

*Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Συστήματα Ελέγχου Ηλεκτρικών Μηχανών*

Εργασία Προσομοίωσης 1:

Μοντελοποίηση και έλεγχος μηχανής συνεχούς ρεύματος

Όνοματεπώνυμο: Καραϊνδρου Κωνσταντίνα

Αριθμός μητρώου: 03117098

Εξάμηνο: 8ο - ΣΗΜΜΥ

Να σημειωθεί πως όσα είναι με χρώμα επισήμανσης αυτής της μορφής, είναι οι διορθώσεις που πραγματοποιήθηκαν σύμφωνα με τα σχόλια.

Μοντέλο μηχανής Συνεχούς Ρεύματος

Γνωρίζουμε ότι οι εξισώσεις δυναμικού μοντέλου για το ηλεκτρικό και το μηχανικό σύστημα της μηχανής είναι οι εξής:

$$L \cdot \frac{di}{dt} = u - R \cdot i - \psi \cdot \omega_r \quad (1)$$

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

όπου εμείς δίνουμε ως εισόδους την τάση τυμπάνου u , και την ροπή φορτίου τ_L , την οποία θεωρούμε σταθερή, και εξόδους το ρεύμα τυμπάνου i και την γωνιακή ταχύτητα του δρομέα ω_r .

Επιπλέον, το μέγεθος $\psi \cdot \omega_r$ είναι η αντι-ΗΕΔ, και το μέγεθος $\psi \cdot i$ είναι η ηλεκτρική ροπή.

Επομένως, με βάση τις ζητούμενες εξόδους, οι (1), και (2), γίνονται ως εξής:

$$i = \frac{1}{L} \int (u - R \cdot i - \psi \cdot \omega_r) dt$$

$$\omega_r = \frac{1}{J} \int (\psi \cdot i - \tau_L) dt$$

Παρακάτω φαίνεται η προσομοίωση του ζητούμενου συστήματος στο περιβάλλον Matlab/Simulink:

Να σημειωθεί ότι χρησιμοποιήθηκαν οι ονομαστικές τιμές των μεγεθών, δηλαδή

$$J = 0.001 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$\tau_{L,N} = 7 \text{ Nm}$$

$$\psi = 0.35 \text{ Vs}$$

$$n_N = 3000 \text{ rpm} \Rightarrow \omega_{r,N} = 314.159 \text{ rad/s}$$

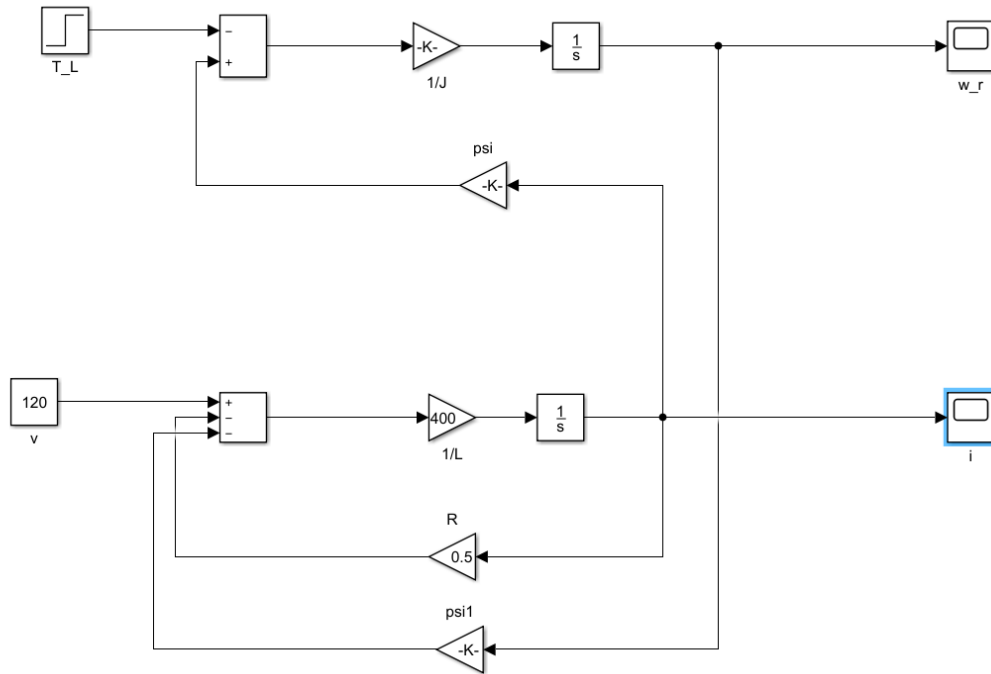
$$L = 2.5 \text{ mH}$$

$$R = 0.5 \Omega$$

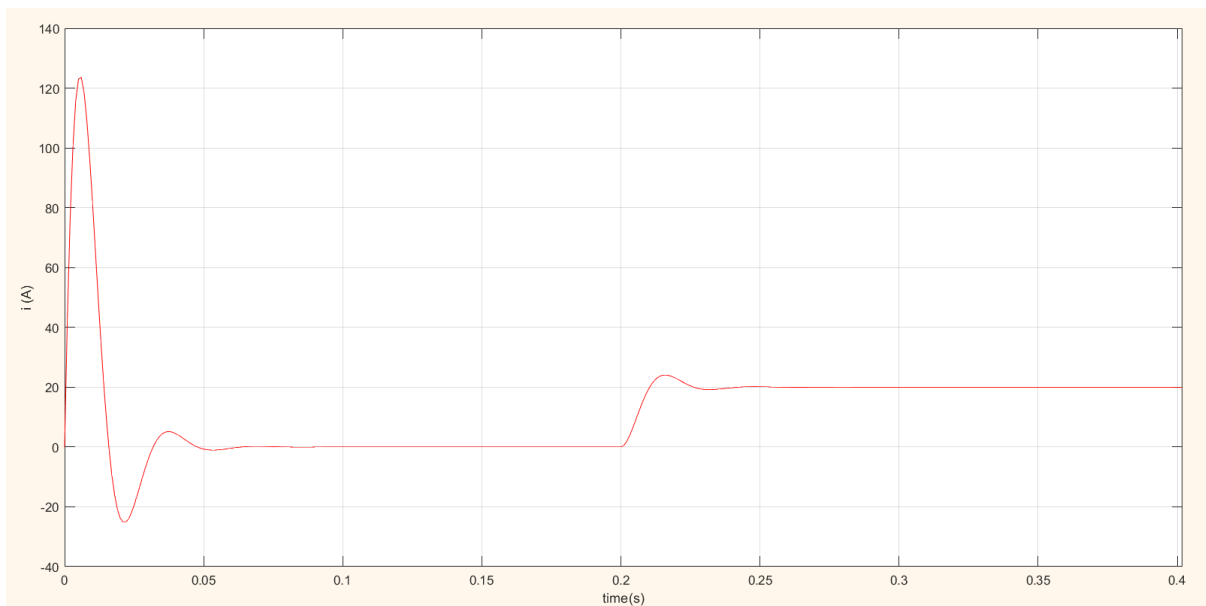
$$i_N = 20 \text{ A}$$

$$u_N = 120 \text{ V}$$

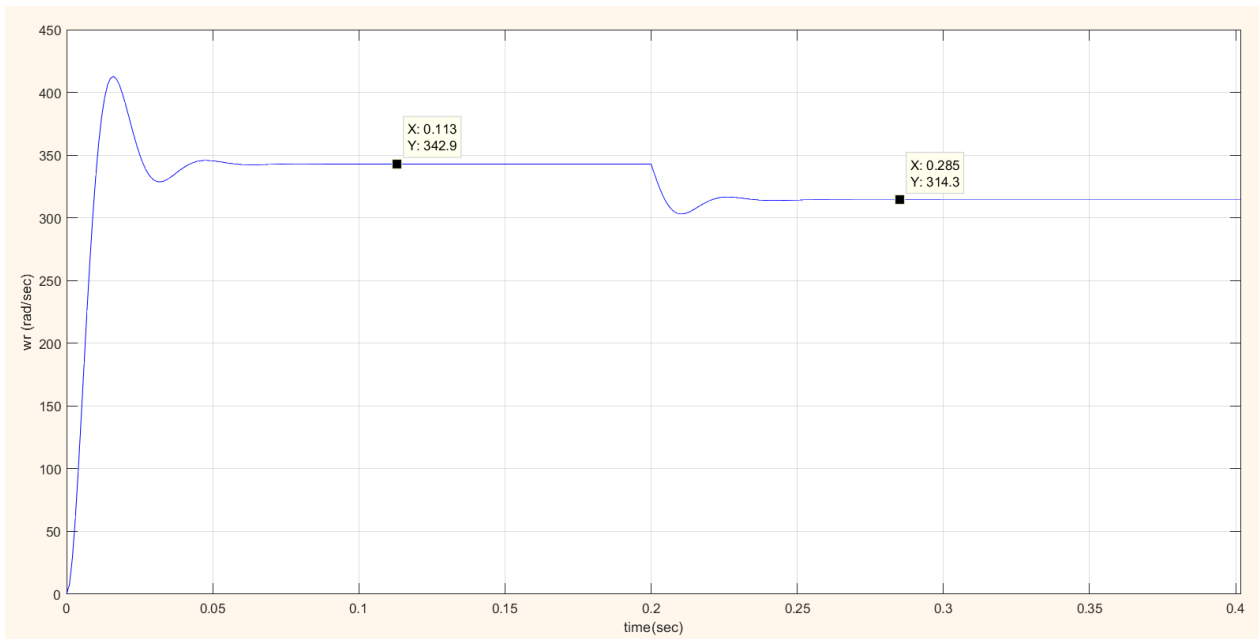
Ξεκινάμε την προσομοίωση, τροφοδοτώντας με ονομαστική τάση 120 V από τη χρονική στιγμή $t = 0 \text{ sec}$, χωρίς φορτίο, και συνδέουμε το ονομαστικό φορτίο ροπής 7 Nm στα 0.2 sec , χρησιμοποιώντας το block “step”.



Η κυματομορφή του ρεύματος φαίνεται παρακάτω:



Η κυματομορφή της γωνιακής ταχύτητας του δρομέα φαίνεται παρακάτω:



Όσον αφορά την κυματομορφή του ρεύματος, βλέπουμε ότι κατά την εκκίνηση το ρεύμα φτάνει μια μέγιστη τιμή 120 A ενώ η ονομαστική τιμή του είναι 20 A. Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως κατά την εκκίνηση η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα είναι μηδενική ($\omega_r = 0$), επομένως χρησιμοποιώντας την (1) βλέπουμε πως δεν υπάρχει όρος που να περιορίζει την ονομαστική τάση τυμπάνου. Όσο η ταχύτητα αυξάνεται, το peak της τάσης τυμπάνου περιορίζεται από την αντι-ΗΕΔ, και το ρεύμα αποκτά την ζητούμενη τιμή. Στο διάστημα $0 - 0.2 \text{ sec}$ βλέπουμε πως το ρεύμα στη μόνιμη κατάσταση είναι μηδενικό, γεγονός το οποίο είναι λογικό καθώς δεν έχουμε συνδέσει κάποιο φορτίο (εν κενώ λειτουργία).

Όταν συνδέσουμε το φορτίο βλέπουμε πως το ρεύμα τυμπάνου αυξάνεται, και αποκτά στη μόνιμη κατάσταση την τιμή των 20 A, η οποία είναι και η ονομαστική του. Παρατηρούμε μια μικρή υπερακόντιση όπου το ρεύμα φτάνει στα 25 A περίπου.

Όσον αφορά την γωνιακή ταχύτητα του δρομέα, βλέπουμε πως και εκείνη κατά την εκκίνηση αποκτά μια τιμή ταχύτητας μεγαλύτερη από την ονομαστική, αλλά δεν την ξεπερνά σε τόσο μεγάλο ποσοστό όσο του ρεύματος.

Για να υπολογίσουμε την γωνιακή ταχύτητα εν κενώ λειτουργία, η (1) στη μόνιμη κατάσταση γίνεται:

$$0 = u - R \cdot i - \psi \cdot \omega_r \Rightarrow u = \psi \cdot \omega_r \Rightarrow \omega_r = \frac{u}{\psi} = 342.857 \text{ rad/s}$$

Η τιμή αυτή επαληθεύεται και στην παραπάνω κυματομορφή.

Με την σύνδεση του ονομαστικού φορτίου βλέπουμε πως η τιμή της ταχύτητας είναι η ονομαστική στη μόνιμη κατάσταση, και παρατηρούμε μια βύθιση στην κυματομορφή.

Έλεγχος ρεύματος

Είδαμε πως με την απουσία ελέγχου ρεύματος, το ρεύμα κατά την εκκίνηση αποκτά μια αρκετά μεγάλη τιμή, συγκεκριμένα 120 A (το 600% της ονομαστικής του). Αυτό είναι ανεπιθύμητο, καθώς δημιουργεί προβλήματα και στο υπόλοιπο σύστημα εκτός από την καταπόνηση των τυλιγμάτων της μηχανής, για παράδειγμα την ενεργοποίηση relay υπερέντασης.

Για τον σκοπό αυτό, φτιάχνουμε αρχικά έναν PI ελεγκτή ενός βαθμού ελευθερίας όπου έχει συνάρτηση μεταφοράς όπως φαίνεται παρακάτω:

$$F_c(s) = k_p + \frac{k_i}{s}$$

όπου k_p το κέρδος του αναλογικού όρου, και k_i το κέρδος του ολοκληρωτικού όρου.

Επιπλέον, η συνάρτηση μεταφοράς του ηλεκτρικού συστήματος είναι:

$$G_e(s) = \frac{1}{sL+R}$$

Θέλουμε η συνάρτηση μεταφοράς κλειστού βρόχου από το i_{ref} στο i να είναι η εξής:

$$G_{cc}(s) = \frac{a_c/s}{1+a_c/s}$$

$$\text{Όμως, ισχύει: } G_{cc}(s) = \frac{G_e(s)}{1 + G_e(s) \cdot F_c(s)}$$

$$\text{Άρα, } G_e(s) \cdot F_c(s) = \frac{a_c}{s} \Rightarrow F_c(s) = \frac{a_c}{s} \cdot (sL + R) = a_c \cdot \widehat{L} + \frac{a_c \cdot \widehat{R}}{s}$$

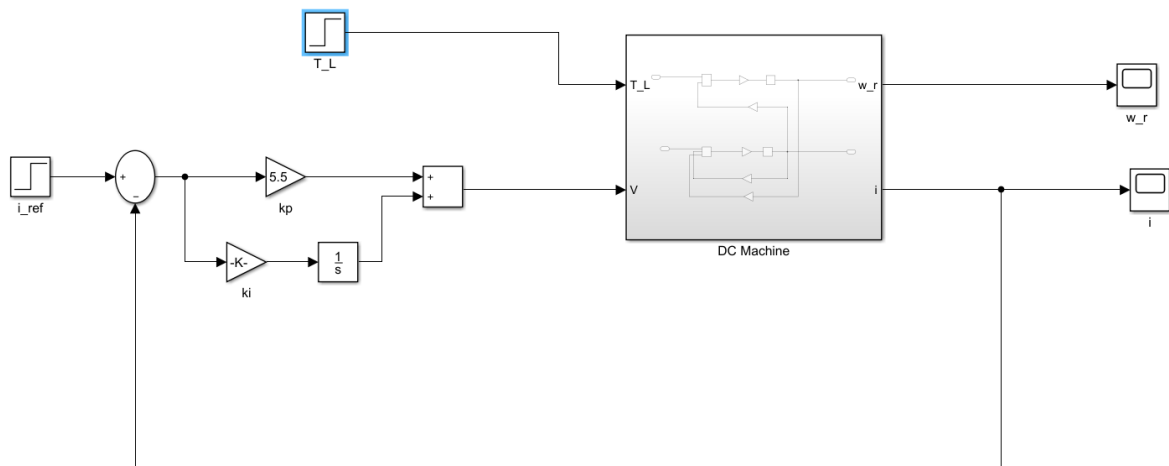
$$\text{Δηλαδή, } k_p = a_c \cdot \widehat{L} \text{ και } k_i = a_c \cdot \widehat{R}$$

Ζητούμενο είναι να έχουμε χρόνο ανύψωσης σε $t_r = 1msec$

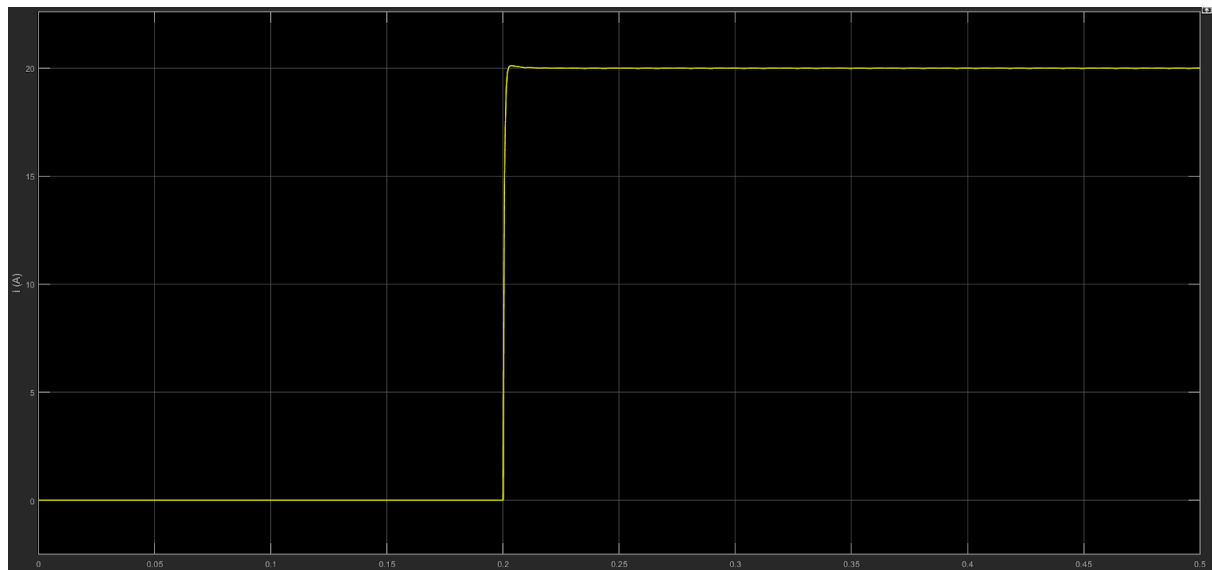
Γνωρίζουμε ότι για συστήματα 1ης τάξης, ισχύει ότι $a_c \cdot t_r \simeq \ln 9 \Rightarrow a_c \simeq 2200$

$$\text{Επομένως, } k_p = a_c \cdot \widehat{L} = 5.5 \text{ και } k_i = a_c \cdot \widehat{R} = 1100$$

Το σύστημα πλέον τροποποιείται ως εξής:

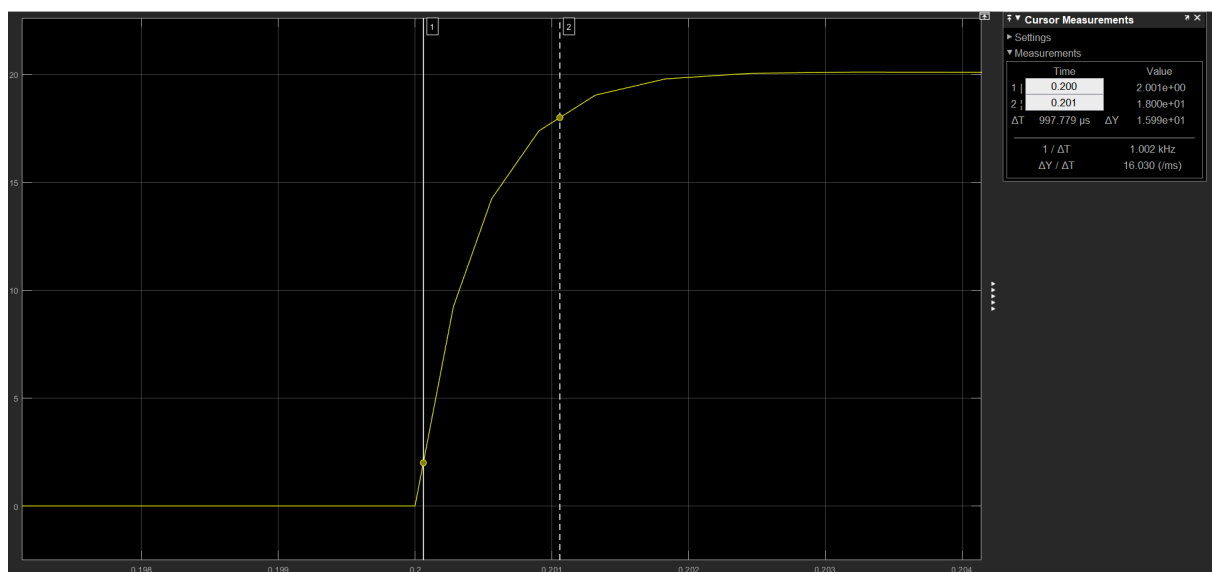


Η κυματομορφή του ρεύματος φαίνεται παρακάτω:



Βλέπουμε πως πλέον δεν έχουμε υπερακόντιση ούτε κατά την εκκίνηση, ούτε κατά την σύνδεση του ονομαστικού φορτίου στα 0.2 sec.

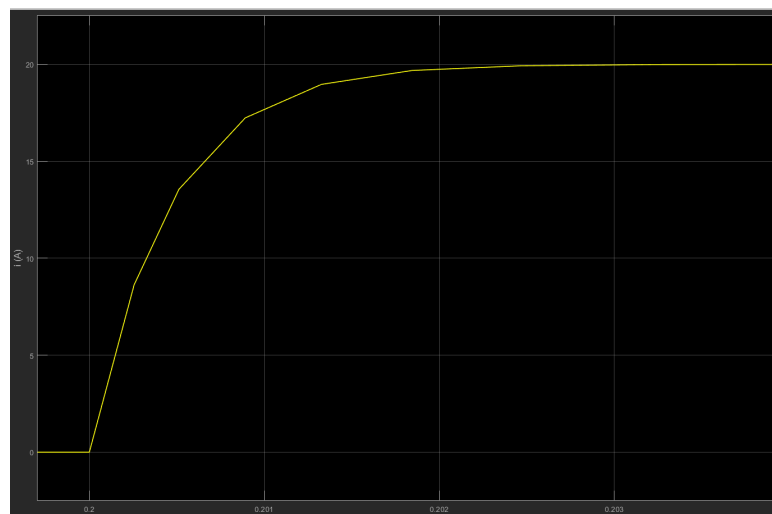
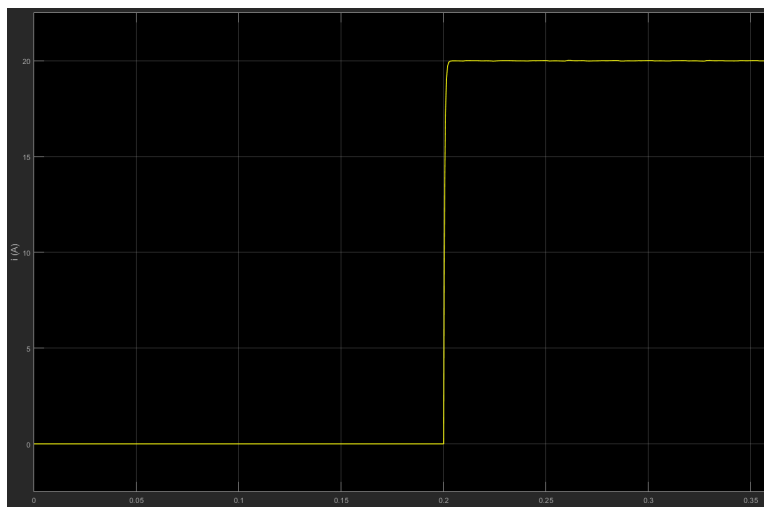
Κάνοντας zoom ώστε να δούμε τον χρόνο ανύψωσης, βλέπουμε το εξής:



Ο χρόνος ανύψωσης ορίζεται ως τον χρόνο που θα χρειαστεί η κυματομορφή να πάει από το 10% στο 90% της τελικής τιμής, δηλαδή στην περίπτωση μας από τα 2 A στα 18 A.

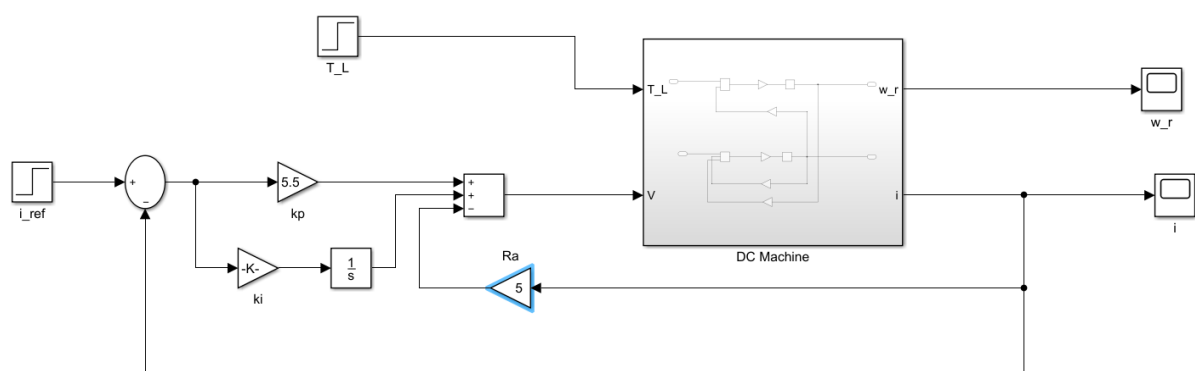
Βλέπουμε πως ο χρόνος αυτός είναι 1 msec.

Τώρα, προσθέτοντας στο σύστημα και την ενεργό απόσβεση R_a , ώστε το σύστημα να είναι λιγότερο ευαίσθητο σε μεταβολές φορτίου, η κυματομορφή του ρεύματος φαίνεται παρακάτω:



Η εικόνα δεξιά είναι μεγέθυνση της αριστερής εικόνας που δείχνει την κυματομορφή του ρεύματος, ώστε να μπορέσουμε να διακρίνουμε τον χρόνο ανόδου. Τώρα βλέπουμε ότι ο χρόνος ανόδου πλησιάζει τα 1 msec .

Το αντίστοιχο schematic στο simulink φαίνεται παρακάτω:



Να σημειωθεί ότι για τις τιμές των κερδών χρησιμοποιήθηκαν τα εξής:

$$k_p = a_c \cdot \widehat{L} = 5.5 \quad (4.57 [1])$$

$$k_i = a_c^2 \cdot \widehat{L} = 12100 \quad (4.57 [1])$$

$$R_a = a_c \cdot \widehat{L} - \widehat{R} = 5 \, \Omega \quad (4.56 [1])$$

Τέλος, υλοποιούμε και αντιμετώπιση συσσώρευσης ολοκληρωτικού σφάλματος (anti-windup). Αυτό είναι χρήσιμο στην περίπτωση που θέλουμε να έχουμε τιμή ρεύματος, για κάποιο διάστημα, μεγαλύτερη της ονομαστικής.

Ωστόσο αυξάνοντας το ρεύμα i_{ref} , θα αυξηθεί και η τάση εξόδου του PI ελεγκτή, και επομένως θα τροφοδοτούμε την μηχανή με τάση μεγαλύτερη της ονομαστικής, πράγμα το οποίο είναι ανεπιθύμητο. Γι' αυτό και προσθέτουμε κορεσμό στην έξοδο του ελεγκτή με όρια $\pm 120 \text{ V}$ όπου είναι η ονομαστική τάση τυμπάνου.

Επιπλέον, θα πρέπει να τροποποιήσουμε κατάλληλα τον ελεγκτή ρεύματος ώστε να ισχύει:

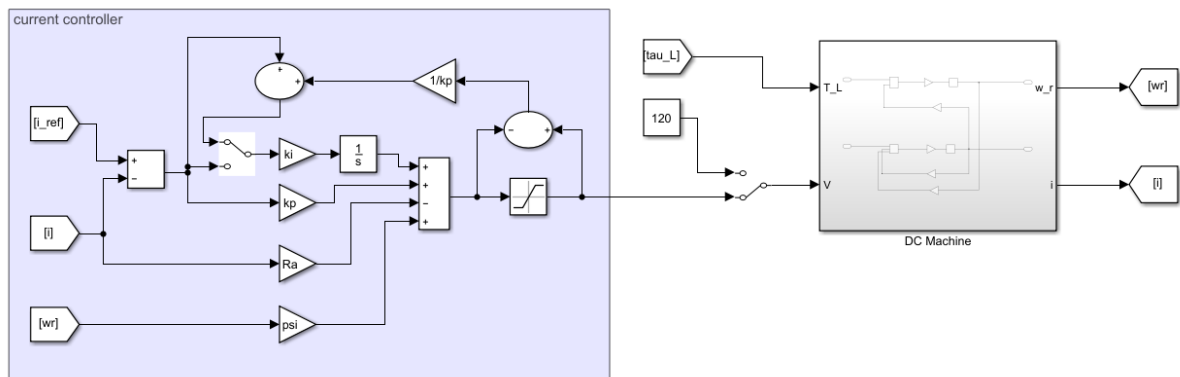
$$\bar{e} = e + \frac{1}{k_p} \cdot (\bar{u}_{ref} - u_{ref})$$

όπου $e = i_{ref} - i$, u_{ref} η τάση εξόδου του PI ελεγκτή πριν το block κορεσμού, και \bar{u}_{ref} η τάση εξόδου του PI ελεγκτή μετά το block κορεσμού.

Τώρα, θα ισχύει: $u_{ref} = k_p \cdot e + k_i \cdot I - R_a \cdot i + \hat{E}$

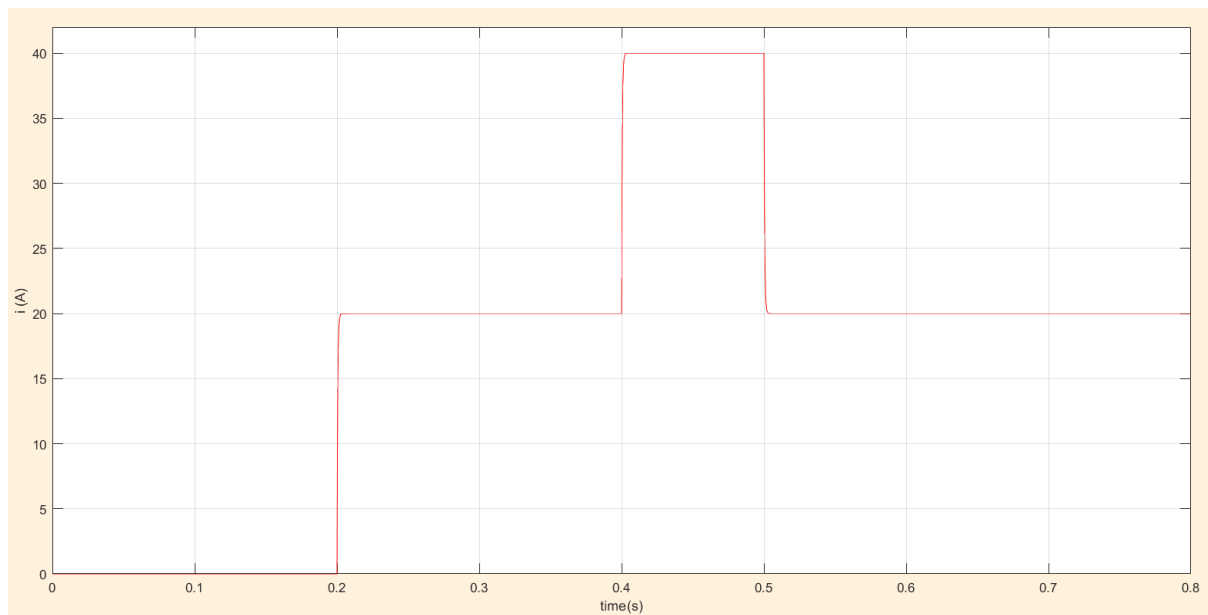
όπου $\frac{dI}{dt} = \bar{e}$ και $\hat{E} = \psi \cdot \omega_r$

Το schematic στο simulink φαίνεται παρακάτω:

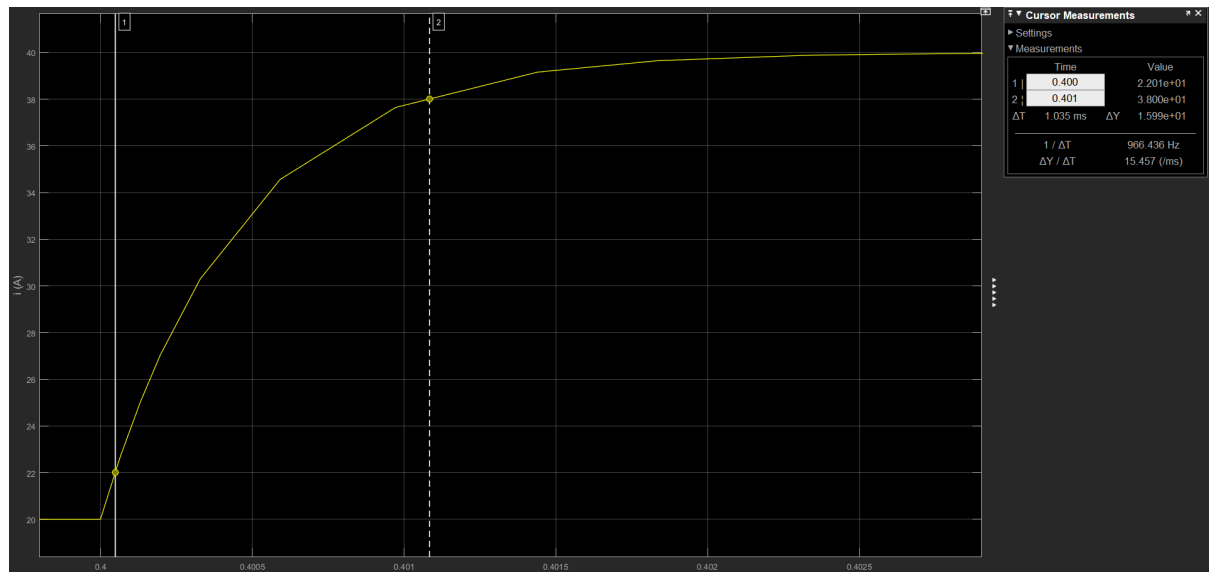


Στα 0.2 sec συνδέουμε ονομαστικό φορτίο ροπής 7 Nm, άρα και απαιτούμε 20 A ρεύμα στη μόνιμη κατάσταση, στα 0.4 sec συνδέουμε φορτίο ροπής 14 Nm, και άρα απαιτούμε 40 A, και τέλος στα 0.5 sec ξανασυνδέουμε φορτίο ροπής 7 Nm, και άρα απαιτούμε 20 A. Γίνεται η δοκιμή στα 40 A, ώστε να δειχθεί ότι ο ελεγκτής λειτουργεί σωστά, και η δοκιμή σε ρεύμα διπλάσιο του ονομαστικού γίνεται για 0.1 sec ώστε να μην έχουμε πρόβλημα στη μηχανή.

Το αποτέλεσμα της κυματομορφής του ρεύματος τυμπάνου φαίνεται παρακάτω:



Παρακάτω φαίνεται και σε zoom ώστε να επιβεβαιώσουμε ότι ικανοποιείται ο ζητούμενος χρόνος ανόδου.



Ο ζητούμενος χρόνος ανόδου (1 msec) είναι η μετάβαση από το 10% (22 A) στο 90% (38 A) της τελικής τιμής (40 A).

Βλέπουμε πως και τώρα ικανοποιείται ο ζητούμενος χρόνος ανόδου.

Έλεγχος ταχύτητας

Τώρα, θα υλοποιήσουμε τον ελεγκτή ταχύτητας 2 βαθμών ελευθερίας, η έξοδος του οποίου δίνει το ρεύμα αναφοράς.

Δίνεται ότι θέλουμε ο χρόνος ανόδου της ταχύτητας να είναι 10 φορές μεγαλύτερος από τον χρόνο ανόδου του ελεγκτή ρεύματος ($t_r = 10 \text{ msec}$).

Άρα, θα ισχύει: $a_s \cdot t_r \simeq \ln 9 \Rightarrow a_s = \frac{\ln 9}{t_r} \simeq 220$

Επομένως τα κέρδη του PI ελεγκτή ταχύτητας θα είναι τα εξής:

$$k_{ps} = \frac{a_s \cdot J}{\psi} = 0.62857 \quad (4.85 [1])$$

$$k_{is} = \frac{a_s^2 \cdot J}{\psi} = 138.2857 \quad (4.85 [1])$$

Επιπλέον, προστέθηκε ο όρος απόσβεσης b_a ώστε να γίνει 2 βαθμών ελευθερίας ο ελεγκτής.

Η τιμή του b_a είναι η εξής:

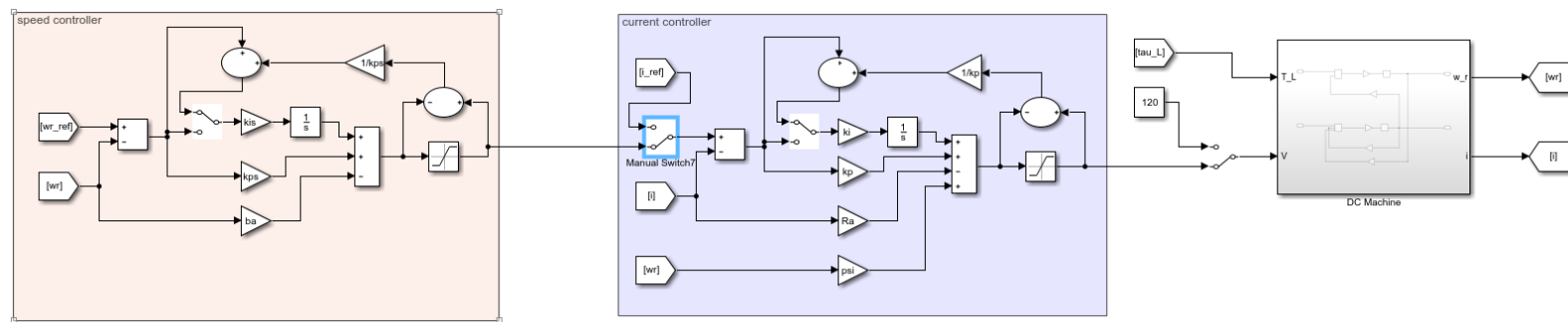
$$b_a = \frac{a_s \cdot J}{\psi} = 0.62857 \quad (4.82 [1])$$

Επιπλέον υλοποιούμε και anti-windup και στον ελεγκτή ταχύτητας, με όμοιο τρόπο όπως και στον ελεγκτή ρεύματος:

$$\bar{e} = e + \frac{1}{k_{ps}} \cdot (\bar{i}_{ref} - i_{ref})$$

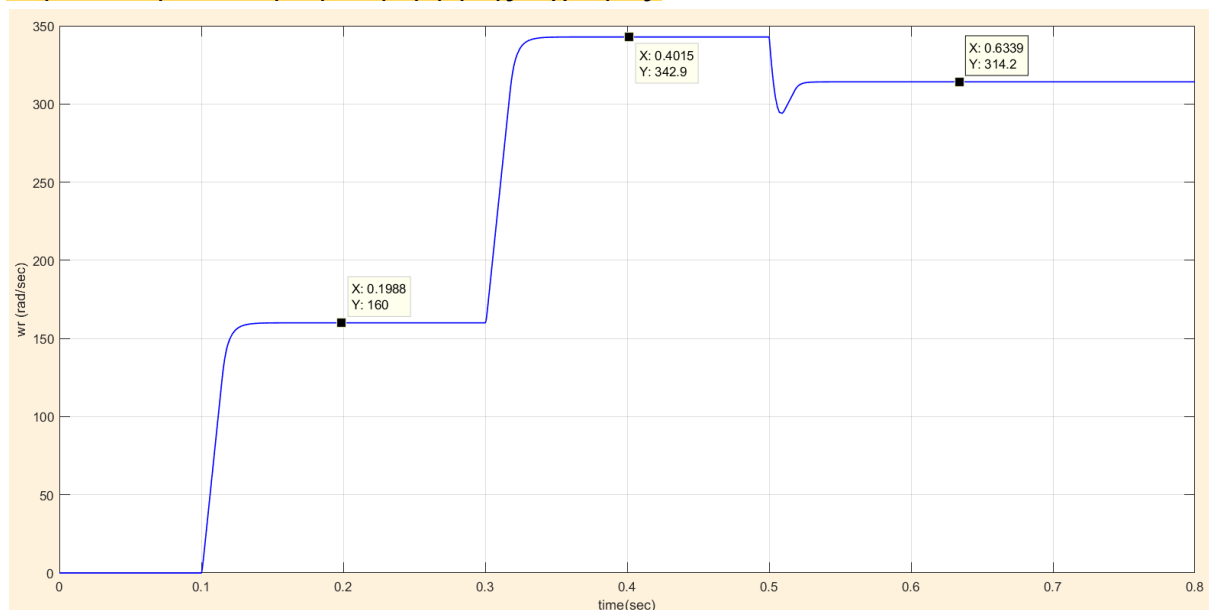
όπου $e = \omega_{ref} - \omega$, i_{ref} το ρεύμα εξόδου του PI ελεγκτή ταχύτητας πριν το block κορεσμού, και \bar{i}_{ref} το ρεύμα εξόδου του PI ελεγκτή ταχύτητας μετά το block κορεσμού.

Το τελικό schematic φαίνεται παρακάτω:

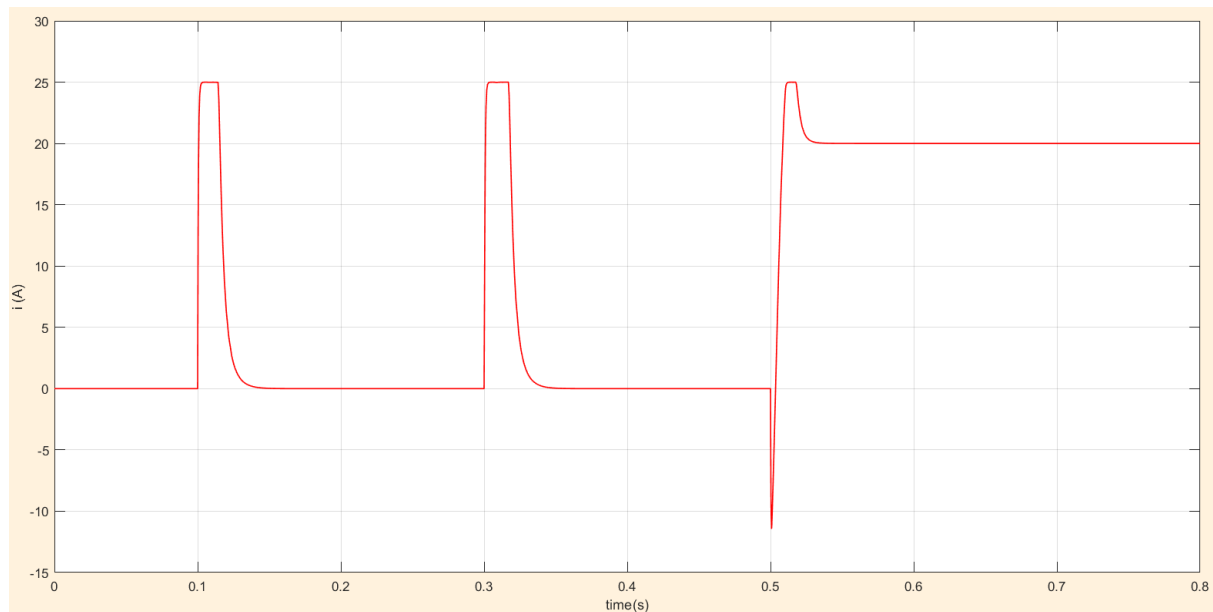


Στην προσομοίωση που θα παρουσιαστούν οι κυματομορφές του ρεύματος και της ταχύτητας, τη χρονική στιγμή 0.1 sec δίνουμε ταχύτητα αναφοράς ίση με 160 rad/sec με μηδενικό φορτίο ροπής, τη χρονική στιγμή 0.3 sec δίνουμε ταχύτητα αναφοράς ίση με 342.857 rad/sec που αντιστοιχεί στην εν κενώ λειτουργία, με μηδενικό φορτίο ροπής και πάλι, και τέλος τη χρονική στιγμή 0.5 sec συνδέουμε ονομαστικό φορτίο 7 Nm και θέτουμε την αναφορά της ταχύτητας ίση με 314.159 rad/sec, η οποία αντιστοιχεί στην ονομαστική ταχύτητα.

Παρακάτω φαίνεται η κυματομορφή της ταχύτητας:



Και του ρεύματος:

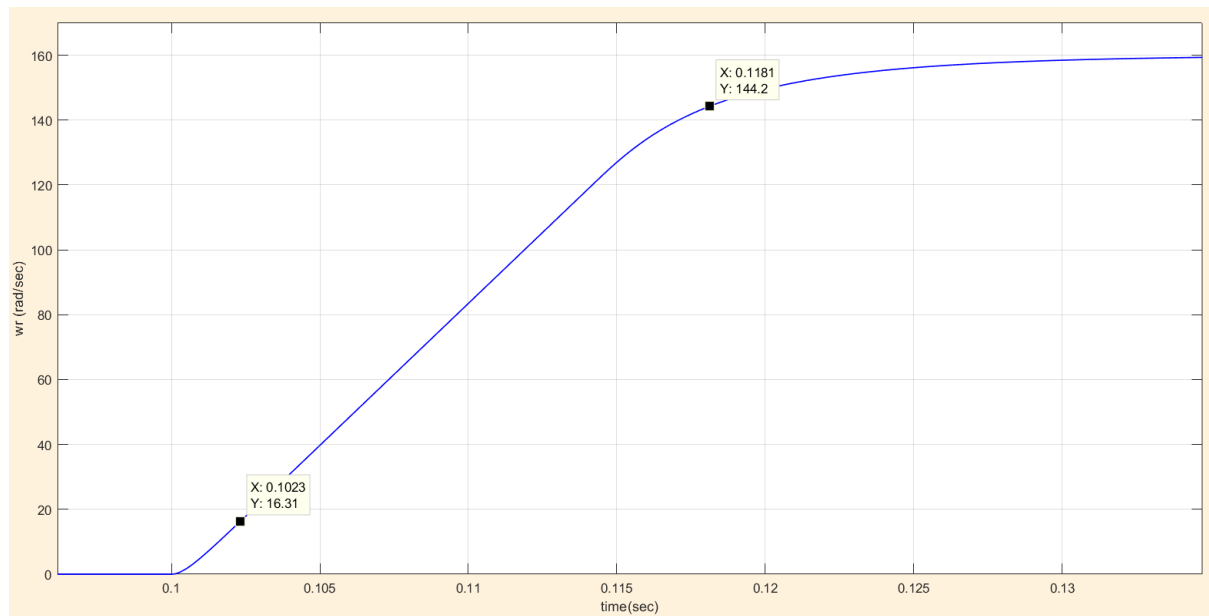


Βλέπουμε πως κατά την εκκίνηση το ρεύμα τείνει να αυξηθεί, ωστόσο περιορίζεται στα 25 A , όπου είναι και το ρεύμα κορεσμού. Αυτή η αύξηση του ρεύματος παρουσιάζεται σε κάθε μεταβολή που γίνεται στην αναφορά της ταχύτητας, ωστόσο το χρονικό διάστημα που το ρεύμα βρίσκεται σε κορεσμό είναι τόσο μικρό ώστε να μην δημιουργείται πρόβλημα στην μηχανή. Μετά το μεταβατικό όπου παρουσιάζεται στην αρχή, το ρεύμα στη μόνιμη κατάσταση είναι μηδενικό για την περίπτωση μηδενικού φορτίου ροπής, με αναφορές ταχύτητας ίσες με 342.857 rad/sec , και 160 rad/sec , όπως και είναι επιθυμητό, και με την προσθήκη ονομαστικού φορτίου και θέτοντας $\omega_{r,ref} = 314.159\text{ rad/sec} = \omega_{r,N}$, το ρεύμα παίρνει την ονομαστική του τιμή (20 A).

Να προστεθεί ότι ο κορεσμός ρεύματος που προστέθηκε, ορίστηκε στα $\pm 25\text{ A}$. Ο λόγος που έγινε αυτό είναι πως με κορεσμό στα $\pm 20\text{ A}$, κατά την σύνδεση του ονομαστικού φορτίου (7 Nm) η ταχύτητα δεν έφτανε την ονομαστική τιμή της, και ήταν ελαφρώς κάτω από τα 300 rad/sec , και επομένως το σφάλμα εισόδου του ελεγκτή ταχύτητας δεν μηδενιζόταν. Θεωρούμε πως ο ορισμός του κορεσμού στο 125% της ονομαστικής τιμής ρεύματος είναι αποδεκτός για την μηχανή, καθώς είναι για μικρά χρονικά διαστήματα και επομένως δεν καταπονείται η μηχανή.

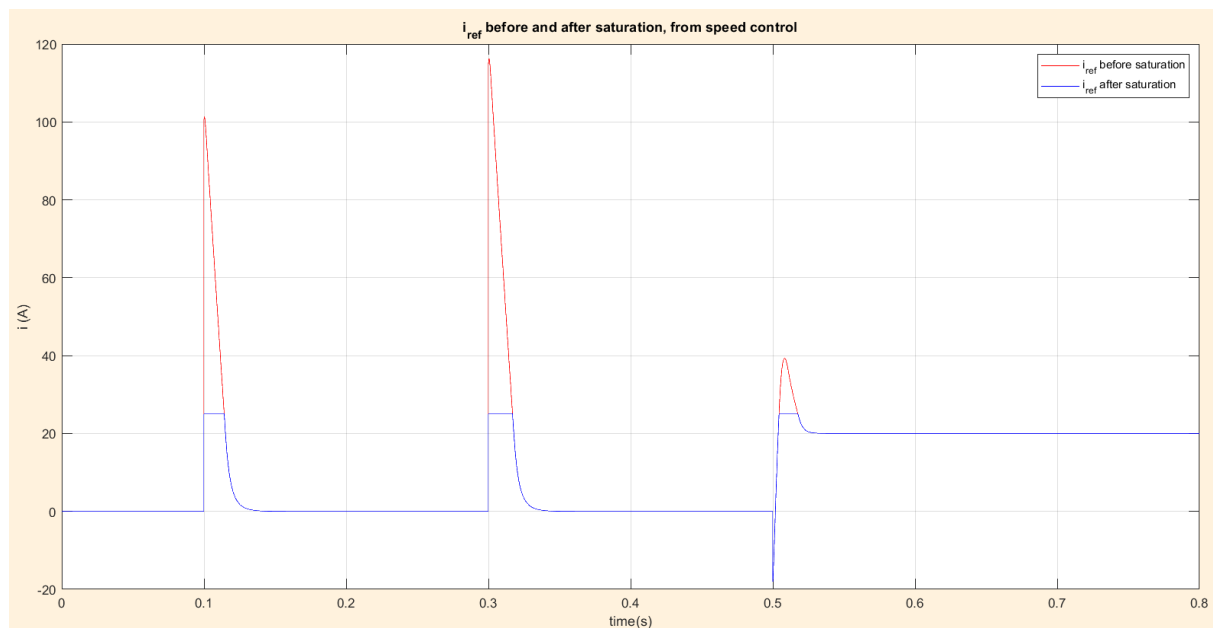
Όσον αφορά την ταχύτητα, βλέπουμε πως οι τιμές που αποκτά στην μόνιμη κατάσταση συμφωνούν με αυτές που υπολογίστηκαν θεωρητικά, και θέσαμε ως αναφορά. Όμοια με το ρεύμα, παρατηρείται μια ταλάντωση - undershoot - κατά την τελευταία μεταβολή φορτίου, η οποία θα μπορούσε να οφείλεται στην βηματική σύνδεση ονομαστικής ροπής φορτίου.

Παρακάτω φαίνεται και σε zoom η μεταβολή της ταχύτητας από 0 σε 160 rad/sec ώστε να αποφανθούμε για τον χρόνο ανόδου:



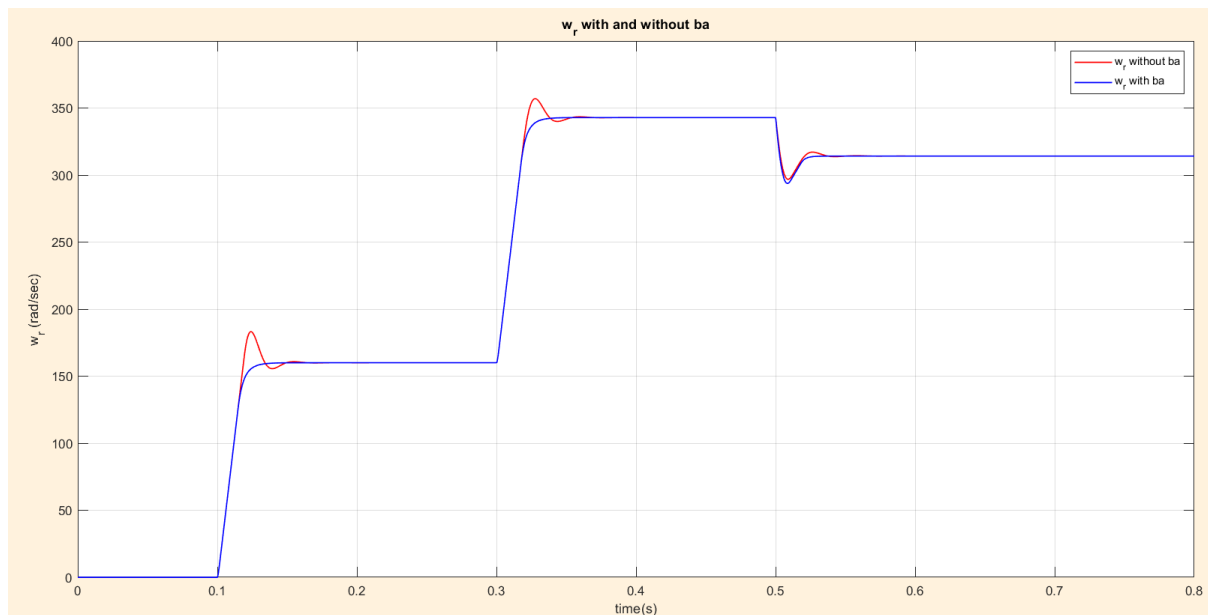
Για να μεταβεί από το 10% της επιθυμητής τιμής (16 rad/sec) στο 90% (144 rad/sec), βλέπουμε ότι απαιτούνται $0.1181 - 0.1023 = 0.0158 \text{ sec} = 15.8 \text{ msec}$, το οποίο είναι ελαφρώς μεγαλύτερο από τον επιθυμητό χρόνο ανόδου (10 msec), ωστόσο είναι στα αποδεκτά όρια.

Τέλος, παρακάτω φαίνονται το ρεύμα αναφοράς μετά τον κορεσμό, και το ρεύμα αναφοράς πριν τον κορεσμό αντίστοιχα:

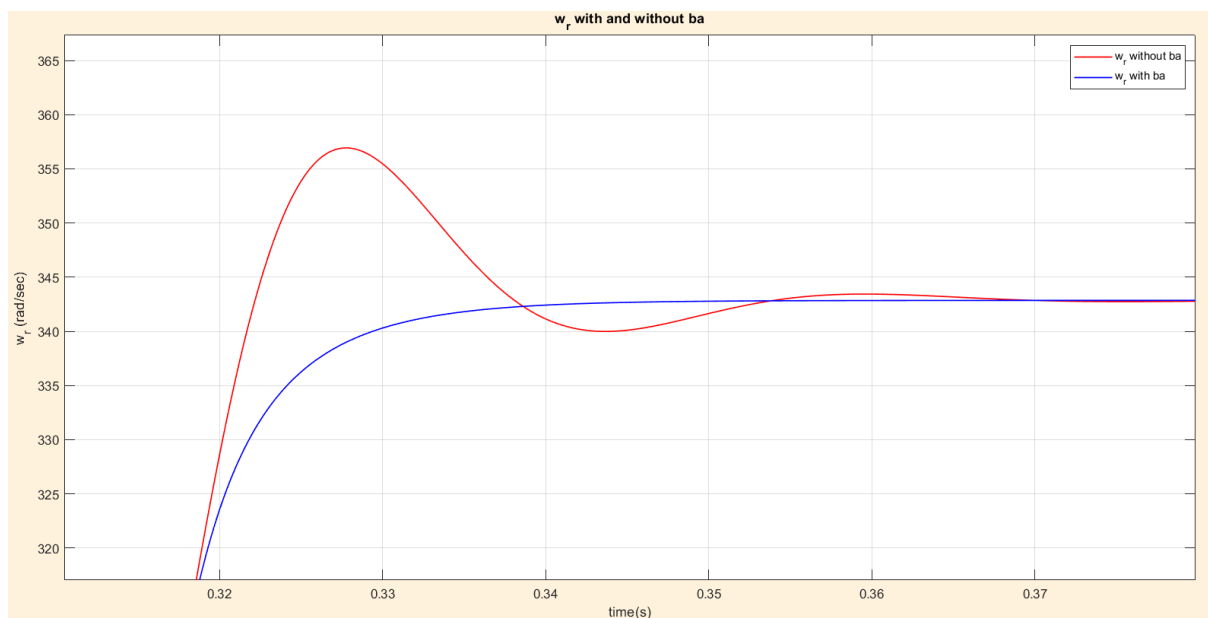


Από το παραπάνω γράφημα, είναι εμφανές ότι λειτουργεί ο κορεσμός, καθώς το ρεύμα πριν το block κορεσμού, αποκτά τιμή μέχρι και δέκα φορές της ονομαστικής της, ενώ χρησιμοποιώντας τον κορεσμό, το ρεύμα δεν ξεπερνά τα $\pm 25 \text{ A}$ που έχουμε ορίσει, αλλά φτάνει τον κορεσμό, για πολύ μικρό χρονικό διάστημα, και έπειτα αποκτά την ορθή τιμή μόνιμης κατάστασης.

Για να συγκρίνουμε την ταχύτητα με μηδενική ενεργό απόσβεση, και με ενεργό απόσβεση, πραγματοποιούμε 2 προσομοιώσεις: μια με την ενεργό απόσβεση b_a , και άλλη μια μηδενίζοντάς την, και με την βοήθεια του block “to workspace” το αποτέλεσμα είναι το εξής:



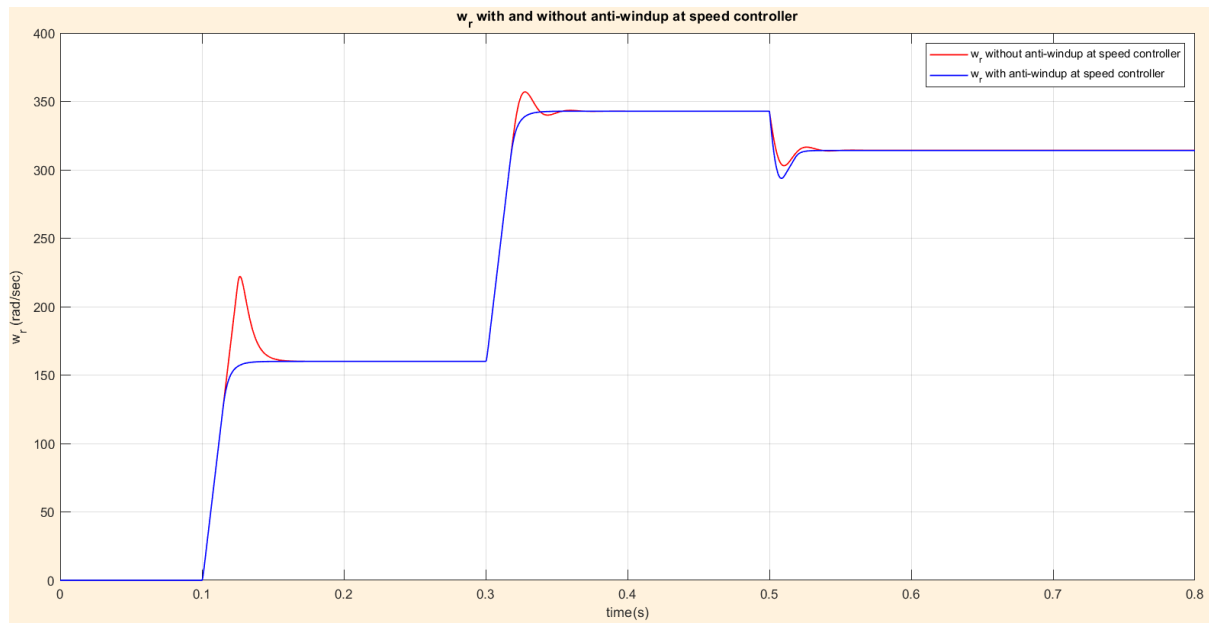
Και σε zoom:



Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης είναι αυτό που περιμέναμε, καθώς με την προσθήκη ενεργούς αποσβεσης b_a μειώνονται οι ταλαντώσεις και η υπερύψωση.

Τέλος, προσθέτοντας manual switch, πραγματοποιούμε προσομοίωση με και χωρίς anti-windup για τον ελεγκτή ταχύτητας, και τα αποτελέσματα φαίνονται παρακάτω:

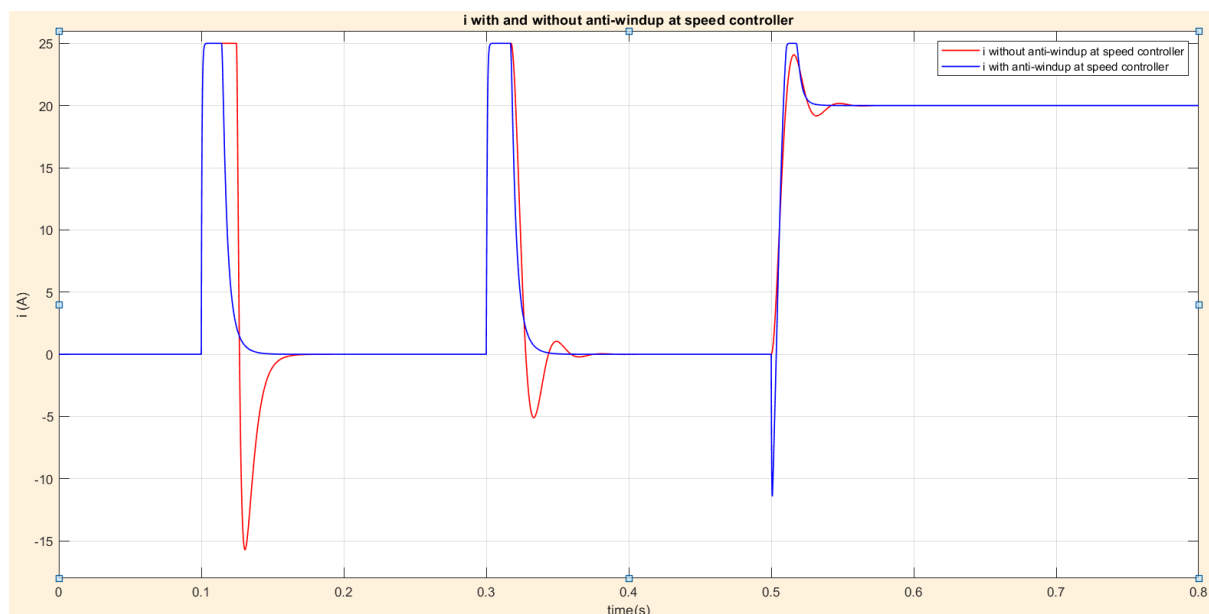
Η κυματομορφή της ταχύτητας φαίνεται παρακάτω:



Βλέπουμε πως αφαιρώντας το anti-windup στον ελεγκτή ταχύτητας έχουμε ένα μεγαλύτερο overshoot κατά την μεταβολή της ταχύτητας από μηδενική στην 160 rad/sec , γεγονός το οποίο είναι λογικό, καθώς το anti-windup περιορίζει αυτά τα overshoot.

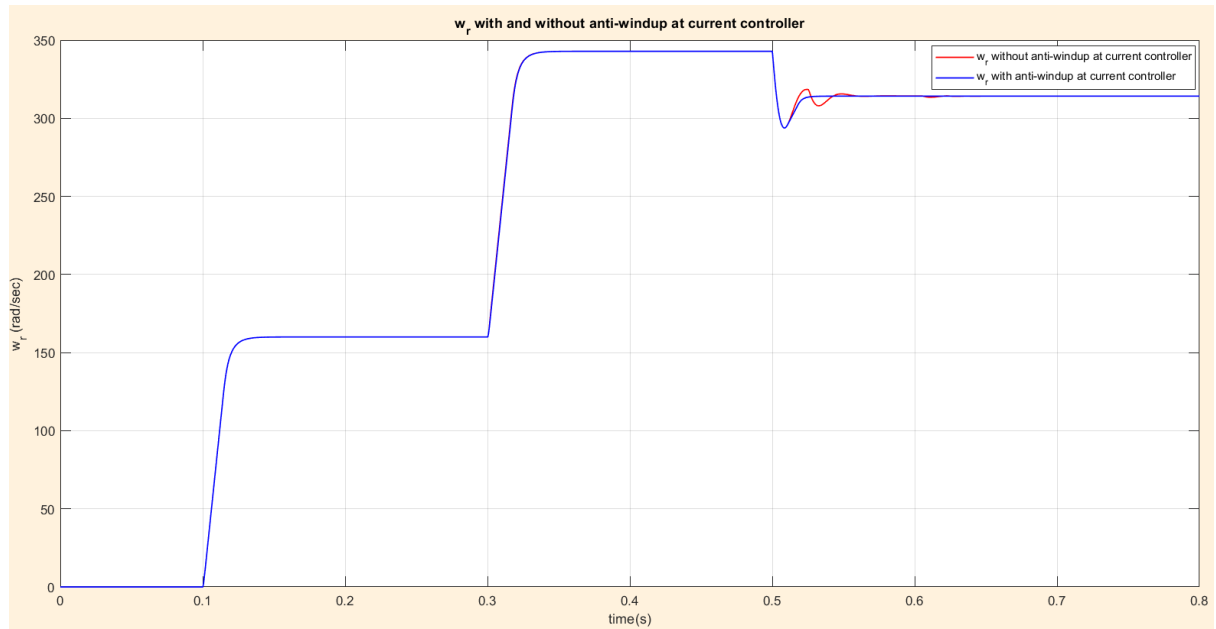
Όσον αφορά την κυματομορφή του ρεύματος, βλέπουμε πως τώρα έχουμε και undershoot, στις 2 πρώτες αλλαγές της ταχύτητας αναφοράς, και το ρεύμα παραμένει στον κόρο για ένα μικρό διάστημα παραπάνω.

Επιπλέον, κατά την τελευταία μεταβολή τη χρονική στιγμή 0.5 sec , όπου συνδέουμε ονομαστικό φορτίο, το ρεύμα χωρίς anti-windup στον έλεγχο ταχύτητας, δεν φτάνει τον κορεσμό κατά την μετάβαση, ούτε πραγματοποιείται undershoot, ωστόσο παρατηρούμε λίγες ταλαντώσεις έως ότου να αποκτήσει την τιμή μόνιμης κατάστασης.

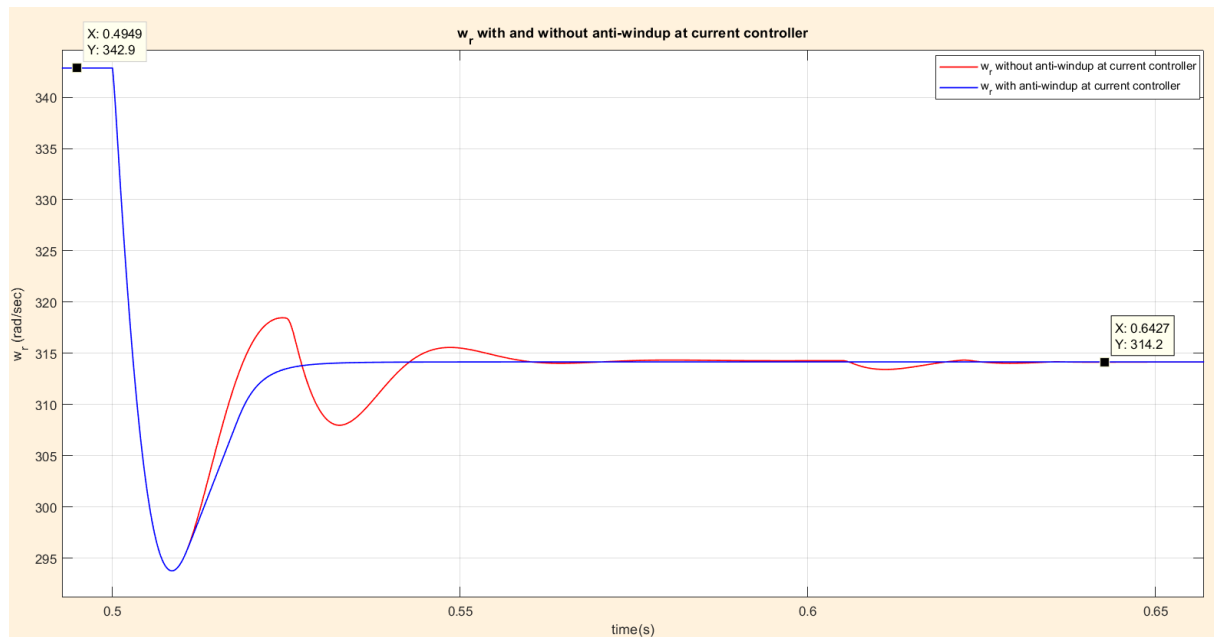


Πραγματοποιούμε την ίδια διαδικασία, αυτή το φορά αφαιρώντας το anti-windup από τον ελεγκτή ρεύματος, και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης φαίνονται παρακάτω:

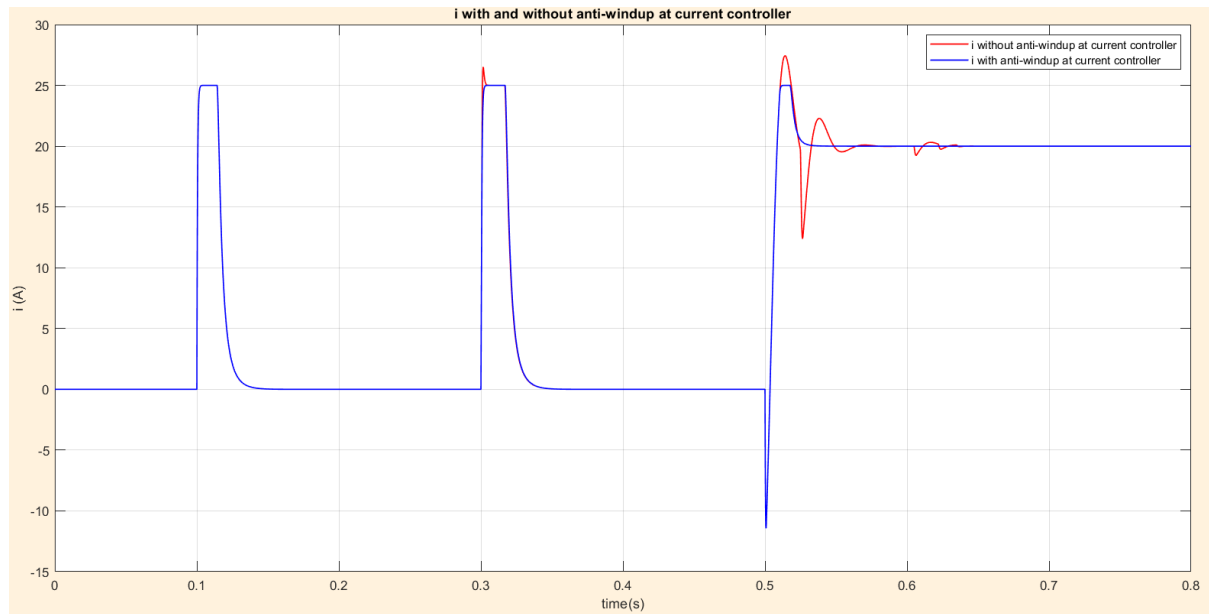
Για την ταχύτητα, όπως φαίνεται παρακάτω και σε zoom, βλέπουμε πως χωρίς το anti-windup στην περίπτωση σύνδεσης του ονομαστικού φορτίου, έχουμε ταλαντώσεις οι οποίες διαρκούν παραπάνω από τις μεταβατικές ταλαντώσεις που έχουμε παρατηρήσει μέχρι στιγμής, σε σύγκριση με την αφαίρεση του anti-windup στον ελεγκτή ταχύτητας.



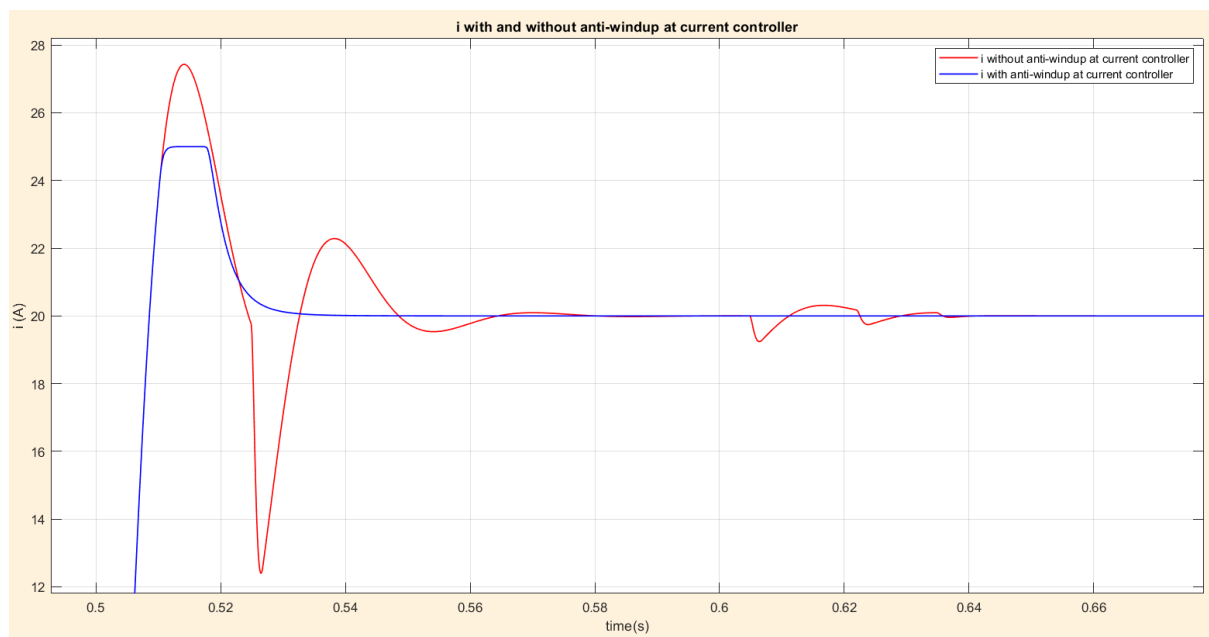
Και σε zoom:



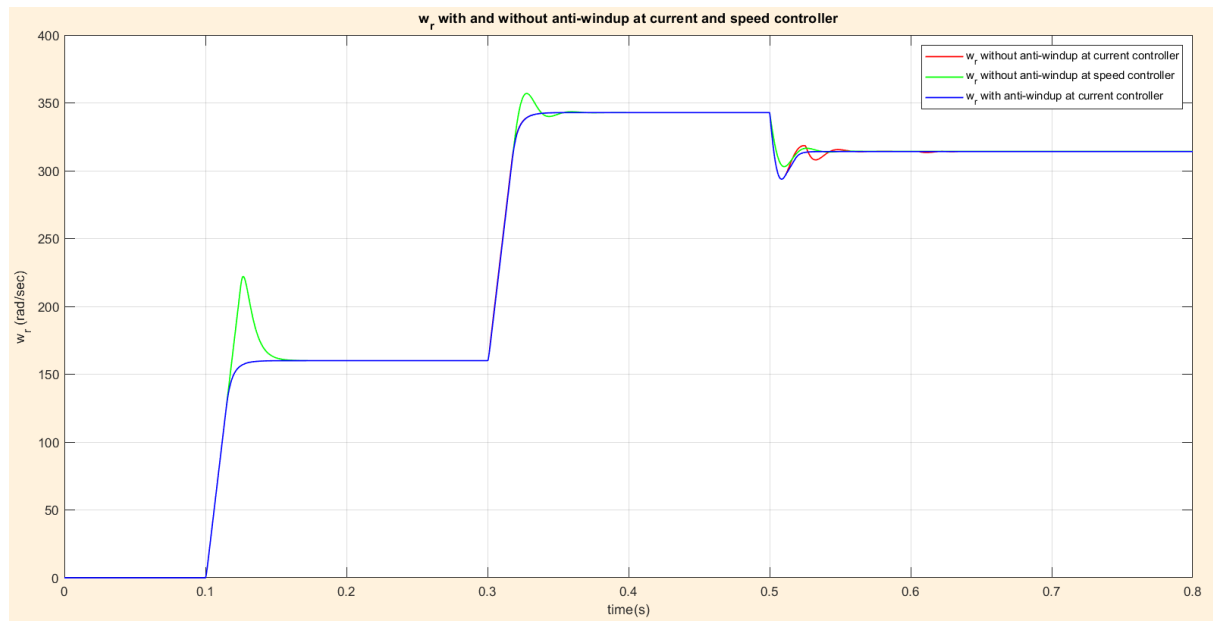
Όμοια, για το ρεύμα τυμπάνου, παρατηρούμε πως με την αφαίρεση του anti-windup έχουμε ταλάντωση γύρω από τη τιμή στη μόνιμη κατάσταση, δηλαδή στα 20 A.



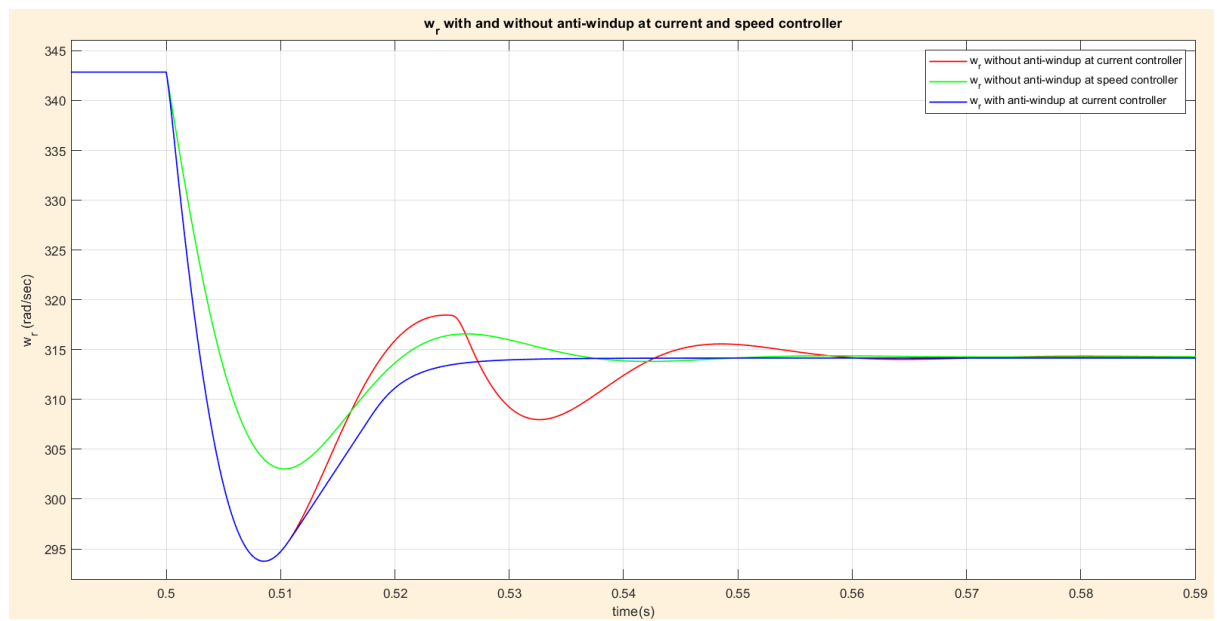
Και σε zoom:



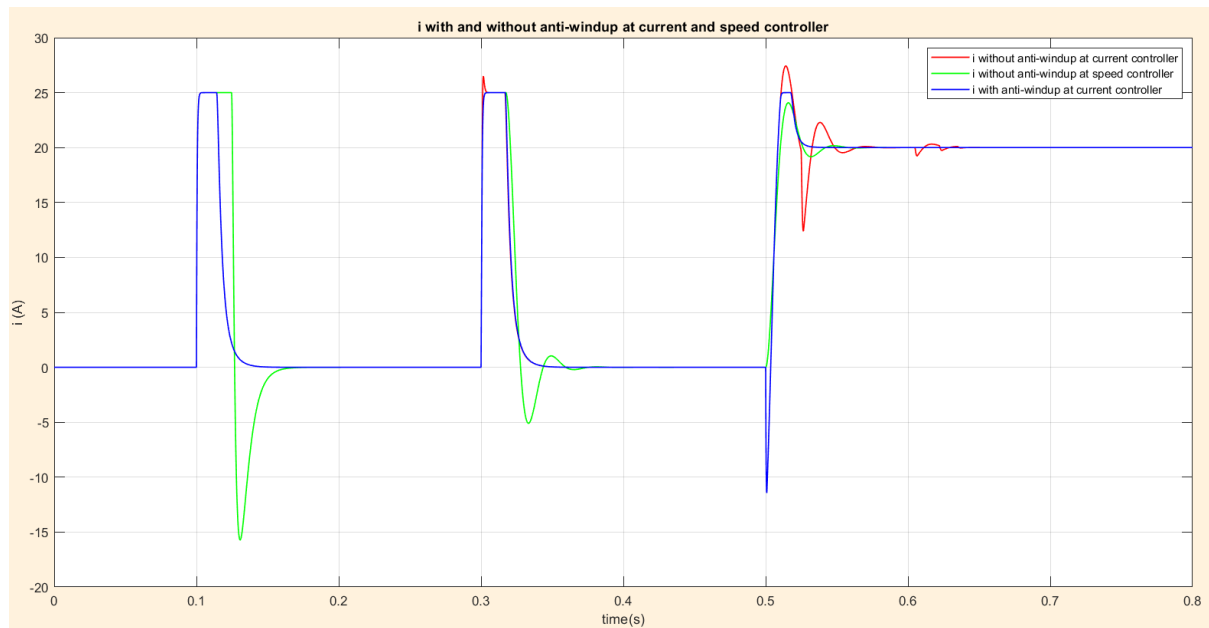
Τέλος, για λόγους πληρότητας, παρουσιάζονται παρακάτω και κοινά γραφήματα για την περίπτωση anti-windup και στους 2 ελεγκτές, για την αφαίρεση του anti-windup στον ελεγκτή ταχύτητας, και για την αφαίρεση του anti-windup στον ελεγκτή ρεύματος:



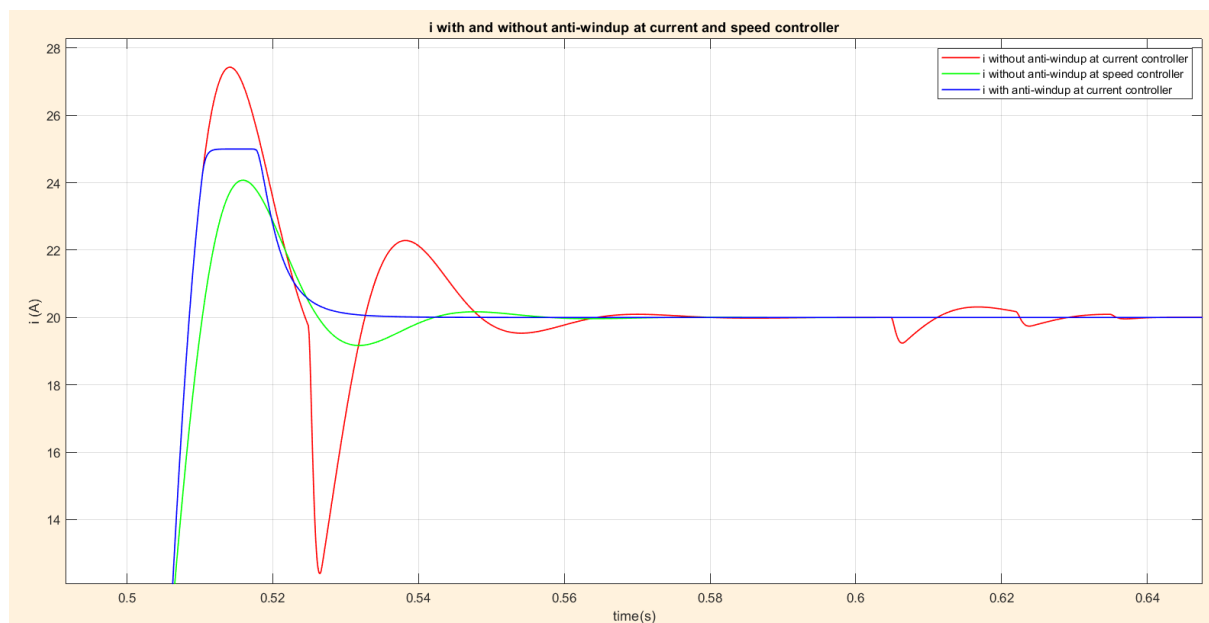
Και σε zoom, κατά την σύνδεση του ονομαστικού φορτίου:



Και οι κυματομορφές του ρεύματος:



Και σε zoom, κατά την σύνδεση του ονομαστικού φορτίου:



Επομένως, η αφαίρεση του anti-windup στον ελεγκτή ρεύματος έχει πιο σοβαρές επιπτώσεις στην λειτουργία του ελέγχου, κατά την σύνδεση φορτίου, το οποίο είναι αναμενόμενο, καθώς ο ελεγκτής ρεύματος είναι ο “φωλιασμένος”, και ο ελεγκτής ταχύτητας είναι ο εξωτερικός ελεγκτής που οδηγεί τον ελεγκτή ρεύματος. Ωστόσο, η αφαίρεση του anti-windup στον ελεγκτή ταχύτητας, δημιουργεί overshoot κατά τις μεταβάσεις με μηδενικό φορτίο.

Βιβλιογραφία

[1] “Control of Voltage-Source Converters and Variable-Speed Drives,” L. Harnefors, M. Hinkkanen, O. Wallmark