

Ομαδική απόδοση, %	Εγγυημένη ελάχιστη απόδοση, %	Ομαδική απόδοση, %	Εγγυημένη ελάχιστη απόδοση, %
95.0	94.1	80.0	77.0
94.5	93.6	78.5	75.5
94.1	93.0	77.0	74.0
93.6	92.4	75.5	72.0
93.0	91.7	74.0	70.0
92.4	91.0	72.0	68.0
91.7	90.2	70.0	66.0
91.0	89.5	68.0	64.0
90.2	88.5	66.0	62.0
89.5	87.5	64.0	59.5
88.5	86.5	62.0	57.5
87.5	85.5	59.5	55.0
86.5	84.0	57.5	52.5
85.5	82.5	55.0	50.5
84.0	81.5	52.5	48.0
82.5	80.0	50.5	46.0
81.5	78.5		

**ΣΧΗΜΑ 7-33** Πίνακας τυποποιημένων ονομαστικών αποδόσεων της NEMA. Η ονομαστική απόδοση περιγράφει τη μέση απόδοση ενός μεγάλου αριθμού όμοιων κινητήρων, ενώ η ελάχιστη εγγυημένη απόδοση περιγράφει την ελάχιστη αποδεκτή απόδοση για οποιονδήποτε δεδομένο κινητήρα της συγκεκριμένη κλάσης.

Άλλοι οργανισμοί τυποποίησης έχουν επίσης εκδώσει κανονισμούς για την απόδοση των επαγωγικών κινητήρων. Οι πιο σημαντικοί απ' αυτούς είναι ο Βρετανικός κανονισμός (BS-269), ο κανονισμός της IEC (IEC 34-2) και ο Ιαπωνικός κανονισμός (JEC-37). Όμως, οι τεχνικές μετρήσεις της απόδοσης που περιγράφονται είναι διαφορετικές για κάθε τυποποίηση και δίνουν διαφορετικά αποτελέσματα για την ίδια μηχανή. Η τυποποίηση της NEMA (Μέθοδος B, IEEE-112) είναι η πιο συντηρητική από τις τέσσερις μεθόδους μέτρησης της απόδοσης κι αυτό θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά τη σύγκριση των κινητήρων που εξετάζονται σε διαφορετικά συστήματα. Αν εξετάζονται δυο κινητήρες με ονομαστική απόδοση 82,5%, από τους οποίους ο ένας αναλύθηκε με την τυποποίηση της NEMA και ο άλλος με την Ιαπωνική τυποποίηση, αυτός που αναλύθηκε με την τυποποίηση της NEMA έχει στην πραγματικότητα μεγαλύτερη απόδοση. Τελικά, όταν συγκρίνονται δυο κινητήρες, είναι σημαντικό η σύγκριση για τις αποδόσεις να γίνεται στο ίδιο σύστημα τυποποίησης.

## 7.8 ΕΚΚΙΝΗΣΗ ΕΠΑΓΩΓΙΚΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ

Οι επαγωγικοί κινητήρες δεν παρουσιάζουν κατά την εκκίνησή τους τα προβλήματα των σύγχρονων κινητήρων. Σε πολλές περιπτώσεις η εκκίνηση των επαγωγικών κινητήρων επιτυγχάνεται απλά με τη σύνδεσή τους στο δίκτυο ισχύος. Όμως, πολλές φορές υπάρχουν σοβαροί λόγοι για να μη γίνεται κάτι τέτοιο. Μπορεί, για παράδειγμα, το ρεύμα εκκίνησης, που απαιτείται, να προκαλεί τέτοια πτώση τάσης στο δίκτυο ισχύος, που να κάνει ανεπίτρεπτη την απλή εκκίνηση με απευθείας σύνδεση στη γραμμή (*across-the-line starting*).

Στους κινητήρες με δακτυλιοφόρο δρομέα η εκκίνηση μπορεί να επιτευχθεί με σχετικά μικρά ρεύματα εκκίνησης με τη σύνδεση εξωτερικής αντίστασης στο δρομέα. Αυτή η ξεχωριστή αντίσταση δεν αυξάνει μόνο τη ροπή εκκίνησης, αλλά παράλληλα μειώνει και το ρεύμα εκκίνησης.

Στους κινητήρες βραχυκυκλωμένου κλωβού το ρεύμα εκκίνησης παίρνει μεγάλο εύρος τιμών και εξαρτάται κυρίως από την ονομαστική ισχύ του κινητήρα και από την ενεργό αντίσταση του δρομέα στις συνθήκες εκκίνησης. Για τον προσδιορισμό του ρεύματος στις συνθήκες εκκίνησης όλοι οι κινητήρες βραχυκυκλωμένου κλωβού χαρακτηρίζονται με κάποιο *κωδικό γράμμα* (δεν πρέπει να συγχέεται με το γράμμα που προσδιορίζει την κλάση) που βρίσκεται στις πινακίδες τους. Το κωδικό γράμμα θέτει τα όρια της έντασης του ρεύματος με την οποία μπορεί να λειτουργήσει ο κινητήρας κατά την εκκίνηση.

Τα παραπάνω όρια εκφράζονται με τη φαινόμενη ισχύ εκκίνησης του κινητήρα συναρτήσει της ονομαστικής του υποδύναμης. Στο Σχ. 7-34, δίνεται ο πίνακας που περιέχει τα αντίστοιχα kVA/hr για κάθε κωδικό γράμμα.

Ονομαστικό κωδικό γράμμα	Ακίνητοποιημένος δρομέας, KVA/hr	Ονομαστικό κωδικό γράμμα	Ακίνητοποιημένος δρομέας, KVA/hr
A	0-3.15	L	9.00-10.00
B	3.15-3.55	M	10.00-11.00
C	3.55-4.00	N	11.20-12.50
D	4.00-4.50	P	12.50-14.00
E	4.50-5.00	R	14.00-16.00
F	5.00-5.60	S	16.00-18.00
G	5.60-6.30	T	18.00-20.00
H	6.30-7.10	U	20.00-22.40
J	7.7-8.00	V	22.40 and up
K	8.00-9.00		

**ΣΧΗΜΑ 7-34** Πίνακας των κωδικών γραμμάτων της NEMA, όπου παρουσιάζεται η φαινόμενη ισχύς εκκίνησης προς την ονομαστική ισχύ του κινητήρα. Κάθε κωδικός γράμματος εκτείνεται μέχρι το κάτω όριο του επόμενου κωδικού, χωρίς όμως να καλύπτει αυτό το όριο.

Ο προσδιορισμός του ρεύματος εκκίνησης ενός επαγωγικού κινητήρα γίνεται με ανάγνωση της ονομαστικής τάσης, της ονομαστικής υποδύναμης και του κωδικού γράμματος από την πινακίδα του κινητήρα. Κατόπιν, υπολογίζεται η φαινόμενη ισχύς εκκίνησης του κινητήρα

$$S_{\text{start}} = (\text{ονομαστική υποδύναμη}) (\text{συντελεστής του κωδικού γράμματος}) \quad (7-55)$$

και το ρεύμα εκκίνησης μπορεί να προσδιοριστεί από την εξίσωση

$$I_L = \frac{S_{\text{start}}}{\sqrt{3} V_T} \quad (7-56)$$

**Παράδειγμα 7-7.** Ποιο είναι το ρεύμα εκκίνησης ενός επαγωγικού κινητήρα ονομαστικής ισχύος 15 hp και ονομαστικής τάσης 208 V, που χαρακτηρίζεται με το κωδικό γράμμα F;

**Λύση.** Σύμφωνα με τον πίνακα του Σχ. 7-34, ο μέγιστος λόγος kVA/hr του κινητήρα είναι 5,6. Έτσι, η μέγιστη φαινόμενη ισχύς εκκίνησης του κινητήρα είναι

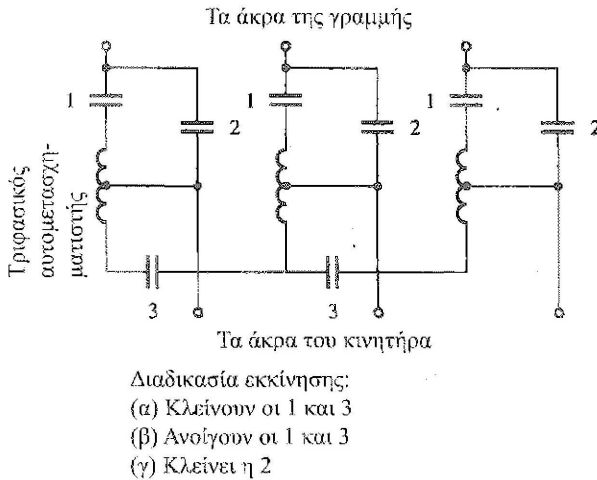
$$S_{\text{start}} = (15 \text{ hp})(5,6) = 84 \text{ kVA}$$

και το ρεύμα εκκίνησης έχει τιμή

$$\begin{aligned} I_L &= \frac{S_{\text{start}}}{\sqrt{3} V_T} \quad (7-56) \\ &= \frac{84 \text{ kVA}}{\sqrt{3}(208 \text{ V})} = 233 \text{ A} \end{aligned}$$

Αν είναι απαραίτητο, το ρεύμα εκκίνησης ενός επαγωγικού κινητήρα μπορεί να μειωθεί με τη χρήση κάποιου κυκλώματος εκκίνησης. Όμως, αν εισαχθεί ένα τέτοιο κύκλωμα, μειώνεται επίσης η ροπή εκκίνησης του κινητήρα.

Ένας τρόπος μείωσης του ρεύματος εκκίνησης είναι η εισαγωγή αυτεπαγωγών ή αντιστάσεων στο δίκτυο ισχύος κατά την εκκίνηση. Άλλος εναλλακτικός τρόπος είναι η μείωση της τάσης εισόδου του κινητήρα κατά την εκκίνηση με την εισαγωγή αυτομετασχηματιστών. Στο Σχ. 7-35, φαίνεται ένα κύκλωμα εκκίνησης επαγωγικού κινητήρα που μειώνει την τάση εισόδου με τη χρήση αυτομετασχηματιστή. Οι επαφές 1 και 3 είναι κλειστές κατά την εκκίνηση, ώστε ο κινητήρας να τροφοδοτείται με μικρότερη τάση. Όταν ο κινητήρας αποκτά κάποια ταχύτητα, αυτές οι επαφές ανοίγουν και οι επαφές 2 κλείνουν. Οι επαφές 2 συνδέουν τον κινητήρα στην πλήρη τάση του δικτύου.



**ΣΧΗΜΑ 7-35** Κύκλωμα εκκίνησης επαγωγικού κινητήρα με αυτομετασχηματιστή.

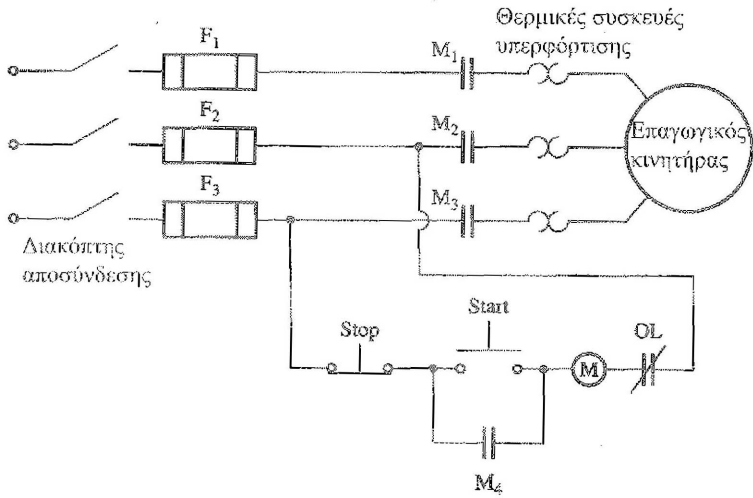
Εδώ πρέπει να γίνει κατανοητό το ότι, ενώ το ρεύμα εκκίνησης μειώνεται ανάλογα με τη μείωση της τάσης εισόδου, η ροπή εκκίνησης μειώνεται με το τετράγωνο της τάσης στα άκρα του κινητήρα. Έτσι, η ελάττωση του ρεύματος εκκίνησης μπορεί να πραγματοποιηθεί μόνο για ένα συγκεκριμένο ποσοστό, αν ο κινητήρας πρέπει να ξεκινά με κάποιο φορτίο στον άξονά του.

## Κυκλώματα Εκκίνησης Επαγωγικών Κινητήρων

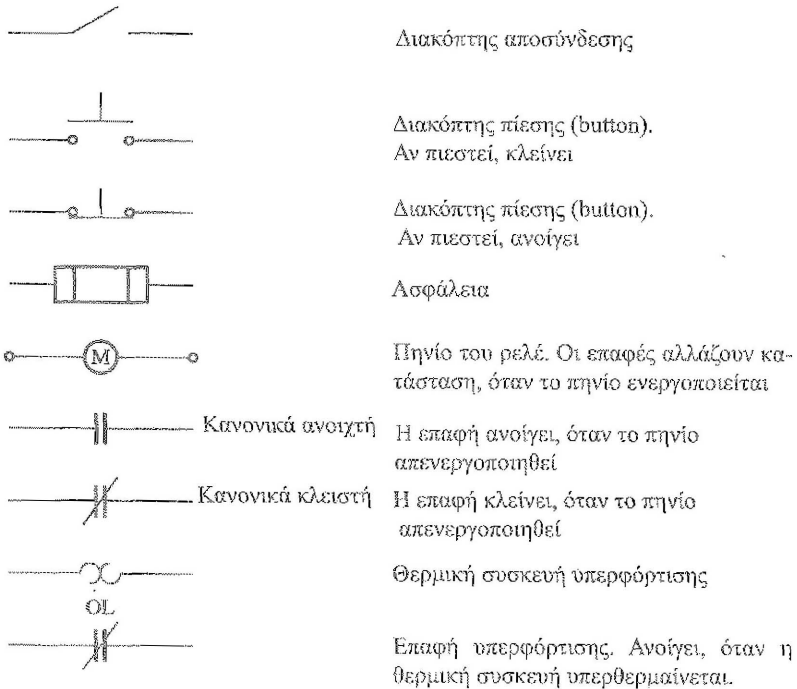
Ένα τυπικό μαγνητικό κύκλωμα εκκίνησης πλήρους τάσης ή εκκίνησης με σύνδεση στη γραμμή κάποιου επαγωγικού κινητήρα φαίνεται στο Σχ. 7-36. Το Σχ. 7-37, εξηγεί τη σημασία των συμβόλων του κυκλώματος εκκίνησης. Η λειτουργία του κυκλώματος είναι πολύ απλή. Όταν πατηθεί ο διακόπτης εκκίνησης, το πηνίο του ρελέ Μ (επαφές - *contactor*) ενεργοποιείται και οι κανονικά ανοιχτές επαφές  $M_1$ ,  $M_2$  και  $M_3$  κλείνουν. Όταν αυτές οι επαφές κλείσουν, στον κινητήρα εφαρμόζεται τάση και ξεκινά η λειτουργία του. Επίσης, η επαφή  $M_4$  κλείνει, ώστε να βραχυκυκλωθεί ο διακόπτης εκκίνησης και να επιτραπεί στο χειριστή να τον αποδεσμεύσει χωρίς να διακόψει την τροφοδοσία του ρελέ Μ. Όταν πατηθεί ο διακόπτης αποκοπής, το ρελέ Μ απενεργοποιείται, οι επαφές Μ ανοίγουν και ο κινητήρας σταματά.

Ένα τέτοιου είδους μαγνητικό κύκλωμα εκκίνησης κινητήρα διαθέτει από κατασκευής κάποιες ιδιότητες προστασίας του κινητήρα, όπως

1. Προστασία από βραχυκύκλωμα
2. Προστασία από υπερφόρτιση
3. Προστασία από τυχόν πτώση τάσης του δικτύου



**ΣΧΗΜΑ 7-36** Τυπικό κύκλωμα εκκίνησης επαγωγικού κινητήρα με σύνδεση στη γραμμή.



**ΣΧΗΜΑ 7-37** Τα τυπικά στοιχεία των κυκλωμάτων ελέγχου επαγωγικών κινητήρων.

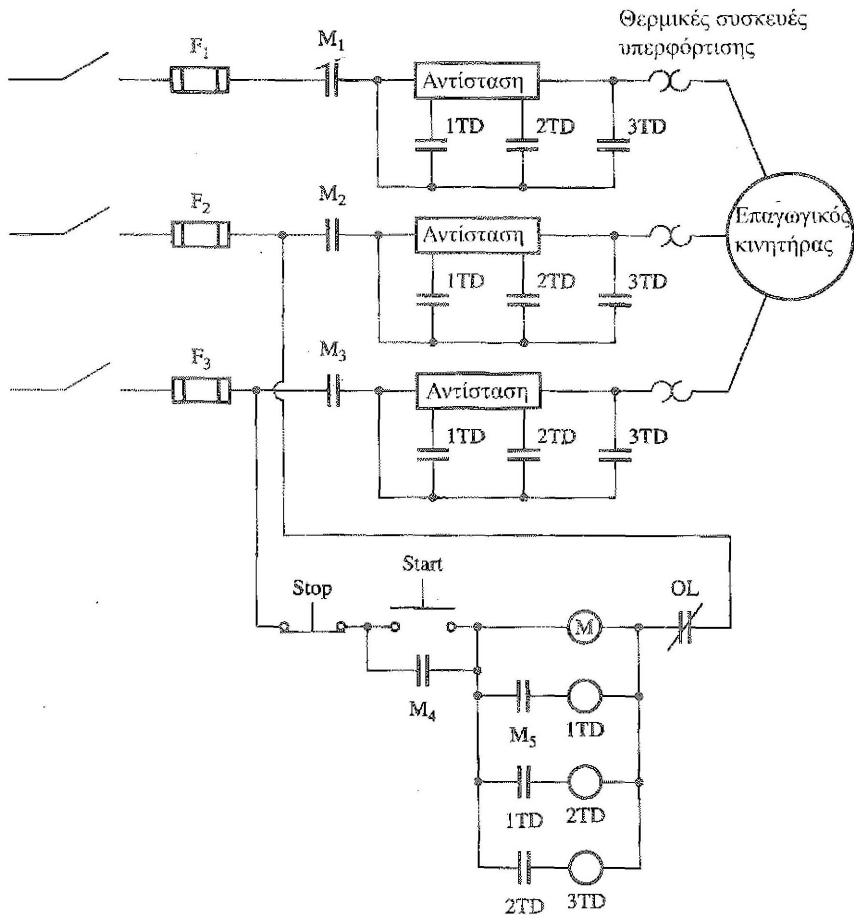
Οι ασφάλειες  $F_1$ ,  $F_2$  και  $F_3$  προσφέρουν στο κύκλωμα προστασία από βραχυκύκλωμα. Αν ξαφνικά στο εσωτερικό του κινητήρα εμφανιστεί βραχυκύκλωμα και το ρεύμα του γίνει πολλές φορές μεγαλύτερο από το ονομαστικό του ρεύμα, οι ασφάλειες θα καούν αποσυνδέοντας έτσι τον κινητήρα από το δίκτυο ισχύος και προστατεύοντάς τον από καταστροφή. Όμως αυτές οι ασφάλειες δε θα πρέπει να καίγονται κατά την κανονική εκκίνηση του κινητήρα κι έτσι κατασκευάζονται, ώστε να αντέχουν σε ρεύματα πολλές φορές μεγαλύτερα από το ρεύμα πλήρους φόρτισης, πριν να διακόψουν την τροφοδοσία. Αυτό σημαίνει ότι τα βραχυκυκλώματα μέσω μιας πολύ μεγάλης αντίστασης και/ή εξαιτίας εξαιρετικά μεγάλων φορτίων δεν αντιμετωπίζονται με τις ασφάλειες.

Οι συσκευές που συμβολίζονται στο σχήμα με OL προστατεύουν τον κινητήρα από υπερφορτίσεις. Αυτές οι συσκευές προστασίας από υπερφορτίσεις αποτελούνται από δυο μέρη: από ένα θερμικό στοιχείο και από τις επαφές υπερφόρτισης. Κάτω από κανονικές συνθήκες οι επαφές υπερφόρτισης είναι κλειστές. Όμως, όταν η θερμοκρασία των θερμικών στοιχείων αυξάνεται υπερβολικά, οι επαφές υπερφόρτισης ανοίγουν απενεργοποιώντας το ρελέ M, το οποίο με τη σειρά του ανοίγει τις επαφές M διακόπτοντας την τροφοδοσία του κινητήρα.

Όταν ένας επαγωγικός κινητήρας υπερφορτίζεται, είναι δυνατό να υποστεί σοβαρή βλάβη εξαιτίας της εξαιρετικά υψηλής θερμοκρασίας που προκαλούν τα μεγάλα ρεύματα στο εσωτερικό του. Όμως, αυτές οι βλάβες εμφανίζονται μετά από κάποιο διάστημα και ο επαγωγικός κινητήρας δεν παθαίνει τίποτα σοβαρό από τα μεγάλα ρεύματα που διαρκούν πολύ λίγο (όπως τα ρεύματα εκκίνησης). Οι βλάβες προκαλούνται, μόνο όταν τα υψηλά ρεύματα παραμένουν για μεγάλο διάστημα. Παρόμοια συμπεριφορά, που εξαρτάται από τη θερμοκρασία, έχουν και τα θερμικά στοιχεία υπερφόρτισης κι έτσι δεν επηρεάζονται από μεγάλα ρεύματα που διαρκούν ελάχιστα, ενώ ενεργοποιούνται με την παρουσία μεγάλων ρευμάτων για σημαντικό διάστημα διακόπτοντας την τροφοδοσία του κινητήρα, πριν αυτός πάθει κάποια βλάβη.

Το κύκλωμα εκκίνησης που αναλύεται εδώ προσφέρει επίσης προστασία από τυχόν πτώσεις τάσης στο δίκτυο. Όπως φαίνεται, το σήμα ελέγχου του ρελέ M έρχεται κατευθείαν από το δίκτυο ισχύος. Αν η τάση που εφαρμόζεται στον κινητήρα πάρει πολύ χαμηλή τιμή, τότε και η τάση που εφαρμόζεται στο ρελέ M θα πάρει το ίδιο μικρή τιμή απενεργοποιώντας το. Κατόπιν, οι επαφές M ανοίγουν διακόπτοντας τη ροή ισχύος προς τον κινητήρα.

Το Σχ. 7-38, δείχνει ένα κύκλωμα εκκίνησης επαγωγικού κινητήρα που διαθέτει αντιστάσεις για τον περιορισμό του ρεύματος εκκίνησης. Το κύκλωμα αυτό είναι παρόμοιο με το προηγούμενο, μόνο που περιέχει κάποια πρόσθετα στοιχεία για τον έλεγχο της απομάκρυνσης των αντιστάσεων εκκίνησης. Τα ρελέ 1TD, 2TD και 3TD, ονομάζονται ρελέ χρονικής καθυστέρησης, πράγμα που σημαίνει ότι, αφού ενεργοποιηθούν, οι επαφές τους κλείνουν μετά από κάποια συγκεκριμένη χρονική καθυστέρηση.



ΣΧΗΜΑ 7-38 Ωμικό κύκλωμα εκκίνησης τριών βημάτων ενός επαγωγικού κινητήρα.

Σ' αυτό το κύκλωμα με το πάτημα του διακόπτη εκκίνησης το ρελέ ενεργοποιείται και, όπως πριν, στον κινητήρα εφαρμόζεται κάποια ισχύς. Καθώς οι επαφές 1TD, 2TD και 3TD είναι όλες τους ανοιχτές, ολόκληρη η αντίσταση εκκίνησης βρίσκεται σε σειρά με τον κινητήρα κι έτσι το ρεύμα εκκίνησης περιορίζεται.

Όπως φαίνεται, μετά το κλείσιμο των επαφών M το ρελέ 1TD ενεργοποιείται. Όμως υπάρχει κάποιο ορισμένο χρονικό διάστημα, μέχρι να κλείσουν οι επαφές 1TD. Κατά τη διάρκεια αυτού του διαστήματος ο κινητήρας επιταχύνεται μέχρι ενός σημείου, ενώ το ρεύμα εκκίνησης μειώνεται λίγο. Κατόπιν, οι επαφές 1TD κλείνουν απομακρύνοντας κάποιο τμήμα της αντίστασης εκκίνησης και ενεργοποιώντας ταυτόχρονα το ρελέ 2TD. Μετά από μια ακόμη περίοδο καθυστέρησης οι επαφές 2TD κλείνουν απομακρύνοντας το δεύτερο τμήμα της αντίστασης εκκίνησης και ενεργοποιώντας ταυτόχρονα το ρελέ 3TD. Τελικά, όταν οι επαφές 3TD κλείνουν, η συνολική αντίσταση εκκίνησης απομακρύνεται από το κύκλωμα.

Η προσεκτική επιλογή των αντιστάσεων και των χρόνων καθυστέρησης κάνει αυτό το κύκλωμα ικανό να αποτρέπει τα ρεύματα εκκίνησης του κινητήρα από το να γίνουν επικίνδυνα μεγάλα, αλλά και να επιτρέπει την ανάπτυξη του απαραίτητου ρεύματος, ώστε να επιτυγχάνεται η προοδευτική επιτάχυνση έως την ταχύτητα κανονικής λειτουργίας.

## 7.9 ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΣΤΟΥΣ ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΥΣ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ

Μέχρι την εμφάνιση των σύγχρονων συστημάτων ηλεκτρονικής οδήγησης οι επαγωγικοί κινητήρες δεν αποτελούσαν γενικά καλή επιλογή για εφαρμογές μεταβλητής ταχύτητας. Το κανονικό εύρος λειτουργίας ενός τυπικού επαγωγικού κινητήρα (κλάσης A, B και C) περιορίζεται κάτω από 5% για την ολίσθηση, ενώ η μεταβολή της ταχύτητας πέρα απ' αυτό το εύρος είναι σχεδόν ανάλογη του φορτίου που εφαρμόζεται στον άξονα του κινητήρα. Ακόμη κι αν η ολίσθηση έπαιρνε μεγαλύτερη τιμή, η απόδοση του κινητήρα θα έπεφτε πολύ χαμηλά, αφού οι απώλειες χαλκού στο δρομέα είναι ανάλογες με την ολίσθηση ( $P_{RCL} = sP_{AG}$ ).

Στην πραγματικότητα υπάρχουν δυο μόνο τεχνικές με τις οποίες είναι δυνατό να ρυθμιστεί η ταχύτητα των επαγωγικών κινητήρων. Στην πρώτη μεταβάλλεται η σύγχρονη ταχύτητα του κινητήρα, που είναι η ταχύτητα περιστροφής των μαγνητικών πεδίων του στάτη και του δρομέα, αφού η ταχύτητα του άξονα παραμένει πάντα κοντά στη σύγχρονη ταχύτητα  $n_{sync}$ . Στην άλλη τεχνική μεταβάλλεται η ολίσθηση του κινητήρα για ένα δεδομένο φορτίο. Πιο κάτω οι δυο αυτές μέθοδοι παρουσιάζονται με πιο πολλές λεπτομέρειες.

Η σύγχρονη ταχύτητα του επαγωγικού κινητήρα δίνεται από τη σχέση

$$n_{sync} = \frac{120 f_e}{P} \quad (7-1)$$

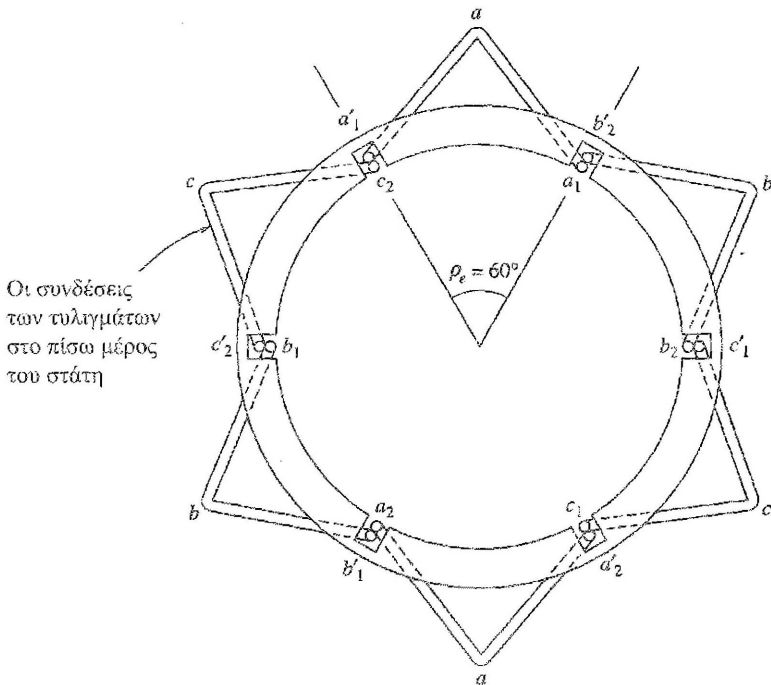
κι έτσι οι μόνοι τρόποι μεταβολής της σύγχρονης ταχύτητας είναι: (1) η ρύθμιση της ηλεκτρικής συχνότητας και (2) η μεταβολή του αριθμού των πόλων της μηχανής. Ο έλεγχος της ολίσθησης πραγματοποιείται με μεταβολή της αντίστασης του δρομέα είτε της τάσης εισόδου στον κινητήρα. Η καθεμιά απ' αυτές τις τεχνικές περιγράφεται στα επόμενα.

### Έλεγχος της Ταχύτητας Επαγωγικών Κινητήρων με Μεταβολή του Αριθμού των Πόλων

Υπάρχουν τρεις βασικές μέθοδοι αλλαγής του αριθμού των πόλων ενός επαγωγικού κινητήρα:

1. Η μέθοδος των διαδοχικών πόλων
2. Πολλαπλά τυλίγματα στο στάτη



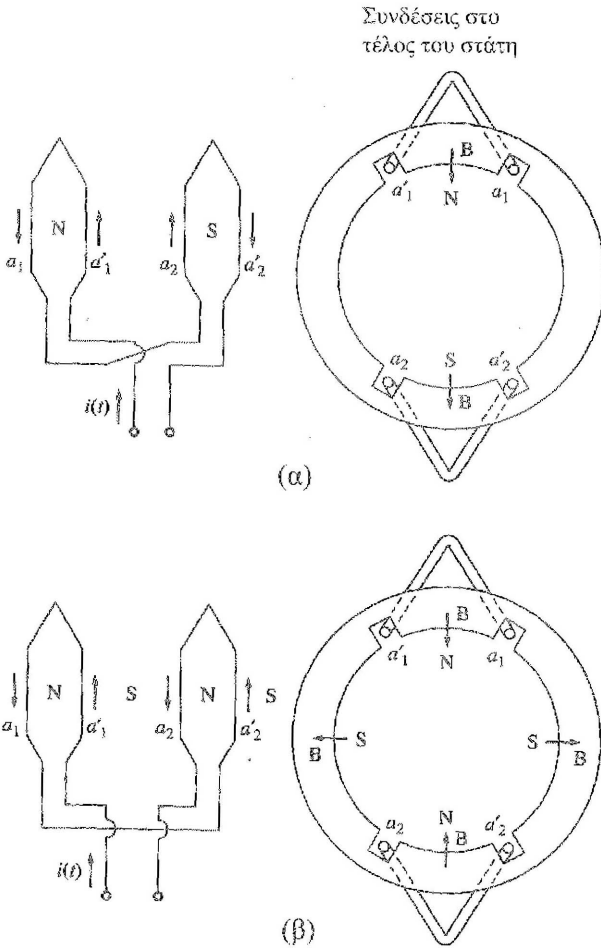


**ΣΧΗΜΑ 7-39** Το τύλιγμα ενός στάτη δυο πόλων που πρόκειται να υποστεί αλλαγή του αριθμού των πόλων. Ας σημειωθεί το μικρό βήμαδρομεία των τυλιγμάτων.

Η μέθοδος των διαδοχικών πόλων (*consequent poles*) είναι μια παλιά μέθοδος ελέγχου της ταχύτητας, που αρχικά αναπτύχθηκε το 1897. Στηρίζεται στο γεγονός ότι ο αριθμός πόλων του τυλιγματος στο στάτη ενός επαγωγικού κινητήρα είναι εύκολο να μεταβληθεί μ' έναν παράγοντα 2 προς 1 με κάποιες απλές αλλαγές στις συνδέσεις των συστάδων. Το Σχ. 7-39, δείχνει έναν απλό στάτη επαγωγικού κινητήρα δύο πόλων, κατάλληλο για αλλαγή των πόλων. Ας σημειωθεί ότι οι ξεχωριστές συστάδες παρουσιάζουν πολύ μικρό βήμα ( $60^\circ$  ως  $90^\circ$ ). Στο Σχ. 7-40, φαίνεται η φάση  $a$  του τυλιγματος για να δοθεί περισσότερη έμφραση σε κάποιες λεπτομέρειες.

Το Σχ. 7-40α, δείχνει τα ρεύματα στη φάση  $a$  του τυλιγματος και σε κάποια χρονική στιγμή της κανονικής λειτουργίας. Ας σημειωθεί ότι οι μαγνητικές γραμμές του πεδίου εξέρχονται από το στάτη στην επάνω ομάδα φάσης (βόρειος πόλος) και εισέρχονται στο στάτη στην κάτω ομάδα φάσης (νότιος πόλος). Έτσι αυτό το τύλιγμα παράγει δυο πόλους στο στάτη.

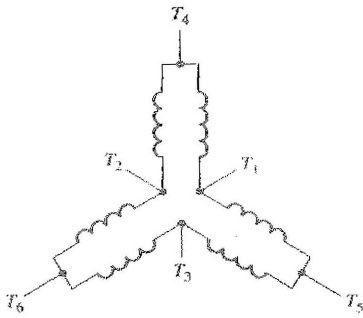
Ας υποθεθεί τώρα, ότι η κατεύθυνση του ρεύματος στην κάτω ομάδα φάσης του στάτη αντιστρέφεται (Σχ. 7-40β). Τότε οι γραμμές του πεδίου θα εξέρχονται από το στάτη και στην επάνω και στην κάτω ομάδα φάσης - κάθε ομάδα παράγει



**ΣΧΗΜΑ 7-40** Η μια φάση ενός τυλίγματος στο οποίο θα γίνει αλλαγή των πόλων. (α) Στη δομή με δυο πόλους η μια συστάδα υλοποιεί τον έναν πόλο και η άλλη συστάδα το δεύτερο πόλο. (β) Όταν αντιστρέφεται η σύνδεση της μιας συστάδας, οι δυο συστάδες υλοποιούν βόρειους πόλους και η μαγνητική ροή επιστρέφει στο στάτη από τα σημεία που βρίσκονται ανάμεσα στις συστάδες. Οι νότιοι πόλοι ονομάζονται *διαδοχικοί πόλοι* (*consequent poles*) και το τύλιγμα είναι πια ένα τύλιγμα τεσσάρων πόλων.

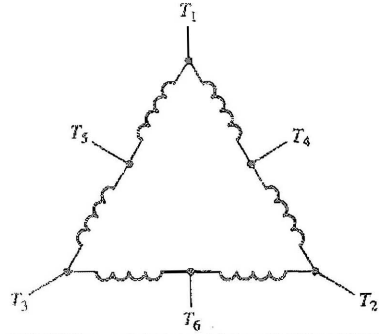
ένα βόρειο μαγνητικό πόλο. Η μαγνητική ροή θα πρέπει να επιστρέφει στο στάτη της μηχανής ανάμεσα από τις δυο ομάδες φάσης δημιουργώντας ένα ζεύγος *διαδοχικών νότιων μαγνητικών πόλων*. Εδώ φαίνεται ότι ο στάτης διαθέτει πια τέσσερις μαγνητικούς πόλους - διπλάσιο αριθμό από πριν.

Ο δρομέας ενός τέτοιου κινητήρα είναι βραχυκυκλωμένου κλωβού, επειδή σ' αυτό το δρομέα επάγονται πάντα τόσοι πόλοι, όσοι ακριβώς παρουσιάζονται στο στάτη κι έτσι μπορεί να προσαρμόζεται κάθε φορά που ο αριθμός των πόλων μεταβάλλεται.



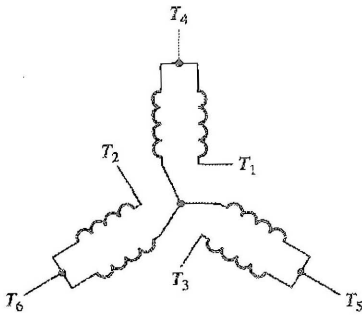
Ταχύ-τητα	Γραμμές			
	$L_1$	$L_2$	$L_3$	
Χαμηλή	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4, T_5, T_6$ ανοιχτά
Υψηλή	$T_4$	$T_5$	$T_6$	$T_1 - T_2 - T_3$ συνδεδεμένα μεταξύ τους

(α)



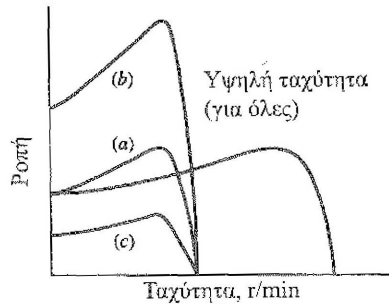
Ταχύ-τητα	Γραμμές			
	$L_1$	$L_2$	$L_3$	
Χαμηλή	$T_4$	$T_5$	$T_6$	$T_1 - T_2 - T_3$ συνδεδεμένα μεταξύ τους
Υψηλή	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4, T_5, T_6$ ανοιχτά

(β)



Ταχύ-τητα	Γραμμές			
	$L_1$	$L_2$	$L_3$	
Χαμηλή	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4, T_5, T_6$ ανοιχτά
Υψηλή	$T_4$	$T_5$	$T_6$	$T_1 - T_2 - T_3$ συνδεδεμένα μεταξύ τους

(γ)



(δ)

**ΣΧΗΜΑ 7-41** Οι δυνατές συνδέσεις των συστάδων στο στάτη ενός κινητήρα για αλλαγή του αριθμού των πόλων σε συνδυασμό με τις αντίστοιχες χαρακτηριστικές ροπής - ταχύτητας. (α) Συνδεσμολογία σταθερής ροπής - οι δυνατότητες της ροπής του κινητήρα παραμένουν σχεδόν σταθερές τόσο για τη συνδεσμολογία υψηλής, όσο και χαμηλής ταχύτητας. (β) Συνδεσμολογία σταθερής ισχύος - οι δυνατότητες της ισχύος του κινητήρα παραμένουν σχεδόν σταθερές τόσο για τη συνδεσμολογία υψηλής, όσο και χαμηλής ταχύτητας. (γ) Συνδεσμολογία ροπής ανεμιστήρα - οι δυνατότητες της ροπής του κινητήρα μεταβάλλονται με την ταχύτητα με τον ίδιο τρόπο που μεταβάλλεται η ροπή των φορτίων τύπου ανεμιστήρα.

Όταν η συνδεσμολογία του κινητήρα μεταβάλλεται και οι πόλοι του από δυο γίνονται τέσσερις, η μέγιστη ροπή του μπορεί να παραμείνει η ίδια (συνδεσμολογία σταθερής ροπής), να μειωθεί στο μισό (συνδεσμολογία ροπής με το νόμο του τετραγώνου) ή να διπλασιαστεί (συνδεσμολογία σταθερής ισχύος εξόδου), ανάλογα με τον τρόπο που αναδιοργανώνονται τα τυλίγματα του στάτη. Στο Σχ. 7-41, φαίνονται οι δυνατές συνδεσμολογίες του στάτη και οι επιπτώσεις της καθεμιάς στη χαρακτηριστική ροπής - ταχύτητας.

Το βασικό μειονέκτημα της μεθόδου μεταβολής της ταχύτητας με διαδοχικούς πόλους είναι το ότι οι ταχύτητες θα πρέπει να έχουν λόγο 2 προς 1. Ο παραδοσιακός τρόπος υπέρβασης αυτού του περιορισμού είναι η εισαγωγή *πολλαπλών τυλιγμάτων στο στάτη* (*multiple stator windings*) με διαφορετικό αριθμό πόλων το καθένα και η ενεργοποίηση ενός απ' αυτά κάθε φορά. Για παράδειγμα, ένας κινητήρας μπορεί να διαθέτει τέσσερις ομάδες τυλιγμάτων στο στάτη με δύο και έξι πόλους η καθεμιά. Έτσι, η σύγχρονη ταχύτητά του σ' ένα σύστημα ισχύος των 60 Hz μπορεί να μεταβάλλεται από τις 1800 r/min ως τις 1200 r/min με την απλή σύνδεση μιας ή της άλλης ομάδας τυλιγμάτων. Δυστυχώς, τα πολλαπλά τυλίγματα στο στάτη αυξάνουν το κόστος του κινητήρα και χρησιμοποιούνται μόνον όταν είναι τελείως απαραίτητα.

Με το συνδυασμό της μεθόδου των διαδοχικών πόλων και της μεθόδου των πολλαπλών τυλιγμάτων είναι δυνατό να κατασκευαστεί ένας κινητήρας τεσσάρων ταχυτήτων. Για παράδειγμα με δυο ξεχωριστά τυλίγματα τεσσάρων και έξι πόλων είναι δυνατό να κατασκευαστεί ένας επαγωγικός κινητήρας που λειτουργώντας στα 60 Hz να περιστρέφεται με ταχύτητες 600, 900, 1200 και 1800 r/min.

## Έλεγχος της Ταχύτητας με Μεταβολή της Συχνότητας του Δικτύου

Αν η συχνότητα που εφαρμόζεται στο στάτη ενός επαγωγικού κινητήρα μεταβληθεί, ο ρυθμός περιστροφής των μαγνητικών του πεδίων  $n_{sync}$  μεταβάλλεται ανάλογα με τη μεταβολή της ηλεκτρικής συχνότητας, ενώ το σημείο λειτουργίας χωρίς φορτίο στην καμπύλη ροπής - ταχύτητας μεταβάλλεται επίσης (βλ. Σχ. 7-42). Η σύγχρονη ταχύτητα του κινητήρα στις ονομαστικές συνθήκες είναι γνωστή ως *βασική ταχύτητα* (*base speed*). Με τον έλεγχο μεταβλητής συχνότητας, η ταχύτητα του κινητήρα είναι δυνατό να ρυθμίζεται πάνω και κάτω από τη βασική ταχύτητα. Μια προσεκτικά σχεδιασμένη συσκευή οδήγησης επαγωγικού κινητήρα με μεταβλητή συχνότητα μπορεί να είναι ιδιαίτερα ευέλικτη. Η ρύθμιση της ταχύτητας του επαγωγικού κινητήρα μπορεί να ξεκινά από ένα μικρό εύρος τιμών, 5% της βασικής ταχύτητας, και να φθάνει σε τιμές διπλάσιες της βασικής ταχύτητας. Όμως, είναι σημαντικό να καθοριστούν κάποια όρια για την τάση και τη ροπή του κινητήρα κατά τη μεταβολή της ταχύτητάς του, ώστε η λειτουργία του να είναι ασφαλής.

Όταν ο κινητήρας περιστρέφεται με ταχύτητες μικρότερες της βασικής, θα πρέπει η τάση που εφαρμόζεται στο στάτη του κινητήρα να περιορίζεται, με σκοπό να είναι ασφαλής η λειτουργία του. Η τάση εισόδου στο στάτη θα πρέπει να μειώνεται γραμμικά με τη μείωση της συχνότητας. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται υποβιβασμός (*derating*) της τάσης. Αν δεν ακολουθείται αυτή η διαδικασία, ο χάλυβας του στάτη οδηγείται σε κορεσμό και το ρεύμα μαγνήτισης του κινητήρα μπορεί να πάρει εξαιρετικά μεγάλες τιμές.

Για να γίνει κατανοητή η αναγκαιότητα του υποβιβασμού, ας σημειωθεί ότι ο επαγωγικός κινητήρας είναι βασικά ένας στρεφόμενος μετασχηματιστής. Όπως σε κάθε μετασχηματιστή, η μαγνητική ροή στον πυρήνα ενός επαγωγικού κινητήρα υπολογίζεται από το νόμο του Faraday

$$v(t) = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (1-36)$$

Αν εφαρμοστεί στον πυρήνα τάση  $v(t) = V_M \sin \omega t$ , η μαγνητική ροή  $\phi$  που προκύπτει είναι

$$\begin{aligned} \phi(t) &= \frac{1}{N_p} \int v(t) dt \\ &= \frac{1}{N} \int V_M \sin \omega t dt \\ \phi(t) &= -\frac{V_M}{\omega N_p} \cos \omega t \end{aligned} \quad (7-57)$$

Σημειώνεται ότι, η ηλεκτρική συχνότητα  $\omega$  εμφανίζεται στον παρονομαστή της παραπάνω έκφρασης. Έτσι, αν η ηλεκτρική συχνότητα που εφαρμόζεται στο στάτη μειωθεί κατά 10% και το πλάτος της τάσης του στάτη παραμείνει σταθερό, η μαγνητική ροή στον πυρήνα του κινητήρα αυξάνεται περίπου κατά 10%, ενώ το ρεύμα μαγνήτισης στο εσωτερικό του αυξάνεται επίσης. Στην ακόρεστη περιοχή της καμπύλης μαγνήτισης του κινητήρα, η αύξηση του ρεύματος μαγνήτισης θα είναι κι αυτή περίπου ίση με 10%. Όμως, στην κορεσμένη περιοχή της καμπύλης μαγνήτισης η αύξηση της μαγνητικής ροής κατά 10% απαιτεί πολύ μεγαλύτερη αύξηση του ρεύματος μαγνήτισης. Οι επαγωγικοί κινητήρες συνήθως κατασκευάζονται με σκοπό να λειτουργούν κοντά στο σημείο κορεσμού της καμπύλης μαγνήτισης κι έτσι η αύξηση της μαγνητικής ροής, που οφείλεται στη μείωση της συχνότητας, προκαλεί σοβαρή αύξηση στο ρεύμα μαγνήτισης του κινητήρα. (Ακριβώς το ίδιο πρόβλημα παρουσιάζεται και στους μετασχηματιστές. Βλ. Ενότητα 2.12.)

Πολύ συχνά η τάση που εφαρμόζεται στο στάτη ελαττώνεται σε ποσοστό ανάλογο με τη μείωση της συχνότητας, με σκοπό την αποφυγή των εξαιρετικά μεγάλων ρευμάτων μαγνήτισης, κάθε φορά που η συχνότητα μειώνεται κάτω από την ονομαστική τιμή της. Αφού η εφαρμοζόμενη τάση  $V_M$  εμφανίζεται στον αριθμητή και η ηλεκτρική συχνότητα  $\omega$  στον παρονομαστή της Εξ. (7-57), τα αποτελέσματα της μεταβολής τους εξουδετερώνονται μεταξύ τους, ώστε το ρεύμα μαγνήτισης να παραμένει ανεπηρέαστο.

Όταν το πλάτος της τάσης που εφαρμόζεται σ' έναν επαγωγικό κινητήρα μεταβάλλεται γραμμικά με τη συχνότητα σε ταχύτητες μικρότερες από τη βασική ταχύτητα, η μαγνητική ροή του κινητήρα παραμένει σχεδόν σταθερή. Έτσι, η μέγιστη ροπή που μπορεί να προσφέρει ο κινητήρας παραμένει σχετικά υψηλή. Όμως, η μέγιστη επιτρεπόμενη ισχύς του κινητήρα θα πρέπει κι αυτή να μειώνεται γραμμικά με τη μείωση της συχνότητας, ώστε το κύκλωμα του στάτη να προστατεύεται από υπερθέρμανση. Η ισχύς με την οποία τροφοδοτείται ένας τριφασικός κινητήρας, δίνεται από τη σχέση

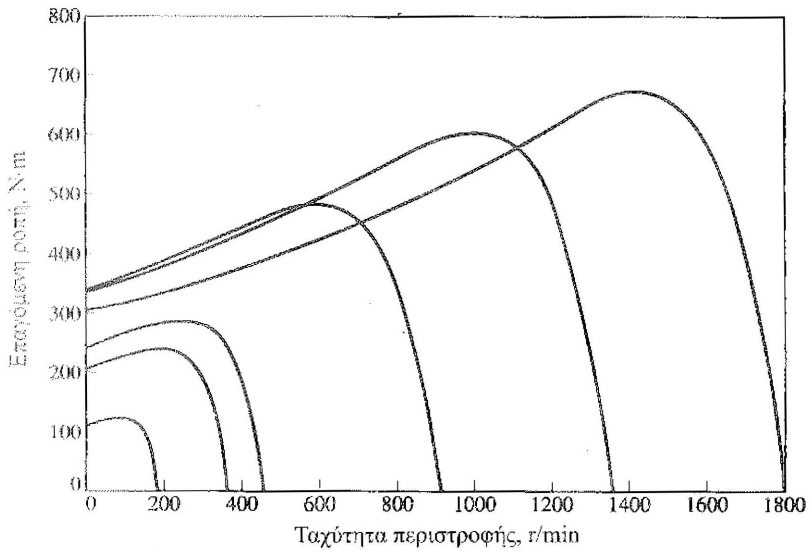
$$P = \sqrt{3} V_L I_L \cos\theta$$

Αν η τάση  $V_L$  μειωθεί, θα πρέπει να μειωθεί και η μέγιστη ισχύς  $P$ , διαφορετικά το ρεύμα στο εσωτερικό του κινητήρα θα πάρει τόσο μεγάλες τιμές, που ο κινητήρας θα υπερθερμανθεί.

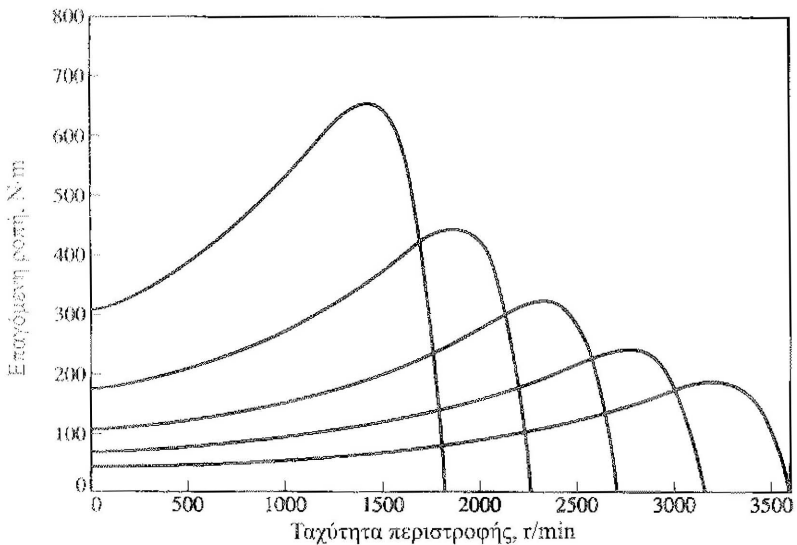
Στο Σχ. 7-42α, φαίνεται μια οικογένεια χαρακτηριστικών ροπής - ταχύτητας ενός επαγωγικού κινητήρα για ταχύτητες μικρότερες από τη βασική, όπου θεωρείται ότι το πλάτος της τάσης στο στάτη μεταβάλλεται γραμμικά με τη συχνότητα.

Όταν η ηλεκτρική συχνότητα που εφαρμόζεται στον κινητήρα ξεπεράσει την ονομαστική συχνότητα, η τάση στο στάτη θα πρέπει να παραμείνει σταθερή. Αν και κάτω απ' αυτές τις συνθήκες οι προηγούμενοι περιορισμοί για τον κορεσμό του στάτη επιτρέπουν την αύξηση της τάσης πάνω από την ονομαστική της τιμή, η τάση συγκρατείται σ' αυτή την τιμή με σκοπό την προστασία της μόνωσης του κινητήρα. Όσο η ηλεκτρική συχνότητα αυξάνεται πάνω από τη βασική ταχύτητα, τόσο μεγαλύτερος γίνεται ο παρονομαστής της Εξ. (7-57). Όμως, επειδή ο αριθμητής της εξίσωσης για τιμές της συχνότητας πάνω από την ονομαστική παραμένει σταθερός, η προκαλούμενη μαγνητική ροή στη μηχανή θα μειώνεται και μαζί της θα μειώνεται η μέγιστη ροπή του κινητήρα. Το Σχ. 7-42β, δείχνει μια οικογένεια χαρακτηριστικών ροπής ταχύτητας ενός επαγωγικού κινητήρα για ταχύτητες πάνω από τη βασική, στις οποίες γίνεται η υπόθεση σταθερής τάσης στο στάτη.

Στο Σχ. 7-42γ, φαίνεται η οικογένεια των χαρακτηριστικών ροπής - ταχύτητας ενός επαγωγικού κινητήρα, του οποίου η τάση στο στάτη μεταβάλλεται γραμμικά με τη συχνότητα για ταχύτητες κάτω από τη βασική ταχύτητα και παραμένει σταθερή για ταχύτητες πάνω από τη βασική. Η ονομαστική ταχύτητα του επαγωγικού κινητήρα στο Σχ. 7-42 είναι 1800 r/min.

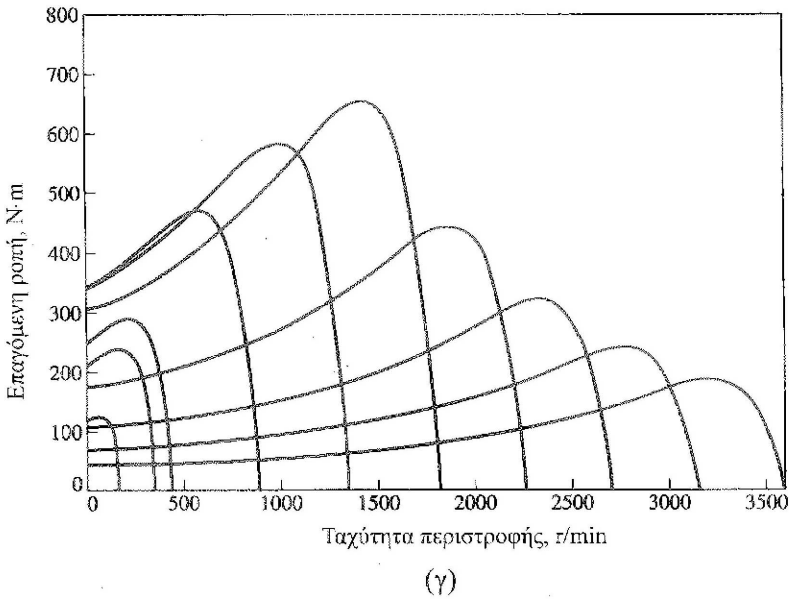


(α)



(β)

**ΣΧΗΜΑ 7-42** Ρύθμιση της ταχύτητας ενός επαγωγικού κινητήρα με μεταβολή της συχνότητας. (α) Οικογένεια χαρακτηριστικών ροπής - ταχύτητας για ταχύτητες κάτω από τη βασική, όπου υποτίθεται ότι οι τάσεις εισόδου ελαττώνονται γραμμικά με την ταχύτητα. (β) Οικογένεια χαρακτηριστικών ροπής - ταχύτητας για ταχύτητες πάνω από τη βασική, όπου υποτίθεται ότι οι τάσεις εισόδου διατηρούνται σταθερές.



**ΣΧΗΜΑ 7-42 (Συνέχεια) (γ)** Οι χαρακτηριστικές ροπής - ταχύτητας για όλες τις συχνότητες.

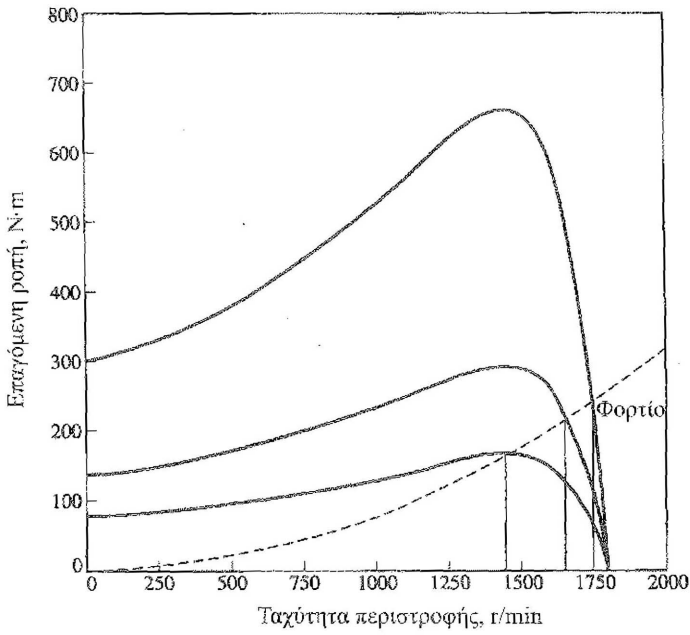
Στο παρελθόν το βασικό μειονέκτημα της μεθόδου μεταβολής της ταχύτητας του κινητήρα με ρύθμιση της ηλεκτρικής του συχνότητας ήταν η έλλειψη μιας ειδικής γεννήτριας με μεταβαλλόμενη συχνότητα ή ενός μηχανικού τρόπου μεταβολής της συχνότητας. Το πρόβλημα αυτό επιλύθηκε με την ανάπτυξη των σύγχρονων συσκευών οδήγησης μεταβλητής συχνότητας με ηλεκτρονικούς διακόπτες. Στην πραγματικότητα η μεταβολή της συχνότητας τροφοδοσίας με συσκευές οδήγησης ηλεκτρονικών διακοπών έχει γίνει η πιο δημοφιλής μέθοδος ρύθμισης της ταχύτητας των επαγωγικών κινητήρων. Σημειώνεται ότι αυτή η μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιονδήποτε επαγωγικό κινητήρα αντίθετα από τη μέθοδο μεταβολής των πόλων που απαιτεί κινητήρες με ειδικά τυλίγματα στο στάτη.

Στην Ενότητα 7-10, θα παρουσιαστεί μια τυπική συσκευή οδήγησης μεταβλητής συχνότητας με ηλεκτρονικούς διακόπτες.

### Έλεγχος της Ταχύτητας με Μεταβολή της Τάσης Τροφοδοσίας

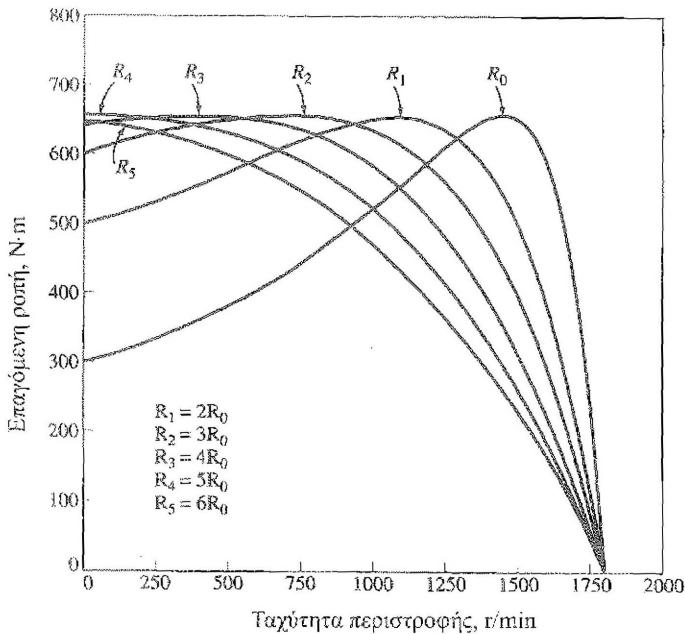
Η ροπή που αναπτύσσει ένας επαγωγικός κινητήρας εξαρτάται από το τετράγωνο της εφαρμοζόμενης τάσης. Αν το φορτίο του κινητήρα διαθέτει χαρακτηριστική ροπής - ταχύτητας όμοια μ' αυτή του Σχ. 7-43, η ταχύτητά του είναι δυνατό να ρυθμίζεται σ' ένα περιορισμένο εύρος τιμών με τη μεταβολή της τάσης τροφοδοσίας. Αυτή η μέθοδος ελέγχου χρησιμοποιείται συνήθως στους μικρούς κινητήρες που κινούν ανεμιστήρες.





ΣΧΗΜΑ 7-43 Ρύθμιση της ταχύτητας ενός επαγωγικού κινητήρα με έλεγχο της τάσης εισόδου.

Έλεγχος της Ταχύτητας με Μεταβολή της Αντίστασης Δρομέα

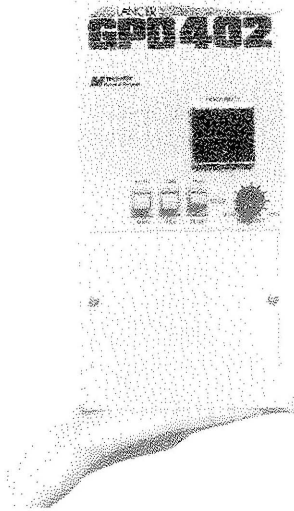


ΣΧΗΜΑ 7-44 Ρύθμιση της ταχύτητας ενός επαγωγικού κινητήρα δακτυλιοφόρου δρομέα με μεταβολή της αντίστασης του δρομέα.

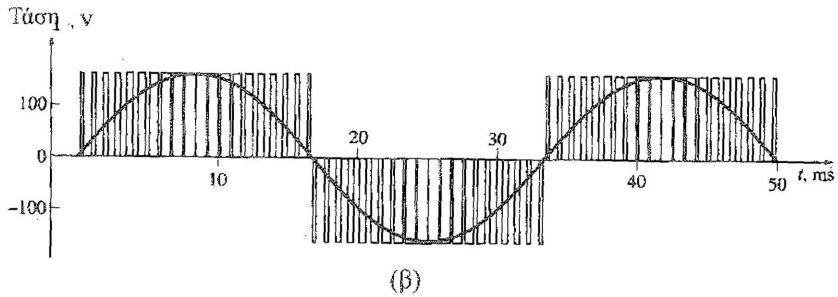
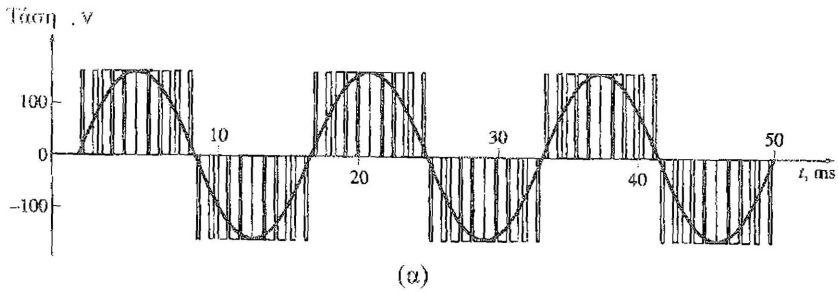
Στους επαγωγικούς κινητήρες με δακτυλιοφόρο δρομέα είναι δυνατή η μεταβολή της μορφής της χαρακτηριστικής ροπής - ταχύτητας με την εισαγωγή πρόσθετων αντιστάσεων στο κύκλωμα δρομέα της μηχανής. Οι χαρακτηριστικές ροπής - ταχύτητας που παράγονται, φαίνονται στο Σχ. 7-44. Αν η χαρακτηριστική ροπής - ταχύτητας του φορτίου είναι όμοια μ' αυτή του σχήματος, τότε η μεταβολή της αντίστασης δρομέα μεταβάλλει την ταχύτητα λειτουργίας του κινητήρα. Όμως, η εισαγωγή πρόσθετων αντιστάσεων στο κύκλωμα δρομέα ενός επαγωγικού κινητήρα μειώνει σημαντικά την απόδοση της μηχανής. Έτσι, μια τέτοια μέθοδος μεταβολής της ταχύτητας χρησιμοποιείται μόνο για σύντομες περιόδους λόγω των προβλημάτων απόδοσης που δημιουργεί.

## 7.10 ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΟΔΗΓΗΣΗΣ ΕΠΑΓΩΓΙΚΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟΥΣ ΔΙΑΚΟΠΤΕΣ

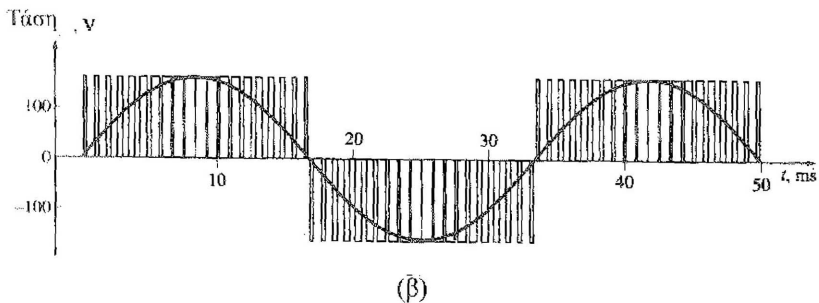
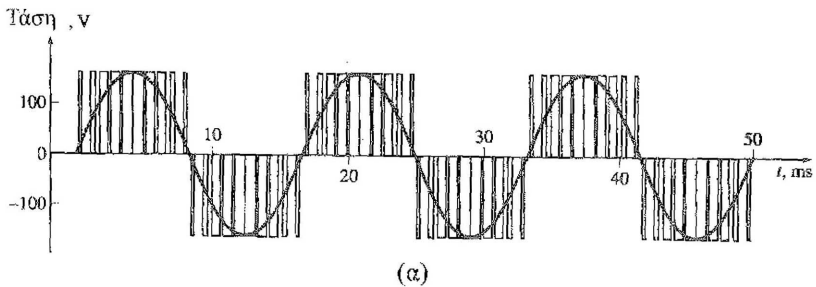
Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα, η μέθοδος που προτιμάται στις μέρες μας για τη ρύθμιση της ταχύτητας των επαγωγικών κινητήρων είναι οι διατάξεις οδήγησης μεταβλητής συχνότητας με ηλεκτρονικούς διακόπτες. Στο Σχ. 7-45, φαίνεται μια τυπική διάταξη οδήγησης τέτοιου είδους. Η συγκεκριμένη διάταξη είναι πολύ ευέλικτη: η είσοδός της μπορεί να είναι μονοφασική ή τριφασική, με συχνότητα 50 ή 60 Hz και πλάτος από 208 ως 230 V. Η έξοδος της διάταξης είναι ένα τριφασικό σύστημα τάσεων με συχνότητα που μεταβάλλεται από 0 ως 120 Hz και πλάτος που μεταβάλλεται από 0 V ως την ονομαστική τάση του κινητήρα.



**ΣΧΗΜΑ 7-45** Τυπική διάταξη οδήγησης μεταβλητής συχνότητας με ηλεκτρονικούς διακόπτες ενός επαγωγικού κινητήρα. (Προσφορά *MagneTek Drives and Systems*).

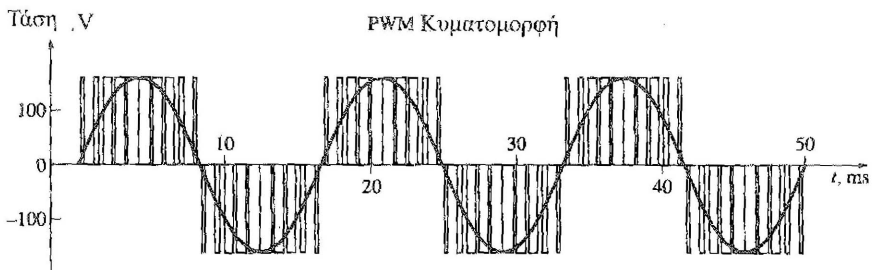


**ΣΧΗΜΑ 7-46** Έλεγχος μεταβλητής συχνότητας με μια κυματομορφή PWM: (α) Κυματομορφή PWM 60 Hz, 120 V. (β) Κυματομορφή PWM 30 Hz, 120 V.

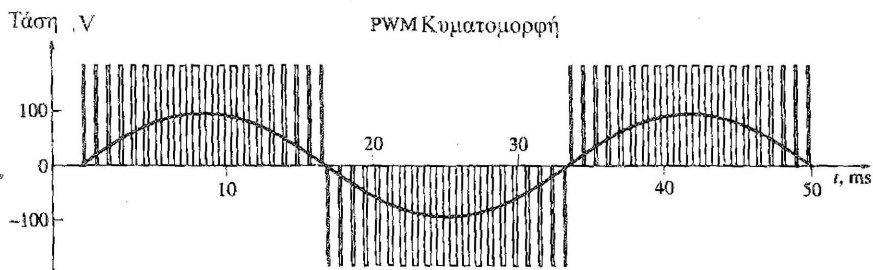


**ΣΧΗΜΑ 7-47** Έλεγχος μεταβλητής τάσης με μια κυματομορφή PWM: (α) Κυματομορφή PWM 60 Hz, 120 V. (β) Κυματομορφή PWM 60 Hz, 60 V.

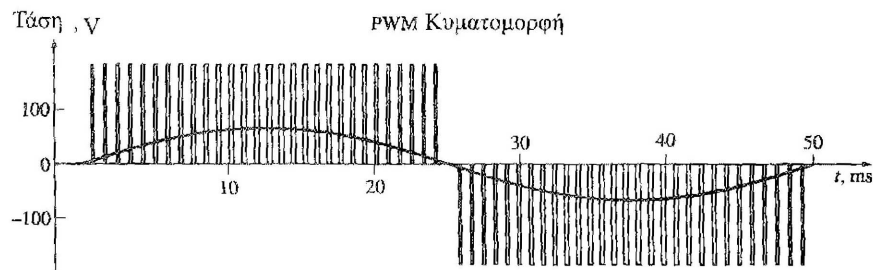
Η τάση και η συχνότητα εξόδου στην παραπάνω διάταξη ρυθμίζεται με τις τεχνικές διαμόρφωσης εύρους παλμών (pulse-width modulation - PWM), που περιγράφηκαν στο Κεφ. 3. Στη διαμόρφωση εύρους παλμών τόσο η τάση, όσο και η συχνότητα της εξόδου μεταβάλλονται ανεξάρτητα μεταξύ τους. Το Σχ. 7-46, περιγράφει τον τρόπο με τον οποίο η διάταξη οδήγησης PWM ρυθμίζει τη συχνότητα εξόδου διατηρώντας σταθερή την ενεργό τιμή της τάσης, ενώ το Σχ. 7-47, περιγράφει τον τρόπο με τον οποίο η διάταξη οδήγησης PWM ρυθμίζει την ενεργό τιμή της τάσης διατηρώντας σταθερή τη συχνότητα.



(α)



(β)



(γ)

**ΣΧΗΜΑ 7-48** Ταυτόχρονος έλεγχος μεταβλητής τάσης και συχνότητας με μια κυματομορφή PWM: (α) Κυματομορφή PWM 60 Hz, 120 V. (β) Κυματομορφή PWM 30 Hz, 60 V. (γ) Κυματομορφή PWM 20 Hz, 40 V.

Όπως αναφέρθηκε στην Ενότητα 7.9, συχνά είναι επιθυμητή η γραμμική μεταβολή της ενεργού τιμής της τάσης με ταυτόχρονη μεταβολή της συχνότητας εξόδου. Στο Σχ. 7-48, φαίνονται οι τυπικές κυματομορφές της τάσης εξόδου μιας φάσης της διάταξης οδήγησης, στην περίπτωση ταυτόχρονης γραμμικής μεταβολής της συχνότητας με την ενεργό τιμή της τάσης\*.

Στο Σχ. 7-48α, η συχνότητα της τάσης εξόδου είναι ρυθμισμένη στα 60 Hz και η ενεργός τιμή της τάσης στα 120 V. Στο Σχ. 7-48β, η συχνότητα της τάσης εξόδου είναι ρυθμισμένη στα 30 Hz και η ενεργός τιμή της τάσης στα 60 V, ενώ στο Σχ. 7-48γ, η συχνότητα της τάσης εξόδου είναι ρυθμισμένη στα 20 Hz και η ενεργός τιμή της τάσης στα 40 V. Ας σημειωθεί ότι και στις τρεις περιπτώσεις το πλάτος της τάσης στην έξοδο της διάταξης οδήγησης παραμένει σταθερό. Το μέγεθος της ενεργού τιμής της τάσης ρυθμίζεται ανάλογα με το κλάσμα του χρόνου στο οποίο εμφανίζεται τάση στην έξοδο του κινητήρα, ενώ η συχνότητα ρυθμίζεται από το ρυθμό που μεταβάλλεται η πολικότητα των πωλών από θετική σε αρνητική και αντίστροφα.

Η τυπική συσκευή οδήγησης επαγωγικού κινητήρα του Σχ. 7-45, διαθέτει από κατασκευής πολλές ιδιότητες που βελτιώνουν την ικανότητα ρύθμισης και την ευκολία χρήσης. Μερικές απ' αυτές τις ιδιότητες συνοψίζονται παρακάτω.

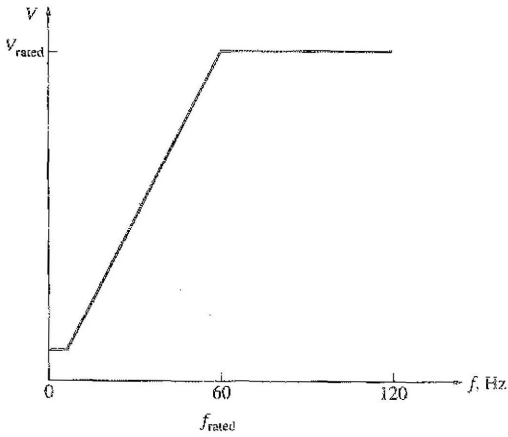
### Ρύθμιση της Συχνότητας (Ταχύτητας)

Η συχνότητα εξόδου της διάταξης οδήγησης μπορεί να ελέγχεται χειροκίνητα από ένα σύστημα ελέγχου τοποθετημένο πάνω στο σασί της διάταξης ή να ελέγχεται από απόσταση με κάποιο σήμα ρεύματος ή τάσης. Η ικανότητα ρύθμισης της συχνότητας εξόδου μιας διάταξης οδήγησης με κάποιο εξωτερικό σήμα ελέγχου είναι πολύ σημαντική, επειδή επιτρέπει τη χρήση ενός εξωτερικού υπολογιστή ή ενός ελεγκτή διαδικασίας (process controller) για τον έλεγχο της ταχύτητας του κινητήρα σε συνδυασμό με τις συνολικές ανάγκες της βιομηχανικής μονάδας στην οποία είναι εγκατεστημένος.

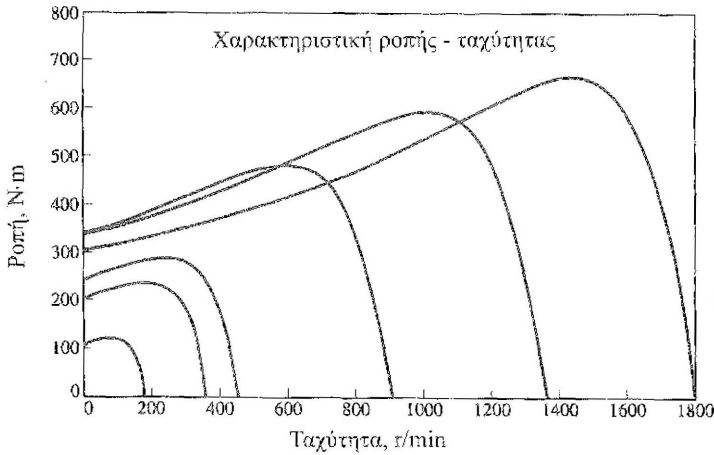
### Επιλογή της Μορφής της Τάσης και της Συχνότητας

Οι τύποι των μηχανικών φορτίων που εφαρμόζονται σ' έναν επαγωγικό κινητήρα παρουσιάζουν μεγάλη ποικιλία. Μερικά φορτία, όπως οι ανεμιστήρες, απαιτούν μικρή ροπή κατά την εκκίνηση (ή όταν περιστρέφονται με μικρή ταχύτητα) που αυξάνεται με το τετράγωνο της ταχύτητας. Κάποια άλλα φορτία μπορεί να είναι πιο δύσκολα στην εκκίνησή τους και να απαιτούν ροπή μεγαλύτερη από την ονομαστική ροπή υπό πλήρες φορτίο για να αρχίσουν να κινούνται. Η συγκεκριμένη συσκευή οδήγησης παράγει μεγάλη ποικιλία καμπυλών τάσης - συχνότητας, από τις οποίες μπορεί να επιλεγεί η πιο κατάλληλη, με σκοπό η ροπή του κινητήρα να ανταποκρίνεται στην απαιτούμενη ροπή του φορτίου. Τρεις απ' αυτές τις καμπύλες παρουσιάζονται στα Σχ. 7-49 ως 7-51.

\* Οι κυματομορφές εξόδου στο Σχ. 7-47 είναι στην πραγματικότητα απλοποιημένες κυματομορφές. Μια πραγματική διάταξη οδήγησης επαγωγικού κινητήρα έχει πολύ μεγαλύτερη φέρουσα συχνότητα απ' αυτή που φαίνεται στο σχήμα.



(α)



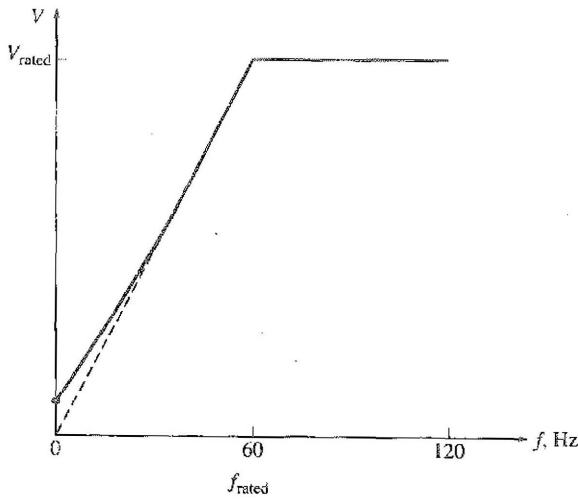
(β)

**ΣΧΗΜΑ 7-49** (α) Οι δυνατές καμπύλες τάσης - συχνότητας για τη συσκευή οδήγησης μεταβλητής συχνότητας με ηλεκτρονικούς διακόπτες ενός επαγωγικού κινητήρα: *Τυποποιημένη καμπύλη*. Αυτή περιλαμβάνει ένα γραμμικό τμήμα για συχνότητες μικρότερες από την ονομαστική και ένα τμήμα σταθερής τάσης για συχνότητες μεγαλύτερες από την ονομαστική. (β) Οι χαρακτηριστικές ροπής - ταχύτητας που παράγονται για συχνότητες μικρότερες της ονομαστικής (σε συχνότητες μεγαλύτερες της ονομαστικής οι χαρακτηριστικές μοιάζουν μ' αυτές του Σχ. 7-41β).

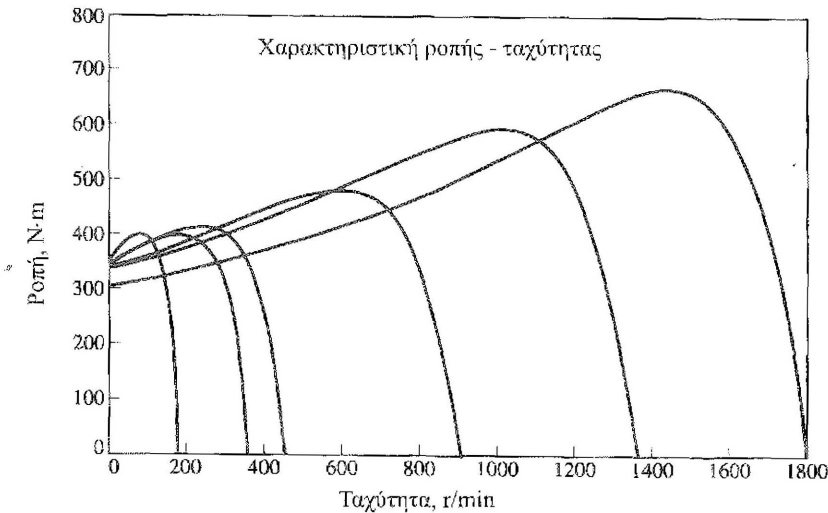
Το Σχ. 7-49α, παρουσιάζει την τυποποιημένη ή γενικής εφαρμογής καμπύλη τάσης - συχνότητας που περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα. Σ' αυτή τη μέθοδο η τάση εξόδου μεταβάλλεται γραμμικά με τις μεταβολές της συχνότητας για ταχύτητες μικρότερες από τη βασική και παραμένει σταθερή για ταχύτητες μεγαλύτερες από τη βασική. (Η μικρή περιοχή σταθερή τάσης στις πολύ μικρές συχνότητες είναι απαραίτητη για να είναι σίγουρη η ανάπτυξη ροπής στις πολύ μικρές ταχύτητες). Το Σχ. 7-49β, δείχνει τις αντίστοιχες χαρακτηριστικές ροπής - συχνότητας του επαγωγικού κινητήρα για κάποιες συχνότητες λειτουργίας κάτω από τη βασική ταχύτητα.

Στο Σχ. 7-50α, φαίνεται η καμπύλη τάσης - συχνότητας που χρησιμοποιείται για φορτία με υψηλή ροπή εκκίνησης. Σ' αυτή τη μέθοδο η τάση και πάλι μεταβάλλεται γραμμικά με τη συχνότητα για ταχύτητες μικρότερες από τη βασική αλλά η κλίση της καμπύλης είναι μικρότερη για συχνότητες μικρότερες από 30 Hz. Για κάθε δεδομένη συχνότητα η τάση εξόδου της διάταξης θα είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη τάση της προηγούμενης μεθόδου. Αυτή η αύξηση της τάσης προσφέρει μεγαλύτερες ροπές με το μειονέκτημα αυξημένου μαγνητικού κορεσμού και αυξημένου ρεύματος μαγνήτισης. Όμως, ο αυξημένος μαγνητικός κορεσμός και τα μεγάλα ρεύματα μαγνήτισης είναι αποδεκτά για τις μικρές χρονικές περιόδους που διαρκεί η εκκίνηση των ισχυρών φορτίων. Το Σχ. 7-50β, δείχνει τις αντίστοιχες χαρακτηριστικές ροπής - ταχύτητας του επαγωγικού κινητήρα για κάποιες συχνότητες λειτουργίας κάτω από τη βασική ταχύτητα. Ας σημειωθεί εδώ η αυξημένη ροπή που είναι διαθέσιμη στις χαμηλές συχνότητες σε σχέση με το Σχ. 7-49β.

Το Σχ. 7-51α, δείχνει την καμπύλη τάσης - συχνότητας που χρησιμοποιείται για φορτία με μικρές ροπές εκκίνησης, που ονομάζονται *φορτία ομαλής εκκίνησης* (*soft-start load*). Σ' αυτή τη μέθοδο η τάση μεταβάλλεται παραβολικά με τη συχνότητα για ταχύτητες μικρότερες από τη βασική. Για κάθε δεδομένη συχνότητα κάτω από τα 60 Hz η τάση εξόδου της συσκευής θα είναι μικρότερη από την αντίστοιχη τάση της βασικής μεθόδου. Αυτή η μειωμένη τάση παράγει μικρότερη ροπή και προσφέρει αργή και ομαλή εκκίνηση για φορτία χαμηλής ροπής. Το Σχ. 7-51β, δείχνει τις αντίστοιχες χαρακτηριστικές ροπής - ταχύτητας του επαγωγικού κινητήρα για κάποιες συχνότητες λειτουργίας κάτω από τη βασική ταχύτητα. Ας σημειωθεί ότι η ροπή που είναι διαθέσιμη στις χαμηλές συχνότητες είναι μειωμένη σε σχέση με το Σχ. 7-49.



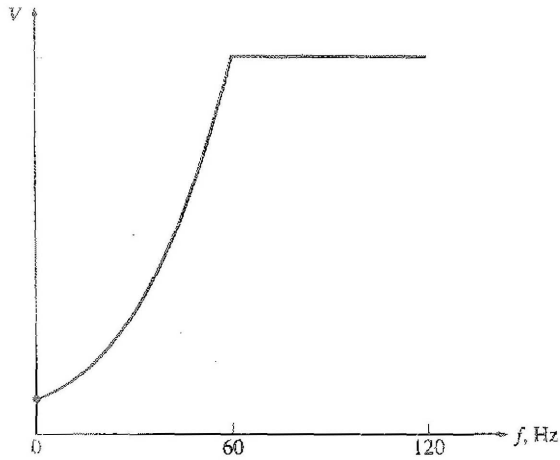
(a)



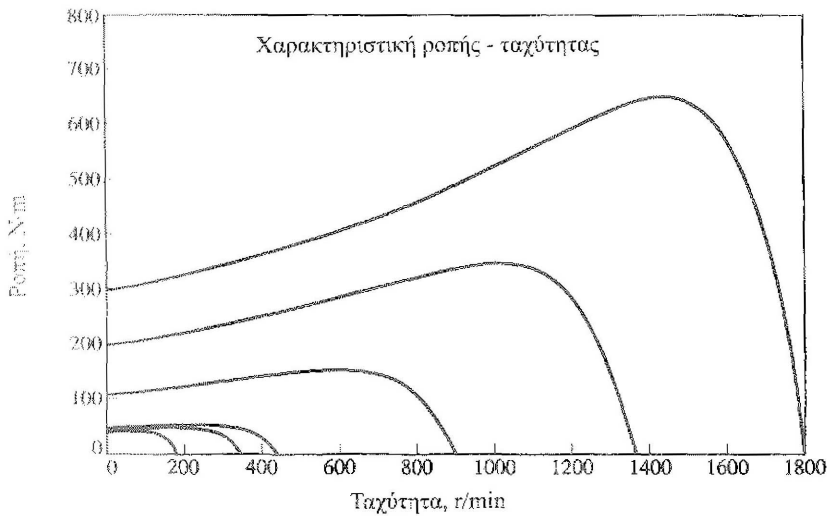
(β)

**ΣΧΗΜΑ 7-50** Οι δυνατές καμπύλες τάσης - συχνότητας για τη συσκευή οδήγησης μεταβλητής συχνότητας με ηλεκτρονικούς διακόπτες ενός επαγωγικού κινητήρα: *Καμπύλη υψηλής ροπής εκκίνησης*. Αυτή είναι διαμορφωμένη, ώστε να αντιστοιχεί σε φορτία που απαιτούν μεγάλες ροπές εκκίνησης. Είναι όμοια με τη γραμμική καμπύλη τάσης - συχνότητας και διαφέρει μόνο στις χαμηλές ταχύτητες. Η τάση είναι δυσανάλογα μεγάλη στις χαμηλές ταχύτητες, με σκοπό την παραγωγή υψηλών ροπών εκκίνησης και με το συμβιβασμό για ανάπτυξη μεγάλων ρευμάτων μαγνήτισης. (β) Οι χαρακτηριστικές ροπής - ταχύτητας που παράγονται για συχνότητες μικρότερες της ονομαστικής (σε συχνότητες μεγαλύτερες της ονομαστικής οι χαρακτηριστικές μοιάζουν μ' αυτές του Σχ. 7-41β).





(α)



(β)

**ΣΧΗΜΑ 7-51** (α) Οι δυνατές καμπύλες τάσης - συχνότητας για τη συσκευή οδήγησης μεταβλητής συχνότητας με ηλεκτρονικούς διακόπτες ενός επαγωγικού κινητήρα: *Καμπύλη ροπής ανεμιστήρα*. Αυτή έχει αναπτυχθεί με σκοπό την εξυπηρέτηση κινητήρων που οδηγούν ανεμιστήρες ή φυγόκεντρες αντλίες, που παρουσιάζουν μικρές ροπές εκκίνησης. (β) Οι χαρακτηριστικές ροπής - ταχύτητας που παράγονται για συχνότητες μικρότερες της ονομαστικής (σε συχνότητες μεγαλύτερες της ονομαστικής οι χαρακτηριστικές μοιάζουν μ' αυτές του Σχ. 7-41β).

## Ανεξάρτητα Ρυθμιζόμενες Επιταχύνσεις και Επιβραδύνσεις

Όταν η ταχύτητα του κινητήρα θα πρέπει να μεταβληθεί, η συσκευή οδήγησης που τον ελέγχει θα πρέπει να μεταβάλει τη συχνότητά της, ώστε η ταχύτητα να πάρει τη νέα τιμή της. Αν η μεταβολή της ταχύτητας είναι ξαφνική (π.χ. στιγμιαία από 900 r/min σε 1200 r/min), η συσκευή οδήγησης δεν προσπαθεί να μεταβάλει στιγμιαία την ταχύτητα από την προηγούμενη επιθυμητή τιμή στη νέα επιθυμητή τιμή. Αντίθετα, οι ρυθμοί της επιτάχυνσης ή της επιβράδυνσης του κινητήρα περιορίζονται σε κάποιο επίπεδο ασφαλείας με τη βοήθεια ειδικών κυκλωμάτων που περιλαμβάνονται στα ηλεκτρονικά της συσκευής οδήγησης. Αυτοί οι ρυθμοί είναι δυνατό να ρυθμίζονται ανεξάρτητα για τις επιταχύνσεις και τις επιβραδύνσεις του κινητήρα.

## Προστασία του Κινητήρα

Η συσκευή οδήγησης του επαγωγικού κινητήρα περιλαμβάνει ποικίλες ιδιότητες που έχουν σκοπό την προστασία του κινητήρα που συνδέεται στη συσκευή οδήγησης. Η συσκευή μπορεί να ανιχνεύσει ισχυρά μόνιμα ρεύματα (περίπτωση υπερφόρτισης), ισχυρά στιγμιαία ρεύματα, καταστάσεις υπερτάσεων και καταστάσεις μειωμένης τάσης. Σε καθεμιά από τις προηγούμενες περιπτώσεις η συσκευή οδήγησης διακόπτει τη λειτουργία του κινητήρα.

Συσκευές οδήγησης επαγωγικών κινητήρων όπως οι προηγούμενες είναι τόσο ευέλικτες και αξιόπιστες στις μέρες μας, που οι επαγωγικοί κινητήρες σε πολλές εφαρμογές, όπου απαιτούνται μεγάλου εύρους μεταβολές της ταχύτητας, άρχισαν να αντικαθιστούν τους κινητήρες συνεχούς ρεύματος.

## 7.11 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΣΤΟ ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΚΥΚΛΩΜΑ

Το ισοδύναμο κύκλωμα ενός επαγωγικού κινητήρα αποτελεί ένα πολύ σημαντικό εργαλείο για τον προσδιορισμό της απόκρισης του κινητήρα στις αλλαγές του φορτίου του. Όμως, για να χρησιμοποιηθεί το ισοδύναμο κύκλωμα του επαγωγικού κινητήρα, θα πρέπει να προσδιοριστούν οι τιμές των στοιχείων σ' αυτό το κύκλωμα. Πώς σε μια πραγματική μηχανή προσδιορίζονται τα  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $X_1$ ,  $X_2$  και  $X_M$ ;

Αυτές οι πληροφορίες είναι δυνατό να εξαχθούν από έναν επαγωγικό κινητήρα, αν αυτός υποβληθεί σε μια σειρά από πειράματα που είναι ανάλογα με τα πειράματα βραχυκύκλωσης και ανοιχτού κυκλώματος σ' ένα μετασχηματιστή. Τα πειράματα αυτά θα πρέπει να πραγματοποιούνται κάτω από συνθήκες αυστηρά ελεγχόμενες, επειδή οι αντιστάσεις μεταβάλλονται με τη θερμοκρασία και ειδικά η αντίσταση δρομέα μεταβάλλεται με τη συχνότητα στο δρομέα. Οι ακριβείς λεπτομέρειες σχετικά με τον τρόπο πραγματοποίησης των πειραμάτων σ' έναν επαγωγικό κινητήρα, ώστε να επιτυγχάνονται ακριβή αποτελέσματα, παρουσιάζονται στην Τυποποίηση 112 της IEEΕ. Αν και οι λεπτομέρειες της