

Εργασία Προσομοίωσης 2:

Μοντελοποίηση και εκκίνηση στο δίκτυο μηχανής επαγωγής

Ονοματεπώνυμο: 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.

Ζητούμενο 1

Αρχικά, το ισοδύναμο T μοντέλο της μηχανής επαγωγής φαίνεται παρακάτω:

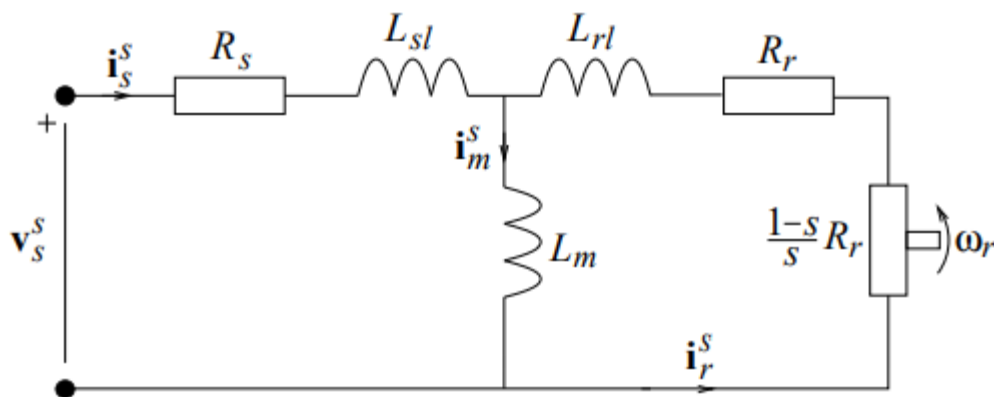


Figure 5.10. Steady-state T-equivalent circuit for the induction motor.

Να αναφερθεί πως στην πραγματικότητα στα τυλίγματα του στάτη και του δρομέα, έχουμε διαφορετικό αριθμό σπειρών, και συνήθως ισχύει $N_s > N_r$, επομένως οι τιμές για την αντίσταση και αυτεπαγωγή στάτη θα είναι ελαφρώς μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες του δρομέα.

Οι αντιστάσεις στάτη και δρομέα είναι της τάξης των 100άδων mΩ, έως και Ω, ώστε να μην έχουμε και μεγάλες απώλειες, επομένως επιλέγουμε $R_r = 0.2 \Omega$ και $R_s = 0.22 \Omega$, τιμές τις οποίες βλέπουμε σε αρκετές εφαρμογές. Συγκεκριμένα για την ισχύ της μηχανής που προκύπτει, παρατηρήθηκε πως οι αντιστάσεις ήταν στο εύρος τιμών $0.1 - 0.4 \Omega$. Αρχικά είχε επιλεγεί τιμή αντιστάσεων ίση με 0.4Ω , ωστόσο αφενός είναι μεγάλη σχετικά τιμή αυτή

για την ισχύ της παρούσας μηχανής, αφετέρου μέσω προσομοίωσης παρατηρήθηκε πως είχαμε καλύτερη απόκριση με μικρότερη τιμή αντίστασης.

Επιπλέον, οι αντιδράσεις δρομέα και στάτη X_{sl} και X_{rl} αντίστοιχα, είναι παραπλήσιες σε τιμή με τις αντιστάσεις δρομέα και στάτη.

Επομένως, για $L_{rl} = 0.002 \text{ H}$ και $L_{sl} = 0.0022 \text{ H}$ έχω μια ικανοποιητική σύγκλιση στις τιμές των αντιστάσεων (καθώς $X_{sl} = \omega_s \cdot L_{sl} = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0.002 = 0.63 \Omega$).

Η αυτεπαγωγή μαγνήτισης είναι μια τάξη μεγέθους ($\times 10$) μεγαλύτερη από τις αυτεπαγωγές στάτη και δρομέα, επομένως επιλέγω $L_m = 0.02 \text{ H}$.

Ωστόσο, η μελέτη της δυναμικής απόκρισης της μηχανής επαγωγής βασίζεται στο ισοδύναμο “αντίστροφο-Γ” μοντέλο, το οποίο φαίνεται παρακάτω:

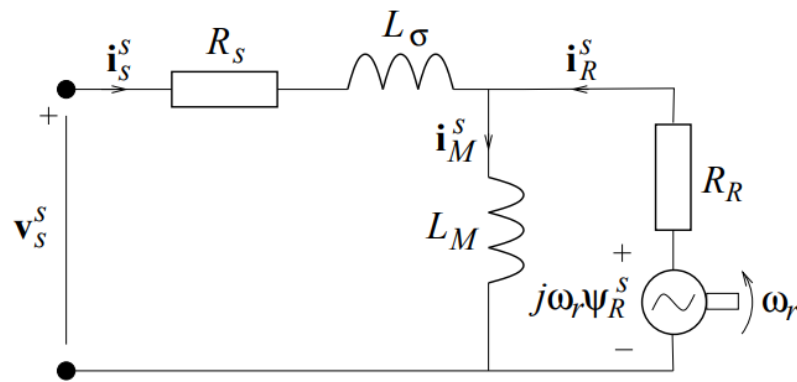


Figure 5.11. Dynamic inverse-Γ-equivalent circuit for the induction motor.

Για να καταλήξουμε στο παραπάνω μοντέλο, χρησιμοποιήθηκαν τα εξής:

$$L_{\sigma} \simeq L_{rl} + L_{sl} = 0.0042 \text{ H}$$

$$b = \frac{L_m}{L_m + L_{sl}} = 0.9091$$

$$L_M = b \cdot L_m = 0.0182 \text{ H}$$

$$R_R = b^2 \cdot R_r = 0.18182 \Omega$$

Όσον αφορά τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά της μηχανής, με συχνότητα $f_s = 50 \text{ Hz}$ αριθμό πόλων ίσο με 2, άρα $n_p = 1$, η σύγχρονη ταχύτητα θα είναι:

$$\omega_s = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_s}{n_p} = 314.159 \text{ rad/sec}$$

Ως τάση τροφοδοσίας επιλέγονται τα 230 V του δικτύου (άρα σε πλάτος $230\sqrt{2} \text{ V}$).

Επιπλέον, για τον μετασχηματισμό αβ, επιλέγω $K = 1$, ώστε να έχω ίδιο πλάτος και στο πεδίο αβ.

Με βάση τα παραπάνω στοιχεία, η μέγιστη ροπή θα δίνεται από τον τύπο:

$$\tau_e^{max} = \frac{3 \cdot n_p}{2K^2} \cdot \frac{|v_s|^2}{2 \cdot \omega_1 \cdot X_{\sigma}} = \frac{3 \cdot n_p}{4} \cdot \frac{|v_s|^2}{\omega_1^2 \cdot L_{\sigma}} = 191.425 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (5.70 [1])$$

Επιπλέον, η μέγιστη ολίσθηση δίνεται από τον τύπο:

$s_p = \frac{R_R}{X_g} = \frac{R_R}{\omega_s \cdot L_g} = 13.78\%$, τιμή αποδεκτή, καθώς όπως αναφέρεται στο βιβλίο [1], τυπικές τιμές μέγιστης ολίσθησης είναι μεταξύ 10% – 20% (σελίδα 154).

Όπως αναφέρεται στο βιβλίο [2] σελίδα 490, η ροπή ανατροπής (δηλαδή η μέγιστη ροπή) σε έναν τυπικό επαγωγικό κινητήρα είναι ίση με το 200 – 250% της ονομαστικής ροπής της μηχανής κατά την πλήρη φόρτιση.

Επιπλέον, στο βιβλίο [1] σελίδα 154, αναφέρεται πως για ολίσθηση ίση με το 20% της s_p , η ονομαστική ροπή είναι ίση με το 40% της μέγιστης ροπής, επομένως θεωρούμε ονομαστική ροπή ίση με $\tau_e = 40\% \cdot 191.425 \text{ Nm} = 76.57 \text{ Nm}$, και ολίσθηση ίση με $s = 0.2 \cdot 13.78\% = 2.756\%$.

Επομένως, για αυτή την τιμή ολίσθησης, μπορούμε να υπολογίσουμε την ονομαστική ηλεκτρική ταχύτητα δρομέα ως εξής:

$$\omega_r = \omega_s \cdot (1 - s) \Rightarrow \omega_r = 305.5 \text{ rad/sec}$$

Άρα, η ονομαστική μηχανική ταχύτητα του δρομέα, θα είναι ίση με: $\omega_m = \frac{\omega_r}{n_p} = 305.5 \text{ rad/sec}$.

Επομένως, η ισχύς της μηχανής θα είναι:

$$P_e = \tau_e \cdot \omega_m \simeq 23.4 \text{ kW}$$

Τέλος, επιλέγω ροπή αδρανείας ίση με $J = 0.2 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, καθώς για μια τυπική μηχανή επαγωγής μικρής ισχύος, η τιμή της ροπής αδράνειας δεν ξεπερνά το $\frac{1}{2} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$.

Στο ερώτημα (3) θα αναλυθεί περαιτέρω.

Ζητούμενο 2

Οι ηλεκτρικές εξισώσεις για το δυναμικό “ανάστροφο-Γ” ισοδύναμο μοντέλο μηχανής επαγωγής είναι οι εξής:

$$\frac{d\psi_R^s}{dt} = R_R \cdot i_s^s - \left(\frac{R_R}{L_M} - j\omega_r \right) \psi_R^s \quad (5.36 \text{ [1]})$$

$$\frac{di_s^s}{dt} = v_s^s - (R_R + R_s) \cdot i_s^s + \left(\frac{R_R}{L_M} - j\omega_r \right) \psi_R^s \quad (5.37 \text{ [1]})$$

Θέλουμε να εκφράσουμε τις παραπάνω εξισώσεις στο πεδίο αβ, επομένως εφαρμόζοντας μετασχηματισμό Laplace, και χρησιμοποιώντας τις παρακάτω 3 σχέσεις, γίνεται:

$$\begin{aligned} I_s^s &= I_{sa}^s + j \cdot I_{s\beta}^s \\ \Psi_R^s &= \Psi_{Ra}^s + j \cdot \Psi_{R\beta}^s \\ V_s^s &= V_{sa}^s + j \cdot V_{s\beta}^s \end{aligned}$$

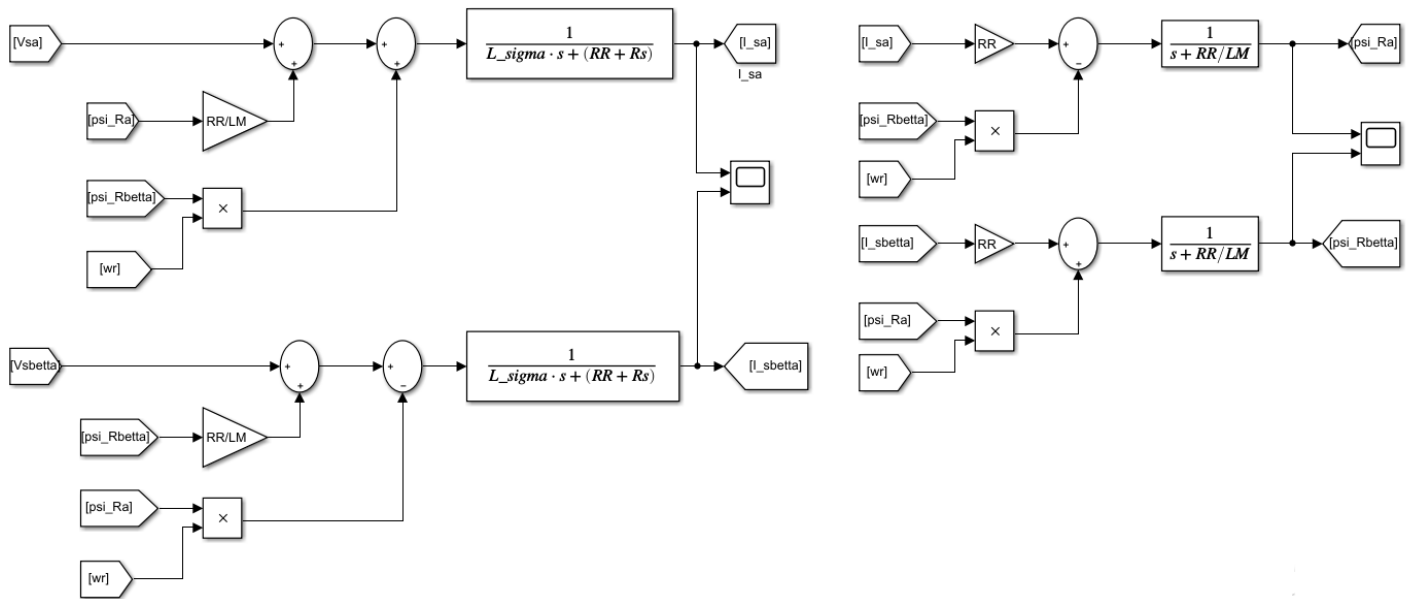
$$I_{sa}^s = \text{Re} \{ I_s^s \} = \frac{1}{sL_\sigma + R_R + R_s} \cdot \left[V_{sa}^s + \frac{R_R}{L_M} \cdot \Psi_{Ra}^s + \omega_r \cdot \Psi_{R\beta}^s \right]$$

$$I_{s\beta}^s = \text{Im} \{ I_s^s \} = \frac{1}{sL_\sigma + R_R + R_s} \cdot \left[V_{s\beta}^s + \frac{R_R}{L_M} \cdot \Psi_{R\beta}^s - \omega_r \cdot \Psi_{Ra}^s \right]$$

$$\Psi_{Ra}^s = \frac{1}{s + \frac{R_R}{L_M}} \cdot \left[R_R \cdot I_{sa}^s - \omega_r \cdot \Psi_{R\beta}^s \right]$$

$$\Psi_{R\beta}^s = \frac{1}{s + \frac{R_R}{L_M}} \cdot \left[R_R \cdot I_{s\beta}^s + \omega_r \cdot \Psi_{Ra}^s \right]$$

Το schematic για το ηλεκτρικό μέρος στο simulink φαίνεται παρακάτω:



Η εξίσωση για το μηχανικό μέρος είναι η εξής:

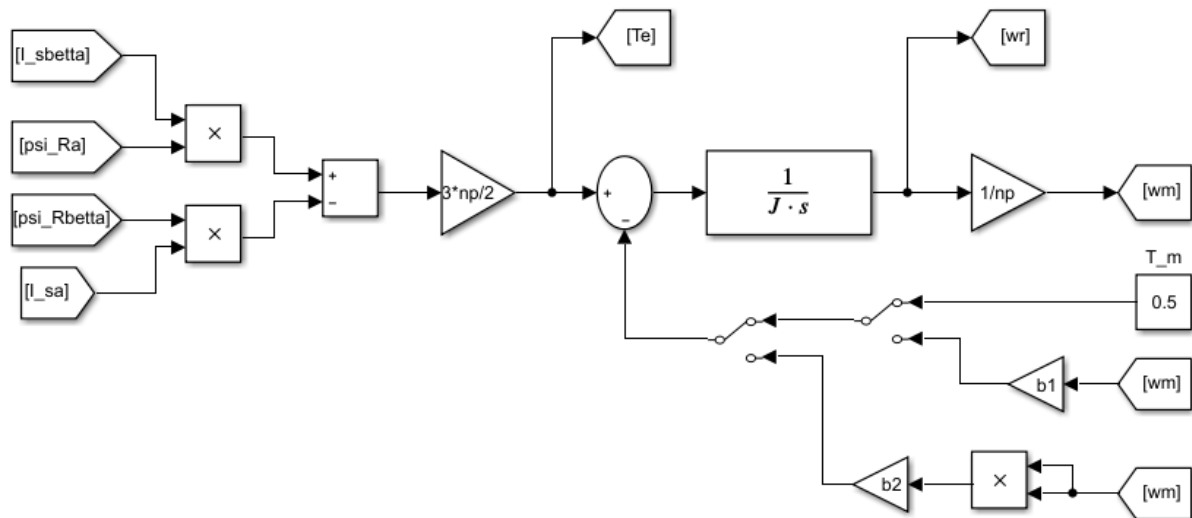
$$J \cdot \frac{d\omega_r}{dt} = \tau_e - \tau_m$$

Επομένως, εφαρμόζοντας μετασχηματισμό Laplace, γίνεται:

$$\omega_r = \frac{1}{sJ} \cdot (\tau_e - \tau_m)$$

$$\text{με } \tau_e = \frac{3 \cdot n_p}{2K^2} \cdot \text{Im} \{ (\Psi_s^s)^* i_s^s \} = \frac{3 \cdot n_p}{2K^2} \cdot (\Psi_{Ra}^s \cdot I_{s\beta}^s - \Psi_{R\beta}^s \cdot I_{sa}^s)$$

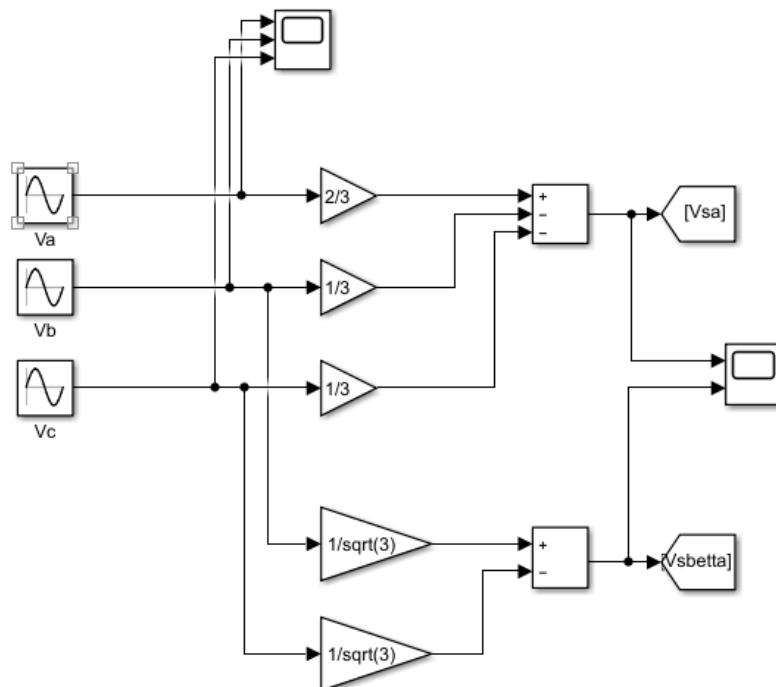
Το schematic του στο simulink, φαίνεται παρακάτω:



Τέλος, όσον αφορά την τάση τροφοδοσίας, μετασχηματίζουμε από το πεδίο abc στο αβ τις τριφασικές τάσεις ως εξής:

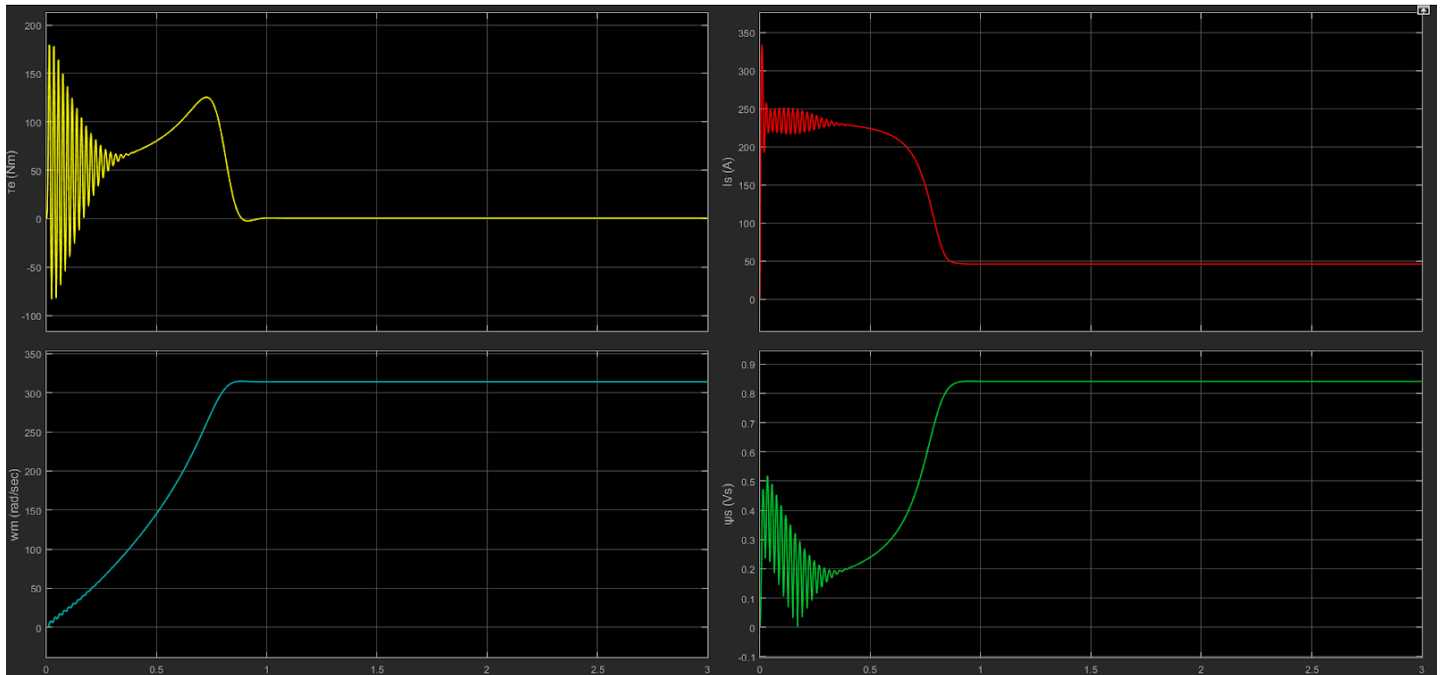
$$V_{sa}^s = \frac{2}{3} \cdot V_a - \frac{1}{3} \cdot V_b - \frac{1}{3} \cdot V_c$$

$$V_{sb}^s = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot V_b - \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot V_c$$

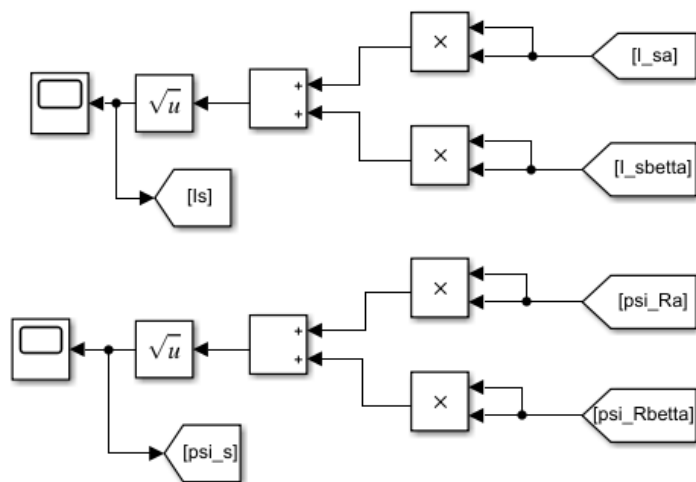


Ζητούμενο 3

Για το ερώτημα αυτό, δίνουμε ροπή ίση με 0.5 Nm στη μηχανή, σχεδόν μηδενική. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης είναι τα εξής:



Να σημειωθεί πως για να βρεθούν το μέτρο της ροής του δρομέα, και του ρεύματος του στάτη, υλοποιήθηκε το εξής:



Παρατηρούμε πως στην μόνιμη κατάσταση έχουμε σχεδόν μηδενική ροπή (0.5 Nm) και η ταχύτητα τείνει στην σύγχρονη (314.159 rad/sec).

Παρατηρούμε σχεδόν γραμμική μεταβολή ταχύτητας, από μηδενική προς την ονομαστική κενού φορτίου (δηλαδή σύγχρονη).

Όσον αφορά το διάγραμμα της ροπής, βλέπουμε πως παρά τις ταλαντώσεις κατά την εκκίνηση, δεν ξεπερνά την μέγιστη τιμή της, η οποία υπολογίστηκε θεωρητικά στα 191.425 Nm .

Επιπλέον, οι μεγαλύτερες ταλαντώσεις της ροπής παρατηρούνται κατά τις χαμηλές ταχύτητες. Η μηχανή κατά την εκκίνηση επιταχύνει και επιβραδύνει ελαφρώς, αυτό φαίνεται και στις ελαφρές διακυμάνσεις της ταχύτητας κατά την εκκίνηση. Το γεγονός αυτό δημιουργεί καταπονήσεις στην ροπή της μηχανής. Τέλος στην μόνιμη κατάσταση δεν παρατηρούμε ταλαντώσεις λόγω μικρής μάζας του δρομέα (μικρή ροπή αδράνειας).

Από την θεωρία της μόνιμης κατάστασης, περιμέναμε ροπή εκκίνησης παραπλήσια με την ονομαστική, και μάλιστα μικρότερη, καθώς ισχύει:

$$\tau_{εκ} = 2 \cdot s_p \cdot \tau_e^{max} = 52.76 \text{ Nm} \quad (5.74)$$

Ωστόσο, παρατηρούμε ταλαντώσεις κατά την εκκίνηση σε όλα τα μεγέθη, το οποίο οφείλεται στο γεγονός πως η δυναμική της ροής είναι αργή, καθώς έχει παρόμοια χρονική σταθερά με το μηχανικό μέρος. Αυτή η αργή δυναμική οφείλεται στην μεγαλύτερη τιμή της αυτεπαγωγής μαγνήτισης, σε σύγκριση με την αυτεπαγωγή του στάτη και του δρομέα.

Επιπλέον, η μέγιστη τιμή του ρεύματος του στάτη θα είναι:

$$|i_s|_{max} \approx \frac{|V_s|}{X_\sigma} \cdot (1 + e^{-\pi R_\sigma / X_\sigma}) = 341.215 \text{ A} \quad (5.86)$$

όπου $R_\sigma = R_s + R_R$

Επαληθεύεται και μέσω προσομοίωσης πως το ρεύμα δεν ξεπερνά αυτή τη μέγιστη τιμή.

Το ρεύμα κατά την εκκίνηση υπολογίζεται από τον τύπο (με το μοντέλο της μόνιμης κατάστασης):

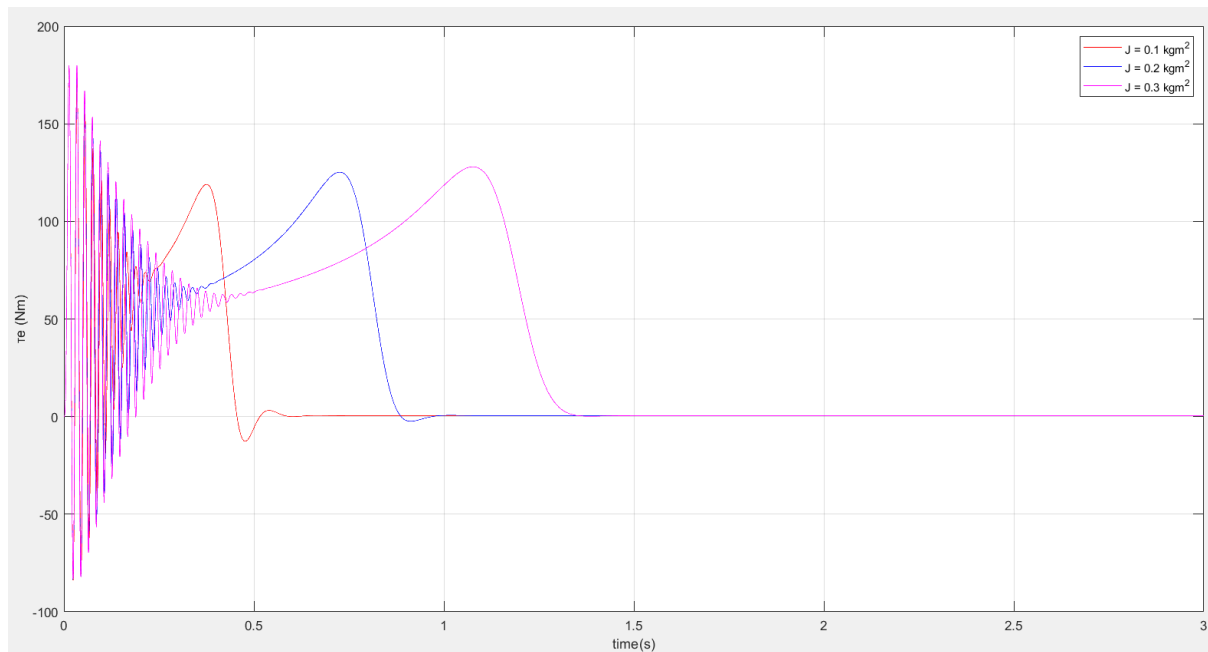
$$|i_s| = \frac{|V_s|}{X_\sigma} = 246.51 \text{ A} \quad (5.77)$$

Η τιμή αυτή είναι η 5πλάσια **της τιμής του ρεύματος κατά την μόνιμη κατάσταση, με συνδεδεμένο σχεδόν μηδενικό φορτίο**, όπως φαίνεται και από το γράφημα.

Ωστόσο, βλέπουμε πως το μέγιστο ρεύμα παρατηρείται κατά την εκκίνηση, και στην προσομοίωση είναι όσο υπολογίστηκε με την (5.86), και είναι το 7πλάσιο **του αντίστοιχου της μόνιμης κατάστασης**, γεγονός το οποίο είναι αναμενόμενο. Το ρεύμα εκκίνησης με το μοντέλο της μόνιμης κατάστασης προκύπτει μικρότερο από το πραγματικό, καθώς αγνοήσαμε την δυναμική απόκριση του ρεύματος με την σύνδεση στο δίκτυο. Επιπλέον, κατά την εκκίνηση η τιμή της ολίσθησης είναι ίση με 1, επομένως η αντίσταση που “βλέπει” η μηχανή είναι η R_R , η οποία έχει σχετικά μικρή τιμή, και η τάση τροφοδοσίας συγκριτικά έχει μεγάλη τιμή, άρα αυτό επίσης οδηγεί σε μεγάλη τιμή ρεύματος εκκίνησης. Όταν η ολίσθηση είναι σχεδόν ίση με το 0, τότε $\frac{R_R}{s} \rightarrow \infty$ άρα είναι ανοικτοκύκλωμα, και επομένως το μόνο ρεύμα που εισέρχεται στη μηχανή είναι το ρεύμα μαγνήτισης.

Τέλος, η τιμή της ροής είναι μικρή και κάτω της μονάδας, όπως και περιμέναμε.

Επιπλέον, όπως αναφέρθηκε στο ερώτημα (1), παρακάτω παρατίθεται συμπληρωματικά η ροπή τ_e για τιμές ροπής αδράνειας $J = 0.1, 0.2, 0.3 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$



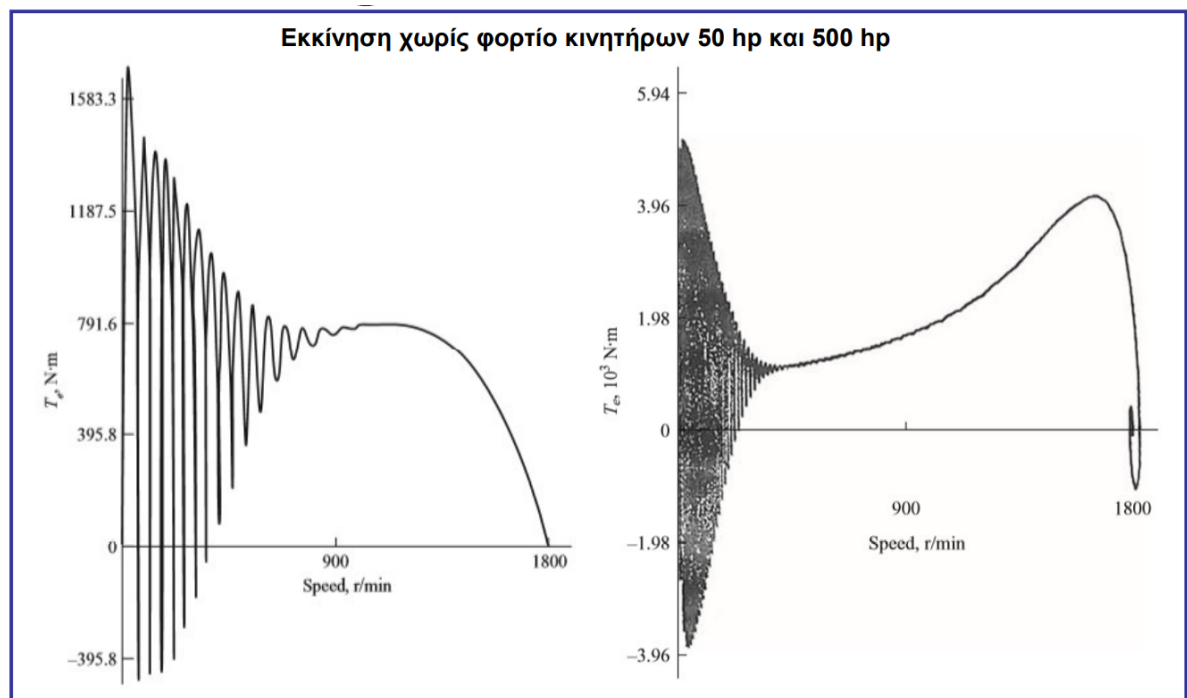
Παρατηρούμε πως όσο αυξάνουμε την ροπή αδράνειας, τόσο αυξάνεται και ο αριθμός των ταλαντώσεων κατά το υπομεταβατικό φαινόμενο, αλλά και το σύστημα γίνεται ολοένα και πιο αργό, καθώς αυξάνεται η χρονική σταθερά του μηχανικού μέρους.

Επιπλέον, με $J = 0.1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, παρατηρούμε και μια ακόμα ταλάντωση γύρω από τη μόνιμη κατάσταση (0.5 Nm), η οποία οφείλεται στην μικρή τιμή της ροπής αδράνειας, καθώς τότε το σύστημα είναι πιο ασταθές και ευάλωτο στις μεταβολές. Αν μειώναμε κι' άλλο την ροπή αδράνειας, πιθανώς να βρισκόμασταν σε περιοχή αστάθειας, όπου τα μεγέθη δεν αποκτούν την τιμή της μόνιμης κατάστασης, αλλά ταλαντώνονται με σταθερό πλάτος γύρω από αυτή (hunting).

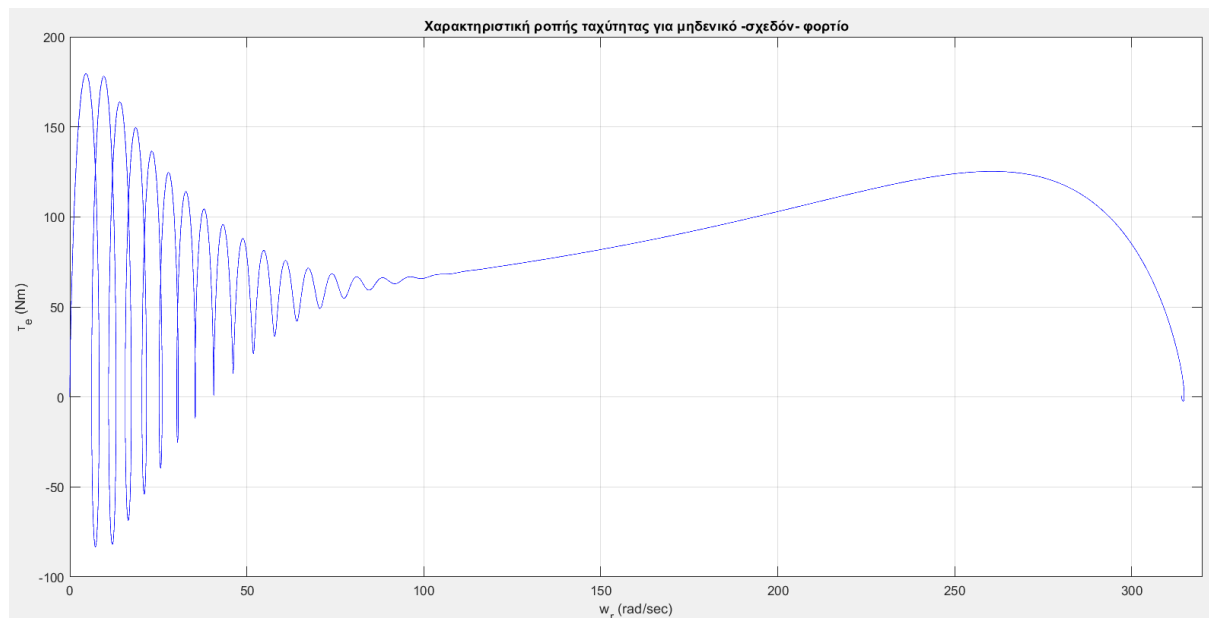
Να αναφερθεί πως στις μηχανές επαγωγής, μας ενδιαφέρει το ρεύμα εκκίνησης, ώστε να χρησιμοποιηθούν κατάλληλες ασφάλειες οι οποίες μπορούν να αντέξουν αυτό το υψηλό ρεύμα εκκίνησης, αλλά όχι για χρόνους μεγαλύτερους των sec, καθώς η μέγιστη διάρκεια εκκίνησης δεν ξεπερνά κάποια δευτερόλεπτα, ακόμα και υπό φορτίο.

Τέλος, σε μια μηχανή των 100άδων kW, θα παρατηρούσαμε πως οι ταλαντώσεις κατά την εκκίνηση περιορίζονται στην πολύ αρχική ταχύτητα, και η μηχανή έπειτα να ακολουθεί την χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας μόνιμης κατάστασης. Όταν πλησιάζαμε την σύγχρονη ταχύτητα, θα παρατηρούσαμε διαδρομές τύπου μαιάνδρου, όπου έχουμε ταλαντώσεις της μηχανής γύρω από το σημείο λειτουργίας της, η οποία περνά και σε λειτουργία γεννήτριας, άρα έχουμε και ταχύτητες υψηλότερες της ονομαστικής. Αυτό οφείλεται στην μεγαλύτερη ροπή αδράνειας μηχανής, σε σύγκριση με μια μικρότερη μηχανή, ωστόσο οι ταλαντώσεις αυτές είναι σε μικρή κλίμακα.

Παρακάτω παρατίθεται διάγραμμα ροπής-αδράνειας όπως περιγράφηκε παραπάνω για μια μεγαλύτερη μηχανή, από τις διαφάνειες του μαθήματος “Μεταβατική Κατάσταση Λειτουργίας Ηλεκτρικών Μηχανών”:



Τέλος, παρατίθεται και η χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας που προκύπτει κατά την προσομοίωση:



Καθώς η μηχανή είναι ισχύος παραπλήσιας με αυτής των 50 Hp, που παρουσιάζεται παραπάνω, όπως βλέπουμε η κυματομορφή που προκύπτει είναι παρόμοια. Οι ταλαντώσεις κατά τις χαμηλές ταχύτητες είναι εμφανείς, ενώ στη συνέχεια η χαρακτηριστική είναι σαν αυτή της μόνιμης κατάστασης. Παρατηρούμε μια πολύ μικρή ταλάντωση όταν φτάνουμε την σύγχρονη ταχύτητα, η οποία φαίνεται και στο διάγραμμα ροπής συναρτήσεως του χρόνου, όπου εμφανίζεται ένα μικρό overshoot προς τα αρνητικά.

Ζητούμενο 4

Για να έχουμε ροπή φορτίου ανάλογη της ταχύτητας, θα ισχύει ότι $\tau_m = b_1 \cdot \omega_m$, και για να

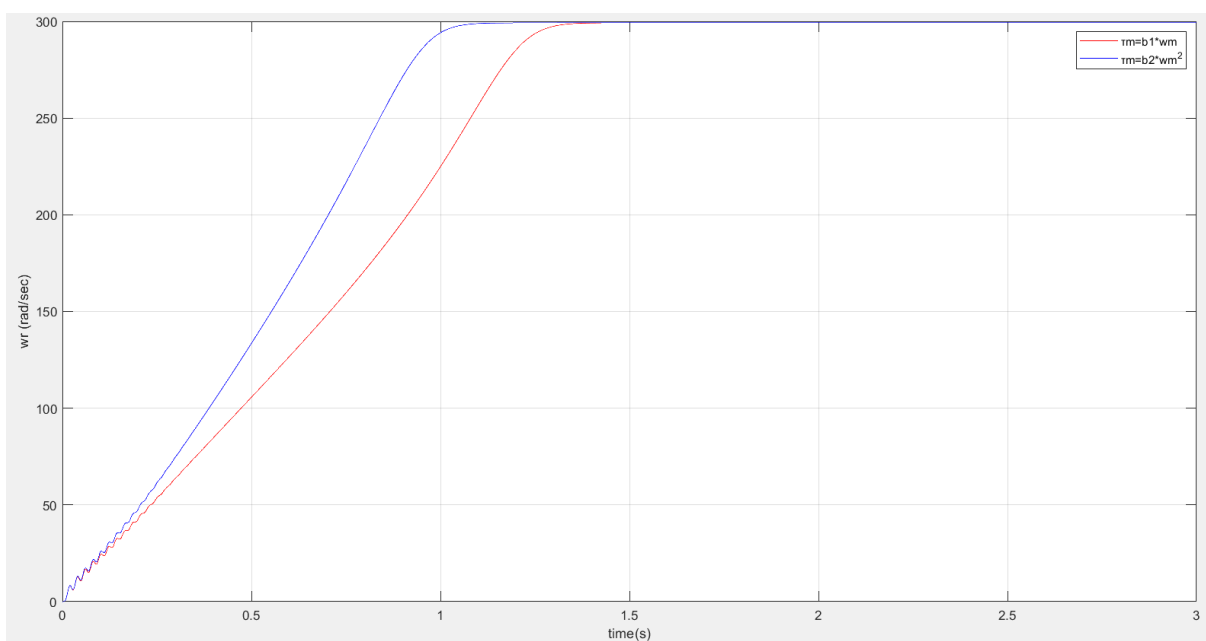
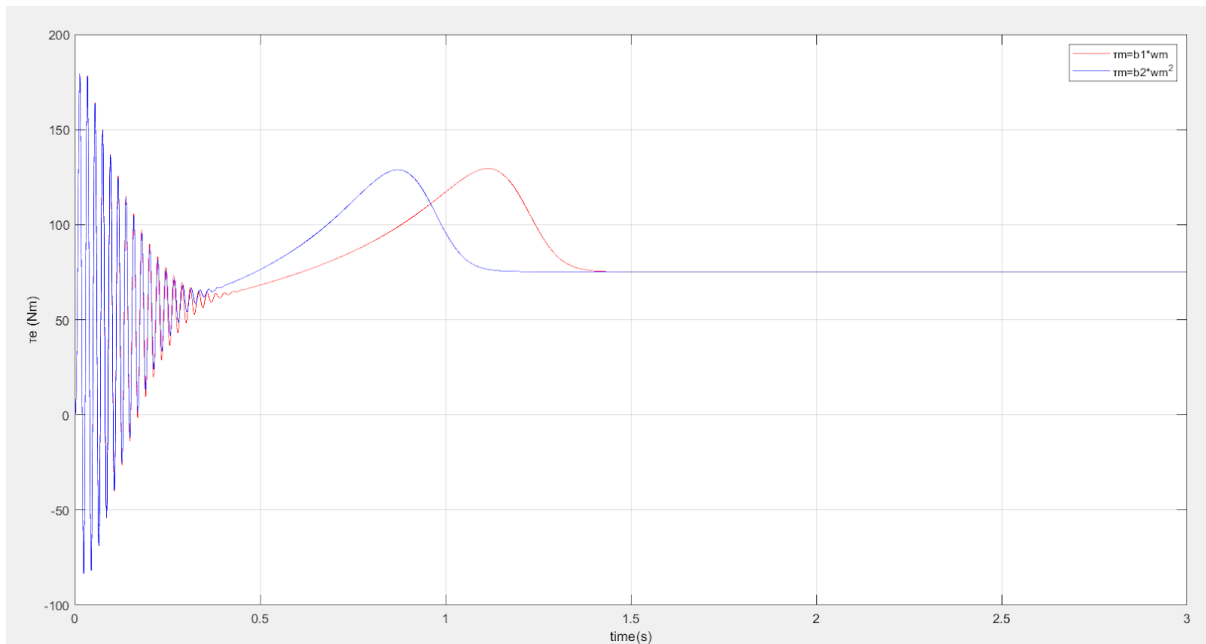
έχουμε ροπή φορτίου ανάλογη του τετραγώνου της ταχύτητας, θα ισχύει: $\tau_m = b_2 \cdot \omega_m^2$

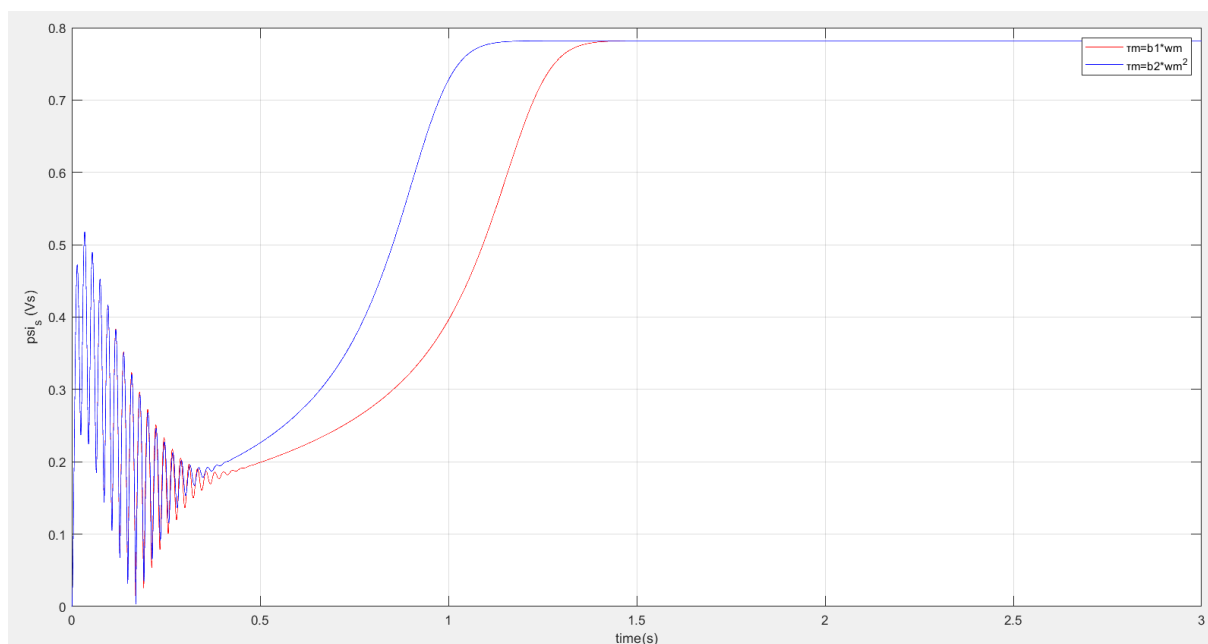
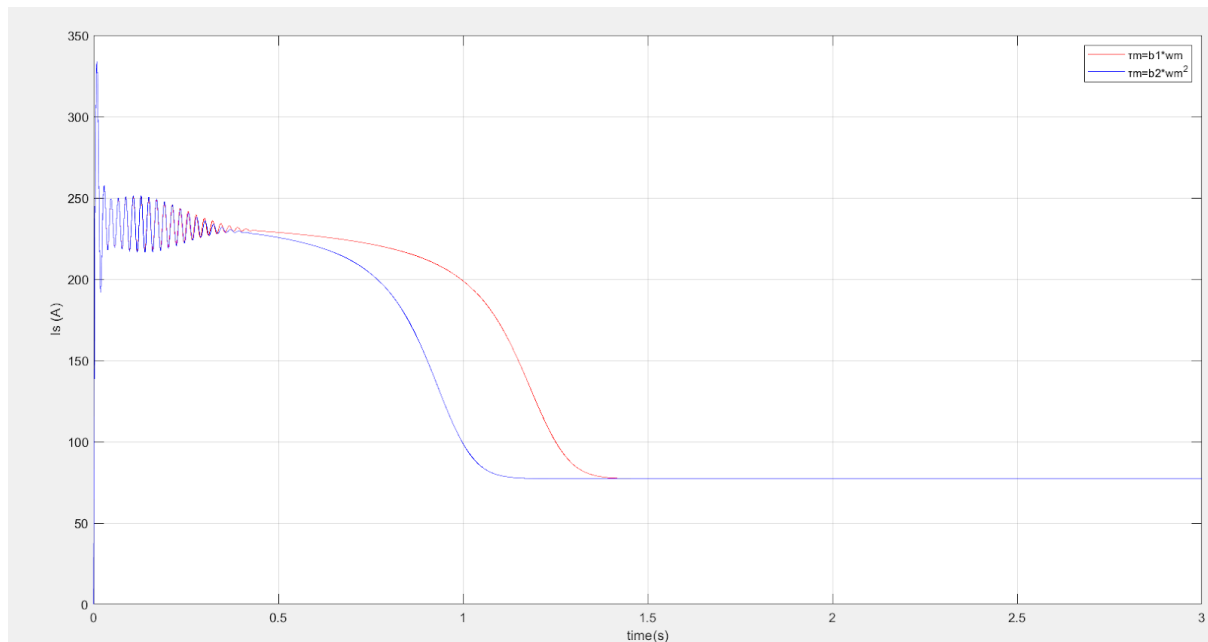
Για να υπολογίσουμε τους συντελεστές b_1 , b_2 εξετάζουμε την ροπή φορτίου για ονομαστικές τιμές, δηλαδή στην μόνιμη κατάσταση ως εξής:

$$\tau_{m, nom} = b_1 \cdot \omega_{m, nom} \Rightarrow b_1 = 0.251$$

$$\tau_{m, nom} = b_2 \cdot \omega_{m, nom}^2 \Rightarrow b_2 = 8.4042 \cdot 10^{-4}$$

Τα ζητούμενα διαγράμματα ροπής, ταχύτητας, ρεύματος στάτη, και ροής φαίνονται παρακάτω:





Βλέπουμε αρχικά πως η τιμή της ροπής στη μόνιμη κατάσταση είναι ίση με την ονομαστική (76.57 Nm). Επιπλέον, παρατηρείται ταλάντωση σε όλα τα μεγέθη κατά την εκκίνηση, και στα 2 είδη φορτίου, και ο αριθμός των ταλαντώσεων είναι σχεδόν ο ίδιος. Ωστόσο, παρατηρούμε πως το φορτίο το οποίο εξαρτάται από το τετράγωνο της ταχύτητας έχει πιο γρήγορη απόκριση σε σύγκριση με το φορτίο που εξαρτάται από την ταχύτητα, αυτή η πιο γρήγορη απόκριση παρατηρείται σε όλα τα μεγέθη. Επιπλέον, να σημειωθεί πως η μηχανική ταχύτητα δρομέα δεν φτάνει ακριβώς την ονομαστική τιμή της, αλλά είναι λίγο μικρότερη. Αυτό θα μπορούσε να οφείλεται στο γεγονός πως έχει επιλεγεί τιμή ολίσθησης αρκετά μικρή, αλλά και σε ένα πιθανό σφάλμα θεωρητικών υπολογισμών.

Όσον αφορά το ρεύμα στάτη, βλέπουμε πως μειώνεται αρκετά πιο γρήγορα στην περίπτωση του φορτίου που εξαρτάται από το τετράγωνο της ταχύτητας. Αυτό θα μπορούσε να αιτιολογηθεί, καθώς ο όρος $\left(\frac{R_R}{L_M} - j\omega_r\right) \psi_R^s$ της back-EMF μειώνεται πιο γρήγορα, αφού έχουμε πιο γρήγορη μεταβολή ταχύτητας.

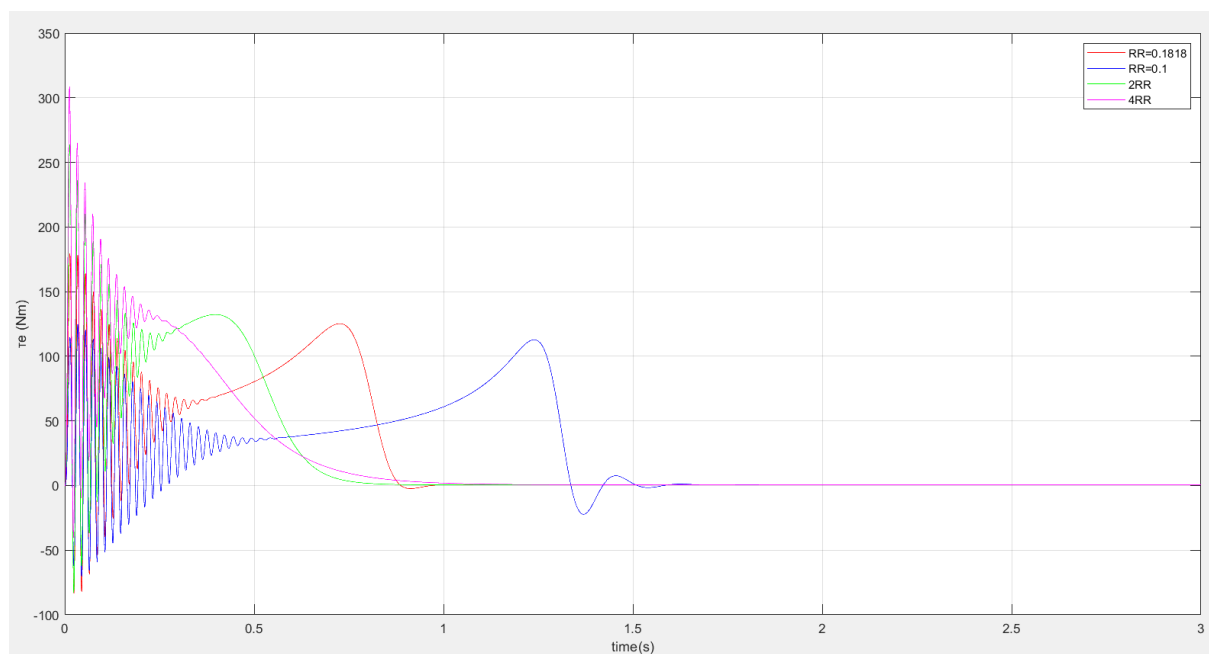
Τέλος, όσον αφορά την ροή, βλέπουμε ότι αποκτά πιο γρήγορα την τιμή της μόνιμης κατάστασης στην περίπτωση του φορτίου ανάλογου του τετραγώνου της ταχύτητας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως ισχύει: $\psi_R = L_M \cdot i_d$, επομένως αν το ρεύμα αποκτά την τιμή μόνιμης κατάστασης πιο γρήγορα, το ίδιο θα συμβεί και με την ροή.

Ένα τελικό συμπέρασμα είναι πως παρατηρώντας τις εξισώσεις της παραγώγου του ρεύματος στάτη, της παραγώγου της ροής και της παραγώγου της ταχύτητας, βλέπουμε ότι έχουμε σε όλες τις εξισώσεις περιέχονται όλες οι μεταβλητές που προαναφέρθηκαν, επομένως, μια απότομη μεταβολή σε μια μεταβλητή μιας από αυτές τις εξισώσεις (η ροπή φορτίου στην εξίσωση μηχανικού μέρους) προκαλεί και πιο απότομες μεταβολές και στις υπόλοιπες μεταβλητές.

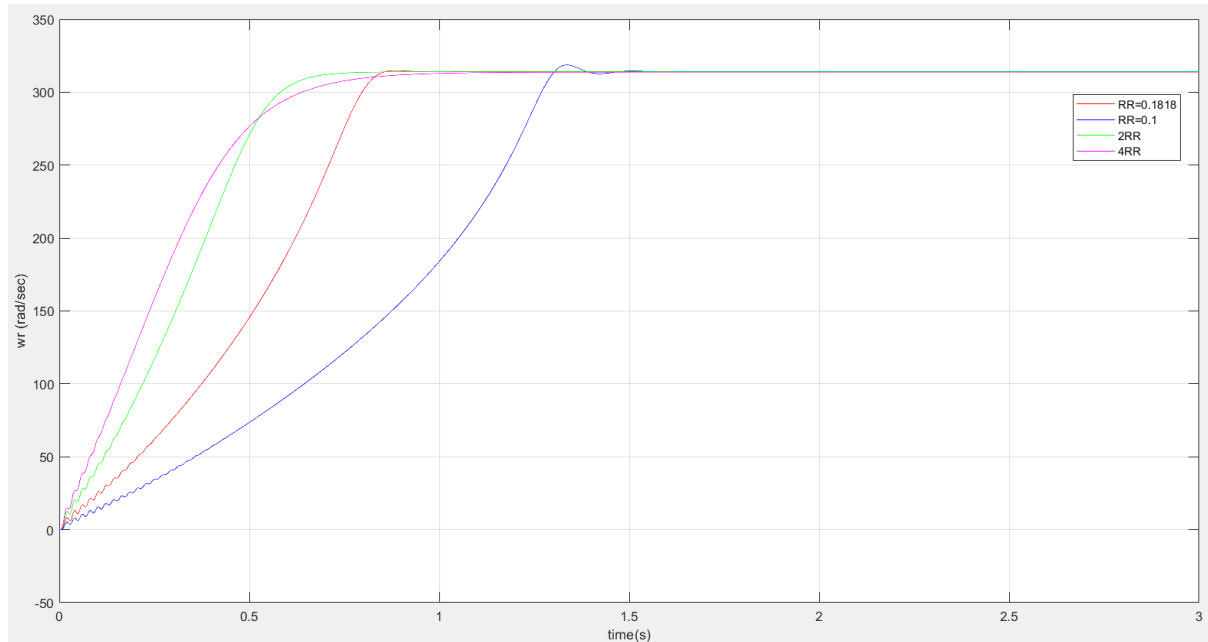
Ζητούμενο 5

Στο ερώτημα αυτό, πραγματοποιούμε 4 προσομοιώσεις, όπου η 1η αφορά αντίσταση δρομέα ίση με αυτή που υπολογίστηκε στο ερώτημα (1) δηλαδή $R_R = 0.1818 \Omega$, η 2η με $R_R = 0.1 \Omega$, η 3η με $2R_R$, και η 4η με $4R_R$.

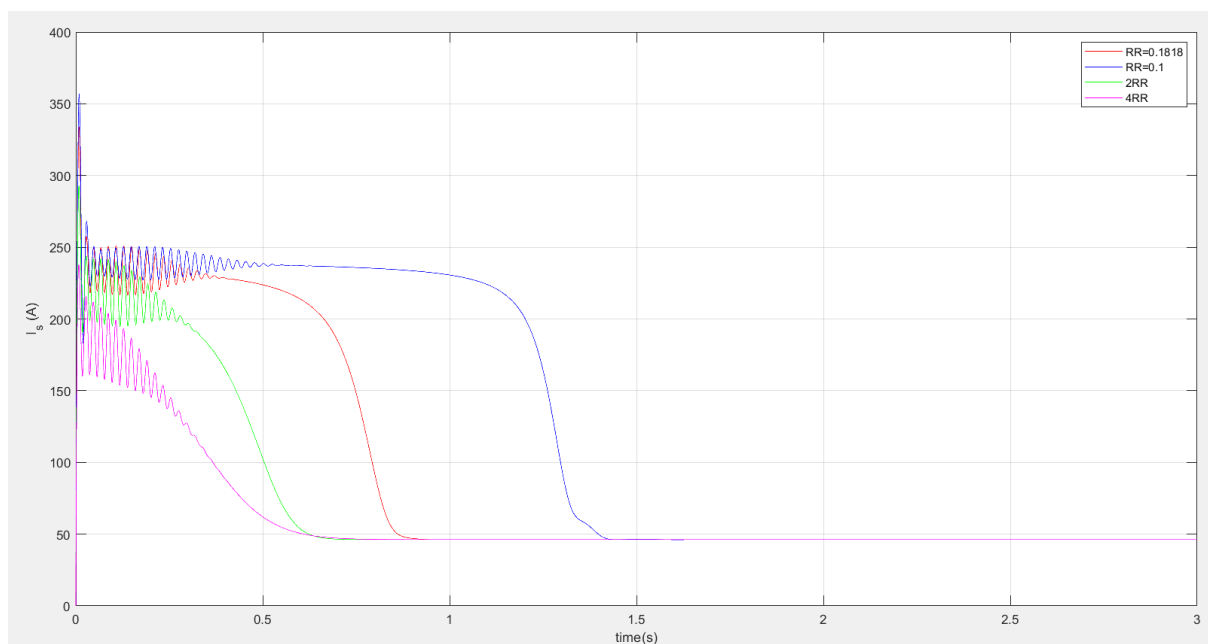
Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης φαίνονται παρακάτω:



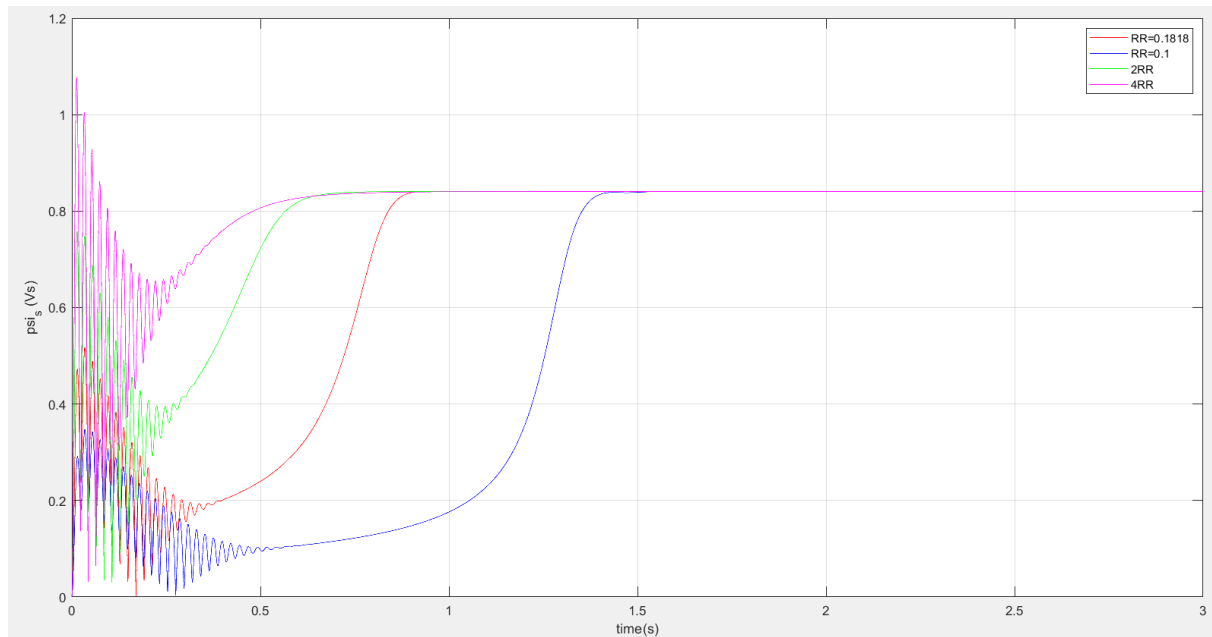
Όσον αφορά το διάγραμμα της ροπής, παρατηρούμε πως όσο μικρότερη είναι η αντίσταση δρομέα, τόσο και πιο αργή είναι η μετάβαση στη μόνιμη κατάσταση. Επιπλέον, με την μικρότερη αντίσταση έχουμε και παραπάνω ταλαντώσεις γύρω από τη μόνιμη κατάσταση. Κατά την εκκίνηση παρατηρείται μεγαλύτερη ροπή εκκίνησης όσο αυξάνεται και η αντίσταση, γεγονός το οποίο είναι λογικό, καθώς η ροπή εκκίνησης δίνεται από τον τύπο (5.73) όπου βλέπουμε πως στον αριθμητή έχουμε την αντίσταση R_R . Τέλος έχουμε περισσότερες ταλαντώσεις κατά την εκκίνηση, όσο μειώνεται η αντίσταση δρομέα.



Όσον αφορά το γράφημα της ταχύτητας, και εδώ παρατηρούμε πιο αργή μεταβολή της ταχύτητας με την μείωση της αντίστασης, αλλά και ταλάντωση γύρω από την τιμή της μόνιμης κατάστασης στην περίπτωση της μικρότερης αντίστασης. Βλέπουμε δηλαδή ότι αυξάνεται το overshoot όσο μειώνεται η αντίσταση.

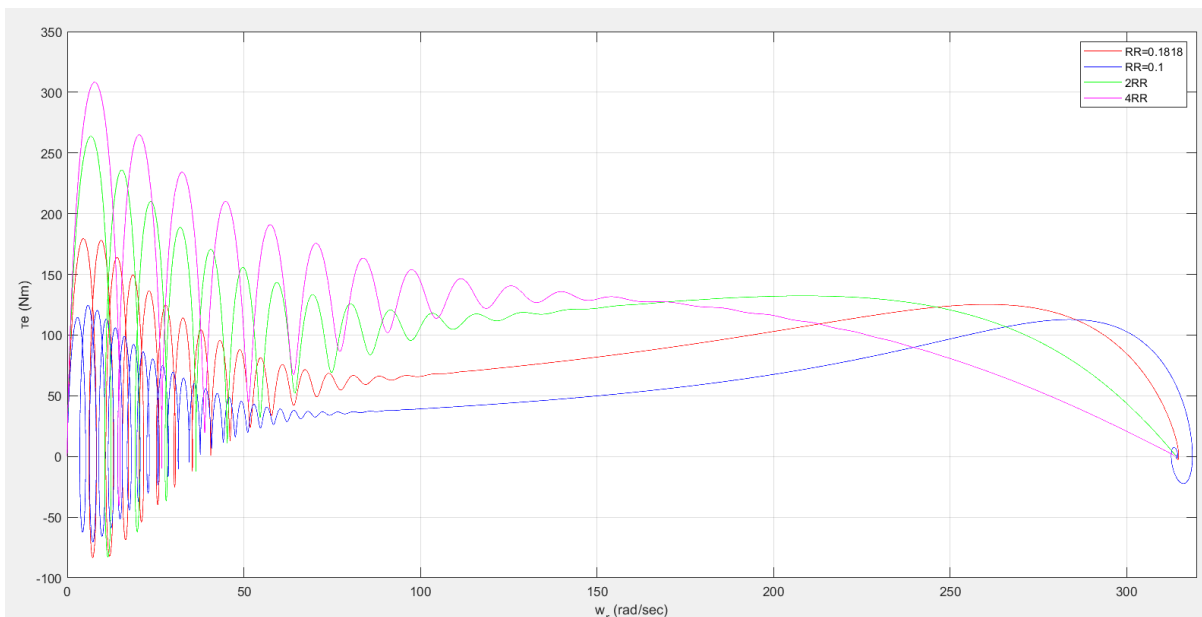


Για το ρεύμα του στάτη παρατηρούμε πως μειώνεται πολύ πιο γρήγορα προς την τιμή της μόνιμης κατάστασής του όσο αυξάνεται η αντίσταση.



Τέλος, από το γράφημα της ροής, βλέπουμε πως με μεγαλύτερη τιμή αντίστασης έχουμε πιο γρήγορη μετάβαση στην μόνιμη κατάσταση, καθώς δεν πραγματοποιείται αυτή η “βύθιση” που παρατηρείται στις 2 μικρότερες αντιστάσεις.

Συμπληρωματικά παρατίθεται και γράφημα ροπής-στροφών, όπου παρατηρούνται και τα φαινόμενα που αναφέρθηκαν και στο γράφημα της ροπής. Με την διαδρομή τύπου μαιάνδρου στην μόνιμη κατάσταση για την μικρότερη αντίσταση, καταλαβαίνουμε πως έχουμε μικρές σχετικά ταλαντώσεις γύρω από τη μόνιμη κατάσταση, γεγονός το οποίο επαληθεύεται και στο γράφημα της ροπής συναρτήσεως του χρόνου. Παρατηρούμε πως με τη λήξη των ταλαντώσεων κατά την εκκίνηση, η χαρακτηριστική ροπής-στροφών είναι σαν εκείνη στο μοντέλο μόνιμης κατάστασης. Η μέγιστη τιμή της ροπής δεν αλλάζει, καθώς δεν εξαρτάται από την αντίσταση δρομέα, ωστόσο αυξάνεται η ολίσθηση μέγιστης ροπής με την αύξηση της αντίστασης, άρα έχουμε μετακίνηση της χαρακτηριστικής προς τα αριστερά.



Τέλος, να αναφερθεί πως ο λόγος που προσθέτουμε επιπλέον αντίσταση στον δρομέα, είναι ώστε να επιτύχουμε μεγαλύτερη ροπή εκκίνησης, αφού έχουμε μετακίνηση της χαρακτηριστικής προς τα αριστερά. Αυτό μπορεί να το θέλουμε σε περίπτωση φορτίων σταθερής ροπής, και όχι ανάλογης της ταχύτητας. Η μέθοδος αυτή, όπου προστίθεται αντίσταση, μπορεί να γίνει μόνο σε μηχανές δακτυλιοφόρου δρομέα, καθώς σε μηχανές με δρομέα κλωβού δεν έχουμε πρόσβαση στις αντιστάσεις.

Ζητούμενο 6 (bonus)

Στο ερώτημα αυτό ζητείται να πραγματοποιηθεί βαθμωτός έλεγχος V/f .

Η μέθοδος αυτή θα εφαρμοστεί ώστε αντί να έχω απευθείας σύνδεση στο δίκτυο, άρα και σταθερή συχνότητα, να μπορώ να έχω μεταβλητή συχνότητα. Επομένως, κατασκευάζουμε ελεγκτή ανοικτού βρόχου, ο οποίος θα ελέγχει το πλάτος της τάσης ανάλογα με την επιθυμητή συχνότητα με την οποία θέλουμε να τροφοδοτήσουμε την μηχανή.

Να αναφερθεί πως λέγεται βαθμωτός έλεγχος καθώς δεν ελέγχω την φάση της τάσης, αλλά μόνο το πλάτος του - στον διανυσματικό έλεγχο ελέγχω και το πλάτος, αλλά και την γωνία στην οποία τοποθετείται η τάση.

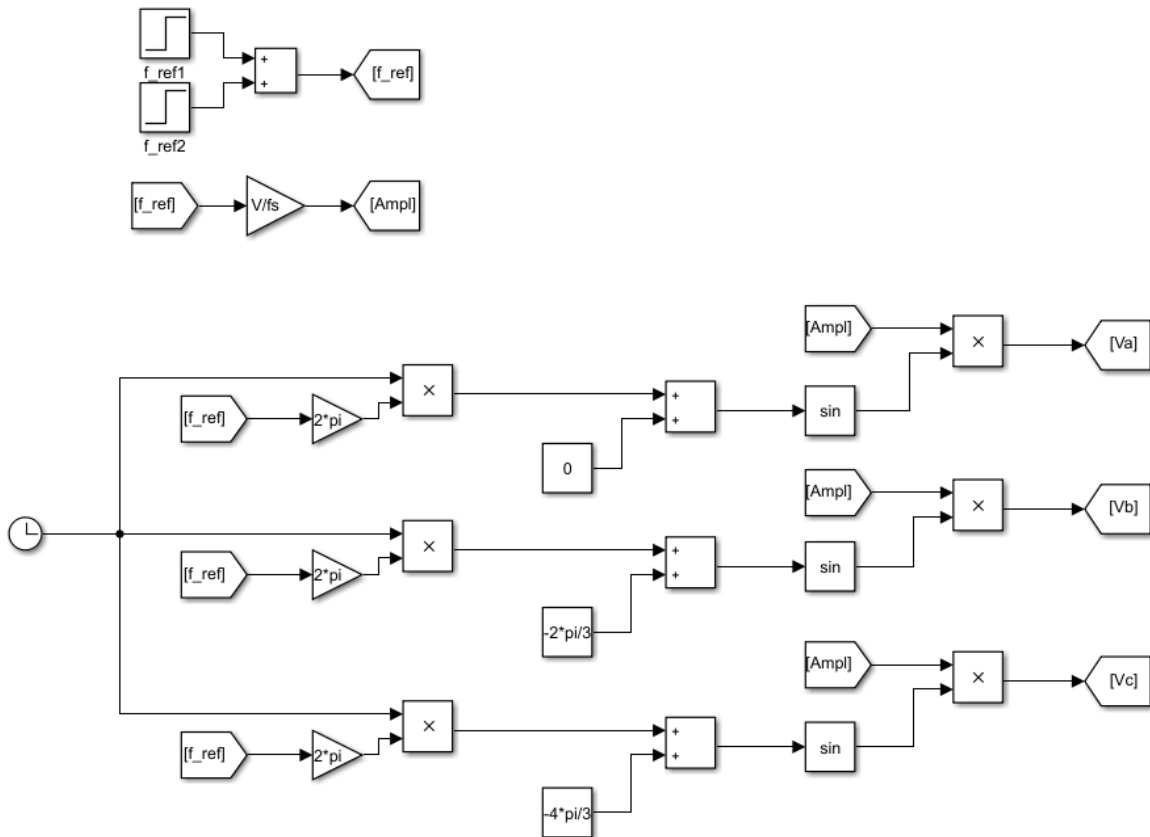
Για να βρούμε την τιμή του λόγου V/f ο οποίος θα πρέπει να διατηρείται σταθερός, αντικαθιστούμε με τις ονομαστικές τιμές πλάτους τάσης και συχνότητας:

$$\frac{V}{f} = \frac{V_{nom}}{f_{nom}} = \frac{230 \cdot \sqrt{2}}{50} = 6.51$$

Επομένως, μεταβάλλοντας την τιμή της συχνότητας, θα πρέπει να μεταβάλλουμε και την τιμή του πλάτους της τάσης ως εξής:

$$V' = \frac{V_{nom}}{f_{nom}} \cdot f_{ref} = 6.51 \cdot f_{ref}$$

Παρακάτω φαίνεται το schematic στο simulink:



Ισχύει ότι:

$$V_a = V' \cdot \sin(2\pi f_{ref} \cdot t)$$

$$V_b = V' \cdot \sin(2\pi f_{ref} \cdot t - \frac{2\pi}{3})$$

$$V_c = V' \cdot \sin(2\pi f_{ref} \cdot t - \frac{4\pi}{3})$$

Στην προσομοίωση που φαίνεται παραπάνω, όπου *Ampl* εννοείται το πλάτος V' .

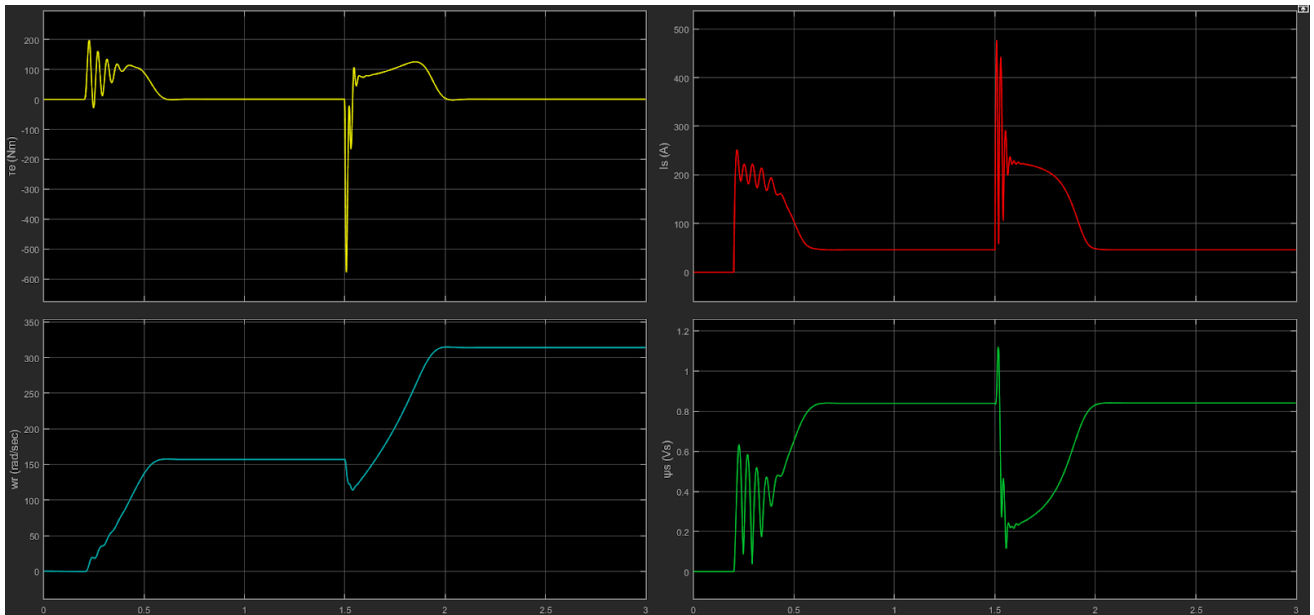
Επιπλέον, ο όρος $2\pi f_{ref} \cdot t$ παράγεται μέσω πολλαπλασιασμού του $2\pi f_{ref}$ που είναι σταθερή ποσότητα, με το clock (ώστε να έχουμε και το t).

Οι τάσεις που προκύπτουν, περνούν από μετασχηματισμό αβ όπως έχει ήδη ειπωθεί.

Έχει οριστεί μέσω των block “step” $f_{ref} = 25 \text{ Hz}$ τη χρονική στιγμή $t = 0.2 \text{ sec}$, και

$f_{ref} = 50 \text{ Hz}$ τη χρονική στιγμή $t = 1.5 \text{ sec}$.

Τα γραφήματα της ροπής, ταχύτητας, ρεύματος στάτη και ροής φαίνονται παρακάτω, στην περίπτωση σύνδεσης φορτίου ίσου με 0.5 Nm (όπως στο ερώτημα (3)):



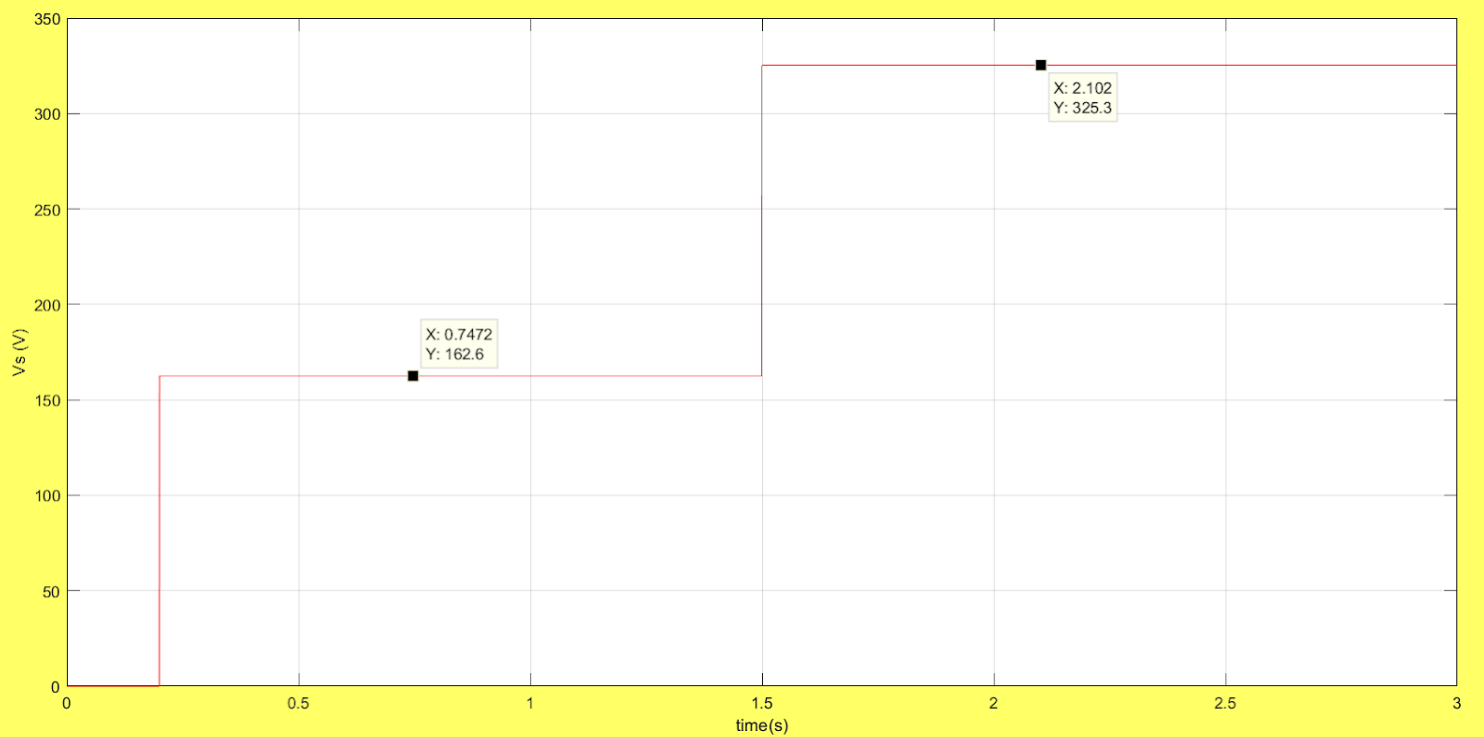
Βλέπουμε πως μεταβάλλοντας βηματικά την συχνότητα f_{ref} η απόκριση σε όλα τα μεγέθη είναι παρόμοια με αυτή της απευθείας σύνδεσης στο δίκτυο.

Όσον αφορά το γράφημα της ταχύτητας βλέπουμε πως αυτή ξεκινά να αυξάνεται κατά την χρονική στιγμή 0.2 sec , όπως έχει οριστεί, και φτάνει μέχρι την ταχύτητα η οποία είναι ίση με το $\frac{1}{2}$ της σύγχρονης περίπου, δηλαδή 157.1 rad/sec .

Όταν ορίζουμε $f_{ref} = 50 \text{ Hz}$, η ταχύτητα κάνει μια “βύθιση” και έπειτα αυξάνεται έως την τιμή μόνιμης κατάστασης, η οποία είναι σχεδόν ίση με τη σύγχρονη ταχύτητα (314.159 rad/sec). Σχετικά με το γράφημα της ροπής, βλέπουμε πως αυτή αποκτά την επιθυμητή τιμή μόνιμης κατάστασης (0.5 Nm), και κατά τις βηματικές μεταβολές της συχνότητας παρατηρούμε ταλαντώσεις όμοιες με αυτές που παρατηρούσαμε και στην σύνδεση με το δίκτυο, ωστόσο με ένα πιο μεγάλο peak κατά τις πρώτες ταλαντώσεις.

Όμοια και το ρεύμα στάτη και η ροή αποκτούν την μόνιμη κατάσταση όπως και στην απευθείας σύνδεση στο δίκτυο, πραγματοποιώντας και ταλαντώσεις στις βηματικές μεταβολές.

Τέλος, παρακάτω φαίνεται και η κυματομορφή του μέτρου της τάσης $V_s = \sqrt{V_{sa}^2 + V_{sb}^2}$:

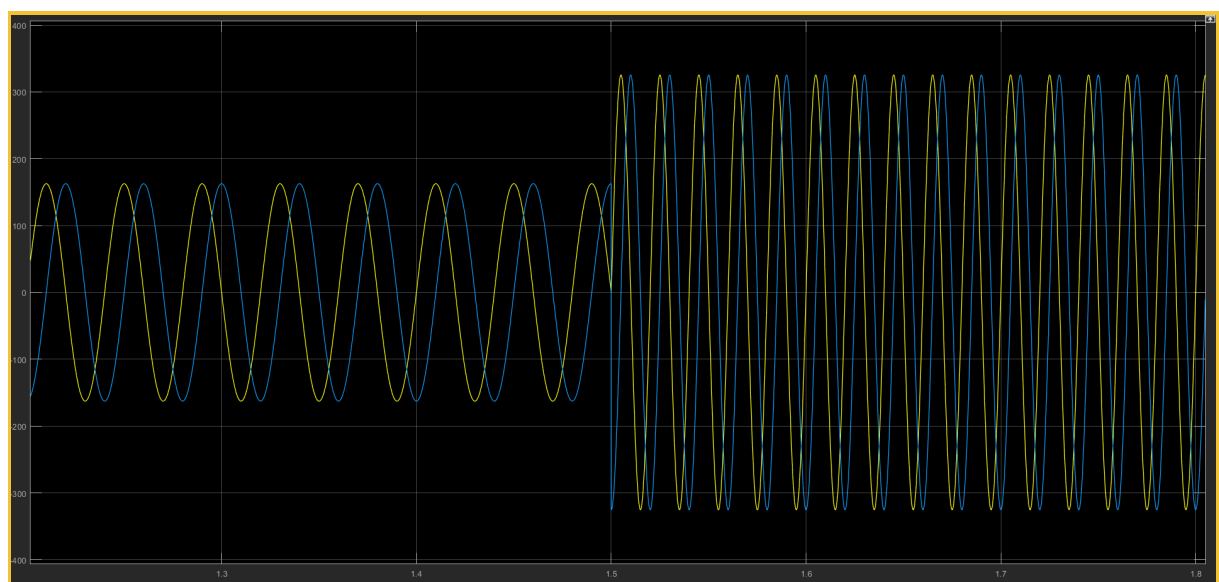


Βλέπουμε πως για το διάστημα $0.2 - 1.5 \text{ sec}$, το μέτρο της τάσης είναι ίσο με 162.6 V , γεγονός το οποίο είναι λογικό, καθώς τότε έχουμε $f_{ref} = 25 \text{ Hz}$ άρα θα ισχύει:

$$V' = \frac{V_{nom}}{f_{nom}} \cdot f_{ref} = \frac{325.3}{50} \cdot 25 = \frac{325.3}{2} = 162.65 \text{ V}.$$

Από τη χρονική στιγμή 1.5 sec και έπειτα, $V' = \frac{V_{nom}}{f_{nom}} \cdot f_{ref} = \frac{325.3}{50} \cdot 50 = 325.3 \text{ V}$

Επιπλέον, παρακάτω φαίνονται οι κυματομορφές των τάσεων, V_{sa} και V_{sb} ώστε να γίνεται διακριτή η αλλαγή της συχνότητας από τα 25 Hz στα 50 Hz :



Βιβλιογραφία

[1] Control of Voltage-Source Converters and Variable-Speed Drives, Lennart Harnefors
Marko Hinkkanen, Oskar Wallmark.

[2] Ηλεκτρικές μηχανές, 4η έκδοση, Stephen J. Chapman