

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Συστήματα Ελέγχου Ηλεκτρικών Μηχανών

2η άσκηση - Επαγωγικός Κινητήρας

Νοδάρης Άγγελος - 03117125

21 / 6 / 2021

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

Μοντέλο επαγωγικού κινητήρα

1. Το πρώτο βήμα της μοντελοποίησης του επαγωγικού κινητήρα είναι να επιλεχθούν τα βασικά χαρακτηριστικά του, οι αντιστάσεις και οι αυτεπαγωγές. Για να μην χρησιμοποιηθούν πλήρως επινοημένες τιμές, επιλέχθηκε ένα μοντέλο μηχανής Ευρωπαϊκών προδιαγραφών με τα εξής χαρακτηριστικά:

- $V_N = 230 \text{ V}$ (RMS, phase voltage)
- $I_N = 63 \text{ A}$
- $f_N = 50 \text{ Hz}$
- $\omega_N = 314,16 \text{ rad/s}$

Ύστερα, επιλέχθηκαν ο συντελεστής ισχύος και ο βαθμός απόδοσης της μηχανής με βάση συνηθισμένες τιμές για μηχανές κάτω των 100kW:

- $\cos\phi = 0.8$
- $\eta = 0.85$

Από τις προδιαγραφές αυτές προκύπτουν τα περισσότερα υπόλοιπα χαρακτηριστικά που μας ενδιαφέρουν:

- $S_{N,in} = 43470 \text{ VA}$
- $P_{N,in} = 34776 \text{ W}$
- $P_{N,out} = 29560 \text{ W}$ ή 40 HP (περίπου)

Εάν θεωρηθεί πως είναι μια τυπική τετραπολική μηχανή με ονομαστική ολίσθηση γύρω στο 5%, υπολογίζεται ότι:

- $T_{N,e} = 198.08 \text{ Nm}$
- $\omega_{N,r} = 298.45 \text{ rad/s}$
- $\omega_{N,m} = 149.23 \text{ rad/s}$, άρα $n_N = 1425 \text{ RPM}$

Στη συνέχεια, είναι απαραίτητο να προσδιοριστούν οι τιμές βάσης προκειμένου να επιλεχθούν κατάλληλα τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά:

- $T_{base} = 276.74 \text{ Nm}$
- $J_{base} = 0.0056 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$
- $Z_{base} = 3.65 \text{ Ohms}$
- $L_{base} = 0.0116 \text{ H}$

Με βάση όλα αυτά, παρακάτω προσδιορίζονται οι τιμές των αντιστάσεων και των αυτεπαγωγών του ισοδύναμου Γ της μηχανής αλλά και της ροπής αδράνειας:

- $R_S = 0.365 \text{ Ohms} \rightarrow R_S = 0.1 \text{ pu}$
- $R_R = 0.1643 \text{ Ohms} \rightarrow R_R = 0.045 \text{ pu}$

- $L_M = 0.029 \text{ H} \rightarrow L_M = 2.5 \text{ pu}$
- $L_\sigma = 0.0035 \text{ H} \rightarrow L_\sigma = 0.3 \text{ pu}$
- $J = 100 \text{ pu} = 0.56 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$

Σημείωση: η μηχανή που επιλέχθηκε είχε δοθεί με τις δοκιμές κενού φορτίου και ακινητοποιημένου δρομέα. Αρχικά υπολογίσθηκαν οι τιμές των αντιστάσεων και αυτεπαγωγών μέσω των δοκιμών, ωστόσο μετά από επαλήθευση αυτές ξέφευγαν από τα όρια που έχουμε θεωρήσει ότι είναι “ασφαλή” για μια τυπική IM ισχύς λιγότερο από 100kW, τα οποία παρατίθενται εδώ:

Typical per-unit values for induction motors rated less than 100 kW are

<i>Magnetizing inductance</i> L_M :	1.5 – 3
<i>Leakage inductance</i> L_σ :	0.15 – 0.3
<i>Resistance</i> R_s, R_r :	0.01 – 0.1.

Ακόμη και αν αγνοούσαμε τα όρια αυτά, η προσομοίωση της μηχανής έδινε λάθος αποτελέσματα, δηλαδή όχι απλώς δεν συμφωνούσαν οι ονομαστικές τιμές στη μόνιμη κατάσταση, αλλά η ίδια μηχανή είχε υπερβολικά μεγάλες ταλαντώσεις. Επομένως θεωρήθηκε προτιμότερο να αλλαχθούν οι τιμές του ισοδύναμου κυκλώματος προκειμένου να είναι εντός ορίων. Αυτό προφανώς επιφέρει αλλαγές τόσο στο συντελεστή ισχύος αλλά και στην απόδοση της μηχανής, επομένως θα έπρεπε εξ αρχής να υπολογισθούν πάλι όλα τα χαρακτηριστικά της μηχανής. Κάτι τέτοιο θεωρείται εκτός του σκοπού της άσκησης, επομένως διατηρήθηκαν οι τιμές που αναφέρθηκαν παραπάνω.

2. Για να υλοποιηθεί η μηχανή ως ισοδύναμο μοντέλο σε περιβάλλον Simulink, πρέπει να αναλυθεί το ηλεκτρικό και το μηχανικό τμήμα της στο πεδίο αναφοράς αβ. Αρχικά, οι ηλεκτρικές εξισώσεις που περιγράφουν τον στάτη και το δρομέα:

$$\mathbf{v}_s^s - R_s \mathbf{i}_s^s - \frac{d\boldsymbol{\psi}_s^s}{dt} = 0 \quad \text{και} \quad \mathbf{v}_r^r - R_r \mathbf{i}_r^r - \frac{d\boldsymbol{\psi}_r^r}{dt} = 0$$

Στη συνέχεια, εκφράζονται οι εξισώσεις στο στατικό πεδίο αβ:

$$\begin{aligned} \frac{d\boldsymbol{\psi}_s^s}{dt} &= \mathbf{v}_s^s - R_s \mathbf{i}_s^s & (\text{stator}) \\ \frac{d\boldsymbol{\psi}_r^s}{dt} &= j\omega_r \boldsymbol{\psi}_r^s - R_r \mathbf{i}_r^s & (\text{rotor}). \end{aligned}$$

Αντί να έχουμε όμως διαφορετικές εξισώσεις που να περιγράφουν το στάτη και το δρομέα ανεξάρτητα, είναι προτιμότερο να έχουμε ένα ενιαίο σύστημα που να περιγράφει όλη τη μηχανή από την πλευρά του στάτη που ελέγχουμε. Για αυτόν το σκοπό, η μηχανή περιγράφεται με το ισοδύναμο Γ μοντέλο και περιγράφεται από τις εξισώσεις:

$$\frac{d\psi_R^s}{dt} = R_R \mathbf{i}_s^s - \left(\frac{R_R}{L_M} - j\omega_r \right) \psi_R^s \quad \text{και}$$

$$L_\sigma \frac{d\mathbf{i}_s^s}{dt} = \mathbf{v}_s^s - (R_s + R_R) \mathbf{i}_s^s - \underbrace{\left(j\omega_r - \frac{R_R}{L_M} \right) \psi_R^s}_{\mathbf{E}_b^s}$$

Αυτές οι 2 εξισώσεις πρέπει να μετασχηματιστούν με Λαπλάς και να αναλυθούν στις συνιστώσες τους στο πεδίο αβ και θα μας δώσουν την (σχεδόν) τελική μορφή του μοντέλου: Από την 2η εξίσωση προκύπτει το μοντέλο του ρεύματος:

$$I_s^\alpha(s) = (1 / (sL_\sigma + R_s + R_R)) * (V_s^\alpha(s) + (R_R / L_M) * \psi_R^\alpha(s) + \omega_r * \psi_R^\beta(s))$$

$$I_s^\beta(s) = (1 / (sL_\sigma + R_s + R_R)) * (V_s^\beta(s) + (R_R / L_M) * \psi_R^\beta(s) - \omega_r * \psi_R^\alpha(s))$$

Και από την 1η εξίσωση το εν συνεχεία μοντέλο της ροής:

$$\psi_R^\alpha(s) = (1 / (s + R_R / L_M)) * (R_R * I_s^\alpha(s) - \omega_r * \psi_R^\beta(s))$$

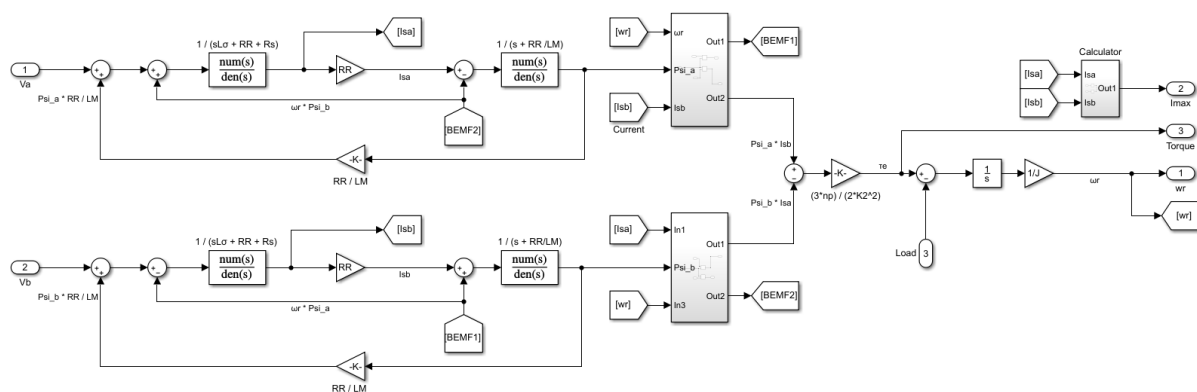
$$\psi_R^\beta(s) = (1 / (s + R_R / L_M)) * (R_R * I_s^\beta(s) - \omega_r * \psi_R^\alpha(s))$$

Η τελική παραγόμενη γωνιακή ταχύτητα ω_r συνδυάζει τις παραπάνω εξισώσεις και το μηχανικό τμήμα της μηχανής και είναι το τελικό στάδιο του μοντέλου:

$$\omega_r = (T_e - T_{load}) / sJ$$

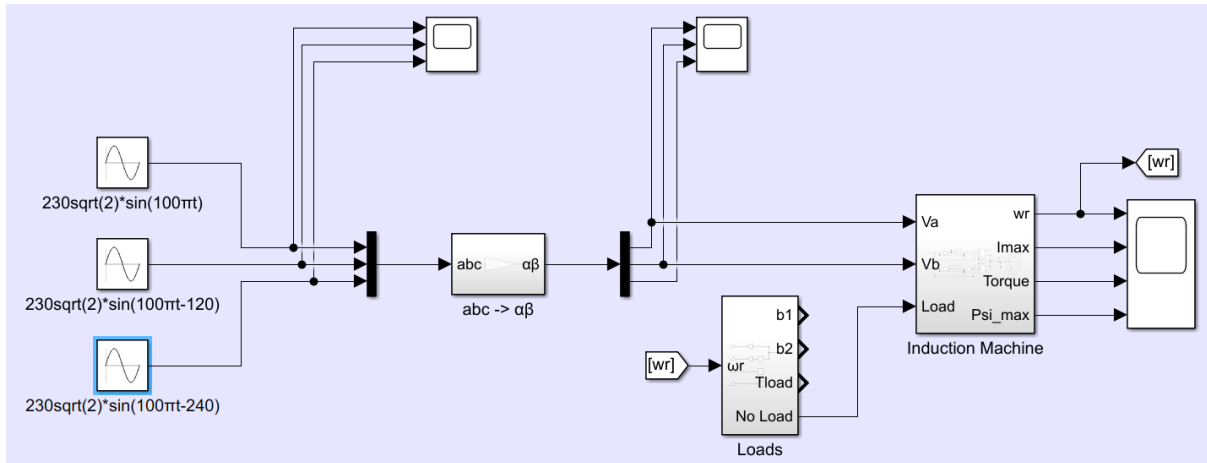
$$\text{όπου } T_e = 3 * n_p * (\psi_R^\alpha(s) * I_s^\beta(s) - \psi_R^\beta(s) * I_s^\alpha(s)) / K_2^2$$

Παρακάτω φαίνεται το ολοκληρωμένο διάγραμμα της μηχανής:

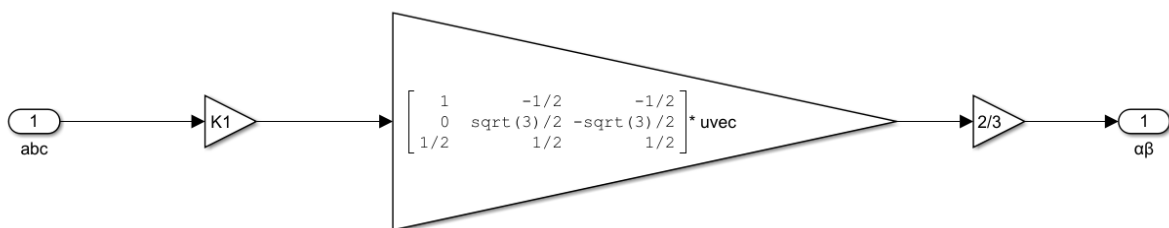


3. Στη συνέχεια, πρέπει να προσομοιωθεί εκκίνηση από το δίκτυο. Αυτό ουσιαστικά ορίζει ότι η συχνότητα θα πρέπει να είναι σταθερή (στην περίπτωση αυτή επιλέχθηκε ευρωπαϊκή τροφοδοσία με $f_N = 50\text{Hz}$). Φυσικά, εκτός από το ίδιο το μοντέλο της μηχανής, πρέπει να προσομοιωθεί και η τροφοδοσία η οποία με τη σειρά της μετασχηματίζεται επίσης στο πεδίο αβ. Αρκεί να πολλαπλασιαστεί η τριφασική πηγή με τον πίνακα Clarke και το gain K_1 . Εδώ

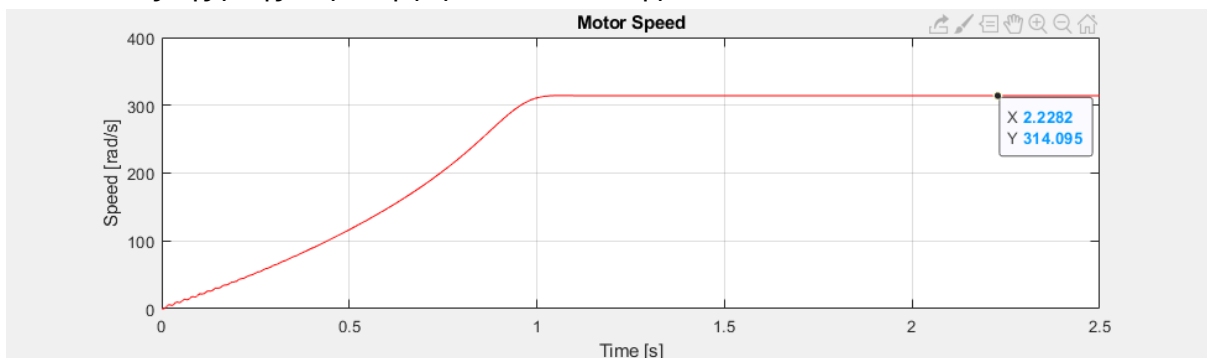
πρέπει να σημειωθεί ότι και το K_1 και το K_2 από την εξίσωση της ροπής επιλέχθηκαν ίσα με $K_1 = K_2 = 1/\sqrt{2}$. Η επιλογή έγινε αφενός επειδή βολεύει να φαίνονται οι RMS τιμές (ειδικά στην ισχύ / ροπή της μηχανής όπου γίνεται απλοποίηση), αφετέρου επειδή ως τιμές βάσης της μηχανής επιλέχθηκαν οι RMS τιμές και όχι τα πλάτη. Η τριφασική πηγή και ο ΜΣ Clarke επιτεύχθηκαν “χειροκίνητα” ως εξής:

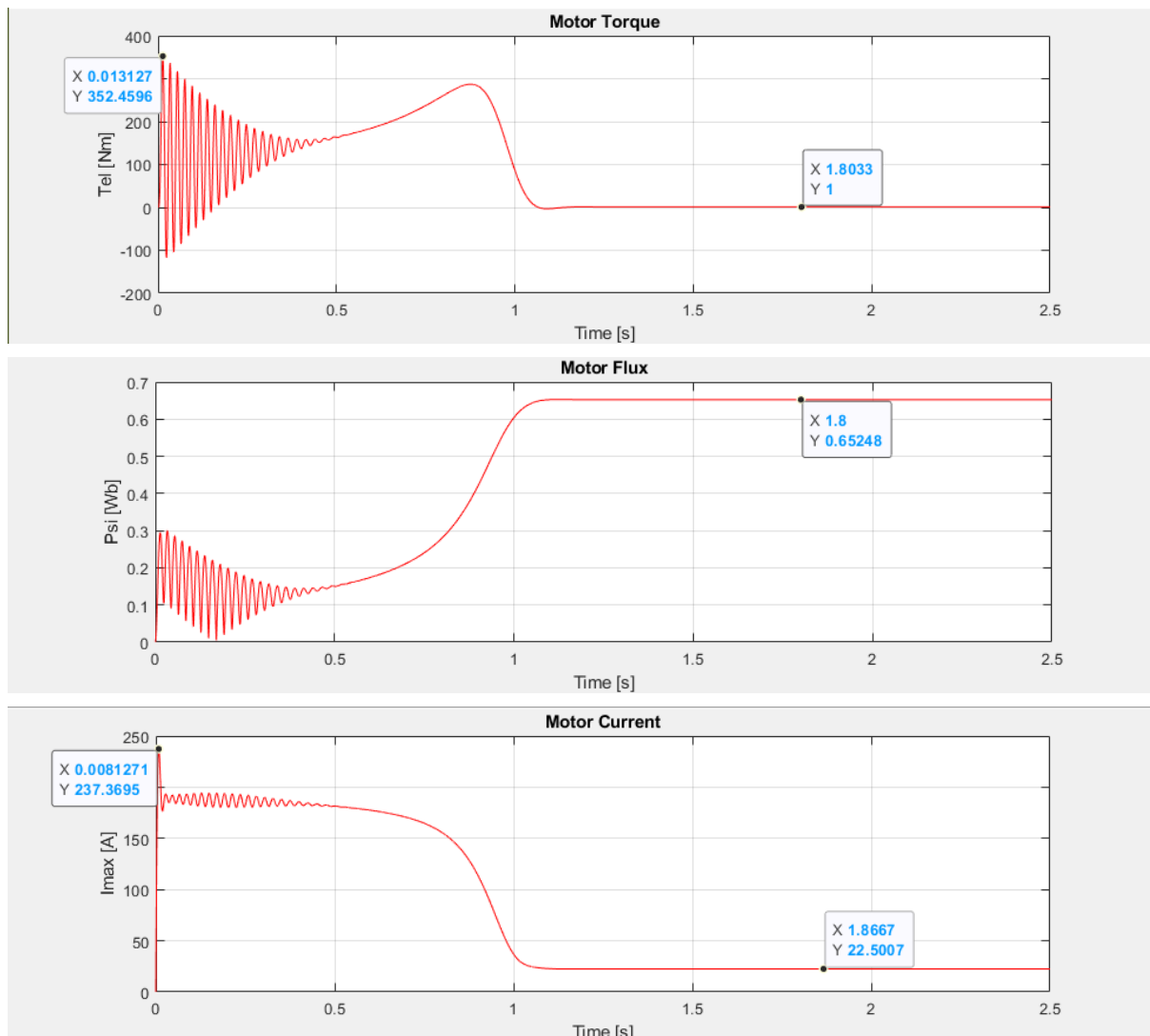


Και ο ΜΣ Clarke χάρη στην ιδιότητα του gain “Matrix * Vector”:



Στη συνέχεια, τρέχει η προσομοίωση για 5 δευτερόλεπτα και καταγράφονται οι γραφικές παραστάσεις της γωνιακής ταχύτητας, του πλάτους του ρεύματος, της ηλεκτρικής ροπής και του πλάτους της ροής. Η ροπή φορτίου τίθεται ίση με το 0:



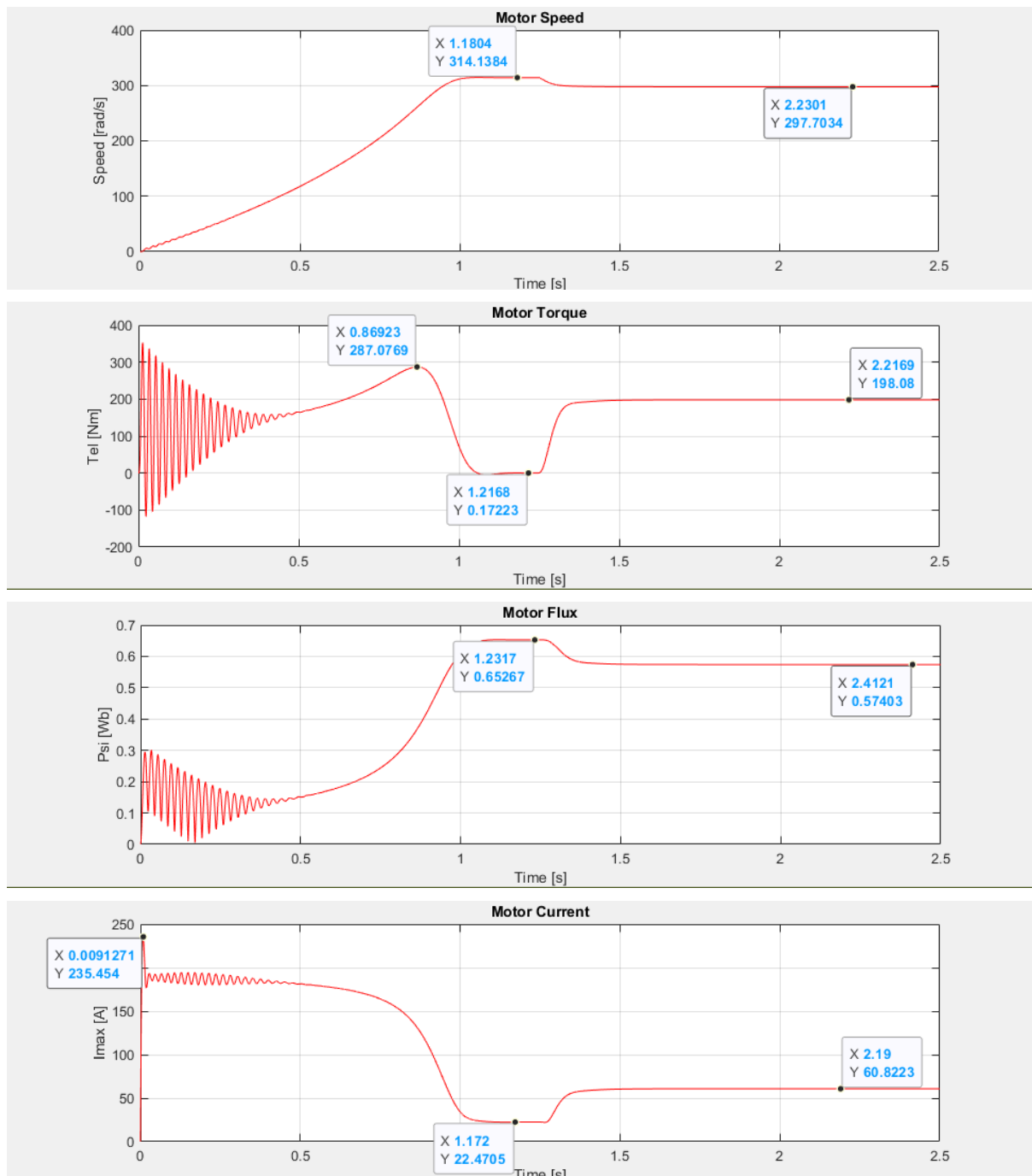


Όπως είναι αναμενόμενο, οι στροφές σταθεροποιούνται στη σύγχρονη ταχύτητα αφού δεν έχουμε φορτίο (314 rad/s), η ροπή καταλήγει να έχει μια χαμηλή τιμή προκειμένου να περιστρέφει το δρομέα (ο οποίος έχει μια ροπή αδράνειας), και το ρεύμα παραμένει σε μια πολύ μικρή τιμή (**22.5 A**), το οποίο είναι και το ρεύμα μαγνήτισης i_d . Η μαγνητική ροή επίσης καταλήγει σταθερή σε μια σχετικά μικρή τιμή. Το μέγιστο ρεύμα μπορεί να βρεθεί (θεωρητικά) μέσω του τύπου:

$$|i_s|_{\max} \approx \frac{V}{X_\sigma} \left(1 + e^{-\pi R_\sigma / X_\sigma} \right)$$

Η επίλυση του τύπου για την συγκεκριμένη μηχανή που χρησιμοποιείται βγάζει λάθος αποτέλεσμα (γύρω στα 280A), το οποίο πιθανότατα οφείλεται στο γεγονός ότι επιλέχθηκαν προσεγγιστικά οι παράμετροι της μηχανής προκειμένου να τεθούν εντός των ορίων που έχουν αναφερθεί προηγουμένως.

4. Έπειτα, πρέπει να προσομοιωθούν οι περιπτώσεις φορτίου ανάλογου της ταχύτητας και του τετραγώνου της ταχύτητας. Για να επιτευχθεί αυτό, πρέπει να πολλαπλασιαστεί η ταχύτητα με μια σταθερά καταλλήλως ώστε σε συνθήκες πλήρους φορτίου να εμφανιστούν ονομαστικές στροφές. Πρώτα όμως, θα γίνει η προσομοίωση του βηματικού ονομαστικού φορτίου το οποίο συνδέεται στα 2.5sec:



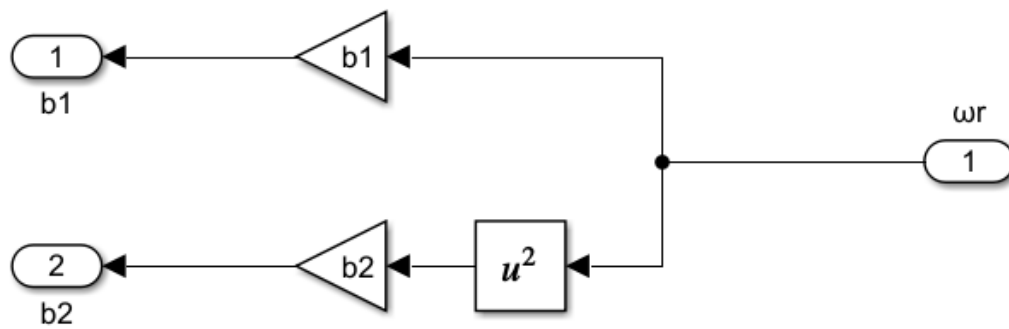
Από την γραφική παράσταση, τελικά φαίνεται ότι η τελική ονομαστική γωνιακή ταχύτητα είναι $\omega_r^N = 297.7 \text{ rad/s}$. Επομένως, αυτή είναι η τιμή που θα χρησιμοποιηθεί για τους παρακάτω υπολογισμούς. Όσον αφορά τις υπόλοιπες τιμές, φαίνεται ότι:

$T_N = 198.08 \text{ Nm}$ (όπως είχε υπολογιστεί)

$I_N = 60.8 \text{ A}$

$\Psi_N = 0.574 \text{ Wb}$

Η υλοποίηση των υπόλοιπων φορτίων γίνεται με απλό τρόπο:

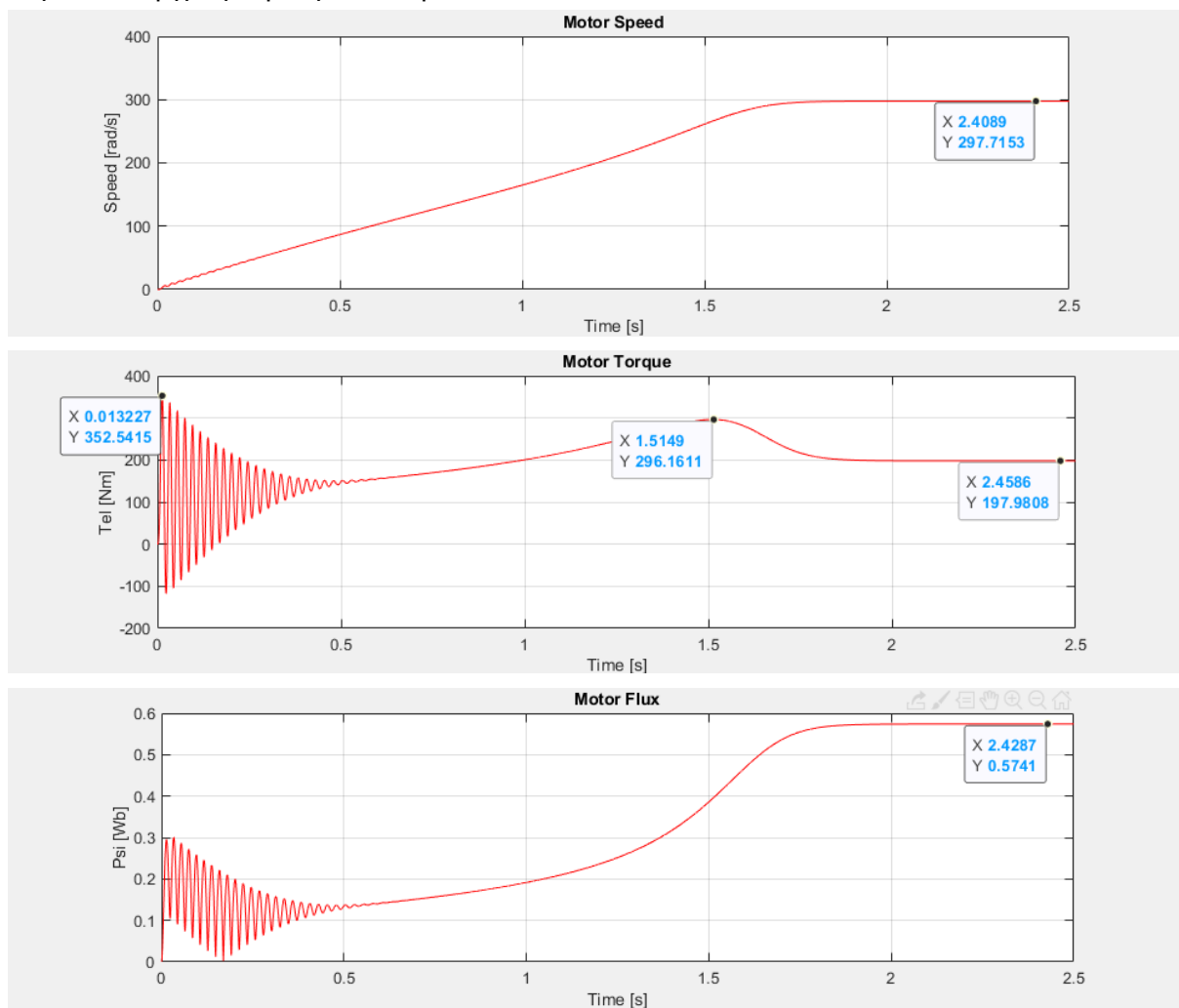


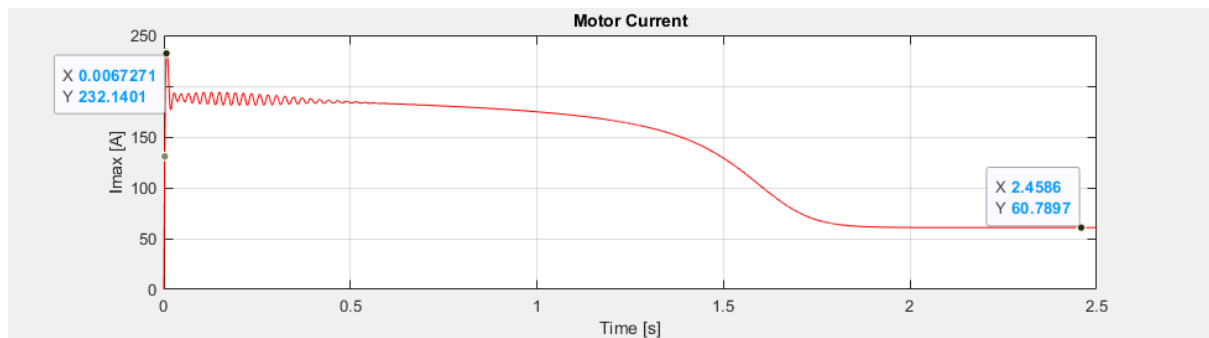
Έτσι, για συνθήκες steady state ($d\omega/dt = 0$) έχουμε:

α. Φορτίο ανάλογο της ταχύτητας:

- $\tau_e^N = b_1 * \omega_r \rightarrow b_1 = 0.665 \text{ N*m*s / rad}$

Παρακάτω η γραφική παράσταση:



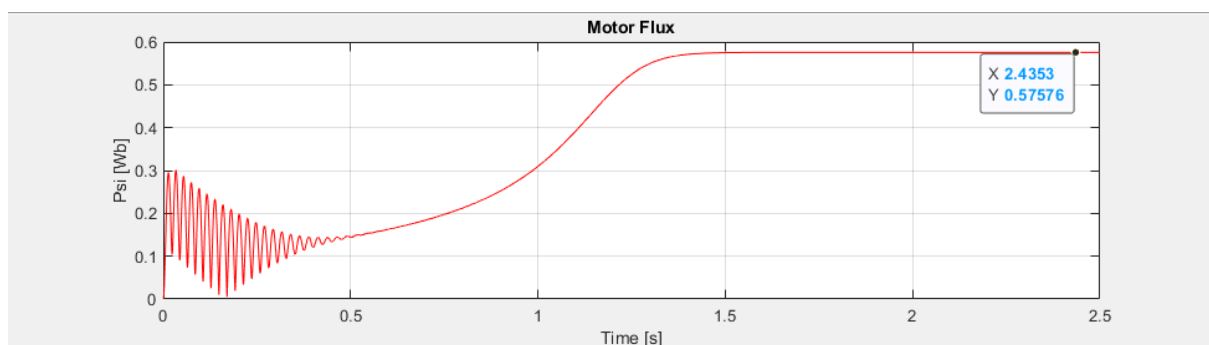
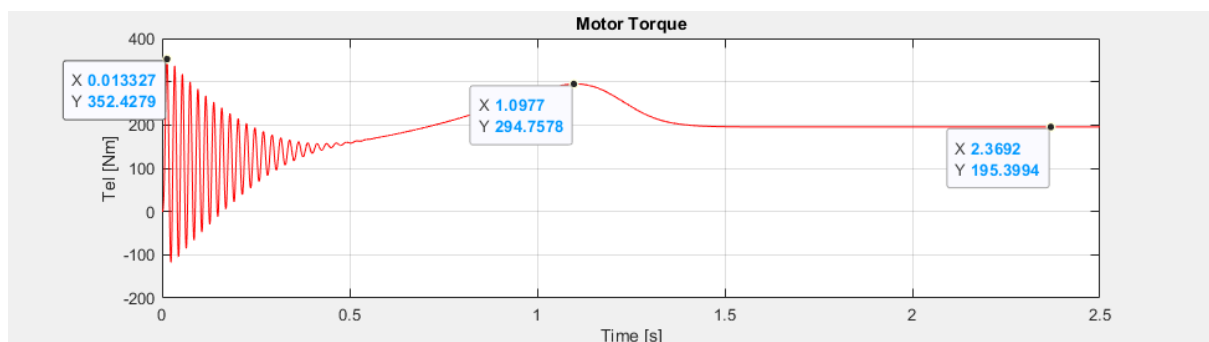
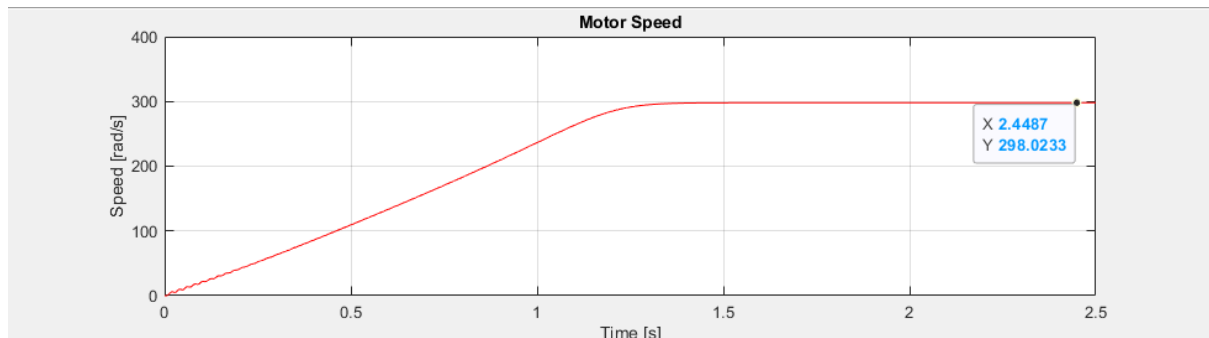


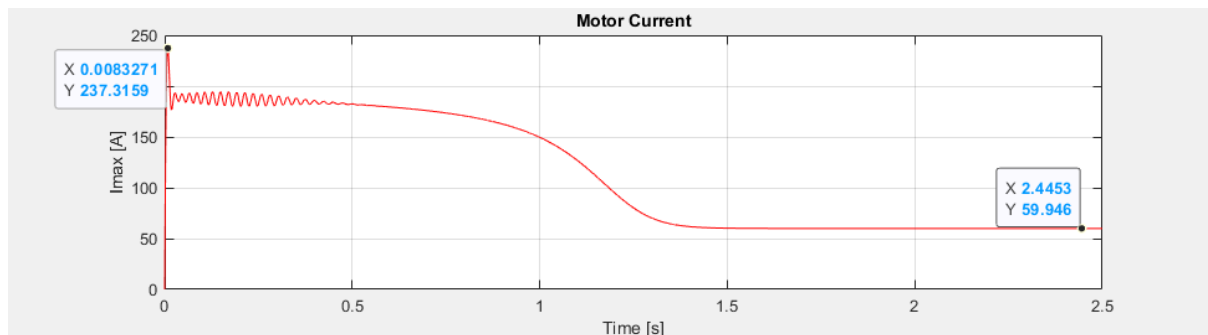
Οι τιμές που επιτεύχθηκαν σε κάθε περίπτωση έχουν ελάχιστη απόκλιση από τις αναμενόμενες ονομαστικές τιμές, πιθανότατα λόγω κάποιας στρογγυλοποίησης ή και λόγω έλλειψης επαρκούς χρόνου προσομοίωσης. Σε κάθε περίπτωση, οι αποκλίσεις είναι ελάχιστες για να είναι προβληματικές.

β. Φορτίο ανάλογο του τετραγώνου της ταχύτητας:

- $\tau_e^N = b_2 * \omega_r^2 \rightarrow b_2 = 0.0022 \text{ N*m*s / rad}$

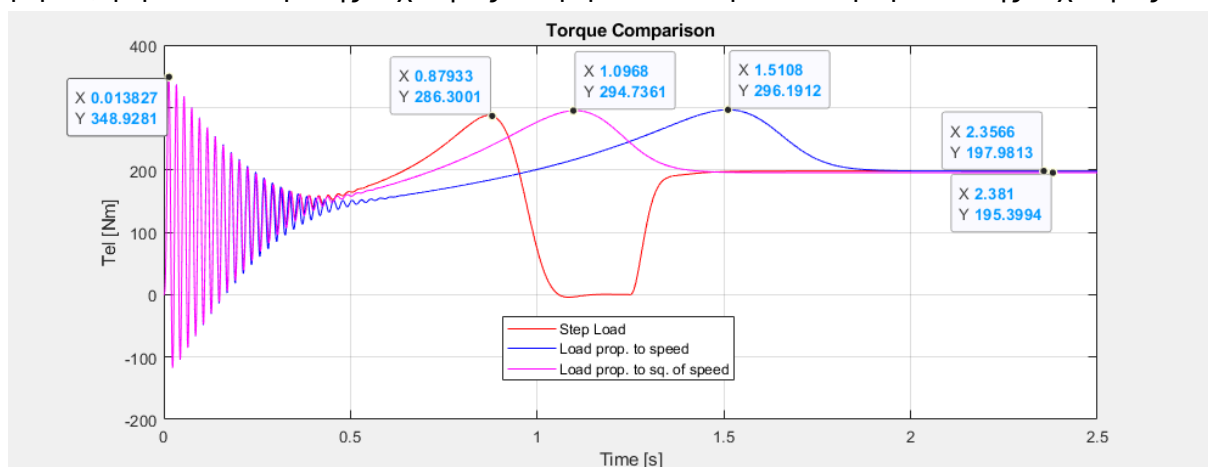
Παρακάτω η γραφική παράσταση:



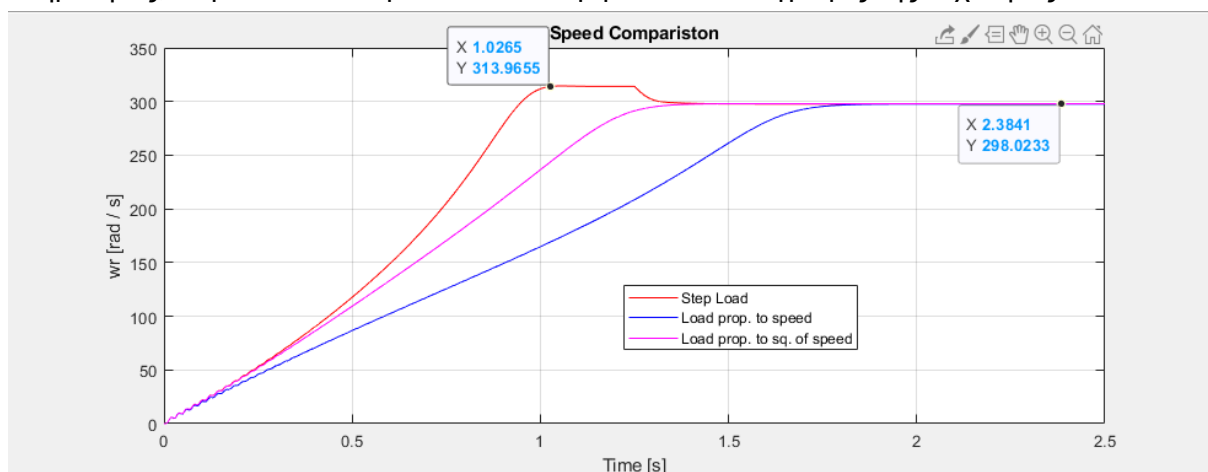


Πάλι ελαφριές αποκλίσεις, οι λόγοι και τα συμπεράσματα όμοια με την περίπτωση φορτίου ανάλογου της ταχύτητας.

Εφόσον το ενδιαφέρον μέγεθος είναι η παραγόμενη ροπή, παρακάτω παρατίθενται συγκριτικά οι ροπές που προκύπτουν από το τρέξιμο των προσομοιώσεων για βηματικό φορτίο, φορτίο ανάλογο της ταχύτητας και φορτίο ανάλογο του τετραγώνου της ταχύτητας:



Όπως φαίνεται, η παραγόμενη ροπή καταλήγει σε κάθε περίπτωση να είναι ονομαστική. Η ροπή με το φορτίο ανάλογο του τετραγώνου έχει μια μικρή απόκλιση, ωστόσο αυτό οφείλεται στη στρογγυλοποίηση του b_2 (συγκεκριμένα, με ένα ακόμη δεκαδικό υπήρχε σχεδόν μηδενική απόκλιση). Παρατηρείται επίσης έντονη ομοιότητα στις τιμές των peak των ροπών για την εκάστοτε περίπτωση, το οποίο είναι λογικό καθώς η μέγιστη τιμή της ροπής εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της μηχανής και την τροφοδοσία και όχι το φορτίο. Χάριν πληρότητας, παρατίθενται παρακάτω και συγκριτικά οι καταγραφές της ταχύτητας:

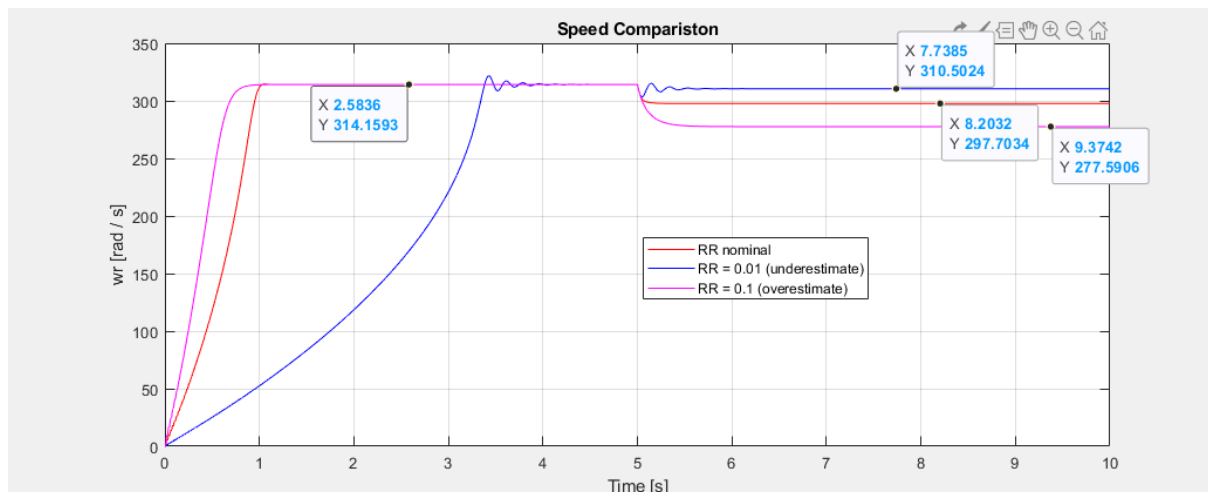


Όπως είναι εμφανές και αναμενόμενο, και οι 3 διαφορετικές προσομοιώσεις συγκλίνουν με μεγάλη ακρίβεια στις ονομαστικές στροφές (πάλι το b_2 προκαλεί μικρή απόκλιση λόγω

στρογγυλοποίησης). Αυτό που αξίζει να σημειωθεί είναι ότι το φορτίο που είναι ανάλογο του τετραγώνου της ταχύτητας έχει ταχύτερο χρόνο ανόδου συγκριτικά με το “αναλογικό” φορτίο. Το πλάτος του ρεύματος και της ροής παρέμειναν επίσης όλα κοντά στις ονομαστικές τους τιμές, με μεγάλη ακρίβεια ($I \sim 60.8\text{A}$, $\Psi \sim 0.574\text{ Vs}$).

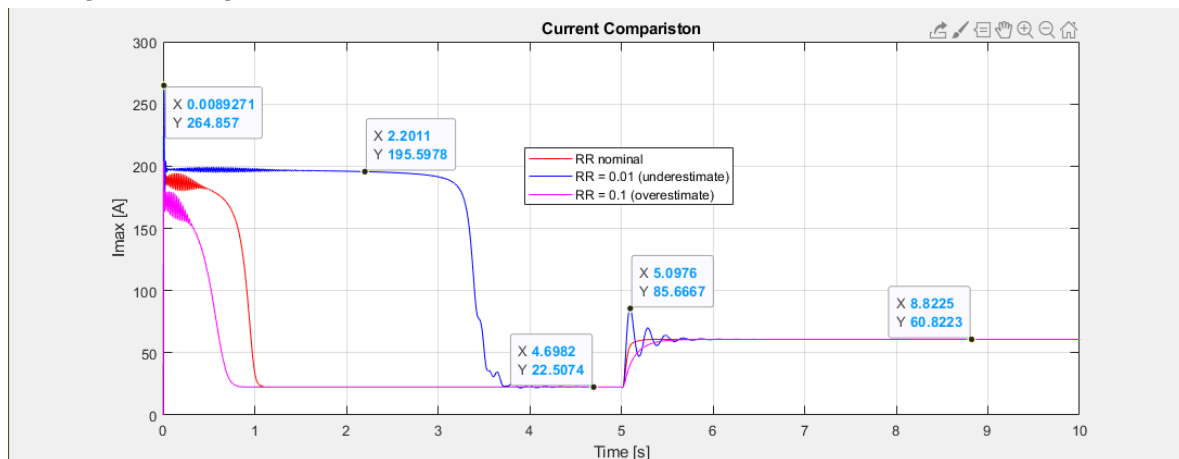
5. Πλέον, πρέπει να εξεταστεί η επίδραση που φέρει η μεταβολή της αντίστασης του δρομέα. Εφόσον όλη η άσκηση έχει πραγματοποιηθεί με το ισοδύναμο Γ , αντί να μεταβληθεί η αντίσταση R_r , θα μεταβληθεί η ισοδύναμη αντίσταση δρομέα R_R (θα θεωρούμε ότι διατηρούμε το λόγο L_m / L_r σταθερό). Πρέπει να σημειωθεί ότι ήδη από τις επιλογές του πρώτου ερωτήματος παρατηρήθηκε ότι η αντίσταση αυτή προκαλεί έντονες μεταβολές της ροπής και του ρεύματος. Η αρχική τιμή της είναι $R_R = 3.65 \cdot 0.045 = 0.1643\text{ Ohms}$. Για να ελεγχθεί η αύξηση και η μείωση της, θα τεθεί στις ακραίες δυνατές τιμές της για μηχανή επαγωγής $< 100\text{kW}$, δηλ. $R_R = 0.01\text{ pu}$ και $R_R = 0.1\text{ pu}$. Παρακάτω συγκρίνονται οι γραφικές παραστάσεις, με ονομαστικό φορτίο που συνδέεται στα 5 sec:

Γωνιακή ταχύτητα:



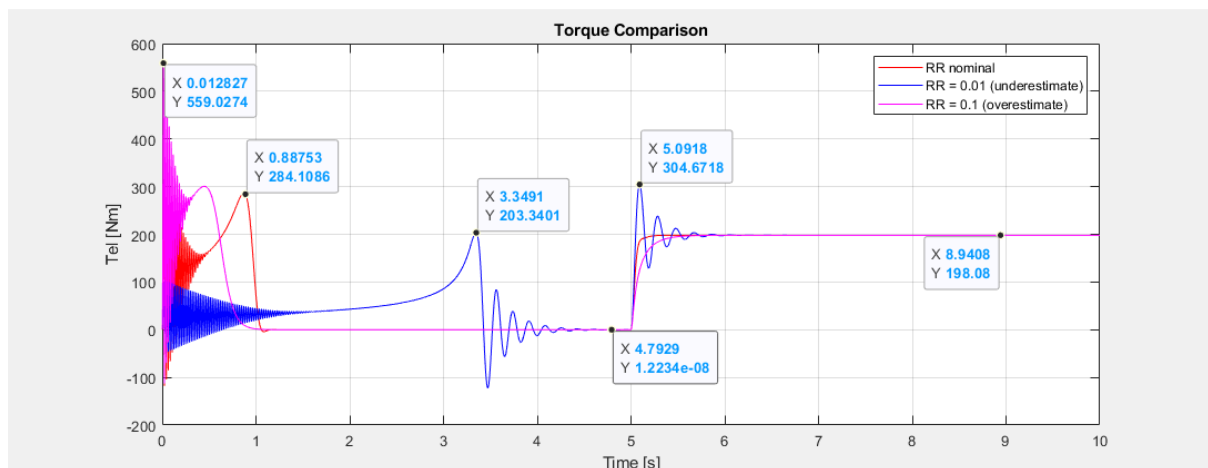
Παρατηρείται ότι μια μεγάλη αντίσταση (0.1 pu) ρίχνει τις στροφές στο steady state, ωστόσο επιταχύνεται ο χρόνος ανόδου της μηχανής και ελαττώνονται (ουσιαστικά εξαλείφονται) οι ταλαντώσεις. Αντιθέτως, μια πολύ μικρή αντίσταση αργεί πάρα πολύ να φέρει την μηχανή σε κατάσταση μόνιμης λειτουργίας και φέρει μεγάλες ταλαντώσεις, ωστόσο έχει πολύ μικρή πτώση στροφών στο steady state.

Πλάτος ρεύματος:



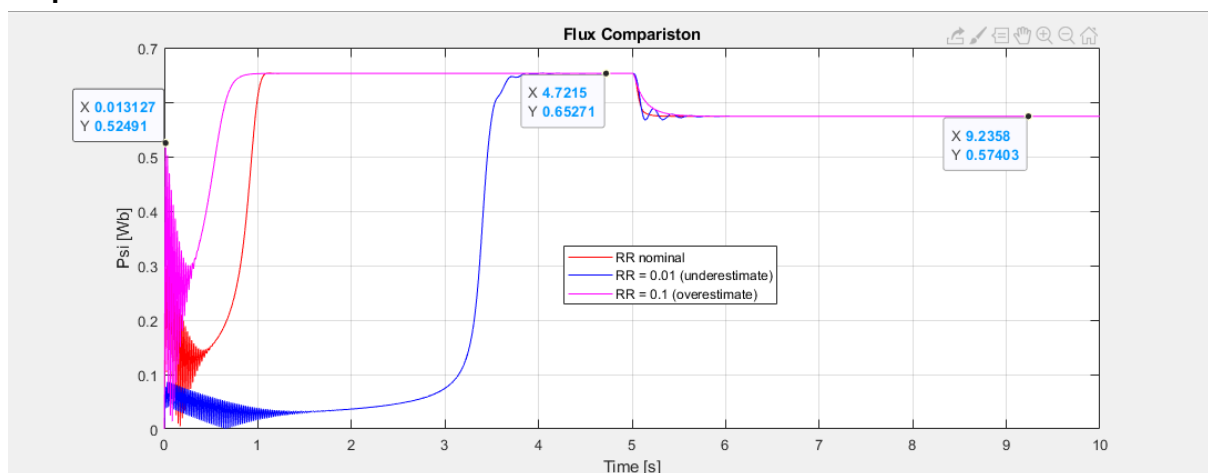
Φαίνεται πως η μικρή αντίσταση πάλι καθυστερεί την έλευση του steady state και αυξάνει την αρχική τιμή του ρεύματος (μάλιστα για πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα), ωστόσο προκαλεί λιγότερο έντονες ταλαντώσεις κατά την εκκίνηση. Κατά την είσοδο του φορτίου επίσης φέρει ταλαντώσεις, ωστόσο όχι για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα από το χρονικό διάστημα επαναφοράς που χρειάζονται οι άλλες αντιστάσεις. Η μεγάλη αντίσταση, πλήρως αντίστροφα, φέρει μεγαλύτερες ταλαντώσεις στην εκκίνηση, μειώνει δραστικά το χρόνο για την επίτευξη του steady state και μειώνει λίγο την τιμή του ρεύματος εκκίνησης. Σε κάθε περίπτωση και οι 3 αντιστάσεις δίδουν ίδιο ρεύμα στο steady state.

Παραγόμενη ηλεκτρική ροπή:



Η μικρή αντίσταση δίδει πολύ μικρότερη ροπή και ταλάντωση στην εκκίνηση αλλά επιτυγχάνει steady state πολύ αργά και επίσης έχει πολύ έντονες ταλαντώσεις όταν κοντεύει στο steady state. Εν αντιθέσει, η μεγάλη αντίσταση αναγκάζει τη μηχανή να αναπτύξει πολύ μεγαλύτερη ροπή στην αρχή και απαλείφει πρακτικά πλήρως τις ταλαντώσεις και μειώνει το χρόνο steady state.

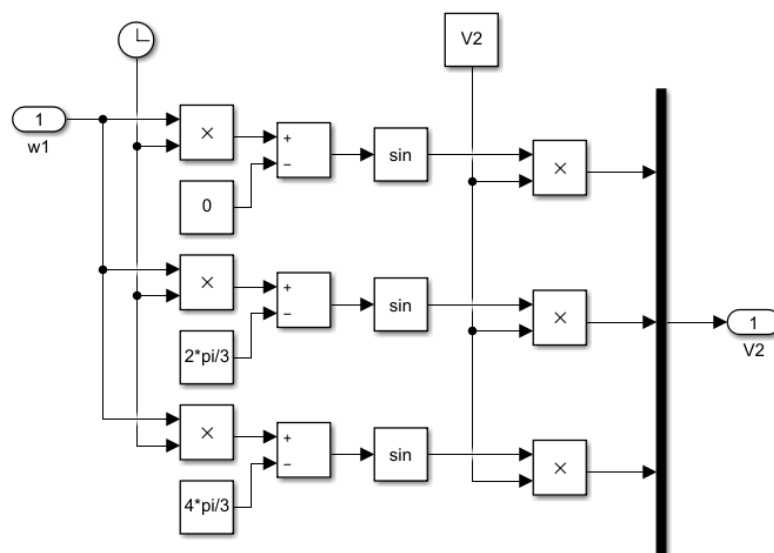
Ροή:



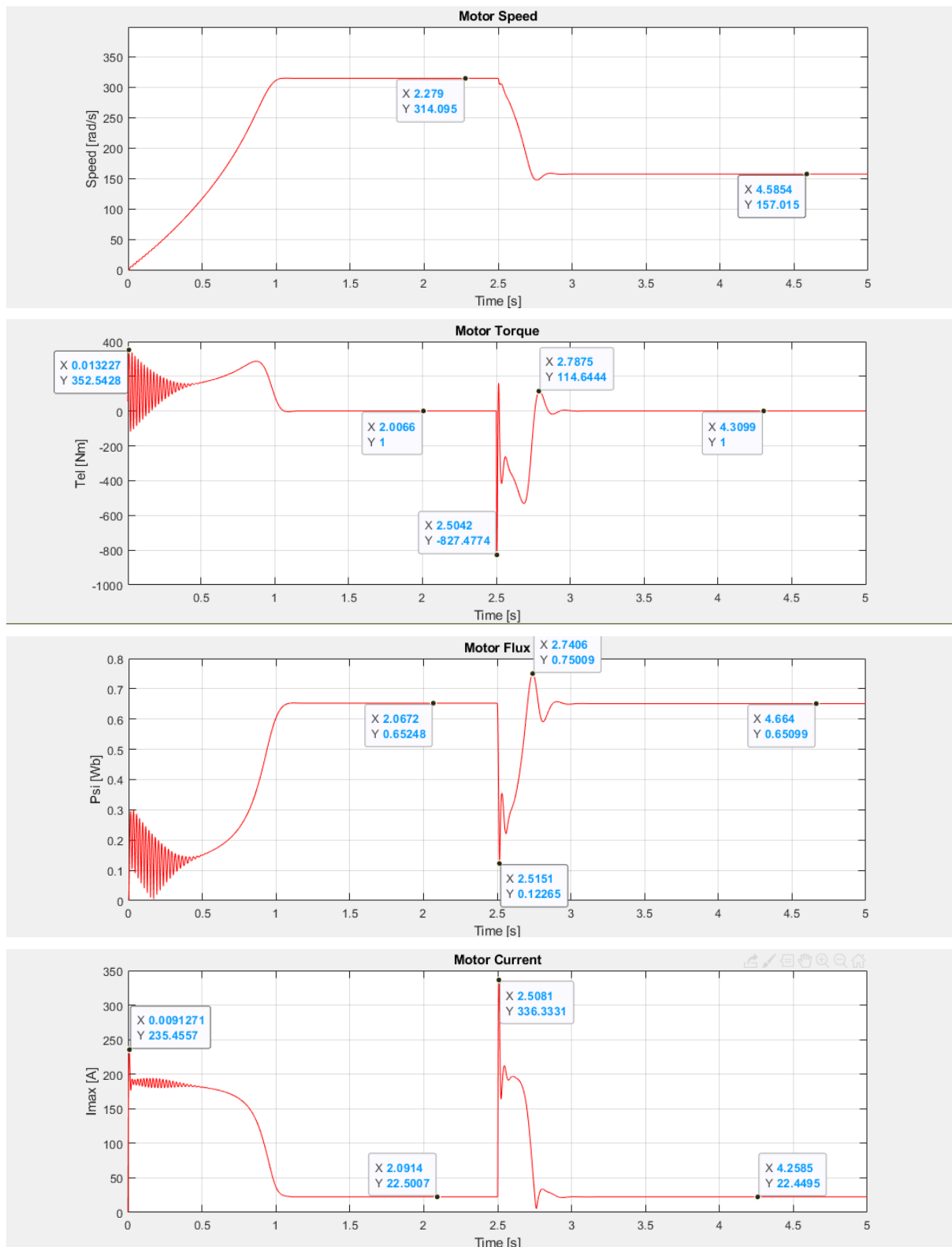
Τα αποτελέσματα για τη ροή είναι πλήρως αντίστοιχα της ροπής (που είναι λογικό). Η μικρότερη αντίσταση φέρει, **όπως φαίνεται από τις παραπάνω συγκρίσεις**, λιγότερη ροή και ταλάντωση στην εκκίνηση, αλλά απαιτεί περισσότερο χρόνο για επίτευξη steady state. Για την μεγάλη αντίσταση ισχύουν ακριβώς τα αντίστροφα.

Συμπερασματικά, μπορεί κανείς να πει ότι η επιλογή μιας μεγάλης αντίστασης δίνει στη μηχανή μια ακαμψία (stiffness), καθώς την κάνει ανθεκτική σε ταλαντώσεις και έντονες μεταβολές. Επίσης, της επιτρέπει να παράγει μεγαλύτερη ροπή εκκίνησης, την οποία η μηχανή πρέπει να σχεδιασμένη να αντέχει (πολλαπλάσια της ονομαστικής τιμής) και μεγαλύτερη πτώση στροφών κατά την φόρτωση της με φορτίο. Ωστόσο, αυξημένη αντίσταση σημαίνει και αυξημένες απώλειες σε θερμότητα. Αντιστρόφως, μικρή αντίσταση δίνει χαμηλή ροπή εκκίνησης, μεγαλύτερο ρεύμα εκκίνησης και πολύ έντονες ταλαντώσεις στις μεταβατικές καταστάσεις. Μια μέση τιμή φαίνεται να είναι η βέλτιστη λύση προκειμένου να παρέχεται ταυτόχρονα και υψηλότερη ροπή και μικρότερο ρεύμα στην εκκίνηση αλλά και να απαλείφονται οι ταλαντώσεις, χωρίς όμως να χάνεται σημαντικό εύρος στροφών στο steady state και ισχύς λόγω θερμότητας. **Το ιδανικό θα ήταν να υπήρχε πολύ υψηλότερη αντίσταση στην εκκίνηση προκειμένου να δημιουργηθεί υψηλή ροπή και να επιτευχθούν γρήγορα οι ονομαστικές στροφές, ενώ ταυτόχρονα θα περιοριστεί το ρεύμα εκκίνησης. Κάτι τέτοιο μπορεί εύκολα να ρυθμιστεί σε κατάλληλη μηχανή (π.χ. δακτυλιοφόρου δρομέα, με εισαγωγή αντιστάσεων οι οποίες στη συνέχεια αφαιρούνται).**

6. Υλοποίηση ελέγχου με σταθερό λόγο V/f: ο σκοπός του ελέγχου αυτού είναι να ελαττώνονται οι στροφές της μηχανής διατηρώντας σταθερό το λόγο τάσης προς συχνότητα τροφοδοσίας. Οι κύριες απαιτήσεις του ελέγχου είναι στην μόνιμη κατάσταση να επιτυγχάνεται ονομαστική ροή και συνεπώς ροπή, για τιμές της συχνότητας από 50Hz και κάτω (με ένα κατώτατο όριο διάφορο του 0 που δεν θα εξεταστεί τώρα). Θα εξεταστεί μόνο η περίπτωση κενού φορτίου, διότι το ονομαστικό φορτίο αλλάζει αντιστρόφως ανάλογα με την ταχύτητα περιστροφής και είναι σκοπιμότερο να αναδειχθεί ποιοτικά το πείραμα. Παρακάτω παρουσιάζεται η υλοποίηση του ελέγχου:



Η υλοποίηση είναι ουσιαστικά πάλι μια τριφασική τάση τροφοδοσίας με ξεχωριστές τιμές τάσης και συχνότητας, η οποία θα ενεργοποιηθεί μέσω διακόπτη. Η μηχανή θα τροφοδοτηθεί με ονομαστική τάση και συχνότητα έως τα 2.5sec όπου θα αλλάξει στις υποδιπλάσιες τιμές των $f_1 = 25\text{Hz}$ και $V_2 = 162.5\text{ V}$ (πλάτος). Η προσομοίωση φαίνεται παρακάτω:



Όπως φαίνεται, η γωνιακή ταχύτητα (άρα και οι στροφές) υποδιπλασιάστηκε (από 314 → 157 rad/s), η ροή επαναφέρθηκε στην ίδια τιμή με προηγούμενως και ιδίως συμπεριφέρθηκε τόσο η ροπή όσο και το ρεύμα. Προφανώς παρατηρούνται σχετικά έντονα μεταβατικά φαινόμενα, τα οποία είναι αναμενόμενα καθώς η τροφοδοσία αλλάζει απότομα με step μεταβολή. Η μεταβολή της ταχύτητας, ωστόσο, είναι πολύ ομαλότερη έναντι των ηλεκτρικών μεγεθών, γεγονός αναμενόμενο λόγω της ροπής αδράνειας του ρότορα. Επομένως, ο έλεγχος θεωρείται πετυχημένος. **ΤΕΛΟΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ**