

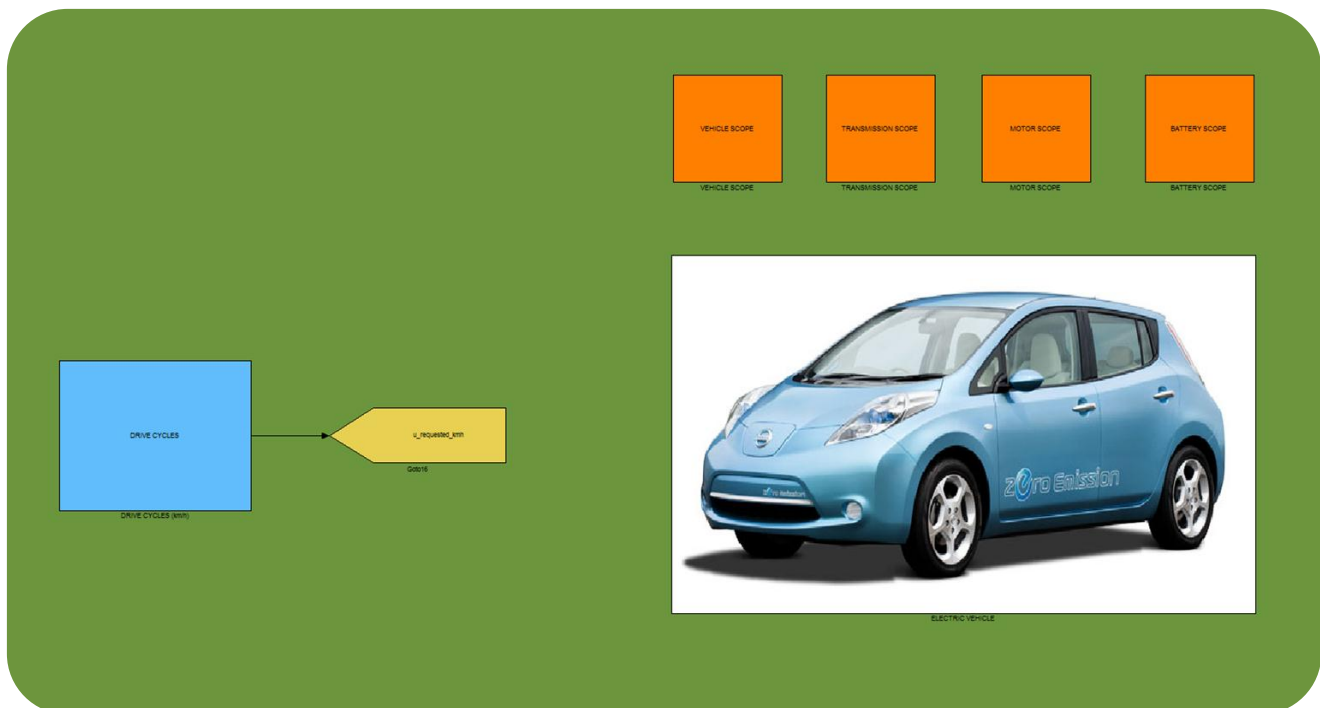


ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
21/11/2012

Α.Τ.Ε.Ι. ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΟΧΗΜΑΤΩΝ

Προσομοίωση ηλεκτρικού οχήματος με το λογισμικό Matlab/Simulink



Όνοματεπώνυμο Φοιτητή: Αθανάσιος Μανώλας

Επιβλέπων Καθηγητής: Θεόδωρος Κοσμάνης

Περιεχόμενα

1 ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΟΧΗΜΑΤΑ	3
1.1 ΙΣΤΟΡΙΑ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ	3
1.2 ΔΙΑΔΡΟΜΗ ΙΣΧΥΟΣ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ	5
1.3 ΔΟΜΗ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ	6
1.3.1 Τυπική δομή ηλεκτρικού οχήματος	6
1.3.2 Δομή ηλεκτρικού οχήματος με σύστημα σταθερής σχέσης μετάδοσης (ηλεκτροκινητήρας πίσω)	7
1.3.3 Δομή ηλεκτρικού οχήματος με σύστημα σταθερής σχέσης μετάδοσης (ηλεκτροκινητήρας μπροστά).....	7
1.3.4 Δομή ηλεκτρικού οχήματος χωρίς διαφορικό.....	8
1.3.5 Δομή ηλεκτρικού οχήματος με τον ηλεκτροκινητήρα και το σύστημα σταθερής σχέσης μετάδοσης, ενσωματωμένα στον τροχό.....	8
1.3.6 Δομή ηλεκτρικού οχήματος με τον ηλεκτροκινητήρα ενσωματωμένο στον τροχό	9
2 ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	11
2.1 ΜΠΑΤΑΡΙΕΣ	11
2.1.1 Χαρακτηριστικά μπαταριών.....	11
2.1.1.1 Ονομαστική τάση.....	11
2.1.1.2 Χωρητικότητα.....	13
2.1.1.3 Αποθηκευμένη ενέργεια	14
2.1.1.4 Ισχύς.....	14
2.1.1.5 Ρυθμός φόρτισης/εκφόρτισης	16
2.1.1.6 Κατάσταση εκφόρτισης SOD (State Of Discharge).....	16
2.1.1.7 Κατάσταση φόρτισης SOC (State Of Charge).....	16
2.1.1.9 Διάγραμμα Ragone	17
2.1.1.10 Ειδική ενέργεια	18
2.1.1.11 Ειδική ισχύς.....	18
2.1.1.12 Διάρκεια ζωής.....	18
2.1.2 Τύποι μπαταριών.....	18
2.1.2.1 Μολύβδου-οξέος	18
2.1.2.2 Νικελίου-καδμίου (NiCd).....	19
2.1.2.3 Νικελίου-μετάλλων υδριδίου (NiMH)	19
2.1.2.4 Ιόντων λιθίου (Li-ion).....	19
2.1.2.5 Λιθίου πολυμερών (LiPo)	20
2.2 ΥΠΕΡΠΥΚΝΩΤΕΣ.....	20
2.2.1 Αρχή λειτουργίας	21
2.2.2 Παράμετροι υπερπυκνωτών.....	22
2.2.3 Τεχνολογία υπερπυκνωτών	24

3 ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΡΟΩΘΗΣΗΣ	27
3.1 DC ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ	29
3.1.1 Αρχή λειτουργίας και κατασκευή των DC κινητήρων.....	29
3.1.2 Απόδοση DC κινητήρων ξένης διέγερσης.....	31
3.1.3 Αναγεννητική πέδηση των DC κινητήρων.....	34
3.1.4 Βαθμός απόδοσης των DC κινητήρων.....	36
3.1.5 Στρατηγική ελέγχου των DC κινητήρων	38
3.1.6 Έλεγχος των DC κινητήρων με <i>chopper</i>	39
3.1.6.1 Κύκλωμα μείωσης της τάσης.....	39
3.1.6.2 Κύκλωμα αύξησης της τάσης.....	41
3.2 ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΙ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ	42
3.2.1 Μονοφασικός <i>inverter</i>	45
3.2.2 Τριφασικός <i>inverter</i>	48
3.3 ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ ΜΟΝΙΜΩΝ ΜΑΓΝΗΤΩΝ.....	50
3.4 ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ	55
4 ΜΟΝΤΕΛΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ.....	59
4.1 ΚΥΚΛΟΙ ΟΔΗΓΗΣΗΣ	60
4.2 ΜΟΝΤΕΛΟ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΤΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ	63
4.2.1 Υπολογισμός αντιστάσεων.....	64
4.2.1.1 Υπολογισμός της αντίστασης λόγω αδράνειας	64
4.2.1.2 Υπολογισμός της αντίστασης κύλισης	64
4.2.1.3 Υπολογισμός αντίστασης λόγω κλίσης του δρόμου	64
4.2.1.4 Υπολογισμός αεροδυναμικής αντίστασης	65
4.2.2 Υπολογισμός κινητήριας δύναμης.....	65
4.2.3 Υπολογισμός απαιτούμενης ισχύος	65
4.2.4 Μπλοκ δυναμικής του οχήματος.....	66
4.3 ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΡΟΧΩΝ	70
4.4 ΜΟΝΤΕΛΟ ΔΙΑΦΟΡΙΚΟΥ.....	73
4.5 ΜΟΝΤΕΛΟ ΚΙΒΩΤΙΟΥ ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΣΧΕΣΗΣ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ.....	76
4.6 ΜΟΝΤΕΛΟ DC ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΗΤΗΡΑ ΚΑΙ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ΟΔΗΓΗΣΗΣ	79
4.6.1 Μοντέλο DC ηλεκτροκινητήρα.....	81
4.6.2 Μοντέλο κυκλώματος οδήγησης.....	84
4.7 ΜΟΝΤΕΛΟ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ.....	91
5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ	95
5.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ	95
5.2 ΚΥΚΛΟΣ ΟΔΗΓΗΣΗΣ ECE	96
5.2 ΚΥΚΛΟΣ ΟΔΗΓΗΣΗΣ UDDS	113
6 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΕΚΤΑΣΕΙΣ	131
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	133

1 ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΟΧΗΜΑΤΑ

1.1 ΙΣΤΟΡΙΑ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ

Πριν το 1830 τα οχήματα ήταν ακόμα ατμοκίνητα, καθώς οι νόμοι της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής και κατά συνέπεια οι ηλεκτρικές μηχανές, δεν είχαν ακόμη ανακαλυφθεί. Ήδη από το 1820 ο *Faraday* είχε δείξει τις αρχές λειτουργίας των ηλεκτρικών μηχανών. Ωστόσο, όταν το 1831 ανακάλυψε τους νόμους της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής, άνοιξε το δρόμο για την ανάπτυξη και την εξέλιξη των ηλεκτρικών μηχανών, εξάρτημα απαραίτητο για την ηλεκτρική κίνηση των οχημάτων.

Το πρώτο ηλεκτρικό όχημα κατασκευάστηκε από τον Γάλλο *Gustave Trouve* το 1881 (εικόνα 1.1). Ήταν ένα τρίκυκλο ηλεκτρικό όχημα με μπαταρία μολύβδου – οξέος, το οποίο έπαιρνε κίνηση από έναν DC ηλεκτροκινητήρα ισχύος 0,1 hp. Ένα παρόμοιο ηλεκτρικό όχημα κατασκευάστηκε το 1883 από δύο Βρετανούς καθηγητές. Ωστόσο, αυτά τα πρώτα ηλεκτρικά οχήματα δεν κατάφεραν να προσελκύσουν το ενδιαφέρον του κοινού, γιατί είχαν μικρή χιλιομετρική αυτονομία (περίπου 16 km) και τελική ταχύτητα (περίπου 15 km/h).



Εικόνα 1.1 Το πρώτο ηλεκτρικό όχημα που κατασκευάστηκε το 1881 από τον Γάλλο *Gustave Trouve*. Σήμερα φυλάσσεται σε μουσείο της Γερμανίας.

Το 1894 κατασκευάστηκε το πρώτο εμπορικό ηλεκτρικό όχημα, από τους *Morris* και *Salom* και ονομαζόταν *Electrobat* (εικόνα 1.2). Αυτό το ηλεκτρικό όχημα χρησιμοποιήθηκε σαν ταξί στην Νέα Υόρκη. Μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για 3 μετακινήσεις των 4 ωρών. Ο χρόνος επαναφόρτισης μεταξύ των μετακινήσεων ήταν 90 λεπτά. Το όχημα αυτό έπαιρνε κίνηση από δύο ηλεκτροκινητήρες ισχύος 1,5 hp, είχε χιλιομετρική αυτονομία 40 km και μέγιστη ταχύτητα 32 km/h.



Εικόνα 1.2 Το πρώτο εμπορικό ηλεκτρικό όχημα (*Electrobat*) που κατασκευάστηκε το 1894 από τους *Morris* και *Salom* και χρησιμοποιήθηκε σαν ταξί στην Νέα Υόρκη.

Η πιο σημαντική τεχνολογική εξέλιξη εκείνης της εποχής, ήταν η εφεύρεση της αναγεννητικής πέδησης από τον Γάλλο *M.A. Darracq* το 1897. Αυτή η τεχνολογία επιτρέπει την ανάκτηση της κινητικής ενέργειας του οχήματος κατά την πέδηση και τη μετατροπή της σε ηλεκτρική ενέργεια από τον ηλεκτροκινητήρα (γεννήτρια), με σκοπό τη φόρτιση της μπαταρίας. Έτσι, ενισχύθηκε σημαντικά η αυτονομία των ηλεκτρικών οχημάτων και ιδιαίτερα κατά την οδήγηση μέσα στην πόλη.

Ακόμη, ένα από τα καλύτερα ηλεκτρικά οχήματα εκείνης της εποχής, ήταν το "*La Jamais Contente*" (εικόνα 1.3), το οποίο κατασκευάστηκε από τον Γάλλο *Camille Jenatzy*. Το όχημα αυτό ήταν το πρώτο όχημα που κατάφερε να φτάσει τα 100 km/h.



Εικόνα 1.3 Το "*La Jamais Contente*". Το πρώτο όχημα που κατάφερε να φτάσει τα 100 km/h.

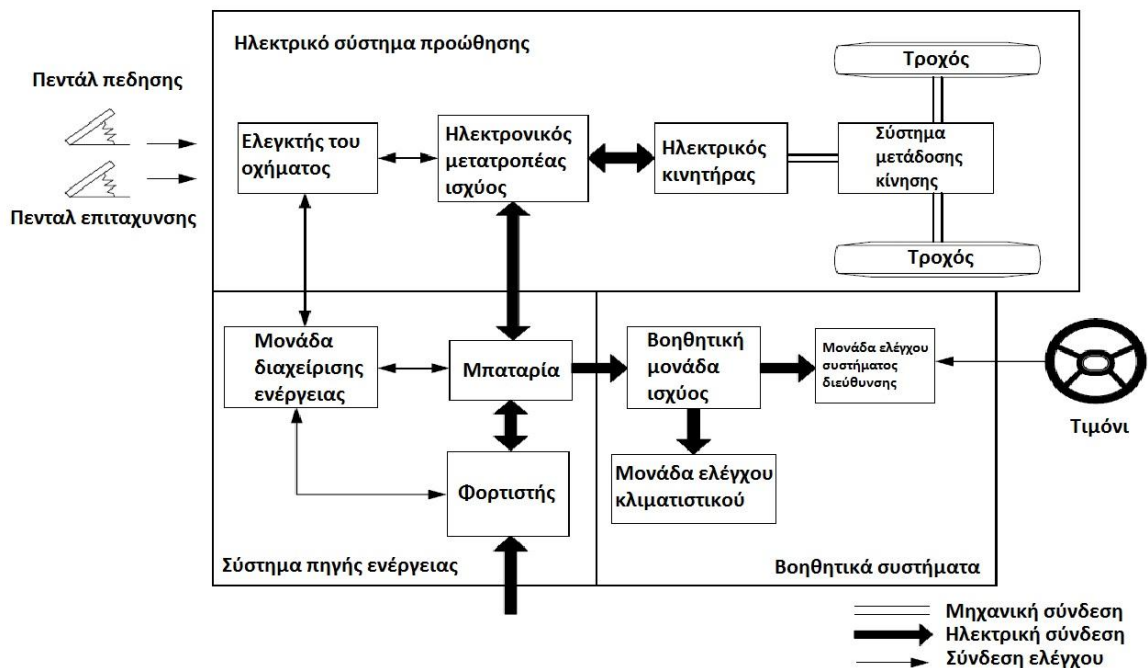
Το 1900 πουλήθηκαν 4200 οχήματα, από τα οποία το 40% ήταν ατμοκίνητα. Το 38% ηλεκτρικά και το 22% βενζινοκίνητα. Ωστόσο, η εφεύρεση της μίζας, η βελτίωση της μαζικής παραγωγής ατμοκίνητων οχημάτων και η περιορισμένη πρόσβαση των αγροτικών περιοχών σε ηλεκτρική ενέργεια, καθώς και το υψηλό κόστος, η μικρή χιλιομετρική αυτονομία και οι χαμηλές επιδόσεις των ηλεκτρικών οχημάτων, οδήγησε σε μεγάλο περιορισμό της χρήσης τους το 1920.

Παρ' όλα αυτά, ο αυξανόμενος αριθμός των οχημάτων, ο μικρός βαθμός απόδοσης των ΜΕΚ, η μόλυνση του περιβάλλοντος, το φαινόμενο του θερμοκηπίου, η εξάντληση των αποθεμάτων πετρελαίου και η ανάγκη για απεξάρτηση από αυτό, είναι ζητήματα που πυροδότησαν και πάλι το ενδιαφέρον γύρω από τα ηλεκτρικά οχήματα το 1960.

Η έρευνα και η ανάπτυξη για τα ηλεκτρικά οχήματα κορυφώθηκε τις δύο τελευταίες δεκαετίες, με τις αυτοκινητοβιομηχανίες να παράγουν συνεχώς νέα μοντέλα. Κι' αυτό, γιατί τα ηλεκτρικά οχήματα είναι ίσως τα μόνα οχήματα μηδενικών ρύπων, καθώς δεν παράγουν κανένα ρύπο κατά τη λειτουργία τους. Ωστόσο, παρά την μεγάλη τεχνολογική ανάπτυξη των μπαταριών και των ηλεκτρονικών ισχύος, η χιλιομετρική αυτονομία και η απόδοση των ηλεκτρικών οχημάτων παραμένουν ακόμη εμπόδια στην εμπορικότητά τους.

1.2 ΔΙΑΔΡΟΜΗ ΙΣΧΥΟΣ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ

Μία τυπική διαδρομή ισχύος ενός σύγχρονου ηλεκτρικού οχήματος παρουσιάζεται στην εικόνα 1.4. Η διαδρομή ισχύος αποτελείται από τρία κυρίως συστήματα: το σύστημα της πηγής ενέργειας, το ηλεκτρικό σύστημα προώθησης και τα διάφορα βοηθητικά συστήματα. Το σύστημα της πηγής ενέργειας αποτελείται από την μπαταρία, τη μονάδα διαχείρισης ενέργειας και τον φορτιστή της μπαταρίας. Το ηλεκτρικό σύστημα προώθησης αποτελείται από τον ελεγκτή του οχήματος, τον ηλεκτρονικό μετατροπέα ισχύος, τον ηλεκτρικό κινητήρα και το σύστημα μετάδοσης κίνησης του οχήματος (κιβώτιο ταχυτήτων, διαφορικό, τροχοί). Τέλος, τα διάφορα βοηθητικά συστήματα είναι η βοηθητική μονάδα ισχύος, η μονάδα ελέγχου του συστήματος διεύθυνσης και η μονάδα ελέγχου του κλιματιστικού.



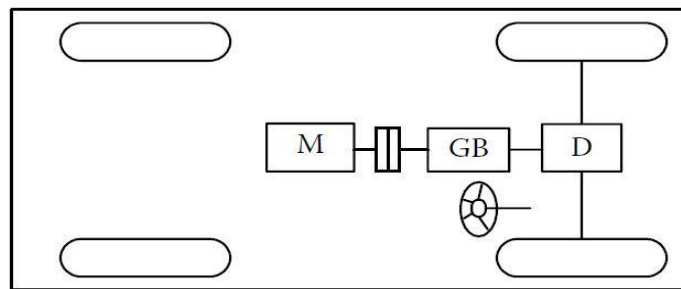
Εικόνα 1.4 Τυπική διαδρομή ισχύος ενός σύγχρονου ηλεκτρικού οχήματος. [1]

Με βάση τα σήματα εισόδου από τα πεντάλ επιτάχυνσης και πέδησης, ο ελεγκτής του οχήματος δίνει τα κατάλληλα σήματα ελέγχου στον ηλεκτρονικό μετατροπέα ισχύος, ο οποίος ελέγχει τη ροή ισχύος από την μπαταρία προς τον ηλεκτροκινητήρα κατά την προώθηση του οχήματος και από τον ηλεκτροκινητήρα (γεννήτρια) προς την μπαταρία κατά τις περιόδους της αναγεννητικής πέδησης. Η μονάδα διαχείρισης ενέργειας σε συνδυασμό με τον ελεγκτή του οχήματος, ελέγχει την ανάκτηση ενέργειας κατά την αναγεννητική πέδηση. Ακόμη, η μονάδα διαχείρισης ενέργειας συνεργάζεται με τον φορτιστή της μπαταρίας για τον έλεγχο της φόρτισής της. Η μονάδα βοηθητικής ισχύος παρέχει την κατάλληλη ισχύ στα διάφορα βοηθητικά συστήματα του οχήματος.

1.3 ΔΟΜΗ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ

Παρακάτω, παρουσιάζονται και περιγράφονται διάφορες δομές των ηλεκτρικών οχημάτων.

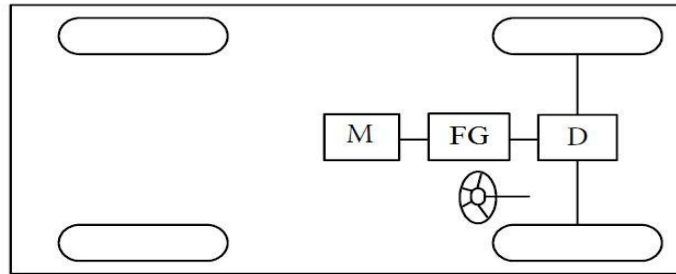
1.3.1 Τυπική δομή ηλεκτρικού οχήματος



Εικόνα 1.5 Τυπική δομή ηλεκτρικού οχήματος (M: Ηλεκτροκινητήρας, GB: Κιβώτιο ταχυτήτων, D: Διαφορικό). [1]

Στην εικόνα 1.5 παρουσιάζεται η τυπική δομή ενός ηλεκτρικού οχήματος. Η διαφορά αυτής της δομής των ηλεκτρικών οχημάτων από τα συμβατικά οχήματα, είναι ότι η μπαταρία και ο ηλεκτροκινητήρας αντικαθιστούν το ρεζερβουάρ καυσίμου και την ΜΕΚ αντίστοιχα. Το σύστημα μετάδοσης κίνησης του οχήματος παραμένει ίδιο και περιλαμβάνει τον συμπλέκτη, το κιβώτιο ταχυτήτων, το διαφορικό και τους τροχούς. Ο συμπλέκτης και το κιβώτιο ταχυτήτων μπορούν να αντικατασταθούν από ένα αυτόματο κιβώτιο ταχυτήτων.

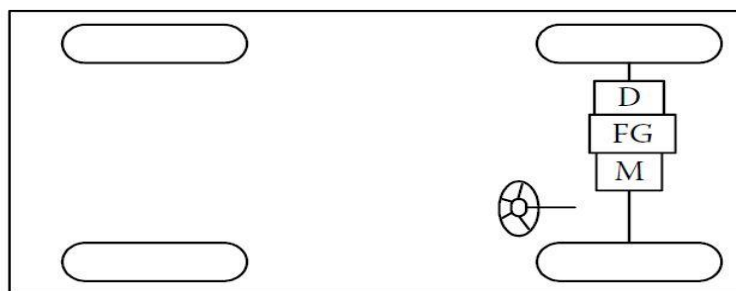
1.3.2 Δομή ηλεκτρικού οχήματος με σύστημα σταθερής σχέσης μετάδοσης (ηλεκτροκινητήρας πίσω)



Εικόνα 1.6 Δομή ηλεκτρικού οχήματος με σύστημα σταθερής σχέσης μετάδοσης (M: Ηλεκτροκινητήρας, FG: Σύστημα σταθερής σχέσης μετάδοσης, D: Διαφορικό). [1]

Στην εικόνα 1.6 παρουσιάζεται η δομή ενός ηλεκτρικού οχήματος, χωρίς κιβώτιο ταχυτήτων και με τον ηλεκτροκινητήρα τοποθετημένο στο πίσω μέρος του οχήματος. Τη θέση του συμπλέκτη και του κιβωτίου ταχυτήτων πήρε ένα σύστημα σταθερής σχέσης μετάδοσης. Ο ηλεκτροκινητήρας που χρησιμοποιείται σ' αυτήν τη δομή, παρουσιάζει σταθερή ισχύ για ένα ευρύ φάσμα ταχυτήτων. Πλεονεκτήματα αυτής της δομής είναι η μείωση του μεγέθους και του βάρους του συστήματος μετάδοσης κίνησης, καθώς και η απλοποίηση της συνολικής διαδρομής ισχύος.

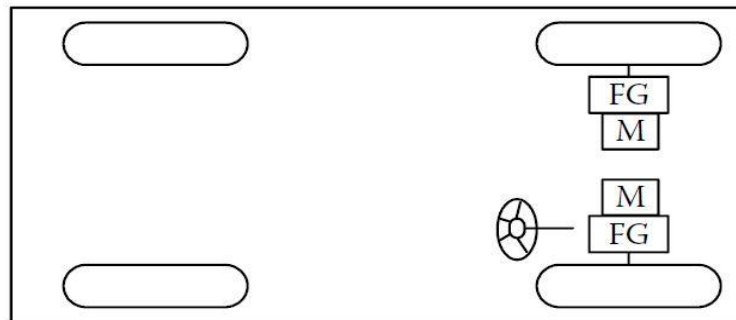
1.3.3 Δομή ηλεκτρικού οχήματος με σύστημα σταθερής σχέσης μετάδοσης (ηλεκτροκινητήρας μπροστά)



Εικόνα 1.7 Δομή ηλεκτρικού οχήματος με σύστημα σταθερής σχέσης μετάδοσης (M: Ηλεκτροκινητήρας, FG: Σύστημα σταθερής σχέσης μετάδοσης, D: Διαφορικό). [1]

Στην εικόνα 1.7 παρουσιάζεται η δομή ενός ηλεκτρικού οχήματος χωρίς κιβώτιο ταχυτήτων και με τον ηλεκτροκινητήρα τοποθετημένο στο μπροστινό μέρος του οχήματος. Αυτή η δομή είναι παρόμοια μ' αυτήν της εικόνας 1.6. Ωστόσο, απλοποιείται ακόμη περισσότερο η διαδρομή ισχύος και μειώνεται το μέγεθος του συνολικού συστήματος, καθώς ο ηλεκτροκινητήρας, το σύστημα σταθερής σχέσης μετάδοσης και το διαφορικό συνδέονται μεταξύ τους σε μία ενιαία διάταξη στο μπροστινό μέρος του οχήματος.

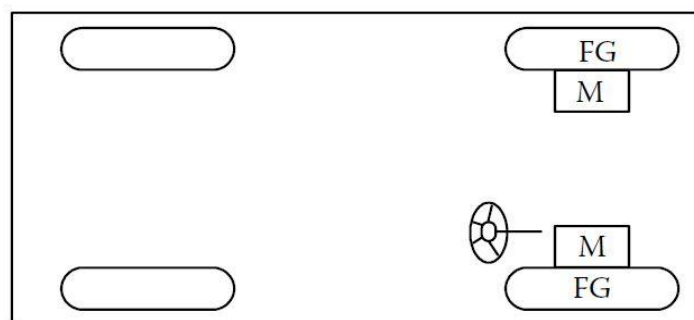
1.3.4 Δομή ηλεκτρικού οχήματος χωρίς διαφορικό



Εικόνα 1.8 Δομή ηλεκτρικού οχήματος χωρίς διαφορικό (M: Ηλεκτροκινητήρας, FG: Σύστημα σταθερής σχέσης μετάδοσης). [1]

Στην εικόνα 1.8 παρουσιάζεται η δομή ενός ηλεκτρικού οχήματος χωρίς διαφορικό. Το σύστημα μετάδοσης κίνησης του οχήματος έχει αντικατασταθεί από δύο ηλεκτροκινητήρες. Ο κάθε ηλεκτροκινητήρας συνδέεται και δίνει κίνηση σ' έναν από τους δύο μπροστινούς τροχούς του οχήματος, μέσω ενός συστήματος σταθερής σχέσης μετάδοσης. Σ' αυτήν τη δομή οι δύο ηλεκτροκινητήρες συνεργάζονται με τους αισθητήρες του ABS, καθώς κατά την πορεία του οχήματος σε στροφή ο εσωτερικός και ο εξωτερικός τροχός θα πρέπει να περιστρέφονται με διαφορετική γωνιακή ταχύτητα, μέσω των ηλεκτροκινητήρων.

1.3.5 Δομή ηλεκτρικού οχήματος με τον ηλεκτροκινητήρα και το σύστημα σταθερής σχέσης μετάδοσης, ενσωματωμένα στον τροχό

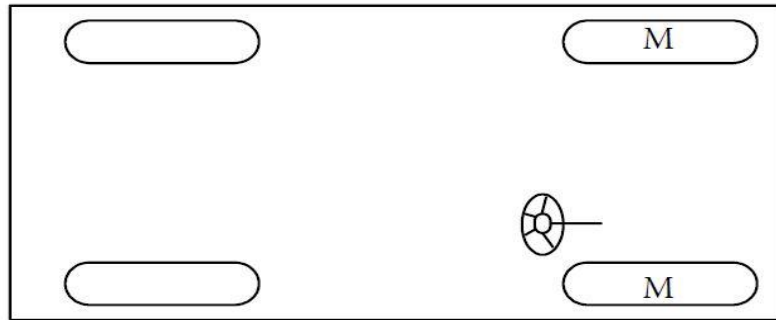


Εικόνα 1.9 Δομή ηλεκτρικού οχήματος με τον ηλεκτροκινητήρα και το σύστημα σταθερής σχέσης μετάδοσης ενσωματωμένα στον τροχό (M: Ηλεκτροκινητήρας, FG: Σύστημα σταθερής σχέσης μετάδοσης). [1]

Στην εικόνα 1.9 παρουσιάζεται μία δομή ενός ηλεκτρικού οχήματος, παρόμοια με αυτήν της εικόνας 1.8. Η διαφορά τους είναι ότι ο ηλεκτροκινητήρας και το σύστημα σταθερής σχέσης μετάδοσης είναι ενσωματωμένα στον τροχό, απλοποιώντας έτσι ακόμη περισσότερο τη διαδρομή ισχύος. Ακόμη, μπορεί να

χρησιμοποιηθεί ένα λεπτό πλανητικό σύστημα γραναζιών, με σκοπό να μειώσει την ταχύτητα του ηλεκτροκινητήρα και να αυξήσει τη ροπή του.

1.3.6 Δομή ηλεκτρικού οχήματος με τον ηλεκτροκινητήρα ενσωματωμένο στον τροχό



Εικόνα 1.10 Δομή ηλεκτρικού οχήματος με τον ηλεκτροκινητήρα ενσωματωμένο στον τροχό (M: Ηλεκτροκινητήρας). [1]

Στην εικόνα 1.10 παρουσιάζεται η δομή ενός ηλεκτρικού οχήματος με τον ηλεκτροκινητήρα ενσωματωμένο στον τροχό. Η διαφορά αυτής της δομής με δομή της εικόνας 1.9, είναι ότι αφαιρείται το σύστημα σταθερής σχέσης μετάδοσης και ο ηλεκτροκινητήρας συνδέεται απευθείας στον τροχό. Έτσι, ο ηλεκτροκινητήρας και ο τροχός περιστρέφονται με την ίδια γωνιακή ταχύτητα. Γι' αυτό το λόγο, σ' αυτήν την δομή των ηλεκτρικών οχημάτων απαιτούνται ηλεκτροκινητήρες οι οποίοι μπορούν να παρέχουν υψηλές τιμές ροπής. Ωστόσο, τέτοιοι ηλεκτροκινητήρες έχουν μεγάλο όγκο και βάρος.

2 ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

2.1 ΜΠΑΤΑΡΙΕΣ

Το εξάρτημα με το μεγαλύτερο όγκο και βάρος των ηλεκτρικών οχημάτων, πάνω στο οποίο εστιάζεται το ενδιαφέρον και η έρευνα, είναι η μπαταρία. Κι αυτό, γιατί αποτελεί το μεγαλύτερο εμπόδιο στην εμπορικότητα των ηλεκτρικών οχημάτων, καθώς είναι το εξάρτημα με το υψηλότερο κόστος (ενδεικτικά το κόστος της μπαταρίας σε εφαρμογές ηλεκτρικών οχημάτων, ξεκινάει από 12000 € και φτάνει ως και 30000 €) και είναι υπεύθυνες για την μικρή αυτονομία των ηλεκτρικών οχημάτων, καθώς η μέγιστη χιλιομετρική απόσταση που μπορεί να καλύψει ένα ηλεκτρικό όχημα με την έως τώρα τεχνολογία είναι 352 km (*Tesla Roadster*), σύμφωνα με τον κατασκευαστή του και υπό ορισμένες συνθήκες οδήγησης.

Οι μπαταρίες αποτελούνται από δύο ή περισσότερα κελιά που συνδέονται κατάλληλα μεταξύ τους (σε σειρά ή παράλληλα) για να επιτευχθούν τα επιθυμητά χαρακτηριστικά (ονομαστική τάση και χωρητικότητα). Τα κελιά αυτά αποτελούνται από ένα θετικό και ένα αρνητικό ηλεκτρόδιο και ανάμεσά τους υπάρχει ο ηλεκτρολύτης. Έτσι, ανάλογα με τον τύπο της μπαταρίας πραγματοποιείται η αντίστοιχη χημική αντίδραση για την μετατροπή της χημικής ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια.

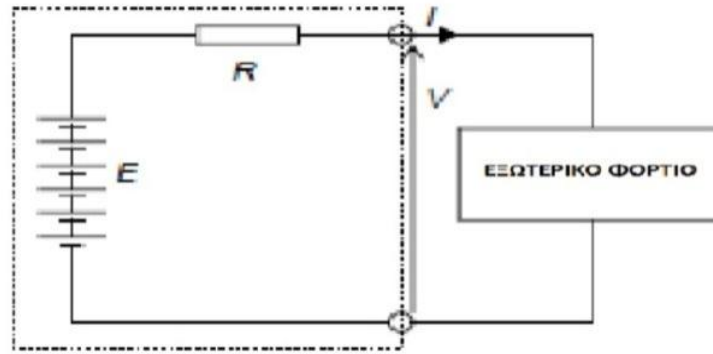
Υπάρχουν δύο κατηγορίες μπαταριών: οι πρωτεύουσες μπαταρίες και οι δευτερεύουσες μπαταρίες. Η διαφορά τους είναι ότι οι πρωτεύουσες μπαταρίες δεν μπορούν να φορτιστούν σε αντίθεση με τις δευτερεύουσες – γνωστές και ως επαναφορτιζόμενες – οι οποίες μπορούν να φορτιστούν. Στις εφαρμογές των οχημάτων, οι μπαταρίες που χρησιμοποιούνται είναι κατά κανόνα δευτερεύουσες μπαταρίες.

Γενικά, υπάρχουν διάφορα χαρακτηριστικά των μπαταριών - τα οποία θα αναλυθούν στη συνέχεια - με τη βοήθεια των οποίων μπορεί να γίνει εκλογή της κατάλληλης μπαταρίας κάθε φορά, ανάλογα με τη χρήση. Μερικά από αυτά είναι η ονομαστική της τάση, η χωρητικότητά της, η ειδική της ενέργεια, η ειδική της ισχύ κλπ. Για τους κατασκευαστές ηλεκτρικών οχημάτων το σημαντικότερο χαρακτηριστικό των μπαταριών είναι η ειδική ενέργεια, καθώς σύμφωνα μ' αυτό προσδιορίζεται η χιλιομετρική αυτονομία του οχήματος.

2.1.1 Χαρακτηριστικά μπαταριών

2.1.1.1 Ονομαστική τάση

Η τάση ενός κελιού είναι η διαφορά δυναμικού που αναπτύσσεται μεταξύ της θετικής και της αρνητικής πλάκας του κελιού. Η ονομαστική τάση του κελιού αντιστοιχεί κατά προσέγγιση στην τάση του κελιού όταν αυτό παρέχει ηλεκτρική ενέργεια. Η τάση των μπαταριών που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές ηλεκτρικών οχημάτων κυμαίνεται από 300 V έως 600 V.



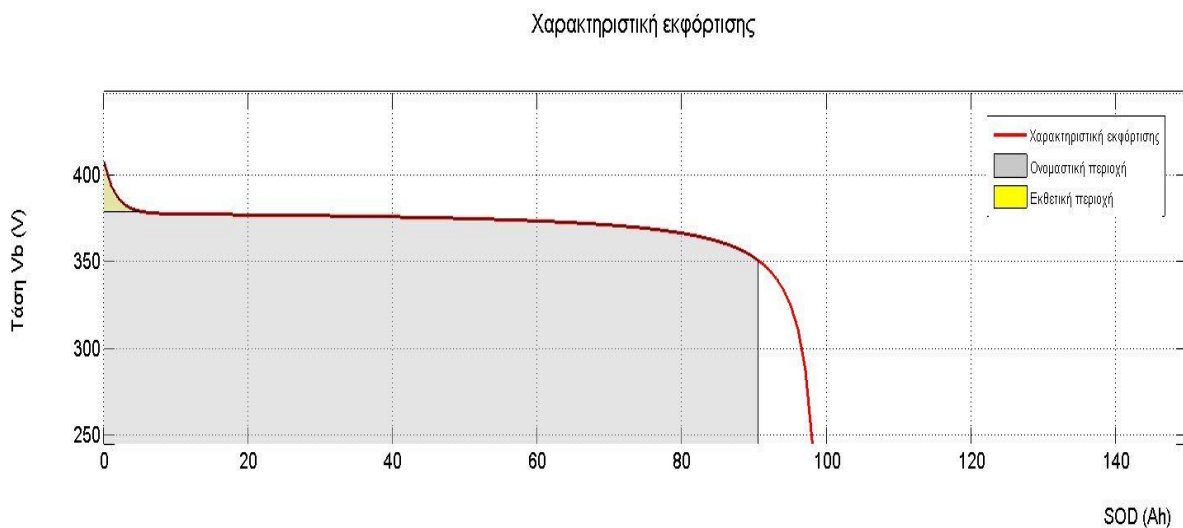
Εικόνα 2.1 Ισοδύναμο κύκλωμα μπαταρίας. [3]

Ένα απλό ισοδύναμο κύκλωμα της μπαταρίας φαίνεται στην εικόνα 2.1. Αποτελείται από την τάση των κελιών E , την εσωτερική αντίσταση της μπαταρίας R και της τάση V στους πόλους της μπαταρίας. Από το παραπάνω κύκλωμα προκύπτει ότι η τάση στους πόλους της μπαταρίας είναι:

$$V = E - I \cdot R \quad (V) \quad (2.1)$$

Κατά συνέπεια, όταν η μπαταρία συνδέεται με εξωτερικό φορτίο, τότε η τάση στου πόλους της V είναι μικρότερη από την τάση των κελιών E κατά τον παράγοντα $I \cdot R$ και η τάση αυτή ονομάζεται τάση κλειστού κυκλώματος. Έτσι, όσο αυξάνεται το ρεύμα I που φεύγει από την μπαταρία, τόσο μειώνεται η τάση στους πόλους της. Αντίθετα, όταν η μπαταρία δεν συνδέεται με φορτίο, τότε η τάση στους πόλους της μπαταρίας V είναι ίση με την τάση των κελιών E και ονομάζεται τάση ανοιχτού κυκλώματος.

Αξίζει να σημειωθεί, ότι η τάση των κελιών E δεν είναι σταθερή αλλά εξαρτάται από την κατάσταση φόρτισης, καθώς και άλλους παράγοντες όπως είναι η θερμοκρασία. Στην εικόνα 2.2 φαίνεται η εξάρτηση της τάσης των κελιών από την κατάσταση εκφόρτισης.



Εικόνα 2.2 Τάση (V) – Κατάσταση εκφόρτισης SOD (A·h).

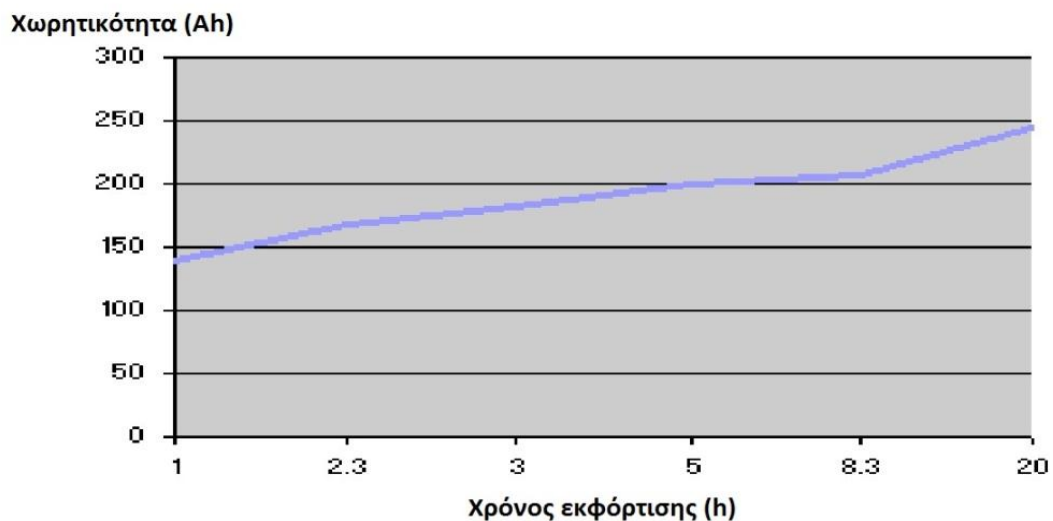
Ακόμη, όταν η εσωτερική αντίσταση R της μπαταρίας αυξάνεται, ο βαθμός απόδοσης της μπαταρίας μειώνεται, γιατί αυξάνεται το ποσοστό της ηλεκτρικής ενέργειας που μετατρέπεται σε θερμότητα (φαινόμενο *Joule*). Επίσης, η τιμή της εσωτερικής αντίστασης R της μπαταρίας είναι διαφορετική κατά τη διάρκεια φόρτισης και εκφόρτισης και εξαρτάται από την κατάσταση φόρτισης, τη θερμοκρασία και τον αριθμό των κύκλων φόρτισης/εκφόρτισης.

2.1.1.2 Χωρητικότητα

Ένα άλλο σημαντικό τεχνικό χαρακτηριστικό της μπαταρίας είναι η χωρητικότητά της. Χωρητικότητα είναι η ποσότητα του ηλεκτρικού φορτίου που είναι αποθηκευμένο στη μπαταρία. Μονάδα μέτρησης της χωρητικότητας (ή του ηλεκτρικού φορτίου) στο *SI* είναι το *Coulomb*. Για παράδειγμα, 1 *Coulomb* είναι η ποσότητα του ηλεκτρικού φορτίου που ρέει σ' έναν αγωγό από ρεύμα έντασης 1 *Ampere* σε 1 *sec*. Ωστόσο, λόγω του ότι το *Coulomb* είναι αρκετά μικρή μονάδα μέτρησης του ηλεκτρικού φορτίου, στη βιβλιογραφία η χωρητικότητα των μπαταριών δίνεται πάντα σε *A·h* (1 *A·h*=3600 *C*). Κατά συνέπεια, η χωρητικότητα Q της μπαταρίας υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας το ρεύμα εκφόρτισης I της μπαταρίας με το συνολικό χρόνο εκφόρτισης t .

$$Q = I \cdot t \text{ (A} \cdot \text{h)} \quad (2.2)$$

Για παράδειγμα, αν μία μπαταρία έχει ονομαστική χωρητικότητα 100 *A·h*, αυτό σημαίνει ότι μπορεί να δώσει ρεύμα έντασης 5 *A* για 20 *h* ή 20 *A* για 5 *h* ή 50 *A* για 2 *h*. Όλα αυτά όμως στη θεωρία, καθώς η ονομαστική χωρητικότητα της μπαταρίας δίνεται για ένα συγκεκριμένο ρεύμα εκφόρτισης (ή ρυθμό εκφόρτισης). Αν το ρεύμα εκφόρτισης είναι μεγαλύτερο από αυτό που δίνει ο κατασκευαστής, τότε η χωρητικότητα της μπαταρίας μειώνεται. Αντίθετα αν το ρεύμα εκφόρτισης είναι μικρότερο από αυτό που δίνει ο κατασκευαστής, τότε η χωρητικότητα της μπαταρίας αυξάνεται. Στην εικόνα 2.3 φαίνεται η εξάρτηση της χωρητικότητας της μπαταρίας από το χρόνο εκφόρτισης.



Εικόνα 2.3 Χωρητικότητα (A·h) – Χρόνος εκφόρτισης (h).

Παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται ο χρόνος εκφόρτισης της μπαταρίας (δηλαδή μειώνεται το ρεύμα εκφόρτισης), αυξάνεται η διαθέσιμη χωρητικότητα της μπαταρίας. Συνεπώς, ο υπολογισμός της χωρητικότητας της μπαταρίας σε συνάρτηση με το ρυθμό εκφόρτισης είναι ένα σύνθετο φαινόμενο, το οποίο όμως μπορεί να υπολογιστεί με διάφορες τρόπους.

Εντέλει, η τιμή της χωρητικότητας των μπαταριών που χρησιμοποιούνται σε ηλεκτρικά οχήματα, ξεκινάει από τα 50 A·h και φτάνει έως και τα 200 A·h.

2.1.1.3 Αποθηκευμένη ενέργεια

Σκοπός της μπαταρίας είναι να αποθηκεύει ηλεκτρική ενέργεια. Αυτή η αποθηκευμένη ηλεκτρική ενέργεια εξαρτάται από την τάση V και από την χωρητικότητα Q της μπαταρίας. Μονάδα μέτρησης της ενέργειας στο SI είναι το *Joule*, όμως πολύ συχνά στη βιβλιογραφία η αποθηκευμένη ηλεκτρική ενέργεια των μπαταριών δίνεται σε $W \cdot h$ ($1 W \cdot h = 3600 J$). Ενδεικτικά, η τιμή της αποθηκευμένης ενέργειας των μπαταριών στις εφαρμογές των ηλεκτρικών οχημάτων κυμαίνεται από 20 kW·h έως 60 kW·h. Η εξίσωση που δίνει την αποθηκευμένη ηλεκτρική ενέργεια E των μπαταριών είναι:

$$E = V \cdot Q \text{ (J)} \quad (2.3)$$

Ωστόσο, αυτή η εξίσωση πρέπει να χρησιμοποιείται με προσοχή, καθώς τόσο η τάση V , όσο και η χωρητικότητα Q της μπαταρίας είναι μεγέθη που μεταβάλλονται με το ρυθμό εκφόρτισης (ρεύμα εκφόρτισης). Και τα δύο μεγέθη μειώνονται με την αύξηση του ρυθμού εκφόρτισης. Έτσι, όσο μεγαλύτερος είναι ρυθμός εκφόρτισης τόσο μικρότερη είναι η διαθέσιμη ηλεκτρική ενέργεια που μπορεί να παρέχει η μπαταρία.

2.1.1.4 Ισχύς

Η ηλεκτρική ισχύς P που παρέχεται από την μπαταρία εξαρτάται από την τάση της και το ρεύμα που εκφορτίζεται. Μονάδα μέτρησης της ισχύος στο SI είναι το *Watt*. Ένας προσεγγιστικός υπολογισμός της ηλεκτρικής ισχύος P της μπαταρίας μπορεί να γίνει από τον παρακάτω τύπο:

$$P = V \cdot I \text{ (W)} \quad (2.4)$$

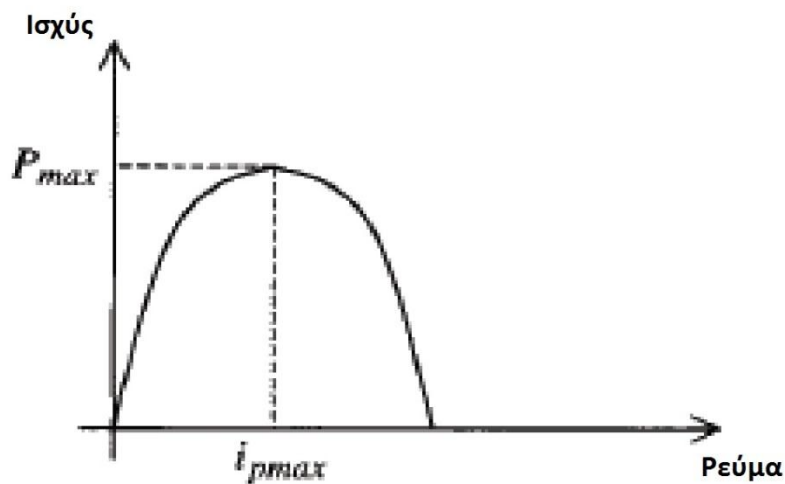
Λαμβάνοντας όμως υπόψη και την εσωτερική αντίσταση R της μπαταρίας, η παρεχόμενη ηλεκτρική ισχύς P της μπαταρίας υπολογίζεται από τη σχέση:

$$P = E \cdot I - I^2 \cdot R \text{ (W)} \quad (2.5)$$

Λύνοντας την παραπάνω εξίσωση, το ρεύμα που απαιτείται από την μπαταρία για μία δεδομένη ισχύ βρίσκεται από την εξίσωση:

$$I = \frac{E - \sqrt{E^2 - 4 \cdot R \cdot P}}{2 \cdot R} \quad (A) \quad (2.6)$$

Στην εικόνα 2.4 φαίνεται η ηλεκτρική ισχύς της μπαταρίας σε σχέση με το ρεύμα εκφόρτισης. Είναι φανερό ότι υπάρχει μία τιμή του ρεύματος για την οποία η ηλεκτρική ισχύς της μπαταρίας γίνεται μέγιστη.



Εικόνα 2.4 Ισχύς - Ρεύμα. [2]

Αυτή η μέγιστη ηλεκτρική ισχύς P_{max} που μπορεί να παρέχει η μπαταρία μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$P_{max} = \frac{E^2}{4 \cdot R} \quad (W) \quad (2.7)$$

Και το ρεύμα εκφόρτισης I_{rmax} που παρέχει η μπαταρία στη μέγιστη ισχύ P_{max} δίνεται από την εξίσωση:

$$I_{rmax} = \frac{E}{2 \cdot R} \quad (A) \quad (2.8)$$

Όμως, δεδομένου ότι τόσο η τάση E , όσο και η εσωτερική αντίσταση R της μπαταρίας μεταβάλλονται με την κατάσταση φόρτισης, η μέγιστη ηλεκτρική ισχύς P_{\max} της μπαταρίας είναι και αυτή μεταβαλλόμενη. Γι' αυτό, η απόδοση των μπαταριών αξιολογείται με βάση την συνεχή ονομαστική ισχύ που δίνει ο κατασκευαστής. Αυτή η συνεχής ονομαστική ισχύς είναι η μέγιστη ισχύς που μπορεί να παρέχει η μπαταρία για ένα παρατεταμένο χρονικό διάστημα, χωρίς αυτή να καταστραφεί και μπορεί να μην είναι ίδια με τη μέγιστη ισχύ P_{\max} που υπολογίζεται από τη σχέση 2.7.

2.1.1.5 Ρυθμός φόρτισης/εκφόρτισης

Πολύ συχνά, αντί να αναφέρεται το ρεύμα φόρτισης ή εκφόρτισης της μπαταρίας γίνεται αναφορά του ρυθμού φόρτισης ή εκφόρτισής της. Αυτό γίνεται με σκοπό να υπάρχει ένα μέτρο του ρυθμού με τον οποίο η μπαταρία φορτίζεται ή εκφορτίζεται, σε σχέση με την ονομαστική της χωρητικότητα. Ο ρυθμός φόρτισης/εκφόρτισης ορίζεται ως ο λόγος της ονομαστικής χωρητικότητας Q της μπαταρίας σε Ah προς το χρόνο φόρτισης ή εκφόρτισης της t σε h.

2.1.1.6 Κατάσταση εκφόρτισης SOD (State Of Discharge)

Η κατάσταση εκφόρτισης SOD της μπαταρίας δίνει το μέγεθος του ηλεκτρικού φορτίου (ή της χωρητικότητας) που έχει αφαιρεθεί από αυτήν κατά τη διάρκεια εκφόρτισης της και δίνεται από το παρακάτω ολοκλήρωμα:

$$SOD(t) = \int_0^t \frac{I(t)}{3600} \cdot dt \quad (A \cdot h) \quad (2.9)$$

όπου η κατάσταση εκφόρτισης SOD(t) σε A·h, το ρεύμα I σε A και ο χρόνος t σε h.

2.1.1.7 Κατάσταση φόρτισης SOC (State Of Charge)

Η κατάσταση φόρτισης SOC της μπαταρίας δίνει το ποσό του ηλεκτρικού φορτίου που έχει απομείνει στην μπαταρία κατά την περίοδο εκφόρτισής της. Η εξίσωση που δίνει την κατάσταση φόρτισης SOC της μπαταρίας είναι:

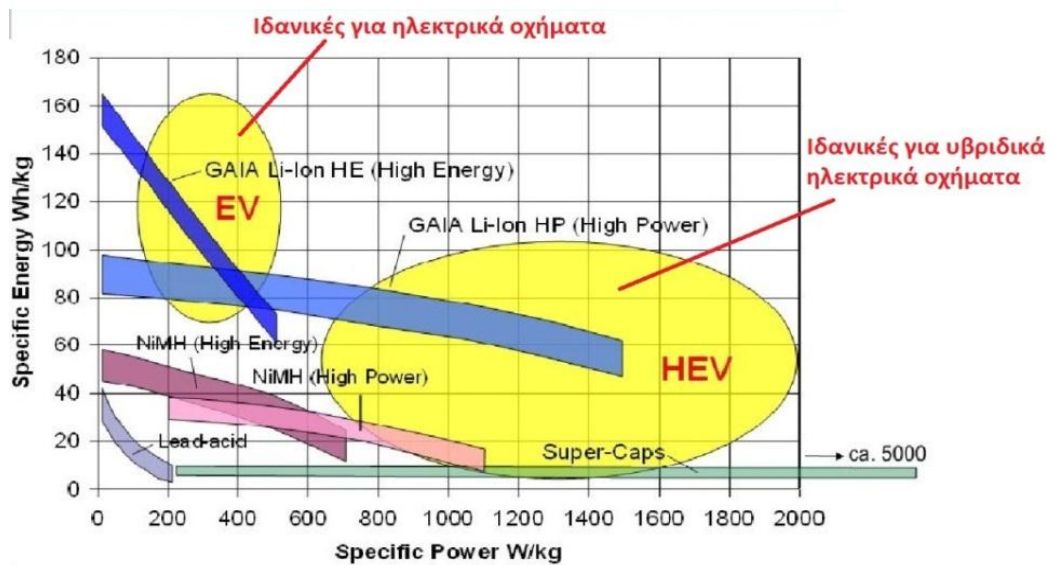
$$SOC(t) = Q - SOD(t) = Q - \int_0^t \frac{I(t)}{3600} \cdot dt \quad (A \cdot h) \quad (2.10)$$

Αρκετές φορές, η κατάσταση εκφόρτισης SOC δίνεται και σαν ποσοστό επί της εκατό της ονομαστικής χωρητικότητας Q που έχει απομείνει στη μπαταρία και υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$SOC(t) = \frac{Q - \int_0^t \frac{I(t)}{3600} \cdot dt}{Q} \cdot 100 \% \quad (2.11)$$

2.1.1.9 Διάγραμμα Ragone

Με το διάγραμμα *Ragone* μπορεί να γίνει σύγκριση των διάφορων πηγών ενέργειας, καθώς και να παρατηρηθεί η μεταβολή της ειδικής τους ενέργειας με τη μεταβολή της ειδικής τους ισχύος ή και το αντίστροφο. Από το διάγραμμα *Ragone* μπορεί εύκολα να παρατηρηθεί για τις μπαταρίες, ότι όσο αυξάνεται η ειδική τους ενέργεια μειώνεται η ειδική τους ισχύς και αντίστροφα. Αυτό συμβαίνει, γιατί λαμβάνοντας γρήγορα ενέργεια από την μπαταρία (υψηλός ρυθμός εκφόρτισης) μειώνεται η διαθέσιμη ενέργειά της.



Εικόνα 2.5 Διάγραμμα Ragone.

Έτσι, υπάρχουν μπαταρίες με υψηλή ειδική ενέργεια, αλλά χαμηλή ειδική ισχύ. Αυτό σημαίνει ότι μπορούν να αποθηκεύσουν μεγάλο ποσό ενέργειας, όμως αυτή την ενέργεια μπορούν να την αποδώσουν αργά. Αυτές είναι μπαταρίες που είναι ιδανικές για χρήση σε ηλεκτρικά οχήματα (όπως φαίνεται και στην παραπάνω εικόνα), τα οποία κατά συνέπεια έχουν υψηλή χιλιομετρική αυτονομία και χαμηλή απόδοση. Από την άλλη, υπάρχουν μπαταρίες που έχουν υψηλή ειδική ισχύ, αλλά χαμηλή ειδική ενέργεια, πράγμα που τις κάνει ιδανικές για χρήση σε υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα.

2.1.1.10 Ειδική ενέργεια

Το μέγεθος της ειδικής ενέργειας δείχνει το ποσό της ηλεκτρικής ενέργειας που είναι αποθηκευμένο ανά μονάδα μάζας της μπαταρίας. Μονάδα μέτρησης της ειδικής ενέργειας στο *SI* είναι το *J/kg*, όμως στη βιβλιογραφία τις περισσότερες φορές δίνεται σε *W·h/kg* ($1\text{ W}\cdot\text{h}/\text{kg}=3600\text{ J}/\text{kg}$). Για τους κατασκευαστές ηλεκτρικών οχημάτων, η ειδική ενέργεια είναι το κυριότερο χαρακτηριστικό της μπαταρίας, διότι προσδιορίζει το βάρος της μπαταρίας ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή χιλιομετρική αυτονομία του οχήματος. Ωστόσο, αυτός ο υπολογισμός αποτελεί μόνο μία προσέγγιση, καθώς η πραγματική αποθηκευμένη ενέργεια της μπαταρίας εξαρτάται από τον ρυθμό εκφόρτισής της, όπως ειπώθηκε και παραπάνω.

2.1.1.11 Ειδική ισχύς

Είναι η μέγιστη διαθέσιμη ηλεκτρική ισχύς ανά μονάδα μάζας της μπαταρίας και προσδιορίζει το βάρος της μπαταρίας, με σκοπό την επίτευξη της επιθυμητής απόδοσης του οχήματος. Μονάδα μέτρησης της ειδικής ισχύος στο *SI* είναι το *W/kg*. Η ειδική ισχύς είναι το σημαντικότερο χαρακτηριστικό της μπαταρίας για τους κατασκευαστές υβριδικών ηλεκτρικών οχημάτων, καθώς εκεί η επιθυμητή χιλιομετρική αυτονομία του οχήματος επιτυγχάνεται με τη χρήση της ΜΕΚ.

2.1.1.12 Διάρκεια ζωής

Η διάρκεια ζωής της μπαταρίας μετράται σε κύκλους φόρτισης/εκφόρτισής της, χωρίς αυτή να χάσει το 20% της αρχικής της χωρητικότητας και ο αριθμός των κύκλων ζωής διαφέρει ανάλογα με τον τύπο και την τεχνολογία της μπαταρίας. Ωστόσο, η πραγματική διάρκεια ζωής της μπαταρίας εξαρτάται από τον ρυθμό φόρτισης/εκφόρτισής της, αλλά και το βάθος εκφόρτισής της. Όσο μεγαλύτερα είναι ο ρυθμός φόρτισης/εκφόρτισης και το βάθος εκφόρτισης, τόσο μικρότερη θα είναι και η διάρκεια ζωής της μπαταρίας.

2.1.2 Τύποι μπαταριών

2.1.2.1 Μολύβδου-οξέος

Η μπαταρία μολύβδου-οξέος εφευρέθηκε το 1859 από τον Γάλλο φυσικό *Gaston Plante* και είναι η πρώτη επαναφορτιζόμενη μπαταρία που χρησιμοποιήθηκε σε εμπορική χρήση το 1881. Λόγω των υλικών κατασκευής της, έχει το χαμηλότερο κόστος όλες τις άλλες μπαταρίες (100-125 €/kW·h). Οι μπαταρίες μολύβδου-οξέος παρουσιάζουν χαμηλό ρυθμό αυτοεκφόρτισης (λιγότερο από 5% ανά μήνα) και έχουν χαμηλή απαίτηση συντήρησης. Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματά τους είναι η υψηλή ειδική ισχύς τους (έως και 285 W/kg) και η ικανότητα τους να παρέχουν υψηλούς ρυθμούς εκφόρτισης (έως και 10·Q).

Παρ' όλα αυτά, οι μπαταρίες μολύβδου-οξέος έχουν αρκετά μειονεκτήματα. Ένα από αυτά είναι η χαμηλή ειδική ενέργειά τους (έως και 50 W·h/kg), η οποία οφείλεται κυρίως στο υψηλό μοριακό βάρος του μολύβδου. Επίσης, η απόδοσή τους σε χαμηλές θερμοκρασίες είναι κακή, καθώς σε θερμοκρασίες κάτω από τους 10°C τόσο η ειδική τους ενέργεια, όσο και η ειδική τους ισχύς μειώνονται σημαντικά. Το χαρακτηριστικό αυτό περιορίζει σημαντικά τη χρήση τους σε οχήματα που λειτουργούν σε χαμηλές

θερμοκρασίες. Ακόμη, παρουσιάζουν μικρή διάρκεια ζωής (έως 800 κύκλους) και η φόρτιση τους διαρκεί αρκετό χρόνο. Τέλος, δεν είναι φιλικές προς το περιβάλλον, καθώς ο μόλυβδος είναι τοξικός.

2.1.2.2 Νικελίου-καδμίου (NiCd)

Γενικά, το νικέλιο είναι ένα πιο ελαφρύ μέταλλο από τον μόλυβδο, το οποίο έχει πολύ καλές ηλεκτροχημικές ιδιότητες. Οι μπαταρίες νικελίου-καδμίου βρίσκονται στο εμπόριο από το 1956 και έχουν σχετικά υψηλή ειδική ισχύ (έως 250 W/kg). Σε αντίθεση με τις μπαταρίες μολύβδου-οξέος έχουν καλή απόδοση και σε χαμηλές θερμοκρασίες και γενικά παρουσιάζουν μεγάλο εύρος θερμοκρασιών λειτουργίας (από -40°C έως 80°C). Επίσης, έχουν την δυνατότητα να παρέχουν υψηλούς ρυθμούς εκφόρτισης (έως 20·Q). Ακόμη, έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής (έως 2000 κύκλους) και σχετικά χαμηλό κόστος (200-300 €/kW·h).

Τα μειονεκτήματα των μπαταριών νικελίου-καδμίου είναι η σχετικά χαμηλή ειδική ενέργεια (έως 80 W·h/kg), ο σχετικά υψηλός ρυθμός αυτοεκφόρτισης (περίπου 20% ανά μήνα) και το φαινόμενο μνήμης το οποίο παρουσιάζουν. Πρόσθετα, οι μπαταρίες νικελίου-καδμίου δεν είναι φιλικές προς το περιβάλλον, καθώς το κάδμιο είναι τοξικό και καρκινογόνο.

2.1.2.3 Νικελίου-μετάλλων υδριδίου (NiMH)

Οι μπαταρίες νικελίου-μετάλλων υδριδίου είναι στην αγορά από το 1990 και ήρθαν για να αντικαταστήσουν τις μπαταρίες νικελίου-καδμίου, καθώς είναι απαλλαγμένες από το επιβλαβές κάδμιο. Βρίσκονται υπό συνεχή ανάπτυξη και είναι από τις μπαταρίες που χρησιμοποιούνται περισσότερο σε εφαρμογές ηλεκτρικών και υβριδικών ηλεκτρικών οχημάτων. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν το *Toyota Prius* και το *Honda Insight*. Παρουσιάζουν έως και 40% υψηλότερη ειδική ενέργεια από τις μπαταρίες νικελίου-καδμίου και μικρότερη επίδραση του φαινομένου μνήμης. Το κυριότερο πλεονέκτημα αυτών των μπαταριών είναι η υψηλή ειδική ισχύς, καθώς η τιμή της μπορεί να φτάσει τα 1800 W/kg.

Ωστόσο, είναι λιγότερο ανθεκτικές από τις μπαταρίες νικελίου-καδμίου, καθώς οι υψηλοί ρυθμοί εκφόρτισης μειώνουν την διάρκεια ζωής τους. Γι' αυτό το λόγο, προτιμώνται χαμηλοί ρυθμοί εκφόρτισης. Τα καλύτερα αποτελέσματα επιτυγχάνονται με ρυθμό εκφόρτισης από 0,2·Q έως 0,5·Q. Επίσης, έχουν υψηλότερο ρυθμό αυτοεκφόρτισης (περίπου 30% ανά μήνα) από τις μπαταρίες νικελίου-καδμίου και παράγουν θερμότητα κατά την φόρτιση τους. Ακόμη, η αποθήκευσή τους πρέπει να γίνεται σε δροσερό μέρος, γιατί διαφορετικά μειώνεται η απόδοσή τους. Εντέλει, έχουν αρκετά υψηλό κόστος (150-300 €/kW·h).

2.1.2.4 Ιόντων λιθίου (Li-ion)

Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου εισήχθησαν στο εμπόριο στις αρχές της δεκαετίας του 1990. Σήμερα, αποτελούν την ταχύτερα αναπτυσσόμενη και την πιο πολλά υποσχόμενη τεχνολογία μπαταριών. Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου έχουν ένα σημαντικό πλεονέκτημα βάρους σε σύγκριση με τις άλλες μπαταρίες, καθώς το λίθιο είναι το ελαφρύτερο μέταλλο. Το χαρακτηριστικό αυτό σε συνδυασμό με την υψηλή ειδική ενέργεια (έως και 200 W·h/kg) και την υψηλή ειδική ισχύ (έως 3500 W/kg) που προσφέρουν, τις καθιστούν ιδανική επιλογή για εφαρμογές ηλεκτρικών και υβριδικών ηλεκτρικών οχημάτων. Αξιοσημείωτο παράδειγμα, αποτελεί το *Tesla Roadster* το οποίο χρησιμοποιώντας μπαταρία ιόντων λιθίου έχει χιλιομετρική αυτονομία 352 km (υπό ορισμένες συνθήκες λειτουργίας) σύμφωνα με τον κατασκευαστή του. Ακόμη, δεν παρουσιάζουν καθόλου το φαινόμενο μνήμης, έχουν χαμηλές απαιτήσεις συντήρησης,

χαμηλό ρυθμό αυτοεκφόρτισης (περίπου 5-10% ανά μήνα) και υψηλή διάρκεια ζωής (έως 3000 κύκλους).

Ωστόσο, για την ασφαλή λειτουργία τους πρέπει να συνοδεύονται από ένα κύκλωμα προστασίας για ακριβή έλεγχο της τάσης κατά την φόρτισή τους, ενώ το κόστος τους παραμένει ακόμα αρκετά υψηλό (250-500 €/kW·h).

2.1.2.5 Λιθίου πολυμερών (LiPo)

Οι μπαταρίες λιθίου πολυμερών θεωρούνται μπαταρίες στερεάς κατάστασης, γιατί ο ηλεκτρολύτης τους είναι στερεός. Τα χαρακτηριστικά τους είναι παρόμοια με αυτά των μπαταριών ιόντων λιθίου. Ωστόσο, η χρήση στερεών πολυμερών για ηλεκτρολύτη – σ' αντίθεση με τους εύφλεκτους υγρούς ηλεκτρολύτες των μπαταριών ιόντων λιθίου – έχει ως αποτέλεσμα την μεγαλύτερη ασφάλεια και ειδικότερα στην περίπτωση του τροχαίου ατυχήματος. Ακόμη, επειδή τα κελιά των μπαταριών λιθίου πολυμερών είναι πιο λεπτά, οι μπαταρίες λιθίου πολυμερών προσαρμόζονται πιο εύκολα στον διαθέσιμο χώρο του πλαισίου του οχήματος.

Το μειονέκτημα αυτών των μπαταριών, είναι ότι πρέπει να λειτουργούν σε θερμοκρασίες από 80°C έως 120°C, καθώς η αγωγιμότητα του πολυμερούς ηλεκτρολύτη είναι πολύ χαμηλή σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος. Γι' αυτό το λόγο, μεταξύ των κελιών τοποθετούνται επίπεδες συσκευές θέρμανσης για την επίτευξη της κατάλληλης θερμοκρασίας λειτουργίας.

2.2 ΥΠΕΡΠΥΚΝΩΤΕΣ

Οι υπερπυκνωτές χαρακτηρίζονται από πολύ υψηλότερη ειδική ισχύ (έως 14000 W/kg), αλλά πολύ χαμηλότερη ειδική ενέργεια (έως 6 W·h/kg) σε σύγκριση με τις μπαταρίες. Μπορούν να φορτιστούν ή να εκφορτιστούν σε μερικά μόνο δευτερόλεπτα, παραλαμβάνοντας ή παρέχοντας αντίστοιχα υψηλές τιμές ισχύος. Το γεγονός αυτό τις καθιστά ιδανικές για την τροφοδοσία των ηλεκτρικών και υβριδικών ηλεκτρικών οχημάτων, κατά τις περιόδους όπου απαιτείται υψηλή ισχύ από την πηγή ενέργειας, όπως είναι η επιτάχυνση ή η κίνηση σε ανηφορικό δρόμο. Ακόμη, είναι κατάλληλοι για την γρηγορότερη και αποδοτικότερη αποθήκευση της ενέργειας κατά την αναγεννητική πέδηση. Παρ' όλα αυτά, λόγω της πολύ χαμηλής ειδικής ενέργειας που έχουν δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μοναδική πηγή ενέργειας στα ηλεκτρικά και υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα. Γι' αυτό το λόγο, χρησιμοποιούνται σαν βοηθητική πηγή ενέργειας και σε συνδυασμό με την μπαταρία επιτυγχάνουν την υβριδοποίηση του συστήματος τροφοδοσίας ενέργειας. Μ' αυτόν τον τρόπο, καλύπτονται η απαίτηση της υψηλής ειδικής ενέργειας από τη μπαταρία και της υψηλής ειδικής ισχύος από τον υπερπυκνωτή.

Επίσης, οι υπερπυκνωτές έχουν μικρή απαίτηση συντήρησης και δεν παρουσιάζουν κίνδυνο υπερφόρτισης, εφόσον η τάση τροφοδοσίας είναι κάτω από τη μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή. Ακόμη, παρουσιάζουν μεγάλη διάρκεια ζωής (της τάξης των εκατομμυρίων κύκλων) με ελάχιστη μείωση της απόδοσής τους μετά από εκατοντάδες χιλιάδες κύκλους ζωής και σε αντίθεση με κάποιους τύπους μπαταριών είναι φιλικό προς το περιβάλλον, καθώς δεν περιέχουν τοξικά υλικά. Ωστόσο, ένα ακόμη σημαντικό μειονέκτημά τους είναι ο πολύ υψηλός ρυθμός αυτοεκφόρτισής τους. Κατά συνέπεια, είναι κατάλληλοι μόνο για βραχυπρόθεσμη αποθήκευση ενέργειας. Ενδεικτικά, μέσα σ' ένα μήνα μπορεί να χάσουν έως και το 50% της αποθηκευμένης τους ενέργειας.

2.2.1 Αρχή λειτουργίας

Γενικά, οι πυκνωτές είναι συσκευές οι οποίες αποθηκεύουν ηλεκτρική ενέργεια με τη μορφή ηλεκτροστατικού πεδίου. Αποτελούνται από μία θετικά φορτισμένη πλάκα και μία αρνητικά φορτισμένη πλάκα, οι οποίες τοποθετούνται παράλληλα μεταξύ τους και χωρίζονται από ένα μονωτικό υλικό (διηλεκτρικό) το οποίο εμποδίζει την κίνηση ηλεκτρικών φορτίων.

Οι πυκνωτές χαρακτηρίζονται από την χωρητικότητά τους C η οποία έχει μονάδα μέτρησης στο SI το *Farad*. Η χωρητικότητά τους υπολογίζεται από τη σχέση:

$$C = \varepsilon \cdot \frac{A}{d} \quad (F) \quad (2.12)$$

όπου ε είναι η διηλεκτρική σταθερά του μονωτικού υλικού, A η επιφάνεια των παράλληλων πλακών και d η μεταξύ τους απόσταση. Από τη σχέση 2.12 προκύπτει ότι η χωρητικότητα C ενός πυκνωτή, είναι ανάλογη της διηλεκτρικής σταθεράς ε του μονωτικού υλικού και της επιφάνειας A των παράλληλων πλακών και αντιστρόφως ανάλογη της μεταξύ τους απόστασης d .

Το αποθηκευμένο ηλεκτρικό φορτίο Q ενός πυκνωτή υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$Q = C \cdot V \quad (2.13)$$

όπου C η χωρητικότητα του πυκνωτή και V η τάση του πυκνωτή.

Η αποθηκευμένη ενέργεια E σ' έναν πυκνωτή δίνεται από τη σχέση:

$$E = \frac{1}{2} \cdot C \cdot V^2 \quad (J) \quad (2.14)$$

Από τη σχέση 2.14 παρατηρείται ότι η αποθηκευμένη ενέργεια ενός πυκνωτή, αυξάνεται περισσότερο με την τάση του και λιγότερο με την χωρητικότητά του.

Ακόμη, λόγω της πολύ χαμηλής ισχύος που παρουσιάζει σε χαμηλές τιμές τάσης, δεν μπορεί να αξιοποιηθεί η συνολική αποθηκευμένη ενέργεια. Έτσι, στην πράξη η ενέργεια που μπορεί να αποθηκευτεί σ' έναν πυκνωτή δίνεται από τη σχέση:

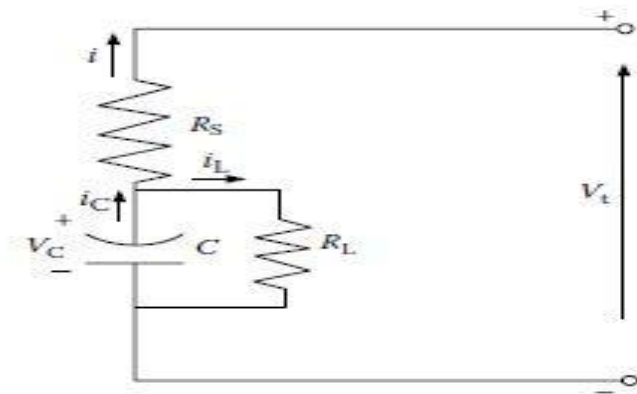
$$E = \frac{1}{2} \cdot C \cdot V_{max}^2 - \frac{1}{2} \cdot C \cdot V_{min}^2 \quad (J) \quad (2.15)$$

όπου V_{max} είναι η ονομαστική τάση του υπερπυκνωτή και V_{min} η μικρότερη τιμή της τάσης που μπορεί να πάρει ο πυκνωτής.

2.2.2 Παράμετροι υπερπυκνωτών

Το πιο απλό ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ενός υπερπυκνωτή, αποτελείται από έναν στοιχείο υπερπυκνωτή με χωρητικότητα C συνδεδεμένο σε σειρά με μία εσωτερική αντίσταση R_S , η οποία προσδιορίζει τις απώλειες ισχύος του υπερπυκνωτή. Αυτή η εσωτερική αντίσταση R_S του υπερπυκνωτή είναι πολύ μικρή και αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τον υψηλό βαθμό απόδοσής του (90% ή περισσότερο).

Αυτό το ηλεκτρικό κύκλωμα κρίνεται ικανοποιητικό σε μεγάλο βαθμό. Ωστόσο, για μεγαλύτερη ακρίβεια υπάρχουν πιο πολύπλοκα ηλεκτρικά κυκλώματα. Ένα πιο σύνθετο ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ενός υπερπυκνωτή παρουσιάζεται στην εικόνα 2.6.



Εικόνα 2.6 Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα υπερπυκνωτή. [1]

Σ' αυτό το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα του υπερπυκνωτή, εκτός από την εσωτερική αντίσταση R_S που είναι συνδεδεμένη σε σειρά με τον υπερπυκνωτή, λαμβάνεται υπόψη και η αντίσταση διαρροής του διηλεκτρικού R_L που συνδέεται παράλληλα με τον υπερπυκνωτή. Η αντίσταση διαρροής του διηλεκτρικού R_L προσδιορίζει τον ρυθμό αυτοεκφόρτισης του υπερπυκνωτή, καθώς η μόνωση μεταξύ των πλακών δεν είναι τέλεια. Η τιμή της είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτήν της εσωτερικής αντίστασης σε σειρά R_S . Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της αντίστασης διαρροής του διηλεκτρικού R_L , τόσο μικρότερος είναι και ο ρυθμός αυτοεκφόρτισης του υπερπυκνωτή. Συνήθως, οι κατασκευαστές υπερπυκνωτών αντί να δίνουν την αντίσταση διαρροής του διηλεκτρικού R_L δίνουν το ρεύμα διαρροής του διηλεκτρικού i_L το οποίο μπορεί να υπολογιστεί από την παρακάτω σχέση:

$$i_L = V_C / R_L \quad (A) \quad (2.16)$$

Η τάση V_t του υπερπυκνωτή στα άκρα του κατά την εκφόρτισή του υπολογίζεται από τη σχέση:

$$V_t = V_c - i \cdot R_s \quad (V) \quad (2.17)$$

Η τάση V_c του υπερπυκνωτή υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\frac{dV_c}{dt} = -\left(\frac{i + i_L}{C}\right) \quad (2.18)$$

Αντικαθιστώντας τη σχέση 2.16 στη σχέση 2.18 προκύπτει η παρακάτω εξίσωση:

$$\frac{dV_c}{dt} = \frac{V_c}{C \cdot R_L} - \frac{i}{C} \quad (2.19)$$

Η τελική λύση της εξίσωσης 2.19 είναι:

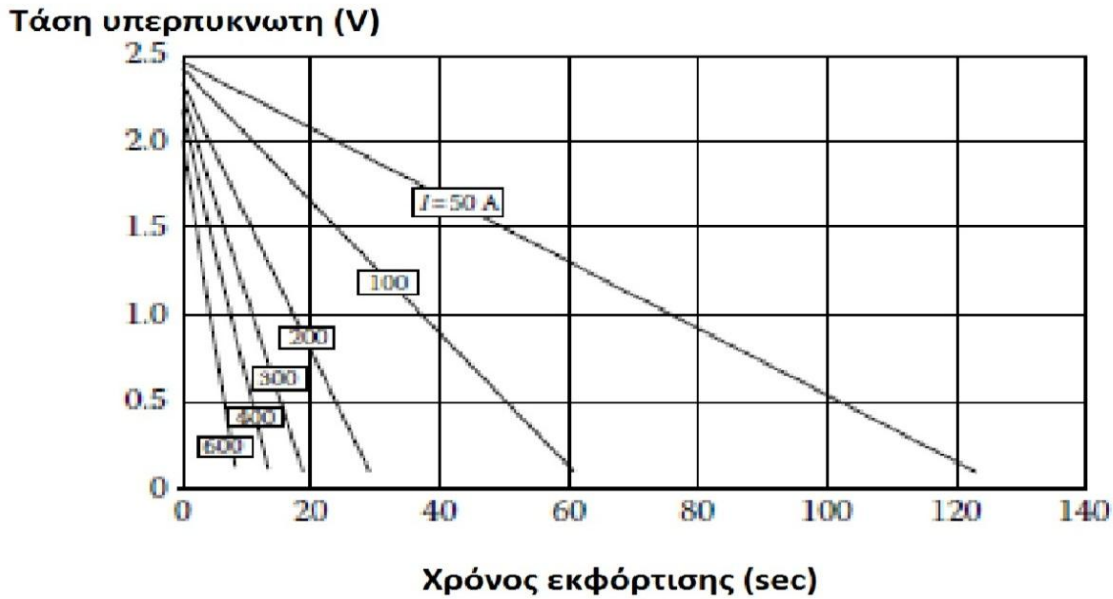
$$V_c = \left(V_{co} \cdot \int_0^t \frac{i}{C} \cdot e^{\frac{t}{C \cdot R_L}} \cdot dt \right) \cdot e^{-\frac{t}{C \cdot R_L}} \quad (V) \quad (2.20)$$

όπου t ο χρόνος εκφόρτισης και V_{co} η ονομαστική τάση του υπερπυκνωτή.

Αντικαθιστώντας τη σχέση 2.20 στη σχέση 2.17, η τάση V_t στα άκρα του υπερπυκνωτή κατά την εκφόρτιση είναι:

$$V_t = \left(V_{co} \cdot \int_0^t \frac{i}{C} \cdot e^{\frac{t}{C \cdot R_L}} \cdot dt \right) \cdot e^{-\frac{t}{C \cdot R_L}} - i \cdot R_s \quad (V) \quad (2.21)$$

Όπως φαίνεται στη εικόνα 2.7 η τάση του υπερπυκνωτή μειώνεται γραμμικά σε συνάρτηση με το χρόνο και όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του ρεύματος εκφόρτισης, τόσο γρηγορότερα μειώνεται η τάση του.



Εικόνα 2.7 Τάση υπερπυκνωτή – Χρόνος εκφόρτισης. [1]

Η κατάσταση φόρτισης SOC των υπερπυκνωτών υπολογίζεται πιο εύκολα από αυτήν των μπαταριών, γιατί εξαρτάται μόνο από την τάση τους. Έτσι, μπορεί να υπολογιστεί εύκολα και με μεγάλη ακρίβεια από την παρακάτω σχέση:

$$SOC = \frac{C \cdot (V - V_{min})}{C \cdot (V_{max} - V_{min})} \cdot 100\% = \frac{V - V_{min}}{V_{max} - V_{min}} \cdot 100\% \quad (2.22)$$

2.2.3 Τεχνολογία υπερπυκνωτών

Υπάρχουν δύο τεχνολογίες υπερπυκνωτών, οι *ultracapacitors* και οι *supercapacitors*. Η κύρια διαφορά τους από τους κλασικούς πυκνωτές είναι ότι έχουν μεγαλύτερη ειδική ενέργεια.

Οι *ultracapacitors* είναι ειδικές εκδόσεις των ηλεκτρολυτικών πυκνωτών και χρησιμοποιούν ηλεκτροχημικά συστήματα για την αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας σ' ένα στρώμα πολωμένου υγρού στη διεπιφάνεια μεταξύ ενός αγώγιμου ηλεκτρολύτη μετά από ιονισμό και ενός ηλεκτρικά αγώγιμου ηλεκτρολύτη. Οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις των *ultracapacitors* οι οποίες είναι γνωστές και ως *Faradaic*, περιορίζονται μόνο στα επιφανειακά στρώματα.

Από την άλλη πλευρά, οι *supercapacitors* έχουν την ικανότητα να αποθηκεύουν μεγάλη ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς εκτός από τη συμβατική αποθήκευση ηλεκτροστατικού φορτίου ο ηλεκτρολύτης που περιέχουν επιτρέπει και την αποθήκευση ηλεκτροστατικού φορτίου με τη μορφή ιόντων. Η λειτουργία ενός *supercapacitor* δεν περιλαμβάνει ηλεκτροχημικές αντιδράσεις. Χαρακτηριστικό των *supercapacitors* είναι ότι οι πλάκες τους (ηλεκτρόδια) κατασκευάζονται από πορώδη άνθρακα ο οποίος έχει μεγάλη εσωτερική επιφάνεια, βοηθώντας έτσι την απορρόφηση ιόντων και την παροχή μεγαλύτερης πυκνότητας φορτίων σε σχέση με τους συμβατικούς πυκνωτές. Τα ιόντα κινούνται πολύ πιο αργά από τα ηλεκτρόνια και αυτό έχει σαν αποτέλεσμα οι *supercapacitors* να εκφορτίζονται σε πολύ

μεγαλύτερο χρόνο από τους κλασικούς ηλεκτρολυτικούς πυκνωτές. Παρ' όλα αυτά, ο χρόνος εκφόρτισης τους παραμένει ακόμα πολύ μικρότερος από αυτόν των μπαταριών.

Το κλειδί στο σχεδιασμό των σύγχρονων υπερπυκνωτών είναι η τοποθέτηση ενός πολύ λεπτού μονωτικού υμένα μεταξύ των παράλληλων πλακών, επιτρέποντας έτσι την πολύ μικρή απόσταση μεταξύ των πλακών. Μ' αυτόν τον τρόπο αυξάνεται η χωρητικότητα του υπερπυκνωτή. Ωστόσο, η τάση ενός υπερπυκνωτή θα πρέπει να διατηρείται χαμηλή (1-3 V), γιατί υψηλές τάσεις θα προκαλούσαν ηλεκτρικά τόξα μεταξύ των πλακών και ο υπερπυκνωτής θα καταστρεφόταν. Το γεγονός αυτό θέτει ένα όριο στη μέγιστη δυνατή ενέργεια που μπορεί να αποθηκεύσει ο υπερπυκνωτής.

Μία λύση για την αύξηση αυτής της τάσης είναι η σύνδεσή τους σε σειρά. Γενικά, αν δύο πυκνωτές με χωρητικότητα C_1 και C_2 συνδεθούν σε σειρά, τότε η συνολική τους χωρητικότητα θα είναι:

$$1/C = 1/C_1 + 1/C_2 \quad (2.23)$$

Για παράδειγμα, αν δύο πυκνωτές με χωρητικότητα 3 F συνδεθούν σε σειρά, τότε η συνολική τους χωρητικότητα θα είναι 1,5 F. Άρα, τοποθετώντας τους πυκνωτές σε σειρά αυξάνεται αθροιστικά η συνολική τους τάση, αλλά μειώνεται η συνολική τους χωρητικότητα. Παρ' όλα αυτά, η ενέργεια που μπορούν να αποθηκεύσουν αυξάνεται, γιατί είναι ανάλογη του τετραγώνου της τάσης τους.

Ωστόσο, ένα σημαντικό πρόβλημα με αυτήν την συνδεσμολογία, είναι αυτό της εξισορρόπησης του φορτίου. Όλοι οι υπερπυκνωτές που συνδέονται σε σειρά θα πρέπει να έχουν το ίδιο φορτίο. Όμως, το πρόβλημα είναι ότι ο κάθε υπερπυκνωτής έχει ένα ρυθμό αυτοεκφόρτισης, ο οποίος στην πράξη δεν είναι ίδιος σε όλους τους υπερπυκνωτές. Κατά συνέπεια, μπορεί να υπάρξει μία σχετική αύξηση του φορτίου και της τάσης σε κάποιους υπερπυκνωτές. Αν αυτή η τάση ξεπεράσει τα 3 V υπάρχει κίνδυνος καταστροφής του υπερπυκνωτή.

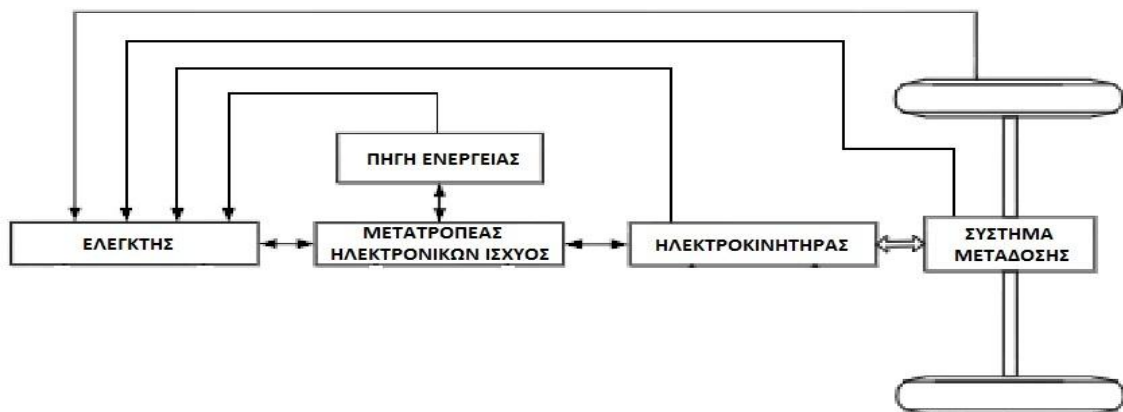
Το παραπάνω πρόβλημα μπορεί να λυθεί με τη χρήση κυκλωμάτων εξισορρόπησης φορτίου. Τα κυκλώματα αυτά παρακολουθούν συνεχώς την τάση των υπερπυκνωτών και μοιράζουν ισοδύναμα το φορτίο, ώστε όλοι οι υπερπυκνωτές να έχουν την ίδια τάση. Τα συστήματα αυτά προσθέτουν κόστος και όγκο και ξοδεύουν κάποιο ποσό ενέργειας, καθώς καταναλώνουν ρεύμα περίπου 1 mA ή περισσότερο.

Εντέλει, συνδέοντας παράλληλα τα στοιχεία των υπερπυκνωτών η συνολική τους χωρητικότητα αυξάνεται αθροιστικά όπως φαίνεται και στη παρακάτω σχέση:

$$C = C_1 + C_2 \quad (2.24)$$

3 ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΡΟΩΘΗΣΗΣ

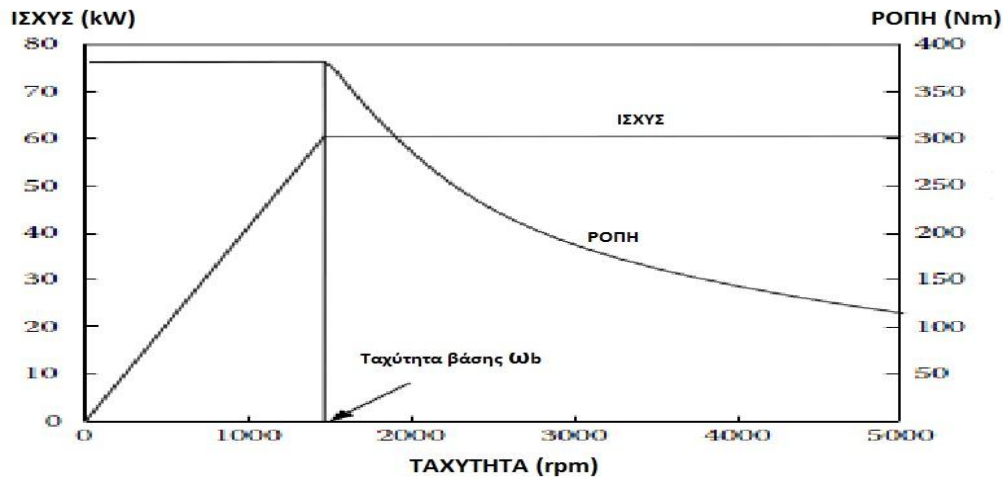
Το ηλεκτρικό σύστημα προώθησης προσδιορίζει τα χαρακτηριστικά απόδοσης ενός ηλεκτρικού οχήματος. Ένα λειτουργικό διάγραμμα ενός τυπικού ηλεκτρικού συστήματος προώθησης παρουσιάζεται στην εικόνα 3.1.



Εικόνα 3.1 Τυπικό ηλεκτρικό σύστημα προώθησης ενός ηλεκτρικού οχήματος.

Αποτελείται από τον ηλεκτροκινητήρα, τον μετατροπέα ηλεκτρονικών ισχύος και τον ελεγκτή, οι οποίοι συνεργάζονται με την πηγή ενέργειας και το σύστημα μετάδοσης. Ο ηλεκτροκινητήρας χρησιμοποιείται για τη μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας της πηγής σε μηχανική για την κίνηση του οχήματος ή αντίστροφα για τη μετατροπή της κινητικής ενέργειας του οχήματος σε ηλεκτρική, με σκοπό τη φόρτιση της πηγής ενέργειας. Αυτή η αντίστροφη ροή ισχύος είναι γνωστή ως αναγεννητική πέδηση. Ο ηλεκτροκινητήρας μπορεί να είναι είτε συνεχούς ρεύματος, είτε εναλλασσόμενου ρεύματος. Τα πρώτα ηλεκτρικά οχήματα χρησιμοποιούσαν ηλεκτροκινητήρες συνεχούς ρεύματος, λόγω της ώριμης τεχνολογίας τους και του εύκολου ελέγχου τους. Ωστόσο, το μέγεθος τους και οι υψηλές απαιτήσεις συντήρησης περιόρισαν την εφαρμογή τους σε ηλεκτρικά οχήματα. Σήμερα, οι ηλεκτροκινητήρες που χρησιμοποιούνται περισσότερο σε εφαρμογές ηλεκτρικών οχημάτων είναι οι επαγωγικοί κινητήρες, οι κινητήρες με μόνιμους μαγνήτες (κυρίως *BLDC*) και οι κινητήρες μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης (*SRM*).

Η επιλογή του κατάλληλου ηλεκτροκινητήρα εξαρτάται από τις απαιτήσεις του οδηγού, τον τύπο του οχήματος και την ισχύ που μπορεί να παρέχει η πηγή ενέργειας. Κάθε ηλεκτροκινητήρας έχει μία χαρακτηριστική ροπής – ταχύτητας, καθώς και ισχύος ταχύτητας, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.2



Εικόνα 3.2 Χαρακτηριστική ροπής - ταχύτητας και ισχύος - ταχύτητας. [1]

Για ταχύτητες χαμηλότερες από την ταχύτητα βάσης ω_b ο ηλεκτροκινητήρας έχει σταθερή ροπή, ενώ για ταχύτητες μεγαλύτερες από την ταχύτητα βάσης ω_b ο ηλεκτροκινητήρας έχει σταθερή ισχύ. Οι περιοχές σταθερής ροπής και σταθερής ισχύος αντιπροσωπεύονται από το λόγο ταχυτήτων x , ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος της μέγιστης ταχύτητας ω_{max} προς την ταχύτητα βάσης ω_b .

$$x = \omega_{max} / \omega_b \quad (3.1)$$

Ο λόγος ταχυτήτων x είναι επιθυμητό να είναι μεγάλος, γιατί όσο μεγαλύτερος είναι τόσο μεγαλύτερη είναι η περιοχή σταθερής ισχύος από την περιοχή σταθερής ροπής. Κάθε τύπος ηλεκτροκινητήρα έχει ένα μέγιστο λόγο ταχυτήτων x . Για παράδειγμα, οι κινητήρες με μόνιμους μαγνήτες έχουν μέγιστο λόγο ταχυτήτων x μικρότερο από δύο ($x < 2$), γιατί το μαγνητικό πεδίο που παράγεται από τους μαγνήτες δεν μπορεί να μειωθεί. Οι επαγωγικοί κινητήρες έχουν μέγιστο λόγο ταχυτήτων x περίπου τέσσερα και οι κινητήρες μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης έχουν το μεγαλύτερο λόγο ταχυτήτων x από όλους τους τύπους ηλεκτροκινητήρων ο οποίος μπορεί να είναι μεγαλύτερος από έξι, επιτυγχάνοντας έτσι μεγάλη περιοχή σταθερής ισχύος.

Οι σημαντικότερες απαιτήσεις από έναν ηλεκτροκινητήρα είναι:

- Ευέλικτος έλεγχος λειτουργίας
- Υψηλός βαθμός απόδοσης
- Χαμηλός θόρυβος
- Χαμηλή απαίτηση συντήρησης
- Υψηλή ταχύτητα λειτουργίας
- Μεγάλη περιοχή σταθερής ισχύος
- Μεγάλο λόγο ονομαστικής ροπής/ροπής αδράνειας
- Μεγάλος λόγος ονομαστικής ισχύος/βάρους

Έπειτα, ο μετατροπέας ηλεκτρονικών ισχύος μετατρέπει την τάση και το ρεύμα της πηγής ενέργειας σε μία κατάλληλη τιμή για την τροφοδοσία του ηλεκτροκινητήρα. Ο ελεγκτής διαχειρίζεται τον μετατροπέα δίνοντάς του τα κατάλληλα σήματα ελέγχου, ώστε ο ηλεκτροκινητήρας να λειτουργεί στο επιθυμητό σημείο ροπής - ταχύτητας, σύμφωνα με την εντολή που έχει δώσει ο οδηγός μέσω του πεντάλ επιτάχυνσης.

3.1 DC ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ

3.1.1 Αρχή λειτουργίας και κατασκευή των DC κινητήρων

Η αρχή λειτουργίας των DC κινητήρων είναι απλή. Όταν μέσα από έναν αγωγό ο οποίος βρίσκεται μέσα σε σταθερό μαγνητικό πεδίο περάσει ένα ρεύμα, τότε λόγω των δύο μαγνητικών πεδίων αναπτύσσεται πάνω στον αγωγό μία δύναμη.

Οι DC κινητήρες έχουν δύο τυλίγματα. Ένα τύλιγμα στο στάτη το οποίο ονομάζεται τύλιγμα διέγερσης και ένα τύλιγμα στο ρότορα το οποίο ονομάζεται τύλιγμα οπλισμού. Όταν μέσα από αυτά τα δύο τυλίγματα περάσει ρεύμα, δημιουργούνται δύο μαγνητικά πεδία τα οποία αλληλεπιδρούν μεταξύ τους και έτσι παράγεται μία ροπή, η οποία περιστρέφει το ρότορα.

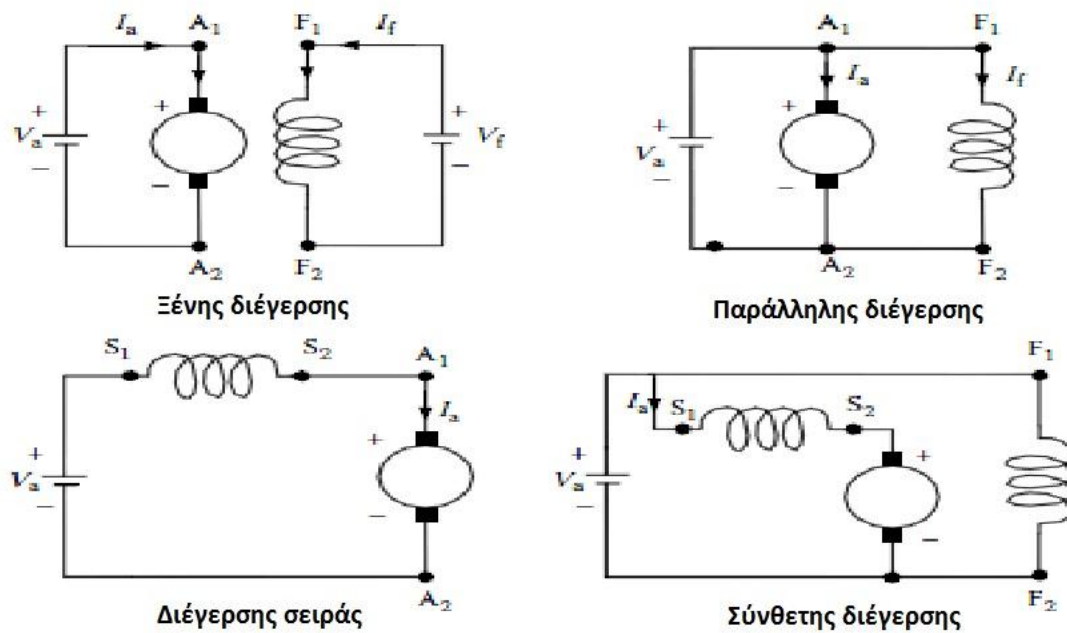
Τα πλεονεκτήματα των DC κινητήρων είναι:

- Ευκολία ελέγχου, λόγω της γραμμικότητας τους
- Δυνατότητα ανεξάρτητου ελέγχου των τυλιγμάτων διέγερσης και οπλισμού
- Ανεπτυγμένη τεχνολογία

Τα μειονεκτήματα των DC κινητήρων είναι:

- Υψηλή απαίτηση συντήρησης, λόγω ψηκτρών
- Μικρές ταχύτητες λειτουργίας
- Ηλεκτρομαγνητικά παράσιτα, λόγω συλλέκτη
- Χαμηλός βαθμός απόδοσης
- Χαμηλή πυκνότητα ισχύος

Οι DC κινητήρες μπορούν να ταξινομηθούν ανάλογα με τη συνδεσμολογία του τυλιγματος διέγερσης σε ξένης διέγερσης, παράλληλης διέγερσης, διέγερσης σειράς και σύνθετης διέγερσης, οι οποίοι φαίνονται στην εικόνα 3.3.

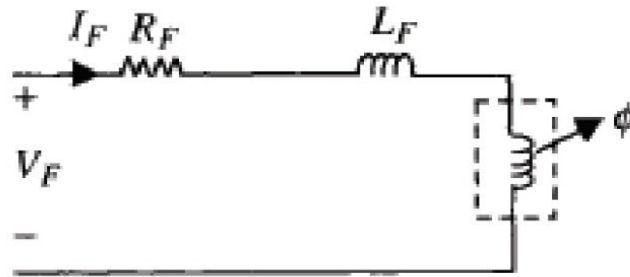


Εικόνα 3.3 Τύποι DC κινητήρων. [1]

Στους DC κινητήρες με παράλληλη διέγερση το τύλιγμα διέγερσης συνδέεται παράλληλα με το τύλιγμα οπλισμού και τροφοδοτούνται από την ίδια πηγή ενέργειας. Έτσι, προσφέρουν μικρή ευελιξία ελέγχου. Στους DC κινητήρες με διέγερση σειράς το τύλιγμα διέγερσης συνδέεται σε σειρά με το τύλιγμα οπλισμού και κατά συνέπεια τροφοδοτούνται με την ίδια τάση και διαρρέονται από το ίδιο ρεύμα. Γι' αυτό το λόγο, έχουν μικρή ευελιξία ελέγχου. Χαρακτηριστικό αυτών των κινητήρων είναι η πολύ υψηλή ροπή σε χαμηλές ταχύτητες, ενώ όσο η ταχύτητα τους αυξάνεται η ροπή τους πέφτει απότομα. Αυτή η συμπεριφορά τους κάνει κατάλληλους σε εφαρμογές που απαιτείται υψηλή ροπή εκκίνησης όπως η μίζα των οχημάτων, αλλά όχι σε ηλεκτρικά οχήματα. Τέλος, στους DC κινητήρες με ξένη διέγερση, τα τυλίγματα διέγερσης και οπλισμού δεν συνδέονται μεταξύ τους και τροφοδοτούνται με διαφορετική τάση. Συνεπώς, επιτρέπουν τον πλήρη έλεγχο της λειτουργίας τους, καθώς μπορεί να ελεγχθεί τόσο η μαγνητική ροή Φ (μέσω ελέγχου της τάσης V_f του τυλίγματος διέγερσης), όσο και η τάση V_a του τυλίγματος οπλισμού. Έτσι, οι DC κινητήρες που χρησιμοποιούνται σε ηλεκτρικά οχήματα είναι κατά κανόνα ξένης διέγερσης.

3.1.2 Απόδοση DC κινητήρων ξένης διέγερσης

Στην εικόνα 3.4 φαίνεται ένα ισοδύναμο κύκλωμα του τυλίγματος διέγερσης το οποίο αποτελείται από μία αντίσταση R_F και ένα πηνίο με αυτεπαγωγή L_F . Οι τιμές της αντίστασης R_F και της αυτεπαγωγής L_F του τυλίγματος διέγερσης, είναι πολύ μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες του τυλίγματος οπλισμού. Έτσι, ο χρόνος απόκρισης του τυλίγματος διέγερσης είναι πολύ μεγαλύτερος από αυτόν του τυλίγματος οπλισμού.

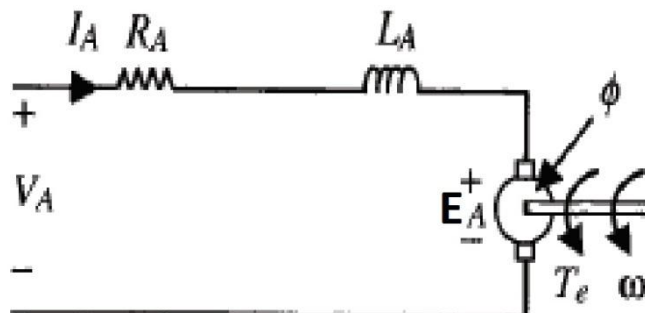


Εικόνα 3.4 Ισοδύναμο κύκλωμα τυλίγματος διέγερσης. [2]

Η μαγνητική ροή Φ είναι συνάρτηση του ρεύματος διέγερσης I_F και καθορίζει την παραγωγή ροπής. Η τάση V_F τυλίγματος διέγερσης υπολογίζεται από τη σχέση:

$$V_F = I_F \cdot R_F + L_F \cdot \frac{dI_F}{dt} \quad (V) \quad (3.2)$$

Στην εικόνα 3.5 φαίνεται το ισοδύναμο κύκλωμα του τυλίγματος οπλισμού. Αποτελείται από μία αντίσταση R_A , ένα πηνίο με αυτεπαγωγή L_A και μία επαγόμενη τάση E_A .



Εικόνα 3.5 Ισοδύναμο κύκλωμα τυλίγματος οπλισμού. [2]

Η τάση V_A του τυλίγματος οπλισμού υπολογίζεται από τη σχέση:

$$V_A = E_A + I_A \cdot R_A + L_A \cdot \frac{dI_A}{dt} \quad (V) \quad (3.3)$$

Δεδομένου ότι η τιμή της αυτεπαγωγής L_A του τυλίγματος οπλισμού είναι πολύ μικρή, η τάση V_A μπορεί να υπολογιστεί απλοποιώντας τη σχέση 3.3

$$V_A = E_A + I_A \cdot R_A \quad (V) \quad (3.4)$$

Η εξίσωση που δίνει την επαγόμενη τάση E_A του κινητήρα κατά την περιστροφή του είναι:

$$E_A = K \cdot \Phi \cdot \omega \quad (V) \quad (3.5)$$

όπου ω είναι η γωνιακή ταχύτητα του κινητήρα σε rad/sec, Φ η μαγνητική ροή σε Weber και K μία σταθερά του κινητήρα που εξαρτάται από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του.

Αυτή η επαγόμενη τάση E_A αντιτίθεται στην τάση V_A που τροφοδοτεί το τύλιγμα οπλισμού. Έτσι, το ρεύμα I_A του τυλίγματος οπλισμού υπολογίζεται ως εξής:

$$I_A = \frac{V_A - E_A}{R_A} = \frac{V_A - K \cdot \Phi \cdot \omega}{R_A} \quad (A) \quad (3.6)$$

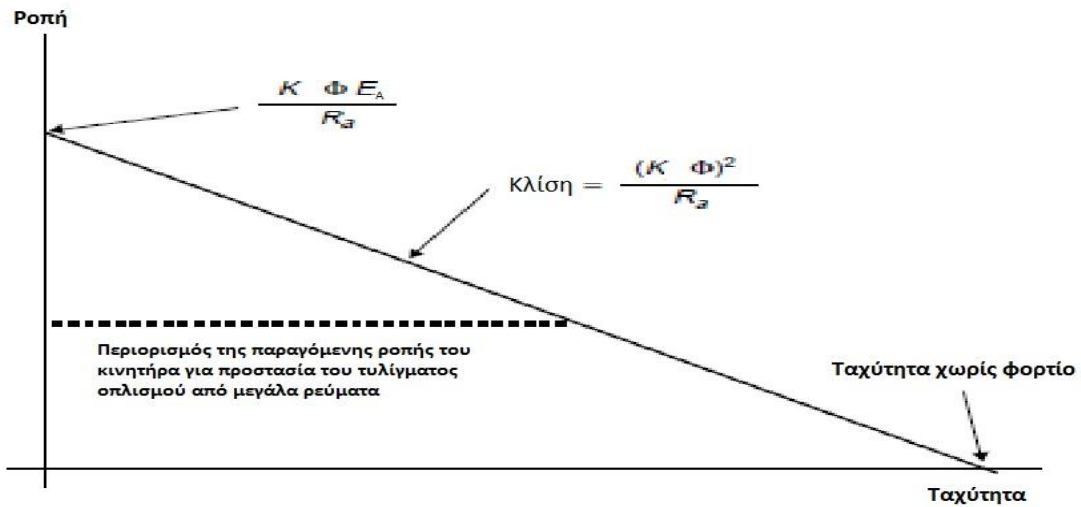
Η ροπή T του κινητήρα δίνεται από τη σχέση:

$$T = K \cdot \Phi \cdot I_A \quad (Nm) \quad (3.7)$$

Συνδυάζοντας τις σχέσεις 3.4, 3.5 και 3.7 η ροπή ενός DC κινητήρα με ξένη διέγερση υπολογίζεται από τη σχέση:

$$T = \frac{K \cdot \Phi}{R_A} \cdot V_A - \frac{(K \cdot \Phi)^2}{R_A} \cdot \omega \quad (Nm) \quad (3.8)$$

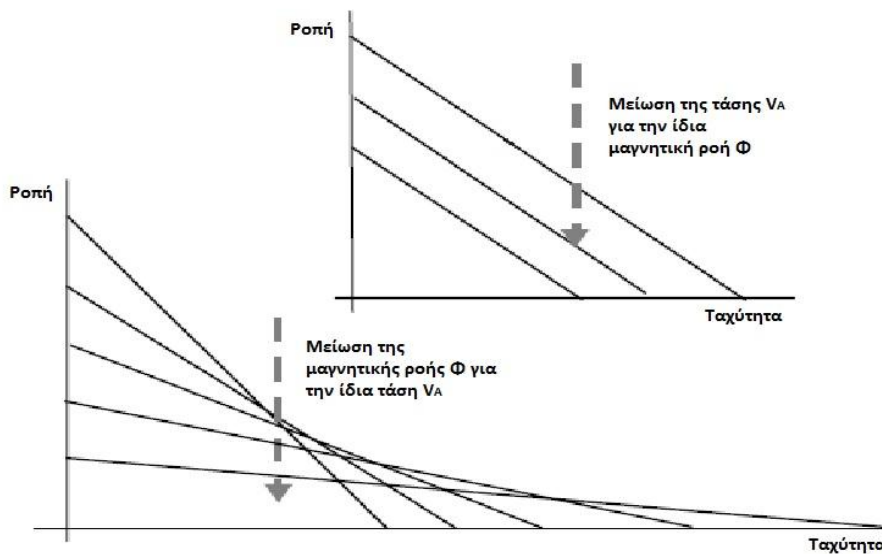
Από την εξίσωση 3.8 φαίνεται ότι η μέγιστη ροπή παρουσιάζεται για μηδενική ταχύτητα και όσο η ταχύτητα του κινητήρα αυξάνεται η ροπή μειώνεται, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.6.



Εικόνα 3.6 Χαρακτηριστική ροπής – ταχύτητας ενός DC κινητήρα ξένης διέγερσης. [3]

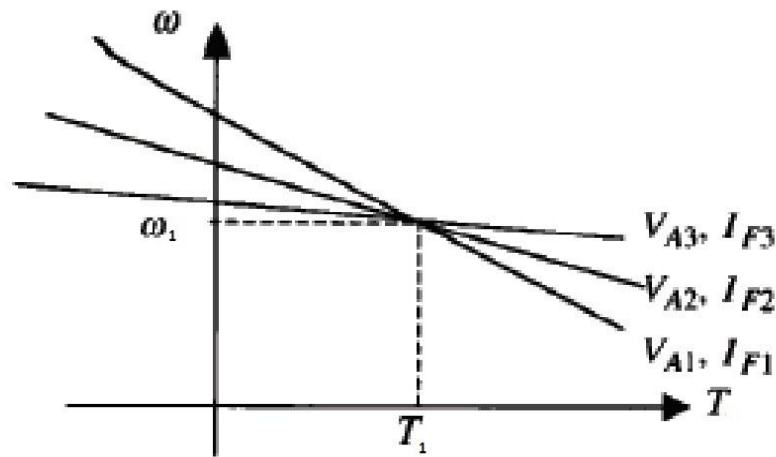
Όπως φαίνεται η παραγόμενη ροπή του κινητήρα μειώνεται στις χαμηλές στροφές σε μία σταθερή τιμή για την προστασία του τυλίγματος σπλισμού από μεγάλα ρεύματα.

Επίσης, από την εξίσωση 3.8 φαίνεται καθαρά ότι η χαρακτηριστική ροπής – ταχύτητας εξαρτάται από την τάση V_A και από τη μαγνητική ροή Φ . Η επίπτωση που έχει η μεταβολή της τάσης V_A και της μαγνητικής ροής Φ στην χαρακτηριστική ροπής – ταχύτητας φαίνεται στην εικόνα 3.7.



Εικόνα 3.7 Επίδραση της τάσης σπλισμού V_A και της μαγνητικής ροής Φ στην χαρακτηριστική ροπής – ταχύτητας. [3]

Για μία συγκεκριμένη ροπή T_1 και γωνιακή ταχύτητα ω_1 , υπάρχουν άπειροι συνδυασμοί τάσεων V_A και μαγνητικών ροών Φ , οι οποίοι ικανοποιούν την εξίσωση 3.8, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.8.



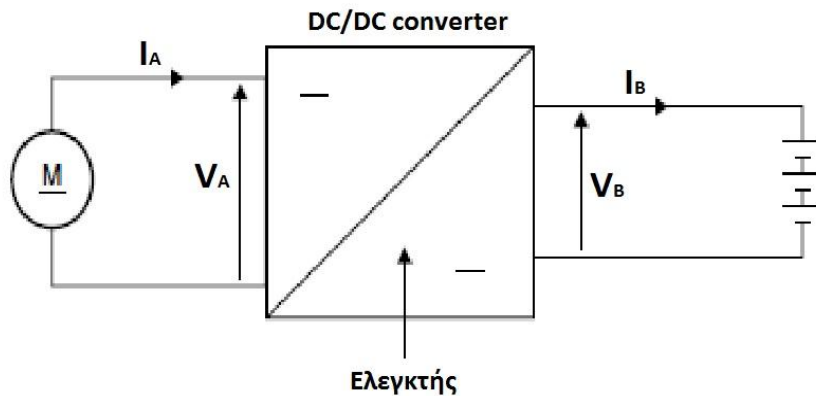
Εικόνα 3.8 Συνδυασμοί τάσεων οπλισμού V_A και μαγνητικών ροών Φ (η μαγνητική ροή Φ είναι συναρτημένη του ρεύματος διέγερσης I_F), για ένα συγκεκριμένο σημείο λειτουργίας. [2]

Ωστόσο, η επιλογή της τάσης V_A και της μαγνητικής ροής Φ γίνεται με βάση τη βελτιστοποίηση της απόδοσης και την ελαχιστοποίηση των απωλειών του κινητήρα. Γι' αυτό το σκοπό υπάρχει ένας αλγόριθμος βελτιστοποίησης ο οποίος δίνει τον ιδανικό συνδυασμό της τάσης τροφοδοσίας V_A του τυλίγματος οπλισμού και της μαγνητικής ροής Φ , για κάθε σημείο λειτουργίας του κινητήρα.

3.1.3 Αναγεννητική πέδηση των DC κινητήρων

Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό των ηλεκτρικών μηχανών είναι ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μετατροπή της κινητικής ενέργειας σε ηλεκτρική κατά την πέδηση του οχήματος, αυξάνοντας έτσι τη χιλιομετρική αυτονομία του οχήματος περίπου 10-15%. Ο τρόπος λειτουργίας είναι πιο εύκολος στην περίπτωση των DC μηχανών. Ωστόσο, οι βασικές αρχές λειτουργίας εφαρμόζονται σ' όλους τους τύπους ηλεκτρικών μηχανών.

Στην εικόνα 3.9 φαίνεται μία τυπική συνδεσμολογία μεταξύ μίας μπαταρίας και μίας ηλεκτρικής μηχανής, μεταξύ των οποίων υπάρχει ένας μετατροπέας (*DC/DC converter*).



Εικόνα 3.9 Συνδεσμολογία μπαταρίας – μετατροπέα – ηλεκτρικής μηχανής. [3]

Αγνοώντας την παρουσία του μετατροπέα και υποθέτοντας ότι η μπαταρία έχει μία τάση V_B και η DC γεννήτρια περιστρέφεται με μία γωνιακή ταχύτητα ω , το ρεύμα το οποίο φορτίζει την μπαταρία είναι:

$$I = \frac{E_A - V_B}{R_A} = \frac{K \cdot \Phi \cdot \omega - V_B}{R_A} \quad (A) \quad (3.9)$$

Λόγω αυτού του ρεύματος, στον ρότορα της γεννήτριας παράγεται μία αρνητική ροπή η οποία είναι ανάλογη αυτού του ρεύματος και δίνεται από τη σχέση:

$$T = -\frac{(K \cdot \Phi)^2 + K \cdot \Phi \cdot V_B}{R_A} \quad (Nm) \quad (3.10)$$

Μόλις η επαγόμενη τάση της γεννήτριας E_A γίνει ίση με την τάση V_B της μπαταρίας, το ρεύμα που φορτίζει τη μπαταρία γίνεται μηδέν και δεν υπάρχει πλέον αναγεννητική πέδηση. Επίσης, αν η τάση V_B της μπαταρίας είναι πολύ μικρή, τότε είναι δύσκολο να αποθηκεύσει ολόκληρη την ηλεκτρική ενέργεια που της δίνεται και ιδιαίτερα στις υψηλές ταχύτητες περιστροφής της γεννήτριας, όπου το ρεύμα φτάνει πολύ υψηλές τιμές.

Γι' αυτό το λόγο, μεταξύ τους τοποθετείται ένας μετατροπέας (*DC/DC converter*), ο οποίος αυξάνει την τάση της γεννήτριας από V_A σε V_B ($V_B > V_A$) και μειώνει το ρεύμα της γεννήτριας από I_A σε I_B ($I_B < I_A$), φέρνοντας το στα κατάλληλα επίπεδα για την φόρτιση της μπαταρίας. Ακόμη, αν η τάση που παράγει η γεννήτρια κάτω από χαμηλές ταχύτητες είναι μικρότερη από την τάση της μπαταρίας, ο *DC/DC converter* μπορεί να αυξήσει την τάση της γεννήτριας, ώστε να φορτιστεί η μπαταρία. Μ' αυτόν τον τρόπο, επιτυγχάνεται η αναγεννητική πέδηση ακόμα και κάτω από χαμηλές ταχύτητες.

Εντέλει, ένας *DC/DC converter* δεν έχει βαθμό απόδοσης 100% και κατά συνέπεια κάποιο ποσό ηλεκτρικής ενέργειας χάνεται μέσα σ' αυτόν. Έτσι, η ισχύς εξόδου μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$V_B \cdot I_B = \eta_C \cdot V_A \cdot I_A \quad (3.11)$$

Παρ' όλα αυτά, ο βαθμός απόδοσης η_C ενός *DC/DC converter* είναι μεγάλος ($\eta_C > 90\%$).

3.1.4 Βαθμός απόδοσης των DC κινητήρων

Οι κυριότερες πηγές απωλειών των DC κινητήρων είναι ίδιες για όλους τους τύπους ηλεκτροκινητήρων και μπορούν να χωριστούν σε τέσσερις κύριες κατηγορίες.

Η πρώτη πηγή απωλειών είναι οι **απώλειες χαλκού**. Αυτού του είδους οι απώλειες προκαλούνται λόγω της ωμικής αντίστασης των τυλιγμάτων του κινητήρα. Έτσι, ένα ποσό της ηλεκτρικής ενέργειας που τροφοδοτεί τον κινητήρα μετατρέπεται σε θερμότητα. Η θερμότητα που παράγεται είναι ανάλογη του τετραγώνου του ρεύματος. Οι απώλειες χαλκού δίνονται από τη σχέση:

$$P_C = I_A^2 \cdot R_A \quad (W) \quad (3.12)$$

Από τη σχέση 3.7 προκύπτει ότι:

$$I_A = \frac{T}{K \cdot \Phi} \quad (A) \quad (3.13)$$

Αντικαθιστώντας τη σχέση 3.13 στη σχέση 3.12 προκύπτει:

$$P_C = \left(\frac{R_A}{(K \cdot \Phi)^2} \right) \cdot T^2 = k_C \cdot T^2 \quad (W) \quad (3.14)$$

Η δεύτερη σημαντικότερη πηγή απωλειών είναι οι **απώλειες σιδήρου**, λόγω της μεταβολής του μαγνητικού πεδίου στο ρότορα κατά την περιστροφή του. Αυτό το μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο προκαλεί δύο τύπους απωλειών. Η πρώτη πηγή απωλειών ονομάζονται *απώλειες υστέρησης* και είναι η ενέργεια που χάνεται στη συνεχή μαγνήτιση – απομαγνήτιση του σιδήρου. Η δεύτερη πηγή απωλειών του σιδήρου, οφείλεται στο ότι λόγω του μεταβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου που βρίσκεται συνεχώς ο σίδηρος, επάγονται σ' αυτόν ρεύματα. Τα ρεύματα αυτά ονομάζονται *δινορεύματα* και παράγουν θερμότητα στο σίδηρο.

Οι απώλειες σιδήρου είναι ανάλογες της συχνότητας του μεταβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου και άρα της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα και υπολογίζονται από τη σχέση:

$$P_i = k_i \cdot \omega \quad (W) \quad (3.15)$$

όπου k_i είναι μία σταθερά. Στην πράξη όμως η τιμή του k_i δεν είναι σταθερή, αλλά μεταβάλλεται καθώς επηρεάζεται από την ένταση του μαγνητικού πεδίου και άλλων μη σταθερών παραγόντων. Ωστόσο, μία σταθερή τιμή του k_i δίνει συνήθως μία καλή προσέγγιση των απωλειών σιδήρου.

Η τρίτη κατηγορία απωλειών είναι οι **μηχανικές απώλειες**, οι οποίες χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: τις *απώλειες τριβών* και τις *απώλειες εξαερισμού*. Οι απώλειες τριβών οφείλονται στις τριβές που αναπτύσσονται στα ρουλεμάν και στις ψήκτρες, ενώ οι απώλειες εξαερισμού οφείλονται στην τριβή που αναπτύσσεται μεταξύ του αέρα και των περιστρεφόμενων μερών του κινητήρα.

Οι απώλειες τριβών υπολογίζονται από τη σχέση:

$$P_f = T_f \cdot \omega \quad (Nm) \quad (3.16)$$

όπου T_f είναι η ροπή τριβών σε Nm.

Οι απώλειες εξαερισμού είναι ανάλογες του κύβου της ταχύτητας περιστροφής και υπολογίζονται από τη σχέση:

$$P_w = k_w \cdot \omega^3 \quad (W) \quad (3.17)$$

όπου k_w είναι μια σταθερά η οποία εξαρτάται από το μέγεθος και το σχήμα του ρότορα, καθώς και από τη μέθοδο ψύξης του κινητήρα.

Η τελευταία κατηγορία απωλειών είναι οι **σταθερές απώλειες**, οι οποίες είναι ανεξάρτητες της ταχύτητας περιστροφής και της ροπής του κινητήρα. Στους DC κινητήρες με ξένη διέγερση είναι οι απώλειες του τυλίγματος διέγερσης. Στους κινητήρες με μόνιμους μαγνήτες αυτές οι απώλειες είναι μηδέν, γιατί το μαγνητικό πεδίο παράγεται από τους μαγνήτες. Οι σταθερές απώλειες συνήθως συμβολίζονται με το γράμμα C .

Συνεπώς, οι συνολικές απώλειες ισχύος ενός DC κινητήρα δίνονται από τη σχέση:

$$P_{loss} = k_c \cdot T^2 + k_i \cdot \omega + T_f \cdot \omega + k_w \cdot \omega^3 + C \quad (W) \quad (3.18)$$

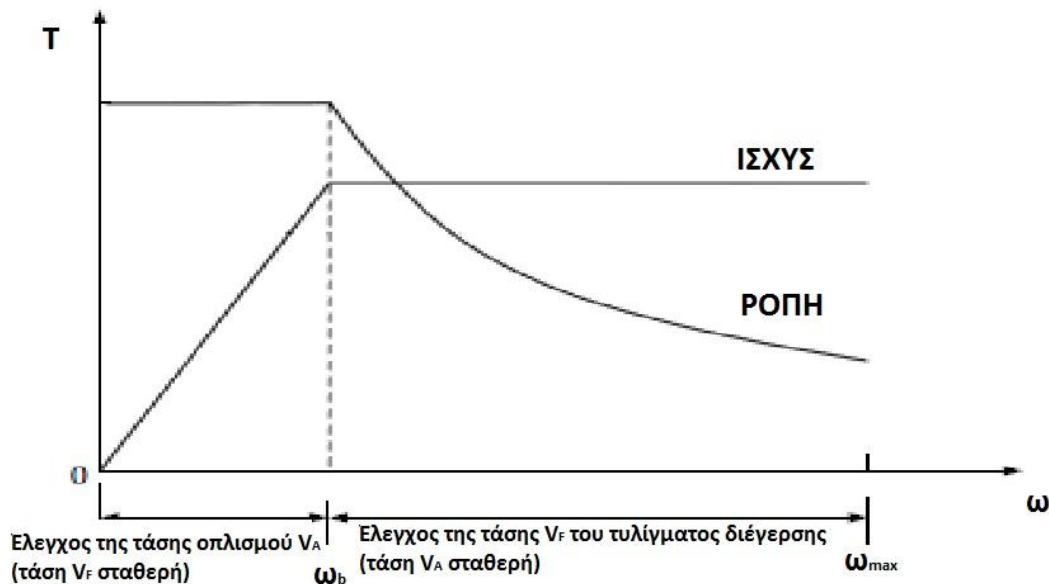
Αυτή η σχέση μπορεί να χρησιμοποιηθεί με καλή προσέγγιση σ' όλους τους τύπους ηλεκτροκινητήρων.

Ο βαθμός απόδοσης ενός ηλεκτροκινητήρα υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\eta_m = \frac{T \cdot \omega}{T \cdot \omega + k_c \cdot T^2 + k_i \cdot \omega + T_f \cdot \omega + k_w \cdot \omega^3 + C} \cdot 100\% \quad (3.19)$$

3.1.5 Στρατηγική ελέγχου των DC κινητήρων

Οι DC κινητήρες που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές ηλεκτρικών οχημάτων, έχουν μία περιοχή σταθερής ροπής πριν την ταχύτητα βάσης ω_b και μία περιοχή σταθερής ισχύος μετά την ταχύτητα βάσης ω_b .



Εικόνα 3.10 Στρατηγική ελέγχου των DC κινητήρων. [1]

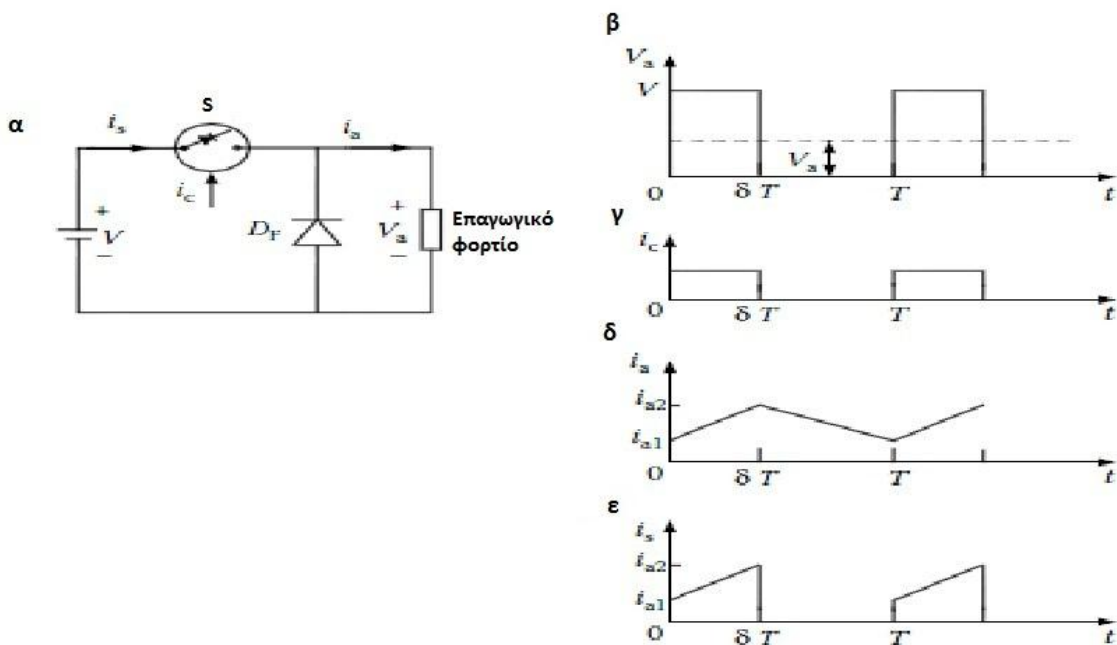
Όπως φαίνεται και στην εικόνα 3.10 στην περιοχή σταθερής ροπής η μαγνητική ροή Φ και κατά συνέπεια η τάση V_F του τυλίγματος διέγερσης διατηρείται σταθερή και για την αύξηση της ταχύτητας αυξάνεται η τάση V_A του τυλίγματος οπλισμού. Στην ταχύτητα βάσης ω_b η τάση οπλισμού V_A παίρνει την ονομαστική της τιμή και δεν αυξάνεται παραπάνω. Προκειμένου να αυξηθεί η ταχύτητα του κινητήρα σε τιμές μεγαλύτερες από την ταχύτητα βάσης ω_b , μειώνεται η τάση V_F του τυλίγματος διέγερσης και κατά συνέπεια η μαγνητική ροή Φ . Αποτέλεσμα, αυτής της μείωσης είναι να αυξηθεί η ταχύτητα του κινητήρα, ενώ η ροπή πέφτει παραβολικά με την αύξηση των στροφών. Συνεπώς, μ' αυτήν την στρατηγική ελέγχου προκύπτει η χαρακτηριστική ροπής - ταχύτητας ενός DC κινητήρα που χρησιμοποιείται σε ηλεκτρικά οχήματα.

3.1.6 Έλεγχος των DC κινητήρων με chopper

Οι *choppers* ή αλλιώς *DC/DC converters* χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της λειτουργίας των DC κινητήρων. Τα πλεονεκτήματα που προσφέρουν είναι ο ευέλικτος έλεγχος της τάσης τροφοδοσίας των τυλιγμάτων του κινητήρα, ο υψηλός βαθμός απόδοσης του κινητήρα και η αναγεννητική πέδηση ακόμη και σε πολύ χαμηλές ταχύτητες. Επίσης, λόγω της υψηλής συχνότητας λειτουργίας τους, το ρεύμα που τροφοδοτεί τον κινητήρα είναι σταθερό και έτσι σταθεροποιείται και η παραγόμενη ροπή του. Μικρή συχνότητα λειτουργίας θα είχε ως αποτέλεσμα την κυμάτωση του ρεύματος και κατά συνέπεια την κυμάτωση της παραγόμενης ροπής. Για την αύξηση ή την μείωση της τάσης τροφοδοσίας των τυλιγμάτων οπλισμού και διέγερσης, οι *choppers* χρησιμοποιούν κάποια κυκλώματα μείωσης και αύξησης της τάσης, τα οποία αναλύονται παρακάτω.

3.1.6.1 Κύκλωμα μείωσης της τάσης

Ένα τυπικό κύκλωμα μείωσης της τάσης - το οποίο αναφέρεται στη βιβλιογραφία ως *step-down chopper* ή *buck-converter* - φαίνεται στη εικόνα 3.11 α.



Εικόνα 3.11 α. Κύκλωμα μείωσης της τάσης **β.** Κυματομορφή της τάσης τροφοδοσίας V_a του φορτίου **γ.** Κυματομορφή του ρεύματος ελέγχου i_c **δ.** Κυματομορφή του ρεύματος i_a του φορτίου **ε.** Κυματομορφή του ρεύματος i_s της μπαταρίας. [1]

Μία πηγή συνεχούς ρεύματος V τροφοδοτεί ένα επαγωγικό φορτίο, μέσω ενός διακόπτη S . Το σύμβολο του διακόπτη χρησιμοποιείται για να προσομοιώσει τη λειτουργία ενός τρανζίστορ ή κάποιου άλλου ημιαγωγικού διακόπτη ηλεκτρονικών ισχύος. Μία δίοδος D_F είναι συνδεδεμένη παράλληλα με το επαγωγικό φορτίο. Ο διακόπτης S λειτουργεί με μία περίοδο T και παραμένει κλειστός για το χρονικό διάστημα:

$$t_{ON} = \delta \cdot T \text{ (sec)} \quad (3.20)$$

όπου δ είναι ο κύκλος λειτουργίας, ο οποίος παίρνει τιμές $0 \leq \delta \leq 1$ και ορίζεται ως:

$$\delta = \frac{t_{ON}}{T} \quad (3.21)$$

Το ρεύμα i_c προσομοιώνει το ρεύμα βάσης ενός τρανζίστορ. Η κυματομορφή του ρεύματος ελέγχου i_c φαίνεται στην εικόνα 3.11 γ. Όταν υπάρχει ρεύμα ελέγχου i_c ο διακόπτης S είναι κλειστός (το τρανζίστορ άγει) και η πηγή τροφοδοτεί το φορτίο με τάση V , όπως φαίνεται στην εικόνα 3.11 α. Όταν το ρεύμα ελέγχου i_c είναι μηδέν, ο διακόπτης S είναι ανοιχτός (το τρανζίστορ δεν άγει) και η πηγή δεν τροφοδοτεί το φορτίο.

Έτσι, κατά το χρονικό διάστημα $0 \leq t \leq \delta T$ ο διακόπτης S είναι κλειστός και το ρεύμα i_a που τροφοδοτεί το επαγωγικό φορτίο, αυξάνεται από i_{a1} σε i_{a2} , όπως φαίνεται στην εικόνα 3.11 δ. Τη χρονική στιγμή $t = \delta T$ ο διακόπτης S ανοίγει και παραμένει ανοιχτός για το χρονικό διάστημα $\delta T \leq t \leq T$. Λόγω της ηλεκτρικής ενέργειας που έχει αποθηκεύσει το επαγωγικό φορτίο, το επαγωγικό φορτίο συνεχίζει να διαρρέεται με ρεύμα μέσω της διόδου D_F , το οποίο μειώνεται από i_{a2} σε i_{a1} . Επίσης, στην εικόνα 3.11 ε φαίνεται η κυματομορφή του ρεύματος i_s της πηγής, το οποίο υπάρχει μόνο όταν ο διακόπτης S είναι κλειστός και η τιμή του είναι ίση με το ρεύμα τροφοδοσίας i_a του επαγωγικού φορτίου.

Η μέση τιμή της τάσης τροφοδοσίας V_a του φορτίου δίνεται από την εξίσωση:

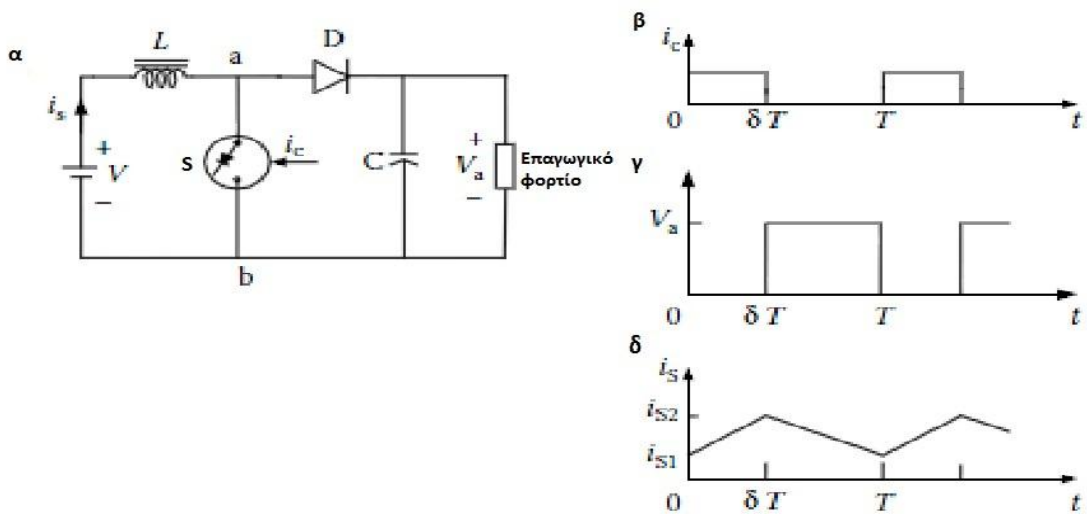
$$V_a = \frac{1}{T} \cdot \int_0^{t_{ON}} V \cdot dt = \frac{t_{ON}}{T} \cdot V = \delta \cdot V \text{ (V)} \quad (3.22)$$

Ελέγχοντας την τιμή του δ μεταξύ 0 και 1 η τάση τροφοδοσίας V_a μπορεί να πάρει τιμές από 0 έως V . Έτσι, το *chopper* μπορεί να ελέγξει την τάση τροφοδοσίας V_a του φορτίου. Η τεχνική ελέγχου που χρησιμοποιείται συνήθως, είναι η περίοδος T (και άρα η συχνότητα) του *chopper* να διατηρείται σταθερή και για τη μεταβολή του κύκλου λειτουργίας δ , μεταβάλλεται ο χρόνος t_{ON} που ο διακόπτης S είναι κλειστός. Αυτός ο χρόνος t_{ON} ελέγχεται από τον ελεγκτή, ο οποίος ελέγχει το ρεύμα ελέγχου i_c .

Ο βαθμός απόδοσης ενός κυκλώματος μείωσης της τάσης συνήθως είναι πάνω από 90%, ενώ σε κυκλώματα υψηλής τάσης (περίπου 100 V ή περισσότερο) μπορεί να φτάσει έως και 98%.

3.1.6.2 Κύκλωμα αύξησης της τάσης

Πολύ συχνά είναι επιθυμητό να αυξάνεται η τάση ενός κυκλώματος. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η αναγεννητική πέδηση σε χαμηλές ταχύτητες. Αυτό μπορεί να γίνει πολύ απλά και αποτελεσματικά με τη χρήση ενός κυκλώματος αύξησης της τάσης, το οποίο αναφέρεται στη βιβλιογραφία ως *step-up chopper* ή *boost converter*. Ένα τυπικό κύκλωμα αύξησης της τάσης φαίνεται στην εικόνα 3.12 α.



Εικόνα 3.12 α. Κύκλωμα αύξησης της τάσης **β.** Κυματομορφή του ρεύματος ελέγχου i_C . **γ.** Κυματομορφή της τάσης τροφοδοσίας V_a του φορτίου **δ.** Κυματομορφή του ρεύματος i_S του πηνίου. [1]

Αποτελείται από μία πηγή συνεχούς ρεύματος V , ένα πηνίο με αυτεπαγωγή L , έναν διακόπτη S ο οποίος ελέγχεται από το ρεύμα ελέγχου i_C , μία διόδο D , έναν πυκνωτή C και ένα επαγωγικό φορτίο.

Κατά τη διάρκεια της περιόδου T , ο διακόπτης S είναι κλειστός το χρονικό διάστημα $0 \leq t \leq \delta T$ και ανοιχτός το χρονικό διάστημα $\delta T \leq t \leq T$. Το χρονικό διάστημα που ο διακόπτης S είναι κλειστός το ρεύμα i_S του πηνίου αυξάνεται από i_{S1} σε i_{S2} (εικόνα 3.12 δ) και έτσι αυξάνεται η αποθηκευμένη ενέργεια του πηνίου. Ταυτόχρονα, το φορτίο τροφοδοτείται από τον πυκνωτή C , ο οποίος εκφορτίζεται. Η διόδος D δεν επιτρέπει τα ρεύμα του πυκνωτή να πάει προς την αντίθετη κατεύθυνση. Όταν ο διακόπτης S ανοίξει, η αποθηκευμένη ενέργεια του πηνίου τροφοδοτεί τον πυκνωτή C και το φορτίο. Επίσης, ο πυκνωτής C για την σταθεροποίηση της τάσης τροφοδοσίας του φορτίου.

Η μέση τάση μεταξύ των σημείων a και b δίνεται από τη σχέση:

$$V_{ab} = V_a \cdot (1 - \delta) \quad (V) \quad (3.23)$$

Η μέση τάση V_L στα άκρα του πηνίου είναι:

$$V_L = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T \left(L \cdot \frac{di_s}{dt} \right) \cdot dt = \frac{1}{T} \cdot \int_{i_{s1}}^{i_{s2}} L \cdot di = 0 \text{ (V)} \quad (3.24)$$

Η τάση V της πηγής είναι:

$$V = V_L + V_{ab} \text{ (V)} \quad (3.25)$$

Αντικαθιστώντας τις σχέσεις 3.23 και 3.24 στη σχέση 3.25 προκύπτει:

$$V_a = \frac{V}{1 - \delta} \text{ (V)} \quad (3.26)$$

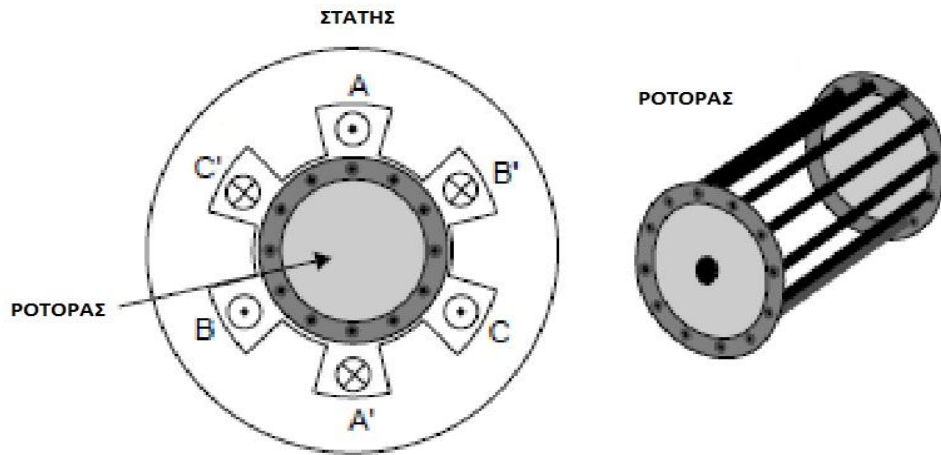
Σύμφωνα με την εξίσωση 3.26, θεωρητικά η τάση τροφοδοσίας V_a του φορτίου μπορεί να πάρει τιμές από V έως $+\infty$, ελέγχοντας το δ από 0 έως 1. Στην πράξη όμως η τάση τροφοδοσίας V_a μεταβάλλεται από V έως μία μεγαλύτερη τάση (και όχι ως το άπειρο).

Τα κυκλώματα αύξησης της τάσης έχουν μικρότερο βαθμό απόδοσης από τα κυκλώματα μείωσης της τάσης. Συνήθως, είναι πάνω από 80%. Ωστόσο, σε κυκλώματα υψηλής τάσης (από 100 V και πάνω) ο βαθμός απόδοσής τους μπορεί να φτάσει 95% ή και περισσότερο.

3.2 ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΙ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ

Οι επαγωγικοί κινητήρες χρησιμοποιούνται ευρέως σε βιομηχανικές εφαρμογές όλων των τύπων, λόγω της αναπτυγμένης τους τεχνολογίας, της υψηλής τους αξιοπιστίας, του χαμηλού τους κόστους και της χαμηλής απαίτησης συντήρησης. Για την τροφοδότησή τους απαιτούν μία πηγή εναλλασσόμενου ρεύματος. Έτσι, η μπαταρία από μόνη της δεν είναι κατάλληλη για την τροφοδότηση ενός επαγωγικού κινητήρα. Γι' αυτό το λόγο, χρησιμοποιείται ένας *inverter* ο οποίος μετατρέπει το συνεχές ρεύμα της μπαταρίας σε εναλλασσόμενο, για την τροφοδότηση του επαγωγικού κινητήρα.

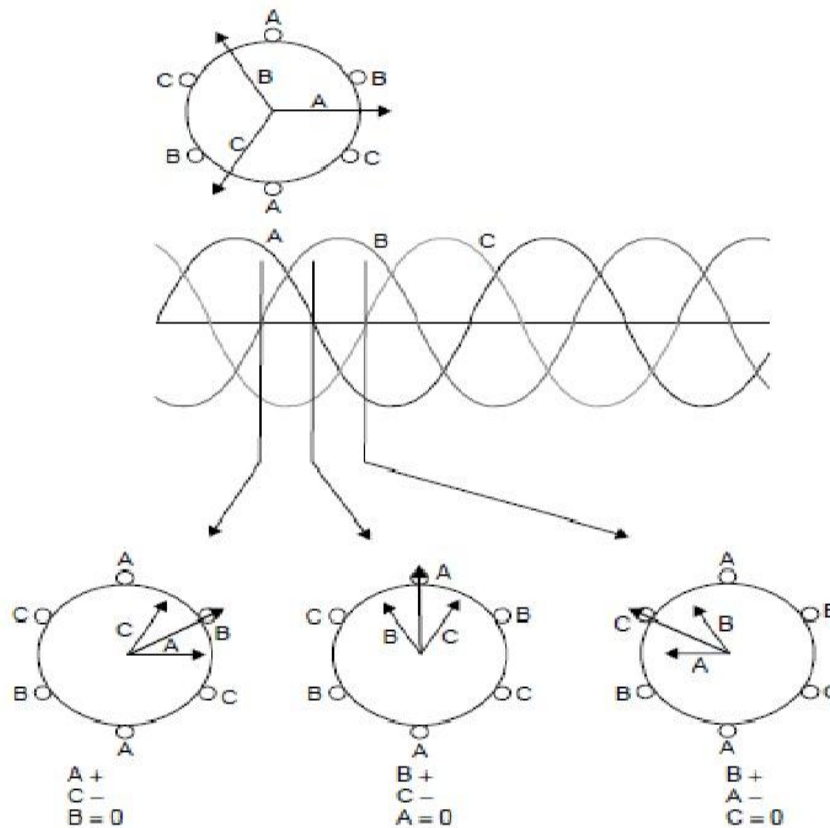
Η δομή ενός τριφασικού επαγωγικού κινητήρα φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 3.13 Δομή τριφασικού επαγωγικού κινητήρα. [3]

Ο στάτης αποτελείται από τρία τυλίγματα τα οποία βρίσκονται σε γωνία 120° μεταξύ τους. Ο ρότορας αποτελείται από χάλκινους ή αλουμινένιους αγωγούς οι οποίοι συνδέονται μεταξύ τους σχηματίζοντας ένα είδος κλώβου, ενώ στο εσωτερικό του υπάρχουν στρώσεις σιδήρου.

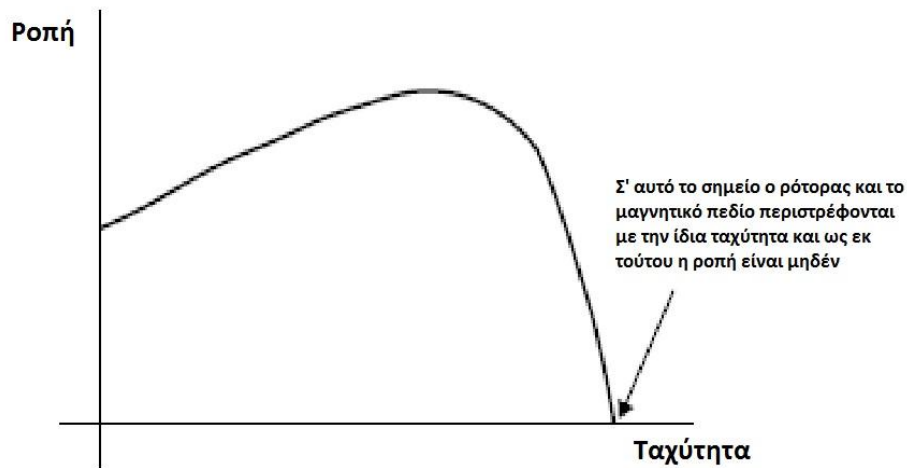
Η αρχή λειτουργίας του παρουσιάζεται στην εικόνα 3.14.



Εικόνα 3.14 Αρχή λειτουργίας τριφασικού επαγωγικού κινητήρα. [3]

Η τροφοδότηση των τριών τυλιγμάτων του στάτη με τριφασικό εναλλασσόμενο ρεύμα, έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή ενός μαγνητικού πεδίου το οποίο περιστρέφεται αριστερόστροφα όπως φαίνεται στην εικόνα 3.14. Αυτό το περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο διέρχεται μέσα από τους αγωγούς του ρότορα οι οποίοι διαρρέονται από ρεύμα και έτσι παράγεται μία ροπή η οποία περιστρέφει το ρότορα. Μεταξύ του περιστρεφόμενου ρότορα και του περιστρεφόμενου μαγνητικού πεδίου υπάρχει μία σχετική ταχύτητα, με τον ρότορα να κυνηγάει συνεχώς το περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο. Αν ο ρότορας και το μαγνητικό πεδίο περιστρέφονται με την ίδια γωνιακή ταχύτητα, τότε η σχετική τους ταχύτητα είναι μηδέν και έτσι δεν παράγεται καμία ροπή.

Η χαρακτηριστική ροπής – ταχύτητας ενός επαγωγικού κινητήρα φαίνεται στην εικόνα 3.15.



Εικόνα 3.15 Χαρακτηριστική ροπής ταχύτητας ενός επαγωγικού κινητήρα. [3]

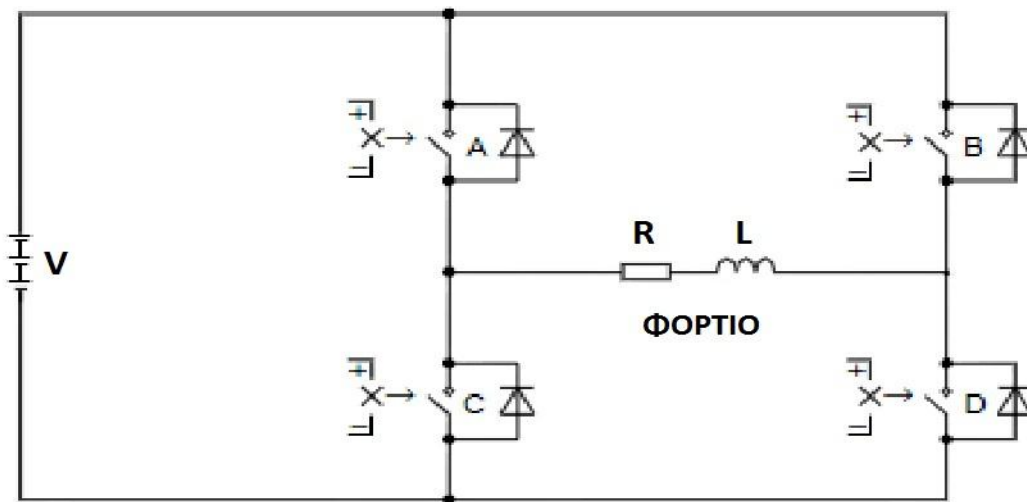
Η ροπή ενός επαγωγικού κινητήρα αυξάνεται όταν η γωνιακή ταχύτητα του ρότορα είναι μικρότερη από την γωνιακή ταχύτητα του μαγνητικού πεδίου. Όταν η σχετική τους γωνιακή ταχύτητα γίνει πολύ μικρή, η ροπή αρχίζει και πέφτει απότομα, ενώ όταν αποκτήσουν την ίδια γωνιακή ταχύτητα η ροπή μηδενίζεται.

Η διάταξη των τυλιγμάτων της εικόνας 3.13 είναι γνωστή ως δύο πόλων. Αυξάνοντας τον αριθμό των τυλιγμάτων, αυξάνεται και ο αριθμός των πόλων. Η ταχύτητα περιστροφής του μαγνητικού πεδίου, είναι ανάλογη της συχνότητας τροφοδοσίας των τυλιγμάτων και αντιστρόφως ανάλογη του αριθμού των ζευγαριών πόλων. Έτσι, ένας 2-πολικός επαγωγικός κινητήρας μπορεί να περιστραφεί με τη διπλάσια ταχύτητα από έναν 4-πολικό επαγωγικό κινητήρα, για την ίδια συχνότητα τροφοδοσίας.

Ο έλεγχος της ταχύτητας περιστροφής του μαγνητικού πεδίου, γίνεται μέσω ελέγχου της συχνότητας τροφοδοσίας. Αυτό γίνεται εύκολα με τη χρήση ενός τριφασικού *inverter*, η λειτουργία του οποίου θα αναλυθεί στη συνέχεια. Ωστόσο, για τον έλεγχο της ταχύτητας περιστροφής του ρότορα χρησιμοποιείται ένας αισθητήρας ταχύτητας, ο οποίος μετράει την ταχύτητα του ρότορα και στέλνει αυτήν την πληροφορία στον ελεγκτή ο οποίος στέλνει τα κατάλληλα σήματα στον *inverter*, ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή ταχύτητα λειτουργίας του κινητήρα. Ο βαθμός απόδοσης των επαγωγικών κινητήρων είναι 1-2% μικρότερος από αυτών των κινητήρων με μόνιμους μαγνήτες.

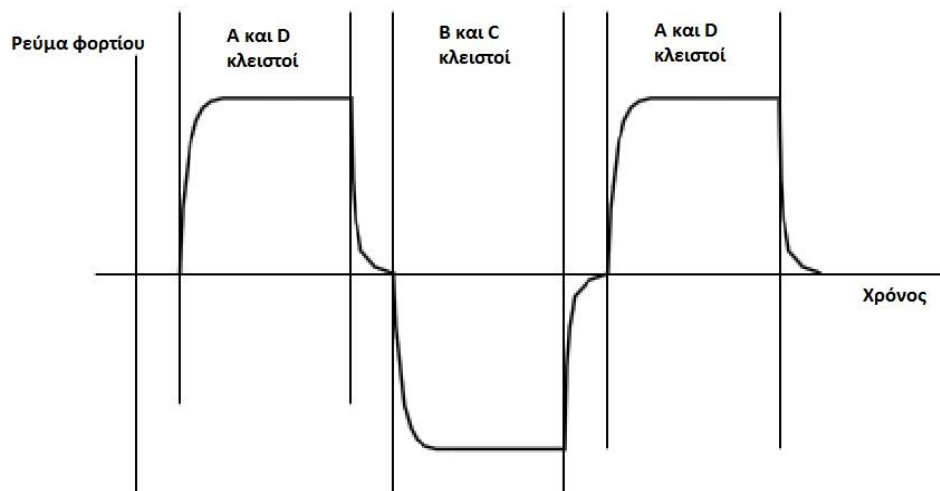
3.2.1 Μονοφασικός inverter

Ο *inverter* είναι ένα κύκλωμα το οποίο χρησιμοποιείται για τη μετατροπή του συνεχούς ρεύματος σε εναλλασσόμενο, με σκοπό την τροφοδοσία ενός AC κινητήρα. Στην εικόνα 3.16 φαίνεται ένα ισοδύναμο κύκλωμα ενός μονοφασικού *inverter*, το οποίο αποτελείται από τέσσερις ημιαγωγίμους διακόπτες ηλεκτρονικών ισχύος και τέσσερις διόδους. Το φορτίο στο οποίο εφαρμόζεται η εναλλασσόμενη τάση, αντιπροσωπεύεται από μία αντίσταση R και ένα επαγωγικό φορτίο L.



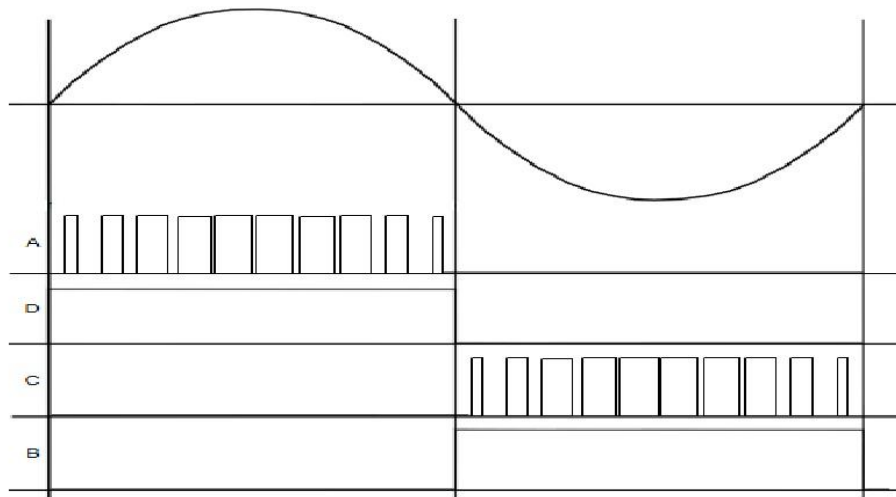
Εικόνα 3.16 Ισοδύναμο κύκλωμα μονοφασικού *inverter*. [3]

Η αρχή λειτουργίας του είναι απλή. Όταν οι διακόπτες A και D είναι κλειστοί, η πηγή τροφοδοτεί το φορτίο. Όταν οι διακόπτες A και D ανοίξουν, λόγω του επαγωγικού φορτίου L το ρεύμα συνεχίζει να ρέει προς την ίδια διεύθυνση μέσω των διόδων B και C. Όταν οι διακόπτες B και C κλείσουν η πηγή τροφοδοτεί και πάλι το φορτίο, αλλά τώρα το ρεύμα έχει αντίθετη διεύθυνση. Όταν οι διακόπτες B και C ανοίξουν, λόγω του επαγωγικού φορτίου L το ρεύμα συνεχίζει να ρέει προς την ίδια διεύθυνση μέσω των διόδων A και D. Ο κύκλος αυτός επαναλαμβάνεται συνεχώς τροφοδοτώντας έτσι το φορτίο με εναλλασσόμενο ρεύμα, η κυματομορφή του οποίου φαίνεται στην εικόνα 3.17.



Εικόνα 3.17 Κυματομορφή του ρεύματος ενός μονοφασικού *inverter* χωρίς χρήση *PWM*. [3]

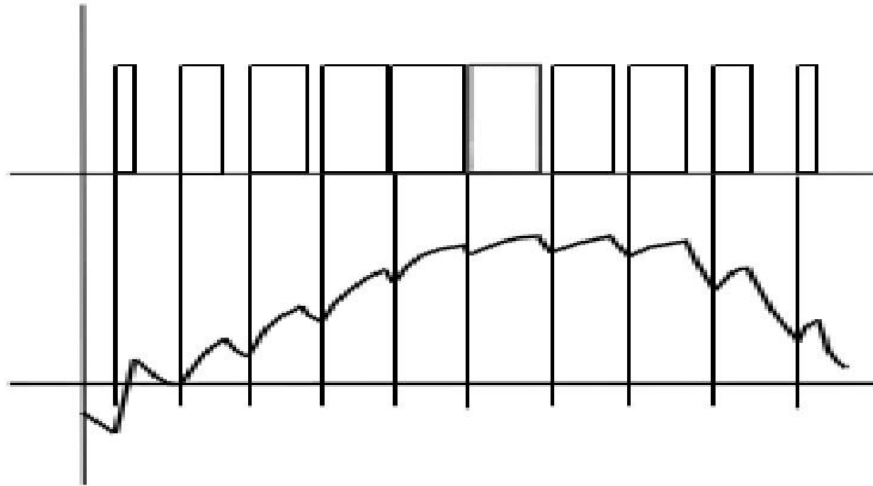
Είναι φανερό ότι διαφέρει αρκετά από την κυματομορφή ενός ημιτονοειδούς εναλλασσόμενου ρεύματος. Με σκοπό την επίτευξη μίας ημιτονοειδούς κυματομορφής του ρεύματος χρησιμοποιείται μία πιο σύνθετη μέθοδος, η οποία είναι γνωστή ως διαμόρφωση του πλάτους του παλμού (*PWM – Pulse Width Modulation*). Η αρχή λειτουργίας της φαίνεται στην εικόνα 3.18.



Εικόνα 3.18 Αρχή λειτουργίας ενός *PWM*. [3]

Κατά τη θετική περίοδο του ρεύματος ο διακόπτης D είναι συνεχώς κλειστός, ενώ ο διακόπτης A ανοιγοκλείνει με κάποια περίοδο παράγοντας παλμούς. Το πλάτος του παλμού είναι μεταβαλλόμενο και έχει μέγιστη τιμή στο μέσο αυτής της θετικής περιόδου και ελάχιστη τιμή στην αρχή και στο τέλος αυτής της θετικής περιόδου. Αντίστοιχα, κατά την αρνητική περίοδο του ρεύματος, ο διακόπτης B είναι συνεχώς κλειστός, ενώ ο διακόπτης C ανοιγοκλείνει και αυτός με κάποια περίοδο, παρόμοια με τον διακόπτη A.

Έτσι, παράγεται μία ημιτονοειδής κυματομορφή του ρεύματος, της οποίας η ακριβή μορφή εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του φορτίου. Μία ημιτονοειδής κυματομορφή του ρεύματος κατά τη θετική περίοδο φαίνεται στην εικόνα 3.19.

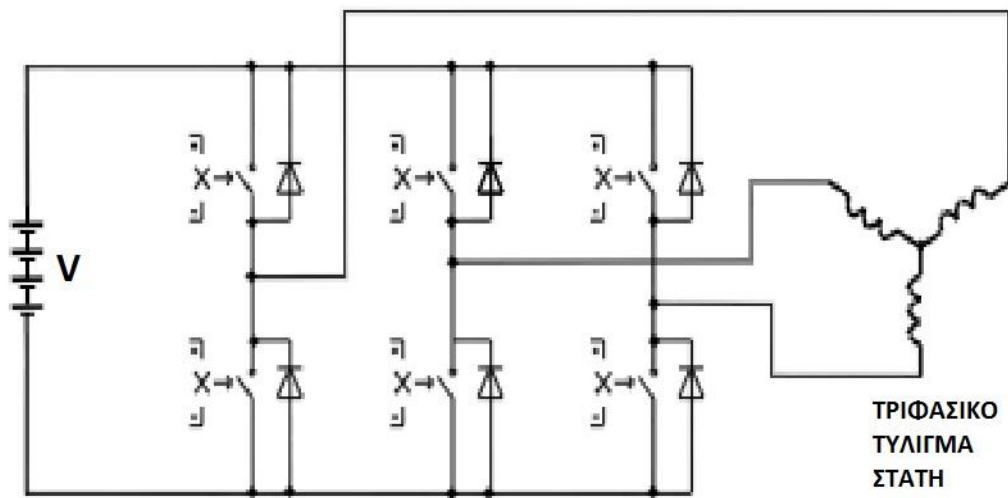


Εικόνα 3.19 Κυματομορφή του ρεύματος ενός μονοφασικού *inverter* με χρήση *PWM*. [3]

Αυτή η κυματομορφή του ρεύματος μπορεί να μην είναι ακριβώς ημιτονοειδής, ωστόσο προσεγγίζει κατά πολύ τη μορφή ενός ημιτόνου. Συνήθως, εικοσιτέσσερις παλμοί ανά κύκλο ημιτόνου δίνουν μία ικανοποιητική προσέγγιση. Οι παλμοί αυτοί παράγονται από έναν μικροεπεξεργαστή.

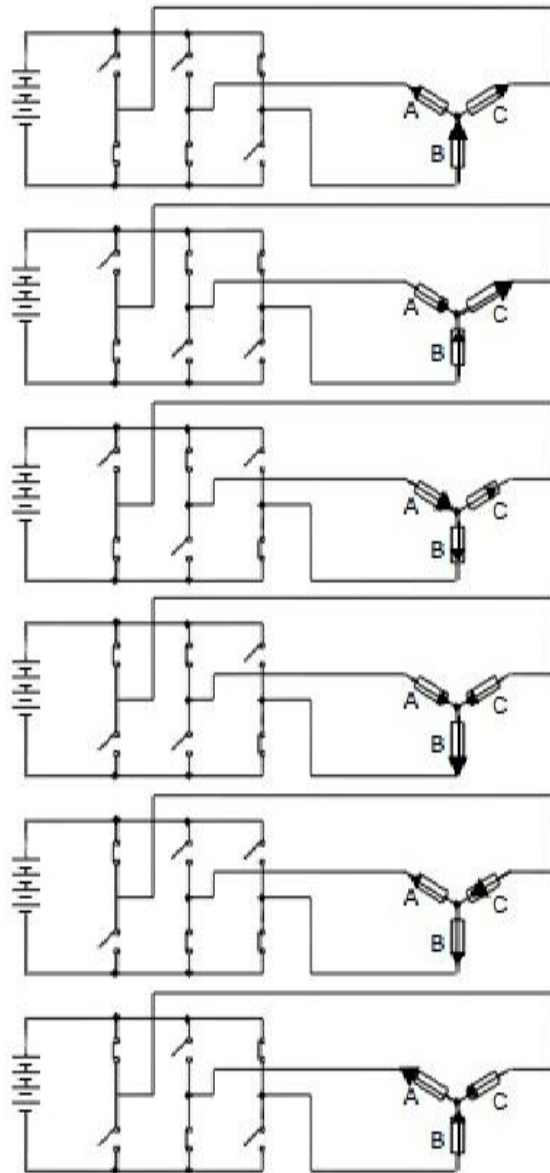
3.2.2 Τριφασικός inverter

Οι περισσότεροι AC κινητήρες που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές ηλεκτρικών οχημάτων είναι τριφασικοί. Κατά συνέπεια, για την τροφοδότηση τους απαιτείται ένας τριφασικός *inverter*, ο οποίος είναι λίγο πιο περίπλοκος από τον μονοφασικό *inverter*. Ένα ισοδύναμο ενός τριφασικού *inverter* φαίνεται στη εικόνα 3.20.



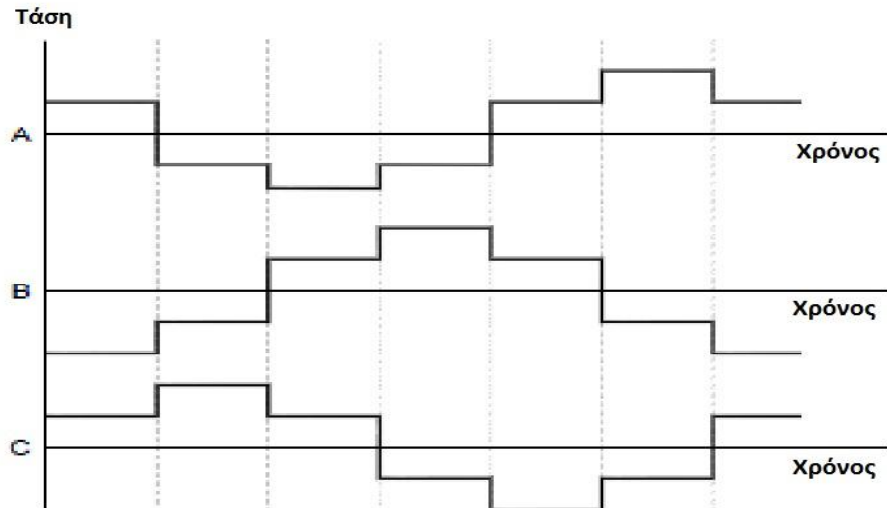
Εικόνα 3.20 Ισοδύναμο κύκλωμα ενός τριφασικού *inverter*. [3]

Αποτελείται από έξι ημιαγωγίσιμους διακόπτες ηλεκτρονικών ισχύος με τις αντίστοιχες διόδους, οι οποίοι συνδέονται με το τριφασικό τύλιγμα του στάτη. Η σειρά με την οποία ανοιγοκλείνουν οι διακόπτες παρουσιάζεται στην εικόνα 3.21.



Εικόνα 3.21 Σειρά με την οποία ανοιγοκλείνουν οι διακόπτες ενός τριφασικού *inverter*. [3]

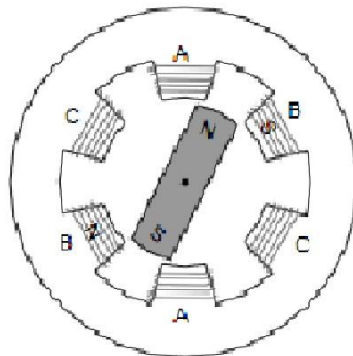
Όπως φαίνεται κάθε κύκλος χωρίζεται σε έξι βήματα. Στην εικόνα 3.22 φαίνεται πως μεταβάλλεται η τάση σε κάθε ένα από τα τρία τυλίγματα του στάτη, για κάθε βήμα. Η κυματομορφή της τάσης στα τρία τυλίγματα, προφανώς δεν προσεγγίζει μία ημιτονοειδή μορφή. Συνεπώς, όπως και στους μονοφασικούς *inverter*, χρησιμοποιείται η μέθοδος διαμόρφωσης του πλάτους του παλμού (*PWM*) με τον ίδιο τρόπο, για την παραγωγή τάσης ημιτονοειδούς μορφής στα τρία τυλίγματα του στάτη.



Εικόνα 3.22 Κυματομορφή της τάσης των τριών τυλιγμάτων χωρίς χρήση PWM. [3]

3.3 ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ ΜΟΝΙΜΩΝ ΜΑΓΝΗΤΩΝ

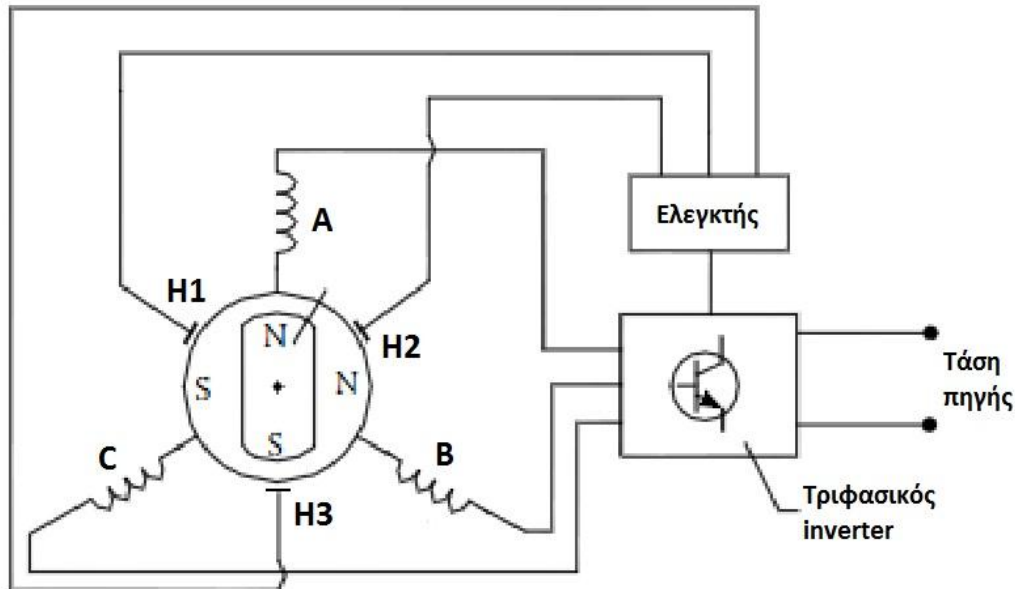
Οι κινητήρες με μόνιμους μαγνήτες δεν έχουν τύλιγμα διέγερσης για την παραγωγή μαγνητικού πεδίου, καθώς αυτό παράγεται από τους μαγνήτες. Από τους διάφορους κινητήρες μόνιμων μαγνητών, οι BLDC (*Brushless DC*) κινητήρες είναι οι πιο πολλά υποσχόμενοι σε εφαρμογές ηλεκτρικών οχημάτων και το κυριότερο χαρακτηριστικό τους είναι ότι δεν έχουν ψήκτρες. Ο στάτης τους αποτελείται από ένα τριφασικό τύλιγμα και ο ρότορας τους αποτελείται από μαγνήτες, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.23.



Εικόνα 3.23 Δομή των BLDC κινητήρων. [3]

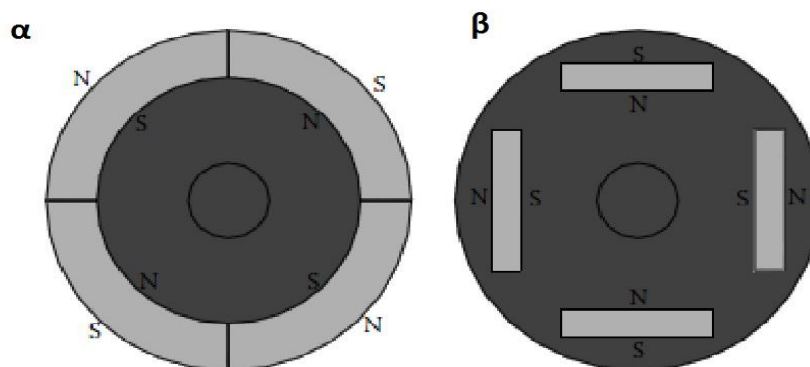
Στην εικόνα 3.24 φαίνεται ένα τυπικό κύκλωμα οδήγησης ενός BLDC κινητήρα το οποίο αποτελείται από έναν τριφασικό *inverter*, έναν ελεγκτή και τρεις αισθητήρες *Hall*. Οι αισθητήρες *Hall* ανιχνεύουν τη θέση του ρότορα και δίνουν αυτήν την πληροφορία στον ελεγκτή, ο οποίος με βάση αυτήν την πληροφορία δίνει ρεύμα μέσω του τριφασικού *inverter* στο κατάλληλο τύλιγμα του στάτη, ώστε να

περιστραφεί ο ρότορας. Έτσι, η συχνότητα του ρεύματος πρέπει να βρίσκεται πάντα σε συγχρονισμό με τη θέση του ρότορα.



Εικόνα 3.24 Τυπικό κύκλωμα οδήγησης ενός BLDC κινητήρα. [1]

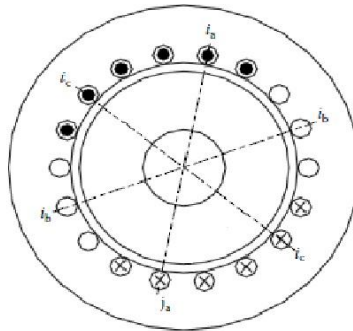
Οι BLDC κινητήρες μπορούν να ταξινομηθούν ανάλογα με τη θέση των μόνιμων μαγνητών στο ρότορα. Έτσι, χωρίζονται σε: BLDC κινητήρες με μαγνήτες στην επιφάνεια του ρότορα (εικόνα 3.25 α) και BLDC κινητήρες με μαγνήτες στο εσωτερικό του ρότορα (εικόνα 3.25 β).



Εικόνα 3.25 α. BLDC με μαγνήτες στην επιφάνεια του ρότορα β. BLDC με μαγνήτες στο εσωτερικό του ρότορα. [1]

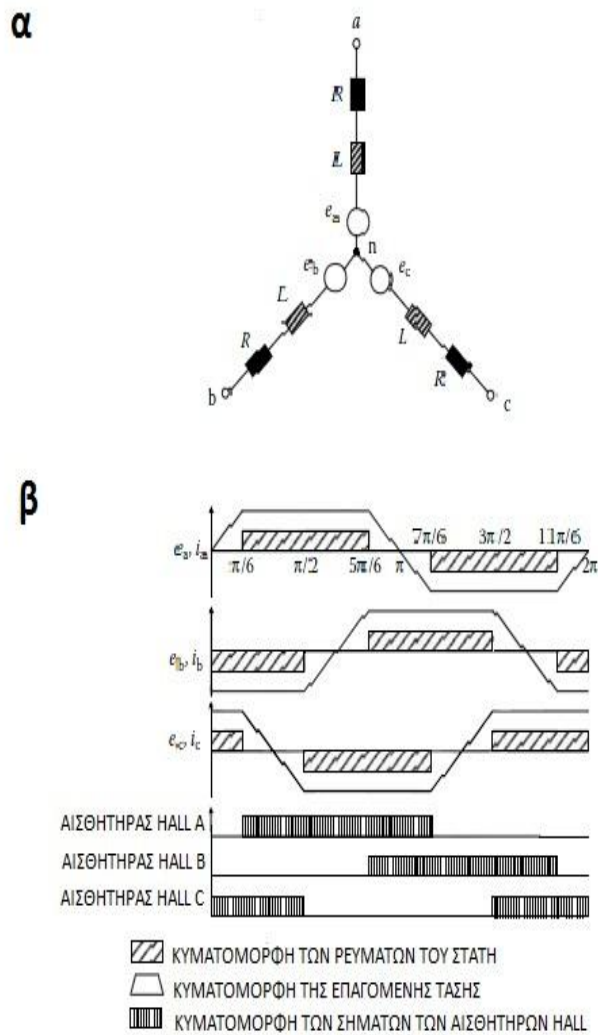
Η κατασκευή των *BLDC* κινητήρων με μαγνήτες στην επιφάνεια του ρότορα είναι εύκολη. Ωστόσο, υπάρχει κίνδυνος οι μαγνήτες να αποσπαστούν από την επιφάνεια του ρότορα κατά τη διάρκεια υψηλών ταχυτήτων. Από την άλλη, οι *BLDC* με μαγνήτες στο εσωτερικό του ρότορα δεν χρησιμοποιούνται τόσο συχνά, όμως μπορούν να λειτουργήσουν σε υψηλότερες ταχύτητες.

Ακόμη, οι *BLDC* κινητήρες μπορούν να ταξινομηθούν και ανάλογα με την κυματομορφή της επαγόμενης τάσης. Συγκεκριμένα, υπάρχουν δύο κατηγορίες: οι *BLDC* τραπεζοειδούς κυματομορφής και οι *BLDC* ημιτονοειδούς κυματομορφής.



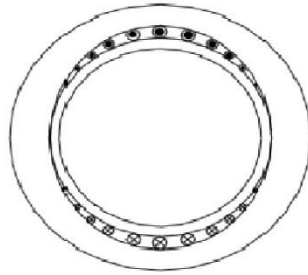
Εικόνα 3.26 *BLDC* κινητήρας με τραπεζοειδή κυματομορφή της επαγόμενης τάσης. [1]

Στην εικόνα 3.26 φαίνεται η διάταξη των τυλιγμάτων του στάτη ενός *BLDC* κινητήρα τραπεζοειδούς κυματομορφής της επαγόμενης τάσης και στην εικόνα 3.27 α φαίνεται το ισοδύναμο κύκλωμα αυτού του κινητήρα. Στην εικόνα 3.27 β φαίνεται ότι η κυματομορφή του ρεύματος που διαρρέει τα τυλιγμάτα του στάτη είναι τετραγωνικής μορφής. Κάθε τύλιγμα διαρρέεται από ρεύμα για 240° (120° θετικό ρεύμα και 120° αρνητικό ρεύμα) και δεν διαρρέεται από ρεύμα για 120° σε κάθε περίοδο. Συνεπώς, κάθε τύλιγμα διαρρέεται από ρεύμα κατά τα $2/3$ μίας περιόδου. Επίσης, φαίνεται η τραπεζοειδής μορφή της επαγόμενης τάσης στα τυλιγμάτα του στάτη.



Εικόνα 3.27 α. Ισοδύναμο κύκλωμα *BLDC* κινητήρα με τραπεζοειδή κυματομορφή της επαγόμενης τάσης **β.** Κυματομορφές ενός *BLDC* κινητήρα με τραπεζοειδή κυματομορφή της επαγόμενης τάσης. [1]

Στην εικόνα 2.28 φαίνεται η διάταξη των τυλιγμάτων του στάτη ενός *BLDC* κινητήρα ημιτονοειδούς κυματομορφής της επαγόμενης τάσης. Χαρακτηριστικό αυτών των κινητήρων είναι ότι η κυματομορφή, τόσο του ρεύματος, όσο και της επαγόμενης τάσης είναι ημιτονοειδής και η λειτουργία τους είναι παρόμοια με αυτήν των AC κινητήρων.



Εικόνα 3.28 BLDC κινητήρας με ημιτονοειδή κυματομορφή της επαγόμενης τάσης. [1]

Τα κυριότερα **πλεονεκτήματα** των BLDC κινητήρων είναι:

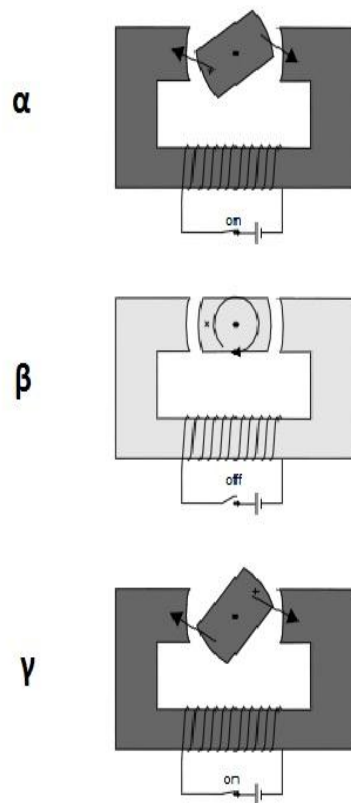
- **Υψηλός βαθμός απόδοσης:** Η χρήση μαγνητών για την παραγωγή μαγνητικού πεδίου έχει ως αποτέλεσμα οι BLDC κινητήρες να έχουν τον υψηλότερο βαθμό απόδοσης από όλους τους τύπους ηλεκτροκινητήρων, καθώς οι μαγνήτες δεν καταναλώνουν κάποια ισχύ για την παραγωγή μαγνητικού πεδίου. Επίσης, έχουν λιγότερες απώλειες τριβών, λόγω απουσίας των ψηκτρών.
- **Υψηλή πυκνότητα ισχύος:** Η χρήση μαγνητών με υψηλή πυκνότητα ενέργειας, έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ισχυρού μαγνητικού πεδίου, το οποίο επιτρέπει την επίτευξη υψηλής ροπής και τη μείωση του μεγέθους του κινητήρα.
- **Ευκολία ψύξης:** Επειδή δεν υπάρχουν τυλιγμάτα στο ρότορα και κατά συνέπεια ροή ρεύματος, δεν παράγεται θερμότητα στο ρότορα. Η μόνη θερμότητα που παράγεται είναι στο στάτη, ο οποίος μπορεί να ψυχθεί ευκολότερα από το ρότορα, καθώς δεν περιστρέφεται και βρίσκεται στην περιφέρεια του κινητήρα.
- **Χαμηλή απαίτηση συντήρησης και υψηλή διάρκεια ζωής:** Η απουσία των ψηκτρών έχει ως αποτέλεσμα την χαμηλή απαίτηση συντήρησης και τον μειωμένο κίνδυνο βλάβης. Συνεπώς, η διάρκεια ζωής τους εξαρτάται μόνο από τη μόνωση των τυλιγμάτων του στάτη, τη φθορά των ρουλεμάν και τη διάρκεια ζωής των μαγνητών.
- **Χαμηλός θόρυβος:** Παράγουν χαμηλό θόρυβο, γιατί η μετατροπή του συνεχούς ρεύματος σε εναλλασσόμενο γίνεται ηλεκτρονικά (μέσω του *inverter*) και όχι μηχανικά (μέσω του συλλέκτη και των ψηκτρών). Οι συχνότητες λειτουργίας ενός *inverter* είναι αρκετά υψηλές και δεν ακούγονται.

Τα κυριότερα **μειονεκτήματα** των BLDC κινητήρων είναι:

- **Υψηλό κόστος:** Οι μαγνήτες με υψηλή πυκνότητα ενέργειας είναι πολύ ακριβότεροι από τους συνηθισμένους μαγνήτες, αυξάνοντας έτσι το κόστος του κινητήρα.
- **Μικρή περιοχή σταθερής ισχύος:** Η μέγιστη ταχύτητα των BLDC κινητήρων δεν μπορεί να είναι μεγαλύτερη από δύο φορές την ταχύτητα βάσης (μέγιστος λόγος ταχυτήτων $x < 2$), έχοντας έτσι περιορισμένη περιοχή σταθερής ισχύος.
- **Απομαγνήτιση μαγνητών:** Οι μαγνήτες μπορούν να απομαγνητιστούν αν εκτεθούν σε υψηλό αντίθετο μαγνητικό πεδίο ή σε υψηλές θερμοκρασίες.
- **Χαμηλή ταχύτητα λειτουργίας:** Οι BLDC κινητήρες με επιφανειακούς μαγνήτες δεν μπορούν να λειτουργήσουν σε υψηλές ταχύτητες, λόγω της περιορισμένης μηχανικής αντοχής της συναρμολόγησης μεταξύ του ρότορα και των μαγνητών.
- **Περιορισμένη ασφάλεια:** Λόγω του μόνιμου μαγνητικού πεδίου που παράγεται από τους μαγνήτες του ρότορα.

3.4 ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ

Οι κινητήρες μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης (*SRM – Switched Reluctance Machine*) έχουν εξαιρετικά χαρακτηριστικά απόδοσης σε εφαρμογές ηλεκτρικών οχημάτων. Η αρχή λειτουργίας τους είναι απλή και φαίνεται στην εικόνα 3.29.



Εικόνα 3.29 Αρχή λειτουργίας των *SRM*. [3]

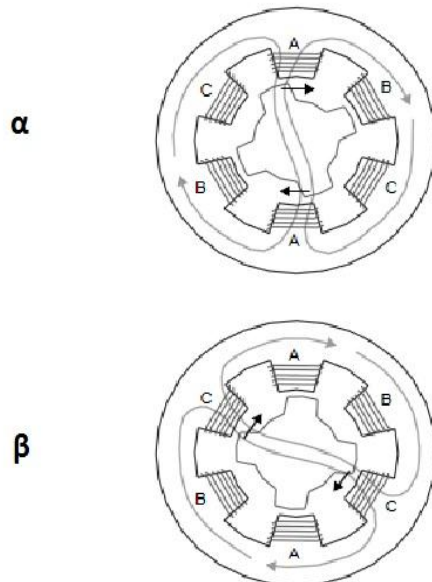
Στην εικόνα 3.29 α, ο στάτης και ο ρότορας μαγνητίζονται λόγω της ροής ρεύματος στο τύλιγμα του στάτη. Έτσι, ο ρότορας αναγκάζεται να μετακινηθεί κάτω από τους πόλους του στάτη. Όταν φτάσει κάτω από τους πόλους ο διακόπτης ανοίγει (εικόνα 3.29 β) και ο ρότορας συνεχίζει να περιστρέφεται - λόγω της ροπής που του ασκήθηκε - μέχρι τη θέση που φαίνεται στην εικόνα 3.29 γ, όπου ο διακόπτης πάλι κλείνει και επαναλαμβάνεται ο ίδιος κύκλος.

Ένας κινητήρας μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης φαίνεται στην εικόνα 3.30. Ο στάτης τους είναι παρόμοιος με αυτόν των *BLDC* και επαγωγικών κινητήρων. Ωστόσο, ο ρότορας τους είναι πιο απλός. Αποτελείται από στρώσεις μαλακού μαγνητικού σιδήρου και στην επιφάνεια του έχει προεξέχοντες πόλους, οι οποίοι είναι δύο λιγότεροι από τους πόλους που σχηματίζονται στο στάτη. Συγκριτικά με τους *BLDC* κινητήρες έχουν μικρότερο κόστος, μεγαλύτερη αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες, μικρότερη ροπή αδράνειας, υψηλότερες ταχύτητες λειτουργίας και μεγαλύτερη περιοχή σταθερής ισχύος, καθώς ο ρότοράς τους δεν έχει μαγνήτες.



Εικόνα 3.30 Κινητήρας μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης (SRM). [3]

Στην εικόνα 3.31 φαίνεται η αρχή λειτουργίας ενός κινητήρα μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης με τριφασικό τύλιγμα στο στάτη. Στην εικόνα 3.31 α το τύλιγμα A που διαρρέεται από ρεύμα, μαγνητίζει τον ρότορα και τον αναγκάζει να περιστραφεί δεξιόστροφα. Όταν οι πόλοι του ρότορα ευθυγραμμιστούν με το μαγνητικό πεδίο του στάτη, το τύλιγμα A του στάτη παύει να διαρρέεται από ρεύμα. Τώρα, οι άλλοι δύο πόλοι του ρότορα βρίσκονται σχεδόν κάτω από τους πόλους του τυλίγματος C του στάτη (εικόνα 3.31 β), το οποίο τώρα ενεργοποιείται, ώστε να αναγκάσει τους πόλους του ρότορα να ευθυγραμμιστούν με το μαγνητικό πεδίο του στάτη, επιτυγχάνοντας έτσι και πάλι την περιστροφή του. Για την ενεργοποίηση των κατάλληλων τυλιγμάτων κάθε φορά, απαιτείται ένας αισθητήρας θέσης του ρότορα, ο οποίος ενημερώνει συνεχώς τον ελεγκτή για τη θέση του ρότορα.

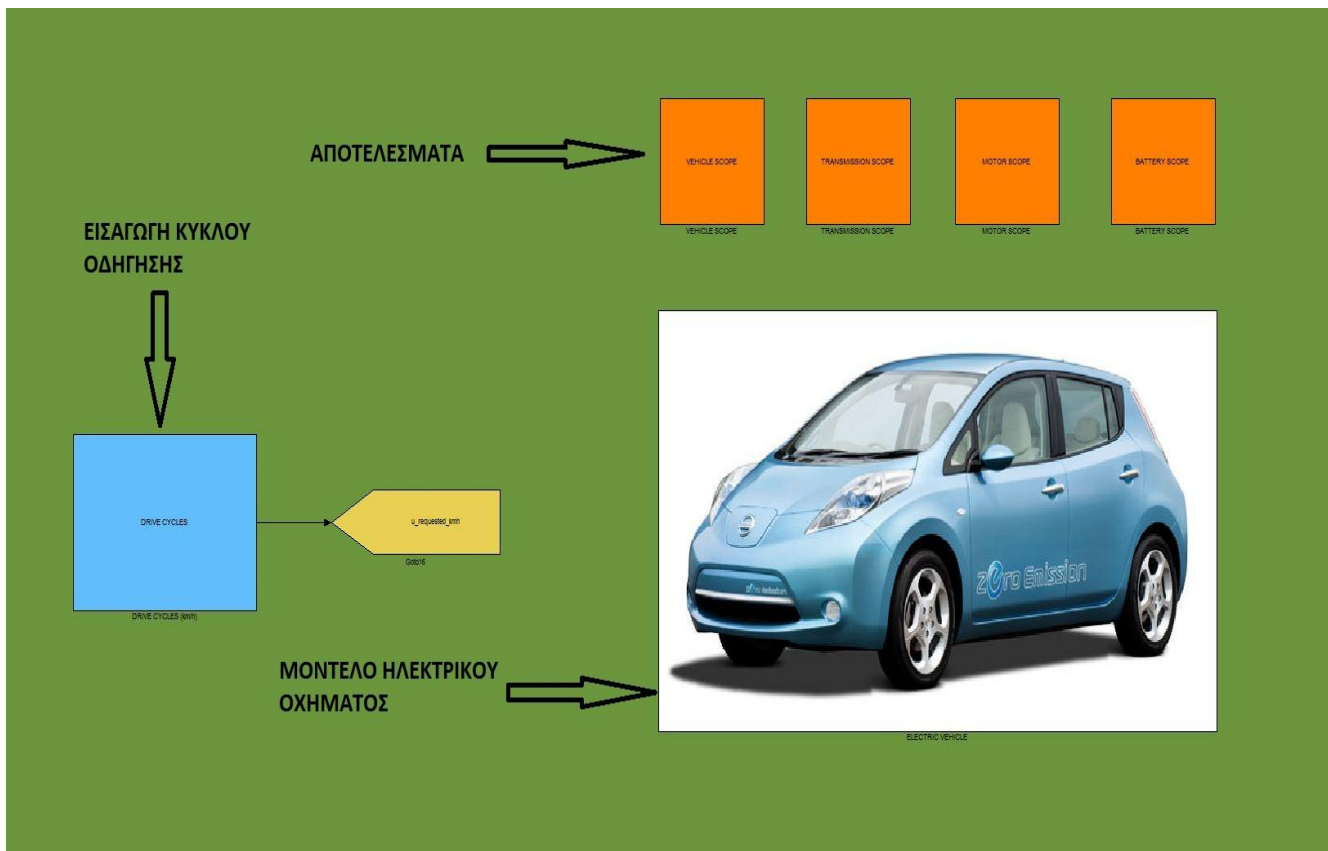


Εικόνα 3.31 Αρχή λειτουργίας κινητήρων μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης με τριφασικό τύλιγμα στάτη. [3]

Αν και ο βαθμός απόδοσης των κινητήρων μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης είναι ελαφρά μικρότερος από αυτόν των *BLDC* κινητήρων, διατηρούν έναν υψηλό βαθμό απόδοσης σ' ένα ευρύτερο φάσμα ροπής – ταχύτητας. Ακόμη, η ψύξη τους είναι το ίδιο εύκολη μ' αυτήν των *BLDC* κινητήρων. Τα κυριότερα μειονεκτήματα των κινητήρων μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης είναι η κυμάτωση της ροπής και η παραγωγή θορύβου κατά τη λειτουργία τους.

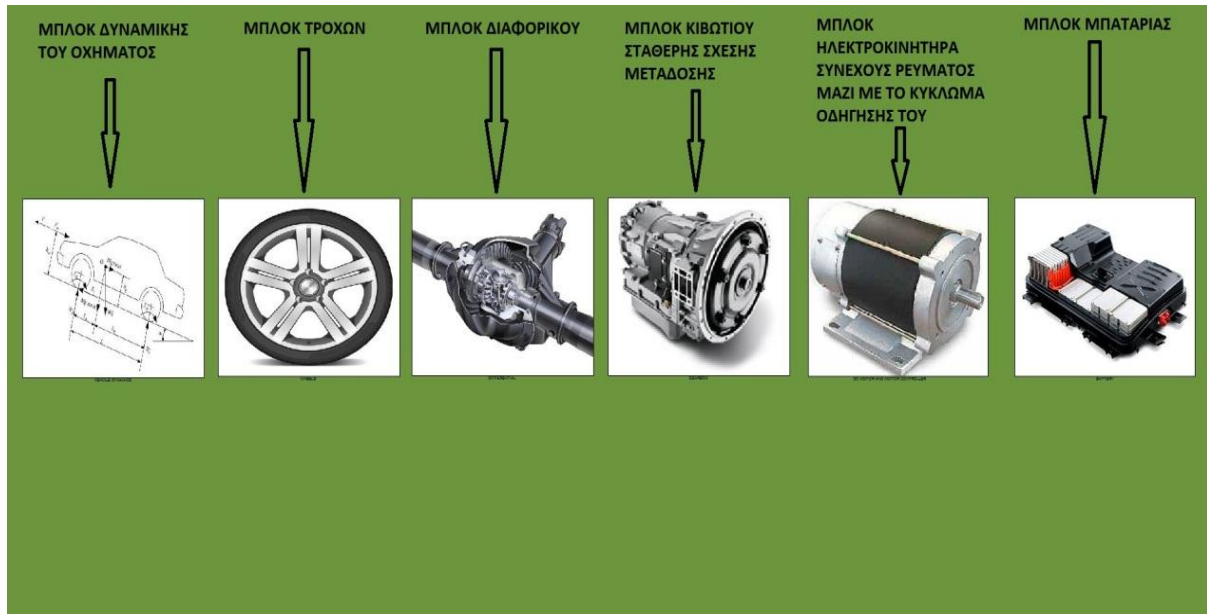
4 ΜΟΝΤΕΛΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται το προσομοιωτικό μοντέλο ενός ηλεκτρικού οχήματος όπως υλοποιήθηκε στο λογισμικό **Matlab/Simulink**. Για την υλοποίηση του μοντέλου του ηλεκτρικού οχήματος, που απεικονίζεται στην εικόνα 4.1, αξιοποιήθηκαν οι εξισώσεις δυναμικής συμπεριφοράς του οχήματος καθώς και τα χαρακτηριστικά της ηλεκτρικής διαδρομής ισχύος του.



Εικόνα 4.1 Το μοντέλο του ηλεκτρικού οχήματος στο *Simulink*.

Το μοντέλο του ηλεκτρικού οχήματος δέχεται ως σήματα εισόδου κύκλους οδήγησης και χωρίζεται σε έξι υποσυστήματα (εικόνα 4.2). Πιο αναλυτικά, υπάρχει το υποσύστημα της δυναμικής του οχήματος, το υποσύστημα των τροχών, το υποσύστημα του διαφορικού, το υποσύστημα του κιβωτίου σταθερής σχέσης μετάδοσης, το υποσύστημα του ηλεκτροκινητήρα συνεχούς ρεύματος μαζί με το κύκλωμα οδήγησής του και εντέλει το υποσύστημα της μπαταρίας. Στο μοντέλο αυτό ο ηλεκτροκινητήρας λειτουργεί μόνο στο πρώτο τεταρτημόριό του (δηλαδή λειτουργεί μόνο ως κινητήρας και όχι ως γεννήτρια) και έτσι δεν υπολογίζεται η επίδραση που θα είχε η αναγεννητική πέδηση στην χιλιομετρική αυτονομία του ηλεκτρικού οχήματος.



Εικόνα 4.2 Υποσυστήματα του ηλεκτρικού οχήματος.

Ο σκοπός αυτού του μοντέλου είναι ο υπολογισμός της κατανάλωσης ρεύματος, της αυτονομίας, της απαιτούμενης ισχύος και ενέργειας, του βαθμού απόδοσης, καθώς και διάφορων άλλων μεγεθών, με βάση τον κύκλο οδήγησης που έχει εισαχθεί ως σήμα εισόδου.

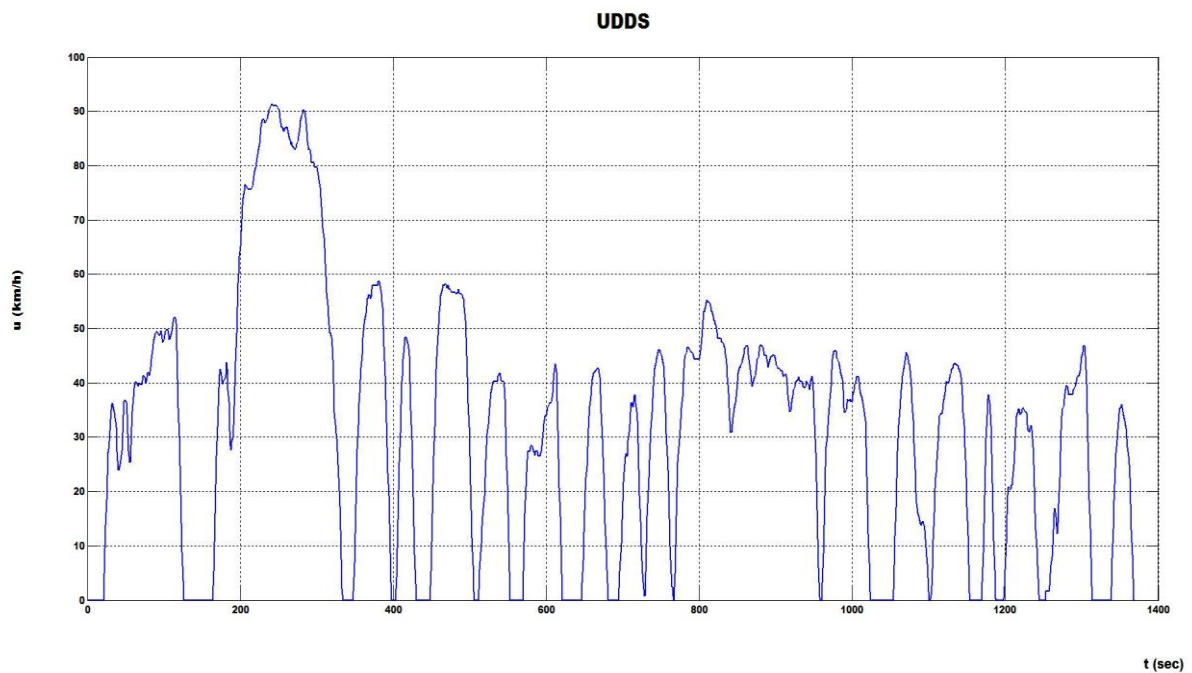
4.1 ΚΥΚΛΟΙ ΟΔΗΓΗΣΗΣ

Η κατανάλωση ενέργειας, η ενεργειακή απόδοση και οι εκπεμπόμενοι ρύποι ενός οχήματος, εξαρτώνται από τον τρόπο οδήγησης και κατά συνέπεια από τις συνθήκες κυκλοφορίας (π.χ. οδήγηση εντός ή εκτός πόλης). Έτσι, αναπτύχθηκαν διάφοροι τυποποιημένοι και μη τυποποιημένοι κύκλοι οδήγησης με σκοπό την σύγκριση της ενεργειακής απόδοσης των διάφορων οχημάτων. Αυτοί οι κύκλοι οδήγησης περιγράφονται από έναν πίνακα, ο οποίος δείχνει τη μεταβολή της ταχύτητας του οχήματος σε συνάρτηση με το χρόνο.

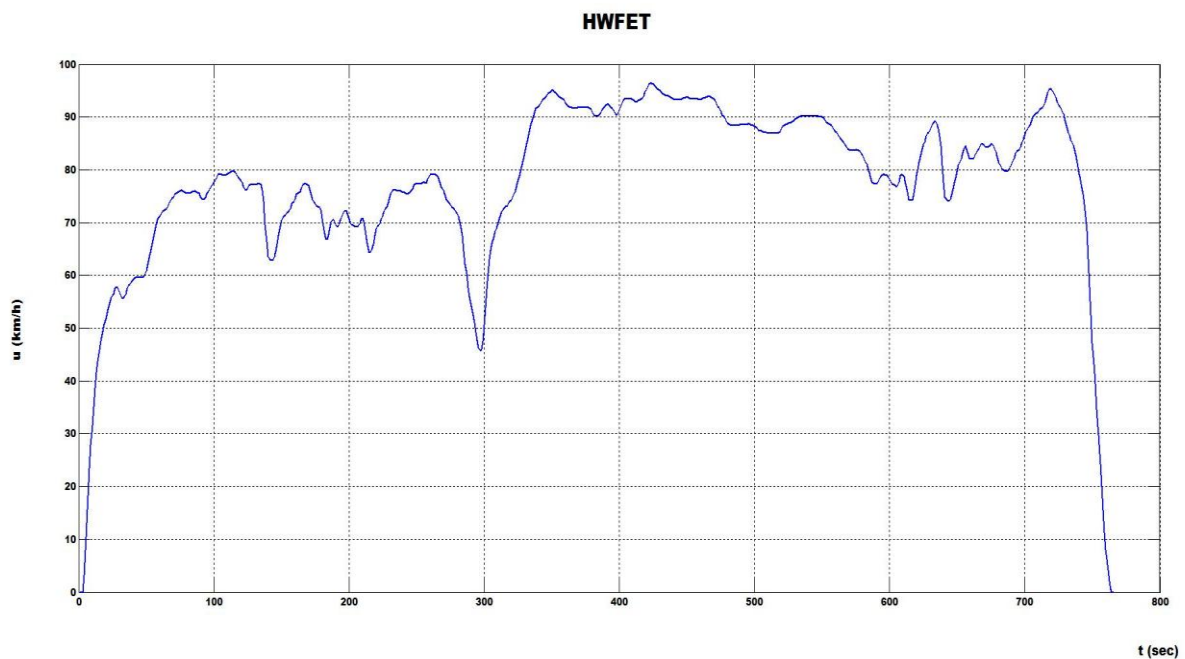
Τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά ενός κύκλου οδήγησης είναι:

- Η χρονική διάρκεια
- Η απόσταση
- Η μέγιστη ταχύτητα
- Η μέση ταχύτητα
- Η μέγιστη επιτάχυνση
- Η μέση επιτάχυνση
- Η μέγιστη επιβράδυνση
- Η μέση επιβράδυνση

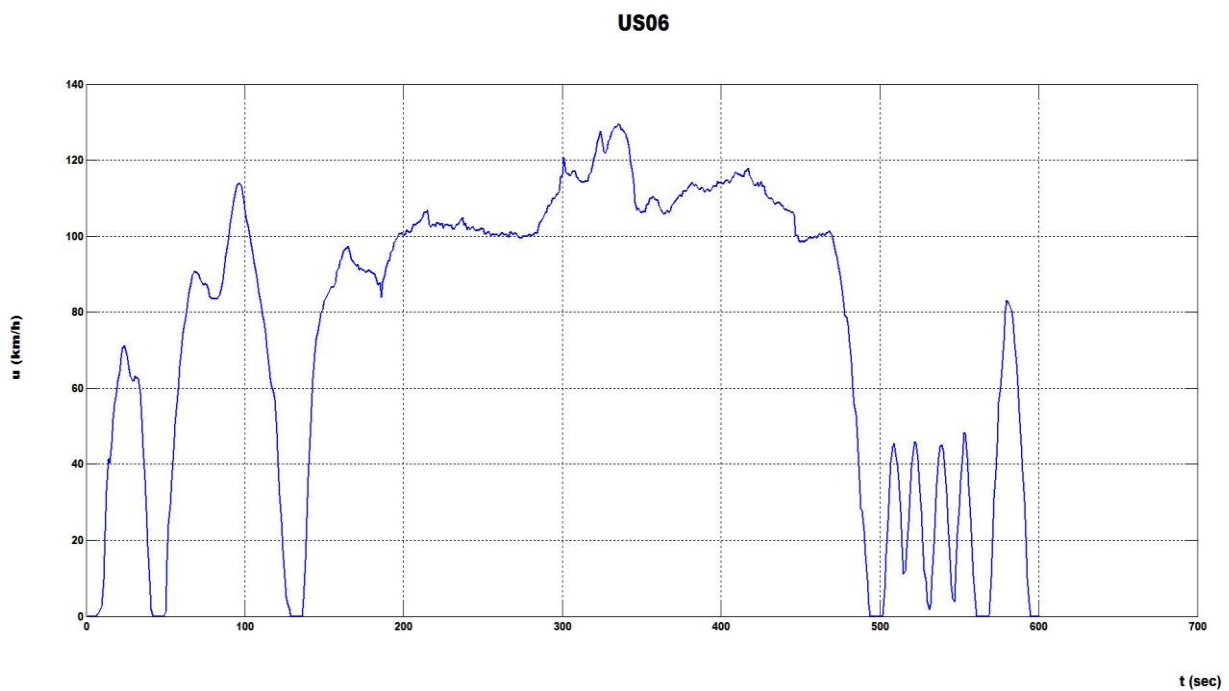
Παρακάτω παρουσιάζονται ενδεικτικά τέσσερις κύκλοι οδήγησης.



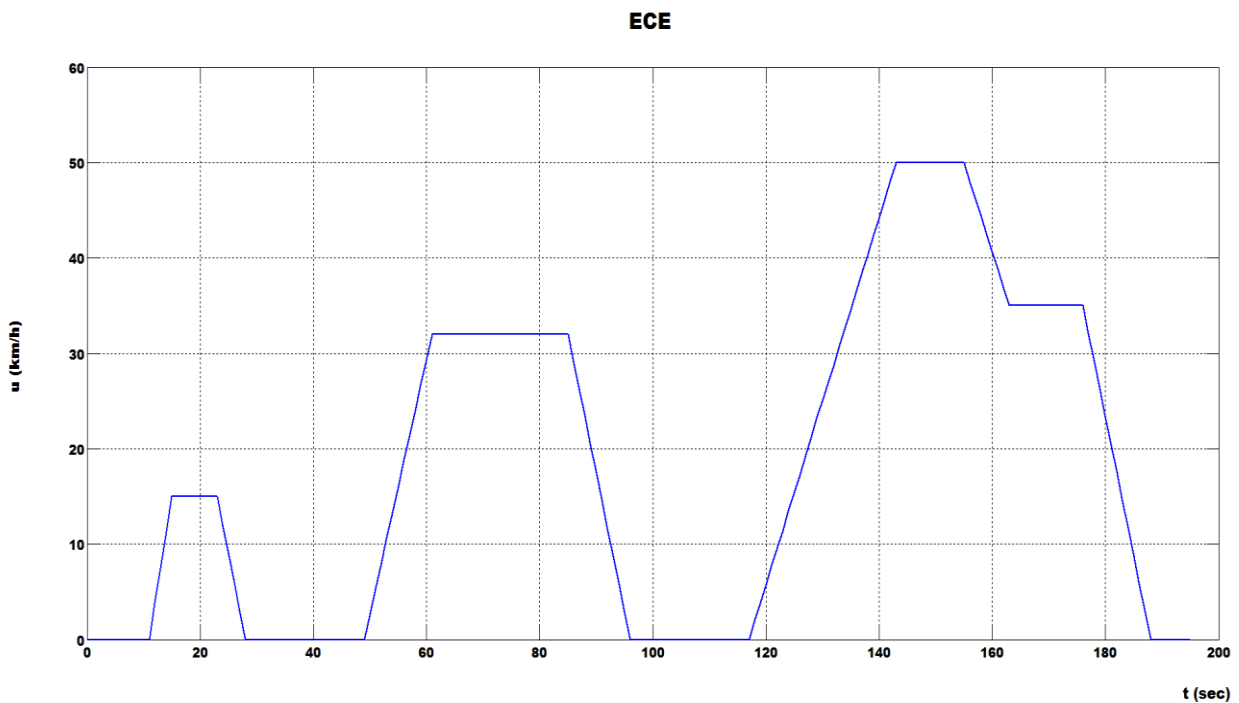
Εικόνα 4.3 Κύκλος οδήγησης *UDDS* (*Urban Dynamometer Driving Schedule*).



Εικόνα 4.4 Κύκλος οδήγησης *HWFET* (*Highway Fuel Economy Test*).



Εικόνα 4.5 Κύκλος οδήγησης *US06*.



Εικόνα 4.6 Κύκλος οδήγησης *ECE* (*Economic Commission of Europe*).

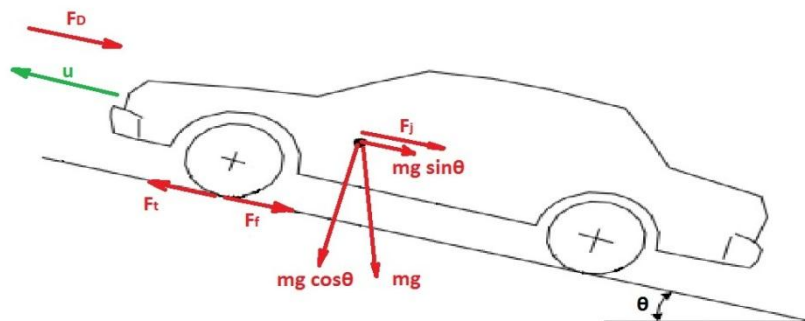
ΚΥΚΛΟΣ ΟΔΗΓΗΣΗΣ	UDDS	HWFET	US06	ECE
Χρονική διάρκεια	1369 sec	765 sec	600 sec	195 sec
Απόσταση	11,99 km	16,51 km	12,89 km	0,99 km
Μέγιστη ταχύτητα	91,25 km/h	96,4 km/h	129,23 km/h	50 km/h
Μέση ταχύτητα	31,51 km/h	77,58 km/h	77,2 km/h	18,26 km/h
Μέγιστη επιτάχυνση	1,48 m/sec ²	1,43 m/sec ²	3,76 m/sec ²	1,06 m/sec ²
Μέση επιτάχυνση	0,5 m/sec ²	0,19 m/sec ²	0,67 m/sec ²	0,64 m/sec ²
Μέγιστη επιβράδυνση	-1,48 m/sec ²	-1,48 m/sec ²	-3,08 m/sec ²	-0,83 m/sec ²
Μέση επιβράδυνση	-0,58 m/sec ²	-0,22 m/sec ²	-0,73 m/sec ²	-0,75 m/sec ²

Πίνακας 4.1 Χαρακτηριστικά των κύκλων οδήγησης.

4.2 ΜΟΝΤΕΛΟ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΤΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ

Το μοντέλο της δυναμικής του οχήματος έχει σκοπό τον υπολογισμό της απαιτούμενης ισχύος. Το πρώτο βήμα για τον υπολογισμό της απαιτούμενης ισχύος είναι ο υπολογισμός των αντιστάσεων κατά την κίνηση του οχήματος. Οι αντιστάσεις ενός οχήματος κατά την κίνηση του είναι:

- Η αντίσταση λόγω αδράνειας
- Η αντίσταση κύλισης
- Η αντίσταση λόγω κλίσης του δρόμου
- Η αεροδυναμική αντίσταση



Εικόνα 4.7 Αντιστάσεις του οχήματος κατά την κίνηση του. [1]

4.2.1 Υπολογισμός αντιστάσεων

4.2.1.1 Υπολογισμός της αντίστασης λόγω αδράνειας

Η αντίσταση λόγω αδράνειας είναι ανάλογη της μάζας του οχήματος και της επιτάχυνσής του. Αν η ταχύτητα του οχήματος είναι σταθερή, τότε η επιτάχυνσή του θα είναι μηδέν και κατά συνέπεια η αντίσταση λόγω αδράνειας θα είναι και αυτή μηδέν. Συνεπώς, η αντίσταση λόγω αδράνειας υπάρχει μόνο όταν μεταβάλλεται η ταχύτητα του οχήματος. Η αντίσταση λόγω αδράνειας δίνεται από τον τύπο:

$$F_j = m \cdot a \text{ (N)} \quad (4.1)$$

όπου m είναι η μάζα του οχήματος σε kg και a η επιτάχυνσή του σε m/sec^2 .

4.2.1.2 Υπολογισμός της αντίστασης κύλισης

Κατά την κύλιση των τροχών ενός οχήματος, λόγω της παραμόρφωσης των ελαστικών στο σημείο επαφής τους με το έδαφος αναπτύσσεται μία αντίσταση. Η αντίσταση αυτή ονομάζεται αντίσταση κύλισης και είναι ανάλογη του συντελεστή κύλισης f (ο οποίος εξαρτάται από την κατάσταση του οδοστρώματος και των ελαστικών και από την ταχύτητα του οχήματος), της μάζας m του οχήματος και της κλίσης θ του δρόμου και δίνεται από τη σχέση:

$$F_f = f \cdot m \cdot g \cdot \cos \theta \text{ (N)} \quad (4.2)$$

όπου g είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας ($g=9,81 \text{ m/sec}^2$).

4.2.1.3 Υπολογισμός αντίστασης λόγω κλίσης του δρόμου

Κατά την πορεία ενός οχήματος σε ανηφορικό δρόμο, δημιουργείται μία συνιστώσα του βάρους του οχήματος η οποία εξαρτάται από το βάρος του οχήματος και από την κλίση θ του δρόμου και δίνεται από τη σχέση:

$$F_s = m \cdot g \cdot \sin \theta \text{ (N)} \quad (4.3)$$

Η αντίσταση αυτή έχει αντίθετη διεύθυνση από την κινητήρια δύναμη των τροχών όταν το όχημα κινείται σε ανηφόρα, ενώ έχει την ίδια διεύθυνση όταν το όχημα κινείται σε κατηφόρα, βοηθώντας έτσι στην κίνηση του οχήματος.

4.2.1.4 Υπολογισμός αεροδυναμικής αντίστασης

Η αεροδυναμική αντίσταση οφείλεται στην τριβή που υπάρχει μεταξύ του αέρα με την επιφάνεια του οχήματος. Η αντίσταση αυτή είναι ανάλογη του τετραγώνου της ταχύτητας του οχήματος και δίνεται από τη σχέση:

$$F_D = 0,5 \cdot C_d \cdot \rho \cdot A \cdot u^2 \quad (N) \quad (4.4)$$

όπου C_d είναι ο αεροδυναμικός συντελεστής του οχήματος ο οποίος εξαρτάται από τη μορφή του οχήματος, ρ η πυκνότητα του αέρα ($\rho=1,2 \text{ kg/m}^3$), A η μετωπική επιφάνεια του οχήματος σε m^2 και u η ταχύτητα του οχήματος σε m/sec (μπορεί να συνυπολογιστεί και η ταχύτητα του ανέμου).

4.2.2 Υπολογισμός κινητήριας δύναμης

Εφόσον γνωρίζουμε τη συνολική αντίσταση του οχήματος, η κινητήρια δύναμη F_t που θα πρέπει να εφαρμοστεί στους τροχούς για να αντισταθμίσει αυτήν την αντίσταση θα είναι:

$$F_t = m \cdot a + f \cdot m \cdot g \cdot \cos \theta + m \cdot g \cdot \sin \theta + 0,5 \cdot C_d \cdot \rho \cdot A \cdot u^2 \quad (N) \quad (4.5)$$

Μ' αυτόν τον τρόπο, υπολογίζεται σε κάθε χρονική στιγμή η κινητήρια δύναμη F_t η οποία θα πρέπει να εφαρμοστεί στους τροχούς για την κίνηση του οχήματος.

4.2.3 Υπολογισμός απαιτούμενης ισχύος

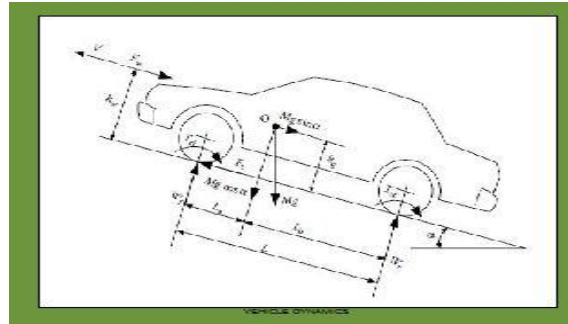
Γνωρίζοντας την κινητήρια δύναμη F_t σε κάθε χρονική στιγμή και την ταχύτητα του οχήματος από τον κύκλο οδήγησης που έχει εισαχθεί σαν σήμα εισόδου στο μοντέλο, μπορεί να υπολογιστεί η απαιτούμενη ισχύς η οποία θα πρέπει να φτάσει στους τροχούς του οχήματος, από την παρακάτω εξίσωση:

$$P = F_t \cdot u \quad (W) \quad (4.6)$$

όπου F_t η κινητήρια δύναμη των τροχών σε N και u η ταχύτητα του οχήματος σε m/sec .

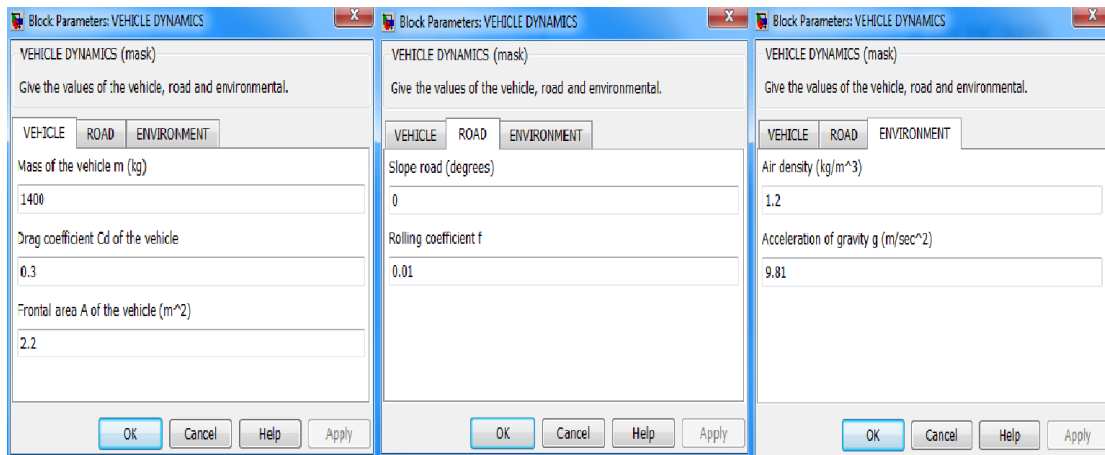
4.2.4 Μπλοκ δυναμικής του οχήματος

Το μπλοκ της δυναμικής του οχήματος απεικονίζεται στη εικόνα 4.8.



Εικόνα 4.8 Μπλοκ της δυναμικής του οχήματος.

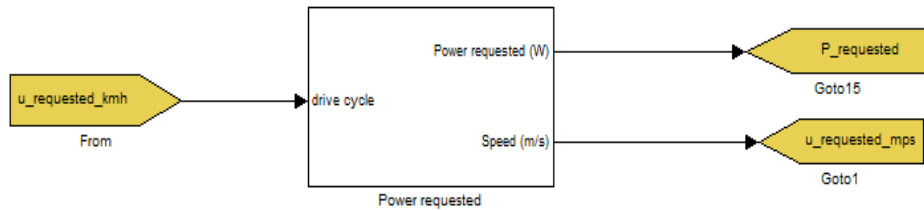
Κάνοντας διπλό κλικ στο μπλοκ της δυναμικής του οχήματος εμφανίζεται το παρακάτω παράθυρο διαλόγου.



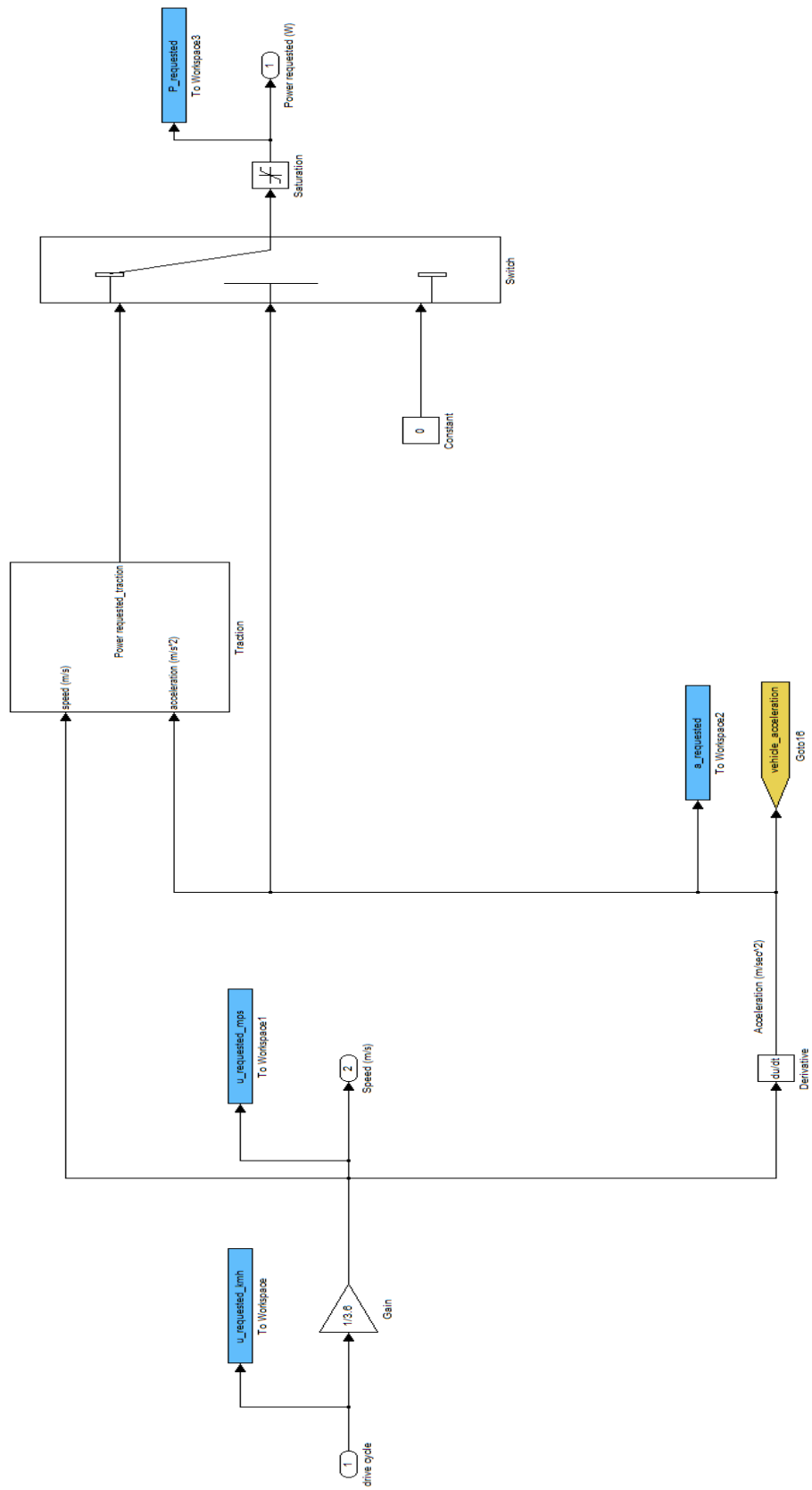
Εικόνα 4.9 Παράθυρο διαλόγου του μπλοκ της δυναμικής του οχήματος στο οποίο μπορούν να δοθούν οι διάφορες παράμετροι για το όχημα, το δρόμο και το περιβάλλον.

Σ' αυτό το παράθυρο μπορούν να δοθούν οι διάφορες τιμές για το όχημα (μάζα, αεροδυναμικός συντελεστής και μετωπική επιφάνεια του οχήματος), το δρόμο (κλίση δρόμου και συντελεστής κύλισης) και το περιβάλλον (πυκνότητα αέρα και επιτάχυνση της βαρύτητας).

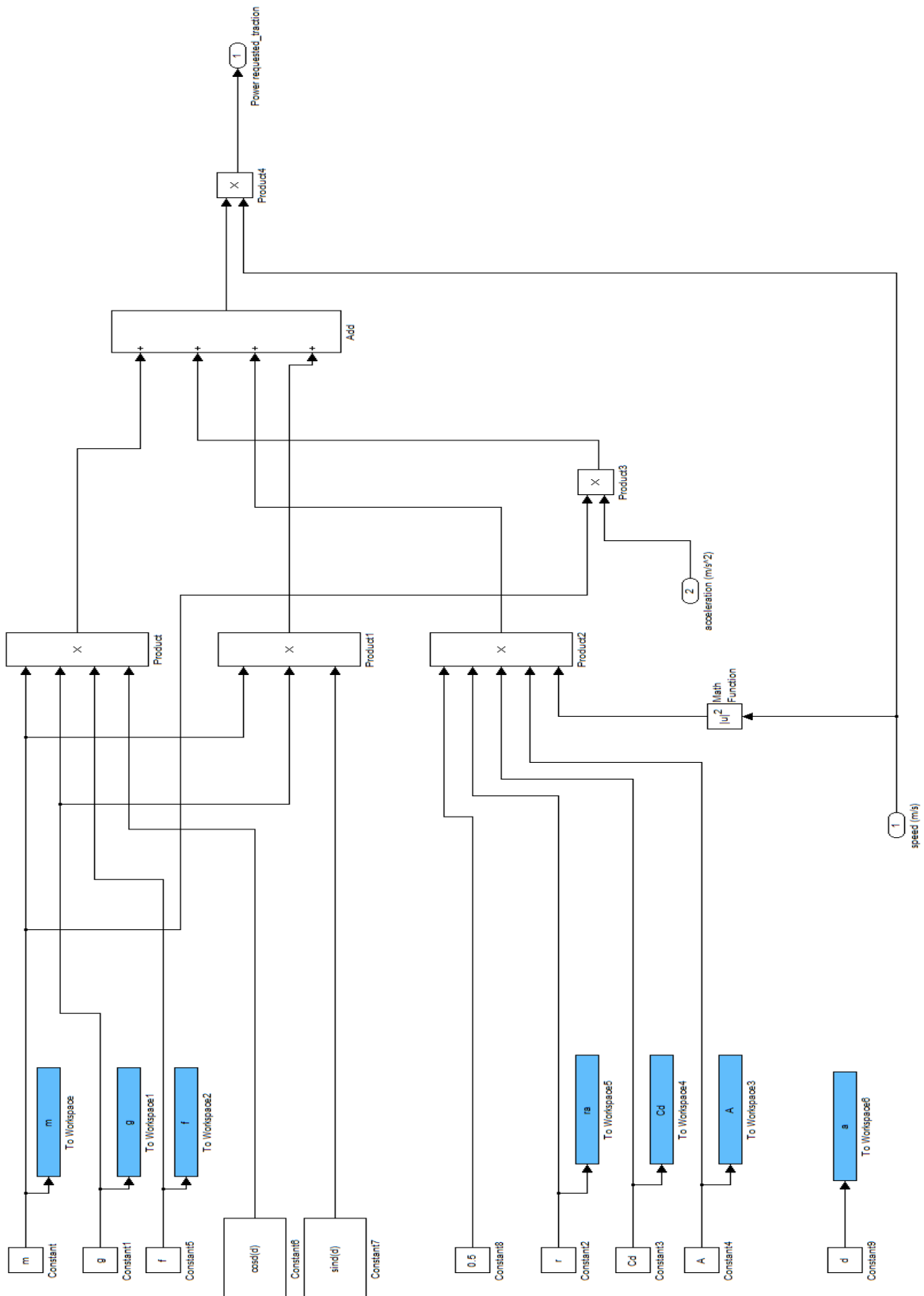
Το μοντέλο που έχει δημιουργηθεί στο **Simulink** κάτω από αυτό το μπλοκ απεικονίζεται στις εικόνες 4.10, 4.11 και 4.12.



Εικόνα 4.10 Μοντέλο της δυναμικής του οχήματος με τα σήματα εισόδου και εξόδου.



Εικόνα 4.11 Υποσύστημα του μοντέλου της δυναμικής του οχήματος.



Εικόνα 4.12 Μοντέλο κινητήριας δύναμης και απαιτούμενης ισχύος.

4.3 ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΡΟΧΩΝ

Το μοντέλο των τροχών δέχεται τα σήματα εξόδου από το μπλοκ της δυναμικής του οχήματος (απαιτούμενη ισχύς σε W και ταχύτητα οχήματος σε m/sec) και σύμφωνα με αυτά υπολογίζει τη ροπή και την γωνιακή ταχύτητα των τροχών, καθώς και την ροπή στη έξοδο του διαφορικού, λαμβάνοντας υπόψη την μαζική ροπή αδράνειας των τροχών (η γωνιακή ταχύτητα στην έξοδο του διαφορικού είναι ίδια με αυτήν των τροχών).

Η γωνιακή ταχύτητα των τροχών μπορεί να υπολογιστεί γνωρίζοντας την ταχύτητα του οχήματος σε m/sec και την ακτίνα του τροχού σε m από τον παρακάτω τύπο:

$$\omega = \frac{u}{r} \text{ (rad/sec)} \quad (4.7)$$

Έτσι, γνωρίζοντας την απαιτούμενη ισχύ των τροχών σε W και την γωνιακή ταχύτητα των τροχών σε rad/sec, η ροπή στους τροχούς του οχήματος μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$T = \frac{P}{\omega} \text{ (Nm)} \quad (4.8)$$

Για τον υπολογισμό της ροπής που θα πρέπει να φτάσει στην έξοδο του διαφορικού, συνυπολογίζεται η μαζική ροπή αδράνειας των τροχών και των περιστρεφόμενων μερών τους. Έτσι, η ροπή στην έξοδο του διαφορικού είναι:

$$T_d = T + J_w \cdot \frac{d\omega}{dt} \text{ (Nm)} \quad (4.9)$$

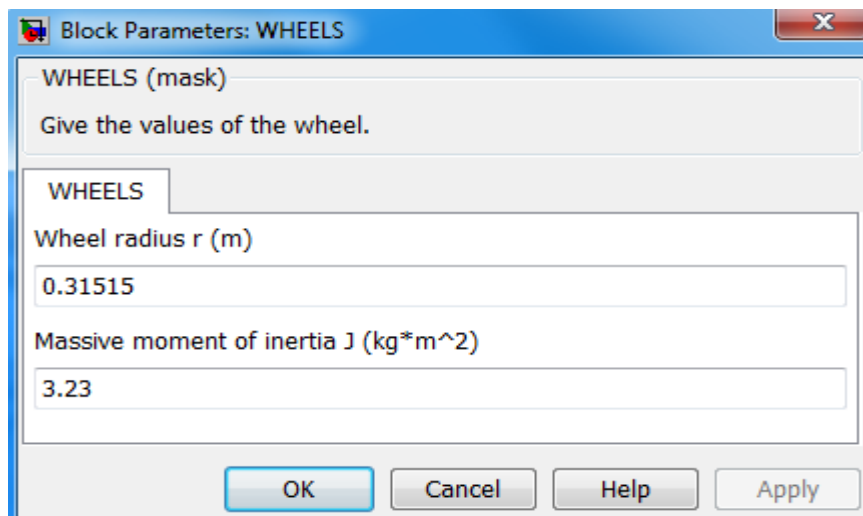
όπου J_w η ροπή αδράνειας των τροχών σε $\text{kg}\cdot\text{m}^2$.

Το μπλοκ των τροχών απεικονίζεται στην εικόνα 4.13.



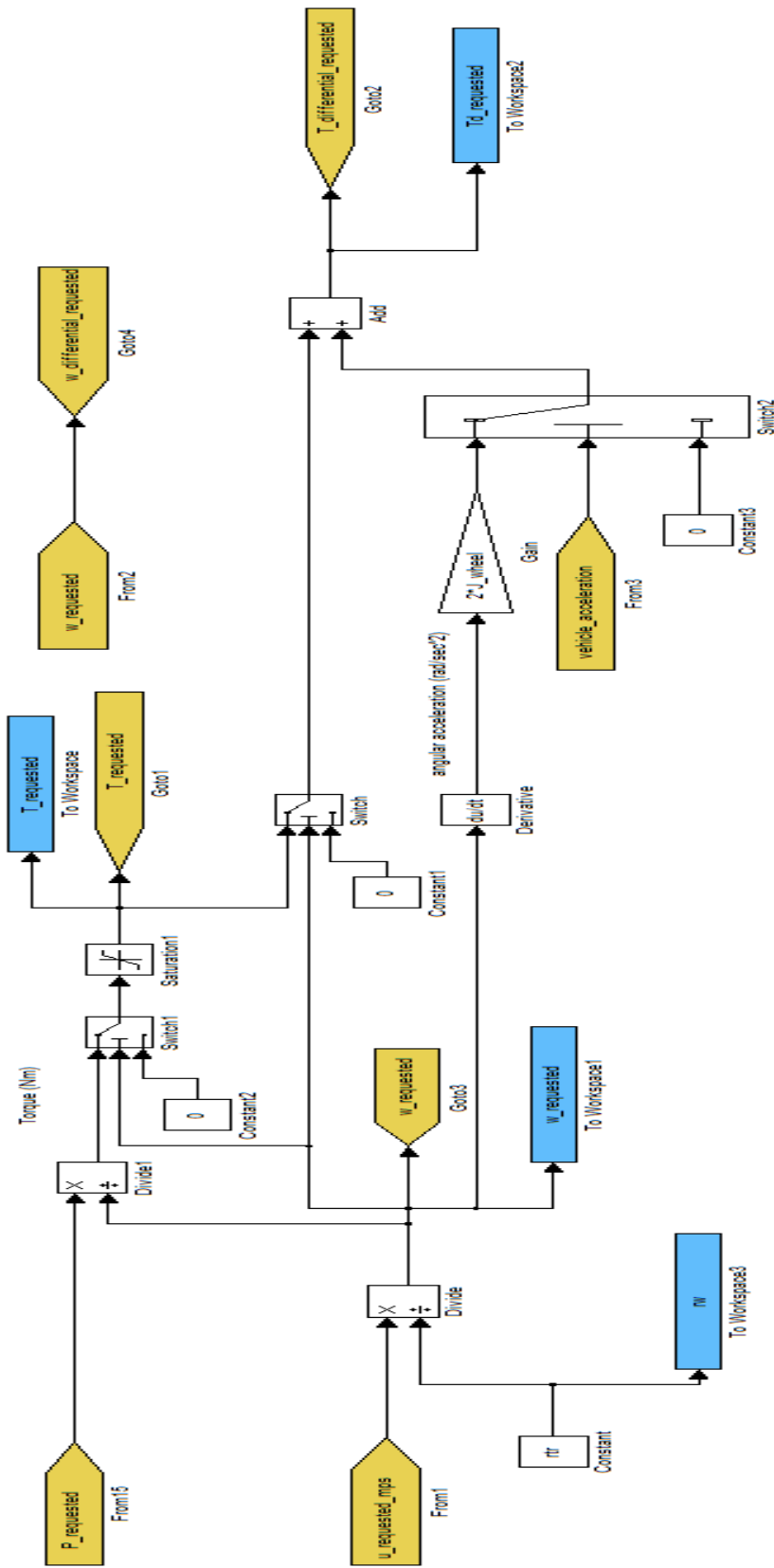
Εικόνα 4.13 Μπλοκ των τροχών.

Κάνοντας διπλό κλικ στο μπλοκ των τροχών εμφανίζεται το παρακάτω παράθυρο διαλόγου, στο οποίο μπορούν να δοθούν η ακτίνα του τροχού (σε m) και μαζική ροπή αδράνειας (σε $\text{kg}\cdot\text{m}^2$) για τον έναν τροχό.



Εικόνα 4.14 Παράθυρο διαλόγου του μπλοκ των τροχών.

Το μοντέλο που αντιστοιχεί σε αυτό το μπλοκ απεικονίζεται στην εικόνα 4.15.



Εικόνα 4.15 Μοντέλο των τροχών.

4.4 ΜΟΝΤΕΛΟ ΔΙΑΦΟΡΙΚΟΥ

Το μοντέλο του διαφορικού παίρνει ως σήματα εισόδου τη ροπή (σε Nm) και τη γωνιακή ταχύτητα (σε rad/sec) στην έξοδο του διαφορικού και σύμφωνα μ' αυτά υπολογίζει την απαιτούμενη ροπή και γωνιακή ταχύτητα στην έξοδο του κιβώτιου σταθερής σχέσης μετάδοσης.

Η γωνιακή ταχύτητα στην έξοδο του κιβώτιου σταθερής σχέσης μετάδοσης υπολογίζεται με τον τύπο:

$$\omega_g = i_d \cdot \omega \left(\frac{rad}{sec} \right) \quad (4.10)$$

όπου i_d είναι η σχέση μετάδοσης του διαφορικού.

Η ροπή στην έξοδο του κιβώτιου σταθερής σχέσης μετάδοσης υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$T_g = \left(T_d + J_d \cdot \frac{d\omega}{dt} \right) / \eta_d \cdot i_d \quad (Nm) \quad (4.11)$$

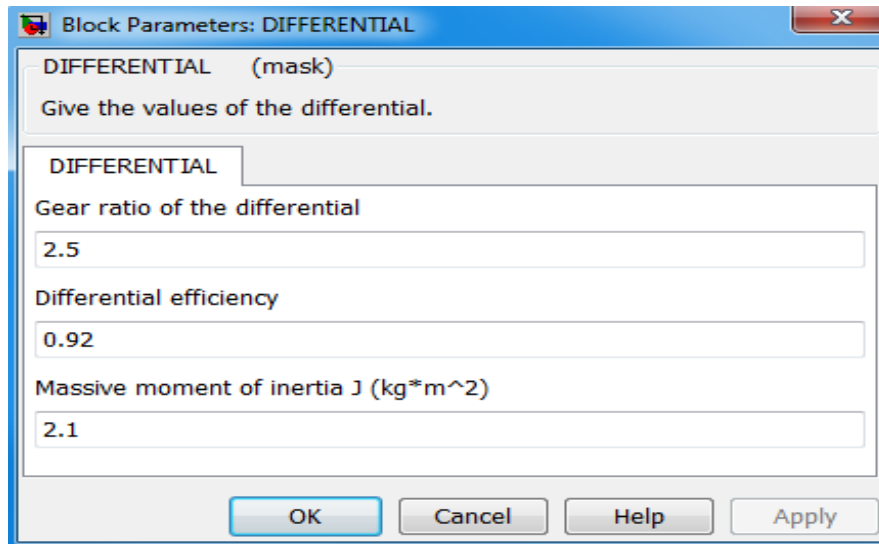
όπου η_d ο βαθμός απόδοσης του διαφορικού, και J_d η μαζική ροπή αδράνειας του διαφορικού σε $kg \cdot m^2$.

Το μπλοκ του διαφορικού απεικονίζεται στην εικόνα 4.16.



Εικόνα 4.16 Μπλοκ του διαφορικού.

Κάνοντας διπλό κλικ στο μπλοκ του διαφορικού εμφανίζεται το παρακάτω παράθυρο διαλόγου στο οποίο μπορούν να δοθούν η σχέση μετάδοσης, ο βαθμός απόδοσης και η μαζική ροπή αδράνειας (σε $\text{kg}\cdot\text{m}^2$) του διαφορικού.



Εικόνα 4.17 Παράθυρο διαλόγου του μπλοκ του διαφορικού.

Το μοντέλο που αντιστοιχεί στο μπλοκ του διαφορικού απεικονίζεται στην εικόνα 4.18.

4.5 ΜΟΝΤΕΛΟ ΚΙΒΩΤΙΟΥ ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΣΧΕΣΗΣ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ

Το μοντέλο του κιβώτιου σταθερής σχέσης μετάδοσης έχει ως σήματα εισόδου τη ροπή (σε Nm) και τη γωνιακή ταχύτητα (σε rad/sec) στην έξοδο του κιβώτιου σταθερής σχέσης μετάδοσης, και με βάση αυτά υπολογίζει τη ροπή και την γωνιακή ταχύτητα που απαιτούνται από τον ηλεκτροκινητήρα στην έξοδό του.

Η γωνιακή ταχύτητα που απαιτείται στην έξοδο του ηλεκτροκινητήρα υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\omega_m = i_g \cdot \omega_g \left(\frac{rad}{sec} \right) \quad (4.12)$$

όπου i_g είναι η σχέση μετάδοσης του κιβωτίου σταθερής σχέσης μετάδοσης.

Η ροπή που απαιτείται στην έξοδο του ηλεκτροκινητήρα υπολογίζεται από τη σχέση:

$$T_L = \left(T_g + J_g \cdot \frac{d\omega_g}{dt} \right) / \eta_g \cdot i_g \quad (Nm) \quad (4.13)$$

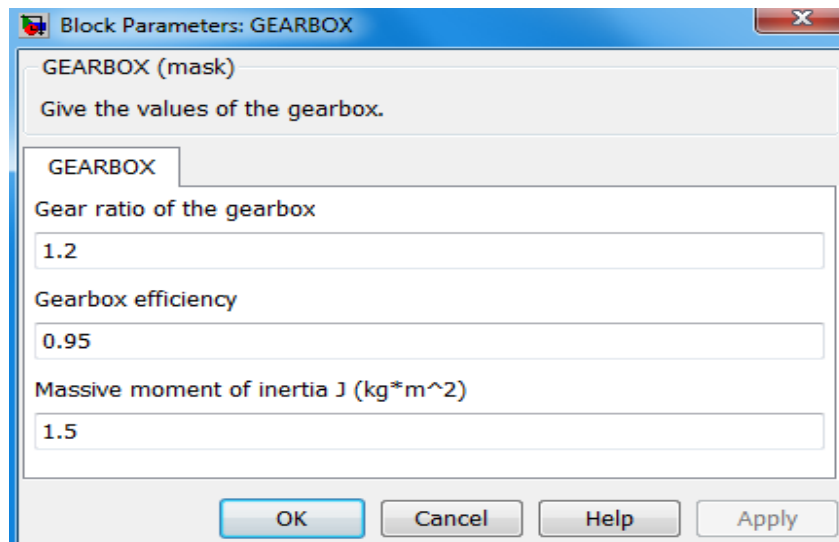
όπου η_g ο βαθμός απόδοσης του κιβώτιου σταθερής σχέσης μετάδοσης, και J_g η μαζική ροπή αδράνειας του κιβώτιου σταθερής σχέσης μετάδοσης σε $kg \cdot m^2$.

Το μπλοκ του κιβώτιου σταθερής σχέσης μετάδοσης φαίνεται στην εικόνα 4.19.



Εικόνα 4.19 Μπλοκ του κιβώτιου σταθερής σχέσης μετάδοσης.

Κάνοντας διπλό κλικ στο μπλοκ του κιβώτιου σταθερής σχέσης μετάδοσης εμφανίζεται το παρακάτω παράθυρο διαλόγου στο οποίο μπορούν να δοθούν η σχέση μετάδοσης, ο βαθμός απόδοσης και η μαζική ροπή αδράνειας (σε $\text{kg}\cdot\text{m}^2$) του κιβώτιου σταθερής σχέσης μετάδοσης.



Εικόνα 4.20 Παράθυρο διαλόγου του μπλοκ του κιβώτιου σταθερής σχέσης μετάδοσης.

Το μοντέλο που υπάρχει κάτω από το μπλοκ του κιβώτιου σταθερής σχέσης μετάδοσης φαίνεται στην εικόνα 4.21.

4.6 ΜΟΝΤΕΛΟ DC ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΗΤΗΡΑ ΚΑΙ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ΟΔΗΓΗΣΗΣ

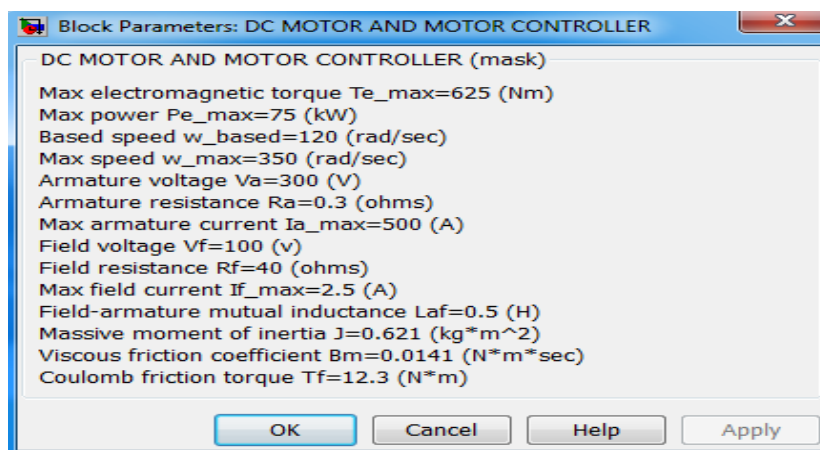
Το μπλοκ του DC ηλεκτροκινητήρα και του κυκλώματος οδήγησης του, δέχεται ως σήματα εισόδου την απαιτούμενη ροπή (σε Nm) και γωνιακή ταχύτητα (σε rad/sec) στην έξοδο του ηλεκτροκινητήρα και σύμφωνα με αυτά υπολογίζει την τάση οπλισμού V_a και διέγερσης V_f και το ρεύμα οπλισμού I_a και διέγερσης I_f τα οποία τροφοδοτούν τον ηλεκτροκινητήρα και εκφορτίζουν την μπαταρία.

Το μπλοκ του DC ηλεκτροκινητήρα μαζί με το κύκλωμα οδήγησής του φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 4.22 Μπλοκ του DC ηλεκτροκινητήρα με το κύκλωμα οδήγησης του.

Κάνοντας διπλό κλικ στο μπλοκ του DC ηλεκτροκινητήρα και του κυκλώματος οδήγησής του εμφανίζεται το παρακάτω παράθυρο, στο οποίο παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του DC ηλεκτροκινητήρα (εικόνα 4.23). Σ' αυτό το μπλοκ δεν επιτρέπεται να αλλαχθούν οι παράμετροι του DC ηλεκτροκινητήρα, καθώς η σχεδίαση του κυκλώματος οδήγησης έγινε για τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά του DC ηλεκτροκινητήρα. Συνεπώς, αλλάζοντας κάποια χαρακτηριστικά του DC ηλεκτροκινητήρα, πρέπει να αλλάξει και η σχεδίαση του κυκλώματος οδήγησης.



Εικόνα 4.23 Χαρακτηριστικά του DC ηλεκτροκινητήρα.

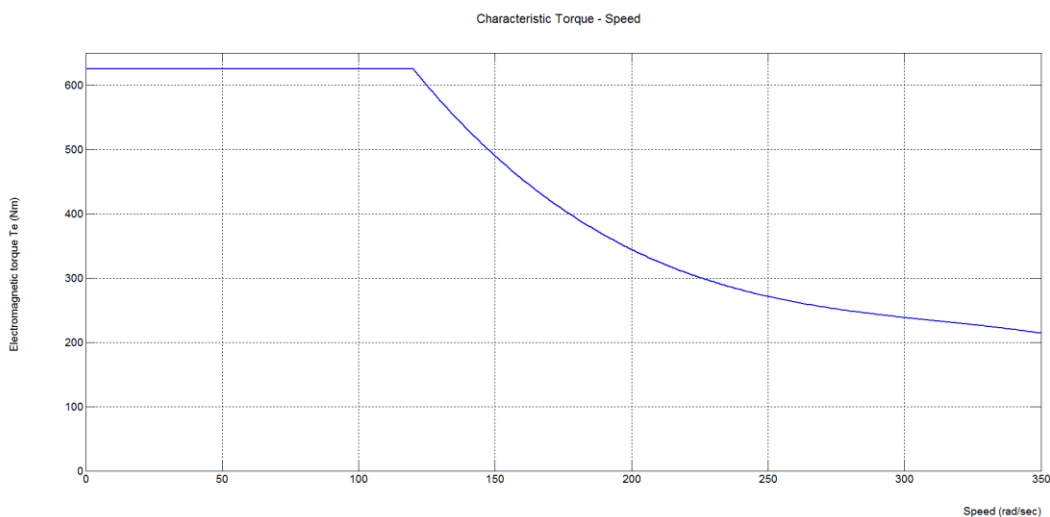
Προσομοίωση ηλεκτρικού οχήματος με το λογισμικό Matlab/Simulink

Τα χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου DC ηλεκτροκινητήρα φαίνονται και στον παρακάτω πίνακα.

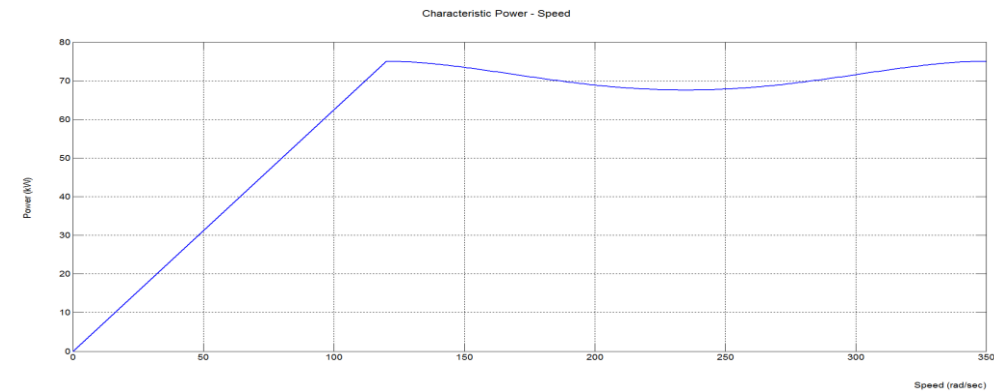
Μέγιστη ηλεκτρομαγνητική ροπή $T_e \max$	625 N·m
Μέγιστη ηλεκτρομαγνητική ισχύς $P_e \max$	75 kW
Ταχύτητα βάσης ω_{based}	120 rad/sec
Μέγιστη ταχύτητα ω_{max}	350 rad/sec
Τάση οπλισμού V_a	300 V
Αντίσταση τυλίγματος οπλισμού R_a	0,3 Ω
Μέγιστο ρεύμα οπλισμού $I_a \max$	500 A
Τάση διέγερσης V_f	100 V
Αντίσταση τυλίγματος διέγερσης R_f	40 Ω
Μέγιστο ρεύμα διέγερσης $I_f \max$	2,5 A
Κοινή αυτεπαγωγή οπλισμού – διέγερσης L_{af}	0,5 H
Μαζική ροπή αδράνειας του ηλεκτροκινητήρα J_m	0,621 kg·m ²
Αεροδυναμικός συντελεστής τριβών B_m	0,0141 N·m·sec
Ροπή τριβών T_f	12,3 N·m

Πίνακας 4.2 Χαρακτηριστικά DC ηλεκτροκινητήρα.

Η χαρακτηριστική ροπής – ταχύτητας και ισχύος – ταχύτητας του ηλεκτροκινητήρα φαίνονται στις εικόνες 4.24 και 4.25 αντίστοιχα.

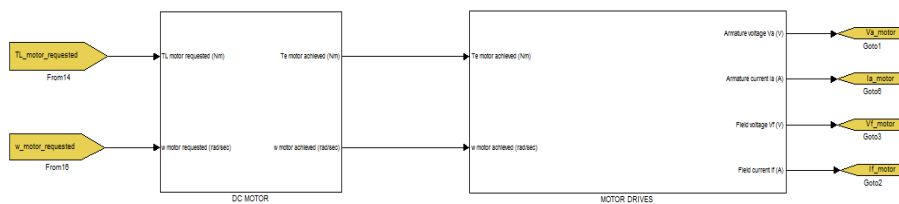


Εικόνα 4.24 Χαρακτηριστική ροπής – ταχύτητας.



Εικόνα 4.25 Χαρακτηριστική ισχύος – ταχύτητας.

Σε αυτό το μπλοκ αντιστοιχούν τα μοντέλα του DC ηλεκτροκινητήρα και του κυκλώματος οδήγησης (εικόνα 4.26).



Εικόνα 4.26 Μπλοκ του DC ηλεκτροκινητήρα και του κυκλώματος οδήγησης.

4.6.1 Μοντέλο DC ηλεκτροκινητήρα

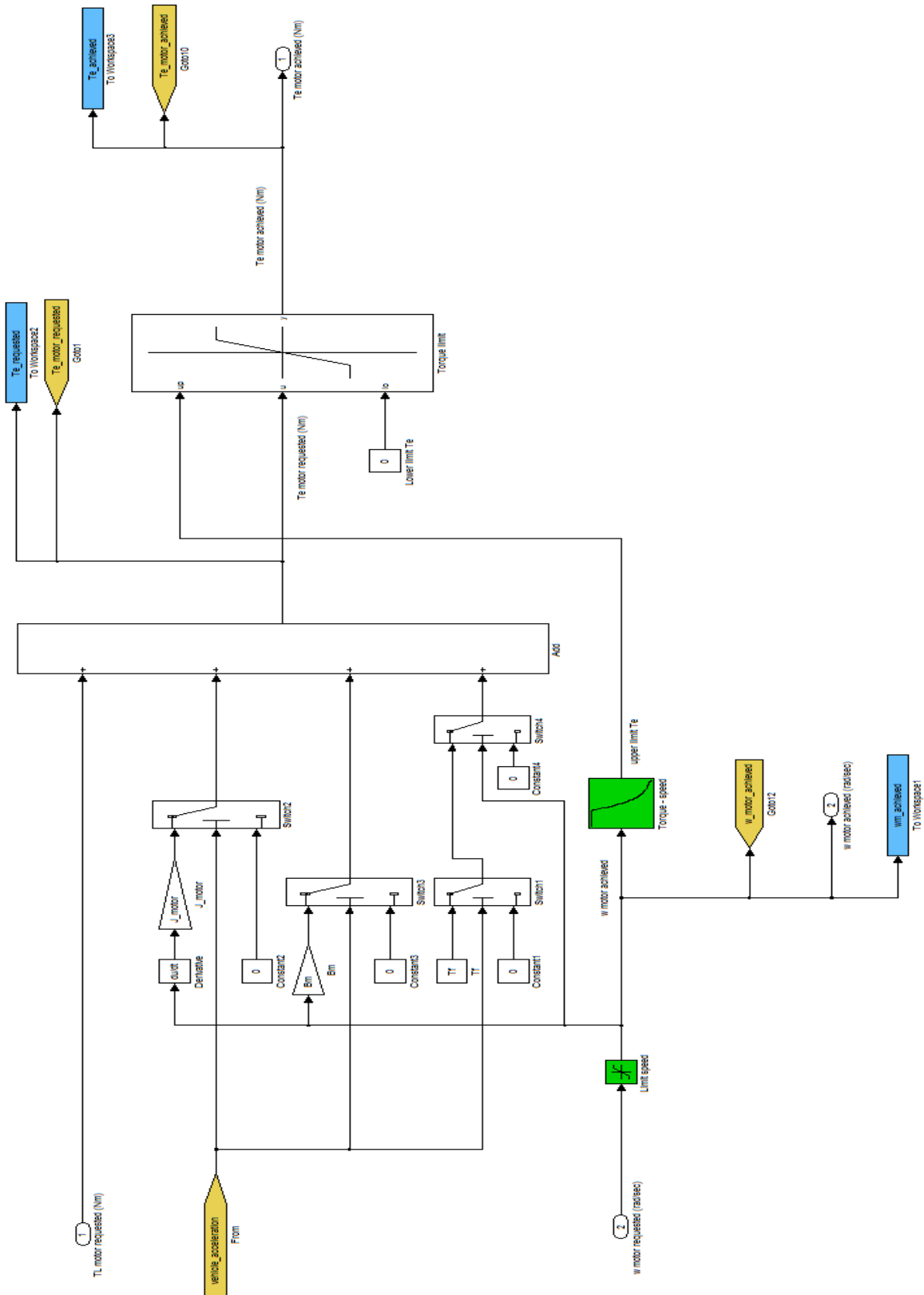
Το μοντέλο του DC ηλεκτροκινητήρα έχει ως σήματα εισόδου την ροπή (σε Nm) και την γωνιακή ταχύτητα (σε rad/sec) στην έξοδο του ηλεκτροκινητήρα και σύμφωνα μ' αυτά υπολογίζει την ηλεκτρομαγνητική ροπή η οποία απαιτείται.

Επίσης, η επιθυμητή ροπή και γωνιακή ταχύτητα του ηλεκτροκινητήρα φιλτράρονται από έναν πίνακα (χάρτη), ώστε να υπολογίζεται σε κάθε βήμα η ροπή και η ταχύτητα την οποία μπορεί να δώσει ο ηλεκτροκινητήρας, σύμφωνα με την χαρακτηριστική ροπής – ταχύτητας που έχει (εικόνα 4.24).

Η ηλεκτρομαγνητική ροπή του DC ηλεκτροκινητήρα υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$T_e = T_L + J_m \cdot \frac{d\omega_m}{dt} + B_m \cdot \omega_m \cdot T_f \quad (Nm) \quad (4.14)$$

Το μοντέλο του DC ηλεκτροκινητήρα στο **Simulink** φαίνεται στην εικόνα 4.27.



Εικόνα 4.27 Μοντέλο του DC ηλεκτροκινητήρα.

Η ισχύς εξόδου του DC ηλεκτροκινητήρα υπολογίζεται από τη σχέση:

$$P_{out} = T_L \cdot \omega_m \text{ (W)} \quad (4.15)$$

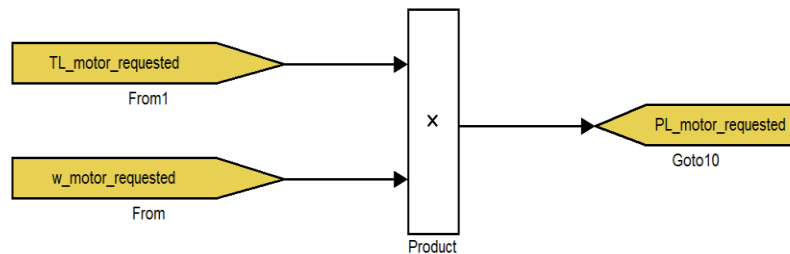
Η ηλεκτρομαγνητική ισχύς του DC ηλεκτροκινητήρα υπολογίζεται από τη σχέση:

$$P_e = T_e \cdot \omega_m \text{ (W)} \quad (4.16)$$

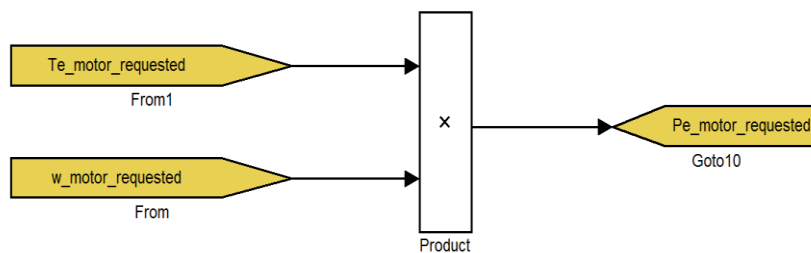
Ο μηχανικός βαθμός απόδοσης του DC ηλεκτροκινητήρα δείχνει τις απώλειες που έχει ο DC ηλεκτροκινητήρας λόγω τριβών και υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\eta_m = \frac{P_{out}}{P_e} \cdot 100 \% \quad (4.17)$$

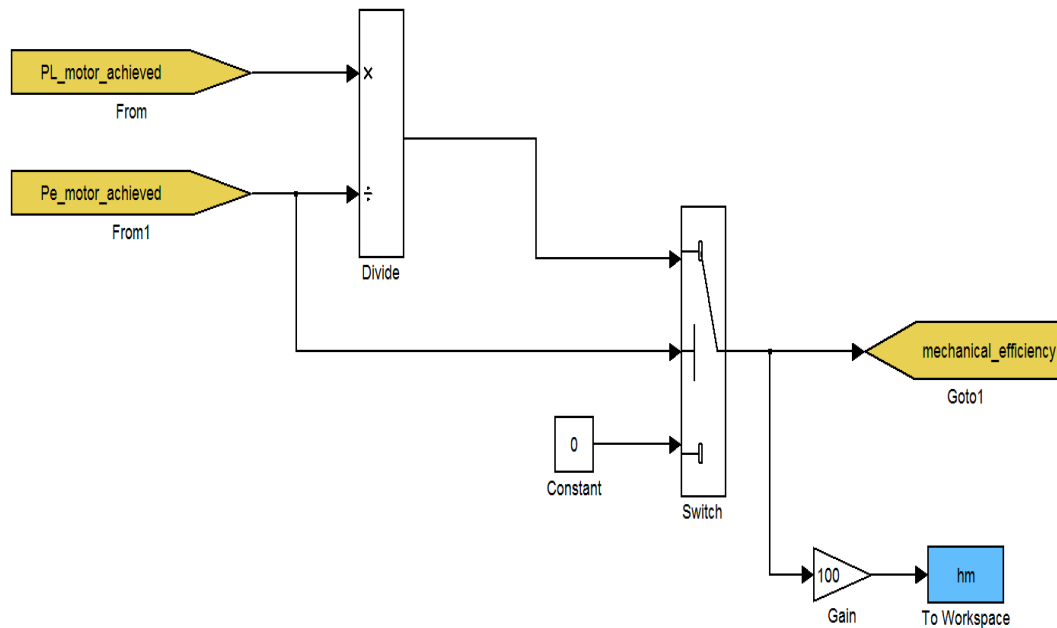
Τα μοντέλα υπολογισμού της ισχύος εξόδου, της ηλεκτρομαγνητικής ισχύος και του μηχανικού βαθμού απόδοσης του DC ηλεκτροκινητήρα παρουσιάζονται στις εικόνες 4.28, 4.29 και 4.30 αντίστοιχα.



Εικόνα 4.28 Μοντέλο ισχύος εξόδου του DC ηλεκτροκινητήρα.



Εικόνα 4.29 Μοντέλο ηλεκτρομαγνητικής ισχύος του DC ηλεκτροκινητήρα.

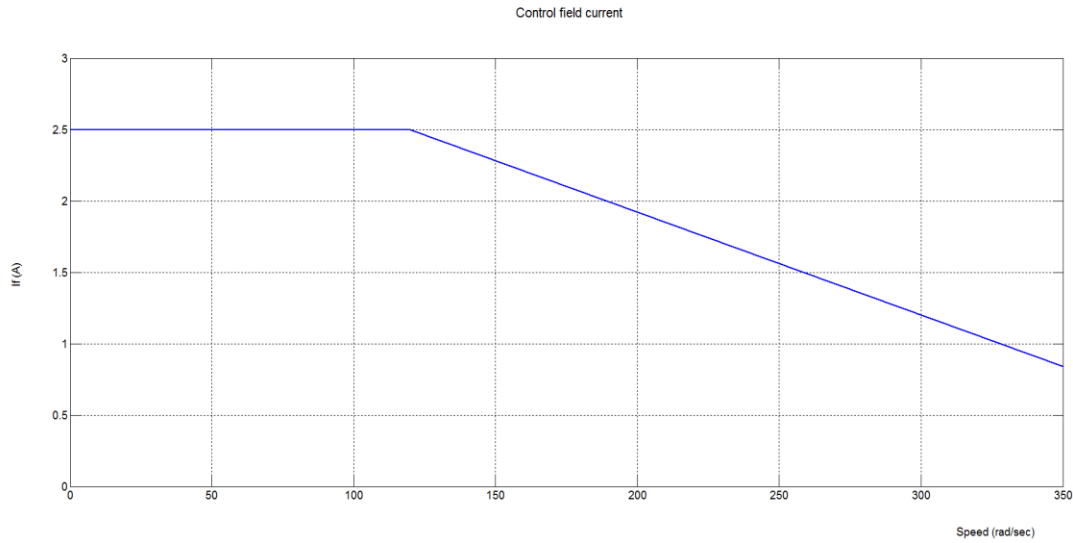


Εικόνα 4.30 Μοντέλο υπολογισμού του μηχανικού βαθμού απόδοσης του DC ηλεκτροκινητήρα.

4.6.2 Μοντέλο κυκλώματος οδήγησης

Το μοντέλο του κυκλώματος οδήγησης έχει ως σήματα εισόδου την ηλεκτρομαγνητική ροπή (σε Nm) και τη γωνιακή ταχύτητα (σε rad/sec) του ηλεκτροκινητήρα και σύμφωνα με αυτά υπολογίζει την τάση οπλισμού V_a , διέγερσης V_f , καθώς και τα ρεύματα οπλισμού I_a και διέγερσης I_f .

Η λειτουργία του DC ηλεκτροκινητήρα χωρίζεται σε δύο περιοχές: την περιοχή σταθερής ροπής (για ταχύτητες μικρότερες ή ίσες με την ταχύτητα βάσης) και την περιοχή σταθερής ισχύος (για ταχύτητες μεγαλύτερες από την ταχύτητα βάσης). Στην περιοχή σταθερής ροπής το ρεύμα διέγερσης I_f παραμένει σταθερό στην ονομαστική του τιμή (2,5 A) και δεν μεταβάλλεται σε συνάρτηση με τις στροφές. Στην περιοχή σταθερής ισχύος το ρεύμα διέγερσης I_f πέφτει γραμμικά σε συνάρτηση με τις στροφές έως την τιμή 0,8571 A (εικόνα 4.31).

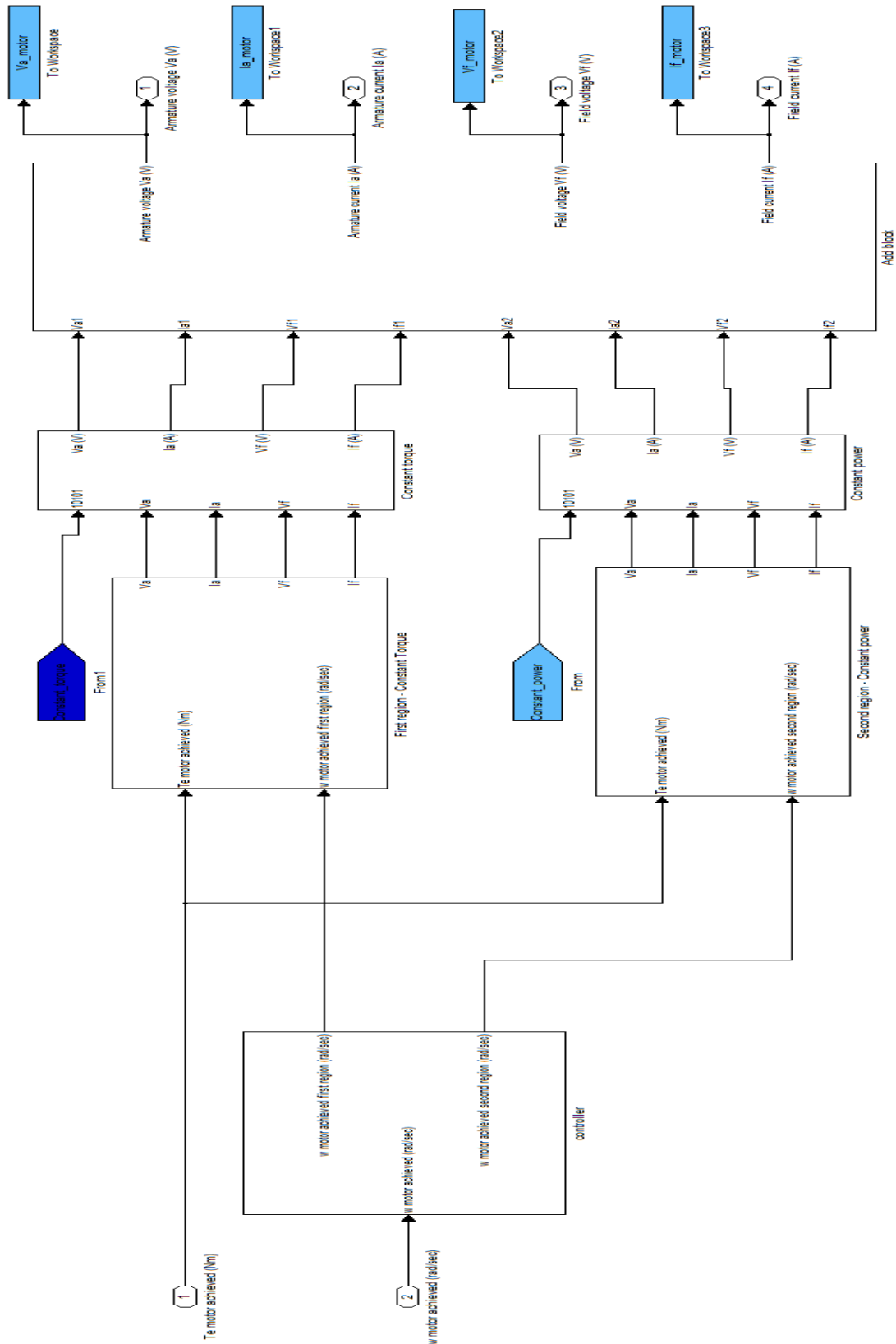


Εικόνα 4.31 Έλεγχος του ρεύματος διέγερσης I_f σε συνάρτηση με τις στροφές.

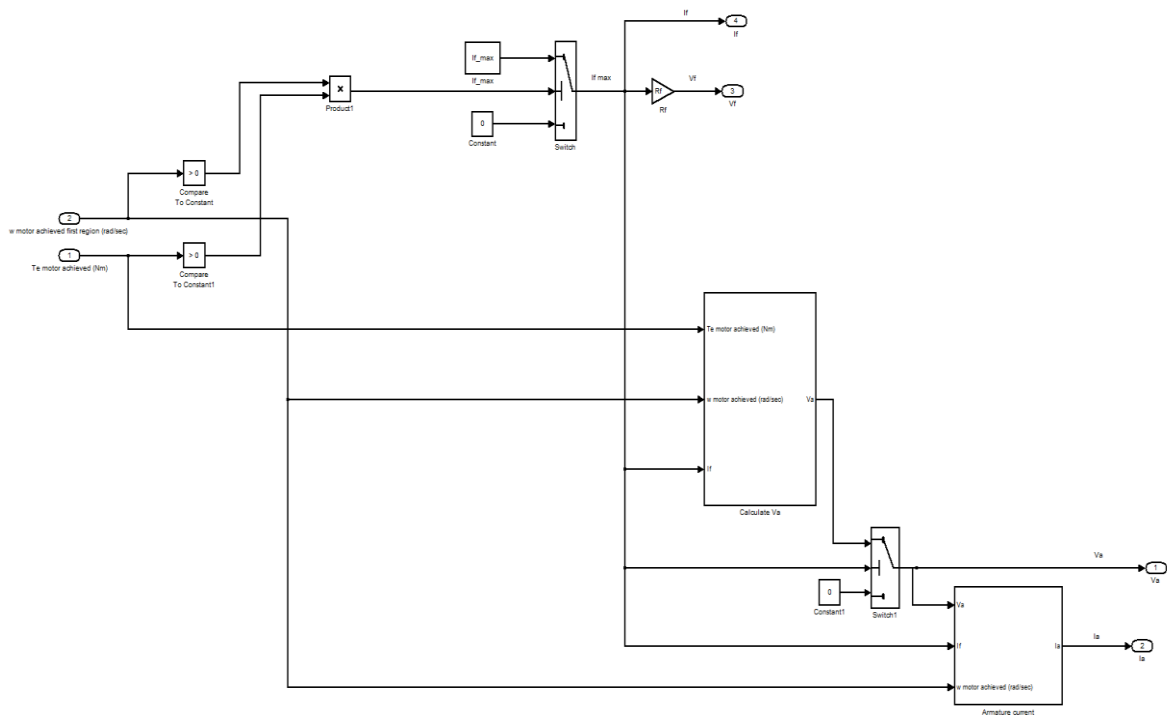
Εφόσον είναι γνωστό το ρεύμα διέγερσης I_f η τάση διέγερσης V_f υπολογίζεται από τον τύπο:

$$V_f = I_f \cdot R_f \quad (V) \quad (4.18)$$

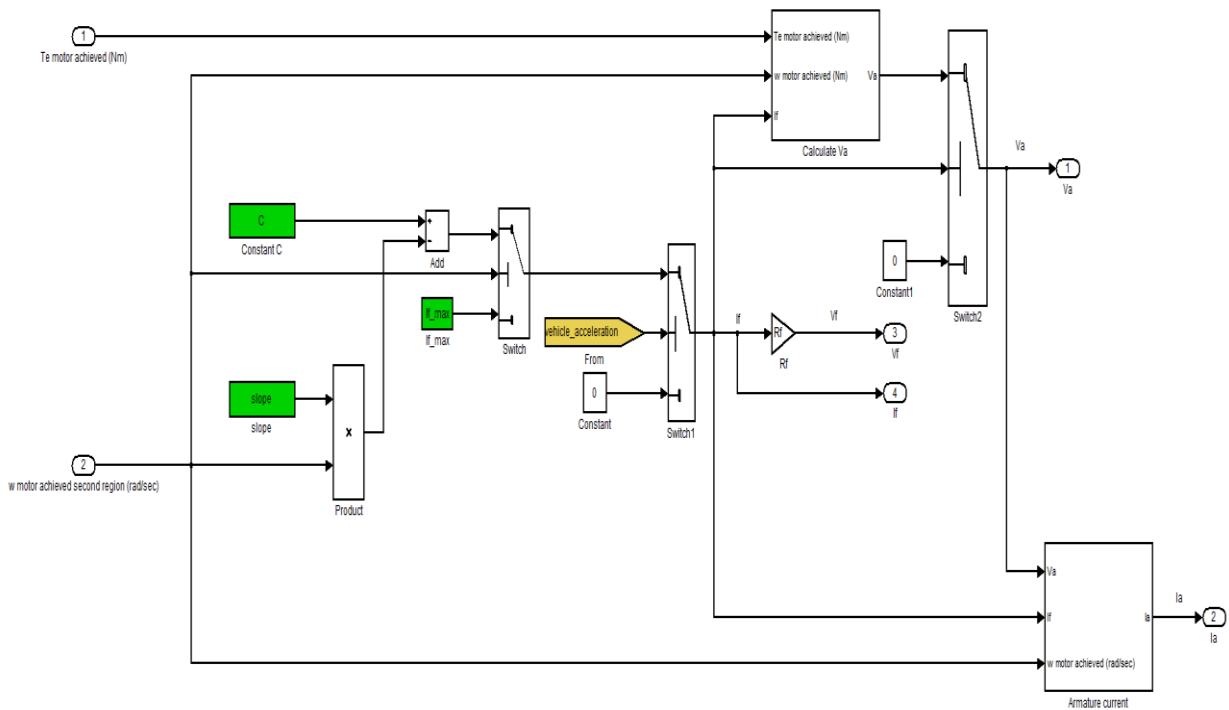
Το μοντέλο του κυκλώματος οδήγησης φαίνεται στις εικόνες 4.32, 4.33 και 4.34.



Εικόνα 4.32 Μοντέλο του κυκλώματος οδήγησης.



Εικόνα 4.33 Μοντέλο περιοχής σταθερής ροπής.



Εικόνα 4.34 Μοντέλο περιοχής σταθερής ισχύος.

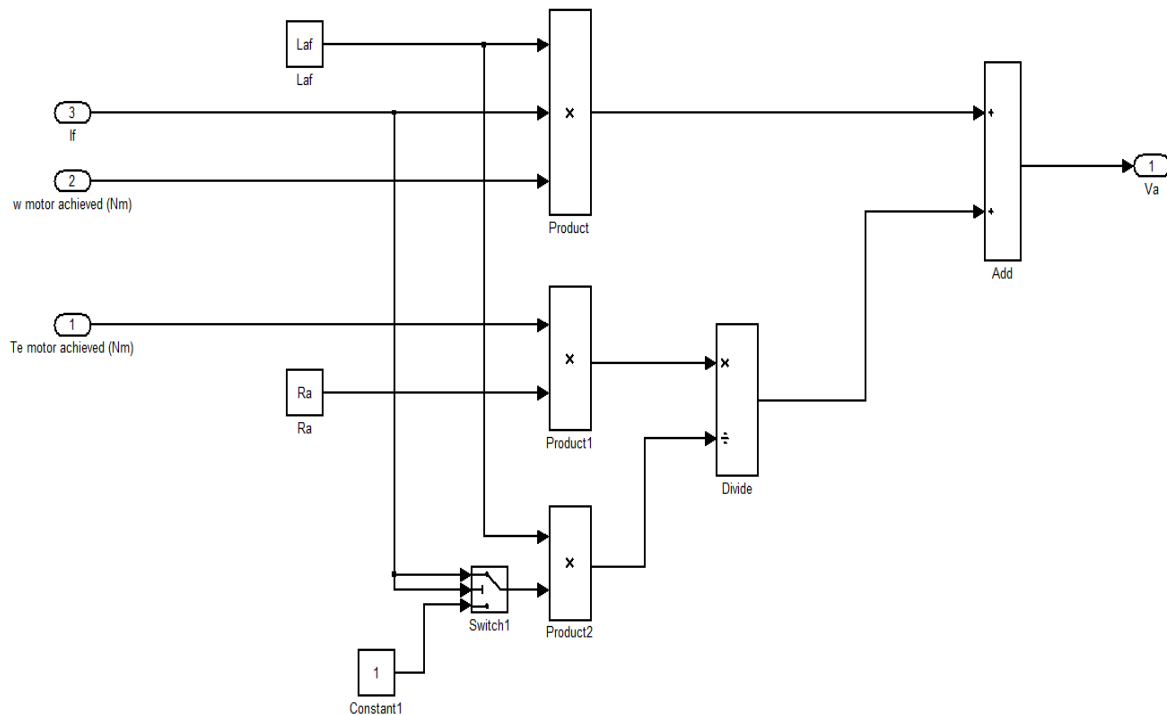
Η τάση οπλισμού V_a η οποία θα πρέπει να εφαρμοστεί στο τύλιγμα οπλισμού υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$V_a = L_{af} \cdot I_f \cdot \omega_m + \frac{T_e}{L_{af} \cdot I_f} \cdot R_a \quad (V) \quad (4.19)$$

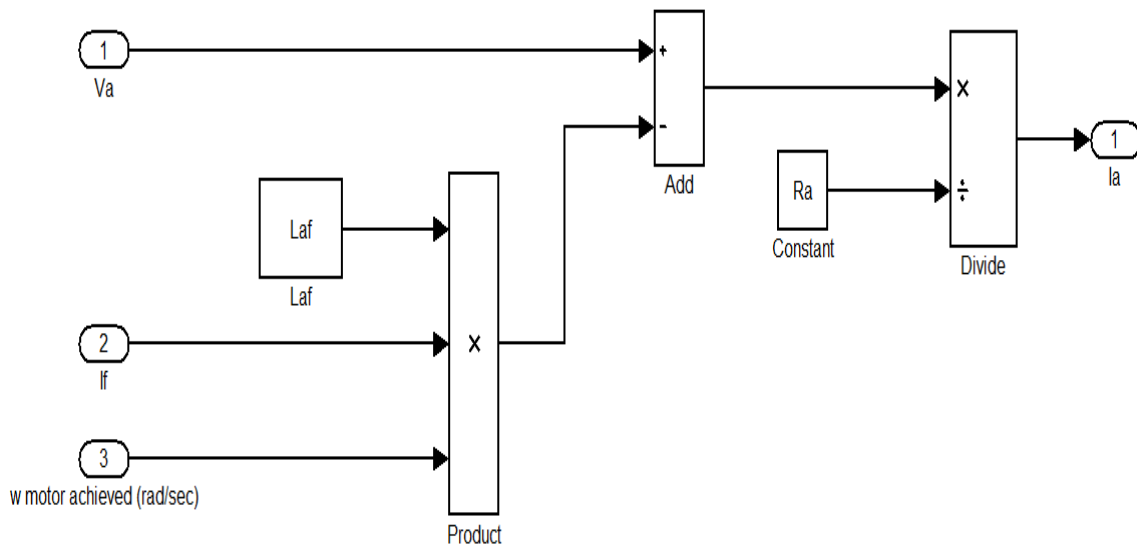
Το ρεύμα οπλισμού I_a που διαρρέει το τύλιγμα οπλισμού βρίσκεται από την εξίσωση:

$$I_a = \frac{V_a - L_{af} \cdot I_f \cdot \omega_m}{R_a} \quad (A) \quad (4.20)$$

Τα μοντέλα υπολογισμού της τάσης οπλισμού V_a και του ρεύματος διέγερσης I_a φαίνονται στις εικόνες 4.35 και 4.36 αντίστοιχα.



Εικόνα 4.35 Μοντέλο υπολογισμού της τάσης οπλισμού V_a .



Εικόνα 4.36 Μοντέλο υπολογισμού του ρεύματος διέγερσης I_a .

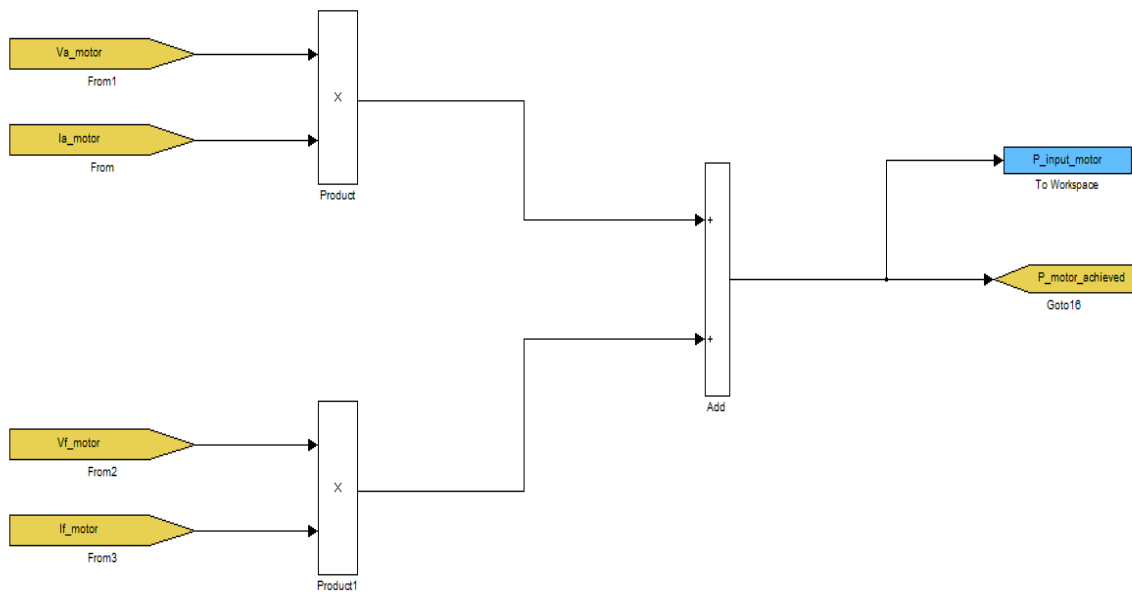
Συνεπώς, η ισχύς εισόδου του DC ηλεκτροκινητήρα υπολογίζεται από την σχέση:

$$P_{in} = V_a \cdot I_a + V_f \cdot I_f \quad (W) \quad (4.21)$$

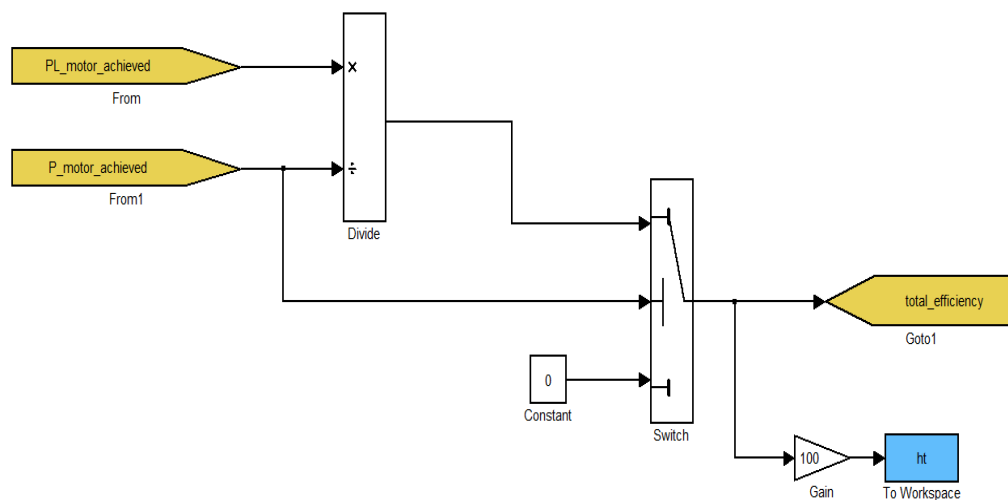
Ο συνολικός βαθμός απόδοσης του DC ηλεκτροκινητήρα υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\eta_t = \frac{P_{out}}{P_{in}} \cdot 100 \% \quad (4.22)$$

Τα μοντέλα υπολογισμού της ισχύος εισόδου και του συνολικού βαθμού απόδοσης του DC ηλεκτροκινητήρα παρουσιάζονται στις εικόνες 4.37 και 4.38 αντίστοιχα.



Εικόνα 4.37 Μοντέλο υπολογισμού της ισχύος εισόδου του DC ηλεκτροκινητήρα.



Εικόνα 4.38 Μοντέλο υπολογισμού του συνολικού βαθμού απόδοσης του DC ηλεκτροκινητήρα.

4.7 ΜΟΝΤΕΛΟ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ

Το μοντέλο της μπαταρίας έχει ως σήμα εισόδου το ρεύμα που τροφοδοτεί τον DC ηλεκτροκινητήρα (δηλαδή το ρεύμα εκφόρτισης της I_b) και σύμφωνα με αυτό υπολογίζει την τάση της μπαταρίας και την κατάσταση φόρτισής της.

Το ρεύμα εκφόρτισης I_b της μπαταρίας είναι:

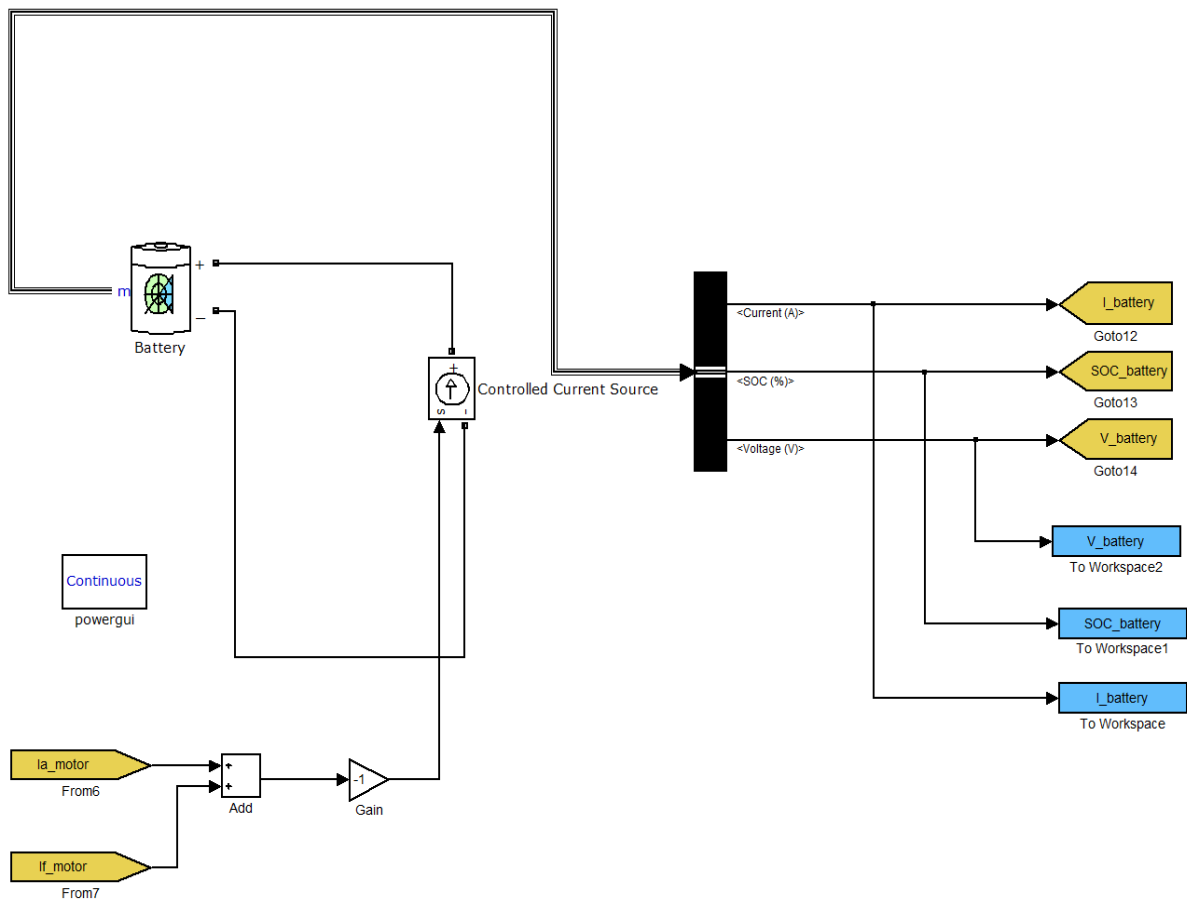
$$I_b = I_a + I_f \text{ (A)} \quad (4.23)$$

Το μπλοκ του μοντέλου της μπαταρίας φαίνεται στην εικόνα 4.39



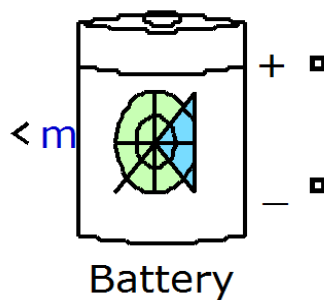
Εικόνα 4.39 Μπλοκ της μπαταρίας.

Κάνοντας διπλό κλικ σ' αυτό το μπλοκ εμφανίζεται το μοντέλο της μπαταρίας (εικόνα 4.40).



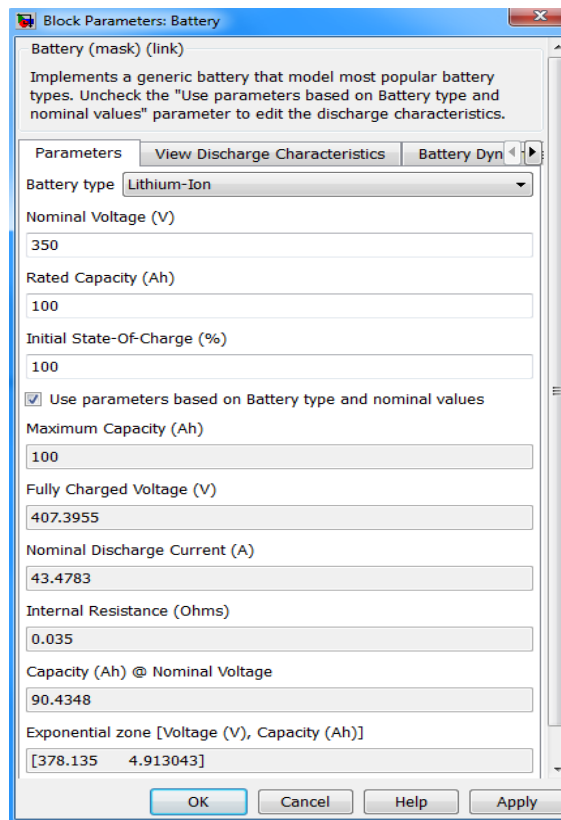
Εικόνα 4.40 Μοντέλο της μπαταρίας.

Το μπλοκ που χρησιμοποιήθηκε για να αντιπροσωπεύσει την μπαταρία, υπάρχει στη βιβλιοθήκη του **Simulink/SimPowerSystems**. Η όψη αυτού του μπλοκ φαίνεται στην εικόνα 4.41.



Εικόνα 4.41 Μπλοκ της μπαταρίας από την βιβλιοθήκη του *Simulink*.

Κάνοντας διπλό κλικ σ' αυτό το μπλοκ εμφανίζεται το παρακάτω παράθυρο διαλόγου.



Εικόνα 4.42 Παράθυρο διαλόγου του μπλοκ της μπαταρίας.

Εδώ, μπορεί να γίνει επιλογή του τύπου της μπαταρίας (π.χ. νικελίου – μετάλλων υδριδίου, ιόντων λιθίου κ.λπ.) και να δοθούν η ονομαστική τάση, η ονομαστική χωρητικότητα και η αρχική κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας, καθώς και άλλες παράμετροι (π.χ. εσωτερική αντίσταση της μπαταρίας κ.λπ.).

Οι υποθέσεις που έχουν γίνει για την δημιουργία του μπλοκ της μπαταρίας είναι οι εξής:

- Η εσωτερική αντίσταση της μπαταρίας είναι σταθερή κατά τη διάρκεια των κύκλων φόρτισης και εκφόρτισης και δεν μεταβάλλεται ανάλογα με την ένταση του ρεύματος
- Οι χαρακτηριστικές φόρτισης και εκφόρτισης υποτίθεται ότι έχουν την ίδια μορφή
- Η χωρητικότητα της μπαταρίας είναι σταθερή και δεν μεταβάλλεται ανάλογα με την ένταση του ρεύματος
- Δεν υπολογίζεται η αυτοεκφόρτιση της μπαταρίας (το πρόβλημα αυτό μπορεί να λυθεί βάζοντας ένα σταθερό ρεύμα εκφόρτισης στην είσοδο της μπαταρίας, το οποίο θα αντιπροσωπεύει το ρεύμα εκφόρτισής της)
- Δεν λαμβάνεται υπόψη το φαινόμενο μνήμης
- Η ελάχιστη χωρίς φορτίο τάση της μπαταρίας είναι 0 V και η ελάχιστη χωρητικότητά της είναι 0 A·h

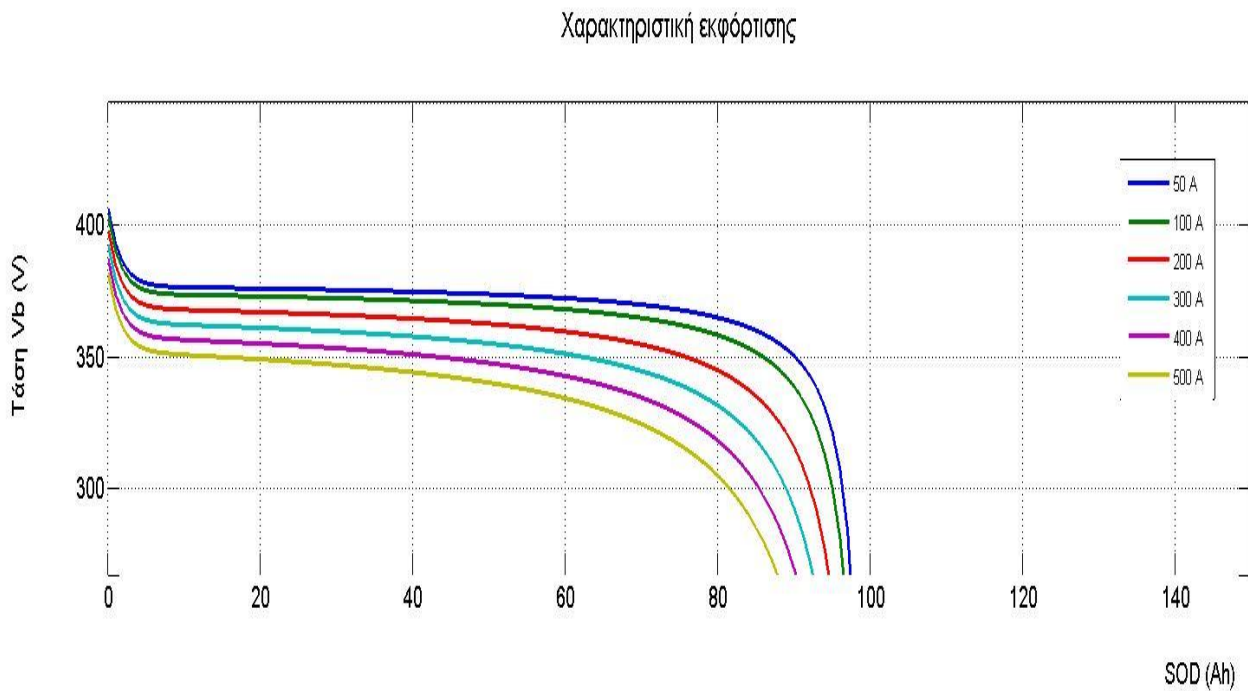
Προσομοίωση ηλεκτρικού οχήματος με το λογισμικό Matlab/Simulink

Η μπαταρία που επιλέχθηκε για το μοντέλο του ηλεκτρικού οχήματος είναι ιόντων λιθίου και τα χαρακτηριστικά της φαίνονται στον πίνακα 4.3.

Ονομαστική τάση μπαταρίας V_b	350 V
Ονομαστική χωρητικότητα μπαταρίας Q_b	100 A·h
Αρχική κατάσταση φόρτισης SOC	100 %

Πίνακας 4.3 Χαρακτηριστικά μπαταρίας.

Η χαρακτηριστική εκφόρτισης της συγκεκριμένης μπαταρίας για διάφορα ρεύματα εκφόρτισης φαίνεται στην εικόνα 4.43.



Εικόνα 4.43 Χαρακτηριστική εκφόρτισης της μπαταρίας για διάφορα ρεύματα εκφόρτισης.

5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

5.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ

Οι διάφορες παράμετροι και τα χαρακτηριστικά του ηλεκτρικού οχήματος για το οποίο έγινε η προσομοίωση απεικονίζονται στον πίνακα 5.1.

Μάζα οχήματος m	1400 kg
Αεροδυναμικός συντελεστής C_d	0,3
Μετωπική επιφάνεια A	2,2 m ²
Κλίση δρόμου θ	0 °
Συντελεστής κύλισης f	0,01
Πυκνότητα αέρα ρ	1,2 kg/m ³
Επιτάχυνση της βαρύτητας g	9,81 m/sec ²
Ακτίνα τροχού r	0,31515 m
Μαζική ροπή αδράνειας τροχού J_w	3,23 kg·m ²
Σχέση μετάδοσης διαφορικού i_d	2,5
Βαθμός απόδοσης διαφορικού η_d	0,92
Μαζική ροπή αδράνειας διαφορικού J_d	2,1 kg·m ²
Σχέση μετάδοσης κιβώτιου ταχυτήτων i_g	1,2
Βαθμός απόδοσης κιβώτιου ταχυτήτων η_g	0,95
Μαζική ροπή αδράνειας κιβώτιου ταχυτήτων J_g	1,5 kg·m ²
Μέγιστη ηλεκτρομαγνητική ροπή $T_e \max$	625 N·m
Μέγιστη ηλεκτρομαγνητική ισχύς $P_e \max$	75 kW
Ταχύτητα βάσης ω_{based}	120 rad/sec
Μέγιστη ταχύτητα ω_{\max}	350 rad/sec
Τάση οπλισμού V_a	300 V
Αντίσταση τυλίγματος οπλισμού R_a	0,3 Ω
Μέγιστο ρεύμα οπλισμού I_a	500 A
Τάση διέγερσης V_f	100 V
Αντίσταση τυλίγματος διέγερσης R_f	40 Ω
Μέγιστο ρεύμα διέγερσης I_f	2,5 A
Κοινή αυτεπαγωγή οπλισμού – διέγερσης L_{af}	0,5 H
Μαζική ροπή αδράνειας ηλεκτροκινητήρα J_m	0,621 kg·m ²

Αεροδυναμικός συντελεστής τριβών B_m	0,0141 N·m·sec
Ροπή τριβών T_f	12,3 N·m
Ονομαστική τάση μπαταρίας V_b	350 V
Ονομαστική χωρητικότητα μπαταρίας Q_b	100 A·h
Αρχική κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας SOC	100 %

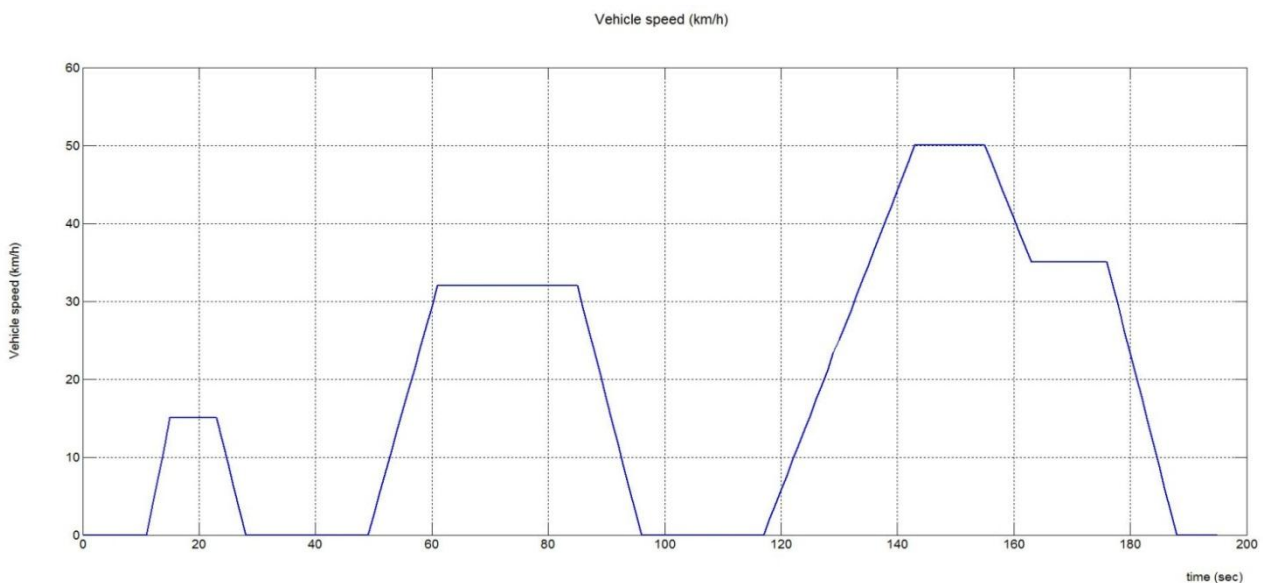
Πίνακας 5.1 Παράμετροι και χαρακτηριστικά του ηλεκτρικού οχήματος.

Η υπόθεση που γίνεται για την προσομοίωση του ηλεκτρικού οχήματος, είναι ότι ο ηλεκτροκινητήρας τίθεται σε λειτουργία μόνο κατά τις περιόδους επιτάχυνσης και σταθερής ταχύτητας. Κατά τις περιόδους επιβράδυνσης, θεωρείται ότι το όχημα φρενάρει και ο ηλεκτροκινητήρας τίθεται εκτός λειτουργίας (δεν καταναλώνει ρεύμα), όπως και στην περίπτωση που το όχημα έχει μηδενική ταχύτητα (ακίνητο όχημα). Συνεπώς, η ισχύς που πρέπει να φτάσει στους τροχούς, υπολογίζεται μόνο για τις περιόδους επιτάχυνσης και σταθερής ταχύτητας του ηλεκτρικού οχήματος.

Η προσομοίωση του μοντέλου του ηλεκτρικού οχήματος, έγινε για δύο κύκλους λειτουργίας. Ο πρώτος κύκλος λειτουργίας είναι ο *ECE* (*Economic Commission of Europe*) και ο δεύτερος κύκλος λειτουργίας είναι ο *UDDS* (*Urban Dynamometer Driving Schedule*).

5.2 ΚΥΚΛΟΣ ΟΔΗΓΗΣΗΣ ECE

Ο κύκλος οδήγησης *ECE* ο οποίος επιλέχθηκε για τον προσδιορισμό της ενεργειακής απόδοσης του ηλεκτρικού οχήματος είναι ένας σχετικά απλός κύκλος οδήγησης (εικόνα 5.1) τα χαρακτηριστικά του οποίου παρουσιάζονται στον πίνακα 5.2.



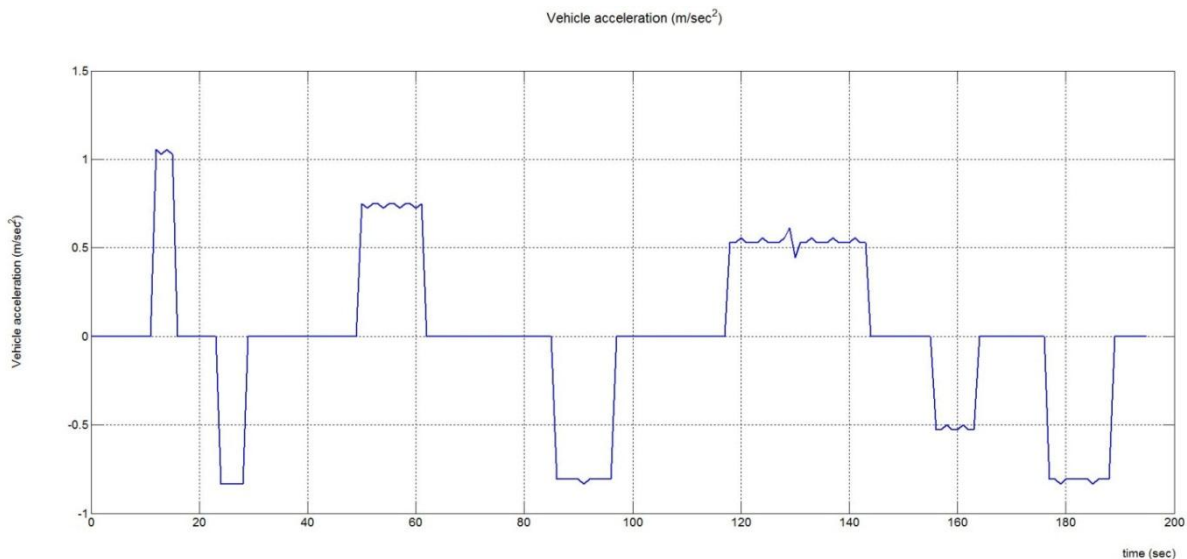
Εικόνα 5.1 Κύκλος οδήγησης *ECE* (*Economic Commission of Europe*).

Χρονική διάρκεια	195 sec
Απόσταση	0,99 km
Μέγιστη ταχύτητα	50 km/h
Μέση ταχύτητα	18,26 km/h
Μέγιστη επιτάχυνση	1,06 m/sec ²
Μέση επιτάχυνση	0,64 m/sec ²
Μέγιστη επιβράδυνση	-0,83 m/sec ²
Μέση επιβράδυνση	-0,75 m/sec ²

Πίνακας 5.2 Χαρακτηριστικά κύκλου οδήγησης ECE.

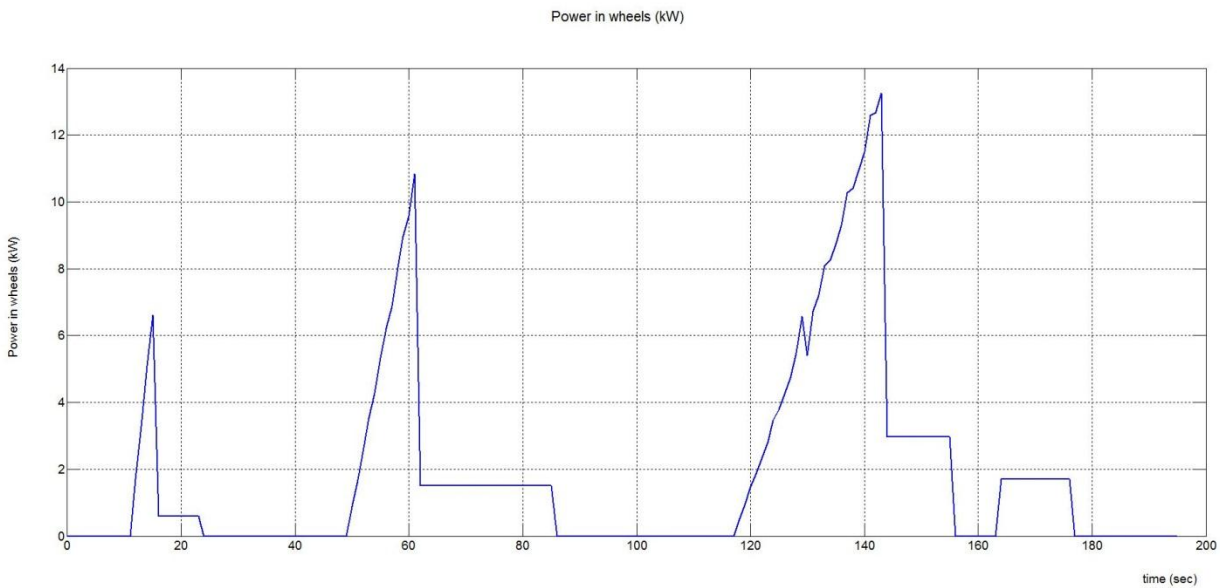
Η μέγιστη ταχύτητα του οχήματος ($u=50$ km/h) παρατηρείται κατά το χρονικό διάστημα $t=143-155$ sec.

Οι επιταχύνσεις και οι επιβραδύνσεις του οχήματος κατά τη διάρκεια του κύκλου οδήγησης απεικονίζονται στην εικόνα 5.2.



Εικόνα 5.2 Επιταχύνσεις και επιβραδύνσεις του οχήματος κατά τη διάρκεια του κύκλου οδήγησης.

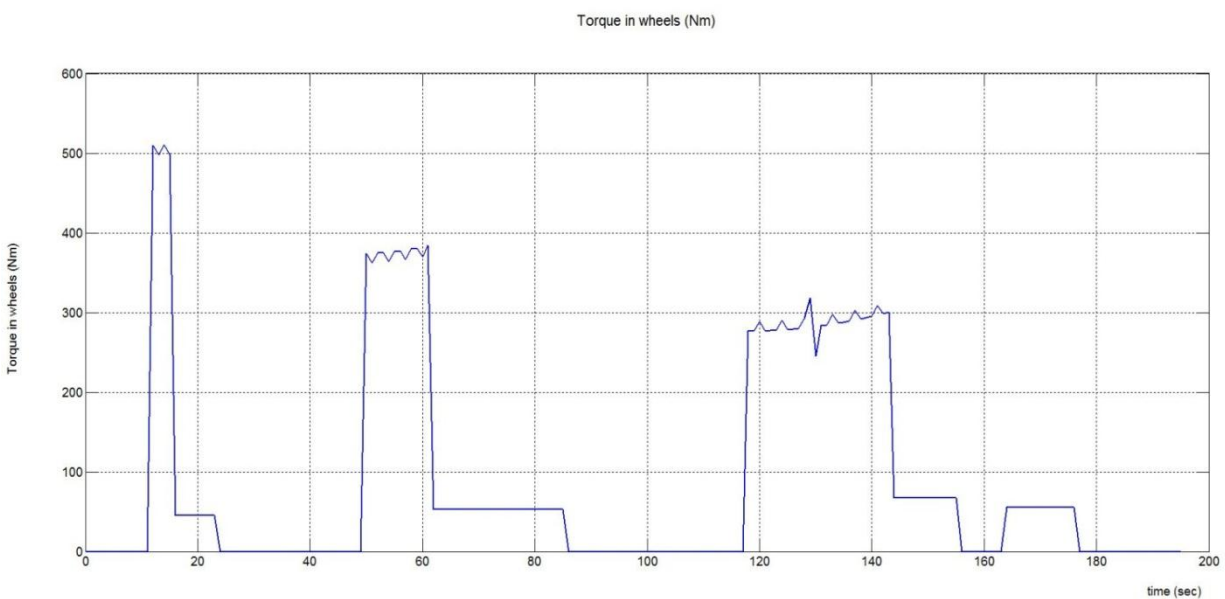
Η ισχύς η οποία θα πρέπει να φτάσει στους τροχούς του οχήματος κατά τη διάρκεια του κύκλου οδήγησης φαίνεται στην εικόνα 5.3.



Εικόνα 5.3 Απαιτούμενη ισχύς στους τροχούς του οχήματος σε kW.

Όπως φαίνεται στην εικόνα 5.3 η μέγιστη ισχύς που απαιτείται στους τροχούς του οχήματος είναι 13,24 kW τη χρονική στιγμή $t=143$ sec.

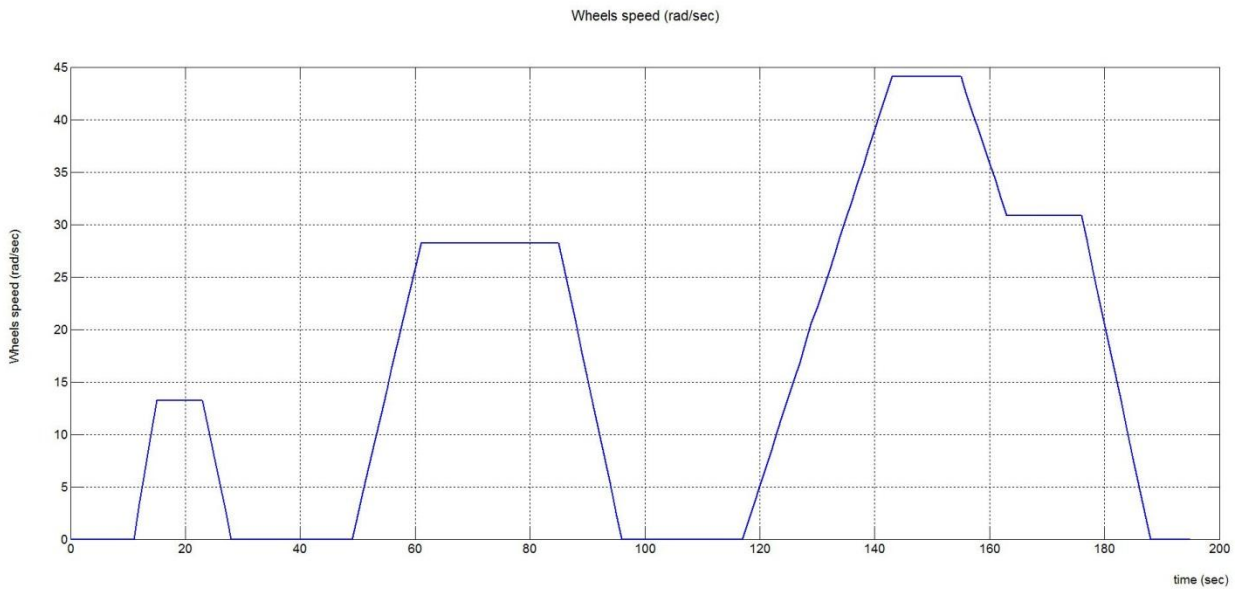
Η ροπή στους τροχούς του οχήματος κατά τη διάρκεια του κύκλου οδήγησης φαίνεται στην εικόνα 5.4.



Εικόνα 5.4 Ροπή στους τροχούς του οχήματος σε Nm.

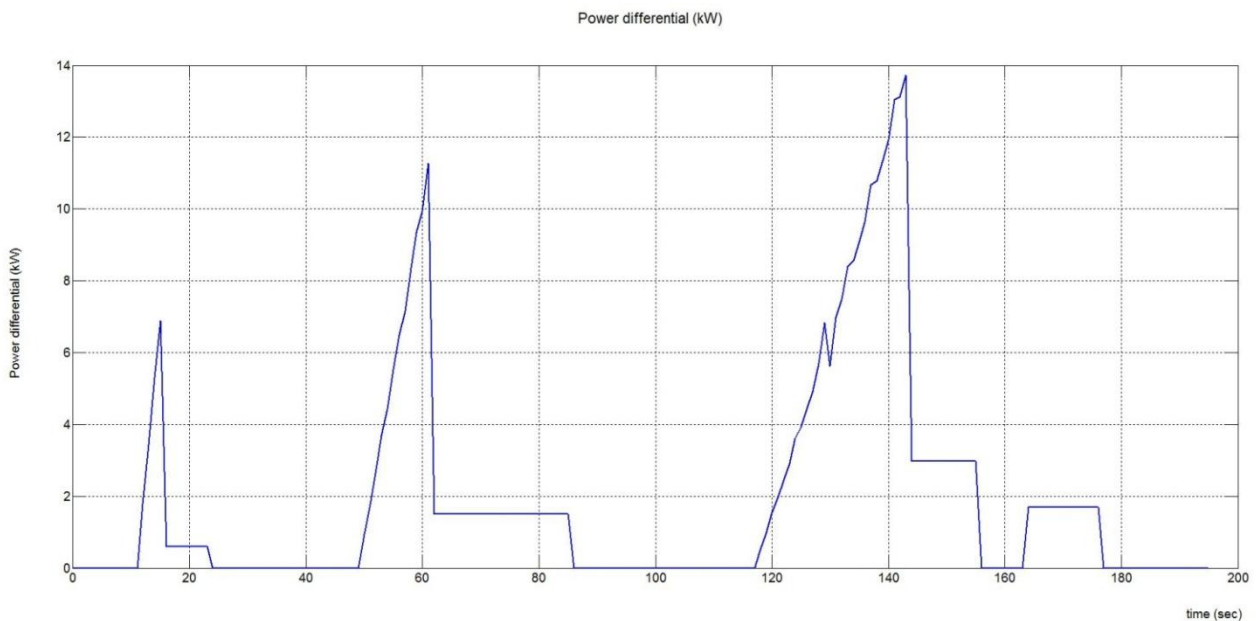
Η μέγιστη ροπή που απαιτείται στους τροχούς του οχήματος είναι 510,42 Nm τη χρονική στιγμή $t=14$ sec.

Η γωνιακή ταχύτητα των τροχών κατά τη διάρκεια του κύκλου οδήγησης απεικονίζεται στην εικόνα 5.5.

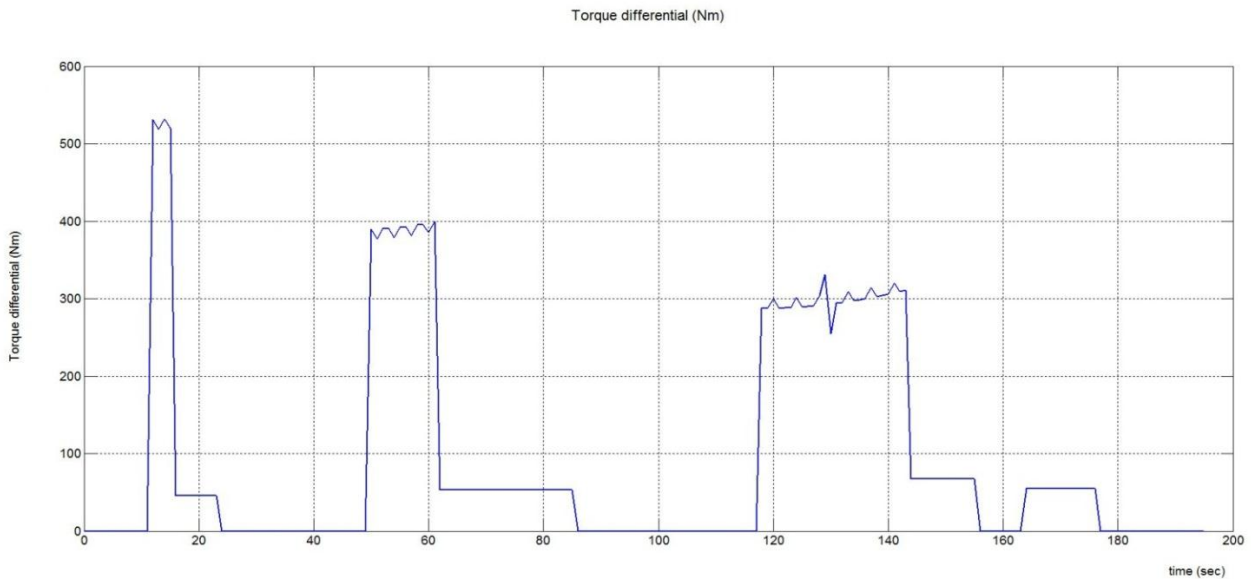


Εικόνα 5.5 Γωνιακή ταχύτητα των τροχών σε rad/sec.

Η ισχύς και η ροπή στην έξοδο του διαφορικού φαίνεται στις εικόνες 5.6 και 5.7 αντίστοιχα.



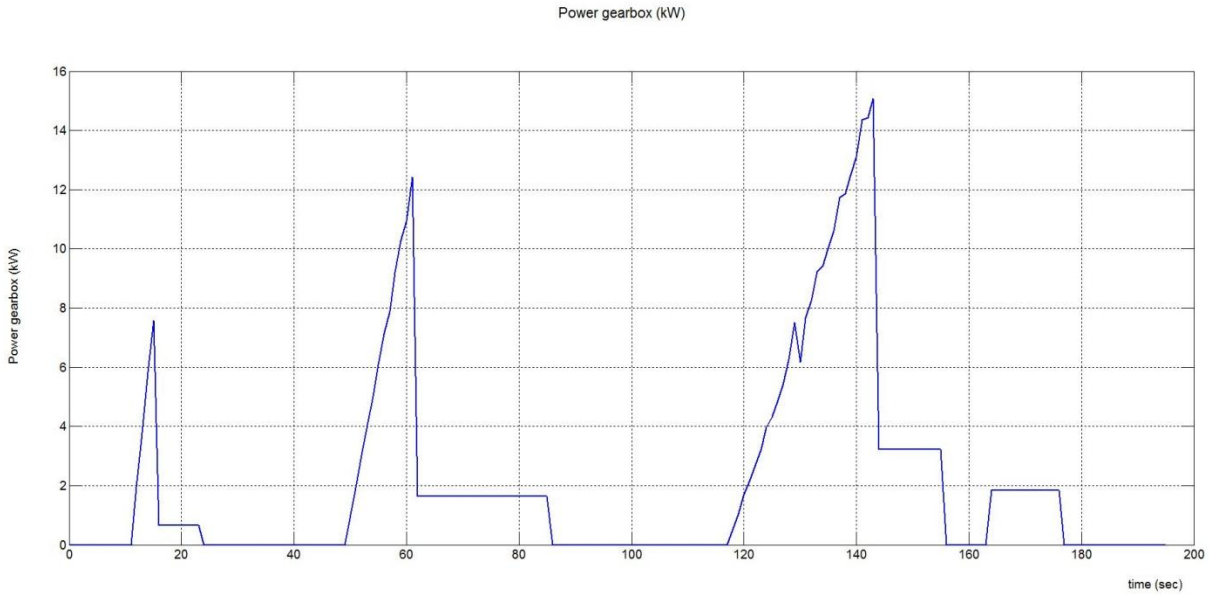
Εικόνα 5.6 Ισχύς στην έξοδο του διαφορικού σε kW.



Εικόνα 5.7 Ροπή στην έξοδο του διαφορικού σε Nm.

Η ισχύς και η ροπή στην έξοδο του διαφορικού είναι μεγαλύτερες από την ισχύ και τη ροπή στους τροχούς, κατά την αδράνεια των τροχών σε περιόδους επιτάχυνσης, ενώ σε περιόδους σταθερής ταχύτητας (π.χ. κατά το χρονικό διάστημα $t=61-85$ sec) είναι ίσες. Έτσι, τη χρονική στιγμή $t=143$ sec όπου η ισχύς στους τροχούς είναι 13,24 kW, η ισχύς στην έξοδο του διαφορικού είναι 13,72 kW. Ακόμη, τη χρονική στιγμή $t=14$ sec όπου η ροπή στους τροχούς είναι 510,42 Nm, η ροπή στην έξοδο του διαφορικού είναι 532,07 Nm. Η γωνιακή ταχύτητα στην έξοδο του διαφορικού είναι ίση με την γωνιακή ταχύτητα των τροχών (εικόνα 5.5).

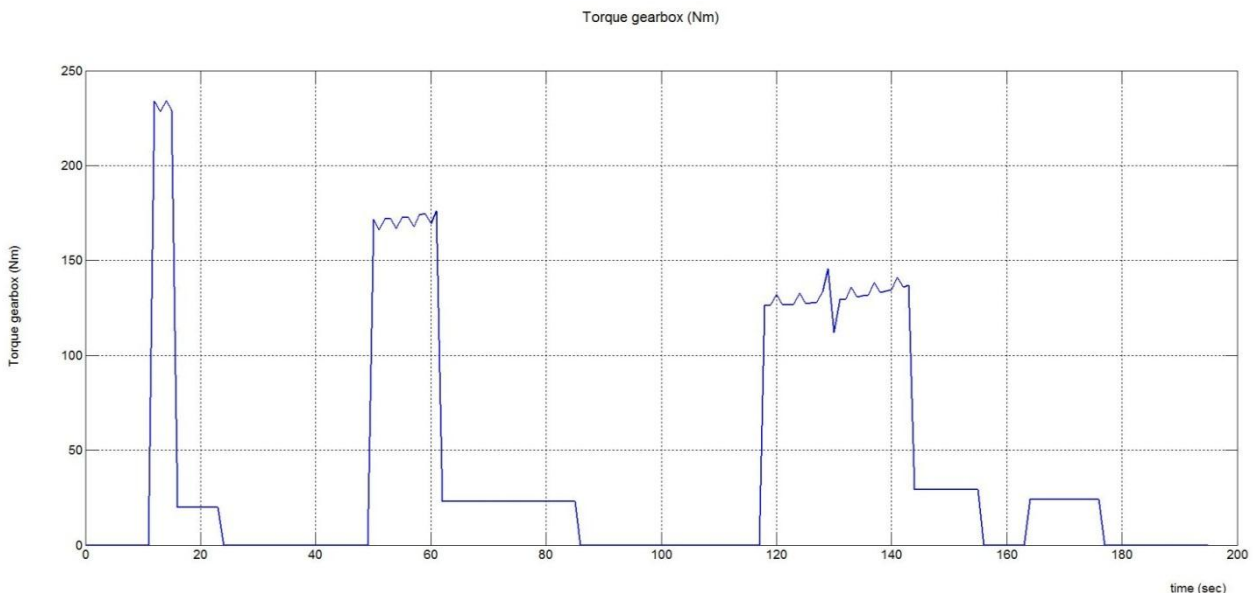
Η ισχύς στην έξοδο του κιβώτιου σταθερής σχέσης μετάδοσης κατά τη διάρκεια του κύκλου οδήγησης φαίνεται στην εικόνα 5.8.



Εικόνα 5.8 Ισχύς στην έξοδο του κιβώτιου σταθερής σχέσης μετάδοσης σε kW.

Λόγω των απωλειών στο διαφορικό η ισχύς που απαιτείται στην έξοδο του κιβώτιου σταθερής σχέσης μετάδοσης είναι μεγαλύτερη από την ισχύ στην έξοδο του διαφορικού και έχει μέγιστη τιμή 15,08 kW τη χρονική στιγμή $t=143$ sec.

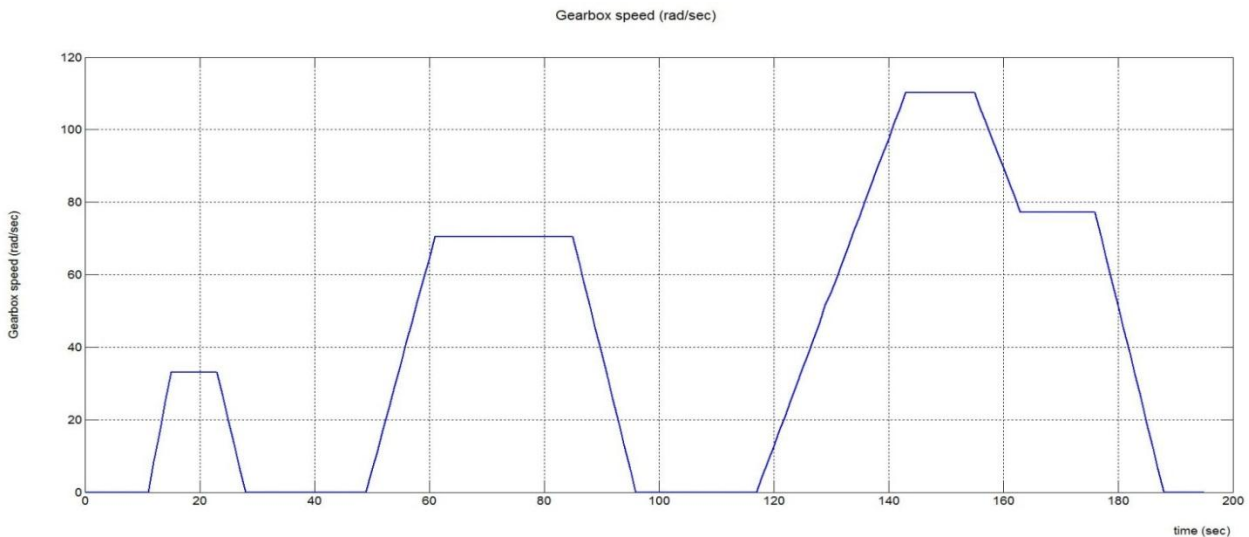
Η ροπή στην έξοδο του κιβώτιου σταθερής σχέσης μετάδοσης κατά τη διάρκεια του κύκλου οδήγησης φαίνεται στην εικόνα 5.9.



Εικόνα 5.9 Ροπή στην έξοδο του κιβώτιου σταθερής σχέσης μετάδοσης σε Nm.

Όπως φαίνεται από την εικόνα 5.9, η ροπή στην έξοδο του κιβώτιου σταθερής σχέσης μετάδοσης είναι μικρότερη από την ροπή στην έξοδο του διαφορικού, λόγω της σχέσης μετάδοσης του διαφορικού ($i_d=2,5$). Έτσι, η μέγιστη ροπή στην έξοδο του κιβώτιου σταθερής σχέσης μετάδοσης περιορίζεται στα 234,39 Nm τη χρονική στιγμή $t=14$ sec.

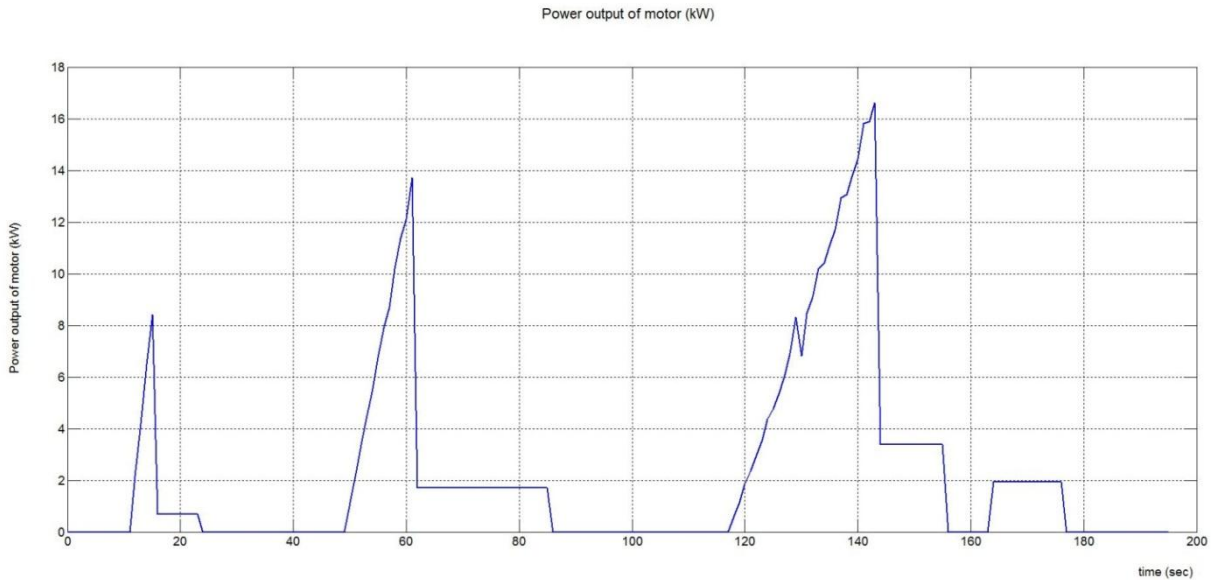
Η γωνιακή ταχύτητα στην έξοδο του κιβώτιου σταθερής σχέσης μετάδοσης κατά τη διάρκεια του κύκλου οδήγησης φαίνεται στην εικόνα 5.10.



Εικόνα 5.10 Γωνιακή ταχύτητα στην έξοδο του κιβώτιου σταθερής σχέσης μετάδοσης σε rad/sec.

Από την εικόνα 5.10 παρατηρείται ότι η γωνιακή ταχύτητα στην έξοδο του κιβώτιου σταθερής σχέσης μετάδοσης είναι μεγαλύτερη από την γωνιακή ταχύτητα στην έξοδο του διαφορικού, λόγω της σχέσης μετάδοσης του διαφορικού ($i_d=2,5$). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, η γωνιακή ταχύτητα στην έξοδο του κιβώτιου σταθερής σχέσης μετάδοσης να έχει μέγιστη τιμή 110,22 rad/sec κατά το χρονικό διάστημα $t=143-145$ sec.

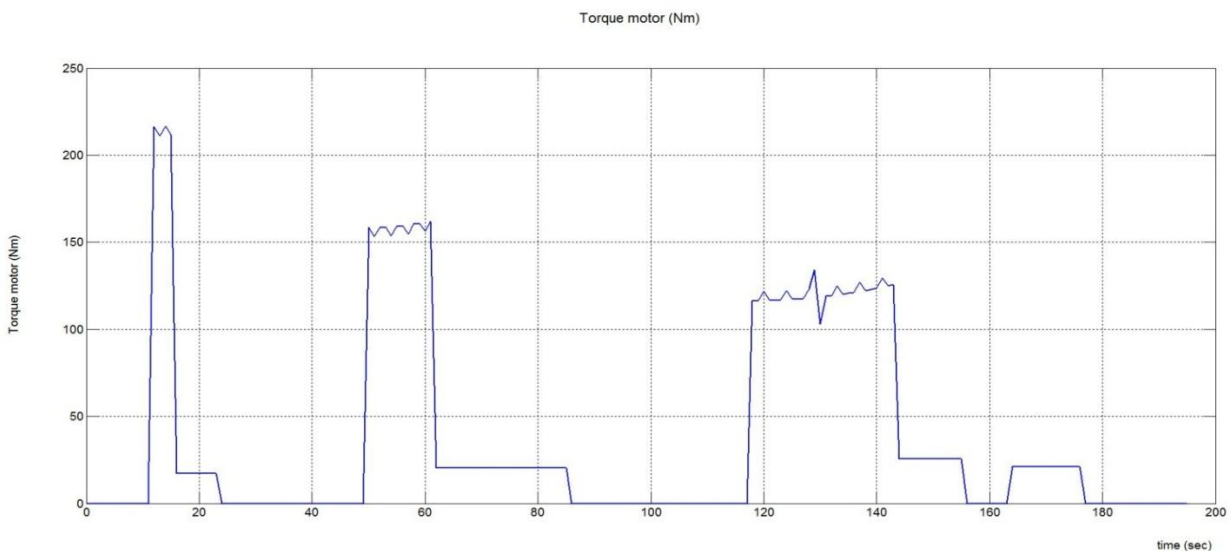
Η ισχύς εξόδου του ηλεκτροκινητήρα κατά τη διάρκεια του κύκλου οδήγησης απεικονίζεται στην εικόνα 5.11.



Εικόνα 5.11 Ισχύς εξόδου του DC ηλεκτροκινητήρα σε kW.

Η ισχύς που απαιτείται στην έξοδο του ηλεκτροκινητήρα είναι μεγαλύτερη από την ισχύ στην έξοδο του κιβώτιου σταθερής σχέσης μετάδοσης, λόγω των απωλειών στο κιβώτιο σταθερής σχέσης μετάδοσης. Έτσι η μέγιστη ισχύς στην έξοδο του ηλεκτροκινητήρα είναι 16,6 kW τη χρονική στιγμή $t=143$ sec.

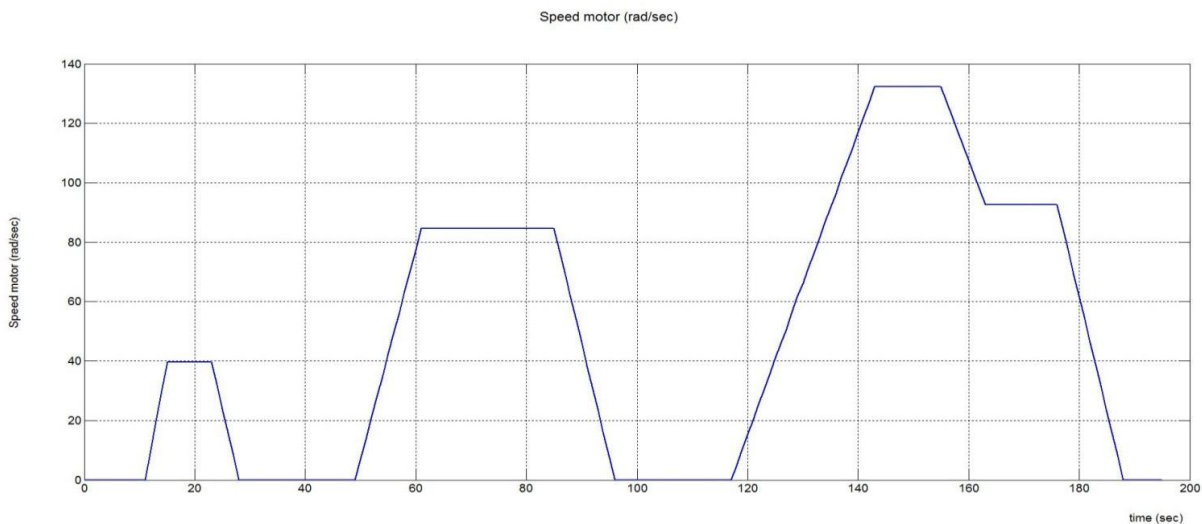
Η ροπή στην έξοδο του ηλεκτροκινητήρα κατά τη διάρκεια του κύκλου οδήγησης φαίνεται στην εικόνα 5.12.



Εικόνα 5.12 Ροπή εξόδου του ηλεκτροκινητήρα σε Nm.

Η ροπή εξόδου του ηλεκτροκινητήρα είναι μικρότερη από την ροπή στην έξοδο του κιβώτιου σταθερής σχέσης μετάδοσης, λόγω της σχέσης μετάδοσης του κιβώτιου σταθερής σχέσης μετάδοσης ($i_g=1,2$). Έτσι, η μέγιστη ροπή στην έξοδο του ηλεκτροκινητήρα είναι 216,63 Nm τη χρονική στιγμή $t=14$ sec, όπως φαίνεται στην εικόνα 5.12.

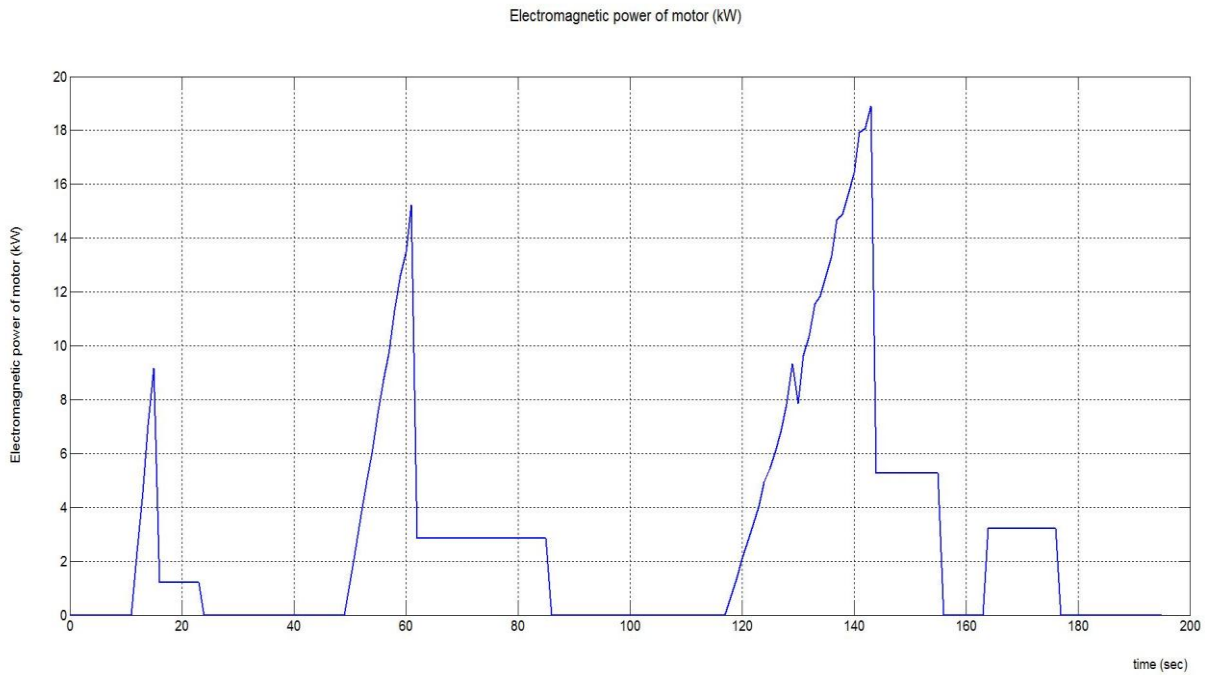
Η γωνιακή ταχύτητα του ηλεκτροκινητήρα κατά τη διάρκεια του κύκλου οδήγησης απεικονίζεται στην εικόνα 5.13.



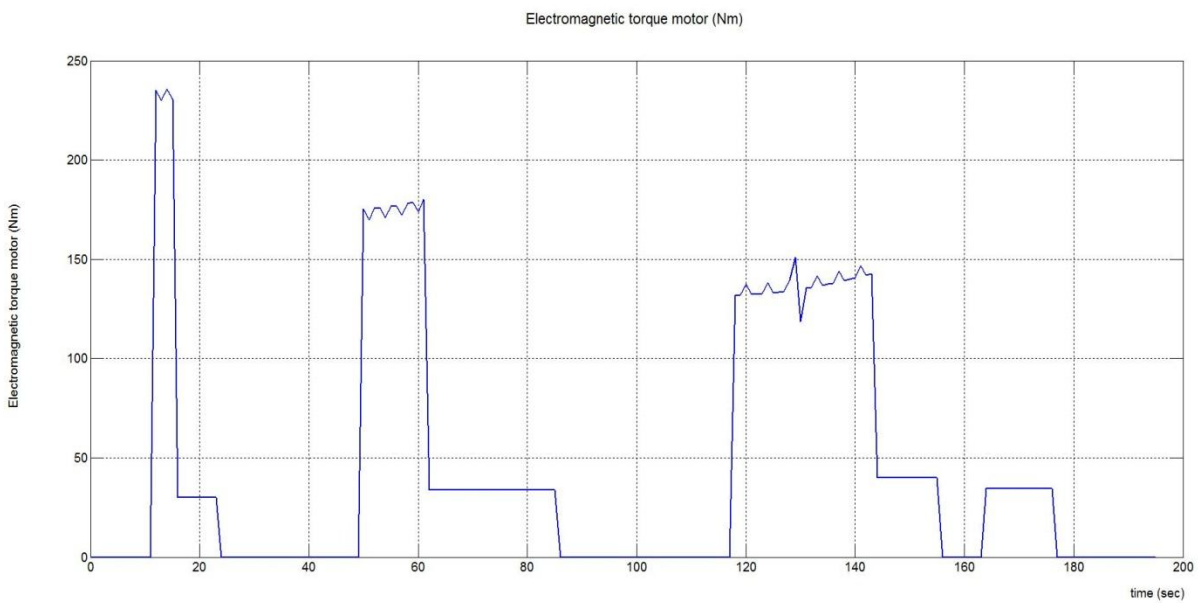
Εικόνα 5.13 Γωνιακή ταχύτητα του DC ηλεκτροκινητήρα σε rad/sec.

Λόγω της σχέσης ($i_g=1,2$) μετάδοσης του κιβωτίου σταθερής σχέσης μετάδοσης η γωνιακή ταχύτητα του ηλεκτροκινητήρα είναι μεγαλύτερη από τη γωνιακή ταχύτητα στην έξοδο του κιβωτίου σταθερής σχέσης μετάδοσης. Έτσι, η μέγιστη ταχύτητα του ηλεκτροκινητήρα είναι 132,27 rad/sec κατά το χρονικό διάστημα $t=143-155$ sec. Επίσης, από την εικόνα 5.13 φαίνεται σε ποια περιοχή λειτουργεί ο ηλεκτροκινητήρας. Για ταχύτητες μικρότερες ή ίσες με 120 rad/sec ο ηλεκτροκινητήρας λειτουργεί στην περιοχή σταθερής ροπής, ενώ για ταχύτητες μεγαλύτερες από 120 rad/sec ο ηλεκτροκινητήρας λειτουργεί στην περιοχή σταθερής ισχύος. Από την εικόνα 5.13 φαίνεται ότι ο ηλεκτροκινητήρας λειτουργεί περισσότερο στην περιοχή σταθερής ροπής, καθώς στην περιοχή σταθερής ισχύος λειτουργεί μόνο κατά το χρονικό διάστημα $t=141-157$ sec.

Στις εικόνες 5.14 και 5.15 απεικονίζεται η ηλεκτρομαγνητική ισχύς και η ηλεκτρομαγνητική ροπή του ηλεκτροκινητήρα αντίστοιχα, κατά τη διάρκεια του κύκλου οδήγησης.



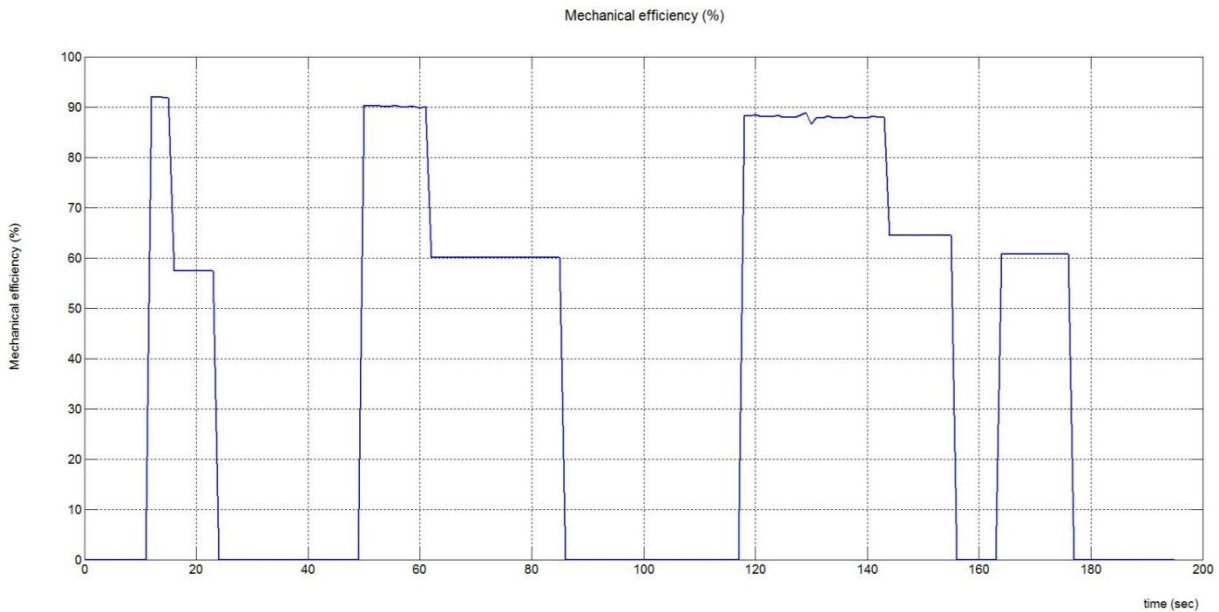
Εικόνα 5.14 Ηλεκτρομαγνητική ισχύς του DC ηλεκτροκινητήρα σε kW.



Εικόνα 5.15 Ηλεκτρομαγνητική ροπή του DC ηλεκτροκινητήρα σε Nm.

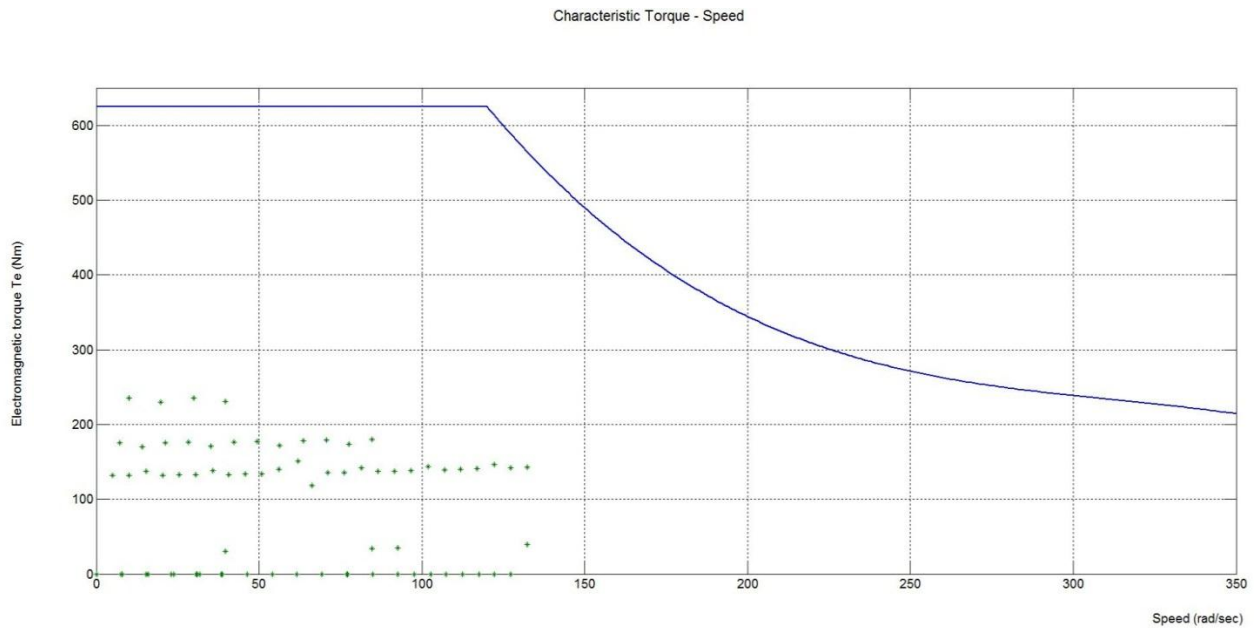
Η ηλεκτρομαγνητική ισχύς και ροπή του ηλεκτροκινητήρα είναι μεγαλύτερες από την ισχύ και την ροπή στην έξοδο του ηλεκτροκινητήρα, κατά την αδράνεια του ηλεκτροκινητήρα και τις τριβές που αυτός έχει στο εσωτερικό του. Έτσι, η μέγιστη ηλεκτρομαγνητική ισχύς του ηλεκτροκινητήρα είναι 18,89 kW τη χρονική στιγμή $t=143$ sec και η μέγιστη ηλεκτρομαγνητική ροπή του ηλεκτροκινητήρα είναι 235,59 Nm τη χρονική στιγμή $t=14$ sec.

Γνωρίζοντας την ισχύ εξόδου και την ηλεκτρομαγνητική ισχύ του ηλεκτροκινητήρα κάθε χρονική στιγμή, προκύπτει ο μηχανικός βαθμός απόδοσης του ηλεκτροκινητήρα (εικόνα 5.16), ο οποίος έχει μέγιστη τιμή 92,05 % τη χρονική στιγμή $t=12$ sec.

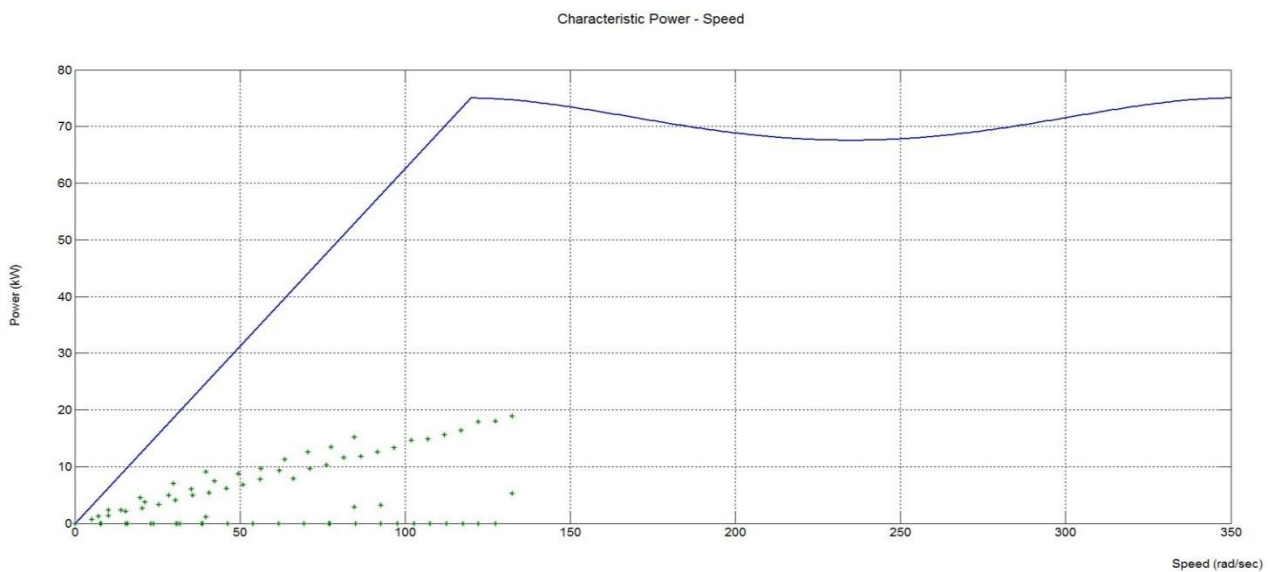


Εικόνα 5.16 Μηχανικός βαθμός απόδοσης του DC ηλεκτροκινητήρα.

Στις εικόνες 5.17 και 5.18 απεικονίζονται τα σημεία λειτουργίας του DC ηλεκτροκινητήρα κατά τη διάρκεια του κύκλου οδήγησης, στην χαρακτηριστική ροπής - ταχύτητας και ισχύος - ταχύτητας αντίστοιχα.

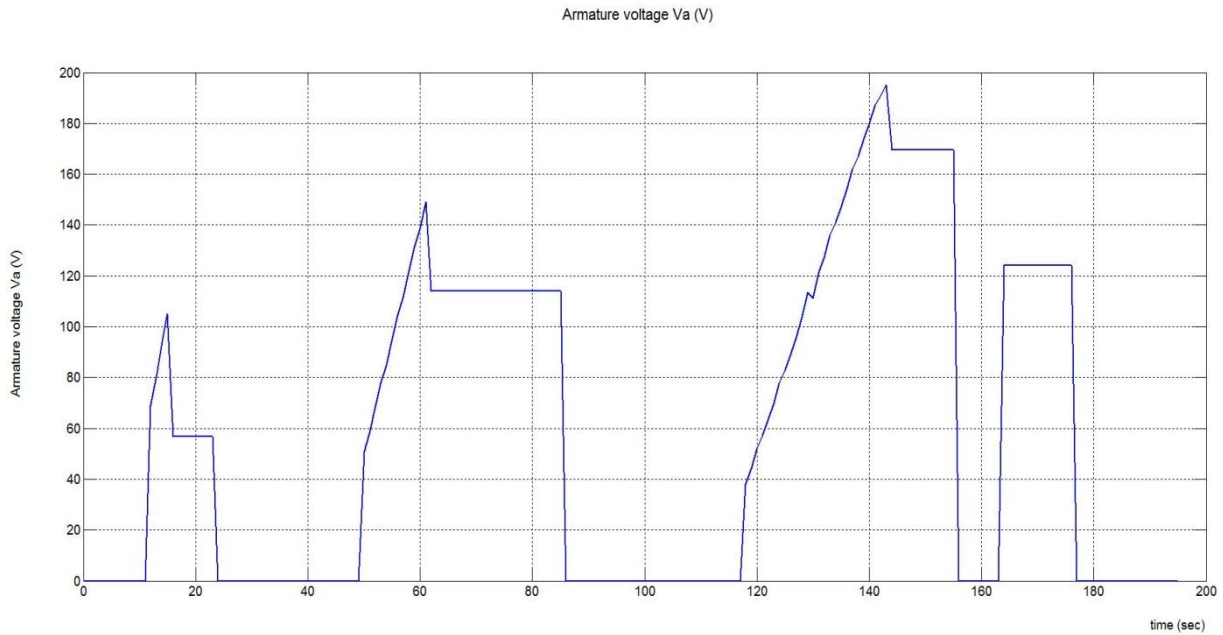


Εικόνα 5.17 Σημεία λειτουργίας του DC ηλεκτροκινητήρα στη χαρακτηριστική ροπής – ταχύτητάς του.

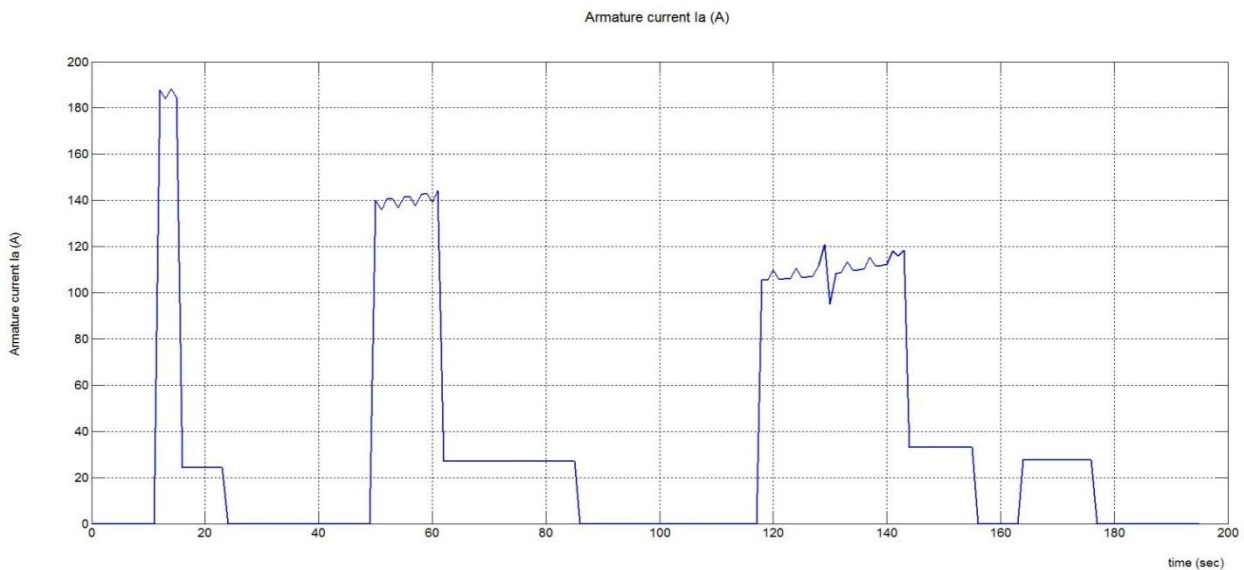


Εικόνα 5.18 Σημεία λειτουργίας του DC ηλεκτροκινητήρα στη χαρακτηριστική ισχύος – ταχύτητάς του.

Στις εικόνες 5.19 και 5.20 φαίνονται η τάση οπισμού V_a και το ρεύμα οπισμού I_a αντίστοιχα, κατά τη διάρκεια του κύκλου οδήγησης.



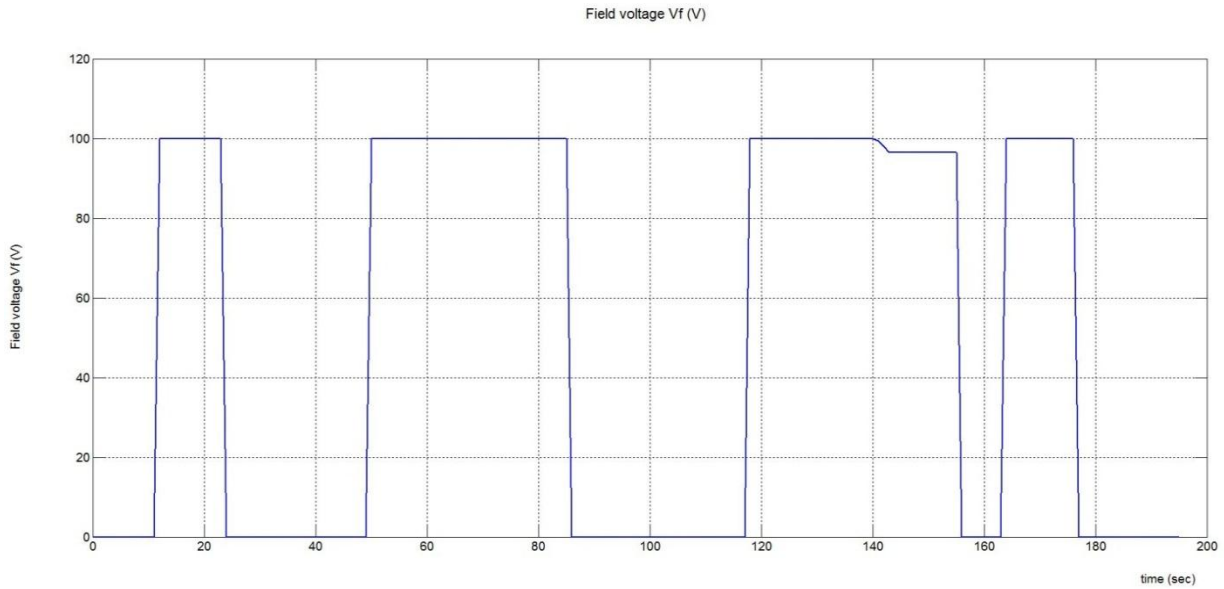
Εικόνα 5.19 Τάση οπλισμού V_a (V).



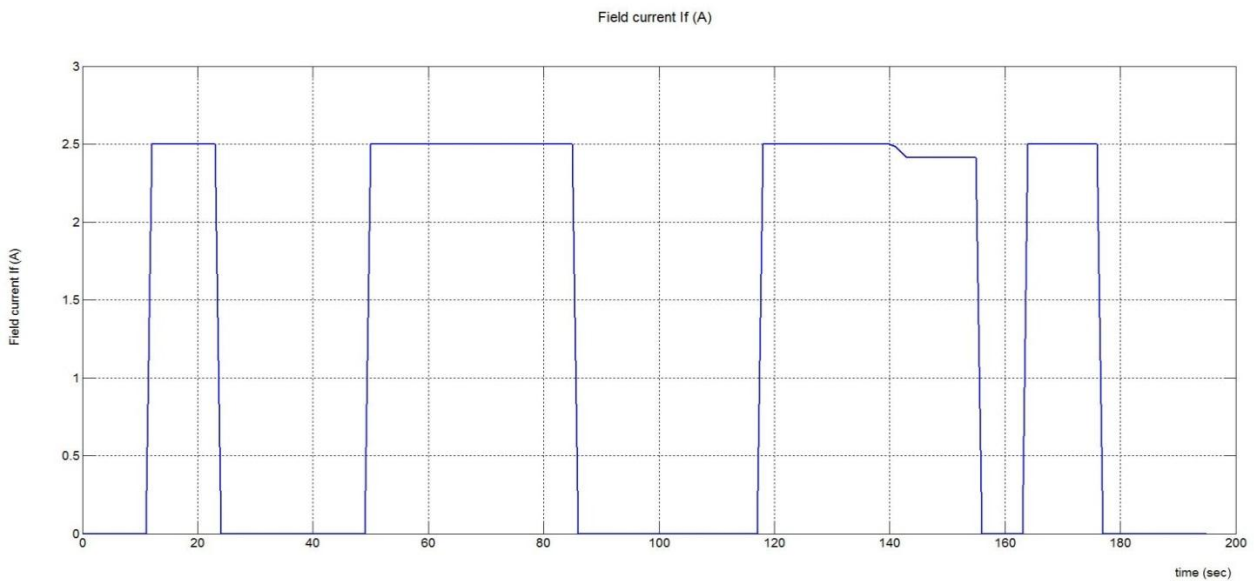
Εικόνα 5.20 Ρεύμα οπλισμού I_a (A).

Όπως φαίνεται από την εικόνα 5.20 η μορφή του ρεύματος οπλισμού είναι παρόμοια με αυτήν της παραγόμενης ροπής του ηλεκτροκινητήρα (εικόνα 5.15) όπως αναμενόταν, καθώς αυτά τα δύο μεγέθη είναι ανάλογα.

Στις εικόνες 5.21 και 5.22 φαίνονται η τάση διέγερσης V_f και το ρεύμα διέγερσης I_f αντίστοιχα, κατά τη διάρκεια του κύκλου οδήγησης.



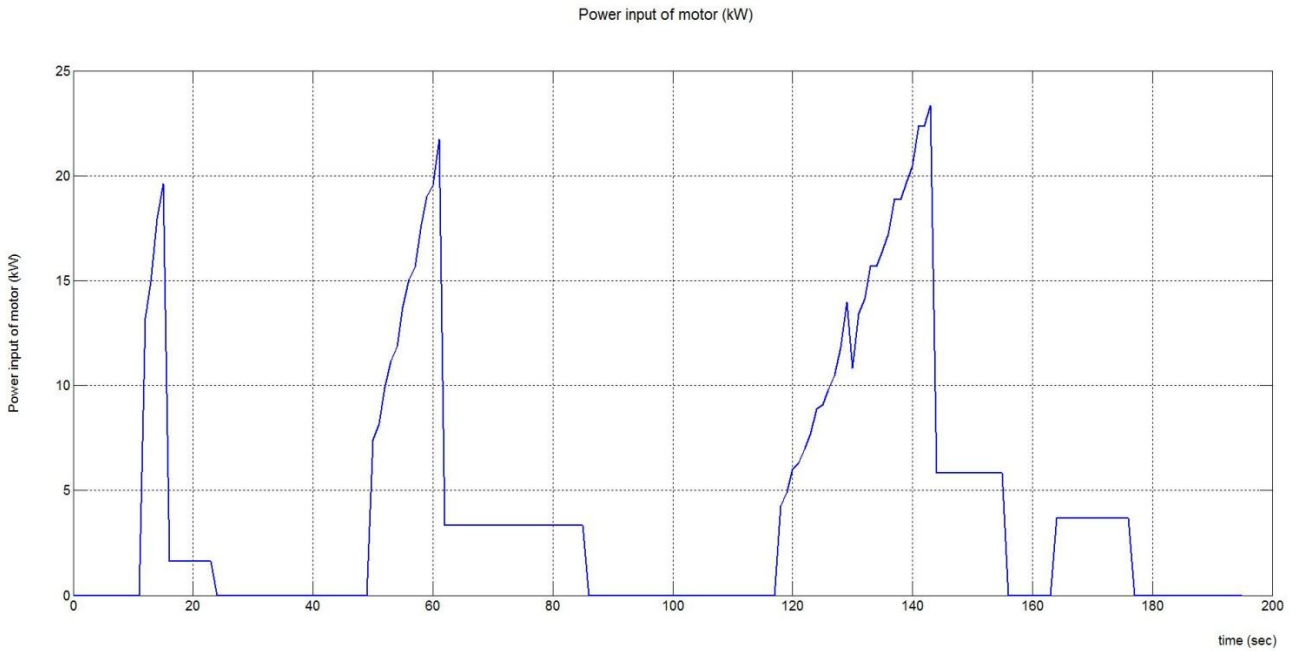
Εικόνα 5.21 Τάση διέγερσης V_f (V).



Εικόνα 5.22 Ρεύμα διέγερσης I_f (A).

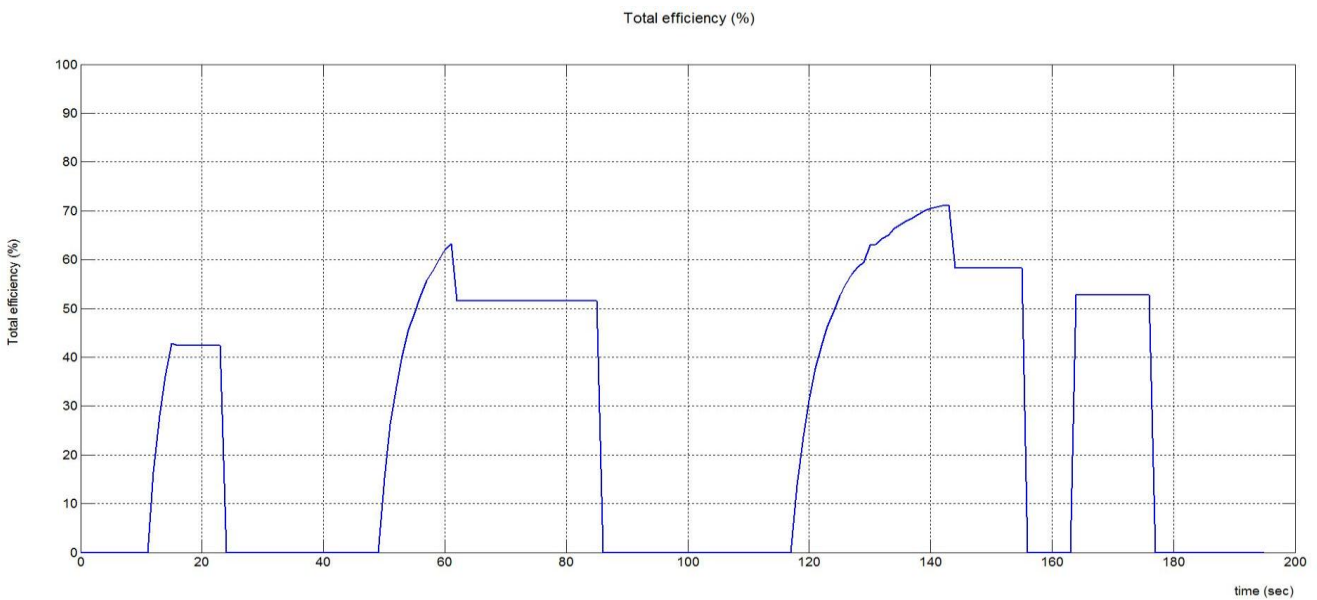
Από τις εικόνες 5.21 και 5.22 μπορεί να παρατηρηθεί ότι για ταχύτητες μεγαλύτερες από την ταχύτητα βάσης η τάση διέγερσης V_f και κατά συνέπεια και το ρεύμα διέγερσης I_f μειώνονται ($t=141-157$ sec), ενώ για ταχύτητες μικρότερες ή ίσες με την ταχύτητα βάσης παραμένουν στην ονομαστική τους τιμή.

Εφόσον είναι γνωστές οι τάσεις οπλισμού V_a και διέγερσης V_f και τα ρεύματα οπλισμού I_a και διέγερσης I_f , προκύπτει η εισερχόμενη ισχύς στον DC ηλεκτροκινητήρα από την μπαταρία, η οποία απεικονίζεται στην εικόνα 5.23.



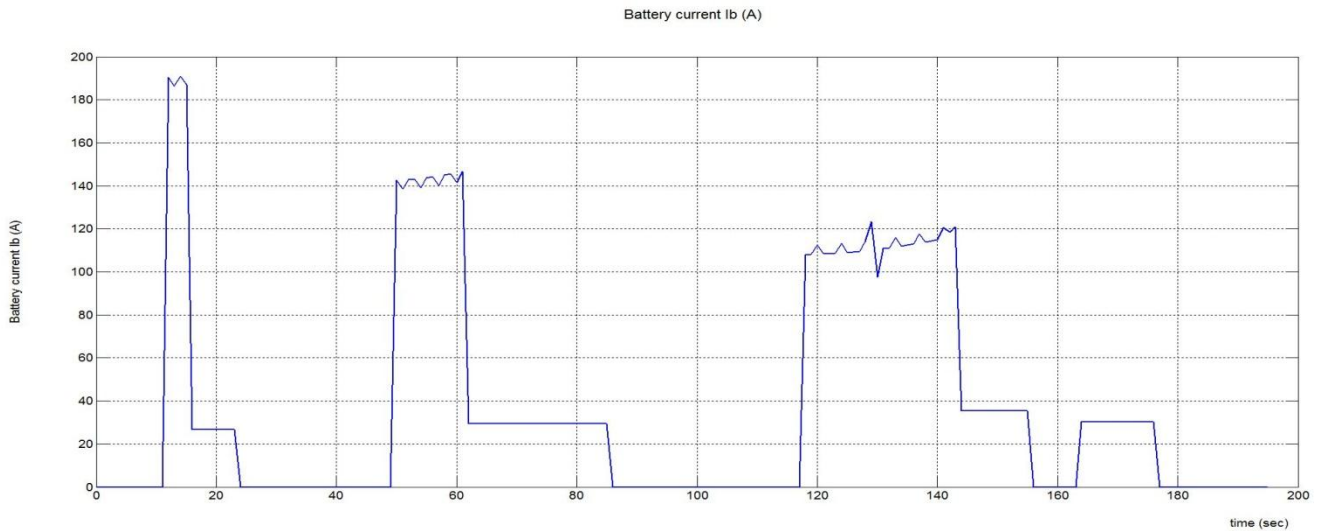
Εικόνα 5.23 Ισχύς εισόδου του DC ηλεκτροκινητήρα σε kW.

Από την ισχύ εξόδου (εικόνα 5.11) και την ισχύ εισόδου (εικόνα 5.23) του ηλεκτροκινητήρα προκύπτει ο συνολικός βαθμός απόδοσης του ηλεκτροκινητήρα, ο οποίος έχει μέγιστη τιμή 71,17 % τη χρονική στιγμή $t=143$ sec (εικόνα 5.24) .



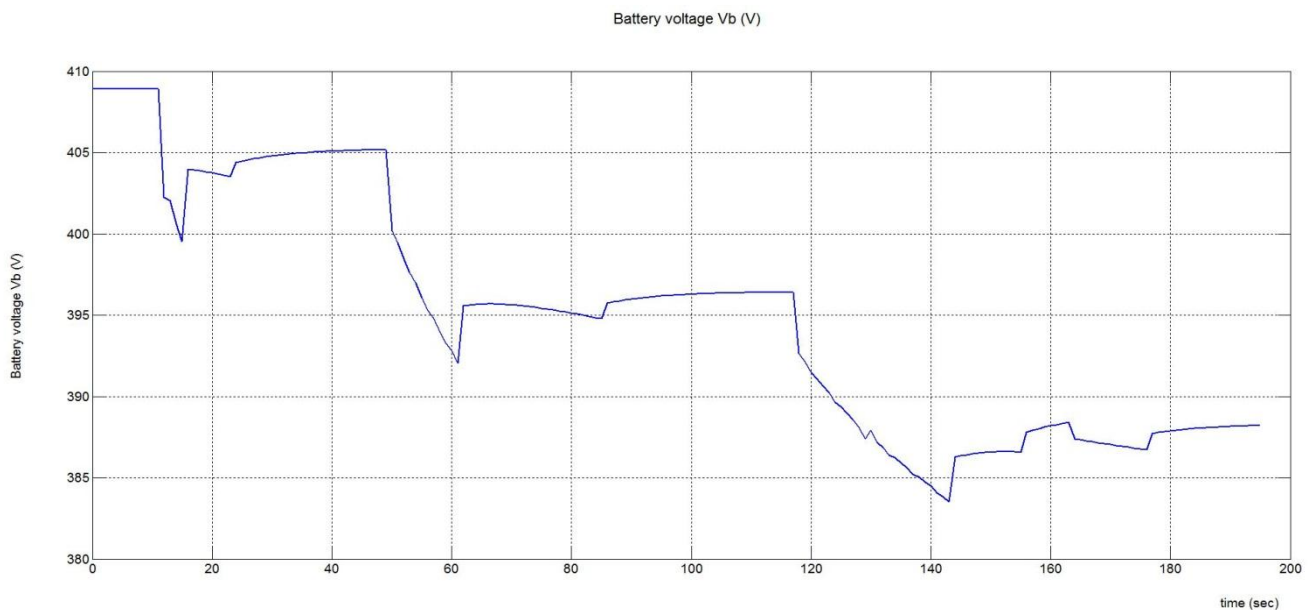
Εικόνα 5.24 Συνολικός βαθμός απόδοσης του DC ηλεκτροκινητήρα.

Το ρεύμα εκφόρτισης I_b της μπαταρίας κατά τη διάρκεια του κύκλου οδήγησης απεικονίζεται στην εικόνα 5.25.



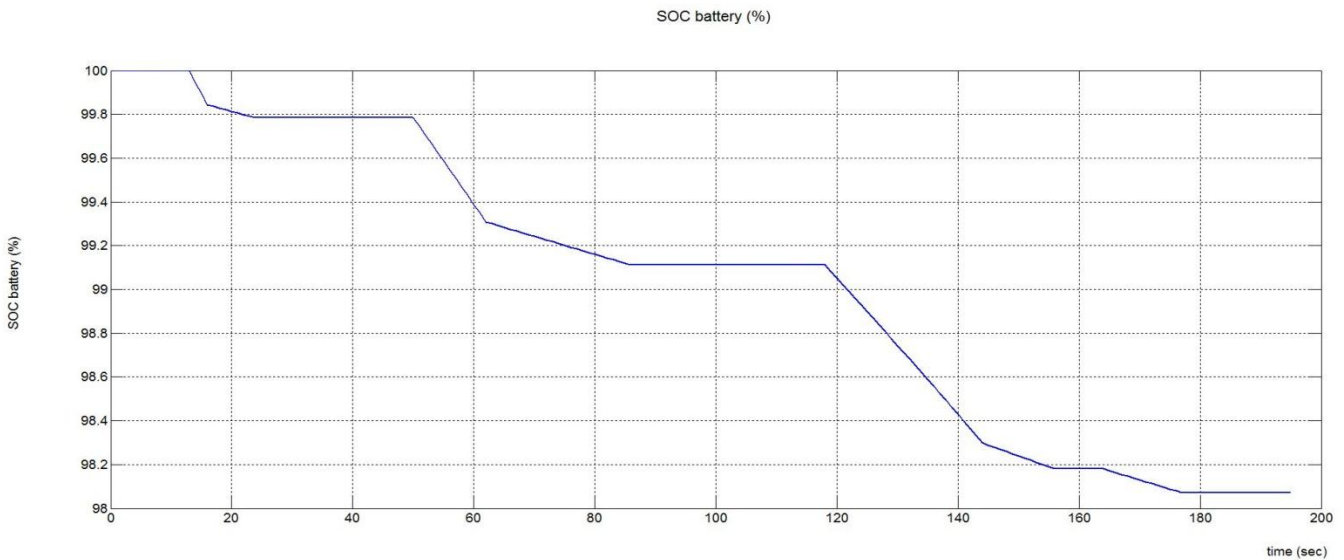
Εικόνα 5.25 Ρεύμα εκφόρτισης I_b (A) της μπαταρίας.

Η μεταβολή της τάσης V_b της μπαταρίας, σύμφωνα με το ρεύμα εκφόρτισης της I_b και την κατάσταση φόρτισής της SOC κατά τη διάρκεια του κύκλου οδήγησης, απεικονίζεται στην εικόνα 5.26.



Εικόνα 5.26 Τάση V_b (V) της μπαταρίας.

Στην εικόνα 5.27 φαίνεται η μείωση της κατάστασης φόρτισης SOC της μπαταρίας κατά τη διάρκεια του κύκλου οδήγησης.



Εικόνα 5.27 Κατάσταση φόρτισης SOC της μπαταρίας.

Από την εικόνα 5.27 παρατηρούμε ότι από αρχική κατάσταση φόρτισης 100 % (μπαταρία πλήρως φορτισμένη) για την κάλυψη 0,99 km, η κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας έπεσε στο 98,07 %.

Η μέση ισχύς στους τροχούς του οχήματος κατά τη διάρκεια του κύκλου οδήγησης είναι:

$$P_{w \text{ average}} = 1,825 \text{ (kW)}$$

Η χρονική διάρκεια του κύκλου οδήγησης είναι:

$$t = 195 \text{ (sec)}$$

Η συνολική ενέργεια που χρησιμοποιήθηκε για την κίνηση του ηλεκτρικού οχήματος είναι:

$$E_w = P_{w \text{ average}} \cdot t = 1,825 \cdot 195 = 355,875 \text{ (kJ)}$$

Η μέση ισχύς που έδωσε η μπαταρία κατά τη διάρκεια του κύκλου οδήγησης είναι:

$$P_{b \text{ average}} = 4,065 \text{ (kW)}$$

Η συνολική ενέργεια με την οποία τροφοδοτήθηκε ο DC ηλεκτροκινητήρας από την μπαταρία κατά τη διάρκεια του κύκλου λειτουργίας είναι:

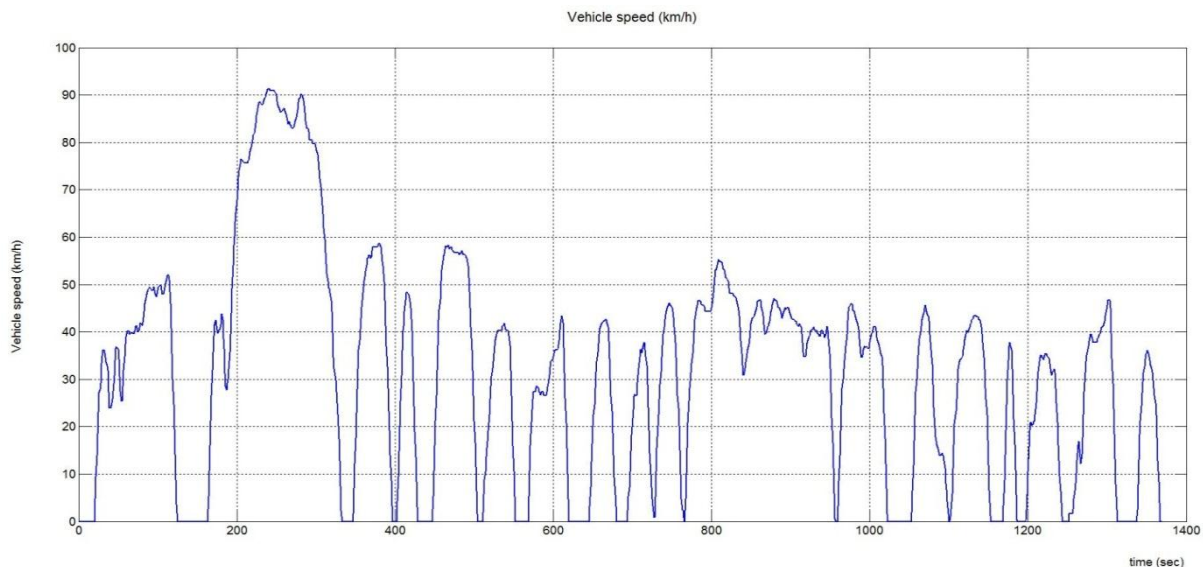
$$E_b = P_{b \text{ average}} \cdot t = 4,065 \cdot 195 = 792,675 \text{ (kJ)}$$

Συνεπώς, ο συνολικός βαθμός απόδοσης του ηλεκτρικού οχήματος γι' αυτόν τον κύκλο οδήγησης είναι:

$$\eta_{total} = \frac{E_w}{E_b} \cdot 100 \% = \frac{355,875}{792,675} \cdot 100 \% = 44.9 \%$$

5.2 ΚΥΚΛΟΣ ΟΔΗΓΗΣΗΣ UDDS

Ο δεύτερος κύκλος οδήγησης ο οποίος επιλέχθηκε για τον προσδιορισμό της ενεργειακής απόδοσης του ηλεκτρικού οχήματος είναι ο *UDDS* (εικόνα 5.28) τα χαρακτηριστικά του οποίου παρουσιάζονται στον πίνακα 5.3.



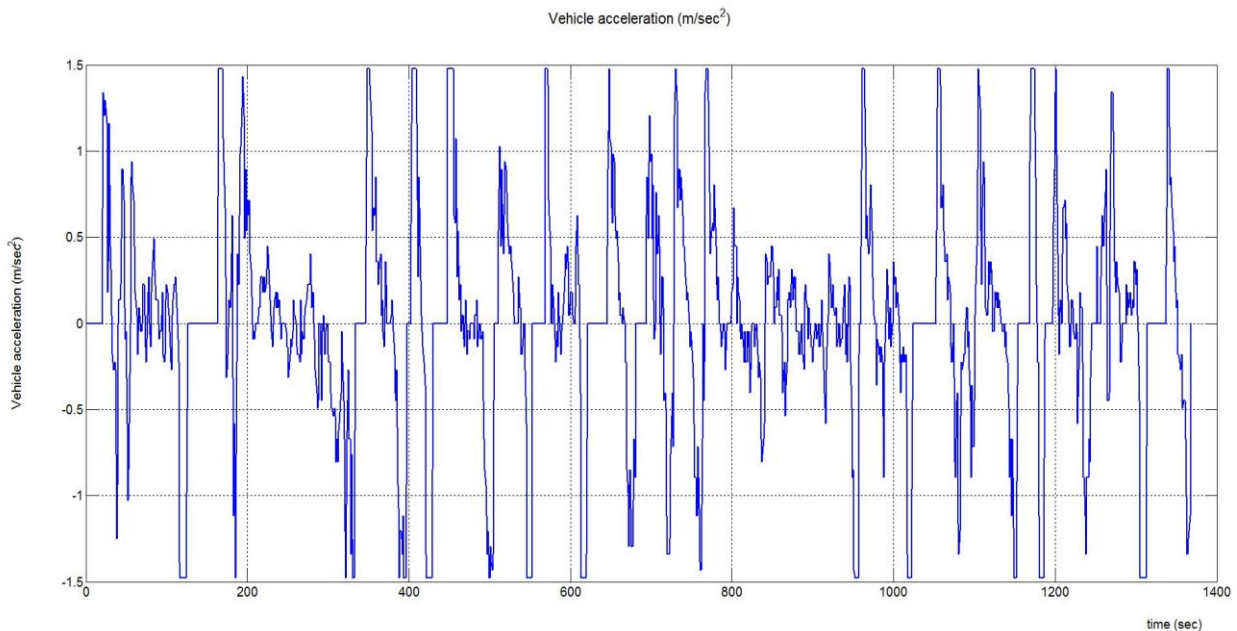
Εικόνα 5.28 Κύκλος οδήγησης *UDDS* (*Urban Dynamometer Driving Schedule*).

Χρονική διάρκεια	1396 sec
Απόσταση	11,99 km
Μέγιστη ταχύτητα	91,25 km/h
Μέση ταχύτητα	31,51 km/h
Μέγιστη επιτάχυνση	1,48 m/sec ²
Μέση επιτάχυνση	0,5 m/sec ²
Μέγιστη επιβράδυνση	-1,48 m/sec ²
Μέση επιβράδυνση	-0,58 m/sec ²

Πίνακας 5.3 Χαρακτηριστικά κύκλου οδήγησης UDDS.

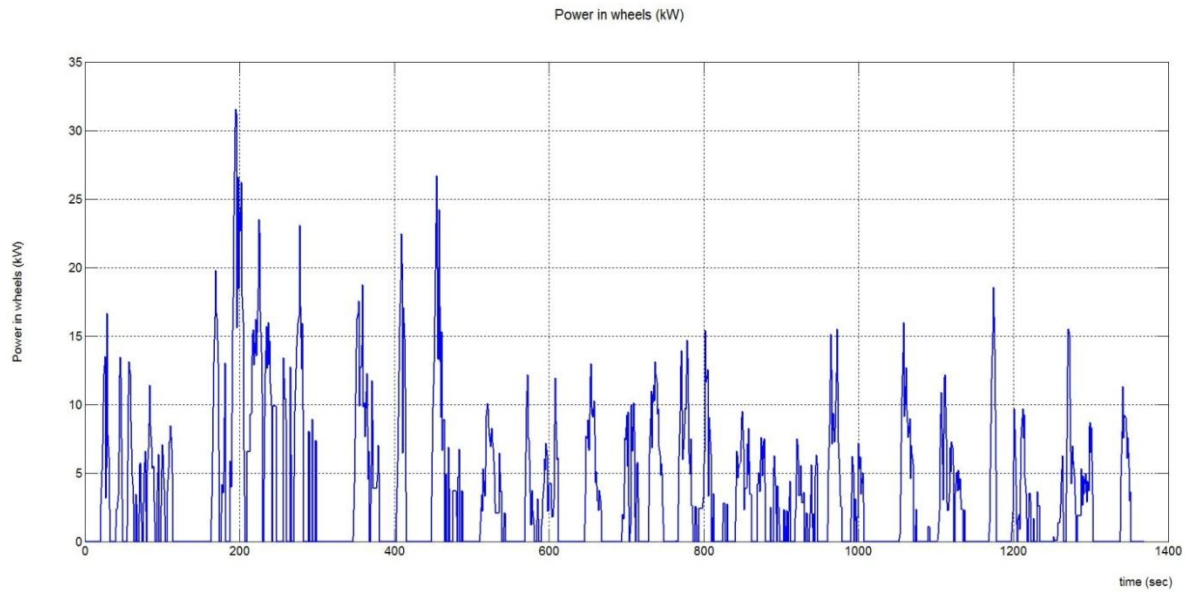
Η μέγιστη ταχύτητα του οχήματος ($u=91,25$ km/h) παρατηρείται τη χρονική στιγμή $t=240$ sec.

Οι επιταχύνσεις και οι επιβραδύνσεις του οχήματος κατά τη διάρκεια του κύκλου οδήγησης απεικονίζονται στην εικόνα 5.29.



Εικόνα 5.29 Επιταχύνσεις και επιβραδύνσεις του οχήματος κατά τη διάρκεια του κύκλου οδήγησης.

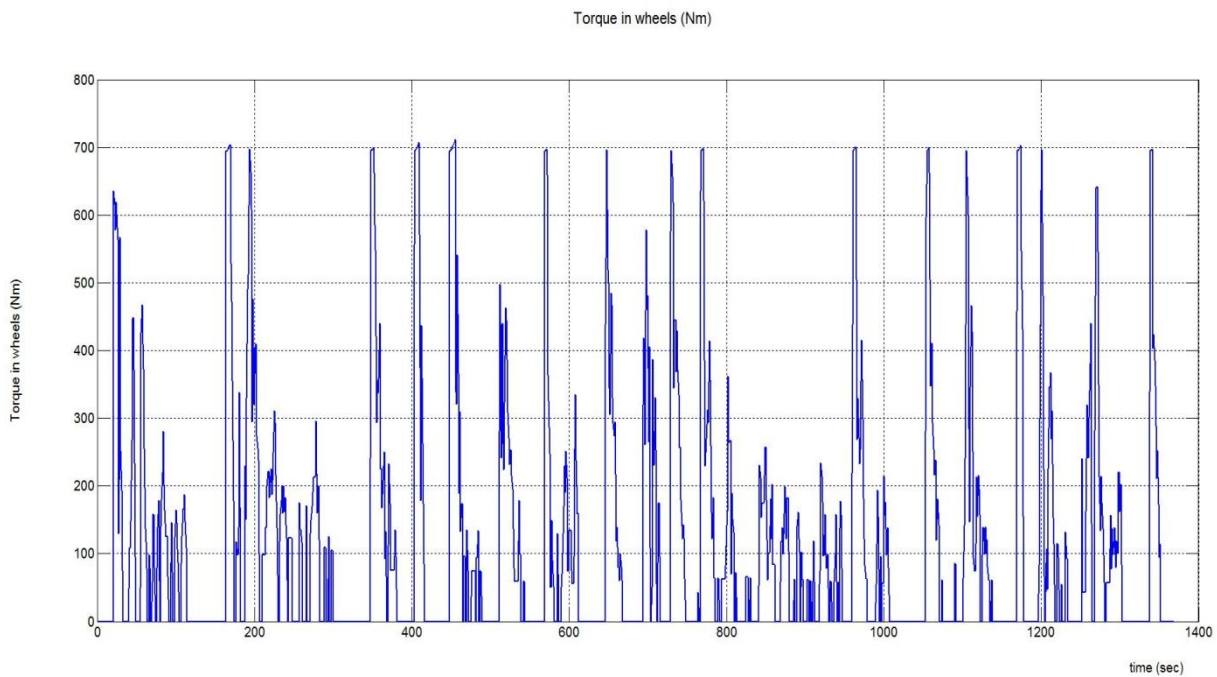
Η ισχύς η οποία θα πρέπει να φτάσει στους τροχούς του οχήματος κατά τη διάρκεια του κύκλου οδήγησης φαίνεται στην εικόνα 5.30.



Εικόνα 5.30 Απαιτούμενη ισχύς στους τροχούς του οχήματος σε kW.

Όπως φαίνεται στην εικόνα 5.30 η μέγιστη ισχύς που απαιτείται στους τροχούς του οχήματος είναι 31,53 kW τη χρονική στιγμή $t=195$ sec.

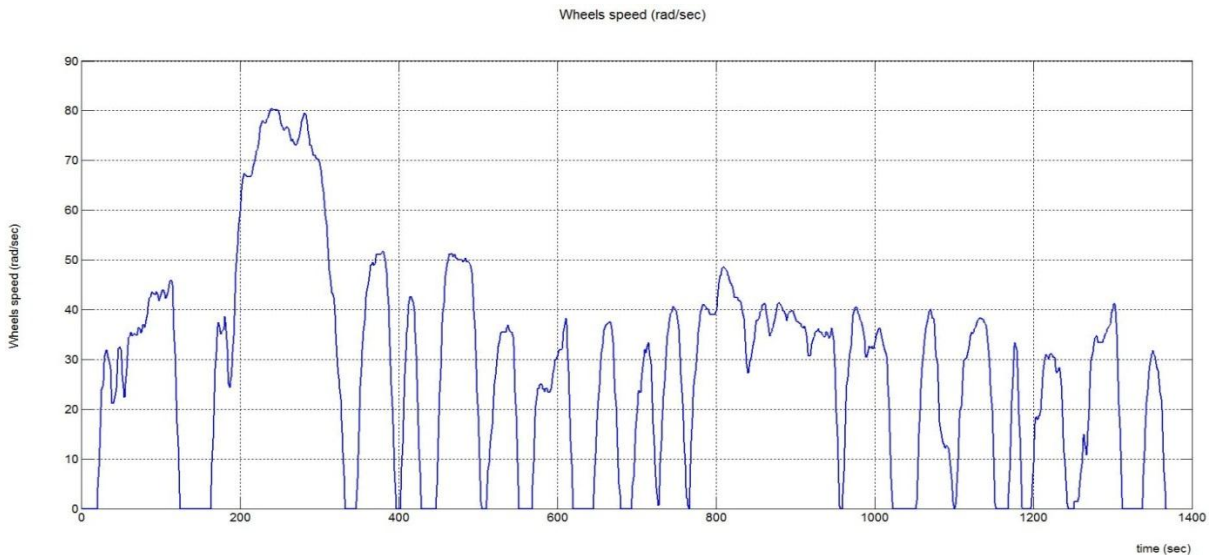
Η ροπή στους τροχούς του οχήματος κατά τη διάρκεια του κύκλου οδήγησης φαίνεται στην εικόνα 5.31.



Εικόνα 5.31 Ροπή στους τροχούς του οχήματος σε Nm.

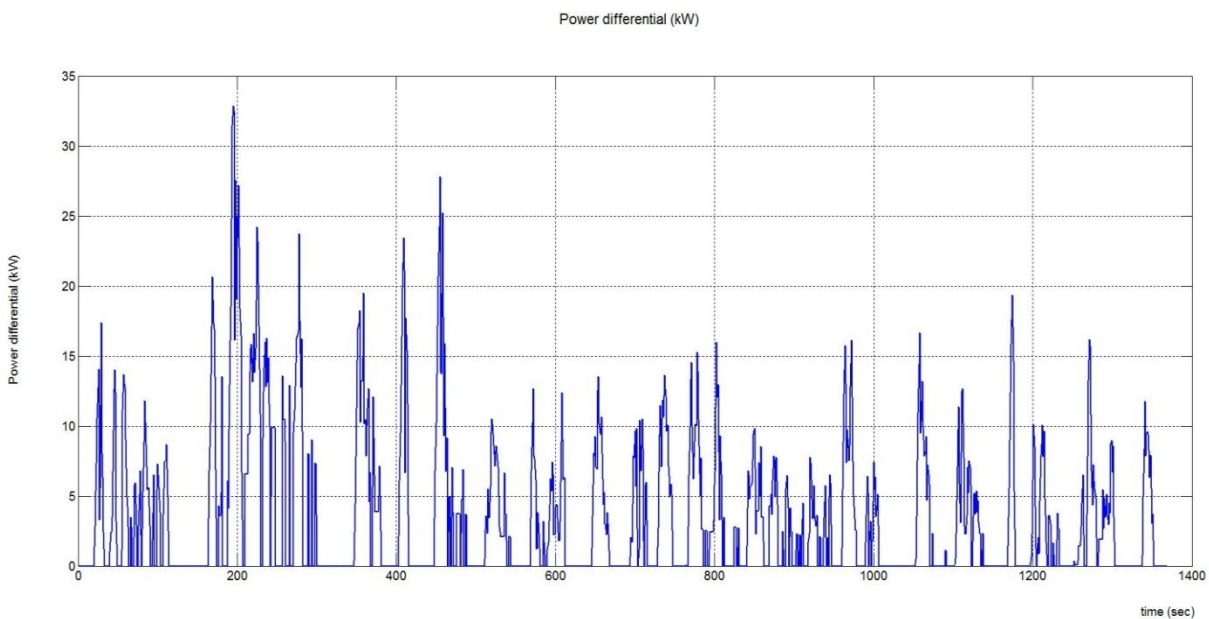
Η μέγιστη ροπή που απαιτείται στους τροχούς του οχήματος είναι 711,83 Nm τη χρονική στιγμή $t=455$ sec. Επίσης, παρατηρείται ότι το προφίλ της ροπής στους τροχούς του οχήματος μοιάζει πολύ με το προφίλ της επιτάχυνσης του οχήματος. Αυτό συμβαίνει, διότι η μεγαλύτερη αντίσταση του οχήματος κατά τη διάρκεια του κύκλου οδήγησης είναι η αντίσταση λόγω αδράνειας, λόγω των συχνών επιταχύνσεων – επιβραδύνσεων του οχήματος.

Η γωνιακή ταχύτητα των τροχών κατά τη διάρκεια του κύκλου οδήγησης απεικονίζεται στην εικόνα 5.32.

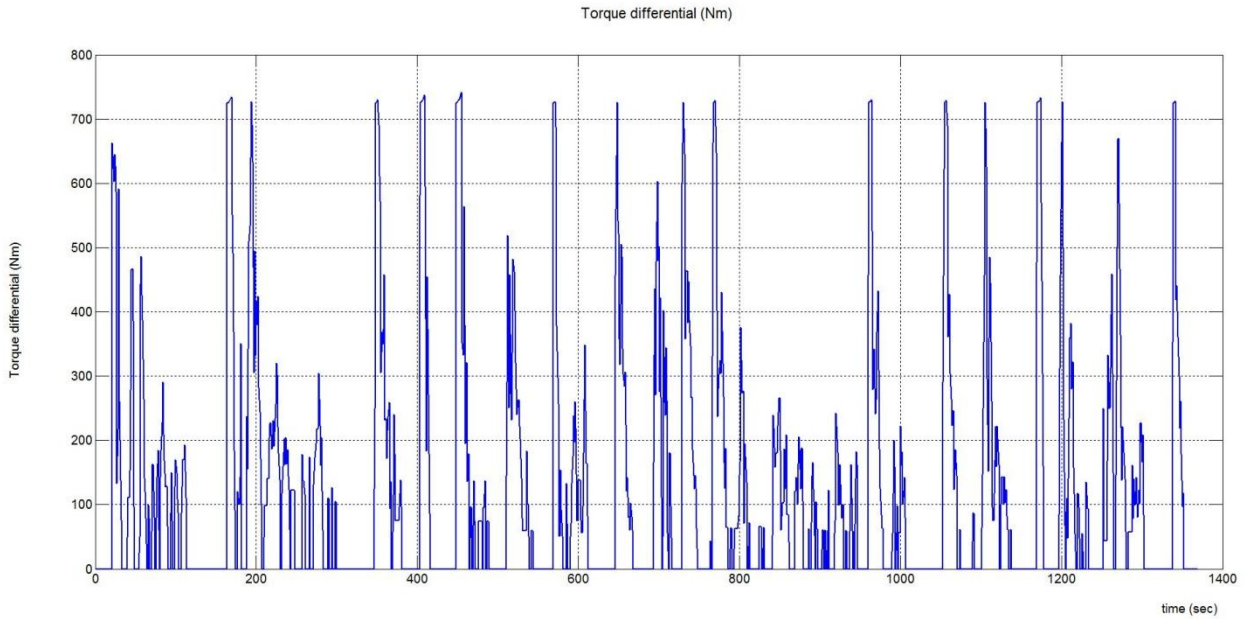


Εικόνα 5.32 Γωνιακή ταχύτητα των τροχών σε rad/sec.

Η ισχύς και η ροπή στην έξοδο του διαφορικού φαίνεται στις εικόνες 5.33 και 5.34 αντίστοιχα.



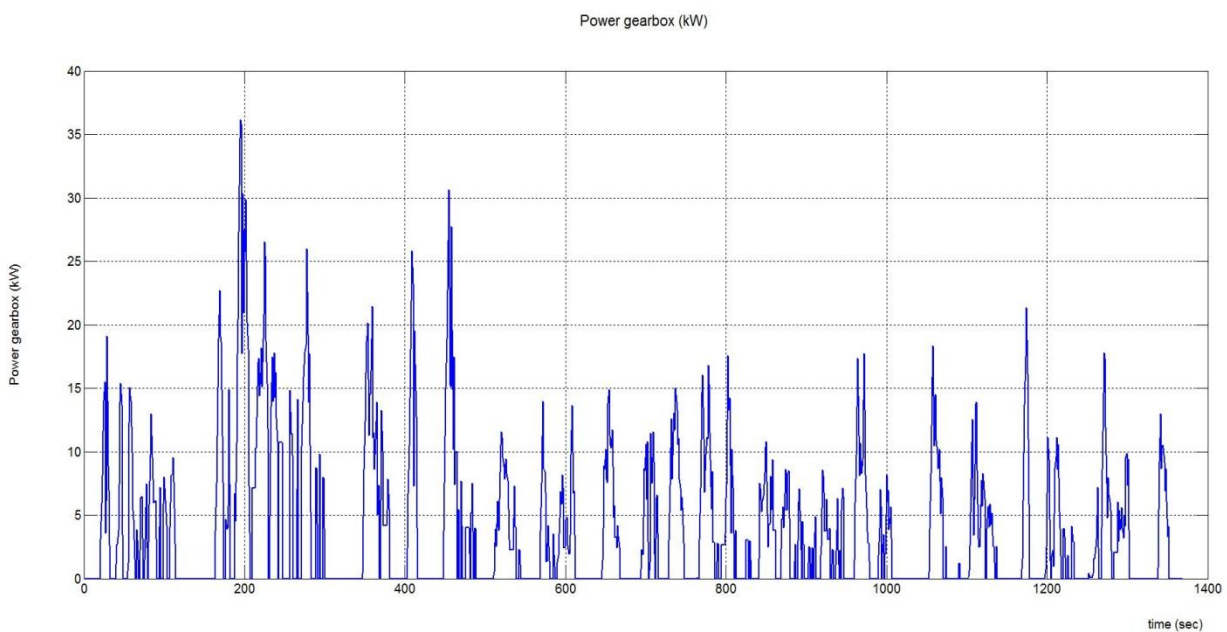
Εικόνα 5.33 Ισχύς στην έξοδο του διαφορικού σε kW.



Εικόνα 5.34 Ροπή στην έξοδο του διαφορικού σε Nm.

Η ισχύς και η ροπή στην έξοδο του διαφορικού είναι μεγαλύτερες από την ισχύ και τη ροπή στους τροχούς, κατά την αδράνεια των τροχών σε περιόδους επιτάχυνσης, ενώ σε περιόδους σταθερής ταχύτητας είναι ίσες. Έτσι, τη χρονική στιγμή $t=195$ sec όπου η ισχύς στους τροχούς είναι 31,53 kW, η ισχύς στην έξοδο του διαφορικού είναι 32,84 kW. Ακόμη, τη χρονική στιγμή $t=455$ sec όπου η ροπή στους τροχούς είναι 711,83 Nm, η ροπή στην έξοδο του διαφορικού είναι 742,08 Nm. Η γωνιακή ταχύτητα στην έξοδο του διαφορικού είναι ίση με την γωνιακή ταχύτητα των τροχών (εικόνα 5.32).

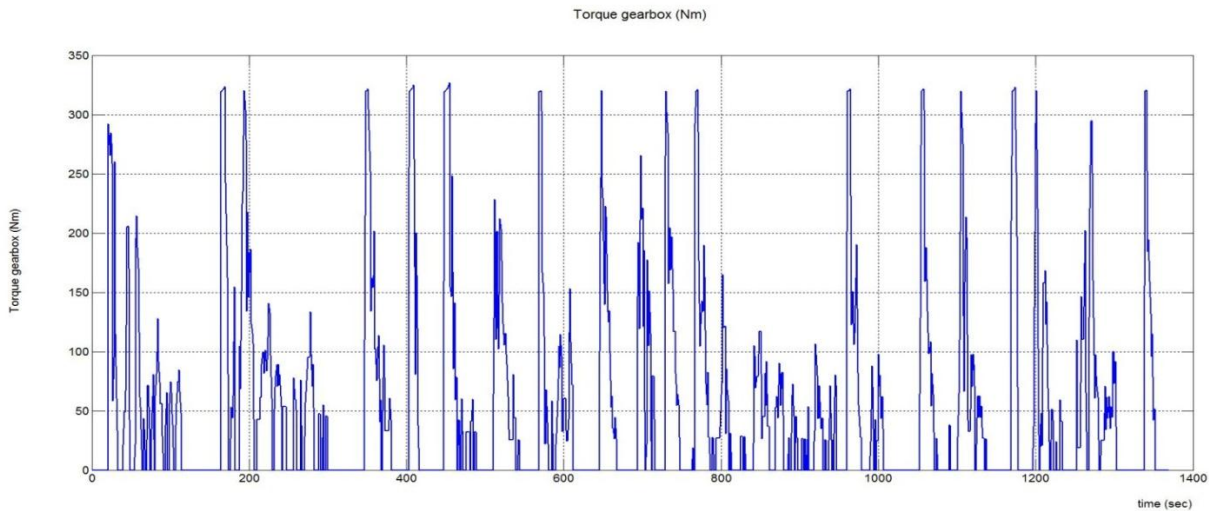
Η ισχύς στην έξοδο του κιβώτιου σταθερής σχέσης μετάδοσης κατά τη διάρκεια του κύκλου οδήγησης φαίνεται στην εικόνα 5.35.



Εικόνα 5.35 Ισχύς στην έξοδο του κιβώτιου σταθερής σχέσης μετάδοσης σε kW.

Λόγω των απωλειών στο διαφορικό η ισχύς που απαιτείται στην έξοδο του κιβώτιου σταθερής σχέσης μετάδοσης είναι μεγαλύτερη από την ισχύ στην έξοδο του διαφορικού και έχει μέγιστη τιμή 36,16 kW τη χρονική στιγμή $t=195$ sec.

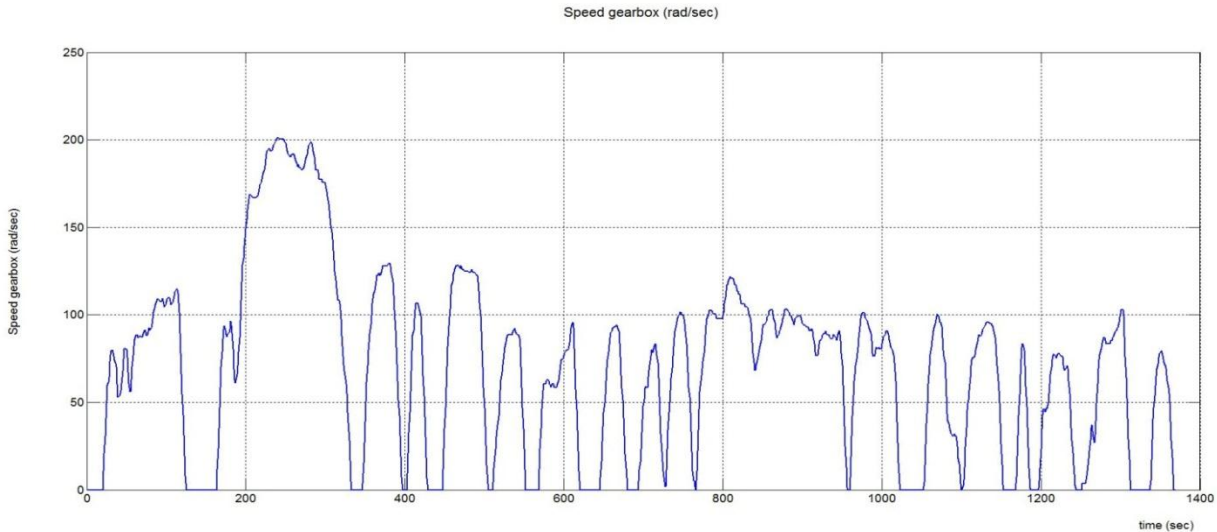
Η ροπή στην έξοδο του κιβώτιου σταθερής σχέσης μετάδοσης κατά τη διάρκεια του κύκλου οδήγησης φαίνεται στην εικόνα 5.36.



Εικόνα 5.36 Ροπή στην έξοδο του κιβώτιου σταθερής σχέσης μετάδοσης σε Nm.

Όπως φαίνεται από την εικόνα 5.36, η ροπή στην έξοδο του κιβώτιου σταθερής σχέσης μετάδοσης είναι μικρότερη από την ροπή στην έξοδο του διαφορικού, λόγω της σχέσης μετάδοσης του διαφορικού ($i_d=2,5$). Έτσι, η μέγιστη ροπή στην έξοδο του κιβώτιου σταθερής σχέσης μετάδοσης περιορίζεται στα 326,92 Nm τη χρονική στιγμή $t=455$ sec.

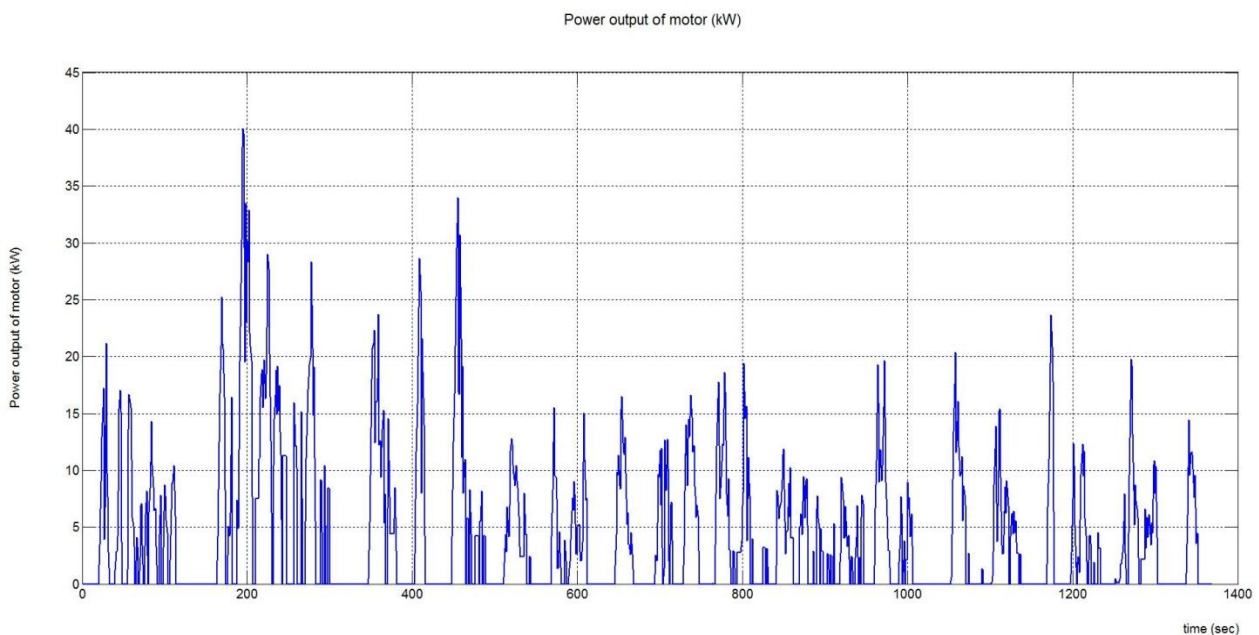
Η γωνιακή ταχύτητα στην έξοδο του κιβώτιου σταθερής σχέσης μετάδοσης κατά τη διάρκεια του κύκλου οδήγησης φαίνεται στην εικόνα 5.37.



Εικόνα 5.37 Γωνιακή ταχύτητα στην έξοδο του κιβώτιου σταθερής σχέσης μετάδοσης σε rad/sec.

Από την εικόνα 5.37 παρατηρείται ότι η γωνιακή ταχύτητα στην έξοδο του κιβώτιου σταθερής σχέσης μετάδοσης είναι μεγαλύτερη από την γωνιακή ταχύτητα στην έξοδο του διαφορικού, λόγω της σχέσης μετάδοσης του διαφορικού ($i_d=2,5$). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, η γωνιακή ταχύτητα στην έξοδο του κιβώτιου σταθερής σχέσης μετάδοσης να έχει μέγιστη τιμή 201,15 rad/sec τη χρονική στιγμή $t=240$ sec.

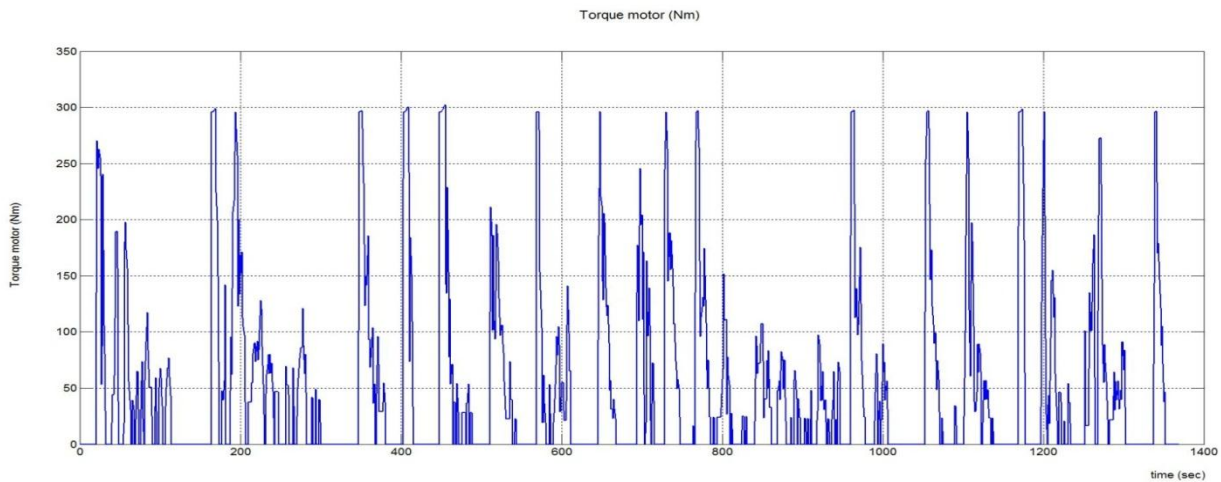
Η ισχύς εξόδου του ηλεκτροκινητήρα κατά τη διάρκεια του κύκλου οδήγησης απεικονίζεται στην εικόνα 5.38.



Εικόνα 5.38 Ισχύς εξόδου του DC ηλεκτροκινητήρα σε kW.

Η ισχύς που απαιτείται στην έξοδο του ηλεκτροκινητήρα είναι μεγαλύτερη από την ισχύ στην έξοδο του κιβώτιου σταθερής σχέσης μετάδοσης, λόγω των απωλειών στο κιβώτιο σταθερής σχέσης μετάδοσης. Έτσι η μέγιστη ισχύς στην έξοδο του ηλεκτροκινητήρα είναι 40,06 kW τη χρονική στιγμή $t=195$ sec.

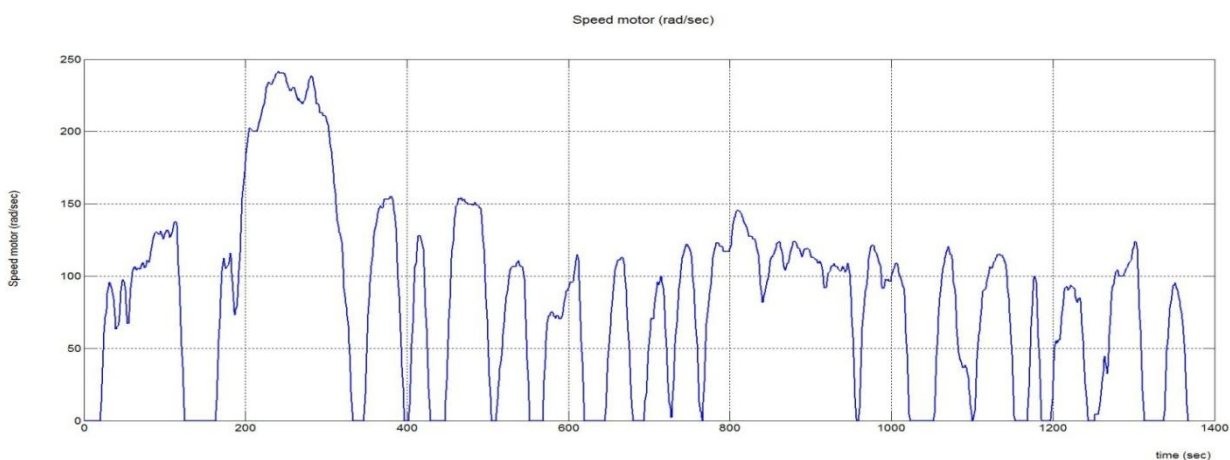
Η ροπή στην έξοδο του ηλεκτροκινητήρα κατά τη διάρκεια του κύκλου οδήγησης φαίνεται στην εικόνα 5.39.



Εικόνα 5.39 Ροπή εξόδου του ηλεκτροκινητήρα σε Nm.

Η ροπή εξόδου του ηλεκτροκινητήρα είναι μικρότερη από την ροπή στην έξοδο του κιβώτιου σταθερής σχέσης μετάδοσης, λόγω της σχέσης μετάδοσης του κιβώτιου σταθερής σχέσης μετάδοσης ($i_g=1,2$). Έτσι, η μέγιστη ροπή στην έξοδο του ηλεκτροκινητήρα είναι 302,18 Nm τη χρονική στιγμή $t=455$ sec, όπως φαίνεται στην εικόνα 5.39.

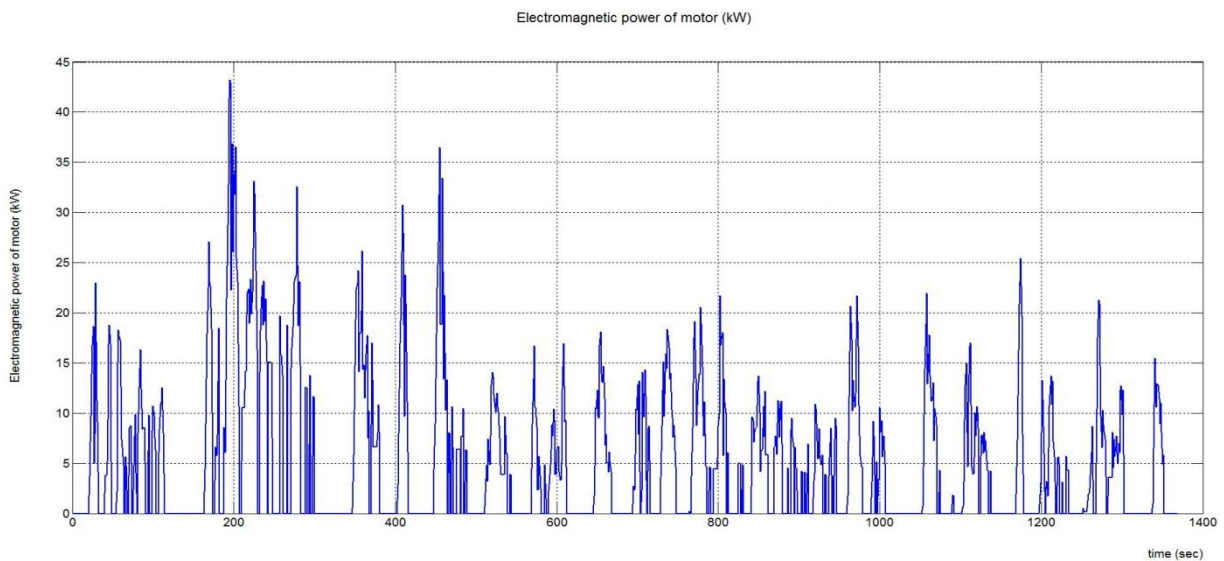
Η γωνιακή ταχύτητα του ηλεκτροκινητήρα κατά τη διάρκεια του κύκλου οδήγησης απεικονίζεται στην εικόνα 5.40.



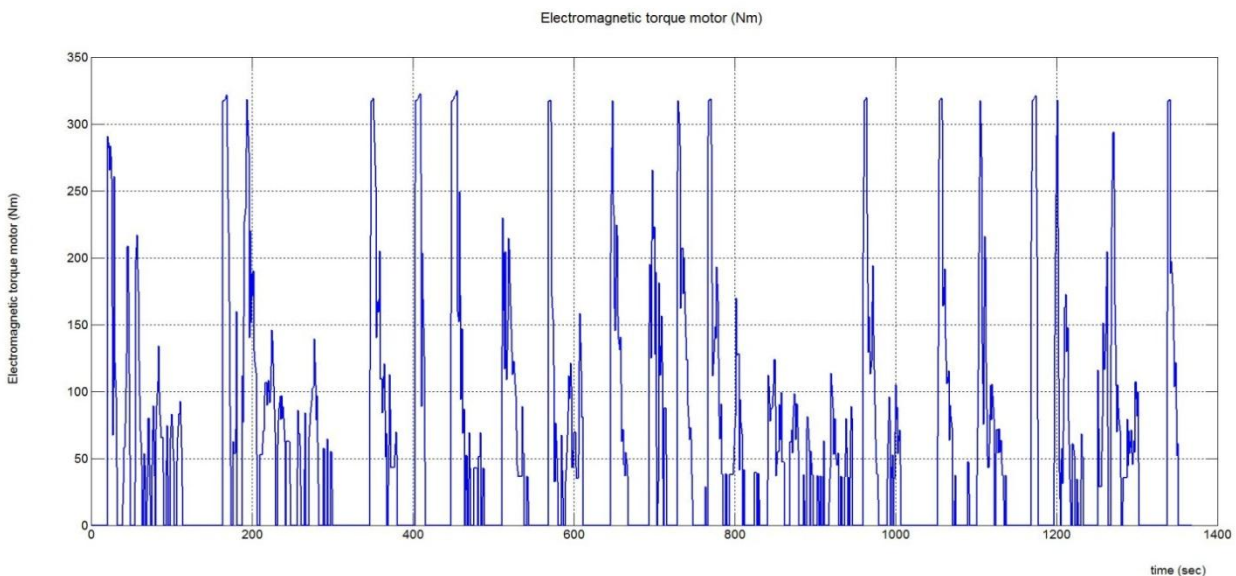
Εικόνα 5.40 Γωνιακή ταχύτητα του DC ηλεκτροκινητήρα σε rad/sec.

Λόγω της σχέσης ($i_g=1,2$) μετάδοσης του κιβωτίου σταθερής σχέσης μετάδοσης η γωνιακή ταχύτητα του ηλεκτροκινητήρα είναι μεγαλύτερη από τη γωνιακή ταχύτητα στην έξοδο του κιβωτίου σταθερής σχέσης μετάδοσης. Έτσι, η μέγιστη ταχύτητα του ηλεκτροκινητήρα είναι 241,39 rad/sec τη χρονική στιγμή $t=240$ sec. Επίσης, από την εικόνα 5.40 φαίνεται σε ποια περιοχή λειτουργεί ο ηλεκτροκινητήρας. Για ταχύτητες μικρότερες ή ίσες με 120 rad/sec ο ηλεκτροκινητήρας λειτουργεί στην περιοχή σταθερής ροπής, ενώ για ταχύτητες μεγαλύτερες από 120 rad/sec ο ηλεκτροκινητήρας λειτουργεί στην περιοχή σταθερής ισχύος. Από την εικόνα 5.13 φαίνεται ότι ο ηλεκτροκινητήρας λειτουργεί και στις δύο περιοχές γι' αυτόν τον κύκλο οδήγησης.

Στις εικόνες 3.41 και 3.42 απεικονίζεται η ηλεκτρομαγνητική ισχύς και η ηλεκτρομαγνητική ροπή του ηλεκτροκινητήρα αντίστοιχα, κατά τη διάρκεια του κύκλου οδήγησης.



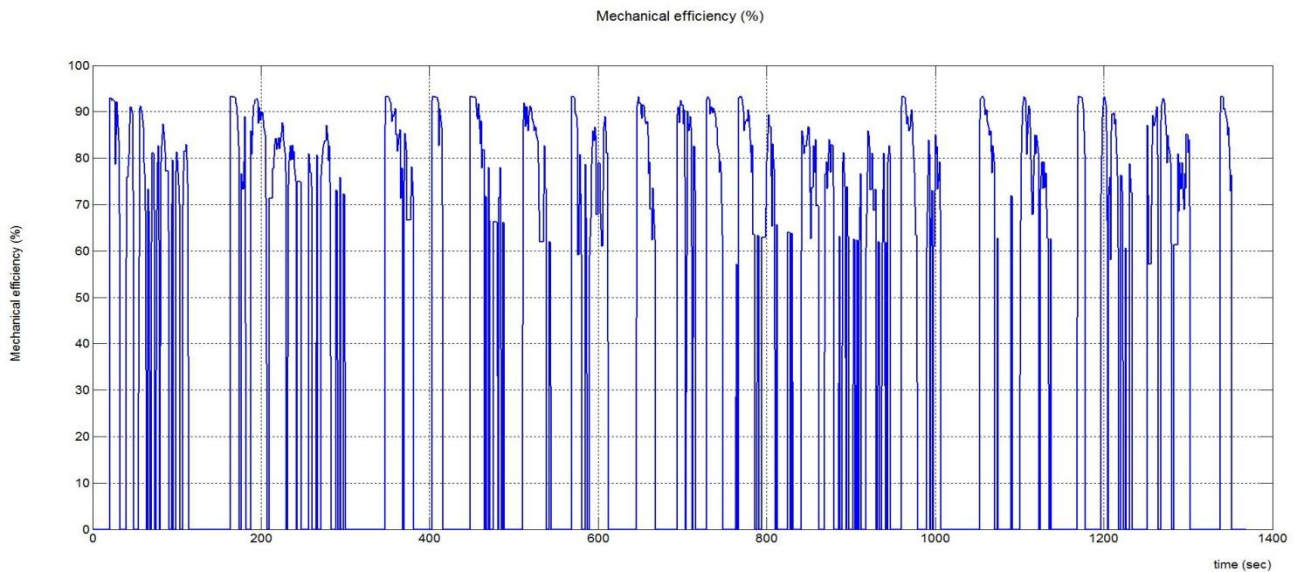
Εικόνα 5.41 Ηλεκτρομαγνητική ισχύς του DC ηλεκτροκινητήρα σε kW.



Εικόνα 5.42 Ηλεκτρομαγνητική ροπή του DC ηλεκτροκινητήρα σε Nm.

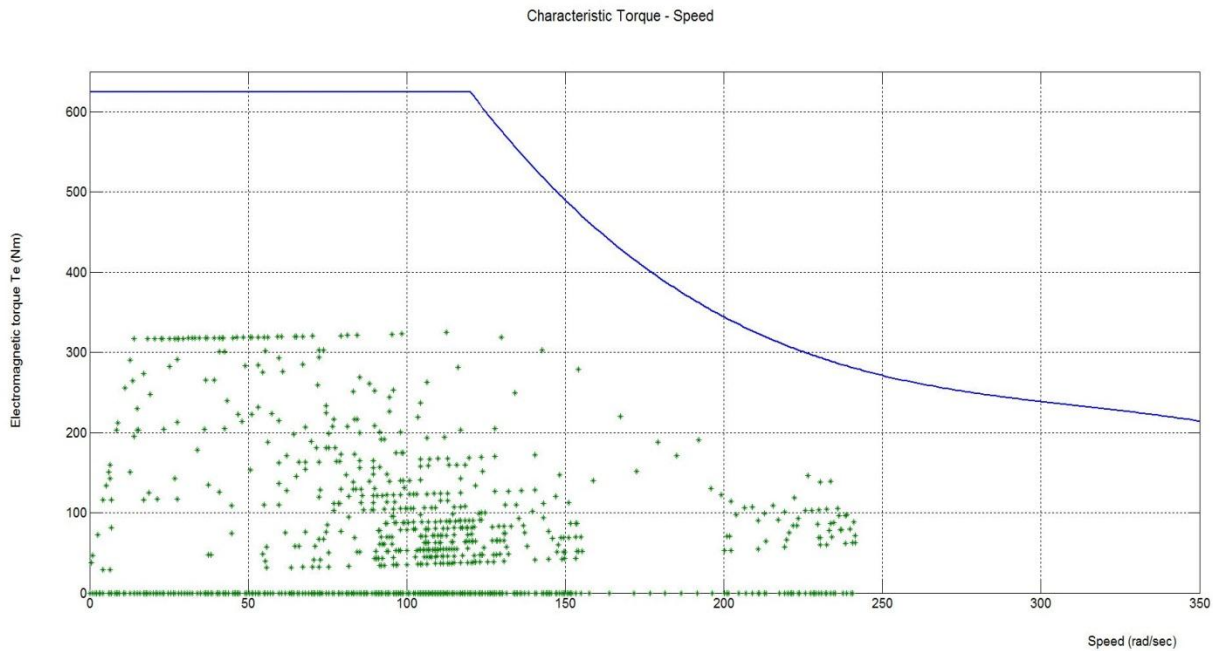
Η ηλεκτρομαγνητική ισχύς και ροπή του ηλεκτροκινητήρα είναι μεγαλύτερες από την ισχύ και την ροπή στην έξοδο του ηλεκτροκινητήρα, κατά την αδράνεια του ηλεκτροκινητήρα και τις τριβές που αυτός έχει στο εσωτερικό του. Έτσι, η μέγιστη ηλεκτρομαγνητική ισχύς του ηλεκτροκινητήρα είναι 43,23 kW τη χρονική στιγμή $t=195$ sec και η μέγιστη ηλεκτρομαγνητική ροπή του ηλεκτροκινητήρα είναι 324,79 Nm τη χρονική στιγμή $t=455$ sec.

Γνωρίζοντας την ισχύ εξόδου και την ηλεκτρομαγνητική ισχύ του ηλεκτροκινητήρα κάθε χρονική στιγμή, προκύπτει ο μηχανικός βαθμός απόδοσης του ηλεκτροκινητήρα (εικόνα 5.43), ο οποίος σε αρκετές περιόδους κατά τη διάρκεια του κύκλου οδήγησης ξεπερνάει το 90 %.

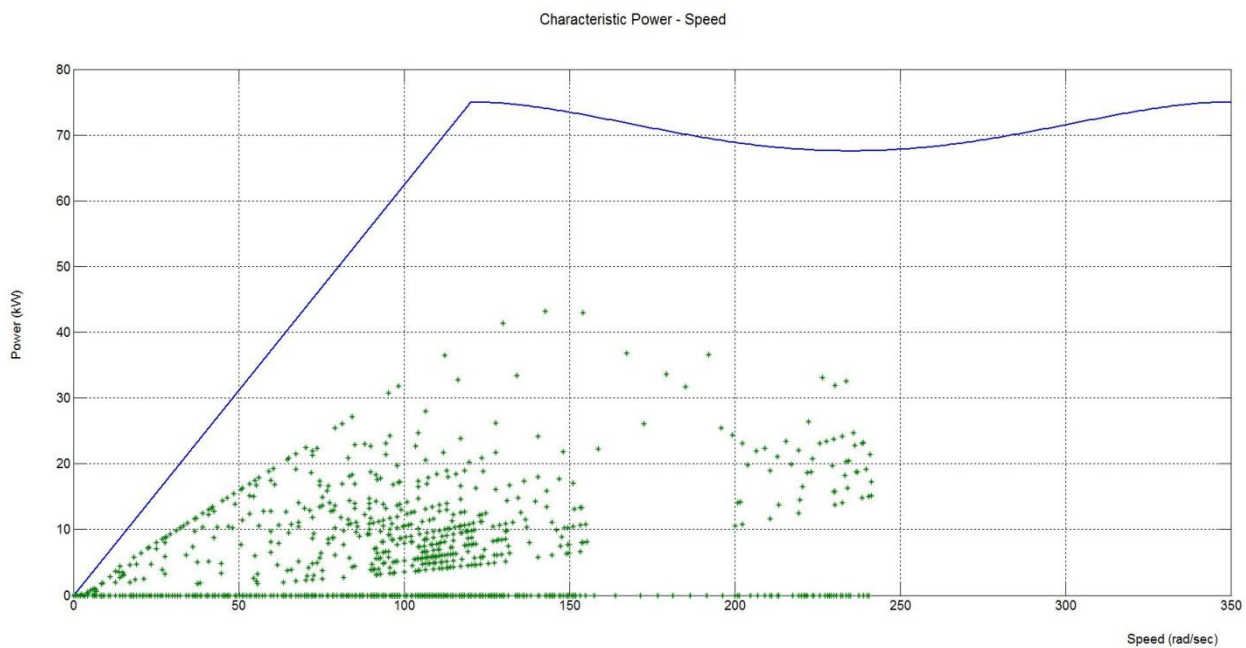


Εικόνα 5.43 Μηχανικός βαθμός απόδοσης του DC ηλεκτροκινητήρα.

Στις εικόνες 5.44 και 5.45 απεικονίζονται τα σημεία λειτουργίας του DC ηλεκτροκινητήρα κατά τη διάρκεια του κύκλου οδήγησης, στην χαρακτηριστική ροπής - ταχύτητας και ισχύος - ταχύτητας αντίστοιχα.

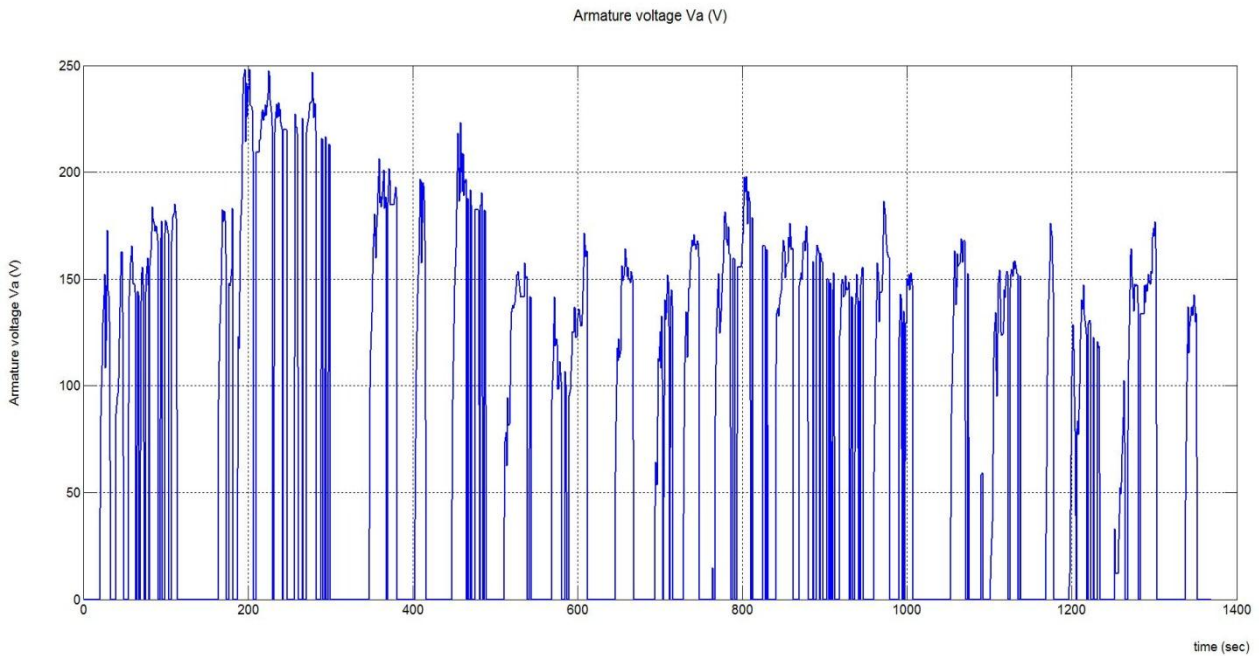


Εικόνα 5.44 Σημεία λειτουργίας του DC ηλεκτροκινητήρα στη χαρακτηριστική ροπής – ταχύτητάς του.

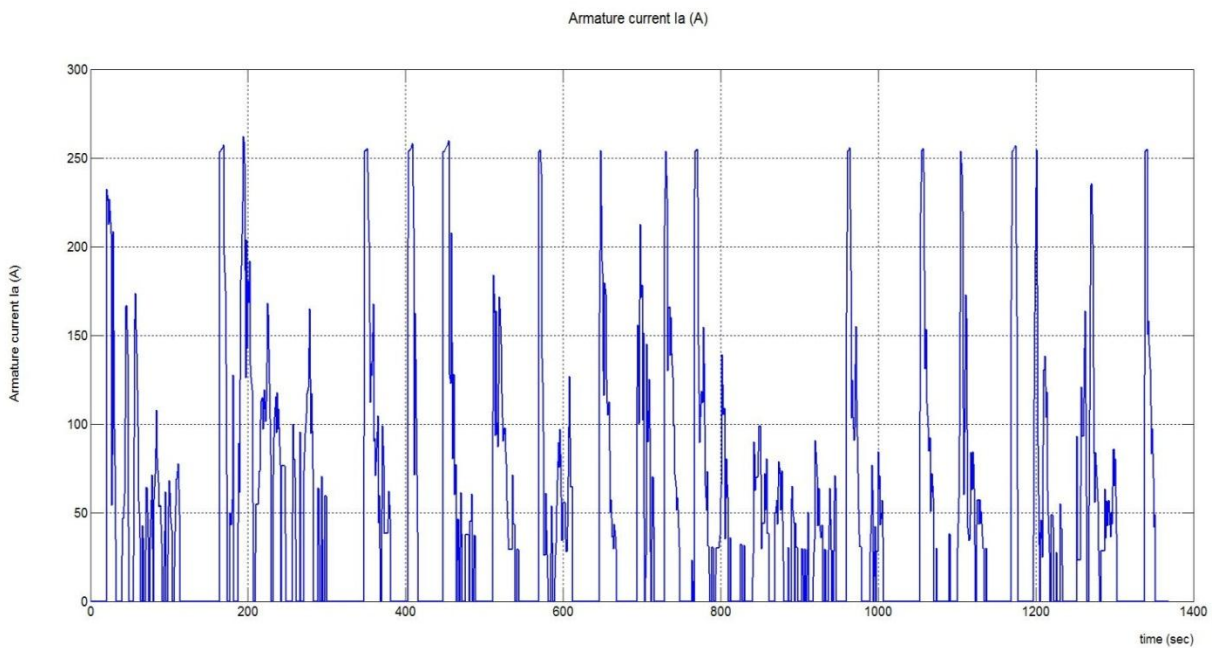


Εικόνα 5.45 Σημεία λειτουργίας του DC ηλεκτροκινητήρα στη χαρακτηριστική ισχύος – ταχύτητάς του.

Στις εικόνες 5.46 και 5.47 φαίνονται η τάση οπισμού V_a και το ρεύμα οπισμού I_a αντίστοιχα, κατά τη διάρκεια του κύκλου οδήγησης.



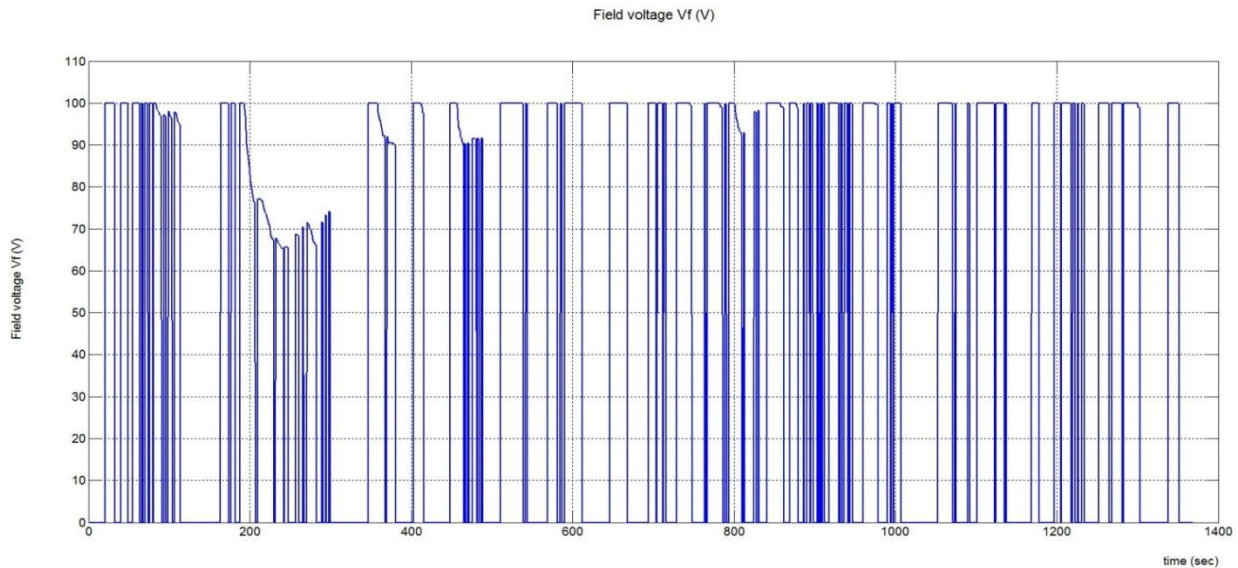
Εικόνα 5.46 Τάση οπισμού V_a (V).



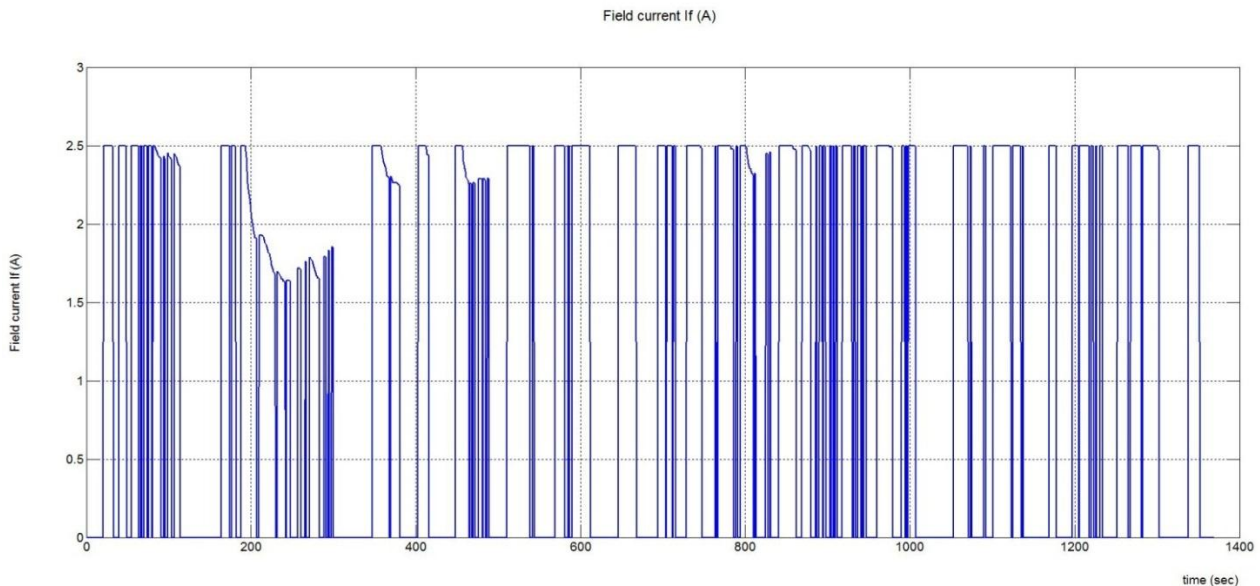
Εικόνα 5.47 Ρεύμα οπισμού I_a (A).

Όπως φαίνεται από την εικόνα 5.47 η μορφή του ρεύματος οπλισμού είναι παρόμοια με αυτήν της παραγόμενης ροπής του ηλεκτροκινητήρα (εικόνα 5.42) όπως αναμενόταν, καθώς αυτά τα δύο μεγέθη είναι ανάλογα.

Στις εικόνες 5.48 και 5.49 φαίνονται η τάση διέγερσης V_f και το ρεύμα διέγερσης I_f αντίστοιχα, κατά τη διάρκεια του κύκλου οδήγησης.



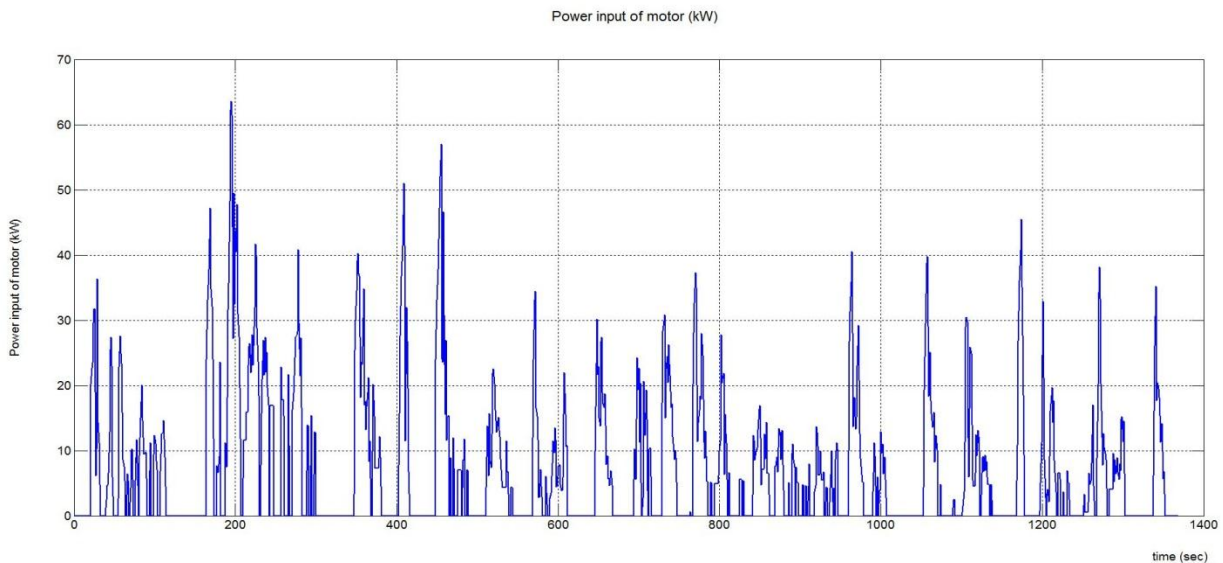
Εικόνα 5.48 Τάση διέγερσης V_f (V).



Εικόνα 5.49 Ρεύμα διέγερσης I_f (A).

Από τις εικόνες 5.48 και 5.49 μπορεί να παρατηρηθεί ότι για ταχύτητες μεγαλύτερες από την ταχύτητα βάσης η τάση διέγερσης V_f και κατά συνέπεια και το ρεύμα διέγερσης I_f μειώνονται, ενώ για ταχύτητες μικρότερες ή ίσες με την ταχύτητα βάσης παραμένουν στην ονομαστική τους τιμή.

Εφόσον είναι γνωστές οι τάσεις οπλισμού V_a και διέγερσης V_f και τα ρεύματα οπλισμού I_a και διέγερσης I_f , προκύπτει η εισερχόμενη ισχύς στον DC ηλεκτροκινητήρα από την μπαταρία, η οποία απεικονίζεται στην εικόνα 5.50.



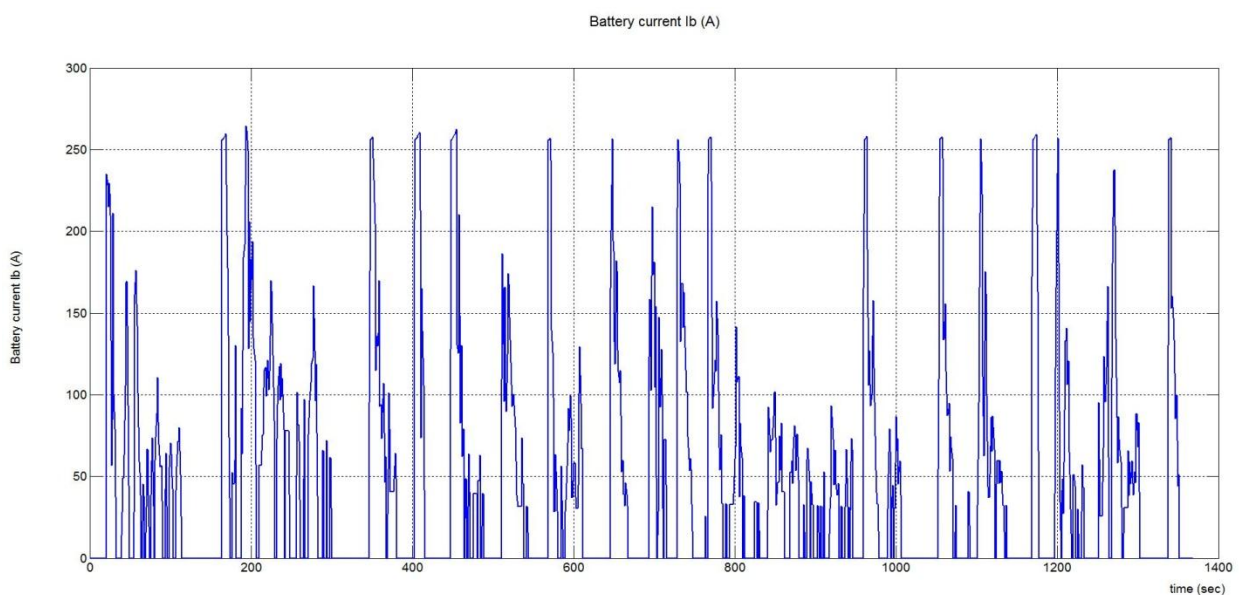
Εικόνα 5.50 Ισχύς εισόδου του DC ηλεκτροκινητήρα σε kW.

Από την ισχύ εξόδου (εικόνα 5.38) και την ισχύ εισόδου (εικόνα 5.50) του ηλεκτροκινητήρα προκύπτει ο συνολικός βαθμός απόδοσης του ηλεκτροκινητήρα, ο οποίος έχει μέγιστη τιμή 72,02 % (εικόνα 5.51) .



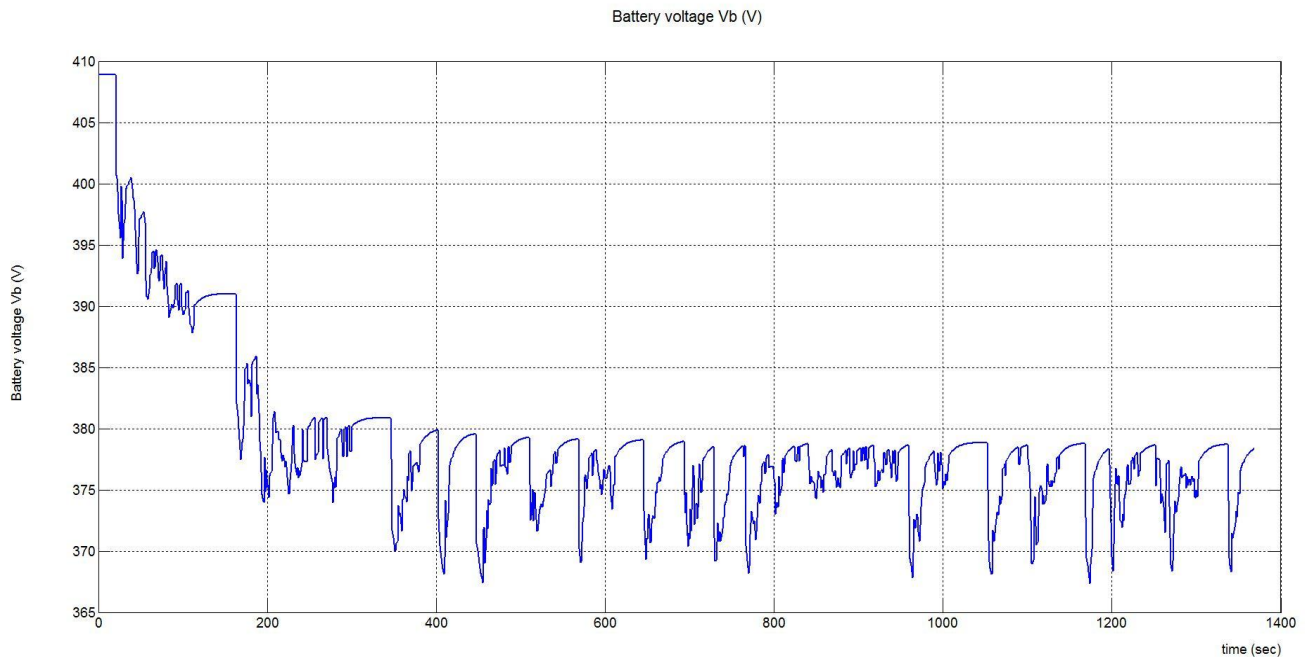
Εικόνα 5.51 Συνολικός βαθμός απόδοσης του DC ηλεκτροκινητήρα.

Το ρεύμα εκφόρτισης I_b της μπαταρίας κατά τη διάρκεια του κύκλου οδήγησης απεικονίζεται στην εικόνα 5.52.



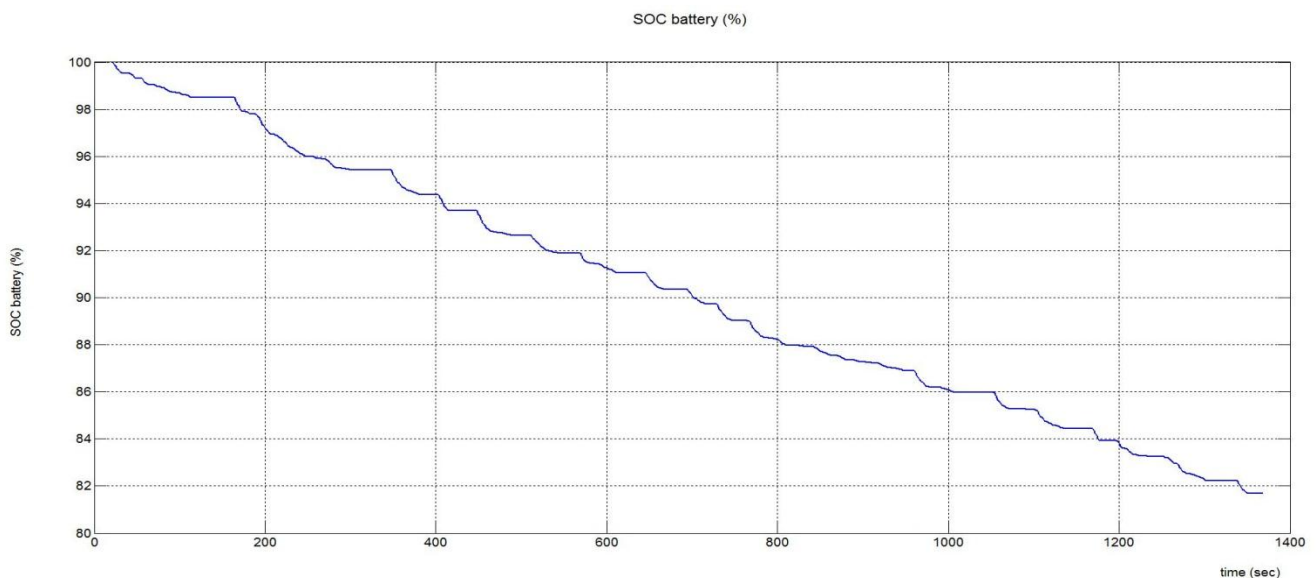
Εικόνα 5.52 Ρεύμα εκφόρτισης I_b (A) της μπαταρίας.

Η μεταβολή της τάσης V_b της μπαταρίας, σύμφωνα με το ρεύμα εκφόρτισης της I_b και την κατάσταση φόρτισης της SOC κατά τη διάρκεια του κύκλου οδήγησης, απεικονίζεται στην εικόνα 5.53.



Εικόνα 5.53 Τάση V_b (V) της μπαταρίας.

Στην εικόνα 5.54 φαίνεται η μείωση της κατάστασης φόρτισης SOC της μπαταρίας κατά τη διάρκεια του κύκλου οδήγησης.



Εικόνα 5.54 Κατάσταση φόρτισης SOC της μπαταρίας.

Από την εικόνα 5.54 παρατηρούμε ότι από αρχική κατάσταση φόρτισης 100 % (μπαταρία πλήρως φορτισμένη) για την κάλυψη 11,99 km, η κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας έπεσε στο 81,68 %.

Η μέση ισχύς στους τροχούς του οχήματος κατά τη διάρκεια του κύκλου οδήγησης είναι:

$$P_{w \text{ average}} = 3,45 \text{ (kW)}$$

Η χρονική διάρκεια του κύκλου οδήγησης είναι:

$$t = 1369 \text{ (sec)}$$

Η συνολική ενέργεια που χρησιμοποιήθηκε για την κίνηση του ηλεκτρικού οχήματος είναι:

$$E_w = P_{w \text{ average}} \cdot t = 3,45 \cdot 1369 = 4723,05 \text{ (kJ)}$$

Η μέση ισχύς που έδωσε η μπαταρία κατά τη διάρκεια του κύκλου οδήγησης είναι:

$$P_{b \text{ average}} = 7,24 \text{ (kW)}$$

Η συνολική ενέργεια με την οποία τροφοδοτήθηκε ο DC ηλεκτροκινητήρας από την μπαταρία κατά τη διάρκεια του κύκλου οδήγησης είναι:

$$E_b = P_{b \text{ average}} \cdot t = 7,24 \cdot 1369 = 9911,56 \text{ (kJ)}$$

Συνεπώς, ο συνολικός βαθμός απόδοσης του ηλεκτρικού οχήματος γι' αυτόν τον κύκλο οδήγησης είναι:

$$\eta_{total} = \frac{E_w}{E_b} \cdot 100 \% = \frac{4723,05}{9911,56} \cdot 100 \% = 47,65 \%$$

6 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΕΚΤΑΣΕΙΣ

Το παρόν μοντέλο του ηλεκτρικού οχήματος έχει ακόμα πολλά περιθώρια βελτίωσης, τα οποία θα μπορούσαν να καλυφθούν σε μελλοντικές πτυχιακές εργασίες. Αρχικά, θα μπορούσε να δημιουργηθεί το μοντέλο ενός κυκλώματος οδήγησης του DC ηλεκτροκινητήρα, το οποίο θα του επέτρεπε να λειτουργήσει και στο δεύτερο τεταρτημόριο του (δηλαδή ως γεννήτρια), με σκοπό να φανεί η επίδραση της αναγεννητικής πέδησης στη χιλιομετρική αυτονομία του ηλεκτρικού οχήματος. Επίσης, θα μπορούσε να γίνει ακριβέστερος υπολογισμός του βαθμού απόδοσης του DC ηλεκτροκινητήρα, λαμβάνοντας υπόψη όλες τις απώλειες που αυτός έχει κατά τη λειτουργία του. Ωστόσο, πιο σκόπιμο θα ήταν η αντικατάσταση του μοντέλου DC ηλεκτροκινητήρα με το μοντέλο ενός *BLDC* ηλεκτροκινητήρα, ο οποίος χρησιμοποιείται ευρέως σε εφαρμογές ηλεκτρικών και υβριδικών ηλεκτρικών οχημάτων.

Έπειτα, θα μπορούσε να δημιουργηθεί ένα μοντέλο της μπαταρίας το οποίο με βάση την ένταση του ρεύματος φόρτισης ή εκφόρτισης θα υπολόγιζε την χωρητικότητα της μπαταρίας, την εσωτερική της αντίσταση κατά τις περιόδους φόρτισης και εκφόρτισης, καθώς και τις χαρακτηριστικές καμπύλες φόρτισης και εκφόρτισής της. Επίσης, η μπαταρία θα μπορούσε να αντικατασταθεί από ένα μοντέλο κυψελών καυσίμου.

Πρόσθετα, θα μπορούσε να δημιουργηθεί το μοντέλο ενός υπερπυκνωτή, ο οποίος θα έπαιρνε ή θα έδινε τα ρεύματα υψηλής έντασης, από και προς τον ηλεκτροκινητήρα. Αυτό όμως προϋποθέτει και τη δημιουργία ενός μοντέλου το οποίο θα επιλέγει πότε θα χρησιμοποιείται η μπαταρία και πότε ο υπερπυκνωτής.

Τέλος, θα μπορούσε να δημιουργηθεί και το μοντέλο μίας ΜΕΚ, με σκοπό τη μοντελοποίηση ενός υβριδικού ηλεκτρικού οχήματος. Για να γίνει αυτό όμως απαιτείται και η δημιουργία του συστήματος μετάδοσης της κίνησης ενός υβριδικού ηλεκτρικού οχήματος, καθώς και η δημιουργία του μοντέλου ενός ελεγκτή ο οποίος θα ελέγχει τη ροή ισχύος με βάση κάποια σενάρια οδήγησης.

Βιβλιογραφία

- [1] M. Ehsani, Y.Gao, A. Emadi, *"Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles"*, CRC Press, 2010.
- [2] I. Husain, *"Electric and Hybrid Vehicles Design Fundamentals"*, CRC Press, 2003.
- [3] J. Larminie, J. Lowry, *"Electric Vehicle Technology Explained"*, WILEY, 2003.
- [4] C. Mi, M. Masrur, D.W. Gao, *"Hybrid Electric Vehicles Principles and Applications with Practical Perspectives"*, WILEY, 2011.
- [5] S. Chapman, *"Ηλεκτρικές μηχανές"*, Τζιόλα, 2010.
- [6] Θ. Κοσμάνης, Διδακτικές σημειώσεις του μαθήματος *" Ηλεκτρικά και Υβριδικά Ηλεκτρικά Οχήματα "*.
- [7] MATLAB/SIMULINK® The Mathworks Inc. Version 7.6 R2008a.
- [8] Ιστοσελίδα: www.batteryuniversity.com.
- [9] Ιστοσελίδα: www.mpoweruk.com.