



**ΤΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ  
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ**

---

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

Του φοιτητή του τμήματος ηλεκτρολογίας του ΤΕΙ Πειραιά

**Μπαντούνας Γ. Ανδρέας**

**A.M. 35104**

**Έλεγχος ροπής τριφασικών ασύγχρονων κινητήρων-μέθοδος  
προστασίας**

**Επιβλέπων: Πέτρος Καραϊσάς**

**4-10-2011**

## Περιεχόμενα

<b>1</b>	<b>ΑΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ.....</b>	<b>3</b>
1.1	Εισαγωγή.....	3
1.2	Κατασκευαστικά χαρακτηριστικά ασύγχρονης μηχανής.....	4
1.3	Αρχή λειτουργίας ασύγχρονης μηχανής.....	11
1.4	Εξαγωγή ισοδύναμου κυκλώματος.....	13
<b>2</b>	<b>ΕΛΕΓΧΟΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΕΠΑΓΩΓΗΣ .....</b>	<b>24</b>
2.1	Χαρακτηριστικές ροπής – ταχύτητας.....	24
2.2	Έλεγχος κινητήρα επαγωγής .....	28
2.3	Εκκίνηση επαγωγικών κινητήρων και ρύθμιση στροφών .....	31
<b>3</b>	<b>ΕΛΕΓΧΟΣ ΡΟΠΗΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΕΠΑΓΩΓΗΣ.....</b>	<b>43</b>
3.1	Επιδερμικό φαινόμενο και επίδρασή του στις ασύγχρονες μηχανές .....	43
3.2	Ροπές ανώτερων αρμονικών .....	45
3.3	Αντιμετώπιση των ανώτερων αρμονικών.....	49
3.4	Τεχνικές ελέγχου τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα .....	49
<b>4</b>	<b>ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ.....</b>	<b>55</b>
4.1	Επιλογή και συντήριση επαγωγικών κινητήρων.....	55
	<b>Βιβλιογραφία .....</b>	<b>58</b>

# **1 ΑΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ**

## **1.1 Εισαγωγή**

Οι ηλεκτρικές μηχανές μετατρέπουν την μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική (γεννήτριες) και αντίστροφα (κινητήρες) ή μετατρέπουν ηλεκτρική ενέργεια με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά σε ηλεκτρική διαφορετικών χαρακτηριστικών.

Γενικά η ηλεκτρική μηχανή είναι ένα σύστημα που μετατρέπει την ηλεκτρική ισχύ σε μηχανική ροπή στον άξονά του, ή αντίστροφα. Οι μηχανές επαγωγής μπορούν να λειτουργήσουν τόσο σαν κινητήρες όσο και σαν γεννήτριες. Σαν γεννήτριες όμως σπάνια χρησιμοποιούνται για λόγους οικονομικούς. Από τα διάφορα είδη ηλεκτρικών μηχανών εναλλασσόμενου ρεύματος ο τριφασικός ασύγχρονος ή επαγωγικός κινητήρας χρησιμοποιείται ευρύτατα στις βιομηχανικές εφαρμογές. Ενδεικτικό αυτού είναι ότι οι επαγωγικοί κινητήρες απορροφούν το 60% περίπου της συνολικής παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Η μελέτη των κινητήρων αυτών και ιδιαίτερα των προβλημάτων τους είναι ένας πολύ σημαντικός τομέας που διαρκώς εξελίσσεται.

Οι ασύγχρονοι κινητήρες χρησιμοποιούνται κατά κόρον και επικράτησαν στη βιομηχανία γιατί είναι απλοί στην κατασκευή και οικονομικοί. Ακόμα είναι εύκολοι στη συντήρηση, εύκολη σύνδεση με το δίκτυο, προσαρμογή σε διάφορα περιβάλλοντα λειτουργίας, εύκολη συντήρηση και επισκευή. Οι ασύγχρονοι κινητήρες είναι ασφαλείς στη λειτουργία και έχουν καλό βαθμό απόδοσης. Οι ισχείς τους κυμαίνονται από δεκάδες W έως MW. Τα βασικά μειονεκτήματά τους είναι η κατανάλωση αέργου ισχύος, η δύσκολη προσαρμογή τους στις στροφές του φορτίου, καθώς έχουν περίπου σταθερή ταχύτητα περιστροφής. Ενδεικτικό της καθολικής χρήσης της μηχανής αυτής είναι ότι, οι επαγωγικοί κινητήρες απορροφούν το 60% περίπου, της συνολικά παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας.

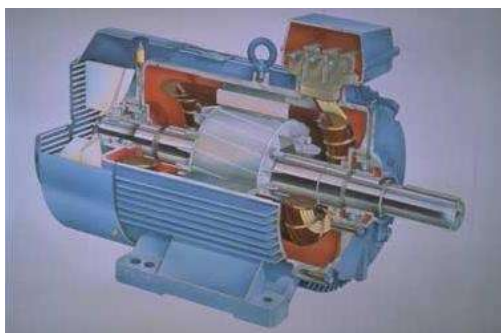
Διακρίνονται σε μονοφασικούς και τριφασικούς. Οι τριφασικοί υποδιαιρούνται σε δύο κύριες κατηγορίες, τους κινητήρες δακτυλιοφόρου και βραχυκυκλωμένου δρομέα.

## 1.2 Κατασκευαστικά χαρακτηριστικά ασύγχρονης μηχανής

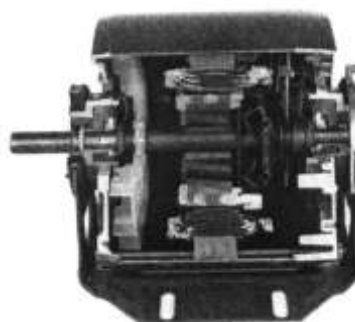
Μία ασύγχρονη μηχανή αποτελείται από δύο μέρη, ένα ακίνητο που λέγεται στάτης και ένα κινητό που λέγεται ρότορας ή δρομέας και βρίσκεται στο εσωτερικό της μηχανής. Ο στάτης περιλαμβάνει τον πυρήνα και τα τυλίγματα του. Ο πυρήνας αποτελείται από ελάσματα χάλυβα αξονικά τοποθετημένα, στην εσωτερική επιφάνεια των οποίων υπάρχουν συμμετρικές εγκοπές και κατά συνέπεια αξονικές αυλακώσεις προκειμένου να τοποθετηθούν τα τυλίγματα του στάτη. Τα τυλίγματα του στάτη μπορούν να συνδεθούν κατ' αστέρα ή τρίγωνο ανάλογα με το σχεδιασμό. Επίσης, τα τυλίγματα στο στάτη πρέπει να κατανέμονται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να επιτυγχάνεται κατά το δυνατόν ημιτονοειδής κατανομή του αναπτυσσόμενου μαγνητικού πεδίου στο διάκενο. Τα κύρια μέρη μιας μηχανής είναι :

- Ο πυρήνας ο οποίος κατασκευάζεται από σιδηρομαγνητικό υλικό με μεγάλη μαγνητική διαπερατότητα και αποτελεί το βασικό μέρος του «μαγνητικού κυκλώματος».
- Τα τυλίγματα που αποτελούνται από κατάλληλα μονωμένους αγωγούς. Το μαγνητικό κύκλωμα χρησιμεύει για τη συγκέντρωση της μαγνητικής ροής που δημιουργούν τα ρεύματα που διαρρέουν τα τυλίγματα ώστε με την αλληλεπίδραση των δημιουργούμενων πεδίων να επιτυγχάνεται η «ηλεκτρομηχανική μετατροπή» σύμφωνα με τους νόμους του ηλεκτρομαγνητισμού.

Παρακάτω φαίνεται η τομή ενός ασύγχρονου κινητήρα.

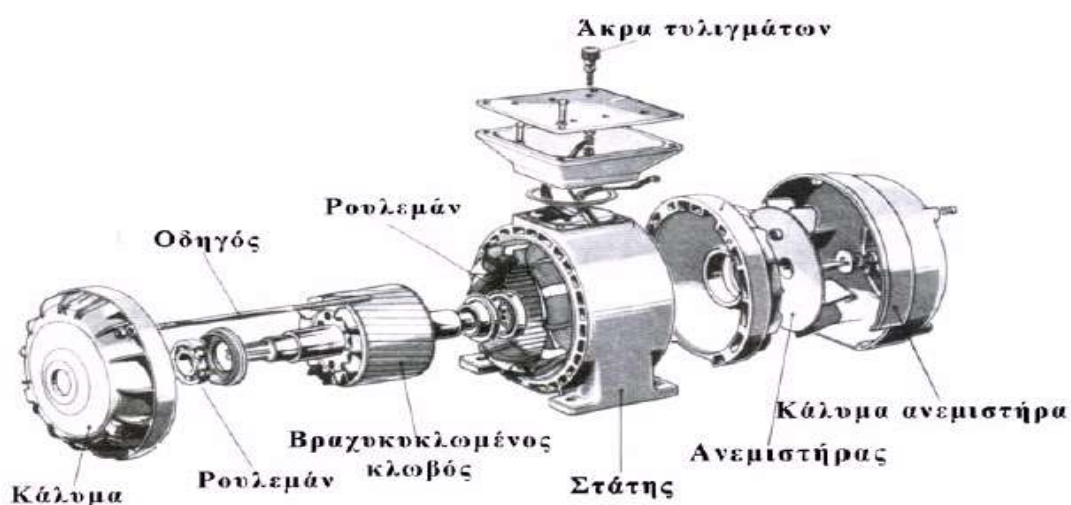


*Εικ 1.1* Τομή ασύγχρονου κινητήρα



*Εικ 1.2* τομή κινητήρα με διαχωρισμένο τύλιγμα

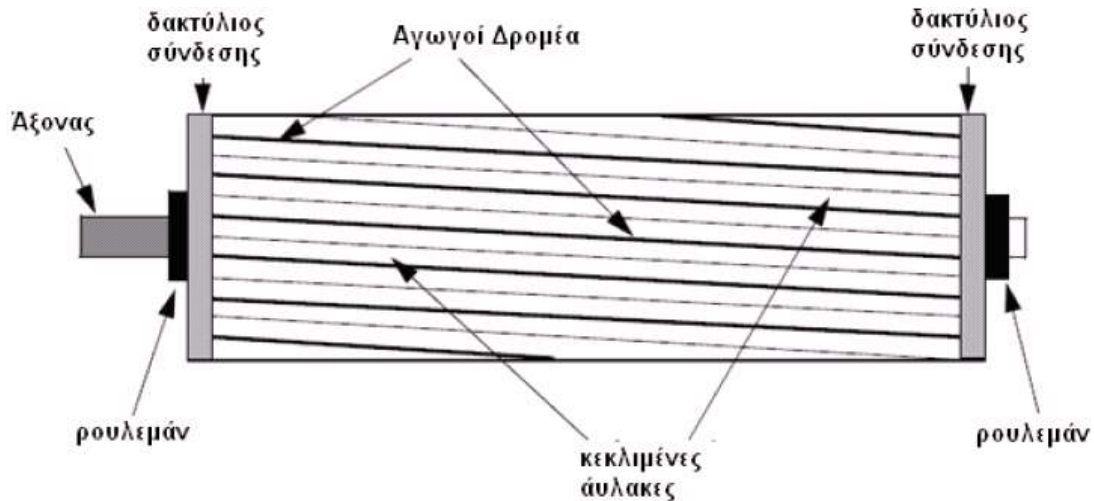
Μια ηλεκτρική μηχανή επαγωγής αποτελείται ουσιαστικά από ένα σταθερό μέρος το στάτη ο οποίος φέρει στις αύλακές του ένα μονοφασικό, διφασικό ή τριφασικό τύλιγμα και ένα στρεφόμενο μέρος, το δρομέα. Όταν το τύλιγμα του στάτη του κινητήρα τροφοδοτείται από συμμετρική πηγή θα δημιουργηθεί στο διάκενο μαγνητικό πεδίο που στρέφεται με τη σύγχρονη ταχύτητα. Το στρεφόμενο μέρος του διακένου επάγει τάσεις στα τυλίγματα του δρομέα το οποίο αποτελείται από κλειστά κυκλώματα. Οι τάσεις αυτές έχουν ως αποτέλεσμα τη ροή ρευμάτων στα τυλίγματα του δρομέα και τη δημιουργία κύματος ΜΕΔ το οποίο στρέφεται ως προς το στάτη με τη σύγχρονη ταχύτητα. Η αλληλεπίδραση των δύο πεδίων στάτη και δρομέα ή του συνισταμένου πεδίου του διακένου και του πεδίου του δρομέα προκαλεί την ροπή της μηχανής επαγωγής.



*Εικ 1.3a* Η ανατομία ενός ασύγχρονου κινητήρα

## ΔΡΟΜΕΑΣ

Ο δρομέας είναι κατασκευασμένος από αρκετά, λεπτά φύλλα μετάλλου, με κατανεμημένες ράβδους αλουμινίου ή χαλκού στην περιφέρεια του.



Εικ. 1.3α δρομέας κλωβού με κεκλιμένες ράβδους

Οι άυλακες του δρομέα δεν είναι ακριβώς παράλληλες με τον άξονα αλλά έχουν μια ελαφριά κλίση για δύο κυρίως λόγους. Ο πρώτος λόγος είναι να κάνει τη μηχανή να τρέχει πιο αθόρυβα μειώνοντας τον μαγνητικό θόρυβο και για να ελαττώσει τις αρμονικές αυλάκων. Ο δεύτερος λόγος είναι για να βοηθήσει την μείωση της τάσης «κλειδώματος» του δρομέα. Τα δόντια του δρομέα έχουν την τάση να ακινητοποιούνται κάτω από τα δόντια του στάτη όπου υπάρχει απευθείας μαγνητική έλξη μεταξύ τους. Αυτό συμβαίνει όταν ο αριθμός των οδοντώσεων του δρομέα είναι ίσος με τον αριθμό οδοντώσεων του στάτη.

Ο δρομέας προσάπτεται στο στέλεχος της μηχανής χρησιμοποιώντας ρουλεμάν στις δύο άκρες. Συνήθως η μια άκρη είναι μακρύτερη από την άλλη για να οδηγεί το φορτίο. Μεταξύ του στάτη και του δρομέα υπάρχει διάκενο αέρος, μέσω του οποίου μεταφέρεται ενέργεια από το στάτη στο δρομέα εξ επαγωγής. Η παραγόμενη ροπή αναγκάζει το δρομέα και το φορτίο να περιστραφούν. Ανεξάρτητα από τον τύπο δρομέα που θα χρησιμοποιηθεί, η αρχή λειτουργίας περιστροφής παραμένει η ίδια.

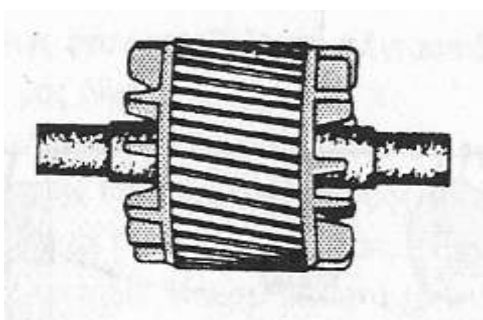
Η πολυφασική μηχανή επαγωγής όταν ο δρομέας μένει ακίνητος μπορεί να θεωρηθεί σαν μετασχηματιστής στον οποίο το παλλόμενο πεδίο έχει αντικατασταθεί από στρεφόμενο πεδίο. Η μόνη διαφορά είναι η ύπαρξη του διακένου στη μηχανή επαγωγής η οποία για αυτό απαιτεί πολύ μεγαλύτερο ρεύμα διεγέρσεως που φθάνει το 40% του ονομαστικού ρεύματος αυτής. Για τον, κατά το δυνατό, περιορισμό της συνιστάμενης ΜΕΔ (μαγνητεγερτική δύναμη) του διακένου που είναι αναγκαία για το πεδίο του διακένου λαμβάνονται ορισμένα κατασκευαστικά μέτρα όπως οι αύλακες του στάτη διαμορφώνονται μισόκλειστες, ενώ του δρομέα μισόκλειστες ή τελείως κλειστές και το διάκενο μεταξύ στάτη και δρομέα γίνεται μικρό.

Οι ασύγχρονες μηχανές κατασκευάζονται με τρεις τύπους δρομέων, τύλιγμα κλωβού ή βραχυκυκλωμένος δρομέας, με τυλιγμένο δρομέα ή με δακτυλίους και με δρομείς χωρίς αύλακες.

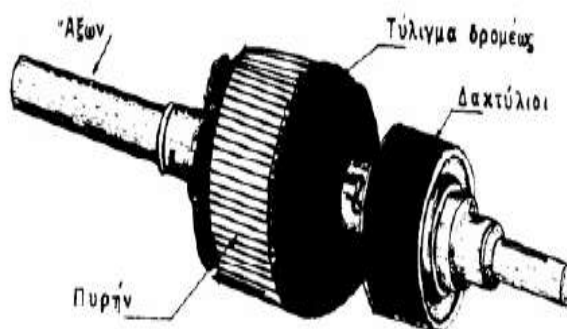
- Τύλιγμα κλωβού: Αποτελεί το απλούστερο τύλιγμα για το δρομέα ενός κινητήρα επαγωγής. Το τύλιγμα αποτελείται από αριθμό ράβδων από αλουμίνιο ή χαλκό κατά τη διεύθυνση της γεννήτριρας ή με κάποια λοξότητα, οι οποίες βραχυκυκλώνονται στα δύο άκρα με δακτυλίους από το ίδιο υλικό. Ο κλωβός από αλουμίνιο κατασκευάζεται με χύτευση κι ο κλωβός από χαλκό συντίθεται από τις ράβδους. Το τύλιγμα κλωβού με S2 ράβδους μπορεί να θεωρηθεί σαν ένα τύλιγμα με S2 φάσεις με μία ράβδο ανά φάση. Έτσι οι S2 φάσεις συνδέονται κατά αστέρα με τον ένα δακτύλιο ενώ με τον άλλο δακτύλιο βραχυκυκλώνονται. Μια άλλη θεώρηση του τυλίγματος κλωβού είναι ότι έχει  $\frac{S_2}{p}$  φάσεις όπου  $p$  ο αριθμός πόλων του συνεργαζόμενου στάτη. Κάθε φάση αποτελείται από συγκεντρωμένα πηνία ενός ελίγματος και με βήμα  $\beta=180^\circ$  ηλεκτρικές μοίρες, ενώ κάθε πηνίο είναι βραχυκυκλωμένο. Όλα τα πηνία του τυλίγματος κλωβού βραχυκυκλώνονται στα δύο ακραία τμήματά τους με τους δακτυλίους. Ένα τύλιγμα κλωβού μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κινητήρα με οποιοδήποτε αριθμό πόλων. Για τη βελτίωση των συνθηκών εκκινήσεως το τύλιγμα κλωβού κατασκευάζεται με υψηλές και στενές ράβδους ή με διπλό κλωβό.

- Τύλιγμα δρομέα με δακτυλίους: Τυλιγμένοι δρομείς για κινητήρες μέχρι 10kW εφοδιάζονται με συμμετρικά τριφασικά τυλίγματα όπως αυτά που χρησιμοποιούνται στο στάτη. Για δρομείς κινητήρων μέσης ισχύος χρησιμοποιούνται σχεδόν πάντοτε τυλίγματα με δύο στρώματα με δύο πλευρές πηνίου σε κάθε αύλακα και με ακέραιο ή κλασματικό αριθμό

αυλάκων ανά πολικό βήμα και φάση. Η σύνδεση των τριών φάσεων του δρομέα γίνεται συνήθως κατά αστέρα. Ο δρομέας με δακτυλίους συγκρινόμενος με το δρομέα κλωβού είναι πιο ακριβός διότι καταρχήν απαιτεί δακτυλίους ψήκτρες και αντιστάσεις εκκινήσεως. Πλην αυτών συχνά προβλέπονται διατάξεις οι οποίες επιτρέπουν μια ανύψωση των ψηκτρών και βραχυκύκλωση των δακτυλίων μετά την επίτευξη της εκκινήσεως. Επιπλέον το τύλιγμα κλωβού έχει λιγότερο αγωγίμο υλικό από το τύλιγμα δρομέα με δακτυλίους για την αυτή ισχύ.



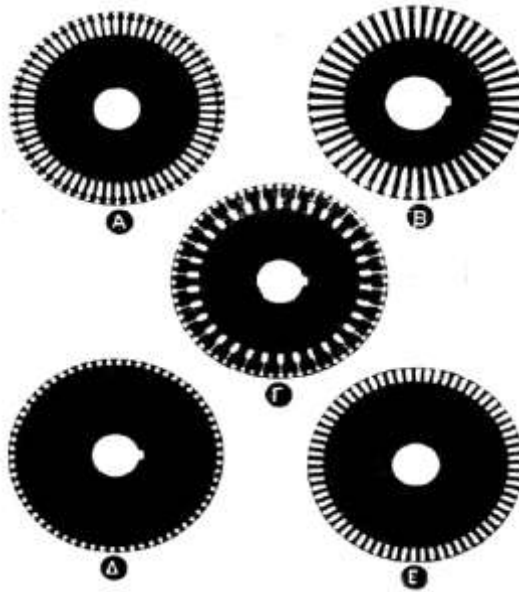
*Εικ 1.4 AM με κλωβό*



*Εικ1.5 A.M. με δακτυλιοφόρο δρομέα*

- Δρομείς χωρίς αύλακες : Οι δρομείς αυτοί κατασκευάζονται συνήθως από ολόσωμο σίδηρο όπου επάγονται δινορρεύματα ώστε να προκύψει χρήσιμη ροπή. Εν τούτοις ο βαθμός αποδόσεως, ο συντελεστής ισχύος και η ικανότητα υπερφορτίσεως ενός τέτοιου κινητήρα δεν είναι ευνοϊκοί. Οι κινητήρες με ολόσωμους δρομείς χρησιμοποιούνται για συστήματα κινήσεως με υψηλό αριθμό στροφών ανά λεπτό επειδή έχουν μεγάλη μηχανική αντοχή. Αναπτύσσουν σχετικώς μεγάλη ροπή εκκινήσεως και μικρό ρεύμα εκκινήσεως. Για την βελτίωση των ιδιοτήτων τους ενίοτε κατασκευάζεται ο δρομέας από στρώματα κατάλληλων υλικών. Η απλούστερη κατασκευή αυτού του τύπου είναι η τοποθέτηση φύλλου χαλκού επί της κυλινδρικής επιφάνειας του ολόσωμου σιδήρου. Οι κινητήρες πολύ μικρής ισχύος για τα συστήματα αυτομάτου ελέγχου έχουν τον σίδηρο στο δρομέα ακίνητο, ενώ το στρεφόμενο μέρος του δρομέα κατασκευάζεται από αλουμίνιο, έχει δε τη μορφή κυπέλλου με ένα μόνο έδρανο.





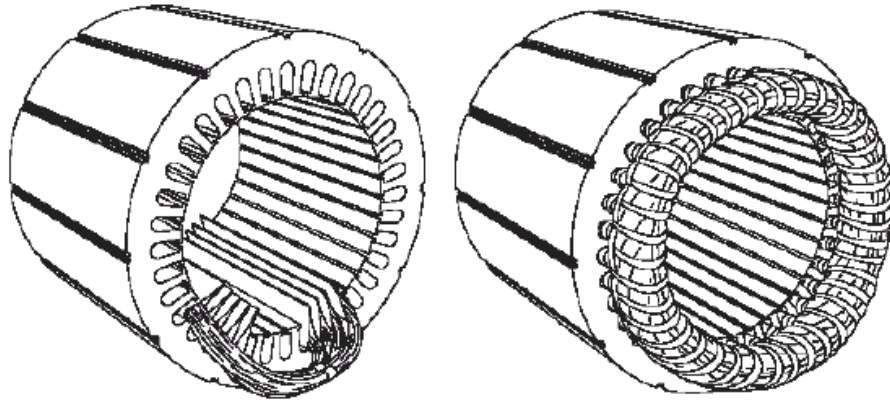
*Εικ 1.6 Διάφοροι τύποι μαγνητικών ελασμάτων για την κατασκευή δρομέα ασύγχρονου επαγωγικού κινητήρα*

- A. Τύπος ελάσματος για την κατασκευή κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα ομαλής ροπής και μικρού ρεύματος εκκίνησης
- B. Τύπος ελάσματος για την κατασκευή δρομέα δακτυλιοφόρου κινητήρα
- C. Τύπος ελάσματος για την κατασκευή κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα μεγάλης ροπής και μικρού ρεύματος εκκίνησης
- D. Τύπος ελάσματος για την κατασκευή κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα μεγάλης ροπής και μεγάλης ολίσθησης
- E. Τύπος ελάσματος για την κατασκευή κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα ομαλής ροπής και ομαλού ρεύματος εκκίνησης

## **ΣΤΑΤΗΣ**

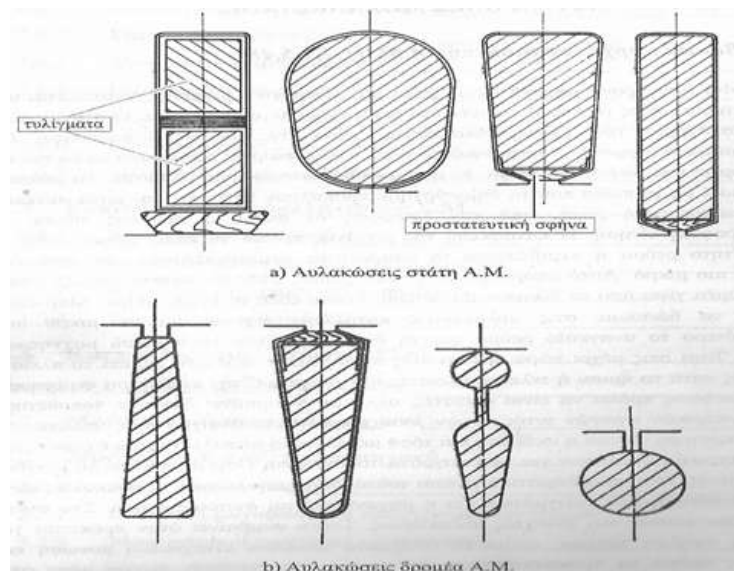
Ο στάτης ενός ασύγχρονου κινητήρα αποτελείται από ένα κυλινδρικό σώμα ελασμάτων τα οποία είναι διαμορφωμένα κατά τέτοιο τρόπο έτσι ώστε στο εσωτερικό μέρος του να δημιουργούνται αυλάκια. Μέσα στα αυλάκια τοποθετείτε το τριφασικό τύλιγμα για να αναπτύσσεται το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο. Ο αριθμός των πόλων μιας επαγωγικής μηχανής εναλλασσόμενου ρεύματος εξαρτάται από την εσωτερική σύνδεση των τυλιγμάτων του στάτη.

Οι αυλακώσεις του στάτη μέσα στις οποίες τοποθετείται το τύλιγμα έχουν κατάλληλο σχήμα έτσι ώστε να μικρύνει περισσότερο το αναγκαίο ρεύμα για να δημιουργεί το επιθυμητό μαγνητικό πεδίο. Σήμερα συναντάμε αυλακώσεις στο στάτη ανοιχτές κατά το ήμισυ ή τελείως κλειστές αυλακώσεις. Όσο μικραίνει το άνοιγμα μιας αυλακώσεως τόσο μικρότερη γίνεται η σκέδαση και τόσο μεγαλύτερη ασφάλεια έχουμε έναντι των φυγοκεντρικών δυνάμεων.



*Εικ 1.7 Κατασκευαστική δομή στάτη τριφασικών μηχανών*

Στην Εικόνα 1.8 βλέπουμε μερικούς χαρακτηριστικούς τύπους αυλακώσεων στάτη και δρομέα.



*Εικ. 1.8 Μορφές αυλακώσεων Ασύγχρονης Μηχανής*

### 1.3 Αρχή λειτουργίας ασύγχρονης μηχανής

Στο στάτη της μηχανής εφαρμόζεται τριφασικό σύστημα τάσεων με αποτέλεσμα οι αγωγοί του στάτη να διαρρέονται από τριφασικό σύστημα ρευμάτων. Αυτά τα ρεύματα παράγουν το πεδίο του στάτη  $B_s$  που περιστρέφεται με τη λεγόμενη σύγχρονη ταχύτητα η οποία δίνεται από τον παρακάτω τύπο.

$$n_s = \frac{60 f_s}{p} (\Sigma A \Lambda) \quad (1.1)$$

όπου

$n_s$ : η ταχύτητα του στάτη (synchronous stator speed) σε rpm

$f_s$ : η ηλεκτρική συχνότητα σε Hz

$p$ : ο αριθμός των πόλων της μηχανής

Πολλές φορές οι στροφές ανά λεπτό συμβολίζονται με τα αρχικά των αγγλικών λέξεων Revolutions per Minute, RPM ή rpm.

Η τάση στα άκρα των αγωγών του δρομέα προκαλείται από τη σχετική κίνηση του δρομέα ως προς το μαγνητικό πεδίο του στάτη. Το ρεύμα του δρομέα προκαλεί το αντίστοιχο μαγνητικό πεδίο του δρομέα  $B_r$ . Στους σύγχρονους κινητήρες, η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα είναι ίση με την ταχύτητα περιστροφής του μαγνητικού πεδίου του στάτη. Αντίθετα, στους ασύγχρονους κινητήρες, η ταχύτητα του δρομέα είναι πάντα μικρότερη από τη σύγχρονη ταχύτητα (από εκεί προέρχεται και ο όρος ασύγχρονοι κινητήρες) και εξαρτάται από το μέγεθος του φορτίου που είναι συνδεδεμένο στον άξονα της μηχανής. Αν η ταχύτητα του δρομέα ήταν ίση με τη σύγχρονη ταχύτητα του στάτη δε θα υπήρχε σχετική κίνηση των αγωγών του δρομέα ως προς το μαγνητικό πεδίο του στάτη και δε θα αναπτυσσόταν τάση εξ' επαγωγής στα άκρα τους. Για να εκφράσουμε αυτή τη διαφορά των ταχυτήτων στάτη και δρομέα χρησιμοποιούμε ένα νέο μέγεθος που λέγεται ολίσθηση, ο τύπος της οποίας φαίνεται παρακάτω:

$$S = \frac{n_s - n_r}{n_s} = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \quad (1.2)$$

Δηλαδή, η ολίσθηση ορίζεται ως η ποσοστιαία διαφορά της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα από τη σύγχρονη ταχύτητα του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου.

Συγκεκριμένα στον παραπάνω τύπο ορίστηκαν οι ποσότητες:

S: η ολίσθηση (slip), αδιάστατο μέγεθος

$n_s$ : η σύγχρονη ταχύτητα του στάτη (synchronous stator speed) σε rpm

$n_r$ : η ταχύτητα του δρομέα (rotor speed) σε rpm

$\omega_s$ : η σύγχρονη γωνιακή ταχύτητα του στάτη σε rad/sec

$\omega_r$ : η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα σε rad/sec

Η ολίσθηση S κυμαίνεται μεταξύ 0 και 1 (συνήθως μεταξύ 0.01 και 0.05). Η συχνότητα των ρευμάτων που επάγονται στο δρομέα δίνονται από τον τύπο:

$$f_r = s \cdot f \quad (1.3)$$

όπου

$f_r$ : η συχνότητα των ρευμάτων του δρομέα σε Hz

f: η ηλεκτρική συχνότητα σε Hz

Η ηλεκτρική γωνία συνδέεται με τη μηχανική μέσω της σχέσης

$$\theta_{el} = \frac{p}{2} \cdot \theta_{mech} \quad (1.4)$$

Δηλαδή, ένας κύκλος τάσης, που αντιστοιχεί σε 360, παράγεται κάθε φορά που ένα ζεύγος πόλων περνά από ένα τύλιγμα στάτη.

Όταν το τριφασικό τύλιγμα του στάτη τροφοδοτείται από μία συμμετρική τριφασική πηγή τάσεων προκαλεί, όπως έχει αναφερθεί, στο διάκενο της μηχανής ένα στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο, το οποίο στρέφεται με γωνιακή ταχύτητα ανάλογη της συχνότητας εναλλασσόμενων τάσεων (άρα και των ρευμάτων) του στάτη. Η ταχύτητα αυτή ονομάζεται σύγχρονη γωνιακή ταχύτητα και δίνεται από τον τύπο:

$$\omega_s = \frac{2\pi f_s}{p} \text{ (rad/sec)} \quad (1.5)$$

όπου  $f_s$  η ηλεκτρική συχνότητα και  $p$  τα ζεύγη των μαγνητικών πόλων της μηχανής.

#### 1.4 Εξαγωγή ισοδύναμου κυκλώματος

Θεωρούμε κατά αρχή ηλεκτρικές μηχανές επαγωγής που έχουν μόνο συμμετρικά τριφασικά τυλίγματα τα οποία διεγείρονται από συμμετρικές πολυφασικές τάσεις. Η μελέτη μπορεί να περιοριστεί μόνο σε μια φάση δεδομένου ότι η συμπεριφορά όλων των φάσεων σε ένα συμμετρικό πολυφασικό σύστημα είναι η ίδια και η μόνη διάκριση μεταξύ τους είναι η χαρακτηριστική διαφορά φάσεως χρόνου. Για τριφασικές μηχανές, θεωρείται ότι το τύλιγμα του στάτη είναι συνδεδεμένο κατά αστέρα. Η παραδοχή αυτή καθιστά τη μελέτη κάποιος πιο άνετη εφόσον το ρεύμα γραμμής συμπίπτει με το ρεύμα της φάσεως της μηχανής ενώ η τάση της φάσεως έχει την τιμή της τάσεως γραμμής προς ουδέτερο. Γίνεται επίσης η παραδοχή ότι όλα τα ρεύματα και οι τάσεις έχουν ημιτονοειδή μορφή. Οι επιδράσεις των αρμονικών χώρου στην διανομή της ροής αγνοούνται εκτός όταν απαιτούνται για τον υπολογισμό των αντιδράσεων σκεδάσεως στάτη και δρομέα.

Πρώτον, θεωρείται ο στάτης. Το κύμα ροής του διακένου το οποίο στρέφεται στο διάκενο με τη σύγχρονη ταχύτητα παράγει συμμετρικές πολυφασικές αντι-ηλεκτρεγερτικές δυνάμεις στις φάσεις του στάτη. Η τάση ακροδεκτών του στάτη διαφέρει από την αντι-ΗΕΔ κατά την

πτώση τάσεως στη σύνθετη αντίδραση σκεδάσεως του στάτη. Η ανυσματική σχέση ανά φάση είναι :

$$\boxed{V_1 = E_1 + I_1(r_1 + jx_1)} \quad (1.6)$$

όπου

$V_1$  = η τάση ακροδεκτών του στάτη

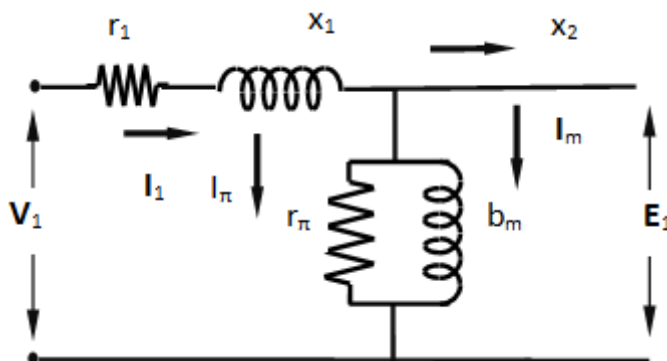
$E_1$  = η αντι-HEΔ που αναπτύσσεται από την συνισταμένη ροή διακένου

$I_1$  = το ρεύμα του στάτη

$r_1$  = η πραγματική αντίσταση του στάτη

$x_1$  = η αντίδραση σκεδάσεως του στάτη

Οι θετικές φορές φαίνονται στο ισοδύναμο κύκλωμα του παρακάτω κυκλώματος:



*Εικ. 1.9* Ισοδύναμο κύκλωμα στάτη πολυφασικού κινητήρα επαγωγής

Η συνισταμένη ροή διακένου δημιουργείται από τις συνδυασμένες HEΔ των ρευμάτων του στάτη και του δρομέα. Ακριβώς όπως στο ανάλογο του μετασχηματιστή, το ρεύμα του στάτη μπορεί να αναλυθεί σε δύο συνιστώσες, μία συνιστώσα φορτίου και μια διεγέρσεως. Η συνιστώσα φορτίου  $I_2$  παράγει MEΔ η οποία αντιτίθεται ακριβώς στην HEΔ του ρεύματος του δρομέα. Η συνιστώσα διεγέρσεως  $I_\phi$  είναι το πρόσθετο ρεύμα του στάτη, το οποίο απαιτείται για τη δημιουργία της συνισταμένης ροής διακένου και είναι συνάρτηση της HEΔ  $E_1$ . Το ρεύμα διεγέρσεως μπορεί να αναλυθεί σε μία συνιστώσα απωλειών πυρήνα  $I_\pi$  σε φάση με την  $E_1$  και μια συνιστώσα μαγνήτισης  $I_m$  μεταπορευόμενη την  $E_1$  κατά  $90^\circ$ . Στο

ισοδύναμο κύκλωμα το ρεύμα διεγέρσεως μπορεί να περιληφθεί μέσω παράλληλου κλάδου, που σχηματίζεται από την αγωγιμότητα  $g_\pi$  των απωλειών πυρήνα και από μια μαγνητίζουσα αγωγιμότητα  $b_m$  εν παραλλήλω με την τάση  $E_1$ . Τόσο το  $g_\pi$  όσο και το  $b_m$  συνήθως καθορίζονται στην ονομαστική συχνότητα του στάτη και για την τιμή του  $E_1$  πλησίον της αναμενόμενης τιμής λειτουργίας. Γίνεται η παραδοχή ότι και τα δύο παραμένουν σταθερά για τις μικρές αποκλίσεις από την τιμή αυτή η οποία σχετίζεται με την κανονική λειτουργία του κινητήρα. Μέχρι εδώ, το ισοδύναμο κύκλωμα για τα φαινόμενα του στάτη είναι ακριβώς το ίδιο με το ισοδύναμο κύκλωμα του πρωτεύοντος του μετασχηματισμού. Προς συμπλήρωση του ισοδύναμου κυκλώματος πρέπει να ενσωματωθεί η επίδραση του δρομέα. Ο δρομέας μπορεί να είναι ή με τύλιγμα κλωβού ή του τυλιγμένου τύπου με τύλιγμα συμμετρικό πολυφασικό. Και στις δύο περιπτώσεις τα βασικά φαινόμενα είναι τα ίδια. Ας θεωρήσουμε τις συνθήκες οι οποίες υφίστανται όταν ο δρομέας στρέφεται με ταχύτητα  $n$  που αντιστοιχεί σε Α.Μ ολίσθηση  $s$ . Η θεμελιώδης συνιστώσα χώρου του κύματος της συνισταμένης ροής διακένου  $\Phi_R$  τότε οδεύει ως προς το δρομέα στην ταχύτητα ολισθήσεως και επάγει ΗΕΔ συχνότητας της ολίσθησης στα κυκλώματα του δρομέα. Οι ΗΕΔ αυτές παράγουν ρεύματα συχνότητας ολισθήσεως στις βραχυκυκλωμένες φάσεις του δρομέα ή ράβδους. Εάν ο δρομέας είναι του τυλιγμένου τύπου, πρέπει να έχει τον ίδιο αριθμό πόλων όπως ο στάτης αν και δεν είναι απαραίτητο να έχει τον ίδιο αριθμό φάσεων. Στον τυλιγμένο δρομέα, τα ρεύματα του δρομέα συχνότητας ολισθήσεως παράγουν ένα κύμα ΜΕΔ (μαγνητεγερτική δύναμη) του οποίου η θεμελιώδης συνιστώσα χώρου έχει τον ίδιο αριθμό πόλων όπως το επάγον κύμα ροής και το οποίο οδεύει στη ταχύτητα ολισθήσεως ως προς τον δρομέα. Η γωνία φάσεως χώρου μεταξύ του κύματος επάγουσας ροής και του κύματος ΜΕΔ του δρομέα είναι η γωνία ροπής  $\delta$ , η οποία είναι κατά  $90^\circ$  μεγαλύτερη από τη γωνία  $\varphi_2$  του Σ.Ι. του δρομέα. Για τον καθορισμό τώρα του ισοδύναμου κυκλώματος θεωρούμε ένα τυλιγμένο δρομέα με τον ίδιο αριθμό πόλων με το στάτη. Ο αριθμός των ενεργών ελιγμάτων ανά φάση στο τύλιγμα του στάτη είναι  $a$  φορές τον αριθμό στο τύλιγμα του δρομέα. Τα ενεργά ελίγματα ορίζονται ως τα υπάρχοντα ελίγματα διορθωμένα ως προς τις επιδράσεις των θεμελιωδών συντελεστών βήματος  $k_p$  και πλάτους  $k_b$ .

Ας συγκρίνουμε τώρα τη μαγνητική επίδραση του δρομέα αυτού με ένα δρομέα μαγνητικός ισοδύναμο που έχει τον ίδιο αριθμό ελιγμάτων με το στάτη. Για την ίδια ροή και ταχύτητα η σχέση μεταξύ της τάσης  $E_r$  που επάγεται στον πραγματικό δρομέα και της τάσεως  $E_{2s}$  που επάγεται στον ισοδύναμο δρομέα είναι :

$$\boxed{E_{2s} = aE_r} \quad (1.7)$$

Εάν οι δρομείς είναι μαγνητικά ισοδύναμοι, τα αμπέρ-ελίγματα τους πρέπει να είναι ίσα, οπότε η σχέση μεταξύ του πραγματικού ρεύματος του δρομέα  $I_r$  και του ρεύματος  $I_{2s}$  στον ισοδύναμο δρομέα πρέπει να είναι

$$\boxed{I_{2s} = \frac{I_r}{a}} \quad (1.8)$$

Συνεπώς η σχέση μεταξύ της συνθέτου αντιστάσεως σκεδάσεως στην συχνότητα ολισθήσεως  $Z_{2s}$  του ισοδύναμου δρομέα και της συνθέτου αντιστάσεως σκεδάσεως στην συχνότητα ολισθήσεως  $Z_r$  του πραγματικού δρομέα πρέπει να είναι

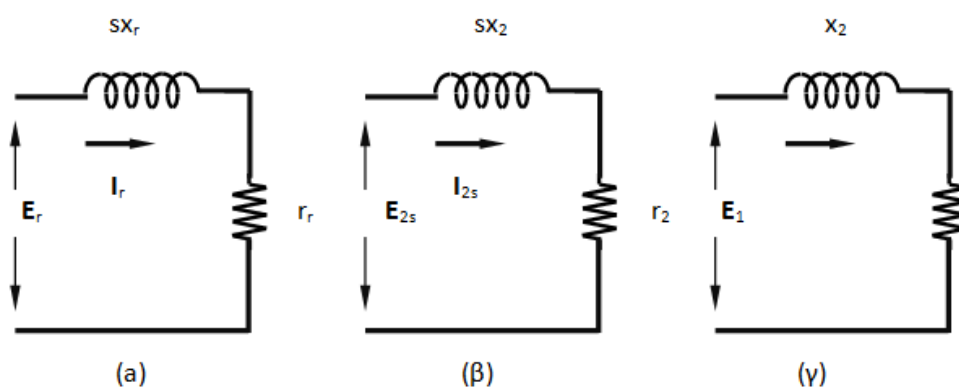
$$\boxed{Z_{2s} = \frac{E_{2s}}{I_{2s}} = a^2 \frac{E_r}{I_r} = a^2 Z_r} \quad (1.9)$$

Οι τάσεις, ρεύματα και σύνθετες αντιστάσεις στον ισοδύναμο δρομέα ορίζονται ως οι τιμές που αναφέρονται στον στάτη. Η μέθοδος είναι η ίδια όπως στο μετασχηματιστή όπου τα μεγέθη του δευτερεύοντος αναφέρονται στο πρωτεύον. Οι παράγοντες αναφοράς είναι λόγοι των ενεργών ελιγμάτων, ουσιαστικά όμοιοι προς τους λόγους των μετασχηματιστών. Οι παράγοντες αναφοράς πρέπει βεβαίως να είναι γνωστοί όταν ενδιαφερόμαστε ιδιαίτερα να δούμε ,τι συμβαίνει στα κυκλώματα του δρομέα. Από την άποψη του στάτη όμως οι αντανακλώμενες επιδράσεις του δρομέα εμφανίζονται συναρτήσει των αναχθέντων ποσοτήτων και η θεωρία τόσο των τυλιγμένων όσο και των δρομέων κλωβού μπορεί να διατυπωθεί συναρτήσει του αναχθέντος δρομέα. Εφόσον ο δρομέας είναι βραχυκυκλωμένος, η διανυσματική σχέση μεταξύ της ΗΕΔ συχνότητας ολισθήσεως  $E_{2s}$  που αναπτύσσεται στην θεωρούμενη φάση του αναχθέντος δρομέα και του ρεύματος  $I_{2s}$  στην φάση αυτή είναι

$$\boxed{\frac{E_{2s}}{I_{2s}} = Z_{2s} = r_2 + jsx_2} \quad (1.10)$$



όπου  $Z_{2s}$  είναι η ανά φάση σύνθετη αντίσταση του δρομέα στην συχνότητα ολισθήσεως αναχθείσα στο στάτη,  $r_2$  η αναχθείσα πραγματική αντίσταση και  $sX_2$  η αναχθείσα αντίδραση σκεδάσεως στην συχνότητα ολισθήσεως. Η αντίδραση εκφράζεται κατά αυτόν τον τρόπο διότι είναι ανάλογη προς την συχνότητα του δρομέα και ως εκ τούτου της ολισθήσεως. Έτσι το  $x_2$  ορίζεται ως η τιμή την οποία θα είχε η αναχθείσα αντίδραση σκεδάσεως του δρομέα στην συχνότητα του στάτη. Έτσι αν  $r_r$ ,  $sX_r$  η αντίσταση και η αντίδραση σκεδάσεως του δρομέα στην τάση τάση  $E_r$  και συχνότητα  $s\omega_1$  του δρομέα τότε το ισοδύναμο κύκλωμα μιας φάσεως του δρομέα φαίνεται στο σχήμα 3-2α όπου  $x_r$  ορίζεται πάλι στη συχνότητα του στάτη. Με βάση τις παραπάνω εξισώσεις το ισοδύναμο κύκλωμα μίας φάσεως του δρομέα παίρνει τη μορφή της εικόνας. 1.10 β. Σ'αυτό όλα τα μεγέθη είναι ανηγμένα στο στάτη. Για τη σύγχρονη αντίσταση σκεδάσεως ισχύει ότι  $r_2 = a^2 r_r$  και  $(sX_2) = a^2 (sX_r)$ .



**Εικ. 1.10** Στάδια ανάπτυξης ισοδύναμου κυκλώματος δρομέα πολυφασικού κινητήρα επαγωγής

Ο στάτης βλέπει ένα κύμα ροής και ένα κύμα ΜΕΔ περιστρεφόμενα στη σύγχρονη ταχύτητα. Το κύμα ροής επάγει την τάση  $E_{2s}$  στο δρομέα στη συχνότητα ολισθήσεως και στο στάτη την αντι-ΗΕΔ  $E_1$ . Εάν δεν υπήρχε η επίδραση της ταχύτητας, η αναχθείσα τάση δρομέα θα ήταν ίση προς την τάση του στάτη, εφόσον το αναχθέν τύλιγμα του δρομέα είναι πανομοιότυπο με το τύλιγμα του στάτη. Λόγω του ότι η σχετική ταχύτητα του κύματος ροής ως προς το δρομέα είναι  $s$  φορές την ταχύτητα του ως προς τον στάτη, η σχέση μεταξύ των πραγματικών τιμών των ΗΕΔ στάτη και δρομέα είναι :

$$E_{2s} = sE_1 \quad (1.11)$$

Στο κύμα ΜΕΔ του δρομέα αντιτίθεται η ΜΕΔ της συνιστώσας ρεύματος φορτίου  $I_2$ , του ρεύματος του στάτη και γι' αυτό, για ενδεικνύμενες τιμές ισχύει :

$$I_{2s} = I_2 \quad (1.12)$$

Η διαίρεση των εξισώσεων 1.11 και 1.12 δίνει :

$$\frac{E_{2s}}{I_{2s}} = s \frac{E_1}{I_2} \quad (1.13)$$

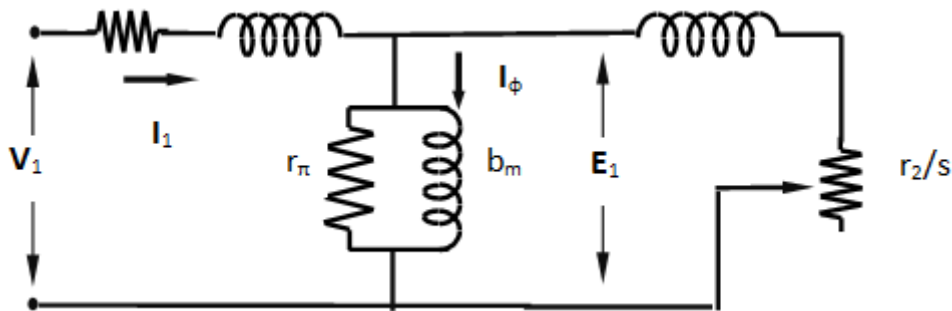
Τα δύο κύματα ΜΕΔ του στάτη και του δρομέα που οφείλονται αντίστοιχα στα ρεύματα  $I_2$  και  $I_{2s}$  στρέφονται με τη σύγχρονη ταχύτητα ενώ συγχρόνως πρέπει να είναι ίσα και αντίθετα. Έτσι η ύπαρξη ρεύματος φορτίου δε μεταβάλλει ουσιαστικά την ισορροπία στο μαγνητικό πεδίο της μηχανής.

Συνεπώς, το κύμα ΜΕΔ το δημιουργούμενο από το ρεύμα φορτίου  $I_2$  πρέπει να είναι μετατεθειμένο στο χώρο από το συνιστάμενο κύμα ροής κατά την αυτή γωνία χώρου όπως αυτή μεταξύ του κύματος ΜΕΔ του δρομέα και του συνισταμένου κύματος ροής, δηλαδή τη γωνία ροπής  $\delta$ . Η γωνία φάσεως χρόνου μεταξύ της τάσεως στάτη  $E_1$  και του ρεύματος φορτίου στάτη  $I_2$  ως εκ τούτου πρέπει να ισούται με την αντίστοιχη γωνία Σ.Ι. του δρομέα  $\varphi_2$ . Το γεγονός ότι οι ΜΕΔ στάτη και δρομέα πρέπει να είναι σε αντίθεση, λαμβάνεται υπόψη εφόσον το ρεύμα δρομέα  $I_{2s}$  δημιουργείται από την ΗΕΔ του δρομέα  $E_{2s}$  ενώ το ρεύμα του στάτη  $I_2$  ρέει αντίθετα προς την αντι-ΗΕΔ του στάτη  $E_1$ . Για τούτο η τελευταία εξίσωση αληθεύει όχι μόνο για ενδεικνύμενες τιμές αλλά και στην ανυσματική έννοια. Αντικατάσταση της 1.10 στην 1.13 και με διαίρεση και τον δύο μελών με το  $s$  προκύπτει:

$$\frac{E_1}{I_2} = \frac{r_2}{s} + jx_2 \quad (1.14)$$

Δηλαδή ο στάτης βλέπει μαγνητικές συνθήκες στο διάκενο οι οποίες έχουν ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη αντι-ΗΕΔ  $E_1$  στο στάτη και του ρεύματος φορτίου  $I_2$  στο στάτη. Επίσης έπεται από την τελευταία εξίσωση ότι οι συνθήκες αυτές είναι ταυτόσημες με το αποτέλεσμα συνδέσεως μιας σύνθετης αντίστασης  $\frac{r_2}{s} + jx_2$  συχνότητας του στάτη στην  $E$ . Συνεπώς η

επίδραση του δρομέα ( Εικ. 1.10γ ) μπορεί να ενσωματωθεί στο ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 1.9 με σύνδεση της αντίστασης αυτής στους ακροδέκτες ΑΒ. Το τελικό αποτέλεσμα φαίνεται στην Εικ. 1.11



Εικ. 1.11 Ισοδύναμο κύκλωμα πολυφασικού κινητήρα επαγωγής

Η συνδυασμένη επίδραση το φορτίου στον άξονα και της αντιστάσεως του δρομέα εμφανίζεται ως ανακλώμενη αντίσταση  $r_2 / s$ , μια συνάρτηση της ολίσθησης και ως εκ τούτου του μηχανικού φορτίου. Το ρεύμα στην ανακλώμενη σύνθετη αντίσταση του δρομέα ισούται με τη συνιστώσα φορτίου  $I_2$  του ρεύματος του στάτη. Η τάση στη σύνθετη αντίσταση ισούται προς την ΗΕΔ  $E_1$  του στάτη. Πρέπει να σημειωθεί ότι όταν τα ρεύματα και οι τάσεις του δρομέα ανακλώνται στον στάτη, η συχνότητά τους μετατρέπεται επίσης σε συχνότητα του στάτη. Όλα τα ηλεκτρικά φαινόμενα του δρομέα, όταν παρατηρούνται από το στάτη, γίνονται φαινόμενα συχνότητας του στάτη, διότι το τύλιγμα του στάτη απλώς βλέπει κύματα ΜΕΔ και ροής να οδεύουν στην σύγχρονη ταχύτητα.

Από απλή εποπτεία ισοδύναμου κυκλώματος διαπιστώνεται ότι η ισχύς που προσδίδεται στο διάκενο από τα τυλίγματα του στάτη είναι

$$P_{g1} = m_1 E_1 I_2 \cos \varphi_2 \quad (1.15)$$

όπου  $m_1$  ο αριθμός των φάσεων του στάτη. Η αντίστοιχη ροπή θα είναι τότε

$$T = \frac{1}{\omega_s} m_1 E_1 I_2 \cos \varphi_2 = \frac{P_s}{4\pi f} m_1 E_1 I_2 \cos \varphi_2 \quad (1.16)$$

όπου  $\omega_s$  είναι η σύγχρονη γωνιακή ταχύτητα σε μηχανικά ακτίνια ανά δευτερόλεπτο και  $P_s$  ο αριθμός πόλων του στάτη. Η ροπή αυτή ονομάζεται εσωτερική μαγνητική ροπή του κινητήρα. Συνεπώς

$$T = \frac{1}{\omega_s} P_{g1} \quad (1.17)$$

Εξ άλλου το ισοδύναμο κύκλωμα δείχνει ότι  $P_{g1}$  ισούται με την ισχύ που απορροφάται από την ανακλώμενη αντίσταση δρομέα  $r_2/s$  για όλες τις φάσεις, δηλαδή

$$P_{g1} = m_1 I_2^2 \frac{r_2}{s} \quad (1.18)$$

Από την οποία έπεται ότι

$$T = \frac{1}{\omega_s} m_1 I_2^2 \frac{r_2}{s} \quad (1.19)$$

Η μηχανική ισχύς ισούται με τη ροπή επί την γωνιακή ταχύτητα. Η εσωτερική μηχανική ισχύς  $P$  η αναπτυσσόμενη από τον κινητήρα, είναι ως εκ τούτου

$$P = (1 - s)\omega_s T = (1 - s)P_{g1} \quad (1.20)$$

εφόσον η μηχανική γωνιακή ταχύτητα του δρομέα σε ολίσθηση  $s$  είναι  $(1-s)\omega_s$  rad/sec, Από τη παραπάνω σχέση φαίνεται ότι, από την ισχύ που μεταφέρεται από το στάτη στο δρομέα, ένα ποσοστό  $1-s$  μετατρέπεται σε μηχανική, ενώ ένα ποσοστό  $s$  μετατρέπεται σε θερμότητα στην αντίσταση του δρομέα. Συνεπώς ένας κινητήρας που λειτουργεί με μεγάλη ολίσθηση δεν είναι ιδιαίτερα αποδοτικός.

Σημειώνεται τέλος ότι η ισχύς της παραπάνω σχέσης, δεν είναι η ωφέλιμη μηχανική ισχύς, καθώς πρέπει να αφαιρεθούν οι απώλειες τριβών, αερισμού κλπ, οι οποίες όμως είναι της τάξης του 0.5% και μπορούν να παραλειφθούν. Η ωφέλιμη ισχύς στον άξονα χαρακτηρίζεται σαν  $PL$  και με τον κινητήρα να απορροφά από το δίκτυο ισχύ  $P_{el}$ , ο συντελεστής απόδοσης του κινητήρα προκύπτει από τη σχέση:

$$n = \frac{PL}{P_{el}} \quad (1.21)$$

Η μέγιστη εσωτερική ροπή ή ροπή ανατροπής  $T_{max}$  και η μέγιστη εσωτερική ισχύς  $P_{max}$  μπορούν να προκύψουν αμέσως με κυκλωματική θεώρηση. Ας σημειωθεί ότι η μέγιστη ροπή και μέγιστη ισχύς δεν λαμβάνουν χώρα στην ίδια ταχύτητα. Από την εξίσωση 1.19 ,προκύπτει ότι η εσωτερική ροπή είναι μέγιστη όταν η ισχύς που προσδίδεται στην αντίσταση  $r_2 /s$  είναι μέγιστη. Τώρα με τη γνωστή αρχή της προσαρμογής σύνθετης αντιστάσεως στη θεωρία κυκλωμάτων, η ισχύς αυτή θα είναι μέγιστη όταν η σύνθετη αντίσταση  $r_2 /s$  είναι ίση με το μέτρο της σύνθετης αντίστασης μεταξύ αυτής και της σταθερής τάσης  $V_{1a}$  ήτοι σε μία τιμή  $s_{max}$  ολισθήσεως για την οποία :

$$\frac{r_2}{s_{maxT}} = \sqrt{R_1 + (X_1 + X_2)^2} \quad (1.22)$$

Η ολίσθηση  $s_{maxT}$  στη μέγιστη ροπή είναι τότε :

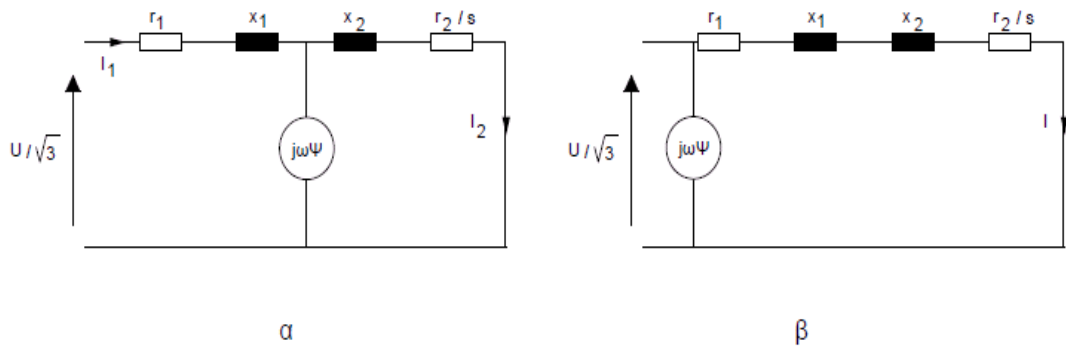
$$s_{maxT} = \frac{r_2}{\sqrt{R_1 + (X_1 + X_2)^2}} \quad (1.23)$$

και η αντίστοιχη ροπή είναι :

$$T_{max} = \frac{1}{\omega_s} \frac{\frac{1}{2} m_1 V_{1a}^2}{R_1 + \sqrt{R_1 + (X_1 + X_2)^2}} \quad (1.23)$$

Από τις δύο τελευταίες εξισώσεις προκύπτει ότι η ολίσθηση στη μέγιστη ροπή είναι ευθέως ανάλογη προς την αντίσταση του δρομέα  $r_2$ , αλλά η τιμή της μέγιστης ροπής είναι ανεξάρτητη της  $r_2$ . Όταν η  $r_2$  αυξηθεί με εισαγωγή εξωτερικής αντιστάσεως στο δρομέα ενός κινητήρα με τυλιγμένο δρομέα, η μέγιστη εσωτερική ροπή είναι ως εκ τούτου ανεπηρέαστη, αλλά η ταχύτητα στην οποία αυτή λαμβάνει χώρα μπορεί να ελεγχθεί άμεσα.

Στα σχήματα αυτά  $U$  είναι η πολική τάση τροφοδοσίας του κινητήρα, ενός τριφασικού επαγωγικού κινητήρα.



*Εικ. 1.12 α) Τελικό ισοδύναμο κύκλωμα επαγωγικού κινητήρα. β) Απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα επαγωγικού κινητήρα.*

Από την Εικ. 1.12 προκύπτει ότι το ρεύμα του κινητήρα μπορεί να προσεγγιστεί από τη σχέση:

$$\bar{I} = \frac{\bar{U}/\sqrt{3}}{\left(r_1 + \frac{r'_2}{s}\right) + j\omega(L_1 + L'_2)} \quad (1.24)$$

με μέτρο

$$I = \frac{U/\sqrt{3}}{\left(r_1 + \frac{r'_2}{s}\right) + (\omega(L_1 + L'_2))^2} \quad (1.25)$$

Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι η τιμή της ισοδύναμης ωμικής αντίστασης του δρομέα εξαρτάται από την ταχύτητα περιστροφής και μεταβάλλεται μεταξύ των τιμών  $r^2$  και  $\infty$ , καθώς η ταχύτητα περιστροφής μεταβάλλεται από 0 έως τη σύγχρονη, αντίστοιχα.

## 2 ΕΛΕΓΧΟΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΕΠΑΓΩΓΗΣ

### 2.1 Χαρακτηριστικές ροπής – ταχύτητας.

Χρησιμοποιώντας τη σχέση  $P_L = T \omega_m$ , (όπου  $T$  η ροπή σε Nm και  $\omega_m$  η μηχανική γωνιακή ταχύτητα περιστροφής σε rad/s), προκύπτει η μηχανική ροπή που αναπτύσσει ο δρομέας εξαιτίας της  $P_m$ ,

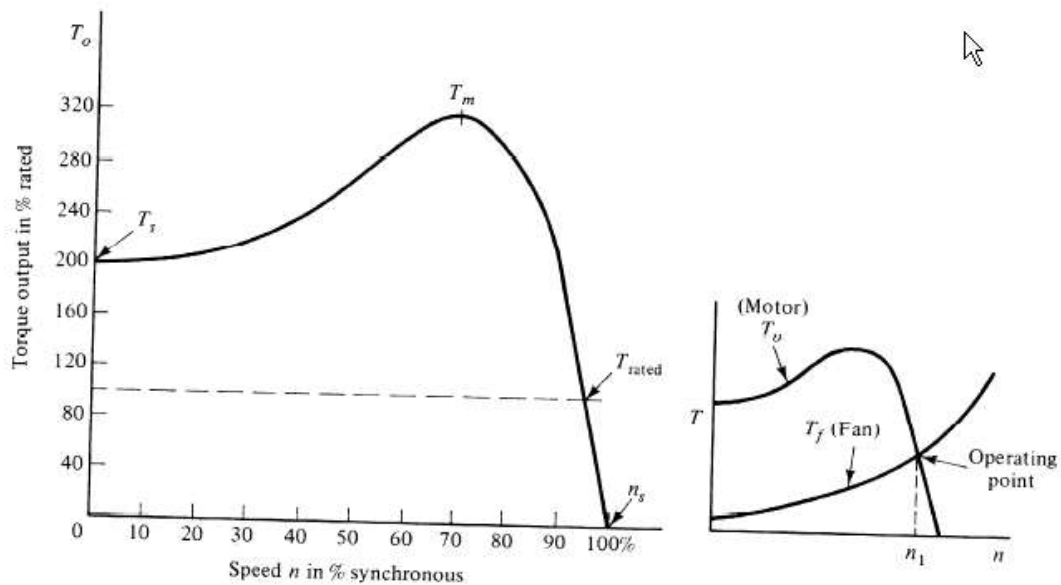
$$T_m = \frac{P_L}{\omega_m} = \frac{P_L}{(1-s)\omega} \quad (2.1)$$

και προκύπτει τελικά:

$$I = 3 \frac{r'_2}{\omega_s} \frac{(U/\sqrt{3})^2}{\left(r_1 + \frac{r'_2}{s}\right) + (X_1 + X'_2)^2} \quad (2.2)$$

Η μηχανική ροπή είναι συνεπώς συνάρτηση της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα. Η γραφική παράσταση της παραπάνω σχέσης οδηγεί σε μια καμπύλη, όπως αυτή της Εικ. 2.1, που είναι μία *χαρακτηριστική καμπύλη ροπής – ταχύτητας περιστροφής*. Στην καμπύλη αυτή η ροπή δίνεται σαν ποσοστό της ονομαστικής, ενώ, στον οριζόντιο άξονα, δίνεται η ταχύτητα σαν ποσοστό της σύγχρονης, αντιστοιχώντας σε τιμές της ολίσθησης  $s$  από 1 έως 0. Η καμπύλη αυτή δείχνει ότι κατά την εκκίνηση ο κινητήρας αναπτύσσει μία αρχική *ροπή εκκίνησης*  $T_S$ . Η ροπή αυτή είναι μεγαλύτερη από την ονομαστική και αυξάνει καθώς αυξάνεται η ταχύτητα μέχρι μία μέγιστη τιμή  $T_m$ . Στη συνέχεια, η ροπή μειώνεται ραγδαία και σχεδόν γραμμικά, έως τη σύγχρονη ταχύτητα  $n$ , όπου ο κινητήρας δεν παράγει ροπή.





**Εικ.2.1** Τυπική καμπύλη ροπής-ταχύτητας ασύγχρονου κινητήρα. β) Σημείο λειτουργίας ασύγχρονου κινητήρα

Η Εικ.2.1β δείχνει την υπέρθεση της χαρακτηριστικής αυτής με την αντίστοιχη καμπύλη  $T$ - $\eta$  του φορτίου. Κατά την εκκίνηση μόνο μικρή ροπή απαιτείται για την περιστροφή του κινητήρα, ικανή να υπερνικήσει τις μηχανικές τριβές. Καθώς ο κινητήρας επιταχύνεται, η ροπή που απαιτείται για την περιστροφή αυξάνει.

Σε κάθε χρονική στιγμή στο φορτίο εφαρμόζεται η διαφορά μεταξύ προσφερόμενης ροπής  $T_0$  και απαιτούμενης  $T_f$ . Καθώς η διαφορά αυτή είναι θετική κατά την εκκίνηση του κινητήρα, άρα επιταχύνεται μέχρι το σημείο τομής των 2 καμπυλών, που αποτελεί και το σημείο λειτουργίας για ταχύτητα περιστροφής  $n_1$ . Πέρα από το σημείο αυτό δεν είναι δυνατή η επιτάχυνση του κινητήρα. Μεταβολές της απαιτούμενης ροπής του φορτίου οδηγούν σε νέα σημεία λειτουργίας με μεγαλύτερη ή μικρότερη ταχύτητα περιστροφής.

Η περιοχή ευσταθούς λειτουργίας του επαγωγικού κινητήρα είναι η γραμμική περιοχή κοντά στη σύγχρονη ταχύτητα. Στην περιοχή αυτή ένας επαγωγικός κινητήρας λειτουργεί με σταθερή, σχεδόν, ταχύτητα περιστροφής, λίγο μικρότερη της σύγχρονης. Μεταβολές του φορτίου αντιμετωπίζονται με πολύ μικρές μεταβολές της ολίσθησης, άρα και της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα.

Από τις σχέσεις 2.1 και 2.2 προκύπτουν ορισμένες σημαντικές παρατηρήσεις. Η ένταση του ρεύματος του κινητήρα είναι ανάλογη του  $1/s$ . Καθώς η ολίσθηση μεταβάλλεται μεταξύ 1 και 0, για ακίνητο δρομέα και για τη σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής αντίστοιχα, η τιμή του ρεύματος μεταβάλλεται και μάλιστα

$$I = \frac{U/\sqrt{3}}{\sqrt{(r_1 + r'_2)^2 + ((L_1 + L'_2)\omega)^2}} \quad (2.3)$$

όταν  $s=1$ .

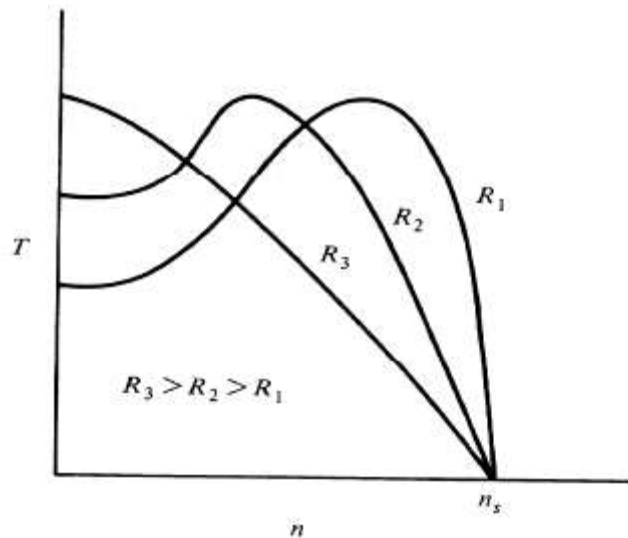
Καθώς η τιμή της  $r'_2$  είναι μικρή για τον περιορισμό των απωλειών, το ρεύμα της 2.3 δηλαδή το **ρεύμα εκκίνησης**, προκύπτει περίπου 5 έως 8 φορές μεγαλύτερο από αντίστοιχο της κανονικής λειτουργίας του κινητήρα στις ονομαστικές στροφές. Το μεγάλο ρεύμα εκκίνησης αποτελεί και ένα βασικό μειονέκτημα του επαγωγικού κινητήρα, καθώς προκαλεί ανεπιθύμητες βυθίσεις τάσης στα κυκλώματα τροφοδοσίας και απαιτεί ιδιαίτερα συστήματα εκκίνησης και προστασίας, που παρουσιάζονται αναλυτικά στη συνέχεια. Σε περιπτώσεις που ο κινητήρας βρεθεί στην κατάσταση εκκίνησης για μεγάλους χρόνους, όταν πχ το μηχανικό φορτίο είναι μεγαλύτερο από τη ροπή εκκίνησης μπλοκάροντας έτσι το δρομέα, υπάρχει κίνδυνος καταστροφής των τυλιγμάτων του στάτη από υπερθέρμανση, αν δεν έχει προβλεφθεί η εγκατάσταση κατάλληλων διατάξεων προστασίας (θερμικά).

Η μηχανική ροπή που αναπτύσσει ο κινητήρας, όπως προκύπτει από τη 2.2 είναι συνάρτηση του τετραγώνου της τάσης, άρα μεταβολές της τάσης τροφοδοσίας επηρεάζουν σημαντικά τη ροπή του κινητήρα. Ιδιαίτερα αν η τάση είναι μικρότερη της ονομαστικής, η ροπή εκκίνησης μπορεί να είναι ιδιαίτερα χαμηλή, έτσι ώστε ο κινητήρας να μην εκκινεί και να κινδυνεύει να καταστραφεί για τους λόγους που προαναφέρθηκαν.

Ένα άλλο σημαντικό χαρακτηριστικό των επαγωγικών κινητήρων είναι η μέγιστη ροπή που μπορεί να αναπτύξει ο κινητήρας, ποσότητα η οποία συχνά αποτελεί τη βάση του σχεδιασμού του κινητήρα. Η μέγιστη ροπή αυτή (ή ροπή ανατροπής) είναι συνήθως 200 – 300 % της ονομαστικής, επιτρέποντας έτσι τον κινητήρα να αντιμετωπίζει στιγμιαίες αιχμές του φορτίου. Η ροπή αυτή όμως δεν μπορεί να εφαρμόζεται συνεχώς, διότι τα υψηλά ρεύματα του στάτη θα οδηγήσουν στην καταστροφή των περιελίξεών του.

Από τη 2.2 προκύπτει επίσης ότι η ροπή του κινητήρα είναι ανάλογη της ωμικής αντίστασης του δρομέα. Κατά την εκκίνηση μάλιστα, για  $s = 1$ , η ροπή εκκίνησης αυξάνει, όσο αυξάνει η αντίσταση αυτή, χωρίς μάλιστα να επηρεάζεται η μέγιστη ροπή του κινητήρα. Η σχέση αυτή φαίνεται στην οικογένεια χαρακτηριστικών ροπής – ταχύτητας της Εικ.2.2. Από την 2.3 εξάλλου, προκύπτει ότι για μεγάλες τιμές της αντίστασης του δρομέα το ρεύμα εκκίνησης ελαττώνεται σημαντικά. Εκμετάλλευση των δύο αυτών χαρακτηριστικών

ιδιοτήτων γίνεται στους επαγωγικούς κινητήρες δακτυλιοφόρου δρομέα. Κατάλληλες εξωτερικές μεταβλητές ωμικές αντιστάσεις συνδέονται, μέσα από τους δακτύλιους, σε σειρά με τα τυλίγματα του δρομέα, αυξάνοντας σημαντικά την αντίστασή του. Μετά την εκκίνηση του κινητήρα οι αντιστάσεις αυτές σταδιακά μηδενίζονται, εξασφαλίζοντας με τον τρόπο αυτό, υψηλή ροπή με χαμηλό ρεύμα κατά την εκκίνηση, και ιδιαίτερα ομαλή καμπύλη ροπής ταχύτητας μέχρι του σημείου λειτουργίας.



**Εικ.2.2** Μεταβολή των καμπυλών  $T-n$  σαν συνάρτηση της αντίστασης του δρομέα

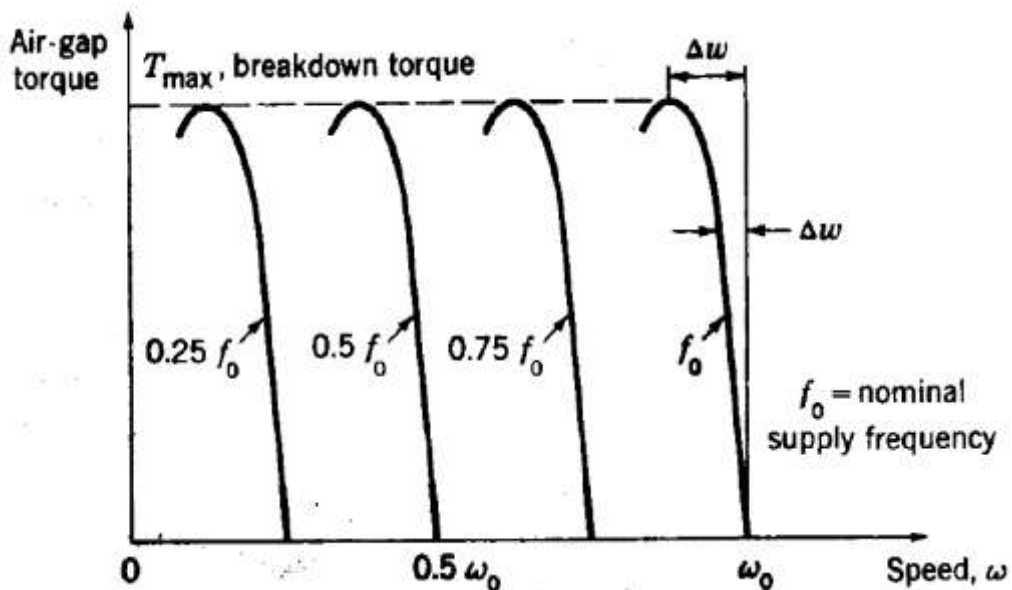
Ένα τελευταίο ιδιαίτερο χαρακτηριστικό των επαγωγικών κινητήρων είναι η υψηλή κατανάλωση αέργου ισχύος. Για λειτουργία με ονομαστικό φορτίο, επαγωγικοί κινητήρες μέσου μεγέθους, εμφανίζουν επαγωγικούς συντελεστές ισχύος ( $\cos\phi$ ) μεταξύ 0.7 και 0.9, οι οποίοι σε περίπτωση ελάττωσης του φορτίου τους, γίνονται 0.5 ή και λιγότερο. Με το πλήθος των επαγωγικών κινητήρων που είναι σε χρήση, το φαινόμενο αυτό επιβάλλει την εφαρμογή κατάλληλων μέτρων αντιστάθμισης (βελτίωσης του  $\cos\phi$ ).

## 2.2 Έλεγχος κινητήρα επαγωγής

Οι κινητήρες επαγωγής εξαιτίας της απλότητάς τους βρίσκουν πολλές εφαρμογές. Παρόλα αυτά έχουν το μειονέκτημα, σε αντίθεση με του dc κινητήρες, ότι η ταχύτητα με την οποία στρέφονται δεν μπορεί να μεταβάλλεται επαρκώς σε ένα μεγάλο εύρος τιμών, για διάφορες καταστάσεις λειτουργίας.

**Μέθοδος αλλαγής του αριθμού των πόλων:** Σε αυτή την μέθοδο τα τυλίγματα του στάτορα είναι σχεδιασμένα με τέτοιο τρόπο ώστε αλλάζοντας τις συνδέσεις στα διάφορα πηνία, οι άκρες των οποίων βρίσκονται έξω από τον κινητήρα, μπορούμε να αλλάζουμε τον αριθμό των πόλων με ένα ρυθμό 2:1. Αυτό έχει ως συνέπεια δύο διαφορετικές σύγχρονες ταχύτητες.

**Μέθοδος μεταβολής της συχνότητας:** Γνωρίζουμε πως η σύγχρονη ταχύτητα είναι ανάλογη της συχνότητας. Επομένως αν είναι δυνατόν να μεταβάλλουμε την συχνότητα τροφοδοσίας της τάσης, τότε αλλάζουμε και την σύγχρονη ταχύτητα του κινητήρα. Παράλληλα όμως, η μέγιστη αναπτυσσόμενη ροπή είναι αντιστρόφως ανάλογη της σύγχρονης ταχύτητας. Επομένως αν επιθυμούμε (σχεδόν) σταθερή μέγιστη ροπή, θα πρέπει να αυξάνουμε ταυτόχρονα και την τάση και την συχνότητα τροφοδοσίας για να πετύχουμε τελικά αύξηση των στροφών. Άρα τα όρια της περιοχής μεταβολής της τάσης ορίζουν τα περιθώρια ρύθμισης των στροφών του κινητήρα.



Εικ.2.3 Καμπύλες ροπής – ταχύτητας επαγωγικού κινητήρα με τροφοδότηση μεταβλητής συχνότητας

Από τις παραπάνω χαρακτηριστικές παρατηρούμε τα εξής:

- Η ροπή εκκίνησης αυξάνει ελαττούμενης της συχνότητας. Πράγματι κατά την εκκίνηση η συχνότητα του δρομέα είναι ίση με τη συχνότητα του στάτη. Όσο λοιπόν ελαττώνετε η συχνότητα ,τόσο περισσότερο υπερिशχύει ο ωμικός χαρακτήρας στο δρομέα ( $R_2 \gg X_2$ ), με αποτέλεσμα η γωνία των δυο πεδίων, διακένου και δρομέα ,να πλησιάζει τις  $90^\circ$ , με αποτέλεσμα την παραγωγή βέλτιστης ροπής.

$$T = K\Phi_\delta I_2 \sin \delta \quad (2.4)$$

- Η μέγιστη ροπή (η ροπή ανατροπής) διατηρείτε σταθερή. Από το ισοδύναμο κύκλωμα της ασύγχρονης μηχανής, κατά Thevenin, προκύπτει η εξής σχέση για την μέγιστη ροπή :

$$T_{max} = \frac{1}{\Omega_S} \frac{\frac{3}{2} V_{TH}^2}{R_{TH} + \sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_2)^2}} \quad (2.5)$$

Αν αμελήσουμε την πτώση τάσης του τυλίγματος τυμπάνου, τότε :

$$V_{TH} = V_1 \text{ και } Z_{TH} = 0$$

Επομένως,

$$T_{max} = \frac{1}{\omega_S} \frac{\frac{3}{2} V_1^2}{X_2}, \omega_S = \frac{2}{P} \omega = \frac{4\pi f_1}{P}$$

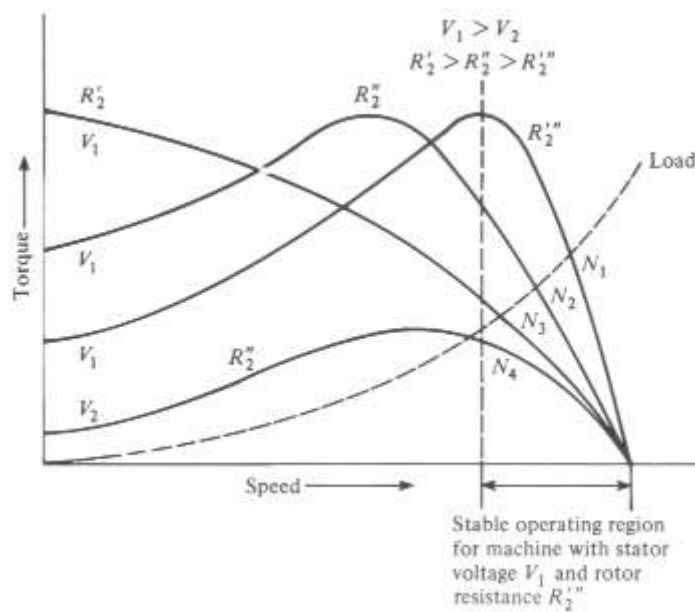
Άρα

$$T_{max} = \frac{P}{4\pi f_1} \frac{\frac{3}{2} V_1^2}{2\pi f_1 L_2} = \frac{3P}{16\pi^2 L_2} \left(\frac{V_1}{f_1}\right)^2 = K \left(\frac{E}{f_1}\right)^2$$

Παρατηρούμε ότι για  $V/f$  σταθερό, η μέγιστη ροπή παραμένει επίσης σταθερή. Άρα η ροπή και γενικότερα η συμπεριφορά του κινητήρα, εξαρτάται αποκλειστικά και μόνο από την συχνότητα του δρομέα, δηλαδή από την ολίσθηση  $S = f_2 / f_1$ . Για το λόγο αυτό οι χαρακτηριστικές ροπής-στροφών, για τις διάφορες συχνότητες του στάτη ,είναι μεταξύ τους όμοιες.

Η μέθοδος αυτή του ελέγχου των στροφών επιτρέπει ομαλή ρύθμιση της ταχύτητας περιστροφής σε μια αρκετά μεγάλη περιοχή στροφών. Η συχνότητα μπορεί να μεταβάλλεται από μερικά Hz μέχρι και εκατοντάδες Hz. Η ταυτόχρονη μεταβολή τάσης και συχνότητας επιτρέπει στον κινητήρα να διατηρεί πρακτικά σταθερή τη μέγιστη ροπή, μετακινώντας το σημείο λειτουργίας του πάνω σε μια οικογένεια καμπυλών, όπου παρουσιάζετε στο παραπάνω σχήμα.(Εικ.2.3)

**Μέθοδος μεταβολής της ολίσθησης:** Η μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής σε κινητήρα επαγωγής μπορεί να γίνει κατανοητή με την παρακάτω εικόνα



Εικ.2.4 έλεγχος στροφών με αλλαγή της ολίσθησης

Η διακεκομμένη καμπύλη δείχνει την χαρακτηριστική στροφών-ροπής του φορτίου. Η συνεχόμενες καμπύλες είναι οι χαρακτηριστικές στροφών-ροπής του κινητήρα για διάφορες συνθήκες λειτουργίας, όπως είναι διαφορετικές αντιστάσεις ρότορα  $R_2', R_2'', R_2'''$  και διαφορετικές τάσεις στάτορα  $V_1, V_2$ . Άρα, αφού έχουμε 4 διαφορετικές καμπύλες στροφών-ροπής, ο κινητήρας μπορεί να δουλέψει σε οποιαδήποτε από τις τέσσερις ταχύτητες  $N_1, N_2, N_3, N_4$ . Πρέπει να σημειώσουμε πως ευσταθές σημείο λειτουργίας είναι δεξιά του σημείου μέγιστης ροπής. Στην πράξη η ολίσθηση μπορεί να μεταβληθεί με μία από τις παρακάτω μεθόδους:

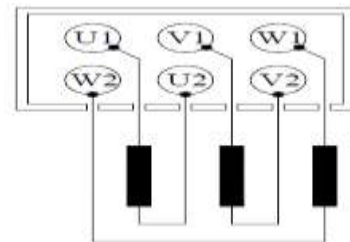
- Μεταβολή της τάσης του στάτορα: Αφού η αναπτυσσόμενη ηλεκτρομαγνητική ροπή είναι ανάλογη του τετραγώνου της τάσης, μπορούμε να έχουμε διαφορετικές καμπύλες στροφών-ροπής για διαφορετικές τάσεις τροφοδοσίας. Επομένως για δεδομένη αντίσταση ρότορα (π.χ.  $R_2$ ) έχουμε δύο διαφορετικές καμπύλες λειτουργίας, για δύο διαφορετικές τάσεις τροφοδοσίας, όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα. Επομένως ο κινητήρας μπορεί να σε N2 ή N4 στρόφους. Ο αριθμός των στροφών μπορεί να μεταβάλλεται συνεχώς, εάν υπάρχει δυνατότητα συνεχούς μεταβολής της τάσης τροφοδοσίας. Η μέθοδος αυτή βρίσκει εφαρμογή σε κινητήρες τύπου κλωβού και τυλίγματος δρομέα με δακτυλίους.
- Μεταβολή της αντίστασης ρότορα: Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται σε κινητήρες τυλιγμένου δρομέα με δακτυλίους. Η επίδραση της εισαγωγής εξωτερικών αντιστάσεων φαίνεται στο προηγούμενο σχήμα. Για το δεδομένο φορτίο υπάρχουν 3 ευσταθείς καταστάσεις λειτουργίας. Με συνεχή μεταβολή των εξωτερικών αντιστάσεων πετυχαίνουμε συνεχή μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα.

## 2.3 Εκκίνηση επαγωγικών κινητήρων και ρύθμιση στροφών

### 2.3.1 Εκκίνηση επαγωγικών κινητήρων.

Παρακάτω βλέπουμε το ακροκιβώτιο των τυλιγμάτων του στάτη. Είναι ένα μονωμένο κουτί στην εξωτερική πλευρά του κινητήρα από όπου ξεκινούν και καταλήγουν οι αρχές και τα τέλη των φάσεων. Οι αρχές των τυλιγμάτων δηλώνονται με τα γράμματα  $U_1$   $V_1$   $W_1$  και τα τέλη με τα γράμματα  $U_2$   $V_2$   $W_2$ .

- ▶ Το τύλιγμα  $U_1 - U_2$  είναι η 1<sup>η</sup> φάση
- ▶ Το τύλιγμα  $V_1 - V_2$  είναι η 2<sup>η</sup> φάση
- ▶ Το τύλιγμα  $W_1 - W_2$  είναι η 3<sup>η</sup> φάση



*Εικ.2.5 Σύνδεση κινητήρα*

Για να αρχίσει να περιστρέφεται ένας κινητήρας πρέπει να αναπτυχθεί σε αυτόν εσωτερική ροπή εκκίνησης μεγαλύτερη από το άθροισμα των ροπών αντιδράσεως δηλαδή τις ροπές τριβής και ωφέλιμου φορτίου. Το ρεύμα που χρειάζεται για να δημιουργηθεί η ροπή εκκίνησης είναι πολύ μεγαλύτερο από το ονομαστικό ρεύμα του κινητήρα. Το μεγάλο αυτό ρεύμα εκκίνησης προκαλεί μεγάλες απώλειες ισχύος για το μικρό χρόνο εκκίνησης και υπολογίσιμη πτώση τάσης. Το ρεύμα εκκίνησης για εκκίνηση με πλήρες φορτίο είναι  $I_{εκκ} = (4 \text{ εως } 8) \times I_{ον}$ .

Άρα κατά την εκκίνηση μας ενδιαφέρουν δυο μεγέθη:

- Η ροπή εκκίνησης
- Το ρεύμα εκκίνησης

Το ζητούμενο στην εκκίνηση είναι να έχουμε όσο το δυνατόν μικρότερο ρεύμα εκκίνησης και ροπή κατάλληλη για ομαλή εκκίνηση. Πολύ μεγάλη ροπή εκκίνησης σε σχέση με το φορτίο κατά την εκκίνηση θα μας έδινε απότομο ξεκίνημα. Ροπή εκκίνησης μικρότερη από από την ροπή φορτίου δεν θα επέτρεπε στον κινητήρα να αναπτύξει στροφές.

Η ροπή και το ρεύμα κατά την εκκίνηση του επαγωγικού κινητήρα δίνονται από τις σχέσεις 2.2 και 2.3 αντίστοιχα, οι οποίες παίρνουν τη μορφή:

$$T = 3 \frac{r'_2}{\omega} \frac{(U/\sqrt{3})^2}{(r_1 + r'_2)^2 + (x_1 + x'_2)^2} \quad (2.6)$$

$$I = \frac{U/\sqrt{3}}{\sqrt{(r_1 + r'_2)^2 + ((L_1 + L'_2) \omega)^2}} \quad (2.7)$$

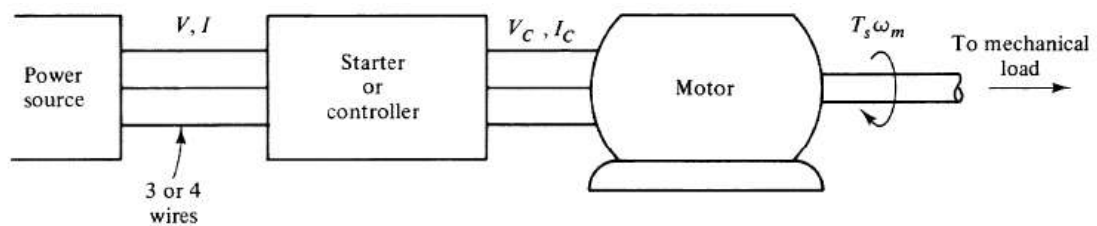
όταν  $s=1$ .

Η τιμή της  $r'_2$  σε  $\Omega$  είναι γενικά μικρή, συνεπώς η μεταβολή της ολίσθησης  $s$  από μερικά εκατοστά κατά την ονομαστική λειτουργία σε μονάδα κατά την εκκίνηση, έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της τιμής του ρεύματος. Το ρεύμα αυτό είναι γνωστό σαν ρεύμα εκκίνησης και μπορεί να φθάσει μέχρι και 4-8 φορές το ονομαστικό ρεύμα λειτουργίας. Τα μεγάλα ρεύματα εκκίνησης μπορούν να προκαλέσουν ανεπιθύμητα φαινόμενα, όπως ενεργοποίηση διακοπών, τήξη ασφαλειών, σημαντικές βυθίσεις τάσης και προβλήματα στη λειτουργία γειτονικών καταναλωτών.



Γενικά, μονοφασικοί κινητήρες μέχρι 1 HP ή 3φασικοί μέχρι 2 kW εκκινούν με απευθείας σύνδεση στο δίκτυο. Για μεγαλύτερους κινητήρες πρέπει να ληφθούν κατάλληλα μέτρα για τον περιορισμό του ρεύματος εκκίνησης. Ο περιορισμός του ρεύματος εκκίνησης μπορεί να γίνει με μια από τις παρακάτω μεθόδους .

Η πιο συνηθισμένη μέθοδος περιορισμού του ρεύματος εκκίνησης είναι το ξεκίνημα του κινητήρα με χαμηλότερη τάση στα πηνία του στάτη. Η διάταξη της Εικ.2.6 παρουσιάζει την διαγραμματική λειτουργία ενός τέτοιου “εκκινητή”. Μία διάταξη μείωσης της τάσης μπορεί να είναι ένας κατάλληλος αυτομετασχηματιστής με μεσαία λήψη. Ειδικότερα σε τριφασικά συστήματα έχει καθιερωθεί η χρήση ενός ειδικού αυτοματισμού γνωστού σαν **διακόπτης αστέρα – τριγώνου**. Με τον αυτοματισμό αυτό, ένας 3φασικός κινητήρας εκκινεί με τα τυλίγματα του στάτη συνδεδεμένα σε αστέρα υπό φασική τάση, άρα μικρότερη κατά 3φορές της ονομαστικής και μόλις φτάσει κοντά στην ονομαστική ταχύτητα περιστροφής, τα τυλίγματα συνδέονται σε τρίγωνο, λειτουργώντας πλέον με πολική τάση. Η μεταγωγή αυτή ελέγχεται με χρονοδιακόπτη .

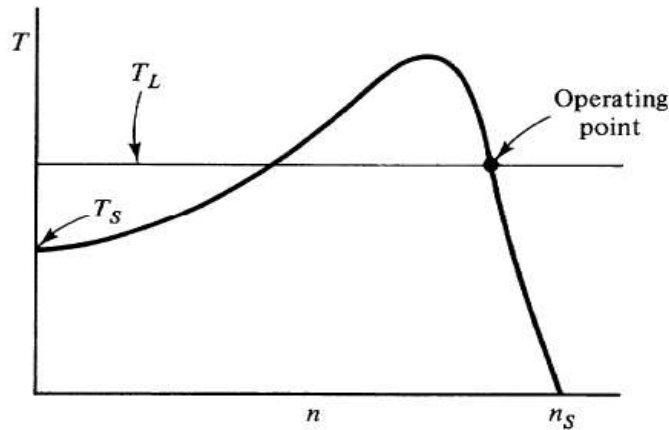


**Εικ.2.6** Λειτουργικό διάγραμμα συστήματος εκκίνησης επαγωγικού κινητήρα

Ο εκκινητής μπορεί να είναι και κάποια ηλεκτρονική διάταξη περιορισμού της τάσης. Τέτοιες διατάξεις υλοποιούνται με χρήση thyristors και μπορούν να τροφοδοτήσουν τον κινητήρα με μεταβλητή τάση που ξεκινά από κάποια χαμηλή τιμή και ακολουθώντας κάποια προγραμματισμένη διαδικασία μεταβολής φτάνει στην ονομαστική τιμή, όταν ο κινητήρας έχει αποκτήσει τις ονομαστικές στροφές. Οι διατάξεις αυτές, γνωστές σαν **ηλεκτρονικοί εκκινητές ή soft starters**, γίνονται ολοένα και πιο δημοφιλείς καθώς οι τεχνολογικές εξελίξεις έχουν συμβάλει στη σημαντική μείωση της τιμής τους.

Ένα σημαντικό πρόβλημα, που σχετίζεται με τους εκκινητές που μειώνουν την τάση, είναι η μείωση της ροπής εκκίνησης. Η ροπή που παράγεται από έναν επαγωγικό κινητήρα είναι, για κάθε ταχύτητα, συνάρτηση του τετραγώνου της τάσης. Έτσι, τροφοδότηση του κινητήρα με τάση ίση με το μισό της ονομαστικής, οδηγεί σε μείωση της ροπής εκκίνησης κατά  $\frac{3}{4}$ .

Η Εικ.2.6 δείχνει ένα φορτίο με σταθερή οριζόντια καμπύλη  $T-n$ , όπως πχ. ένας μεταφορικός μάντας. Από την υπέρθεση των 2 καμπυλών, φαίνεται ότι ενώ ο κινητήρας δεν έχει πρόβλημα να κινήσει το φορτίο, δεν διαθέτει την απαιτούμενη ροπή εκκίνησης του φορτίου από την ηρεμία.



Εικ.2.7 Προβλήματα με ανάπτυξη ικανοποιητικής ροπής εκκίνησης επαγωγικού κινητήρα.

Η εφαρμογή εκκινήτων που υποβιβάζουν την τάση τροφοδοσίας κατά την εκκίνηση μπορεί να επιδεινώσει μία τέτοια κατάσταση, υποβιβάζοντας σημαντικά την καμπύλη  $T-n$  του κινητήρα κατά την εκκίνηση. Στην περίπτωση αυτή, ή το φορτίο θα συμπλεχθεί με τον κινητήρα όταν αυτός αποκτήσει κατάλληλη ταχύτητα περιστροφής με χρήση κάποιας ειδικής διάταξης, ή πρέπει να χρησιμοποιηθεί άλλος τύπος κινητήρα με διαφορετική καμπύλη ροπής – ταχύτητας.

Μια άλλη μέθοδος για τη μείωση του ρεύματος εκκίνησης είναι η μεταβολή της τιμής της  $r_2$ . Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται μόνο στην περίπτωση επαγωγικών κινητήρων με δακτυλιοφόρο δρομέα. Κατάλληλες μεταβλητές ωμικές αντιστάσεις ισχύος συνδέονται εξωτερικά σε σειρά με τα τυλίγματα του δρομέα, προσφέροντας έτσι τη δυνατότητα μεταβολής της τιμής της  $r_2$ . Η εικόνα 2.2 δείχνει τη μεταβολή των καμπυλών  $T-n$  για μεταβλητή  $r_2$ . Το ιδιαίτερο πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι αφήνει αμετάβλητη τη μέγιστη ροπή και προσφέρει υψηλές ροπές εκκίνησης με ρεύματα εκκίνησης μικρότερα του ονομαστικού. Το μειονέκτημά της είναι ότι εφαρμόζεται μόνο σε κινητήρες με δακτυλιοφόρο δρομέα και ότι οι απαιτούμενες συστοιχίες αντιστάσεων είναι ογκώδεις και δαπανηρές.

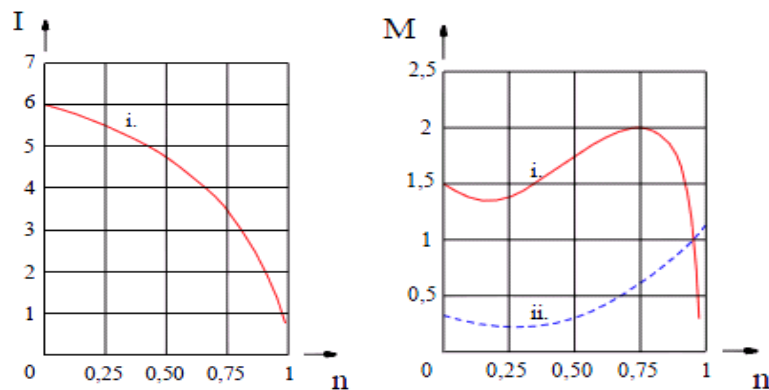
Όπως αναφέρθηκε κι παραπάνω οι τροποί εκκίνησης ενός ασύγχρονου επαγωγικού κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα:

- Απευθείας εκκίνηση σε πλήρη τάση δικτύου
- Εκκίνηση με αστέρα-τρίγωνο
- Εκκίνηση με αντιστάσεις στο τύλιγμα του στάτη
- Εκκίνηση με αυτομετασχηματιστή

### 2.3.1.1 .Απευθείας εκκίνηση τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα

Κατά την μέθοδο αυτή ο στάτης συνδέεται απευθείας στο δίκτυο. Όταν θέσουμε σε λειτουργία τον κινητήρα αυτός αντλεί στιγμιαία ένα μεγάλο ρεύμα εκκίνησης ( $I_{εκ}$ ), το οποίο είναι 4 ή 8 φορές μεγαλύτερο από το ονομαστικό ρεύμα ( $I_{ov}$ ), δηλαδή  $I_{εκ} = (4 - 8) \times I_{ov}$ . Η μέθοδος είναι ιδανική από τη στιγμή που το ρεύμα αυτό δεν μας δημιουργεί προβλήματα και η αρχική ροπή εκκίνησης είναι επαρκής για να ξεκινήσει τον κινητήρα. Παρακάτω φαίνονται οι χαρακτηριστικές του ρεύματος και της ροπής του κινητήρα συνάρτηση της ταχύτητας. Έτσι στην  $I=f(n)$  βλέπουμε (i)

Το ρεύμα του κινητήρα και στην  $M= f(n)$  βλέπουμε την ροπή του κινητήρα (i) και τη ροπή του φορτίου του κινητήρα (ii).



Εικ.2.8 Χαρακτηριστική ροπής και ρεύματος συνάρτηση της ταχύτητας .

Συνήθως, η ροπή κατά την διάρκεια της εκκίνησης είναι μεγαλύτερη από την ονομαστική ροπή και γίνεται ακόμα μεγαλύτερη όταν ο κινητήρας φτάσει περίπου στο 80% της ταχύτητας του ενώ ταυτόχρονα το ρεύμα εκκίνησης έχει μειωθεί αισθητά. Αυτή η μέθοδος προϋποθέτει

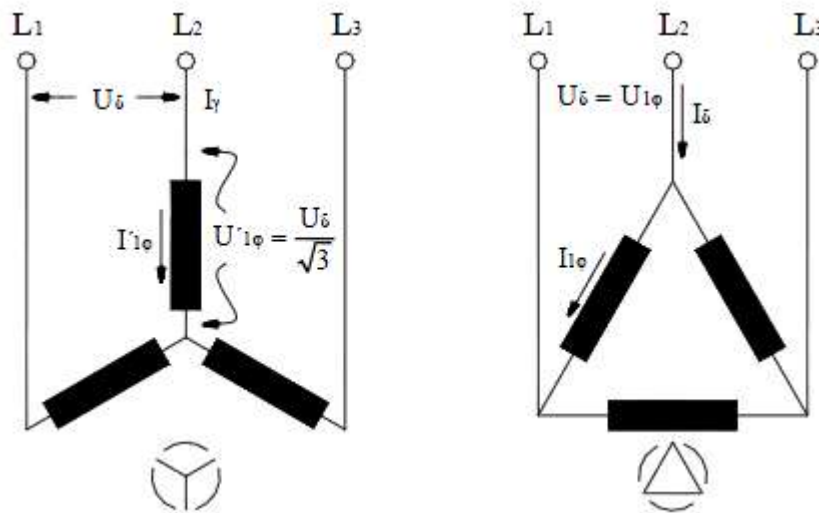
η εκκίνηση των μηχανών να γίνεται σε πλήρες φορτίο και χρησιμοποιείτε για μηχανές μικρής κι μεγάλης ισχύος.

### 2.3.1.2 Εκκίνηση κινητήρα με Αστέρα (Y) – Τρίγωνο (Δ)

Στην κανονική λειτουργία του κινητήρα τα πηνία του συνδέονται σε τρίγωνο οπότε και η φασική τάση  $U_1$  του ισοδύναμου κυκλώματος είναι ίση με την πολική τάση του δικτύου,

$$U_{1\Delta} = U_{1\phi} = U_1 = U_\delta .$$

Στην εκκίνηση όμως έχουμε τάση  $U'_{1\phi} = U_{1Y} = \frac{U_\Delta}{\sqrt{3}}$ .



Εικ.2.9 .Σύνδεση αστέρα-Τρίγωνο

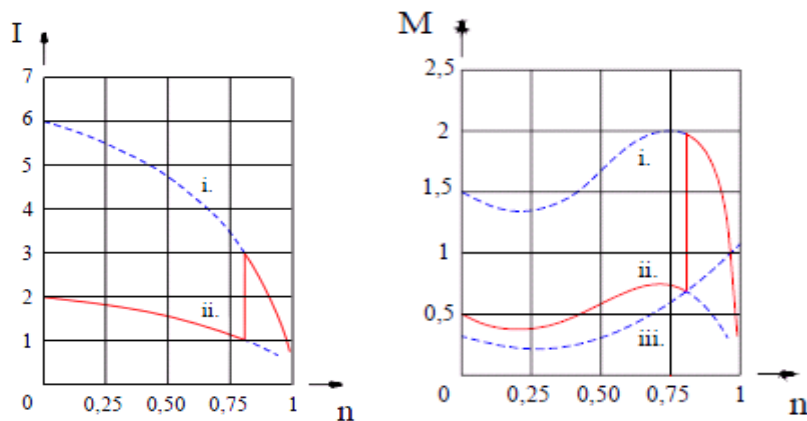
Επίσης έχουμε,  $\frac{U'_{1\phi}}{U_{1\phi}} = \alpha$ , όπου  $\alpha$  ο συντελεστής υποβιβασμού της τάσης.

$$\frac{U'_{1\phi}}{U_{1\phi}} = \alpha = \frac{U_\delta}{\frac{U_\delta}{\sqrt{3}}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \text{ και για } I'_{1\epsilon\kappa\kappa} = \alpha I_{\epsilon\kappa\kappa}, I_{1\epsilon\kappa\gamma} = \alpha I_{1\epsilon\kappa\kappa} = \frac{1}{\sqrt{3}} I_{1\epsilon\kappa\phi}$$

$$I_{1\epsilon\kappa\gamma} = \frac{1}{3} I_{1\epsilon\kappa\phi}$$

Η ροπή είναι  $M'_{1\epsilon\kappa} = \alpha^2 M_{\epsilon\kappa}$ , δηλαδή ανάλογη του τετραγώνου της τάσεως και ίση με το 1/3 της ροπής εκκίνησης σε τρίγωνο, δηλαδή  $M_{\epsilon\kappa\gamma} = \frac{1}{3} M_{\epsilon\kappa\Delta}$ . αυτο φαίνεται και από τις χαρακτηριστικές  $I=f(n)$  και  $M=f(n)$  που ακολουθούν παρακάτω. Με άλλα λόγια αν το ρεύμα

εκκίνησης με απευθείας εκκίνηση είναι εξαπλάσιο του ονομαστικού ρεύματος, στην εκκίνηση με αστέρα είναι διπλάσιο. Στις παρακάτω εικόνες φαίνονται οι χαρακτηριστικές του ρεύματος και της ροπής του κινητήρα συνάρτηση της ταχύτητας. Έτσι στην  $I=f(n)$  βλέπουμε (i) το ρεύμα του κινητήρα σε απευθείας  $\Delta$  και (ii) το ρεύμα του κινητήρα σε  $Y$  και στην  $M=f(n)$  βλέπουμε την ροπή του κινητήρα (i) σε απευθείας  $\Delta$  και τη ροπή του φορτίου του κινητήρα (ii)



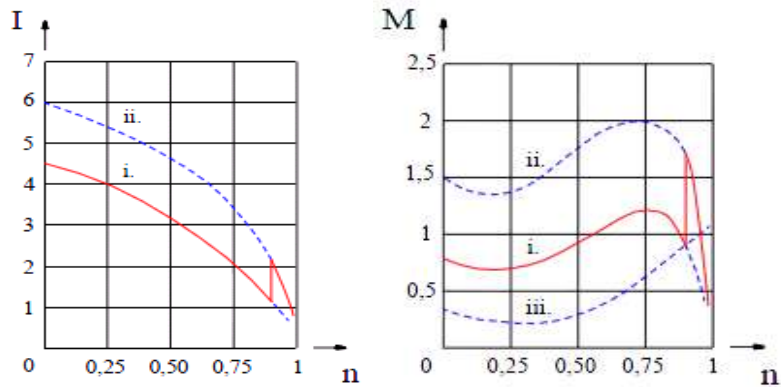
*Εικ.2.10 . Χαρακτηριστική ροπής και ρεύματος συνάρτηση της ταχύτητας*

Για να εφαρμόσουμε την μέθοδο αυτή θα πρέπει ο κινητήρας να είναι κατασκευασμένος για σύνδεση των τυλιγμάτων του σε τρίγωνο και η ονομαστική του τάση να συμπίπτει με την πολική τάση του δικτύου (στοιχεία που αναγράφονται στην πινακίδα της μηχανής). Έτσι για το δίκτυο της ΔΕΗ 380/220 Volts θα πρέπει η πινακίδα της μηχανής να γράφει 380 Volts  $\Delta$  ή 380/660 Volts  $\Delta/Y$ . Αν η πινακίδα γράφει 220/380 Volts  $\Delta/Y$  ο κινητήρας δεν μπορεί να εκκινήσει με αυτή τη μέθοδο.

### **2.3.1.3 Εκκίνηση τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα με αντιστάσεις στο στάτη**

Σε αυτή τη μέθοδο εκκίνησης προϋποθέτουμε σε σειρά με τα τυλίγματα του στάτη συμμετρικές αντιστάσεις για να περιορίσουμε το ρεύμα εκκίνησης. Παρακάτω φαίνονται οι χαρακτηριστικές του ρεύματος και της ροπής του κινητήρα συνάρτηση της ταχύτητας. Έτσι στην  $I=f(n)$  βλέπουμε ( i ) το ρεύμα του κινητήρα με αντίσταση και (ii) το ρεύμα του

κινητήρα χωρίς αντίσταση(απευθείας) και στην  $M= f(n)$  βλέπουμε την ροπή του κινητήρα (i) με αντίσταση, την ροπή του κινητήρα (ii) χωρίς αντίσταση ,τη ροπή του φορτίου του κινητήρα (iii) .

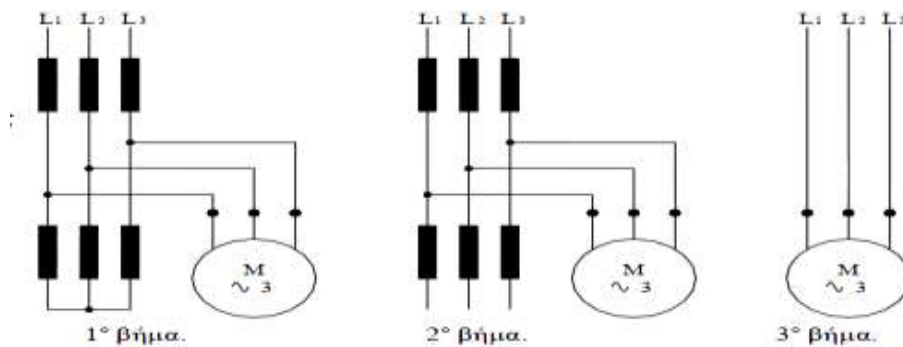


*Εικ.2.11 . Χαρακτηριστική ροπής και ρεύματος συνάρτηση της ταχύτητας*

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για μηχανές φορτίου με αυξανόμενη ροπή ή ροπή γύρω στο μισό της ονομαστικής ροπής που περιέχουν μεγάλη αδράνειας μηχανές.

### 2.3.1.4 Εκκίνηση τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα με αυτομετασχηματιστή

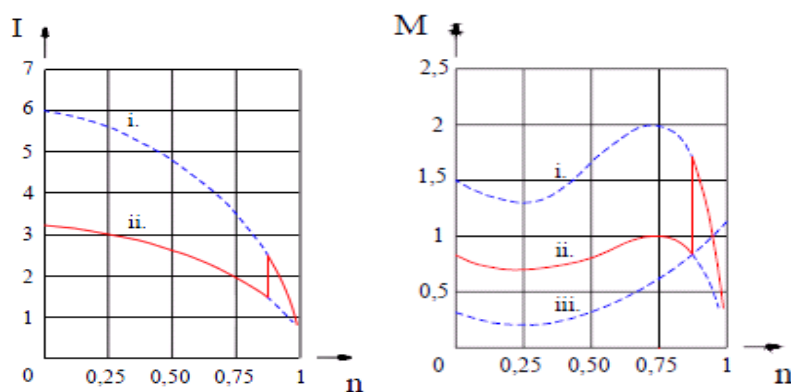
Ο κινητήρας τροφοδοτείται με μεταβαλλόμενη τάση μέσω ενός αυτομετασχηματιστή ο οποίος βγαίνει εκτός κυκλώματος όταν η εκκίνηση γίνει πλήρης .Η εκκίνηση αποτελείται από τα παρακάτω τρία βήματα.



*Εικ.2.12 Διαδικασία εκκίνησης*

Κατά την διάρκεια του πρώτου βήματος(σύνδεση αστέρα) η ροπή μειώνετε ανάλογα με το τετράγωνο της τάσης και το ρεύμα γραμμής σε όμοια αναλογία αλλά ελαφρως υψηλότερα λόγω του ρεύματος μαγνητίσεως του αυτομετασχηματιστή ενώ το ρεύμα σε κάθε τύλιγμα μειώνετε μόνο σε σχέση με το λόγο της τάσεως.

Στο δεύτερο βήμα εκκίνησης για να αποφύγουμε κάποιο ενδεχόμενο μεγάλη πτώση της επαγωγικής αντίστασης των τυλιγμάτων του αυτομετασχηματιστή, θα πρέπει η επαγωγική αντίσταση να είναι μικρή και προσαρμοσμένη στον κινητήρα .Για να πετύχουμε την κατάλληλη τιμή της επαγωγικής αντίστασης είναι αναγκαίο να βάλουμε έναν αυτομετασχηματιστή του οποίου ο μαγνητικός πυρήνας να έχει κενό αέρα .Το δεύτερο βήμα έχει σαν προορισμό να μετριάσει τις μεταβατικές καταστάσεις που είναι μικρές σε διάρκεια. Έτσι στην  $I=f(n)$  βλέπουμε ( i ) το ρεύμα του κινητήρα σε απευθείας σύνδεση και (ii) το ρεύμα του κινητήρα με αυτομετασχηματιστή και στην  $M= f(n)$  βλέπουμε την ροπή του κινητήρα (i) σε απευθείας σύνδεση, την ροπή του κινητήρα (ii) με αυτομετασχηματιστή ,τη ροπή του φορτίου του κινητήρα (iii) .



**Εικ.2.13** . Χαρακτηριστική ροπής και ρεύματος συνάρτηση της ταχύτητας

Αυτή η μέθοδος εκκίνησης χρησιμοποιείται για μεγάλης ισχύος κινητήρες ,γιατί συγκρινόμενη με την εκκίνηση με αντιστάσεις αυτή προσφέρει μια μεγάλη ροπή εκκίνησης και ένα χαμηλό ρεύμα κορυφής ενώ παράλληλα προσθέτοντας μερικές διαθέσιμες λήψεις στον αυτομετασχηματιστή η τάση εκκίνησης μπορεί να ρυθμιστεί σε σχέση με το φορτίο.

### 2.3.2 Ρύθμιση στροφών επαγωγικών κινητήρων.

Από την καμπύλη ροπής-ταχύτητας της Εικ 2.1 και για λειτουργία στην ευσταθή γραμμική περιοχή, ο επαγωγικός κινητήρας λειτουργεί με μικρή ολίσθηση που αντιστοιχεί στην ονομαστική ροπή του φορτίου. Μεταβολές του φορτίου οδηγούν σε μετακινήσεις του σημείου λειτουργίας, άρα και σε μεταβολές της ταχύτητας περιστροφής, οι οποίες όμως είναι πολύ μικρές. Άρα ο επαγωγικός κινητήρας μπορεί να θεωρηθεί ότι λειτουργεί με σταθερή, πρακτικά, ταχύτητα περιστροφής.

Σε πολλές όμως περιπτώσεις απαιτείται λειτουργία του κινητήρα με μεταβλητές στροφές, είτε ακολουθώντας κάποιο μεταβαλλόμενο πρόγραμμα παραγωγικής διαδικασίας, είτε γιατί το φορτίο απαιτεί μεταβλητές στροφές. Στη συνέχεια εξετάζονται οι τρόποι εκείνοι με τους οποίους ο επαγωγικός κινητήρας μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές όπου απαιτούνται μεταβαλλόμενες ταχύτητες περιστροφής.

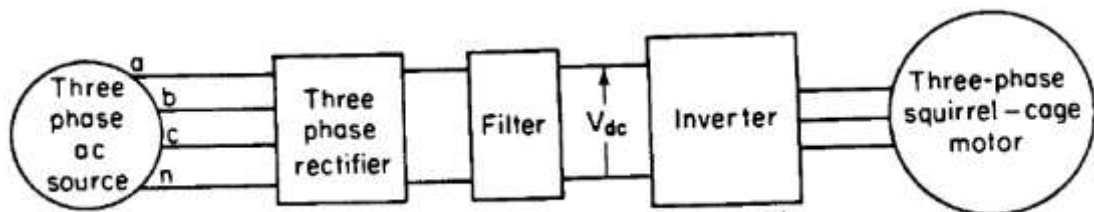
$$\omega_m = \omega(1 - \varsigma) \quad (2.8)$$

συνεπώς για την μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα πρέπει να αλλάξει είτε η σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής, είτε η ολίσθηση. (1.2).

Η σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής, όπως προκύπτει από την 1.1, εξαρτάται από το πλήθος των ζευγών των πόλων του κινητήρα και από τη συχνότητα της τάσης τροφοδοσίας του κινητήρα. Η πρώτη μέθοδος ρύθμισης των στροφών του επαγωγικού κινητήρα στηρίζεται στην αλλαγή του πλήθους των ζευγών των πόλων. Οι περιελίξεις του στάτη μπορούν να κατασκευαστούν σαν ζεύγη, με τέτοιο τρόπο, ώστε με την ενεργοποίηση ενός διακόπτη, ο κινητήρας να έχει 1 ή 2 ζεύγη πόλων και συνεπώς η σύγχρονη ταχύτητα να υποδιπλασιάζεται. Έτσι η ταχύτητα ενός τέτοιου κινητήρα στα 50Hz μπορεί να είναι στις περιοχές των 3000 ή 1500 rpm αντίστοιχα. Οι κινητήρες αυτοί χαρακτηρίζονται σαν κινητήρες 2 ταχυτήτων και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε 2 καθορισμένες περιοχές στροφών με σχέση 1:2 χωρίς να είναι δυνατή η ρύθμιση σε ενδιάμεσες τιμές. Η επόμενη μέθοδος ρύθμισης στροφών, με επέμβαση στην σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής, στηρίζεται στη μεταβολή της συχνότητας τροφοδοσίας και συνεπώς στην αντίστοιχη μεταβολή της σύγχρονης ταχύτητας. Το τριφασικό σύστημα τάσεων των 50Hz οδηγείται σε μια ειδική **ανορθωτική διάταξη (rectifier)** όπου με χρήση thyristors μετατρέπεται σε συνεχή (dc) τάση. Η συνεχής αυτή τάση οδηγείται στη συνέχεια σε μια παρόμοια ηλεκτρονική διάταξη με



thyristors, η οποία όμως λειτουργεί αντίστροφα, δηλαδή μετατρέπει τη συνεχή τάση σε τριφασική συμμετρική. Η συσκευή αυτή, εξαιτίας της λειτουργίας της, ονομάζεται **αντιστροφέας (inverter)**. Με κατάλληλο έλεγχο του χρονισμού της έναυσης των thyristors, δηλαδή της γωνία έναυσης, είναι δυνατή η ρύθμιση τόσο της συχνότητας του παραγόμενου τριφασικού συστήματος τάσεων, όσο και του πλάτους της τάσης. Η εφαρμογή μιας τέτοιας διάταξης για την μεταβολή της συχνότητας τροφοδοσίας, δηλαδή των στροφών, ενός επαγωγικού κινητήρα φαίνεται στο Εικ. 2.14. Η διάταξη αυτή επιτρέπει, θεωρητικά, απεριόριστη μεταβολή της συχνότητας τροφοδοσίας. Η μαγνητική ροή ανά πόλο είναι όμως ανάλογη του λόγου  $U/f$ .



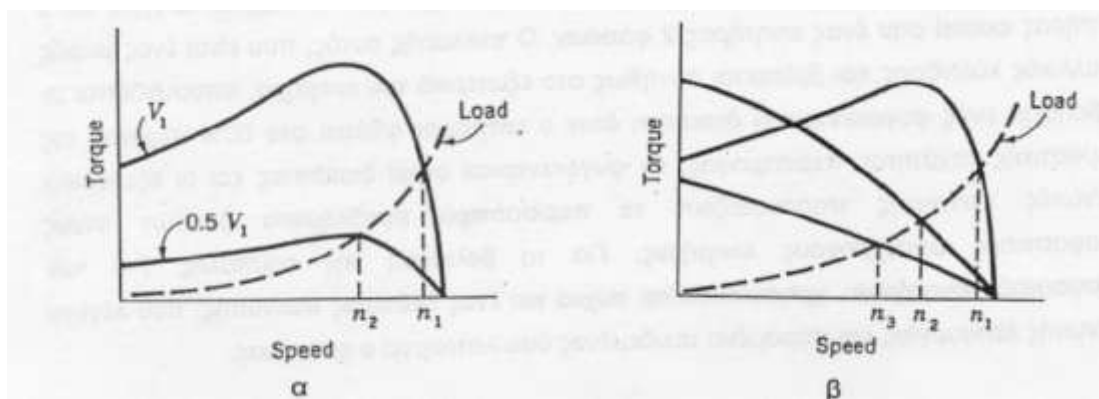
*Εικ. 2.14. Λειτουργικό διάγραμμα συστήματος ηλεκτρονικού ελέγχου στροφών επαγωγικού κινητήρα*

Τα συστήματα τροφοδότησης με μεταβλητή συχνότητα μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για την εκκίνηση επαγωγικών κινητήρων. Στην περίπτωση αυτή ο κινητήρας εκκινεί συνήθως με χαμηλή συχνότητα και τάση. Το ηλεκτρονικό σύστημα ελέγχου επιτρέπει τον συνεχή έλεγχο του ρεύματος και της ροπής, εξασφαλίζοντας με τον τρόπο αυτό ιδιαίτερα ομαλές εκκινήσεις.

Οι τεχνικές που προαναφέρθηκαν ελέγχουν την ταχύτητα περιστροφής με μεταβολή του πλήθους των πόλων και της σύγχρονης ταχύτητας.

Όπως φαίνεται, όμως, από την τυπική καμπύλη ροπής – ταχύτητας του Εικ. 2.1, εφόσον η χαρακτηριστική ροπής του φορτίου παραμένει σταθερή, κάθε μεταβολή της καμπύλης T-n του κινητήρα οδηγεί σε νέα σημεία λειτουργίας. Αυτά αντιστοιχούν σε διαφορετικές τιμές ολίσθησης, άρα και σε διαφορετικές ταχύτητες περιστροφής. Η μορφή της καμπύλης T-n του επαγωγικού κινητήρα εξαρτάται από τη τάση λειτουργίας και από την αντίσταση του δρομέα. Επιδρώντας συνεπώς στα μεγέθη αυτά είναι δυνατή η μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα.

Η ροπή που αναπτύσσει ο επαγωγικός κινητήρας μεταβάλλεται σαν συνάρτηση του τετραγώνου της τάσης. Μεταβολές συνεπώς της τάσης τροφοδοσίας, οδηγούν σε δραστικές αλλαγές της καμπύλης  $T-n$  του κινητήρα, όπως φαίνεται στο Εικ. 2.1α. Αν η καμπύλη του φορτίου δίνεται από τη διακεκομμένη γραμμή, φαίνεται ότι με την αλλαγή της τάσης του κινητήρα, η ταχύτητά του ελαττώνεται από  $n_1$  σε  $n_2$ . Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για τον έλεγχο στροφών σε μικρής ισχύος κινητήρες, όπως πχ σε ανεμιστήρες.



**Εικ. 2.15.** Ρύθμιση ταχύτητας επαγωγικού κινητήρα με μεταβολή της ολίσθησης. α) Μεταβάλλοντας την τάση τροφοδοσίας, β) μεταβάλλοντας την αντίσταση του δρομέα.

### **3 ΕΛΕΓΧΟΣ ΡΟΠΗΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΕΠΑΓΩΓΗΣ**

#### **3.1 Επιδερμικό φαινόμενο και επίδρασή του στις ασύγχρονες μηχανές**

Ένα φαινόμενο που επιδρά στη λειτουργία των ασύγχρονων μηχανών και κυρίως στην εκκίνηση είναι το επιδερμικό φαινόμενο. Η εναλλασσόμενη μαγνητική ροή που δημιουργείται από το εναλλασσόμενο ρεύμα που διαρρέει μια αγωγίμη μπάρα του δρομέα, αλληλεπιδρά με την ίδια τη μπάρα, παράγοντας ένα αντίστροφο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, το οποίο αντιστέκεται στην διέλευση του ρεύματος. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το ρεύμα να μην μπορεί να εκμεταλλευτεί όλη την ωφέλιμη διατομή του αγωγού για την διέλευσή του, αλλά ένα μικρό μόνο μέρος στην εξωτερική επιφάνεια. Η προκύπτουσα ανομοιομορφη πυκνότητα ρεύματος έχει ως αποτέλεσμα την μεγάλη αύξηση της πραγματικής αντίστασης της μπάρας και κατά συνέπεια των απωλειών. Η παρουσία των αρμονικών ρεύματος επιδεινώνει το επιδερμικό φαινόμενο. Το επιδερμικό φαινόμενο είναι η τάση ενός εναλλακτικού ηλεκτρικού ρεύματος (AC) να διανεμηθεί μέσα σε έναν αγωγό με τέτοιο τρόπο, ώστε η πυκνότητα ρεύματος κοντά στην επιφάνεια του αγωγού να είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη στον πυρήνα του. Το επιδερμικό φαινόμενο προκαλεί αύξηση στην αντίσταση του αγωγού καθώς η συχνότητα του ρεύματος αυξάνεται. Το επιδερμικό φαινόμενο οφείλεται στα ρεύματα αυτεπαγωγής που εμφανίζονται από το ρεύμα (AC). Η πυκνότητα ρεύματος  $J$ , σε έναν απείρου πάχους επίπεδο αγωγό, ελαττώνεται εκθετικά σε βάθος  $d$  από την επιφάνεια, σύμφωνα με τον τύπο:

$$J = J_s e^{-d/\delta} \quad (3.1)$$

όπου  $\delta$  είναι μια σταθερά που καλείται επιδερμικό βάθος (skin depth). Ορίζεται ως το βάθος κάτω από την επιφάνεια του αγωγού, στο οποίο η πυκνότητα ρεύματος εξασθενεί στο  $1/e$  (περίπου 0,37) της πυκνότητας ρεύματος στην επιφάνεια  $J_s$ . Μπορεί να υπολογιστεί με τη βοήθεια του ακόλουθου τύπου:

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}} \quad (3.2)$$

όπου

$\rho$  : η ειδική αντίσταση του αγωγού

$\omega$  : η γωνιακή συχνότητα του ρεύματος  $= 2\pi f$

$\mu$  : η απόλυτη μαγνητική διαπερατότητα του αγωγού  $= \mu_0 \cdot \mu_r$  ,

όπου  $\mu_0$  η μαγνητική διαπερατότητα του κενού ( $4 \pi \cdot 10^{-7} \text{ N/A}^2$ ) και

$\mu_r$  η σχετική διαπερατότητα του αγωγού

Στις ασύγχρονες μηχανές κλωβού, το επιδερμικό φαινόμενο στις μπάρες παίζει σημαντικό ρόλο. Αυτό συμβαίνει γιατί, το ρεύμα μιας μπάρας συνοδεύεται από ένα μαγνητικό πεδίο σκέδασης, το οποίο διαρρέει την αυλάκωση όπου βρίσκεται η μπάρα και δημιουργεί μια τάση εξ επαγωγής σε αυτήν. Το αποτέλεσμα είναι η άνιση κατανομή του ρεύματος σε μια διατομή του αγωγού και μάλιστα κατά τρόπο τέτοιο ώστε η πυκνότητα ρεύματος να μεγαλώνει όσο πλησιάζουμε προς το διάκενο. Η εκτόπιση αυτή του ρεύματος γίνεται πιο ισχυρή όσο μεγαλώνει η συχνότητα του δρομέα, δηλαδή όσο μεγαλώνει η ολίσθηση. Το φαινόμενο αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της ωμικής αντίστασης του δρομέα, ενώ αντίθετα η επαγωγιμότητα σκεδάσεως μιας αυλάκωσης μειώνεται. Ο λόγος της αντίστασης  $R$  μιας μπάρας όταν το ρεύμα έχει μια συχνότητα  $f_r$ , προς την αντίσταση  $R_0$  που παρουσιάζεται στο συνεχές ρεύμα, δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{R}{R_0} = Y \frac{\sinh 2Y + \sin 2Y}{\cosh 2Y - \cos 2Y} \quad (3.3)$$

$$\text{όπου } Y = 2\pi \sqrt{\frac{b_M f_r}{\rho 10^5 b_A}} h_M.$$

Τα διάφορα σύμβολα σημαίνουν:

$\rho$  = ειδική αντίσταση σε  $\Omega \text{mm}^2 / \text{m}$

$b_M$  = πλάτος μιας μπάρας

$b_A$  = πλάτος μιας αυλάκωσης

$h_M$  = ύψος μιας μπάρας σε cm

$f_r$  = συχνότητα των ρευμάτων του δρομέα σε Hz

Η αύξηση της αντίστασης αυξανομένης της ολίσθησης επιφέρει τα ίδια αποτελέσματα όπως μια εξωτερική αντίσταση σε ένα δακτυλιοφόρο δρομέα. Κατά την εκκίνηση η αντίσταση  $R_R$  είναι μεγάλη και έτσι η ροπή εκκίνησης είναι επίσης μεγάλη, ενώ στην ονομαστική λειτουργία η αντίσταση είναι μικρή όπως και οι απώλειες. Η συμπεριφορά αυτή, που στηρίζεται σε φυσικούς νόμους, συμβαίνει να είναι ότι ακριβώς επιθυμούμε. Βέβαια, υπάρχει και κάτι ανεπιθύμητο, ότι δηλαδή αυξανομένης της ταχύτητας αυξάνει και η σκέδαση, με αποτέλεσμα να έχουμε μείωση της ροπής ανατροπής και του συντελεστή ισχύος, διότι μεγαλώνει η άεργος ισχύς που απαιτείται για τη δημιουργία του πεδίου σκεδάσεως. Η εκτόπιση του ρεύματος εξαρτάται κατά πολύ από τη μορφή των αυλακώσεων. Όταν η διατομή μιας μπάρας είναι κυκλική, η εκτόπιση είναι μικρότερη από εκείνη που εμφανίζεται, εάν έχουμε ορθογώνια διατομή με μεγάλο ύψος. ( *Εικ. 1.8* )

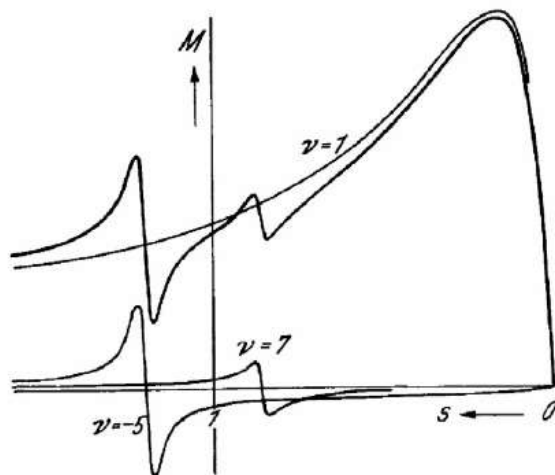
### **3.2 Ροπές ανώτερων αρμονικών**

Οι ανώτερες αρμονικές του μαγνητικού πεδίου του στάτη και του δρομέα δημιουργούν μαζί ροπές και δυνάμεις, οι οποίες είναι επιβλαβείς για τις ασύγχρονες μηχανές και ιδιαίτερα ενοχλούν τους κινητήρες με κλωβό κατά την εκκίνηση. Στις μηχανές με δακτυλιοφόρο δρομέα μπορούμε με εξωτερικές αντιστάσεις να αυξήσουμε τη ροπή της βασικής αρμονικής τόσο, ώστε οι παρασιτικές ανώτερες ροπές να είναι ασήμαντες. Τα αποτελέσματα της αλληλεπίδρασης των ανώτερων αρμονικών του στάτη και του δρομέα μπορούν να χωριστούν σε τρεις κατηγορίες.

#### **α) Ασύγχρονες ανώτερες ροπές**

Πρώτα πρέπει να αναφέρουμε ότι μια ανώτερη αρμονική έχει το δικό της αριθμό ζευγών πόλων. Έτσι η αρμονική της τάξης  $v$  έχει  $v$   $p$  ζεύγη πόλων, όπου  $p$  είναι τα ζεύγη των πόλων της βασικής αρμονικής. Μεταξύ των αρμονικών του στάτη και του δρομέα υπάρχουν μερικές, των οποίων τα ζεύγη των πόλων είναι ίσα και στρέφονται με την ίδια ταχύτητα σχετικά προς το στάτη, ανεξάρτητα από την ταχύτητα του δρομέα. Η κατάσταση αυτή είναι δυνατή μόνον όταν η συγκεκριμένη αρμονική του δρομέα, που θέλουμε να εξετάσουμε, προέρχεται από τη μία αρμονική του στάτη με την οποία ταυτίζεται ως προς τον αριθμό ζευγών πόλων και την ταχύτητα. Τότε λέμε ότι μεταξύ αυτών υπάρχει επαγωγική ζεύξη. Οι

αρμονικές του είδους που αναφέραμε δημιουργούν μια ηλεκτρομαγνητική ροπή, όπως ακριβώς συμβαίνει και με τις βασικές αρμονικές. Όπως γνωρίζουμε το πεδίο του στάτη δημιουργεί ένα πεδίο στο δρομέα, το οποίο σχετικά προς το στάτη στρέφεται με τη σύγχρονη ταχύτητα ανεξάρτητα από τη γωνιακή ταχύτητα του δρομέα και έχει τον ίδιο αριθμό ζευγών πόλων. Επειδή λοιπόν η συμπεριφορά των πεδίων και στις δύο περιπτώσεις είναι όμοια, ονομάζουμε τις ροπές που προέρχονται από αρμονικές του είδους αυτού ασύγχρονες ανώτερες ροπές. Οι ροπές αυτές προστίθενται στη ροπή της βασικής αρμονικής και έτσι προκύπτει κάποια παραμόρφωση της γνωστής χαρακτηριστικής καμπύλης  $M=f(s)$ . Στην εικόνα 3.1 βλέπουμε τις ροπές για  $\nu=1$ ,  $\nu=5$  και  $\nu=7$  καθώς και το άθροισμα αυτών. Παρατηρούμε ότι στην εκκίνηση δημιουργείται μια διατάραξη στη ροπή της βασικής αρμονικής, η οποία είναι δυνατό να συγκρατήσει τη μηχανή, όταν ο άξονας είναι συνδεδεμένος με φορτίο.

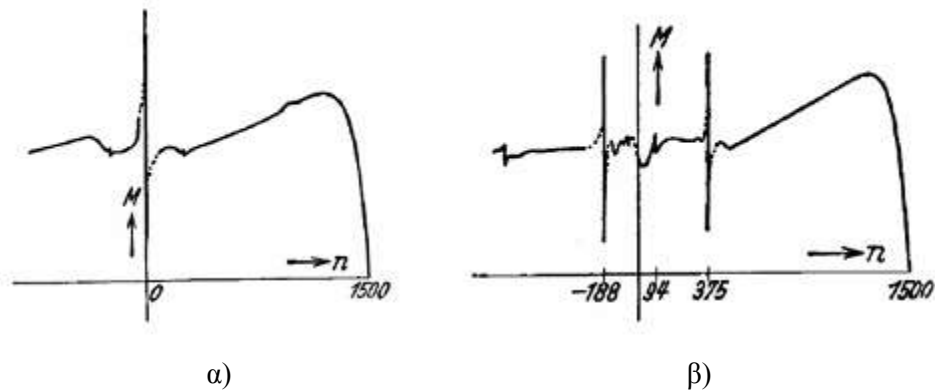


*Εικ. 3.1* Ασύγχρονες ανώτερες ροπές τάξεως  $\nu=5$  και  $\nu=7$

### **β) Σύγχρονες ανώτερες ροπές**

Εάν ο αριθμός ζευγών πόλων μιας ανώτερης αρμονικής του δρομέα είναι ακριβώς ίσος με τον αριθμό ζευγών πόλων μιας αρμονικής του στάτη, αλλά η πρώτη δεν προέρχεται από τη δεύτερη, τότε οι δύο αυτές αρμονικές έχουν διαφορετικές ταχύτητες και δημιουργούν μια ταλαντευόμενη ροπή. Η συχνότητα της ταλάντωσης αυτής είναι ίση με τη διαφορά των συχνοτήτων των δύο αρμονικών. Επειδή η συχνότητα των αρμονικών του δρομέα εξαρτάται από την ταχύτητα του δρομέα, έπεται ότι και η συχνότητα των ταλαντευόμενων ανώτερων ροπών μεταβάλλεται, όταν μεταβάλλεται η ταχύτητα του δρομέα. Εάν συμβεί οι δύο

ανώτερες αρμονικές να στρέφονται με την ίδια ταχύτητα, τότε η ροπή αυτών αποκτάει συχνότητα μηδέν, δηλαδή δημιουργείται μια σταθερή ροπή, της οποίας το μέγεθος εξαρτάται από τη γωνία μεταξύ των δύο αρμονικών, όπως συμβαίνει στη σύγχρονη μηχανή. Για το λόγο αυτό λέμε ότι, οι δύο αρμονικές του είδους που αναφέραμε σχηματίζουν μια σύγχρονη ανώτερη ροπή. Η σύγχρονη ροπή προσπαθεί να κρατήσει το δρομέα σε μια σταθερή ταχύτητα, η οποία μπορεί να είναι μηδέν, δηλαδή βρισκόμαστε σε κατάσταση ηρεμίας, ή σε μία άλλη ταχύτητα. Οι σύγχρονες ροπές που εμφανίζονται στην ηρεμία είναι επικίνδυνες, διότι είναι δυνατό να εμποδίσουν την εκκίνηση. Στο σχήμα 3.2 βλέπουμε τις δύο περιπτώσεις σύγχρονων ροπών.



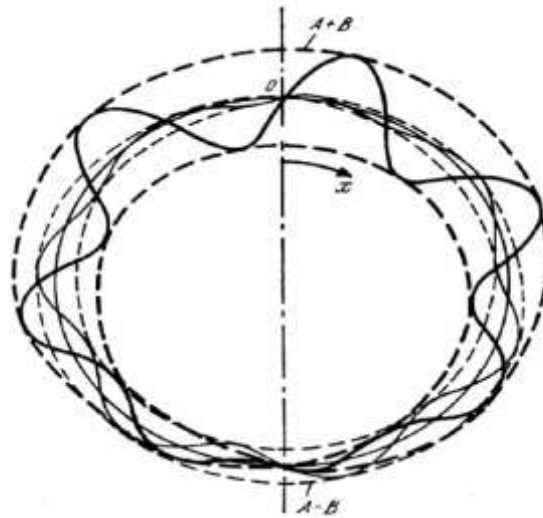
Εικ. 3.2 Σύγχρονες ανώτερες ροπές α) κατά την ηρεμία και β) κατά την κίνηση

Οι σύγχρονες ανώτερες ροπές είναι δυνατό να προστίθενται ή να αφαιρούνται από τη ροπή των βασικών αρμονικών. Αυτό εξαρτάται από το εάν οι συνεργαζόμενες ανώτερες αρμονικές στρέφονται κατά την ίδια φορά ή κατ' αντίθετη.

### γ) Δυνάμεις ανώτερων αρμονικών

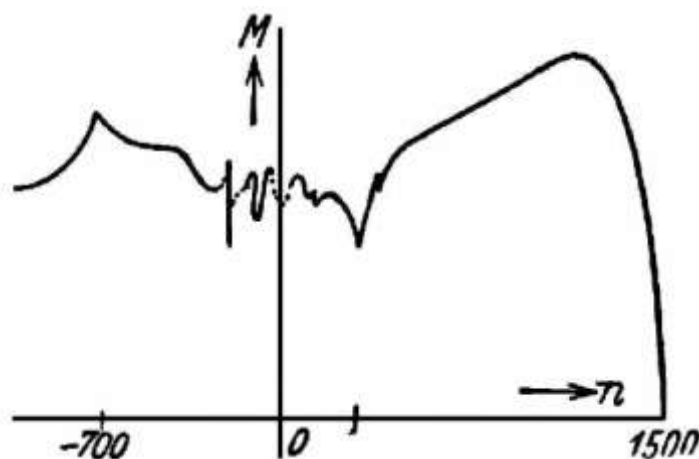
Εκτός από τις δύο παραπάνω μορφές των ροπών, οι ανώτερες αρμονικές δημιουργούν δυνάμεις, οι οποίες έχουν ακτινική διεύθυνση και προκαλούν έλξη μεταξύ στάτη και δρομέα. Όταν δύο ανώτερες αρμονικές του στάτη ή δύο του δρομέα, ή μία του στάτη και μία του δρομέα, των οποίων οι τάξεις μεγέθους διαφέρουν κατά 1 και οι οποίες έχουν αντίθετη φορά περιστροφής, αλληλεπιδράσουν, τότε δημιουργείται μια άλλη κύμανση με ημιτονοειδή διαμόρφωση πλάτους. Αυτή προκαλεί δυνάμεις ανάλογες του τετραγώνου της επαγωγής. Σε δύο διαμετρικά τοποθετημένα σημεία παρουσιάζεται, στο μεν ένα σημείο ένα μέγιστο και

στο δε άλλο ένα ελάχιστο, ώστε συνολικά να επικρατεί έλξη προς μία κατεύθυνση. Στην εικόνα 3.3 αποδίδει την κατανομή των κυματοειδών δυνάμεων για μερικές αρμονικές.



**Εικ. 3.3** Δυνάμεις λόγω ανώτερων αρμονικών σε ασύγχρονη μηχανή

Οι δυνάμεις αυτές αναγκάζουν μερικά τμήματα της μηχανής να ταλαντεύονται και έτσι να προκαλείται θόρυβος. Όταν η συχνότητα των ταλαντευόμενων δυνάμεων είναι ίση με την ιδιοσυχνότητα των τμημάτων της μηχανής που πάλλονται, ο θόρυβος γίνεται ιδιαίτερα ισχυρός. Λόγω της κατανομής των δυνάμεων αυτών ο κυκλικός στάτης τείνει να παραμορφωθεί. Επίσης ο άξονας τείνει να λυγίσει. Εκτός αυτών έχουμε μια ακόμη παραμόρφωση της ροπής, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.4, διότι οι ταλαντώσεις των μηχανικών τμημάτων σπαταλούν ορισμένη ενέργεια.



**Εικ 3.4** Επίδραση των ταλαντευόμενων δυνάμεων επί της ροπής μιας ασύγχρονης μηχανής



### 3.3 Αντιμετώπιση των ανώτερων αρμονικών

Όπως είδαμε στην προηγούμενη παράγραφο, οι ανώτερες αρμονικές έχουν δυσάρεστες συνέπειες στη λειτουργία των ασύγχρονων μηχανών. Για να αντιμετωπιστούν αυτές οι αρνητικές επιδράσεις σε ικανοποιητικό βαθμό, πρέπει να δοθεί τεράστια προσοχή στην κατάλληλη κατασκευή του στάτη και του δρομέα. Τρεις είναι οι βασικοί τρόποι αντιμετώπισης των ανώτερων αρμονικών. Καταρχήν, η κατάλληλη επιλογή αναλογίας αυλακώσεων δρομέα στάτη, η οποία προκύπτει εμπειρικά και από υπολογισμούς. Κατά δεύτερον, η δημιουργία κλίσης στις αυλακώσεις του δρομέα ως προς τις αυλακώσεις του στάτη. Επίσης η μεταβολή του μήκους του διακένου μπορεί να επηρεάσει το αρμονικό περιεχόμενο του πεδίου της ασύγχρονης μηχανής. Τέλος, μια μέθοδος, που μελετάται και εφαρμόζεται τα τελευταία χρόνια, αποτελεί ο σχεδιασμός του δρομέα ή του στάτη, της ασύγχρονης μηχανής, με κλειστές αυλακώσεις. (εικόνα 1.8).

### 3.4 Τεχνικές ελέγχου τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα

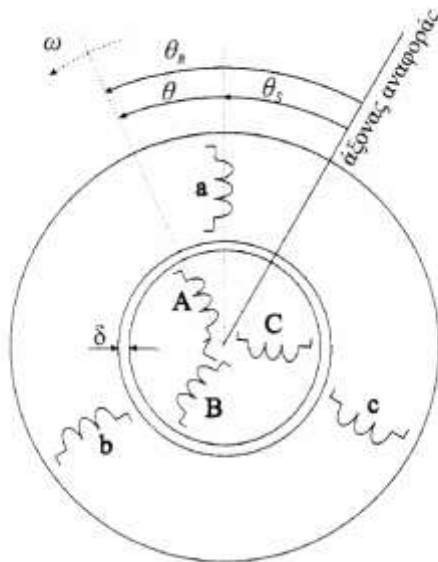
Ο προσδιορισμός της τεχνικής ελέγχου ενός τριφασικού ασύγχρονου ηλεκτροκινητήρα απαιτεί τη μελέτη του μαθηματικού μοντέλου που περιγράφει τη λειτουργία του. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή υπάρχουν ελεγκτές που επιτρέπουν τον έλεγχο τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα Σε αυτό το σημείο λαμβάνονται υπόψη κάποιες παραδοχές.

- ο στάτης και ο δρομέας φέρουν συμμετρικό τριφασικό τύλιγμα έκαστος, με διαφορά 120ο μεταξύ των φάσεων
- οι ωμικές αντιστάσεις, οι επαγωγές και οι αμοιβαίες επαγωγές θεωρούνται σταθερές, δηλαδή ανεξάρτητες της τιμής των ρευμάτων που τις διαρρέουν και της θερμοκρασίας
- το μαγνητικό πεδίο στο διάκενο, μεταξύ στάτη και δρομέα, θεωρείται ημιτονοειδώς κατανομημένο και αμελούνται οι ανώτερες αρμονικές που οφείλονται στις αυλακώσεις
- οι απώλειες τριβών και σιδήρου θεωρούνται αμελητέες
- η μηχανή φέρει δύο πόλους. Το ίδιο ισχύει και για μηχανές με μεγαλύτερο αριθμό πόλων.

Ορίζεται, επίσης, ένας άξονας αναφοράς καθώς και οι γωνίες θέσης που σχηματίζονται μεταξύ των μεγεθών του στάτη, του δρομέα και του άξονα αναφοράς.

- $\theta_S$  είναι η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ του διανύσματος του μαγνητικού πεδίου του στάτη και του άξονα αναφοράς
- $\theta_R$  είναι η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ του διανύσματος του μαγνητικού πεδίου του δρομέα και του άξονα αναφοράς
- $\theta = \theta_S - \theta_R$  είναι η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ του διανύσματος του μαγνητικού πεδίου του στάτη και του διανύσματος του μαγνητικού πεδίου του δρομέα

Σημειώνεται ότι ο άξονας αναφοράς είναι ακίνητος και οι γωνίες αυτές μεταβάλλονται συναρτήσει του χρόνου, λόγω της περιστροφής του δρομέα. Στη συνέχεια, αντιστοιχίζονται οι γεωμετρικές γωνίες με ηλεκτρικές. Μία πλήρης περιστροφή του δρομέα ισοδυναμεί με μία περίοδο του μαγνητικού πεδίου του διακένου (εφόσον η μηχανή είναι διπολική), η οποία με τη σειρά της αντιστοιχεί σε πλήρη ηλεκτρική γωνία ίση με  $2\pi$ . Μεταξύ ηλεκτρικής και γεωμετρικής γωνίας ισχύει η σχέση:  $\theta_{el} = p \cdot \theta_g$ , όπου  $p$  είναι ο αριθμός των ζευγών πόλων.



*Εικ. 3.5 Μοντέλο τριφασικής ασύγχρονης μηχανής*

Οι μέθοδοι ελέγχου που χρησιμοποιούνται για τους ασύγχρονους κινητήρες είναι οι εξής:

- Βαθμωτός έλεγχος ή έλεγχος του λόγου της τάσης προς τη συχνότητα (Scalar Control ή U/f Control)
- Διανυσματικός έλεγχος ή έμμεσος έλεγχος ροπής ή έλεγχος προσανατολισμένου πεδίου (**Vector Control** ή Indirect Torque Control ή Field Oriented Control - FOC)
- Άμεσος έλεγχος ροπής (**Direct Torque Control** - DTC)

### 3.4.1 Έλεγχος του λόγου της τάσης προς τη συχνότητα

Σε αυτό το είδος ελέγχου, η ηλεκτρική μηχανή τροφοδοτείται με ημιτονοειδή τάση μεταβλητής συχνότητας. Η τάση αυτή παράγεται από έναν αντιστροφέα, ο οποίος παλμοδοτείται από μικροελεγκτή, σύμφωνα με τη τεχνική διαμόρφωσης του πλάτους των παλμών (Pulse Width Modulation - PWM). Σε αυτή τη μέθοδο ελέγχου ο λόγος της τάσης ως προς τη συχνότητα (V/f) πρέπει να παραμένει σταθερός έτσι ώστε να διατηρείται σταθερή ροπή σε όλο το φάσμα λειτουργίας του κινητήρα. Τα σήματα που ελέγχονται είναι η τάση και η συχνότητα, ενώ δεν απαιτείται κάποιο σήμα ανατροφοδότησης (έλεγχος ανοιχτού βρόχου). Μια τέτοια τεχνική ελέγχου έχει σχετικά χαμηλό κόστος και αποτελεί μία υλοποιήσιμη λύση. Από την άλλη μεριά, παρουσιάζει το μειονέκτημα ότι η ροπή που εφαρμόζεται δεν ελέγχεται άμεσα και συνεπώς εξαρτάται από το εκάστοτε φορτίο που αναλαμβάνει ο κινητήρας. Επίσης, η απόκριση σε μεταβατικές καταστάσεις δεν είναι γρήγορη εξαιτίας της προκαθορισμένης διακοπτικής λειτουργίας του αντιστροφέα.

Οι πιο γνωστές τεχνικές που βασίζονται στο βαθμωτό έλεγχο είναι οι ακόλουθες:

- **Ημιτονοειδής διαμόρφωση πλάτους παλμών (Sinusoidal PWM)** – Πλεονέκτημα αυτής της τεχνικής ελέγχου είναι το μικρό υπολογιστικό κόστος που απαιτείται, ενώ μειονέκτημά της αποτελεί το χαμηλό πλάτος του σήματος της τάσης για τη θεμελιώδη συχνότητα το οποίο είναι μικρότερο από το 90 % του συνολικού πλάτους του σήματος εισόδου, καθώς το υπόλοιπο βρίσκεται στις ανώτερες αρμονικές.
- **Διαμόρφωση πλάτους παλμών έξι σταδίων (Six-Step PWM)** – Ο αντιστροφέας σε αυτή την τεχνική ελέγχου έχει έξι ξεχωριστές διακοπτικές

καταστάσεις. Όταν αυτός παλμοδοτείται από συγκεκριμένη αλληλουχία διακοπτικών καταστάσεων τότε ο άξονας του τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα μπορεί να στρέφεται. Πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι δεν απαιτούνται ενδιάμεσοι υπολογισμοί, γεγονός που κάνει απλούστερη την υλοποίησή της. Η τιμή της βασικής αρμονικής της τάσης είναι μεγαλύτερη από την τιμή της στην είσοδο του αντιστροφέα. Από την άλλη μεριά, το μειονέκτημα της εντοπίζεται στις χαμηλές συχνότητες των ανώτερων αρμονικών, οι οποίες βρίσκονται κοντά στη βασική αρμονική και δε μπορούν να φιλτραριστούν από την επαγωγή του ηλεκτροκινητήρα. Ως αποτέλεσμα, αυξάνονται οι απώλειες, αυξάνεται η κυμάτωση της ροπής και παρουσιάζεται ακανόνιστη συμπεριφορά του κινητήρα σε χαμηλό αριθμό στροφών.

- **Διαμόρφωση πλάτους παλμών μέσω διανύσματος χώρου (Space Vector Modulation PWM - SVM PWM)** – Αυτή η τεχνική ελέγχου βασίζεται στην ιδέα ότι τα διανύσματα των τριών φάσεων της τάσης του επαγωγικού κινητήρα μπορούν να μετασχηματιστούν σε ένα μόνο στρεφόμενο διάνυσμα. Η περιστροφή αυτού του διανύσματος μπορεί να παράγει μέσω της συγκεκριμένης μεθόδου ελέγχου τριφασικά ημιτονοειδή σήματα. Πλεονέκτημά της είναι η οι χαμηλότερες τιμές των ανώτερων αρμονικών και η λιγότερη μνήμη που απαιτεί ο μικροελεγκτής σε σύγκριση με την τεχνική ημιτονοειδούς διαμόρφωσης παλμών. Ως μειονέκτημά της θεωρούνται η χαμηλή τιμή της τάσης εισόδου σε σχέση με την τάση στο DC bus και οι περισσότεροι υπολογισμοί που απαιτούνται.
- **Διαμόρφωση πλάτους παλμών μέσω διανύσματος χώρου με υπερδιαμόρφωση (SVM PWM with overmodulation)** – Σε αυτή τη τεχνική ελέγχου παράγεται ένα ημιτονοειδές σήμα η βασική αρμονική του οποίου έχει μεγαλύτερη τιμή από το πλάτος της συνεχούς τάσης στην είσοδο. Ως ελαττώματα χαρακτηρίζονται οι πολύπλοκοι υπολογισμοί, η κυμάτωση και ο θόρυβος από τις ανώτερες αρμονικές που εμφανίζονται στην πολική τάση. Όμως, ο λόγος του αθροίσματος της ισχύος των ανώτερων αρμονικών προς την ισχύ της βασικής αρμονικής παραμένει μικρότερος συγκριτικά με την τεχνική διαμόρφωσης παλμών έξι σταδίων.

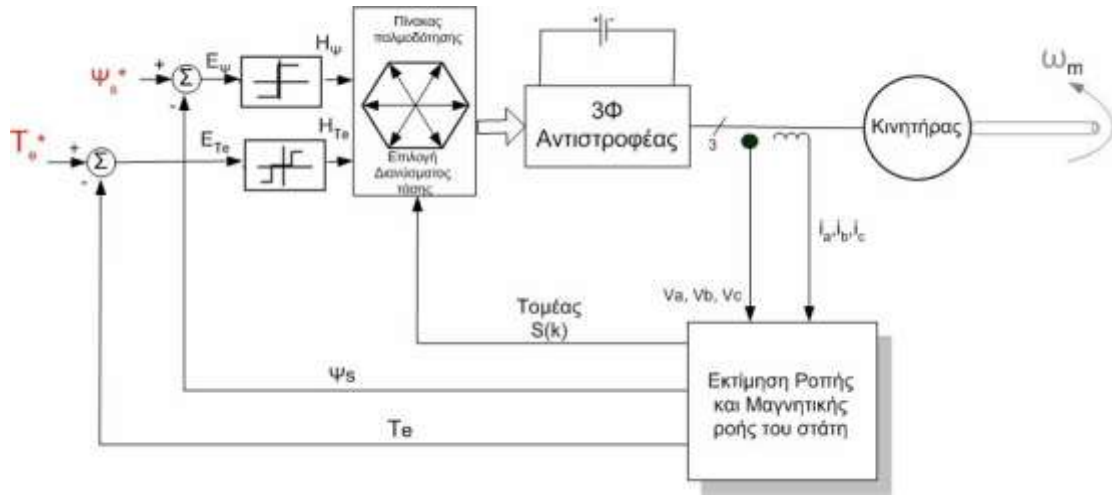
### 3.4.2 Διανυσματικός έλεγχος

Ως γνωστόν, η ηλεκτρομαγνητική ροπή που παράγεται από έναν ασύγχρονο ηλεκτροκινητήρα οφείλεται στην αλληλεπίδραση ενός στρεφόμενου πεδίου, που δημιουργεί το τριφασικό τύλιγμα του στάτη, και των επαγόμενων στο δρομέα ρευμάτων. Το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται στο διάκενο είναι συνάρτηση του χώρου και του χρόνου και τα επαγόμενα ρεύματα στο δρομέα δε μπορούν να διαχωριστούν σε συνιστώσες που δημιουργούν ροπή ή ροή. Στη μέθοδο του διανυσματικού ελέγχου τα διανύσματα των τριών φάσεων του ρεύματος μετατρέπονται από ένα στατικό σύστημα αναφοράς τριών αξόνων abc σε ένα ορθοκανονικό σύστημα δύο αξόνων το οποίο έχει κατάλληλο προσανατολισμό και στρέφεται με το σύγχρονο αριθμό στροφών. Με αυτό τον τρόπο το ρεύμα διαχωρίζεται σε δύο συνιστώσες οι οποίες είναι κάθετες μεταξύ τους: αυτήν που προκαλεί τη μαγνητική ροή και αυτήν που δημιουργεί την ηλεκτρομαγνητική ροπή. Ο άξονας d εκφράζει την ροή που παράγει το ρεύμα του στάτη και ο άξονας q εκφράζει τη παραγόμενη ροπή. Αυτός ο διαχωρισμός επιτρέπει τον ξεχωριστό έλεγχο αυτών των δύο παραμέτρων, με παρόμοιο τρόπο με αυτόν που εφαρμόζεται για τον έλεγχο μηχανών συνεχούς ρεύματος. Καθώς η παραγόμενη ροπή ελέγχεται μόνο μετά από μετασχηματισμού και όχι άμεσα σαν κύριο σήμα εισόδου, η μέθοδος αυτή ονομάζεται και έμμεσος έλεγχος ροπής.

### 3.4.3 Άμεσος έλεγχος ροπής

Ο άμεσος έλεγχος ροπής σε σχέση με τις μεθόδους εμμέσου ελέγχου ροπής και βαθμωτού ελέγχου, δεν έχει προκαθορισμένη διακοπτική συμπεριφορά. Η κατάσταση των διακοπτικών στοιχείων του αντιστροφέα καθορίζεται ανάλογα με το εκάστοτε φορτίο που αναλαμβάνει ο κινητήρας. Με αυτόν τον τρόπο η τεχνική DTC αποκρίνεται ταχύτατα σε οποιαδήποτε άμεση μεταβολή του φορτίου και η ακρίβεια της ταχύτητας μπορεί να εγγυηθεί με σφάλμα μόλις 0.5 %, χωρίς τη χρήση συστήματος ανατροφοδότησης. Ωστόσο, αυξάνεται η πολυπλοκότητα του αλγορίθμου ελέγχου. Επίσης, ο έλεγχος της ροπής παραμένει ακριβής ακόμα και στις χαμηλές συχνότητες, ενώ παρουσιάζεται γραμμικότητα σε όλο το φάσμα ελέγχου. Το σύστημα κλειστού βρόχου δεν είναι υποχρεωτικό όπως αναφέρθηκε, αλλά αν χρησιμοποιηθεί επιτυγχάνεται ακόμα καλύτερος έλεγχος ταχύτητας. Τέλος η μέθοδος αυτή είναι λιγότερο ευαίσθητη σε μεταβολές των φυσικών χαρακτηριστικών του

ηλεκτροκινητήρα. Το γενικό δομικό διάγραμμα της τεχνικής DTC παρουσιάζεται στο ακόλουθο σχήμα.



*Εικ. 3.6* Γενικό δομικό διάγραμμα άμεσου ελέγχου ροπής

Το σημαντικότερο πλεονέκτημα της τεχνικής DTC είναι ότι η διακοπτική λειτουργία του αντιστροφέα ελέγχει άμεσα τη ροπή και τη μαγνητική ροή του ηλεκτροκινητήρα. Οι μεταβλητές που χρησιμοποιούνται ως σήματα εισόδου είναι η συνεχής τάση στην είσοδο του αντιστροφέα, τα φασικά ρεύματα του κινητήρα και η τρέχουσα κατάσταση των διακοπτικών στοιχείων. Για τον υπολογισμό των φασικών τάσεων του κινητήρα χρησιμοποιείται η συνεχής τάση στο DC bus και η διακοπτική κατάσταση του αντιστροφέα. Έπειτα, τα σήματα των τάσεων και των ρευμάτων του κινητήρα εισάγονται σε ένα μαθηματικό μοντέλο το οποίο εκφράζει τη λειτουργία του κινητήρα, βασισμένο σε εξισώσεις που προκύπτουν από τη θεωρία ηλεκτρικών μηχανών. Από αυτό το μοντέλο του ηλεκτροκινητήρα, μετά από μία διαδικασία μετασχηματισμών και πράξεων, εξάγονται οι τρέχουσες υπολογισθείσες τιμές της ροής και της ροπής. Στη συνέχεια, αυτές οι έξοδοι συγκρίνονται με τα αντίστοιχα μεγέθη αναφοράς και με αυτόν τον τρόπο καθορίζεται η νέα διακοπτική κατάσταση του αντιστροφέα. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται με περίοδο της τάξεως των μsec και έτσι ανανεώνεται συνεχώς και άμεσα η διακοπτική λογική.

## **4 ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ**

### **4.1 Επιλογή και συντήριση επαγωγικών κινητήρων**

Η τεράστια ποικιλία τύπων, μεγεθών και ποιοτήτων επαγωγικών κινητήρων που είναι διαθέσιμη στην αγορά, κάνει ιδιαίτερα σύνθετο το πρόβλημα της επιλογής του κατάλληλου κινητήρα για μια εφαρμογή. Οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν την επιλογή είναι:

- Διαθέσιμη τάση και συχνότητα.
- Ροπή (ή αντίστοιχα ισχύς) και ταχύτητα περιστροφής που απαιτούνται
- Μορφή του κύκλου εργασίας του κινητήρα.
- Χαρακτηριστικά περιβάλλοντος εγκατάστασης, (υγρασία, σκόνη, θερμοκρασία, εκρηκτικό περιβάλλον κλπ). Ειδικές προδιαγραφές, γνωστές σαν δείκτης IP XY διέπουν τη προστασία από είσοδο ξένων σωμάτων ή επαφής με το ανθρώπινο σώμα (δείκτης X) και την προστασία από είσοδο νερού (δείκτης Y). Ειδικές προδιαγραφές απαιτούνται για κινητήρες που θα λειτουργήσουν σε ειδικά επικίνδυνα περιβάλλοντα (εκρηκτικά κλπ).
- Χαρακτηριστικά τοποθέτησης, δηλαδή διαστάσεις κινητήρα, τρόπος έδρασης κλπ.
- Δυνατότητες συντήρησης.
- Τύποι κινητήρων που ήδη χρησιμοποιούνται και συντηρούνται στη μονάδα.
- Αξιοπιστία προμηθευτών.

Η προμήθεια του κινητηρίου συστήματος εξετάζεται στο σύνολο και περιλαμβάνει και τις απαραίτητες συσκευές ελέγχου και προστασίας (εκκινητές, θερμικά κλπ.). Εξετάζεται η σκοπιμότητα και δυνατότητα εγκατάστασης συστήματος ελέγχου με μεταβλητή συχνότητα. Τέτοιες διατάξεις μπορούν να ανιχνεύσουν ισχυρά μόνιμα ρεύματα (περίπτωση υπερφόρτισης), ισχυρά στιγμιαία ρεύματα, καταστάσεις υπερτάσεων και καταστάσεις μειωμένης τάσης. Σε καθεμιά από τις προηγούμενες περιπτώσεις η διάταξη διακόπτει την λειτουργία του κινητήρα. Σε σχέση με τη διαστασιολόγηση ένας κινητήρας γενικά επιλέγεται με ονομαστική ισχύ ίση με το μέγιστο φορτίο που έχει να αντιμετωπίσει. Πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη το γεγονός, ότι όταν ο κινητήρας φορτίζεται ελαφρά υποφέρει και από απόδοση και από συντελεστή ισχύος, ενώ συνεχίζει να εμφανίζει υψηλά ρεύματα

εκκίνησης και απαιτεί συνεπώς μεγαλύτερες διατομές αγωγών τροφοδοσίας και μεγαλύτερα μέσα προστασίας. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του κόστους εγκατάστασης και την επιδείνωση του συνολικού συντελεστή απόδοσης. Αντίθετα, σύμφωνα με τους κανονισμούς της IEC και VDE οι κινητήρες μπορούν να υπερφορτωθούν σε ποσοστό 150% του ονομαστικού τους ρεύματος για χρόνους της τάξης των 2 min υπό ονομαστική τάση και συχνότητα, εάν δεν ορίζεται διαφορετικά από τον κατασκευαστή.

Το μεγαλύτερο πρόβλημα στους κινητήρες είναι η υπερθέρμανση, που μπορεί να προκαλέσει καταστροφή της μόνωσης των περιελίξεων. Κατάλληλες διατάξεις προστασίας (θερμικά) προβλέπονται για τους κινητήρες. Παρόλα αυτά σε περιπτώσεις συχνών εκκινήσεων επιλέγονται συνήθως μεγαλύτεροι κινητήρες.

Όλες οι μηχανές σχεδιάζονται για λειτουργία σε θερμοκρασία μικρότερη των 100°C. Ανάλογα με την ισχύ της μηχανής επιλέγεται ο τύπος ψύξης ώστε να διασφαλίζεται η ασφάλεια της μόνωσης των τυλιγμάτων και γενικά των υλικών της μηχανής.

Ο πίνακας δείχνει τον διαχωρισμό αυτό

Ισχύς Ηλεκτρικής Μηχανής	Τύπος Ψύξης
$P_m < H_p$	Φυσική ψύξη
$H_p < P_m < 10^3 H_p$	Εξαναγκασμένη ψύξη αέρα (πτερωτή)
$10^3 H_p < P_m < 10^5 H_p$	Υδροψυκτα τυλίγματα
$10^5 H_p < P_m$	Κυκλοφορία υγρού υδρογόνου

Πίνακας 1.8.3.1: Ψύξη μηχανών ανάλογα με την ισχύ

Όπου  $1hp = 746 W$

Η σωστή συντήρηση των κινητήρων είναι κυρίως πρόβλημα σωστού προγραμματισμού. Οι μικροί κινητήρες έχουν αυτολίπαντα ρουλεμάν ή κουζινέτα και δεν απαιτούν πρόσθετη λίπανση, εφόσον λειτουργούν σε περιβάλλον που συμφωνεί με τις προδιαγραφές τους. Οι μεγάλοι κινητήρες απαιτούν λίπανση σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή. Η σκόνη, η βρωμιά, η υγρασία βλάπτουν γενικά. Ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται στη σωστή λειτουργία του συστήματος ψύξης. Οι επαγωγικοί κινητήρες επιδέχονται εύκολα επισκευές, όπως περιελίξεις, ρουλεμάν κλπ. Οι δακτυλιοφόροι κινητήρες απαιτούν συστηματικό έλεγχο στις ψήκτρες και τους συλλέκτες τους.

Τέλος, για εφαρμογές συστημάτων ηλεκτρικής κίνησης όπου ο ηλεκτρικός κινητήρας μπορεί να λειτουργεί σε μεγάλη κλίμακα στροφών είναι απαραίτητη η χρήση εξωτερικής-ανεξάρτητης ψύξης. Στην απλούστερη περίπτωση η ψύξη μπορεί να προέρχεται από έναν



μικρότερο ηλεκτρικό κινητήρα κατάλληλα τοποθετημένο στο κέλυφος του τριφασικού κινητήρα. Υπάρχουν όμως και περιπτώσεις, κυρίως για ηλεκτρικούς κινητήρες μεγάλης ισχύος, όπου η ψύξη τους γίνεται με την χρήση ψυκτικού υγρού που κυκλοφορεί στο στάτη. Σε αυτή την περίπτωση ο στάτης κατασκευάζεται με επιπλέον αυλακώσεις ώστε να τοποθετούνται σωλήνες μέσω των οποίων ρέει το ψυκτικό υγρό.

## Βιβλιογραφία

1. Charman, S. J. *Ηλεκτρικές μηχανές AC-DC*. Θεσσαλονίκη: Τζιόλα.
2. Αθ.Σαφάκα, Κ. Τ. «Ηλεκτρικές Μηχανές Α».
3. Αθ.Σαφάκα, Κ. Τ. «Ηλεκτρικές Μηχανές Β».
4. ΑΠΘ, Γ. Π. (2010). ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ Ι, Επαγωγικοί ή ασύγχρονοι κινητήρες. ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ .
5. Ιορδάνη, Κ. «Τριφασικοί Ασύγχρονοι Επαγωγικοί κινητήρες»,. Α.Τ.Ε.Ι Θεσσαλονίκης.
6. Μαλατέστας, Π. Β. (2010). Ηλεκτρική κίνηση. Τζιόλα.
7. Μανιάς, Σ. ( 2000). Ηλεκτρονικά Ισχύος. Αθήνα: Συμεών.
8. ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑ, Α. Λ. ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ Σ. ΡΑΠΤΗΣ (Διπλωματική).
9. Μιχαήλ Λειβαδαράς, Η. Μ. Ανάλυση και Σύγκριση Μεθόδων Εκκίνησης Ασύγχρονων Κινητήρων Εφαρμόζοντας Άμεσο Έλεγχο Ροπής.
10. Ν.Π.Τρωγαδάς, Δ. η. «Ηλεκτρικές Μηχανές , Ασύγχρονες Σύγχρονες μηχανές» ΤΕΙ Λάρισας.