



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
& ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ
ΜΗΧΑΝΩΝ: ΜΟΝΤΕΛΟ ΡΕΥΜΑΤΟΣ -
ΒΕΛΤΙΩΜΕΝΟΣ ΔΙΑΝΥΣΜΑΤΙΚΟΣ
ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΗΧΑΝΗΣ ΕΠΑΓΩΓΗΣ

ΛΟΥΚΑΣ ΚΟΥΤΣΟΥΜΠΑΣ
ΑΜ:03117128

1. ΜΟΝΤΕΛΟ ΡΕΥΜΑΤΟΣ

Στο μοντέλο προσομοίωσης της προηγούμενης άσκησης, στην οποία έχουμε υλοποιήσει τον διανυσματικό έλεγχο του ρεύματος με την χρήση ενός ελεγκτή κλειδώματος φάσης(PLL) για την μηχανή με 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:

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

θα προσθέσουμε το μοντέλο ρεύματος χρησιμοποιώντας τον έμμεσο προσανατολισμό πεδίου(IFO). Προκειμένου να υλοποιήσουμε το μοντέλο ρεύματος θα πρέπει πρώτα να βρούμε έναν καλύτερο τρόπο υπολογισμού της εκτίμησης της ροής του δρομέα. Αυτή η καλύτερη εκτίμηση επιτυγχάνεται μέσω της παρακάτω εξίσωσης:

$$\frac{d\hat{\psi}_R}{dt} = \hat{R}_R i_s - \left(\frac{\hat{R}_R}{\hat{L}_M} - j\omega_r \right) \hat{\psi}_R$$

Θεωρώντας, επιπλέον, ότι η ροή έχει μόνο πραγματική συνιστώσα καθώς βρισκόμαστε σε τέλειο προσανατολισμό πεδίου $\psi_q \simeq 0$ η παραπάνω εξίσωση απλοποιείται ως εξής:

$$\frac{d\hat{\psi}_R}{dt} = \hat{R}_R i_d - \frac{\hat{R}_R}{\hat{L}_M} \hat{\psi}_R$$

οπότε στο πεδίο του Laplace λαμβάνουμε:

$$s\hat{\psi}_R = \hat{R}_R(i_d - \frac{\hat{\psi}_R}{\hat{L}_M}) \Rightarrow \hat{\psi}_R = \hat{R}_R(i_d - \frac{\hat{\psi}_R}{\hat{L}_M}) \frac{1}{s}$$

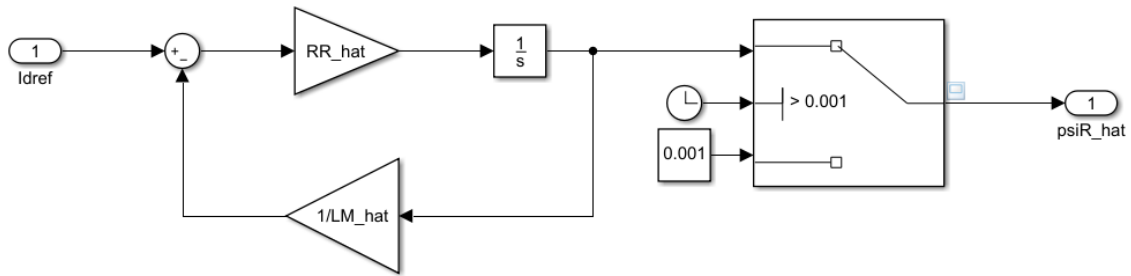
Για να παραλήψουμε τον θόρυβο των μετρήσεων θα αντικαταστήσουμε το ρεύμα με την αναφορά του, οπότε εν τέλει έχουμε:

$$\hat{\psi}_R = \hat{R}_R(i_d^{ref} - \frac{\hat{\psi}_R}{\hat{L}_M}) \frac{1}{s}$$

Για την αναφορά του ρεύματος επιλέγουμε τιμή ως εξής:

$$i_d^{ref} = \frac{\psi_{ref}}{\hat{L}_M}$$

όπου $\psi_{ref} = 0.557 \text{ Wb}$, η τιμή της ροής στο ονομαστικό φορτίο που μπορέσαμε να μετρήσουμε στα πλαίσια της προηγούμενης άσκησης και $\hat{L}_M = L_M = 0.1237 \text{ H}$. Η υλοποίηση της εκτίμησης της ροής σύμφωνα με τις ανωτέρω εξισώσεις φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 1: Εκτίμηση της ροής του δρομέα

Ο διακόπτης που φαίνεται στο σχήμα προφυλάσσει την προσομοίωση μας από διαιρέσεις με το μηδέν καθώς η υλοποίηση της εκτίμησης της ροής θα ξεκινούσε από $\hat{\psi}_R = 0$.

Στην συνέχεια πρέπει να υλοποιήσουμε την αναφορά του ρεύματος στον άξονα q. Επομένως, σε αυτό το στάδιο κατασκευάζουμε τον ελεγκτή ταχύτητας που περιγράφεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$i_{q,nom}^{ref} = k_{ps} e_s + k_{is} e_s - b_a \omega_r$$

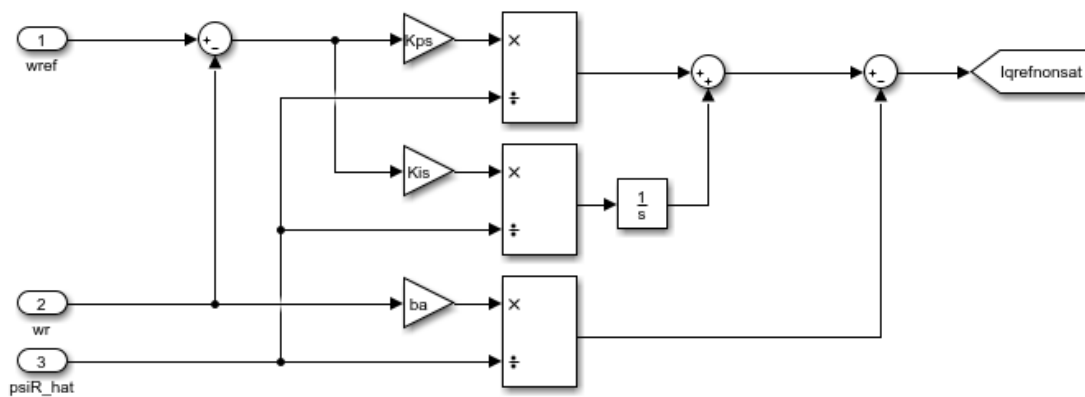
όπου e_s το σφάλμα μεταξύ της ταχύτητας αναφοράς και της ω_r , b_a η ενεργός απόσβεση και k_{ps} , k_{is} το αναλογικό και ολοκληρωτικό κέρδος του PI ελεγκτή αντίστοιχα.

Σε αυτό το σημείο επιλέγουμε το φορτίο με το οποίο θα γίνουν οι δοκιμές μας, το οποίο θα είναι ανάλογο της ταχύτητας και επομένως θα είναι της μορφής $\tau_L = b\omega_r$ όπου

θέτοντας στην προηγούμενη εξίσωση $\tau_L^N = 26.8 \text{ Nm}$, $\omega_r^N = 302.4 \text{ rad/sec}$ προκύπτει $b = 0.0886$. Επιπλέον, θέτουμε $\omega_{ref} = \omega_r^N = 302.4 \text{ rad/sec}$ και επιθυμούμε χρόνο ανόδου για την ταχύτητα στην τάξη του δευτερολέπτου, οπότε προκύπτει το εύρος ζώνης ανοιχτού βρόχου $\alpha_s = \ln 9 / t_{rs} = \ln 9 / 1 = 2.197 \text{ rad/sec}$, τα κέρδη του ελεγκτή:

$$k_{ps} = \frac{2K^2\alpha_s\hat{J}}{3n_p^2\hat{\psi}_R}, k_{is} = \frac{2K^2\alpha_s^2\hat{J}}{3n_p^2\hat{\psi}_R}$$

και η ενεργός απόσβεση $b_a = \frac{2K^2(\alpha_s\hat{J}-b)}{3n_p^2\hat{\psi}_R}$. Η υλοποίηση στο περιβάλλον του simulink φαίνεται παρακάτω.



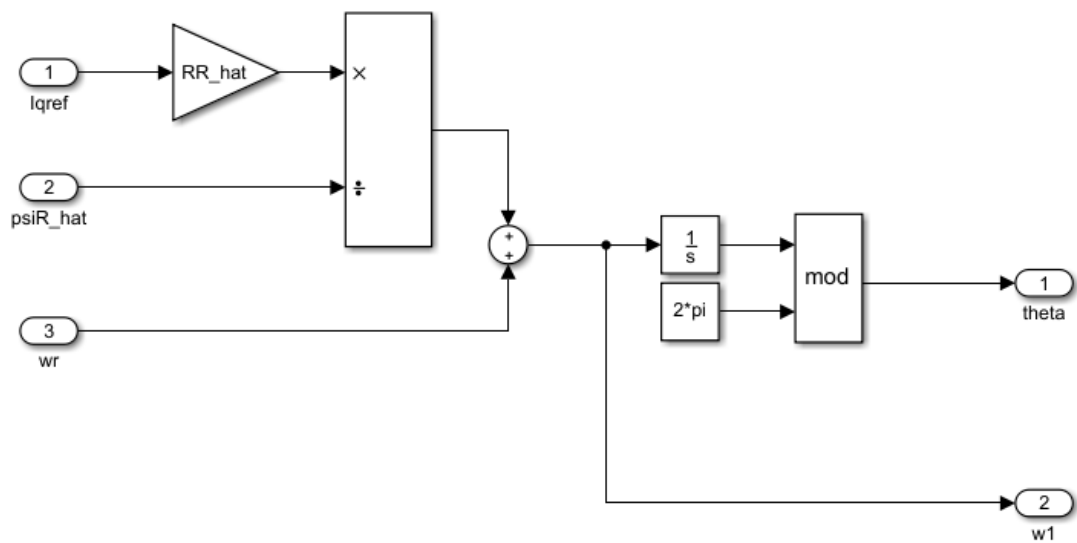
Σχήμα 2: Speed Control

Τα gain μπλοκ k_{ps} , k_{is} , b_a που φαίνονται έχουν τις παραπάνω τιμές των κερδών έτοιμες από το workspace του matlab χωρίς όμως το $\hat{\psi}_R$ στους παρανομαστές τους προκειμένου να αξιοποιήσουμε την τιμή της $\hat{\psi}_R$ που κατασκευάσαμε παραπάνω.

Εχοντας υλοποιήσει τον ελεγκτή ταχύτητας μπορούμε τώρα να κατασκευάσουμε το μοντέλο ρεύματος με βάση την εξίσωση του, η οποία είναι η εξής:

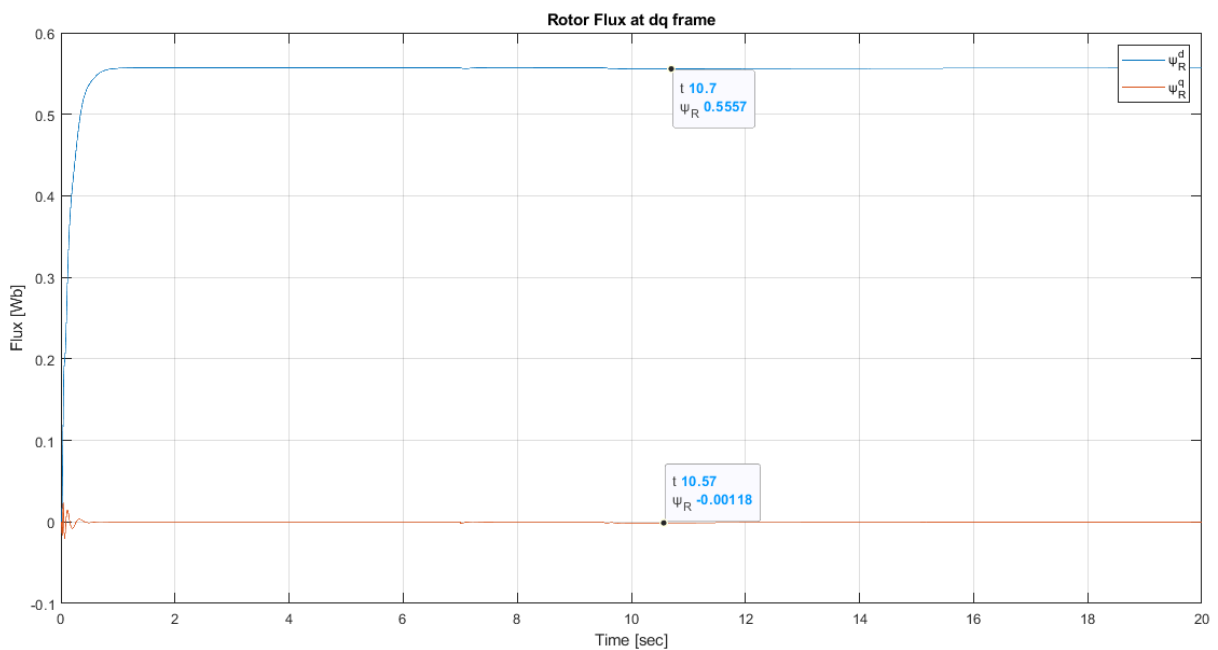
$$\omega_1 = \omega_r + \frac{\hat{R}_R^{ref} i_q}{\hat{\psi}_R}$$

Σαν εκτίμηση για την αντίσταση δρομέα θα χρησιμοποιήσουμε την πραγματική τιμή, δηλαδή $\hat{R}_R = R_R = 0.8197 \Omega$. Προκύπτει, λοιπόν, η παρακάτω υλοποίηση στο περιβάλλον της προσομοίωσης.

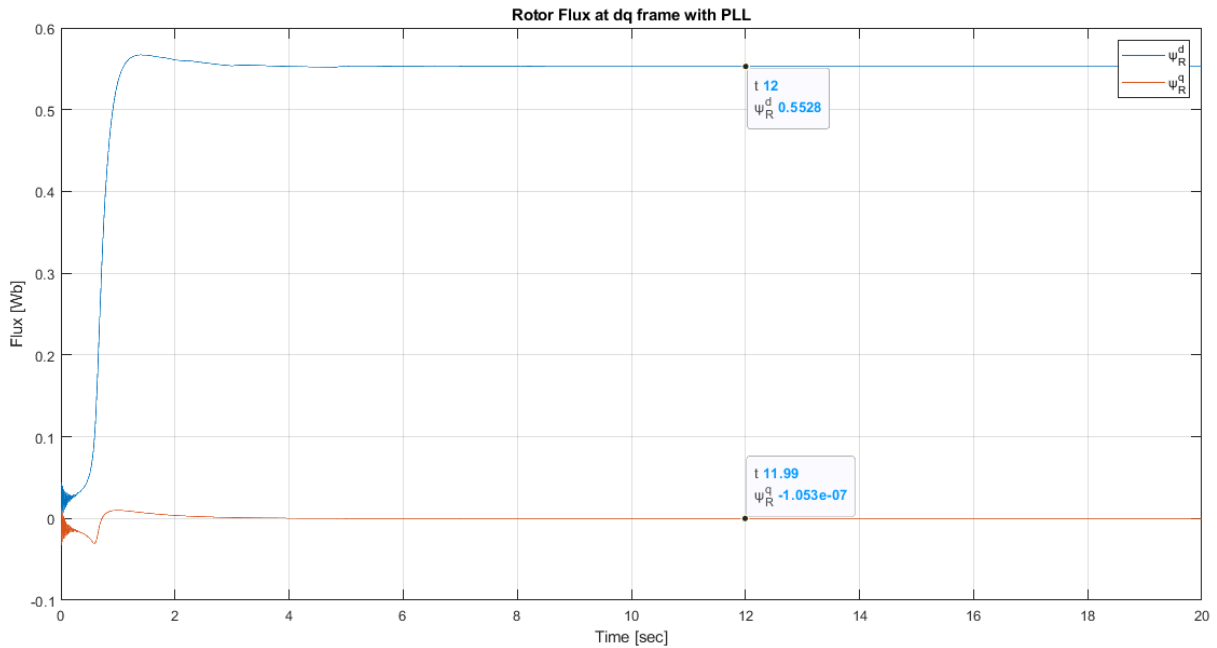


Σχήμα 3: Current Model

Με την νέα γωνία θ που παράξαμε μέσω της ω_1 μπορούμε να μετασχηματίσουμε τις συνιστώσες της ροής στο dq frame όπως είχαμε κάνει και με την γωνία που παρήγαγε το PLL. Κάνοντας, λοιπόν αυτόν τον μετασχηματισμό θα προκύψουν τα εξής για την ροή.



Σχήμα 4: Ροή στο dq frame - Επαλήθευση Perfect Field Orientation

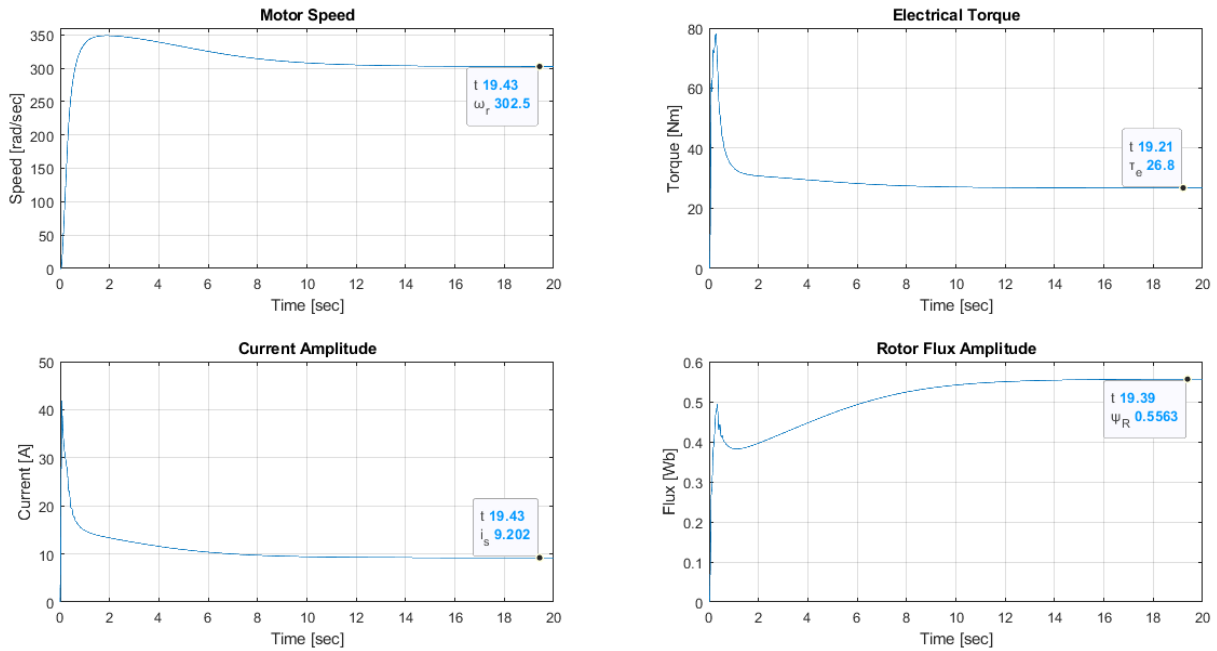


Σχήμα 5: Ροή στο dq frame με PLL

Παρατηρούμε πως η συνιστώσα d πλησιάζει την εκτίμηση μας για την ροή, ενώ η συνιστώσα q είναι σχεδόν μηδενική. Αυτή η πολύ μικρή απόκλιση που φαίνεται μάλλον οφείλεται σε σφάλμα της προσομοίωσης και όχι στην εκτίμηση της ροής, παρόλα αυτά δεν δημιουργεί προβλήματα στον τέλειο προσανατολισμό πεδίου. Συνεπώς, ο τέλειος προσανατολισμός πεδίου που φτιάξαμε στην προηγούμενη άσκηση συνεχίζει να ισχύει και για το μοντέλο ρεύματος. Συγκρίνοντας, επίσης τις συνιστώσες της ροής για υλοποίηση με PLL και για υλοποίηση με Current Model παρατηρούμε πως κάνοντας χρήση του PLL έχουμε πολύ πιο ακριβή αποτελέσματα και πολύ μικρότερο σφάλμα στην συνιστώσα q όσον αφορά τον τέλειο προσανατολισμό του πεδίου. Όμως, η κατασκευή του PLL βασίζεται στην προϋπόθεση πως μετράμε την ροή στον δρομέα, γεγονός που δεν θα μπορούσε να συμβεί σε μια πραγματική μηχανή. Παρόλα αυτά το μοντέλο ρεύματος δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα και δείχνει να αντιμετωπίζει ορισμένα μεταβατικά στην αρχή της προσομοίωσης που εμφανίζονται στην ροή για υλοποίηση με PLL.

Επομένως, γνωρίζοντας πλέον πως λειτουργεί το μοντέλο ρεύματος κάνουμε και τους υπόλοιπους μετασχηματισμούς από dq σε αβ και από αβ σε dq χρησιμοποιώντας την γωνία του current model.

Τέλος, οι έξοδοι της μηχανής έπεται από την χρήση του μοντέλου ρεύματος είναι οι εξής:



Σχήμα 6: Έξοδοι μηχανής με την χρήση του current model

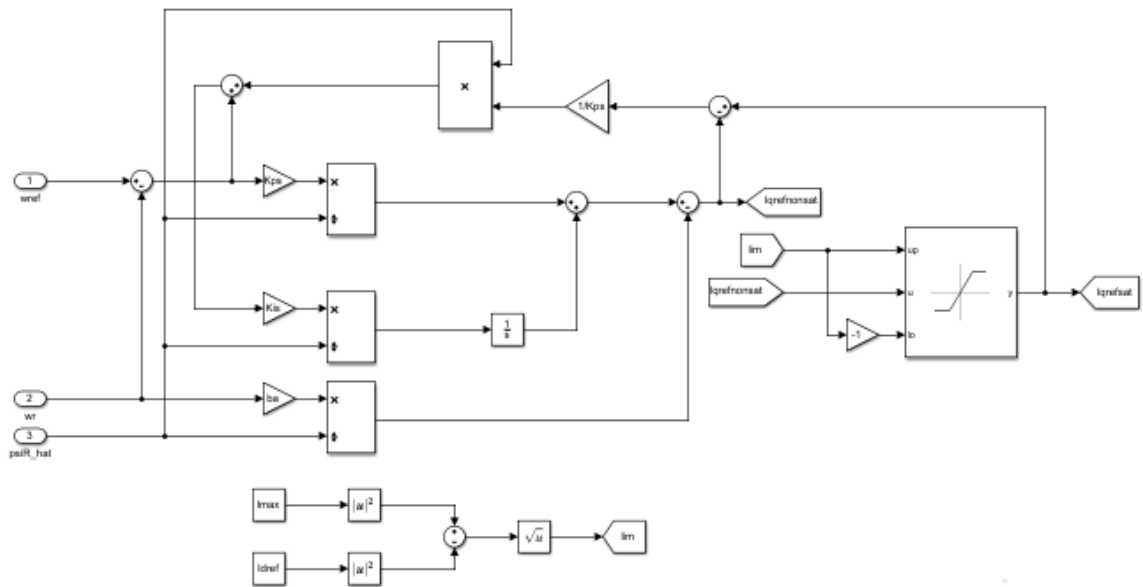
2. ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ

Έχοντας, λοιπόν, υλοποιήσει το μοντέλο ρεύματος και έχοντας επαληθεύσει την ορθή λειτουργία του μπορούμε να κλείσουμε τον βρόχο ελέγχου της ταχύτητας προσθέτοντας saturation στο ρεύμα αναφοράς και προστασία έναντι συσσώρευσης ολοκληρωτικού σφάλματος.

Προκειμένου να περιορίσουμε το ρεύμα θα πρέπει να ορίσουμε την μέγιστη τιμή του. Επιλέγουμε λοιπόν, $I_{max} = 15 A$, τιμή περίπου 1.5 φορές μεγαλύτερη της ονομαστικής. Συνεπώς, ο περιορισμός της αναφοράς του ρεύματος για την συνιστώσα q θα γίνει με βάση την παρακάτω εξίσωση:

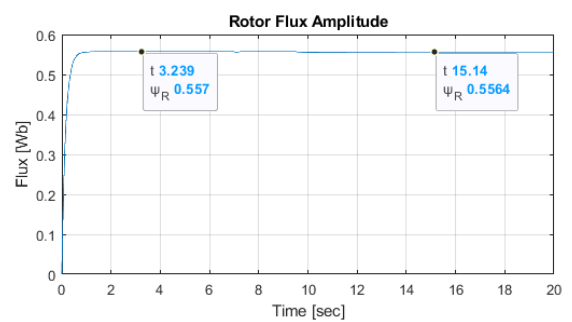
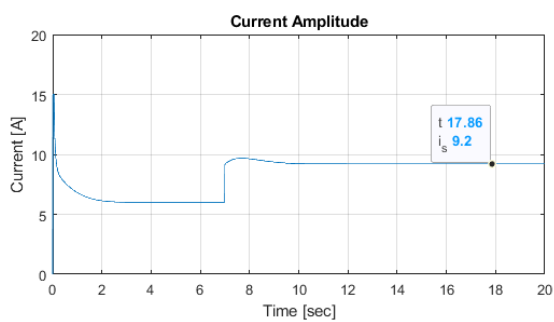
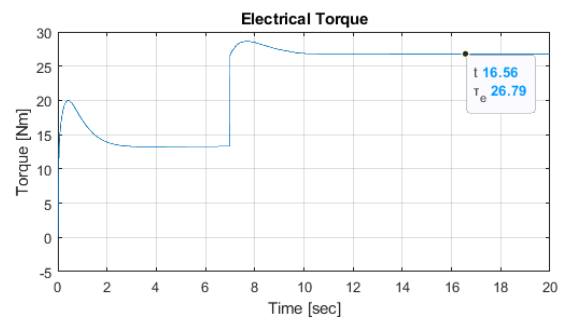
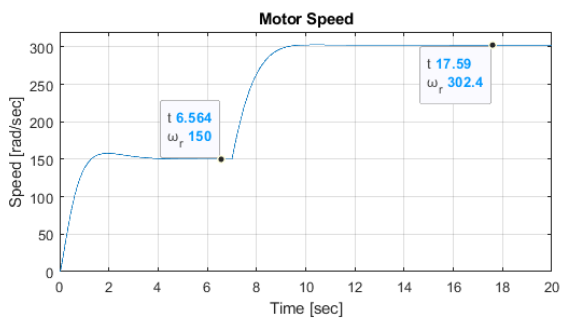
$$i_q^{ref} = sat(i_{q,nom}^{ref}, \sqrt{I_{max}^2 - i_{d,ref}^2})$$

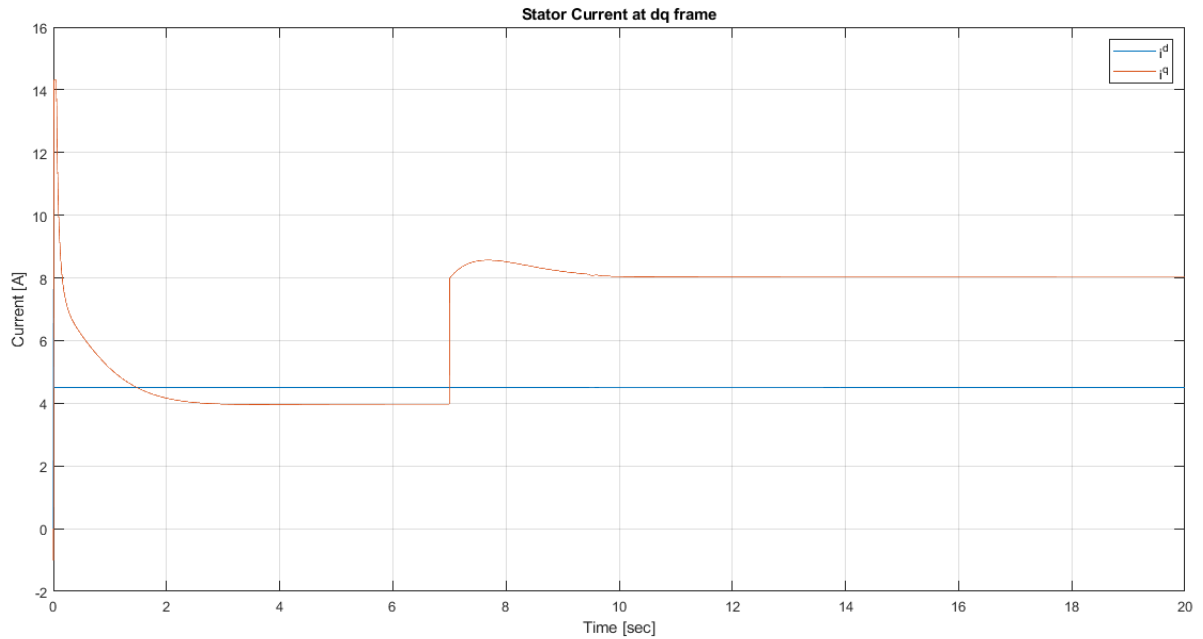
Οπότε το συνολικό μοντέλο του ελεγκτή ταχύτητας φαίνεται παρακάτω στο περιβάλλον του simulink.



Σχήμα 7: Speed Control with saturation and anti windup

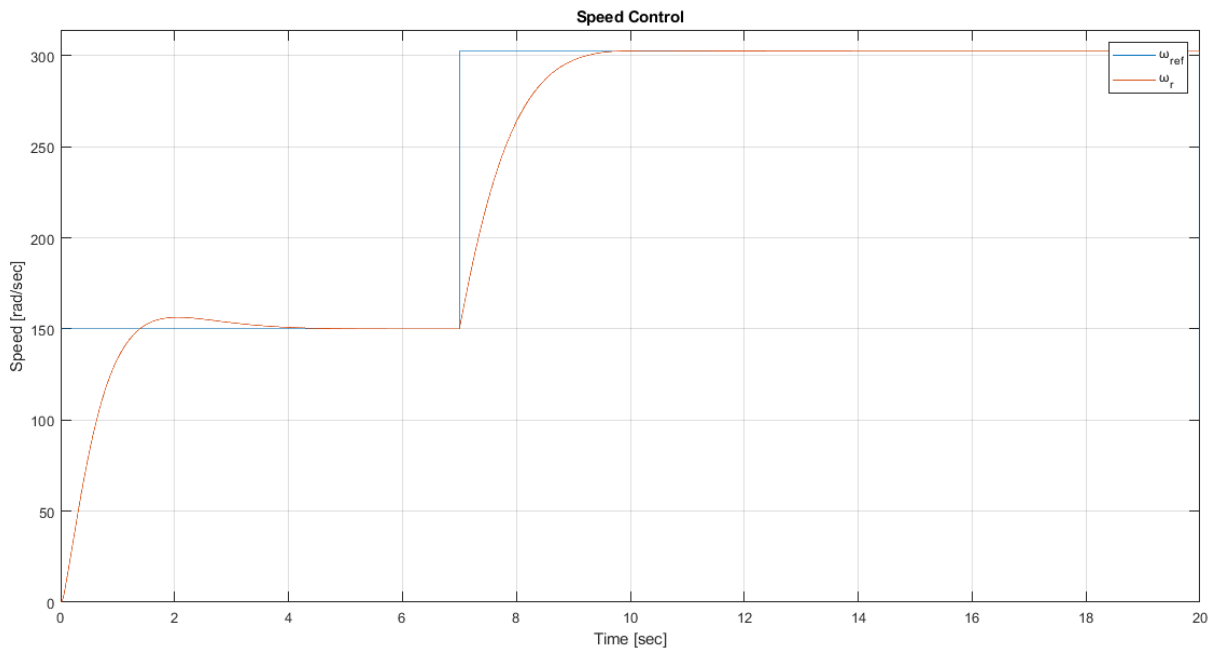
Επιπλέον, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για μια βηματική αλλαγή της ταχύτητας αναφοράς.





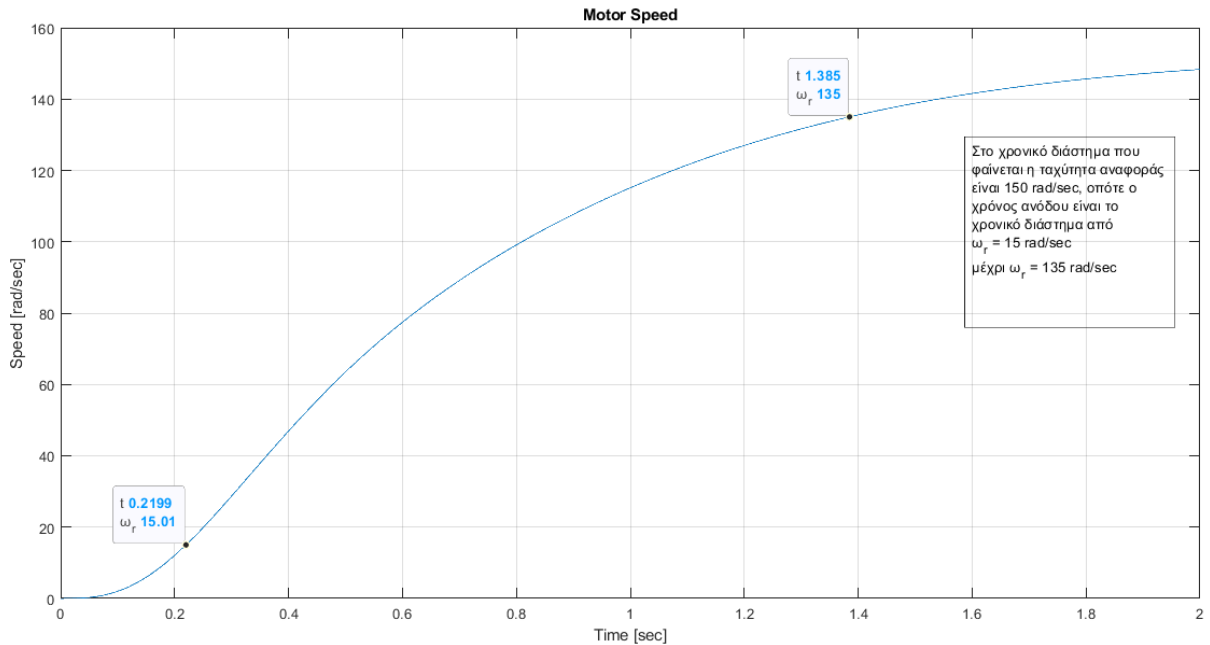
Σχήμα 8: Προσομοίωση για βηματική μεταβολή της ταχύτητας αναφοράς

Παρατηρούμε πως η μηχανή ανταποκρίνεται στις βηματικές μεταβολές της ταχύτητας διατηρώντας σταθερή την ροή του δρομέα με μια πολύ μικρή πτώση με την πάροδο του χρόνου. Ιδιαίτερα στο χρονικό διάστημα που ορίζουμε $\omega_{ref} = \omega_r^N = 302.4 \text{ rad/sec}$ επαληθεύεται ονομαστικό ρεύμα και ονομαστική ροπή. Ταυτόχρονα αναλύοντας το ρεύμα σε συνιστώσες παρατηρούμε την συνιστώσα d να έχει καθόλη την διάρκεια της προσομοίωσης σταθερή τιμή και την συνιστώσα q να μεταβάλλεται όταν μεταβάλλεται και η ταχύτητα και επομένως η ροπή (φορτίο ανάλογο της ταχύτητας). Παρακάτω φαίνεται η βηματική απόκριση της ταχύτητας αναφοράς σε σύγκριση με την ταχύτητα ω_r .



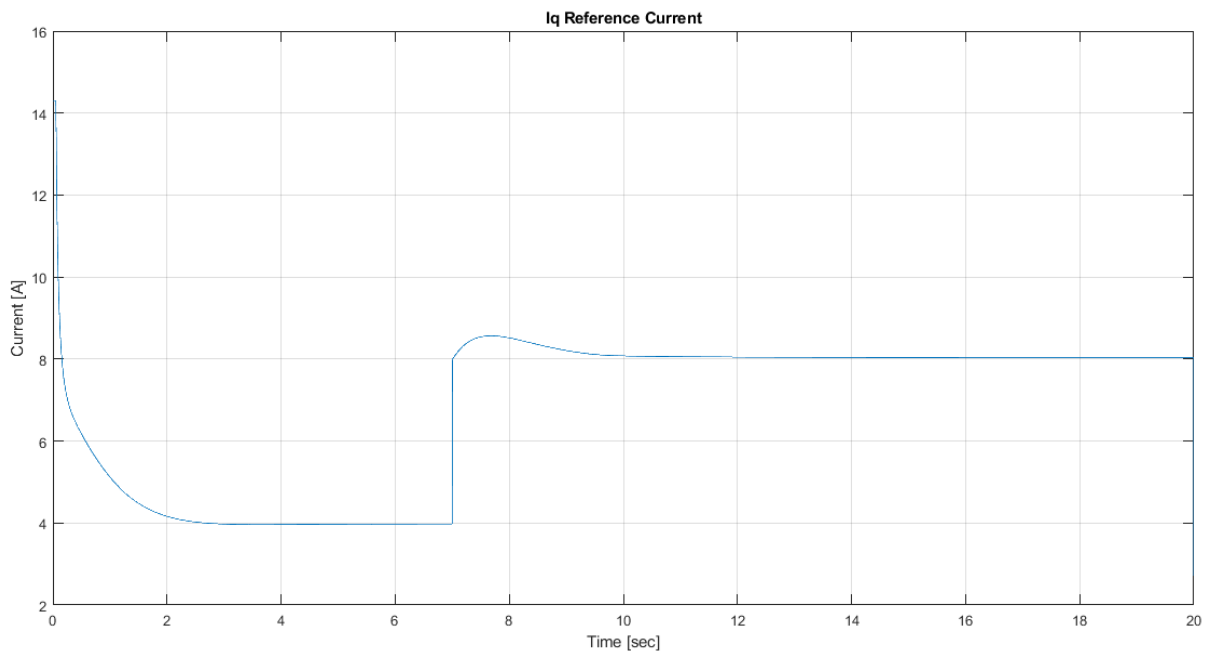
Σχήμα 9: Σύγκριση ω_{ref} , ω_r

Βλέπουμε πως η ταχύτητα ακολουθεί την αναφορά της και κάνοντας ζουμ στην αρχή του χρόνου προσομοίωσης λαμβάνουμε την εξής εικόνα:



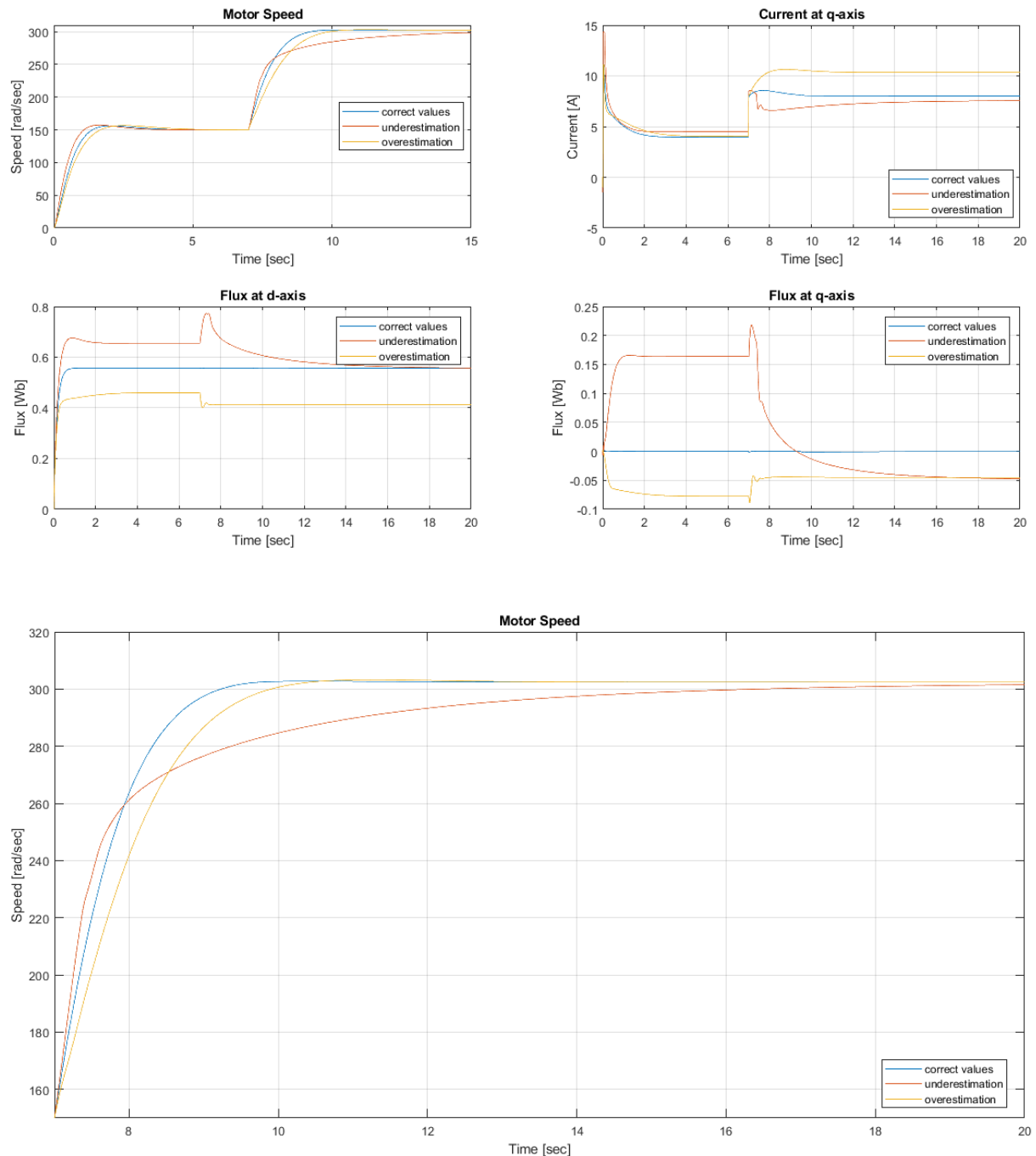
Σχήμα 10: Επαλήθευση χρόνου ανόδου

οπότε επαληθεύεται ο επιθυμητός χρόνος ανόδου για την ταχύτητα. Τέλος, η αναφορά της συνιστώσας q του ρεύματος παρουσιάζεται παρακάτω.



3. ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ

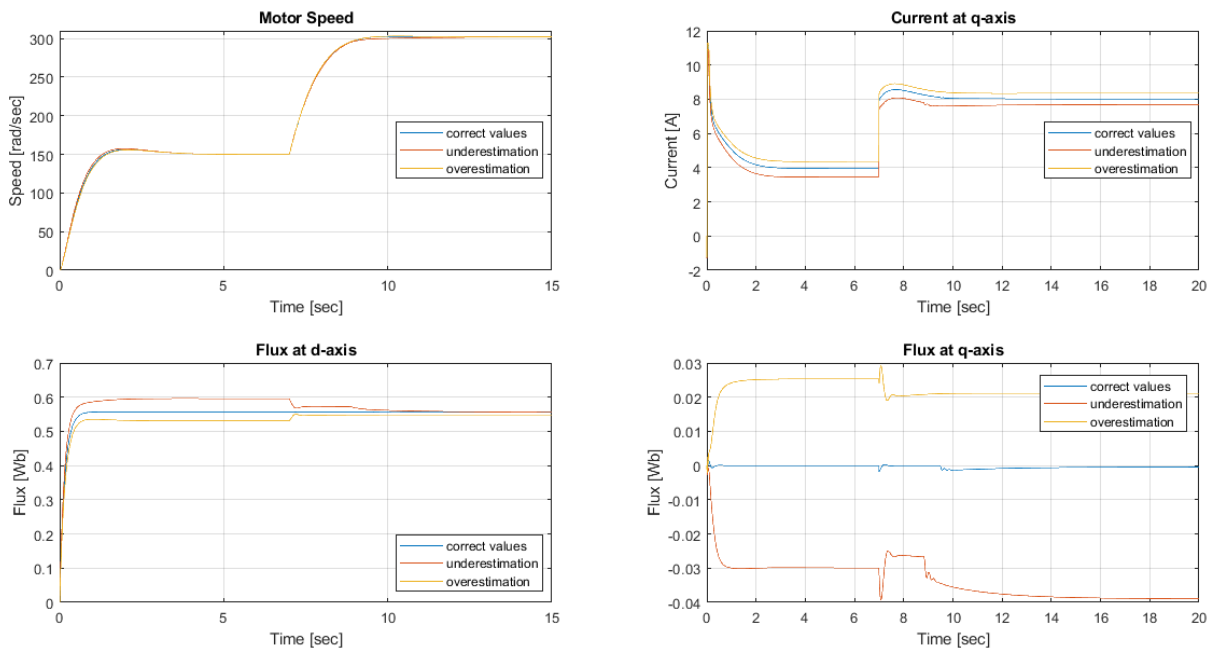
Για να επιβεβαιώσουμε την ευαισθησία του current model αρκεί να αλλάξουμε την τιμή της εκτίμησης \hat{R}_R . Συγκεκριμένα, εκτελούμε δοκιμές για υποεκτίμηση ($\hat{R}_R = 0.6R_R$) και υπερεκτίμηση ($\hat{R}_R = 1.4R_R$) της R_R . Τα αποτελέσματα για την ταχύτητα, την ροή και την συνιστώσα q του ρεύματος φαίνονται παρακάτω.

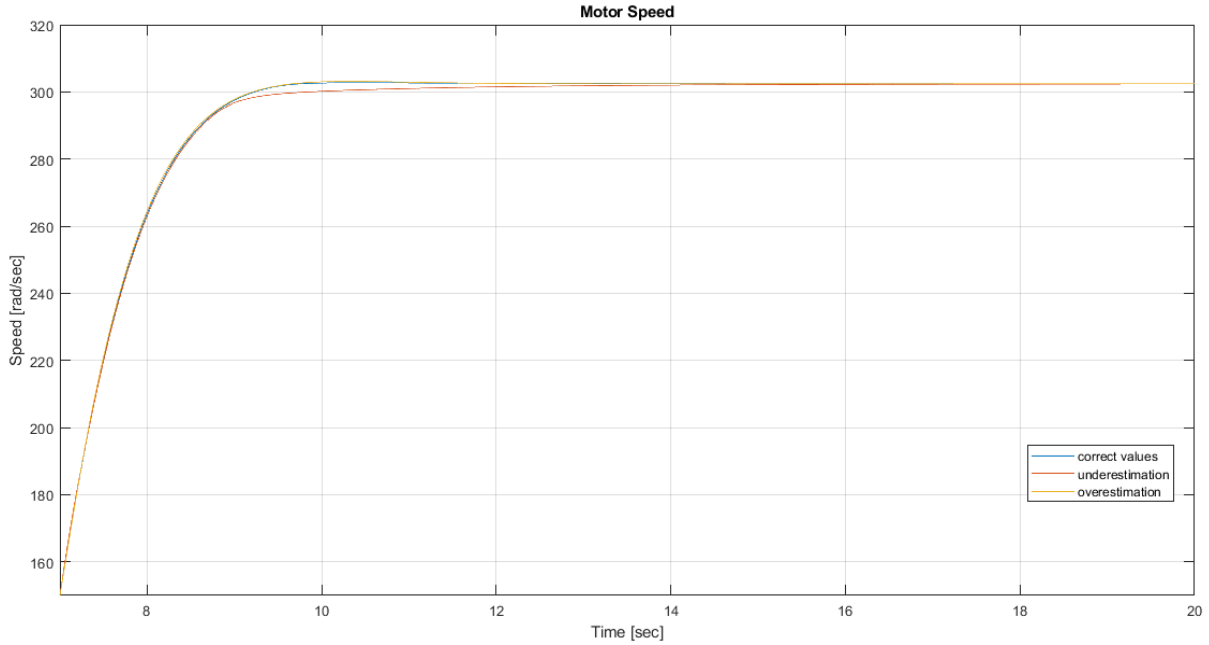


Σχήμα 11: Ευαισθησία μοντέλου ρεύματος στην αντίσταση δρομέα

Παρατηρούμε πως και στις δύο περιπτώσεις χάνεται ο τέλειος προσανατολισμός πεδίου και οι συνιστώσες της ροής δεν ταυτίζονται με αυτές όπου έχουμε σωστή εκτίμηση της αντίστασης δρομέα. Επιπλέον, στις λάθος εκτιμήσεις η ταχύτητα καθυστερεί να φτάσει την αναφορά της σε σχέση με την δοκιμή για σωστή εκτίμηση αντίστασης. Μεταξύ των δύο, όμως, η υπερεκτίμηση φαίνεται να πλησιάζει περισσότερο την απόκριση της μηχανής με σωστή εκτίμηση στην R_R .

Επαναλαμβάνουμε τις παραπάνω δοκιμές μεταβάλλοντας τώρα την εκτίμηση της αυτεπαγωγής μαγνήτισης (\hat{L}_M) και κρατώντας σωστή την εκτίμηση \hat{R}_R , οπότε η σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ υποτίμησης ($\hat{L}_M = 0.9L_M$) και υπερεκτίμησης ($\hat{L}_M = 1.1L_M$) σε σχέση με την σωστή εκτίμηση είναι η εξής:





Σχήμα 12: Ευαισθησία μοντέλου ρεύματος στην αυτεπαγωγή μαγνήτισης

Βλέπουμε πως η ευαισθησία του μοντέλου ρεύματος στην αυτεπαγωγή μαγνήτισης είναι μικρότερη από ότι στην αντίσταση δρομέα καθώς και η υπερεκτίμηση και η υποεκτίμηση δεν αλλάζουν την απόκριση της ταχύτητας ιδιαίτερα σε σχέση με την σωστή εκτίμηση της αυτεπαγωγής μαγνήτισης. Αυτό συμβαίνει διότι η αυτεπαγωγή μαγνήτισης παίζει σημαντικό ρόλο στην κατασκευή του ρεύματος αναφοράς i_d^{ref} , γεγονός που δεν επηρεάζει την ταχύτητα ή την ροπή της μηχανής αφού η αρχική μας σύμβαση για τον τέλειο προσανατολισμό πεδίου είναι η συνιστώσα d να ρυθμίζει το πεδίο και η συνιστώσα q την ροπή. Παρατηρούμε την συνιστώσα q της ροής να πλησιάζει περισσότερο την τιμή μηδέν χωρίς φυσικά όμως να την επιτυγχάνει.

4. ΒΕΛΤΙΩΜΕΝΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΡΕΥΜΑΤΟΣ

Η ευαισθησία του current model που διαπιστώθηκε στο προηγούμενο ερώτημα δημιουργεί την ανάγκη για ένα βελτιωμένο μοντέλο ρεύματος. Για την επίτευξη αυτού του βελτιωμένου μοντέλου θα γυρίσουμε στην λογική του PLL τροποποιώντας αυτή την φορά την εκτίμηση της αντί-ΗΕΔ και χρησιμοποιώντας σαν $\hat{\omega}_g = \omega_r + \frac{\hat{R}_R i_q^{ref}}{\hat{\psi}_R}$, την έξοδο δηλαδή του μοντέλου ρεύματος που έχουμε ήδη υλοποιήσει. Όσον αφορά την εκτίμηση \hat{E}_d θα χρησιμοποιήσουμε την εξής εξίσωση:

$$\hat{E} = v_s - (\hat{R}_s + j\omega_1 \hat{L}_\sigma) i_s - \hat{L}_\sigma \frac{di_s}{dt}$$

όπου αναλύοντας σε συνιστώσες d,q και θεωρώντας τον βρόχο ελέγχου του ρεύματος γρηγορότερο από την δυναμική της ροής (αγνοώντας δηλαδή τον όρο $\hat{L}_\sigma \frac{di_s}{dt}$) λαμβάνουμε την εξής εξίσωση:

$$\hat{E}_d = \hat{u}_d^{ref} - \hat{R}_s \hat{i}_d^{ref} + \omega_1 \hat{L}_\sigma \hat{i}_q^{ref}$$

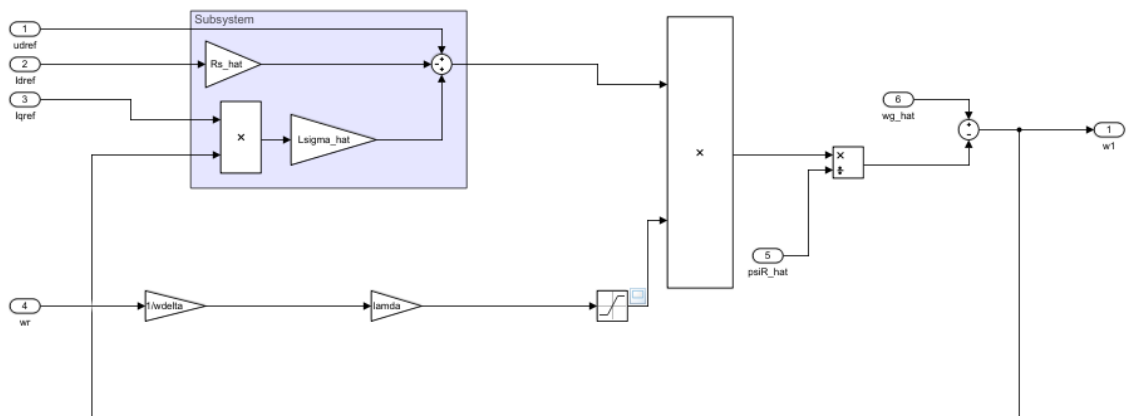
Χρησιμοποιούνται και πάλι οι αναφορές των μεγεθών για αποφυγή θορύβου μετρήσεων. Επομένως, το βελτιωμένο μοντέλο ρεύματος θα ακολουθεί την παρακάτω εξίσωση.

$$\omega_1 = \omega_r + \frac{\hat{R}_s \hat{i}_q^{ref}}{\hat{\psi}_R} - \frac{\lambda_s}{\hat{\psi}_R} \hat{E}_d$$

όπου το $\frac{\lambda_s}{\hat{\psi}_R}$ αποτελεί το αναλογικό κέρδος που θα είχαμε στην εξίσωση του PLL (ο ολοκληρωτικός όρος παραλείπεται). Η υλοποίηση του κέρδους λ_s θα γίνει περιορίζοντας το ως εξής:

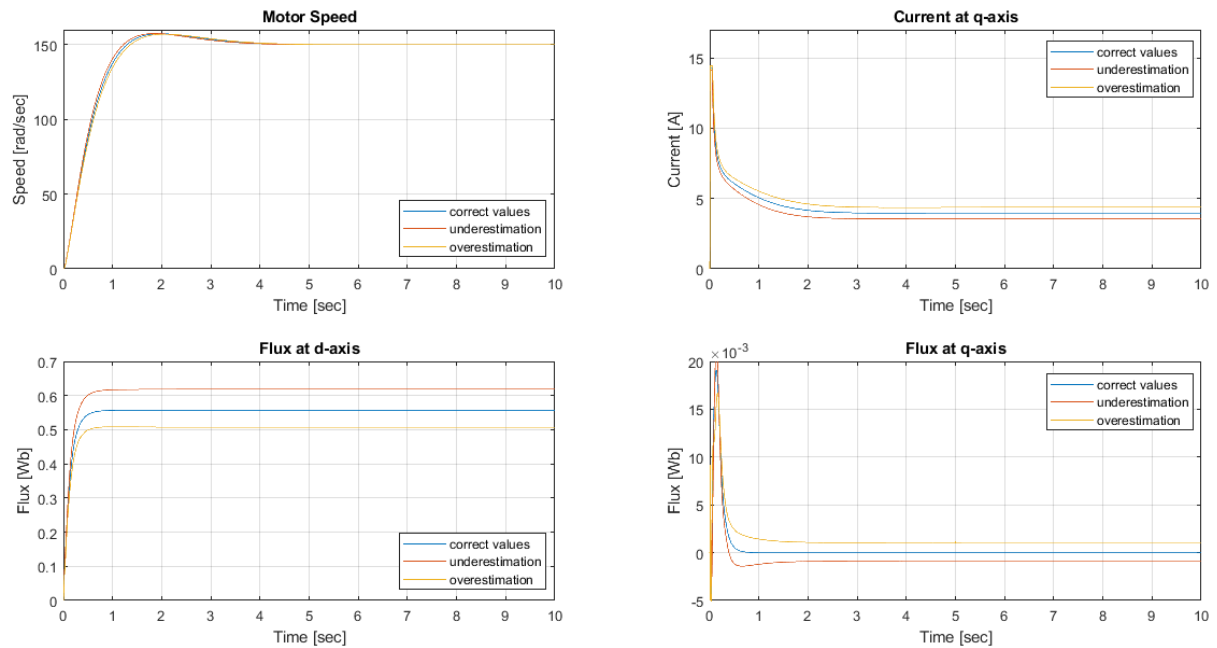
$$\lambda_s = \text{sat}\left(\lambda \frac{\omega_r}{\omega_\Delta}, \lambda\right)$$

επιλέγοντας αυθαίρετα $\lambda = 2, \omega_\Delta = 0.2\omega_r^N$. Σκοπός του λ_s είναι να επιταχύνει την δυναμική κατάσταση της q συνιστώσας της ροής ώστε να επιτυγχάνεται τέλειος προσανατολισμός πεδίου. Συνεπώς, η υλοποίηση του modified current model στο περιβάλλον του simulink θα είναι η εξής:

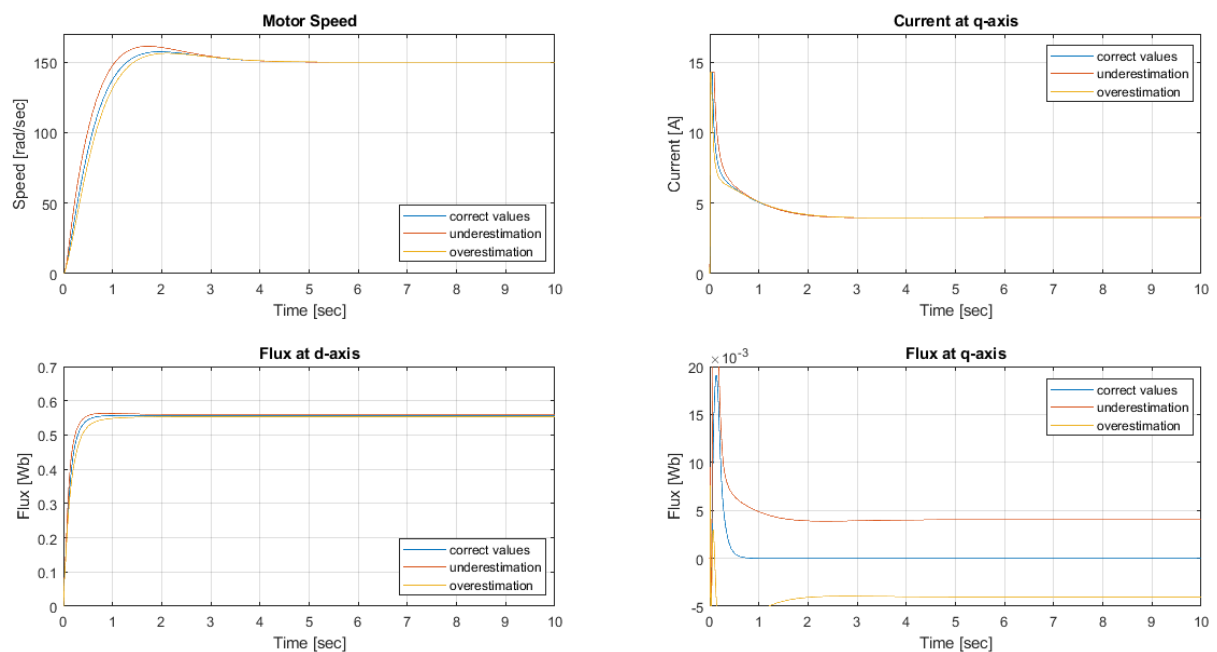


Σχήμα 13: Modified Current Control

Κάνοντας ακριβώς τις ίδιες προσομοιώσεις όπως και στο ερώτημα 3 με ταχύτητα αναφοράς $\omega_{ref} = 150 \text{ rad/sec}$ λαμβάνουμε τα εξής αποτελέσματα για το τροποποιημένο μοντέλο ρεύματος:



Σχήμα 14: Υπερεκτίμηση και υποεκτίμηση αυτεπαγωγής μαγνήτισης

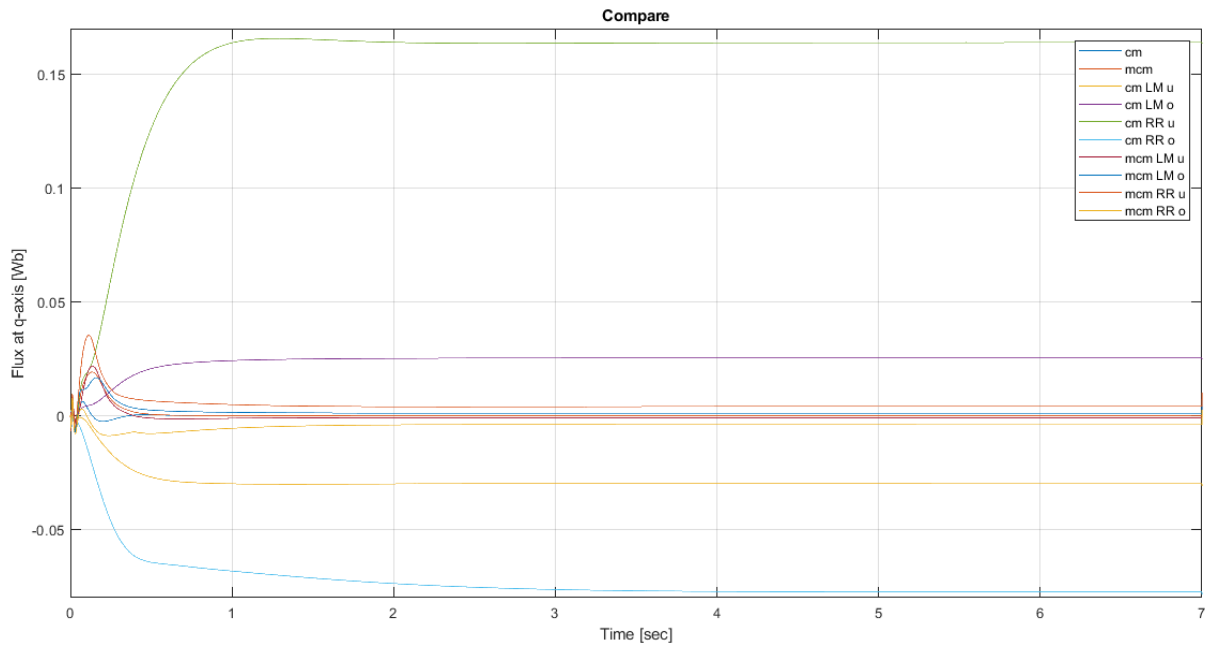


Σχήμα 15: Υπερεκτίμηση και υποεκτίμηση αντίστασης δρομέα

Παρατηρούμε πως πλέον το βελτιωμένο μοντέλο ρεύματος προσφέρει καλύτερα αποτελέσματα για την ροή και την ταχύτητα της μηχανής σε λανθασμένες εκτιμήσεις καθότι είμαστε πάντα αρκετά κοντά στο perfect field orientation και η ταχύτητα έχει σχεδόν παρόμοια απόκριση ανεξαρτήτως εκτίμησης. Μια τελική παρατήρηση που έχουμε να κάνουμε για τις λανθασμένες εκτιμήσεις της αυτεπαγωγής μαγνήτισης είναι πως ενώ έχουμε πολύ καλή απόκριση για την ροή ψ_q , όσον αφορά την ψ_d παρατηρούμε πως αλλάζει αισθητά η τιμή της για λανθασμένες εκτιμήσεις. Αυτό συμβαίνει ακριβώς

επειδή το βελτιωμένο μοντέλο ρεύματος εστιάζει στον τέλει προσανατολισμό του πεδίου με αποτέλεσμα οι αλλαγές στην L_M να μεταφράζονται σαν αλλαγές του “μεγέθους” του πεδίου και επειδή το λ_s επιταχύνει την συνθήκη $\psi_q = 0$ αναγκαστικά τις αλλαγές της αυτεπαγωγής θα της υποστεί το ψ_d .

Συγκριτικά τα αποτελέσματα για την ροή είναι τα εξής:



Σχήμα 16: Ροή για τις διάφορες δοκιμές