

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Συστήματα Ελέγχου Ηλεκτρικών Μηχανών

1η άσκηση - DC κινητήρας

Νοδάρης Άγγελος - 03117125

21 / 6 / 2021

(Σημείωση: οι διορθώσεις κειμένου θα γίνουν με **bold** γραμματοσειρά, οι διορθωμένες γραφικές παραστάσεις θα έχουν κόκκινο χρώμα, εκτός από αυτές που δείχνουν συγκρίσεις οι οποίες είναι όλες καινούργιες)

Μοντέλο Μηχανής ΣΡ

1. Το πρώτο βήμα για την μοντελοποίηση του ελέγχου του DC motor είναι να χτίσουμε ένα ισοδύναμο μοντέλο για τον κινητήρα. Οι δύο βασικές σχέσεις που θα χρησιμοποιήσουμε είναι οι εξής:

$$L \frac{di}{dt} = v - Ri - \psi \omega_r$$

$$J \frac{d\omega_r}{dt} = \psi i - \tau_L$$

Η πρώτη εξίσωση αποτελεί το ηλεκτρικό κομμάτι της μηχανής και η δεύτερη το μηχανικό. Η “ηλεκτρική εξίσωση” χτίζεται ουσιαστικά από νόμο τάσεων Κίρχωφ στο κυκλωματικό ισοδύναμο της μηχανής και η “μηχανική εξίσωση” απλώς περιγράφει το σύνολο των ροπών που ασκούνται στον ρότορα της μηχανής ($Jd\omega/dt = \tau_{ol} = \tau_{el} - \tau_{load}$). Οι δύο σχέσεις συνδέονται μεταξύ τους μέσω της μαγνητικής ροής ψ , οπότε αυτή θα είναι ο συνδετικός κρίκος μεταξύ των δύο στο ισοδύναμο μοντέλο.

Μερικές χρήσιμες σχέσεις:

Ri : η πτώση τάσης λόγω της αντίστασης τυλιγμάτων

Ldi/dt : η πτώση τάσης λόγω της επαγωγής των τυλιγμάτων

V : τάση τροφοδοσίας

$\psi \omega_r$: η αντι-ηλεκτρεγερτική δύναμη (τάση) που προκαλείται εξ επαγωγής στον κινητήρα

ψi : η ηλεκτρική ροπή που παράγει ο κινητήρας

Επίσης, από την εκφώνηση έχουμε τις παραμέτρους του κινητήρα που εξετάζεται:

Πίνακας 1: Ονομαστικές τιμές και τιμές παραμέτρων της μηχανής ΣΡ

Ονομαστική τάση τυμπάνου V_N	120 V
Ονομαστικό ρεύμα τυμπάνου I_N	20 A
Ονομαστική ταχύτητα n_N	3000 rpm
Ονομαστική ροπή τ_N	7 Nm
Αντίσταση τυμπάνου R	0,5 Ω
Αυτεπαγωγή τυμπάνου L	2,5 mH
Πεπλεγμένη ροή ψ	0,35 Vs
Ροπή αδρανείας J	0,001 kgm ²

Με βάση τις δύο εξισώσεις της μηχανής αλλά και του σχήματος του βιβλίου

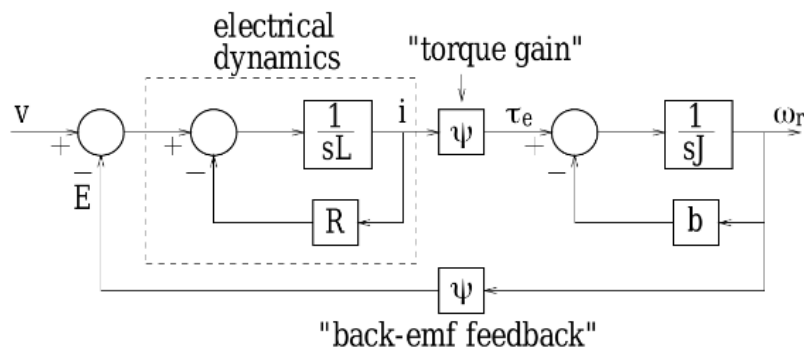
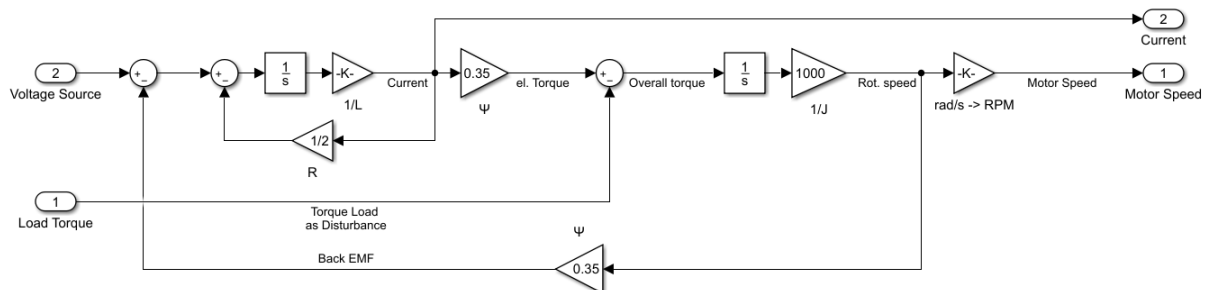


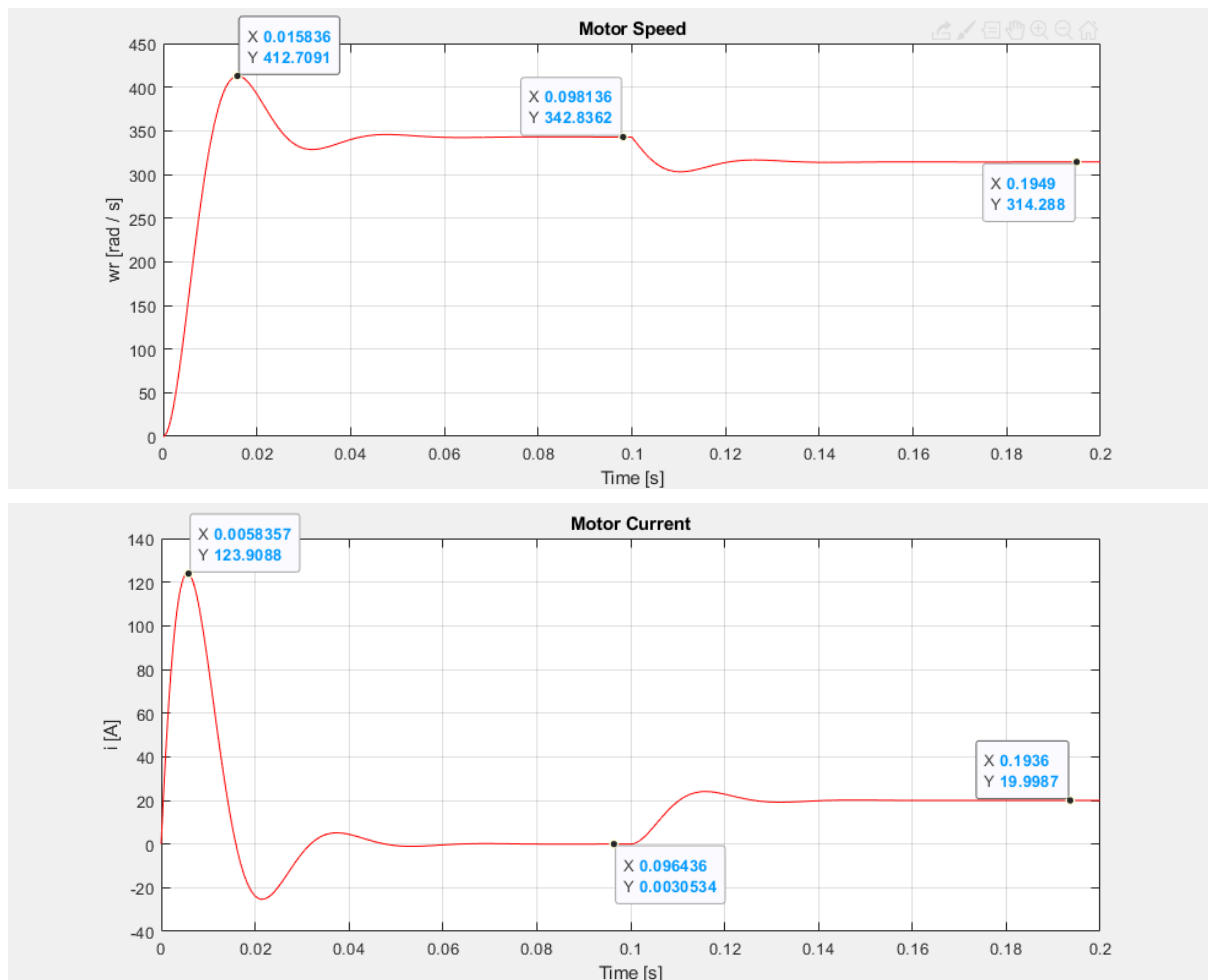
Figure 4.9. Block diagram of the dc-motor dynamics.

χτίζουμε το ισοδύναμο μοντέλο στο Simulink το οποίο έχει την εξής μορφή:



Ο λόγος για τον οποίο η προσομοίωση ξεκινά με την τάση πηγής είναι επειδή αυτή είναι η αναφορά μας, είναι το μέγεθος το οποίο μπορούμε να ορίζουμε κατ'επιλογήν, και τελειώνει με την ταχύτητα και τη ροπή γιατί αυτά είναι τα μεγέθη τα οποία εν τέλει θέλουμε να ελέγχουμε. Η αλληλουχία των blocks έως και το current προκύπτει εάν λύσουμε την ηλεκτρική εξίσωση ως προς το ρεύμα. Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας ως “αναφορά” το ρεύμα, τα υπόλοιπα block προκύπτουν αν λύσουμε την μηχανική εξίσωση ως προς τη γωνιακή ταχύτητα.

Όσον αφορά το τρέξιμο της προσομοίωσης, ρυθμίζουμε την ροπή φορτίου ως step block που “ενεργοποιείται” στα 0,1sec. Αυτό είναι αρκετός χρόνος ώστε να φτάσει πρώτα η μηχανή σε σταθερή κατάσταση. Στη συνέχεια, μόλις παρεμβαίνει και η ροπή φορτίου (ονομαστική), τα μεγέθη τόσο του ρεύματος όσο και της γωνιακής ταχύτητας φτάνουν τις ονομαστικές τους τιμές όπως φαίνεται παρακάτω:



Προφανώς, η τάση που εισάγουμε στη μηχανή είναι 120V. Παρατηρούμε, ωστόσο, ένα πολύ μεγάλο spike του ρεύματος στην αρχή της προσομοίωσης. Λόγω μηχανικής αδράνειας, η μηχανή αργεί να αυξήσει την ταχύτητά της, επομένως έχουμε πολύ αργή αύξηση του όρου ψ_r (back EMF), και εφόσον το $R \cdot i$ έχει πάντα μικρή τιμή σε σχέση με την τάση εισόδου, η παράγωγος του ρεύματος είναι θετική για μεγάλο χρονικό διάστημα. Έτσι, το ρεύμα αυξάνεται πολύ μέχρι να αυξηθεί (αργότερα) με τη σειρά της η γωνιακή ταχύτητα. Έπειτα, μόλις έχουμε ισότητα $\psi_r = V - Ri$ τότε έχουμε peak του ρεύματος. Πάλι όμως λόγω αδράνειας ($J d\omega/dt = \psi$), η ταχύτητα συνεχίζει (με μικρότερο ρυθμό) να αυξάνεται, επομένως έχουμε αρνητική παράγωγο ρεύματος και γι' αυτό βλέπουμε την απότομη πτώση του ρεύματος μέχρι και σε αρνητικές τιμές, ώσπου να αποκτήσει ξανά θετική τιμή η παράγωγος κ.ο.κ. Το φαινόμενο αυτό συνεχίζεται έως ότου να ισορροπήσει η κατάσταση, δηλαδή να μηδενιστεί το ρεύμα και συνεπώς η επιτάχυνση της μηχανής. Όταν πλέον μπει και η ροπή φορτίου, το ρεύμα πάλι πραγματοποιεί μια μικρή ταλάντωση ώσπου να ισορροπήσει στις ονομαστικές τιμές (όπου $\psi_i = T_{load}$).

Επαλήθευση τιμών:

Εν κενώ στροφές: $L di/dt = 0 \rightarrow V - Ri - \psi_r = 0$ και εφόσον $i = 0$ στην μόνιμη κατάσταση, έχουμε $V = \psi_r \rightarrow \omega_r = 342.86 \text{ rad/s}$

Υπό φορτίο στροφές: $L di/dt = 0 \rightarrow 120 - 0.5 \cdot 20 - 0.35\omega_r = 0 \rightarrow \omega_r = 314.29 \text{ rad/s}$

Έλεγχος ρεύματος και ταχύτητας

Ελεγκτής ρεύματος

2. Σε αυτό το στάδιο θα χτίσουμε τον ελεγκτή ρεύματος, ξεκινώντας από τον απλό PI ελεγκτή και προσθέτοντας όλες τις υπόλοιπες ρυθμίσεις βήμα βήμα. **Θα δοκιμασθεί step load αλλά και φορτίο ανάλογο της ταχύτητας.**

Φορτίο ανάλογο ταχύτητας: $Jd\omega_r / dt = \psi_i - b\omega_r \rightarrow b = 0.022$

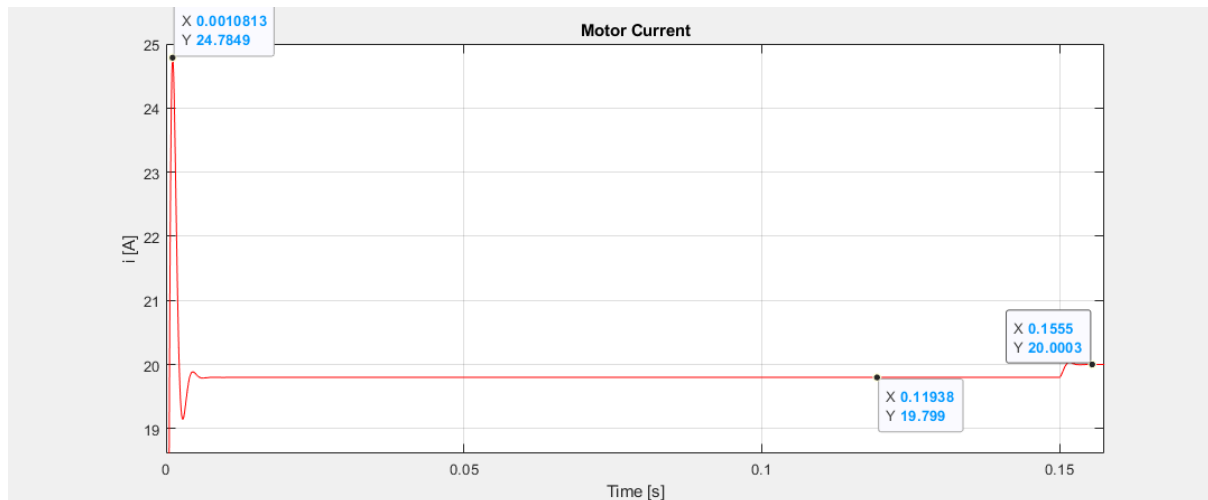
Ο PI ελεγκτής τροφοδοτείται με το σφάλμα μεταξύ ονομαστικού (επιθυμητού) ρεύματος και του πραγματικού ρεύματος, και μέσω του ολοκληρωτικού και αναλογικού μέρους δίδει την τάση αναφοράς στην μηχανή. Οι τιμές για το bandwidth και τα κέρδη του ελεγκτή προέκυψαν από τις σχέσεις:

$$ac \cdot t_{rise} = \ln 9 \rightarrow ac = 2197$$

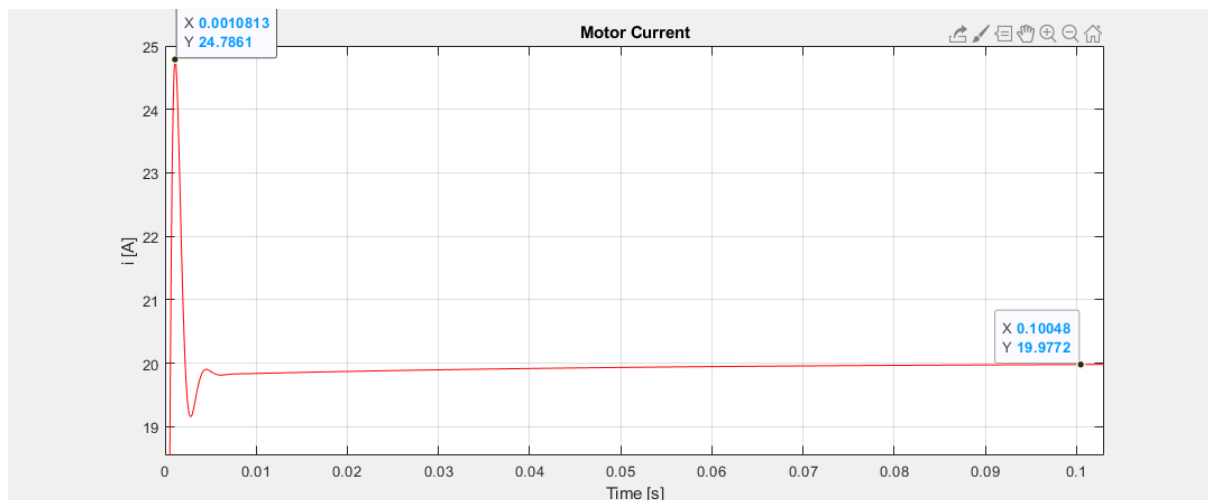
$$K_p = ac \cdot L = 2197 \cdot 0.0025$$

$$K_i = ac \cdot R = 2197 \cdot 0.5$$

Step Load



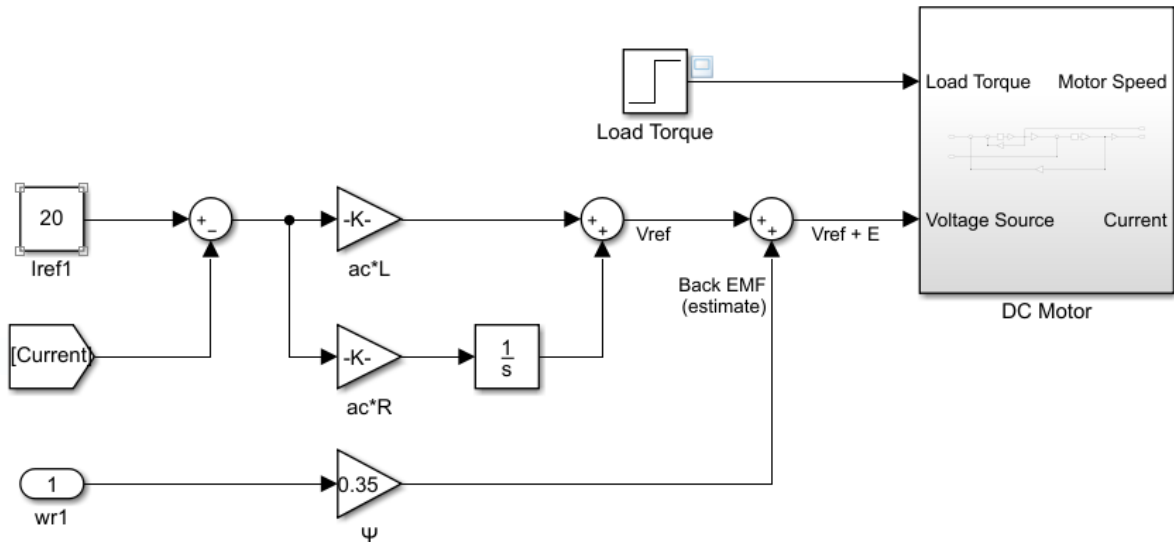
Proportional Load



Παρατηρούμε ότι προκύπτει ένα μικρό overshoot του ρεύματος, **τόσο στην περίπτωση του step load και του proportional load**, το οποίο θα ήταν επιθυμητό να εξαλειφθεί.

Από την ηλεκτρική εξίσωση, καταλαβαίνουμε ότι η επίδραση της back EMF είναι αυτή που προκαλεί τις ταλαντώσεις του ρεύματος που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Επομένως, μπορούμε να βελτιώσουμε την απόκριση εάν καταφέρουμε να εξαλείψουμε την επίδρασή της. Πρακτικά, αυτό μπορεί να γίνει εφόσον έχουμε μια καλή εκτίμηση της μαγνητικής ροής ψ και της ταχύτητας ω_r . Σε περιβάλλον προσομοίωσης, όμως, τις τιμές αυτές τις γνωρίζουμε

επακριβώς, επομένως προσθέτοντας την τιμή της back EMF στην τάση αναφοράς, μπορούμε να την εξαλείψουμε πλήρως. Μέχρι τώρα έχουμε το εξής κύκλωμα:



Στη συνέχεια, μελετάμε την εξής σχέση:

$$e = \frac{\psi}{\alpha_c R J} (\psi i - b \omega_r).$$

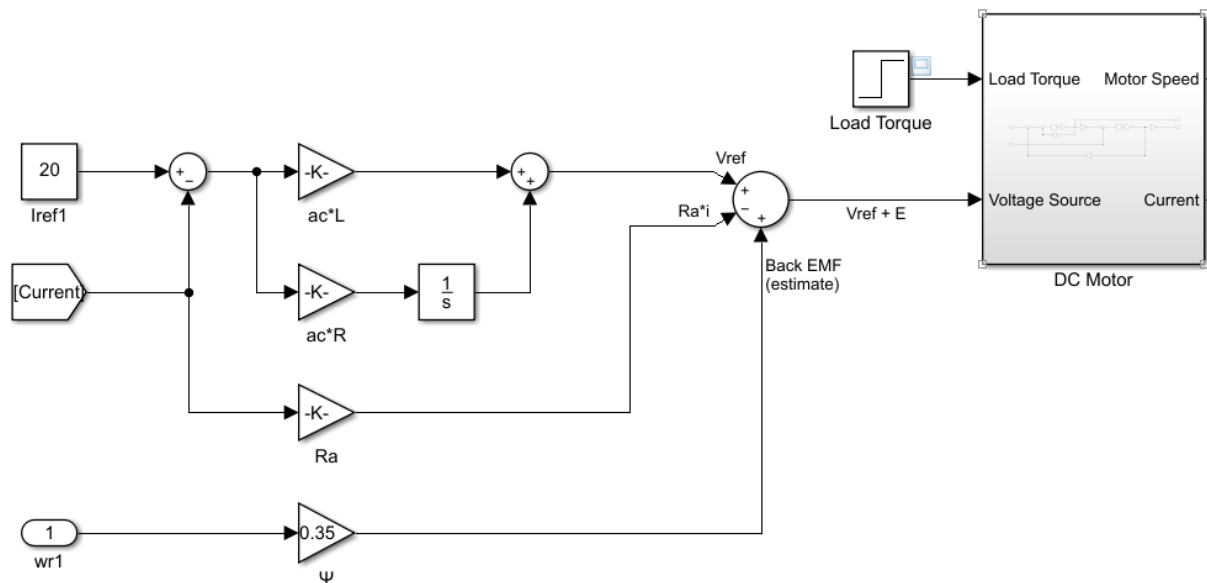
Παρατηρούμε ότι με αύξηση της αντίστασης, το σφάλμα θα μειωνόταν καθώς είναι αντιστρόφως ανάλογο. Αυτό είναι κάτι επιθυμητό να συμβεί, ωστόσο δεν μπορούμε να προσθέσουμε παραπάνω φυσική αντίσταση στο κύκλωμα διότι θα αυξηθούν οι απώλειες της μηχανής. Μπορούμε, όμως, να προσθέσουμε έναν ακόμη κύκλο ανάδρασης με μια νέα, εικονική αντίσταση R_a , η οποία θα προστίθεται αποκλειστικά ως σήμα στη συνολική αντίσταση και έτσι θα μειώσουμε το σφάλμα χωρίς να αυξήσουμε τις απώλειες. Οι νέες τιμές των κερδών του PI ελεγκτή διαμορφώνονται ως εξής:

$$k_p = \alpha_c \hat{L} \quad k_i = \alpha_c (\hat{R} + R_a).$$

Με επιλογή της $R_a = ac*L' - R'$, οι τελικές τιμές των κερδών έχουν ως εξής:

$$k_p = \alpha_c \hat{L} \quad k_i = \alpha_c^2 \hat{L}.$$

Θα πρέπει να προσέξουμε, όταν προσθέσουμε και τον εξωτερικό ελεγκτή, οι τιμές των κερδών του ελεγκτή ρεύματος να είναι ανώτερες αυτών της ταχύτητας προκειμένου να μην υποπέσει σε ταλαντώσεις το σύστημα. Με άλλα λόγια, ο εσωτερικός ελεγκτής πρέπει να είναι πάντα ταχύτερος από τον εξωτερικό προκειμένου να τον “προλαβαίνει”.



Το τελικό στάδιο του ελεγκτή ρεύματος είναι να περιορίσουμε την τάση μέσω κορεσμού και κυκλώματος anti-windup, **το οποίο επίσης βελτιώνει και ουσιαστικά εξαλείφει το overshoot του ρεύματος, ακόμα και σε μεταβατικές καταστάσεις.** Αυτό χρειάζεται διότι το κύκλωμα, σε μεγάλες μεταβολές του ρεύματος αναφοράς (σε πολλαπλάσια του 1αμ) προκαλεί πολύ υψηλή τάση. Αυτό είναι απαγορευτικό αρχικά εφόσον δεν μπορούμε να παρέχουμε παραπάνω από την τάση που δίδει ο μετατροπέας (την τάση βάσης $V_{base} = 120V$), αλλά ακόμα και να ήταν δυνατό θα ήταν επικίνδυνο για τη μηχανή. **Τα όρια κορεσμού τίθενται $+Vs = 120V$.** Το κύκλωμα κορεσμού και anti-windup δημιουργείται με βάση τις εξισώσεις:

$$\frac{dI}{dt} = \bar{e}$$

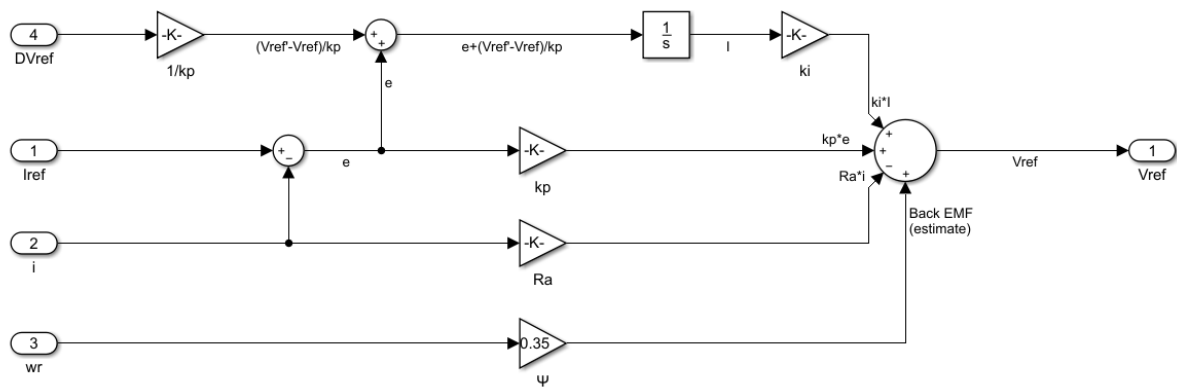
$$v_{ref} = k_p e + k_i I - R_a i + \hat{E}$$

$$\bar{v}_{ref} = \text{sat}(v_{ref}, V_{base}).$$

όπου:

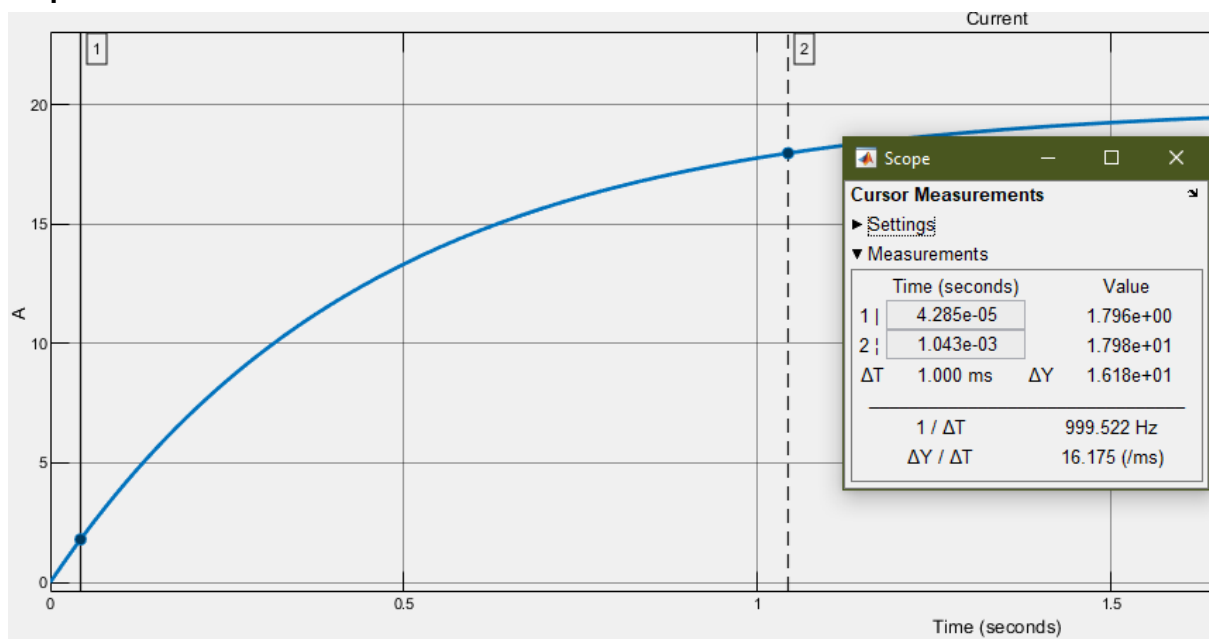
$$\bar{e} = e + \frac{1}{k_p}(\bar{v}_{ref} - v_{ref}).$$

Το ολικό κύκλωμα αλλάζει ελαφρώς σε σχέση με πριν, καθώς το ολοκληρωτικό κέρδος έχει ως είσοδο το \bar{I} :

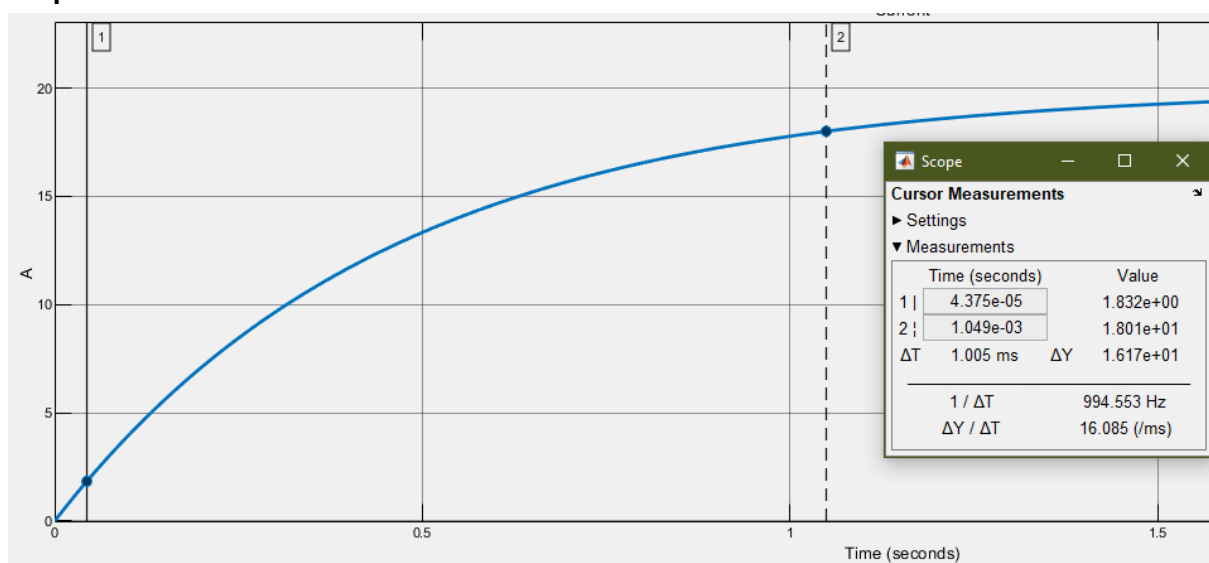


Ελέγχουμε εάν επιτυγχάνεται το επιθυμητό rise time:

Step Load:

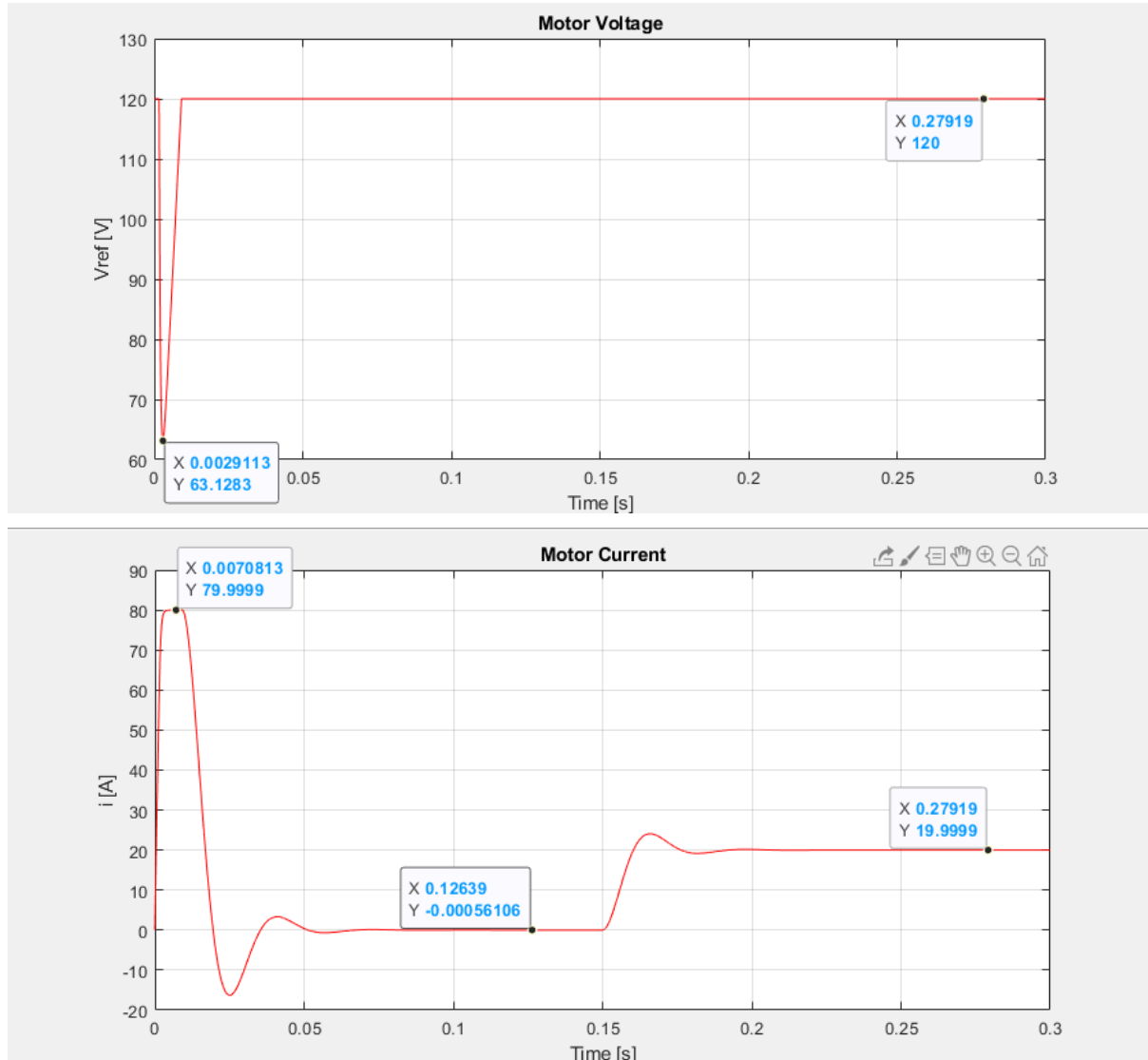


Proportional Load:



Βλέπουμε ότι και στις 2 περιπτώσεις ο χρόνος ανόδου είναι ο επιθυμητός, δηλαδή 1msec. Επομένως, με μεγάλη σιγουριά μπορούμε να αποφανθούμε ότι το rise time είναι πολύ κοντά στο 1ms.

Παρακάτω κάνουμε μια δοκιμή με ρεύμα αναφοράς 4αμ (80Α). Η βασική μας μέριμνα είναι για την τάση, και βλέπουμε ότι κρατιέται όντως στα επιθυμητά επίπεδα, όπως και το ρεύμα, το οποίο γρήγορα επανέρχεται στην ονομαστική του τιμή. Επομένως, η μηχανή προστατεύεται καλά με τη βοήθεια (κυρίως) του anti-windup κυκλώματος.



Ελεγκτής ταχύτητας

3. Στη συνέχεια, πρέπει να υλοποιήσουμε τον ελεγκτή ταχύτητας. Γενικά, ο ρόλος του είναι να παίρνει την επιθυμητή τιμή της ταχύτητας και να χτίζει το απαραίτητο ρεύμα αναφοράς, το οποίο στη συνέχεια μέσω του ελεγκτή ρεύματος τροφοδοτεί την μηχανή με την κατάλληλη τάση, προκειμένου να επιτευχθούν οι επιθυμητές στροφές.

Η κατασκευή του ελεγκτή είναι σχεδόν ίδιος με αυτόν του ρεύματος (προφανώς με τις κατάλληλες τιμές στα αντίστοιχα blocks). Η βασική διαφορά αφορά το bandwidth και συνεπώς το rise time του ελεγκτή. Εφόσον είναι ο εξωτερικός ελεγκτής, είναι απαραίτητο να είναι αργότερος από τον εσωτερικό. Ως περιθώριο ασφαλείας, θεωρείται σωστό να επιλεγεί bandwidth τουλάχιστον μια βαθμίδα μικρότερο από αυτό του εσωτερικού, με άλλα λόγια:

$$\alpha_s \leq 0.1\alpha_c.$$

Επομένως, διαλέγουμε $a_s = 219,7$ Hz, αναμένοντας ένα rise time τουλάχιστον 10 φορές μεγαλύτερο του 1ms.

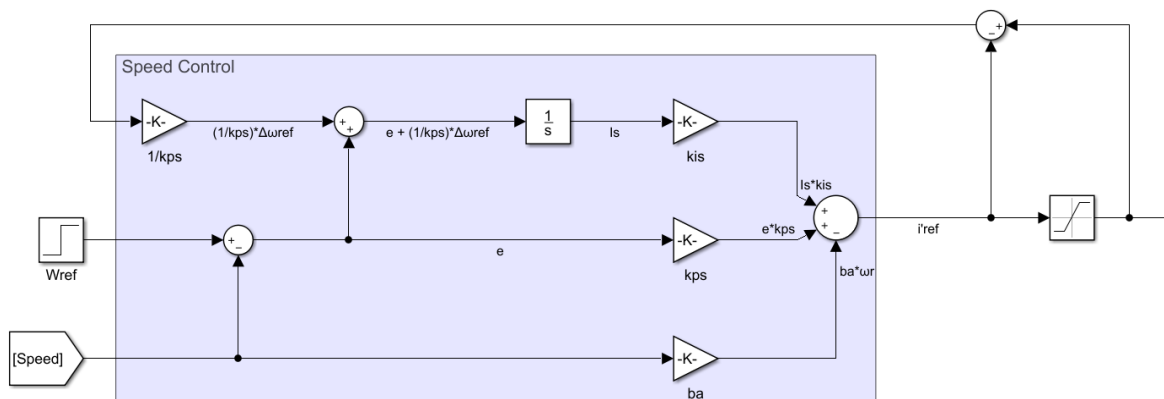
Όπως και πριν, αρχικά χτίζουμε τον PI ελεγκτή, ο οποίος λαμβάνει ως είσοδο το σφάλμα της ταχύτητας αναφοράς με την πραγματική ταχύτητα. Στη συνέχεια, σε πλήρη αναλογία με την ενεργή αντίσταση R_a , ένα ακόμη feedback loop που λέγεται ενεργός απόσβεση. Η τιμή της υπολογίζεται:

$$b_a = (a_s * J) / \Psi$$

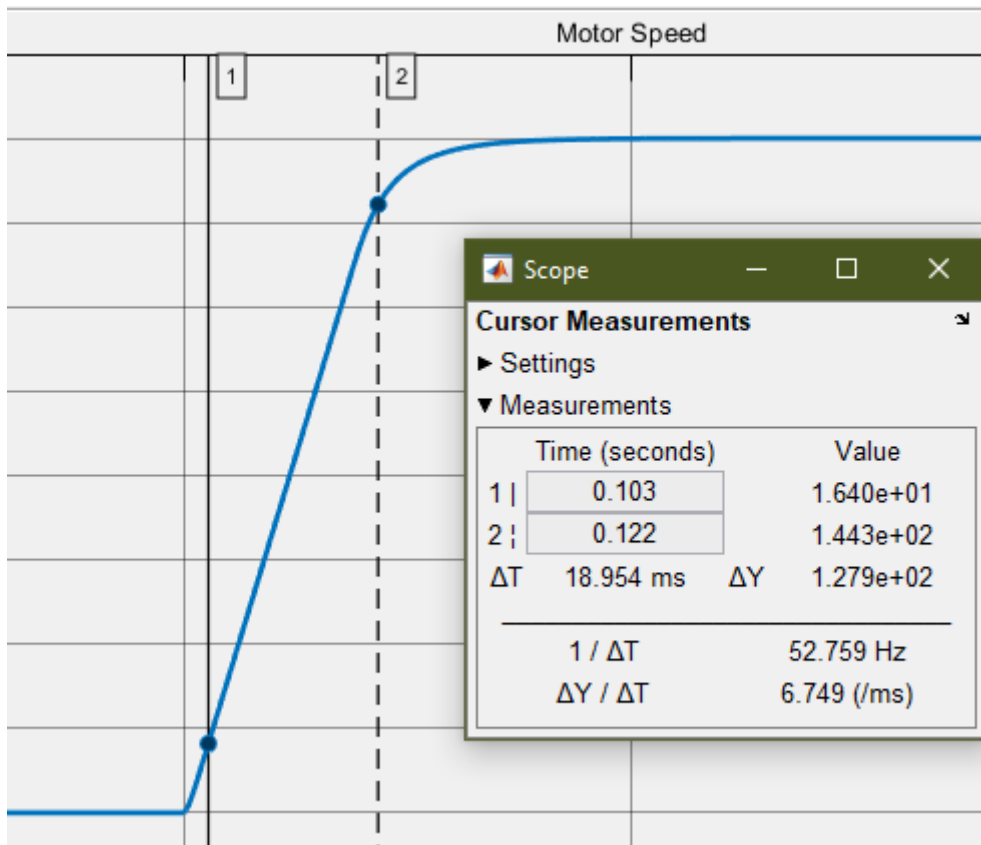
Τέλος, προσθέτουμε και έναν κλάδο antiwindup ο οποίος συνδυάζει το σφάλμα μεταξύ κορεσμού και τιμής αναφοράς (για την τάση) με το σφάλμα μεταξύ τιμής αναφοράς και πραγματικής τιμής (για τη γωνιακή ταχύτητα). **Τα όρια του κορεσμού ρεύματος τίθενται +-Iref.** Οι τιμές των κερδών των ελεγκτών διαλέχθηκαν ως:

$$k_{ps} = \frac{\alpha_s \hat{J}}{\hat{\psi}} \quad k_{is} = \frac{\alpha_s^2 \hat{J}}{\hat{\psi}}$$

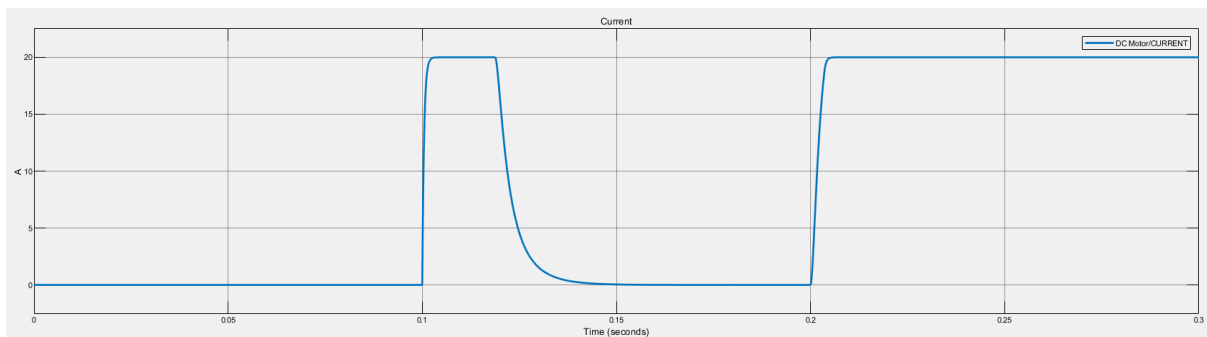
Το τελικό διάγραμμα φαίνεται παρακάτω:



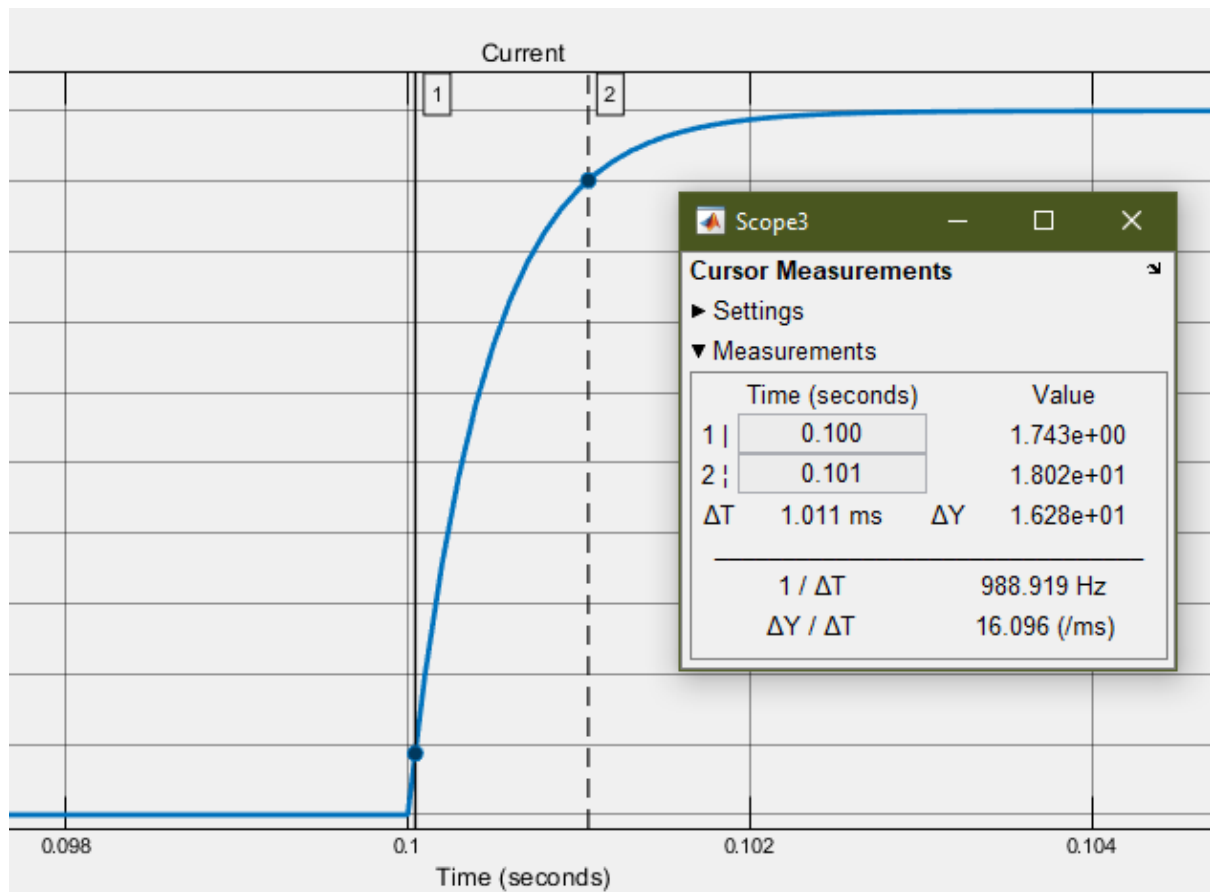
Ελέγχουμε εάν επιτυγχάνουμε το επιθυμητό rise time και βλέπουμε ότι αυτό είναι 18.954ms. Ιδανικά θα θέλαμε να είναι γύρω στα 10ms, όμως μας ενδιαφέρει περισσότερο η τάξη μεγέθους που είναι όντως ένα βαθμό μεγαλύτερη από τον ελεγκτή ρεύματος. Επομένως ο χρόνος ανόδου θεωρείται αποδεκτός. Να σημειωθεί ότι η ταχύτητα που φαίνεται είναι τα 160rad/s της αναφοράς, χωρίς να έχει προστεθεί φορτίο.



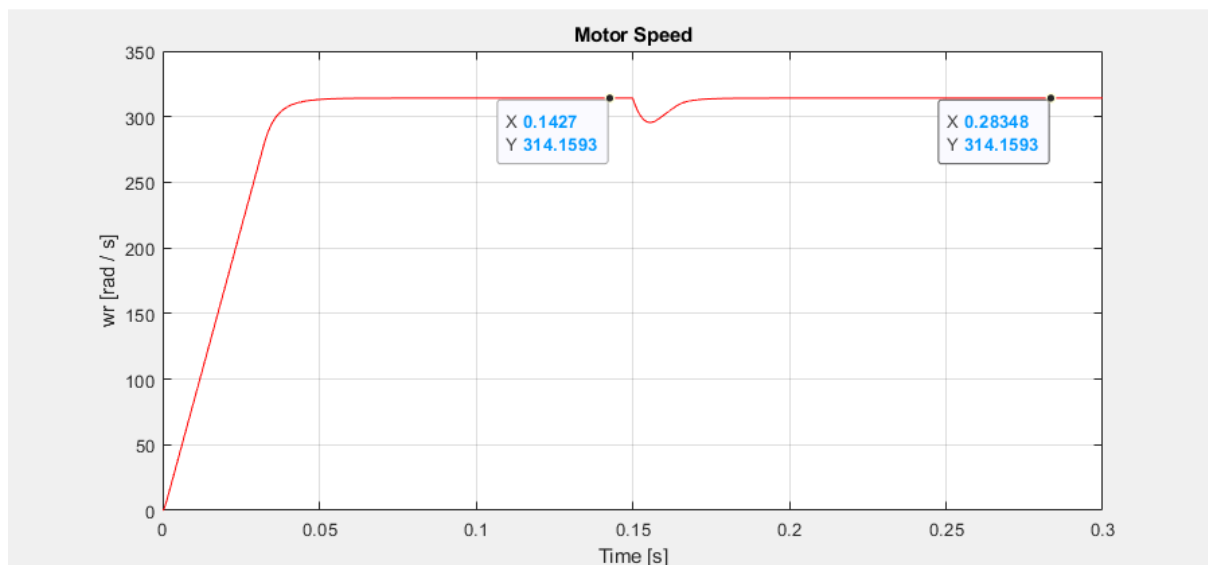
Στη συνέχεια, παρατίθεται η παράσταση του ρεύματος τυμπάνου. Να σημειωθεί ότι η ροπή του φορτίου εφαρμόζεται στα 0,2sec, ενώ η αναφορά της ταχύτητας στα 0,1sec:



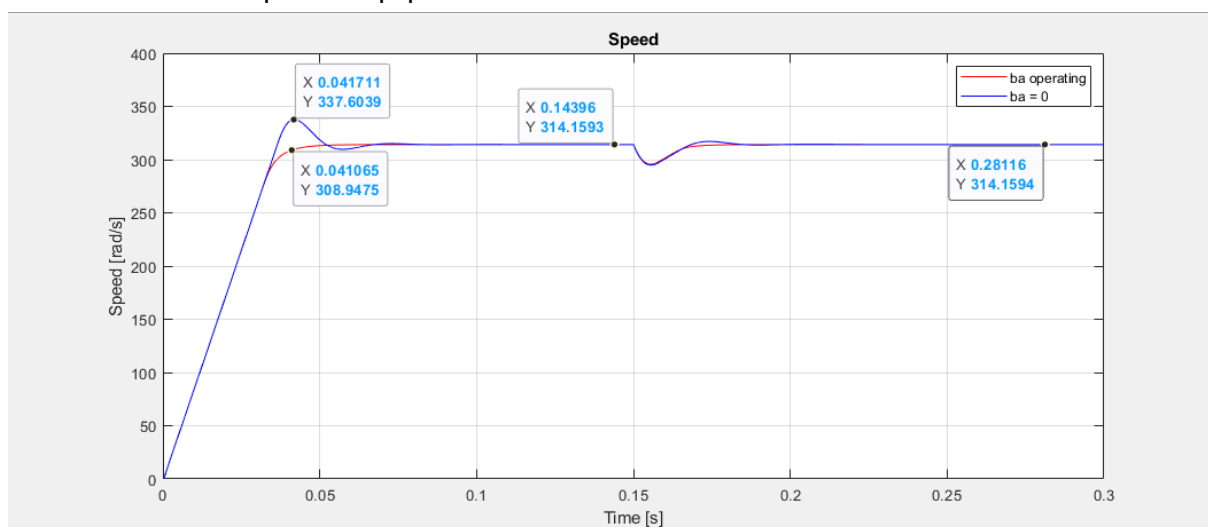
Όπως φαίνεται, το ρεύμα αυξάνεται στην αρχή προκειμένου να φτάσει τις επιθυμητές στροφές ώσπου να μηδενιστεί. Μόλις εφαρμοστεί φορτίο, αυξάνεται πάλι και παραμένει στην ονομαστική τιμή προκειμένου να συνεχίσει να κινείται η μηχανή. Το rise time του ρεύματος παραμένει στην επιθυμητή τιμή των 1ms:



Πρέπει να σημειωθεί ότι από δω και στο εξής θα κάνουμε μια αλλαγή στο saturation του ρεύματος. Αντί να “μπλοκάρουμε” το ρεύμα στα 20A (ονομαστικά), θα δώσουμε περιθώριο να αυξηθεί μέχρι τα 25A. Αυτό είναι απαραίτητο να γίνει διότι χωρίς το overshoot ρεύματος, όποτε εισάγεται κάποια διαταραχή (φορτίο) στη ροπή της μηχανής, οι στροφές της μηχανής ελαττώνονται χωρίς να επανέρχονται στις στροφές της αναφοράς που έχουμε θέσει. Θα μπορούσαμε να δώσουμε πολύ μικρό περιθώριο (ακόμα και 21A) και οι στροφές θα επανέρχονταν (πολύ αργά) στην αναφορά, ή αλλιώς πολύ μεγαλύτερο ώστε να επανέλθουν ταχύτατα. Ωστόσο, τα 25A είναι μια καλή τιμή προκειμένου να έχουμε και σχετικά γρήγορη επαναφορά, αλλά να είμαστε και ασφαλείς όσον αφορά την κατάσταση της μηχανής (υψηλές τιμές ρεύματος μπορεί να την κάψουν). **Επομένως, και τα όρια του κορεσμού αλλάζουν και πάνε στα $\pm I_{ref} = 25 \text{ A}$.** Η επίδραση όλης αυτής της αλλαγής φαίνεται καλά στο παρακάτω γράφημα όπου έχουμε ως αναφορά ονομαστικές στροφές και στη συνέχεια συνδέεται το ονομαστικό φορτίο ($\omega_{ref} = 314 \text{ rad/s}$, φορτίο συνδέεται στα 0.2sec):



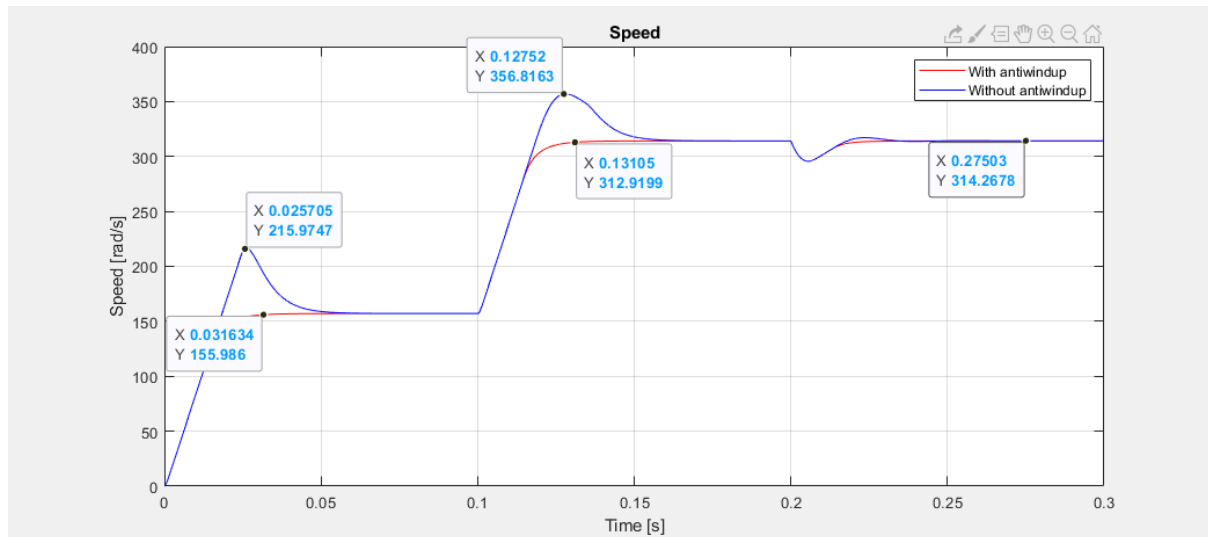
4. Εφόσον έχουμε ολοκληρώσει όλο τον έλεγχο της μηχανής, προχωρούμε σε μερικές δοκιμές. Μετατρέπουμε τον έλεγχο της ταχύτητας από 2 βαθμούς ελευθερίας σε 1, αφαιρώντας τον κλάδο ανατροφοδότησης μέσω της ενεργούς απόσβεσης b_a (όλα τα υπόλοιπα μεγέθη του ελέγχου παρέμειναν ίδια). Οι στροφές αναφοράς είναι οι ονομαστικές 314 rad/s και το ονομαστικό φορτίο συνδέεται στα **0.15sec**.



Η διαφορά που προκαλεί η ανατροφοδότηση της ενεργούς απόσβεσης είναι εμφανής. Η ενεργός απόσβεση, σε γενικές γραμμές, είναι ιδιαίτερα επιθυμητή αν έχουμε “cascaded” και τον ελεγκτή ρεύματος, όπως στη δική μας περίπτωση. Ο σκοπός της είναι να κάνει τον ελεγκτή ταχύτητας να είναι πιο ανθεκτικός στις μεταβολές. Γι’αυτό το λόγο, όπως φαίνεται και παραπάνω, η αφαίρεσή της προκαλεί ταλαντώσεις και overshoots της ταχύτητας στις μεταβατικές καταστάσεις, ενώ μόλις ενεργοποιείται η απόκριση της ταχύτητας είναι εξαιρετικά ομαλή. Επομένως, το σύστημα μεν λειτουργεί χωρίς την απόσβεση, ωστόσο η βελτίωσή του είναι πολύ σημαντική για να παραλειφθεί από τον έλεγχο.

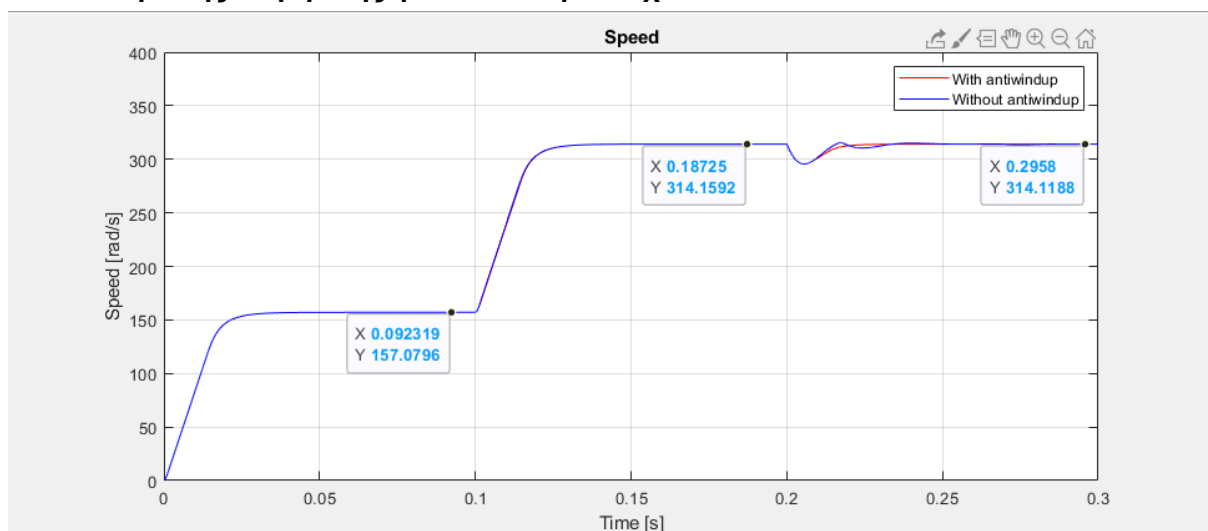
5. Επαναφέρουμε την ενεργό απόσβεση b_a και τώρα θα αφαιρέσουμε το κύκλωμα anti-windup του ελεγκτή ταχύτητας, διατηρώντας όμως τον κορεσμό του παραγόμενου ρεύματος αναφοράς (με όρια **+25 A**). Στη θέση του anti-windup, θα επαναφέρουμε το

ολοκληρωτικό τμήμα του PI ελεγκτή. Για να ελέγξουμε διεξοδικά την επίδραση του antiwindup, θα ορίσουμε τις στροφές της μηχανής αρχικά στις $50 \cdot \pi$ rad/s, ύστερα στα 100π rad/s και το φορτίο θα εισβάλει στα 0.2 δευτερόλεπτα:

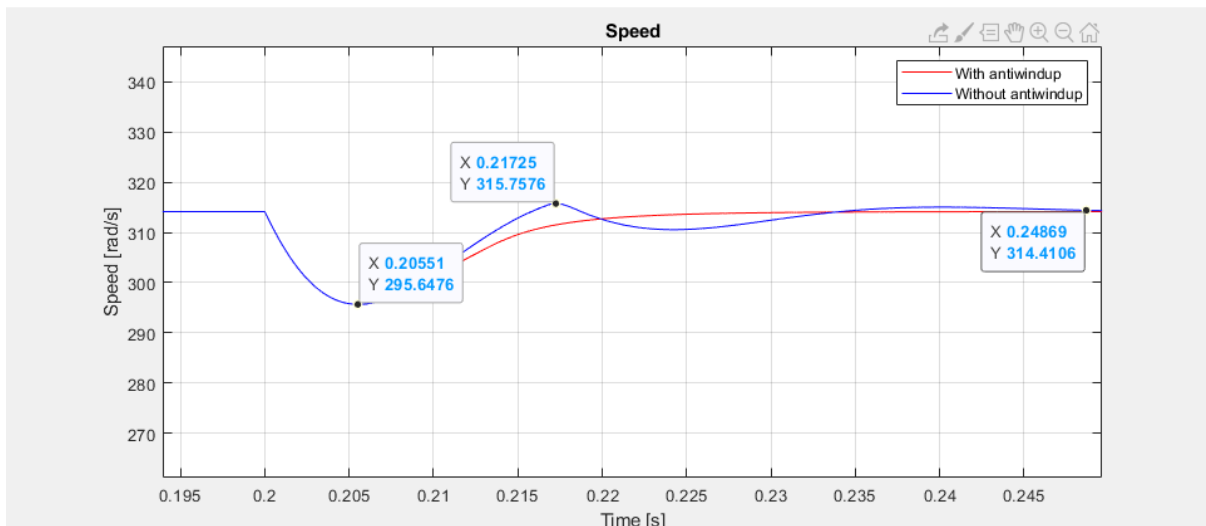


Η λειτουργία του antiwindup είναι ξεκάθαρη. Γνωρίζοντας ότι ο σκοπός του είναι να αναιρεί τα overshoots στο στοιχείο που καλείται να περιορίζει, επαληθεύεται η επίδρασή του, καθώς παρατηρούμε σε κάθε μεταβατικό φαινόμενο οι στροφές να ξεπερνάνε κατά πολύ τις επιθυμητές (στιγμιαία). Μόλις επιδράσει και πάλι, η απόκριση των στροφών είναι απολύτως ομαλή, ακριβώς στις στροφές που είναι ορισμένες από την αναφορά.

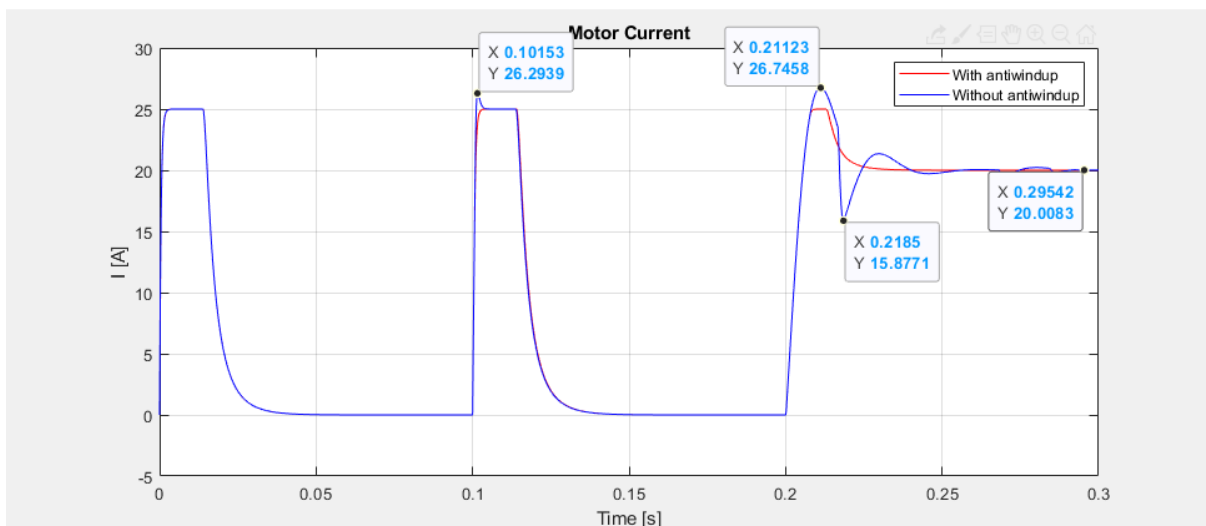
Στη συνέχεια, επαναφέρουμε τον ελεγκτή ταχύτητας στην επιθυμητή συνδεσμολογία και επαναλαμβάνουμε το πείραμα για τον ελεγκτή ρεύματος. Αφαιρούμε τον κλάδο anti-windup, επαναφέρουμε τον ολοκληρωτικό όρο στον PI και διατηρούμε τα υπόλοιπα όμοια, μαζί με τον κορεσμό τάσης στα 120V για τις ίδιες δοκιμές στροφών και φορτίου με παραπάνω. Το αποτέλεσμα της σύγκρισης φαίνεται στη συνέχεια:



Προσθέτουμε και μια μεγέθυνση διότι οι μεταβολές δεν είναι εμφανείς για το μεταβατικό φαινόμενο που προκύπτει από την επίδραση του Step Load, καθώς στις μεταβολές της ταχύτητας δεν υπάρχει κάποια διαφορά ανάμεσα στις 2 δοκιμές:



Παρατηρούμε ότι κατά βάση οι ταλαντώσεις και το overshoot είναι αρκετά μικρής τάξεως, το οποίο είναι λογικό καθώς τροποποιήσαμε το antiwindup του ρεύματος και όχι της ταχύτητας. Υποπτευόμαστε ότι αυτές οι ταλαντώσεις οφείλονται σε ανεπιθύμητες μεταβολές του ρεύματος, οπότε ελέγχουμε την κυματομορφή του ρεύματος:



Όπως ήταν αναμενόμενο, βλέπουμε ότι υπάρχει overshoot ρεύματος (εξάλλου, η βασική λειτουργία του anti-windup είναι να περιορίσει τις υπερεντάσεις), και επίσης στην επίδραση του φορτίου σημειώνονται μερικές ταλαντώσεις. Το σημαντικό επίσης είναι ότι ξεπερνιέται η τιμή του ρεύματος κορεσμού (25 A), το οποίο είναι λογικό καθώς το ρεύμα που φαίνεται στην παραπάνω γραφική είναι το ρεύμα που μετράται από την μηχανή, και όχι το κορεσμένο ρεύμα αναφοράς. Οι μικρές αυτές ταλαντώσεις είναι που προκαλούν και τις ελάχιστες ταλαντώσεις της ταχύτητας που φάνηκαν προηγουμένως.