυρίως λόγω τριβών [31].



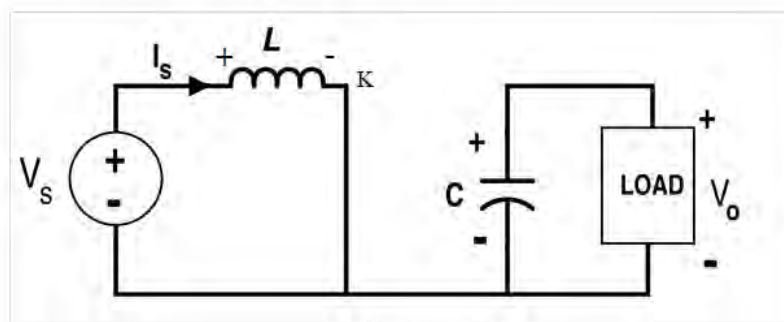
Σχήμα 3.23 – Ο μετατροπέας DC/DC [77]

Ο μετατροπέας DC/DC είναι το νέο στάδιο του σχήματος 3.23. Η εισαγωγή ενός μετατροπέα DC/DC μεταξύ της μπαταρίας και του inverter μπορεί να αλλάξει τη συμπεριφορά του συστήματος. Η λειτουργία αυτού του μετατροπέα είναι να σταθεροποιήσει όσο το δυνατόν περισσότερο την τάση εισόδου στον αντιστροφέα inverter, ανεξάρτητα από την κατάσταση της μπαταρίας. Η αρχιτεκτονική του κυκλώματος προκαλεί άμεσες μεταβολές στην τάση της μπαταρίας. Ο υπερ-πυκνωτής (C_b που συνδέεται παράλληλα με τη μπαταρία και λειτουργεί σαν φίλτρο) βοηθά στη διάρκεια ζωής της. Όμως από την άλλη, προκαλεί διακυμάνσεις στο εύρος των τάσεων. Χωρίς τη χρήση του φίλτρου το εύρος τιμών των τάσεων είναι πολύ υψηλότερο, αλλά η διάρκεια ζωής της μπαταρίας μειώνεται αισθητά για θερμικούς λόγους που προκαλούνται από τις ολοένα αυξανόμενες εσωτερικές αντιστάσεις, λόγω των υψηλών συχνοτήτων της ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής [76].

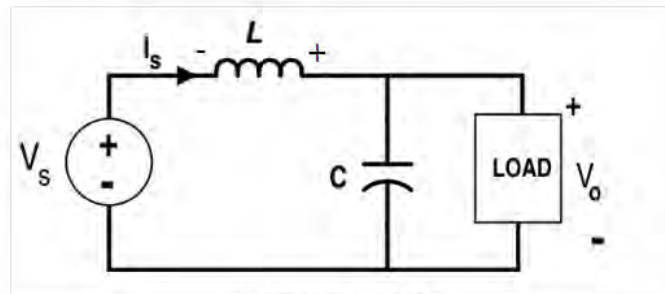
Πιο συγκεκριμένα ο μετατροπέας αυτός λέγεται DC-DC Boost converter. Έργο του είναι να παίρνει μια τάση στην είσοδο και να την ανυψώνει στην έξοδο. Ένας τέτοιος μετατροπέας φαίνεται πιο αναλυτικά στο σχήμα 3.24. Αποτελείται από ένα τρανζίστορ τύπου MOSFET, το οποίο λειτουργεί σαν ένας διακόπτης (switch). Επιπλέον απαρτίζεται από ένα πηνίο, μία δίοδο και έναν πυκνωτή. Ο τρόπος λειτουργίας του φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 3.25.



Σχήμα 3.24 – Boost DC/DC converter [78]



SWITCH S IS ON



SWITCH S IS OFF

Σχήμα 3.25 – Τρόπος λειτουργίας [78]

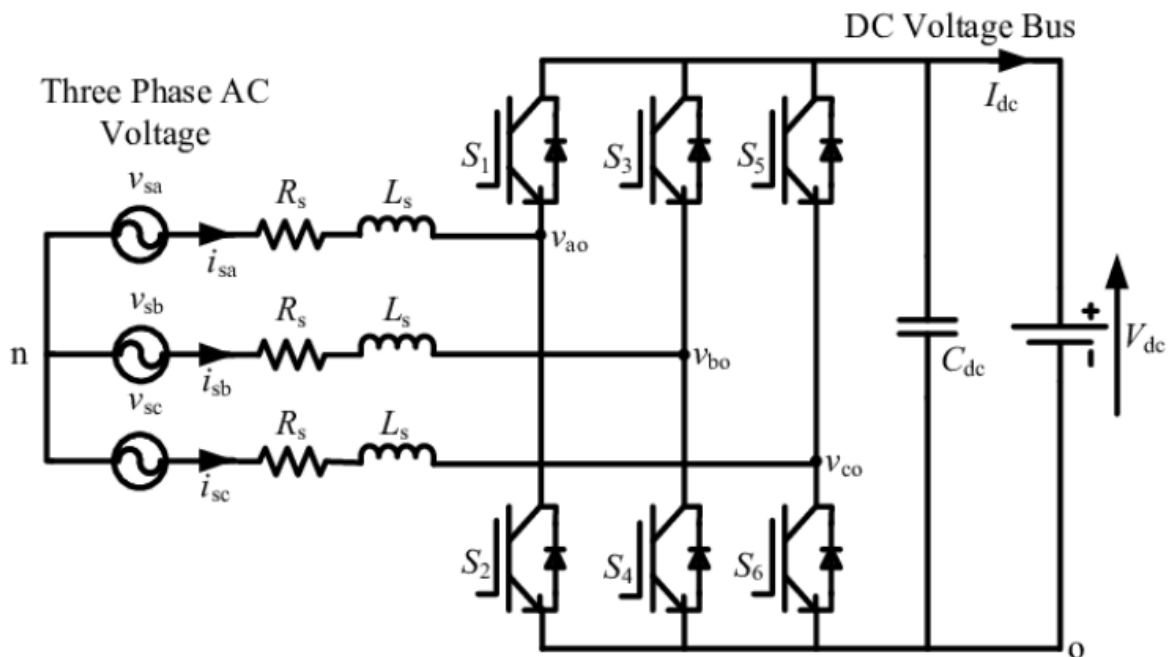
Αρχικά όταν ο διακόπτης S είναι ON, το ρεύμα περνάει μέσα από το πηνίο και στην συνέχεια μέσα από το MOSFET. Επειδή η τάση εξόδου έχει κάποια θετική τιμή αλλά η τάση στο σημείο K είναι μηδενική, η διάδος είναι ανάστροφα πολωμένη και άρα δεν άγει (ανοικτοκύκλωμα). Σε αυτό το στάδιο το πηνίο γεμίζει με ενέργεια. Με το που ο διακοπτης S γίνει OFF και ανοίξει, το ρεύμα πλέον αφού περάσει μέσα από το πηνίο πηγαίνει προς το υπόλοιπο κύκλωμα. Περνάει μέσα από τη διάδο και έπειτα μέσα από τον πυκνωτή ο οποίος φορτίζει. Σε αυτό το στάδιο το πηνίο απελευθερώνει την ενέργεια του η οποία αποθηκεύεται στον πυκνωτή. Με το που ξανα κλείσει ο διακόπτης, το ρεύμα πηγαίνει ανάποδα από τον

πυκνωτή προς τη δίοδο, μέσα από το MOSFET και καταλήγει στην πηγή V_{in} . Κάθε φορά που δημιουργείται τάση στο πηνίο, αυτή στο επόμενο βήμα που ανοίγει ο διακόπτης προστίθεται στην τάση του πυκνωτή. Στην έξοδο φαίνεται η τάση του πυκνωτή στην ουσία.

Το κλειδί ενός DC/DC Boost Converter επομένως είναι το πηνίο. Όταν ο διακόπτης είναι κλειστός το πηνίο γεμίζει με ενέργεια (φορτίζει). Με το που ανοίξει ο διακόπτης το πηνίο σκορπίζει την ενέργεια του και πλέον ο πυκνωτής γεμίζει με αυτή. Κάθε φορά προστίθεται η ενέργεια του πηνίου στην υπάρχουσα του πυκνωτή. Έτσι η τάση στην έξοδο ανυψώνεται [78].

3.3.3. Ο μετατροπέας AC/DC

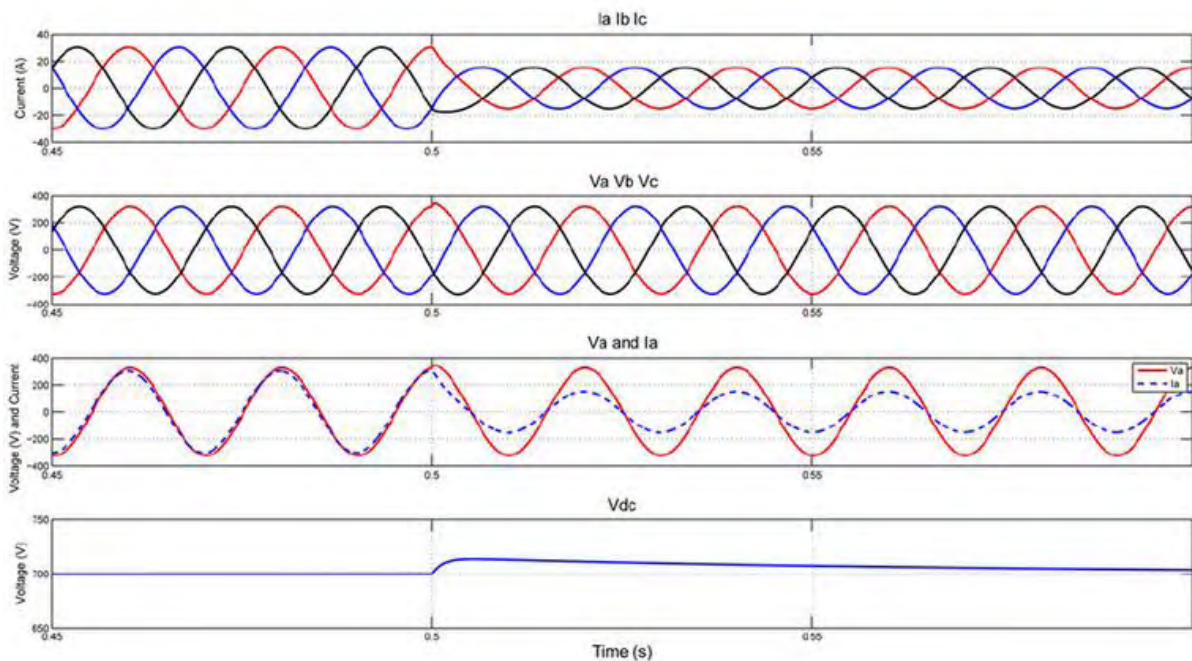
Ένας μετατροπέας AC/DC είναι ένα κύκλωμα το οποίο μετατρέπει το εναλλασσόμενο ρεύμα από το δίκτυο (grid) σε συνεχές για να φορτίσει η μπαταρία. Πρόκειται για ένα κύκλωμα αρκετά παρόμοιο με αυτό του inverter, καθώς πρόκειται για την αντίστροφη διαδικασία. Στο παρακάτω σχήμα 3.26 παρουσιάζεται ένας τριφασικός μετατροπέας AC/DC.



Σχήμα 3.26 – Τριφασικός μετατροπέας AC/DC [79]

Απαρτίζεται και αυτός από έξι διακόπτες (switches) αποτελούμενους από IGBT-διόδους και συνδεδεμένους στις τρεις φάσεις του δικτύου μέσω πηνίου (L) και αντίστασης (R). Ένας

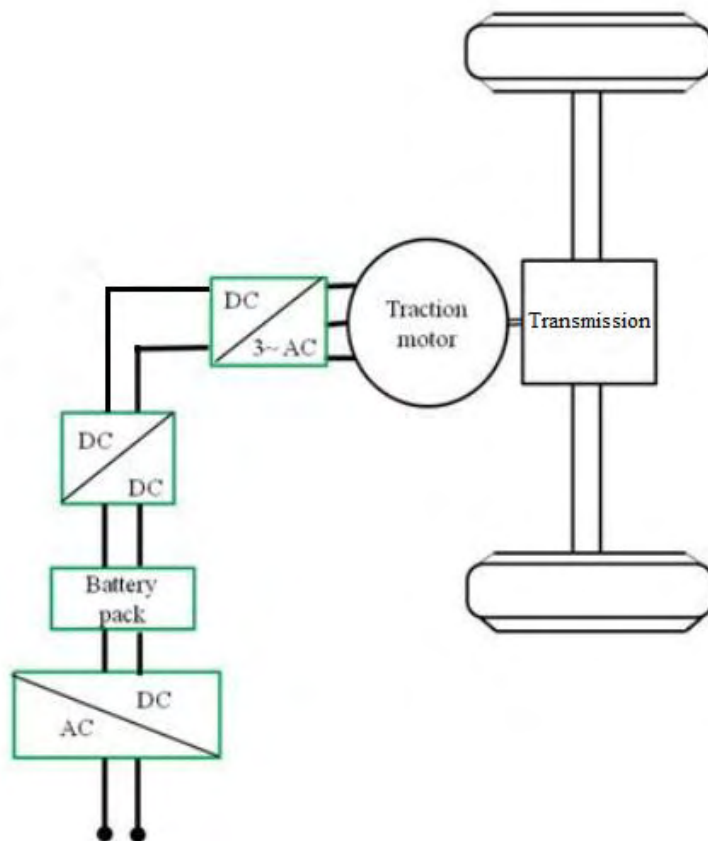
πυκνωτής υπάρχει και πάλι συνδεδεμένος σε σειρά με την DC τάση, ώστε να κρατά σταθερή την τιμή της.



Σχήμα 3.27 – Γραφικές εξόδου [80]

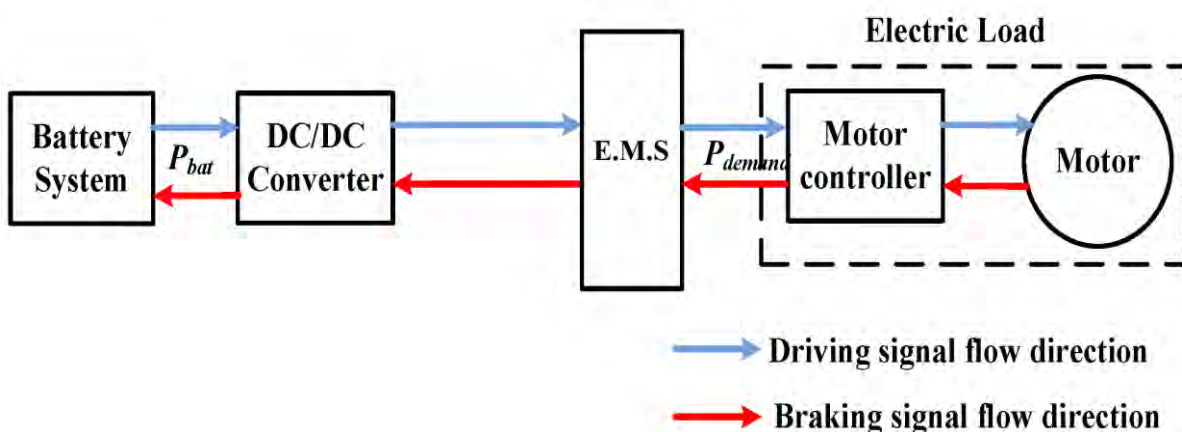
Στο σχήμα 3.27 παρατίθενται οι γραφικές παραστάσεις των τριών φάσεων ρεύματος και τάσεων, έπειτα η γραφική τάσης και ρεύματος της μιας φάσης και τέλος η τάση DC που παράγει το κύκλωμα του μετατροπέα AC/DC στην έξοδο.

Συνοψίζοντας όλα τα παραπάνω, ακολουθεί το σχήμα 3.28 που περιγράφει την πλήρη τοπολογία των ηλεκτρονικών της Tesla Motors. Η διαδικασία έχει να κάνει ως εξής: αρχικά το δίκτυο (τριφασικό) τροφοδοτεί με ενέργεια τη μπαταρία μέσω του μετατροπέα AC/DC. Με αυτόν τον τρόπο φορτίζει η μπαταρία. Έπειτα η μπαταρία των ιόντων λιθίου του οχήματος, για κάποιους λόγους που προαναφέρθηκαν περνάει πρώτα από ένα στάδιο DC/DC μετατροπέα και εν συνεχεία περνάει από ένα δεύτερο στάδιο αντιστροφέα DC/3~AC. Αυτός αφού κάνει τα απαραίτητα δίνει το τριφασικό ρεύμα (τεράστιου μεγέθους γύρω στα 1.500 Ampere) το οποίο τροφοδοτεί το στάτη του τριφασικό επαγωγικό κινητήρα.



Σχήμα 3.28– Πλήρης τοπολογία μετατροπών [81]

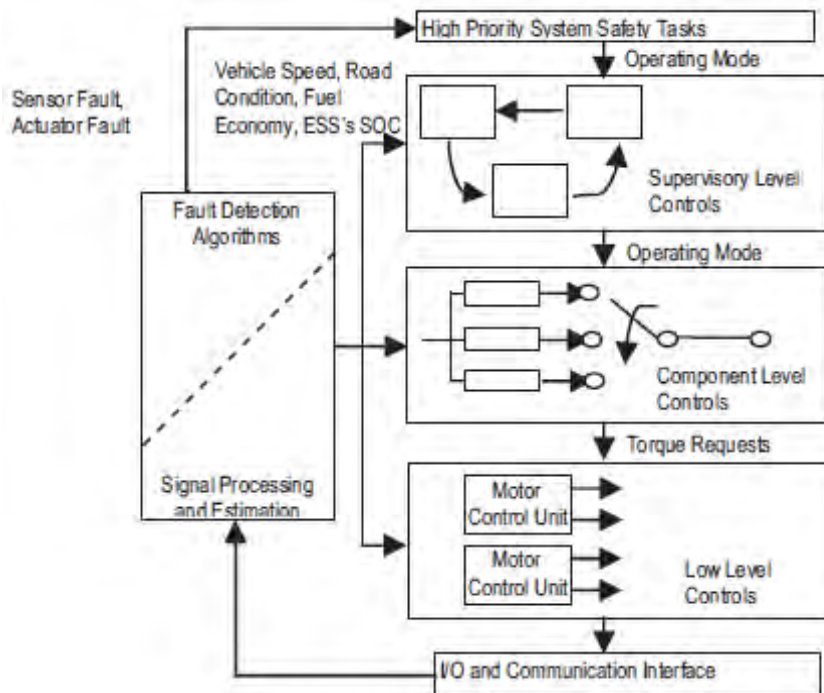
3.4 Το σύστημα διαχείρισης ενέργειας



Σχήμα 3.29 –Σύστημα διαχείρισης ενέργειας [82]

Στο σχήμα 3.29 παρουσιάζεται το σύστημα διαχείρισης ενέργειας (Energy Management System). Πιο συγκεκριμένα το σύστημα αυτό (EMS) απαρτίζεται από τρία επίπεδα. Το πρώτο επίπεδο βασίζεται στο χαμηλού επιπέδου έλεγχο του υλικού (hardware-based low

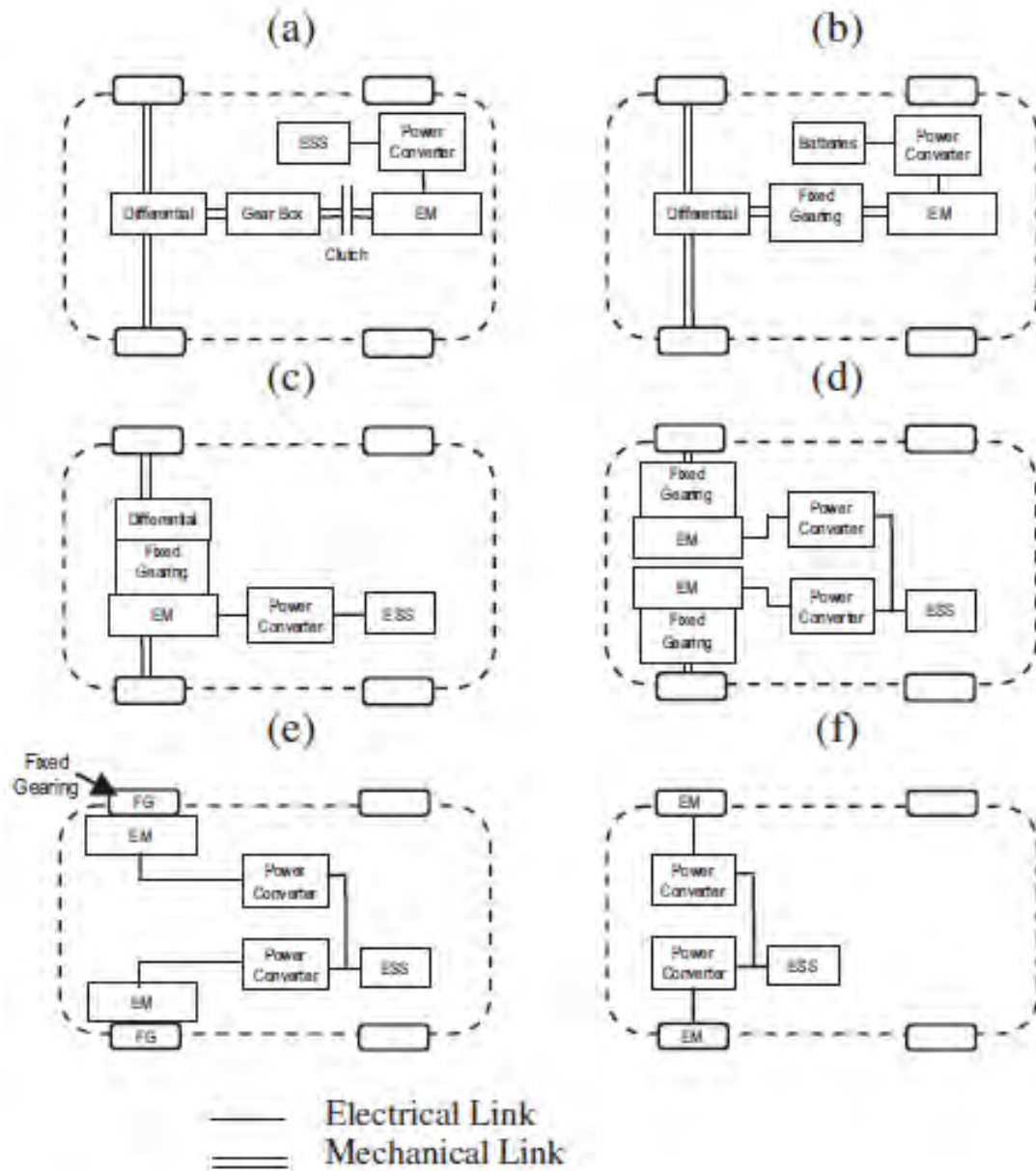
level control ή LLC), το δεύτερο στο χαμηλού επιπέδου έλεγχο των εξαρτημάτων του υλικού (hardware-based low level component control ή LLCC) και το τρίτο στο υψηλού επιπέδου εποπτικό έλεγχο μέσω λογισμικού (software-based high level supervisory control ή HLSC). Αυτά τα συστήματα λειτουργούν μαζί κατά τη διαδικασία της ανάλυσης, της εφαρμογής και της εκτέλεσης της στρατηγικής του EMS, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.30.



Σχήμα 3.30 – Τα επίπεδα του EMS [83]

Ο έλεγχος του χαμηλού επιπέδου (LLC) είναι το πρώτο στάδιο ελέγχου το οποίο περιλαμβάνει ρυθμίσεις του υλικού στην αρχιτεκτονική της μετάδοσης ισχύος σε ένα αμιγώς ηλεκτρικό όχημα (BEV). Η αρχιτεκτονική αφορά την τοπολογία των μονάδων όπως για παράδειγμα του ESS, του ηλεκτρικού κινητήρα, των μετατροπέων ισχύος καθώς επίσης και των μηχανικών και ηλεκτρικών συνδέσεων. Στο σχήμα 3.31 απεικονίζονται οι διαφορετικές αρχιτεκτονικές μετάδοσης της κίνησης των BEV. Η αρχιτεκτονική του σχήματος 3.31 (a) είναι συμβατική, με χρήση συμπλέκτη (clutch) ο οποίος είναι αρμόδιος για την παροχή ή μη ισχύος στον ηλεκτροκινητήρα. Στην (b) χρησιμοποιεί μία μόνο σχέση μετάδοσης χωρίς χρήση συμπλέκτη, προκειμένου να μειωθεί το μέγεθος και το βάρος του κιβωτίου σχέσεων και έτσι απλοποιείται ως ένα βαθμό ο έλεγχος μετάδοσης της κίνησης. Στην (c) για περαιτέρω απλοποίηση της μετάδοσης ενσωματώνονται το κιβώτιο μια σχέσης μετάδοσης με το διαφορικό. Στην (d) χρησιμοποιούνται δύο ξεχωριστοί κινητήρες και κιβώτιο μίας σχέσης με τον άξονα της κίνησης να προσαρμόζει την ταχύτητα στους τροχούς. Στην (e) η

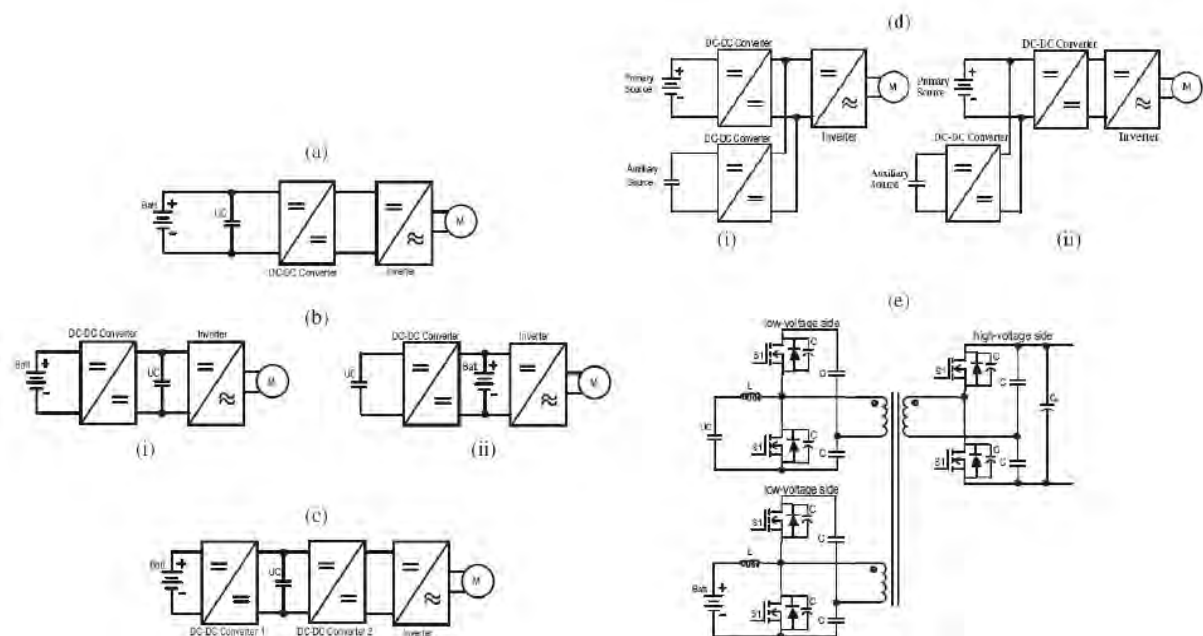
μετάδοση κίνησης είναι άμεση και αμιγώς ηλεκτρική, από το κιβώτιο σχέσης και τον ηλεκτροκινητήρα, χωρίς τη χρήση άξονα μετάδοσης. Τέλος στην (f) η αρχιτεκτονική επιτάσσει την ενσωμάτωση του ηλεκτροκινητήρα στους τροχούς (in-wheel drive), πράγμα που κάνει τη διαδικασία της κίνησης πιο ευέλικτη καθώς επίσης μειώνει το μέγεθος του αμαξώματος σε μεγάλο βαθμό.



Σχήμα 3.31 – Οι διαφορετικές αρχιτεκτονικές για LLC [83]

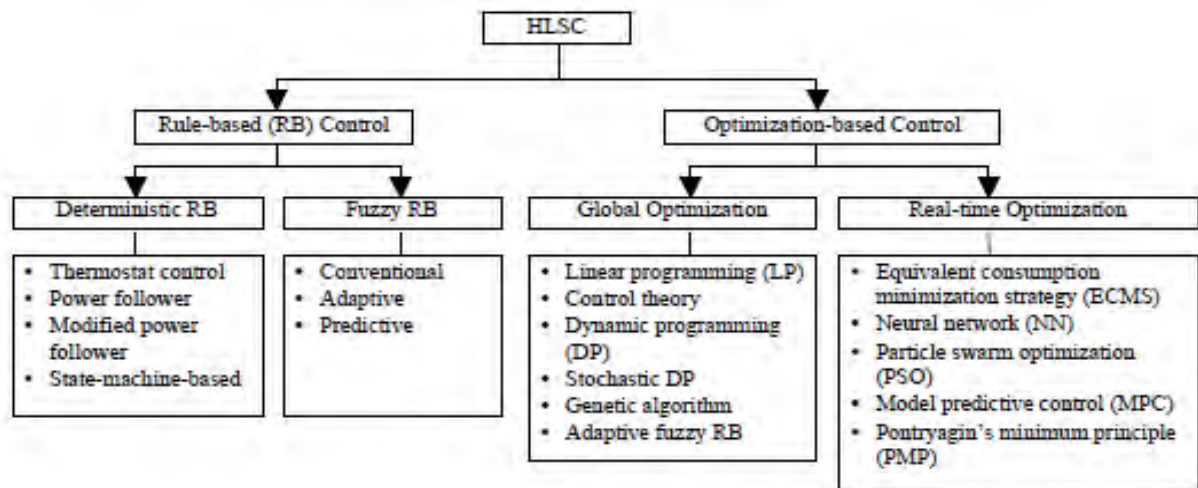
Σύμφωνα με την αρχιτεκτονική της μετάδοσης ισχύος σε ένα BEV, ο χαμηλού επιπέδου έλεγχος των εξαρτημάτων του υλικού (LLCC) σχεδιάζεται σε δεύτερο στάδιο. Το δεύτερο αυτό στάδιο περιλαμβάνει τη ρύθμιση των εξαρτημάτων μεταξύ ηλεκτροκινητήρα και ESS. Πιο συγκεκριμένα περιλαμβάνει τη ρύθμιση των ηλεκτρονικών (power electronic

converters), της κύριας πηγής ενέργειας (μπαταρίας), της βοηθητικής πηγής ενέργειας (UC ή Ultra Capacitor) καθώς και του ηλεκτροκινητήρα. Πιο αναλυτικά ο δίαυλος μετάδοσης σενεχούς (DC), ο μετροπέας DC/DC και ο αντίστοιχος DC/AC χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά και τον έλεγχο της ενέργειας μεταξύ του ESS και του κινητήρα, από τη στιγμή που στα αμιγώς ηλεκτρικά το ESS είναι μία πηγή συνεχούς (DC). Προκειμένου να επιτευχθεί η φόρτιση της μπαταρίας μέσω του μηχανισμού πέδησης, χρησιμοποιείται ένας μετατροπέας DC/DC δύο κατευθύνσεων (bi-directional). Αυτός ο μετροπέας προτιμάται να συνδέεται άμεσα με τον UC, εξαιτίας της ικανότητας της γρήγορης φόρτισης του. Ένας μετατροπέας DC/DC έχει διαφορετικά μεγέθη και τοπολογίες, ανάλογα με τις εκάστοτε απαιτήσεις ενέργειας και τη τοπολογία. Αυξάνοντας την ισχύ σε ένα τέτοιο κύκλωμα, αυξάνεται αυτόματα το μέγεθος των ημιαγωγών (transistors) και των πηνίων και συνεπώς το κόστος ανεβαίνει. Συνήθως ένας μετατροπέας DC/DC έχει μέσο όρο ενεργειακής απόδοσης 91%. Στο σχήμα 3.32 παρακάτω παρουσιάζονται οι πέντε τύποι HESS (Hybrid Energy Storage System & Ultra Capacitor) και μετατροπέων, καθώς και η συνδεσμολογία τους. Πιο συγκεκριμένα στο σχήμα 3.32 φαίνονται (a) μια παθητική παράλληλη σύνδεση, (b) ένας μετατροπέας DC/DC δύο κατευθύνσεων σε σειρά, (c) δύο μετατροπείς DC/DC δύο κατευθύνσεων σε σειρά, (d) δύο μετατροπείς DC/DC δύο κατευθύνσεων συνδεδεμένοι παράλληλα και (e) μετατροπέας πολλαπλής εισόδου ZVS DC/DC δύο κατευθύνσεων.



Σχήμα 3.32 – Διαμορφώσεις του συστήματος LLCC [83]

Το τρίτο και τελευταίο στάδιο είναι το HLSC, αποτελείται από συμβάντα βασισμένα σε γεγονότα ή στο χρόνο. Αυτά με τη σειρά τους οργανώνουν το επίπεδο λειτουργίας των εξαρτημάτων, με σκοπό τη βελτίωση της συνολικής απόδοσης του οχήματος και της κατανάλωσης ενέργειας. Έξυπνοι αλγόριθμοι ελέγχου χρησιμοποιούνται για να βελτιώσουν το δεύτερο στάδιο (LLCC), επειδή το ηλεκτρικό αυτοκίνητο είναι ένα πολύ πολύπλοκο σύστημα αλλά και δυναμικά διακριτό, του οποίου τα δεδομένα αλλάζουν διαρκώς. Το HLSC ταξινομείται σε δύο βασικές κατηγορίες. Η πρώτη είναι ο έλεγχος βάση κανόνων (Rule-Based ή RB) και η δεύτερη ο έλεγχος βάση βελτιστοποίησης (Optimization-based). Οι τεχνικές ελέγχου της πρώτης κατηγορίας βασίζονται στη μαθηματική, ευρηματική και ανθρώπινη τεχνογνωσία σε συνδυασμό με την προκαθορισμένη γνώση στην αυτοκίνηση. Ο έλεγχος βάση κανόνων με τη σειρά του χωρίζεται σε ντετερμινιστικό και σε ασαφή. Στον έλεγχο βελτιστοποίησης, ο ελεγκτής βελτιστοποιείται με βάση το λειτουργικό κόστος του συστήματος. Όμως οι ελεγκτές συνυπολογίζουν όλες τις δυναμικές και στατικές συμπεριφορές του συστήματος, με αποτέλεσμα οι παράμετροι σε αυτούς να διαφοροποιούνται συνεχώς. Ο έλεγχος βελτιστοποίησης διαιρείται σε καθολική βελτιστοποίηση (Global Optimization) και βελτιστοποίηση σε πραγματικό χρόνο (Real-time Optimization). Υπάρχουν πολλές στρατηγικές για κάθε υποδιαίρεση του ελέγχου βάση κανόνων και του ελέγχου βάση βελτιστοποίησης, όπως φαίνονται στο παρακάτω σχήμα 3.33.



Σχήμα 3.33 – Ταξινόμηση των στρατηγικών HLSC [28]

Συνοψίζοντας, όλα τα παραπάνω επίπεδα ελέγχου (LLC, LLCC και HLSC) συνεργάζονται για την επίτευξη της καλύτερης στρατηγικής του EMS. Αρχικά στο πρώτο στάδιο αποφασίζεται η αρχιτεκτονική και η μοντελοποίηση του BEV. Στη συνέχεια στο

δεύτερο στάδιο επιλέγεται η διαμόρφωση του HESS, δηλαδή της μπαταρίας και του υπερπυκνωτή και έπειτα μοντελοποιείται. Τέλος, στο τρίτο στάδιο επιλέγεται η στρατηγική του HLSC και εφαρμόζεται στο LLCC.

3.4.1. Εξοικονόμηση ενέργειας μέσω του μηχανισμού πέδησης

Η αναγεννητική πέδηση όπως λέγεται στα ελληνικά με κατά λέξη μετάφραση ή regenerative braking όπως ορίζεται στους κύκλους της ηλεκτροκίνησης, είναι ένας μηχανισμός που ενισχύει την αυτονομία της μπαταρίας και εξελίσει το σύστημα πέδησης ή αλλιώς φρεναρίσματος. Σύμφωνα με αυτόν, γίνεται ανάκτηση της ενέργειας κατά την επιβράδυνση του οχήματος μετατρέποντας την κινητική του ενέργεια σε μια μορφή που μπορεί είτε να χρησιμοποιηθεί άμεσα (να καλύψει άμεσα ενεργειακές ανάγκες) είτε να αποθηκευτεί για μετέπειτα χρήση. Ο ηλεκτροκινητήρας δηλαδή χρησιμοποιεί την ορμή του οχήματος, προκειμένου να ανακτήσει το ποσοστό της ενέργειας που υπό άλλες συνθήκες θα είχε χαθεί στους δίσκους των φρένων (ή στα τακάκια) ως θερμότητα. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με τα συμβατικά συστήματα πέδησης όπου η πλεονάζουσα κινητική ενέργεια μετατρέπεται σε ανεπιθύμητη και σπαταλούμενη θερμότητα με τριβή στα φρένα.

Πρέπει να ειπωθεί ότι προκειμένου να γίνει αυτό το σύστημα πραγματικότητα και να έχει νόημα θα πρέπει ένα αμάξι να διαθέτει ηλεκτροκινητήρα που λειτουργεί ως γεννήτρια. Έτσι στα ηλεκτρικά αμάξια της Tesla αυτό εφαρμόζεται στις εκδόσεις των μοντέλων που διαθέτουν τετρακίνηση και άρα όπως εξηγήθηκε σε προηγούμενα υποκεφάλαια, αυτές οι εκδόσεις διαθέτουν δύο επαγωγικούς ηλεκτροκινητήρες όπου ο ένας λειτουργεί ως ασύγχρονος κινητήρας μεταδίδοντας κινητική ενέργεια στους τροχούς και ο δεύτερος λειτουργεί ως γεννήτρια βάζοντας σε δεύτερο ρόλο την παραγωγή ροπής. Ο μηχανισμός αυτός αποφεύγεται στα υπόλοιπα καθώς επιβάλλεται η χρήση επιπρόσθετων μονάδων όπως για παράδειγμα μία συστοιχία υπερπυκνωτών [84].

Η κινητική ενέργεια που αποθηκεύεται σε κινούμενο όχημα σχετίζεται με την μάζα και την ταχύτητα του οχήματος σύμφωνα με τον τύπο $E = \frac{1}{2}mv^2$. Έτσι αν κάποια έκδοση είναι δύο φορές βαρύτερη από κάποια άλλη τότε θα αποθηκεύσει διπλάσια ενέργεια ενώ αν κατά την διαδικασία κινείται με διπλάσια ταχύτητα τότε θα αποθηκεύσει τετραπλάσια ταχύτητα. Όμως στην πραγματικότητα η ποσότητα ενέργειας που μπορεί κάποιος οδηγός να ανακτήσει εξαρτάται από το που και πως οδηγεί. Η διαδικασία μετατροπής της χημικής ενέργειας από την μπαταρία μέχρι τον ηλεκτροκινητήρα δεν αλλάζει (μπαταρία αμέσως μετά στον αντιστροφέα και στη συνέχεια στον επαγωγικό κινητήρα για κατανάλωση και μετάδοση ροπής στους τροχούς). Το μεγαλύτερο πρόβλημα είναι οι αεροδυναμικές απώλειες, οι

μεγάλες αντιστάσεις λόγω αέρα που συνδέονται με το προηγούμενο και η τριβή των ελαστικών. Αυτά δρουν και επιβραδύνουν το αυτοκίνητο σε μεγάλο βαθμό και έτσι το κομμάτι αυτής της κινητικής ενέργειας δεν μπορεί να ανακτηθεί. Ακόμη, πολύ σημαντικό στοιχείο είναι το γεγονός ότι το ποσοστό της ενέργειας που σώζεται από αυτόν τον μηχανισμό πηγαίνει στην μπαταρία και περνάει όλη αυτήν την φάση μετατροπής εις διπλούν (από το περιβάλλον στην μπαταρία και από την μπαταρία στον επαγωγικό κινητήρα). Έτσι αν η απόδοση μετατροπής φτάσει στο 80% (ένα πολύ ικανοποιητικό ποσοστό) από την μπαταρία στην μηχανή, η απόδοση της σωσμένης ενέργειας φτάνει στο 64% ($80\% * 80\%$).

Οι αλγόριθμοι που ελέγχουν τα κινούμενα μέρη του απλού τριφασικού επαγωγικού κινητήρα, τον οποίο διαθέτουν όλα τα BEV της Tesla, καταφέρνουν να ελέγχουν την ροπή του κινητήρα τόσο κατά την επιτάχυνση όσο και κατά την πέδηση. Ο ελεγκτής που διαθέτει ο κινητήρας μετατρέπει την εντολή στρέψεως (δηλαδή την εντολή του οδηγού για παραγωγή ροπής) σε εντολές για κατάλληλη έξοδο των τιμών της τάσης και του ρεύματος των τριών φάσεων, προκειμένου να παραχθεί μια εντολή ροπής με τον πλέον αποτελεσματικό τρόπο. Λόγω του λογισμικού η εντολή ροπής που προκύπτει μπορεί να έχει είτε θετικό, είτε αρνητικό πρόσημο (δεν είναι αριθμός, η λέξη πρόσημο συνιστά σχήμα λόγου). Όταν η ροπή χρησιμεύει για να επιβραδυνθεί το όχημα τότε η ενέργεια επιστρέφει στην μπαταρία.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο κινητήρας μπορεί να παραδώσει την εντολή ροπής σε οποιαδήποτε ταχύτητα λειτουργίας συμπεριλαμβανομένης και της κατάστασης ακκινησίας. Αυτό όμως από την εταιρεία δεν φαίνεται να αποτελεί ζήτημα έρευνας αφού η κινητική ενέργεια ενός αργά κινούμενου αυτοκινήτου είναι τόσο χαμηλή, ώστε πολύ λίγη ενέργεια επιστρέφεται στην μπαταρία. Στην πραγματικότητα, το τελευταίο μικρό κομμάτι της επιβράδυνσης του οχήματος δημιουργεί μια τόσο μικρή ποσότητα ενέργειας που καλύπτει σε πολύ μικρό ποσοστό τις σταθερές απώλειες των μετατροπέων (DC/DC, DC/AC) και του κινητήρα.

Υπάρχουν μερικοί στόχοι και περιορισμοί κατά την χρήση αυτού του μηχανισμού. Η Tesla εξακολουθεί να κάνει καινούριες προσθήκες κυρίως στην κατανομή της ροπής προκειμένου να πετύχει νέους στόχους και πάντα εντός των περιορισμών. Όσον αφορά αυτούς τους περιορισμούς, ειδική μελέτη γίνεται στην ασφάλεια της αναγεννητικής πέδησης. Η αρνητική ροπή (κατά την διαδικασία που ενεργοποιείται ο μηχανισμός), που εφαρμόζεται στους πίσω τροχούς μπορεί να προκαλέσει αστάθειες. Από τη στιγμή που το φρενάρισμα είναι μια πηγή αρνητικής ροπής, όταν θα συμβεί η διαδικασία της πέδησης, συγκεκριμένα στο μοντέλο Roadster, θα προσπαθήσει να ελέγξει τους συγκεκριμένους τροχούς κι έτσι το σύστημα ελέγχου πέδησης θα ενεργοποιηθεί. Αυτό θα οδηγήσει στο

κλείδωμα των τροχών (προκειμένου να μην γυρίζουν) κι έτσι θα χαθούν μεγάλα ποσά ενέργειας που υπό άλλες συνθήκες θα αποθηκεύονταν ως αποτέλεσμα του μηχανισμού. Αυτός είναι ένας βασικός λόγος που το Tesla Roadster δεν διαθέτει τον μηχανισμό αυτόν [84].

Όσον αφορά την απόδοση, ο μηχανισμός της αναγεννητικής πέδησης και τα αποτελέσματά του, μπορούν να βελτιώσουν την εμπειρία της οδήγησης με τρόπους που δεν είναι υλοποιήσιμοι σε αντίστοιχα αμάξια με κινητήρες εσωτερικής καύσης.

Τέλος, βασικός περιορισμός είναι η λειτουργία του μηχανισμού κατά την διάρκεια οδήγησης ενώ η μπαταρία του BEV είναι πλήρως ή σχεδόν πλήρως φορτισμένη. Επειδή η πρόσθετη φόρτιση από την εν λόγω διαδικασία θα προκαλούσε αύξηση της τάσης της μπαταρίας πάνω από ένα ασφαλές επίπεδο, ο ελεγκτής του κινητήρα θα περιορίσει την ροπή στρέψης.

3.5 Φόρτιση μπαταρίας

Σημαντικό κεφάλαιο για την εταιρεία αποτελεί η διαδικασία της φόρτισης ως βασική παροχή. Το να φορτιστεί μια τόσο μεγάλης χωρητικότητας μπαταρία με τον συμβατικό καθημερινό εξοπλισμό απαιτεί πολύ χρόνο, τόσο που αποτελεί δυσκολία στις καθημερινές ανάγκες του επαγγελματία κατόχου.

Για το λόγο αυτό η Tesla αποφάσισε να δημιουργήσει σταθμούς υπερφόρτισης και με κατάλληλες προσαρμογές στην τεχνολογία των μπαταριών τους η φόρτιση λειτουργεί μόνο λίγη ώρα.

3.5.1. Σταθμοί Υπερφόρτισης και αλλαγής μπαταρίας

Η Tesla αποκάλυψε το Σεπτέμβρη του 2012 τους πρώτους έξι σταθμούς υπερφόρτισης στην Καλιφόρνια. Οι σταθμοί αυτοί επιτρέπουν στους οδηγούς των ηλεκτρικών οχημάτων της Tesla να λάβουν δωρεάν τη μισή φόρτιση της μπαταρίας τους σε 20 μόλις λεπτά. Το δίκτυο των σταθμών υπερφόρτισης της Tesla είναι το μεγαλύτερο και ταχύτερα αναπτυσσόμενο στον κόσμο. Από το 2014 ο αριθμός των σταθμών πενταπλασιάστηκε. Στόχος ήταν ο διπλασιασμός το 2015 [85]. Ο αξιωματούχος της Tesla, Straubel δήλωσε ότι η εταιρία δουλεύει στο να βελτιώσει τη τεχνολογία της φόρτισης, προκειμένου μια μπαταρία να φτάσει σε πλήρη φόρτιση μόλις σε 5 λεπτά. Αυτό είναι πολύ δύσκολο, όμως υπενθυμίζει ότι η ιδέα των υπέρ φορτιστών πριν 10 χρόνια ακουγόταν ακατόρθωτη [86].

Τον Ιανουάριο του 2013 η εταιρία διαφήμισε για πρώτη φορά τη τεχνολογία της ανταλλαγής μπαταρίας. Η ανταλλαγή είναι αυτοματοποιημένη και συμβαίνει σε 90

δευτερόλεπτα, το οποίο είναι δύο φορές γρηγορότερο από το γέμισμα ενός μεγάλου sedan με βενζίνη. Το Δεκέμβριο του 2014 η εταιρία εφάρμοσε ένα πιλοτικό πρόγραμμα για τη τεχνολογία αυτή, κατασκευάζοντας ένα σταθμό ικανό να πραγματοποιήσει την ανταλλαγή σε 3 λεπτά [87]. Τα οφέλη της τεχνολογίας ανταλλαγής είναι προφανή αλλά υπάρχουν επίσης και κάποιες προκλήσεις. Το πρόβλημα έγκειται στο γεγονός ότι στον ιδιοκτήτη ενός οχήματος ανήκει η μπαταρία που ανταλλάσσεται. Για να λύσει αυτό το πρόβλημα η Tesla δίνει στους πελάτες της την ευκαιρία, να ανταλλάξουν τη μπαταρία τους με μία πλήρως φορτισμένη δανεική, με δυνατότητα παραλαβής της αρχικής στο ταξίδι επιστροφής. Άλλος τρόπος θα ήταν οι πελάτες να κρατήσουν τη μπαταρία που παρέλαβαν και αν είναι νεότερη, η εταιρία θα χρεώσει στο πελάτη την οικονομική διαφορά. Στη Καλιφόρνια η εταιρία άνοιξε το πρώτο ηλιακό σταθμό υπέρ φόρτισης [88]. Με την προσθήκη του πιλοτικού προγράμματος ανταλλαγής μπαταριών, φαίνεται ότι η εταιρία δημιουργεί τα θεμέλια για τους μελλοντικούς σταθμούς φόρτισης.

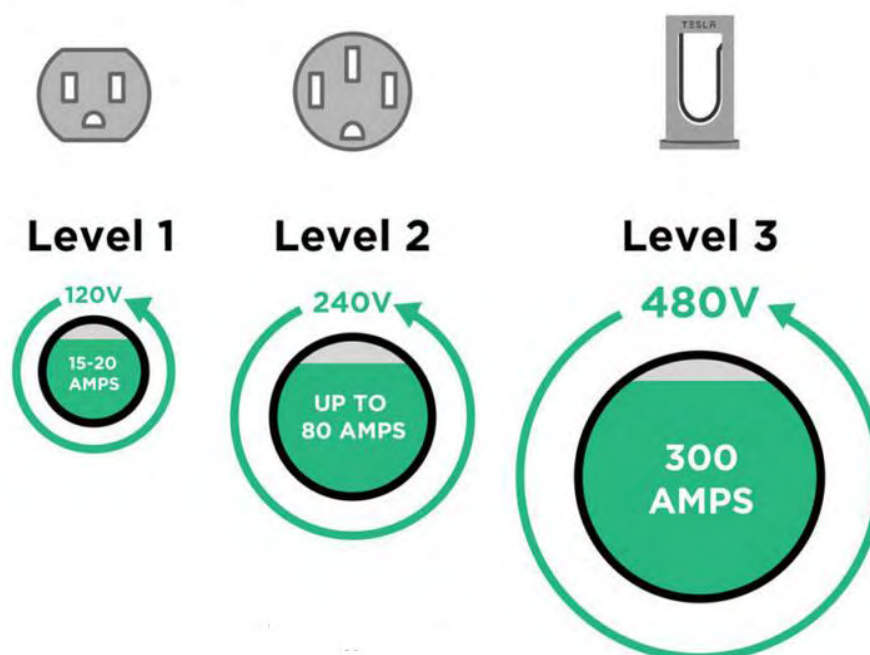
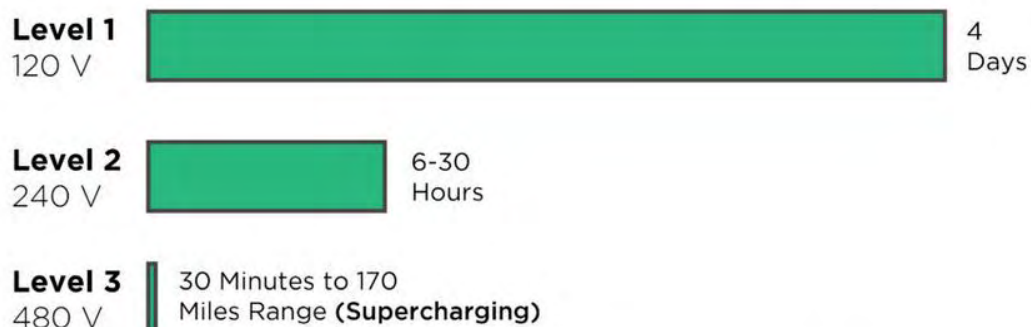
Σχετικά με τους διαθέσιμους αυτή τη στιγμή φορτιστές της αγοράς, υπάρχουν τρία είδη φορτίσεων. Αυτά διαχωρίζονται ανάλογα με τα επίπεδα ονομαστικής τάσης τροφοδοσίας, τη μέγιστη ισχύ που μπορεί να δώσει ο σταθμός καθώς και την μέγιστη ισχύ που μπορεί να λάβει το εκάστοτε μοντέλο.

Στο σχήμα 3.34 παρουσιάζονται τα επίπεδα φόρτισης για δύο μοντέλα της εταιρίας.

Το επίπεδο φόρτισης 1 χρησιμοποιεί κυκλώματα ονομαστικής τάσης 120 V με ρεύμα της τάξεως των 15-20 A. Είναι συνηθέστερο για οικιακή φόρτιση (η τάση των 120V είναι η μέση οικιακή τάση στις Η.Π.Α.). Η εταιρία δίνει στους αγοραστές υποδοχέα συμβατό με αυτό το είδος της πρίζας (NEMA 5-15). Μια ώρα φόρτισης στο επίπεδο 1, αντιστοιχεί σε περίπου 3 χιλιόμετρα αυτονομίας. Η ισχύς που μπορεί να τροφοδοτήσει είναι το πολύ 1.4 kW.

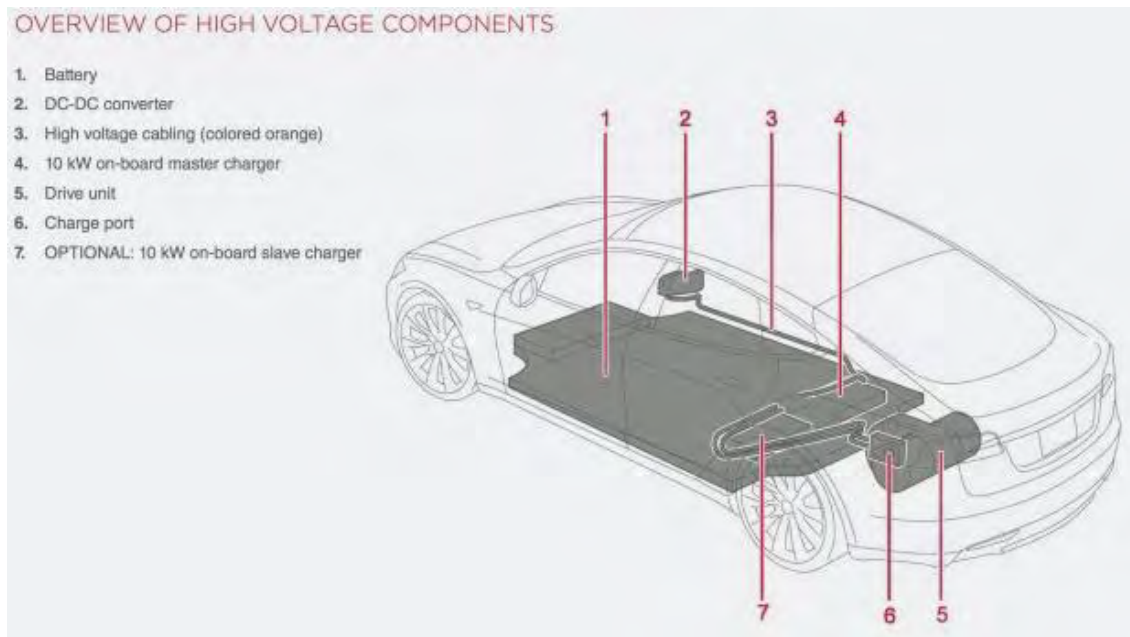
Το επίπεδο φόρτισης 2 χρησιμοποιεί κυκλώματα με ονομαστική τάση στα 240 V και ρεύμα άνω των 80 A, παρόμοια με τη τροφοδοσία μίας ηλεκτρικής κουζίνας (για δεδομένα Η.Π.Α. και πάλι). Οι περισσότεροι δημόσιοι σταθμοί φόρτισης αλλά και σταθμοί για wireless-φόρτιση χρησιμοποιούν το εν λόγω επίπεδο. Μπορούν να φορτίσουν 15 φορές πιο γρήγορα από το προαναφερθέν επίπεδο. Μία ώρα φόρτισης αντιστοιχεί σε περίπου 14 με 84 χιλιόμετρα αυτονομίας, ενώ η ισχύς που μπορεί να τροφοδοτήσει κυμαίνεται από 3.7 – 17.2 kW.

Model S/X 100D Charge Times from Empty to Full



Σχήμα 3.34 – Τα είδη φορτίσεων [89]

Τέλος στο επίπεδο 3, χρησιμοποιούνται υψηλής ισχύος κυκλώματα που διαρρέονται από ρεύμα 300 A και δίνουν ονομαστική τάση 480V. Αυτό το επίπεδο είναι γνωστό με την ονομασία υπερφόρτιση (supercharger). Μισή ώρα φόρτισης σε έναν υπερφόρτιστη ισοδυναμεί με 244 χιλιόμετρα αυτονομίας. Μπορεί να τροφοδοτήσει μέχρι και 140 kW ισχύος ανα όχημα.



Σχήμα 3.35 – Ηλεκτρονικά μέρη υψηλής τάσης [90]

Στο παραπάνω σχήμα 3.35 παρουσιάζονται τα συστατικά υψηλής τάσης ενός μοντέλου. Η διαδικασία των σταδίων φόρτισης που αφορούν τα ηλεκτρονικά, έχει σημειωθεί πιο πάνω. Αυτό που αξίζει να αναφερθεί είναι η παρουσία του εσωτερικού (on-board) φορτιστή. Κατά τη φόρτιση του αμαξώματος από το επίπεδο 2, υπάρχουν δύο πιθανές επιλογές που δίνει η εταιρία στον πελάτη. Την παραδοσιακή plug-in φόρτιση καθώς και την ασύρματη plugless, wireless-charging. Και στις δύο περιπτώσεις η μπαταρία τροφοδοτείται από τον on-board φορτιστή. Στη δεύτερη όμως, το όχημα έχει τη δυνατότητα να φορτίσει μόνο του απλά σταθμεύοντας πάνω από wireless-charging-pad. Ένας adapter λαμβάνει την ενέργεια, την οποία στη συνέχεια διοχετεύει μέσω του on-board φορτιστή στη μπαταρία. Για τη φόρτιση του οχήματος σε υπερφορτιστές όμως, ο on-board φορτιστής δε χρησιμοποιείται και η ενέργεια διοχετεύεται απευθείας στη μπαταρία με τον τρόπο που αναλύθηκε παραπάνω [89].

3.5.2. Τεχνική ανάλυση κατά την φόρτιση της μπαταρίας

Όπως έχει αναλυθεί στην πρώτη υποενότητα, η μπαταρία ιόντων λιθίου αποτελείται από ένα θετικό ηλεκτρόδιο (το οποίο κατέχει ένα υψηλότερο δυναμικό) και ένα αρνητικό ηλεκτρόδιο (το οποίο κατέχει ένα χαμηλότερο δυναμικό), ενώ ενδιάμεσα βρίσκεται ένας ηλεκτρολύτης (ιόντα λιθίου) ιοντικά αγωγίμος αλλά ηλεκτρικά μονωτικός.

Κατά τη διάρκεια της φόρτισης το θετικό ηλεκτρόδιο είναι η άνοδος με την αντίδραση της μείωσης και το αρνητικό ηλεκτρόδιο είναι η κάθοδος με την αντίδραση της οξείδωσης. Κατά την εκφόρτιση η αντίδραση αντιστρέφεται κι έτσι τα θετικά και τα αρνητικά

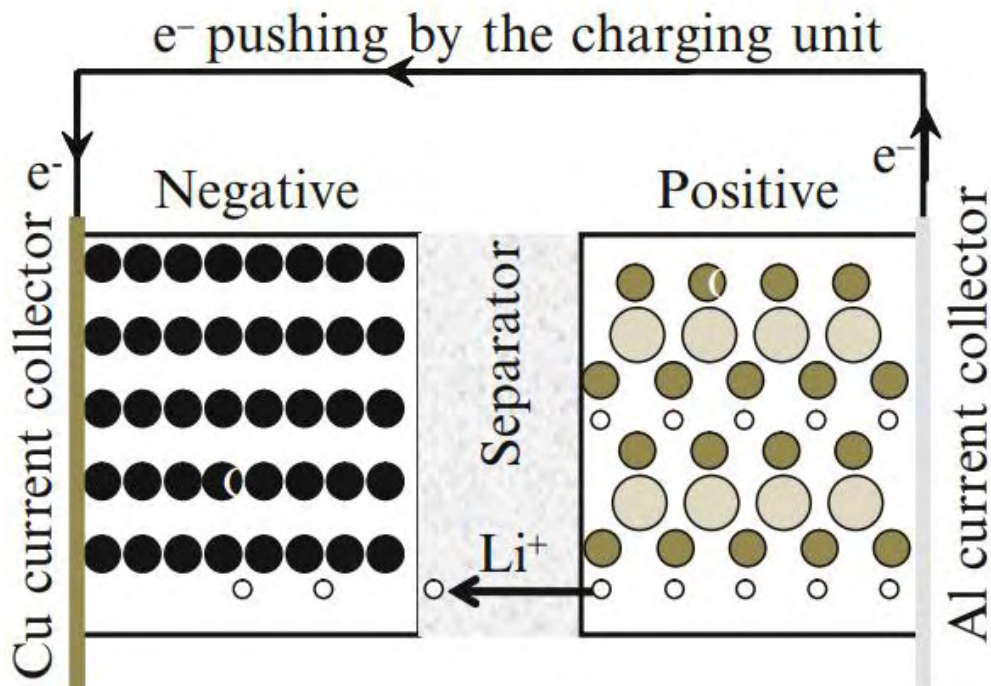
ηλεκτρόδια γίνονται ηλεκτρόδια καθόδου και ανόδου αντίστοιχα. Πρέπει να σημειωθεί ότι τα ενεργά υλικά θετικού και αρνητικού ηλεκτροδίου αναφέρονται επίσης συμβατικά, ως υλικά καθόδου και ανόδου αντίστοιχα. Σε μία σφραγισμένη κυψελίδα, ο υγρός ηλεκτρολύτης συγκρατείται σε ένα διαχωριστή για να αποτρέψει το άμεσο βραχυκύκλωμα που μπορεί να συμβεί σε περίπτωση επαφής των δύο ηλεκτροδίων. Ο διαχωριστής χρησιμεύει επίσης ως δευτερεύουσα δεξαμενή για επιπρόσθετο ηλεκτρολύτη. Είναι ιδανικός για να εξοικονομεί χώρο και λειτουργεί ως επέκταση του ηλεκτρολύτη. Σε μπαταρίες NiMH λειτουργεί ως παγίδα αμμωνίας, ενώ ο κύριος ρόλος του είναι να λειτουργεί ως δικλείδα ασφαλείας προκειμένου να προλαμβάνει την έλλειψη ηλεκτρολύτη.

Το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο ενεργό υλικό στο αρνητικό ηλεκτρόδιο σε μια μπαταρία ιόντων λιθίου που χρησιμοποιείται σε εφαρμογές αυτοκίνησης είναι ο γραφίτης. Κατά τη διάρκεια της φόρτισης μιας τέτοιας μπαταρίας, τα ιόντα λιθίου τα οποία οδηγούνται από τη διαφορά δυναμικού που παρέχεται από τη μονάδα φόρτισης, παρεμβάλλονται στην περιοχή μεταξύ των ελασμάτων γραφίτη (φύλλων γραφίτη). Η διάταξη των θετικών ιόντων λιθίου (Li^+) στον γραφίτη συντονίζεται από το στρώμα διεπιφάνειας του ηλεκτρολύτη (SEI ή Surface-Electrolyte-Interface), το οποίο σχηματίζεται κατά τη διάρκεια της αρχικής διαδικασίας της φόρτισης. Το ενεργό υλικό στο θετικό ηλεκτρόδιο, είναι ένα μεταλλικό οξείδιο που περιέχει ιόντα λιθίου, το οποίο είναι παρόμοιο με το αντίστοιχο ηλεκτρόδιο που βρίσκεται στην μπαταρία νικελίου-μετάλλου υδριδίου. Η διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι στις μπαταρίες ιόντων λιθίου αντικαθίστανται, όπως είναι φυσικό, τα ιόντα υδρογόνου με τα ιόντα λιθίου (στις μπαταρίες NiMH το ενεργό στοιχείο είναι το υδρογόνο).

Στη συνέχεια της φόρτισης, τα θετικά ηλεκτρόδια λιθίου αναπηδούν στην επιφάνεια, κινούνται διαμέσου του ηλεκτρολύτη και τελικά φτάνουν στα αρνητικά ηλεκτρόδια. Η κατάσταση οξειδωσης του μετάλλου θα αυξηθεί και θα επιστρέψει τα ηλεκτρόνια στο εξωτερικό κύκλωμα. Κατά τη διαδικασία όμως της εκφόρτισης η παραπάνω διαδικασία αντιστρέφεται. Τα ιόντα λιθίου κινούνται από τις θέσεις των αρνητικών ηλεκτροδίων, μέσω του ηλεκτρολύτη, στην αρχική θέση του κρυστάλλου (LiMO_2 , υλικό καθόδου). Ο ηλεκτρολύτης που χρησιμοποιείται για να μετακινούνται τα ιόντα λιθίου από το ένα σημείο στο άλλο δεν είναι παρά ένα μίγμα οργανικών ανθρακικών ενώσεων όπως είναι για παράδειγμα το ανθρακικό διαιθύλιο (το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο) το οποίο περιέχει εξαφθοροφωσφορικό λίθιο (LiPF_6). Ο διαχωριστής που αναφέρθηκε παραπάνω, στις μπαταρίες ιόντων λιθίου, είναι μια πολυστρωματική δομή (PP ή polypropylene, πολυπροπυλένιο) η οποία παρέχει αντοχή στην οξείδωση του μετάλλου και μια άλλη δομή

(PE separator, πολυαιθυλένιο) η οποία παρέχει τερματισμό της διαδικασίας με υψηλή ταχύτητα στην περίπτωση βραχυκυκλώματος.

Παρακάτω παρατίθεται η φωτογραφία του σχήματος 3.36 που δείχνει την μετακίνηση των θετικών ηλεκτροδίων διαμέσου του ηλεκτρολύτη στα αρνητικά κατά την φόρτιση. Για εκφόρτιση η φωτογραφία θα ήταν πανομοιότυπη με μόνη διαφορά τη διαφορετική φορά των βελακίων που εικονογραφούν την κατεύθυνση των ιόντων λιθίου. Έτσι:



Σχήμα 3.36 - Φόρτιση μπαταρίας Li-ion [61]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΤΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΤΗΣ TESLA MOTORS

Όταν το 2006 ο ιδιοκτήτης της εταιρίας Elon Musk ρωτήθηκε σχετικά με τη στρατηγική της εταιρίας, δήλωσε «Το σημείο εκκίνησης είναι ένα υψηλής απόδοσης sport αμάξι, αλλά ο μακροπρόθεσμος στόχος είναι η κατασκευή αυτοκινήτων όλων των ειδών, συμπεριλαμβανομένων οικογενειακών οχημάτων χαμηλού κόστους» [91]. Το μυστικό σχέδιο του ιδιοκτήτη σχετικά με τη στρατηγική και το σχεδιασμό των ηλεκτρικών αυτοκινήτων της Tesla συνοψίζεται σε τρεις γενιές, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 4.1.



Σχήμα 4.1 - Οι τρεις γενιές μοντέλων [92]

Στην 1^η γενιά επιτεύχθηκε ο αρχικός στόχος της στρατηγικής: ένα υψηλών επιδόσεων αυτοκίνητο. Στη 2^η γενιά τα μοντέλα και οι εκδόσεις τους διαθέτουν μια πιο εξελιγμένη μπαταρία με μεγαλύτερη αυτονομία, δυνατότητες τετρακίνησης αλλά και συστήματα που διευκολύνουν τη διαδικασία οδήγησης. Τέλος, στη 3^η γενιά υπάγονται φθηνότερα μοντέλα, μικρότερα σε διαστάσεις και ανώτερα σε επιδόσεις που στοχεύουν στη μαζική αγορά. Με αυτό τον τρόπο η εταιρία ευελπιστεί να πετύχει τους στόχους που έθεσε το 2006 [93].

4.1 Η πρώτη γενιά

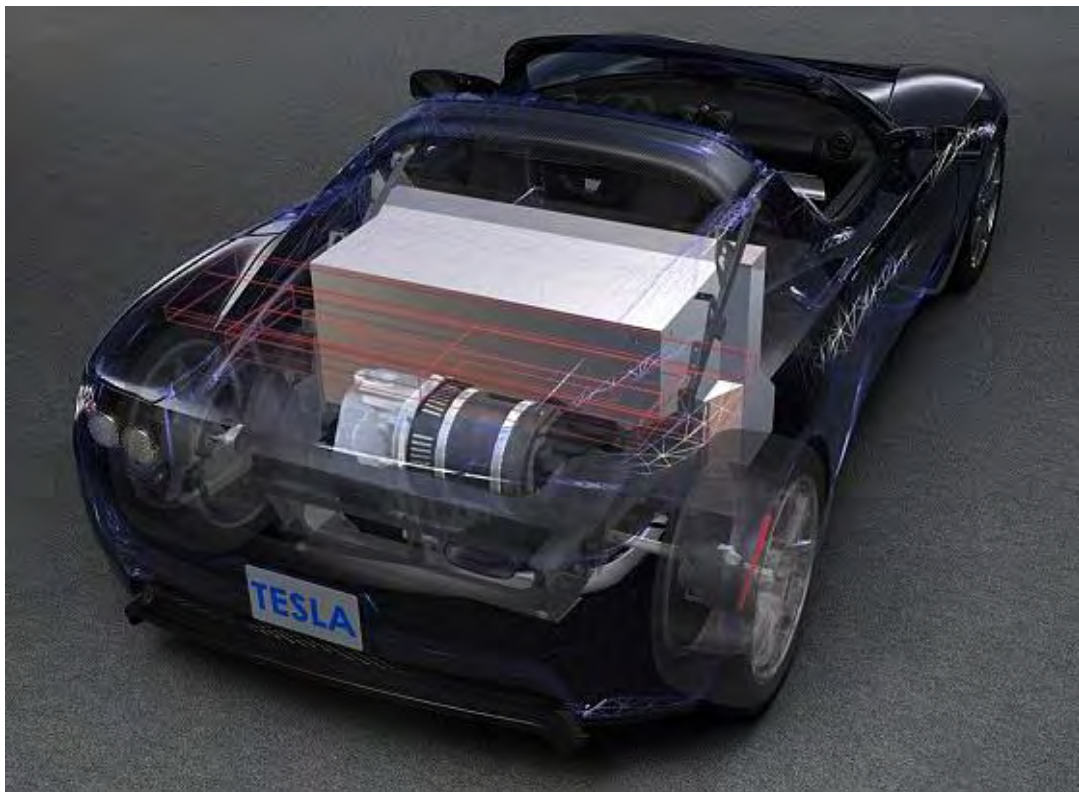
Για να επιτευχθεί το αρχικό βήμα, η εταιρία έπρεπε να παρουσιάσει στο κοινό ένα υψηλής ποιότητας ηλεκτρικό όχημα ούτως ώστε να μπει δυναμικά στην παγκόσμια καταναλωτική αγορά. Ως εκ τούτου το πρώτο μοντέλο που παρουσιάστηκε ήταν το διθέσιο sport ηλεκτρικό αυτοκίνητο Tesla Roadster τον Αύγουστο του 2006. Η εταιρία δε μπορούσε να εισαχθεί γρήγορα στη παγκόσμια αγορά αυτοκίνησης από μόνη της, για αυτό ήρθε σε συνεργασία με την Lotus δανειζόμενη το αμάξωμα του Lotus Elise. Το Roadster φέρει μόνο τον εξωτερικό σχεδιασμό του Elise, αφού όλα τα συστατικά μέρη του σχεδιάστηκαν και αναπτύχθηκαν εξ'ολοκλήρου από τη Tesla, με τον Elon Musk μάλιστα να έχει ηγετικό ρόλο σε αυτό.

Προκειμένου να ξεκινήσει η μαζική παραγωγή του μοντέλου αυτού, που είχε προγραμματιστεί για το Σεπτέμβριο του 2007, η εταιρία ζητούσε συνεχώς νέους επενδυτές συμπεριλαμβανομένου της SDL Ventures, της Valor Equity Partners, τους συνιδρυτές της Google και άλλους. Το ποσό της επένδυσης στην εταιρία μέχρι το 2007 ξεπέρασε τα 105 εκατομμύρια δολάρια και όταν η πρώτη παραγγελία έφυγε από τη γραμμή παραγωγής το 2008, η επένδυση έφτασε τα 140 εκατομμύρια δολάρια (αντί των 25 εκατομμυρίων δολαρίων που είχαν προβλεφθεί αρχικά). Στις αρχές του Αυγούστου του 2009 η Tesla ανακοίνωσε το συνολικό κέρδος για το μήνα Ιούλιο και ήταν 1 εκατομμύριο δολάρια, ενώ τέσσερα χρόνια αργότερα (Μάιο 2013), η εταιρία ήταν η μία και μοναδική από αυτές της αυτοκίνησης που μπορούσε να αποπληρώσει ένα δάνειο ύψους 465 εκατομμυρίων δολαρίων (δάνειο από το Υπουργείο Ενέργειας των Η.Π.Α.) [94][95].

Βάση των τεχνικών χαρακτηριστικών του Roadster υπάρχουν δύο εκδόσεις. Το Tesla Roadster (2008) και το Tesla Roadster Sport (2009). Η ώθηση μεταδίδεται στους τροχούς του πίσω άξονα μέσω ενός σταδίου μετάδοσης που αναπτύχθηκε από την εταιρία BorgWarner Company και βρίσκεται στο πίσω μέρος. Το 2006 τα πρώτα πρωτότυπα διέθεταν κιβώτιο δύο ταχυτήτων (δύο στάδια μετάδοσης). Η καινοτομία όμως συνίσταται στο γεγονός ότι τα BEV χωρίς κιβώτιο ταχυτήτων έχουν υψηλότερη απόδοση, καθώς διαθέτουν λιγότερα κινούμενα μέρη που έχει σαν αποτέλεσμα τη μικρότερη περιστροφική αδράνεια και καθόλου απώλειες ενέργειας στο μηχανισμό ταχυτήτων και διαφορικού [96].

Ως προς το κινητήρα και οι δύο εκδόσεις διαθέτουν τριφασικό τετραπολικό ασύγχρονο AC ηλεκτροκινητήρα που βρίσκεται στο πίσω μέρος του οχήματος όπως φαίνεται στο σχήμα 4.2. Επιπλέον κάποιες αναβαθμίσεις στο κινητήρα και με την συγχώνευση κάποιων κινούμενων μερών αύξησε την ροπή και σαν επακόλουθο έριξε το χρόνο επιταχύνσης των 0-100 χλμ κατά 0.2 δευτερόλεπτα. Η μέγιστη ροπή της απλής έκδοσης είναι 270 Nm με το

έυρος των στροφών του να κυμένεται απο 0-5400 rpm, ενώ της sport έκδοσης 400 Nm με στροφές από 0-5100 rpm. Η ιπποδύναμη της απλής έκδοσης είναι στα 251 hp (185kW), ενώ της sport κατά 40 ίππους παραπάνω (215 kW). Η τελική ταχύτητα ανέρχεται στα 201 χλμ και για τις δύο εκδόσεις [97].



Σχήμα 4.2 – Ο κινητήρας του Roadster [98]

Είναι ευρέως γνωστό ότι το μοντέλο Tesla Roadster τροφοδοτείται από μπαταρίες ιόντων λιθίου (Li-ion). Το ESS αποτελείται από 6.831 μεμονωμένα κελιά ιόντων λιθίου τύπου 18650. Τα κελιά αυτά οργανώνονται σε 11 στρώσεις συνδεδεμένες σε σειρά. Η κάθε στρώση περιέχει 9 τομείς (η Tesla τα αποκαλεί bricks) συνδεδεμένους και αυτούς σε σειρά. Τέλος ο κάθε τομέας περιέχει ομάδες των 69 κελιών συνδεδεμένα παράλληλα. Η μπαταρία καλύπτει περίπου το μέγεθος του αποθηκευτικού χώρου ενός συμβατικού βενζινοκίνητου αμαξίου και ζυγίζει περίπου 409 κιλά. Όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 4.3 η μπαταρία είναι τοποθετημένη στο πίσω μέρος για ασφάλεια και αυτό συμβάλλει σημαντικά στο γρήγορο χρόνο επιτάχυνσης καθώς και στην αυτονομία. Αυτές οι μπαταρίες ιόντων λιθίου είναι πολύ καλύτερες από τα αντίστοιχα κελιά νικελίου ιδριδίου μετάλλου (NiMH) και μολύβδου οξέως (lead-acid). Ωστόσο και αυτά τα κελιά έχουν τους περιορισμούς τους. Η μεγαλύτερη

πρόκληση είχε να κάνει με την αύξηση της ενεργειακής πυκνότητας της μπαταρίας ενώ ταυτόχρονα θα έπρεπε να μεγαλώνει η διάρκεια ζωής της. Χρησιμοποιείται ένας συνδυασμός χημικών ενώσεων στην οικογένεια των μπαταριών ιόντων λιθίου προκειμένου να εξαχθεί το καλύτερο αποτέλεσμα [99].

Αυτό που δε μπορεί να αποφευχθεί είναι ότι όλες η μπαταρίες γερνούν και τότε χάνουν τη μέγιστη χωρητικότητά τους. Αυτό οδηγεί στην μείωση της οδηγικής αυτονομίας. Οι



Σχήμα 4.3 - Η μπαταρία του Roadster [99]

μπαταρίες δε γερνούν μόνο με το χρόνο και τη χρήση αλλά ακόμη και όταν δε χρησιμοποιούνται. Η εταιρία εξετάζει δύο κατηγορίες γήρανσης: τη γήρανση από τη χρήση που ονομάζεται κύκλος ζωής και τη γήρανση από το χρόνο που ονομάζεται ημερολογιακή ζωή. Αυτοί οι δύο διαφορετικοί μηχανισμοί της γήρανσης μπορούν να θεωρηθούν ως δύο ξεχωριστές δυνάμεις. Στην πραγματικότητα λειτουργούν μαζί και ανάλογα με τον τύπο της εφαρμογής και τον τρόπο χρήσης η μία μπορεί να απωβεί πιο καθοριστική από την άλλη. Μία άλλη παράμετρος που επηρεάζει τη διαδικασία της γήρανσης είναι οι περιβαλλοντικές συνθήκες όπως η θερμοκρασία και η υγρασία. Ο κύκλος ζωής των κελιών της μπαταρίας ιόντων λιθίου, ορίζεται από τους κατασκευαστές ως ο αριθμός των φορτίσεων εκφορτίσεων που χρειάζονται προκειμένου η χωρητικότητα των κελιών να μειωθεί σε ένα ποσοστό σε σχέση με το αρχικό. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ένα κελί δε καταστρέφεται στο τέλος του

κύκλου ζωής. Διαθέτει ένα σημαντικό αριθμό χρησιμων κύκλων ακόμα, απλά σε πολύ μικρότερη χωρητικότητα. Υπάρχουν μερικοί παράγοντες που επηρεάζουν το κύκλο ζωής ενός κελιού των μπαταριών ιόντων λιθίου. Κάποιοι από αυτούς μπορούν να αποφευχθούν και κάποιοι άλλοι, που εισάγονται κατά την κατασκευή της μπαταρίας όχι. Είναι σημαντικό και πρέπει να αναφερθεί ότι όλα τα κελιά δε δημιουργούνται ίσα. Οι παράγοντες που επηρεάζουν τον κύκλο ζωής και μπορούν να προβλεφθούν είναι:

- Αποφυγή πολύ υψηλών και πολύ χαμηλών τάσεων κατά τη φόρτιση. Οι τάσεις άνω των 4.14 V/cell (95% κατάσταση φόρτισης) και αυτές κάτω των 3 V/cell (περίπου 2% της κατάστασης φόρτισης) προκαλούν φυσική και ηλεκτρική καταπόνηση στα κελιά.
- Αποφυγή πολύ υψηλών τιμών φόρτισης. Η γρηγορότερη φόρτιση από το μέσω χρόνο φόρτισης (2 ώρες) μπορεί να προκαλέσει μείωση στη ζωή του κελιού.
- Αποφυγή φόρτισης σε θερμοκρασίες κάτω από 0° βαθμούς. (Καινοτομία της εταιρίας αποτελεί η θέρμανση της μπαταρίας πριν τη φόρτιση σε χαμηλές θερμοκρασίες).
- Αποφυγή πολύ υψηλών ποσοστών εκφόρτισης. (Η μπαταρία της εταιρίας έχει σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο ώστε όταν εξασθενεί σε μεγάλο βαθμό 5-10% μπαίνει σε λειτουργία ύπνου) [99].

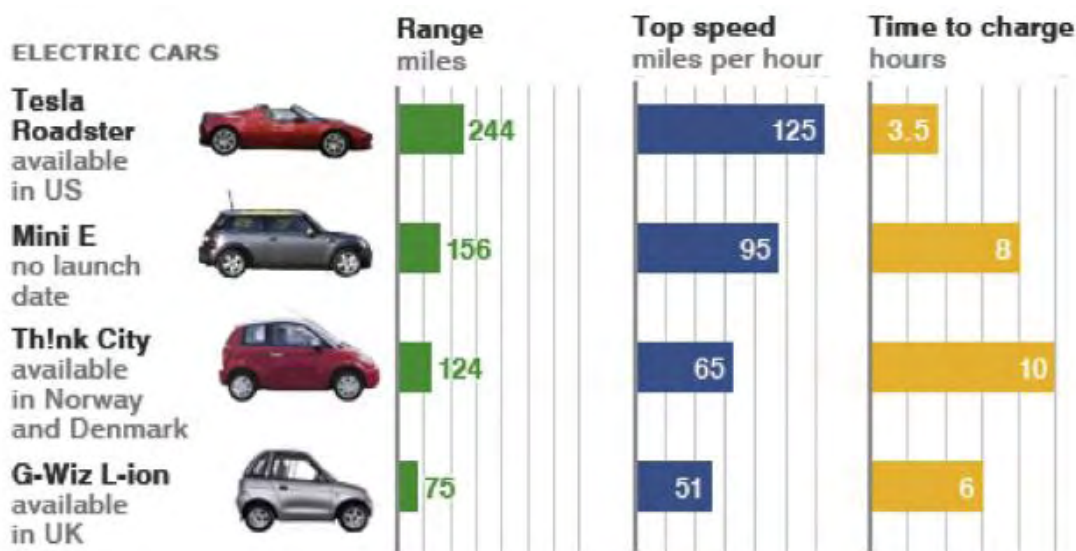
Υπάρχει μεγάλη διαφορά στον κύκλο ζωής ενός κελιού μεταξύ των τάσεων 4.2 V/cell (όπου ορίζεται από τους κατασκευαστές ως πλήρως φορτισμένο) και 4.15 V/cell (που αντιπροσωπεύει φόρτιση της τάξης του 95%). Αυτή η μείωση σε ποσοστό 5% της αρχικής χωρητικότητας ανά κελί (λόγω γήρανσης), στη μπαταρία διαρκούσε πολύ περισσότερο. Αυτό η Tesla το αντιλήφθηκε και οριοθέτησε σαν ανώτερο επίπεδο φόρτισης ανα κελί στο 95% και χρησιμοποίησε το ποσοστό του 5% για την αύξηση της αυτονομίας της μπαταρίας. Επίσης κατά την οριοθέτηση της εκφόρτισης (κατώτερη τάση 3 V/cell), η Tesla με νέα καινοτομία της αποτρέπει τη χρήση της μπαταρίας όταν τα κελιά φτάσουν σε αυτό το όριο.

Σχετικά με την ημερολογιακή ζωή των κελιών ιόντων λιθίου, αυτά χάνουν τη χωρητικότητά τους με το χρόνο, ακόμη και όταν δε χρησιμοποιούνται. Μάλιστα τα κελιά χάνουν χωρητικότητα από την αρχή της κατασκευής τους από τον πρώτο κιόλας χρόνο. Δύο παράγοντες μειώνουν την ημερολογιακή ζωή δραστικά: ο μέσος όρος της θερμοκρασίας ολόκληρης της ζωής της και ο χρόνος που δαπανήθηκε σε καταστάσεις υψηλής φόρτισης. Οι μπαταρίες θα διαρκούσαν στο μέγιστο εάν αποθηκεύονταν κατά τη διάρκεια χαμηλής φόρτισης σε ψυγείο. Γερνούν το μέγιστο όταν αποθηκεύονται σε θερμά μέρη σε πλήρη

φόρτιση. Άλλη μια καινοτομία της Tesla ήταν ο σχεδιασμός ενός εξελιγμένου συστήματος υγρής ψύξης το οποίο θα διατηρεί τη μπαταρία σε ευνοϊκή θερμοκρασία, ακόμα και σε ακραίες περιβαλλοντικές συνθήκες. Το σύστημα ψύξης προσπαθεί να διατηρεί τη θερμοκρασία των κελιών, κάθε στιγμή στη ζωής τους κάτω από τους 35° και πάνω από 25° C βαθμούς.

Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας στην ημερολογιακή ζωή είναι η κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας κατά την αποθήκευση. Σε υψηλότερες καταστάσεις φόρτισης, τα κελιά χάνουν τη χωρητικότητας τους γρηγορότερα. Αυτός είναι ένας δεύτερος λόγος για τον οποίο η εταιρία αποφάσισε να τοποθετήσει ανώτερο όριο φόρτισης (4.15 V/cell). Βάση αυτής της λογικής η εταιρία προσφέρει στους οδηγούς την επιλογή να φορτίσουν τη μπαταρίας τους γύρω στο 50% (3.8 V/cell) ή στο 90% (4.10 V/cell). Με αυτόν τον τρόπο αυξάνει την ημερολογιακή ζωή των κελιών, ανάλογα με τις εκάστοτε χιλιομετρικές απαιτήσεις. Η πλήρης φόρτιση (4.15 V/cell) συμβαίνει μόνο όταν είναι αναγκαίο [99].

Συνοψίζοντας, η εταιρία εργάστηκε σκληρά πάνω στην επιλογή των κατάλληλων κελιών και στο σχεδιασμό του καλύτερου συστήματος ψύξης, δίνοντας ταυτόχρονα ιδιαίτερη προσοχή στα επίπεδα φόρτισης. Με αυτόν τον τρόπο κατάφερε να αυξήσει την αυτονομία της μπαταρίας κατά 5 χρόνια, το οποίο μεταφράζεται σε περίπου 161.000 χλμ. Αυτή η απόδοση δίνει στη μπαταρία του Tesla Roadster το καλύτερο συνδυασμό αυτονομίας και ζωής, από οποιαδήποτε άλλη μπαταρία ηλεκτρικού αμαξιού της εποχής.



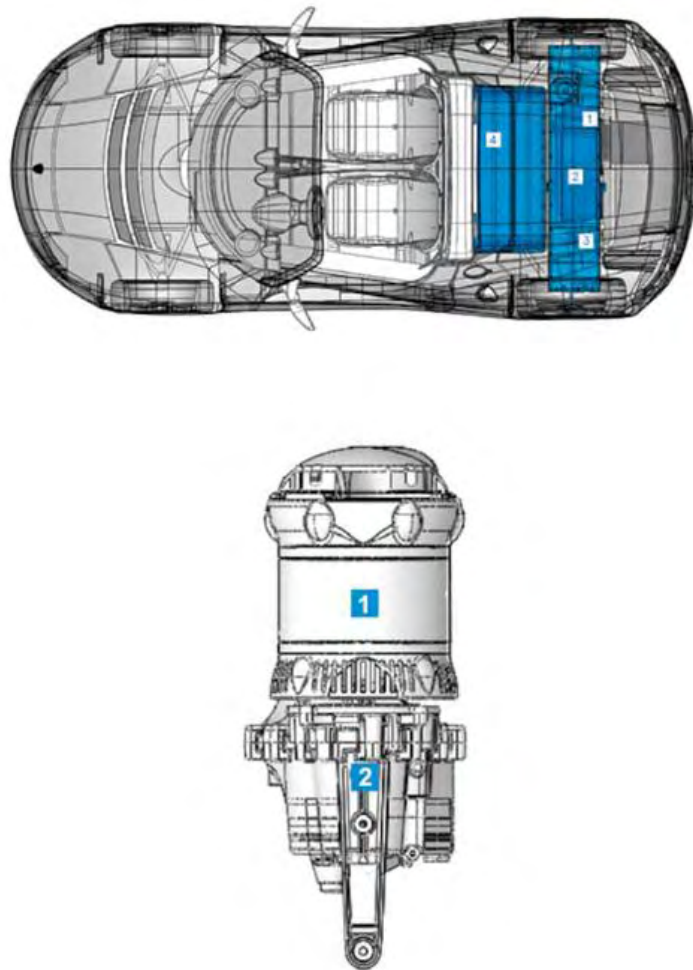
Σχήμα 4.4 – Επιδόσεις ηλεκτρικών αυτοκινήτων το 2009 [27]

Όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.4 το Roadster έφερε την επανάσταση σε αυτονομία, τελική ταχύτητα καθώς και στους χρόνους φόρτισης.

Τέλος είναι σημαντικό και πρέπει να ειπωθεί ότι η συνολική χωρητικότητα της μπαταρίας της απλής έκδοσης του Roadster είναι 37.4 kWh ενώ η αντίστοιχη της sport έκδοσης έχει χωρητικότητα 53 kWh. Και οι δύο εκδόσεις διαθέτουν αυτονομία μέχρι και 395 χλμ με μέση τάση φόρτισης στα 375 V [97]. Μεγαλύτερη αυτονομία πέτυχε η αναβάθμιση του Roadster 3.0, όπου οι μηχανικοί της Tesla εργάστηκαν για τη δημιουργία μίας νέας μπαταρίας χωρητικότητας 70 kWh. Επιπροσθέτως η εταιρία επανασχεδίασε το εξωτερικό κέλυφος του αμαξώματος κάνοντας το πιο αεροδυναμικό. Όλα τα παραπάνω συντέλεσαν στη βελτίωση της αυτονομίας της νέας έκδοσης κατά 40-50%. Η συνολική αυτονομία έφτασε τα 644 χλμ, σχεδόν διπλάσια από τις προηγούμενες δύο εκδόσεις [100].

Παρακάτω στο σχήμα 4.5 παρατίθενται ο πανοραμικός σκελετός ενός Roadster.

- 1) Ο τριφασικός τετραπολικός ασύγχρονος AC ηλεκτροκινητήρας της Tesla ο οποίος ζυγίζει 52 κιλά, με μέγιστη περιστροφή στις 14.000 rpm, παρέχοντας μέγιστη ιπποδύναμη 251hp (185kW) στις 8.000 στροφές. Ο ρότορας από συγκολλημένο χάλυβα και σίδηρο χαλκού υποστηρίζεται από δύο σφραγισμένα και σε μόνιμη λύπανση κεραμικά ρουλεμάν. Τουλάχιστον 205 Nm ροπής είναι διαθέσιμα από 0-5400 στροφές. Τέλος οι εξωτερικές επιφάνειες του κινητήρα ψύχονται με αέρα.
- 2) Το κιβώτιο ταχυτήτων ενός σταδίου μετάδοσης του Roadster, σχεδιασμένο από την εταιρία BorgWarner Company.
- 3) Τα ηλεκτρονικά και συγκεκριμένα ο αντιστροφέας inverter, ο οποίος μετατρέπει τη συνεχή τάση της μπαταρίας σε εναλλασσόμενη τριφασική που απαιτείται από τον ηλεκτροκινητήρα. Αυτό γίνεται με τη χρήση ημιαγωγών και συγκεκριμένα 72 transistor IGBT.
- 4) Το ESS του Tesla Roadster, το οποίο αποτελείται από μία μπαταρία, ένα σύστημα ψύξης (cooling system) και 17 κυκλώματα.



Σχήμα 4.5 - Το πλήρες σχεδιάγραμμα ενός Roadster [101]

4.2 Η δεύτερη γενιά

Οι πιο αξιοσημείωτες αναβαθμίσεις που έχει κάνει η εταιρία σε επίπεδο τελικού προϊόντος περιλαμβάνουν την αύξηση της ταχύτητας στην παραγωγή οχημάτων, τις αναβαθμισμένες εκδόσεις του Roadster (Roadster 3.0) αλλά το πιο σημαντικό, την πλατφόρμα δεύτερης γενιάς του μοντέλου S. Ο διευθύνων σύμβουλος της Tesla δήλωσε ότι η εταιρία διπλασίασε την εβδομαδιαία παραγωγή το 2014 [102]. Η ταχύτεροι ρυθμοί παραγωγής οδηγούν σε χαμηλότερες καταναλώσεις πόρων και σαν συνέπεια έχει την πτώση τιμών των ηλεκτροκίνητων EV στην αγορά.

Η μεγάλη διαφορά που διαχωρίζει τη γραμμή παραγωγής της πρώτης γενιάς από τη δεύτερη έγκειται στην αλλαγή της τοποθέσιας της μπαταρίας όπως φαίνεται στο σχήμα 4.6.



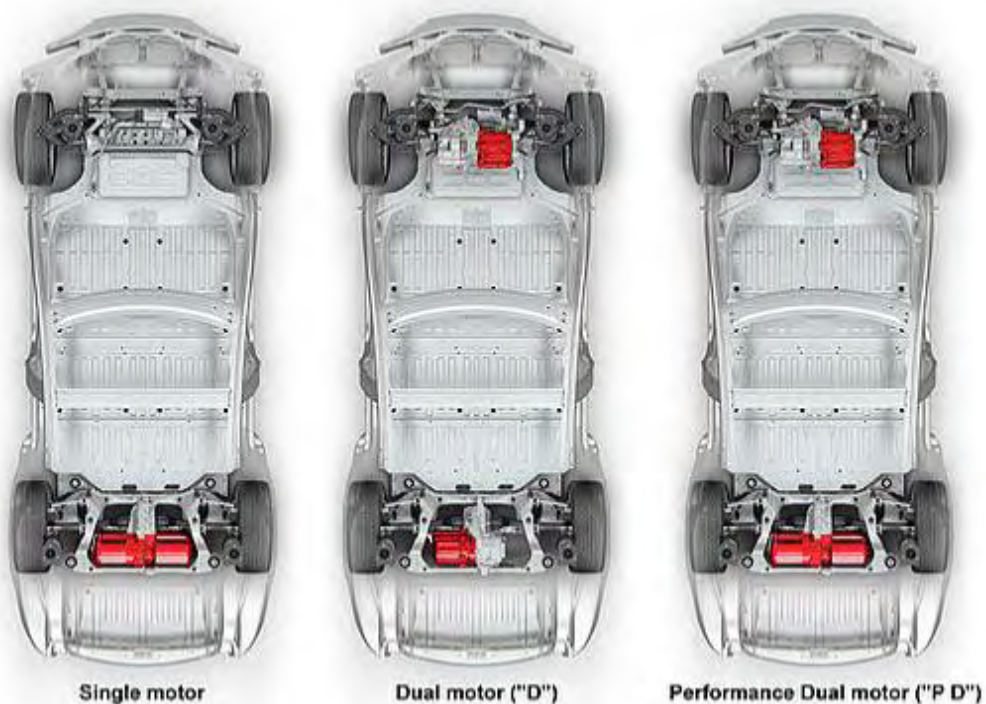
Σχήμα 4.6 - Η τοπολογία της μπαταρίας του μοντέλου S [103]

Στο Roadster η μπαταρία βρισκόταν στο πίσω μέρος του αμαξώματος, ενώ στο μοντέλο S η μπαταρία βρίσκεται στην πλατφόρμα του αυτοκινήτου και απλώνεται σε όλο το κάτω μέρος του αυτοκινήτου (πάτωμα-σασί). Η τοποθέτηση των μπαταριών σε αυτή τη θέση έχει προκαλέσει αναβαθμίσεις στο τελικό προϊόν σε επίπεδο απόδοσης, ασφάλειας και εξοικονόμησης χώρου. Αυτά δεν έχουν παρατηρηθεί στο παρελθόν σε βενζινοκίνητα οχήματα. Επιπλέον αυτές οι εξελίξεις οδήγησαν την Tesla στην δημιουργία μιας επιτυχημένης πλατφόρμας αρχιτεκτονικής, που θα μπορούσε να δανειστεί για την παραγωγή ηλεκτρικών αμαξιών άλλων κατασκευαστών.

Το μοντέλο S είναι ένα πλήρως ηλεκτρικό πεντάθυρο πολυτελές αμάξι το οποίο παρουσιάστηκε από την εταιρία τον Ιούνιο του 2012. Κατάφερε να βαθμολογηθεί με 5 αστέρια ως το πιο ασφαλές αμάξι από το Euro NCAP (European New Car Assessment Programme) [104]. Πιο συγκεκριμένα το μοντέλο έχει δομικά πλεονεκτήματα που δε διαθέτουν τα συμβατικά αυτοκίνητα. Διαθέτει χαμηλό κέντρο βάρους επειδή η μπαταρία (το πιο βαρύ κομμάτι του οχήματος), βρίσκεται κάτω από τους επιβάτες, κάνοντας την ανατροπή του εξαιρετικά απίθανη. Επίσης, στο μπροστινό μέρος υπάρχει ένας μεγάλος αποθηκευτικός χώρος λόγω έλλειψης του κινητήρα, το οποίο σημαίνει ότι σε περίπτωση μετωπικής σύγκρουσης το αμάξι μπορεί να απορροφήσει περισσότερη ενέργεια έναντι των περισσότερων κοινότυπων αμαξιών. Το εξωτερικό σώμα του είναι ενισχυμένο με προεξοχές αλουμινίου σε στρατηγικά σημεία και η οροφή του μπορεί να δεχθεί πρόσκρουση έως 4g. Για όλους τους παραπάνω λόγους το μοντέλο S κατόρθωσε να βαθμολογηθεί με 5 αστέρια

σε κάθε υποκατηγορία του NHTSA (National Highway Traffic Safety Administration) το 2013.

Το μοντέλο S κυκλοφορεί σε διαφορετικές εκδόσεις ανάλογα με τη μπαταρία, τον κινητήρα και τον εξοπλισμό που διαθέτει. Αναφορικά με το κινητήρα όλες οι εκδόσεις διαθέτουν τριφασικό τετραπολικό AC ηλεκτροκινητήρα. Ανάλογα με τη συνολική απόδοση του εκάστοτε μοντέλου υπάρχουν τρεις διαφοροποιήσεις στο υλικό του όπως φαίνεται στο σχήμα 4.7. Στις απλές εκδόσεις ο κινητήρας βρίσκεται στο πίσω μέρος και για αυτό το λόγο διαθέτουν αυστηρά οπισθοκίνηση RWD (Rear Wheel Drive). Στις εκδόσεις “P” (performance), η τοπολογία σε σχέση με τις απλές δεν διαφοροποιείται.



Σχήμα 4.7 – Τοπολογίες των κινητήρων του μοντέλου S [103]

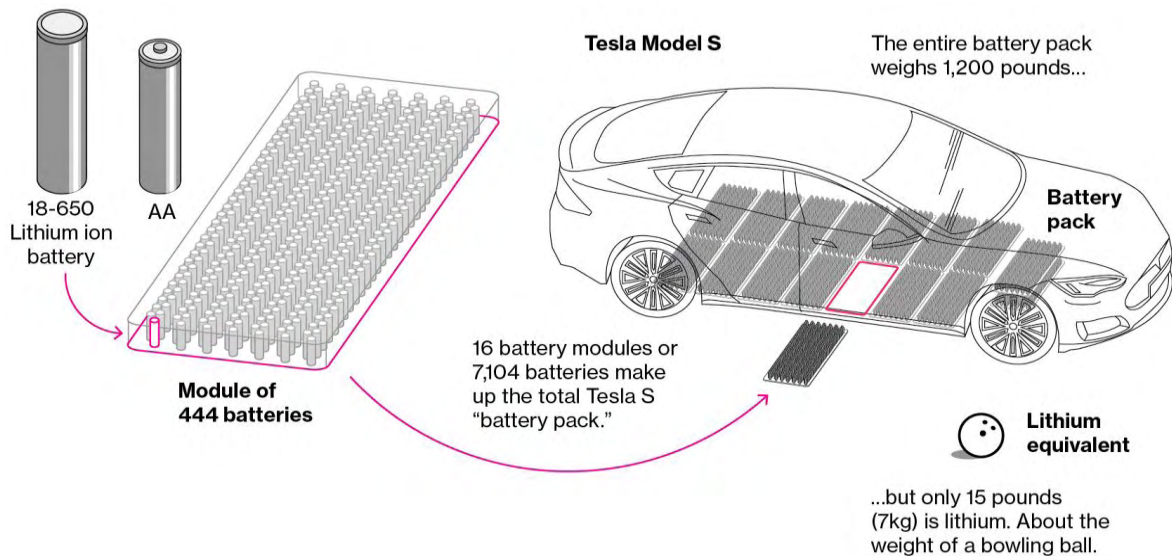
Διαθέτουν μεγαλύτερο, δυνατότερο και λιγότερο ενεργειακά αποδοτικό κινητήρα. Στις εκδόσεις “D” (Dual Motor) η Tesla εισήγαγε την τετρακίνηση AWD (All Wheel Drive), προσθέτοντας έναν δεύτερο υψηλής απόδοσης κινητήρα στο μπροστινό άξονα του αμαξώματος. Τέλος, ο συνδυασμός των παραπάνω δημιούργησε τις πιο ισχυρές εκδόσεις των μοντέλων S, “P_D” οι οποίες διαθέτουν έναν πιο ισχυρό πίσω κινητήρα από τις “D” εκδόσεις [105].

Οι αλγόριθμοι στο τμήμα λογισμικού της Tesla, Tesla Firmware, βοηθούν στη διατήρηση σταθερής ροπής ελέγχοντας την ποσότητα ηλεκτρικού ρεύματος που ρέει μέσω των επαφών

στους ηλεκτροκινητήρες. Το Ludicrous Speed προσθέτει μια νέα ασφάλεια και ένα νέο τύπο επαφής, που μπορεί να διατηρήσει χωρίς προβλήματα τη ροή ηλεκτρικού ρεύματος από 1.300 - 1.500 Ampere, επιτρέποντας έτσι στους ηλεκτροκινητήρες να παράγουν προσωρινά περισσότερη ισχύ. Αυτό συντελεί στη περαιτέρω μείωση του χρόνου της επιτάχυνσης [106].

Αυτή τη στιγμή σύμφωνα με την ιστοσελίδα της εταιρίας βρίσκονται σε κυκλοφορία οι εξής εκδόσεις του μοντέλου S, 75D, 100D, P100D. Η έκδοση 75D διαθέτει ηλεκτροκινητήρα με ιπποδύναμη 518 hp (386kW), ενώ οι υπόλοιπες δύο διαθέτουν ισχυρότερο ηλεκτροκινητήρα 762 hp (568Kw). Όσον αφορά τη συνολική ροπή, η έκδοση 75D μπορεί να παράξει 659 Nm, η 100D 660 Nm, ενώ η P100D 931 Nm. Αναφορικά με το χρόνο επιτάχυνσης το 75D φτάνει τα 0-100 χλμ σε 4.4 δευτερόλεπτα, έναντι 3.8 του 100D και 2.4 του P100D. Τέλος, οι τελικές ταχύτητες είναι 230 χλμ/ώρα για το 75D και 249 χλμ/ώρα για τις υπόλοιπες δύο εκδόσεις [59].

Όλες οι παραπάνω εξαιρετικές επιδόσεις συνδέονται άρρηκτα με τη χωρητικότητα και την αποδοτικότητα της μπαταρίας. Η εταιρία έχει εξοπλίσει τις διάφορες εκδόσεις του μοντέλου S με μπαταρίες που διαθέτουν 7.104 κελιά ιόντων λιθίου. Τα κελιά αυτά σχηματικά είναι ελαφρώς μεγαλύτερα από τις γνωστές κυλινδρικές μπαταρίες μεγέθους AA, έχοντας διάμετρο 18 χιλιοστά και ύψος 65 χιλιοστά και απαρτίζουν τη μπαταρία. Ο σχεδιασμός της Panasonic, με τη συμβολή της Tesla, αποτελούν μια πολύ ισχυρή αρχιτεκτονική φόρμουλα η οποία αποδίδει πολύ αξιόπιστες επιδόσεις στο απαιτητικό περιβάλλον της αυτοκίνησης. Η αρχιτεκτονική αυτή χωρίζει τα 7.104 κελιά σε 16 μονάδες (modules) των 444 κελιών, ικανά να αποθηκεύσουν 85kWh ηλεκτρικής ενέργειας. Οι μονάδες αυτές είναι συνδεδεμένες σε σειρά (14 από αυτές στο επίπεδο τμήμα και 2 στοιβαγμένες μπροστά). Κάθε μονάδα εμπεριέχει 6 ομάδες (bricks) των 74 κελιών συνδεδεμένα παράλληλα. Αυτές οι 6 ομάδες στη συνέχεια συνδέονται σε σειρά εντός της μονάδας. Από τον Ιούνιο του 2012 η μπαταρία χρησιμοποιούσε τροποποιημένα κελιά από την Panasonic με καθόδους νικελίου-κοβαλτίου-αλουμινίου. Κάθε κελί ήταν της μορφής 18650 (εξαιτίας των διαστάσεων που προαναφέρθηκαν), αρκετά παρόμοια με τα κελιά της Panasonic NCR18650B, τα οποία διέθεταν ενεργειακή πυκνότητα της τάξης των 265Wh/kg. Οι αναλυτές εκτιμούν ότι το κόστος της μπαταρίας είναι περίπου το 21-22% του συνολικού κόστους του αυτοκινήτου. Στο παρακάτω σχήμα 4.8 παρατίθενται όσα ήδη περιγράφηκαν.



Σχήμα 4.8 - Η μορφολογία της μπαταρίας του μοντέλου S [107]

Επιπροσθέτως η εταιρία ανακοίνωσε την προσδοκία της για την ετήσια βελτίωση της χωρητικότητας της μπαταρίας κατά περίπου 5%. Έτσι οι μηχανικοί της επαναρύθμισαν το εσωτερικό της μπαταρίας έτσι ώστε κάθε μονάδα πλέον να περιέχει 516 κελιά, σε σύνολο 8.256 κελιών, ικανών να αποθηκεύσουν λίγο παραπάνω από 100kWh ενέργειας και παρέχοντας αυτονομία άνω των 483 χιλιομέτρων [108]. Επίσης εξήγησε ότι εκτός από την έκδοση του P90D, όλες οι υπόλοιπες διέθεταν μια ασφάλεια των 1.300 A, το οποίο είναι κάπως συντηρητικό δεδομένου ότι υπάρχει μια αβεβαιότητα κάτω από τις συνθήκες κατά τις οποίες η ασφάλεια καίγεται. Για να λύσει το πρόβλημα αυτό η Tesla στο P90D, εισήγαγε τα κελιά μέσα σε κράμα Inconel και μία ηλεκτρονικά ελεγχόμενη ασφάλεια (που ενεργοποιείται σε περίπτωση φωτιάς), η οποία ελέγχει το ρεύμα σε χρόνο της τάξεως των χιλιοστών του δευτερολέπτου και κόβει την παροχή ενέργειας με μεγάλη ακρίβεια και σιγουριά και έχει ανοχή έως 1.500 A [109].

Ανάλογα με τις εκδόσεις του μοντέλου S που κυκλοφορούν αυτήν τη στιγμή στην αγορά, στο παρακάτω σχήμα 4.9 παρατίθενται με τη σειρά οι τύποι τους βάση της μπαταρίας που διαθέτουν. Με τη σειρά από πάνω προς τα κάτω περιγράφονται:

	75 kWh	100 kWh	
Drive train	AWD	Ludicrous	AWD
Model Designation	75D	P100D	100D
NEDC Range	490 km	613 km	632 km
0–100 km/h	4.4 sec	2.4 sec	4.4 sec
Top speed	230 km/h	250 km/h	250 km/h

Σχήμα 4.9 [103]

Η κίνηση που προσφέρουν οι τρεις εκδόσεις, η ονομασία τους, η αυτονομία τους σε χιλιόμετρα, ο χρόνος επιτάχυνσης από 0-100 χλμ/ώρα και τέλος η μέγιστη ταχύτητα.

Ο αυτόματος πιλότος (autopilot) είναι μία καινοτομία που η εταιρία εισήγαγε για πρώτη φορά στη δεύτερη γενιά παραγωγής. Για την εγκατάσταση του είναι αναγκαίος ένας αριθμός από προγράμματα λογισμικού σε συνδυασμό με ειδικό εξοπλισμό ανίχνευσης χώρου. Χωρίζεται σε διαφορετικές εκδόσεις και η Tesla δουλεύει συνεχώς πάνω στη βελτίωση τους.

Η πρώτη έκδοση η οποία ήταν διαθέσιμη για όλα τα μοντέλα S από το Σεπτέμβριο του 2014 ήταν η έκδοση autopilot 1.0. Πιο συγκεκριμένα ο εξοπλισμός που απαιτείται είναι: οχτώ περιφερειακές κάμερες, δώδεκα υπερηχητικούς αισθητήρες, ένα μπροστινό radar που ανιχνεύει όλα τα εμπόδια σε οποιαδήποτε συνθήκη του περιβάλλοντος και όλα αυτά συνδέονται σε έναν πολύ ισχυρό onboard υπολογιστή. Αυτός ο υπολογιστής διαθέτει λογισμικά που επεξεργάζονται με επιτυχία τις πληροφορίες που δέχεται από τα radar, τις κάμερες και τα σήματα sonar. Σχετικά με τις κάμερες, τρεις τοποθετούνται στο μπροστινό μέρος για ανίχνευση κοντινών και μακρινών εμποδίων, μια τοποθετείται στο πίσω μέρος και από ένα ζευγάρι στα πλάγια τα οποία με τη σειρά τους κοιτούν μπροστά και πίσω [110]. Αυτά ενημερώνουν τον οδηγό σε πραγματικό χρόνο και καταφέρνουν να οδηγήσουν αυτόματα το μοντέλο S. Ο συνδυασμός των παραπάνω καταφέρει να προσφέρει τα εξής:

- Ενημέρωση κυκλοφορίας και σύστημα ελέγχου ταχύτητας (Cruise Control)
- Αυτόματο στρίψιμο του αμαξώματος
- Αυτόματη οδήγηση χωρίς τη παρουσία οδηγού (summon) από και προς το σημείο στάθμευσης
- Σύστημα αλλαγής λωρίδας με εντολή οδηγού μέσω του φλάς
- Σύστημα πλήρους αυτόνομης στάθμευσης, με το αυτοκίνητο να εκτελεί μόνο του, τους απαιτούμενους ελιγμούς.

Η πρώτη επίσημη βελτίωση έγινε διαθέσιμη τον Οκτώβριο του 2016 και περιλάμβανε τη βελτίωση των ήδη υπάρχοντων λειτουργιών καθώς επίσης και προσθήκη νέων. Πιο συγκεκριμένα η νέα ενισχυμένη έκδοση 2.0 περιλαμβάνει:

- Βελτιωμένη ενημέρωση κυκλοφορίας και σύστημα ελέγχου ταχύτητας (Cruise Control), η ταχύτητα του θα ρυθμίζεται σύμφωνα με τις συνθήκες κυκλοφορίας.
- Βελτιωμένο στρίψιμο του αμαξώματος
- Βελτιωμένη έξυπνη έκδοση της λειτουργίας summon
- Βελτιωμένο σύστημα αλλαγής λωρίδας, το όχημα θα διατηρείται σε μία λωρίδα και η αλλαγή λωρίδας θα πραγματοποιείται πλέον αυτόματα, χωρίς την εντολή του οδηγού.
- Βελτιωμένο σύστημα αυτόνομης στάθμευσης
- Σύστημα αποφυγής κίνησης (On-ramp to Off-ramp), υπολογισμός πιο σύντομης διαδρομής για αποφυγή συμφόρησης.
- Πλήρως αυτοματοποιημένο σύστημα οδήγησης (μέσω του Gps), το αμάξι έχει τη δυνατότητα να μεταβαίνει μόνο του από έναν αυτοκινητόδρομο σε άλλο, ενώ όταν ο προορισμός το απαιτεί το όχημα θα βγαίνει από αυτόν. Όταν φτάνει ο οδηγός στο προορισμό του το όχημα παρκάρει μόνο του (λειτουργία αυτόνομης στάθμευσης), ενώ με μια απλή εντολή στο κινητό (έξυπνη έκδοση λειτουργίας summon) το όχημα επανέρχεται πίσω στον οδηγό [103].

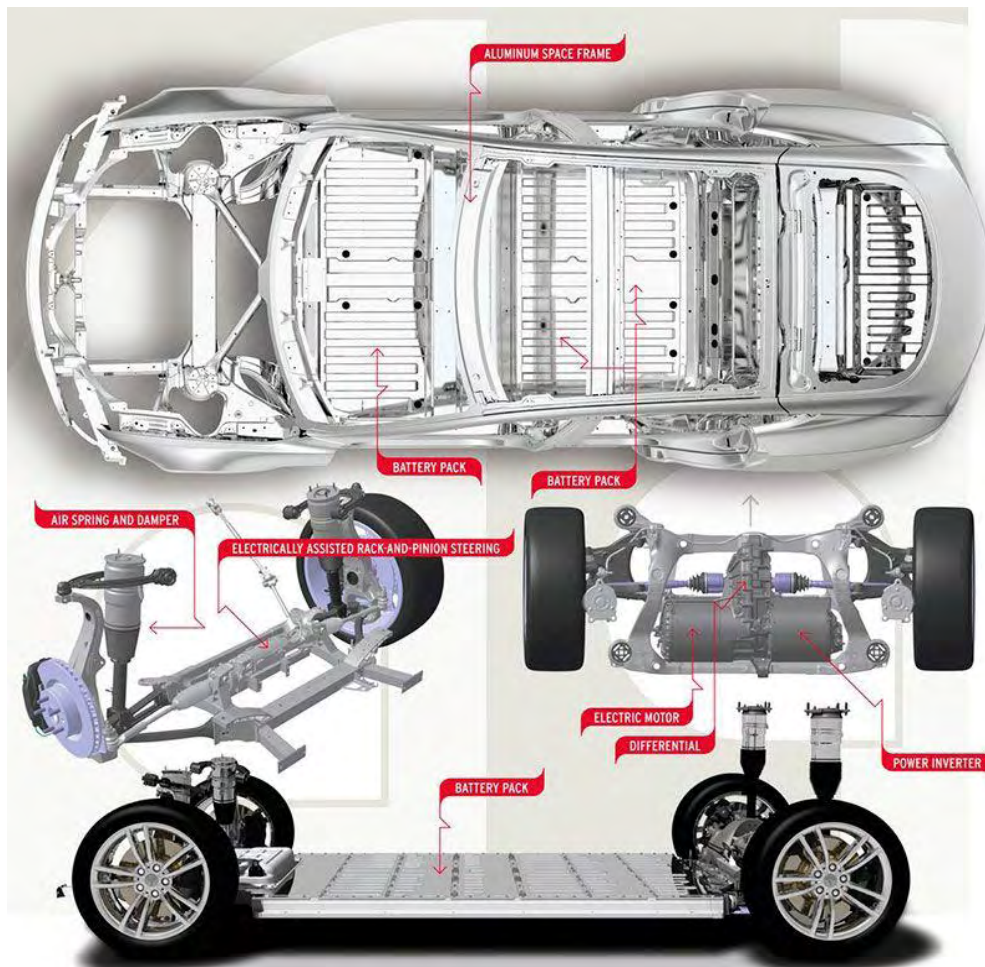


Σχήμα 4.10 – Ο αυτόματος πιλότος [92]

Όλες οι εκδόσεις των μοντέλων S είναι εξοπλισμένες με μία οθόνη αφής των 17 ιντσών, οι οποίες απεικονίζουν τη κατάσταση του οχήματος κάθε στιγμή. Η παραπάνω φωτογραφία (σχήμα 4.10) παραθέτει ένα στιγμιότυπο της οθόνης αφής κατά τη διάρκεια εφαρμογής του

αυτόματου πιλότου. Κάτω δεξιά φαίνονται οι επιλογές του Cruise Control (D-Drive, N-Neutral, R-Rear, P-Parking). Ακριβώς από πάνω υπάρχει ενημέρωση σχετικά με τη μέση κατανάλωση της ενέργειας της μπαταρίας κατά την οδήγηση. Στη μέση σκιαγραφείται το περιβάλλον του δρόμου (με βοήθεια των αισθητήρων sonar). Η ταχύτητα προσαρμόζεται και αυτή βάση της σήμανσης. Τέλος στα αριστερά της οθόνης υπάρχει ένδειξη της χωρητικότητας της μπαταρίας και ένας χάρτης πλοήγησης Gps. Οι χάρτες αυτοί είναι υψηλής ακρίβειας και σχεδιασμένοι από την εταιρία. Στις ιδιαιτερότητες του συστήματος αυτόματου πιλότου είναι η επικοινωνία του κάθε αυτοκινήτου με μία κεντρική βάση δεδομένων-δίκτυο το οποίο αξιοποιώντας τα δεδομένα θα προσφέρει, με το πέρασμα του χρόνου, καθημερινές ενημερώσεις σε όλους τους χρήστες. Ο διευθύνων σύμβουλος της εταιρίας εξήγησε ότι το σύστημα αυτό συνεχώς μαθαίνει και βελτιώνεται μόνο του χάρη στους αλγορίθμους μηχανικής μάθησης, την ασύρματη σύνδεση του αυτοκινήτου στο δίκτυο και τη λεπτομερή χαρτογράφηση μέσω των αισθητήρων. Όλες αυτές οι ενημερώσεις γίνονται από ένα κεντρικό cloud [111].

Στο σχήμα 4.11 παρουσιάζεται ο πλήρης σκελετός ενός μοντέλου S. Στο πίσω μέρος βρίσκεται ο ηλεκτροκινητήρας, το διαφορικό, το οποίο παρόμοια με του Roadster αποτελείται από ένα στάδιο μετάδοσης της κίνησης και ο μετατροπέας inverter (ο οποίος διαθέτει 14 IGBT ανα διακόπτη και συνολικά 84). Η μπαταρία όπως ήδη αναφέρθηκε καλύπτει όλο το κάτω μέρος του αμαξώματος. Στο μπροστά μέρος η Tesla εφάρμοσε ένα ηλεκτρικό σύστημα για το στρίψιμο των τροχών (Electrically Assisted Steering) έναντι του κοινού υδραυλικού. Τα υδραυλικά συστήματα αν και πολύ εξεληγμένα πλέον, έχουν κάποια μειονεκτήματα. Το βασικό μειονέκτημα είναι ότι χάνεται ένα μικρό ποσό ενέργειας κατά την κίνηση της αντλίας (pump) από τον κινητήρα. Επιπλέον επειδή υπάρχει ένα υγρό που ρέει μέσα στην αντλία, υπάρχουν κάποιοι περιορισμοί στη λειτουργία του υδραυλικού συστήματος. Τέλος, τοποθέτησε αναρτήσεις αέρος (Air Spring & Damper), οι οποίες δεν έχουν τους περιορισμούς των κοινών αναρτήσεων λαδιού και πετυχαίνουν πολύ καλή απόσβεση κραδασμών.



Σχήμα 4.11 – Το πλήρες σχεδιάγραμμα ενός μοντέλου S [112]

Μετά τη μεγάλη επιτυχία που σημείωσε το μοντέλο S, ο διευθύνων σύμβουλος της εταιρίας αποκάλυψε το Φεβρουάριο του 2012 το επόμενο μοντέλο με την επωνυμία X [113]. Το μοντέλο X ήταν το δεύτερο κατά σειρά όχημα που κατασκευάστηκε στη δεύτερη γενιά και είναι εξολοκλήρου βασισμένο στη πλατφόρμα του μοντέλου S. Το όραμα της εταιρίας ήταν η κατασκευή ενός οχήματος που θα διέθετε τη λειτουργικότητα ενός minivan και θα ήταν πιο κομψό από ένα μέσο SUV (Sport Utility Vehicle). Η εταιρία αρχικά είχε προγραμματίσει τη παράδοση των πρώτων παραγγελιών το 2013. Εξαιτίας κάποιων καθυστερήσεων που υπήρξαν λόγω της βελτίωσης της ποιότητας του μοντέλου, τελικά οι πρώτες παραγγελίες παραδόθηκαν το 2015 [114]. Το μοντέλο X ζυγίζει 10% περισσότερο από το μοντέλο S ενώ μοιράζεται το 60% των εξαρτημάτων του. Εξαιτίας του αυξημένου βάρους, η αυτονομία στο μοντέλο X μειώνεται κατά 10% αλλά η εταιρία δίνει τη δυνατότητα της επιλογής στη χωρητικότητα της μπαταρίας. Επιπλέον το αμάξι διαθέτει χώρο για επτά επιβάτες και ίδιον της κατασκευής του είναι το γεγονός ότι οι πίσω πόρτες ανοίγουν κάθετα προς τα πάνω, παρέχοντας μια ευκολία κατά την αποβίβαση [113]. Οι

εκδόσεις που αυτή τη στιγμή είναι διαθέσιμες από το site της εταιρίας είναι οι 75D, 100D, P100D. Η αυτονομία, οι χρόνοι επιτάχυνσης από 0-100 χιλιόμετρα και η τελική ταχύτητα των εκδόσεων του μοντέλου X, παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα 4.12.

	75 kWh	100 kWh	
Drive train	AWD	Ludicrous	AWD
Model Designation	75D	P100D	100D
NEDC Range	382km	465km	475km
0-100 km/h	4.9sec	2.9 sec	4.7 sec
Top speed	210km/h	250km/h	250km/h

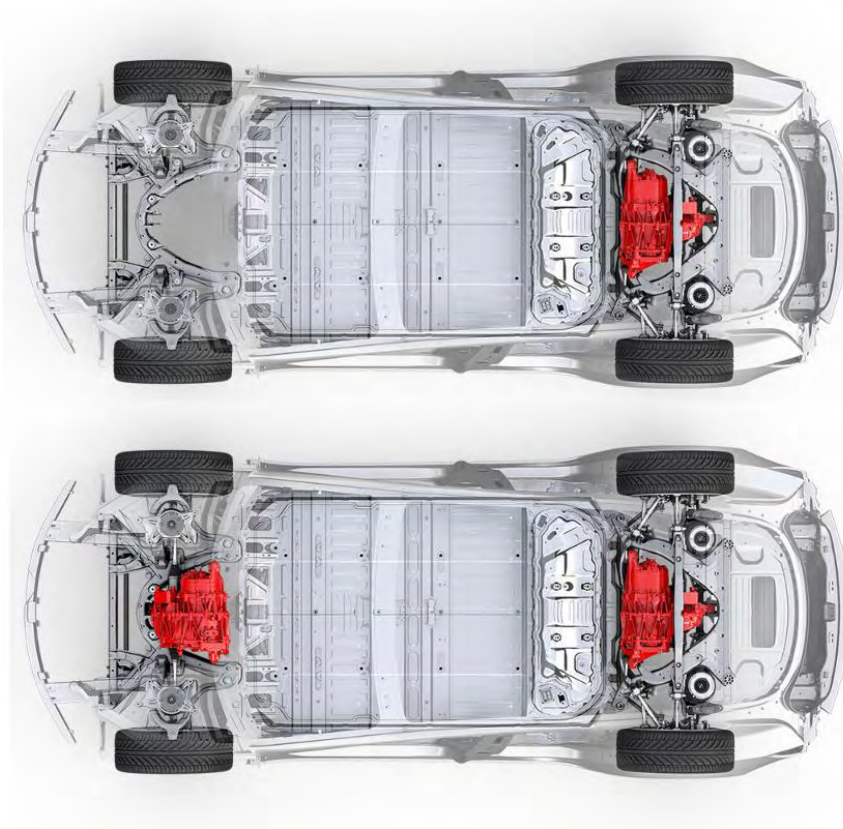
Σχήμα 4.12 - Χαρακτηριστικά μοντέλου X [110]

4.3 Η τρίτη γενιά

Το τέταρτο κατά σειρά δημιούργημα της εταιρίας και πρώτο που ανήκει στη πλατφόρμα τρίτης γενιάς είναι το μοντέλο 3. Με την κατασκευή αυτού του μοντέλου ο Elon Musk ολοκληρώνει με επιτυχία το μακροπρόθεσμο στόχο της στρατηγικής του, που δεν ήταν άλλος από τη δημιουργία ενός φθηνότερου οικογενειακού αμαξώματος, μικρότερων διαστάσεων, ικανό να διεκδικήσει τη μαζική αγορά.

Η διαφοροποίηση της πλατφόρμας τρίτης γενιάς από τη δεύτερη έγκειται στο γεγονός της αναβάθμισης της μπαταρίας και προσθήκη νέου εξοπλισμού, αυξάνοντας την αυτονομία και τη ζωή της. Ογκομετρικά το μοντέλο 3 είναι μικρότερο έναντι του μεγαλύτερου αδερφού του, μοντέλου S, με την έκδοση της μπαταρίας χωρητικότητας 100kWh να ζυγίζει πάνω από 450 κιλά λιγότερο [115].

Ο κινητήρας που χρησιμοποιεί είναι ο τριφασικός τετραπολικός ασύγχρονος AC ηλεκτροκινητήρας στο πίσω μέρος και σε περίπτωση τετρακίνησης εισάγεται ένας δεύτερος στο μπροστινό άξονα, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.13. Στο πίσω μέρος του άξονα βρίσκεται ο ηλεκτροκινητήρας μαζί με το μετατροπέα inverter, ο οποίος στο μοντέλο 3 απαρτίζεται από MOSFET transistor [116].



Σχήμα 4.13 – Οι τοπολογίες κινητήρων του μοντέλου 3 [117]

Είναι σημαντικό ότι το μοντέλο 3 βρίσκεται σε αρκετά πρώιμο στάδιο και η μαζική παραγωγή του δεν έχει ξεκινήσει ακόμη. Για το λόγο αυτό, στην αγορά κυκλοφορούν περιορισμένες εκδόσεις οπισθοκίνησης RWD. Σύμφωνα με τα λεγόμενα του Elon Musk, όταν η εταιρία καταφέρει να παράξει 5.000 μοντέλα τη βδομάδα τότε θα εισάγει και τις εκδόσεις τετρακίνησης AWD στη γραμμή παραγωγής. Επίσης το πλάνο της εταιρίας αναφορικά με τις εκδόσεις που θα κυκλοφορήσουν δεν διαφοροποιείται σε σχέση με τις αντίστοιχες του μοντέλου S. Έτσι το μοντέλο 3 θα διαθέτει εκδόσεις τετρακίνησης και «performance» [118].

Το μοντέλο 3 χρησιμοποιεί μπαταρίες επόμενης γενιάς με κελιά τύπου 2170 (21 χιλιοστά φάρδος και 70 χιλιοστά ύψος). Στο παρακάτω σχήμα 4.14 παρουσιάζεται το νέο κελί σχηματικά σε σχέση με το παλιό. Το νέο κελί αναπτύχθηκε από τη συνεργασία της Tesla με την Panasonic και παράγεται πλέον μαζικά στο Gigafactory. Το σημαντικό γεγονός είναι ότι το νέο κελί μπορεί να αποθηκεύσει πολύ περισσότερη ενέργεια.

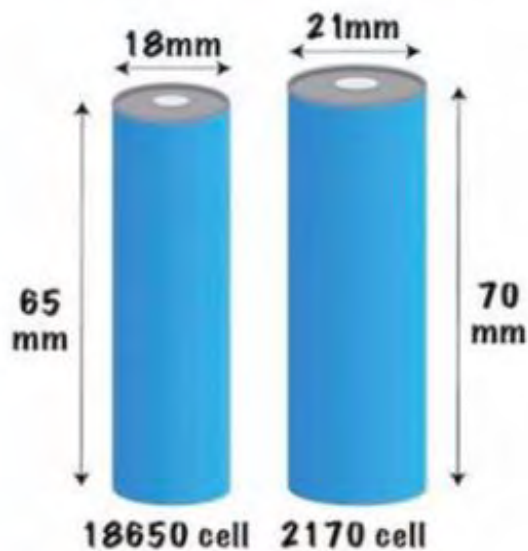
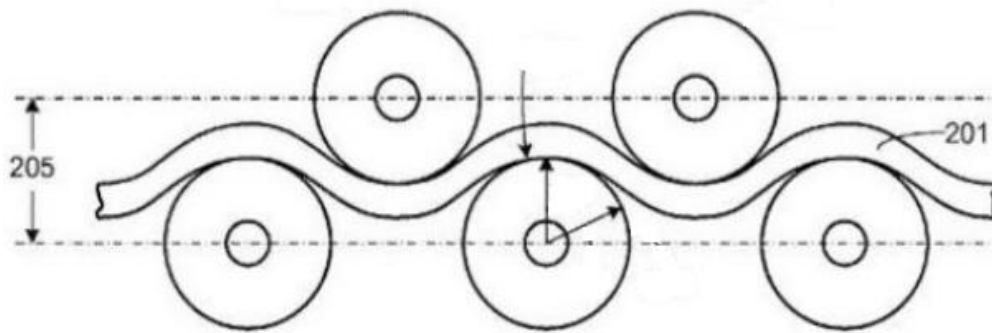


Photo credit: DNK Power

Σχήμα 4.14 – Η νέα μπαταρία [119]

Σύμφωνα με τον Elon Musk, το νέο κελί διαθέτει τη μεγαλύτερη ενεργειακή πυκνότητα στον κόσμο αλλά ταυτόχρονα είναι το φθηνότερο. Η Tesla έχει ως όραμα τη παραγωγή αυτών των νέων κελιών, στο ίδιο κόστος με τα παλιά. Αυτό θα οδηγήσει αφενός στη μείωση της τιμής της μπαταρίας και αφετέρου στη μείωση του κόστους αγοράς του ηλεκτρικού αυτοκινήτου. Τα κελιά τύπου 2170 είναι περίπου 50% μεγαλύτερα σε όγκο, μπορούν όμως δώσουν σχεδόν το διπλάσιο ρεύμα. Ένα κελί τύπου 18650 δίνει 3.000 mA ενώ ένα 2170 5.750 – 6.000 mA [120]. Η μπαταρία αποτελείται από τα νέα αυτά κελιά τα οποία μπορούν να διαχειριστούν τα υψηλά ποσοστά θερμότητας. Αυτό επιτυγχάνεται με χρήση επίπεδων σωληνώσεων στους οποίους ρέει ψυκτικό υγρό και βρίσκονται σε επαφή με τα κελιά. Αυτή η μέθοδος καταφέρνει να πετύχει τη ψύξη όλων των κελιών όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.15 [121].



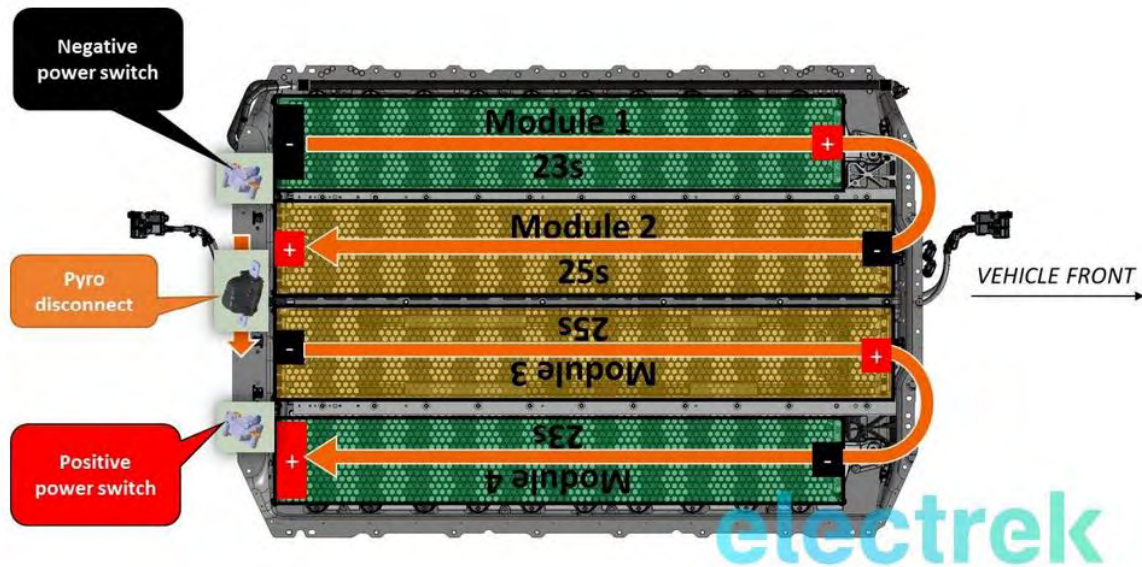
Σχήμα 4.15 – Το σύστημα ψύξης [121]

Η μπαταρία της απλής έκδοσης του μοντέλου 3, 50 kWh, αποτελείται από 2.976 κελιά χωρισμένα σε ομάδες των 31 κελιών συνδεδεμένα παράλληλα ανα τομέα (brick). Οι 96 τομείς συνδέονται σε σειρά και απαρτίζουν 4 ξεχωριστές μονάδες (modules), 2 μονάδες των 23 και 2 των 25 συνδεδεμένες σε σειρά. Ο λόγος για τον οποίο οι μονάδες δεν χωρίζονται σε 4 τομείς των 24αρων έχει να κάνει με τους ακροδέκτες της κάθε μονάδας, ώστε να εξαληφθεί η ύπαρξη ίδιας πολικότητας σε κάθε ακροδέκτη της.

Το επόμενο πακέτο μπαταρίας των 74 kWh, η έκδοση μεγάλης αυτονομίας (long range), αποτελείται από 4.416 κελιά τα οποία πλέον οργανώνονται σε 96 τομείς συνδεδεμένους σε σειρά, των 46 κελιών συνδεδεμένα παράλληλα. Οι τομείς απαρτίζουν και πάλι 4 μονάδες, συνδεσμολογίας σε σειρά, όπως φαίνεται από το σχήμα 4.16.

Η νέα μπαταρία που σχεδιάζει να κυκλοφορήσει η Tesla χωρητικότητας 100 kWh η οποία είναι πολύ καλύτερη από τις αντίστοιχες της δεύτερης γενιάς, θα αποτελείται από 16 μονάδες των 516 κελιών, με συνολικά 8.256 κελιά [122].

Αντίθετα με τη μπαταρία του μοντέλου S και X, η Tesla δεν κατασκεύασε τη μπαταρία του μοντέλου 3 με την δυνατότητα να αλλάζει εύκολα. Οι συνολικές αυτονομίες των μπαταριών είναι 350 χιλιόμετρα και 538 χιλιόμετρα σε απλή και long range έκδοση αντίστοιχα. Οι τελικές ταχύτητες κυμαίνονται στα 210 χλμ/ώρα στην απλή και 225 χλμ/ώρα στην έκδοση μεγάλης αυτονομίας. Η απλή έκδοση επιταχύνει 0-100 χιλιόμετρα σε 5.6 δευτερόλεπα.



Σχήμα 4.16 – Οι μορφολογία της μπαταρίας ενός μοντέλου 3 [122]

Μία πολύ σημαντική καινοτομία πάνω στην οποία δουλεύει η εταιρία, είναι η νέα γενιά σταθμών φόρτισης. Ενώ οι περισσότερες εταιρίες επικεντρώνονται στη επίτευξη ψηλών ποσοστών κατά τη φόρτιση, η Tesla εργάζεται για την επίτευξη ενός νέου αυτομαποημένου συστήματος ταχείας φόρτισης. Αρχικά έπρεπε να επανασχεδιάσει την αρχιτεκτονική της μπαταρίας. Πλέον μέσα στο πακέτο της μπαταρίας εμπεριέχεται ο φορτιστής, η επαφή γρήγορης φόρτισης καθώς και ο μετατροπέας DC/DC. Το νέο πακέτο σχεδιασμού της μπαταρίας διαθέτει τις απαραίτητες συνδέσεις και για τη μελλοντική επερχόμενη έκδοση τετρακίνησης AWD. Επιπλέον θα υπάρξουν ριζικές αλλαγές και στο σύστημα του υπερφορτιστή.

Τέλος, η λειτουργία του αυτόματου πιλότου είναι η ίδια με αυτή των προηγούμενων μοντέλων της δεύτερης γενιάς και διατίθεται δωρεάν. Για να ληφθούν όμως επόμενες ενημερώσεις θα απαιτείται κάποιο ποσό [59].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Σε μία παγκοσμιοποιημένη αγορά όπου το επίπεδο του ανταγωνισμού είναι εξαιρετικά υψηλό, είναι πολύ δύσκολο για μία καινούργια εταιρία να διεισδύσει στην αγορά. Η επένδυση για έναν καινούργιο κατασκευαστή αυτοκινήτων όπως η Tesla το μακρινό 2003, απαιτούσε μεγάλο κόστος. Επιπλέον η εταιρία θα έπρεπε να επενδύσει σε έργα υποδομής για την εξασφάλιση των βασικών υπηρεσιών γύρω από την ηλεκτροκίνηση, όπως φόρτιση και αλλαγή μπαταρίας. Οι στόχοι της Tesla ήταν εξ αρχής πολύ μεγαλύτεροι από τους περισσότερους κατασκευαστές αυτοκινήτων, εφόσον οραματιζόταν να οικοδομήσουν έναν κόσμο με αυτοκίνητα απαλλαγμένα ρύπων και να φέρουν το μέλλον πιο κοντά στο παρόν.

Αρχικά η στρατηγική της Tesla Motors ήταν να εφαρμόσει την καινοτομία στα προϊόντα της σχεδιάζοντας εξελιγμένα ηλεκτρικά οχήματα και στη συνέχεια να επεξεργαστεί και να εξελίξει άλλες, μέσω πολλαπλών τεχνολογιών που υιοθετεί από διάφορες εταιρίες. Επιπλέον η εταιρία μοιράζεται τις ιδέες της καθώς έχει εγκαθιδρύσει σημαντικές στρατηγικές συμμαχίες πάνω στο κομμάτι της έρευνας και ανάπτυξης (Research & Development) με μεγάλες εταιρίες. Μέσω αυτών των συμμαχιών κατάφερε να εδραιωθεί στην αγορά της ηλεκτροκίνησης.

Όλες οι εταιρίες στον τομέα της ηλεκτροκίνησης προσέφεραν και προσφέρουν ριζοσπαστικές ιδέες. Η Tesla όμως, μέσω της συμμαχίας με την Panasonic και με τη δημιουργία του Gigafactory, πέτυχε τη μαζική παραγωγή μπαταριών. Η ανάπτυξη εξελιγμένων μπαταριών ιόντων λιθίου και η συνεχής έρευνα πάνω στη βελτίωση της τεχνολογίας τους αποτέλεσε σημαντικό παράγοντα για την αναγνώριση της. Επιπλέον με τη δημιουργία δικτύου υπερφορτιστών και με την λειτουργία αλλαγής μπαταρίας, η εταιρία πετυχαίνει σταδιακά την ολοένα αυξανόμενη ζήτηση του αγοραστικού κοινού για αμιγώς ηλεκτρικά αυτοκίνητα.

Οι μελλοντικοί στόχοι της Tesla είναι η δημιουργία ενός πλήρως αυτόνομου συστήματος οδήγησης σε συνδυασμό με ένα σύστημα αυτοματοποιημένης φόρτισης. Όπως γίνεται κατανοητό, ο στόχος της εταιρίας δεν είναι η κερδοφορία αλλά η παρακίνηση του κόσμου στη χρήση εξολοκλήρου πράσινης ενέργειας και μέσων πιο φιλικών προς το περιβάλλον. Κλείνοντας η εταιρία σχεδιάζει την παραγωγή επόμενων, πιο εξελιγμένων μοντέλων που θα αλλάξουν τα δεδομένα στην ηλεκτροκίνηση μια για πάντα.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Alessandro Volta. (2018). *Encyclopedia Britannica*. Retrieved from <https://www.britannica.com/biography/Alessandro-Volta>
- [2] Santini, D. J. (2011). Electric Vehicle Wave of History: Lessons Learned about Market Deployment of Electric Vehicles [PDF]. Retrieved from <http://www.intechopen.com/books/electric-vehicles-the-benefits-and-barriers/plug-in-electric-vehicles-a-century-later-historical-lessons-on-what-is-different-what-is-not>
- [3] Chan, C. C. (2013). The Rise & Fall Of Electric Vehicles In 1828-1930: Lessons Learned. *Proceeding Of The IEEE*. 101(1), 206-212.
- [4] Moore, E. A. (2009). As electric cars gain currency, Oregon charges ahead. *Christian Science Monitor*. Retrieved from <http://features.csmonitor.com/environment/2009/02/10/as-electric-cars-gain-currency-oregon-charges-ahead/>
- [5] Bellis, M. (2006). History of electric vehicles: The early years, electric cars from 1830 to 1930. *About.com*. Retrieved from <http://inventors.about.com/library/weekly/aacarselectrica.htm>
- [6] Development of the Motor Car and Bicycle. *The Government of Australia*. (2003). Retrieved from <http://www.travelsmart.gov.au/teachers/teachers6.html>
- [7] Solution: Alternative Energy for Passenger Vehicles. (n.d.) *The Electric/Hybrid Car*. Retrieved from <http://blog.lib.umn.edu/ernst102/architecture/pg15%20copy.pdf>
- [8] Wakefield, E. H. (1994). History of the Electric Automobile. *Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers*. 1, 2-3.
- [9] World's first electric car build by Victorian inventor. (2009, Apr. 24). *Daily Telegraph*. Retrieved from <http://www.telegraph.co.uk/news/newstopics/howaboutthat/5212278/Worlds-first-electric-car-built-by-Victorian-inventor-in-1884.html>
- [10] Cub Scout Car Show. (2008, Jan). Retrieved from http://www.macscouter.com/CubScouts/PowWow07/SCCC_2007/CubScoutThemes/Jan_2008.pdf
- [11] Valdes-Dapena, P (2006, Apr. 24). Hybrid cars are so last century. *CNN Money*. Retrieved from http://money.cnn.com/2006/04/18/Autos/alternative_fuel_history

- [12] Wakefield, E. H. (1998). History of the Electric Automobile: Hybrid Electric Vehicles. *Society of Automotive Engineers*
- [13] Automobile (n.d.) Retrieved from <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/44957/automobile/259061/Early-electricautomobiles#ref=ref918099>
- [14] Kirsch, D. A. (2000). The Electric Vehicle and the Burden of History. *New Brunswick, NJ: Rutgers Univ. Press.* 153-162
- [15] Life & Death of the Electric Car (2006). *NOW on PBS*. Retrieved from <http://www.pbs.org/now/shows/223/electric-car-timeline.html>
- [16] 1984. (2009). Retrieved from https://web.archive.org/web/20060202065804/http://www.yale.com/ygl_history.asp?language=ENGLISH
- [17] Cowan, R., & Hultén, S. (1996). *Escaping Lock-in: the Case of the Electric Vehicle*. Retrieved from <http://www.cgl.uwaterloo.ca/racowan/escape.html>
- [18] Lektro has been making electric vehicles since 1945. (2013, Jul. 13). Retrieved from <http://www.lektro.com/about/history/>
- [19] Rearview Mirror. (2013, Jul 13). Retrieved from <http://errorpage.penton.com/>
- [20] Russell, R. (2013). Tubes, Hi-Fi Electronics, Tape heads and Nicad Batteries. Retrieved from <http://www.roger-russell.com/sonopg/sononst.htm>
- [21] Carr, R. (1966). In search of the town car. *Council of Industrial Design.* (211): 29-37
- [22] GM's long road back to electric cars. (2009). Retrieved from https://money.cnn.com/galleries/2008/autos/0809/gallery.gm_electric_cars/3.html
- [23] Goodstein, J. (2004). Godfather of the Hybrid. *Engineering & Science. California Institute of Technology.*(3): 22-29
- [24] Matthe, R., & Ulrich, E. (2014). The Voltec System: Energy Storage and Electric Propulsion. *Lithium-ion batteries: Advances and applications.* 151-176. DOI: 10.1016/B978-0-444-59513-3.00008-X
- [25] Hurst, D., & Wheelock, C. (2011). Executive Summary: Neighborhood Electric Vehicles – Low speed Electric Vehicles for Consumer and Fleet Markets. *Pike Search.* Retrieved from <https://web.archive.org/web/20120307083002/http://www.pikeresearch.com/wordpress/wp-content/uploads/2011/06/NEV-11-Executive-Summary.pdf>

- [26] Das, S. H., Tan, W. C., Yatim, A. H. M. (2017). Fuel cell electric vehicles: A review on power conditioning units and topologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 76: 268-291.
- [27] Wilberforce, T., El-Hassan, Z., Khatib, F.N., Al Makky, A., Baroutaji, A., Carton, G. J., Olabi, G. A. (2017). Developments of electric cars and fuel cell hydrogen electric cars. *Hydrogen Energy*. 42: 25695-25734.
- [28] Qin, N. (2016, Oct 17). Electric Vehicle Architectures [PowerPoint]. Retrieved from http://evsummit.org/speakers/presentations/2016/Workshop_Powertrain_Qin.pdf
- [29] Hardman, S., Shiu, E., Steinberger-Wilckens, R. (2014). Changing the fate of Fuel Cell Vehicles: Can lessons be learnt from Tesla Motors?. *Hydrogen Energy*. 40: 1625-1638.
- [30] Williamson, S. S. (2013). *Energy Management Strategies for Electric and Plug-in Hybrid Electric Vehicles*. DOI: 10.1007/978-1-4614-7711-2
- [31] Janiaud, N., Vallet, Francois-Xavier, Petit, M., Sandou, G. (2009). Electric Vehicle Powertrain Architecture and Control Global Optimization. *World Electric Vehicle Journal*. 3(4): 682-693. DOI: 10.3390/wevj3040682
- [32] Jaguemont, J., Boulon, L., Venet, P., Dube, Y., Sari, A. (2015, Aug 27). Lithium-Ion Battery Aging Experiments at Subzero Temperatures and Model Development for Capacity Fade Estimation. *IEEE Transportation Vehicle Technology*. 65: 4328-4343. DOI: 10.1109/TVT.2015.2473841
- [33] Zhang, X., Kong, X., Li, G., Li, J. (2014). Thermodynamic assessment of active cooling/heating methods for lithium-ion batteries of electric vehicles in extreme conditions. *Energy*. 64: 1092-1101. DOI: doi.org/10.1016/j.energy.2013.10.088
- [34] Manzetti, S., & Mariasiu, F. (2015). Electric vehicle battery technologies: From present state to future systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 51: 1004-1012. DOI: 10.1016/j.rser.2015.07.010
- [35] Christensen, J., Albertus, P., Sanchez-Carrera, R. S., Lohmann, T., Kozinsky, B., Liedtke, R., Ahmed, J., Kojic, A. (2012). A Critical Review of Li/Air Batteries. *Journal of the Electrochemical Society*. 159(2): R1-R30. DOI: 10.1149/2.086202jes
- [36] Malik, M., Dincer, I., Rosen, M. A. (2016). Review on use of phase change materials in battery thermal management for electric and hybrid electric vehicles. *International Journal of Energy Research*. 40(8): 1011-1031. DOI: 10.1002/er.3496

- [37] Burke, A., & Miller, M. (2011). The power capability of ultracapacitors and lithium batteries for electric and hybrid vehicle application. *Journal of Power Sources*. 196(1): 514-522. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2010.06.092
- [38] Ostadi, A., Kazerani, M., Chen, S. K. (2013). Hybrid Energy Storage System (HESS) in Vehicular Applications: A Review on Interfacing Battery and Ultra-capacitor Units. In Proceedings of the IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Detroit, MI, USA, 16-19 June 2013
- [39] Nitta, N., Wu, F., Lee, J. T., Yushin, G. (2015). Li-ion battery materials: present and future. *Materials today*. 18(5): 252-264.
- [40] Moorthi, M. (2017). Lithium titanate based batteries for high and high cycle life applications. *NEI Corporation*. Retrieved from www.neicorporation.com
- [41] Lowe, M., Tokuoka, S., Trigg, T., Gereffi, G. (2010). Lithium-ion batteries for electric vehicles: The U.S. value chain. *Center on Globalization, Governance & Competitiveness*. Retrieved from [https://unstats.un.org/unsd/trade/s_geneva2011/refdocs/RDs/Lithium-Ion%20Batteries%20\(Gereffi%20-%20May%202010\).pdf](https://unstats.un.org/unsd/trade/s_geneva2011/refdocs/RDs/Lithium-Ion%20Batteries%20(Gereffi%20-%20May%202010).pdf)
- [42] Muenzel, V., Hollenkamp, F. A., Bhatt, A., Hoog, J., Brazil, M., Thomas, D., Mareels, I. (2015). A Comparative Testing Study of Commercial 18650-Format Lithium-Ion Battery Cells. *Journal of The Electrochemical Society*. 162(8): A1592-A1600. DOI: 10.1149/2.0721508jes
- [43] Weicker, P. (2014). A systems approach to lithium-ion battery management. London, United Kingdom. Artech House.
- [44] Barsukov, Y., & Qian, J. (2013). Battery power management for portable devices. London, United Kingdom. Artech House.
- [45] Panasonic. (2017, Apr). Retrieved from <https://industrial.panasonic.com/ww>
- [46] Sony Website. (2018, April). Retrieved from <https://www.sonyenergy-devices.co.jp/en/>
- [47] Hitachi Vehicle Energy Website. (2018, April). Retrieved from <http://www.hitachi-ve.co.jp/en/>
- [48] Chem LG Website. (2018, April). Retrieved from <http://www.lgchem.com/global/main>
- [49] Amperex Technology Limited (ATL) Website. (2018, April). Retrieved from <http://www.atlbattery.com/en/>
- [50] SK Innovation website (2018, April). Retrieved from <http://eng.skinnovation.com/>

- [51] Barre, A., Deguilhem, B., Grolleau, S., Gerard, M., Suard, F., Riu, D. (2013). A review on lithium-ion battery ageing mechanisms and estimations for automotive application. *Journal of Power Sources*. 241: 680-689. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2013.05.040
- [52] Wang, Q., Ping, P., Zhao, X., Chu, G., Sun, J., Chen, C. (2012, Jun 15). Thermal runaway caused fire and explosion of lithium ion battery. *Journal of Power Sources*. 208: 210-224. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2012.02.038
- [53] Golubkov, A., Fuchs, D., Wagner, J., Wiltsche, H., Stangl, C., Voitic, G.... (2013). Thermal-runaway experiments on consumer Li-ion batteries with metal-oxide and olivine-type cathodes. *RSC Advances*. 4: 3633-3642. DOI: 10.1039/C3RA45748F
- [54] Golubkov, A., Scheickl, S., Planteu, R., Voitic, G., Wiltsche, H., Stangl, C., Fauler, G... (2015). Thermal runaway of commercial 18650 Li-ion batteries with LFP and NCA cathodes – impact of state of charge and overcharge. *RSC Advances*. 5: 57171-57186. DOI: 10.1039/c5ra05897j
- [55] Tarascon, M., & Armand, M. (2001). Issues and challenges facing rechargeable lithium batteries. *Nature International Journal of Science*. 359-367. DOI: 10.1038/35104644
- [56] The Battery University website. (2018). Retrieved from <https://batteryuniversity.com/>
- [57] Williard, N., He, W., Hendricks, C., Pecht, M. (2013). Lessons Learned from the 787 Dreamliner Issue on Lithium-Ion Battery Reliability. *Energies*. 6(9): 4682-4695. DOI: 10.3390/en6094682
- [58] Yoo, G., Jang, B., Son, J. (2015, Jan). Novel design of core shell structure by NCA modification on NCM cathode material to enhance capacity and cycle life for lithium secondary battery. *Ceramics International*. 41(1): 1913-1916. DOI: 10.1016/j.ceramint.2014.09.077
- [59] Tesla Website. (2018, April). Retrieved from <https://www.tesla.com/>
- [60] Technology Roadmap: Electric and plug-in hybrid electric vehicles (EV/PHEV). (2011). Retrieved from http://www.indiaenvironmentportal.org.in/files/EV_PHEV_Roadmap.pdf
- [61] Young, K., Wang, C., Wang, L. Y., Strunz, K. (2013). Electric Vehicle Battery Technologies [PDF]. Retrieved from https://www.springer.com/cda/content/document/cda_downloadaddocument/9781461401339-c1.pdf?SGWID=0-0-45-1364113-p174121858

- [62] Smith, M., Gladwin, D., Stone, D. (2017, Aug). Experimental analysis of Dynamic Charge Acceptance test conditions for lead-acid and lithium iron phosphate cells. *Journal of Energy Storage*. 12: 55-65. DOI: 10.1016/j.est.2017.03.012
- [63] Matheys, J., Mierlo, J., Timmermans, J. M., Bossche, P. (2008, Feb). Life-cycle assessment of batteries in the context of the EU Directive on end-of-life vehicles. *International Journal of Vehicle Design*. 46(2): 189-203. DOI: 10.1504/IJVD.2008.017182
- [64] Bakker, Daan. (2010, Aug). Battery Electric Vehicles (Master's thesis). *Universiteit Utrecht*. Retrieved from http://www.emic-bg.org/files/Battery_Electric_Vehicles.pdf
- [65] Wikipedia for AC induction motors. (2018). Retrieved from https://en.wikipedia.org/wiki/Induction_motor
- [66] Rippel, W. (2007, Jan 9). *Induction Versus DC Brushless Motors*. Retrieved from <https://www.tesla.com/blog/induction-versus-dc-brushless-motors?redirect=no>
- [67] Barnes, M. (2003). 3-Phase AC induction motors. *Practical Variable Speed Drives and Power Electronics*. 36-76. DOI: 10.1016/B978-075065808-9/50002-4
- [68] Genberg, T. (2017). Motor Fundamentals (Bachelor's thesis). Retrieved from: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/132021/Genberg_Tom.pdf?sequence=1
- [69] Parekh, R. (2003). AC Induction Motor Fundamentals. *Microchip AN887*. Retrieved from: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/appnotes/00887a.pdf>
- [70] Sehrawat, A. (2016, Sep 19). Why sliprings are provided in an induction motor? [Online Forum Post]. Message posted to <https://www.quora.com/Why-sliprings-are-provided-in-an-induction-motor>
- [71] Nasir, S. (2016, Oct 10). Wound Rotor Induction Motor. *The engineering projects*. Retrieved from <https://www.theengineeringprojects.com/2016/10/wound-rotor-induction-motor.html>
- [72] Kargl, M. & Steen, W. (2005). The AC induction motor. In *Drilling Fluids Processing Handbook* (413-464). Published by ASME Shale Shaker Committee.
- [73] Klempner, G. & Kerszenbaum, I. (2008, Feb). Theory, Construction and Operation. *Handbook of Large Turbo-Generator Operation and Maintenance* (1-32). Published by Wiley Online Library. DOI: 10.1002/9780470382769
- [74] Almeida, A., & Greenberg, S. (2004). Electric Motors. *Earth Systems and Environmental Sciences*. 2: 191-201. DOI: 10.1016/B0-12-176480-X/00096-6

- [75] Mathukiya, G. M. (2017, March). 3 Phase Inverter with 180 and 120 Conduction Mode. *International Journal of Modern Trends in Engineering and Research*. 4(3): 113-118. DOI: 10.21884/IJMTER.2017.4090.RHSM1
- [76] Zhai, L., Lee, G., Gao, X., Zhang, X., Gu, Z., Zou, M. (2015). Impact of Electromagnetic Interference from Power Inverter Drive System on Batteries in Electric Vehicle. *Energy Procedia*. 88: 881-888. DOI: 10.1016/j.egypro.2016.06.105
- [77] Jyotheeswara, R. K., & Natarajan, S. (2018). Energy sources and multi-input DC-DC converters used in hybrid electric vehicle application – A review. *International Journal of Hydrogen Energy*. 43(36): 17388-17405. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.07.076
- [78] Analysis of Four DC-DC Converts in Equilibrium. (2015, Jun 06). *All about Circuits*. Retrieved from <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/analysis-of-four-dc-dc-converters-in-equilibrium/>
- [79] Akter, P., Mekhilef, S., Tan, N. M. L., Akagi, H. (2015). Model Predictive Control of Bidirectional AC-DC Converter for Energy Storage System. *Journal of Electrical Engineering and Technology*. 10(01): 165-175. DOI: 10.5370/JEET.2015.10.1.165
- [80] Haghbin, S., & Carlson, O. (2014). Integrated motor drive and non-isolated battery charger based on the split-phase PM motors for plug-in vehicles. *The Journal of Engineering*. DOI: 10.1049/joe.2014.0126
- [81] Indian Institute of Technology Guwahati (IIT Guwahati). (2013). *Lecture 9 : DC-DC Converters for EV and HEV Applications*. Retrieved from <https://nptel.ac.in/courses/108103009/9>
- [82] Zhang, Q., & Deng, W. (2016). An Adaptive Energy Management System for Electric Vehicles Based on Driving Cycle Identification and Wavelet Transform. *Diagnostic Measurements and Condition Assessments for Power Transformers*. 9(5): 341. DOI: 10.3390/en9050341
- [83] Tie, S. & Tan, C. (2012). A Review of Power and Energy Management Strategies in Electric Vehicles. Paper presented at 4th International Conference on Intelligent and Advanced Systems, Kuala Lumpur, Malaysia. DOI: 10.1109/ICIAS.2012.6306229
- [84] Solberg, G. (2007, Jun 29). *The Magic of Tesla Roadster Regenerative Braking*. Retrieved from <https://www.tesla.com/blog/magic-tesla-roadster-regenerative-braking?redirect=no>
- [85] The Tesla Team. (2015). 2,000 Superchargers. Retrieved from <http://www.teslamotors.com/blog/2000-superchargers>

- [86] Bullis, K. (2013, Aug 7). How Tesla Is Driving Electric Car Innovation. *MIT Technology Review*. Retrieved from <http://www.technologyreview.com/news/516961/how-tesla-is-driving-electric-carinnovation/>
- [87] The Tesla Team. (2014, Dec 19). Battery Swap Pilot Program. Retrieved from <https://www.tesla.com/blog/battery-swap-pilot-program>
- [88] DeMorro, C. (2015). First Solar-Powered Tesla Supercharger Nearly Ready. Printed 05.05.2014. <http://cleantechnica.com/2015/02/24/first-solar-powered-tesla-supercharger-nearly-ready/>
- [89] Yamauchi, M. (2018). Tesla Charging: The Complete Guide to Charging at Home, in Public and Autonomously. *Plugless*. Retrieved from <https://www.pluglesspower.com/learn/tesla-model-s-charging-home-public-autonomously/>
- [90] Hutchinson, L. (2013, Oct 10). Review: Tesla Motors' all-electric Model S is fast-but is it a good car?. *Arstechnica*. Retrieved from <https://arstechnica.com/features/2013/10/review-tesla-model-s/3/>
- [91] Tyler. (2006, Jun 1). Tesla Motors Raises \$40 Million (U.S.) More. *Clean Break*. Retrieved from <http://www.cleanbreak.ca/2006/06/01/tesla-motors-raises-40-million-us-more/>
- [92] Witt, D. (2015). Tesla Motors Presentation: California Transportation Commission [PowerPoint presentation]. Retrieved from [http://catc.ca.gov/meetings/2015/2015-10/pinks/Tab_13_4.13\(Tesla\).pdf](http://catc.ca.gov/meetings/2015/2015-10/pinks/Tab_13_4.13(Tesla).pdf)
- [93] Tesla Motors Company Overview. (2011). Retrieved from http://files.shareholder.com/downloads/ABEA-4CW8X0/3363335016x0x494001/dd297293-ec2d-4dc5-8db4-63d491fb6bd0/Company_Overview_Q3_2011.pdf
- [94] Technical director of Tesla Motors about what is happening in the company under the hood. (2014, Jun 3). Retrieved from <http://aenergy.ru/4324>
- [95] Tesla Motors – history of company. (2014). Retrieved from <http://shop-tesla.ru/index.html>
- [96] Bady, R., Biermann, J. W., Kaufmann, B., Hacker, H. (1999). European electric vehicle fleet demonstration with ZEBRA batteries. *SAE Paper*. DOI: 10.4271/1999-01-1156

- [97] Vynakov, O. F., Savolova, E. V., Skrynnyk, A. I. (2016). Modern Electric Cars Of Tesla Motors Company. *Journal of Automation of Technological and Business-Processes*. 8(2): 9-18. DOI: 10.15673/atbp.v8i2.162
- [98] Oliver, B. (2008, November). The battery powered supercar that's electrifying the world. *The Daily Mail*. Retrieved from http://i.dailymail.co.uk/i/pix/2008/11/04/article-1083018-02238604000005DC-372_634x411.jpg
- [99] Eberhard, M. (2006, Nov 30). *A Bit About Batteries*. Retrieved from <https://www.tesla.com/blog/bit-about-batteries?redirect=no>
- [100] The Tesla Team. (2014, Dec 26). *Roadster 3.0*. Retrieved from <https://www.tesla.com/blog/roadster-30>
- [101] Lerner, P. (2008, Mar 11). 2008 Tesla Roadster. *Automobile*. Retrieved from <https://www.automobilemag.com/news/2008-tesla-roadster/>
- [102] Automotive News World Congress. (2015). *Elon Musk on Why Hydrogen fuel cell is dumb*. Retrieved from https://www.youtube.com/watch?v=Y_e7rA4fBAo
- [103] Verbist, L. (2017, Dec 3). Useful information when buying a Previously Owned Tesla Model S (Part 2). *Teslars*. Retrieved from https://www.teslars.com/single-post/2017/12/03/Usefull-information-when-buying-a-Previously-Owned-Tesla-Model-S-Part-2?fb_comment_id=1765538380136993_1765543113469853
- [104] The Tesla Team. (2014, Nov 5). *Model S Achieves Euro NCAP 5-Star Safety Rating*. Retrieved from <https://www.tesla.com/blog/model-s-achieves-euro-ncap-5star-safety-rating>
- [105] Peeters, S. (2017, Feb 6). Driving a Tesla 101: real-world driving range. *Silver Lining*. Retrieved from <http://www.silver-lining.be/2017/02/driving-a-tesla-101-real-world-driving-range/>
- [106] How does Tesla 'Ludicrous Speed' work?. (2015, Jul 17). Retrieved from <https://www.teslarati.com/how-does-tesla-ludicrous-speed-work/>
- [107] Shankleman, J., Biesheuvel, T., Ryan, J., Merrill, D. (2017, September 7). We are Going to Need More Lithium. *BloomberBusinessweek*. Retrieved from <https://www.bloomberg.com/graphics/2017-lithium-battery-future/>
- [108] Pressman, M. (2017, Aug 6). Understanding Tesla's Lithium Ion Batteries. *Evannex*. Retrieved from <https://evannex.com/blogs/news/understanding-teslas-lithium-ion-batteries>

- [109] Yadav, S. (2016, Apr). Tesla Motors Revolutionizing the Global Automotive Industry. *Shiv Nadar University*. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/313839281_Tesla_Motors_Revolutionizing_the_Global_Automotive_Industry
- [110] Dilorio, R. W. (2017, Sep). Electric Vehicle Technology [PowerPoint presentation]. Retrieved from <https://www.wm.edu/sites/cwa/course-info/classnotes/fall2017/DiIorioTesla-Electric-Vehicle-Technology.pdf>
- [111] Fehrenbacher, K. (2015, Oct 16). How Tesla is ushering in the age of the learning car. *Fortune*. Retrieved from <http://fortune.com/2015/10/16/how-tesla-autopilot-learns/>
- [112] Morris, C. (2017, Jun 6). Engineering 101: Tesla Electric Vehicle Tech Explained. *Evannex*. Retrieved from: <https://evannex.com/blogs/news/how-does-an-electric-car-work>
- [113] Model X Reveal Event. (2012). Retrieved from https://www.youtube.com/watch?v=mURbzh9t0_0
- [114] Tesla Model X Delay Underscores At Challenges of Perfection. (2014, Nov 8). Retrieved from <http://evworld.com/news.cfm?newsid=34503>
- [115] Golson, J. (2018, Feb 27). New Tesla Model 3 2018 review. *Autoexpress*. Retrieved from <https://www.autoexpress.co.uk/tesla/model-3/100317/new-tesla-model-3-2018-review>
- [116] Barbarini, E. (2018, Jun 25). STMicroelectronics SiC Module in Tesla Model 3 Inverter [PDF]. Retrieved from https://www.systemplus.fr/wp-content/uploads/2018/06/SP18413-STM_SiC_Module_Tesla_Model_3_Inverter_sample-3.pdf
- [117] Igtidar, A. (2018, Apr 11). All you need to know about the dual motor Tesla Model 3 (all-wheel drive). *Xauto*. Retrieved from <http://www.xautoworld.com/tesla/model-3-dual-motor/>
- [118] Lambert, F. (2018). First Tesla Model 3 Dual Motor Performance rolls off new assembly line. *Electrek*. Retrieved from <https://electrek.co/2018/06/16/tesla-model-3-dual-motor-performance-new-assembly-line/>
- [119] Hanley, S. (2017, Aug 9). Tesla Using New 270 Battery Cells To Power Model 3. *Gas*. Retrieved from <https://gas2.org/2017/08/09/tesla-using-new-2170-battery-cells-power-model-3/>

- [120] Morris, C. (2017, Feb 28). Tesla's new 2170 battery cell packs more power. *Evannex*. Retrieved from <https://evannex.com/blogs/news/tesla-s-new-2170-cell-packs-more-power>
- [121] Arcus, C. (2018, Jul 8). Tesla Model 3 & Chevy Bolt Battery Packs Examined. *CleanTechnica*. Retrieved from <https://cleantechnica.com/2018/07/08/tesla-model-3-chevy-bolt-battery-packs-examined/>
- [122] Lambert, F. (2017, Aug 24). Tesla Model 3: Exclusive first look at Tesla's new battery pack architecture. *Electrek*. Retrieved from <https://electrek.co/2017/08/24/tesla-model-3-exclusive-battery-pack-architecture/>