



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
& ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ
ΜΗΧΑΝΩΝ: ΔΙΑΝΥΣΜΑΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ
ΜΗΧΑΝΗΣ ΕΠΑΓΩΓΗΣ

ΛΟΥΚΑΣ ΚΟΥΤΣΟΥΜΠΑΣ
ΑΜ:03117128

1. ΕΛΕΓΚΤΗΣ ΚΛΕΙΔΩΜΑΤΟΣ ΦΑΣΗΣ - PLL

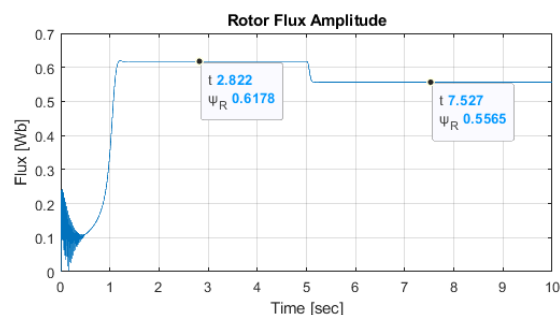
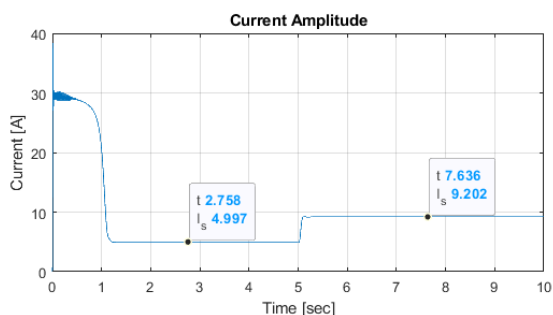
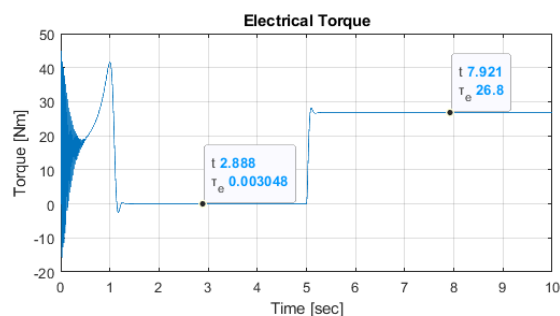
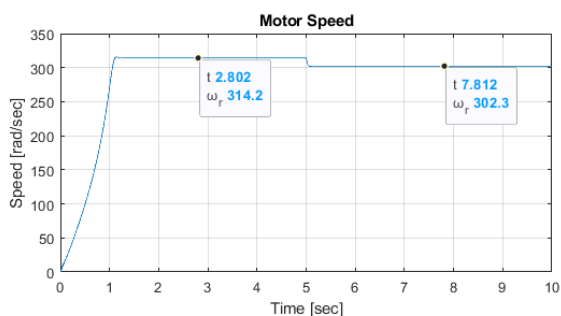
Χρησιμοποιούμε την μηχανή της προηγούμενης άσκησης προσομοίωσης η οποία έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

$$P_{out}^N = 4 \text{ kW}, V^N = 230 \text{ V rms}, n_p = 2, n^N = 1443 \text{ rpm}, I^N = 9.2 \text{ A}$$

και τα εξής ηλεκτρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά:

$$R_s = 2.2667 \, \Omega, R_r = 0.8197 \, \Omega, L_\sigma = 0.0227 \text{ H}, L_M = 0.1237 \text{ H}, J = 0.08 \text{ kgm}^2$$

Η εκκίνηση της συγκεκριμένης μηχανής από το δίκτυο είναι η εξής:



Σχήμα 1: Εκκίνηση από το δίκτυο και σύνδεση ονομαστικού φορτίου την χρον.στιγμή $t = 5 \text{ sec}$

Παρατηρούμε επαλήθευση των αναμενόμενων τιμών για την ταχύτητα, δηλαδή σύγχρονη ταχύτητα για κενό φορτίο ($\omega_r = 314.15 \text{ rad/sec}$) και ονομαστική ταχύτητα για

φορτίο ονομαστικής ροπής ($\omega_r = 302.3 \text{ rad/sec} \Rightarrow n = \frac{60\omega_r}{2\pi n_p} \simeq 1443 \text{ rpm}$). Επιπλέον,

παρατηρούμε πως και οι υπόλοιπες έξοδοι της μηχανής έχουν τις αναμενόμενες τιμές για κενό και ονομαστικό φορτίο, ενώ η ροή κενού φορτίου είναι περίπου ίση με $\psi_R = 0.62 \text{ Wb}$ και στο ονομαστικό φορτίο μειώνεται ελαφρώς.

Σε αυτό το στάδιο υλοποιούμε έναν ελεγκτή κλειδώματος φάσης προκειμένου να μετατρέψουμε τις συνιστώσες της μηχανής από το πλαίσιο αβ στο στρεφόμενο πλαίσιο dq για να υλοποιήσουμε στην συνέχεια τον έλεγχο του ρεύματος.

Για την υλοποίηση ενός PLL που θα είναι τέλεια προσανατολισμένο στον ρότορα της μηχανής θέλουμε ως αρχική θεώρηση ο προσανατολισμός του dq να είναι κάθετος στο διάνυσμα E^s της αντί-ΗΕΔ. Η μέτρηση όμως της αντί-ΗΕΔ είναι πρακτικά σχεδόν αδύνατη και το πιο κοντινό στην πραγματική τιμής της θα ήταν κάποια εκτίμησή της. Γνωρίζουμε όμως για το μοντέλο μας και μπορούμε να μετρήσουμε, σύμφωνα με την εκφώνηση, την ροή του ρότορα. Επιπλέον, έχουμε την εξής εκτίμηση για την αντί-ΗΕΔ:

$$\widehat{E}^s = j\omega_1 \psi_R^s \Rightarrow \widehat{E}_d = -\omega_1 \psi_q, \widehat{E}_q = \omega_1 \psi_d.$$

Επομένως, στον αρχικό τύπο υλοποίησης του PLL, ο οποίος είναι ο εξής:

$$\omega_1 = \frac{a_l}{s+a_l} (\widehat{\omega}_g - k_{pp} \widehat{E}_d - k_{ip} \int \widehat{E}_d dt)$$

η αντικατάσταση της συνιστώσας \widehat{E}_d από τον παραπάνω τύπο και εν τέλει η χρήση της ροής θα μας αποφέρει τον εξής τύπο:

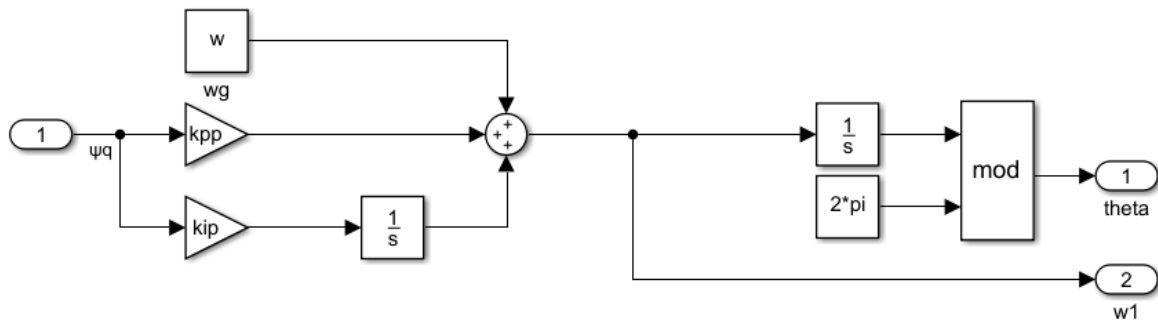
$$\omega_1 = \frac{a_l}{s+a_l} (\widehat{\omega}_g + k_{pp} \psi_q + k_{ip} \int \psi_q dt)$$

Ο όρος $\frac{a_l}{s+a_l}$ ουσιαστικά αποτελεί ένα LPF το οποίο σκοπός του είναι να εξαλείψει τις συνιστώσες θορύβου των μετρήσεων, όμως στην προσομοίωση μας που οι μετρήσεις θεωρούνται ιδανικές δεν θα χρησιμοποιήσουμε κάποιο φίλτρο. Ο όρος $\widehat{\omega}_g$ αποτελεί μια εκτίμηση για την αναμενόμενη ω_1 , οπότε θα θεωρήσουμε $\widehat{\omega}_g = 314.15 \text{ rad/sec}$. Τέλος, τα κέρδη του PI ελεγκτή τα επιλέγουμε ως εξής:

$$k_{pp} = \frac{2\alpha_p}{\widehat{\psi}}$$

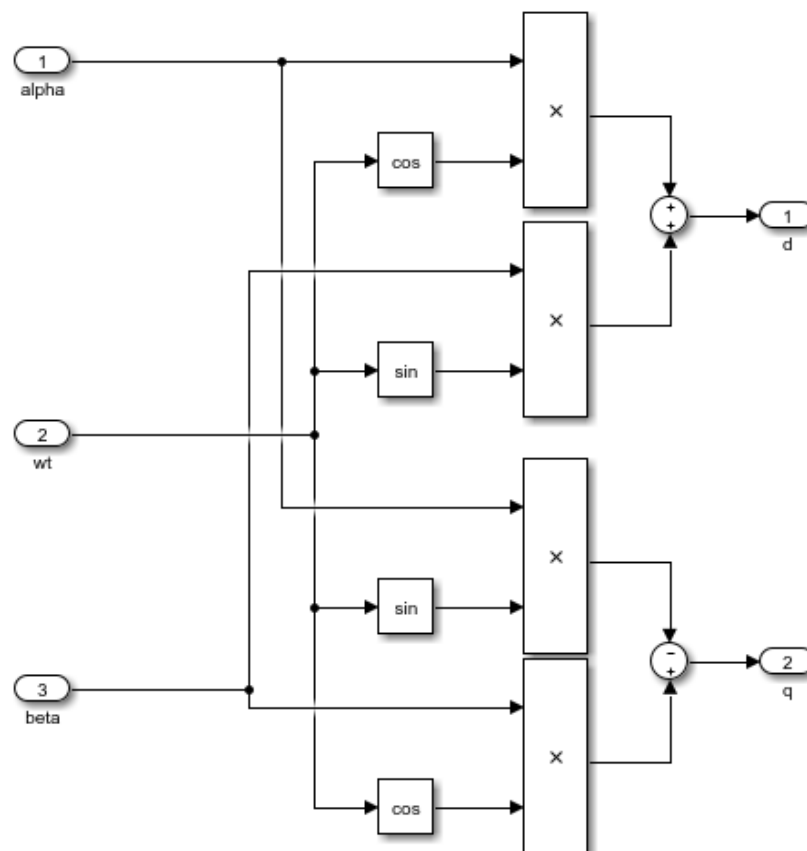
$$k_{ip} = \frac{\alpha_p^2}{\widehat{\psi}}$$

όπου το α_p επιλέγεται έτσι ώστε να είναι μια τάξη μεγέθους μικρότερη του εύρους ζώνης κλειστού βρόχου για τον ελεγκτή ρεύματος. Στην περίπτωση μας θα θεωρήσουμε $\alpha_p = 110 \text{ rad/sec}$ και $\hat{\psi} = 0.62$ σύμφωνα με τις μετρήσεις της ροής που είχαμε από την εκκίνηση από το δίκτυο. Επομένως $k_{pp} = 354.8387$, $k_{ip} = 19516$ και η υλοποίηση στο περιβάλλον του simulink η εξής:



Σχήμα 2: Υλοποίηση PLL block

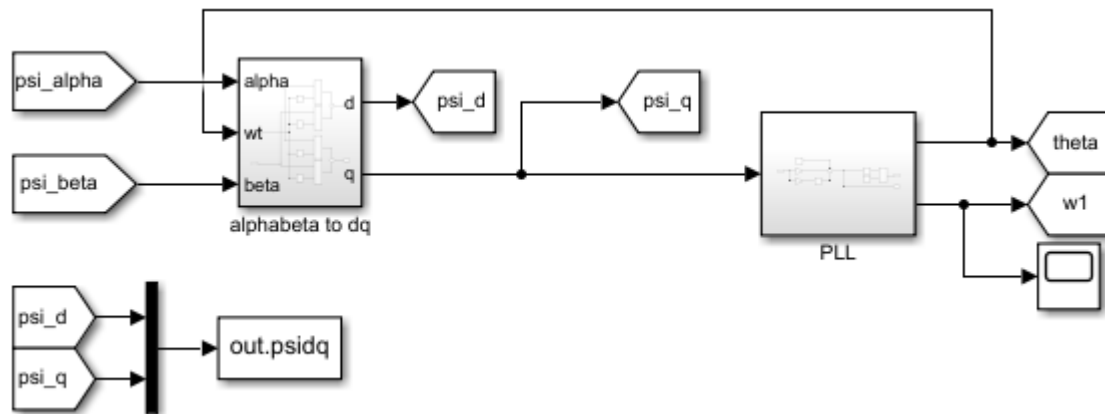
Έχοντας λοιπόν την γωνία θ πλέον μπορούμε να κάνουμε τον μετασχηματισμό των συνιστωσών της μηχανής από το πεδίο αβ στο στρεφόμενο dq χρησιμοποιώντας το εξής μπλοκ μετασχηματισμού:



Σχήμα 3: Μετασχηματισμός από το αβ στο dq

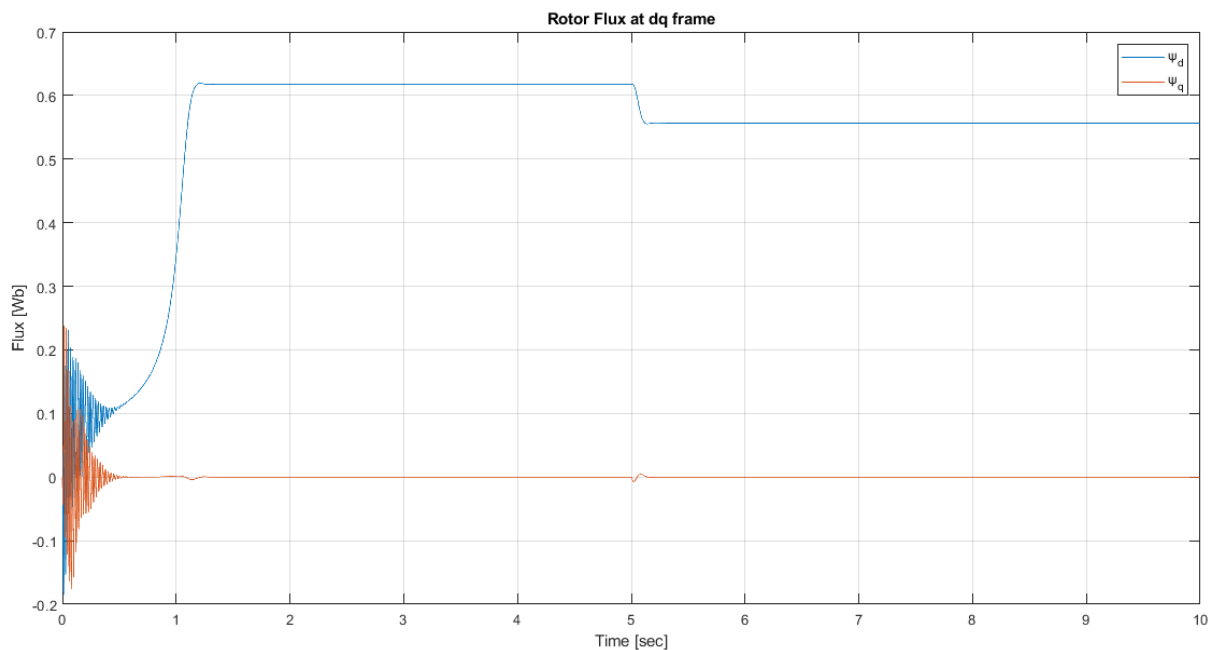
Χρησιμοποιώντας, λοιπόν το παραπάνω μπλοκ μπορούμε να μετασχηματίσουμε την ροή του ρότορα και το ρεύμα του στάτη στο dq πλαίσιο. Μάλιστα η αρχική μας θεώρηση

για το PLL, όσον αφορά το ψ_q , είναι ουσιαστικά μια ανατροφοδότηση της εξόδου του παραπάνω μπλοκ, καθώς ο ελεγκτής κλειδώματος φάσης και ο μετασχηματισμός Park είναι αλληλένδετα. Εν τέλει όλο το σύστημα έχει την εξής μορφή:



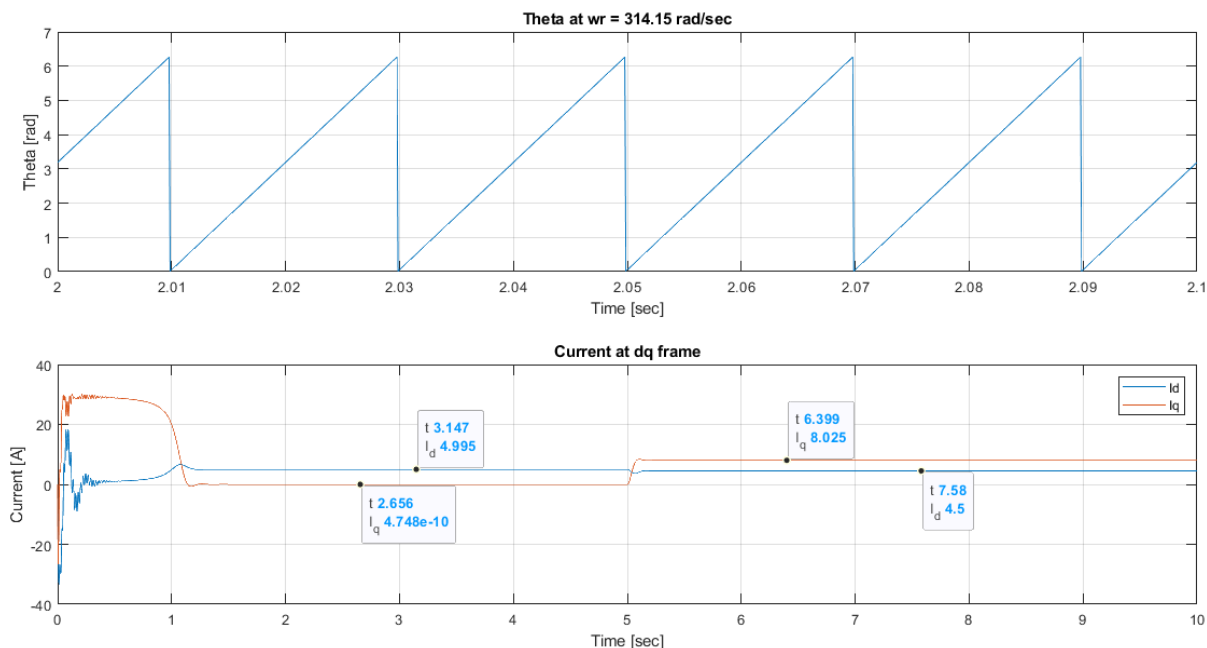
Σχήμα 4: Ολοκληρωμένη η μέθοδος υλοποίησης του PLL

Επομένως, προκειμένου να επαληθεύσουμε τον τέλει προσανατολισμού πεδίου αρκεί η συνιστώσα $\psi_q = 0 \Rightarrow E_d = 0$. Παρακάτω φαίνονται οι συνιστώσες της ροής του ρότορα.



Σχήμα 5: Ροή ρότορα στο dq frame

Όπως επαληθεύεται από το παραπάνω σχήμα έχουμε πετύχει τέλει προσανατολισμό στο πεδίο του ρότορα καθώς $\psi_q = 0$ (πορτοκαλί κυματομορφή). Όσον αφορά το ρεύμα στο dq πλαίσιο και την γωνία θ λαμβάνουμε τις εξής κυματομορφές:



Σχήμα 6: Γωνία θ και ρεύμα στο dq frame

Παρατηρούμε πως η γωνία κυμαίνεται μεταξύ 0 και 2π με περίοδο που ταυτίζεται με την περίοδο του δικτύου. Όσον αφορά το ρεύμα παρατηρούμε πως κατά την εκκίνηση το μεγάλο ρεύμα που είχαμε δει και το οποίο έχει σαν αποτέλεσμα την ανάπτυξη της ροπής εκκίνησης οφείλεται κατά κύριο λόγο στην συνιστώσα i_q , ενώ με το πέρασ του χρόνου και την μόνιμη κατάσταση κενού φορτίου με σύγχρονη ταχύτητα βλέπουμε πως η συνιστώσα i_q μηδενίζεται και επομένως το ρεύμα κενού φορτίου προκύπτει από την συνιστώσα i_d . Μετά την σύνδεση του ονομαστικού φορτίου παρατηρούμε πως η συνιστώσα i_d έχει μια μικρή πτώση και η συνιστώσα i_q λαμβάνει τιμή τέτοια ώστε το διανυσματικό άθροισμα $i_d + ji_q$, το οποίο αποτελεί και το ρεύμα του στάτη, να έχει μέτρο ίσο με την ονομαστική τιμή του ρεύματος. Οι παρατηρήσεις αυτές επαληθεύουν τον τέλειο προσανατολισμό που θέλαμε να επιτύχουμε, καθώς επαληθεύουν την ιδιότητά του που περιγράφει το ρεύμα i_d ως την συνιστώσα που ρυθμίζει την ροή και επομένως το μαγνητικό πεδίο και το ρεύμα i_q ως την συνιστώσα που ρυθμίζει την ροπή της μηχανής.

2. ΕΛΕΓΧΟΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ dq

Σε αυτήν την φάση θα υλοποιήσουμε έναν διανυσματικό ελεγκτή για το ρεύμα του στάτη. Οι εξισώσεις που θα ακολουθήσουμε προκειμένου να υλοποιήσουμε τον έλεγχο ρεύματος και επομένως να κατασκευάσουμε τις τάσεις αναφοράς με τις οποίες θα τροφοδοτήσουμε την μηχανή είναι οι εξής:

$$\begin{bmatrix} v_d^{\text{ref}} \\ v_q^{\text{ref}} \end{bmatrix} = k_p \begin{bmatrix} e_d \\ e_q \end{bmatrix} + k_i \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R_a & \omega_1 \hat{L} \\ -\omega_1 \hat{L} & R_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \hat{E}_d \\ \hat{E}_q \end{bmatrix}$$

οι οποίες αν αναλυθούν λαμβάνουν την παρακάτω μορφή:

$$u_d^{ref} = k_p e_d + k_i I_d - R_a i_d - \omega_1 \hat{L} i_q + \hat{E}_d$$

$$u_q^{ref} = k_p e_q + k_i I_q + \omega_1 \hat{L} i_d - R_a i_q + \hat{E}_q$$

όπου e_d, e_q τα σφάλματα ρεύματος μεταξύ αναφοράς και πραγματικής τιμής, R_a η ενεργός αντίσταση την οποία προσθέτουμε εικονικά στο σύστημα προκειμένου να περιορίσουμε ακόμη περισσότερο το σφάλμα μεταξύ τιμής αναφοράς και πραγματικής τιμής, $\omega_1 \hat{L} = \omega_1 L_\sigma$ όρος που αποτελεί το cross coupling μεταξύ των δύο συνιστωσών στο dq frame και τέλος \hat{E}_d, \hat{E}_q οι εκτιμήσεις της back emf στους αντίστοιχους άξονες. Θέτουμε σαν επιθυμητό χρόνο ανόδου το 1 ms για το ρεύμα οπότε το εύρος ζώνης κλειστού βρόχου προκύπτει ίσο με $a_c = \ln 9 / t_{rc} = 2197\text{ rad/sec}$. Επομένως το αναλογικό και ολοκληρωτικό κέρδος του PI ελεγκτή θα υπολογιστούν σύμφωνα με τους παρακάτω τύπους αντίστοιχα:

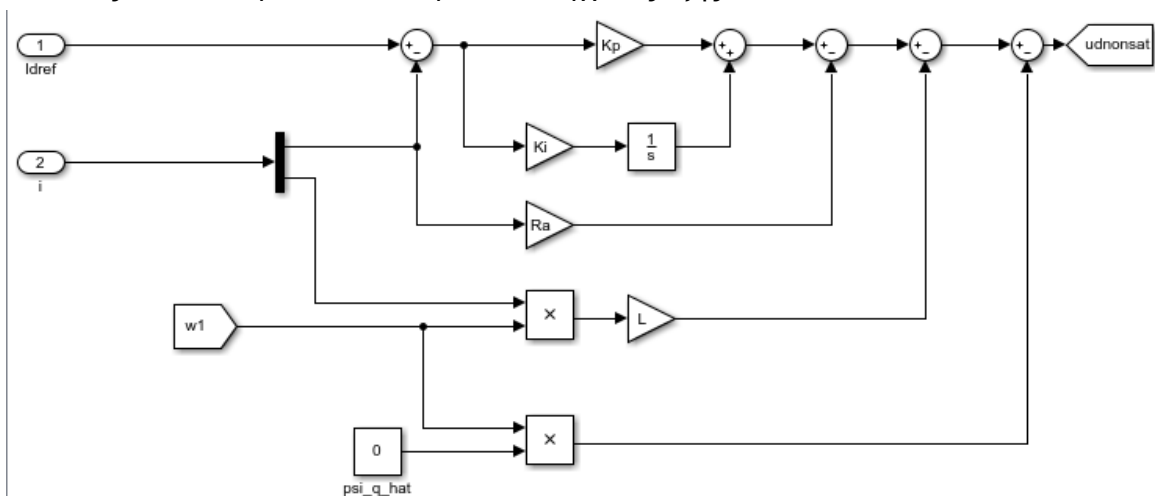
$$k_p = a_c \hat{L}, k_i = a_c^2 \hat{L}$$

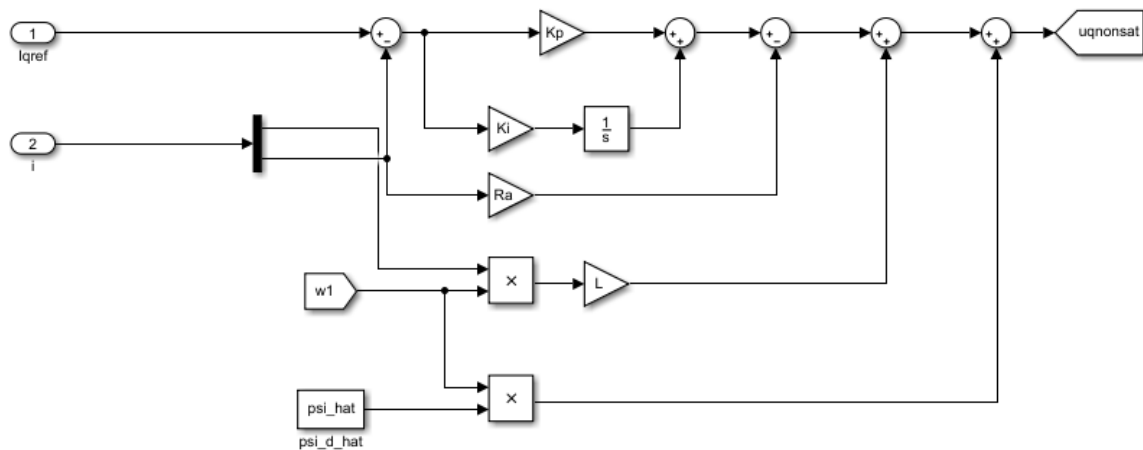
Τα I_d, I_q αναφέρονται στο σχήμα του anti-windup το οποίο θα υλοποιήσουμε σε επόμενο ερώτημα οπότε προς το παρόν $I_d = e_d, I_q = e_q$. Τέλος, τις εκτιμήσεις της back emf τις κάνουμε ως εξής:

$$\hat{E}_d = 0$$

$$\hat{E}_q = \omega_1 \hat{\psi} = 0.62 \omega_1$$

Συνεπώς, υλοποιούμε τον διανυσματικό έλεγχο ως εξής:





Σχήμα 7: Υλοποίηση διανυσματικού ελέγχου ρεύματος

Το decoupling που χρησιμοποιήσαμε σκοπό έχει να αποπλέκει τις συνιστώσες i_d, i_q μεταξύ τους, ώστε ο έλεγχος του ρεύματος να μπορεί να γίνει ξεχωριστά για την καθεμία από αυτές.

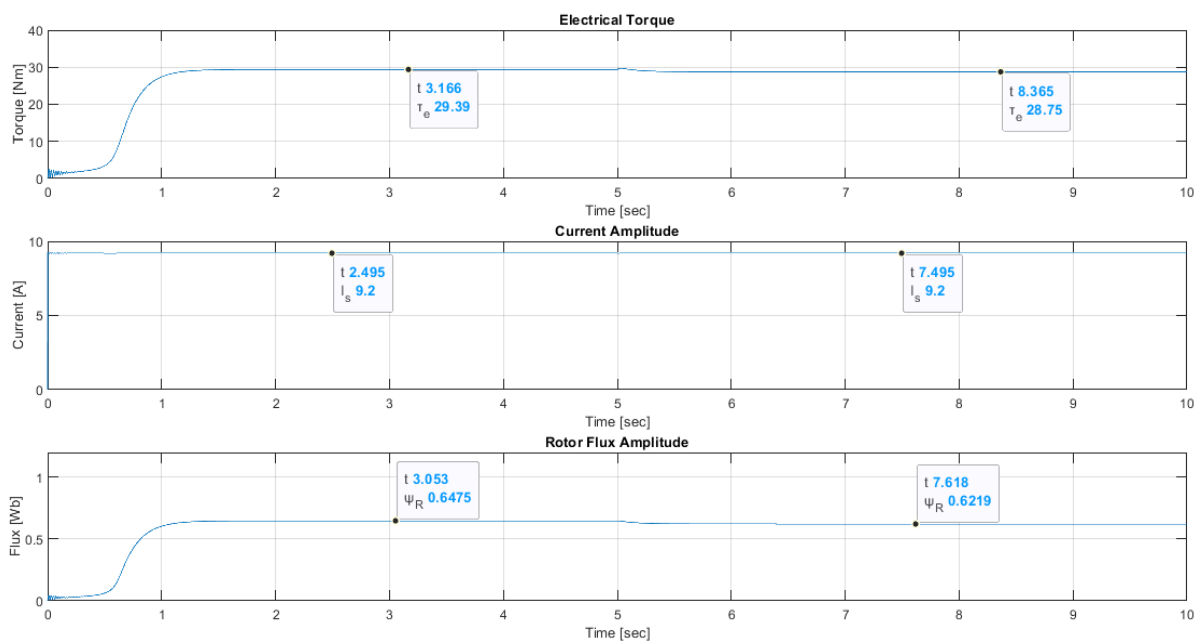
Επιλέγουμε τις αναφορές των ρευμάτων ως εξής:

$$i_d^{ref} = \hat{\psi} / L_M$$

$$i_q^{ref} = \sqrt{i_N^2 - i_{d,ref}^2}$$

όπου $\hat{\psi} = 0.62 \text{ Wb}$ η ροή κενού φορτίου, L_M η αυτεπαγωγή μαγνήτισης και $i_N = 9.2 \text{ A}$ το ονομαστικό ρεύμα.

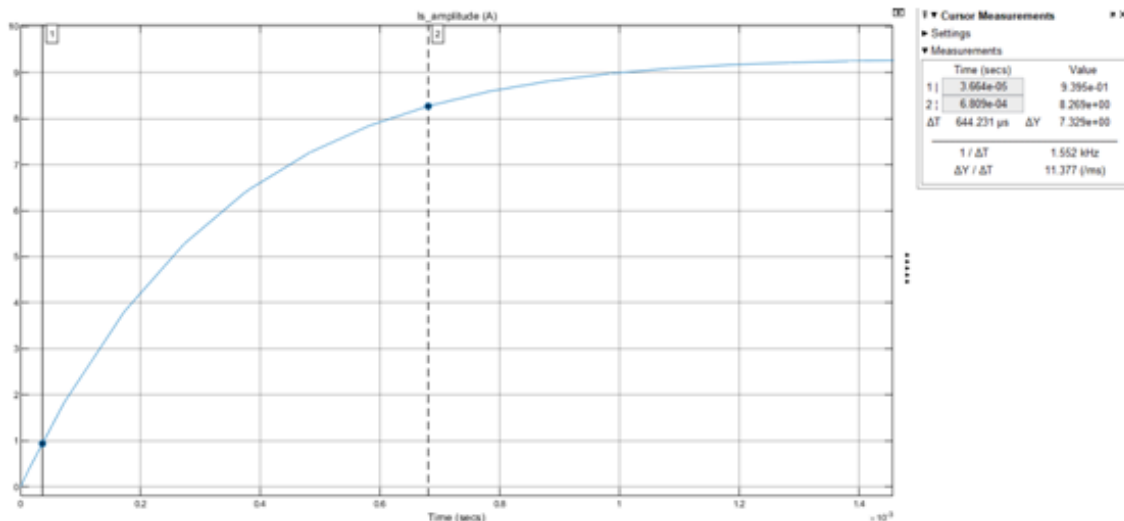
Τρέχοντας την προσομοίωση λαμβάνουμε τα εξής αποτελέσματα:



Σχήμα 8: Προσομοίωση με έλεγχο ρεύματος και σύνδεση ονομαστικού φορτίου την χρον.στιγμή $t = 5 \text{ sec}$

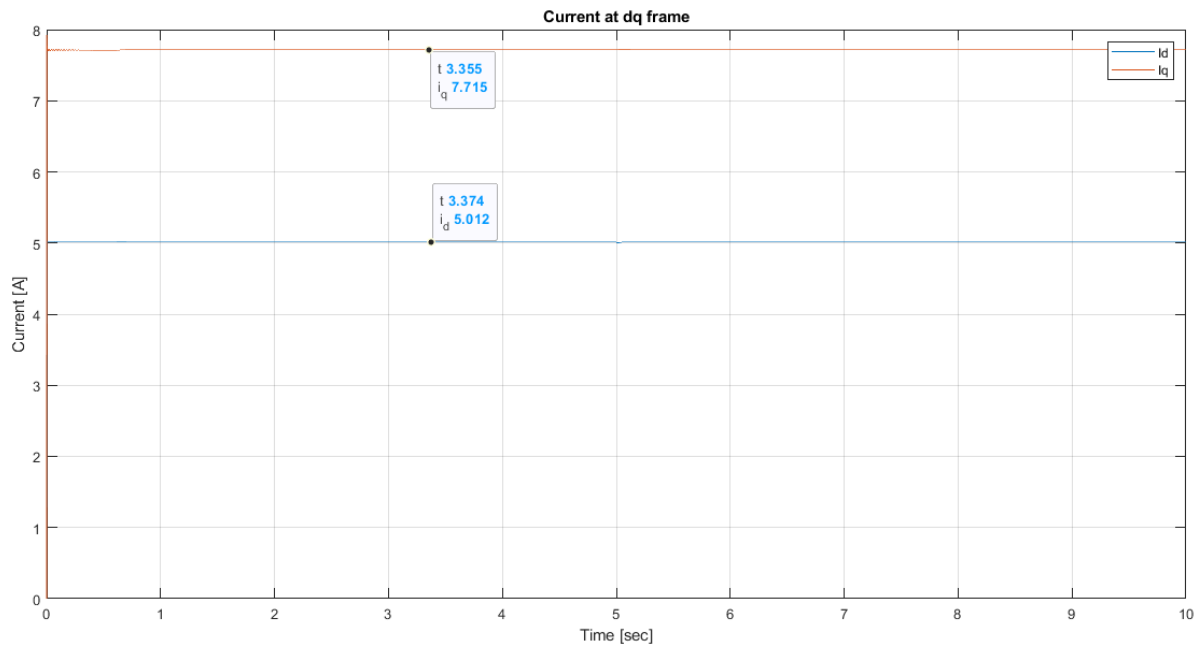
Παρατηρούμε πως η ηλεκτρική ροπή αυξάνει εως μια τιμή λίγο πάνω από την ονομαστική και κατά την σύνδεση του φορτίου μειώνεται ελαφρώς, παραμένοντας όμως μεγαλύτερη της ονομαστικής. Παρόμοια είναι και τα αποτελέσματα για την ροή καθώς στην μόνιμη κατάσταση έχουμε ροή μεγαλύτερη από την ροή κενού φορτίου την οποία και χρησιμοποιούμε στον υπολογισμό του i_d^{ref} προκειμένου η συνιστώσα ρεύματος που ελέγχει το πεδίο να επιβάλει ρεύμα ικανό για την διατήρηση του πεδίου. Αυτή η απόκλιση οφείλεται στον τρόπο με τον οποίο εκτιμούμε την ροή του πεδίου στους υπολογισμούς μας.

Το ρεύμα, παρόλα αυτά παρατηρούμε πως στην μόνιμη κατάσταση του ανεξαρτήτως ύπαρξης φορτίου ή μη διατηρείται στην ονομαστική τιμή του. Με ένα ζουμ στην αρχή της προσομοίωσης για το ρεύμα λαμβάνουμε την εξής εικόνα προκειμένου να υπολογίσουμε τον χρόνο ανόδου.



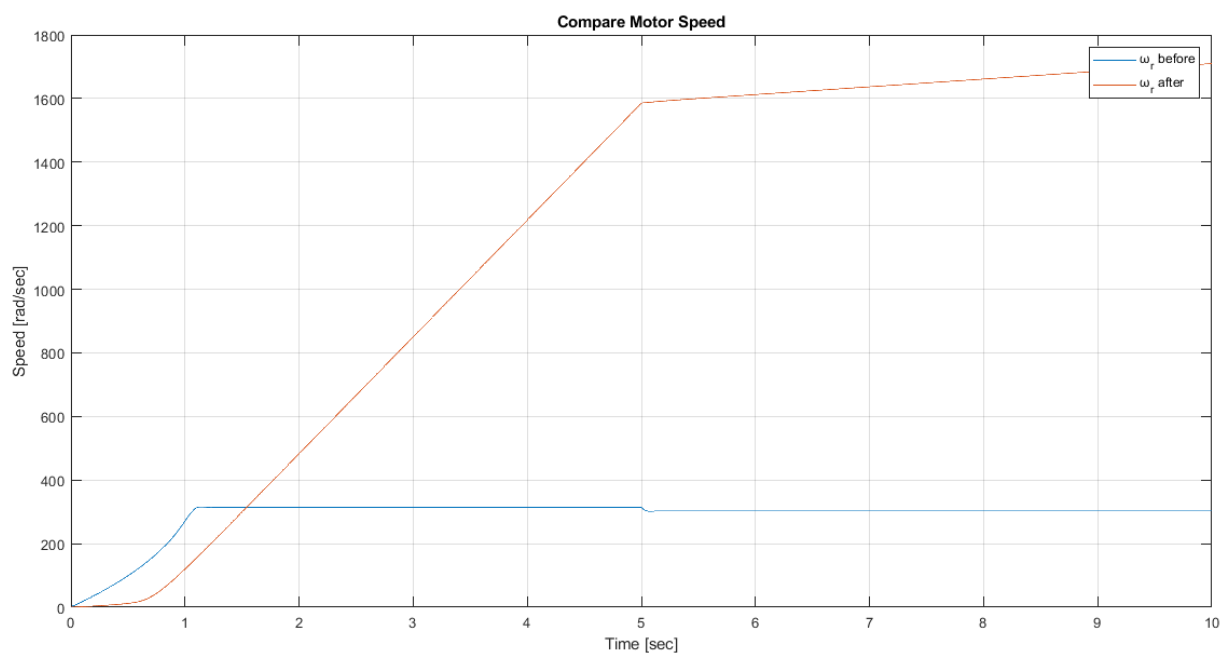
Σχήμα 9: Χρόνος ανόδου ρεύματος

Με την χρήση κερσόρων ο χρόνος ανόδου του ρεύματος είναι της τάξης του μισού ms περίπου, μικρότερος από τον επιθυμητό. Επιπλέον, οι συνιστώσες του ρεύματος στο dq frame έχουν την εξής μορφή:



Σχήμα 10: Ρεύμα στο dq frame

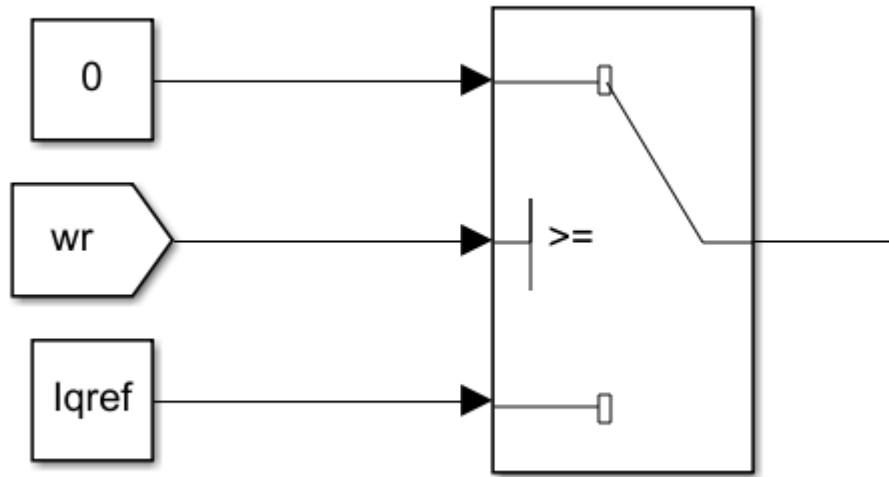
ταυτίζονται, δηλαδή, με τις τιμές αναφοράς των ελεγκτών. Τέλος, όσον αφορά την ταχύτητα παρατηρούμε τα εξής:



Σχήμα 11: Σύγκριση ταχύτητας πριν και μετά τον έλεγχο του ρεύματος

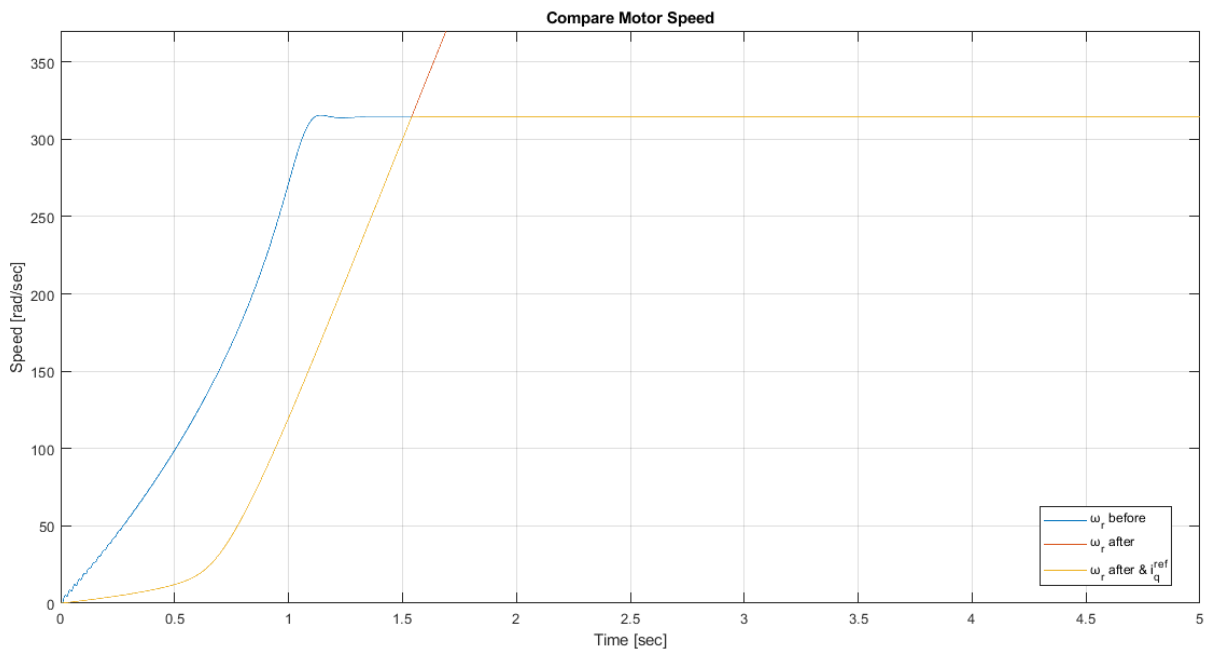
Βλέπουμε πως μετά την εφαρμογή του ελέγχου η ταχύτητα καθυστερεί ελαφρώς την απότομη αύξηση της σε σχέση με την εκκίνηση από το δίκτυο, όμως λόγω έλλειψης κορεσμού της τάσης αναφοράς η ταχύτητα θα αυξάνεται συνεχώς για όλη την διάρκεια της προσομοίωσης. Προφανώς, αυτό θα ήταν καταστροφικό για μια πραγματική μηχανή, όμως στα πλαίσια της προσομοίωσης δεν έχουμε κάποιο πρόβλημα. Ένας έμμεσος

τρόπος με τον οποίο θα μπορούσαμε να ελέγξουμε την ταχύτητα ώστε να την περιορίσουμε στην σύγχρονη θα ήταν να μηδενίσουμε την αναφορά του ρεύματος i_q την χρονική στιγμή που $\omega_r = 314.15 \text{ rad/sec}$ και επομένως αφού μηδενίζεται η συνιστώσα του ρεύματος που ελέγχει την ροπή θα μηδενιστεί και η ροπή εκκίνησης της μηχανής σταματώντας με αυτόν τον τρόπο την αύξηση της ταχύτητας. Χρησιμοποιώντας τον παρακάτω διακόπτη:



Σχήμα 12: Έμμεσος τρόπος ελέγχου της ταχύτητας

προκειμένου να προσομοιώσουμε τον παραπάνω έμμεσο τρόπο ελέγχου της ταχύτητας λαμβάνουμε τα εξής αποτελέσματα για την ταχύτητα:



Σχήμα 13: Σύγκριση ταχύτητας μετά και την αλλαγή του i_q^{ref}

3. ΚΟΡΕΣΜΟΣ ΤΑΣΗΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ - ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΕΝΑΝΤΙ ΣΥΣΣΩΡΕΥΣΗΣ ΟΛΟΚΛΗΡΩΤΙΚΟΥ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ

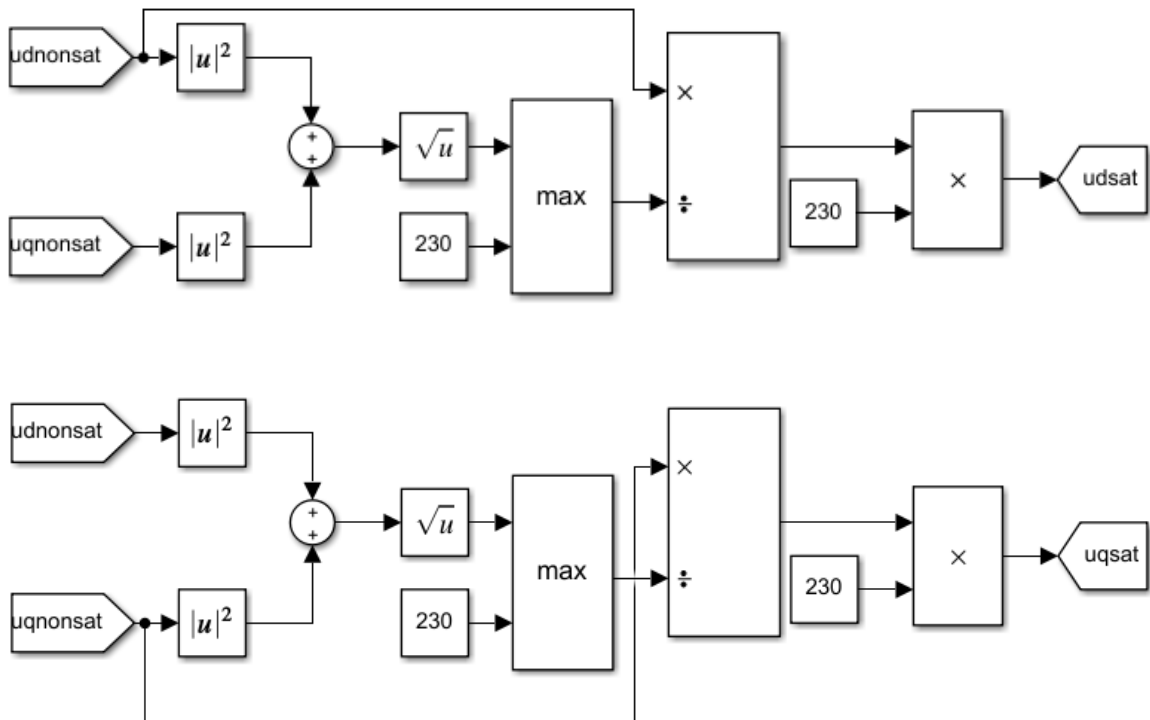
Σε αυτό το στάδιο προσθέτουμε αρχικά κορεσμό της τάσης αναφοράς, προκειμένου να την περιορίσουμε στην ονομαστική της τιμή και στην συνέχεια προσθέτουμε το anti-windup σχήμα στον έλεγχο έτσι ώστε να εξαλείψουμε την συσσώρευση ολοκληρωτικού σφάλματος.

Ο κορεσμός των τάσεων αναφοράς πρέπει να γίνει με τέτοιο τρόπο ώστε το διανυσματικό άθροισμα των συνιστωσών u_d^{ref}, u_q^{ref} να μην ξεπερνά την ονομαστική τιμή της τάσης εισόδου της μηχανής. Προκειμένου να το πετύχουμε αυτό θα υλοποιήσουμε τον κορεσμό με βάση τις παρακάτω εξισώσεις:

$$\bar{u}_d = \frac{u_d^{ref}}{\max\{\sqrt{u_{d,ref}^2 + u_{q,ref}^2}, V^N\}} V^N$$

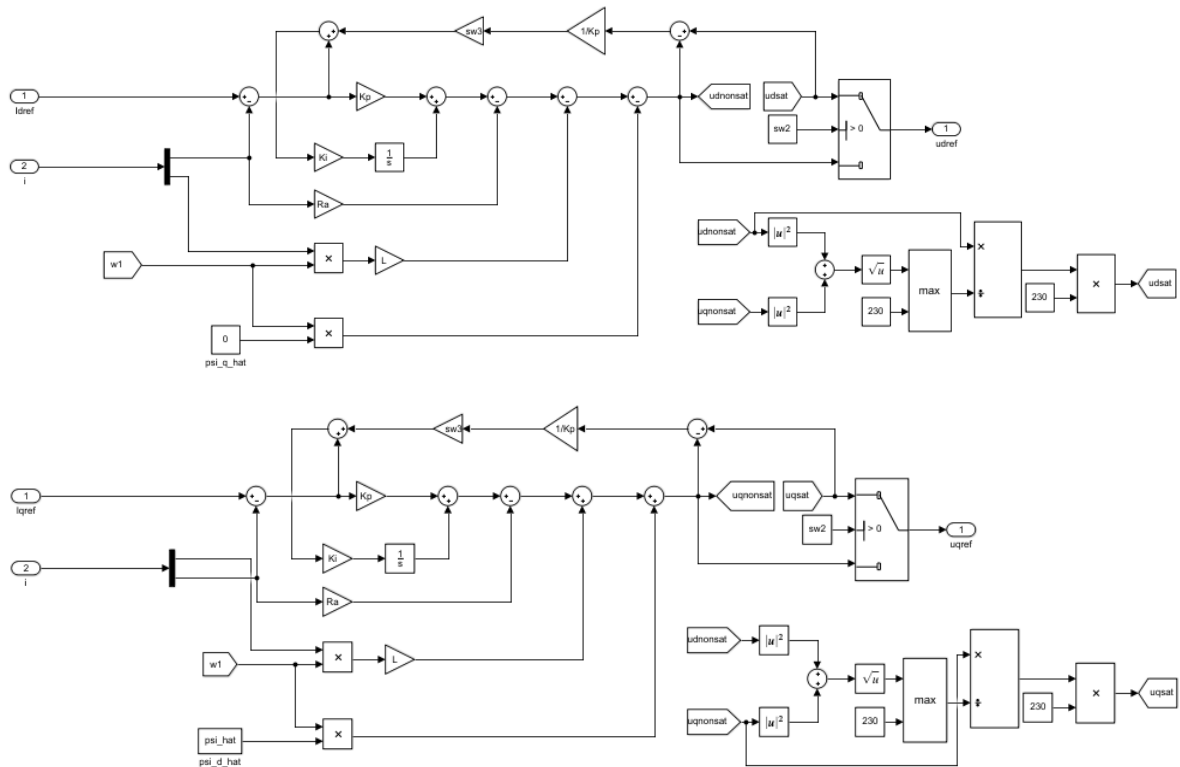
$$\bar{u}_q = \frac{u_q^{ref}}{\max\{\sqrt{u_{d,ref}^2 + u_{q,ref}^2}, V^N\}} V^N$$

Επομένως, η υλοποίηση του κορεσμού γίνεται ως εξής:



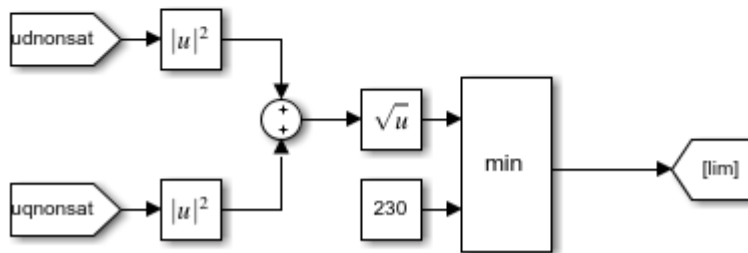
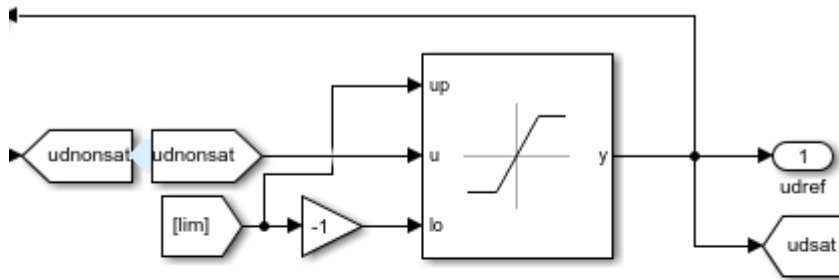
Σχήμα 14: Κορεσμός τάσης αναφοράς

Στην συνέχεια, προσθέτουμε το anti-windup και επομένως οι ελεγκτές μας παίρνουν την παρακάτω τελική μορφή:



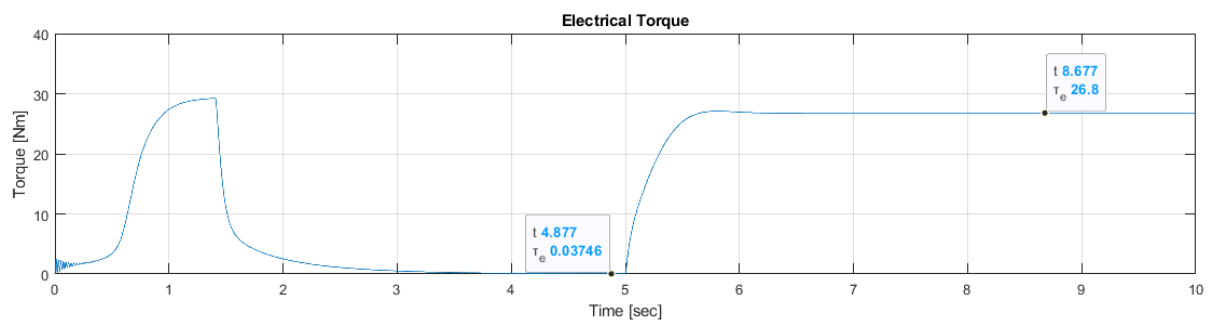
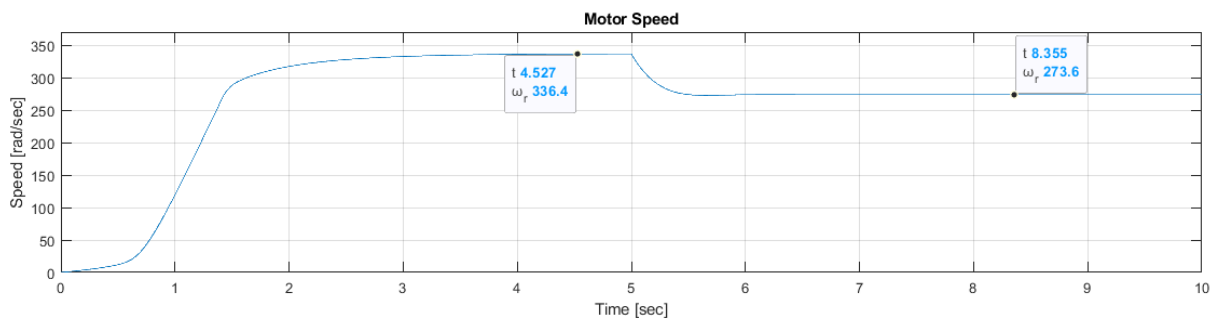
Σχήμα 15: Ολοκληρωμένος διανυσματικός έλεγχος

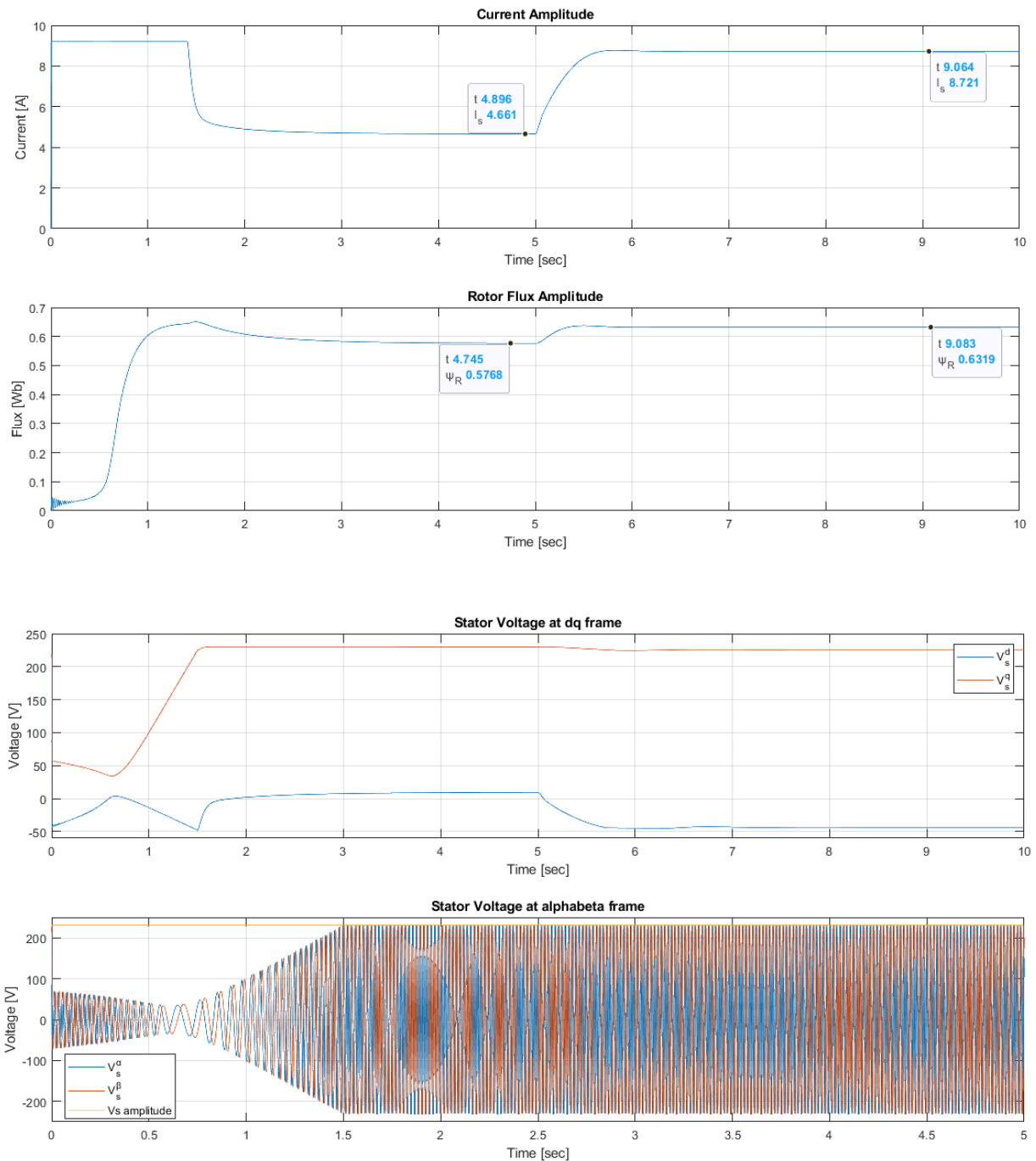
Το sw2 που φαίνεται στην παραπάνω υλοποίηση επιλέγει αν στην προσομοίωση μας θα χρησιμοποιηθεί κορεσμός τάσης ή όχι ενώ με το κέρδος sw3 βγάζουμε εκτός προσομοίωσης το anti-windup scheme. Προφανώς, χωρίς κορεσμό δεν θα θέταμε σε λειτουργία το anti-windup scheme οπότε βασική προϋπόθεση λειτουργίας του anti-windup scheme είναι η λειτουργία του κορεσμού. Στην προσομοίωση υπάρχουν περισσότερο για να μπορούμε ανα πάσα στιγμή να ανατρέξουμε σε προσομοιώσεις πριν τον κορεσμό και για μία συγκεκριμένη δοκιμή που μπορεί να θέλουμε να δούμε έλεγχο ρεύματος με κορεσμό αλλά χωρίς anti-windup. Επιπλέον, όσον αφορά τον κορεσμό της τάσης αναφοράς, η υλοποίηση που φαίνεται βασίζεται στις εξισώσεις που αναφέραμε παραπάνω, οι οποίες βγάζουν απευθείας την κορεσμένη τάση χωρίς την χρήση κάποιου saturation block. Για την συγκεκριμένη περίπτωση δουλεύει καθώς ξέρουμε απευθείας τον τύπο, όμως σε άλλες περιπτώσεις συνήθως ξέρουμε τα όρια, οπότε εναλλακτικά θα μπορούσαμε να χρησιμοποιήσουμε ένα saturation dynamic block ως εξής:



το οποίο είναι και υπολογιστικά πιο εύκολο για το simulink.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με κορεσμό τάσης και με προστασία έναντι συσσώρευσης ολοκληρωτικού σφάλματος παρουσιάζονται παρακάτω.



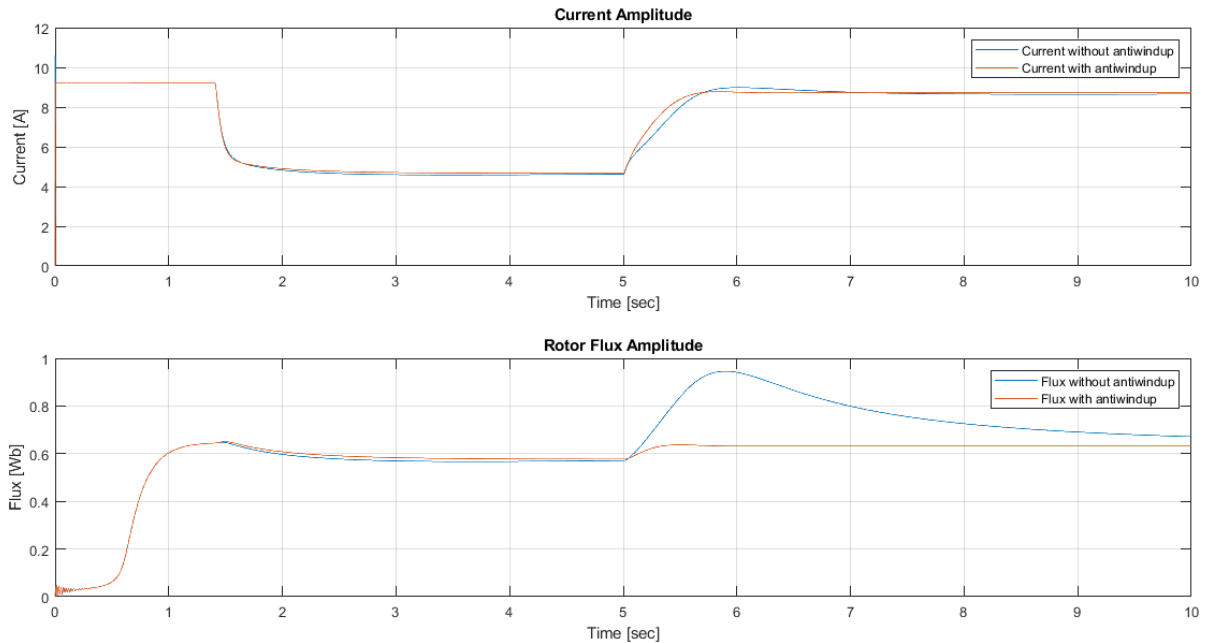


Σχήμα 16: Σύγκριση αποτελεσμάτων για έλεγχο με κορεσμό και με anti-windup

Παρατηρούμε πως οι ταχύτητα πλέον επιδέχεται κάποιο βαθμό ελέγχου αν και πάλι στις δοκιμές φαίνεται στο κενό φορτίο να ξεπερνάει την σύγχρονη και στην σύνδεση ονομαστικού φορτίου να πέφτει αρκετά πιο κάτω από την ονομαστική. Η ροπή αρχικά αυξάνεται κατά την εκκίνηση και στην συνέχεια όταν η ταχύτητα έχει αποκτήσει κάποια τιμή μηδενίζεται. Στην σύνδεση ονομαστικού φορτίου παρατηρούμε πως η ροπή φτάνει στην ονομαστική της τιμή.

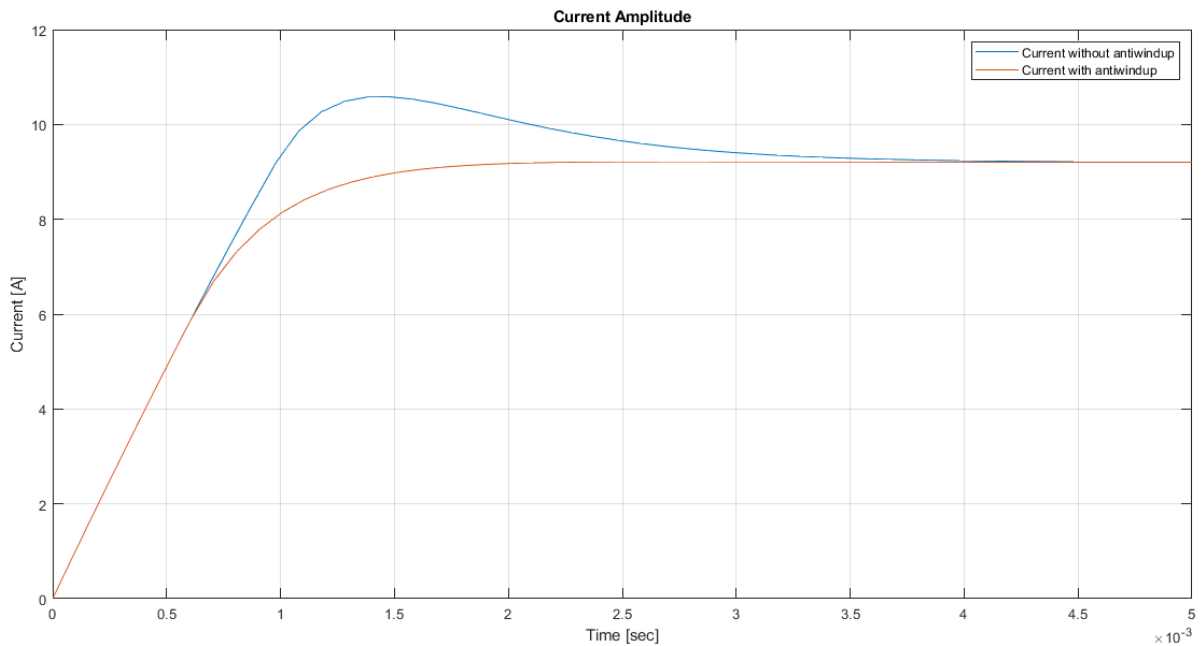
Επιπλέον, η ροή παρατηρούμε να κάνει ένα overshoot στην εκκίνηση της μηχανής και στην συνέχεια να φθίνει σε μια τιμή μικρότερη από αυτήν που είχαμε υπολογίσει για κενό φορτίο, ενώ κατά την σύνδεση ονομαστικού φορτίου βλέπουμε την ροή να ξανακάνει ένα

overshoot και να προσεγγίζει πολύ περισσότερο την εκτίμηση $\hat{\psi} = 0.62 \text{ Wb}$. Να σημειώσουμε εδώ πως χωρίς την προστασία από συσσώρευση ολοκληρωτικού σφάλματος η ροή κάνει ένα πολύ μεγάλο overshoot και αργεί υπερβολικά πολύ να προσεγγίσει την τιμή $\hat{\psi}$, όπως φαίνεται παρακάτω στην σύγκριση των δύο προσομοιώσεων. Τέλος, παρουσιάστηκε και η κορεσμένη τάση η οποία επαληθεύουμε πως έχει μέγιστη τιμή την ονομαστική.



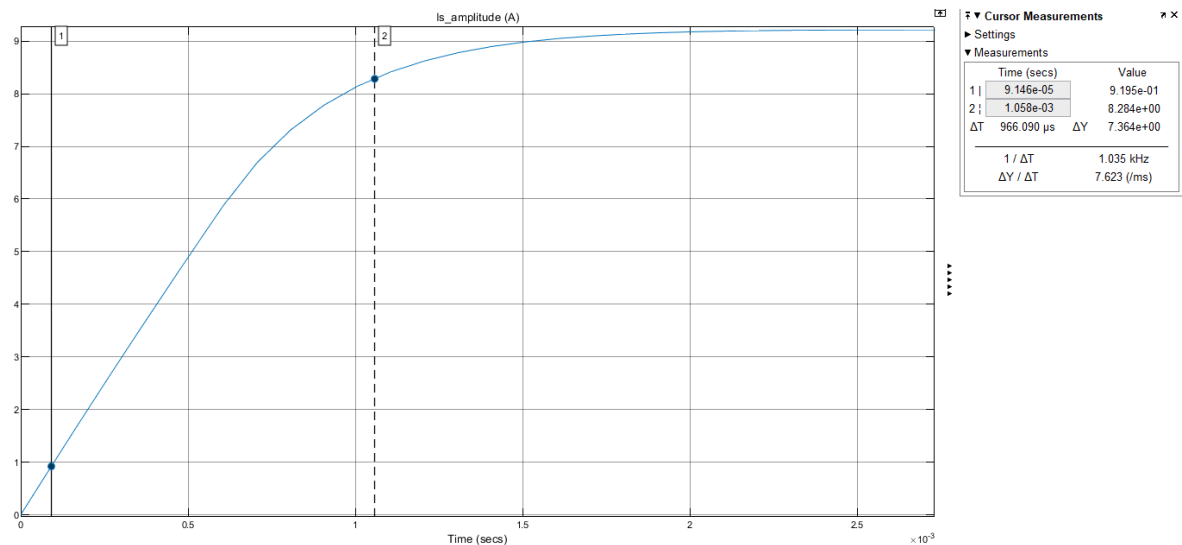
Αυτά τα αποτελέσματα μας προειδοποιούν πως η εκτίμηση της ροής που έχουμε υλοποιήσει δεν είναι ιδανική και θα πρέπει να αναζητήσουμε ένα μοντέλο που θα μπορεί να εκτιμήσει καλύτερα την ροή του δρομέα.

Τέλος, όσον αφορά το ρεύμα παρατηρούμε πως το ρεύμα στον στάτη προσεγγίζει την αναμενόμενη τιμή για κενό φορτίο και για ονομαστικό με μικρές αποκλίσεις, ενώ παράλληλα είναι αισθητά κάποια overshoot όταν δεν γίνεται χρήση του anti-windup σχήματος συνοδευόμενα με μια καθυστέρηση στην επιβολή της μόνιμης κατάστασης για το ρεύμα. Κάνοντας ένα ζουμ στην εκκίνηση λαμβάνουμε την εξής κυματομορφή για το ρεύμα:



Σχήμα 17: Σύγκριση αποτελεσμάτων για έλεγχο με κορεσμό και με anti-windup

ενώ με την χρήση των κερσόρων μπορούμε να μετρήσουμε τον χρόνο ανόδου ο οποίος φαίνεται παρακάτω:



Σχήμα 18: Χρόνος ανόδου ρεύματος

και ταυτίζεται με τον επιλεγμένο χρόνο του 1 ms . Στο σχήμα 17 έχουμε αντιπαραθέσει και τα αποτελέσματα του ρεύματος αν δεν είχαμε το anti-windup scheme προκειμένου να επαληθεύσουμε ένα μικρό overshoot στην εκκίνηση της μηχανής.

Συνεπώς, παρατηρούμε πως χρειαζόμαστε μια καλύτερη προσέγγιση για την ροή και την ανι-ΗΕΔ προκειμένου να βελτιώσουμε τον έλεγχο του ρεύματος, ο οποίος να μην λειτουργεί σωστά αλλά δυστυχώς έχει μικρές αποκλίσεις από τα αναμενόμενα αποτελέσματα.