



**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ Τ.Ε.
ΑΤΕΙ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ**

Πτυχιακή Εργασία

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ AC ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΜΕ ΤΗΝ ΤΕΧΝΙΚΗ “ΕΥΘΕΟΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΡΟΠΗΣ” (DTC)

Modeling and Control of AC motors using Direct Torque Control (DTC)

Του φοιτητή
Φεγγομύτη Αθανασίου
Αρ. Μητρώου: 102751

Επιβλέπων καθηγητής
Φώτης Στεργιόπουλος

ΜΑΙΟΣ 2019
ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

| | |
|---|----|
| ΠΕΡΙΛΗΨΗ - ABSTRACT | 3 |
| ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ..... | 4 |
| ΕΛΕΓΧΟΣ ΕΠΑΓΩΓΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ | 5 |
| Voltage-Frequency (Τάσης-Συχνότητας) | 5 |
| Vector control (Διανυσματικός έλεγχος)..... | 5 |
| Field acceleration method..... | 5 |
| Direct Torque Control (DTC) | 5 |
| ΑΡΧΕΣ ΤΟΥ ΑΜΕΣΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΡΟΠΗΣ | 7 |
| ΕΙΣΑΓΩΓΗ..... | 7 |
| ΕΛΕΓΚΤΗΣ DTC..... | 7 |
| DTC ΣΧΗΜΑΤΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ | 10 |
| ΜΕΘΟΔΟΙ DTC..... | 13 |
| Τεχνική του τροποποιημένου πίνακα αλλαγής..... | 13 |
| Μέθοδος πίνακα έξι τομέων με μεταβλητές ζώνες | 13 |
| Μέθοδος δώδεκα τομέων με μεταβλητές ζώνες | 15 |
| Έλεγχος νεκρής ζώνης - Deadbeat control | 15 |
| Έλεγχος σταθερής διακοπτικής συχνότητας - Constant switching frequency approach | 15 |
| Ευφυείς τεχνικές ελέγχου ή τεχνικές τεχνητής νοημοσύνης DTC..... | 15 |
| Dtc θεωρία | 16 |
| ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ - ΜΕΙΩΝΕΚΤΗΜΑΤΑ..... | 16 |
| ΤΟ DTC ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΟΥ ΘΑ ΒΑΣΙΣΤΟΥΜΕ | 17 |
| ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΘΕΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΡΟΗΣ | 18 |
| ΨΗΦΙΑΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΗΣ ΡΟΠΗΣ | 18 |
| ΛΟΓΙΚΗ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗΣ SWITCHING TABLE..... | 18 |
| Κλειστος βρόγχος DTC χωρίς έλεγχο στροφών..... | 20 |
| ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΡΟΠΗΣ ΚΑΙ ΡΟΗΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ | 21 |
| ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ | 25 |
| Ροπή αναφοράς 49.75Nm και φορτίο 47Nm | 25 |
| Ταχύτητα και ηλεκτρομαγνητική ροπή..... | 25 |
| Γεωμετρικός τόπος ηλεκτρομαγνητικής ροής | 26 |
| Σφάλματα ηλεκτρομαγνητικής ροπής και ροής..... | 27 |
| Ρεύματα | 27 |
| Ροπή αναφοράς 20Nm και φορτίο 19Nm | 28 |
| Ταχύτητα και ηλεκτρομαγνητική ροπή..... | 28 |
| Γεωμετρικός τόπος ηλεκτρομαγνητικής ροής | 29 |

| | |
|---|----|
| Σφάλματα ηλεκτρομαγνητικής ροπής και ροής..... | 30 |
| Ρεύματα | 30 |
| Κλειστός βρόγχος DTC με έλεγχο στροφών..... | 31 |
| Για φορτίο 20Nm | 34 |
| Ταχύτητα | 34 |
| Ηλεκτρομαγνητική ροπή και ηλεκτρομαγνητική ροή | 35 |
| Ρεύματα | 35 |
| Για φορτίο 50Nm | 36 |
| Ταχύτητα | 36 |
| Ηλεκτρομαγνητική ροπή και ηλεκτρομαγνητικής ροή | 37 |
| Ρεύματα | 37 |
| Μεταβολή ταχύτητας με ράμπα με μέγιστο φορτίο..... | 38 |
| Ταχύτητα | 38 |
| Ηλεκτρομαγνητική ροπή και ηλεκτρομαγνητική ροή | 38 |
| Ρεύματα | 39 |
| Σταθερή ταχύτητα και μεταβολή του φορτίου | 40 |
| Ταχύτητα 400 rpm | 40 |
| Ταχύτητα | 40 |
| Ηλεκτρομαγνητική ροπή και ηλεκτρομαγνητική ροή..... | 40 |
| Ρεύματα | 41 |
| Ταχύτητα 1400rpm | 41 |
| Ταχύτητα | 41 |
| Ηλεκτρομαγνητική ροπή και ηλεκτρομαγνητική ροή..... | 42 |
| Ρεύματα | 42 |
| Δοκιμή μοντέλου με μεγαλύτερο κινητήρα | 43 |
| Direct torque control με κινητήρα 110KW χωρίς έλεγχο στροφών..... | 44 |
| Ταχύτητα – Ροπή..... | 45 |
| Σφάλμα ηλεκτρομαγνητικής ροπής – Σφάλμα ηλεκτρομαγνητικής ροής..... | 45 |
| Ρεύματα | 46 |
| Direct torque control με κινητήρα 110KW με έλεγχο στροφών | 46 |
| Ταχύτητα | 48 |
| Σφάλμα ηλεκτρομαγνητικής ροπής – Σφάλμα ηλεκτρομαγνητικής ροής..... | 48 |
| Ρεύματα | 49 |
| Βιβλιογραφία | 50 |

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της συγκεκριμένης πτυχιακής εργασίας είναι η ανάπτυξη μοντέλων σε περιβάλλον MATLAB SIMULINK αναφορικά με την τεχνική ελέγχου κινητήρων γνωστή ως Direct Torque Control (DTC). Πρόκειται για μια προσομοίωση λειτουργίας του κινητήρα και κατ' επέκταση το μοντέλο αυτό να χρησιμοποιηθεί ως γενικότερο μοντέλο σε ένα σύστημα διαχείρισης ηλεκτρικής ενέργειας με κινητήρες. Επιδίωξη της συγκεκριμένης εργασίας είναι να γίνει εμβάθυνση σε θέματα ελέγχου ηλεκτρικών κινητήρων ώστε να προκύψει ένα μοντέλο το οποίο στη συνέχεια θα μπορέσει να χρησιμοποιηθεί γενικότερα σε διατάξεις ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιούν κινητήρες.

ABSTRACT

The purpose of this thesis is to develop models in MATLAB SIMULINK environment, which are made for induction motor control using the Direct Torque Control (DTC) Technik. This is a simulation of an induction motor operation and by extension this model can be used as a general model in an electrical power management system with motors. The aim of this thesis is to deepen the control of the induction motors in order to create a model which can then be used widely in electrical devices using induction motors.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αρχικά, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου, εκ βάθους καρδιάς, στον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Φώτη Στεργιόπουλο, που στάθηκε αρωγός κάθε φορά που τον χρειάστηκα, από την επιλογή του θέματος της παρούσας εργασίας έως και την ολοκλήρωσή της.

Επιπρόσθετα, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου, και στα τρία μέλη της οικογενείας μου, τους γονείς μου, Γιώργο και Κατερίνα, όπως επίσης και τον αδερφό μου, Νίκο, καθώς ήταν δίπλα μου κάθε φορά που το είχα ανάγκη όλα αυτά τα χρόνια.

ΕΛΕΓΧΟΣ ΕΠΑΓΩΓΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ

Voltage-Frequency (Τάσης-Συχνότητας)

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι ελέγχου επαγωγικών κινητήρων. Οι κύριες διαφορές μεταξύ τους είναι η απόδοση κινητήρα καθώς και το κόστος της υλοποίησης της εφαρμογής.

Παρά το γεγονός ότι ο λόγος τάσης-συχνότητας είναι ο απλούστερος ελεγκτής, είναι ο περισσότερο διαδεδομένος, αφού χρησιμοποιείται στην πλειοψηφία των εφαρμογών στην βιομηχανία. Είναι γνωστός ως κλιμακωτός έλεγχος και ισχύει μία σταθερή σχέση ανάμεσα σε τάση και συχνότητα. Η δομή είναι πολύ απλή και συνήθως δεν χρησιμοποιείται ανάδραση στην ταχύτητα. Παρόλα αυτά, ο ελεγκτής αυτός δεν επιτυγχάνει μεγάλη ακρίβεια ούτε στην ταχύτητα ούτε στην απόκριση της ροπής κυρίως λόγω του γεγονότος ότι η μαγνητική ροή του στάτη και η ροπή δεν ελέγχονται απ' ευθείας.

Vector control (Διανυσματικός έλεγχος)

Σε αυτόν τον τύπο των ελεγκτών, υπάρχουν βρόγχοι ελέγχου για την ροπή και για την μαγνητική ροή. Τα κύρια μειονεκτήματα είναι η τεράστια υπολογιστική ισχύς που απαιτείται και η υποχρεωτικά καλή γνώση των παραμέτρων του κινητήρα.

Field acceleration method

Αυτή η μέθοδος βασίζεται στην αποφυγή ηλεκτρομαγνητικών μεταβατικών φαινομένων που δημιουργούν καθυστερήσεις στην απόκριση ροπής. Επιπρόσθετα, οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται μπορούν να απλοποιηθούν αποθηκεύοντας τον διανυσματικό μετασχηματισμό στον ελεγκτή.

Επιτυγχάνεται μια μείωση του απαιτούμενου υπολογιστικού φόρτου, ξεπερνώντας έτσι το κύριο πρόβλημα των διανυσματικών ελεγκτών με αποτέλεσμα να γίνεται μια σημαντική εναλλακτική λύση.

Direct Torque Control (DTC)

Στον άμεσο έλεγχο ροπής είναι δυνατό να γίνει άμεσα έλεγχος στην μαγνητική ροή του στάτη και την ροπή επιλέγοντας την κατάλληλη διαμόρφωση στον αντιστροφέα.

Τα κύρια χαρακτηριστικά του είναι τα ακόλουθα:

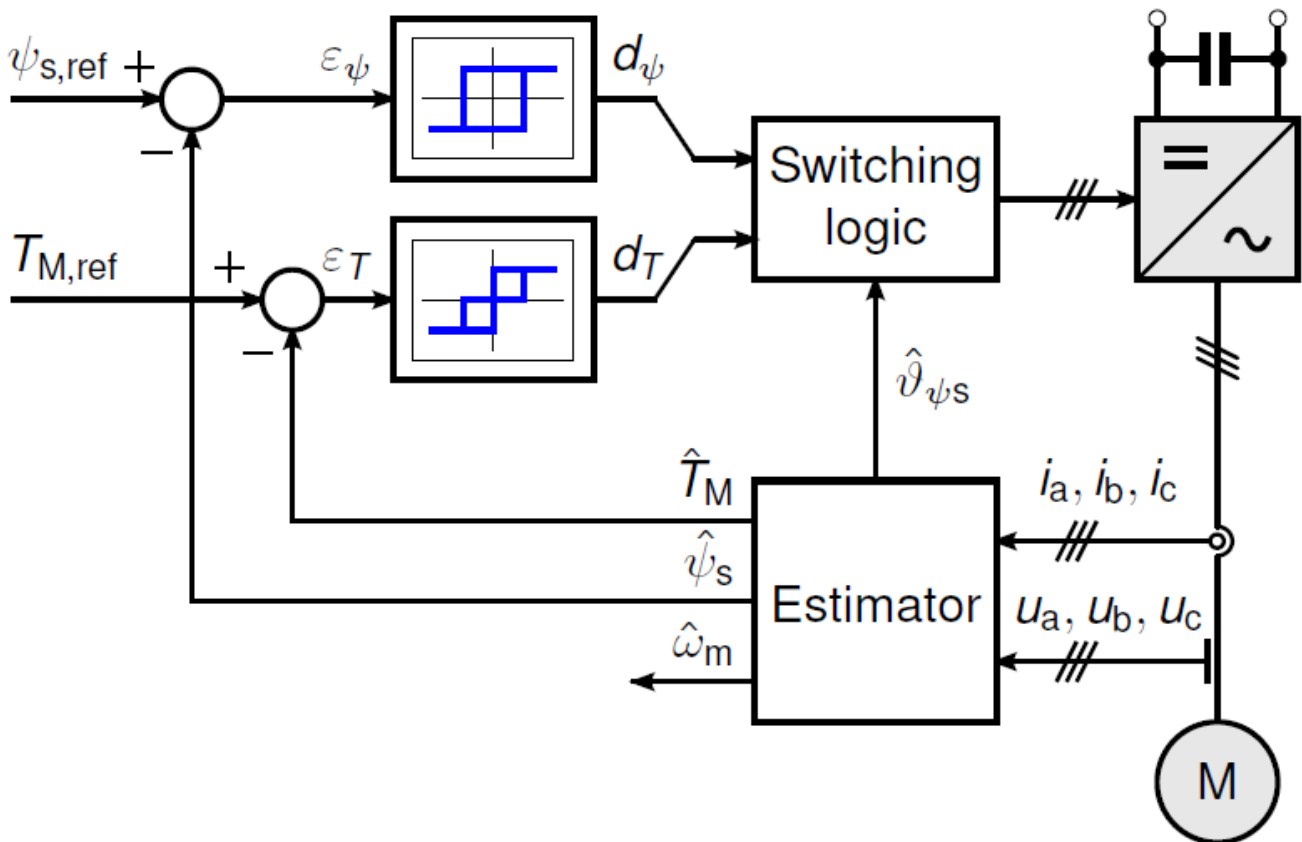
- Απ' ευθείας έλεγχος ροπής και απ' ευθείας έλεγχος της ροής του στάτη
- Έμμεσος έλεγχος των ρευμάτων και των τάσεων του στάτη
- Η μαγνητική ροή και τα ρεύματα του στάτη πλησιάζουν ημιτονοειδείς μορφές
- Υψηλή απόδοση ακόμα και όταν ο ρότορας είναι ακίνητος

Έτσι αυτή η μέθοδος παρουσιάζει τα εξής πλεονεκτήματα:

- Απουσία μετασχηματισμών ρευμάτων τάσεων
- Απουσία ρυθμιστή τάσης, όπως και άλλων ελεγκτών (PID κλπ) για την ροή και την ροπή
- Ελάχιστος χρόνος απόκρισης ροπής, μικρότερος ακόμα και από τους διανυσματικούς ελεγκτές

Πάραυτα παρουσιάζει και μειονεκτήματα:

- Πιθανά προβλήματα κατά την εκκίνηση
- Απαραίτητοι αισθητήρες (εκτιμητές) ροής και ροπής, που συνεπάγεται την συνεχή παρακολούθηση των παραμέτρων
- Διακυμάνσεις στην ροπή και την ροή



Απλοποιημένο διάγραμμα Direct Torque Control

ΑΡΧΕΣ ΤΟΥ ΑΜΕΣΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΡΟΠΗΣ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ηλεκτρομαγνητική ροπή σε ένα τριφασικό επαγωγικό κινητήρα περιγράφεται από την σχέση

$$t_e = \frac{3}{2} P \bar{\psi}_s \bar{i}_s \quad (1.1)$$

όπου ψ_s είναι η μαγνητική ροή του στάτη και i_s το ρεύμα του στάτη και P ο αριθμός των ζευγών πόλων του κινητήρα. Η παραπάνω εξίσωση μπορεί να γραφεί και ως εξής

$$t_e = \frac{3}{2} P \bar{\psi}_s \bar{i}_s \sin(\alpha_s - \rho_s) \quad (1.2)$$

όπου ρ_s είναι η γωνία ροής του στάτη και α_s είναι η γωνία ρεύματος του στάτη, και οι δύο με αναφορά τον οριζόντιο άξονα.

Αν η ροή του στάτη κρατιέται σταθερή και η γωνία ρ_s αλλάζει γρήγορα, τότε η ηλεκτρομαγνητική ροή ελέγχεται άμεσα.

Το ίδιο συμπέρασμα μπορεί να εξέλθει χρησιμοποιώντας μια άλλη σχέση για την ηλεκτρομαγνητική ροπή.

$$t_e = \frac{3}{2} P \frac{L_m}{L_s L_r - L_m^2} \bar{\psi}_s \psi_r \sin(\rho_s - \rho_r) \quad (1.3)$$

Λόγω του ότι η σταθερά χρόνου του ρότορα είναι μεγαλύτερη από αυτή του στάτη, η μαγνητική ροή του ρότορα αλλάζει αργά συγκριτικά με του στάτη, και στην πραγματικότητα μπορεί να θεωρηθεί σταθερή. Όσο η ροή του στάτη παραμένει σταθερή, η ηλεκτρομαγνητική ροπή μπορεί να αλλάζει ταχέως και να ελέγχεται με την έννοια ότι αλλάζει η γωνία $\rho_s - \rho_r$. Για μικρό χρονικό διάστημα η γωνία ρ_r να θεωρηθεί σταθερή, οπότε η ροπή μπορεί να αλλάξει με μεταβολή της γωνίας ρ_s .

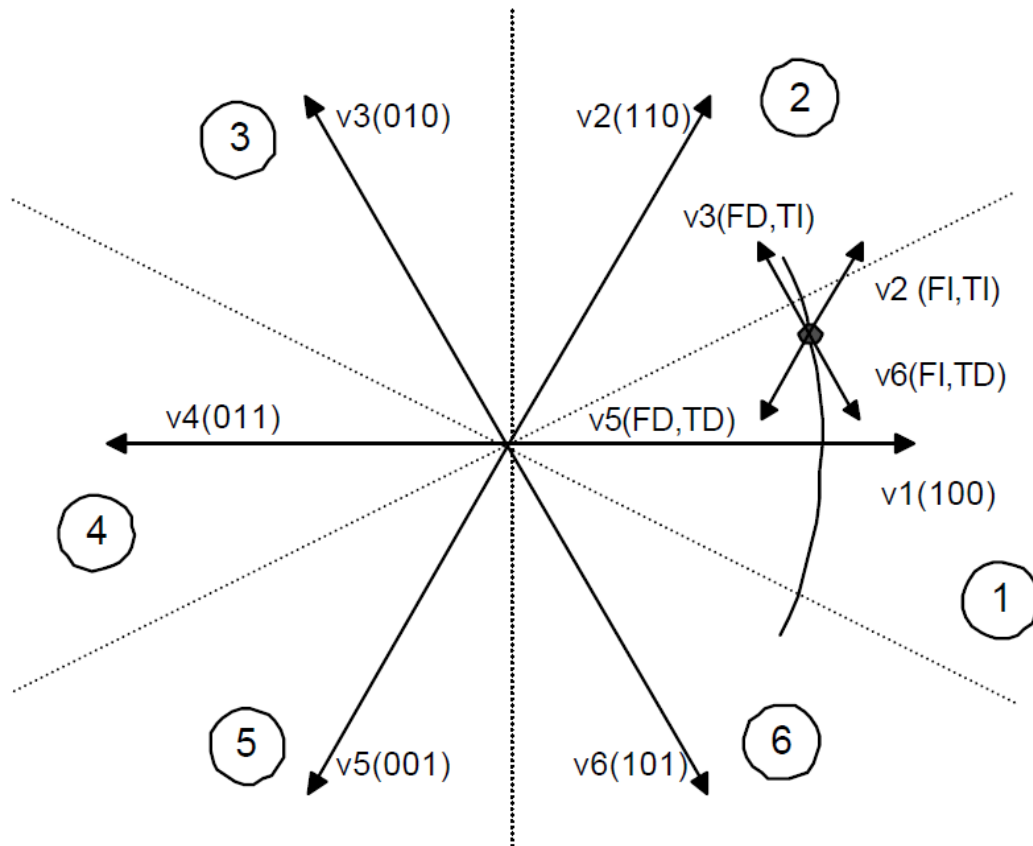
ΕΛΕΓΚΤΗΣ DTC

Ο τρόπος να επιβληθεί η απαιτούμενη ροή στον στάτη είναι μέσω της επιλογής της καταλληλότερης κατάστασης της πηγής τάσης του αντιστροφέα (inverter). Αν οι ωμικές αντιστάσεις παραβλεφθούν χάριν απλότητας, τότε η τάση του στάτη επηρεάζει άμεσα την ροή του στάτη ακολουθώντας την παρακάτω εξίσωση

$$\frac{d\psi_s}{dt} = u_s \quad (1.4)$$

Ο αποσυνδεδεμένος έλεγχος της ροής του στάτη και της ροπής επιτυγχάνεται επιδρώντας στις συνιστώσες x, y του διανύσματος πεπλεγμένης ροής στον γεωμετρικό τόπο αυτού. Αυτές οι δύο συνιστώσες είναι ευθέως ανάλογες ($R_s=0$) με τις συνιστώσες της τάσης του ίδιου διανυσματικού χώρου προς τις ίδιες κατευθύνσεις.

Στο σχήμα 1.1 φαίνεται ο πιθανός δυναμικός τόπος της ροής του στάτη και οι διαφορετικές εκδοχές ανάλογα με την κατάσταση των διακοπών του αντιστροφέα που είναι επιλεγμένες. Ο γεωμετρικός τόπος του διανύσματος ροής χωρίζεται σε 6 διαφορετικά κομμάτια που διακρίνονται από την διακεκομμένη γραμμή.

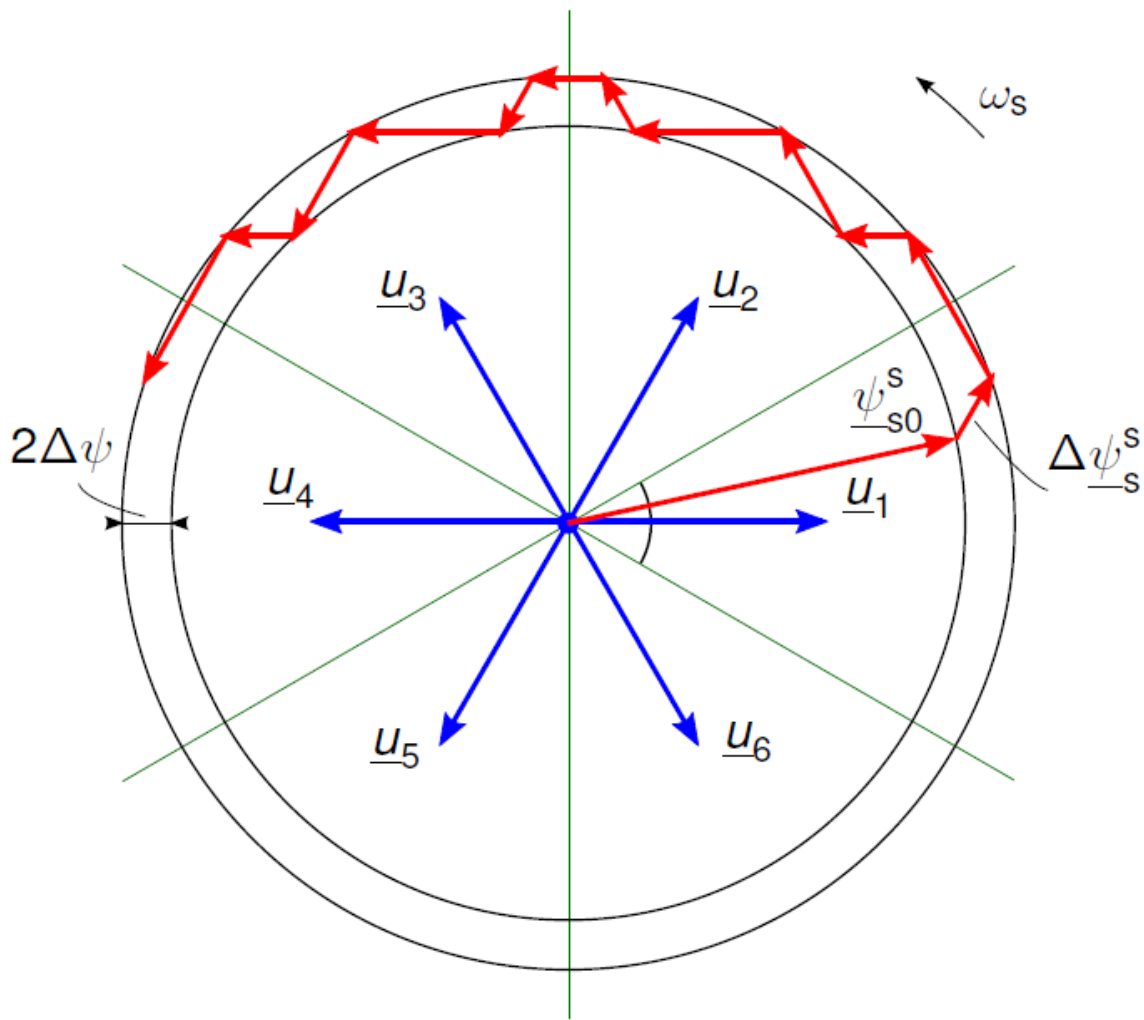


(σχήμα 1.1)πιθανά διανύσματα ροής στάτη και πιθανά διανύσματα τάσης
 FD: μείωση ροής, FI: αύξηση ροής, TD: μείωση ροπής, TI: αύξηση ροπής

Σύμφωνα με το σχήμα 1.1 μπορεί να γραφεί ο παρακάτω γενικός πίνακας (πίνακας 1.1). Βγαίνει το συμπέρασμα ότι οι καταστάσεις V_k και V_{k+3} δεν υπολογίζονται στην ροπή γιατί και τα δύο κομμάτια μπορούν να αυξήσουν (στις πρώτες 30 μοίρες) και να μειώσουν(στις υπόλοιπες 30 μοίρες) την ροπή στο ίδιο κομμάτι εξαρτόμενα από την θέση της ροής του στάτη.

| ΔΙΑΝΥΣΜΑ ΤΑΣΗΣ | ΑΥΞΗΣΗ | ΜΕΙΩΣΗ |
|----------------|-------------------------|-----------------------------|
| ΡΟΗ ΣΤΑΤΗ | V_k, V_{k+1}, V_{k-1} | $V_{k+2}, V_{k-2}, V_{k+3}$ |
| ΡΟΠΗ | V_{k+1}, V_{k+2} | V_{k-1}, V_{k-2} |

(πίνακας 1.1) επίδραση διανυσμάτων τάσης στη ροή του στάτη και της ροπής, όπου k ο αριθμός του τομέα της ροής του στάτη



(Σχήμα 1.2) Επιλογή διανυσμάτων τάσης του αντιστροφέα

Οι τιμές του πίνακα (lookup table) για την επιλογή του διανύσματος τάσης του αντιστροφέα φαίνονται παρακάτω.

| Φ | τ | S_1 | S_2 | S_3 | S_4 | S_5 | S_6 |
|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| FI | TI | V_2 | V_3 | V_4 | V_5 | V_6 | V_1 |
| | T= | V_0 | V_7 | V_0 | V_7 | V_0 | V_7 |
| | TD | V_6 | V_1 | V_2 | V_3 | V_4 | V_5 |
| FD | TI | V_3 | V_4 | V_5 | V_6 | V_1 | V_2 |
| | T= | V_7 | V_0 | V_7 | V_0 | V_7 | V_0 |
| | TD | V_5 | V_6 | V_1 | V_2 | V_3 | V_4 |

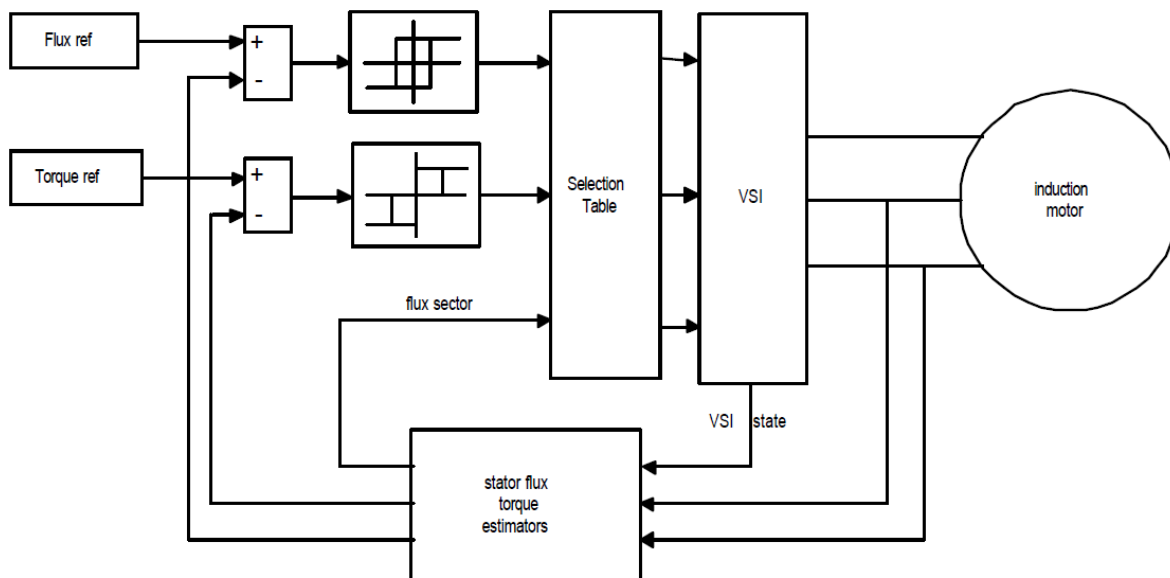
(πίνακας 1.2) Φ : Σφάλμα ροής του στάτη μετά από το μπλοκ υστέρησης, τ : Σφάλμα ροπής μετά από το μπλοκ υστέρησης, FI/FD: Αύξηση/Μείωση ροής, TI/TD: Αύξηση/Μείωση ροπής

Οι τομείς του διανυσματικού χώρου της ροής του στάτη συμβολίζονται με S_1 έως S_6 . Το σφάλμα της ροής του στάτη μετά το μπλοκ της υστέρησης(Φ) μπορεί να πάρει δύο τιμές. Το σφάλμα της ροπής μετά το μπλοκ της υστέρησης μπορεί να πάρει τρεις τιμές. Τα μηδενικά διανύσματα V_0 και V_7 επιλέγονται όταν η μαγνητική ροή είναι μεταξύ των δοσμένων ορίων και πρέπει να παραμείνει σταθερή.

DTC ΣΧΗΜΑΤΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ

Στο σχήμα 1.3 παρουσιάζεται μία εκδοχή σχηματικού διαγράμματος του DTC. Όπως είναι φανερό, υπάρχουν δύο βρόγχοι, ένας για την μαγνητική ροή του στάτη και ένας για την ροπή. Οι τιμές αναφοράς (reference values) της ροής και της ροπής συγκρίνονται με τις πραγματικές τιμές, και το αποτέλεσμα που προκύπτει τροφοδοτείται στα δύο επιπέδων και τριών επιπέδων μπλοκ αντίστοιχα. Οι έξοδοι των μπλοκ υστέρησης μαζί με την θέση της μαγνητικής ροής του στάτη χρησιμοποιούνται ως είσοδοι στον πίνακα 1.2. Η θέση της ροής του στάτη διαιρείται σε έξι διαφορετικούς τομείς. Σύμφωνα με το σχήμα 1.3, η ροή του στάτη και το σφάλμα της ροπής τείνουν να περιορίζονται στις αντίστοιχες ζώνες υστέρησης. Μπορεί να αποδειχθεί ότι η ζώνη υστέρησης της ροής επηρεάζει κυρίως την παραμόρφωση του ρεύματος του στάτη όσον αφορά κυρίως τις χαμηλές αρμονικές και η υστέρηση της ροπής επηρεάζει την συχνότητα μεταγωγής.

Η μέθοδος DTC απαιτεί εκτιμητές ροής και ροπής, οι οποίοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν όπως φαίνεται στο σχήμα 1.3, δηλαδή, μέσω δύο φάσεων ρεύματος και την κατάσταση του αντιστροφέα.



(σχήμα 1.3) Σχηματικό Διάγραμμα DTC

Πάραυτα, ροή και ροπή μπορούν να βρεθούν χρησιμοποιώντας και άλλα μεγέθη όπως δύο ρεύματα του στάτη και την ταχύτητα, ή δύο ρεύματα του στάτη και την θέση του άξονα.

- Οι εκτιμητές της ροπής και της ροής

Το DTC δεν απαιτεί αισθητήρες ταχύτητας και θέσης του ρότορα. Η εκτίμηση της ροής και της ροπής βασίζονται σε εξισώσεις της τάσης του στάτη που δεν απαιτούν πληροφορίες ταχύτητας και θέσης όταν εφαρμόζονται σταθερές συντεταγμένες. Έτσι, από την κατάσταση του αντιστροφέα τάσης πηγής και έχοντας την στιγμιαία τιμή της τάσης DC, συλλέγεται και η τάση φάσης του κινητήρα. Την στιγμή που θα συλλεχθούν οι τιμές τάσης και ρεύματος, θα μετασχηματιστούν σε d και q συνιστώσες κατά τον μετασχηματισμό Παρκ (park's transformation).

$$I_d = i_a \cos\theta + i_b \sin\theta \quad (1.4)$$

$$I_q = i_b \cos\theta + i_a \sin\theta \quad (1.5)$$

Η ροή του στάτη στην τελική της μορφή περιγράφεται ως εξής

$$\psi_s = \int (V_s - \bar{i}_s R_s) dt \quad (1.6)$$

με χρήση μετασχηματισμού "z" η παραπάνω εξίσωση γίνεται

$$\Psi_s = \frac{z^{-1}}{1-z^{-1}} T_s (v_s - \bar{i}_s R_s) \quad (1.7)$$

η εξίσωση στο πεδίο χρόνου εκφράζεται ως

$$\psi_s(k) - \psi_s(k-1) = T_s V_s(k-1) - T_s R_s \bar{i}_s(k-1) \quad (1.8)$$

οι συνιστώσες d και q της εξίσωσης (1.6)

$$\psi_{sd}(k) - \psi_{sd}(k-1) = T_s V_{sd}(k-1) - T_s R_s i_{sd}(k-1) \quad (1.7)$$

$$\psi_{sq}(k) - \psi_{sq}(k-1) = T_s V_{sq}(k-1) - T_s R_s i_{sq}(k-1) \quad (1.8)$$

Τα τριφασικά ρεύματα και οι τάσεις μετατρέπονται σε συνιστώσες d και q όπως δείχνουν οι παρακάτω εξισώσεις

$$u_{qs} = u_{an} = \frac{2}{3}u_{ab} + \frac{1}{3}u_{bc} \quad (1.9)$$

$$u_{ds} = \frac{1}{\sqrt{3}} (-u_{bc}) \quad (1.10)$$

$$i_{qs} = i_{as} \quad (1.11)$$

$$i_{ds} = \frac{1}{\sqrt{3}} (i_{cs} - i_{bs}) \quad (1.12)$$

Οι συνιστώσες d και q της ροής δίνονται από τις εξισώσεις 1.13 και 1.14 ενώ η ηλεκτρομαγνητική ροπή T_e από την 1.15

$$\lambda_{qs} = \int u_{qs} - R_s i_{qs} dt \quad (1.13)$$

$$\lambda_{ds} = \int u_{ds} - R_s i_{ds} dt \quad (1.14)$$

$$T_e = \frac{3P}{2} (\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds}) \quad (1.15)$$

Πρέπει να σημειωθεί ότι μετασχηματισμός συντεταγμένων δεν είναι απαραίτητος. Πάραυτα, η ακρίβεια της εκτίμησης είναι περιορισμένη εξ' αιτίας του ολοκληρώματος ανοιχτού βρόγχου, το οποίο μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλες αποκλείσεις μεταξύ εκτίμησης και πραγματικής τιμής της ροής του στάτη.

ΜΕΘΟΔΟΙ DTC

Στο κλασικό DTC που έχει παρουσιαστεί ως τώρα υπάρχουν και μειονεκτήματα που συνοψίζονται στα παρακάτω:

- Λανθασμένη ή αργή απόκριση ροπής και ροής κατά την εκκίνηση
- Δεν διακρίνονται σφάλματα ροπής και ροής
- Χρησιμοποιούνται τα ίδια διανύσματα κατά την εκκίνηση, τις βηματικές αλλαγές και τις συνθήκες σταθερής κατάστασης

Για να προσπεραστούν τα συγκεκριμένα μειονεκτήματα, χρησιμοποιούνται οι ακόλουθες τεχνικές:

- Η τεχνική του τροποποιημένου πίνακα αλλαγής (modified switching table)
- Έλεγχος νεκρής ζώνης (Deadbeat control technique)
- Τεχνική σταθερής διακοπτικής συχνότητας (Constant switching frequency technique)
- Ευφυείς τεχνικές ελέγχου (intelligent control techniques)

Τεχνική του τροποποιημένου πίνακα αλλαγής

Πολλές παραλλαγές μπορούν να γίνουν στον πίνακα εναλλαγής με σκοπό την βελτίωση τις καταστάσεις εκκίνησης και υπερύψωσης, λειτουργία πολύ χαμηλής ταχύτητας, μείωση διακυμάνσεων ροπής, μεταβλητή λειτουργία συχνότητας διακοπών και απόσβεση επιπέδου θορύβου.

Τα προαναφερθέντα επιτυγχάνονται με τις εξής μεθόδους:

1. Πίνακας έξι τομέων με μεταβλητές ζώνες
2. Πίνακας δώδεκα τομέων

Μέθοδος πίνακα έξι τομέων με μεταβλητές ζώνες

Κατά την εκκίνηση και σε λειτουργία με πολύ χαμηλή ταχύτητα ο βασικός πίνακας που έχουμε δει πιο πάνω (πιν.1.2) επιλέγει πολύ συχνά μηδενικά διανύσματα με αποτέλεσμα την μείωση της ροής λόγω της πτώσης της αντίστασης του στάτη. Αυτό αντιμετωπίζεται είτε με την χρήση ενός σήματος θορύβου είτε με ένα τροποποιημένο πίνακα με σκοπό να εφαρμόσει την κατάλληλη τάση σε κατάλληλη ακολουθία.

Ο παρακάτω πίνακας δείχνει τις διαφορές ανάμεσα στις δύο περιπτώσεις:

| Voltage vectors | Κλασικό DTC | Τροποποιημένο DTC |
|-----------------|--------------|-------------------|
| V_1 | -30 έως 30 | 0 έως -60 |
| V_2 | 30 έως 90 | 0 έως 60 |
| V_3 | 90 έως 150 | 60 έως 120 |
| V_4 | -150 έως 150 | 120 έως 180 |
| V_5 | -90 έως -150 | -120 έως -180 |
| V_6 | -30 έως -90 | -60 έως -120 |

(πιν.1.3) Σύγκριση κλασικό και τροποποιημένο DTC

| Φ | T | S_1 | S_2 | S_3 | S_4 | S_5 | S_6 |
|--------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Αύξηση | Αύξηση | V_2 | V_3 | V_4 | V_5 | V_6 | V_1 |
| | Σταθερή | V_0 | V_7 | V_0 | V_7 | V_0 | V_7 |
| | Μείωση | V_1 | V_2 | V_3 | V_4 | V_5 | V_6 |
| Μείωση | Αύξηση | V_4 | V_5 | V_6 | V_1 | V_2 | V_3 |
| | Σταθερή | V_7 | V_0 | V_7 | V_0 | V_7 | V_0 |
| | Μείωση | V_5 | V_6 | V_1 | V_2 | V_3 | V_4 |

(πιν.1.4) Πίνακας διανυσμάτων τροποποιημένου DTC

Μέθοδος δώδεκα τομέων με μεταβλητές ζώνες

Σε αυτή τη μέθοδο έχουμε διαχωρισμό του τόπου της ροής του στάτη σε δώδεκα τομείς αντί για έξι που έχουμε στο κλασικό DTC. Σε αυτή τη μέθοδο και τα έξι ενεργά διανύσματα τάσης χρησιμοποιούνται ανά τομέα. Αντίθετα με το κλασικό DTC, εισάγεται η παρακάτω διαδικασία. Δηλαδή, εκτός από την αύξηση ή μείωση της ροπής, εισάγεται επίσης μικρή ή ελαφρά αύξηση ή μείωση της ροπής. Δεδομένου, ότι η συνιστώσα εφαπτομενικού διανύσματος τάσης είναι πολύ μικρή, πρέπει επίσης να ληφθεί υπόψη η μικρή μεταβολή της ροπής.

| Φ | T | S ₁ | S ₂ | S ₃ | S ₄ | S ₅ | S ₆ | S ₇ | S ₈ | S ₉ | S ₁₀ | S ₁₁ | S ₁₂ |
|--------|--------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| Αύξηση | αύξηση | V ₂ | V ₃ | V ₃ | V ₄ | V ₄ | V ₅ | V ₅ | V ₆ | V ₆ | V ₁ | V ₁ | V ₂ |
| | Μικρή αύξηση | V ₂ * | V ₂ | V ₃ * | V ₃ | V ₄ * | V ₄ | V ₅ * | V ₅ | V ₆ * | V ₆ | V ₁ * | V ₁ |
| | Μικρή μείωση | V ₁ | V ₁ * | V ₂ | V ₂ * | V ₃ | V ₃ * | V ₄ | V ₄ * | V ₅ | V ₅ * | V ₆ | V ₆ * |
| | Μείωση | V ₆ | V ₁ | V ₁ | V ₂ | V ₂ | V ₃ | V ₃ | V ₄ | V ₄ | V ₅ | V ₅ | V ₆ |
| Μείωση | αύξηση | V ₃ | V ₄ | V ₄ | V ₅ | V ₅ | V ₆ | V ₆ | V ₁ | V ₁ | V ₂ | V ₂ | V ₃ |
| | Μικρή αύξηση | V ₄ | V ₄ * | V ₅ | V ₅ * | V ₆ | V ₆ * | V ₁ | V ₁ * | V ₂ | V ₂ * | V ₃ | V ₃ * |
| | Μικρή μείωση | V ₇ | V ₅ | V ₀ | V ₆ | V ₇ | V ₁ | V ₀ | V ₂ | V ₇ | V ₃ | V ₀ | V ₄ |
| | Μείωση | V ₅ | V ₆ | V ₆ | V ₁ | V ₁ | V ₂ | V ₂ | V ₃ | V ₃ | V ₄ | V ₄ | V ₅ |

(όπου * δεν υπάρχει κατάλληλη κατάσταση και επιλέγουμε την πιο κοντινή στην επιθυμητή)

Έλεγχος νεκρής ζώνης - Deadbeat control

Η ιδέα πάνω στην οποία βασίζεται η μέθοδος deadbeat DTC είναι να εξαναγκασθεί η ροπή και η ροή του στάτη να φτάσει στην επιθυμητή τιμή έπειτα από μια περίοδο δειγματοληψίας συνθέτοντας το κατάλληλο διάνυσμα τάσης του στάτη που εφαρμόζεται από την διαμόρφωση διανυσματικού χώρου. Στην προσέγγιση αυτή, οι αλλαγές ροής και ροπής είναι αρχικά προβλέψιμες από τις εξισώσεις της μηχανής, και αφού λυθεί μια τετραγωνική εξίσωση για να βρεθεί το διάνυσμα της τάσης του στάτη σε σταθερές συντεταγμένες.

Έλεγχος σταθερής διακοπτικής συχνότητας - Constant switching frequency approach

Η συχνότητα του inverter διατηρείται σταθερή και μεγαλύτερη από την συχνότητα δειγματοληψίας, γεγονός που μειώνει δραστικά τους κυματισμούς της ροής και της ροπής. Διαφορετικές τεχνικές διαμόρφωσης διανυσματικού χώρου χρησιμοποιούνται σε αυτή τη προσέγγιση και δεν εφαρμόζεται έλεγχος deadbeat.

Ευφυείς τεχνικές ελέγχου ή τεχνικές τεχνητής νοημοσύνης DTC

Οι τεχνικές τεχνητής νοημοσύνης βρίσκουν εφαρμογή σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών στην επιστήμη και την μηχανική. Η τεχνητή νοημοσύνη είναι βασικά η ενσωμάτωση της ανθρώπινης ευφυΐας στην μηχανή έτσι ώστε η μηχανή να μπορεί να «σκεφτεί» έξυπνα σαν ανθρώπινο ον. Κατηγοριοποιείται σε (i) hard computing και (ii) soft computing τεχνικές.

Dtc θεωρία

Οι επαγωγικές μηχανές χρησιμοποιούνται πλέον για πάνω από εκατό χρόνια. Εξ αιτίας της απλότητας τους, τραχύτητας, της αξιοπιστίας, της αποδοτικότητας, του χαμηλού κόστους, της συμπαγούς κατασκευής και του ποικιλίας χρήσης, οι επαγωγικές μηχανές βραχυκυκλωμένου κλωβού είναι οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες μηχανές σε σταθερές ταχύτητες. Παρόλα αυτά οι εξελίξεις στα variable speed drives έχουν κάνει δυνατή την χρησιμοποίησή τους σε ένα ακόμα μεγαλύτερο φάσμα εφαρμογών.

Παρότι ο επαγωγικός κινητήρας είναι ανώτερος του κινητήρα συνεχούς ρεύματος σε ότι έχει σχέση με το μέγεθος, το βάρος, την αδράνεια του ρότορα, την απόδοση, την μέγιστη ταχύτητα, την αξιοπιστία, το κόστος κ.λπ. λόγω της δομής του απαιτεί πολύ πιο σύνθετα συστήματα ελέγχου απ' ότι για παράδειγμα μια μηχανή συνεχούς ρεύματος ξένης διέγερσης.

Σε ένα DTC drive, είναι δυνατό να ελεγχθεί απευθείας η ροή του στάτη (ή την ροή του ρότορα, ή η magnetizing flux linkage) και η ηλεκτρομαγνητική ροπή από την βέλτιστη επιλογή διακοπών στον αντιστροφέα. Η επιλογή γίνεται με σκοπό την μείωση του σφάλματος της ροής και της ροπής, εντός των αντίστοιχων ζωνών υστέρησης ροής και ροπής, για να επιτευχθεί γρήγορη απόκριση στην ροπή, χαμηλή συχνότητα εναλλαγής διακοπών του αντιστροφέα (low inverter switching frequency??), και χαμηλές απώλειες αρμονικών. Το DTC επιτρέπει την πολύ γρήγορη απόκριση της ροπής και τον ευέλικτο χειρισμό του επαγωγικού κινητήρα.

ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ - ΜΕΙΩΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

Τα κύρια πλεονεκτήματα του DTC είναι:

- Απουσία μετασηματισμού συντεταγμένων (που είναι απαραίτητος στις περισσότερες διανυσματοδεικτούμενες)
- Δεν απαιτεί τη γνώση του ηλεκτρικού μοντέλου του κινητήρα (όπως π.χ. με διανυσματικό έλεγχο)
- Απουσία ξεχωριστού μπλοκ διαμόρφωσης τάσης (που είναι απαραίτητο στα vector drives)
- Απουσία κυκλώματος αποσύνδεσης τάσης (απαραίτητο σε voltage-source vector drives)
- Απουσία αρκετών ελεγκτών
- Μόνο ο τομέας που βρίσκεται (flux-linkage space vector) είναι απαραίτητο να οριστεί και όχι η ακριβής (flux-linkage space vector) θέση

Τα κύρια μειονεκτήματα του DTC είναι:

- Πιθανά προβλήματα κατά την εκκίνηση και την χρήση σε χαμηλές ταχύτητες και κατά την διάρκεια αλλαγών στην εντολή ροπής
- Αναγκαιότητα για αισθητήρια ροής και ροπής (το ίδιο πρόβλημα υπάρχει και στα vector drives)
- Στην ρύθμιση της εναλλαγής της συχνότητας
- Στην υψηλή ροπή κύλισης

Πάραυτα είναι δυνατό να παρακαμφτούν κάποιες από αυτές τις δυσκολίες.

ΤΟ DTC ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΟΥ ΘΑ ΒΑΣΙΣΤΟΥΜΕ

Πρόκειται για ένα σύστημα DTC για γρήγορο έλεγχο επαγωγικού κινητήρα. Το προτεινόμενο υλικό μιμείται το συμβατικό πίνακα στον οποίο στηρίζεται το DTC και δεν απαιτεί κανένα γρήγορο υπολογιστικό σύστημα όπως μικροεπεξεργαστές, PC ή DSP. Ο ελεγκτής χρησιμοποιεί αποκλειστικά διακριτά υλικά εξαρτήματα.

Το δημοφιλές DTC με βάση τον πίνακα χρησιμοποιεί αποθηκευμένες πληροφορίες σε έναν πίνακα τριών διαστάσεων, όπου οι μεταβλητές είναι τα σφάλματα ροής και ροπής και η θέση του διανύσματος της ηλεκτρομαγνητικής ροής του τυλίγματος του στάτη. Ένας τυπικός πίνακας μπορεί να είναι ο εξής.

| S_λ | S_T | (S_θ) | | | | | |
|-------------|-------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | | (1) | (2) | (3) | (4) | (5) | (6) |
| 1 | 1 | VI (1 1 0) | I (1 0 0) | II (1 0 1) | III (0 0 1) | IV (0 1 1) | V (0 1 0) |
| 1 | 0 | VIII (1 1 1) | VII (0 0 0) | VIII (1 1 1) | VII (0 0 0) | VIII (1 1 1) | VII (0 0 0) |
| 1 | -1 | II (1 0 1) | III (0 0 1) | IV (0 1 1) | V (0 1 0) | VI (1 1 0) | I (1 0 0) |
| 0 | 1 | V (0 1 0) | VI (1 1 0) | I (1 0 0) | II (1 0 1) | III (0 0 1) | IV (0 1 1) |
| 0 | 0 | VII (0 0 0) | VIII (1 1 1) | VII (0 0 0) | VIII (1 1 1) | VII (0 0 0) | VIII (1 1 1) |
| 0 | -1 | III (0 0 1) | IV (0 1 1) | V (0 1 0) | VI (1 1 0) | I (1 0 0) | II (1 0 1) |

Πίνακας 2.1

Το S_λ παίρνει την τιμή του από την ροή. Παίρνει λογικό '1' για αύξηση στον πλάτος της ροής και λογικό '0' για μείωση του πλάτους. Αντίστοιχα '1' '0' και '-1' παίρνει για αύξηση, κράτηση τιμής και μείωση του S_T . Από την άλλη το S_θ μας επισημαίνει σε ποιο από τα 6 χωρία βρίσκεται το διάνυσμα της ροής. Από αυτές τις τρεις μεταβλητές, λοιπόν, καθορίζεται σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα (πίνακας 2.1) η συμπεριφορά του αντιστροφέα. Με λατινικούς αριθμούς φαίνεται το διάνυσμα τάσης και μέσα στις παρενθέσεις φαίνεται η κατάσταση των τριών 'ποδιών' του inverter.

Σε όλα τα παραπάνω, το DTC έχει υλοποιηθεί με την βοήθεια κάποιου γρήγορου επεξεργαστή, όπως DSP ή PC. Τα πραγματικά ρεύματα του κινητήρα και οι τάσεις μετρούνται και η τιμή τους μεταφέρεται στο PC ή το DSP. Το ρεύμα και η τάση από τριφασική μορφή μετατρέπεται σε δύο φάσεις μέσω μετασχηματισμού dq με τις παρακάτω εξισώσεις.

$$U_{qs} = \frac{2}{3} u_{ab} + \frac{1}{3} u_{bc} \quad (1)$$

$$U_{ds} = \frac{1}{\sqrt{3}} (-u_{bc}) \quad (2)$$

$$i_{qs} = i_{as} \quad (3)$$

$$i_{ds} = \frac{1}{\sqrt{3}} (i_{cs} - i_{bs}) \quad (4)$$

Στην συνέχεια οι συντεταγμένες d q της ροής δίνονται από τις εξισώσεις (5),(6) και η ροπή από την (7). Η ροή του στάτη που προκύπτει από την εξίσωση $\lambda_s^2 = \lambda_{ds}^2 + \lambda_{qs}^2$.

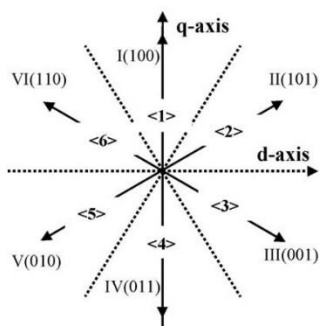
$$\lambda_{qs} = \int (v_{qs} - R_s i_{qs}) dt \quad (5)$$

$$\lambda_{ds} = \int (v_{ds} - R_s i_{ds}) dt \quad (6)$$

$$T_e = \frac{3P}{2} (\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds}) \quad (7)$$

ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΘΕΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΡΟΗΣ

Για να προσδιορίσουμε την θέση που βρίσκεται το διάνυσμα της ροής θα πρέπει να βρούμε τα A_0 , A_1 , A_2 . Το A_2 παίρνει την τιμή του από το πρόσημο του λ_{ds} . Το A_1 παίρνει το πρόσημο του από το λ_{qs} . Το A_0 είναι 1 όταν η απόλυτη τιμή της διαίρεσης $\lambda_{qs} / \lambda_{ds}$ είναι μεγαλύτερη από $\tan 60 = 1,732$. Ο συνδυασμός των τριών αυτών μεταβλητών σύμφωνα με τον πίνακα 2.2 δείχνει το χωρίο που βρίσκεται η ροή.



| A_2 | A_1 | A_0 | Sector no. (S_θ) |
|-------|-------|-------|---------------------------|
| 0 | 0 | 0 | (5) |
| 0 | 0 | 1 | (4) |
| 0 | 1 | 0 | (6) |
| 0 | 1 | 1 | (1) |
| 1 | 0 | 0 | (3) |
| 1 | 0 | 1 | (4) |
| 1 | 1 | 0 | (2) |
| 1 | 1 | 1 | (1) |

Πίνακας 2.2

ΨΗΦΙΑΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΗΣ ΡΟΠΗΣ

υστέρησης. Το S_{T1} θα είναι το λογικό αποτέλεσμα για την θετική αναφορά και το S_{T2} για την αρνητική. Αν η ροπή είναι μέσα στα όρια τότε και οι δυο μεταβλητές παίρνουν την τιμή 0. Αν η ροπή είναι μικρότερη της αναφοράς το S_{T1} παίρνει την τιμή 0 ενώ το S_{T2} 1. Αν η ροπή είναι μεγαλύτερη της αναφοράς τότε το S_{T1} παίρνει την τιμή 1 ενώ το S_{T2} 0. Ουσιαστικά, η πρώτη περίπτωση αντιστοιχεί στην κατάσταση '0' του S_T για τον πίνακα 1. Η δεύτερη κατάσταση για την περίπτωση '-1' και η τρίτη για την '1'. Δεν είναι δυνατό οι δυο μεταβλητές να Για την ροπή έχουμε τις μεταβλητές S_{T1} και S_{T2} . Η πραγματική ροπή αφαιρείται από την χρησιμοποιώντας συγκριτές πάρουν ταυτόχρονα τιμή 1.

ΛΟΓΙΚΗ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗΣ SWITCHING TABLE

Συνεπώς έχουμε έξι σήματα ελέγχου που ακολουθώντας τον πίνακα 2 αντικαθιστούν τον πίνακα 1.

| $A_2 A_1 A_0$ | $S_{T1} S_{T2} S_{\lambda}$ | | | | | | | |
|---------------|-----------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | 000 abc | 001 abc | 011 abc | 010 abc | 110 abc | 111 abc | 101 abc | 100 abc |
| 000 (5) | 000 | 111 | 110 | 100 | XXX | XXX | 011 | 001 |
| 001 (4) | 111 | 000 | 010 | 110 | XXX | XXX | 001 | 101 |
| 011 (1) | 000 | 111 | 101 | 001 | XXX | XXX | 110 | 010 |
| 010 (6) | 111 | 000 | 100 | 101 | XXX | XXX | 010 | 011 |
| 110 (2) | 111 | 000 | 001 | 011 | XXX | XXX | 100 | 110 |
| 111 (1) | 000 | 111 | 101 | 001 | XXX | XXX | 110 | 010 |
| 101 (4) | 111 | 000 | 010 | 110 | XXX | XXX | 001 | 101 |
| 100 (3) | 000 | 111 | 011 | 010 | XXX | XXX | 101 | 100 |

Πίνακας 2.3

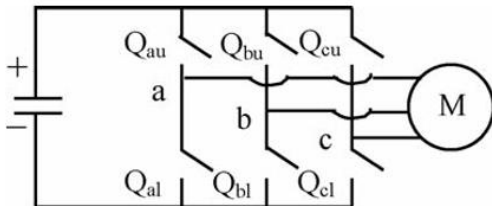
Ο πίνακας 2.3 έχει για εξόδους οκτώ διανύσματα. Για να παραχθεί ο παραπάνω πίνακας αλήθειας χρησιμοποιούμε τις παρακάτω εξισώσεις, που υλοποιούνται μέσω λογικών πυλών.

$$Q_a = A_1 A_0 S_\lambda + \bar{A}_2 \bar{A}_0 S_{T2} + A_2 \bar{A}_0 S_{T1} + \bar{A}_1 A_0 \bar{S}_\lambda + \bar{A}_0 \bar{S}_{T1} \bar{S}_{T2} (A_1 \bar{S}_\lambda + \bar{A}_1 S_\lambda).$$

$$Q_b = A_2 \bar{A}_1 S_{T2} + \bar{A}_2 A_1 S_{T1} + A_1 A_0 S_{T1} + \bar{A}_1 A_0 S_{T2} + A_2 \bar{A}_0 S_{T2} \bar{S}_\lambda + \bar{A}_1 \bar{S}_{T1} (\bar{A}_0 S_\lambda + A_0 \bar{S}_\lambda) + \bar{A}_2 \bar{A}_1 \bar{A}_0 S_\lambda + A_1 \bar{S}_{T2} (S_\lambda \bar{A}_0 + \bar{S}_\lambda \bar{A}_0).$$

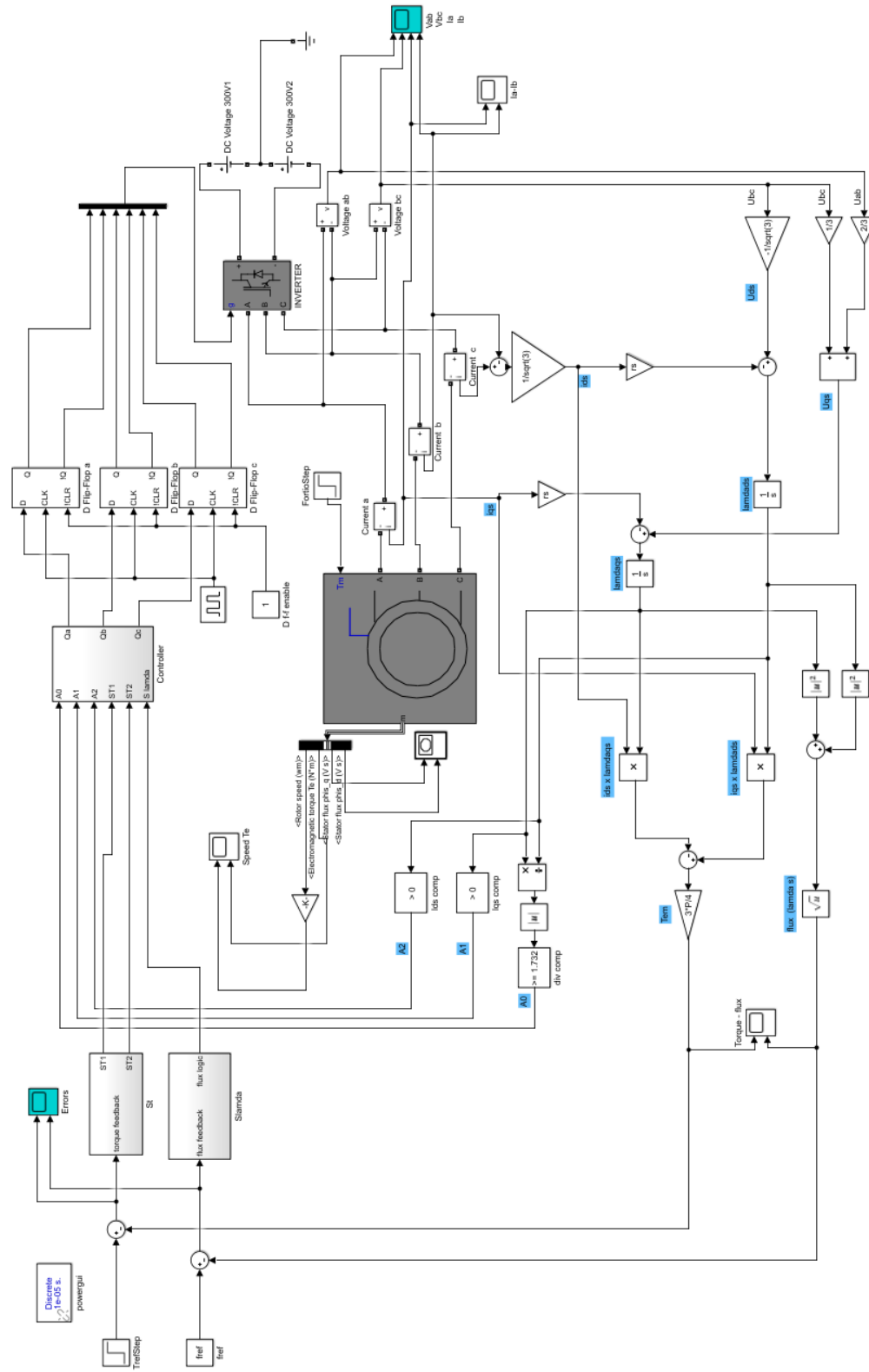
$$Q_c = \bar{A}_2 \bar{A}_1 S_{T1} + A_2 A_1 S_{T2} + A_1 A_0 S_{T2} + A_1 \bar{S}_{T1} (S_\lambda \bar{A}_0 + \bar{S}_\lambda \bar{A}_0) + \bar{A}_1 A_0 S_{T1} + \bar{A}_2 A_1 \bar{A}_0 \bar{S}_\lambda + A_2 \bar{A}_1 \bar{A}_0 S_\lambda + \bar{A}_1 \bar{S}_{T2} (S_\lambda \bar{A}_0 + A_0 \bar{S}_\lambda).$$

Το Q_a το Q_b και το Q_c αντιπροσωπεύουν τις καταστάσεις των διακοπών a,b,c αντίστοιχα όπως δείχνει και το παρακάτω σκίτσο. Όταν η κατάσταση είναι '1' ο πάνω διακόπτης κλείνει και ο κάτω ανοίγει και έτσι έχουμε τάση. Αντίθετα, όταν η κατάσταση είναι '0' ο πάνω διακόπτης ανοίγει και ο κάτω κλείνει οπότε η τάση είναι μηδέν.



Τέλος, ανάμεσα στον controller και τον αντιστροφέα υπάρχουν 3 D flip-flop με κοινό ρολόι για τον συγχρονισμό των σημάτων. Το ρολόι είναι χρονισμένο στα 20μs.

Κλειστος βρόγχος DTC χωρίς έλεγχο στροφών



Η προσομοίωση του MATLAB/Simulink γίνεται σε διακριτό χρόνο με περίοδο δειγματοληψίας 10 μ s.

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΡΟΠΗΣ ΚΑΙ ΡΟΗΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ

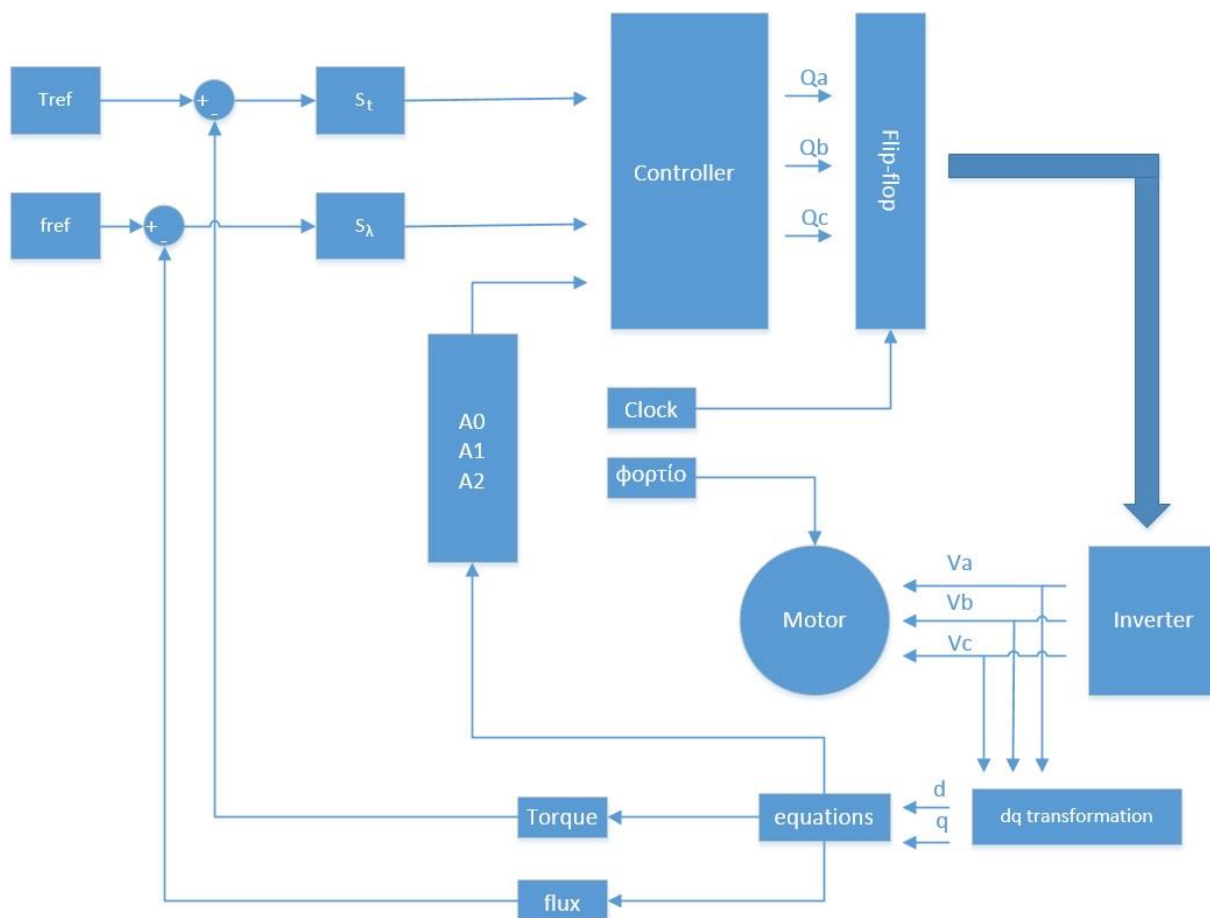
Η ροή και η ροπή αναφοράς υπολογίζονται από τα χαρακτηριστικά του κινητήρα βάση των εξισώσεων (1) και (2).

$$T_{ref} \approx \frac{P_{out} * 60}{2 * \pi * n} \quad (1)$$

$$\Psi_s \approx \frac{2 * T}{3 * p * I_s * \cos \chi} \quad (2)$$

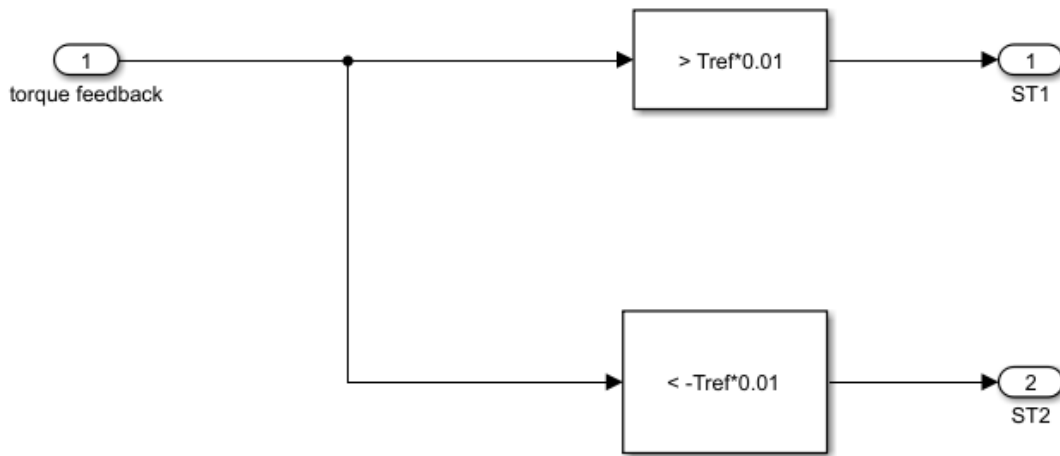
Επιπρόσθετα, στον κινητήρα προσθέτουμε ένα φορτίο περίπου 5% μικρότερο από αυτό της αναφοράς καθώς υπάρχουν και απώλειες οι οποίες πρέπει να υπολογιστούν. Οπότε σε για ροπή αναφοράς 49.75Nm θα έχουμε φορτίο 47Nm, για 20Nm ροπή αναφοράς θα έχουμε φορτίο 19Nm και ούτω καθ' εξής.

Αυτό συμβαίνει γιατί αν είναι ακριβώς ίδια το φορτίο και αναφορά, το φορτίο επιβραδύνει τον κινητήρα και τελικά τον γυρνά προς την αντίθετη κατεύθυνση.

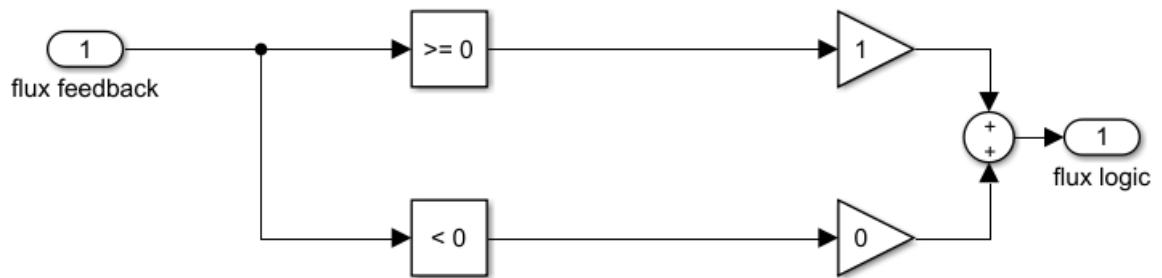


Απλοποιημένο διάγραμμα

Οι τρεις φάσεις του αντιστροφέα μετατρέπονται σε δύο μέσω της dq μετατροπής και μέσα από εξισώσεις καταλήγουμε να έχουμε την στιγμιαία Η/Μ ροή και ροπή όπως και τα A0 A1 A2 που είναι απαραίτητα για την εύρεση της θέσης της Η/Μ ροής. Η στιγμιαία ροπή συγκρίνεται με την ροπή αναφοράς όπως και η στιγμιαία ροή με την ροή αναφοράς. Από αυτές τις τιμές προκύπτουν οι δυαδικές τιμές των S_t και S_λ .

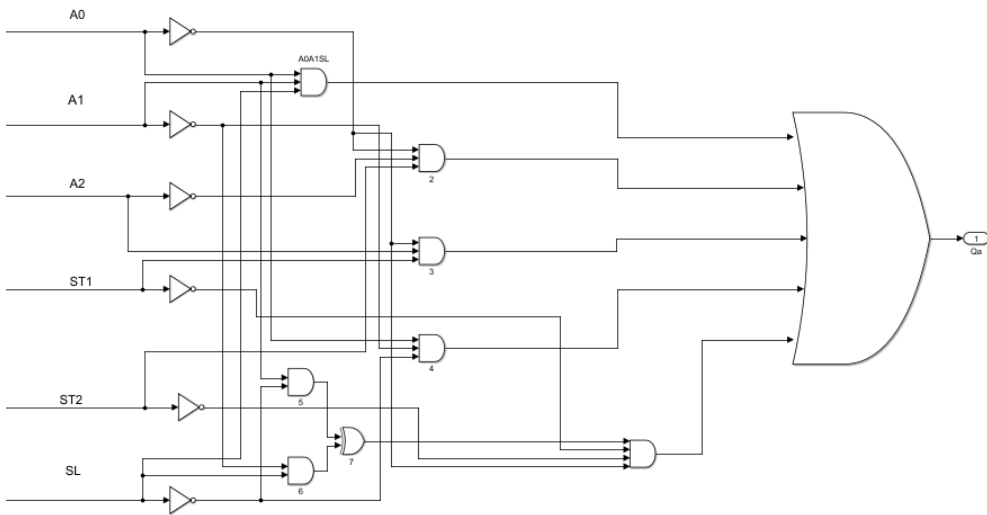


Διαδικασία εύρεσης ST1,ST2

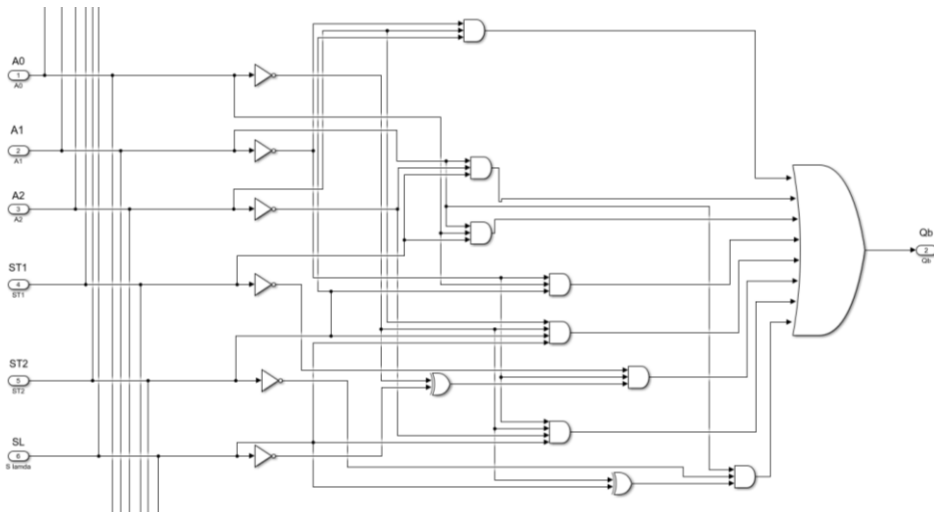


Διαδικασία εύρεσης Sλ

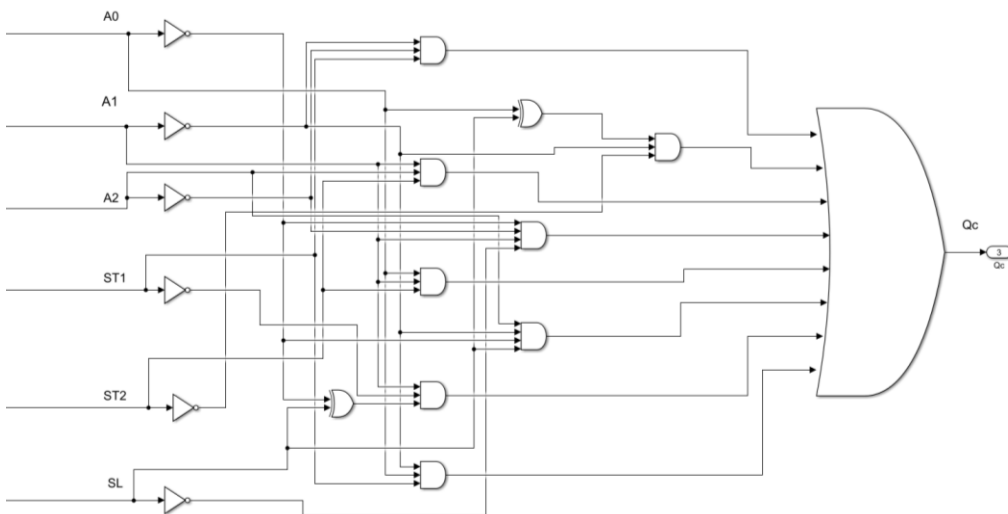
Αυτές οι πέντε δυαδικές μεταβλητές (A0,A1,A2, S_i, S_λ) αποτελούν τις εισόδους του controller. Ο controller αποτελείται από λογικές πύλες που αναπαριστούν τις εξισώσεις για τα Q_a, Q_b, Q_c.



Μετατροπή εξίσωσης Qa σε λογικές πύλες

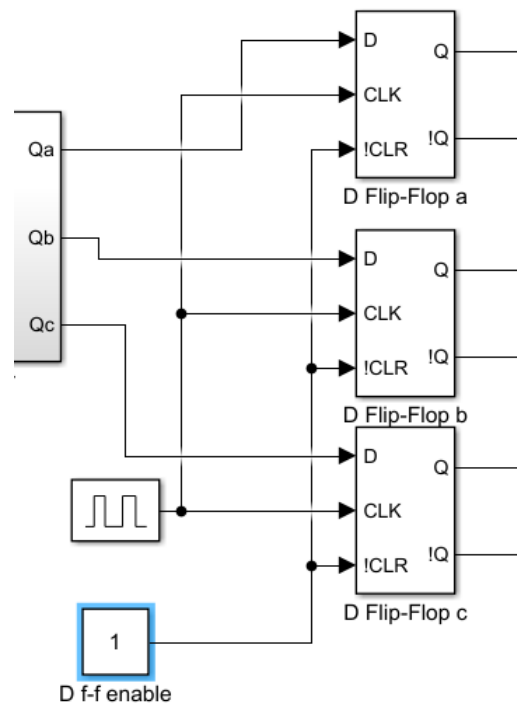


Μετατροπή εξίσωσης Qb σε λογικές πύλες



Μετατροπή εξίσωσης Qc σε λογικές πύλες

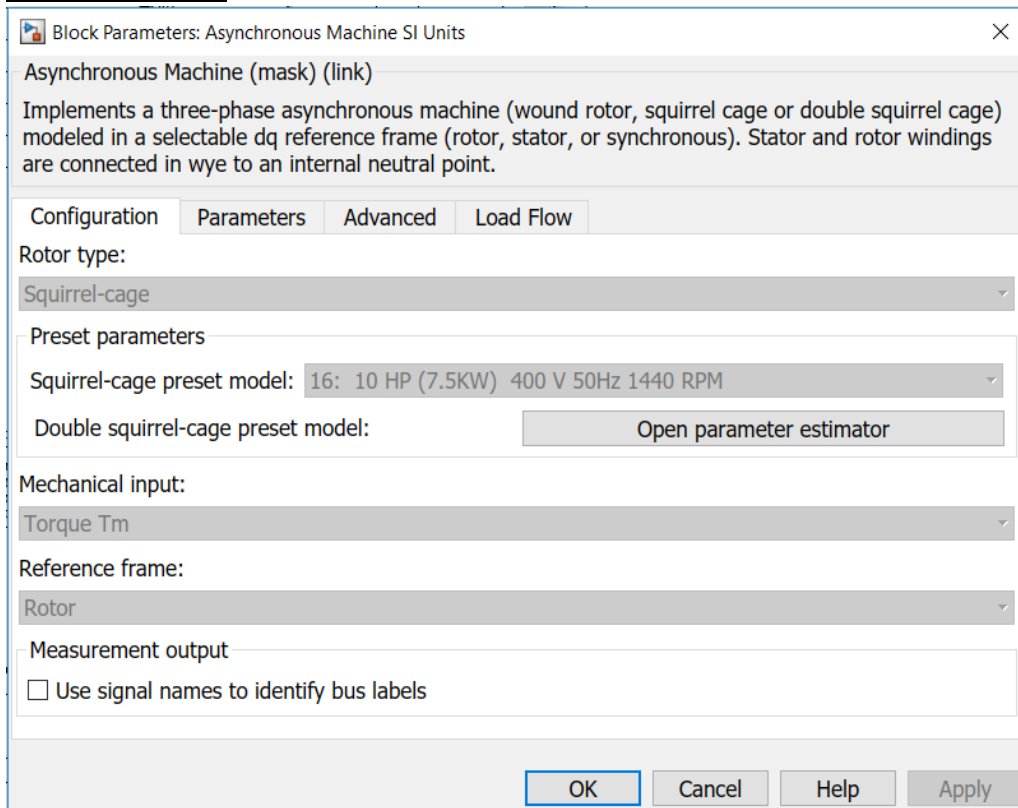
Στην συνέχεια οι έξοδοι του controller περνούν από τρία D Flip-flop με κοινό clock για τον συγχρονισμό της εξόδου.



D flip-flops για συγχρονισμό Qa, Qb, Qc

Τα σήματα Qa, Qb, Qc καταλήγουν στον αντιστροφέα ο οποίος τροφοδοτεί τον κινητήρα με τάση κλείνοντας ταυτόχρονα και τον βρόγχο.

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

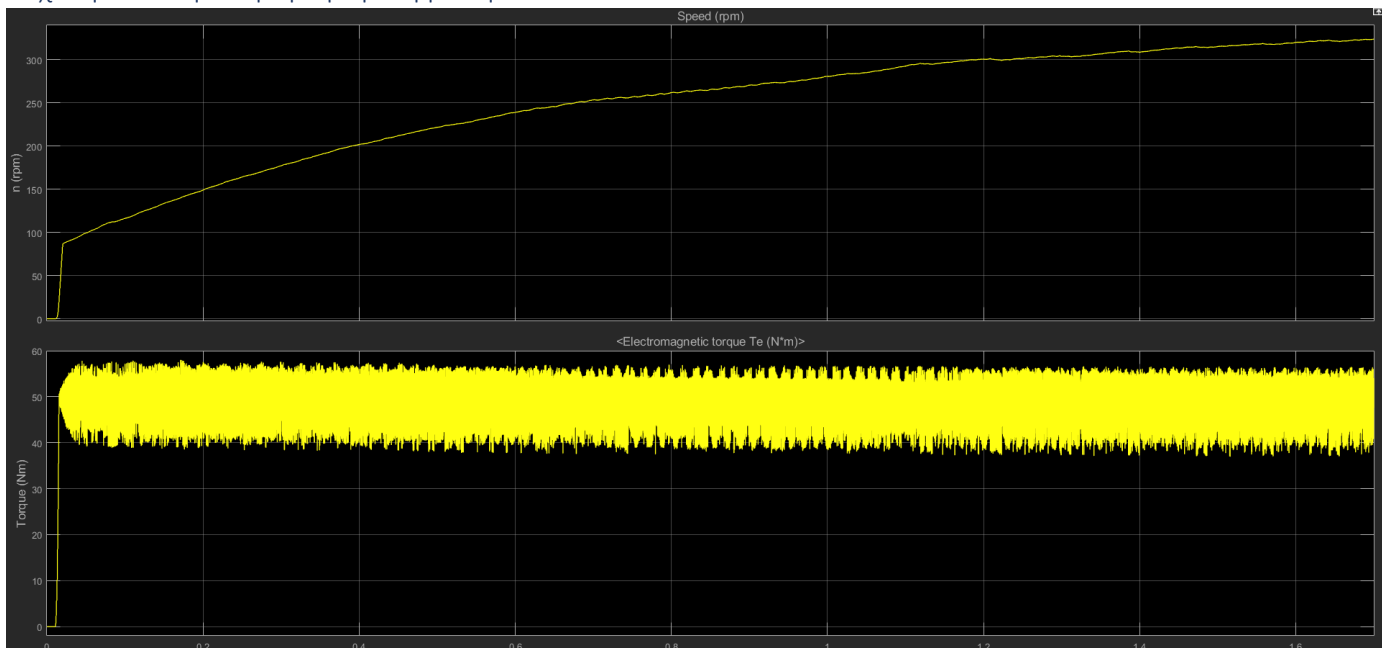


Όπως παρατηρούμε ο κινητήρας που χρησιμοποιούμε είναι 10 ίππων, 400V, 50Hz και με ονομαστική ταχύτητα 1440rpm. Ο κινητήρας ξεκινά την χρονική στιγμή $T=0,01s$ και το φορτίο στον κινητήρα μπαίνει την στιγμή $T=0,02s$ με σκοπό να μην γυρίσει ανάποδα ο ρότορας στην αρχή.

Ροπή αναφοράς 49.75Nm και φορτίο 47Nm

Η προσομοίωση διαρκεί 1.7 seconds. Η ταχύτητα ανεβαίνει με όλο και μικρότερο ρυθμό μεταβολής και τείνει να σταθεροποιηθεί στις 380rpm.

Ταχύτητα και ηλεκτρομαγνητική ροπή

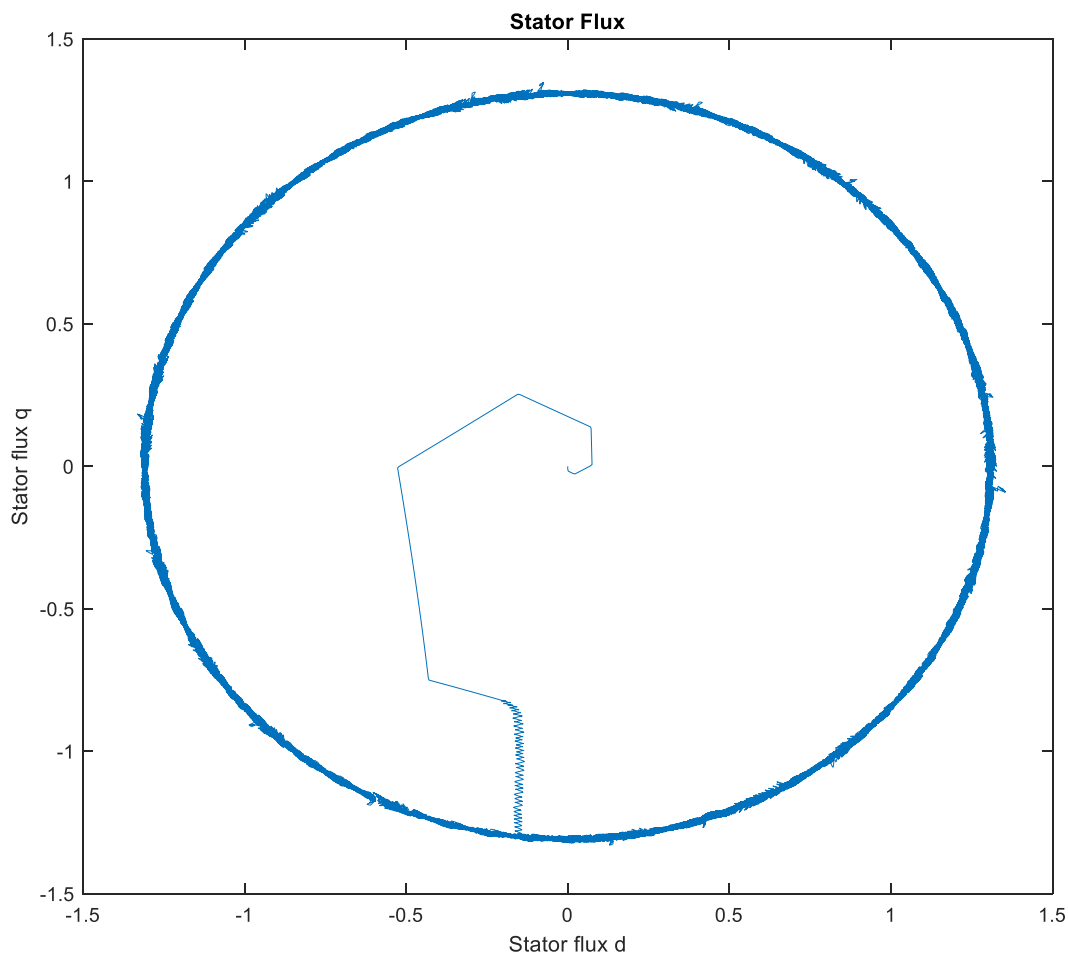


Ταχύτητα και ηλεκτρομαγνητική ροπή

Η Η/Μ ροπή ανεβαίνει στιγμιαία στην επιθυμητή τιμή. Πάραυτα, η ροπή δεν σταθεροποιείται και έχει ταλαντώσεις γύρω από την τιμή των 47Nm.

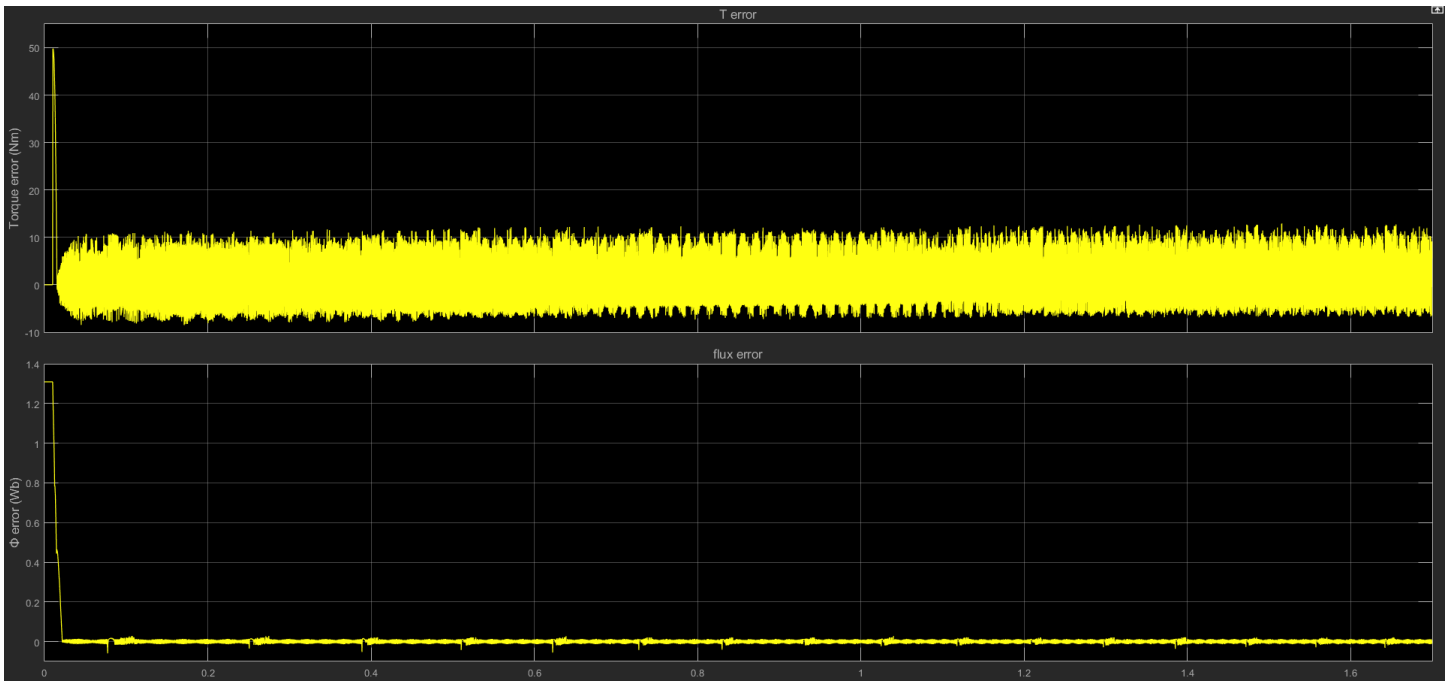
Γεωμετρικός τόπος ηλεκτρομαγνητικής ροής

Ο τόπος της ηλεκτρομαγνητικής ροής του στάτη έχοντας στους δύο άξονες τις d-q συνιστώσες της ροής φαίνεται παρακάτω και όπως μπορεί κανείς να διαπιστώσει ότι δημιουργείται κύκλος με κέντρο την αρχή των αξόνων και ακτίνα την ροή αναφοράς.



Γεωμετρικός τόπος ηλεκτρομαγνητικής ροής του στάτη

Σφάλματα ηλεκτρομαγνητικής ροπής και ροής

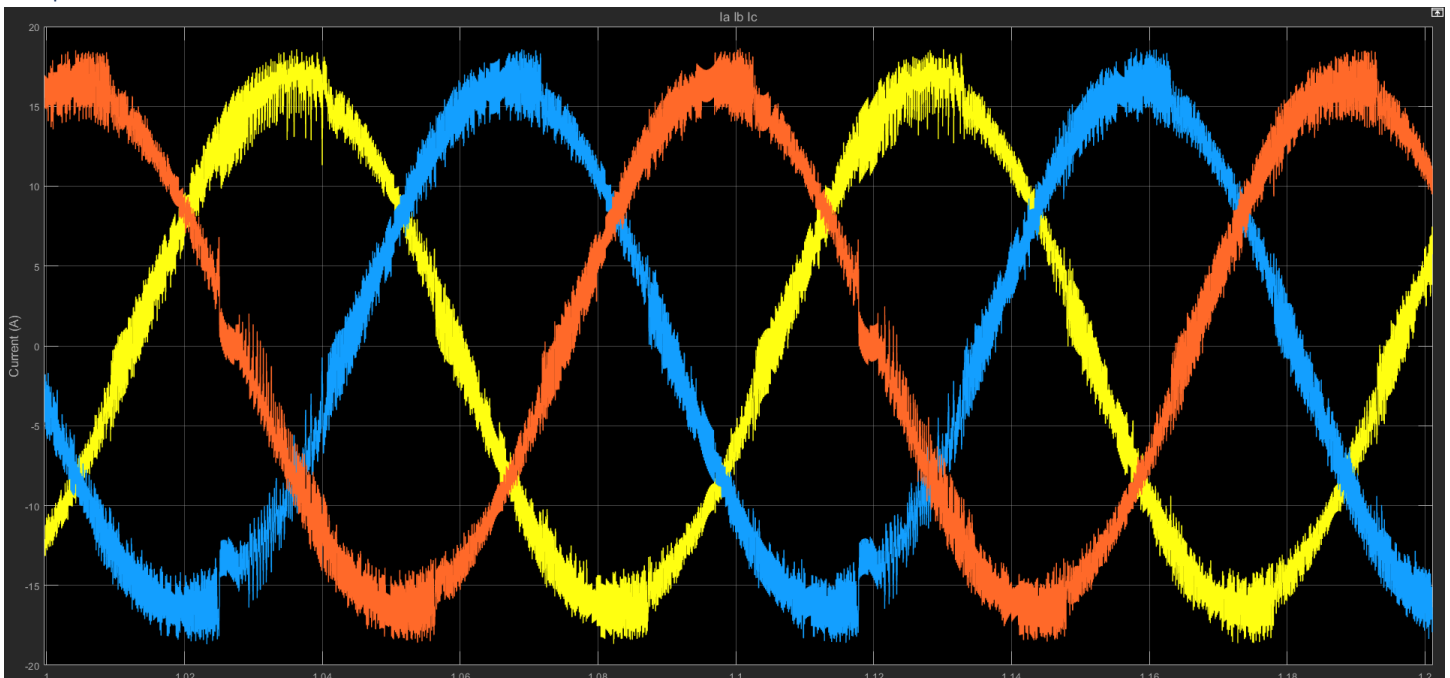


Σφάλμα ροπής και σφάλμα ροής

Στο σφάλμα της ροπής παρατηρούμε πως υπάρχουν ταλαντώσεις γύρω από το μηδέν, χωρίς, όμως, το σφάλμα να εξαλείφεται. [Ακόμα το πλάτος του σφάλματος είναι αρκετά μεγάλο αν σκεφτούμε ότι είναι περίπου το 15% της ροπής αναφοράς.]

Το σφάλμα της ροής μηδενίζεται σχεδόν ακαριαία και παραμένει σε τιμές αμελητέες πολύ κοντά στο μηδέν.

Ρεύματα



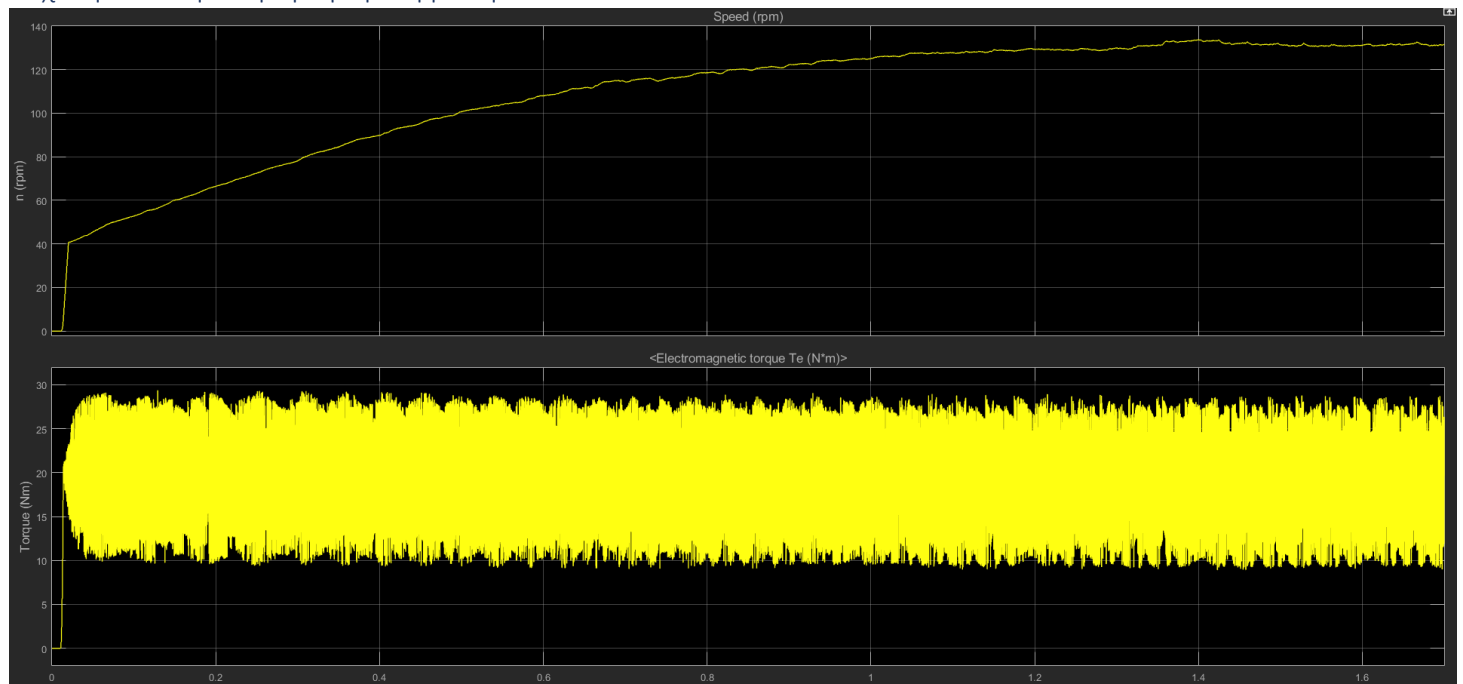
Ρεύματα I_a , I_b , I_c

Τα ρεύματα I_a , I_b , I_c αποτελούνται από αρμονικές που σχηματίζουν ημίτονα που έχουν πλάτος 18 A και μεταξύ τους διαφορά φάσης 120° .

Ροπή αναφοράς 20Nm και φορτίο 19Nm

Η προσομοίωση διαρκεί 1.7 seconds. Η ταχύτητα ανεβαίνει με όλο και μικρότερο ρυθμό μεταβολής και τείνει να σταθεροποιηθεί στις 135rpm. Παρατηρείται δηλαδή μείωση στροφών παρά την μείωση του φορτίου.

Ταχύτητα και ηλεκτρομαγνητική ροπή

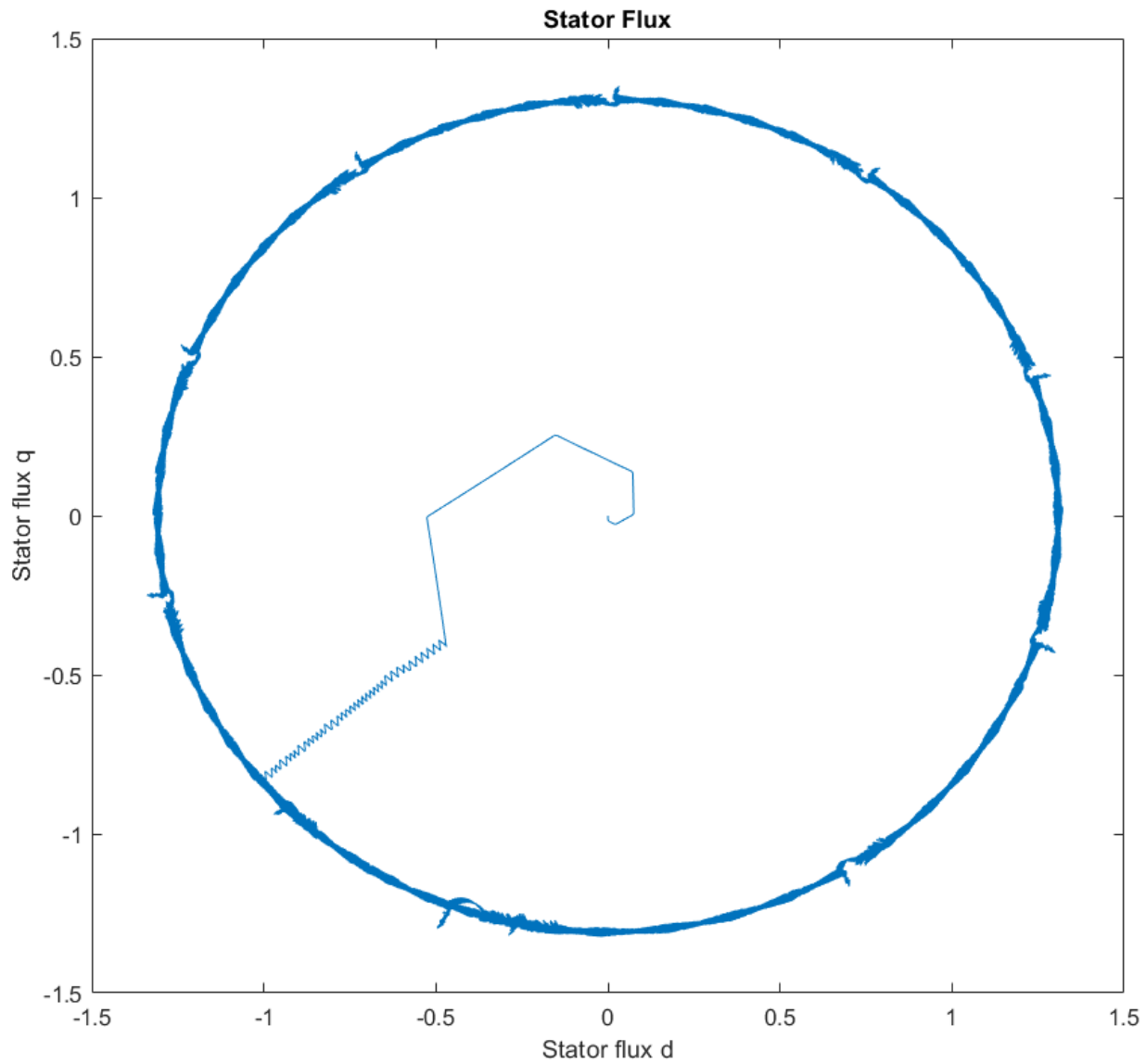


Ταχύτητα και ηλεκτρομαγνητική ροπή

Η ροπή ανεβαίνει στην επιθυμητή τιμή και ταλαντώνεται γύρω από αυτήν.

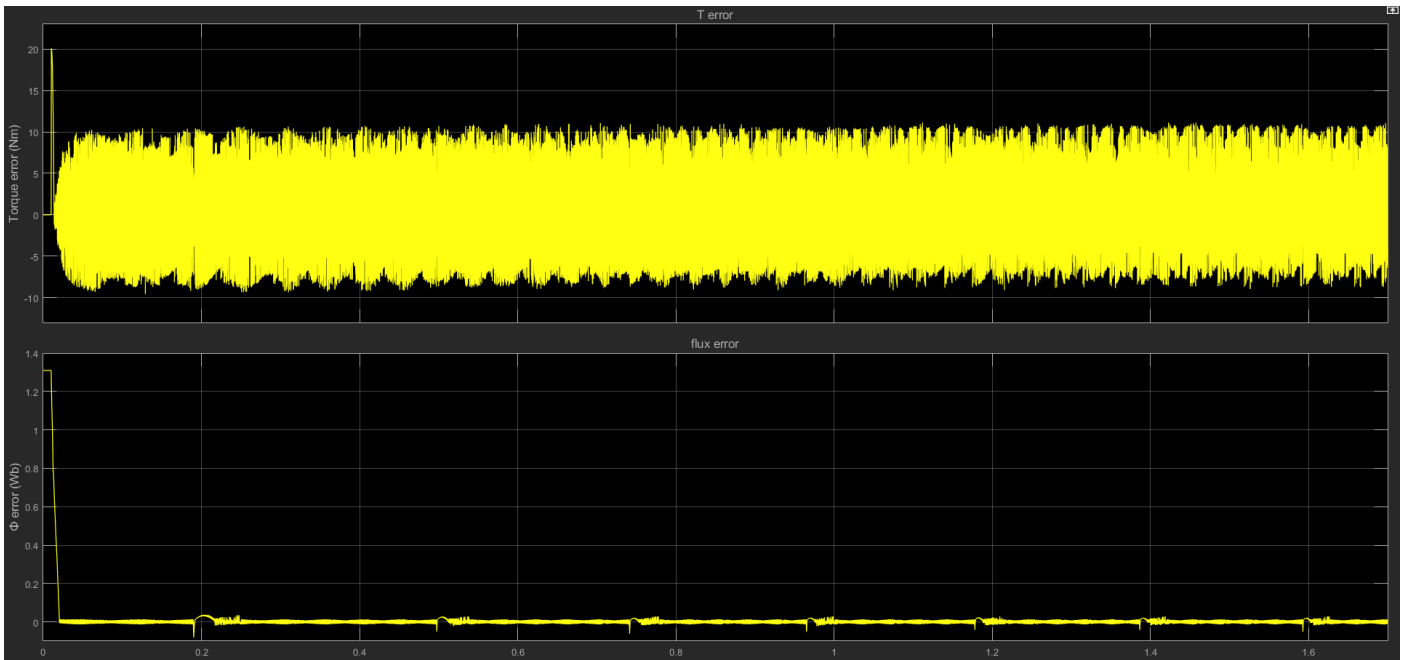
Γεωμετρικός τόπος ηλεκτρομαγνητικής ροής

Ο τόπος της ροής του στατή είναι κύκλος με ακτίνα την ροή αναφοράς. Η ροή παρουσιάζει κάποιες μικρές ταλαντώσεις οι οποίες 'σβήνουν' πολύ γρήγορα.



Γεωμετρικός τόπος ηλεκτρομαγνητικής ροής του στατή

Σφάλματα ηλεκτρομαγνητικής ροπής και ροής

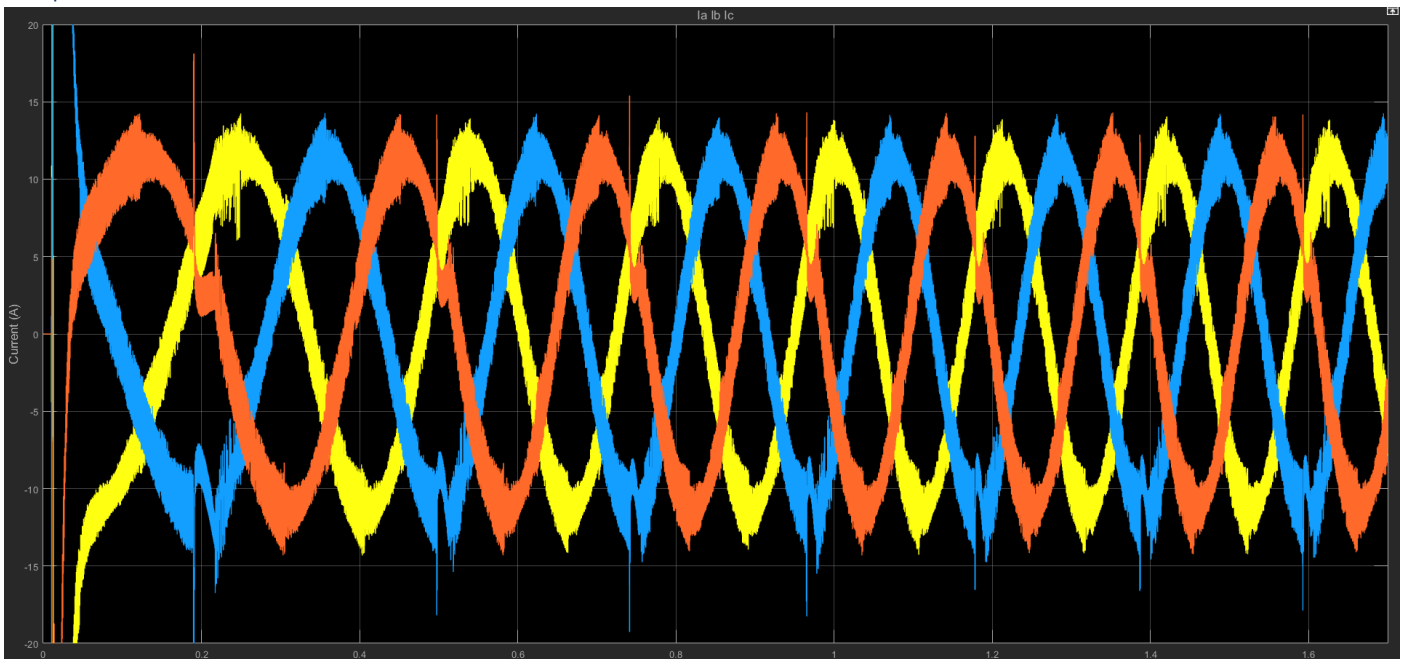


Σφάλμα ροπής και σφάλμα ροής

Το σφάλμα της ροπής έχει μεγάλες ταλαντώσεις γύρω από το μηδέν. [οι ταλαντώσεις έχουν πλάτος 10Nm δηλαδή το 50% της ροπής αναφοράς]

Το σφάλμα της ροής μηδενίζεται άμεσα και παραμένει σε πολύ μικρές τιμές με εξαίρεση κάποιες ταλαντώσεις που έχουν φανεί και παραπάνω στον γεωμετρικό τόπο της ροής.

Ρεύματα

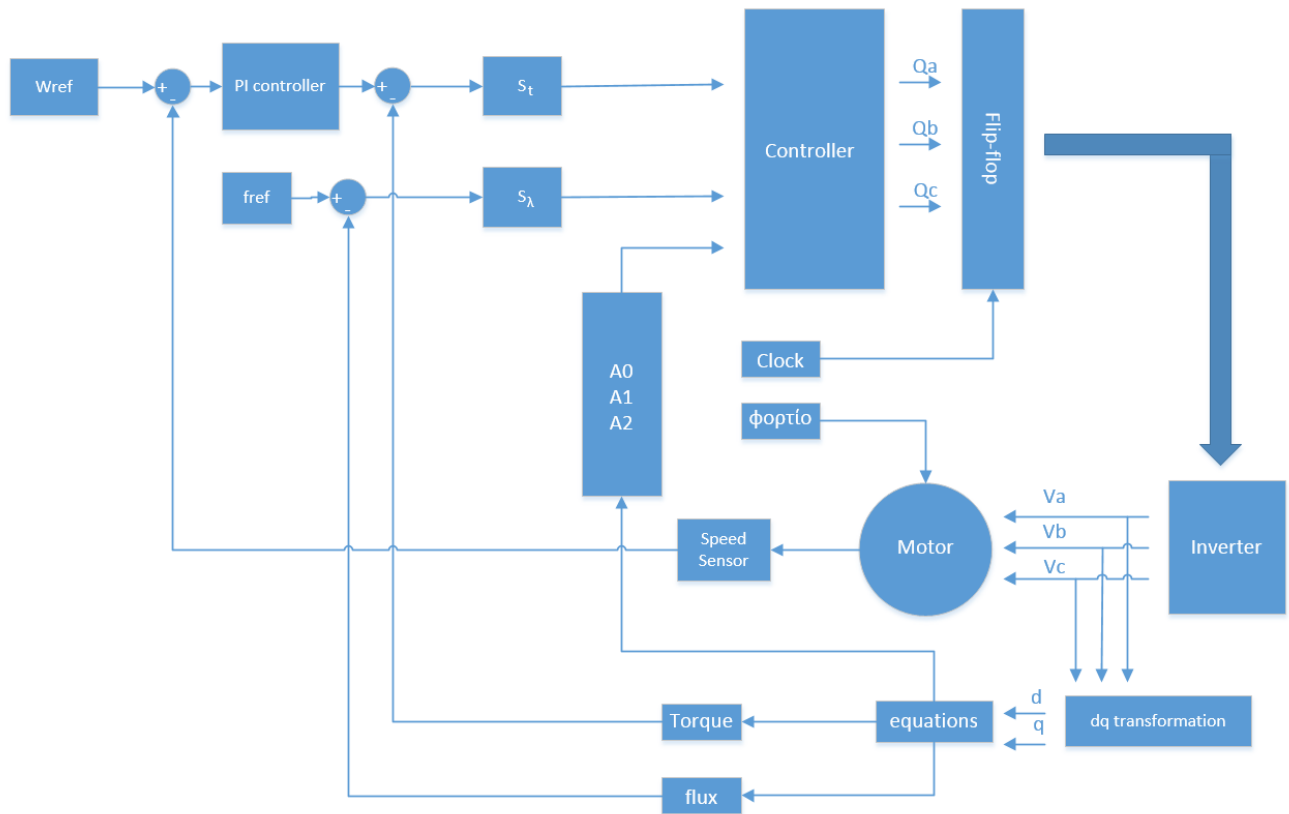


Ρεύματα Ia, Ib, Ic

Τα ρεύματα Ia, Ib, Ic, και εδώ όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, αποτελούνται από αρμονικές που σχηματίζουν ημίτονα. Έχουν πλάτος 13 A και μεταξύ τους διαφορά φάσης 120°. Συνεπώς, όπως ήταν αναμενόμενο, μειώνεται το φορτίο και το ρεύμα μειώνεται και αυτό.

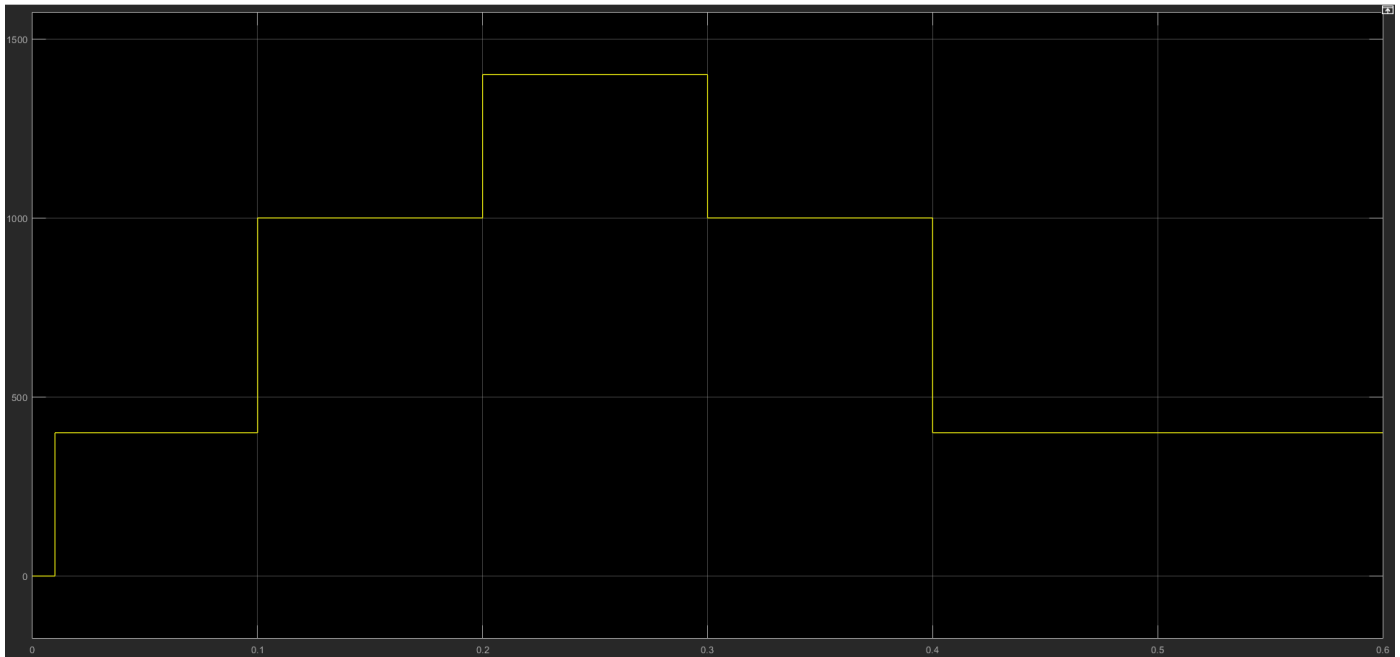
Ο έλεγχος στροφών επιτυγχάνεται κάνοντας χρήση του κλειστού βρόγχου DTC και με την προσθήκη ενός PI ελεγκτή. Το παραπάτω είναι η υλοποίηση του σε περιβάλλον Simulink.

Αρχικά, για την ρύθμιση του PI ελεγκτή μηδενίζουμε τον συντελεστή ολοκλήρωσης, $K_i = 0$, και αυξάνουμε τον αναλογικό συντελεστή K_p μέχρις ότου η ταχύτητα να έχει μια μικρή υπερύψωση. Αυτό στο σύστημά συνέβη στο $K_p = 180$. Στην συνέχεια, αυξάνουμε το K_i μέχρι το σφάλμα να μειωθεί στα επιθυμητά επίπεδα. Στην συγκεκριμένη περίπτωση, το σφάλμα μηδενίζει για $K_i = 60$.



Απλοποιημένο διάγραμμα

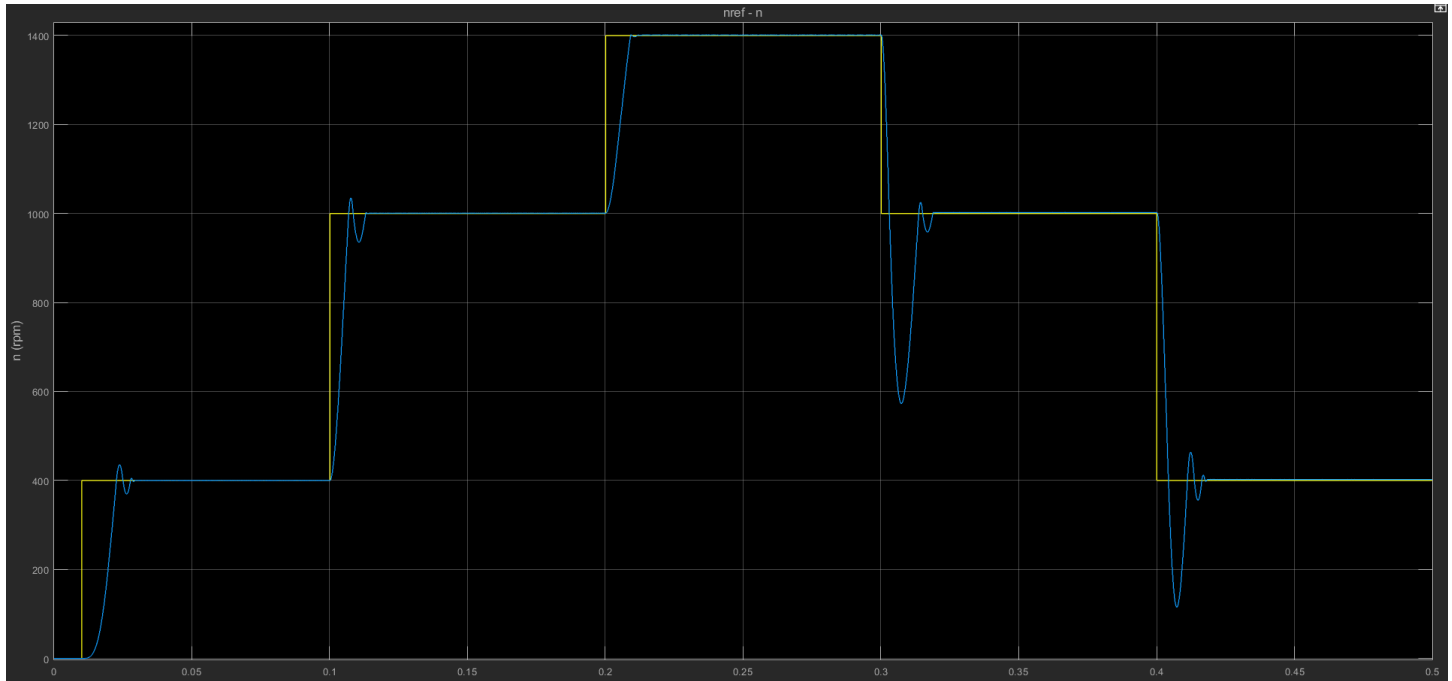
Για να εξεταστεί η συμπεριφορά του συστήματος για φορτία 20 και 50Nm θα μεταβάλουμε την επιθυμητή ταχύτητα του κινητήρα από την στάση μέχρι τις 1400 στροφές βηματικά, όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα.



Μεταβολή ταχύτητας αναφοράς n_{ref}

Για φορτίο 20Nm

Ταχύτητα

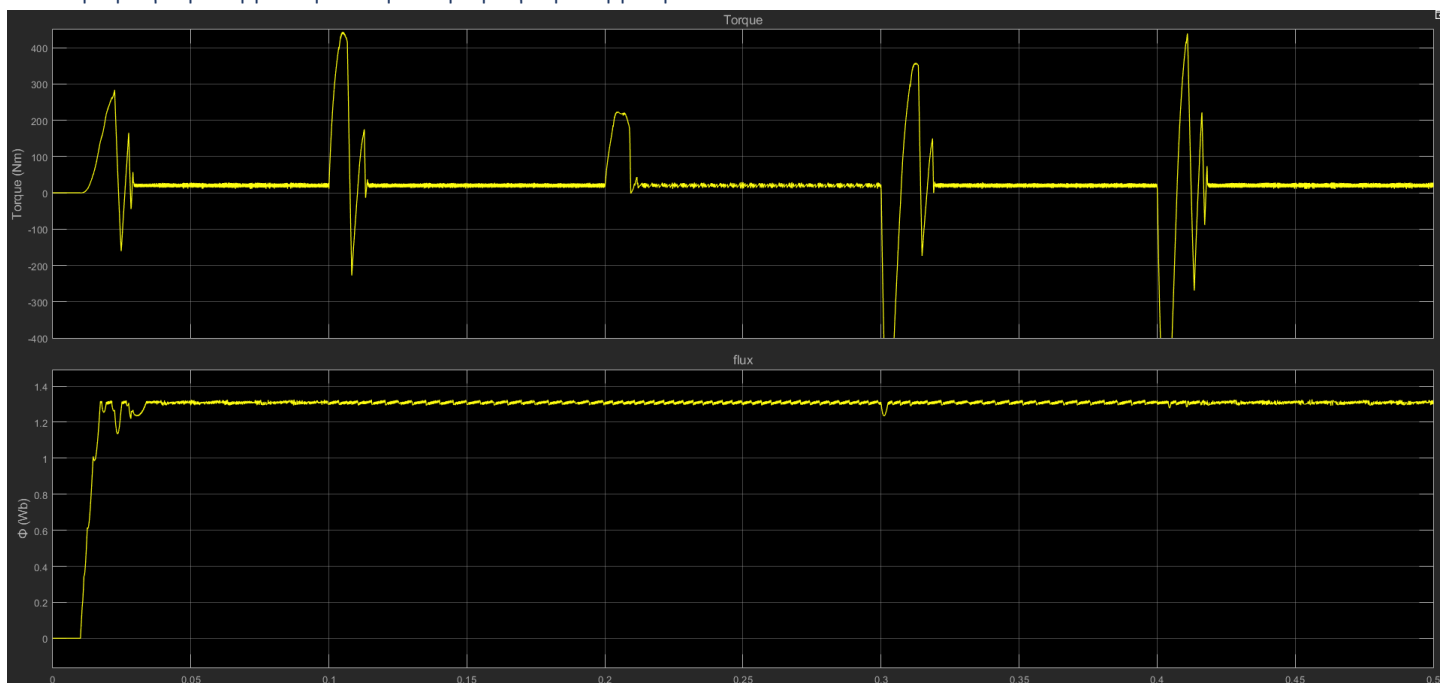


Ταχύτητα αναφοράς – Πραγματική ταχύτητα

Ο κινητήρας ξεκινά την χρονική στιγμή $T=0.01$ και το φορτίο προστίθεται την χρονική στιγμή $T=0.02$. Η ταχύτητα σταθεροποιείται με ακρίβεια που φαίνεται στον παρακάτω πίνακα.

| Speed reference (rpm) | Speed (rpm) | Σφάλμα(%) |
|-----------------------|-------------|-----------|
| 400 | 400.1 | 0.02 |
| 1000 | 1001 | 0.1 |
| 1400 | 1401 | 0.07 |
| 1000 | 1002 | 0.2 |
| 400 | 401.8 | 0.45 |

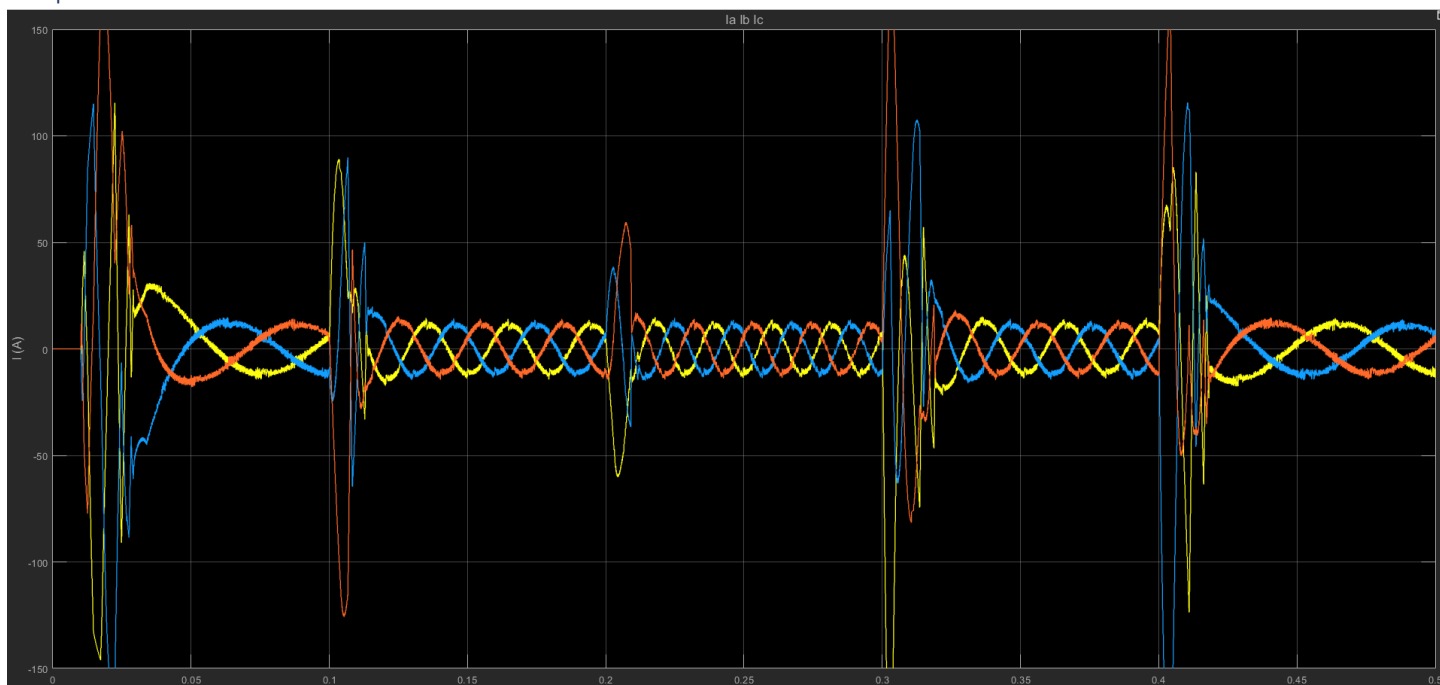
Ηλεκτρομαγνητική ροπή και ηλεκτρομαγνητική ροή



Σφάλματα Η/Μ ροπής και Η/Μ ροής

Όταν η ταχύτητα σταθεροποιείται η Η/Μ ροπή ταλαντώνεται γύρω από την ροπή αναφοράς. Όταν όμως μεταβάλλεται η ταχύτητα η ροπή έχει απότομες και μεγάλες μεταβολές. Η Η/Μ ροή από την αρχή προσεγγίζει την ροή αναφοράς και την ακολουθεί χωρίς μεγάλες αποκλίσεις.

Ρεύματα



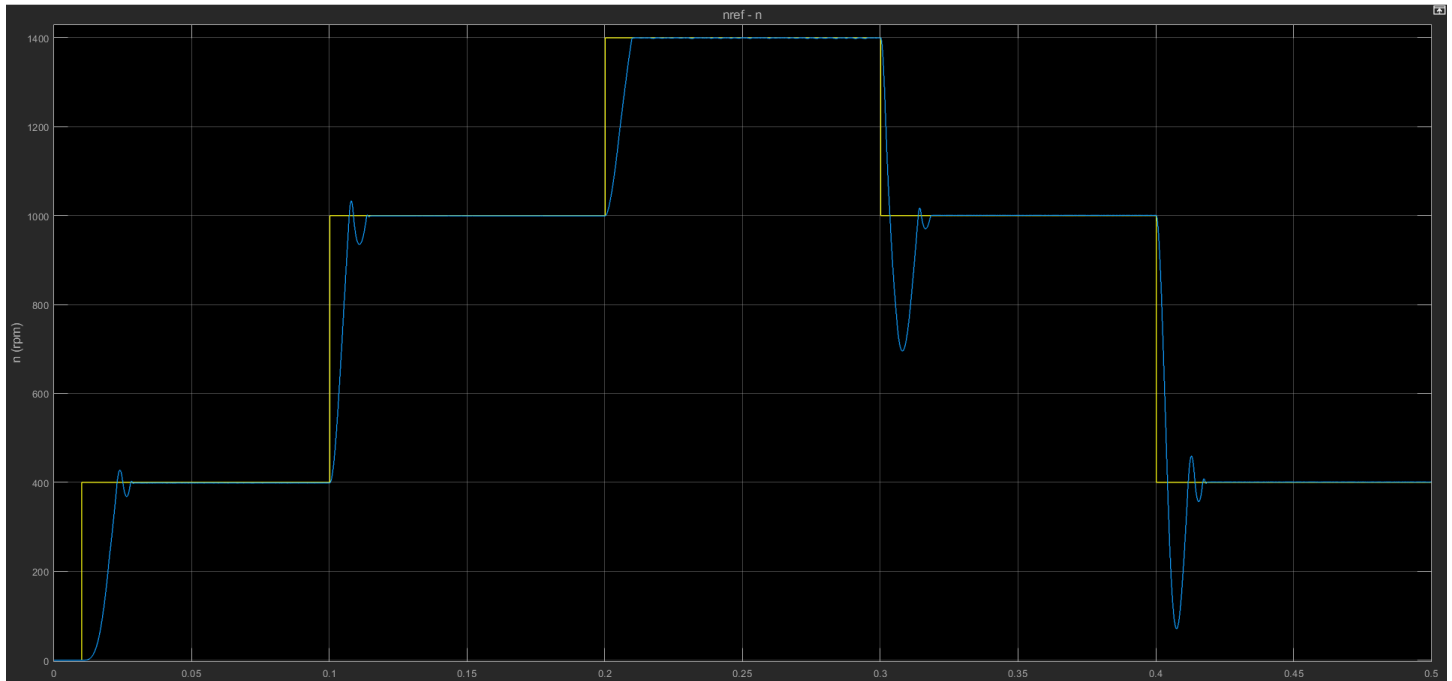
Ρεύματα I_a , I_b , I_c

Τα τρία ρεύματα αποτελούνται από αρμονικές που σχηματίζουν τρία ημίτονα με διαφορά φάσης 120° . Όπως είναι αναμενόμενο η συχνότητα των ημιτόνων είναι άμεσα συνδεδεμένη με την ταχύτητα του ρότορα και αυξομειώνεται ανάλογα. Από την άλλη, το

πλάτος του ρεύματος έχει ταλαντώσεις κατά την διάρκεια μεταβολής της ταχύτητας, ενώ είναι σταθερό στα 14 A όταν η ταχύτητα του ρότορα είναι σταθερή.

Για φορτίο 50Nm

Ταχύτητα

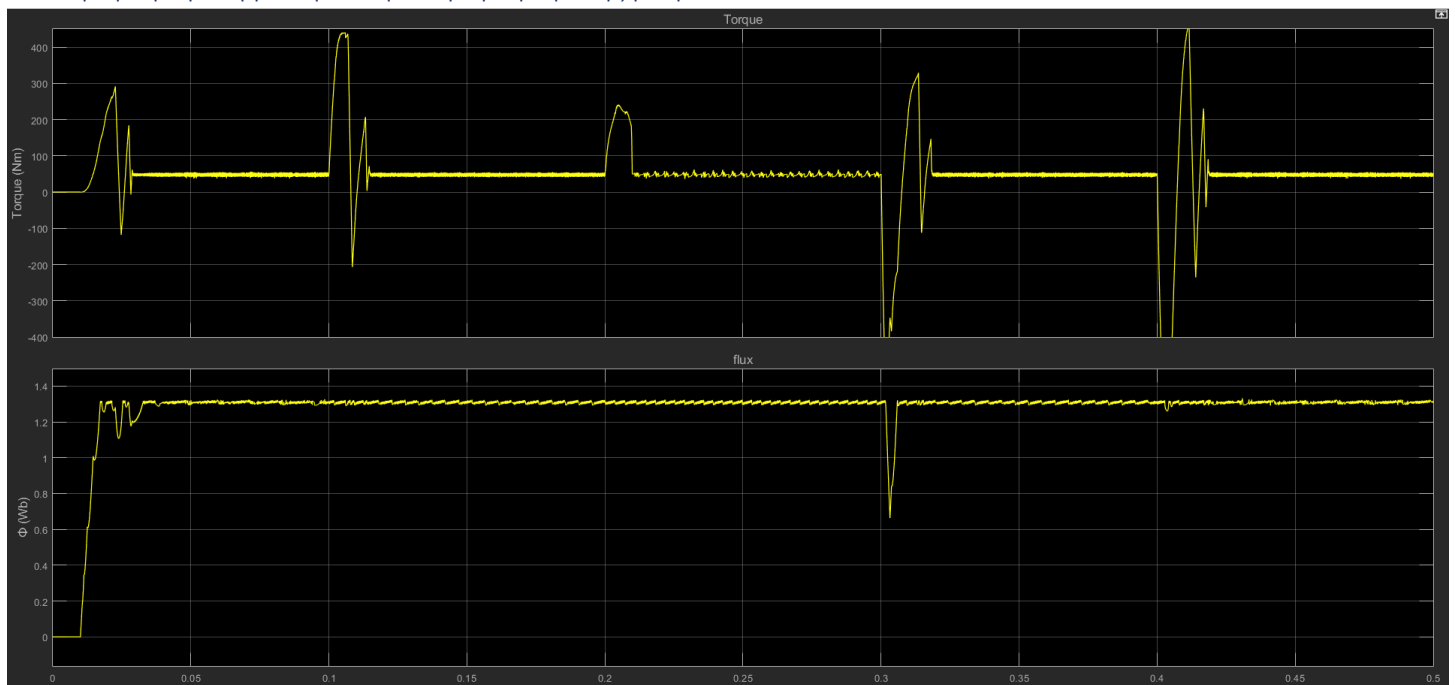


Ταχύτητα αναφοράς – Πραγματική ταχύτητα

Ο κινητήρας ξεκινά την χρονική στιγμή $T=0.01$ και το φορτίο προστίθεται την χρονική στιγμή $T=0.02$. Η ταχύτητα σταθεροποιείται με ακρίβεια που φαίνεται στον παρακάτω πίνακα. [παρατήρηση ότι στην μείωση στροφών η υπερύψωση είναι μεγαλύτερη όμως αυτό μπορεί να εξηγηθεί από το φορτίο]

| Speed reference (rpm) | Speed (rpm) | Σφάλμα (%) |
|-----------------------|-------------|------------|
| 400 | 398,4 | 0,4 |
| 1000 | 999,1 | 0,09 |
| 1400 | 1400 | 0 |
| 1000 | 1001 | 0,1 |
| 400 | 400,7 | 0,175 |

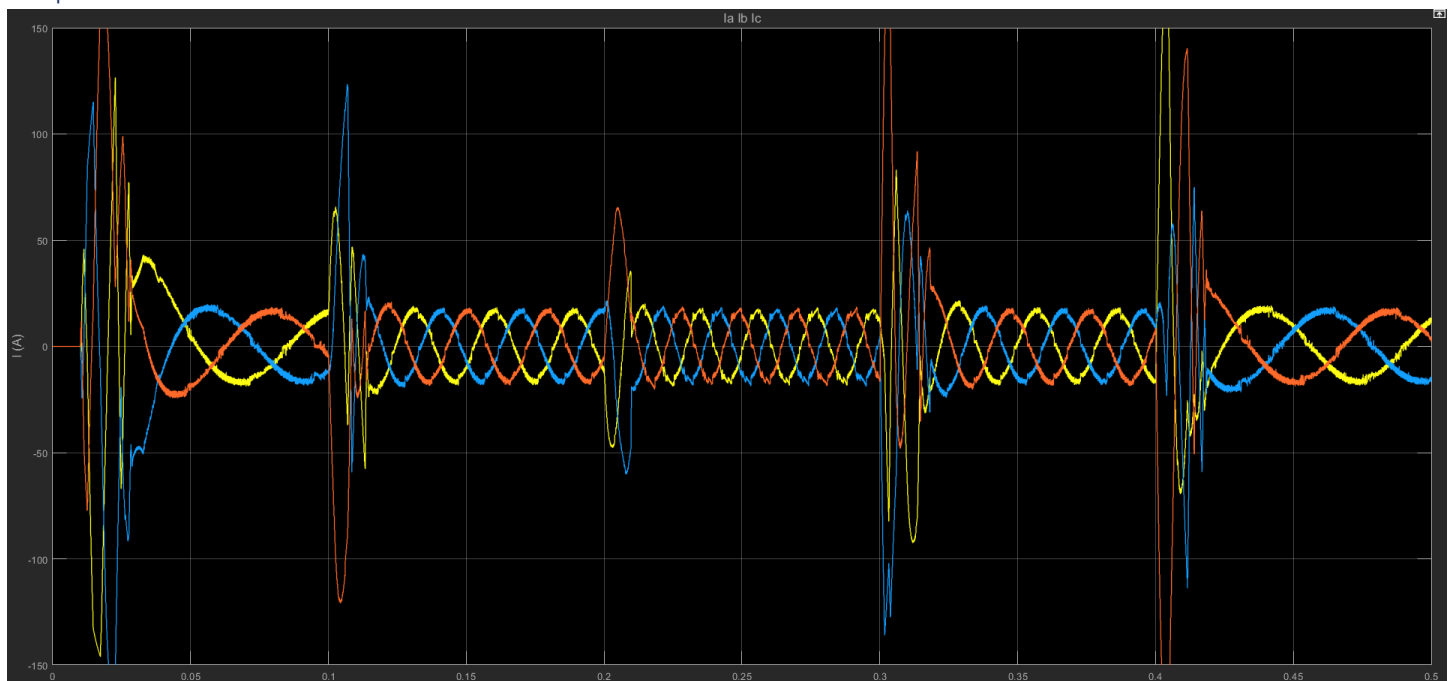
Ηλεκτρομαγνητική ροπή και ηλεκτρομαγνητικής ροή



Σφάλματα Η/Μ ροπής και Η/Μ ροής

Όταν η ταχύτητα σταθεροποιείται η Η/Μ ροπή ταλαντώνεται γύρω από την ροπή αναφοράς. Όταν όμως μεταβάλλεται η ταχύτητα η ροπή έχει απότομες και μεγάλες μεταβολές. Η Η/Μ ροή από την αρχή προσεγγίζει την ροή αναφοράς και την ακολουθεί με αμελητέες αποκλίσεις.

Ρεύματα

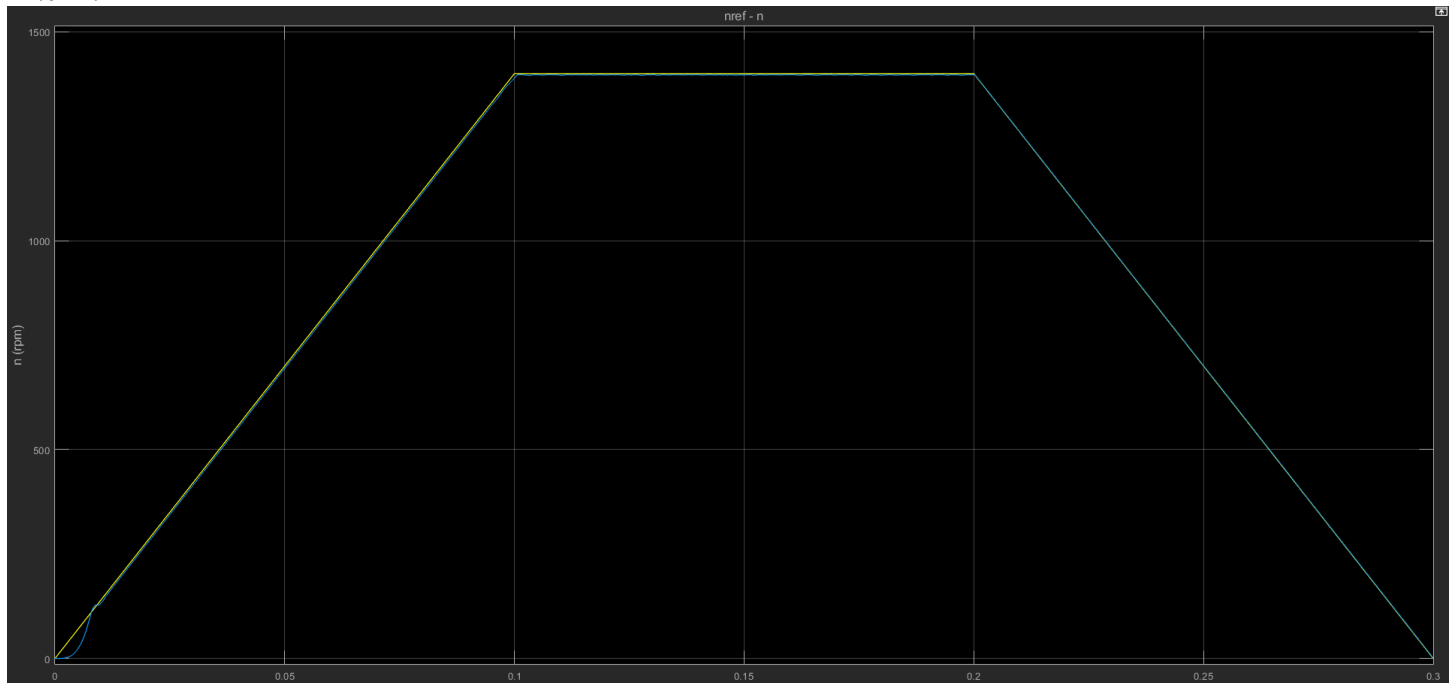


Ρεύματα I_a , I_b , I_c

Τα τρία ρεύματα αποτελούνται από αρμονικές που σχηματίζουν τρία ημίτονα με διαφορά φάσης 120° όπως και στο μικρότερο φορτίο. Η συχνότητα είναι εξαρτώμενη από την ταχύτητα του κινητήρα, ενώ παρατηρούμε αύξηση στο πλάτος του ρεύματος σε 20Α, αναμενόμενο λόγω του αυξημένου φορτίου. Στις μεταβολές ταχύτητας έχουμε υπερψώσεις στις τιμές των ρευμάτων.

Μεταβολή ταχύτητας με ράμπα με μέγιστο φορτίο

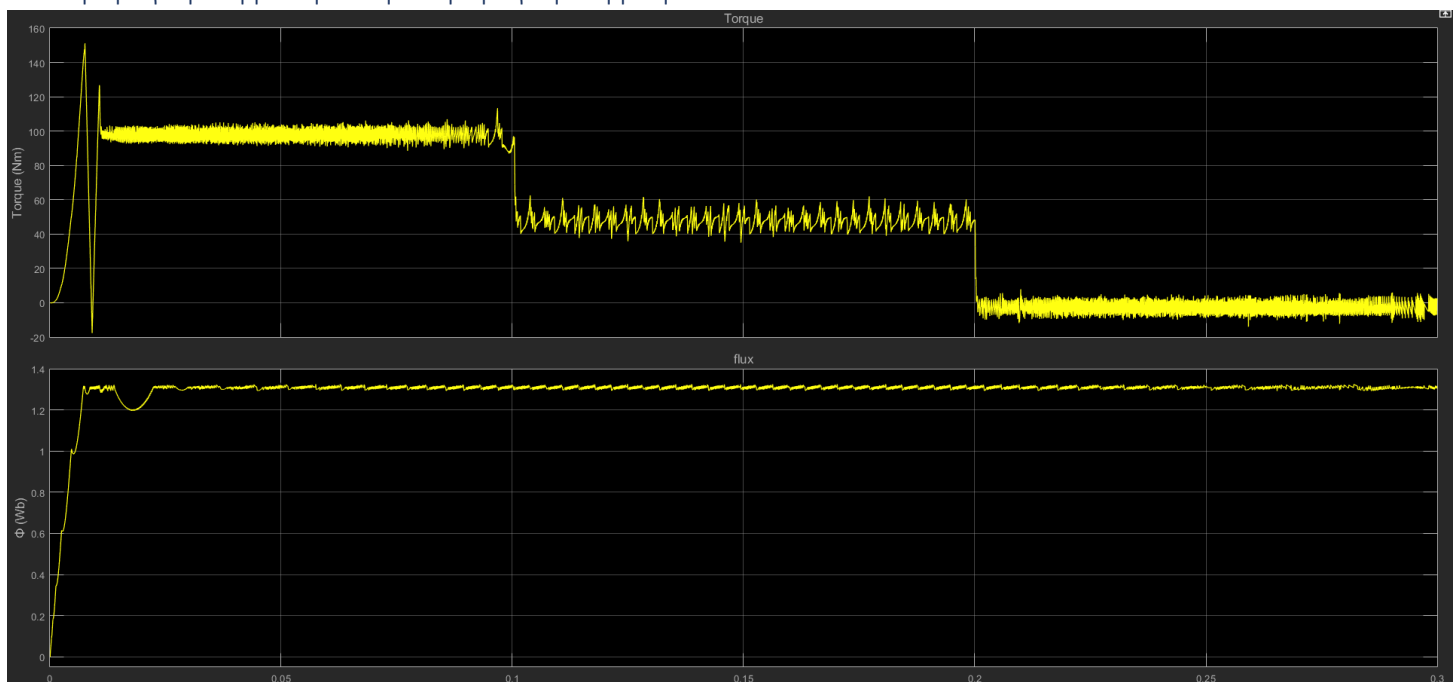
Ταχύτητα



Ταχύτητα αναφοράς – Πραγματική ταχύτητα

Η πραγματική ταχύτητα σχεδόν ταυτίζεται με την ταχύτητα αναφοράς τόσο στην ράμπα επιτάχυνσης όσο και στην επιβράδυνσης.

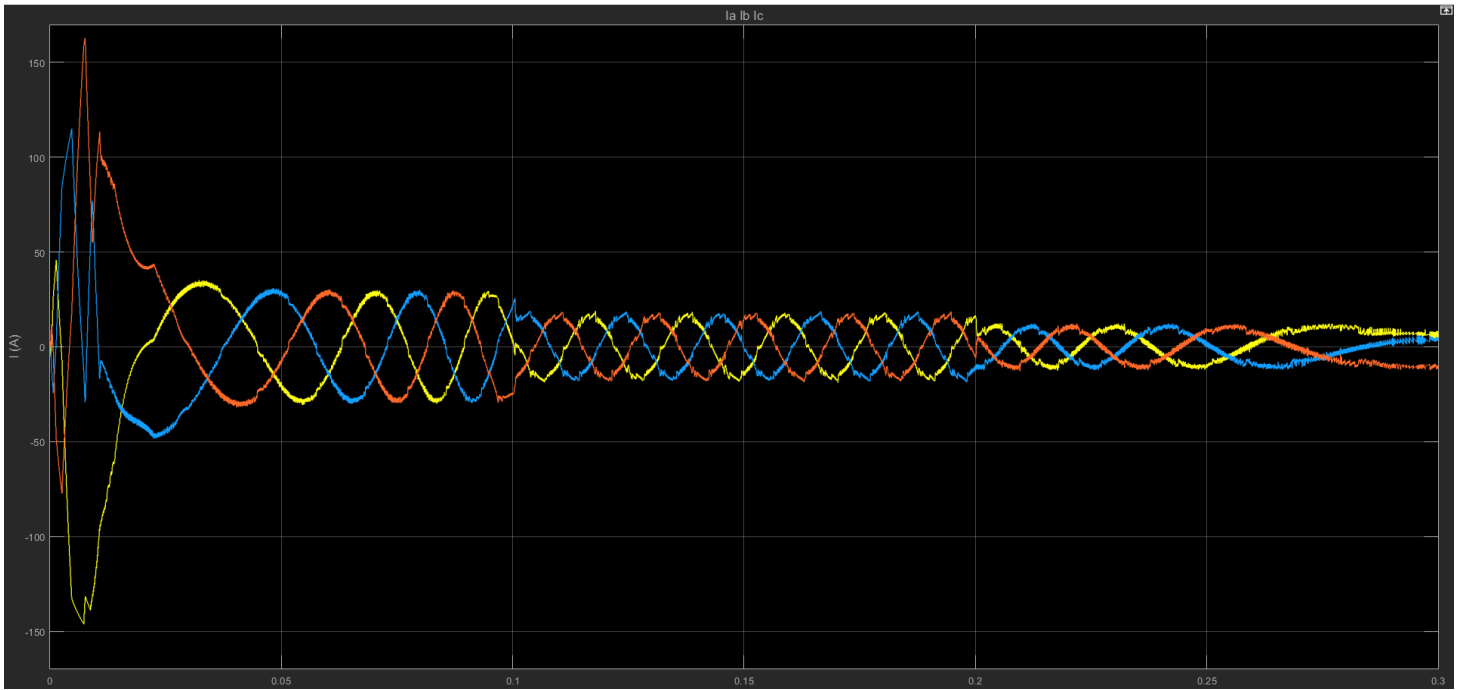
Ηλεκτρομαγνητική ροπή και ηλεκτρομαγνητική ροή



Ηλεκτρομαγνητική ροπή – ηλεκτρομαγνητική ροή

Κατά την διάρκεια της επιτάχυνσης η ηλεκτρομαγνητική ροπή ταλαντώνεται γύρω από τα 100Nm. Όσο η ταχύτητα είναι σταθερή η ροπή ταλαντώνεται γύρω από την ροπή αναφοράς και κατά της διάρκεια της επιβράδυνσης γύρω από τα 0Nm. Όσον αφορά την ηλεκτρομαγνητική ροή από την αρχή της επιτάχυνσης προσεγγίζει την ροή αναφοράς και έχει καθ' όλη την διάρκεια πολύ μικρές αποκλίσεις από την ροή αναφοράς.

Ρεύματα



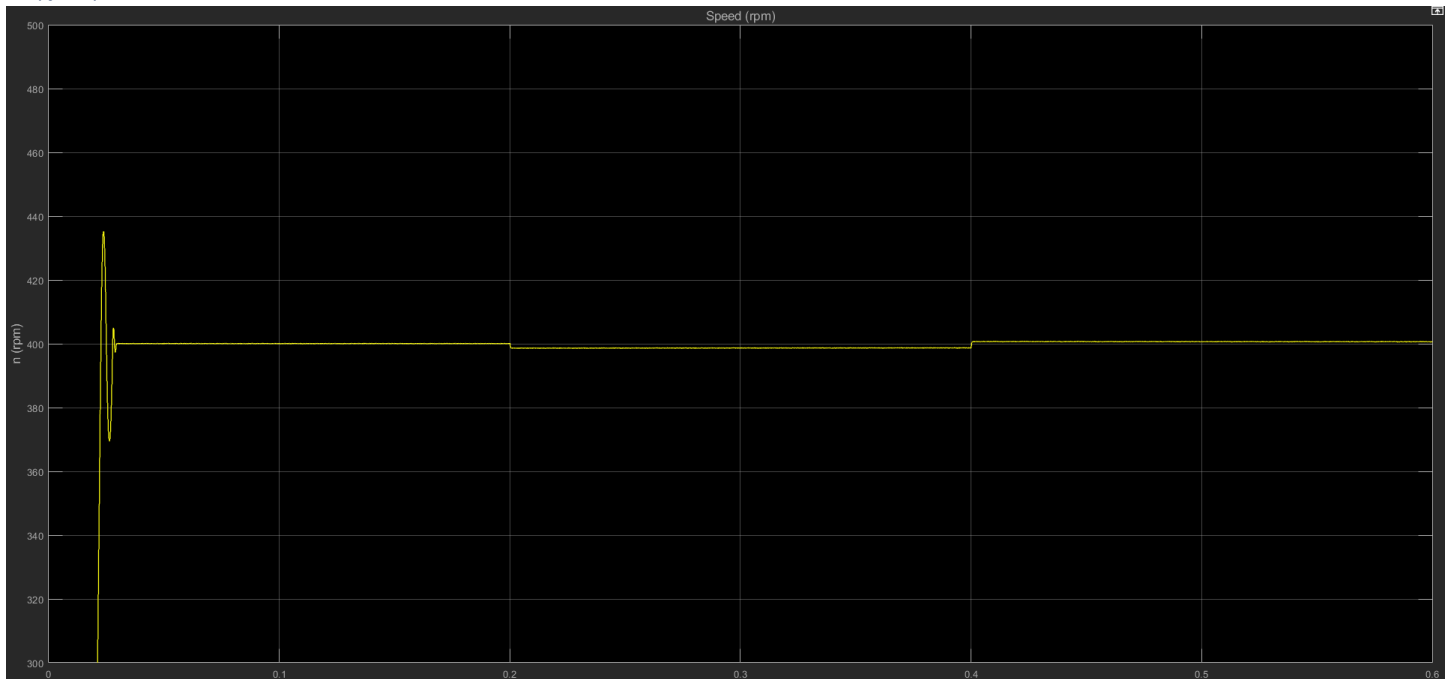
Ρεύματα I_a , I_b , I_c

Τα ρεύματα κατά την επιτάχυνση έχουν την μεγαλύτερη ένταση, 30A , και όπως είναι αναμενόμενο η συχνότητά τους αυξάνεται μέχρις ότου φτάσει την ταχύτητα αναφοράς όπου και η συχνότητα σταθεροποιείται και η ένταση του ρεύματος μειώνεται στα 18A. Τέλος, κατά την διάρκεια της επιβράδυνσης η ένταση μειώνεται στα 12A και η συχνότητα μειώνεται μέχρι να μηδενιστεί.

Σταθερή ταχύτητα και μεταβολή του φορτίου

Ταχύτητα 400 rpm

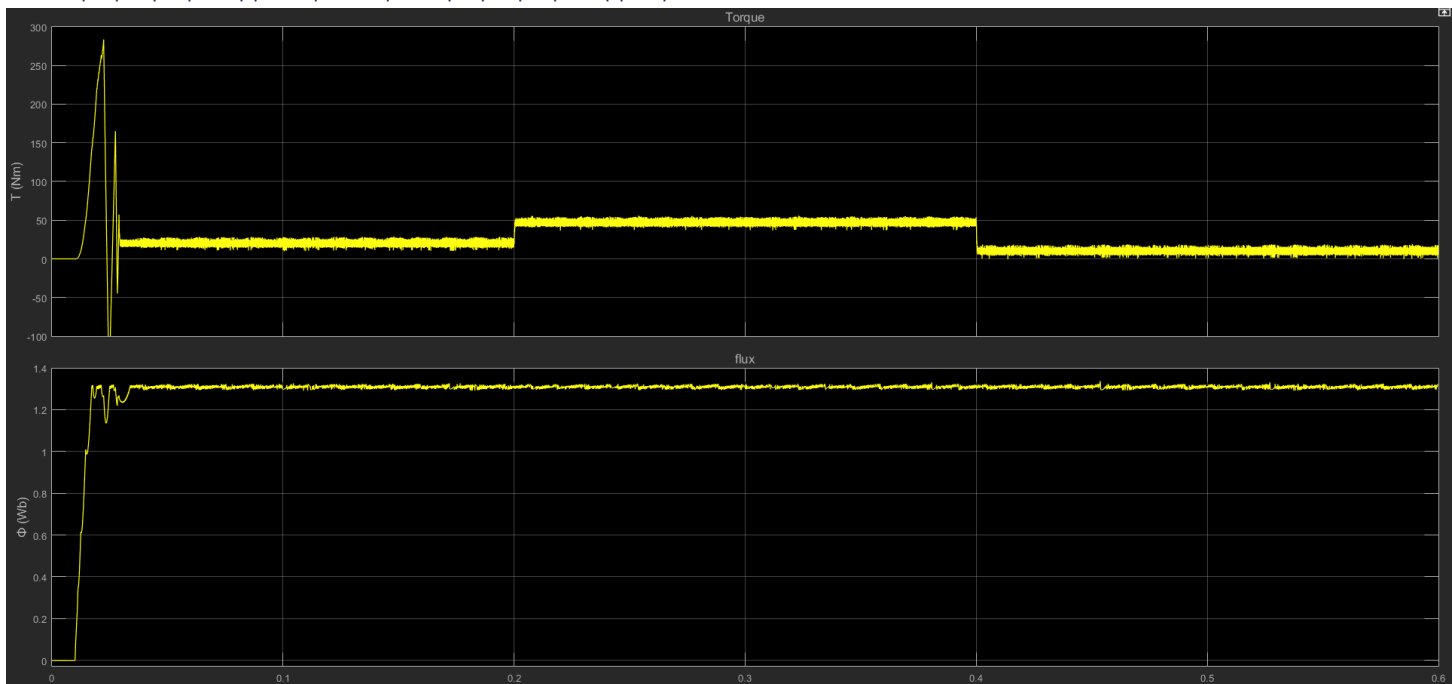
Ταχύτητα



Ταχύτητα αναφοράς – Πραγματική ταχύτητα

Παρατηρείται μείωση της ταχύτητας με την αύξηση του φορτίου. Η μείωση είναι 1.5rpm δηλαδή περίπου 0.37%.

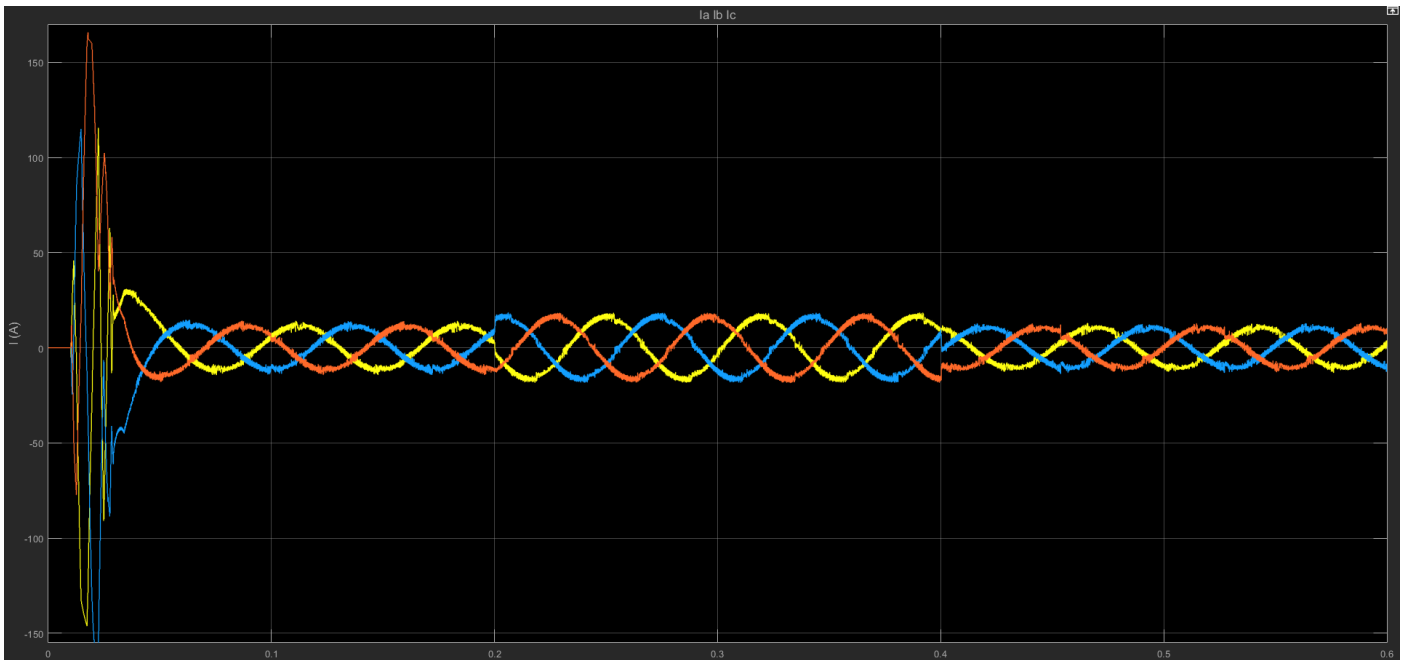
Ηλεκτρομαγνητική ροπή και ηλεκτρομαγνητική ροή



Ηλεκτρομαγνητική ροπή – ηλεκτρομαγνητική ροή

Η Η/Μ ροπή ταλαντώνεται κάθε φορά γύρω από την στιγμιαία ροπή αναφοράς. Η Η/Μ ροή είναι ίση με την ροή αναφοράς.

Ρεύματα

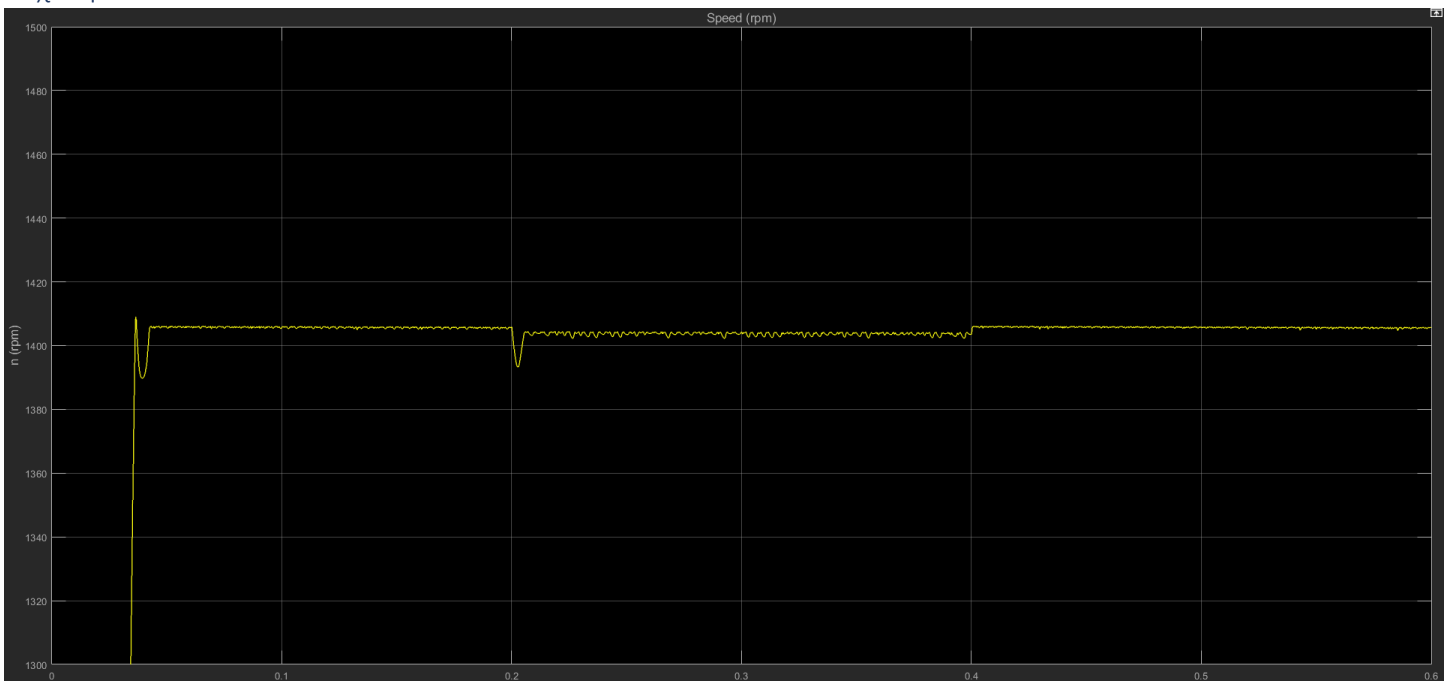


Ρεύματα I_a, I_b, I_c

Η ένταση του ρεύματος καθώς αυξάνεται το φορτίο αυξάνεται και αυτή από τα 14 A στα 18 A. Η συχνότητα μεταβάλλεται ελάχιστα αφού μεταβάλλεται και η ταχύτητα του κινητήρα.

Ταχύτητα 1400rpm

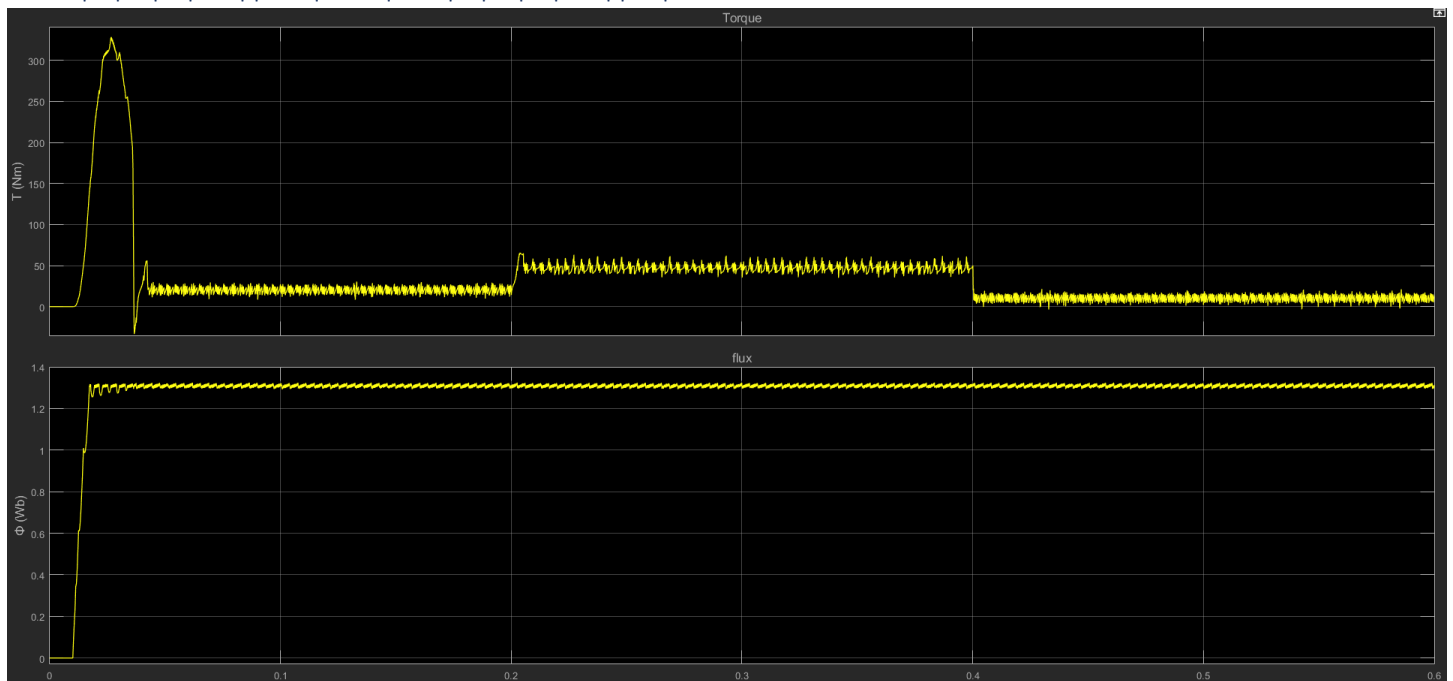
Ταχύτητα



Ταχύτητα αναφοράς – Πραγματική ταχύτητα

Η ταχύτητα κατά την αύξηση του φορτίου μειώνεται κατά 2rpm δηλαδή 0.14%

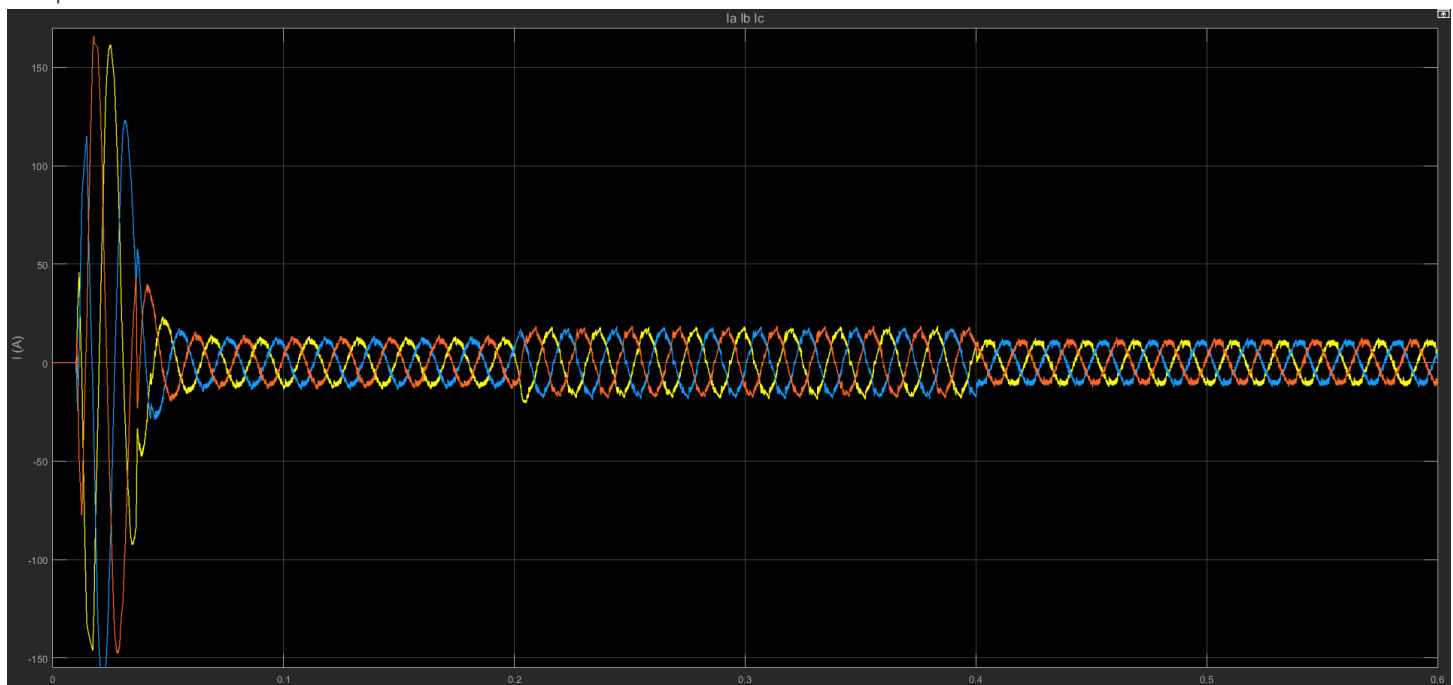
Ηλεκτρομαγνητική ροπή και ηλεκτρομαγνητική ροή



Ηλεκτρομαγνητική ροπή – ηλεκτρομαγνητική ροή

Η Η/Μ ροπή ακολουθεί την ροπή αναφοράς και η ροή σχεδόν είναι ίση με την ροή αναφοράς.

Ρεύματα



Ρεύματα I_a , I_b , I_c

Αυξάνεται η ένταση του ρεύματος όταν αυξάνεται το φορτίο, ενώ η συχνότητα μεταβάλλεται ελάχιστα καθώς έχουμε μια μικρή μεταβολή στην ταχύτητα.

Δοκιμή μοντέλου με μεγαλύτερο κινητήρα

Στο μοντέλο μας γίνεται αλλαγή κινητήρα και επιλέγουμε έναν μεγαλύτερο των 110KW 400V 50Hz με ονομαστική ταχύτητα 1487rpm. Η προσομοίωση γίνεται για χρόνο ίσο με

Block Parameters: Asynchronous Machine SI Units ×

Asynchronous Machine (mask) (link)

Implements a three-phase asynchronous machine (wound rotor, squirrel cage or double squirrel cage) modeled in a selectable dq reference frame (rotor, stator, or synchronous). Stator and rotor windings are connected in wye to an internal neutral point.

Configuration Parameters Advanced Load Flow

Rotor type:

Squirrel-cage

Preset parameters

Squirrel-cage preset model: 20: 150 HP (110KW) 400 V 50Hz 1487 RPM

Double squirrel-cage preset model: Open parameter estimator

Mechanical input:

Torque Tm

Reference frame:

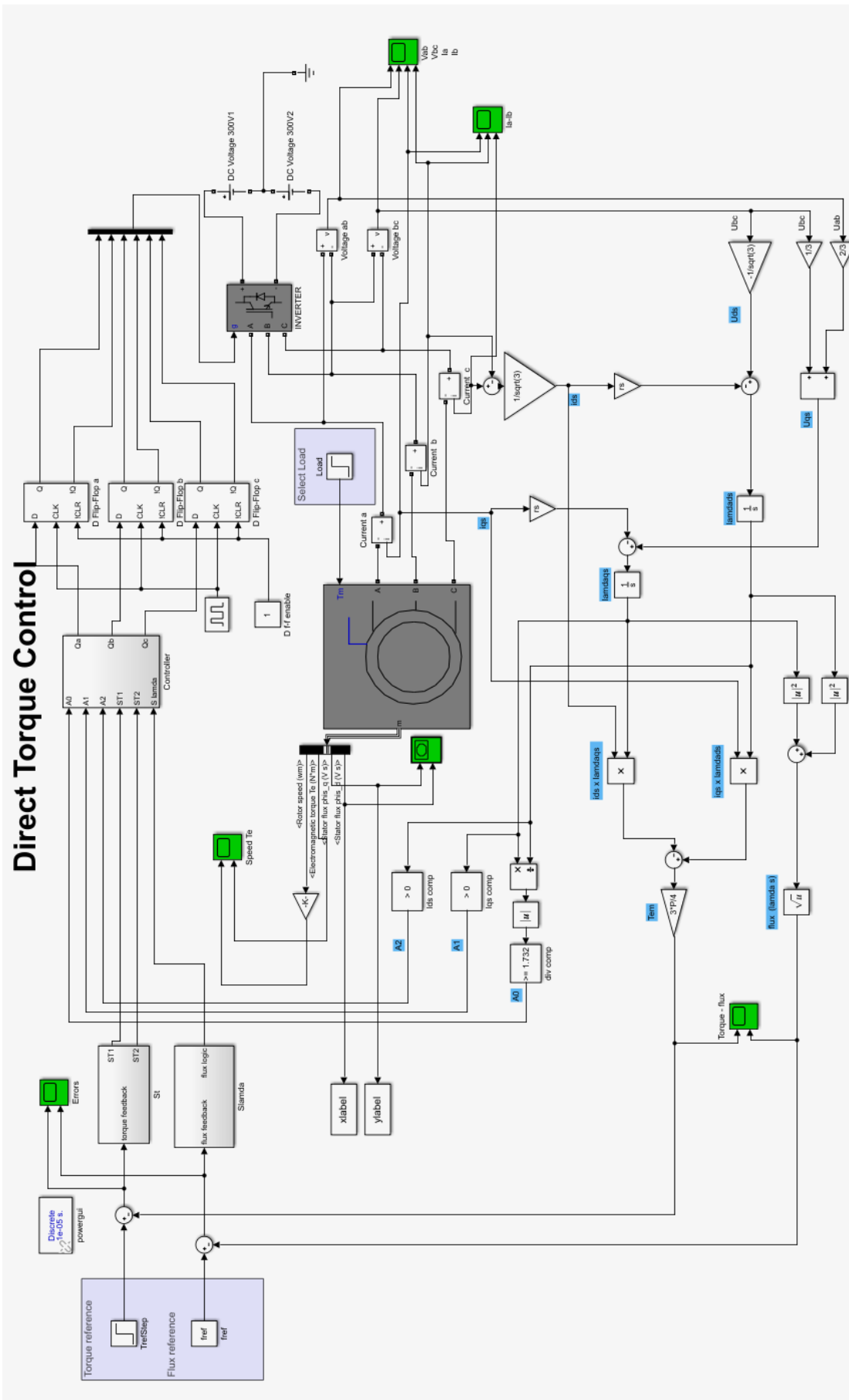
Rotor

Measurement output

Use signal names to identify bus labels

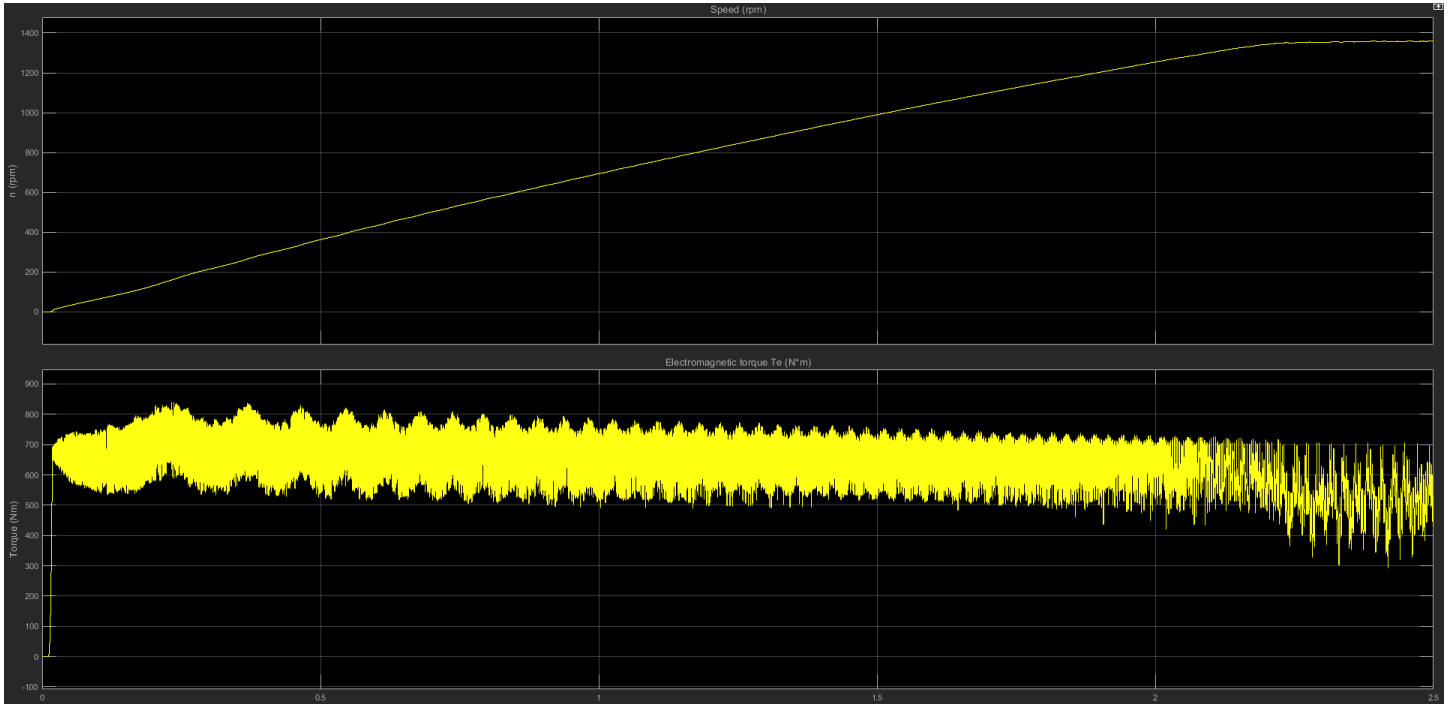
OK Cancel Help Apply

Direct torque control με κινητήρα 110KW χωρίς έλεγχο στροφών



Η προσομοίωση διαρκεί 2,5 δευτερόλεπτα.

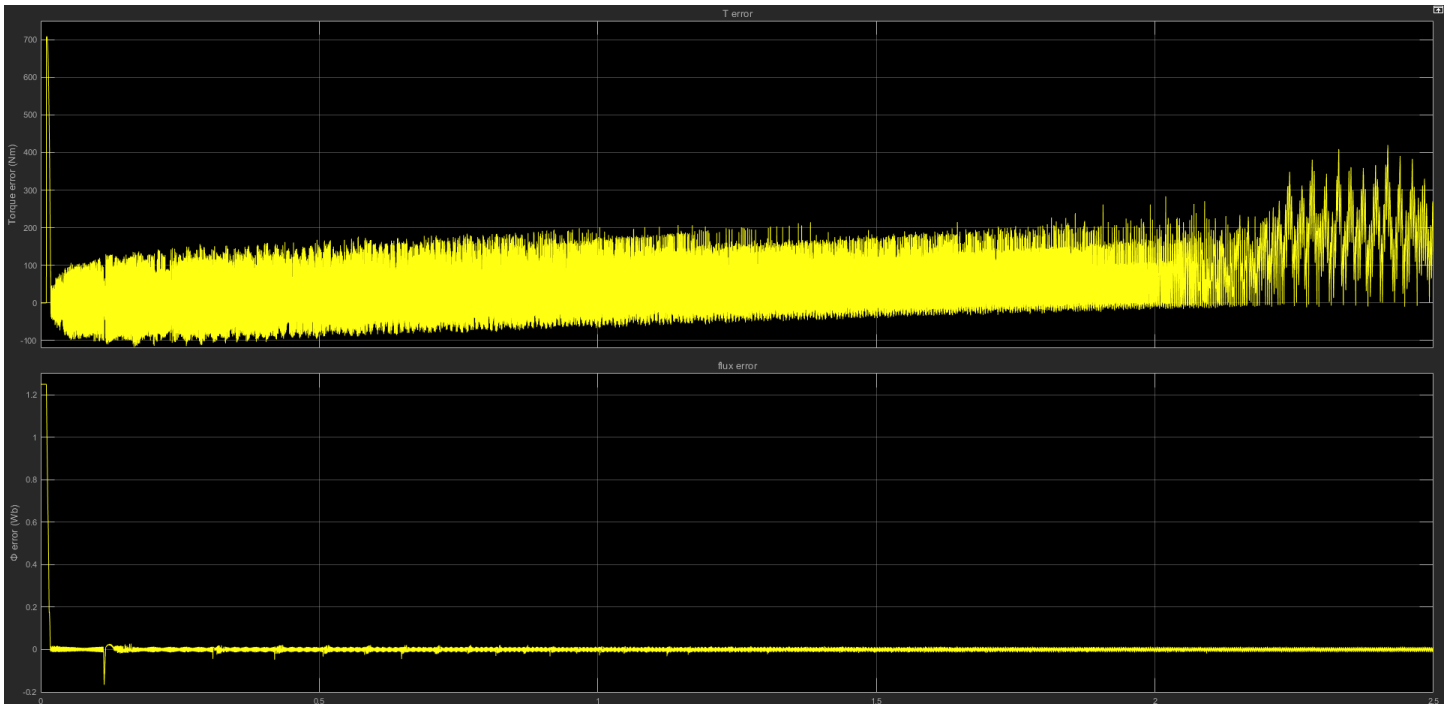
Ταχύτητα – Ροπή



Ταχύτητα – Ροπή

Η ταχύτητα σταθεροποιείται στις 1360 rpm.

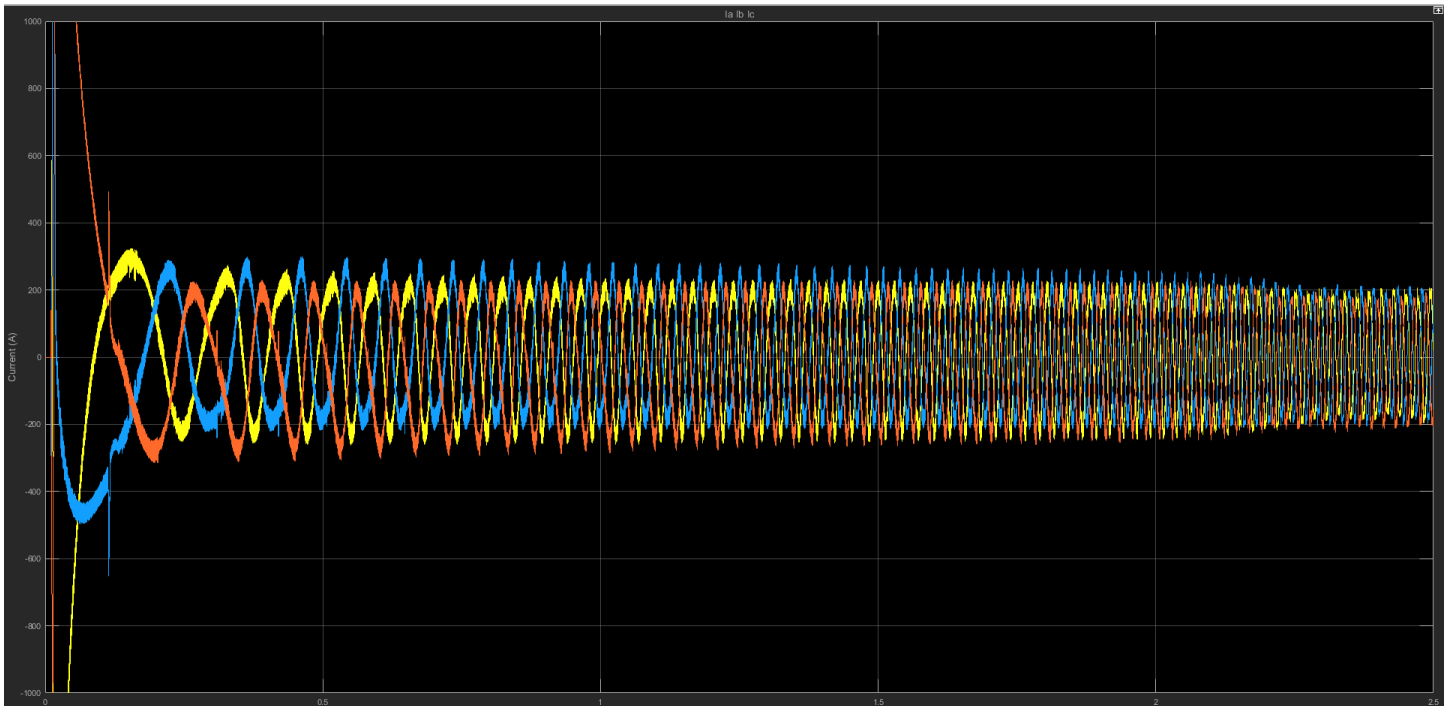
Σφάλμα ηλεκτρομαγνητικής ροπής – Σφάλμα ηλεκτρομαγνητικής ροής



Σφάλμα ηλεκτρομαγνητικής ροπής – Σφάλμα ηλεκτρομαγνητικής ροής

Η ηλεκτρομαγνητική ροπή τείνει να μηδενίσει το σφάλμα, παράυτα υπάρχουν μεγάλες ταλαντώσεις. Από την άλλη η ηλεκτρομαγνητική ροή δεν έχει ουσιαστικά σφάλμα.

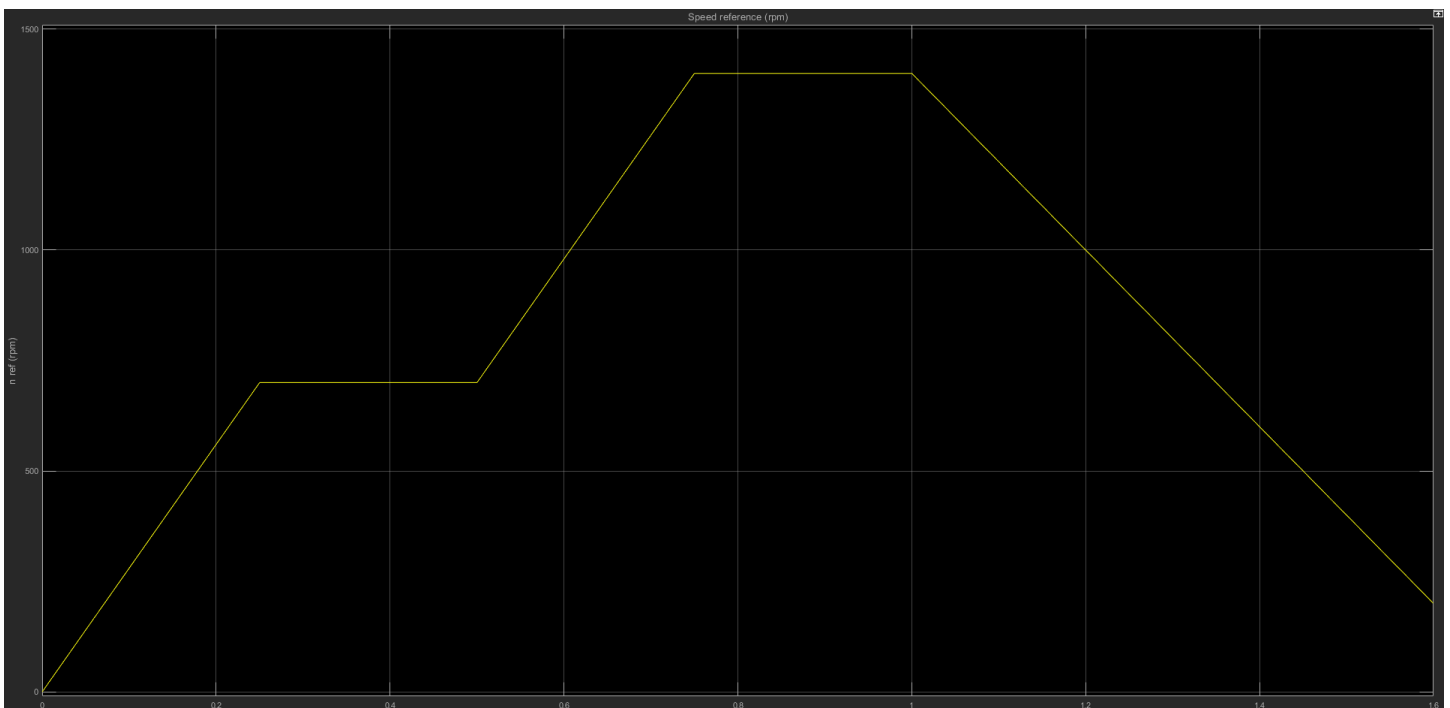
Ρεύματα



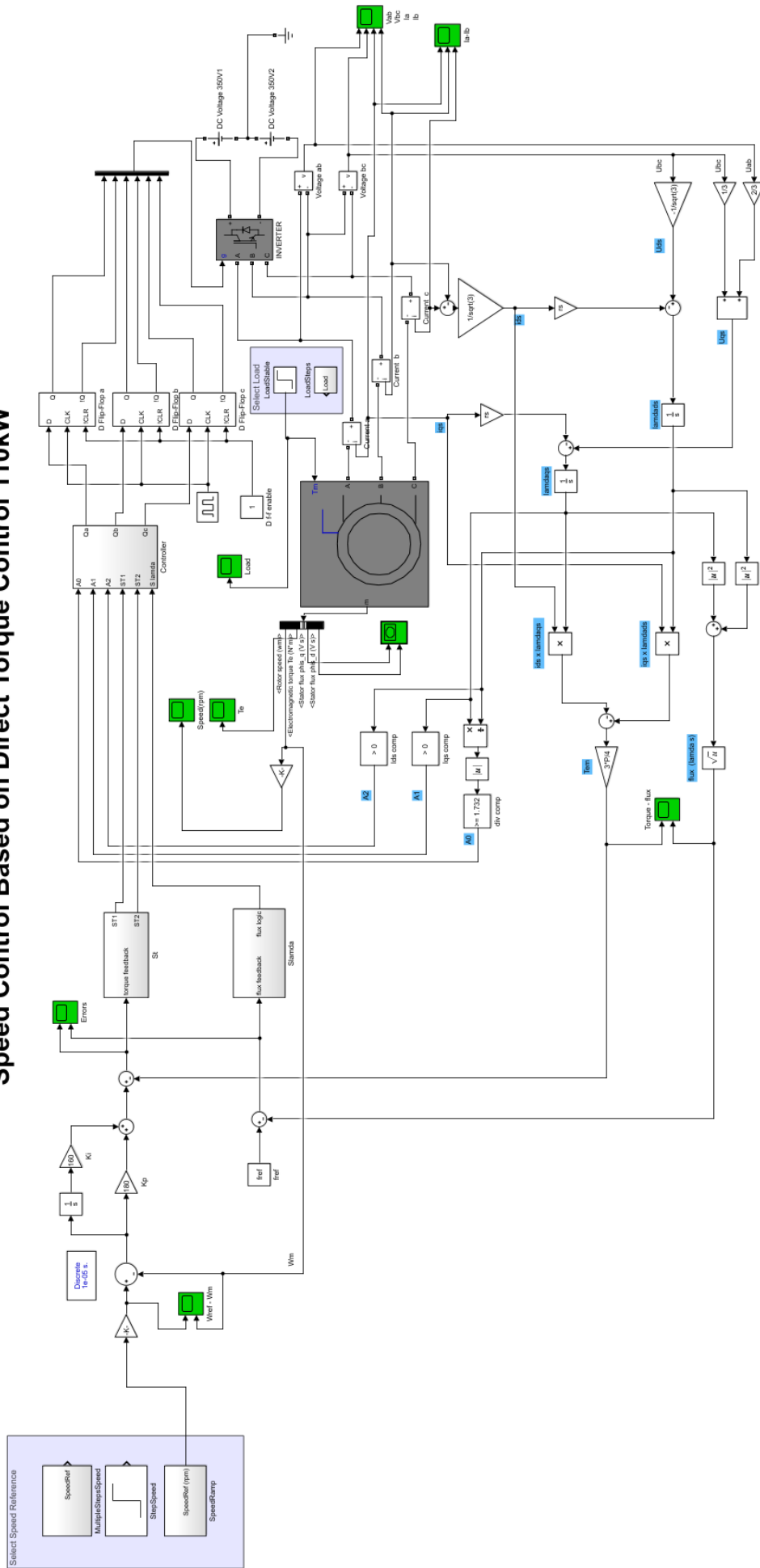
Ρεύματα I_a , I_b , I_c

Direct torque control με κινητήρα 110KW με έλεγχο στροφών

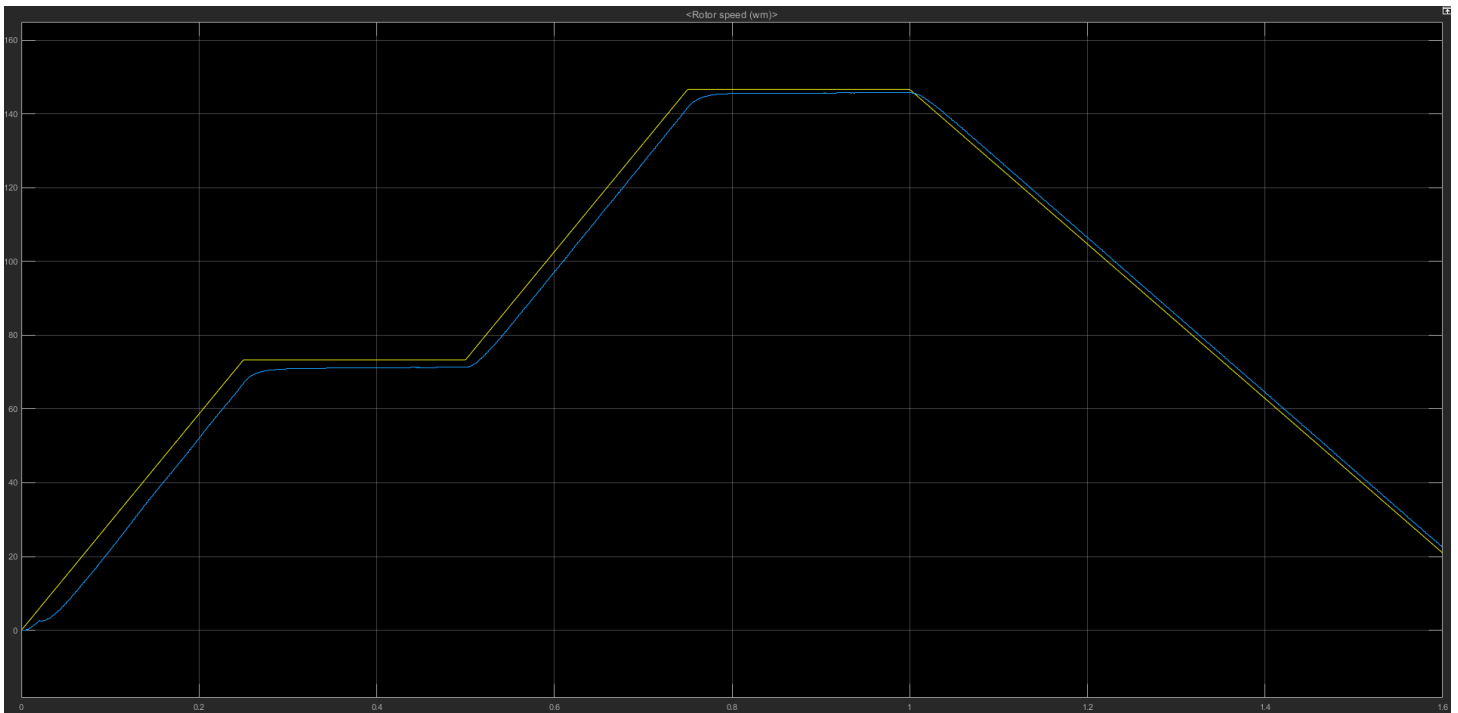
Η προσομοίωση γίνεται με μέγιστο φορτίο σε χρόνο 1,6 δευτερόλεπτα. Σαν είσοδος δίνονται οι παρακάτω ράμπες. Οι παράμετροι που χρειάστηκαν να ελεγχθούν ή να αλλάξουν σε σχέση με το μοντέλο του προηγούμενου κινητήρα των 7,5KW είναι οι πόλοι, η ροπή αναφοράς, η ροπή αναφοράς, η αντίσταση του στάτη και τέλος οι παράμετροι, K_r και K_i , του PI ελεγκτή.



Speed Control Based on Direct Torque Control 110kW



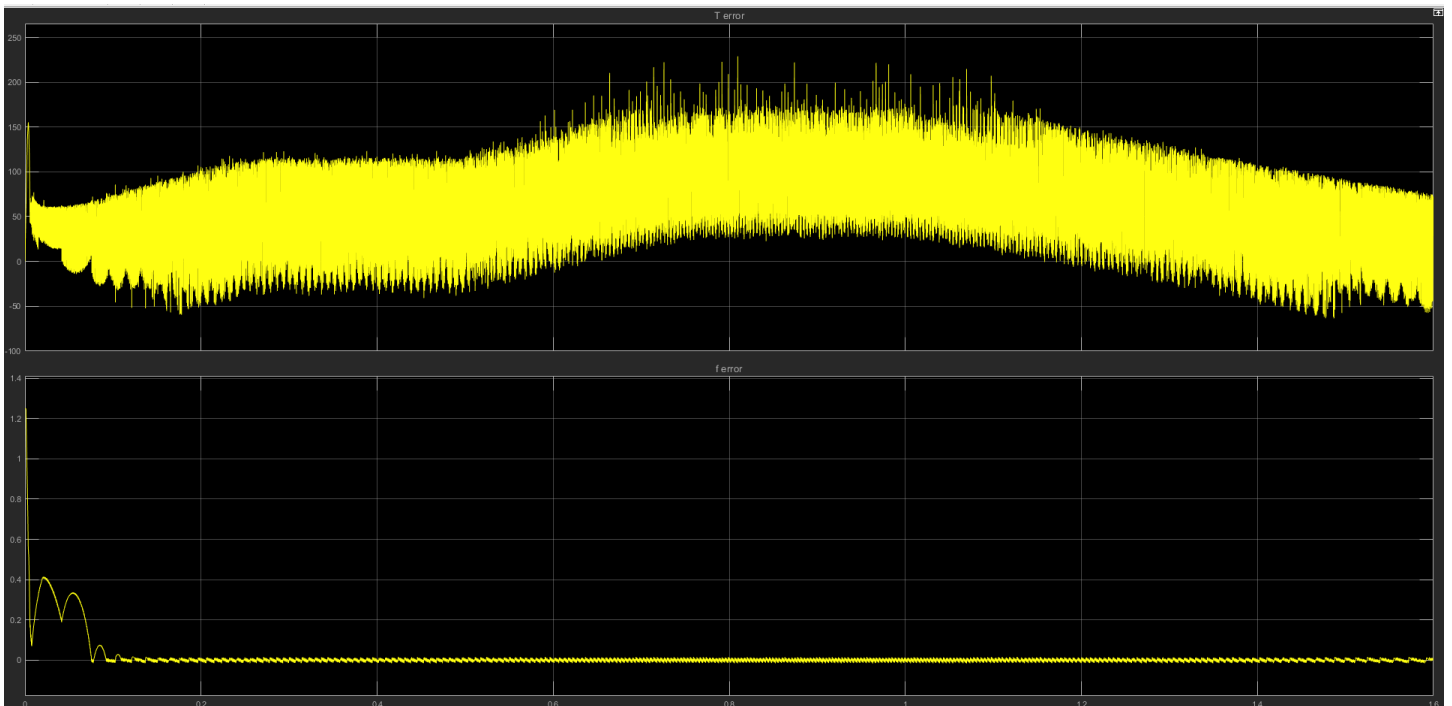
Ταχύτητα



Επιθυμητή ταχύτητα – Πραγματική ταχύτητα

Η ταχύτητα ακολουθεί την είσοδο με αρκετά καλή απόκριση και ακρίβεια.

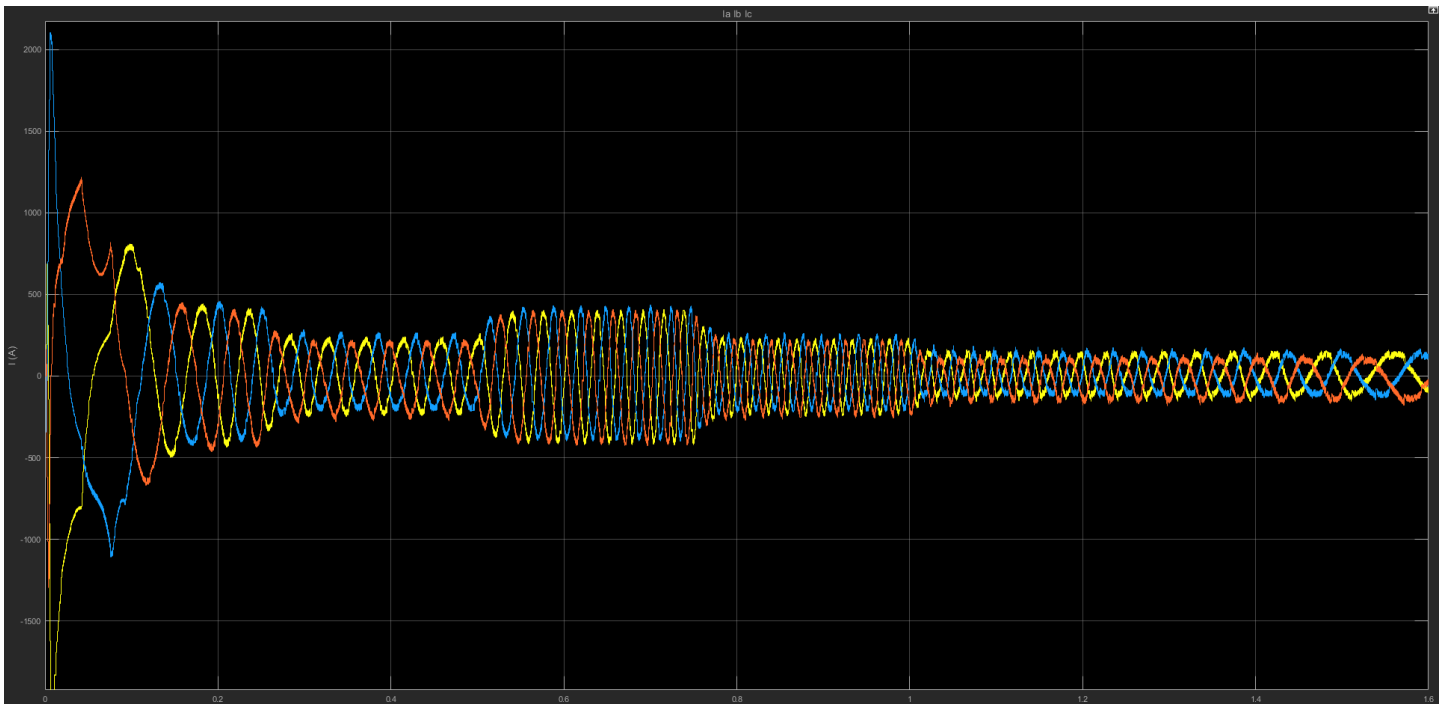
Σφάλμα ηλεκτρομαγνητικής ροπής – Σφάλμα ηλεκτρομαγνητικής ροής



Σφάλμα ηλεκτρομαγνητικής ροπής – Σφάλμα ηλεκτρομαγνητικής ροής

Υπάρχει σφάλμα στην ροπή το οποίο σταδιακά μειώνεται ενώ δεν το σφάλμα της ηλεκτρομαγνητικής ροής είναι αμεληταίο.

Ρεύματα



Ρεύματα I_a , I_b , I_c

Όπως είναι αναμενόμενο καθώς αυξάνεται η ταχύτητα αυξάνεται η συχνότητα, ενώ κατά την διάρκεια της επιτάχυνσης το πλάτος του ρεύματος είναι μεγαλύτερο και κατά την επιβράδυνση είναι μικρότερο σε σχέση με τα διαστήματα που η ταχύτητα αναφοράς παραμένει σταθερή.

Παρατήρηση

Το μοντέλο λειτουργεί και με τον κινητήρα των 110KW με τα ίδια πλεονεκτήματα και με τις ίδιες αδυναμίες με αυτόν των 7,5KW. Είναι πολύ εύκολη η ρύθμιση καθώς αλλάζουν ελάχιστες παράμετροι και είναι γνωστές για κάθε κινητήρα ή υπολογίζονται εύκολα.

Βιβλιογραφία

- <A simple hardware realization of switching table based direct torque control of induction motor> των Bibhu Prasad Panigrahi, Dinkar Prasad, Sabyasachi SenGupta
- <Sensorless vector and direct torque control> του Peter Vas
- <Space vector modulated – direct torque controlled (DTC - SVM) Inverter – Fed induction motor drive> του Marcin Zelechowski
- < Simulink Model of Direct Torque Control of Induction Machine> του H. Sanusi
- www.mathworks.com