Κατσούπης Ευάγγελος
2017030077

Προσωπικά στοιχεία

Παρακάτω παρουσιάζονται τα δεδομένα πάνω στα οποία θα βασιστή η παρούσα εργασία

- Έτος εισαγωγής στο ΗΜΜΥ: *2017*. Άρα ο κινητήρας αποτελείται από ένα ζεύγος πόλων.

$$\mathbf{p = 1}$$

- Αρχικό γράμμα επωνύμου: *K*. Άρα ο κινητήρας εργάζεται στα:

$$\mathbf{f_s = 50\ Hz}$$

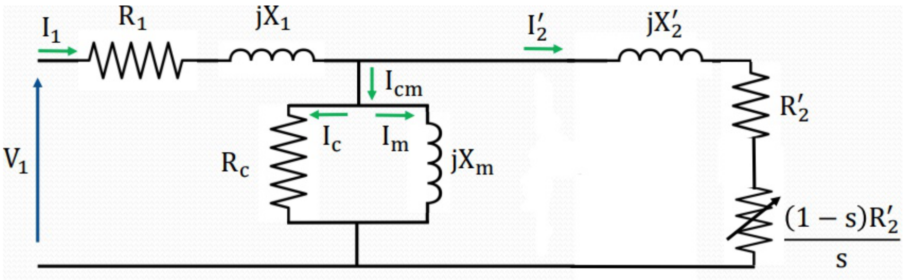
- Τελευταίο ψηφίο φοιτητικού αριθμού μητρώου: *7*. Τότε ο κινητήρας είναι:

συνδεδεμένος σε τρίγωνο

- Μεταβλητές για τον υπολογισμό των μετρήσεων:

$$\mathbf{x = y = z = 7}$$

Ισοδύναμο κύκλωμα για επαγωγικού κινητήρα



Επεξεργασία δεδομένων από μετρήσεις για πλήρες ισοδύναμο κύκλωμα

Πείραμα συνεχούς ρεύματος.

Κατά την διάρκεια τροφοδοσίας του κινητήρα με συνεχές ρεύμα, στα τυλίγματα του στάτη εφαρμόζεται μια συνεχής τάση με αποτέλεσμα να μην επάγεται τάση στο κύκλωμα του δρομέα οδηγώντας σε μηδενικό ρεύμα δρομέα και επομένως μηδενική αντίδραση κινητήρα λόγο του συνεχούς ρεύματος (πηνίο X_1 σαν βραχυκύκλωμα). Συνοψίζοντας, το συνολικό ρεύμα του κινητήρα περιορίζεται εξ' ολοκλήρου από την αντίσταση R_1.

Άρα η αντίσταση μπορεί να υπολογιστεί ως:

$$R_1 = 1 + 0.05x \Rightarrow$$
$$\boxed{R_1 = 1.35\ \Omega}$$

Πείραμα ακινητοποιημένου δρομέα.

Κατά την διάρκεια του πειράματος ο δρομέας κλειδώνεται στην ακινησία, ενώ ο στάτης τροφοδοτείται με τριφασική τάση και συγκεκριμένα με το 25% της ονομαστικής. Στην περίπτωση μας (περίπτωση τριγώνου):

$$V_{ph} = V_L = 0.25 \cdot 400 = 100\ V$$

Σε αυτό το σημείο θα υπολογιστεί και το φασικό ρεύμα για την επεξεργασία των παρακάτω. Βάση δεδομένων το ρεύμα γραμμής υπολογίζεται ως:

$$I_{ph} = \frac{I_L}{\sqrt{3}} = \frac{10 + 0.2y}{\sqrt{3}} = \frac{11.4}{\sqrt{3}} \simeq 6.58\ A$$

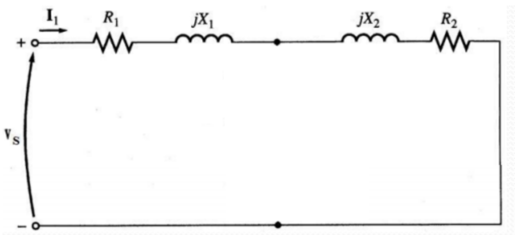
Από την μέτρηση της ενεργού ισχύος, στην μια φάση, μπορούμε να υπολογίσουμε το συντελεστή ισχύος, κατά το πείραμα ακινητοποιημένου δρομέα ως εξύς:

$$\begin{gathered} P_{ph} = V_{ph} \cdot I_{ph} \cdot \cos(\phi) \Rightarrow \\ \cos(\phi) = \frac{P_{ph}}{V_{ph} I_{ph}} = \frac{300 + 4x}{100 \cdot 6.58} = \frac{328}{658} \Rightarrow \\ \cos(\phi) = 0.498 \ \ \&\ \ \phi = 60.13^{\circ} \end{gathered}$$

Έχοντας υπολογίσει το συντελεστή ισχύος και την γωνία της σύνθετης αντίστασης το πείραμα θα αναλυθεί κυκλωματικά. Λόγου του ότι ο δρομέας είναι ακινητοποιημένος, η ολίσθηση θεωρείται μέγιστη, $s = 1$. Άρα η πλήρης αντίσταση $\frac{R_2}{s}$ (υπολογίζεται από $R_2 + \frac{R_2(1-s)}{s}$) είναι αρκετά μικρή και ίση με R_2.

Λόγου του ότι οι R_2 και Q_2 είναι αρκετά μικρότερες από τις παράλληλες αντιστάσεις σιδήρου και (R_C & X_M) σχεδόν όλο το ρεύμα θα περάσει από τις πρώτες. Άρα, σε αυτή την περίπτωση, οι R_1, X_1, R_2 και X_2 θα συμπεριφέρονται σαν να είναι συνδεδεμένες σε σειρά και θα από το ίδιο ρεύμα.

Το ισοδύναμο κύκλωμα για το παρόν πείραμα ακινητοποιημένου δρομέα είναι το εξής:



Υπολογίζοντας το μέτρο της ολικής σύνθετης αντίστασης μπορεί να βρεθούν οι ολικές αντιστάσεις ως εξής:

$$|Z_{total}| = \frac{V_{ph}}{I_{ph}} = \frac{100}{6.58} \simeq 15.2\ \Omega$$

Αναπτύσσοντας την ολική αντίσταση ώς:

$$Z_{total} = R_{total} + jX_{total}$$

μπορούν να υπολογιστούν οι συνολικές αντιστάσεις και η συνολική αντίδραση ώς εξής:

$$\begin{gathered} R_{total} = |Z_{total}| \cdot cos(\phi) = 15.2 \cdot 0.498 \simeq 7.57\ \Omega \Rightarrow \\ R_1 + R_2' = 7.57\ \Omega \Rightarrow \\ \boxed{R_2' = 6.22\ \Omega} \end{gathered}$$

$$X_{total} = |Z_{total}| \cdot sin(\phi) = 15.2 \cdot 0.867 \simeq 13.18\ \Omega \Rightarrow$$
$$X_1 + X_2' = 13.18\ \Omega$$

Για τις αντιδράσεις δεν υπάρχει κάποιος μαθηματικός τρόπος για τον υπολογισμό αυτόν αλλά εμπειρικός ο οποίος βασίζεται στον τρόπο με τον οποίο έχει δημιουργηθεί ο δρομέας.

Ποιο συγκεκριμένα, ανάλογα με την κλάση του δρομέα έχουμε και διαφορετική αναλογία αντιδράσεων ως προς την ολική αλλά και διαφορετική χαρακτηριστική Ροπής-Ταχύτητας.

Αν συγκριθούν ποιοτικά οι χαρακτηριστικές που απεικονίζουν την ροπή ως προς την ταχύτητα, για διαφορετικές τιμές αντίστασης δρομέα (slide 5, pg 105-107) με αυτές για τις διαφορετικές κλάσεις (slide 5, pg 110) παρατειρήται μια ομοιότητα για την περίπτωση όπου $R_2' > R_1$ και για κλάση D.

Άρα θα επιλεχθεί η αναλογία:

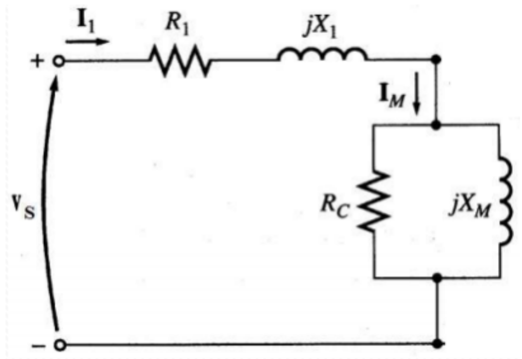
$$0.5X_1 = 0.5X_2' = X_{total} \Rightarrow$$
$$\boxed{X_1 = X_2' = 6.59\ \Omega}$$

Πείραμα εν κενό.

Κατά την διάρκεια του πειράματος χωρίς φορτίο υπολογίζονται οι απώλειες περιστροφής του κινητήρα και παρέχονται πληροφορίες σχετικά με το ρεύμα μαγνητιστής. Σε αυτή την περίπτωση, το μοναδικό φορτίο είναι οι μηχανικές απώλειες.

Η ολίσθηση του κινητήρα είναι αρκετά μικρή με αποτέλεσμα η αντίσταση της ηλεκτρομαγνητικής ισχύς $\left(\frac{R_2(1-s)}{s}\right)$ είναι πολύ μεγαλύτερή από τις αντιστάσεις που οφείλονται στις απώλειες χαλκού του δρομέα (R_2) και αντίδρασης αυτού (X_2). Άρα το ρεύμα (I_2) που θα περνά από από τον κόμβο του δρομέα θα είναι πρακτικά 0.

Άρα το ισοδύναμο κύκλωμα αναφοράς θα είναι το εξύς:



Σε αυτή την περίπτωση έχουμε τα εξής δεδομένα.

$$V_{ph} = V_L = 400\ V$$
$$I_{ph} = \frac{I_L}{\sqrt{3}} = \frac{1 + 0.1z}{\sqrt{3}} = 0.98\ A$$
$$P_{ph} = 100 + 3(y + z) = 142\ W$$

Με βάση τα παραπάνω δεδομένα μπορεί να υπολογιστεί η συνολική φασική φαινόμενη ισχύς ως:

$$S_{ph} = V_{ph}I_{ph} = 392\ \text{VA}$$

Αν από φαινόμενη αφαιρεθεί η πραγματική, το αποτέλεσμα είναι η άεργη ισχύης που καταναλώνουν τα παθητικά στοιχεία του κυκλώματος. Άρα:

$$Q_{ph} = S_{ph} - P_{ph} = 250 \text{ VAr}$$

Δεδομένου του ότι οι R_1 και X_1 είναι γνωστές μπορεί να υπολογιστούν οι ισχύς που καταναλώνονται από τις πλέον άγνωστες αντιστάσεις.

$$P_{ph}^{total} = P_{R_1} + P_{R_C} = I_{ph}^2 R_1 + P_{R_C} \Rightarrow$$
$$P_{R_C} = P_{ph}^{total} - I_{ph}^2 R_1 = 142 - 0.98^2 \cdot 1.35 \Rightarrow$$
$$P_{R_C} \simeq 140.71 \ W$$

$$Q_{ph}^{total} = Q_{X_1} + Q_{X_m} = I_{ph}^2 X_1 + Q_{X_m} \Rightarrow$$
$$Q_{X_m} = Q_{ph}^{total} - I_{ph}^2 X_1 = 250 - 0.98^2 \cdot 6.59 \Rightarrow$$
$$Q_{X_m} \simeq 243.67 \text{ VAr}$$

Άρα αν βρεθούν η τάση ή τα ρεύματα που αναφέρονται στον κόμβο θα μπορούν να υπολογιστούν και οι τιμές των άγνωστων στοιχείων.

Σε αυτή την περίπτωση μπορεί να βρεθεί η τάση του παράλληλου κλάδου αν από την αρχική φασική αφαιρεθεί η πτώση τάσης που προσφέρει η σύνθετη αντίσταση του στάτη. Άρα:

$$V_{C-M} = V_{ph} - V_{R_1+jX_1} = 400 - I_{ph}|Z_1| = 400 - \sqrt{R_1^2 + X_1^2} = 400 - 6.72 = 393.27 \ V$$

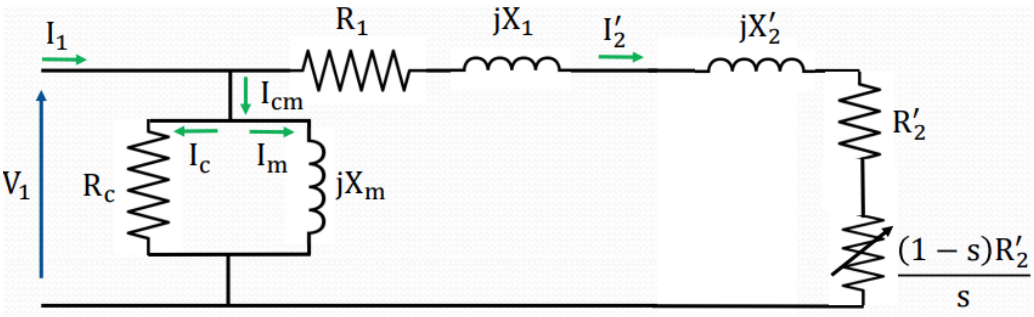
Άρα μπορούν να γίνουν οι υπολογισμοί για τις τελικές για τα άγνωστα στοιχεία με την χρήση των τύπων ισχύων που υπολογίστηκαν παραπάνω:

$$P_{R_c} = \frac{V_{C-M}^2}{R_C} \Rightarrow R_C = \frac{V_{C-M}^2}{P_{R_c}}$$
$$R_C = \frac{393.42^2}{140.71} \Rightarrow$$
$$\boxed{R_C = 1099.98 \simeq 1.1 \text{ k}\Omega}$$

$$Q_{X_m} = \frac{V_{C-M}^2}{X_m} \Rightarrow X_m = \frac{V_{C-M}^2}{Q_{X_M}}$$
$$X_m = \frac{393.42^2}{243.67} \Rightarrow$$
$$\boxed{X_m = 635.2 \simeq 0.635 \text{ k}\Omega}$$

Επεξεργασία δεδομένων από μετρήσεις για ισοδύναμο κύκλωμα με παράλληλα στοιχεία στην είσοδο.

Σε αυτή την περίπτωση το κύκλωμα αναφοράς είναι το εξής:



Πείραμα συνεχούς ρεύματος.

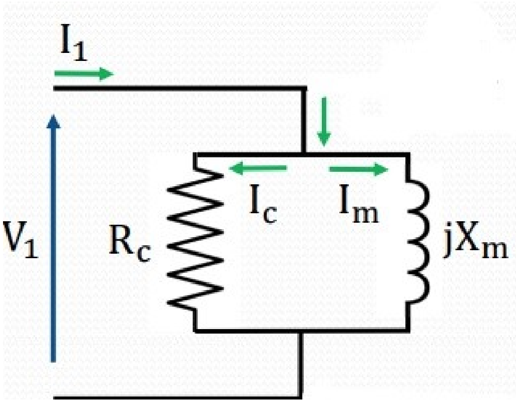
Κατά την διάρκεια τροφοδοσίας με dc ρεύμα, μπορούμε να υπολογίσουμε μόνο την αντίσταση του στάτη, όπου και σε αυτή την περίπτωση είναι ισούται με:

$$\boxed{R_1 = 1.35}$$

Για την περίπτωση της λειτουργίας με ακινητοποιημένο δρομέα, όμοια ο παράλληλος κόμβος θα αμελείται μιας και το ρεύμα δεν θα περνά από τον παράλληλο κόμβο

Πείραμα σε λειτουργία εν κενό.

Σε αυτή την περίπτωση όμοια, το ρεύμα θα περάσει μόνο από τον παράλληλο κόμβο μιας και η αντίσταση στην έξοδο θα είναι πάρα πολύ μεγάλη λόγου του μικρού slip. Δεδομένου των παραπάνω το ισοδύναμο κύκλωμα είναι: Σε αυτή την περίπτωση τάση εισόδου θα είναι και η τάση του παράλληλου κλάδου και το



φασικό ρεύμα εισόδου θα είναι και αυτό που διαχωρίζεται στα άγνωστα στοιχεία. Άρα:

$$V_{C-M} = V_{ph} = 400\ V\ \&\ I_{C-M} = I_{ph} = 0.98\ A$$

Η ισχύς από την μέτρηση αναφέρεται στην πραγματική ισχύς που της αντίστασης R_C. Όμοια με την προηγούμενη περίπτωση θα η άεργος ισχύς μπορεί να υπολογιστεί με την αφαίρεση της παραπάνω από την φαινόμενη ($S_{ph} = 392$ VA). Άρα, τα στοιχεία μπορούν να υπολογιστούν ως:

$$P_{ph} = P_{R_C} = 142\ W \Rightarrow$$
$$\frac{V_p h^2}{R_C} = 142 \Rightarrow R_C = \frac{V_p h^2}{142} \Rightarrow$$
$$\boxed{R_C = 1126.76 \simeq 1.127\ \text{k}\Omega}$$

$$Q_{ph} = Q_{X_m} = S_{ph} - P_{ph} = 250\ \text{VAr} \Rightarrow$$
$$\frac{V_p h^2}{X_m} = 250 \Rightarrow X_m = \frac{V_p h^2}{250} \Rightarrow$$
$$\boxed{X_m = 640 \simeq 0.64\ \text{k}\Omega}$$

Πείραμα λειτουργίας με ακινητοποιημένο δρομέα.

Για το παρόν πείραμα, όπου $s = 1$, η αντιστάσεις δρομέα και στάτη είναι αρκετά μικρότερες από τις αντιστάσεις R_C & X_m, με αποτέλεσμα ο παράλληλος κόμβος να παραλείπεται, μιας και θα περνά μικρό μηδενικό ρεύμα από αυτόν. Άρα το ισοδύναμο κύκλωμα θα είναι πρακτικά το ίδιο με αυτό της προηγούμενης περίπτωσης και με τιμές στοιχείων:

$$\boxed{R_2' = 6.22\ \Omega\ \ \&\ \ X_1 = X_2' = 6.59\ \Omega}$$

Γραφικές ροπής και ρεύματος στάτη ως προς την ταχύτητα.

Για τον υπολογισμό των παραμέτρων ροπής και ρεύματος, και στις δύο περιπτώσεις, αρχικά υπολογίστηκαν οι ολικές σύνθετες αντιστάσεις, για κάθε περίπτωση, ώστε να βρεθούν τα επιμέρους ρεύματα και ροπές. Ο υπολογισμός αυτός είναι σύμφωνος με τις διάφορες τιμές του slip και άρα της μηχανικής ταχύτητας. Ο τρόπος για κάθε περίπτωση είναι ο παρακάτω:

Σύνθετη αντίσταση δρομέα, παράλληλων στοιχείων και δρομέα κατά IEEE:

$$Z_2 = \frac{R_2}{s} + jX_2, \quad Z_{CM} = \frac{Z_2 \cdot jX_m}{R_C + jX_m}, \quad Z_1 = R_1 + jX_1$$

Η συνολική σύνθετη αντίσταση είναι το άθροισμα της Z_1 και αυτής που αποτελείται από τις παράλληλες Z_{CM} και Z_2.

Το ρεύμα στάτη I_{phase}, είναι και αυτό το οποίο μπορεί να υπολογιστεί με την χρήση του νόμου του Ohm μιας και θα είναι και αυτό το οποίο καταναλώνεται από όλο το κύκλωμα.

Για τον υπολογισμό της ροπής, υπολογιστικέ η τάση του παράλληλου κόμβου:

$$E_1 = V_{phase} - I_{phase} \cdot (R_1 + jX_1)$$

αλλά και το ρεύμα το οποίο θα περάσει στον δρομέα:

$$I_2 = \frac{E_1}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + X_2^2}}$$

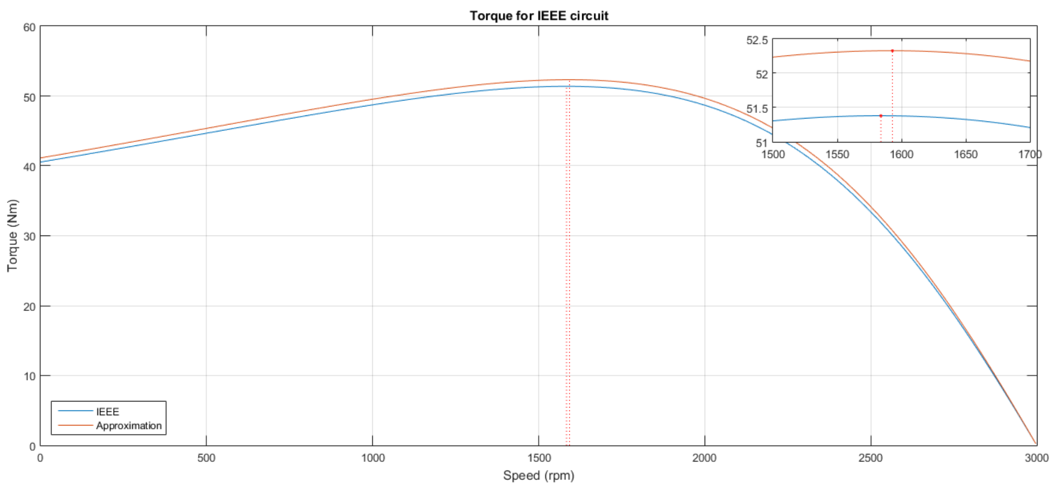
Με βάση τα παραπάνω η συνολική ροπή υπολογίζεται ως:

$$T_{total} = 3T_{em} = 3 \cdot \frac{1}{\omega_s} \cdot (I_2)^2 \cdot \frac{R_2}{s}$$

.
Για την περίπτωση όπου ο παράλληλος κόμβος είναι μπροστά γίνονται τα ίδια βήματα, με την διαφορά ότι η σύνθετη αντίσταση υπολογίζεται ως:

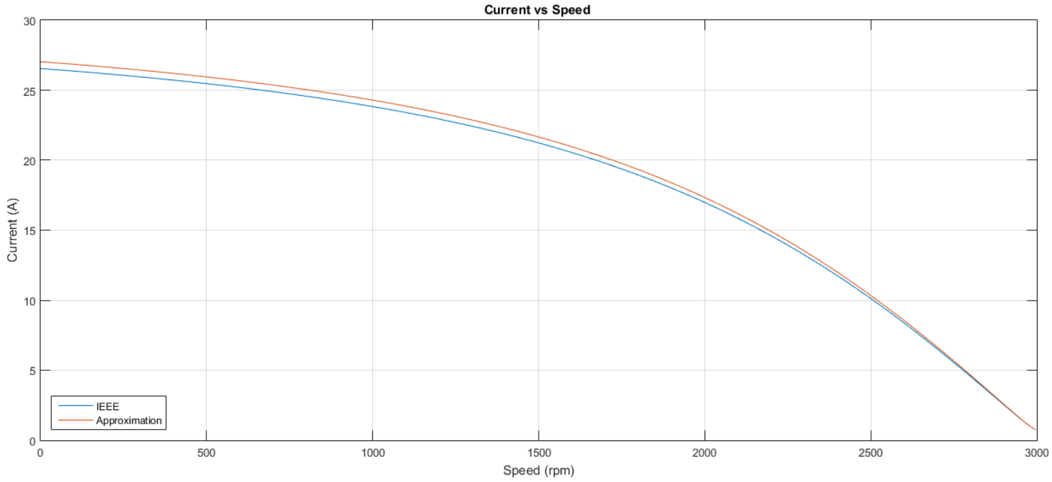
$$Z_{total} = Z_{CM} // (Z_1 + Z_2)$$

Η χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας, και για τις δύο περιπτώσεις:



Γενικά το κατά προσέγγιση ισοδύναμο μπορεί να έχει διαφορά από το πραγματικό ισοδύναμο της τάξης του 5%. Σε αυτή την περίπτωση η διαφορά είναι της τάξεως των 2%. Η διαφορά είναι πιο εμφανής κοντά στο σημείο ανατροπής όπου με την χρήση του κατά προσέγγιση κυκλώματος, το σημείο είναι ελαφρώς μεγαλύτερο με αποτέλεσμα να 'χάνεται' περιοχή από την ευστάθεια.

Ίδια διαφορά μπορεί να σημειωθεί και στην χαρακτηριστική ρεύματος στάτη-ταχύτητας όπου χρειάζεται παραπάνω ρεύμα κατά την εκκίνηση της μηχανής:



Για τον υπολογισμό των παραμέτρων, αλλά και την εξαγωγή των χαρακτηριστικών, έγινε χρήση του προγράμματος $MATLAB$ και με τον κώδικα αναφοράς να παρουσιάζεται στο τέλος:

Ανάλυση υπό δεδομένο slip

Για την συγκεκριμένη περίπτωση θα χρησιμοποιηθεί το ισοδύναμο κύκλωμα κατά IEEE. Για δεδομένο slip ($s = 3 + y = 10\%$), είναι γνωστή η αντίσταση της ισχύς. Αν υπολογιστούν οι σύνθετες αντιστάσεις κάθε κόμβου, μπορεί να υπολογιστεί η συνολική σύνθετη αντίσταση του κινητήρα και στην συνέχεια το φασικό ρεύμα που διέπει τον στάτη. Και σε αυτή την περίπτωση (όμοια με προηγούμενο ερώτημα) η συνολική αντίσταση θα ορίζεται ως:

$$Z_{total} = (R_1 + jX_1) + \left(\left(\frac{R_2}{s} + jX_2\right) // (R_C // X_m)\right)$$

Το ρεύμα του στάτη θα ορίζεται, ως το πηλίκο της τάσης τροφοδοσίας (φασική) προς την σύνθετη αντίσταση:

$$I_{phase} = I_{stator} = \frac{V_{phase}}{Z_{total}} = 6.246 - j1.884i = 6.525\underline{/16.789^\circ}\ A$$

Με βάση το ρεύμα (συζυγές αυτού) μπορεί να υπολογιστεί η φαινόμενη ισχύς ως:

$$S_{ph} = V_{phase} \cdot I^*_{phase} = 2498.707 + j753.878 \text{ VA}$$

Άρα η συνολική φαινόμενη ισχύς και η απόλυτη αυτής, είναι:

$$\boxed{S_{total} = 7496.122 + j2261.633 \text{ VA}} \ \& \ \boxed{|S_{total}| = 7829.868 \text{ VA}}$$

Η φαινόμενη ισχύς μπορεί να γραφεί και ως ανάπτυγμα ενεργού και άεργου ισχύος, μιας και είναι στην καρτεσιανή μορφή της:

$$S_{total} = P_{total} + jQ_{total}$$

Άρα η συνολική ενεργή ισχύς θα είναι:

$$\boxed{P_{total} = 7496.122\ W}$$

Η συνολική άεργος ισχύς:

$$\boxed{Q_{total} = 2261.633\ \text{VAr}}$$

Για τον υπολογισμό της απόδοσης θα πρέπει να υπολογιστεί η μηχανική ροπή εξόδου του κινητήρα. Λόγου του ότι οι μηχανικές απώλειες αμελούνται, η μηχανική ροπή εξόδου θα ισούται με την ηλεκτρομαγνητική ισχύς (P_{em}) που προσφέρει η αντίσταση $\frac{R_2(1-s)}{s}$:

$$P_{mech} = P_em = I_2^2 \cdot \frac{R_2(1-s)}{s} = 6234.813\ W$$

Για τον υπολογισμό της, βρέθηκε το αντίστοιχο ρεύμα I_2 που διαπερνά το δρομέα για το συγκεκριμένο slip.

Τέλος η απόδοση του κινητήρα μπορεί να υπολογιστεί ως:

$$\boxed{a = \frac{P_{mech}}{P_{el}} = \frac{P_{em}}{P_{el}} = 0.832}$$

Και σε αυτό το σημείο, οι πράξεις και οι υπολογισμοί, πραγματοποιήθηκαν με χρήση προγράμματος σε $MATLAB$ και παρουσιάζεται στο τέλος.

Ανάλυση κινητήρα από χαρακτηριστική απόδοσης-στροφών

Για slip $s = 0.04$ θα υπολογιστεί η χαρακτηριστική γραφική απόδοσης-ταχύτητας και θα ελεγχθεί το σημείο λειτουργίας για το δεδομένο slip. Για να γίνει ο υπολογισμός πρέπει αρχικά να βρεθούν η ηλεκτρική ισχύς εισόδου αλλά και η μηχανική στην έξοδο.

Λόγου του ότι οι μηχανικές απώλειες αμελούνται, η ισχύς εξόδου θα είναι και σε αυτή την περίπτωση η ηλεκτρομαγνητική ισχύς που προσφέρει η $\left(R_2\frac{1-s}{s}\right)$. Για τον υπολογισμό αυτής θα πρέπει να γίνει, όμοια, μια ανάλυση ώστε να βρεθούν τα ρεύματα στον στάτη και στον δρομέα και στην συνέχεια οι ισχύς αναφοράς.

Παρομοίως, βρέθηκε η ολική αντίσταση και υπολογίστηκε το ρεύμα στον στάτη για τις διάφορες τιμές των ολισθήσεων:

$$I_{stator} = I_{phase} = \frac{V_{phase}}{Z_{total}}$$

Το αποτέλεσμα είναι μιγαδικοί αριθμοί, για κάθε slip, από τους οποίους μπορεί να βρεθούν οι γωνίες (ϕ) που θα χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό των διαφορετικών ισχύων εισόδου:

$$P_{el} = V_{phase} \cdot |I_{phase}| \cdot cos(\phi)$$

Για τις P_{em} θα πρέπει να βρεθεί, και πάλη, η διαφορά τάσης στα παράλληλα στοιχεία ώστε να να βρεθεί το ρεύμα που θα διαπερνά την R_2:

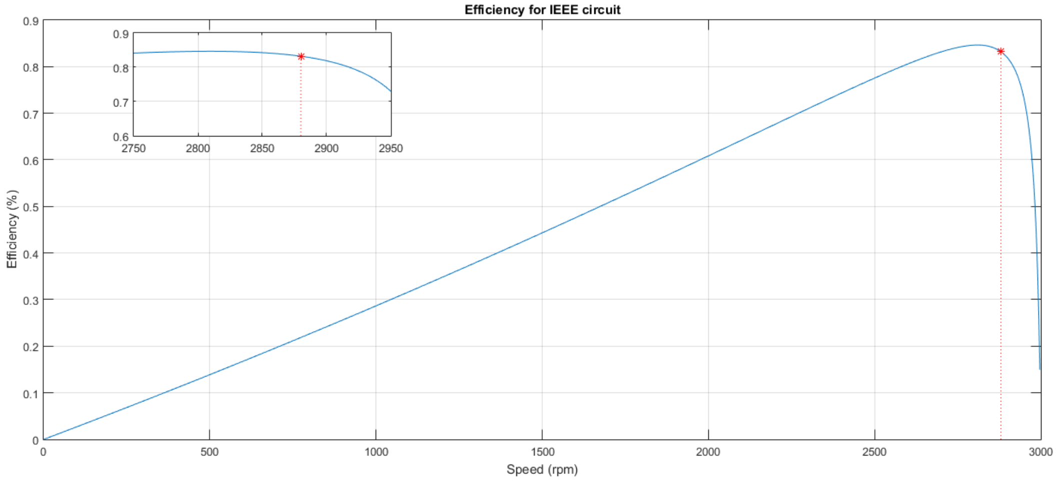
$$E_1 = V_{phase} - I_{phase}(R_1 + jX_1)$$

$$I_2 = \frac{E_1}{\sqrt{\frac{R_2}{s} + X_2^2}}$$

Τώρα μπορεί να υπολογιστεί η ισχύς εξόδου ως:

$$P_{mech} = P_{em} = |I_2|^2 \cdot \frac{R_2(1-s)}{s}$$

Τέλος και με τον υπολογισμό της απόδοσης $a = \frac{P_{em}}{P_{el}}$ δημιουργείτε η παρακάτω χαρακτηριστική:



Για ονομαστική ολίσθηση λειτουργίας στα $s = 4\%$ παρατηρείται ότι η απόδοση, $\mathbf{a} = \mathbf{0.83}$ %, είναι πολύ κοντά στην μέγιστη, $\mathbf{a_{max}} = \mathbf{0.85}$ %, οδηγώντας σε σχετικά μια καλή επιλογή. Αν η ολίσθηση ήταν αυξημένη κατά 2 μονάδες ($s = 6\%$), η απόδοση θα ήταν η μέγιστη.

Ο κώδικας για τον υπολογισμό των στοιχείων και την απεικόνιση της χαρακτηριστικής μπορεί να βρεθεί παρακάτω.

Κώδικας για υπολογισμούς τιμών και γραφικών.

Υπολογισμός χαρακτηριστικών T_{mech}/rpm και I_{stator}/rpm (q_2).

```
clear all;close all;clc
% Data
V_phase = 400;
f_s = 50;
omega_s = 2*pi*f_s;
poles = 2;
n_s = (60*f_s)/(poles/2);
% Equivalent Circuit (IEEE)
R_1 = 1.35;
R_2 = 6.22;
R_c = 1099.98;
X_total = 13.18;
X_1 = 0.5 * X_total;
X_2 = 0.5 * X_total;
X_m = 635.2;
% Slip
s_step = 0.001;
s = 0:s_step:1;
s(1) = s_step;
% Mechanical speed
n_m = (1-s) * n_s;
% Frequency
f = (1-s)*f_s;
% Composite resistances
Z_2 = R_2./s + 1j * X_2; % rotor
    resistances
Z_CM = (R_c*(1j*X_m))/(R_c+(1j*X_m));
    % pararell componens
Z_2CM = (Z_2*Z_CM)./(Z_2+Z_CM); %
    compination of the above
Z_1 = R_1 + 1j * X_1; % stator
    rasistances
% Total Resistance
Z_total = Z_1 + Z_2CM;
% Stator Current for each s
I_phase = V_phase ./ Z_total;
% Indaction Voltage and Current
E_1 = V_phase-I_phase.*(R_1+1j*X_1);
I_2 = E_1./sqrt((R_2./s).^2+X_2.^2);
% Torque Calculations
T_em = (1/omega_s).*(I_2.^2).*(R_2./s)
    ;
T_3ph = 3*abs(T_em);
max_index = find(T_3ph==max(T_3ph));
% Approximated Equivalent Circuit
% Different components
R_c_p = 1126.76;
X_m_p = 640;
% Total resistance
% pararell componens
Z_CM_p = (R_c_p*(1j * X_m_p))/(R_c_p
    +(1j*X_m_p) );
Z_series = R_1 + R_2./s + 1j*X_1 + 1j*
    X_2;
Z_total_p = (Z_CM_p * Z_series) ./ (
    Z_CM_p + Z_series);
% Input Current for each s
I_phase_p = V_phase ./ Z_total_p;
% Current for Resistances in series
I_2_p = V_phase ./ sqrt( (R_1 + R_2./s
    ).^2 + (X_1 + X_2)^2 );
% Torque
T_em_p=(1/omega_s)*(I_2_p.^2).*(R_2./s
    );
T_3ph_p = 3*abs(T_em_p);
max_index_p = find(T_3ph_p==max(
    T_3ph_p));
% Differenses
fprintf('Differences for torques: %.2f
     %%\n',mean((T_3ph_p - T_3ph)./
    T_3ph)*100)
fprintf('Differences for currents: %.2
    f %%\n', mean((abs(I_phase_p)-abs(
    I_phase))./abs(I_phase))*100)
```

Για τη εξαγωγή των γραφικών έγινε χρήση του παρακάτω:

```
% Figures
% Torque vs Speed
fig_1=figure('name','torque_speed');
plot(n_m,T_3ph); hold on;
plot(n_m,T_3ph_p); hold on;
plot([n_m(max_index) n_m(max_index)
    ],[0 T_3ph(max_index)],':r'); hold
     on;
plot([n_m(max_index_p) n_m(max_index_p
    )],[0 T_3ph_p(max_index_p)],':r')
T_3ph(max_index)],':r')
xlabel('Speed (rpm)'); ylabel('Torque
    (Nm)');
title('Torque for IEEE circuit');
legend('IEEE', 'Approximation', '
    Location','southwest'); grid on;
axes('Position',[.7 .7 .2 .2])
box on
plot(n_m, T_3ph); hold on
plot(n_m, T_3ph_p); hold on
plot(n_m(max_index),T_3ph(max_index),
    '.r'); hold on
plot(n_m(max_index_p),T_3ph_p(
    max_index_p), '.r'); hold on
plot([n_m(max_index) n_m(max_index)
    ],[51 T_3ph(max_index)],':r') hold
     on
plot([n_m(max_index_p) n_m(max_index_p
    )],[51 T_3ph_p(max_index_p)],':r')
     grid on
xlim([1500, 1700])
set(fig_1,'Position',[0 0 1500 600]);
% Current vs Speed
fig_2 = figure('name','Current vs
    speed');
plot(n_m,abs(I_phase)); hold on;
plot(n_m,abs(I_phase_p));
xlabel('Speed (rpm)');
ylabel('Current (A)');
title('Current vs Speed ');
legend('IEEE','Approximation','
    Location','southwest')
grid on;
set(fig_2,'Position',[0 0 1500 600]);
```

Υπολογισμός ρεύματος στάτη ισχύων και απόδοσης για s = 10%.

```
clear all;close all;clc
% Data
V_phase = 400;
f_s = 50;
omega_s = 2*pi*f_s;
poles = 2;
n_s = (60*f_s)/(poles/2);
% Equivalent Circuit (IEEE)
R_1 = 1.35;
R_2 = 6.22;
R_c = 1099.98;
X_total = 13.18;
X_1 = 0.5 * X_total;
X_2 = 0.5 * X_total;
X_m = 635.2;
% Slip
s = 0.1;
% Composite resistances
Z_2 = R_2./s + 1j * X_2; % rotor
    resistances
Z_CM = (R_c * (1j * X_m) ) / (R_c + (1
    j * X_m) ); % pararell componens
Z_2CM = (Z_2 * Z_CM) ./ (Z_2 + Z_CM);
    % compination of the above
    pararrel.
Z_1 = R_1 + 1j * X_1; % stator
    rasistances
Z_total = Z_1 + Z_2CM; % total
    Resistance
% Stator Current
I_phase = V_phase ./ Z_total;
I_line = I_phase * sqrt(3);
fprintf('I_phase = I_stator =  %.3f
    %+.3fj A \n\n',real(I_phase),...
     imag(I_phase));
% Indaction Voltage and Current
E_1 = V_phase - I_phase.*(R_1 + 1j*X_1
    );
I_2 = E_1 ./ sqrt( (R_2./s).^2 + X_2
    .^2);
% Power Factor
phi = -angle(I_phase);
PF = cos(phi);
fprintf('Power Factor = cos(%.3f) =
    %.3f\n\n',phi,PF);
% Apparent power
S = V_phase * conj(I_phase);
fprintf('Total apparent power: S = %.3
    f%+.3fj VA, |S| = %.3f VA\n\n' ...
     ,3*real(S),3*imag(S), 3*abs(S));
% Real power
P = real(S);
fprintf('Total real power: P = %.3f W\
    n\n',3*P);
% Reactive power
Q = imag(S);
fprintf('Total reactive power: Q = %.3
    f VAr\n\n', 3*Q);
% Mechanical output power
P_mech = abs(I_2)^2 * ( R_2*((1-s)/s )
    );
fprintf('Total output power: P_{mech}
    = %.3f W \n\n', 3*P_mech);
% Efficiency
a = P_mech / P;
fprintf('Efficiency: a = %.3f %% \n\n'
    , a);
```

Ανάλυση για ονομαστική ολίσθηση (s = 4%)

```
clear all;close all;clc
% Data
V_phase = 400;
f_s = 50;
omega_s = 2*pi*f_s;
poles = 2;
n_s = (60*f_s)/(poles/2);
% Equivalent Circuit (IEEE)
R_1 = 1.35;
R_2 = 6.22;
R_c = 1099.98;
X_total = 13.18;
X_1 = 0.5 * X_total;
X_2 = 0.5 * X_total;
X_m = 635.2;
% Slip
s_step = 0.001;
s = 0:s_step:1;
s(1) = s_step;
% Mechanical speed
n_m = (1-s) * n_s;
% Composite resistances
Z_2 = R_2./s+1j*X_2; % rotor
    resistances
Z_CM = (R_c*(1j*X_m))/(R_c+(1j*X_m));
    % pararell componens
Z_2CM = (Z_2*Z_CM)./(Z_2+Z_CM);%
    compination of the above pararrel.
Z_1 = R_1+1j*X_1; % stator rasistances
% Total Resistance
Z_total = Z_1 + Z_2CM;
% Stator Current for each s
I_phase = V_phase ./ Z_total;
% Angle of current
phi = -angle(I_phase);
% Indaction Voltage and Current
E_1 =V_phase-I_phase.*(R_1+1j*X_1);
I_2 = E_1./sqrt( (R_2./s).^2+X_2.^2);
% Electrical Input Power Calculation
P_el = V_phase .* abs(I_phase) .* cos(
    phi);
% Mechanical Output Power Calculation
P_mech = abs(I_2).^2 .* ( R_2.*((1-s)
    ./s ));
% Efficiency Calculator
Eff = P_mech ./ P_el;
% Mechanical speed at s = 0.04;
n= (1 - 0.04)*n_s;
% Find possition at the efficiency
    curve
index = find(n_m == n);
% Figures
% Efficiency vs Speed
fig_1 = figure('name', 'efficiency vs
    speed');
plot(n_m,Eff);
hold on;
plot([n_m(index) n_m(index)],[0 Eff(
    index)],':r')
hold on;
plot(n_m(index),Eff(index), '*r');
grid on;
xlabel('Speed (rpm)');
ylabel('Efficiency (%)');
title('Efficiency for IEEE circuit');
axes('Position',[.2 .7 .2 .2])
box on
t = 40;
plot(n_m,Eff);
hold on;
plot([n_m(index) n_m(index)],[0 Eff(
    index)],':r')
hold on;
plot(n_m(index),Eff(index), '*r');
xlim([2750,2950])
ylim([0.7,0.9])
grid on
set(fig_1,'Position',[0 0 1500 600]);
fprintf('Max efficiency: a = %.3f %% \
    n', max(Eff))
fprintf('Efficiency for s = 4%%: a =
    %.3f %% \n', Eff(index))
```