



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

# Ηλεκτρικές Μηχανές II

Μάθημα 12<sup>ο</sup>

Επαγωγικοί κινητήρες – Μέρος Β΄

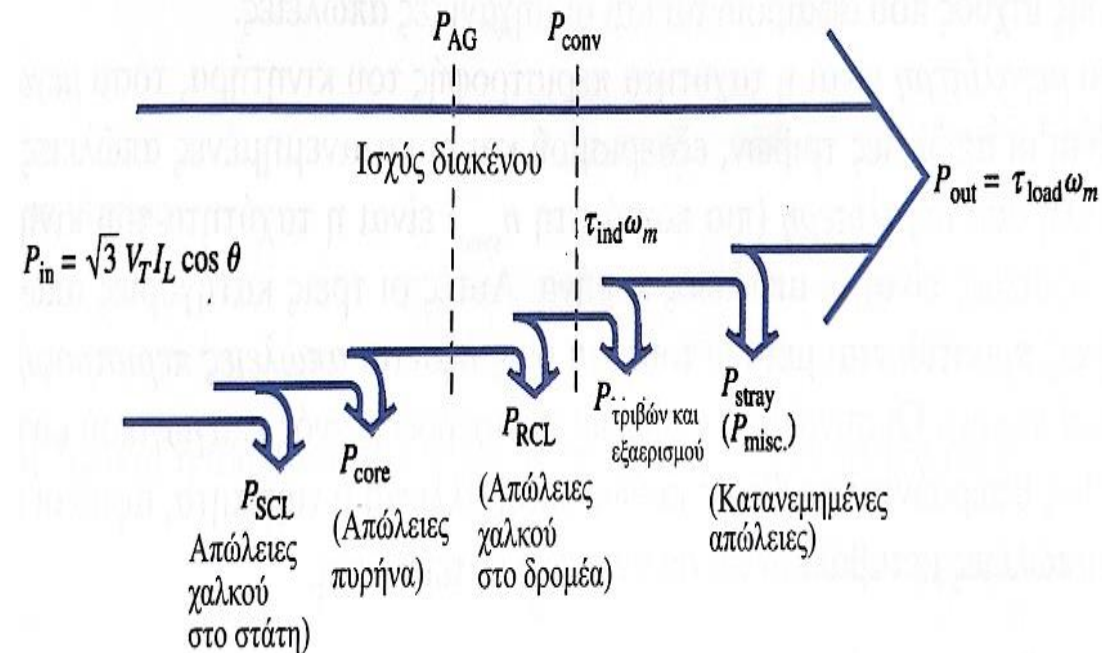
Γιώργος Ορφανουδάκης

# Περιεχόμενα μαθήματος

1. Απώλειες και Διαγράμματα Ροής Ισχύος
2. Ισχύς και Ροπή ενός Επαγωγικού Κινητήρα
3. Απώλειες Χαλκού στο Δρομέα

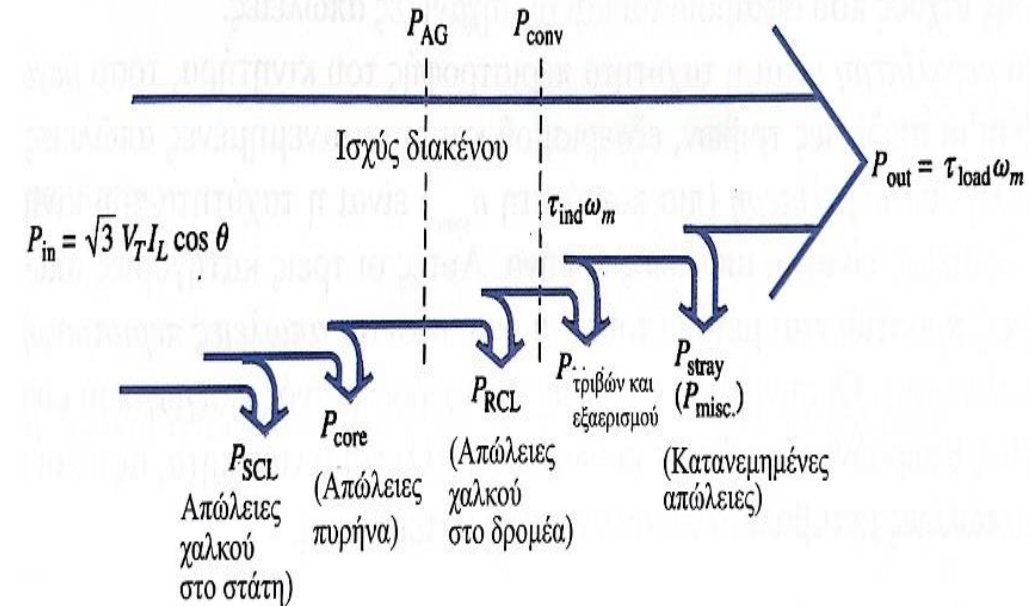
# Απώλειες και Διαγράμματα Ροής Ισχύος

- Ο επαγωγικός κινητήρας λειτουργεί ως **στρεφόμενος μετασχηματιστής**
- Σ' έναν κανονικό μετασχηματιστή η ηλεκτρική ισχύς εξόδου είναι η ισχύς στο δευτερεύον τύλιγμα
- Στον επαγωγικό κινητήρα, το δευτερεύον τύλιγμα είναι εκείνο του δρομέα
- Στους κινητήρες ΒΚ, αυτό είναι βραχυκυκλωμένο, οπότε δεν παρέχει ηλεκτρική ισχύ στην έξοδό του
- Η ισχύς εξόδου του κινητήρα είναι μηχανική
- Η σχέση ανάμεσα στην ηλεκτρική ισχύ εισόδου και στη μηχανική ισχύ εξόδου ενός επαγωγικού κινητήρα παρουσιάζεται στο διάγραμμα ροής ισχύος



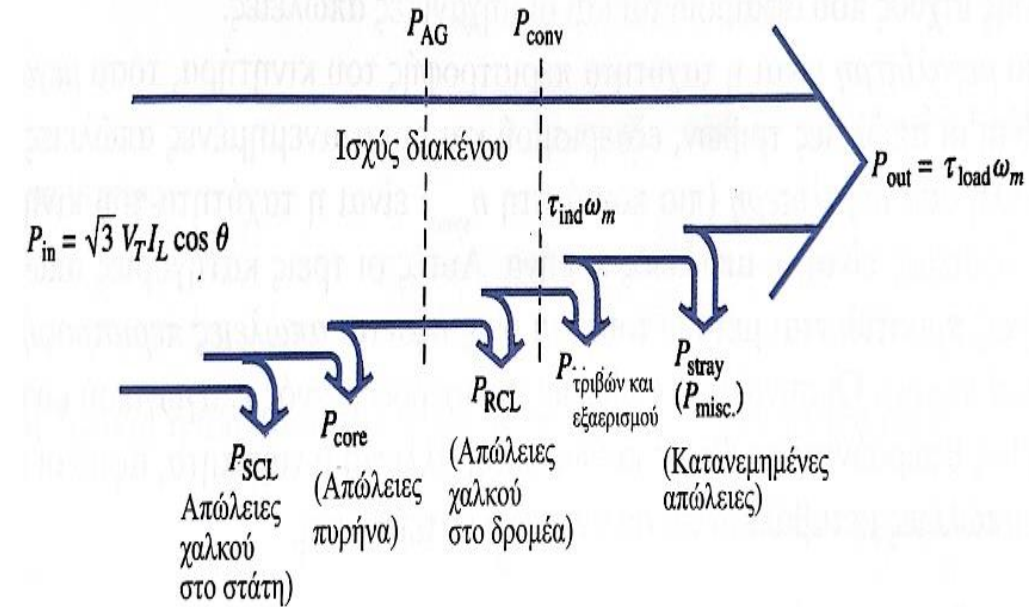
# Απώλειες και Διαγράμματα Ροής Ισχύος

- Η ηλεκτρική **ισχύς εισόδου** στον κινητήρα  $P_{in}$  έχει τη μορφή τριφασικού συστήματος τάσεων και ρευμάτων
- Το πρώτο είδος απωλειών που υπολογίζεται στον κινητήρα είναι οι ωμικές ( $I^2R$ ) απώλειες στο τύλιγμα του στάτη (**απώλειες χαλκού στο στάτη** – Stator Copper Losses –  $P_{SCL}$ )
- Κατόπιν κάποιο ποσό ισχύος χάνεται στα σιδηρομαγνητικά υλικά (**πυρήνας** – core) με τη μορφή απωλειών **υστέρησης** και απωλειών εξαιτίας των **δινορρευμάτων** ( $P_{core}$ )
- Η ισχύς που απομένει, μεταφέρεται στο δρομέα της μηχανής **περνώντας από το διάκενο** που υπάρχει μεταξύ του στάτη και του δρομέα, αυτή η ισχύς ονομάζεται **ισχύς διακένου** (Air Gap),  $P_{AG}$  της μηχανής



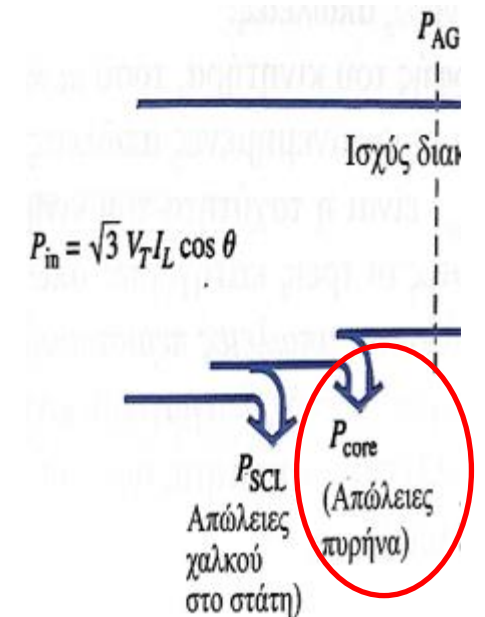
# Απώλειες και Διαγράμματα Ροής Ισχύος

- Ένα μέρος της ισχύος που μεταφέρεται στο δρομέα χάνεται με τη μορφή ωμικών ( $I^2R$ ) απωλειών στα τυλίγματα του δρομέα (**απώλειες χαλκού στο δρομέα – Rotor Copper Losses –  $P_{RCL}$** )
- Η ισχύς που απομένει, **μετατρέπεται από ηλεκτρική σε μηχανική μορφή ( $P_{conv}$ )**
- Απ' αυτή την ισχύ αφαιρούνται τελικά οι απώλειες τριβής και εξαερισμού (**Friction & Windage  $P_{F\&W}$**  καθώς και οι **κατανεμημένες (miscellaneous/stray) απώλειες  $P_{misc}$** )
- Το υπόλοιπο ποσό της μηχανικής ισχύος αποτελεί την **ισχύ εξόδου  $P_{out}$**  της μηχανής



# Παρατήρηση για τις Απώλειες Πυρήνα

- Οι απώλειες πυρήνα δεν εμφανίζονται ακριβώς στο σημείο του διαγράμματος που φαίνεται στο σχήμα, δηλ. μόνο στον στάτη
- Στην πραγματικότητα, προέρχονται κατά ένα μέρος από το κύκλωμα του στάτη και κατά ένα μέρος από το κύκλωμα του δρομέα
- Επειδή όμως ο κινητήρας συνήθως περιστρέφεται με ταχύτητα που είναι πολύ κοντά στη σύγχρονη, η σχετική ταχύτητα των μαγνητικών πεδίων είναι πολύ μικρή κι έτσι οι απώλειες πυρήνα στο δρομέα είναι πολύ χαμηλές σε σχέση με τις αντίστοιχες απώλειες στο στάτη
- Στο ισοδύναμο κύκλωμα του επαγωγικού κινητήρα, αυτές οι απώλειες αντιστοιχίζονται στην αντίσταση  $R_c$  (ή στην αγωγιμότητα  $G_c$ )
- Στην περίπτωση που οι απώλειες πυρήνα δίνονται με κάποια αριθμητική τιμή (π.χ. x Watts) και όχι με την τιμή κάποιου ηλεκτρικού στοιχείου, αυτές προστίθενται στις μηχανικές απώλειες της μηχανής και αφαιρούνται σ' εκείνο το σημείο του διαγράμματος ροής ισχύος που αφαιρούνται και οι μηχανικές απώλειες



# Απώλειες Περιστροφής

- Όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα, τόσο μεγαλύτερες είναι οι απώλειες τριβών, εξαερισμού και οι κατανεμημένες απώλειες
- Από την άλλη όσο μεγαλύτερη (πιο κοντά στη  $n_{sync}$ ) είναι η ταχύτητα του κινητήρα, τόσο λιγότερες είναι οι απώλειες πυρήνα
- Αυτές οι τρεις κατηγορίες απωλειών συνήθως προστίθενται μεταξύ τους και ονομάζονται **απώλειες περιστροφής (rotational losses)**
- Οι συνολικές απώλειες περιστροφής ενός επαγωγικού κινητήρα συνήθως **θεωρούνται σταθερές καθώς μεταβάλλεται η ταχύτητα**, αφού οι επιμέρους απώλειες μεταβάλλονται σε αντίθετη κατεύθυνση

## Παράδειγμα 6-2.

Ένας τριφασικός επαγωγικός κινητήρας με ονομαστική τάση, συχνότητα και ισχύ 480 V, 60 Hz και 50 hp, αντίστοιχα, λειτουργεί με ρεύμα 60 A και με συντελεστή ισχύος 0,85 επαγωγικό. Οι απώλειες χαλκού στο στάτη είναι 2 kW και οι απώλειες χαλκού στο δρομέα 700 W. Οι απώλειες τριβής και εξαερισμού είναι 600 W, οι απώλειες πυρήνα 1800 W, ενώ οι κατανεμημένες απώλειες θεωρούνται αμελητέες. Να υπολογιστούν οι παρακάτω ποσότητες:

1. Η ισχύς διακένου  $P_{AG}$
2. Η ισχύς που μετατρέπεται από ηλεκτρική σε μηχανική μορφή  $P_{conv}$
3. Η ισχύς εξόδου  $P_{out}$
4. Η απόδοση του κινητήρα



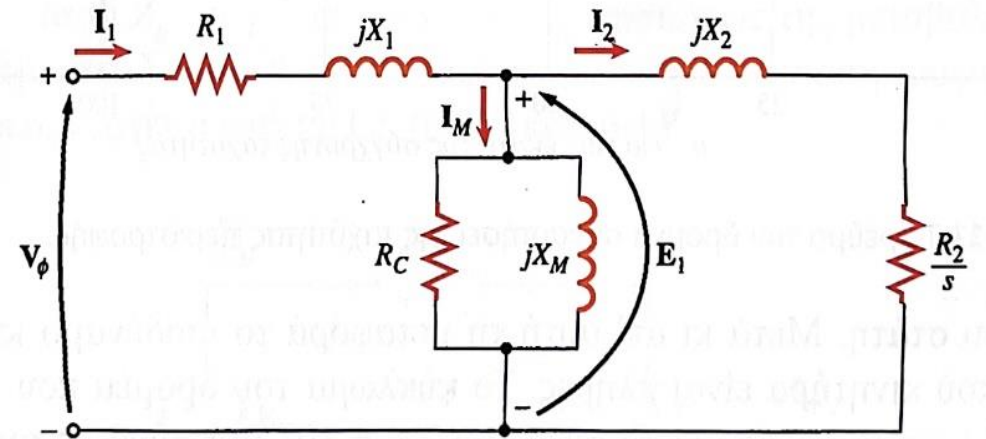
# Ισχύς και Ροπή ενός Επαγωγικού Κινητήρα

- Η λεπτομερής μελέτη του ισοδύναμου κυκλώματος βοηθά στην εξαγωγή των εξισώσεων για την ισχύ, τις απώλειες και τη ροπή, που διέπουν τη λειτουργία του επαγωγικού κινητήρα

$$I_1 = \frac{V_\Phi}{Z_{eq}}$$

Όπου

$$Z_{eq} = R_1 + jX_1 + \frac{1}{\frac{1}{R_C} + \frac{1}{jX_M} + \frac{1}{R_2/s + jX_2}}$$



# Ισχύς και Απώλειες

- Οι απώλειες χαλκού στις τρεις φάσεις του στάτη υπολογίζονται από τη σχέση

$$P_{SCL} = 3I_1^2 R_1$$

- Οι απώλειες πυρήνα δίνονται από τη σχέση

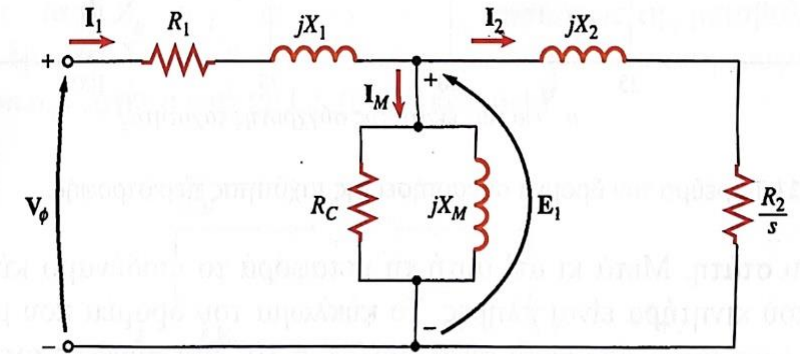
$$P_{core} = \frac{3E_1^2}{R_C}$$

- Έτσι η ισχύς διακένου υπολογίζεται ως εξής

$$P_{AG} = P_{in} - P_{SCL} - P_{core}$$

- Εξετάζοντας τώρα το κύκλωμα του δρομέα, το μοναδικό στοιχείο του κυκλώματος όπου είναι δυνατό να καταναλώνεται η ισχύς διακένου είναι η ισοδύναμη αντίσταση  $R_2/s$
- Έτσι, η ισχύς διακένου δίνεται και από τη σχέση

$$P_{AG} = 3I_2^2 \frac{R_2}{s}$$



# Ισχύς και Απώλειες

- Οι ωμικές απώλειες στο κύκλωμα του δρομέα δίνονται από την εξίσωση

$$P_{RCL} = 3I_R^2 R_R = 3I_2^2 R_2$$

- Μετά την αφαίρεση των απωλειών χαλκού στο στάτη, των απωλειών πυρήνα και των απωλειών χαλκού στο δρομέα από την ισχύ εισόδου του κινητήρα, η ισχύς που απομένει μετατρέπεται από ηλεκτρική σε μηχανική μορφή (αναπτυσσόμενη μηχανική ισχύς):ση

$$P_{conv} = P_{AG} - P_{RCL} = 3I_2^2 \frac{R_2}{s} - 3I_2^2 R_2 = 3I_2^2 R_2 \left( \frac{1}{s} - 1 \right)$$

- Από τις εξισώσεις  $P_{AG} = 3I_2^2 \frac{R_2}{s}$  και  $P_{RCL} = 3I_2^2 R_2$ , φαίνεται ότι οι απώλειες χαλκού στο δρομέα είναι ίσες με το γινόμενο της ισχύος διακένου επί την ολίσθηση

$$P_{RCL} = sP_{AG}$$

- Δηλαδή, όσο μικρότερη είναι η ολίσθηση, τόσο μικρότερη είναι η τιμή των απωλειών στο δρομέα της μηχανής

# Ισχύς και Απώλειες

- Ας σημειωθεί ακόμη ότι, στην περίπτωση που ο κινητήρας δεν περιστρέφεται, η ολίσθηση είναι  $s = 1$  και η ισχύς διακένου καταναλώνεται εξ ολοκλήρου στο κύκλωμα του δρομέα
- Το γεγονός αυτό έχει λογική εξήγηση, αφού ο κινητήρας δεν περιστρέφεται, η ισχύς εξόδου του  $P_{out} = \tau_{load}\omega_m$  θα πρέπει να είναι μηδενική
- Μια άλλη σχέση μεταξύ της ισχύος διακένου και της ισχύος που μετατρέπεται από ηλεκτρική σε μηχανική μορφή εξάγεται από τη σχέση

$$P_{conv} = P_{AG} - P_{RCL} = P_{AG} - sP_{AG}$$

$$P_{conv} = (1 - s)P_{AG}$$

- Τελικά, αν οι απώλειες τριβής, εξαερισμού και οι κατανεμημένες απώλειες είναι γνωστές, η ισχύς εξόδου του κινητήρα θα είναι

$$P_{out} = P_{conv} - P_{F\&W} - P_{misc}$$

# Ροπή ενός Επαγωγικού Κινητήρα

- Η επαγόμενη (ή αναπτυσσόμενη) ροπή  $\tau_{ind}$  στο εσωτερικό μιας μηχανής έχει οριστεί ως η ροπή που παράγεται κατά τη μετατροπή της ηλεκτρικής ισχύος σε μηχανική
- Η επαγόμενη ροπή δίνεται από την εξίσωση

$$\tau_{ind} = \frac{P_{conv}}{\omega_m}$$

- Αυτή η ροπή διαφέρει από τη ροπή που είναι πραγματικά αξιοποιήσιμη στην έξοδο του κινητήρα κατά τις ροπές τριβής και εξαερισμού που εμφανίζονται στη μηχανή

# Ροπή ενός Επαγωγικού Κινητήρα

- Η επαγόμενη ροπή ενός επαγωγικού κινητήρα εκφράζεται και με διαφορετικό τρόπο
  - Η εξίσωση  $\omega_m = (1 - s)\omega_{sync}$ , εκφράζει την πραγματική ταχύτητα περιστροφής σε σχέση με τη σύγχρονη ταχύτητα και την ολίσθηση
  - Η εξίσωση  $P_{conv} = (1 - s)P_{AG}$  δίνει την  $P_{conv}$  σε σχέση με την  $P_{AG}$  και την ολίσθηση
- Η αντικατάσταση των εξισώσεων αυτών στην εξίσωση  $\tau_{ind} = \frac{P_{conv}}{\omega_m}$  δίνει:

$$\tau_{ind} = \frac{(1 - s)P_{AG}}{(1 - s)\omega_{sync}} = \frac{P_{AG}}{\omega_{sync}}$$

- Η τελευταία εξίσωση είναι πολύ χρήσιμη, επειδή εκφράζει την επαγόμενη ροπή σε άμεση σχέση με την ισχύ διακένου και τη σύγχρονη ταχύτητα, η οποία δε μεταβάλλεται
- Έτσι, η  $\tau_{ind}$  υπολογίζεται, αν είναι γνωστή η  $P_{AG}$

# Διαχωρισμός των Απωλειών Χαλκού στο Δρομέα και της Ισχύος που Μετατρέπεται από Ηλεκτρική σε Μηχανική

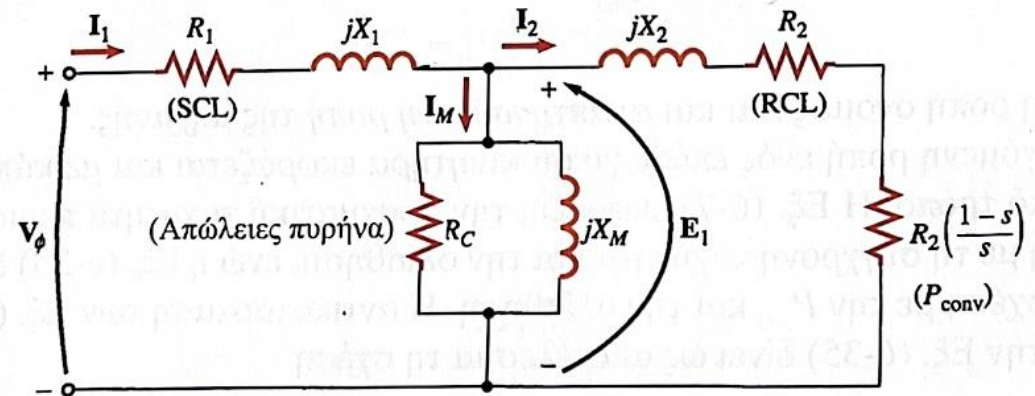
- Ένα μέρος της ισχύος που μεταφέρεται μέσω του **διακένου** του επαγωγικού κινητήρα καταναλώνεται στις **απώλειες χαλκού του δρομέα** ( $P_{RCL}$ ), ενώ το υπόλοιπο μέρος της μετατρέπεται σε **μηχανική ισχύ εξόδου** ( $P_{out}$ ), που κινεί τον άξονα της μηχανής
- Όπως προαναφέρθηκε, η ισχύς διακένου καταναλώνεται στην ισοδύναμη αντίσταση  $R_2/s$
- Ωστόσο, είναι δυνατός ο διαχωρισμός των δυο τμημάτων της ισχύος διακένου και η αντιστοίχισή τους σε ξεχωριστά στοιχεία του ισοδύναμου κυκλώματος
  - Η εξίσωση  $P_{AG} = 3I_2^2 \frac{R_2}{s}$  εκφράζει τη συνολική ισχύ διακένου ενός επαγωγικού κινητήρα, ενώ
  - η εξίσωση  $P_{RCL} = 3I_2^2 R_2$ , δίνει τις πραγματικές απώλειες στο δρομέα της μηχανής
- Η ισχύς **διακένου** είναι ίση με την ισχύ που θα καταναλωνόταν από μια αντίσταση  $R_2/s$ , ενώ οι **απώλειες χαλκού στο δρομέα** είναι ίσες με την ισχύ που θα καταναλωνόταν σε μια αντίσταση  $R_2$

# Διαχωρισμός των Απωλειών Χαλκού στο Δρομέα και της Ισχύος που Μετατρέπεται από Ηλεκτρική σε Μηχανική

- Η διαφορά τους είναι η ισχύς  $P_{conv}$ , η οποία με τη σειρά της είναι ίση με την ισχύ που καταναλώνεται σε μία ισοδύναμη αντίσταση  $R_{conv}$ , όπου

$$R_{conv} = \frac{R_2}{s} - R_2 = R_2 \left( \frac{1}{s} - 1 \right) = R_2 \left( \frac{1-s}{s} \right)$$

- Το ισοδύναμο κύκλωμα στο σχήμα, οι  $P_{RCL}$  και  $P_{conv}$  έχουν διαχωριστεί και αντιστοιχίζονται σε δυο διαφορετικά στοιχεία





## Παράδειγμα 6-3.

Ένας επαγωγικός κινητήρας συνδεδεμένος σε αστέρα, διαθέτει τέσσερις πόλους και έχει ονομαστική τάση, ισχύ και συχνότητα 460 V, 25 hp και 60 Hz, αντίστοιχα. Οι σύνθετες αντιστάσεις στο ισοδύναμο μονοφασικό κύκλωμα του κινητήρα, που δίνονται παρακάτω, αναφέρονται στο στάτη της μηχανής

$$R_1 = 0,641 \Omega \quad R_2 = 0,332 \Omega$$

$$X_1 = 1,106 \Omega \quad X_2 = 0,464 \Omega \quad X_M = 26,3 \Omega$$

Οι συνολικές απώλειες περιστροφής έχουν τιμή 1100 W και θεωρούνται σταθερές. Οι απώλειες πυρήνα περιλαμβάνονται στις απώλειες περιστροφής. Αν η ολίσθηση του δρομέα είναι 2,2% στη λειτουργία με ονομαστική τάση και συχνότητα, να υπολογιστούν σ' αυτές τις συνθήκες οι παρακάτω ποσότητες για τον κινητήρα

(α) Η ταχύτητά του

(β) Το ρεύμα του στάτη

(γ) Ο συντελεστής ισχύος

(δ) Οι  $P_{conv}$  και  $P_{out}$

(ε) Οι  $\tau_{ind}$  και  $\tau_{load}$

(ζ) Η απόδοση

# Σχετικό υλικό

- Από το βιβλίο «Ηλεκτρικές Μηχανές AC-DC», Stephen J. Chapman, εκδ. Τζιόλα, 5<sup>η</sup> έκδ.
  - Κεφάλαιο 6, Παράγραφος 6.4