

Εργασία Προσομοίωσης 4:

**Διανυσματικός έλεγχος μηχανής επαγωγής, Μοντέλο ρεύματος, Βελτιωμένος
διανυσματικός έλεγχος μηχανής επαγωγής**

Ονοματεπώνυμο: Καραϊνδρου Κωνσταντίνα

Αριθμός μητρώου: 03117098

Εξάμηνο: 8ο - ΣΗΜΜΥ

Ερώτημα 1

Για το ερώτημα αυτό, θεωρούμε πως δεν έχουμε μέτρηση της ροής του δρομέα ψ . Ωστόσο, στην πραγματικότητα, η ποσότητα αυτή δεν είναι εύκολα μετρήσιμη. Στην προηγούμενη άσκηση προσομοίωσης, παίρναμε τη μέτρηση της ροής από το πεδίο $\alpha\beta$, πραγματοποιούσαμε μετασχηματισμό $\alpha\beta \rightarrow dq$ και έπειτα δίνουμε το ψ_q ως είσοδο στον PLL, ο οποίος είναι ένας PI ελεγκτής ο οποίος προσπαθεί να μηδενίσει το ψ_q , ώστε να έχουμε τέλειο προσανατολισμό πάνω στο ψ_d .

Θέλοντας τώρα να υλοποιήσουμε το μοντέλο ρεύματος, οι εξισώσεις που το περιγράφουν φαίνονται παρακάτω:

$$\frac{d\hat{\psi}_R}{dt} = \hat{R}_R \cdot \hat{i}_d - \frac{\hat{R}_R}{\hat{L}_M} \cdot \hat{\psi}_R$$

(9.5)

$$\omega_1 = \omega_r + \frac{\hat{R}_R}{\hat{\psi}_R} \cdot \hat{i}_q \quad (9.6)$$

Αντί του ρεύματος \hat{i}_q , μπορούμε να το αντικαταστήσουμε με το $\hat{i}_{q,ref}$ καθώς θεωρούμε ότι έχει πολύ γρήγορη απόκριση ο ελεγκτής ρεύματος, οπότε δεν έχει κάποια ουσιαστική διαφορά. Ωστόσο το $\hat{i}_{q,ref}$ το ορίζουμε εμείς, και δεν είναι μέτρηση όπως το \hat{i}_q , επομένως με τον τρόπο αυτό δεν έχουμε θόρυβο λόγω μετρήσεων.

Επομένως, η (9.6) γίνεται:

$$\omega_1 = \omega_r + \frac{\hat{R}_R}{\hat{\psi}_R} \cdot \hat{i}_{q,ref} \quad (9.7)$$

Όμοια, και στην (9.5) μπορούμε να αντικαταστήσουμε το ρεύμα i_d με το $i_{d,ref}$ και γίνεται ως

εξής:

$$\frac{d\widehat{\psi}_R}{dt} = \widehat{R}_R \cdot i_{d,ref} - \frac{\widehat{R}_R}{\widehat{L}_M} \cdot \widehat{\psi}_R \quad (9.8)$$

Η (9.8) εφαρμόζοντας μετασχηματισμό Laplace, γίνεται:

$$\widehat{\psi}_R = \frac{1}{s + \frac{\widehat{R}_R}{\widehat{L}_M}} \cdot \widehat{R}_R \cdot i_{d,ref} \quad (1)$$

Επιπλέον, εμείς παράγουμε την ω_1 , οπότε θα χρειαστεί και ολοκλήρωση του ω_1 ώστε να

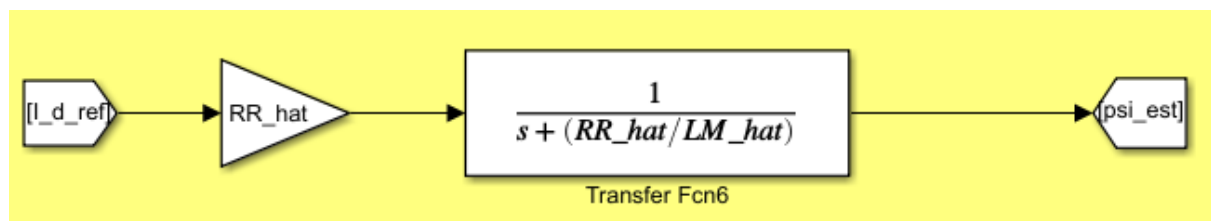
παραχθεί η γωνία $\theta_1 = \int \omega_1$ την οποία θα τροφοδοτούμε για τον μετασχηματισμό $\alpha\beta \leftrightarrow dq$,

αλλά και να πραγματοποιείται $mod(2\pi)$ ώστε να μην έχουμε αριθμητικό overflow.

Για τον σκοπό του παρόντος ερωτήματος αλλά και των υπόλοιπων όπου δεν εξετάζουμε την περιοχή του field weakening, η εκτίμηση της ροής $\widehat{\psi}_R$ συγκλίνει στην $\psi_{R,ref}$ (η οποία μετρήθηκε από την προηγούμενη άσκηση, ότι $\psi_R = 0.7821 Vs$ στην περίπτωση που χρησιμοποιούμε φορτίο $b \cdot \omega_m$) και η οποία $\psi_{R,ref}$ είναι σταθερή.

Επομένως, μπορούμε να αντικαταστήσουμε την εκτίμηση $\widehat{\psi}_R$ με την $\psi_{R,ref}$.

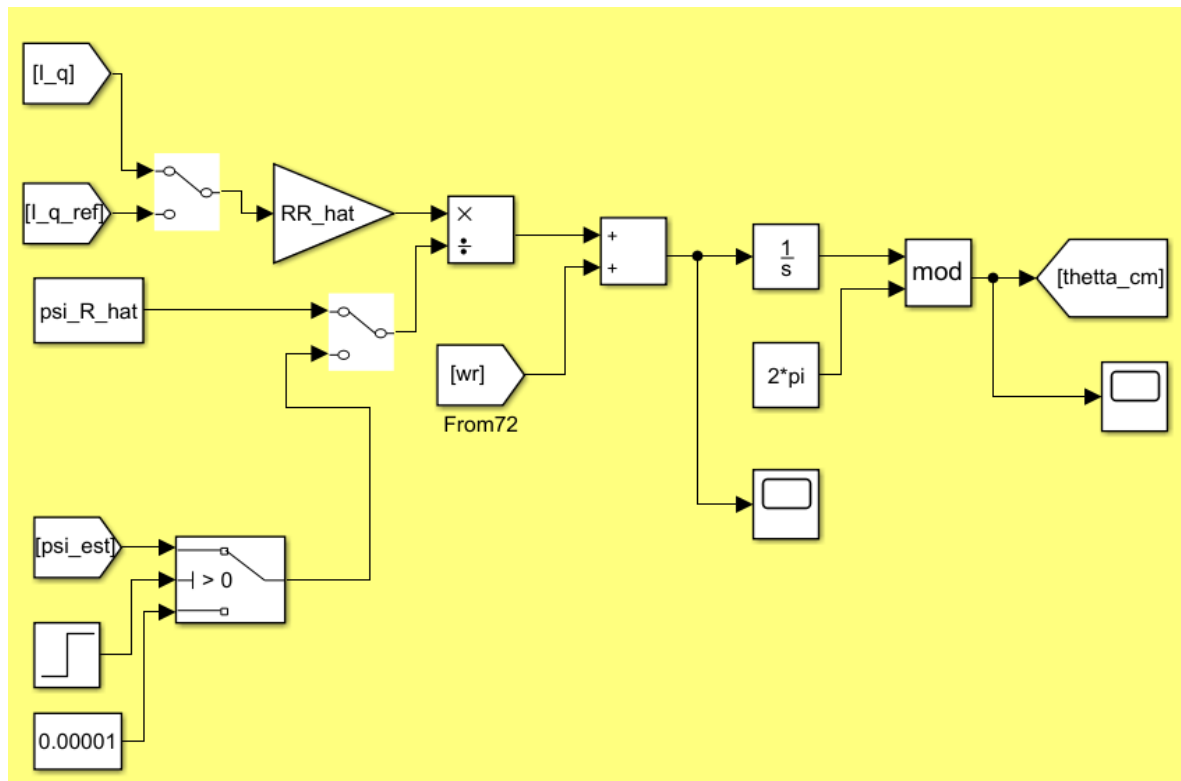
Η υλοποίηση των παραπάνω στο simulink φαίνεται παρακάτω:



Αρχικά φαίνεται η υλοποίηση της εκτίμησης $\widehat{\psi}_R$ όπως περιγράφεται από την (1).

Όπου \widehat{R}_R και \widehat{L}_M χρησιμοποιήσαμε τις τιμές που χρησιμοποιούμε και στο μοντέλο της μηχανής, δηλαδή θεωρούμε ότι έχουμε άριστες εκτιμήσεις.

Δηλαδή $\widehat{R}_R = 0.1818 \Omega$ και $\widehat{L}_M = 0.0182 H$.

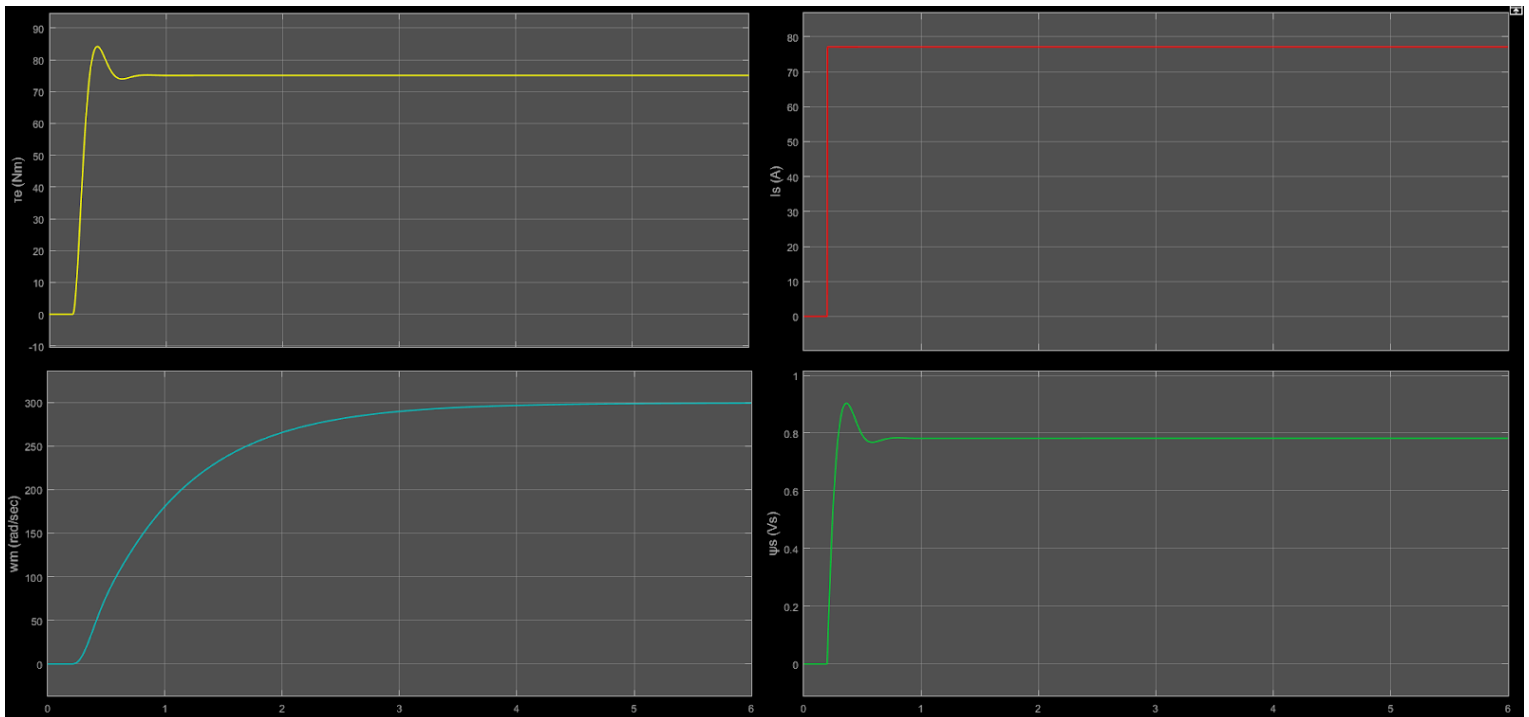


Παραπάνω φαίνεται η υλοποίηση της (9.7).

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, εμείς για το σκοπό της προσομοίωσης χρησιμοποιήσαμε $\hat{\psi}_R = \psi_{R,ref}$, ωστόσο έχει συμπεριληφθεί στη προσομοίωση και η παραγωγή του $\hat{\psi}_R$ για λόγους πληρότητας.

Τέλος, να σημειωθεί ότι έχει τοποθετηθεί διακόπτης που να δίνει την τιμή $0.00001 \approx 0$ κατά τα πρώτα δευτερόλεπτα της προσομοίωσης, καθώς εμφανιζόταν error λόγω διαίρεσης με το 0.

Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης, χρησιμοποιώντας το current model για την παραγωγή της γωνίας θ_1 , υπό ονομαστικό φορτίο ανάλογου της ταχύτητας ($b \cdot \omega_m$), φαίνεται παρακάτω:

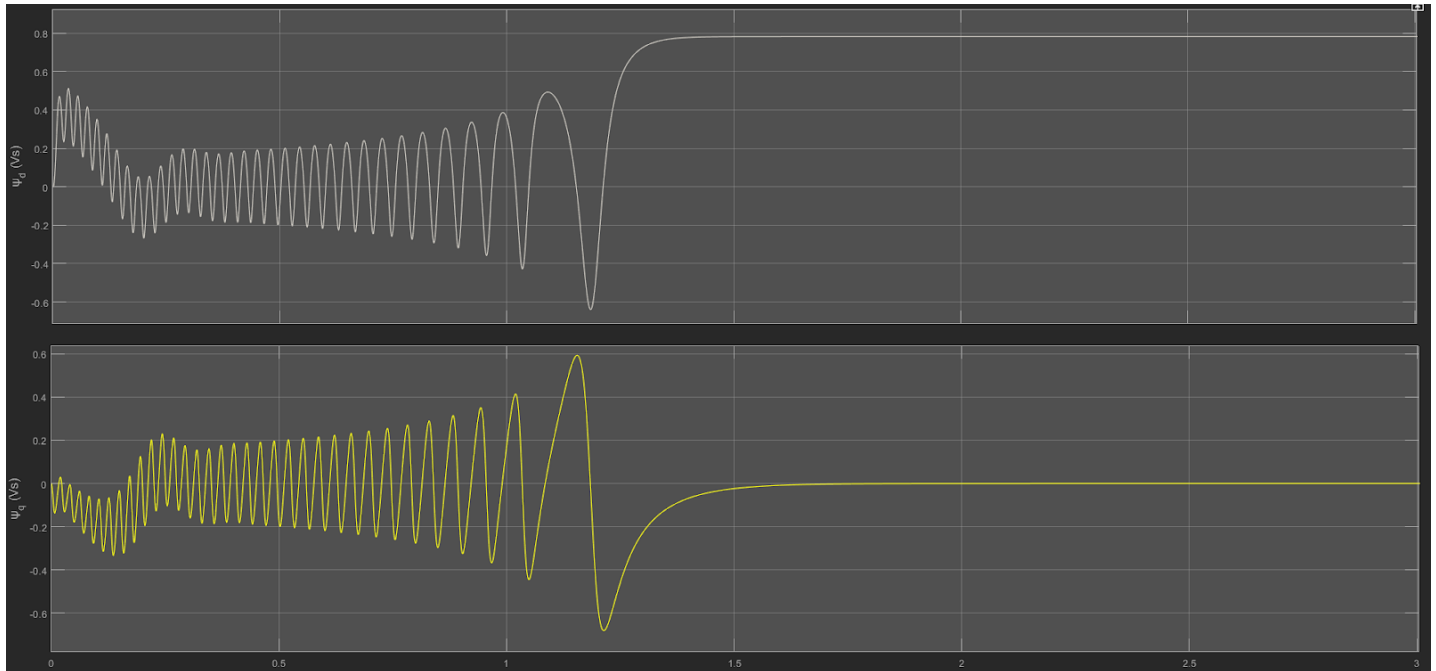


Να σημειωθεί ότι η προσομοίωση πραγματοποιείται μόνο με τη χρήση του ελεγκτή ρεύματος, και ενεργοποιούμε τα references των ρευμάτων όπως αυτά υπολογίστηκαν στην άσκηση 3, κατά τη χρονική στιγμή 0.2 sec , δηλαδή $i_{q,ref} = 64.03 \text{ A}$ και $i_{d,ref} = 42.97 \text{ A}$.

Βλέπουμε πως η απόκριση του ρεύματος είναι η αναμενόμενη, καθώς έχουμε ενεργοποιήσει τον ελεγκτή ρεύματος και έχουμε πολύ γρήγορη απόκριση (σε σύγκριση με την απόκριση της ταχύτητας) και γρήγορη σύγκλιση στην τιμή μόνιμης κατάστασης χωρίς overshoot.

Στις κυματομορφές της ροπής και της ροής ωστόσο παρατηρούμε ένα μικρό overshoot, και τέλος στην κυματομορφή της ταχύτητας παρατηρούμε την αργή σύγκλισή της στην τιμή μόνιμης κατάστασης.

Τέλος για να επιβεβαιώσουμε την ορθή λειτουργία του μοντέλου ρεύματος, πραγματοποιούμε και προσομοίωση με σύνδεση στο δίκτυο, και οι κυματομορφές των ψ_q και ψ_d φαίνονται παρακάτω:



Βλέπουμε πως μετά το μεταβατικό φαινόμενο, η ροή πάνω στον άξονα q μηδενίζεται, και άρα έχουμε τέλει προσανατολισμό πάνω στη ροή του δρομέα, ψ_d , δηλαδή όλη η ροή είναι πάνω στον άξονα d.

Ερώτημα 2

Στο ερώτημα αυτό ζητείται να κατασκευαστεί ελεγκτής ταχύτητας.

Αρχικά θα πρέπει να ορίσουμε τον χρόνο ανόδου, τον οποίο θεωρούμε ίσο με τον δεκαπλάσιο από αυτόν του ελεγκτή ρεύματος, δηλαδή θα ισχύει $t_r = 10 \text{ msec}$ άρα,

$$a_s = 0.1 \cdot a_c \Rightarrow a_s = 220 \text{ Hz}$$

Επομένως, τα κέρδη του ελεγκτή θα ορίζονται ως εξής:

$$k_{ps} = \frac{a_s \cdot \hat{J}}{\hat{\psi}} = 56.26$$

$$k_{is} = \frac{a_s^2 \cdot \hat{J}}{\hat{\psi}} = 12377$$

$$b_a = \frac{a_s \cdot \hat{J} - b_1}{\hat{\psi}} = 55.94$$

όπου $\hat{J} = 0.2 \text{ kgm}^2$, $\hat{\psi} = 0.7821 \text{ Vs}$ και $b_1 = 0.251$ όπως είχε υπολογιστεί στην εργασία (2) για την περίπτωση του ονομαστικού φορτίου ροπής ανάλογης της ταχύτητας, $b_1 \cdot \omega_m$.

Επιπλέον, προστέθηκε anti-windup, με όμοιο τρόπο όπως και στους ελεγκτές ρεύματος.

Δηλαδή, υλοποιήθηκε το παρακάτω:

$$\dot{i}_{q,ref} = k_{ps} \cdot e + k_{is} \cdot I - b_a \cdot \omega_r$$

$$\text{όπου } e = \omega_{r,ref} - \omega_r$$

$$\text{και } I = \int \left(e + \frac{1}{k_{ps}} \cdot (\bar{i}_{q,ref} - i_{q,ref}) \right)$$

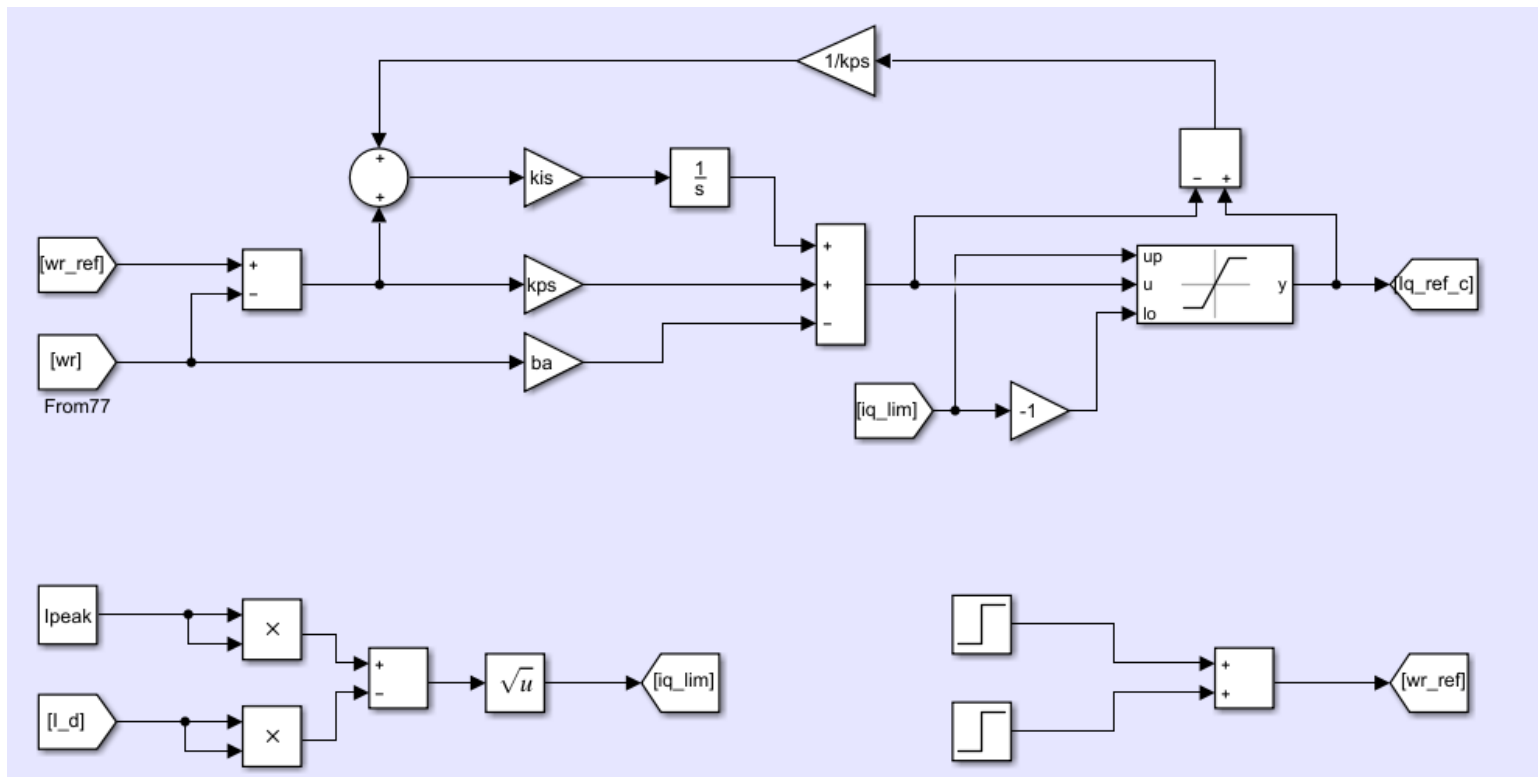
όπου $i_{q,ref}$ το ρεύμα που προκύπτει από τον ελεγκτή ταχύτητας πριν τον κορεσμό, και $\bar{i}_{q,ref}$ το ρεύμα που προκύπτει μετά τον κορεσμό.

Τέλος, έχει προστεθεί δυναμικός κορεσμός που να περιορίζει το reference του ρεύματος στον q άξονα.

$$\text{Ορίζουμε ως } i_{q,lim} = \sqrt{I_{peak}^2 - i_d^2}$$

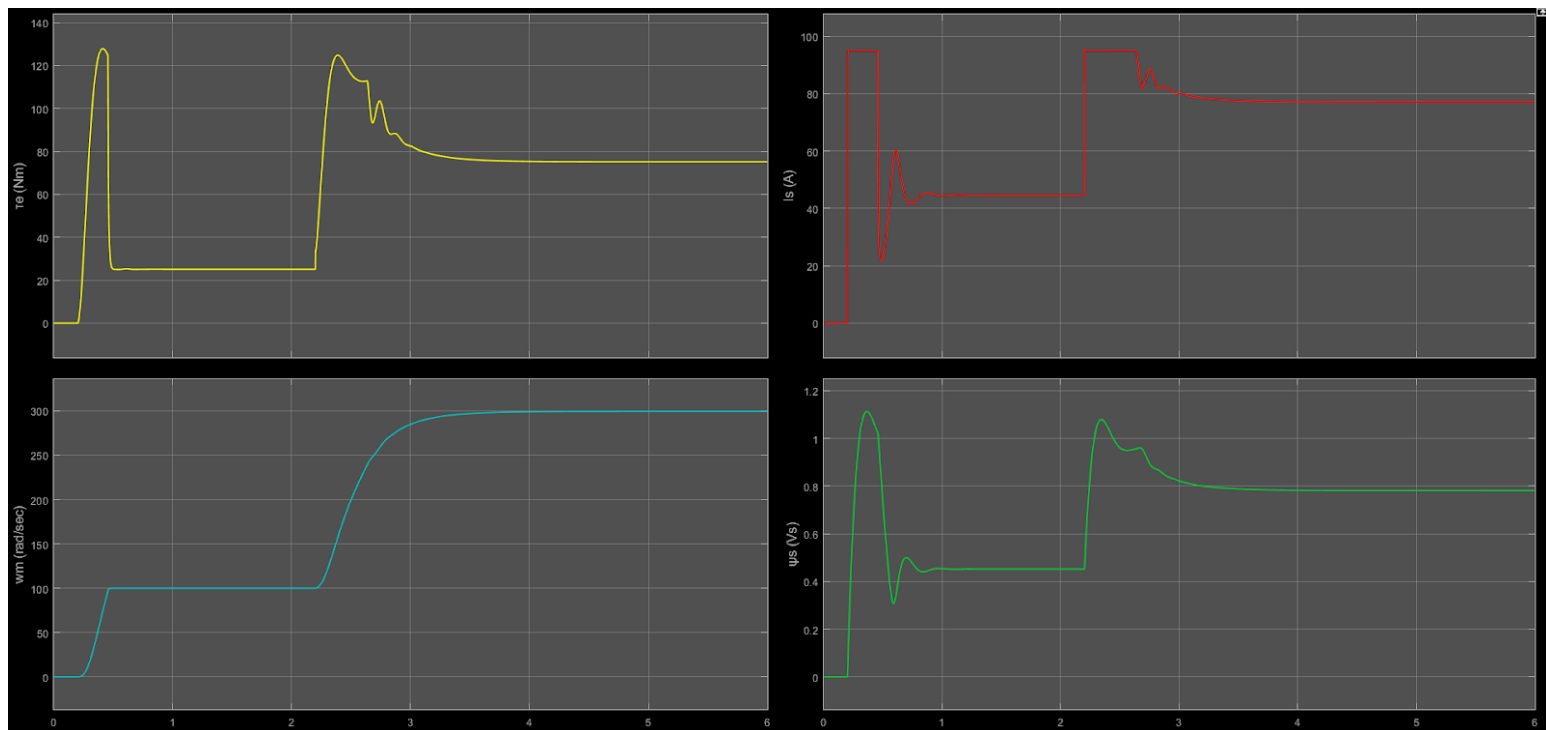
όπου αν $I_{s,nom} = 77.11 \text{ A}$, τότε μπορούμε να ορίσουμε $I_{peak} = 95 \text{ A}$, καθώς θεωρούμε πως η μηχανή μας μπορεί να αντέξει ρεύμα μεγαλύτερο του ονομαστικού για κάποια δευτερόλεπτα.

Παρακάτω φαίνεται η υλοποίηση του ζητούμενου ελεγκτή στο simulink:



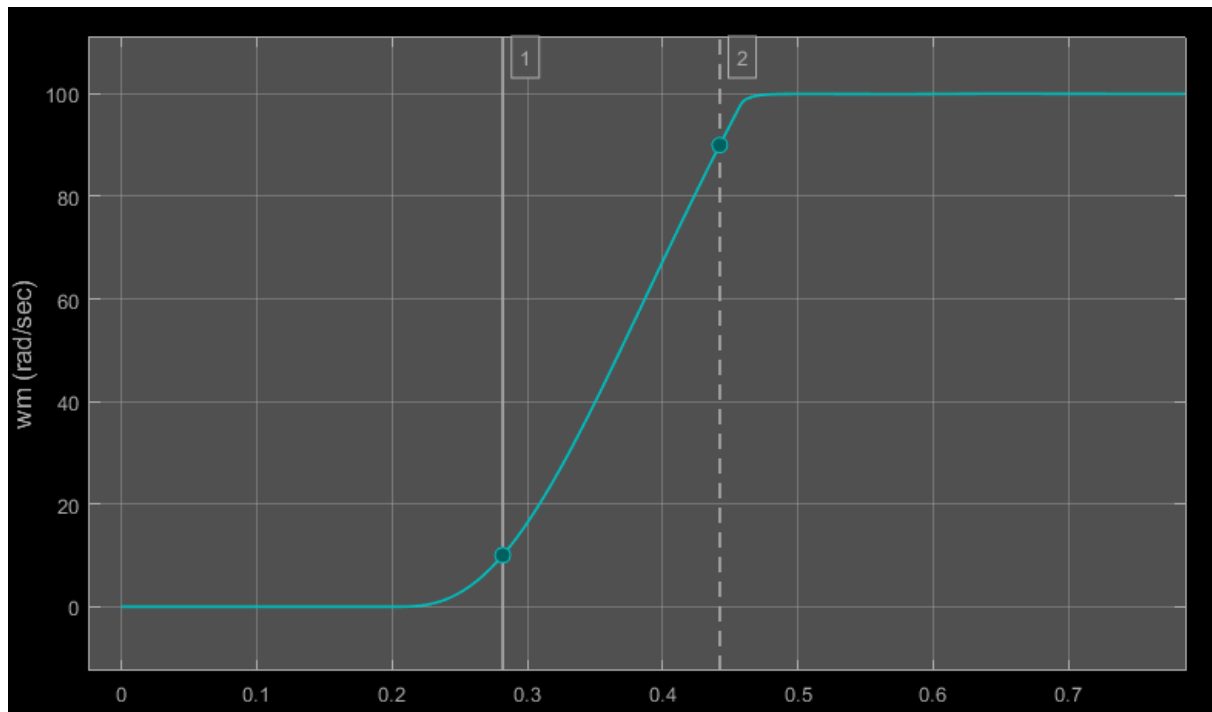
Πραγματοποιήθηκε προσομοίωση όπου δίνουμε $\omega_{r,ref} = 100 \text{ rad/sec}$ τη χρονική στιγμή 0.2 sec , και $\omega_{r,ref} = \omega_{r,nom} = 305.5 \text{ rad/sec}$ τη χρονική στιγμή 2.2 sec .

Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης φαίνεται παρακάτω:

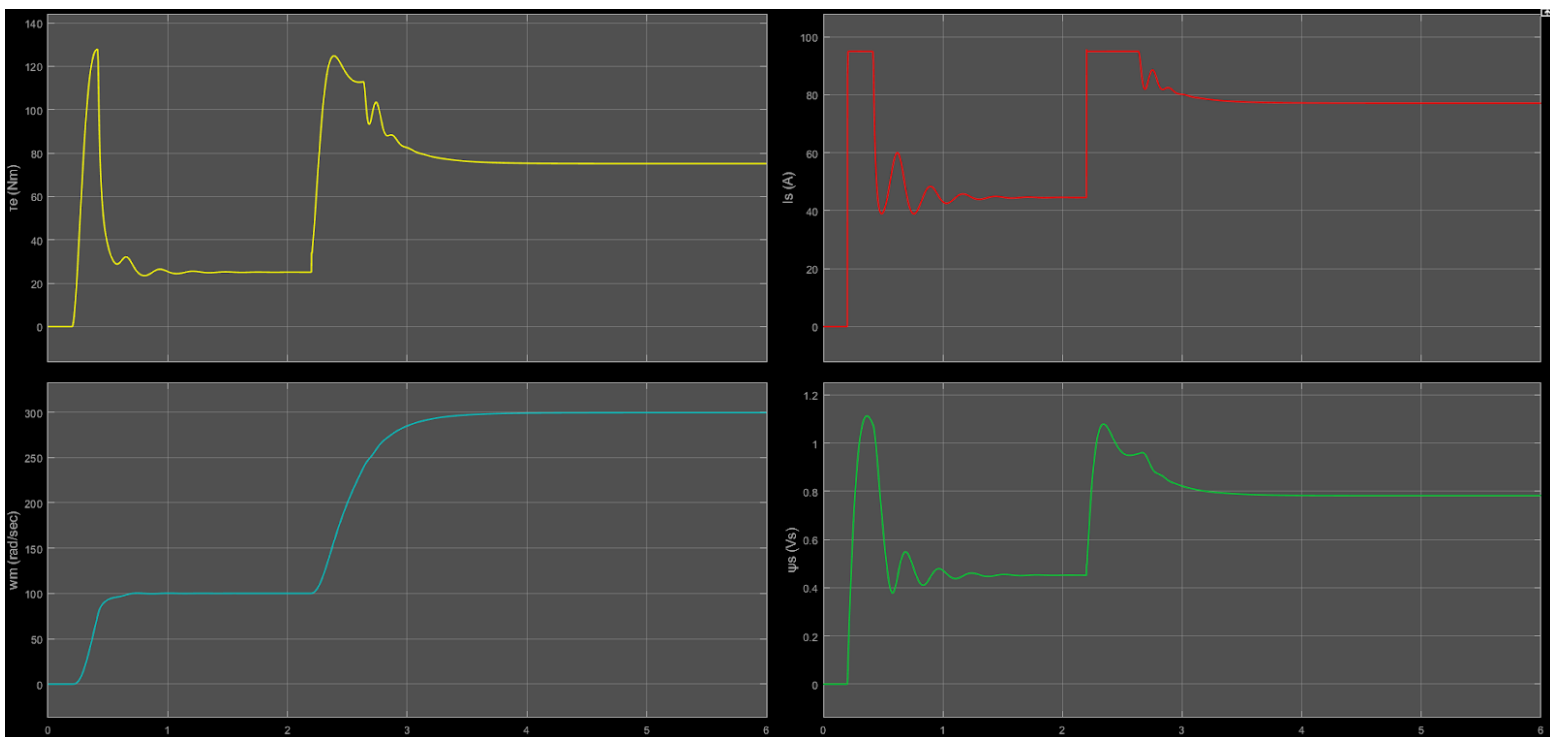


Βλέπουμε αρχικά πως επιτυγχάνεται ο έλεγχος της ταχύτητας, και αποκτά τις επιθυμητές που ορίζουμε εμείς ως αναφορές.

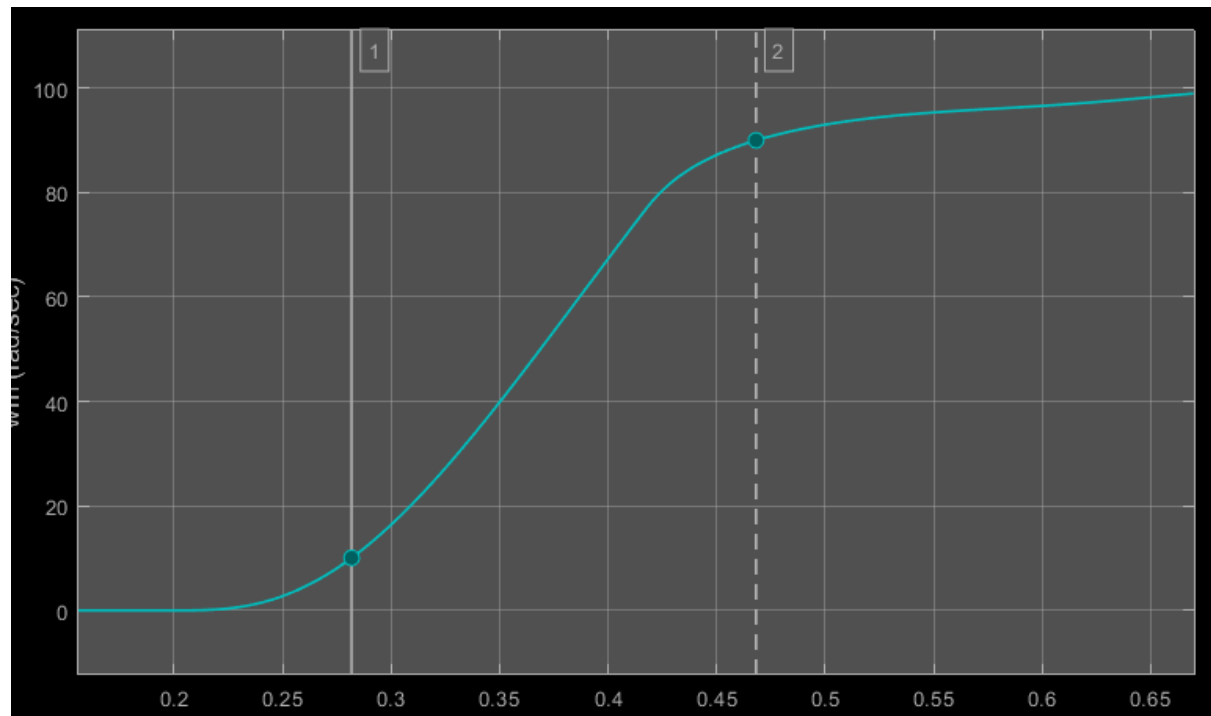
Κάνοντας zoom ώστε να αποφανθούμε για τον χρόνο απόκρισης του ελεγκτή ταχύτητας βλέπουμε το εξής:



Βλέπουμε πως ο θεωρητικός χρόνος ανόδου δεν επαληθεύεται στην προσομοίωση.
Πραγματοποιώντας προσομοίωση για $t_r = 0.1 \text{ sec}$, τα αποτελέσματα είναι τα εξής:



Και σε zoom η ταχύτητα ώστε να δούμε τον χρόνο ανόδου:



Βλέπουμε πως η απόκριση της ταχύτητας δεν άλλαξε δραστικά με την αλλαγή του χρόνου ανόδου, και έγινε ελαφρώς πιο αργός ο ελεγκτής (γεγονός το οποίο είναι λογικό, αφού αυξήσαμε τον χρόνο ανόδου). Ωστόσο παρατηρούμε πως στα υπόλοιπα μεγέθη έχουμε περισσότερες ταλαντώσεις, σε σύγκριση με τον ελεγκτή με χρόνο ανόδου 10 msec . Αυτό θα μπορούσε να οφείλεται στο γεγονός πως αυξάνοντας τον χρόνο ανόδου, το bandwidth a_s γίνεται ίσο με $a_s = 22$, επομένως τα κέρδη k_{ps} και k_{is} υποδεκαπλασιάζονται και υποεκατονταπλασιάζονται αντίστοιχα, και η ενεργός απόσβεση b_a , επίσης υποδεκαπλάζεται περίπου (αφού είναι ανάλογη του a_s).

Η ενεργός απόσβεση b_a μειώνει τυχόν ταλαντώσεις, επομένως η μείωση της τιμής της θα μπορούσε να οδηγή σε αυτές τις ταλαντώσεις, σε συνδυασμό με την αργή απόκριση του ελεγκτή.

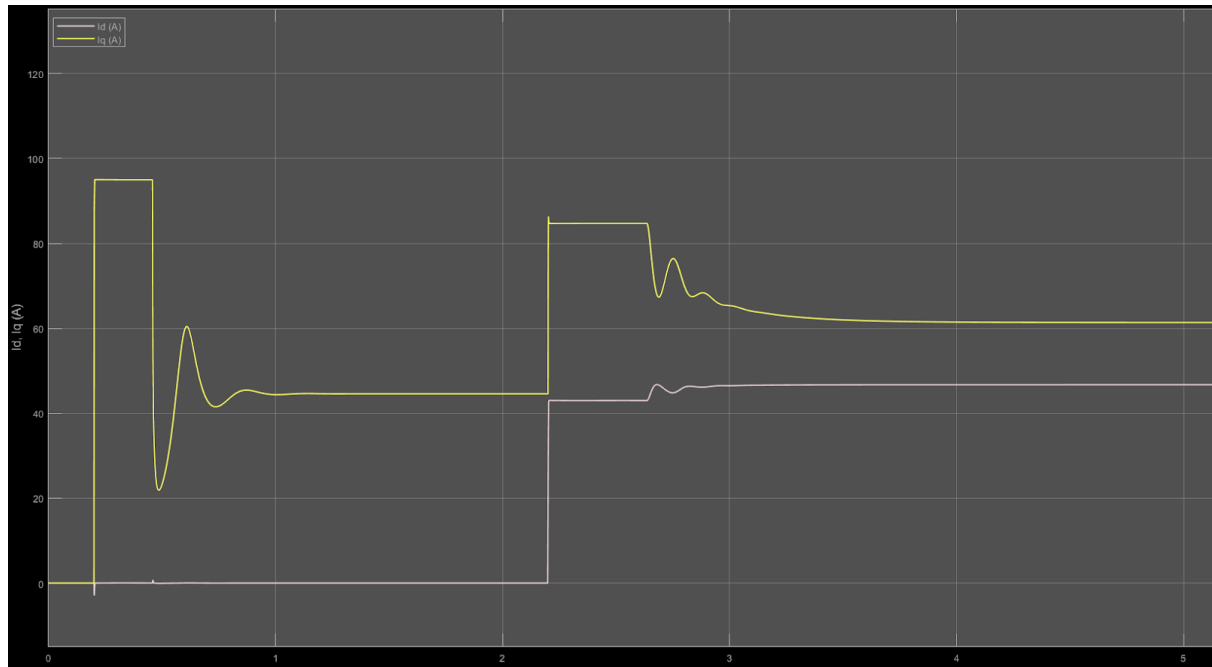
Επομένως προτιμάμε $a_s = 220$, καθώς έχουμε καλύτερη απόκριση τότε, και ας μην επαληθεύεται πειραματικά ο χρόνος ανόδου.

Όσον αφορά την κυματομορφή της ροπής, βλέπουμε πως αυτή αποκτά μεγάλες τιμές έως ότου να έχουμε την επιθυμητή ταχύτητα, καθώς η μηχανή απαιτείται να επιταχύνει ώστε να αποκτήσει την επιθυμητή αυτή ταχύτητα, και έπειτα αποκτά την τιμή μόνιμης κατάστασης.

Αφού αυξάνεται η ροπή λόγω ανάγκης επιτάχυνσης της μηχανής, αυξάνεται και το ρεύμα i_q και γι αυτό φτάνει σε κορεσμό.

Βλέπουμε πως ο κορεσμός του ρεύματος λειτουργεί όπως θα επιθυμούσαμε, δηλαδή περιορίζει το ρεύμα I_s έως την τιμή I_{peak} που ορίσαμε παραπάνω.

Παρακάτω φαίνονται και οι κυματομορφές των ρευμάτων i_d και i_q :



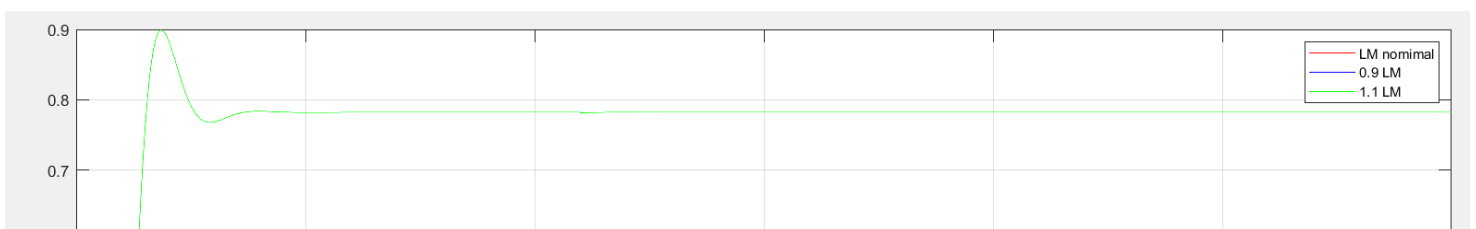
Βλέπουμε πως το ρεύμα i_d ακολουθεί την τιμή που ορίζουμε εμείς ως reference, και το ρεύμα i_q είναι αυτό το οποίο έρχεται σε κορεσμό λόγω της επιτάχυνσης όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ωστόσο στην μόνιμη κατάσταση αποκτά την επιθυμητή τιμή.

Ερώτημα 3

Στα παραπάνω 2 ερωτήματα είχαμε υποθέσει ότι έχουμε ιδανικές εκτιμήσεις της αντίστασης δρομέα, \hat{R}_R , και της αυτεπαγωγής μαγνήτισης \hat{L}_M , δηλαδή ίσες με τις ονομαστικές τιμές της μηχανής. Ωστόσο, στην πραγματικότητα οι τιμές αυτές δεν είναι σταθερές και μεταβάλλονται. Οι μετρήσεις για τις τιμές αυτές γίνονται σε κρύες συνθήκες της μηχανής, δηλαδή χωρίς σημαντική ροπή φορτίου, αλλά και με λίγα λεπτά λειτουργίας της μηχανής. Ωστόσο στην πραγματικότητα, η μηχανή δουλεύει ίσως και σε διάρκεια ωρών, αλλά και με υψηλές τιμές ροπής φορτίου, επομένως η αντίσταση δρομέα μεταβάλλεται με το πέρασμα του χρόνου (αυξάνεται μεταξύ του 50-100% παραπάνω από τις κρύες μετρήσεις).

Ξέρουμε θεωρητικά πως μια λάθος εκτίμηση της αντίστασης δρομέα, \hat{R}_R , επηρεάζει σημαντικά την απόκριση, αλλά και ενδέχεται να “χαλάσει” τον τέλειο προσανατολισμό πεδίου, σε σύγκριση με την αυτεπαγωγή μαγνήτισης \hat{L}_M , μεταβολές της οποίας δεν επηρεάζουν τόσο σημαντικά το μοντέλο ρεύματος.

Πραγματοποιούμε προσομοίωση όπου μεταβάλλουμε τις τιμές της εκτίμησης της αυτεπαγωγής μαγνήτισης. Συγκεκριμένα πραγματοποιήθηκε προσομοίωση για ονομαστική

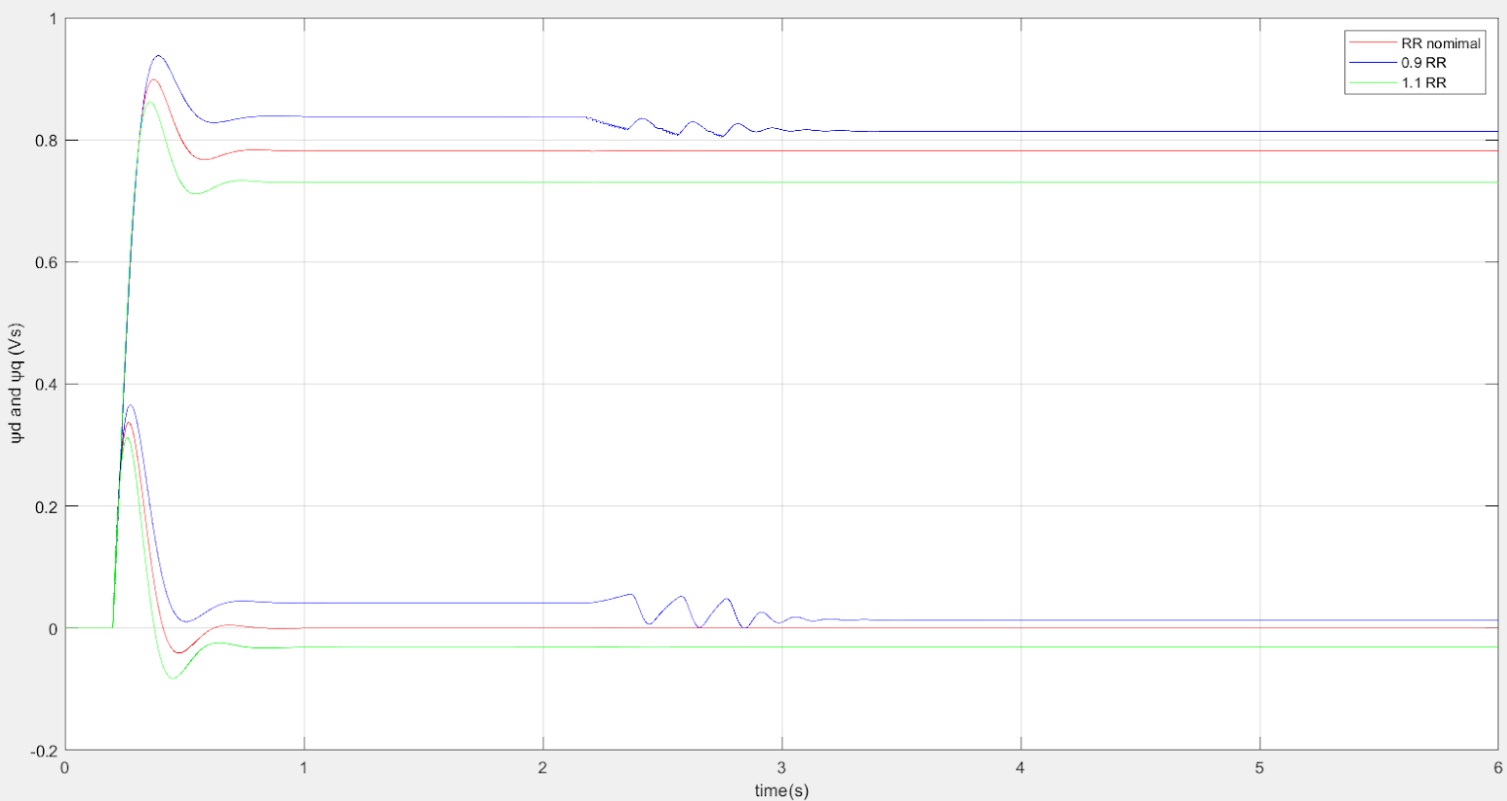


τιμή εκτίμησης \hat{L}_M , $0.9 \cdot \hat{L}_M$ και $1.1 \cdot \hat{L}_M$, και τα αποτελέσματα για την ροή στους άξονες d και q φαίνεται παρακάτω:

Βλέπουμε πως με οποιαδήποτε μεταβολή της τιμής της εκτίμησης της αυτεπαγωγής μαγνήτισης, δεν μεταβάλλονται τα μεγέθη, και διατηρείται ο τέλειος προσανατολισμός, δηλαδή έχουμε μηδενική συνιστώσα ροής στον q άξονα, και όλη η ροή βρίσκεται στον d άξονα.

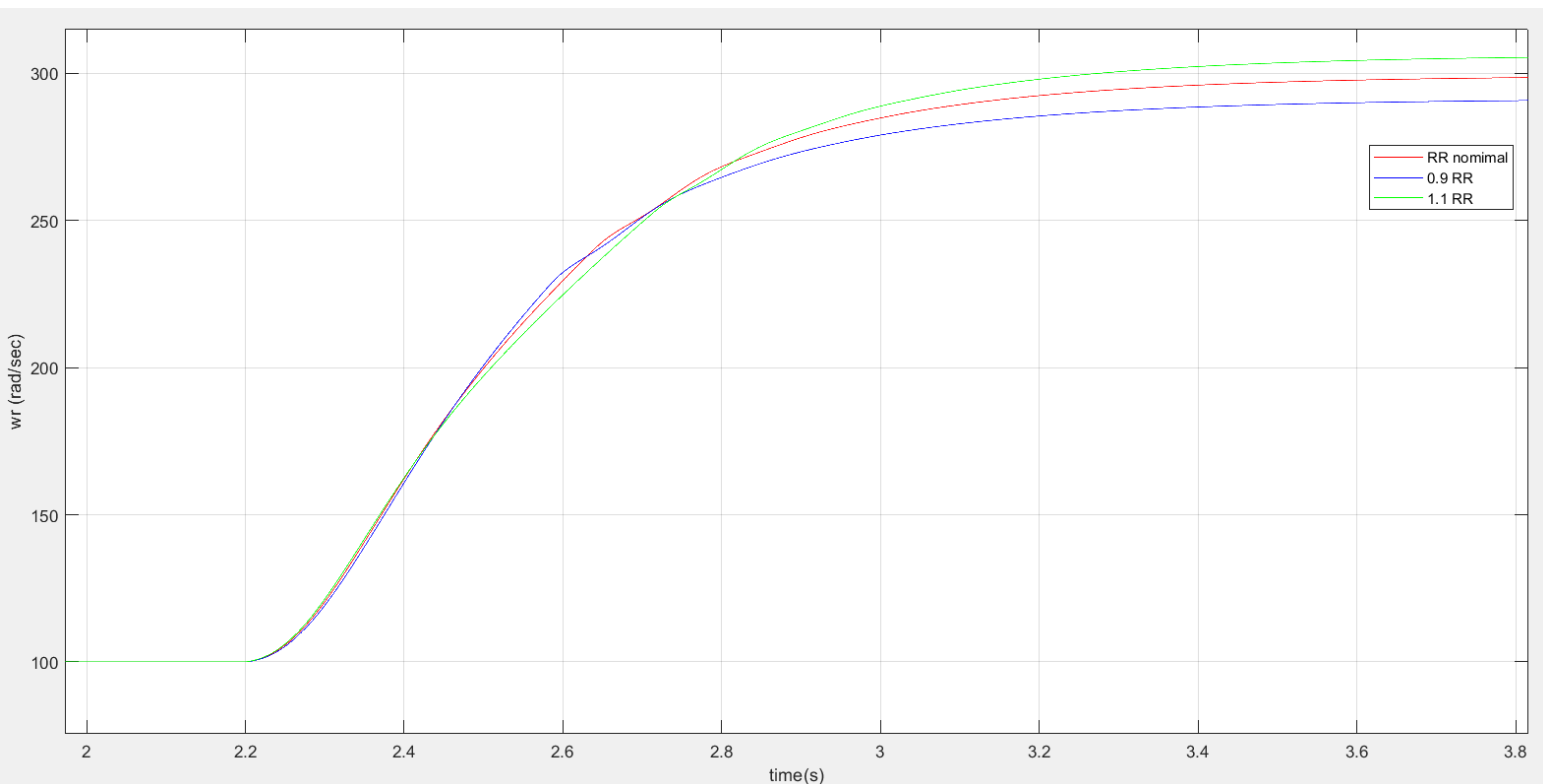
Επομένως το current model έχει μικρή ευαισθησία σε μεταβολές της εκτίμησης \hat{L}_M .

Στη συνέχεια πραγματοποιούμε προσομοίωση όπου μεταβάλλουμε τις τιμές της εκτίμησης της αντίστασης δρομέα. Συγκεκριμένα πραγματοποιήθηκε προσομοίωση για ονομαστική τιμή εκτίμησης \hat{R}_R , $0.9 \cdot \hat{R}_R$ και $1.1 \cdot \hat{R}_R$, και τα αποτελέσματα για την ροή στους άξονες d και q φαίνεται παρακάτω:



Βλέπουμε πως με την υποεκτίμηση της αντίστασης δρομέα, $(0.9 \cdot \hat{R}_R)$, η τιμή της ροής αυξάνεται, τόσο στον d άξονα, όσο και στον q άξονα, και με την υπereκτίμηση $(1.1 \cdot \hat{R}_R)$, η τιμή της ροής μειώνεται τόσο στον d άξονα, όσο και στον q άξονα. Επιπλέον, παρατηρείται κάποιου είδους αστάθειας για ένα χρονικό διάστημα στην περίπτωση της υποεκτίμησης.

Τέλος, παρακάτω φαίνεται και η απόκριση της ταχύτητας (συμπεριλαμβάνοντας και τον ελεγκτή ταχύτητας) για τις εναλλαγές της τιμής της εκτίμησης της αντίστασης δρομέα:



Βλέπουμε πως με την υποεκτίμηση έχουμε πιο αργή σύγκλιση στην τιμή μόνιμης κατάστασης, και μάλιστα η ταχύτητα δεν φτάνει στην μόνιμη κατάσταση την ονομαστική της τιμή, αλλά είναι ελαφρώς χαμηλότερη.

Αντίθετα, με την υπερεκτίμηση, η ταχύτητα αποκτά την τιμή της μόνιμης κατάστασης πιο γρήγορα, σε σύγκριση με το αν χρησιμοποιούσαμε ονομαστική αντίσταση δρομέα, και μάλιστα λύνεται και το πρόβλημα που είχαμε ότι η τιμή της ονομαστικής ταχύτητας κατά τη μόνιμη κατάσταση δεν μπορεί να φτάσει την τιμή που υπολογίστηκε θεωρητικά (305.5 rad/sec).

Ερώτημα 4

Στο ερώτημα αυτό, ζητείται να υλοποιηθεί το τροποποιημένο μοντέλο ρεύματος, το οποίο περιγράφεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\omega_1 = \frac{a_l}{s + a_l} \cdot \left(\omega_r + \frac{\hat{R}_R \cdot i_{q,ref} - \lambda_s \cdot \hat{E}_d}{\hat{\Psi}_R} \right) \quad (9.28)$$

$$\text{όπου } \hat{E}_d = \bar{u}_{d,ref} - \hat{R}_s \cdot i_{d,ref} + \omega_1 \cdot \hat{L}_\sigma \cdot i_{q,ref} \quad (9.29)$$

Ουσιαστικά είναι το μοντέλο ρεύματος, απλά έχει προστεθεί και ένας proportional όρος. Έχει προστεθεί και ένα βαθυπερατό φίλτρο, με συχνότητα αποκοπής η οποία ορίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$\frac{R_R}{L_M} \ll a_l < a_c, \text{ όπου } a_c = 2200 \text{ και } \frac{R_R}{L_M} = 9.989$$

Να σημειωθεί πως για το σκοπό της παρούσας εργαστηριακής άσκησης δεν είναι απαραίτητο να προσομοιώσουμε το βαθυπερατό φίλτρο, καθώς ο λόγος ύπαρξής του είναι η απομόνωση του θορύβου που εισέρχεται λόγω των μετρήσεων. Στην προσομοίωση αυτή, δεν έχουμε θόρυβο στις μετρήσεις, ωστόσο στο πραγματικό βιομηχανικό περιβάλλον θα είχαμε.

Τέλος, θα πρέπει να ορίσουμε και το λ_s .

Ορίζεται ότι:

$$\lambda_s = \text{sat}\left(\lambda \cdot \frac{\omega_r}{\omega_\Delta}, \lambda\right) \rightarrow \lambda \cdot \frac{\omega_r}{\omega_\Delta}, \quad |\omega_r| \leq \omega_\Delta \quad (9.39)$$

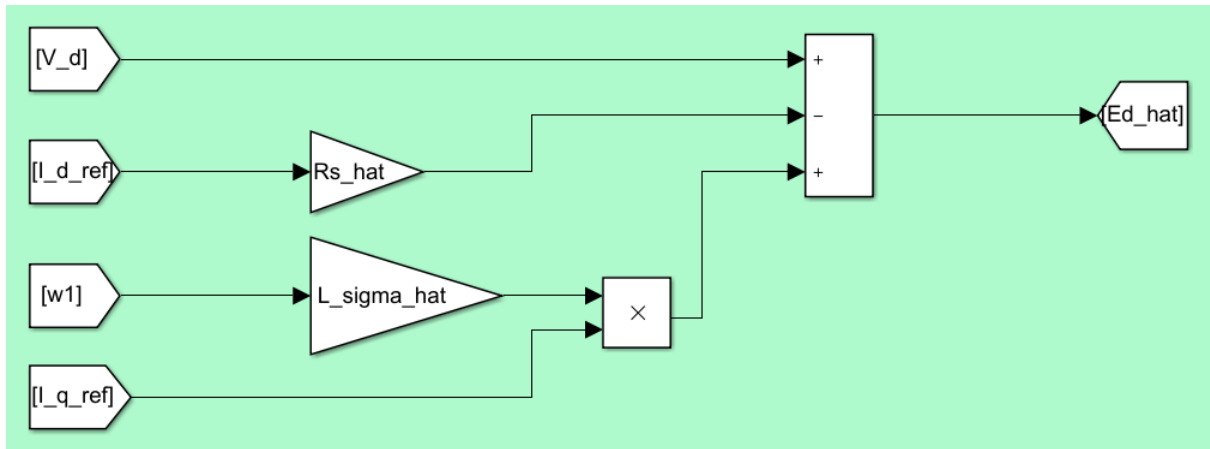
$$\rightarrow \lambda \cdot \text{sgn}(\omega_r), \quad |\omega_r| > \omega_\Delta$$

$$\text{όπου } 1 \leq \lambda \leq 2 \quad \text{και} \quad 0.05 \cdot \omega_{base} \leq \omega_\Delta \leq 0.2 \cdot \omega_{base}$$

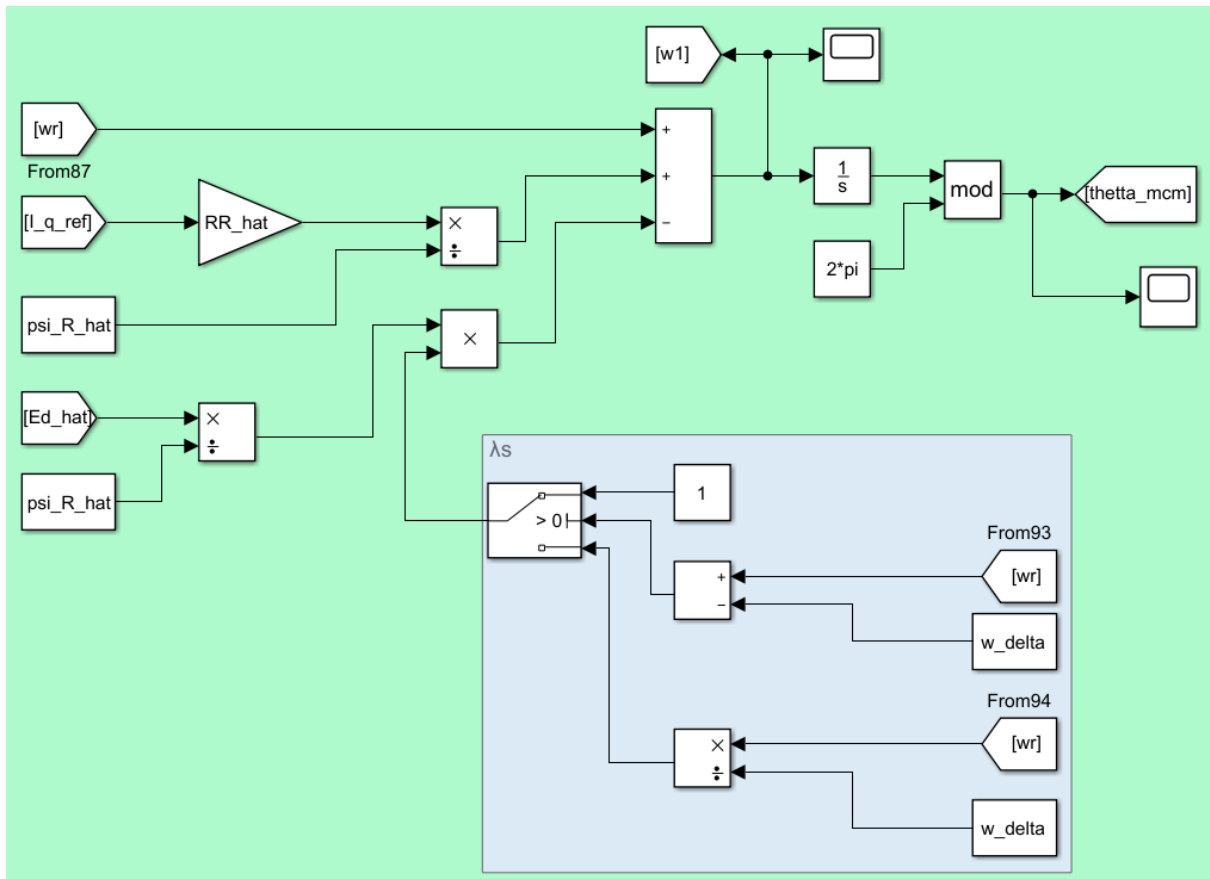
$$\text{Επέλεγα } \lambda = 1 \text{ και } \omega_\Delta = 0.1 \cdot \omega_{base} = 30.55 \text{ rad/sec}$$

Ουσιαστικά, χρησιμοποιώντας το λ_s μας βοηθά να έχουμε καλή απόκριση και στις χαμηλές στροφές, αλλά και ευστάθεια.

Παρακάτω φαίνεται η υλοποίηση του \hat{E}_d όπως αυτή περιγράφηκε από την (9.29):



Παρακάτω φαίνεται η υλοποίηση της (9.28) και της (9.39):



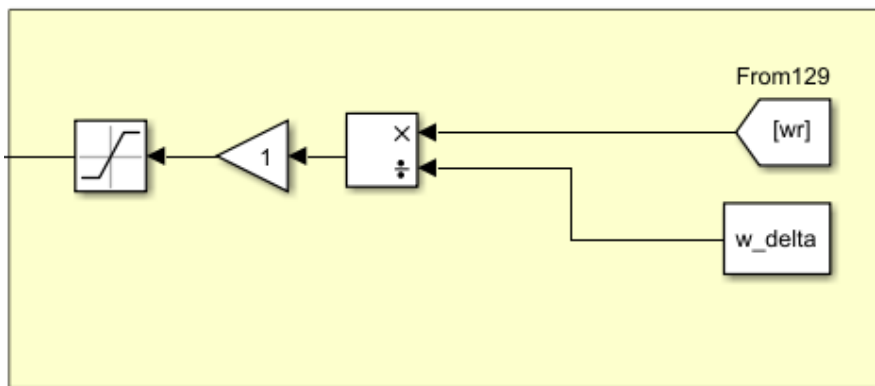
Για την παραγωγή του λ_s έχει προστεθεί switch, όπου έχει trigger την διαφορά $\omega_r - \omega_\Delta$.

Συγκεκριμένα, όταν $\omega_r - \omega_\Delta > 0$ ενεργοποιείται ο πάνω διακόπτης, όπου μεταφέρει το $\lambda = 1$

, ενώ όταν $\omega_r - \omega_\Delta \leq 0$ ενεργοποιείται ο κάτω διακόπτης, όπου μεταφέρεται το $\lambda \cdot \frac{\omega_r}{\omega_\Delta} = \frac{\omega_r}{\omega_\Delta}$

.

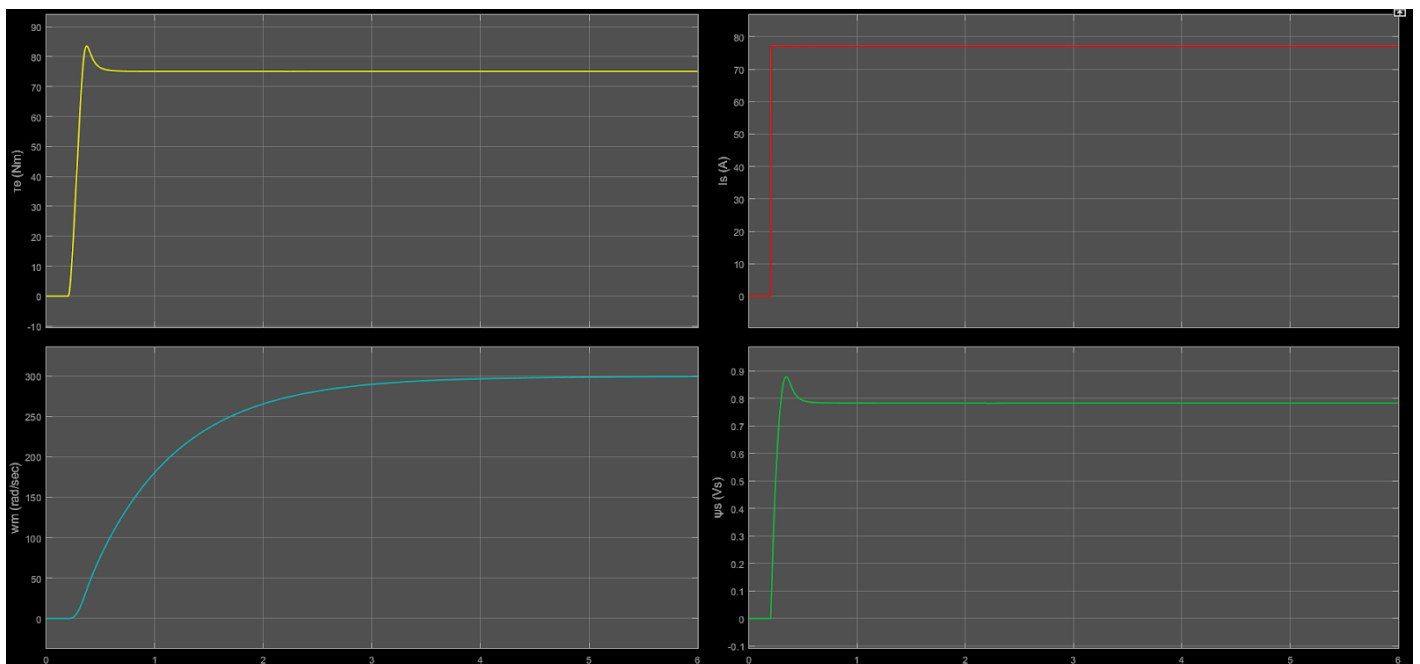
Μια πιο σωστή υλοποίηση υπολογισμού του λ_s είναι η παρακάτω:



Στη συγκεκριμένη υλοποίηση έχουν ληφθεί υπόψιν και οι αρνητικές τιμές ταχύτητας, και για όρια κορεσμού έχουμε θέσει ± 1 , δηλαδή την τιμή του λ .

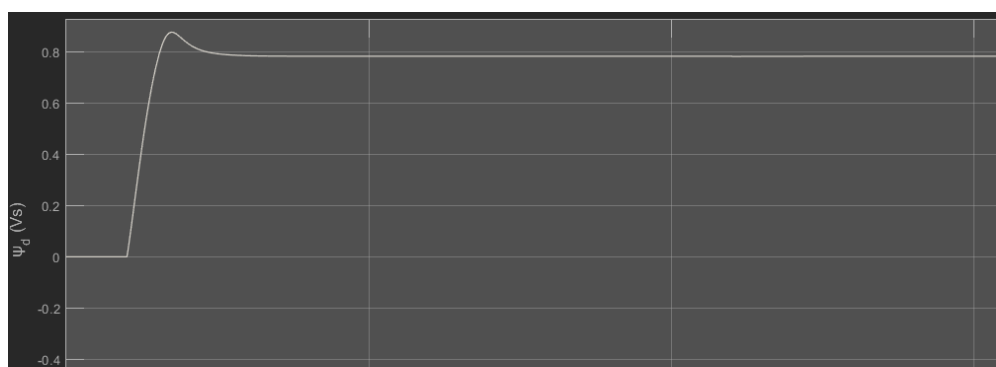
Πραγματοποιούμε προσομοίωση με ενεργοποιημένους τους ελεγκτές ρεύματος μόνο, ώστε να επιβεβαιώσουμε την ορθή λειτουργία του βελτιωμένου μοντέλου ρεύματος.

Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης είναι το εξής:

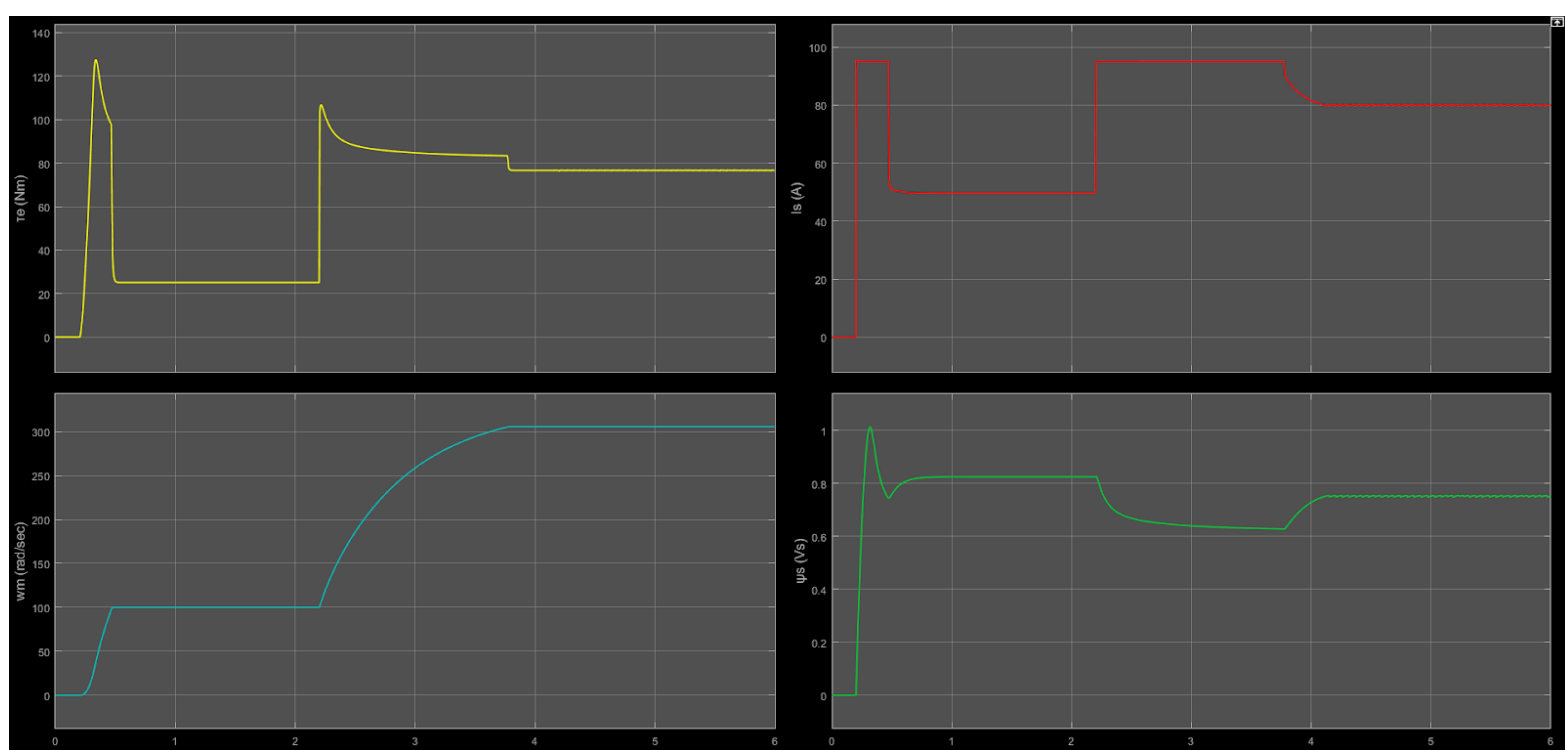


Βλέπουμε πως τα μεγέθη αποκτούν την επιθυμητή τιμή της μόνιμης κατάστασης.

Επιπλέον, παρακάτω φαίνεται και η κυματομορφή της ροής του δρομέα στον άξονα d και q ώστε να επιβεβαιώσουμε ότι και σε αυτή την περίπτωση έχουμε τέλει προσανατολισμό πεδίου, δηλαδή μηδενική συνιστώσα ροής στον q άξονα, και όλη τη ροή προσανατολισμένη στον άξονα d.



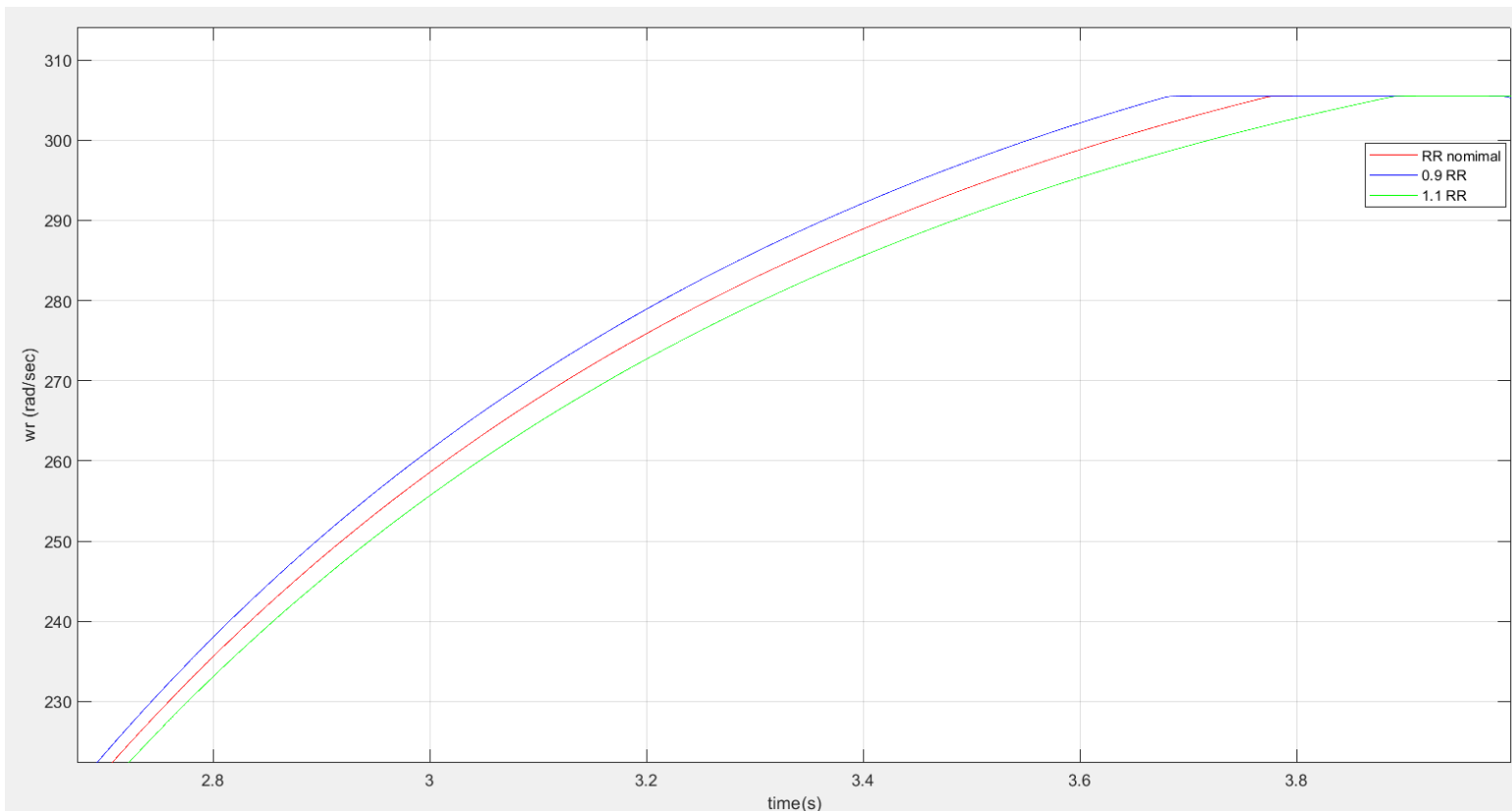
Τώρα, πραγματοποιούμε προσομοίωση με ενεργοποιημένο τον ελεγκτή ταχύτητας, και το αποτέλεσμα της προσομοίωσης είναι το εξής:



Αρχικά βλέπουμε πως πλέον η ταχύτητα στη μόνιμη κατάσταση μπορεί και φτάνει την ονομαστική θεωρητική τιμή της, γεγονός το οποίο δεν πετυχαίναμε στις προηγούμενες περιπτώσεις. Ωστόσο υπάρχει ένα μεγαλύτερο διάστημα κορεσμού του ρεύματος. Αυτό ωστόσο θεωρούμε πως δεν μας επηρεάζει, καθώς έχουμε θέσει όριο κορεσμού του ρεύματος αρκετά κοντά στην ονομαστική του τιμή. Επιπλέον, τα υπόλοιπα μεγέθη αποκτούν την τιμή μόνιμης κατάστασης όταν πλέον το ρεύμα έχει περάσει τον κορεσμό.

Στη συνέχεια, πραγματοποιούμε προσομοίωση όπου μεταβάλλουμε την εκτίμηση της αντίστασης του δρομέα για ονομαστική τιμή εκτίμησης \hat{R}_R , $0.9 \cdot \hat{R}_R$ και $1.1 \cdot \hat{R}_R$.

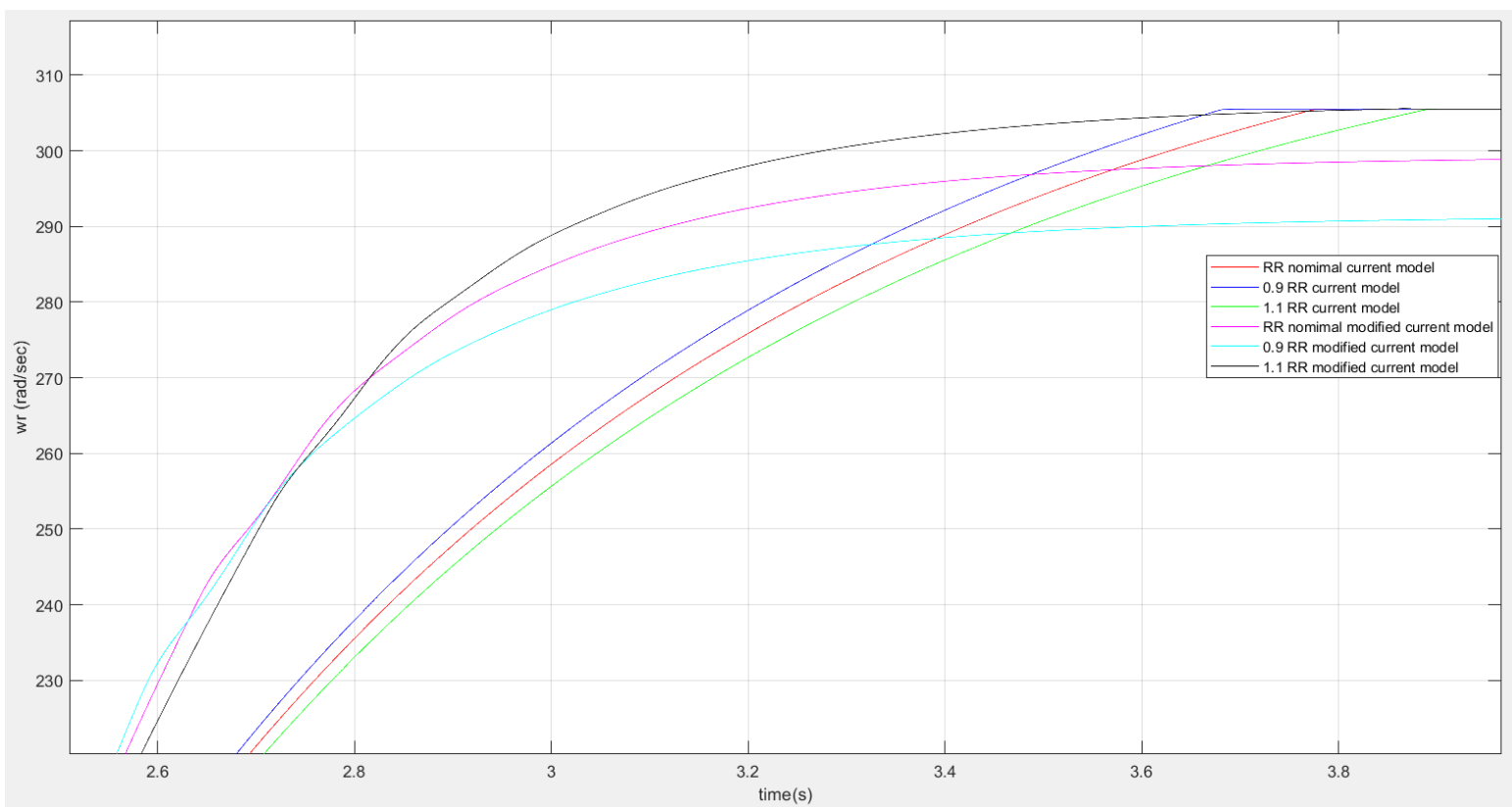
Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης για την απόκριση της ταχύτητας στις υψηλές στροφές φαίνεται παρακάτω:



Εξάγουμε παρόμοια συμπεράσματα με το ερώτημα 3. Συγκεκριμένα, βλέπουμε ότι έχουμε πιο γρήγορη απόκριση στην περίπτωση της υπερεκτίμησης ($1.1 \cdot \hat{R}_R$), και πιο αργή απόκριση στην περίπτωση της υποεκτίμησης ($0.9 \cdot \hat{R}_R$).

Ωστόσο, η διαφορά του βελτιωμένου μοντέλου ρεύματος, με το μοντέλο ρεύματος, είναι πως τώρα έχουμε και στις 3 περιπτώσεις εκτίμησης, σύγκλιση στην ονομαστική τιμή της ταχύτητας, και όχι παρακάτω όπως στο μοντέλο ρεύματος.

Τέλος, παρακάτω φαίνεται σε κοινό γράφημα, η απόκριση της ταχύτητας στις υψηλές στροφές, για την περίπτωση του μοντέλου ρεύματος, αλλά και το βελτιωμένο μοντέλο ρεύματος, στις 3 δοκιμές για τις διάφορες τιμές της εκτίμησης της αντίστασης του δρομέα:



Βλέπουμε πως αν συγκρίνουμε την απόκριση της ταχύτητας με τα 2 μοντέλα ρεύματος, έχουμε πιο γρήγορη απόκριση και σύγκλιση στη μόνιμη κατάσταση με το βελτιωμένο μοντέλο ρεύματος, αλλά και έχουμε μικρότερη διαφορά μεταξύ των 3 δοκιμών για τις διάφορες τιμές εκτίμησης αντίστασης δρομέα.

Επαληθεύουμε δηλαδή πως το μοντέλο ρεύματος είναι πιο ευαίσθητο σε λάθος εκτίμηση της αντίστασης δρομέα, \hat{R}_R , σε σύγκριση με το βελτιωμένο μοντέλο ρεύματος.

Ερώτημα 5

Στο ερώτημα αυτό ζητείται να υλοποιηθεί ελεγκτής εξασθένησης πεδίου.

Ισχύει ότι:

$$|V_s| = \sqrt{V_d^2 + V_q^2} = |\omega_1| \cdot \sqrt{i_q^2 + \left(\frac{L_\sigma + L_M}{L_\sigma}\right) \cdot i_d^2} \leq V_{s,nom}$$

Για να μεταβούμε στην περιοχή εξασθένησης πεδίου, η ω_1 θα αυξηθεί, και επομένως θα πρέπει να μειώσουμε κάποιον όρο ρεύματος από το υπόριζο.

Ωστόσο, δεν επιθυμούμε να μειώσουμε το ρεύμα i_q , καθώς έτσι θα μειώσουμε και την απαιτούμενη ροπή. Έτσι, θα μειώσουμε το ρεύμα πεδίου i_d .

Γι' αυτό και θέτω ως $i_{d,ref}$ το εξής:

$$i_{d,ref} = k_{fw} \cdot \int [V_{base}^2 - V_{d,ref}^2 - V_{q,ref}^2] dt \quad (9.75)$$

Όπου να σημειωθεί ότι οι τάσεις $V_{d,ref}$ και $V_{q,ref}$ είναι οι τάσεις που προκύπτουν από τους αντίστοιχους ελεγκτές ρεύματος, ωστόσο πριν τον κορεσμό.

Επιπλέον θα θέσω περιορισμούς στις τιμές που μπορεί να πάρει η αναφορά του ρεύματος i_d , καθώς θέλω να το μειώσω αλλά όχι υπερβολικά, ώστε να έχουμε ονομαστική τάση στον στάτη πάντα.

Επομένως, ορίζω:

$$i_{d,ref} = \min[\max(i_{d,ref}, I_{min}), I_{nom}] \quad (2)$$

$$\text{όπου } I_{nom} = \frac{\psi_{ref}}{\hat{L}_M} = 42.9725 \text{ A} \quad (9.76)$$

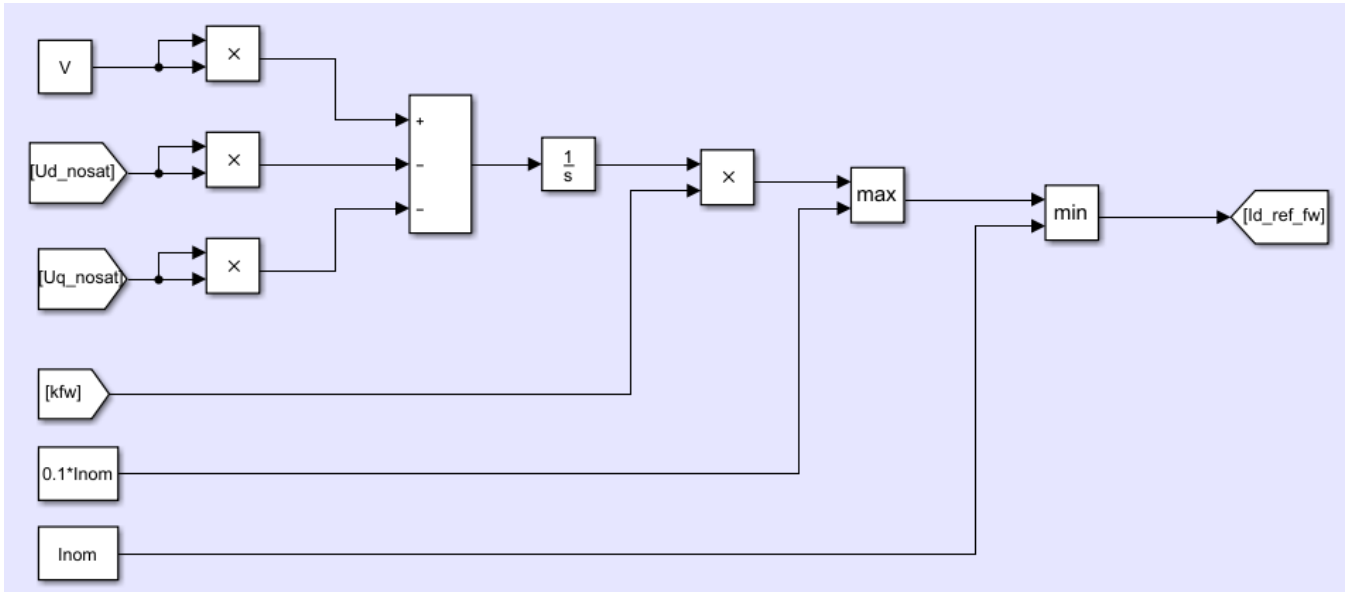
$$\text{και } I_{min} = 0.1 \cdot I_{nom} = 4.29725 \text{ A} \quad (9.77)$$

Το κέρδος k_{fw} του ολοκληρωτικού ελεγκτή ορίζει το πόσο γρήγορα ή αργά θα γίνεται η μείωση ή η αύξηση του $i_{d,ref}$.

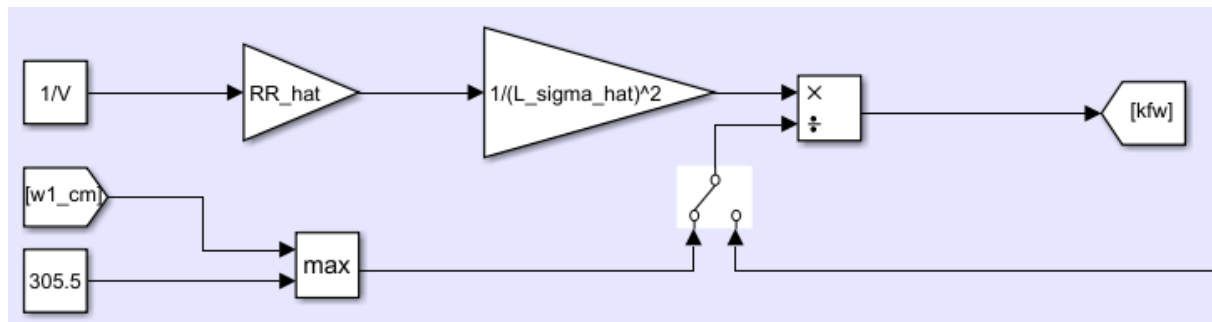
Ορίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$k_{fw} = \frac{\hat{R}_R}{\hat{L}_\sigma^2 \cdot V_{base} \cdot \max(\omega_1, \omega_{base})} \quad (9.87)$$

Παρακάτω φαίνεται η υλοποίηση των (9.75), (2), (9.76), (9.77) στο simulink:



Και παρακάτω φαίνεται η υλοποίηση της (9.87):



Επιπλέον, θα τροποποιήσουμε και την αναφορά του ρεύματος i_q ώστε να έχουμε μέγιστη ροπή.

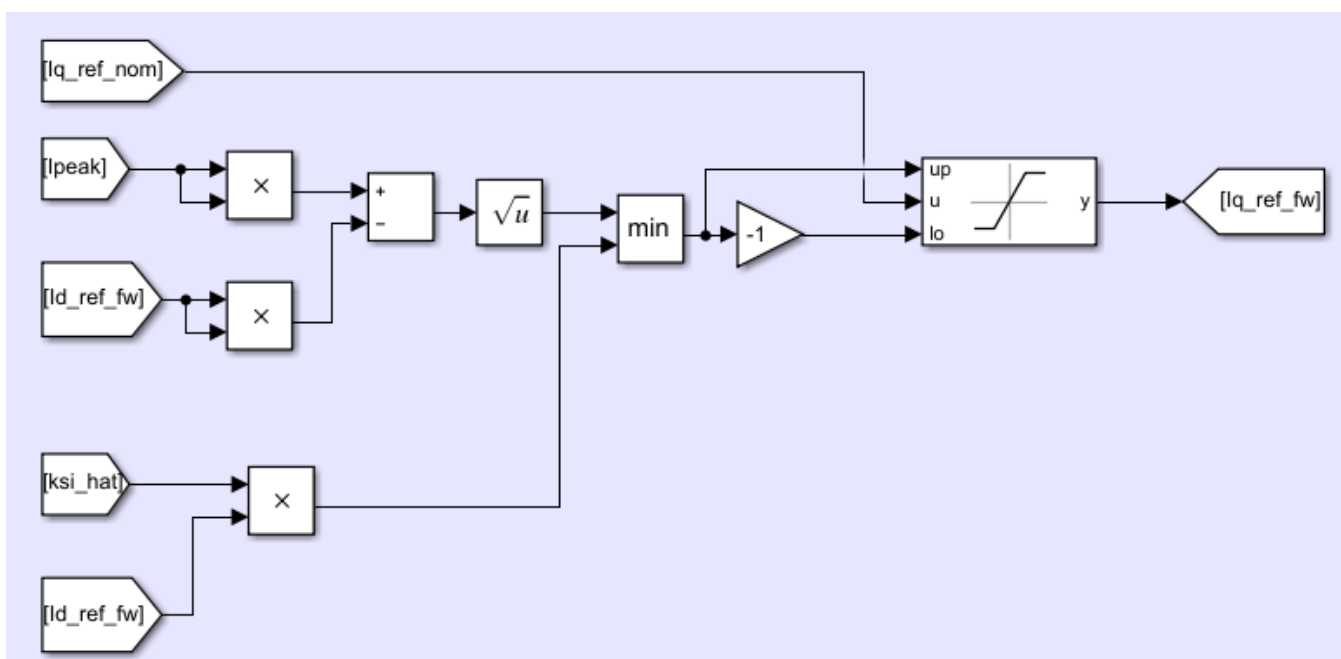
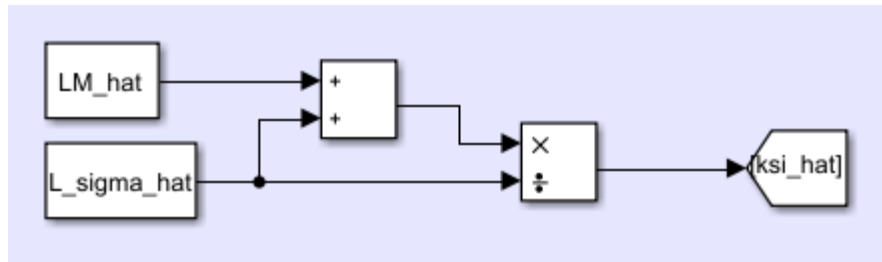
$$\text{Ορίζουμε: } \hat{\xi} = \frac{\hat{L}_\sigma + \hat{L}_M}{\hat{L}_\sigma} \quad (9.92)$$

Επομένως, ορίζουμε την αναφορά του ρεύματος i_q , έπειτα από το saturation ως εξής:

$$i_{q,ref} = \text{sat} \left[i_{q,ref,nom}, \min \left(\sqrt{I_{max}^2 - i_{d,ref}^2}, \hat{\xi} \cdot i_{d,ref} \right) \right] \quad (9.94)$$

όπου $i_{q,ref,nom}$ η αναφορά του i_q που παράγεται από τον ελεγκτή ταχύτητας πριν τον κορεσμό.

Η υλοποίηση των (9. 92) και (9. 94) στο simulink φαίνονται παρακάτω:

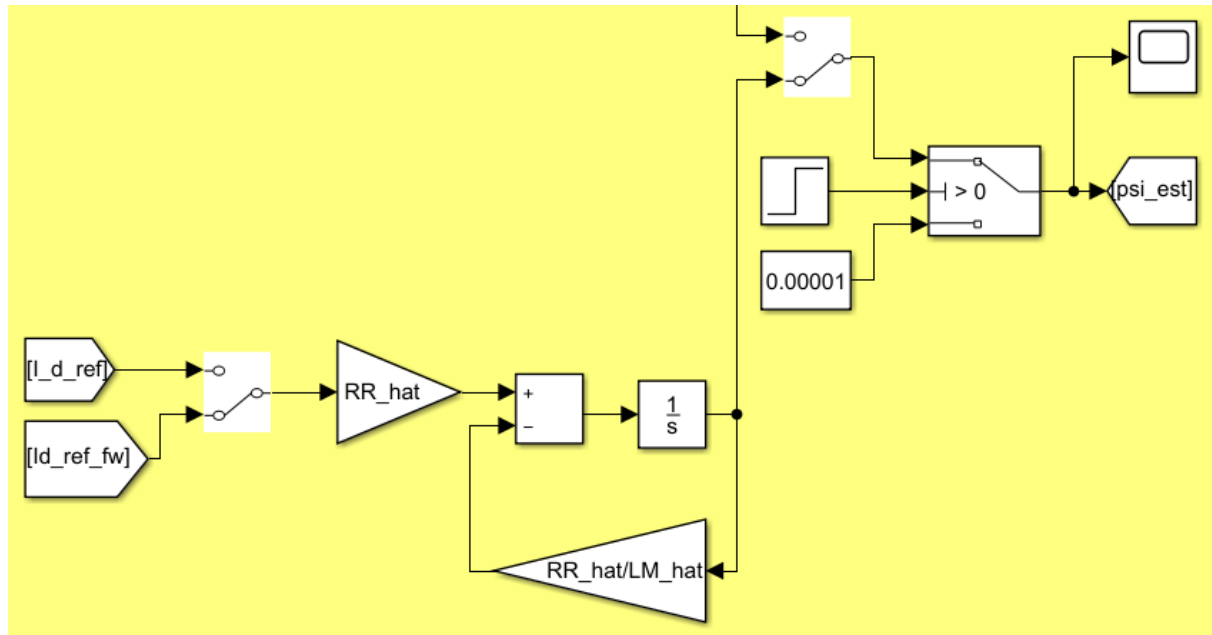


Επιπλέον, θα πρέπει να τροποποιήσουμε το μοντέλο ρεύματος, καθώς τώρα δεν έχουμε σταθερή εκτίμηση της ροής, αλλά στην περιοχή εξασθένησης πεδίου μειώνεται.

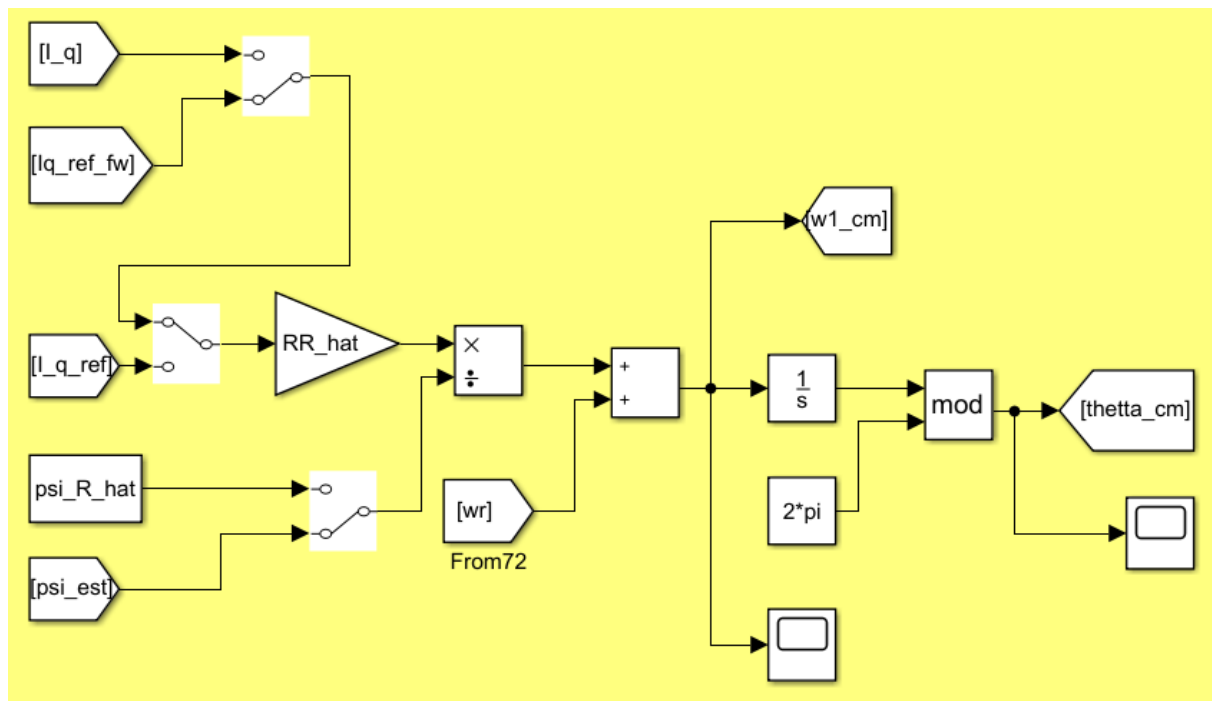
Επομένως, ορίζουμε:

$$\hat{\Psi}_R = \int \left(\hat{R}_R \cdot i_{d,ref} - \hat{\Psi}_R \cdot \frac{\hat{R}_R}{\hat{L}_M} \right)$$

Παρακάτω φαίνεται η υλοποίησή του στο simulink:



Επομένως, στο μοντέλο ρεύματος θα χρησιμοποιήσουμε αυτή την εκτίμηση της ροής, και δεν θα θεωρήσουμε σταθερή τιμή εκτίμησης $\hat{\psi}_R = 0.7821 \text{ Vs}$.



Τέλος, θα πρέπει να τροποποιήσουμε και τον ελεγκτή ταχύτητας.

Αρχικά, θα δίνουμε ως το σήμα μετά τον κορεσμό στο anti-windup αυτό το οποίο παράχθηκε από την (9. 94).

$$\Delta\eta\lambda\acute{\alpha}\delta\eta: I_s = \int \left(e_s + \frac{1}{k_{ps}} \cdot (i_{q,ref} - i_{q,ref,nom}) \right)$$

με $e_s = \omega_{ref} - \omega_r$ και $i_{q,ref,nom} = k_{ps} \cdot e_s + k_{is} \cdot I_s - b_a \cdot \omega_r$

Επιπλέον, θα πρέπει να τροποποιήσουμε την τιμή των κερδών ως εξής:

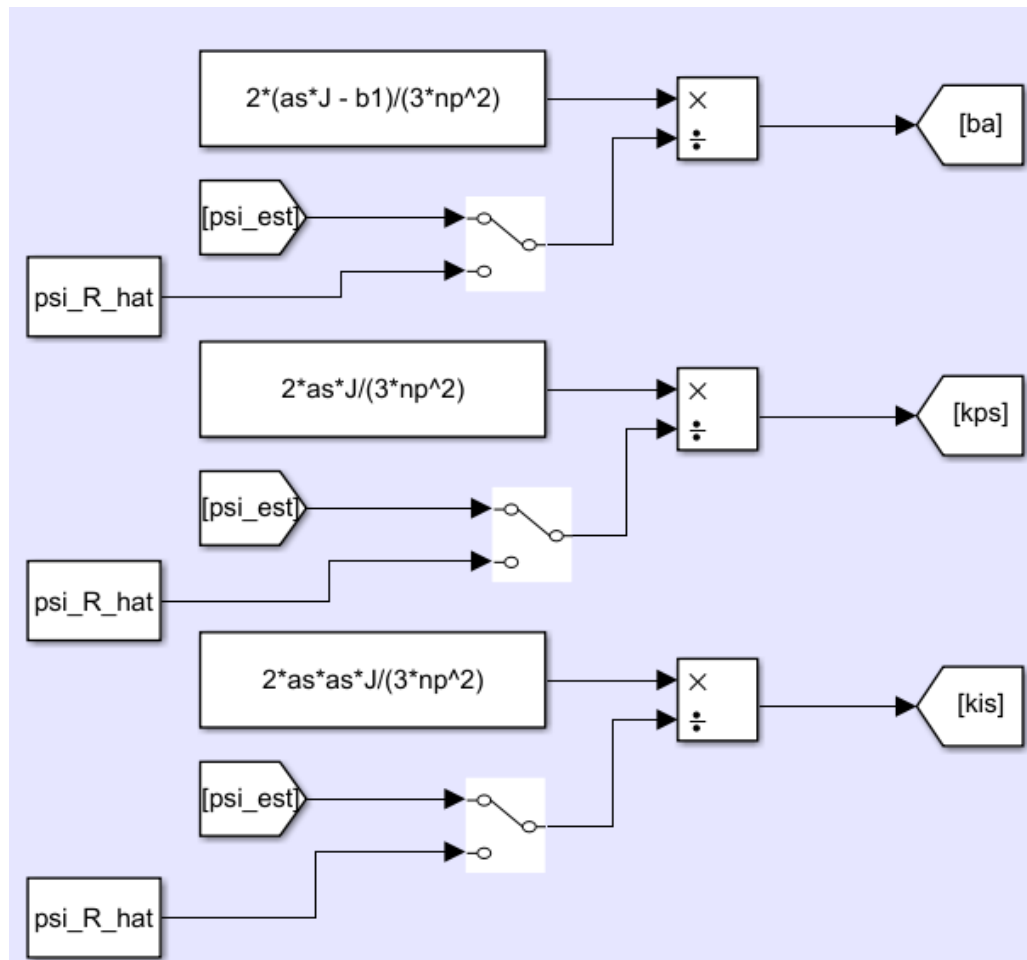
$$b_a = \frac{2K^2 \cdot (a_s \cdot \hat{J} - b_1)}{3n_p^2 \cdot \hat{\psi}_R}$$

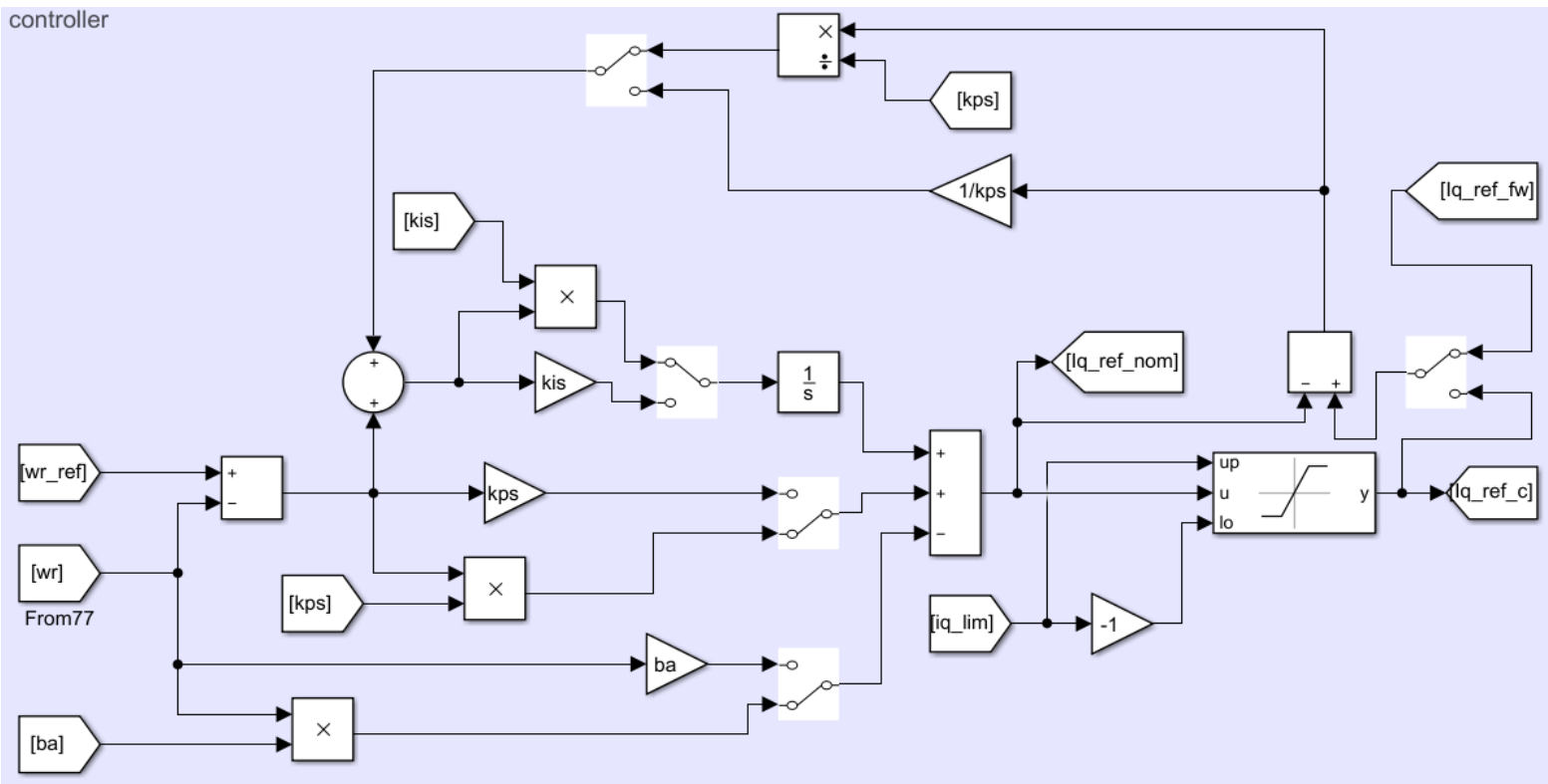
$$k_{ps} = \frac{2K^2 \cdot a_s \cdot \hat{J}}{3n_p^2 \cdot \hat{\psi}_R}$$

$$k_{is} = \frac{2K^2 \cdot a_s^2 \cdot \hat{J}}{3n_p^2 \cdot \hat{\psi}_R}$$

Επομένως, ο ελεγκτής ταχύτητας με τις παραπάνω τροποποιήσεις φαίνεται παρακάτω:

Η παραγωγή των κερδών:



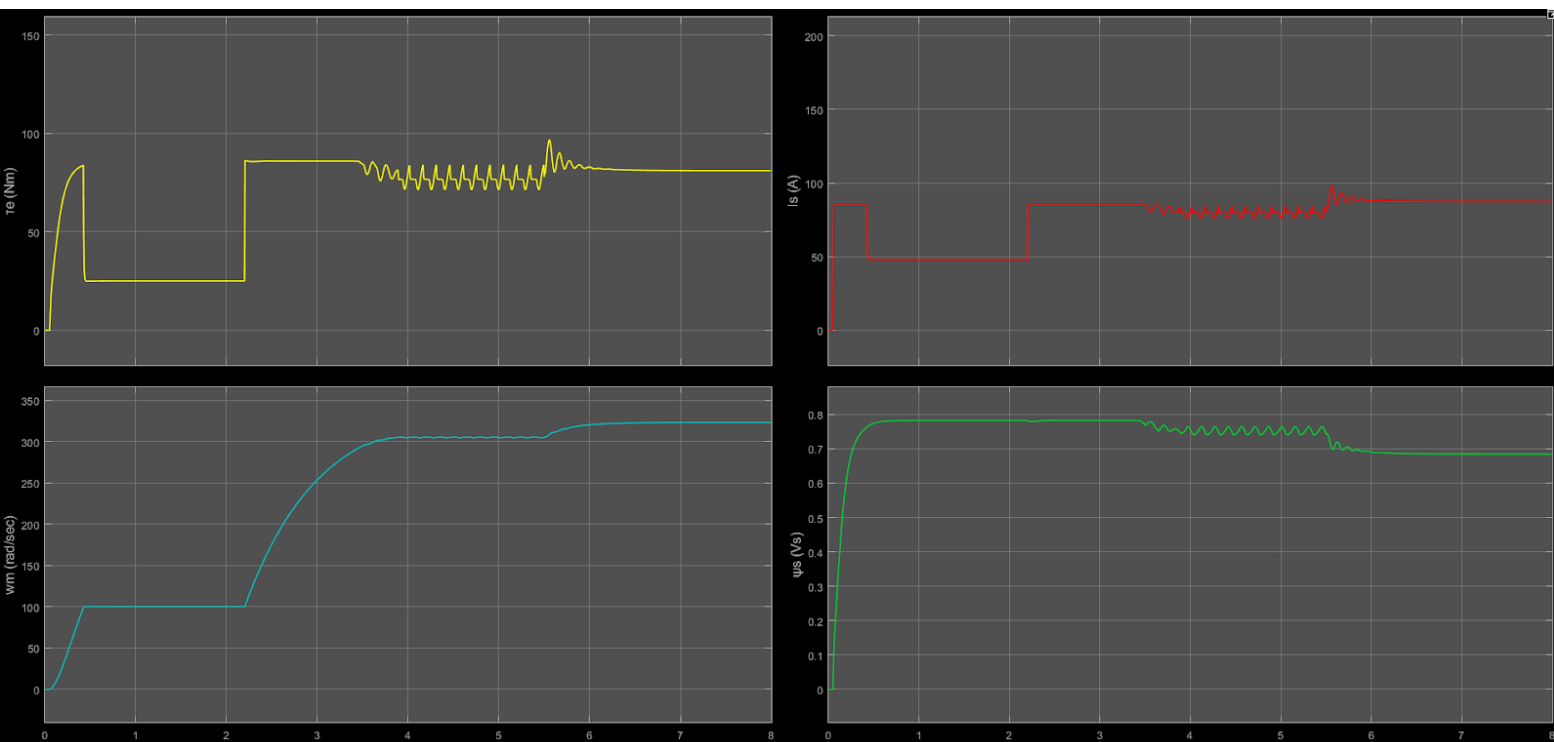


Τροφοδοτούμε τα references των ελεγκτών ρεύματος με τα παραγόμενα $i_{q,ref}$ και $i_{d,ref}$ (στην προσομοίωση ονομαζόμενα $I_{q_ref_fw}$ και $I_{d_ref_fw}$).

Τέλος, να αναφερθεί πως όπου I_{peak} όπου είναι η μέγιστη τιμή ρεύματος που επιτρέπεται, ώστε να ορίσουμε τα όρια του κορεσμού, θα εξηγηθεί παρακάτω πώς ορίστηκε.

Πραγματοποιούμε προσομοίωση όπου δίνουμε $\omega_{ref} = 100 \text{ rad/sec}$ τη χρονική στιγμή 0 sec , $\omega_{ref} = 305.5 \text{ rad/sec}$ τη χρονική στιγμή 2.2 sec και $\omega_{ref} = 325.5 \text{ rad/sec}$ τη χρονική στιγμή 5.5 sec .

Το αποτέλεσμα φαίνεται παρακάτω:



Να σημειωθεί πως η τιμή του I_{max} επιλέχθηκε έτσι ώστε να μπορεί η ταχύτητα να φτάνει στην επιθυμητή τιμή της, αλλά και να έχουμε όσο το δυνατόν λιγότερες ταλαντώσεις. Για το χρονικό διάστημα $0 - 5.5 \text{ sec}$ επιλέχθηκε $I_{max} = 85 \text{ A}$ και έπειτα για την λειτουργία εξασθένησης πεδίου, δηλαδή μετά τα 5.5 sec επιλέχθηκε $I_{max} = 100 \text{ A}$.

Βλέπουμε πως καταφέρνουμε να πετύχουμε την ταχύτητα που δίνουμε ως reference, και στην περιοχή εξασθένησης πεδίου.

Ωστόσο κατά την ονομαστική ταχύτητα παρουσιάζονται κάποιες μικρές ταλαντώσεις, πιθανώς λόγω κάποιας αστάθειας. Οι ταλαντώσεις αυτές δεν εμφανίζονται στην περιοχή εξασθένησης πεδίου.

Βλέπουμε επιπλέον, ότι κατά την εξασθένηση πεδίου, η τιμή της ροής είναι χαμηλότερη από την ονομαστική, γεγονός το οποίο περιμέναμε, καθώς η ροή μειώνεται με την αύξηση της ταχύτητας πέρα από την ονομαστική τιμή της.

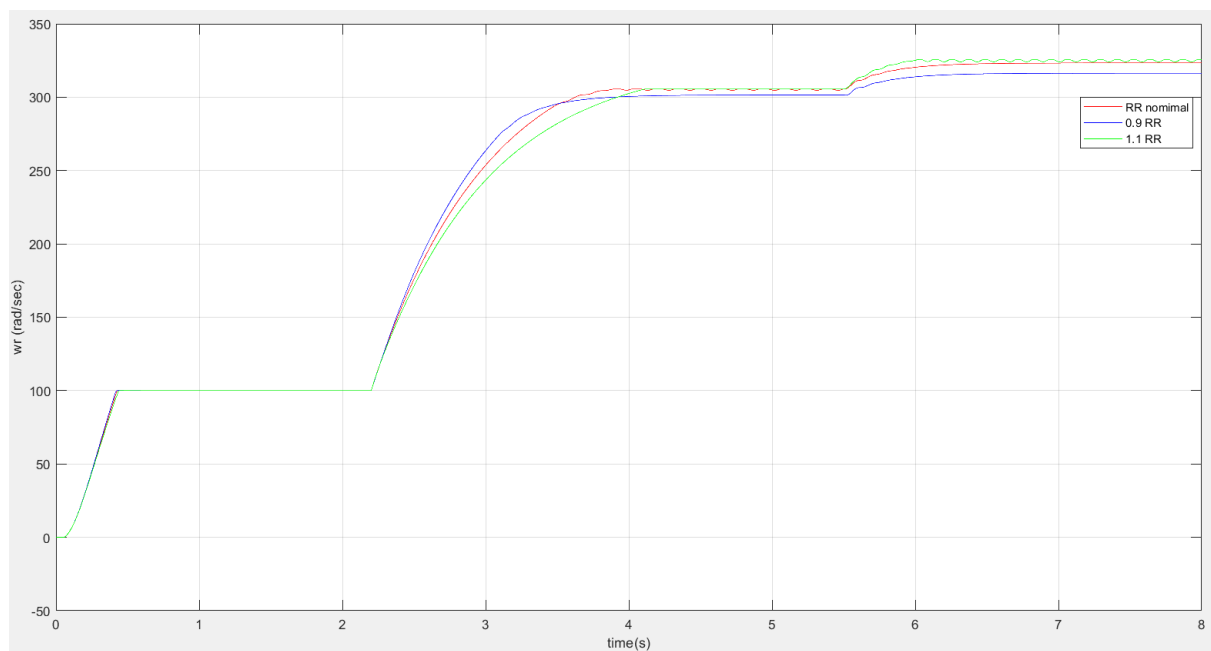
Η ροπή επιπλέον είναι μεγαλύτερη, όπως και το ρεύμα, κατά την ταχύτητα 325.5 rad/sec , γεγονός το οποίο είναι αναμενόμενο, καθώς η μηχανή χρειάζεται να επιταχύνει για να φτάσει στις υψηλότερες στροφές, και αύξηση της ροπής συνεπάγεται αύξηση και του ρεύματος i_q , καθώς είμαστε στην περιοχή 1 εξασθένησης πεδίου κατά την παρούσα δοκιμή.

Ερώτημα 6

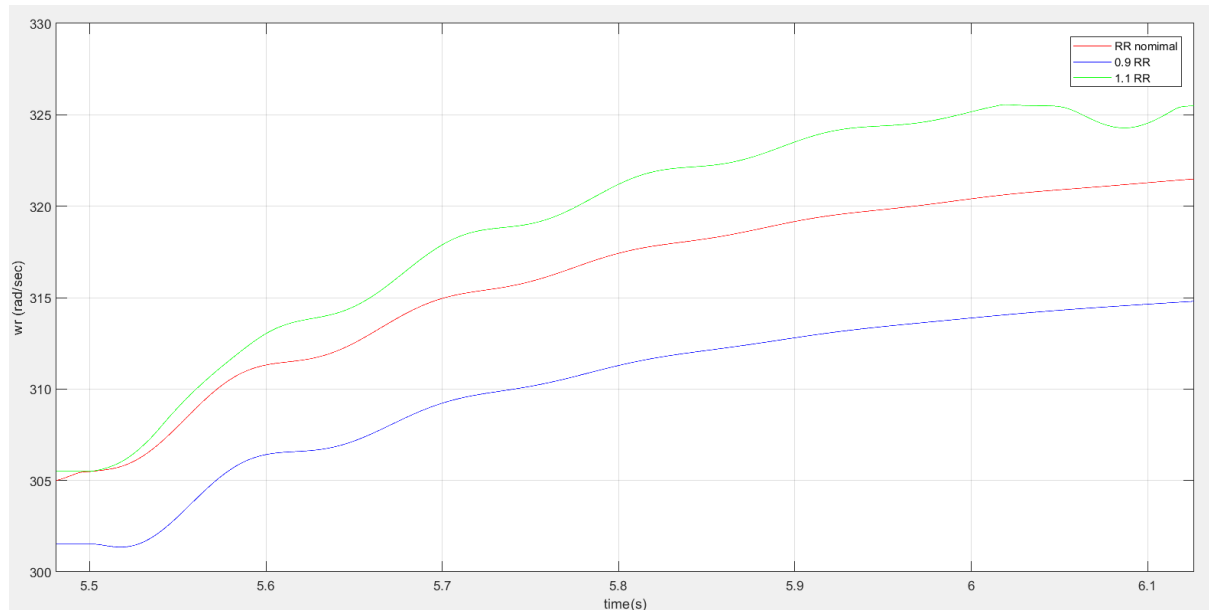
Αρχικά, παρακάτω φαίνεται η απόκριση της ταχύτητας για μεταβολές της εκτίμησης της ροής του δρομέα \hat{R}_R στην ονομαστική τιμή της, σε $0.9 \cdot \hat{R}_R$ και σε $1.1 \cdot \hat{R}_R$.

Έχει χρησιμοποιηθεί το current model.

Το αποτέλεσμα φαίνεται παρακάτω:



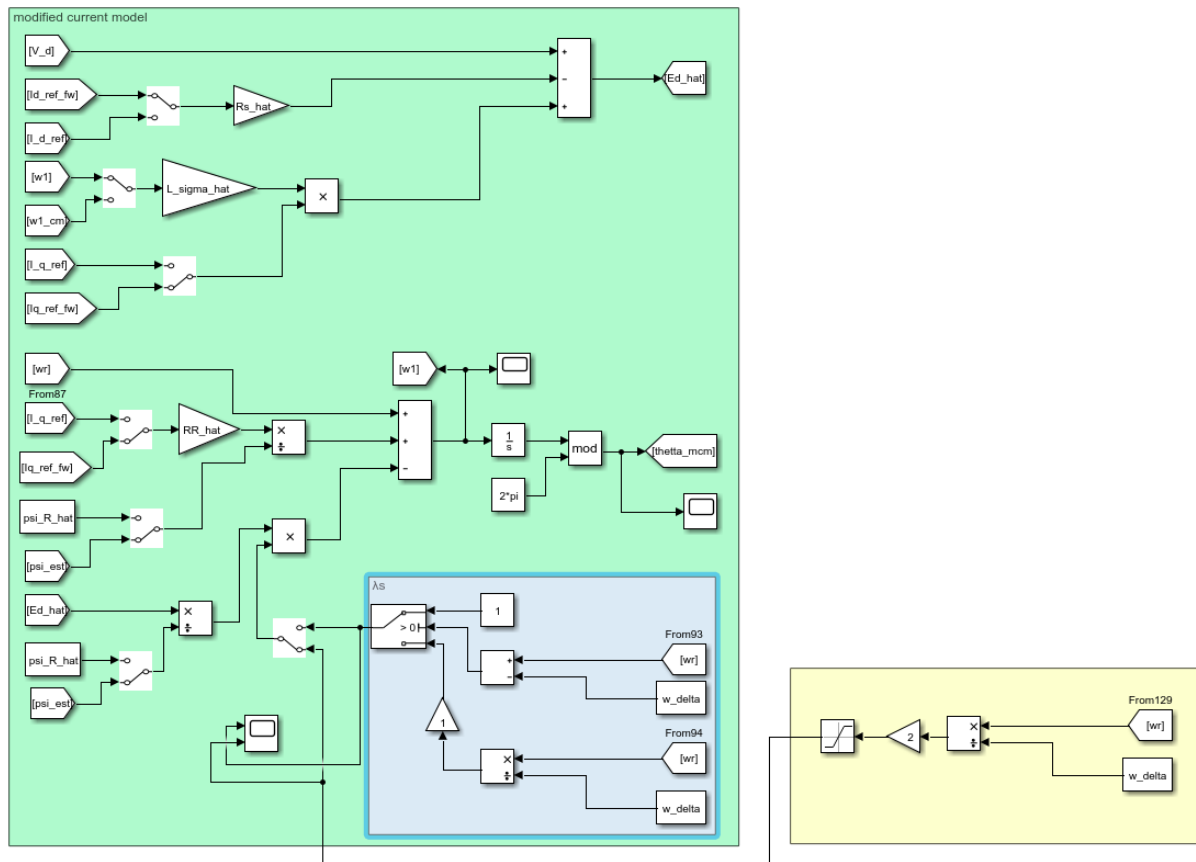
Και σε zoom κατά την περιοχή εξασθένησης πεδίου, δηλαδή σε ταχύτητες μεγαλύτερες από την ονομαστική:



Εξάγουμε τα ίδια συμπεράσματα με το ερώτημα (3), δηλαδή με υποεκτίμηση της αντίστασης δρομέα ($0.9 \cdot \hat{R}_R$) έχουμε πιο αργή απόκριση, και δεν έχουμε σύγκλιση στην επιθυμητή ταχύτητα που δίνουμε ως αναφορά, αλλά είναι ελαφρώς χαμηλότερη.

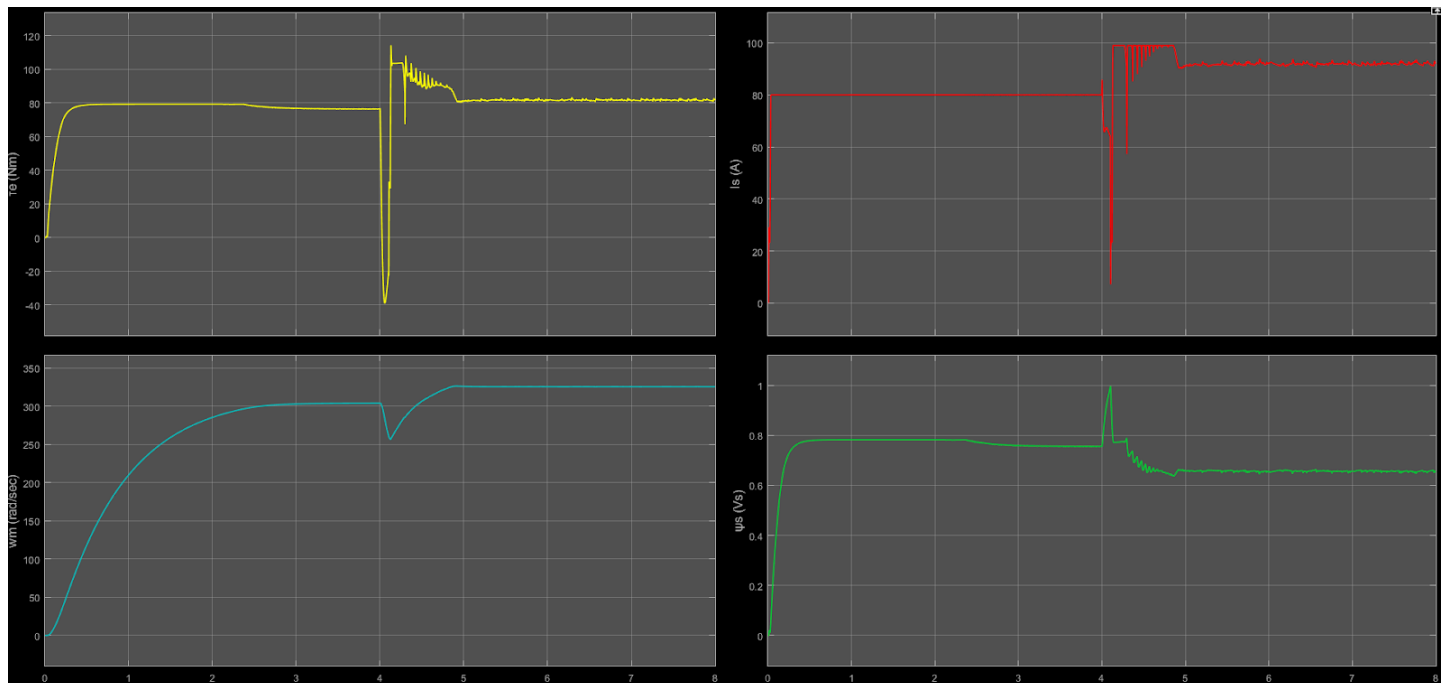
Στην περίπτωση της υπερεκτίμησης ($1.1 \cdot \hat{R}_R$) έχουμε σύγκλιση στην επιθυμητή τιμή της ταχύτητας, και έχουμε πιο γρήγορη απόκριση, ωστόσο παρουσιάζονται κάποιες ταλαντώσεις κατά την περιοχή εξασθένησης πεδίου, πιθανώς λόγω του ρεύματος που έχει οριστεί για τον κορεσμό, I_{peak} .

Τέλος, τροποποιήθηκε κατάλληλα το modified current model ως προς τις τιμές των references που δέχεται, ώστε να μπορέσει να λειτουργήσει και στην περιοχή εξασθένησης πεδίου, όπως φαίνεται παρακάτω:



Παρακάτω φαίνεται το αποτέλεσμα της προσομοίωσης, δίνοντας $\omega_{r,ref} = 305.5 \text{ rad/sec}$ τη χρονική στιγμή 0 sec και $\omega_{r,ref} = 325.5 \text{ rad/sec}$ τη χρονική στιγμή 4 sec .

Επιπλέον, για τον κορεσμό του ρεύματος θέτω $I_{peak} = 85 \text{ A}$ μέχρι τα 4 sec , και έπειτα $I_{peak} = 105 \text{ A}$ (καθώς για μεγαλύτερη τιμή ταχύτητας απαιτείται και περισσότερο ρεύμα).

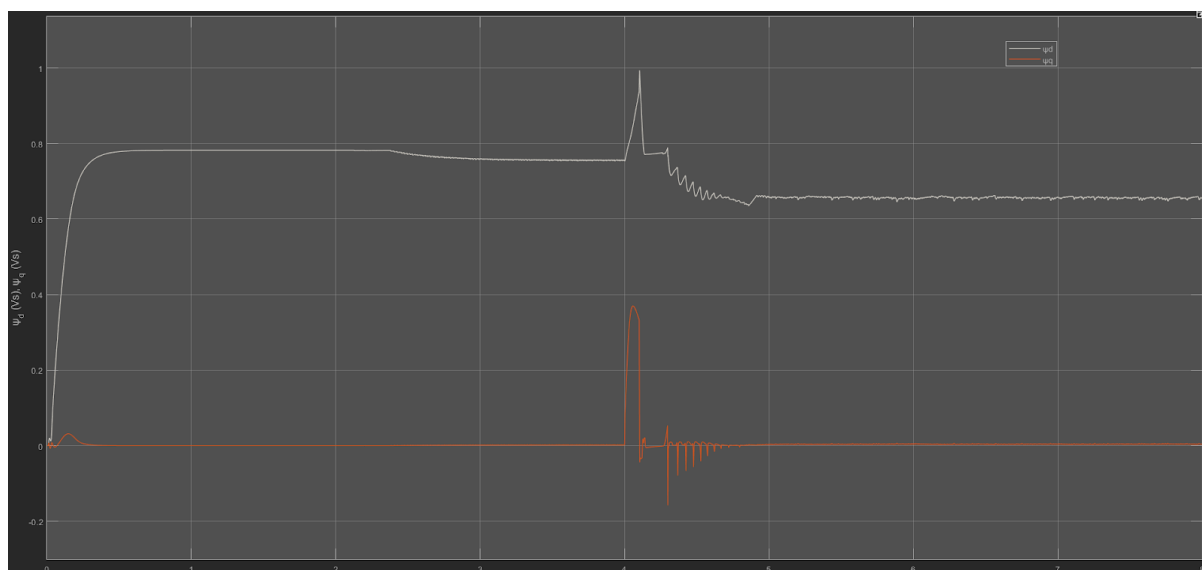


Βλέπουμε πως η ταχύτητα αποκτά την επιθυμητή τιμή και στις δύο περιπτώσεις, ωστόσο παρατηρείται μια βύθιση στην κυματομορφή της ταχύτητας κατά την αύξησή της αρχικά πάνω από την ονομαστική.

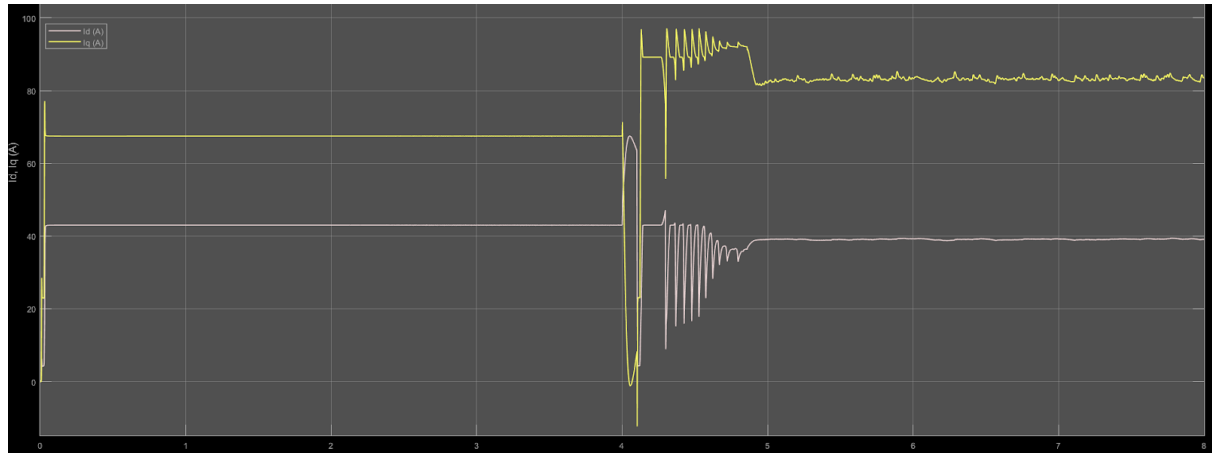
Υπάρχει ένα ποσοστό θορύβου στα μεγέθη το οποίο θα μπορούσε ίσως να ελαττωθεί με χρήση φίλτρου.

Επιπλέον, παρακάτω φαίνεται η κυματομορφή της ροής στον d και στον q άξονα.

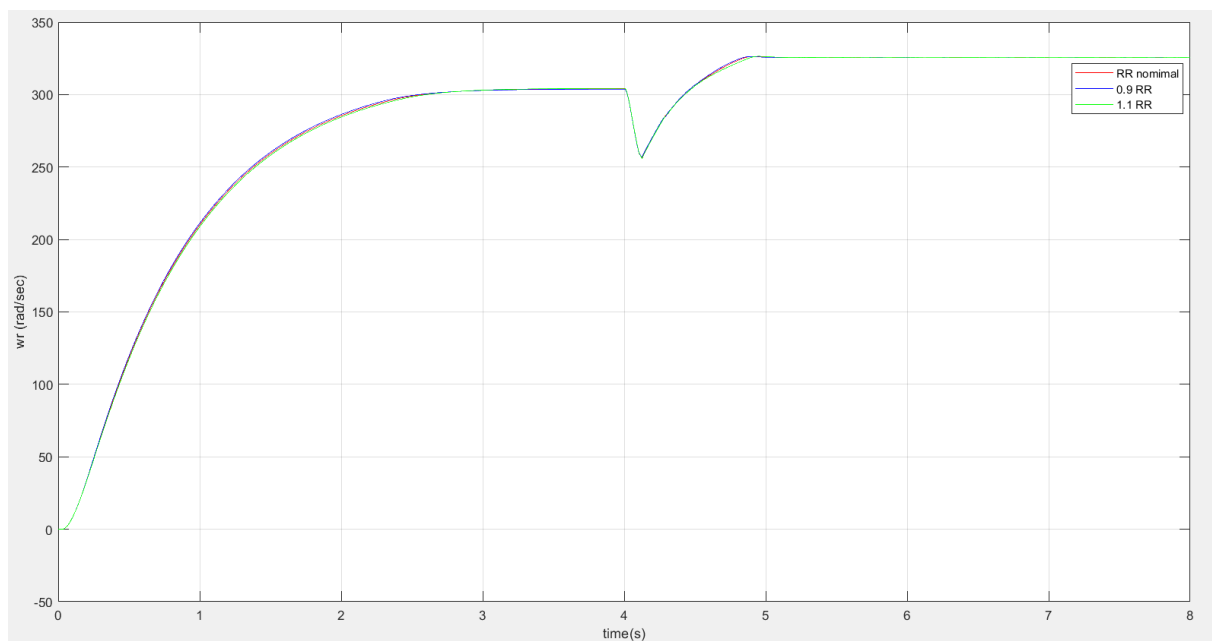
Πέραν από το μεταβατικό με την αλλαγή της αναφοράς της ταχύτητας, $\psi_q = 0$ (στην περιοχή εξασθένησης πεδίου έχει μια πολύ μικρή απόκλιση την οποία θα μπορούσαμε να αποδώσουμε σε σφάλμα υπολογισμών), και η ροή ψ_d μειώνεται με την αύξηση της ταχύτητας πέρα από την ονομαστική τιμή της, γεγονός το οποίο επιθυμούσαμε.



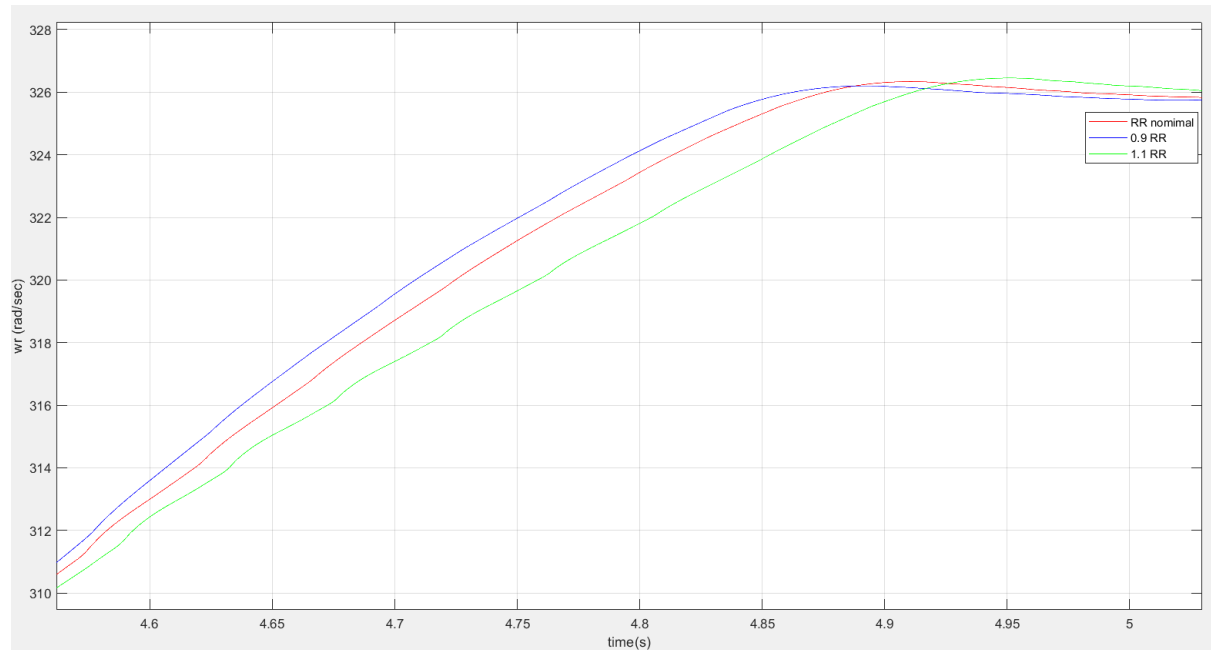
Παρακάτω φαίνεται η κυματομορφή του ρεύματος στον d και στον q άξονα.
 Επαληθεύουμε πως το ρεύμα i_d ελαττώνεται κατά την εξασθένηση πεδίου, και το ρεύμα i_q αυξάνεται, καθώς έχουμε μεγαλύτερη απαίτηση σε ροπή.



Παρακάτω φαίνεται η προσομοίωση που περιγράφηκε παραπάνω, ωστόσο μεταβάλλοντας τις τιμές της εκτίμησης της ροής του δρομέα \hat{R}_R στην ονομαστική τιμή της, σε $0.9 \cdot \hat{R}_R$ και σε $1.1 \cdot \hat{R}_R$:



Και σε zoom ώστε να μπορέσουμε να διακρίνουμε πιο καλά την απόκριση της ταχύτητας στην περιοχή εξασθένησης πεδίου:



Συγκρίνοντας την απόκριση της ταχύτητας μεταξύ των 2 μοντέλων ρεύματος, έχουμε πιο γρήγορη απόκριση και σύγκλιση στη μόνιμη κατάσταση με το βελτιωμένο μοντέλο ρεύματος, αλλά και έχουμε μικρότερη διαφορά μεταξύ των 3 δοκιμών για τις διάφορες τιμές εκτίμησης αντίστασης δρομέα.

Επαληθεύουμε δηλαδή πως το μοντέλο ρεύματος είναι πιο ευαίσθητο σε λάθος εκτίμηση της αντίστασης δρομέα, \hat{R}_R , σε σύγκριση με το βελτιωμένο μοντέλο ρεύματος και στην περιοχή εξασθένησης πεδίου.

Βιβλιογραφία

[1] Control of Voltage-Source Converters and Variable-Speed Drives, Lennart Harnefors
Marko Hinkkanen, Oskar Wallmark.