



Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο
Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχ. & Μηχ. Η/Υ

Ηλεκτρικές Μηχανές II

Μάθημα 11^ο

Επαγωγικοί κινητήρες

Γιώργος Ορφανουδάκης

Περιεχόμενα μαθήματος

1. Αρχή λειτουργίας επαγωγικών κινητήρων
2. Ισοδύναμο Κύκλωμα του Επαγωγικού Κινητήρα
3. Ισοδύναμο Κύκλωμα του Μετασχηματιστή στο Ισοδύναμο Κύκλωμα του Επαγωγικού Κινητήρα
4. Ισοδύναμο Κύκλωμα του Δρομέα του Επαγωγικού Κινητήρα
5. Τελικό Ισοδύναμο Κύκλωμα

Αρχή λειτουργίας επαγωγικών κινητήρων

- Τα τριφασικά εναλλασσόμενα ρεύματα στον στάτη δημιουργούν ένα περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό του.
- Έστω ότι η μηχανή είναι δακτυλιοφόρος, άρα έχει τυλίγματα (πηνία) στον δρομέα, και ο δρομέας είναι αρχικά ακίνητος.
- Λόγω του περιστρεφόμενου μαγνητικού πεδίου που δημιουργείται από τον στάτη, η μαγνητική ροή, Φ , που διαρρέει τα τυλίγματα του δρομέα μεταβάλλεται.
- Λόγω της μεταβολής της μαγνητικής ροής ($\Delta\Phi/\Delta t$), επάγεται τάση στα τυλίγματα του δρομέα.
- Εάν στα άκρα των τυλιγμάτων του δρομέα συνδεθεί ένα παθητικό φορτίο (π.χ. μία αντίσταση) ή εάν τα άκρα τους βραχυκυκλωθούν, τότε η επαγόμενη τάση δημιουργεί ροή ρεύματος στον δρομέα.
- Το ρεύμα αυτό έχει ως αποτέλεσμα ο δρομέας να αποκτήσει ένα δικό του μαγνητικό πεδίο.
- Το μαγνητικό πεδίο του δρομέα είναι επίσης περιστρεφόμενο και αλληλεπιδρά με το πεδίο του στάτη, με αποτέλεσμα την παραγωγή ροπής.

Αρχή λειτουργίας επαγωγικών κινητήρων (2)

- Η ροπή έχει φορά τέτοια ώστε ο δρομέας να επιταχύνεται προς την φορά περιστροφής του μαγνητικού πεδίου του στάτη.
- Καθώς η ταχύτητα του δρομέα αυξάνεται, μειώνεται ο ρυθμός μεταβολής της μαγνητικής ροής ($\Delta\Phi/\Delta t$) στα τυλίγματα του δρομέα, άρα μειώνεται και η τάση που επάγεται στον δρομέα.
- Αν, σε ιδανικές συνθήκες, ο κινητήρας έχει μηδενικό φορτίο (δηλ. ροπή φορτίου), τότε ο δρομέας επιταχύνει έως τη σύγχρονη ταχύτητα, n_s , στην οποία ο ρυθμός μεταβολής της μαγνητικής ροής ($\Delta\Phi/\Delta t$) είναι μηδενικός, άρα δεν επάγεται τάση, ρεύμα, και μαγνητικό πεδίο στον δρομέα. Η ροπή τότε μηδενίζεται και η ταχύτητα παραμένει σταθερή.
- Σε πραγματικές συνθήκες, δηλ. για μη μηδενικό φορτίο, ο δρομέας επιταχύνει και τελικά ισορροπεί σε μία ταχύτητα $n_r < n_s$, στην οποία η μεταβολή της μαγνητικής ροής είναι τέτοια ώστε επάγεται τάση, ρεύμα και μαγνητικό πεδίο που έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση ροπής ίσης με τη ροπή του φορτίου (συμπεριλαμβανομένων των μηχανικών απωλειών).
- Όσο αυξάνεται το φορτίο, τόσο μειώνεται η n_r , με αποτέλεσμα την αύξηση των παραπάνω μεγεθών και την παραγωγή υψηλότερης ροπής από τον κινητήρα.

Αρχή λειτουργίας επαγωγικών κινητήρων (3)

- Αρχή λειτουργίας τριφασικών επαγωγικών κινητήρων
 - https://www.youtube.com/watch?v=AQqyGNOP_3o&t=187s
- Δακτυλιοφόροι τριφασικοί επαγωγικοί κινητήρες
 - <https://www.youtube.com/watch?v=JPn5Ou-N0b0>
- Μονοφασικοί επαγωγικοί κινητήρες
 - <https://www.youtube.com/watch?v=awrUxv7B-a8>

Το Ισοδύναμο Κύκλωμα του Επαγωγικού Κινητήρα



- Η λειτουργία του κινητήρα βασίζεται στις τάσεις και τα ρεύματα που παράγονται **εξ' επαγωγής** στο δρομέα και οφείλονται στο μαγνητικό πεδίο του στάτη
- Επειδή, κατά την παραγωγή των τάσεων και των ρευμάτων ο επαγωγικός κινητήρας λειτουργεί εντελώς όμοια μ' ένα μετασχηματιστή, το ισοδύναμο κύκλωμα του κινητήρα θα μοιάζει αρκετά μ' αυτό του μετασχηματιστή
- Ο επαγωγικός κινητήρας ονομάζεται και μηχανή απλής διέγερσης (singly excited), σε αντιδιαστολή με τις σύγχρονες μηχανές που ονομάζονται διπλής διέγερσης (doubly excited), επειδή τροφοδοτείται με ισχύ μόνο το κύκλωμα του στάτη του
- Επειδή ο επαγωγικός κινητήρας δε διαθέτει ξεχωριστό κύκλωμα διέγερσης, στο ισοδύναμο κύκλωμά του δεν υπάρχει εσωτερική πηγή τάσης, όμοια με την εσωτερική τάση E_A των σύγχρονων μηχανών

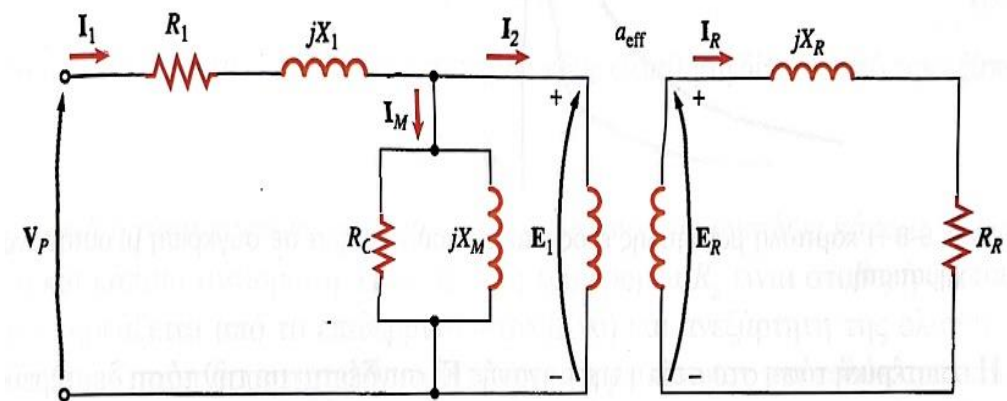
Το Ισοδύναμο Κύκλωμα του Επαγωγικού Κινητήρα



- Το ισοδύναμο κύκλωμα του επαγωγικού κινητήρα είναι δυνατό να εξαχθεί, αν είναι γνωστή
 - η λειτουργία των μετασχηματιστών και
 - οι κανόνες που διέπουν τη μεταβολή της συχνότητας στο δρομέα με τη μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής
- Η ανάπτυξη του ισοδύναμου κυκλώματος ενός επαγωγικού κινητήρα
 - ξεκινά με το ισοδύναμο κύκλωμα του μετασχηματιστή
 - κατόπιν λαμβάνεται υπόψη η μεταβολή της συχνότητας στο δρομέα
 - και τέλος λαμβάνονται υπόψη άλλα σχετικά φαινόμενα

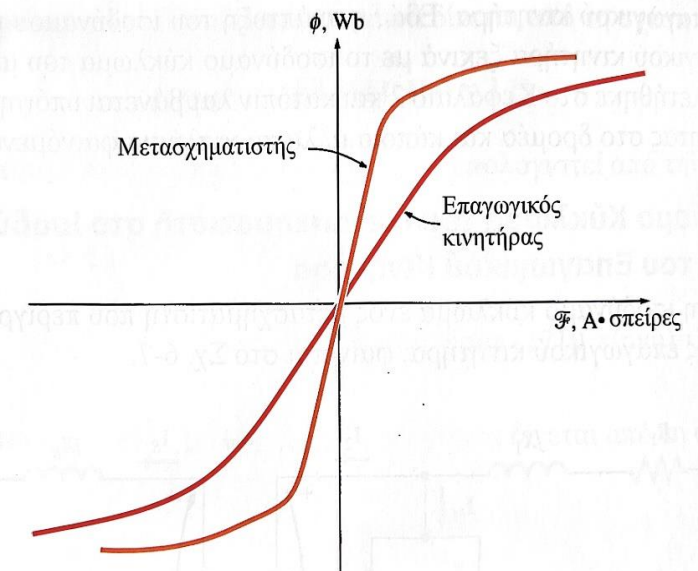
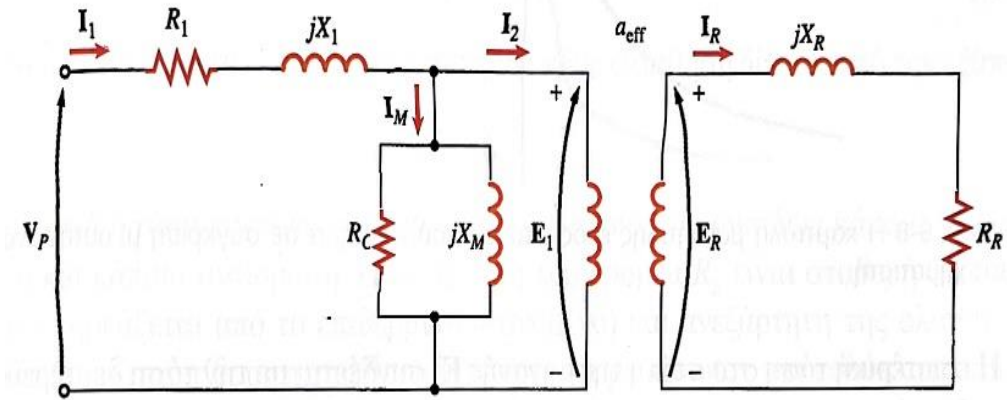
Το Ισοδύναμο Κύκλωμα του Μετασχηματιστή στο Ισοδύναμο Κύκλωμα του Επαγωγικού Κινητήρα

- Ανά φάση ισοδύναμο κύκλωμα ενός μετασχηματιστή που περιγράφει τη λειτουργία ενός επαγωγικού κινητήρα
- Ο στάτης συνδέεται με τον δρομέα μέσω ενός ιδανικού μετασχηματιστή με λόγο μετασχ.: α_{eff}
- Όπως σε κάθε μετασχηματιστή, στο πρωτεύον τύλιγμα (τύλιγμα του στάτη) εμφανίζεται μια αντίσταση και μια αυτεπαγωγή
 - Η αντίσταση του στάτη συμβολίζεται με R_1
 - Η αντίδραση διαρροής συμβολίζεται με X_1
- Αυτές οι δυο ποσότητες εμφανίζονται στην είσοδο του ισοδύναμου κυκλώματος της μηχανής



Το Ισοδύναμο Κύκλωμα του Μετασχηματιστή στο Ισοδύναμο Κύκλωμα του Επαγωγικού Κινητήρα

- Όπως σε κάθε μετασχηματιστή που διαθέτει σιδηρομαγνητικό πυρήνα, η μαγνητική ροή στο εσωτερικό της μηχανής εξαρτάται από το **ολοκλήρωμα** της εφαρμοζόμενης τάσης E_1
- Στο κάτω σχήμα φαίνεται η γραφική παράσταση της μαγνητεγερτικής δύναμης ως προς τη μαγνητική ροή στο εσωτερικό της μηχανής (καμπύλη μαγνήτισης)
- Συγκρίνεται με την αντίστοιχη καμπύλη ενός μετασχηματιστή ισχύος
- Η κλίση της καμπύλης μαγνήτισης του επαγωγικού κινητήρα είναι πολύ λιγότερο απότομη απ' αυτή ενός καλά σχεδιασμένου μετασχηματιστή



Το Ισοδύναμο Κύκλωμα του Μετασχηματιστή στο Ισοδύναμο Κύκλωμα του Επαγωγικού Κινητήρα

- Αυτό συμβαίνει, επειδή στη μηχανή υπάρχει διάκενο (δηλ. κενό μεταξύ στάτη και δρομέα) που αυξάνει τη μαγνητική αντίσταση κατά τη διαδρομή της ροής, πράγμα που μειώνει τη σύζευξη μεταξύ του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος
- Όσο μεγαλύτερη μαγνητική αντίσταση παρουσιάζει το διάκενο της μηχανής (δηλ. όσο μεγαλύτερο είναι το κενό), τόσο μεγαλύτερο είναι το ρεύμα μαγνήτισης που απαιτείται για την εξασφάλιση μιας δεδομένης ροής
- Έτσι, η αντίσταση μαγνήτισης X_M στο ισοδύναμο κύκλωμα ενός επαγωγικού κινητήρα, έχει πολύ μικρότερη τιμή απ' αυτήν ενός μετασχηματιστή

Το Ισοδύναμο Κύκλωμα του Μετασχηματιστή στο Ισοδύναμο Κύκλωμα του Επαγωγικού Κινητήρα

- Η εσωτερική τάση στο στάτη της μηχανής E_1 συνδέεται με την τάση δευτερεύοντος E_R μέσω του μετασχηματιστή με κάποιον ενεργό λόγο μετασχηματισμού α_{eff}
- Στον επαγωγικό κινητήρα δακτυλιοφόρου δρομέα είναι εύκολος ο προσδιορισμός του λόγου μετασχηματισμού α_{eff}
- Αυτός είναι ίσος με τον αριθμό των αγωγών ανά φάση του στάτη προς τον αριθμό των αγωγών ανά φάση του δρομέα επί τους συντελεστές βήματος και κατανομής
- Όμως, στον κινητήρα βραχυκυκλωμένου κλωβού, του οποίου ο δρομέας δε διαθέτει συγκεκριμένο αριθμό αγωγών, είναι μάλλον δύσκολος ο ακριβής προσδιορισμός του α_{eff}
- Η τάση E_R που παράγεται στο δρομέα της μηχανής παράγει με τη σειρά της κάποιο ρεύμα στο βραχυκυκλωμένο κύκλωμα του δρομέα (δευτερεύον) της μηχανής

Το Ισοδύναμο Κύκλωμα του Μετασχηματιστή στο Ισοδύναμο Κύκλωμα του Επαγωγικού Κινητήρα

- Οι σύνθετες αντιστάσεις πρωτεύοντος και το ρεύμα μαγνήτισης του επαγωγικού κινητήρα είναι σχεδόν όμοια μεγέθη με τα αντίστοιχα στο ισοδύναμο κύκλωμα του μετασχηματιστή
- Το ισοδύναμο κύκλωμα του επαγωγικού κινητήρα **διαφέρει** από το ισοδύναμο κύκλωμα πρωτεύοντος του μετασχηματιστή στις επιπτώσεις που έχει η μεταβολή της συχνότητας στο δρομέα πάνω στην τάση του δρομέα E_R και στις σύνθετες αντιστάσεις R_R και jX_R

Ισοδύναμο Κύκλωμα του Δρομέα του Επαγωγικού Κινητήρα

- Όταν στο στάτη ενός επαγωγικού κινητήρα εφαρμοστεί μια τάση, στο δρομέα του αναπτύσσεται τάση εξ επαγωγής
- Γενικά, όσο μεγαλύτερη είναι η σχετική ταχύτητα μεταξύ των πεδίων του στάτη και του δρομέα, τόσο μεγαλύτερη είναι η τάση που αναπτύσσεται στο δρομέα της μηχανής
- Η **μέγιστη** σχετική κίνηση μεταξύ των δυο παραπάνω πεδίων επιτυγχάνεται, όταν ο δρομέας της μηχανής είναι **ακίνητος**
- Σ' αυτή την περίπτωση ο δρομέας ονομάζεται ακινητοποιημένος (blocked ή locked rotor) και η τάση που επάγεται στα τυλίγματα του είναι η μέγιστη δυνατή
- Η **ελάχιστη** τάση (0 V) επάγεται στα τυλίγματα του δρομέα, όταν αυτός περιστρέφεται με ταχύτητα **ίση** με την ταχύτητα περιστροφής του πεδίου του στάτη, όταν δηλαδή, δεν υφίσταται η σχετική κίνηση
- Για κάθε άλλη ενδιάμεση τιμή της ταχύτητας του δρομέα η **επαγόμενη τάση είναι ανάλογη της ολίσθησης**

Ισοδύναμο Κύκλωμα του Δρομέα του Επαγωγικού Κινητήρα

- Έτσι, αν η επαγόμενη τάση, στην περίπτωση που ο κινητήρας λειτουργεί με ακινητοποιημένο δρομέα, συμβολιστεί με E_{R0} η τιμή της επαγόμενης τάσης για οποιαδήποτε τιμή της ολίσθησης δίνεται από τη σχέση

$$E_R = sE_{R0}$$

και η συχνότητα της επαγόμενης τάσης σε κάθε ολίσθηση δίνεται από την εξίσωση

$$f_{re} = sf_{se}$$

- Αυτή η τάση εμφανίζεται στο δρομέα, ο οποίος παρουσιάζει κάποια αντίσταση και κάποια αντίδραση
- Η αντίσταση του δρομέα R_R είναι σταθερή (εκτός κι αν επηρεάζεται από το επιδερμικό φαινόμενο) και ανεξάρτητη της ολίσθησης

Ισοδύναμο Κύκλωμα του Δρομέα του Επαγωγικού Κινητήρα

- Αντίθετα, η αντίδραση του δρομέα εξαρτάται με πιο πολύπλοκο τρόπο από την ολίσθηση
- Πιο συγκεκριμένα, η αντίδραση του δρομέα εξαρτάται από την αυτεπαγωγή του δρομέα και από τη συχνότητα της τάσης και του ρεύματος στο δρομέα
- Αν η αυτεπαγωγή του δρομέα έχει τιμή L_R , η αντίδρασή του δίνεται από την

$$X_R = \omega_{re} L_R = 2\pi f_{re} L_R$$

όμως, από την εξίσωση προκύπτει $f_{re} = s f_{se}$, οπότε

$$\begin{aligned} X_R &= 2\pi s f_{re} L_R \\ &= s(2\pi f_{re} L_R) \\ &= s X_{R0} \end{aligned}$$

όπου X_{R0} είναι η αντίδραση του ακινητοποιημένου δρομέα

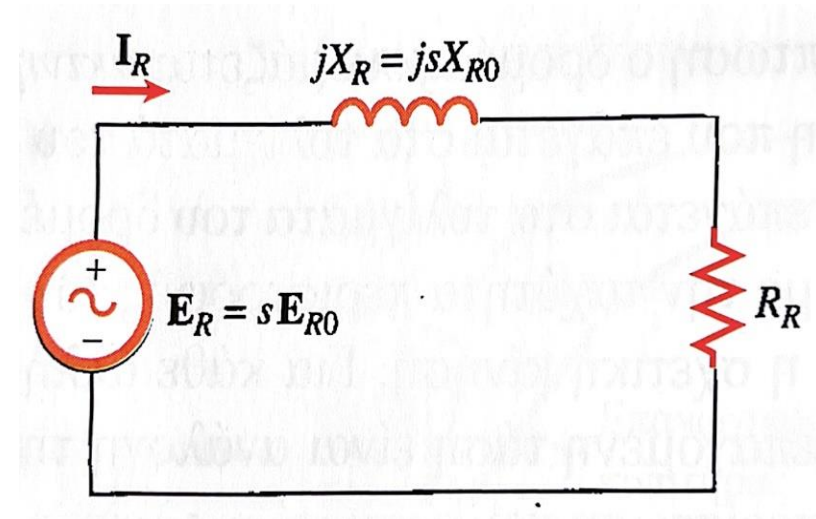
Ισοδύναμο Κύκλωμα του Δρομέα του Επαγωγικού Κινητήρα

- Το ισοδύναμο κύκλωμα που προκύπτει για το δρομέα της μηχανής, φαίνεται στο παραδίπλα σχήμα
- Το ρεύμα του δρομέα υπολογίζεται ως εξής

$$I_R = \frac{E_R}{R_R + jsX_R}$$

$$I_R = \frac{E_R}{R_R + jsX_{R0}}$$

$$I_R = \frac{E_{R0}}{R_R/s + jX_{R0}}$$



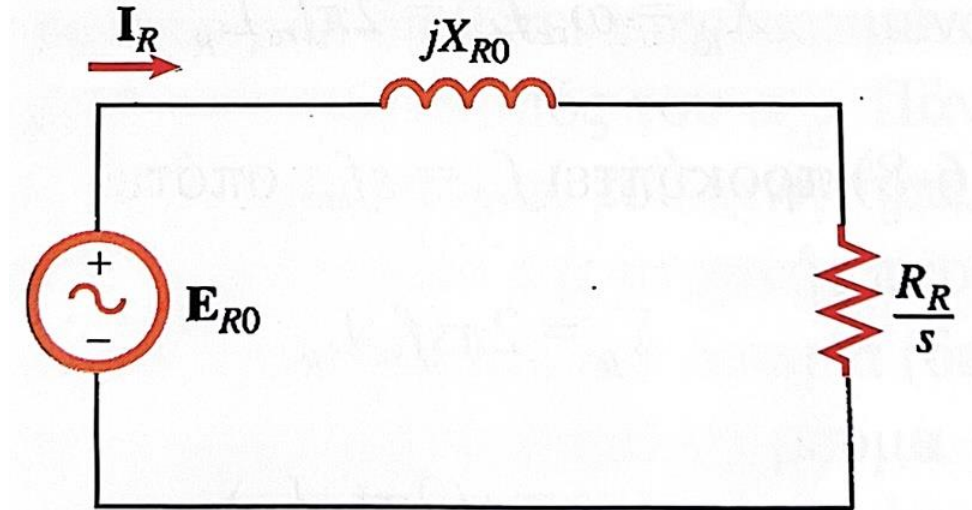
- Άρα, όλα τα αποτελέσματα της μεταβολής στην ταχύτητα του δρομέα είναι δυνατό να εκφραστούν με μια **μεταβλητή σύνθετη αντίσταση** που τροφοδοτείται από μια πηγή σταθερής τάσης E_{R0}

Ισοδύναμο Κύκλωμα του Δρομέα του Επαγωγικού Κινητήρα

- Σύμφωνα με αυτή τη θεώρηση, η ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση του δρομέα θα είναι:

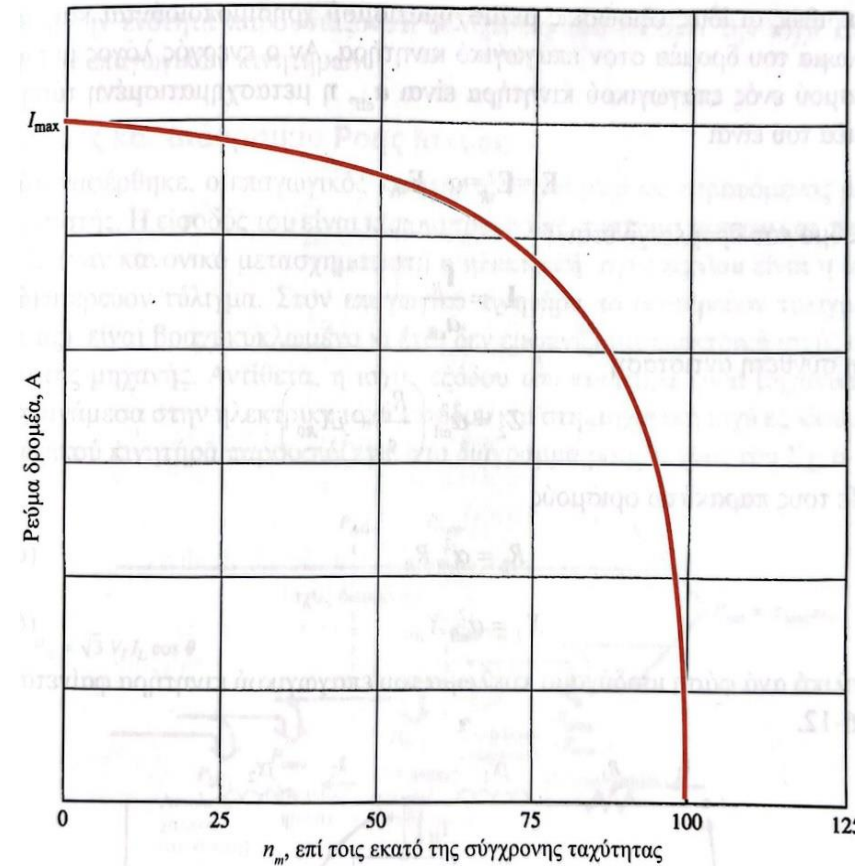
$$Z_{R,eq} = R_R/s + jX_{R0}$$

- Το αντίστοιχο κύκλωμα του δρομέα σε αυτή την περίπτωση φαίνεται στο δίπλα σχήμα
- Η τάση του δρομέα είναι σταθερή και ίση με E_{R0} , ενώ η σύνθετη αντίσταση $Z_{R,eq}$ και περιλαμβάνει όλες τις επιπτώσεις της μεταβολής στην ολίσθηση του δρομέα



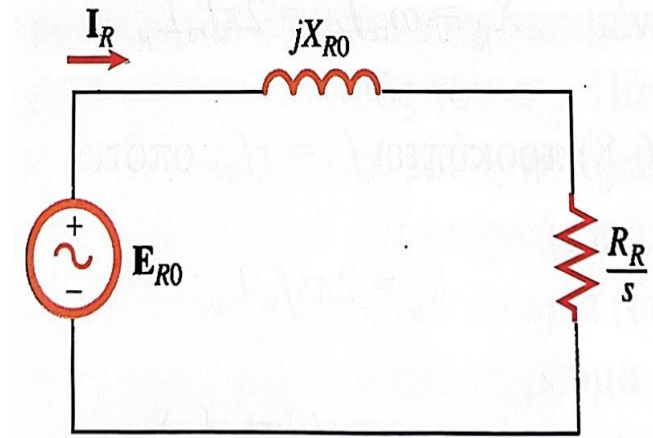
Ισοδύναμο Κύκλωμα του Δρομέα του Επαγωγικού Κινητήρα

- Γραφική παράσταση του ρεύματος του δρομέα συναρτήσει της ταχύτητας, όπως εξάγεται από τις εξισώσεις $I_R = \frac{E_R}{R_R + jsX_{R0}}$ και $I_R = \frac{E_{R0}}{R_R/s + jX_{R0}}$
- Για πολύ μικρές τιμές της ολίσθησης, το ωμικό μέρος είναι $R_R/s \gg R_{R0}$, οπότε η αντίσταση υπερισχύει και το ρεύμα μεταβάλλεται γραμμικά με την ολίσθηση
- Αντίθετα, για μεγάλες τιμές της ολίσθησης, η X_{R0} είναι πολύ μεγαλύτερη από την R_R/s , ενώ το ρεύμα του δρομέα προσεγγίζει μια σταθερή τιμή, καθώς η τιμή της ολίσθησης γίνεται πολύ μεγάλη



Το Τελικό Ισοδύναμο Κύκλωμα

- Στο τελικό ανά φάση ισοδύναμο κύκλωμα του επαγωγικού κινητήρα είναι απαραίτητη η μεταφορά του τμήματος του δρομέα στο επίπεδο τάσης του κυκλώματος του στάτη
- Μετά κι απ' αυτή τη μεταφορά το ισοδύναμο κύκλωμα του επαγωγικού κινητήρα είναι πλήρες, το κύκλωμα του δρομέα που μεταφέρεται στο κύκλωμα του στάτη είναι αυτό του παρουσιάζεται στο διπλανό σχήμα
- Στη σύνθετη αντίστασή του έχουν περιληφθεί όλες οι επιπτώσεις της μεταβολής της ταχύτητας



Το Τελικό Ισοδύναμο Κύκλωμα

- Στον κανονικό μετασχηματιστή οι τάσεις, τα ρεύματα και οι σύνθετες αντιδράσεις του δευτερεύοντος, μεταφέρονται στο πρωτεύον με τη βοήθεια του λόγου μετασχηματισμού

$$V_P = V'_S = \alpha V_S$$

$$I_P = I'_S = \frac{I_S}{\alpha}$$

$$Z'_S = \alpha^2 Z_S$$

όπου στο αριστερό μέρος των εξισώσεων βρίσκονται οι τιμές της τάσης, του ρεύματος και της σύνθετης αντίστασης που αναφέρονται στο πρωτεύον τύλιγμα

- Οι ίδιες εξισώσεις χρησιμοποιούνται και για τον επαγωγικό κινητήρα
- Αν ο ενεργός λόγος μετασχηματισμού ενός επαγωγικού κινητήρα είναι α_{eff} η μετασχηματισμένη τάση του δρομέα του είναι

$$E_1 = E'_R = \alpha_{eff} E_{R0}$$

Το Τελικό Ισοδύναμο Κύκλωμα

- Το ρεύμα του δρομέα γίνεται

$$I_2 = \frac{I_R}{\alpha_{eff}}$$

- Και η σύνθετη αντίσταση

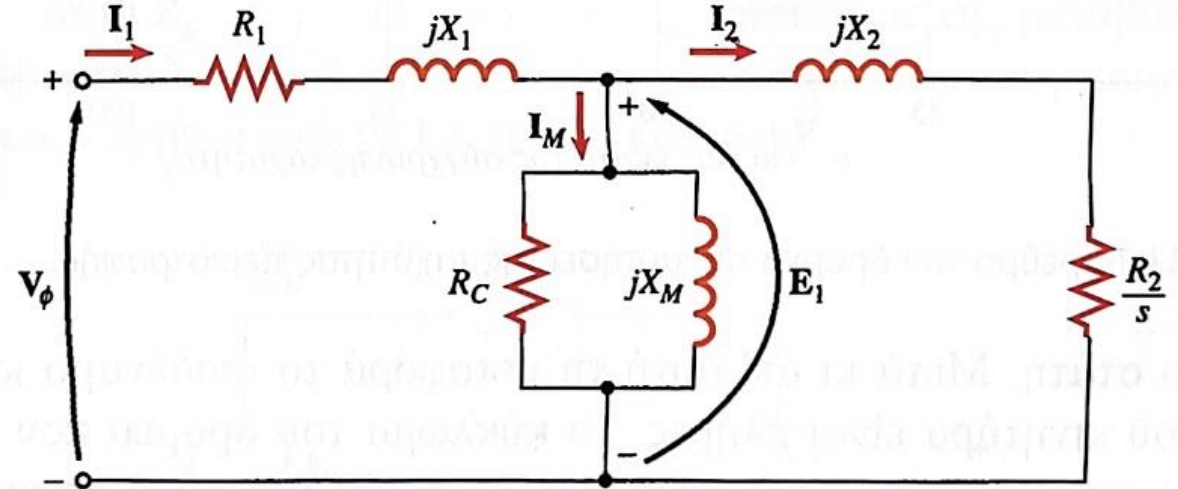
$$Z_2 = \alpha_{eff}^2 \left(\frac{R_R}{s} + jX_{R0} \right)$$

- Με τους παρακάτω ορισμούς

$$R_2 = \alpha_{eff}^2 R_R$$

$$X_2 = \alpha_{eff}^2 X_{R0}$$

- Το τελικό ανά φάση ισοδύναμο κύκλωμα του επαγωγικού κινητήρα φαίνεται στο παραδίπλα σχήμα



Προσδιορισμός παραμέτρων

- Η αντίσταση δρομέα R_R καθώς και η αντίδραση ακινητοποιημένου δρομέα X_{R0} προσδιορίζονται πολύ δύσκολα στον κινητήρα βραχυκυκλωμένου κλωβού
- Το ίδιο συμβαίνει και με τον ενεργό λόγο μετασχηματισμού α_{eff}
- Ευτυχώς όμως, είναι δυνατές κάποιες μετρήσεις που δίνουν κατευθείαν τις τιμές της ανακλώμενης σύνθετης αντίστασης και αντίδρασης R_2 και X_2 , χωρίς να είναι απαραίτητος ο ξεχωριστός προσδιορισμός των R_R , X_{R0} και α_{eff}

Σχετικό υλικό

- Από το βιβλίο «Ηλεκτρικές Μηχανές AC-DC», Stephen J. Chapman, εκδ. Τζιόλα, 5^η έκδ.
 - Κεφάλαιο 6, Παράγραφοι 6.1 – 6.3