



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
& ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ
ΜΗΧΑΝΩΝ: ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ
ΕΛΕΓΧΟΣ DC ΜΗΧΑΝΗΣ

ΛΟΥΚΑΣ ΚΟΥΤΣΟΥΜΠΑΣ
ΑΜ:03117128

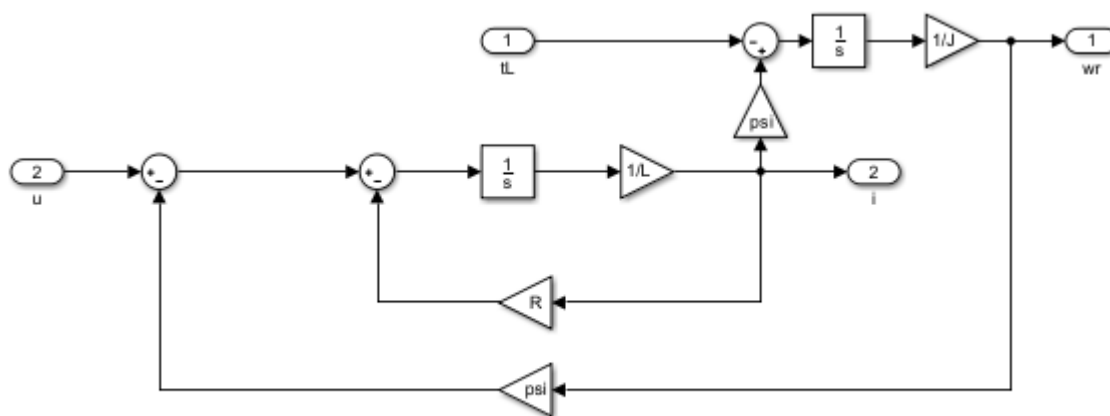
1. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΗΧΑΝΗΣ DC

Σύμφωνα με τις εξισώσεις κατάστασης της μηχανής dc:

$$L \frac{di}{dt} = v - Ri - \psi \omega_r \quad (1)$$

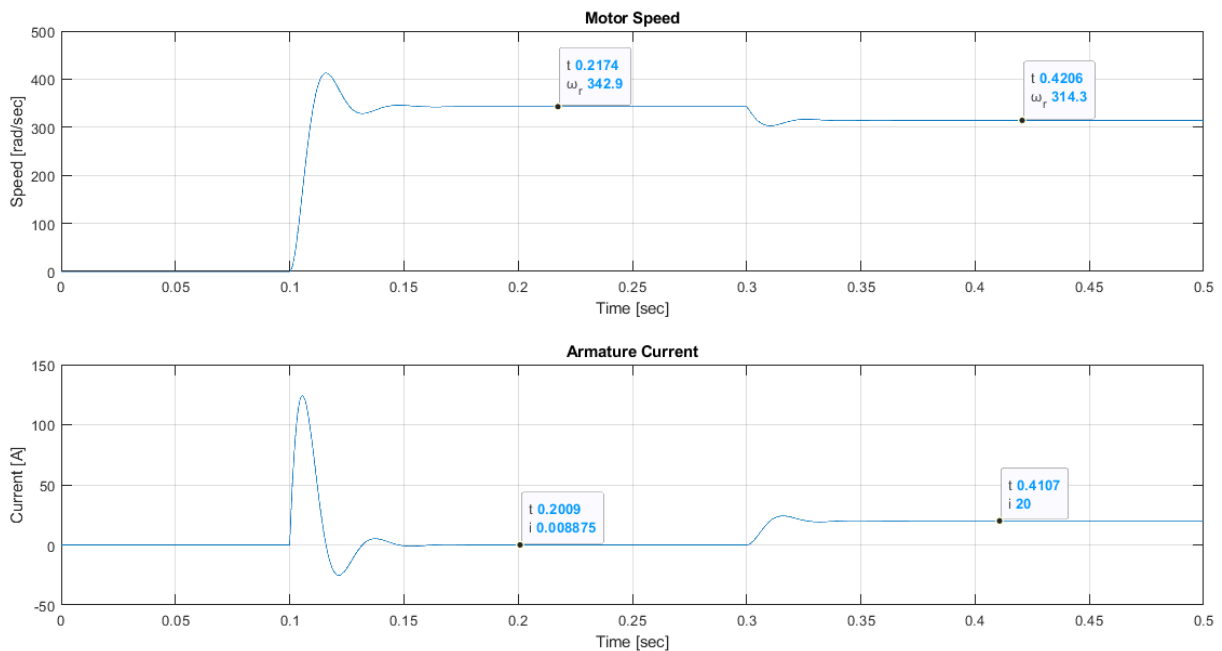
$$J \frac{d\omega_r}{dt} = \psi i - \tau_L \quad (2)$$

έχουμε το εξής μοντέλο για την μηχανή dc:



όπου σαν εισόδοι του συστήματος έχουμε την τάση στους ακροδέκτες του στάτη της μηχανής και την ροπή του φορτίου. Οι έξοδοι από το παραπάνω μοντέλο είναι η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα και το ρεύμα του τυμπάνου. Σαν εισόδους, προκειμένου να γίνει εμφανής η λειτουργία της dc μηχανής χρησιμοποιήθηκαν τόσο για την τάση όσο και για την ροπή φορτίου βηματικές αποκρίσεις υλοποιημένες με το block step της βιβλιοθήκης του Simulink, ενώ οι έξοδοι του συστήματος οδηγήθηκαν στο block scope, ώστε να παρατηρηθεί η κυματομορφή τους. Χρησιμοποιώντας λοιπόν τις ονομαστικές τιμές και τις τιμές των παραμέτρων της μηχανής που δίνονται στην εκφώνηση της άσκησης προσομοίωσης και τροφοδοτώντας με ονομαστική τάση συνδέεται στον άξονα της

μηχανής φορτίο ονομαστικής ροπής και προκύπτουν οι παρακάτω κυματομορφές για την γωνιακή ταχύτητα και το ρεύμα:



Εφαρμόζεται ονομαστική τάση την χρονική στιγμή $t = 0.1\text{sec}$ ενώ η ονομαστική ροπή εφαρμόζεται την χρονική στιγμή $t = 0.3\text{sec}$. Η μεγάλη κορυφή του ρεύματος κατά την εφαρμογή ονομαστικής τάσης οφείλεται στο γεγονός πως δεν έχει προλάβει να παραχθεί αντι-ΗΕΔ στην μηχανή ώστε να εξισορροπήσει το μεγάλο ρεύμα τυμπάνου κατά την εκκίνηση, γεγονός που ενδεχομένως να προκαλέσει προβλήματα στην μηχανή.

Επιπλέον μπορούμε να παρατηρήσουμε πως παρά το μεγάλο ρεύμα στην αρχή στην συνέχεια η μηχανή έχει την επιθυμητή συμπεριφορά. Κατά την διάρκεια κενού φορτίου αναπτύσσεται μια γωνιακή ταχύτητα μεγαλύτερη της ονομαστικής, η οποία υπολογίζεται μέσω των παραπάνω εξισώσεων ως εξής:

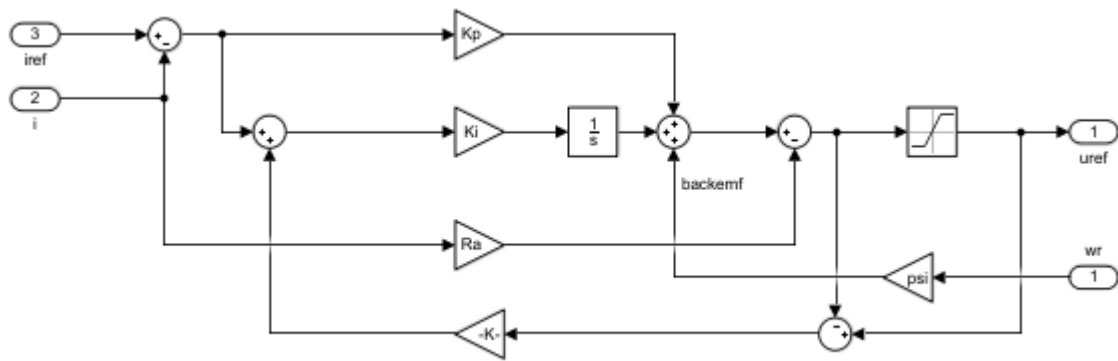
$$(2) \Rightarrow \psi i = 0 \Rightarrow i = 0 \text{ για } \tau_L = 0 \text{ και } \frac{d\omega_r}{dt} = 0 \text{ στην μόνιμη κατάσταση}$$

$$(1) \Rightarrow v = \psi \omega_r \Rightarrow \omega_r = \frac{120}{0.35} = 343 \text{ rad/sec}$$

Επίσης παρατηρείται μηδενικό ρεύμα, όπως υπολογίστηκε και παραπάνω, ενώ στην συνέχεια που συνδέεται φορτίο ονομαστικής ροπής η ταχύτητα παίρνει την ονομαστική της τιμή και το ρεύμα τυμπάνου επίσης.

2. ΕΛΕΓΧΟΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ

Σε αυτό το σημείο θα υλοποιήσουμε τον παρακάτω ελεγκτή ρεύματος με δύο βαθμούς ελευθερίας και με λειτουργία anti-windup:

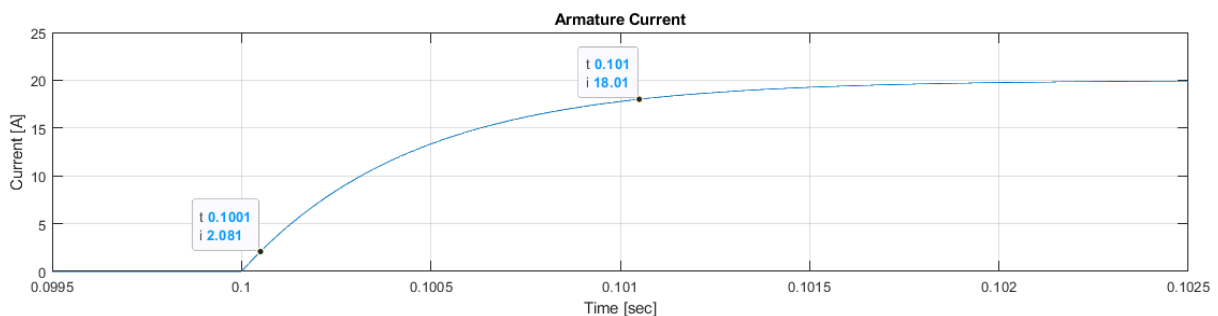
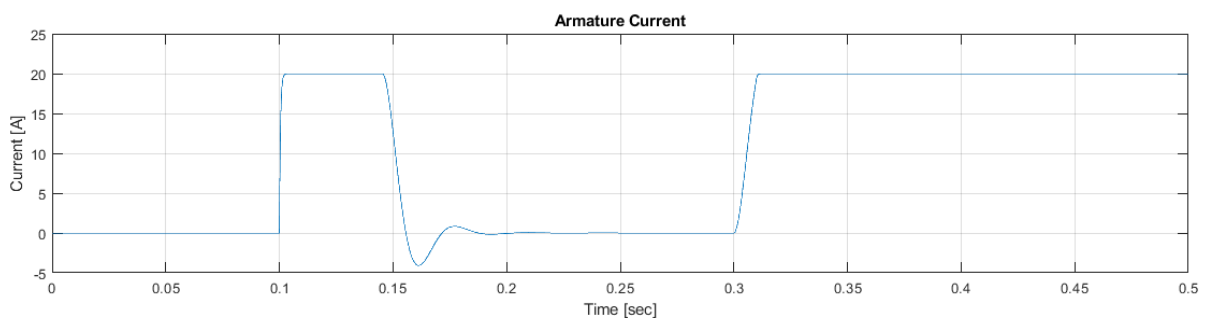


Τα κέρδη του PI ελεγκτή έχουν επιλεχθεί με βάση τους εξής τύπους:

$$K_p = a_c L$$

$$K_i = a_c (R + R_a) = a_c^2 L$$

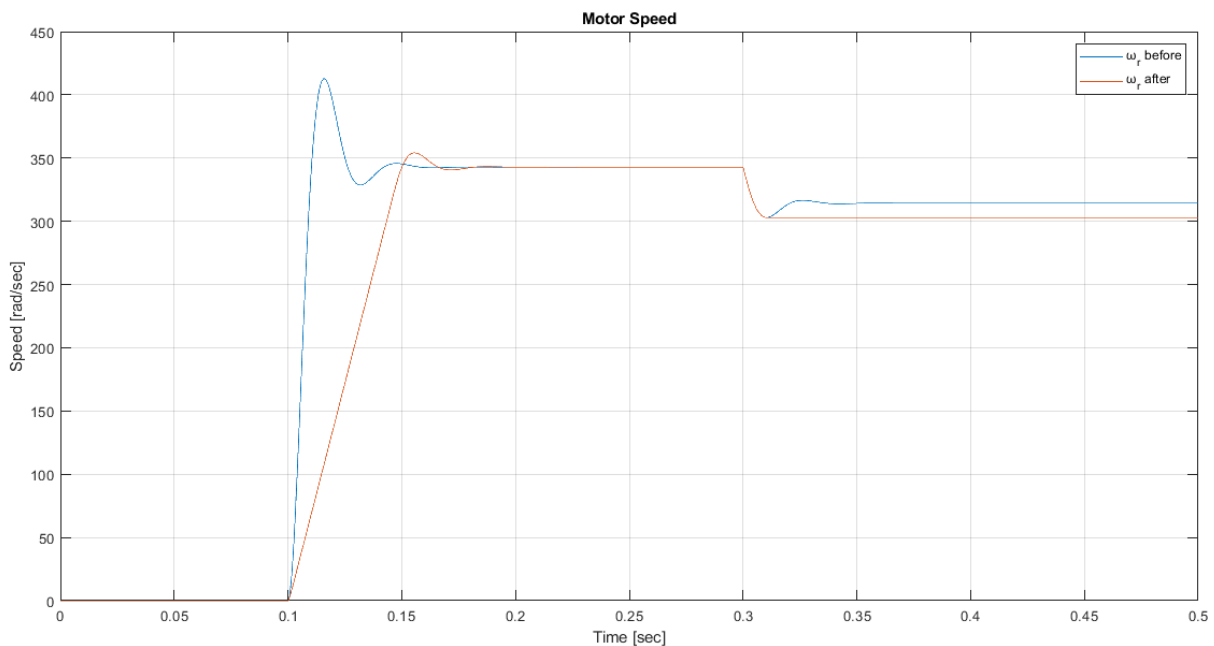
όπου $a_c t_{rc} = \ln 9 \Rightarrow a_c = 2197 \text{ rad/sec}$ το εύρος ζώνης κλειστού βρόχου για χρόνο ανόδου $t_{rc} = 1 \text{ ms}$ και $R_a = a_c L - R$ μια “ενεργός αντίσταση” σκοπός της οποίας είναι να μειώσει το σφάλμα ελέγχου και επομένως να αποτρέψει πιθανά overshoot του ρεύματος. Σαν όρια στο saturation block ορίσαμε την ονομαστική τάση. Παρακάτω φαίνεται το ρεύμα τυμπάνου για ονομαστικό φορτίο και μια μεγέθυνση στην άνοδο του προκειμένου να μετρήσουμε τον χρόνο ανόδου.



Παρατηρούμε πως ο χρόνος ανόδου τον οποίο εμείς θέλαμε και θεωρήσαμε σαν

δεδομένο εν τέλει επιτυγχάνεται μέσω του ελέγχου, ενώ και το ρεύμα τελικώς αποκτά με ομαλό τρόπο την ονομαστική τιμή του.

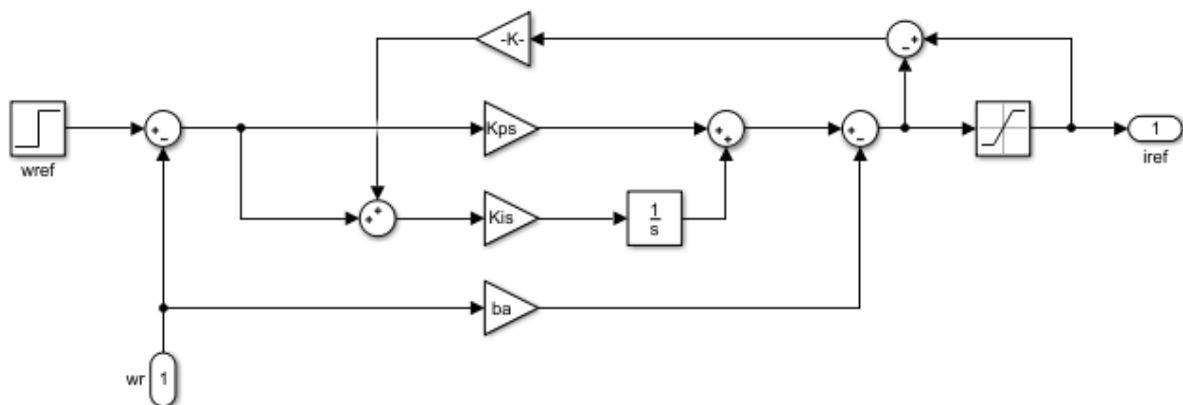
Όσον αφορά την ταχύτητα η σύγκριση πριν και μετά τον έλεγχο έχει το εξής αποτέλεσμα:



Παρατηρούμε πως ο έλεγχος του ρεύματος επιφέρει μια καθυστέρηση στην ανάπτυξη της ταχύτητας, όμως περιορίζεται το overshoot που υπήρχε χωρίς έλεγχο. Επιπλέον, μετά την σύνδεση του φορτίου παρατηρούμε μια απόκλιση της ταχύτητας από την αναμενόμενη τιμή της, δηλαδή την ονομαστική η οποία είναι $\omega_r = 314.15 \text{ rad/sec}$.

3. ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ

Σε αυτό το σημείο υλοποιήθηκε ο παρακάτω ελεγκτής ταχύτητας 2 βαθμών ελευθερίας:



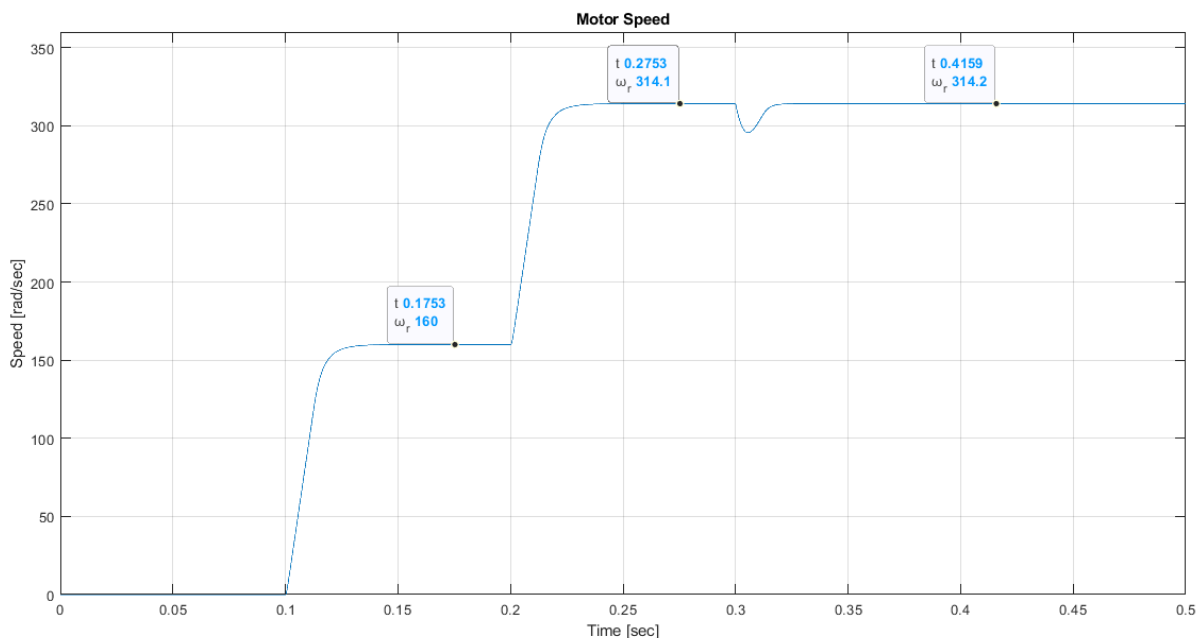
Τα κέρδη του PI ελεγκτή έχουν υπολογιστεί με βάση τους εξής τύπους:

$$Kps = \frac{a_s J}{\psi}$$

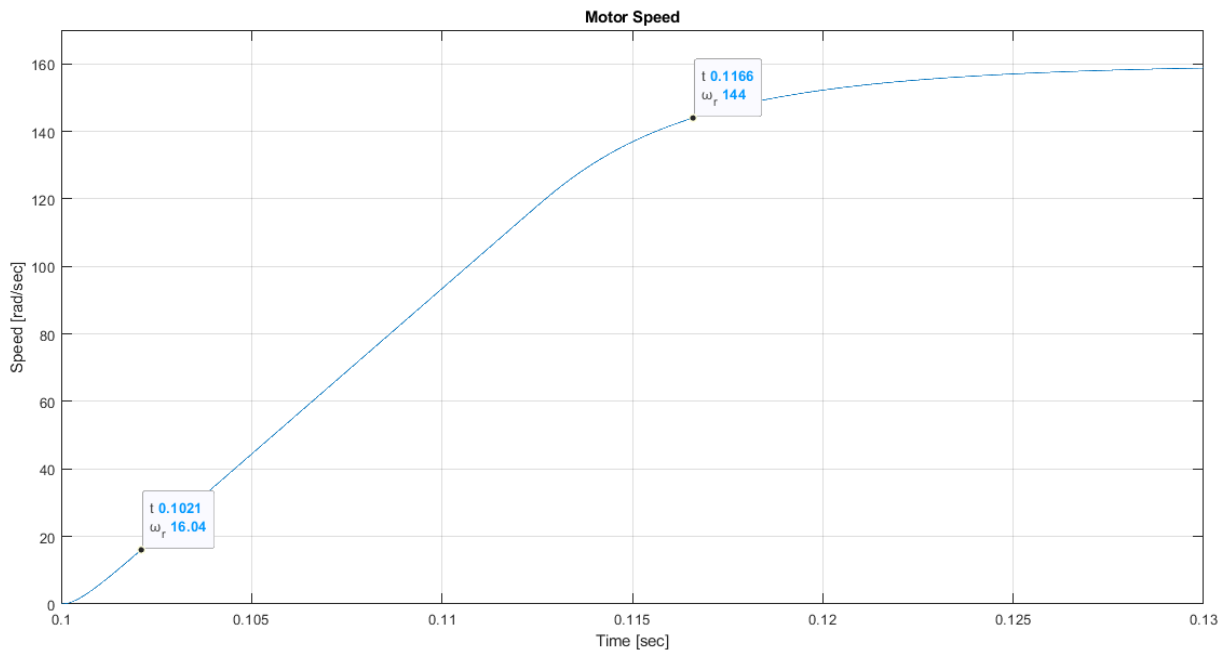
$$Kis = \frac{a_s^2 J}{\psi}$$

όπου $a_s = 0.1a_c$ καθώς μας ζητείται από την εκφώνηση ο χρόνος ανόδου της ταχύτητας να είναι $10ms$, ενώ $b_a = \frac{a_s J}{\psi}$ η “ενεργός απόσβεση” του μηχανικού μέρους, η οποία έχει αντίστοιχη λειτουργία όπως η R_a στο ηλεκτρικό. Για γρήγορες μεταβολές της ταχύτητας η ενεργός απόσβεση παίρνει την παραπάνω τιμή. Σαν όρια στο saturation block ορίστηκε $I_{max} = 28 A$, τιμή κοντά στην ονομαστική τιμή του ρεύματος. Ο λόγος που δεν ορίστηκε ακριβώς στην ονομαστική τιμή είναι το γεγονός πως σε μεταβολές του φορτίου θα θέλαμε να μπορεί ο ελεγκτής να επαναφέρει στην κατάλληλη ταχύτητα τον δρομέα, ώστε να εξυπηρετείται η αντίστοιχη ροπή.

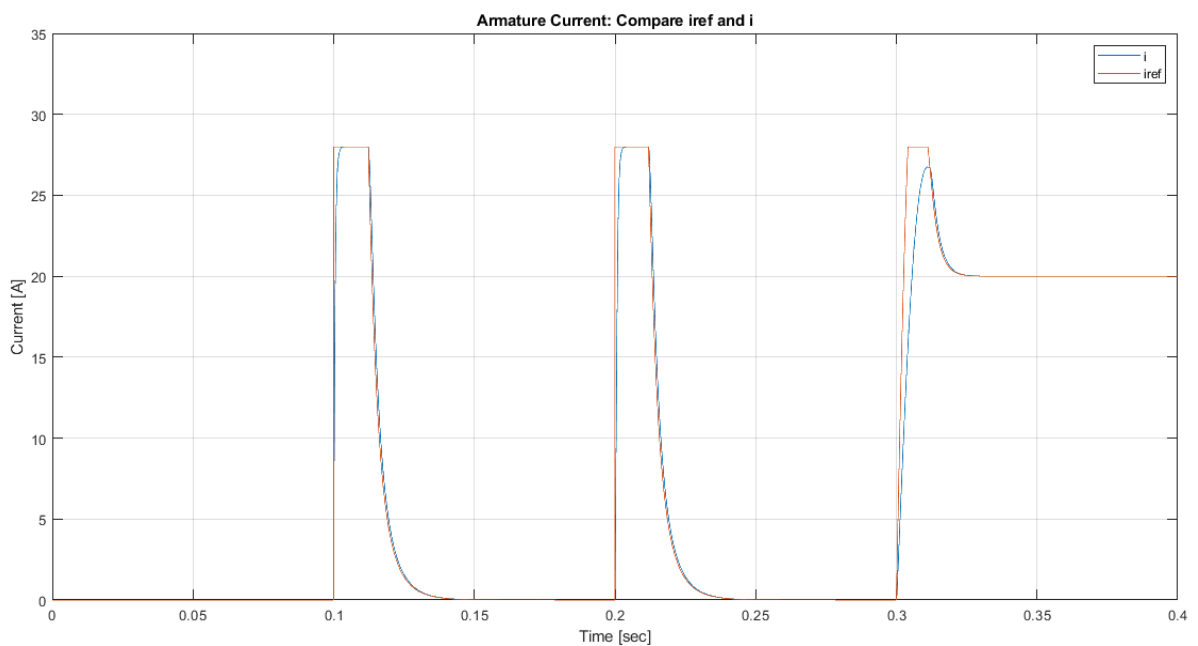
Αρχικά γίνεται δοκιμή για βηματική ταχύτητα αναφοράς $\omega_{ref} = 160 \text{ rads/sec}$ και στην συνέχεια η ταχύτητα αναφοράς παίρνει την τιμή για ονομαστικό φορτίο ($\omega_{ref} = 314.15 \text{ rads/sec}$) και συνδέεται φορτίο ονομαστικής ροπή $\tau_L = 7 Nm$ στα 0.3 sec . Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης είναι τα εξής:



Παρατηρούμε την ορθή λειτουργία του ελεγκτή ταχύτητας καθώς αρχικά περιορίζει την ταχύτητα στα 160 rad/sec στην συνέχεια στην ταχύτητα κενού φορτίου και τέλος κατά την σύνδεση του φορτίου η ταχύτητα περιορίζεται στις ονομαστικές στροφές, καθώς . Επιπλέον, μετρώντας με τους κέρσορες του score τον χρόνο ανόδου για την αρχική μεταβολή της ταχύτητας εύρους 160 rad/sec λαμβάνουμε χρόνο ανόδου της ταχύτητας $t_{rs} = 14.519 ms$, μία τάξη μεγέθους μεγαλύτερη δηλαδή του χρόνου ανόδου του ρεύματος, απαίτηση που είχαμε κάνει όταν επιλέξαμε τιμή για το a_s . Παρακάτω φαίνεται η εν λόγω μέτρηση:



Τέλος, παρακάτω φαίνεται η σύγκριση του ρεύματος αναφοράς και της πραγματικής τιμής του.

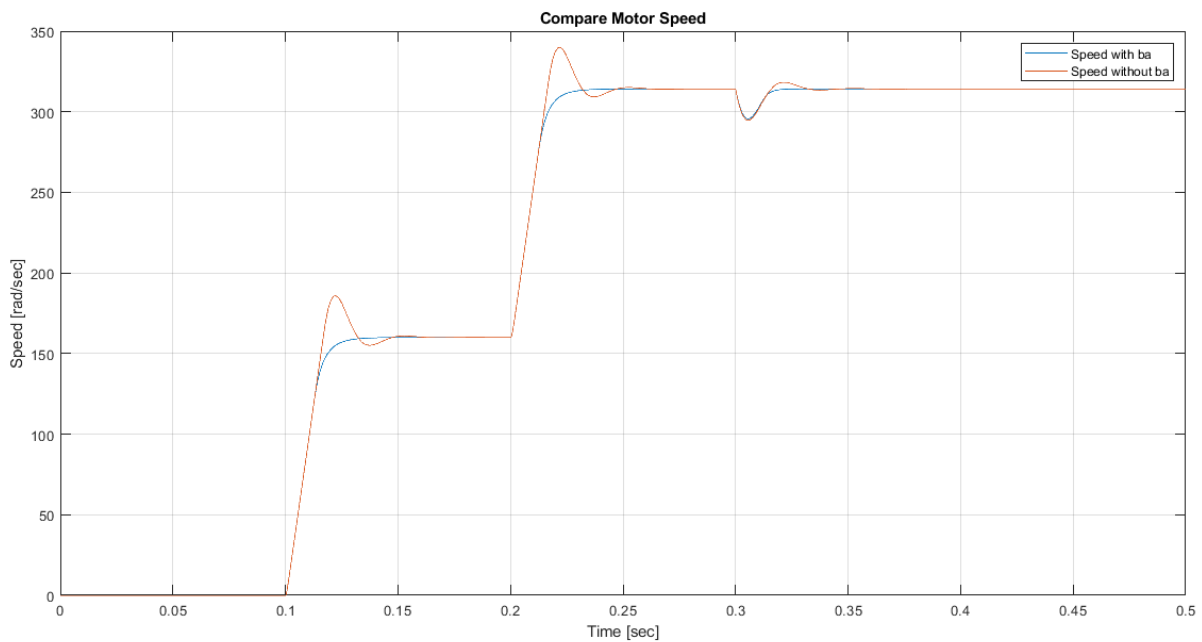


Παρατηρούμε πως το ρεύμα αναφοράς κατασκευάζεται πιο γρήγορα από την τιμή του ρεύματος, γεγονός το οποίο περιμέναμε καθώς χωρίς αναφορά δεν θα μπορούσαν να δημιουργηθεί η τάση της μηχανής.

4. ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΧΩΡΙΣ ΕΝΕΡΓΟ ΑΠΟΣΒΕΣΗ

Γίνεται επανάληψη της προσομοίωσης που πραγματοποιήθηκε πριν με την διαφορά

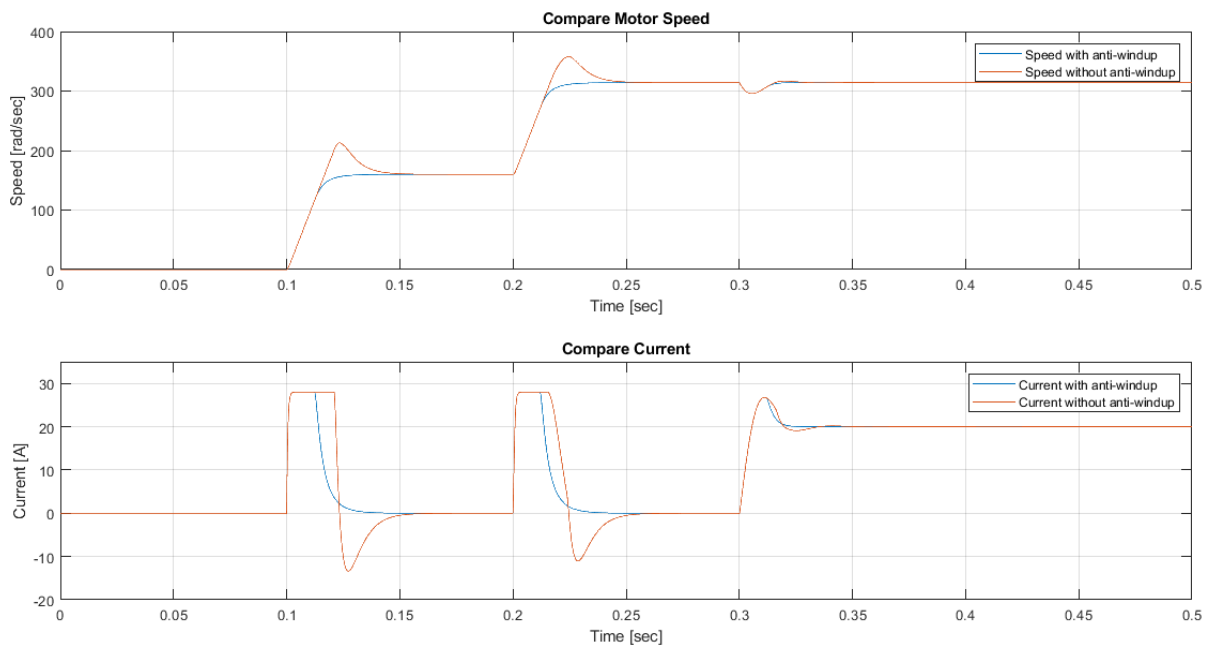
πως πλέον αφαιρείται η ba . Με την χρήση του matlab απεικονίζουμε τις γραφικές παραστάσεις των ταχυτήτων σε κοινούς άξονες για τις δύο προσομοιώσεις ώστε να συγκριθούν τα αποτελέσματα.



Παρατηρούμε πως χωρίς την ενεργό απόσβεση ο έλεγχος της ταχύτητας αργεί λίγο περισσότερο να έρθει εις πέρας ενώ ταυτόχρονα υπάρχουν ορισμένα προβλήματα overshoot της ταχύτητας όταν αυτή αυξάνεται, ώστε να προσεγγίσει την νέα ω_{ref} κάθε φορά. Ο ρόλος της, λοιπόν, είναι σημαντικός όσον αφορά την άμεση υλοποίηση του ελέγχου και την επιβολή της ταχύτητας αναφοράς.

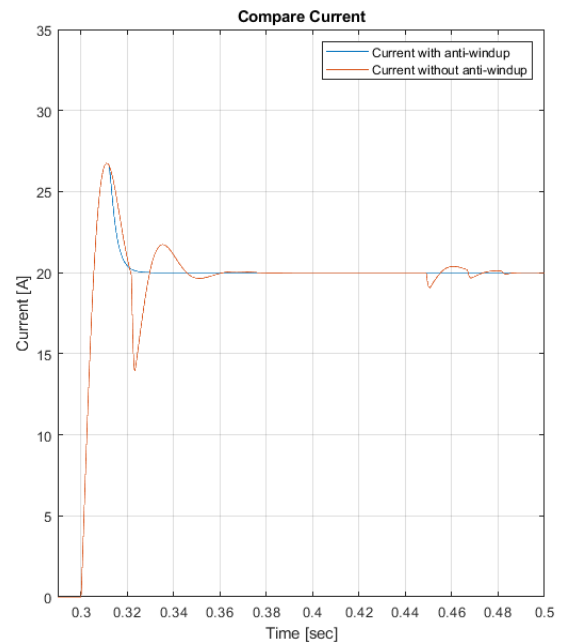
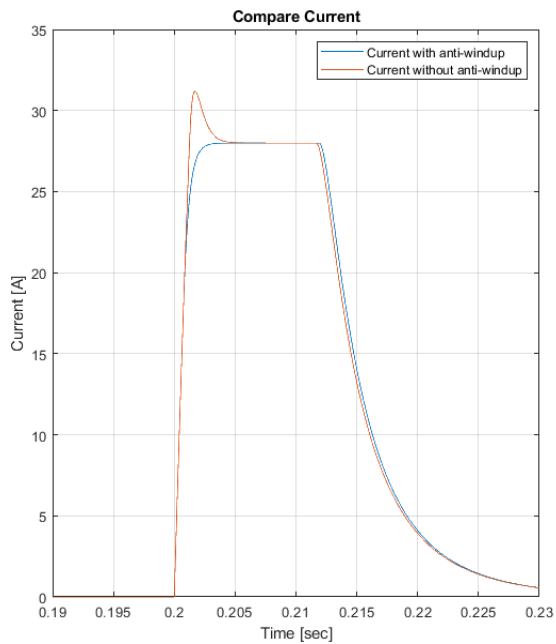
5. ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΧΩΡΙΣ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΣΥΣΣΩΡΕΥΣΗΣ ΟΛΟΚΛ. ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ

Σε αυτήν την δοκιμή αφαιρούμε το κομμάτι του ελέγχου ταχύτητας το οποίο αντιμετωπίζει την συσσώρευση του ολοκληρωτικού σφάλματος χωρίς όμως να αφαιρεθεί το saturation block για τον περιορισμό των ρευμάτων. Η ταχύτητα του δρομέα και το ρεύμα του στάτη σε σύγκριση με τις αντίστοιχες γραφικές του ερωτήματος 3 φαίνονται παρακάτω.



Παρατηρούμε πως και πάλι χωρίς anti-windup scheme ο έλεγχος της ταχύτητας καθυστερεί ενώ και πάλι αντιμετωπίζουμε προβλήματα με overshoot ταχύτητας. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να καθυστερεί και ο ελεγκτής του ρεύματος να φτιάξει την σωστή τιμή για το ρεύμα όπως φαίνεται από την δεύτερη γραφική του σχήματος. Επίσης παρατηρούμε και απότομο “φρενάρισμα” της μηχανής το οποίο αποτυπώνεται με την μορφή αρνητικού ρεύματος λίγο πριν εξισορροπηθεί η ταχύτητα στην τιμή αναφορά της.

Επαναφέρουμε το anti-windup scheme για τον έλεγχο της ταχύτητας και αφαιρούμε το αντίστοιχο για τον έλεγχο του ρεύματος. Τρέχοντας την προσομοίωση και συγκρίνοντας τα αποτελέσματα με αυτά της προσομοίωσης του ερωτήματος 3 παρατηρούμε τις εξής διαφορές για το ρεύμα του στάτη:



Παρατηρούμε πως χωρίς την αντιμετώπιση συσσώρευσης ολοκληρωτικού λάθους το ρεύμα κάνει ένα overshoot την στιγμή που αλλάζει η αναφορά της ταχύτητας από τα 160 rad/sec στα 314.15 rad/sec και στην συνέχεια γίνεται αμυδρά πιο γρήγορο το ρεύμα από ότι με anti-windup. Επιπλέον κάποια μικρά undershoot και overshoot συμβαίνουν και κατά την σύνδεση ονομαστικού φορτίου. Η ταχύτητα δεν επηρεάζεται από το anti-windup του ρεύματος, ενώ και το ρεύμα δεν φαίνεται να επηρεάζεται σε άλλο σημείο της προσομοίωσης όπως φαίνεται παρακάτω.

