

# ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ ΜΕΣΗΣ ΤΑΣΗΣ

## 8

### Ενότητα 1.8

- 1.8.1** Αρχή λειτουργίας των ασύγχρονων κινητήρων
- 1.8.2** Μόνωση των τυλιγμάτων του στάτη
- 1.8.3** Ψύξη των κινητήρων μέσης τάσης
- 1.8.4** Προστασία των κινητήρων μέσης τάσης
- 1.8.5** Ομαλός εκκινητής μέσης τάσης
- 1.8.6** Ρύθμιση στροφών κινητήρων μέσης τάσης με μεταβολή της συχνότητας



# Διδακτικοί στόχοι

*Στο τέλος αυτής της ενότητας οι μαθητές θα πρέπει να είναι σε θέση:*

- ☞ να γνωρίζουν την αρχή λειτουργίας του ασύγχρονου κινητήρα.
- ☞ να ξεχωρίζουν τις κατασκευαστικές ιδιομορφίες της μόνωσης των τυλιγμάτων στους κινητήρες μέσης τάσης.
- ☞ να αναφέρουν τον τρόπο ψύξης στους κινητήρες μέσης τάσης.
- ☞ να διακρίνουν τις διάφορες προστασίες που εφαρμόζουμε στους κινητήρες μέσης τάσης.
- ☞ να αναφέρουν την αρχή λειτουργίας του ομαλού εκκινητή με θυρίστορ.
- ☞ να απαριθμούν τα πλεονεκτήματα της ομαλής εκκίνησης.
- ☞ να αναφέρουν συγκεκριμένες εφαρμογές όπου η ρύθμιση των στροφών είναι βασικό στοιχείο στη λειτουργία του φορτίου.

## 1.8 Κινητήρες μέσης τάσης

Σε μεγάλους ηλεκτρικούς καταναλωτές, όπως είναι τα αντλιοστάσια, οι βιομηχανίες, τα λατομεία, οι ταινιόδρομοι, οι σταθμοί παραγωγής κ.ά, απαιτείται η ηλεκτρική κίνηση μηχανημάτων με ισχύ πολλών εκατοντάδων kW.

Οι κινητήρες χαμηλής τάσης (400 V) που υπάρχουν στην αγορά περιορίζονται σε ονομαστική ισχύ μέχρι τα 300 kW περίπου. Πάνω από αυτή την ισχύ, το ρεύμα του κινητήρα είναι τόσο μεγάλο που η κατασκευή των τυλιγμάτων τους είναι πολύ δύσκολη και αντιοικονομική. Από την άλλη πλευρά, οι μεγάλοι καταναλωτές είναι υποχρεωτικά καταναλωτές μέσης τάσης. Έτσι καταλήγουμε στους κινητήρες μέσης τάσης, με ονομαστική τάση 3 kV, 6 kV, ή 10 kV.

Οι κινητήρες που συνήθως συναντάμε είναι κινητήρες των 6 kV που συνδέονται στο δίκτυο των 20 kV μέσω μετασχηματιστή ισχύος 20/6.3 kV. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.8α ο ασύγχρονος κινητήρας μέσης τάσης μοιάζει στην κατασκευή του με τον αντίστοιχο κινητήρα χαμηλής τάσης. Ένα σημείο που τον κάνει να ξεχωρίζει, είναι το κιβώτιο σύνδεσης του, που είναι πιο ογκώδες από το κιβώτιο σύνδεσης του κινητήρα χαμηλής τάσης. Το ηλεκτρικό του μέρος αποτελείται από:

- το ακίνητο μέρος, που ονομάζεται *στάτης*
- το κινητό μέρος που ονομάζεται *δρομέας*



Εικόνα 1.8α Κινητήρας 1000 kW, 6.6 kV, 1486 rpm, IM B3, IP23

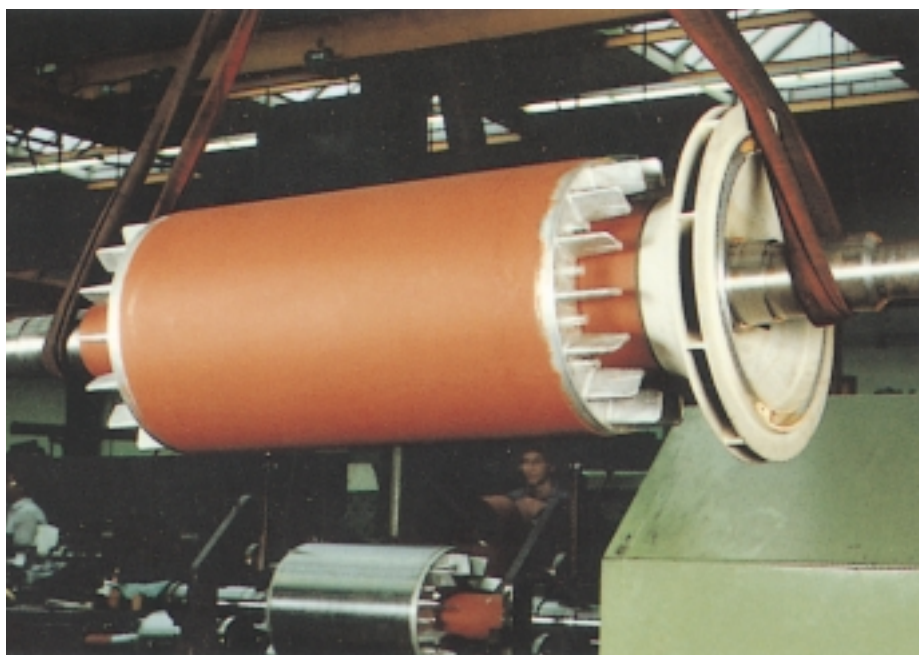
Ο στάτης είναι κατασκευασμένος από πολλά μαγνητικά ελάσματα απο πυριτιούχο χάλυβα που κόβονται σε ειδικές πρέσες. Τα ελάσματα είναι περασμένα με ειδικό μονωτικό βερνίκι και συγκρατούνται σφικτά μεταξύ τους με ραφές συγκόλλησης στην εξωτερική τους περιφέρεια. Στα αυλάκια που σχηματίζουν τα ελάσματα του στάτη, τοποθετούνται οι τρεις φάσεις του τύλιγματος.

Το τύμπανο του δρομέα είναι κατασκευασμένο με παρόμοιο τρόπο, όπως ο στάτης. Ανάλογα με τον τρόπο που κατασκευάζεται το τύλιγμα του δρομέα, οι ασύγχρονοι κινητήρες χωρίζονται σε:

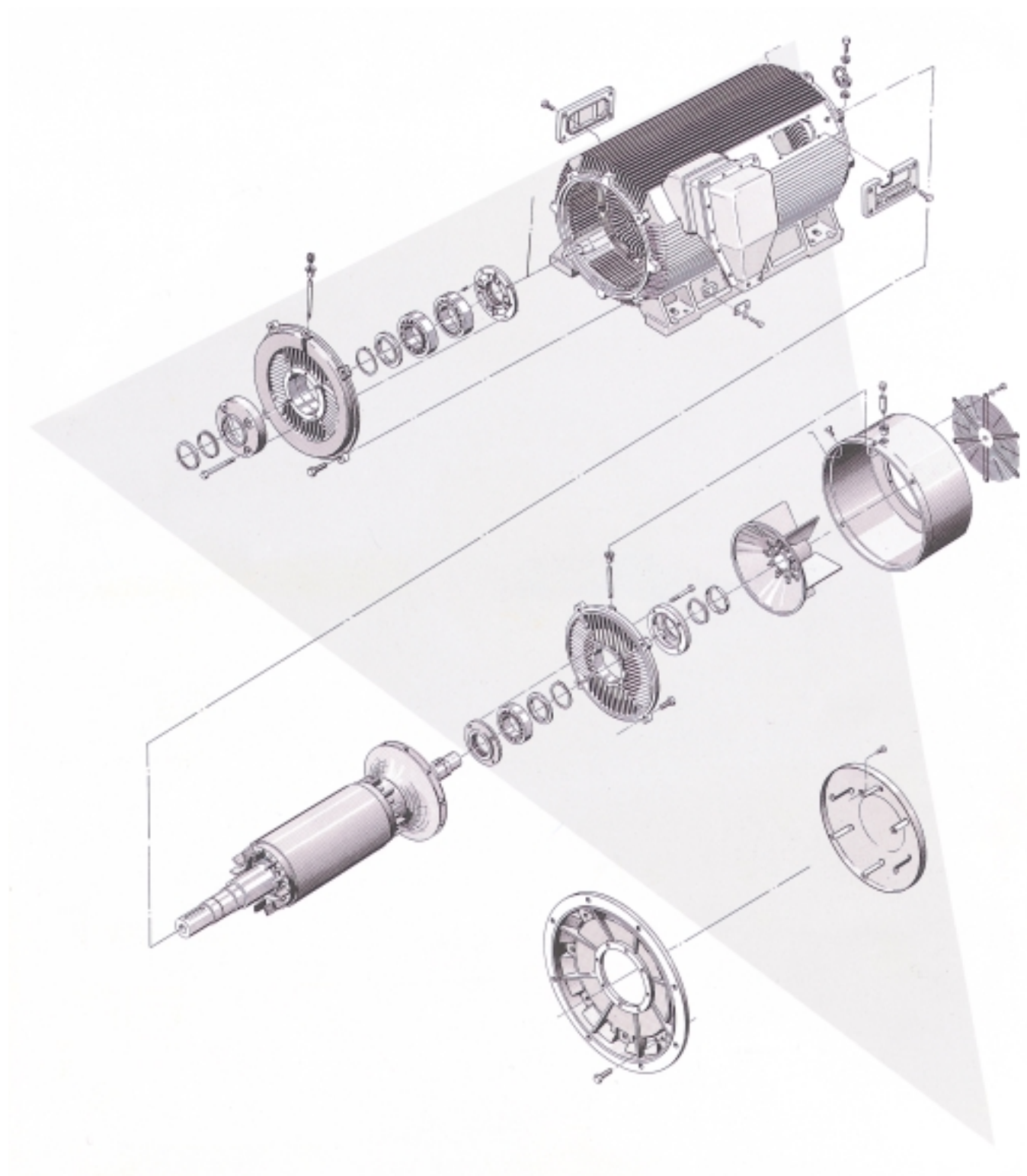
- **βραχυκυκλωμένου δρομέα (ή κλωβού).** Το τύλιγμα του δρομέα αποτελείται από χάλκινες ράβδους ή συνήθως από καθαρό χυτό αλουμίνιο. Το αλουμίνιο, σε υγρή μορφή, χυτεύεται με πίεση μέσα στα αυλάκια του τυμπάνου του δρομέα. Ταυτόχρονα χυτεύονται και τα δύο δακτυλίδια που βραχυκυκλώνουν τις ράβδους στα άκρα τους.
- **δακτυλιοφόρου δρομέα.** Το τύλιγμα του δρομέα μοιάζει με το τύλιγμα του στάτη. Καταλήγει σε τρία μονωμένα μεταξύ τους δακτυλίδια, στερεωμένα πάνω στον άξονα του δρομέα. Στα δακτυλίδια εφάπτονται ψήκτρες, με ψηκτροθήκες στερεωμένες στο στάτη. Κινητήρες αυτού του τύπου συναντάμε σε ειδικές εφαρμογές, όπου απαιτείται υψηλή ροπή εκκίνησης, δηλαδή, κατά την εκκίνηση, στον άξονα του κινητήρα εφαρμόζεται (αντιτίθεται) πολύ μεγάλο μηχανικό φορτίο. Για παράδειγμα αναφέρουμε τους ταινιόδρομους που μεταφέρουν το λιγνίτη από τα λιγνιτορυχεία στους ατμοηλεκτρικούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Σήμερα οι κινητήρες αυτού του τύπου αντικαθίστανται με απλούς κινητήρες βραχυκυκλωμένου δρομέα, σε συνδυασμό με ομαλούς εκκινητές (παράγραφο 1.8.5).

**Υπενθυμίζουμε ότι, το τύλιγμα του στάτη είναι το μόνο στοιχείο του κινητήρα που συνδέεται ηλεκτρικά με το δίκτυο. Το ρεύμα στο τύλιγμα του δρομέα δημιουργείται εξ' επαγωγής**



Εικόνα 1.8β  
Δρομέας κινητήρα 6.6 kV



**Εικόνα 1.8γ** Κατασκευή κινητήρα  
μέσης τάσης οριζόντιου τύπου (IM B3)  
με βαθμό προστασίας IP 54



### 1.8.1 Αρχή λειτουργίας των ασύγχρονων κινητήρων

Η αρχή λειτουργίας των ασύγχρονων κινητήρων μέσης τάσης, είναι ακριβώς ίδια με αυτή των κινητήρων χαμηλής τάσης. Επειδή θεωρούμε ότι είναι απαραίτητη για την κατανόηση των παραγράφων που ακολουθούν, παρακάτω παρουσιάζεται σύντομα η αρχή αυτή.

#### Στάδιο 1. Η δημιουργία του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου στο στάτη

Όταν τροφοδοτήσουμε τα τυλίγματα του στάτη με ένα τριφασικό συμμετρικό σύστημα εναλλασσόμενων ρευμάτων, στο εσωτερικό της μηχανής δημιουργείται ένα στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο. Η ταχύτητα περιστροφής του είναι η σύγχρονη ταχύτητα  $n_s$  και εξαρτάται από τη συχνότητα του δικτύου (50 Hz) και τον αριθμό των πόλων που δημιουργούν τα τυλίγματα του στάτη. Για διπολικούς κινητήρες είναι  $n_s = 3000$  RPM, για τετραπολικούς  $n_s = 1500$  RPM, για εξαπολικούς  $n_s = 1000$  RPM κ.ο.κ.

#### Στάδιο 2. Η δημιουργία εξ'επαγωγής ρεύματος στο δρομέα

Τα τυλίγματα του δρομέα κόβονται από τις μαγνητικές γραμμές του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου του στάτη και, συνεπώς, εμφανίζεται σε αυτά τάση εξ'επαγωγής. Αν ο δρομέας είναι τύπου βραχυκυκλωμένου δρομέα, τότε στους βραχυκυκλωμένους αγωγούς του κλωβού δημιουργούνται πολύ ισχυρά ρεύματα. Αν πάλι έχουμε δακτυλιοφόρο δρομέα, τότε το ηλεκτρικό κύκλωμα κλείνει μέσω των εξωτερικών αντιστάσεων εκκίνησης.

Το αποτέλεσμα, και στις δύο περιπτώσεις, είναι

ότι στο δρομέα εμφανίζονται εξ'επαγωγής ρεύματα. Μοιάζει, δηλαδή, ο ασύγχρονος κινητήρας με μετασχηματιστή με την αντιστοιχία:

- πρωτεύον τύλιγμα -> το τύλιγμα του στάτη
- δευτερεύον τύλιγμα -> το τύλιγμα του δρομέα

#### Στάδιο 3. Η εμφάνιση δυνάμεων Laplace στο δρομέα

Συνεχίζοντας το συλλογισμό μας, βλέπουμε ότι έχουμε ρευματοφόρους αγωγούς (τα τυλίγματα του δρομέα) μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο (το πεδίο του στάτη), και, συνεπώς, πάνω στους αγωγούς θα ασκηθούν δυνάμεις Laplace. Η φορά των δυνάμεων Laplace είναι τέτοια, ώστε πάνω στο δρομέα δημιουργείται ροπή με αποτέλεσμα την περιστροφή του δρομέα.

Ο δρομέας αρχίζει να περιστρέφεται και επιταχύνει όσο ασκείται ροπή.

#### Στάδιο 4. Η προσπάθεια του δρομέα να φτάσει τη σύγχρονη ταχύτητα

Ο ρότορας προσπαθεί να φτάσει την ταχύτητα ( $n_s$ ) του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου. Όσο όμως πλησιάζει να τη φτάσει, η σχετική ταχύτητα των αγωγών του ελαττώνεται και, συνεπώς, η εξ'επαγωγής τάση μειώνεται, το ρεύμα μειώνεται, και η ροπή μειώνεται. Αποτέλεσμα είναι ότι ο δρομέας πλησιάζει πολύ κοντά στη σύγχρονη ταχύτητα αλλά ποτέ δεν τη φτάνει (απ' όπου και το όνομα ασύγχρονος).

Όσο μεγαλύτερο είναι το μηχανικό φορτίο στον άξονα του κινητήρα, τόσο μεγαλύτερη θα είναι και η απόκλιση (ολίσθηση) του δρομέα από τη σύγχρονη ταχύτητα.

Στον Πίνακα 1.8 βλέπουμε τα τεχνικά στοιχεία των κινητήρων ενός κατασκευστή. Παρατηρούμε ότι η ονομαστική ταχύτητα των 2-πολικών κινητήρων είναι 2980 έως 2986 RPM, δηλαδή πολύ κοντά στις 3000 RPM. Αντίστοιχα για τους 4-πολικούς είναι 1489 έως 1494 RPM, δηλαδή πολύ κοντά στις 1500 RPM.

Πίνακας 1.8 Πίνακας με τεχνικά στοιχεία κινητήρων 6,6 kV 50 Hz όπως εμφανίζεται σε τεχνικά φυλλάδια εταιρειών											
3000 RPM, 2-πόλων, 50 Hz											
Ονομαστική ισχύς	Ονομ. ταχύ- τητα	Από- δοση	συνφ	Απώ- λειες	Ονομ. ρεύμα	Ονομ. ροπή	Ροπή εκκί- νησης	Ρεύμα εκκί- νησης	Ροπή ακιν. δρομέα	Ροπή αδρα- νείας	Βάρος
$P_N$ kW	$\eta_N$ %	$\eta$	$\cos\phi$	$P_V$ kW	$I_N$ A	$M_N$ Nm	$M_A/M_N$	$I_A/I_N$	$M_K/M_N$	kgm <sup>2</sup>	t
1040	2980	97,0	0,93	32,2	160	3333	0,60	6,0	2,5	19,0	5,0
1180	2981	97,1	0,93	35,2	182	3760	0,65	6,5	2,6	21,0	5,4
1320	2985	97,0	0,91	40,8	210	4223	0,45	5,8	2,5	28,0	6,0
1460	2985	97,2	0,92	42,1	225	4671	0,45	6,0	2,5	3,0	6,4
1580	2985	97,2	0,92	45,5	245	5055	0,50	6,2	2,6	32,0	6,7
1780	2986	97,4	0,92	47,5	275	5692	0,55	6,5	2,8	34,0	7,0
1500 RPM, 4-πόλων, 50 Hz											
1030	1489	96,8	0,86	34,0	172	6606	0,85	5,6	2,2	30,0	4,9
1180	1489	97,0	0,86	36,5	196	7568	0,85	5,5	2,1	33,5	5,2
1300	1490	97,1	0,86	38,8	215	8332	0,85	5,7	2,2	37,0	5,5
1460	1491	96,9	0,87	46,7	240	93,51	0,70	5,4	2,0	54,0	6,8
1580	1492	97,1	0,86	47,2	265	10113	0,85	5,9	2,3	59,0	7,0
1750	1491	97,2	0,87	50,4	285	11209	0,70	5,5	2,0	64,0	7,3
1960	1491	97,3	0,87	54,4	320	12554	0,70	5,5	2,0	72,0	7,8
2150	1494	97,3	0,88	59,7	350	13743	0,55	5,5	2,3	137,0	11,2
2600	1494	97,5	0,88	66,7	420	16620	0,55	5,5	2,2	157,0	12,2
2900	1494	97,6	0,8	71,3	470	18537	0,50	5,5	2,2	171,0	12,8
3150	1494	97,7	0,88	74,2	510	20136	0,55	5,5	2,2	186,0	13,6

### 1.8.2 Μόνωση των τυλιγμάτων του στάτη

Όπως είδαμε παραπάνω, τα τυλίγματα του στάτη είναι το ηλεκτρικό μέρος του κινητήρα που συνδέεται με το δίκτυο.

Τα τυλίγματα αποτελούνται από επιμέρους πηνία. Τα πηνία κατασκευάζονται από χάλκινες μπάρες, τις οποίες διαμορφώνουμε σε σχήμα, ώστε να ταιριάζουν στα αυλάκια του στάτη. Κατόπιν, τα περιτυλίγουμε με πολλές στρώσεις από ειδική ταινία μίκας (Εικόνα 1.8.2α).

Η μίκας είναι ένα ορυκτό υλικό που έχει την ιδιότητα να είναι πολύ κακός αγωγός στο ηλεκτρικό ρεύμα (συνεπώς έχει καλές μονωτικές ιδιότητες) και, ταυτόχρονα, είναι αρκετά καλός αγωγός στη μετάδοση της θερμότητας. Ετσι αποτελεί την ιδανική λύση για την περίπτωση που θέλουμε σε περιορισμένο χώρο να έχουμε αγωγούς με ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο που διαρρέονται από μεγάλα ρεύματα.

Στην Εικόνα 1.8.2β βλέπουμε τη διαδικασία εμποτισμού του τελειωμένου στάτη με ειδικά εποξειδικά βερνίκια και το ψήσιμό του σε ειδικούς φούρνους με κενό αέρα.

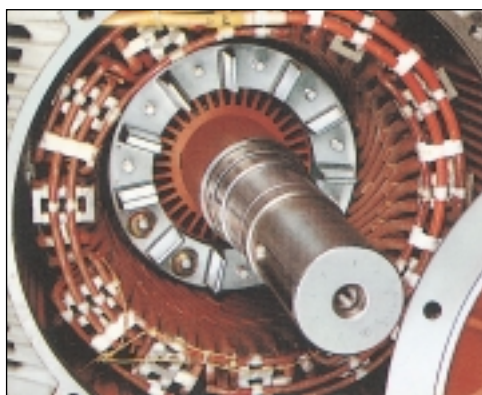
**Η μόνωση των πηνίων αποτελεί το πιο κρίσιμο σημείο στην κατασκευή του κινητήρα διότι οποιαδήποτε αστοχία κατά τη λειτουργία του κινητήρα δημιουργεί σφάλμα φάσης προς τη γη και ο κινητήρας πρέπει να επισκευαστεί ή συνήθως να αντικατασταθεί.**



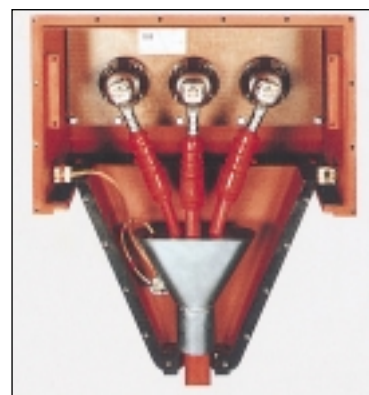
(α)



(β)



(γ)



(δ)

Εικόνα 1.8.2 α. Αυτόματη περιέλιξη των πηνίων με ταινία μίκας

β. Ο στάτης πλήρης με τα τυλίγματα του, κατεβαίνει στη δεξαμενή εμποτισμού

γ. Ο στάτης τοποθετημένος στο κέλυφος του κινητήρα με τις άκρες των τυλιγμάτων του που καταλήγουν στο κιβώτιο σύνδεσης,

δ. κιβώτιο σύνδεσης



### 1.8.3 Ψύξη των κινητήρων μέσης τάσης

Όπως γνωρίζουμε, κατά τη λειτουργία του κινητήρα, ένα μικρό ποσοστό της ηλεκτρικής ενέργειας που καταναλώνει ο κινητήρας, μετατρέπεται σε θερμικές απώλειες. Στους κινητήρες μέσης τάσης, επειδή η ονομαστική ισχύς τους είναι μεγάλη, το ποσό των θερμικών απωλειών είναι σημαντικό.

Ένα από τα βασικά στοιχεία στην κατασκευή των κινητήρων μέσης τάσης είναι και το σύστημα ψύξης. Με τον όρο ψύξη, εννοούμε την απαγωγή της θερμότητας που παράγεται στο εσωτερικό του κινητήρα και την αποβολή της στο περιβάλλον.

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.8.3 οι κινητήρες μέσης τάσης έχουν δύο ανεξάρτητα κυκλώματα ψύξης με αέρα που είναι:

- **ένα κλειστό εσωτερικό κύκλωμα ψύξης** (κόκκινα βέλη)
- **ένα ανοικτό εξωτερικό κύκλωμα ψύξης** (μπλέ βέλη).

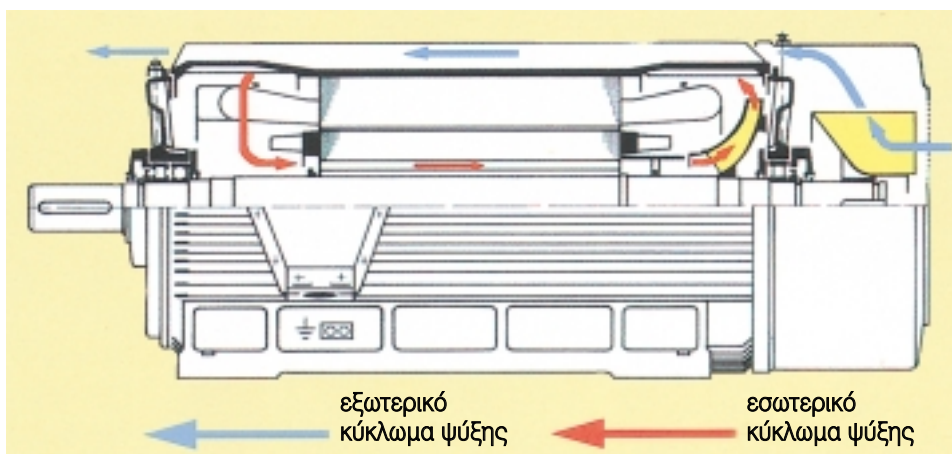
Το μεγαλύτερο μέρος της θερμότητας, αναπτύσσεται στα τυλίγματα του στάτη και μεταφέρεται με αγωγιμότητα, από τον πυρήνα του στάτη στο εξωτερικό περίβλημα του κινητήρα. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.8.3, το εξωτερικό περίβλημα του κινητήρα είναι διαμορφωμένο σε πτερύγια που βοηθάνε στην ψύξη του.

Με τη βοήθεια ενός εσωτερικού ανεμιστήρα, που βρίσκεται στον άξονα του κινητήρα, ο αέρας του εσωτερικού κυκλώματος τίθεται σε κίνηση, και μεταφέρει τη θερμότητα από τα τυλίγματα του δρομέα αλλά και τις άκρες των τυλιγμάτων του στάτη, στο εξωτερικό περίβλημα του κινητήρα.

Στο εξωτερικό κύκλωμα ψύξης, ο αέρας του περιβάλλοντος οδηγείται κατά μήκος των πτερυγίων του περιβλήματος. Αυτό γίνεται με τη βοήθεια ενός εξωτερικού ανεμιστήρα που βρίσκεται πάνω στον άξονα του κινητήρα.

**Το εξωτερικό περίβλημα του κινητήρα, χάρη στην ειδική του διαμόρφωση με πτερύγια ψύξης, λειτουργεί σαν εναλλάκτης θερμότητας μεταξύ του εσωτερικού και εξωτερικού κυκλώματος ψύξης. Έτσι οι θερμικές απώλειες του κινητήρα αποβάλλονται στον αέρα του περιβάλλοντος.**

**Η σωστή ψύξη των τυλιγμάτων και των εδράνων του κινητήρα, είναι βασική προϋπόθεση για την απρόσκοπτη λειτουργία του.**



Εικόνα 1.8.3 Αρχή λειτουργίας ψύξης κινητήρα με αέρα

### 1.8.4 Προστασία των κινητήρων μέσης τάσης

Για την προστασία των κινητήρων μέσης τάσης, χρησιμοποιούνται διάφοροι τύποι ηλεκτρονόμων (H/N) προστασίας, που παρέχουν ο καθένας χωριστά, τις προστασίες που αναφέρονται παρακάτω. Στην αγορά, υπάρχουν H/N που περιλαμβάνουν όλες αυτές τις προστασίες σε μια συσκευή και ονομάζονται **ηλεκτρονόμοι ολικής προστασίας κινητήρων**.

Οι προστασίες ενός κινητήρα μέσης τάσης είναι:

- **Θερμοκρασία τυλιγμάτων.** Θερμίστορ<sup>(1)</sup> ή αντιστάσεις Pt100<sup>(2)</sup> τοποθετούνται στις κεφαλές των τυλιγμάτων του κινητήρα για την επιτήρηση της θερμοκρασίας τους. Στην πράξη, τα θερμίστορ συνδέονται σε σειρά και καταλήγουν σε ειδικό κλεμμοκιβώτιο, από όπου συνδέονται με τον H/N προστασίας. Σε περίπτωση ανύψωσης της θερμοκρασίας, ο H/N δίνει αρχικά εντολή προειδοποίησης (alarm) και, αν η θερμοκρασία συνεχίζει να ανεβαίνει και ξεπεράσει το επιτρεπτό όριο, δίνει εντολή απόζευξης (tripping).
- **Προστασία από υπερφόρτιση, βραχυκύκλωμα.** Γίνεται με κλασσικούς H/N υπερέντασης αντιστρόφου χρόνου που ρυθμίζονται στο ονομαστικό ρεύμα του κινητήρα.
- **Προστασία από υπέρταση, υπόταση.** Ο H/N αυτός εξασφαλίζει ότι ο κινητήρας εργάζεται μέ-

σα στα ανεκτά όρια τάσης, που έχει ορίσει ο κατασκευστής του. Συνήθως ρυθμίζεται στο  $\pm 10\%$  της ονομαστικής τάσης. Υπάρχει πάντα μια μικρή χρονική καθυστέρηση ( $\Delta t \cong 100 \text{ ms}$ ) πριν την εντολή απόζευξης, ώστε να μη διεγείρεται άσκοπα από στιγμιαίες διακυμάνσεις της τάσης του δικτύου που προκαλούνται, π.χ. από το άνοιγμα-κλείσιμο διακοπών και τους κεραυνούς.

- **Προστασία δρομέα από δύσκολες εκκινήσεις.** Σε κινητήρες με υπερβολικά δύσκολες ή συχνές εκκινήσεις μπορεί να καταστραφεί ο ρότορας λόγω υπερθέρμανσης. Η μέτρηση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του στρεφόμενου δρομέα είναι αδύνατη. Έτσι, με τη βοήθεια ειδικών ψηφιακών H/N δημιουργείται ένα μαθηματικό μοντέλο (θερμική εικόνα) εξομείωσης της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του ρότορα. Ο H/N αυτός διατηρεί στη μνήμη την εικονική θερμοκρασία του δρομέα και αποφασίζει, αν θα επιτρέψει την εκκίνηση του κινητήρα.
- **Προστασία από ασυμμετρία ρευμάτων.** Σε περίπτωση ασυμμετρίας των τριών φάσεων του δικτύου η θερμοκρασία του δρομέα ανεβαίνει κατακόρυφα. Ειδικός H/N αναλαμβάνει την επιτήρηση της συμμετρίας των τριών ρευμάτων και σε περίπτωση που υπερβούμε το επιτρεπτό όριο, δίνει εντολή απόζευξης.

(1) Θερμίστορ είναι αντιστάσεις ημιαγωγών που αλλάζουν την αντίστασή τους ανάλογα με την θερμοκρασία

(2) Οι αντιστάσεις αυτές κατασκευάζονται από σύρμα πλατίνας (Pt) και έχουν ωμική αντίσταση 100Ω σε θερμοκρασία 0°C γι' αυτό και ονομάζονται αισθητήρες Pt100. Όπως γνωρίζουμε η αντίσταση των μετάλλων (στην περίπτωση μας της πλατίνας) αλλάζει με τη θερμοκρασία. Χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο αλλά και την ακριβή μέτρηση της θερμοκρασίας.

### 1.8.5 Ομαλός εκκινητής μέσης τάσης (medium voltage soft starter)

Κατά την εκκίνησή του, ο κινητήρας βραχυκυκλωμένου δρομέα, απορροφά ρεύμα που μπορεί να φτάσει το εξαπλάσιο του ονομαστικού του. Έτσι προκαλείται μια **στιγμαία πτώση τάσης** στο δίκτυο, η οποία έχει επιπτώσεις και στους άλλους καταναλωτές. Η πτώση τάσης, που λέγεται και **βύθιση τάσης**, δημιουργεί ιδιαίτερα προβλήματα σε κινητήρες, ηλεκτρονικά μηχανήματα κ.ά.

Στους κινητήρες χαμηλής τάσης, έχουν αναπτυχθεί μια σειρά τεχνικές, με στόχο να περιορίσουν το πρόβλημα της εκκίνησής τους. Οι τεχνικές αυτές είναι:

- εκκίνηση αστέρα-τριγώνου
- εκκίνηση με αυτομετασχηματιστή
- εκκίνηση με ομαλό (ηλεκτρονικό) εκκινητή

Στους κινητήρες μέσης τάσης, όταν το φορτίο για λόγους μηχανικούς δε μπορεί να ξεκινήσει απ'ευθείας, χρησιμοποιείται ο ομαλός εκκινητής (soft starter)

Η αρχή λειτουργίας του φαίνεται στην Εικόνα 1.8.5. Σε κάθε φάση υπάρχουν δύο θυρίστορ, τοποθετημένοι ανάστροφα, που λειτουργούν ως ηλεκτρονικοί διακόπτες. Κατά την εκκίνηση, οι διακόπτες αυτοί κλείνουν και επιτρέπουν τη διέλευση του ρεύματος μόνο σε ένα μικρό τμήμα της περιόδου  $T$  (Εικόνα 1.8.5) της εναλλασσόμενης τάσης. Αν αντιστοιχίσουμε την περίοδο  $T$  σε  $360^\circ$ , τότε χρησιμοποιούμε την έννοια της γωνίας αποκοπής  $\alpha$ , για

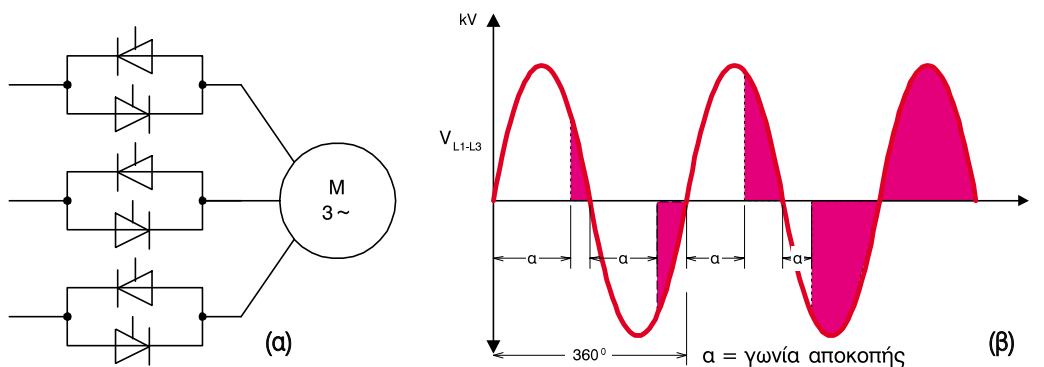
να περιγράψουμε τη λειτουργία του ομαλού εκκινητή.

- Όπου η γωνία αποκοπής είναι  $\alpha = 180^\circ$ , σημαίνει ότι δεν περνά καθόλου ρεύμα και ο κινητήρας είναι σταματημένος.
- Όταν ο ομαλός εκκινητής λάβει εντολή να ξεκινήσει, το ηλεκτρονικό σύστημα ελέγχου αρχίζει να ελαττώνει σταδιακά τη γωνία αποκοπής  $\alpha$ , ο κινητήρας επιταχύνει, και φτάνει ομαλά την ονομαστική του ταχύτητα.
- Όταν η γωνία αποκοπής είναι  $\alpha = 0^\circ$ , σημαίνει ότι το ρεύμα του κινητήρα έχει φτάσει την ονομαστική του τιμή.

Με το ίδιο τρόπο, αλλά αυξάνοντας σταδιακά την γωνία αποκοπής από  $0^\circ$  σε  $180^\circ$  πετυχαίνουμε το ομαλό σταμάτημα του κινητήρα.

Τα πλεονεκτήματα της ομαλής εκκίνησης είναι:

- **Μειωμένο ρεύμα στην εκκίνηση**, με αποτέλεσμα τον περιορισμό στη βύθιση τάσης και την παρενόχληση του δικτύου.
- **Ομαλή επιτάχυνση του φορτίου**, με αποτέλεσμα τον περιορισμό ζημιών στην παραγωγική διαδικασία και στο τελικό προϊόν.
- **Αύξηση του χρόνου ζωής** όλων των μηχανικών μερών, π.χ κιβώτιο ταχυτήτων, εδράνων κ.λπ.



Εικόνα 1.8.5

- α. Αρχή λειτουργίας του ομαλού εκκινητή  
β. Έλεγχος της γωνίας αποκοπής

### 1.8.6 Ρύθμιση στροφών κινητήρων μέσης τάσης με μεταβολή της συχνότητας (medium voltage drive)

Ο μετατροπέας συχνότητας μετατρέπει την τριφασική τάση του δικτύου με σταθερό πλάτος (20 kV) και συχνότητα (50 Hz) σε **τριφασική τάση με μεταβλητό πλάτος και συχνότητα**.

Λόγω του αυξημένου κόστους, τους συναντάμε σε ειδικές εφαρμογές όπου η ρύθμιση των στροφών και της ροπής του φορτίου είναι απαραίτητη για τη σωστή λειτουργία της παραγωγικής διαδικασίας. Τέτοιες εφαρμογές είναι:

- μεγάλες αντλίες δικτύων ύδρευσης και αποχέτευσης
- αντλίες, συμπιεστές σε πετροχημικές βιομηχανίες
- κίνηση της προπέλας σε πλοία
- ταινιόδρομοι σε ορυχεία, τσιμεντοβιομηχανίες
- μύλοι άλεσης σε βιομηχανίες τροφίμων
- ανεμιστήρες σε υπόγειες σήραγγες

Η αρχή λειτουργίας του ρυθμιστή στροφών φαίνεται στην Εικόνα 1.8.6α.

1. **Διακόπτης ισχύος**
2. **Μετασχηματιστής ισχύος** με δύο δευτερεύοντα τυλίγματα
3. Διπλή **ανορθωτική διάταξη** αποτελούμενη από διόδους για τη μετατροπή της εναλασσόμενης τάσης σε συνεχή τάση σταθερού πλάτους.
4. **Φίλτρο** από συστοιχία πυκνωτών για την εξομάλυνση της συνεχούς τάσης.
5. **Αντιστροφέας** αποτελούμενος από ειδικά τρανζίστορ ισχύος μέσης τάσης (Εικόνα 1.8.6β). Μετατρέπει τη συνεχή τάση σε εναλασσόμενη τά-

ση, μεταβλητής συχνότητας και πλάτους.

Στην Εικόνα 1.8.6δ βλέπουμε ότι η κυματομορφή του εναλασσόμενου ρεύματος στην έξοδο του αντιστροφέα δεν είναι τελείως ομαλή αλλά έχει μικρές διακυμάνσεις που οφείλονται στις αρμονικές<sup>(1)</sup> συχνότητες που δημιουργούνται κατά τη διαδικασία της μετατροπής. Αν το ποσοστό των αρμονικών είναι μεγάλο τότε απαιτούνται επιπλέον φίλτρα στην έξοδο του αντιστροφέα.

**6. Μετασχηματιστές τάσης και έντασης** για τη μέτρηση της τάσης και του ρεύματος στην έξοδο του ρυθμιστή.

**7. Κινητήρας** βραχυκυκλωμένου δρομέα μέσης τάσης. Γνωρίζουμε ότι η ταχύτητα περιστροφής<sup>(2)</sup> του δρομέα εξαρτάται άμεσα από τη συχνότητα του Ε.Ρ που τροφοδοτεί τα τυλίγματά του.

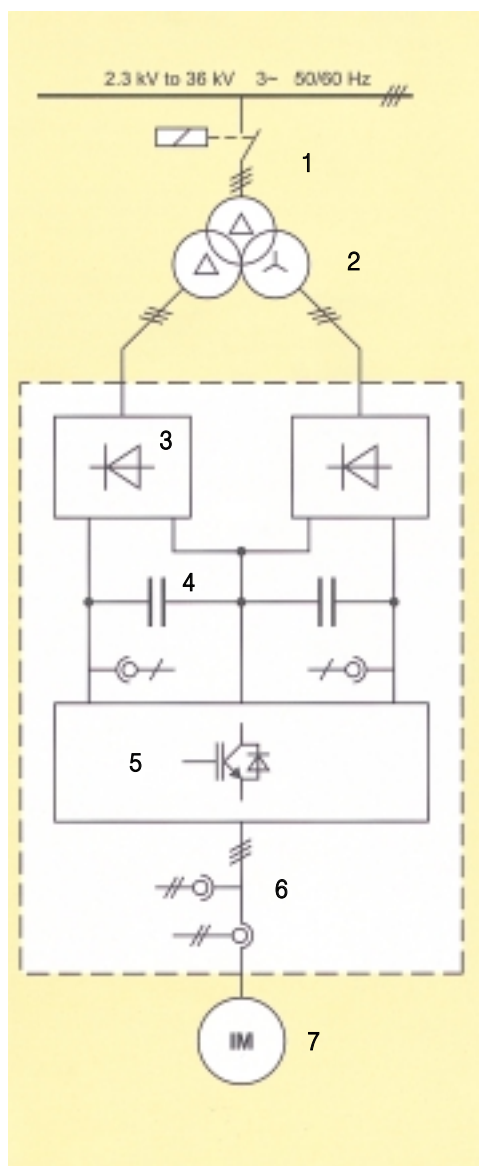
Ο ρυθμιστής στροφών μέσης τάσης αποτελείται από μια μεταλλική ντουλάπα που περιέχει τα ηλεκτρονικά ισχύος (διόδους, τρανζίστορ κα.) αλλά και όλα τα κυκλώματα ελέγχου. Η επιλογή του γίνεται με βάση την ονομαστική ισχύ (kW) του κινητήρα αλλά και τα χαρακτηριστικά του φορτίου. Κατασκευάζονται από τυποποιημένες συρταρωτές ηλεκτρονικές κάρτες (modules), έτσι ώστε να είναι εύκολη η συντήρηση και η επισκευή τους (Εικόνα 1.8.6γ). Στη διαδικασία της μετατροπής του Ε.Ρ σε Σ.Ρ και ξανά σε Ε.Ρ, ένα μέρος της ηλεκτρικής ισχύος μετατρέπεται σε θερμότητα. Η ψύξη των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων ισχύος γίνεται με αέρα και, σε μεγάλους ρυθμιστές, με νερό (υδροψυκτοι).

(1) Λέγονται αρμονικές συχνότητες, διότι είναι ακέραια πολλαπλάσια της βασικής συχνότητας. Για παράδειγμα, αν ο ρυθμιστής παράγει Ε.Ρ συχνότητας 50 Hz, οι αρμονικές είναι 100 Hz, 150 Hz, 200 Hz κ.ο.κ.

(2) Η ταχύτητα περιστροφής ( $n_s$ ) του ρότορα δίνεται από τον τύπο

$$n_s = \frac{f \cdot 60}{p}$$

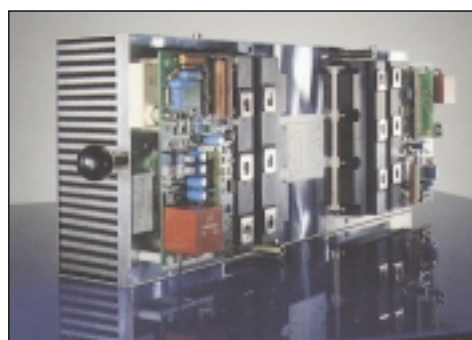
όπου  $f$  = συχνότητα Ε.Ρ. που τροφοδοτεί το στάτη,  $p$  = αριθμός ζευγών πόλων που σχηματίζουν τα τυλίγματα του στάτη



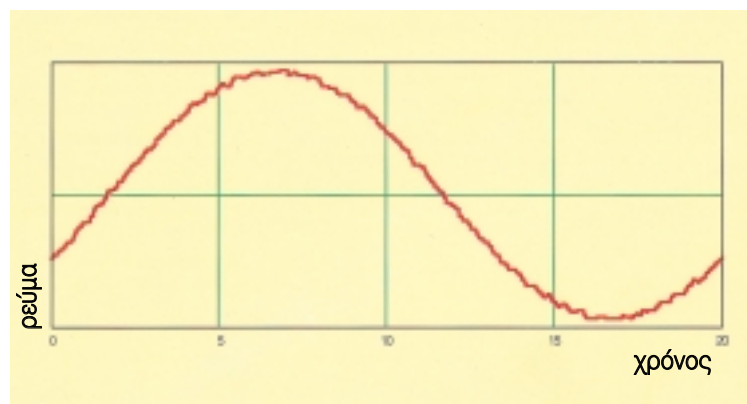
(α)



(β)



(γ)



(δ)

Εικόνα 1.8.6

- α. Αρχή λειτουργίας ρυθμιστή στροφών μέσης τάσης
- β. Τρανζίστορ μέσης τάσης που χρησιμοποιείται στους ρυθμιστές στροφών
- γ. Υδρόψυκτη κάρτα με τα ηλεκτρονικά ισχύος
- δ. Κυματομορφή του ρεύματος στην έξοδο του ρυθμιστή στροφών.