

# Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

## Συστήματα Ελέγχου Ηλεκτρικών Μηχανών

### 3η άσκηση - Διανυσματικός Έλεγχος Α'

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)

#### Phase Lock Loop

Τιμές του μοντέλου από την προηγούμενη άσκηση:

- $V_N = 230 \text{ V (RMS, phase voltage)}$
- $I_N = 63 \text{ A}$
- $f_N = 50 \text{ Hz}$
- $\omega_N = 314,16 \text{ rad/s}$
- $T_{N,e} = 198.08 \text{ Nm}$
- $\omega_{N,r} = 298.45 \text{ rad/s}$
- $\omega_{N,m} = 149.23 \text{ rad/s}$ , άρα  $n_N = 1425 \text{ RPM}$
- $T_{base} = 276.74 \text{ Nm}$
- $J_{base} = 0.0056 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$
- $Z_{base} = 3.65 \text{ Ohms}$
- $L_{base} = 0.0116 \text{ H}$
- $R_S = 0.365 \text{ Ohms} \rightarrow R_S = 0.1 \text{ pu}$
- $R_R = 0.1643 \text{ Ohms} \rightarrow R_R = 0.045 \text{ pu}$
- $L_M = 0.029 \text{ H} \rightarrow L_M = 2.5 \text{ pu}$
- $L_\sigma = 0.0035 \text{ H} \rightarrow L_\sigma = 0.3 \text{ pu}$
- $J = 100 \text{ pu} = 0.56 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$
- $\tau e^N = b_1 * \omega_r \rightarrow b_1 = 0.665 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s} / \text{rad}$
- $\tau e^N = b_2 * \omega_r^2 \rightarrow b_2 = 0.0022 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s} / \text{rad}$

1. Στην παρούσα φάση το ζητούμενο ερώτημα είναι να χτιστεί ένας ελεγκτής κλειδώματος φάσης, ο οποίος θα είναι τέλεια προσανατολισμένος στο πεδίο του δρομέα. Αφού επιτευχθεί ο προσανατολισμός, η παραγόμενη γωνία θα πρέπει να εφαρμοστεί στον μετασχηματισμό σε σύγχρονες συντεταγμένες (dq) του ρεύματος. Στη συνέχεια, τα ρεύματα θα πρέπει να περαστούν από τον ελεγκτή ρεύματος και με τη σειρά τους θα φτιάξουν τις αναφορές των απαιτούμενων τάσεων για τη λειτουργία της μηχανής.

Το μοντέλο της μηχανής που έχει δημιουργηθεί επιτρέπει την απευθείας μέτρηση των συνιστωσών  $\Psi_\alpha$ ,  $\Psi_\beta$  του πεδίου. Αυτό προφανώς είναι κάτι ιδανικό και μπορεί να πραγματοποιηθεί μόνο σε περιβάλλον προσομοίωσης, καθώς σε πρακτικό επίπεδο δεν υπάρχει αντίστοιχο όργανο μέτρησης της ροής. Με τη βοήθεια της απευθείας μέτρησης, το στρεφόμενο πεδίο dq είναι επιθυμητό να προσανατολιστεί στον άξονα d, δηλαδή το διάνυσμα της ροής στο σύστημα αβ να “πέφτει” όλη πάνω στον (πραγματικό) άξονα d. Αυτό

θα έχει ως αποτέλεσμα να υπάρχει μόνο η συνιστώσα  $\Psi_d$ , και αυτό είναι ωφέλιμο διότι θα χρησιμοποιείται μόνο αυτή η μεταβλητή για να ρυθμιστεί η ροπή της μηχανής. Εξηγείται και μέσω εξισώσεων ως εξής:

$$P_e = -\frac{3}{2K^2} \operatorname{Re} \{j\omega_r \Psi_R i_R^*\}$$

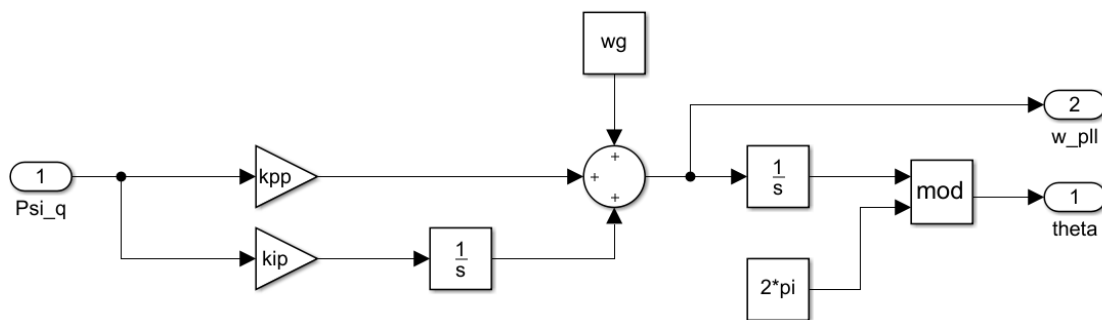
Με μετασχηματισμό σε dq πλαίσιο και με διαίρεση με τη μηχανική ταχύτητα, προκύπτει η εξίσωση της ροπής:

$$\tau_e = \frac{3n_p}{2K^2} (\psi_d i_q - \psi_q i_d).$$

Μηδενίζοντας το  $\Psi_q$ , φαίνεται ότι θα απλοποιούσε σημαντικά τη δημιουργία ροπής, καθώς αυτή θα καθορίζεται μόνο από το  $i_q$  (εφόσον έτσι και αλλιώς δεν γίνεται να ελεγχθεί άμεσα το  $\Psi_d$ ). Το  $i_d$  πλέον θεωρείται το ρεύμα μαγνήτισης, και σε κάθε περίπτωση θα πρέπει να λαμβάνει μια σταθερή τιμή προκειμένου να μπορεί να στρέφεται η μηχανή.

Το PLL ουσιαστικά είναι ο συνδυασμός του μετασχηματισμού  $\alpha\beta \rightarrow dq$  με τον ανιχνευτή φάσης. Η συνιστώσα  $\Psi_q$  που πρέπει να μηδενιστεί (να προσανατολιστεί πάνω της το πλαίσιο) εισάγεται στον PI του PLL, οπότε ο ελεγκτής προσπαθεί μονίμως να τη μηδενίσει. Αυτό το επιτυγχάνει παράγοντας επαναλαμβανόμενα μια γωνία  $\theta_1$  η οποία προσπαθεί να πετυχαίνει πάντα την τιμή της γωνίας του  $\Psi^s$  έτσι ώστε να μετακινεί τον άξονα d πάνω στο διάνυσμα. Εφόσον ο ελεγκτής είναι αρκετά γρήγορος, η γωνία  $\theta_1$  πρέπει σχεδόν πάντα να ταυτίζεται με την πραγματική γωνία του  $\Psi^s$ .

Τα block diagrams του Phase Detector φαίνονται παρακάτω:



Εφόσον ο επιθυμητός χρόνος ανόδου του ρεύματος θα χρειαστεί να είναι 1ms (δηλαδή  $\omega_c = 2200\text{Hz}$ ) και το PLL, όπως αναφέρεται και στο βιβλίο, πρέπει να είναι τουλάχιστον κατά μία τάξη αργότερο από τον ελεγκτή ρεύματος (συγκεκριμένα, αναφέρεται ότι το bandwidth του PLL συνηθίζεται να είναι κάποιες δεκάδες ή εκατοντάδες Hertz, σε αντίθεση με τον ελεγκτή ρεύματος που είναι γύρω στα 2200 Hertz), το  $\omega_c$  επιλέγεται ίσο με:

- $\omega_c = 100\text{Hz}$

Το  $\Psi_{\text{hat}}$ , δηλαδή η εκτιμώμενη επιθυμητή τιμή της ροής, από μέτρηση από προηγούμενη προσομοίωση σε πλήρες φορτίο τέθηκε ως:

- $\Psi_{\text{hat}} = 0.65 \text{ Wb}$

Οι τιμές των κερδών υπολογίσθηκαν από τις έτοιμες εξισώσεις ως εξής:

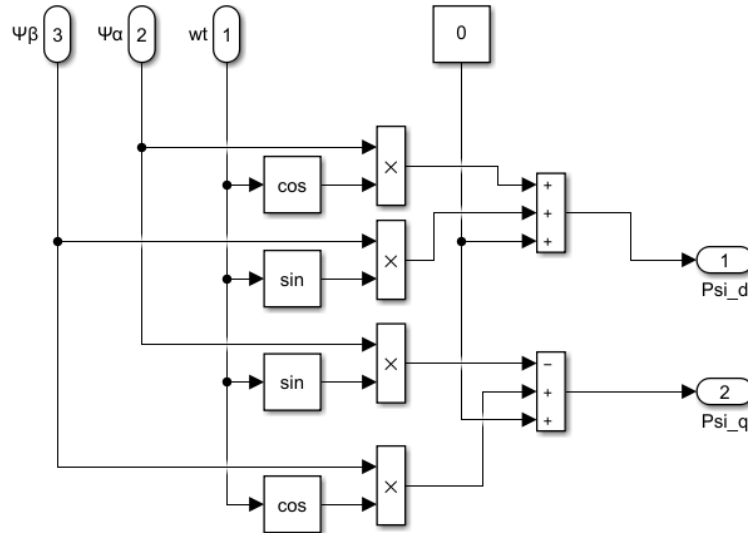
- $k_{pp} = 2 * \omega_c / \Psi_{\text{hat}}$

- $k_{ip} = ap^2 / \Psi_{hat}$

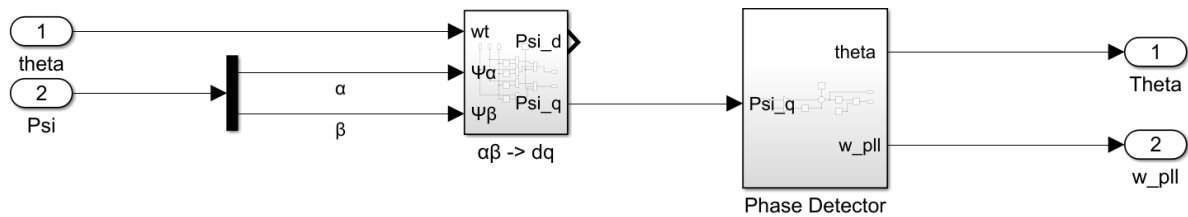
Η εκτίμηση της γωνιακής ταχύτητας  $\omega_g$  τέθηκε ίση με την αναμενόμενη του δικτύου, δηλαδή:

- $\omega_g = 100\pi \text{ rad/s}$

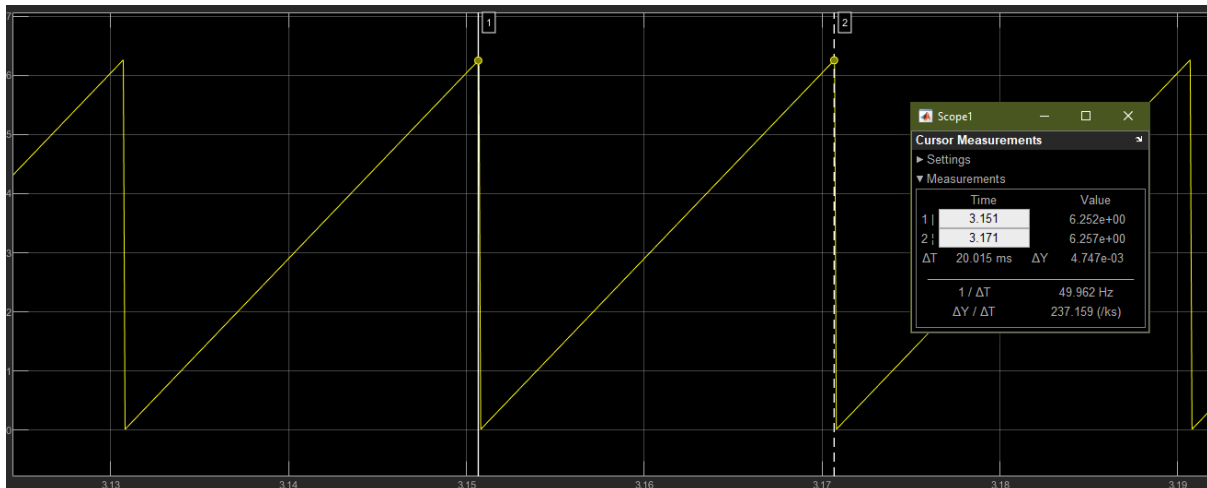
Ο μετασχηματισμός σε dq συντεταγμένες, με τη βοήθεια του γνωστού πίνακα Park, γίνεται ως εξής:



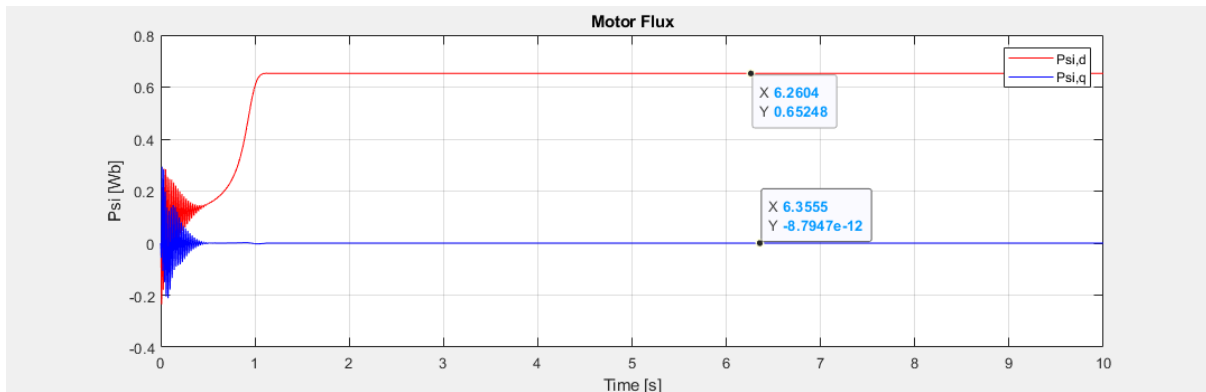
Και το συνολικό block του PLL:



Και τελικά το αποτέλεσμα της παραγόμενης γωνίας:

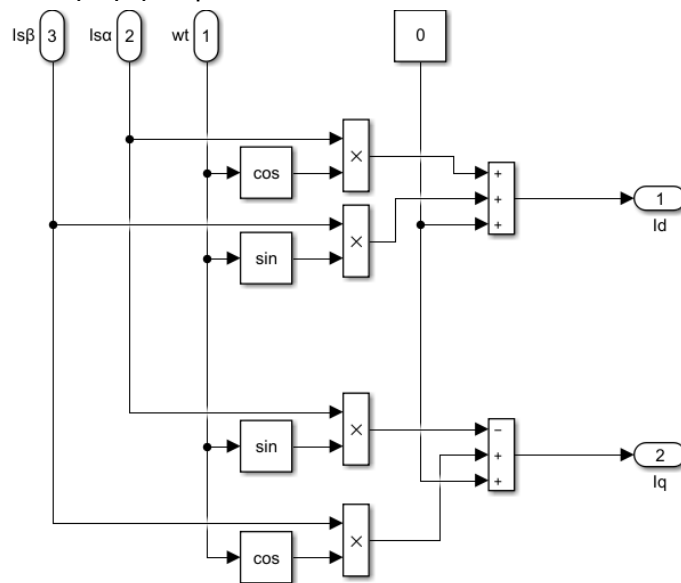


Παρατηρείται ότι η περίοδος της παραγόμενης γωνίας στην μόνιμη κατάσταση ταυτίζεται με την περίοδο της τροφοδοσίας. Επομένως, η ανίχνευση φάσης δουλεύει σωστά. Ελέγχεται και η ροή:

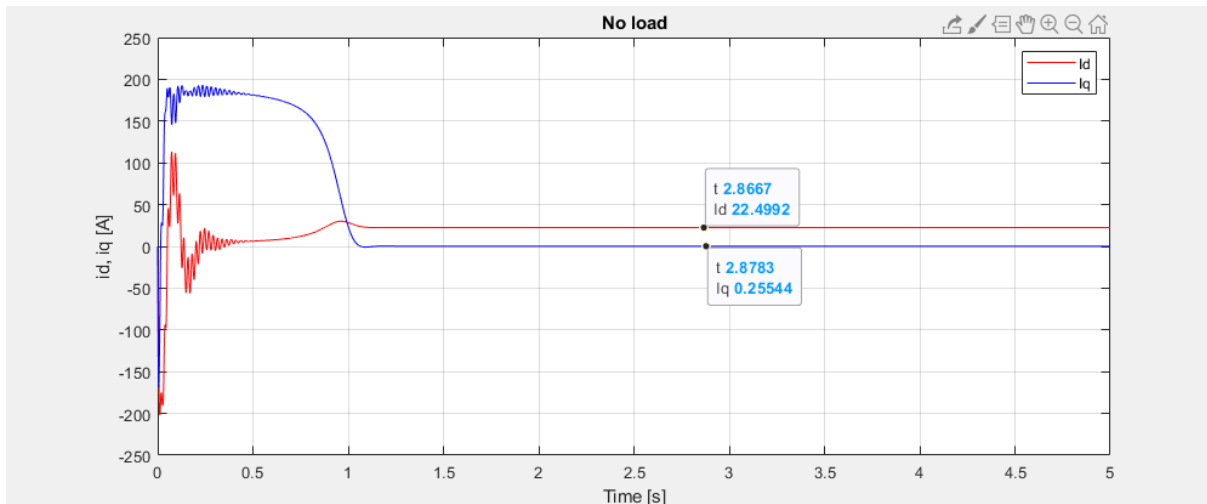


Όπως φαίνεται, η συνιστώσα  $\Psi_q$  επιτυχώς μηδενίζεται στην μόνιμη κατάσταση, που σημαίνει ότι επιτεύχθηκε τέλειος προσανατολισμός πεδίου. Η  $\Psi_d$  λαμβάνει την τιμή της μόνιμης κατάστασης εν κενώ φορτίο.

Ο επόμενος στόχος είναι να μετασχηματιστούν τα ρεύματα στο πεδίο dq, προσανατολισμένα χάρη στη γωνία του PLL. **Απευθείας από την μηχανή λαμβάνεται απευθείας και η μέτρηση του ρεύματος (το οποίο μπορεί να μετρηθεί με ευκολία και στην πραγματική ζωή).** Επομένως, λαμβάνονται και περνώνται στο ίδιο ακριβώς block μετασχηματισμού  $\alpha\beta \rightarrow dq$  που χρησιμοποιήθηκε και για τη ροή, και ως είσοδο φάσης - προσανατολισμού χρησιμοποιείται η γωνία παραγόμενη από το PLL:



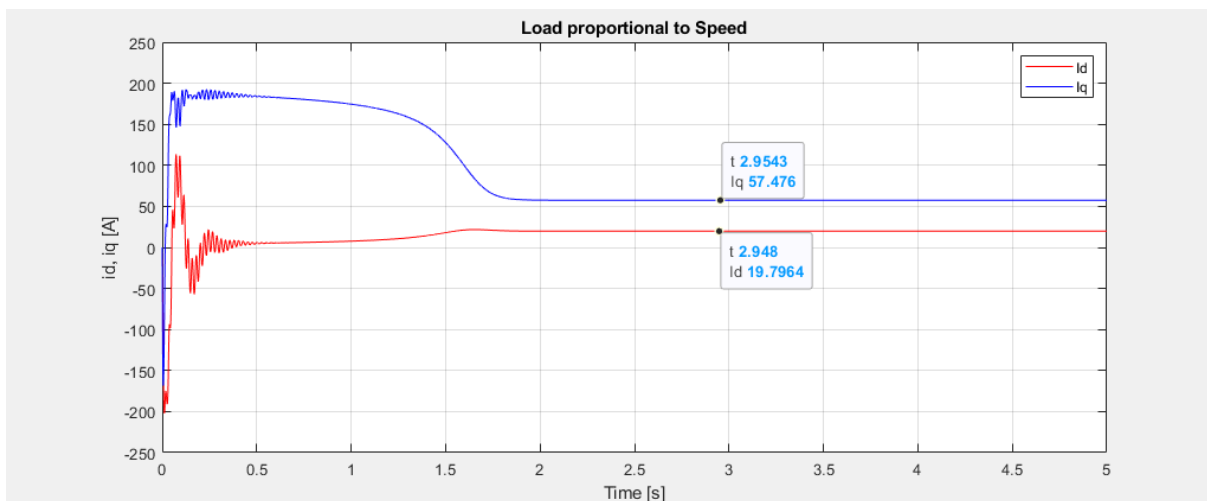
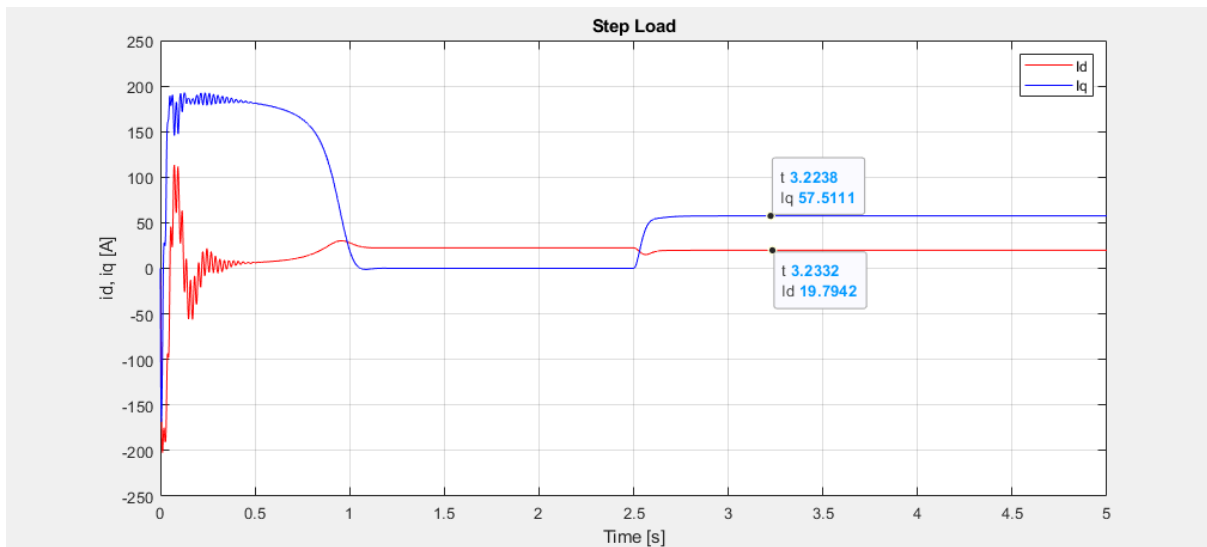
Έπειτα ελέγχονται και τα αποτελέσματα του μετασχηματισμού του ρεύματος:  
**Περίπτωση κενού φορτίου:**



Επιτυχημένος φαίνεται να είναι και ο μετασχηματισμός των ρευμάτων. Η τιμή του  $i_q$  είναι αναμενόμενη, πρακτικά μηδενική, καθώς δεν υπάρχει φορτίο και επομένως δεν υπάρχει ανάπτυξη ροπής. Η τιμή του μαγνητίζοντος ρεύματος  $i_d$  είναι επίσης αναμενόμενη, καθώς στον τέλει προσανατολισμό πεδίου δίδεται ως εξής:

- $i_d = \psi_{\text{hat}} / L_M = 22.4 \text{ A}$

**Περίπτωση πλήρους φορτίου** (step στα 2.5sec και μετά φορτίο ανάλογο της ταχύτητας):

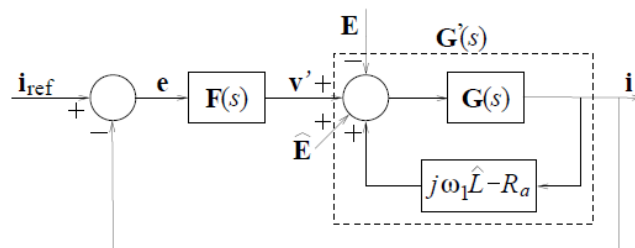


Το ρεύμα  $I_d$  πέφτει ελαφρώς σε σχέση με το κενό φορτίο, διότι το  $\Psi_d$  ελαττώνεται και επομένως το πηλίκο  $I_d = \Psi_d / L_m$  ελαττώνεται. Η τιμή του  $I_q$  στη συνέχεια μπορεί να προσδιορισθεί εύκολα και να επαληθευθεί μέσω της προσομοίωσης, χρησιμοποιώντας τον τύπο του μέτρου του ρεύματος:

- $I_q = \sqrt{I^2 - I_d^2} = 57.5 \text{ A (περίπου)}$

Επομένως και πάλι επαληθεύεται η ορθή λειτουργία του PLL και του μετασχηματισμού ρευμάτων. Προφανώς, εφόσον δεν ανατροφοδοτείται το μετασχηματισμένο ρεύμα στην τροφοδοσία της μηχανής (προς το παρόν), τα υπόλοιπα αποτελέσματα της μηχανής (στροφές, ροπή κλπ.) μένουν ως έχουν από την απλή προσομοίωση του μοντέλου της μηχανής επαγωγής.

2. Στη συνέχεια, πρέπει να προστεθεί ο ελεγκτής ρεύματος. Θα χτιστούν 2 ελεγκτές, ένας για κάθε συνιστώσα τάσης. Κάθε ελεγκτής θα έχει είσοδο και τις 2 συνιστώσες ρεύματος, την αναφορά κάθε συνιστώσας ρεύματος και την παραγόμενη γωνιακή ταχύτητα από το PLL. Η βασική περιγραφή του κάθε ελεγκτή αποτυπώνεται από το παρακάτω διάγραμμα:



Το  $F(s)$  αναπαριστά τον PI ελεγκτή του ρεύματος, και ο υπόλοιπος κλάδος ουσιαστικά αναπαριστά μια ανατροφοδότηση από μέσα από την μηχανή με κάποιους πρόσθετους κλάδους. Πιο συγκεκριμένα, ο κλάδος ανατροφοδότησης  $j\omega_1 L$  επιτρέπει την απόζευξη της ηλεκτρικής εξίσωσης:

$$L \frac{di}{dt} = v - (R + j\omega_1 L)i - \underbrace{jEe^{j\bar{\theta}}}_{E}$$

Η απόζευξη αποτελεί πρώτο και πολύ σημαντικό βήμα για την επεξεργασία του ρεύματος. Η σύμπλεξη φαίνεται στις παρακάτω εξισώσεις:

$$\begin{aligned} L \frac{di_d}{dt} &= v_d - Ri_d + \omega_1 Li_q - E_d \\ L \frac{di_q}{dt} &= v_q - Ri_q - \omega_1 Li_d - E_q. \end{aligned}$$

Το πρόβλημα είναι ότι, εφόσον οι 2 εξισώσεις είναι αναμεταξύ τους “μπλεγμένες” στο πεδίο dq, η τροποποίηση της μίας συνιστώσας ρεύματος φέρει αλλαγές και στην άλλη συνιστώσα. Επομένως, μέσω της απόζευξης (με τον τρόπο που αναφέρθηκε μόλις παραπάνω), επιτρέπεται η επεξεργασία καθεμιάς συνιστώσας ξεχωριστά. Αυτό είναι εξαιρετικά σημαντικό διότι, στην περίπτωση που έχει επιτευχθεί ο τέλει προσανατολισμός πεδίου, άλλο ρόλο έχει η συνιστώσα  $i_d$  (μαγνητίζει την μηχανή), και άλλο η συνιστώσα  $i_q$  (παράγει την ροπή της μηχανής), ρόλοι οι οποίοι είναι απαραίτητο να είναι πλήρως διακριτοί μεταξύ τους, αλλιώς δεν έχει νόημα να προσπαθήσει κανείς να ελέγξει την μηχανή. Ο όρος  $\omega_1$  αναφέρεται στη ταχύτητα συγχρονισμού του στρεφόμενου πεδίου dq, δηλαδή την παραγόμενη από το PLL γωνιακή

ταχύτητα. Λόγω του πολλαπλασιασμού με το  $j$  και εφόσον στην προσομοίωση ουσιαστικά δεν γίνεται να προστεθούν μιγαδικοί αριθμοί, η απόζευξη του  $I_d$  θα γίνει με τη βοήθεια του  $I_q$  και αντίστροφα (θα φανεί αυτό καλύτερα στο block της προσομοίωσης). Χάρη στην απόζευξη, είναι εφικτό να επεξεργάζονται οι συνιστώσες του ρεύματος ξεχωριστά. Η ενεργός αντίδραση  $R_a$  επιταχύνει τον έλεγχο το του ρεύματος (όμοια με την περίπτωση της DC μηχανής). Ο όρος  $E_{\hat{d}}$  είναι ουσιαστικά μια εκτίμηση της αντι-ηλεκτρεγερτικής δύναμης που προκαλείται από τη μηχανή. Στην περίπτωση της DC μηχανής υπήρχε ακριβή τιμή της ροής και επομένως, με κατάλληλο πολλαπλασιασμό με την ταχύτητα, ήταν εφικτό να αναιρεθεί πλήρως η επίδρασή της. Η εκτίμηση τώρα γίνεται ως εξής:

$$\hat{E} = j\omega_1 \hat{\Psi}_R.$$

Επομένως, για τη συνιστώσα  $V_d$  της τάσης θα χρησιμοποιηθεί εκτίμηση της συνιστώσας  $\Psi_q$ , και για τη  $V_q$  της  $\Psi_d$  (αντίθετες συνιστώσες d-q λόγω του πολλαπλασιασμού με το  $j$ ). Εφόσον έχει γίνει τέλειος προσανατολισμός πεδίου, η  $\Psi_q$  θα ορισθεί ως 0 και η  $\Psi_d$  ως:

- $\Psi_{d\_hat} = 0.65 \text{ Wb}$ ,

δηλαδή η τιμή της στο πλήρες φορτίο. Το αναλογικό και ολοκληρωτικό κέρδος ορίζονται από τις γνωστές εξισώσεις:

- $k_{cp} = ac * L\sigma$
- $k_{ci} = ac * (R + R_a)$

Το  $ac$  επιλέχθηκε καταλλήλως ώστε να είναι μια τουλάχιστον τάξη ταχύτερο από το PLL αλλά και να επιτυγχάνει χρόνο ανόδου 1ms, επομένως επιλέχθηκε:

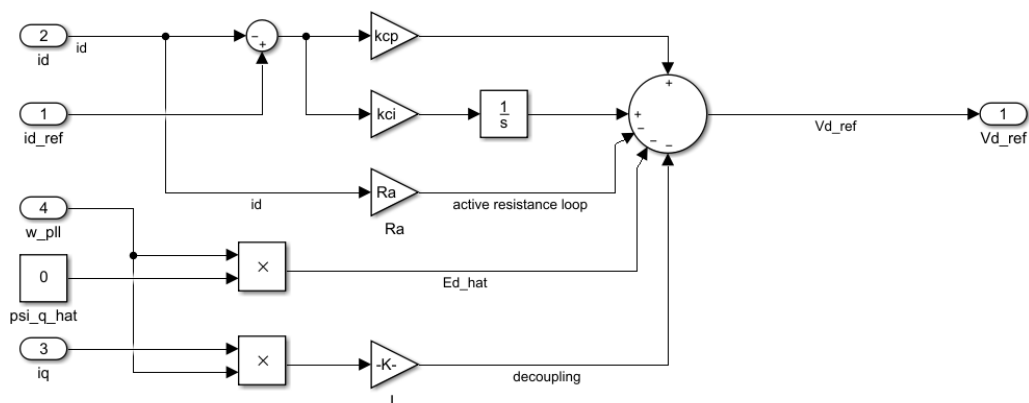
- $ac = 2200 \text{ Hz}$

Οι αναφορές του ρεύματος ορίστηκαν όπως και πριν από:

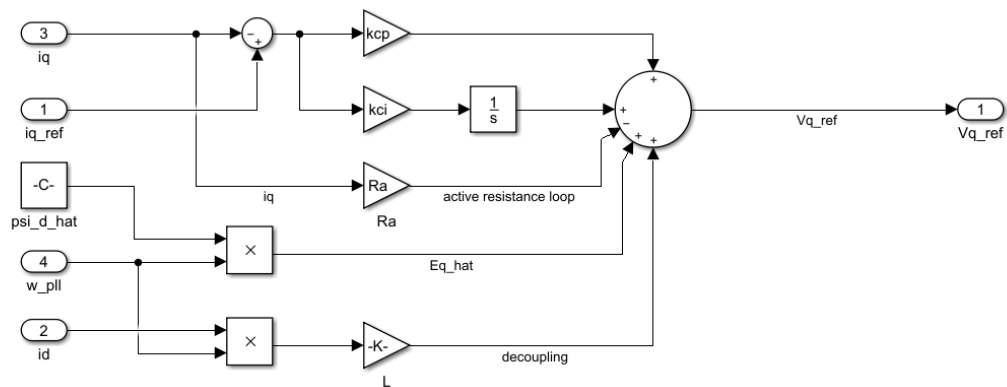
- $I_{d\_ref} = \Psi_{d\_hat} / L_M = 22.4 \text{ A}$
- $I_{q\_ref} = \sqrt{I^2 - I_d^2} = 56.7 \text{ A}$

Προφανώς υπάρχουν μικρές αποκλίσεις σε σχέση με πριν. Αυτό οφείλεται κατά βάση στη διαφοροποίηση του  $\Psi_{d\_hat}$  όταν υπάρχει πλήρες φορτίο. Παρακάτω φαίνεται πλέον η ολοκληρωμένη υλοποίηση του κάθε ελεγκτή:

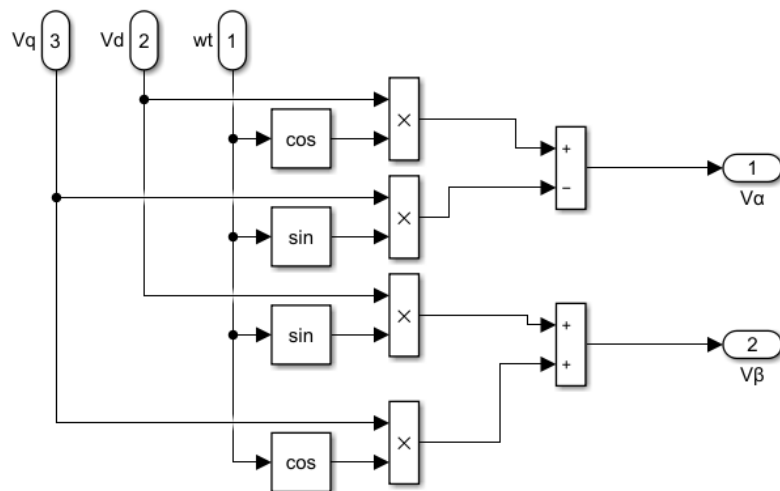
#### Id control:



#### Iq control:



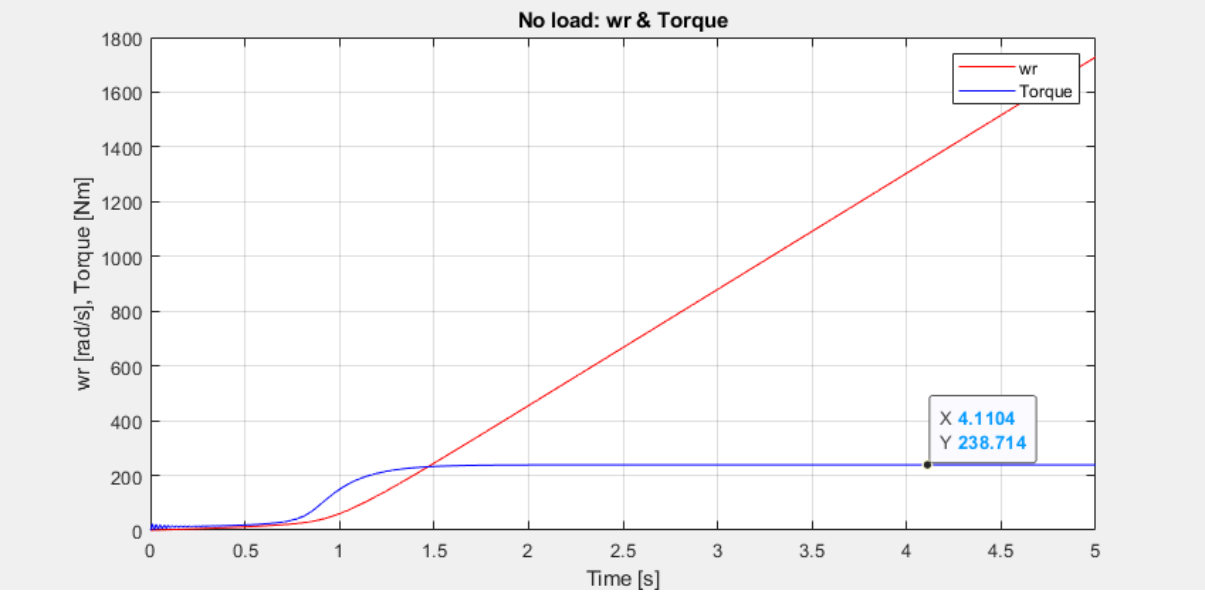
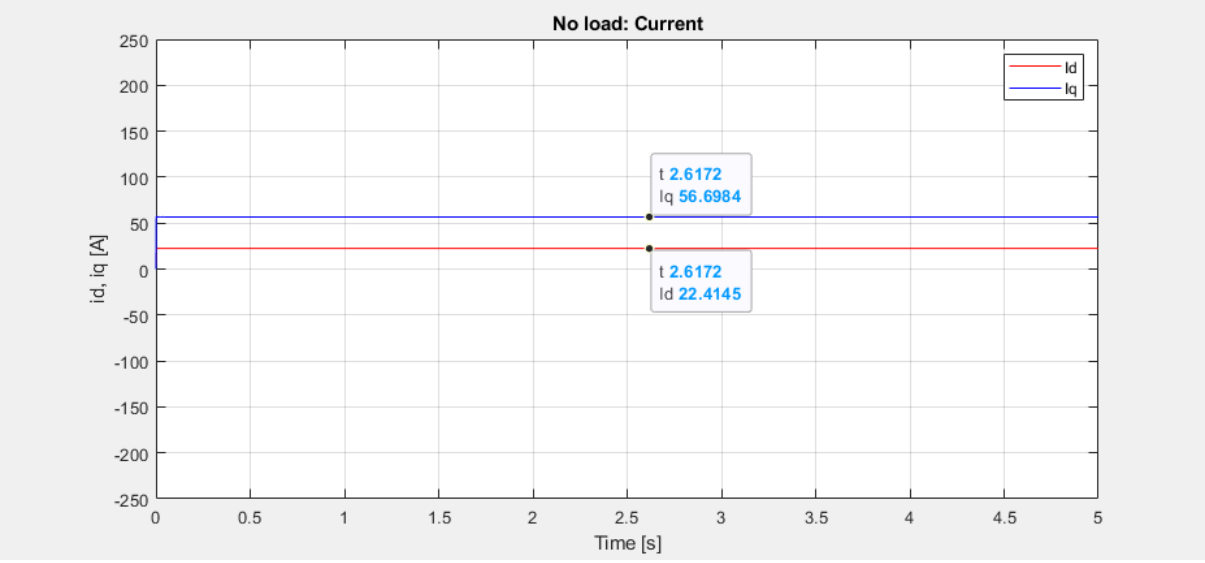
Έτσι δημιουργούνται οι επιθυμητές αναφορές της τάσης. Για να ολοκληρωθεί η τροφοδοσία, εφόσον δημιουργήθηκαν αυτές οι τάσεις στο πεδίο dq, πρέπει να μετασχηματιστούν στο πεδίο αβ και να τροφοδοτήσουν τη μηχανή. Για να επιτευχθεί αυτό, χρησιμοποιείται ο γνωστός πίνακα του αντίστροφου μετασχηματισμού Park από dq → αβ, και προφανώς πάλι χρησιμοποιείται η γωνία συγχρονισμού από το PLL. Η υλοποίηση φαίνεται παρακάτω:



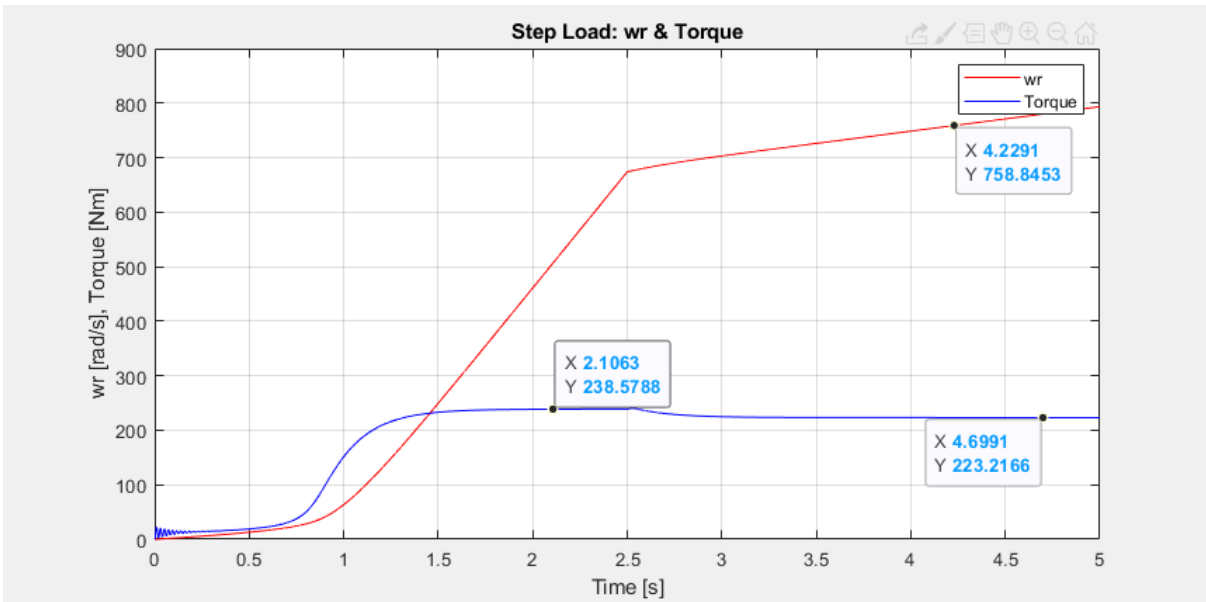
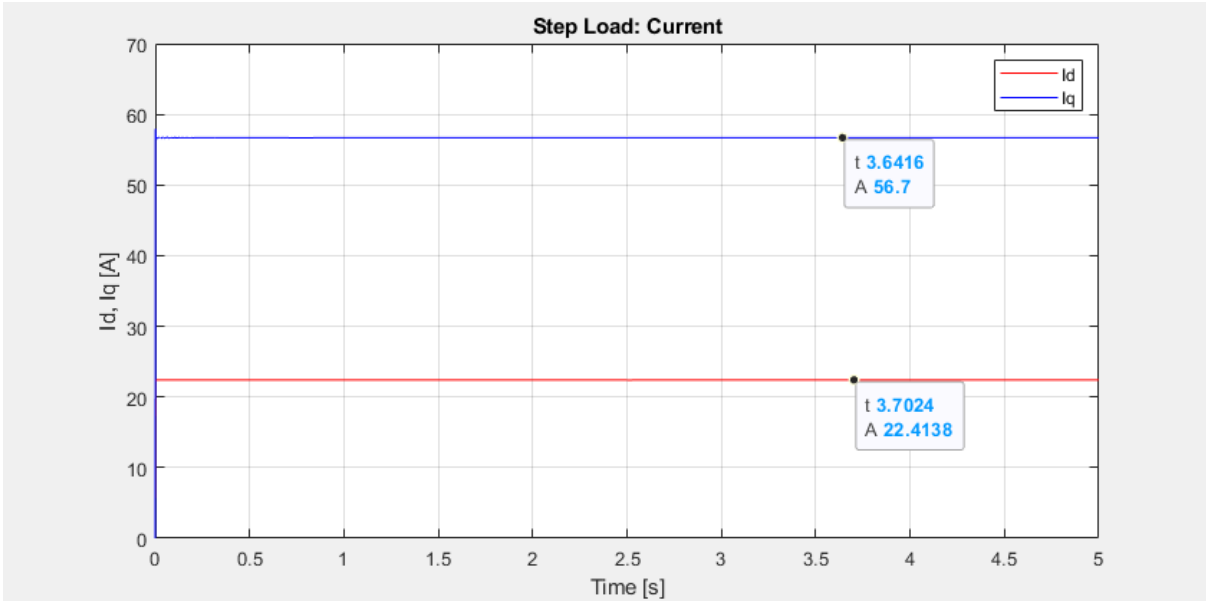
Προφανώς οι τάσεις  $V_\alpha$ ,  $V_\beta$  συνδέονται με τη σειρά τους απευθείας στη μηχανή. Εφόσον δεν υπάρχει κορεσμός των τάσεων ωστόσο, δε γίνεται να αποφανθεί κανείς ότι ο έλεγχος είναι ολοκληρωμένος. Επομένως, η μηχανή πετυχαίνει (σχετικά) λογικά αποτελέσματα μόνο στις περιπτώσεις όπου έχει φορτίο ανάλογο της ταχύτητας. Στην περίπτωση κενού φορτίου (και στην περίπτωση step load, έως ότου συνδεθεί το φορτίο), εφόσον προστάζεται από τον ελεγκτή να δημιουργείται ονομαστικό ρεύμα  $I_q$ , αυτό σημαίνει ότι χτίζεται και ονομαστική ροπή χωρίς περιορισμούς. Επομένως, οι στροφές αυξάνονται επ'άπειρον. Παρακάτω φαίνονται τα σχετικά αποτελέσματα:

**Περίπτωση κενού φορτίου:**

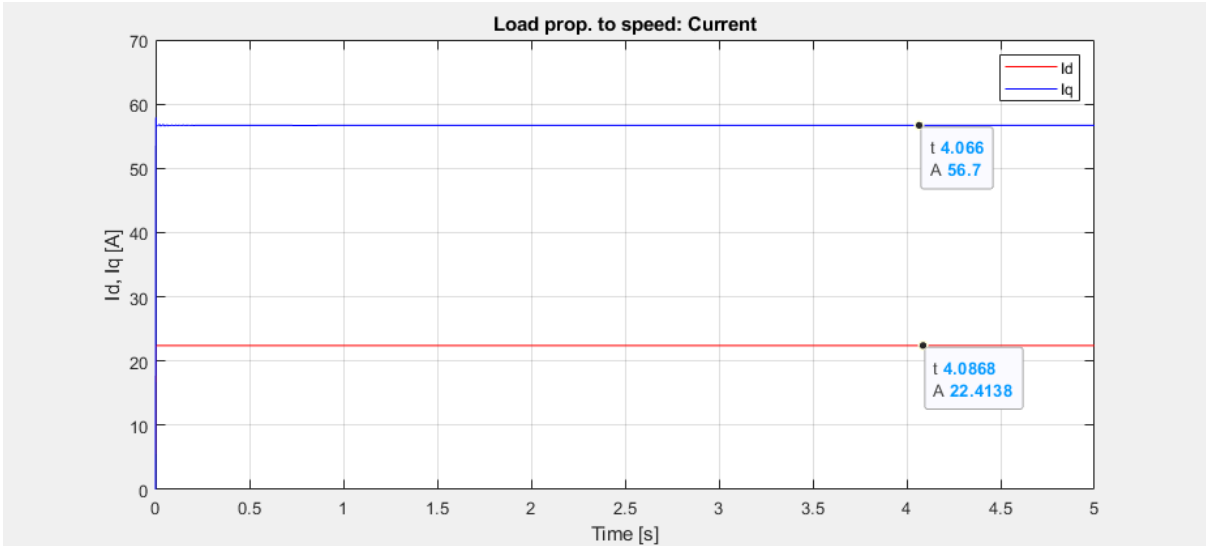


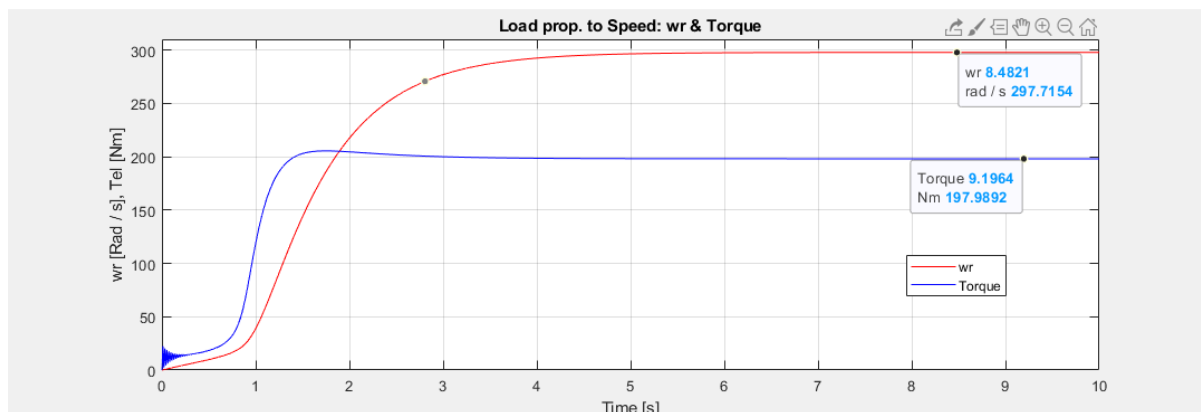


**Περίπτωση step load (στα 2.5sec):**



Περίπτωση φορτίου αναλόγου της ταχύτητας:



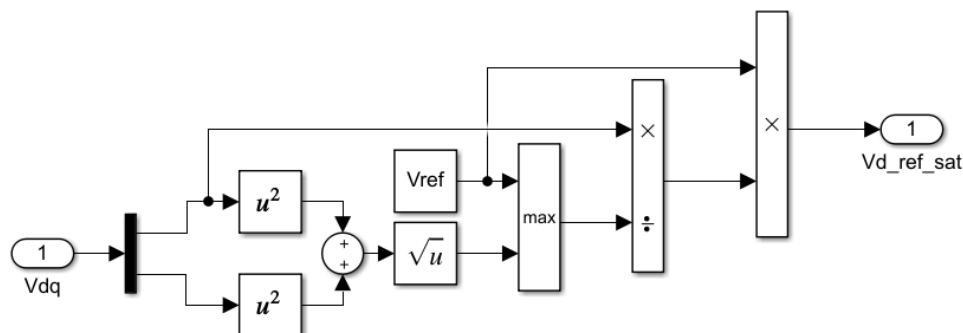


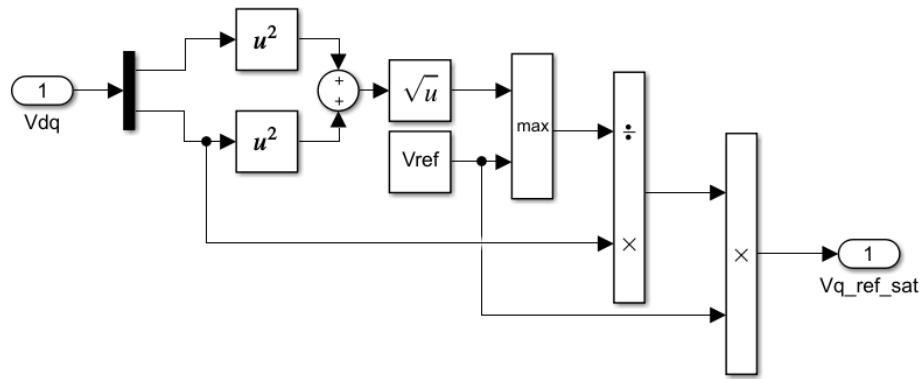
Η παραπάνω σύγκριση αποτελεί διόρθωση. Πλέον επιτυγχάνονται οι επιθυμητές στροφές πλήρους φορτίου (έγιναν μικρές διορθώσεις στις τιμές του ρεύματος και της ονομαστικής ροής). Σε κάθε περίπτωση, παρόλα αυτά, ο ελεγκτής ρεύματος φαίνεται να λειτουργεί άψογα καθώς πετυχαίνει επακριβώς τις τιμές που απαιτούνται και μάλιστα με εξαιρετικό rise time, το οποίο θα εξεταστεί περισσότερο στο επόμενο ερώτημα της άσκησης.

3. Το τελευταίο κομμάτι της άσκησης αφορά τον κορεσμό της παραγόμενης τάσης από τους ελεγκτές ρεύματος, αλλά και τη δημιουργία ενός κλάδου anti-windup που θα περιορίζει τη συσσώρευση ολοκληρωτικού σφάλματος, και εν συνεχεία θα “κόβει” τα overshoots τάσης. Σε αντίθεση με τον έλεγχο της μηχανής DC, τώρα ο κορεσμός δεν μπορεί να γίνει απλώς με το block κορεσμού και με τη γνωστή αφαίρεση μεταξύ κορεσμένης τιμής και παραγόμενης τιμής. Όπως δείχθηκε και στο εργαστήριο, η τάση αναφοράς δημιουργείται με βάση την εξίσωση:

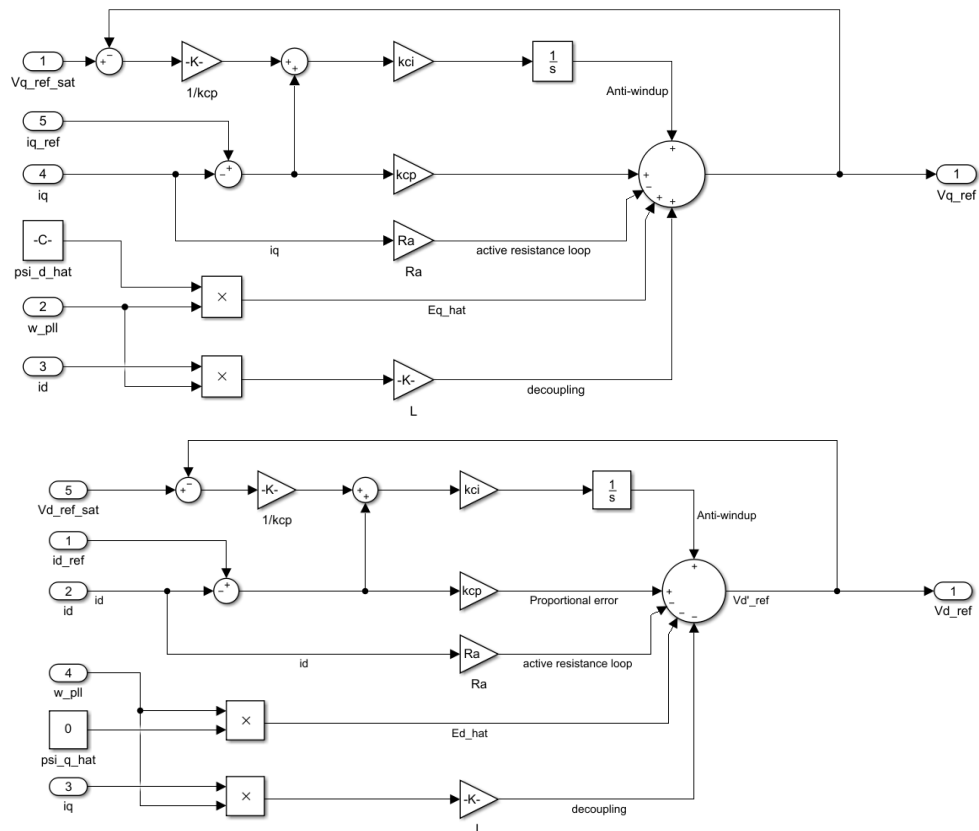
$$\bullet \quad V_{d,ref} = \frac{V_d}{\max\{\sqrt{V_d^2 + V_q^2}, V_n\}} * V_n,$$

Όπου  $V_{d,ref}$  η τελική παραγόμενη τάση,  $V_d$  και  $V_q$  οι τάσεις που παράγονται από τους ελεγκτές ρεύματος και  $V_n$  η ονομαστική τάση τροφοδοσίας. Η ίδια εξίσωση κατά πλήρη αντιστοιχία δίνει και την συνιστώσα  $q$  της τάσης. Αυτή η εξίσωση ουσιαστικά προστάζει την τάση να ελαττώνεται όποτε η παραγόμενη από τους ελεγκτές τάση ξεπερνάει την ονομαστική τιμή. Σε κάθε άλλη περίπτωση, Η τελική τάση είναι αυτή που παράγει ο ελεγκτής. Έτσι, η τελική παραγόμενη τάση δεν κινδυνεύει να ξεπεράσει την ονομαστική και επομένως προστατεύεται η μηχανή και περιορίζονται οι στροφές, καθώς πλέον θα πιάνουν “ταβάνι”. Το block που υλοποιεί την παραπάνω εξίσωση φαίνεται παρακάτω:

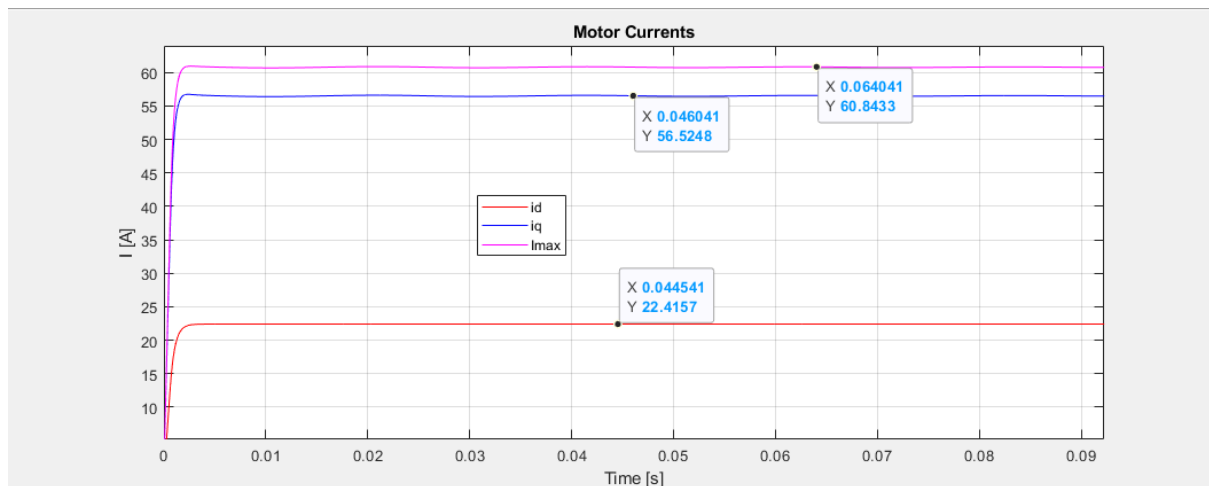




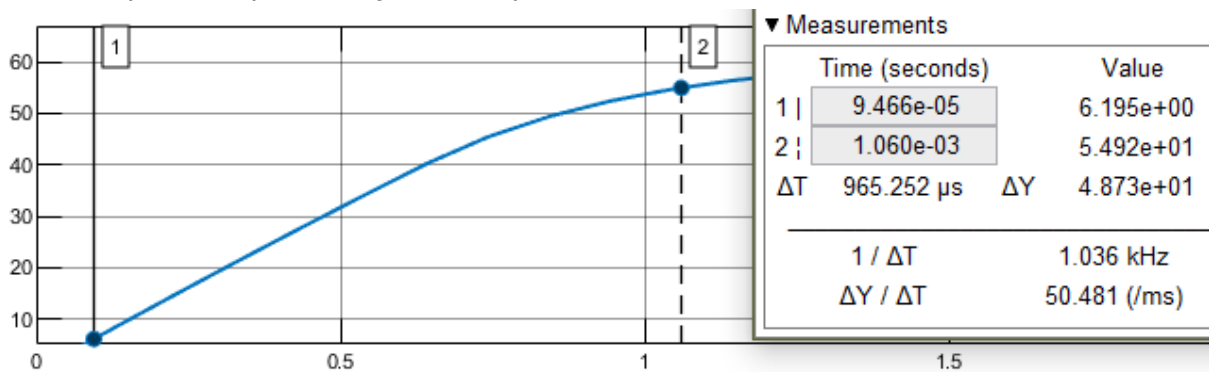
Προφανώς, η  $V_{ref}$  είναι η ονομαστική τάση. Στη συνέχεια, εφαρμόζεται και ο κλάδος anti-windup. Όπως και στη DC μηχανή, η διαφορά μεταξύ της τελικής τάσης αναφοράς και την τάση παραγόμενη από τον ελεγκτή περνιέται από τον ολοκληρωτικό όρο και αθροίζεται τελικά στο PLL. Προφανώς πρέπει να προηγηθεί διαίρεση με τον αναλογικό όρο (εφόσον υπάρχει ανατροφοδότηση τάσης), αλλά και άθροιση με το σφάλμα. Τα κέρδη παραμένουν ως έχουν, και το block διάγραμμα φαίνεται παρακάτω:



Παρακάτω ελέγχεται εάν επιτυγχάνεται το επιθυμητό αποτέλεσμα από τον κλάδο antiwindup και saturation, δηλαδή να απαλειφθούν πλήρως οι υπερεντάσεις σε οποιαδήποτε συνιστώσα ρεύματος (δοκιμή σε κενό φορτίο):

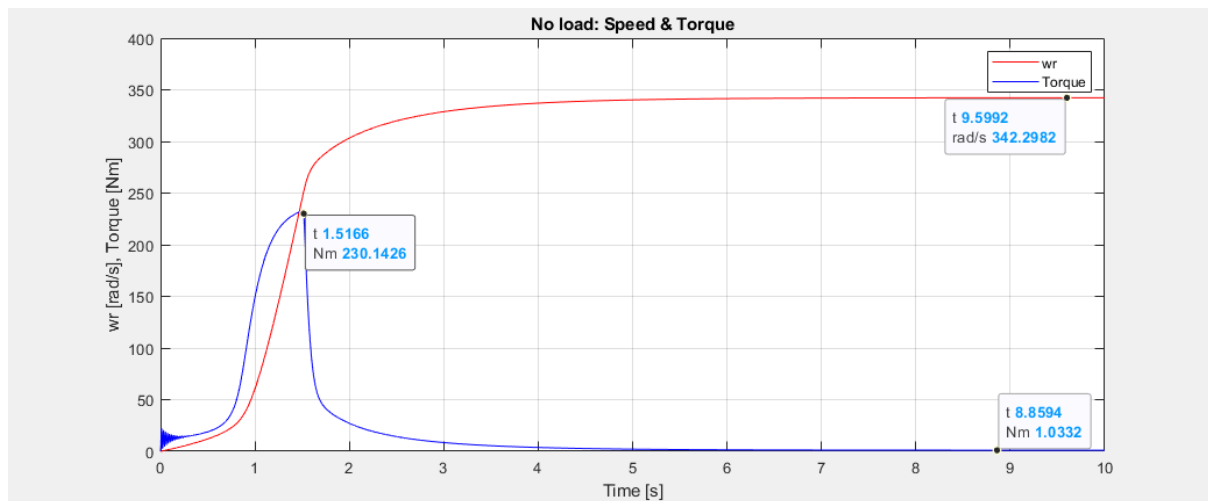


Επομένως, φαίνεται πως η λειτουργία είναι σωστή. Πλέον ήρθε η ώρα να ελεγχθεί αν επιτυγχάνεται το σωστό rise time του ρεύματος. Οι τάσεις που τροφοδοτούνται τώρα στη μηχανή είναι οι τελικές, οι οποίες παράγονται με τη βοήθεια της εξίσωσης και των blocks που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Η δοκιμή γίνεται σε κενό φορτίο:



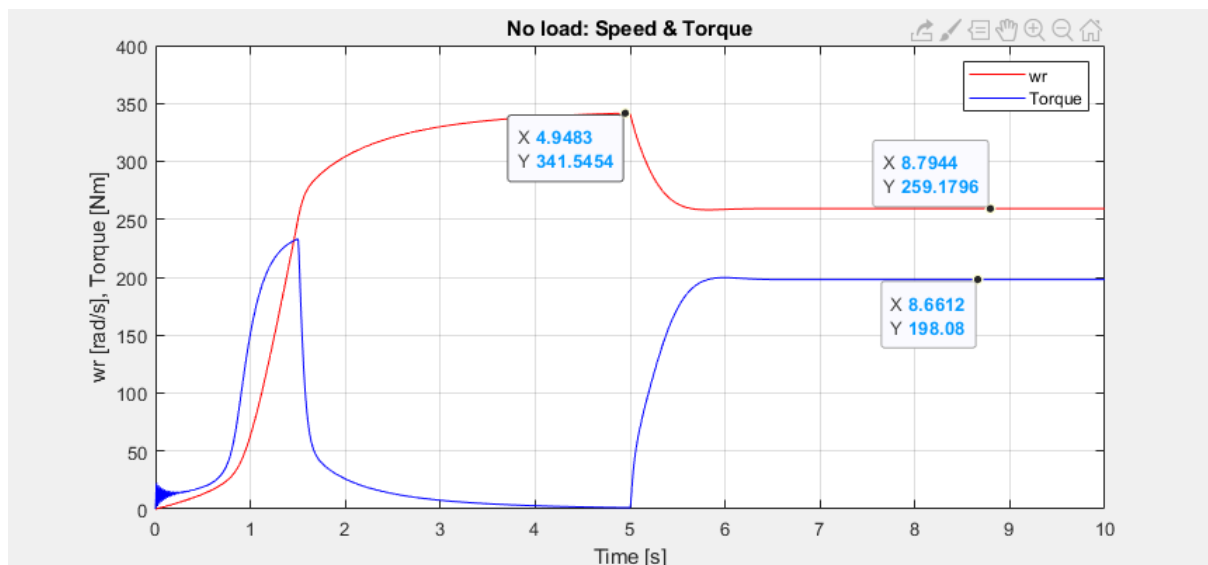
Όπως φαίνεται από το  $\Delta T$ , ο χρόνος είναι εξαιρετικά κοντά στο 1ms (διαφέρει λόγω μικρών αποκλίσεων στις μετρήσεις του ρεύματος), επομένως ο έλεγχος θεωρείται επιτυχημένος. Στη συνέχεια, πρέπει να συγκριθούν οι τιμές της ταχύτητας και της ροπής για διάφορα είδη φορτίου όπως έγινε στο 2ο ερώτημα. Παρακάτω φαίνονται οι αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις:

**Περίπτωση κενού φορτίου:**

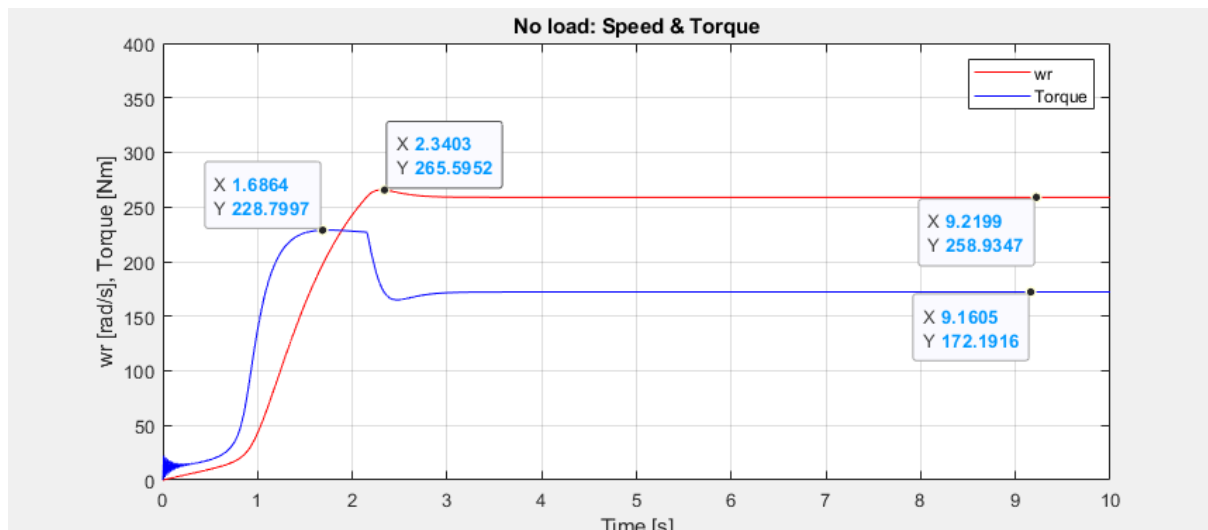


Παρατηρούμε ότι, όπως και στη DC μηχανή, η ταχύτητα του κενού φορτίου φτάνει περίπου τα 342 rad/s, δηλαδή τις στροφές που αντιστοιχούν σε περιπτώσεις κενού φορτίου όταν η μηχανή τροφοδοτείται με τάσεις συχνότητας 50Hz. Στη μηχανή DC η τιμή αυτή επαληθεύεται εύκολα μέσω της ηλεκτρικής και της μηχανικής εξίσωσης, ωστόσο λόγω της πολυπλοκότητας των εξισώσεων της επαγωγικής μηχανής η επαλήθευση παραλήφθηκε. Η ροπή, όπως είναι αναμενόμενο, φτάνει μια μέγιστη τιμή προκειμένου να παραχθούν οι στροφές και στη συνέχεια μηδενίζεται, καθώς δεν υπάρχει ροπή φορτίου που να αντιτίθεται στον ρότορα. Επομένως, δεν απαιτείται και παραγωγή ηλεκτρικής ροπής.

#### Περίπτωση Step Load (στα 5sec):

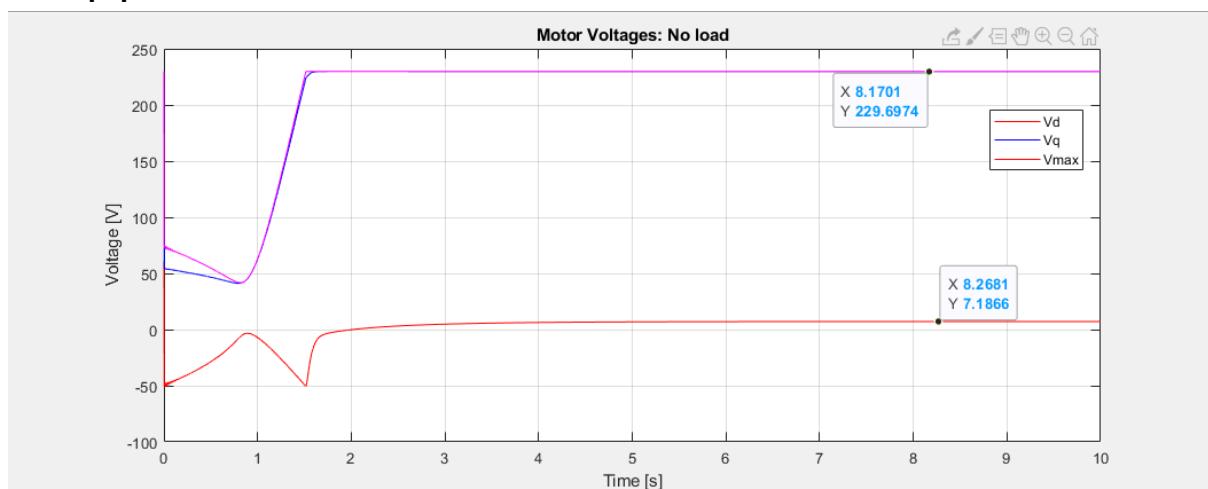


#### Περίπτωση φορτίου αναλόγου της ταχύτητας:

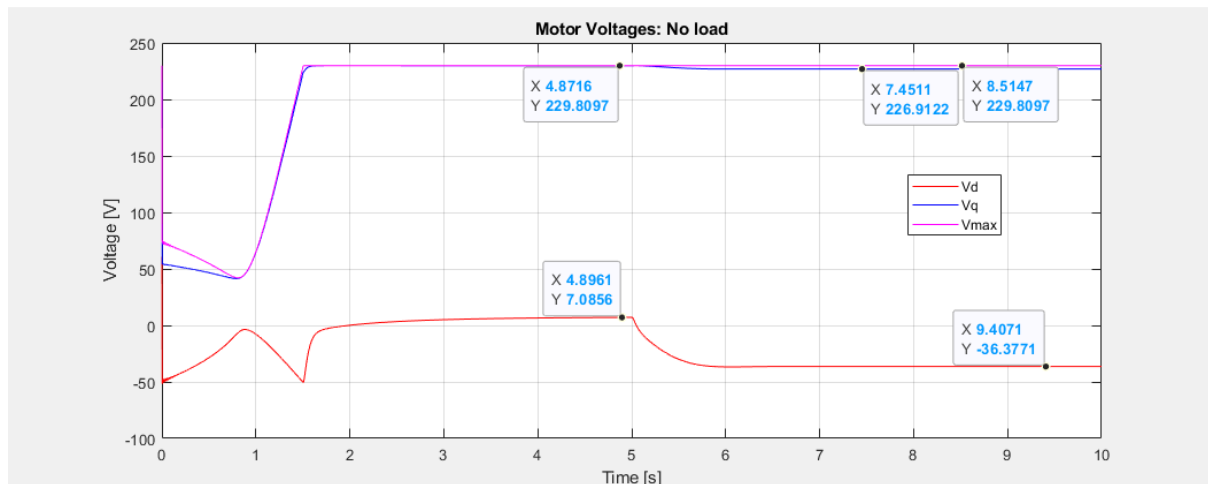


Φαίνεται ότι στις περιπτώσεις πλήρους φορτίου υπάρχει μια απόκλιση από τις αναμενόμενες τιμές ροπής και ταχύτητας. Αυτή η απόκλιση προέρχεται και από την απόκλιση των ρευμάτων από τις αναφορές που έχουν ορισθεί. Η απόκλιση αυτή μπορεί να οφείλεται στην λανθασμένη εκτίμηση της back-EMF (δεν υπάρχει ακριβής μέτρηση / τιμή της ροής στην εκτίμηση της αντι-ΗΕΔ), αλλά και στη διαφορετική συμπεριφορά που μπορεί να έχει η μηχανή επαγωγής με εφαρμοσμένο έλεγχο σε σχέση με τον DC κινητήρα. Ωστόσο, το rise time του ρεύματος είναι το επιθυμητό σε κάθε περίπτωση, και είναι εμφανές ότι δεν υπάρχουν πουθενά σημαντικά overshoots ούτε στα ρεύματα, ούτε στην ροπή και ούτε στις στροφές. Πρέπει σε κάθε περίπτωση να τονιστεί ότι δεν υπάρχει άμεσος έλεγχος των στροφών (λείπει ο ελεγκτής ταχύτητα), επομένως είναι αναμενόμενο να υπάρχουν αποκλίσεις από τις επιθυμητές τιμές των στροφών. Παρακάτω φαίνονται και οι γραφικές παραστάσεις των συνιστωσών των τάσεων  $V_d$ ,  $V_q$  και της συνισταμένης  $V_{max}$  για όλες τις περιπτώσεις φορτίου:

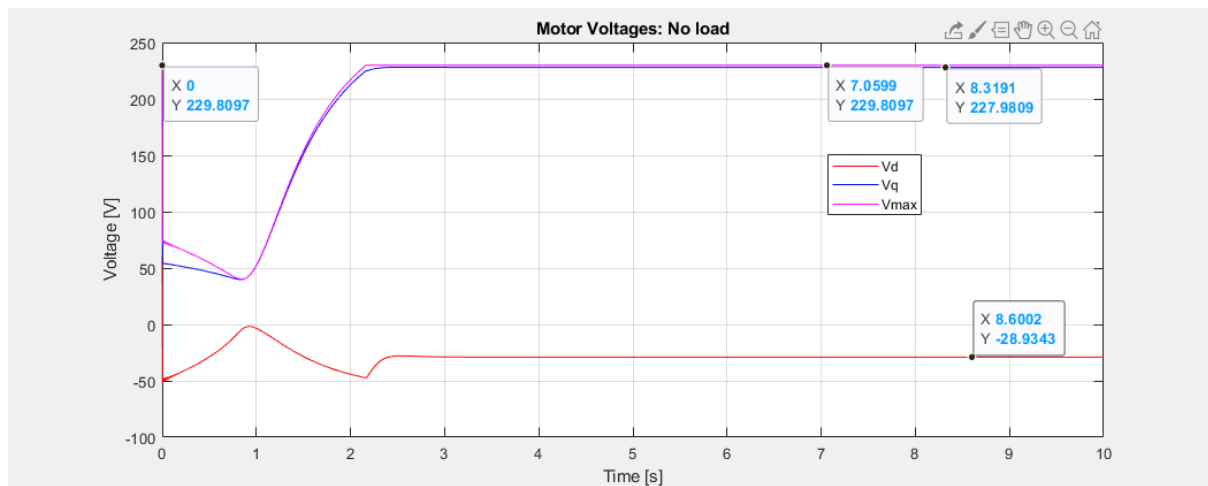
#### Κενό φορτίο:



### Step Load:



### Load proportional to speed:



Φαίνεται ότι σε κάθε περίπτωση φορτίου, η τάση περιορίζεται στην ονομαστική τιμή της (περίπου 230V). Επομένως, ο δυναμικός κορεσμός της δουλεύει ορθά, καθώς ο ρόλος του είναι να περιορίζει και να ορίζει κατάλληλα την τάση εντός των ορίων της ονομαστικής τιμής της.

ΤΕΛΟΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ