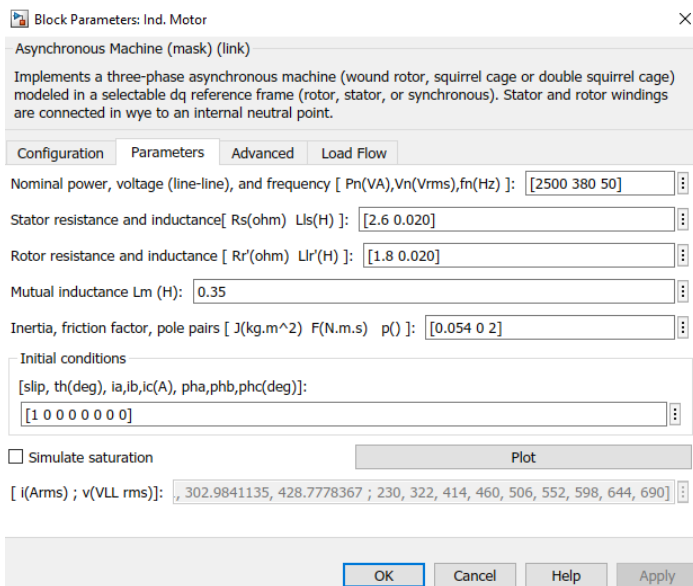


Σερβοκινητήρια Συστήματα

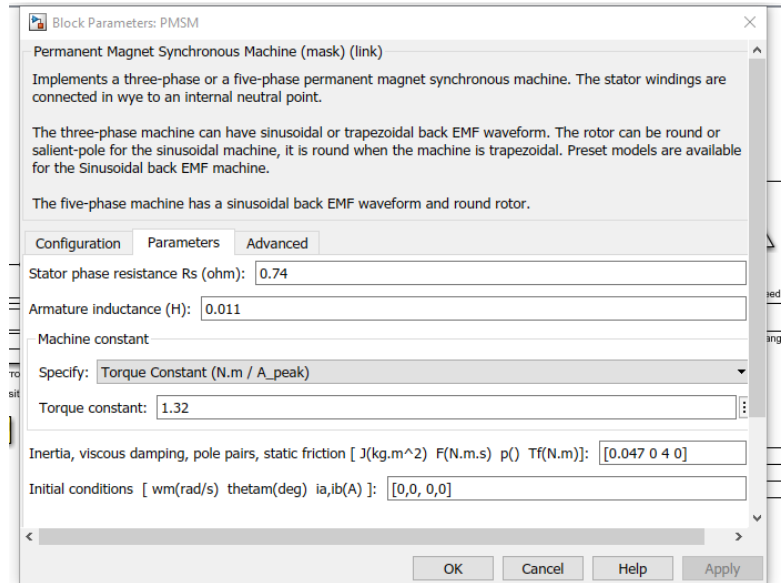
Ομάδα 1

Ονοματεπώνυμο	AEM	E-mail
Μπόρτας Στέφανος	8869	smportas@ece.auth.gr
Κοσέογλου Σωκράτης	8837	sokrkose@ece.auth.gr

Αρχικά, στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται οι παράμετροι που προσθέσαμε στο Simulink για τον Σύγχρονο Κινητήρα Μόνιμου Μαγνήτη καθώς και τον Επαγωγικού Κινητήρα, τους οποίους κληθήκαμε να ελέγξουμε.

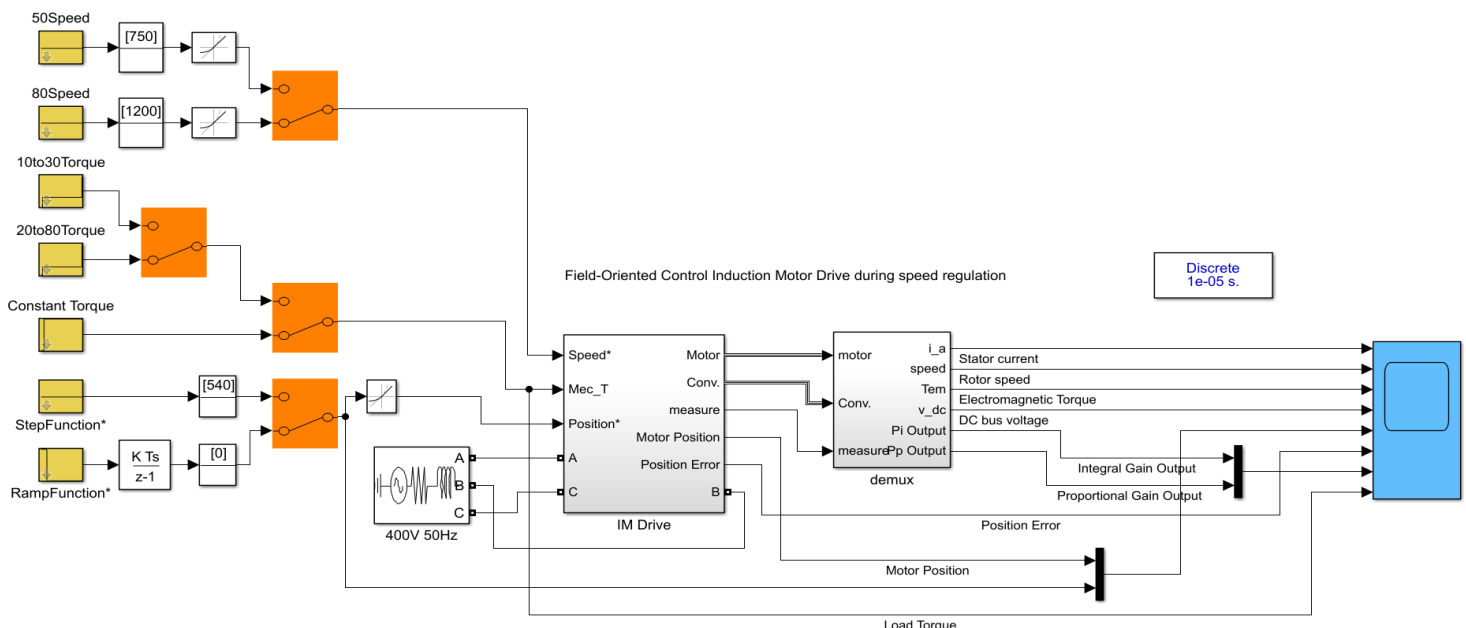


Παράμετροι Επαγωγικού Κινητήρα

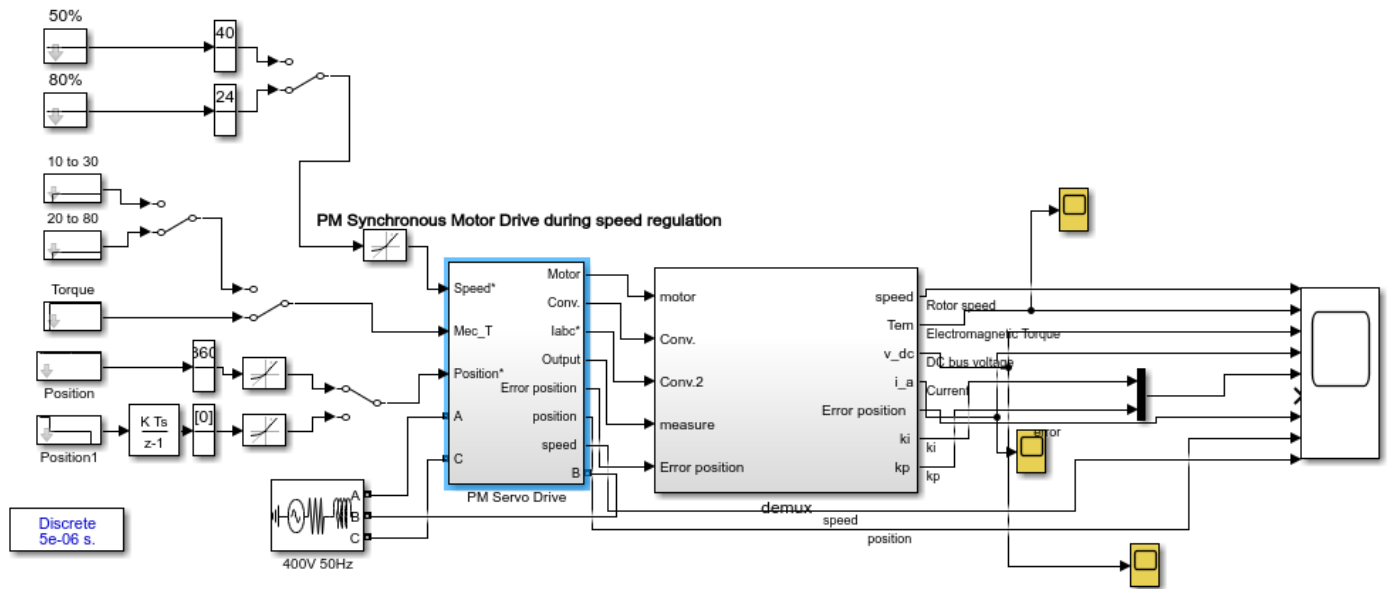


Παράμετροι Σύγχρονου Κινητήρα Μόνιμου Μαγνήτη

Επίσης, παρακάτω φαίνονται στην γενική τους μορφή τα εκάστοτε μοντέλα.



Μοντέλο Επαγωγικού Κινητήρα



Μοντέλο PMSM

Ερώτημα 4.1

Στο ερώτημα αυτό ζητείτε να διαστασιολογήσουμε τους περιοριστές ρεύματος και ροπής καθώς και τον περιοριστή της ολοκληρωτικής βαθμίδας, ο οποίος υλοποιεί το λεγόμενο Anti-Windup. Αρχικά, οι περιοριστές ροπής και ρεύματος τοποθετήθηκαν έτσι ώστε να είναι 2.5 φορές μεγαλύτεροι της ονομαστικής ροπής και του ονομαστικού ρεύματος του κάθε κινητήρα αντίστοιχα. Ενώ ο περιοριστής της ολοκληρωτικής βαθμίδας του ελεγκτή ταχύτητας βρέθηκε ύστερα από μια διαδικασία trial & error. Πιο συγκεκριμένα, ο περιοριστής αυτός υλοποιεί το σύστημα Anti-Windup για τους PI. Windup ονομάζεται το σφάλμα το οποίο συσσωρεύεται κατά την άνοδο και στην συνέχεια αποδίδεται πίσω στο σύστημα προκαλώντας υπερύψωση. Για τον λόγο αυτό προστίθεται ο συγκεκριμένος περιοριστής ο οποίος λέει στην ουσία ότι εάν το σύστημα φτάσει στον κορεσμό μόνο από τον αναλογικό όρο τότε μην χρησιμοποιεί τον ολοκληρωτικό όρο.

Συνεπώς, για τον επαγωγικό κινητήρα, δεδομένου ότι η ονομαστική τιμή του ρεύματος είναι $4.9 A_{rms}$, δηλαδή $I_{peak} = 4.9 * \sqrt{2} = 6.929 A$, συνεπώς ο περιοριστής ρεύματος τοποθετήθηκε από $-17.324 A$ έως $17.324 A$. Έπειτα, ο περιοριστής ροπής τοποθετήθηκε επίσης 2.5 φορές πάνω από την ονομαστική ροπή, δηλαδή από $-41.2 Nm$ έως $41.2 Nm$, δεδομένου ότι η ονομαστική ροπή του επαγωγικού κινητήρα είναι $\tau = \frac{P}{\omega} = \frac{2500}{1440 * \frac{\pi}{30}} = 16.578 Nm$. Τέλος, ο περιοριστής του ολοκληρωτικού όρου τοποθετήθηκε συναρτήσει της μέγιστης ροπής, δηλαδή από $-41.2/0.81$ έως $41.2/0.81$ ή αλλιώς από -50.86 έως 50.86 .

Για τον Σύγχρονο Κινητήρα Μόνιμου Μαγνήτη τοποθετήθηκε περιοριστής ροπής 2.5 φορές πάνω από την ονομαστική ($14 Nm$), δηλαδή $-35 Nm$ έως $35 Nm$. Για τον περιοριστή του ολοκληρωτικού όρου τοποθετήθηκε πάλι συναρτήσει της μέγιστης ροπής, δηλαδή $-35/0.7$ έως $35/0.7$ ή αλλιώς -50 έως 50 . Στον μόνιμο μαγνήτη δεν χρησιμοποιήθηκε κάποιος περιοριστής ρεύματος.

Ερώτημα 4.2

Στο ερώτημα αυτό κληθήκαμε να τρέξουμε τα μοντέλα του επαγωγικού κινητήρα καθώς και του PMSM με διάφορες εισόδους αναφοράς θέσης και να ελέγξουμε με το κατάλληλο tuning των PI ελεγκτών την απόκριση τους. Πιο συγκεκριμένα για τον επαγωγικό κινητήρα έγιναν 6 διαφορετικές προσομοιώσεις, 3 προσομοιώσεις με βηματικές εισόδους για 1, 1.5 και 2 περιστροφές του κινητήρα, καθώς και 3 προσομοιώσεις με ράμπα ως είσοδο με διαφορετικές κλίσεις η καθεμία, με πλάτος 1.5 περιστροφή (που είναι και το ζητούμενο σύμφωνα με τις παραμέτρους της ομάδας μας). Ενώ για τον PMSM έγιναν πάλι 6 διαφορετικές προσομοιώσεις (3 βηματικές και 3 ράμπας). Για βηματικές εισόδους μπήκανε 0.5, 1 και 1.5 περιστροφές του κινητήρα ενώ για ράμπα ως είσοδο έγιναν για διαφορετικές κλίσεις με τελική τιμή την 1 περιστροφή. Σε αντίθεση όμως με τις προσομοιώσεις στον επαγωγικό κινητήρα προσομοιώθηκε και η επιστροφή του κινητήρα με μόνιμος μαγνήτες στην αρχική του θέση, δηλαδή στις 0 μοίρες.

Σε αυτό το σημείο πρώτου προχωρήσουμε στην παρουσίαση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων μας είναι αναγκαίο να πούμε δύο λόγια για την λογική την οποία ακολουθούν οι ελεγκτές. Γενικότερα, κατά βάση ο αναλογικός όρος κάνει το σύστημα να έχει πιο γρήγορη απόκριση ενώ ο ολοκληρωτικός όρος συμβάλει στην κυρίως στην μείωση του σφάλματος μόνιμης κατάστασης αλλά ταυτόχρονα μπορεί να εισάγει κάποιο ποσοστό υπερύψωσης στο σύστημα. Για τον έλεγχο θέσης των δύο κινητήρων χρησιμοποιήθηκε PI ελεγκτής, καθώς η εισαγωγή διαφορικού ελεγκτή έκανε αρκετά πιο σύνθετη την διαδικασία ελέγχου. Όσον αφορά την βηματική απόκριση, η ύπαρξη ενός ολοκληρωτή είναι αρκετή ώστε να μηδενίζεται το σφάλμα θέσης, παρ' όλα αυτά για τον έλεγχο θέσης με σήμα αναφοράς ράμπα για να έχουμε μηδενικό σφάλμα χρειαζόμαστε άλλον ένα ολοκληρωτή (εάν το σήμα αναφοράς ήταν μόνιμα ράμπα θα είχαμε μόνιμα κάποιο σφάλμα) αλλά δεδομένο ότι η ράμπα στην μόνιμη κατάσταση έχει σταθερό πλάτος δεν επιλέξαμε να εισάγουμε και δεύτερο ολοκληρωτή.

❖ Επαγωγικός Κινητήρας

Παρακάτω φαίνονται συνοπτικά οι ελεγκτές που χρησιμοποιήθηκαν για τον βέλτιστο έλεγχο της κάθε προσομοίωσης του επαγωγικού κινητήρα.

Βηματική Αναφορά Θέσης με πλάτος 540°	
Αναλογικός Ελεγκτής Θέσης	1,84
Αναλογικός Ελεγκτής Ταχύτητας	0,415
Ολοκληρωτικός Ελεγκτής Ταχύτητας	2,95

Βηματική Αναφορά Θέσης με πλάτος 360°	
Αναλογικός Ελεγκτής Θέσης	1,84
Αναλογικός Ελεγκτής Ταχύτητας	0,415
Ολοκληρωτικός Ελεγκτής Ταχύτητας	3,75

Βηματική Αναφορά Θέσης με πλάτος 720°	
Αναλογικός Ελεγκτής Θέσης	1,84
Αναλογικός Ελεγκτής Ταχύτητας	0,415
Ολοκληρωτικός Ελεγκτής Ταχύτητας	2,7

Ράμπα Αναφορά Θέσης με χρόνο ανόδου 1 second	
Αναλογικός Ελεγκτής Θέσης	2,85
Αναλογικός Ελεγκτής Ταχύτητας	0,415
Ολοκληρωτικός Ελεγκτής Ταχύτητας	2,95

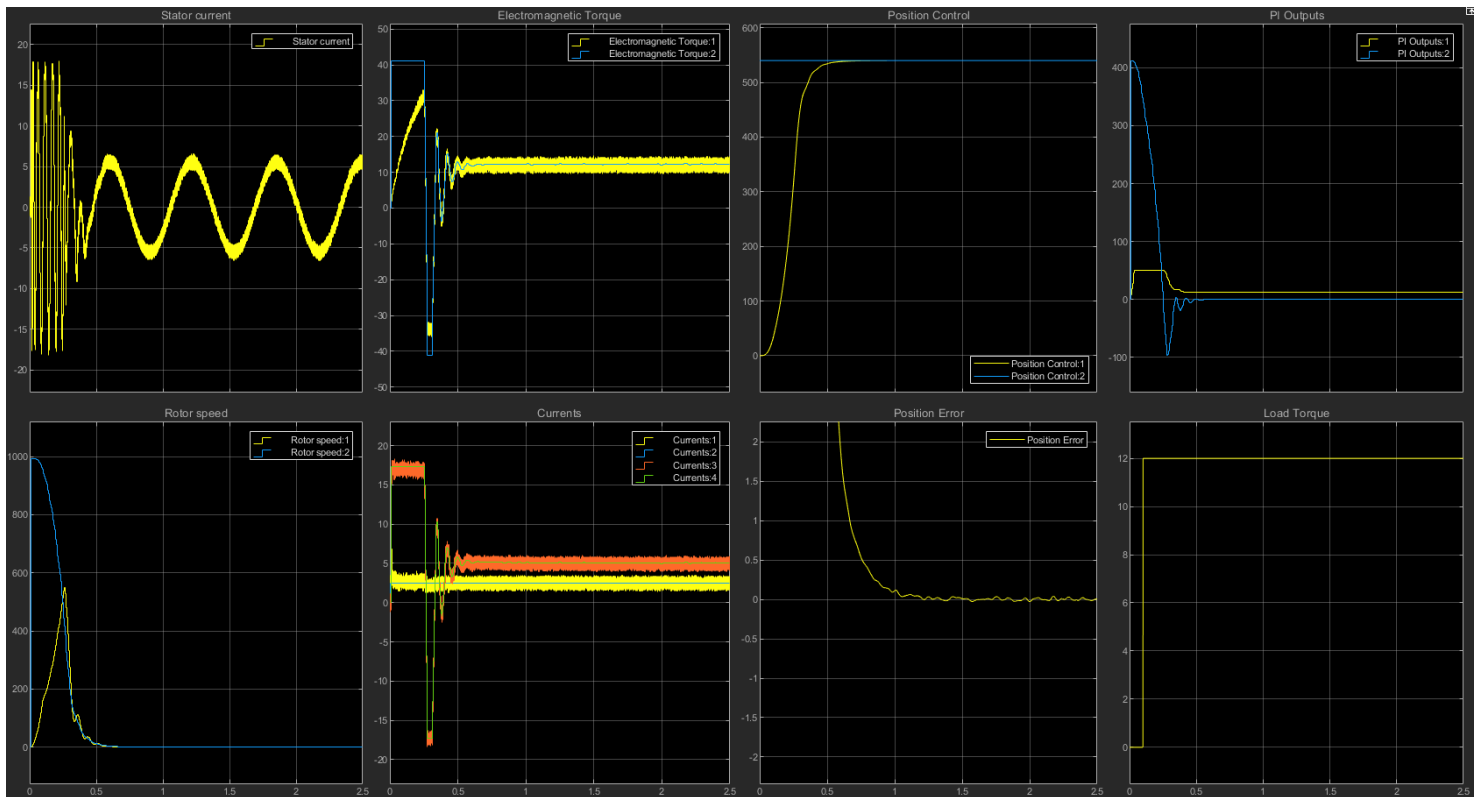
Ράμπα Αναφορά Θέσης με χρόνο ανόδου 0.5 second	
Αναλογικός Ελεγκτής Θέσης	2,65
Αναλογικός Ελεγκτής Ταχύτητας	0,415
Ολοκληρωτικός Ελεγκτής Ταχύτητας	2,95

Ράμπα Αναφορά Θέσης με χρόνο ανόδου second	
Αναλογικός Ελεγκτής Θέσης	1,95
Αναλογικός Ελεγκτής Ταχύτητας	0,415
Ολοκληρωτικός Ελεγκτής Ταχύτητας	2,95

Ο επαγωγικός κινητήρας ο οποίος θα χρησιμοποιηθεί για τον ταινιόδρομο θέλουμε να έχει γρήγορη απόκριση και όσο το δυνατόν μηδενική υπερύψωση και πολύ καλή ακρίβεια θέσης και αυτό υλοποιήθηκε με τους παραπάνω ελεγκτές καθώς και τους περιοριστές τους οποίους αναλύσαμε στο Ερώτημα 4.1

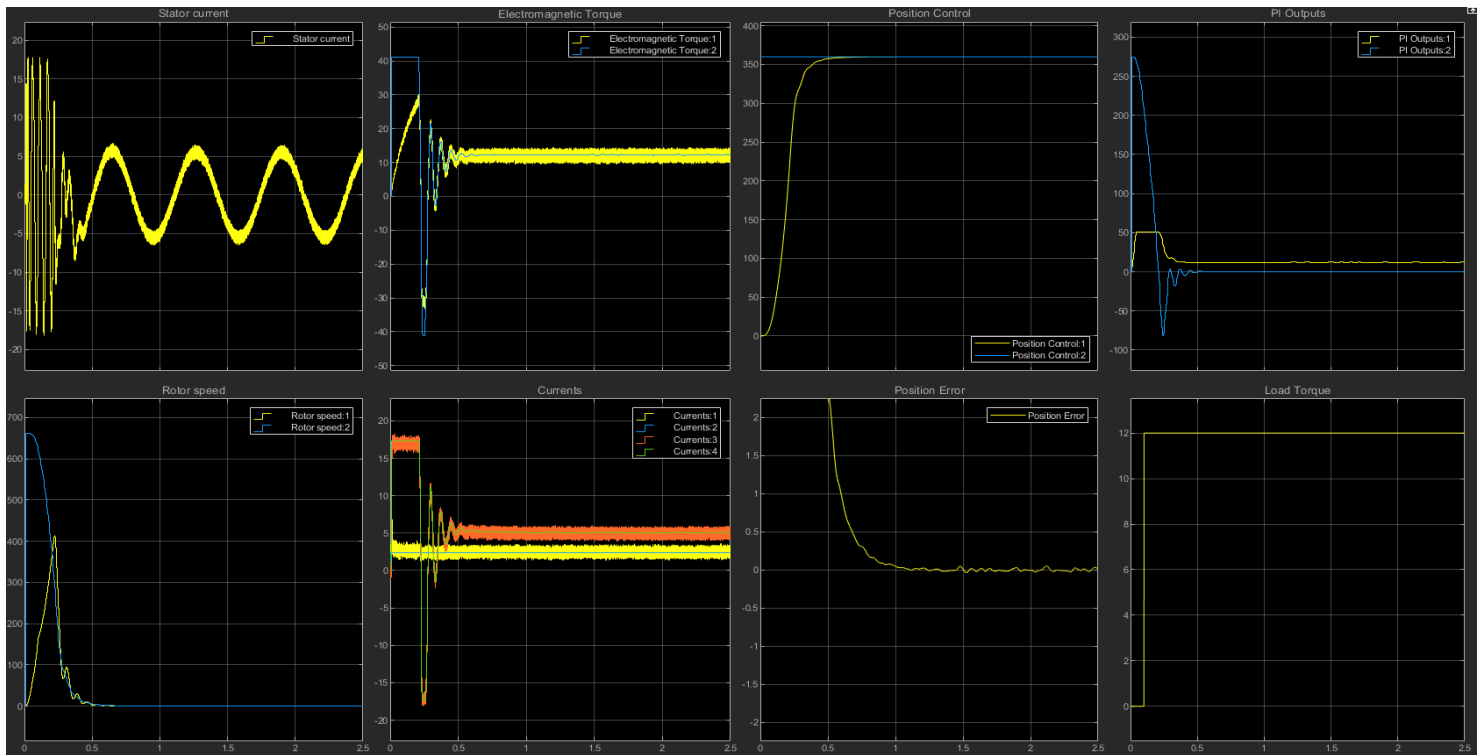
- Βηματική Αναφορά Θέσης με πλάτος 540°

Παρακάτω βλέπουμε τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης προσομοίωσης. Πιο συγκεκριμένα, στην εικόνα που βρίσκεται στην 1^η σειρά και 3^η στήλη (Position Control) βλέπουμε την απόκριση θέσης του κινητήρα η οποία πληροί αρκετά καλά τις προϋποθέσεις καθώς είναι αρκετά γρήγορη, δεν έχει καθόλου υπερυψώσεις και όπως φαίνεται και από την καμπύλη που βρίσκεται ακριβώς από κάτω (Position Error) έχει λιγότερο από 0.1° σφάλμα θέσης μόνιμης κατάστασης. Επίσης, παρουσιάζονται και οι κυματομορφές του ρεύματος φάσης (Stator Current), της ηλεκτρομαγνητικής ροπής (Electromagnetic Torque), της ταχύτητας του κινητήρα σε σχέση με την αναφορά ταχύτητας (Rotor Speed), τα ρεύματα ροπής (Iq) και πεδίου (Id) (Currents) και τέλος την ροπή φορτίου (Load Torque) καθώς και η έξοδος του αναλογικού και ολοκληρωτικού όρου του ελεγκτή ταχύτητας (PI Outputs) το οποίο μας βοήθησε πολύ στο να κάνουμε το κατάλληλο tuning. Πιο συγκεκριμένα, αυτό που μπορούμε να δούμε πολύ εύκολα είναι η λειτουργία του Anti-Windup στα πρώτα 0.3 second περίπου όπου το σύστημα έχει φτάσει στον κορεσμό, καθώς το ρεύμα ροπής έχει φτάσει στα όρια του περιοριστή οπότε κρατείτε σταθερός ο ολοκληρωτικός όρος και αλλάζει μόνο ο αναλογικός όρος του ελεγκτή. Επίσης βλέπουμε ότι η ταλαντώσεις του αναλογικού όρου είναι αρκετά μικρές κάτι το οποίο ναι μεν κάνει το σύστημα μας λίγο πιο αργό αλλά ταυτόχρονα το κάνει να μην είναι τόσο «ζωηρό», δηλαδή να μην έχει απότομες μεταβολές στην απόκριση θέσης σε μικρά σφάλματα ταχύτητας. Τέλος βλέπουμε ότι παρά το γεγονός ότι το ρεύμα ροπής και κατά συνέπεια το ρεύμα φάσης του κινητήρα πιάνει κατευθείαν περιοριστή, η ροπή δεν προλαβαίνει να φτάσει στον περιοριστή καθώς οι μηχανικές σταθερές χρόνου του συστήματος είναι πολύ μεγαλύτερες από τις ηλεκτρικές σταθερές χρόνου.



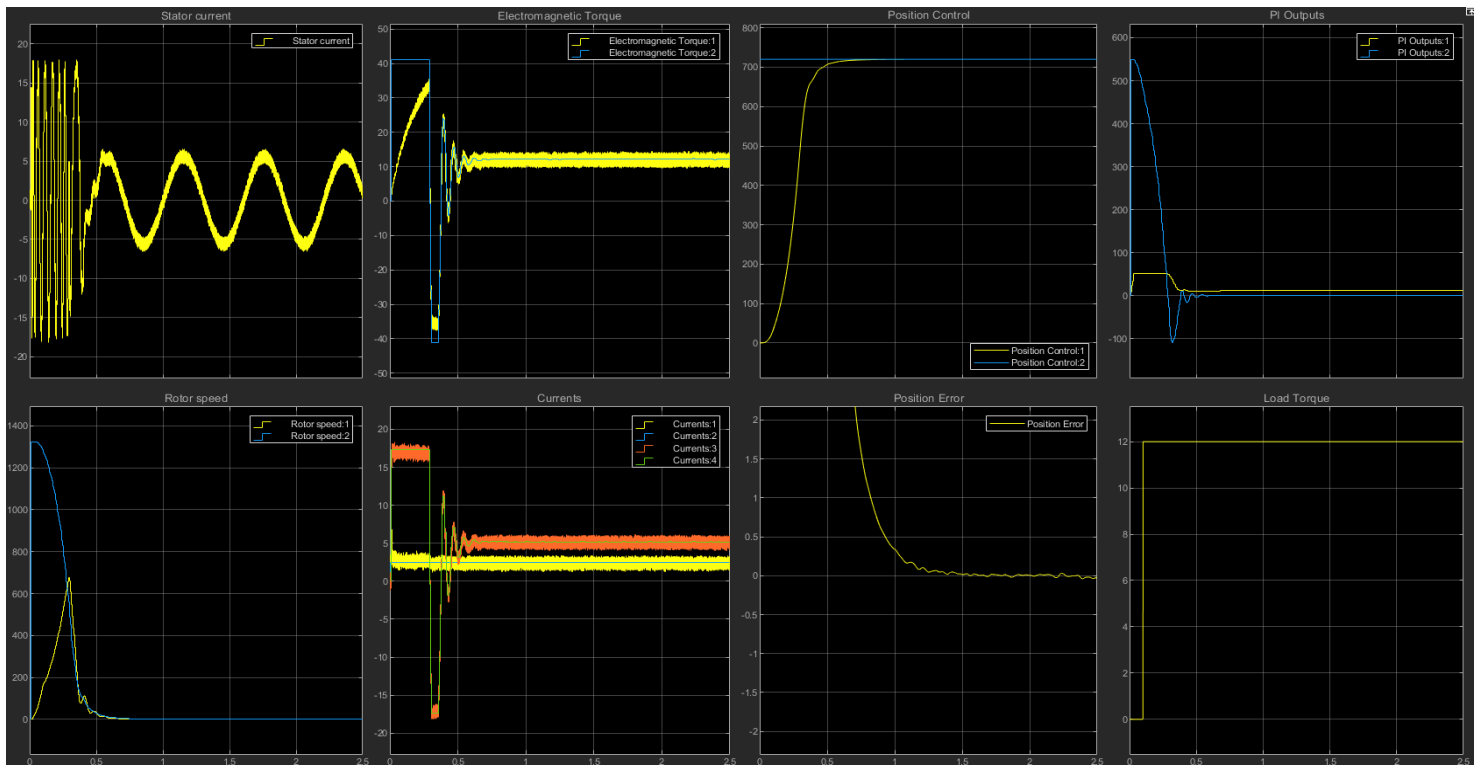
- Βηματική Αναφορά Θέσης με πλάτος 360°

Στην συνέχεια, εκτελέσαμε την ίδια προσομοίωση με προηγούμενως, αλλάζοντας μόνο το πλάτος βηματικής αναφοράς θέσης από 540 σε 360. Αρχικά, είδαμε ότι το σύστημα δούλευε αρκετά καλά με τους ίδιους ελεγκτές και δεν υπήρχε κάποια αστάθεια, παρ' όλα αυτά υπήρχε μια μικρή υπερύψωση στην απόκριση θέσης του κινητήρα και για αυτό τον λόγο είδαμε ότι με την αλλαγή του ολοκληρωτικού όρου από 2.95 σε 3.75 μπορέσαμε να διορθώσουμε αυτή την μικρή υπερύψωση, με όμως κόστος την μικρή αύξηση του χρόνου ανόδου του συστήματος. Παρακάτω φαίνονται αναλυτικά τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης προσομοίωσης. Τα αποτελέσματα είναι αρκετά παρόμοια με προηγούμενως κάτι το οποίο είναι αρκετά ενθαρρυντικό καθώς αυτό το οποίο εξετάζεται σε αυτήν την προσομοίωση είναι το κατά πόσο αλλάζει η συμπεριφορά του συστήματος σε περίπτωση που ο ταινιόδρομος κάνει μικρότερη διαδρομή από αυτή που είχαμε θεωρήσει στην αρχή. Συνεπώς βλέπουμε ότι χωρίς καθόλου αλλαγές στους PI το σύστημα έχει σχετικά καλή απόκριση, ενώ για να βελτιστοποιηθεί χρειάζονται μικρές αλλαγές.



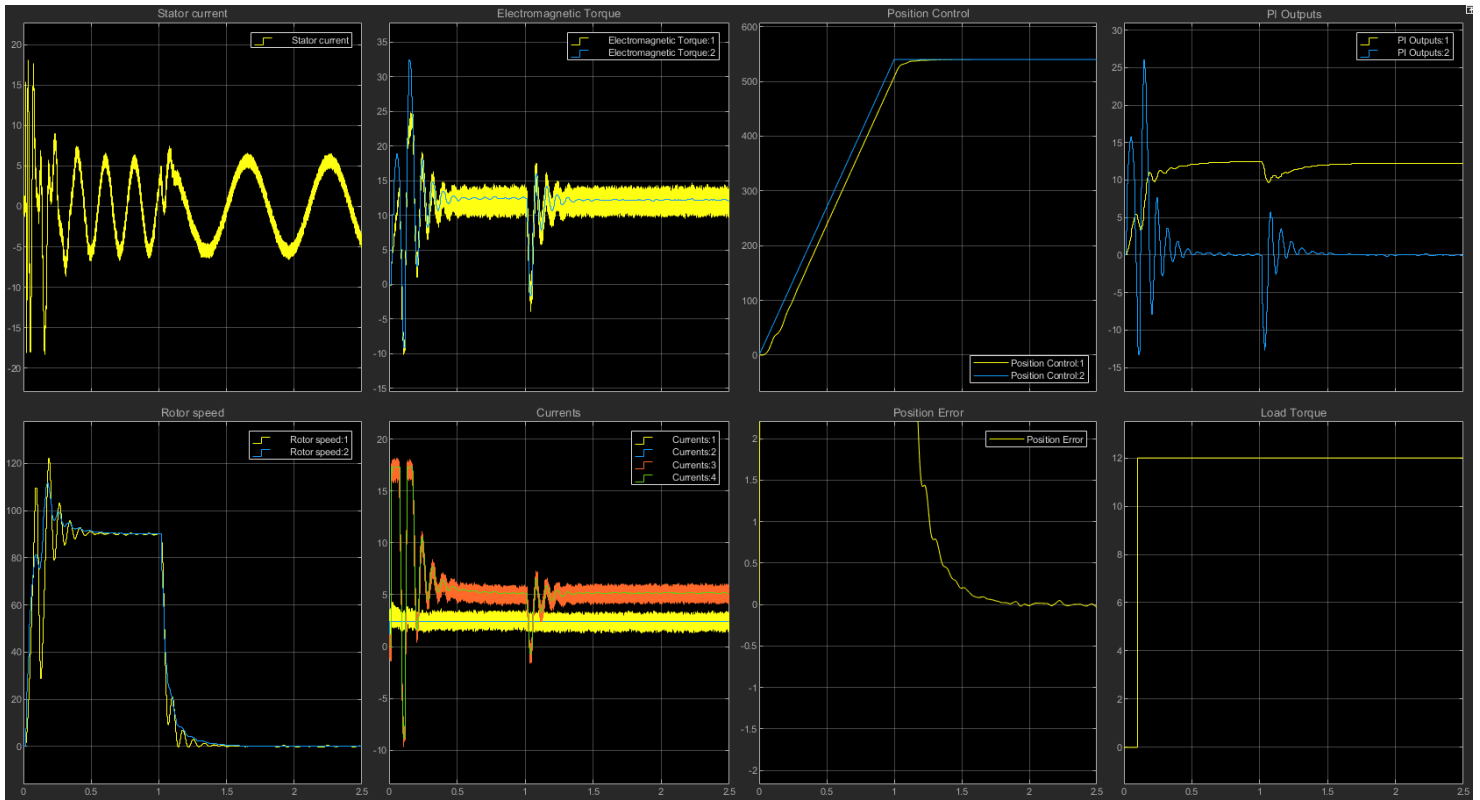
- Βηματική Αναφορά Θέσης με πλάτος 720°

Η τελευταία προσομοίωση που τρέξαμε είναι για να ελέγξουμε την απόκριση του σερβοκινητήριου συστήματος σε περίπτωση που ο επαγωγικός κινητήρας που κινεί τον ταινιόδρομο εκτελέσει 2 περιστροφές. Όπως και προηγουμένως, το σύστημα, με τους ίδιους ελεγκτές που χρησιμοποιήσαμε για την προσομοίωση των 1.5 περιστροφών είναι αρκετά ικανοποιητική απόκριση, χωρίς καθόλου υπερψύσεις. Παρ' όλα αυτά με σκοπό την βελτιστοποίηση του συστήματος σε περίπτωση όπου στην πράξη εκτελέσει 2 περιστροφές αλλάξαμε τον ολοκληρωτικό όρο από 2.95 σε 2.7, κάτι το οποίο έκανε το σύστημα ακόμη πιο γρήγορο. Τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης προσομοίωσης φαίνονται παρακάτω.



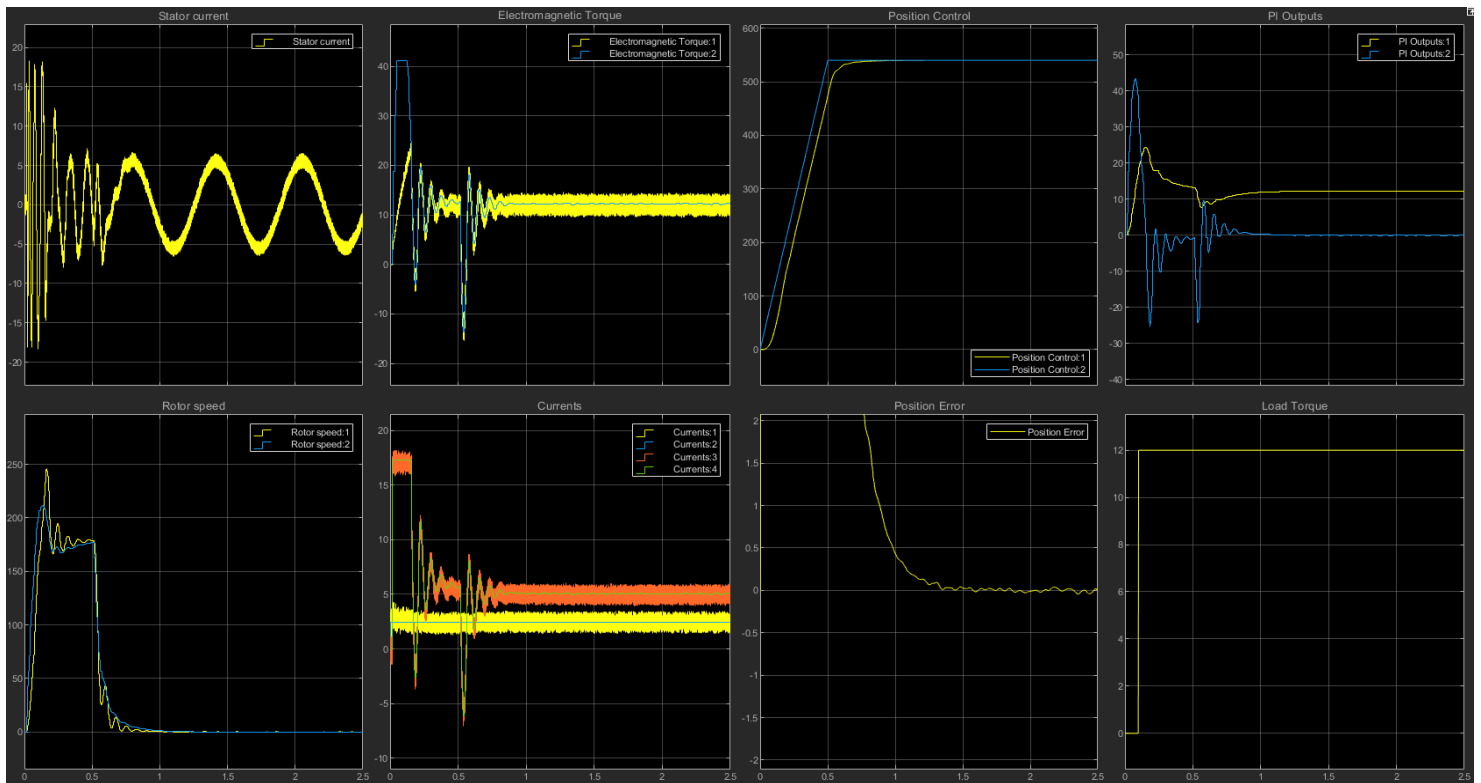
- Ράμπα Αναφορά Θέσης με χρόνο ανόδου 1 second

Σε αυτή την προσομοίωση δοκιμάσαμε να δούμε πως αποκρίνεται το σύστημα μας σε περίπτωση που του δώσουμε ως αναφορά θέσης μια ράμπα και όχι μια βηματική συνάρτηση. Αρχικά, δοκιμάσαμε να τρέξουμε την συγκεκριμένη προσομοίωση με τους ίδιους ελεγκτές με αυτούς της 1^{ης} προσομοίωσης (δηλαδή την βηματική απόκριση με πλάτος 540) και είδαμε ότι η απόκριση ήταν αρκετά ικανοποιητική αλλά όχι τόσο γρήγορη όσο θα θέλαμε. Για τον λόγο αυτό, αλλάξαμε τον αναλογικό όρο του ελεγκτή θέσης από 1.84 σε 2.85. Έτσι, όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα, το σύστημα μας έγινε αρκετά πιο «ζωηρό» καθώς μπορούμε να δούμε τα μεγάλα σφάλματα ταχύτητας στην μεταβατική κατάσταση, αλλά ταυτόχρονα καταφέραμε να μειώσουμε το σφάλμα θέσης στην μεταβατική κατάσταση και συνεπώς να γίνει πιο γρήγορη η απόκριση του συστήματος όταν φτάσουμε στην μόνιμη κατάσταση (δηλαδή στις 540°). Όπως είπαμε και προηγουμένως όταν δίνουμε στο σύστημα ως αναφορά μια ράμπα, δεδομένου ότι έχουμε μόνον ένα ολοκληρωτή είναι λογικό να υπάρχει μόνιμα κάποιο σφάλμα θέσης κατά την διάρκεια ανόδου της ράμπας. Παρ' όλα αυτά δεδομένου ότι η είσοδος μένει σταθερή από το 1s και μετά, θεωρήσαμε ότι δεν υπήρχε λόγος να προσπαθήσουμε να μειώσουμε και άλλο το σφάλμα θέσης κατά την άνοδο βάζοντας άλλον έναν ολοκληρωτή στην σχεδίαση μας καθώς το tuning των PI θα γινόταν αρκετά πιο δύσκολο χωρίς να επιφέρει μεγάλη βελτίωση στο σύστημα. Τέλος, όπως και στις προηγούμενες προσομοιώσεις στόχος μας ήταν τόσο η ταχύτητα όσο και το μικρό σφάλμα θέσης στην μόνιμη κατάσταση κάτι το οποίο επιβεβαιώνεται από τα αποτελέσματα παρακάτω.



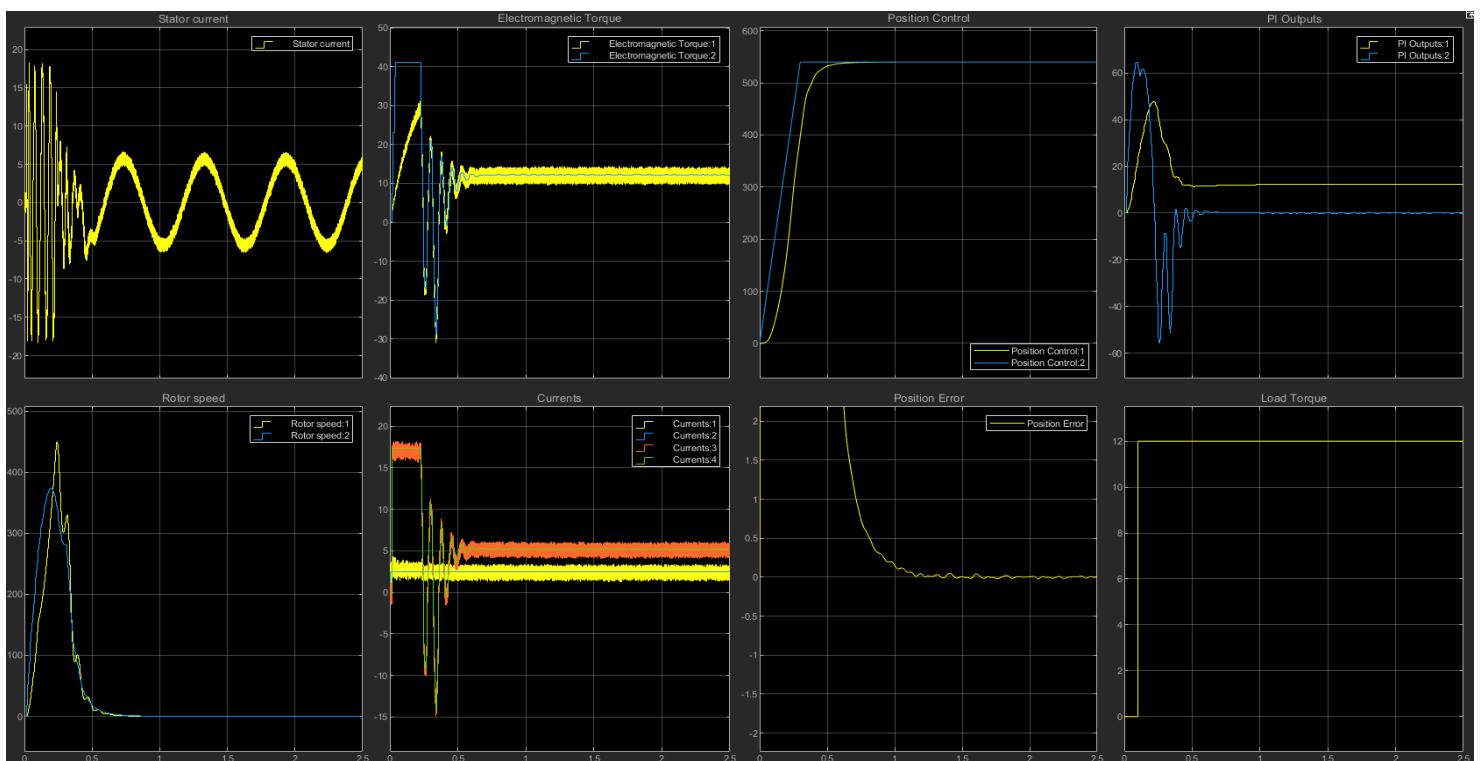
- Ράμπα Αναφορά Θέσης με χρόνο ανόδου 0.5 second

Στην συγκεκριμένη προσομοίωση ελέγξαμε πως αποκρίνεται το σύστημα μας σε ακόμη πιο γρήγορη και απότομη ράμπα. Όπως ήταν αναμενόμενο, η απόκριση ήταν αρκετά ικανοποιητική αλλά για να μικρύνουμε λίγο παραπάνω κάποιες ταλαντώσεις στην άνοδο της θέσης του κινητήρα αλλάξαμε τον αναλογικό όρο του ελεγκτή θέσης από 2.85 σε 2.65 και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης φαίνονται παρακάτω.



- Ράμπα Αναφορά Θέσης με χρόνο ανόδου 0.3 second

Τέλος δοκιμάσαμε να τρέξουμε το μοντέλο του επαγωγικού κινητήρα και σε μια ακόμα πιο απότομη ράμπα. Σε αυτή την περίπτωση κρατώντας τους ίδιους ελεγκτές είχαμε καλή απόκριση του κινητήρα χωρίς υπερυψώσεις και με μικρό σφάλμα μόνιμης κατάστασης. Παρ' όλα αυτά είχαμε κάποιες μικρές ταλαντώσεις της θέσης του κινητήρα. Συνεπώς για να κάνουμε πιο ομαλή την απόκριση του κινητήρα μικρύνουμε τον αναλογικό όρο του ελεγκτή θέσης από 2.65 σε 1.95, μεγαλώνοντας έτσι βέβαια λίγο τον χρόνο ανόδου του κινητήρα. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης φαίνονται παρακάτω.



❖ Σύγχρονος Κινητήρας Μόνιμου Μαγνήτη (PMSM)

Παρακάτω παρουσιάζονται τα κέρδη του ελεγκτή θέσης και του ελεγκτή ταχύτητας για την κάθε προσομοίωση:

Βηματική Αναφορά Θέσης με πλάτος 360°	
Αναλογικός Ελεγκτής Θέσης	1,7
Αναλογικός Ελεγκτής Ταχύτητας	0,32
Ολοκληρωτικός Ελεγκτής Ταχύτητας	2

Βηματική Αναφορά Θέσης με πλάτος 180°	
Αναλογικός Ελεγκτής Θέσης	1,55
Αναλογικός Ελεγκτής Ταχύτητας	0,32
Ολοκληρωτικός Ελεγκτής Ταχύτητας	2

Βηματική Αναφορά Θέσης με πλάτος 540°	
Αναλογικός Ελεγκτής Θέσης	1,45
Αναλογικός Ελεγκτής Ταχύτητας	0,32
Ολοκληρωτικός Ελεγκτής Ταχύτητας	2

Ράμπα Αναφορά Θέσης με χρόνο ανόδου 1 second	
Αναλογικός Ελεγκτής Θέσης	4,25
Αναλογικός Ελεγκτής Ταχύτητας	0,32
Ολοκληρωτικός Ελεγκτής Ταχύτητας	2

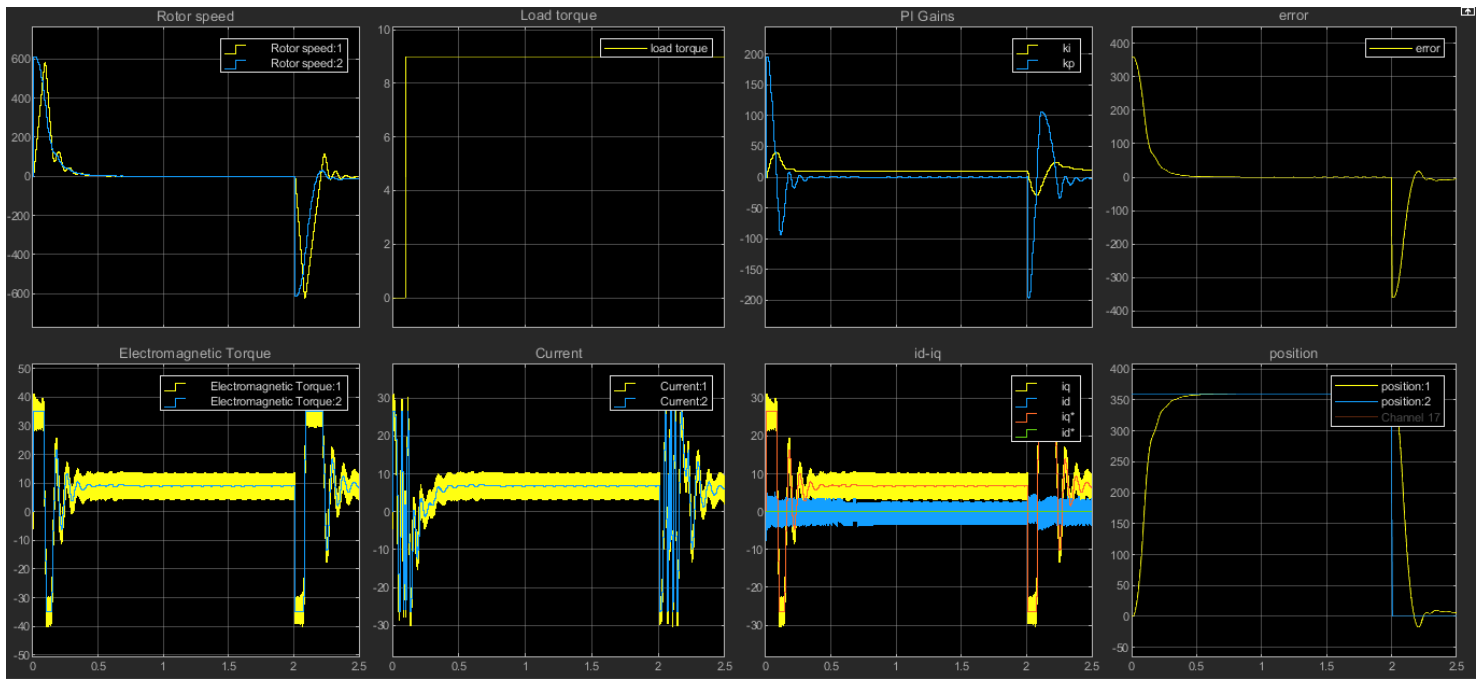
Ράμπα Αναφορά Θέσης με χρόνο ανόδου 0.5 second	
Αναλογικός Ελεγκτής Θέσης	4,1
Αναλογικός Ελεγκτής Ταχύτητας	0,32
Ολοκληρωτικός Ελεγκτής Ταχύτητας	2

Ράμπα Αναφορά Θέσης με χρόνο ανόδου 0.3 second	
Αναλογικός Ελεγκτής Θέσης	4,05
Αναλογικός Ελεγκτής Ταχύτητας	0,32
Ολοκληρωτικός Ελεγκτής Ταχύτητας	2

Στον κινητήρα μόνιμου μαγνήτη θέλουμε να έχουμε γρήγορη απόκριση και σχεδόν μηδενικό σφάλμα θέσης με ανοχή ύψους 5% υπερύψωση.

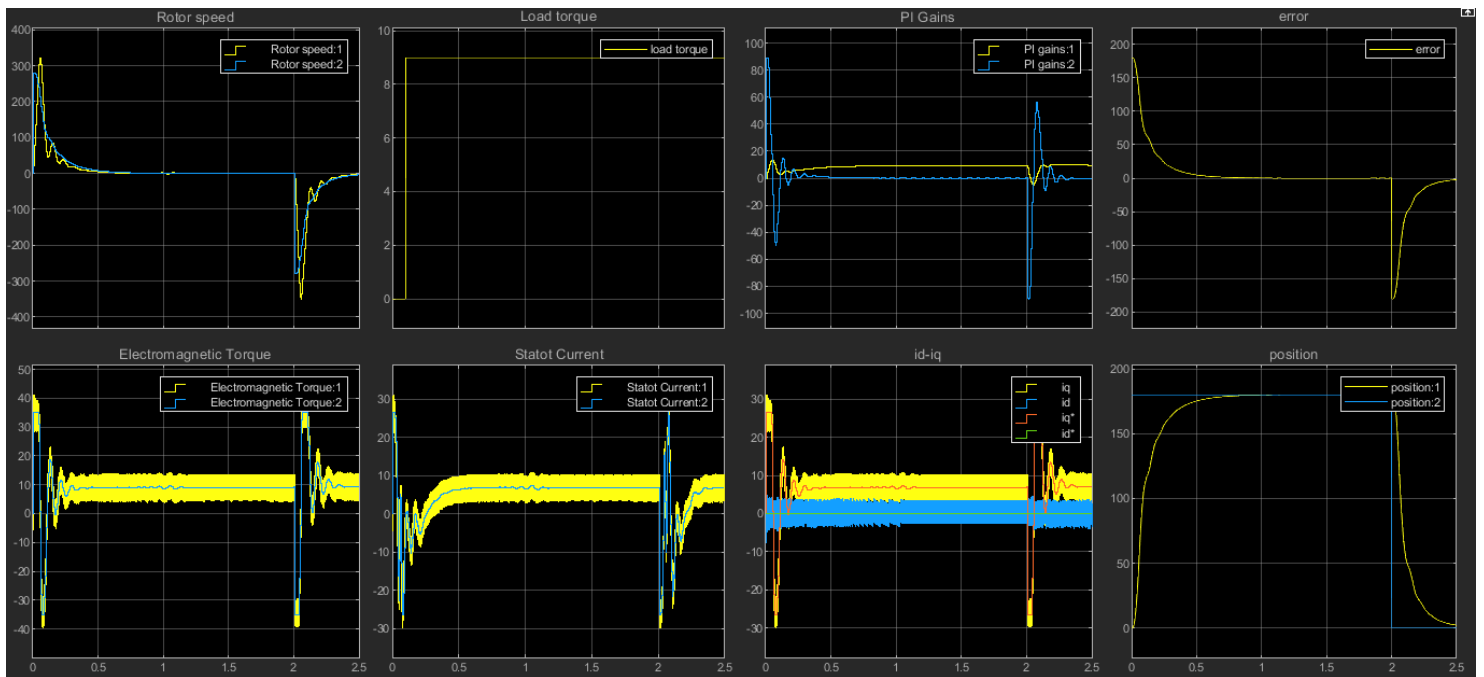
- Βηματική Αναφορά Θέσης με πλάτος 360°

Στην αρχή έγινε προσομοίωση για 360 μοίρες, δηλαδή 1 περιστροφή. Με τα παραπάνω κέρδη που παρουσιάζονται στον πίνακα παρατηρείται μια γρήγορη απόκριση ταχύτητα και θέσης. Το σύστημα φτάνει στις 360 μοίρες σε 0,83 s και έχουμε 0% υπερύψωση. Στην επιστροφή του όμως στην αρχική του θέση βλέπουμε να υπάρχει μια υπερύψωση ίση με 17.26 μοίρες που είναι μέσα στα όρια. Από το διάγραμμα των PI Gains παρατηρούμε μεγάλη άνοδο του k_p που περιορίζεται γρήγορα περιορίζοντας τις ταλαντώσεις του ρότορα. Τέλος παρατηρούμε ότι μόνο η ηλεκτρομαγνητική ροπή περιορίζεται από τον περιοριστή της, ενώ ο περιοριστής κέρδους δεν ενεργοποιείται



- Βηματική Αναφορά Θέσης με πλάτος 180°

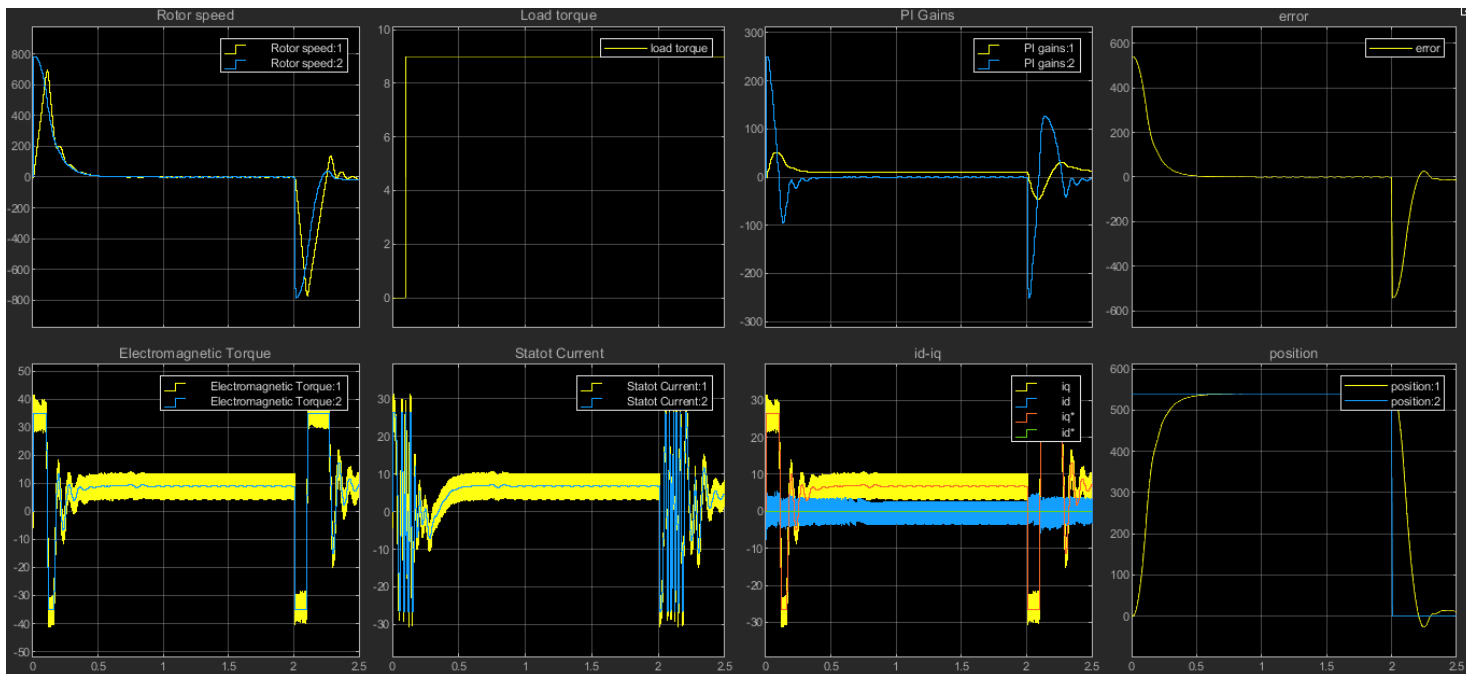
Μεταβάλλεται τώρα το step από 360 σε 180 (0.5 περιστροφή). Η ταχύτητα και η θέση με τα ήδη υπάρχον κέρδη είναι καλή με την διαφορά ότι η υπερύψωση στη επιστροφή στην αρχική θέση μεγάλωσε οπότε μειώσαμε το κέρδος του ελεγκτή θέσης. Λόγω της μείωσης αυτής αυξήθηκε ο χρόνος που φτάνει στην ζητούμενη τιμή, ο οποίος είναι 1.08 s και δεν έχουμε κάποια υπερύψωση.



- Βηματική Αναφορά Θέσης με πλάτος 540°

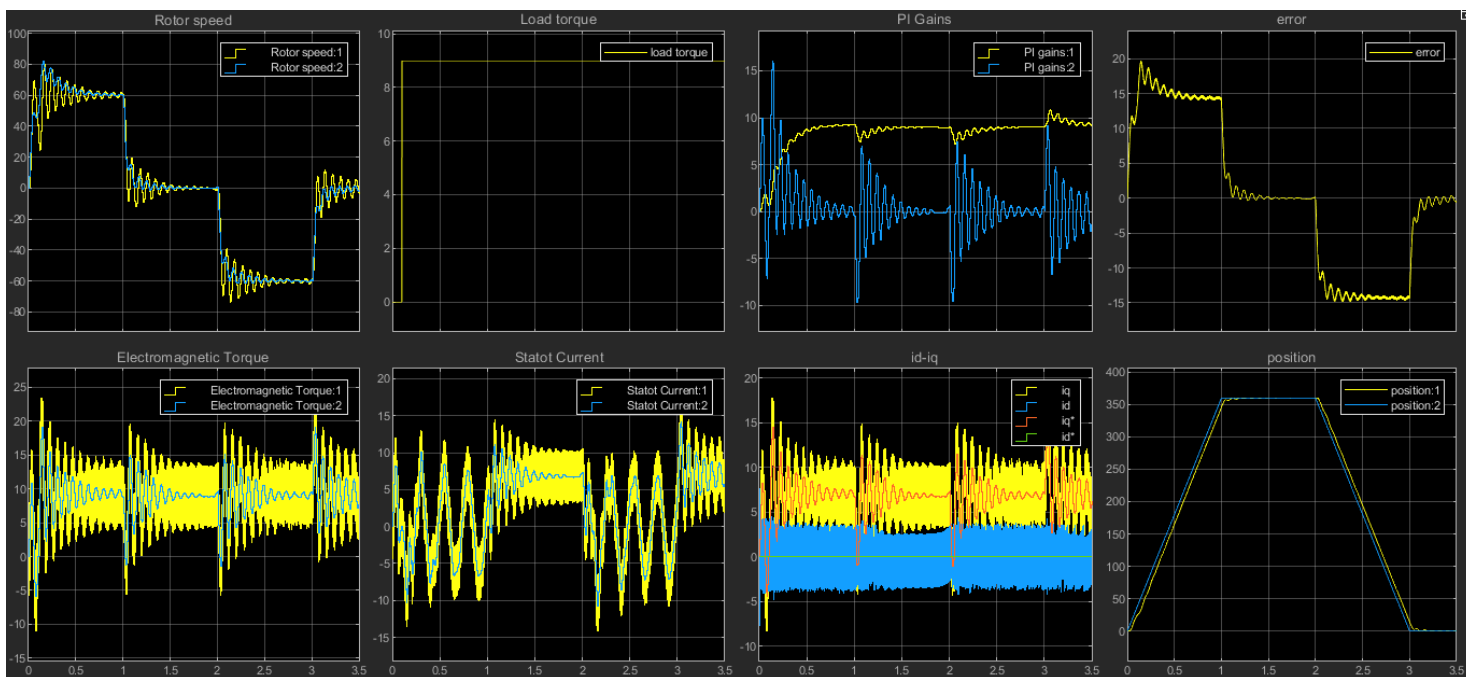
Τέλος αλλάξαμε την βηματική από 360 σε 540 μοίρες (1.5 περιστροφές). Με τα κέρδη που τα κέρδη των 360 μοιρών η απόκριση της ταχύτητας και της θέσης δεν είναι οι επιθυμητές, καθώς έχουμε μεγάλη υπερύψωση. Οπότε μειώνοντας το κέρδος του ελεγκτή θέσης αυξήθηκε ο χρόνος απόκρισης. Η υπερύψωση για αυτά τα κέρδη είναι $26,5$ μοίρες ($\sim 5\%$) και ο

χρόνος απόκρισης είναι 0,9 s.



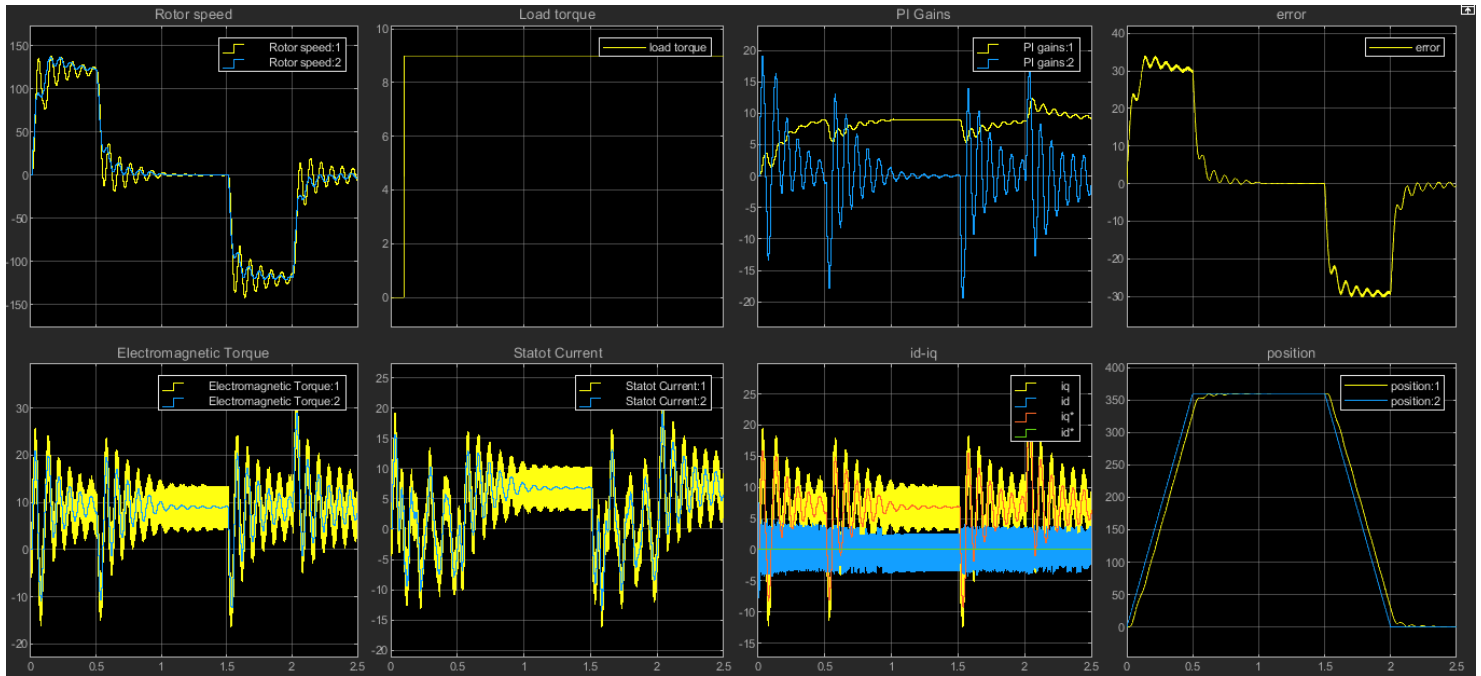
- Ράμπα Αναφορά Θέσης με χρόνο ανόδου 1 second

Σε αυτό το στάδιο της προσομοίωσης αναπαριστάτε η απόκριση του κινητήρα με σήμα αναφοράς ράμπα. Για την βέλτιστη απόκριση μεταβλήθηκε κατά πολύ το κέρδος του ελεγκτή θέσης, ενώ τα κέρδη του ελεγκτή ταχύτητας έμειναν αμετάβλητα. Λόγω της μεταβολής αυτής παρατηρούνται κάποιες ταλαντώσεις αλλά δεν είναι αρκετές για να χαλάσει την ευστάθεια του συστήματος. Ο χρόνος ανόδου είναι ίσος 1,19 s και η υπερύψωση είναι 0,3 μόιρες. Παρατηρήθηκε ότι η υπερύψωση του συστήματος εξαλείφθηκε σχεδόν.



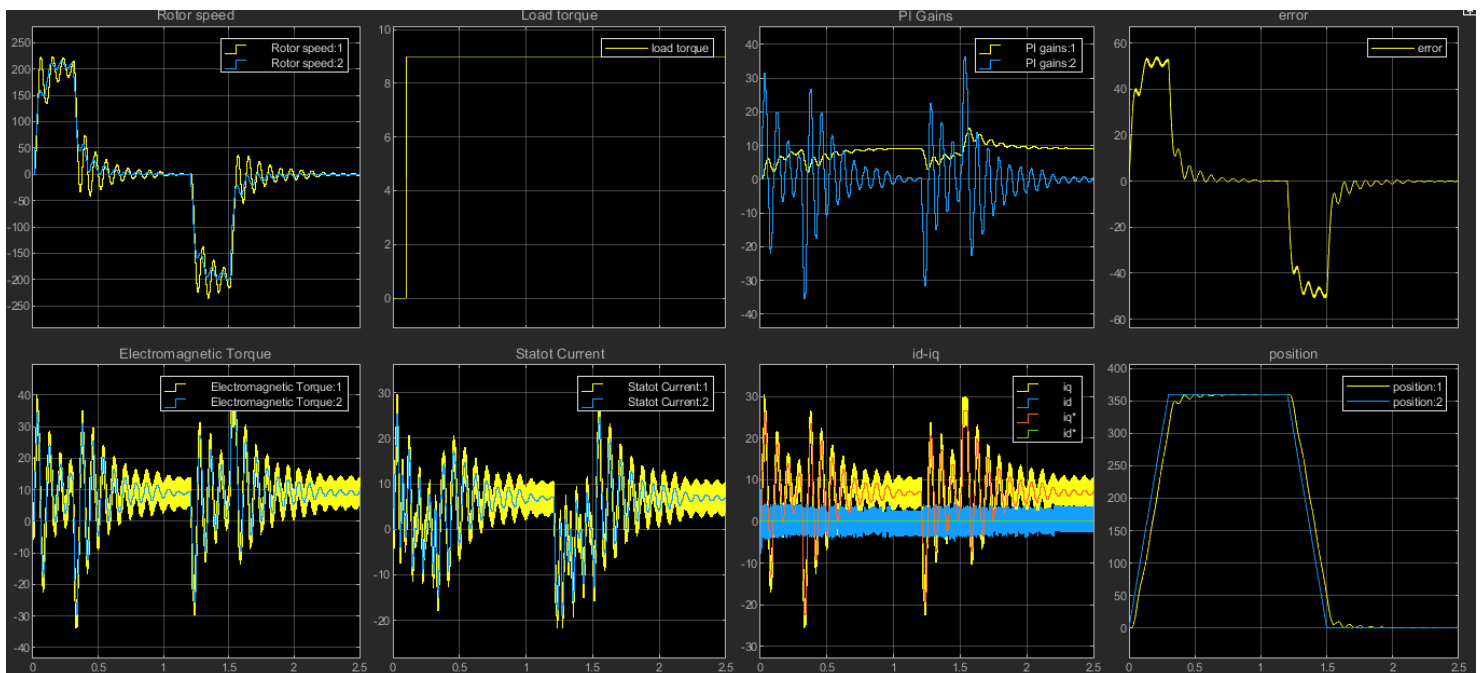
- Ράμπα Αναφορά Θέσης με χρόνο ανόδου 0,5 second

Αυξάνοντας τον ρυθμό αύξησης της θέσης αναφοράς και με τα κέρδη της ράμπας του ενός δευτερολέπτου παρατηρείται μια αστάθεια στο σύστημα με αποτέλεσμα να μειωθεί το κέρδος του ελεγκτή θέσης. Ο χρόνος ανόδου είναι 0,7 s και η υπερύψωση είναι 0,1 μοίρες.



- Ράμπα Αναφορά Θέσης με χρόνο ανόδου 0,3 second

Τέλος, μεταβλήθηκε πάλι ο ρυθμός ανόδου του σήματος αναφοράς και προσομοιώνει μια ράμπα στα όρια της βηματικής απόκρισης. Πάλι παρατηρείται αστάθεια στο συστήματα με συνέπεια να μειωθεί κι άλλο το κέρδος του ελεγκτή θέσης. Ο χρόνος ανόδου είναι 0,5 s και η υπερύψωση είναι 0,4.



Ερώτημα 4.3

Σε αυτό το ερώτημα καλούμαστε να κάνουμε έλεγχο ταχύτητας εν αντίθεσή με το προηγούμενο ερώτημα στο οποίο κάναμε έλεγχο θέσης. Στόχος του ερωτήματος ήταν να δούμε κατά πόσο η μεταβολή του φορτίου επηρεάζει την ταχύτητα του κινητήρα και να προσπαθήσουμε να μειώσουμε αυτή την επιρροή με την κατάλληλη αλλαγή των ελεγκτών. Πιο συγκεκριμένα, τρέξαμε 4 προσομοιώσεις για το κάθε σερβοκινητήριο σύστημα, 2 προσομοιώσεις με ταχύτητα περιστροφής στο 50% της ονομαστικής και 2 με ταχύτητα περιστροφής στο 80% της ονομαστικής.

❖ Επαγωγικός Κινητήρας

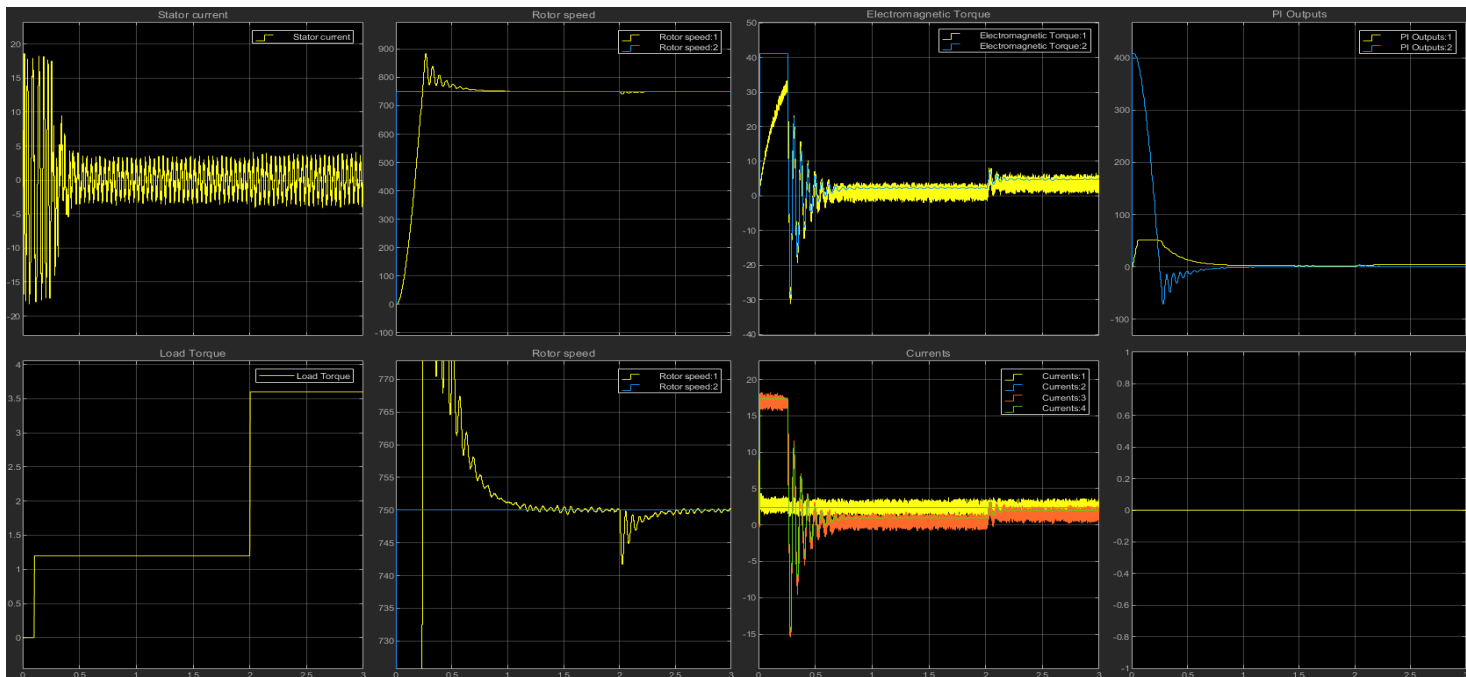
Παρακάτω φαίνονται συνοπτικά οι τελικοί παράμετροι των PI για κάθε προσομοίωση.

750 rpm (10% -> 30% Load)		750 rpm (20% -> 80% Load)	
Αναλογικός Ελεγκτής Ταχύτητας	0,545	Αναλογικός Ελεγκτής Ταχύτητας	0,56
Ολοκληρωτικός Ελεγκτής Ταχύτητας	2,95	Ολοκληρωτικός Ελεγκτής Ταχύτητας	2,95

1200 rpm (10% -> 30% Load)		1200 rpm (20% -> 80% Load)	
Αναλογικός Ελεγκτής Ταχύτητας	0,53	Αναλογικός Ελεγκτής Ταχύτητας	0,56
Ολοκληρωτικός Ελεγκτής Ταχύτητας	2,75	Ολοκληρωτικός Ελεγκτής Ταχύτητας	2,85

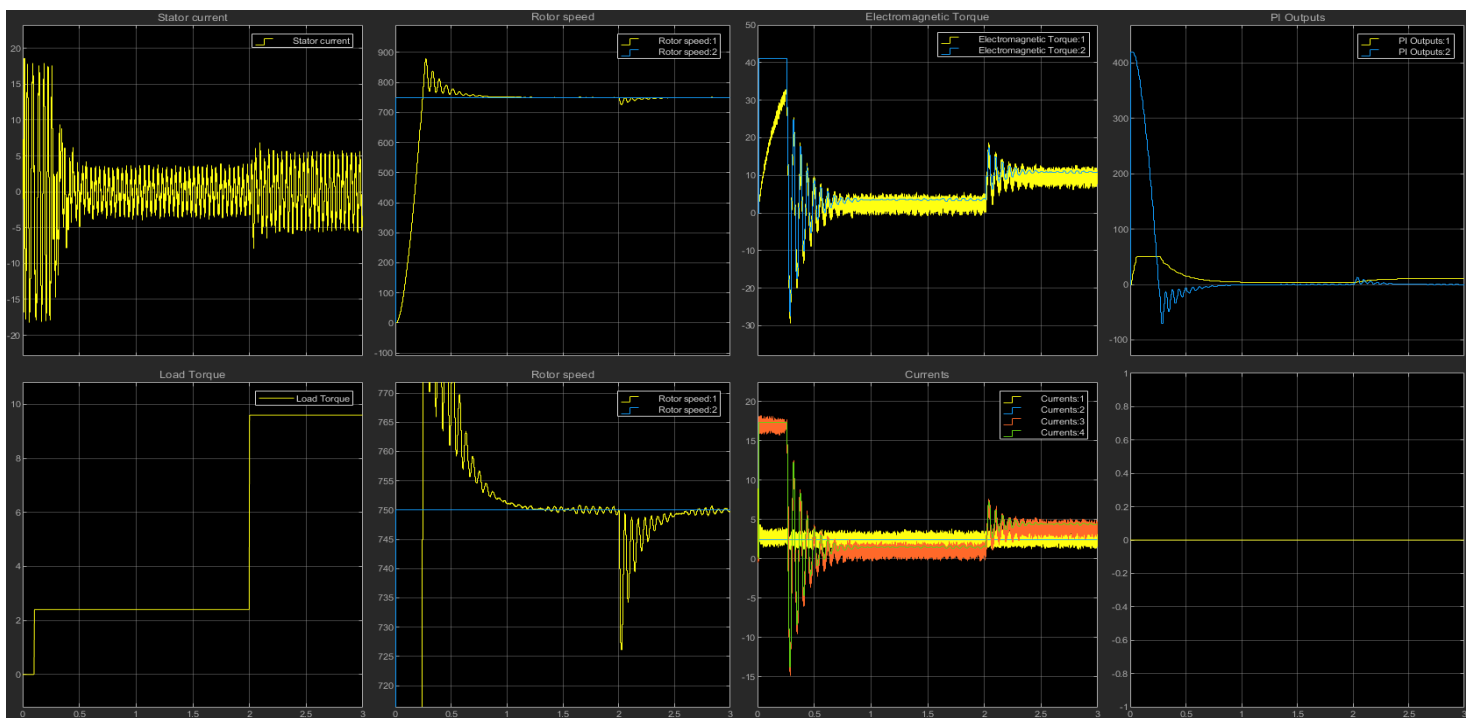
- Έλεγχος Ταχύτητας με 750 rpm και εναλλαγή φορτίου από 1.2 Nm σε 3.6 Nm

Στόχος της συγκεκριμένης προσομοίωσης ήταν να κάνουμε έλεγχο ταχύτητας στα 750 rpm και να ελέγξουμε κατά πόσο μεταβάλλεται η ταχύτητα του κινητήρα όταν αλλάξουμε βηματικά την ροπή του φορτίου από 1.2 Nm σε 3.6 Nm. Συνεπώς, για να μειώσουμε την απόρριψη διαταραχών αυξήσαμε αρκετά το αναλογικό κέρδος του ελεγκτή ταχύτητας από 0.415 σε 0.545 (το οποίο είναι μεγάλη αλλαγή δεδομένου ότι το αναλογικό κέρδος του ελεγκτή ταχύτητας είναι αρκετά ευαίσθητο). Έτσι καταφέραμε να κάνουμε το σύστημα ακόμη πιο «νευρικό», αυξάνοντας βέβαια λίγο τις ταλαντώσεις του. Ταυτόχρονα όμως, καταφέραμε να κάνουμε την πτώση ταχύτητας του κινητήρα στα 741.8 rpm, συνεπώς η απόρριψη βηματικών διαταραχών το φορτίου είναι 1.09 %. Παρακάτω βλέπουμε αυτά που βλέπαμε και προηγουμένως μόνο μου τώρα για καλύτερη ευκρίνεια παρουσιάζουμε δύο φορές της ταχύτητα του κινητήρα, για καλύτερη κατανόηση της απόκρισης. Επίσης, βλέπουμε κάποια μεταβατικά φαινόμενα στην αρχή στα οποία δεν δίνουμε κάποια σημασία δεδομένου ότι αυτό που μας ενδιαφέρει είναι η απόρριψη διαταραχών του φορτίου.



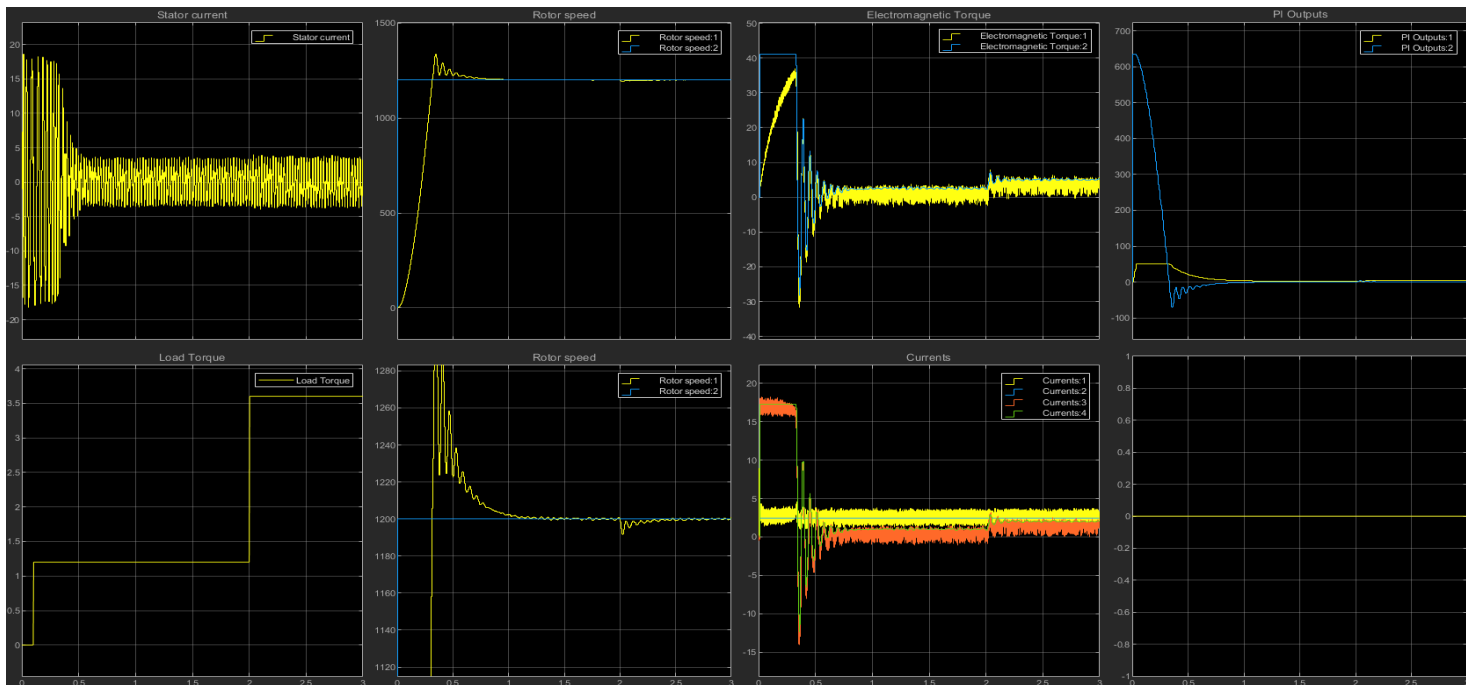
- Έλεγχος Ταχύτητας με 750 rpm και εναλλαγή φορτίου από 2.4 Nm σε 9.6 Nm

Σε αυτή την περίπτωση δεδομένου ότι η αύξηση της ροπής είναι ακόμα μεγαλύτερη από πριν αυξήσαμε ακόμη περισσότερο το αναλογικό κέρδος. Πιο συγκεκριμένα επιλέχτηκε στα 0.56. Έτσι πετύχαμε μια απόρριψη διαταραχών φορτίου στα 3.2% δεδομένου ότι στιγμιαία η ταχύτητα του κινητήρα πέφτει στα 726 rpm.



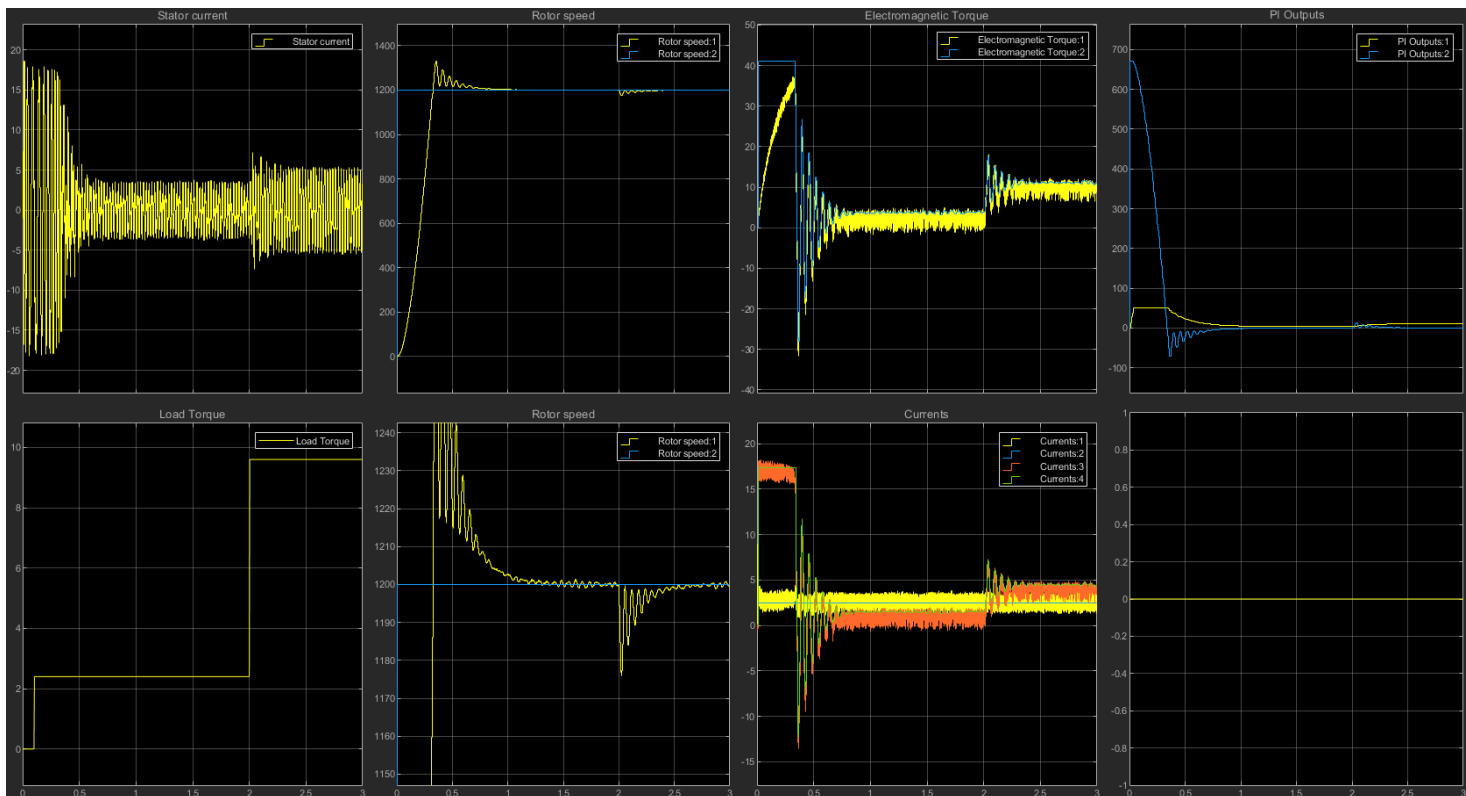
- Έλεγχος Ταχύτητας με 1200 rpm και εναλλαγή φορτίου από 1.2 Nm σε 3.6 Nm

Σε αυτή την περίπτωση η μεταβολή της ροπής είναι σχετικά μικρή σε σχέση με την σχετικά μεγάλη ταχύτητα περιστροφής των 1200 rpm, συνεπώς η απόρριψη διαταραχών φορτίου είναι αρκετά μικρή. Πιο συγκεκριμένα, τοποθετήσαμε τον αναλογικό όρο στα 0.53 και τον ολοκληρωτικό όρο στα 2.75 και αυτό είχε ως αποτέλεσμα να πετύχουμε απόρριψη διαταραχών φορτίου 0.7% δεδομένου ότι στιγμιαία η ταχύτητα πέφτει στα 1191.6 rpm.



- Έλεγχος Ταχύτητας με 1200 rpm και εναλλαγή φορτίου από 2.4 Nm σε 9.6 Nm

Τέλος εκτελέσαμε και μια ακόμη προσομοίωση στα 1200 rpm με ακόμη μεγαλύτερη εναλλαγή φορτίου. Συνεπώς για να μικρύνουμε την απόρριψη διαταραχών αυξήσαμε τον αναλογικό όρο στο 0.56 και τον ολοκληρωτικό όρο στο 2.85, πετυχαίνοντας έτσι απόρριψη διαταραχών 2% καθώς η ταχύτητα πέφτει στιγμιαία στα 1176 rpm.



❖ Σύγχρονος Κινητήρας Μόνιμου Μαγνήτη (PMSM)

Παρακάτω φαίνονται συνοπτικά οι τελικοί παράμετροι των PI για κάθε προσομοίωση.

1400 rpm (10% -> 30% Load)	
Αναλογικός Ελεγκτής Ταχύτητας	0,4
Ολοκληρωτικός Ελεγκτής Ταχύτητας	3,3

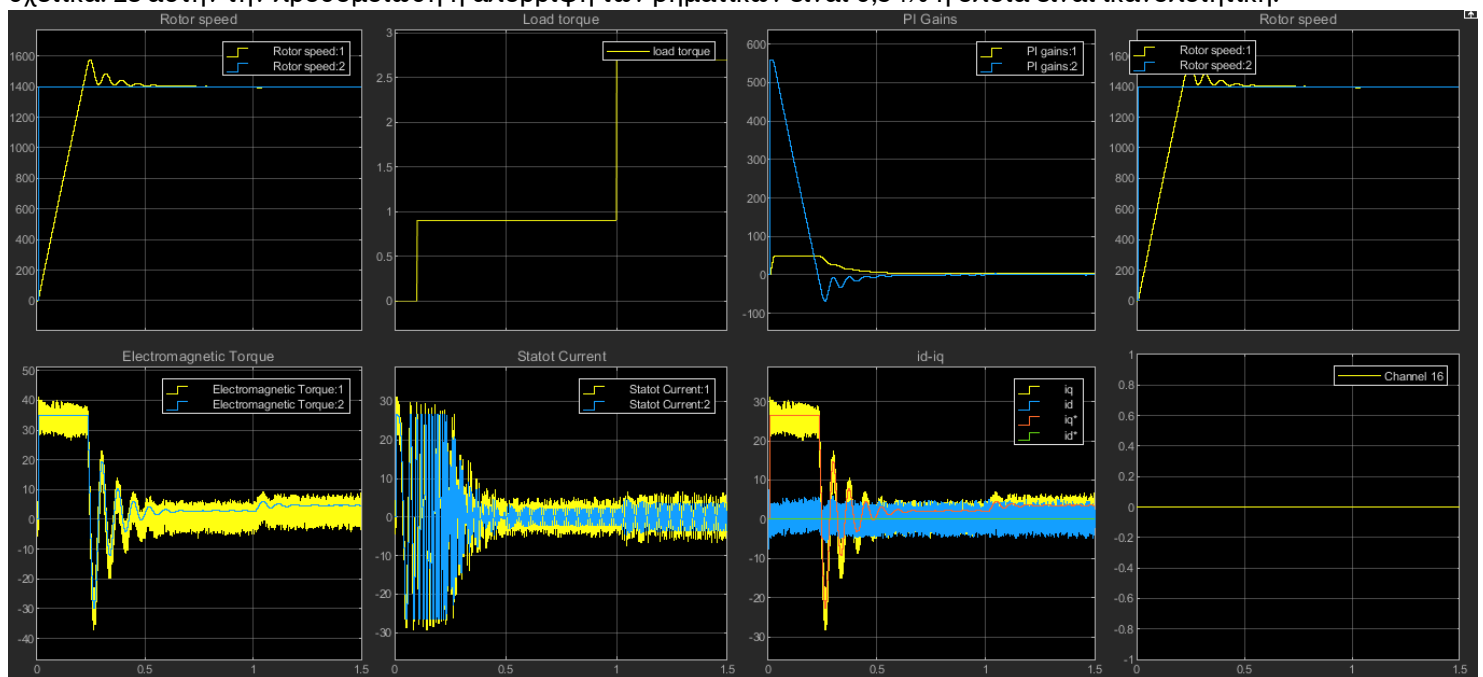
1400 rpm (20% -> 80% Load)	
Αναλογικός Ελεγκτής Ταχύτητας	0,42
Ολοκληρωτικός Ελεγκτής Ταχύτητας	3,3

2240 rpm (10% -> 30% Load)	
Αναλογικός Ελεγκτής Ταχύτητας	0,37
Ολοκληρωτικός Ελεγκτής Ταχύτητας	3,1

2240 rpm (20% -> 80% Load)	
Αναλογικός Ελεγκτής Ταχύτητας	0,4
Ολοκληρωτικός Ελεγκτής Ταχύτητας	3,5

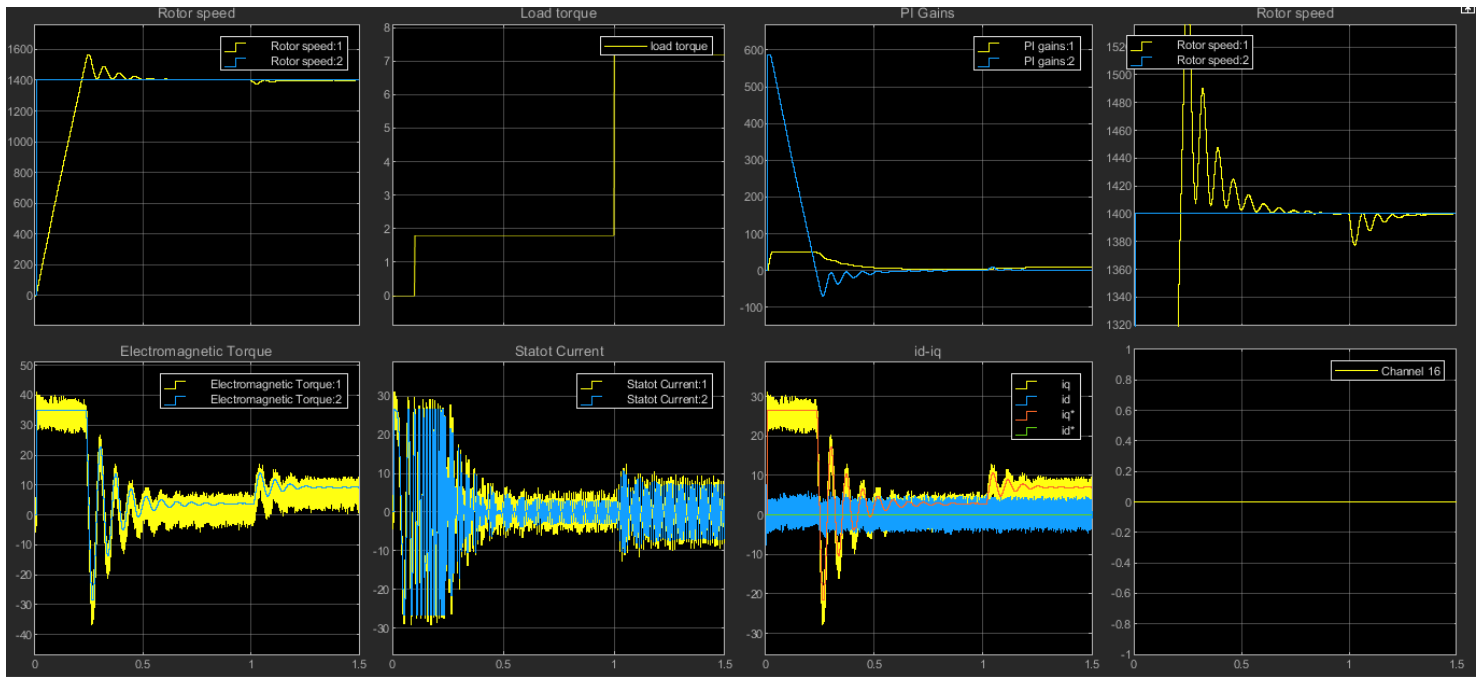
- Έλεγχος Ταχύτητας με 1400 rpm και εναλλαγή φορτίου από 0.9 Nm σε 2.7 Nm

Στον κινητήρα με μόνιμους μαγνήτες παρατηρείται μικρή μεταβολή της ταχύτητας με την αλλαγή του φορτίου. Όπως στον επαγωγικό, έτσι και σε αυτόν τον κινητήρα μεταβάλλονται και τα δύο κέρδη του ελεγκτή ταχύτητας κατά μια μεγάλη τιμή σχετικά. Σε αυτήν την προσομοίωση η απόρριψη των βηματικών είναι 0,54% η οποία είναι ικανοποιητική.



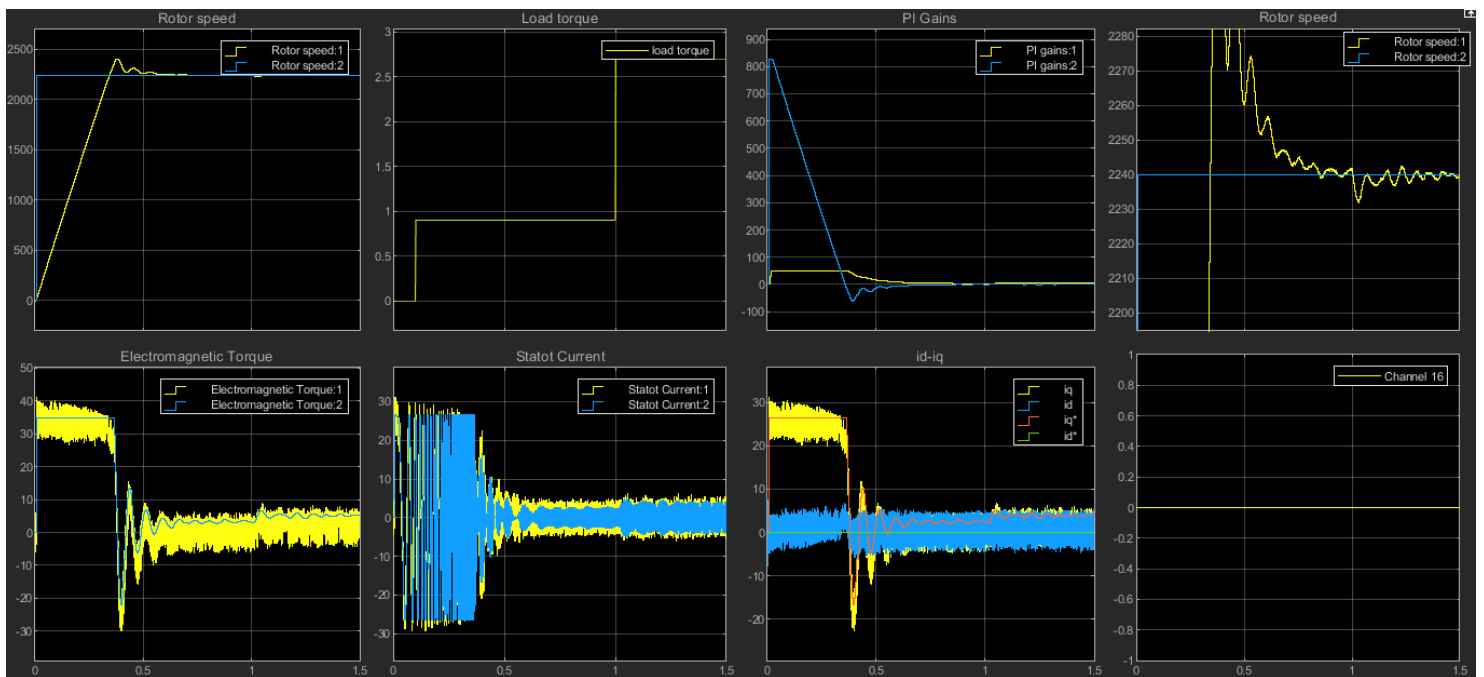
- Έλεγχος Ταχύτητας με 1400 rpm και εναλλαγή φορτίου από 1.8 Nm σε 7.2 Nm

Μεγαλώνοντας την μεταβολή του φορτίου αυξήθηκε ο αναλογικός ελεγκτής. Η απόρριψη βηματικών διαταραχών αυξήθηκε στο ποσοστό του 1,6% που επίσης είναι ικανοποιητικό.



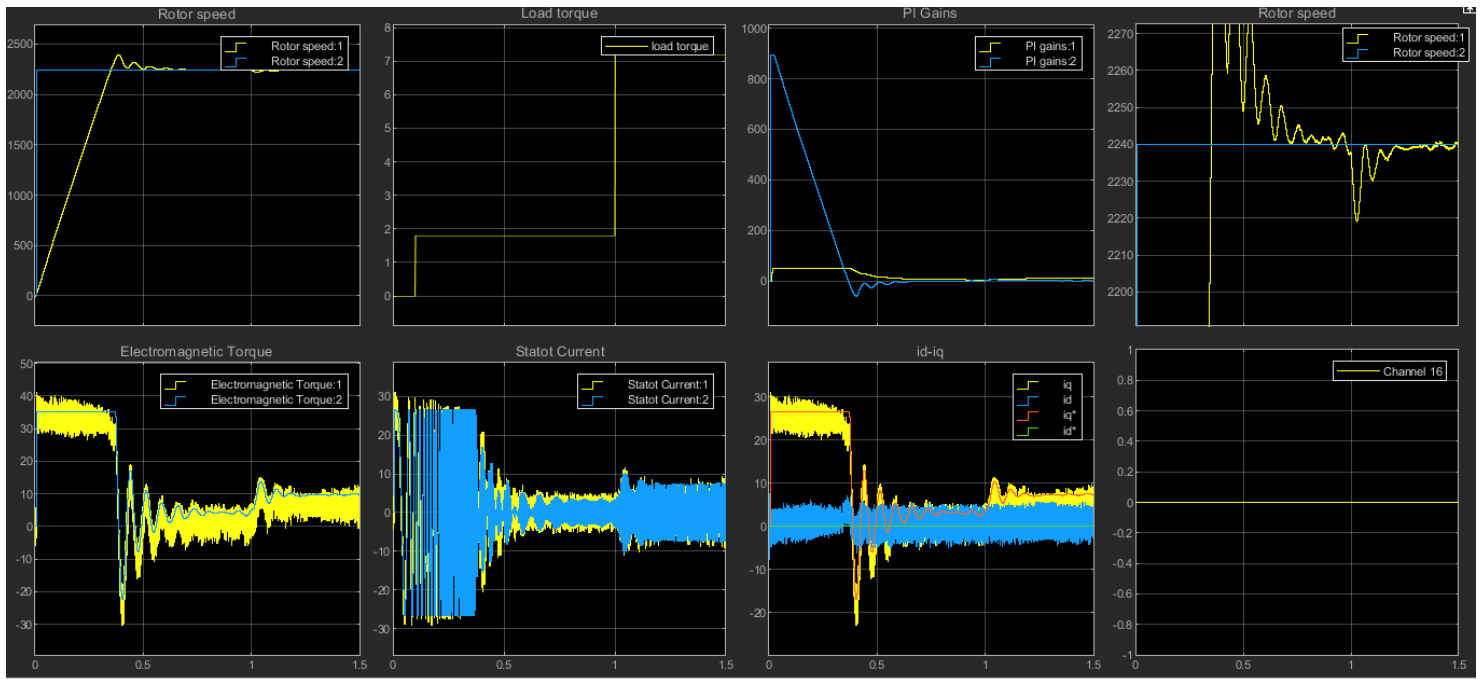
- Έλεγχος Ταχύτητας με 2240 rpm και εναλλαγή φορτίου από 0.9 Nm σε 2.7 Nm

Με την αύξηση των στροφών παρατηρήθηκε ότι με την μικρή μείωση των κερδών έχουν μια ικανοποιητική απόρριψη διαταραχών. Η απόρριψη σε αυτό το στάδιο είναι 0.35%.



- Έλεγχος Ταχύτητας με 2240 rpm και εναλλαγή φορτίου από 1.8 Nm σε 7.2 Nm

Τέλος με την αύξηση της μεταβολής μειώθηκε το αναλογικό κέρδος και αυξήθηκε το ολοκληρωτικό με μικρές μεταβολές. Η απόρριψη της διαταραχής είναι 0,93%.



Ερώτημα 4.4

Στο ερώτημα αυτό έγινε μια ενδεικτική σχεδίαση των σημάτων αναφοράς των δύο κινητήρων. Το σήμα αναφοράς του PMSM είναι ένας παλμός ο οποίος ξεκινάει αφού τελειώσει ο έλεγχος του επαγωγικού κινητήρα. Ενώ το σήμα αναφοράς του επαγωγικού κινητήρα είναι μια καμπυλωτή ράμπα. Για να δημιουργήσουμε αυτό το σήμα χρησιμοποιήσαμε την βιβλιοθήκη Signal Editor του Simulink. Παρακάτω φαίνονται τα δύο σήματα αναφοράς. Η αναφορά του PMSM ξεκινάει από τις 360° και όχι από τις 0° αλλά στην ουσία ο έλεγχος του PMSM ξεκινάει αφού τελειώσει ο επαγωγικός κινητήρας, όπως θα δείξουμε και στα επόμενα ερωτήματα.

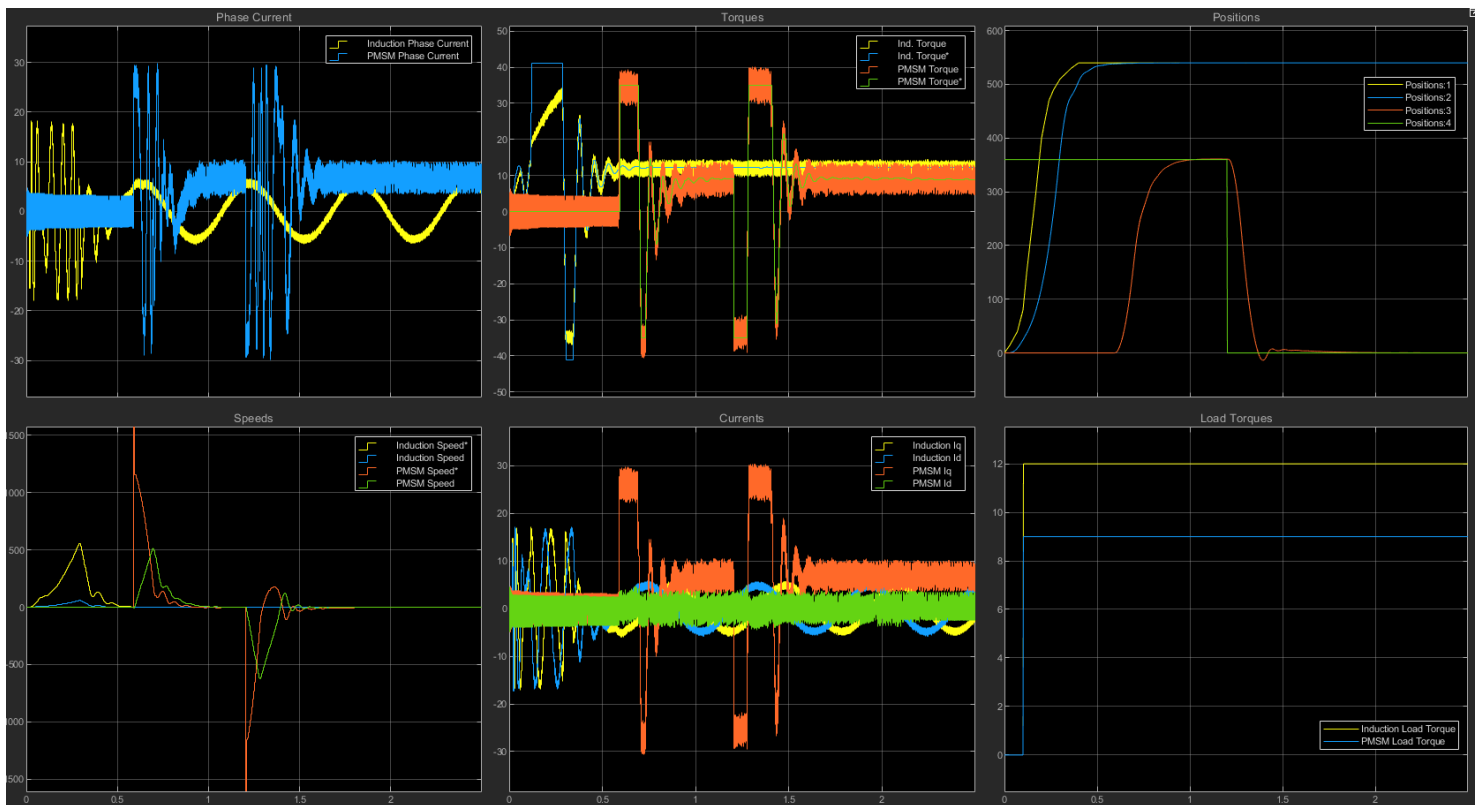


Ερώτημα 4.5

Στο συγκεκριμένο ερώτημα προσομοιώσαμε την απόκριση θέσης και των δυο σερβοκινητήριων συστημάτων μαζί. Πιο συγκεκριμένα, για τον επαγωγικό κινητήρα χρησιμοποιήσαμε αρχικά τους ελεγκτές της προσομοίωσης που είχαμε κάνει με είσοδο ράμπα και στην συνέχεια τους αλλάξαμε ώστε να βελτιστοποιήσουμε την απόκριση του συστήματος. Επίσης, το σήμα αναφοράς του επαγωγικού κινητήρα φτάνει στην μόνιμη κατάσταση στα 0.4 seconds και αυτό ήταν το βέλτιστο δυνατό το οποίο μπορέσαμε να πετύχουμε. Όσον αφορά τον PMSM, ξεκινήσαμε την προσομοίωση με τους ελεγκτές που είχαμε βρει από την προσομοίωση με βηματική είσοδο αναφοράς θέσης και στην συνέχεια τους αλλάξαμε όπως φαίνονται παρακάτω ώστε να πετύχουμε το βέλτιστο δυνατό αποτέλεσμα και να καλύπτουμε τις προδιαγραφές του προβλήματος. Παρακάτω φαίνονται συνοπτικά οι ελεγκτές οι οποίοι χρησιμοποιήθηκαν.

Επαγωγικός Κινητήρας		Σύγχρονος Κινητήρας Μόνιμου Μαγνήτη	
Αναλογικός Ελεγκτής Θέσης	2,2	Αναλογικός Ελεγκτής Θέσης	3,2
Αναλογικός Ελεγκτής Ταχύτητας	0,415	Αναλογικός Ελεγκτής Ταχύτητας	0,22
Ολοκληρωτικός Ελεγκτής Ταχύτητας	2,95	Ολοκληρωτικός Ελεγκτής Ταχύτητας	1,4

Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Όπως βλέπουμε στην πάνω δεξιά εικόνα, ο συνολικός χρόνος λειτουργίας του συστήματος μας είναι περίπου 1.6 seconds. Επίσης, το ποσοστό υπερύψωσης είναι 3.75% κάτι το οποίο είναι αποδεκτό. Επίσης, ο επαγωγικός κινητήρας που θα χρησιμοποιηθεί για τον ταινιόδρομο έχει σφάλμα μόνιμης κατάστασης μικρότερο από 0.1° . Τέλος, παρουσιάζονται και τα αντίστοιχα ρεύματα και ροπές του εκάστοτε σερβοκινητήριου συστήματος.



Ερώτημα 4.6

Στο ερώτημα αυτό αλλάξαμε τις ροπές φορτίου των δύο κινητήρων από 12 Nm σε 13.8 Nm για τον επαγωγικό κινητήρα και από 9 Nm σε 9.9 Nm για τον PMSM. Έτσι, ξανατρέξαμε το μοντέλο για τις νέες ροπές φορτίου και με τις τιμές ελεγκτών που βρήκαμε στο προηγούμενο ερώτημα και παρατηρήσαμε ότι η απόκριση του συστήματος έγινε λίγο πιο αργή από πριν. Παρ' όλα αυτά οι τελικές τιμές των ελεγκτών που χρησιμοποιήσαμε δεν διαφέρουν πολύ από αυτές του προηγούμενου ερωτήματος καθώς όσον αφορά τον επαγωγικό κινητήρα είχαμε περισσότερες ταλαντώσεις και ναι μεν ήταν πιο γρήγορη η άνοδος αλλά δεν ήταν τόσο ομαλή, συνεπώς κρατήσαμε τις ίδιες παραμέτρους. Ενώ για τον PMSM αλλάξαμε λίγο το αναλογικό κέρδος του ελεγκτή θέσης έτσι ώστε να καλύπτονται οι προδιαγραφές υπερύψωσης του συστήματος, και συγκεκριμένα στο 4.8%. Παρακάτω φαίνονται συνοπτικά τα κέρδη των ελεγκτών που χρησιμοποιήθηκαν.

Επαγωγικός Κινητήρας		Σύγχρονος Κινητήρας Μόνιμου Μαγνήτη	
Αναλογικός Ελεγκτής Θέσης	2,2	Αναλογικός Ελεγκτής Θέσης	3,15
Αναλογικός Ελεγκτής Ταχύτητας	0,415	Αναλογικός Ελεγκτής Ταχύτητας	0,22
Ολοκληρωτικός Ελεγκτής Ταχύτητας	2,95	Ολοκληρωτικός Ελεγκτής Ταχύτητας	1,4

Τέλος παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Όπως φαίνεται ο χρόνος λειτουργίας του συστήματος είναι περίπου 1.8 seconds ενώ το σφάλμα θέσης του επαγωγικού κινητήρα είναι και πάλι μέσα στο επιθυμητό επίπεδο.

