

**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ  
ΚΕΝΤΡΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ**

**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΕ**

# **ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ**

**ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ**

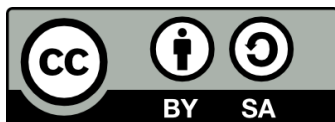
**κ. ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΘΕΜΕΛΗΣ**

**ΣΕΡΡΕΣ, ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2015**



## Άδειες Χρήσης

Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό υπόκειται σε άδειες χρήσης Creative Commons. Για εκπαιδευτικό υλικό, όπως εικόνες, που υπόκειται σε άλλου τύπου άδειας χρήσης, η άδεια χρήσης αναφέρεται ρητώς.



Το έργο αυτό αδειοδοτείται από την Creative Commons Αναφορά Δημιουργού - Παρόμοια Διανομή 4.0 Διεθνές Άδεια. Για να δείτε ένα αντίγραφο της άδειας αυτής, επισκεφτείτε <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.el>.

## Χρηματοδότηση

Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.

Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο ΤΕΙ Κεντρικής Μακεδονίας**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο τη αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.

Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.



## ΤΡΙΦΑΣΙΚΟΙ ΑΣΥΓΧΡΟΝΟΙ – ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΙ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ

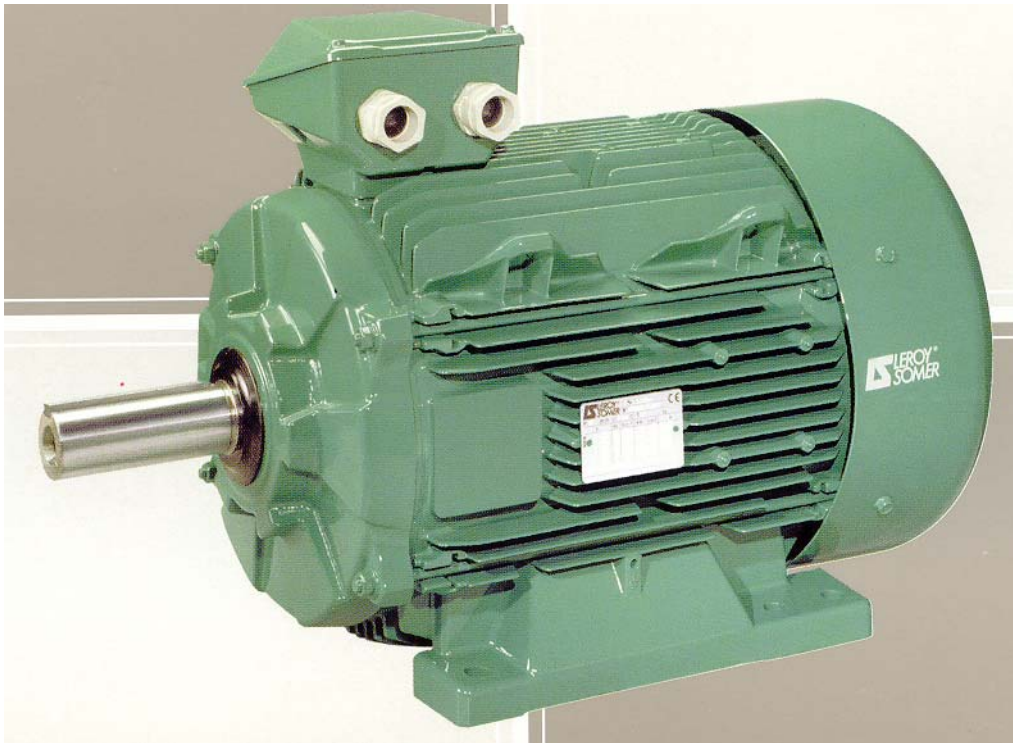
### 5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Από τα διάφορα είδη ηλεκτρικών μηχανών εναλλασσόμενου ρεύματος, ο *τριφασικός ασύγχρονος ή επαγωγικός κινητήρας (induction motor)*, χρησιμοποιείται ευρύτατα στις βιομηχανικές εφαρμογές. Ενδεικτικό της καθολικής χρήσης της μηχανής αυτής είναι ότι, οι επαγωγικοί κινητήρες απορροφούν το 60% περίπου, της συνολικά παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Τα πλεονεκτήματα του ασύγχρονου κινητήρα, με κυριότερο την απλή κατασκευαστική δομή του δρομέα, θα εξηγηθούν στη συνέχεια.

Οι επαγωγικές μηχανές χρησιμοποιούνται σχεδόν αποκλειστικά ως κινητήρες, εξαιτίας των μειονεκτημάτων που παρουσιάζουν όταν λειτουργούν ως γεννήτριες. Για το λόγο αυτό οι επαγωγικές μηχανές αναφέρονται ως επαγωγικοί κινητήρες.

Η αρχή λειτουργίας των ασύγχρονων κινητήρων διατυπώθηκε από τον *N. Tesla* στα τέλη της δεκαετίας του 1880. Επαγωγικοί κινητήρες με μορφή αντίστοιχη της σημερινής, ήταν εμπορικά διαθέσιμοι από το 1896. Από τότε έως το 1970, οι βελτιώσεις στην ποιότητα των υλικών κατασκευής, στις τεχνικές χύτευσης και στη μόνωση των τυλιγμάτων, επέτρεψε τη δραστική μείωση του μεγέθους και του κόστους κατασκευής των επαγωγικών κινητήρων. Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι ένας σημερινός ασύγχρονος κινητήρας των 100hp, έχει τις ίδιες διαστάσεις με ένα κινητήρα 7.5hp του 1897.

Η μείωση στις διαστάσεις των επαγωγικών κινητήρων δεν είχε συνοδευτεί από ουσιαστική βελτίωση του βαθμού απόδοσης, έως την πετρελαϊκή κρίση του 1973, εξαιτίας του μικρού κόστους της ηλεκτρικής ενέργειας. Όμως, στη συνέχεια, όλοι οι κατασκευαστές ανέπτυξαν επαγωγικούς κινητήρες με το χαρακτηρισμό *υψηλής απόδοσης (high efficiency induction motors)*. Οι κινητήρες αυτοί, αν και έχουν μεγαλύτερο κόστος από τους τυπικούς επαγωγικούς κινητήρες, αποκτούν όλο και μεγαλύτερο μερίδιο της αγοράς. Η τυπική μορφή ενός επαγωγικού κινητήρα υψηλής απόδοσης εικονίζεται στο Σχ. 5.1.



**Σχ. 5.1** Τυπική εξωτερική δομή ενός τριφασικού επαγωγικού κινητήρα υψηλής απόδοσης. Ο εικονιζόμενος κινητήρας είναι κατασκευής της εταιρείας Leroy-Somer

## 5.2 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ

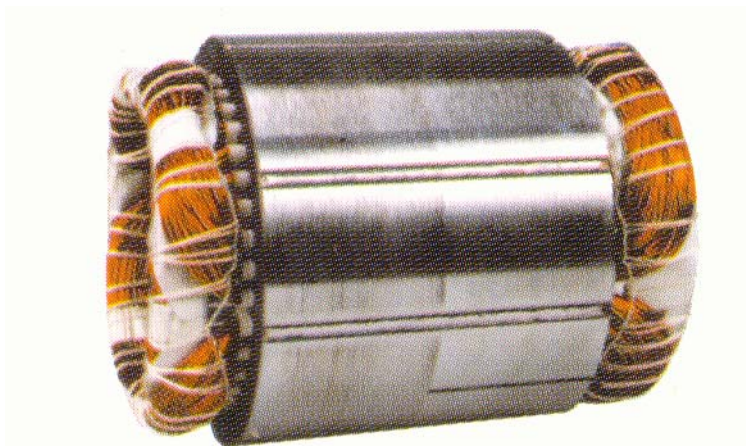
Οι μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες: τις *σύγχρονες* (*synchronous*) και τις *ασύγχρονες* ή *επαγωγικές μηχανές*. Οι σύγχρονες μηχανές, αντίθετα από τις επαγωγικές, χρησιμοποιούνται κυρίως ως γεννήτριες.

Οι κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος, όλων των κατηγοριών, έχουν την ίδια αρχή λειτουργίας. Σύμφωνα μ' αυτή, ο δρομέας του κινητήρα στρέφεται από τη ροπή, η οποία τείνει να ευθυγραμμίσει τα μαγνητικά πεδία του αναπτύσσουν τα τυλίγματα του στάτη και του δρομέα. Αν το μαγνητικό πεδίο του στάτη μπορούσε να στραφεί, τότε η αναπτυσσόμενη ροπή θα ανάγκαζε το δρομέα να ακολουθεί το μαγνητικό πεδίο του στάτη. Επομένως, η λειτουργία όλων κινητήρων εναλλασσόμενου ρεύματος στηρίζεται στη δυνατότητα παραγωγής από το τυλίγμα του στάτη ενός *στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου*.

Στους σύγχρονους κινητήρες η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα είναι ίση με την ταχύτητα που στρέφεται το πεδίο του στάτη. Αντίθετα, στους ασύγχρονους κινητήρες, η ταχύτητα του δρομέα είναι μικρότερη από εκείνη του στρεφόμενου πεδίου του στάτη και εξαρτάται από το μέγεθος του φορτίου.

## 5.3 ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΗ ΔΟΜΗ ΤΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ

Στις μηχανές συνεχούς ρεύματος ο στάτης αποτελείται από το ζύγωμα, πάνω στον οποίο στηρίζονται οι μαγνητικοί πόλοι. Οι μαγνητικοί πόλοι προεξέχουν από το κυλινδρικό ζύγωμα και ονομάζονται *έκτυποι πόλοι* (*salient poles*). Το τυλίγμα της διέγερσης, που φέρουν οι πόλοι του στάτη, τροφοδοτείται με συνεχές ρεύμα και παράγει ένα *σταθερό* και ομοιόμορφο μαγνητικό πεδίο. Το τυλίγμα του οπλισμού τοποθετείται σε αυλακώσεις, στον κυλινδρικό δρομέα.



Σχ. 5.2 Κατασκευαστική δομή του στάτη, των τριφασικών μηχανών

Στις μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος, με έμφαση τις σύγχρονες γεννήτριες, οι ρόλοι του στάτη και του δρομέα είναι αντεστραμμένοι, σε σχέση με τις μηχανές συνεχούς ρεύματος. Η μορφή του δρομέα αλλάζει δραστικά, ανάλογα με το είδος της μηχανής εναλλασσόμενου ρεύματος. Ο δρομέας των μηχανών εναλλασσόμενου ρεύματος μπορεί να έχει κυλινδρική δομή με αυλακώσεις, εντός των οποίων τοποθετείται το τύλιγμα. Εναλλακτικά, ο δρομέας μπορεί να έχει πόλους οι οποίοι να προεξέχουν (*salient pole rotor*), όπως οι πόλοι του στάτη στις μηχανές συνεχούς ρεύματος. Στην κατασκευαστική δομή του δρομέα των επαγωγικών κινητήρων, θα αναφερθούμε λεπτομερέστερα στη συνέχεια.

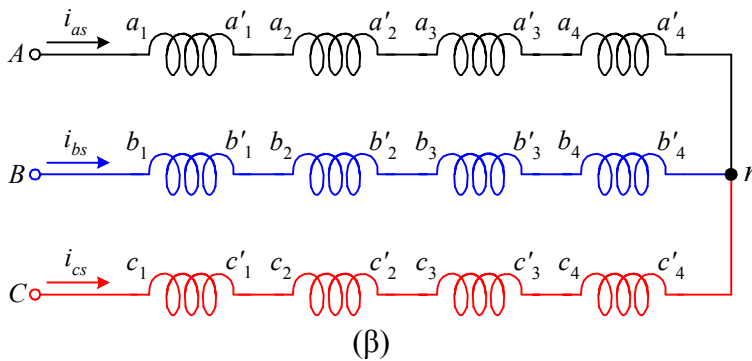
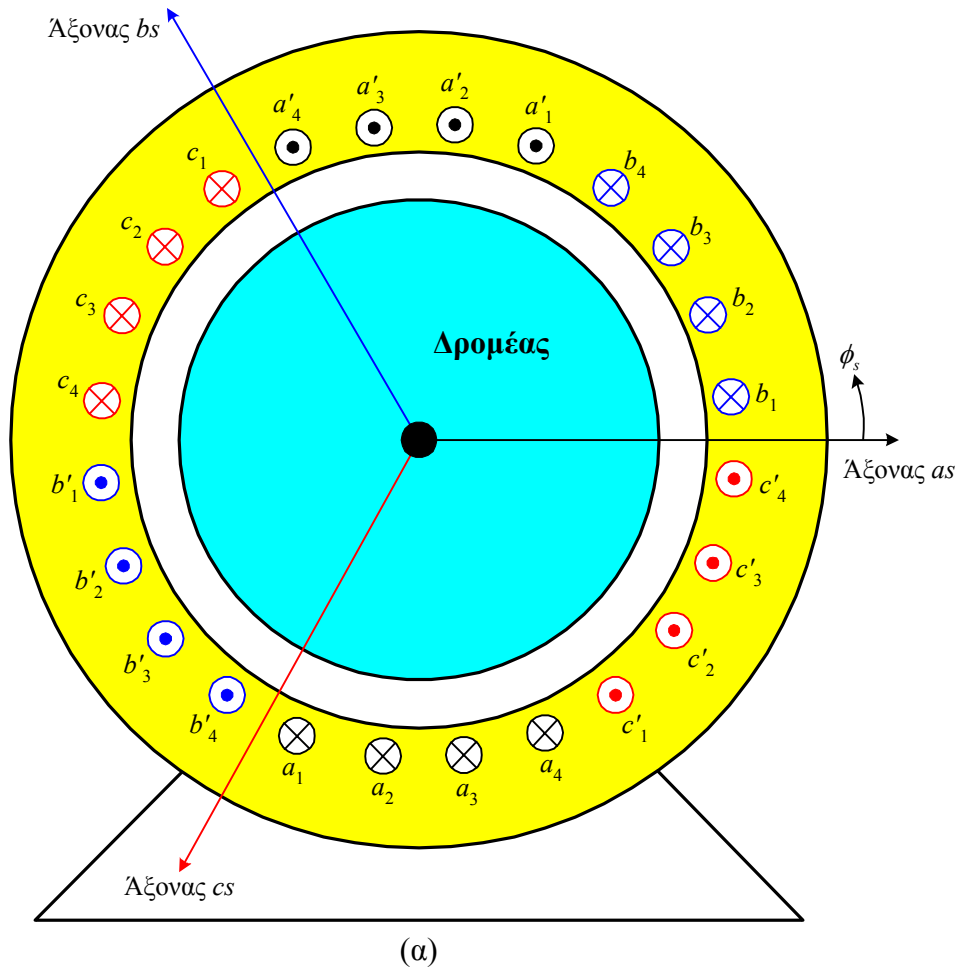
Αντίθετα από το δρομέα, ο στάτης όλων μηχανών εναλλασσόμενου ρεύματος έχει την ίδια κατασκευαστική δομή. Ο στάτης είναι μια κυλινδρική δομή από ελάσματα μονωμένα μεταξύ τους. Στο εσωτερικό του φέρει αυλακώσεις, μέσα στις οποίες τοποθετείται το τύλιγμα του στάτη, όπως εικονίζεται στο Σχ. 5.2. Στη συνέχεια θεωρούμε ότι το τύλιγμα του στάτη είναι τριφασικό, οπότε η μηχανή χαρακτηρίζεται ως τριφασική. Όταν το τριφασικό τύλιγμα του στάτη διαρρέετε από ένα τριφασικό σύστημα ρευμάτων, αναπτύσσεται το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο.

Εκτός από τις τριφασικές μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος, υπάρχουν οι μονοφασικές και οι διφασικές. Οι μηχανές αυτές φέρουν στο στάτη μονοφασικό ή διφασικό τύλιγμα αντίστοιχα. Η χρήση τους είναι περιορισμένη, σε σχέση με τις τριφασικές μηχανές, εξαιτίας των λειτουργικών μειονεκτημάτων που παρουσιάζουν.

#### 5.4 ΤΟ ΣΤΡΕΦΟΜΕΝΟ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ

Όπως και στην ανάλυση των μηχανών συνεχούς ρεύματος, θεωρούμε αρχικά μια μηχανή εναλλασσόμενου ρεύματος, ο στάτης της οποίας φέρει ένα στοιχειώδες τριφασικό τύλιγμα. Το τύλιγμα του στάτη, όπως εικονίζεται στο Σχ. 5.3α, δημιουργεί ένα στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο με δύο πόλους (διπολική μηχανή). Το τριφασικό τύλιγμα είναι σε σύνδεση αστέρα (Σχ. 5.3β).

Στην τριφασική μηχανή, η κάθε φάση του τυλίγματος είναι μετατοπισμένη κατά  $120^\circ$ , σε σχέση με τις άλλες δύο. Οι άξονες  $as$ ,  $bs$ ,  $cs$ , δηλώνουν τη θετική φορά των μαγνητικών πεδίων, που παράγουν τα τρία τυλίγματα μόνα τους. Τα τρία τυλίγματα έχουν την ίδια αντίσταση και τον ίδιο αριθμό σπειρών, όποτε το τριφασικό τύλιγμα του στάτη ονομάζεται *συμμετρικό*. Οι *πλευρές των ομάδων* (*coil sides*), κάθε τυλίγματος είναι τοποθετημένες σε αυλάκια (*slots*), τα οποία σχηματίζουν γωνία (*span*)  $180^\circ$  στη διπολική μηχανή. Η φορά του ρεύματος σε κάθε πλευρά των ομάδων, οι οποίες αποτελούνται από ορισμένο αριθμό σπειρών, εικονίζεται στο Σχ. 5.3α. Τα άκρα των τεσσάρων ομάδων κάθε τυλίγματος συνδέονται σε σειρά, με τον τρόπο που εικονίζεται στο Σχ. 5.3β. Τα άκρα  $a'_4$ ,  $b'_4$  και  $c'_4$  από τα τρία τυλίγματα συνδέονται μεταξύ τους, στη σύνδεση αστέρα.



**Σχ. 5.3** Στοιχειώδης διπολική μηχανή εναλλασσόμενου ρεύματος, με τριφασικό τύλιγμα στο στάτη (α), σε σύνδεση αστέρα (β)

Στη στοιχειώδη μηχανή του Σχ. 5.3α, οι πλευρές των ομάδων κάθε τυλίγματος, είναι ομοιόμορφα κατανομημένες στην επιφάνεια του στάτη, σε γωνία  $60^\circ$ . Στις πραγματικές μηχανές, οι πλευρές των ομάδων κατανομούνται σε μεγαλύτερη γωνία. Έτσι, στην ίδια αυλάκωση τοποθετούνται οι πλευρές από δύο ομάδες. Επιπλέον, οι ομάδες δεν έχουν τον ίδιο αριθμό σπειρών. Το τύλιγμα του Σχ. 5.3α ονομάζεται *full-pitch*, επειδή οι αντίθετες πλευρές των ομάδων σχηματίζουν γωνία  $180^\circ$  (διπολική μηχανή). Συχνά, οι αντίθετες πλευρές των ομάδων σχηματίζουν γωνία μικρότερη από  $180^\circ$ , οπότε το τύλιγμα ονομάζεται *fractional-pitch*.

Στο Σχ. 5.4 εικονίζεται το ανάπτυγμα της στοιχειώδους μηχανής. Ως αρχή των αξόνων θεωρείται ο άξονας  $as$  στα δεξιά του σχήματος. Ακόμη, στο Σχ. 5.4 εικονίζεται η μαγνητεγερτική δύναμη  $ME\Delta$ , που αναπτύσσεται από το τύλιγμα της φάσης  $as$ . Η  $ME\Delta_{as}$  μεταβάλλεται βηματικά στο κέντρο των αγωγών του τυλίγματος. Σημειώνουμε ότι, το μαγνητικό πεδίο διατρέχει ακτινικά

το διάκενο. Η ακτινική διεύθυνση του πεδίου οφείλεται στο μικρό πλάτος του διακένου σχετικά με τη διάμετρο του δρομέα και τη μεγάλη μαγνητική του αντίσταση, σε σχέση μ' εκείνη του σιδήρου στο στάτη και το δρομέα. Η ΜΕΔ που αναπτύσσεται από το τύλιγμα  $bs$  (ΜΕΔ<sub>bs</sub>) έχει την ίδια μορφή με την ΜΕΔ<sub>as</sub>, αλλά είναι μετατοπισμένη κατά 120° προς τα αριστερά. Αντίστοιχα, η ΜΕΔ<sub>cs</sub> είναι μετατοπισμένη κατά 240° προς τα αριστερά ως προς την ΜΕΔ<sub>as</sub>. Οι άξονες  $as$ ,  $bs$ ,  $cs$ , βρίσκονται στο μέσο της μέγιστης θετικής ΜΕΔ κάθε τυλίγματος.

Οι κυματομορφές των ΜΕΔ που αναπτύσσουν τα τυλίγματα της στοιχειώδους μηχανής στο διάκενο, είναι μη ημιτονοειδείς συναρτήσεις της χωρικής γωνίας  $\phi_s$ . Αυτό είναι ανεπιθύμητο, ιδιαίτερα στις μηχανές μεγάλης ισχύος, γιατί προκαλεί την ανάπτυξη αρμονικών τάσεων και ρευμάτων. Για την παραγωγή ημιτονοειδούς ΜΕΔ στο διάκενο της μηχανής, τα τυλίγματα του στάτη πρέπει να έχουν ημιτονοειδή κατανομή, όπως εικονίζεται στο Σχ. 5.5α. Τότε, η ΜΕΔ έχει την ημιτονοειδή μορφή του Σχ. 5.5β και ορίζεται από την παρακάτω σχέση, για τη φάση  $as$

$$ΜΕΔ_{as} = \frac{N_s}{2} i_{as} \cos \phi_s \tag{5.1}$$

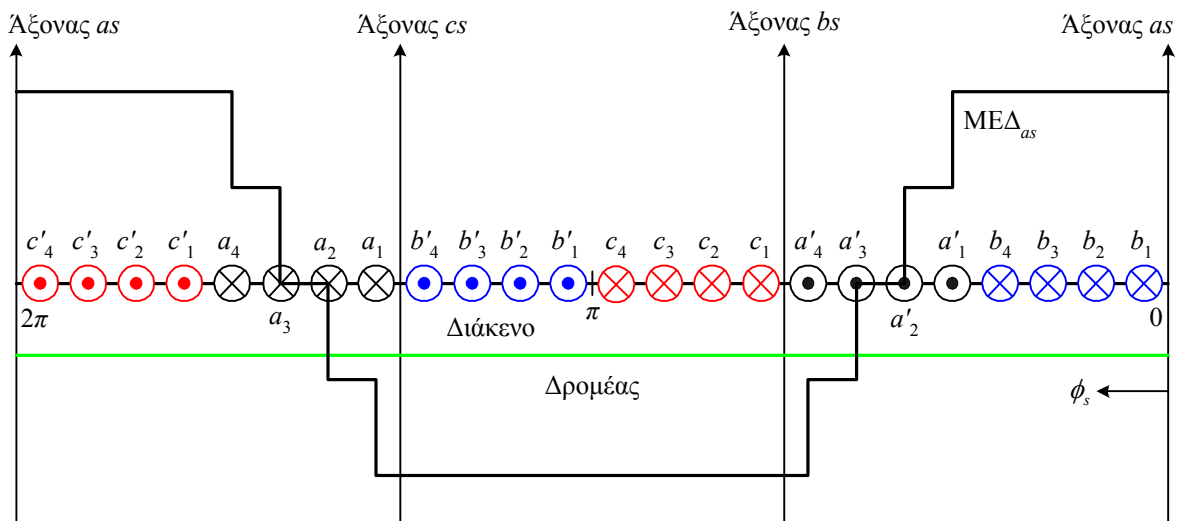
όπου  $i_{as}$  είναι το ρεύμα στη φάση  $as$  του τυλίγματος και  $N_s$  είναι ο ισοδύναμος αριθμός σπειρών ενός ημιτονοειδούς κατανομημένου τυλίγματος, ο οποίος δίνει την ίδια θεμελιώδη συνιστώσα με το πραγματικό τύλιγμα. Οι ΜΕΔ που αναπτύσσονται από τα τυλίγματα των φάσεων  $bs$  και  $cs$ , ορίζονται από τις σχέσεις

$$ΜΕΔ_{bs} = \frac{N_s}{2} i_{bs} \cos(\phi_s - 2\pi/3) \tag{5.2}$$

$$ΜΕΔ_{cs} = \frac{N_s}{2} i_{cs} \cos(\phi_s + 2\pi/3) \tag{5.3}$$

Η ολική ΜΕΔ στο διάκενο, από τα τρία τυλίγματα, είναι ίση με το άθροισμα των επιμέρους ΜΕΔ

$$ΜΕΔ_s = \frac{N_s}{2} [i_{as} \cos \phi_s + i_{bs} \cos(\phi_s - 2\pi/3) + i_{cs} \cos(\phi_s + 2\pi/3)] \tag{5.4}$$



Σχ. 5.4 Ανάπτυγμα της στοιχειώδους μηχανής, όπου εικονίζεται το τριφασικό τύλιγμα και η αναπτυσσόμενη ΜΕΔ από τη φάση  $as$

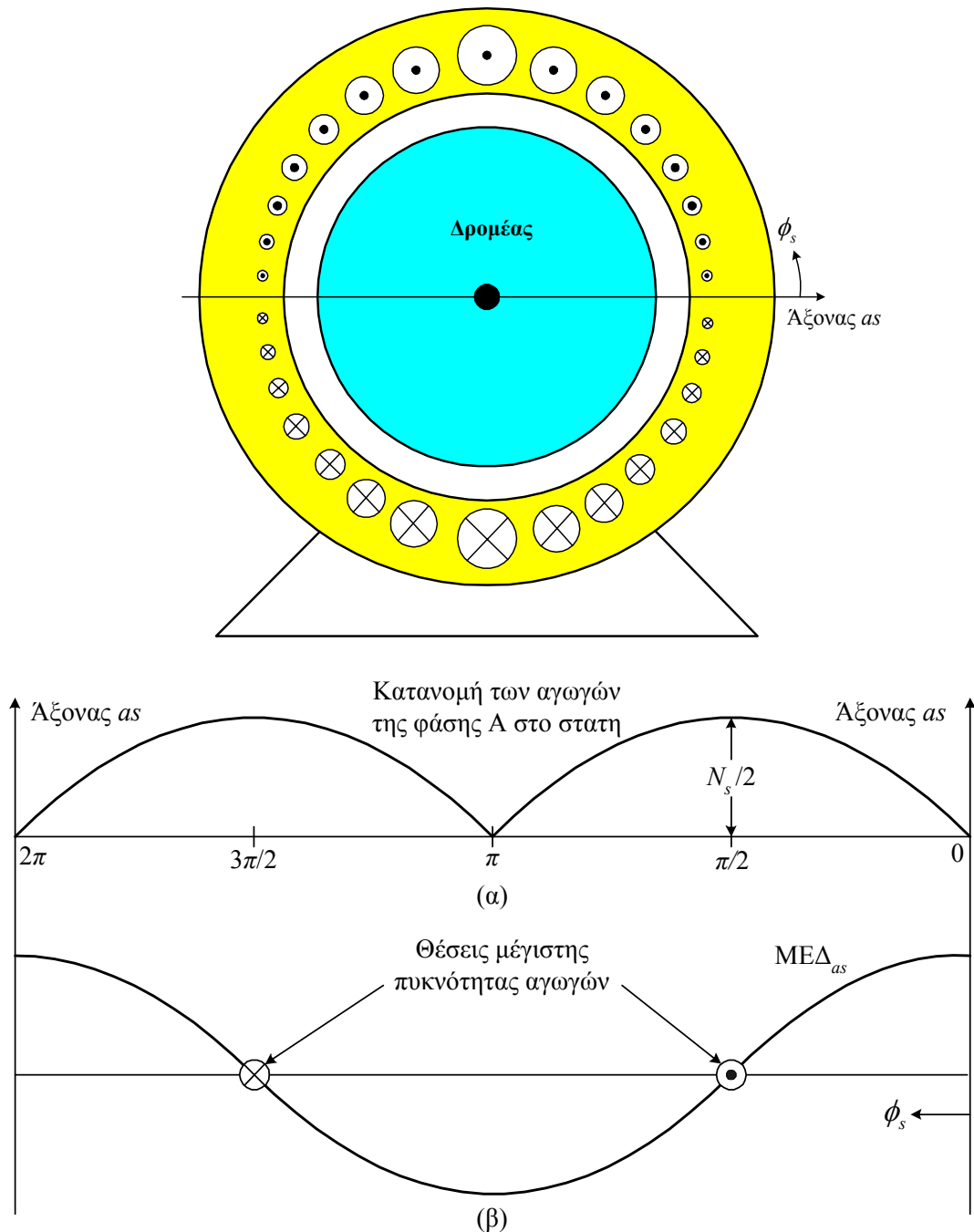
Τα συμμετρικά ρεύματα στο τριφασικό τύλιγμα της μηχανής, ορίζονται από τις σχέσεις

$$i_{as} = I_{ms} \cos(\omega_e t) \tag{5.5}$$

$$i_{bs} = I_{ms} \cos(\omega_e t - 2\pi/3) \tag{5.6}$$

$$i_{cs} = I_{ms} \cos(\omega_e t + 2\pi/3) \tag{5.7}$$

όπου  $\omega_e$  είναι η κυκλική συχνότητα των ρευμάτων. Αντικαθιστώντας τις Εξ. (5.5)–(5.7) στην Εξ. (5.4), ορίζεται η ολική ΜΕΔ στο διάκενο της μηχανής



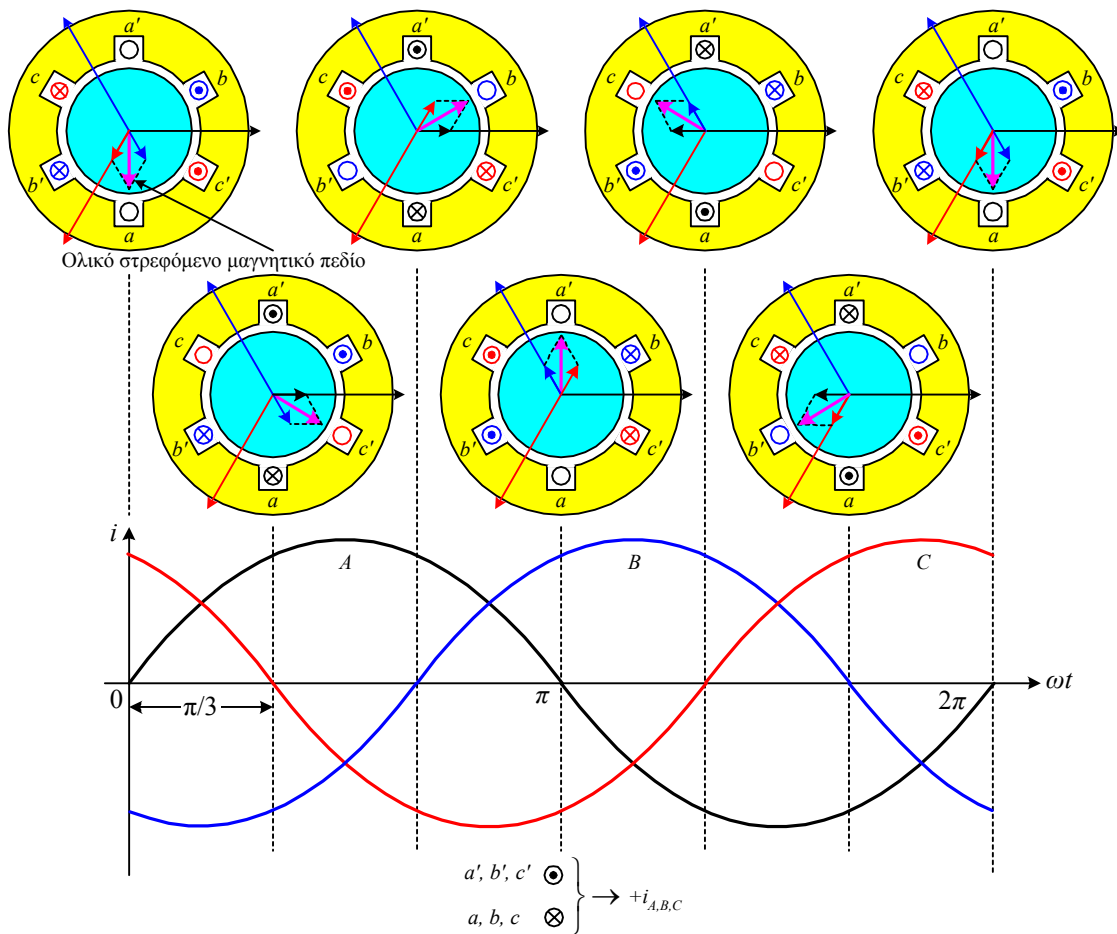
Σχ. 5.5 Τύλιγμα της φάσης as με ημιτονοειδή κατανομή (α) και η παραγόμενη ΜΕΔ στο διάκενο (β)



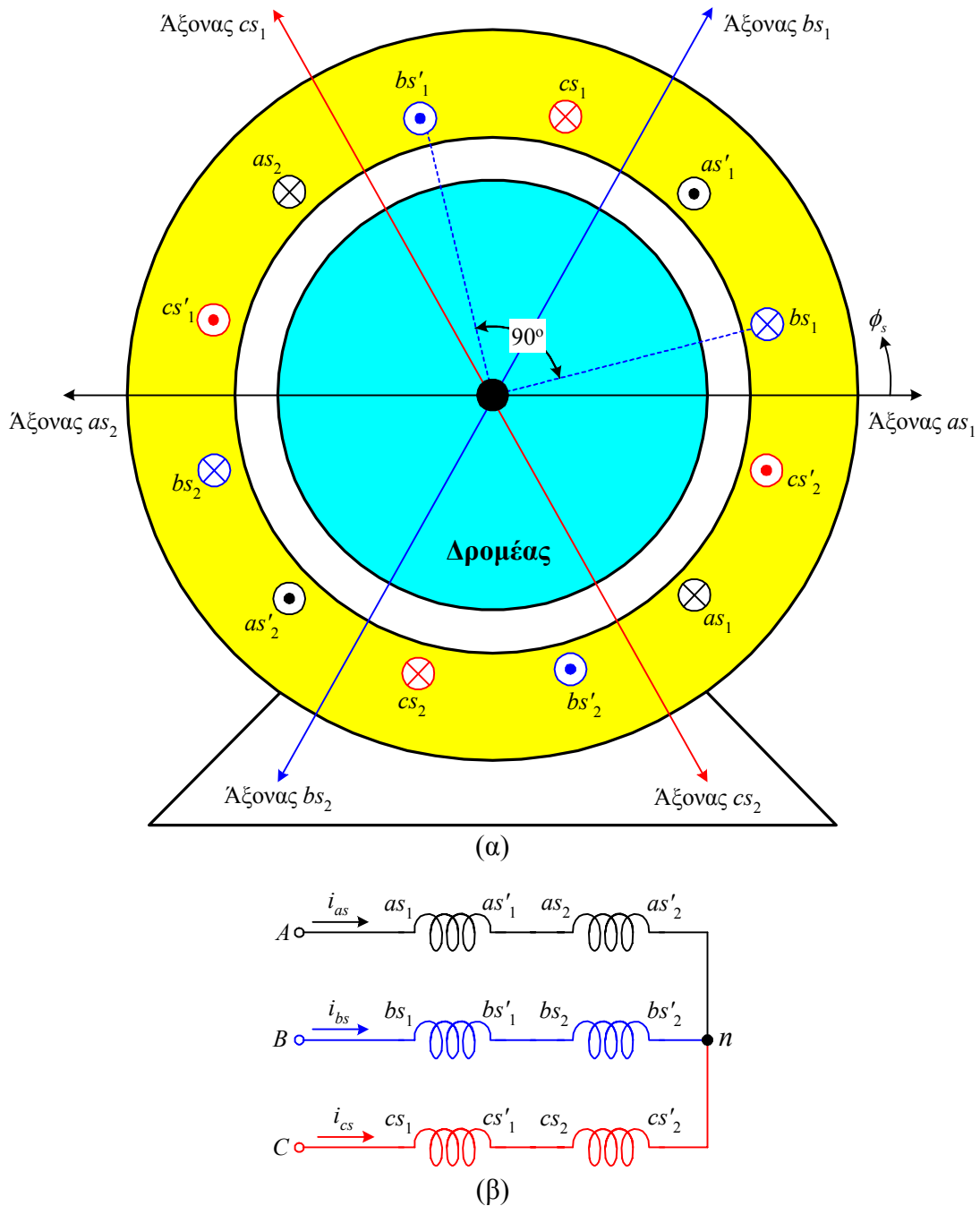
$$ME\Delta_s = \frac{N_s}{2} \frac{3}{2} I_{ms} \cos(\omega_e t - \phi_s) \tag{5.8}$$

Η Εξ. (5.8) παριστά μια ΜΕΔ με ημιτονοειδή κατανομή, η οποία στρέφεται με γωνιακή ταχύτητα  $\omega_e$  σε σχέση με το στάτη της μηχανής, με φορά αντίθετη των δεικτών του ρολογιού. Η ΜΕΔ έχει ένα ζεύγος πόλων. Επομένως, η ροή των τριφασικών ρευμάτων από το τριφασικό τύλιγμα του στάτη δημιούργησε ένα μαγνητικό πεδίο, ο βόρειος και ο νότιος πόλος του οποίου κάνουν μια πλήρη περιστροφή σε κάθε περίοδο των ρευμάτων.

Η δημιουργία του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου γίνεται φανερή από το Σχ. 5.6. Η θετική φορά των ρευμάτων σε καθένα από τα τρία τύλιγματα του στάτη, αντιστοιχεί σ' εκείνη του Σχ. 5.3α. Κάθε τύλιγμα από τη ροή του αντίστοιχου ρεύματος παράγει ένα μαγνητικό πεδίο, η θετική φορά του οποίου (βόρειος πόλος) εικονίζεται στο Σχ. 5.6 και είναι ίδια μ' εκείνη στο Σχ. 5.3α. Στο Σχ. 5.6 εικονίζονται τα μαγνητικά πεδία που παράγει κάθε τύλιγμα του στάτη μόνο του, καθώς και το ολικό πεδίο της μηχανής σε επτά διακριτές χρονικές στιγμές, οι οποίες αντιστοιχούν σε γωνίες των ρευμάτων  $60^\circ$ . Η διαδοχή φάσης των ρευμάτων είναι *ABC*. Παρατηρούμε ότι στη διπολική μηχανή που εξετάζουμε το ολικό μαγνητικό πεδίο στρέφεται κατά  $60$  μηχανικές μοίρες σε κάθε  $60^\circ$  μεταβολή της φασικής γωνίας των ρευμάτων με αντι-ωρολογιακή φορά, όπως ήδη γνωρίζουμε από την Εξ.(5.8). Αν η σειρά διαδοχής φάσης των ρευμάτων αντιστραφεί, τότε θα αντιστραφεί και η φορά περιστροφής του μαγνητικού πεδίου (ωρολογιακή).



**Σχ. 5.6** Παραγωγή του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου σε μια διπολική τριφασική μηχανή με θετική σειρά διαδοχής των φάσεων (*ABC*). Το μαγνητικό πεδίο εκτελεί μια πλήρη περιστροφή, με φορά αντίθετη των δεικτών του ρολογιού, σε κάθε περίοδο των ρευμάτων



Σχ. 5.7 Στοιχειώδης τετραπολική μηχανή εναλλασσόμενου ρεύματος, με τριφασικό τύλιγμα στο στάτη

Στο Σχ. 5.7 εικονίζονται τα τυλίγματα του στάτη σε μια τετραπολική μηχανή. Το τύλιγμα της κάθε φάσης αποτελείται από δύο επιμέρους τυλίγματα, τα οποία συνδέονται σε σειρά. Τα τρία τυλίγματα συνδέονται σε αστέρα. Οι αντίθετες πλευρές των ομάδων κάθε τυλίγματος (*span*) σχηματίζουν γωνία 90°. Η ΜΕΔ που αναπτύσσεται στο διάκενο των μηχανών με  $P$  πόλους, ορίζεται με αντίστοιχο τρόπο από τη σχέση

$$ME\Delta_s = \frac{N_s}{P} \frac{3}{2} I_{ms} \cos \left\{ \omega_e t - \frac{P}{2} \phi_s \right\} \quad (5.9)$$

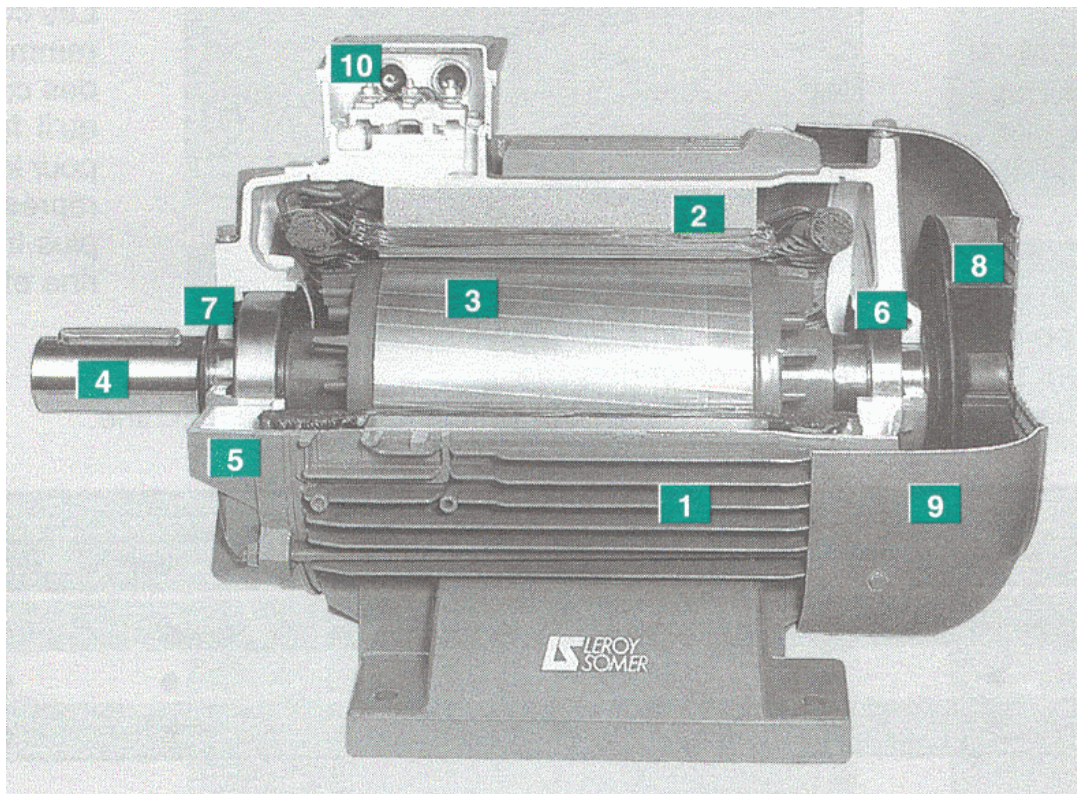
Η ταχύτητα περιστροφής της ΜΕΔ είναι μειωμένη και ίση με  $\omega_e / (P/2)$ . Η ταχύτητα της ΜΕΔ ονομάζεται *σύγχρονη ταχύτητα*. Το μαγνητικό πεδίο αποτελείται από  $P$  πόλους.

## 5.5 ΕΙΔΗ ΕΠΑΓΩΓΙΚΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ

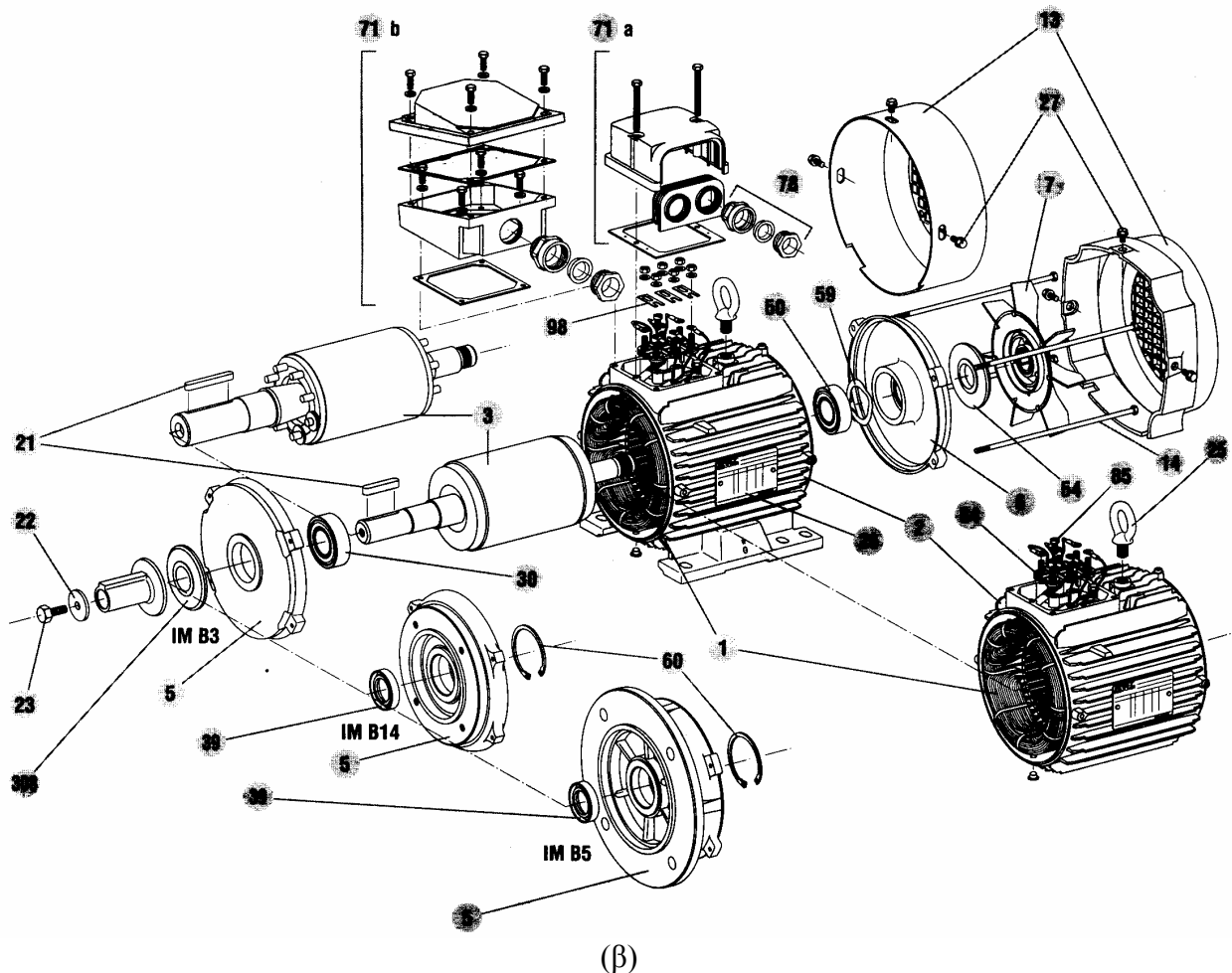
Οι επαγωγικοί κινητήρες διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, ανάλογα με την κατασκευαστική δομή του δρομέα τους: σε κινητήρες με βραχυκυκλωμένο δρομέα ή κλωβό (*squirrel cage rotor*) και σε κινητήρες με δακτυλιοφόρο δρομέα (*wound rotor*).

Οι κινητήρες με βραχυκυκλωμένο κλωβό είναι οι πλέον διαδεδομένοι. Ο δρομέας των κινητήρων αυτών αποτελείται από ελάσματα μονωμένα μεταξύ τους, τα οποία προσαρμόζονται στον άξονα. Τα ελάσματα φέρουν οδοντώσεις, οι οποίες σχηματίζουν αυλάκια κατά μήκος του δρομέα. Η γεωμετρική μορφή των αυλακώσεων καθορίζει την ηλεκτρική συμπεριφορά του κινητήρα, δηλαδή τη χαρακτηριστική ταχύτητας–ροπής. Στις κλάσεις (*classes*) των επαγωγικών κινητήρων με βραχυκυκλωμένο κλωβό, ανάλογα με τη μορφή των αυλακώσεων και στην ιδιαίτερη μορφή της χαρακτηριστικής ταχύτητας–ροπής κάθε κλάσης, θα αναφερθούμε στη συνέχεια.

Στα αυλάκια του δρομέα τοποθετούνται ράβδοι από χαλκό ή ορείχαλκο, τα άκρα των οποίων συνδέονται μεταξύ τους με δακτύλιους βραχυκύκλωσης (*shorting rings*). Έτσι, σχηματίζεται το τύλιγμα κλωβού του δρομέα. Στους επαγωγικούς κινητήρες μικρής ισχύος, το τύλιγμα κλωβού κατασκευάζεται με χύτευση αλουμινίου στα αυλάκια του δρομέα. Στην περίπτωση αυτή, οι δακτύλιοι βραχυκύκλωσης και τα πτερύγια εξαερισμού χυτεύονται μαζί με τους αγωγούς του κλωβού, οι οποίοι δεν είναι μονωμένοι ως προς το σίδηρο του δρομέα. Όμως, τα ρεύματα κυκλοφορούν κυρίως από τον κλωβό, καθώς η αγωγιμότητα του αλουμινίου είναι πολύ μεγαλύτερη από εκείνη του σιδήρου. Είναι φανερό ότι, ο δρομέας του επαγωγικού κινητήρα με βραχυκυκλωμένο κλωβό, δεν συνδέεται ηλεκτρικά με καμιά πηγή. Στο γεγονός αυτό οφείλεται η απλή κατασκευή και η ευρεία χρήση του επαγωγικού κινητήρα βραχυκυκλωμένου κλωβού (Σχ. 5.8).



(α)



(β)

Σχ. 5.8 Τριφασικός επαγωγικός κινητήρας με βραχυκυκλωμένο κλωβό. (α) Διακρίνονται τα παρακάτω μέρη: 1–Πτερύγια ψύξης του στάτη, 2–Ελάσματα του στάτη και το τύλιγμα, 3–Δρομέας, 4–Άξονας, 5–9–Κέλυφος, 6–7– Ρουλεμάν, 8–Ανεμιστήρας, 10–Κιβώτιο ηλεκτρικής σύνδεσης.  
(β) Λεπτομερής σχεδιαστική καταγραφή των επιμέρους τμημάτων του κινητήρα

Ο δρομέας των επαγωγικών κινητήρων με δακτυλιοφόρο δρομέα φέρει αυλακώσεις, μέσα στις οποίες τοποθετείται ένα τριφασικό τύλιγμα, αντίστοιχο μ' εκείνο του στάτη. Οι τρεις φάσεις του τυλίγματος στο δρομέα συνδέονται σχεδόν πάντα σε αστέρα. Τα τρία άκρα του τυλίγματος αστέρα καταλήγουν σε ισάριθμους δακτυλίους, που φέρει ο δρομέας. Μέσω των δακτυλίων και των ψηκτρών που εφάπτονται σ' αυτούς, είναι δυνατή η σύνδεση ρυθμιστικών αντιστάσεων στο τύλιγμα του δρομέα. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η τροποποίηση της χαρακτηριστικής ταχύτητας–ροπής του κινητήρα, ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας.

## 5.6 ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΔΟΜΗ ΤΟΥ ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ

Ο επαγωγικός κινητήρας έχει στο στάτη ένα συμμετρικό τριφασικό τύλιγμα, με ωμική αντίσταση  $R_s$ , αυτεπαγωγή  $L_{st}$  και ισοδύναμο αριθμό σπειρών  $w_s$  ανά φάση (Σχ. 5.9). Όταν το τύλιγμα του στάτη τροφοδοτηθεί από μια συμμετρική τριφασική πηγή με τάση  $u$  και συχνότητα  $\omega_e$ , δημιουργείται το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο του στάτη  $\phi_s$ . Το συνιστώσα  $\phi_{sr}$  του πεδίου του στάτη (κοινή ροή, *mutual flux*), διασχίζει ακτινικά το διάκενο και συνδέει το τύλιγμα του δρομέα. Η συνιστώσα  $\phi_{ls}$  ονομάζεται ροή σκέδασης (*leakage flux*) και συνδέει μόνο τις σπείρες του στάτη. Το μέγεθος της ροής σκέδασης εξαρτάται από τη σύζευξη μεταξύ των τυλιγμάτων του

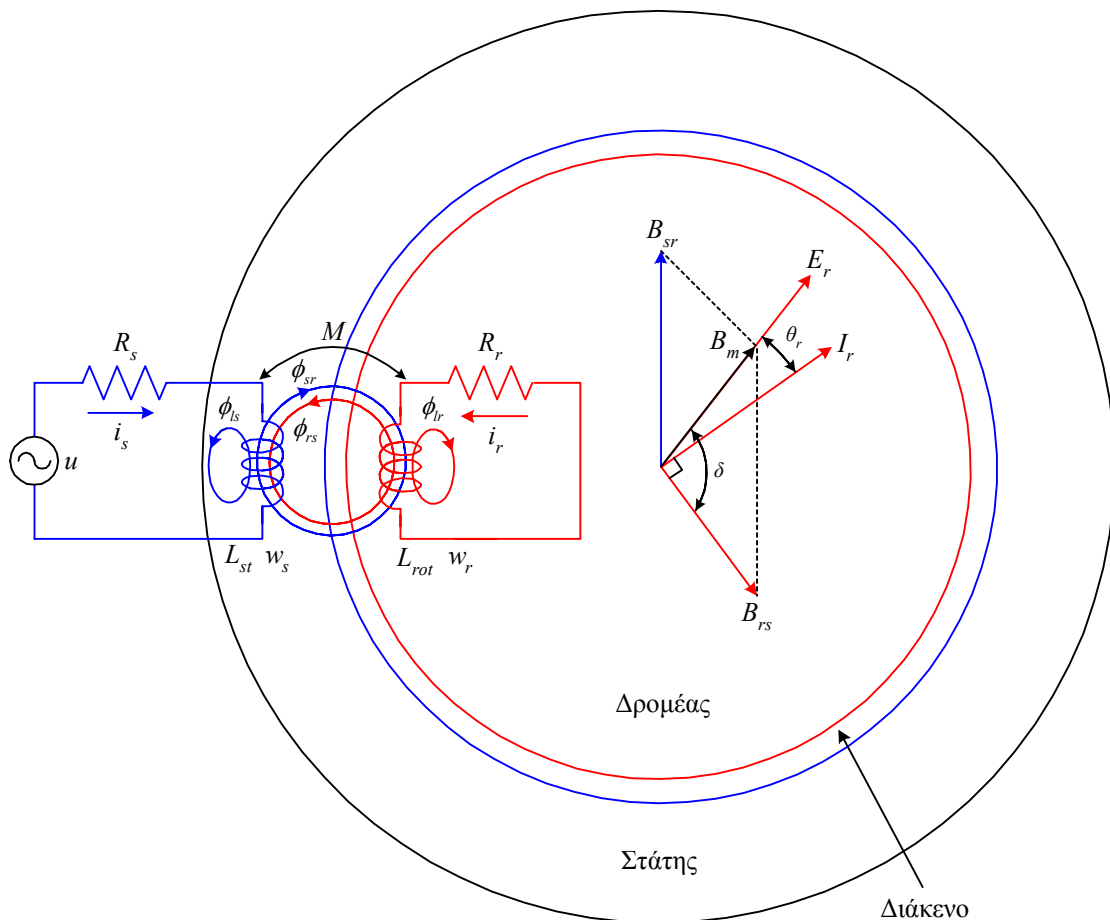
στάτη και του δρομέα. Η σύζευξη των τυλιγμάτων στις ηλεκτρικές μηχανές είναι πολύ μικρότερη από εκείνη στους μετασχηματιστές, εξαιτίας του διακένου. Το ολικό πεδίο του στάτη είναι ίσο με

$$\phi_s = \phi_{ls} + \phi_{sr} \tag{5.10}$$

Το τύλιγμα του δρομέα έχει τη μορφή πλήρους τριφασικού τυλίγματος, με τον ίδιο αριθμό πόλων μ' εκείνο του στάτη, στον κινητήρα με δακτυλιοφόρο δρομέα. Στον κινητήρα με βραχυκυκλωμένο κλωβό το τύλιγμα του δρομέα αποτελείται από ράβδους, τα άκρα των οποίων συνδέονται με δακτυλίους βραχυκύκλωσης. Το τύλιγμα κλωβού μπορεί να θεωρηθεί αντίστοιχο με ένα πλήρες συμμετρικό τριφασικό τύλιγμα, με αριθμό πόλων ίσο μ' εκείνο του στάτη.

Καθώς το στρεφόμενο πεδίο του στάτη (συνιστώσα  $\phi_{sr}$ ) τέμνει τους αγωγούς του τυλίγματος του δρομέα, επάγει σ' αυτούς συμμετρικές τριφασικές τάσεις  $E_r$ . Το πλάτος και η συχνότητα των επαγόμενων τάσεων, εξαρτάται από τη σχετική ταχύτητα του δρομέα ως προς το στρεφόμενο πεδίο του στάτη. Το τύλιγμα του δρομέα έχει ωμική αντίσταση  $R_r$ , αυτεπαγωγή  $L_{rot}$  και ισοδύναμο αριθμό σπειρών  $w_r$  ανά φάση. Εξαιτίας της επαγωγικής φύσης του βραχυκυκλωμένου τυλίγματος του δρομέα, το ρεύμα στο δρομέα  $I_r$  καθυστερεί ως προς την επαγόμενη τάση  $E_r$ . Στο Σχ. 5.9 εικονίζεται μόνο η μία φάση των τυλιγμάτων στο στάτη και το δρομέα.

Τα τριφασικά ρεύματα που ρέουν στο δρομέα, ως συνέπεια των επαγόμενων τάσεων από το στρεφόμενο πεδίο του στάτη, προκαλούν την ανάπτυξη του στρεφόμενου πεδίου του δρομέα  $\phi_r$ . Η συνιστώσα  $\phi_{rs}$  του πεδίου του δρομέα, συνδέει το τύλιγμα του στάτη.



Σχ. 5.9 Ηλεκτρομαγνητική δομή του επαγωγικού κινητήρα

Η συνιστώσα  $\phi_r$  αντιπροσωπεύει τη ροή σκέδασης. Έτσι, ισχύει

$$\phi_r = \phi_{lr} + \phi_{rs} \quad (5.11)$$

Το διανυσματικό διάγραμμα των παραπάνω μεγεθών εικονίζεται στο Σχ. 5.9. Η ολική μαγνητική ροή στο διάκενο του κινητήρα  $\phi_m$ , είναι ίση με το διανυσματικό άθροισμα των κοινών ροών του στάτη και του δρομέα

$$\phi_m = \phi_{sr} + \phi_{rs} \quad (5.12)$$

Η αλληλεπίδραση των μαγνητικών πεδίων του στάτη και του δρομέα, τα οποία στρέφονται με την ίδια ταχύτητα, προκαλεί την ανάπτυξη μιας σταθερής ηλεκτρομαγνητικής ροπής. Η ροπή είναι ανάλογη με το εξωτερικό γινόμενο των πεδίων

$$T_e = C_1 (\mathbf{B}_{sr} \times \mathbf{B}_{rs}) \quad (5.13)$$

ή αντίστοιχα των πεδίων

$$T_e = C_2 (\mathbf{B}_m \times \mathbf{B}_{rs}) \quad (5.14)$$

$$T_e = C_T B_m B_{rs} \sin \delta = C_T B_m B_{rs} \cos \theta_r \quad (5.15)$$

και η φορά της είναι η ίδια με τη φορά περιστροφής των πεδίων του στάτη και του δρομέα.

Από τα προηγούμενα προκύπτει ότι, τα ρεύματα στο δρομέα του κινητήρα προέρχονται από τις τάσεις εξ επαγωγής που προκαλεί το στρεφόμενο πεδίο του στάτη. Επομένως, ο δρομέας δεν απαιτείται να τροφοδοτηθεί από κάποια εξωτερική πηγή ενέργειας. Οι μηχανές με τροφοδότηση μόνο στο στάτη, ονομάζονται *απλής διέγερσης (singly excited)*. Αντίστοιχα, οι μηχανές που τροφοδοτούνται από εξωτερικές πηγές τόσο στο στάτη όσο και στο δρομέα, όπως οι σύγχρονες και οι μηχανές συνεχούς ρεύματος, ονομάζονται *διπλής διέγερσης (doubly excited)*.

## 5.7 Η ΟΛΙΣΘΗΣΗ

Η ταχύτητα περιστροφής του μαγνητικού πεδίου του στάτη, εξαρτάται από τη συχνότητα των ρευμάτων τροφοδοσίας  $\omega_e = 2\pi f_e$  και τον αριθμό των πόλων  $P$ , σύμφωνα με την Εξ. (5.9). Η ταχύτητα του στρεφόμενου πεδίου ονομάζεται σύγχρονη ταχύτητα  $n_s$  και ορίζεται από την παρακάτω σχέση σε rpm

$$n_s = \frac{60 \cdot f_e}{P/2} = \frac{120 f_e}{P} \quad (5.16)$$

Στον επαγωγικό κινητήρα, η ανάπτυξη της ροπής οφείλεται στην αλληλεπίδραση των μαγνητικών πεδίων του στάτη και του δρομέα. Όμως, το πεδίο του δρομέα οφείλεται στις τάσεις εξ επαγωγής, οι οποίες αναπτύσσονται στο δρομέα μόνο όταν υπάρχει σχετική κίνηση μεταξύ του δρομέα και του στρεφόμενου πεδίου. Επομένως, η ταχύτητα του δρομέα δεν μπορεί να είναι ίση με τη σύγχρονη, καθώς τότε δεν θα επάγονταν τάσεις στο δρομέα, με συνέπεια το ρεύμα και η ροή του δρομέα να ήταν μηδενικά. Έτσι, η ροπή θα μηδενίζονταν και η ταχύτητα του κινητήρα θα μειώνονταν σε μια τιμή μικρότερη από τη σύγχρονη.

Η διαφορά της ταχύτητας του δρομέα  $n_r$  από τη σύγχρονη  $n_s$  ονομάζεται *ταχύτητα ολίσθησης* (*slip speed*) και ορίζεται από τη σχέση

$$n_{slip} = n_s - n_r \quad (5.17)$$

Η ποσοστιαία διαφορά της ταχύτητας του κινητήρα από τη σύγχρονη ταχύτητα ονομάζεται *ολίσθηση* (*slip*)

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \times 100\% \quad (5.18)$$

Όταν ο κινητήρας είναι ακίνητος, η ολίσθηση είναι ίση με τη μονάδα ( $s = 1$ ). Αν ο δρομέας στρέφονταν με τη σύγχρονη ταχύτητα, η ολίσθηση θα ήταν μηδέν ( $s = 0$ ). Από την Εξ. (5.18) προκύπτει η παρακάτω σχέση της ταχύτητας του κινητήρα, ως συνάρτηση της σύγχρονης ταχύτητας και της ολίσθησης

$$n_r = (1 - s)n_s \quad (5.19)$$

Η ονομασία ασύγχρονος κινητήρας, προέρχεται από τη διαφορά της ταχύτητας του δρομέα από τη σύγχρονη, η οποία είναι ανάλογη με τη ροπή του φορτίου.

## 5.8 ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΤΟΥ ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ

Η λειτουργία του επαγωγικού κινητήρα στηρίζεται στην ανάπτυξη τάσεων εξ επαγωγής στο τριφασικό τύλιγμα του δρομέα. Επομένως, η αρχή λειτουργίας του επαγωγικού κινητήρα είναι ίδια μ' εκείνη του μετασχηματιστή. Για το λόγο αυτό, ο ασύγχρονος κινητήρας ονομάζεται και *στρεφόμενος μετασχηματιστής* (*rotating transformer*).

Προκειμένου να λάβουμε το ισοδύναμο κύκλωμα του συμμετρικού τριφασικού επαγωγικού κινητήρα, θεωρούμε την ηλεκτρομαγνητική δομή ανά φάση του Σχ. 5.9, από την οποία προκύπτουν οι παρακάτω εξισώσεις

$$u = R_s i_s + L_{st} \frac{di_s}{dt} - M \frac{di_r}{dt} \quad (5.20)$$

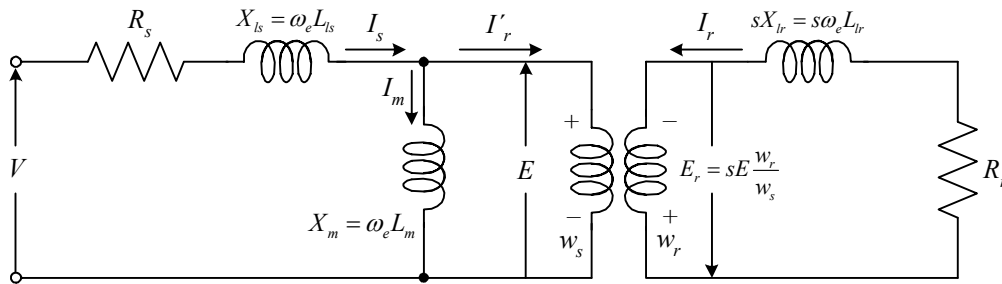
$$0 = R_r i_r + L_{rot} \frac{di_r}{dt} - M \frac{di_s}{dt} \quad (5.21)$$

όπου  $M$  είναι ο συντελεστής αμοιβαίας επαγωγής μεταξύ των τυλιγμάτων του στάτη και του δρομέα. Αν θεωρήσουμε ημιτονοειδή μεγέθη και μόνιμη κατάσταση ισορροπίας, οι Εξ. (5.20)–(5.21) λαμβάνουν τη μορφή

$$V = R_s I_s + j\omega_e L_{st} I_s - j\omega_e M I_r \quad (5.22)$$

$$0 = R_r I_r + js\omega_e L_{rot} I_r - js\omega_e M I_s \quad (5.23)$$

Οι εξισώσεις του επαγωγικού κινητήρα διαφέρουν από εκείνες του μετασχηματιστή, μόνο στο δευτερεύον κύκλωμα (δρομέα).



Σχ. 5.10 Ανά φάση ισοδύναμο κύκλωμα του επαγωγικού κινητήρα, το οποίο στηρίζεται στο μοντέλο του μετασηματιστή

Στο Σχ. 5.10 εικονίζεται το ισοδύναμο κύκλωμα του μετασηματιστή, τροποποιημένο ως προς το δρομέα, για τις ανάγκες του επαγωγικού κινητήρα. Στον κινητήρα, αντίθετα από το μετασηματιστή, η συχνότητα των επαγόμενων τάσεων και των ρευμάτων στο δρομέα δεν είναι σταθερή και ίση με τη συχνότητα του πρωτεύοντος (στάτη). Στον επαγωγικό κινητήρα, η συχνότητα των επαγόμενων τάσεων και ρευμάτων  $f_r$  εξαρτάται από την ολίσθηση, όπως προκύπτει από την Εξ. (5.23) και ορίζεται από τη σχέση

$$f_r = sf_e \tag{5.24}$$

Όταν ο κινητήρας είναι ακίνητος, η συχνότητα του δρομέα είναι ίση με τη συχνότητα του στάτη. Καθώς η ταχύτητα τείνει προς τη σύγχρονη, η συχνότητα των τάσεων και των ρευμάτων στο δρομέα τείνει στο μηδέν. Εκτός από τη συχνότητα των επαγόμενων τάσεων και το πλάτος των τάσεων μεταβάλλεται ανάλογα με την ολίσθηση. Έτσι, η επαγόμενη τάση είναι μέγιστη κατά την εκκίνηση του κινητήρα, όπου  $n_r = 0$ ,  $s = 1$  και ελάχιστη όταν η ταχύτητα τείνει προς τη σύγχρονη ( $s \rightarrow 0$ ). Οι Εξ. (5.22), (5.23) του κινητήρα, με κατάλληλος χειρισμούς, λαμβάνουν την παρακάτω μορφή

$$V = (R_s + jX_{ls})I_s + jX_m(I_s - I_r') \tag{5.25}$$

$$0 = \left(\frac{R_r'}{s} + jX_{lr}'\right)I_r' + jX_m(I_r' - I_s) \tag{5.26}$$

Στις Εξ. (5.25)–(5.26), ορίζονται τα παρακάτω μεγέθη, τα οποία εμφανίζονται και στο ισοδύναμο κύκλωμα του επαγωγικού κινητήρα:

$X_{ls}$  είναι η αντίδραση σκέδασης του στάτη, η οποία εκφράζει τη ροή σκέδασης  $\phi_{ls}$

$$X_{ls} = \omega_e \left( L_{st} - M \frac{w_s}{w_r} \right) \tag{5.27}$$

$X_{lr}'$  είναι η αντίδραση σκέδασης του δρομέα, η οποία εκφράζει τη ροή σκέδασης  $\phi_{lr}$

$$X_{lr}' = \omega_e \left( L_{rot} - M \frac{w_r}{w_s} \right) \tag{5.28}$$

$X_m$  είναι η αντίδραση μαγνήτισης, η οποία παριστά τη σύζευξη μεταξύ των τυλιγμάτων του στάτη και του δρομέα



$$X_m = \omega_e M \frac{w_s}{w_r} \tag{5.29}$$

Τα μεγέθη του δρομέα αναφέρονται στο στάση, μέσω του λόγου σπειρών των δύο τυλιγμάτων  $w_s/w_r$ , από τις σχέσεις:

$$R'_r = R_r \left( \frac{w_s}{w_r} \right)^2 \tag{5.30}$$

$$X'_{lr} = X_{lr} \left( \frac{w_s}{w_r} \right)^2 \tag{5.31}$$

$$I'_r = I_r \left( \frac{w_r}{w_s} \right) \tag{5.32}$$

$$X_{ls} + X_m = \omega_e L_{st} \tag{5.33}$$

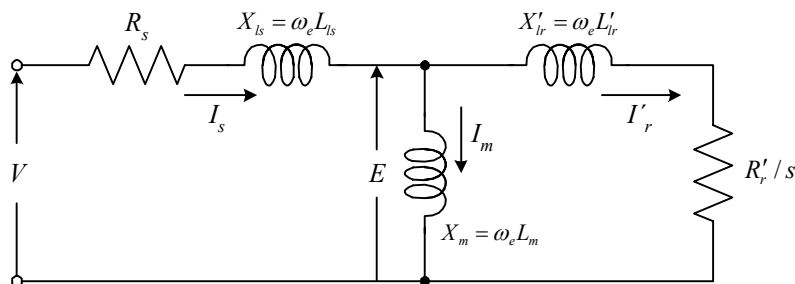
$$X'_{lr} + X_m = \omega_e L'_{rot} \tag{5.34}$$

Το τελικό ισοδύναμο κύκλωμα του επαγωγικού κινητήρα, από τις Εξ. (5.25)–(5.26), εικονίζεται στο Σχ. 5.11. Στο ισοδύναμο κύκλωμα, η τάση του δρομέα είναι σταθερή  $E$  και η συχνότητα είναι ίση μ' εκείνη του στάτη  $\omega_e$ . Οι επιπτώσεις από τη μεταβολή της ταχύτητας έχουν ενσωματωθεί στην ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση του δρομέα  $X'_{lr} + R'_r / s$ , η οποία εξαρτάται από την ολίσθηση.

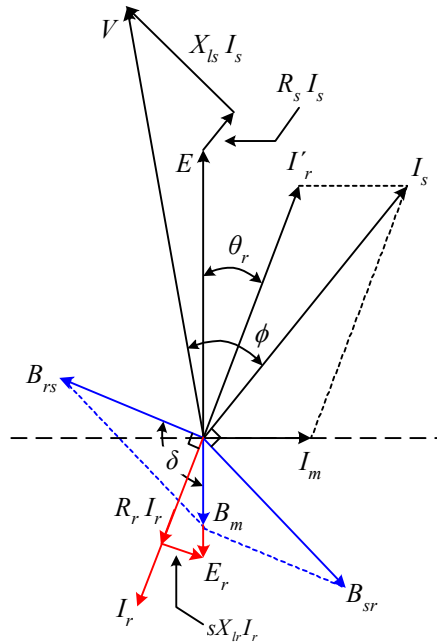
Στο Σχ. 5.12 παρουσιάζεται το διάγραμμα *στρεφόμενων ανυσμάτων (phasors)*, των τάσεων και των ρευμάτων του κινητήρα. Τα δύο πρώτα τεταρτημόρια αναφέρονται στα μεγέθη του κινητήρα, ανοιγμένα στο στάτη. Εικονίζονται ακόμη, τα μεγέθη στην πλευρά του δρομέα και τα μαγνητικά πεδία.

### 5.9 ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΤΩΝ ΕΠΑΓΩΓΙΚΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ

Ο βαθμός απόδοσης του τριφασικού επαγωγικού κινητήρα, εκφράζει την ικανότητά του να μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια εισόδου σε μηχανική.



**Σχ. 5.11** Τυπικό ισοδύναμο κύκλωμα του επαγωγικού κινητήρα. Τα μεγέθη του δρομέα αναφέρονται στην τάση και τη συχνότητα του στάτη



Σχ. 5.12 Ανυσματικό διάγραμμα των τάσεων, των ρευμάτων και των μαγνητικών πεδίων του επαγωγικού κινητήρα

Κατά τη μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας, ένα ποσοστό της ισχύος εισόδου καταναλώνεται από τον κινητήρα, με αποτέλεσμα την ανύψωση της θερμοκρασίας του. Αυτό το ποσοστό αντιπροσωπεύει τις απώλειες της μηχανής, οι οποίες πρέπει να είναι οι ελάχιστες δυνατές. Οι ολικές απώλειες των επαγωγικών κινητήρων, απαρτίζονται από τις παρακάτω επιμέρους συνιστώσες:

➤ *Απώλειες χαλκού ή ωμικές απώλειες (copper, winding losses).* Οι απώλειες χαλκού οφείλονται στη ροή των ρευμάτων από τα τυλίγματα του στάτη και του δρομέα. Οι απώλειες χαλκού στο στάτη ορίζονται από τη σχέση

$$P_{cu\_s} = 3R_s I_s^2 \tag{5.35}$$

και στο δρομέα από τη σχέση

$$P_{cu\_r} = 3R'_r I_r'^2 \tag{5.36}$$

Οι ολικές απώλειες χαλκού είναι ίσες με το άθροισμα των απωλειών στο στάτη και το δρομέα

$$P_{cu} = P_{cu\_s} + P_{cu\_r} \tag{5.37}$$

Οι απώλειες χαλκού εξαρτώνται από το μέγεθος των αντιστάσεων των τυλιγμάτων και το μέγεθος των ρευμάτων στο στάτη  $I_s$  και το δρομέα  $I_r'$ , τα οποία είναι συνάρτηση της ροπής του φορτίου. Οι απώλειες χαλκού στο στάτη και το δρομέα συμβάλλουν κατά 33–40% και 15–22% αντίστοιχα, στις ολικές απώλειες των συμβατικών επαγωγικών κινητήρων υπό ονομαστικές συνθήκες λειτουργίας.

➤ *Απώλειες σιδήρου ή μαγνητικές απώλειες (core, iron losses).* Οι απώλειες σιδήρου προκύπτουν από το άθροισμα των απωλειών υστέρησης και δινορευμάτων στο στάτη και το δρομέα. Εξαρτώνται από το μέγεθος της ολικής μαγνητικής ροής στο διάκενο  $\phi_m$  και τη συχνότητα

μεταβολής της, ενώ είναι ανεπηρέαστες από τη ροπή του φορτίου. Οι απώλειες σιδήρου στο στάτη προσεγγίζονται από τη σχέση

$$P_{iron\_s} = k_e \omega_e^2 \phi_m^2 + k_h \omega_e \phi_m^n \quad (5.38)$$

και στο δρομέα από την

$$P_{iron\_r} = k_e (s\omega_e)^2 \phi_m^2 + k_h s\omega_e \phi_m^n \quad (5.39)$$

όπου  $k_e$  είναι ο συντελεστής απωλειών δινορευμάτων και  $k_h$  ο συντελεστής απωλειών υστέρησης. Ο εκθέτης  $n$  λαμβάνει τιμές από 1.5 έως 2.5 και συνήθως θεωρείται  $n = 2$ . Στην περίπτωση αυτή, οι ολικές απώλειες σιδήρου του επαγωγικού κινητήρα είναι ίσες με

$$P_{iron\_s+r} = [k_e (1+s^2) \omega_e^2 + k_h (1+s) \omega_e] \phi_m^2 \quad (5.40)$$

Οι απώλειες σιδήρου στο δρομέα είναι σημαντικά μικρότερες από εκείνες στο στάτη, εξαιτίας της μικρότερης συχνότητας  $s\omega_e$ . Οι απώλειες σιδήρου αποτελούν τη δεύτερη σημαντικότερη συνιστώσα των ολικών απωλειών, με ποσοστό περίπου 20%. Στο ισοδύναμο κύκλωμα του Σχ. 5.11, οι μαγνητικές απώλειες μοντελοποιούνται με μια αντίσταση  $R_m$  σε παράλληλη σύνδεση με την αντίδραση μαγνήτισης. Η τιμή της αντίστασης απωλειών σιδήρου, υπολογίζεται από τη σχέση

$$P_{iron\_s+r} = \frac{E^2}{R_m} \quad (5.41)$$

με αντικατάσταση της Εξ. (5.40) και θέτοντας  $E = \omega_e \phi_m$ , οπότε

$$R_m = \frac{1}{k_e (1+s^2) + k_h (1+s) / \omega_e} \quad (5.42)$$

➤ *Μηχανικές απώλειες (mechanical losses)*. Οι μηχανικές απώλειες  $P_{fw}$ , περιλαμβάνουν τις απώλειες τριβών (*friction*), λόγω της περιστροφής του άξονα και τη συνιστώσα *αερισμού (windage)* από τη λειτουργία του ανεμιστήρα. Οι απώλειες τριβών-αερισμού, μεταβάλλονται προσεγγιστικά ανάλογα με το τετράγωνο της ταχύτητας

$$P_{fw} = C_{fw} n_r^2 \quad (5.43)$$

όπου,  $C_{fw}$  είναι ο συντελεστής μηχανικών απωλειών. Οι μηχανικές απώλειες αποτελούν το 8–10% των ολικών απωλειών στο ονομαστικό φορτίο.

➤ *Κατανεμημένες απώλειες (stray losses)*. Πρόκειται για πρόσθετες απώλειες της μηχανής, οι οποίες οφείλονται στην αύξηση της ροής σκέδασης με το φορτίο και στις υψηλές συχνότητας διακυμάνσεις της ροής αυτής. Ο προσδιορισμός των κατανεμημένων απωλειών  $P_{stray}$  είναι εξαιρετικά δύσκολος. Έτσι, συνήθως λαμβάνονται ίσες με το 1% της ισχύος εξόδου της μηχανής, στη λειτουργία με το ονομαστικό φορτίο. Οι κατανεμημένες απώλειες αποτελούν το 8–20% των ολικών απωλειών, ανάλογα με την ιπποδύναμη του κινητήρα.

### 5.10 ΙΣΧΥΣ ΚΑΙ ΡΟΠΗ ΤΩΝ ΕΠΑΓΩΓΙΚΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ

Ο τριφασικός επαγωγικός κινητήρας μετατρέπει την ηλεκτρική ισχύ εισόδου σε μηχανική. Η ηλεκτρική ισχύς εισόδου ορίζεται από τη σχέση

$$P_{in} = 3VI_s \cos \phi \quad (5.44)$$

όπου  $V$  είναι η φασική τάση,  $I_s$  το φασικό ρεύμα και  $\phi$  η διαφορά φάσης μεταξύ της τάσης και του ρεύματος. Η ισχύς που απομένει, αν από την ισχύ εισόδου αφαιρεθούν οι απώλειες χαλκού και οι μαγνητικές απώλειες στο στάτη, είναι η ισχύς που μέσω του διακένου μεταφέρεται στο δρομέα. Η ισχύς αυτή ονομάζεται *ισχύς διακένου (air gap power)*. Από το ισοδύναμο κύκλωμα του κινητήρα, η ισχύς διακένου μπορεί να καταναλωθεί μόνο στην αντίσταση  $R'_r$ . Επομένως, η ισχύς διακένου ορίζεται από τη σχέση

$$P_{ag} = 3I_r'^2 \frac{R'_r}{s} = 3EI_r' \cos \theta_r \quad (5.45)$$

Ένα τμήμα της ισχύος διακένου χάνεται ως απώλειες χαλκού στο δρομέα και ένα τμήμα ως απώλειες σιδήρου στο δρομέα. Η ισχύς που απομένει  $P_m$ , μετατρέπεται σε μηχανική. Η ισχύς αυτή ονομάζεται *αναπτυσσόμενη μηχανική ισχύς* και ορίζεται από την παρακάτω σχέση, αν αγνοήσουμε τις μικρές απώλειες σιδήρου στο δρομέα.

$$P_m = P_{ag} - P_{cu\_r} = 3I_r'^2 \frac{R'_r}{s} - 3I_r'^2 R'_r = P_{ag} (1 - s) \quad (5.46)$$

Συνήθως, οι απώλειες σιδήρου του δρομέα ενσωματώνονται στις μαγνητικές απώλειες του στάτη. Οι απώλειες χαλκού του δρομέα, από την Εξ. (5.46), υπολογίζονται από το γινόμενο της ισχύος διακένου με την ολίσθηση

$$P_{cu\_r} = sP_{ag} \quad (5.47)$$

Όταν ο κινητήρας δεν στρέφεται ( $s=1$ ), όλη η ισχύς διακένου μετατρέπεται σε θερμότητα στην αντίσταση του δρομέα. Αυτό συμβαίνει γιατί η ισχύς εξόδου είναι μηδενική. Η ωφέλιμη ισχύς εξόδου του επαγωγικού κινητήρα, είναι μικρότερη από την αναπτυσσόμενη ισχύ κατά τις μηχανικές και τις κατανεμημένες απώλειες

$$P_{out} = P_m - P_{fw} - P_{stray} \quad (5.48)$$

Αντίστοιχα, η πραγματική ροπή στον άξονα του κινητήρα, εξαιτίας των τριβών και των κατανεμημένων απωλειών είναι μικρότερη από την εσωτερική ροπή. Η εσωτερική ροπή ονομάζεται *αναπτυσσόμενη ή ηλεκτρομαγνητική ροπή (developed torque)*. Η ηλεκτρομαγνητική ροπή ορίζεται από την αναπτυσσόμενη μηχανική ισχύ και την κυκλική ταχύτητα του κινητήρα, ή ισοδύναμα από την ισχύ διακένου και τη σύγχρονη ταχύτητα

$$T_e = \frac{P_m}{\omega_r} = \frac{(1-s)P_{ag}}{(1-s)\omega_s} = \frac{P_{ag}}{\omega_s} \quad (5.49)$$

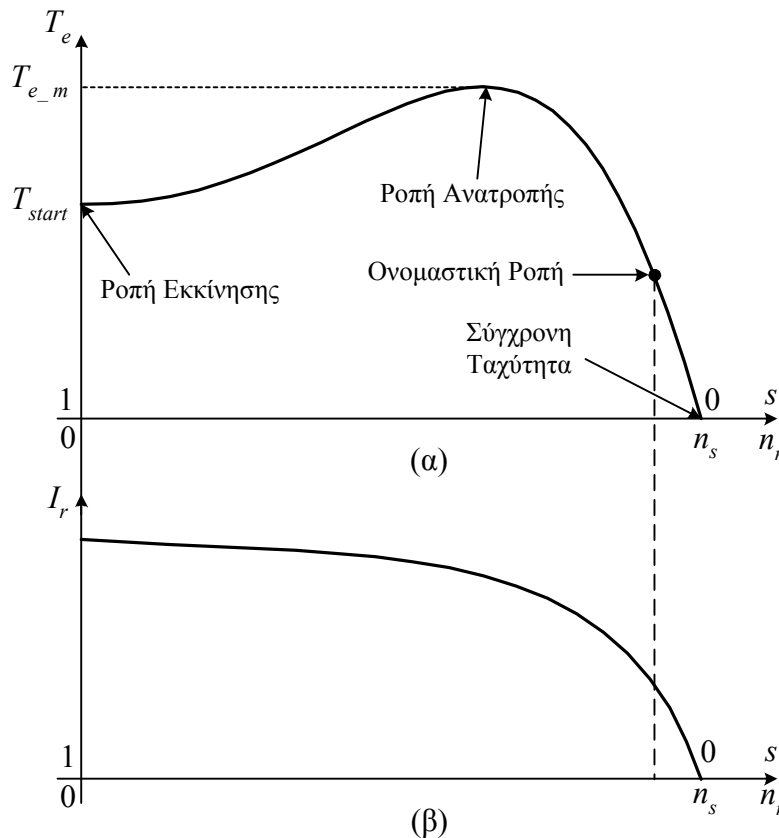
5.11 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ–ΡΟΠΗΣ

Η ροπή που αναπτύσσει ένας επαγωγικός κινητήρας μεταβάλλεται με την ταχύτητα, με τον τρόπο που εικονίζεται στο Σχ. 5.13α. Προκειμένου να ερμηνεύσουμε τη χαρακτηριστική αυτή, θεωρούμε ότι ο κινητήρας λειτουργεί αρχικά χωρίς φορτίο (Σχ. 5.14α). Τότε, η ταχύτητα του κινητήρα είναι περίπου ίση με τη σύγχρονη. Το μαγνητικό πεδίο του στάτη  $\mathbf{B}_{sr}$  παράγεται από το ρεύμα  $I_s$ . Το ολικό μαγνητικό πεδίο  $\mathbf{B}_m$  είναι ανάλογο με το ρεύμα μαγνήτισης  $I_m$  (Σχ. 5.11). Το ρεύμα μαγνήτισης εξαρτάται από την τάση  $E$ , όταν ο κινητήρας είναι ακόρεστος. Επειδή η πτώση τάσης στη σύνθετη αντίσταση του στάτη  $R_s + jX_{ls}$  είναι πολύ μικρή, η τάση  $E$  είναι σταθερή και περίπου ίση με την τάση τροφοδοσίας  $V$ . Επομένως, το ολικό μαγνητικό πεδίο στο διάκενο του κινητήρα είναι σταθερό και ανεξάρτητο από τη ροπή του φορτίου.

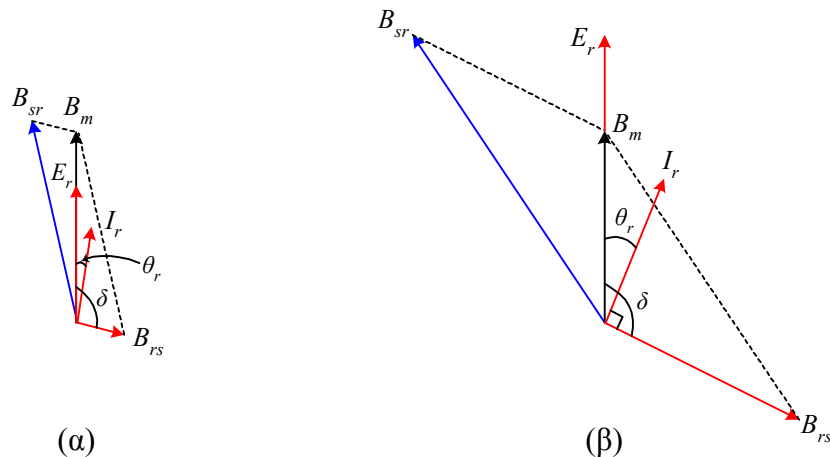
Η τάση που επάγεται στο τύλιγμα του δρομέα  $E_r$  είναι πολύ μικρή, εξαιτίας της μικρής ολίσθησης. Έτσι, το ρεύμα του δρομέα  $I_r$  και το πεδίο που αυτό αναπτύσσει  $\mathbf{B}_{rs}$ , είναι μικρά. Επειδή η συχνότητα των επαγόμενων τάσεων είναι μικρή, η αντίδραση του δρομέα είναι πολύ μικρή σε σχέση με την ωμική του αντίσταση και η διαφορά φάσης μεταξύ  $I_r$  και  $E_r$  είναι ελάχιστη. Μολονότι το ρεύμα του δρομέα είναι πολύ μικρό στη λειτουργία χωρίς φορτίο, το ρεύμα τροφοδοσίας του στάτη είναι αρκετά μεγάλο, καθώς παρέχει το ρεύμα μαγνήτισης. Το μέτρο της αναπτυσσόμενης ροπής δίνεται από τη σχέση

$$T_e = C_T B_m B_{rs} \sin \delta \tag{5.50}$$

Επειδή το μαγνητικό πεδίο  $\mathbf{B}_{rs}$  είναι μικρό, η ροπή που αναπτύσσει ο κινητήρας είναι τόσο όση να υπερνικήσει τις απώλειές του.



Σχ. 5.13 Τυπική χαρακτηριστική ροπής–ταχύτητας των επαγωγικών κινητήρων (α) και μεταβολή του ρεύματος του δρομέα με την ταχύτητα (β)



Σχ. 5.14 Μεταβολή των μαγνητικών πεδίων όταν ο επαγωγικός κινητήρας λειτουργεί χωρίς φορτίο (α) και με υψηλό φορτίο (β)

Όταν η ροπή του φορτίου αυξηθεί στην ονομαστική τιμή, η ταχύτητα του κινητήρα μειώνεται και η ολίσθηση αυξάνει. Έτσι, η τάση που επάγεται στο δρομέα αυξάνεται. Η αυξημένη τάση  $E_r$  προκαλεί την αύξηση του ρεύματος και του μαγνητικού πεδίου στο δρομέα. Ταυτόχρονα, η αύξηση της συχνότητας στο δρομέα έχει ως αποτέλεσμα τη μεγαλύτερη διαφορά φάσης μεταξύ των  $E_r$  και  $I_r$  (Σχ. 5.14β). Η αντίδραση του δρομέα  $sX'_{lr}$  είναι τώρα παραπλήσια της ωμικής του αντίστασης  $R_r$ . Η αύξηση του πεδίου  $\mathbf{B}_{rs}$  τείνει να αυξήσει την αναπτυσσόμενη ροπή. Αντίθετα, η αύξηση της γωνίας  $\delta$ , η οποία είναι μεγαλύτερη από  $90^\circ$ , τείνει να μειώσει τη ροπή. Καθώς η επίδραση του πεδίου είναι μεγαλύτερη από την επίδραση της γωνίας, η ροπή αυξάνεται.

Η επίδραση του μαγνητικού πεδίου του δρομέα  $\mathbf{B}_{rs}$  υπερिशχύει της γωνίας  $\delta$ , μέχρι μια τιμή του φορτίου, η οποία αντιστοιχεί στη μέγιστη ροπή (Σχ. 5.13α). Η μέγιστη ροπή ονομάζεται *ροπή ανατροπής* (*pull out torque, breakdown torque*). Η ροπή ανατροπής είναι 2 έως 3 φορές μεγαλύτερη της ονομαστικής. Όταν η ροπή του φορτίου γίνει μεγαλύτερη από τη ροπή ανατροπής, η επίδραση του  $\sin\delta$  είναι εντονότερη από εκείνη του μαγνητικού πεδίου και η ροπή που αναπτύσσει ο κινητήρας μειώνεται. Το αποτέλεσμα στην περίπτωση αυτή είναι ο κινητήρας να σταματήσει (παθητικό φορτίο).

Η μεταβολή του ρεύματος του δρομέα με την ταχύτητα εικονίζεται στο Σχ. 5.13β. Σε μικρές τιμές της ολίσθησης, η μεταβολή του ρεύματος στο δρομέα και της ροπής είναι γραμμική με την ολίσθηση. Αυτό οφείλεται στην αμελητέα αντίδραση του δρομέα  $X'_{lr}$ , συγκριτικά με την  $R'_r/s$ . Σε ροπές μεγαλύτερες από την ονομαστική, η συχνότητα των ρευμάτων στο δρομέα είναι αρκετά μεγάλη και η αντίδραση του δρομέα είναι συγκρίσιμη με την  $R'_r/s$ . Έτσι, ο συντελεστής ισχύος του δρομέα  $\cos\theta_r = \sin\delta$  μειώνεται. Η μεταβολή του ρεύματος του δρομέα και της ροπής περιορίζεται, σε ροπές μεγαλύτερες από την ονομαστική. Σε ροπές υψηλότερες από τη ροπή ανατροπής, ο συντελεστής ισχύος του δρομέα γίνεται πολύ μικρός και η ροπή μειώνεται αντί να αυξάνει. Ακόμη, το ρεύμα του δρομέα είναι περίπου σταθερό.

Η ροπή που αναπτύσσει ο κινητήρας στη μηδενική ταχύτητα ονομάζεται ροπή εκκίνησης ( $T_{start}$ ). Η ροπή εκκίνησης είναι μεγαλύτερη από την ονομαστική ροπή, συνήθως της τάξης του 150% της ονομαστικής.

## 5.12 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΑΝΑΠΤΥΣΣΟΜΕΝΗΣ ΡΟΠΗΣ

Για τον υπολογισμό της ροπής που αναπτύσσει ο επαγωγικός κινητήρας, από την Εξ. (5.49), απαιτείται η γνώση της ισχύος διακένου. Ο υπολογισμός της ισχύος διακένου προϋποθέτει τον υπολογισμό του ρεύματος στο δρομέα. Για τον υπολογισμό του ρεύματος δρομέα στο ισοδύναμο κύκλωμα του κινητήρα (Σχ. 5.15α), αντικαθιστούμε το τμήμα του κυκλώματος αριστερά των

σημείων A–B, με το ισοδύναμο κύκλωμα *Thevenin*. Η τάση και η σύνθετη αντίσταση *Thevenin* ορίζονται από τις σχέσεις

$$\mathbf{V}_T = \frac{jX_m}{R_s + j(X_{ls} + X_m)} V = V_T \angle \theta_T \quad (5.51)$$

$$\mathbf{Z}_T = \frac{jX_m(R_s + jX_{ls})}{R_s + j(X_{ls} + X_m)} = R_T + jX_T \approx R_s + jX_{ls} \quad (5.52)$$

Το νέο ισοδύναμο κύκλωμα του κινητήρα εικονίζεται στο Σχ. 5.15β. Το μέτρο του ρεύματος στο δρομέα είναι ίσο με

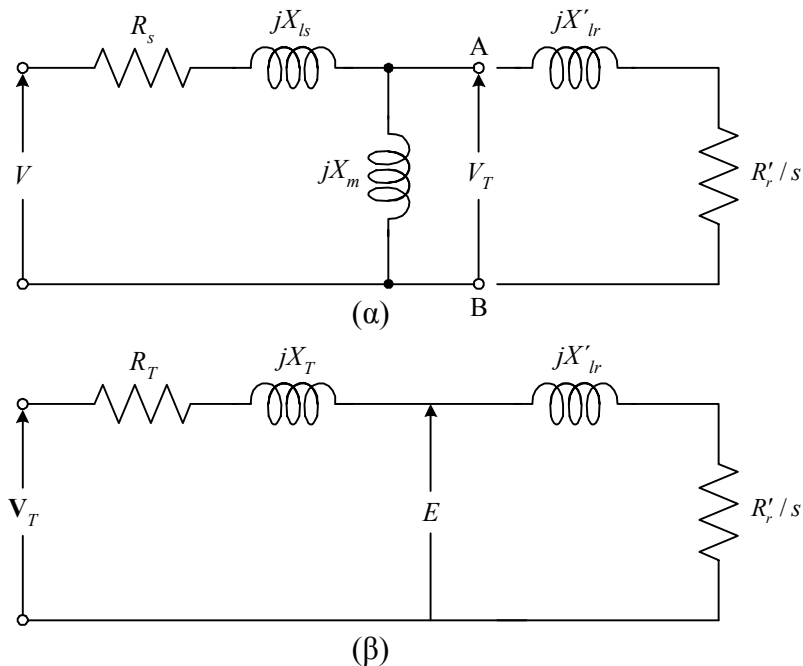
$$I_r' = \frac{V_T}{\sqrt{(R_T + R_r'/s)^2 + (X_T + X_{lr}')^2}} \quad (5.53)$$

Η ισχύς διακένου είναι

$$P_{ag} = 3I_r'^2 \frac{R_r'}{s} = \frac{3V_T^2}{(R_T + R_r'/s)^2 + (X_T + X_{lr}')^2} \frac{R_r'}{s} \quad (5.54)$$

και η ροπή

$$T_e = \frac{P_{ag}}{\omega_s} = \frac{3V_T^2}{(R_T + R_r'/s)^2 + (X_T + X_{lr}')^2} \frac{R_r'}{s\omega_s} \quad (5.55)$$



Σχ. 5.15 Μετατροπή του ισοδύναμου κυκλώματος του κινητήρα (α), στο ισοδύναμο κατά *Thevenin* (β)

Από την Εξ. (5.55) προκύπτει ότι, η ροπή του κινητήρα μεταβάλλεται ανάλογα με το τετράγωνο της τάσης τροφοδοσίας. Επομένως, μια μικρή μεταβολή στην τάση  $V$ , προκαλεί σημαντική μεταβολή στην αναπτυσσόμενη ροπή. Στο Σχ. 5.16 εικονίζεται η πλήρης χαρακτηριστική ροπής–ταχύτητας του επαγωγικού κινητήρα, από την Εξ. (5.55). Η επαγωγική μηχανή λειτουργεί ως γεννήτρια, όταν η ταχύτητα του δρομέα είναι μεγαλύτερη από τη σύγχρονη, οπότε η ολίσθηση γίνεται αρνητική. Η ολίσθηση είναι μεγαλύτερη από τη μονάδα στο δεύτερο τεταρτημόριο, όπου η φορά περιστροφής του κινητήρα είναι αντίθετη από τη φορά του στρεφόμενου πεδίου του στατή. Η λειτουργία με  $s > 1$  επιτυγχάνεται με την αλλαγή της σύνδεσης δύο φάσεων στα τυλίγματα του στάτη, οπότε αντιστρέφεται η φορά των μαγνητικών πεδίων και ο κινητήρας υφίσταται πέδηση (*plugging*).

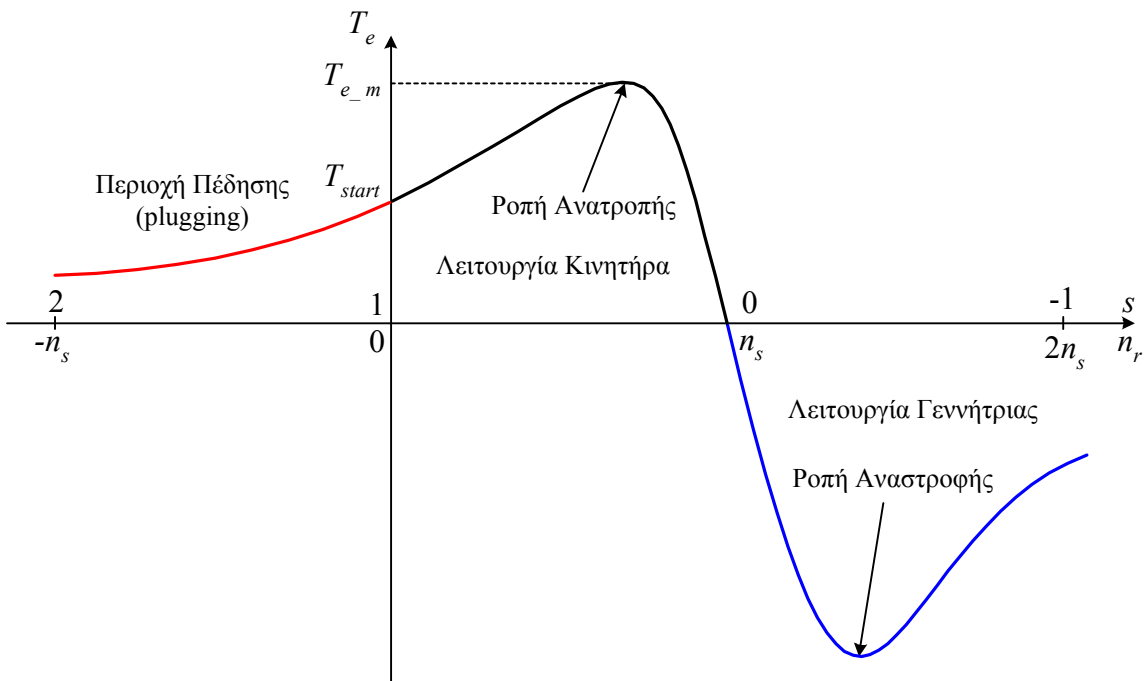
Ο κινητήρας αναπτύσσει τη μέγιστη ροπή όταν η ισχύς διακένου, η οποία καταναλώνεται στην ισοδύναμη αντίσταση  $R'_r/s$  είναι μέγιστη. Σύμφωνα με το θεώρημα μέγιστης μεταφοράς ισχύος, η ισχύς διακένου είναι μέγιστη όταν ισχύει η σχέση

$$\frac{R'_r}{s} = \sqrt{R_T^2 + (X_T + X'_{lr})^2} \tag{5.56}$$

από την οποία προκύπτει η τιμή της ολίσθησης  $s_m$  που αντιστοιχεί στη ροπή ανατροπής.

$$s_m = \frac{R'_r}{\sqrt{R_T^2 + (X_T + X'_{lr})^2}} \approx \frac{R'_r}{X_{ls} + X'_{lr}} \tag{5.57}$$

Από την Εξ. (5.57), η τιμή της ολίσθησης στη ροπή ανατροπής είναι ανάλογη με την αντίσταση του δρομέα. Επομένως, όσο μεγαλύτερη είναι η αντίσταση του δρομέα, σε τόσο μικρότερη ταχύτητα θα εμφανίζεται η μέγιστη ροπή. Αντικαθιστώντας την Εξ. (5.57) στην Εξ. (5.55), προκύπτει η ροπή ανατροπής



Σχ. 5.16 Πλήρης χαρακτηριστική ροπής–ταχύτητας του επαγωγικού κινητήρα, όπου περιλαμβάνονται οι περιοχές πέδησης και γεννήτριας



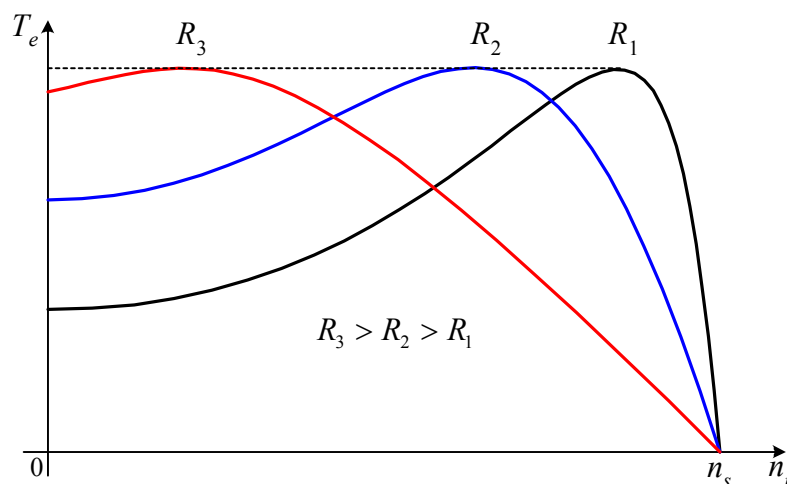
$$T_{e\_m} = \frac{3V_T^2}{2\omega_s \left[ R_T + \sqrt{R_T^2 + (X_T + X'_{lr})^2} \right]} \approx \frac{3V_T^2}{2\omega_s [X_{ls} + X'_{lr}]} \quad (5.58)$$

Η ροπή ανατροπής είναι ανάλογη με το τετράγωνο της τάσης τροφοδοσίας και αντιστρόφως ανάλογη των αντιδράσεων του στάτη και του δρομέα. Έτσι, οι αντιδράσεις σκέδασης πρέπει να είναι μικρές, όταν είναι επιθυμητή μια μεγάλη ροπή ανατροπής.

### 5.13 ΚΛΑΣΕΙΣ ΤΩΝ ΕΠΑΓΩΓΙΚΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ

Η μορφή της χαρακτηριστικής ροπής–ταχύτητας των επαγωγικών κινητήρων εξαρτάται από την ωμική αντίσταση του δρομέα  $R'_r$  και την ολική αντίδραση σκέδασης  $X_{ls} + X'_{lr}$ . Ένας επαγωγικός κινητήρας με μεγάλη αντίσταση στο δρομέα, εμφανίζει τη μέγιστη ροπή σε μικρή ταχύτητα και έχει υψηλή ροπή εκκίνησης. Όμως, οι απώλειες ισχύος στην ονομαστική λειτουργία είναι υψηλές, εξαιτίας της μεγάλης ολίσθησης ( $P_{cu\_r} = sP_{ag}$ ). Αντίθετα, ένας κινητήρας με μικρή αντίσταση στο δρομέα παρουσιάζει μικρή ροπή εκκίνησης, μεγάλο ρεύμα εκκίνησης, αλλά και υψηλό βαθμό απόδοσης στην ονομαστική λειτουργία. Ταυτόχρονα, η μεταβολή της ταχύτητας με το φορτίο είναι περιορισμένη. Ο συνδυασμός της επιθυμητής υψηλής αντίστασης κατά την εκκίνηση και της μικρής αντίστασης στην κανονική λειτουργία, επιτυγχάνεται ιδανικά στους κινητήρες με δακτυλιοφόρο δρομέα. Κατά την εκκίνηση των κινητήρων δακτυλιοφόρου δρομέα, προστίθενται εξωτερικές αντιστάσεις σε σειρά με το τύλιγμα του δρομέα, το οποίο έχει μικρή αντίσταση. Οι αντιστάσεις αυτές αφαιρούνται στην κανονική λειτουργία του κινητήρα. Με τον τρόπο αυτό οι χαρακτηριστικές ροπής–ταχύτητας του κινητήρα μεταβάλλονται όπως στο Σχ. 5.17.

Η επιθυμητή μεταβολή της αντίστασης του δρομέα ανάλογα με την τιμή της ολίσθησης, μπορεί να επιτευχθεί και στους κινητήρες βραχυκυκλωμένου κλωβού, με την κατάλληλη σχεδίαση των αυλακώσεων του δρομέα. Όταν οι αυλακώσεις είναι κοντά στην επιφάνεια του δρομέα, οι ράβδοι του τυλίγματος κλωβού είναι σε ισχυρή σύζευξη με το τύλιγμα του στάτη. Επομένως, μόνο ένα μικρό τμήμα της ροής δεν συνδέει το τύλιγμα του στάτη. Έτσι, η αντίδραση σκέδασης του δρομέα  $X'_{lr}$  είναι μικρή.



Σχ. 5.17 Τροποποίηση των χαρακτηριστικών ροπής–ταχύτητας των επαγωγικών κινητήρων με δακτυλιοφόρο δρομέα, με τη μεταβολή της αντίστασης στο τύλιγμα του δρομέα

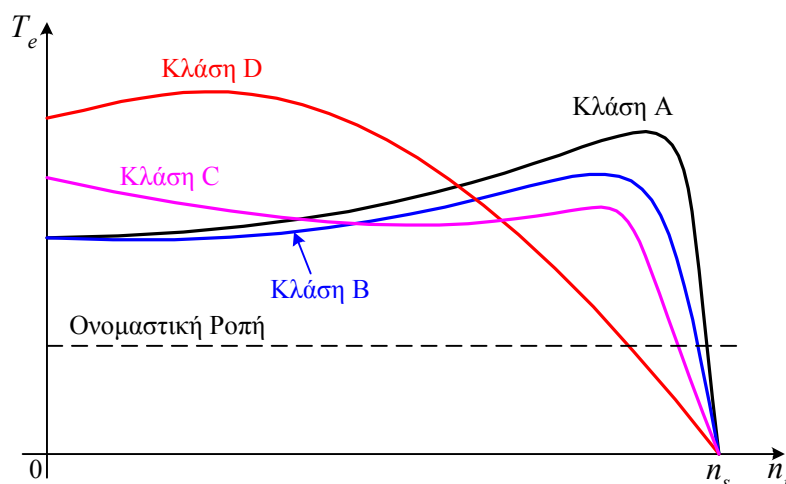
Αντίθετα, όταν οι ράβδοι είναι τοποθετημένες βαθιά μέσα στο δρομέα, η ροή και η αντίδραση σκέδασης του δρομέα είναι υψηλές. Η ωμική αντίσταση του τυλίγματος κλωβού εξαρτάται από το μέγεθος των αυλακώσεων, η οποία επιβάλλει τη διατομή των ράβδων. Όσο μεγαλύτερη είναι η διατομή των ράβδων, τόσο μικρότερη είναι η ωμική αντίσταση του κλωβού.

Οι επαγωγικοί κινητήρες βραχυκυκλωμένου κλωβού διακρίνονται σε τέσσερις κατηγορίες, ανάλογα με τη διαμόρφωση των αυλακώσεων του δρομέα, οι οποίες ονομάζονται *κλάσεις σχεδίασης*. Στους κινητήρες κλάσης A, η διαμόρφωση των αυλακώσεων επιβάλλει τη χρήση ράβδων μεγάλης διατομής, οι οποίες βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια του δρομέα. Έτσι, το τύλιγμα κλωβού εμφανίζει μικρή αντίσταση και μικρή αντίδραση. Οι κινητήρες κλάσης A έχουν μικρή ροπή εκκίνησης και μεγάλο ρεύμα εκκίνησης. Όμως, η ολίσθηση του κινητήρα στο ονομαστικό φορτίο είναι πολύ μικρή, με αποτέλεσμα ο βαθμός απόδοσης να είναι υψηλός. Η χαρακτηριστική ροπής–ταχύτητας του κινητήρα εικονίζεται στο Σχ. 5.18.

Στους κινητήρες κλάσης D, οι ράβδοι του κλωβού βρίσκονται και πάλι κοντά στην επιφάνεια του δρομέα αλλά έχουν μικρή διατομή. Έτσι, η αντίσταση του κλωβού είναι μεγάλη, ενώ η αντίδραση σκέδασης είναι μικρή. Ως αποτέλεσμα, οι κινητήρες κλάσης D έχουν μεγάλη ροπή εκκίνησης και μικρό ρεύμα εκκίνησης. Όμως, η ολίσθηση στο ονομαστικό φορτίο είναι μεγάλη, με αποτέλεσμα τις υψηλές απώλειες στο δρομέα και το μικρό βαθμό απόδοσης. Επιπλέον, η διακύμανση της ταχύτητας με το φορτίο είναι σημαντική.

Η αντίσταση του δρομέα στους κινητήρες κλάσης A και D είναι σταθερή. Αντίθετα, στους κινητήρες με κλάση σχεδίασης B και C, η αντίσταση του δρομέα μεταβάλλεται με την ολίσθηση (ταχύτητα). Έτσι, οι κινητήρες αυτοί συνδυάζουν την υψηλή ροπή εκκίνησης των κινητήρων κλάσης D και τον υψηλό βαθμό απόδοσης στην ονομαστική λειτουργία των κινητήρων κλάσης A.

Στους κινητήρες με κλάση B, η μεταβολή της αντίστασης του δρομέα με την ολίσθηση, επιτυγχάνεται κατασκευάζοντας το δρομέα με *βαθιά αυλάκια*. Στην ονομαστική λειτουργία, όπου η συχνότητα των επαγόμενων τάσεων στο δρομέα είναι μικρή, το ρεύμα ρέει ομοιόμορφα σ' όλη τη διατομή των ράβδων. Έτσι, η ενεργός διατομή των ράβδων είναι μεγάλη και η αντίσταση του δρομέα μικρή, όπως στους κινητήρες κλάσης A. Κατά την εκκίνηση, όπου η συχνότητα των επαγόμενων τάσεων είναι μεγάλη, οι αντιδράσεις σκέδασης των ράβδων είναι υψηλές. Το ρεύμα του δρομέα ρέει μόνο από τις περιοχές των ράβδων που βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια του δρομέα, οι οποίες έχουν μικρές αντιδράσεις. Με τον τρόπο αυτό η ενεργός διατομή των ράβδων μειώνεται και η αντίσταση του δρομέα εμφανίζεται αυξημένη κατά την εκκίνηση, όπως στους κινητήρες κλάσης D. Η ροπή εκκίνησης των κινητήρων τάξης B είναι σχεδόν ίση μ' εκείνη των κινητήρων τάξης A, αλλά το ρεύμα εκκίνησης είναι μειωμένο κατά 25% περίπου.



Σχ. 5.18 Τυπικές χαρακτηριστικές ροπής–ταχύτητας των επαγωγικών κινητήρων βραχυκυκλωμένου κλωβού, ανάλογα με την κλάση σχεδίασης

Στους κινητήρες κλάσης C, η μεταβολή της αντίστασης του δρομέα με την ταχύτητα είναι εντονότερη και επιτυγχάνεται κατασκευάζοντας το δρομέα με διπλό κλωβό. Ο κινητήρας φέρει ένα τύλιγμα κλωβού, το οποίο αποτελείται από ράβδους μεγάλης διατομής τοποθετημένες στο εσωτερικό του δρομέα. Ένας δεύτερος ανεξάρτητος κλωβός από ράβδους μικρής διατομής, βρίσκεται στην επιφάνεια του δρομέα. Στην κανονική λειτουργία του κινητήρα, το ρεύμα του δρομέα ρέει και από τα δύο τυλίγματα κλωβού και ο κινητήρας εμφανίζει μικρή αντίσταση στο δρομέα. Κατά την εκκίνηση, το ρεύμα κυκλοφορεί κυρίως από το εξωτερικά τοποθετημένο τύλιγμα κλωβού, με την υψηλή αντίσταση. Το μειονέκτημα των κινητήρων με διπλό κλωβό είναι το μεγαλύτερο κόστος κατασκευής τους, σε σχέση με τις υπόλοιπους κινητήρες βραχυκυκλωμένου δρομέα.

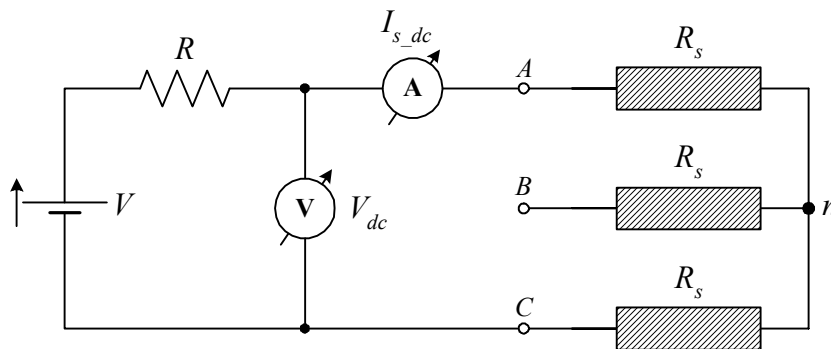
#### 5.14 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΟΥ ΙΣΟΔΥΝΑΜΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ

Για τον προσδιορισμό των παραμέτρων του ισοδύναμου κυκλώματος του επαγωγικού κινητήρα, πραγματοποιούνται τρία πειράματα. Οι ακριβείς συνθήκες των πειραμάτων αυτών περιγράφονται στην τυποποίηση 112 της IEEE. Αντίστοιχες τυποποιήσεις έχουν εκδώσει και άλλοι οργανισμοί.

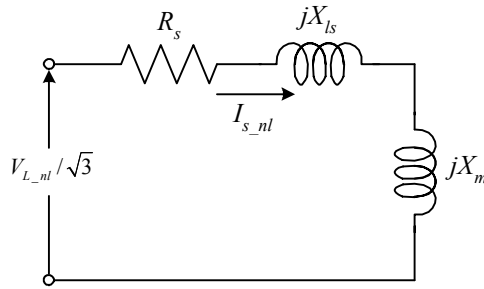
Στον προσδιορισμό της ωμικής αντίστασης του στάτη  $R_s$ , χρησιμοποιείται το πείραμα συνεχούς ρεύματος (*dc test*). Η διάταξη μέτρησης εικονίζεται στο Σχ. 5.19. Τα τυλίγματα του στάτη είναι συνδεδεμένα σε αστέρα και τροφοδοτούνται από μια πηγή συνεχούς τάσης. Η τάση της πηγής ρυθμίζεται έτσι ώστε, το ρεύμα  $I_{s\_dc}$  να είναι ίσο με το ονομαστικό. Εξαιτίας της συνεχούς τάσης τροφοδοσίας, δεν επάγονται ρεύματα στο δρομέα και η αντίδραση του στάτη είναι μηδενική. Επομένως, η τιμή του ρεύματος περιορίζεται μόνο από την ωμική αντίσταση των δύο τυλιγμάτων του στάτη, σε σύνδεση σειράς

$$R_s = \frac{V_{dc}}{2I_{s\_dc}} \quad (5.59)$$

Το ρεύμα επιλέγεται ίσο με το ονομαστικό, έτσι ώστε η μέτρηση της αντίστασης  $R_s$  να αντιστοιχεί στη θερμοκρασία του κινητήρα με το ονομαστικό φορτίο. Η αντίσταση των χάλκινων τυλιγμάτων των κινητήρων μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία. Ακόμη, εξαιτίας του επιδερμικού φαινομένου, το οποίο εμφανίζεται στην κανονική λειτουργία με εναλλασσόμενη τάση, η αντίσταση που προσδιορίζεται από το πείραμα συνεχούς ρεύματος είναι ελαφρά μικρότερη από την πραγματική.



Σχ. 5.19 Διάταξη μέτρησης της αντίστασης του στάτη, με το πείραμα συνεχούς ρεύματος



Σχ. 5.20 Απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα του επαγωγικού κινητήρα στο πείραμα κενού

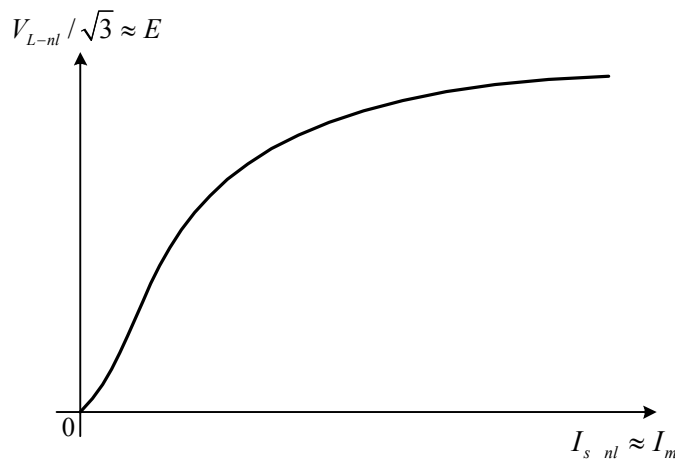
Το πείραμα κενού (*no-load test*) χρησιμοποιείται για τον καθορισμό της αντίδρασης μαγνήτισης  $X_m$ , των απωλειών του κινητήρα χωρίς φορτίο και της καμπύλης μαγνήτισης. Ο κινητήρας τροφοδοτείται με την ονομαστική τάση και λειτουργεί χωρίς φορτίο. Επομένως, η ισχύς που απορροφά ο κινητήρας από το δίκτυο είναι ίση με την ισχύ απωλειών, καθώς το φορτίο είναι μηδενικό. Η τριφασική ισχύς εισόδου, τα ρεύματα γραμμής  $I_{s\_nl}$  και η πολική τάση  $V_{L\_nl}$  μετρούνται με τα κατάλληλα όργανα. Επειδή ο κινητήρας λειτουργεί στο κενό, η ολίσθηση και το ρεύμα του δρομέα είναι σχεδόν μηδενικά. Έτσι, το ισοδύναμο κύκλωμα του κινητήρα αποκτά την απλοποιημένη μορφή του Σχ. 5.20. Το μέτρο της σύνθετης αντίστασης εισόδου του κινητήρα είναι ίσο με το λόγο της τάσης προς το ρεύμα

$$\frac{V_{L\_nl}}{\sqrt{3}I_{s\_nl}} = \sqrt{R_s^2 + (X_{ls} + X_m)^2} \tag{5.60}$$

Από την Εξ. (5.60) υπολογίζεται η ολική αντίδραση του στάτη  $X_{ls} + X_m$ . Για τον ανεξάρτητο καθορισμό των δύο επιμέρους αντιδράσεων, πρέπει να διεξαχθεί και το τρίτο πείραμα. Με το πείραμα κενού μετράται η ισχύς που απορροφά ο κινητήρας  $P_{in\_nl}$ . Η ισχύς αυτή είναι ίση με τις απώλειες του κινητήρα

$$P_{in\_nl} = P_{loss} = P_{cu\_s} + P_{cu\_r} + P_{iron} + P_{fw} + P_{stray} \tag{5.61}$$

Στην Εξ. (5.61), οι απώλειες χαλκού στο δρομέα είναι ελάχιστες. Μικρές είναι και οι κατανεμημένες απώλειες, στη λειτουργία κενού. Οι απώλειες χαλκού στο στάτη είναι ίσες με  $P_{cu\_s} = 3R_s I_{s\_nl}^2$ . Επομένως, το άθροισμα των απωλειών σιδήρου και των μηχανικών είναι ίσο με



Σχ. 5.21 Καμπύλη μαγνήτισης του επαγωγικού κινητήρα από το πείραμα κενού

$$P_{iron} + P_{fw} = P_{in\_nl} - 3R_s I_{s\_nl}^2 \quad (5.62)$$

Όταν ο κινητήρας λειτουργεί χωρίς φορτίο, το ρεύμα του στάτη είναι με μεγάλη ακρίβεια ίσο με το ρεύμα μαγνήτισης ( $I_{s\_nl} \approx I_m$ ). Ακόμη, η τάση τροφοδοσίας είναι περίπου ίση με την τάση  $E$ . Έτσι, μεταβάλλοντας την τάση του στάτη και μετρώντας την τάση αυτή και το ρεύμα, προσδιορίζεται η καμπύλη μαγνήτισης του κινητήρα, η οποία έχει τη μορφή του Σχ. 5.21.

Με το πείραμα ακίνητου δρομέα (*blocked rotor test*), υπολογίζονται και οι υπόλοιπες παράμετροι του ισοδύναμου κυκλώματος. Στο πείραμα αυτό ο δρομέας διατηρείται ακίνητος, ενώ ο κινητήρας τροφοδοτείται με την κατάλληλη μειωμένη τάση, έτσι ώστε το ρεύμα του στάτη να είναι ίσο με το ονομαστικό. Επειδή ο δρομέας δεν στρέφεται, η ολίσθηση είναι ίση με τη μονάδα. Επομένως, η σύνθετη αντίσταση του δρομέα είναι πολύ μικρότερη από την αντίδραση μαγνήτισης και το ισοδύναμο κύκλωμα του κινητήρα αποκτά την απλοποιημένη μορφή του Σχ. 5.22. Το μέτρο της σύνθετης αντίστασης εισόδου του κινητήρα είναι ίσο με το λόγο της φασικής τάσης τροφοδοσίας  $V_{L\_br} / \sqrt{3}$  προς το ρεύμα του στάτη  $I_{s\_br}$

$$\frac{V_{L\_br}}{\sqrt{3}I_{s\_br}} = |\mathbf{Z}_{br}| = \sqrt{(R_s + R'_r)^2 + (X_{ls} + X'_{lr})^2} \quad (5.63)$$

Από τη μέτρηση της ισχύος εισόδου  $P_{in\_br}$ , υπολογίζεται ο συντελεστής ισχύς

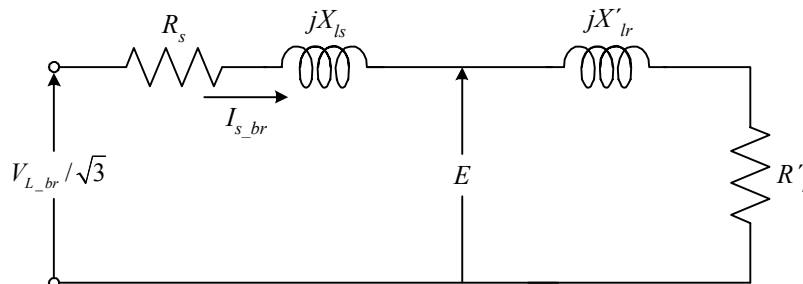
$$\cos \phi_{br} = \frac{P_{in\_br}}{\sqrt{3}V_{L\_br}I_{s\_br}} \quad (5.64)$$

και επειδή  $\mathbf{Z}_{br} = R_{br} + jX_{br} = |\mathbf{Z}_{br}| \cos \phi_{br} + j|\mathbf{Z}_{br}| \sin \phi_{br}$ , το άθροισμα των αντιστάσεων του στάτη και του δρομέα είναι ίσο με

$$R_s + R'_r = \frac{V_{L\_br}}{\sqrt{3}I_{s\_br}} \cos \phi_{br} \quad (5.65)$$

Αντίστοιχα, η ολική αντίδραση σκέδασης είναι ίση με

$$X_{br} = X_{ls} + X'_{lr} = \frac{V_{L\_br}}{\sqrt{3}I_{s\_br}} \sin \phi_{br} = \sqrt{\left(\frac{V_{L\_br}}{\sqrt{3}I_{s\_br}}\right)^2 - (R_s + R'_r)^2} \quad (5.66)$$



Σχ. 5.22 Απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα του επαγωγικού κινητήρα, στο πείραμα ακίνητου δρομέα

**Πίνακας 1.** Εμπειρικός διαχωρισμός της ολικής αντίδρασης σκέδασης, ανάλογα με το είδος του επαγωγικού κινητήρα

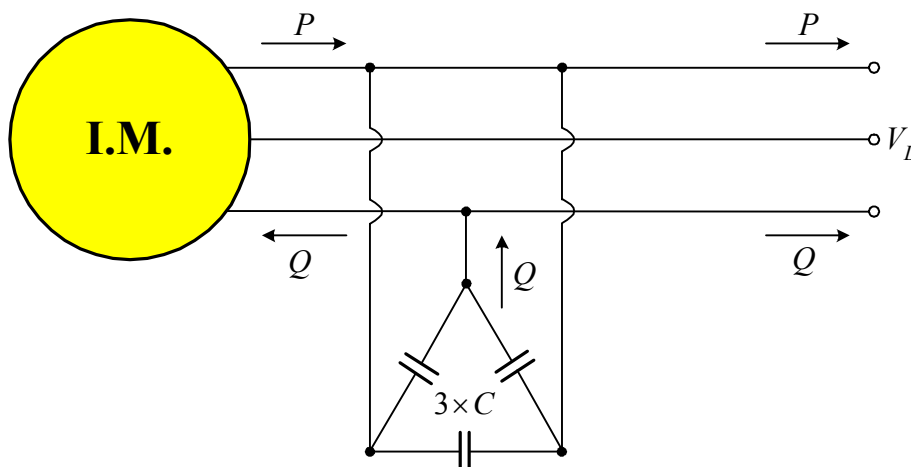
Είδος/Κλάση κινητήρα	$X_{ls}$	$X'_{lr}$
Δακτυλιοφόρου δρομέα	$0.5 \cdot X_{br}$	$0.5 \cdot X_{br}$
Κλάσης Α	$0.5 \cdot X_{br}$	$0.5 \cdot X_{br}$
Κλάσης Β	$0.4 \cdot X_{br}$	$0.6 \cdot X_{br}$
Κλάσης C	$0.3 \cdot X_{br}$	$0.7 \cdot X_{br}$
Κλάσης D	$0.5 \cdot X_{br}$	$0.5 \cdot X_{br}$

Οι τιμές των αντιδράσεων στην Εξ. (5.66), αντιστοιχούν στη συχνότητα τροφοδοσίας του κινητήρα. Επειδή δεν υπάρχει κάποια απλή μέθοδος για τον ανεξάρτητο καθορισμό των επιμέρους αντιδράσεων, έχει προκύψει εμπειρικά ο παραπάνω πίνακας υπολογισμού, ανάλογα με το είδος και την κλάση σχεδίασης του κινητήρα.

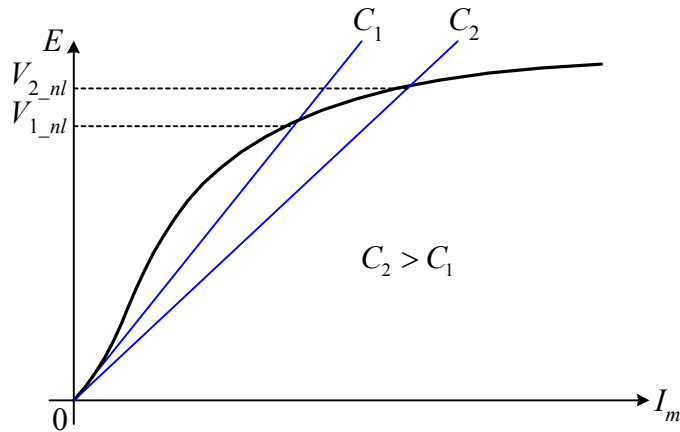
Η αντίσταση του δρομέα υπολογίζεται από την Εξ. (5.65), αν αφαιρέσουμε από την ολική αντίσταση, την αντίσταση του στάτη από το πείραμα συνεχούς ρεύματος. Όμως, η ενεργός αντίσταση του δρομέα στους κινητήρες κλάσης Β και C, εξαρτάται από τη συχνότητα των ρευμάτων στο δρομέα. Στο πείραμα ακίνητου δρομέα, η συχνότητα των ρευμάτων στο δρομέα είναι ίση με τη συχνότητα του στάτη. Επομένως, για τον ακριβή καθορισμό της αντίστασης του δρομέα στους κινητήρες αυτούς, η συχνότητα της τάσης τροφοδοσίας του κινητήρα  $V_{L_{br}}$  πρέπει να είναι πολύ μικρότερη από τη συχνότητα του δικτύου.

### 5.15 Η ΕΠΑΓΩΓΙΚΗ ΜΗΧΑΝΗ ΩΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ

Η επαγωγική μηχανή λειτουργεί ως γεννήτρια, όταν στρέφεται από μια κινητήρια μηχανή με ταχύτητα μεγαλύτερη της σύγχρονης (Σχ. 5.16). Η τριφασική ισχύς που παράγει η επαγωγική γεννήτρια, εξαρτάται από τη ροπή που εφαρμόζει η κινητήρια μηχανή. Η ροπή αυτή πρέπει να είναι μικρότερη από μια μέγιστη τιμή, η οποία ονομάζεται *ροπή αναστροφής (push over torque)*. Η ροπή αναστροφής είναι μεγαλύτερη από τη ροπή ανατροπής. Η ταχύτητα της γεννήτριας αυξάνεται υπερβολικά, όταν η επιβαλλόμενη ροπή γίνει μεγαλύτερη από τη ροπή αναστροφής.



**Σχ. 5.23** Αυτόνομη λειτουργία της τριφασικής επαγωγικής γεννήτριας, με τη σύνδεση πυκνωτών για την παροχή της άεργου ισχύος

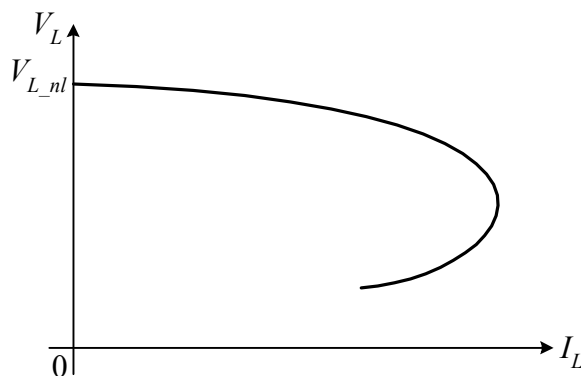


**Σχ. 5.24** Καθορισμός της τάσης εξόδου της επαγωγικής γεννήτριας, η οποία λειτουργεί αυτόνομα, από την τομή της καμπύλης μαγνήτισης και της χαρακτηριστικής τάσης-ρεύματος των πυκνωτών

Το μεγάλο μειονέκτημα της επαγωγικής γεννήτριας είναι ότι δεν παράγει άεργο ισχύ. Επιπλέον, για την ανάπτυξη του μαγνητικού πεδίου πρέπει να καταναλώσει άεργο ισχύ. Για το λόγο αυτό, οι επαγωγικές γεννήτριες σπάνια χρησιμοποιούνται αυτόνομα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Συνήθως συνδέονται στο ηλεκτρικό δίκτυο, το οποίο τις τροφοδοτεί με την αναγκαία άεργο ισχύ και ρυθμίζει την τάση εξόδου τους. Η κυριότερη εφαρμογή τους είναι στις ανεμογεννήτριες, οι οποίες συνδέονται στο υπάρχον ισχυρό ηλεκτρικό δίκτυο. Στην περίπτωση αυτή, η επαγωγική μηχανή προσφέρει απλή κατασκευή και τη δυνατότητα περιστροφής της με ταχύτητα η οποία μπορεί να μεταβάλλεται.

Για την αυτόνομη λειτουργία της επαγωγικής γεννήτριας απαιτείται η σύνδεση πυκνωτών, όπως εικονίζεται στο Σχ. 5.23. Οι πυκνωτές παρέχουν την άεργο ισχύ που απαιτεί η γεννήτρια και το φορτίο. Η τάση εξόδου της γεννήτριας στη λειτουργία χωρίς φορτίο, ορίζεται από το σημείο τομής της καμπύλης μαγνήτισης και της χαρακτηριστικής τάσης-ρεύματος των πυκνωτών (Σχ. 5.24). Η αυτοδιέγερση της επαγωγικής γεννήτριας, όπως και στις γεννήτριες συνεχούς ρεύματος, οφείλεται στον παραμένον μαγνητισμό.

Η χαρακτηριστική φορτίου εικονίζεται στο Σχ. 5.25, όταν η γεννήτρια τροφοδοτεί ένα επαγωγικό φορτίο. Η απότομη πτώση της τάσης εξόδου με την αύξηση του ρεύματος φορτίου, οφείλεται στην αύξηση της άεργου ισχύος που απαιτεί το φορτίο. Την άεργο ισχύ παρέχουν αποκλειστικά οι πυκνωτές  $C$ , με σταθερή τιμή. Εκτός από τη μεταβολή της τάσης εξόδου με το φορτίο, μεταβάλλεται και η ταχύτητα του κινητήρα. Έτσι, η συχνότητα των τάσεων εξόδου δεν είναι σταθερή.



**Σχ. 5.25** Χαρακτηριστική φορτίου της επαγωγικής γεννήτριας, όταν τροφοδοτεί ένα επαγωγικό φορτίο με σταθερό συντελεστή ισχύος

### 5.16 ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΕΠΑΓΩΓΙΚΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ

Όταν ένας τριφασικός επαγωγικός κινητήρας τροφοδοτείται από το δίκτυο σταθερής τάσης και συχνότητας, στρέφεται με μια ταχύτητα η οποία είναι λίγο μικρότερη από τη σύγχρονη. Η μεταβολή της ταχύτητας από τη σύγχρονη εξαρτάται από το φορτίο και είναι τόσο μεγαλύτερη όσο υψηλότερη είναι η αντίσταση του δρομέα. Όμως, η λειτουργία του κινητήρα με μειωμένη ταχύτητα σημαίνει αύξηση της ολίσθησης και των απωλειών χαλκού στο δρομέα ( $P_{cu_r} = sP_{ag}$ ), με συνέπεια τη μείωση του βαθμού απόδοσης.

Ο έλεγχος της ταχύτητας των επαγωγικών κινητήρων επιτυγχάνεται με δύο τρόπους:

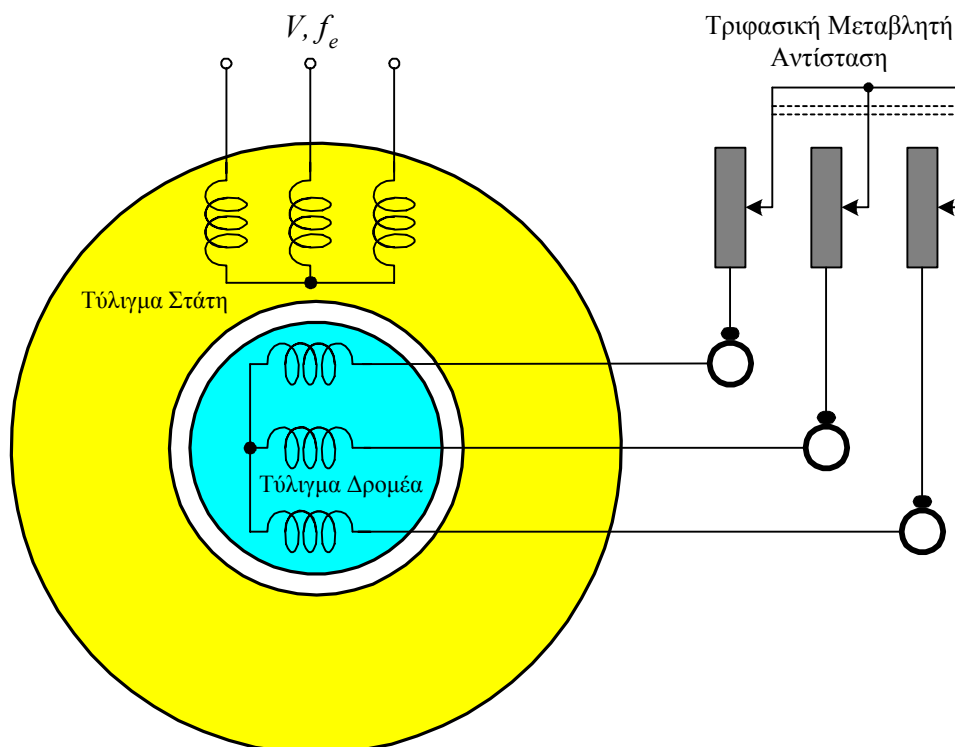
- Με τη ρύθμιση της ολίσθησης.
- Με τη ρύθμιση της σύγχρονης ταχύτητας.

Η ρύθμιση της ολίσθησης, για δεδομένη ροπή φορτίου, επιτυγχάνεται με τη μεταβολή της αντίστασης του δρομέα στον κινητήρα δακτυλιοφόρου δρομέα και με τον έλεγχο της τάσης τροφοδοσίας στον κινητήρα βραχυκυκλωμένου κλωβού.

Η ρύθμιση της σύγχρονης ταχύτητας από τη σχέση  $n_s = 120f_e / P$ , επιτυγχάνεται είτε με τη μεταβολή του αριθμού των πόλων του τυλίγματος του στάτη, ή με τη μεταβολή της συχνότητας τροφοδοσίας.

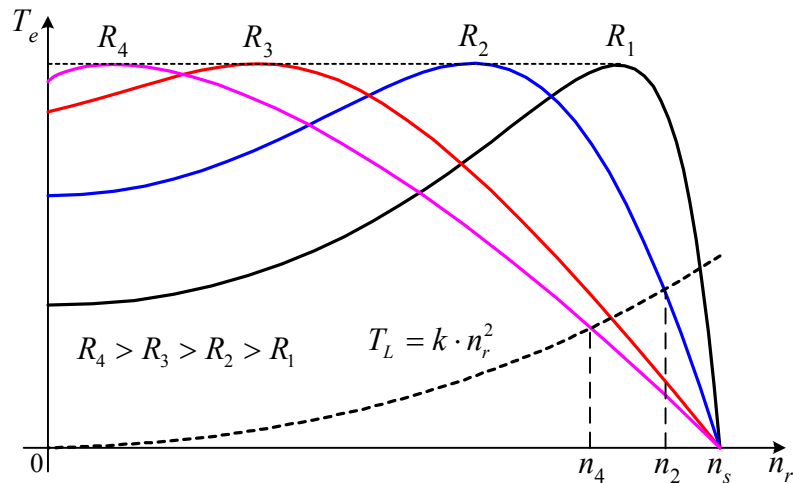
### 5.17 ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΜΕ ΡΥΘΜΙΣΗ ΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΤΟΥ ΔΡΟΜΕΑ

Η ταχύτητα των επαγωγικών κινητήρων με δακτυλιοφόρο δρομέα ρυθμίζεται με την εισαγωγή μεταβλητών αντιστάσεων στο τυλίγμα του δρομέα, όπως παρουσιάζεται στο Σχ. 5.26. Με τον τρόπο αυτό μεταβάλλεται η μορφή της χαρακτηριστικής ροπής–ταχύτητας του κινητήρα.



Σχ. 5.26 Εισαγωγή ρυθμιστικών αντιστάσεων στο δρομέα, για τη ρύθμιση της ταχύτητας του κινητήρα με δακτυλιοφόρο δρομέα





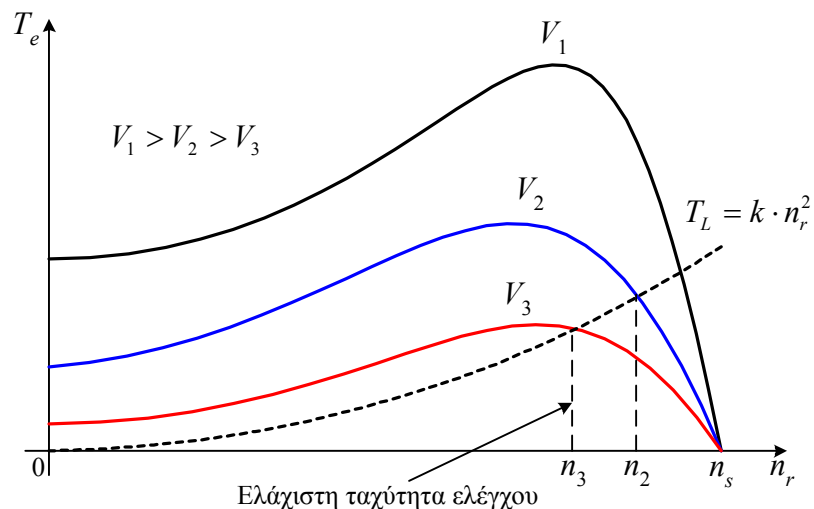
Σχ. 5.27 Έλεγχος της ταχύτητας του επαγωγικού κινητήρα με δακτυλιοφόρο δρομέα, με τη μεταβολή της αντίστασης του δρομέα

Στο Σχ. 5.27 εικονίζονται οι χαρακτηριστικές του κινητήρα για τέσσερις τιμές της αντίστασης του δρομέα, μαζί με τη χαρακτηριστική του φορτίου. Η ροπή του φορτίου μεταβάλλεται ανάλογα με το τετράγωνο της ταχύτητας. Αυτή η χαρακτηριστική φορτίου είναι πολύ κοινή και απαντάται στις αντλίες, τους ανεμιστήρες και τα ανυψωτικά (*pump, fan, crane*). Η μεταβολή της ταχύτητας με τη ρύθμιση της αντίστασης είναι φανερή. Η ταχύτητα του κινητήρα μειώνεται από την τιμή  $n_2$  όταν  $R_r = R_2$  στην τιμή  $n_4$  όταν  $R_r = R_4$ . Το μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι, ο βαθμός απόδοσης της διάταξης μειώνεται με τη μείωση της ταχύτητας, εξαιτίας των εξωτερικών αντιστάσεων.

## 5.18 ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΜΕ ΡΥΘΜΙΣΗ ΤΗΣ ΤΑΣΗΣ ΤΟΥ ΣΤΑΤΗ

Στους επαγωγικούς κινητήρες βραχυκυκλωμένου κλωβού, η ρύθμιση της ολίσθησης (ταχύτητας) επιτυγχάνεται με τη μεταβολή της τάσης τροφοδοσίας των τυλιγμάτων του στάτη. Η συχνότητα των τάσεων είναι σταθερή και ίση με τη συχνότητα του δικτύου. Καθώς η ροπή που αναπτύσσει ο επαγωγικός κινητήρας είναι ανάλογη με το τετράγωνο της τάσης του στάτη, οι χαρακτηριστικές ροπής–ταχύτητας μεταβάλλονται όπως στο Σχ. 5.28, για διάφορες τιμές της τάσης. Η ροπή του φορτίου είναι ανάλογη με το τετράγωνο της ταχύτητας. Από το Σχ. 5.28 είναι φανερό ότι, η ταχύτητα του κινητήρα δεν μπορεί να ελεγχθεί σε τιμές πολύ μικρότερες από τη σύγχρονη. Η ελάχιστη δυνατή ταχύτητα είναι η  $n_3$ , που αντιστοιχεί στη ροπή ανατροπής για την τάση  $V_3$ . Ακόμη, το ρεύμα του κινητήρα είναι ανάλογο της τάσης. Έτσι, ο λόγος ροπής προς ρεύμα, η μέγιστη ροπή, ο συντελεστής ισχύος και ο βαθμός απόδοσης, μειώνονται με τη μείωση της ταχύτητας. Επομένως, ο έλεγχος της ταχύτητας των επαγωγικών κινητήρων με τη ρύθμιση της τάσης του στάτη δεν είναι αποτελεσματικός.

Ο έλεγχος της τάσης στα τυλίγματα του στάτη επιτυγχάνεται με κατάλληλους μετατροπείς ισχύος, οι οποίοι ονομάζονται *ρυθμιστές εναλλασσόμενης τάσης (ac voltage controllers)*. Η κυκλωματική δομή του τριφασικού ρυθμιστή εναλλασσόμενης τάσης εικονίζεται στο Σχ. 5.29. Τα τυλίγματα του κινητήρα μπορεί να είναι σε σύνδεση αστέρα (Σχ. 5.29α), ή τριγώνου (Σχ. 5.29β). Ο ρυθμιστής αποτελείται από έξι *ελεγχόμενους ανορθωτές πυριτίου (SCR)*, οι οποίοι συνδέονται ανά δύο αντιπαράλληλα. Σε μικρές ισχύς χρησιμοποιούνται ως διακόπτες τρία *TRIAC*, στη θέση των έξι *SCR*. Το *TRIAC* συμπεριφέρεται όπως δύο αντιπαράλληλοι ελεγχόμενοι ανορθωτές πυριτίου, όμως έχει πολύ μικρότερη ικανότητα χειρισμού ισχύος απ' αυτούς. Οι *SCR* δέχονται παλμούς έναυσης με τη σειρά αρίθμησης τους και με διαφορά φάσης  $60^\circ$ .



Σχ. 5.28 Έλεγχος της ταχύτητας του επαγωγικού κινητήρα, με τη μεταβολή της τάσης του στάτη

Οι ρυθμιστές εναλλασσόμενης τάσης χρησιμοποιούνται συνήθως στον έλεγχο της ταχύτητας επαγωγικών κινητήρων κλάσης D, σε εφαρμογές αντλιών και ανεμιστήρων, όπου δεν απαιτείται έλεγχος της ταχύτητας σε μικρές τιμές. Όμως, η κυριότερη εφαρμογή τους είναι στην εκκίνηση των επαγωγικών κινητήρων όλων των κατηγοριών, οπότε ονομάζονται *soft starters*. Οι ηλεκτρονικοί εκκινητές έχουν αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους εκκίνησης, με αυτομετασχηματιστή ή διακόπτη αστέρα-τριγώνου. Κάποια από τα πλεονεκτήματα είναι: η ομαλή επιτάχυνση και επιβράδυνση, ο έλεγχος του ρεύματος, η μειωμένη συντήρηση, η προστασία από έλλειψη ή ασυμμετρία των φάσεων. Επιπλέον, ένας εκκινητής με ρυθμιστή εναλλασσόμενης τάσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην ελαχιστοποίηση των απωλειών του επαγωγικού κινητήρα, λειτουργώντας τον κινητήρα με μειωμένη τάση σε μικρά φορτία. (Ο επαγωγικός κινητήρας λειτουργεί με το μέγιστο βαθμό απόδοσης στο ονομαστικό φορτίο, όπου η κατανομή των επιμέρους απωλειών του είναι η βέλτιστη. Όταν το φορτίο μειώνεται, η βέλτιστη κατανομή των απωλειών διαταράσσεται και ο βαθμός απόδοσης μειώνεται. Μεταβάλλοντας την τάση τροφοδοσίας του κινητήρα ανάλογα με το φορτίο του, ώστε η μαγνητική ροή στο διάκενο να έχει πάντα τη βέλτιστη τιμή, επιτυγχάνουμε το μέγιστο βαθμό απόδοσης. Η βέλτιστη τιμή της μαγνητικής ροής εξαρτάται από το φορτίο και την ταχύτητα του κινητήρα).

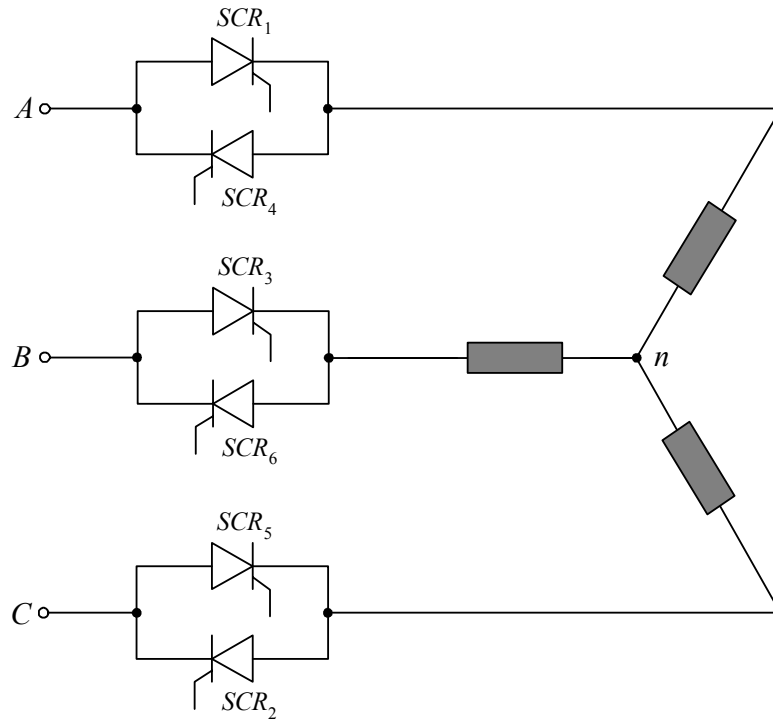
## 5.19 ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΜΕ ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΟΥ ΑΡΙΘΜΟΥ ΤΩΝ ΠΟΛΩΝ

Ο αριθμός των μαγνητικών πόλων που αναπτύσσονται από το τριφασικό τύλιγμα του στάτη μπορεί να μεταβληθεί, με τη μέθοδο των *διαδοχικών πόλων* (*consequent poles*), ή τοποθετώντας *πολλαπλά τυλίγματα στο στάτη* (*multiple stator windings*).

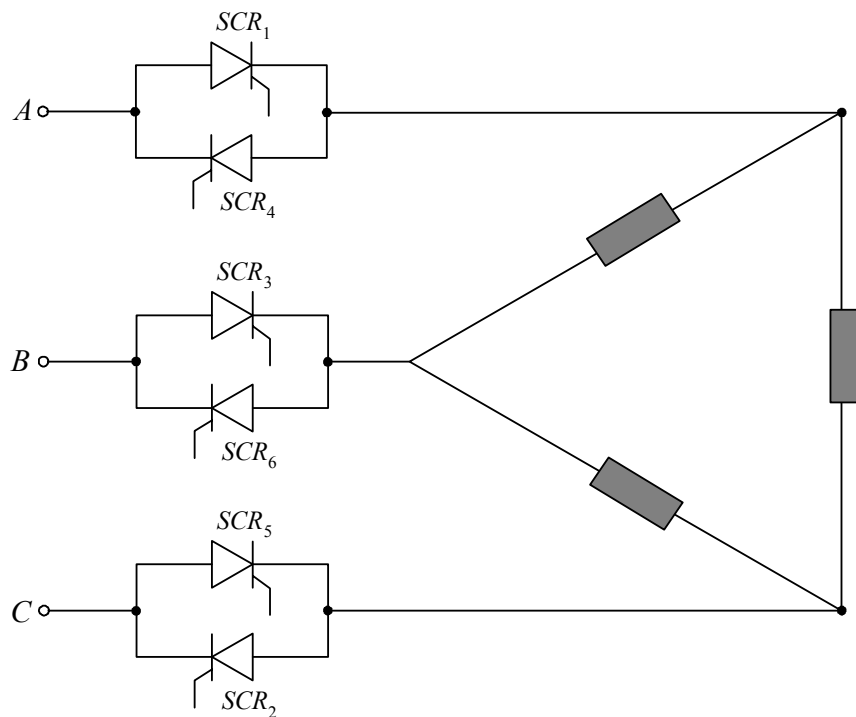
Στη μέθοδο των διαδοχικών πόλων, με κάποιες απλές αλλαγές στη σύνδεση των ομάδων του τυλίγματος του στάτη, ο αριθμός των πόλων του μεταβάλλεται με ένα λόγο 2 προς 1. Έτσι, ο επαγωγικός κινητήρας μπορεί να έχει δύο ή τέσσερις πόλους και σύγχρονη ταχύτητα 3000rpm ή 1500rpm αντίστοιχα.

Όταν ο λόγος 2 προς 1 στην ταχύτητα δεν είναι βολικός, τοποθετούνται στο στάτη περισσότερα από ένα ανεξάρτητα τριφασικά τυλίγματα, με τον επιθυμητό αριθμό πόλων. Ανάλογα με τη ζητούμενη ταχύτητα, τροφοδοτείται κάθε φορά το κατάλληλο τύλιγμα. Το μειονέκτημα των πολλαπλών τυλιγμάτων είναι ότι αυξάνουν το κόστος του κινητήρα. Ακόμη, η μέθοδος των πολλαπλών τυλιγμάτων μπορεί να συνδυασθεί με τη μέθοδο των διαδοχικών πόλων, για τη λειτουργία του κινητήρα σε περισσότερες ταχύτητες.

Πρέπει να σημειωθεί ότι, η μέθοδος ελέγχου της ταχύτητας με τη μεταβολή του αριθμών των πόλων, μπορεί να εφαρμοστεί μόνο σε επαγωγικούς κινητήρες με βραχυκυκλωμένο κλωβό. Ο δρομέας των κινητήρων αυτών αναπτύσσει πάντα τόσους πόλους, όσοι είναι και οι πόλοι του στάτη. Αυτό δεν ισχύει στους κινητήρες με δακτυλιοφόρο δρομέα, όπου το τύλιγμα του δρομέα αναπτύσσει ένα καθορισμένο αριθμό πόλων, ανάλογο με την κατασκευή του.



(α)

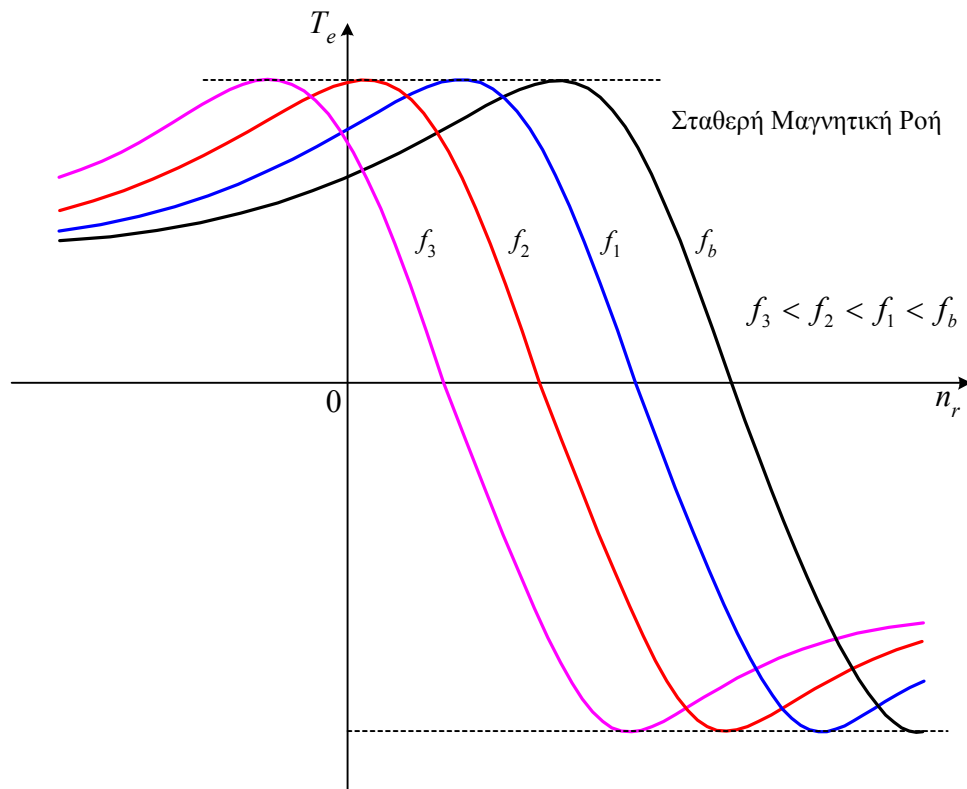


(β)

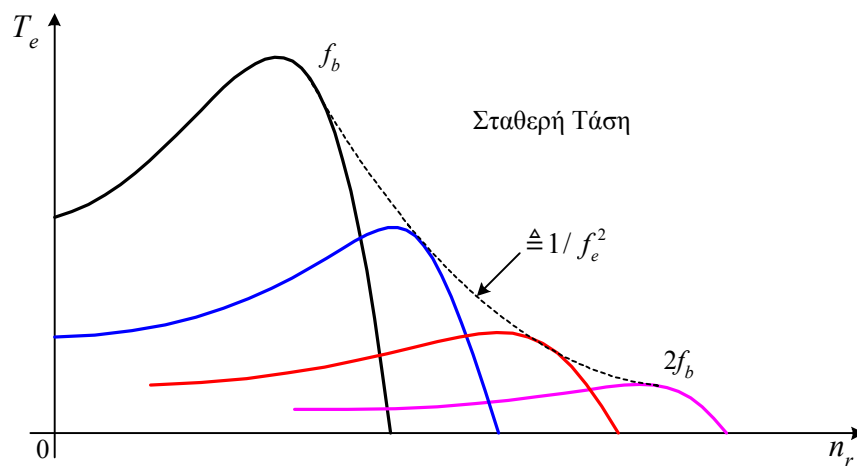
Σχ. 5.29 Τριφασικός ρυθμιστής εναλλασσόμενης τάσης, με φορτίο σε σύνδεση αστέρα (α) και τριγώνου (β)

## 5.20 ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΜΕ ΤΗ ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ

Η βέλτιστη μέθοδος για τον έλεγχο της ταχύτητας των επαγωγικών κινητήρων κάθε είδους, είναι με τη ρύθμιση της συχνότητας τροφοδοσίας του στάτη. Έτσι, μεταβάλλεται η σύγχρονη ταχύτητα, δηλαδή η ταχύτητα περιστροφής των μαγνητικών πεδίων και μαζί τους η ταχύτητα του κινητήρα. Η σύγχρονη ταχύτητα που αντιστοιχεί στην ονομαστική συχνότητα  $f_b$ , ονομάζεται βασική (base).



(α)



(β)

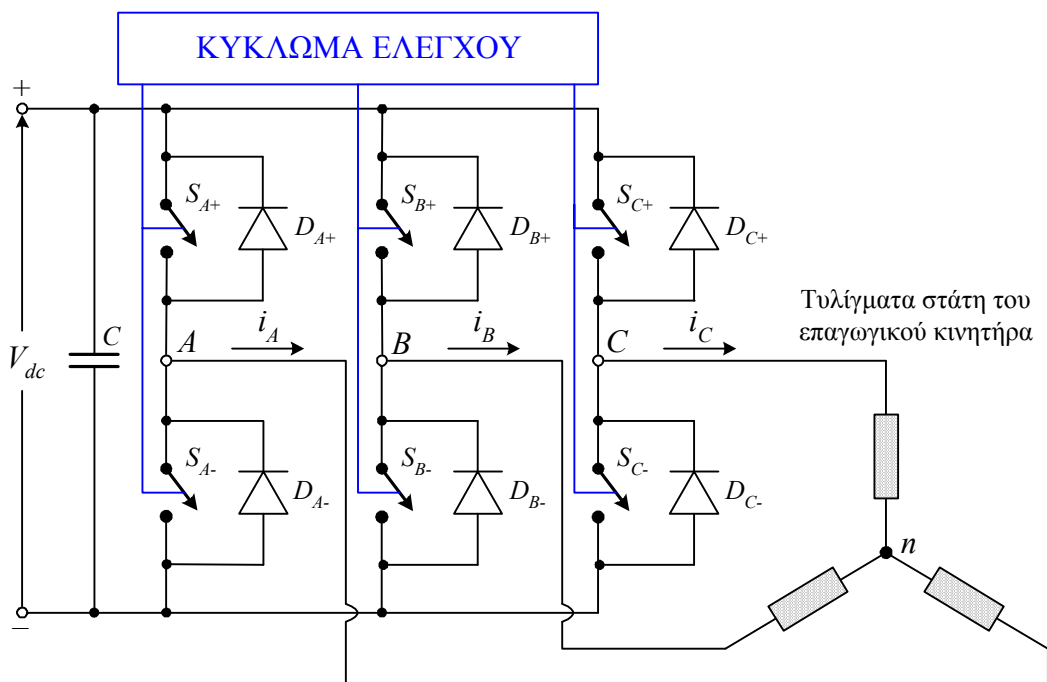
**Σχ. 5.30** Έλεγχος της ταχύτητας του επαγωγικού κινητήρα με τη μεταβολή της συχνότητας, σε τιμές μικρότερες από τη βασική, με σταθερή τη μαγνητική ροή (α) και σε τιμές μεγαλύτερες από τη βασική, με σταθερή την τάση (β)

Καθώς η συχνότητα των τάσεων τροφοδοσίας μπορεί να ρυθμιστεί σε τιμές μικρότερες αλλά και μεγαλύτερες της ονομαστικής, η ταχύτητα του κινητήρα μπορεί να μεταβληθεί από το μηδέν, μέχρι μια τιμή πολλαπλάσια της βασικής. Το άνω όριο της ταχύτητας περιορίζεται από τη μηχανική αντοχή του κινητήρα. Εκτός από την ευρεία περιοχή ρύθμισης της ταχύτητας, η μέθοδος εξασφαλίζει τη λειτουργία του κινητήρα με μικρή ολίσθηση σε κάθε ταχύτητα. Έτσι, ο βαθμός απόδοσης διατηρείται υψηλός.

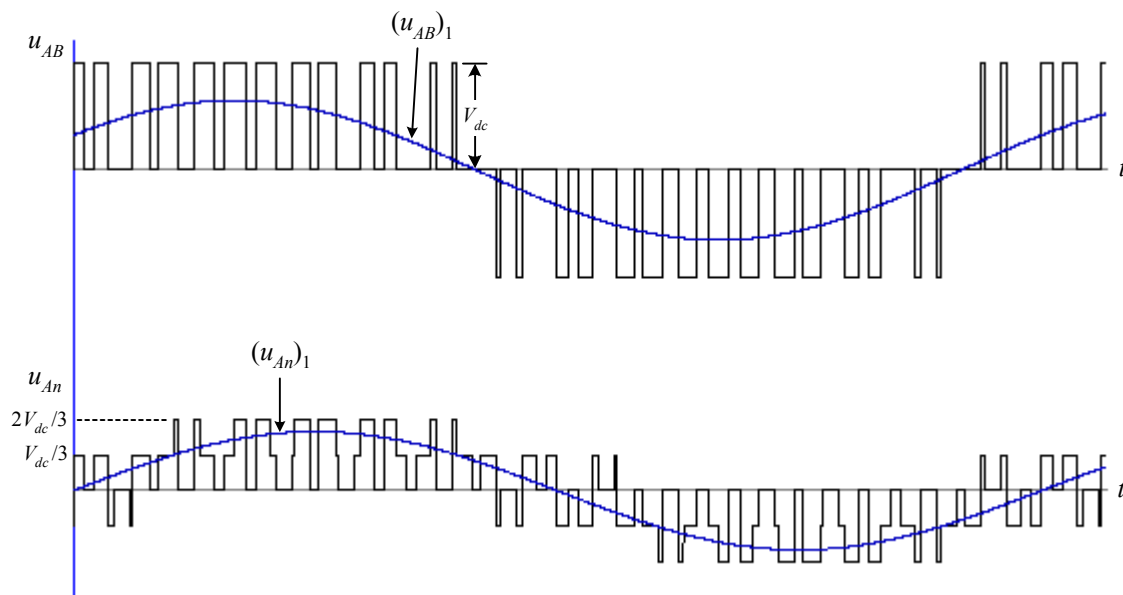
Όταν η ταχύτητα του κινητήρα ρυθμίζεται σε τιμές μικρότερες της βασικής, η μείωση της συχνότητας συνοδεύεται από αντίστοιχη μείωση της τάσης. Ειδικότερα, ο λόγος της τάσης προς τη συχνότητα  $V/f_e$  διατηρείται σταθερός. Με τον τρόπο αυτό η μαγνητική ροή στο διάκενο του κινητήρα παραμένει περίπου σταθερή ( $\phi_m = E/f_e$ ). Στο Σχ. 5.30α εικονίζονται οι χαρακτηριστικές ροπής–ταχύτητας του κινητήρα, σε διάφορες συχνότητες μικρότερες από τη βασική, όταν μαγνητική ροή διατηρείται σταθερή. Παρατηρούμε ότι η ροπή ανατροπής (μέγιστη ροπή), δεν μεταβάλλεται με τη μεταβολή της συχνότητας. Έτσι, ο κινητήρας μπορεί να ελέγξει φορτία, τα οποία απαιτούν μεγάλη ροπή σε μικρές ταχύτητες. Επιπλέον, η δυναμική συμπεριφορά του κινητήρα είναι εξαιρετική.

Στην ονομαστική ταχύτητα, ο κινητήρας τροφοδοτείται με την ονομαστική τάση και τη βασική συχνότητα. Για την αύξηση της ταχύτητας, σε τιμές πέρα από την ονομαστική, η συχνότητα γίνεται μεγαλύτερη από τη βασική. Όμως, η τάση τροφοδοσίας διατηρείται σταθερή στην ονομαστική τιμή, για την προστασία της μόνωσης των τυλιγμάτων. Επειδή η τάση δεν ακολουθεί την αύξηση της συχνότητας, η μαγνητική ροή μειώνεται καθώς η συχνότητα αυξάνει. Το αποτέλεσμα είναι η μείωση της μέγιστης ροπής ανατροπής με το τετράγωνο της συχνότητας, όπως εικονίζεται στο Σχ. 5.30β.

Αν και η μέθοδος ελέγχου της ταχύτητας με τη ρύθμιση της συχνότητας προσφέρει πολύ καλύτερα χαρακτηριστικά λειτουργίας απ' όλες τις άλλες μεθόδους, η χρήση της έχει γενικευτεί μόλις τα τελευταία χρόνια. Αυτό οφείλεται στην κατασκευή των κατάλληλων μετατροπέων ισχύος, οι οποίοι ονομάζονται αντιστροφείς (*inverters*), με λογικό κόστος και υψηλή αξιοπιστία. Στο Σχ. 5.31 εικονίζεται η δομή του τριφασικού αντιστροφέα πηγής τάσης.



Σχ. 5.31 Κυκλωματική δομή του τριφασικού αντιστροφέα πηγής τάσης



Σχ. 5.32 Κυματομορφές της πολικής και της φασικής τάσης στον κινητήρα. Διακρίνεται ακόμη η θεμελιώδης συνιστώσα των τάσεων, με συχνότητα  $f_e$

Ο αντιστροφέας ονομάζεται πηγής τάσης, επειδή τροφοδοτείται από μια πηγή συνεχούς τάσης. Η συνεχής τάση εισόδου του αντιστροφέα  $V_{dc}$ , προέρχεται από την ανόρθωση της τάσης του δικτύου, την οποία εξομαλύνει ο πυκνωτής  $C$ . Οι αντιστροφείς που τροφοδοτούνται από πηγές συνεχούς ρεύματος ονομάζονται *αντιστροφείς πηγής ρεύματος* και χρησιμοποιούνται στον έλεγχο κινητήρων μεγάλης ισχύος. Οι έξι διακόπτες του αντιστροφέα πηγής τάσης, είναι συνήθως *MOSFET* ισχύος (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*) ή *IGBT* (*Insulated Gate Bipolar Transistor*). Αντιπαράλληλα με κάθε διακόπτη συνδέεται μια δίοδος, η οποία εξασφαλίζει την αμφίδρομη ροή της ισχύος μεταξύ της dc εισόδου και της ac εξόδου. Οι διακόπτες οδηγούνται από το κύκλωμα ελέγχου, με κάποια από τις πολλές τεχνικές *διαμόρφωσης εύρους παλμού PWM* (*Pulse Width Modulation*).

Το χαρακτηριστικό όλων των τεχνικών *PWM* είναι η ρύθμιση εκτός από τη συχνότητα και της τάσης τροφοδοσίας του κινητήρα. Όμως, οι διακόπτες του αντιστροφέα λειτουργούν με μια συχνότητα  $f_s$ , η οποία είναι πολύ μεγαλύτερη από τη θεμελιώδη  $f_e$ . Η συχνότητα  $f_s$  ονομάζεται *συχνότητα μετάβασης* (*switching frequency*). Στο Σχ. 5.32 παρουσιάζεται ενδεικτικά η κυματομορφή της πολικής και της φασικής τάσης στον κινητήρα, όταν τροφοδοτείται από ένα *PWM* αντιστροφέα. Ο κινητήρας εξαιτίας της επαγωγικής συμπεριφοράς του, φιλτράρει τις συνιστώσες υψηλής συχνότητας των ρευμάτων και ανταποκρίνεται μόνο στη θεμελιώδη συνιστώσα τους. Τα μικρά αρμονικά ρεύματα αυξάνουν τις απώλειες χαλκού και σιδήρου του κινητήρα.