



## ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ ΣΑΡΙΚΑΣ

Προσομοίωση ηλεκτρονικού  
διαφορικού ηλεκτρικού οχήματος  
Simulation of an electronic differential  
of an electric vehicle

Τομέας: Τομέας Μηχανολογικών Κατασκευών & Αυτομάτου Ελέγχου

Επιβλέπων: Δημήτριος Κουλοχέρης, Αν. Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα 2023

--- κενή σελίδα ---

Υπεύθυνη δήλωση για λογοκλοπή και για κλοπή πνευματικής ιδιοκτησίας:

Έχω διαβάσει και κατανοήσει τους κανόνες για τη λογοκλοπή και τον τρόπο σωστής αναφοράς των πηγών που περιέχονται στον οδηγό συγγραφής Διπλωματικών Εργασιών. Δηλώνω ότι, από όσα γνωρίζω, το περιεχόμενο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι προϊόν δικής μου εργασίας και υπάρχουν αναφορές σε όλες τις πηγές που χρησιμοποίησα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτή τη Διπλωματική εργασία είναι του συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ή του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Παναγιώτης Σαρίκας

## Περιεχόμενα (Contents)

Περιεχόμενα (Contents) .....	4
Περιεχόμενα σχημάτων (Contents of figures) .....	7
Περιεχόμενα πινάκων (Contents of tables) .....	20
Συντομεύσεις - αρκτικόλεξα (abbreviations) .....	21
Περίληψη .....	22
Abstract .....	23
Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή (Introduction) .....	24
1.1 Ηλεκτρικά οχήματα (electrical vehicles) .....	24
1.2 Διαφορικό (Differential) .....	25
1.2.1 Μηχανικό διαφορικό (Mechanical differential) .....	25
1.2.2 Ηλεκτρονικό διαφορικό (electronic differential) .....	26
1.3 Σκοπός Διπλωματικής Εργασίας .....	26
1.4 Δομή Εργασίας .....	27
Κεφάλαιο 2 Μοντελοποίηση ηλεκτρονικού διαφορικού (Electronic differential modelling) .....	28
2.1 Η αρχή λειτουργίας του συστήματος ηλεκτρονικού διαφορικού (The principle of electronic differential system) .....	28
2.2 Εφαρμογή συστήματος ηλεκτρονικού διαφορικού (Electronic differential system implementation) .....	28
Κεφάλαιο 3 Δυναμική οχήματος (Vehicle dynamics) .....	33
Κεφάλαιο 4 Ηλεκτροκινητήρας (Motor) .....	35
4.1 Κινητήρας συνεχούς ρεύματος με ψήκτρες (Brushed DC motor) .....	35
4.1.1 Εισαγωγή (Introduction) .....	35
4.1.2 Μοντελοποίηση κινητήρα συνεχούς ρεύματος με ψήκτρες (Brushed DC motor model) .....	36
4.1.3 Έλεγχος κινητήρα (Motor control) .....	37
4.2 Σύγχρονος κινητήρας μόνιμου μαγνήτη (Permanent magnet synchronous motor) .....	38
4.2.1 Εισαγωγή (Introduction) .....	38
4.2.2 Μοντελοποίηση σύγχρονου κινητήρα μόνιμου μαγνήτη (Permanent magnet synchronous motor model) .....	39
4.2.3 Έλεγχος κινητήρα (Motor control) .....	43
Κεφάλαιο 5 Σύστημα ελέγχου Μοντέλου 1 (Model 1 Control System) .....	44
5.1 Σύστημα ελέγχου κλειστού βρόχου (Closed loop control system) .....	44
5.2 Έλεγχος με τη χρήση PID (PID control) .....	44
5.3 Τα χαρακτηριστικά των όρων P, I και D (The characteristics of the P, I, and D terms) .....	46

5.3.1 Αναλογική απόκριση (proportional response) .....	47
5.3.2 Ολοκληρωτική απόκριση (integral response).....	47
5.3.3 Διαφορική απόκριση (derivative response) .....	47
5.4 Συντονισμός PID (PID tuning).....	48
5.5 Κορεσμός και anti-windup (saturation and anti-windup) .....	48
5.6 Εφαρμογή του ελεγκτή PID (Implementation of the PID controller) .....	49
<b>Κεφάλαιο 6 Σύστημα ελέγχου Μοντέλου 2 (Model 2 Control System)</b> .....	<b>51</b>
6.1 Θεωρεία διανυσματικού ελέγχου (Vector control theory) .....	51
6.1.1 Διανυσματικός έλεγχος ρεύματος (Vector current control) .....	51
6.1.2 Διανυσματικός έλεγχος με προσανατολισμό πεδίου (FOC).....	52
6.1.3 Εφαρμογή του FOC (The technique of the FOC).....	53
6.2 Μετατροπέας (Inverter).....	58
6.2.1 Εφαρμογές (Applications) .....	58
6.2.2 Κατηγορίες μετατροπέων (Types of inverter) .....	58
6.2.3 Εσωτερικός έλεγχος μετατροπέα (Internal control of inverter) .....	60
6.3 Θεωρεία του SVPWM (SVPWM theory) .....	62
6.3.1 Η αρχή λειτουργίας του SVPWM (Principle of SVPWM) .....	62
6.3.2 Εφαρμογή του SVPWM (Space vector technique of pulse width modulation) .....	65
<b>Κεφάλαιο 7 Πηγή ενέργειας (Energy source)</b> .....	<b>70</b>
7.1 Εισαγωγή (Introduction) .....	70
7.2 Ανεξάρτητη πηγή τάσης (Independent voltage sources) .....	71
7.3 Εφαρμογή της μπαταρίας (Implementation of the battery) .....	73
<b>Κεφάλαιο 8 Κιβώτιο ταχυτήτων (Gearbox)</b> .....	<b>74</b>
<b>Κεφάλαιο 9 Ανάλυση και επεξήγηση των μοντέλων στο Simulink (Simulink models analysis and explanation)</b> .....	<b>75</b>
9.1 Ανάλυση μοντέλου 1 στο Simulink (Simulink model 1 analysis) .....	75
9.1.1 Υποσύστημα διεύθυνσης τιμονιού (Steering subsystem).....	75
9.1.2 Υποσύστημα πεντάλ (Pedal subsystem) .....	76
9.1.3 Σύστημα ηλεκτρονικού διαφορικού (Electronic differential system) .....	76
9.1.4 Ελεγκτές (Controllers) .....	77
9.1.5 Πηγές ενέργειας (Energy sources) .....	79
9.1.6 Ηλεκτροκινητήρες (Motors).....	81
9.1.7 Κιβώτιο ταχυτήτων (Gearbox) .....	83

9.1.8 Χρησιμοποιούμενες συναρτήσεις (Functions) .....	84
9.1.9 Συνολικό μοντέλο ηλεκτρονικού διαφορικού στο περιβάλλον Simulink (Electronic differential overall model in Simulink).....	86
9.2 Ανάλυση μοντέλου 2 στο Simulink (Simulink model 2 analysis) .....	92
9.2.1 Μοντελοποίηση του FOC (FOC model).....	92
9.2.2 Μοντελοποίηση του SVPWM (SVPWM model).....	97
9.2.3 Υποσύστημα μετατροπέα (Inverter subsystem).....	100
9.2.4 Πηγές ενέργειας (Energy sources) .....	101
9.2.5 Ηλεκτροκινητήρες (Motors).....	101
9.2.6 Συνολικό μοντέλο ηλεκτρονικού διαφορικού στο περιβάλλον Simulink (Electronic differential overall model in Simulink).....	103
Κεφάλαιο 10 Περιγραφή προσομοιώσεων (Simulation description).....	109
10.1 Σενάριο 1: Ευθύς δρόμος και επιταχυνόμενη κίνηση μέχρι την σταθερή ταχύτητα των 80km/h (Straight road and accelerated motion up to the constant speed of 80 km/h) .....	109
10.2 Σενάριο 2: Ευθύς δρόμος με ανωφέρεια 8% και επιταχυνόμενη κίνηση μέχρι την σταθερή ταχύτητα των 60km/h (Straight road with 8% slope and accelerated motion up to the constant speed of 60 km/h) .....	109
10.3 Σενάριο 3: Στροφή δεξιά και επιταχυνόμενη κίνηση μέχρι την σταθερή ταχύτητα των 80km/h (Clockwise-curved road and accelerated motion up to the constant speed of 80 km/h).....	109
10.4 Σενάριο 4: Στροφή αριστερή και επιταχυνόμενη κίνηση μέχρι την σταθερή ταχύτητα των 80km/h (Counter-clockwise-curved road and accelerated motion up to the constant speed of 80 km/h).....	110
10.5 Σενάριο 5: Στροφές αριστερές και δεξιές με ανωφέρεια 2% και επιταχυνόμενη κίνηση μέχρι την σταθερή ταχύτητα των 80km/h (Counter-clockwise and clockwise curved road with 2% slope and accelerated motion up to the constant speed of 80 km/h).....	110
Κεφάλαιο 11 Αποτελέσματα και συμπεράσματα των προσομοιώσεων (Results and conclusions of the simulations).....	111
11.1 Μοντέλο 1 - Σενάριο 5: Στροφές αριστερές και δεξιές με ανωφέρεια 2% και επιταχυνόμενη κίνηση μέχρι την σταθερή ταχύτητα των 80km/h (Counter-clockwise and clockwise curved road with 2% slope and accelerated motion up to the constant speed of 80 km/h) .....	111
11.2 Μοντέλο 2 - Σενάριο 5: Στροφές αριστερές και δεξιές με ανωφέρεια 2% και επιταχυνόμενη κίνηση μέχρι την σταθερή ταχύτητα των 80km/h (Counter-clockwise and clockwise curved road with 2% slope and accelerated motion up to the constant speed of 80 km/h) .....	122
11.3 Γενικά Συμπεράσματα (General Conclusions) .....	137
Παράρτημα (Appendix).....	139
Προδιαγραφές (Specifications).....	139
Μοντέλο 1 - Σενάριο 1: Ευθύς δρόμος και επιταχυνόμενη κίνηση μέχρι την σταθερή ταχύτητα των 80km/h (Straight road and accelerated motion up to the constant speed of 80 km/h).....	141

Μοντέλο 1 - Σενάριο 2: Ευθύς δρόμος με ανωφέρεια 10% και σταθερή ταχύτητα 60km/h (Straight road with 8% slope at 60 km/h speed) .....	144
Μοντέλο 1 - Σενάριο 3: Στροφή δεξιά και επιταχυνόμενη κίνηση μέχρι την σταθερή ταχύτητα των 80km/h (Clockwise-curved road and accelerated motion up to the constant speed of 80 km/h) .....	148
Μοντέλο 1 - Σενάριο 4: Στροφή αριστερή και επιταχυνόμενη κίνηση μέχρι την σταθερή ταχύτητα των 80km/h (Counter-clockwise-curved road and accelerated motion up to the constant speed of 80 km/h) .....	153
Μοντέλο 2 - Σενάριο 1: Ευθύς δρόμος και επιταχυνόμενη κίνηση μέχρι την σταθερή ταχύτητα των 80km/h (Straight road and accelerated motion up to the constant speed of 80 km/h) .....	158
Μοντέλο 2 - Σενάριο 2: Ευθύς δρόμος με ανωφέρεια 8% και σταθερή ταχύτητα 60km/h (Straight road with 8% slope at 60 km/h speed) .....	163
Μοντέλο 2 - Σενάριο 3: Στροφή δεξιά και επιταχυνόμενη κίνηση μέχρι την σταθερή ταχύτητα των 80km/h (Clockwise-curved road and accelerated motion up to the constant speed of 80 km/h) .....	168
Μοντέλο 2 - Σενάριο 4: Στροφή αριστερή και επιταχυνόμενη κίνηση μέχρι την σταθερή ταχύτητα των 80km/h (Counter-clockwise-curved road and accelerated motion up to the constant speed of 80 km/h) .....	173
Βιβλιογραφία (References) .....	179

## Περιεχόμενα σχημάτων (Contents of figures)

Σχήμα 2.1: Αναπαράσταση τροχών σε στροφή (Wheels when cornering) .....	29
Σχήμα 2.2: Μοντέλο διεύθυνσης κατά Ackermann (Ackermann steering model).....	29
Σχήμα 2.3: Μοντέλο τροχιάς οδήγησης (driving trajectory model) .....	30
Σχήμα 2.4: Διάγραμμα μοντέλου ηλεκτρονικού διαφορικού (Block diagram of the electric differential system).....	32
Σχήμα 4.1: α) κινητήρες συνεχούς ρεύματος με ψήκτρες και μόνιμους μαγνήτες β) κινητήρες συνεχούς ρεύματος με ψήκτρες και τυλίγματα πεδίου (a) permanent magnet brushed dc motor b) wound-field brushed dc motor) .....	35
Σχήμα 4.2: Τριφασικός, δύο πόλων, PMSM (Three phase, two-pole PMSM) .....	39
Σχήμα 5.1: Δομικό διάγραμμα ενός βασικού συστήματος ελέγχου κλειστού βρόχου (Block diagram of a basic closed loop control system) .....	44
Σχήμα 5.2: Δομικό διάγραμμα του συστήματος ελέγχου κλειστού βρόχου (Block diagram of closed loop control system) .....	44
Σχήμα 5.3: Δομικό διάγραμμα του συστήματος ελέγχου κλειστού βρόχου με χρήση κατευθυντή PID (Block diagram of closed loop control system using PID controller) .....	45
Σχήμα 5.4: Απόκριση ενός τυπικού συστήματος ελέγχου κλειστού βρόχου με χρήση PID (response of a typical PID closed loop system) .....	46
Σχήμα 5.5: Δομικό διάγραμμα συστήματος με κορεσμένο ενεργοποιητή και anti-windup (Block diagram of a system with saturation of the actuator and anti-windup) .....	48
Σχήμα 5.6: Δομικό διάγραμμα του κατευθυντή PID με χρήση διαφορικού φίλτρου (Block diagram of PID controller withderivative filter) .....	49

Σχήμα 6.1: Γενική αρχή εφαρμογής διανυσματικού ελέγχου ρεύματος (General principle of vector current control implementation).....	51
Σχήμα 6.2: Direct και quadrature άξονες (Direct and quadrature axes) .....	52
Σχήμα 6.3: a) Ευθυγράμμιση του διανύσματος μαγνητικής ροής, για μηδενική ροπή b) Ευθυγράμμιση του διανύσματος μαγνητικής ροής, για μέγιστη ροπή (a) Alignment of the magnetic flux vector with zero torque b) Alignment of the magnetic flux vector with maximum torque).....	53
Σχήμα 6.4: Δομικό διάγραμμα ελέγχου με προσανατολισμό πεδίου (Field Oriented Control block diagram).....	54
Σχήμα 6.5: Πλαίσια αναφοράς (reference frames) .....	55
Σχήμα 6.6: Μετασχηματισμός Clark (Clark transformation) .....	56
Σχήμα 6.7: Μετασχηματισμός Park (Park transformation) .....	56
Σχήμα 6.8: Αντίστροφος μετασχηματισμός Park (Inverse Park Transformation) .....	57
Σχήμα 6.9: Αντίστροφος μετασχηματισμός Clark (Inverse Clark Transformation) .....	57
Σχήμα 6.10: Τετράγωνο, τροποποιημένο και καθαρό ημιτονοειδές κύμα (Square, Modified, and Pure Sine Wave) .....	59
Σχήμα 6.11: (a) Μετατροπέας πηγής τάσης (VSI), b) Μετατροπέας πηγής ρεύματος (CSI) .....	60
Σχήμα 6.12: Δομικό διάγραμμα τεχνικής PWM (PWM technique block diagram) .....	61
Σχήμα 6.13: Μετατροπέας PWM τριφασικής πηγής τάσης (Three-phase voltage source PWM Inverter).....	62
Σχήμα 6.14: Τα οκτώ διανύσματα τάσης του μετατροπέα (The eight inverter voltage vectors).....	63
Σχήμα 6.15: Τα βασικά διανύσματα μεταγωγής της τεχνικής SVPWM (Basic switching vectors for SVPWM) .....	64
Σχήμα 6.16: Τάση αναφοράς της τεχνικής SVPWM για PMSM (Reference voltage of SVPWM for PMSM) .....	64
Σχήμα 6.17: Διανύσματα εναλλαγής και οι έξι τομείς για τη τεχνική SVPWM (Switching vectors and six sectors for SVPWM) .....	66
Σχήμα 6.18: Σήματα αναφοράς του SVPWM (SVPWM reference signals).....	68
Σχήμα 6.19: Σύνοψη του τρόπου λειτουργίας του FOC με το SVPWM (Summary of how FOC with SVPWM operates).....	69
Σχήμα 7.1: Ηλεκτρικές πηγές (Electrical sources).....	70
Σχήμα 7.2: Ανεξάρτητες πηγές τάσης (Independent voltage sources).....	71
Σχήμα 7.3: Σύγκριση ιδανικής και πραγματικής πηγής τάσης (Comparison of ideal and practical voltage source) .....	71
Σχήμα 7.4: Χαρακτηριστικά πραγματικής πηγής τάσης (Practical Voltage Source Characteristics) .....	72
Σχήμα 9.1: Υποσύστημα τιμονιού στο περιβάλλον Simulink (Steering subsystem in Simulink) .....	75
Σχήμα 9.2: Υποσύστημα πεντάλ στο περιβάλλον Simulink (Pedal subsystem in Simulink) .....	76
Σχήμα 9.3: Ηλεκτρονικό διαφορικό στο περιβάλλον Simulink (Electronic differential system in Simulink) .....	77
Σχήμα 9.4: Ελεγκτής PID του αριστερού κινητήρου τροχού στο περιβάλλον Simulink (PID controller of left drive wheel in Simulink) .....	78
Σχήμα 9.5: Ελεγκτής PID του δεξιού κινητήρου τροχού στο περιβάλλον Simulink (PID controller of right drive wheel in Simulink) .....	79
Σχήμα 9.6: Συνεχής τάση τυμπάνου του κινητήρα 1 στο περιβάλλον Simulink (DC armature voltage of motor 1 in Simulink).....	80

Σχήμα 9.7: Συνεχής τάση πεδίου του κινητήρα 1 στο περιβάλλον Simulink (DC field voltage of motor 1 in Simulink) .....	80
Σχήμα 9.8: Συνεχής τάση πεδίου του κινητήρα 2 στο περιβάλλον Simulink (DC field voltage of motor 2 in Simulink) .....	80
Σχήμα 9.9: Κινητήρας συνεχούς ρεύματος αριστερού κινητήριου τροχού στο περιβάλλον Simulink (DC motor of left drive wheel in Simulink) .....	82
Σχήμα 9.10: Κινητήρας συνεχούς ρεύματος δεξιού κινητήριου τροχού στο περιβάλλον Simulink (DC motor of right drive wheel in Simulink) .....	83
Σχήμα 9.11: Υπολογισμός της διαφοράς ανάμεσα στις γωνιακές ταχύτητες των κινητήριων τροχών (Calculation of difference between wheel drive angular speeds) .....	84
Σχήμα 9.12: Υπολογισμός της γωνιακής ταχύτητας του φανταστικού κεντρικού οπίσθιου τροχού ως προς το κέντρο στροφής (Calculation of center of turn angular speed) .....	84
Σχήμα 9.13: Υπολογισμός του φορτίου ροπής που ο αριστερός τροχός καλείται να υπερνικήσει (Calculation of load torque that left wheel has to overcome).....	85
Σχήμα 9.14: Υπολογισμός του φορτίου ροπής που ο δεξιός τροχός καλείται να υπερνικήσει (Calculation of load torque that right wheel has to overcome) .....	85
Σχήμα 9.15: Ολικό μοντέλο ηλεκτρονικού διαφορικού στο περιβάλλον Simulink (Electronic differential total model in Simulink) .....	86
Σχήμα 9.16: Δομικό διάγραμμα του ολικού μοντέλου ηλεκτρονικού διαφορικού (Block diagram of electronic differential total model).....	86
Σχήμα 9.17: Επεξήγηση των μπλοκ του δομικού διαγράμματος του ολικού μοντέλου ηλεκτρονικού διαφορικού (Block explanation of block diagram of electronic differential total model) .....	87
Σχήμα 9.18: Διανυσματικός έλεγχος FOC & SVPWM, στο περιβάλλον Simulink (Vetor control FOC & SVPWM in Simulink).....	92
Σχήμα 9.19: Ελεγκτής ταχύτητας PID, του αριστερού κινητήριου τροχού, στο περιβάλλον Simulink (PID speed controller of left drive wheel in Simulink).....	94
Σχήμα 9.20: Ελεγκτής ρεύματος q άξονα, PI, του αριστερού κινητήριου τροχού, στο περιβάλλον Simulink (PI current controller of q axis, of left drive wheel in Simulink) .....	94
Σχήμα 9.21: Ελεγκτής ρεύματος d άξονα, PI, του αριστερού κινητήριου τροχού, στο περιβάλλον Simulink (PI current controller of d axis, of left drive wheel in Simulink) .....	95
Σχήμα 9.22: Μετασχηματισμός Clark, στο περιβάλλον Simulink (Clark transformation in Simulink) .....	95
Σχήμα 9.23: Μετασχηματισμός Park, στο περιβάλλον Simulink (Park transformation in Simulink) .....	96
Σχήμα 9.24: Αντίστορφος μετασχηματισμός Park, στο περιβάλλον Simulink (Park inverse transformation in Simulink).....	96
Σχήμα 9.25: Η μέθοδος SVPWM, στο περιβάλλον Simulink (The technique SVPWM in Simulink).....	97
Σχήμα 9.26: Προσδιορισμός τομέα, της τεχνικής SVPWM, στο περιβάλλον Simulink (Sector Identification of the technique SVPWM in Simulink).....	98
Σχήμα 9.27: Υπολογισμός μεταβλητών χρόνου X, Y, Z, της τεχνικής SVPWM, στο περιβάλλον Simulink (Calculation of time variables X, Y, Z, of the SVPWM technique in Simulink) .....	98
Σχήμα 9.28: Προσδιορισμός χρόνου δράσης των διανυσμάτων τάσης, T1, T2, της τεχνικής SVPWM, στο περιβάλλον Simulink (Calculation of action time T1 and T2 of voltage vectors, of the SVPWM technique in Simulink).....	99
Σχήμα 9.29: Υπολογισμός χρόνου εναλλαγής κάθε τρανζίστορ, της τεχνικής SVPWM, στο περιβάλλον Simulink (Determine the switching time of each transistor, of the SVPWM technique in Simulink).....	99

Σχήμα 9.30: Δημιουργία παλμών PWM, της τεχνικής SVPWM, στο περιβάλλον Simulink (Generation of PWM pulses, of the SVPWM technique in Simulink) .....	100
Σχήμα 9.31: Μετατροπέας πηγής τάσης του αριστερού ηλεκτροκινητήρα, στο περιβάλλον Simulink (Voltage source inverter of left motor in Simulink) .....	100
Σχήμα 9.32: Πηγής τάσης του αριστερού ηλεκτροκινητήρα, στο περιβάλλον Simulink (Voltage source of left motor in Simulink) .....	101
Σχήμα 9.33: Σύγχρονος κινητήρας μόνιμου μαγνήτη αριστερού κινητήρου τροχού, στο περιβάλλον Simulink (Permanent Magnet Synchronous Motors of left drive wheel in Simulink) .....	102
Σχήμα 9.34: Κινητήρας, μετατροπέας και πηγή τάσης, αριστερού κινητήρου τροχού, στο Simulink (PMSM, inverter, energy source of left drive wheel in Simulink) .....	103
Σχήμα 9.35: Ολικό μοντέλο ηλεκτρονικού διαφορικού στο περιβάλλον Simulink (Electronic differential total model in Simulink) .....	104
Σχήμα 11.1: Γωνία τιμονιού (steering angle) .....	111
Σχήμα 11.2: Γωνιακή ταχύτητα αναφοράς (reference speed) .....	111
Σχήμα 11.3: Γωνιακή ταχύτητα αναφοράς σε μεγέθυνση (reference speed in zoom) .....	111
Σχήμα 11.4: Γραμμική ταχύτητα κινητήριων τροχών (Linear traction wheels speed) .....	111
Σχήμα 11.5: Γραμμική ταχύτητα κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (Linear traction wheels speed in zoom) .....	112
Σχήμα 11.6: Γραμμική ταχύτητα κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (Linear traction wheels speed in zoom) .....	112
Σχήμα 11.7: Γραμμική ταχύτητα κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (Linear traction wheels speed in zoom) .....	113
Σχήμα 11.8: Γραμμική ταχύτητα κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (Linear traction wheels speed in zoom) .....	113
Σχήμα 11.9: Γραμμική ταχύτητα κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (Linear traction wheels speed in zoom) .....	113
Σχήμα 11.10: Γωνιακή ταχύτητα κινητήριων τροχών (traction wheels speed) .....	113
Σχήμα 11.11: Γωνιακή ταχύτητα κινητήρων (motors speed) .....	113
Σχήμα 11.12: Διαφορά γωνιακής ταχύτητας των κινητήριων τροχών (traction wheels speed difference) .....	113
Σχήμα 11.13: Σφάλμα γωνιακής ταχύτητας κινητήρων (motors speed error) .....	114
Σχήμα 11.14: Σφάλμα γωνιακής ταχύτητας κινητήρων σε μεγέθυνση (motors speed error in zoom) .....	114
Σχήμα 11.15: Σφάλμα γωνιακής ταχύτητας κινητήρων σε μεγέθυνση (motors speed error in zoom) .....	114
Σχήμα 11.16: Σφάλμα γωνιακής ταχύτητας κινητήρων σε μεγέθυνση (motors speed error in zoom) .....	114
Σχήμα 11.17: Σφάλμα γωνιακής ταχύτητας κινητήρων σε μεγέθυνση (motors speed error in zoom) .....	114
Σχήμα 11.18: Σφάλμα γωνιακής ταχύτητας κινητήρων σε μεγέθυνση (motors speed error in zoom) .....	114
Σχήμα 11.19: Σήμα ελέγχου του συστήματος (system control signal) .....	115
Σχήμα 11.20: Φορτίο ροπής κινητήριων τροχών (load traction wheels torque) .....	115
Σχήμα 11.21: Φορτίο ροπής κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (load traction wheels torque in zoom) .....	116
Σχήμα 11.22: Φορτίο ροπής κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (load traction wheels torque in zoom) .....	116
Σχήμα 11.23: Φορτίο ροπής κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (load traction wheels torque in zoom) .....	116
Σχήμα 11.24: Φορτίο ροπής κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (load traction wheels torque in zoom) .....	116
Σχήμα 11.25: Φορτίο ροπής κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (load traction wheels torque in zoom) .....	116
Σχήμα 11.26: Φορτίο ροπής κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (load traction wheels torque in zoom) .....	116

Σχήμα 11.27: Φορτίο ροπής κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (load traction wheels torque in zoom) .....	117
Σχήμα 11.28: Ροπή έλξης κινητήριων τροχών (tractive wheels torque) .....	117
Σχήμα 11.29: Ροπή έλξης κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (tractive wheels torque in zoom).....	117
Σχήμα 11.30: Ροπή έλξης κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (tractive wheels torque in zoom).....	117
Σχήμα 11.31: Ροπή έλξης κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (tractive wheels torque in zoom).....	118
Σχήμα 11.32: Ροπή έλξης κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (tractive wheels torque in zoom).....	118
Σχήμα 11.33: Ροπή έλξης κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (tractive wheels torque in zoom).....	118
Σχήμα 11.34: Ηλεκτρική ροπή (electrical torque) .....	118
Σχήμα 11.35: Ηλεκτρική ροπή σε μεγέθυνση (electrical torque in zoom) .....	119
Σχήμα 11.36: Ηλεκτρική ροπή σε μεγέθυνση (electrical torque in zoom) .....	119
Σχήμα 11.37: Ηλεκτρική ροπή σε μεγέθυνση (electrical torque in zoom) .....	119
Σχήμα 11.38: Ηλεκτρική ροπή σε μεγέθυνση (electrical torque in zoom) .....	119
Σχήμα 11.39: Ηλεκτρική ροπή σε μεγέθυνση (electrical torque in zoom) .....	119
Σχήμα 11.40: Ρεύμα τυλιγμάτων τυμπάνου (armature current) .....	119
Σχήμα 11.41: Τάση τυμπάνου (armature voltage) .....	120
Σχήμα 11.42: Τάση τυμπάνου σε μεγέθυνση (armature voltage in zoom).....	120
Σχήμα 11.43: Τάση τυμπάνου σε μεγέθυνση (armature voltage in zoom).....	121
Σχήμα 11.44: Τάση τυμπάνου σε μεγέθυνση (armature voltage in zoom).....	121
Σχήμα 11.45: Τάση τυμπάνου σε μεγέθυνση (armature voltage in zoom).....	121
Σχήμα 11.46: Τάση τυμπάνου σε μεγέθυνση (armature voltage in zoom).....	121
Σχήμα 11.47: Ρεύμα τυλιγμάτων πεδίου (field current) .....	121
Σχήμα 11.48: Τάση πεδίου (field voltage) .....	121
Σχήμα 11.49: Γωνία τιμονιού (steering angle).....	122
Σχήμα 11.50: Γωνιακή ταχύτητα αναφοράς (reference speed) .....	122
Σχήμα 11.51: Γωνιακή ταχύτητα αναφοράς σε μεγέθυνση (reference speed in zoom).....	122
Σχήμα 11.52: Γωνιακή ταχύτητα αναφοράς σε μεγέθυνση (reference speed in zoom).....	122
Σχήμα 11.53: Γραμμική ταχύτητα κινητήριων τροχών (Linear traction wheels speed) .....	123
Σχήμα 11.54: Γραμμική ταχύτητα κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (Linear traction wheels speed in zoom) .....	123
Σχήμα 11.55: Γραμμική ταχύτητα κινητήριων τροχών (Linear traction wheels speed) .....	124
Σχήμα 11.56: Γραμμική ταχύτητα κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (Linear traction wheels speed in zoom) .....	124
Σχήμα 11.57: Γραμμική ταχύτητα κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (Linear traction wheels speed in zoom) .....	124
Σχήμα 11.58: Γραμμική ταχύτητα κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (Linear traction wheels speed in zoom) .....	124
Σχήμα 11.59: Γωνιακή ταχύτητα κινητήρων/κινητήριων τροχών (motors/traction wheels speed) .....	124
Σχήμα 11.60: Γωνιακή ταχύτητα κινητήρων/κινητήριων τροχών (motors/traction wheels speed) .....	124
Σχήμα 11.61: Διαφορά γωνιακής ταχύτητας των κινητήριων τροχών (traction wheels speed difference) .....	125
Σχήμα 11.62: Σφάλμα γωνιακής ταχύτητας κινητήρων (motors speed error).....	125
Σχήμα 11.63: Σφάλμα γωνιακής ταχύτητας κινητήρων σε μεγέθυνση (motors speed error in zoom) ...	125
Σχήμα 11.64: Σφάλμα γωνιακής ταχύτητας κινητήρων σε μεγέθυνση (motors speed error in zoom) ...	125
Σχήμα 11.65: Σφάλμα γωνιακής ταχύτητας κινητήρων σε μεγέθυνση (motors speed error in zoom) ...	126

Σχήμα 11.66: Σφάλμα γωνιακής ταχύτητας κινητήρων σε μεγέθυνση (motors speed error in zoom) ...	126
Σχήμα 11.67: Σφάλμα γωνιακής ταχύτητας κινητήρων σε μεγέθυνση (motors speed error in zoom) ...	126
Σχήμα 11.68: Φορτίο ροπής κινητήριων τροχών (load traction wheels torque) .....	126
Σχήμα 11.69: Φορτίο ροπής κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (load traction wheels torque in zoom) 127	127
Σχήμα 11.70: Φορτίο ροπής κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (load traction wheels torque in zoom) 127	127
Σχήμα 11.71: Φορτίο ροπής κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (load traction wheels torque in zoom) 127	127
Σχήμα 11.72: Φορτίο ροπής κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (load traction wheels torque in zoom) 127	127
Σχήμα 11.73: Φορτίο ροπής κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (load traction wheels torque in zoom) 128	128
Σχήμα 11.74: Ροπή έλξης κινητήριων τροχών (tractive wheels torque) .....	128
Σχήμα 11.75: Ροπή έλξης κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (tractive wheels torque in zoom).....	129
Σχήμα 11.76: Ροπή έλξης κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (tractive wheels torque in zoom).....	129
Σχήμα 11.77: Ροπή έλξης κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (tractive wheels torque in zoom).....	129
Σχήμα 11.78: Ροπή έλξης κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (tractive wheels torque in zoom).....	129
Σχήμα 11.79: Ροπή έλξης κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (tractive wheels torque in zoom).....	130
Σχήμα 11.80: Ηλεκτρική ροπή (electrical torque) .....	130
Σχήμα 11.81: Σφάλμα ροπής έλξης κινητήριων τροχών (tractive wheels torque error).....	130
Σχήμα 11.82: Σφάλμα ροπής έλξης κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (tractive wheels torque error in zoom) .....	130
Σχήμα 11.83: Ρεύμα στάτορα του κινητήρα 1 σε a-b-c πλαίσιο αναφοράς, σε μεγέθυνση (Stator current of motor 1 in a-b-c reference frame, in zoom) .....	131
Σχήμα 11.84: Ρεύμα στάτορα του κινητήρα 1 σε a-b-c πλαίσιο αναφοράς, σε μεγέθυνση (Stator current of motor 1 in a-b-c reference frame, in zoom) .....	131
Σχήμα 11.85: Ρεύμα στάτορα του κινητήρα 1 σε a-b-c πλαίσιο αναφοράς, σε μεγέθυνση (Stator current of motor 1 in a-b-c reference frame, in zoom) .....	131
Σχήμα 11.86: Ρεύμα στάτορα του κινητήρα 1 σε a-b-c πλαίσιο αναφοράς, σε μεγέθυνση (Stator current of motor 1 in a-b-c reference frame, in zoom) .....	131
Σχήμα 11.87: Ρεύμα στάτορα του κινητήρα 1 σε a-b-c πλαίσιο αναφοράς, σε μεγέθυνση (Stator current of motor 1 in a-b-c reference frame, in zoom) .....	132
Σχήμα 11.88: Ρεύμα στάτορα του κινητήρα 1 σε alpha-beta πλαίσιο αναφοράς, σε μεγέθυνση (Stator current of motor 1 in alpha-beta reference frame, in zoom) .....	132
Σχήμα 11.89: Ρεύμα στάτορα του κινητήρα 1 σε alpha-beta πλαίσιο αναφοράς, σε μεγέθυνση (Stator current of motor 1 in alpha-beta reference frame, in zoom) .....	132
Σχήμα 11.90: Ρεύμα στάτορα του κινητήρα 1 σε alpha-beta πλαίσιο αναφοράς, σε μεγέθυνση (Stator current of motor 1 in alpha-beta reference frame, in zoom) .....	132
Σχήμα 11.91: Ρεύμα στάτορα του κινητήρα 1 σε alpha-beta πλαίσιο αναφοράς, σε μεγέθυνση (Stator current of motor 1 in alpha-beta reference frame, in zoom) .....	133
Σχήμα 11.92: Ρεύμα στάτορα του κινητήρα 1 σε alpha-beta πλαίσιο αναφοράς, σε μεγέθυνση (Stator current of motor 1 in alpha-beta reference frame, in zoom) .....	133
Σχήμα 11.93: Ρεύμα στάτορα του κινητήρα 1 σε q-d πλαίσιο αναφοράς (Stator current of motor 1 in q-d reference frame) .....	133
Σχήμα 11.94: Ρεύμα στάτορα του κινητήρα 1 σε q-d πλαίσιο αναφοράς, σε μεγέθυνση (Stator current of motor 1 in q-d reference frame, in zoom) .....	133
Σχήμα 11.95: Σφάλμα ρεύματος στάτορα της q συνιστώσας (q-axis stator current error) .....	133

Σχήμα 11.96: Σφάλμα ρεύματος στάτορα της q συνιστώσας, σε μεγέθυνση (q-axis stator current error, in zoom) .....	133
Σχήμα 11.97: Τάση στάτορα του κινητήρα 1 σε a-b-c πλαίσιο αναφοράς (Stator voltage of motor 1 in a-b-c reference frame) .....	134
Σχήμα 11.98: Τάση στάτορα του κινητήρα 1 σε a-b-c πλαίσιο αναφοράς, σε μεγέθυνση (Stator voltage of motor 1 in a-b-c reference frame, in zoom) .....	134
Σχήμα 11.99: Τάση στάτορα του κινητήρα 1 σε alpha-beta πλαίσιο αναφοράς (Stator voltage of motor 1 in alpha-beta reference frame) .....	134
Σχήμα 11.100: Τάση στάτορα του κινητήρα 1 σε alpha-beta πλαίσιο αναφοράς, σε μεγέθυνση (Stator voltage of motor 1 in alpha-beta reference frame, in zoom) .....	134
Σχήμα 11.101: Τάση στάτορα του κινητήρα 1 σε alpha-beta πλαίσιο αναφοράς, σε μεγέθυνση (Stator voltage of motor 1 in alpha-beta reference frame, in zoom) .....	135
Σχήμα 11.102: Τάση στάτορα του κινητήρα 1 σε alpha-beta πλαίσιο αναφοράς, σε μεγέθυνση (Stator voltage of motor 1 in alpha-beta reference frame, in zoom) .....	135
Σχήμα 11.103: Τάση στάτορα του κινητήρα 1 σε alpha-beta πλαίσιο αναφοράς, σε μεγέθυνση (Stator voltage of motor 1 in alpha-beta reference frame, in zoom) .....	135
Σχήμα 11.104: Τάση στάτορα του κινητήρα 1 σε q-d πλαίσιο αναφοράς, σε μεγέθυνση (Stator voltage of motor 1 in q-d reference frame, in zoom) .....	135
Σχήμα 11.105: Τάση τροφοδοσίας (Supply voltage) .....	136
Σχήμα 11.106: Ακολουθία τομέων της μεθόδου SVPWM 1 (Sectors sequence of SVPWM method 1) ..	136
Σχήμα 11.107: Χρονικές μεταβλητές X, Y, Z της μεθόδου SVPWM 1 (Time variables X, Y, Z of the SVPWM method 1) .....	136
Σχήμα 11.108: Ενεργός χρόνος T1, T2 της μεθόδου SVPWM 1 (Active time T1, T2 of SVPWM method 1) .....	136
Σχήμα 11.109: Σημεία εναλλαγής διανυσμάτων $Tcm1$ , $Tcm2$ , $Tcm3$ της μεθόδου SVPWM 1 (Points switching vector voltage of SVPWM method 1) .....	137
Σχήμα 11.110: Παλμοί της μεθόδου SVPWM 1 (Pulses of SVPWM method 1) .....	137
Σχήμα 0.1: Γωνία τιμονιού (steering angle) .....	141
Σχήμα 0.2: Γωνιακή ταχύτητα αναφοράς (reference speed) .....	141
Σχήμα 0.3: Γραμμική ταχύτητα κινητήριων τροχών (Linear traction wheels speed) .....	141
Σχήμα 0.4: Γραμμική ταχύτητα κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (Linear traction wheels speed in zoom) .....	141
Σχήμα 0.5: Γωνιακή ταχύτητα κινητήριων τροχών (traction wheels speed) .....	141
Σχήμα 0.6: Γωνιακή ταχύτητα κινητήρων (motors speed) .....	141
Σχήμα 0.7: Διαφορά γωνιακής ταχύτητας των κινητήριων τροχών (traction wheels speed difference) ..	142
Σχήμα 0.8: Σφάλμα γωνιακής ταχύτητας κινητήρων (motors speed error) .....	142
Σχήμα 0.9: Σφάλμα γωνιακής ταχύτητας κινητήρων σε μεγέθυνση (motors speed error in zoom) ..	142
Σχήμα 0.10: Σήμα ελέγχου του συστήματος (system control signal) .....	142
Σχήμα 0.11: Φορτίο ροπής κινητήριων τροχών (load traction wheels torque) .....	142
Σχήμα 0.12: Φορτίο ροπής κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (load traction wheels torque in zoom) ..	142
Σχήμα 0.13: Ροπή έλξης κινητήριων τροχών (tractive wheels torque) .....	143
Σχήμα 0.14: Ροπή έλξης κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (tractive wheels torque in zoom) .....	143
Σχήμα 0.15: Ηλεκτρική ροπή (electrical torque) .....	143
Σχήμα 0.16: Ηλεκτρική ροπή σε μεγέθυνση (electrical torque in zoom) .....	143

Σχήμα 0.17: Ηλεκτρική ροπή σε μεγέθυνση (electrical torque in zoom) .....	143
Σχήμα 0.18: Ρεύμα τυλιγμάτων τυμπάνου (armature current) .....	143
Σχήμα 0.19: Τάση τυμπάνου (armature voltage) .....	144
Σχήμα 0.20: Τάση τυμπάνου σε μεγέθυνση (armature voltage in zoom) .....	144
Σχήμα 0.21: Ρεύμα τυλιγμάτων πεδίου (field current) .....	144
Σχήμα 0.22: Τάση πεδίου (field voltage) .....	144
Σχήμα 0.23: Γωνία τιμονιού (steering angle) .....	144
Σχήμα 0.24: Γωνιακή ταχύτητα αναφοράς (reference speed) .....	144
Σχήμα 0.25: Γραμμική ταχύτητα κινητήριων τροχών (Linear traction wheels speed) .....	145
Σχήμα 0.26: Γραμμική ταχύτητα κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (Linear traction wheels speed in zoom) .....	145
Σχήμα 0.27: Γωνιακή ταχύτητα κινητήριων τροχών (traction wheels speed) .....	145
Σχήμα 0.28: Γωνιακή ταχύτητα κινητήρων (motors speed) .....	145
Σχήμα 0.29: Διαφορά γωνιακής ταχύτητας των κινητήριων τροχών (traction wheels speed difference) .....	145
Σχήμα 0.30: Σφάλμα γωνιακής ταχύτητας κινητήρων (motors speed error) .....	145
Σχήμα 0.31: Σφάλμα γωνιακής ταχύτητας κινητήρων σε μεγέθυνση (motors speed error in zoom) .....	146
Σχήμα 0.32: Σήμα ελέγχου του συστήματος (system control signal) .....	146
Σχήμα 0.33: Φορτίο ροπής κινητήριων τροχών (load traction wheels torque) .....	146
Σχήμα 0.34: Φορτίο ροπής κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (load traction wheels torque in zoom) .....	146
Σχήμα 0.35: Ροπή έλξης κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (tractive wheels torque) .....	146
Σχήμα 0.36: Ροπή έλξης κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (tractive wheels torque in zoom) .....	146
Σχήμα 0.37: Ηλεκτρική ροπή (electrical torque) .....	147
Σχήμα 0.38: Ηλεκτρική ροπή σε μεγέθυνση (electrical torque in zoom) .....	147
Σχήμα 0.39: Ηλεκτρική ροπή σε μεγέθυνση (electrical torque in zoom) .....	147
Σχήμα 0.40: Ρεύμα τυλιγμάτων τυμπάνου (armature current) .....	147
Σχήμα 0.41: Τάση τυμπάνου (armature voltage) .....	147
Σχήμα 0.42: Τάση τυμπάνου σε μεγέθυνση (armature voltage in zoom) .....	147
Σχήμα 0.43: Ρεύμα τυλιγμάτων πεδίου (field current) .....	148
Σχήμα 0.44: Τάση πεδίου (field voltage) .....	148
Σχήμα 0.45: Γωνία τιμονιού (steering angle) .....	148
Σχήμα 0.46: Γωνιακή ταχύτητα αναφοράς (reference speed) .....	148
Σχήμα 0.47: Γωνιακή ταχύτητα αναφοράς σε μεγέθυνση (reference speed in zoom) .....	148
Σχήμα 0.48: Γραμμική ταχύτητα κινητήριων τροχών (Linear traction wheels speed) .....	148
Σχήμα 0.49: Γραμμική ταχύτητα κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (Linear traction wheels speed in zoom) .....	149
Σχήμα 0.50: Γραμμική ταχύτητα κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (Linear traction wheels speed in zoom) .....	149
Σχήμα 0.51: Γωνιακή ταχύτητα κινητήριων τροχών (traction wheels speed) .....	149
Σχήμα 0.52: Γωνιακή ταχύτητα κινητήρων (motors speed) .....	149
Σχήμα 0.53: Διαφορά γωνιακής ταχύτητας των κινητήριων τροχών (traction wheels speed difference) .....	149
Σχήμα 0.54: Σφάλμα γωνιακής ταχύτητας κινητήρων (motors speed error) .....	149
Σχήμα 0.55: Σφάλμα γωνιακής ταχύτητας κινητήρων σε μεγέθυνση (motors speed error in zoom) .....	150

Σχήμα 0.56: Σήμα ελέγχου του συστήματος (system control signal) .....	150
Σχήμα 0.57: Φορτίο ροπής κινητήριων τροχών (load traction wheels torque) .....	150
Σχήμα 0.58: Φορτίο ροπής κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (load traction wheels torque in zoom)..	150
Σχήμα 0.59: Φορτίο ροπής κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (load traction wheels torque in zoom)..	150
Σχήμα 0.60: Ροπή έλξης κινητήριων τροχών (tractive wheels torque) .....	150
Σχήμα 0.61: Ροπή έλξης κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (tractive wheels torque in zoom).....	151
Σχήμα 0.62: Ροπή έλξης κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (tractive wheels torque in zoom).....	151
Σχήμα 0.63: Ροπή έλξης κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (tractive wheels torque in zoom).....	151
Σχήμα 0.64: Ηλεκτρική ροπή (electrical torque) .....	151
Σχήμα 0.65: Ηλεκτρική ροπή σε μεγέθυνση (electrical torque in zoom).....	151
Σχήμα 0.66: Ηλεκτρική ροπή σε μεγέθυνση (electrical torque in zoom).....	151
Σχήμα 0.67: Ηλεκτρική ροπή σε μεγέθυνση (electrical torque in zoom).....	152
Σχήμα 0.68: Ρεύμα τυλιγμάτων τυμπάνου (armature current) .....	152
Σχήμα 0.69: Τάση τυμπάνου (armature voltage) .....	152
Σχήμα 0.70: Τάση τυμπάνου σε μεγέθυνση (armature voltage in zoom).....	152
Σχήμα 0.71: Τάση τυμπάνου σε μεγέθυνση (armature voltage in zoom).....	152
Σχήμα 0.72: Ρεύμα τυλιγμάτων πεδίου (field current) .....	152
Σχήμα 0.73: Τάση πεδίου (field voltage) .....	153
Σχήμα 0.74: Γωνία τιμονιού (steering angle).....	153
Σχήμα 0.75: Γωνιακή ταχύτητα αναφοράς (reference speed) .....	153
Σχήμα 0.76: Γωνιακή ταχύτητα αναφοράς σε μεγέθυνση (reference speed in zoom).....	153
Σχήμα 0.77: Γραμμική ταχύτητα κινητήριων τροχών (Linear traction wheels speed) .....	153
Σχήμα 0.78: Γραμμική ταχύτητα κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (Linear traction wheels speed in zoom) .....	154
Σχήμα 0.79: Γραμμική ταχύτητα κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (Linear traction wheels speed in zoom) .....	154
Σχήμα 0.80: Γωνιακή ταχύτητα κινητήριων τροχών (traction wheels speed) .....	154
Σχήμα 0.81: Γωνιακή ταχύτητα κινητήρων (motors speed) .....	154
Σχήμα 0.82: Διαφορά γωνιακής ταχύτητας των κινητήριων τροχών (traction wheels speed difference)	154
Σχήμα 0.83: Σφάλμα γωνιακής ταχύτητας κινητήρων (motors speed error).....	154
Σχήμα 0.84: Σφάλμα γωνιακής ταχύτητας κινητήρων σε μεγέθυνση (motors speed error in zoom) .....	155
Σχήμα 0.85: Σφάλμα γωνιακής ταχύτητας κινητήρων σε μεγέθυνση (motors speed error in zoom) .....	155
Σχήμα 0.86: Σήμα ελέγχου του συστήματος (system control signal) .....	155
Σχήμα 0.87: Φορτίο ροπής κινητήριων τροχών (load traction wheels torque) .....	155
Σχήμα 0.88: Φορτίο ροπής κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (load traction wheels torque in zoom)..	155
Σχήμα 0.89: Φορτίο ροπής κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (load traction wheels torque in zoom)..	155
Σχήμα 0.90: Ροπή έλξης κινητήριων τροχών (tractive wheels torque) .....	156
Σχήμα 0.91: Ροπή έλξης κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (tractive wheels torque in zoom).....	156
Σχήμα 0.92: Ροπή έλξης κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (tractive wheels torque in zoom).....	156
Σχήμα 0.93: Ροπή έλξης κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (tractive wheels torque in zoom).....	156
Σχήμα 0.94: Ηλεκτρική ροπή (electrical torque) .....	156
Σχήμα 0.95: Ηλεκτρική ροπή σε μεγέθυνση (electrical torque in zoom) .....	156
Σχήμα 0.96: Ηλεκτρική ροπή σε μεγέθυνση (electrical torque in zoom) .....	157

Σχήμα 0.97: Ηλεκτρική ροπή σε μεγέθυνση (electrical torque in zoom) .....	157
Σχήμα 0.98: Ρεύμα τυλιγμάτων τυμπάνου (armature current) .....	157
Σχήμα 0.99: Τάση τυμπάνου (armature voltage) .....	157
Σχήμα 0.100: Τάση τυμπάνου σε μεγέθυνση (armature voltage in zoom) .....	157
Σχήμα 0.101: Τάση τυμπάνου σε μεγέθυνση (armature voltage in zoom) .....	157
Σχήμα 0.102: Ρεύμα τυλιγμάτων πεδίου (field current) .....	158
Σχήμα 0.103: Τάση πεδίου (field voltage) .....	158
Σχήμα 0.104: Γωνία τιμονιού (steering angle) .....	158
Σχήμα 0.105: Γωνιακή ταχύτητα αναφοράς (reference speed) .....	158
Σχήμα 0.106: Γωνιακή ταχύτητα αναφοράς σε μεγέθυνση (reference speed in zoom) .....	158
Σχήμα 0.107: Γωνιακή ταχύτητα αναφοράς σε μεγέθυνση (reference speed in zoom) .....	158
Σχήμα 0.108: Γραμμική ταχύτητα κινητήριων τροχών (Linear traction wheels speed) .....	159
Σχήμα 0.109: Γραμμική ταχύτητα κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (Linear traction wheels speed in zoom) .....	159
Σχήμα 0.110: Γραμμική ταχύτητα κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (Linear traction wheels speed in zoom) .....	159
Σχήμα 0.111: Γωνιακή ταχύτητα κινητήρων/κινητήριων τροχών (motors/traction wheels speed) .....	159
Σχήμα 0.112: Γωνιακή ταχύτητα κινητήρων/κινητήριων τροχών (motors/traction wheels speed) .....	159
Σχήμα 0.113: Διαφορά γωνιακής ταχύτητας των κινητήριων τροχών (traction wheels speed difference) .....	159
Σχήμα 0.114: Σφάλμα γωνιακής ταχύτητας κινητήρων (motors speed error) .....	160
Σχήμα 0.115: Σφάλμα γωνιακής ταχύτητας κινητήρων σε μεγέθυνση (motors speed error in zoom) .....	160
Σχήμα 0.116: Σφάλμα γωνιακής ταχύτητας κινητήρων σε μεγέθυνση (motors speed error in zoom) .....	160
Σχήμα 0.117: Φορτίο ροπής κινητήριων τροχών (load traction wheels torque) .....	160
Σχήμα 0.118: Ροπή έλξης κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (tractive wheels torque in zoom) .....	160
Σχήμα 0.119: Ηλεκτρική ροπή σε μεγέθυνση (electrical torque in zoom) .....	160
Σχήμα 0.120: Σφάλμα ροπής έλξης κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (tractive wheels torque error in zoom) .....	161
Σχήμα 0.121: Ρεύμα στάτορα του κινητήρα 1 σε a-b-c πλαίσιο αναφοράς (Stator current of motor 1 in a-b-c reference frame) .....	161
Σχήμα 0.122: Ρεύμα στάτορα του κινητήρα 1 σε alpha-beta πλαίσιο αναφοράς, σε μεγέθυνση (Stator current of motor 1 in alpha-beta reference frame, in zoom) .....	161
Σχήμα 0.123: Ρεύμα στάτορα του κινητήρα 1 σε q-d πλαίσιο αναφοράς, σε μεγέθυνση (Stator current of motor 1 in q-d reference frame, in zoom) .....	161
Σχήμα 0.124: Τάση στάτορα του κινητήρα 1 σε a-b-c πλαίσιο αναφοράς, σε μεγέθυνση (Stator voltage of motor 1 in a-b-c reference frame, in zoom) .....	161
Σχήμα 0.125: Τάση στάτορα του κινητήρα 1 σε alpha-beta πλαίσιο αναφοράς, σε μεγέθυνση (Stator voltage of motor 1 in alpha-beta reference frame, in zoom) .....	161
Σχήμα 0.126: Τάση στάτορα του κινητήρα 1 σε q-d πλαίσιο αναφοράς, σε μεγέθυνση (Stator voltage of motor 1 in q-d reference frame, in zoom) .....	162
Σχήμα 0.127: Τάση τροφοδοσίας (Supply voltage) .....	162
Σχήμα 0.128: Ακολουθία τομέων της μεθόδου SVPWM 1 (Sectors sequence of SVPWM method 1) ....	162
Σχήμα 0.129: Χρονικές μεταβλητές X, Y, Z της μεθόδου SVPWM 1 (Time variables X, Y, Z of the SVPWM method 1)....	162

Σχήμα 0.130: Ενεργός χρόνος T1, T2 της μεθόδου SVPWM 1 (Active time T1, T2 of SVPWM method 1) .....	162
Σχήμα 0.131: Σημεία εναλλαγής διανυσμάτων $Tcm1$ , $Tcm2$ , $Tcm3$ της μεθόδου SVPWM 1 (Points switching vector voltage of SVPWM method 1) .....	162
Σχήμα 0.132: Παλμοί της μεθόδου SVPWM 1 (Pulses of SVPWM method 1) .....	163
Σχήμα 0.133: Γωνία τιμονιού (steering angle).....	163
Σχήμα 0.134: Γωνιακή ταχύτητα αναφοράς (reference speed) .....	163
Σχήμα 0.135: Γωνιακή ταχύτητα αναφοράς σε μεγέθυνση (reference speed in zoom) .....	163
Σχήμα 0.136: Γωνιακή ταχύτητα αναφοράς σε μεγέθυνση (reference speed in zoom) .....	163
Σχήμα 0.137: Γραμμική ταχύτητα κινητήριων τροχών (Linear traction wheels speed) .....	164
Σχήμα 0.138: Γραμμική ταχύτητα κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (Linear traction wheels speed in zoom) .....	164
Σχήμα 0.139: Γραμμική ταχύτητα κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (Linear traction wheels speed in zoom) .....	164
Σχήμα 0.140: Γωνιακή ταχύτητα κινητήρων/κινητήριων τροχών (motors/traction wheels speed) .....	164
Σχήμα 0.141: Γωνιακή ταχύτητα κινητήρων/κινητήριων τροχών (motors/traction wheels speed) .....	164
Σχήμα 0.142: Διαφορά γωνιακής ταχύτητας των κινητήριων τροχών (traction wheels speed difference) .....	164
Σχήμα 0.143: Σφάλμα γωνιακής ταχύτητας κινητήρων (motors speed error).....	165
Σχήμα 0.144: Σφάλμα γωνιακής ταχύτητας κινητήρων σε μεγέθυνση (motors speed error in zoom) ...	165
Σχήμα 0.145: Σφάλμα γωνιακής ταχύτητας κινητήρων σε μεγέθυνση (motors speed error in zoom) ...	165
Σχήμα 0.146: Φορτίο ροπής κινητήριων τροχών (load traction wheels torque) .....	165
Σχήμα 0.147: Ροπή έλξης κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (tractive wheels torque in zoom).....	165
Σχήμα 0.148: Ηλεκτρική ροπή σε μεγέθυνση (electrical torque in zoom) .....	165
Σχήμα 0.149: Σφάλμα ροπής έλξης κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (tractive wheels torque error in zoom) .....	166
Σχήμα 0.150: Ρεύμα στάτορα του κινητήρα 1 σε a-b-c πλαίσιο αναφοράς, σε μεγέθυνση (Stator current of motor 1 in a-b-c reference frame, in zoom) .....	166
Σχήμα 0.151: Ρεύμα στάτορα του κινητήρα 1 σε alpha-beta πλαίσιο αναφοράς, σε μεγέθυνση (Stator current of motor 1 in alpha-beta reference frame, in zoom) .....	166
Σχήμα 0.152: Ρεύμα στάτορα του κινητήρα 1 σε q-d πλαίσιο αναφοράς, σε μεγέθυνση (Stator current of motor 1 in q-d reference frame, in zoom) .....	166
Σχήμα 0.153: Τάση στάτορα του κινητήρα 1 σε a-b-c πλαίσιο αναφοράς, σε μεγέθυνση (Stator voltage of motor 1 in a-b-c reference frame, in zoom) .....	166
Σχήμα 0.154: Τάση στάτορα του κινητήρα 1 σε alpha-beta πλαίσιο αναφοράς, σε μεγέθυνση (Stator voltage of motor 1 in alpha-beta reference frame, in zoom) .....	166
Σχήμα 0.155: Τάση στάτορα του κινητήρα 1 σε q-d πλαίσιο αναφοράς, σε μεγέθυνση (Stator voltage of motor 1 in q-d reference frame, in zoom) .....	167
Σχήμα 0.156: Τάση τροφοδοσίας (Supply voltage) .....	167
Σχήμα 0.157: Ακολουθία τομέων της μεθόδου SVPWM 1 (Sectors sequence of SVPWM method 1) ....	167
Σχήμα 0.158: Χρονικές μεταβλητές X, Y, Z της μεθόδου SVPWM 1 (Time variables X, Y, Z of the SVPWM method 1).....	167
Σχήμα 0.159: Ενεργός χρόνος T1, T2 της μεθόδου SVPWM 1 (Active time T1, T2 of SVPWM method 1) .....	167

Σχήμα 0.160: Σημεία εναλλαγής διανυσμάτων $Tcm1$ , $Tcm2$ , $Tcm3$ της μεθόδου SVPWM 1 (Points switching vector voltage of SVPWM method 1) .....	167
Σχήμα 0.161: Παλμοί της μεθόδου SVPWM 1 (Pulses of SVPWM method 1) .....	168
Σχήμα 0.162: Γωνία τιμονιού (steering angle).....	168
Σχήμα 0.163: Γωνιακή ταχύτητα αναφοράς (reference speed) .....	168
Σχήμα 0.164: Γωνιακή ταχύτητα αναφοράς σε μεγέθυνση (reference speed in zoom).....	168
Σχήμα 0.165: Γωνιακή ταχύτητα αναφοράς σε μεγέθυνση (reference speed in zoom).....	168
Σχήμα 0.166: Γραμμική ταχύτητα κινητήριων τροχών (Linear traction wheels speed) .....	169
Σχήμα 0.167: Γραμμική ταχύτητα κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (Linear traction wheels speed in zoom) .....	169
Σχήμα 0.168: Γραμμική ταχύτητα κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (Linear traction wheels speed in zoom) .....	169
Σχήμα 0.169: Γραμμική ταχύτητα κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (Linear traction wheels speed in zoom) .....	169
Σχήμα 0.170: Γωνιακή ταχύτητα κινητήρων/κινητήριων τροχών (motors/traction wheels speed).....	169
Σχήμα 0.171: Γωνιακή ταχύτητα κινητήρων/κινητήριων τροχών (motors/traction wheels speed).....	169
Σχήμα 0.172: Διαφορά γωνιακής ταχύτητας των κινητήριων τροχών (traction wheels speed difference) .....	170
Σχήμα 0.173: Σφάλμα γωνιακής ταχύτητας κινητήρων (motors speed error).....	170
Σχήμα 0.174: Σφάλμα γωνιακής ταχύτητας κινητήρων σε μεγέθυνση (motors speed error in zoom) ...	170
Σχήμα 0.175: Σφάλμα γωνιακής ταχύτητας κινητήρων σε μεγέθυνση (motors speed error in zoom) ...	170
Σχήμα 0.176: Φορτίο ροπής κινητήριων τροχών (load traction wheels torque) .....	170
Σχήμα 0.177: Ροπή έλξης κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (tractive wheels torque in zoom).....	170
Σχήμα 0.178: Ηλεκτρική ροπή σε μεγέθυνση (electrical torque in zoom) .....	171
Σχήμα 0.179: Σφάλμα ροπής έλξης κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (tractive wheels torque error in zoom) .....	171
Σχήμα 0.180: Ρεύμα στάτορα του κινητήρα 1 σε a-b-c πλαίσιο αναφοράς, σε μεγέθυνση (Stator current of motor 1 in a-b-c reference frame, in zoom) .....	171
Σχήμα 0.181: Ρεύμα στάτορα του κινητήρα 1 σε alpha-beta πλαίσιο αναφοράς, σε μεγέθυνση (Stator current of motor 1 in alpha-beta reference frame, in zoom) .....	171
Σχήμα 0.182: Ρεύμα στάτορα του κινητήρα 1 σε q-d πλαίσιο αναφοράς, σε μεγέθυνση (Stator current of motor 1 in q-d reference frame, in zoom) .....	171
Σχήμα 0.183: Τάση στάτορα του κινητήρα 1 σε a-b-c πλαίσιο αναφοράς, σε μεγέθυνση (Stator voltage of motor 1 in a-b-c reference frame, in zoom) .....	171
Σχήμα 0.184: Τάση στάτορα του κινητήρα 1 σε alpha-beta πλαίσιο αναφοράς, σε μεγέθυνση (Stator voltage of motor 1 in alpha-beta reference frame, in zoom) .....	172
Σχήμα 0.185: Τάση στάτορα του κινητήρα 1 σε q-d πλαίσιο αναφοράς, σε μεγέθυνση (Stator voltage of motor 1 in q-d reference frame, in zoom) .....	172
Σχήμα 0.186: Τάση τροφοδοσίας (Supply voltage) .....	172
Σχήμα 0.187: Ακολουθία τομέων της μεθόδου SVPWM 1 (Sectors sequence of SVPWM method 1) ....	172
Σχήμα 0.188: Χρονικές μεταβλητές X, Y, Z της μεθόδου SVPWM 1 (Time variables X, Y, Z of the SVPWM method 1).....	172
Σχήμα 0.189: Ενεργός χρόνος T1, T2 της μεθόδου SVPWM 1 (Active time T1, T2 of SVPWM method 1) .....	172

Σχήμα 0.190: Σημεία εναλλαγής διανυσμάτων $Tcm1$ , $Tcm2$ , $Tcm3$ της μεθόδου SVPWM 1 (Points switching vector voltage of SVPWM method 1) .....	173
Σχήμα 0.191: Παλμοί της μεθόδου SVPWM 1 (Pulses of SVPWM method 1) .....	173
Σχήμα 0.192: Γωνία τιμονιού (steering angle).....	173
Σχήμα 0.193: Γωνιακή ταχύτητα αναφοράς (reference speed) .....	173
Σχήμα 0.194: Γωνιακή ταχύτητα αναφοράς σε μεγέθυνση (reference speed in zoom).....	173
Σχήμα 0.195: Γωνιακή ταχύτητα αναφοράς σε μεγέθυνση (reference speed in zoom).....	173
Σχήμα 0.196: Γραμμική ταχύτητα κινητήριων τροχών (Linear traction wheels speed) .....	174
Σχήμα 0.197: Γραμμική ταχύτητα κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (Linear traction wheels speed in zoom) .....	174
Σχήμα 0.198: Γραμμική ταχύτητα κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (Linear traction wheels speed in zoom) .....	174
Σχήμα 0.199: Γραμμική ταχύτητα κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (Linear traction wheels speed in zoom) .....	174
Σχήμα 0.200: Γωνιακή ταχύτητα κινητήρων/κινητήριων τροχών (motors/traction wheels speed).....	174
Σχήμα 0.201: Γωνιακή ταχύτητα κινητήρων/κινητήριων τροχών (motors/traction wheels speed).....	174
Σχήμα 0.202: Διαφορά γωνιακής ταχύτητας των κινητήριων τροχών (traction wheels speed difference) .....	175
Σχήμα 0.203: Σφάλμα γωνιακής ταχύτητας κινητήρων (motors speed error).....	175
Σχήμα 0.204: Σφάλμα γωνιακής ταχύτητας κινητήρων σε μεγέθυνση (motors speed error in zoom) ...	175
Σχήμα 0.205: Σφάλμα γωνιακής ταχύτητας κινητήρων σε μεγέθυνση (motors speed error in zoom) ...	175
Σχήμα 0.206: Φορτίο ροπής κινητήριων τροχών (load traction wheels torque) .....	175
Σχήμα 0.207: Ροπή έλξης κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (tractive wheels torque in zoom).....	175
Σχήμα 0.208: Ηλεκτρική ροπή σε μεγέθυνση (electrical torque in zoom) .....	176
Σχήμα 0.209: Σφάλμα ροπής έλξης κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (tractive wheels torque error in zoom) .....	176
Σχήμα 0.210: Ρεύμα στάτορα του κινητήρα 1 σε a-b-c πλαίσιο αναφοράς, σε μεγέθυνση (Stator current of motor 1 in a-b-c reference frame, in zoom) .....	176
Σχήμα 0.211: Ρεύμα στάτορα του κινητήρα 1 σε alpha-beta πλαίσιο αναφοράς, σε μεγέθυνση (Stator current of motor 1 in alpha-beta reference frame, in zoom) .....	176
Σχήμα 0.212: Ρεύμα στάτορα του κινητήρα 1 σε q-d πλαίσιο αναφοράς, σε μεγέθυνση (Stator current of motor 1 in q-d reference frame, in zoom) .....	176
Σχήμα 0.213: Τάση στάτορα του κινητήρα 1 σε a-b-c πλαίσιο αναφοράς, σε μεγέθυνση (Stator voltage of motor 1 in a-b-c reference frame, in zoom) .....	176
Σχήμα 0.214: Τάση στάτορα του κινητήρα 1 σε alpha-beta πλαίσιο αναφοράς, σε μεγέθυνση (Stator voltage of motor 1 in alpha-beta reference frame, in zoom) .....	177
Σχήμα 0.215: Τάση στάτορα του κινητήρα 1 σε q-d πλαίσιο αναφοράς, σε μεγέθυνση (Stator voltage of motor 1 in q-d reference frame, in zoom) .....	177
Σχήμα 0.216: Τάση τροφοδοσίας (Supply voltage) .....	177
Σχήμα 0.217: Ακολουθία τομέων της μεθόδου SVPWM 1 (Sectors sequence of SVPWM method 1) ....	177
Σχήμα 0.218: Χρονικές μεταβλητές X, Y, Z της μεθόδου SVPWM 1 (Time variables X, Y, Z of the SVPWM method 1).....	177
Σχήμα 0.219: Ενεργός χρόνος T1, T2 της μεθόδου SVPWM 1 (Active time T1, T2 of SVPWM method 1) .....	177

---

Σχήμα 0.220: Σημεία εναλλαγής διανυσμάτων $Tcm1$ , $Tcm2$ , $Tcm3$ της μεθόδου SVPWM 1 (Points switching vector voltage of SVPWM method 1) .....	178
Σχήμα 0.221: Παλμοί της μεθόδου SVPWM 1 (Pulses of SVPWM method 1) .....	178

## Περιεχόμενα πινάκων (Contents of tables)

Πίνακας 5.1: Η γενική επίδραση των συντελεστών του κατευθυντή (The general effects of each controller parameter) .....	47
Πίνακας 6.1: (Switching vectors, phase voltages and output line to line voltages) .....	65
Πίνακας 6.2: Αντιστοίχιση του N με τον τομέα S (Mapping of N to sector S) .....	66
Πίνακας 6.3: Αντιστοίχιση των X, Y, Z στον ενεργό χρόνο T1 και T2 (Mapping of X, Y, Z to active time T1 and T2) .....	67
Πίνακας 6.4: (Switching with Points vector) .....	68
Πίνακας 0.1: Οι προδιαγραφές του οχήματος της προσομοίωσης.....	139
Πίνακας 0.2: Οι προδιαγραφές των κινητήρων του μοντέλου 1.....	139
Πίνακας 0.3: Οι προδιαγραφές των μπαταριών του μοντέλου 1.....	139
Πίνακας 0.4: Οι προδιαγραφές των κινητήρων του μοντέλου 2.....	140
Πίνακας 0.5: Οι προδιαγραφές των μπαταριών του μοντέλου 2.....	140
Πίνακας 0.6: Οι προδιαγραφές των μετατροπέων του μοντέλου 2.....	140

## Συντομεύσεις - αρκτικόλεξα (abbreviations)

EV	electric vehicle
BEV	battery electric vehicles
EDS	electronic differential system
FOC	field-oriented control
PWM	pulse width modulation
SVPWM	space vector pulse width modulation
VSI	voltage source inverter
CSI	current Source Inverter
PMSM	permanent magnet synchronous motor
VC	vector control
AC	alternative current
DC	direct current
CEMF	counter electromotive force
EMF	electromotive force
PID	proportional-integral-derivative
PI	proportional-integral
RRF	rotating reference frame
SCR	Silicon-Controlled Rectifier

## Περίληψη

Σε αυτή την εργασία, προτείνεται και μοντελοποιείται ένα ηλεκτρονικό διαφορικό σύστημα (EDS) για ελαφρύ ηλεκτρικό όχημα (EV), που χρησιμοποιείται για τη μεταφορά επιβατών, με δύο οπίσθιους κινητήριους τροχούς, κάνοντας χρήση του μοντέλου Ackermann-Jeantan. Η χρήση του ηλεκτρονικού διαφορικού αποτελεί μια τεχνολογική πρόοδο του σχεδιασμού των οχημάτων, προσφέροντας καλύτερη ευστάθεια στο όχημα σε κυρτό δρόμο, ενώ ταυτόχρονα έχει τα πλεονεκτήματα της αντικατάστασης του ογκώδες, βαριού και μη αποδοτικού μηχανικού κιβωτίου ταχυτήτων και του μηχανικού διαφορικού, με πιο αποδοτικούς, ελαφρούς και μικρούς ηλεκτρικούς κινητήρες που συνδέονται απευθείας με τους τροχούς ή μέσω ενός μόνο γραναζιού. Συγκεκριμένα, μοντελοποιούνται δύο μοντέλα ηλεκτρικού οχήματος, τα οποία διαφέρουν μεταξύ τους ως προς το σύστημα πρόωσης και τον έλεγχο αυτού. Το πρώτο επανδρώνεται με δυο κινητήρες συνεχούς ρεύματος με ψήκτρες (Brushed DC motor), οι οποίοι συνδέονται με τους τροχούς, μέσω ενός γραναζιού. Το μοντέλο αυτό χρήζει απλότητας, χρησιμοποιώντας έναν απλό σύστημα ελέγχου, ρύθμισης τάσης, για κάθε έναν ηλεκτροκινητήρα. Το δεύτερο μοντέλο, επανδρώνεται με δύο σύγχρονους κινητήρες μόνιμου μαγνήτη (Permanent magnet synchronous motor). Το μοντέλο αυτό κάνει χρήση διανυσματικού ελέγχου (vector control) και συγκεκριμένα διανυσματικό έλεγχο με προσανατολισμό πεδίου (FOC), χρησιμοποιώντας την προηγμένη μέθοδο του Space Vector PWM (SVPWM), η οποία έχει το πλεονέκτημα της γρήγορης δυναμικής απόκρισης, με χαμηλούς κυματισμούς στην ταχύτητα, στην απόκριση ροπής και ελάχιστη εξάρτηση από τις παραμέτρους του κινητήρα. Η τεχνική αυτή δημιουργεί σήματα, τα οποία ελέγχουν ένα μετατροπέα τάσης (VSI). Ρόλος αυτού είναι ο έλεγχος των κινητήρων AC, μετατρέποντας, πρώτα, την συνεχή τάση της μπαταρίας του οχήματος, σε εναλλασσόμενη τριών φάσεων. Το σύστημα ελέγχου, οι ηλεκτροκινητήρες, το ηλεκτρονικό διαφορικό σύστημα και ο συνολικός μηχανισμός ηλεκτρικού οχήματος, κάθε μοντέλου, μοντελοποιούνται και προσομοιώνονται ψηφιακά με τη χρήση του λογισμικού MATLAB. Έχουν πραγματοποιηθεί διαφορετικές προσομοιώσεις, των οποίων τα αποτελέσματα δείχνουν καλή σταθερότητα και ευστάθεια του οχήματος, σε ευθύ και κυρτό δρόμο, σε σταθερή και επιταχυνόμενη κίνηση, καθώς και σε δρόμο οριζόντιο ή ανηφορικό.

## Abstract

In this paper, an electronic differential system (EDS) is proposed and modelled for a lightweight electric vehicle (EV), by means of the vehicle used for passenger transportation, having two back-driving in-wheels, using the Ackermann-Jeantand model. The use of electronic differential constitutes a technological advance in vehicle design, offering the best stability for vehicle on the curved road. The electronic differential has the advantage of replacing loosely, heavy and inefficient mechanical transmission and mechanical differential with more efficient, light and small electric motors directly coupled to the wheels via a single gear or an in-wheel motor. Specifically, two electric vehicle structures are modelled which differ from each other in terms of the propulsion system and its control. The first one is powered by two Brushed DC motors connected to the wheels through a single gear. This model is characterized by its simplicity, using a simple control system, voltage control, for each electric motor. The proposed traction system of the second model consists of two permanent magnet synchronous motors (PMSM). This model employs vector control (VC), and specifically, field-oriented control (FOC), incorporating the advanced technique of space vector pulse width modulated (SVPWM), which has the advantage of fast dynamic response with low ripples in speed, torque response, and least dependency on motor parameters. The SVPWM technique produces pulses in order to control a voltage source inverter (VSI). Its role is to control the AC motors, converting, first, the direct voltage of the vehicle's battery, to alternating three-phase voltage. The control system, motors, electronic differential system and the overall electrical vehicle mechanism, for both of the two structures, are modelled and digitally simulated by using MATLAB software. Different simulations have been carried out, the results of which show good vehicle stability, on a straight and curved road, in steady and accelerating motion, as well as on a horizontal or uphill road.

## Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή (Introduction)

### 1.1 Ηλεκτρικά οχήματα (electrical vehicles)

Οι εξελίξεις στις τεχνολογίες μεταφορών είναι ταχύτερες από ποτέ. Καθώς οι απροσδιόριστες διακυμάνσεις στην τιμή του πετρελαίου και των υπόλοιπων καυσίμων, η έλλειψη πηγών ενέργειας και οι περιβαλλοντικές ανησυχίες έχουν γίνει μείζον ζήτημα, η έρευνα για την τεχνολογία ηλεκτρικών οχημάτων (electrical vehicles - EVs) έχει ενισχυθεί πολύ σημαντικά. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, έρευνες σχετικά με το σύστημα κινητήριας πρώσης των EVs, να έχουν τραβήξει μεγάλη προσοχή στην αυτοκινητοβιομηχανία και στους ακαδημαϊκούς [1].

Ο αριθμός των οχημάτων που κατασκευάζονται κάθε χρόνο αυξάνεται παράλληλα με την αύξηση του πληθυσμού. Οι διαδικασίες παραγωγής έχουν αναπτυχθεί μαζί με τις νέες τεχνολογίες και τις ευφυείς αυτοματοποιημένες διαδικασίες. Η ανάπτυξη υβριδικών και ηλεκτρικών οχημάτων είναι μία από τις εναλλακτικές λύσεις για τη μείωση της ρύπανσης και των επιπτώσεων των επικίνδυνων αερίων που απελευθερώνονται στον αέρα.

Παράλληλα με την ανάπτυξη και χρήση των ηλεκτρικών οχημάτων, οι μελέτες για τη βελτίωση των συστημάτων κίνησης και της τεχνολογίας ελέγχου των οχημάτων έχουν αποκτήσει μεγάλη σημασία. Τα ηλεκτρικά οχήματα με μπαταρία (battery electric vehicles - BEV), με μηδενικές εκπομπές οχήματος, αποτελούν ένα παραδείγματα στο οποίο χρησιμοποιούνται οι εναλλακτικές πηγές ενέργειας [2]. Τα EV εισάγουν αξιοσημείωτα πλεονεκτήματα στον κόσμο των μεταφορών. Μερικά από αυτά τα πλεονεκτήματα είναι, η μη ρυπογόνος, ασφαλής και υψηλή ενεργειακή απόδοση, η εξισορρόπηση των συστημάτων ισχύος, οι μηδενικές τοπικές εκπομπές καυσαερίων, η αθόρυβη και σχεδόν χωρίς κραδασμούς λειτουργία τους [71]. Από την άλλη πλευρά, η χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα και η απαίτηση μεγάλου χρόνου για φόρτιση των μπαταριών είναι μερικά από τα μειονεκτήματα των ηλεκτρικών οχημάτων. Η απόδοση των ηλεκτρικών οχημάτων μπορεί να βελτιωθεί με την εφαρμογή βέλτιστων μεθόδων διαχείρισης ενέργειας, κατάλληλου σχεδιασμού κινητήρα, επιλογής μεθόδου κίνησης και στρατηγικών ελέγχου [72].

Ένα όχημα μπορεί να ταξινομηθεί με βάση τον τύπο συστήματος μετάδοσης κίνησης (drive system) που αυτό χρησιμοποιεί. Συγκεκριμένα, υπάρχουν δύο τύποι συστημάτων μετάδοσης κίνησης (drive system): συστήματα μονής μετάδοσης κίνησης (single-drive systems) και συστήματα πολλαπλής μετάδοσης κίνησης (multi-drive systems) [2]. Επίσης, ένα ηλεκτρικό όχημα μπορεί να ταξινομηθεί σε έμμεσα κινούμενο EV (indirectly driven EV), το οποίο τροφοδοτείται από ηλεκτρικούς κινητήρες, χρησιμοποιώντας μηχανικό σύστημα μετάδοσης κίνησης και κιβώτιο ταχυτήτων, και σε άμεσα κινούμενο EV (directly driven EVs), το οποίο τροφοδοτείται με κινητήρες εντός των τροχών (in-wheel or wheel motors), οι οποίοι δηλαδή συνδέονται άμεσα με αυτούς, χωρίς επιπλέον μηχανικά εξαρτήματα μετάδοσης κίνησης [1].

## 1.2 Διαφορικό (Differential)

Ένα όχημα, προκυμμένου να μεταδώσει την κίνηση και την ισχύ του, από τον κινητήρα ή τους κινητήρες του, στους τροχούς του, χρησιμοποιεί κάποιου είδους συστήματος μετάδοσης. Οι σημαντικότερες λειτουργίες του συστήματος μετάδοσης κίνησης, είναι οι εξής [76]:

1. Η μεταφορά της περιστροφικής κίνησης του κινητήρα, στους κινητήριους τροχούς.
2. Να μεταβάλλει τις στροφές και την ροπή που παρέχει ο κινητήρας ώστε οι κινητήριοι τροχοί να παίρνουν την απαιτούμενη ελκτική δύναμη για να μπορέσουν να αντιμετωπίζουν τις διάφορες αντιστάσεις κίνησης του οχήματος.
3. Δυνατότητα αναστροφής κίνησης των τροχών για την οπίσθια πορεία του οχήματος.
4. Άλλαγή της κατεύθυνσης της κινήσεως από ευθύγραμμη σε εγκάρσια έτσι ώστε να φθάνει στους τροχούς.
5. Να δίνει διαφορετική περιστροφική ταχύτητα σε κάθε κινητήριο τροχό, όταν το όχημα κινείται σε καμπύλη τροχιά.
6. Διανομή της κίνησης και της ροπής στους εμπρόσθιους και στους οπίσθιους τροχούς.

Το σύστημα μετάδοσης, μεταξύ άλλων, απαρτίζεται από το διαφορικό. Το διαφορικό είναι ο μηχανισμός που βασικό σκοπό έχει να επιτρέπει στους δύο κινητήριους τροχούς, στα προσθιοκίνητα ή οπισθιοκίνητα οχήματα, ή στους δυο άξονες μετάδοσης στα τετρακίνητα, να περιστρέφονται με διαφορετικές γωνιακές ταχύτητες και να κατανέμει τη ροπή στρέψης ανάλογα με τον συντελεστή πρόσφυσης στους κινητήριους τροχούς [76].

Υπάρχουν δύο τύποι συστήματος διαφορικού (differential system), το μηχανικό διαφορικό σύστημα (mechanical differential system) και το ηλεκτρονικό διαφορικό σύστημα (electronic differential system).

### 1.2.1 Μηχανικό διαφορικό (Mechanical differential)

Το κλασικό μηχανικό διαφορικό σύστημα, επιτρέπει τη διαφορετική ταχύτητα των κινητήριων τροχών και κατανέμει τη ροπή, η οποία παράγεται από έναν μόνο κινητήρα, στους τροχούς [2]. Ένα συμβατικό μηχανικό διαφορικό αποτελείται από τα εξής μέρη:

1. Κεντρικός άξονας – Άτρακτος: Από τον άξονα αυτόν, η κίνηση μεταδίδεται στο πινιόν του διαφορικού
2. Πινιόν: Είναι ένας κωνικός οδοντωτός τροχός, μέσω του οποίου η κίνηση μεταδίδεται από το κεντρικό άξονα στο διαφορικό.
3. Κορώνα: Είναι μια κωνική οδοντωτή στεφάνη, η οποία μαζί με το πινιόν αποτελούν το ζεύγος της γωνιακής μετάδοσης και αλλάζουν την διεύθυνση της κίνησης κατά  $90^{\circ}$ , από τη κεντρική άτρακτο στα ημιαξόνια.
4. Θήκη πλανητικού μηχανισμού – Φορέας δορυφόρων: Είναι στερεωμένη πάνω στη κορώνα και περιστρέφεται μαζί με αυτή και φέρει τον κυρίως πλανητικό μηχανισμό.
5. Άξονας δορυφόρων.
6. Πλανήτες: Είναι δυο κωνικοί οδοντωτοί τροχοί, οι οποίοι πάντοτε έχουν ευθύγραμμα κωνικά δόντια, λίγο μεγαλύτεροι από τους δορυφόρους. Είναι στερεωμένοι μέσα στη θήκη του διαφορικού και μπλεγμένοι μόνιμα με τους δορυφόρους. Ο άξονας τους συμπίπτει με τον άξονα περιστροφής των ημιαξόνιων. Με τους πλανήτες συνδέονται τα ημιαξόνια με πολύσφηνα.

7. Δορυφόροι: Είναι συνήθως δύο στον αριθμό αλλά μπορούν να υπάρξουν και 4 κωνικοί οδοντωτοί τροχοί οι οποίοι έχουν πάντοτε ευθύγραμμα κωνικά δόντια, στερεωμένοι στο εσωτερικό της θήκης, με άξονες κάθετους στον άξονα περιστροφής των ημιαξονίων των τροχών.
8. Έξοδος προς τροχούς – Ημιαξόνια

### 1.2.2 Ηλεκτρονικό διαφορικό (electronic differential)

Εναλλακτικές δομές και μέθοδοι, όπως το ηλεκτρονικό διαφορικό, έχουν μελετηθεί για τη μείωση των διαταραχών, για πιο ομαλή, αποτελεσματική και αποδοτική οδήγηση [2]. Σε ορισμένες μελέτες, αντί να χρησιμοποιείται ένας μόνο κινητήρας, χρησιμοποιούνται δυο ή και περισσότεροι κινητήρες για την ανάπτυξη της απαιτούμενης ροπής, οι οποίοι τοποθετούνται ακριβώς μέσα στους τροχούς (in-wheel motors). Έτσι, οι κινητήρες των τροχών αυτών, μπορούν να ελέγχονται ξεχωριστά, για να δίνουν πιο γρήγορη και ακριβή απόκριση στη δημιουργία της απαιτούμενης ροπής. Αυτό το σύστημα παρέχει, επίσης, διαφορετικές ταχύτητες για τους τροχούς, ειδικά όταν το όχημα υπόκειται σε στροφές. Το ηλεκτρονικό διαφορικό έχει πλεονεκτήματα όπως ταχύτερο χρόνο απόκρισης, ακριβή γνώση της ροπής έλξης ανά τροχό (traction torque per wheel), μεγαλύτερη ασφάλεια του οδηγού, αύξηση της ενεργειακής απόδοσης, μεγαλύτερη ευελιξία και μείωση της μάζας [73]. Το ηλεκτρονικό διαφορικό είναι απλό αφού δεν έχει βαριά και μη αποδοτικά μηχανικά μέρη, όπως γρανάζια, άξονες, συμπλέκτη και άλλα μηχανικά εξαρτήματα. Είναι, επίσης, ευέλικτο ως προς την αναδιαμόρφωση (reconfiguration) και τον επανα-συντονισμό (retuning) του συστήματος ελέγχου. [74].

Διάφοροι τύποι ηλεκτροκινητήρων, κρίνονται ως κατάλληλοι, για να χρησιμοποιούνται σε ένα EV, έτσι ώστε όχι μόνο να το τροφοδοτήσουν αλλά και να προσφέρουν την λειτουργία του ηλεκτρονικού διαφορικού. Η επιλογή ηλεκτρικών κινητήρων για EV διαφέρει για διαφορετικές εφαρμογές [75]. Τα χαρακτηριστικά και οι διαμορφώσεις κάθε εφαρμογής EV ορίζονται, συνήθως, σε σχέση με το βάρος, τις διαστάσεις, την τάση, την ταχύτητα, τη ροπή και την εμβέλεια.

### 1.3 Σκοπός Διπλωματικής Εργασίας

Ο σκοπός της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας (Δ.Ε.) είναι η μοντελοποίηση ενός ηλεκτρικού διαφορικού, σε ένα αμιγώς ηλεκτρικό όχημα. Το ηλεκτρικό όχημα αυτό, είναι τεσσάρων τροχών, των οποίων οι δύο οπίσθιοι τροχοί εξοπλίζονται με ηλεκτροκινητήρες, αποτελώντας τους κινητήριους τροχούς.

Αρχικά, έγινε η θεώρηση ότι χρησιμοποιούνται δυο κινητήρες συνεχούς ρεύματος με ψήκτρες (Brushed DC motor) και έτσι προέκυψε το Μοντέλο 1. Το μοντέλο αυτό χαρακτηρίζεται από απλότητα, χρησιμοποιώντας ένα απλό σύστημα ελέγχου για κάθε έναν ηλεκτροκινητήρα. Σκοπός αυτού του μοντέλου, είναι η δημιουργία ενός EV, το οποίο χρησιμοποιεί ηλεκτρονικό διαφορικό. Συγκεκριμένα, αυτό θα πρέπει να επιτυγχάνει τις βασικές λειτουργίες ενός ηλεκτρονικού διαφορικού, όπως τις διαφορετικές γωνιακές ταχύτητες στους κινητήριους τροχούς, αλλά και το, σταθερό, ποσοστό ροπής που θα μεταβιβάζεται στον καθένα.

Στη συνέχεια, έγινε η μοντελοποίηση ενός δεύτερου, πιο σύνθετου, μοντέλου, το Μοντέλο 2, το οποίο είναι εξοπλισμένο με δύο σύγχρονους κινητήρες μόνιμου μαγνήτη (Permanent magnet synchronous motor). Το μοντέλο αυτό κάνει χρήση ενός πολύπλοκου, και πιο ρεαλιστικού, συστήματος ελέγχου για

κάθε έναν κινητήρα. Αναλυτικότερα, κάνει χρήση διανυσματικού ελέγχου (vector control) και συγκεκριμένα χρησιμοποιεί διανυσματικό έλεγχο με προσανατολισμό πεδίου (FOC), αξιοποιώντας την προηγμένη μέθοδο του Space Vector PWM (SVPWM). Σκοπός αυτού του μοντέλου, είναι να χρησιμοποιήσει το υπάρχων και δοκιμασμένο σύστημα του ηλεκτρονικού διαφορικού, που υιοθετήθηκε στο Μοντέλο 1, αλλά με την αλλαγή του είδους των κινητήρων και του συστήματος ελέγχου του καθενός από αυτών, έτσι ώστε να προσεγγίσει τη δομή και τις επιδόσεις ενός ρεαλιστικού ηλεκτρικού οχήματος.

Για την επαλήθευση, αξιολόγηση και σύγκριση των δύο μοντέλων, υλοποιούνται πέντε σενάρια προσομοίωσης, για το κάθε μοντέλο. Για την επίτευξη αυτών, η μοντελοποίηση έγινε στο γραφικό προγραμματιστικό περιβάλλον του Simulink, MATLAB.

#### 1.4 Δομή Εργασίας

Το όχημα που μοντελοποιείται στην παρούσα Δ.Ε., είναι ένα άμεσα κινούμενο αμιγώς ηλεκτρικό όχημα (directly driven EV), δηλαδή οι κινητήρες του συνδέονται απευθείας με τους τροχούς του, μέσω δύο κινητήρων στους οπίσθιους τροχούς. Οι κινητήρες (wheel motors) μπορούν να ελέγχονται ανεξάρτητα, επιτυγχάνοντας πιο γρήγορη και ακριβή απόκριση στις εντολές του οδηγού, καθιστώντας τον έλεγχο του οχήματος και της κίνησής του, πιο ευσταθή, σε σύγκριση με τον αντίστοιχο των έμμεσα κινούμενων EV, αλλά και των EV που κάνουν χρήση μηχανικού διαφορικού.

Η παρούσα Δ.Ε. οργανώνεται ως εξής: Το Κεφάλαιο 2 αναλύει την αρχή λειτουργίας και τις εξισώσεις που διέπουν το ηλεκτρονικό διαφορικό, κάνοντας χρήση του μοντέλου Ackermann-Jeantan. Το Κεφάλαιο 3 περιγράφει τις εξισώσεις που διέπουν τη δυναμική του οχήματος, από όπου προκύπτει το φορτίο κάθε κινητήριου τροχού κάθε χρονική στιγμή. Το Κεφάλαιο 4 αναλύει τα δύο είδη ηλεκτροκινητήρων, που χρησιμοποιούνται στα, Μοντέλα 1 και 2 που αναφέρθηκαν παραπάνω. Το Κεφάλαιο 5 παρουσιάζει το σύστημα ελέγχου του Μοντέλου 1 ενώ στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάζεται το σύστημα ελέγχου του Μοντέλου 2. Το Κεφάλαιο 7 περιγράφει τις πηγές ενέργειας, που χρησιμοποιούνται στα δύο μοντέλα. Το Κεφάλαιο 8 επεξηγεί το κιβώτιο ταχυτήτων που χρησιμοποιείται στο Μοντέλο 1 και μόνο. Στο Κεφάλαιο 9 πραγματοποιείται η ανάλυση του Μοντέλου 1 και 2, στο περιβάλλον του Simulink. Το Κεφάλαιο 10 περιγράφει λεπτομερώς τις προσομοίωσης των διαφόρων περιπτώσεων που μελετήθηκαν, για τα δύο μοντέλα και το Κεφάλαιο 11 συνοψίζει τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, καθώς και τα συμπεράσματα αυτών.

## Κεφάλαιο 2 Μοντελοποίηση ηλεκτρονικού διαφορικού (Electronic differential modelling)

### 2.1 Η αρχή λειτουργίας του συστήματος ηλεκτρονικού διαφορικού (The principle of electronic differential system)

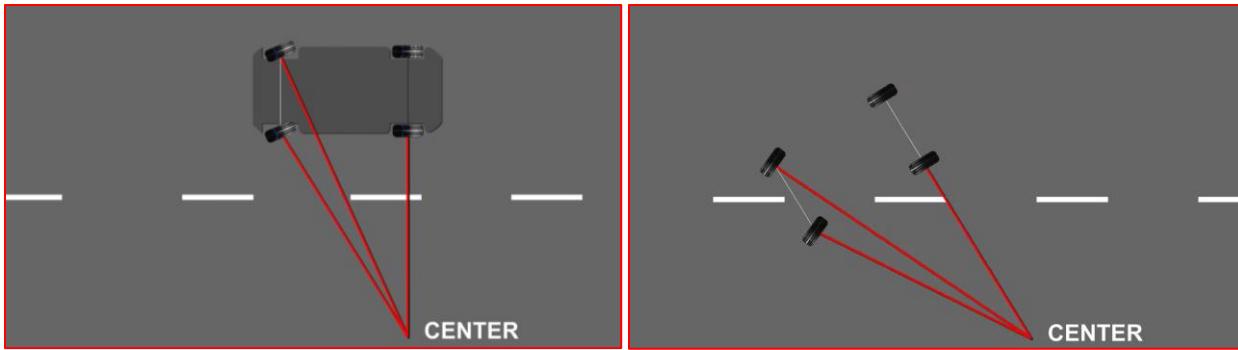
Το ηλεκτρικό όχημα που μοντελοποιείται είναι τετράτροχο. Οι δύο οπίσθιοι τροχοί επανδρώνονται με ηλεκτροκινητήρες, αποτελώντας τους κινητήριους τροχούς, ενώ οι δύο εμπρόσθιοι συμμετέχουν στο σύστημα διεύθυνσης του οχήματος. Οι εμπρόσθιοι τροχοί συνδέονται με ένα μετατρόχιο, ενώ οι κινητήριοι συνδέονται ανεξάρτητα ο ένας με τον άλλο, με έναν ηλεκτροκινητήρα ο καθένας τους.

Το ηλεκτρονικό διαφορικό (electronic differential) χρησιμοποιείται για να παρέχει την απαιτούμενη ροπή και ταχύτητα σε κάθε τροχό του οχήματος και χρησιμοποιείται αντί του συμβατικού μηχανικού διαφορικού (mechanical differential) σε συστήματα πολλαπλών κινήσεων (multi-drive systems) [2]. Ο αλγόριθμος του ηλεκτρονικού διαφορικού βασίζεται στην πρόβλεψη της διαφοράς της ταχύτητας που παρατηρείται μεταξύ του αριθμού των περιστροφών του εσωτερικού και του εξωτερικού τροχού, κατά τη διάρκεια στροφής του οχήματος. Πιο συγκεκριμένα, ο εξωτερικός τροχός περιστρέφεται με μεγαλύτερη ταχύτητα από τον εσωτερικό τροχό, καθώς ο πρώτος πρέπει να διανύει μεγαλύτερη απόσταση. Το ηλεκτρονικό διαφορικό εκμεταλλεύεται το σύστημα του τιμονιού για τον έλεγχο και την πρόβλεψη της ταχύτητας κάθε τροχού.

### 2.2 Εφαρμογή συστήματος ηλεκτρονικού διαφορικού (Electronic differential system implementation)

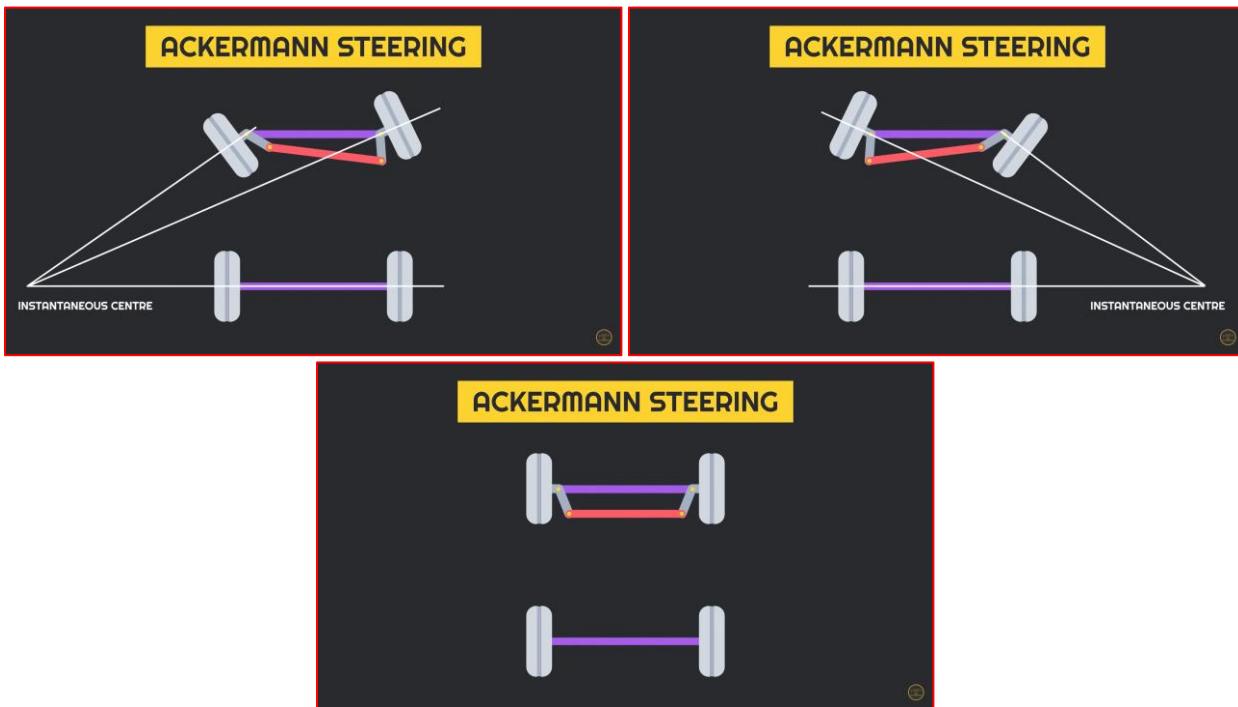
Με σκοπό την πρόβλεψη της διαφοράς της ταχύτητας εσωτερικού και του εξωτερικού τροχού, ένα απλό μοντέλο δυναμικής συμπεριφοράς οχήματος αναπτύσσεται στο τρέχον κεφάλαιο. Σε αυτήν την εφαρμογή, η εντολή πεντάλ γκαζιού ορίζει την κοινή ταχύτητα αναφοράς  $\omega_{ref}$ . Οι πραγματικές ταχύτητες αναφοράς του συστήματος είναι οι  $\omega_{ref-left}$  ή  $\omega_{w,1,ref}$  και  $\omega_{ref-right}$  ή  $\omega_{w,2,ref}$  του αριστερού και δεξιού κινητήριου τροχού αντίστοιχα. Οι τελευταίες προκύπτουν από τη ρύθμιση της κοινής ταχύτητας αναφοράς  $\omega_{ref}$ .

Το μοντέλο διεύθυνσης Ackermann-Jeantaud (Andrzejewski & Awrejcewicz, 2005) που χρησιμοποιείται ευρέως ως τροχιά οδήγησης υιοθετείται σε αυτή την εργασία. Συγκεκριμένα, η τροχιά οδήγησης Ackermann-Jeantaud χαρακτηρίζεται ως μια γεωμετρική διάταξη συνδέσμων στο σύστημα διεύθυνσης ενός αυτοκινήτου ή άλλων οχημάτων που έχουν σχεδιαστεί για να επιλύουν το πρόβλημα των τροχών στο εσωτερικό και το εξωτερικό μιας στροφής [1]. Τα σύγχρονα αυτοκίνητα δεν χρησιμοποιούν αμιγώς το σύστημα διεύθυνσης ackermann-Jeantaud, επειδή αγνοεί, εν μέρει, κάποια δυναμικά φαινόμενα.



Σχήμα 2.1: Αναπαράσταση τροχών σε στροφή (Wheels when cornering)

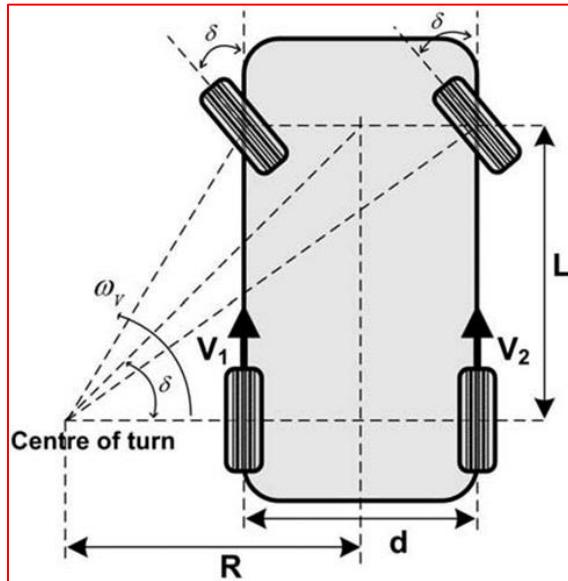
Όταν το όχημα υπόκειται σε στροφή, οι τροχοί του εμφανίζουν διαφορετική γωνιακή ταχύτητα μεταξύ τους. Η περιστροφική ταχύτητα αυτή είναι ανάλογη της απόστασης του οχήματος από το κέντρο της στροφής. Όπως μπορεί να γίνει κατανοητό και από το Σχήμα 2.1, οι τροχοί του οχήματος απέχουν από το κέντρο στροφής με την ακόλουθη σειρά από τον πιο μακρινό προς τον πιο κοντινό: εξωτερικός εμπρόσθιος, ο εξωτερικός οπίσθιος, εσωτερικός εμπρόσθιος και τέλος εσωτερικός οπίσθιος τροχός. Έτσι, για τις γωνιακές ταχύτητες ισχύει αντίστοιχα η ακόλουθη ανισοτική σχέση: ο εξωτερικός εμπρόσθιος περιστρέφεται πιο γρήγορα από όλους, τον οποίο ακολουθεί με τη σειρά του ο εξωτερικός οπίσθιος· στη συνέχεια ο εσωτερικός εμπρόσθιος, ενώ στο τέλος ο εσωτερικός οπίσθιος τροχός.



Σχήμα 2.2: Μοντέλο διεύθυνσης κατά Ackermann (Ackermann steering model)

Η ολίσθηση στους πίσω τροχούς αγνοείται, με αποτέλεσμα η ταχύτητα των τροχών μπορεί να οριστεί ως συνάρτηση της ακτίνας των τροχών [2]. Το μοντέλο τροχιάς οδήγησης του Ackermann-Jeantaud (Ackermann-Jeantaud driving trajectory model) που παρουσιάζεται στο ακόλουθο Σχήμα 2.3, δείχνει τη

δομή του οχήματος όταν αυτό υπόκειται σε στροφή, όπου το  $L$  αντιπροσωπεύει το μεταξόνιο, δη γωνία διεύθυνσης και  $d$  την απόσταση μεταξύ των τροχών του ίδιου άξονα.



Σχήμα 2.3: Μοντέλο τροχιάς οδήγησης (driving trajectory model)

Από το προαναφερθέν μοντέλο, μπορούν να υπολογιστούν τα ακόλουθα χαρακτηριστικά: [1], [3], [4], [6], [28], [29]. Στη συνέχεια, στο κεφάλαιο αυτό, ο δείκτης '1' θα αναφέρεται στον αριστερό τροχό της στροφής του οχήματος, ενώ ο δείκτης '2' στον δεξιό. Από τριγωνομετρία του σχήματος, η ακτίνα της καμπύλης-στροφής  $R$ , σχετίζεται με το μεταξόνιο  $L$  και τη γωνία διεύθυνσης  $\delta$ , μέσω της εξίσωσης:

$$R = \frac{L}{\tan \delta} \quad (\text{Εξ. 2.1})$$

Έστω, τώρα, ότι οι δύο κινητήριοι τροχοί συνδέονται με ένα φανταστικό οπίσθιο μετατρόχιο και ακριβώς στο κέντρο του μετατροχίου τοποθετείται ένας επιπλέον φανταστικός οπίσθιος κινητήριος τροχός. Αν  $R$  η ακτίνα της καμπύλης-στροφής για τον φανταστικό μεσαίο-κεντρικό κινητήριο τροχό, τότε θα ισχύουν οι ακόλουθες εξισώσεις για τους άλλους δύο. Συγκεκριμένα, σύμφωνα με το Σχήμα 2.3, για τον αριστερό (εξωτερικό ή 1) κινητήριο τροχό, η ακτίνα καμπύλης-στροφής δίνεται από την εξίσωση:

$$R_1 = R - \frac{d}{2} \quad (\text{Εξ. 2.2})$$

ενώ για τον δεξιό (εξωτερικό ή 2) κινητήριο τροχό, η ακτίνα καμπύλης-στροφής δίνεται από την εξίσωση:

$$R_2 = R + \frac{d}{2} \quad (\text{Εξ. 2.3})$$

Ο φανταστικός κεντρικός οπίσθιος τροχός περιστρέφεται ως προς το κέντρο στροφής ακτίνας  $R$ , με γωνιακή ταχύτητα  $\omega_v$ . Τότε, η γραμμική ταχύτητα κάθε κινητήριου τροχού μπορεί να εκφραστεί ως συνάρτηση της ταχύτητας του φανταστικού οπίσθιου τροχού και της αντίστοιχης ακτίνας καμπύλης-στροφής:

$$V_v = \omega_v R \quad (\text{Εξ. 2.4})$$

$$V_1 = \omega_v R_1 = \omega_v \left( R - \frac{d}{2} \right) \quad (\text{Εξ. 2.5})$$

$$V_2 = \omega_v R_2 = \omega_v \left( R + \frac{d}{2} \right) \quad (\text{Εξ. 2.6})$$

Η γωνιακή ταχύτητα του αριστερού και του δεξιού κινητήριου τροχού, γύρω από τον άξονα τους, μπορεί να εκφραστεί ως συνάρτηση της διαμήκους (γραμμικής) τους ταχύτητας και της ακτίνας τροχού  $r$ . Επομένως, για τον αριστερό (εσωτερικό ή 1) και τον δεξιό (εσωτερικό ή 2) κινητήριο τροχό αντίστοιχα, δίνονται οι ακόλουθες εξισώσεις, χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (Εξ. 2.5) και (Εξ. 2.6):

$$\omega_{w,1} = \frac{V_1}{r} = \frac{\omega_v R_1}{r} \quad (\text{Εξ. 2.7})$$

$$\omega_{w,2} = \frac{V_2}{r} = \frac{\omega_v R_2}{r} \quad (\text{Εξ. 2.8})$$

Η διαφορά ανάμεσα στην γωνιακή ταχύτητα του αριστερού και του δεξιού κινητήριου τροχού ορίζεται από την ακόλουθη εξίσωση, χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (Εξ. 2.2), (Εξ. 2.3), (Εξ. 2.7) και (Εξ. 2.8):

$$\Delta\omega_w = \omega_{w,1} - \omega_{w,2} = \frac{\omega_v R_1}{r} - \frac{\omega_v R_2}{r} = \frac{\omega_v}{r} (R_1 - R_2) = -\frac{d}{r} \omega_v \quad (\text{Εξ. 2.9})$$

Για τη γραμμική ταχύτητα των κινητήριων τροχών ισχύει η ακόλουθη εξίσωση, χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (Εξ. 2.7) και (Εξ. 2.8)

$$V_v = \frac{V_1 + V_2}{2} = \frac{\omega_{w,1} r + \omega_{w,2} r}{2} = r \frac{\omega_{w,1} + \omega_{w,2}}{2} \quad (\text{Εξ. 2.10})$$

Έτσι από τις εξισώσεις (Εξ. 2.4) και (Εξ. 2.10) ισχύει:

$$\omega_v = \frac{V_v}{R} = \frac{r}{R} \frac{\omega_{w,1} + \omega_{w,2}}{2} \quad (\text{Εξ. 2.11})$$

Από τις εξισώσεις (Εξ. 2.1), (Εξ. 2.9) και (Εξ. 2.11), ορίζεται εν τέλει, η διαφορά ανάμεσα στην γωνιακή ταχύτητα του αριστερού και του δεξιού κινητήριου τροχού, από την εξίσωση:

$$\begin{aligned} \Delta\omega_w &= -\frac{d}{r} \omega_v = -\frac{d}{r} \frac{R}{R} \left( \frac{\omega_{w,1} + \omega_{w,2}}{2} \right) \\ &= -\frac{d}{R} \left( \frac{\omega_{w,1} + \omega_{w,2}}{2} \right) = -\frac{1}{2} \frac{d \tan \delta}{L} (\omega_{w,1} + \omega_{w,2}) \end{aligned} \quad (\text{Εξ. 2.12})$$

Έτσι, οι κινητήριοι τροχοί έχουν γωνιακές ταχύτητες αναφοράς:

$$\omega_{ref-left} = \omega_{w,1,ref} = \omega_{ref} - \frac{1}{2} \Delta\omega_w \quad (\text{Εξ. 2.13})$$

$$\omega_{ref-right} = \omega_{w,2,ref} = \omega_{ref} + \frac{1}{2} \Delta\omega_w \quad (\text{Εξ. 2.14})$$

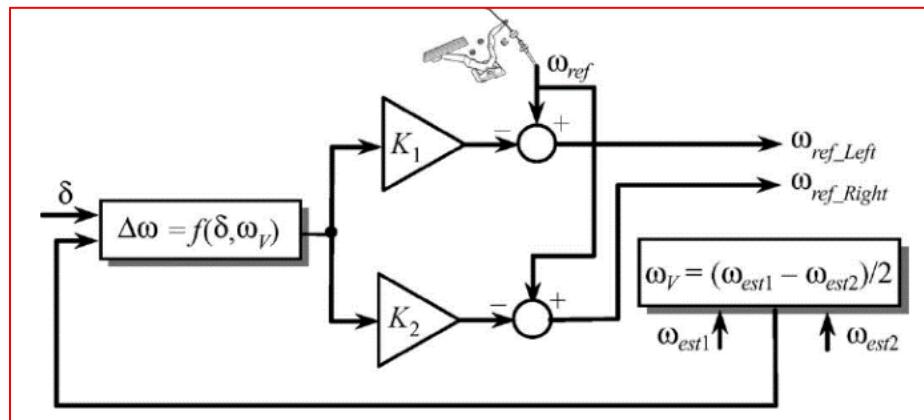
Μέσω του λόγου μετάδοσης  $i_{gear}$ , οι ηλεκτροκινητήρες έχουν γωνιακή ταχύτητα αναφοράς, η οποία δίνεται από τις ακόλουθες εξισώσεις, για τον αριστερό και δεξιό αντίστοιχα, χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (Εξ. 2.13) και (Εξ. 2.14):

$$\begin{aligned}\omega_{m,1,ref} &= i_{gear} \omega_{w,1,ref} = i_{gear} \left( \omega_{w,ref} - \frac{1}{2} \Delta \omega_w \right) \\ &= i_{gear} \omega_{w,ref} - \frac{1}{2} i_{gear} \Delta \omega_w = \omega_{m,ref} - \frac{1}{2} \Delta \omega_m\end{aligned}\quad (\text{Εξ. 2.15})$$

$$\begin{aligned}\omega_{m,2,ref} &= i_{gear} \omega_{w,2,ref} = i_{gear} \left( \omega_{w,ref} + \frac{1}{2} \Delta \omega_w \right) \\ &= i_{gear} \omega_{w,ref} + \frac{1}{2} i_{gear} \Delta \omega_w = \omega_{m,ref} + \frac{1}{2} \Delta \omega_m\end{aligned}\quad (\text{Εξ. 2.16})$$

Η γωνία διεύθυνσης του τιμονιού δείχνει την κατεύθυνση της τροχιάς

$$\begin{aligned}\delta > 0 &\Rightarrow Turn Left \\ \delta = 0 &\Rightarrow Straight Ahead \\ \delta < 0 &\Rightarrow Turn Right\end{aligned}\quad (\text{Εξ. 2.17})$$



Σχήμα 2.4: Διάγραμμα μοντέλου ηλεκτρονικού διαφορικού (Block diagram of the electric differential system)

## Κεφάλαιο 3 Δυναμική οχήματος (Vehicle dynamics)

Το όχημα για να κινηθεί με την επιθυμητή ταχύτητα που του ορίζουν οι ελεγκτές (controllers) του συστήματος κλειστού βρόχου, καλείται να υπερνικήσει ορισμένες αντιστάσεις. Οι αντιστάσεις αυτές, εκφρασμένες τόσο σε δυνάμεις όσο και σε ροπές χρίζονται οι ακόλουθες [1],[3],[5]:

1. Η αντίσταση αναρρίχησης (grading resistance): Είναι η αντίσταση που υφίσταται το όχημα, όταν αυτό κινείται σε ανωφέρεια, λόγω του βάρους του. Συγκεκριμένα, η δύναμη και η ροπή αντίστοιχα που αυτό δέχεται, δίνονται από τις εξισώσεις:

$$F_g = mgsin(\alpha), [N] \quad (\text{Εξ. 3.1})$$

$$T_g = mgsin(\alpha)R_w, [Nm] \quad (\text{Εξ. 3.2})$$

2. Η αντίσταση κύλισης (rolling resistance): Είναι η αντίσταση που υπόκεινται οι τροχοί του οχήματος καθώς αυτό κυλά στο οδόστρωμα. Συγκεκριμένα, η δύναμη και η ροπή αντίστοιχα που οι τροχοί δέχονται, δίνονται από τις εξισώσεις:

$$F_r = f_r mgcos(a), [N] \quad (\text{Εξ. 3.3})$$

$$T_r = f_r mgcos(a)R_w, [Nm] \quad (\text{Εξ. 3.4})$$

3. Η αεροδυναμική αντίσταση (aerodynamics drag): Είναι η αντίσταση που υφίσταται το όχημα, όταν αυτό κινείται σε ένα ρευστό, τον αέρα περιβάλλοντος.

$$F_a = \frac{1}{2} \rho S C_x R_w^2 \omega_w^2, [N] \quad (\text{Εξ. 3.5})$$

$$T_a = F_a R_w = \frac{1}{2} \rho S C_x R_w^3 \omega_w^2, [Nm] \quad (\text{Εξ. 3.6})$$

4. Αδρανειακές αντιστάσεις οχήματος (vehicle inertia resistance)

$$F_i = m j_w, [N] \quad (\text{Εξ. 3.7})$$

$$T_i = m j_u R_w = m j_\omega R_w^2, [Nm] \quad (\text{Εξ. 3.8})$$

Έτσι, η συνολική αντίσταση (total resistive) μπορεί να αποδοθεί από τις ακόλουθες εξισώσεις, χρησιμοποιώντας τις παραπάνω εξισώσεις:

$$F_{total} = F_g + F_r + F_a + F_i, [N] \quad (\text{Εξ. 3.9})$$

$$T_{total} = T_g + T_r + T_a + T_i, [Nm] \quad (\text{Εξ. 3.10})$$

- $m$ , η μάζα του οχήματος (vehicle mass), [ $kg$ ]
- $g$ , η επιτάχυνση της βαρύτητας (gravitational acceleration), [ $m/s^2$ ]
- $a$ , η ανωφέρεια ή η γωνία κλίσης του οδοστρώματος, (slope angle), [ $deg$ ]
- $R_w$ , η ισοδύναμη ή ενεργός ακτίνα των τροχών (rolling or effective wheel radius), [ $m$ ]
- $f_r$ , ο συντελεστής κύλισης (rolling coefficient), [-]
- $C_x$ , ο συντελεστής οπισθέλκουσας (aerodynamic drag coefficient), [-]

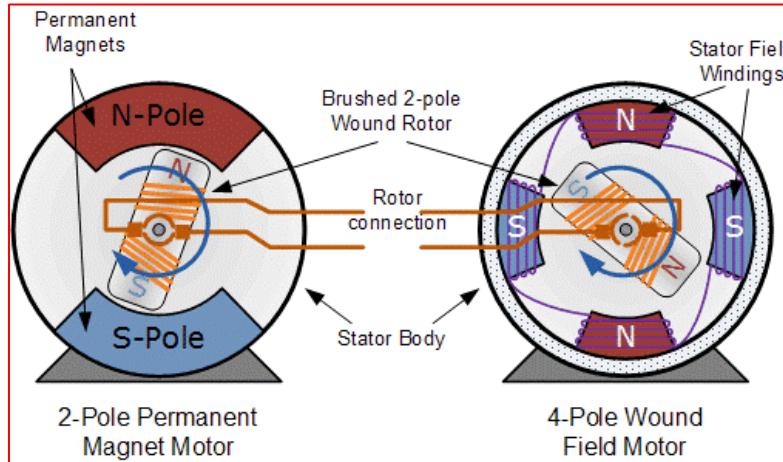
- $\rho$ , η πυκνότητα του αέρα (Air density), [ $kg/m^3$ ]
- $S$ , η επιφάνεια εγκάρσιας διατομής οχήματος (vehicle cross sectional area), [ $m^2$ ]
- $j_u$ , η γραμμική επιτάχυνση του κινητήριου τροχού του οχήματος, [ $m/s^2$ ]
- $j_\omega$  η γωνιακή επιτάχυνση του κινητήριου τροχού του οχήματος, [ $rad/s^2$ ]

## Κεφάλαιο 4 Ηλεκτροκινητήρας (Motor)

### 4.1 Κινητήρας συνεχούς ρεύματος με ψήκτρες (Brushed DC motor)

#### 4.1.1 Εισαγωγή (Introduction)

Οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος διακρίνονται σε αυτούς που αποτελούνται ψήκτρες και συλλέκτη (brushed dc motor) και σε αυτούς που δεν περιέχουν τα στοιχεία αυτά (brushless dc motor). Ειδικότερα, οι πρώτοι διακριτοποιούνται ανάλογα με τον αν έχουν τυλίγματα πεδίου (wound-field) ή μόνιμους μαγνήτες (permanent magnet) [10].



Σχήμα 4.1: α) κινητήρες συνεχούς ρεύματος με ψήκτρες και μόνιμους μαγνήτες β) κινητήρες συνεχούς ρεύματος με ψήκτρες και τυλίγματα πεδίου (a) permanent magnet brushed dc motor b) wound-field brushed dc motor)

Οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος με ψήκτρες και τυλίγματα πεδίου διαχωρίζονται, στη συνέχεια, στις εξής κατηγορίες ανάλογα με το τρόπο συνδεσμολογίας του τυλίγματος του πεδίου (field) [10].

1. Ξένης διέγερσης (separately excited), όπου το τύλιγμα του πεδίου τροφοδοτείται ανεξάρτητα από το τύλιγμα του δρομέα (τυμπάνου).
2. Παράλληλης διέγερσης (shunt), όπου το τύλιγμα του πεδίου είναι συνδεδεμένο παράλληλα με το τύλιγμα του δρομέα (τυμπάνου).
3. Διέγερσης σειράς (series), όπου το τύλιγμα του πεδίου είναι συνδεδεμένο σε σειρά με το τύλιγμα του δρομέα (τυμπάνου).
4. Σύνθετης διέγερσης (compound), όπου υπάρχει τύλιγμα σε σειρά και άλλο σε παράλληλη σύνδεση με το τύλιγμα του δρομέα (τυμπάνου).

Οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος με ψήκτρες (motor DC brush) αποτελούνται από [10]:

1. τον στάτη/στάτορα (stator), το ακίνητο μέρος του κινητήρα, που φέρει τα τυλίγματα του πεδίου (field winding) ή τους μόνιμους μαγνήτες (permanent magnet)
2. τον δρομέα/ρότορα (rotor), το περιστρεφόμενο μέρος του κινητήρα, που φέρει τα τυλίγματα του τυμπάνου (οπλισμού – armature)
3. τον συλλέκτη (commutator) και τις ψήκτρες (brushes)

Τα κύρια πλεονεκτήματα των κινητήρων αυτών αποτελούν:

- Η ευκολία με την οποία μπορούν να ρυθμιστούν οι στροφές τους.
- Η δυνατότητα μεταβολής της χαρακτηριστικής ροπής-στροφών σε σχεδόν οποιαδήποτε μορφή και με μεγάλο συντελεστή απόδοσης.
- Η δυνατότητα να εφαρμόζουν ροπή μέχρι πέντε φορές μεγαλύτερη της ονομαστικής τους, υπό την προϋπόθεση ότι η απαιτούμενη ισχύς είναι διαθέσιμη. Σε αντίθεση με τους κινητήρες συνεχούς ρεύματος, οι κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος τείνουν να σταματούν όταν η ανάγκη για ροπή υπερβαίνει ένα όριο.
- Η ευκολία αλλαγής της φοράς περιστροφής.
- Η δυνατότητα τροφοδοσίας από συσσωρευτές, χαρακτηριστικό πολύ χρήσιμο σε εφαρμογές όπου δεν υπάρχει ισχύς δικτύου, όπως στα οχήματα.

Ο κινητήρας που επιλέχθηκε στην πρώτη μοντελοποίηση του ηλεκτρικού συστήματος είναι κινητήρας συνεχούς ρεύματος τυλιγμένου πεδίου (wound-field DC motor) και ειδικότερα ξένης διέγερσης (separately excited). Τα χαρακτηριστικά του κινητήρα αυτού περιλαμβάνουν σταθερή ταχύτητα, ευκολία μεταβολής της και μέση ανάπτυξη ροπής κατά την εκκίνηση. Χρησιμοποιείται σε εφαρμογές μέσης και υψηλής ισχύος.

#### 4.1.2 Μοντελοποίηση κινητήρα συνεχούς ρεύματος με ψήκτρες (Brushed DC motor model)

Όταν ένας κινητήρας συνεχούς ρεύματος συνδεθεί με τροφοδοσία συνεχούς τάσης, τα τυλίγματα του δρομέα (τυμπάνου) διαρρέονται από σχετικά μεγάλο ρεύμα, λόγω τη μικρής αντίστασης που παρουσιάζουν. Τότε, οι ρευματοφόροι αγωγοί των τυλιγμάτων υφίστανται δυνάμεις κατά Lorentz, και η ροπή που αναπτύσσεται προκαλεί την περιστροφή του δρομέα και του φορτίου. Μόλις αρχίσει ο δρομέας να περιστρέφεται εμφανίζεται μια τάση από επαγωγή, που ονομάζεται αντί-ηλεκτρεγερτική δύναμη, ΑΗΕΔ (counter electromotive force, CEMF).

Η τάση τροφοδοσίας  $v_k$  του κινητήρα δίνεται από την εξίσωση

$$v_k = e_a + i_a R_a \quad (\text{Εξ. 4.1})$$

- $e_a$ , η αντί-ηλεκτρεγερτική δύναμη ΑΗΕΔ (CEMF), [V]
- $i_a$ , το ρεύμα που διαρρέει τα τυλίγματα του δρομέα – τυμπάνου (armature current), [A]
- $R_a$ , η αντίσταση των τυλιγμάτων του τυμπάνου (armature resistance), [Ohm]

Η αντί-ηλεκτρεγερτική δύναμη ΑΗΕΔ (CEMF)  $e_a$  είναι ανάλογη με την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα του κινητήρα και το μέτρο της δίνεται από την εξίσωση

$$e_a = K_\omega \Phi \omega = K_e \omega \quad (\text{Εξ. 4.2})$$

- $K_e$ , η σταθερά τάσης, [Wb]
- $K_\omega$ , η αδιάστατη σταθερά η οποία εξαρτάται από τους συνολικούς αγωγούς στο δρομέα, τον αριθμό των παράλληλων κλάδων, τον αριθμό των πόλων, [-]
- $\omega$ , η ταχύτητα του δρομέα του κινητήρα, [rad/s]
- $\Phi$ , η μαγνητική ροή ανά πόλο, [Wb]

Επειδή ο κινητήρας είναι ξένης διέγερσης, η σταθερά τάσης  $K_e$  είναι ανάλογη με το ρεύμα πεδίου  $i_f$ :

$$K_e = L_{af} i_f \quad (\text{Εξ. 4.3})$$

- $L_{af}$ , η αμοιβαία επαγωγή πεδίου-οπλισμού, [ $H$ ]
- $i_f$ , το ρεύμα που διαρρέει τα τυλίγματα του πεδίου, το οποίο αποτελεί το ρεύμα διέγερσης (field current), [ $A$ ]

Η ηλεκτρομηχανική ροπή που αναπτύσσεται από τη μηχανή συνεχούς ρεύματος είναι ανάλογη με το ρεύμα οπλισμού  $i_a$ .

$$T_e = K_\omega \Phi i_a = K_T i_a, [Nm] \quad (\text{Εξ. 4.4})$$

- $i_a$ , το ρεύμα που διαρρέει τα τυλίγματα του δρομέα – τυμπάνου (armature current), [ $A$ ]
- $K_\omega$ , η αδιάστατη σταθερά, η οποία εξαρτάται από τους συνολικούς αγωγούς στο δρομέα, τον αριθμό των παράλληλων κλάδων, τον αριθμό των πόλων, [–]
- $\Phi$ , η μαγνητική ροή ανά πόλο, [ $Wb$ ]
- $K_T$ , η σταθερά ροπής, [ $Wb$ ]

Η μαγνητική ροή ανά πόλο  $\Phi$  είναι ανάλογη του ρεύματος που διαρρέει τα τυλίγματα του στάτη και το μέτρο της δίνεται από την εξίσωση

$$\Phi = K_f i_f, [Wb] \quad (\text{Εξ. 4.5})$$

- $i_f$ , το ρεύμα που διαρρέει τα τυλίγματα του πεδίου, το οποίο αποτελεί το ρεύμα διέγερσης (field current), [ $A$ ]
- $K_f$ , μια παράμετρος που εξαρτάται από τον αριθμό των τυλιγμάτων και το σημείο λειτουργίας του μαγνητικού κυκλώματος, [ $Wb/A$ ]

Εάν συνδέουμε έναν κινητήρα χωρίς φορτίο με μια σταθερή πηγή τάσης, τότε αυτός θα αρχίσει να περιστρέφεται. Αναμφισβήτητα, όσο αυξάνεται η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα, τόσο αυξάνεται και η επαγόμενη ΑΗΕΔ. Όσο αυξάνεται η ΑΗΕΔ, τόσο μειώνεται το ρεύμα του τυμπάνου και επομένως τόσο μειώνεται και η παραγόμενη ροπή. Όταν η ΑΗΕΔ γίνει ίση με την τάση τροφοδοσίας  $v_k$ , τότε το ρεύμα μηδενίζεται κάτι το οποίο συμβαίνει και με τη ροπή. Εφόσον, πλέον δεν παράγεται ροπή, ο κινητήρας δεν μπορεί να στραφεί σε υψηλότερες στροφές. Επομένως, για μια ορισμένη τάση τροφοδοσίας, οι μέγιστες στροφές κάθε κινητήρα συνεχούς ρεύματος περιορίζονται από την αναπτυσσόμενη ΑΗΕΔ [10].

#### 4.1.3 Έλεγχος κινητήρα (Motor control)

Οι στροφές ενός κινητήρα ξένης διέγερσης μπορούν να ρυθμιστούν με τρεις τρόπους:

- Με ρύθμιση της τάσης τροφοδοσίας  $v_k$
- Με ρύθμιση του ρεύματος διέγερσης-πεδίου  $i_f$
- Με ρύθμιση της αντίστασης τυμπάνου  $R_a$

Η δυνατότητα μεταβολής του ρεύματος που προκαλεί το πεδίο είναι ένα πλεονέκτημα των κινητήρων ξένης διέγερσης, γιατί η αύξηση του αυξάνει την ροπή που παράγεται και φυσικά ελαττώνει τις στροφές. Παρόλα αυτά, στο μοντέλο που σχεδιάστηκε, έγινε έλεγχος του κινητήρα μόνο με ρύθμιση της τάσης τροφοδοσίας  $v_k$ , επιδρώντας και ρυθμίζοντας τις στροφές του κινητήρα.

## 4.2 Σύγχρονος κινητήρας μόνιμου μαγνήτη (Permanent magnet synchronous motor)

### 4.2.1 Εισαγωγή (Introduction)

Οι σύγχρονοι κινητήρες τροφοδοτούνται από εναλλασσόμενη τάση και παράγονται σε μεγάλο εύρος ισχύων [10]. Οι κινητήρες αυτοί λέγονται σύγχρονοι αφού λειτουργούν σε μια μόνο ταχύτητα, την ταχύτητα του περιστρεφόμενου μαγνητικού πεδίου που είναι ακριβώς ανάλογη της συχνότητας του ρεύματος.

Οι σύγχρονοι κινητήρες μπορούν να ταξινομηθούν με βάση τον τρόπο με τον οποίο μαγνητίζεται ο ρότορας, στις ακόλουθες δύο κατηγορίες [40]:

1. Μη διεγερμένοι σύγχρονοι κινητήρες (Non-Excited Synchronous Motors)
2. Σύγχρονοι κινητήρες διεγερμένου συνεχούς ρεύματος (Direct Current Excited Synchronous Motors)

Οι σύγχρονοι κινητήρες διεγερμένου συνεχούς ρεύματος, σε αντίθεση με τους άλλους, απαιτούν, επιπλέον, παροχή συνεχούς ρεύματος για να δημιουργήσει το μαγνητικό πεδίο ο ρότορας. Διαθέτουν τόσο τυλίγματα πεδίου στο στάτη (τα οποία τροφοδοτούνται με AC) όσο και τυλίγματα στο ρότορα (τα οποία τροφοδοτούνται με DC). Λόγω της αλληλεπίδρασης του πεδίου του στάτορα με το ρότορα, ο τελευταίος γίνεται ηλεκτρομαγνήτης αποκτώντας βόρειους και νότιους πόλους που αλληλοεπιδρούν με τους πόλους πεδίου του στάτορα.

Στους μη διεγερμένους σύγχρονους κινητήρες, ο ρότορας είναι κατασκευασμένος από χάλυβα υψηλής συγκράτησης (high-retentively steel), όπως ο χάλυβας κοβαλτίου [40]. Αυτοί οι σύγχρονοι κινητήρες δεν χρειάζονται τάση διέγερσης για να ξεκινήσουν, αφού χρησιμοποιούν τα σιδηρομαγνητικά υλικά στους ρότορες τους, για να αλληλοεπιδράσουν με τους στάτορες τους [43].

Στη συνέχεια, ο μη διεγερμένος σύγχρονος κινητήρας χωρίζεται στις εξής τρεις κατηγορίες [10],[40]:

1. Σύγχρονοι κινητήρες υστέρησης (Hysteresis Synchronous Motors)
2. Σύγχρονοι κινητήρες μαγνητικής ανίστασης (Reluctance Synchronous Motors)
3. Σύγχρονοι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη (Permanent Magnet Synchronous Motors)

Οι σύγχρονοι κινητήρες αποτελούνται από [10]:

1. τον στάτη/στάτορα (stator), το ακίνητο μέρος του κινητήρα, που φέρει τα τυλίγματα του πεδίου (field winding)
2. τον δρομέα/ρότορα (rotor), το περιστρεφόμενο μέρος του κινητήρα, που φέρει τα τυλίγματα του τυμπάνου (οπλισμού – armature) ή τα σιδηρομαγνητικά υλικά

Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα των σύγχρονων κινήτρων είναι [10], [41]:

- Η σταθερή ταχύτητα με την οποία στρέφονται, ανεξάρτητα από το φορτίο,
- Η ευκολία με την οποία μπορούν να μεταβάλλουν τον συντελεστή ισχύος
- Η δυναμική απόδοση τόσο σε λειτουργία υψηλής όσο και σε χαμηλή ταχύτητα
- Η υψηλή συγκέντρωση ισχύος
- Η χαμηλή αδράνεια του ρότορα
- Η υψηλή και ομαλή ροπή
- Η υψηλή απόδοση σε υψηλές ταχύτητες

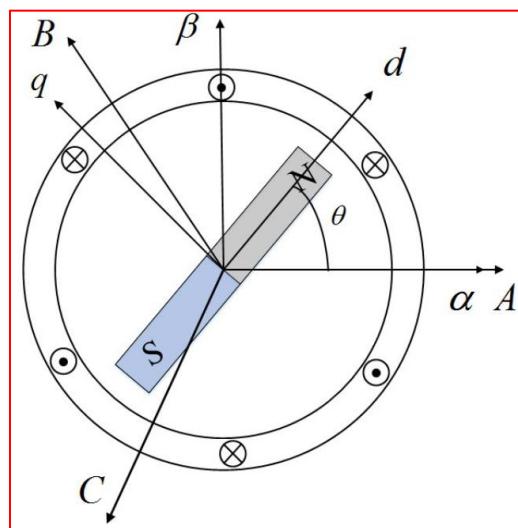
- Η ικανότητα διατήρησης πλήρης ροπής σε χαμηλές στροφές
- Η ανθεκτικότητα στην φθορά
- Η υψηλή αξιοπιστία
- Η εύκολη συντήρηση και εγκατάσταση
- Η αποτελεσματική διάχυση της θερμότητας
- Ο μειωμένος θόρυβος

Από την άλλη παρουσιάζουν ορισμένα μειονεκτήματα, όπως:

- Το κόστος τους
- Η ανάγκη για ύπαρξη τροφοδοσίας από συνεχή τάση (στους κινητήρες με τυλιγμένο δρομέα)
- Το γεγονός ότι δεν μπορούν να εκκινήσουν ως σύγχρονοι κινητήρες, αλλά συνήθως ως επαγωγικοί κινητήρες

Ο κινητήρας που επιλέχθηκε στη δεύτερη μοντελοποίηση του ηλεκτρικού συστήματος είναι μη διεγερμένος σύγχρονος κινητήρας (non-excited synchronous motor) και συγκεκριμένα μόνιμου μαγνήτη (permanent magnet).

#### 4.2.2 Μοντελοποίηση σύγχρονου κινητήρα μόνιμου μαγνήτη (Permanent magnet synchronous motor model)



Σχήμα 4.2: Τριφασικός, δύο πόλων, PMSM (Three phase, two-pole PMSM)

Η κατασκευή του σύγχρονου κινητήρα μόνιμου μαγνήτη μπορεί να παραλληλιστεί με αυτή του βασικού σύγχρονου κινητήρα, με τη μόνη διαφορά να αποτελεί ο ρότορας, ο οποίος δεν φέρει τυλίγματα πεδίου. Ένας σύγχρονος κινητήρας μόνιμου μαγνήτη χρησιμοποιεί μόνιμους μαγνήτες στον χαλύβδινο ρότορα για να δημιουργήσει μια σταθερή μαγνητική ροή [40]. Ο ρότορας κλειδώνει όταν η ταχύτητα περιστροφής του είναι κοντά στη σύγχρονη ταχύτητα. Από τη άλλη, ο στάτορας φέρει τυλίγματα και τροφοδοτείται με παροχή εναλλασσόμενου ρεύματος, για να παράγει το περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο.

Ο σύγχρονος κινητήρας που χρησιμοποιήθηκε στο δεύτερο μοντέλο πρόκειται για τριφασικό κινητήρα (three-phase motor), δηλαδή, τροφοδοτείται από εναλλασσόμενο ρεύμα τριών φάσεων. Αναφορικά με το μαθηματικό μοντέλο του, λήφθηκαν οι ακόλουθες υποθέσεις: [44-46]:

1. Ο κορεσμός του πυρήνα του κινητήρα παραμελείται (Ignoring the core saturation and machine winding leakage inductance)
2. η μαγνητική ροή που δημιουργείται από τους μόνιμους μαγνήτες στον στάτορα είναι ημιτονοειδής, πράγμα που σημαίνει ότι οι επαγόμενες ηλεκτρεγερτικές δυνάμεις είναι ημιτονοειδείς (The induced EMF is sinusoidal)
3. Η απώλεια των δινορρευμάτων και της υστέρησης θεωρείται αμελητέα (The loss of eddy current and hysteresis is negligible)
4. Δεν υπάρχει δυναμική ρεύματος πεδίου (There are no field current dynamics)

Οι μαθηματικές εξισώσεις, που τον διέπουν, παρουσιάζονται, στη συνέχεια, εκφρασμένες ως προς το πλαίσιο αναφοράς του ρότορα, δηλαδή το περιστρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς q-d (rotating reference frame q-d). Όλες οι ποσότητες στο πλαίσιο αναφοράς του ρότορα αναφέρονται στον στάτορα.

Η τάση του στάτορα στους άξονες q και d, δίνεται, αντίστοιχα, από τις ακόλουθες εξισώσεις [39], [44], [45]:

$$v_q = \frac{d\lambda_q}{dt} + R i_q + \lambda_d p \omega_m \quad (\text{Εξ. 4.6})$$

$$v_d = \frac{d\lambda_d}{dt} + R i_d - \lambda_q p \omega_m \quad (\text{Εξ. 4.7})$$

- $v_q$ , η τάση στάτορα στο q άξονα, στο πλαίσιο αναφοράς q-d (q-axis stator voltage), [V]
- $v_d$ , η τάση στάτορα στο d άξονα, στο πλαίσιο αναφοράς q-d (d-axis stator voltage), [V]
- $i_q$ , το ρεύμα στάτορα στο q άξονα, στο πλαίσιο αναφοράς q-d (q-axis stator current), [A]
- $i_d$ , το ρεύμα στάτορα στο d άξονα, στο πλαίσιο αναφοράς q-d (d-axis stator current), [A]
- $\omega_m$ , η γωνιακή ταχύτητα του ρότορα (angular velocity of the rotor), [ $\frac{\text{rad}}{\text{s}}$ ]
- $R$ , η αντίσταση των τυλιγμάτων του στάτορα (resistance of the stator windings), [Ohms]
- $\lambda$ , η μαγνητική ροή που προκαλείται από τους μόνιμους μαγνήτες του ρότορα στις φάσεις του στάτη (magnetic flux induced by rotor permanent magnet in the stator phases), [Wb]
- $\lambda_q$ , η μαγνητική ροή που προκαλείται από το στάτορα στο q άξονα, στο πλαίσιο αναφοράς q-d (q-axis stator flux)
- $\lambda_d$ , η μαγνητική ροή που προκαλείται από το στάτορα στο d άξονα, στο πλαίσιο αναφοράς q-d (d-axis stator flux)
- $p$ , ο αριθμός των ζευγών πόλων του κινητήρα, (number of pole-pairs of motor)

Η μαγνητική ροή του στάτορα στους άξονες q και d, δίνεται, αντίστοιχα, από τις ακόλουθες εξισώσεις [39], [44], [45]:

$$\lambda_q = L_q i_q \quad (\text{Εξ. 4.8})$$

$$\lambda_d = L_d i_d + \lambda \quad (\text{Εξ. 4.9})$$

- $L_q$ , η αυτεπαγωγή q-άξονα (q-axis inductance), [H]
- $L_d$ , η αυτεπαγωγή d-άξονα (d-axis inductance), [H]

Αντικαθιστώντας τις εξισώσεις (Εξ. 4.8), (Εξ. 4.9) της μαγνητικής ροή του στάτορα, στις εξισώσεις (Εξ. 4.6), (Εξ. 4.7) της τάσης του στάτορα, προκύπτουν οι ακόλουθες εξισώσεις της τάσης στους άξονες q και d, αντίστοιχα:

$$v_q = \lambda p \omega_m + L_d p \omega_m i_d + L_q \frac{di_q}{dt} + R i_q \quad (\text{Εξ. 4.10})$$

$$v_d = L_d \frac{di_d}{dt} + R i_d - L_q p \omega_m i_q \quad (\text{Εξ. 4.11})$$

Επιλύοντας τις παραπάνω εξισώσεις (Εξ. 4.10), (Εξ. 4.11) ως προς το ρεύμα του στάτορα στους άξονες q και d, προκύπτουν, αντίστοιχα, οι ακόλουθες εξισώσεις:

$$\frac{di_q}{dt} = \frac{1}{L_q} v_q - \frac{R}{L_q} i_q - \frac{L_d}{L_q} p \omega_m i_d - \frac{\lambda p \omega_m}{L_q} \quad (\text{Εξ. 4.12})$$

$$\frac{di_d}{dt} = \frac{1}{L_d} v_d - \frac{R}{L_d} i_d + \frac{L_q}{L_d} p \omega_m i_q \quad (\text{Εξ. 4.13})$$

Η ηλεκτρομαγνητική ροπή που αναπτύσσεται από τη μηχανή προσδιορίζεται από την εξίσωση:

$$T_e = \frac{3}{2} p (\lambda i_q + (L_d - L_q) i_d i_q) = \frac{3}{2} p K_e i_q \quad (\text{Εξ. 4.14})$$

Από την παραπάνω εξίσωση (Εξ. 4.14) προκύπτει πως η παραγόμενη ηλεκτρομαγνητική ροπή είναι αποτέλεσμα δύο όρων, δηλαδή δύο διακριτών μηχανισμών. Ο πρώτος όρος αντιστοιχεί στην “the mutual reaction torque”, και συμβαίνει λόγω της αλληλεπίδρασης μεταξύ του ρεύματος  $i_q$ , του στάτορα και του μόνιμου μαγνήτη. Ο δεύτερος όρος αντιστοιχεί στην “the reluctance torque” και συμβαίνει εξαιτίας της διαφοράς της αντίστασης (reluctance) στο d και στο q άξονα.

Για έναν στρογγυλό ρότορα (round rotor), δεν υπάρχει διακύμανση στην επαγωγή φάσης και επομένως θα ισχύει:

$$L_d = L_q \quad (\text{Εξ. 4.15})$$

Επομένως, από τις εξισώσεις (Εξ. 4.14) και (Εξ. 4.15) προκύπτει πως για στρογγυλό ρότορα η ηλεκτρομαγνητική ροπή που αναπτύσσεται από τη μηχανή είναι ανάλογη με το ρεύμα του στάτορα  $i_q$  και προσδιορίζεται από την ακόλουθη εξίσωση. Επίσης, θέτουμε  $i_d = 0$ , καθώς δεν επηρεάζει την ηλεκτρομαγνητική ροπή, μετατρέποντας το σύστημα σε γραμμικό, καθώς οι συνιστώσες του ρεύματος του στάτορα, στους άξονες q και d, είναι συνδεδεμένες.

$$T_e = \frac{3}{2} p \lambda i_q \quad (\text{Εξ. 4.16})$$

Η μηχανική ροπή που αναπτύσσεται από τη μηχανή προσδιορίζεται από την εξίσωση

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{1}{J} (T_e - T_f - F\omega_m - T_L) \quad (\text{Εξ. 4.17})$$

- $T_e$ , η ηλεκτρομαγνητική ροπή (electromagnetic torque), [Nm]
- $T_L$ , το φορτίο, δηλαδή η απαιτούμενη μηχανική ροπή (mechanical load torque), [Nm]
- $T_f$ , η ροπή στατικής τριβής (static friction torque), [Nm]
- $J$ , η συνδυασμένη αδράνεια ρότορα και φορτίου (combined inertia of rotor and load), [kgm<sup>2</sup>]
- $F$ , η συνδυασμένη ιξώδης τριβή ρότορα και φορτίου (combined viscous friction of rotor and load), [Nms]

Η γωνιακή θέση του ρότορα προσδιορίζεται από την εξίσωση:

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega_m \quad (\text{Εξ. 4.18})$$

- $\theta$ , η γωνιακή θέση ρότορα (rotor angular position), [rad]

Ο στάτης και ο δρομέας έχουν πάντα τον ίδιο αριθμό πόλων, στον οποίο οφείλεται η σύγχρονη ταχύτητα, η οποία δίνεται από την εξίσωση:

$$n_s = \frac{60f}{p} \quad (\text{Εξ. 4.19})$$

- $n_s$ , η σύγχρονη ταχύτητα (synchronous speed), [rpm]
- $f$ , η συχνότητα ρεύματος (current frequency), [Hz]
- $p$ , ο αριθμός των ζευγών πόλων του κινητήρα (number of pole-pairs of motor)

Η σύγχρονη ή αλλιώς η ηλεκτρική ταχύτητα του ρότορα προσδιορίζεται από την εξίσωση:

$$\omega_e = \omega_s = p \omega_m \quad (\text{Εξ. 4.20})$$

- $\omega_e = \omega_s$ , η σύγχρονη ταχύτητα (synchronous speed), [rad/s]
- $\omega_m$ , η γωνιακή ταχύτητα του ρότορα (angular velocity of the rotor), [rad/s]

Η ροπή σε ένα σύγχρονο κινητήρα μόνιμου μαγνήτη παράγεται ως εξής [10]: Το περιστρεφόμενο πεδίο που δημιουργείται στον στάτη από το εναλλασσόμενο ρεύμα παρασύρει το δρομέα, ο οποίος αποτελείται από μόνιμο μαγνήτη. Ο δρομέας στρέφεται στη σύγχρονη ταχύτητα ως να είναι ‘κλειδωμένος’ με το περιστρεφόμενο πεδίο που παράγει ο στάτης. Όταν εμφανισθεί ένα μηχανικό φορτίο (ροπή) στην άτρακτό του, ο δρομέας μετακινείται σχετικά με το στρεφόμενο πεδίο του στάτη, κατά μια μικρή μηχανική γωνία  $\alpha$ , η οποία εκφράζεται από την εξίσωση:

$$\alpha = \frac{\delta}{p} \quad (\text{Εξ. 4.21})$$

- $\alpha$ , η μηχανική γωνία
- $\delta$ , η ηλεκτρική γωνία ή γωνία ροπής
- $p$ , ο αριθμός των ζευγών πόλων του κινητήρα

Μετά το μεταβατικό φαινόμενο, όπου δημιουργείται αυτή η μικρή σχετική μετακίνηση μεταξύ του δρομέα και του στάτη, ο δρομέας συνεχίζει να ‘κυνηγάει’ το στρεφόμενο πεδίο του στάτη με την ίδια, σύγχρονη ταχύτητα. Αν το μηχανικό φορτίο αυξηθεί, τότε η γωνία α ή δ αυξάνεται κι άλλο, ενώ ο δρομέας συνεχίζει να στρέφεται με την ίδια γωνιακή ταχύτητα.

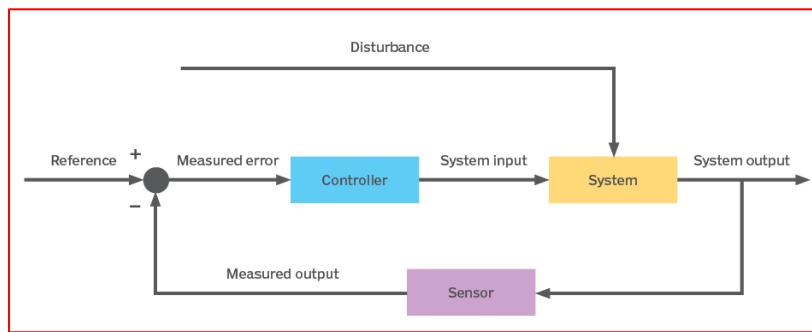
#### 4.2.3 Έλεγχος κινητήρα (Motor control)

Υπάρχει πληθώρα τεχνικών ελέγχου που εφαρμόζονται στα συστήματα ελέγχου των σύγχρονων κινητήρων. Για την επίλυση απλών εργασιών χρησιμοποιείται συνήθως τραπεζοειδής έλεγχος με αισθητήρες Hall. Για την επίλυση προβλημάτων που απαιτούν μέγιστη απόδοση από την ηλεκτρική κίνηση, συνήθως επιλέγεται έλεγχος πεδίου (FOC).

## Κεφάλαιο 5 Σύστημα ελέγχου Μοντέλου 1 (Model 1 Control System)

### 5.1 Σύστημα ελέγχου κλειστού βρόχου (Closed loop control system)

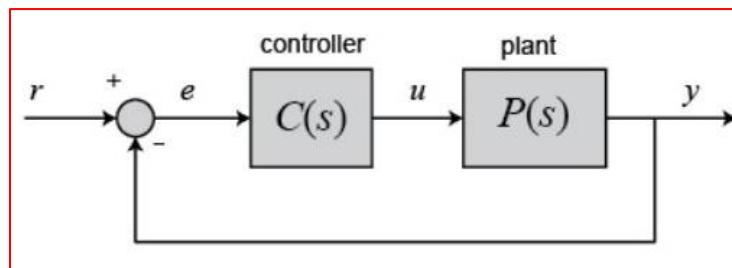
Ένα σύστημα ελέγχου κλειστού βρόχου (closed loop control system) είναι μια μηχανική ή ηλεκτρονική διάταξη που ρυθμίζει αυτόματα ένα σύστημα (system or plant), ώστε να διατηρεί σε αυτό μία επιθυμητή κατάσταση (desired state or reference point), χωρίς την ανθρώπινη αλληλεπίδραση. Αυτό, μπορεί να χρησιμοποιεί σύστημα ανάδρασης (feedback system) ή αισθητήρα (sensor) [13]. Η ρύθμιση του συστήματος επιτυγχάνεται με την εισαγωγή διάταξης που ονομάζεται κατευθυντής ή ελεγκτής (controller).



Σχήμα 5.1: Δομικό διάγραμμα ενός βασικού συστήματος ελέγχου κλειστού βρόχου (Block diagram of a basic closed loop control system)

### 5.2 Έλεγχος με τη χρήση PID (PID control)

Ο έλεγχος Proportional-Integral-Derivative (PID) είναι ο πιο συνηθισμένος αλγόριθμος ελέγχου που χρησιμοποιείται στη βιομηχανία και έχει γίνει παγκοσμίως αποδεκτός στον βιομηχανικό έλεγχο. Η δημοτικότητα των ελεγκτών PID μπορεί να αποδοθεί τόσο στην ισχυρή τους απόδοση σε ένα ευρύ φάσμα συνθηκών λειτουργίας, όσο και στη λειτουργική τους απλότητα. Όπως υποδηλώνει το όνομα, ο κατευθυντής PID συναποτελείται από τρεις βασικούς συντελεστές, τον αναλογικό, τον ολοκληρωτικό και τον διαφορικό, οι οποίοι ποικίλλουν για να λάβουν τη βέλτιστη απόκριση.



Σχήμα 5.2: Δομικό διάγραμμα του συστήματος ελέγχου κλειστού βρόχου (Block diagram of closed loop control system)

Ο κατευθυντής PID σε σύστημα κλειστού βρόχου παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.3, του οποίου οι μεταβλητές και ο τρόπος λειτουργίας εξηγείται στη συνέχεια [14]:

- Η μεταβλητή  $r$  εκφράζει την τιμή αναφοράς (reference value or desired output) και αποτελεί το επιθυμητό σήμα εξόδου του συστήματος ελέγχου κλειστού βρόχου.

- Η μεταβλητή  $y$  εκφράζει το πραγματικό σήμα εξόδου του συστήματος (actual system output). Αυτό, ανατροφοδοτείται και συγκρίνεται με την τιμή αναφοράς.
- Η μεταβλητή  $e$  εκφράζει το σφάλμα παρακολούθησης (tracking error), το οποίο ισούται με την διαφορά μεταξύ του επιθυμητού σήματος εξόδου  $r$  και του πραγματικού σήματος εξόδου  $y$ , σύμφωνα με την εξίσωση:

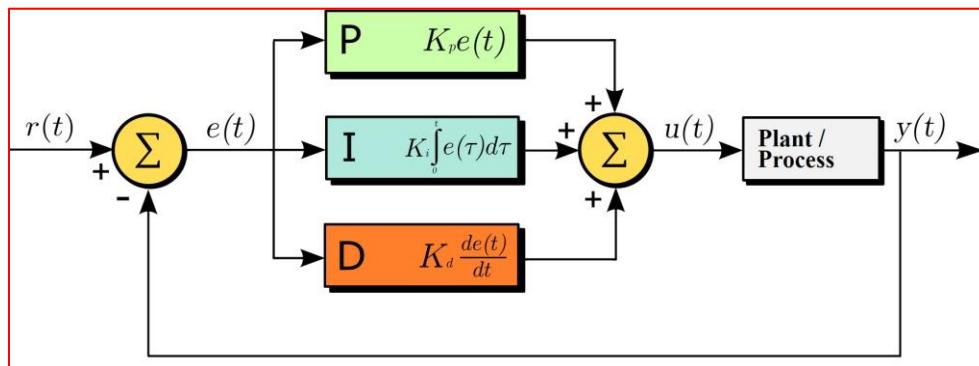
$$e(t) = r(t) - y(t) \quad (\text{Εξ. 5.1})$$

- Η μεταβλητή  $u$  εκφράζει το σήμα εξόδου του κατευθυντή ή το σήμα ελέγχου του συστήματος (controller output or control signal), το οποίο ισούται με το σήμα εισόδου του συστήματος. Αυτό, υπολογίζεται στο πεδίο του χρόνου (time domain) από το σφάλμα ανάδρασης ως εξής:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (\text{Εξ. 5.2})$$

όπου,

- $K_p$  = αναλογικό κέρδος (proportional gain),
- $K_i$  = ολοκληρωτικό κέρδος (integral gain),
- $K_d$  = διαφορικό κέρδος (derivative gain)



Σχήμα 5.3: Δομικό διάγραμμα του συστήματος ελέγχου κλειστού θρόχου με χρήση κατευθυντή PID (Block diagram of closed loop control system using PID controller)

Συγκεκριμένα, το σήμα του σφάλματος  $e$ , τροφοδοτείται στον κατευθυντή PID, ο οποίος υπολογίζει την παράγωγο και το ολοκλήρωμα του σφάλματος αυτού ως προς το χρόνο. Το σήμα ελέγχου  $u$ , ως το σήμα εξόδου του κατευθυντή, τροφοδοτείται στο σύστημα από το οποίο προκύπτει το σήμα εξόδου  $y$ . Στη συνέχεια, το σήμα εξόδου του συστήματος  $y$ , ανατροφοδοτείται και συγκρίνεται με την τιμή αναφοράς  $r$ , ώστε να εκτιμηθεί το νέο σήμα του σφάλματος  $e'$ . Ο κατευθυντής λαμβάνει αυτό το νέο σήμα σφάλματος  $e'$ , και υπολογίζει εκ νέου το σήμα ελέγχου  $u'$ . Αυτή η διαδικασία συνεχίζεται όσο ο κατευθυντής είναι σε ισχύ, με σκοπό την ελαχιστοποίηση του σφάλματος. Η συνάρτηση μεταφοράς (transfer function) του κατευθυντή PID, βρίσκεται εφαρμόζοντας τον μετασχηματισμό Laplace στην εξίσωση (Εξ. 5.2) [14]:

$$F(s) = K_p + K_i \frac{1}{s} + K_d s = \frac{K_d s^2 + K_p s + K_i}{s} \quad (\text{Εξ. 5.3})$$

### 5.3 Τα χαρακτηριστικά των όρων P, I και D (The characteristics of the P, I, and D terms)

Με τον όρο χρονική απόκριση ενός συστήματος, εννοούμε τη συμπεριφορά του συστήματος συναρτήσει του χρόνου, όταν διεγείρεται από μία συγκεκριμένη είσοδο. Η χρονική απόκριση ενός συστήματος ελέγχου αποτελείται από δύο μέρη [14],[15],[16]:

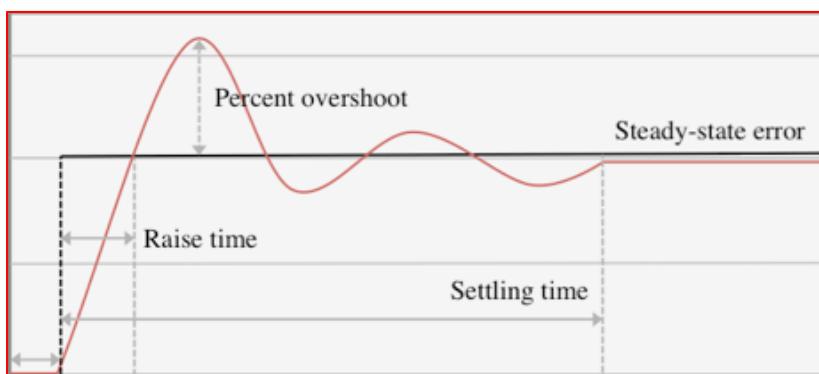
1. Τη μεταβατική απόκριση (transient response).
2. Την απόκριση μόνιμης κατάστασης (steady state response)

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται ορισμένες βασικές προδιαγραφές της μεταβατικής απόκρισης (transient response specifications):

- $t_d$ , ο χρόνος καθυστέρησης (delay time), [sec]: Είναι ο χρόνος που χρειάζεται για να φθάσει η απόκριση, για πρώτη φορά, στο 50% της τελικής της τιμής, την τιμή αναφοράς.
- $t_r$ , ο χρόνος ανύψωσης (rise time), [sec]: Είναι ο χρόνος που χρειάζεται για να ανέλθει η απόκριση από το 10% στο 90% της τελικής της τιμής, της τιμής αναφοράς.
- $t_p$ , ο χρόνος κορυφής (peak time), [sec]: Είναι ο χρόνος που χρειάζεται για να φθάσει η απόκριση στην πρώτη κορυφή της καμπύλης.
- $t_s$ , ο χρόνος αποκατάστασης (settling time), [sec]: Είναι ο χρόνος που χρειάζεται για να φθάσει και να παραμείνει η καμπύλη απόκρισης ανάμεσα στο  $\pm 2\%$  ή  $\pm 5\%$  της τελικής τιμής, της τιμής αναφοράς.
- $M_p$ , η μέγιστη ποσοστιαία υπερακόντιση (maximum percent overshoot), [-]: Είναι η διαφορά της μέγιστης τιμής της απόκρισης του συστήματος, όταν αυτή υπερβαίνει την τιμή αναφοράς, από την τιμή αναφοράς. Αν η απόκριση δεν υπερβεί ποτέ την τιμή αναφοράς, τότε η υπερακόντιση είναι μηδενική.

Για την απόκριση της μόνιμης κατάστασης ορίζεται:

- $e_{ss}$ , το σφάλμα μόνιμης κατάστασης (steady-state error): Είναι το τελικό σταθερό σφάλμα, μεταξύ του τιμής αναφοράς και του πραγματικού σήματος εξόδου του συστήματος.



Σχήμα 5.4: Απόκριση ενός τυπικού συστήματος ελέγχου κλειστού θρόχου με χρήση PID (response of a typical PID closed loop system)

### 5.3.1 Αναλογική απόκριση (proportional response)

Η αναλογική συνιστώσα του σήματος ελέγχου  $K_p e(t)$  εξαρτάται από το σφάλμα παρακολούθησης. Γενικότερα, η αύξηση του αναλογικού κέρδους  $K_p$  αυξάνει την ταχύτητα της απόκρισης του συστήματος ελέγχου, ελαττώνοντας έτσι το χρόνο ανύψωσης  $t_r$ . Ωστόσο, εάν το αναλογικό κέρδος λάβει μεγάλες τιμές, το σήμα εξόδου  $y$ , δηλαδή η απόκριση, θα αρχίσει να ταλαντώνεται, εμφανίζοντας αύξηση υπερακόντισης. Αν το αναλογικό κέρδος αυξηθεί περεταίρω, οι ταλαντώσεις θα γίνουν έντονες και το σύστημα ενδέχεται να γίνει ασταθές. Τέλος, με την αύξηση του κέρδους, ελαττώνεται το σφάλμα μόνιμης κατάστασης  $e_{ss}$  [14-15].

### 5.3.2 Ολοκληρωτική απόκριση (integral response)

Η ολοκληρωτική συνιστώσα του σήματος ελέγχου  $K_i \int e(t) dt$  εξαρτάται από το ολοκλήρωμα του σφάλματος παρακολούθησης, εκφράζοντας το παρελθόν του σφάλματος. Γενικά, η αύξηση του ολοκληρωτικού κέρδους  $K_i$ , τείνει να συμβάλλει στη μείωση του σφάλματος σταθερής κατάστασης  $e_{ss}$ . Εάν υπάρχει σταθερό και επίμονο σφάλμα, τότε η ολοκληρωτική απόκριση θα αυξάνεται συνεχώς με την πάροδο του χρόνου, αυξάνοντας έτσι το σήμα ελέγχου και μειώνοντας το σφάλμα. Ωστόσο, σημαντικό μειονέκτημα του ολοκληρωτικού όρου, αποτελεί η πιθανότητα να καταστεί το σύστημα πιο αργό και ταλαντευτικό, αφού όταν το σήμα σφάλματος αλλάζει πρόσημο, μπορεί να χρειαστεί λίγος χρόνος για να επανέλθει (unwind) ο ολοκληρωτικός όρος [14-15].

### 5.3.3 Διαφορική απόκριση (derivative response)

Η διαφορική συνιστώσα του σήματος ελέγχου  $K_d \frac{de(t)}{dt}$  εξαρτάται από το ρυθμό μεταβολής του σφάλματος παρακολούθησης, προσθέτοντας στον ελεγκτή την ικανότητα να προβλέπει το σφάλμα, εκφράζοντας το μέλλον του σφάλματος. Έτσι, εάν το σφάλμα αρχίσει να έχει μεγάλη κλίση, το σήμα ελέγχου μπορεί να γίνει μεγάλο ακόμη και όταν το μέγεθος του σφάλματος είναι ακόμα σχετικά μικρό. Η ικανότητα πρόβλεψης τείνει να προσθέτει απόσβεση στο σύστημα, μειώνοντας έτσι την υπερακόντιση, αλλά καθιστώντας το πιο αργό, αυξάνοντας έτσι το χρόνο αποκατάστασης  $t_s$ . Η προσθήκη του διαφορικού όρου, ωστόσο, δεν έχει καμία επίδραση στο σφάλμα μόνιμης κατάστασης  $e_{ss}$ . Συνήθως, χρησιμοποιούνται πολύ μικρές τιμές στο διαφορικό κέρδος  $K_d$ , επειδή η διαφορική απόκριση είναι πολύ ευαίσθητη στον θόρυβο του σήματος εξόδου του συστήματος. Εάν το σήμα ανάδρασης του αισθητήρα είναι θορυβώδες ή εάν ο ρυθμός βρόχου ελέγχου είναι πολύ αργός, η διαφορική συνιστώσα μπορεί να κάνει το σύστημα ελέγχου ασταθές [14-15].

Στη συνέχεια, συνοψίζεται στον ακόλουθο πίνακα (Πίνακας 5.1) η απόκριση του συστήματος αναφορικά με τις τρεις συνιστώσες του ελεγκτή PID [14-15,18]:

Πίνακας 5.1: Η γενική επίδραση των συντελεστών του κατευθυντή (The general effects of each controller parameter)

	Rise Time $t_r$	Overshoot $M_p$	Settling Time $t_s$	Steady-State Error $e_{ss}$
$K_p$	Decrease ↓	Increase ↑	Small Change ≈	Decrease ↓
$K_i$	Decrease ↓	Increase ↑	Increase ↑	Decrease ↓
$K_d$	Small Change ≈	Decrease ↓	Decrease ↓	No Change –

## 5.4 Συντονισμός PID (PID tuning)

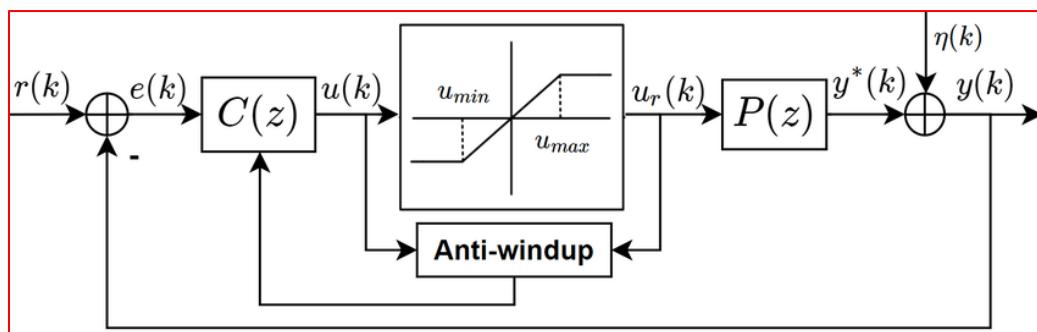
Ο συντονισμός PID (PID tuning) είναι η διαδικασία εύρεσης των τιμών των αναλογικών, ολοκληρωτικών και διαφορικών κερδών ενός ελεγκτή PID για την επίτευξη της επιθυμητής απόδοσης και την ικανοποίηση των απαιτήσεων σχεδιασμού [22].

## 5.5 Κορεσμός και anti-windup (saturation and anti-windup)

Το σύστημα (plant) απαρτίζεται από δύο διαφορετικά υποσυστήματα [20]. Το πρώτο ονομάζεται ενεργοποιητής (actuator) και αποτελεί συσκευή που παράγει δύναμη ή ενέργεια για να αλλάξει την κατάσταση του συστήματος. Συγκεκριμένα, τροφοδοτείται με το σήμα ελέγχου του ελεγκτή, ενώ αυτός παρέχει σήμα που τροφοδοτεί το σύστημα, τέτοιο ώστε να του προκαλέσει την επιθυμητή έξοδο. Το δεύτερο υποσύστημα λέγεται process και είναι αυτό το οποίο ο ενεργοποιητής τροφοδοτεί και επιδράει με κάποιο τρόπο [20].

Το πρόβλημα είναι πως, στον φυσικό κόσμο, οι ενεργοποιητές δεν είναι γραμμικά συστήματα [20]. Δεν μπορούν να ακολουθούν οποιαδήποτε εντολή τους δίνεται από το σήμα εξόδου του ελεγκτή. Μερικά από τα προβλήματα που αντιμετωπίζουν είναι το backlash, rate constrains και saturation. Ένα φαινόμενο κορεσμού (saturation effect), σε ένα σύστημα ελέγχου ανάδρασης, συμβαίνει όταν οποιοδήποτε μέρος του συστήματος αυτού, φτάσει σε ένα φυσικό όριο [17]. Για παράδειγμα, κορεσμό υφίσταται ένα ελατήριο, όταν αυτό συμπιέζεται πέρα από την μέγιστη συμπίεση του, ένας οδηγός ηλεκτροκινητήρα όταν αυτός φτάνει το μέγιστο επιτρεπτό ρεύμα ή ένας ενισχυτής, του οποίου η τάση εξόδου περιορίζεται από την τάση τροφοδοσίας του. Όταν το σημείο λειτουργίας του συστήματος ελέγχου ανάδρασης εμφανίζει φαινόμενο κορεσμού για οποιοδήποτε από τα στοιχεία του, τότε η κλίση του σήματος ελέγχου είναι οριζόντια [17]. Για αυτό, μια αλλαγή της εισόδου δεν προκαλεί καμία αλλαγή στην έξοδο του κορεσμένου στοιχείου. Αυτό σημαίνει ότι το κέρδος του κλειστού βρόχου είναι μηδέν και συνεπώς το σύστημα συμπεριφέρεται σαν σύστημα ανοιχτού βρόχου όπου δεν υπάρχει διαθέσιμος έλεγχος.

Είναι σημαντικό να λαμβάνεται υπόψη ο κορεσμός του ενεργοποιητή στον σχεδιασμό πρακτικών συστημάτων ελέγχου. Και αυτό, καθώς ο κορεσμός του ενεργοποιητή μειώνει την αναμενόμενη απόδοση του κλειστού βρόχου του συστήματος, ενώ μπορεί να προκαλέσει αστάθεια κλειστού βρόχου [19].



Σχήμα 5.5: Δομικό διάγραμμα συστήματος με κορεσμένο ενεργοποιητή και anti-windup (Block diagram of a system with saturation of the actuator and anti-windup)

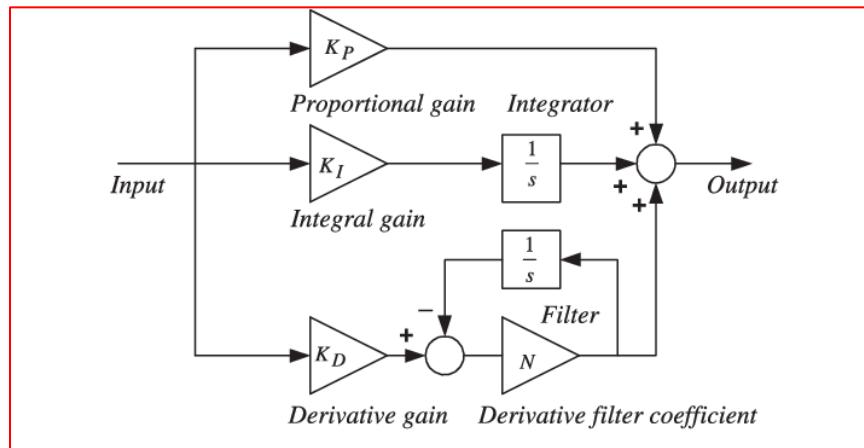
Η δομή ενός συστήματος, του οποίου ο ενεργοποιητής υφίσταται κορεσμό, παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.5, στο πεδίο του διακριτού χρόνου (discrete-time domain). Οι μεταβλητές που εμφανίζονται επεξηγούνται ως εξής [21]:

- $r(k)$  είναι η αναφορά (reference)
- $e(k)$  είναι το σφάλμα (error)
- $u(k)$  είναι το υπολογιζόμενο σήμα ελέγχου (calculated control signal)
- $u_r(k)$  είναι το σήμα ελέγχου που εφαρμόζεται στην εγκατάσταση (plant control signal)
- $y^*(k)$  είναι η έξοδος του, προς έλεγχο, συστήματος (plant output)
- $\eta(k)$  είναι το σήμα θορύβου (noise signal)
- $y(k)$  είναι η μετρούμενη έξοδος συστήματος (measured system output)
- $C(z)$  είναι ο ελεγκτής (controller)
- $P(z)$  είναι το, προς έλεγχο, σύστημα (plant)

Για την αντιμετώπιση του κορεσμού, ενεργοποιείται ο μηχανισμός integrator anti-windup. Δύο συνηθισμένοι, τέτοιου είδους, μηχανισμοί είναι ο back-calculation και ο clamping.

Η μέθοδος back-calculation προτάθηκε από τους Fertik και Ross (1967) [21]. Ως στόχο, έχει να αποτρέψει τη συσσώρευση μεγάλης τιμής από τον ολοκληρωτικό όρο, όταν η έξοδος του ελεγκτή  $u(k)$  είναι κορεσμένη, δηλαδή όταν  $u(k) \neq u_r(k)$ . Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση ενός επιπρόσθετου όρου (compensation), ο οποίος τροφοδοτεί στον ολοκληρωτικό όρο, τη διαφορά μεταξύ της εξόδου του ελεγκτή και της εισόδου του συστήματος, πολλαπλασιασμένη με ένα κέρδος  $K_b = 1/T_t$ , όπου το  $T_t$  είναι μια παράμετρος που ονομάζεται σταθερά χρόνου παρακολούθησης (tracking time constant). Το κέρδος  $K_b$  ονομάζεται back-calculation κέρδος (back-calculation gain) και καθορίζει πόσο γρήγορα θα γίνει επαναφορά του ολοκληρωτικού όρου.

## 5.6 Εφαρμογή του ελεγκτή PID (Implementation of the PID controller)



Σχήμα 5.6: Δομικό διάγραμμα του κατευθυντή PID με χρήση διαφορικού φίλτρου (Block diagram of PID controller with derivative filter)

Το είδος του κατευθυντή που χρησιμοποιήθηκε είναι ο, παράλληλης σύνδεσης, PID (Proportional Integral Derivative), στον οποίο έχει προστεθεί ένα φίλτρο, με την μεταβλητή  $N$  να ονομάζεται συντελεστής φίλτρου (filter coefficient), επιδρώντας μόνο στην διαφορική συνιστώσα του ελεγκτή PID. Το φίλτρο αυτό προστέθηκε, επειδή η διαφορική απόκριση είναι πολύ ευαίσθητη στον θόρυβο του σήματος εξόδου του συστήματος, όπως επισημάνθηκε στο προηγούμενο υποκεφάλαιο. Συνεπώς, το φίλτρο περιορίζει τη

διαφορική συνιστώσα να μπορεί να κάνει το σύστημα ελέγχου ασταθές. Ο ελεγκτής PID μοντελοποιείται από την ακόλουθη εξίσωση, ενώ το δομικό του διάγραμμα παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.6:

$$K_p + K_i \frac{1}{s} + K_d \frac{N}{1 + N \frac{1}{s}} \quad (\text{Εξ. 5.4})$$

Επειδή οι κινητήριοι τροχοί είναι δύο σε αριθμό, θα υπάρχουν δύο σύστημα ελέγχου κλειστού βρόχου, κάθε ένα από τα οποία θα ελέγχει έναν ηλεκτροκινητήρα. Έτσι, για τον αριστερό κινητήριο τροχό, τον τροχό 1, τοποθετείται ο ελεγκτής PID 1, ο οποίος ελέγχει το σύστημα ελέγχου κλειστού βρόχου 1. Ομοίως, για τον δεξιό κινητήριο τροχό, τον τροχό 2, τοποθετείται ο ελεγκτής PID 2, ο οποίος ελέγχει το σύστημα ελέγχου κλειστού βρόχου 2. Το κάθε σύστημα (plant) προς έλεγχο, απαρτίζεται από:

- έναν κινητήρα συνεχούς ρεύματος (DC motor),
- μία πηγή ελεγχόμενης τάσης (controlled voltage source)
- μία πηγής τάσης πεδίου (field voltage source)

Έτσι, στο μοντέλο του ηλεκτρονικού διαφορικού που αναπτύσσεται, για το σύστημα ελέγχου κλειστού βρόχου 1,

- η τιμή αναφοράς  $r$ , ισούται με τη γωνιακή ταχύτητα αναφοράς του κινητήρα 1,  $\omega_{m,1,ref}$ ,
- το σήμα εξόδου του ελεγκτή  $u$ , αποτελεί το σήμα εισόδου για το, προς έλεγχο, σύστημα 1, το οποίο ισοδυναμεί με σήμα τάσης τροφοδοσίας 1,  $v_{k,1}$ ,
- το πραγματικό σήμα εξόδου  $y$ , ισούται με την πραγματική γωνιακή ταχύτητα του κινητήρα 1,  $\omega_{m,1}$ ,
- το σφάλμα παρακολούθησης  $e$ , ισούται με το σφάλμα της γωνιακής ταχύτητας του κινητήρα 1,  $\omega_{er,1}$

Ομοίως, για το σύστημα ελέγχου κλειστού βρόχου 2,

- η τιμή αναφοράς  $r$ , ισούται με τη γωνιακή ταχύτητα αναφοράς του κινητήρα 2,  $\omega_{m,2,ref}$ ,
- το σήμα εξόδου του ελεγκτή  $u$ , αποτελεί το σήμα εισόδου για το, προς έλεγχο, σύστημα 2, το οποίο ισοδυναμεί με σήμα τάσης τροφοδοσίας 2,  $v_{k,2}$ ,
- το πραγματικό σήμα εξόδου  $y$ , ισούται με την πραγματική γωνιακή ταχύτητα του κινητήρα 2,  $\omega_{m,2}$ ,
- το σφάλμα παρακολούθησης  $e$ , ισούται με το σφάλμα της γωνιακής ταχύτητας του κινητήρα 2,  $\omega_{er,2}$

Στο κάθε σύστημα κλειστού βρόχου, η πηγή ελεγχόμενης τάσης αποτελεί τον actuator, ενώ ο ηλεκτροκινητήρας και η πηγή τάσης πεδίου αποτελούν το process. Εν τέλει, αυτό που επιτυγχάνεται, είναι ο έλεγχος της γωνιακής ταχύτητας του κάθε συστήματος κλειστού βρόχου, με την χρήση κατευθυντή PID (closed loop speed control of motor using PID controller).

Αναφορικά με το φαινόμενο του κορεσμού, αυτό μπορεί να εμφανιστεί στην τάση τροφοδοσίας του κάθε συστήματος κλειστού βρόχου. Για αυτό το λόγο εφαρμόζεται η μέθοδος back-calculation.

## Κεφάλαιο 6 Σύστημα ελέγχου Μοντέλου 2 (Model 2 Control System)

### 6.1 Θεωρεία διανυσματικού ελέγχου (Vector control theory)

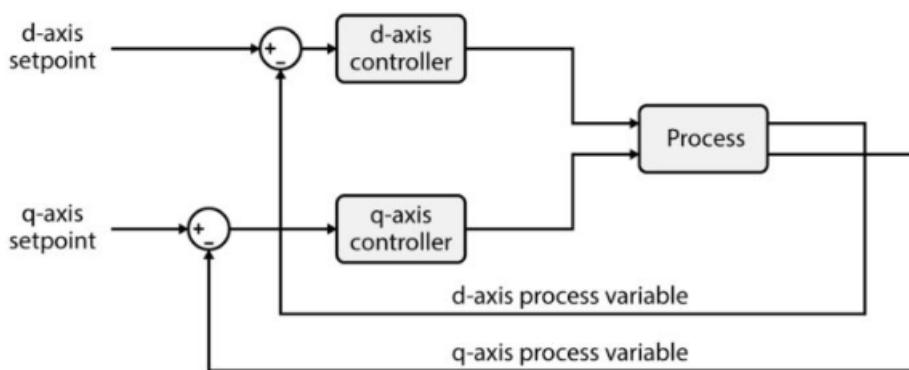
#### 6.1.1 Διανυσματικός έλεγχος ρεύματος (Vector current control)

Ο διανυσματικός έλεγχος ρεύματος (vector current control), γνωστός και ως έλεγχος ρεύματος dq, θεωρείται μια ευρέως διαδεδομένη τεχνική ελέγχου για τριφασικά ρεύματα εναλλασσόμενου ρεύματος, η οποία χρησιμοποιεί ένα περιστρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς (rotating reference frame), συγχρονισμένο με την τάση της πηγής [50].

Σε εφαρμογές συνεχούς ρεύματος, οι συμβατικοί ελεγκτές PI επιτυγχάνουν εξαιρετική απόδοση, παρέχοντας ελάχιστο σφάλμα σταθερής κατάστασης, χάρη στο μεγάλο κέρδος που παρέχεται από τη δράση του ενσωματωμένου ελέγχου. Ωστόσο, σε εφαρμογές εναλλασσόμενου ρεύματος, οι ελεγκτές PI εμφανίζουν αναπόφευκτα μια καθυστερημένη απόκριση παρακολούθησης, η οποία μπορεί να επηρεάσει τη σταθερότητα και την απόδοση του συστήματος, ιδιαίτερα σε εφαρμογές υψηλής συχνότητας. Επίσης, μπορούν να παρουσιάσουν συμπεριφορά υπερακόντισης και έντονης ταλάντωσης, όταν τα κέρδη ελέγχου είναι πολύ υψηλά, γεγονός που μπορεί να προκαλέσει αστάθεια στο σύστημα.

Έτσι, για την αντιμετώπιση αυτού, γίνεται η εφαρμογή των ελεγκτών PI εντός ενός περιστρεφόμενου πλαισίου αναφοράς, το οποίο επιτρέπει τον "εκ νέου εντοπισμό" του μεγάλου κέρδους στην επιθυμητή συχνότητα. Αυτή η τεχνική, απαιτεί συγχρονισμό του περιστρεφόμενου πλαισίου αναφοράς με την τάση τροφοδοσίας.

Αναλυτικότερα, μόλις δημιουργηθεί το πλαίσιο αναφοράς, η χρήση των μετασχηματισμών Clarke και Park επιτρέπει το μετασχηματισμό των ποσοτήτων από το στατικό πλαίσιο αναφοράς στο περιστρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς. Ο έλεγχος του εναλλασσόμενου ρεύματος AC μετατρέπεται, επομένως, σε ένα νέο σενάριο ελέγχου, που αποτελείται από δύο ρεύματα, συνεχούς ρεύματος DC. Και τα δύο ρεύματα μπορούν, στη συνέχεια, να ελεγχθούν χρησιμοποιώντας συμβατικούς ελεγκτές PI, με μηδενικό σφάλμα σταθερής κατάστασης.



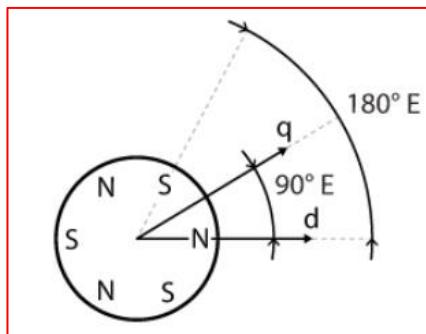
Σχήμα 6.1: Γενική αρχή εφαρμογής διανυσματικού ελέγχου ρεύματος (General principle of vector current control implementation)

### 6.1.2 Διανυσματικός έλεγχος με προσανατολισμό πεδίου (FOC)

Η τεχνική Field Oriented Control (FOC) είναι μια μορφή διανυσματικού ελέγχου (vector control) [27], [51]. Πρόκειται για μια στρατηγική ελέγχου της συμπεριφοράς ενός τριφασικού ηλεκτροκινητήρα, σύμφωνα με την οποία τα ρεύματα (currents), οι τάσεις (voltages) και οι μαγνητικές ροές (magnetic fluxes) του στάτορα του κινητήρα εκφράζονται ως διανύσματα χώρου (space vectors) μέσα σε ένα περιστρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς [51]. Τα διανύσματα χώρου είναι μια μαθηματική αναπαράσταση των περιστρεφόμενων μαγνητικών πεδίων σε τριφασικά ηλεκτρικά συστήματα AC, τα οποία χρησιμοποιούνται συχνά στην ανάλυση και τον έλεγχο κινητήρων AC. Ένα διάνυσμα χώρου είναι ένα σύνθετο διάνυσμα που αντιπροσωπεύει τις στιγμιαίες τιμές των τριφασικών μεγεθών σε ένα τριφασικό ηλεκτρικό σύστημα.

Στην περίπτωση μιας σύγχρονης μηχανής, οι ροές στάτορα και ρότορα είναι σύγχρονες. Επομένως, μια φυσική επιλογή είναι ο προσανατολισμός του στάτορα, στο περιστρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς (RRF), με το  $d$  άξονα (direct axis) να είναι ευθυγραμμισμένος με τη ροή του ρότορα. Για να επιτευχθεί ο προσανατολισμός του στο περιστρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς (RRF), η θέση του ρότορα πρέπει να είναι γνωστή καθ' όλη τη διάρκεια του ελέγχου. Η θέση του είτε μετριέται με κωδικοποιητή (encoder) είτε εκτιμάται με τεχνική χωρίς αισθητήρα (sensorless technique). Ο κωδικοποιητής είναι, ουσιαστικά, μια συσκευή που μετατρέπει τη μηχανική κίνηση ενός περιστρεφόμενου άξονα ή μιας γραμμικής θέσης σε ηλεκτρικό σήμα που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό της θέσης, της ταχύτητας ή της κατεύθυνσης της κίνησης.

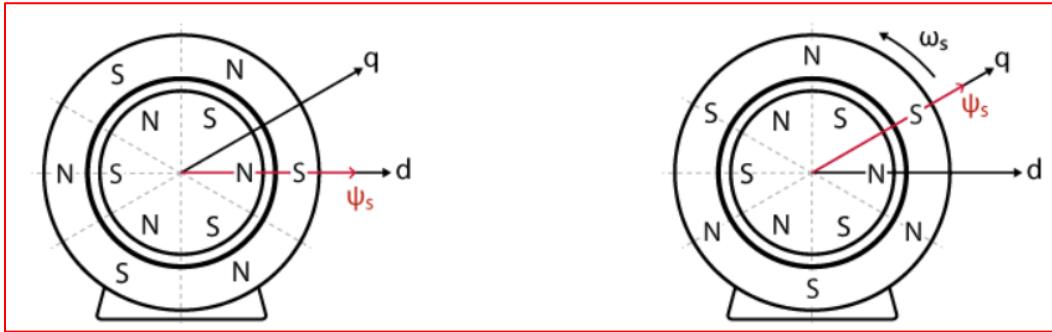
Οι άξονες  $d$  και  $q$  του περιστρεφόμενου πλαισίου αναφοράς έχουν φυσική σημασία στην περίπτωση ενός ηλεκτροκινητήρα [51]. Συγκεκριμένα, ο άξονας  $d$  ευθυγραμμίζεται απευθείας σε έναν μαγνητικό πόλο του δρομέα και ο άξονας  $q$  μετατοπίζεται κατά  $90^{\circ}$ E (electrical degrees), προκύπτοντας έτσι το όνομα του  $q$  άξονα ως quadrature axis, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6.2. Όπως πάντα, δύο μαγνητικοί πόλοι αντίθετης πολικότητας είναι μετατοπισμένοι κατά  $180^{\circ}$  E (electrical degrees).



Σχήμα 6.2: Direct και quadrature άξονες (Direct and quadrature axes)

Όταν οι μαγνητικοί πόλοι του στάτορα είναι ευθυγραμμισμένοι με τους αντίθετους πόλους τους στον ρότορα, τότε το σύστημα βρίσκεται σε ισορροπία και το διάνυσμα ροής του στάτορα (stator flux vector) είναι ευθυγραμμισμένο στον άξονα  $d$ . Αντίθετα, όταν οι μαγνητικοί πόλοι του στάτορα δεν είναι ευθυγραμμισμένοι με τον αντίθετο αντίστοιχο τους, τότε οι ελεκτικές και απωστικές τους δυνάμεις δημιουργούν μια ροπή στον ρότορα. Σε αυτήν την περίπτωση, η μαγνητική ροή του στάτορα δεν είναι ευθυγραμμισμένη με τον άξονα  $d$ , με τη διαφορά γωνίας μεταξύ των δύο να ονομάζεται γωνία φορτίου

ή γωνία ισχύος (load angle or power angle) και να είναι μη μηδενική. Συνοπτικά, η συνιστώσα του άξονα q της ροής του στάτη συμβάλλει στη δημιουργία ροπής, ενώ η συνιστώσα του άξονα d μαγνητίζει τη μηχανή μόνο



Σχήμα 6.3: a) Ευθυγράμμιση του διανύσματος μαγνητικής ροής, για μηδενική ροπή b) Ευθυγράμμιση του διανύσματος μαγνητικής ροής, για μέγιστη ροπή (a) Alignment of the magnetic flux vector with zero torque b) Alignment of the magnetic flux vector with maximum torque)

### 6.1.3 Εφαρμογή του FOC (The technique of the FOC)

Η αρχή λειτουργίας του FOC βασίζεται στις εξισώσεις του κινητήρα σε αυτό το περιστρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς (RRF). Συγκεκριμένα, οι εξισώσεις του στάτορα, περιγράφονται λεπτομερώς στο κεφάλαιο 4.2. Από τις εξισώσεις (Εξ. 4.9), (Εξ. 4.16), επιλύοντας ως προς το ρεύμα του στάτορα προκύπτουν:

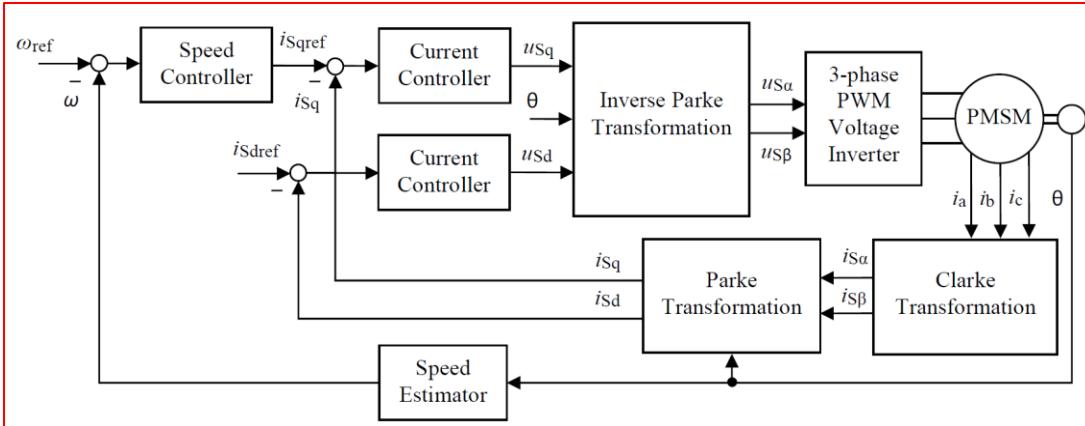
$$i_d^* = \frac{(\lambda_d^* - \lambda)}{L_d} \quad (\text{Εξ. 6.1})$$

$$i_q^* = \frac{T_e^*}{\frac{3}{2} p \lambda} \quad (\text{Εξ. 6.2})$$

Είναι φανερό, πως η μαγνητική ροή του στάτορα και συγκεκριμένα η συνιστώσα του d άξονα (d-axis component), καθώς και η ηλεκτρομαγνητική ροπή μπορούν να ελεγχθούν ανεξάρτητα από το ρεύμα  $i_d$  και  $i_q$  αντίστοιχα. Ο ανεξάρτητος έλεγχος των ρευμάτων  $i_q$  και  $i_d$  μπορεί να υλοποιηθεί με δύο ελεγκτές [51]. Τέλος, ο αλγόριθμος FOC, δημιουργεί τάση αναφοράς που ένας διαμορφωτής PWM (PWM modulator) μετατρέπει σε σήματα πύλης για έναν μετατροπέα πηγής τάσης (voltage source inverter).

Γνωρίζοντας τα ρεύματα του στάτορα και τη γωνία του ρότορα, η τεχνική του FOC μπορεί να ελέγξει τη ηλεκτρομαγνητική ροπή του κινητήρα και τη μαγνητική ροή με πολύ αποτελεσματικό τρόπο [48]. Τα κύρια πλεονεκτήματα αυτής της τεχνικής είναι η βελτιωμένη απόδοση, η ομαλότερη λειτουργία και η γρήγορη απόκριση σε σύγκριση με τις παραδοσιακές τεχνικές ελέγχου, καθώς και ο μικρός κυματισμός της ροπής (little torque ripple) [60].

Ο FOC υλοποιείται χρησιμοποιώντας δύο ελεγκτές ρεύματος, έναν για το στοιχείο του direct άξονα και έναν άλλο για το στοιχείο του quadrature άξονα, καθώς και έναν ελεγκτή ταχύτητας.



Σχήμα 6.4: Δομικό διάγραμμα ελέγχου με προσανατολισμό πεδίου (Field Oriented Control block diagram)

Όπως γίνεται φανερό και από το Σχήμα 6.4, υπάρχουν δύο διακριτοί βρόχοι για έλεγχο, εφαρμόζοντας το FOC [44]:

1. Βρόχος ταχύτητας (velocity loop): ο εξωτερικός βρόγχος που ρυθμίζει την ταχύτητα του κινητήρα και παράγει το σήμα αναφοράς για τον ελεγκτή ρεύματος του q άξονα.
2. Βρόχος ρεύματος (current loop): ο εσωτερικός βρόγχος ρυθμίζει τη μαγνητική ροή και τη ηλεκτρομαγνητική ροπή του κινητήρα.

Αρχικά, η ταχύτητα αναφοράς (reference speed)  $\omega_{m,ref}$  συγκρίνεται με τη μετρούμενη, πραγματική, ταχύτητα κινητήρα  $\omega_m$  και το σήμα σφάλματος τροφοδοτείται στον ελεγκτή ταχύτητας, ο οποίος είναι PID [48]. Ο ελεγκτής αυτός, συγκρίνοντας το σφάλμα της ταχύτητας εξάγει μια εντολή ροπής. Η ροπή συσχετίζεται με την ταχύτητα του κινητήρα, σύμφωνα με την εξίσωση (Εξ. 4.17). Μόλις ληφθεί η εντολή ροπής, αυτή μπορεί να μετατραπεί σε τιμή αναφοράς του ρεύματος του στάτορα, του q άξονα,  $i_{q,ref}$ , σύμφωνα με την εξίσωση (Εξ. 4.16).

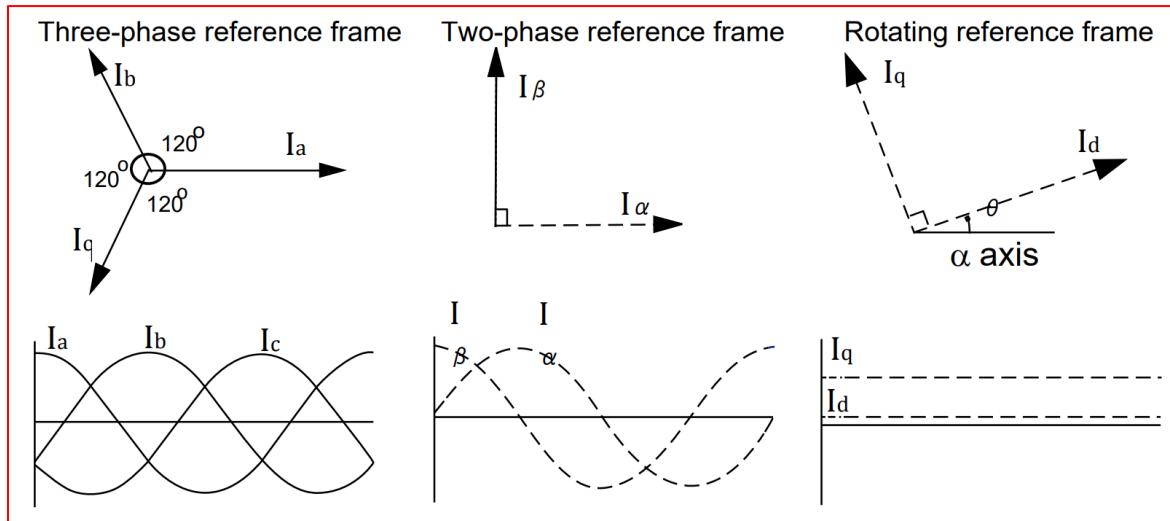
Στη συνέχεια, υπάρχει ένας ελεγκτής PI για τη ρύθμιση της συνιστώσας q του ρεύματος. Η τιμή αναφοράς  $i_{q,ref}$ , συγκρίνεται με τη μετρούμενη  $i_q$  και στη συνέχεια τροφοδοτείται στον ελεγκτή PI. Επιπλέον, υπάρχει άλλος ένας ελεγκτής PI για τη ρύθμιση της συνιστώσας d του ρεύματος του στάτη. Η τιμή αναφοράς,  $i_{d,ref}$ , σε αυτή τη διπλωματική εργασία έχει εκτιμηθεί με μηδέν, όπως αναφέρεται στο κεφάλαιο 4.2

Οι έξοδοι των ελεγκτών PI εξάγουν τη τάση αναφοράς του στάτορα  $V_{q,ref}$  και  $V_{d,ref}$  στον άξονα q και d αντίστοιχα. Η τάση μετασχηματίζεται στο πεδίο αναφοράς alpha-beta, με τη χρήση του αντίστροφου μετασχηματισμού Park. Στη συνέχεια, οι τάσεις αναφοράς χρησιμοποιούνται από τη μονάδα PWM για τη δημιουργία των σημάτων εντολών που θα τροφοδοτήσουν τον μετατροπέα (inverter).

Όλοι οι ελεγκτές ρεύματος και ταχύτητας έχουν εφαρμοστεί λαμβάνοντας υπόψιν τα φυσικά όρια της ροπής και της τάσης. Έτσι, έχει συμπεριληφθεί το φαινόμενο του κορεσμού για την αποφυγή υπέρβασης της μέγιστης ροπής και των τάσεων που επιτρέπονται.

Για την υλοποίηση του FOC, χρησιμοποιούνται τα ακόλουθα τρία πλαίσια αναφοράς (reference frames):

- Τριφασικό πλαίσιο αναφοράς (Three-phase reference frame), στο οποίο, τα ρεύματα  $i_a$ ,  $i_b$  και  $i_c$  είναι ομοεπίπεδα τριφασικά μεγέθη υπό γωνία 120 μοιρών μεταξύ τους.
- Ορθογώνιο στατικό πλαίσιο αναφοράς (Orthogonal stationary reference frame), στο οποίο, τα ρεύματα  $i_\alpha$  (κατά τον άξονα α) και  $i_\beta$  (κατά τον άξονα β) είναι κάθετα μεταξύ τους, αλλά στο ίδιο επίπεδο με το τριφασικό πλαίσιο αναφοράς. Πρόκειται για ένα σταθερό πλαίσιο αναφοράς που είναι ευθυγραμμισμένο με τα τυλίγματα του στάτη του τριφασικού κινητήρα.
- Ορθογώνιο περιστρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς (Orthogonal rotating reference frame), στο οποίο, το ρεύμα  $i_d$  βρίσκεται υπό γωνία περιστροφής  $\theta$  ως προς τον άξονα α και το ρεύμα  $i_q$  είναι κάθετο στο  $i_d$  κατά μήκος του άξονα q [49]. Αυτό είναι ένα πλαίσιο αναφοράς που περιστρέφεται με τον ρότορα του κινητήρα AC. Σε αυτό το πλαίσιο, η μαγνητική ροή και η ροπή του κινητήρα αντιτροσωπεύονται από δύο στοιχεία: το στοιχείο του άξονα d και το στοιχείο του άξονα q. Το στοιχείο του άξονα d είναι ευθυγραμμισμένο με τον μαγνητικό πόλο του δρομέα και το στοιχείο του άξονα q είναι κάθετο στο στοιχείο του άξονα d.



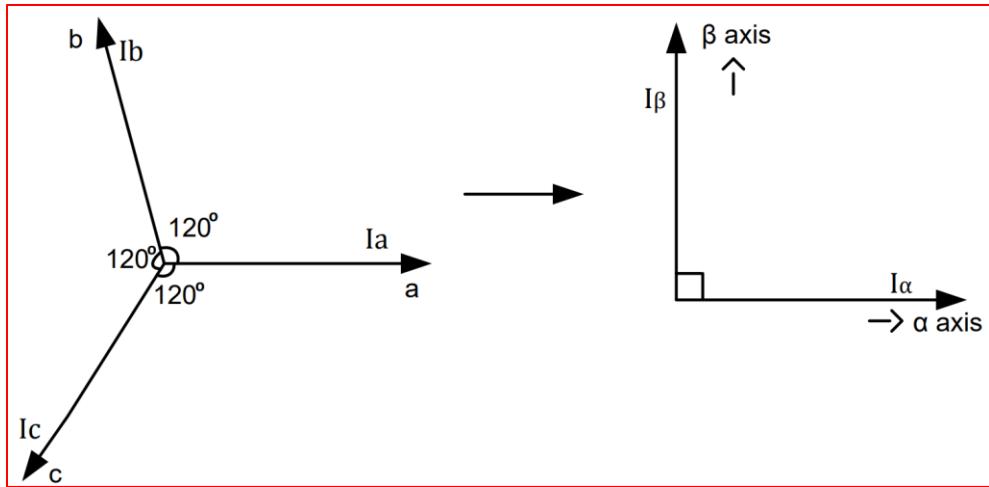
Σχήμα 6.5: Πλαίσια αναφοράς (reference frames)

Στη συνέχεια, παρατίθενται οι μετασχηματισμοί συντεταγμένων που χρησιμοποιούνται στο FOC, για να μετασχηματίσουν το ρεύμα και τη τάση από το ένα πλαίσιο αναφοράς σε ένα άλλο:

- Clark transformation ( $abc$ -to- $\alpha\beta$ ) [49], [57], [62]:

Οι τριφασικές ποσότητες του ρεύματος του στάτορα μετασχηματίζονται από το τριφασικό πλαίσιο αναφοράς  $a-b-c$ , στο ορθογώνιο στατικό δύο αξόνων  $\alpha$ - $\beta$ , μέσω της εξίσωσης (Εξ. 6.3)

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (\text{Εξ. 6.3})$$

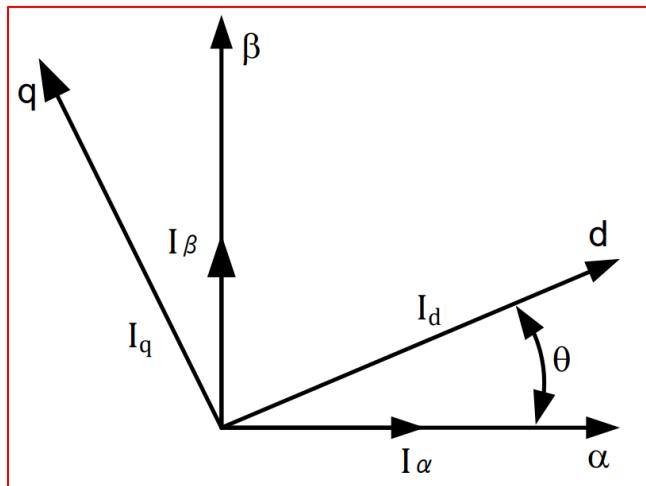


Σχήμα 6.6: Μετασχηματισμός Clark (Clark transformation)

- Park transformation ( $\alpha\beta$ -to- $dq$ ) [44], [47], [49]:

Το ρεύμα του στάτορα μετασχηματίζονται από το ορθογώνιο στατικό πλαίσιο αναφοράς δύο αξόνων  $\alpha$ - $\beta$ , στο περιστρεφόμενο  $q$ - $d$ , μέσω της εξίσωσης (Εξ. 6.4).

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{Εξ. 6.4})$$

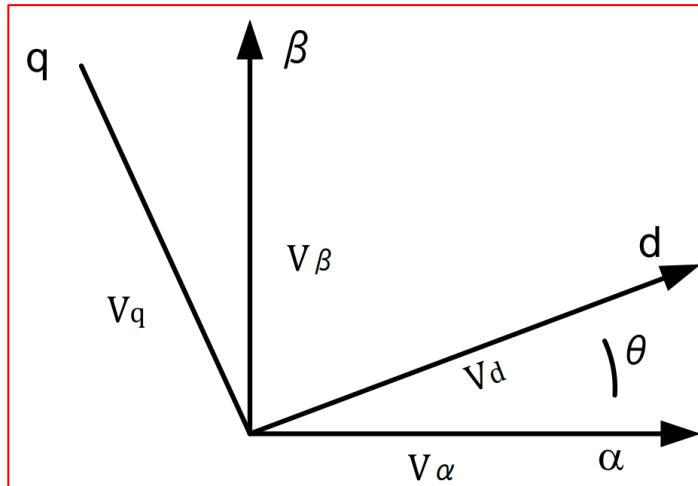


Σχήμα 6.7: Μετασχηματισμός Park (Park transformation)

- Park inverse transformation ( $dq$ -to- $\alpha\beta$ ) [46], [49]:

Η τάση του στάτορα μετασχηματίζεται από το ορθογώνιο περιστρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς  $d$ - $q$ , στο ορθογώνιο στατικό δύο αξόνων  $\alpha$ - $\beta$ , μέσω της εξίσωσης (Εξ. 6.5).

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} \quad (\text{Εξ. 6.5})$$

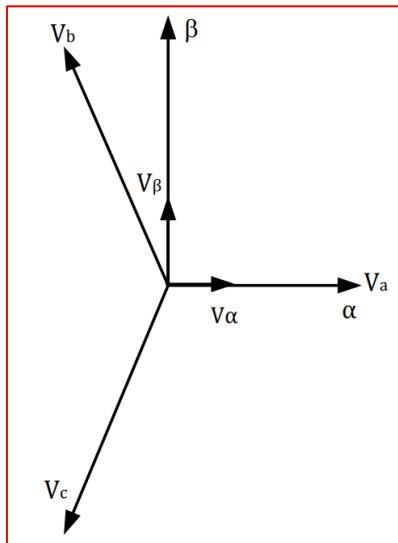


Σχήμα 6.8: Αντίστροφος μετασχηματισμός Park (Inverse Park Transformation)

- Clark inverse transformation ( $\alpha\beta$ -to- $abc$ ) [49], [62]:

Η τάση του στάτορα μετασχηματίζεται από το ορθογώνιο στατικό πλαίσιο αναφοράς δύο αξόνων  $\alpha\beta$  στο τριφασικό  $a-b-c$ , μέσω της εξίσωσης (Εξ. 6.6).

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{Εξ. 6.6})$$



Σχήμα 6.9: Αντίστροφος μετασχηματισμός Clark (Inverse Clark Transformation)

- $i_a, i_b, i_c$ , οι τρείς φάσεις του ρεύματος του στάτορα στο τριφασικό πλαίσιο αναφοράς
- $i_\alpha, i_\beta$ , το ρεύμα του στάτορα στο ορθογώνιο στατικό πλαίσιο αναφοράς
- $i_d, i_q$ , το ρεύμα του στάτορα στο ορθογώνιο περιστρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς
- $\theta$ , η γωνία περιστροφής
- $V_a, V_b, V_c$ , οι τρείς φάσεις της τάσης του στάτορα στο τριφασικό πλαίσιο αναφοράς
- $V_\alpha, V_\beta$ , η τάση του στάτορα στο ορθογώνιο στατικό πλαίσιο αναφοράς
- $V_d, V_q$ , η τάση του στάτορα στο ορθογώνιο περιστρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς

Συνοψίζοντας, η βασική ιδέα πίσω από το FOC είναι ο έλεγχος του ηλεκτροκινητήρα σε ένα σύστημα συντεταγμένων όπου οι δύο ορθογώνιοι άξονες αντιτροσωπεύουν τη μαγνητική ροή και τη ροτή που παράγονται από τον κινητήρα. Αυτή η προσέγγιση διαχωρίζει τον έλεγχο του μαγνητικού πεδίου και τη ροτή του κινητήρα, γεγονός που απλοποιεί τη στρατηγική ελέγχου και παρέχει καλύτερη απόδοση σε σύγκριση με τις παραδοσιακές τεχνικές ελέγχου. Τελικά, η λειτουργία του FOC, μπορεί να συνοψιστεί στα ακόλουθα βήματα [48], [61]:

1. Μετρούνται το ρεύμα του στάτη στο τριφασικό πλαίσιο αναφοράς, καθώς και η γωνία του ρότορα.
2. Το ρεύμα του στάτη μετατρέπεται στο ορθογώνιο στατικό πλαίσιο αναφοράς, α-β, με τη χρήση του μετασχηματισμού Clark.
3. Το ρεύμα του στάτη μετατρέπεται στο περιστρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς, αυτό του ρότορα, q-d, με τη χρήση του μετασχηματισμού Park. Οι τιμές του ρεύματος στο πλαίσιο αναφοράς q-d, παραμένουν αμετάβλητες σε συνθήκες σταθερής κατάστασης.
4. Με τον ελεγκτή ταχύτητας PID, λαμβάνεται η τιμή αναφοράς του ρεύματος του στάτορα στο q (quadrature) άξονα, ενώ η τιμή αναφοράς του ρεύματος του στάτορα στο d (direct) άξονα είναι μηδέν. Το ρεύμα του q άξονα ελέγχει την παραγόμενη ηλεκτρομαγνητική ροτή, ενώ το ρεύμα του d άξονα ελέγχει τη μαγνητική ροή του d άξονα
5. Τα σήματα σφάλματος του ρεύματος του στάτορα, τροφοδοτούν τους ελεγκτές ρεύματος PI, για τη δημιουργία τάσεων αναφοράς στο πλαίσιο αναφοράς q-d.
6. Οι τάσεις αναφοράς μετασχηματίζονται ξανά στο πλαίσιο αναφοράς α-β.
7. Με αυτές τις νέες τιμές τάσεις υπολογίζονται τα σήματα του PWM που απαιτούνται για την οδήγηση του μετατροπέα (inverter).

## 6.2 Μετατροπέας (Inverter)

### 6.2.1 Εφαρμογές (Applications)

Οι μετατροπείς ισχύος (power inverters) είναι συσκευές που μετατρέπουν τη μορφή της ηλεκτρικής ενέργειας, και συγκεκραμένα, το συνεχές ρεύμα (DC) σε εναλλασσόμενο ρεύμα (AC). Οι μετατροπείς διατίθενται σε μεγάλη ποικιλία, αναφορικά με την τιμή, την ισχύ, την απόδοση και τον σκοπό τους [54].

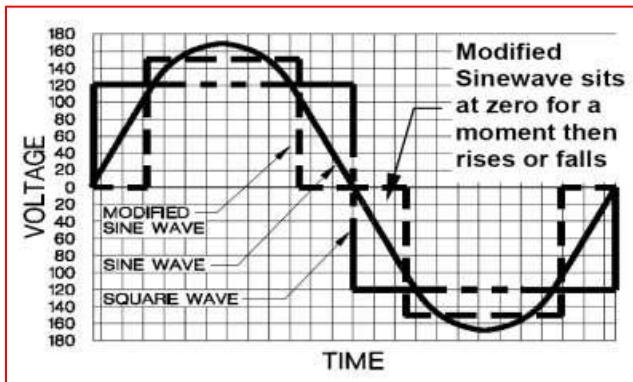
### 6.2.2 Κατηγορίες μετατροπέων (Types of inverter)

Οι μετατροπείς ισχύος χρησιμοποιούνται σήμερα σε πολλές εφαρμογές, όπως για τη τροφοδοσία συσκευών σε ένα αυτοκίνητο, στα κινητά τηλέφωνα, στα ραδιόφωνα και στις τηλεοράσεις [54]. Η

εφαρμογή που απασχολεί την παρούσα εργασία, αποτελεί ένα ηλεκτρικό όχημα, το οποίο έχει διαθέσιμη πηγή συνεχούς ρεύματος, δηλαδή την μπαταρία του, και έχει την ανάγκη για τροφοδοσία των κινητήρων του, με εναλλασσόμενο ρεύμα. Οι μετατροπείς επιτρέπουν, λοιπόν, την παροχή εναλλασσόμενου ρεύματος σε περιοχές ή εφαρμογές, όπου μπορούν να διατεθούν μόνο μπαταρίες, επιτρέποντας τη φορητότητα και απελευθερώνοντας τις εφαρμογές αυτές, από μακριά καλώδια τροφοδοσίας.

Στη βιομηχανία, σήμερα, υπάρχουν δύο διαφορετικοί τύποι μετατροπέων ισχύος, οι μετατροπείς τροποποιημένου ημιτονοειδούς κύματος (modified sine wave generator) και οι μετατροπείς καθαρού ημιτονοειδούς κύματος (pure sine wave generator). Αυτοί οι μετατροπείς διαφέρουν ως προς τις εξόδους τους, παρέχοντας διαφορετικά επίπεδα απόδοσης και παραμόρφωσης που μπορεί να επηρεάσουν τις ηλεκτρονικές συσκευές με διαφορετικούς τρόπους.

Ένα τροποποιημένο ημιτονοειδές κύμα (modified sine wave) είναι παρόμοιο με ένα τετράγωνο κύμα (square wave), αλλά παρόλο που έχει μια βηματική (stepping) εμφάνιση, αυτό σχετίζεται περισσότερο, σχηματικά, με ένα ημιτονοειδές κύμα. Αυτό παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.10, το οποίο δείχνει πώς ένα τροποποιημένο ημιτονοειδές κύμα τάσης (modified sine wave) προσπαθεί να μιμηθεί το ίδιο το ημιτονοειδές κύμα τάσης.



Σχήμα 6.10: Τετράγωνο, τροποποιημένο και καθαρό ημιτονοειδές κύμα (Square, Modified, and Pure Sine Wave)

Η κυματομορφή είναι εύκολο να παραχθεί επειδή είναι απλώς το προϊόν μιας εναλλαγής μεταξύ 3 τιμών σε καθορισμένες συχνότητες, αφήνοντας έτσι έξω τα πιο περίπλοκα κυκλώματα που απαιτούνται για ένα καθαρό ημιτονοειδές κύμα. Ο τροποποιημένος μετατροπέας ημιτονοειδούς κύματος (modified sine wave inverter) παρέχει μια φθηνή και εύκολη λύση για την τροφοδοσία συσκευών που χρειάζονται εναλλασσόμενο ρεύμα.

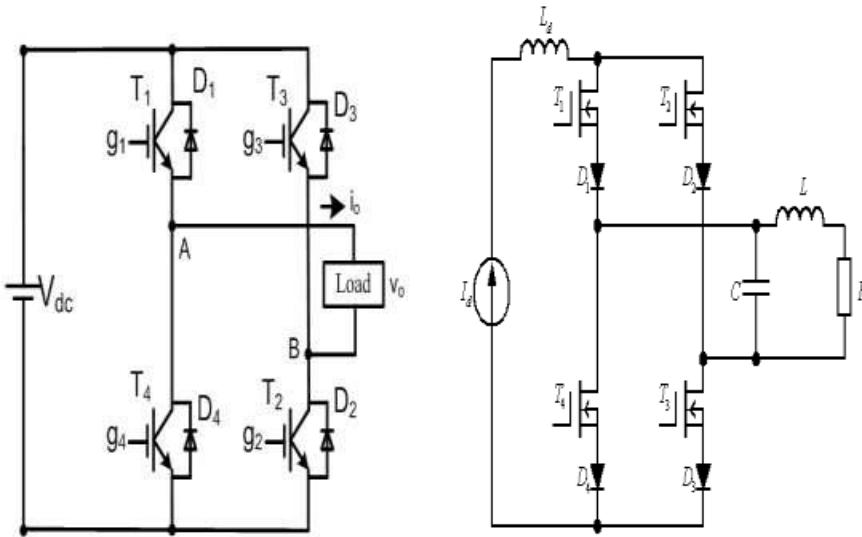
Αντιθέτως, οι μετατροπείς καθαρού ημιτονοειδούς κύματος (pure sine wave generator) είναι σε θέση να προσομοιώνουν με ακρίβεια την ισχύ AC που παρέχεται από μια πρίζα τοίχου. Συνήθως, όμως, είναι πιο ακριβοί και σύνθετοι, από τους μετατροπείς τροποποιημένου ημιτονοειδούς κύματος (modified sine wave), λόγω του προστιθέμενου κυκλώματος.

Ανάλογα με την είσοδο και την έξοδο υπάρχουν δύο τύποι μετατροπέων, οι οποίοι παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.11, [54]:

1. Μετατροπέας πηγής τάσης (Voltage Source Inverter - VSI): Σε αυτούς τους τύπους μετατροπέων, η τάση εισόδου διατηρείται σταθερή και το πλάτος της τάσης εξόδου δεν εξαρτάται από το φορτίο.

Ωστόσο, η κυματομορφή του ρεύματος εξόδου, καθώς και το μέγεθός του, εξαρτάται από τη φύση της αντίστασης φορτίου.

- Μετατροπέας πηγής ρεύματος (Current Source Inverter - CSI): Σε αυτούς τους τύπους μετατροπέων, το ρεύμα εισόδου είναι σταθερό αλλά ρυθμιζόμενο. Το πλάτος του ρεύματος εξόδου είναι ανεξάρτητο από το φορτίο. Ωστόσο, η κυματομορφή της τάσης εξόδου, καθώς και το μέγεθός της, εξαρτάται από τη φύση της αντίστασης φορτίου.



Σχήμα 6.11: (a) Μετατροπέας πηγής τάσης (VSI), b) Μετατροπέας πηγής ρεύματος (CSI)

### 6.2.3 Εσωτερικός έλεγχος μετατροπέα (Internal control of inverter)

Η τάση εξόδου από έναν μετατροπέα μπορεί να ρυθμιστεί, με την εφαρμογή ενός ελέγχου μέσα στον ίδιο τον μετατροπέα. Η πιο αποτελεσματική μέθοδος για να γίνει αυτό, είναι με έλεγχο διαμόρφωσης πλάτους παλμού (pulse width modulation – PWM).

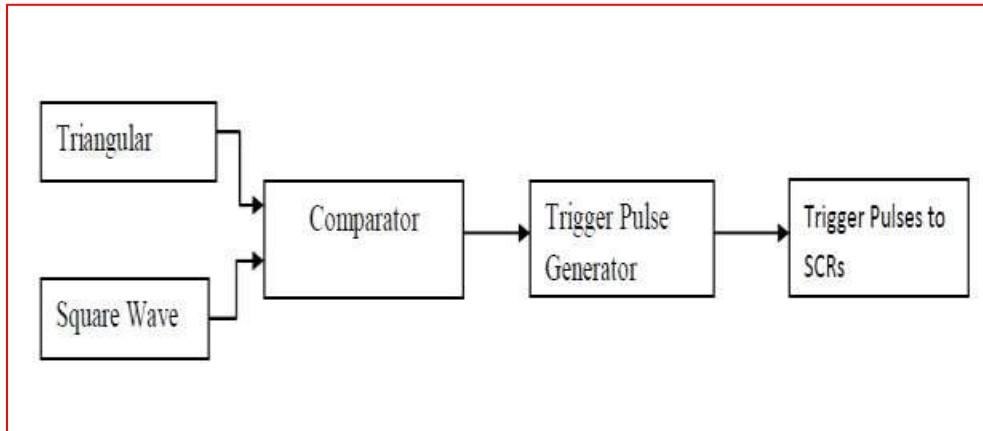
Το σήμα PWM χρησιμοποιείται, ευρέως, ως μέσο ελέγχου τροφοδοσίας εναλλασσόμενου ρεύματος (AC), σε εφαρμογές, που έχουν διαθέσιμη πηγή συνεχούς ρεύματος (DC) ή για προηγμένη μετατροπή DC/AC. Ο κύκλος λειτουργίας (duty cycle) του σήματος PWM μπορεί να ελέγξει την ταχύτητα των κινητήρων, που διαφορετικά θα λειτουργούσαν μόνο σε πλήρη ταχύτητα ή θα ήταν εκτός λειτουργίας.

Το μοτίβο με το οποίο λειτουργεί ο κύκλος λειτουργίας (duty cycle) ενός σήματος PWM, μπορεί να δημιουργηθεί μέσω απλών αναλογικών στοιχείων, ενός ψηφιακού μικροελεγκτή (digital microcontroller) ή συγκεκριμένων κυκλωμάτων PWM (integrated circuits PWM).

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6.12, το τετραγωνικό κύμα (square wave), το οποίο αποτελεί την κυματομορφή αναφοράς εισόδου (input reference waveform), καθώς και το τριγωνικό κύμα (triangular wave), το οποίο αποτελεί το φέρον κύμα (carrier wave), περνούν από έναν συγκριτή (comparator), για να επιτευχθεί η δημιουργία της κυματομορφής PWM (PWM waveform). Οι παλμοί ενεργοποίησης (triggering pulses) παράγονται στα σημεία τομής του φέροντος κύματος (carrier wave) και κύματος αναφοράς εισόδου (input reference wave). Οι παλμοί πυροδότησης παράγονται για την ενεργοποίηση

των SCR (Silicon Controlled Rectifier), έτσι ώστε η τάση εξόδου να είναι διαθέσιμη κατά το διάστημα που το τριγωνικό κύμα τάσης υπερβαίνει το τετράγωνο κύμα διαμόρφωσης.

Το SCR είναι μια συσκευή ημιαγωγών που λειτουργεί ως ηλεκτρικά ελεγχόμενος διακόπτης [55], [56]. Αναλυτικότερα, το SCR είναι ένα θυρίστορ τριών ακροδεκτών (three-terminal thyristor) που λειτουργεί σαν δίοδος ανορθωτή πυριτίου, του οποίου ο αγωγός ελέγχεται από ένα ρεύμα εισόδου. Το SCR ανήκει στην οικογένεια ημιαγωγών που περιλαμβάνει τρανζίστορ και διόδους. Ο βασικός σκοπός του, είναι να λειτουργεί ως διακόπτης που μπορεί να ενεργοποιεί ή να απενεργοποιεί μικρές ή μεγάλες ποσότητες ενέργειας.



Σχήμα 6.12: Δομικό διάγραμμα τεχνικής PWM (PWM technique block diagram)

Τα πλεονεκτήματα της τεχνικής PWM είναι τα εξής:

- Ο έλεγχος τάσης εξόδου με αυτήν τη μέθοδο μπορεί να επιτευχθεί χωρίς πρόσθετα εξαρτήματα.
- Με αυτή τη μέθοδο, οι αρμονικές χαμηλότερης τάξης μπορούν να εξαλειφθούν ή να ελαχιστοποιηθούν μαζί με τον έλεγχο της τάσης εξόδου. Καθώς οι αρμονικές υψηλότερης τάξης μπορούν να φιλτράρονται εύκολα, οι απαρτήσεις φιλτραρίσματος ελαχιστοποιούνται.

Το κύριο μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι τα SCR είναι ακριβά, καθώς πρέπει να διαθέτουν χαμηλούς χρόνους απενεργοποίησης και ενεργοποίησης.

Υπάρχουν πολλές διαφορετικές τεχνικές PWM, εκ των οποίων οι σημαντικότερες είναι οι εξής:

- a. Διαμόρφωση ενός παλμού (Single pulse width modulation)
- b. Διαμόρφωση πολλαπλών παλμών (Multiple pulse width modulation)
- c. Διαμόρφωση πλάτους παλμού επιλεγμένης αρμονικής εξάλειψης (Selected harmonic elimination pulse width modulation)
- d. Διαμόρφωση πλάτους παλμού ελάχιστου ρεύματος κυματισμού (Minimum ripple current pulse width modulation)
- e. Διαμόρφωση πλάτους ημιτονοειδούς παλμού (Sinusoidal pulse width modulation - SPWM)
- f. Διαμόρφωση πλάτους παλμού διανυσματικού χώρου (Space Vector Pulse Width Modulation - SVPWM)

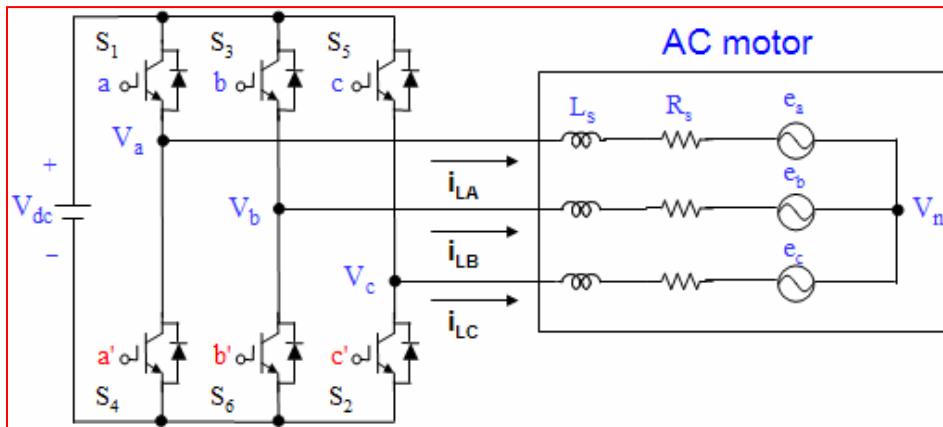
### 6.3 Θεωρεία του SVPWM (SVPWM theory)

#### 6.3.1 Η αρχή λειτουργίας του SVPWM (Principle of SVPWM)

Η μέθοδος Space Vector PWM (SVPWM) είναι μια προηγμένη μέθοδος PWM, όντας η καταλληλότερη, μεταξύ των υπολοίπων τεχνικών PWM για τον έλεγχο εφαρμογών μεταβλητής συχνότητας [44],[47],[52],[53],[54]. Λόγω των ανώτερων χαρακτηριστικών απόδοσης της, βρίσκεται ευρεία εφαρμογή τα τελευταία χρόνια. Ουσιαστικά, η μέθοδος SVPWM είναι ένας αλγόριθμος διαμόρφωσης πλάτους παλμού (PWM) που χρησιμοποιείται για τη δημιουργία κυματομορφών εναλλασσόμενου ρεύματος AC. Η μέθοδος αυτή, συνηθίζεται για τον έλεγχο ενός μετατροπέα και κατά επέκταση για την οδήγηση (drive) τριφασικού κινητήρα εναλλασσόμενου ρεύματος σε διαφορετικές ταχύτητες, ο οποίος τροφοδοτείται από συνεχής τάση DC.

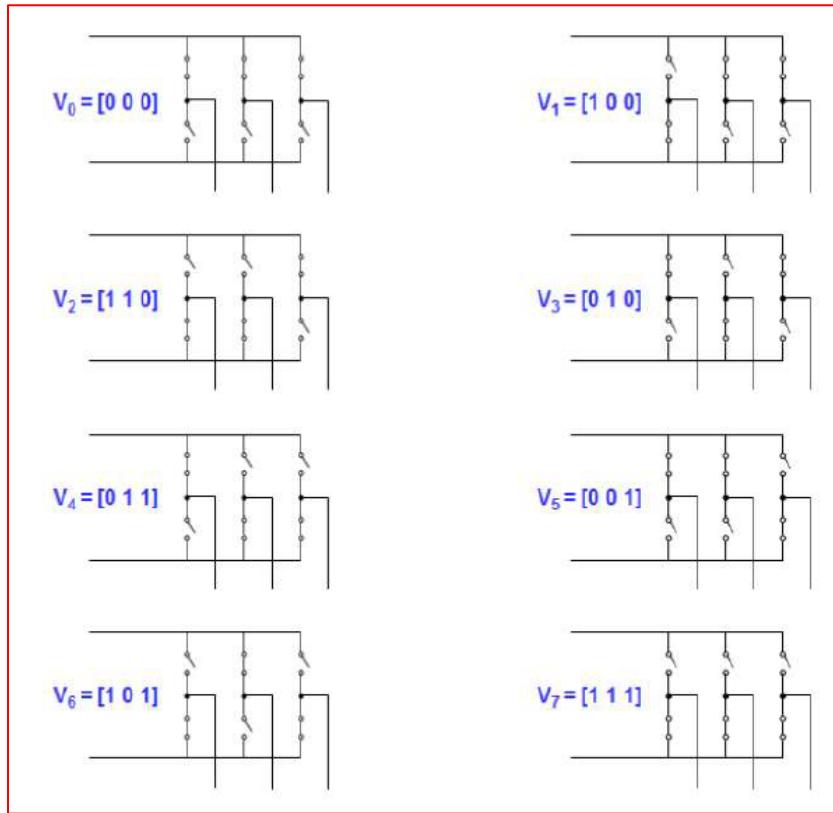
Για την υλοποίηση της μεθόδου SVPWM, δειγματοληπτείται ένα σήμα αναφοράς τάσης  $V_{ref}$  με συχνότητα  $f_s$ , ( $T_s = \frac{1}{f_s}$ ). Το διάνυσμα τάσης αναφοράς, στη συνέχεια, συντίθεται χρησιμοποιώντας έναν συνδυασμό δύο γειτονικών ενεργών διανυσμάτων μεταγωγής (adjacent active switching vectors) και ενός ή και των δύο μηδενικών διανυσμάτων (zero vector). Υπάρχουν διάφορες στρατηγικές επιλογής της σειράς των ενεργών διανυσμάτων και ποια μηδενικά διανύσματα θα χρησιμοποιηθούν. Η επιλογή στρατηγικής θα επηρεάσει το αρμονικό περιεχόμενο και τις απώλειες μεταγωγής (harmonic content and the switching losses).

Το μοντέλο κυκλώματος ενός τυπικού μετατροπέα PWM τριφασικής πηγής τάσης (three-phase voltage source PWM inverter), το οποίο απαρτίζεται από έξι τρανζίστορ (transistor), φαίνεται στο Σχήμα 6.13. Οι μεταβλητές  $S_1$  έως  $S_6$ , είναι οι έξι διακόπτες ισχύος (power switches), που διαμορφώνουν την έξοδο, οι οποίοι ελέγχονται από τις μεταβλητές μεταγωγής (switching variables)  $a$ ,  $a'$ ,  $b$ ,  $b'$ ,  $c$  και  $c'$ . Τα τρανζίστορ με τους διακόπτες  $S_1$ ,  $S_3$ ,  $S_5$ , χαρακτηρίζονται ως άνω (upper) τρανζίστορ, ενώ αυτά με τους διακόπτες  $S_2$ ,  $S_4$ ,  $S_6$ , χαρακτηρίζονται ως κάτω (lower) τρανζίστορ. Ένα τρανζίστορ θεωρείται ενεργοποιημένο, όταν αυτό διαρρέεται από ρεύμα. Όταν, λοιπόν, ένα άνω τρανζίστορ είναι ενεργοποιημένο, δηλαδή, όταν το  $a$ ,  $b$  ή  $c$  είναι 1, τότε το αντίστοιχο κάτω τρανζίστορ είναι απενεργοποιημένο, δηλαδή, το αντίστοιχο  $a'$ ,  $b'$  ή  $c'$  είναι 0. Επομένως, οι καταστάσεις ενεργοποίησης και απενεργοποίησης των άνω τρανζίστορ  $S_1$ ,  $S_3$ ,  $S_5$ , μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον εξολοκλήρου προσδιορισμό της τάσης εξόδου του μετατροπέα.



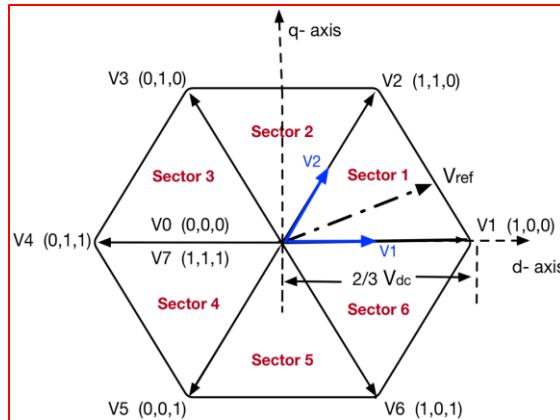
Σχήμα 6.13: Μετατροπέας PWM τριφασικής πηγής τάσης (Three-phase voltage source PWM Inverter)

Υπάρχουν οκτώ πιθανοί συνδυασμοί ενεργοποίησης και απενεργοποίησης που μπορούν να δημιουργηθούν από τους τρεις άνω διακόπτες ισχύος  $S_1, S_3, S_5$ , οι οποίοι παρουσιάζονται στο (Σχήμα 6.14).



Σχήμα 6.14: Τα οκτώ διανύσματα τάσης του μετατροπέα (The eight inverter voltage vectors)

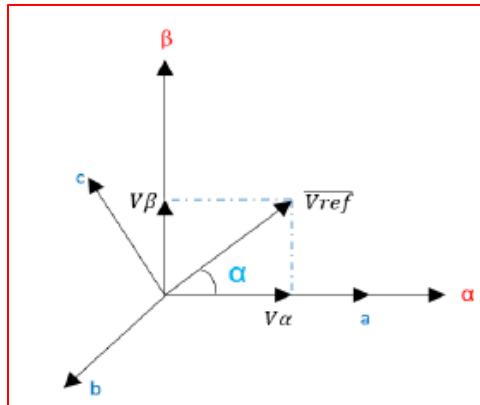
Με άλλα λόγια, ο μετατροπέας (inverter) μπορεί να έχει ως έξοδο, οκτώ διανύσματα χώρου (space vectors), ανάλογα με τους οκτώ πιθανούς συνδυασμούς μεταγωγής (switching) [44]. Αυτά τα οκτώ διανύσματα χώρου ονομάζονται βασικά διανύσματα χώρου και πρόκεινται για διανύσματα τάσης. Αυτά, απαρτίζονται από έξι ενεργά διανύσματα (active vectors), τα οποία συμβολίζονται από  $V_1$  έως  $V_6$ , και από δύο μηδενικά διανύσματα (zero vectors), τα οποία συμβολίζονται  $V_0$  και  $V_7$ . Τα έξι μη μηδενικά διανύσματα, διαμορφώνουν τους άξονες ενός εξάγωνου, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 6.15 και τροφοδοτούν ηλεκτρική ενέργεια στο φορτίο.



Σχήμα 6.15: Τα βασικά διανύσματα μεταγωγής της τεχνικής SVPWM (Basic switching vectors for SVPWM)

Η γωνία μεταξύ οποιωνδήποτε δύο γειτονικών, μη μηδενικών, διανυσμάτων είναι 60 μοίρες. Τα δύο μηδενικά διανύσματα  $V_0$  και  $V_7$ , βρίσκονται στο κέντρο του εξάγωνου και προσφέρουν μηδενική τάση στο φορτίο. Ο στόχος της τεχνικής SVPWM, είναι η δημιουργία του διανύσματος τάσης αναφοράς  $V_{ref}$ , χρησιμοποιώντας τα οκτώ μοτίβα μεταγωγής (switching patterns) ή αλλιώς τα οκτώ διανύσματα χώρου, αντιπροσωπεύοντας την τριφασική τάση AC [44]. Το διάνυσμα τάσης αναφοράς, στο πλαίσιο αναφοράς  $\alpha$ - $\beta$ , δίνεται από την εξίσωση:

$$V_{ref} = \sqrt{V_\alpha^2 + V_\beta^2} \quad (\text{Εξ. 6.7})$$



Σχήμα 6.16: Τάση αναφοράς της τεχνικής SVPWM για PMSM (Reference voltage of SVPWM for PMSM)

Η μέγιστη προσβάσιμη τάση είναι η ακτίνα του κύκλου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.17, η οποία ισούται με:

$$V_{ref,max} = \frac{1}{\sqrt{3}} V_{dc} \quad (\text{Εξ. 6.8})$$

όπου  $V_{dc}$  η τάση της πηγής.

Τα οκτώ διανύσματα μεταγωγής (switching vectors), η τάση εξόδου (line to neutral / phase voltage) και η τάση εξόδου (line to line), σε σχέση με την συνεχή τάση τροφοδοσίας  $V_{dc}$ , δίνονται στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 6.1: (Switching vectors, phase voltages and output line to line voltages)

Voltage Vectors	Switching Vectors			Line to neutral voltage			Line to line voltage		
	a	b	c	$V_{an}$	$V_{bn}$	$V_{cn}$	$V_{ab}$	$V_{bc}$	$V_{ca}$
$V_0$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$V_1$	1	0	0	2/3	-1/3	-1/3	1	0	-1
$V_2$	1	1	0	1/3	1/3	-2/3	0	1	-1
$V_3$	0	1	0	-1/3	2/3	-1/3	-1	1	0
$V_4$	0	1	1	-2/3	1/3	1/3	-1	0	1
$V_5$	0	0	1	-1/3	-1/3	2/3	0	-1	1
$V_6$	1	0	1	1/3	-2/3	1/3	1	-1	0
$V_7$	1	1	1	0	0	0	0	0	0

Όλες οι παραπάνω τάσεις πρέπει να πολλαπλασιαστούν με την τάση τροφοδοσίας  $V_{dc}$  [54].

### 6.3.2 Εφαρμογή του SVPWM (Space vector technique of pulse width modulation)

Ο αλγόριθμος του SVPWM απαρτίζεται από εξής τέσσερα κύρια βήματα [44], [47], [52], [53]:

1. Προσδιορισμός τομέα (Sector identification)
2. Προσδιορισμός χρόνου εναλλαγής-δράσης των διανυσμάτων τάσης (Voltage vector switching-action time)
3. Υπολογισμός χρόνου εναλλαγής κάθε τρανζίστορ (Determine the switching time of each transistor/Three phase time comparison generation)
4. Δημιουργία παλμών PWM (Generation of PWM pulses)

Ο υπολογισμός του αριθμού του sector και των διανυσμάτων τάσης (voltage vectors), υλοποιείται στο ορθογώνιο στατικό πλαίσιο αναφοράς α-β

#### A. Sector identification

Για τον προσδιορισμό του χρόνου εναλλαγής (switching time) και της σειράς εναλλαγής (switching sequence), είναι σημαντικό να είναι γνωστός ο τομέας (sector) στον οποίο βρίσκεται το διάνυσμα τάσης αναφοράς. Έτσι, ο παρακάτω αλγόριθμος χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό του τομέα του διανύσματος τάσης εξόδου αναφοράς. Αρχικά, τρεις ενδιάμεσες μεταβλητές, χρησιμοποιούνται,  $V_{ref1}$ ,  $V_{ref2}$  και  $V_{ref3}$  [26], και η τιμή τους υπολογίζεται από τις ακόλουθες εξισώσεις, όπου  $V_{alpha}$  και  $V_{beta}$ , η τιμή της τάσης του στάτορα στο ορθογώνιο στατικό πλαίσιο αναφοράς α-β.

$$V_{ref1} = V_{beta} \quad (\text{Εξ. 6.9})$$

$$V_{ref2} = \sqrt{3} V_{alpha} - V_{beta} \quad (\text{Εξ. 6.10})$$

$$V_{ref3} = -\sqrt{3} V_{alpha} - V_{beta} \quad (\text{Εξ. 6.11})$$

Στη συνέχεια, προσδιορίζονται οι μεταβλητές  $A$ ,  $B$  και  $C$ , οι οποίες θεωρούνται ως λογικές μεταβλητές που λαμβάνουν τις τιμές 0 ή 1 ανάλογα με τις ακόλουθες συνθήκες:

$$A = \begin{cases} 1, & V_{ref1} > 0 \\ 0, & V_{ref1} \leq 0 \end{cases} \quad (\text{Εξ. 6.12})$$

$$B = \begin{cases} 1, & V_{ref2} > 0 \\ 0, & V_{ref2} \leq 0 \end{cases} \quad (\text{Εξ. 6.13})$$

$$C = \begin{cases} 1, & V_{ref3} > 0 \\ 0, & V_{ref3} \leq 0 \end{cases} \quad (\text{Εξ. 6.14})$$

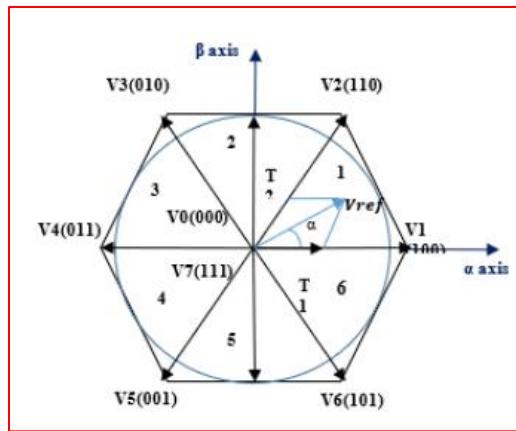
Χρησιμοποιώντας τις λογικές μεταβλητές,  $A$ ,  $B$  και  $C$ , προσδιορίζεται η μεταβλητή  $N$ , σύμφωνα με την εξίσωση (Εξ. 6.15).

$$N = A + 2B + 4C \quad (\text{Εξ. 6.15})$$

Η μεταβλητή  $N$  χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό του τρέχοντος τομέα  $S$ , όπου βρίσκεται το διάνυσμα τάσης αναφοράς  $V_{ref}$ , σύμφωνα με την 1-1 αντιστοίχιση που ορίζει ο Πίνακας 6.2

Πίνακας 6.2: Αντιστοίχιση του  $N$  με τον τομέα  $S$  (Mapping of  $N$  to sector  $S$ )

$N$	3	1	5	4	6	2
$S$	1	2	3	4	5	6



Σχήμα 6.17: Διανύσματα εναλλαγής και οι έξι τομείς για τη τεχνική SVPWM (Switching vectors and six sectors for SVPWM)

#### B. Calculation of action time $T_1$ and $T_2$ of basic voltage vector

Ο χρόνος λειτουργίας (operation time) των δύο γειτονικών βασικών διανυσμάτων τάσης (voltage vectors), από τα  $V_0$  έως  $V_7$ , που απαρτίζουν το διάνυσμα τάσης αναφοράς  $V_{ref}$ , του τρέχοντος τομέα, ορίζεται ως  $T_1$  και  $T_2$  αντίστοιχα. Στον παραδοσιακό αλγόριθμο SVPWM, οι γωνίες χώρου (space angles) και οι τριγωνομετρικές συναρτήσεις χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των χρονικών μεταβλητών  $T_1$  και  $T_2$ , γεγονός που καθιστά τη διαδικασία πολύπλοκη. Στην παρούσα μέθοδο, αυτές οι χρονικές

περίοδοι, υπολογίζονται, χρησιμοποιώντας τη τάση του στάτορα στο ορθογώνιο στατικό πλαίσιο αναφοράς  $\alpha$ - $\beta$ ,  $V_\alpha$  και  $V_\beta$ . Συγκεκριμένα, υπολογίζονται οι μεταβλητές χρόνου  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  από τις ακόλουθες εξισώσεις και στη συνέχεια, με δεδομένο τον αριθμό του τρέχοντος τομέα, προσδιορίζονται οι χρονικές περίοδοι  $T_1$  και  $T_2$ , των δυο διανυσμάτων τάσης, σύμφωνα με αυτό που ορίζει ο Πίνακας 6.3, [47].

$$X = \sqrt{3} \frac{T}{V_{dc}} V_{beta} \quad (Εξ. 6.16)$$

$$Y = \frac{3}{2} \frac{T}{V_{dc}} \left( V_{alpha} + \frac{\sqrt{3}}{3} V_{beta} \right) \quad (Εξ. 6.17)$$

$$Z = \frac{3}{2} \frac{T}{V_{dc}} \left( -V_{alpha} + \frac{\sqrt{3}}{3} V_{beta} \right) \quad (Εξ. 6.18)$$

Πίνακας 6.3: Αντιστοίχιση των  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  στον ενεργό χρόνο  $T1$  και  $T2$  (Mapping of  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  to active time  $T1$  and  $T2$ )

<i>sector P</i>	1	2	3	4	5	6
$T_1$	Z	Y	-Z	-X	X	-Y
$T_2$	Y	-X	X	Z	-Y	-Z

Η μεταβλητή  $T$  αναφέρεται στο συνολικό χρονικό διάστημα που αντιστοιχεί στην συνολική περίοδο εναλλαγής (total switching period or PWM modulation period). Ανάλογα με την τιμή του αθροίσματος των χρονικών περιόδων  $T_1$  και  $T_2$  σε σχέση με το συνολικό χρόνο της εναλλαγής  $T$ , οι χρονικές μεταβλητές  $T_1$  και  $T_2$ , λαμβάνουν νέες τιμές. Συγκεκριμένα, όταν ισχύει η ακόλουθη ανισότητα:

$$(T_1 + T_2) - T < 0 \quad (Εξ. 6.19)$$

τότε οι χρονικές περίοδοι  $T_1$  και  $T_2$  προσδιορίζονται, όπως ειπώθηκε, από τον Πίνακας 6.3

Σε αντίθετη περίπτωση, οι μεταβλητές αυτές λαμβάνουν τις νέες τιμές,  $T_1^*$  και  $T_2^*$ , σύμφωνα με τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$T_1^* = \frac{T_1}{(T_1 + T_2)} T \quad (Εξ. 6.20)$$

$$T_2^* = \frac{T_2}{(T_1 + T_2)} T \quad (Εξ. 6.21)$$

### C. Three phase time comparison generation

Για να υπολογιστούν οι τιμές σύγκρισης χρόνου, κάθε φάσης,  $T_{cm1}$ ,  $T_{cm2}$ ,  $T_{cm3}$ , ορίζονται οι ενδιάμεσες χρονικές μεταβλητές  $T_a$ ,  $T_b$ ,  $T_c$  σύμφωνα με τις παρακάτω εξισώσεις, [44]:

$$T_0 = T - (T_1 + T_2) \quad (\text{Εξ. 6.22})$$

$$T_a = \frac{T_0}{4} \quad (\text{Εξ. 6.23})$$

$$T_b = \frac{T_0}{4} + \frac{T_1}{2} \quad (\text{Εξ. 6.24})$$

$$T_c = \frac{T_0}{4} + \frac{T_1}{2} + \frac{T_2}{2} \quad (\text{Εξ. 6.25})$$

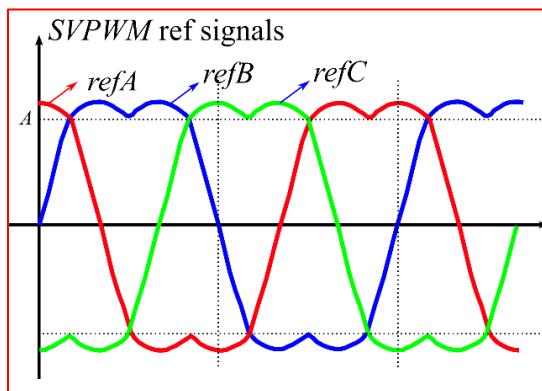
Στη συνέχεια, τα χρονικά σημεία για την εναλλαγή διανυσμάτων (points for vector switching)  $T_{cm1}$ ,  $T_{cm2}$ ,  $T_{cm3}$ , μπορούν να προσδιορισθούν από τον Πίνακας 6.4

Πίνακας 6.4: (Switching with Points vector)

Point switching vector	Sector					
	1	2	3	4	5	6
$T_{cm1}$	$T_b$	$T_a$	$T_a$	$T_c$	$T_c$	$T_b$
$T_{cm2}$	$T_a$	$T_c$	$T_b$	$T_b$	$T_a$	$T_c$
$T_{cm3}$	$T_c$	$T_b$	$T_c$	$T_a$	$T_b$	$T_a$

### D. Generation of PWM pulses

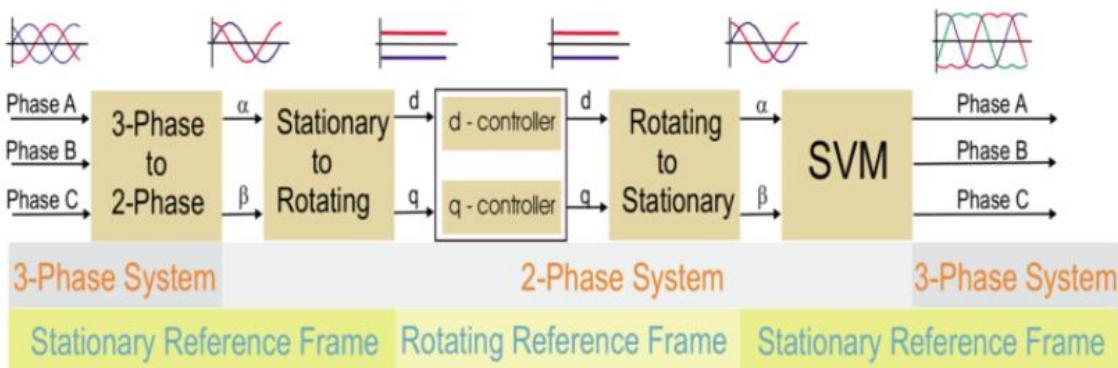
Συγκρίνοντας τα υπολογισμένα σημεία εναλλαγής διανυσμάτων  $T_{cm1}$ ,  $T_{cm2}$ ,  $T_{cm3}$  με την κυματομορφή ισοσκελούς τριγώνου (isosceles' triangle wave), μπορεί να δημιουργηθεί μια συμμετρική κυματομορφή PWM διανυσματικού χώρου (space vector PWM waveform). Το ισοσκελές τριγωνικό κύμα παράγεται με την ενσωμάτωση της γεννήτριας παλμών (pulse generator). Δημιουργούνται, έτσι, συνολικά έξι παλμοί PWM, οι οποίοι ελέγχουν τον τριφασικό μετατροπέα πηγής τάσης (voltage source inverter).



Σχήμα 6.18: Σήματα αναφοράς του SVPWM (SVPWM reference signals)

Συνοπτικά, η μέθοδος SVPWM είναι μια τεχνική που χρησιμοποιείται στο τελευταίο βήμα του FOC, για τον προσδιορισμό σημάτων PWM, για τους διακόπτες ενός μετατροπέα τάσης, VSI, προκειμένου να δημιουργηθούν οι επιθυμητές 3-φασικές τάσεις που θα τροφοδοτήσουν τον ηλεκτροκινητήρα. Ακολουθεί μια σύνοψη του τρόπου λειτουργίας του FOC με το SVPWM [65]:

- 1) Πραγματοποιείται η μέτρηση, δύο εκ των τριών φάσεων του ρεύματος του στάτορα, οι οποίες μετασχηματίζονται, με τη χρήση του μετασχηματισμού Clark. Ο μετασχηματισμός αυτός μετατρέπει το ρεύμα του στάτορα, από το τριφασικό σύστημα  $a - b - c$  σε ένα δισδιάστατο ορθογώνιο στατικό πλαίσιο αναφοράς  $alpha - beta$ . Η μέτρηση της τρίτης φάσης του ρέματος στο τριφασικό σύστημα  $a - b - c$  δεν είναι απαραίτητη, καθώς προκύπτει από τις άλλες δύο, σύμφωνα με το πρώτο Κανόνα του Kirchhoff. Σύμφωνα με τον κανόνα αυτό, το άθροισμα των εντάσεων του ηλεκτρικού ρεύματος που εισέρχονται σε έναν κόμβο ισούται με το άθροισμα των εντάσεων που εξέρχονται από αυτό τον κόμβο. Έτσι, θα ισχύει πως το τρίτο ρεύμα πρέπει να είναι το αρνητικό άθροισμα των δύο πρώτων.
- 2) Πραγματοποιείται ο μετασχηματισμός Park, στο ρεύμα του στάτορα, μετατρέποντάς το από ορθογώνιο στατικό πλαίσιο αναφοράς  $alpha - beta$ , στο περιστρεφόμενο  $q - d$ . Το ρεύμα του άξονα  $d$  είναι ευθυγραμμισμένο με τη μαγνητική ροή του ρότορα, ενώ το ρεύμα του άξονα  $q$ , το οποίο είναι αυτό που παράγει τη ροπή, είναι ορθογώνιο ως προς αυτή τη ροή του ρότορα.
- 3) Η ροή του στάτη, της  $d$  συνιστώσας, καθώς και η ροπή, ελέγχονται ανεξάρτητα, από ελεγκτές PI, από τους οποίους και προκύπτουν οι τάσεις του στάτορα,  $V_d$  και  $V_q$ .
- 4) Πραγματοποιείται ο αντίστροφός μετασχηματισμός Park, στη τάση του στάτορα, μετατρέποντάς τις  $V_d$  και  $V_q$ , από το ορθογώνιο περιστρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς  $q - d$ , στο στατικό  $alpha - beta$ , σε  $V_{alpha}$  και  $V_{beta}$ . Αυτά είναι τα στοιχεία του διανύσματος τάσης στάτη και αποτελούν την είσοδο για το SVPWM, το οποίο παράγει την τάση εξόδου τριών φάσεων,  $V_a$ ,  $V_b$  και  $V_c$  που εν τέλη θα τροφοδοτήσει τον κινητήρα. Τέλος, παρατηρείται πως η χρήση του SVPWM εξαλείφει την ανάγκη για έναν αντίστροφο μετασχηματισμό Clark, για το μετασχηματισμό των τριφασικών τάσεων εξόδου.



Σχήμα 6.19: Σύνοψη του τρόπου λειτουργίας του FOC με το SVPWM (Summary of how FOC with SVPWM operates)

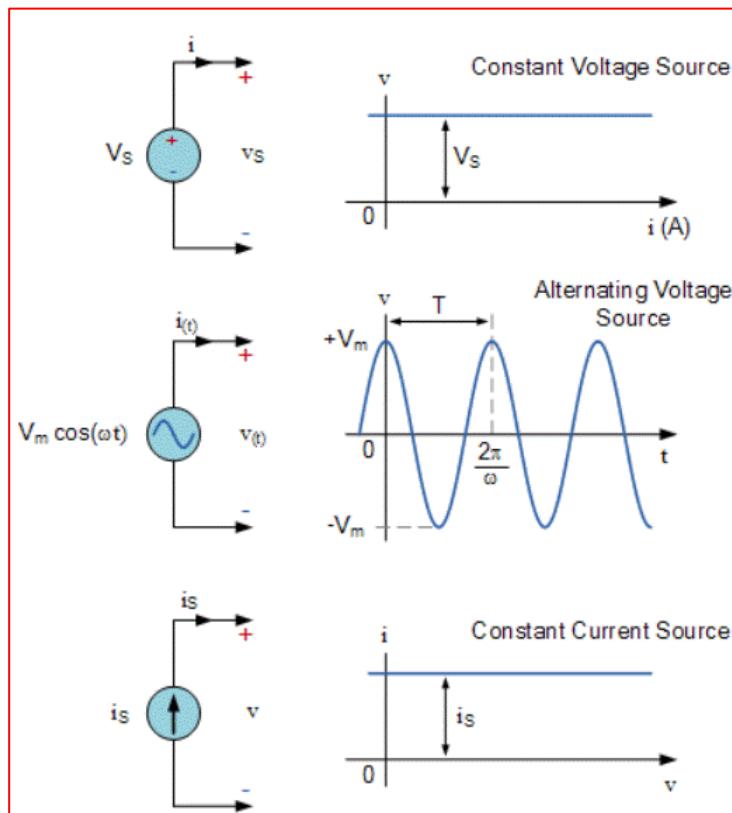
## Κεφάλαιο 7 Πηγή ενέργειας (Energy source)

### 7.1 Εισαγωγή (Introduction)

Υπάρχουν δύο τύποι στοιχείων σε ένα ηλεκτρικό ή ηλεκτρονικό κύκλωμα, τα παθητικά στοιχεία (passive elements) και τα ενεργά στοιχεία (active elements) [23]. Ως ενεργό, ορίζεται το στοιχείο, το οποίο μπορεί να παρέχει συνεχώς ενέργεια σε ένα κύκλωμα, όπως μια μπαταρία, μια γεννήτρια ή ένας λειτουργικός ενισχυτής. Από την άλλη πλευρά, ως παθητικό, ορίζεται το στοιχείο, το οποίο δεν μπορεί να παρέχει ενέργεια, αλλά μόνο την καταναλώνει.

Τα ενεργά στοιχεία ενός κυκλώματος, τα οποία παρέχουν ηλεκτρική ενέργεια στο κύκλωμα ή στο δίκτυο που είναι συνδεδεμένο σε αυτά, αποκαλούνται ως ηλεκτρικές πηγές (electrical sources). Αυτές διακριτοποιούνται σε πηγή τάσης (voltage source) και σε πηγή ρεύματος (current source). Πέρα από την πρόσδοση ενέργειας, οι ηλεκτρικές πηγές μπορούν να απορροφήσουν ενέργεια επιτρέποντάς την να ρέει και προς τις δύο κατευθύνσεις.

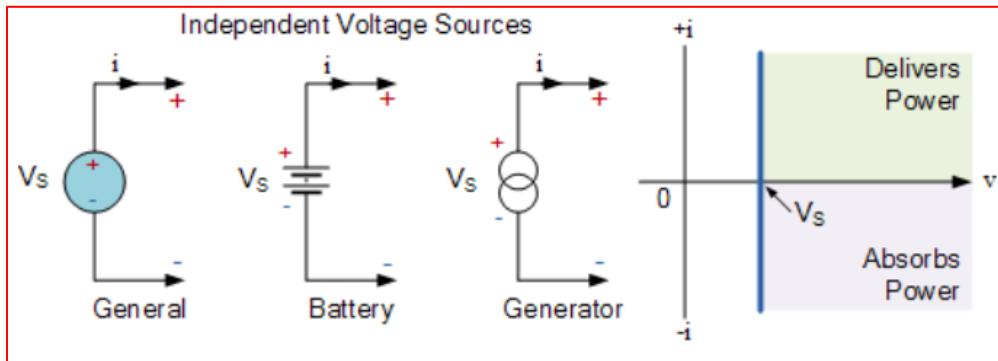
Και οι δύο τύποι ηλεκτρικής πηγής μπορούν να ταξινομηθούν σε συνεχής (DC) και εναλλασσόμενη (AC) πηγή. Συγκεκριμένα, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.1, μια σταθερή, σε τιμή, τάση ονομάζεται, συνεχής τάση (DC voltage), ενώ μια τάση που μεταβάλλεται ημιτονοειδώς με το χρόνο, ονομάζεται εναλλασσόμενη τάση (AC voltage). Ομοίως, ένα σταθερό, σε τιμή, ρεύμα ονομάζεται, συνεχές ρεύμα (DC current), ενώ ένα ρεύμα που μεταβάλλεται ημιτονοειδώς με το χρόνο, ονομάζεται εναλλασσόμενη ρεύμα (AC current).



Σχήμα 7.1: Ηλεκτρικές πηγές (Electrical sources)

Οι ηλεκτρικές πηγές, μπορούν να ταξινομηθούν, επίσης, σε ανεξάρτητες ή ιδανικές (independent or ideal) και σε εξαρτημένες ή ελεγχόμενες (dependent or controlled), αναφορικά με το εάν η τιμή τους εξαρτάται από την τάση ή το ρεύμα, κάποιου άλλου στοιχείου του κυκλώματος.

Μια ιδανική πηγή, θεωρητικά, μπορεί να αποδώσει άπειρη ποσότητα ενέργειας, χωρίς απώλειες, έχοντας έτσι χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης (I-V characteristics) που αντιπροσωπεύεται από μια ευθεία γραμμή. Ωστόσο, στην πράξη, υπάρχει πάντα μια αντίσταση που είναι είτε συνδεδεμένη παράλληλα με την πηγή, αν αυτή πρόκειται για πηγή ρεύματος, είτε σε σειρά με την πηγή, αν αυτή πρόκειται για πηγή τάσης. Έτσι, η αντίσταση αυτή σχετίζεται με την πηγή, επηρεάζοντας την έξοδό της.

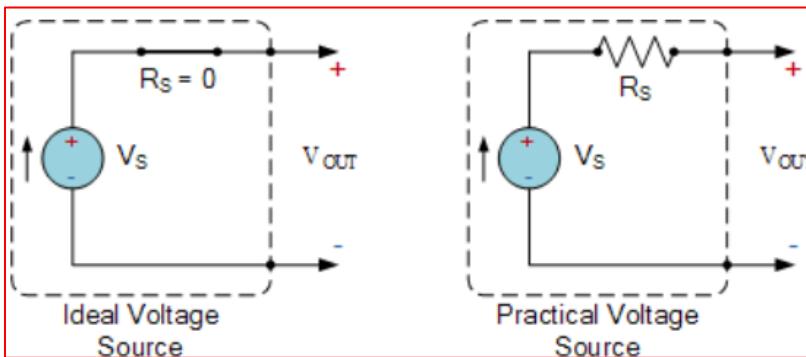


Σχήμα 7.2: Ανεξάρτητες πηγές τάσης (Independent voltage sources)

## 7.2 Ανεξάρτητη πηγή τάσης (Independent voltage sources)

Μια πηγή τάσης, παρέχει μια διαφορά δυναμικού (τάση) μεταξύ δύο σημείων μέσα σε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα, επιτρέποντας στο ρεύμα να διαρρέει σε αυτό. Μια μπαταρία είναι η πιο συνήθης πηγή τάσης για ένα κύκλωμα, με την τάση που εμφανίζεται μεταξύ θετικού και αρνητικού ακροδέκτη της, να ονομάζεται τάση ακροδεκτών (terminal voltage).

Η ιδανική πηγή τάσης ορίζεται ως το ενεργό στοιχείο δύο ακροδεκτών που είναι ικανό να τροφοδοτεί και να διατηρεί την ίδια τάση στους ακροδέκτες του, ανεξάρτητα από το ρεύμα που το διαρρέει. Αυτό συμβαίνει καθώς η εσωτερική αντίσταση (internal resistance)  $R_s$ , που διαθέτει η πηγή, θεωρείται μηδενική. Ωστόσο, μια πραγματική πηγή τάσης (practical voltage resource) διαθέτει εσωτερική αντίσταση μη αμελητέα, και έτσι, η τάση ακροδεκτών θα μειωθεί με την αύξηση του ρεύματος φορτίου.



Σχήμα 7.3: Σύγκριση ιδανικής και πραγματικής πηγής τάσης (Comparison of ideal and practical voltage source)

Στο Σχήμα 7.3, παρουσιάζεται η σύγκριση μιας ιδανικής και πραγματικής πηγής τάσης. Αναλυτικότερα, η εσωτερική αντίσταση,  $R_s$ , ανεξάρτητα από το πόσο μικρή είναι, έχει επίδραση στη χαρακτηριστική της πηγής, καθώς η τάση ακροδεκτών ελαττώνεται με την αύξηση του ρεύματος φορτίου. Αυτό συμβαίνει επειδή το ίδιο ρεύμα φορτίου ρέει μέσω της αντίστασης,  $R_s$ .

Όπως αναφέρει ο νόμος του Ohm, όταν ρεύμα ρέει μέσω μιας αντίστασης, παράγεται πτώση τάσης στην ίδια την αντίσταση, σύμφωνα με την εξίσωση:

$$V = iR, [\Omega] \quad (\text{Εξ. 7.1})$$

- $V$ , η πτώση τάσης της αντίστασης (voltage), [V]
- $i$ , το ρεύμα που διαρρέει την αντίσταση (current), [A]
- $R$ , η αντίσταση του κυκλώματος (resistance), [ $\Omega$ ]

Έτσι, η πτώση τάσης της πραγματικής θα ισούται με:

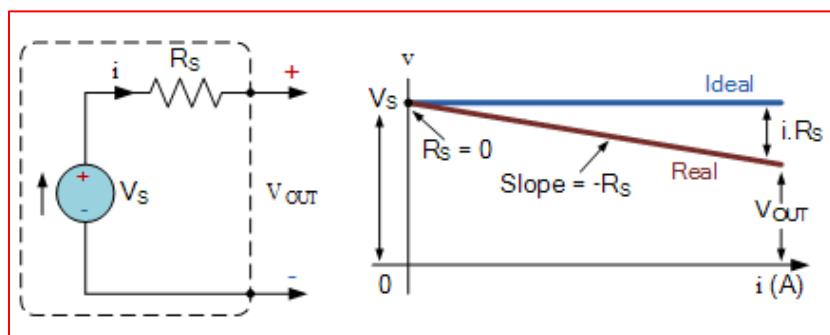
$$V_{drop} = i_s R_s, [\Omega] \quad (\text{Εξ. 7.2})$$

- $V_{drop}$ , η πτώση τάσης της πηγής, λόγω της εσωτερικής της αντίστασης (voltage drop), [V]
- $i_s$ , το ρεύμα που διαρρέει την πηγή (current source), [A]
- $R_s$ , η εσωτερική αντίσταση της πηγής (internal resistance), [ $\Omega$ ]

Τότε το άθροισμα της τάσης γύρω από τον βρόχο, που δίνεται από τον νόμο τάσης του Kirchoff, είναι:

$$V_{out} = V_s - V_{drop} = V_s - i_s R_s, [\Omega] \quad (\text{Εξ. 7.3})$$

- $V_{out}$ , η τάση ακροδεκτών της πηγής τάσης (terminal voltage), [V]
- $V_s$ , η τάση ακροδεκτών της ιδανικής πηγής τάσης (voltage drop), [V]
- $i_s$ , το ρεύμα που διαρρέει την πηγή τάσης (current source), [A]
- $R_s$ , η εσωτερική αντίσταση της πηγής τάσης (internal resistance), [ $\Omega$ ]



Σχήμα 7.4: Χαρακτηριστικά πραγματικής πηγής τάσης (Practical Voltage Source Characteristics)

Η εξίσωση (Εξ. 7.3) μπορεί να σχεδιαστεί για να αποδώσει την χαρακτηριστική καμπύλη I-V, της πραγματικής πηγής τάσης. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.4, πρόκειται για μια ευθεία γραμμή, με κλίση

$-R_s$ , που τέμνει τον κατακόρυφο άξονα τάσης στο ίδιο σημείο με το VS, της ιδανικής πηγής τάσης, όταν το ρεύμα που διαρρέεται είναι μηδέν.

Τέλος, η χαρακτηριστική καμπύλη I-V μιας πραγματικής μπαταρίας αποτελεί μια κοντινή προσέγγιση της αντίστοιχης ιδανικής πηγής τάσης, καθώς η αντίσταση πηγής  $R_s$  είναι συνήθως αρκετά μικρή.

### 7.3 Εφαρμογή της μπαταρίας (Implementation of the battery)

Η πηγή ενέργειας που χρησιμοποιήθηκε στη μοντελοποίηση του συστήματος ηλεκτρονικού διαφορικού, αποτελεί η πηγή τάσης.

Αναφορικά με την τροφοδοσία των τυλιγμάτων του τυμπάνου, κάθε ηλεκτροκινητήρα, του Μοντέλου 1, χρησιμοποιήθηκε ένα σύστημα μπαταριών ιόντων λιθίου, το οποίο προσφέρει μέγιστη τάση 400V. Για την τροφοδοσία των τυλιγμάτων του πεδίου, κάθε ηλεκτροκινητήρα, του μοντέλου αυτού, χρησιμοποιήθηκε ένα σύστημα μπαταριών ιόντων λιθίου, το οποίο προσφέρει σταθερή τάση 120V.

Αναφορικά με το Μοντέλο 2, γίνεται χρήση δύο συστημάτων μπαταριών ιόντων λιθίου, καθένα από τα οποία προσφέρει μέγιστη τάση 500V, τροφοδοτώντας έναν ηλεκτροκινητήρα.

Η τεχνολογία μπαταριών ιόντων λιθίου προσφέρει πλεονεκτήματα αναφορικά με την ειδική ενέργεια, την ειδική ισχύ και τη διάρκειας ζωής έναντι άλλων τύπων επαναφορτιζόμενων μπαταριών [3], [8], [9], [11], [12].

## Κεφάλαιο 8 Κιβώτιο ταχυτήτων (Gearbox)

Για την αύξηση της ροπής που αποδίδουν οι κινητήρες στους κινητήριους τροχούς, αλλά και για την μείωση της γωνιακής τους ταχύτητας σε μια επιθυμητή για το όχημα, γίνεται χρήση δύο κιβωτίων ταχυτήτων, ένα για κάθε κινητήριο τροχό. Κάθε κιβώτιο αποτελείται από μία μόνο σταθερή σχέση μετάδοσης.

Συγκεκριμένα, οι εξισώσεις που συνδέουν τις γωνιακές ταχύτητες κινητήρα και κιβωτίου ταχυτήτων είναι:

$$\omega_{w,1} = \left( \frac{1}{i_{gear,1}} \right) \omega_{m,1} \quad (\text{Εξ. 8.1})$$

$$\omega_{w,2} = \left( \frac{1}{i_{gear,2}} \right) \omega_{m,2} \quad (\text{Εξ. 8.2})$$

Η ηλεκτρική ροπή που προσφέρει ο κινητήρας, συνδέεται με την ροπή έλξης του κινητήριου τροχού από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$T_{t,1} = (n_{eff,gear,1} i_{gear,1}) T_{e,1} \quad (\text{Εξ. 8.3})$$

$$T_{t,2} = (n_{eff,gear,2} i_{gear,2}) T_{e,2} \quad (\text{Εξ. 8.4})$$

- $\omega_{w,1}, \omega_{w,2}$ , η πραγματική γωνιακή ταχύτητα του κινητήριου τροχού 1 και 2 αντίστοιχα (wheel speed 1, wheel speed 2), [ $rads^{-1}$ ].
- $\omega_{m,1}, \omega_{m,2}$ , η πραγματική γωνιακή ταχύτητα του κινητήρα 1 και 2 αντίστοιχα (motor speed 1, motor speed 2), [ $rads^{-1}$ ].
- $T_{e,1}, T_{e,2}$ , η ηλεκτρική ροπή του κινητήρα 1 και 2 αντίστοιχα (electrical torque 1, electrical torque 2), [ $Nm$ ].
- $T_{t,1}, T_{t,2}$ , η ροπή έλξης του κινητήριου τροχού 1 και 2 αντίστοιχα (tractive torque 1, tractive torque 2), [ $Nm$ ].
- $i_{gear,1}, i_{gear,2}$ , η σχέση μετάδοσης του κιβωτίου ταχυτήτων 1 και 2 αντίστοιχα (gear ratio 1, gear ratio 2).
- $n_{eff,gear,1}, n_{eff,gear,2}$ , ο βαθμός απόδοσης του κιβωτίου ταχυτήτων 1 και 2 αντίστοιχα (gearbox efficiency 1, gearbox efficiency 2).

Το κιβώτιο ταχυτήτων, χρησιμοποιήθηκε μονό στο Μοντέλο 1, δοκιμάζοντας και αξιολογώντας την επίδραση του λογού μετάδοσης στο σύστημα του ηλεκτρονικού διαφορικού. Στο Μοντέλο 2 θεωρήθηκε περιττό, οπότε και δεν έγινε η χρήση του.

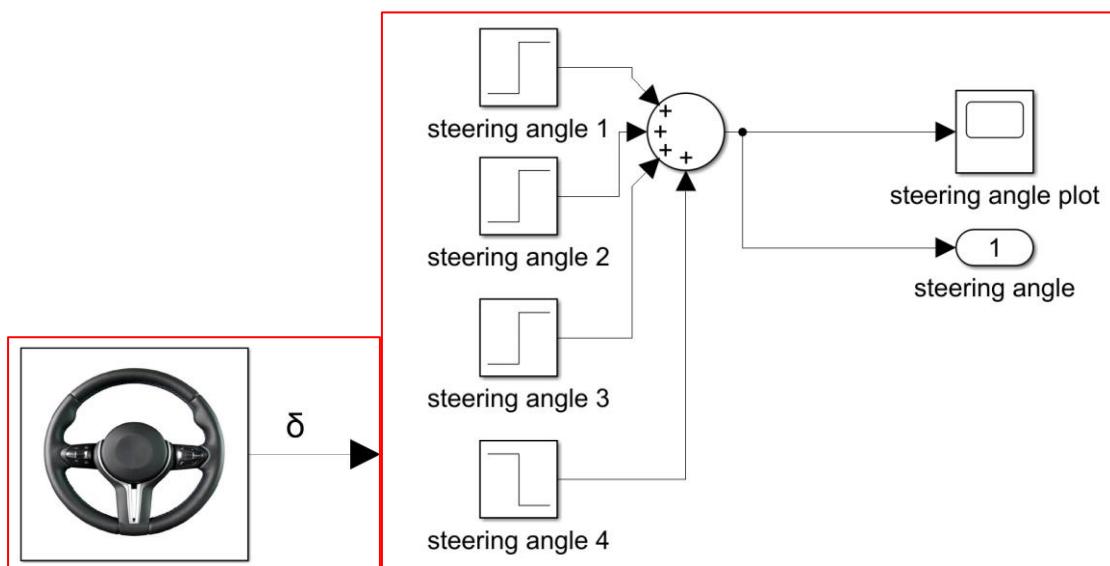
## Κεφάλαιο 9 Ανάλυση και επεξήγηση των μοντέλων στο Simulink (Simulink models analysis and explanation)

### 9.1 Ανάλυση μοντέλου 1 στο Simulink (Simulink model 1 analysis)

Το παρακάτω μοντέλο (Μοντέλο 1) του λογισμικού Simulink της MATLAB, μοντελοποιεί ένα ηλεκτρονικό διαφορικό σύστημα ενός ηλεκτρικού οχήματος με δύο οπίσθιους κινητήριους τροχούς. Οι ηλεκτροκινητήρες αυτοί είναι συνεχούς ρεύματος. Ως είσοδοι, στο σύστημα, λαμβάνονται η γωνία τιμονιού οχήματος  $\delta$  και η γωνιακή ταχύτητα αναφοράς  $\omega_{ref}$ , ως εντολή πεντάλ γκαζιού.

#### 9.1.1 Υποσύστημα διεύθυνσης τιμονιού (Steering subsystem)

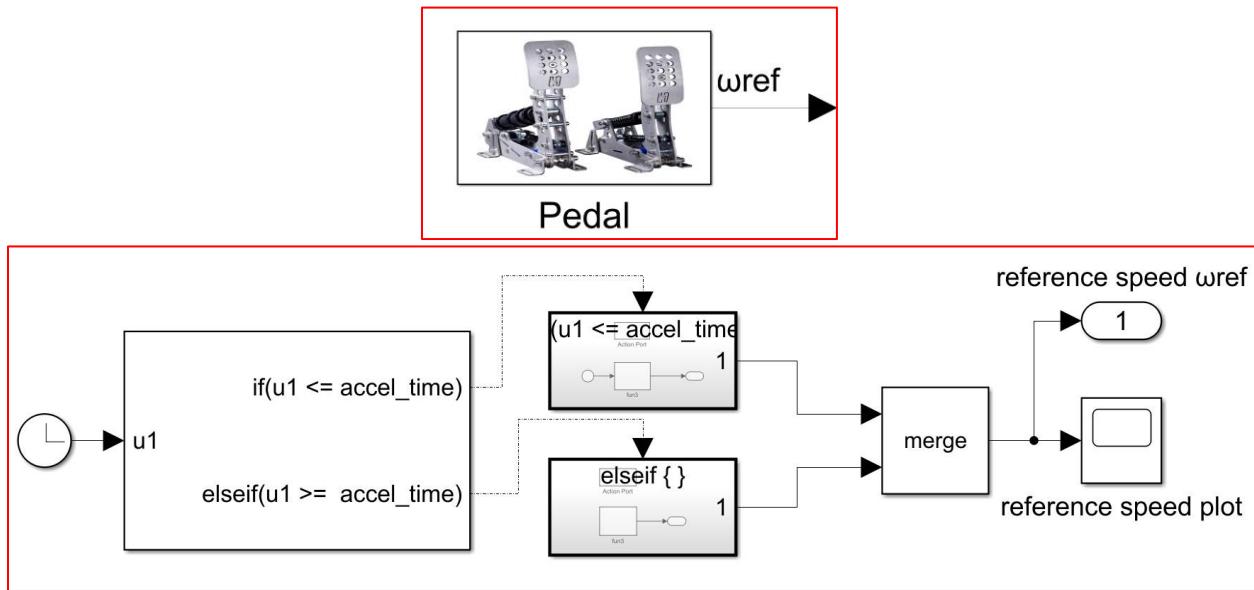
Το υποσύστημα διεύθυνσης τιμονιού ορίζει την γωνία στροφής  $\delta$  του οχήματος. Αυτό, στρέφει τους δύο εμπρόσθιους τροχούς, όπως ορίζει το μοντέλο τροχιάς του Ackermann, σύμφωνα με το Σχήμα 2.3. Η γωνία στροφής του οχήματος αποτελεί μεταβλητή εισόδου για το ηλεκτρονικό διαφορικό και καθορίζει τη διαφορά της γωνιακής ταχύτητας που έχουν οι δύο ηλεκτροκινητήρες όταν αυτοί περιστρέφονται και συνεπώς οι δύο κινητήριοι τροχοί. Έτσι, για μηδενική γωνία, οι κινητήριοι τροχοί περιστρέφονται με την ίδια ταχύτητα, ενώ με την αύξηση της τιμής της γωνίας στροφής του οχήματος, αυξάνεται η διαφορά της γωνιακής ταχύτητας, σύμφωνα με την εξίσωση (Εξ. 2.12). Η γωνία στροφής έχει ορισμένους περιορισμούς, όπως την ευστάθεια του οχήματος, συνεπώς δεν ξεπερνάει μια μέγιστη τιμή, η οποία τέθηκε υπόψιν στις προσομοιώσεις που ακολουθούν. Στο Σχήμα 9.1, παρουσιάζεται η μοντελοποίηση του συστήματος αυτού, στο περιβάλλον του Simulink, με τη γωνία  $\delta$  να μπορεί να μεταβληθεί έως και πέντε φορές σε μια προσομοίωση, αριθμός ο οποίος κρίνεται ικανοποιητικός για το σκοπό της προσομοίωσης.



Σχήμα 9.1: Υποσύστημα τιμονιού στο περιβάλλον Simulink (Steering subsystem in Simulink)

### 9.1.2 Υποσύστημα πεντάλ (Pedal subsystem)

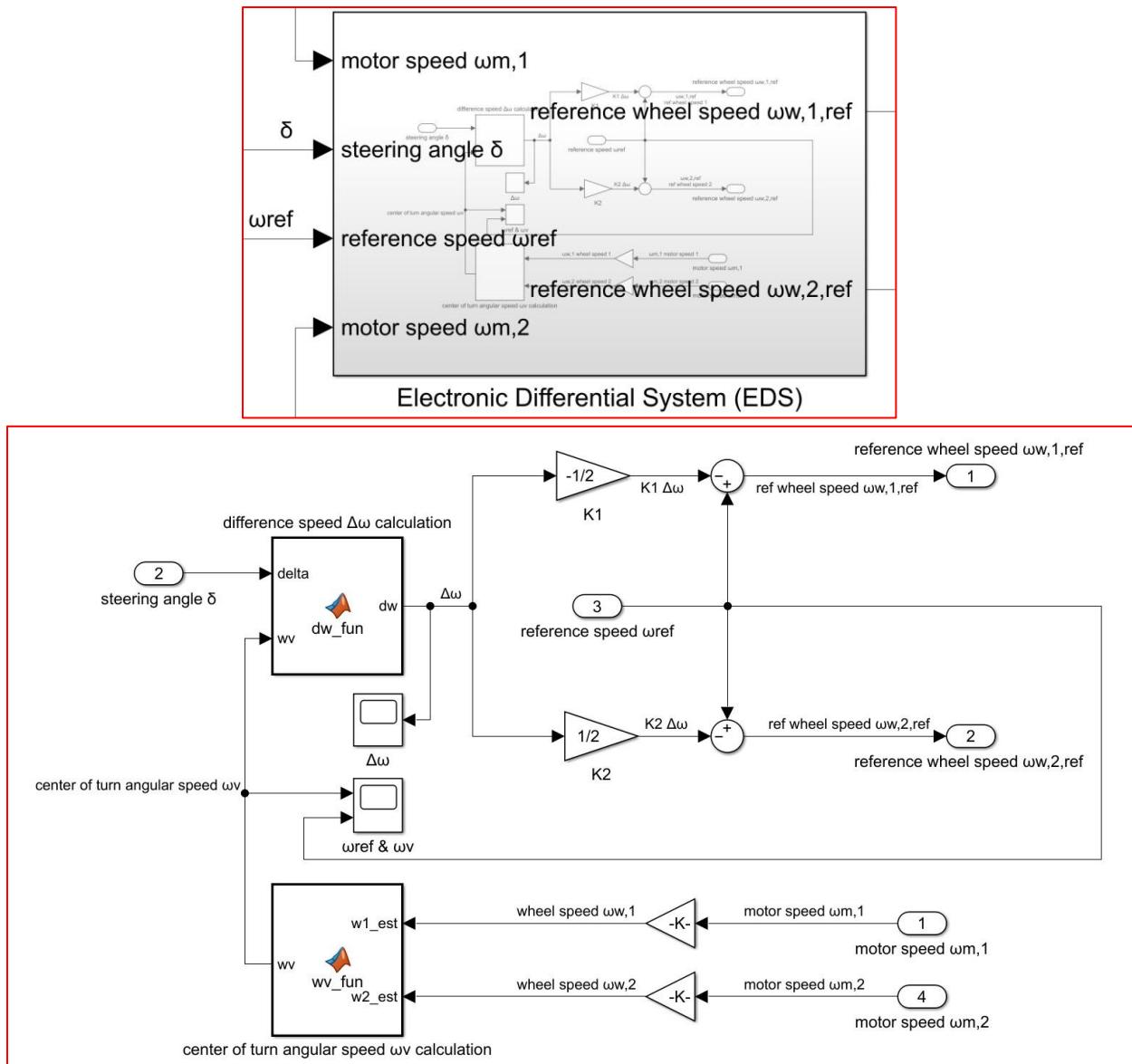
Το υποσύστημα πεντάλ ορίζει τη γωνιακή ταχύτητα αναφοράς  $\omega_{ref}$  του ηλεκτρονικού διαφορικού και συνεπώς του οχήματος. Η ταχύτητα αυτή, αναφέρεται στη γωνιακή ταχύτητα που έχει το κέντρο του φανταστικού οπίσθιου μετατροχίου ως προς το κέντρο στροφής του οχήματος. Η γωνιακή ταχύτητα αναφοράς αποτελεί μεταβλητή εισόδου για το ηλεκτρονικό διαφορικό και καθορίζει το είδος της κίνησης του οχήματος αλλά και την απόλυτη τιμή της ταχύτητάς του. Στο Σχήμα 9.2, παρουσιάζεται η μοντελοποίηση του συστήματος αυτού, στο περιβάλλον του Simulink.



Σχήμα 9.2: Υποσύστημα πεντάλ στο περιβάλλον Simulink (Pedal subsystem in Simulink)

### 9.1.3 Σύστημα ηλεκτρονικού διαφορικού (Electronic differential system)

Το ηλεκτρονικό διαφορικό (EDS) ορίζει τις γωνιακές ταχύτητες αναφοράς των κινητήριων τροχών του οχήματος  $\omega_{w,1,ref}$  και  $\omega_{w,2,ref}$ . Αυτό, διαχειρίζεται ως εισόδους, τις μεταβλητές γωνίας στροφής  $\delta$ , γωνιακής ταχύτητας αναφοράς  $\omega_{ref}$  και των πραγματικών ταχυτήτων των δύο ηλεκτροκινητήρων  $\omega_{m,1}$  και  $\omega_{m,2}$ . Σκοπός του μοντέλου αυτού είναι να προσφέρει στο όχημα τη δυνατότητα να αποκτά την επιθυμητή ταχύτητα αναφοράς που ορίζει το πεντάλ, ενώ όταν αυτό υπόκειται σε στροφή να παρέχει στους κινητήριους τροχούς διαφορετική ταχύτητα για να αποφεύγονται φαινόμενα ολίσθησης και αστάθειας. Στο Σχήμα 9.3, παρουσιάζεται η μοντελοποίηση του συστήματος αυτού, στο περιβάλλον του Simulink.



Σχήμα 9.3: Ηλεκτρονικό διαφορικό στο περιβάλλον Simulink (Electronic differential system in Simulink)

#### 9.1.4 Ελεγκτές (Controllers)

Οι ελεγκτές είναι δύο σε αριθμό, όσοι και οι κινητήριοι τροχοί του οχήματος. Ως είσοδο λαμβάνουν το σφάλμα της γωνιακής ταχύτητας των ηλεκτροκινητήρων  $\omega_{er,1}$  και  $\omega_{er,2}$ , ενώ ως έξοδο παράγουν ένα σήμα ελέγχου, το οποίο τροφοδοτείται στο σύστημα (plant), καθορίζοντας την τάσης τροφοδοσίας  $v_k$  των κινητήρων. Οι πραγματικές γωνιακές ταχύτητες των δύο ηλεκτροκινητήρων,  $\omega_{m,1}$  και  $\omega_{m,2}$ , αποτελούν το σήμα εξόδου των συστημάτων ελέγχου κλειστού βρόχου 1 και 2. Σκοπός των ελεγκτών αποτελεί η εκμηδένιση του σφάλματος της γωνιακής ταχύτητας αναγκάζοντας τους κινητήρες να στραφούν με τη γωνιακή ταχύτητα αναφοράς τους  $\omega_{m,1,ref}$  και  $\omega_{m,2,ref}$ . Αυτό, όμως, πρέπει να επιτευχθεί με τρόπο τέτοιο ώστε να υπάρχει ευστάθεια, αμελητέα υπερακόντιση και αμελητέο σφάλμα

μόνιμης κατάστασης. Το είδος του ελεγκτή που χρησιμοποιήθηκε είναι ο παράλληλος PID (Proportional Integral Derivative), ο οποίος μοντελοποιείται σύμφωνα με την εξίσωση (Εξ. 5.4).

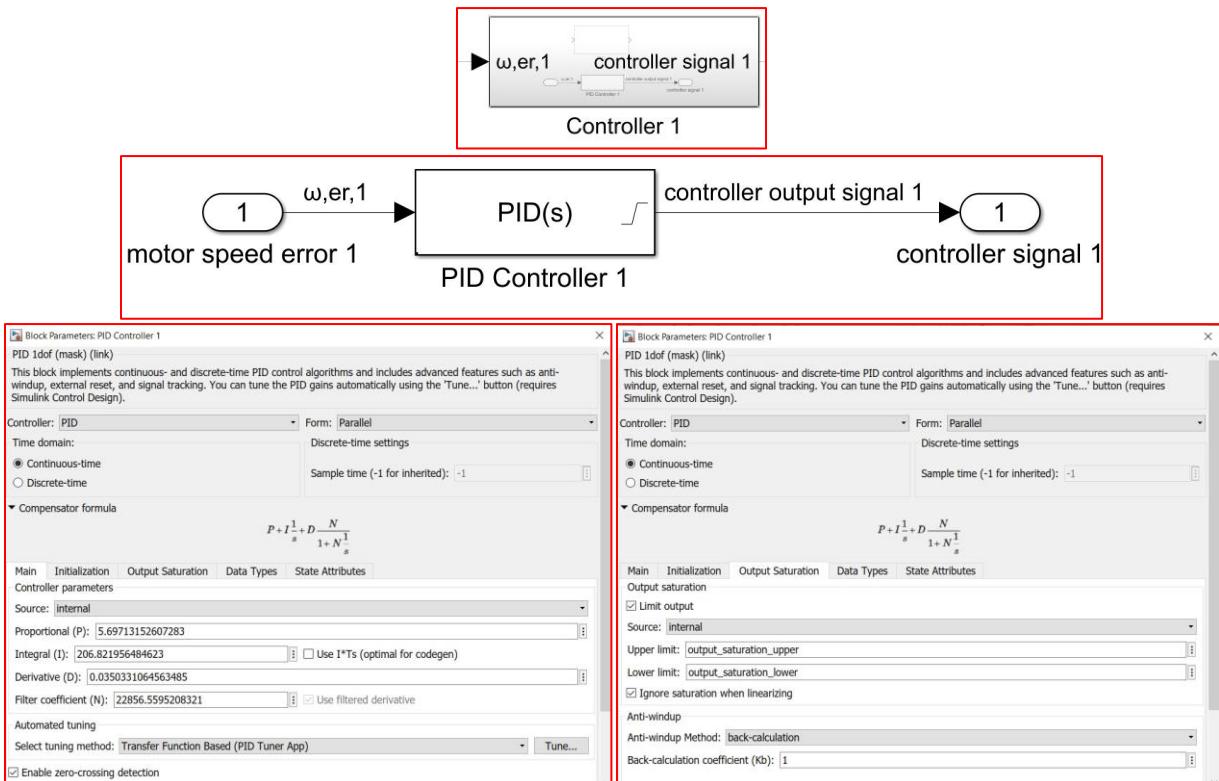
Οι τιμές των συντελεστών του ελεγκτή PID, οι οποίοι έχουν επεξηγηθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο, λαμβάνουν τις ακόλουθες τελικές τιμές:

- Το αναλογικό κέρδος (proportional gain) ισούται με  $K_p = 5.69713152607283$
- Το ολοκληρωτικό κέρδος (integral gain), ισούται με  $K_i = 206.821956484623$
- Το διαφορικό κέρδος (derivative gain), ισούται με  $K_d = 0.0350331064563485$
- Ο συντελεστής φίλτρου (filter coefficient), ισούται με  $N = 22856.5595208321$

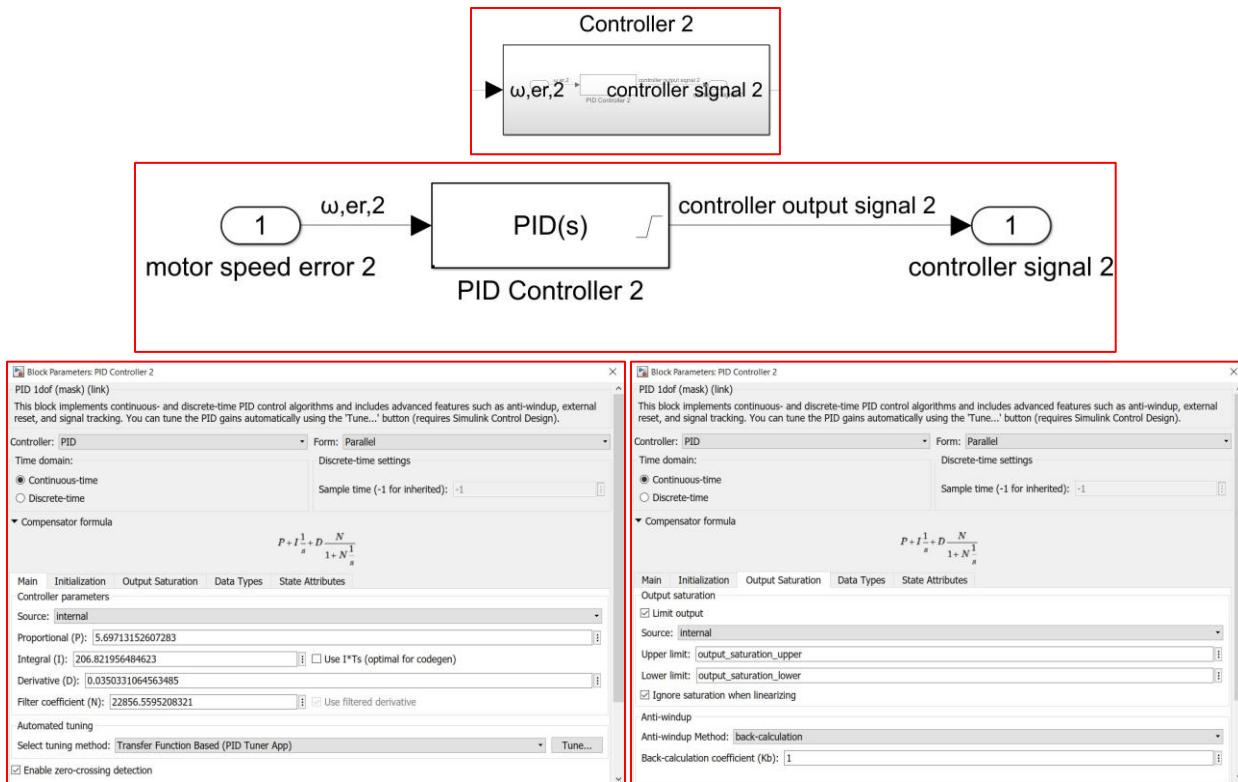
Αναφορικά με την μέθοδο συντονισμού (tuning method), έγινε χρήση της Transfer Function Based, όπου και προσδιορίστηκαν οι τιμές των συντελεστών του ελεγκτή. Αναφορικά με το φαινόμενο κορεσμού (saturation effect), λόγθικε υπόψιν στη μοντελοποίηση, και συγκεκριμένα στη τάση τροφοδοσίας  $v_k$ . Επειδή το όχημα διαθέτει δύο μπαταρίες των 400 Volt, τα όρια καθορίστηκαν από αυτές, στις ακόλουθες τιμές:

- Άνω όριο κορεσμού (saturation upper limit), ίσο με +400 Volt
- Κάτω όριο κορεσμού (saturation lower limit), ίσο με -400 Volt

Αναφορικά με την μέθοδο anti-windup, έγινε χρήση της μεθόδου back calculation anti-windup. Τέλος, στα σχήματα: Σχήμα 9.4 και Σχήμα 9.5, παρουσιάζεται η μοντελοποίηση των δύο ελεγκτών, στο περιβάλλον του Simulink.



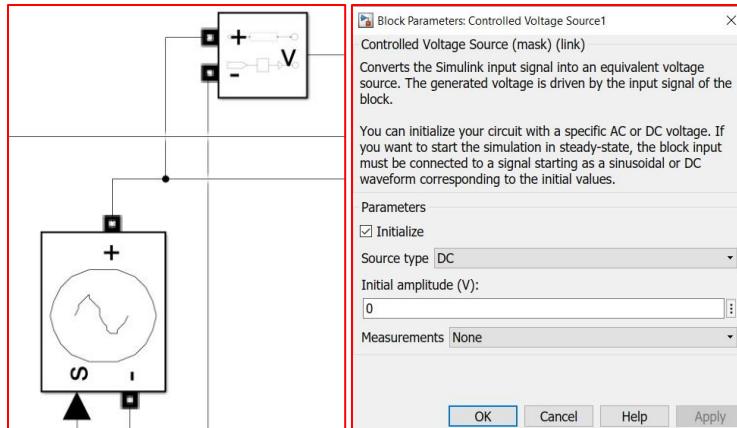
Σχήμα 9.4: Ελεγκτής PID του αριστερού κινητήρου τροχού στο περιβάλλον Simulink (PID controller of left drive wheel in Simulink)



Σχήμα 9.5: Ελεγκτής PID του δεξιού κινητήρου τροχού στο περιβάλλον Simulink (PID controller of right drive wheel in Simulink)

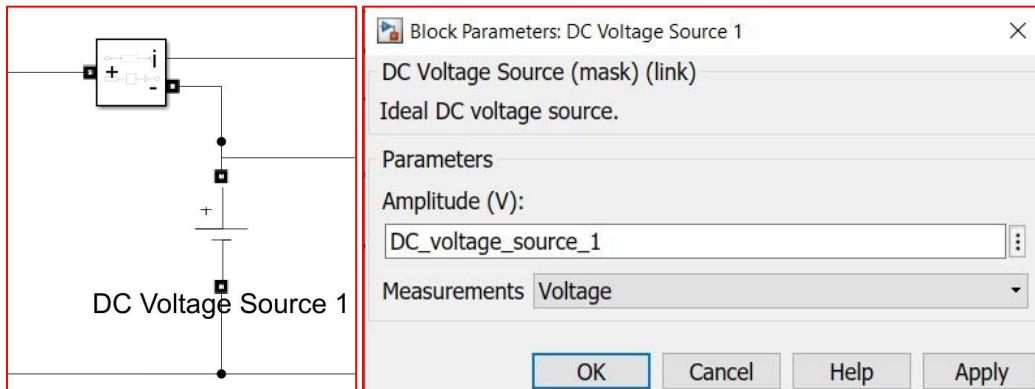
### 9.1.5 Πηγές ενέργειας (Energy sources)

Για τη μοντελοποίηση της πηγής τάσης που τροφοδοτεί τα τυλίγματα του τυμπάνου του κινητήρα, χρησιμοποιείται το μπλοκ πηγής ελεγχόμενης τάσης (controlled voltage source block) του Simulink. Η πηγή αυτή αντιπροσωπεύει μια ιδανική πηγή τάσης, η οποία διατηρεί την καθορισμένη επιθυμητή τάση στην έξοδό της, ανεξάρτητα από το ρεύμα που την διαφέρει. Η τάση εξόδου της είναι  $V = V_s$ , όπου  $V_s$  είναι η αριθμητική τιμή που παρουσιάζεται στη θύρα φυσικού σήματος. Το φυσικό σήμα αυτό, αποτελεί είσοδο της πηγής και τροφοδοτείται από το σήμα ελέγχου του εκλεκτή. Στο Σχήμα 9.6, παρουσιάζεται η μοντελοποίηση της πηγής τάσης τυλιγμάτων τυμπάνου, του αριστερού ηλεκτροκινητήρα, στο περιβάλλον του Simulink. Ομοίως συμβαίνει για την πηγή τάσης τυμπάνου του δεξιού ηλεκτροκινητήρα.

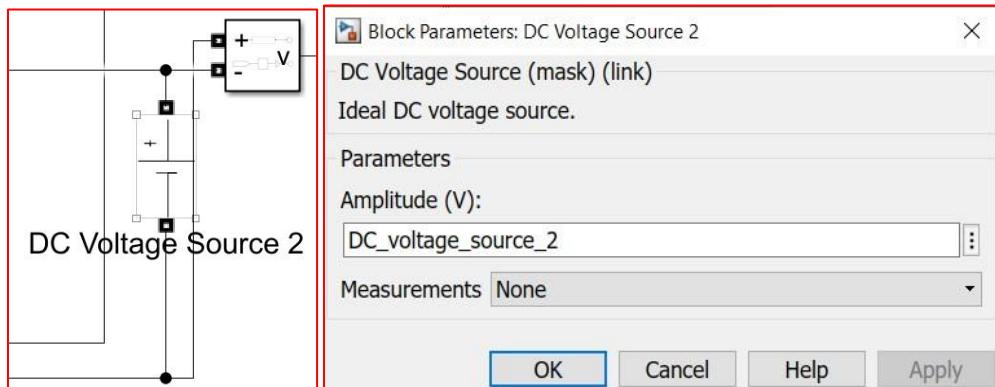


Σχήμα 9.6: Συνεχής τάση τυμπάνου του κινητήρα 1 στο περιβάλλον Simulink (DC armature voltage of motor 1 in Simulink)

Για τη μοντελοποίηση της πηγής τάσης που τροφοδοτεί τα τυλίγματα του πεδίου του κινητήρα, χρησιμοποιείται μια ιδανική πηγή συνεχούς τάσης, η οποία διατηρεί σταθερή την τάση στα άκρα της, παρέχοντας ρεύμα σταθερής τιμής. Στα σχήματα: Σχήμα 9.7 και Σχήμα 9.8, παρουσιάζεται η μοντελοποίηση των δύο πηγών τάσης τυλιγμάτων πεδίου, του αριστερού και δεξιού ηλεκτροκινητήρα αντίστοιχα, στο περιβάλλον του Simulink.



Σχήμα 9.7: Συνεχής τάση πεδίου του κινητήρα 1 στο περιβάλλον Simulink (DC field voltage of motor 1 in Simulink)



Σχήμα 9.8: Συνεχής τάση πεδίου του κινητήρα 2 στο περιβάλλον Simulink (DC field voltage of motor 2 in Simulink)

### 9.1.6 Ηλεκτροκινητήρες (Motors)

Οι κινητήρες που επιλέχθηκαν στη μοντελοποίηση του ηλεκτρικού συστήματος, του Μοντέλου 1, είναι κινητήρες συνεχούς ρεύματος τυλιγμένου πεδίου (wound-field DC motor) και συγκεκριμένα ξένης διέγερσης (separately excited).

Στα σχήματα: Σχήμα 9.9 και Σχήμα 9.10, παρουσιάζεται η μοντελοποίηση των ηλεκτροκινητήρων του αριστερού και δεξιού κινητήριου τροχού αντίστοιχα, στο περιβάλλον του Simulink.

Για τον κινητήρα συνεχούς ρεύματος τυλιγμένου πεδίου χρησιμοποιούνται ως είσοδοι:

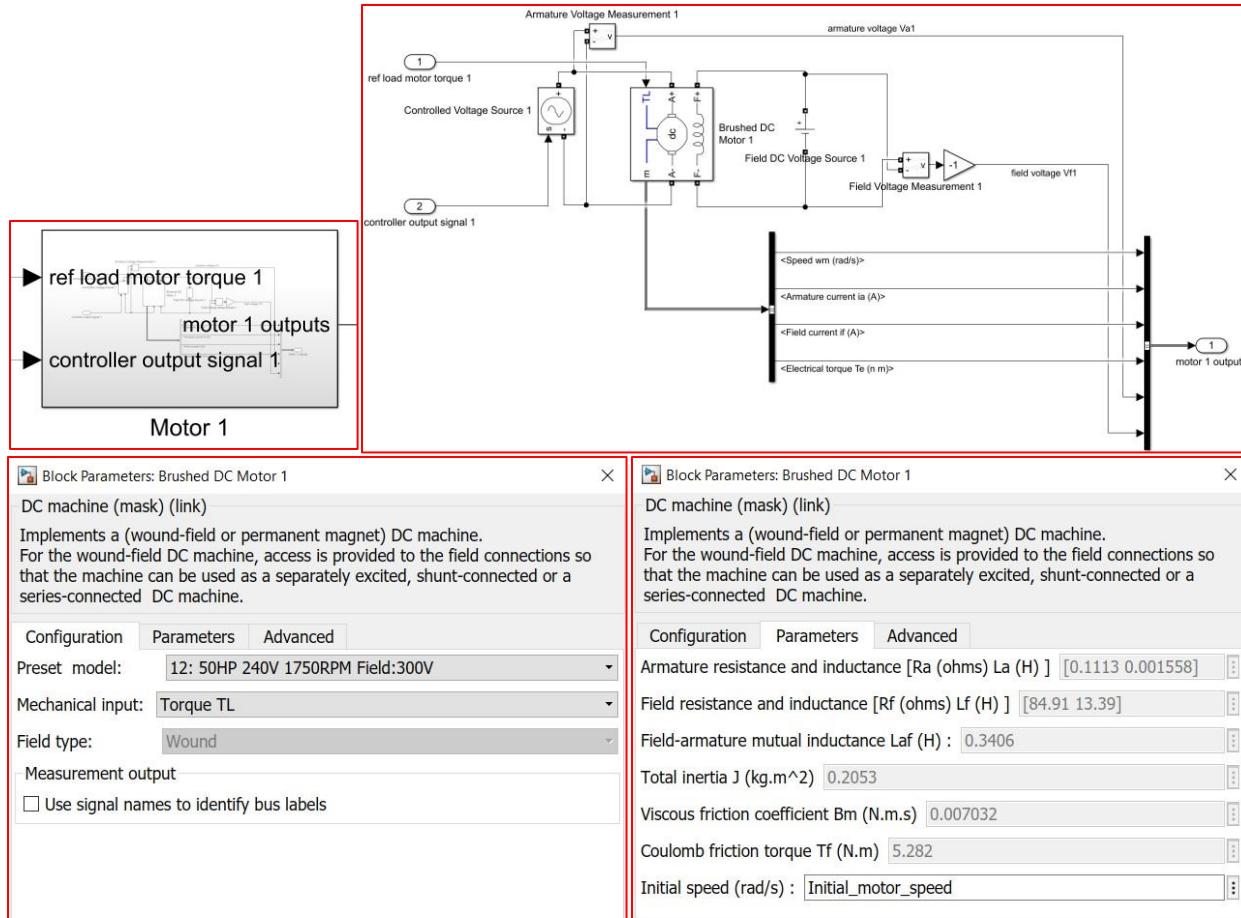
- $V_f$ , οι ακροδέκτες του τυλίγματος του πεδίου, οι οποίοι συμβολίζονται με  $F+$ ,  $F-$ , και συνεπώς η τάση του πεδίου (field voltage), [V]
- $V_a$ , οι ακροδέκτες του τυλίγματος του τυμπάνου, οι οποίοι συμβολίζονται με  $A+$ ,  $A-$ , και συνεπώς η τάση του τυμπάνου (armature voltage), [V]
- $T_L$ , το φορτίο, δηλαδή η απαιτούμενη μηχανική ροπή (mechanical load torque), [Nm]

Οι έξοδοι του κινητήρα είναι τα μεγέθη:

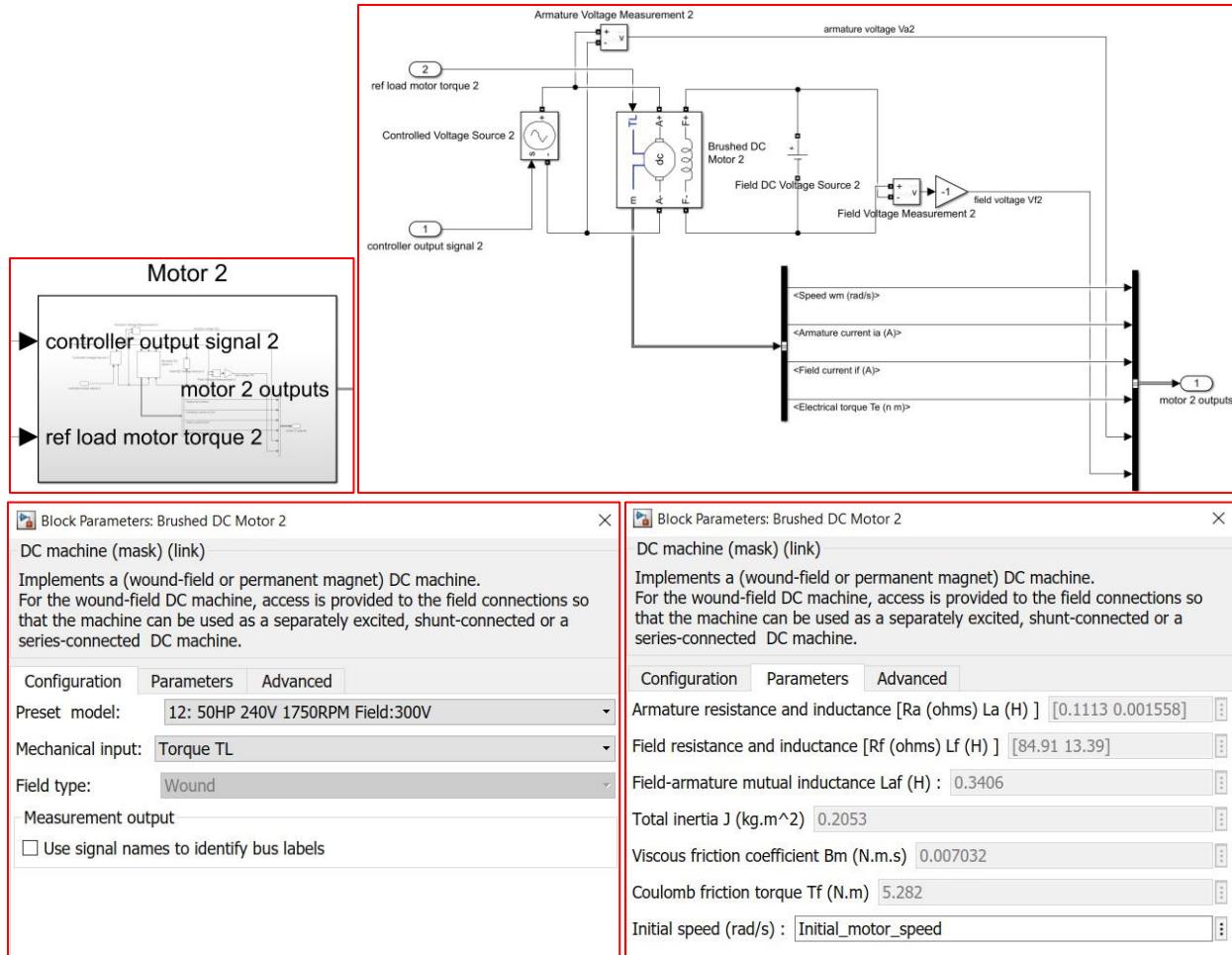
- $\omega$ , η ταχύτητα περιστροφής κινητήρα (motor speed), [rad/s]
- $i_a$ , το ρεύμα που διαρρέει τα τυλίγματα του δρομέα – τυμπάνου (armature current), [A]
- $i_f$ , το ρεύμα που διαρρέει τα τυλίγματα του πεδίου, το οποίο αποτελεί το ρεύμα διέγερσης (field current), [A]
- $T_e$ , η ηλεκτρική ροπή (electrical torque), [Nm]

Οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται για την μοντελοποίηση του κινητήρα είναι:

- $R_a$ , η αντίσταση των τυλιγμάτων του τυμπάνου (armature resistance), [Ohm]
- $L_a$ , η επαγωγή του τυμπάνου (armature inductance), [H]
- $R_f$ , η αντίσταση των τυλιγμάτων του πεδίου (field resistance), [Ohm]
- $L_f$ , η επαγωγή του πεδίου (field inductance), [H]
- $L_{af}$ , η αμοιβαία επαγωγή πεδίου-οπλισμού (field-armature mutual inductance), [H]
- $J$ , η συνολική αδράνεια (total inertia), [ $kgm^2$ ]
- $B_m$ , ο συντελεστής ιξώδους τριβής (viscous friction coefficient), [Nms]
- $T_f$ , η ροπή τριβής κουλόμπ (coulomb friction torque), [Nm]



Σχήμα 9.9: Κινητήρας συνεχούς ρεύματος αριστερού κινητήρου τροχού στο περιβάλλον Simulink (DC motor of left drive wheel in Simulink)



Σχήμα 9.10: Κινητήρας συνεχούς ρεύματος δεξιού κινητήρου τροχού στο περιβάλλον Simulink (DC motor of right drive wheel in Simulink)

### 9.1.7 Κιβώτιο ταχυτήτων (Gearbox)

Το κιβώτιο ταχυτήτων που επιλέχθηκε για κάθε κινητήριο τροχό, έχει σταθερή σχέση μετάδοσης, ίση με

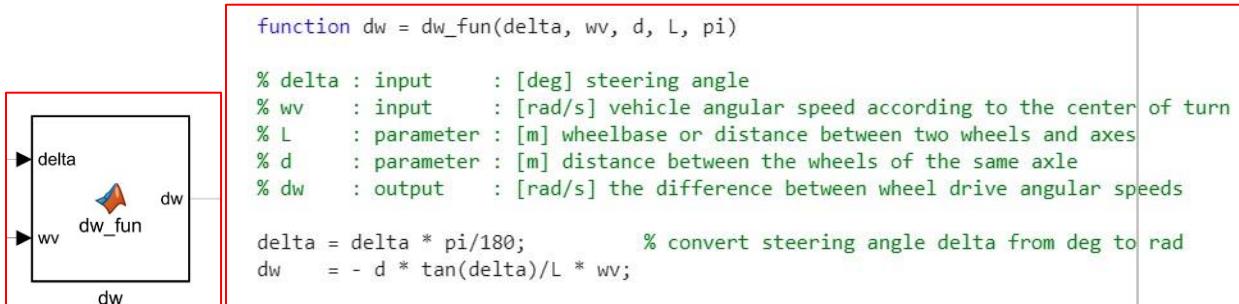
$$i_{gear,1} = i_{gear,2} = 7.2$$

και βαθμό απόδοσης

$$n_{eff,gear,1} = n_{eff,gear,2} = 98 \%$$

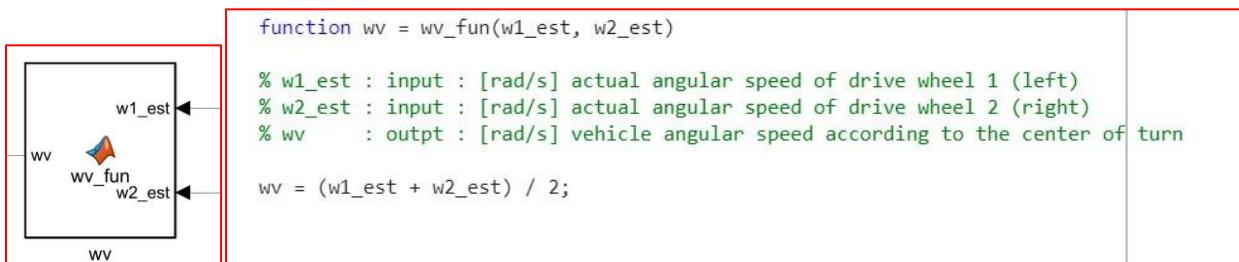
### 9.1.8 Χρησιμοποιούμενες συναρτήσεις (Functions)

Στο Σχήμα 9.11, παρουσιάζεται, στο περιβάλλον της MATLAB, η συνάρτηση υπολογισμού της διαφοράς ανάμεσα στις γωνιακές ταχύτητες των κινητήριων τροχών  $\Delta\omega$ . Ως είσοδοι της συνάρτησης αποτελούν η γωνία τιμονιού,  $\delta$ , και η γωνιακή ταχύτητα του φανταστικού κεντρικού οπίσθιου τροχού  $\omega_v$ . Ως παράμετροι χρησιμοποιούνται το μεταξόνιο  $L$  και το μετατρόχιο  $d$ , τα οποία για δεδομένο όχημα είναι σταθερά.



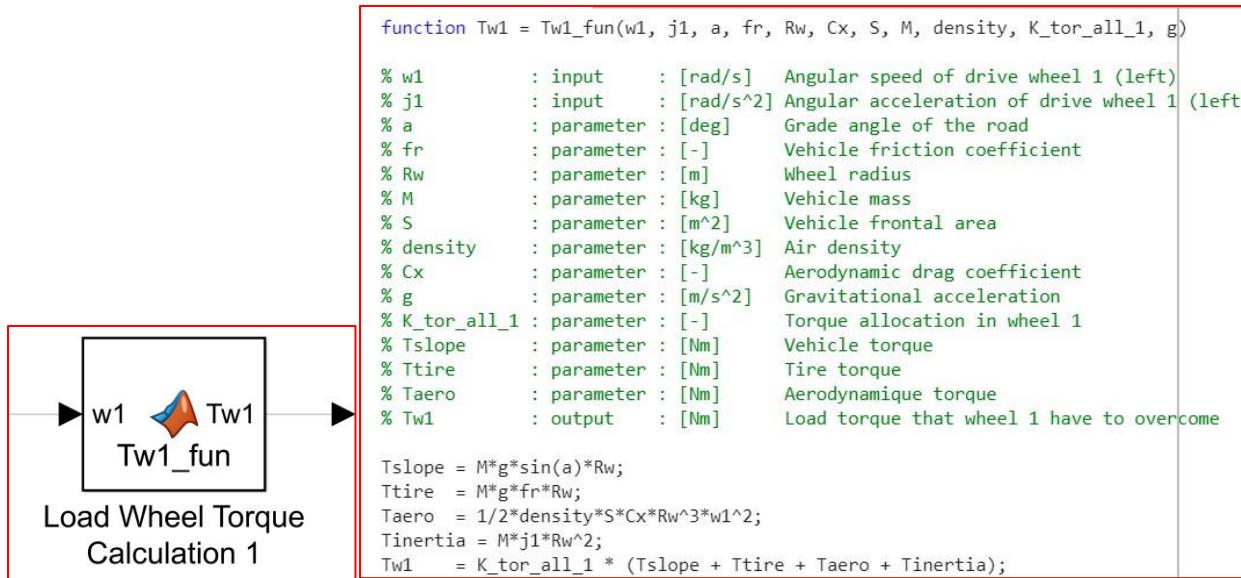
Σχήμα 9.11: Υπολογισμός της διαφοράς ανάμεσα στις γωνιακές ταχύτητες των κινητήριων τροχών (*Calculation of difference between wheel drive angular speeds*)

Στο Σχήμα 9.12, παρουσιάζεται, στο περιβάλλον της MATLAB, η συνάρτηση υπολογισμού της γωνιακής ταχύτητας του φανταστικού κεντρικού οπίσθιου τροχού ως προς το κέντρο στροφής,  $\omega_v$ . Ως είσοδοι της συνάρτησης αποτελούν η πραγματική γωνιακή ταχύτητα των κινητήριων τροχών,  $\omega_{w,1}$  και  $\omega_{w,2}$ .

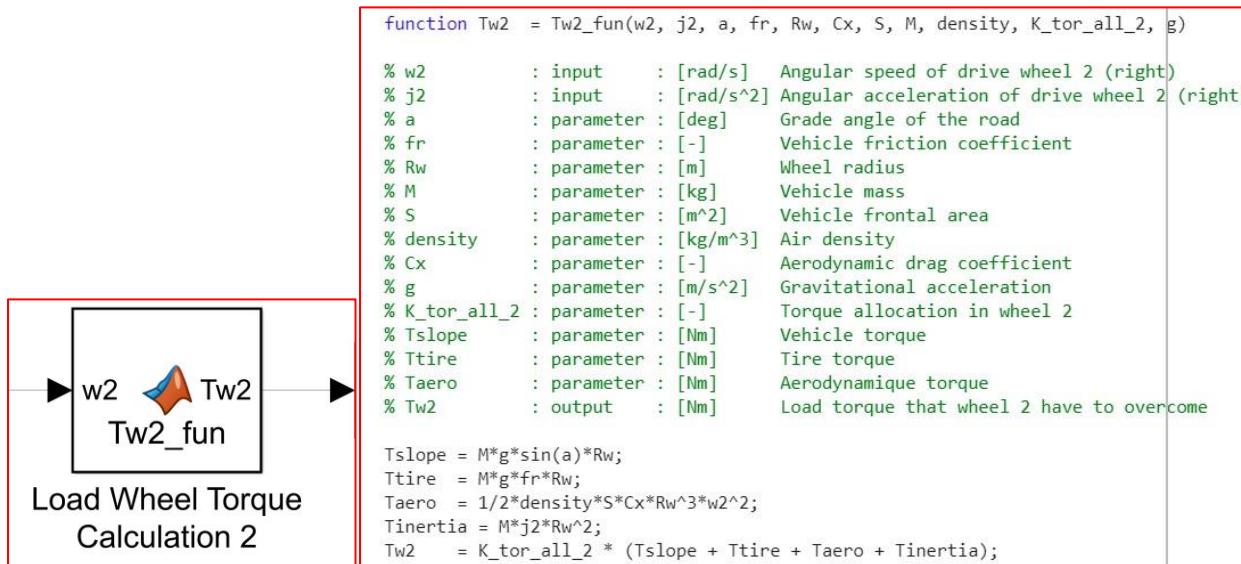


Σχήμα 9.12: Υπολογισμός της γωνιακής ταχύτητας του φανταστικού κεντρικού οπίσθιου τροχού ως προς το κέντρο στροφής (*Calculation of center of turn angular speed*)

Στο Σχήμα 9.13, παρουσιάζεται στο περιβάλλον της MATLAB, η συνάρτηση υπολογισμού του πραγματικού φορτίου ροπής του αριστερού κινητήριου τροχού,  $T_{LW,1}$ . Ως είσοδος της συνάρτησης αποτελεί η πραγματική γωνιακή ταχύτητα του κινητήριου τροχού 1,  $\omega_{w,1}$  καθώς και η γωνιακή του επιτάχυνση  $j_{w,1}$ . Αν για είσοδο χρησιμοποιηθεί η γωνιακή ταχύτητα αναφοράς του κινητήριου τροχού 1,  $\omega_{w,1,ref}$ , τότε η συνάρτηση υπολογίζει το φορτίο ροπής αναφοράς του κινητήριου τροχού 1,  $T_{LW,1,ref}$ . Σε κάθε περίπτωση, ως παράμετροι χρησιμοποιούνται η μάζα του οχήματος,  $m$ , η επιτάχυνση της βαρύτητας,  $g$ , η γωνία κλίσης του οδοιστρώματος,  $a$ , η ισοδύναμη ή ενεργός ακτίνα των τροχών,  $R_w$ , ο συντελεστής κύλισης,  $f_r$ , ο συντελεστής οπισθέλκουσας,  $C_x$ , η πυκνότητα του αέρα,  $\rho$  και η επιφάνεια εγκάρσιας διατομής οχήματος,  $S$ . Ομοίως, στο Σχήμα 9.14, παρουσιάζεται, στο περιβάλλον της MATLAB, η συνάρτηση υπολογισμού του πραγματικού φορτίου ροπής του δεξιού κινητήριου τροχού,  $T_{LW,2}$ .

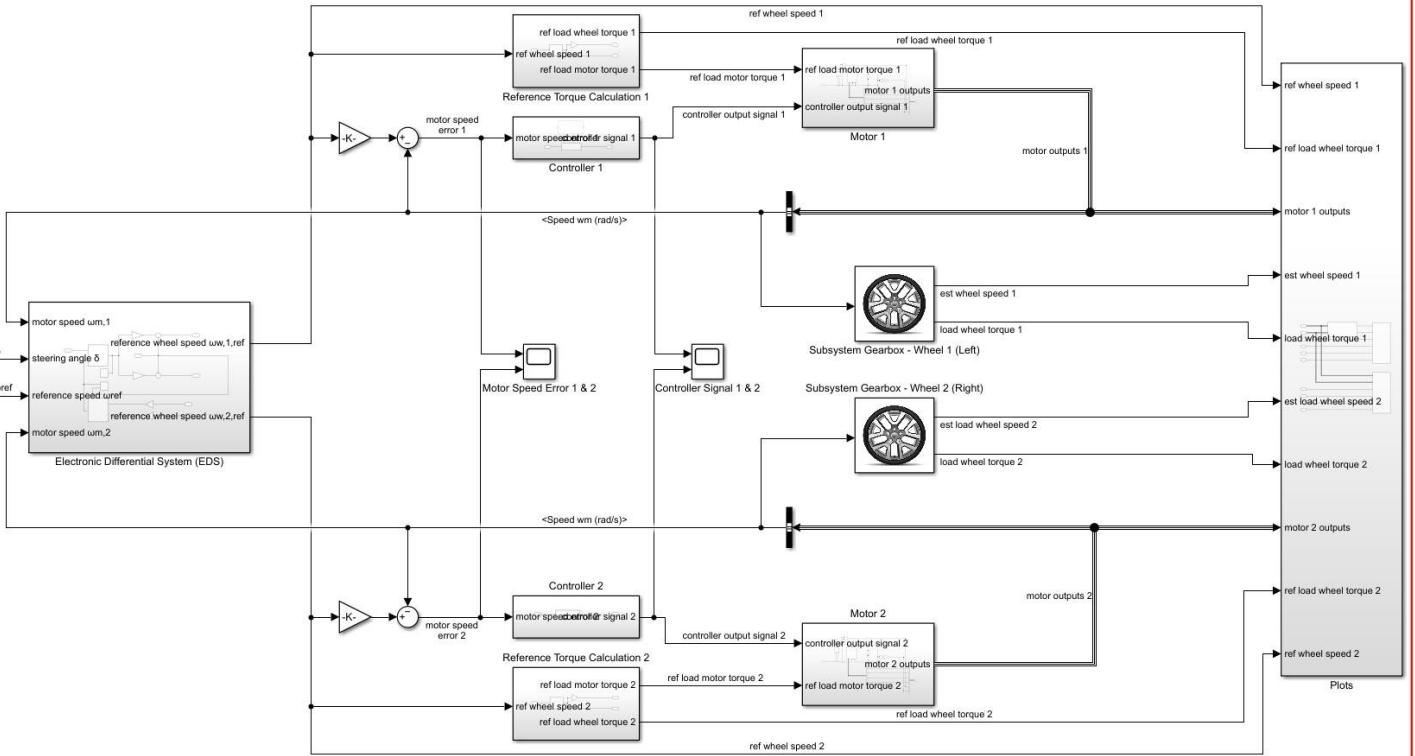


Σχήμα 9.13: Υπολογισμός του φορτίου ροπής που ο αριστερός τροχός καλείται να υπερνικήσει (Calculation of load torque that left wheel has to overcome)

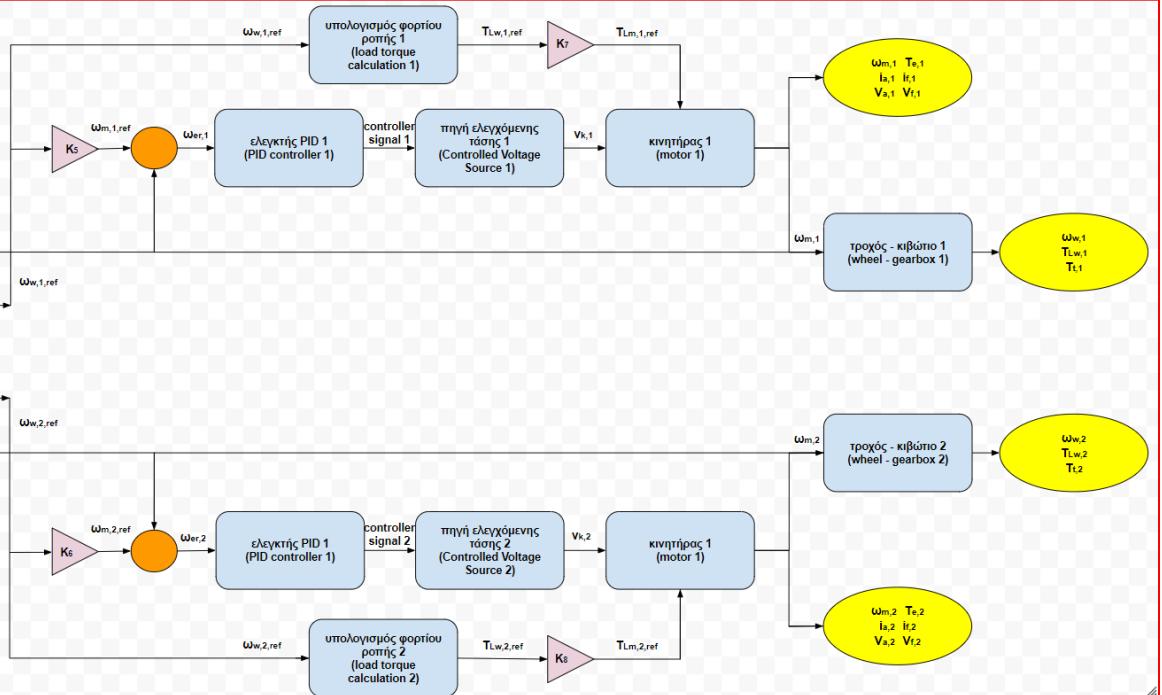


Σχήμα 9.14: Υπολογισμός του φορτίου ροπής που ο δεξιός τροχός καλείται να υπερνικήσει (Calculation of load torque that right wheel has to overcome)

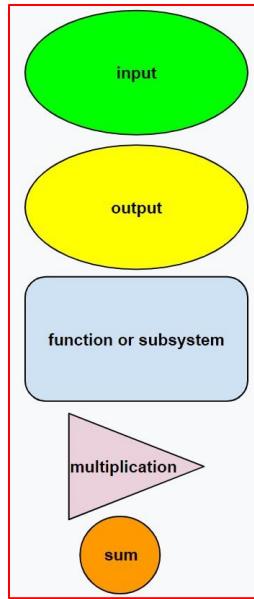
### 9.1.9 Συνολικό μοντέλο ηλεκτρονικού διαφορικού στο περιβάλλον Simulink (Electronic differential overall model in Simulink)



Σχήμα 9.15: Ολικό μοντέλο ηλεκτρονικού διαφορικού στο περιβάλλον Simulink (Electronic differential total model in Simulink)



Σχήμα 9.16: Δομικό διάγραμμα του ολικού μοντέλου ηλεκτρονικού διαφορικού (Block diagram of electronic differential total model)



Σχήμα 9.17: Επεξήγηση των μπλοκ του δομικού διαγράμματος του ολικού μοντέλου ηλεκτρονικού διαφορικού (Block explanation of block diagram of electronic differential total model)

Μεταβλητές εισόδου Μοντέλου 1 (Model 1, inputs):

- $\delta$ , η γωνία τιμονιού οχήματος, (steering angle), [ $deg$ ]. Αυτή ορίζεται από το τιμόνι και αποτελεί είσοδο για το μοντέλο του ηλεκτρονικού διαφορικού.
- $\omega_{ref} = \omega_{w,ref}$ , η κοινή γωνιακή ταχύτητα αναφοράς τροχού (reference wheel speed), [ $rads^{-1}$ ]. Αυτή ορίζεται από το πεντάλ του γκαζιού, και αποτελεί είσοδο για το μοντέλο του ηλεκτρονικού διαφορικού. Είναι η ταχύτητα που θα έπρεπε να περιστρέφονται οι δύο κινητήριοι τροχοί, αν η γωνία τιμονιού οχήματος ήταν μηδενική.

Ενδιάμεσες μεταβλητές - παράμετροι Μοντέλου 1 (Model 1, parameters):

- $v_{k,1}$ , η τάση τροφοδοσίας 1 (supply voltage 1), [V]. Είναι η τάση που τροφοδοτεί τον ηλεκτροκινητήρα του αριστερού κινητήριου τροχού (1). Επειδή ο κινητήρας είναι ξένης διέγερσης η τάση αυτή ταυτίζεται με την τάση του τυμπάνου. Τέλος, αποτελεί έξοδο της πηγής ελεγχόμενης τάσης 1.
- $v_{k,2}$ , η τάση τροφοδοσίας 2 (supply voltage 2), [V]. Είναι η τάση που τροφοδοτεί τον ηλεκτροκινητήρα του δεξιού κινητήριου τροχού (2). Επειδή ο κινητήρας είναι ξένης διέγερσης η τάση αυτή ταυτίζεται με την τάση του τυμπάνου. Τέλος, αποτελεί έξοδο της πηγής ελεγχόμενης τάσης 2.
- $\omega_v$ , η γωνιακή ταχύτητα του φανταστικού κεντρικού οπίσθιου τροχού ως προς το κέντρο στροφής (center of turn angular speed), [ $rads^{-1}$ ].
- $\Delta\omega$ , η διαφορά ανάμεσα στις γωνιακές ταχύτητες των κινητήριων τροχών (difference between the angular speeds of the wheel drives), [ $rads^{-1}$ ]. Αυτή είναι μη μηδενική όταν η γωνία τιμονιού οχήματος είναι μη μηδενική. Έτσι, όταν η γωνία τιμονιού είναι θετική, το όχημα στρίβει αριστερά, οπότε ο αριστερός κινητήριος τροχός (1) έχει την εσωτερική της στροφής και περιστρέφεται πιο αργά από τον δεξιό κινητήριο τροχό (2) κατά  $|\Delta\omega|$ . Ομοίως αν η γωνία τιμονιού είναι αρνητική.

- $\omega_{m,1,ref}$ , η γωνιακή ταχύτητα αναφοράς του κινητήρα 1 (reference motor speed 1), [ $rads^{-1}$ ]. Είναι η περιστροφική ταχύτητα η οποία λειτουργεί σαν είσοδος στο σύστημα ελέγχου κλειστού βρόχου 1, καθώς αυτή εξαρτάται από τις εισόδους του μοντέλου, το τιμόνι και το πεντάλ του γκαζιού. Είναι η ταχύτητα που ο κινητήρας 1 καλείται να περιστραφεί.
- $\omega_{m,2,ref}$ , η γωνιακή ταχύτητα αναφοράς του κινητήρα 2 (reference motor speed 2), [ $rads^{-1}$ ]. Είναι η περιστροφική ταχύτητα η οποία λειτουργεί σαν είσοδος στο σύστημα ελέγχου κλειστού βρόχου 2, καθώς αυτή εξαρτάται από τις εισόδους του μοντέλου, το τιμόνι και το πεντάλ του γκαζιού. Είναι η ταχύτητα που ο κινητήρας 2 καλείται να περιστραφεί.
- $\omega_{w,1,ref}$ , η γωνιακή ταχύτητα αναφοράς του κινητήριου τροχού 1 (reference wheel speed 1), [ $rads^{-1}$ ]. Είναι η περιστροφική ταχύτητα που ο κινητήριος τροχός 1 καλείται να περιστραφεί. Αυτή, αποτελεί έξοδος του συστήματος ηλεκτρονικού διαφορικού, EDS, ενώ συνδέεται με την  $\omega_{m,1,ref}$  μέσω του κιβωτίου ταχύτητας.
- $\omega_{w,2,ref}$ , η γωνιακή ταχύτητα αναφοράς του κινητήριου τροχού 2 (reference wheel speed 2), [ $rads^{-1}$ ]. Είναι η περιστροφική ταχύτητα που ο κινητήριος τροχός 2 καλείται να περιστραφεί. Αυτή, αποτελεί έξοδος του συστήματος ηλεκτρονικού διαφορικού, EDS, ενώ συνδέεται με την  $\omega_{m,2,ref}$  μέσω του κιβωτίου ταχύτητας.
- $\omega_{m,1}$ , η πραγματική γωνιακή ταχύτητα του κινητήρα 1 (motor speed 1), [ $rads^{-1}$ ]. Είναι η ταχύτητα με την οποία περιστρέφεται ο κινητήρας 1. Αυτή αποτελεί την ανάδραση (feedback) του συστήματος ελέγχου κλειστού βρόχου 1, και μέσω του κατευθυντή 1 προσεγγίζει την  $\omega_{m,1,ref}$ , μέχρις ότου ταυτιστούν.
- $\omega_{m,2}$ , η πραγματική γωνιακή ταχύτητα του κινητήρα 2 (motor speed 2), [ $rads^{-1}$ ]. Είναι η ταχύτητα με την οποία περιστρέφεται ο κινητήρας 2. Αυτή αποτελεί την ανάδραση (feedback) του συστήματος ελέγχου κλειστού βρόχου 2, και μέσω του κατευθυντή 2 προσεγγίζει την  $\omega_{m,2,ref}$ , μέχρις ότου ταυτιστούν.
- $\omega_{w,1}$ , η πραγματική γωνιακή ταχύτητα του κινητήριου τροχού 1 (wheel speed 1), [ $rads^{-1}$ ]. Αυτή προκύπτει από την  $\omega_{m,1}$ , μέσω του κιβωτίου ταχύτητας. Καθώς η  $\omega_{m,1}$  προσεγγίζει την  $\omega_{m,1,ref}$ , η  $\omega_{w,1}$  προσεγγίζει την  $\omega_{w,1,ref}$ .
- $\omega_{w,2}$ , η πραγματική γωνιακή ταχύτητα του κινητήριου τροχού 2 (wheel speed 2), [ $rads^{-1}$ ]. Αυτή προκύπτει από την  $\omega_{m,2}$ , μέσω του κιβωτίου ταχύτητας. Καθώς η  $\omega_{m,2}$  προσεγγίζει την  $\omega_{m,2,ref}$ , η  $\omega_{w,2}$  προσεγγίζει την  $\omega_{w,2,ref}$ .
- $\omega_{er,1}$  το σφάλμα της γωνιακής ταχύτητας του κινητήρα 1 (motor speed error 1), [ $rads^{-1}$ ]. Είναι η διαφορά της ταχύτητας αναφοράς  $\omega_{m,1,ref}$ , με την πραγματική ταχύτητα  $\omega_{m,1}$ . Αυτή αποτελεί την είσοδο του κατευθυντή 1. Συγκεκριμένα,

$$\omega_{er,1} = \omega_{m,1,ref} - \omega_{m,1} \quad (\text{Εξ. 9.1})$$

- $\omega_{er,2}$  το σφάλμα της γωνιακής ταχύτητας του κινητήρα 2 (motor speed error 2), [ $rads^{-1}$ ]. Είναι η διαφορά της ταχύτητας αναφοράς  $\omega_{m,2,ref}$ , με την πραγματική ταχύτητα  $\omega_{m,2}$ . Αυτή αποτελεί την είσοδο του κατευθυντή 2. Συγκεκριμένα,

$$\omega_{er,2} = \omega_{m,2,ref} - \omega_{m,2} \quad (\text{Εξ. 9.2})$$

- $T_{Lm,1,ref}$ , το φορτίο ροπής αναφοράς του κινητήρα 1 (reference load motor torque 1), [Nm]. Είναι το φορτίο ροπής που έχει ως αναφορά ο κινητήρας 1, για να προσεγγίσει την γωνιακή ταχύτητα αναφοράς του. Αποτελεί μεταβλητή εισόδου για τον ηλεκτροκινητήρα 1.
- $T_{Lm,2,ref}$ , το φορτίο ροπής αναφοράς του κινητήρα 2 (reference load motor torque 2), [Nm]. Είναι το φορτίο ροπής που έχει ως αναφορά ο κινητήρας 2, για να προσεγγίσει την γωνιακή ταχύτητα αναφοράς του. Αποτελεί μεταβλητή εισόδου για τον ηλεκτροκινητήρα 2.
- $T_{Lw,1,ref}$ , το φορτίο ροπής αναφοράς του κινητήριου τροχού 1 (reference load wheel torque 1), [Nm]. Είναι το φορτίο ροπής που έχει ως αναφορά ο κινητήριος τροχός 1, για να προσεγγίσει την γωνιακή ταχύτητα αναφοράς του. Σχετίζεται με την ροπή  $T_{Lm,1,ref}$ , μέσω του κιβωτίου ταχύτητας.
- $T_{Lw,2,ref}$ , το φορτίο ροπής αναφοράς του κινητήριου τροχού 2 (reference load wheel torque 2), [Nm]. Είναι το φορτίο ροπής που έχει ως αναφορά ο κινητήριος τροχός 2, για να προσεγγίσει την γωνιακή ταχύτητα αναφοράς του. Σχετίζεται με την ροπή  $T_{Lm,2,ref}$ , μέσω του κιβωτίου ταχύτητας.
- $T_{Lm,1}$ , το πραγματικό φορτίο ροπής του κινητήρα 1 (actual load motor torque 1), [Nm]. Είναι το πραγματικό φορτίο ροπής που ο κινητήρας 1 καλείται να υπερνικήσει. Αυτό επιτυγχάνεται όταν ο κινητήριος τροχός 1 κινείται με την πραγματική γωνιακή ταχύτητα. Καθώς η ταχύτητα αυτή προσεγγίζει την γωνιακή ταχύτητα αναφοράς, η  $T_{Lm,1}$  προσεγγίζει την  $T_{Lm,1,ref}$ , μέχρις ότου ταυτιστούν.
- $T_{Lm,2}$ , το πραγματικό φορτίο ροπής του κινητήρα 2 (actual load motor torque 2), [Nm]. Είναι το πραγματικό φορτίο ροπής που ο κινητήρας 2 καλείται να υπερνικήσει. Αυτό επιτυγχάνεται όταν ο κινητήριος τροχός 2 κινείται με την πραγματική γωνιακή ταχύτητα. Καθώς η ταχύτητα αυτή προσεγγίζει την γωνιακή ταχύτητα αναφοράς, η  $T_{Lm,2}$  προσεγγίζει την  $T_{Lm,2,ref}$ , μέχρις ότου ταυτιστούν.
- $T_{Lw,1}$ , το πραγματικό φορτίο ροπής του κινητήριου τροχού 1 (actual load wheel torque 1), [Nm]. Είναι το πραγματικό φορτίο ροπής που ο κινητήριος τροχός 1 καλείται να υπερνικήσει. Αυτό επιτυγχάνεται όταν ο κινητήριος τροχός 1 κινείται με την πραγματική γωνιακή ταχύτητα. Καθώς η ταχύτητα αυτή προσεγγίζει την γωνιακή ταχύτητα αναφοράς, η  $T_{Lw,1}$  προσεγγίζει την  $T_{Lw,1,ref}$ , μέχρι ότου ταυτιστούν.
- $T_{Lw,2}$ , το πραγματικό φορτίο ροπής του κινητήριου τροχού 2 (actual load wheel torque 2), [Nm]. Είναι το πραγματικό φορτίο ροπής που ο κινητήριος τροχός 2 καλείται να υπερνικήσει. Αυτό επιτυγχάνεται όταν ο κινητήριος τροχός 2 κινείται με την πραγματική γωνιακή ταχύτητα. Καθώς η ταχύτητα αυτή προσεγγίζει την γωνιακή ταχύτητα αναφοράς, η  $T_{Lw,2}$  προσεγγίζει την  $T_{Lw,2,ref}$ , μέχρι ότου ταυτιστούν.
- $T_{e,1}$ , η ηλεκτρική ροπή του κινητήρα 1 (electrical torque 1), [Nm]. Είναι η ροπή που αποδίδει στην έξοδό του ο ηλεκτροκινητήρας 1.
- $T_{e,2}$ , η ηλεκτρική ροπή του κινητήρα 2 (electrical torque 2), [Nm]. Είναι η ροπή που αποδίδει στην έξοδό του ο ηλεκτροκινητήρας 2.
- $T_{t,1}$ , η ροπή έλξης του κινητήριου τροχού 1 (tractive torque/ actual wheel torque 1), [Nm]. Είναι η ροπή που προσφέρει ο κινητήρας 1 στον κινητήριο τροχό 1, η οποία μεταδίδεται μέσω του κιβωτίου ταχύτητας 1.

- $T_{t,2}$ , η ροπή έλξης του κινητήριου τροχού 2 (tractive torque/ actual wheel torque 2), [ $Nm$ ]. Είναι η ροπή που προσφέρει ο κινητήρας 2 στον κινητήριο τροχό 2, η οποία μεταδίδεται μέσω του κιβωτίου ταχύτητας 2.
- $k_1$ , η παράμετρος που δείχνει τι ποσοστό της  $\Delta\omega$ , κατανέμεται στον αριστερό κινητήριο τροχό (1). Στο μοντέλο έχει την σταθερή τιμή  $-50\%$ . Το αρνητικό πρόσημο υποδηλώνει πως για θετική γωνία τιμονιού, δηλαδή όταν το όχημα υπόκειται σε αριστερή στροφή, η γωνιακή ταχύτητα του κινητήριου τροχού (1) ελαττώνεται κατά  $50\%$  της διαφοράς  $\Delta\omega$ .
- $k_2$ , η παράμετρος που δείχνει τι ποσοστό της  $\Delta\omega$ , κατανέμεται στον δεξί κινητήριο τροχό (2). Στο μοντέλο έχει την σταθερή τιμή  $+50\%$ . Το θετικό πρόσημο υποδηλώνει πως για θετική γωνία τιμονιού, δηλαδή όταν το όχημα υπόκειται σε αριστερή στροφή, η γωνιακή ταχύτητα του κινητήριου τροχού (2) αυξάνεται κατά  $50\%$  της διαφοράς  $\Delta\omega$ .
- $k_3$ , η παράμετρος αυτή ισούται με  $1/i_{gear,1}$ . Είναι το μέγεθος που συνδέει τις γωνιακές ταχύτητες κινητήρα 1,  $\omega_{m,1}$  και κινητήριου τροχού 1,  $\omega_{w,1}$ , μέσω του λόγου μετάδοσης  $i_{gear,1}$ . Συγκεκριμένα,

$$\omega_{w,1} = k_3 \omega_{m,1} \quad (\text{Εξ. 9.3})$$

- $k_4$ , η παράμετρος αυτή ισούται με  $1/i_{gear,2}$ . Είναι το μέγεθος που συνδέει τις γωνιακές ταχύτητες κινητήρα 2,  $\omega_{m,2}$  και κινητήριου τροχού 2,  $\omega_{w,2}$ , μέσω του λόγου μετάδοσης  $i_{gear,2}$ . Συγκεκριμένα,

$$\omega_{w,2} = k_4 \omega_{m,2} \quad (\text{Εξ. 9.4})$$

- $k_5$ , η παράμετρος αυτή ισούται με  $i_{gear,1}$ . Είναι το μέγεθος που συνδέει τις γωνιακές ταχύτητες κινητήρα 1,  $\omega_{m,1,ref}$  και κινητήριου τροχού 1,  $\omega_{w,1,ref}$ , μέσω του λόγου μετάδοσης  $i_{gear,1}$ . Συγκεκριμένα,

$$\omega_{m,1,ref} = k_5 \omega_{w,1,ref} \quad (\text{Εξ. 9.5})$$

- $k_6$ , η παράμετρος αυτή ισούται με  $i_{gear,2}$ . Είναι το μέγεθος που συνδέει τις γωνιακές ταχύτητες κινητήρα 2,  $\omega_{m,2,ref}$  και κινητήριου τροχού 2,  $\omega_{w,2,ref}$ , μέσω του λόγου μετάδοσης  $i_{gear,2}$ . Συγκεκριμένα,

$$\omega_{m,2,ref} = k_6 \omega_{w,2,ref} \quad (\text{Εξ. 9.6})$$

- $k_7$ , η παράμετρος αυτή ισούται με  $1/(n_{eff,gear,1} i_{gear,1})$ . Είναι το μέγεθος που συνδέει το φορτίο ροπής αναφοράς του κινητήριου τροχού 1,  $T_{Lw,1,ref}$ , με το φορτίο ροπής αναφοράς του κινητήρα 1,  $T_{Lm,1,ref}$ . Συγκεκριμένα,

$$T_{Lm,1,ref} = k_7 T_{Lw,1,ref} \quad (\text{Εξ. 9.7})$$

- $k_8$ , η παράμετρος αυτή ισούται με  $1/(n_{eff,gear,2} i_{gear,2})$ . Είναι το μέγεθος που συνδέει το φορτίο ροπής αναφοράς του κινητήριου τροχού 2,  $T_{Lw,2,ref}$ , με το φορτίο ροπής αναφοράς του κινητήρα 2,  $T_{Lm,2,ref}$ . Συγκεκριμένα,

$$T_{Lm,2,ref} = k_8 T_{Lw,2,ref} \quad (\text{Εξ. 9.8})$$

*Μεταβλητές εξόδου Μοντέλου 1 (Model 1, outputs):*

1. *Oι έξοδοι του κινητήρα (motor outputs):*

- $\omega_{m,1}$ , η πραγματική γωνιακή ταχύτητα του κινητήρα 1 (motor speed 1), [ $rads^{-1}$ ].
- $\omega_{m,2}$ , η πραγματική γωνιακή ταχύτητα του κινητήρα 2 (motor speed 2), [ $rads^{-1}$ ].
- $T_{e,1}$ , η ηλεκτρική ροπή του ηλεκτροκινητήρα 1 (electrical torque 1), [ $Nm$ ].
- $T_{e,2}$ , η ηλεκτρική ροπή του ηλεκτροκινητήρα 2 (electrical torque 2), [ $Nm$ ].
- $i_{a,1}$ , το ρεύμα που διαρρέει τα τυλίγματα του δρομέα – τυμπάνου του κινητήρα 1 (armature current 1), [ $A$ ].
- $i_{a,2}$ , το ρεύμα που διαρρέει τα τυλίγματα του δρομέα – τυμπάνου του κινητήρα 2 (armature current 2), [ $A$ ].
- $i_{f,1}$ , το ρεύμα που διαρρέει τα τυλίγματα του πεδίου, του κινητήρα 1, το οποίο αποτελεί το ρεύμα διέγερσης (field current 1), [ $A$ ].
- $i_{f,2}$ , το ρεύμα που διαρρέει τα τυλίγματα του πεδίου, του κινητήρα 2, το οποίο αποτελεί το ρεύμα διέγερσης (field current 2), [ $A$ ].
- $V_{a,1}$ , η τάση του τυλίγματος του τυμπάνου, του κινητήρα 1 (armature voltage 1), [ $V$ ].
- $V_{a,2}$ , η τάση του τυλίγματος του τυμπάνου, του κινητήρα 2 (armature voltage 2), [ $V$ ].
- $V_{f,1}$ , η τάση του πεδίου, του κινητήρα 1 (field voltage 1), [ $V$ ].
- $V_{f,2}$ , η τάση του πεδίου, του κινητήρα 2 (field voltage 2), [ $V$ ].

2. *Oι έξοδοι του τροχού-κιβωτίου (wheel-gearbox outputs):*

- $\omega_{w,1}$ , η πραγματική γωνιακή ταχύτητα του κινητήριου τροχού 1 (wheel speed 1), [ $rads^{-1}$ ].
- $\omega_{w,2}$ , η πραγματική γωνιακή ταχύτητα του κινητήριου τροχού 2 (wheel speed 2), [ $rads^{-1}$ ].
- $T_{LW,1}$ , το πραγματικό φορτίο ροπής του κινητήριου τροχού 1 (actual load wheel torque 1), [ $Nm$ ].
- $T_{LW,2}$ , το πραγματικό φορτίο ροπής του κινητήριου τροχού 2 (actual load wheel torque 2), [ $Nm$ ].
- $T_{t,1}$ , η ροπή έλξης του κινητήριου τροχού 1 (tractive torque/ actual wheel torque 1), [ $Nm$ ].
- $T_{t,2}$ , η ροπή έλξης του κινητήριου τροχού 2 (tractive torque/ actual wheel torque 2), [ $Nm$ ].

## 9.2 Ανάλυση μοντέλου 2 στο Simulink (Simulink model 2 analysis)

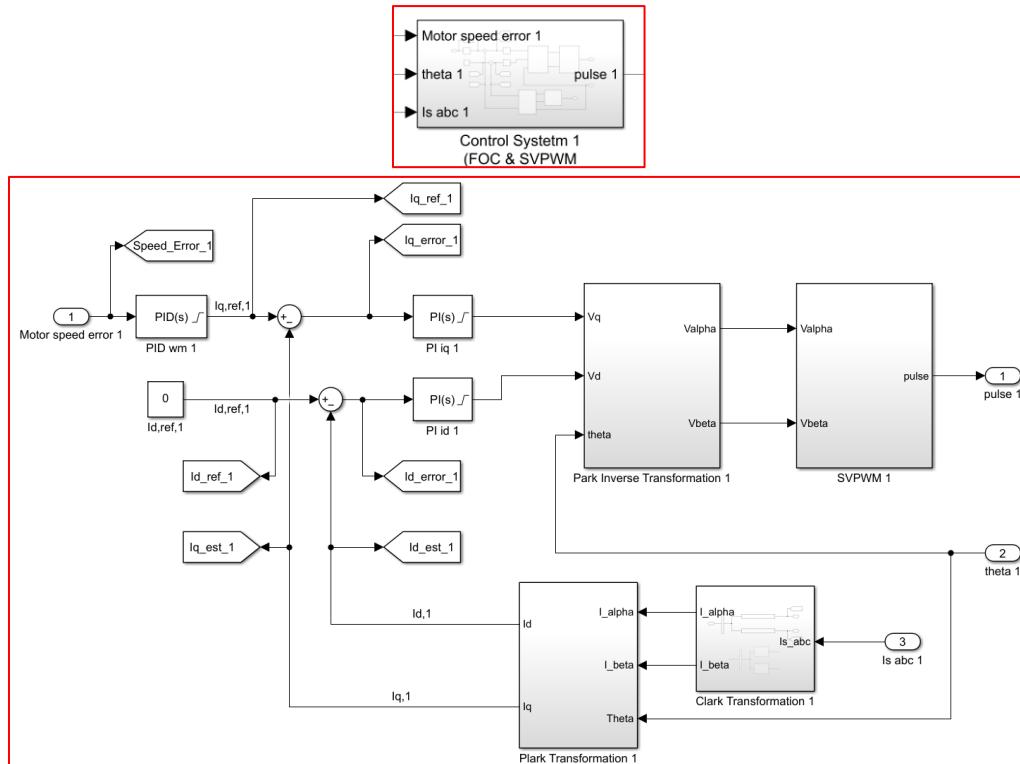
Το παρακάτω μοντέλο (Μοντέλο 2) του λογισμικού Simulink της MATLAB, αναπτύσσει και μοντελοποιεί ένα ηλεκτρονικό διαφορικό σύστημα ενός ηλεκτρικού οχήματος με δύο οπίσθιους κινητήριους τροχούς. Οι ηλεκτροκινητήρες αυτοί είναι εναλλασσόμενου ρεύματος, και συγκεκριμένα σύγχρονοι κινητήρες. Όπως και στο μοντέλο 1, ως είσοδοι, στο σύστημα, λαμβάνονται η γωνία τιμονιού οχήματος  $\delta$  και η γωνιακή ταχύτητα αναφοράς  $\omega_{ref}$ , ως εντολή πεντάλ γκαζιού. Τα Μοντέλα 1 και 2, εμφανίζουν ίδια μοντελοποίηση, στο περιβάλλον του Simulink της MATLAB, στα εξής:

1. Υποσύστημα διεύθυνσης τιμονιού (Steering subsystem)
  2. Υποσύστημα πεντάλ (Pedal subsystem)
  3. Σύστημα ηλεκτρονικού διαφορικού (Electronic differential system)

Επομένως, τα παραπάνω υποσυστήματα δεν θα αναλυθούν, ξανά, στο τρέχων μοντέλο, καθώς αναφέρονται στο Μοντέλο 1. Επίσης το Μοντέλο 2, όπως έχει αναφερθεί, δεν κάνει χρήση κάποιου απλού γραναζιού ή κιβωτίου ταχυτήτων μεταξύ κινητήρων και κινητήριων τροχών.

### 9.2.1 Μοντελοποίηση του FOC (FOC model)

Η στρατηγική ελέγχου του κάθε κινητήρα, δηλαδή η μέθοδος FOC, αναπαρίσταται στο περιβάλλον του Simulink. Συγκεκριμένα, στο Σχήμα 9.18, φαίνεται, συνολικά, η σειρά των μετασχηματισμών των μεγεθών του ρεύματος και της τάσης του στάτορα, καθώς και έλεγχος της γωνιακής ταχύτητας και των φάσεων του ρεύματος, μέχρις ότου δημιουργείται η τάση  $V_q$ ,  $V_d$ , η οποία θα τροφοδοτήσει τη μεθοδολογία του SVPWM, ώστε να δημιουργηθούν οι κατάλληλοι παλμοί. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η μοντελοποίηση των ελεγκτών καθώς και των μετασχηματισμών που χρησιμοποιεί ο διανυσματικός έλεγχος της μεθόδου FOC.



**Σχήμα 9.18:** Διανυσματικός έλεγχος FOC & SVPWM, στο περιβάλλον Simulink (Vector control FOC & SVPWM in Simulink)

Οι ελεγκτές είναι έξι σε αριθμό, τρείς σε κάθε σύστημα ελέγχου, καθένα από τα οποία ελέγχει έναν ηλεκτροκινητήρα. Αρχικά το κάθε σύστημα ελέγχου ξεκινάει με έναν ελεγκτή ταχύτητας τύπου PID, ο οποίος ως είσοδο λαμβάνει το σφάλμα της γωνιακής ταχύτητας του ηλεκτροκινητήρα,  $\omega_{er}$ , ενώ ως έξοδο παράγει ένα σήμα ελέγχου, το οποίο αντιστοιχεί στη τιμή αναφοράς του ρεύματος του στάτορα του q άξονα,  $i_{q,ref}$ . Στη συνέχεια, δύο ελεγκτές ρεύματος, τύπου PI, λαμβάνουν ως είσοδο το σφάλμα του ρεύματος του στάτορα  $i_{q,er}$  και  $i_{d,er}$ , ώστε να ελέγχουν το ρεύμα αυτό, στο περιστρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς,  $i_q$  και  $i_d$ , παράγοντας σήμα εξόδου το οποίο αντιστοιχεί στις τάσεις,  $V_q$  και  $V_d$ , αντίστοιχα.

Οι τιμές των συντελεστών του ελεγκτή ταχύτητας PID, οι οποίοι έχουν επεξηγηθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο, λαμβάνουν τις ακόλουθες τελικές τιμές,

- Το αναλογικό κέρδος (proportional gain) ισούται με  $K_p = 2291.666667$
- Το ολοκληρωτικό κέρδος (integral gain), ισούται με  $K_i = 83.333333$
- Το διαφορικό κέρδος (derivative gain), ισούται με  $K_d = 0.0625$
- Ο συντελεστής φίλτρου (filter coefficient), ισούται με  $N = 2.0$

Αναφορικά με το φαινόμενο κορεσμού, λήφθηκε υπόψιν στη μοντελοποίηση. Τα όρια που καθορίστηκαν είναι τα εξής, επιδρώντας ουσιαστικά στο ρεύμα του στάτορα  $i_q$ :

- Άνω όριο κορεσμού (saturation upper limit), ίσο με  $+70 A$
- Κάτω όριο κορεσμού (saturation lower limit), ίσο με  $-70 A$

Οι τιμές των συντελεστών του ελεγκτή ρεύματος PI, και συγκεκριμένα του,  $i_q$ , λαμβάνουν τις ακόλουθες τελικές τιμές,

- $K_p = 2.5$
- $K_i = 0.714286$

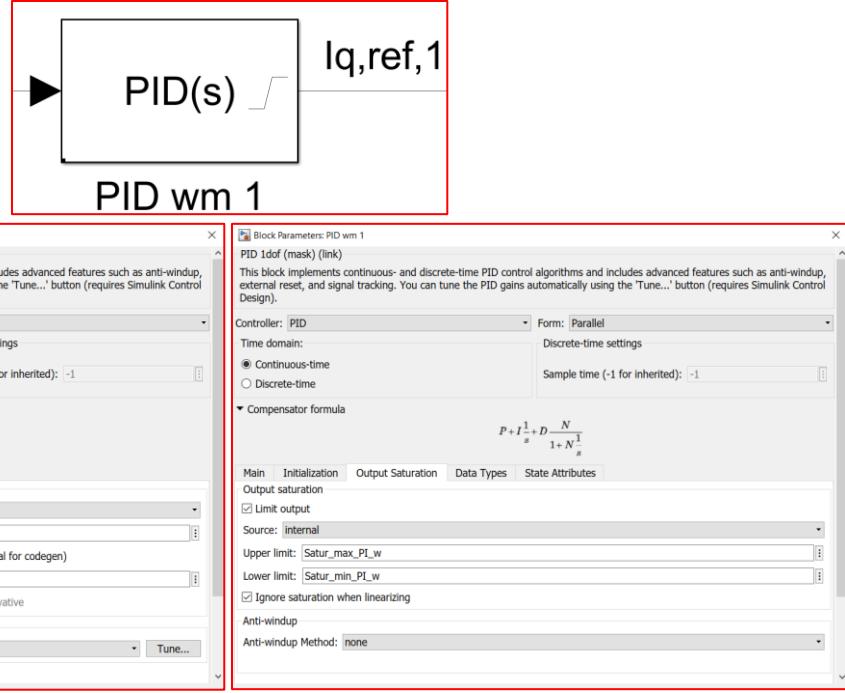
Οι τιμές των συντελεστών του ελεγκτή ρεύματος PI, και συγκεκριμένα του,  $i_d$ , λαμβάνουν τις ακόλουθες τελικές τιμές,

- $K_p = 0.416667$
- $K_i = 0.014286$

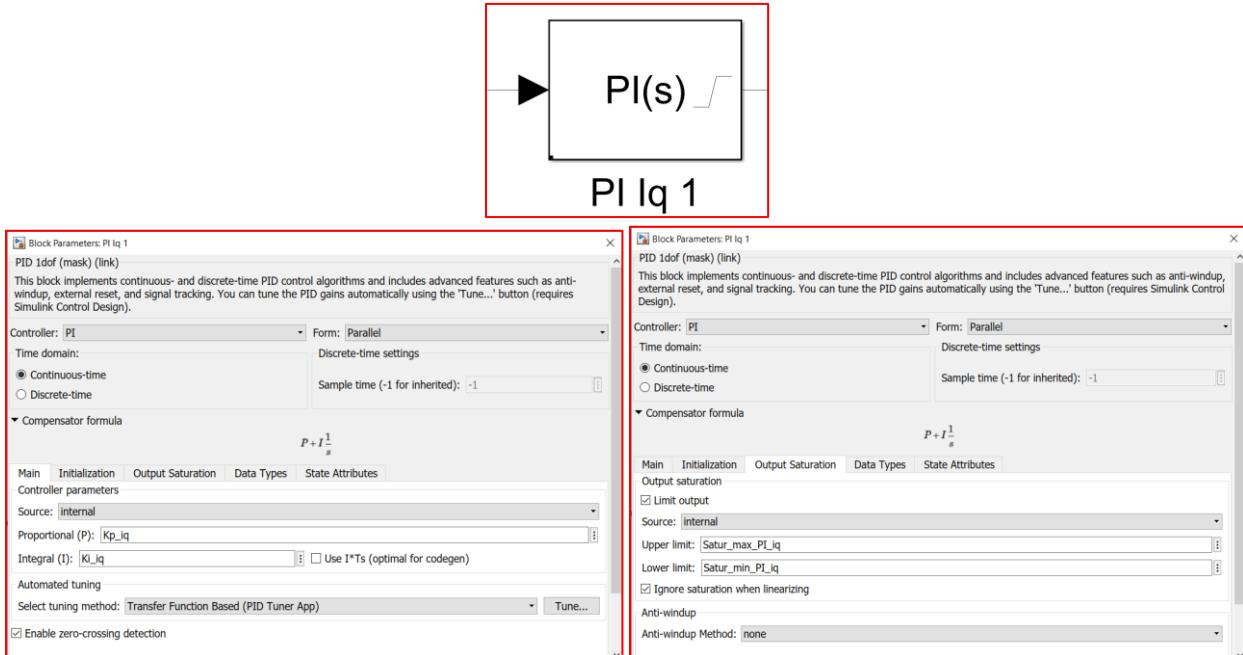
Αναφορικά με το φαινόμενο κορεσμού, λήφθηκε υπόψιν στη μοντελοποίηση των ελεγκτών ρεύματος. Τα όρια που καθορίστηκαν είναι κοινά και είναι τα εξής, επιδρώντας ουσιαστικά στη τάση του στάτορα  $V_q$  και  $V_d$ , αντίστοιχα:

- Άνω όριο κορεσμού, ίσο με  $+\frac{V_{dc}}{\sqrt{3}} V$
- Κάτω όριο κορεσμού, ίσο με  $-\frac{V_{dc}}{\sqrt{3}} V$

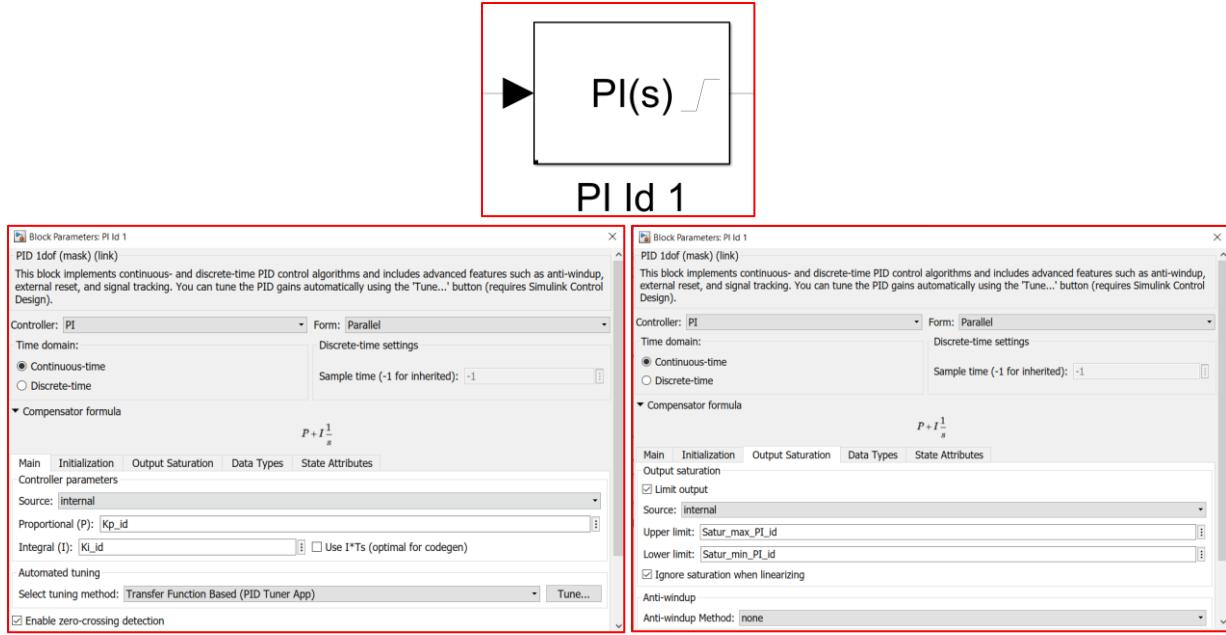
Στα σχήματα: Σχήμα 9.19, Σχήμα 9.20 και Σχήμα 9.21, παρουσιάζεται η μοντελοποίηση του ελεγκτή ταχύτητας PID, του ελεγκτή ρεύματος του q άξονα, PI και του ελεγκτή ρεύματος του d άξονα, PI, αντίστοιχα, του συστήματος ελέγχου του αριστερού κινητήρα, στο περιβάλλον του Simulink.



Σχήμα 9.19: Ελεγκτής ταχύτητας PID, του αριστερού κινητήρου τροχού, στο περιβάλλον Simulink (PID speed controller of left drive wheel in Simulink)

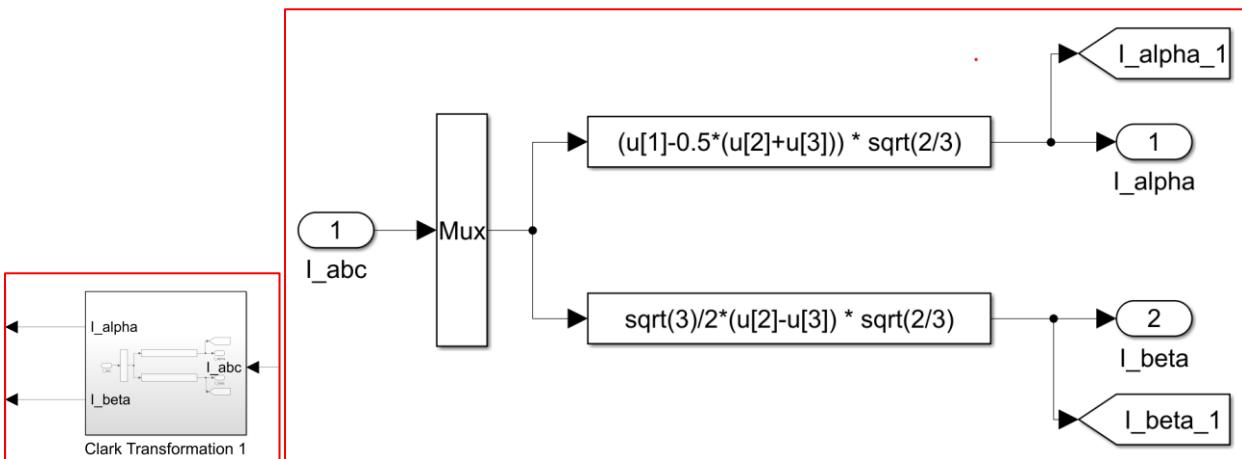


Σχήμα 9.20: Ελεγκτής ρεύματος q άξονα, PI, του αριστερού κινητήρου τροχού, στο περιβάλλον Simulink (PI current controller of q axis, of left drive wheel in Simulink)



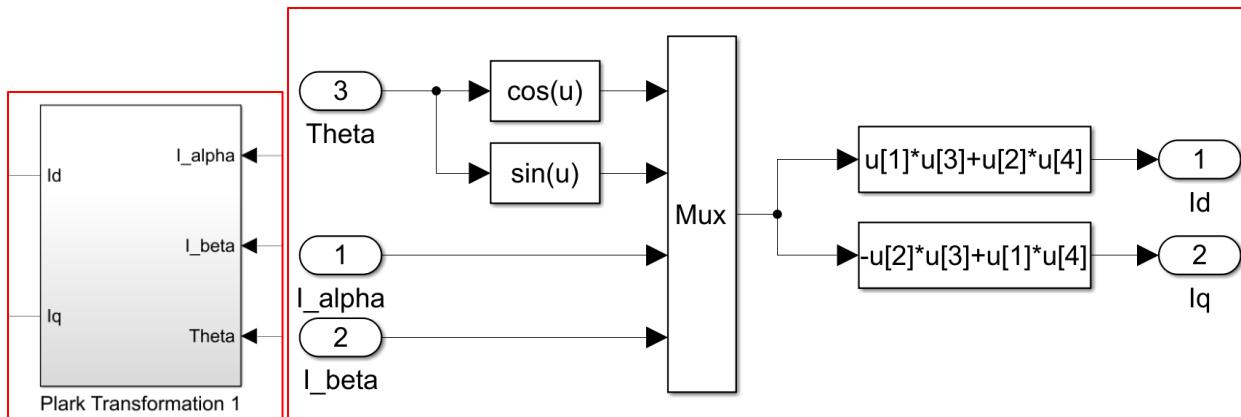
Σχήμα 9.21: Ελεγκτής ρεύματος d άξονα, PI, του αριστερού κυνηγτήρου τροχού, στο περιβάλλον Simulink (PI current controller of d axis, of left drive wheel in Simulink)

Στο Σχήμα 9.22, παρουσιάζεται η μοντελοποίηση του μετασχηματισμού Clark, στο περιβάλλον του Simulink. Οι τριφασικές ποσότητες του ρεύματος του στάτορα  $i_a$ ,  $i_b$ ,  $i_c$ , ως είσοδος, μετασχηματίζονται στο ορθογώνιο στατικό πλαίσιο αναφοράς,  $i_{alpha}$ ,  $i_{beta}$ , μέσω της εξίσωσης (Εξ. 6.3)



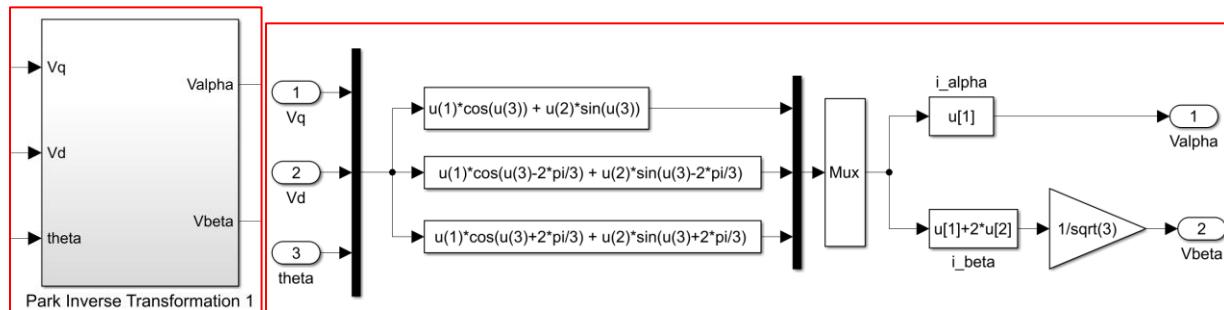
Σχήμα 9.22: Μετασχηματισμός Clark, στο περιβάλλον Simulink (Clark transformation in Simulink)

Στο Σχήμα 9.23, παρουσιάζεται η μοντελοποίηση του μετασχηματισμού Park, στο περιβάλλον του Simulink. Οι διφασικές ποσότητες του ρεύματος του στάτορα,  $i_{alpha}$ ,  $i_{beta}$ , ως είσοδος, μετασχηματίζονται στο περιστρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς,  $i_q$ ,  $i_d$ , μέσω της εξίσωσης (Εξ. 6.4). Ο μετασχηματισμός αυτός, χρησιμοποιεί τη γωνία  $\theta$ , καθώς είναι απαραίτητη η γνώση της θέσης του ρότορα.



Σχήμα 9.23: Μετασχηματισμός Park, στο περιβάλλον Simulink (Park transformation in Simulink)

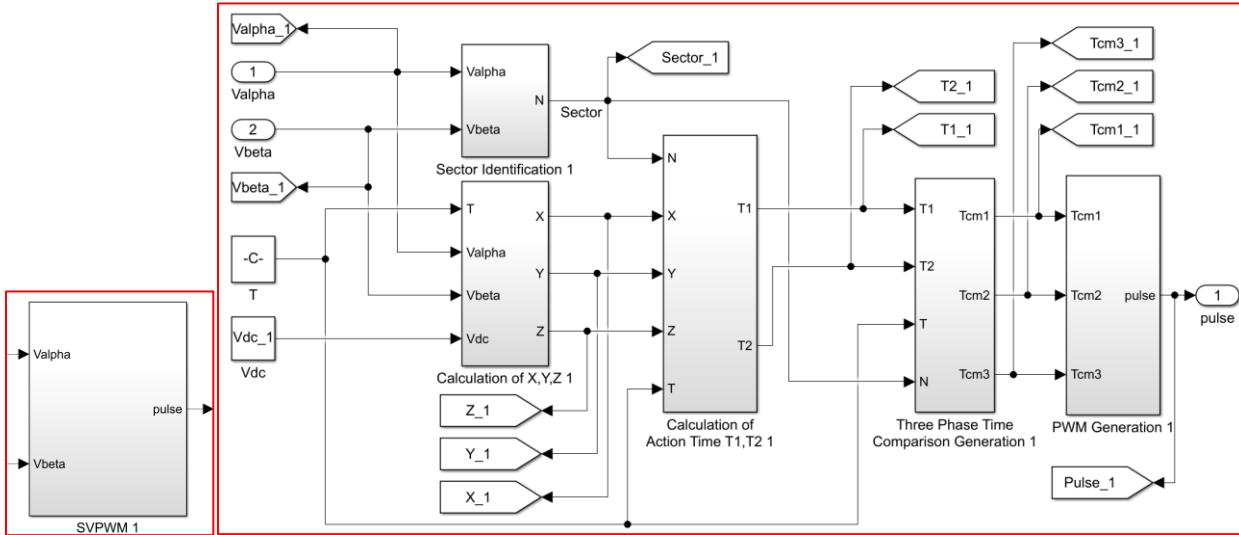
Στο Σχήμα 9.24, παρουσιάζεται η μοντελοποίηση του αντίστροφου μετασχηματισμού Park, στο περιβάλλον του Simulink. Οι ποσότητες της τάσης του στάτορα  $V_q$ ,  $V_d$ , ως είσοδος, μετασχηματίζονται από το περιστρεφόμενο στο στατικό πλαίσιο αναφοράς,  $V_{\alpha}$ ,  $V_{\beta}$ , μέσω της εξίσωσης (Εξ. 6.5). Ο μετασχηματισμός αυτός, χρησιμοποιεί τη γωνία  $\theta$ , καθώς είναι απαραίτητη η γνώση της θέσης του ρότορα.



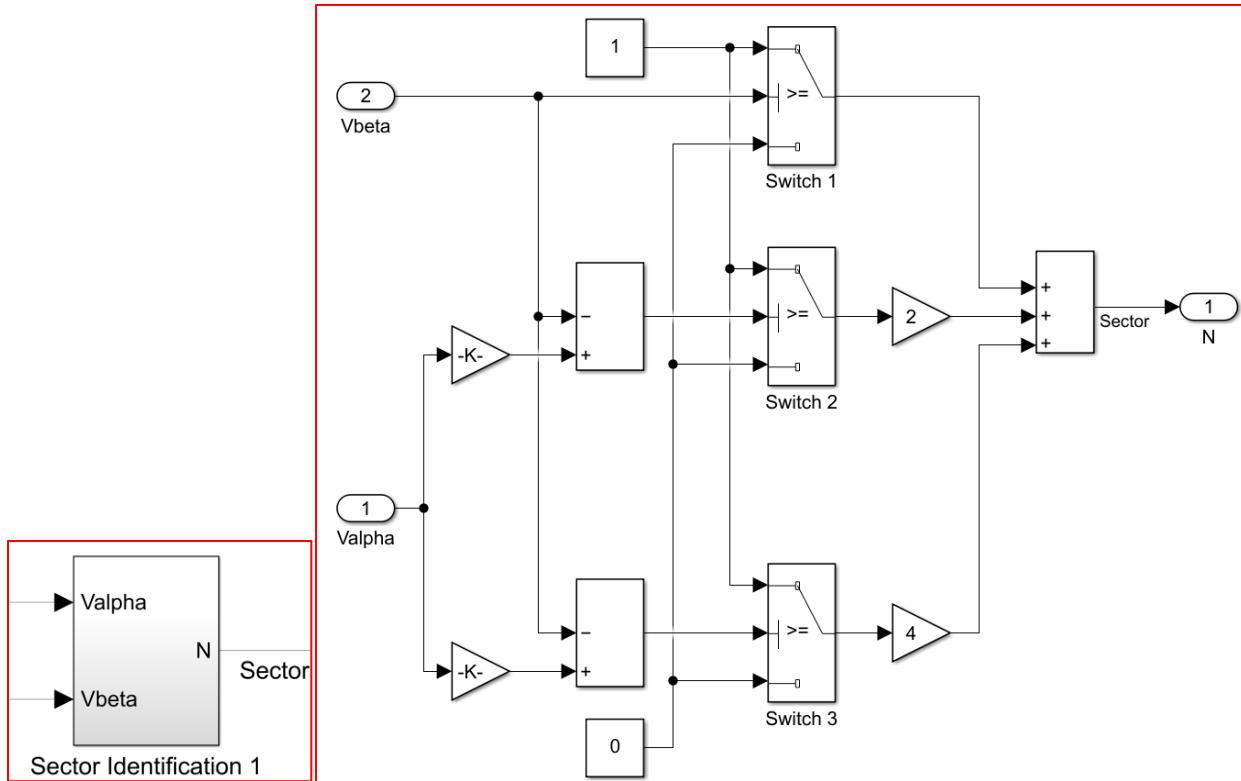
Σχήμα 9.24: Αντίστροφος μετασχηματισμός Park, στο περιβάλλον Simulink (Park inverse transformation in Simulink)

### 9.2.2 Μοντελοποίηση του SVPWM (SVPWM model)

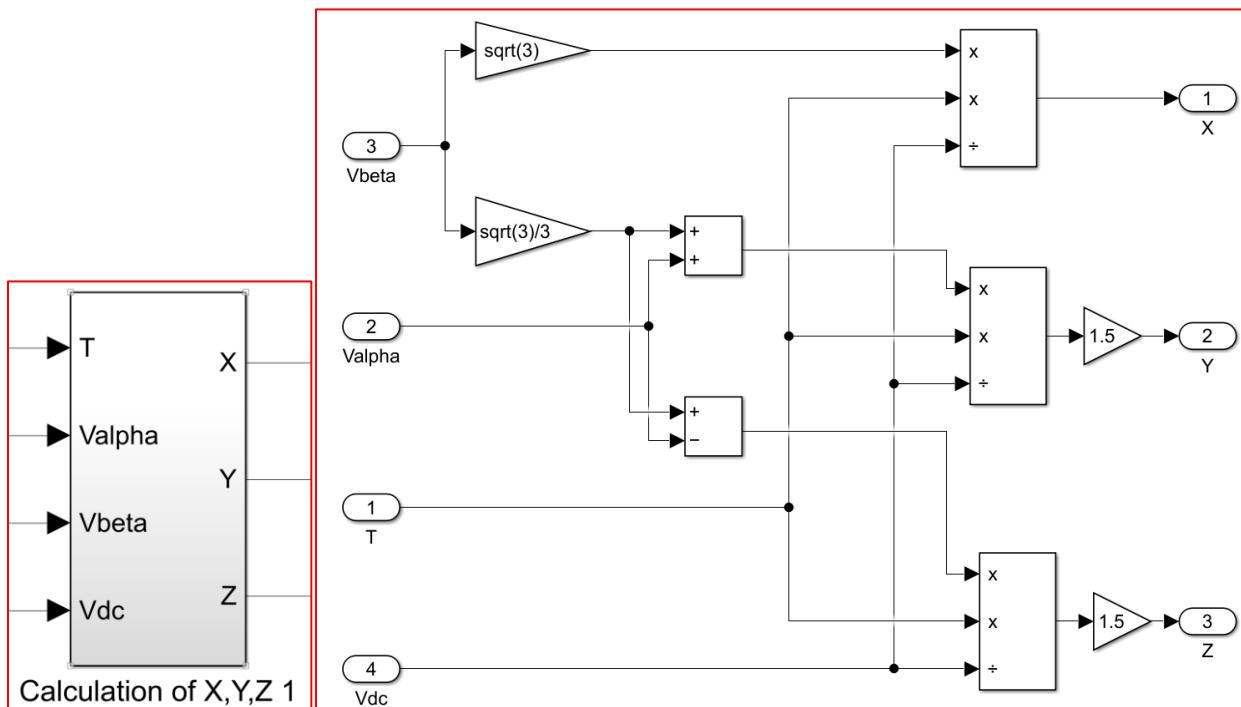
Στο Σχήμα 9.25, παρουσιάζεται, συνολικά, η μοντελοποίηση της μεθόδου SVPWM, στο περιβάλλον Simulink. Αυτή διαχειρίζεται ως μεταβλητές εισόδου, την τάση του στάτορα στο περιστρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς,  $V_q$ ,  $V_d$ , τη συνεχή τάση τροφοδοσίας από την μπαταρία,  $V_{dc}$  και τη μεταβλητή  $T$ , η οποία αναφέρεται στο συνολικό χρονικό διάστημα που αντιστοιχεί στην συνολική περίοδο εναλλαγής. Ως μεταβλητές εξόδου, αποτελούν οι παλμοί, οι οποίοι θα ελέγχουν τον μετατροπέα. Στη συνέχεια, από το Σχήμα 9.26 έως το Σχήμα 9.30 επεξηγείται και αναλύεται λεπτομερώς τεχνική SVPWM, σε κάθε της βήμα.



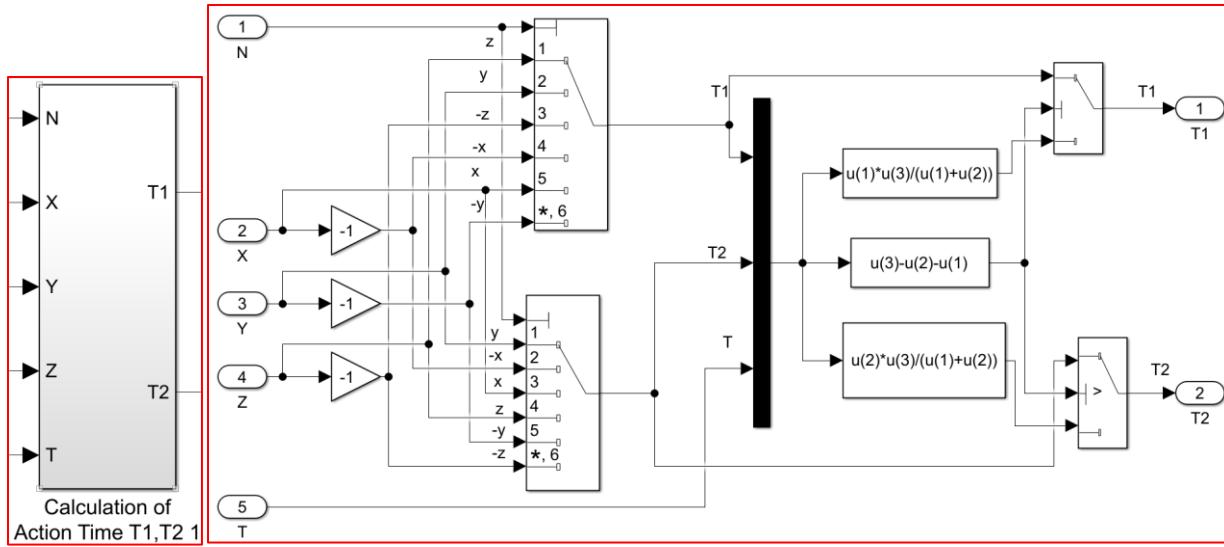
Σχήμα 9.25: Η μέθοδος SVPWM, στο περιβάλλον Simulink (The technique SVPWM in Simulink)



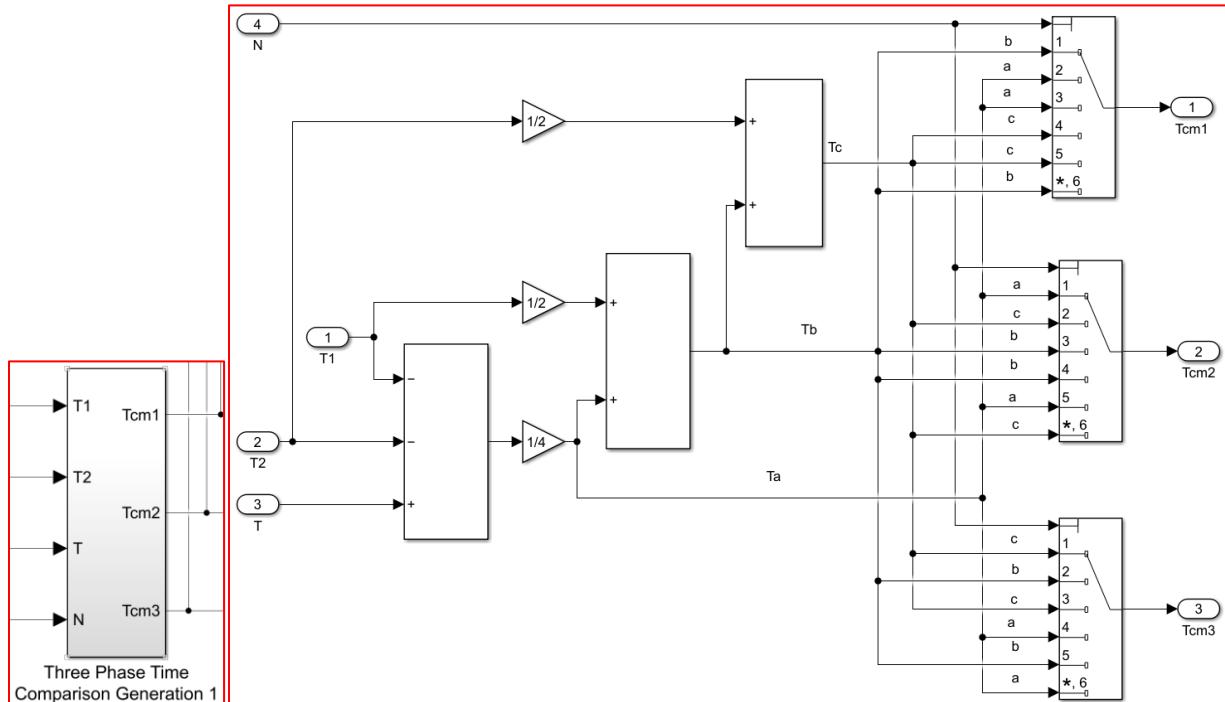
Σχήμα 9.26: Προσδιορισμός τομέα, της τεχνικής SVPWM, στο περιθώλιον Simulink (Sector Identification of the technique SVPWM in Simulink)



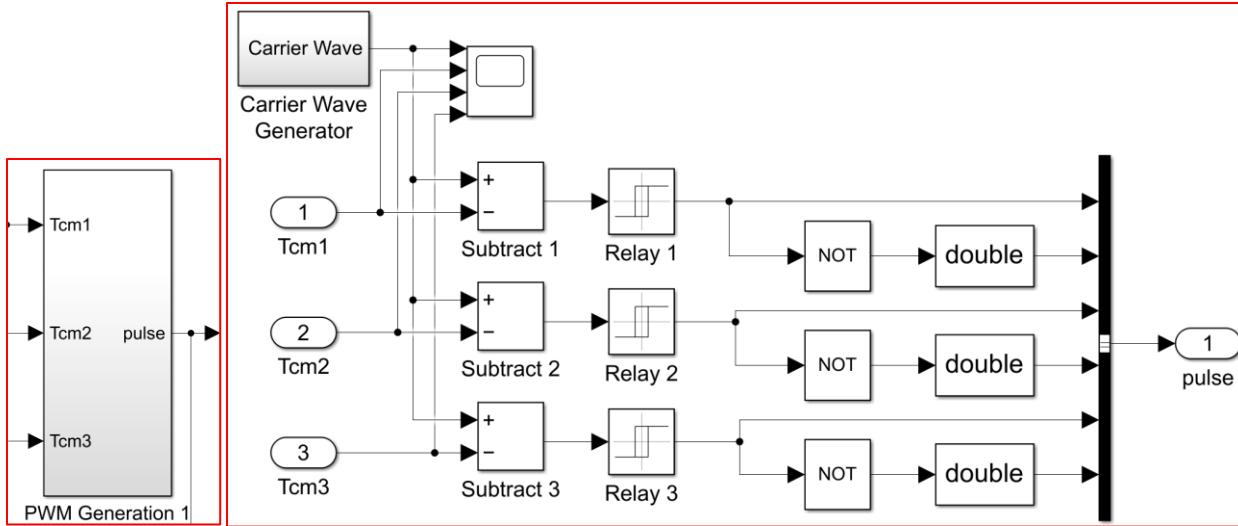
Σχήμα 9.27: Υπολογισμός μεταβλητών χρόνου  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ , της τεχνικής SVPWM, στο περιθώλιον Simulink (Calculation of time variables  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ , of the SVPWM technique in Simulink)



Σχήμα 9.28: Προσδιορισμός χρόνου δράσης των διανυσμάτων τάσης,  $T_1$ ,  $T_2$ , της τεχνικής SVPWM, στο περιβάλλον Simulink  
(Calculation of action time  $T_1$  and  $T_2$  of voltage vectors, of the SVPWM technique in Simulink)



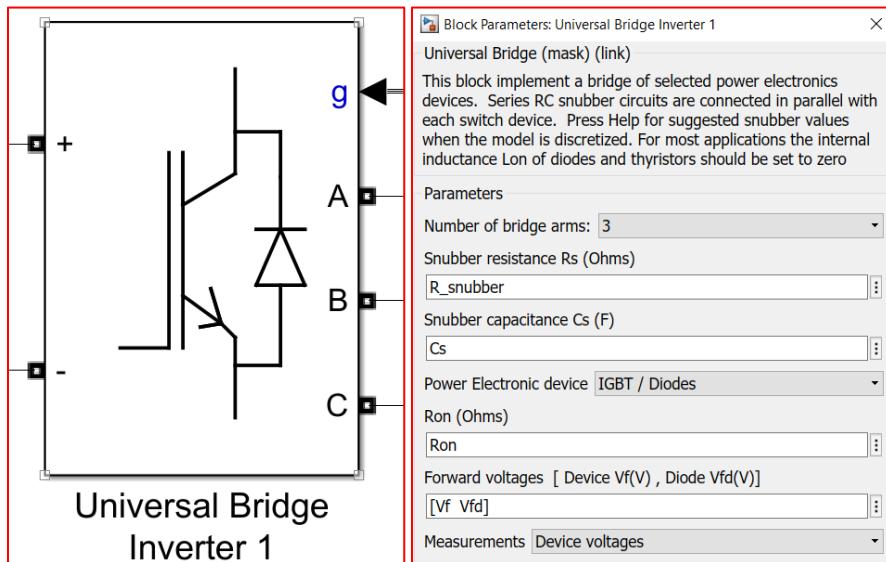
Σχήμα 9.29: Υπολογισμός χρόνου εναλλαγής κάθε τρανζίστορ, της τεχνικής SVPWM, στο περιβάλλον Simulink (Determine the switching time of each transistor, of the SVPWM technique in Simulink)



Σχήμα 9.30: Δημιουργία παλμών PWM, της τεχνικής SVPWM, στο περιβάλλον Simulink (Generation of PWM pulses, of the SVPWM technique in Simulink)

### 9.2.3 Υποσύστημα μετατροπέα (Inverter subsystem)

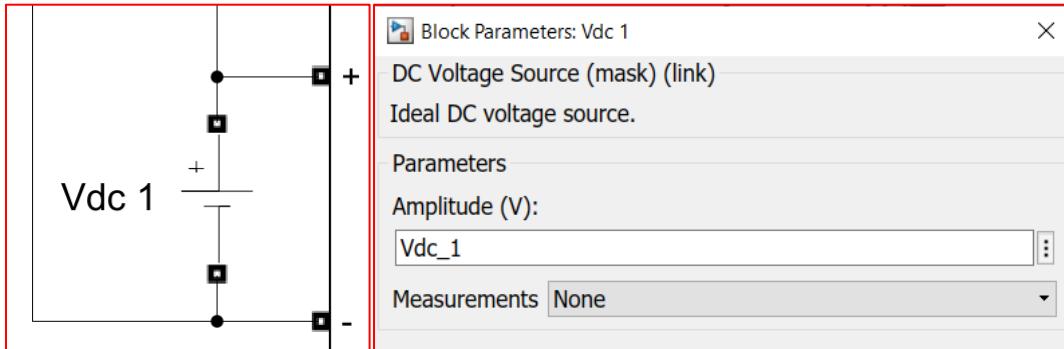
Η κυματομορφή PWM (PWM waveform) που δημιουργείται από τη τεχνική SVPWM, χρησιμοποιείται σε τριφασικό μετατροπέα πηγής τάσης. Η συχνότητα μεταγωγής (switching frequency), του SVPWM που χρησιμοποιείται σε αυτόν τον έλεγχο είναι,  $f = 10 \text{ kHz}$ , και έτσι ο χρόνος δειγματοληψίας είναι  $T = 10^{-4} \text{ sec}$ . Στο Σχήμα 9.31, παρουσιάζεται ο μετατροπέας πηγής τάσης του αριστερού κινητήρα. Ομοίως ισχύουν και για το μετατροπέα πηγής τάσης του δεξιού κινητήρα.



Σχήμα 9.31: Μετατροπέας πηγής τάσης του αριστερού ηλεκτροκινητήρα, στο περιβάλλον Simulink (Voltage source inverter of left motor in Simulink)

#### 9.2.4 Πηγές ενέργειας (Energy sources)

Για τη μοντελοποίηση της πηγής τάσης που τροφοδοτεί τα τυλίγματα του στάτορα του κινητήρα, χρησιμοποιείται μια ιδανική πηγή συνεχούς τάσης, η οποία διατηρεί σταθερή την τάση στα άκρα της, παρέχοντας ρεύμα σταθερής τιμής. Στο Σχήμα 9.32, παρουσιάζεται η μοντελοποίηση της πηγής τάσης τυλιγμάτων του ρότορα, του αριστερού ηλεκτροκινητήρα, στο περιβάλλον του Simulink. Ομοίως ισχύουν και για τη πηγή τάσης του δεξιού κινητήρα. Η τάση, της κάθε μίας, ανέρχεται στα 500 V



Σχήμα 9.32: Πηγής τάσης του αριστερού ηλεκτροκινητήρα, στο περιβάλλον Simulink (Voltage source of left motor in Simulink)

#### 9.2.5 Ηλεκτροκινητήρες (Motors)

Οι κινητήρες που επιλέχθηκαν στη μοντελοποίηση του ηλεκτρικού συστήματος, του Μοντέλου 2, είναι σύγχρονοι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη (Permanent Magnet Synchronous Motors). Στο Σχήμα 9.33, παρουσιάζεται η μοντελοποίηση του ηλεκτροκινητήρα του αριστερού κινητήριου τροχού, στο περιβάλλον του Simulink. Η μοντελοποίηση του ηλεκτροκινητήρα του δεξιού κινητήριου τροχού

Για τον σύγχρονο κινητήρα εναλλασσόμενου ρεύματος χρησιμοποιούνται ως είσοδοι:

- $V_a$ ,  $V_b$ ,  $V_c$ , οι τρείς φάσεις της τάσης του στάτορα, στο τριφασικό πλαίσιο αναφοράς (stator voltage  $a - b - c$  reference frame), [V]
- $T_L$ , το φορτίο, δηλαδή η απαιτούμενη μηχανική ροπή (mechanical load torque), [Nm]

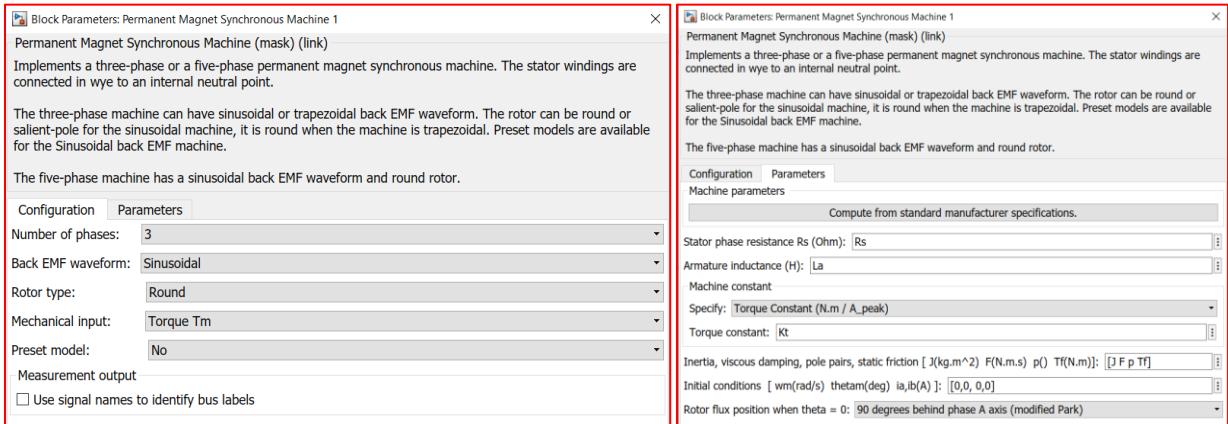
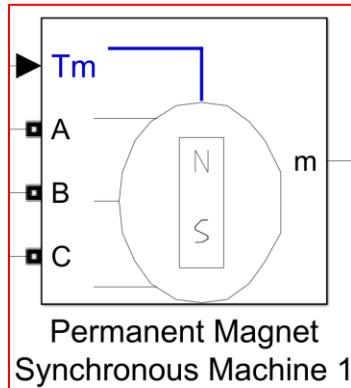
Οι έξοδοι του κινητήρα είναι τα μεγέθη:

- $\omega$ , η ταχύτητα περιστροφής κινητήρα (motor speed), [ $rad/s$ ]
- $\theta$ , η γωνία περιστροφής του ρότορα (rotor angle), [ $rad$ ]
- $i_a$ ,  $i_b$ ,  $i_c$  το ρεύμα που διαρρέει τα τυλίγματα του στάτορα (armature current), [A]
- $T_e$ , η ηλεκτρική ροπή (electrical torque), [Nm]

Οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται για την μοντελοποίηση του κινητήρα είναι:

- $R_s$  = , η αντίσταση κάθε φάσης του στάτορα (Stator phase resistance), [ $Ohm$ ]
- $L_a$  =, η επαγωγή του τυμπάνου (armature inductance), [ $H$ ]
- $K_t$ , η σταθερά ροπής (torque constant), [ $Nm/A$ ]
- $p$ , ο αριθμός των ζευγών πόλων του κινητήρα, (number of pole-pairs of motor)
- $J$ , η συνδυασμένη αδράνεια ρότορα και φορτίου (combined inertia of rotor and load), [ $kgm^2$ ]

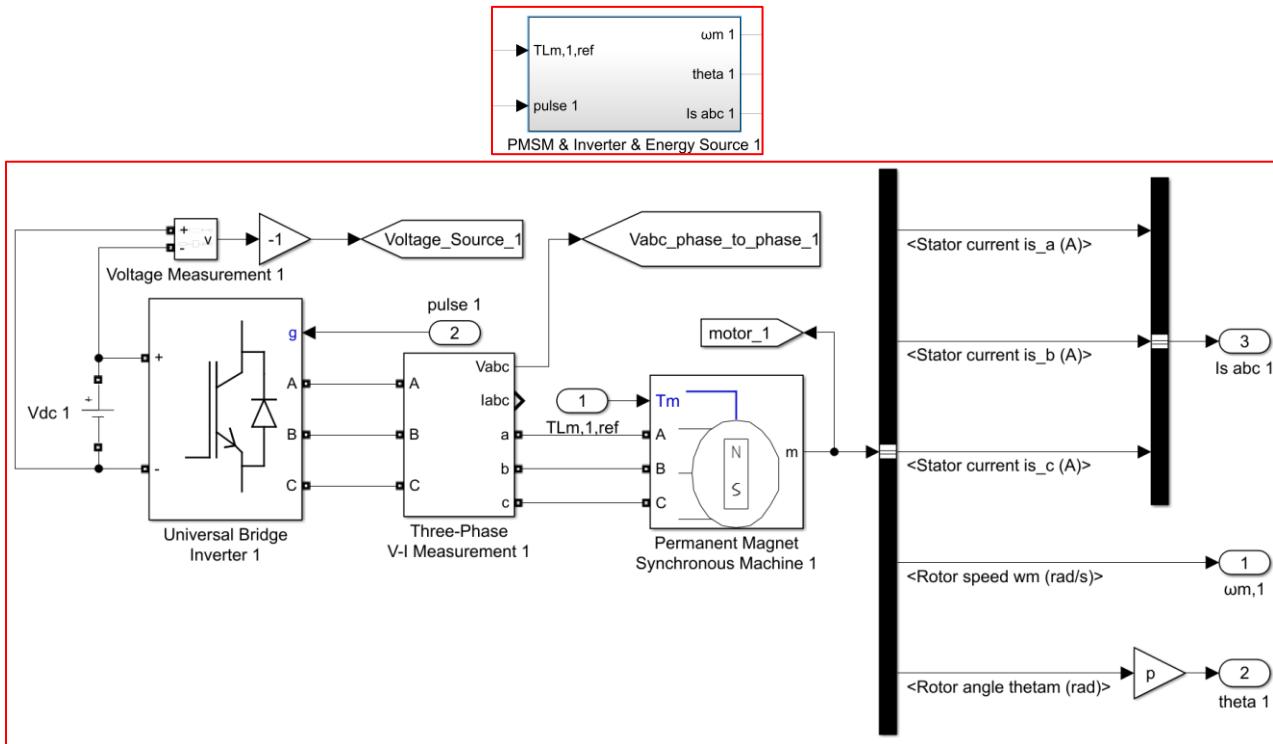
- $F$ , η συνδυασμένη ιξώδης τριβή ρότορα και φορτίου (combined viscous friction of rotor and load), [ $Nms$ ]
- $T_f$ , η ροπή τριβής κουλόμπ (coulomb friction torque), [ $Nm$ ]



**Σχήμα 9.33:** Σύγχρονος κινητήρας μόνιμου μαγνήτη αριστερού κινητήρου τροχού, στο περιβάλλον Simulink (*Permanent Magnet Synchronous Motors of left drive wheel in Simulink*)

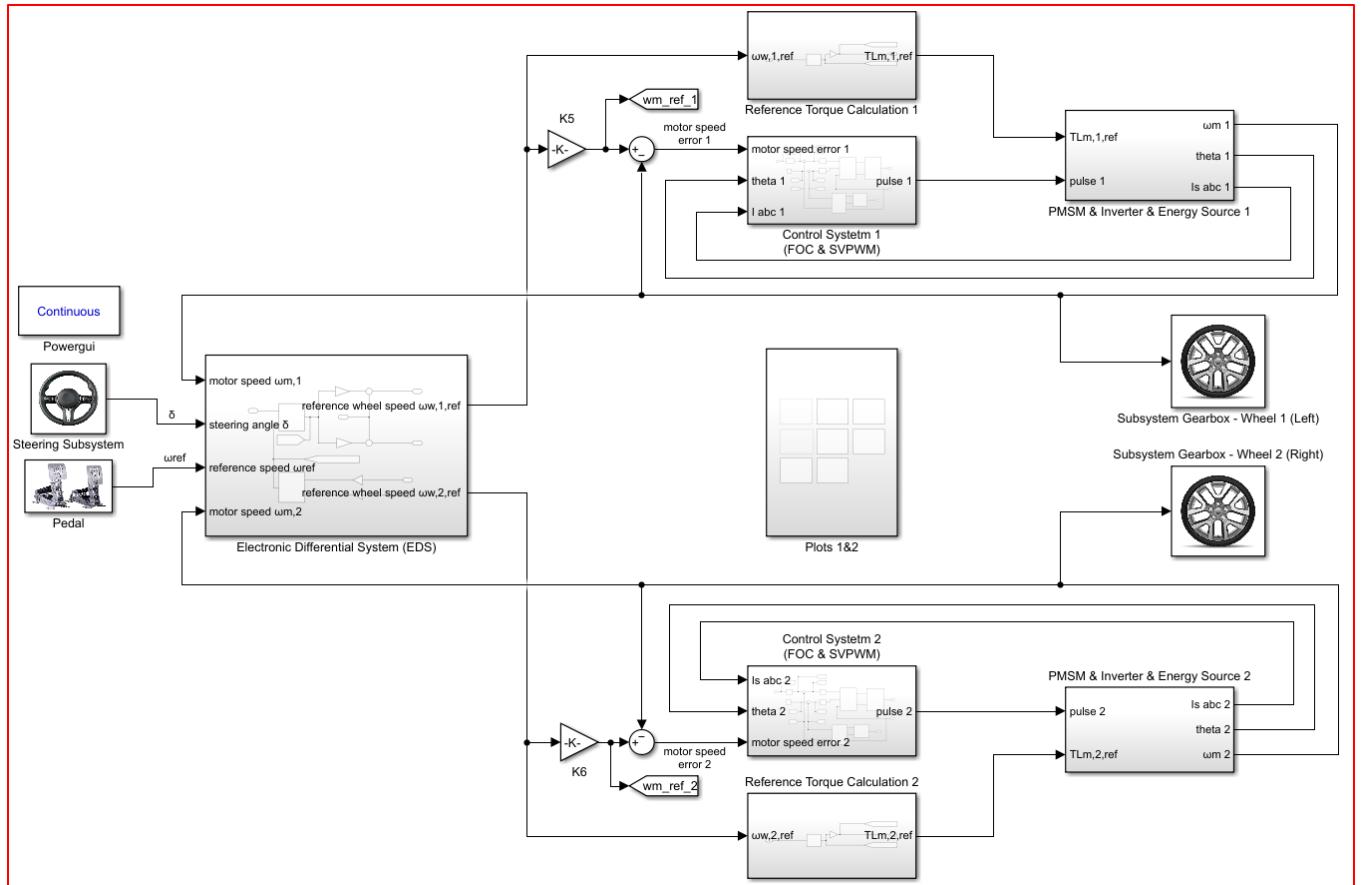
### 9.2.6 Συνολικό μοντέλο ηλεκτρονικού διαφορικού στο περιβάλλον Simulink (Electronic differential overall model in Simulink)

Στο Σχήμα 9.34, παρουσιάζονται στο περιβάλλον του Simulink, η πηγή συνεχούς τάσης, ο μετατροπέας πηγής τάσης, η μετρητική διάταξη του ρεύματος και της τάσης στην έξοδο του μετατροπέα, καθώς και ο σύγχρονος ηλεκτροκινητήρας μόνιμου μαγνήτη που αφορούν τον έλεχνο και τη τροφοδοσία του αριστερού (1) κινητήριου τροχού. Ομοίως πρόκειται και για την περίπτωση του δεξιού (2) κινητήριου τροχού.



Σχήμα 9.34: Κινητήρας, μετατροπέας και πηγή τάσης, αριστερού κινητήριου τροχού, στο Simulink (PMSM, inverter, energy source of left drive wheel in Simulink)

Στο Σχήμα 9.35, παρουσιάζεται στο περιβάλλον του Simulink, το ολικό μοντέλο (Μοντέλο 2) του ηλεκτρικού οχήματος, το οποίο εφαρμόζει ηλεκτρονικό διαφορικό σύστημα. Αν και η δομή του φαίνεται κοινή με αυτήν του Μοντέλου 1, πρόκειται για ένα πιο σύνθετο, τόσο υπολογιστικά όσο και από θέμα μοντελοποίησης μοντέλο.



Σχήμα 9.35: Ολικό μοντέλο ηλεκτρονικού διαφορικού στο περιβάλλον Simulink (Electronic differential total model in Simulink)

#### Μεταβλητές εισόδου Μοντέλου 2 (Model 2, inputs):

- δ, η γωνία τιμονιού οχήματος, (steering angle), [deg]. Αυτή ορίζεται από το τιμόνι και αποτελεί είσοδο για το μοντέλο του ηλεκτρονικού διαφορικού.
- $\omega_{ref} = \omega_{w,ref}$ , η κοινή γωνιακή ταχύτητα αναφοράς τροχού (reference wheel speed), [ $rads^{-1}$ ]. Αυτή ορίζεται από το πεντάλ του γκαζιού, και αποτελεί είσοδο για το μοντέλο του ηλεκτρονικού διαφορικού. Είναι η ταχύτητα που θα έπρεπε να περιστρέφονται οι δύο κινητήριοι τροχοί, αν η γωνία τιμονιού οχήματος ήταν μηδενική.

#### Ενδιάμεσες μεταβλητές - παράμετροι Μοντέλου 2 (Model 2, parameters):

- $v_{dc,1}$ , η τάση τροφοδοσίας 1 (supply voltage 1), [V]. Είναι η τάση που τροφοδοτεί τον αριστερό μετατροπέα (1) του αριστερού συστήματος ελέγχου (1). Αυτή, αποτελεί έξοδο της πηγής ελεγχόμενης τάσης 1 (controlled voltage source 1).
- $v_{dc,2}$ , η τάση τροφοδοσίας 2 (supply voltage 2), [V]. Είναι η τάση που τροφοδοτεί τον δεξιό μετατροπέα (2) του δεξιού συστήματος ελέγχου (2). Αυτή, αποτελεί έξοδο της πηγής ελεγχόμενης τάσης 2 (controlled voltage source 2).
- $i_{q,1}, i_{q,2}$ , το ρεύμα στάτορα στο q άξονα, στο πλαίσιο αναφοράς q – d των κινητήρων 1 και 2 αντίστοιχα (q-axis stator current), [A]

- $i_{d,1}$ ,  $i_{d,2}$ , το ρεύμα στάτορα στο d άξονα, στο πλαίσιο αναφοράς  $q - d$  των κινητήρων 1 και 2 αντίστοιχα (d-axis stator current), [A]
- $i_{q,1,ref}$ ,  $i_{q,2,ref}$ , το ρεύμα αναφοράς του στάτορα στο q άξονα, στο πλαίσιο αναφοράς  $q - d$  των κινητήρων 1 και 2 αντίστοιχα (q-axis stator reference current), [A]
- $i_{d,1,ref}$ ,  $i_{d,2,ref}$ , το ρεύμα αναφοράς του στάτορα στο d άξονα, στο πλαίσιο αναφοράς  $q - d$  των κινητήρων 1 και 2 αντίστοιχα (d-axis stator reference current), [A]
- $i_{q,er,1}$ , το σφάλμα του ρεύματος του στάτορα στο q άξονα, στο πλαίσιο αναφοράς  $q - d$  του κινητήρα 1 (q-axis stator current error 1), [A]. Είναι η διαφορά του ρεύματος αναφοράς  $i_{q,1,ref}$ , με το πραγματικό μετρούμενο ρεύμα  $i_{q,1}$ . Αυτό, αποτελεί την είσοδο του κατευθυντή ρεύματος του q άξονα του συστήματος ελέγχου 1. Συγκεκριμένα,

$$i_{q,er,1} = i_{q,1,ref} - i_{q,1} \quad (\text{Εξ. 9.9})$$

- $i_{q,er,2}$ , το σφάλμα του ρεύματος του στάτορα στο q άξονα, στο πλαίσιο αναφοράς  $q - d$  του κινητήρα 2 (q-axis stator current error 2), [A]. Είναι η διαφορά του ρεύματος αναφοράς  $i_{q,2,ref}$ , με το πραγματικό μετρούμενο ρεύμα  $i_{q,2}$ . Αυτό, αποτελεί την είσοδο του κατευθυντή ρεύματος του q άξονα του συστήματος ελέγχου 2. Συγκεκριμένα,

$$i_{q,er,2} = i_{q,2,ref} - i_{q,2} \quad (\text{Εξ. 9.10})$$

- $i_{d,er,1}$ , το σφάλμα του ρεύματος του στάτορα στο d άξονα, στο πλαίσιο αναφοράς  $q - d$  του κινητήρα 1 (d-axis stator current error 1), [A]. Είναι η διαφορά του ρεύματος αναφοράς  $i_{d,1,ref}$ , με το πραγματικό μετρούμενο ρεύμα  $i_{d,1}$ . Αυτό, αποτελεί την είσοδο του κατευθυντή ρεύματος του d άξονα του συστήματος ελέγχου 1. Συγκεκριμένα,

$$i_{d,er,1} = i_{d,1,ref} - i_{d,1} \quad (\text{Εξ. 9.11})$$

- $i_{d,er,2}$ , το σφάλμα του ρεύματος του στάτορα στο d άξονα, στο πλαίσιο αναφοράς  $q - d$  του κινητήρα 2 (d-axis stator current error 2), [A]. Είναι η διαφορά του ρεύματος αναφοράς  $i_{d,2,ref}$ , με το πραγματικό μετρούμενο ρεύμα  $i_{d,2}$ . Αυτό, αποτελεί την είσοδο του κατευθυντή ρεύματος του d άξονα του συστήματος ελέγχου 2. Συγκεκριμένα,

$$i_{d,er,2} = i_{d,2,ref} - i_{d,2} \quad (\text{Εξ. 9.12})$$

- $Pulses_{SVPWM1}$ , οι παλμοί τάσης που δημιουργούνται από την τεχνική SVPWM για τον έλεγχο του μετατροπέα 1, του αριστερού συστήματος ελέγχου (pulses of SVPWM technique 1)
- $Pulses_{SVPWM2}$ , οι παλμοί τάσης που δημιουργούνται από την τεχνική SVPWM για τον έλεγχο του μετατροπέα 2, του δεξιού συστήματος ελέγχου (pulses of SVPWM technique 2)
- $\omega_v$ , γωνιακή ταχύτητα του φανταστικού κεντρικού οπίσθιου τροχού ως προς το κέντρο στροφής (center of turn angular speed), [ $rads^{-1}$ ].
- $\Delta\omega$ , η διαφορά ανάμεσα στις γωνιακές ταχύτητες των κινητήριων τροχών (difference between the angular speeds of the wheel drives), [ $rads^{-1}$ ].
- $\omega_{m,1,ref}$ , η γωνιακή ταχύτητα αναφοράς του κινητήρα 1 (reference motor speed 1), [ $rads^{-1}$ ].
- $\omega_{m,2,ref}$ , η γωνιακή ταχύτητα αναφοράς του κινητήρα 2 (reference motor speed 2), [ $rads^{-1}$ ].

- $\omega_{w,1,ref}$ , η γωνιακή ταχύτητα αναφοράς του κινητήριου τροχού 1 (reference wheel speed 1), [ $rads^{-1}$ ].
- $\omega_{w,2,ref}$ , η γωνιακή ταχύτητα αναφοράς του κινητήριου τροχού 2 (reference wheel speed 2), [ $rads^{-1}$ ].
- $\omega_{m,1}$ , η πραγματική γωνιακή ταχύτητα του κινητήρα 1 (motor speed 1), [ $rads^{-1}$ ].
- $\omega_{m,2}$ , η πραγματική γωνιακή ταχύτητα του κινητήρα 2 (motor speed 2), [ $rads^{-1}$ ].
- $\omega_{w,1}$ , η πραγματική γωνιακή ταχύτητα του κινητήριου τροχού 1 (wheel speed 1), [ $rads^{-1}$ ].
- $\omega_{w,2}$ , η πραγματική γωνιακή ταχύτητα του κινητήριου τροχού 2 (wheel speed 2), [ $rads^{-1}$ ].
- $\omega_{er,1}$  το σφάλμα της γωνιακής ταχύτητας του κινητήρα 1 (motor speed error 1), [ $rads^{-1}$ ].
- $\omega_{er,2}$  το σφάλμα της γωνιακής ταχύτητας του κινητήρα 2 (motor speed error 2), [ $rads^{-1}$ ].
- $T_{Lm,1,ref}$ , το φορτίο ροπής αναφοράς του κινητήρα 1 (reference load motor torque 1), [ $Nm$ ].
- $T_{Lm,2,ref}$ , το φορτίο ροπής αναφοράς του κινητήρα 2 (reference load motor torque 2), [ $Nm$ ].
- $T_{Lw,1,ref}$ , το φορτίο ροπής αναφοράς του κινητήριου τροχού 1 (reference load wheel torque 1), [ $Nm$ ].
- $T_{Lw,2,ref}$ , το φορτίο ροπής αναφοράς του κινητήριου τροχού 2 (reference load wheel torque 2), [ $Nm$ ].
- $T_{Lm,1}$ , το πραγματικό φορτίο ροπής του κινητήρα 1 (actual load motor torque 1), [ $Nm$ ].
- $T_{Lm,2}$ , το πραγματικό φορτίο ροπής του κινητήρα 2 (actual load motor torque 2), [ $Nm$ ].
- $T_{Lw,1}$ , το πραγματικό φορτίο ροπής του κινητήριου τροχού 1 (actual load wheel torque 1), [ $Nm$ ].
- $T_{Lw,2}$ , το πραγματικό φορτίο ροπής του κινητήριου τροχού 2 (actual load wheel torque 2), [ $Nm$ ].
- $T_{e,1}$ , η ηλεκτρική ροπή του κινητήρα 1 (electrical torque 1), [ $Nm$ ].
- $T_{e,2}$ , η ηλεκτρική ροπή του κινητήρα 2 (electrical torque 2), [ $Nm$ ].
- $T_{t,1}$ , η ροπή έλξης του κινητήριου τροχού 1 (tractive torque/ actual wheel torque 1), [ $Nm$ ].
- $T_{t,2}$ , η ροπή έλξης του κινητήριου τροχού 2 (tractive torque/ actual wheel torque 2), [ $Nm$ ].
- $k_1$ , η παράμετρος που δείχνει τι ποσοστό της  $\Delta\omega$ , κατανέμεται στον αριστερό κινητήριο τροχό (1). Στο μοντέλο έχει την σταθερή τιμή  $-50\%$ .
- $k_2$ , η παράμετρος που δείχνει τι ποσοστό της  $\Delta\omega$ , κατανέμεται στον δεξί κινητήριο τροχό (2). Στο μοντέλο έχει την σταθερή τιμή  $+50\%$ .
- $k_3$ , η παράμετρος αυτή ισούται με 1, καθώς δεν χρησιμοποιείται σχέση μετάδοσης. Είναι το μέγεθος που συνδέει τις γωνιακές ταχύτητες κινητήρα 1,  $\omega_{m,1}$  και κινητήριου τροχού 1,  $\omega_{w,1}$ , μέσω του λόγου μετάδοσης. Συγκεκριμένα,

$$\omega_{w,1} = k_3 \omega_{m,1} \quad (\text{Εξ. 9.13})$$

- $k_4$ , η παράμετρος αυτή ισούται με 1, καθώς δεν χρησιμοποιείται σχέση μετάδοσης. Είναι το μέγεθος που συνδέει τις γωνιακές ταχύτητες κινητήρα 2,  $\omega_{m,2}$  και κινητήριου τροχού 2,  $\omega_{w,2}$ , μέσω του λόγου μετάδοσης. Συγκεκριμένα,

$$\omega_{w,2} = k_4 \omega_{m,2} \quad (\text{Εξ. 9.14})$$

- $k_5$ , η παράμετρος αυτή ισούται με 1. Είναι το μέγεθος που συνδέει τις γωνιακές ταχύτητες κινητήρα 1,  $\omega_{m,1,ref}$  και κινητήριου τροχού 1,  $\omega_{w,1,ref}$ , μέσω του λόγου μετάδοσης. Συγκεκριμένα,

$$\omega_{m,1,ref} = k_5 \omega_{w,1,ref} \quad (\text{Εξ. 9.15})$$

- $k_6$ , η παράμετρος αυτή ισούται με 1. Είναι το μέγεθος που συνδέει τις γωνιακές ταχύτητες κινητήρα 2,  $\omega_{m,2,ref}$  και κινητήριου τροχού 2,  $\omega_{w,2,ref}$ , μέσω του λόγου μετάδοσης. Συγκεκριμένα,

$$\omega_{m,2,ref} = k_6 \omega_{w,2,ref} \quad (\text{Εξ. 9.16})$$

- $k_7$ , η παράμετρος αυτή ισούται με 1, καθώς δεν χρησιμοποιείται σχέση μετάδοσης. Είναι το μέγεθος που συνδέει το φορτίο ροπής αναφοράς του κινητήριου τροχού 1,  $T_{Lw,1,ref}$ , με το φορτίο ροπής αναφοράς του κινητήρα 1,  $T_{Lm,1,ref}$ . Συγκεκριμένα,

$$T_{Lm,1,ref} = k_7 T_{Lw,1,ref} \quad (\text{Εξ. 9.17})$$

- $k_8$ , η παράμετρος αυτή ισούται με 1, καθώς δεν χρησιμοποιείται σχέση μετάδοσης. Είναι το μέγεθος που συνδέει το φορτίο ροπής αναφοράς του κινητήριου τροχού 2,  $T_{Lw,2,ref}$ , με το φορτίο ροπής αναφοράς του κινητήρα 2,  $T_{Lm,2,ref}$ . Συγκεκριμένα,

$$T_{Lm,2,ref} = k_8 T_{Lw,2,ref} \quad (\text{Εξ. 9.18})$$

Μεταβλητές εξόδου Μοντέλου 2 (Model 2, outputs):

1. Οι έξοδοι του κινητήρα (motor outputs):

- $\omega_{m,1}$ , η πραγματική γωνιακή ταχύτητα του κινητήρα 1 (motor speed 1), [ $rads^{-1}$ ].
- $\omega_{m,2}$ , η πραγματική γωνιακή ταχύτητα του κινητήρα 2 (motor speed 2), [ $rads^{-1}$ ].
- $\theta_{m,1}$ , η γωνιακή θέση ρότορα 1 (rotor angular position 1), [rad]
- $\theta_{m,2}$ , η γωνιακή θέση ρότορα 2 (rotor angular position 2), [rad]
- $T_{e,1}$ , η ηλεκτρική ροπή του ηλεκτροκινητήρα 1 (electrical torque 1), [Nm].
- $T_{e,2}$ , η ηλεκτρική ροπή του ηλεκτροκινητήρα 2 (electrical torque 2), [Nm].
- $i_{a,1}, i_{a,2}$ , το ρεύμα στάτορα της φάσης  $a$ , στο πλαίσιο αναφοράς  $a - b - c$  των κινητήρων 1 και 2 αντίστοιχα (stator current of phase  $a$ ), [A]
- $i_{b,1}, i_{b,2}$ , το ρεύμα στάτορα της φάσης  $b$ , στο πλαίσιο αναφοράς  $a - b - c$  των κινητήρων 1 και 2 αντίστοιχα (stator current of phase  $b$ ), [A]
- $i_{c,1}, i_{c,2}$ , το ρεύμα στάτορα της φάσης  $c$ , στο πλαίσιο αναφοράς  $a - b - c$  των κινητήρων 1 και 2 αντίστοιχα (stator current of phase  $c$ ), [A]
- $v_{a,1}, v_{a,2}$ , η τάση στάτορα της φάσης  $a$ , στο πλαίσιο αναφοράς  $a - b - c$  των κινητήρων 1 και 2 αντίστοιχα (stator voltage of phase  $a$ ), [V]
- $v_{b,1}, v_{b,2}$ , η τάση στάτορα της φάσης  $b$ , στο πλαίσιο αναφοράς  $a - b - c$  των κινητήρων 1 και 2 αντίστοιχα (stator voltage of phase  $b$ ), [V]
- $v_{c,1}, v_{c,2}$ , η τάση στάτορα της φάσης  $c$ , στο πλαίσιο αναφοράς  $a - b - c$  των κινητήρων 1 και 2 αντίστοιχα (stator voltage of phase  $c$ ), [V]
- $i_{alpha,1}, i_{alpha,2}$ , το ρεύμα στάτορα του  $alpha$  άξονα, στο πλαίσιο αναφοράς  $alpha - beta$  των κινητήρων 1 και 2 αντίστοιχα ( $alpha$  axis stator current), [A]

- $i_{beta,1}, i_{beta,2}$ , το ρεύμα στάτορα της φάσης *beta*, στο πλαίσιο αναφοράς *alpha – beta* των κινητήρων 1 και 2 αντίστοιχα (*beta axis stator current*), [A]
- $v_{alpha,1}, v_{alpha,2}$ , η τάση στάτορα του *alpha* άξονα, στο πλαίσιο αναφοράς *alpha – beta* των κινητήρων 1 και 2 αντίστοιχα (*alpha axis stator voltage*), [V]
- $v_{beta,1}, v_{beta,2}$ , η τάση στάτορα της φάσης *beta*, στο πλαίσιο αναφοράς *alpha – beta* των κινητήρων 1 και 2 αντίστοιχα (*beta axis stator voltage*), [V]
- $i_{q,1}, i_{q,2}$ , το ρεύμα στάτορα στο *q* άξονα, στο πλαίσιο αναφοράς *q – d* των κινητήρων 1 και 2 αντίστοιχα (*q-axis stator current*), [A]
- $i_{d,1}, i_{d,2}$ , το ρεύμα στάτορα στο *d* άξονα, στο πλαίσιο αναφοράς *q – d* των κινητήρων 1 και 2 αντίστοιχα (*d-axis stator current*), [A]
- $v_{q,1}, v_{q,2}$ , η τάση στάτορα στο *q* άξονα, στο πλαίσιο αναφοράς *q – d* των κινητήρων 1 και 2 αντίστοιχα (*q-axis stator voltage*), [V]
- $v_{d,1}, v_{d,2}$ , η τάση στάτορα στο *d* άξονα, στο πλαίσιο αναφοράς *q – d* των κινητήρων 1 και 2 αντίστοιχα (*d-axis stator voltage*), [V]

2. Οι έξοδοι του τροχού (*wheel outputs*):

- $\omega_{w,1}$ , η πραγματική γωνιακή ταχύτητα του κινητήριου τροχού 1 (wheel speed 1), [ $rads^{-1}$ ].
- $\omega_{w,2}$ , η πραγματική γωνιακή ταχύτητα του κινητήριου τροχού 2 (wheel speed 2), [ $rads^{-1}$ ].
- $T_{LW,1}$ , το πραγματικό φορτίο ροπής του κινητήριου τροχού 1 (actual load wheel torque 1), [Nm].
- $T_{LW,2}$ , το πραγματικό φορτίο ροπής του κινητήριου τροχού 2 (actual load wheel torque 2), [Nm].
- $T_{t,1}$ , η ροπή έλξης του κινητήριου τροχού 1 (tractive torque/ actual wheel torque 1), [Nm].
- $T_{t,2}$ , η ροπή έλξης του κινητήριου τροχού 2 (tractive torque/ actual wheel torque 2), [Nm].

## Κεφάλαιο 10 Περιγραφή προσομοιώσεων (Simulation description)

Περικειμένου να προσδιορισθεί το σύστημα του ηλεκτρονικού διαφορικού (electronic differential system) του ηλεκτρικού οχήματος κάθε μοντέλου, το οποίο εξοπλίζεται με δύο ηλεκτροκινητήρες στους οπίσθιους τροχούς, πραγματοποιήθηκαν οι ακόλουθες προσομοιώσεις, στο περιβάλλον Simulink της MATLAB [3], [5]. Κάθε προσομοιώση για να διεξαχθεί, αρκεί να εκτελεστεί ένα αρχείο script της MATLAB (.mat), στο οποίο εισάγονται οι τιμές των δεδομένων και των παραμέτρων. Συγκεκριμένα, στο αρχείο αυτό, μέσω της εντολής, *sim*, εκτελείται το μοντέλο του Simulink το οποίο εισάγεται, με βάσει τις τιμές των εισόδων και των παραμέτρων που εισάγει ο χρήστης.

### 10.1 Σενάριο 1: Ευθύς δρόμος και επιταχυνόμενη κίνηση μέχρι την σταθερή ταχύτητα των 80km/h (Straight road and accelerated motion up to the constant speed of 80 km/h)

Το ηλεκτρικό όχημα αρχικά βρίσκεται σε πλήρη ακινησία, με μηδενική γωνία τιμονιού. Την χρονική στιγμή  $t = 0 \text{ sec}$  αρχίζει να επιταχύνεται σε ίσιο δρόμο, έχοντας σταθερή επιτάχυνση έως την χρονική στιγμή  $t = 5.33 \text{ sec}$ . Την χρονική στιγμή αυτή, έχοντας πιάσει τα  $80 \text{ km/h}$  συνεχίζει να κινείται με σταθερή ταχύτητα έως τη χρονική στιγμή  $t = 20 \text{ sec}$ , όπου τερματίζεται η προσομοιώση του μοντέλου. Καθ' όλη τη διάρκεια, το όχημα κινείται σε ευθύ οριζόντιο δρόμο, οπότε η βαρυτική δύναμη είναι συνεχώς κάθετη σε αυτό.

### 10.2 Σενάριο 2: Ευθύς δρόμος με ανωφέρεια 8% και επιταχυνόμενη κίνηση μέχρι την σταθερή ταχύτητα των 60km/h (Straight road with 8% slope and accelerated motion up to the constant speed of 60 km/h)

Το ηλεκτρικό όχημα αρχικά βρίσκεται σε πλήρη ακινησία, με μηδενική γωνία τιμονιού. Την χρονική στιγμή  $t = 0 \text{ sec}$  αρχίζει να επιταχύνεται σε ίσιο δρόμο, έχοντας σταθερή επιτάχυνση έως την χρονική στιγμή  $t = 5.33 \text{ sec}$ . Την χρονική στιγμή αυτή, έχοντας πιάσει τα  $60 \text{ km/h}$  συνεχίζει να κινείται με σταθερή ταχύτητα έως τη χρονική στιγμή  $t = 20 \text{ sec}$ , όπου τερματίζεται η προσομοιώση του μοντέλου. Καθ' όλη τη διάρκεια, το όχημα κινείται σε ευθύ δρόμο που εμφανίζει σταθερή ανωφέρεια και ίση με  $a = 8\%$ , οπότε η βαρυτική δύναμη επηρεάζει τα φορτία που δέχεται πλέον αυτό.

### 10.3 Σενάριο 3: Στροφή δεξιά και επιταχυνόμενη κίνηση μέχρι την σταθερή ταχύτητα των 80km/h (Clockwise-curved road and accelerated motion up to the constant speed of 80 km/h)

Το ηλεκτρικό όχημα αρχικά βρίσκεται σε πλήρη ακινησία, με μηδενική γωνία τιμονιού. Την χρονική στιγμή  $t = 0 \text{ sec}$  αρχίζει να επιταχύνεται σε ίσιο δρόμο, έχοντας σταθερή επιτάχυνση έως την χρονική στιγμή  $t = 5.33 \text{ sec}$ . Την χρονική στιγμή αυτή, έχοντας πιάσει τα  $80 \text{ km/h}$  συνεχίζει να κινείται με σταθερή ταχύτητα. Την χρονική στιγμή  $t = 8 \text{ sec}$  ο οδηγός-είσοδος του συστήματος επιβάλλει γωνία στο τιμόνι ίση με  $\delta = -15 \text{ deg}$ , αναγκάζοντας το όχημα να κινηθεί σε μια δεξιά κυκλική τροχιά που επιβάλλουν οι 15 μοίρες. Το όχημα πλέον κινείται με σταθερή ταχύτητα, εκτελώντας ομαλή κυκλική κίνηση, σε δρόμο με δεξιά στροφή, μέχρι τη χρονική στιγμή  $t = 18 \text{ sec}$ , όπου το τιμόνι επανέρχεται στην αρχική μηδενική του θέση. Από τη στιγμή αυτή μέχρι τη χρονική στιγμή  $t = 20 \text{ sec}$ , όπου τερματίζεται η προσομοιώση του μοντέλου, το όχημα κινείται σε ευθεία με σταθερή ταχύτητα. Καθ' όλη τη διάρκεια, το όχημα κινείται σε οριζόντιο δρόμο, οπότε η βαρυτική δύναμη είναι συνεχώς κάθετη σε αυτό.

**10.4 Σενάριο 4: Στροφή αριστερή και επιταχυνόμενη κίνηση μέχρι την σταθερή ταχύτητα των 80km/h (Counter-clockwise-curved road and accelerated motion up to the constant speed of 80 km/h)**

Το ηλεκτρικό όχημα αρχικά βρίσκεται σε πλήρη ακινησία, με μηδενική γωνία τιμονιού. Την χρονική στιγμή  $t = 0 \text{ sec}$  αρχίζει να επιταχύνεται σε ίσιο δρόμο, έχοντας σταθερή επιτάχυνση έως την χρονική στιγμή  $t = 5.33 \text{ sec}$ . Την χρονική στιγμή αυτή, έχοντας πιάσει τα  $80 \text{ km/h}$  συνεχίζει να κινείται με σταθερή ταχύτητα. Την χρονική στιγμή  $t = 8 \text{ sec}$  ο οδηγός-είσοδος του συστήματος επιβάλλει γωνία στο τιμόνι  $\delta = 15 \text{ deg}$ , αναγκάζοντας το όχημα να κινηθεί σε μια αριστερή κυκλική τροχιά που επιβάλλουν οι 15 μοίρες. Το όχημα πλέον κινείται με σταθερή ταχύτητα, εκτελώντας ομαλή κυκλική κίνηση, σε δρόμο με αριστερή στροφή, μέχρι τη χρονική στιγμή  $t = 18 \text{ sec}$ , όπου το τιμόνι επανέρχεται στην αρχική μηδενική του θέση. Από τη στιγμή αυτή μέχρι τη χρονική στιγμή  $t = 20 \text{ sec}$ , όπου τερματίζεται η προσομοίωση του μοντέλου, το όχημα κινείται σε ευθεία με σταθερή ταχύτητα. Καθ' όλη τη διάρκεια, το όχημα κινείται σε οριζόντιο δρόμο, οπότε η βαρυτική δύναμη είναι συνεχώς κάθετη σε αυτό.

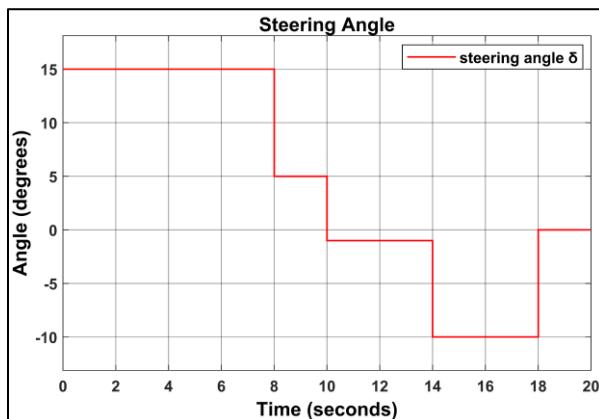
**10.5 Σενάριο 5: Στροφές αριστερές και δεξιές με ανωφέρεια 2% και επιταχυνόμενη κίνηση μέχρι την σταθερή ταχύτητα των 80km/h (Counter-clockwise and clockwise curved road with 2% slope and accelerated motion up to the constant speed of 80 km/h)**

Το ηλεκτρικό όχημα αρχικά βρίσκεται σε πλήρη ακινησία, με μη μηδενική γωνία τιμονιού ίση με  $\delta = 15 \text{ deg}$ . Την χρονική στιγμή  $t = 0 \text{ sec}$  αρχίζει να επιταχύνεται σε δρόμο με αριστερή στροφή, εκτελώντας ομαλά επιταχυνόμενη κυκλική κίνηση, έως την χρονική στιγμή  $t = 5.33 \text{ sec}$ , όπου η ταχύτητα οχήματος σταθεροποιείται στα  $80 \text{ km/h}$ . Η γωνιά τιμονιού παραμένει στις  $\delta = 15 \text{ deg}$ , έως τη χρονική στιγμή  $t = 8 \text{ sec}$ , όπου αυτή ελαττώνεται στις  $\delta = 5 \text{ deg}$ , ενώ το όχημα συνεχίζει να κινείται σε δρόμο με αριστερή στροφή. Την χρονική στιγμή  $t = 10 \text{ sec}$ , η αριστερή στροφή τερματίζεται και ξεκινάει δεξιά στροφή. Η γωνία τιμονιού, τότε, λαμβάνει νέα τιμή, ίση με  $\delta = -1 \text{ deg}$ , επιβάλλοντας στο όχημα να κινηθεί σε δεξιά στροφή, εκτελώντας ομαλή κυκλική κίνηση. Μετά από 4 δευτερόλεπτα, έχοντας φτάσει στη χρονική στιγμή  $t = 14 \text{ sec}$ , η γωνία τιμονιού λαμβάνει την τιμή  $\delta = -10 \text{ deg}$ , επιβάλλοντας στο όχημα να κινηθεί σε νέα δεξιά στροφή, εκτελώντας ομαλή κυκλική κίνηση με νέα ακτίνα καμπυλότητας. Την χρονική στιγμή  $t = 18 \text{ sec}$ , η δεξιά στροφή τερματίζεται και το όχημα συνεχίζει να κινείται σε ευθεία δρόμο με σταθερή ταχύτητα, μέχρι και την χρονική στιγμή  $t = 20 \text{ sec}$ , όπου τερματίζεται η προσομοίωση του μοντέλου. Καθ' όλη τη διάρκεια, το όχημα κινείται σε δρόμο που εμφανίζει σταθερή ανωφέρεια και ίση με  $a = 2\%$ , οπότε η βαρυτική δύναμη επηρεάζει τα φορτία που δέχεται πλέον αυτό.

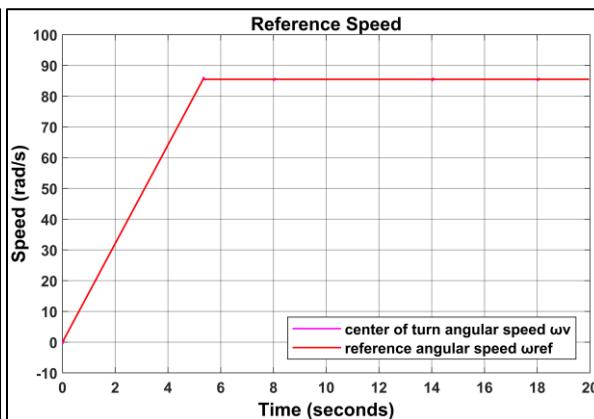
## Κεφάλαιο 11 Αποτελέσματα και συμπεράσματα των προσομοιώσεων (Results and conclusions of the simulations)

11.1 Μοντέλο 1 - Σενάριο 5: Στροφές αριστερές και δεξιές με ανωφέρεια 2% και επιταχυνόμενη κίνηση μέχρι την σταθερή ταχύτητα των 80km/h (Counter-clockwise and clockwise curved road with 2% slope and accelerated motion up to the constant speed of 80 km/h)

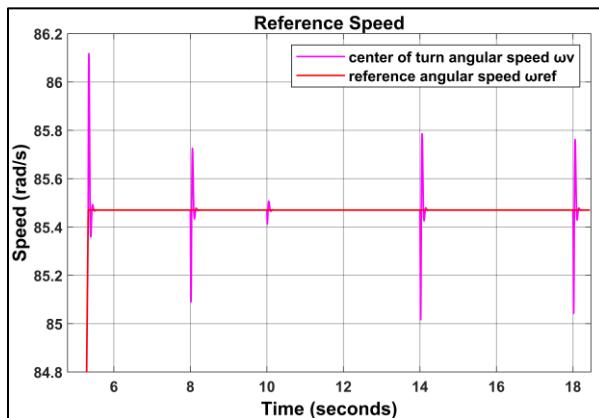
Αυτό το σενάριο πρόκειται από ένα συνδυασμό όλων των προηγούμενων, περιέχοντας επιταχυνόμενη και σταθερή κίνηση, αριστερές και δεξιές στροφές, καθώς και ανωφέρεια. Στα σχήματα: Σχήμα 11.1, Σχήμα 11.2 και Σχήμα 11.3, παρουσιάζονται τα δεδομένα εισόδου του οχήματος, η οποία συγκρίνεται με την πραγματική ταχύτητα του οχήματος (του οπίσθιου φανταστικού τροχού) ως προς το κέντρο στροφής. Στο Σχήμα 11.4, φαίνεται η πραγματική γραμμική ταχύτητα κάθε κινητήριου οπίσθιου τροχού, καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης του σεναρίου, η οποία συγκρίνεται με την αντίστοιχη γραμμική ταχύτητα αναφοράς του.



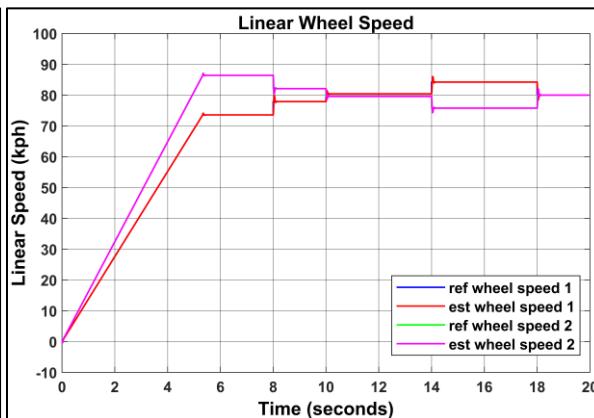
Σχήμα 11.1: Γωνία τιμονιού (steering angle)



Σχήμα 11.2: Γωνιακή ταχύτητα αναφοράς (reference speed)



Σχήμα 11.3: Γωνιακή ταχύτητα αναφοράς σε μεγέθυνση (reference speed in zoom)

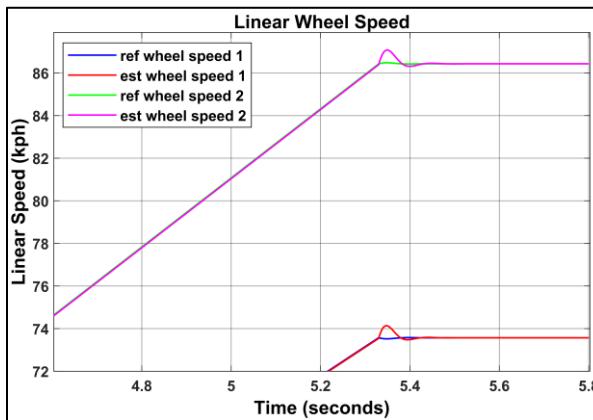


Σχήμα 11.4: Γραμμική ταχύτητα κινητήριων τροχών (Linear traction wheels speed)

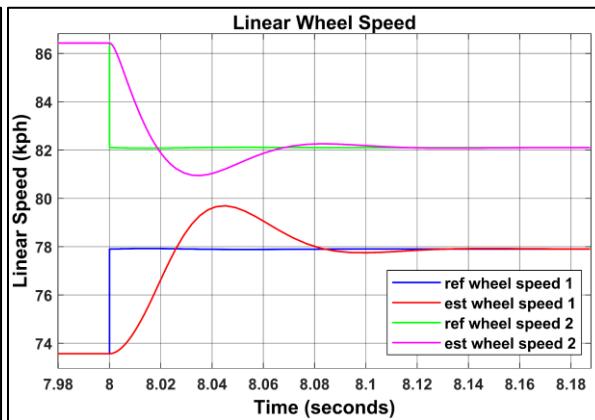
Στα σχήματα: Σχήμα 11.5 έως Σχήμα 11.9, απεικονίζονται οι μεταβολές του διαγράμματος της γραμμικής ταχύτητας, κατά τα στιγμιότυπα που μεταβάλλονται οι είσοδοι του οχήματος, δηλαδή τη χρονική στιγμή  $t = 5.33 \text{ sec}$ , όπου η ταχύτητα οχήματος σταθεροποιείται και τις χρονικές στιγμές  $t = 8, 10, 14, 18 \text{ sec}$ , όπου μεταβάλλεται η γωνία τιμονιού.

Είναι φανερό πως η πραγματική γραμμική ταχύτητα, κάθε κινητήριου τροχού, ακολουθεί με μεγάλη ακρίβεια την αντίστοιχη ταχύτητα αναφοράς του, ενώ τις χρονικές στιγμές που η ταχύτητα αναφοράς αλλάζει, η πραγματική ταχύτητα προσαρμόζεται άμεσα στην νέα τιμή αναφοράς της, εμφανίζοντας καθυστέρηση, μόνο λίγα εκατοστά του δευτερολέπτου, γεγονός που αποδεικνύει την γρήγορη απόκριση της πραγματικής ταχύτητας των τροχών, σε οποιαδήποτε μεταβολή των εισόδων του.

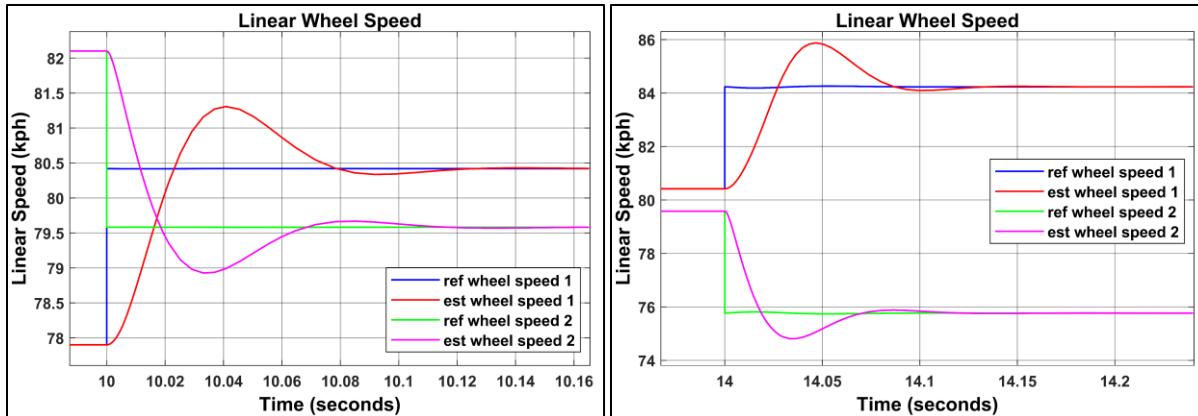
Λόγω ύπαρξης μη μηδενικής γωνίας τιμονιού κατά το χρονικό διάστημα  $t = 0 \text{ sec}$  έως  $t = 18 \text{ sec}$ , οι κινητήριοι τροχοί, δεν περιστρέφονται με την ίδια ταχύτητα. Συγκεκριμένα, ο κινητήριος τροχός που βρίσκεται εσωτερικά της εκάστοτε στροφής, περιστρέφεται πιο αργά από την ταχύτητα αναφοράς του κέντρου του οχήματος, το οποίο με τη σειρά του περιστρέφεται πιο αργά από τον κινητήριο τροχό που βρίσκεται εξωτερικά της εκάστοτε στροφής, εξασφαλίζοντας, και ταυτόχρονα επιβεβαιώνοντας, την σωστή λειτουργία του ηλεκτρονικού διαφορικού. Επίσης, παρατηρείται, πως όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα του οχήματος, αλλά και η απόλυτη τιμή της γωνίας τιμονιού, τόσο μεγαλύτερη είναι και η διαφορά ταχύτητας που εμφανίζουν μεταξύ τους οι δύο κινητήριοι τροχοί, επαληθεύοντας την εξίσωση (Εξ. 2.12), η οποία εξαρτάται από το γινόμενο των όρων ( $\tan \delta$ ) και  $(\omega_{w,1} + \omega_{w,2})$ , και συνεπώς την λειτουργία του ηλεκτρονικού διαφορικού συστήματος. Αυτό γίνεται εμφανές και από το Σχήμα 11.12, όπου απεικονίζεται η διαφορά ταχύτητας των κινητήριων τροχών.



Σχήμα 11.5: Γραμμική ταχύτητα κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (Linear traction wheels speed in zoom)

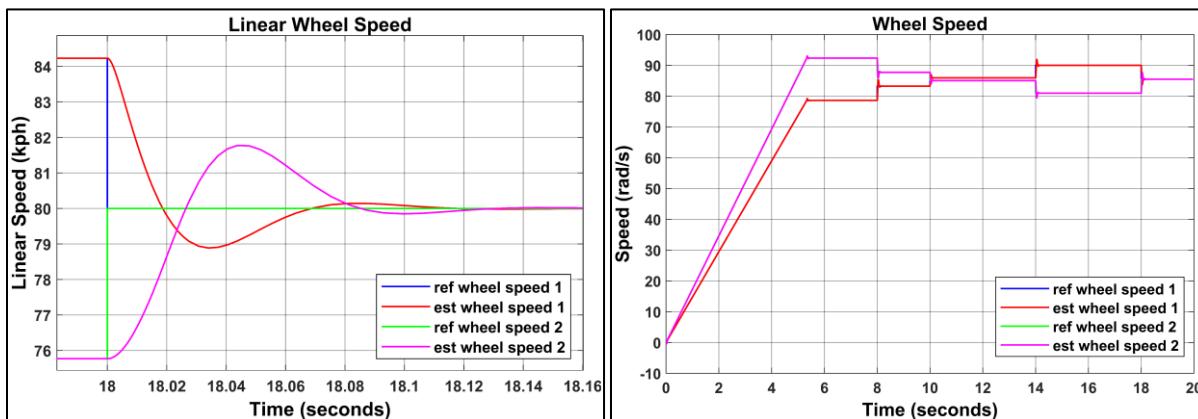


Σχήμα 11.6: Γραμμική ταχύτητα κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (Linear traction wheels speed in zoom)



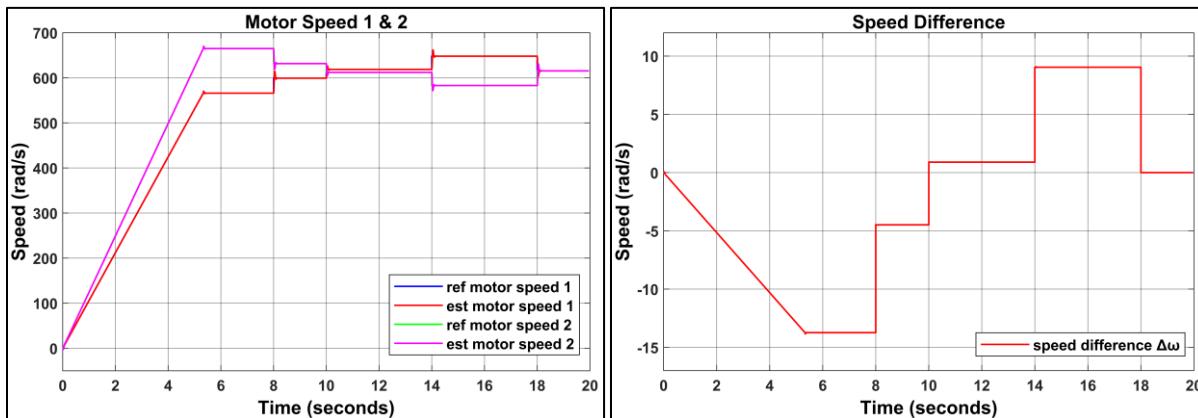
Σχήμα 11.7: Γραμμική ταχύτητα κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (Linear traction wheels speed in zoom)

Σχήμα 11.8: Γραμμική ταχύτητα κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (Linear traction wheels speed in zoom)



Σχήμα 11.9: Γραμμική ταχύτητα κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (Linear traction wheels speed in zoom)

Σχήμα 11.10: Γωνιακή ταχύτητα κινητήριων τροχών (traction wheels speed)



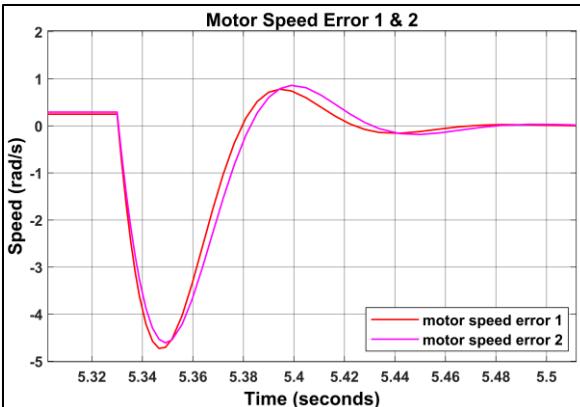
Σχήμα 11.11: Γωνιακή ταχύτητα κινητήρων (motors speed)

Σχήμα 11.12: Διαφορά γωνιακής ταχύτητας των κινητήριων τροχών (traction wheels speed difference)

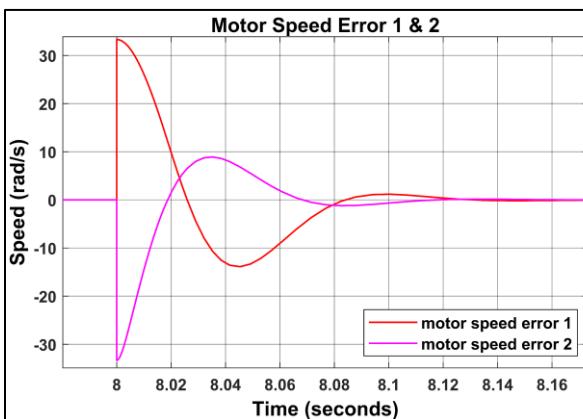
Στα σχήματα: Σχήμα 11.10 και Σχήμα 11.11, απεικονίζεται η γωνιακή ταχύτητα των κινητήριων τροχών και των ηλεκτροκινητήρων τους, αντίστοιχα. Η μορφή των διαγραμμάτων αυτών είναι ίδια με αυτήν της γραμμικής ταχύτητας των κινητήριων τροχών, οπότε δεν αναλύεται περεταίρω.



Σχήμα 11.13: Σφάλμα γωνιακής ταχύτητας κινητήρων (motors speed error)



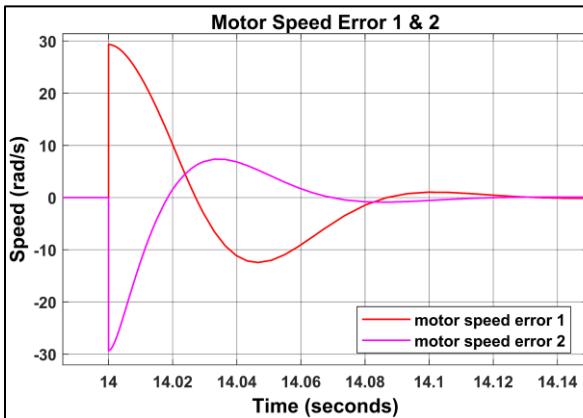
Σχήμα 11.14: Σφάλμα γωνιακής ταχύτητας κινητήρων σε μεγέθυνση (motors speed error in zoom)



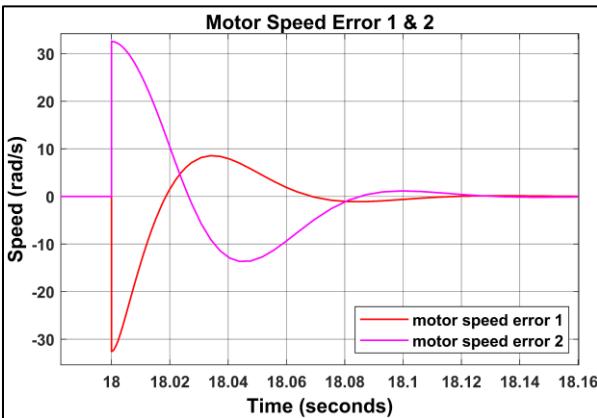
Σχήμα 11.15: Σφάλμα γωνιακής ταχύτητας κινητήρων σε μεγέθυνση (motors speed error in zoom)



Σχήμα 11.16: Σφάλμα γωνιακής ταχύτητας κινητήρων σε μεγέθυνση (motors speed error in zoom)



Σχήμα 11.17: Σφάλμα γωνιακής ταχύτητας κινητήρων σε μεγέθυνση (motors speed error in zoom)



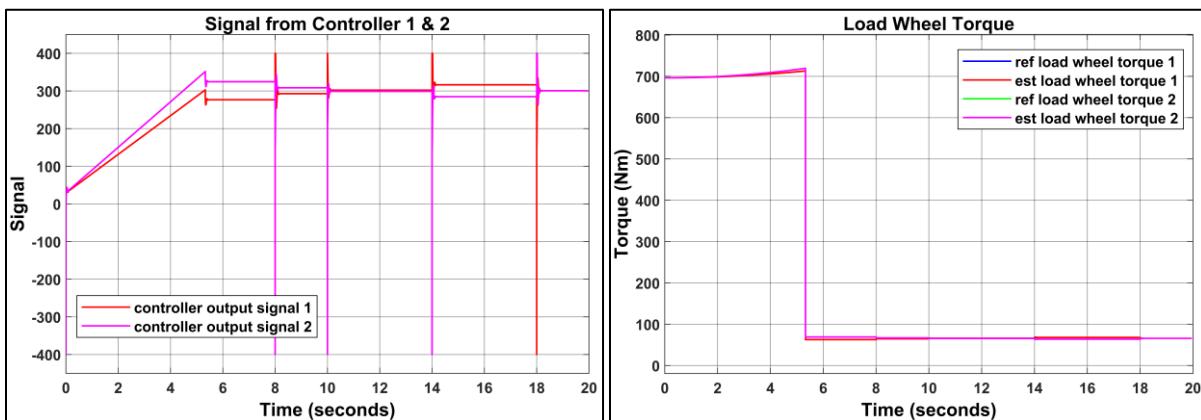
Σχήμα 11.18: Σφάλμα γωνιακής ταχύτητας κινητήρων σε μεγέθυνση (motors speed error in zoom)

Στα σχήματα: Σχήμα 11.13 έως Σχήμα 11.18, φαίνεται το σφάλμα της γωνιακής ταχύτητας των κινητήρων τροχών, δηλαδή η διαφορά της πραγματικής ταχύτητας από την τιμή αναφοράς. Το σφάλμα αυτό είναι πρακτικά μηδενικό, εκτός από τις στιγμές όπου οι μεταβλητές εισόδου του οχήματος μεταβάλλονται,

προκαλώντας αλλαγή στην τιμή αναφοράς της ταχύτητας. Πάλι, όμως, είναι εμφανής, η γρήγορη απόκριση των συστημάτων ελέγχου των τροχών.

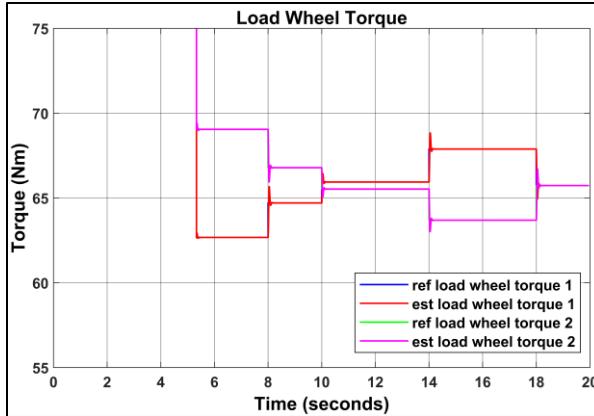
Στο Σχήμα 11.20 απεικονίζεται η πραγματική και η τιμή αναφοράς του φορτίου ροπής, που απαιτείται να υπερνικήσει ο κάθε κινητήριος τροχός. Φαίνεται πως το πραγματικό φορτίο ροπής προσεγγίζει, με ακρίβεια, το φορτίο ροπής αναφοράς, καθώς σχετίζεται άμεσα με το γεγονός πώς η πραγματική ταχύτητα, των τροχών, προσεγγίζει την ταχύτητα αναφοράς τους, αφού το φορτίο ροπής αποτελεί συνάρτηση της ταχύτητας τροχού.

Στη συνέχεια, παρατηρούνται δυο διαστήματα, που συσχετίζονται με τη δυναμική του οχήματος, στα οποία διαφοροποιείται το φορτίο ροπής. Το πρώτο, αφορά το χρονικό διάστημα  $t = 0 \text{ sec}$  έως  $t = 5.33 \text{ sec}$ , όπου το όχημα εκτελεί επιταχυνόμενη κίνηση. Στο διάστημα αυτό ασκούνται στους τροχούς αντίσταση αναρρίχησης, κύλισης, αεροδυναμικής και αδρανειακής φύσεως. Αυτή, όμως, που διαμορφώνει, σχεδόν αποκλειστικά, την μεγάλη τιμή του φορτίου ροπής είναι η αδρανειακή αντίσταση, με αποτέλεσμα ο κάθε τροχός να πρέπει να υπερνικήσει ροπή, τάξης μεγέθους των  $700 \text{ Nm}$ . Το δεύτερο διάστημα, αφορά τη χρονική περίοδο  $t = 5.33 \text{ sec}$  έως  $t = 20 \text{ sec}$ , όπου το όχημα εκτελεί κίνηση με σταθερή ταχύτητα. Στο διάστημα αυτό ασκούνται στους τροχούς μόνο οι αντιστάσεις αναρρίχησης, κύλισης και αεροδυναμικής, με αποτέλεσμα το φορτίο ροπής, κάθε κινητήριου τροχού, να είναι αισθητά μικρότερο από πριν και συγκεκριμένα, της τάξης μεγέθους των  $65 \text{ Nm}$ . Στα σχήματα: Σχήμα 11.21 έως Σχήμα 11.27, αναλύεται περεταίρω το φορτίο ροπής, στα στιγμιότυπα όπου αυτό υφίσταται μεταβολή. Στα σχήματα αυτά, παρατηρείται πως στο χρονικό διάστημα  $t = 0 \text{ sec}$  έως  $t = 18 \text{ sec}$ , όπου το όχημα υπόκειται σε στροφή, το φορτίο ροπής μεταξύ των κινητήριων τροχών διαφέρει. Αυτό είναι λογικό, καθώς όπως αναφέρθηκε, το φορτίο ροπής εξαρτάται από την ταχύτητα του κάθε τροχού. Συνεπώς, ο τροχός της εξωτερικής, εμφανίζει μεγαλύτερες αντιστάσεις από αυτόν της εσωτερικής, κατά τη διάρκεια της κίνησης σε στροφή.

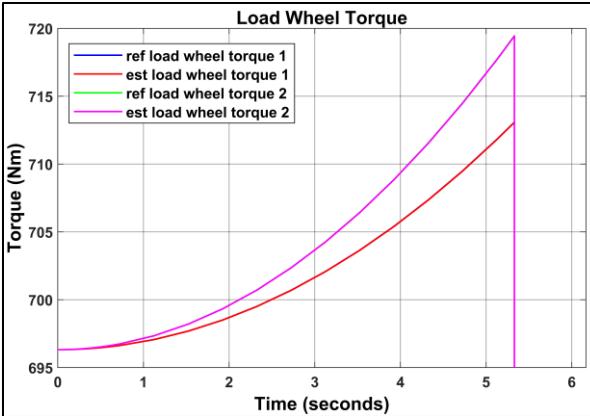


Σχήμα 11.19: Σήμα ελέγχου του συστήματος (system control signal)

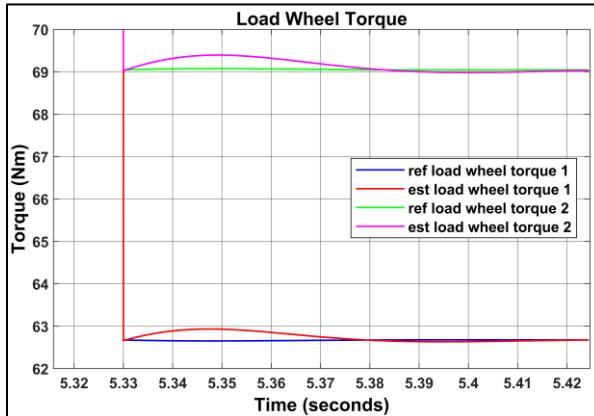
Σχήμα 11.20: Φορτίο ροπής κινητήριων τροχών (load traction wheels torque)



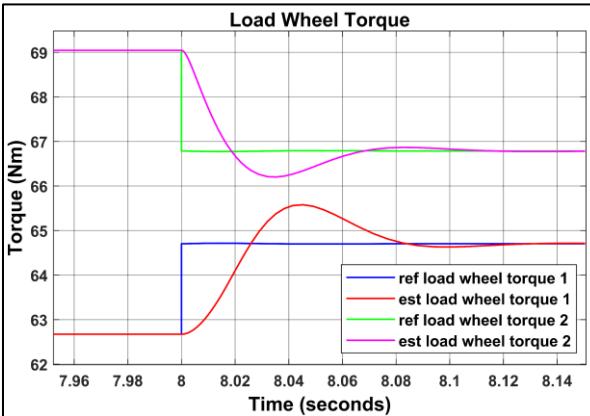
Σχήμα 11.21: Φορτίο ροπής κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (load traction wheels torque in zoom)



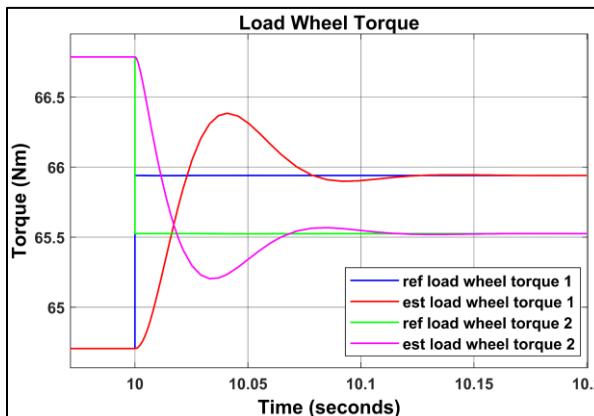
Σχήμα 11.22: Φορτίο ροπής κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (load traction wheels torque in zoom)



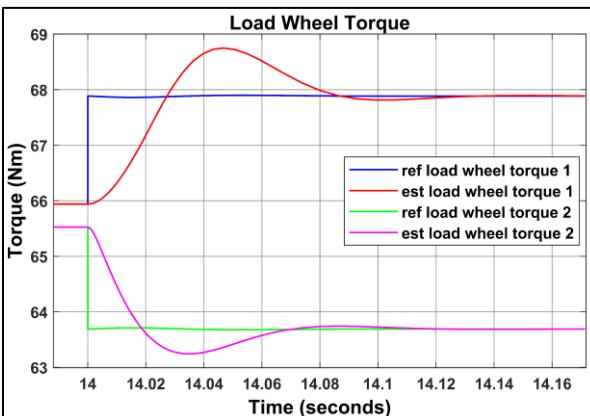
Σχήμα 11.23: Φορτίο ροπής κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (load traction wheels torque in zoom)



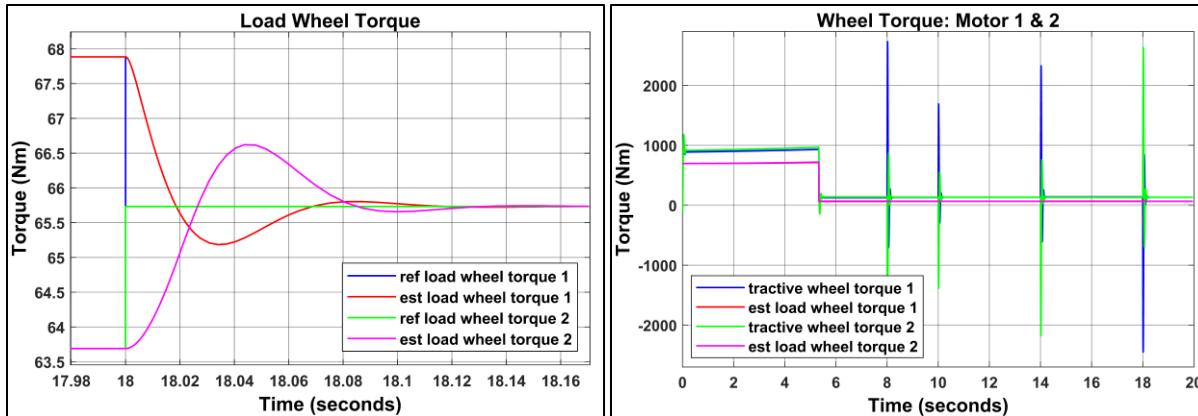
Σχήμα 11.24: Φορτίο ροπής κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (load traction wheels torque in zoom)



Σχήμα 11.25: Φορτίο ροπής κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (load traction wheels torque in zoom)



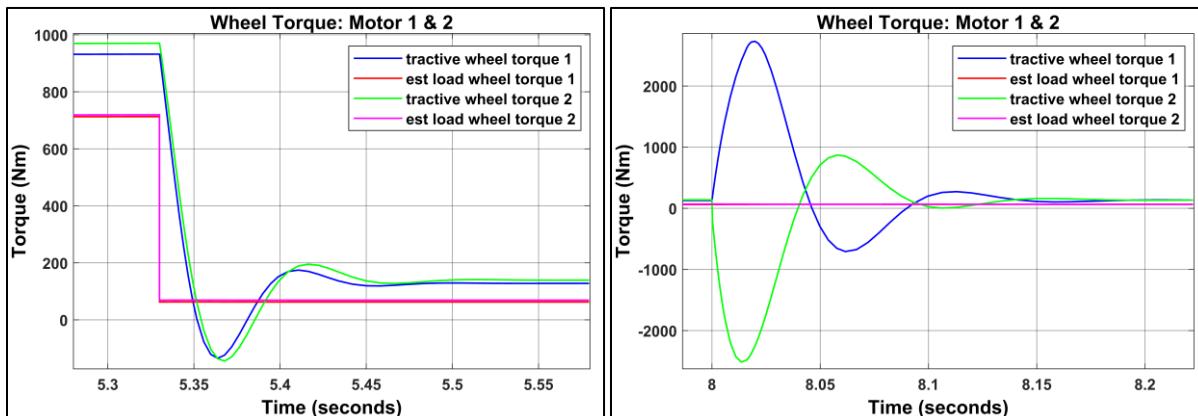
Σχήμα 11.26: Φορτίο ροπής κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (load traction wheels torque in zoom)



Σχήμα 11.27: Φορτίο ροπής κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (load traction wheels torque in zoom)

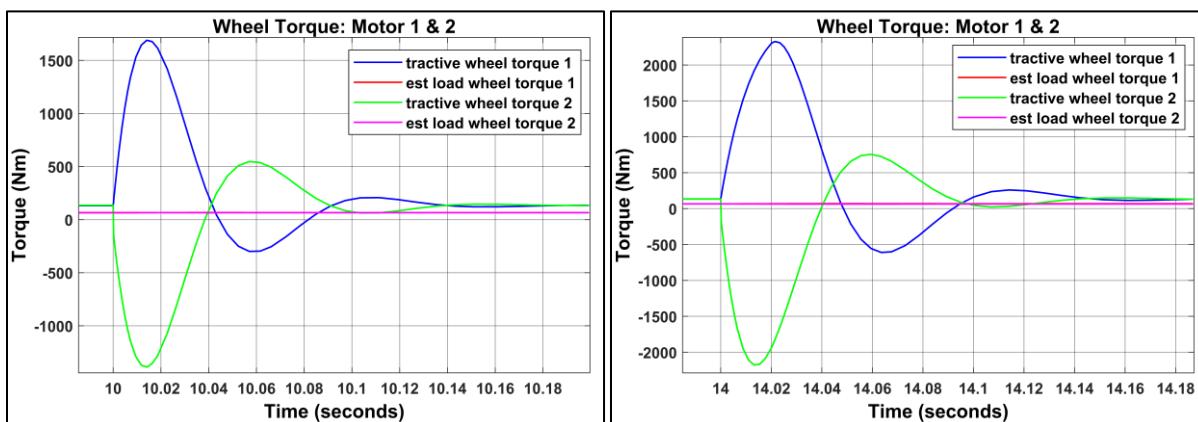
Σχήμα 11.28: Ροπή έλξης κινητήριων τροχών (tractive wheels torque)

Στο Σχήμα 11.28, απεικονίζεται η ροπή έλξης των κινητήριων τροχών, η οποία συγκρίνεται με το πραγματικό φορτίο ροπής τους. Στα σχήματα: Σχήμα 11.29 έως Σχήμα 11.33, αναλύεται περεταίρω η σύγκριση αυτή, στα στιγμιότυπα όπου το όχημα υφίσταται μεταβολές. Φαίνεται, λοιπόν, πως η ροπή έλξης είναι μεγαλύτερη του φορτίου ροπής, καθιστώντας τους κινητήριους τροχούς ικανούς να υπερνικήσουν το φορτίο τους.

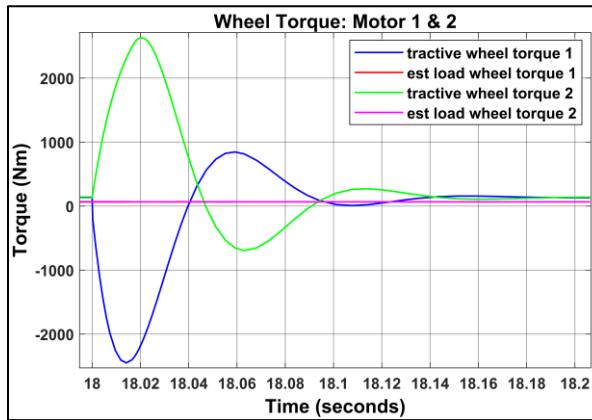


Σχήμα 11.29: Ροπή έλξης κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (tractive wheels torque in zoom)

Σχήμα 11.30: Ροπή έλξης κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (tractive wheels torque in zoom)

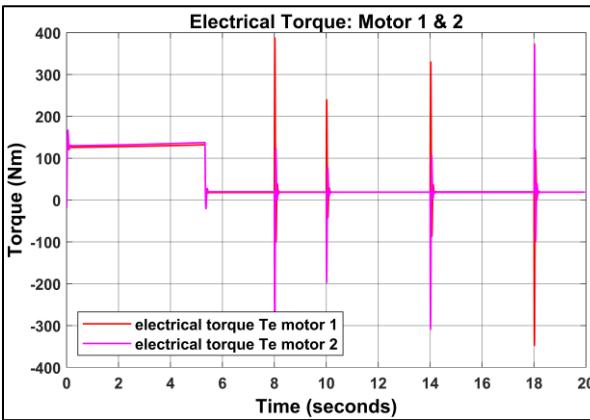


Σχήμα 11.31: Ροπή έλξης κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση  
(tractive wheels torque in zoom)



Σχήμα 11.33: Ροπή έλξης κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση  
(tractive wheels torque in zoom)

Σχήμα 11.32: Ροπή έλξης κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση  
(tractive wheels torque in zoom)



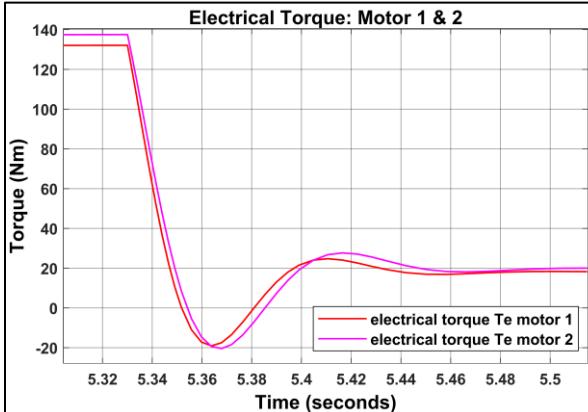
Σχήμα 11.34: Ηλεκτρική ροπή (electrical torque)

Στο Σχήμα 11.34, παρουσιάζεται η ηλεκτρική ροπή που παράγει ο κάθε κινητήρας συνεχούς ρεύματος, ενώ στα σχήματα: Σχήμα 11.35 έως Σχήμα 11.39, αναπαρίστανται στιγμιότυπα, στα οποία η ηλεκτρική ροπή υφίσταται απότομες μεταβολές. Είναι εμφανές, πως στα σημεία αυτά, η δυναμική του οχήματος μεταβάλλεται, με αποτέλεσμα να μεταβάλλεται, στιγμιαία και απότομα η ηλεκτρική ροπή που απαιτείται, από τον κάθε κινητήρα. Αυτό έχει να κάνει με την απότομη μεταβολή του ρεύματος, το οποίο είναι ανάλογο της παραγόμενης ηλεκτρικής ροπής.

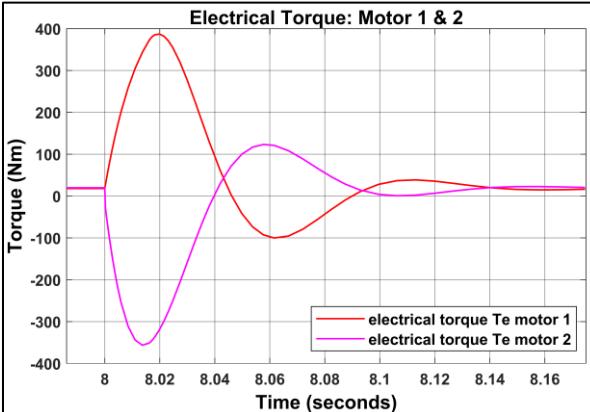
Συγκεκριμένα, σε κάθε στιγμιαία επιβράδυνση ενός τροχού, από τη μεταβολή της γωνίας τιμονιού, η ηλεκτρική ροπή που παράγεται από τον αντίστοιχο κινητήρα του, στιγμιαία ελαττώνεται απότομα, γίνεται αρνητική, ώστε να φρενάρει τον τροχό και στη συνέχεια ξαναγίνεται θετική, για να συνεχίσει ο τροχός να υπερνικάει τις αντιστάσεις του, στη νέα του ταχύτητα περιστροφής. Ομοίως, σε κάθε στιγμιαία επιτάχυνση ενός τροχού, από τη μεταβολή της γωνίας τιμονιού, η ηλεκτρική ροπή που παράγεται από τον αντίστοιχο κινητήρα του, στιγμιαία αυξάνεται απότομα, ώστε να επιταχύνει τον τροχό και στη συνέχεια ελαττώνεται, παραμένοντας θετική, για να συνεχίσει ο τροχός να υπερνικάει τις αντιστάσεις του, στη νέα του ταχύτητα περιστροφής.

Για παράδειγμα, τη χρονική στιγμή  $t = 8 \text{ sec}$ , καθώς το όχημα κινείται με σταθερή ταχύτητα και σε αριστερή στροφή, η γωνία τιμονιού μεταβάλλεται από τις  $15 \text{ deg}$ , στις  $5 \text{ deg}$ . Έτσι, ο αριστερός (1) κινητήριος τροχός, κινούμενος πιο αργά από το δεξιό, αυξάνει την ταχύτητα του, παραμένοντας, όμως, πιο αργός από το δεξιό τροχό. Για αυτό, λοιπόν, όπως απεικονίζεται και στο Σχήμα 11.36, η ηλεκτρική ροπή του αριστερού τροχού, στιγμιαία αυξάνεται, ώστε να επιταχύνει τον αριστερό τροχό στη νέα ταχύτητα περιστροφής του, που ορίζουν η ταχύτητα αναφοράς του οχήματος και η γωνία τιμονιού. Στη συνέχεια, η ηλεκτρική ροπή επανέρχεται σε μια σταθερή θετική τιμή, για να συνεχίσει ο αριστερός τροχός να υπερνικάει τις αντιστάσεις του, στη νέα του ταχύτητα περιστροφής. Αντιθέτως, ο δεξιός (2) κινητήριος τροχός, κινούμενος πιο γρήγορα από τον αριστερό, ελαττώνει την ταχύτητα του, παραμένοντας, όμως, πιο γρήγορος από τον αριστερό τροχό. Για αυτό, λοιπόν, όπως απεικονίζεται και στο Σχήμα 11.36, η ηλεκτρική ροπή του δεξιού τροχού, στιγμιαία ελαττώνεται και γίνεται αρνητική, ώστε να επιβραδύνει τον δεξιό τροχό στη νέα ταχύτητα περιστροφής του, που ορίζουν η ταχύτητα αναφοράς του οχήματος και η γωνία τιμονιού. Στη συνέχεια, η ηλεκτρική ροπή επανέρχεται σε μια σταθερή θετική

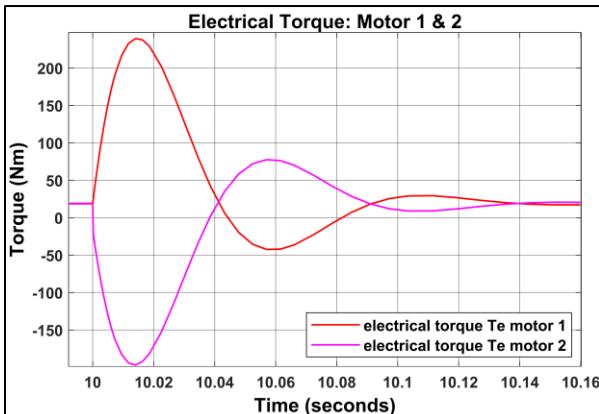
τιμή, για να συνεχίσει ο δεξιός τροχός να υπερνικάει τις αντιστάσεις του, στην νέα του ταχύτητα περιστροφής.



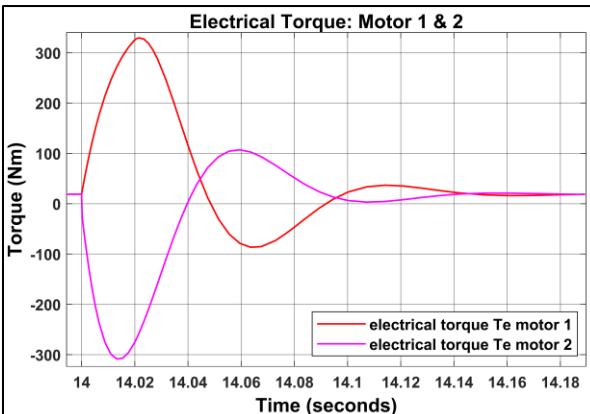
Σχήμα 11.35: Ηλεκτρική ροπή σε μεγέθυνση (electrical torque in zoom)



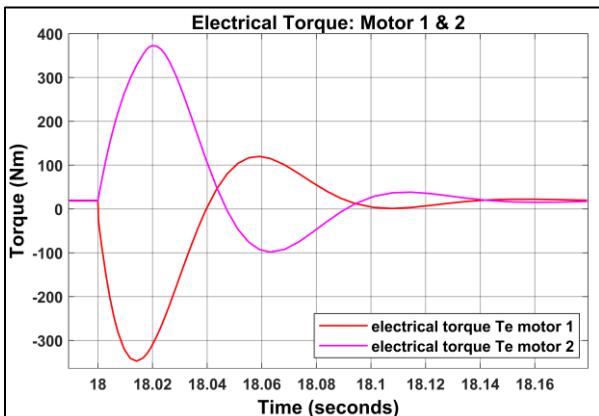
Σχήμα 11.36: Ηλεκτρική ροπή σε μεγέθυνση (electrical torque in zoom)



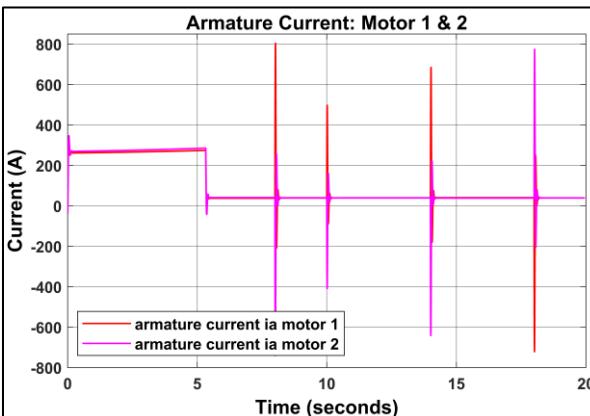
Σχήμα 11.37: Ηλεκτρική ροπή σε μεγέθυνση (electrical torque in zoom)



Σχήμα 11.38: Ηλεκτρική ροπή σε μεγέθυνση (electrical torque in zoom)



Σχήμα 11.39: Ηλεκτρική ροπή σε μεγέθυνση (electrical torque in zoom)

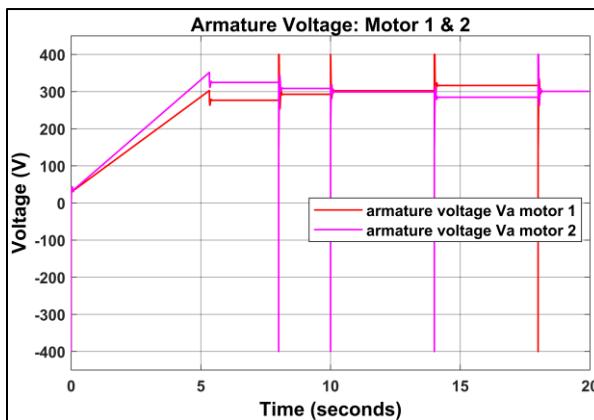


Σχήμα 11.40: Ρεύμα τυλιγμάτων τυμπάνου (armature current)

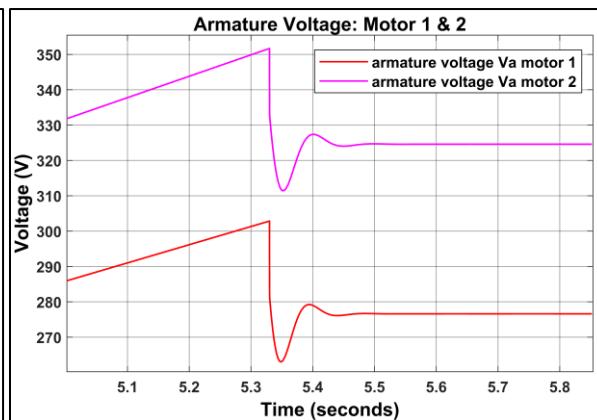
Στο Σχήμα 11.40, απεικονίζεται το ρεύμα των τυλιγμάτων τυμπάνου, των δύο ηλεκτροκινητήρων, το οποίο εμφανίζει τα ίδια χαρακτηριστικά με την ηλεκτρική ροπή, καθώς είναι ανάλογο με αυτήν. Στο χρονικό διάστημα της επιταχυνόμενης κίνησης  $t = 0$  έως  $t = 5.33 \text{ sec}$ , ο κάθε ηλεκτροκινητήρας απαιτεί υψηλό ρεύμα τυμπάνου, καθώς υπάρχει υψηλή απαίτηση ροπής, λόγω της αυξανόμενης ταχύτητας και συνεπώς των αυξανόμενων αντιστάσεων. Ειδικά, όμως, κατά την εκκίνηση, δηλαδή τη χρονική στιγμή  $t = 0$ , εμφανίζεται το ρεύμα εκκίνησης, το οποίο απαιτεί ακόμα μεγαλύτερη τιμή. Το ρεύμα τυμπάνου, και επομένως η απαίτηση για ηλεκτρομαγνητική ροπή, μειώνονται σε μια σταθερή τιμή, όταν η ταχύτητα του οχήματος γίνεται σταθερή.

Αναφορικά με τη τάση τυμπάνου, του σχήματος: Σχήμα 11.41, αυτή εμφανίζει ίδια χαρακτηριστικά με το Σχήμα 11.19, στο οποίο αναπαρίσταται το σήμα εξόδου του ελεγκτή, το οποίο καθορίζει την τάση τυμπάνου. Σε παρόμοια λογική και με την ηλεκτρική ροπή, όταν ο κινητήριος τροχός επιβραδύνει στιγμαία, λόγω μεταβολής γωνίας τιμονιού, τότε η τάση παρουσιάζει στιγμαία, απότομη πτώση, παίρνοντας αρνητική τιμή, με σκοπό την επιβράδυνση του τροχού αυτού, σε μια νέα τιμή ταχύτητας περιστροφής. Αντιθέτως, όταν ο κινητήριος τροχός επιταχύνει στιγμαία, λόγω μεταβολής γωνίας τιμονιού, τότε η τάση παρουσιάζει στιγμαία, απότομη άνοδο, με σκοπό την επιτάχυνση του τροχού αυτού, σε μια νέα τιμή ταχύτητας περιστροφής.

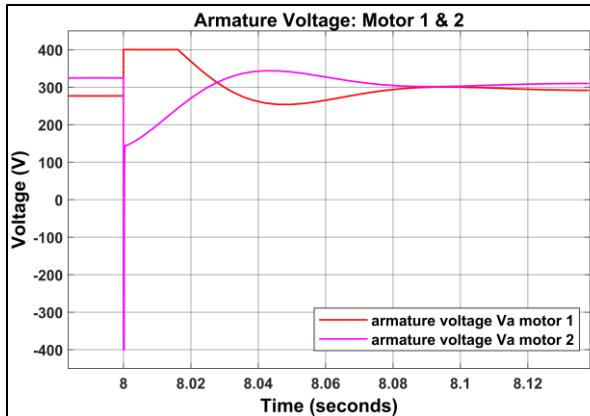
Σε κάθε περίπτωση, ο κινητήριος τροχός που περιστρέφεται στην εξωτερική της στροφής, θα περιστρέφεται πιο γρήγορα από ότι αυτόν της εσωτερικής και συνεπώς θα απαιτεί μεγαλύτερη τάση. Μια σημαντική παρατήρηση, είναι πως η τάση τυμπάνου δεν ξεπερνάει την, κατά απόλυτο, τιμή των  $400 \text{ volt}$ , καθώς έχει συμπεριληφθεί το φαινόμενο του κορεσμού, το οποίο προσομοιώνει μια ρεαλιστική μπαταρία των  $400 \text{ volt}$ , που δεν θα μπορούσε ποτέ να προφέρει τάση μεγαλύτερη από  $400 \text{ volt}$ . Το φαινόμενο του κορεσμού γίνεται πιο εμφανές, στα σχήματα: Σχήμα 11.42 έως Σχήμα 11.46, στα οποία παρουσιάζεται, λεπτομερώς, η τάση τυμπάνου, όπου όταν αυτή φτάνει τις ακραίες τιμές των  $+400 \text{ volt}$  και  $-400 \text{ volt}$ , γίνεται οριζόντια, μέχρι η τιμή της να ξαναπέσει στο αποδεκτό όριο των  $\pm 400 \text{ volt}$ .



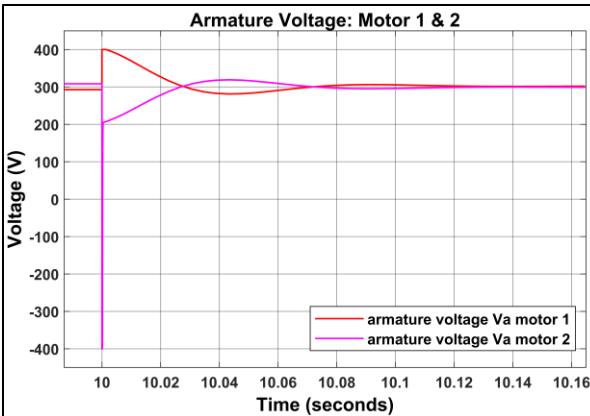
Σχήμα 11.41: Τάση τυμπάνου (armature voltage)



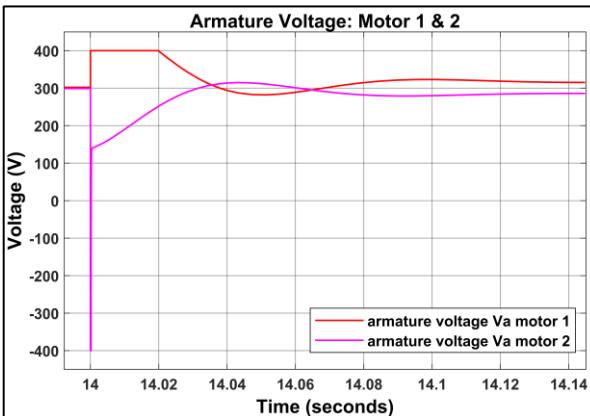
Σχήμα 11.42: Τάση τυμπάνου σε μεγέθυνση (armature voltage in zoom)



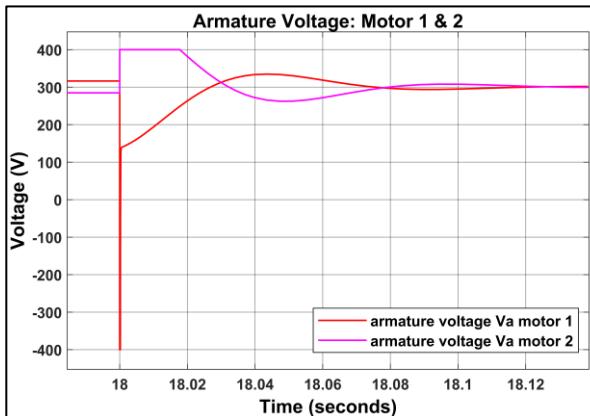
Σχήμα 11.43: Τάση τυμπάνου σε μεγέθυνση (armature voltage in zoom)



Σχήμα 11.44: Τάση τυμπάνου σε μεγέθυνση (armature voltage in zoom)

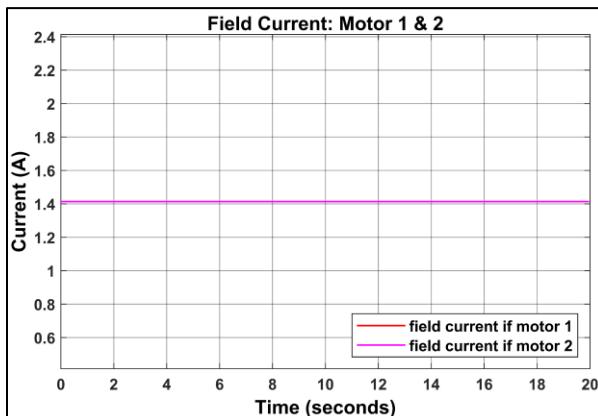


Σχήμα 11.45: Τάση τυμπάνου σε μεγέθυνση (armature voltage in zoom)

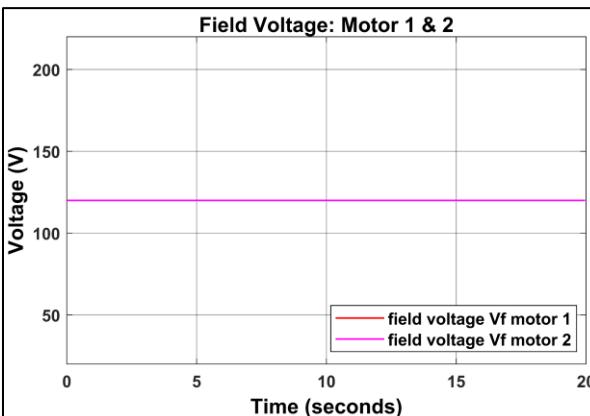


Σχήμα 11.46: Τάση τυμπάνου σε μεγέθυνση (armature voltage in zoom)

Τέλος, στα σχήματα: Σχήμα 11.47 και Σχήμα 11.48, παρουσιάζονται το ρεύμα και η τάση του πεδίου του κινητήρα, τα οποία εμφανίζουν σταθερή τιμή, καθώς η διέγερση του κινητήρα είναι σταθερή και ανεξάρτητη των μεταβολών του οχήματος.



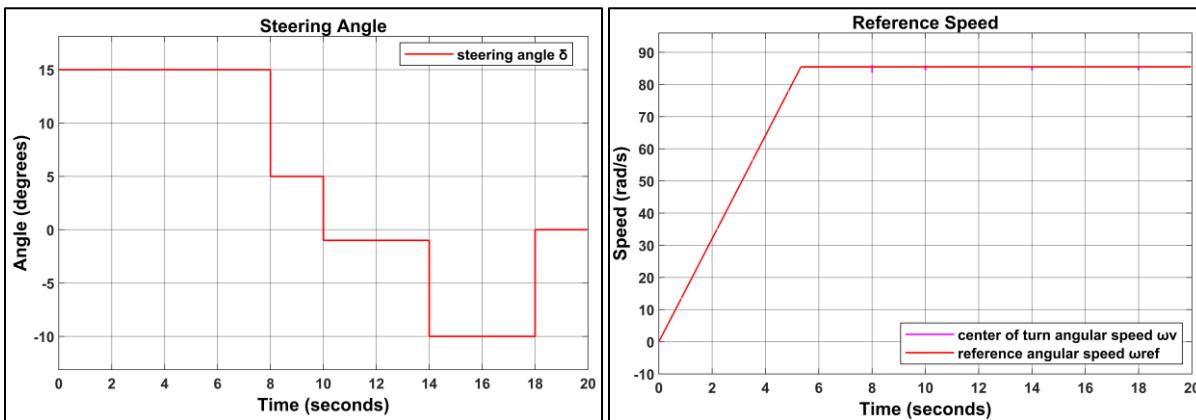
Σχήμα 11.47: Ρεύμα τυλιγμάτων πεδίου (field current)



Σχήμα 11.48: Τάση πεδίου (field voltage)

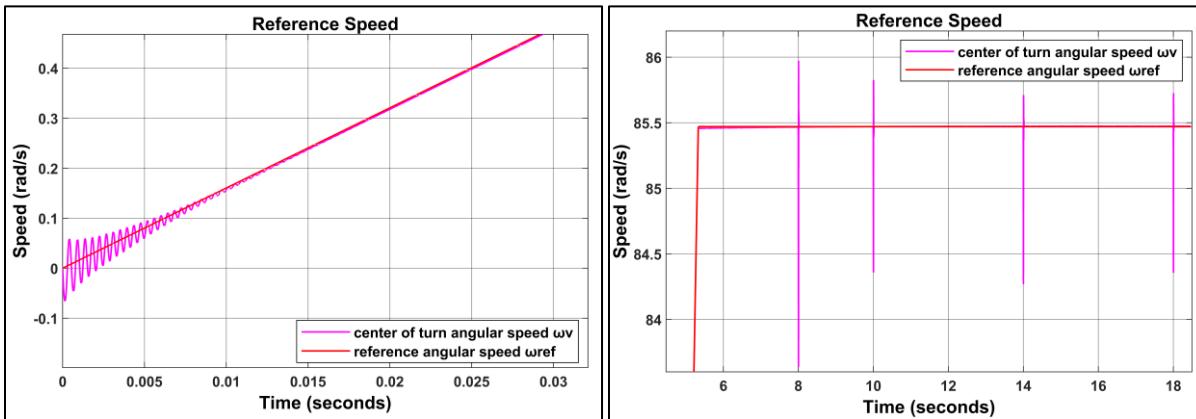
**11.2 Μοντέλο 2 - Σενάριο 5: Στροφές αριστερές και δεξιές με ανωφέρεια 2% και επιταχυνόμενη κίνηση μέχρι την σταθερή ταχύτητα των 80km/h (Counter-clockwise and clockwise curved road with 2% slope and accelerated motion up to the constant speed of 80 km/h)**

Το σενάριο αυτό πρόκειται για ένα συνδυασμό όλων των προηγούμενων σεναρίων, περιέχοντας σταθερή και επιταχυνόμενη κίνηση, αριστερές και δεξιές στροφές, καθώς και ανωφέρεια. Στα σχήματα: Σχήμα 11.49 και Σχήμα 11.50, παρουσιάζονται τα δεδομένα εισόδου του οχήματος, δηλαδή η γωνία τιμονιού και η ταχύτητα αναφοράς του οχήματος, η οποία συγκρίνεται με την πραγματική ταχύτητα του οχήματος (του οπίσθιου φανταστικού τροχού) ως προς το κέντρο στροφής. Στα σχήματα: Σχήμα 11.51 και Σχήμα 11.52 φαίνονται οι στιγμιαίες μεταβολές που υφίσταται η ταχύτητα αναφοράς, τις χρονικές στιγμές  $t = 0, 5.33, 8, 10, 14, 18 \text{ sec}$ , όπου μεταβάλλεται η κίνηση του οχήματος ή η γωνία τιμονιού.



Σχήμα 11.49: Γωνία τιμονιού (steering angle)

Σχήμα 11.50: Γωνιακή ταχύτητα αναφοράς (reference speed)



Σχήμα 11.51: Γωνιακή ταχύτητα αναφοράς σε μεγέθυνση (reference speed in zoom)

Σχήμα 11.52: Γωνιακή ταχύτητα αναφοράς σε μεγέθυνση (reference speed in zoom)

Στο Σχήμα 11.53, φαίνεται η πραγματική γραμμική ταχύτητα κάθε κινητήριου οπίσθιου τροχού, καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης του σεναρίου, η οποία συγκρίνεται με την αντίστοιχη γραμμική ταχύτητα αναφοράς του. Η σύγκριση αυτή, μπορεί να διεξαχθεί καλύτερα από τα σχήματα: Σχήμα 11.54 έως Σχήμα 11.58, στα οποία έχει γίνει μεγέθυνση της γραμμικής ταχύτητας κάθε κινητήριου τροχού τη χρονική

στιγμή  $t = 5.33 \text{ sec}$ , όπου η ταχύτητα οχήματος σταθεροποιείται μετά την επιταχυνόμενη κίνηση του και τις χρονικές στιγμές  $t = 8, 10, 14, 18 \text{ sec}$ , όπου μεταβάλλεται η γωνία τιμονιού.

Είναι φανερό πως η πραγματική γραμμική ταχύτητα, κάθε κινητήριου τροχού, ακολουθεί με μεγάλη ακρίβεια την αντίστοιχη ταχύτητα αναφοράς του, ενώ τις χρονικές στιγμές που η ταχύτητα αναφοράς αλλάζει, η πραγματική ταχύτητα προσαρμόζεται ταχύτατα στην νέα τιμή αναφοράς της, εμφανίζοντας καθυστέρηση, μόνο ένα εκατοστό του δευτερολέπτου, γεγονός που αποδεικνύει την γρήγορη απόκριση της πραγματικής ταχύτητας των τροχών, σε οποιαδήποτε μεταβολή των εισόδων του.

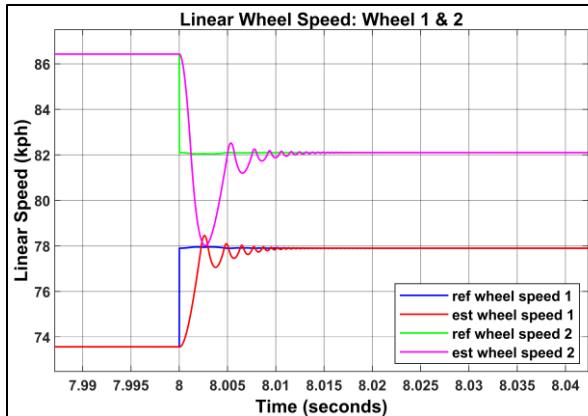
Λόγω ύπαρξης μη μηδενικής γωνίας τιμονιού κατά το χρονικό διάστημα  $t = 0 \text{ sec}$  έως  $t = 18 \text{ sec}$ , οι κινητήριοι τροχοί, δεν περιστρέφονται με την ίδια ταχύτητα. Συγκεκριμένα, το χρονικό διάστημα  $t = 0 \text{ sec}$  έως  $t = 10 \text{ sec}$ , σύμφωνα με το Σχήμα 11.49, η γωνία τιμονιού είναι θετική, οπότε το όχημα υπόκειται σε αριστερή στροφή. Επομένως, ο αριστερός κινητήριος τροχός, ο τροχός 1, θα βρίσκεται εσωτερικά της στροφής με αποτέλεσμα να κινείται πιο αργά, σε σύγκριση με τον δεξιό κινητήριο τροχό, το τροχό 2, ο οποίος θα βρίσκεται εξωτερικά της στροφής. Για αυτό, λοιπόν, στα σχήματα: Σχήμα 11.53 έως Σχήμα 11.58, κατά το χρονικό διάστημα αυτό, φαίνεται η κόκκινη καμπύλη, η καμπύλη του αριστερού κινητήριου τροχού, να λαμβάνει χαμηλότερες τιμές από τη μωβ καμπύλη, τη καμπύλη του δεξιού κινητήριου τροχού. Αντιθέτως, κατά το χρονικό διάστημα  $t = 10 \text{ sec}$  έως  $t = 18 \text{ sec}$ , σύμφωνα με το Σχήμα 11.49, η γωνία τιμονιού είναι αρνητική, οπότε το όχημα υπόκειται σε δεξιά στροφή. Έτσι, ο αριστερός κινητήριος τροχός, ο τροχός 1, θα βρίσκεται εξωτερικά της στροφής με αποτέλεσμα να κινείται πιο γρήγορα, σε σύγκριση με τον δεξιό κινητήριο τροχό, το τροχό 2, ο οποίος θα βρίσκεται εσωτερικά της στροφής. Για αυτό, λοιπόν, στα σχήματα: Σχήμα 11.53 έως Σχήμα 11.58, κατά το χρονικό διάστημα αυτό, φαίνεται η κόκκινη καμπύλη, η καμπύλη του αριστερού κινητήριου τροχού, να λαμβάνει υψηλότερες τιμές από τη μωβ καμπύλη, τη καμπύλη του δεξιού κινητήριου τροχού. Η ανωτέρω παρατήρηση επιβεβαιώνει, τη σωστή λειτουργία του ηλεκτρονικού διαφορικού.



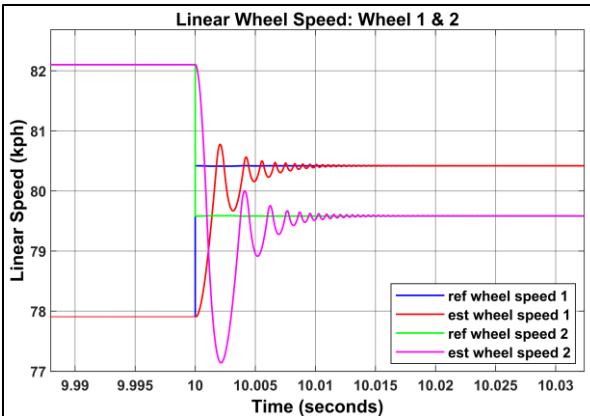
Σχήμα 11.53: Γραμμική ταχύτητα κινητήριων τροχών (Linear traction wheels speed)



Σχήμα 11.54: Γραμμική ταχύτητα κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (Linear traction wheels speed in zoom)



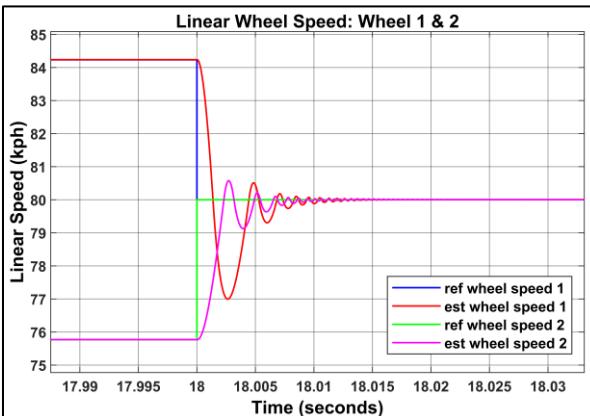
Σχήμα 11.55: Γραμμική ταχύτητα κινητήριων τροχών (Linear traction wheels speed)



Σχήμα 11.56: Γραμμική ταχύτητα κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (Linear traction wheels speed in zoom)

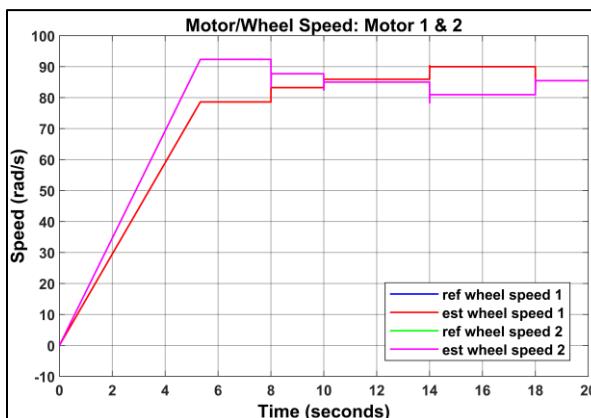


Σχήμα 11.57: Γραμμική ταχύτητα κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (Linear traction wheels speed in zoom)

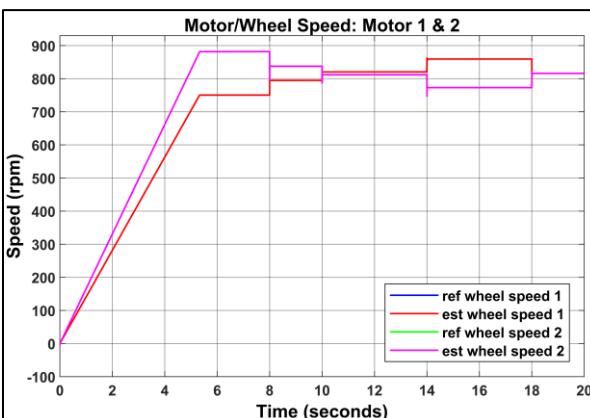


Σχήμα 11.58: Γραμμική ταχύτητα κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (Linear traction wheels speed in zoom)

Στα σχήματα: Σχήμα 11.59 και Σχήμα 11.60, απεικονίζεται η γωνιακή ταχύτητα των κινητήριων τροχών και των ηλεκτροκινητήρων τους, αντίστοιχα. Η μορφή των διαγραμμάτων αυτών είναι ίδια με αυτήν της γραμμικής ταχύτητας των κινητήρων τροχών, οπότε δεν αναλύεται περεταίρω.

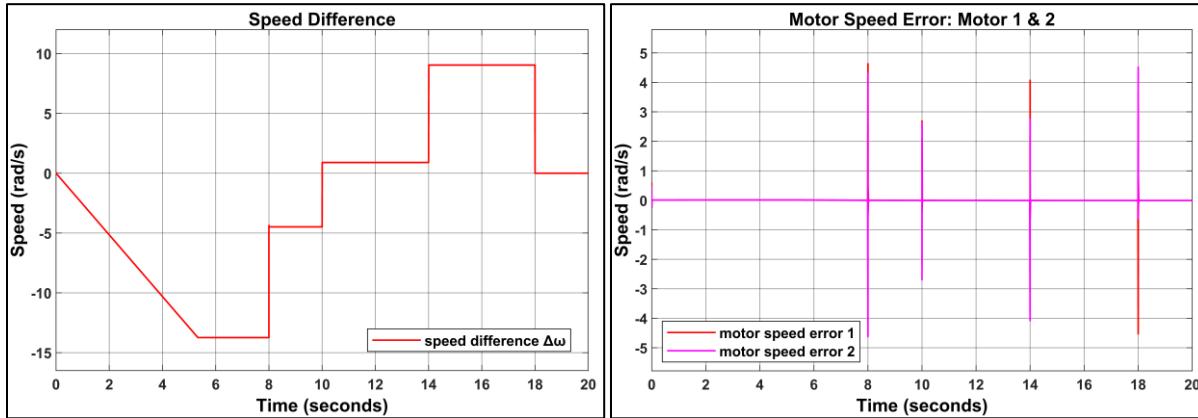


Σχήμα 11.59: Γωνιακή ταχύτητα κινητήρων/κινητήριων τροχών (motors/traction wheels speed)



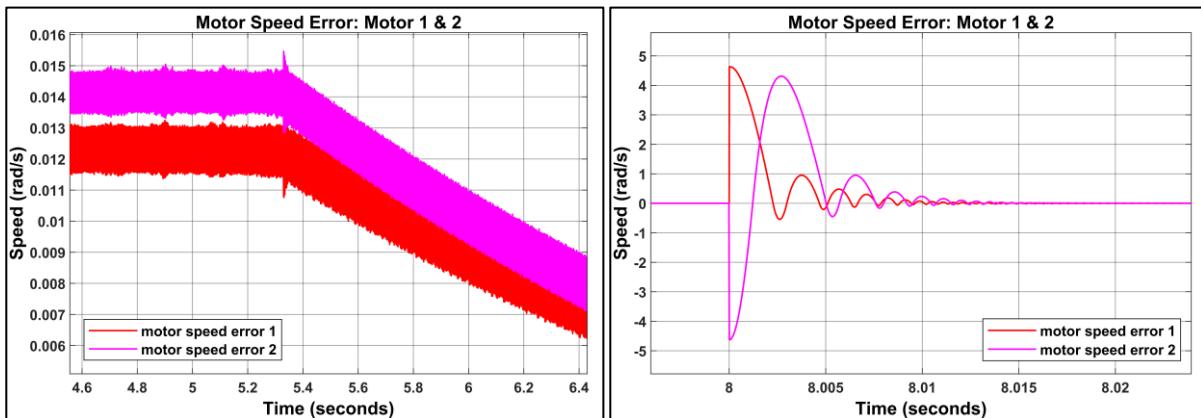
Σχήμα 11.60: Γωνιακή ταχύτητα κινητήρων/κινητήριων τροχών (motors/traction wheels speed)

Επίσης, παρατηρείται, πως όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα του οχήματος, αλλά και η απόλυτη τιμή της γωνίας τιμονιού, τόσο μεγαλύτερη είναι και η διαφορά ταχύτητας που εμφανίζουν μεταξύ τους οι δύο κινητήριοι τροχοί, επαληθεύοντας την εξίσωση (Εξ. 2.12), η οποία εξαρτάται από το γινόμενο των όρων ( $tan\delta$ ) και  $(\omega_{w,1} + \omega_{w,2})$ , και συνεπώς την λειτουργία του ηλεκτρονικού διαφορικού συστήματος. Αυτό γίνεται εμφανές και από το Σχήμα 11.61, όπου απεικονίζεται η διαφορά ταχύτητας των κινητήριων τροχών.



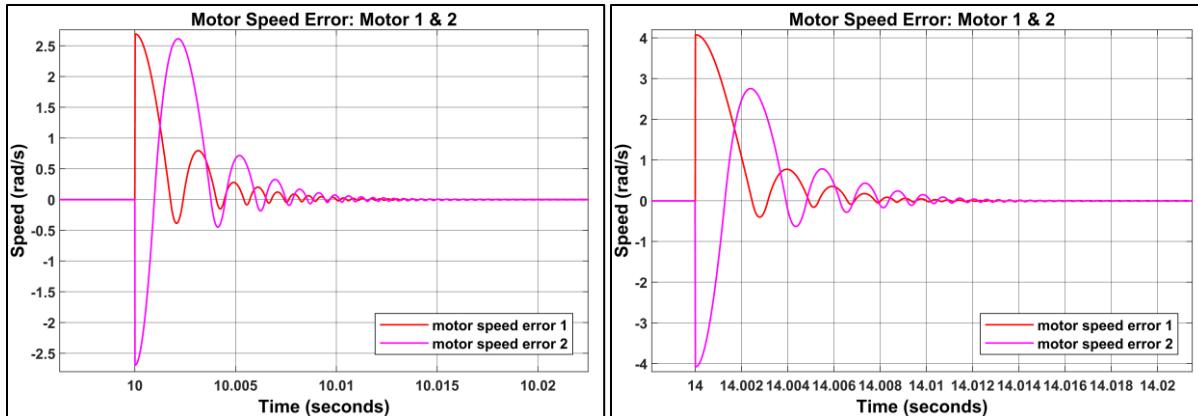
Σχήμα 11.61: Διαφορά γωνιακής ταχύτητας των κινητήριων τροχών (traction wheels speed difference)

Σχήμα 11.62: Σφάλμα γωνιακής ταχύτητας κινητήρων (motors speed error)



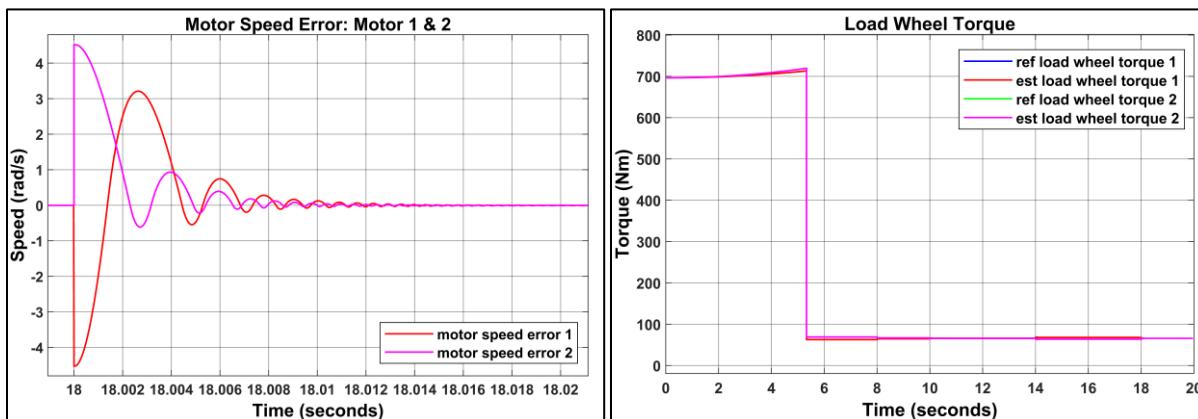
Σχήμα 11.63: Σφάλμα γωνιακής ταχύτητας κινητήρων σε μεγέθυνση (motors speed error in zoom)

Σχήμα 11.64: Σφάλμα γωνιακής ταχύτητας κινητήρων σε μεγέθυνση (motors speed error in zoom)



Σχήμα 11.65: Σφάλμα γωνιακής ταχύτητας κινητήρων σε μεγέθυνση (motors speed error in zoom)

Σχήμα 11.66: Σφάλμα γωνιακής ταχύτητας κινητήρων σε μεγέθυνση (motors speed error in zoom)



Σχήμα 11.67: Σφάλμα γωνιακής ταχύτητας κινητήρων σε μεγέθυνση (motors speed error in zoom)

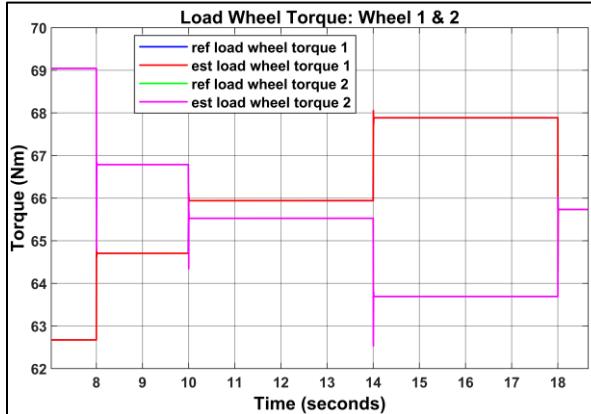
Σχήμα 11.68: Φορτίο ροπής κινητήριων τροχών (load traction wheels torque)

Στα σχήματα: Σχήμα 11.62 έως Σχήμα 11.67, φαίνεται το σφάλμα της γωνιακής ταχύτητας των κινητήρων τροχών, δηλαδή η διαφορά της πραγματικής ταχύτητας από την τιμή αναφοράς. Το σφάλμα αυτό είναι πρακτικά μηδενικό, εκτός από τις στιγμές όπου οι μεταβλητές εισόδου του οχήματος μεταβάλλονται, προκαλώντας αλλαγή στην τιμή αναφοράς της ταχύτητας. Πάλι, όμως, είναι εμφανής, η γρήγορη απόκριση των συστημάτων ελέγχου των τροχών.

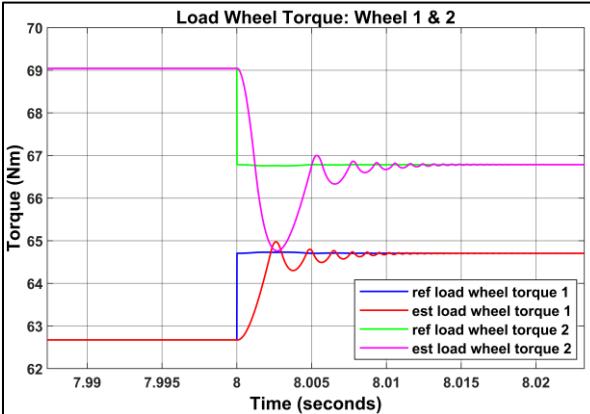
Στο Σχήμα 11.68 απεικονίζεται η πραγματική και η τιμή αναφοράς του φορτίου ροπής, που απαιτείται να υπερνικήσει ο κάθε κινητήριος τροχός. Φαίνεται πως το πραγματικό φορτίο ροπής προσεγγίζει, με ακρίβεια, το φορτίο ροπής αναφοράς, καθώς σχετίζεται άμεσα με το γεγονός πώς η πραγματική ταχύτητα, των τροχών, προσεγγίζει την ταχύτητα αναφοράς τους, αφού το φορτίο ροπής αποτελεί συνάρτηση της ταχύτητας τροχού.

Στη συνέχεια, παρατηρούνται δυο διαστήματα, που συσχετίζονται με τη δυναμική του οχήματος, στα οποία διαφοροποιείται το φορτίο ροπής. Το πρώτο, αφορά το χρονικό διάστημα  $t = 0 \text{ sec}$  έως  $t = 5.33 \text{ sec}$ , όπου το όχημα εκτελεί επιταχυνόμενη κίνηση. Στο διάστημα αυτό ασκούνται στους τροχούς αντίσταση αναρρίχησης, κύλισης, αεροδυναμικής και αδρανειακής φύσεως. Αυτή, όμως, που διαμορφώνει, σχεδόν αποκλειστικά, την μεγάλη τιμή του φορτίου ροπής είναι η αδρανειακή αντίσταση, με αποτέλεσμα ο κάθε τροχός να πρέπει να υπερνικήσει ροπή, τάξης μεγέθους των  $700 \text{ Nm}$ . Το δεύτερο διάστημα, αφορά τη χρονική περίοδο  $t = 5.33 \text{ sec}$  έως  $t = 20 \text{ sec}$ , όπου το όχημα εκτελεί κίνηση με

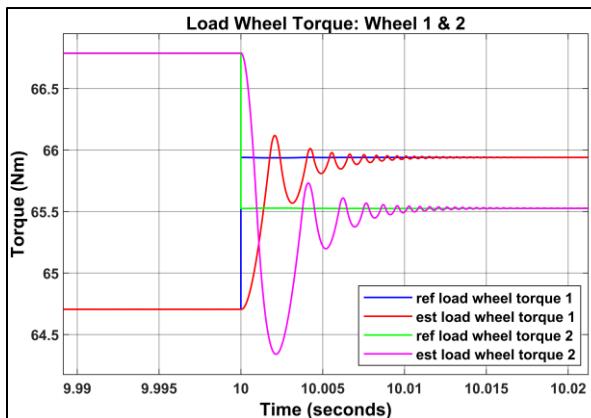
σταθερή ταχύτητα. Στο διάστημα αυτό ασκούνται στους τροχούς μόνο οι αντιστάσεις αναρρίχησης, κύλισης και αεροδυναμικής, με αποτέλεσμα το φορτίο ροπής, κάθε κινητήριου τροχού, να είναι αισθητά μικρότερο από πριν και συγκεκριμένα, της τάξης μεγέθους των  $65\text{Nm}$ . Στα σχήματα: Σχήμα 11.69 έως Σχήμα 11.73, αναλύεται περεταίρω το φορτίο ροπής, στα στιγμιότυπα όπου αυτό υφίσταται μεταβολή. Στα σχήματα αυτά, παρατηρείται πως στο χρονικό διάστημα  $t=0\text{ sec}$  έως  $t=18\text{ sec}$ , όπου το όχημα υπόκειται σε στροφή, το φορτίο ροπής μεταξύ των κινητήριων τροχών διαφέρει. Αυτό είναι λογικό, καθώς όπως αναφέρθηκε, το φορτίο ροπής εξαρτάται από την ταχύτητα του κάθε τροχού. Συνεπώς, ο τροχός της εξωτερικής, εμφανίζει μεγαλύτερες αντιστάσεις από αυτόν της εσωτερικής, κατά τη διάρκεια της κίνησης σε στροφή.



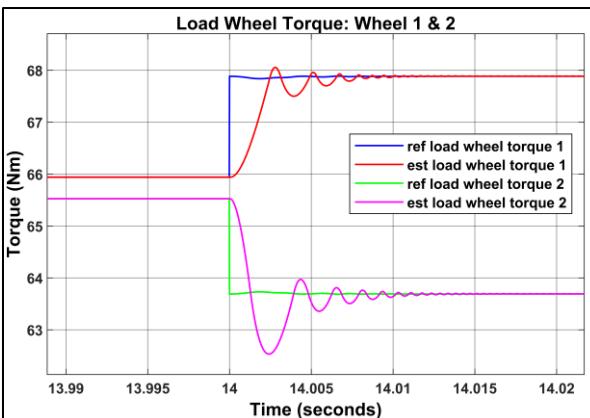
Σχήμα 11.69: Φορτίο ροπής κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (load traction wheels torque in zoom)



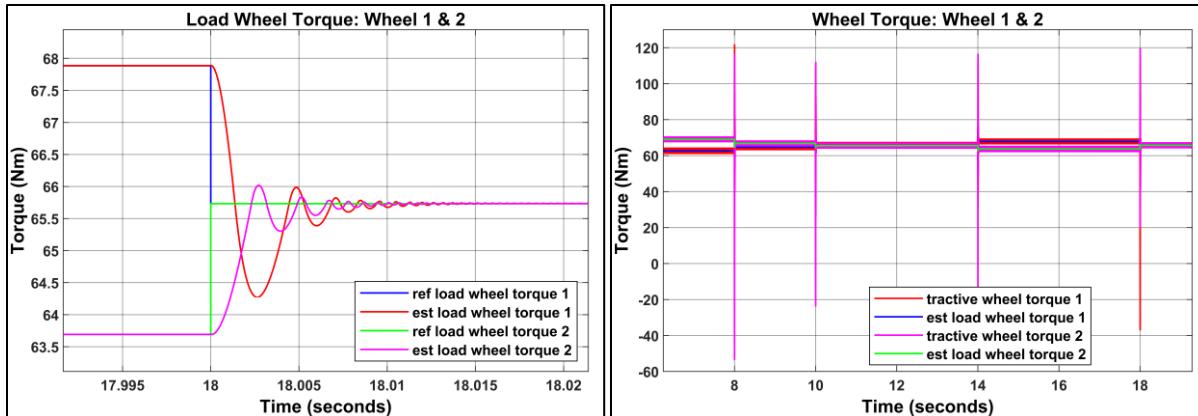
Σχήμα 11.70: Φορτίο ροπής κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (load traction wheels torque in zoom)



Σχήμα 11.71: Φορτίο ροπής κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (load traction wheels torque in zoom)



Σχήμα 11.72: Φορτίο ροπής κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (load traction wheels torque in zoom)



Σχήμα 11.73: Φορτίο ροπής κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (load traction wheels torque in zoom)

Σχήμα 11.74: Ροπή έλξης κινητήριων τροχών (tractive wheels torque)

Στο Σχήμα 11.74, απεικονίζεται η ροπή έλξης των κινητήριων τροχών, η οποία συγκρίνεται με το πραγματικό φορτίο ροπής τους. Στα σχήματα: Σχήμα 11.75 έως Σχήμα 11.79, αναλύεται περεταίρω η σύγκριση αυτή, στα στιγμιότυπα όπου το όχημα υφίσταται μεταβολές. Είναι εμφανές, πως στα σημεία αυτά, η δυναμική του οχήματος μεταβάλλεται, με αποτέλεσμα να μεταβάλλεται, στιγμιαία και απότομα η ροπή έλξης που απαιτείται, από τον κάθε κινητήριο τροχό.

Συγκεκριμένα, σε κάθε στιγμιαία επιβράδυνση ενός τροχού, από τη μεταβολή της γωνίας τιμονιού, η ηλεκτρική ροπή, που παράγεται από τον αντίστοιχο κινητήρα του, και επομένως η ροπή έλξης, στιγμιαία ελαττώνεται απότομα, γίνεται αρνητική, ώστε να φρενάρει τον τροχό και στη συνέχεια ξαναγίνεται θετική, για να συνεχίσει ο τροχός να υπερνικάει τις αντιστάσεις του, στη νέα του ταχύτητα περιστροφής. Ομοίως, σε κάθε στιγμιαία επιτάχυνση ενός τροχού, από τη μεταβολή της γωνίας τιμονιού, η ηλεκτρική ροπή που παράγεται από τον αντίστοιχο κινητήρα του, και επομένως η ροπή έλξης, στιγμιαία αυξάνεται απότομα, ώστε να επιταχύνει τον τροχό και στη συνέχεια ελαττώνεται, παραμένοντας θετική, για να συνεχίσει ο τροχός να υπερνικάει τις αντιστάσεις του, στη νέα του ταχύτητα περιστροφής.

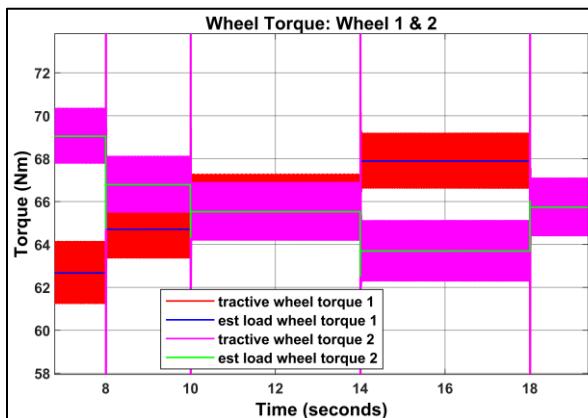
Για παράδειγμα, τη χρονική στιγμή  $t = 10 \text{ sec}$ , καθώς το όχημα κινείται με σταθερή ταχύτητα σε αριστερή στροφή, η γωνία τιμονιού μεταβάλλεται από τις  $5 \text{ deg}$ , στις  $-1 \text{ deg}$ , μεταβαίνοντας σε δεξιά στροφή.

Λίγο πριν τη μεταβολή γωνίας του τιμονιού, ο αριστερός (1) κινητήριος τροχός βρίσκεται εσωτερικά της στροφής και επομένως κινείται πιο αργά από το δεξιό (2) κινητήριο τροχό, ο οποίος βρίσκεται εξωτερικά της στροφής.

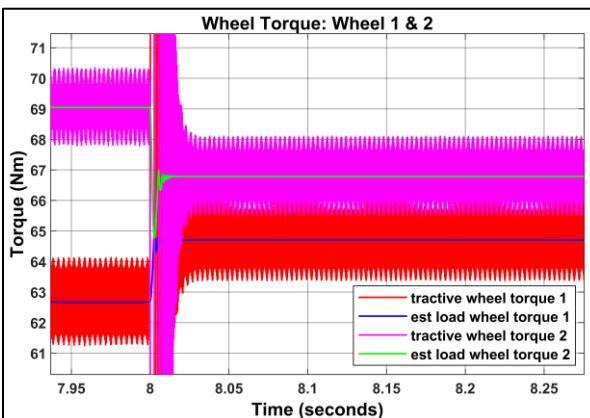
Μετά την μεταβολή της γωνίας τιμονιού, ο αριστερός κινητήριος τροχός, αυξάνει την ταχύτητα του, κινούμενος, πλέον, πιο γρήγορα από το δεξιό τροχό. Για αυτό, λοιπόν, όπως απεικονίζεται και στο στιγμιότυπο των  $t = 10 \text{ sec}$ , στο Σχήμα 11.77, η ροπή έλξης του αριστερού τροχού (κόκκινη καμπύλη), στιγμιαία αυξάνεται απότομα, ώστε να επιταχύνει τον αριστερό κινητήριο τροχό στη νέα ταχύτητα περιστροφής του, που ορίζουν η ταχύτητα αναφοράς του οχήματος και η γωνία τιμονιού. Στη συνέχεια, η ροπή έλξης επανέρχεται σε μια σταθερή θετική τιμή, για να συνεχίσει ο αριστερός τροχός να υπερνικάει τις αντιστάσεις του, στη νέα του ταχύτητα περιστροφής. Επειδή η νέα του ταχύτητα περιστροφής είναι,

πλέον, μεγαλύτερη από πριν, τότε και η ροπής έλξης του θα είναι μεγαλύτερη, γεγονός το οποίο γίνεται εμφανές στο Σχήμα 11.77, όπου η κόκκινη καμπύλη ροπής έλξης αυξάνεται κατά προσέγγιση  $1 \text{ Nm}$ .

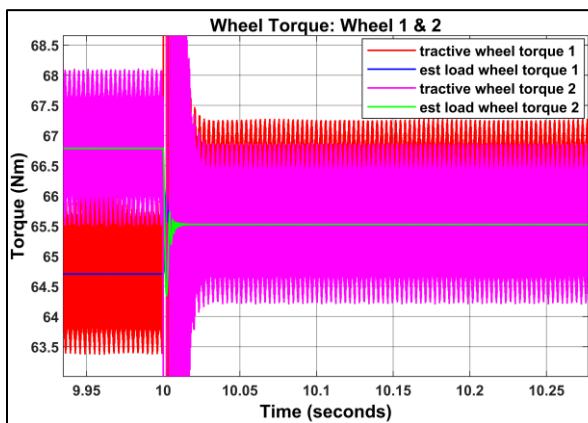
Αντιστοίχως, μετά την μεταβολή της γωνίας τιμονιού, ο δεξιός κινητήριος τροχός, ελαττώνει την ταχύτητα του, κινούμενος, πλέον, πιο αργά από τον αριστερό τροχό. Για αυτό, λοιπόν, όπως απεικονίζεται και στο στιγμιότυπο των  $t = 10 \text{ sec}$ , στο Σχήμα 11.77, η ροπή έλξης του δεξιού τροχού (μωβ καμπύλη), στιγμιαία ελαττώνεται απότομα, ώστε να επιβραδύνει τον δεξιό κινητήριο τροχό στη νέα ταχύτητα περιστροφής του, που ορίζουν η ταχύτητα αναφοράς του οχήματος και η γωνία τιμονιού. Στη συνέχεια, η ροπή έλξης επανέρχεται σε μια σταθερή θετική τιμή, για να συνεχίσει ο δεξιός τροχός να υπερνικάει τις αντιστάσεις του, στη νέα του ταχύτητα περιστροφής. Επειδή η νέα του ταχύτητα περιστροφής είναι, πλέον, μικρότερη από πριν, τότε και η ροπής έλξης του θα είναι μικρότερη, γεγονός το οποίο γίνεται εμφανές στο Σχήμα 11.77, όπου η μωβ καμπύλη ροπής έλξης μεταβάλλεται κατά προσέγγιση  $-1 \text{ Nm}$ .



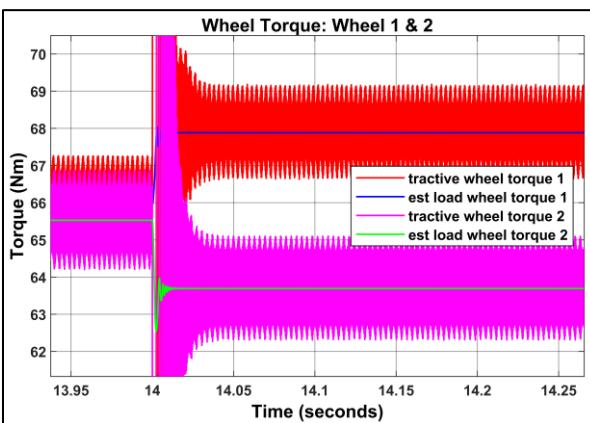
Σχήμα 11.75: Ροπή έλξης κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση  
(tractive wheels torque in zoom)



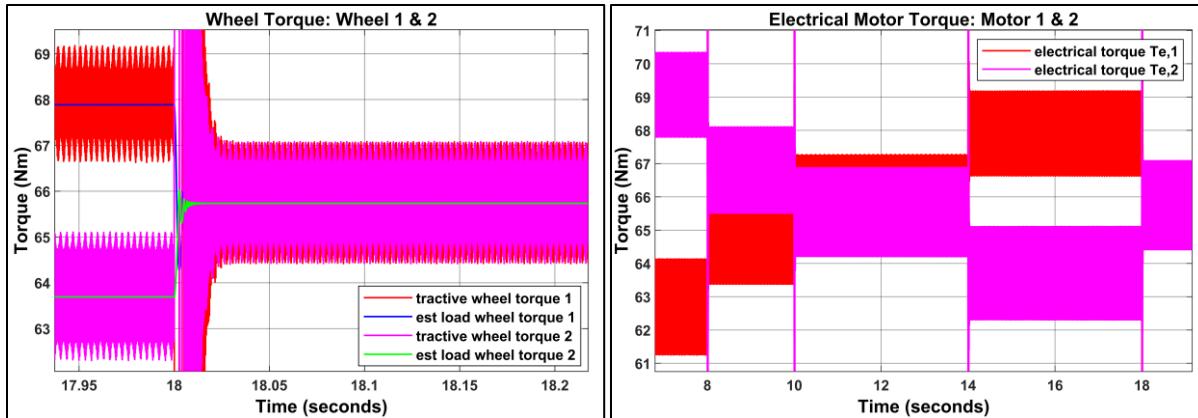
Σχήμα 11.76: Ροπή έλξης κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση  
(tractive wheels torque in zoom)



Σχήμα 11.77: Ροπή έλξης κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση  
(tractive wheels torque in zoom)



Σχήμα 11.78: Ροπή έλξης κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση  
(tractive wheels torque in zoom)

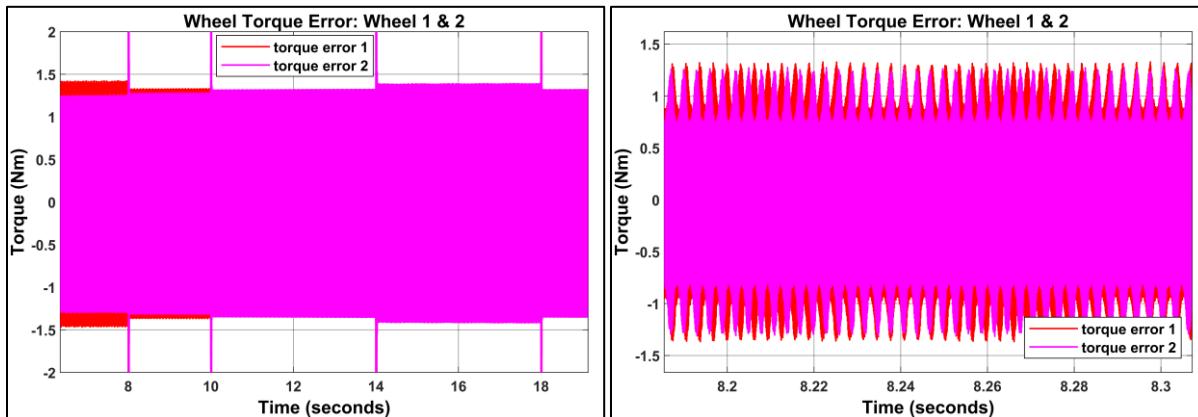


Σχήμα 11.79: Ροπή έλξης κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (tractive wheels torque in zoom)

Σχήμα 11.80: Ηλεκτρική ροπή (electrical torque)

Επίσης, φαίνεται, πως η ροπή έλξης έχει μια μεταβλητή και συγκεκριμένα περιοδική, με το χρόνο, τιμή. Εμφανίζει, δηλαδή, μία διακύμανση, η οποία έχει ως μέση τιμή το πραγματικό φορτίο ροπής. Η διακύμανση αυτή παρουσιάζεται ως σφάλμα ροπής στα σχήματα: Σχήμα 11.81 και Σχήμα 11.82, με την μέγιστη απόκλιση να μην ξεπερνάει, την κατά απόλυτο, τιμή των 1.5 N·m, εκτός των στιγμιαίων ακραίων τιμών που υφίστανται λόγω μεταβολής των εισόδων του συστήματος κατά τις χρονικές στιγμές  $t = 8, 10, 14, 18 \text{ sec}$ . Αυτό, φανερώνει την μεγάλη ακρίβεια που επιτυγχάνει το μοντέλο, στον προσδιορισμό της τιμής του φορτίου ροπής, καθιστώντας τους κινητήριους τροχούς ικανούς να υπερνικήσουν το φορτίο τους.

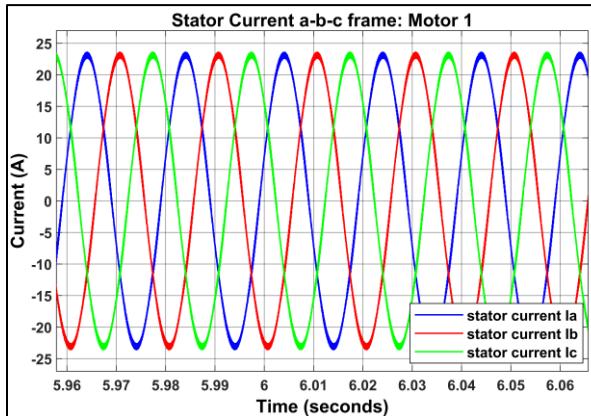
Στο Σχήμα 11.80 παρουσιάζεται η ηλεκτρική ροπή που παράγει ο κάθε σύγχρονος κινητήρας μόνιμου μαγνήτη. Επειδή η σχέση μετάδοσης μεταξύ κινήτηρα και κινητήριου τροχού είναι ένα προς ένα, τότε τα διαγράμματα της ροπής έλξης και της ηλεκτρικής ροπής ταυτίζονται, οπότε η δεύτερη δεν θα αναλυθεί περεταίρω.



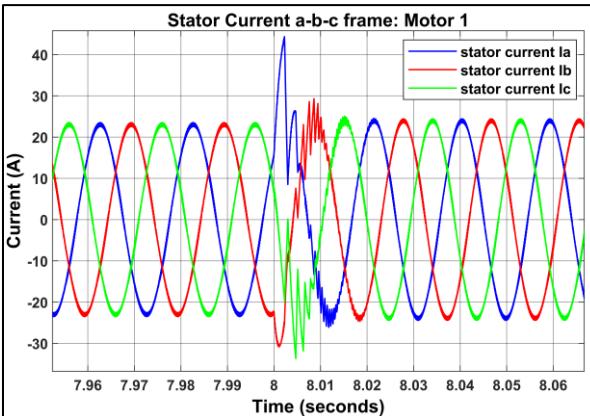
Σχήμα 11.81: Σφάλμα ροπής έλξης κινητήριων τροχών (tractive wheels torque error)

Σχήμα 11.82: Σφάλμα ροπής έλξης κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (tractive wheels torque error in zoom)

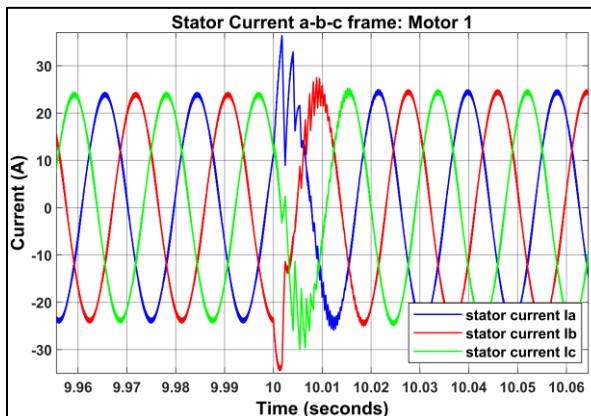
Στη συνέχεια, στα σχήματα: σχήμα 11.80 Σχήμα 11.83 έως Σχήμα 11.87, παρουσιάζονται στιγμιότυπα του ρεύματος του στάτορα του κινητήρα 1 στο  $a - b - c$  πλαίσιο αναφοράς. Συγκεκριμένα, στο Σχήμα 11.83, παρατηρείται η περιοδικότητα και η συμμετρία των τριών φάσεων του ρεύματος του στάτορα, οι οποίες εμφανίζουν συχνότητα της τάξης των 100 Hz. Στα υπόλοιπα στιγμιότυπα, αναπαριστάται το ρεύμα τις χρονικές στιγμές  $t = 8, 10, 14, 18 \text{ sec}$ , κατά τις οποίες μεταβάλλονται οι είσοδοι του συστήματος. Αναδεικνύεται, λοιπόν, πως σε κάθε μεταβολή που υφίσταται το όχημα, το ρεύμα του στάτορα παρουσιάζει απότομα και στιγμιαία αυξομειώσεις, έως ότου επανέρχεται στην επιθυμή του τιμή, μέσα σε ένα εκατοστό του δευτερολέπτου, γεγονός που αποδεικνύει την ταχύτητα απόκριση του μοντέλου. Ομοίως ισχύει και για το ρεύμα του στάτορα του σύγχρονου κινητήρα 2, οπότε και παραλείπεται.



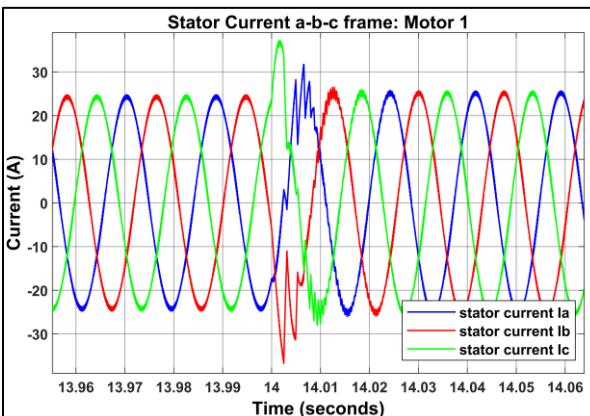
Σχήμα 11.83: Ρεύμα στάτορα του κινητήρα 1 σε  $a-b-c$  πλαίσιο αναφοράς, σε μεγέθυνση (Stator current of motor 1 in  $a-b-c$  reference frame, in zoom)



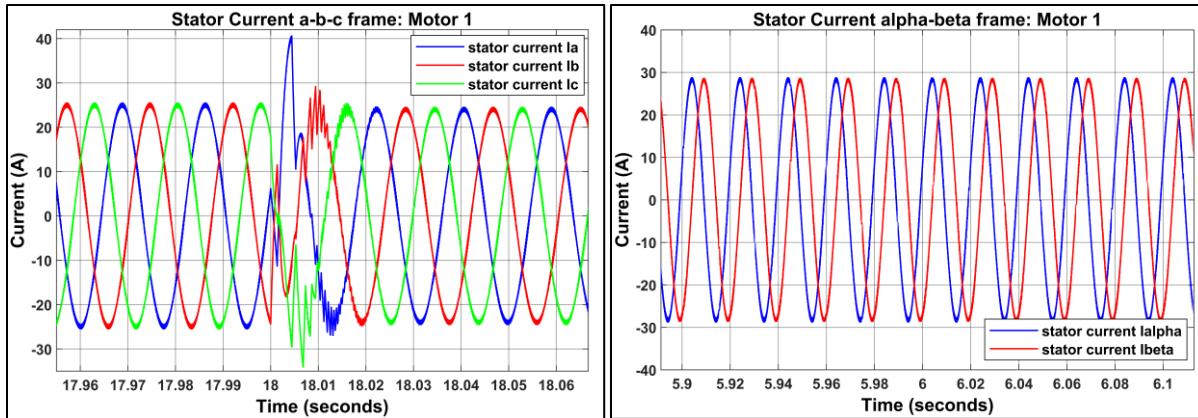
Σχήμα 11.84: Ρεύμα στάτορα του κινητήρα 1 σε  $a-b-c$  πλαίσιο αναφοράς, σε μεγέθυνση (Stator current of motor 1 in  $a-b-c$  reference frame, in zoom)



Σχήμα 11.85: Ρεύμα στάτορα του κινητήρα 1 σε  $a-b-c$  πλαίσιο αναφοράς, σε μεγέθυνση (Stator current of motor 1 in  $a-b-c$  reference frame, in zoom)



Σχήμα 11.86: Ρεύμα στάτορα του κινητήρα 1 σε  $a-b-c$  πλαίσιο αναφοράς, σε μεγέθυνση (Stator current of motor 1 in  $a-b-c$  reference frame, in zoom)

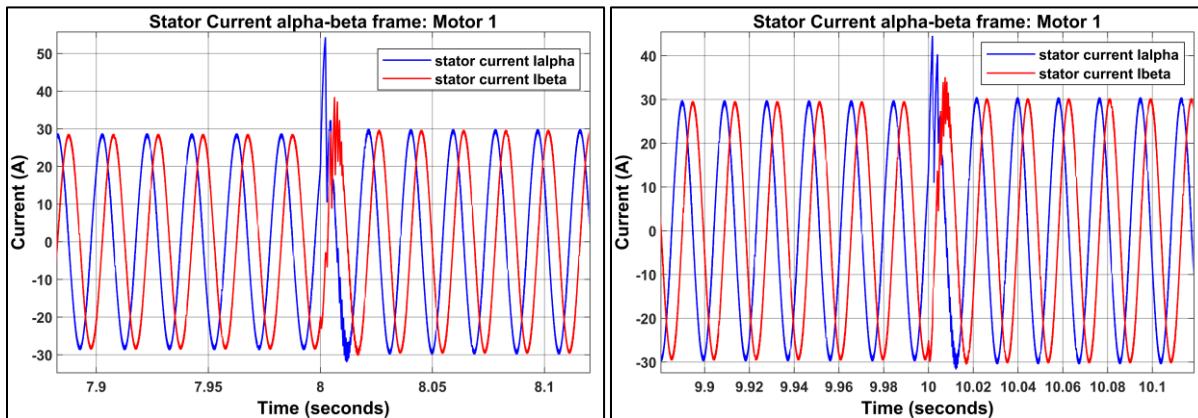


Σχήμα 11.87: Ρεύμα στάτορα του κινητήρα 1 σε a-b-c πλαίσιο αναφοράς, σε μεγέθυνση (Stator current of motor 1 in a-b-c reference frame, in zoom)

Σχήμα 11.88: Ρεύμα στάτορα του κινητήρα 1 σε alpha-beta πλαίσιο αναφοράς, σε μεγέθυνση (Stator current of motor 1 in alpha-beta reference frame, in zoom)

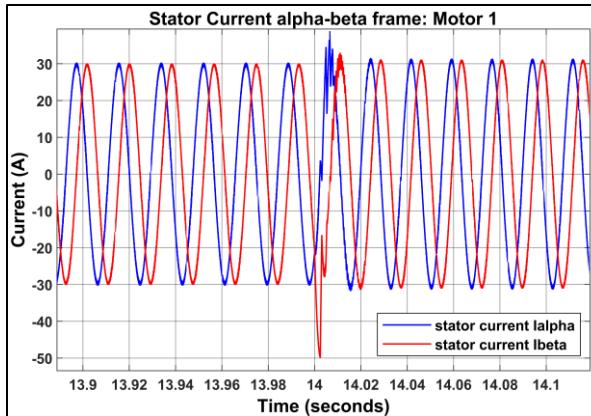
Στα σχήματα: Σχήμα 11.80 Σχήμα 11.88 έως Σχήμα 11.92, παρουσιάζονται στιγμιότυπα του ρεύματος του στάτορα του κινητήρα 1 στο *alpha – beta* πλαίσιο αναφοράς. Συγκεκριμένα, στο Σχήμα 11.88, παρατηρείται η περιοδικότητα και η συμμετρία των δυο φάσεων του ρεύματος του στάτορα, οι οποίες εμφανίζουν συχνότητα της τάξης των 100 Hz. Στα υπόλοιπα στιγμιότυπα, αναπαριστάται το ρεύμα τις χρονικές στιγμές  $t = 8, 10, 14, 18 \text{ sec}$ , κατά τις οποίες μεταβάλλονται οι είσοδοι του συστήματος. Αναδεικνύεται, λοιπόν, πως σε κάθε μεταβολή που υφίσταται το όχημα, το ρεύμα του στάτορα παρουσιάζει απότομα και στιγμιαία αυξομειώσεις, έως ότου επανέρχεται στην επιθυμή του τιμή, μέσα σε ένα εκατοστό του δευτερολέπτου, γεγονός που αποδεικνύει την ταχύτητα απόκριση του μοντέλου. Ομοίως ισχύει και για το ρεύμα του στάτορα του σύγχρονου κινητήρα 2, οπότε και παραλείπεται.

Στη συνέχεια, στα σχήματα: Σχήμα 11.80 Σχήμα 11.93 και Σχήμα 11.94, παρουσιάζεται το ρεύμα του στάτορα του κινητήρα 1 στο *q – d* πλαίσιο αναφοράς, ενώ στα σχήματα: Σχήμα 11.95 και Σχήμα 11.96 αναπαρίσταται το σφάλμα της *q* συνιστώσας, το οποίο φαίνεται να καταλήγει στο μηδέν. Ομοίως ισχύει και για το ρεύμα του στάτορα του σύγχρονου κινητήρα 2, οπότε και παραλείπεται.

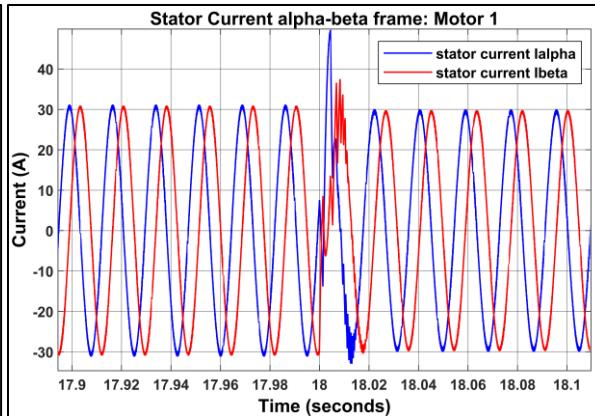


Σχήμα 11.89: Ρεύμα στάτορα του κινητήρα 1 σε alpha-beta πλαίσιο αναφοράς, σε μεγέθυνση (Stator current of motor 1 in alpha-beta reference frame, in zoom)

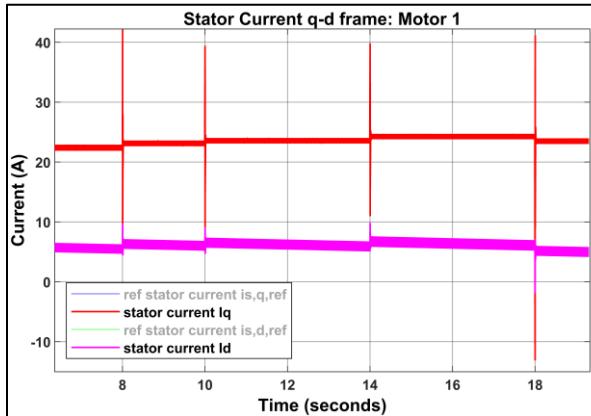
Σχήμα 11.90: Ρεύμα στάτορα του κινητήρα 1 σε alpha-beta πλαίσιο αναφοράς, σε μεγέθυνση (Stator current of motor 1 in alpha-beta reference frame, in zoom)



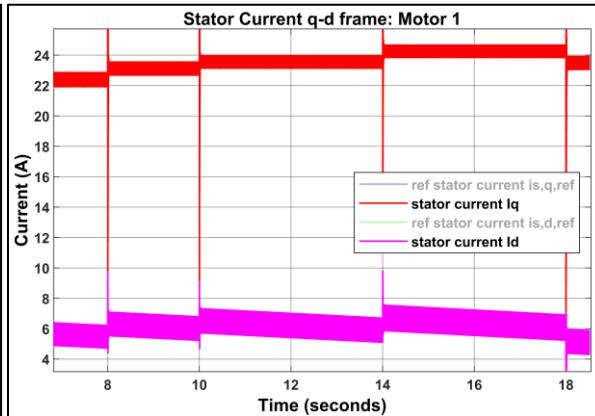
Σχήμα 11.91: Ρεύμα στάτορα του κινητήρα 1 σε alpha-beta πλαίσιο αναφοράς, σε μεγέθυνση (Stator current of motor 1 in alpha-beta reference frame, in zoom)



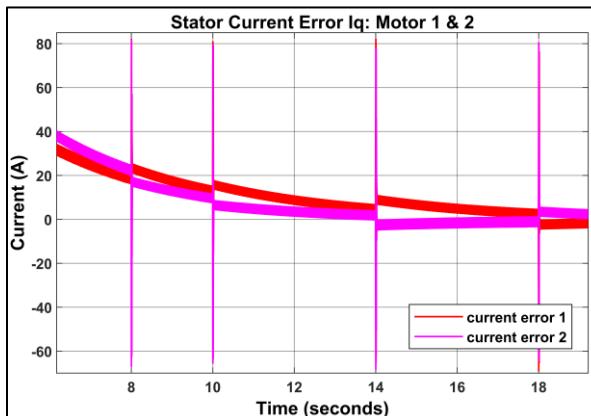
Σχήμα 11.92: Ρεύμα στάτορα του κινητήρα 1 σε alpha-beta πλαίσιο αναφοράς, σε μεγέθυνση (Stator current of motor 1 in alpha-beta reference frame, in zoom)



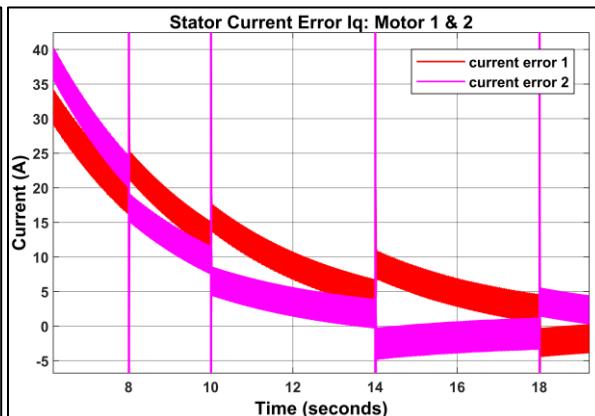
Σχήμα 11.93: Ρεύμα στάτορα του κινητήρα 1 σε q-d πλαίσιο αναφοράς (Stator current of motor 1 in q-d reference frame)



Σχήμα 11.94: Ρεύμα στάτορα του κινητήρα 1 σε q-d πλαίσιο αναφοράς, σε μεγέθυνση (Stator current of motor 1 in q-d reference frame, in zoom)



Σχήμα 11.95: Σφάλμα ρεύματος στάτορα της  $q$  συνιστώσας ( $q$ -axis stator current error)

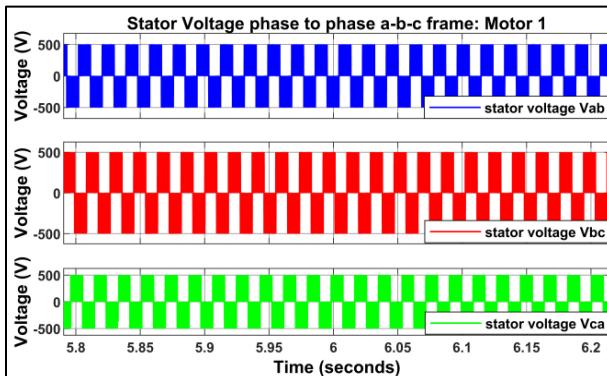


Σχήμα 11.96: Σφάλμα ρεύματος στάτορα της  $q$  συνιστώσας, σε μεγέθυνση ( $q$ -axis stator current error, in zoom)

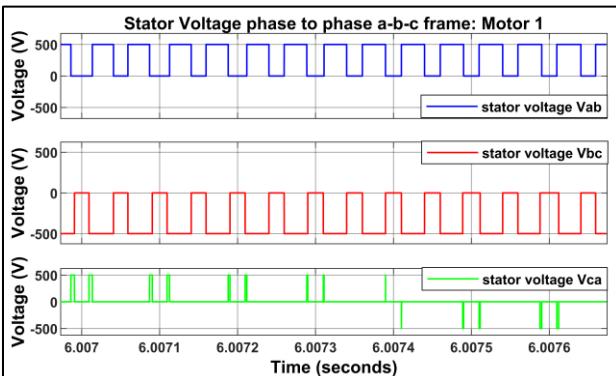
Αναφορικά με την τάση του στάτορα του σύγχρονου κινητήρα 1, αυτή παρουσιάζεται και στα τρία πλαίσια αναφοράς στα σχήματα: Σχήμα 11.80 Σχήμα 11.97 έως Σχήμα 11.98, Σχήμα 11.99 έως Σχήμα 11.103 και Σχήμα 11.104 αντίστοιχα. Η τάση του στάτορα, στο  $a - b - c$  πλαίσιο αναφοράς, λαμβάνει τις τιμές  $-500, 0, 500 \text{ volt}$ , καθώς η τάση τροφοδοσίας, δηλαδή η τάση που προσφέρει η κάθε μία από τις δυο μπαταρίες είναι  $500 \text{ volt}$ . Κάθε χρονική στιγμή, οι τρεις φάσεις της τάσης του στάτορα λαμβάνουν ξεχωριστά τις τιμές  $-500, 0, 500 \text{ volt}$ , χωρίς ποτέ δύο φάσεις να έχουν την ίδια τιμή μεταξύ τους. Αυτό, μπορεί να γίνει εμφανές στο Σχήμα 11.98.

Η διφασική τάση του στάτορα στο  $\alpha - \beta$  πλαίσιο αναφοράς, παρουσιάζει συμμετρία και περιοδικότητα όπως ακριβώς αυτήν του ρεύματος. Στα σχήματα: Σχήμα 11.100 έως Σχήμα 11.103, αναπαριστάται η τάση, τις χρονικές στιγμές  $t = 8, 10, 14, 18 \text{ sec}$ , κατά τις οποίες μεταβάλλονται οι είσοδοι του συστήματος. Αναδεικνύεται, λοιπόν, πως σε κάθε μεταβολή που υφίσταται το όχημα, η τάση του στάτορα παρουσιάζει απότομα και στιγμιαία αυξομειώσεις, έως ότου επανέρχεται στην επιθυμή του τιμή, μέσα σε ένα εκατοστό του δευτερολέπτου, γεγονός που αποδεικνύει, ξανά, την ταχύτητα απόκριση του μοντέλου.

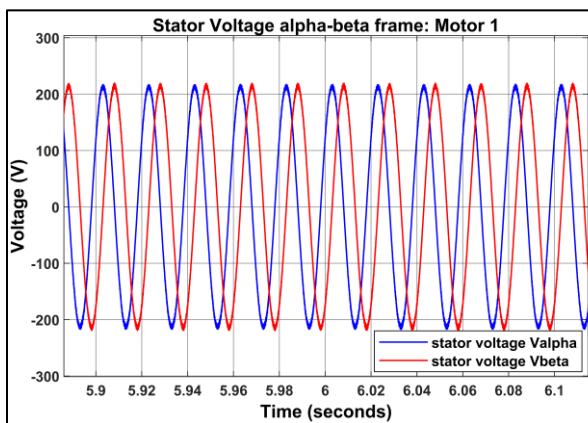
Ομοίως ισχύει και για τη τάση του στάτορα του σύγχρονου κινητήρα 2, οπότε και παραλείπεται.



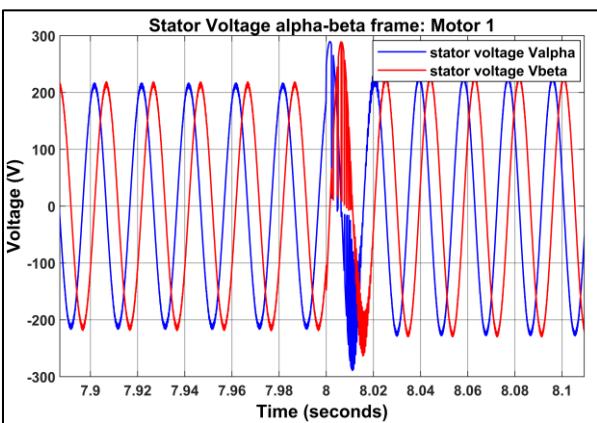
Σχήμα 11.97: Τάση στάτορα του κινητήρα 1 σε  $a-b-c$  πλαίσιο αναφοράς (Stator voltage of motor 1 in  $a-b-c$  reference frame)



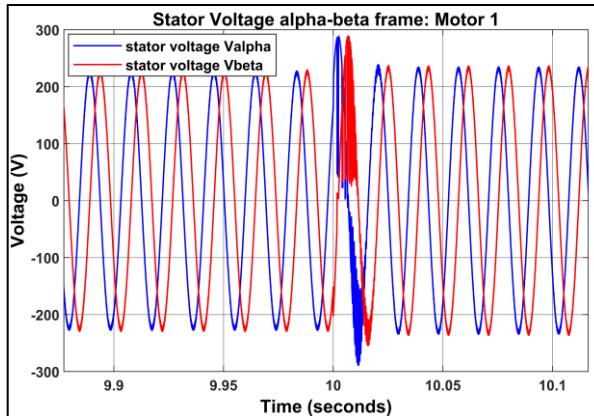
Σχήμα 11.98: Τάση στάτορα του κινητήρα 1 σε  $a-b-c$  πλαίσιο αναφοράς, σε μεγέθυνση (Stator voltage of motor 1 in  $a-b-c$  reference frame, in zoom)



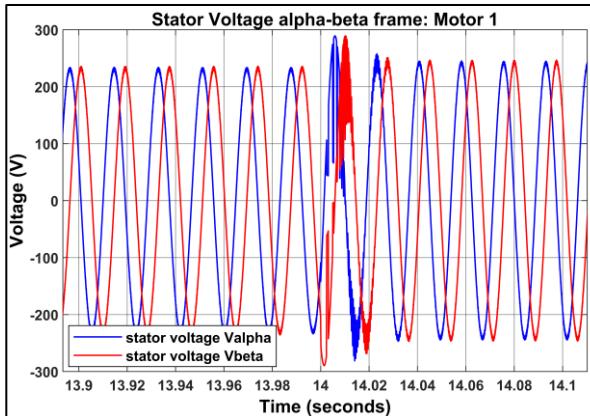
Σχήμα 11.99: Τάση στάτορα του κινητήρα 1 σε  $\alpha-\beta$  πλαίσιο αναφοράς (Stator voltage of motor 1 in  $\alpha-\beta$  reference frame)



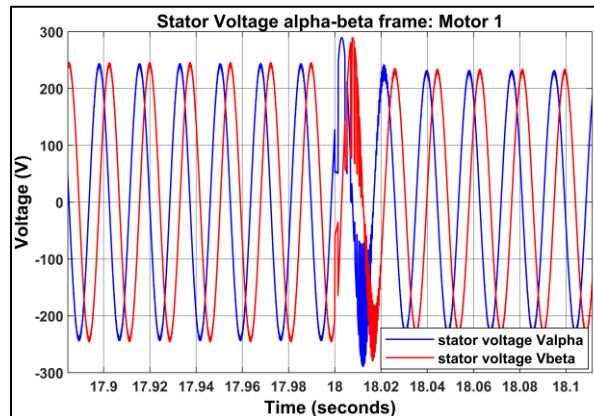
Σχήμα 11.100: Τάση στάτορα του κινητήρα 1 σε  $\alpha-\beta$  πλαίσιο αναφοράς, σε μεγέθυνση (Stator voltage of motor 1 in  $\alpha-\beta$  reference frame, in zoom)



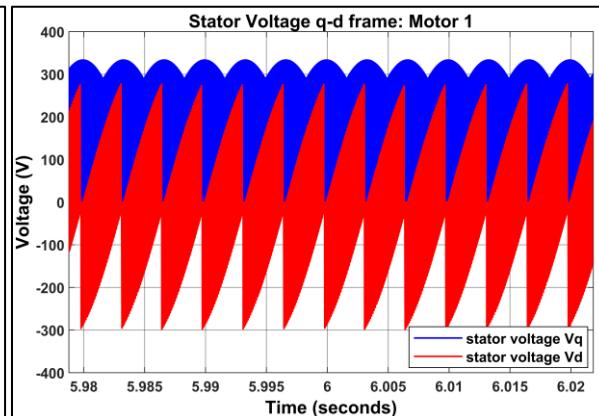
Σχήμα 11.101: Τάση στάτορα του κινητήρα 1 σε alpha-beta πλαίσιο αναφοράς, σε μεγέθυνση (Stator voltage of motor 1 in alpha-beta reference frame, in zoom)



Σχήμα 11.102: Τάση στάτορα του κινητήρα 1 σε alpha-beta πλαίσιο αναφοράς, σε μεγέθυνση (Stator voltage of motor 1 in alpha-beta reference frame, in zoom)



Σχήμα 11.103: Τάση στάτορα του κινητήρα 1 σε alpha-beta πλαίσιο αναφοράς, σε μεγέθυνση (Stator voltage of motor 1 in alpha-beta reference frame, in zoom)



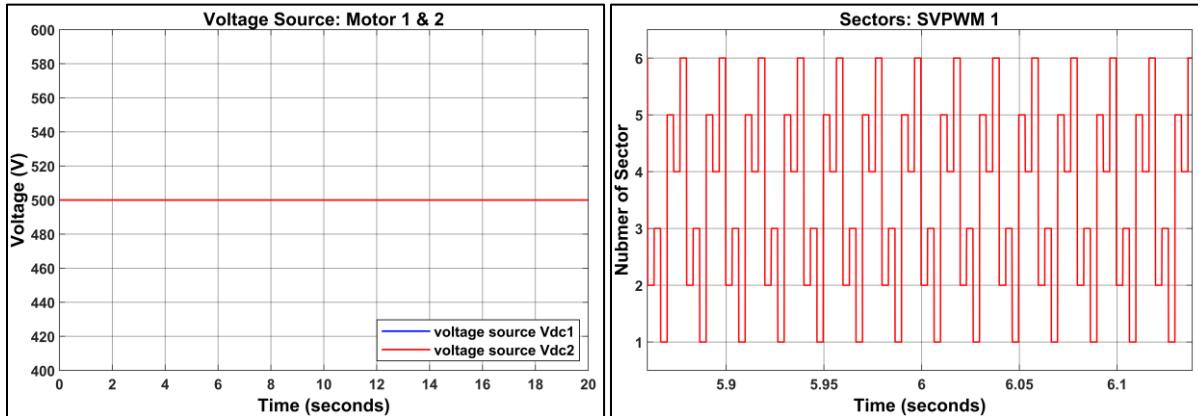
Σχήμα 11.104: Τάση στάτορα του κινητήρα 1 σε q-d πλαίσιο αναφοράς, σε μεγέθυνση (Stator voltage of motor 1 in q-d reference frame, in zoom)

Στο Σχήμα 11.105, προβάλλεται η τάση τροφοδοσίας των δύο σύγχρονων κινητήρων μόνιμου μαγνήτη, δηλαδή η τάση που προσφέρουν οι δυο μπαταρίες του οχήματος. Αυτές, προσφέρουν συνεχές τάση, σταθερής τιμής, ίσης με 500 volt.

Στη συνέχεια, τα υπόλοιπα σχήματα αφορούν τη μέθοδο SVPWM του κινητήρα 1. Συγκεκριμένα, στο Σχήμα 11.106, απεικονίζεται η ακολουθία των τομέων, στους οποίους βρίσκεται, το διάνυσμα τάσης εξόδου αναφοράς  $V_{ref}$ . Η ακολουθία αυτή, έχει προκύψει από το 1<sup>o</sup> βήμα του αλγορίθμου του SVPWM, αυτό του προσδιορισμού τομέα. Είναι εμφανές, πως η απεικονιζόμενη ακολουθία είναι η 3, 1, 5, 4, 6, 2, όντας ακριβώς αυτή που χρησιμοποιήθηκε στους υπολογισμούς του κεφαλαίου 6.3.2, επαληθεύοντας έτσι, τη σωστή λειτουργία του 1<sup>o</sup> βήματος του αλγορίθμου SVPWM.

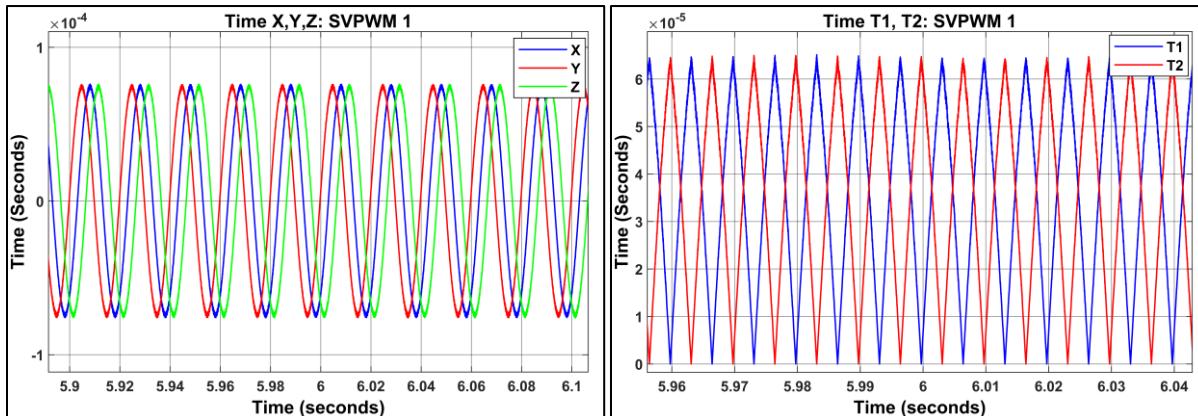
Τα αποτελέσματα του 2<sup>o</sup> βήματος του αλγορίθμου SVPWM, περιγράφονται στο Σχήμα 11.108, στο οποίο υπολογίζονται οι χρονικές μεταβλητές  $T_1$  και  $T_2$ . Αυτές, αποτελούν το χρόνο λειτουργίας των δύο γειτονικών βασικών διανυσμάτων τάσης, από τα V0-V7, που απαρτίζουν το διάνυσμα τάσης εξόδου αναφοράς  $V_{ref}$ , του τρέχοντος τομέα. Είναι εμφανές, πως οι χρόνοι λειτουργίας  $T_1$  και  $T_2$ , διέπονται

από συμμετρία και περιοδικότητα. Στο Σχήμα 11.107, αναπαρίστανται οι χρονικές μεταβλητές  $X, Y, Z$ , που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό των μεταβλητών  $T_1$  και  $T_2$ .



Σχήμα 11.105: Τάση τροφοδοσίας (Supply voltage)

Σχήμα 11.106: Ακολουθία τομέων της μεθόδου SVPWM 1  
(Sectors sequence of SVPWM method 1)

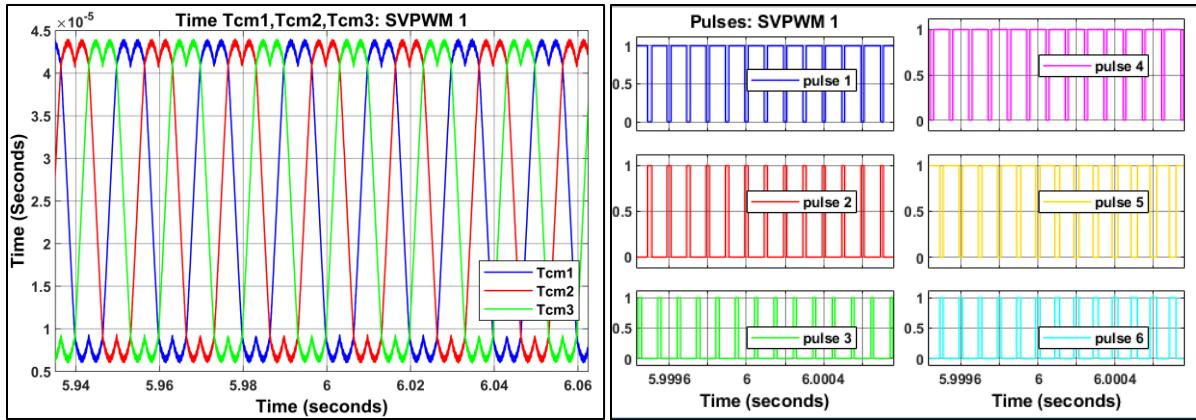


Σχήμα 11.107: Χρονικές μεταβλητές  $X, Y, Z$  της μεθόδου SVPWM 1 (Time variables X, Y, Z of the SVPWM method 1)

Σχήμα 11.108: Ενεργός χρόνος  $T_1, T_2$  της μεθόδου SVPWM 1  
(Active time  $T_1, T_2$  of SVPWM method 1)

Τα αποτελέσματα του 3<sup>ου</sup> βήματος του αλγορίθμου SVPWM, περιγράφονται στο Σχήμα 11.109, στο οποίο υπολογίζονται οι χρονικές μεταβλητές  $T_{cm1}, T_{cm2}, T_{cm3}$ . Οι μεταβλητές αυτές, αποτελούν τα χρονικά σημεία σύγκρισης για την εναλλαγή των διανυσμάτων. Η μορφή των καμπυλών τους, είναι σύμφωνη με τη θεωρητική τους μορφή που παρουσιάστηκε στο Σχήμα 6.18, επαληθεύοντας, έτσι, τη σωστή λειτουργία του αλγορίθμου.

Τα αποτελέσματα του 4<sup>ου</sup> βήματος του αλγορίθμου SVPWM, περιγράφονται στο Σχήμα 11.110, στο οποίο απεικονίζονται οι έξι παλμοί PWM, οι οποίοι ελέγχουν τον τριφασικό μετατροπέα πηγής τάσης.



**Σχήμα 11.109:** Σημεία εναλλαγής διανυσμάτων  $T_{cm1}$ ,  $T_{cm2}$ ,  $T_{cm3}$  της μεθόδου SVPWM 1 (Points switching vector voltage of SVPWM method 1)

**Σχήμα 11.110:** Παλμοί της μεθόδου SVPWM 1 (Pulses of SVPWM method 1)

### 11.3 Γενικά Συμπεράσματα (General Conclusions)

Είναι φανερό, πλέον, μετά την παρατήρηση όλων των αποτελεσμάτων και των πέντε προσομοιώσεων κάθε μοντέλου, πως η πραγματική ταχύτητα, κάθε κινητήριου τροχού, ακολουθεί με μεγάλη ακρίβεια την αντίστοιχη ταχύτητα αναφοράς της. Τις χρονικές στιγμές που η ταχύτητα αναφοράς αλλάζει, η πραγματική ταχύτητα προσαρμόζεται άμεσα στη νέα τιμή αναφοράς της. Το γεγονός αυτό, αποδεικνύει την γρήγορη απόκριση της πραγματικής ταχύτητας των κινητήριων τροχών, σε οποιαδήποτε μεταβολή των εισόδων του οχήματος και κατά συνέπεια, τη σωστή λειτουργία του ηλεκτρονικού διαφορικού συστήματος.

Παρά το γεγονός ότι οι οπίσθιοι κινητήριοι τροχοί ακολουθούν διαφορετικές τροχιές μεταξύ τους, αυτοί στρίβουν προς την ίδια κατεύθυνση, σύμφωνα με το γεωμετρικό μοντέλο διεύθυνσης Ackermann-Jeantaud, με διαφορετικές ταχύτητες που τους επιτρέπει το ηλεκτρονικό διαφορικό. Αναλυτικότερα, η διαφορά της γωνιακής ταχύτητας των κινητήριων τροχών, υπολογίζεται και υλοποιείται, άμεσα και με ακρίβεια, σε όλες τις προσομοιώσεις κάθε μοντέλου. Επίσης, παρατηρείται, πως όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα του οχήματος, αλλά και η απόλυτη τιμή της γωνίας τιμονιού, τόσο μεγαλύτερη είναι και η διαφορά ταχύτητας που εμφανίζουν μεταξύ τους οι δύο κινητήριοι τροχοί, επαληθεύοντας την εξίσωση (Εξ. 2.12), η οποία εξαρτάται από το γινόμενο των όρων ( $tan\delta$ ) και  $(\omega_{w,1} + \omega_{w,2})$ , και συνεπώς την επιθυμητή λειτουργία του ηλεκτρονικού διαφορικού συστήματος.

Το ρεύμα των τυλιγμάτων τυμπάνου των δύο κινητήρων συνεχούς ρεύματος με ψήκτρες και το ρεύμα του στάτορα των σύγχρονων κινητήρων μόνιμου μαγνήτη, εμφανίζει τα ίδια χαρακτηριστικά με την παραγόμενη ηλεκτρική ροπή, καθώς είναι ανάλογο με αυτήν. Δηλαδή, το ρεύμα τροφοδοσίας κάθε ηλεκτροκινητήρα, επηρεάζεται μόνο από το φορτίο του κινητήρα, το φορτίο ροπής. Στο χρονικό διάστημα της επιταχυνόμενης κίνησης  $t = 0$  έως  $t = 5.33$  sec, ο κάθε ηλεκτροκινητήρας, των δύο μοντέλων, απαιτεί υψηλό ρεύμα, καθώς υπάρχει υψηλή απαίτηση ροπής, εξαιτίας της αυξανόμενης ταχύτητας και συνεπώς των αυξανόμενων αντιστάσεων που δημιουργούνται λόγω αδράνειας. Ειδικά, όμως, κατά την εκκίνηση, δηλαδή τη χρονική στιγμή  $t = 0$ , εμφανίζεται το ρεύμα εκκίνησης, το οποίο απαιτεί ακόμα μεγαλύτερη τιμή. Το ρεύμα, και επομένως η απαίτηση για ηλεκτρομαγνητική ροπή, μειώνονται σε μια σταθερή τιμή, όταν η ταχύτητα του οχήματος γίνεται σταθερή. Επιπλέον, σε κάθε

στιγμιαία επιβράδυνση ενός τροχού, από τη μεταβολή της γωνίας τιμονιού, η ηλεκτρική ροπή που παράγεται από τον αντίστοιχο κινητήρα του, στιγμιαία ελαττώνεται απότομα, γίνεται αρνητική, ώστε να φρενάρει τον τροχό και στη συνέχεια ξαναγίνεται θετική, για να συνεχίσει ο τροχός να υπερνικάει τις αντιστάσεις του, στην νέα του ταχύτητα περιστροφής. Ομοίως, σε κάθε στιγμιαία επιτάχυνση ενός τροχού, από τη μεταβολή της γωνίας τιμονιού, η ηλεκτρική ροπή που παράγεται από τον αντίστοιχο κινητήρα του, στιγμιαία αυξάνεται απότομα, ώστε να επιταχύνει τον τροχό και στη συνέχεια ελαττώνεται, παραμένοντας θετική, για να συνεχίσει ο τροχός να υπερνικάει τις αντιστάσεις του, στην νέα του ταχύτητα περιστροφής.

Στο Σενάριο 2, όπου το όχημα κινείται σε ανηφόρα, έντονης κλήσης, αυξάνονται σημαντικά οι απαιτούμενες αντιστάσεις που πρέπει να υπερνικήσουν οι κινητήριοι τροχοί. Φαίνεται λοιπόν η έντονη αύξηση απαίτησης ροπής συγκριτικά με τα υπόλοιπα σενάρια, και συνεπώς η αύξηση του απαιτούμενου ρεύματος των ηλεκτροκινητήρων. Η σωστή λειτουργία του συστήματος του ηλεκτρονικού διαφορικού εξακολουθεί να υφίσταται, παρά την αύξηση του φορτίου ροπής, με το σύστημα ελέγχου να προσεγγίζει με μεγάλη ακρίβεια την επιθυμητή ταχύτητα, κάθε φορά που αυτή μεταβάλλεται.

Αναφορικά με το Μοντέλου 1, η τάση τροφοδοσίας, και άρα η τάση τυμπάνου, που τροφοδοτεί το τύμπανο του ηλεκτροκινητήρα συνεχούς ρεύματος με ψήκτρες, είναι συνεχές τάση και μεταβάλλεται, μόνο από την μεταβολή της ταχύτητας, καθώς εξαρτάται αποκλειστικά από αυτήν. Αυτό, φαίνεται στα διαγράμματα των προσομοιώσεων, όπου έχουμε μεταβολή της τάσης κατά την επιτάχυνση του οχήματος ή όταν το όχημα μεταβάλλει τη γωνία διεύθυνσης τιμονιού, όπου στιγμιαία οι κινητήριοι τροχοί αποκτούν μεταβαλλόμενη ταχύτητα, μέχρι αυτή να σταθεροποιηθεί. Όμως, όπως περιμέναμε και από την θεωρεία, η τάση τυμπάνου δεν εξαρτάται από το φορτίο. Και αυτό επιβεβαιώνεται και από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων 1 και 2, και συγκεκριμένα από τα σχήματα: Σχήμα 0.19 και Σχήμα 0.41, στα οποία υπάρχει διαφορά μόνο στην γωνία ανωφέρειας και συνεπώς μόνο στο φορτίο ροπής, χωρίς ποιοτικές διαφορές στη ταχύτητα αναφοράς. Φαίνεται λοιπόν στα σχήματα αυτά, πως η μορφή της τάσης τυμπάνου και στις δύο περιπτώσεις είναι ακριβώς η ίδια. Εμφανίζει, δηλαδή, ίδια απόκριση, παρά την αισθητή διαφορά ύπαρξης του φορτίου. Αναφορικά με το Μοντέλου 2, τάση τροφοδοσίας που τροφοδοτεί το στάτορα είναι τριών φάσεων και πρακτικά εναλλασσόμενη.

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων των δύο μοντέλων, είναι σαφές πως το Μοντέλο 2 εμφανίζει καλύτερη απόκριση, ως προς την ταχύτητα απόκρισης και την ακρίβεια, αναφορικά με τη ταχύτητα των κινητήριων τροχών και κατά συνέπεια με τη ταχύτητα του οχήματος. Δηλαδή, επιτυγχάνεται με μεγαλύτερη ακρίβεια η λειτουργία του ηλεκτρονικού διαφορικού. Συγκεκριμένα, στο Μοντέλο 1, η πραγματική ταχύτητα πιάνει την τιμή αναφοράς της, όταν αυτή αλλάζει εξαιτίας μεταβολής των εισόδων του οχήματος, μετά από περίπου ένα δέκατο του δευτερολέπτου. Στο Μοντέλο 2, ο χρόνος αυτός ελαττώνεται περίπου στο ένα εκατοστό του δευτερολέπτου. Προκύπτει, έτσι, το συμπέρασμα πως το Μοντέλο 2, εμφανίζει, ταχύτερη απόκριση, προσεγγιστικά κατά δέκα φορές, αναφορικά με τη ταχύτητα των κινητήριων τροχών, έναντι του Μοντέλου 1.

Συμπερασματικά, το ηλεκτρονικό διαφορικό, των δύο μοντέλων που αναπτύχθηκαν, είναι ικανό να ελέγχει τόσο τη ταχύτητα όσο και τη ροπή έλξης κάθε κινητήριου τροχού, με υψηλή ακρίβεια και άμεση απόκριση, σε όλες τις πιθανές συνθήκες οδήγησης. Αυτές είναι, η ευθεία και η κυκλική κίνηση με ύπαρξη αριστερών και δεξιών στροφών, η επιταχυνόμενη και η σταθερή κίνηση, καθώς και η ύπαρξη μηδενικής ή μη μηδενικής κλίσης ανωφέρειας.

## Παράρτημα (Appendix)

### Προδιαγραφές (Specifications)

Πίνακας 0.1: Οι προδιαγραφές του οχήματος της προσομοίωσης

Vehicle total mass	$M$	1200 kg
Distance between the wheels of the same axle	$d$	1.5 m
Distance between two wheels and axes or wheelbase	$L$	2.5 m
Wheel radius	$R_w$	0.26 m
Vehicle friction coefficient	$f_r$	0.01
Vehicle frontal area	$S$	1.9 m <sup>2</sup>
Aerodynamic drag coefficient	$C_x$	0.25 N/(ms) <sup>2</sup>
Gearbox ratio	$i_{gear}$	7.2
Efficiency of the gearbox	$\eta_{gear}$	98 %
Air density	$\rho$	1.3 kg/m <sup>3</sup>

Πίνακας 0.2: Οι προδιαγραφές των κινητήρων του μοντέλου 1

Type	Separately Excited Brushed DC Motor	
Armature resistance	$R_a$	0.1113 ohms
Armature inductance	$L_a$	0.001558 H
Field resistance	$R_f$	84.91 ohms
Field inductance	$L_f$	13.39 H
Field-armature mutual inductance	$L_{af}$	0.3406 H
Total inertia	$J$	0.2053 kgm <sup>2</sup>
Viscous friction coefficient Bm	$B_m$	0.007032
Coulomb friction torque	$T_f$	5.282
Initial speed	-	0 rad/s
Power	-	50 HP or 22371 watt
Voltage	-	240 volt
Speed	-	1750 rpm
Field	-	300 volt

Πίνακας 0.3: Οι προδιαγραφές των μπαταριών του μοντέλου 1

DC armature voltage	$V_a$	400 volt
DC field voltage	$V_f$	120 volt

Πίνακας 0.4: Οι προδιαγραφές των κινητήρων του μοντέλου 2

Type	Permanent Magnet Synchronous Motor	
Configuration		
Number of phases:	-	3
Back EMF waveform:	-	Sinusoidal
Rotor type	-	Round
Mechanical input	-	Torque $T_m$
Parameters		
Stator phase resistance	$R_s$	0.0485 Ohm
Armature inductance	$L_a$	0.000395 H
Flux linkage	$\lambda$	0.1194 Vs
Inertia	$J$	0.0027 kgm <sup>2</sup>
viscous damping	$F$	0.0004924 Nms
pole pairs	$p$	4
static friction	$T_f$	0 Nm

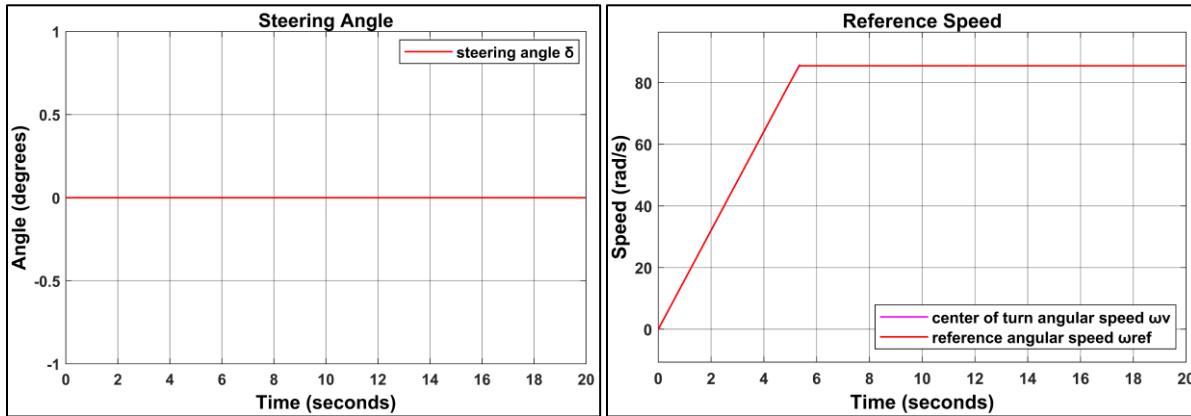
Πίνακας 0.5: Οι προδιαγραφές των μπαταριών του μοντέλου 2

DC voltage	$V_{dc}$	500 volt
------------	----------	----------

Πίνακας 0.6: Οι προδιαγραφές των μετατροπέων του μοντέλου 2

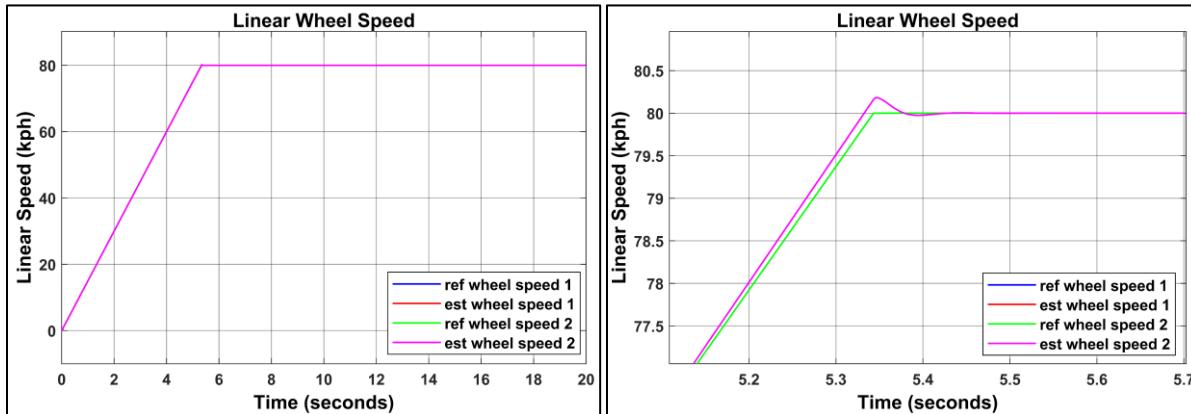
Type	Separately Excited Brushed DC Motor	
Number of bridge arms	-	0.1113 ohms
Power Electronic device	-	IGBT / Diodes
Snubber resistance	$R_{snubber}$	$10^5$ ohms
Snubber capacitance	$C_{snubber}$	infinity F
$R_{on}$	$R_{on}$	$10^{-3}$ ohms
Forward voltage device	$V_f$	0 V
Forward voltage diode	$V_{fd}$	0 V

Μοντέλο 1 - Σενάριο 1: Ευθύς δρόμος και επιταχυνόμενη κίνηση μέχρι την σταθερή ταχύτητα των 80km/h (Straight road and accelerated motion up to the constant speed of 80 km/h)



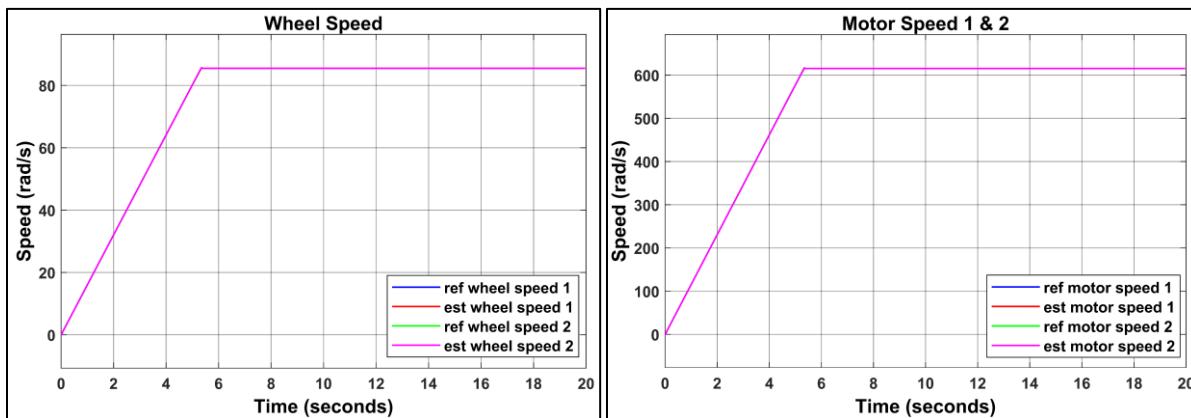
Σχήμα 0.1: Γωνία τιμονιού (steering angle)

Σχήμα 0.2: Γωνιακή ταχύτητα αναφοράς (reference speed)



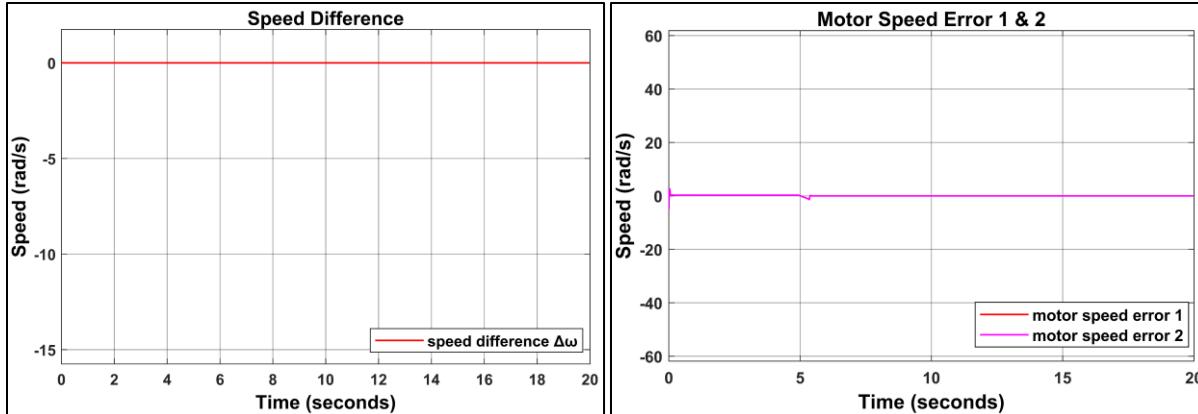
Σχήμα 0.3: Γραμμική ταχύτητα κινητήριων τροχών (Linear traction wheels speed)

Σχήμα 0.4: Γραμμική ταχύτητα κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (Linear traction wheels speed in zoom)



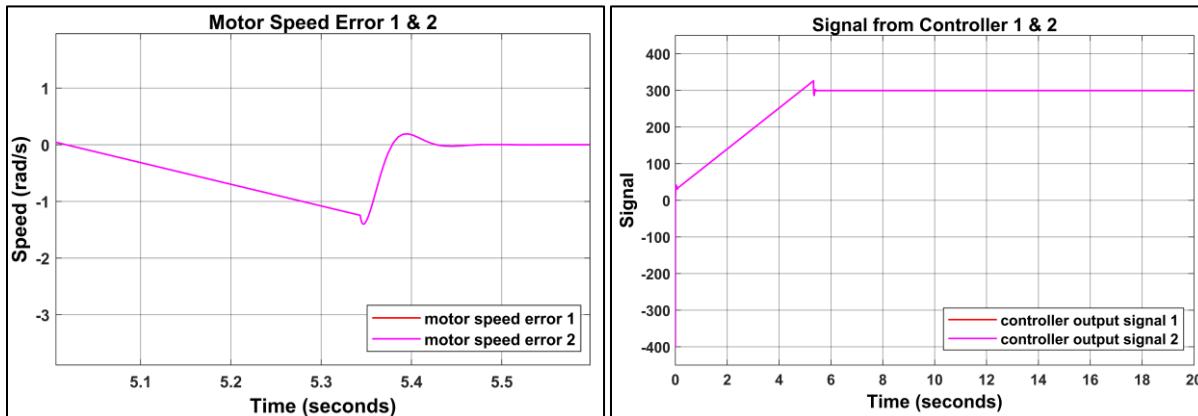
Σχήμα 0.5: Γωνιακή ταχύτητα κινητήριων τροχών (traction wheels speed)

Σχήμα 0.6: Γωνιακή ταχύτητα κινητήρων (motors speed)



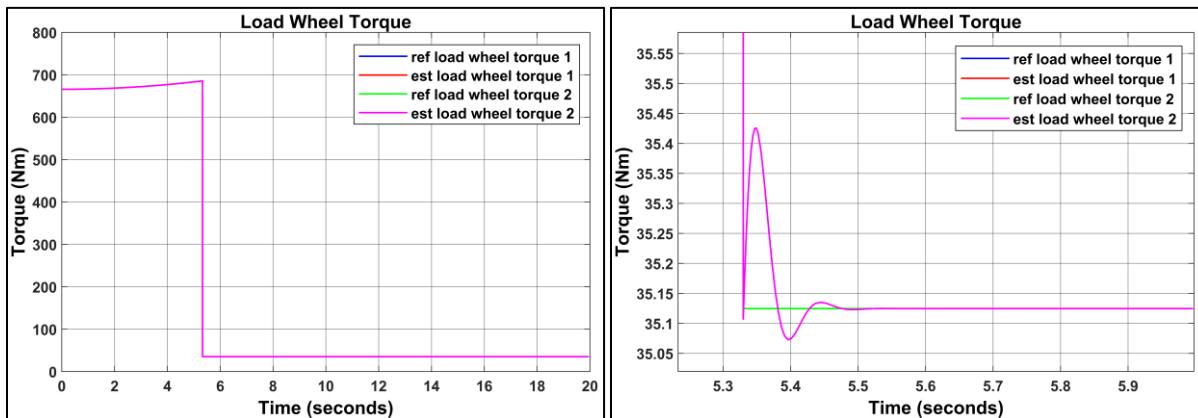
Σχήμα 0.7: Διαφορά γωνιακής ταχύτητας των κινητήριων τροχών (traction wheels speed difference)

Σχήμα 0.8: Σφάλμα γωνιακής ταχύτητας κινητήρων (motors speed error)



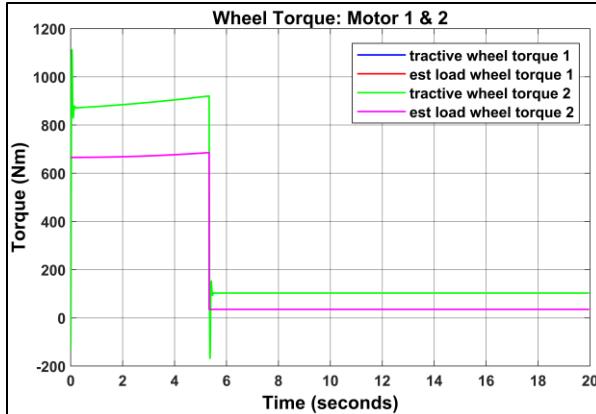
Σχήμα 0.9: Σφάλμα γωνιακής ταχύτητας κινητήρων σε μεγέθυνση (motors speed error in zoom)

Σχήμα 0.10: Σήμα ελέγχου του συστήματος (system control signal)

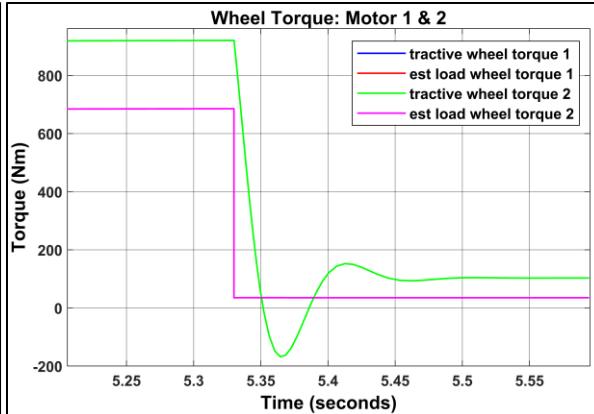


Σχήμα 0.11: Φορτίο ροπής κινητήριων τροχών (load traction wheels torque)

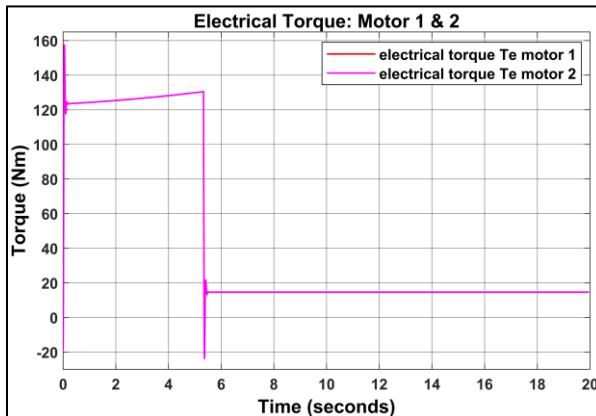
Σχήμα 0.12: Φορτίο ροπής κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (load traction wheels torque in zoom)



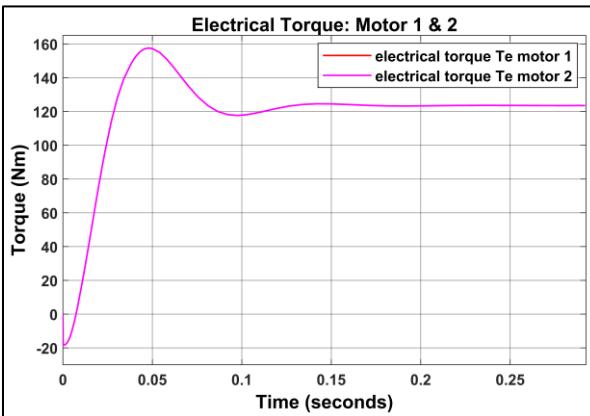
Σχήμα 0.13: Ροπή έλξης κινητήριων τροχών (tractive wheels torque)



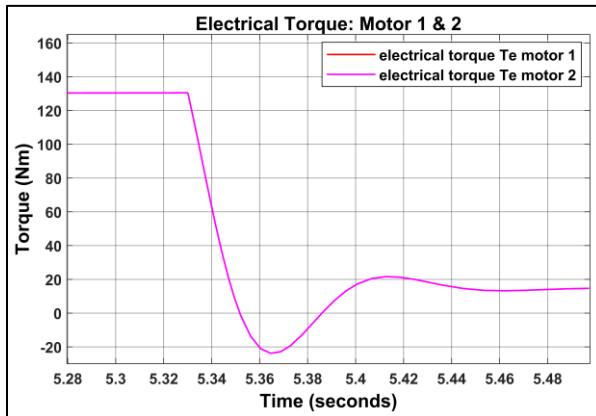
Σχήμα 0.14: Ροπή έλξης κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (tractive wheels torque in zoom)



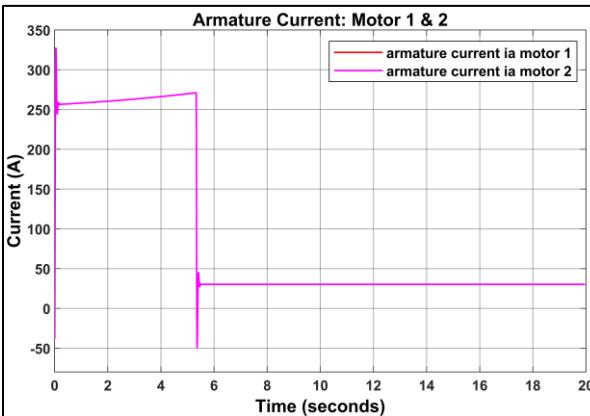
Σχήμα 0.15: Ηλεκτρική ροπή (electrical torque)



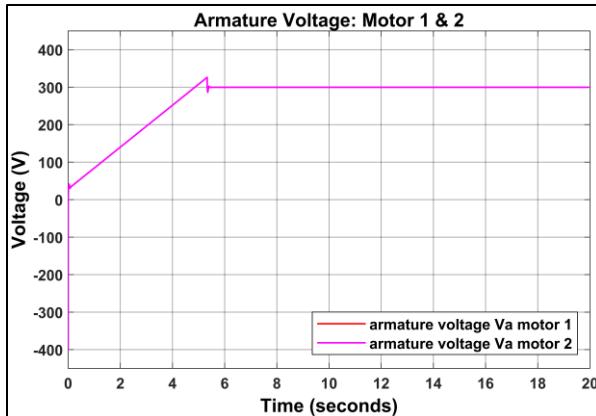
Σχήμα 0.16: Ηλεκτρική ροπή σε μεγέθυνση (electrical torque in zoom)



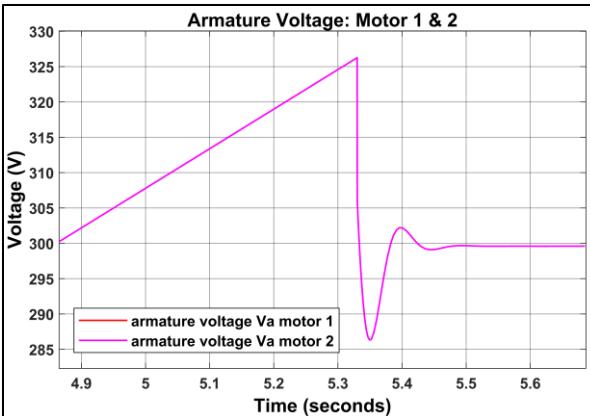
Σχήμα 0.17: Ηλεκτρική ροπή σε μεγέθυνση (electrical torque in zoom)



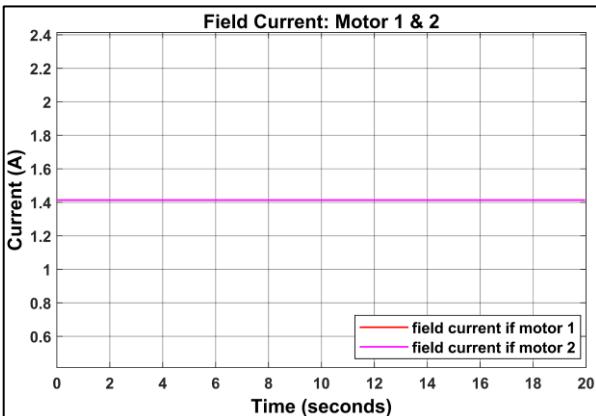
Σχήμα 0.18: Ρεύμα τυλιγμάτων τυμπάνου (armature current)



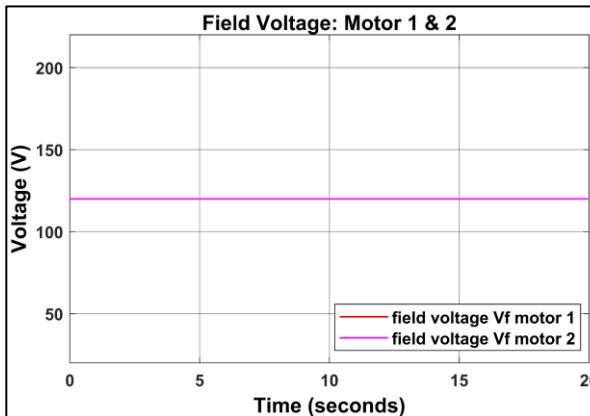
Σχήμα 0.19: Τάση τυμπάνου (armature voltage)



Σχήμα 0.20: Τάση τυμπάνου σε μεγέθυνση (armature voltage in zoom)

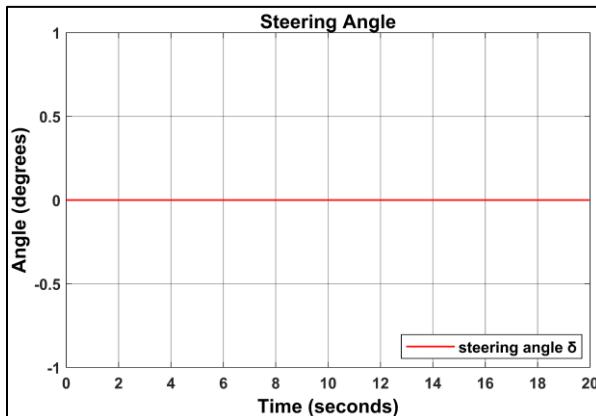


Σχήμα 0.21: Ρεύμα τυλιγμάτων πεδίου (field current)

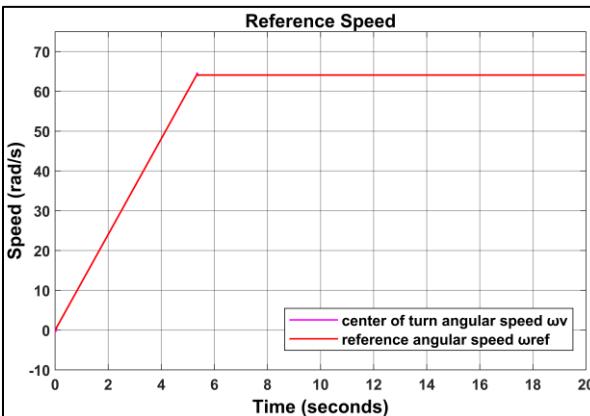


Σχήμα 0.22: Τάση πεδίου (field voltage)

Μοντέλο 1 - Σενάριο 2: Ευθύς δρόμος με ανωφέρεια 10% και σταθερή ταχύτητα 60km/h  
(Straight road with 8% slope at 60 km/h speed)



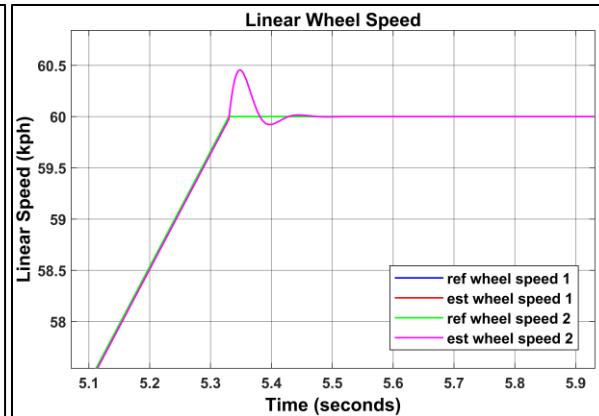
Σχήμα 0.23: Γωνία τιμονιού (steering angle)



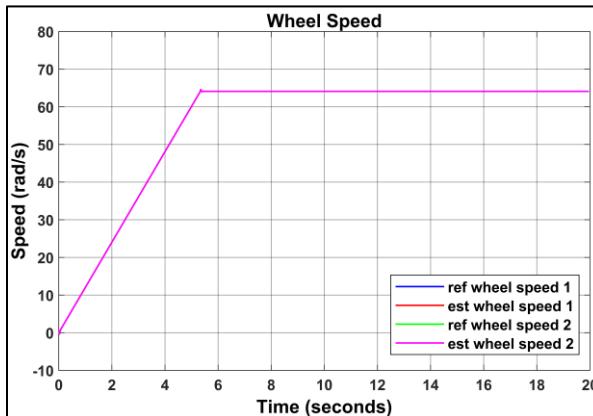
Σχήμα 0.24: Γωνιακή ταχύτητα αναφοράς (reference speed)



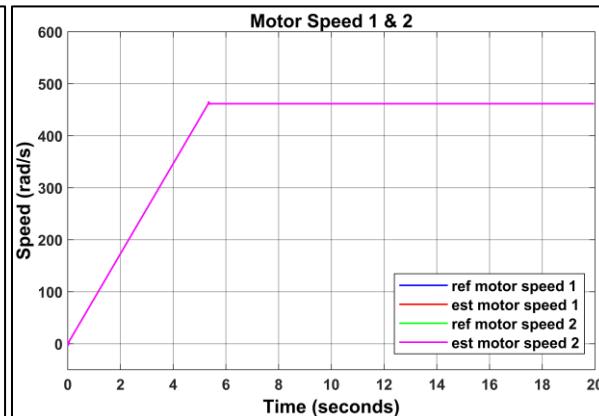
Σχήμα 0.25: Γραμμική ταχύτητα κινητήριων τροχών (Linear traction wheels speed)



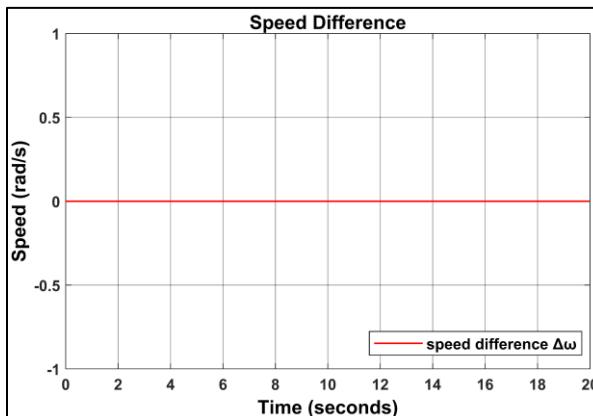
Σχήμα 0.26: Γραμμική ταχύτητα κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (Linear traction wheels speed in zoom)



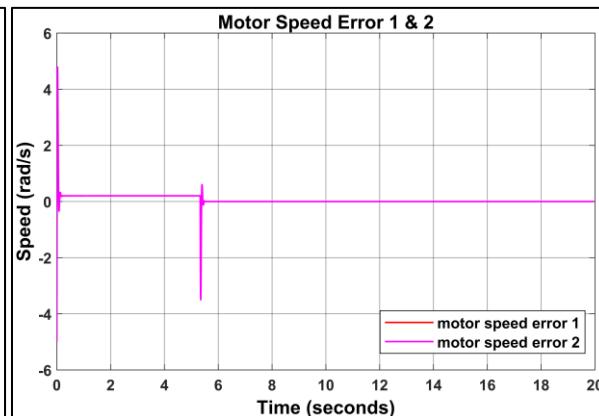
Σχήμα 0.27: Γωνιακή ταχύτητα κινητήριων τροχών (traction wheels speed)



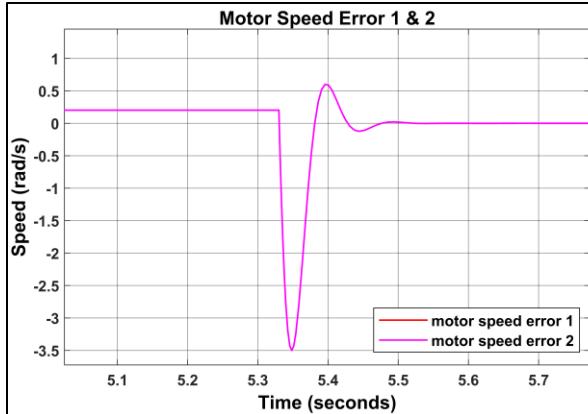
Σχήμα 0.28: Γωνιακή ταχύτητα κινητήρων (motors speed)



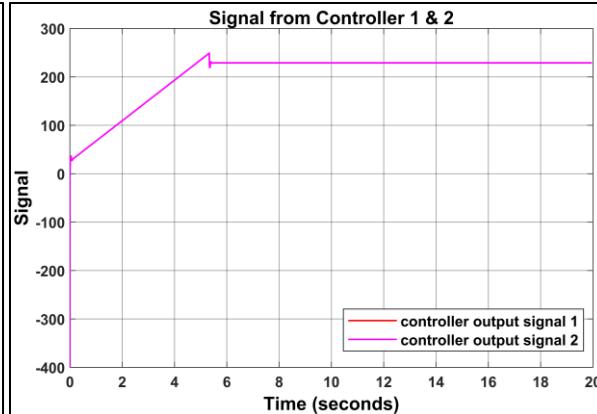
Σχήμα 0.29: Διαφορά γωνιακής ταχύτητας των κινητήριων τροχών (traction wheels speed difference)



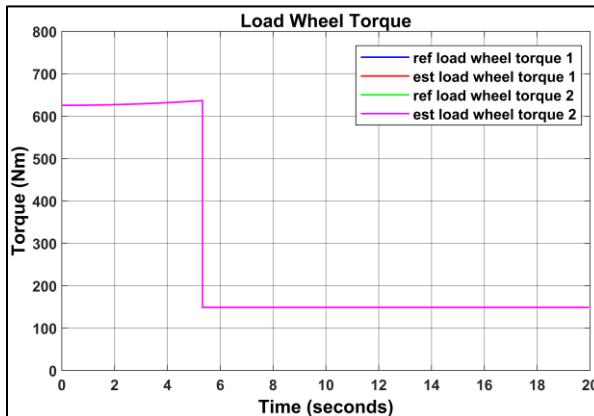
Σχήμα 0.30: Σφάλμα γωνιακής ταχύτητας κινητήρων (motors speed error)



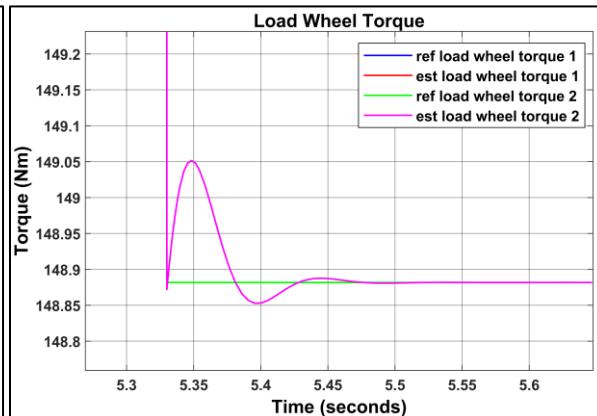
Σχήμα 0.31: Σφάλμα γωνιακής ταχύτητας κινητήρων σε μεγέθυνση (motors speed error in zoom)



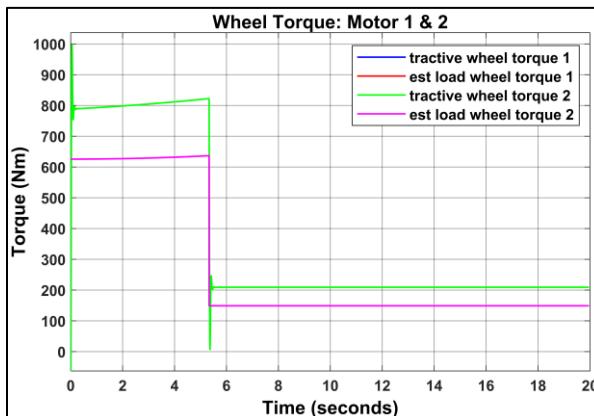
Σχήμα 0.32: Σήμα ελέγχου του συστήματος (system control signal)



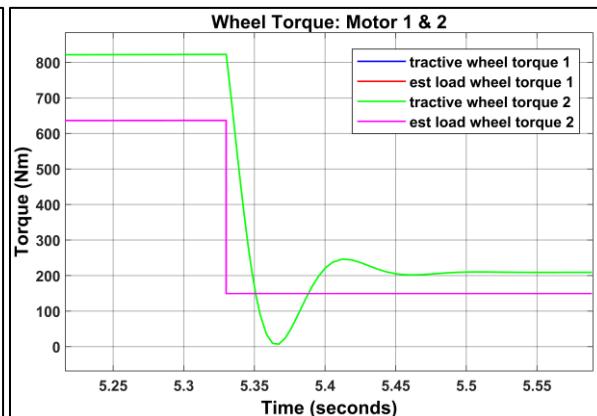
Σχήμα 0.33: Φορτίο ροπής κινητήριων τροχών (load traction wheels torque)



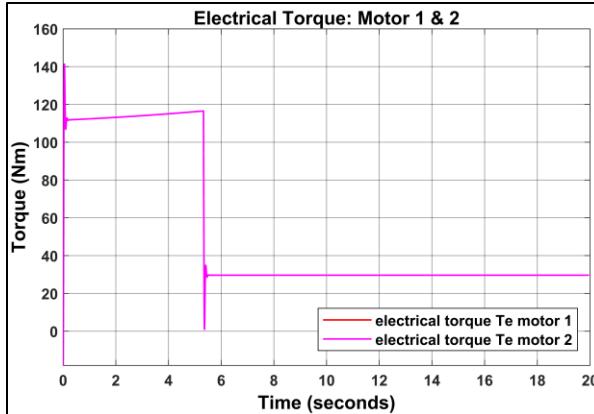
Σχήμα 0.34: Φορτίο ροπής κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (load traction wheels torque in zoom)



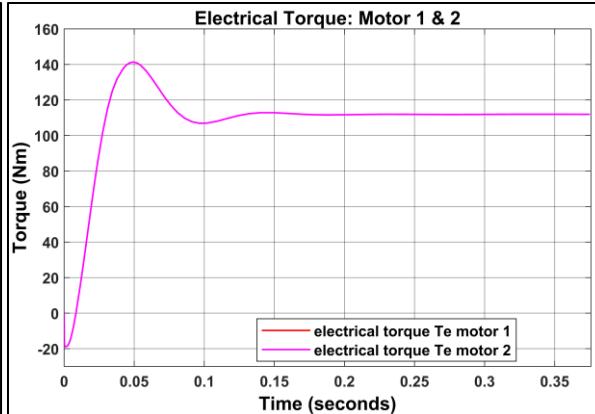
Σχήμα 0.35: Ροπή έλξης κινητήριων τροχών (tractive wheels torque)



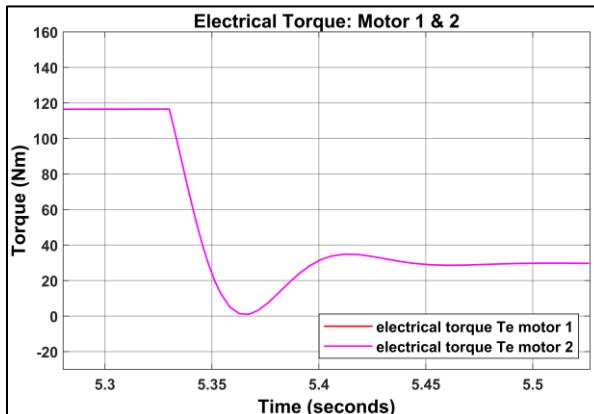
Σχήμα 0.36: Ροπή έλξης κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (tractive wheels torque in zoom)



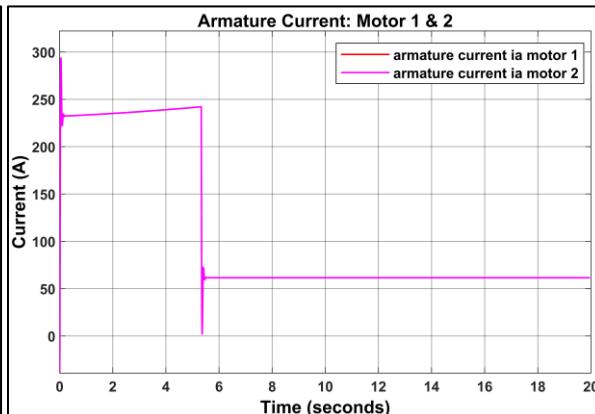
Σχήμα 0.37: Ηλεκτρική ροπή (electrical torque)



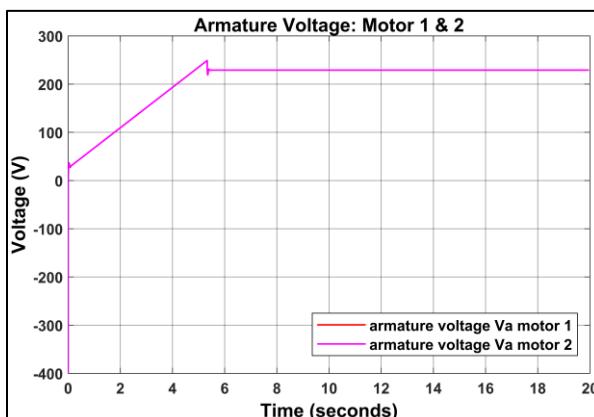
Σχήμα 0.38: Ηλεκτρική ροπή σε μεγέθυνση (electrical torque in zoom)



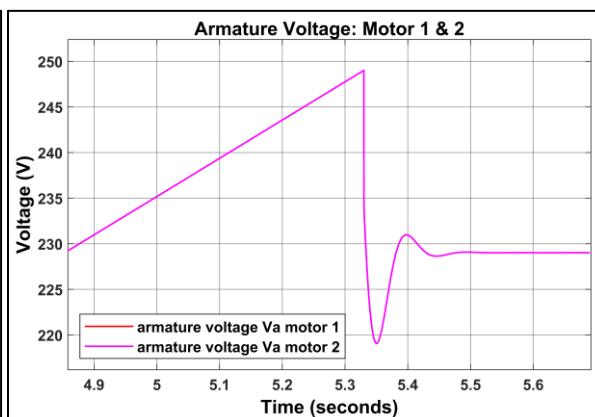
Σχήμα 0.39: Ηλεκτρική ροπή σε μεγέθυνση (electrical torque in zoom)



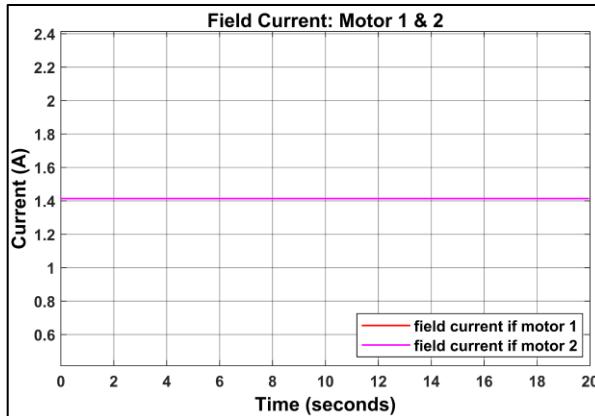
Σχήμα 0.40: Ρεύμα τυλιγμάτων τυμπάνου (armature current)



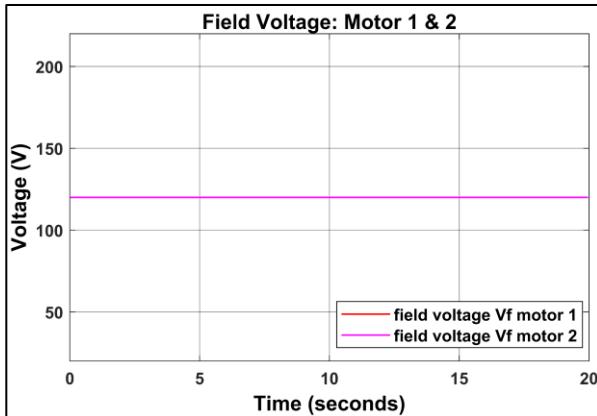
Σχήμα 0.41: Τάση τυμπάνου (armature voltage)



Σχήμα 0.42: Τάση τυμπάνου σε μεγέθυνση (armature voltage in zoom)

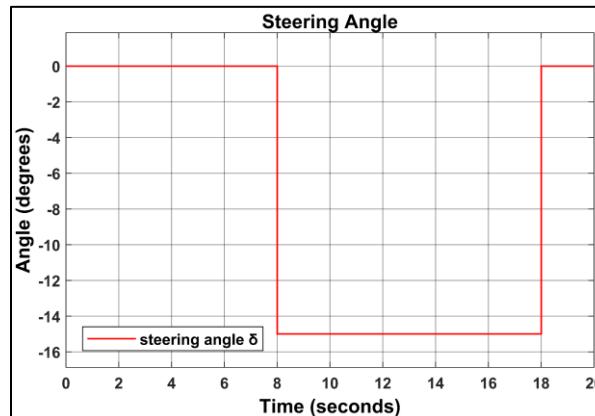


Σχήμα 0.43: Ρεύμα τυλιγμάτων πεδίου (field current)

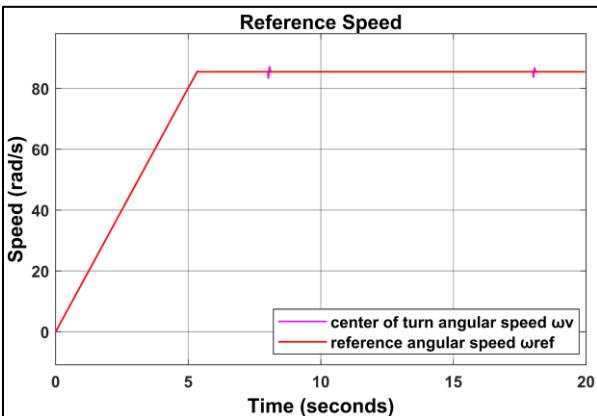


Σχήμα 0.44: Τάση πεδίου (field voltage)

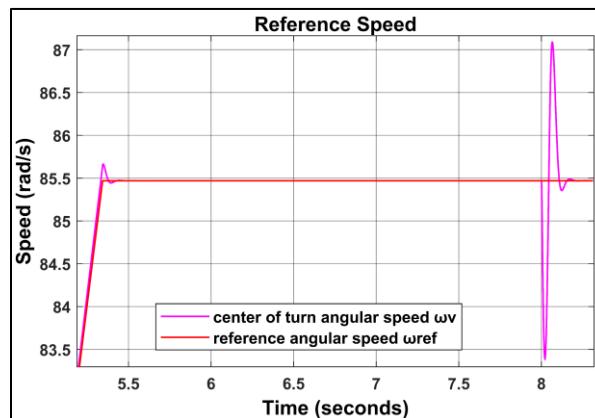
Μοντέλο 1 - Σενάριο 3: Στροφή δεξιά και επιταχυνόμενη κίνηση μέχρι την σταθερή ταχύτητα των 80km/h (Clockwise-curved road and accelerated motion up to the constant speed of 80 km/h)



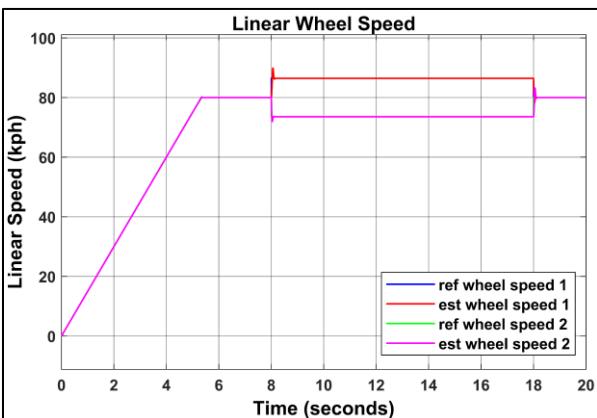
Σχήμα 0.45: Γωνία τιμονιού (steering angle)



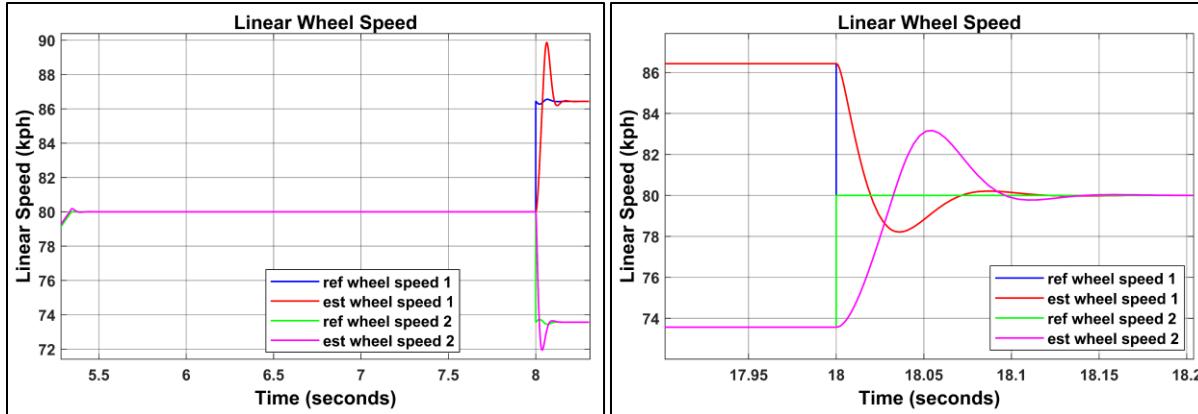
Σχήμα 0.46: Γωνιακή ταχύτητα αναφοράς (reference speed)



Σχήμα 0.47: Γωνιακή ταχύτητα αναφοράς σε μεγέθυνση (reference speed in zoom)

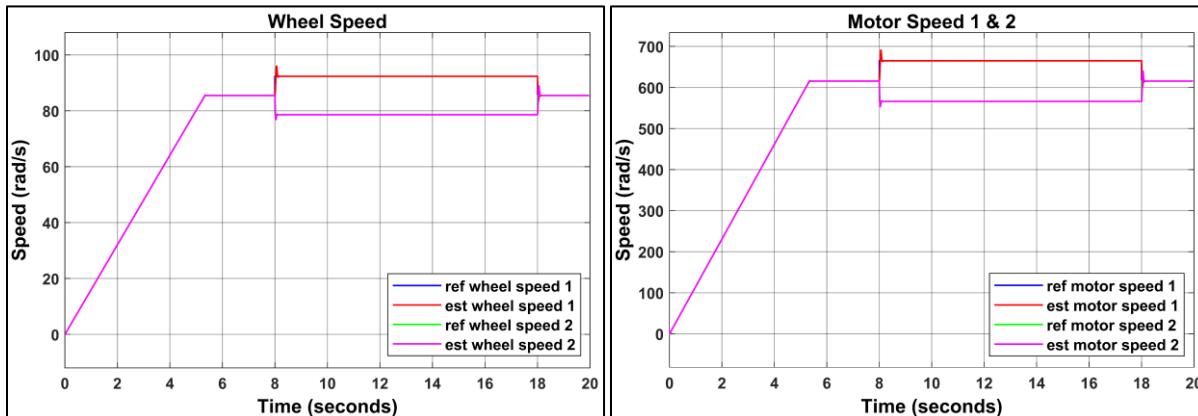


Σχήμα 0.48: Γραμμική ταχύτητα κινητήρων τροχών (Linear traction wheels speed)



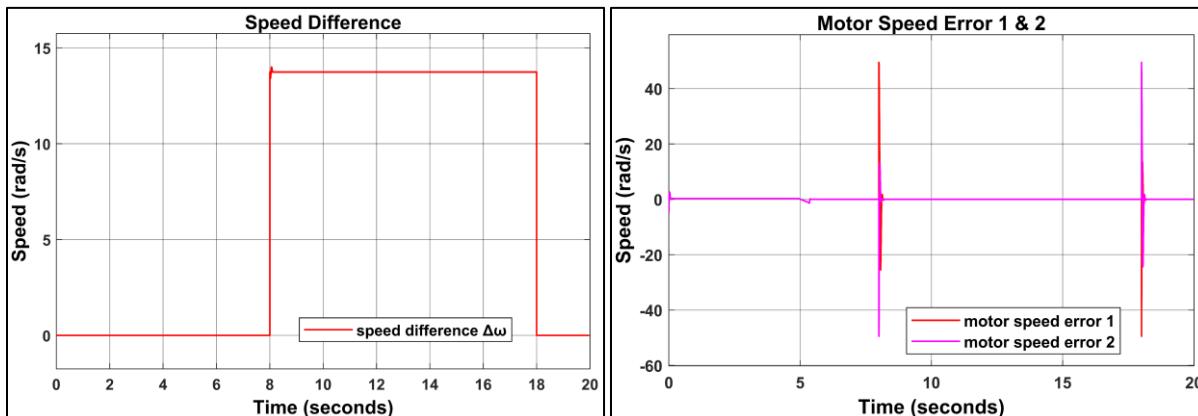
Σχήμα 0.49: Γραμμική ταχύτητα κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (Linear traction wheels speed in zoom)

Σχήμα 0.50: Γραμμική ταχύτητα κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (Linear traction wheels speed in zoom)



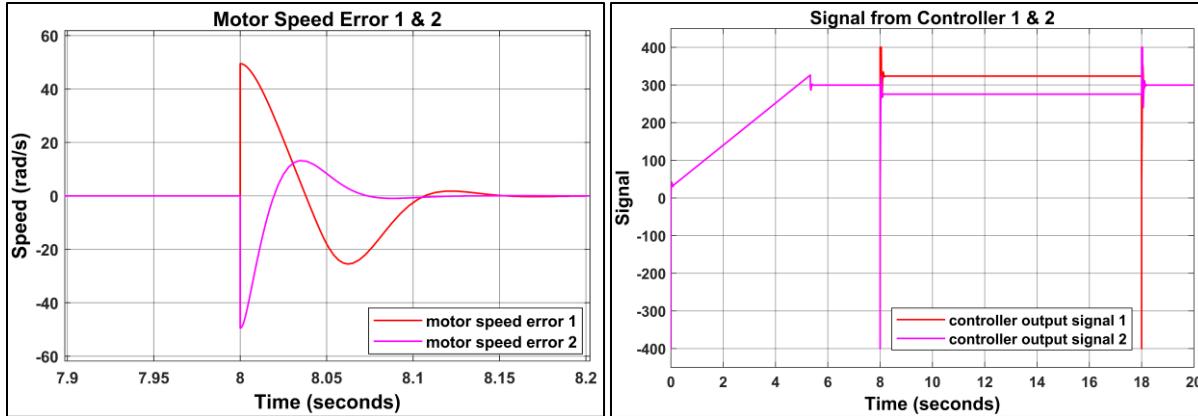
Σχήμα 0.51: Γωνιακή ταχύτητα κινητήριων τροχών (traction wheels speed)

Σχήμα 0.52: Γωνιακή ταχύτητα κινητήρων (motors speed)



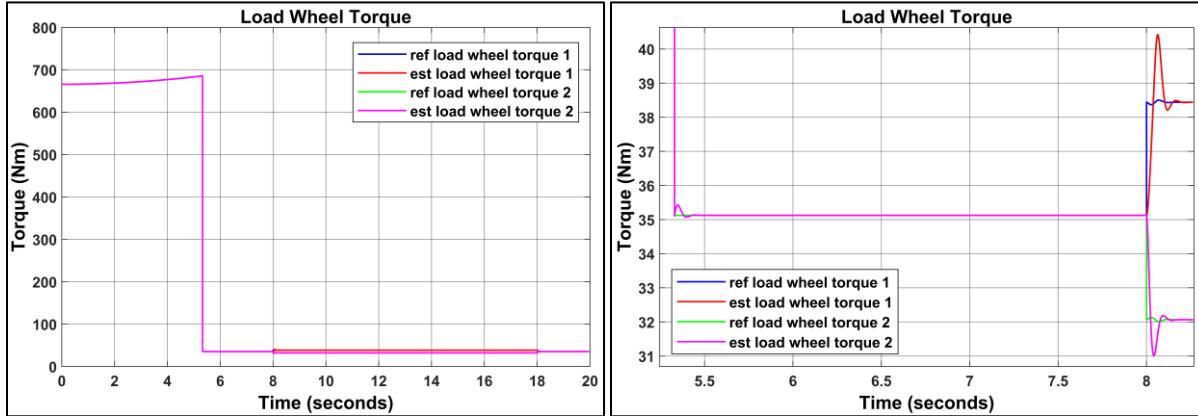
Σχήμα 0.53: Διαφορά γωνιακής ταχύτητας των κινητήριων τροχών (traction wheels speed difference)

Σχήμα 0.54: Σφάλμα γωνιακής ταχύτητας κινητήρων (motors speed error)



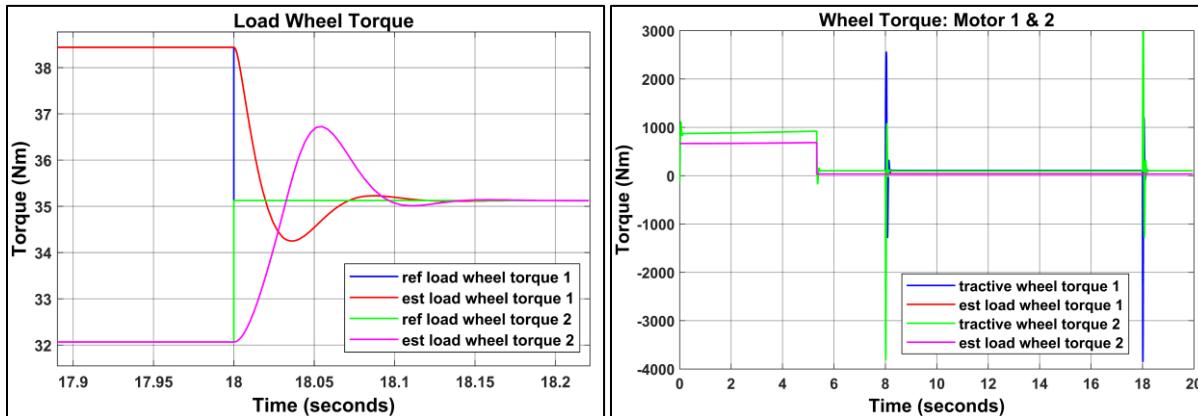
Σχήμα 0.55: Σφάλμα γωνιακής ταχύτητας κινητήρων σε μεγέθυνση (motors speed error in zoom)

Σχήμα 0.56: Σήμα ελέγχου του συστήματος (system control signal)



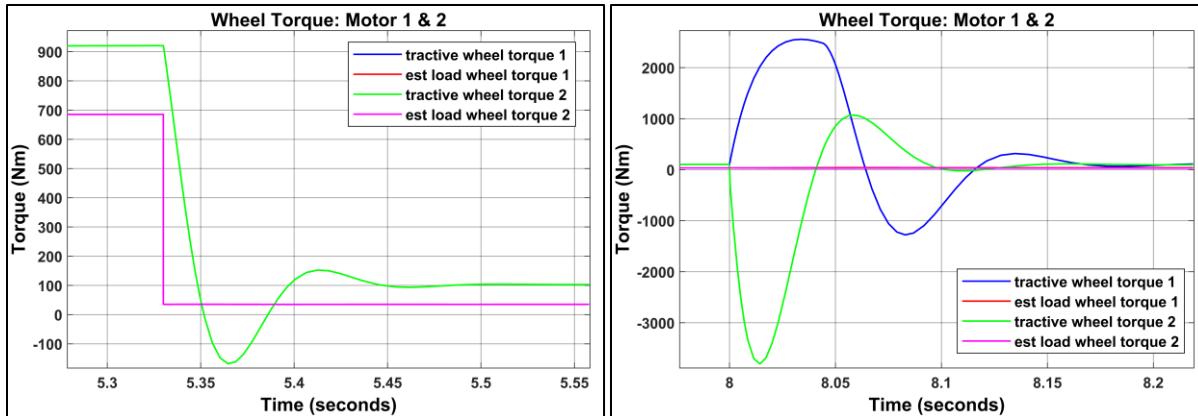
Σχήμα 0.57: Φορτίο ροπής κινητήρων τροχών (load traction wheels torque)

Σχήμα 0.58: Φορτίο ροπής κινητήρων τροχών σε μεγέθυνση (load traction wheels torque in zoom)



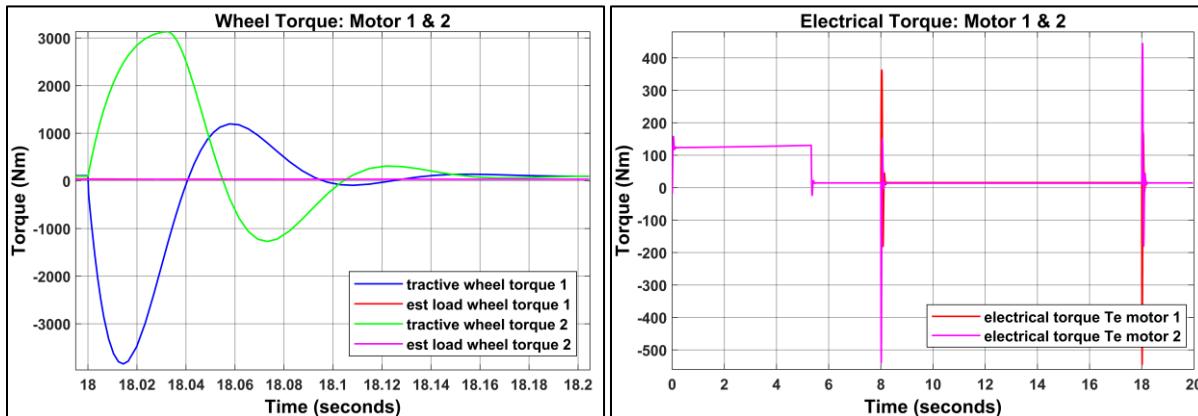
Σχήμα 0.59: Φορτίο ροπής κινητήρων τροχών σε μεγέθυνση (load traction wheels torque in zoom)

Σχήμα 0.60: Ροπή έλξης κινητήρων τροχών (tractive wheels torque)



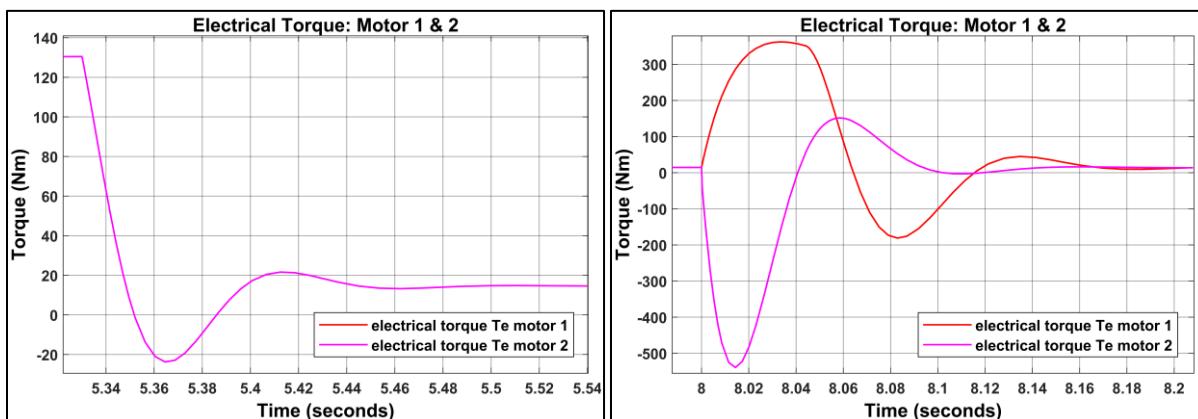
Σχήμα 0.61: Ροπή έλξης κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση  
(tractive wheels torque in zoom)

Σχήμα 0.62: Ροπή έλξης κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση  
(tractive wheels torque in zoom)



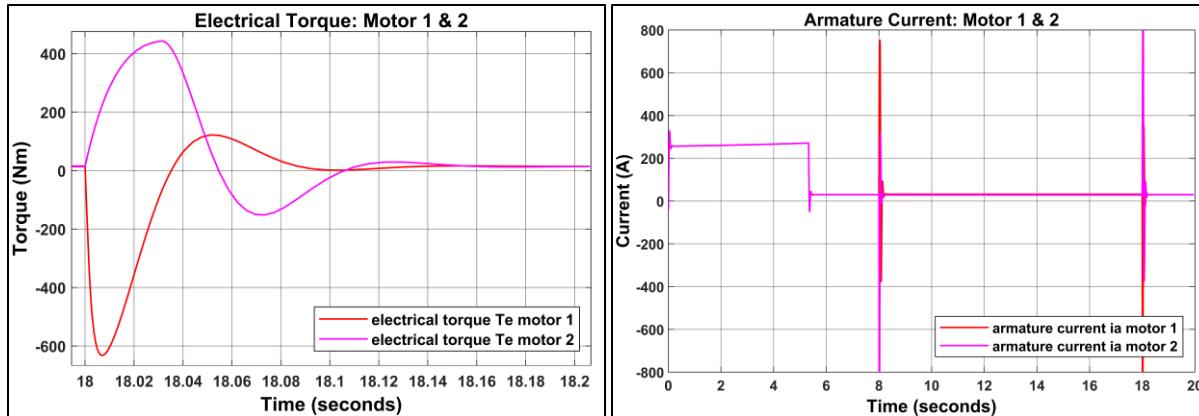
Σχήμα 0.63: Ροπή έλξης κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση  
(tractive wheels torque in zoom)

Σχήμα 0.64: Ηλεκτρική ροπή (electrical torque)



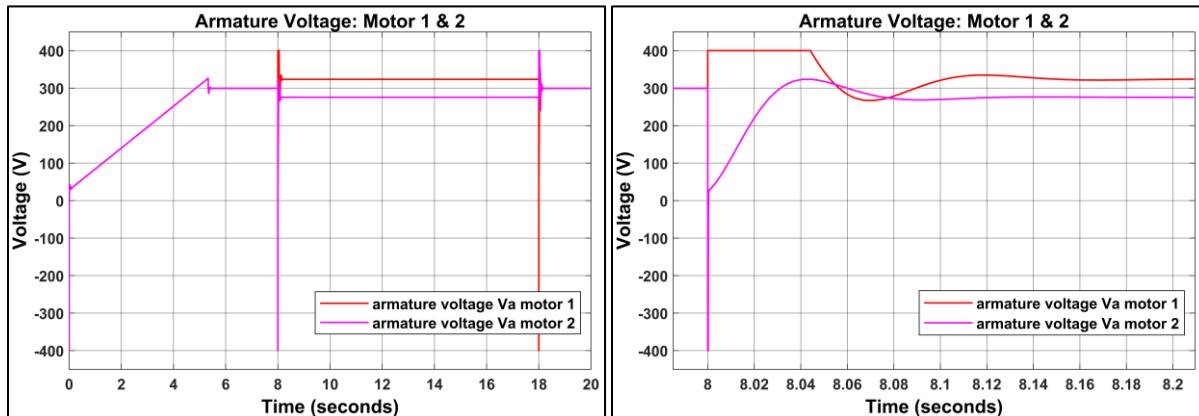
Σχήμα 0.65: Ηλεκτρική ροπή σε μεγέθυνση (electrical torque  
in zoom)

Σχήμα 0.66: Ηλεκτρική ροπή σε μεγέθυνση (electrical torque  
in zoom)



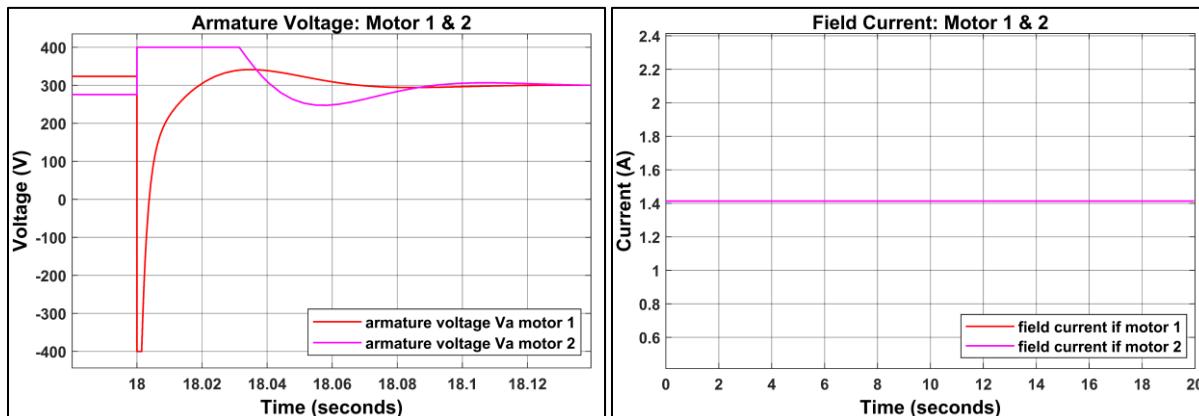
Σχήμα 0.67: Ηλεκτρική ροπή σε μεγέθυνση (electrical torque in zoom)

Σχήμα 0.68: Ρεύμα τυλιγμάτων τυμπάνου (armature current)



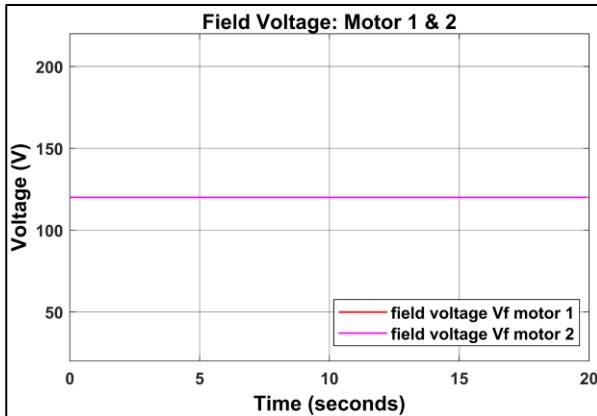
Σχήμα 0.69: Τάση τυμπάνου (armature voltage)

Σχήμα 0.70: Τάση τυμπάνου σε μεγέθυνση (armature voltage in zoom)



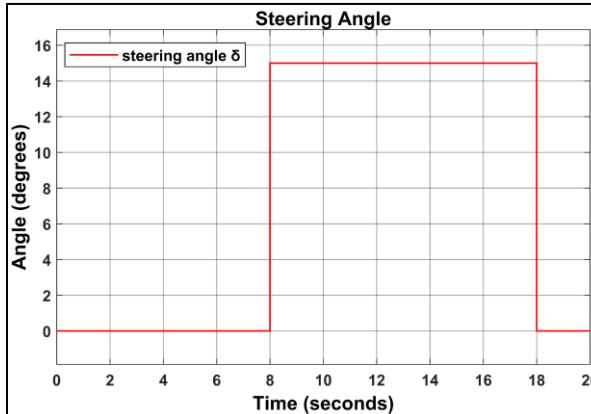
Σχήμα 0.71: Τάση τυμπάνου σε μεγέθυνση (armature voltage in zoom)

Σχήμα 0.72: Ρεύμα τυλιγμάτων πεδίου (field current)

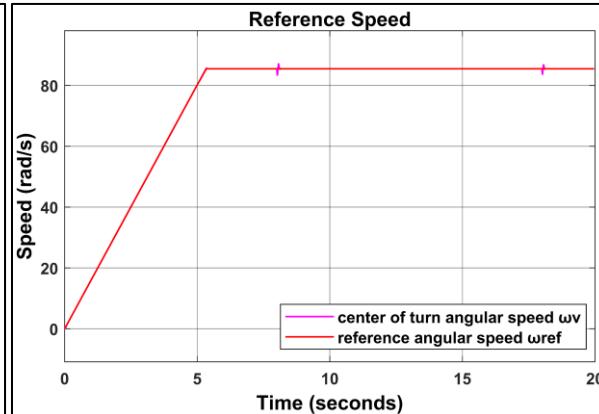


Σχήμα 0.73: Τάση πεδίου (field voltage)

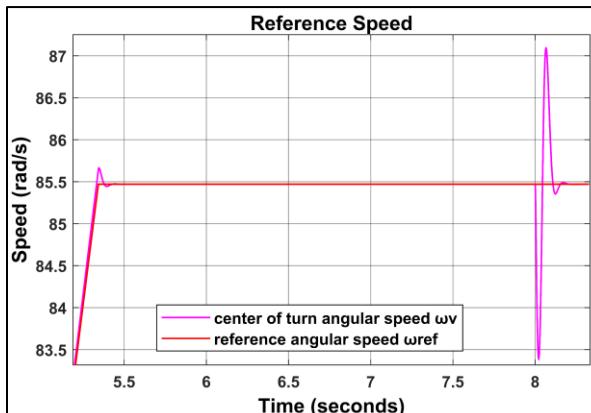
Μοντέλο 1 - Σενάριο 4: Στροφή αριστερή και επιταχυνόμενη κίνηση μέχρι την σταθερή ταχύτητα των 80km/h (Counter-clockwise-curved road and accelerated motion up to the constant speed of 80 km/h)



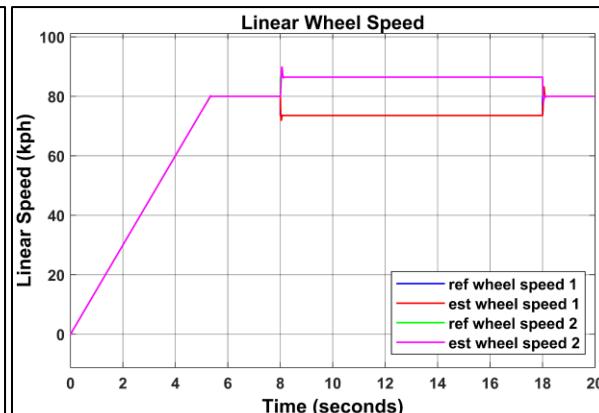
Σχήμα 0.74: Γωνία τιμονιού (steering angle)



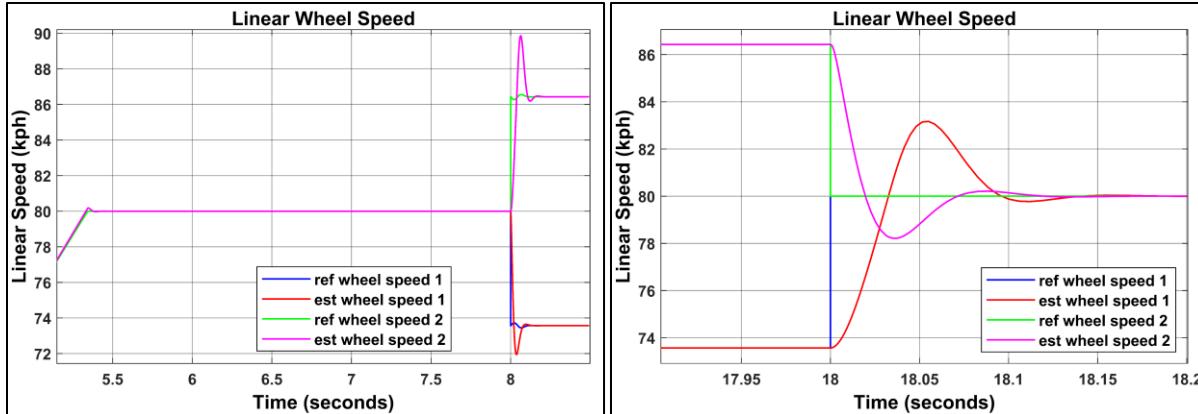
Σχήμα 0.75: Γωνιακή ταχύτητα αναφοράς (reference speed)



Σχήμα 0.76: Γωνιακή ταχύτητα αναφοράς σε μεγέθυνση (reference speed in zoom)

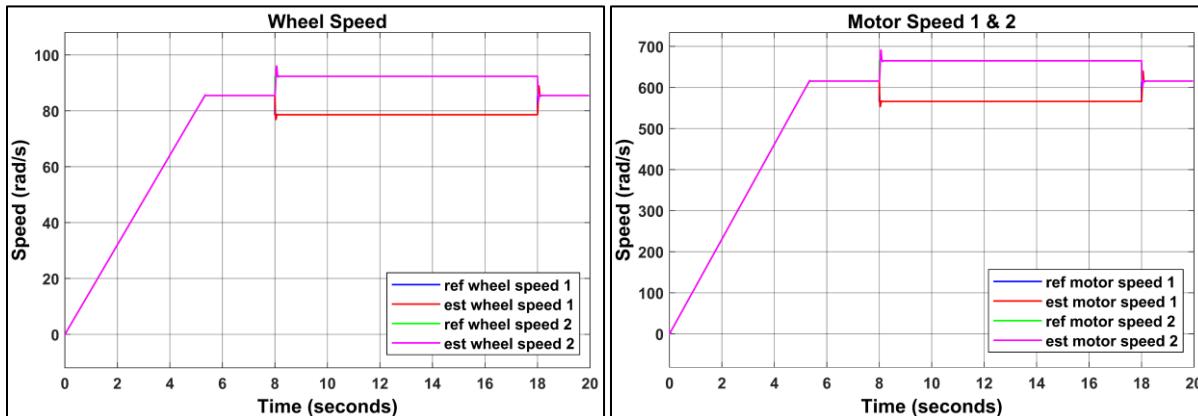


Σχήμα 0.77: Γραμμική ταχύτητα κινητήριων τροχών (Linear traction wheels speed)



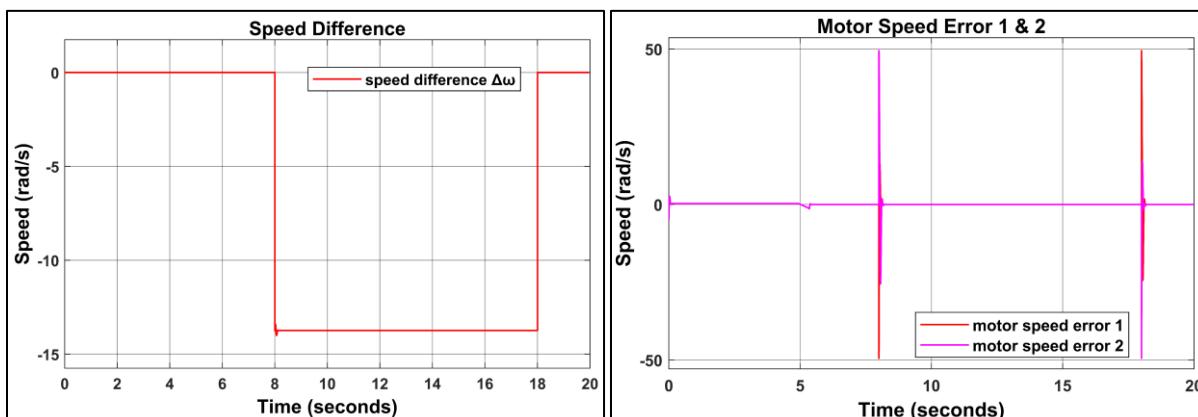
Σχήμα 0.78: Γραμμική ταχύτητα κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (Linear traction wheels speed in zoom)

Σχήμα 0.79: Γραμμική ταχύτητα κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (Linear traction wheels speed in zoom)



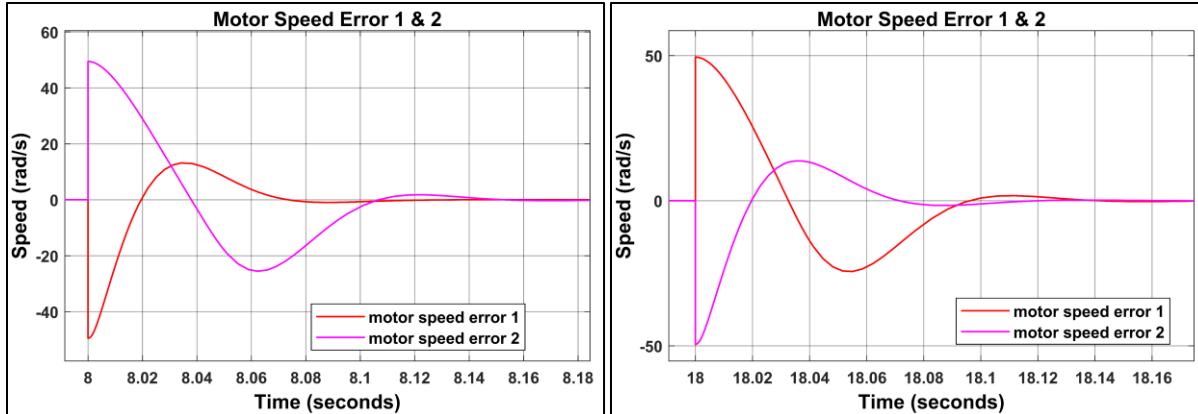
Σχήμα 0.80: Γωνιακή ταχύτητα κινητήριων τροχών (traction wheels speed)

Σχήμα 0.81: Γωνιακή ταχύτητα κινητήρων (motors speed)



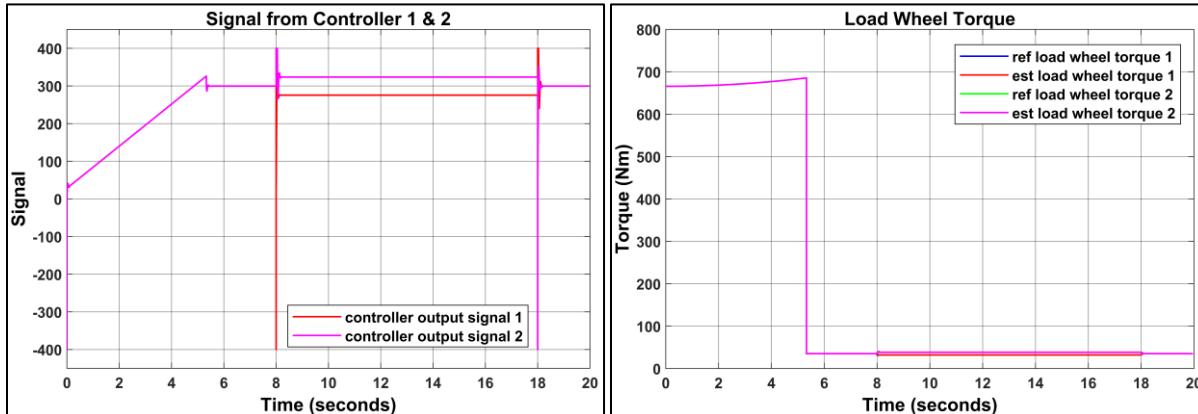
Σχήμα 0.82: Διαφορά γωνιακής ταχύτητας των κινητήριων τροχών (traction wheels speed difference)

Σχήμα 0.83: Σφάλμα γωνιακής ταχύτητας κινητήρων (motors speed error)



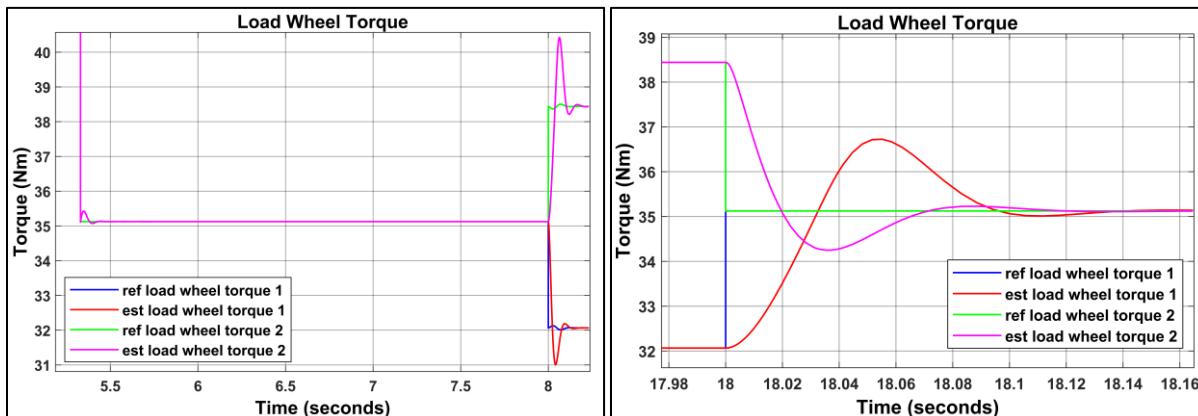
Σχήμα 0.84: Σφάλμα γωνιακής ταχύτητας κινητήρων σε μεγέθυνση (motors speed error in zoom)

Σχήμα 0.85: Σφάλμα γωνιακής ταχύτητας κινητήρων σε μεγέθυνση (motors speed error in zoom)



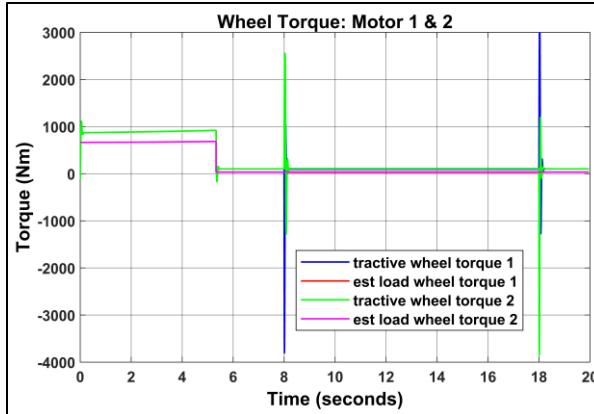
Σχήμα 0.86: Σήμα ελέγχου του συστήματος (system control signal)

Σχήμα 0.87: Φορτίο ροπής κινητήρων τροχών (load traction wheels torque)

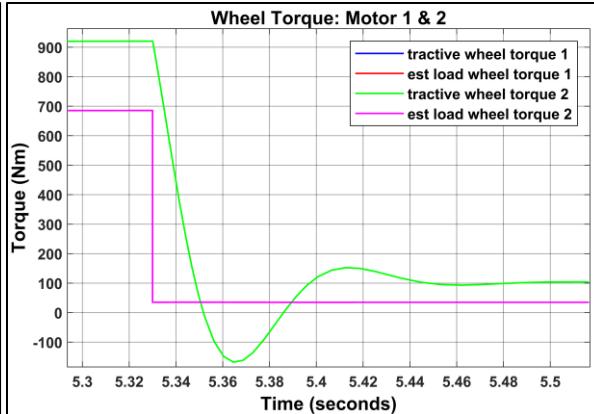


Σχήμα 0.88: Φορτίο ροπής κινητήρων τροχών σε μεγέθυνση (load traction wheels torque in zoom)

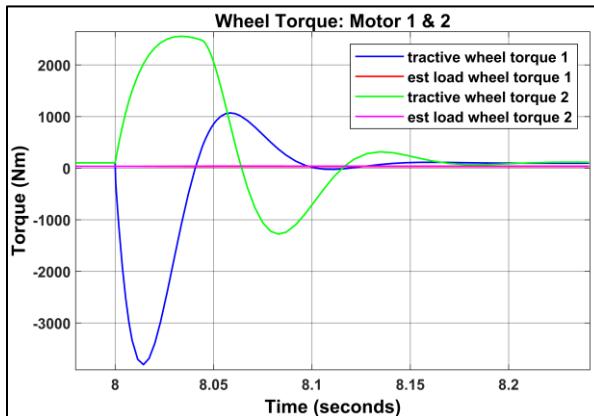
Σχήμα 0.89: Φορτίο ροπής κινητήρων τροχών σε μεγέθυνση (load traction wheels torque in zoom)



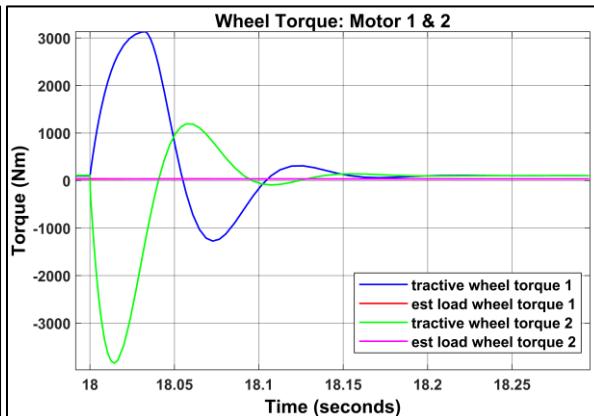
Σχήμα 0.90: Ροπή έλξης κινητήριων τροχών (tractive wheels torque)



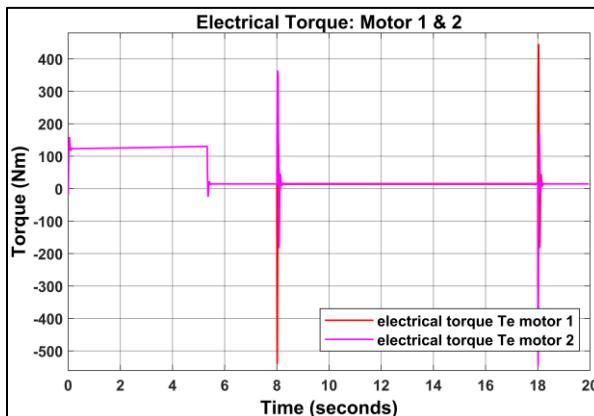
Σχήμα 0.91: Ροπή έλξης κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (tractive wheels torque in zoom)



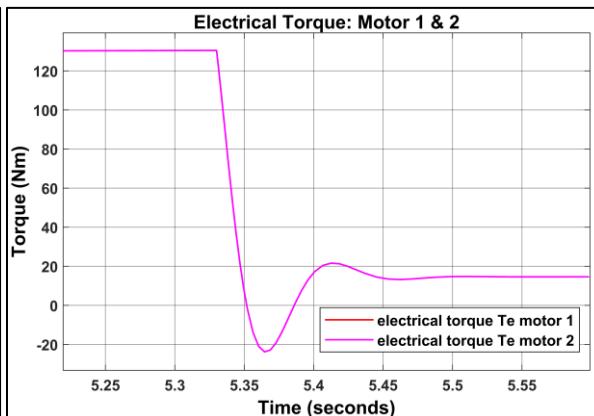
Σχήμα 0.92: Ροπή έλξης κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (tractive wheels torque in zoom)



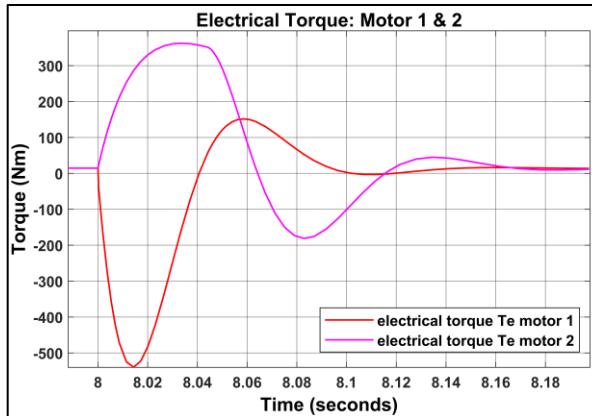
Σχήμα 0.93: Ροπή έλξης κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (tractive wheels torque in zoom)



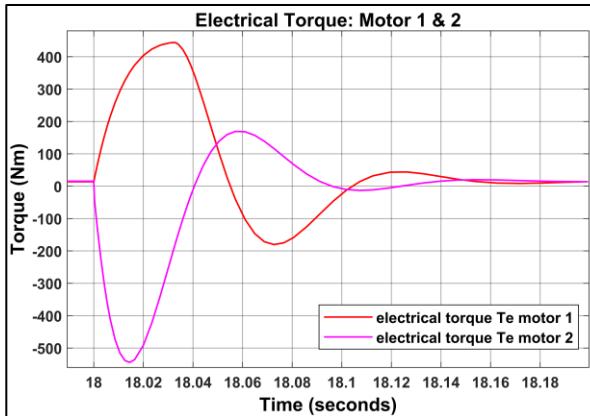
Σχήμα 0.94: Ηλεκτρική ροπή (electrical torque)



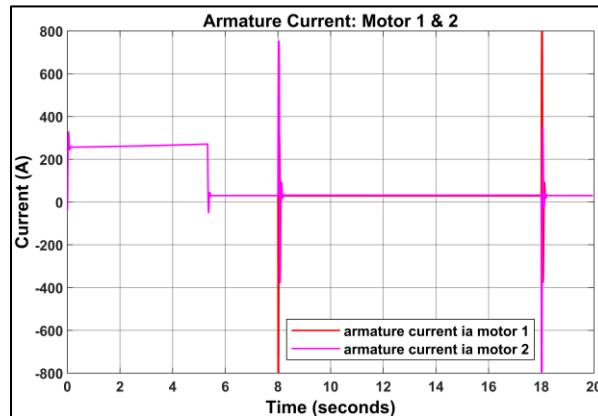
Σχήμα 0.95: Ηλεκτρική ροπή σε μεγέθυνση (electrical torque in zoom)



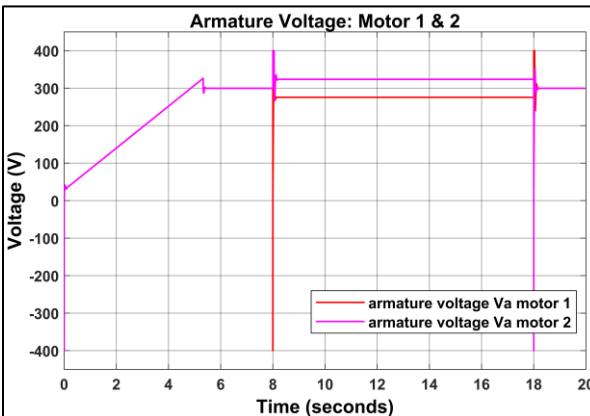
Σχήμα 0.96: Ηλεκτρική ροπή σε μεγέθυνση (electrical torque in zoom)



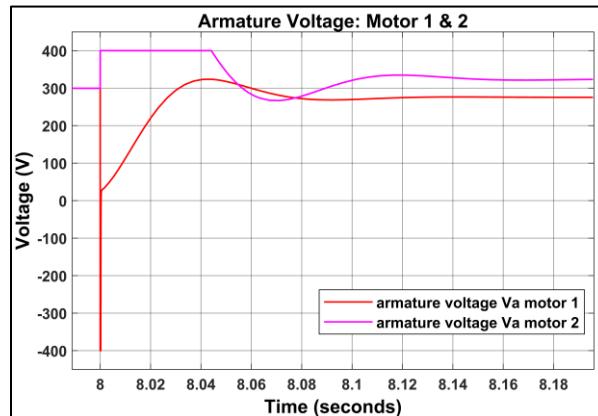
Σχήμα 0.97: Ηλεκτρική ροπή σε μεγέθυνση (electrical torque in zoom)



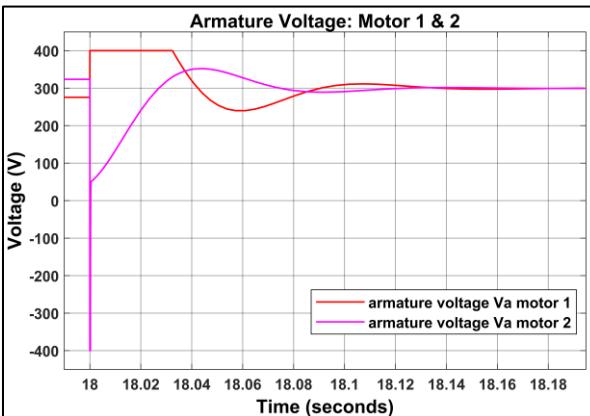
Σχήμα 0.98: Ρεύμα τυλιγμάτων τυμπάνου (armature current)



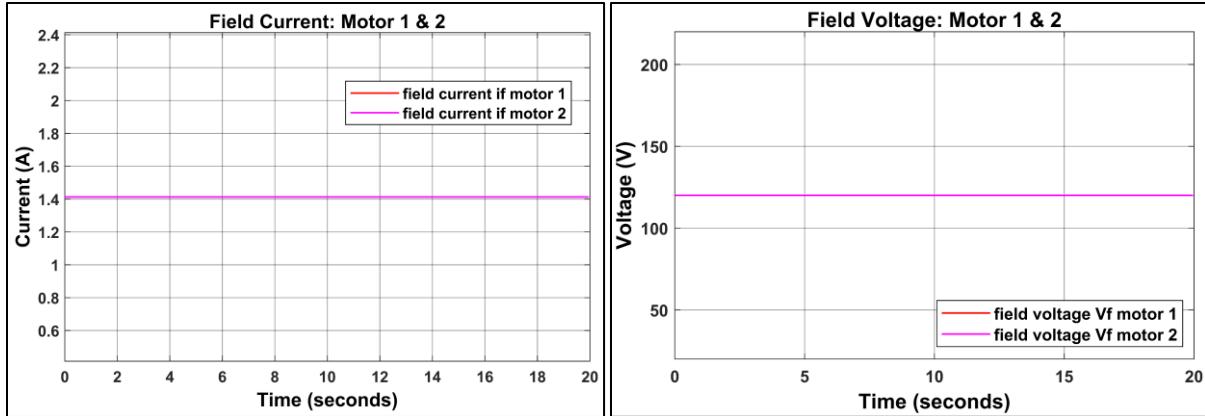
Σχήμα 0.99: Τάση τυμπάνου (armature voltage)



Σχήμα 0.100: Τάση τυμπάνου σε μεγέθυνση (armature voltage in zoom)



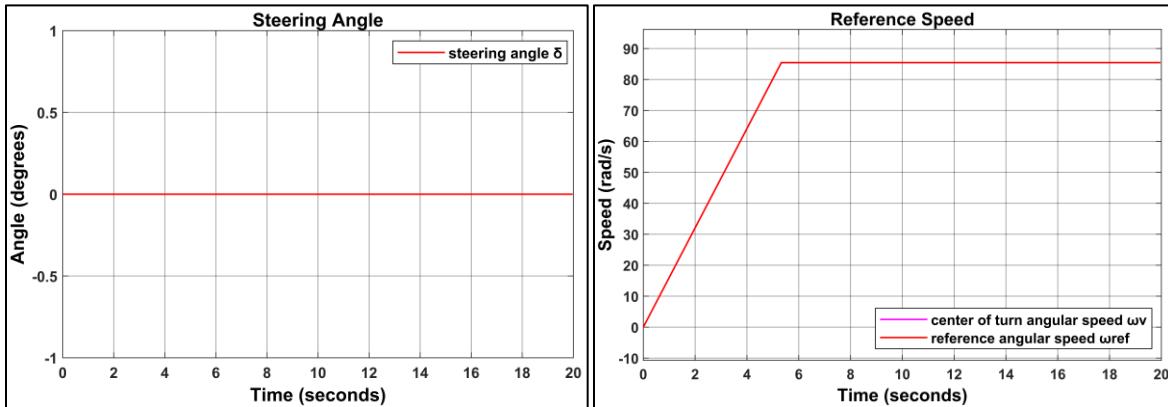
Σχήμα 0.101: Τάση τυμπάνου σε μεγέθυνση (armature voltage in zoom)



Σχήμα 0.102: Ρεύμα τυλιγμάτων πεδίου (field current)

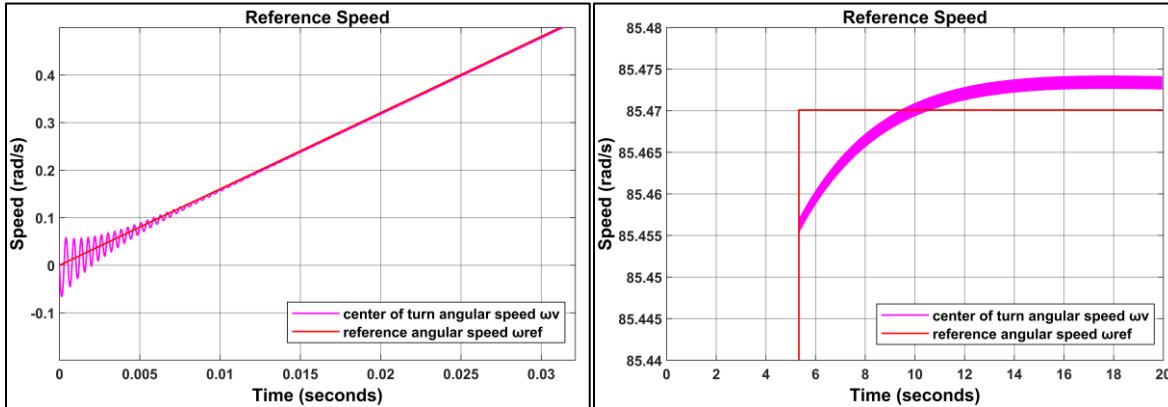
Σχήμα 0.103: Τάση πεδίου (field voltage)

Μοντέλο 2 - Σενάριο 1: Ευθύς δρόμος και επιταχυνόμενη κίνηση μέχρι την σταθερή ταχύτητα των 80km/h (Straight road and accelerated motion up to the constant speed of 80 km/h)



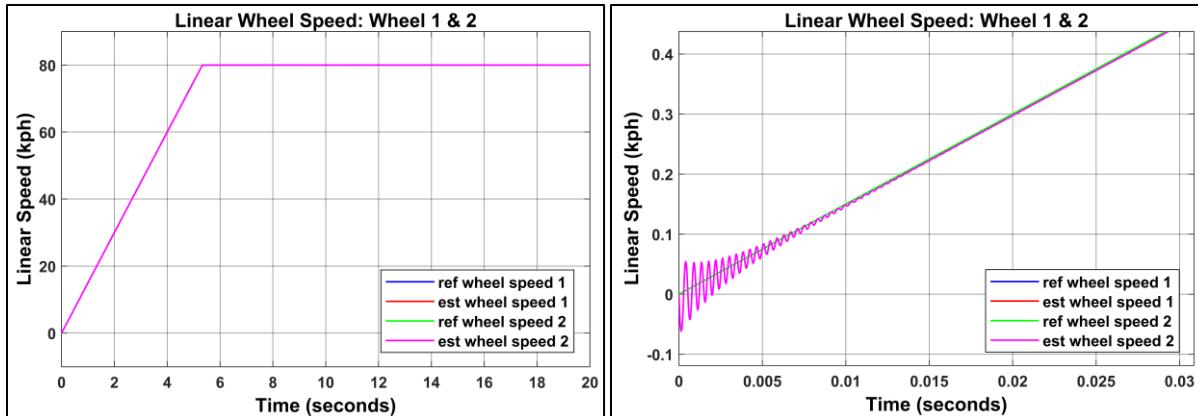
Σχήμα 0.104: Γωνία τιμονιού (steering angle)

Σχήμα 0.105: Γωνιακή ταχύτητα αναφοράς (reference speed)



Σχήμα 0.106: Γωνιακή ταχύτητα αναφοράς σε μεγέθυνση (reference speed in zoom)

Σχήμα 0.107: Γωνιακή ταχύτητα αναφοράς σε μεγέθυνση (reference speed in zoom)



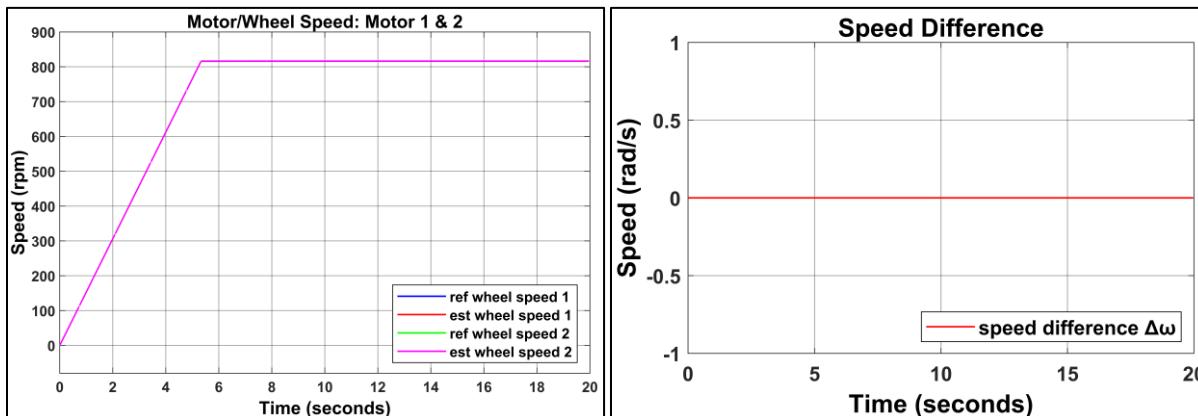
Σχήμα 0.108: Γραμμική ταχύτητα κινητήριων τροχών (Linear traction wheels speed)

Σχήμα 0.109: Γραμμική ταχύτητα κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (Linear traction wheels speed in zoom)



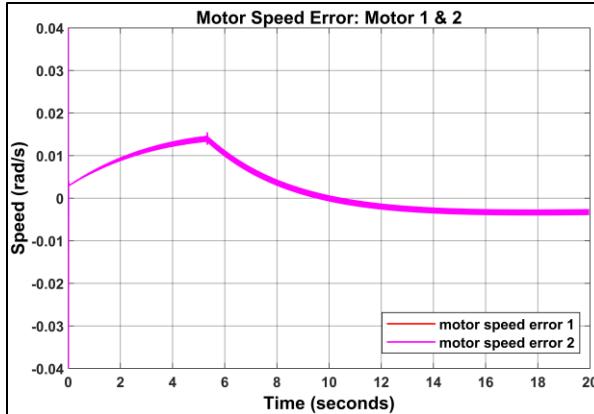
Σχήμα 0.110: Γραμμική ταχύτητα κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (Linear traction wheels speed in zoom)

Σχήμα 0.111: Γωνιακή ταχύτητα κινητήρων/κινητήριων τροχών (motors/traction wheels speed)

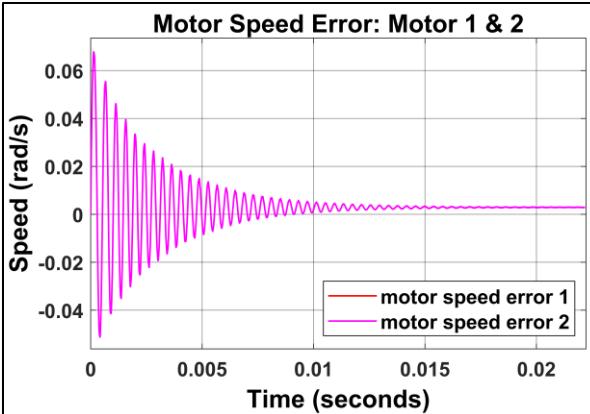


Σχήμα 0.112: Γωνιακή ταχύτητα κινητήρων/κινητήριων τροχών (motors/traction wheels speed)

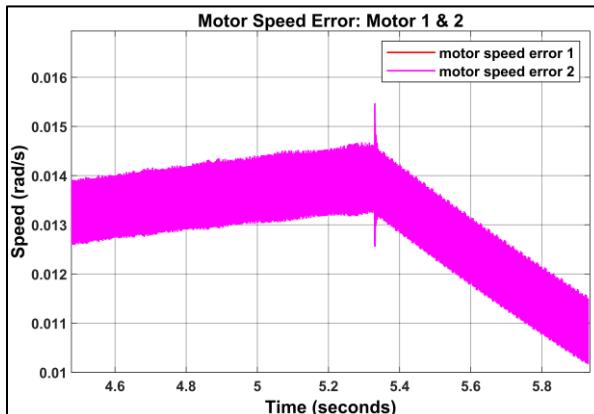
Σχήμα 0.113: Διαφορά γωνιακής ταχύτητας των κινητήριων τροχών (traction wheels speed difference)



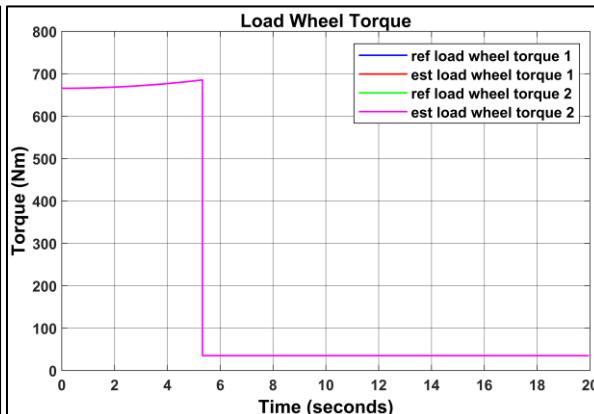
Σχήμα 0.114: Σφάλμα γωνιακής ταχύτητας κινητήρων (motors speed error)



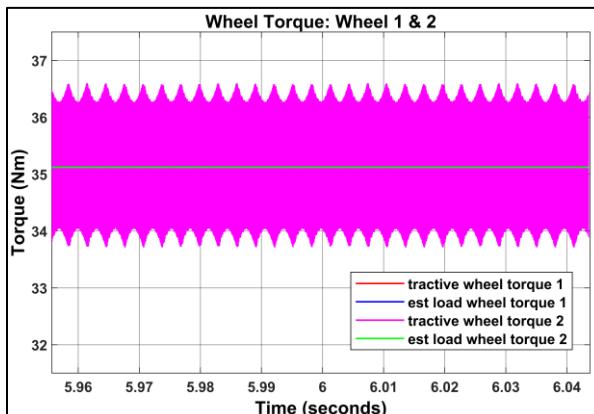
Σχήμα 0.115: Σφάλμα γωνιακής ταχύτητας κινητήρων σε μεγέθυνση (motors speed error in zoom)



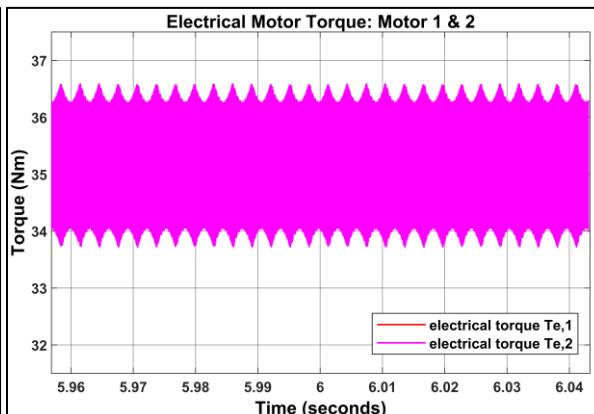
Σχήμα 0.116: Σφάλμα γωνιακής ταχύτητας κινητήρων σε μεγέθυνση (motors speed error in zoom)



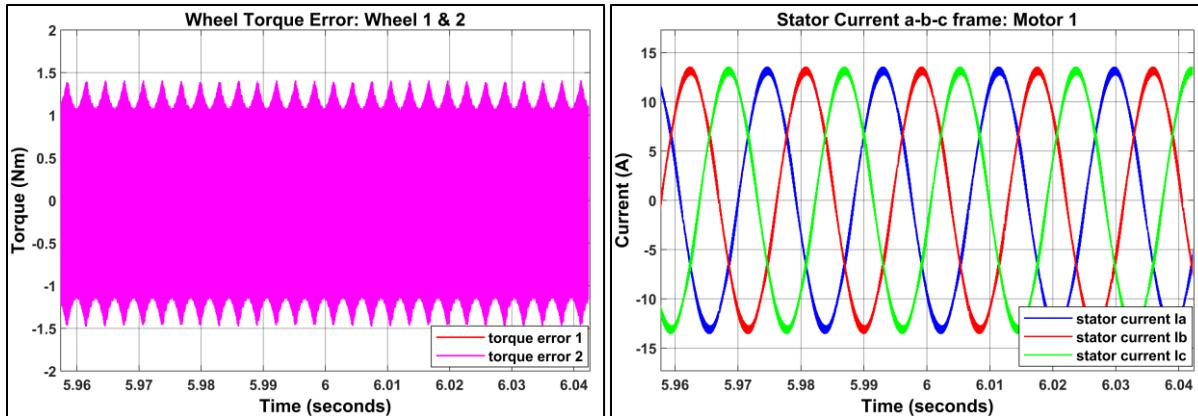
Σχήμα 0.117: Φορτίο ροπής κινητήρων τροχών (load traction wheels torque)



Σχήμα 0.118: Ροπή έλξης κινητήρων τροχών σε μεγέθυνση (tractive wheels torque in zoom)

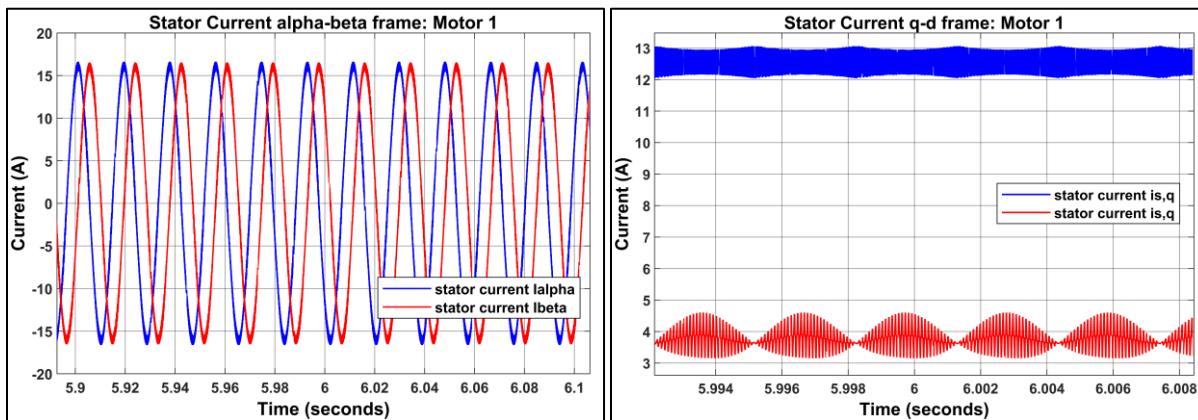


Σχήμα 0.119: Ηλεκτρική ροπή σε μεγέθυνση (electrical torque in zoom)



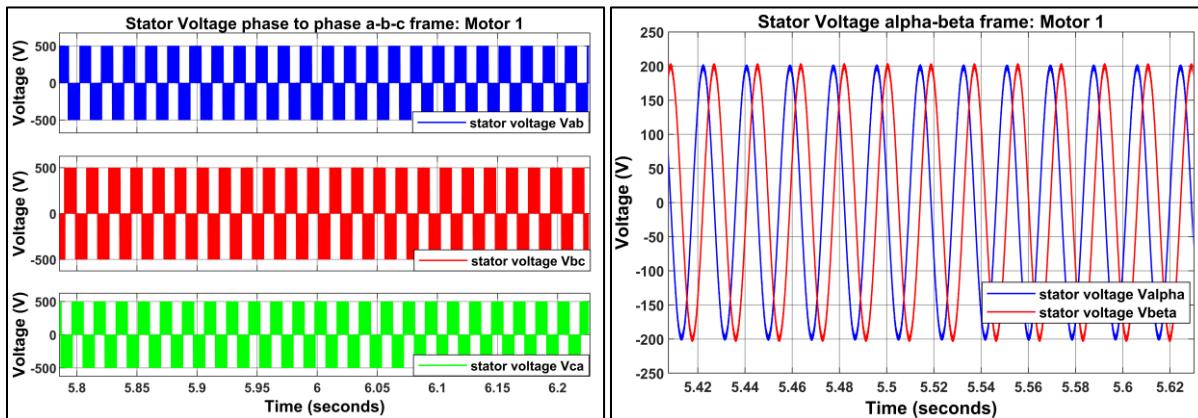
Σχήμα 0.120: Σφάλμα ροπής έλξης κινητήρων τροχών σε μεγέθυνση (tractive wheels torque error in zoom)

Σχήμα 0.121: Ρεύμα στάτορα του κινητήρα 1 σε a-b-c πλαίσιο αναφοράς (Stator current of motor 1 in a-b-c reference frame)



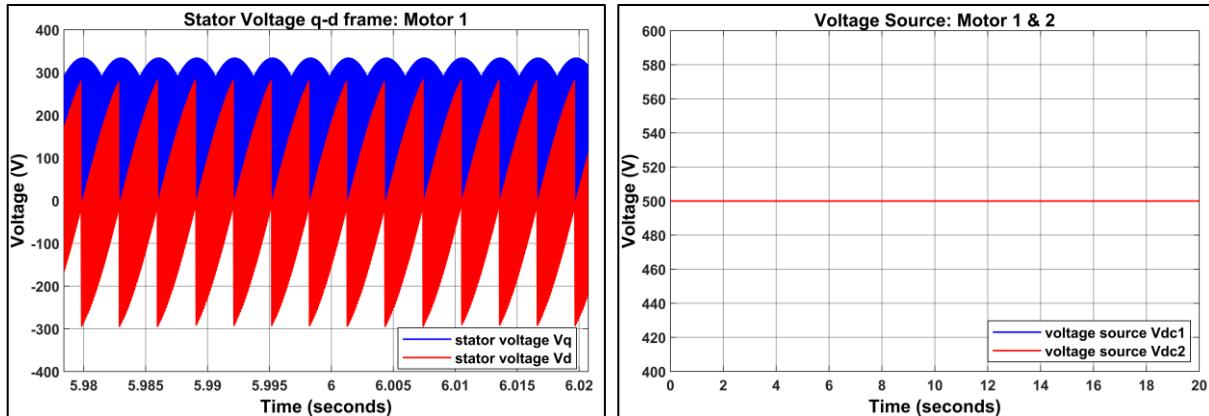
Σχήμα 0.122: Ρεύμα στάτορα του κινητήρα 1 σε alpha-beta πλαίσιο αναφοράς, σε μεγέθυνση (Stator current of motor 1 in alpha-beta reference frame, in zoom)

Σχήμα 0.123: Ρεύμα στάτορα του κινητήρα 1 σε q-d πλαίσιο αναφοράς, σε μεγέθυνση (Stator current of motor 1 in q-d reference frame, in zoom)



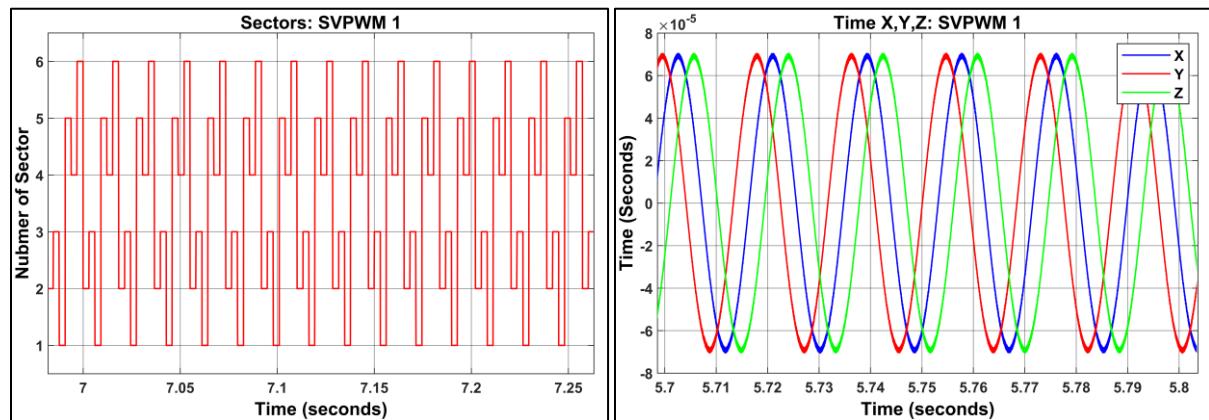
Σχήμα 0.124: Τάση στάτορα του κινητήρα 1 σε a-b-c πλαίσιο αναφοράς, σε μεγέθυνση (Stator voltage of motor 1 in a-b-c reference frame, in zoom)

Σχήμα 0.125: Τάση στάτορα του κινητήρα 1 σε alpha-beta πλαίσιο αναφοράς, σε μεγέθυνση (Stator voltage of motor 1 in alpha-beta reference frame, in zoom)



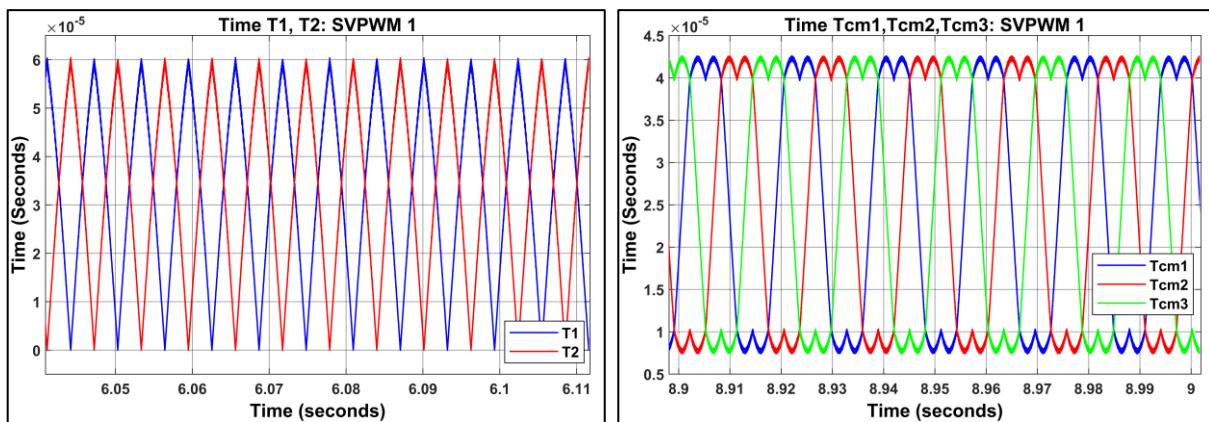
Σχήμα 0.126: Τάση στάτορα του κινητήρα 1 σε q-d πλαισιο αναφοράς, σε μεγέθυνση (Stator voltage of motor 1 in q-d reference frame, in zoom)

Σχήμα 0.127: Τάση τροφοδοσίας (Supply voltage)



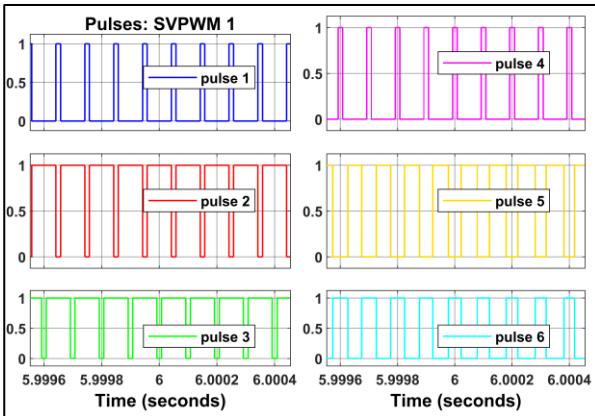
Σχήμα 0.128: Ακολουθία τομέων της μεθόδου SVPWM 1  
(Sectors sequence of SVPWM method 1)

Σχήμα 0.129: Χρονικές μεταβλητές X, Y, Z της μεθόδου SVPWM 1 (Time variables X, Y, Z of the SVPWM method 1)



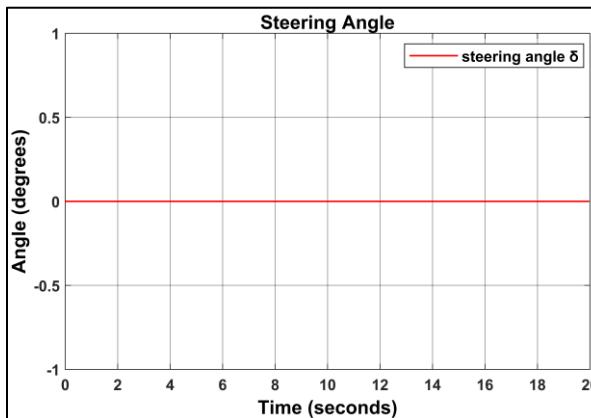
Σχήμα 0.130: Ενεργός χρόνος T1, T2 της μεθόδου SVPWM 1  
(Active time T1, T2 of SVPWM method 1)

Σχήμα 0.131: Σημεία εναλλαγής διανυσμάτων  $T_{cm1}$ ,  $T_{cm2}$ ,  $T_{cm3}$  της μεθόδου SVPWM 1 (Points switching vector voltage of SVPWM method 1)

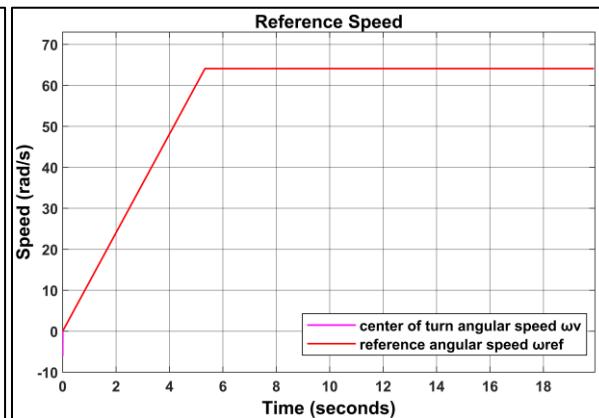


Σχήμα 0.132: Παλμοί της μεθόδου SVPWM 1 (Pulses of SVPWM method 1)

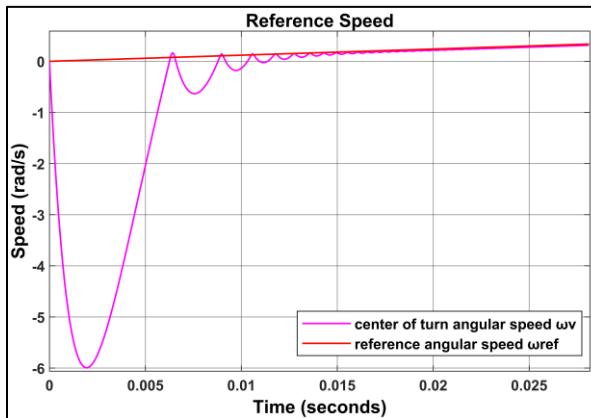
Μοντέλο 2 - Σενάριο 2: Ευθύς δρόμος με ανωφέρεια 8% και σταθερή ταχύτητα 60km/h (Straight road with 8% slope at 60 km/h speed)



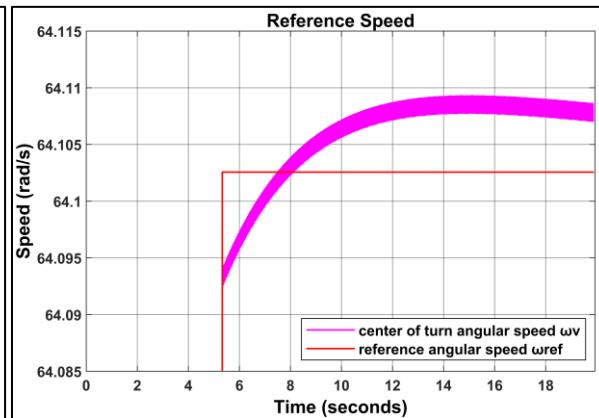
Σχήμα 0.133: Γωνία τιμονιού (steering angle)



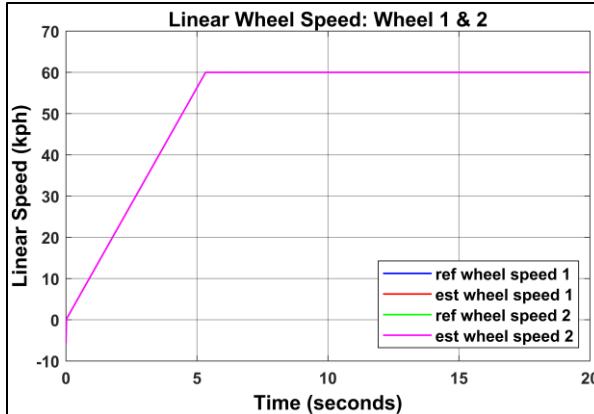
Σχήμα 0.134: Γωνιακή ταχύτητα αναφοράς (reference speed)



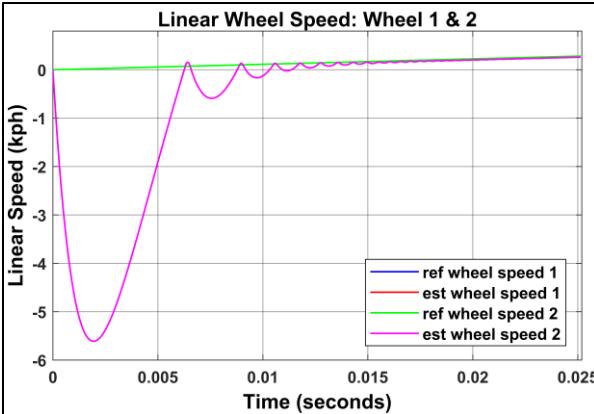
Σχήμα 0.135: Γωνιακή ταχύτητα αναφοράς σε μεγέθυνση (reference speed in zoom)



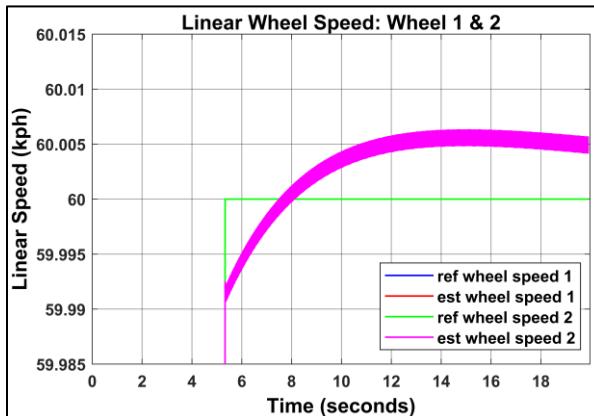
Σχήμα 0.136: Γωνιακή ταχύτητα αναφοράς σε μεγέθυνση (reference speed in zoom)



Σχήμα 0.137: Γραμμική ταχύτητα κινητήριων τροχών (Linear traction wheels speed)



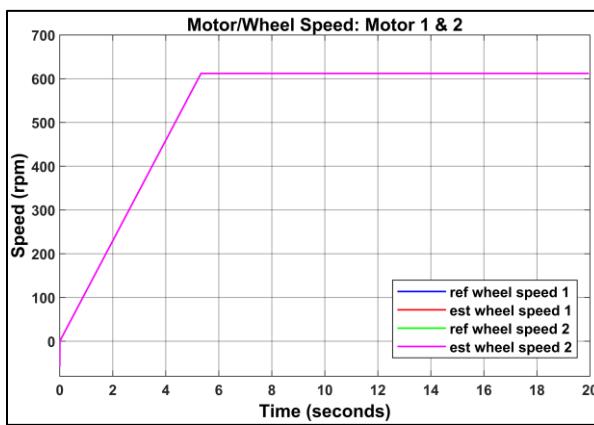
Σχήμα 0.138: Γραμμική ταχύτητα κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (Linear traction wheels speed in zoom)



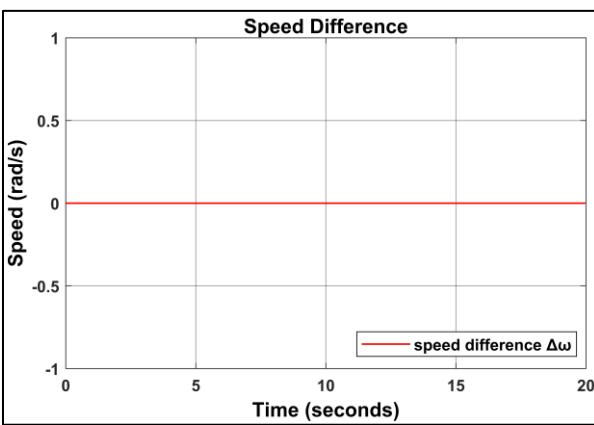
Σχήμα 0.139: Γραμμική ταχύτητα κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (Linear traction wheels speed in zoom)



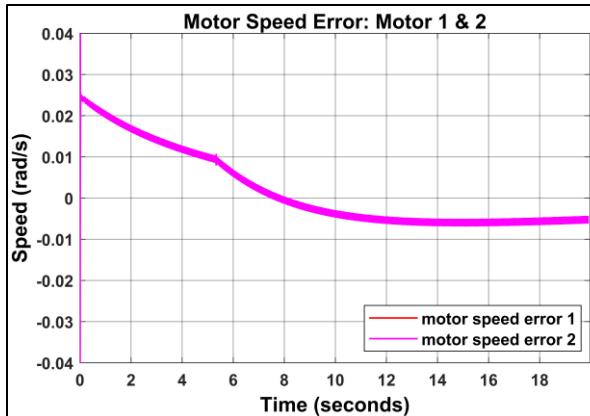
Σχήμα 0.140: Γωνιακή ταχύτητα κινητήρων/κινητήριων τροχών (motors/traction wheels speed)



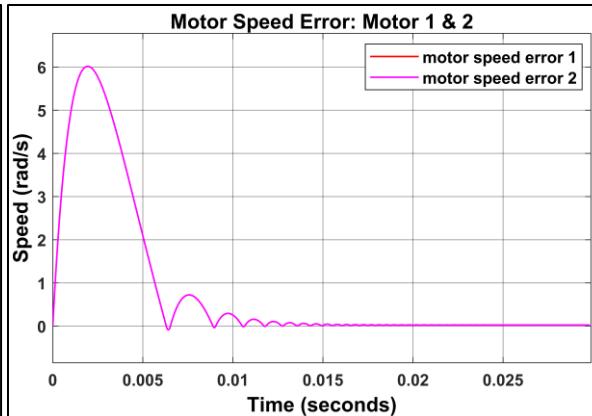
Σχήμα 0.141: Γωνιακή ταχύτητα κινητήρων/κινητήριων τροχών (motors/traction wheels speed)



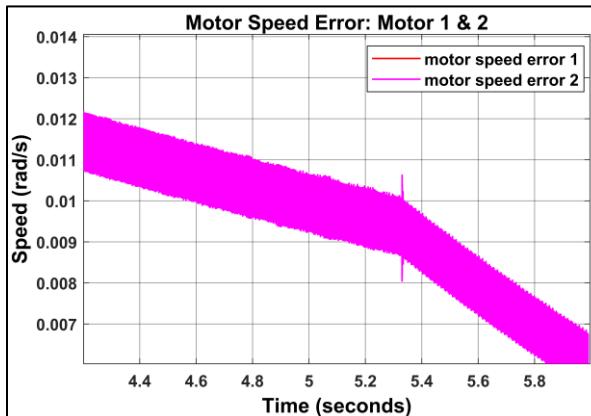
Σχήμα 0.142: Διαφορά γωνιακής ταχύτητας των κινητήριων τροχών (traction wheels speed difference)



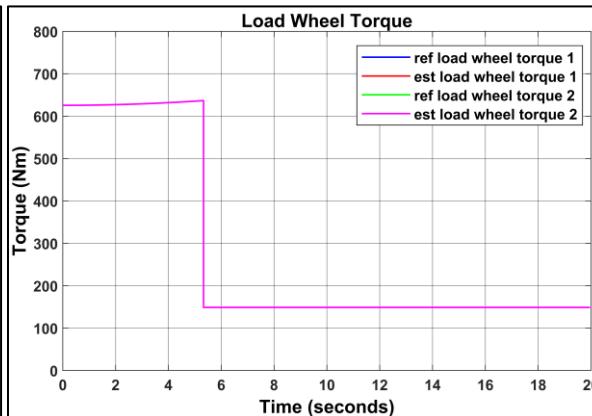
Σχήμα 0.143: Σφάλμα γωνιακής ταχύτητας κινητήρων (motors speed error)



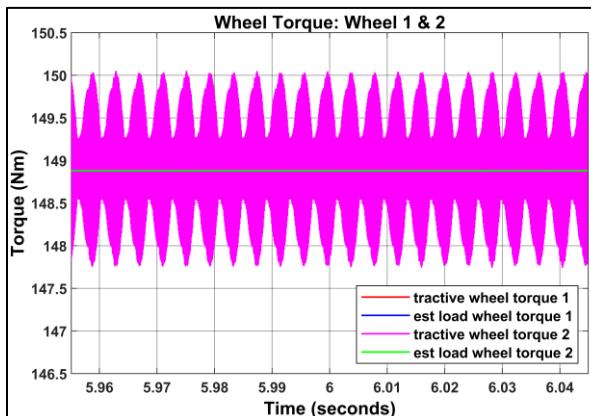
Σχήμα 0.144: Σφάλμα γωνιακής ταχύτητας κινητήρων σε μεγέθυνση (motors speed error in zoom)



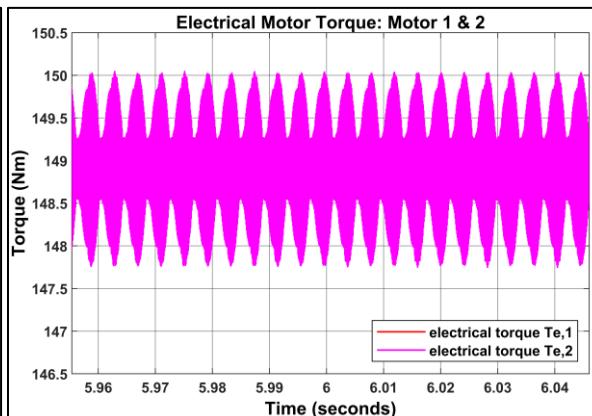
Σχήμα 0.145: Σφάλμα γωνιακής ταχύτητας κινητήρων σε μεγέθυνση (motors speed error in zoom)



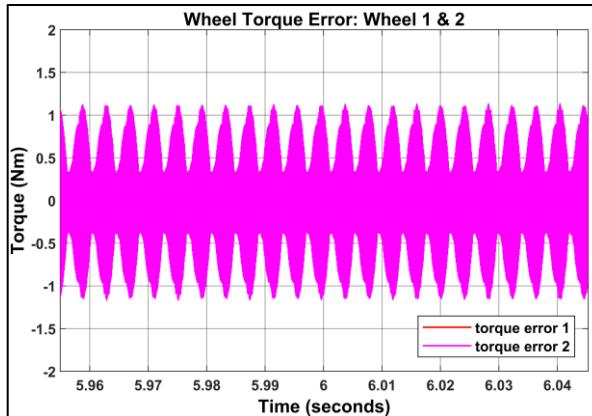
Σχήμα 0.146: Φορτίο ροπής κινητήρων τροχών (load traction wheels torque)



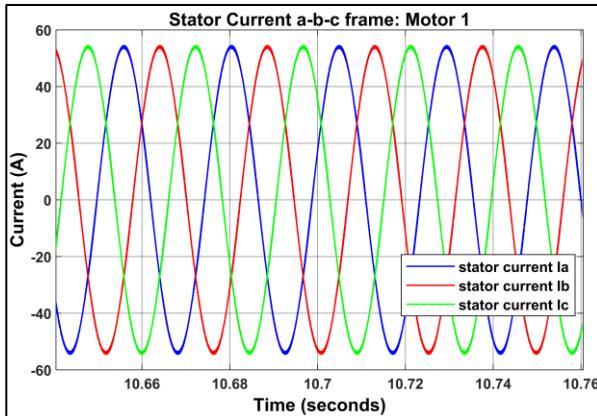
Σχήμα 0.147: Ροπή έλξης κινητήρων τροχών σε μεγέθυνση (tractive wheels torque in zoom)



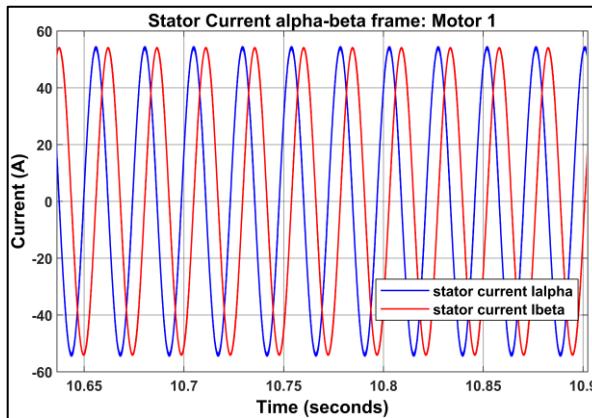
Σχήμα 0.148: Ηλεκτρική ροπή σε μεγέθυνση (electrical torque in zoom)



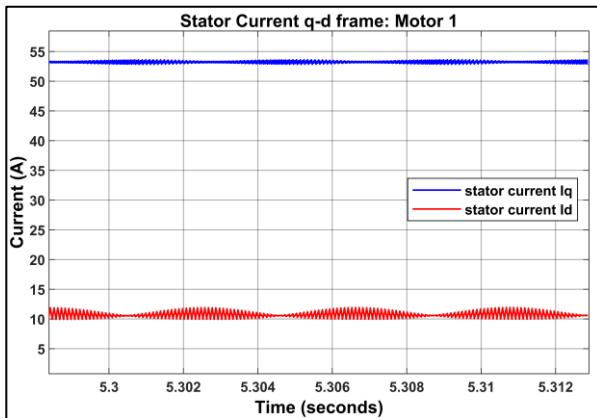
Σχήμα 0.149: Σφάλμα ροπής έλξης κινητήρων τροχών σε μεγέθυνση (tractive wheels torque error in zoom)



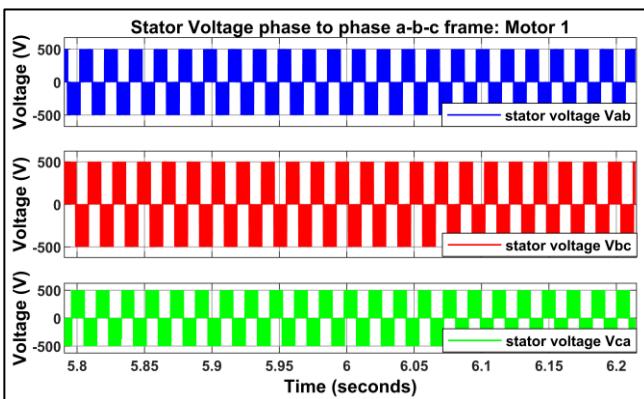
Σχήμα 0.150: Ρεύμα στάτορα του κινητήρα 1 σε a-b-c πλαίσιο αναφοράς, σε μεγέθυνση (Stator current of motor 1 in a-b-c reference frame, in zoom)



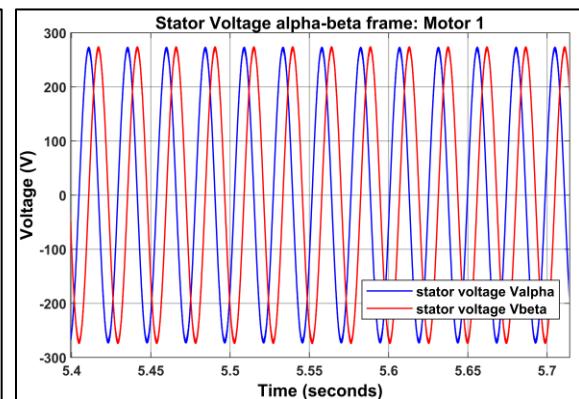
Σχήμα 0.151: Ρεύμα στάτορα του κινητήρα 1 σε alpha-beta πλαίσιο αναφοράς, σε μεγέθυνση (Stator current of motor 1 in alpha-beta reference frame, in zoom)



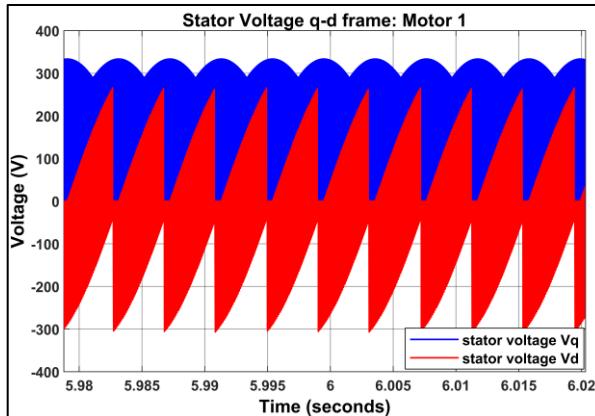
Σχήμα 0.152: Ρεύμα στάτορα του κινητήρα 1 σε q-d πλαίσιο αναφοράς, σε μεγέθυνση (Stator current of motor 1 in q-d reference frame, in zoom)



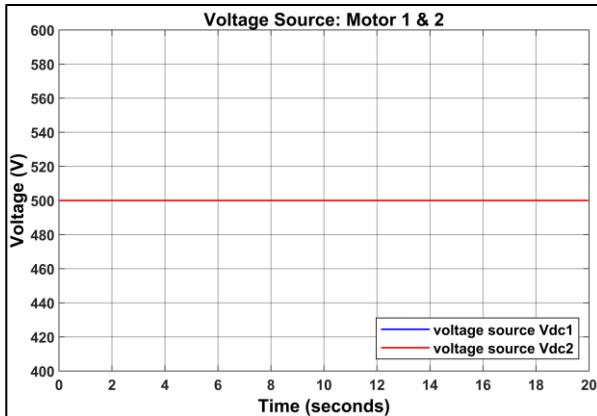
Σχήμα 0.153: Τάση στάτορα του κινητήρα 1 σε a-b-c πλαίσιο αναφοράς, σε μεγέθυνση (Stator voltage of motor 1 in a-b-c reference frame, in zoom)



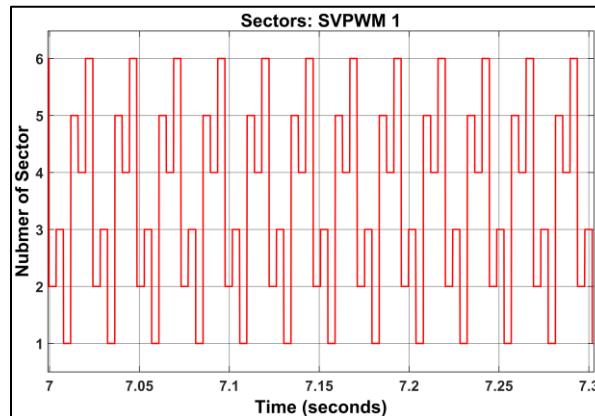
Σχήμα 0.154: Τάση στάτορα του κινητήρα 1 σε alpha-beta πλαίσιο αναφοράς, σε μεγέθυνση (Stator voltage of motor 1 in alpha-beta reference frame, in zoom)



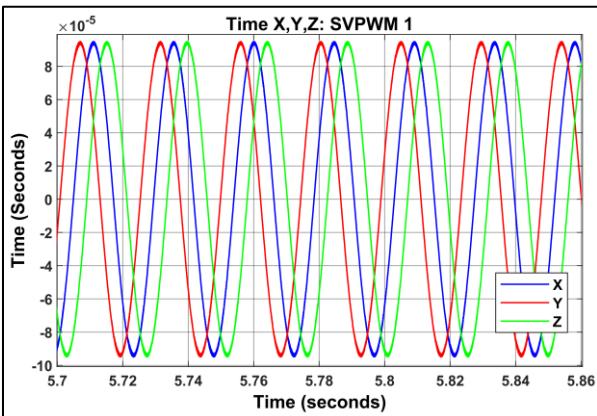
Σχήμα 0.155: Τάση στάτορα του κινητήρα 1 σε q-d πλαίσιο αναφοράς, σε μεγέθυνση (Stator voltage of motor 1 in q-d reference frame, in zoom)



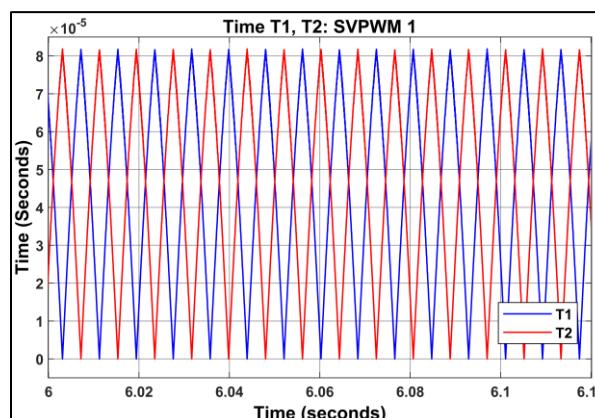
Σχήμα 0.156: Τάση τροφοδοσίας (Supply voltage)



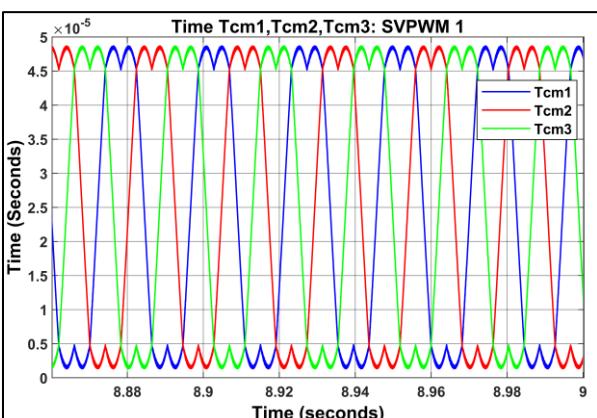
Σχήμα 0.157: Ακολουθία τομέων της μεθόδου SVPWM 1  
(Sectors sequence of SVPWM method 1)



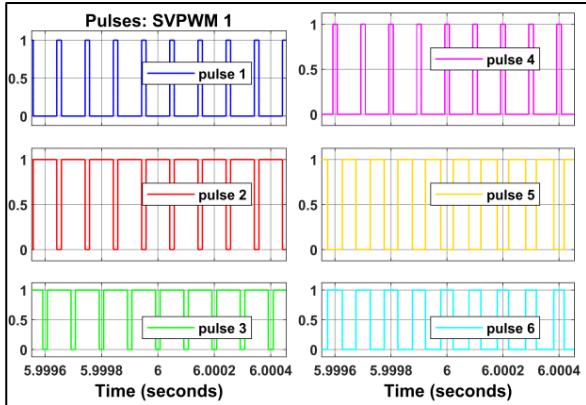
Σχήμα 0.158: Χρονικές μεταβλητές X, Y, Z της μεθόδου SVPWM 1 (Time variables X, Y, Z of the SVPWM method 1)



Σχήμα 0.159: Ενεργός χρόνος T1, T2 της μεθόδου SVPWM 1  
(Active time T1, T2 of SVPWM method 1)

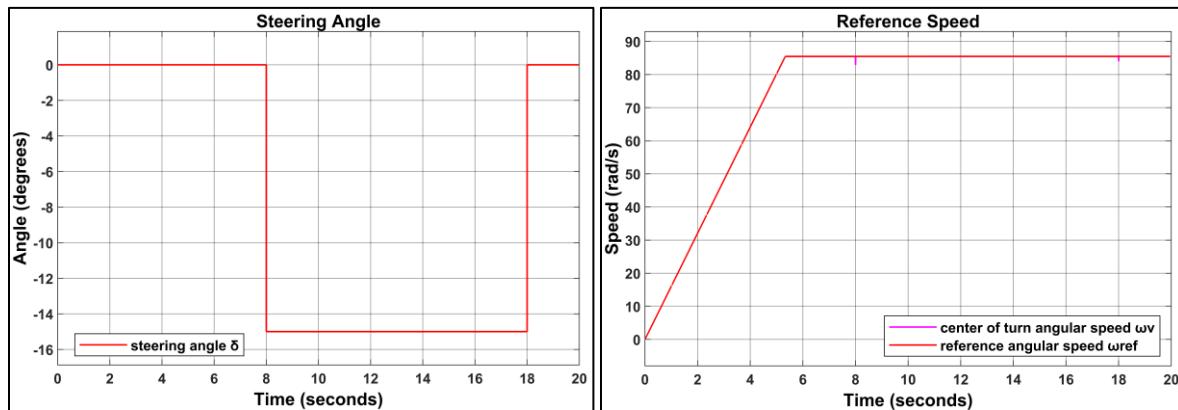


Σχήμα 0.160: Σημεία εναλλαγής διανυσμάτων  $T_{cm1}$ ,  $T_{cm2}$ ,  $T_{cm3}$  της μεθόδου SVPWM 1 (Points switching vector voltage of SVPWM method 1)



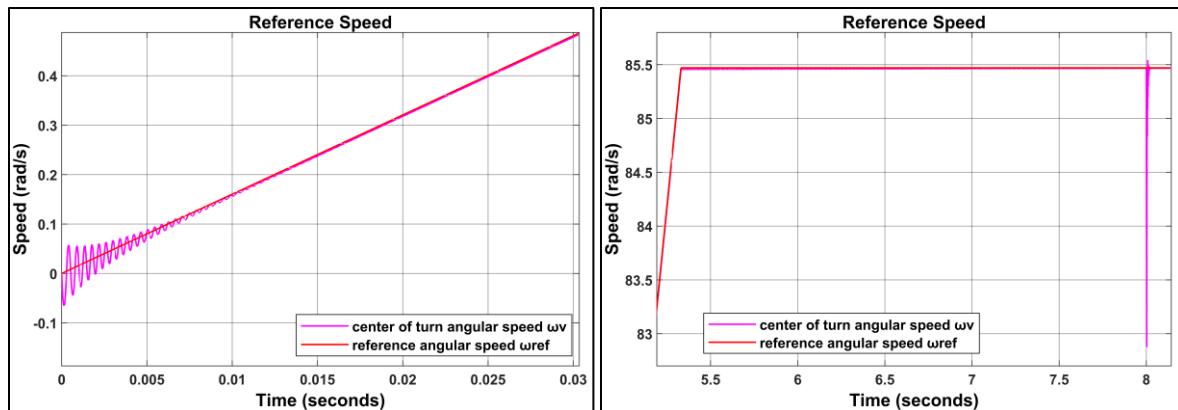
Σχήμα 0.161: Παλμοί της μεθόδου SVPWM 1 (Pulses of SVPWM method 1)

Μοντέλο 2 - Σενάριο 3: Στροφή δεξιά και επιταχυνόμενη κίνηση μέχρι την σταθερή ταχύτητα των 80km/h (Clockwise-curved road and accelerated motion up to the constant speed of 80 km/h)



Σχήμα 0.162: Γωνία τιμονιού (steering angle)

Σχήμα 0.163: Γωνιακή ταχύτητα αναφοράς (reference speed)

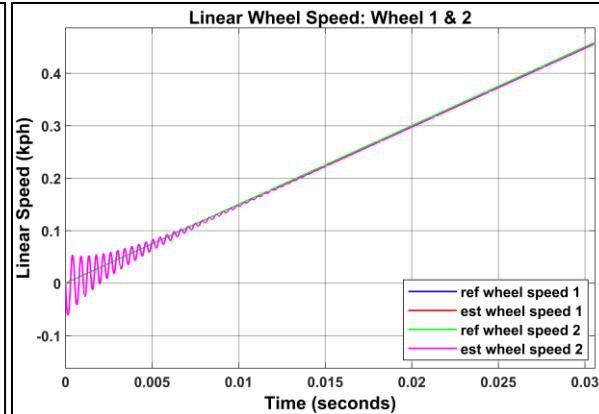


Σχήμα 0.164: Γωνιακή ταχύτητα αναφοράς σε μεγέθυνση (reference speed in zoom)

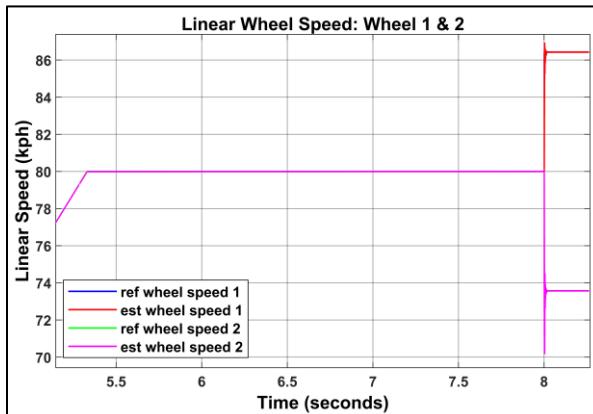
Σχήμα 0.165: Γωνιακή ταχύτητα αναφοράς σε μεγέθυνση (reference speed in zoom)



Σχήμα 0.166: Γραμμική ταχύτητα κινητήριων τροχών (Linear traction wheels speed)



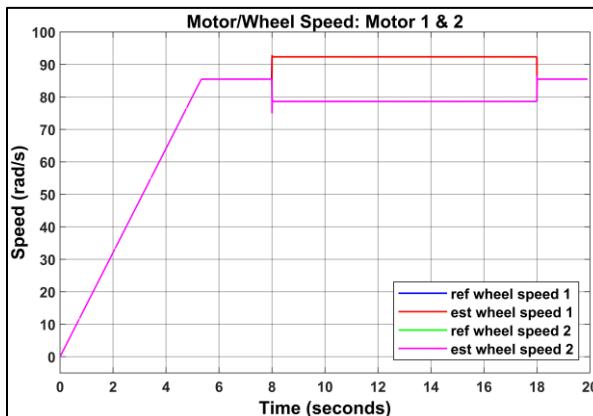
Σχήμα 0.167: Γραμμική ταχύτητα κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (Linear traction wheels speed in zoom)



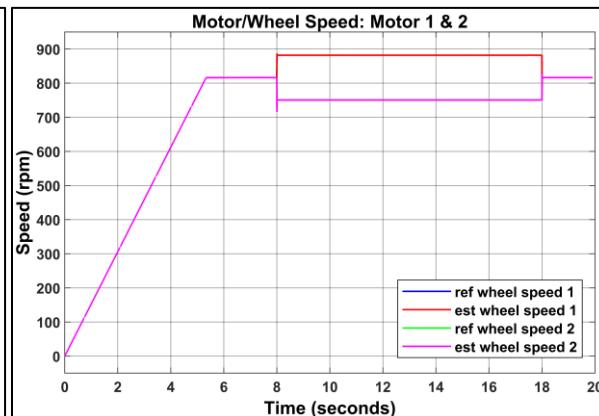
Σχήμα 0.168: Γραμμική ταχύτητα κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (Linear traction wheels speed in zoom)



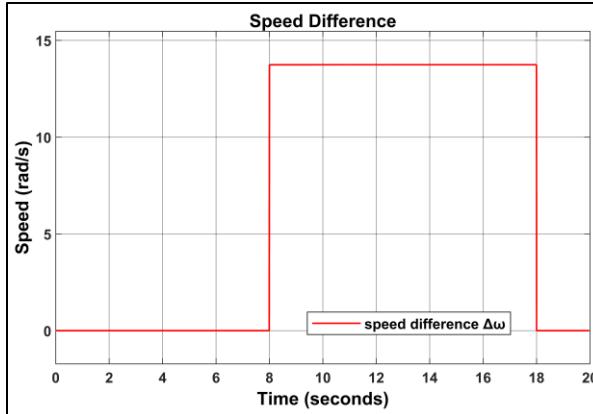
Σχήμα 0.169: Γραμμική ταχύτητα κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (Linear traction wheels speed in zoom)



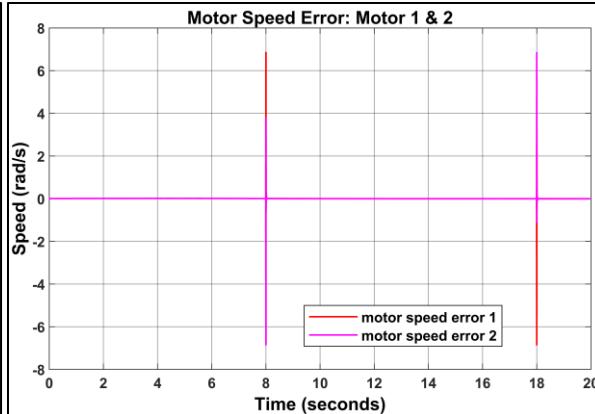
Σχήμα 0.170: Γωνιακή ταχύτητα κινητήρων/κινητήριων τροχών (motors/traction wheels speed)



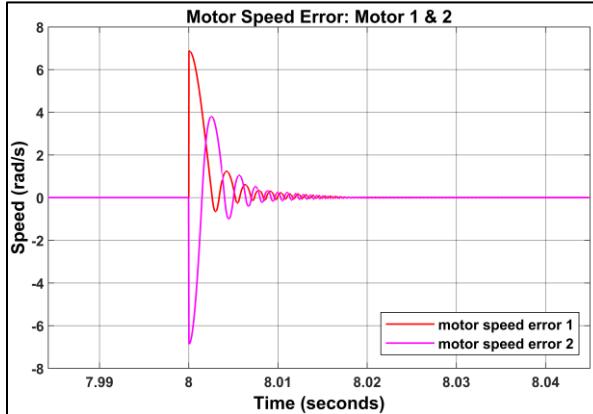
Σχήμα 0.171: Γωνιακή ταχύτητα κινητήρων/κινητήριων τροχών (motors/traction wheels speed)



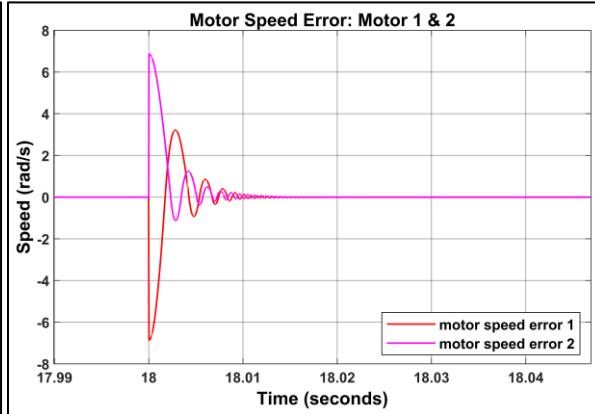
Σχήμα 0.172: Διαφορά γωνιακής ταχύτητας των κινητήριων τροχών (traction wheels speed difference)



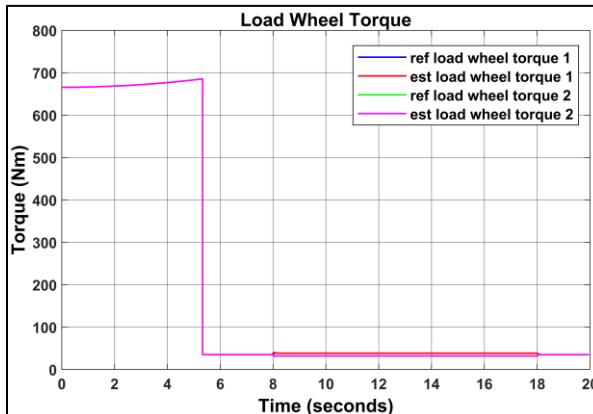
Σχήμα 0.173: Σφάλμα γωνιακής ταχύτητας κινητήρων (motors speed error)



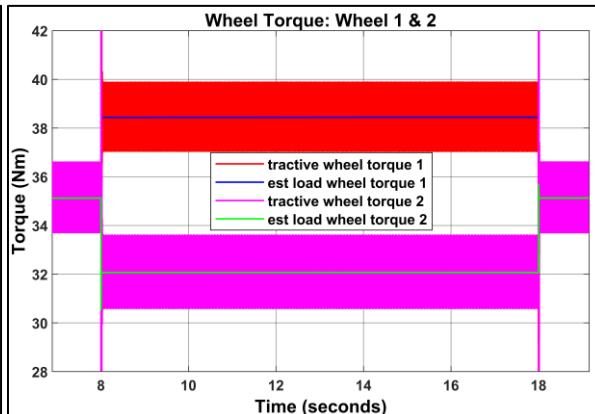
Σχήμα 0.174: Σφάλμα γωνιακής ταχύτητας κινητήρων σε μεγέθυνση (motors speed error in zoom)



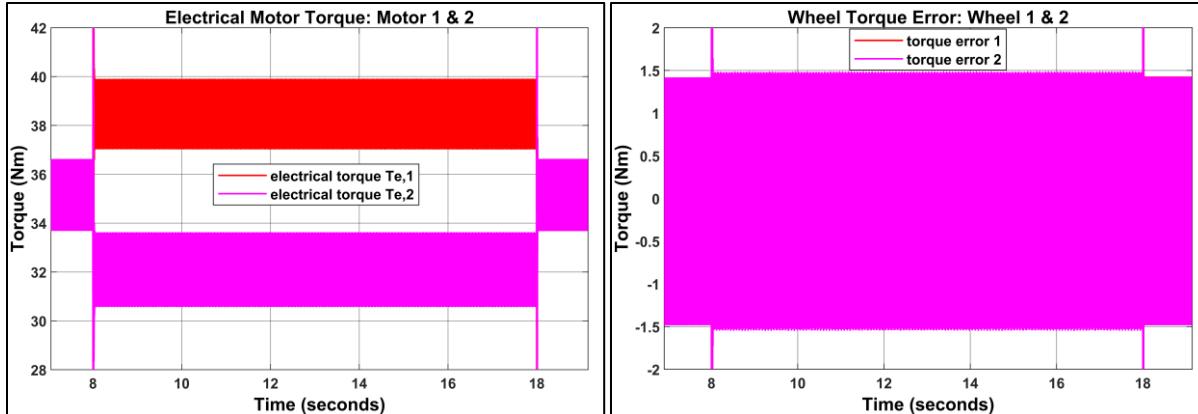
Σχήμα 0.175: Σφάλμα γωνιακής ταχύτητας κινητήρων σε μεγέθυνση (motors speed error in zoom)



Σχήμα 0.176: Φορτίο ροπής κινητήρων τροχών (load traction wheels torque)

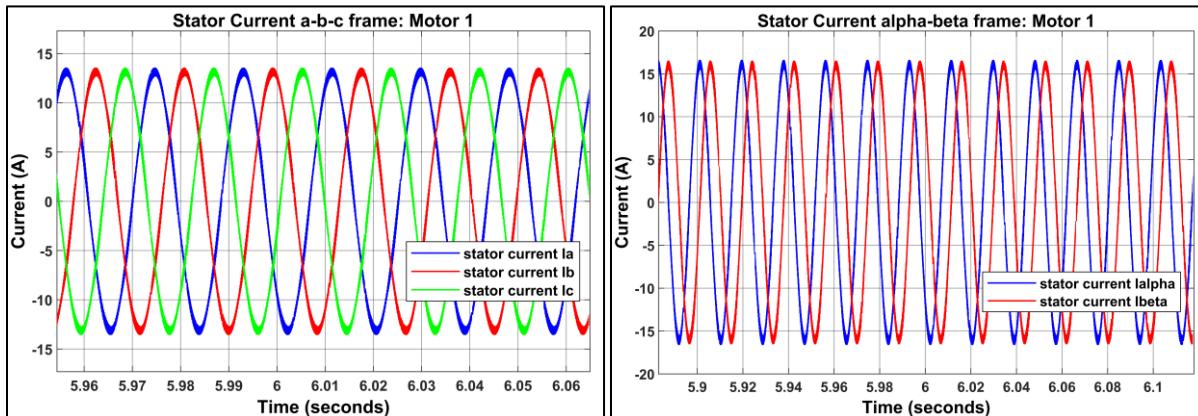


Σχήμα 0.177: Ροπή έλξης κινητήρων τροχών σε μεγέθυνση (tractive wheels torque in zoom)



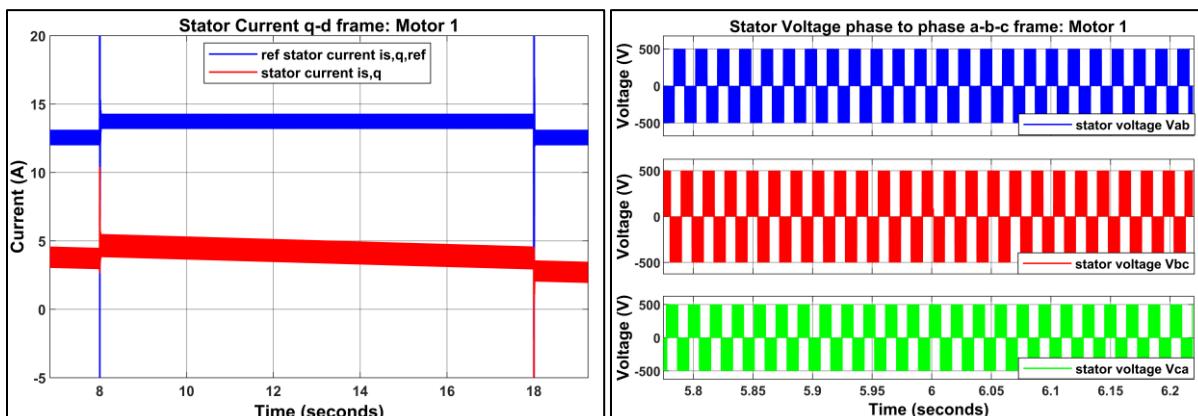
Σχήμα 0.178: Ηλεκτρική ροπή σε μεγέθυνση (electrical torque in zoom)

Σχήμα 0.179: Σφάλμα ροπής έλξης κινητήρων τροχών σε μεγέθυνση (tractive wheels torque error in zoom)



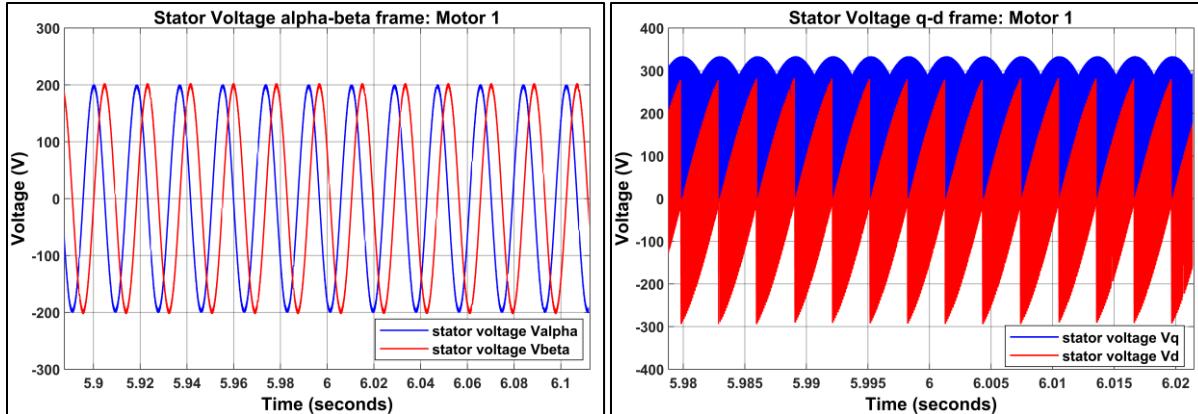
Σχήμα 0.180: Ρεύμα στάτορα του κινητήρα 1 σε a-b-c πλαίσιο αναφοράς, σε μεγέθυνση (Stator current of motor 1 in a-b-c reference frame, in zoom)

Σχήμα 0.181: Ρεύμα στάτορα του κινητήρα 1 σε αλφα-βετα πλαίσιο αναφοράς, σε μεγέθυνση (Stator current of motor 1 in alpha-beta reference frame, in zoom)



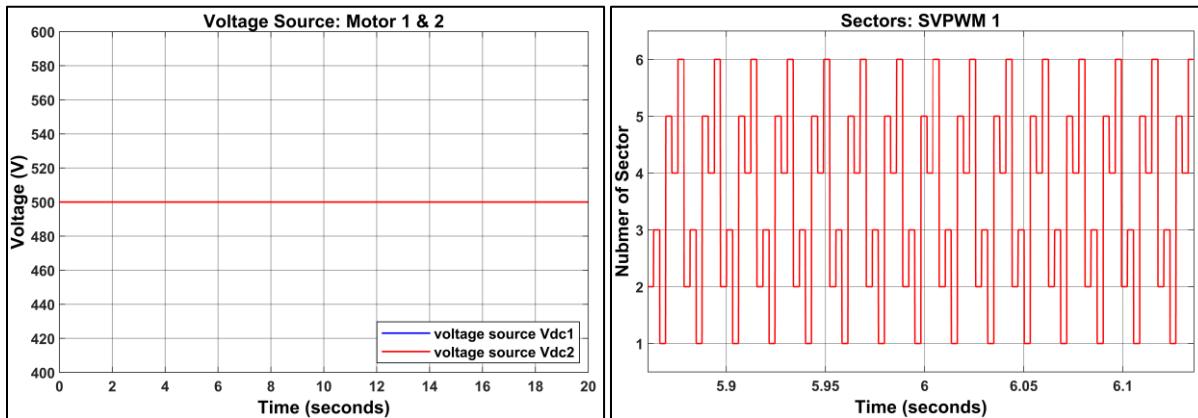
Σχήμα 0.182: Ρεύμα στάτορα του κινητήρα 1 σε q-d πλαίσιο αναφοράς, σε μεγέθυνση (Stator current of motor 1 in q-d reference frame, in zoom)

Σχήμα 0.183: Τάση στάτορα του κινητήρα 1 σε a-b-c πλαίσιο αναφοράς, σε μεγέθυνση (Stator voltage of motor 1 in a-b-c reference frame, in zoom)



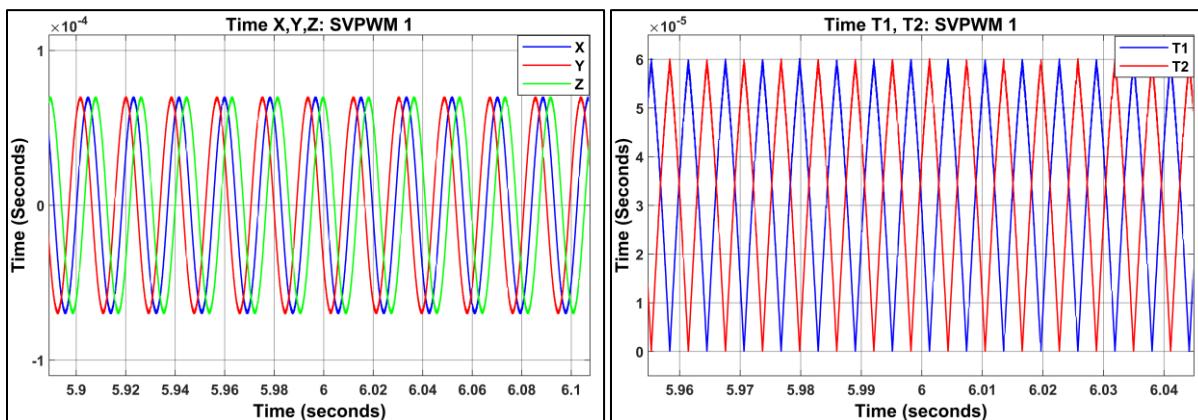
Σχήμα 0.184: Τάση στάτορα του κινητήρα 1 σε alpha-beta πλαίσιο αναφοράς, σε μεγέθυνση (Stator voltage of motor 1 in alpha-beta reference frame, in zoom)

Σχήμα 0.185: Τάση στάτορα του κινητήρα 1 σε q-d πλαίσιο αναφοράς, σε μεγέθυνση (Stator voltage of motor 1 in q-d reference frame, in zoom)



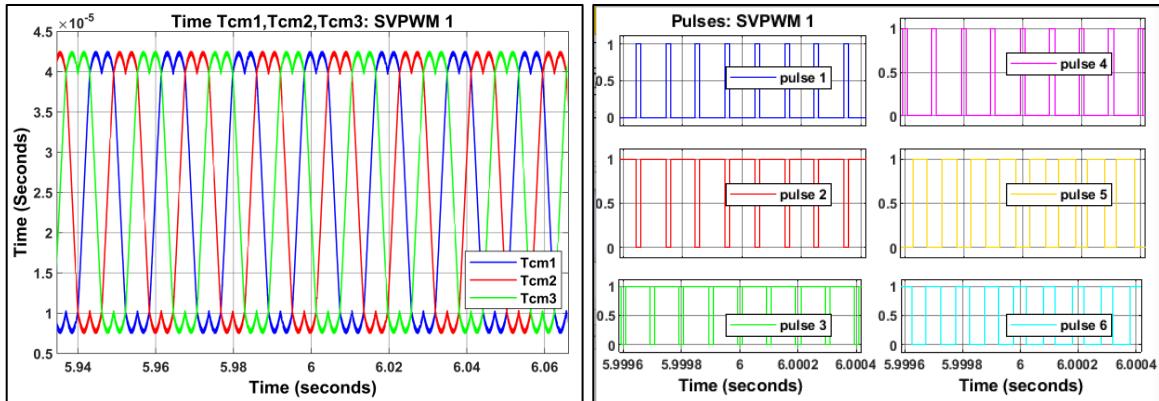
Σχήμα 0.186: Τάση τροφοδοσίας (Supply voltage)

Σχήμα 0.187: Ακολουθία τομέων της μεθόδου SVPWM 1 (Sectors sequence of SVPWM method 1)



Σχήμα 0.188: Χρονικές μεταβλητές X, Y, Z της μεθόδου SVPWM 1 (Time variables X, Y, Z of the SVPWM method 1)

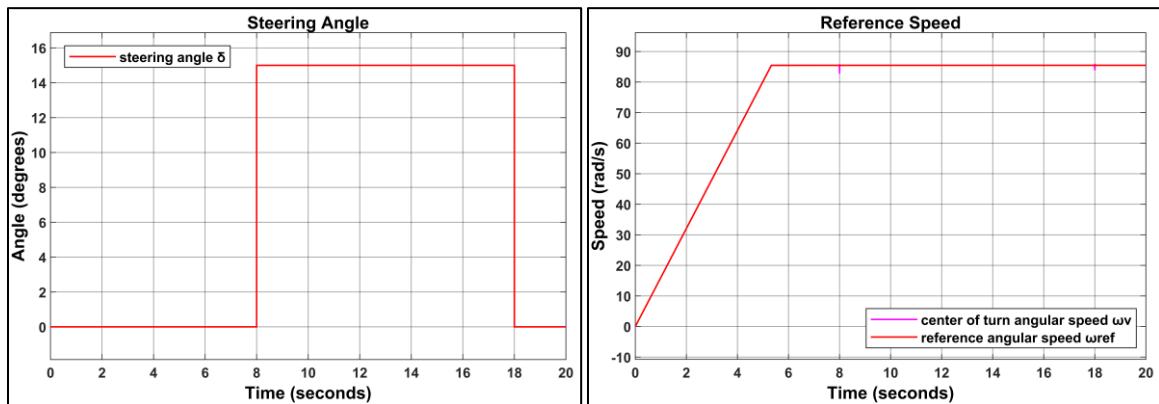
Σχήμα 0.189: Ενεργός χρόνος T1, T2 της μεθόδου SVPWM 1 (Active time T1, T2 of SVPWM method 1)



Σχήμα 0.190: Σημεία εναλλαγής διανυσμάτων  $T_{cm1}$ ,  $T_{cm2}$ ,  $T_{cm3}$  της μεθόδου SVPWM 1 (Points switching vector voltage of SVPWM method 1)

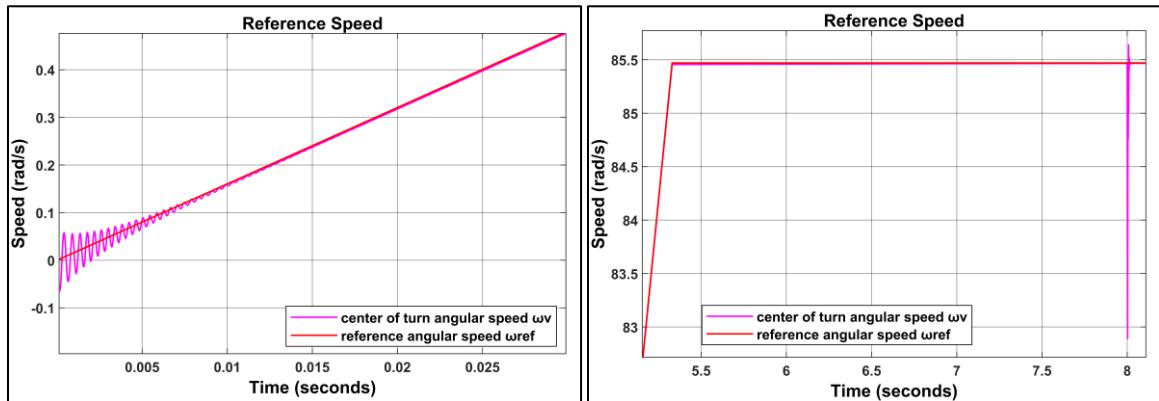
Σχήμα 0.191: Παλμοί της μεθόδου SVPWM 1 (Pulses of SVPWM method 1)

Μοντέλο 2 - Σενάριο 4: Στροφή αριστερή και επιταχυνόμενη κίνηση μέχρι την σταθερή ταχύτητα των 80km/h (Counter-clockwise-curved road and accelerated motion up to the constant speed of 80 km/h)



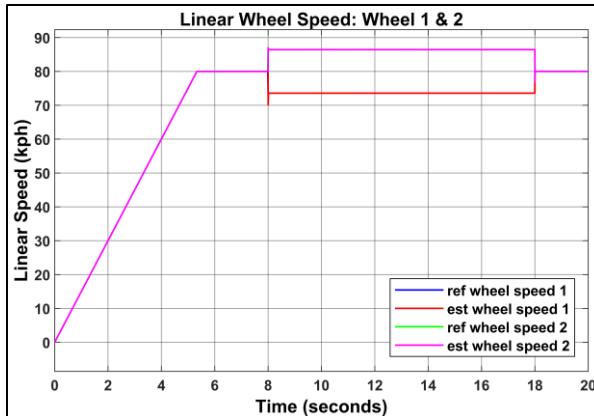
Σχήμα 0.192: Γωνία τιμονιού (steering angle)

Σχήμα 0.193: Γωνιακή ταχύτητα αναφοράς (reference speed)

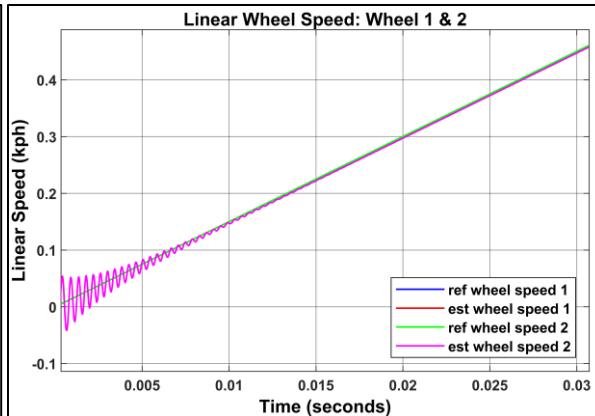


Σχήμα 0.194: Γωνιακή ταχύτητα αναφοράς σε μεγέθυνση (reference speed in zoom)

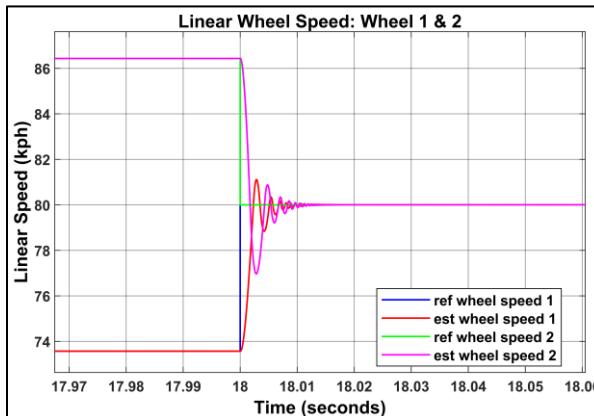
Σχήμα 0.195: Γωνιακή ταχύτητα αναφοράς σε μεγέθυνση (reference speed in zoom)



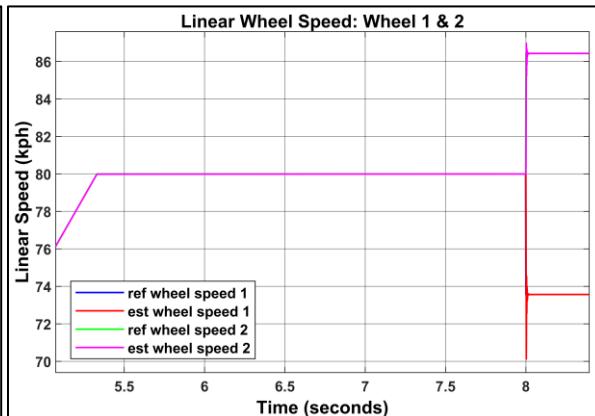
Σχήμα 0.196: Γραμμική ταχύτητα κινητήριων τροχών (Linear traction wheels speed)



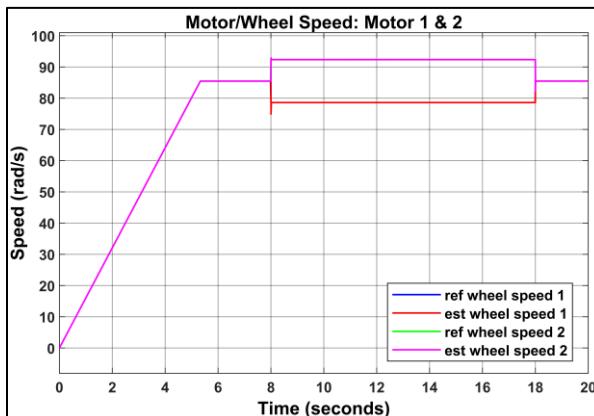
Σχήμα 0.197: Γραμμική ταχύτητα κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (Linear traction wheels speed in zoom)



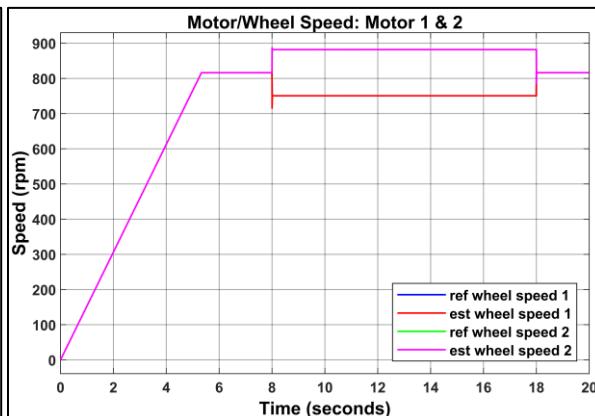
Σχήμα 0.198: Γραμμική ταχύτητα κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (Linear traction wheels speed in zoom)



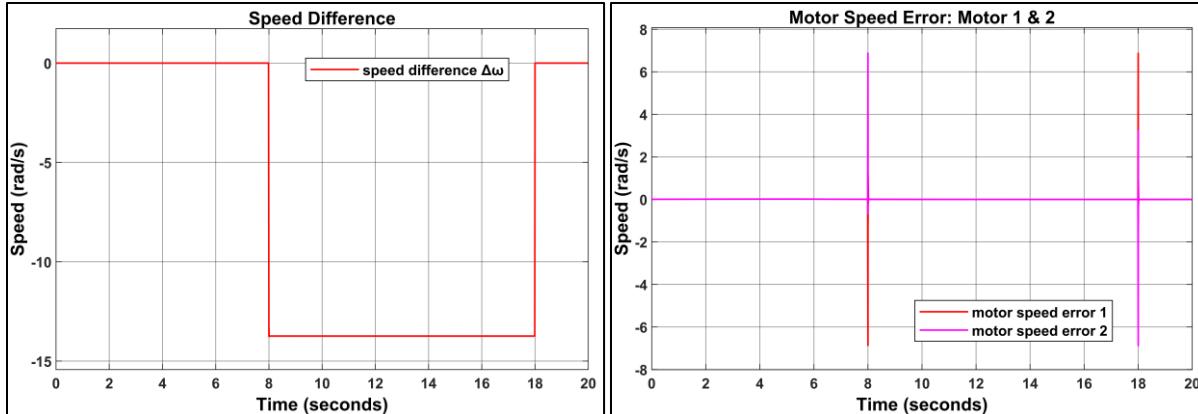
Σχήμα 0.199: Γραμμική ταχύτητα κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (Linear traction wheels speed in zoom)



Σχήμα 0.200: Γωνιακή ταχύτητα κινητήρων/κινητήριων τροχών (motors/traction wheels speed)

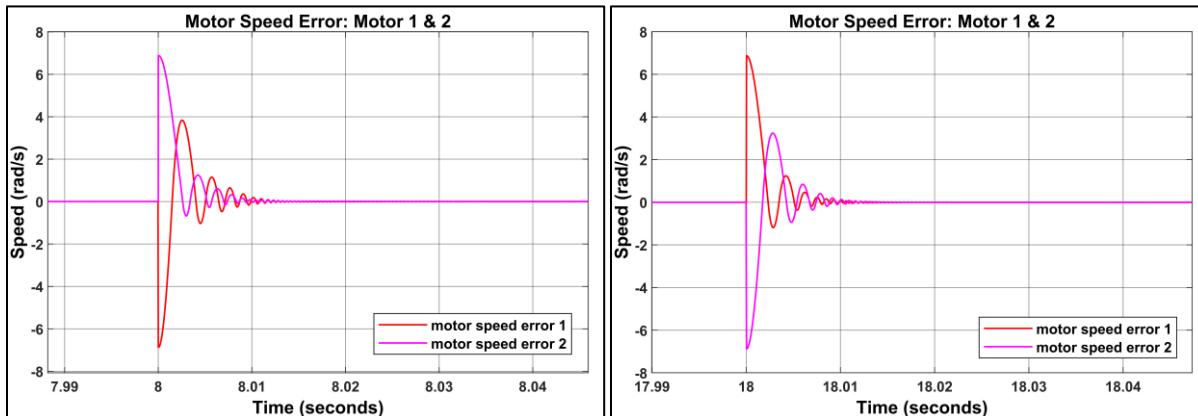


Σχήμα 0.201: Γωνιακή ταχύτητα κινητήρων/κινητήριων τροχών (motors/traction wheels speed)



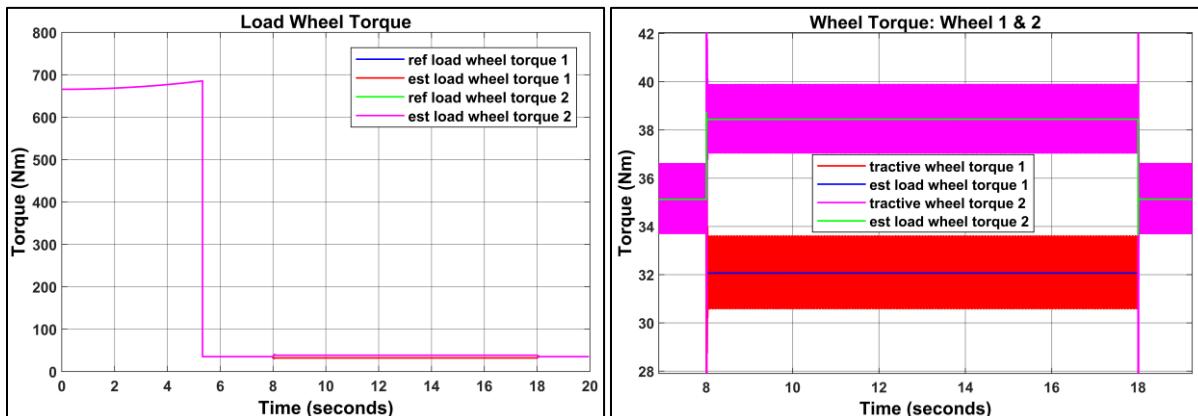
Σχήμα 0.202: Διαφορά γωνιακής ταχύτητας των κινητήριων τροχών (traction wheels speed difference)

Σχήμα 0.203: Σφάλμα γωνιακής ταχύτητας κινητήρων (motors speed error)



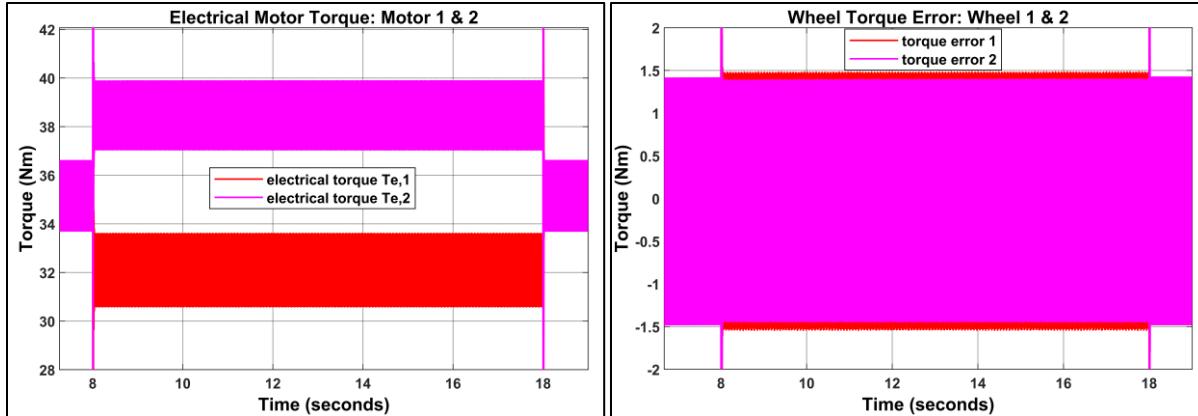
Σχήμα 0.204: Σφάλμα γωνιακής ταχύτητας κινητήρων σε μεγέθυνση (motors speed error in zoom)

Σχήμα 0.205: Σφάλμα γωνιακής ταχύτητας κινητήρων σε μεγέθυνση (motors speed error in zoom)



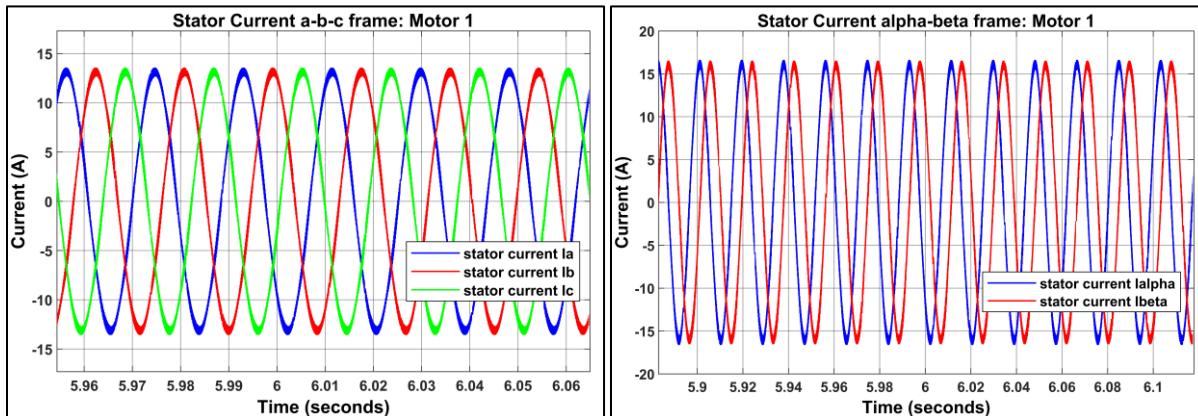
Σχήμα 0.206: Φορτίο ροπής κινητήριων τροχών (load traction wheels torque)

Σχήμα 0.207: Ροπή έλξης κινητήριων τροχών σε μεγέθυνση (tractive wheels torque in zoom)



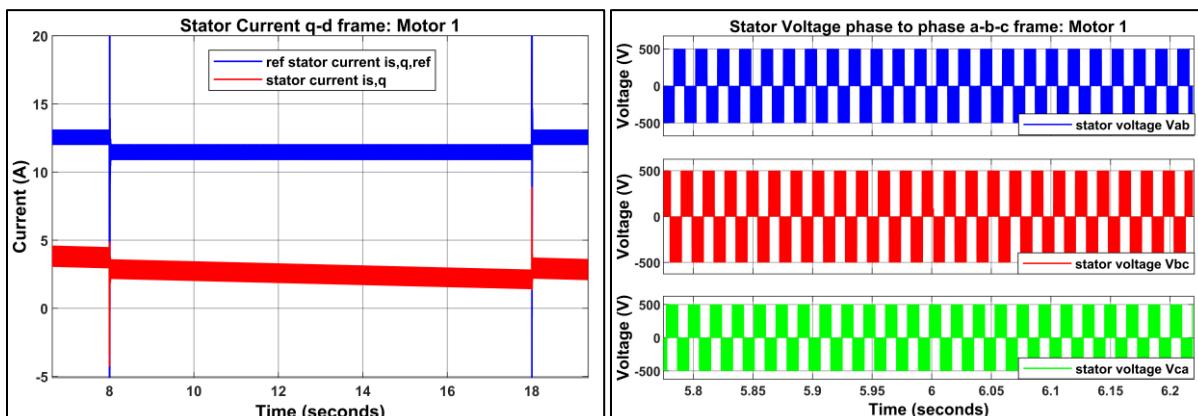
Σχήμα 0.208: Ηλεκτρική ροπή σε μεγέθυνση (electrical torque in zoom)

Σχήμα 0.209: Σφάλμα ροπής έλξης κινητήρων τροχών σε μεγέθυνση (tractive wheels torque error in zoom)



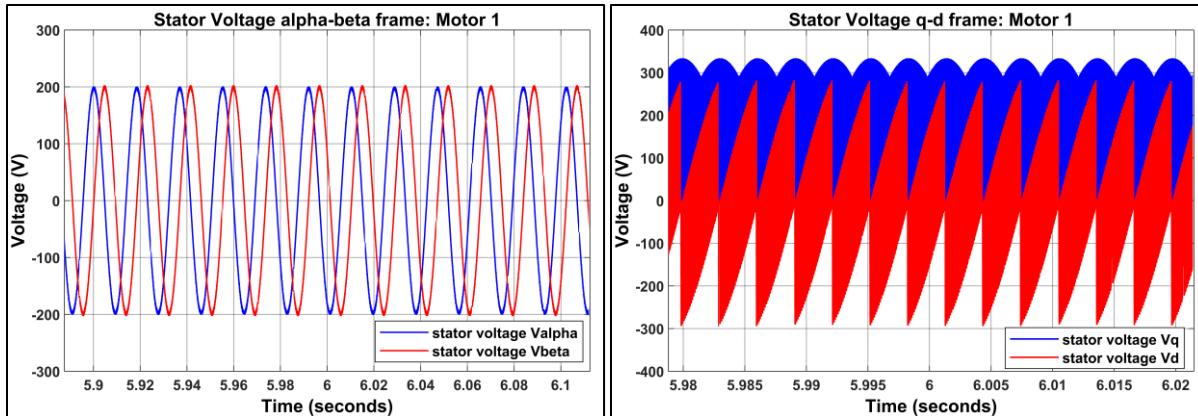
Σχήμα 0.210: Ρεύμα στάτορα του κινητήρα 1 σε a-b-c πλαίσιο αναφοράς, σε μεγέθυνση (Stator current of motor 1 in a-b-c reference frame, in zoom)

Σχήμα 0.211: Ρεύμα στάτορα του κινητήρα 1 σε αλφα-βετα πλαίσιο αναφοράς, σε μεγέθυνση (Stator current of motor 1 in alpha-beta reference frame, in zoom)



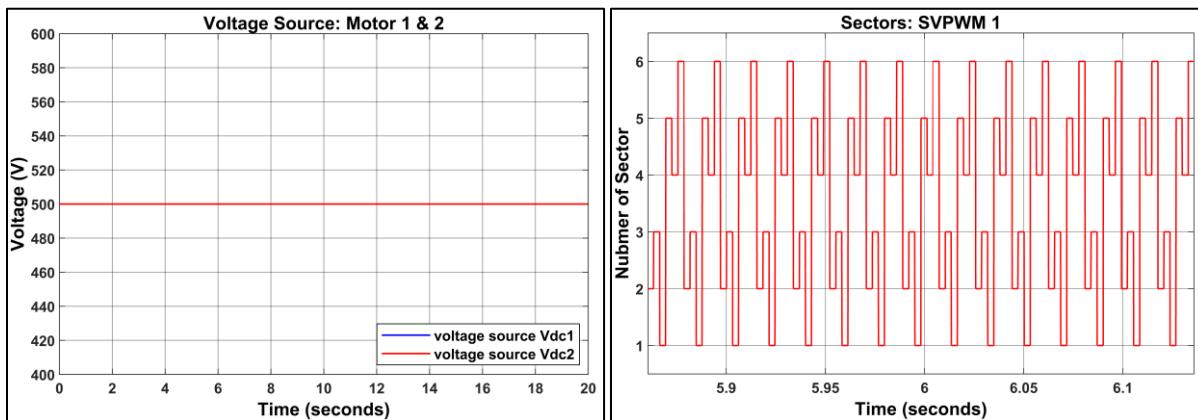
Σχήμα 0.212: Ρεύμα στάτορα του κινητήρα 1 σε q-d πλαίσιο αναφοράς, σε μεγέθυνση (Stator current of motor 1 in q-d reference frame, in zoom)

Σχήμα 0.213: Τάση στάτορα του κινητήρα 1 σε a-b-c πλαίσιο αναφοράς, σε μεγέθυνση (Stator voltage of motor 1 in a-b-c reference frame, in zoom)



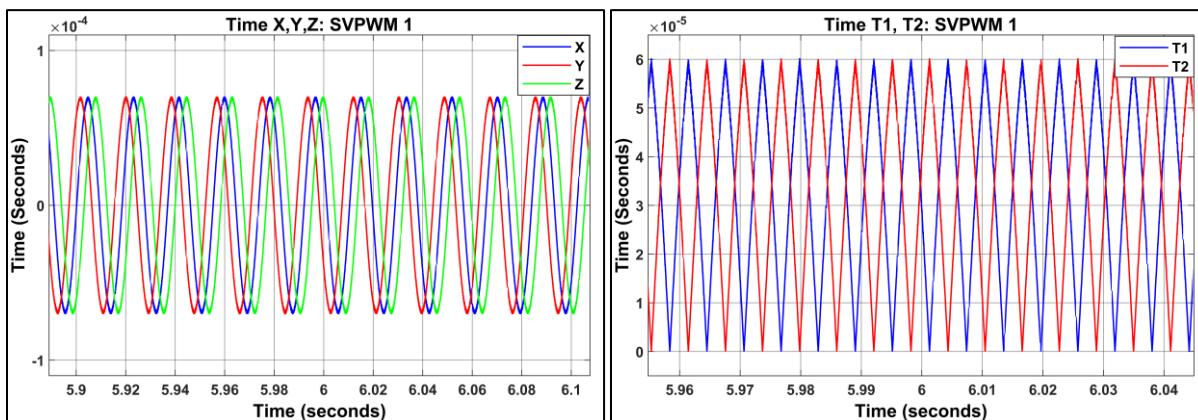
Σχήμα 0.214: Τάση στάτορα του κινητήρα 1 σε alpha-beta πλαίσιο αναφοράς, σε μεγέθυνση (Stator voltage of motor 1 in alpha-beta reference frame, in zoom)

Σχήμα 0.215: Τάση στάτορα του κινητήρα 1 σε q-d πλαίσιο αναφοράς, σε μεγέθυνση (Stator voltage of motor 1 in q-d reference frame, in zoom)



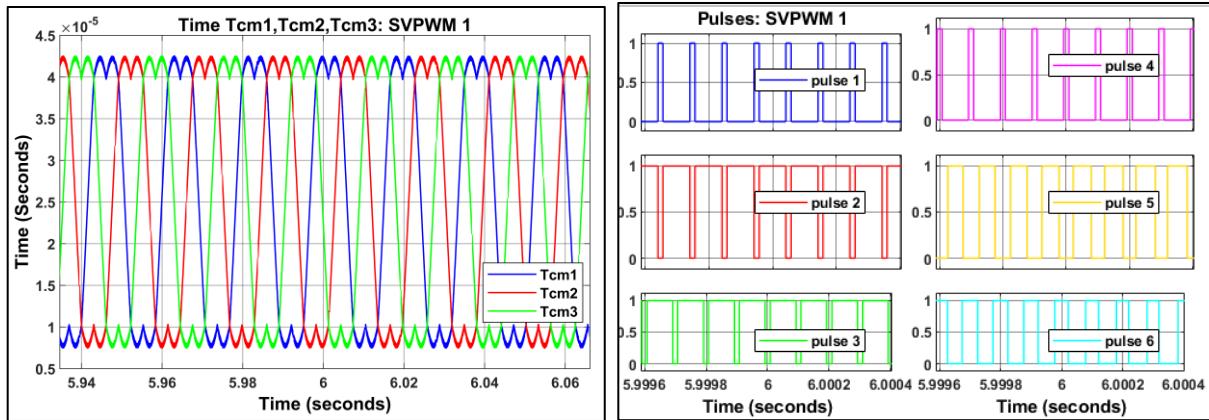
Σχήμα 0.216: Τάση τροφοδοσίας (Supply voltage)

Σχήμα 0.217: Ακολουθία τομέων της μεθόδου SVPWM 1 (Sectors sequence of SVPWM method 1)



Σχήμα 0.218: Χρονικές μεταβλητές X, Y, Z της μεθόδου SVPWM 1 (Time variables X, Y, Z of the SVPWM method 1)

Σχήμα 0.219: Ενεργός χρόνος T1, T2 της μεθόδου SVPWM 1 (Active time T1, T2 of SVPWM method 1)



*Σχήμα 0.220: Σημεία εναλλαγής διανυσμάτων  $T_{cm1}$ ,  $T_{cm2}$ ,  $T_{cm3}$  της μεθόδου SVPWM 1 (Points switching vector voltage of SVPWM method 1)*

*Σχήμα 0.221: Παλμοί της μεθόδου SVPWM 1 (Pulses of SVPWM method 1)*

## Βιβλιογραφία (References)

- [1] Fuzzy Logic Speed Control Stability Improvement of Lightweight Electric Vehicle Drive
- [2] Ozkop A fuzzy logic sliding mode controlled electronic differential for a direct
- [3] Electronic Differential with Direct Torque Fuzzy Control for Vehicle Propulsion System
- [4] A.Nasri,A.Hazzab, I.K.Bousserhane,S.Hadjeri,P.Sicard, “Two Wheel Speed Robust Sliding Mode Control For Electric Vehicle Drive,” Serbian Journal of Electrical Engineering, Vol. 5, No.2, Nov., 2008, pp.199-216.
- [5] Electric Vehicle Stability with Rear Electronic Differential Traction
- [6] A\_new\_FPGA\_based\_control\_system\_for\_electrical\_propulsion\_with\_electronic\_differential
- [8] D.A.J. Rand, R. Woods, R.M. DELL. “Batteries for electric vehicles,” Research Studies. Press Ltd. 1997.
- [9] L.T. Lam, N.P. High, C.G. Phyland, A.J. Urban, Elservier, power sources, vol. 144, pp. 552-555, 2005.
- [10] Ηλεκτρομηχανικά Συστήματα Μετατροπής Ενέργειας, Ευάγγελος Γ. Παπαδόπουλος, Καθηγητής Ε.Μ.Π.
- [11] S. Kandler, C.Y. Wang, “Power and thermal characterization of Lithium-Ion battery pack for hybrid- electric vehicles,” Elservier, Power Sources, vol. 160, pp. 662-673, 2006.
- [12] L.T. Lam, R. Lovey, “Developpement of ultra-battery for hybrid-electric vehicle applications,” Elservier, power sources, vol. 158, pp. 1140-1148, 2006.
- [13] <https://www.techtarget.com/whatis/definition/closed-loop-control-system#:~:text=A%20closed%20loop%20control%20system%20is%20a%20mechanical%20or%20electronic,a%20feedback%20system%20or%20sensor>
- [14] <https://ctms.engin.umich.edu/CTMS/index.php?example=Introduction&section=ControlPID#13>
- [15] <https://www.ni.com/en-us/innovations/white-papers/06/pid-theory-explained.html>
- [16] <http://www.fme.aegean.gr/sites/default/files/SAE-Session10.pdf>
- [17] Linearization of Nonlinear Components, Mark A. Haidekker, in Linear Feedback Controls, 2013  
<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/saturation-effect>
- [18] <https://medium.com/autonomous-robotics/pid-control-85596db59f35>
- [19] <http://scis.scichina.com/en/2019/026201.pdf>
- [20] <https://www.mathworks.com/videos/understanding-pid-control-part-2-expanding-beyond-a-simple-integral-1528310418260.html>
- [21] Analysis of Anti-windup Techniques in PID Control of Processes with Measurement Noise Lucian R. da Silva \* Rodolfo C.C.  
Flesch <https://reader.elesevier.com/reader/sd/pii/S2405896318303975?token=CFF7E3B2B1F26A60D8E1C4C9D19815EB456E1707446DF241B70F7B847C60C0DCE3ACF48E2597911419EB4309E9AF5C9D&originRegion=eu-west-1&originCreation=20221016161724>
- [22] <https://www.mathworks.com/discovery/pid-tuning.html>

- [23] <https://www.electronics-tutorials.ws/dccircuits/voltage-source.html>
- [24] Slobodan N. Vukosavic, “Electrical Machines”, Springer, 2013, DOI 10.1007/978-1-4614-0400-2
- [25] Jan A. Melkebeek, “Electrical Machines and Drives: Fundamentals and Advanced Modelling”, Springer, 2018, ISBN 978-3-319-72729-5
- [26] L. Zhang, R. Norman, and W. Shepherd, “Long-range predictive control of current regulated PWM for induction motor drives using the synchronous reference frame” IEEE Transaction Control System Technology, Vol. 5, pp. 119–126, Jan. 1997
- [27] Nguyen Phung Quang, Jörg-Andreas Dittrich, “Vector Control of Three-Phase AC Machines”, Springer, 2015, ISBN 978-3-662-46914-9
- [28] Keyun.C, Alain.B, and Walter.L, “Energetic Macroscopic Representation and inversion-based control Application to an Electric Vehicle With An Electrical Differential,” Journal of Asian Electric Vehicles, Vol.6, No.1, June 2008, pp.1097-1102
- [29] J. A.Haddoun, M.Benbouzid, D.Diallo, “Modeling, Analysis, and Neural Network Control of An EV Electrical Differential”, IEEE Transactions, Vol.55, No.6, June 2008, pp.2286-2294.
- [39] <https://ww2.mathworks.cn/help//sps/powersys/ref/permanentmagnetsynchronousmachine.html>
- [40] <https://www.linquip.com/blog/types-of-synchronous-motors/>
- [41] <https://www.linquip.com/blog/permanent-magnet-synchronous-motors/#:~:text=Working%20Principle,-The%20permanent%20magnet&text=When%20the%20stator%20winding%20is, and%20the%20rotor%20rotates%20continuously.>
- [42] [https://oaedhlectrologoi.blogspot.com/2017/03/blog-post\\_9.html](https://oaedhlectrologoi.blogspot.com/2017/03/blog-post_9.html)
- [43] <https://www.thomasnet.com/articles/machinery-tools-supplies/synchronous-motors/>
- [44] Speed Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Using SVPWM Vector Control
- [45] Vector Controlled PMSM drive using SVPWM technique – A MATLAB Simulink Implementation
- [46] Simulation\_of\_PMSM\_field-oriented\_control\_based\_on\_SVPWM
- [47] Simulation\_of\_PMSM\_Vector\_Control\_System\_Based\_on\_Matlab\_Simulink
- [48] Design, Simulation and Implementation of a PMSM Drive System
- [50] <https://imperix.com/doc/implementation/vector-current-control>
- [51] <https://imperix.com/doc/implementation/field-oriented-control-of-pmsm>
- [https://imperix.com/doc/software/pulse-width-modulator \(PWM – Pulse Width Modulators\)](https://imperix.com/doc/software/pulse-width-modulator)
- [https://imperix.com/doc/implementation/space-vector-modulation \(Space Vector Modulation SVM\)](https://imperix.com/doc/implementation/space-vector-modulation)
- [https://imperix.com/doc/software/sv-pwm \(SV-PWM – Space vector PWM\)](https://imperix.com/doc/software/sv-pwm)
- <https://imperix.com/doc/implementation/spwm-vs-spwm-modulation-techniques>
- <https://imperix.com/doc/example/three-phase-voltage-source-inverter>
- [52] Performance Analysis of SVPWM Inverter Fed PermanentMagnet Synchronous Motor

- [53] SVPWM Techniques and Applications in HTS PMSM Machines Control
- [55] Louis E. FrenzelJr., in Electronics Explained (Second Edition), 2018
- [56] <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/silicon-controlled-rectifier>
- [57]  
[https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9C%CE%B5%CF%84%CE%B1%CF%83%CF%87%CE%B7%CE%BC%CE%B1%CF%84%CE%B9%CF%83%CE%BC%CF%8C%CF%82\\_Clarke](https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9C%CE%B5%CF%84%CE%B1%CF%83%CF%87%CE%B7%CE%BC%CE%B1%CF%84%CE%B9%CF%83%CE%BC%CF%8C%CF%82_Clarke)
- [60] F. Heydari, A. Sheikhholeslami, K. G. Firouzjah and S. Lesan. "Predictive Field-Oriented Control of PMSM with Space Vector Modulation Technique". *Front. Electr. Electron. Eng. China*, 2010.
- [61] Jorge Zambada, Microchip Corporation, "Sensorless Field Oriented Control of PMSM Motors". Microchip Technology Inc., 2007.
- [65] [https://www.motioncontrolltips.com/what-is-space-vector-pulse-width-modulation-svpwm/#:~:text=Space%20vector%20pulse%20width%20modulation%20\(SVPWM\)%20is%20a%20technique%20used,space%20vector%20pulse%20width%20modulation](https://www.motioncontrolltips.com/what-is-space-vector-pulse-width-modulation-svpwm/#:~:text=Space%20vector%20pulse%20width%20modulation%20(SVPWM)%20is%20a%20technique%20used,space%20vector%20pulse%20width%20modulation)
- [71] Hori, Y. (2004). Future vehicle driven by electricity and control—research on four-wheel-motored "UOT Electric March II". *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 51(5), 954–962. doi:10.1109/tie.2004.834944
- [72] Chan, C. C., Jiang, J. Z., Xia, W., & Chau, K. T. (1996). A novel wide speed range permanent magnet brushless DC motor drive for electric vehicles. *International Journal of Electronics*, 80(2), 235–248. doi:10.1080/002072196137435
- [73] Perez-Pinal, F. J., Nunez, C., Alvarez, R., Cervantes, I., & Emadi, A. (2007, September 9–12). Electric differential for traction applications. Paper presented at the 2007 IEEE vehicle power and propulsion conference, Arlington, TX.
- [74] Chen, B.-C., Yu, C.-C., Lee, W.-S., & Hsu, W.-F. (2007). Design of an electric differential system for three-wheeled electric welfare vehicles with driver-in-the-loop verification. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 56(4), 1498–1505. doi:10.1109/tvt.2007.896975
- [75] Yang, Y.-P., & Chuang, D. S. (2007). Optimal design and control of a wheel motor for electric passenger cars. *IEEE Transactions on Magnetics*, 43(1), 51–61. doi:10.1109/tmag.2006.886153
- [76]  
[https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%94%CE%B9%CE%B1%CF%86%CE%BF%CF%81%CE%B9%CE%BA%CF%8C\\_%CE%BF%CF%87%CE%B7%CE%BC%CE%AC%CF%84%CF%89%CE%BD#:~:text=%CE%A4%CE%BF%20%CE%B4%CE%B9%CE%B1%CF%86%CE%BF%CF%81%CE%B9%CE%BA%CF%8C%20%CE%B5%CE%AF%CE%BD%CE%B1%CE%B9%20%CE%BF%20%CE%BC%CE%B7%CF%87%CE%B1%CE%BD%CE%B9%CF%83%CE%BC%CF%8C%CF%82,%CF%84%CE%BF%CE%BD%20%CF%83%CF%85%CE%BD%CF%84%CE%B5%CE%BB%CE%B5%CF%83%CF%84%CE%AE%20%CF%80%CF%81%CF%8C%CF%83%CF%86%CF%85%CF%83%CE%B7%CF%82%20%CF%83%CF%84%CE%BF%CF%85%CF%82%20%CE%BA%CE%B9%CE%BD%CE%B7%CF%84%CE%AE%CF%81%CE%B9%CE%BF%CF%85%CF%82">https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%94%CE%B9%CE%B1%CF%86%CE%BF%CF%81%CE%B9%CE%BA%CF%8C\\_%CE%BF%CF%87%CE%B7%CE%BC%CE%AC%CF%84%CF%89%CE%BD#:~:text=%CE%A4%CE%BF%20%CE%B4%CE%B9%CE%B1%CF%86%CE%BF%CF%81%CE%B9%CE%BA%CF%8C%20%CE%B5%CE%AF%CE%BD%CE%B1%CE%B9%20%CE%BF%20%CE%BC%CE%B7%CF%87%CE%B1%CE%BD%CE%B9%CF%83%CE%BC%CF%8C%CF%82,%CF%84%CE%BF%CE%BD%20%CF%83%CF%85%CE%BD%CF%84%CE%B5%CE%BB%CE%B5%CF%83%CF%84%CE%AE%20%CF%80%CF%81%CF%8C%CF%83%CF%86%CF%85%CF%83%CE%B7%CF%82%20%CF%83%CF%84%CE%BF%CF%85%CF%82%20%CE%BA%CE%B9%CE%BD%CE%B7%CF%84%CE%AE%CF%81%CE%B9%CE%BF%CF%85%CF%82](https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%94%CE%B9%CE%B1%CF%86%CE%BF%CF%81%CE%B9%CE%BA%CF%8C_%CE%BF%CF%87%CE%B7%CE%BC%CE%AC%CF%84%CF%89%CE%BD#:~:text=%CE%A4%CE%BF%20%CE%B4%CE%B9%CE%B1%CF%86%CE%BF%CF%81%CE%B9%CE%BA%CF%8C%20%CE%B5%CE%AF%CE%BD%CE%B1%CE%B9%20%CE%BF%20%CE%BC%CE%B7%CF%87%CE%B1%CE%BD%CE%B9%CF%83%CE%BC%CF%8C%CF%82,%CF%84%CE%BF%CE%BD%20%CF%83%CF%85%CE%BD%CF%84%CE%B5%CE%BB%CE%B5%CF%83%CF%84%CE%AE%20%CF%80%CF%81%CF%8C%CF%83%CF%86%CF%85%CF%83%CE%B7%CF%82%20%CF%83%CF%84%CE%BF%CF%85%CF%82%20%CE%BA%CE%B9%CE%BD%CE%B7%CF%84%CE%AE%CF%81%CE%B9%CE%BF%CF%85%CF%82)