

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Μεταβατική Κατάσταση Λειτουργίας Ηλεκτρικών Μηχανών

Εργαστηριακή Άσκηση 3:

Ασύγχρονη Μηχανή

Ονοματεπώνυμο: Καραϊνδρου Κωνσταντίνα

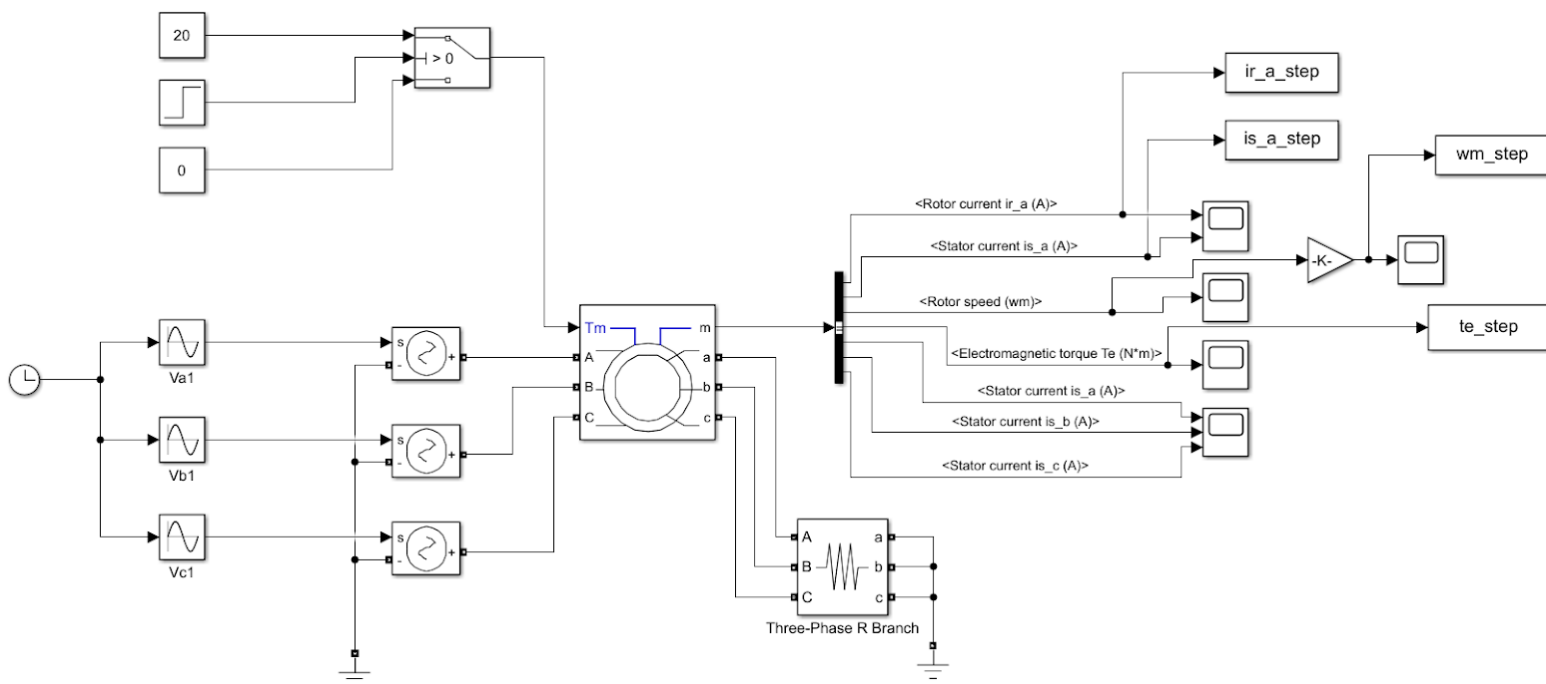
Αριθμός μητρώου: 03117098

Εξάμηνο: 8ο - ΣΗΜΜΥ

Στην εργασία αυτή θα παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του μοντέλου της ασύγχρονης μηχανής μέσω Matlab - Simulink.

Η μηχανή που χρησιμοποιήθηκε, λειτουργεί ως κινητήρας, είναι 2 πόλων, ισχύος 3 Hp, ονομαστικής συχνότητας 50 Hz, και τάσης 230 V rms, φασική.

Παρακάτω φαίνεται η προσομοίωση που υλοποιήθηκε στο simulink:



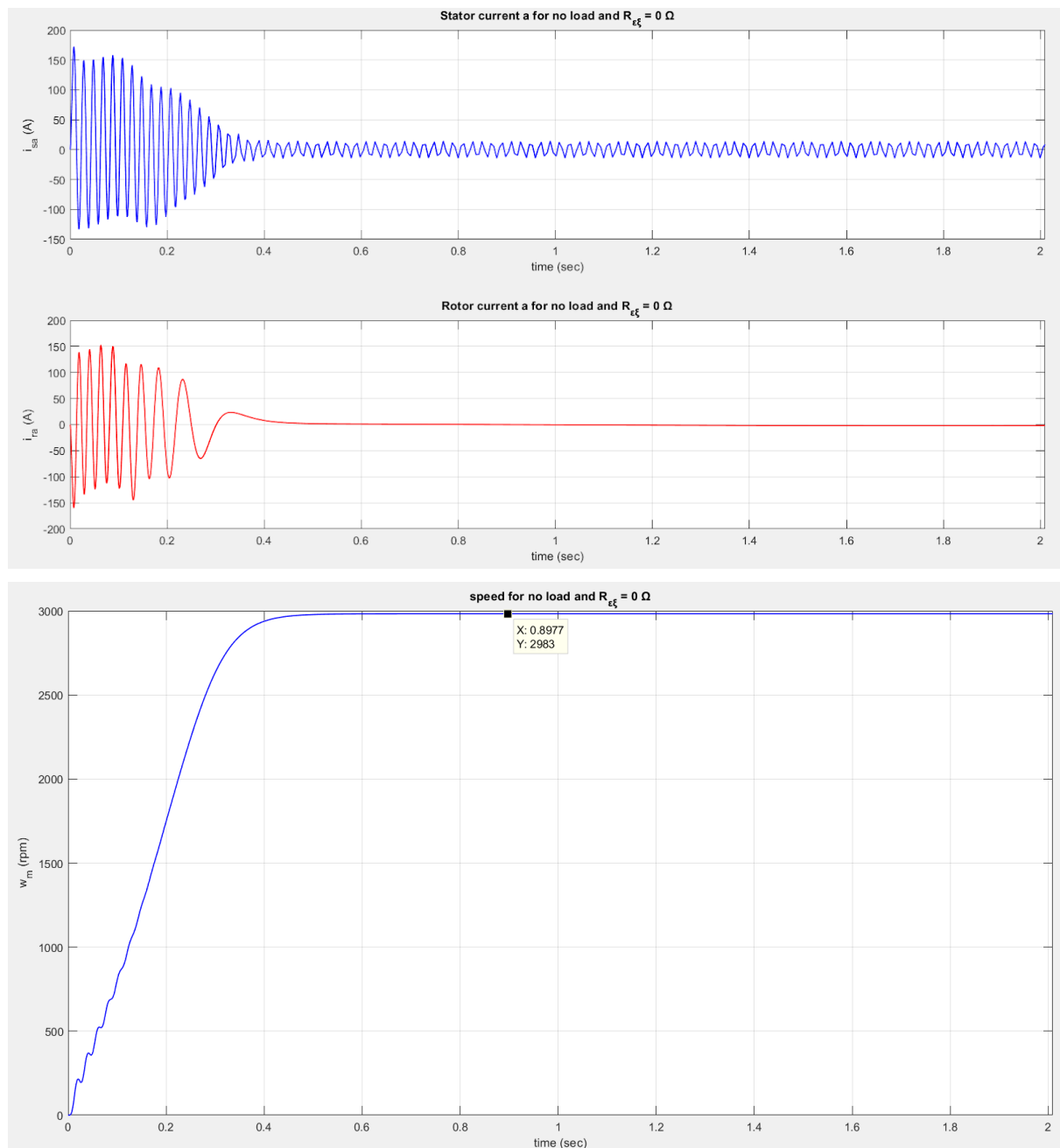
Ανάλυση εκκίνησης

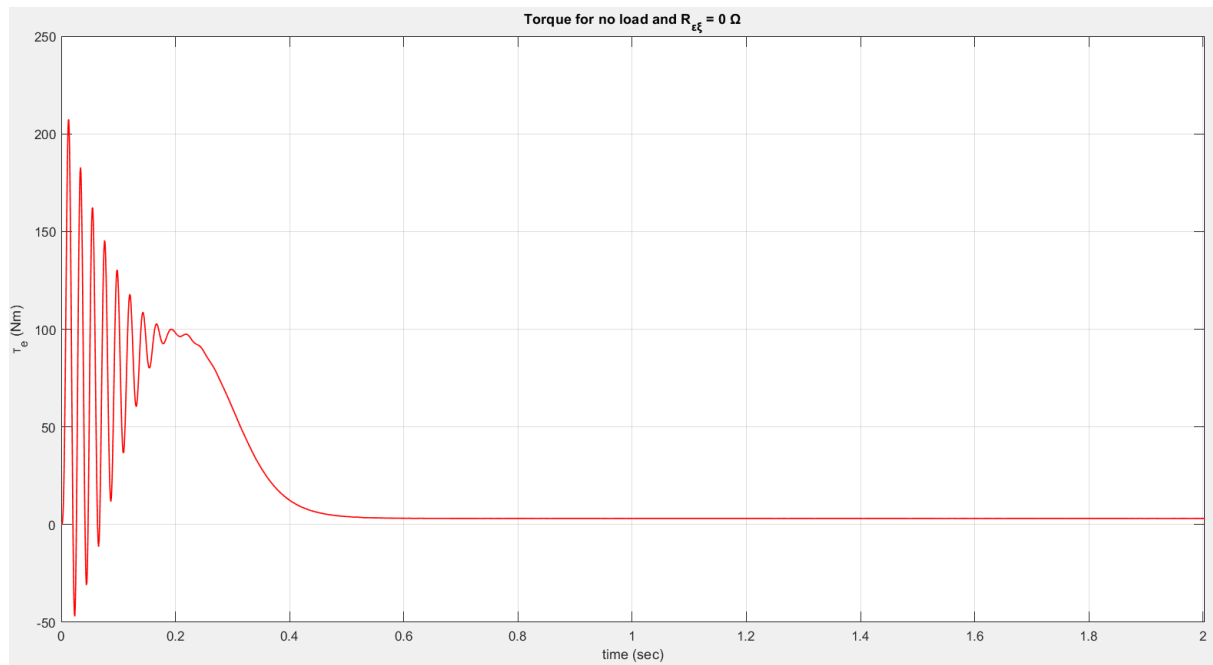
Ζητείται αρχικά να παλμογραφηθούν και να σχολιαστούν τα ρεύματα και οι χρόνοι εκκίνησης, για κάθε μια περίπτωση εξωτερικών αντιστάσεων, δηλαδή 0, 3 και 10 Ω , εν κενώ και υπό φορτίο αντίστοιχα.

Παρακάτω φαίνονται το ρεύμα στάτη και το ρεύμα δρομέα της φάσης a, η ταχύτητα σε rpm, και η ηλεκτρομαγνητική ροπή, τ_e :

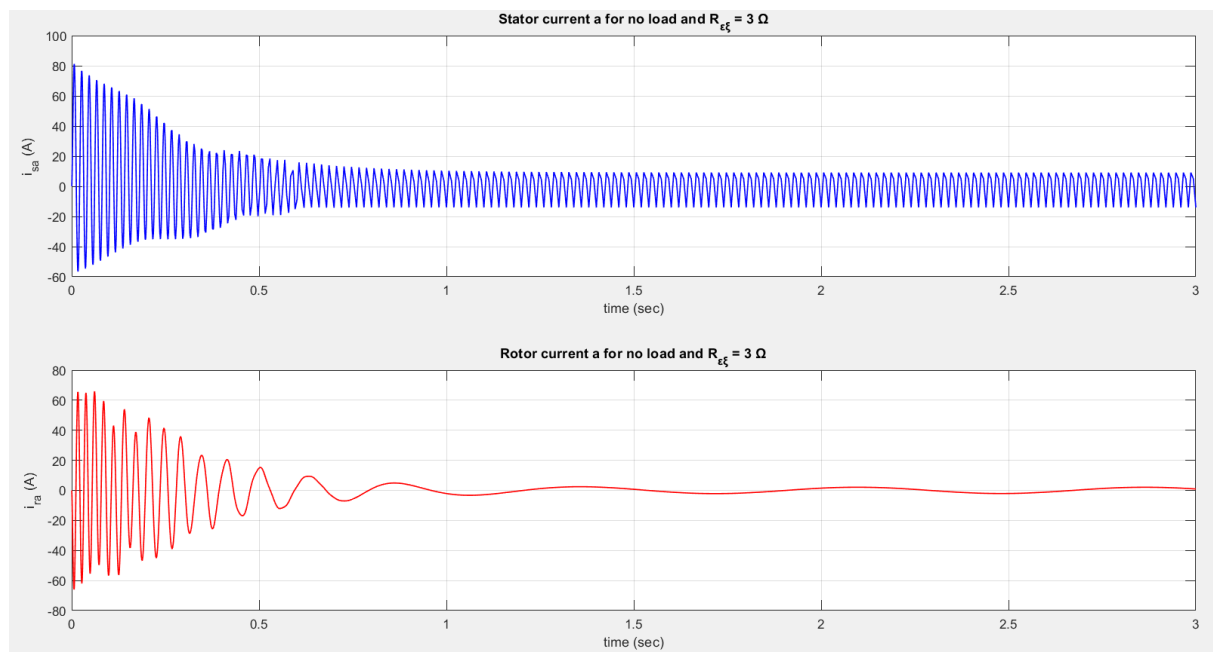
Ο σχολιασμός τους θα πραγματοποιηθεί αφού παρουσιαστούν όλα τα ζητούμενα παλμογραφήματα:

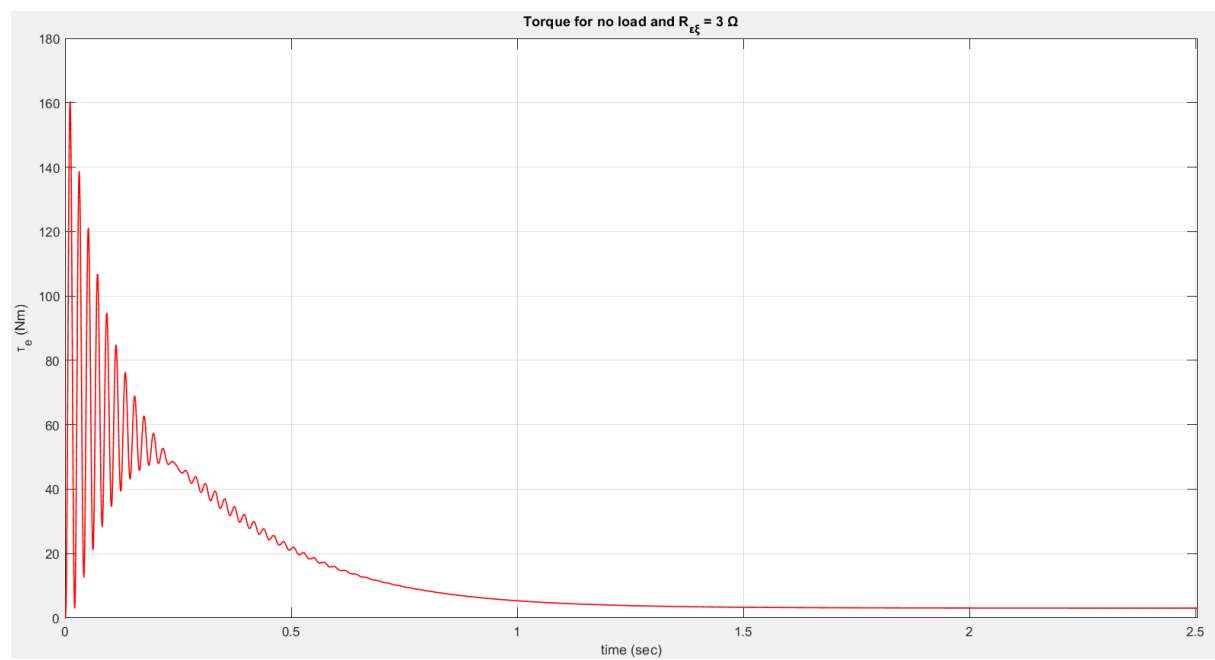
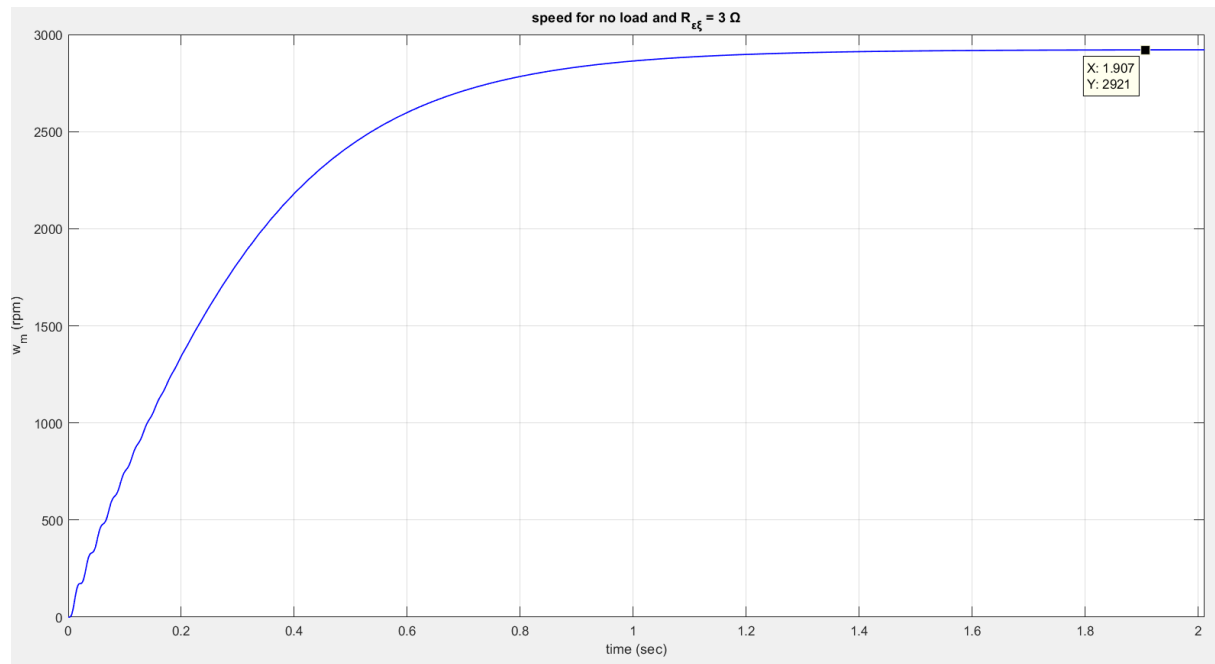
Περίπτωση κενού φορτίου ($\tau_m = 0 \text{ Nm}$) και εξωτερικές αντιστάσεις $R_{\epsilon\xi} = 0 \Omega$:



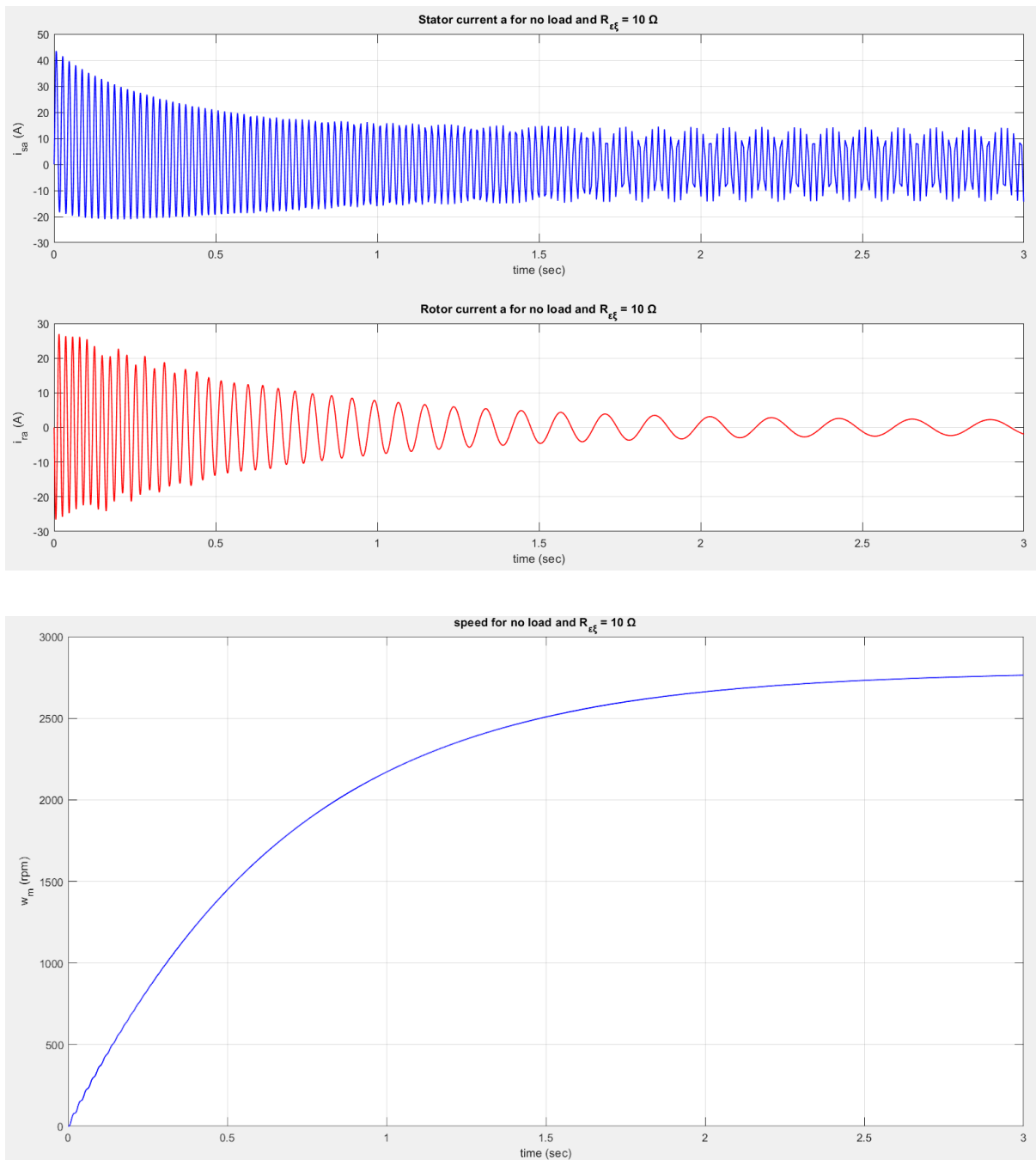


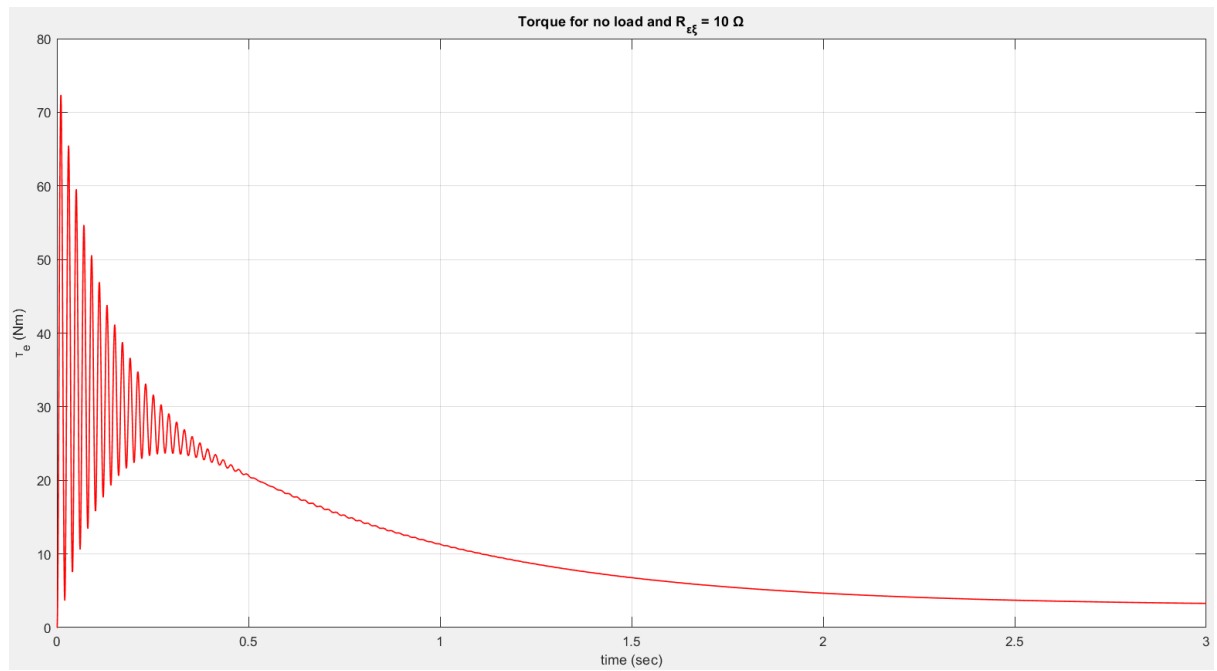
Περίπτωση κενού φορτίου ($\tau_m = 0 \text{ Nm}$) και εξωτερικές αντιστάσεις $R_{\varepsilon\xi} = 3 \Omega$:



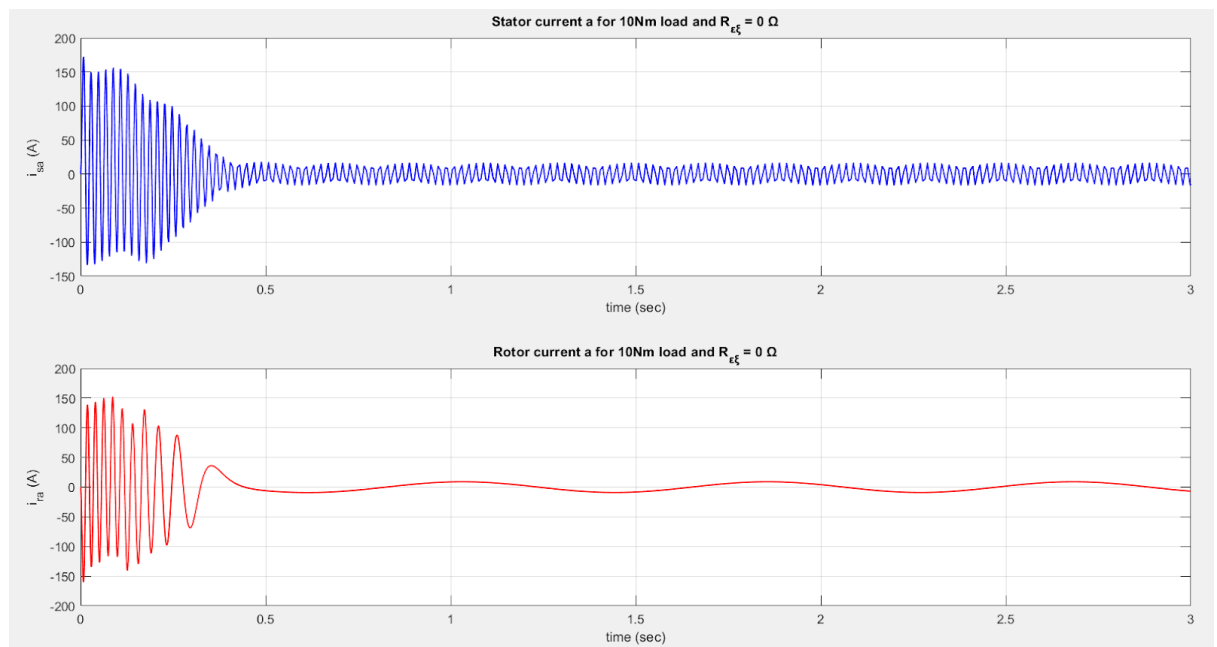


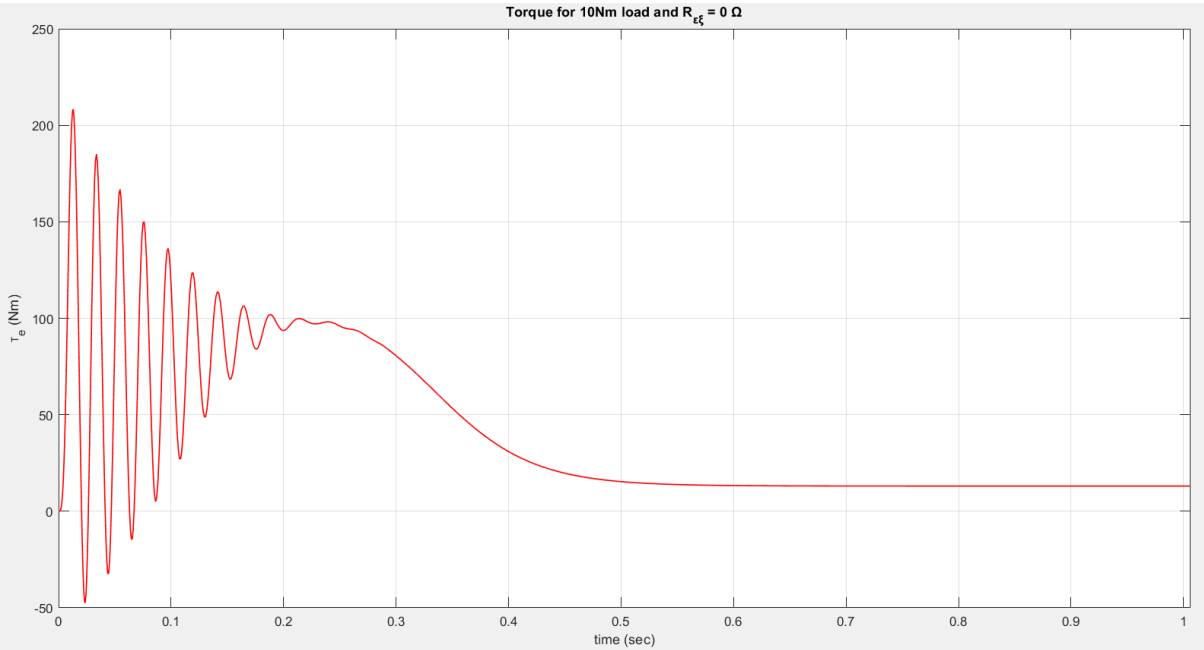
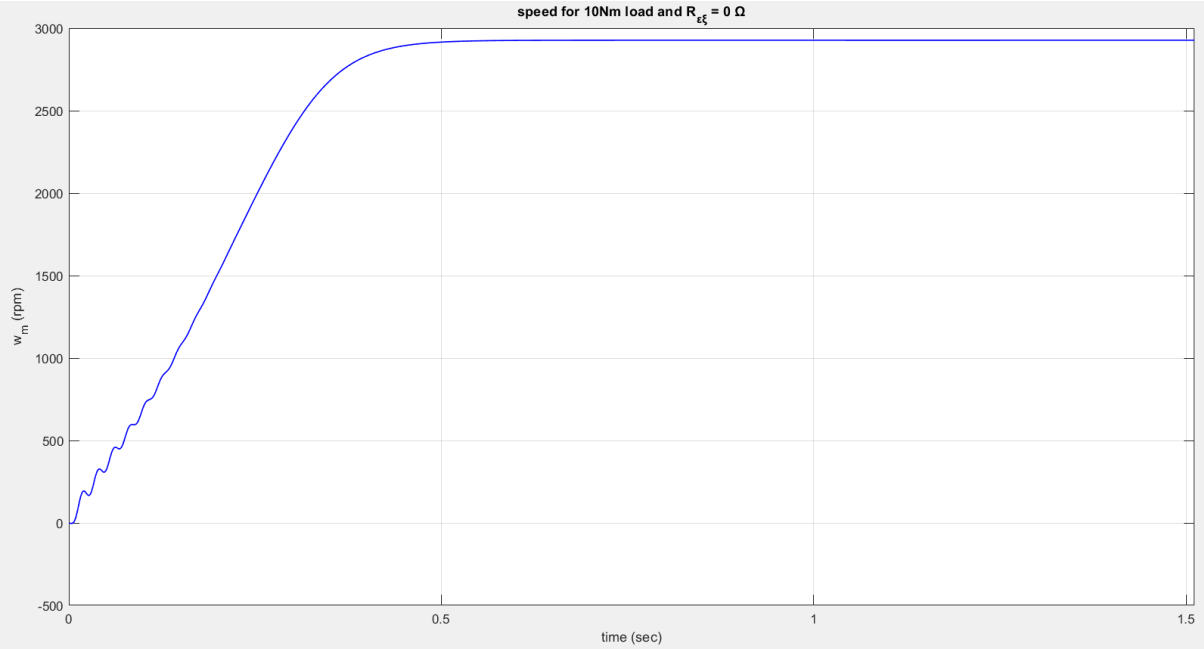
Περίπτωση κενού φορτίου ($\tau_m = 0 \text{ Nm}$) και εξωτερικές αντιστάσεις $R_{e\xi} = 10 \Omega$:

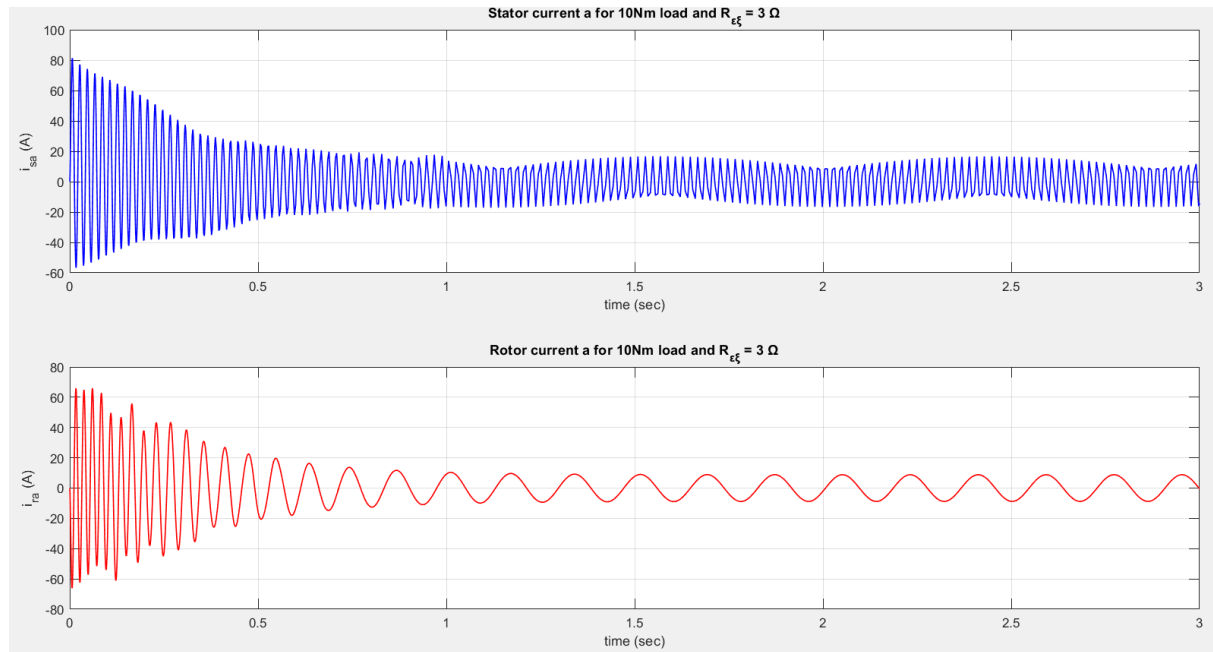




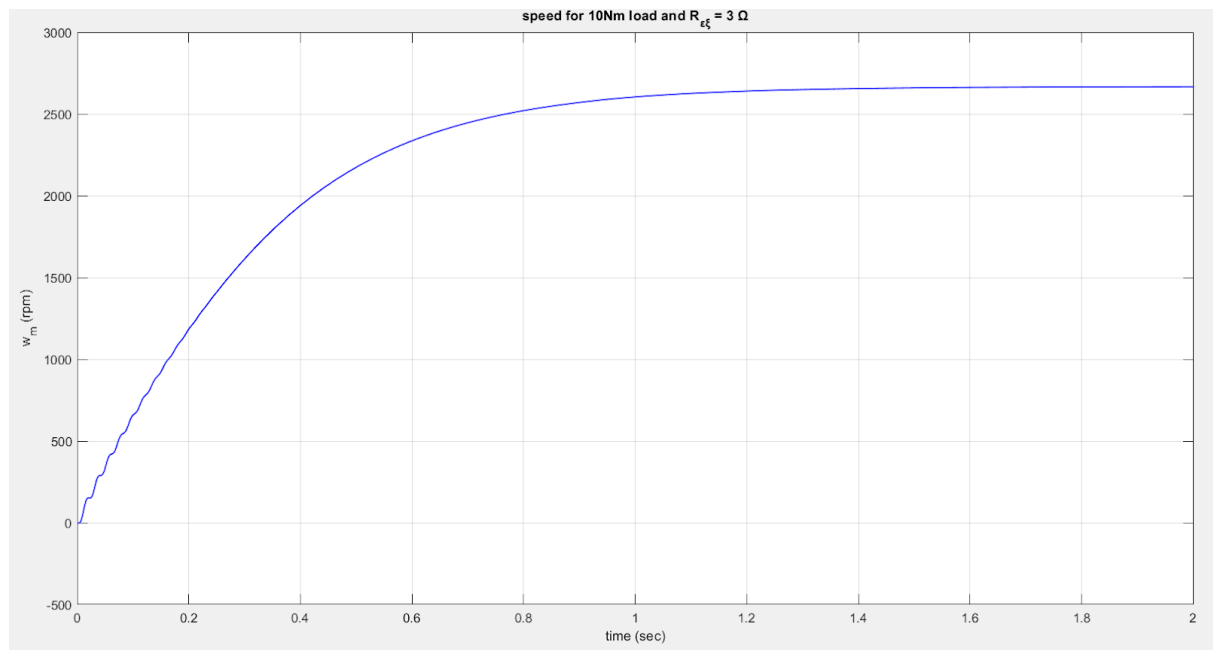
Περίπτωση ύπαρξης φορτίου ($\tau_m = 10 \text{ Nm}$) και εξωτερικές αντιστάσεις $R_{e\xi} = 0 \Omega$:

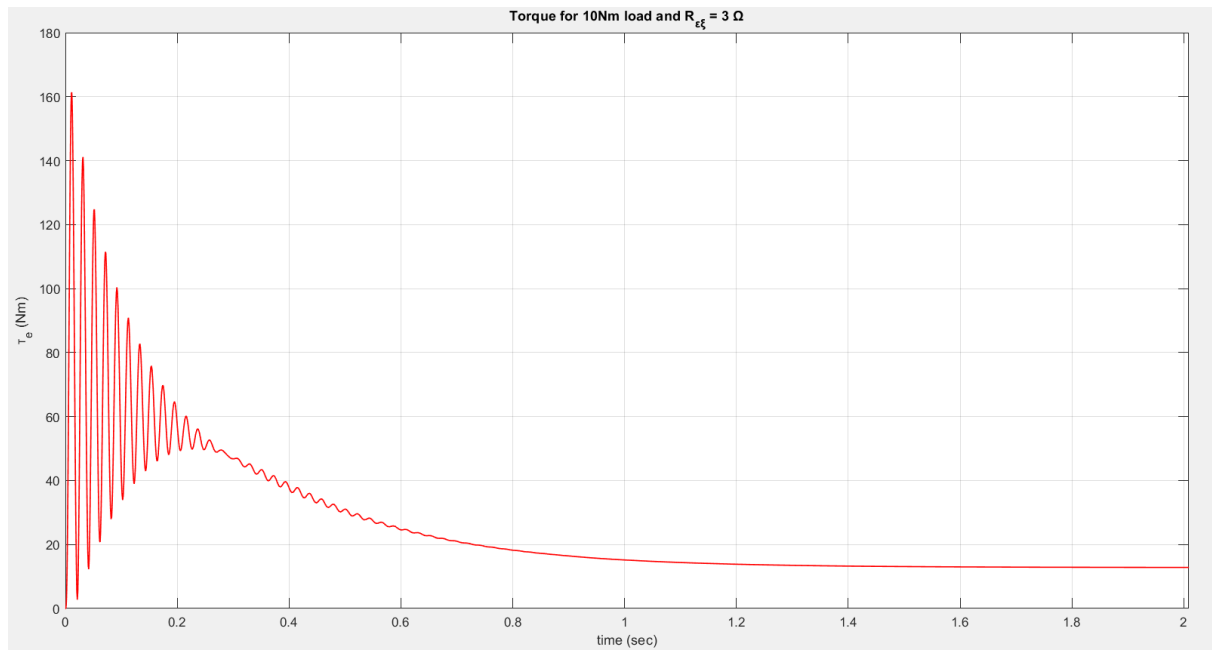




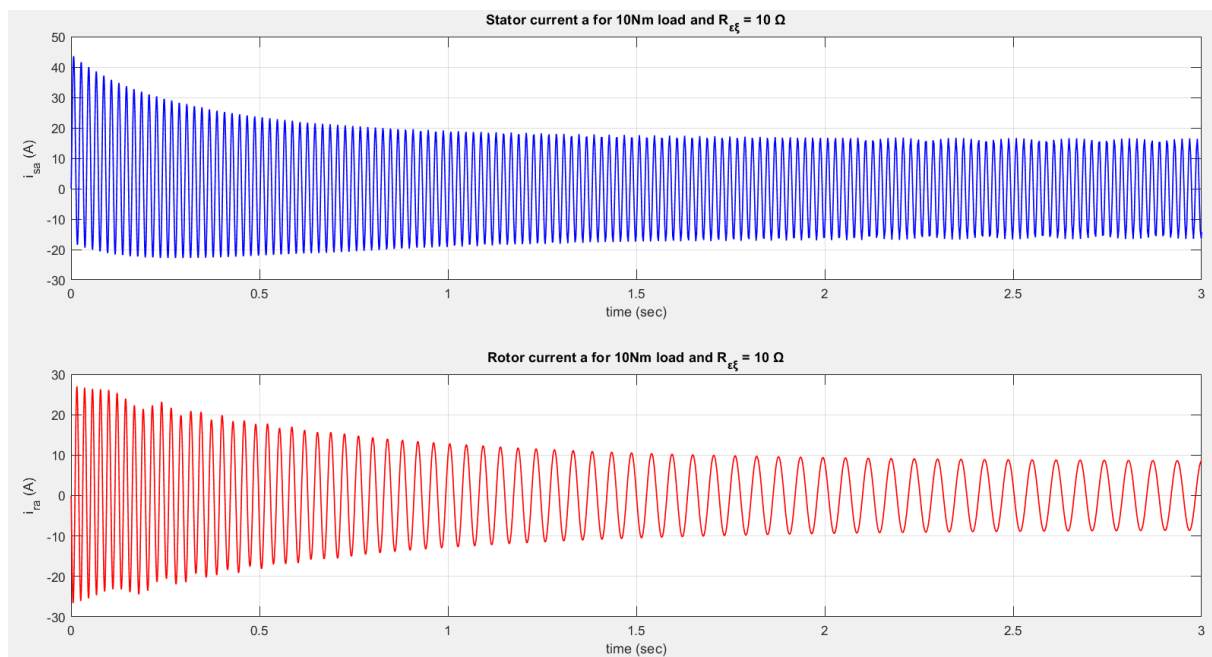


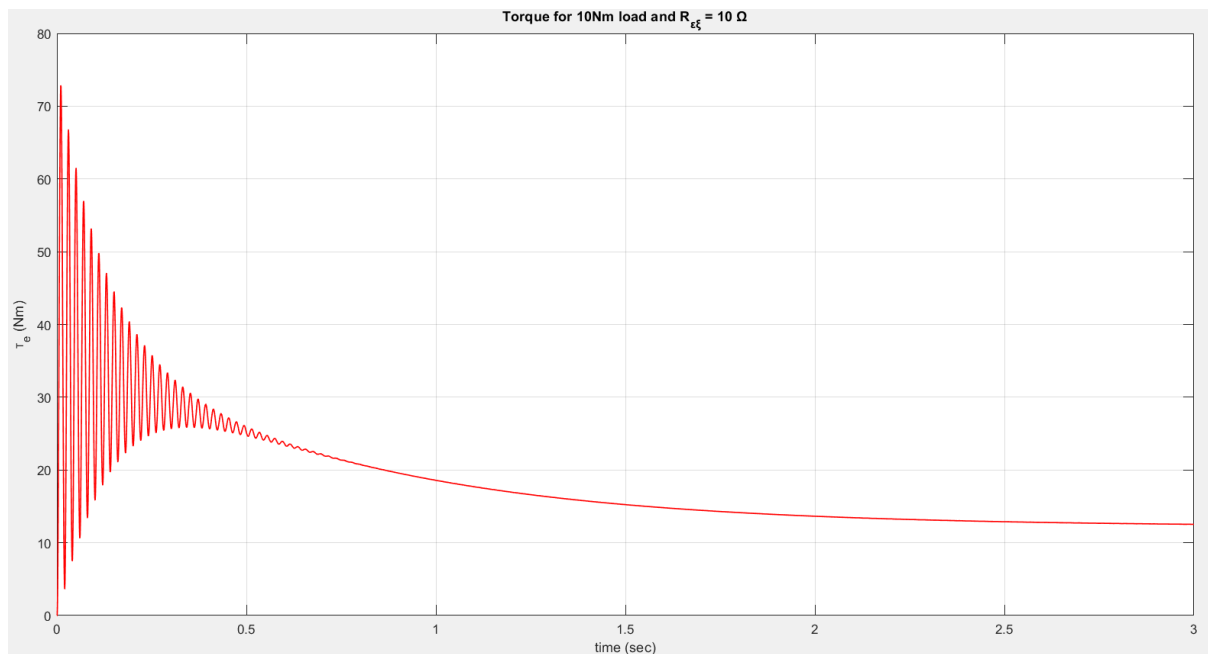
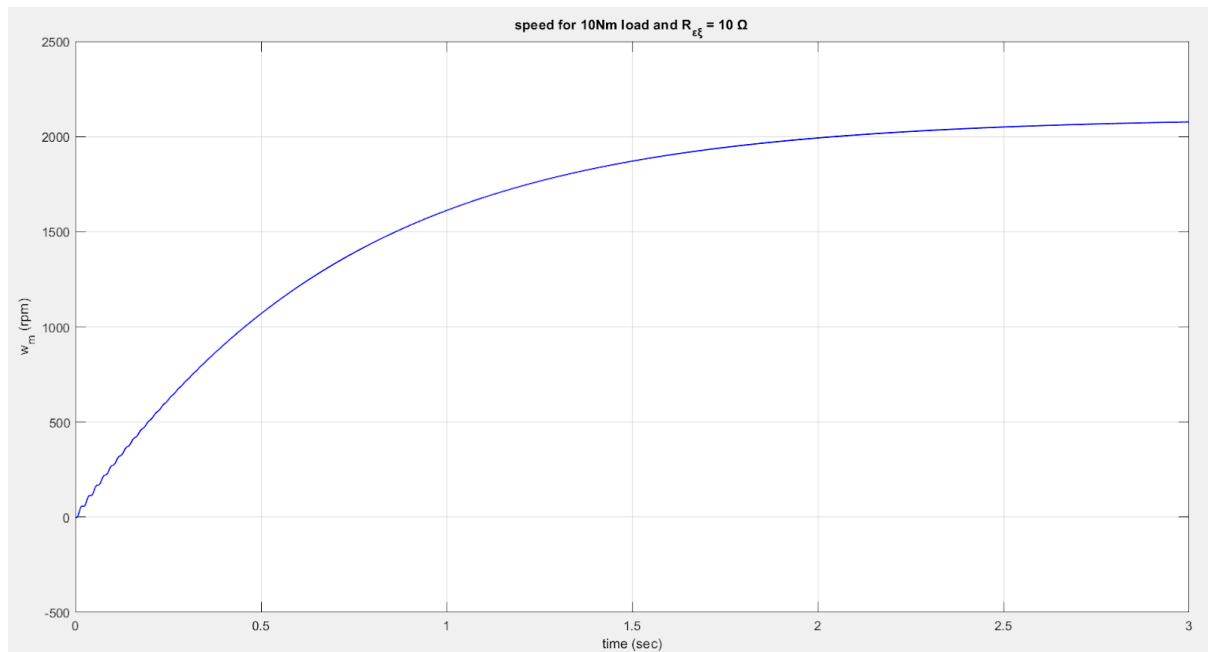
Περίπτωση ύπαρξης φορτίου ($\tau_m = 10 \text{ Nm}$) και εξωτερικές αντιστάσεις $R_{\xi} = 3 \Omega$:





Περίπτωση ύπαρξης φορτίου ($\tau_m = 10 \text{ Nm}$) και εξωτερικές αντιστάσεις $R_{\epsilon\xi} = 10 \Omega$:





Σχολιασμός:

Αρχικά όσον αφορά την περίπτωση κενού φορτίου και $R_{\epsilon\xi} = 0 \Omega$, βλέπουμε πως η ταχύτητα πλησιάζει την ονομαστική, η οποία είναι ίση με 3000 rpm για μια μηχανή 2 πόλων, και μάλιστα η τιμή της φαίνεται να είναι ίση με 2983 rpm . Επιπλέον, παρατηρούνται μικρές ταλαντώσεις κατά την εκκίνηση, στις χαμηλές στροφές της ταχύτητας, και έπειτα ακολουθεί μια γραμμική σχεδόν αύξηση έως ότου να λάβει την τιμή μόνιμης κατάστασης. Όσον αφορά τις κυματομορφές των ρευμάτων, βλέπουμε πως έχουμε ένα αρκετά μεγάλο ρεύμα εκκίνησης, το οποίο είναι περίπου το 7πλάσιο του ονομαστικού κατά την μόνιμη κατάσταση. Αυτό είναι αναμενόμενο, καθώς πραγματοποιούμε απευθείας εκκίνηση και δεν

υπάρχει κάποιος έλεγχος της μηχανής (διανυσματικός για παράδειγμα), και επομένως περιμένουμε να έχουμε ένα ρεύμα εκκίνησης 5 - 10 φορές του ονομαστικού.

Όσον αφορά το γράφημα της ροπής, βλέπουμε και εκεί πως έχουμε το μεταβατικό κατά την εκκίνηση, υπάρχουν δηλαδή ταλαντώσεις, και μετά από αυτό το μεταβατικό πηγαίνουμε στη μόνιμη κατάσταση όπου έχουμε την επιθυμητή ροπή.

Συγκρίνοντας τα παλμογραφήματα όσο αυξάνουμε την τιμή της εξωτερικής αντίστασης, τόσο στην περίπτωση του κενού φορτίου, αλλά και του φορτίου των 10 Nm παρατηρούμε τα εξής:

Όσον αφορά το γράφημα της ταχύτητας, βλέπουμε πως αυξάνοντας την εξωτερική αντίσταση, η ταχύτητα αργεί όλο και περισσότερο να λάβει την τιμή μόνιμης κατάστασης. Επιπλέον, έχουμε μικρότερη τιμή ταχύτητας μόνιμης κατάστασης, γεγονός το οποίο είναι λογικό καθώς αλλάζει η τιμή των αντιστάσεων.

Όσον αφορά τα γραφήματα των ρευμάτων, βλέπουμε πως μειώνεται αρκετά το ρεύμα εκκίνησης όσο αυξάνεται η τιμή των εξωτερικών αντιστάσεων.

Όσον αφορά το γράφημα της ροπής, βλέπουμε πως αλλάζει ο τρόπος με τον οποίο μεταβαίνει από τις ταλαντώσεις στη μόνιμη κατάσταση, γεγονός το οποίο είναι λογικό, καθώς η χαρακτηριστική ροπής-στροφών μετατοπίζεται προς τα αριστερά όσο αυξάνουμε τις εξωτερικές αντιστάσεις.

Συγκρίνοντας τώρα τα παλμογραφήματα του κενού φορτίου και του φορτίου των 10 Nm για τις ίδιες περιπτώσεις εξωτερικής αντίστασης παρατηρούμε τα εξής:

Όσον αφορά το γράφημα της ταχύτητας, βλέπουμε πως έχει μικρότερη τιμή μόνιμης κατάστασης στην περίπτωση της ύπαρξης φορτίου, γεγονός το οποίο είναι επίσης λογικό, καθώς τώρα έχουμε φορτίο, άρα βρισκόμαστε και πιο αριστερά στην χαρακτηριστική ροπής-στροφών και άρα έχουμε και απαίτηση μικρότερης τιμής ταχύτητας.

Για τα γραφήματα των ρευμάτων, έχουμε παρόμοιο ρεύμα εκκίνησης, ωστόσο το ρεύμα κατά την μόνιμη κατάσταση αυξάνεται, καθώς τώρα έχουμε απαίτηση ρεύματος με την ύπαρξη ροπής φορτίου.

Βλέπουμε λοιπόν πως τα αποτελέσματα που λάβαμε μέσω προσομοίωσης, συμφωνούν με αυτά που λάβαμε από τα παλμογραφήματα κατά την διεξαγωγή της εργαστηριακής άσκησης.

Ωστόσο, να σημειωθεί πως δεν έχουμε εμφάνιση του φαινομένου της ηλεκτρομαγνητικής έρψης κατά την αύξηση της τιμής των εξωτερικών αντιστάσεων.

Το φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής έρψης είναι ένα φαινόμενο κατά το οποίο ανάλογα με την τιμή της αντίστασης, παρουσιάζεται αρμονική συνιστώσα χώρου η οποία προκαλεί βύθιση τόσο της ροπής κατά την εκκίνηση, τόσο και στο ρεύμα. Ανάλογα με την τιμή της αντίστασης μπορεί και να μην εμφανίζεται.

Επομένως, σαν τελικό συμπέρασμα να αναφέρουμε πως προσθέτοντας εξωτερικές αντιστάσεις καταφέραμε να περιορίσουμε το ρεύμα εκκίνησης και να πετυχαίνουμε υψηλότερη ροπή σε χαμηλότερες στροφές.

Ωστόσο, αυτός ο τρόπος εκκίνησης μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο σε κινητήρες δακτυλιοφόρου δρομέα.

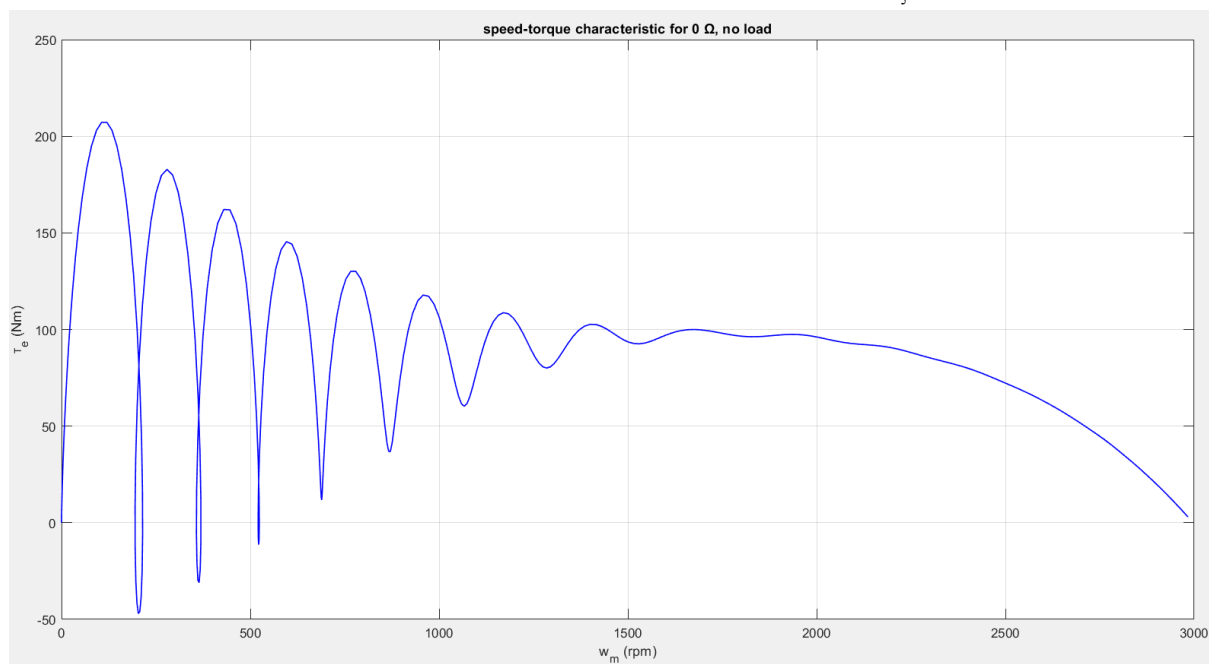
Να σημειωθεί πως θα μπορούσαμε να προσθέσουμε εξωτερική αντίσταση και στον στάτη της μηχανής, και με αυτό τον τρόπο θα έχουμε πετύχει την μείωση του ρεύματος εκκίνησης, ωστόσο δεν μας δίνει τη δυνατότητα να έχουμε αυξημένη ροπή.

Αυτό γίνεται καθώς η ροπή είναι ανάλογη του τετραγώνου της τάσης, και αυτό έχει ως αποτέλεσμα εάν εμείς τοποθετήσουμε αντιστάσεις στον στάτη, θα έχουμε από τη μια πλευρά περιορισμένο ρεύμα εκκίνησης, όμως ταυτόχρονα περιορισμένη ροπή εκκίνησης.

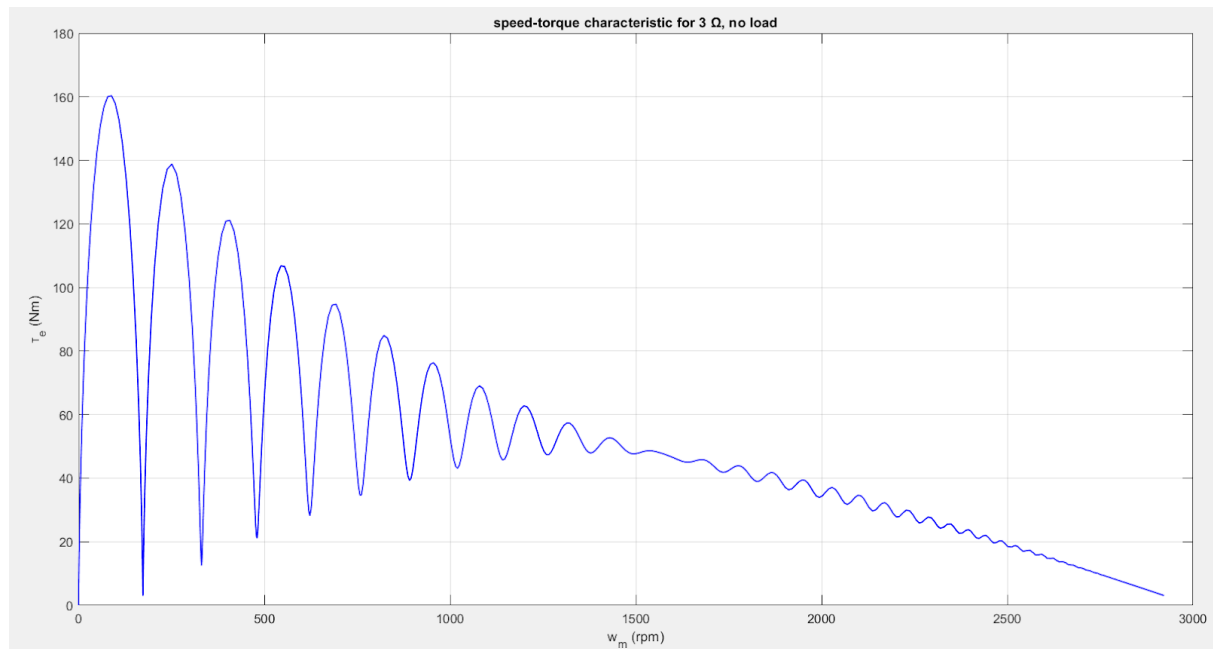
Έπειτα, ζητείται να παλμογραφηθούν και να σχολιαστούν οι χαρακτηριστικές ροπής-ταχύτητας για κάθε μια περίπτωση εξωτερικών αντιστάσεων, δηλαδή 0, 3 και 10 Ω , εν κενώ και υπό φορτίο αντίστοιχα.

Αυτές, φαίνονται παρακάτω:

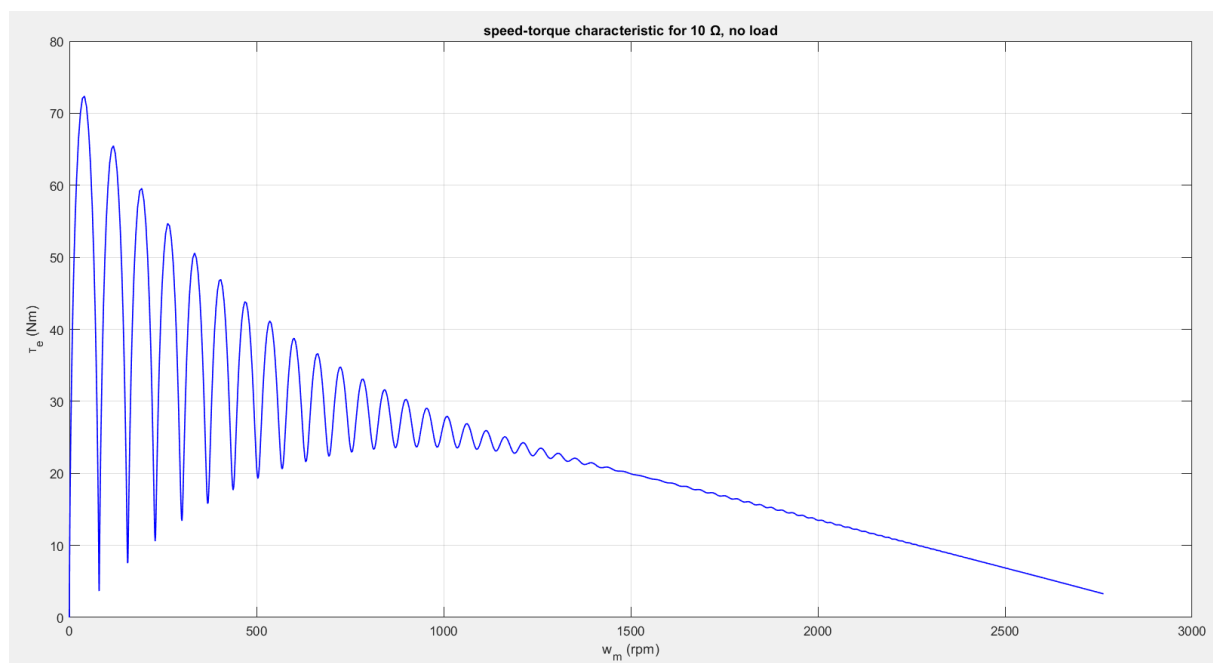
Περίπτωση κενού φορτίου ($\tau_m = 0 \text{ Nm}$) και εξωτερικές αντιστάσεις $R_{\epsilon\xi} = 0 \Omega$:



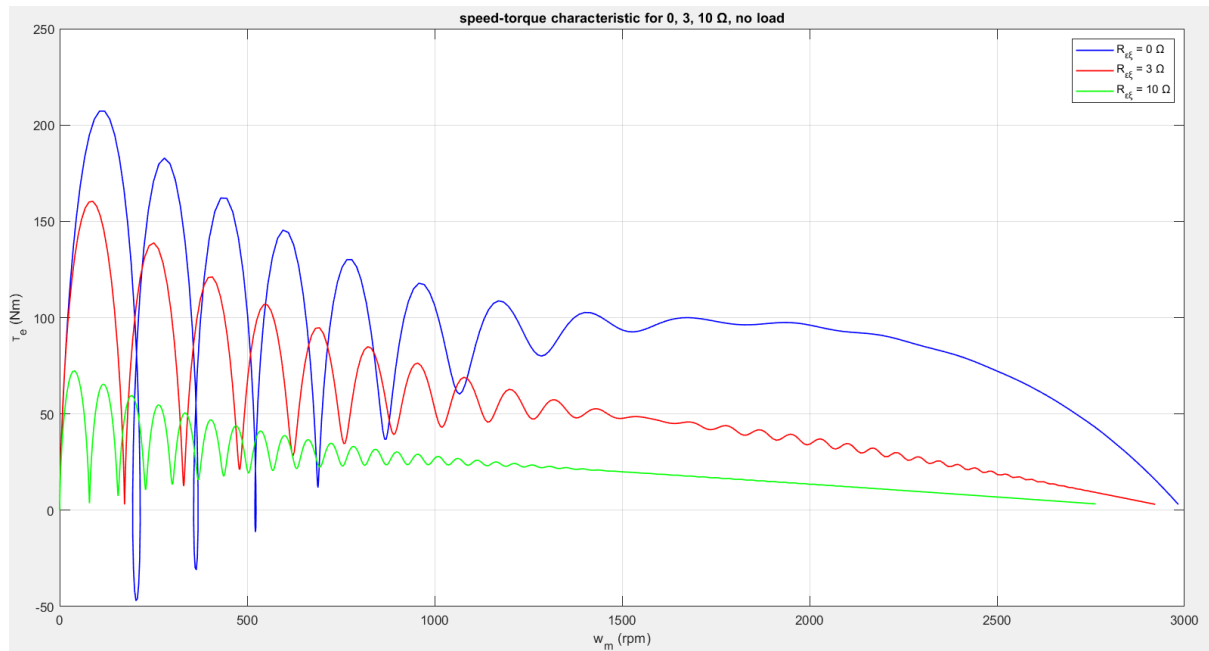
Περίπτωση κενού φορτίου ($\tau_m = 0 \text{ Nm}$) και εξωτερικές αντιστάσεις $R_{\xi} = 3 \Omega$:



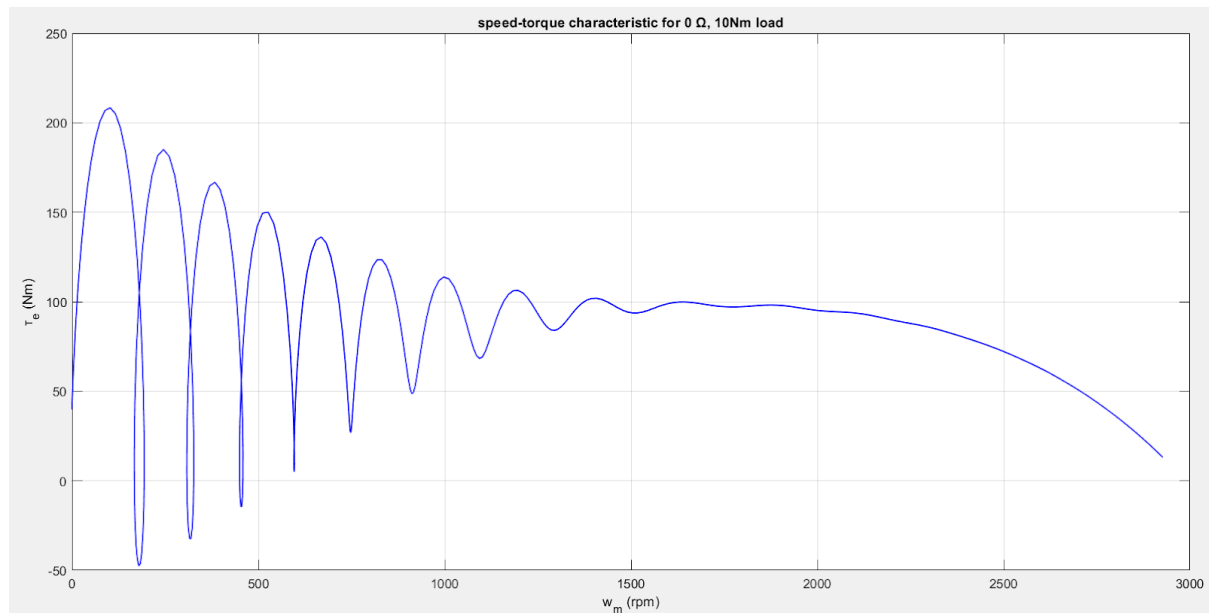
Περίπτωση κενού φορτίου ($\tau_m = 0 \text{ Nm}$) και εξωτερικές αντιστάσεις $R_{\xi} = 10 \Omega$:



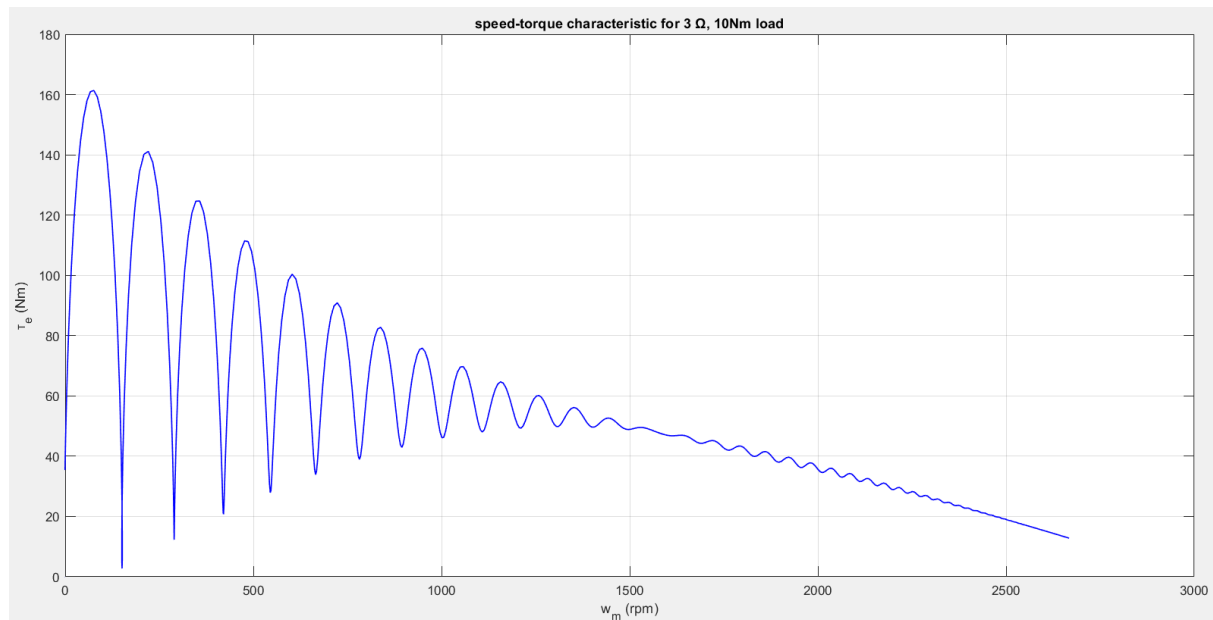
Και σε κοινό γράφημα όλες οι περιπτώσεις για τις εξωτερικές αντιστάσεις για την περίπτωση κενού φορτίου, ώστε να πραγματοποιηθεί πιο εύκολα η σύγκριση:



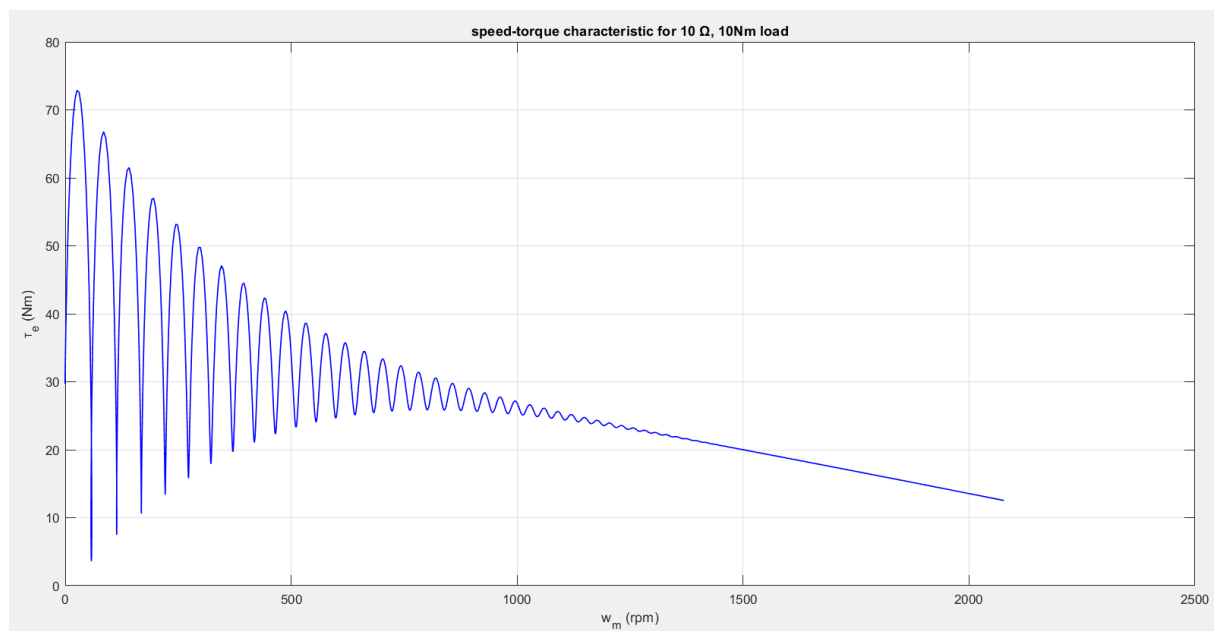
Περίπτωση ύπαρξης φορτίου ($\tau_m = 10 \text{ Nm}$) και εξωτερικές αντιστάσεις $R_{\epsilon\xi} = 0 \Omega$:



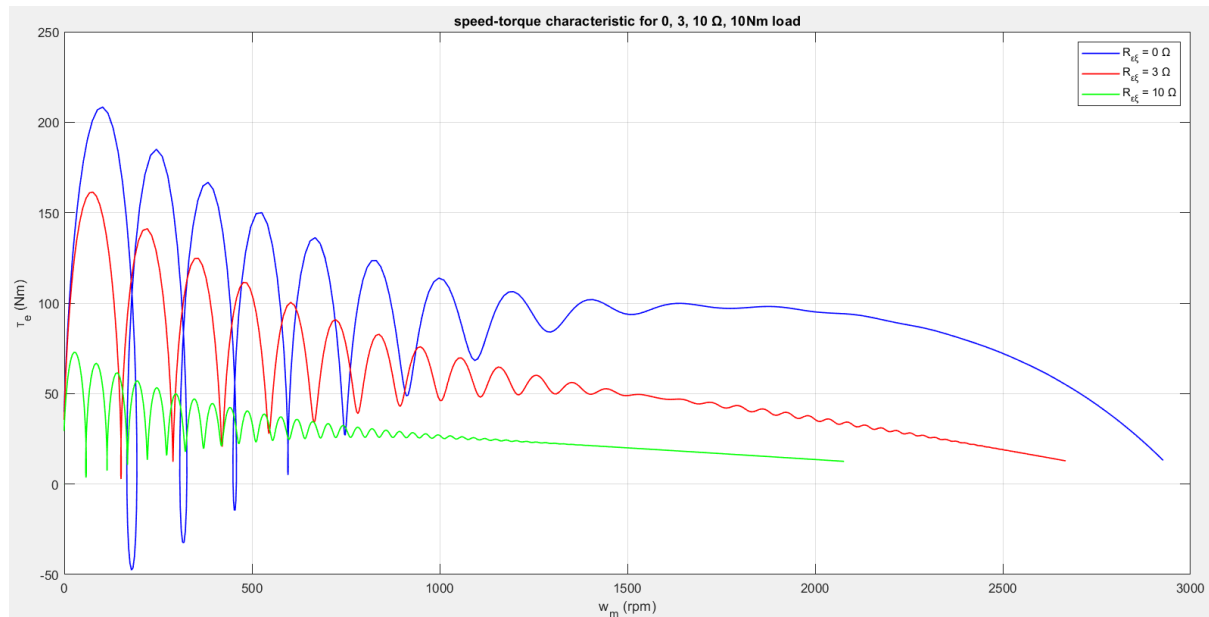
Περίπτωση ύπαρξης φορτίου ($\tau_m = 10 \text{ Nm}$) και εξωτερικές αντιστάσεις $R_{\xi} = 3 \Omega$:



Περίπτωση ύπαρξης φορτίου ($\tau_m = 10 \text{ Nm}$) και εξωτερικές αντιστάσεις $R_{\xi} = 10 \Omega$:



Και σε κοινό γράφημα όλες οι περιπτώσεις για τις εξωτερικές αντιστάσεις για την περίπτωση φορτίου 10 Nm , ώστε να πραγματοποιηθεί πιο εύκολα η σύγκριση:



Σχολιασμός:

Βλέπουμε αρχικά πως σε όλες τις κυματομορφές έχουμε το μεταβατικό φαινόμενο κατά την εκκίνηση, δηλαδή έχουμε εμφάνιση ταλαντώσεων. Έπειτα, ακολουθεί την χαρακτηριστική ροπής-στροφών, έως ότου να λάβει την τιμή μόνιμης κατάστασης.

Αυξάνοντας τις εξωτερικές αντιστάσεις, παρατηρούμε πως τόσο στην περίπτωση ύπαρξης φορτίου, όσο και στην περίπτωση εν κενώ φορτίο, μειώνονται οι ταλαντώσεις εκκίνησης σε πλάτος, και έχουμε μετατόπιση της χαρακτηριστικής ροπής-στροφών προς τα αριστερά.

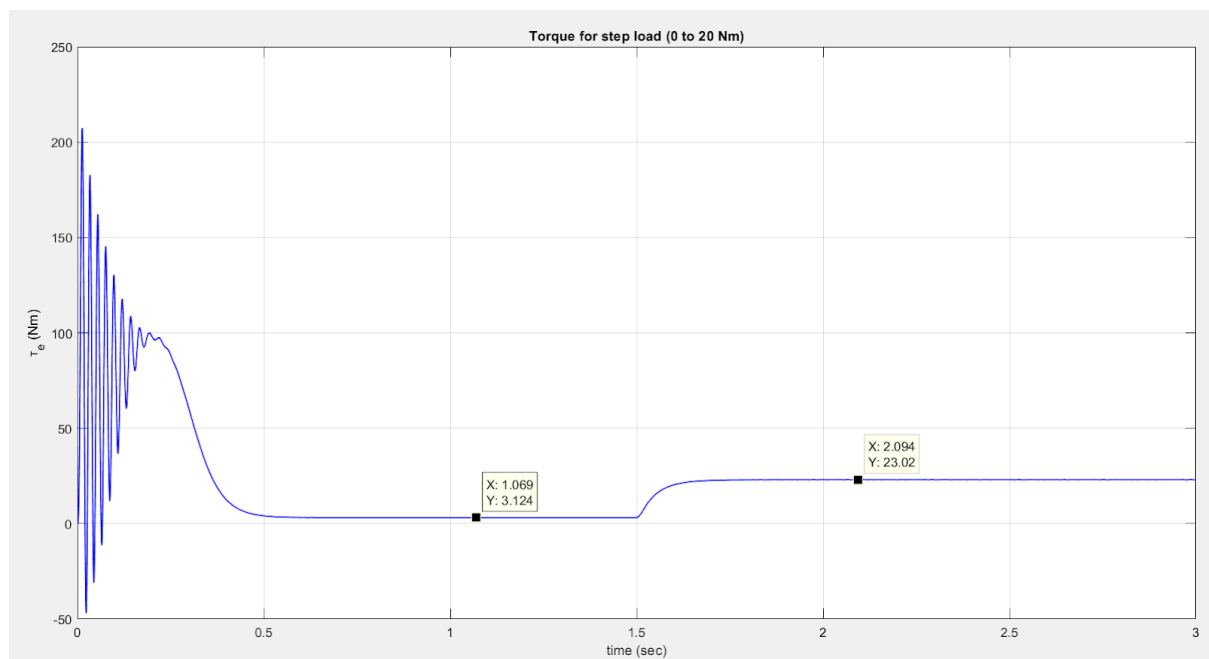
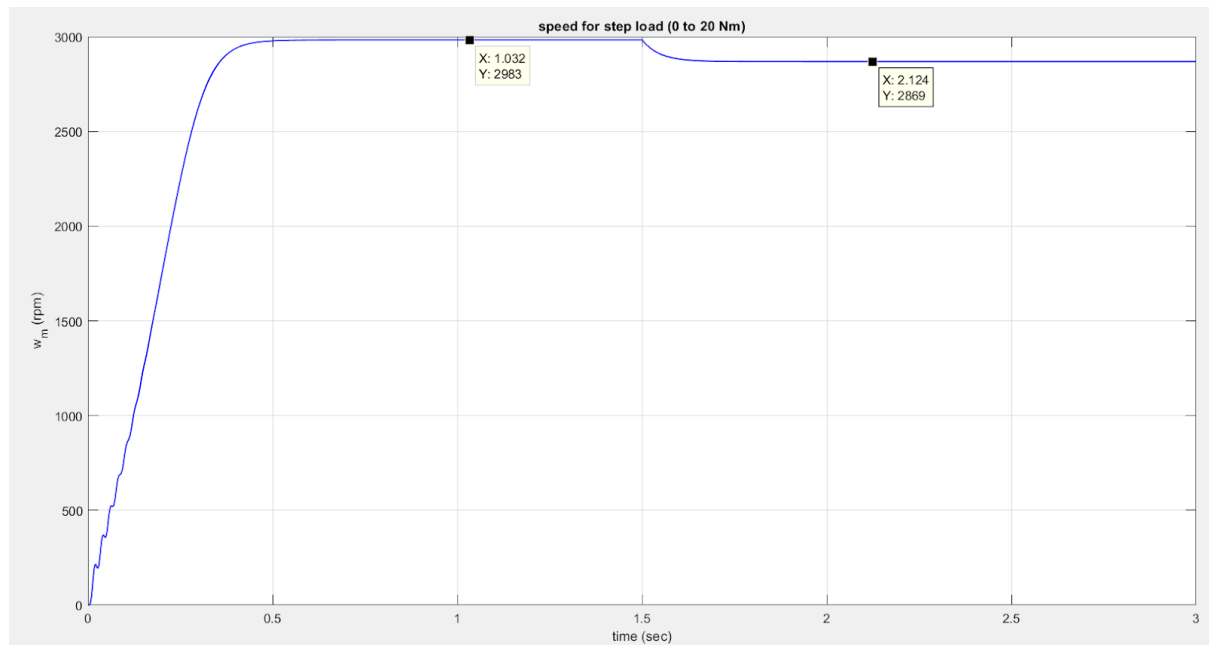
Επιπλέον, η τιμή της ταχύτητας μόνιμης κατάστασης μειώνεται όσο αυξάνεται τιμή της εξωτερικής αντίστασης, γεγονός το οποίο παρατηρήσαμε και στην κυματομορφή της ταχύτητας συναρτήσει του χρόνου.

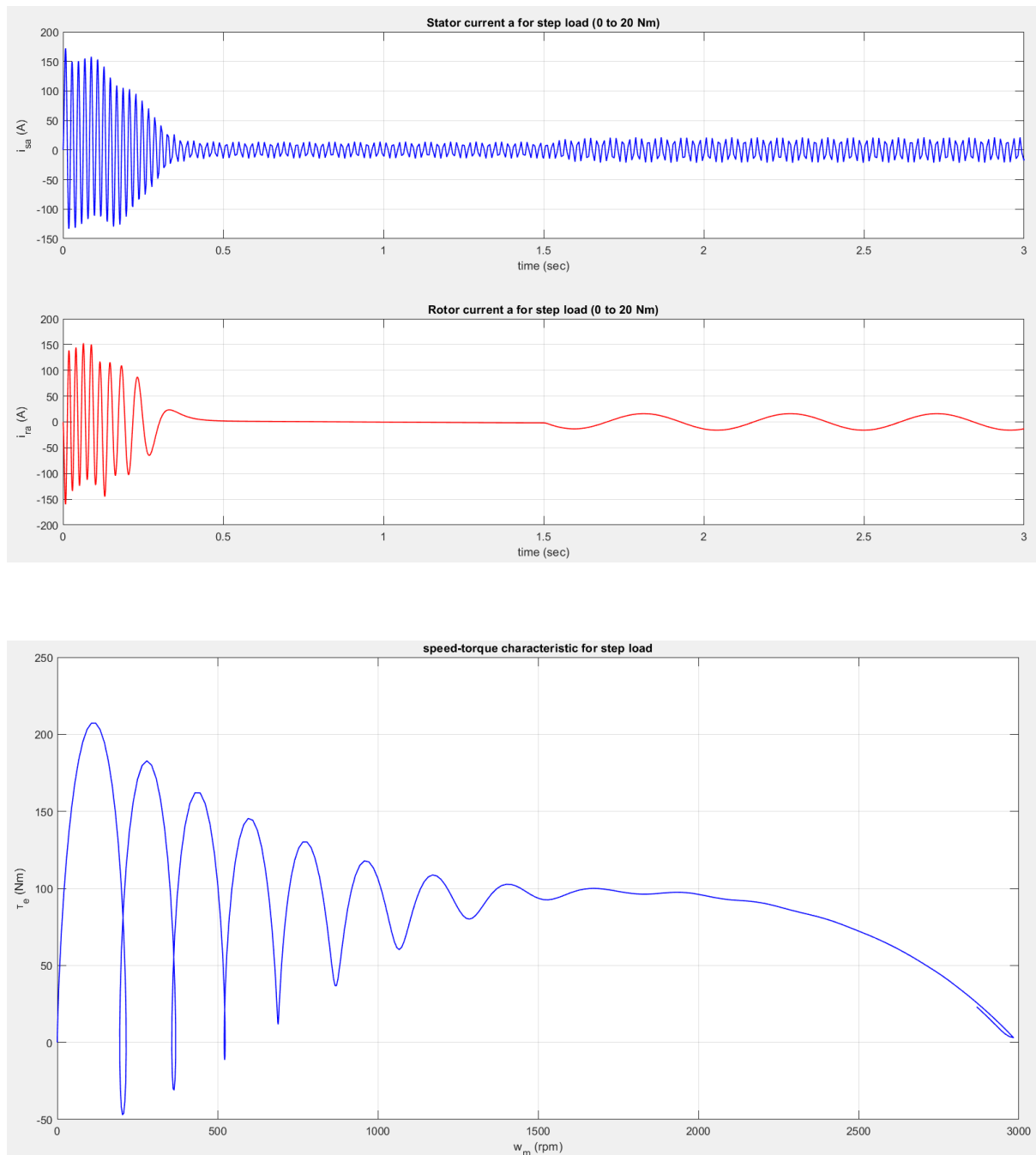
Συγκρίνοντας τις χαρακτηριστικές για την ύπαρξη ροπής φορτίου και για την περίπτωση εν κενώ φορτίο, για τις ίδιες περιπτώσεις εξωτερικών αντιστάσεων κάθε φορά, βλέπουμε πως έχουμε μικρότερη ταχύτητα στη μόνιμη κατάσταση κατά την ύπαρξη ροπής φορτίου, γεγονός το οποίο είναι λογικό και το παρατηρήσαμε επίσης και στην κυματομορφή της ταχύτητας συναρτήσει του χρόνου.

Μεταβατική συμπεριφορά σε απότομη μεταβολή του φορτίου

Τέλος, ζητείται να μεταβάλλουμε απότομα το φορτίο της μηχανής, και να παλμογραφηθούν οι χρονικές μεταβολές της ταχύτητας, της ηλεκτρομαγνητικής ροπής και του ρεύματος στάτη, αλλά και η χαρακτηριστική ροπής-στροφών.

Παρακάτω φαίνονται τα ζητούμενα παλμογραφήματα μέσω προσομοίωσης:





Σχολιασμός:

Όσον αφορά τις κυματομορφές του ρεύματος, βλέπουμε πως έχουμε αύξηση του ρεύματος κατά τη μόνιμη κατάσταση με την προσθήκη φορτίου.

Για τη κυματομορφή της ταχύτητας αλλά και της ηλεκτρομαγνητικής ροπής βλέπουμε πως η μεταβολή του φορτίου δεν επιφέρει ταλαντώσεις κατά την μετάβαση, και αυτό οφείλεται στο γεγονός πως η μηχανή την οποία προσομοιώνουμε είναι μικρής ισχύος. Αν είχαμε μια μηχανή μεγάλης ισχύος (για παράδειγμα 2250 Hp), με τη μεταβολή φορτίου θα παρατηρούσαμε ταλαντώσεις, με συντελεστή ταλάντωσης περίπου ίσο με $\frac{1}{3}$, και άρα θα

παρατηρούσαμε περίπου 3 σημαντικές ταλαντώσεις μέχρι να λάβει την τιμή μόνιμης κατάστασης.

Επιπλέον, ένα άλλο φαινόμενο που παρατηρούμε στις μηχανές μεγάλης ισχύος είναι πως δημιουργούνται τοπικά ταλαντώσεις με την βηματική μεταβολή του φορτίου.

Στις μικρής ισχύος μηχανές δεν έχουμε τέτοιες ταλαντώσεις, παρά μόνο στην εκκίνηση, ενώ στις μεγάλης ισχύος μηχανές έχουμε διαδρομές τύπου μαιάνδρου. Αυτές οι ταλαντώσεις μπορούν να οδηγήσουν στιγμιαία τη μηχανή να λειτουργεί σε ταχύτητες μεγαλύτερες της σύγχρονης, και άρα να λειτουργεί και ως γεννήτρια, μέχρι να φτάσει στην τελική της κατάσταση.

Επιπλέον, στις μεγάλης ισχύος μηχανές, οι ταλαντώσεις κατά την εκκίνηση είναι περιορισμένες σε σύγκριση με τις μηχανές μικρής ισχύος.

Στην κυματομορφή της ροπής συναρτήσει του χρόνου, επειδή η μηχανή είναι μικρής ισχύος, βλέπουμε τις ταλαντώσεις οι οποίες παράγονται κατά την εκκίνηση για ένα σχετικά μεγάλο χρονικό διάστημα συγκρινόμενο με τον χρόνο που χρειάζεται για να μεταβεί στη μόνιμη κατάσταση. Η ηλεκτρομαγνητική ροπή αυξάνεται με την προσθήκη φορτίου, ώστε να εξισωθεί με τη ροπή φορτίου όπως αναμένουμε.

Στην κυματομορφή της ταχύτητας συναρτήσει του χρόνου, βλέπουμε ξανά τις μικρές ταλαντώσεις κατά την εκκίνηση, στις χαμηλές στροφές, και μετά ακολουθεί γραμμική μεταβολή της ταχύτητας, μέχρι τη μόνιμη κατάσταση. Βλέπουμε και εδώ πως στην περίπτωση του κενού φορτίου, η ταχύτητα στην μόνιμη κατάσταση πλησιάζει την σύγχρονη ταχύτητα, αλλά δεν τη φτάνει.

Όσον αφορά τη χαρακτηριστική ροπής-στροφών, βλέπουμε τις ταλαντώσεις για ένα μεγάλο μέρος της ταχύτητας, μέχρι να αποσβεστούν και να ακολουθήσει η χαρακτηριστική ροπής-στροφών την πορεία μέχρι να λάβει την τιμή μόνιμης κατάστασης.

Μεταβάλλοντας βηματικά το φορτίο, βλέπουμε πως η καμπύλη ακολουθεί μια διαδρομή επιστροφής, όπου τελικά φτάνει σε μικρότερη ταχύτητα (αφού έχουμε προσθήκη ροπής φορτίου), και μεγαλύτερη ροπή, όπως είναι επιθυμητό.

Να σημειωθεί πως δεν παρατηρούμε ταλαντώσεις κατά την μετάβαση αυτή, όπως είναι και αναμενόμενο καθώς είναι μηχανή μικρής ισχύος, ενώ σε μια μηχανή μεγάλης ισχύος θα παρατηρούσαμε ταλαντώσεις, οι οποίες θα φαίνονταν στη χαρακτηριστική-στροφών σαν διαδρομές τύπου μαιάνδρου.

Τέλος, παρακάτω θα παρουσιάσω και την αντίστοιχη προσομοίωση όμως με υλοποίηση μοντέλου σήματος για την μηχανή επαγωγής.

Πριν παρουσιαστεί το μοντέλο στο simulink, θα παρουσιαστεί η ανάλυση που ακολουθήθηκε ώστε να προκύψουμε στο μοντέλο αυτό.

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

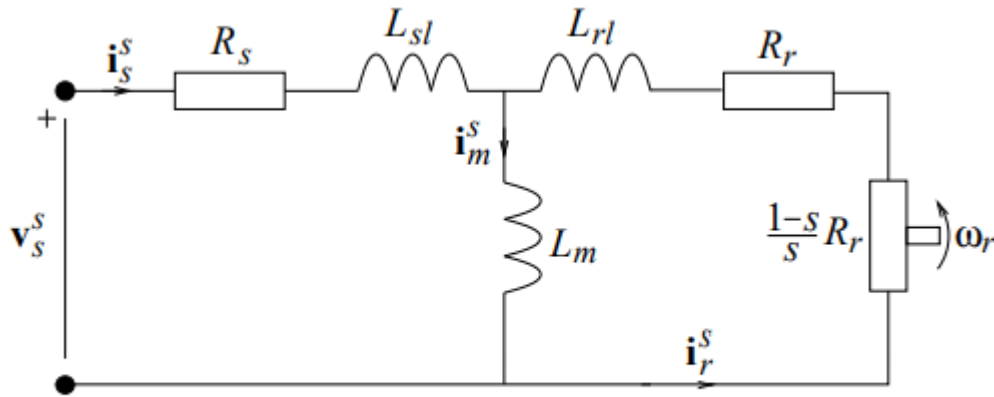


Figure 5.10. Steady-state T-equivalent circuit for the induction motor.

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

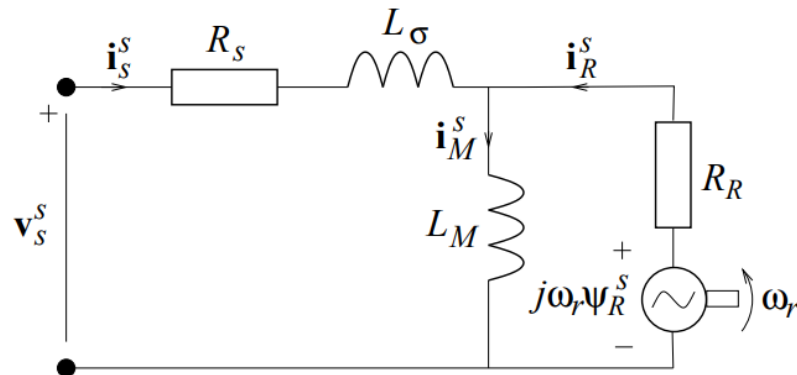


Figure 5.11. Dynamic inverse-Γ-equivalent circuit for the induction motor.

Για να καταλήξουμε στο παραπάνω μοντέλο, χρησιμοποιήθηκαν τα εξής:

$$L_{\sigma} \simeq L_{rl} + L_{sl}$$

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

$$L_M = b \cdot L_m$$

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

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 220 V του δικτύου (άρα σε πλάτος $220\sqrt{2} \text{ V}$). Επιπλέον, για τον μετασχηματισμό αβ, επιλέγω $K = 1$, ώστε να έχω ίδιο πλάτος και στο πεδίο αβ.

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:

$$I_s^s = I_{sa}^s + j \cdot I_{s\beta}^s$$

$$\Psi_R^s = \Psi_{Ra}^s + j \cdot \Psi_{R\beta}^s$$

$$V_s^s = V_{sa}^s + j \cdot V_{s\beta}^s$$

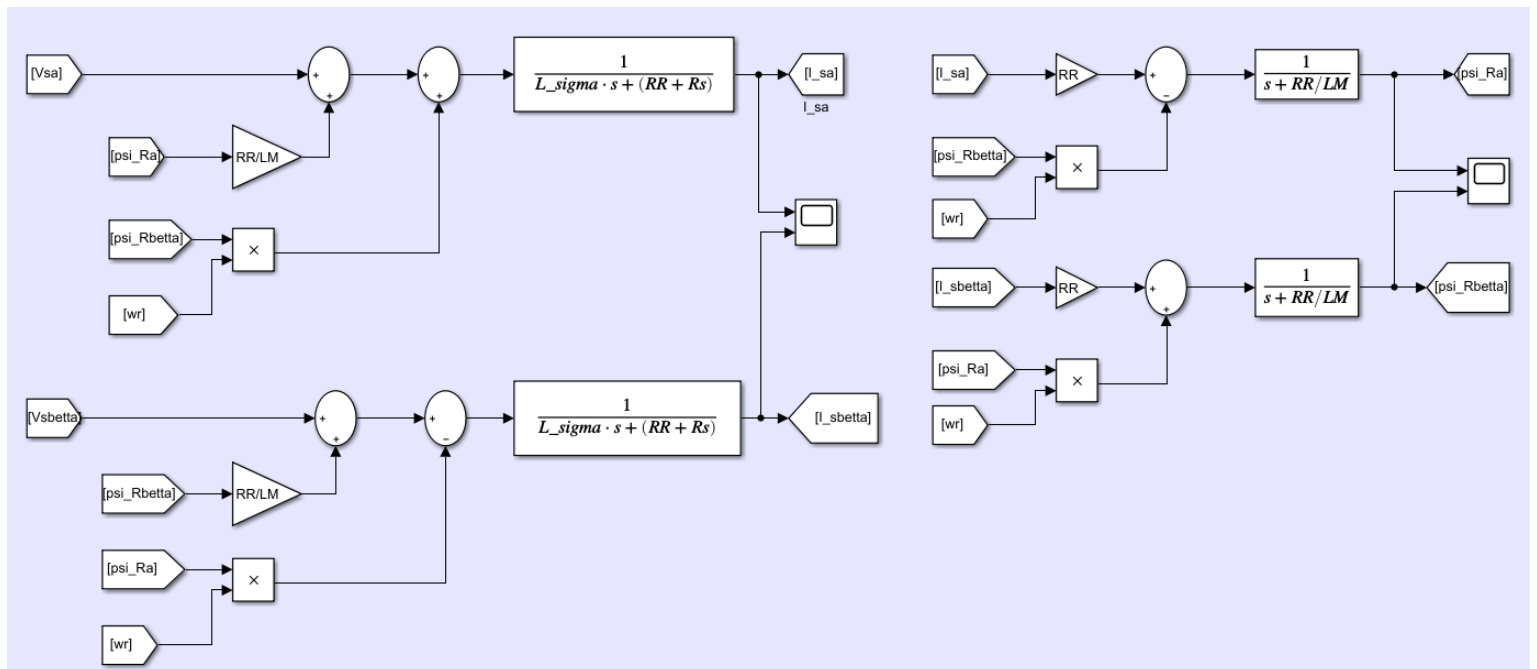
$$I_{sa}^s = \text{Re} \{ I_s^s \} = \frac{1}{sL_\sigma + R_R + R_s} \cdot \left[V_{sa}^s + \frac{R_R}{L_M} \cdot \Psi_{Ra}^s + \omega_r \cdot \Psi_{R\beta}^s \right]$$

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

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

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

Το schematic για το ηλεκτρικό μέρος στο simulink φαίνεται παρακάτω:



Η εξίσωση για το μηχανικό μέρος είναι η εξής:

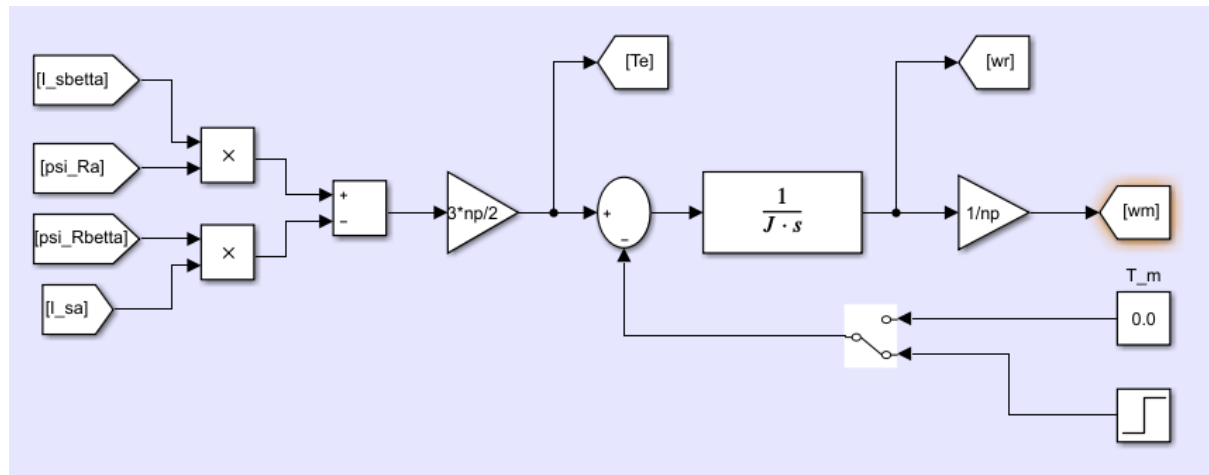
$$J \cdot \frac{d\omega_r}{dt} = \tau_e - \tau_m$$

Επομένως, εφαρμόζοντας μετασχηματισμό Laplace, γίνεται:

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

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

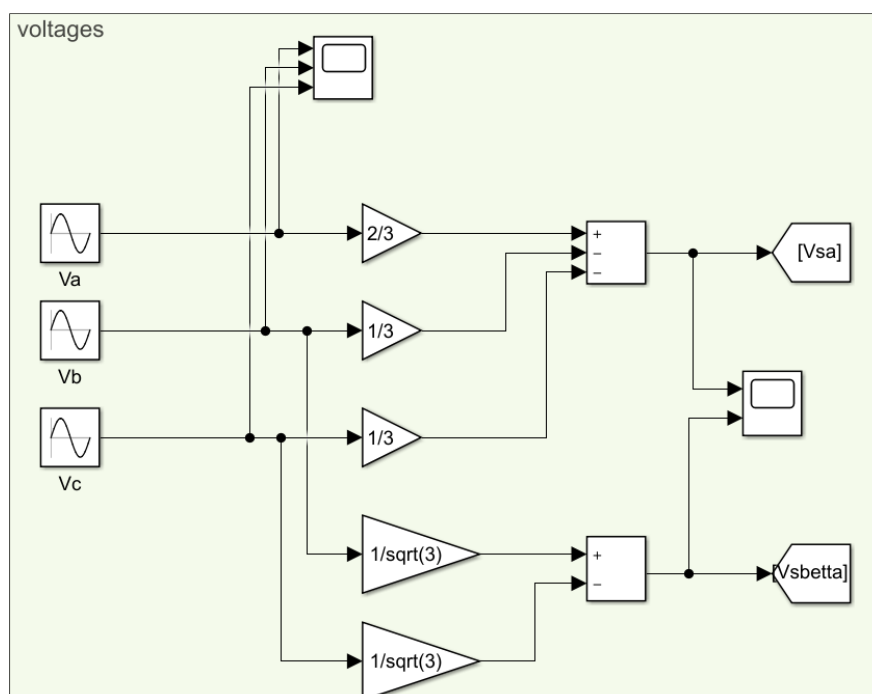
Το schematic του στο simulink, φαίνεται παρακάτω:



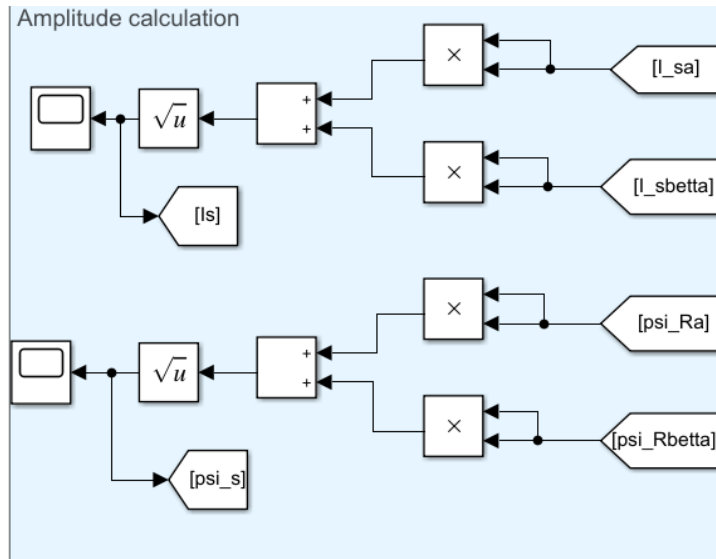
Όσον αφορά την τάση τροφοδοσίας, μετασχηματίζουμε από το πεδίο abc στο αβ τις τριφασικές τάσεις ως εξής:

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

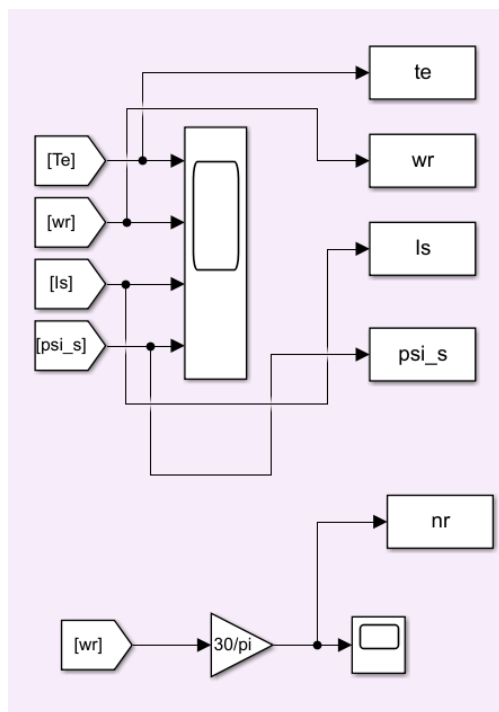
$$V_{s\beta}^s = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot V_b - \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot V_c$$



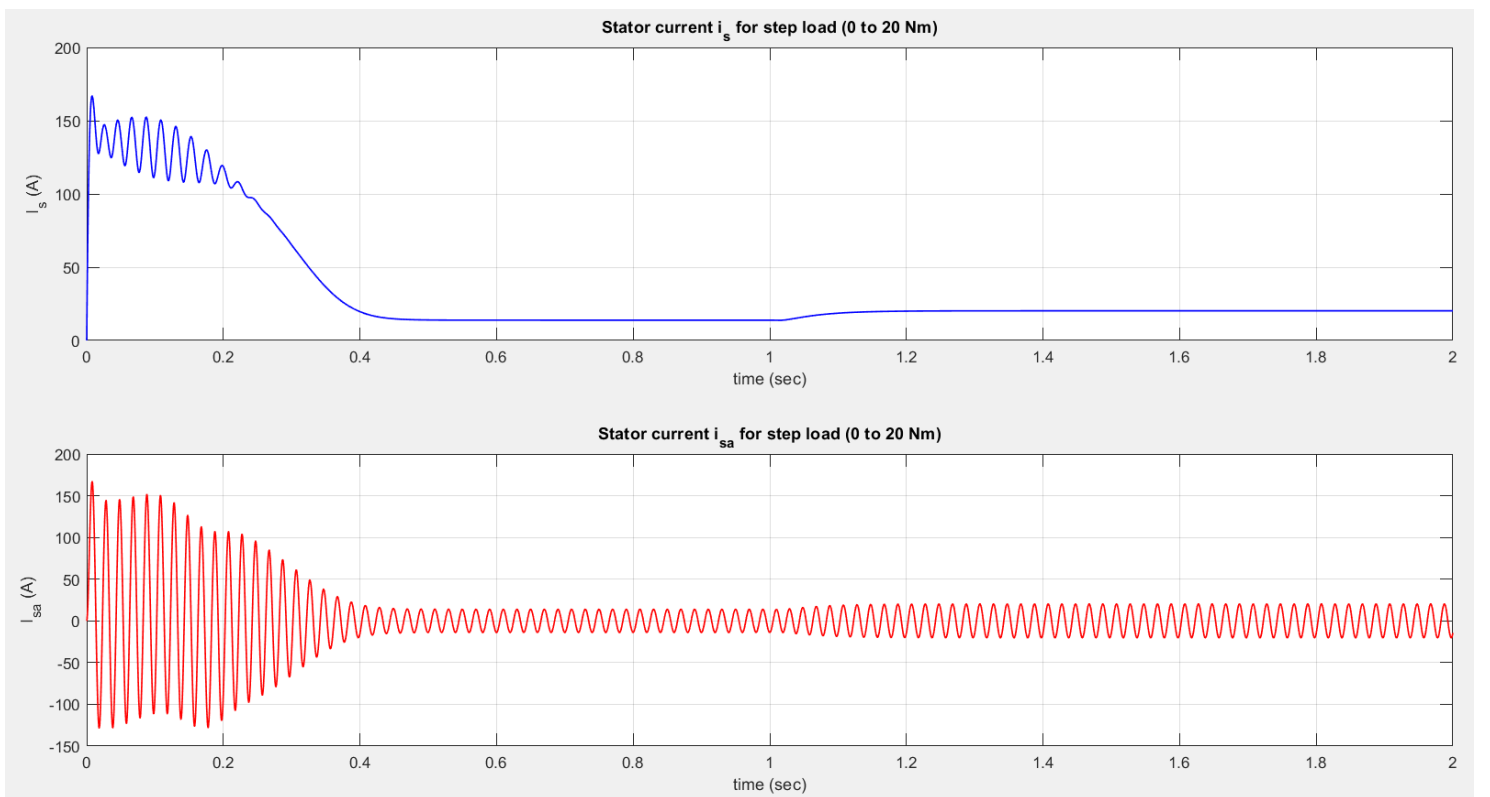
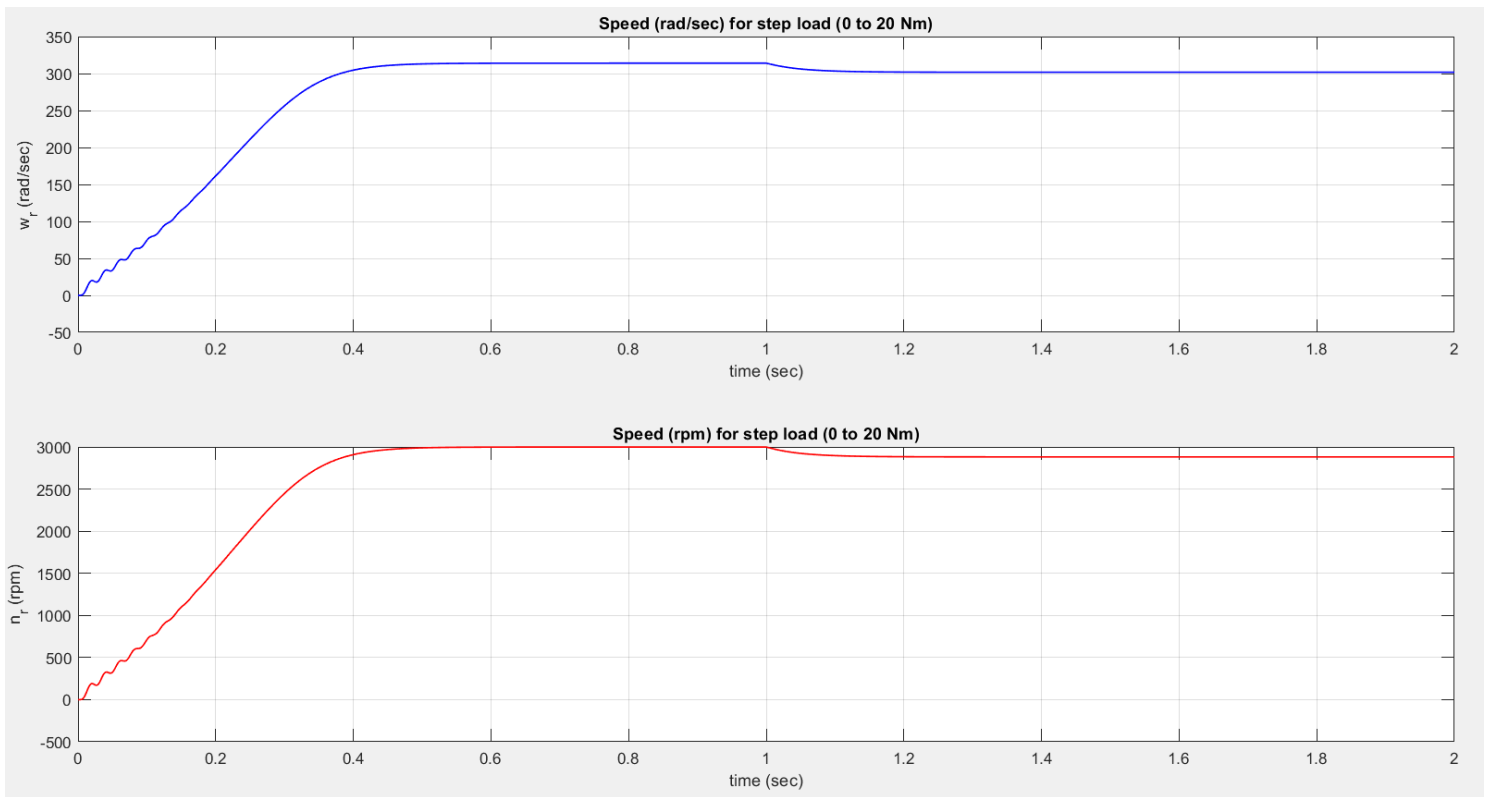
Να σημειωθεί πως για να βρεθούν το μέτρο της ροής του δρομέα, και του ρεύματος του στάτη, υλοποιήθηκε το εξής:

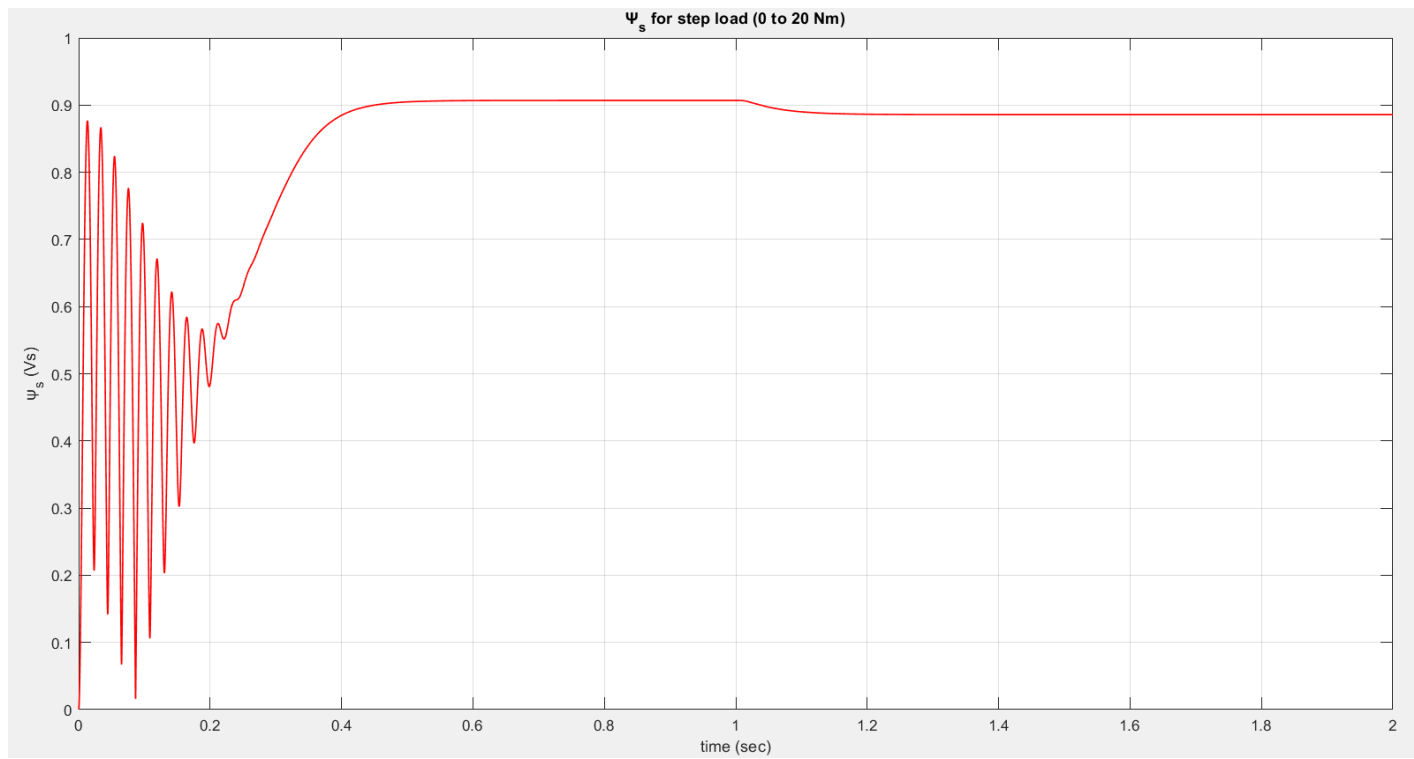
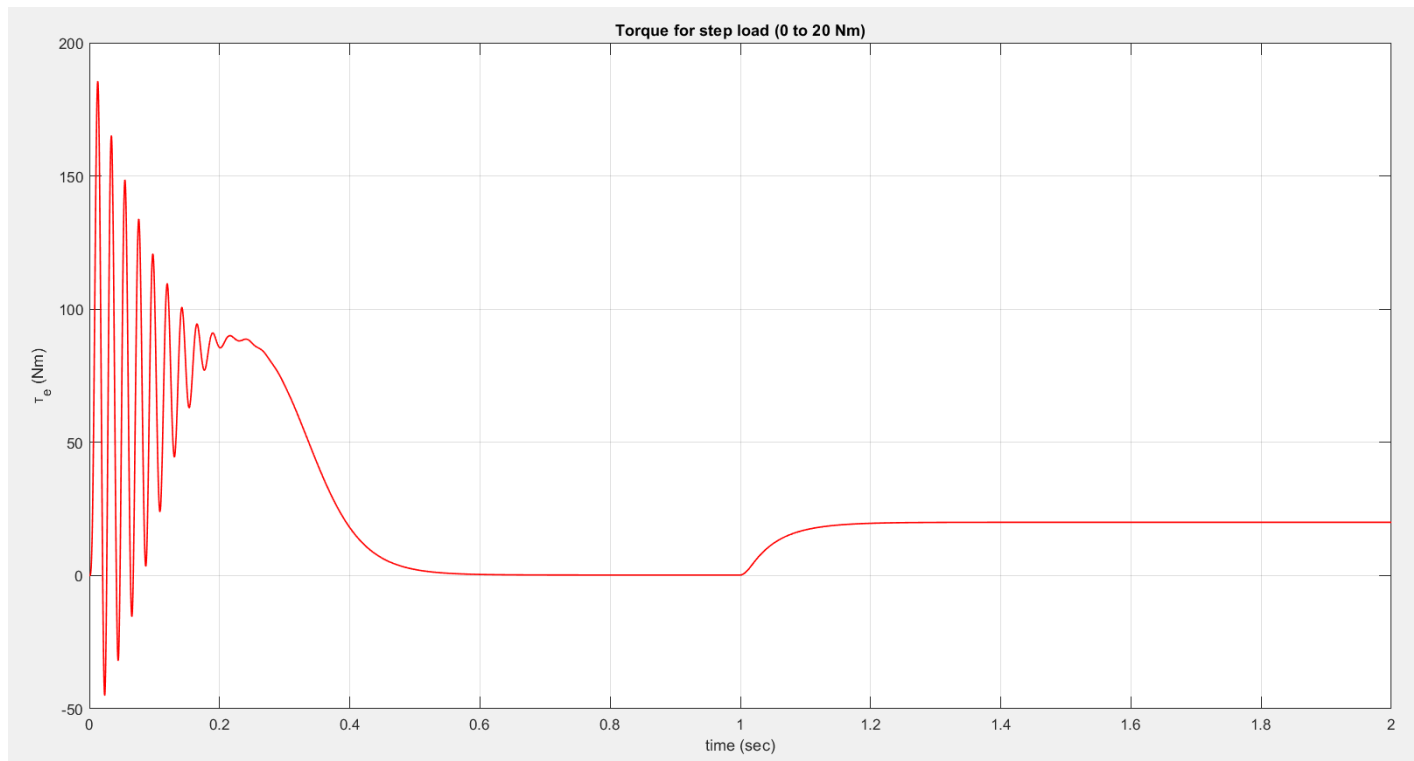


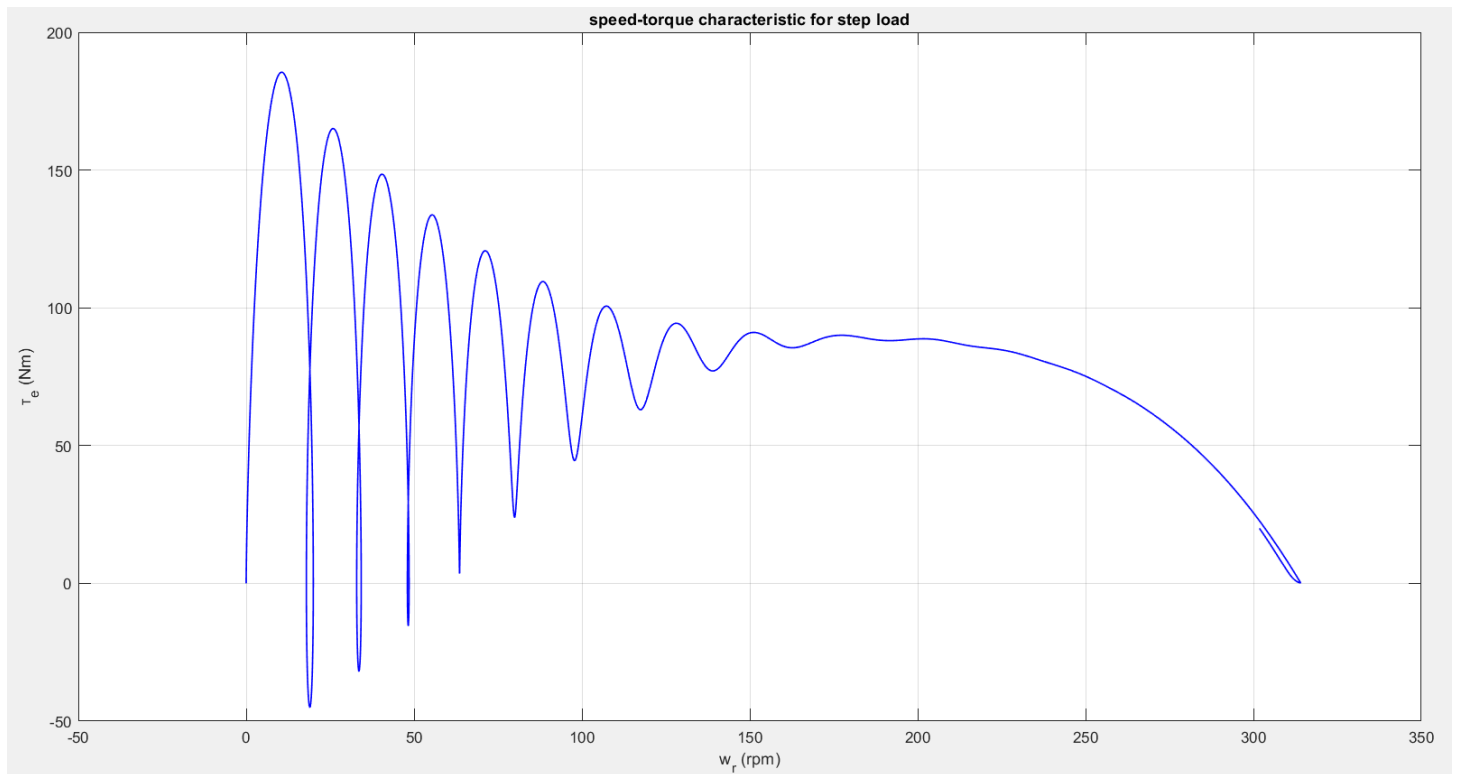
Τέλος φαίνονται και οι μετρήσεις που λαμβάνουμε:



Πραγματοποιήθηκε προσομοίωση για την βηματική μεταβολή φορτίου μόνο, η οποία φαίνεται παρακάτω:







Βλέπουμε πως οι κυματομορφές που προκύπτουν, είναι οι ίδιες με αυτές που αναλύθηκαν παραπάνω, χρησιμοποιώντας το έτοιμο μοντέλο ασύγχρονης μηχανής του simulink. Να σημειωθεί πως στην περίπτωση της βηματικής μεταβολής του φορτίου, οι εξωτερικές συνδεδεμένες αντιστάσεις είναι 0 Ω.