

# Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

## Συστήματα Ελέγχου Ηλεκτρικών Μηχανών

### 4η άσκηση - Διανυσματικός Έλεγχος Β'

Νοδάρης Άγγελος - 03117125

21 / 6 / 2021

(Σημείωση: οι διορθώσεις κειμένου θα γίνουν με **bold** γραμματοσειρά, οι διορθωμένες γραφικές παραστάσεις θα έχουν κόκκινο χρώμα, και υπάρχουν μερικές νέες γραφικές παραστάσεις για συγκρίσεις)

#### Μοντέλο Ρεύματος

##### 1. Απλό μοντέλο ρεύματος

Στην παρούσα άσκηση, το ζητούμενο είναι να χτιστεί το μοντέλο ρεύματος του ελέγχου, το οποίο έχει παρόμοιο στόχο με το PLL (Phase Lock Loop). Εν αντιθέσει με το τελευταίο, όμως, το μοντέλο ρεύματος δεν μετράει απευθείας τη ροή της μηχανής, κάτι το οποίο είναι έτσι και αλλιώς σχεδόν αδύνατο να υλοποιηθεί πρακτικά. Με βάση τις εξισώσεις που θα παρουσιαστούν παρακάτω, σκοπός του είναι να “προβλέψει” τη ροή (με έμμεσο τρόπο - Indirect Field Control) της μηχανής (κυρίως τη φάση της), προκειμένου να κάνει τον τέλειο προσανατολισμό, δηλαδή να μηδενίσει την ροή στον άξονα q. Η μοναδική μέτρηση που χρησιμοποιεί είναι η ταχύτητα της μηχανής  $\omega_r$ , και έχει ιδιαίτερη ευαισθησία στις εκτιμήσεις των παραμέτρων  $R_R$ ,  $L_M$ , οι οποίες μπορεί να έχουν λανθασμένες τιμές είτε λόγω λάθος εκτίμησης, είτε λόγω της θέρμανσης της μηχανής (η τιμή της αντίστασης, ειδικά, αυξάνεται σημαντικά). Η βασική εξίσωση του μοντέλου είναι:

$$\frac{d\hat{\psi}_R^s}{dt} = \hat{R}_R \hat{i}_s^s - \left( \frac{\hat{R}_R}{\hat{L}_M} - j\omega_r \right) \hat{\psi}_R^s.$$

Αφού μετασχηματιστεί στο πεδίο dq, και θεωρώντας πως υπάρχει μόνο πραγματικό μέρος ροής (δηλαδή τέλειος προσανατολισμός πεδίου), η εξίσωση επεκτείνεται στις παρακάτω:

$$\frac{d\hat{\psi}_R}{dt} = \hat{R}_R \hat{i}_d - \frac{\hat{R}_R}{\hat{L}_M} \hat{\psi}_R$$
$$\omega_2 = \omega_1 - \omega_r = \frac{\hat{R}_R \hat{i}_q}{\hat{\psi}_R}.$$

Για να περιοριστεί ο θόρυβος (σε συνθήκες πραγματικού κόσμου), αντί να μετριέται το ρεύμα και οι συνιστώσες του, είναι προτιμότερο να αντικατασταθούν με τις τιμές αναφοράς που ορίζονται από τον Speed Controller ( $I_{q\_ref}$ ) και την μόνιμη τιμή του μαγνητίζοντος ρεύματος ( $I_{d\_ref}$ ):

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

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

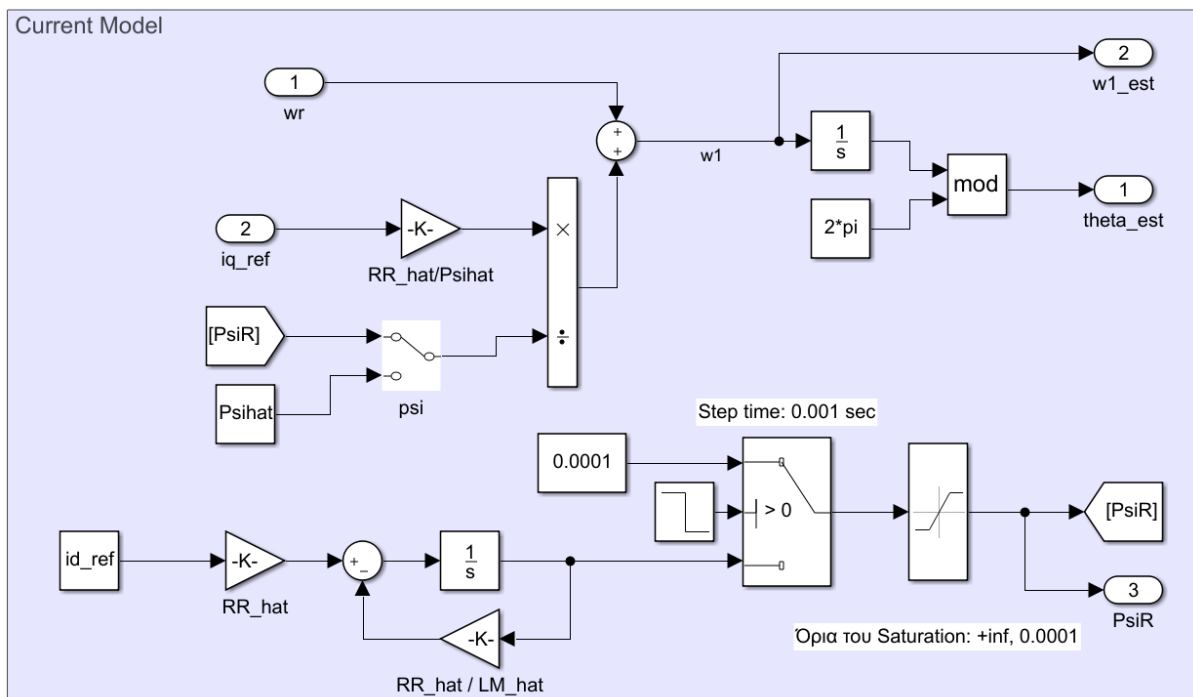
Ο συνολικός αλγόριθμος για την υλοποίηση:

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

$$\theta_1 = \text{mod}(\theta_1 + T_s \omega_1, 2\pi)$$

$$\hat{\psi}_R = \hat{\psi}_R + T_s \hat{R}_R \left( i_d^{\text{ref}} - \frac{\hat{\psi}_R}{\hat{L}_M} \right)$$

Σημείωση: το μαγνητίζον ρεύμα ορίζεται ως  $i_d^{\text{ref}} = \psi_{\text{ref}} / L_{M\_hat}$ , οπότε εξαρτάται από την ροή που θα ορισθεί ως σταθερή τιμή και την εκτίμηση της αυτεπαγωγής μαγνήτισης. Ο αλγόριθμος που φαίνεται παραπάνω προβλέπει μεταβλητή τιμή για την ροή  $\Psi_R$ , διότι προβλέπει να χρησιμοποιηθεί και στην εξασθένιση πεδίου. Στο πλαίσιο των αρχικών ερωτημάτων, θα μπορούσε λοιπόν να τεθεί σταθερό, αλλά για την πληρότητα της άσκησης και επειδή βρέθηκε ότι προκύπτουν καλύτερα αποτελέσματα, η εκτίμηση του  $\Psi_R$  υλοποιήθηκε κανονικά. Το block diagram φαίνεται παρακάτω:



Το  $\Psi_R$  που παράγεται είναι προφανώς και αυτό εκτίμηση (δηλαδή είναι το  $\Psi_{R\_hat}$ ), καθώς δεν έχουμε πραγματική μέτρηση της ροής. Ο σκοπός του Step, του switch και του Saturation είναι για να μην προκύψει διαίρεση με το 0. Εφόσον η αρχική τιμή που δίδεται είναι 0.0001, δηλαδή πρακτικά μηδενική, δεν επηρεάζεται αρνητικά το κύκλωμα, και ο κορεσμός κρατάει θετική τη ροή η οποία έτσι και αλλιώς δεν έχει λόγο να γίνει αρνητική. Ο

διακόπτης, ακόμη, δίδει τη σταθερή τιμή για εξαιρετικά μικρό χρονικό διάστημα, και απο κει και πέρα “αναλαμβάνει” η πραγματική τιμή της ροής που χτίζεται μέσω του κυκλώματος. Χάρη στην υλοποίηση αυτή, θα φανεί και παρακάτω ότι βελτιώνονται δραστικά όλα τα αποτελέσματα της μηχανής και ειδικότερα η απόκριση ροπής και ροής οι οποίες πλέον δεν θα έχουν καθόλου ταλαντώσεις κατά τα μεταβατικά φαινόμενα.

Το ρεύμα “ροπής”  $I_{q\_ref}$  προφανώς δεν είναι σταθερό, και μάλιστα προκύπτει από τον ελεγκτή ταχύτητας. Η υλοποίηση του ελεγκτή ακολούθησε παρόμοια λογική με αυτόν της μηχανής DC της 1ης άσκησης και το διάγραμμά του θα φανεί στο 2ο ερώτημα, συνολικά μαζί με τον κορεσμό και το Antiwindup.

Όπως είναι ήδη γνωστό, ο ελεγκτής λαμβάνει την αναφορά που μεταβάλλεται από τον χειριστή ( $w_{ref}$ ) και μετρώντας την πραγματική ταχύτητα  $w$  φτιάχνει το απαραίτητο ρεύμα για να μηδενιστεί η διαφορά των 2 ταχυτήτων. Οι παράμετροι τόσο του μοντέλου ρεύματος όσο και του ελεγκτή ταχύτητας επιλέχθηκαν ως εξής:

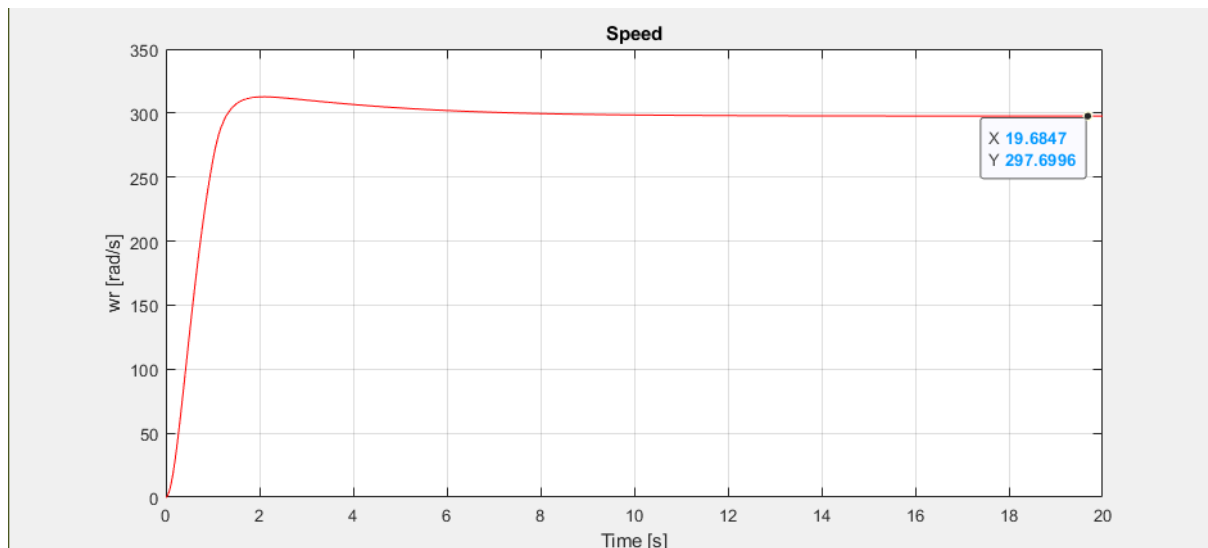
### Current Model

- $RR\_hat = RR$
- $LM\_hat = LM$

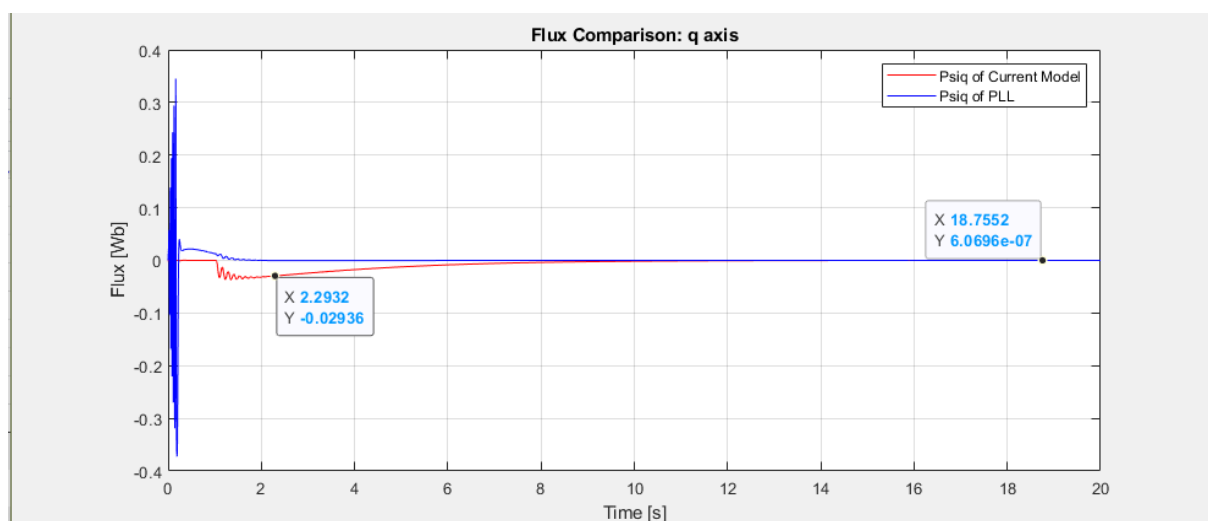
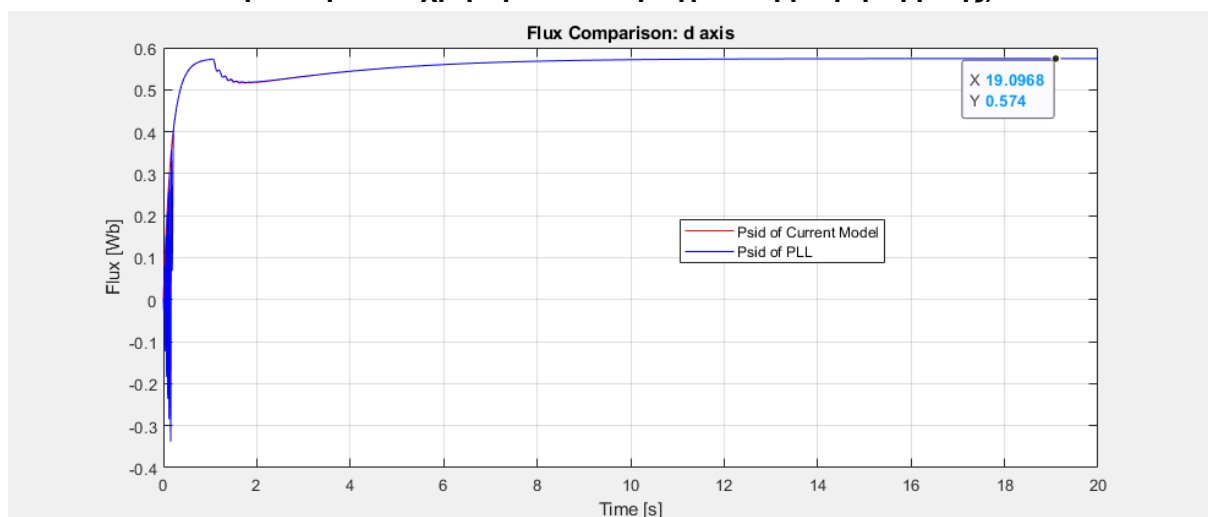
### Speed Controller

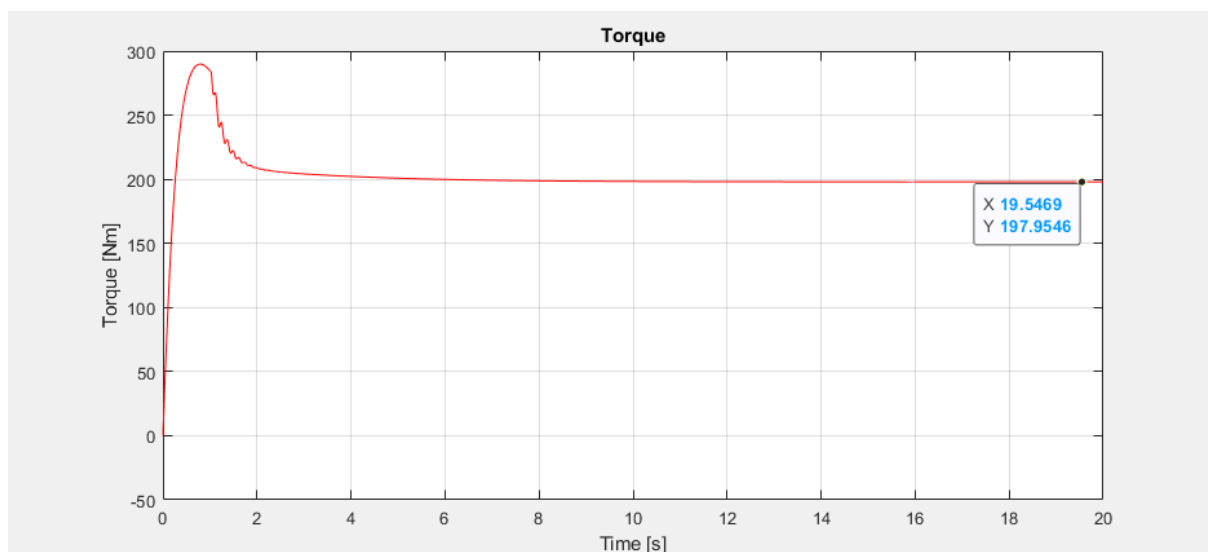
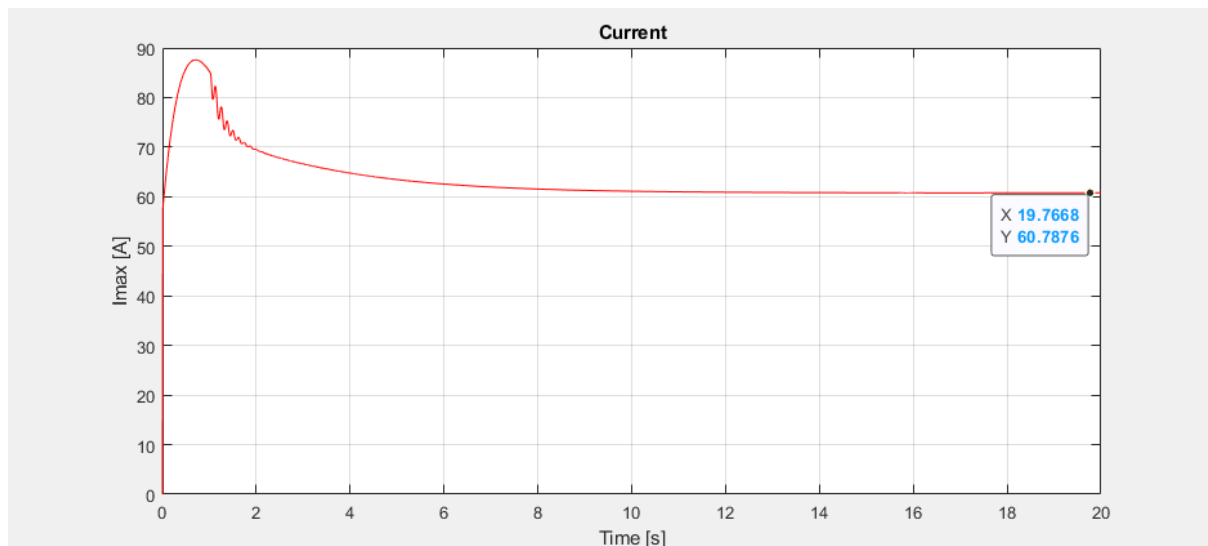
- $w_{ref} = 297.7 \text{ rad/s}$  (ονομαστική ταχύτητα)  
 $tr = 1s$ , δηλαδή το *rise time* των στροφών θεωρήθηκε λογικό να είναι στο 1 δευτερόλεπτο
- $as = \ln(9) * tr = 2.197 \text{ Hz}$
- $ksi = (2*(K^2)*(as^2)*J) / (3*(np^2)*PsiR)$
- $ksp = (2*(K^2)*as*J) / (3*(np^2)*PsiR)$
- $ba = (2*(K^2)*as*(J-b1)) / (3*(np^2)*PsiR)$  (εδώ περιλαμβάνεται η αφαίρεση του  $b1$  καθώς οι περισσότερες δοκιμές θα αφορούν την περίπτωση φορτίου αναλόγου της ταχύτητας, το οποίο είναι πιο “φυσική” δοκιμή σε σχέση με το *Step Load*)
- $K = 1 / \sqrt{2}$

Έχοντας υλοποιήσει αυτά τα 2 βασικά συστήματα, πλέον αντί να χρησιμοποιείται η γωνία του PLL, χρησιμοποιείται η εκτιμημένη γωνία που παράγεται από το μοντέλο. Η γωνία και η γωνιακή ταχύτητα τροφοδοτούνται σε όσα μπλοκ υπήρχαν προηγουμένως που χρειάζονταν, δηλαδή στους 2 ελεγκτές ρεύματος και σε όλους τους μετασχηματισμούς  $\alpha\beta \rightarrow dq$  και αντίστροφα προϋπήρχαν. Διατηρείται ίδιο, ακόμη, το σύστημα κορεσμού της τάσης από την προηγούμενη άσκηση. Εφαρμόζεται ο νέος έλεγχος της μηχανής στην τροφοδοσία, και αρχικά ελέγχονται τα βασικά μεγέθη (ταχύτητα, ρεύμα, ροπή, ροή):

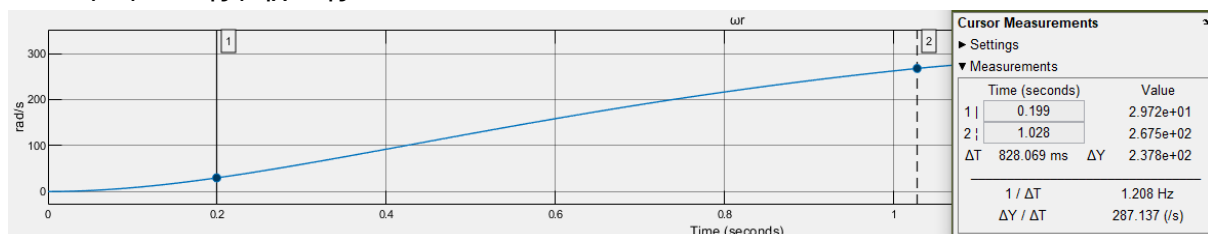


Παρακάτω γίνεται σύγκριση μεταξύ της ροής που “παράγεται” από το μοντέλο ρεύματος με το ολοκληρωμένο PLL της 3ης άσκησης (στον d άξονα οι ροές είναι πανομοιότυπες, με τη μικρή διαφορά ότι η ροή του current model δεν έχει ταλαντώσεις στην εκκίνηση, ενώ στον q άξονα φαίνεται ότι το PLL είναι πιο γρήγορο, το οποίο είναι λογικό εφόσον χρησιμοποιεί πραγματική μέτρηση ροής):





Τα σημαντικά σημεία που πρέπει να επισημανθούν είναι, αρχικά, ότι η ροή έχει ακριβώς την επιθυμητή συμπεριφορά. Η  $\Psi_q$  είναι πρακτικά μηδενική (άρα πέτυχε ο τέλει προσανατολισμός πεδίου) και η συνολική ροή βρίσκεται όλη στον άξονα d (αφού η αναφορά ήταν  $\Psi_{\hat{}} = 0.574$  T). Επίσης, οι στροφές στην μόνιμη κατάσταση είναι πρακτικά ονομαστικές (με μια ελάχιστη απόκλιση εκατοστού), και η ροπή και το ρεύμα φτάνουν και αυτά τις ονομαστικές τους τιμές. Τέλος, αναμένεται να ελεγχθεί ποιοτικά ο χρόνος ανόδου των στροφών της μηχανής:



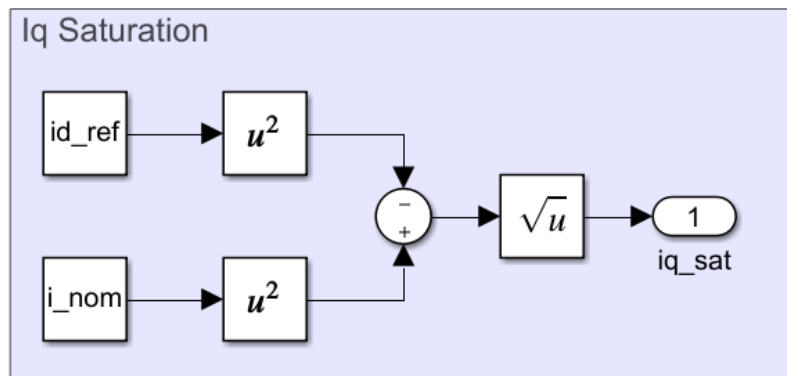
Όπως φαίνεται, το rise time είναι 0.828s το οποίο είναι ίδιας τάξης μεγέθους με το επιθυμητό rise time του 1 second.

## 2. Κορεσμός και antiwindup

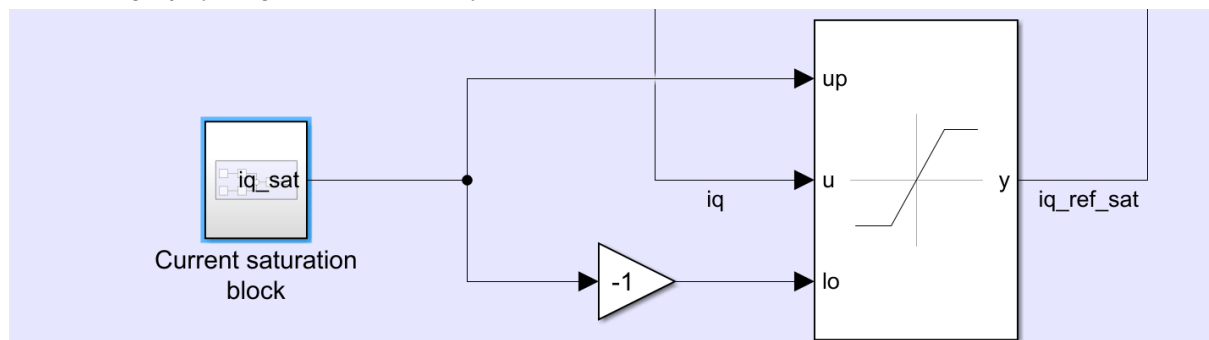
Σε αυτό το ερώτημα το ζητούμενο είναι να ολοκληρωθεί το μοντέλο του ελεγκτή ταχύτητας, προσθέτοντάς του κορεσμό και κύκλωμα Anti-WindUp, που σημαίνει ότι θα πρέπει να βελτιωθεί η απόκριση του ρεύματος. Πρώτο βήμα είναι η δημιουργία της κορεσμένης τιμής του ρεύματος  $i_q$  (το  $i_d$  έτσι και αλλιώς παραμένει σταθερό όσο απαιτείται σταθερό πεδίο). Εφόσον δεν πρέπει να ξεπερνιέται το ονομαστικό ρεύμα, είναι εύκολο μέσω της εξίσωσης μέτρου διανύσματος να βρεθούν τα όρια του saturation block που θα χρησιμοποιηθεί ως εξής:

- $I_{nom}^2 = I_q^2 + I_d^2 \rightarrow I_{q,max} = \pm \sqrt{I_{nom}^2 - I_d^2}$

Η εξίσωση υλοποιείται εύκολα με την παρακάτω διάταξη:



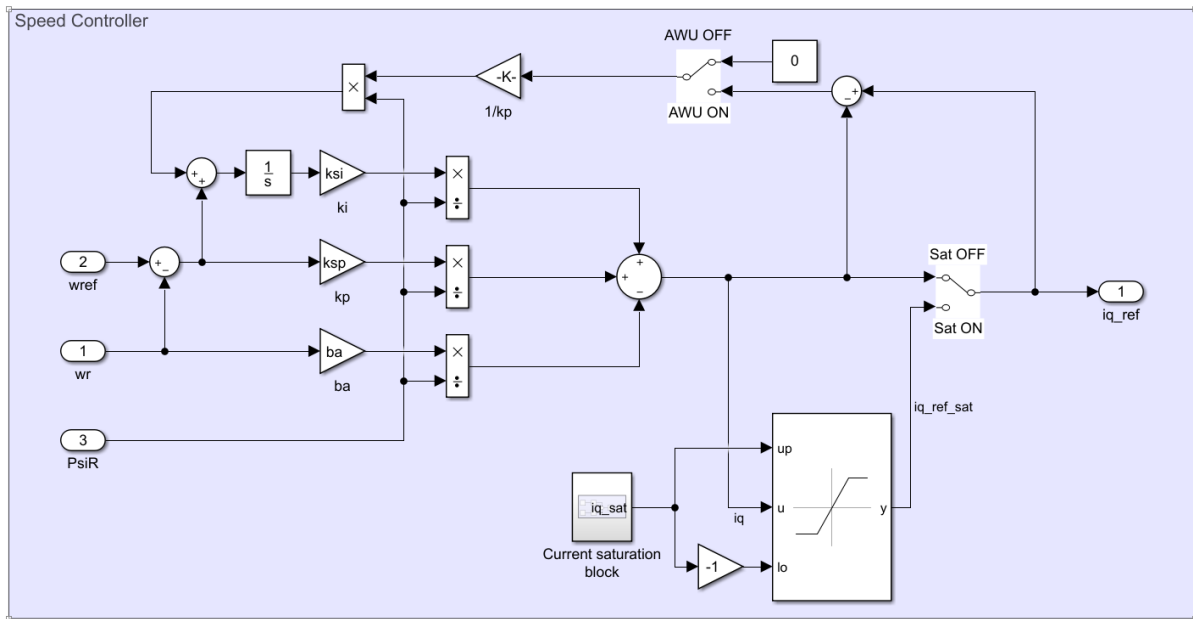
Επομένως, η έξοδος  $i_{q\_sat}$  εφαρμόζεται στα όρια του κορεσμού:



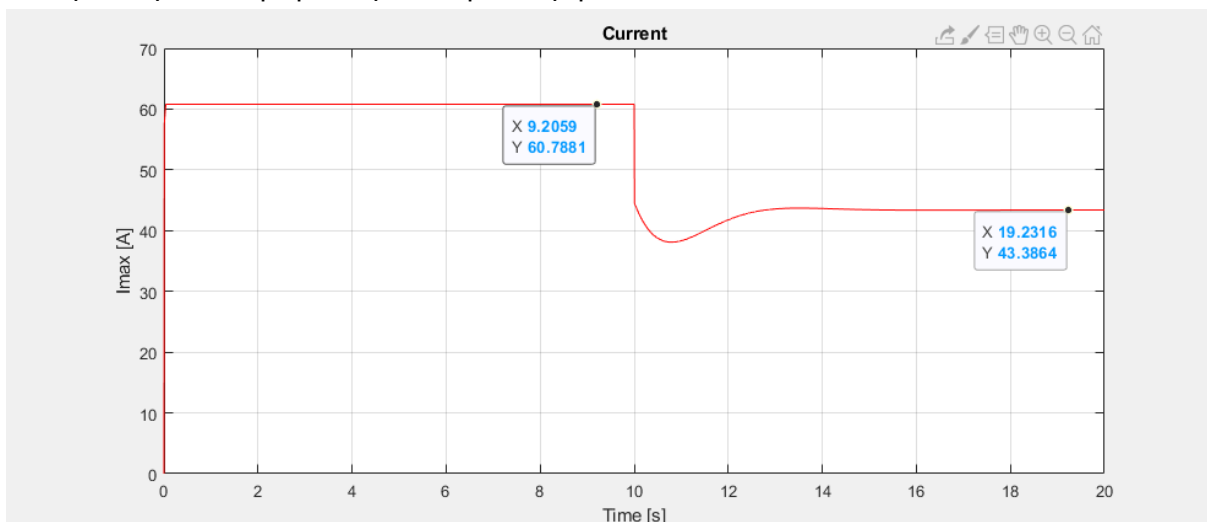
Σε αυτό το στάδιο, έχει ολοκληρωθεί ο κορεσμός του ρεύματος. Παραμένει να υλοποιηθεί και το κύκλωμα antiwindup με βάση τον γνωστό αλγόριθμο:

- $d\Omega/dt = e + 1/k_{sp} * (i_{q\_ref\_sat} - i_q)$
- $i_q = k_{sp} * e + k_{si} * \Omega - \omega_r * b_a$

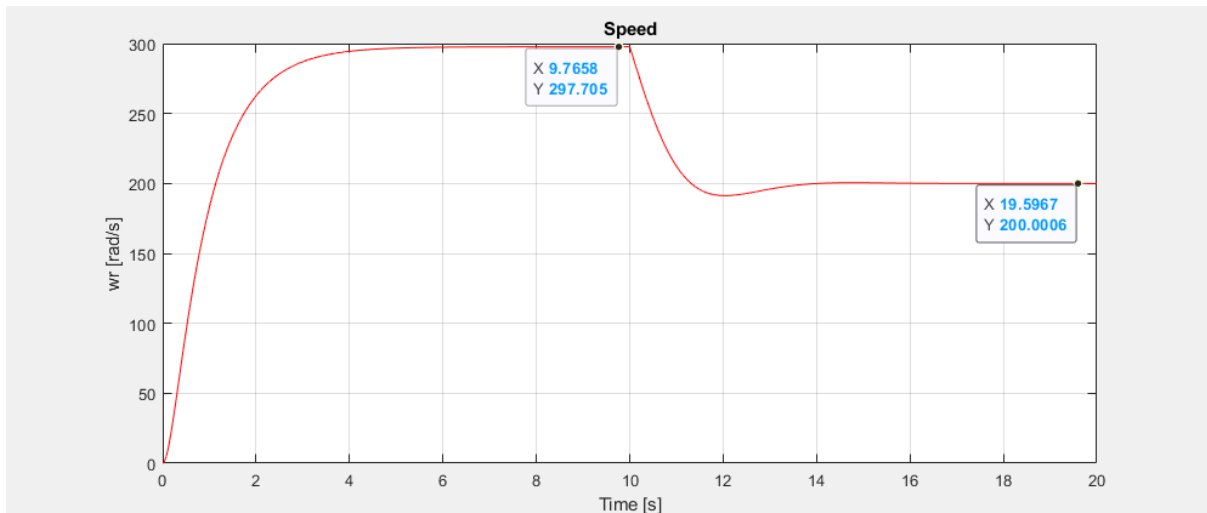
Έτσι, ολοκληρώνεται το antiwindup και συνολικά ο ελεγκτής ταχύτητας:



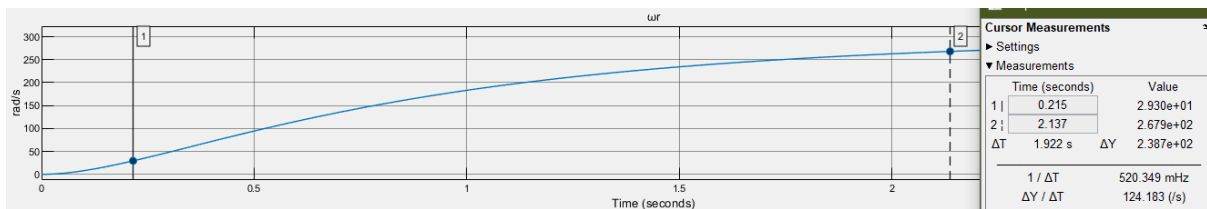
Το antiwindup προφανώς έχει σκοπό να περιορίσει το overshoot του ρεύματος και συνεπώς να βελτιώσει την απόκρισή του. Η βελτίωση είναι ξεκάθαρη, καθώς η τιμή του δεν ξεπερνάει σε καμία περίπτωση την ονομαστική του τιμή:



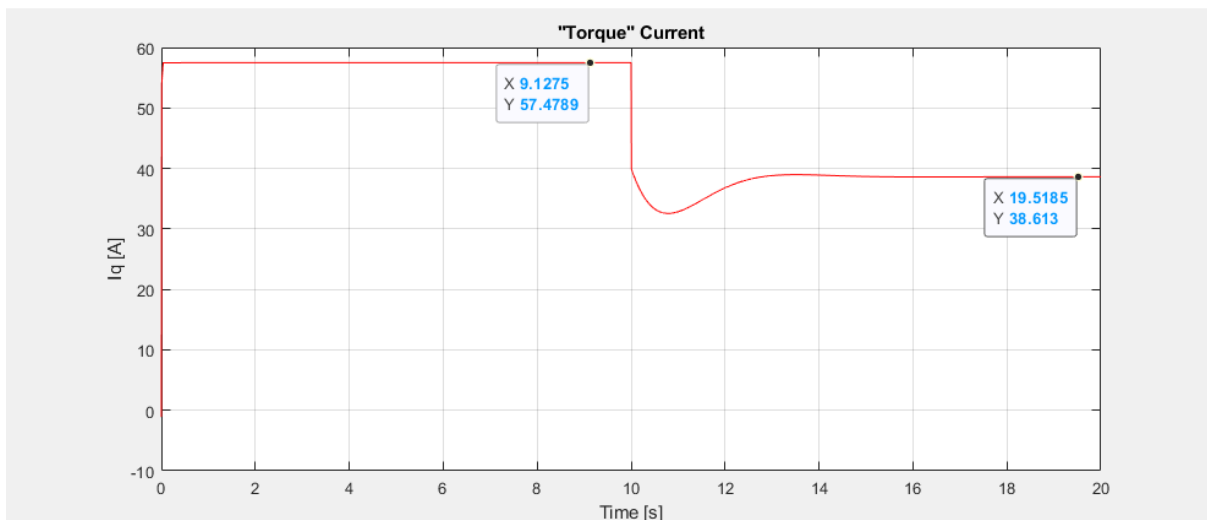
Έπειτα, θα γίνει βηματική αλλαγή της ταχύτητας προκειμένου να επαληθευθεί ότι ο ελεγκτής δουλεύει σωστά:



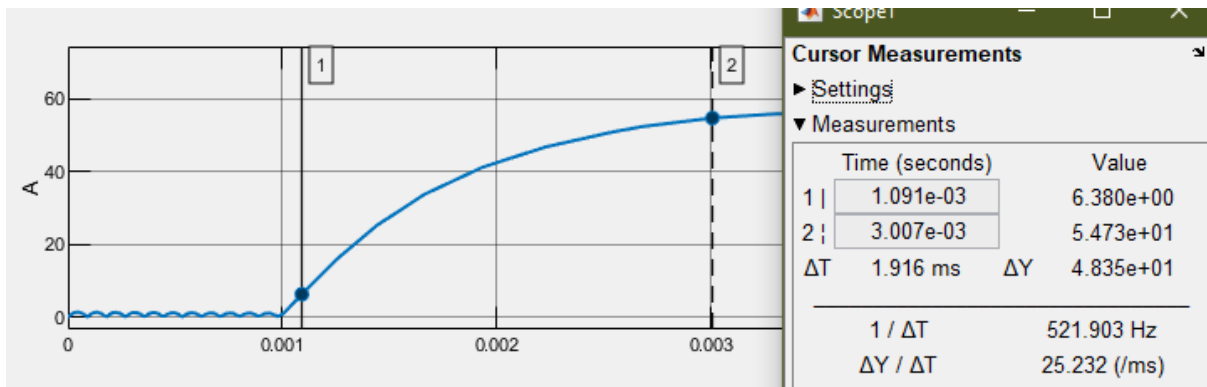
Ο χρόνος ανόδου της μηχανής φαίνεται παρακάτω:



Όπως φαίνεται, τόσο η ονομαστική αλλά και η βηματικά μικρότερη ταχύτητα επιτεύχθηκαν με μεγάλη ακρίβεια. Παρακάτω για πληρότητα φαίνεται και η συνιστώσα του ρεύματος  $I_q$ :



Και παρακάτω φαίνεται ο χρόνος ανόδου του ρεύματος:





### 3. Τροποποιημένες εκτιμήσεις παραμέτρων στο απλό μοντέλο ρεύματος

Επόμενο βήμα είναι να ελεγχθεί κατά πόσο το μοντέλο ρεύματος είναι ευαίσθητο σε λάθος εκτιμήσεις των παραμέτρων  $RR$ ,  $LM$ . Αυτό για την προσομοίωση σημαίνει ότι όλες οι παράμετροι της μηχανής θα παραμείνουν ίδιες με πριν, αλλά θα αλλάξουν οι εκτιμήσεις που επηρεάζουν όλο το υπόλοιπο κομμάτι του κυκλώματος ελέγχου, δηλαδή τον ελεγκτή ταχύτητας και ρεύματος, το μοντέλο ελέγχου, τους κορεσμούς κλπ. Για τον σκοπό αυτό, ορίζονται οι 2 νέες μεταβλητές:

- $LM\_hat = LM$
- $RR\_hat = RR$

Πρακτικά, τα τμήματα τα οποία θα επηρεαστούν είναι τα παρακάτω:

#### Current model

- $\omega_r = \omega_r + iq\_ref * RR\_hat / PsiR$
- $dPsiR / dt = RR\_hat * id\_ref - RR\_hat * PsiR / LM\_hat$

#### Speed controller

- $id\_ref = (Psihat / LM\_hat)$
- $I_{q,max} = \pm \sqrt{I_{nom}^2 - I_d^2}$
- $k_{si} = (2*(K^2)*(as^2)*J) / (3*(np^2)*PsiR)$
- $k_{sp} = (2*(K^2)*as*J) / (3*(np^2)*PsiR)$
- $ba = (2*(K^2)*as*(J-b1)) / (3*(np^2)*PsiR)$

Οπότε θα επηρεαστούν τα όρια κορεσμού του ρεύματος  $I_q$  και τα κέρδη του ελεγκτή.

#### Current controller

- $id\_ref = (Psihat / LM\_hat)$
- $R = R_s + RR\_hat$
- $Ra = (ac * Lsigma) - R$
- $kci = ac * (R + Ra)$

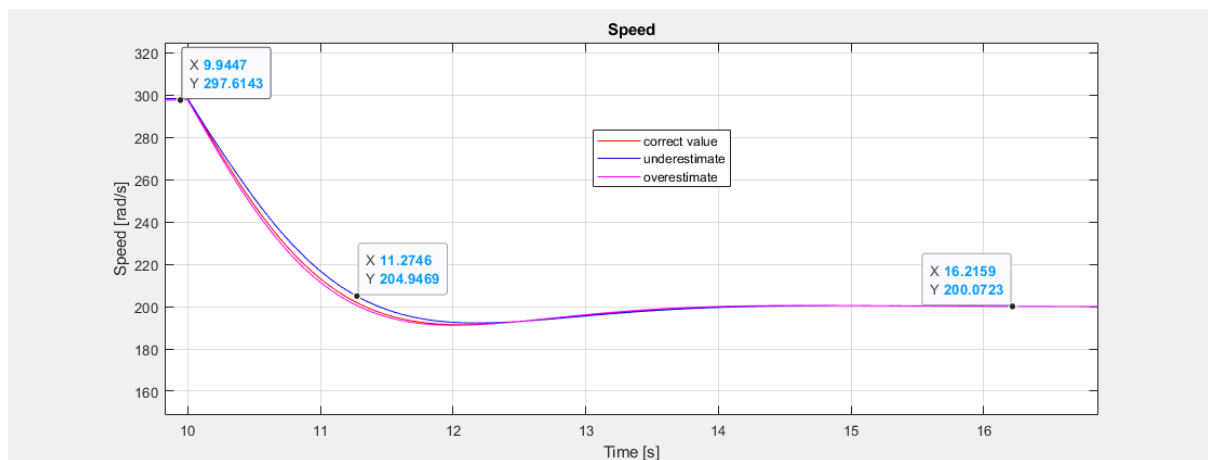
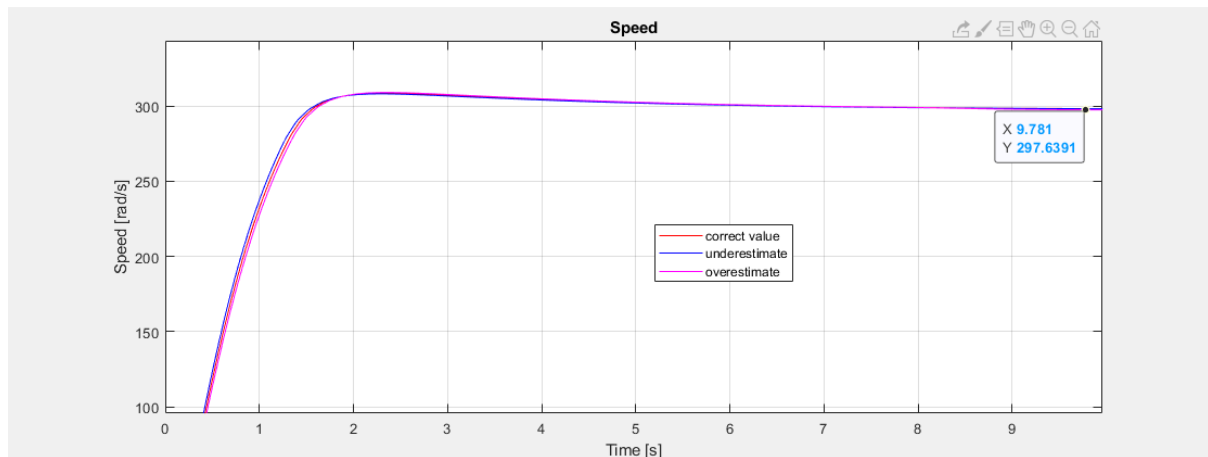
Δηλαδή αλλάζει η αναφορά του ρεύματος μαγνήτισης σε μια σταθερή, λανθασμένη τιμή, και ταυτόχρονα αλλάζει η τιμή της ενεργούς αντίστασης και συνεπώς το ολοκληρωτικό κέρδος.

Οι συγκρίσεις που θα γίνουν παρακάτω θα περιλαμβάνουν μια step down αναφορά στην ταχύτητα, προκειμένου να είναι πιο ξεκάθαρη η συμπεριφορά της μηχανής στην αλλαγή ταχύτητας. Επομένως, πρώτα δοκιμάζεται η υπερεκτίμηση και υποεκτίμηση της αυτεπαγωγής μαγνήτισης  $LM$  κατά  $\pm 10\%$ , δηλαδή:

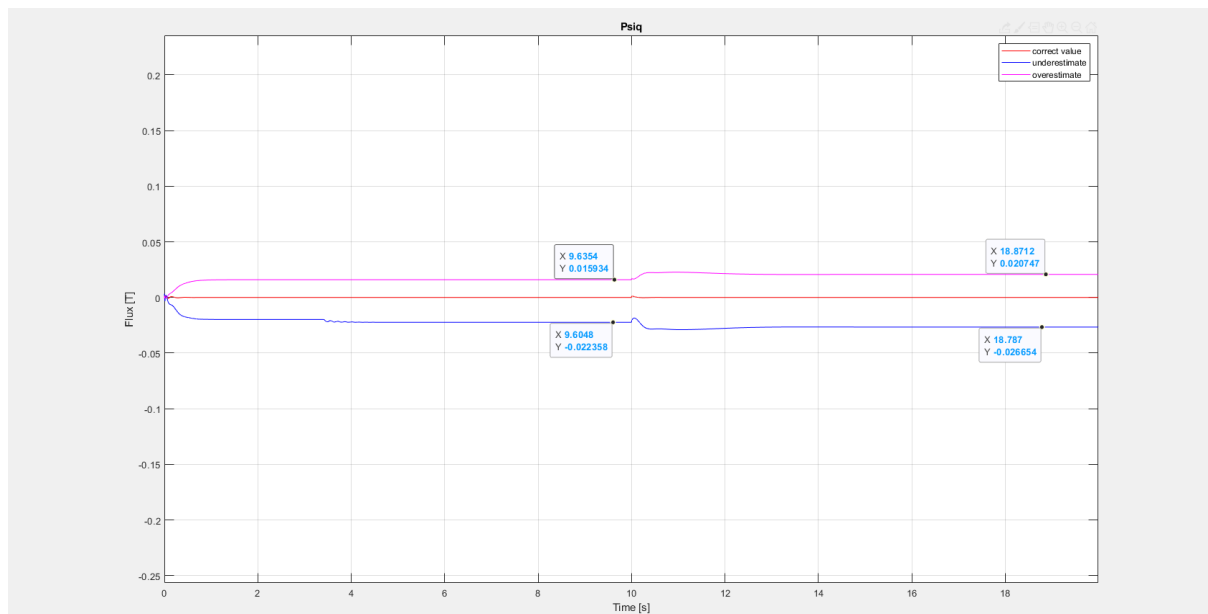
- $LM\_hat$  (υποεκτίμηση) =  $0.9*LM$
- $LM\_hat$  (υπερεκτίμηση) =  $1.1*LM$

Παρατίθεται η γραφική παράσταση της ταχύτητας και της ροής  $\Psi_q$ :

## Νέες γραφικές ταχύτητας:



Όπως φαίνεται, η ταχύτητα δεν επηρεάζεται ιδιαίτερα από τις λανθασμένες εκτιμήσεις της αυτεπαγωγής μαγνήτισης. Φαίνεται ότι η μηχανή λειτουργεί καλύτερα όταν της επιτρέπεται να “τραβάει” παραπάνω ρεύμα, οπότε το ονομαστικό τέθηκε στο 1.25pu δηλαδή 76A.



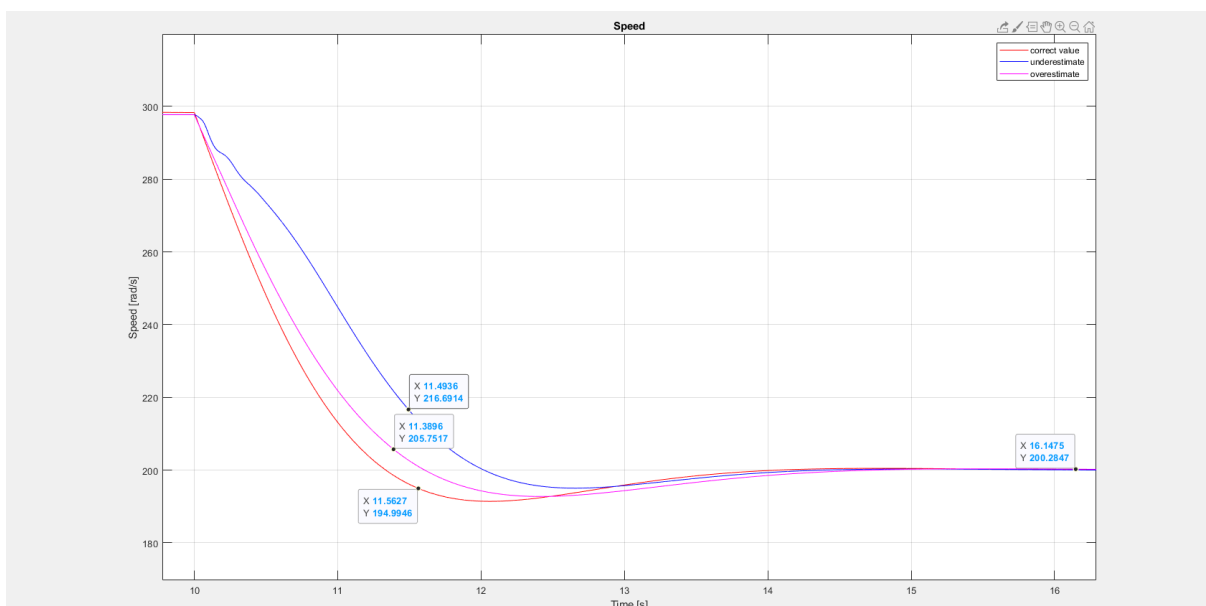
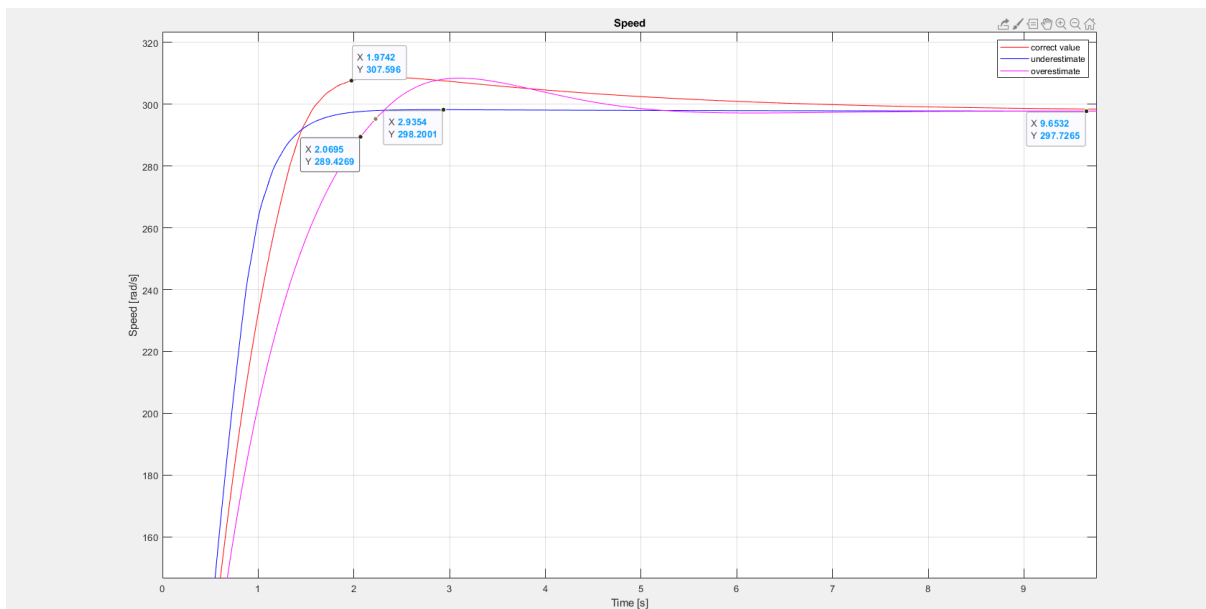
Όπως φαίνεται, υπάρχει μια μικρή απόκλιση στην αναμενόμενη ροή, καθώς αυτή θα έπρεπε να ήταν πιο κοντά στο 0. Ωστόσο, εφόσον οι αποκλίσεις αυτές είναι μικρότερες του 5% της

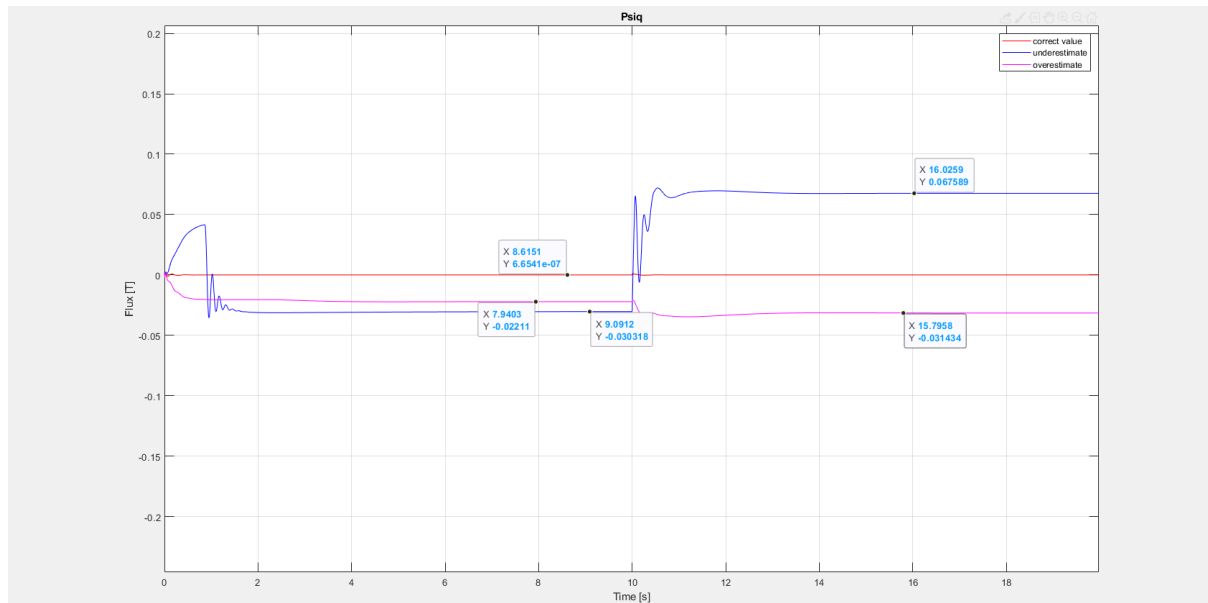
ονομαστικής τιμής της ροής, θεωρείται αποδεκτή απόκλιση επομένως μπορεί να θεωρηθεί ότι διατηρείται ο τέλειος προσανατολισμός πεδίου. Όσον αφορά τις στροφές, φαίνεται ότι οι λανθασμένες εκτιμήσεις προκαλούν πρόβλημα, συγκεκριμένα στις ονομαστικές στροφές, καθώς αυτές δεν επιτυγχάνονται επακριβώς. Στις χαμηλότερες στροφές (200 rad/s) υπάρχει πολύ μεγαλύτερη ακρίβεια, και φαίνεται η υπερεκτίμηση να είναι αργότερη από την υποεκτίμηση και τις σωστές τιμές, με τις 2 τελευταίες περιπτώσεις να επιτυγχάνουν σχεδόν ταυτόχρονα τις επιθυμητές στροφές. Σε κάθε περίπτωση, πάντως, όλες αυτές οι αποκλίσεις είναι μικρές.

Σημείωση: οι δοκιμές έγιναν όλες στην περίπτωση φορτίου ανάλογου της ταχύτητας. Στην περίπτωση κενού φορτίου, οι καθυστερήσεις των λανθασμένων εκτιμήσεων ήταν πολύ πιο εμφανείς και ο τέλειος προσανατολισμός πεδίου διατηρούνταν με πολύ μεγαλύτερη ακρίβεια. Παρόλα αυτά, δεν θεωρήθηκε σκόπιμο να αναδειχθούν οι δοκιμές κενού φορτίου, καθώς μεγαλύτερο ενδιαφέρον έχει η συμπεριφορά της μηχανής υπό φορτίο.

Στη συνέχεια, θα δοκιμασθεί υποεκτίμηση και υπερεκτίμηση της RR κατά  $\pm 20\%$ , δηλαδή:

- $RR\_hat$  (υποεκτίμηση) =  $0.8 \cdot RR$
- $RR\_hat$  (υπερεκτίμηση) =  $1.2 \cdot RR$





Όπως φαίνεται, πλέον δεν υπάρχει τέλειος προσανατολισμός πεδίου, καθώς οι αποκλίσεις έχουν γίνει αρκετά σημαντικές. Η απόκριση ταχύτητας παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, καθώς στην άνοδό της η πιο γρήγορη απόκριση είναι της υποεκτίμησης, αντιθέτως όμως στην κάθοδο της ταχύτητας στα 200 rad/s η απόκριση με τη σωστή εκτίμηση της αντίστασης είναι όντως η πιο γρήγορη απ'όλες, όπως ήταν αναμενόμενο. Οι δοκιμές έγιναν, όπως εξηγήθηκε και πριν, με φορτίο ανάλογο της ταχύτητας, παρόλο που τις πιο σωστές αποκρίσεις τις έδινε η περίπτωση κενού φορτίου (στην περίπτωση κενού φορτίου ο προσανατολισμός ήταν τέλειος σε κάθε περίπτωση. Ωστόσο, δεν έχει νόημα να δοκιμάζεται η περίπτωση κενού φορτίου και όχι η περίπτωση φορτίου αναλόγου της ταχύτητας, καθώς δεν πρόκειται να χρησιμοποιηθεί η μηχανή με αυτόν τον τρόπο).

#### 4. Τροποποιημένες εκτιμήσεις παραμέτρων στο βελτιωμένο μοντέλο ρεύματος

Σε αυτό το ερώτημα, ζητούμενο είναι να υλοποιηθεί το τροποποιημένο μοντέλο ρεύματος, το οποίο αναμένεται να είναι πολύ πιο ανθεκτικό στις λανθασμένες εκτιμήσεις της αντίστασης και της αυτεπαγωγής. Η μορφή του ουσιαστικά χτίζεται με βάση τις εξισώσεις του PLL, και προσαρμόζεται προκειμένου να περιλαμβάνεται η εκτίμηση της ροής. Η εξίσωση του στάτη μπορεί να αναδιαμορφωθεί ως εξής:

$$\mathbf{v}_s^s = R_s \mathbf{i}_s^s + L_\sigma \frac{d\mathbf{i}_s^s}{dt} + \mathbf{E}^s, \quad \mathbf{E}^s = \frac{d\psi_R^s}{dt}$$

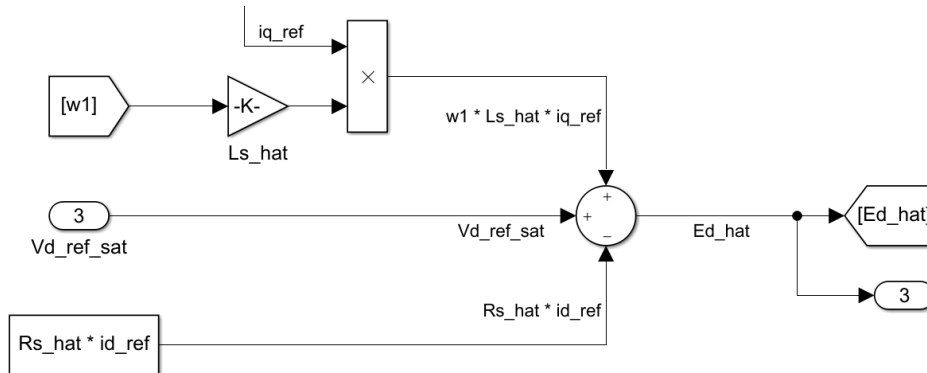
Στη συνέχεια, ίσως το σημαντικότερο βήμα είναι να χτιστεί η εκτίμηση της αντι-ΗΕΔ ως εξής:

$$\hat{\mathbf{E}}^s = \mathbf{v}_s^s - \hat{R}_s \mathbf{i}_s^s - \hat{L}_\sigma \frac{d\mathbf{i}_s^s}{dt}.$$

Προκειμένου να χρησιμοποιηθεί η τάση στο πεδίο dq μετασχηματίζεται ως γνωστός, επίσης για να μειωθεί ο θόρυβος είναι προτιμότερο να χρησιμοποιηθούν οι αναφορές ρεύματος που προκύπτουν από τον ελεγκτή ρεύματος και ακόμη εισάγεται η κορεσμένη τάση αναφοράς όπως έχει υλοποιηθεί από την 3η άσκηση:

$$\hat{E}_d = \hat{v}_d^{\text{ref}} - \hat{R}_s i_d^{\text{ref}} + \omega_1 \hat{L}_\sigma i_q^{\text{ref}}$$

Η υλοποίηση της εκτίμησης της τάσης φαίνεται παρακάτω:



Πλέον, η εκτίμηση της γωνιακής ταχύτητας (και εξ ου της γωνίας) η οποία θα μετασχηματίσει τα μεγέθη, θα κατασκευασθεί από το βελτιωμένο μοντέλο ρεύματος:

$$\omega_1 = \omega_r + \frac{\hat{R}_R i_q^{\text{ref}} - \lambda_s \hat{E}_d}{\hat{\psi}_R}$$

Το  $\Psi_R$  θα συνεχίσει να κατασκευάζεται όπως στην υπόλοιπη άσκηση. Το μόνο που απομένει είναι να ορισθεί η παράμετρος  $\lambda_s$ . Σκοπός αυτής είναι να κρατάει ευσταθές το σύστημα ιδιαίτερα σε χαμηλότερες ταχύτητες. Η υλοποίηση της, μαθηματικά, εξηγείται ως εξής:

$$\lambda_s = \text{sat}(\lambda \omega_r / \omega_\Delta, \lambda) = \begin{cases} \frac{\lambda \omega_r}{\omega_\Delta}, & |\omega_r| \leq \omega_\Delta \\ \lambda \text{sgn} \omega_r, & |\omega_r| > \omega_\Delta \end{cases}$$

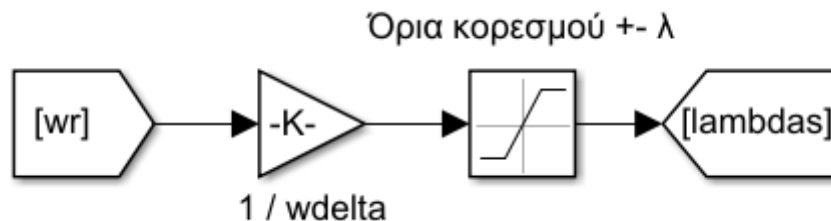
Πρακτικά, αυτό σημαίνει ότι θα χρησιμοποιηθεί ένα block κορεσμού που θα έχει ως έξοδο το λόγο  $\omega_r / \omega_\Delta$  με όρια κορεσμού  $\pm \lambda$ . Οι 2 τελευταίες παράμετροι μπορούν να επιλεγούν με τα παρακάτω όρια:

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

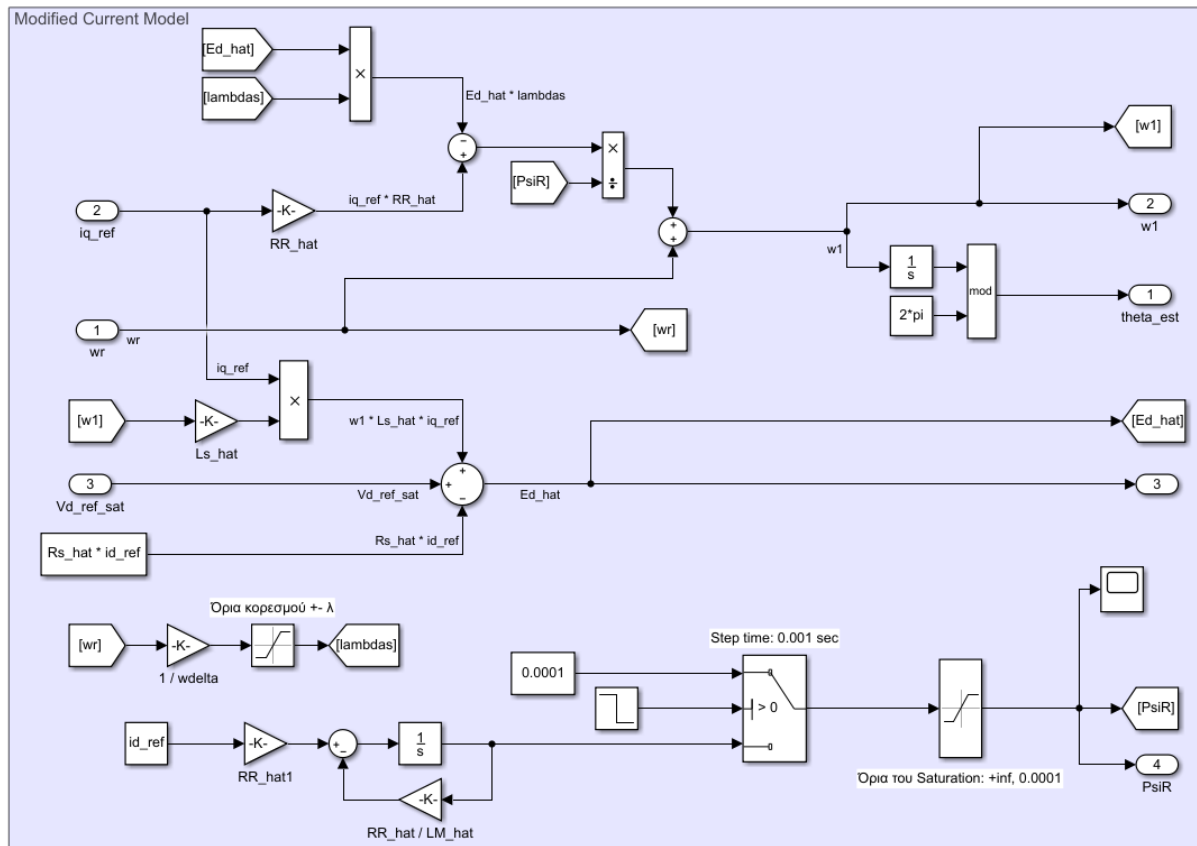
Η επιλογή των τιμών έγινε ως εξής, με βάση τις βέλτιστες επιδόσεις που εμφανίσθηκαν μετά από πολλαπλές δοκιμές:

- $\lambda = 1$
- $\omega_\Delta = 0.05 \omega_{\text{base}}$

Επομένως, το block diagram υλοποιείται ως εξής:

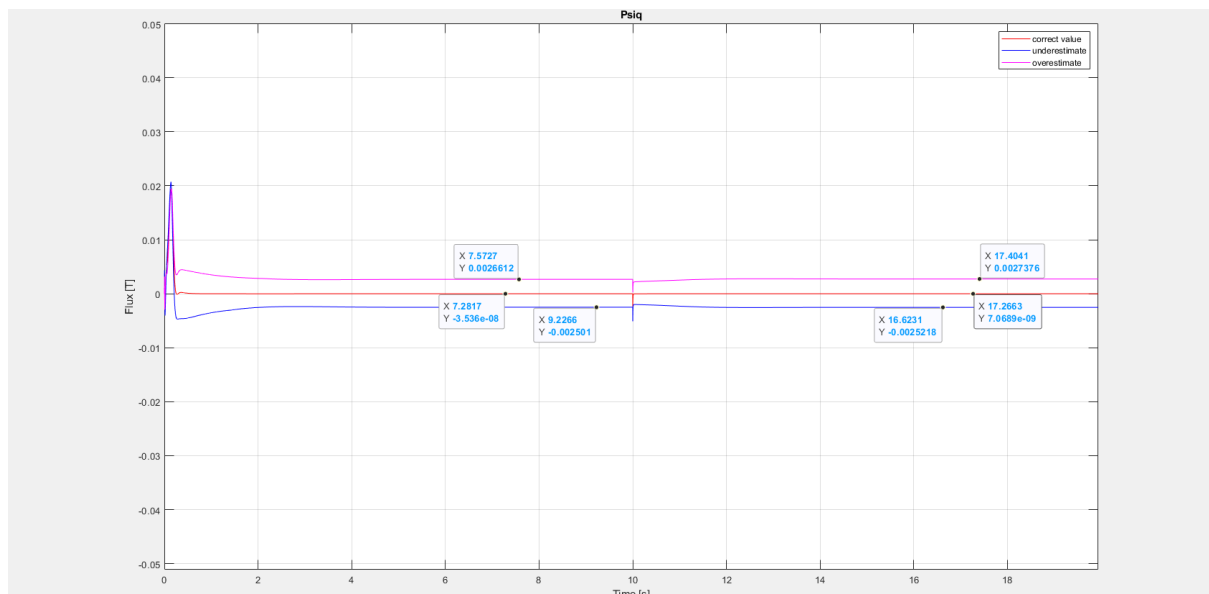


Συνολικά, το διάγραμμα εκτίμησης της γωνιακής ταχύτητας  $\omega_1$  φαίνεται ολοκληρωμένο παρακάτω:

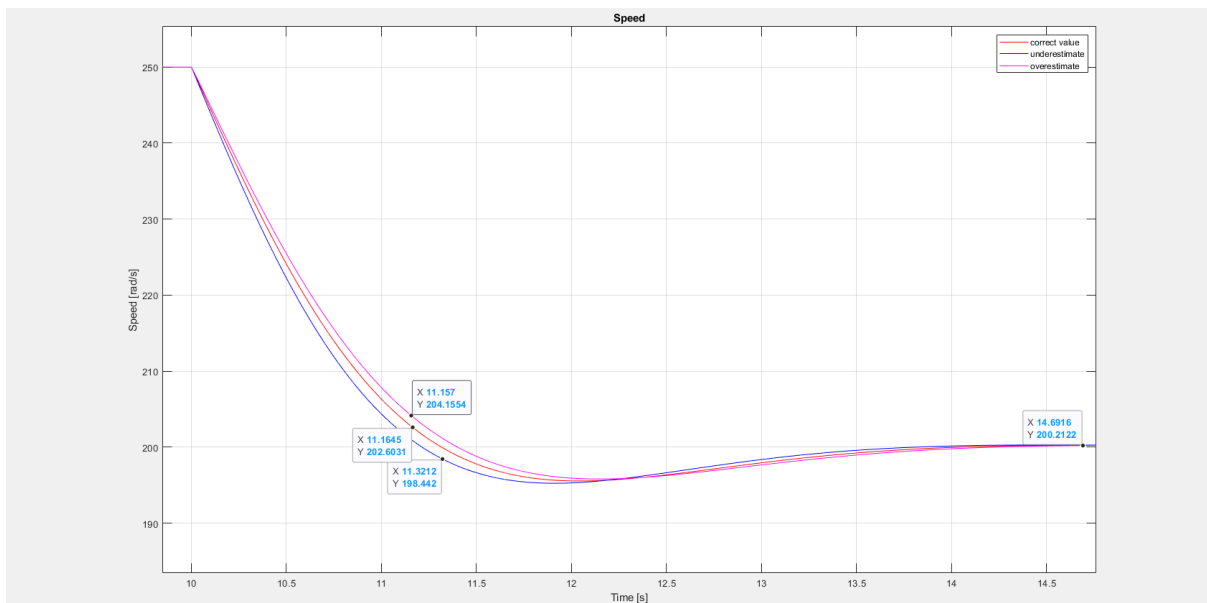
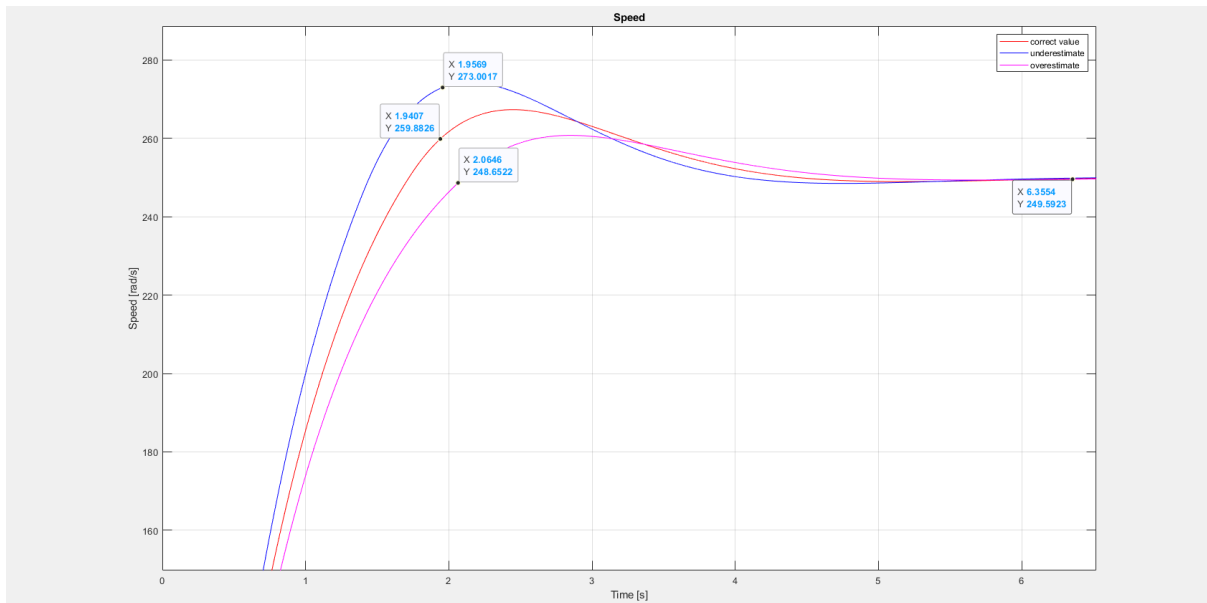


Τώρα πρέπει να γίνουν οι συγκρίσεις πάλι για υποεκτιμήσεις και υπερεκτιμήσεις της αντίστασης και της αυτεπαγωγής μαγνήτισης. Η ταχύτητα ορίσθηκε αρχικά στα 250 rad/s και στη μέση της προσομοίωσης έγινε step down στα 150 rad/s. Επομένως, για:

- $LM\_hat$  (underestimate) =  $0.9 \cdot LM$
- $LM\_hat$  (overestimate) =  $1.1 \cdot LM$



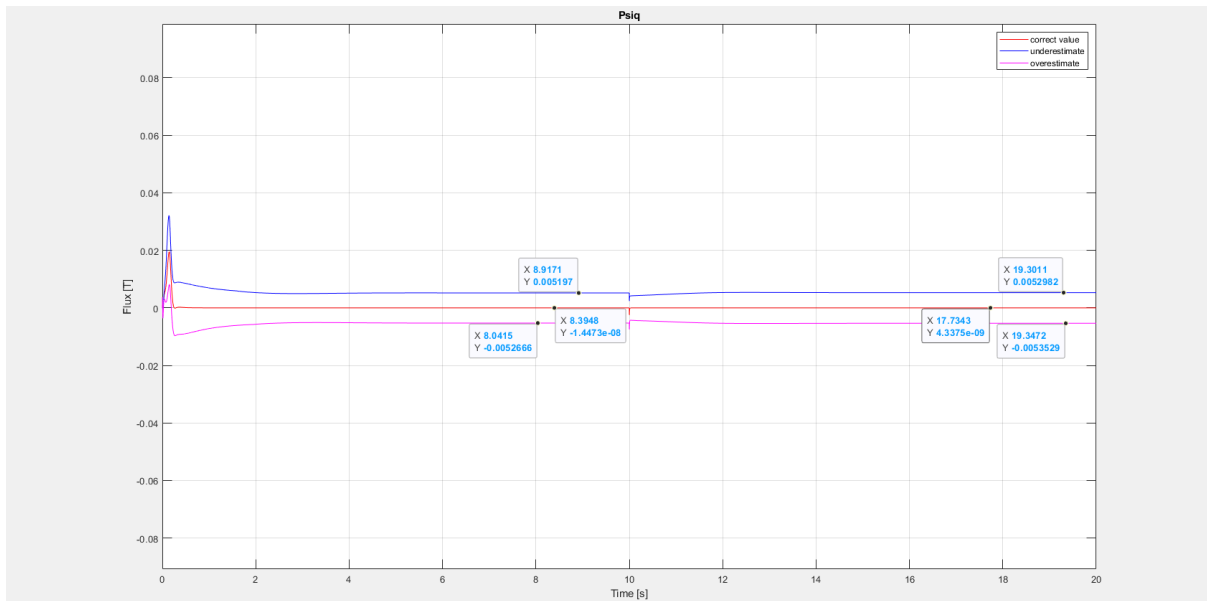
Ήδη είναι εμφανής η βελτίωση σε σχέση με το απλό current model, αφού πλέον η ροή στις λανθασμένες εκτιμήσεις είναι κατά μία τάξη μικρότερη σε σχέση με τις λανθασμένες εκτιμήσεις του 3ου ερωτήματος. Επομένως, ο τέλειος προσανατολισμός πεδίου διατηρείται με μεγαλύτερη ακρίβεια.



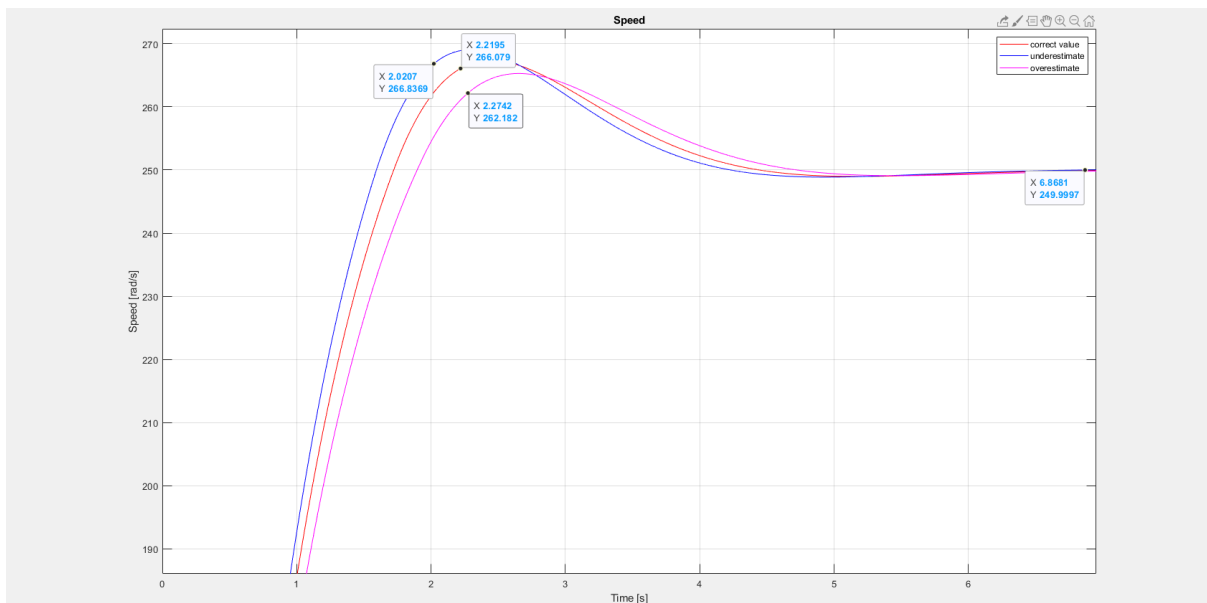
Η ταχύτητα, όπως και πριν, δεν έχει κάποιο συγκεκριμένο χαρακτηριστικό που ήταν αναμενόμενο. Ωστόσο, οι διαφορές είναι πολύ μικρές, επομένως θα μπορούσε να θεωρηθεί ότι οριακά επιτυγχάνονται και οι 2 ταχύτητες περίπου στον ίδιο χρόνο.

Στη συνέχεια, θα δοκιμασθεί υποεκτίμηση και υπερεκτίμηση της RR κατά  $\pm 20\%$ , δηλαδή:

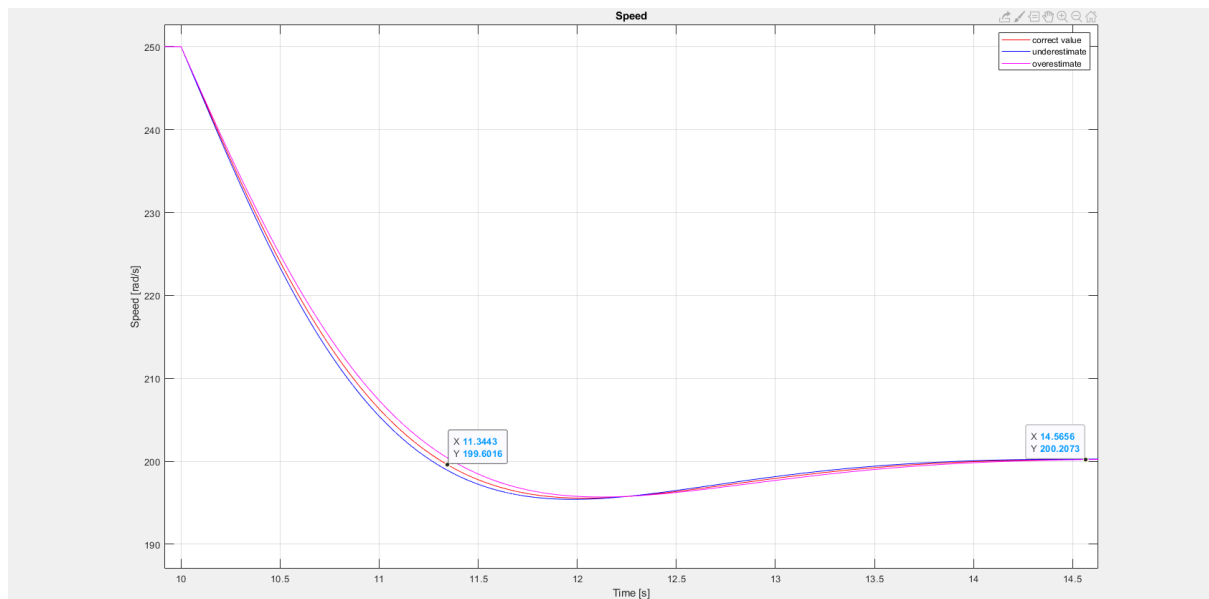
- $RR_{\hat{}} \text{ (υποεκτίμηση)} = 0.8 \cdot RR$
- $RR_{\hat{}} \text{ (υπερεκτίμηση)} = 1.2 \cdot RR$



Φαίνεται ότι όπως και πριν, ακόμα και με μια σχετικά μεγάλη υποεκτίμηση και υπερεκτίμηση της αντίστασης RR, ο προσανατολισμός πεδίου διατηρήθηκε με πολύ μεγάλη ακρίβεια. Μετά από αυτές τις δοκιμές, λοιπόν, συμπεραίνεται ότι όντως το τροποποιημένο μοντέλο λειτούργησε πολύ καλύτερα από το απλό μοντέλο.







Όπως και με τις μετρήσεις της αυτεπαγωγής μαγνήτισης, οι τροποποιήσεις των εκτιμήσεων δεν φέρουν ιδιαίτερα μεγάλη απόκλιση στην απόκριση της ταχύτητας. Συνολικά πάντως, φαίνεται πως η υποεκτίμηση επέφερε τις μεγαλύτερες διακυμάνσεις, ενώ η υπερεκτίμηση καθυστέρωσε περισσότερο την απόκριση των στροφών. Σε κάθε περίπτωση, το τροποποιημένο μοντέλο και διατήρησε βέλτιστα τον προσανατολισμό του πεδίου και βελτίωσε την απόκριση της ταχύτητας, οπότε πλέον ο έλεγχος είναι πολύ πιο σθεναρός απέναντι στις λανθασμένες εκτιμήσεις. Επομένως, η βελτίωση (και συνεπώς η υλοποίηση του μοντέλου) θεωρείται επιτυχημένη.

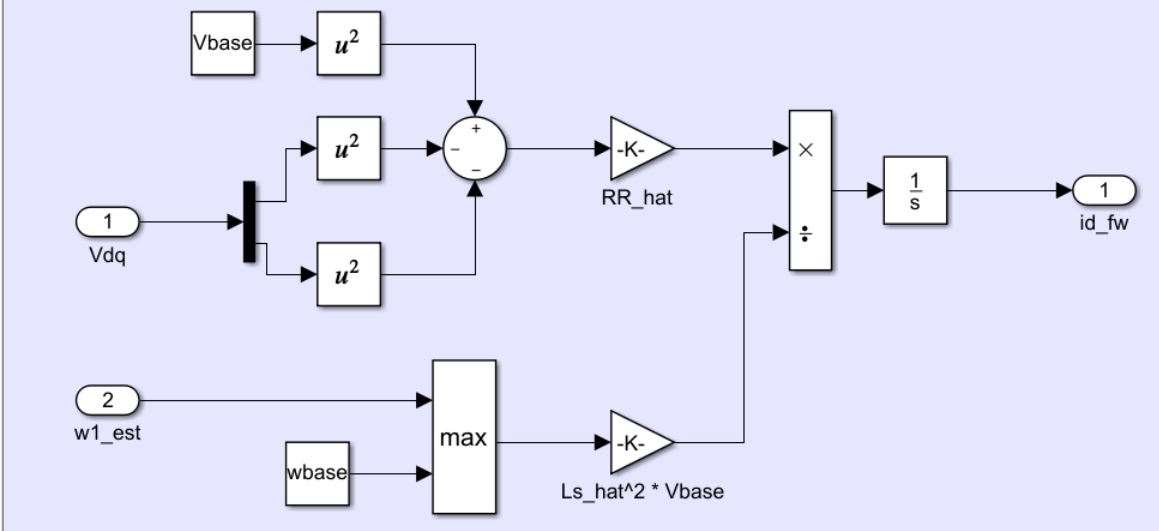
## 5. Εξασθένιση πεδίου

Το μοντέλο για την εξασθένιση πεδίου υλοποιείται με τον παρακάτω αλγόριθμο:

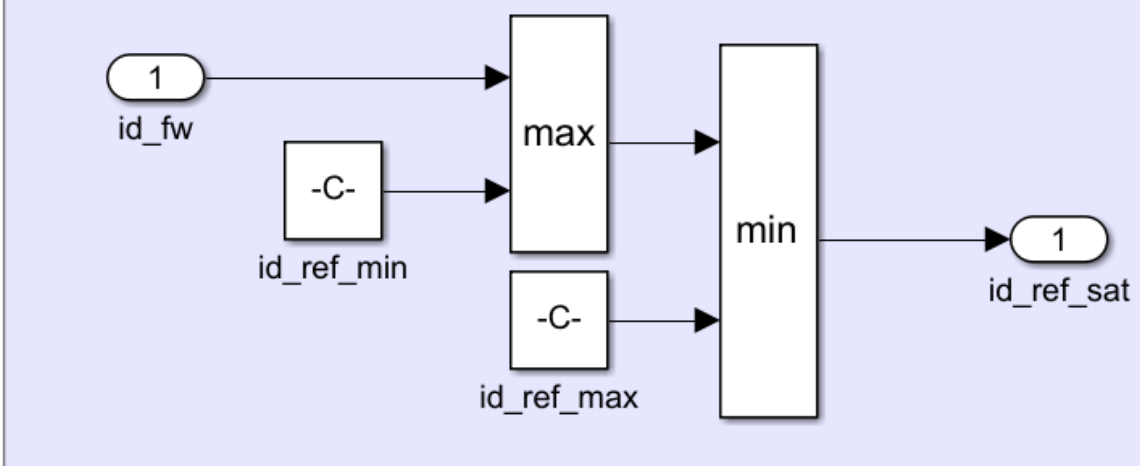
$$\begin{aligned}
 i_d^{\text{ref}} &= i_d^{\text{ref}} + \frac{T_s \hat{R}_R}{\hat{L}_\sigma^2 V_{\text{base}} \max(|\omega_1|, \omega_{\text{base}})} [V_{\text{base}}^2 - (v_d^{\text{ref}})^2 - (v_q^{\text{ref}})^2] \\
 i_d^{\text{ref}} &= \min[\max(i_d^{\text{ref}}, I_{\min}), I_{\text{nom}}] \\
 \hat{\psi}_R &= \hat{\psi}_R + T_s \hat{R}_R \left( i_d^{\text{ref}} - \frac{\hat{\psi}_R}{\hat{L}_M} \right) \\
 b_a &= \frac{2K^2(\alpha_s \hat{J} - \hat{b})}{3n_p^2 \hat{\psi}_R} \\
 k_{ps} &= \frac{2K^2 \alpha_s \hat{J}}{3n_p^2 \hat{\psi}_R} \\
 k_{is} &= \frac{2K^2 \alpha_s^2 \hat{J}}{3n_p^2 \hat{\psi}_R} \\
 e_s &= \omega_{\text{ref}} - \omega_r \\
 i_{q,\text{nom}}^{\text{ref}} &= k_{ps} e_s + k_{is} I_s - b_a \omega_r \\
 \hat{\xi} &= \frac{\hat{L}_\sigma + \hat{L}_M}{\hat{L}_\sigma} \\
 i_q^{\text{ref}} &= \text{sat} \left[ i_{q,\text{nom}}^{\text{ref}}, \min \left( \sqrt{I_{\text{max}}^2 - (i_d^{\text{ref}})^2}, \hat{\xi} i_d^{\text{ref}} \right) \right] \\
 I_s &= I_s + T_s \left[ e_s + \frac{1}{k_{ps}} (i_q^{\text{ref}} - i_{q,\text{nom}}^{\text{ref}}) \right] \\
 \omega_1 &= \omega_r + \frac{\hat{R}_R i_q^{\text{ref}}}{\hat{\psi}_R} \\
 \theta_1 &= \text{mod}(\theta_1 + T_s \omega_1, 2\pi)
 \end{aligned}$$

Από τα προηγούμενα ερωτήματα διατηρήθηκαν σταθερά ο ελεγκτής ταχύτητας και ο εκτιμητής της ροής  $\Psi_R$  (και προφανώς οι ελεγκτές ρεύματος και ο κορεσμός των τάσεων) με τη διαφορά ότι ο εκτιμητής ροής παίρνει πλέον ως είσοδο το κορεσμένο μαγνητίζον ρεύμα  $i_{d\_ref\_sat}$ . Τα υπόλοιπα block φαίνονται παρακάτω:

### Magnetizing Current in Field Weakening

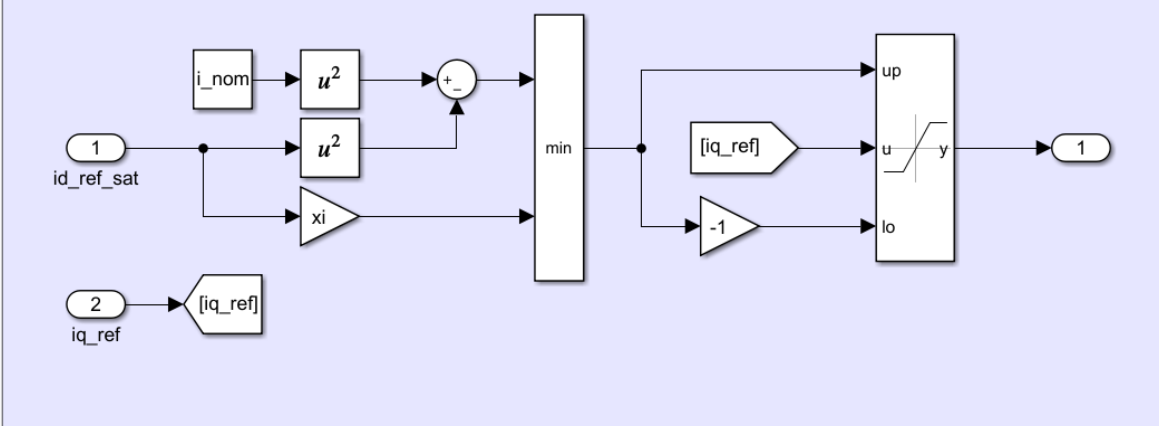


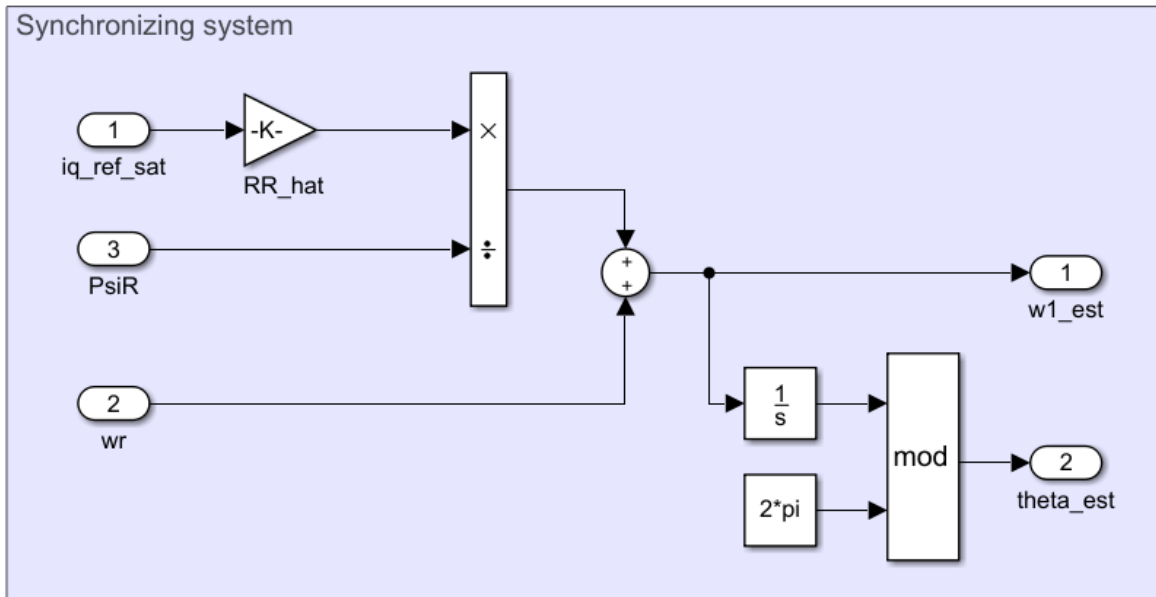
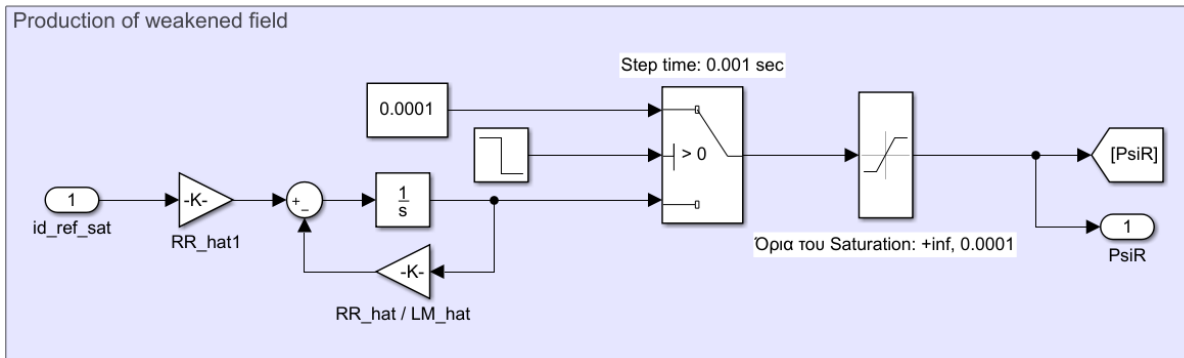
### Saturation of magnetizing current



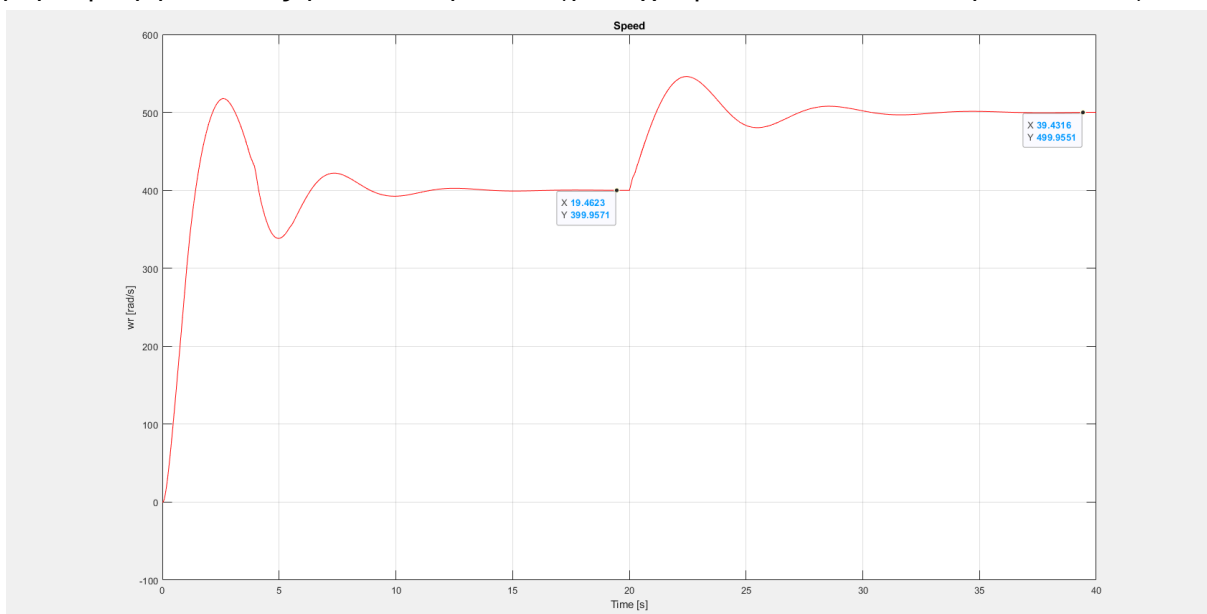
- Όπου:  $id\_ref\_max = \Psi_{\hat{}} / L_{M\_hat}$
- $id\_ref\_min = 0.1 * id\_ref\_max$

### Saturation of torque current Iq





Η υπερύψωση της ταχύτητας επιτεύχθηκε, προς το παρόν, μόνο για το κενό φορτίο. Η απόκριση βέβαια δεν είναι ιδιαίτερα ικανοποιητική (πολλές ταλαντώσεις στη ροή, το ρεύμα και την ροπή), ωστόσο ύστερα από αρκετό χρονικό διάστημα ο στόχος επιτυγχάνεται με μεγάλη ακρίβεια όπως φαίνεται παρακάτω (για ταχύτητα 400 rad/s και ύστερα 500 rad/s):



ΤΕΛΟΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ