



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

Ηλεκτρικές Μηχανές II

Μάθημα 13^ο

Επαγωγικοί κινητήρες – Μέρος Γ'

Γιώργος Ορφανουδάκης

Περιεχόμενα μαθήματος

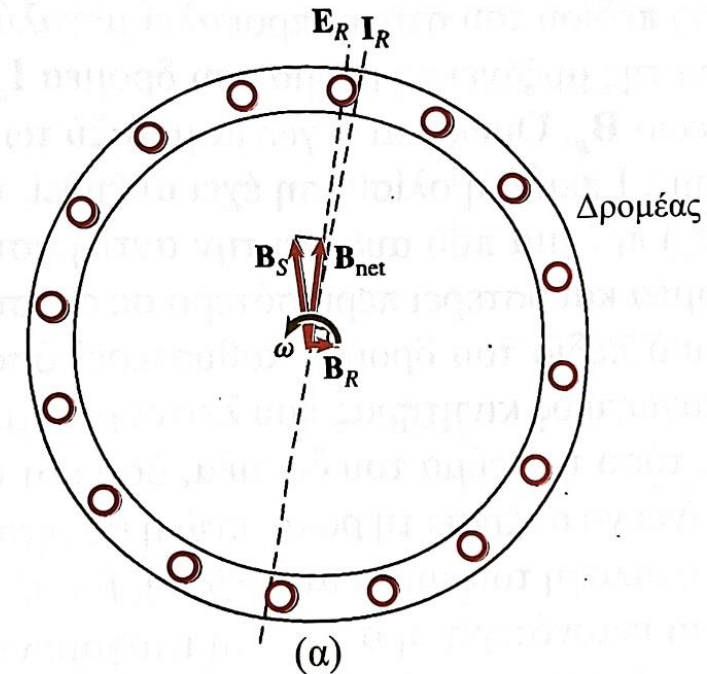
1. Η Επαγόμενη Ροπή από Φυσική Άποψη
2. Χαρακτηριστική Ροπής-Ταχύτητας

Χαρακτηριστικές Ροπής-Ταχύτητας των Επαγωγικών Κινητήρων

- Πώς μεταβάλλεται η ροπή ενός επαγωγικού κινητήρα με τις αλλαγές του φορτίου του;
- Πόση ροπή μπορεί να προσφέρει ένας επαγωγικός κινητήρας κατά την εκκίνηση;
- Πόσο μειώνεται η ροπή του επαγωγικού κινητήρα κατά την αύξηση του φορτίου που εφαρμόζεται στον άξονά του;
- Η σχέση ροπής-ταχύτητας εξετάζεται αρχικά από τη φυσική σκοπιά των μαγνητικών πεδίων του κινητήρα
- Κατόπιν, με τη βοήθεια του ισοδύναμου κυκλώματος προσδιορίζεται μια γενική εξίσωση για τη ροπή συναρτήσει της ολίσθησης του κινητήρα

Η Επαγόμενη Ροπή από Φυσική Άποψη

- Στο σχήμα φαίνεται ένας επαγωγικός κινητήρας ΒΚ, που αρχικά λειτουργεί χωρίς φορτίο
- Το συνολικό μαγνητικό πεδίο \mathbf{B}_{net} στη μηχανή παράγεται από το ρεύμα μαγνήτισης I_M που διαρρέει το ισοδύναμο κύκλωμα
- Το πλάτος του ρεύματος μαγνήτισης και του \mathbf{B}_{net} είναι ανάλογα της τάσης \mathbf{E}_1
- Αν η \mathbf{E}_1 είναι σταθερή, τότε και το συνολικό μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό της μηχανής θα είναι σταθερό
- Σε μια πραγματική μηχανή, η \mathbf{E}_1 μεταβάλλεται με τις αλλαγές του φορτίου, καθώς οι σύνθετες αντιστάσεις \mathbf{R}_1 και \mathbf{X}_1 προκαλούν μεταβαλλόμενες πτώσεις τάσης
- Όμως, αυτές οι πτώσεις τάσης στα τυλίγματα του στάτη είναι σχετικά μικρές, οπότε η \mathbf{E}_1 (και φυσικά τα I_M και \mathbf{B}_{net}) παραμένουν σχεδόν σταθερά με τις αλλαγές του φορτίου



Η Επαγόμενη Ροπή από Φυσική Άποψη

- Κατά τη λειτουργία χωρίς φορτίο,
 - η ολίσθηση είναι πολύ μικρή
 - η σχετική κίνηση ανάμεσα στο δρομέα και τα μαγνητικά πεδία είναι πολύ μικρή
 - η συχνότητα στο δρομέα να είναι επίσης πολύ μικρή
- Αφού η σχετική κίνηση είναι μικρή,
 - η τάση E_R που επάγεται στις ράβδους του δρομέα είναι κι αυτή μικρή
 - το αντίστοιχο ρεύμα I_R έχει μικρή τιμή
 - το ρεύμα του δρομέα παράγει μαγνητικό πεδίο με μικρή επαγωγή B_R
- Επίσης, επειδή η συχνότητα στο δρομέα είναι τόσο μικρή,
 - η επαγωγική αντίδραση του δρομέα (ωL_R) είναι σχεδόν μηδενική
 - το ρεύμα δρομέα I_R είναι σχεδόν **συμφασικό** με την τάση E_R

Η Επαγόμενη Ροπή από Φυσική Άποψη

- Ας σημειωθεί πως το ρεύμα του στάτη θα πρέπει να είναι πολύ μεγάλο ακόμη και στη λειτουργία χωρίς φορτίο, επειδή θα πρέπει να παράγει το μεγαλύτερο μέρος του B_{net}
- Η επαγόμενη ροπή, που διατηρεί την κίνηση του δρομέα, δίνεται από την εξίσωση

$$\tau_{ind} = k B_R \times B_{net}$$

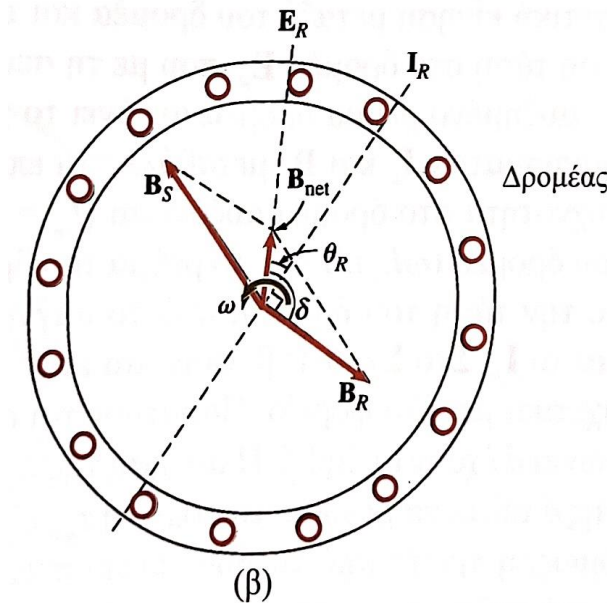
- Το μέτρο της επαγόμενης ροπής είναι

$$\tau_{ind} = k B_R B_{net} \sin \delta$$

- Επειδή το μαγνητικό πεδίο του δρομέα είναι πολύ μικρό, η επαγόμενη ροπή είναι το ίδιο μικρή, τόσο ώστε να είναι ικανή να ξεπεράσει τις απώλειες περιστροφής

Η Επαγόμενη Ροπή από Φυσική Άποψη

- Ας υποθεθεί τώρα ότι στον επαγωγικό κινητήρα προστίθεται φορτίο
- Με την αύξηση του φορτίου, η ολίσθηση αυξάνεται και η ταχύτητα του δρομέα μειώνεται
- Αφού η ταχύτητα περιστροφής μειώνεται, η σχετική κίνηση μεταξύ του δρομέα και του πεδίου του στάτη προκαλεί μεγαλύτερη τάση στο δρομέα E_R , που με τη σειρά της αυξάνει το ρεύμα του δρομέα I_R
- Το αυξημένο ρεύμα δρομέα αυξάνει το πεδίο B_R
- Όμως επειδή η ολίσθηση έχει αυξηθεί, η συχνότητα στο δρομέα ($f_{re} = sf_{se}$) αυξάνεται, γεγονός που **αυξάνει την αντίδραση του δρομέα (ωL_R)**
- Συνεπώς, η **γωνία** μεταξύ των διανυσμάτων I_R και E_R μεταβάλλεται επίσης: το ρεύμα του δρομέα καθυστερεί περισσότερο σε σχέση με την τάση του δρομέα, ενώ το μαγνητικό πεδίο του δρομέα καθυστερεί όσο και το I_R



Η Επαγόμενη Ροπή από Φυσική Άποψη

- Έως ενός σημείου, παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται το φορτίο, τόσο το ρεύμα του δρομέα, όσο και η γωνία δ αυξάνονται, και
 - η αύξηση της B_R τείνει να **αυξήσει** τη ροπή,
 - ενώ η αύξηση της δ τείνει να **μειώσει** τη ροπή
- Επειδή όμως, η πρώτη από τις δυο επιπτώσεις είναι εντονότερη, η συνολική επαγόμενη ροπή αυξάνεται, ώστε να τροφοδοτηθεί το αυξημένο φορτίο του κινητήρα
- Πότε, όμως, ο επαγωγικός κινητήρας φτάνει στη μέγιστη ροπή ανατροπής;
- Αυτό συμβαίνει στο σημείο όπου, καθώς το φορτίο που εφαρμόζεται στον άξονα αυξάνεται, ο όρος $\sin\delta$ μειώνεται περισσότερο απ' ότι αυξάνεται ο όρος B_R
- Τότε μια παραπέρα αύξηση του φορτίου μειώνει την τ_{ind} και ο κινητήρας σταματά
- Αν είναι γνωστή η συμπεριφορά των μαγνητικών πεδίων στη μηχανή, είναι δυνατός ο προσεγγιστικός προσδιορισμός της χαρακτηριστικής ροπής-ταχύτητας του επαγωγικού κινητήρα

Χαρακτηριστική Ροπής-Ταχύτητας

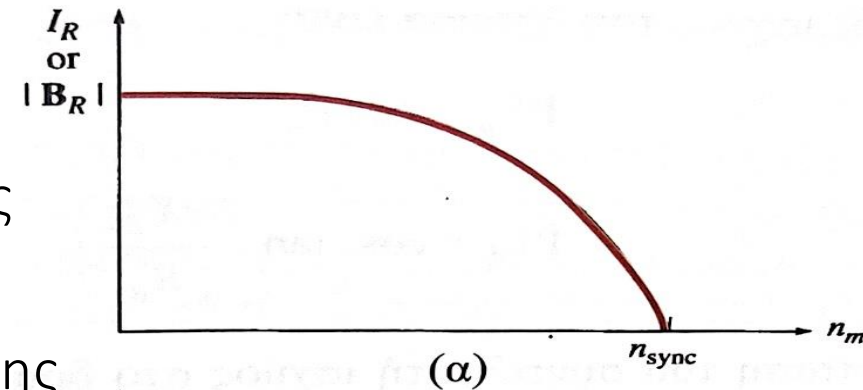
- Όπως είναι γνωστό, η επαγόμενη ροπή στο εσωτερικό του κινητήρα, δίνεται από τη σχέση

$$\tau_{ind} = kB_R B_{net} \sin \delta$$

- Ο καθένας από τους όρους της παραπάνω εξίσωσης μπορεί να ληφθεί ξεχωριστά υπόψη, ώστε να προσδιοριστεί η συνολική συμπεριφορά της μηχανής
- Οι ξεχωριστοί όροι είναι οι εξής:

1. B_R

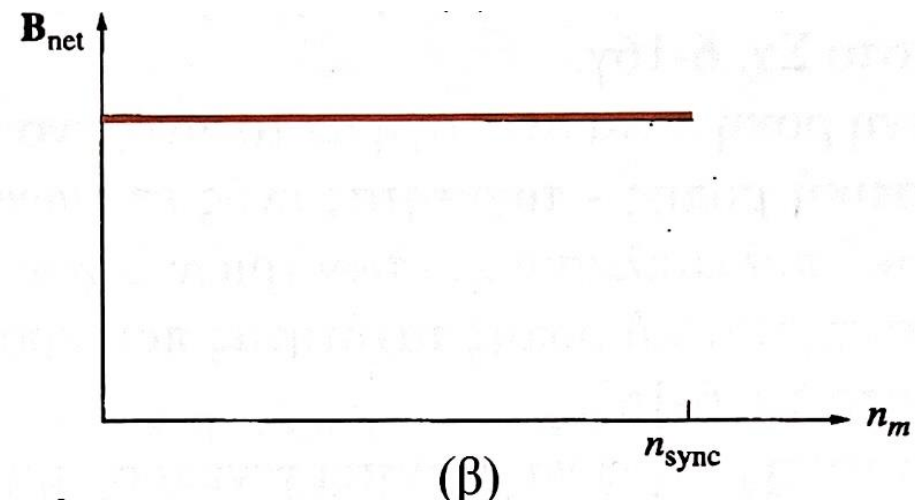
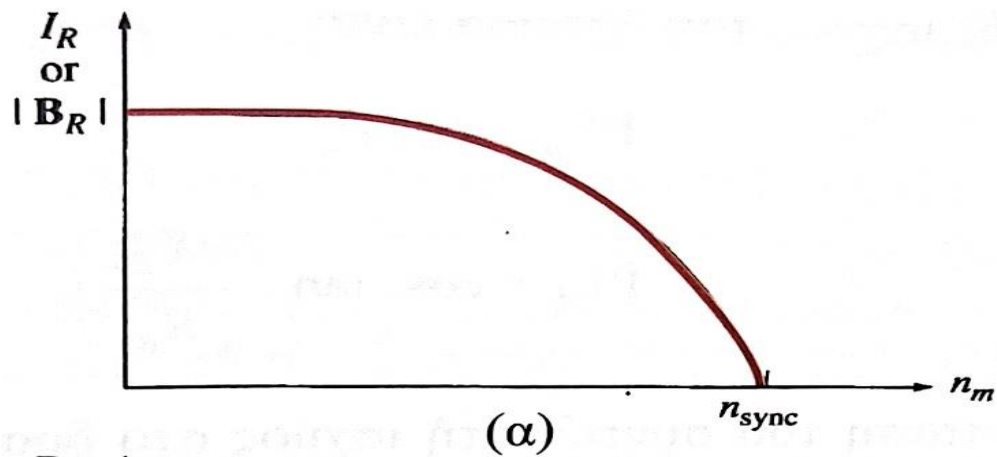
- Το μαγνητικό πεδίο του δρομέα είναι ανάλογο του ρεύματος στο δρομέα, όσο ο δρομέας είναι ακόρεστος
- Το ρεύμα του δρομέα αυξάνεται με την αύξηση της ολίσθησης (με τη μείωση της ταχύτητας) σύμφωνα με την εξίσωση $I_R = \frac{E_{R0}}{R_R/s + jX_{R0}}$
- Το ρεύμα του δρομέα φαίνεται στο σχήμα (α)



Χαρακτηριστική Ροπής-Ταχύτητας

2. B_{net}

- Το συνολικό μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό της μηχανής είναι ανάλογο της τάσης E_1 κι έτσι είναι προσεγγιστικά σταθερό
 - Στην πραγματικότητα η E_1 μειώνεται με την αύξηση του ρεύματος, όμως αυτό το φαινόμενο είναι αμελητέο σε σχέση με τα άλλα δύο και αγνοείται σ' αυτήν την ανάλυση
- Συνεπώς, η καμπύλη της B_{net} συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής φαίνεται στο σχήμα (β)

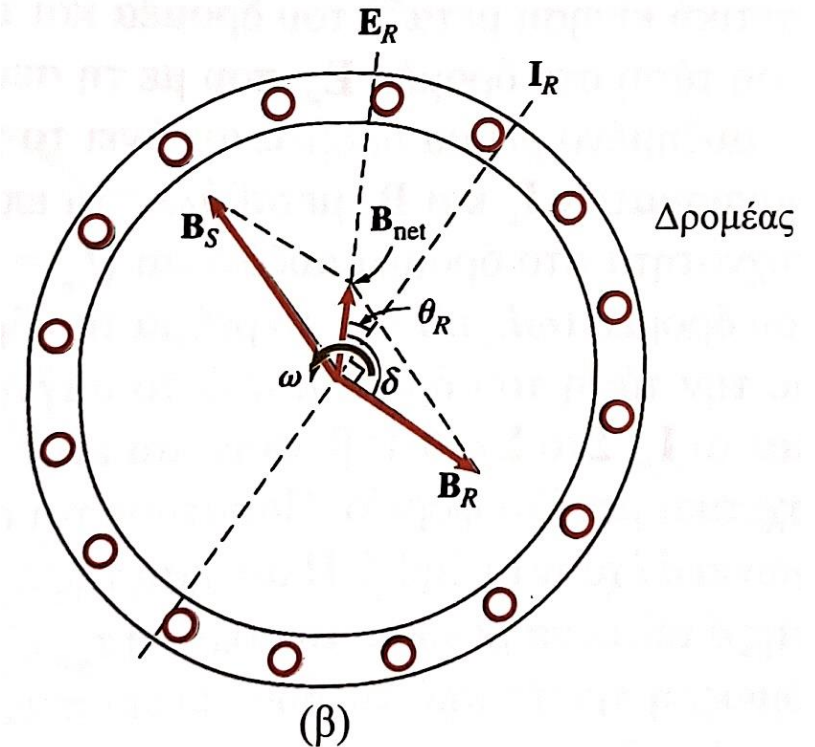


Χαρακτηριστική Ροπής-Ταχύτητας

3. $\sin\delta$

- Η γωνία μεταξύ των μαγνητικών πεδίων του δρομέα και του στάτη μπορεί να εκφραστεί με κάποιον πολύ βολικό τρόπο
- Στο σχήμα φαίνεται πως η γωνία δ είναι ίση με τη γωνία του συντελεστή ισχύος στο δρομέα, αυξημένη κατά 90°

$$\delta = \theta_R + 90^\circ$$



Χαρακτηριστική Ροπής-Ταχύτητας

- Οπότε $\sin \delta = \sin (\theta_R + 90^\circ) = \cos \theta_R$
- Αυτός ο όρος είναι ίσος με το **συντελεστή ισχύος του δρομέα**
- Η γωνία που αντιστοιχεί στο συντελεστή ισχύος του δρομέα μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση

$$\theta_R = \tan^{-1} \frac{X_R}{R_R} = \tan^{-1} \frac{SX_{R0}}{R_R}$$

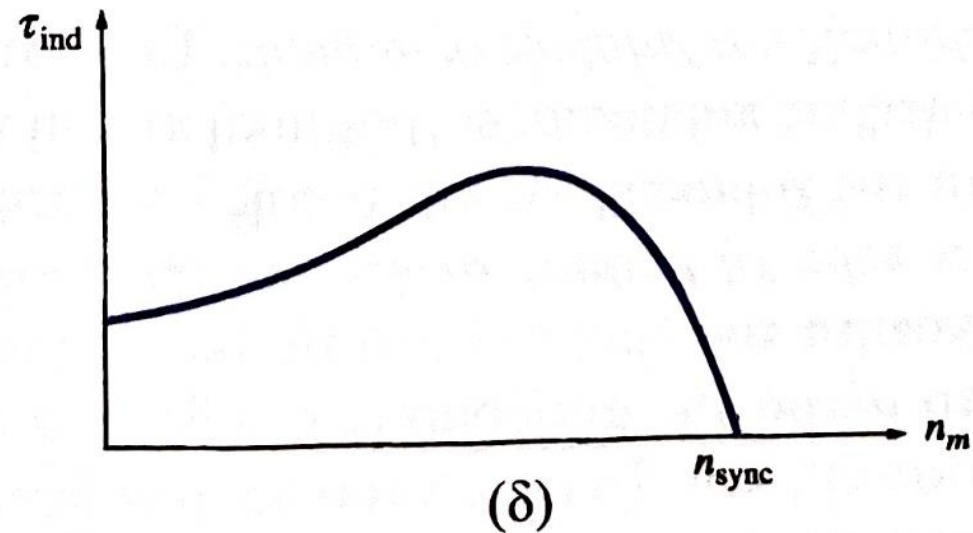
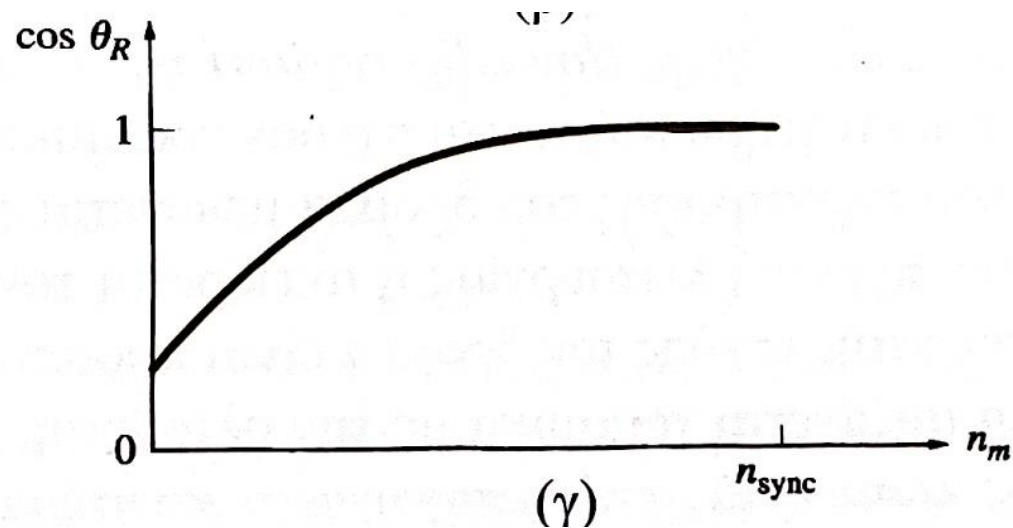
- Έτσι, ο συντελεστής ισχύος του δρομέα είναι

$$PF_R = \cos \theta_R$$

$$PF_R = \cos \tan^{-1} \frac{SX_{R0}}{R_R}$$

Χαρακτηριστική Ροπής-Ταχύτητας

- Η γραφική παράσταση του συντελεστή ισχύος στο δρομέα συναρτήσει της ταχύτητας φαίνεται στο σχήμα (γ)
- Επειδή η επαγόμενη ροπή είναι ανάλογη με το γινόμενο των τριών παραπάνω όρων, η χαρακτηριστική ροπής - ταχύτητας ενός επαγωγικού κινητήρα κατασκευάζεται με γραφικό πολλαπλασιασμό των τριών ξεχωριστών καμπυλών και φαίνεται στο σχήμα (δ)



Η Επαγόμενη Ροπή από Φυσική Άποψη

- Αυτή η χαρακτηριστική μπορεί να χωριστεί γενικά σε τρεις περιοχές
- Η πρώτη είναι η περιοχή χαμηλής ολίσθησης (low-slip region) της καμπύλης, όπου
 - η ολίσθηση του κινητήρα αυξάνεται σχεδόν γραμμικά με την αύξηση του φορτίου
 - η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα μειώνεται σχεδόν γραμμικά με το φορτίο
 - η αντίδραση του δρομέα είναι αμελητέα
 - ο συντελεστής ισχύος του δρομέα είναι προσεγγιστικά μοναδιαίος
 - το ρεύμα δρομέα αυξάνεται γραμμικά με την ολίσθηση
- Το τελικό εύρος της κανονικής ευσταθούς λειτουργίας ενός επαγωγικού κινητήρα περιλαμβάνεται σ' αυτή την περιοχή γραμμικής και χαμηλής ολίσθησης
- Έτσι, κατά την κανονική λειτουργία του, ο επαγωγικός κινητήρας παρουσιάζει γραμμική πτώση της ταχύτητάς του

Χαρακτηριστική Ροπής-Ταχύτητας

- Η δεύτερη περιοχή της χαρακτηριστικής ροπής - ταχύτητας ενός επαγωγικού κινητήρα ονομάζεται περιοχή μέτριας ολίσθησης (moderate-slip region)
 - η συχνότητα του δρομέα είναι υψηλότερη απ' ότι στην προηγούμενη περιοχή
 - το μέτρο της αντίδρασης του δρομέα είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με την αντίστασή του
 - το ρεύμα του δρομέα δεν αυξάνεται τόσο απότομα, όπως στην προηγούμενη περιοχή
 - ο συντελεστής ισχύος αρχίζει να μειώνεται
- Ο κινητήρας αποκτά τη **μέγιστη ροπή** του (ροπή ανατροπής - pullout torque) στο σημείο όπου η αύξηση του ρεύματος εξουδετερώνεται από τη μείωση του συντελεστή ισχύος στο δρομέα

Χαρακτηριστική Ροπής-Ταχύτητας

- Η τρίτη περιοχή της χαρακτηριστικής ροπής-ταχύτητας ενός επαγωγικού κινητήρα ονομάζεται περιοχή υψηλής ολίσθησης (high-slip region)
 - η επαγόμενη ροπή μειώνεται με την αύξηση του φορτίου, καθώς η αύξηση του ρεύματος στο δρομέα επικαλύπτεται από τη μείωση του συντελεστή ισχύος στον δρομέα
- Σ' έναν τυπικό επαγωγικό κινητήρα, η **ροπή ανατροπής** είναι ίση με το **200 – 250%** της ονομαστικής ροπής της μηχανής κατά την πλήρη φόρτιση
- Ακόμη η **ροπή εκκίνησης** (ροπή που αντιστοιχεί σε μηδενική ταχύτητα) είναι περίπου ίση με **150%** της ονομαστικής ροπής στην πλήρη φόρτιση

Σχετικό υλικό

- Από το βιβλίο «Ηλεκτρικές Μηχανές AC-DC», Stephen J. Chapman, εκδ. Τζιόλα, 5^η έκδ.
 - Κεφάλαιο 6, Παράγραφος 6.5