



ΑΝΩΤΑΤΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ  
ΙΔΡΥΜΑ ΠΕΙΡΑΙΑ  
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟΥ ΤΟΜΕΑ  
Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών

Διπλωματική εργασία:

**“Τριφασικός κινητήρας επαγωγής”**

**Σύγχρονες μέθοδοι εκκίνησης**

**και ρύθμισης των στροφών**

**“Induction motor”**

**synchronous starting methods and**

**speed settings**

**Ανδρικούδης Νικόλαος**

**A.M. 13033**

**επιβλέπων καθηγητής εφαρμογών:**

**Βυλλιώτης Ηρακλής**

**Αθήνα 2017**

# Περιεχόμενα

|               |  |    |
|---------------|--|----|
|               | Σκοπός της εργασίας  | 5  |
| <b>Κεφ. 1</b> | <b>ΤΡΙΦΑΣΙΚΟΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ ΕΠΑΓΩΓΗΣ</b>   | 6  |
| 1.1           | Εισαγωγή   | 6  |
| 1.2           | Βασικές αρχές ηλεκτρικών μηχανών   | 7  |
| 1.3           | Βασικά τυλίγματα ηλεκτρικών μηχανών  | 8  |
| 1.3.1         | Τύλιγμα διέγερσης  | 8  |
| 1.3.2         | Τύλιγμα τυμπάνου   | 8  |
| 1.3.3         | Τυλίγματα ηλεκτρικών μηχανών   | 8  |
| 1.4           | Αρχή λειτουργίας   | 11 |
| 1.5           | Διανεμημένο τύλιγμα μίας φάσης τριφασικού τυλίγματος του στάτη διπολικής μηχανής | 12 |
| 1.6           | Ηλεκτρομαγνητική δομή του επεγωγικού κινητήρα                                    | 19 |
| 1.7           | Η ολίσθηση   | 22 |
| 1.8           | Ισοδύναμο κύκλωμα 3φ ασύγχρονου κινητήρα   | 23 |
| 1.9           | Χαρακτηριστική ταχύτητας-ροπής   | 27 |
| 1.10          | Η ροή ενέργειας στους επαγωγικούς κινητήρες                                      | 30 |
| 1.11          | Κινητήρας με βραχυκυκλωμένο δρομέα   | 31 |
| 1.12          | Κινητήρας με δακτυλιοφόρο δρομέα   | 33 |
| 1.13          | Κατηγορίες ασύγχρονων κινητήρων κλωβού   | 34 |
| 1.13.1        | Κατηγορία Α  | 34 |
| 1.13.2        | Κατηγορία Β  | 35 |
| 1.13.3        | Κατηγορία C  | 35 |
| 1.13.4        | Κατηγορία D  | 35 |
| <b>Κεφ.2</b>  | <b>ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ</b>                                     | 36 |
| 2.1           | Ηλεκτρονόμοι (Ρελέ) ή τηλεχειριζόμενοι διακόπτες                                 | 36 |
| 2.2           | Λειτουργία ηλεκτρονόμου  | 36 |
| 2.3           | Θερμικά  | 37 |
| 2.4           | Χρονικά  | 38 |
| 2.5           | Εισαγωγή στα Ημιαγώγιμα στοιχεία ισχύος  | 38 |
| 2.6           | Διακοπτική λειτουργία  | 39 |

|              |   |    |
|--------------|---|----|
| 2.7          | Κυκλώματα προστασίας (snubbers)   | 40 |
| 2.8          | Άλλες διατάξεις προστασίας  | 40 |
| 2.9          | Φίλτρα  | 40 |
| 2.10         | Δίοδοι ισχύος   | 41 |
| 2.11         | Οικογένεια των τρανζίστορ (BJT, power MOSFET, IGBT)                       | 42 |
| 2.12         | Οικογένεια των θυρίστορ (SCR, GTO, IGCT)                                  | 43 |
| 2.13         | Περιοχές ισχύος και διακοπτικής συχνότητας                                | 46 |
| 2.14         | Συνεχή και εναλλασσόμενα μεγέθη   | 46 |
| 2.15         | Ημιτονοειδής μορφή και ενεργός (RMS) τιμή                                 | 47 |
| 2.16         | Ισχύς   | 48 |
| 2.17         | Βασικές κατηγορίες μετατροπέων ισχύος                                     | 48 |
| 2.18         | Τριφασικός AC ρυθμιστής   | 48 |
| 2.19         | Τριφασικός DC- AC ρυθμιστής (αντιστροφέας)                                | 51 |
| <b>Κεφ.3</b> | <b>ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΚΚΙΝΗΣΗΣ</b>  | 53 |
| 3.1          | Αυτόματος διακόπτης Αστέρα-Τριγώνου (Y-Δ)                                 | 53 |
| 3.2          | Συνδεσμολογία και εξήγηση λειτουργίας εκκίνησης Αστέρα-Τριγώνου           | 54 |
| 3.3          | Εκκίνηση με αντιστάσεις στο στάτη   | 57 |
| 3.4          | Συνδεσμολογία και εξήγηση λειτουργίας εκκίνησης με αντιστάσεις στο στάτη  | 58 |
| 3.5          | Εκκίνηση κινητήρα με αντιστάσεις στο δρομέα                               | 60 |
| 3.6          | Συνδεσμολογία και εξήγηση λειτουργίας εκκίνησης με αντιστάσεις στο δρομέα | 60 |
| 3.7          | Απ' ευθείας εκκίνηση  | 62 |
| 3.8          | Συνδεσμολογία και εξήγηση λειτουργίας απ' ευθείας εκκίνησης               | 63 |
| 3.9          | Εκκίνηση με αυτομετασχηματιστή  | 64 |
| 3.10         | Συνδεσμολογία και εξήγηση λειτουργίας εκκίνησης με αυτομετασχηματιστή     | 65 |
| 3.11         | Η λειτουργία ενός αυτομετασχηματιστή                                      | 66 |
| 3.12         | Μειωμένη διαμόρφωση τάσης   | 66 |
| 3.13         | Διαμόρφωση πλήρους τάσης  | 67 |
| 3.14         | Ηλεκτρονική εκκίνηση  | 67 |
| 3.15         | Συνδεσμολογία και εξήγηση λειτουργίας ηλεκτρονικής εκκίνησης              | 70 |

## **Κεφ.4 ΡΥΘΜΙΣΗ ΤΩΝ ΣΤΡΟΦΩΝ**

|          |  |     |
|----------|--|-----|
| 4.1      | Έλεγχος της ταχύτητας των επαγωγικών κινητήρων   | 73  |
| 4.2      | Ρύθμιση των στροφών με αλλαγή του πλήθους των ζευγών των μαγνητικών πόλων  | 73  |
| 4.3      | Ρύθμιση των στροφών με τη γραμμική μεταβολή της συχνότητας τροφοδοσίας του στάτη χρησιμοποιώντας ηλεκτρονικά ισχύος (αντιστροφείς) | 75  |
| 4.3.1    | Επίδραση της ρύθμισης του λόγου V/f  | 75  |
| 4.4      | Η συσκευή ελέγχου μεταβλητής συχνότητας  | 76  |
| 4.5      | Πώς λειτουργεί μια συσκευή ελέγχου   | 76  |
| 4.6      | Συνδεσμολογία και εξήγηση λειτουργίας  | 78  |
| 4.6.1    | Οι Ρυθμιστές Στροφών της Σειράς iC5  | 78  |
| 4.6.2    | Τεχνικά Χαρακτηριστικά της Σειράς iC5  | 80  |
| 4.6.3    | Σχέδιο Καλωδιώσεων της Σειράς iC5  | 81  |
| 4.6.4    | Περιγραφή Ακροδεκτών της Σειράς iC5  | 82  |
| 4.7      | Οι Ρυθμιστές Στροφών της Σειράς iG5A   | 83  |
| 4.7.1    | Τεχνικά Χαρακτηριστικά της Σειράς iG5A   | 85  |
| 4.7.2    | Σχέδιο Καλωδιώσεων της Σειράς iG5A   | 86  |
| 4.7.3    | Περιγραφή Ακροδεκτών της Σειράς iG5A   | 87  |
| 4.8      | Εκκίνηση και Στάση του Ηλεκτροκινητήρα   | 88  |
| 4.9      | Έλεγχος των Στροφών του Ηλεκτροκινητήρα  | 89  |
| 4.10     | Τελευταίες εξελίξεις   | 90  |
| 4.11     | Σύγχρονες τεχνικές ελέγχου   | 92  |
| 4.11.1   | Μονόμετρος ή βαθμωτός έλεγχος  | 93  |
| 4.11.2   | Διανυσματικός έλεγχος  | 94  |
| 4.11.2.1 | Άμεσος διανυσματικός έλεγχος   | 100 |
| 4.11.2.2 | Έμμεσος διανυσματικός έλεγχος  | 108 |
|          | Βιβλιογραφία και πηγές από το διαδίκτυο  | 116 |

## Σκοπός της εργασίας

Η παρούσα πτυχιακή εργασία έχει ως αντικείμενο μελέτης τους τριφασικούς κινητήρες επαγωγής.

Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα βασικά μέρη του κινητήρα, η αρχή λειτουργίας του, ο προσδιορισμός των παραμέτρων του ισοδύναμου κυκλώματος και οι κλάσεις σχεδίασης των κινητήρων.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στους μηχανισμούς ενεργοποίησης των αυτοματισμών εκκίνησης καθώς και μια εισαγωγή στα ηλεκτρονικά ισχύος.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι μέθοδοι εκκίνησης των τριφασικών κινητήρων επαγωγής και περιγράφονται οι αυτοματισμοί εκκίνησης.

Τέλος στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στον έλεγχο στροφών του κινητήρα και κυρίως στη σύγχρονη τεχνική ελέγχου.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1ο

## ΤΡΙΦΑΣΙΚΟΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ ΕΠΑΓΩΓΗΣ

### 1.1 Εισαγωγή

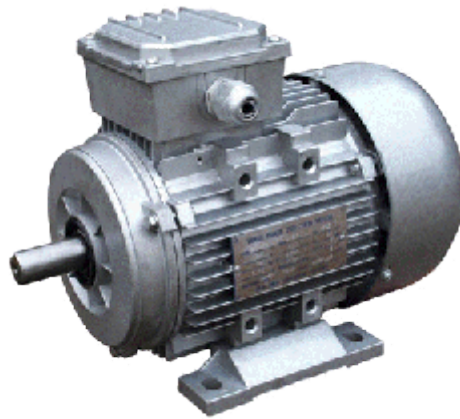
Από τα διάφορα είδη ηλεκτρικών μηχανών εναλλασσόμενου ρεύματος, ο *τριφασικός ασύγχρονος ή επαγωγικός κινητήρας (induction motor)*, χρησιμοποιείται ευρύτατα στις βιομηχανικές εφαρμογές. Ενδεικτικό της καθολικής χρήσης της μηχανής αυτής είναι ότι, οι επαγωγικοί κινητήρες απορροφούν το 60% περίπου, της 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 σχήμα 1.



**Σχήμα 1: ηλεκτρική μηχανή**

## **1.2 Βασικές αρχές ηλεκτρικών μηχανών**

Στις ηλεκτρικές μηχανές υπάρχουν ταυτόχρονα δύο μηχανισμοί.

α) Ο μηχανισμός παραγωγής ροπής

ο οποίος βασίζεται στην προσπάθεια ευθυγράμμισης των δύο μαγνητικών πεδίων που δημιουργούνται από τα τυλίγματα του στάτη και του δρομέα. Τα μαγνητικά πεδία δημιουργούνται μέσα από κατάλληλα διαμορφωμένα τυλίγματα στο στάτη και στο δρομέα της στρεφόμενης ηλεκτρικής μηχανής.

β) Ο μηχανισμός παραγωγής τάσης

Η παραγωγή της τάσης σε ένα τύλιγμα, σχετίζεται άμεσα με τη χρονική μεταβολή της πεπλεγμένης μαγνητικής ροής που δέχεται το ίδιο το τύλιγμα. Η χρονική μεταβολή της πεπλεγμένης ροής μπορεί να προέλθει, είτε από την περιστροφή του τυλίγματος σε χώρο σταθερού μαγνητικού πεδίου, είτε διατης περιστροφής ενός σταθερού μαγνητικού πεδίου σε σχέση με το μαγνητικό άξονα του σταθερού τυλίγματος.

### **1.3 Βασικά τυλίγματα ηλεκτρικών μηχανών**

Το ένα τύλιγμα είναι τοποθετημένο στο **στάτη** και το άλλο στο **δρομέα**.

#### **1.3.1 Τύλιγμα διέγερσης**

Το τύλιγμα διέγερσης έχει ως σκοπό την παραγωγή του μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό (διάκενο) της μηχανής. Το τύλιγμα διέγερσης είναι συνήθως τύλιγμα χαμηλής ισχύος, σε σχέση πάντα με τη συνολική ηλεκτρική ισχύ της μηχανής.

#### **1.3.2 Τύλιγμα τυμπάνου**

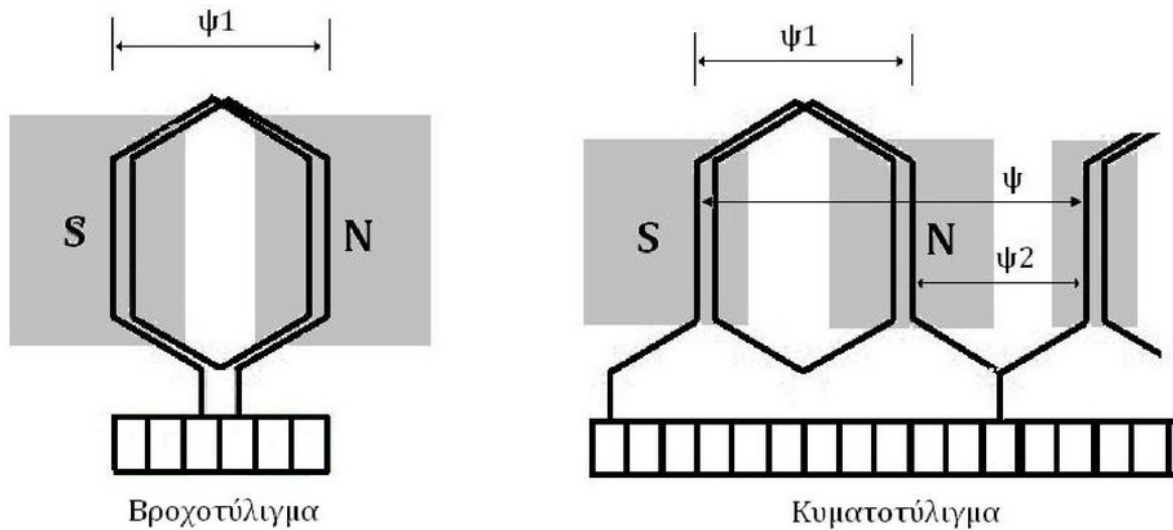
Το τύλιγμα τυμπάνου στρέφεται σε σχέση με το μαγνητικό πεδίο που δημιουργεί το τύλιγμα διέγερσης και στο οποίο επάγονται τάσεις και ροπές. Το τύλιγμα τυμπάνου είναι τύλιγμα ισχύος και έχει ουσιαστικό ρόλο στην ηλεκτρομηχανική μετατροπή της ενέργειας. Ανάλογα του είδους της ηλεκτρικής μηχανής, το τύλιγμα τυμπάνου μπορεί να βρίσκεται στο στάτη ή στο δρομέα.

#### **1.3.3 Τυλίγματα ηλεκτρικών μηχανών**

Το ενεργό μήκος του πηνίου, αντιστοιχεί στα μήκη των αγωγών των κλάδων που βρίσκονται υπό την επενέργεια του συνιστάμενου μαγνητικού πεδίου. Η απόσταση μεταξύ των δύο πλευρών του πηνίου είναι ένα πολικό βήμα ή ηλεκτρικές μοίρες, με αποτέλεσμα οι επαγόμενες τάσεις και ροπές στους δύο κλάδους του τυλίγματος να είναι ίσες σε μέγεθος και να δρουν αθροιστικά.

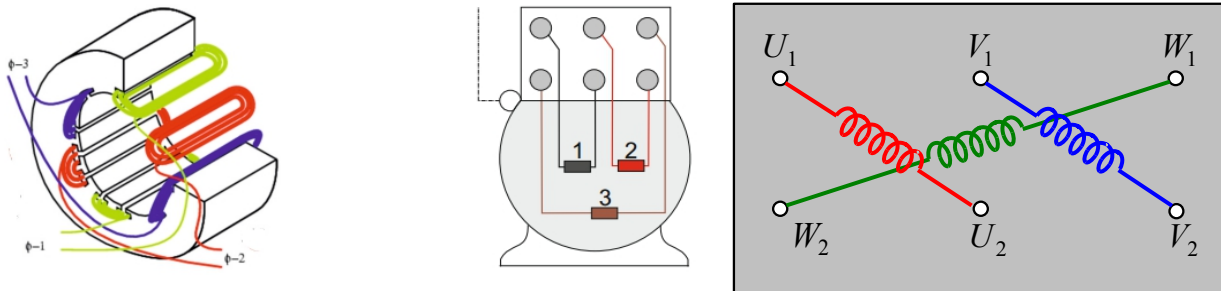
Τα διανεμημένα τυλίγματα των ηλεκτρικών μηχανών διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, τα βροχοειδή και τα κυματοειδή και τα οποία συνήθως είναι απλής ή διπλής στρώσης.





Σχήμα 2: Συνδέσεις ομάδων τυλιγμάτων μηχανών

Το τύλιγμα του στάτη, είναι γνωστό και ως τύλιγμα τυμπάνου. Κατασκευαστικά το τύλιγμα του στάτη, στην περίπτωση του τριφασικού κινητήρα αποτελείται από τρία όμοια διανεμημένα μονοφασικά τυλίγματα, μετατιθέμενα στο χώρο κατά 120 ηλεκτρικές μοίρες.



Σχήμα 3: Τύλιγμα στάτη

Ο αριθμός των πόλων των τυλιγμάτων αυτών, για δεδομένη συχνότητα τροφοδοσίας, καθορίζει τις ονομαστικές στροφές του κινητήρα.

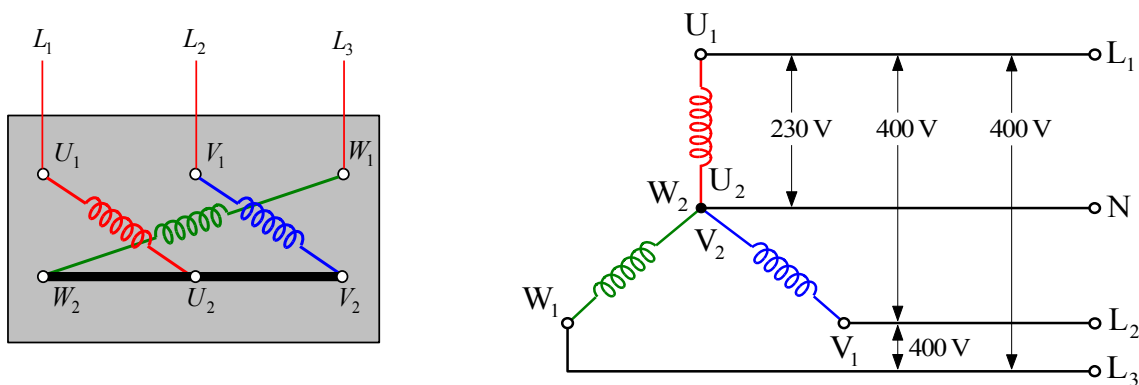
$$n_s = 120 \cdot \frac{f_1}{P} \quad (1.1)$$

Το τύλιγμα του δρομέα είναι βραχυκυκλωμένο και τροφοδοτείται με Ε.Ρ. έμμεσα από το στάτη λόγω επαγωγής, όπως ακριβώς και το δευτερεύον τύλιγμα στην περίπτωση των μετασχηματιστών. Για το λόγο αυτό, ο ασύγχρονος κινητήρας ονομάζεται και κινητήρας επαγωγής.

Μιας και για τη λειτουργία του ασύγχρονου κινητήρα, απαιτείται η τροφοδότηση με εναλλασσόμενη τάση μόνο του ενός από τα δύο τυλίγματα (και συγκεκριμένα του τυλίγματος του στάτη), ο ασύγχρονος κινητήρας χαρακτηρίζεται και σαν κινητήρας απλής τροφοδότησης.

Σε αντίθεση με το μετασχηματιστή, το ρεύμα διέγερσης που απαιτείται για τη δημιουργία της συνισταμένης μαγνητικής ροής στο διάκενο της μηχανής, είναι αρκετά μεγαλύτερο (της τάξης του 40% περίπου του ονομαστικού ρεύματος), λόγω της σημαντικά αυξημένης μαγνητικής αντίστασης που εισάγεται στο σιδηρομαγνητικό κύκλωμα από την ύπαρξη του διακένου.

Ανάλογα δε με τις τάσεις τροφοδοσίας και τον τύπο του κινητήρα, τα τυλίγματα του στάτη συνδέονται είτε σε αστέρα είτε σε τρίγωνο.



Για να συνδέσει ένα κινητήρα σε **ΑΣΤΕΡΑ** στο δίκτυο της ΔΕΗ (πολική 400V) πρέπει η πινακίδα του να αναγράφει

⇒ **230/400V Δ Υ ή 400V Υ**

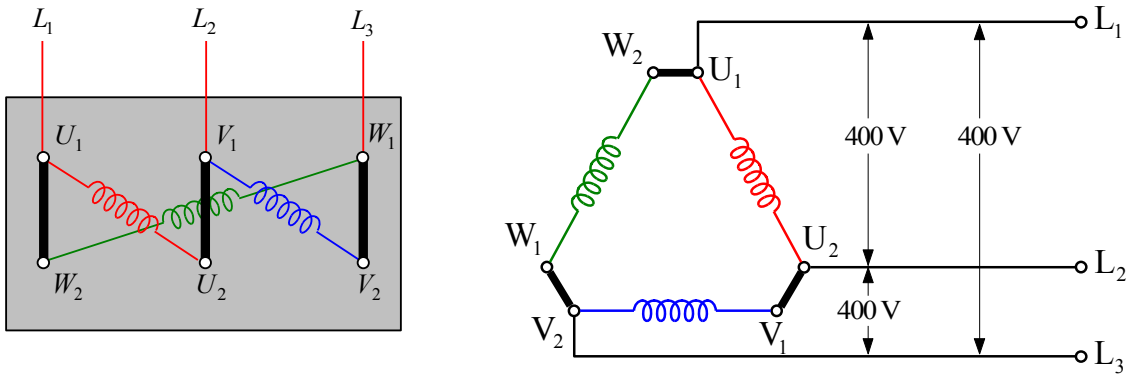
Η πρώτη τάση που αναγράφεται αντιστοιχεί στη συνδεσμολογία Δ. Αν δηλαδή έχουμε πολική τάση (μεταξύ δύο φάσεων) 230V πρέπει να συνδέσουμε τον κινητήρα τρίγωνο. Αυτήν την τάση μπορούμε να την έχουμε από έναν μικρής ισχύος inverter

Η δεύτερη τάση που αναγράφεται αντιστοιχεί στη συνδεσμολογία Υ. Αν δηλαδή έχουμε πολική τάση (μεταξύ δύο φάσεων) 400V, όπως στο δίκτυο της ΔΕΗ, πρέπει να συνδέσουμε τον κινητήρα σε Αστέρα.

230/400V Δ Υ

230/400V Δ Υ

**Σχήμα 4: Συνδεσμολογία αστέρα**



Για να συνδέσω ένα κινητήρα σε **ΤΡΙΓΩΝΟ** στο δίκτυο της ΔΕΗ (πολική 400V) πρέπει η πινακίδα του να αναγράφει

⇒ **400/700V Δ Υ ή 400V Δ**

Η πρώτη τάση που αναγράφεται αντιστοιχεί στη συνδεσμολογία Δ. Αν δηλαδή έχουμε πολική τάση (μεταξύ δύο φάσεων) 400V όπως στο δίκτυο της ΔΕΗ πρέπει να συνδέσουμε τον κινητήρα τρίγωνο.

Μπορούμε όμως να συνδέσουμε τον κινητήρα σε Υ σε κάποιο άλλο δίκτυο με πολική τάση 700V

Σχήμα 5: Συνδεσμολογία τρίγωνο

### 1.4 Αρχή λειτουργίας

Κατά τη λειτουργία μιας ηλεκτρικής μηχανής σαν κινητήρας παρέχεται ηλεκτρική ενέργεια στο κύριο τύλιγμα της μηχανής, που λέγεται τύλιγμα τυμπάνου και αποδίδεται μηχανική ενέργεια εξόδου πάνω σε μια περιστρεφόμενη άτρακτο. Μια εξωτερικά επιβαλλόμενη ηλεκτρική τάση  $v$  οδηγεί ένα ρεύμα  $i$  μέσα στο τύλιγμα τυμπάνου ενάντια σε μια εσωτερικά επαγόμενη αντιηλεκτρεγερτική δύναμη  $e$ . Το τύλιγμα τυμπάνου γίνεται έτσι ικανό να απορροφά ηλεκτρική ενέργεια με ρυθμό  $e \cdot i$ . Το πεδίο ζεύξεως ασκεί μια στιγμιαία ηλεκτρομαγνητική ροπή  $T_{πεδ}$  πάνω στο περιστρεφόμενο μέλος της μηχανής που λέγεται δρομέας (ρότορας). Αν ο δρομέας στρέφεται με γωνιακή ταχύτητα  $\omega$  τότε η στιγμιαία ισχύς εξόδου που αποδίδεται στην άτρακτο θα είναι  $T_{πεδ} \cdot \omega$ . Η εξωτερικά εφαρμοζόμενη ροπή φορτίου  $T_{εξ}$  δρα με φορά αντίστροφη από εκείνη της περιστροφής και καθιστά το φορτίο ικανό ν' απορροφά μηχανική ενέργεια. Ισχύει προφανώς ότι:

$$T_{πεδ} - T_{εξ} = J \cdot \frac{d\omega}{dt} \quad (1.2)$$

που  $J$  είναι η ροπή αδρανείας του δρομέα και του μηχανικού του φορτίου (η κίνηση του οποίου είναι ο τελικός σκοπός της ύπαρξης του κινητήρα).

Όταν  $T_{πεδ} = T_{εξ}$  τότε  $d\omega/dt = 0$  και η μηχανή περιστρέφεται με σταθερή γωνιακή ταχύτητα. Στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας έχουμε ότι

$$(\omega \cdot T_{πεδ})_{μέση\ τιμή} = (e \cdot i)_{μέση\ τιμή} \quad (1.3)$$

Δεδομένου ότι στο τύλιγμα τυμπάνου αναπτύσσεται μια ΗΕΔ (ηλεκτρεγερτική δύναμη), χρειαζόμαστε ένα μαγνητικό πεδίο διεγέρσεως που συνηθέστατα (εκτός από την περίπτωση μόνιμου μαγνήτη στις μικρές μηχανές), στην πράξη παρέχεται από τυλίγματα διεγέρσεως ή τυλίγματα πεδίου.

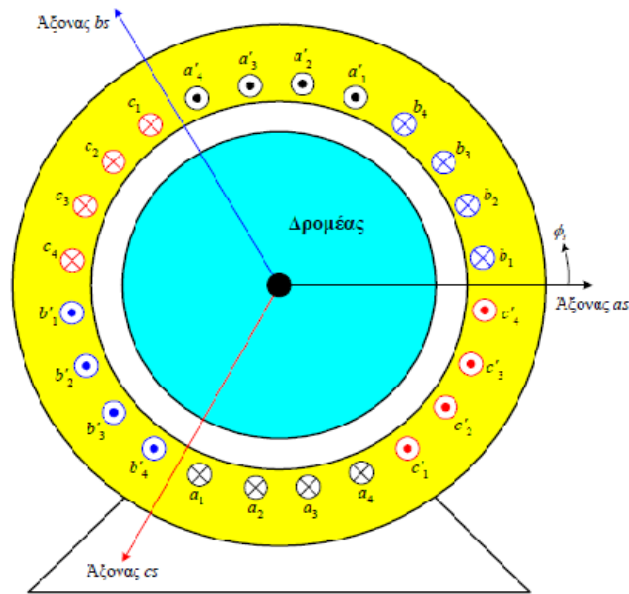
Στη μόνιμη λειτουργία των συνήθων μηχανών της πράξης, οι οποίες έχουν χωριστά τροφοδοτούμενο τύλιγμα διεγέρσεως, η μέση τιμή της ισχύος που τροφοδοτεί το τύλιγμα αυτό δαπανάται υπό μορφή θερμότητας.

### 1.5 Διανεμημένο τύλιγμα μίας φάσης τριφασικού τυλίγματος του στάτη διπολικής μηχανής

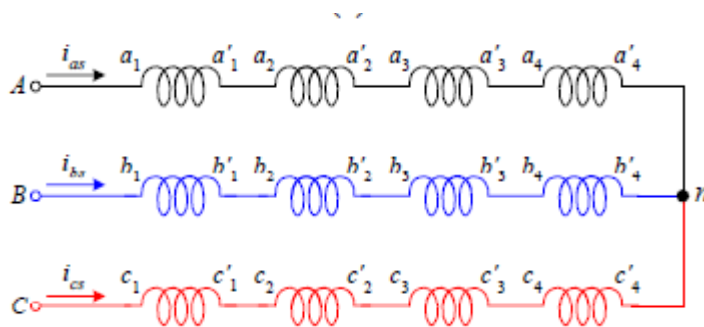
Όπως και στην ανάλυση των μηχανών συνεχούς ρεύματος, θεωρούμε αρχικά μια μηχανή εναλλασσόμενου ρεύματος, ο στάτης της οποίας φέρει ένα στοιχειώδες τριφασικό τύλιγμα. Το τύλιγμα του στάτη, όπως εικονίζεται στην εικόνα 6, δημιουργεί ένα στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο με δύο πόλους (διπολική μηχανή). Το τριφασικό τύλιγμα είναι σε σύνδεση αστέρα (σχήμα 7).

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 στην σχήμα 6. Τα άκρα των τεσσάρων ομάδων κάθε τυλίγματος συνδέονται σε σειρά, με

τον τρόπο που εικονίζεται στην σχήμα 7. Τα άκρα  $a'4$ ,  $b'4$  και  $c'4$  από τα τρία τυλίγματα συνδέονται μεταξύ τους, στη σύνδεση αστέρα.



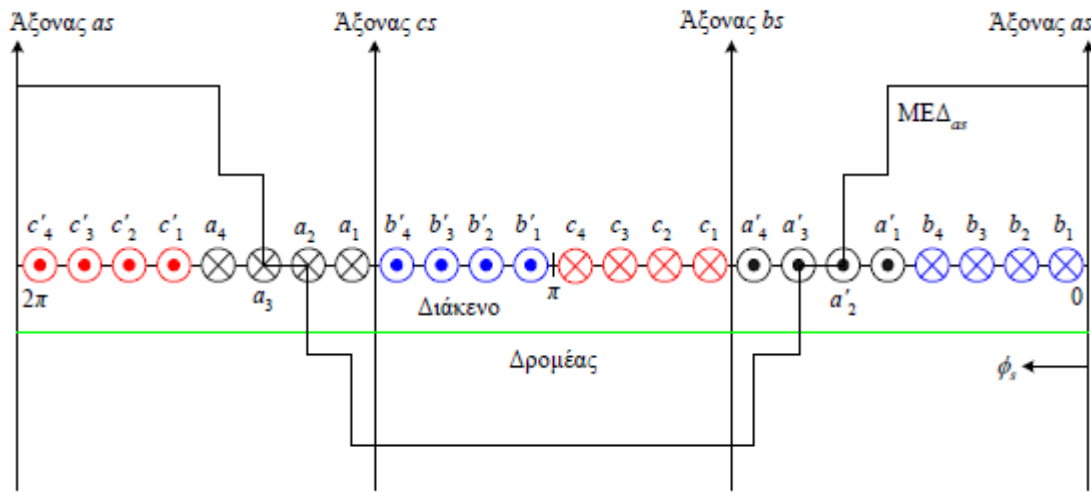
Σχήμα 6: Στοιχειώδης διπολική μηχανή εναλλασσόμενου ρεύματος, με τριφασικό τύλιγμα στο στάτη



Εικόνα 7: σύνδεση αστέρα

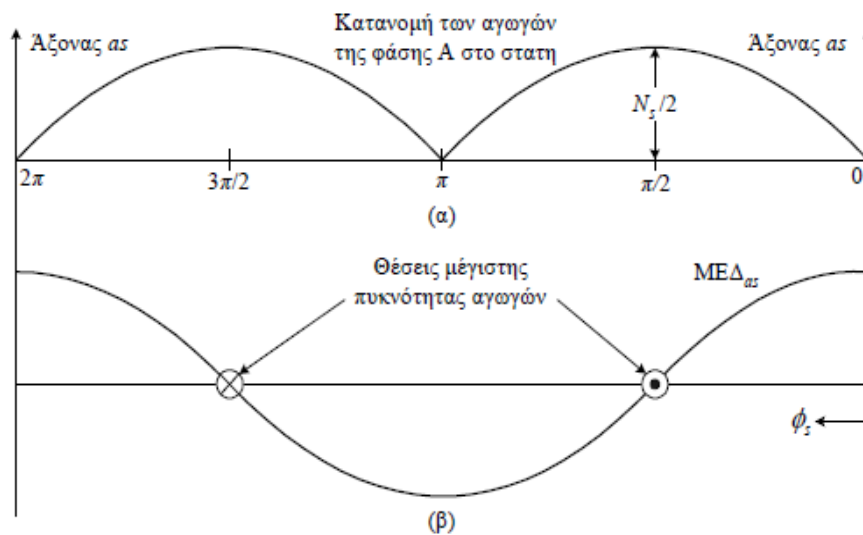
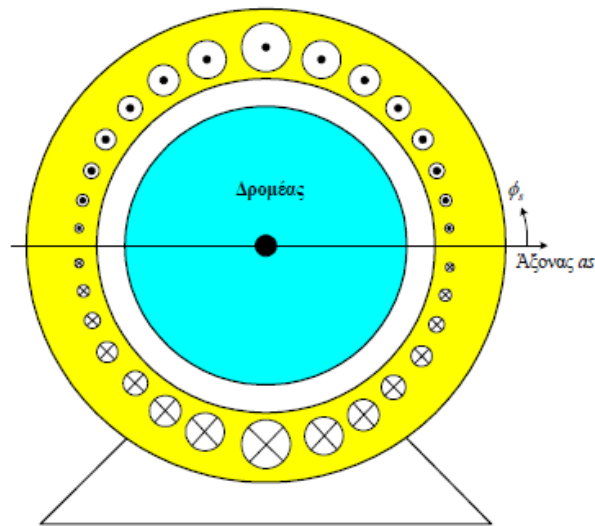
Στη στοιχειώδη μηχανή του σχήματος 6, οι πλευρές των ομάδων κάθε τυλίγματος, είναι ομοιόμορφα κατανομημένες στην επιφάνεια του στάτη, σε γωνία  $60^\circ$ . Στις πραγματικές μηχανές, οι πλευρές των ομάδων κατανέμονται σε μεγαλύτερη γωνία. Έτσι, στην ίδια αυλάκωση τοποθετούνται οι πλευρές από δύο ομάδες. Επιπλέον, οι ομάδες δεν έχουν τον ίδιο αριθμό σπειρών. Το τύλιγμα του σχήματος 6 ονομάζεται *full-pitch*, επειδή οι αντίθετες πλευρές των ομάδων σχηματίζουν γωνία

180° (διπολική μηχανή). Συχνά, οι αντίθετες πλευρές των ομάδων σχηματίζουν γωνία μικρότερη από 180°, οπότε το τύλιγμα ονομάζεται *fractional-pitch*.



**Σχήμα 8:** Ανάπτυγμα της στοιχειώδους μηχανής, όπου εικονίζεται το τριφασικό τύλιγμα και η αναπτυσσόμενη ΜΕΔ από τη φάση *as*

Στο σχήμα 8 φαίνεται το ανάπτυγμα της στοιχειώδους μηχανής. Ως αρχή των αξόνων θεωρείται ο άξονας *as* στα δεξιά του σχήματος. Ακόμη, στο σχήμα 8 βλέπουμε τη μαγνητεγερτική δύναμη ΜΕΔ, που αναπτύσσεται από το τύλιγμα της φάσης *as*. Η ΜΕΔ<sub>*as*</sub> 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.



**Σχήμα 9: τύλιγμα της φάσης  $as$**   
**(α) με ημιτονοειδή κατανομή και**  
**(β) η παραγόμενη ΜΕΔ στο διάκενο**

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 φαίνεται στο σχήμα 9(α). Τότε, η ΜΕΔ έχει την ημιτονοειδή μορφή

του σχήματος 9(β) και ορίζεται από την παρακάτω σχέση, για τη φάση  $as$

$$ME\Delta_{as} = \frac{N_s}{2} \cdot i_{as} \cos\varphi_s \quad (1.4)$$

όπου  $i_{as}$  είναι το ρεύμα στη φάση  $as$  του τυλίγματος και  $N_s$  είναι ο ισοδύναμος αριθμός σπειρών ενός ημιτονοειδούς κατανεμημένου 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:

$$ME\Delta_{bs} = \frac{N_s}{2} \cdot i_{bs} \cos\left(\varphi_s - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (1.5) \text{ και } (1.6)$$

$$ME\Delta_{cs} = \frac{N_s}{2} \cdot i_{cs} \cos\left(\varphi_s + \frac{2\pi}{3}\right)$$

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

$$ME\Delta_s = \frac{N_s}{2} \cdot \left[ i_{as} \cos(\varphi_s) + i_{bs} \cos\left(\varphi_s - \frac{2\pi}{3}\right) + i_{cs} \cos\left(\varphi_s + \frac{2\pi}{3}\right) \right] \quad (1.7)$$

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

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

$$i_{bs} = I_{ms} \cos\left(\omega_e \cdot t - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (1.8), (1.9) \text{ και } (1.10)$$

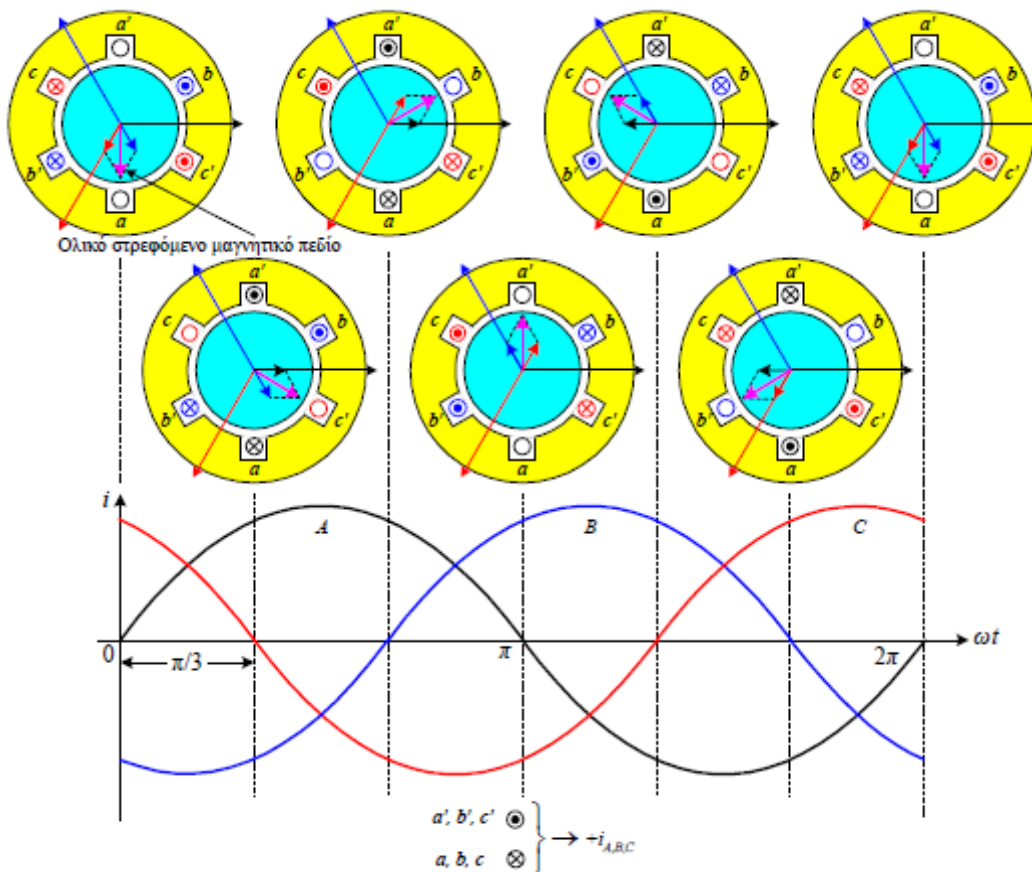
$$i_{cs} = I_{ms} \cos\left(\omega_e \cdot t + \frac{2\pi}{3}\right)$$



όπου  $\omega_e$  είναι η κυκλική συχνότητα των ρευμάτων. Αντικαθιστώντας τις εξισώσεις (5)(6)(7) στην εξίσωση (4), ορίζεται η ολική ΜΕΔ στο διάκενο της μηχανής.

$$ME\Delta_s = \frac{N_s}{2} \frac{3}{2} \cdot I_{ms} \cos(\omega_e t - \varphi_s) \quad (1.11)$$

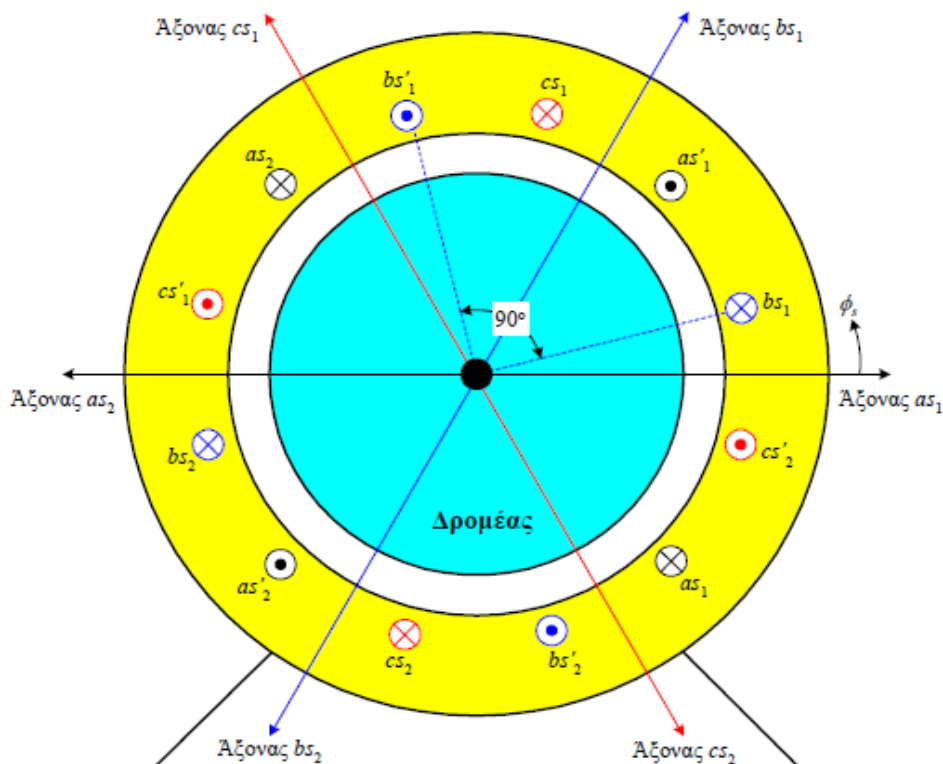
Η εξίσωση 8 παριστά μια ΜΕΔ με ημιτονοειδή κατανομή, η οποία στρέφεται με γωνιακή ταχύτητα  $\omega_e$  σε σχέση με το στάτη της μηχανής, με φορά αντίθετη των δεικτών του ρολογιού. Η ΜΕΔ έχει ένα ζεύγος πόλων. Επομένως, η ροή των τριφασικών ρευμάτων από το τριφασικό τύλιγμα του στάτη δημιούργησε ένα μαγνητικό πεδίο, ο βόρειος και ο νότιος πόλος του οποίου κάνουν μια πλήρη περιστροφή σε κάθε περίοδο των ρευμάτων.

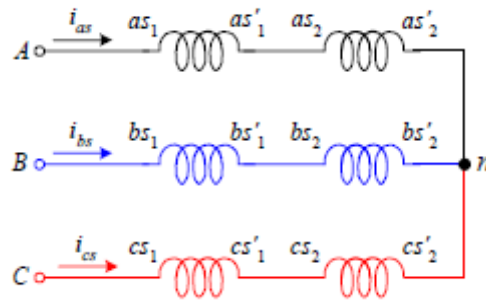


**Σχήμα 10:** Παραγωγή του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου σε μια διπολική τριφασική μηχανή με θετική σειρά διαδοχής των φάσεων (ABC). Το μαγνητικό πεδίο εκτελεί μια πλήρη περιστροφή, με φορά αντίθετη των δεικτών του ρολογιού, σε κάθε περίοδο των ρευμάτων

Η δημιουργία του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου γίνεται φανερή από το σχήμα 10. Η θετική φορά των ρευμάτων σε καθένα από τα τρία τυλίγματα του στάτη, αντιστοιχεί σ' εκείνη του σχήματος 6. Κάθε τύλιγμα από τη ροή του αντίστοιχου ρεύματος παράγει ένα μαγνητικό πεδίο, η θετική φορά του οποίου (βόρειος πόλος) φαίνεται στο σχήμα 10 και είναι ίδια μ' εκείνη στο σχήμα 6. Στο σχήμα 10 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 εξίσωση 8. Αν η σειρά διαδοχής φάσης των ρευμάτων αντιστραφεί, τότε θα αντιστραφεί και η φορά περιστροφής του μαγνητικού πεδίου (ωρολογιακή).





**Σχήμα 11: 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  $90^\circ$ . Η ΜΕΔ που αναπτύσσεται στο διάκενο των μηχανών με  $P$  πόλους, ορίζεται με αντίστοιχο τρόπο από τη σχέση

$$ME\Delta_s = \frac{N_s}{P} \frac{3}{2} \cdot I_{ms} \cos \left\{ \omega_e t - \frac{P}{2} \phi_s \right\} \quad (1.12)$$

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.

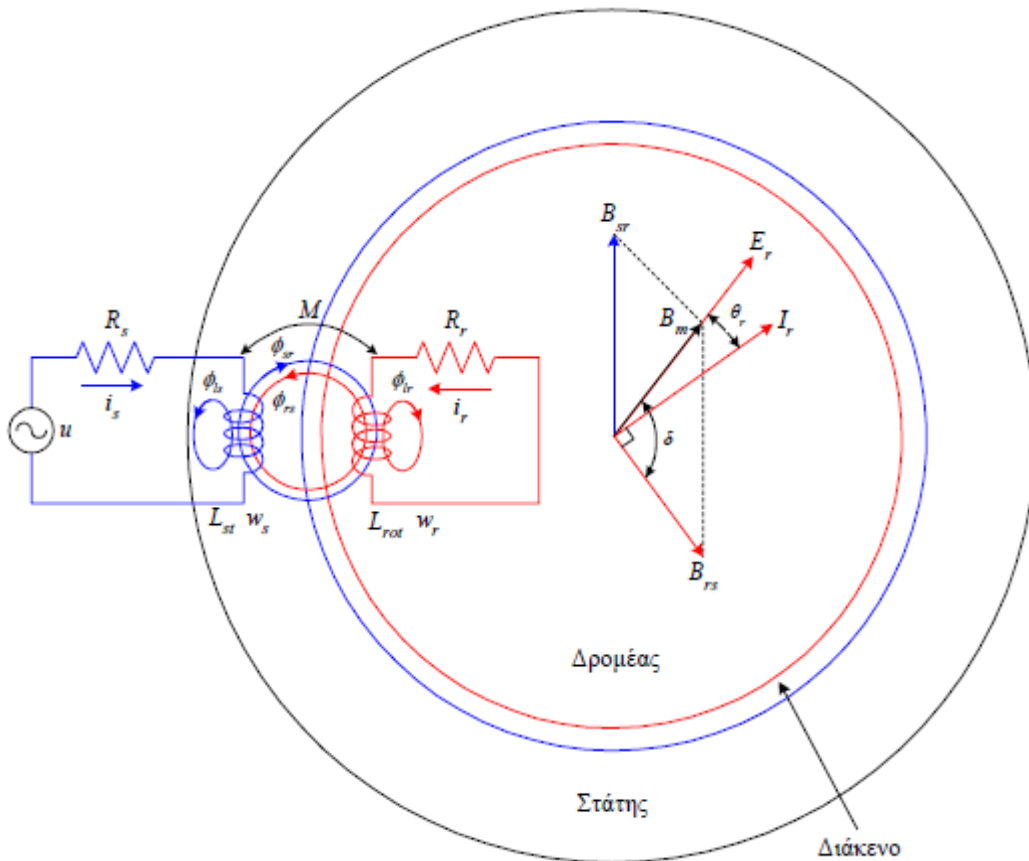
### 1.6 Ηλεκτρομαγνητική δομή του επαγωγικού κινητήρα

Ο επαγωγικός κινητήρας έχει στο στάτη ένα συμμετρικό τριφασικό τύλιγμα, με ωμική αντίσταση  $R_s$ , αυτεπαγωγή  $L_{st}$  και ισοδύναμο αριθμό σπειρών  $ws$  ανά φάση (σχήμα 12). 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

$$\phi_s = \phi_{ls} + \phi_{sr} \quad (1.13)$$

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.



Σχήμα 12: Ηλεκτρομαγνητική δομή του επαγωγικού κινητήρα

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.6 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.

Η συνιστώσα  $\phi_{lr}$  αντιπροσωπεύει τη ροή σκέδασης. Έτσι, ισχύει

$$\phi_r = \phi_{lr} + \phi_{rs} \quad (1.14)$$

Το διανυσματικό διάγραμμα των παραπάνω μεγεθών εικονίζεται στο Σχ.6. Η ολική μαγνητική ροή στο διάκενο του κινητήρα  $\phi_m$ , είναι ίση με το διανυσματικό άθροισμα των κοινών ροών του στάτη και του δρομέα

$$\phi_m = \phi_{sr} + \phi_{rs} \quad (1.15)$$

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

$$T_e = C_1 (B_{sr} \cdot B_{rs}) \quad (1.16)$$

ή αντίστοιχα των πεδίων

$$T_e = C_2 (B_m \cdot B_{rs}) \quad (1.17)$$

$$T_e = C_T B_m B_{rs} \sin(\delta) = C_T B_m B_{rs} \cos(\theta_r) \quad (1.18)$$

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)*.

## 1.7 Η ολίσθηση

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 εξίσωση 16.

Η ταχύτητα του στρεφόμενου πεδίου ονομάζεται σύγχρονη ταχύτητα  $n_s$  και ορίζεται από την παρακάτω σχέση σε rpm

$$n_s = \frac{60 \cdot f_e}{P/2} = \frac{120 \cdot f_e}{P} \quad (1.19)$$

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

$$n_{slip} = n_s - n_r \quad (1.20)$$

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

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \cdot 100 \quad (1.21)$$

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 (1.21) προκύπτει η παρακάτω σχέση της ταχύτητας του κινητήρα, ως συνάρτηση της σύγχρονης ταχύτητας και της ολίσθησης

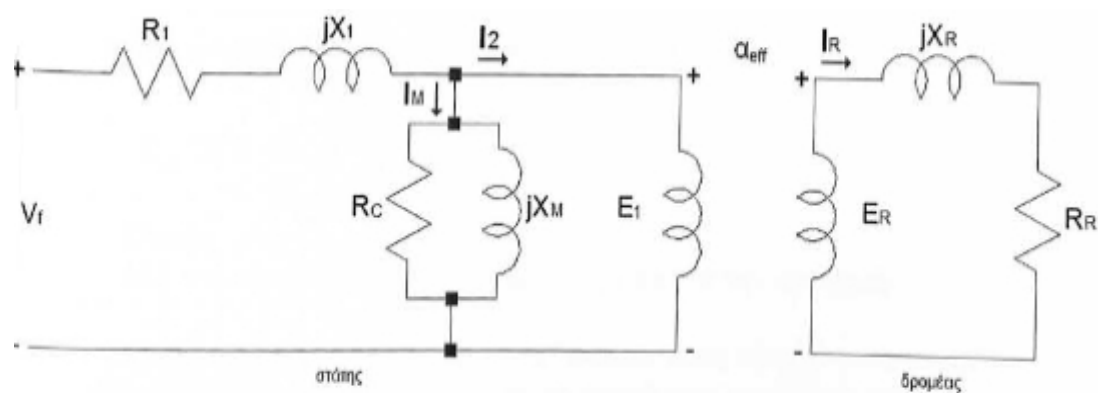
$$n_r = (1-s)n_s \quad (1.22)$$

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

### **1.8 Ισοδύναμο κύκλωμα 3φ ασύγχρονου κινητήρα**

Για την εξαγωγή του ισοδύναμου κυκλώματος ενός επαγωγικού κινητήρα, λαμβάνεται υπόψη ότι η λειτουργία του είναι όμοια με αυτή ενός μετασχηματιστή (όχι, όμως, πανομοιότυπη, αφού η συχνότητα της τάσης στο δρομέα διαφέρει από αυτή στο στάτη). Έτσι, το τύλιγμα του στάτη μπορεί να θεωρηθεί ως το πρωτεύον

τύλιγμα ενός μετασχηματιστή με αντίσταση  $R_1$  η οποία αντικατοπτρίζει τις θερμικές απώλειες στους αγωγούς του αντίστοιχου τριφασικού τυλίγματος. Σημειώνεται πως εξαιτίας της παρουσίας του διακένου, η σύζευξη μεταξύ των δύο επιμέρους κυκλωμάτων στην περίπτωση του επαγωγικού κινητήρα (δηλ. του στάτη και του δρομέα) δεν είναι τόσο καλή, όσο στην περίπτωση ενός καλά σχεδιασμένου μετασχηματιστή. Αυτό συμβαίνει διότι η συνολική ροή που δημιουργείται από το κύκλωμα του στάτη μπορεί να αναλυθεί σε δύο μέρη: σε αυτό το τμήμα της ροής που σχετίζεται με το κύκλωμα του δρομέα (αμοιβαία ροή) και στη ροή σκέδασης, η οποία παριστάνεται μέσω της αντίδρασης  $X_1$ . Επιπλέον, το  $I_M$  είναι το ρεύμα μαγνήτισης (η αιτία ανάπτυξης της μαγνητικής ροής), στο οποίο αντιστοιχίζεται η αντίδραση  $X_M$ . Για το ρεύμα απωλειών του σιδηρομαγνητικού υλικού εισάγεται η ωμική αντίσταση  $R_c$ , περιγράφοντας τις απώλειες υστέρησης και δινορρευμάτων. Η εσωτερική τάση  $E_1$  σχετίζεται με την τάση  $E_R$  που επάγεται στο δρομέα μέσω κάποιο λόγο μετασχηματισμού  $\alpha_{eff}$ . Προφανώς η  $E_R$  είναι αυτή που προκαλεί την κυκλοφορία ηλεκτρικού ρεύματος στο κύκλωμα του δρομέα.



**Σχήμα 13: αρχικό μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα κινητήρα επαγωγής**

Όπου:

$R_1$ = η ωμική αντίσταση ανα φάση του στάτη ( $\Omega$ )

$X_1$ = η επαγωγική αντίδραση ανα φάση του στάτη ( $\Omega$ )

$R_c$ = η ωμική αντίσταση μαγνήτισης ανα φάση του στάτη ( $\Omega$ )

$X_M$ = η επαγωγική αντίδραση μαγνήτισης ανα φάση του στάτη ( $\Omega$ )



$E_I$  = η εσωτερική τάση (ΑΗΕΔ) ανα φάση του στάτη (V)

$E_R$  = η εσωτερική τάση (ΑΗΕΔ) ανα φάση του δρομέα (V)

$X_R$  = η επαγωγική αντίδραση ανα φάση του δρομέα (Ω)

$R_R$  = η ωμική αντίσταση ανα φάση του δρομέα (Ω)

$V_\Phi$  = η εφαρμοζόμενη τάση ανα φάση του στάτη (V)

$\alpha_{\text{eff}}$  = λόγος μετασχηματισμού

Η τάση που επάγεται στους αγωγούς του δρομέα εξαρτάται άμεσα από τη σχετική ταχύτητά του ως προς το πεδίο του στάτη. Όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα τόσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της επαγόμενης τάσης. Αν ο δρομέας είναι ακινητοποιημένος (κατά την εκκίνηση του κινητήρα), η τάση στα τυλίγματα του είναι η μέγιστη δυνατή. Αντίθετα όταν ο δρομέας περιστρέφεται με τη σύγχρονη ταχύτητα, η τάση στους αγωγούς του είναι μηδενική.

Για οποιαδήποτε άλλη τιμή της ταχύτητας περιστροφής η επαγόμενη τάση είναι ανάλογη της ολίσθησης.

$$E_R = s \cdot E_{R0} \quad (1.23)$$

Όπου:  $E_{R0}$  = η τάση στα τυλίγματα του δρομέα κατά την εκκίνηση

Όσον αφορά την αντίδραση του δρομέα, αυτή εξαρτάται τόσο από την αυτεπαγωγή του, όσο και από τη συχνότητα του ρεύματος που τη διαρρέει. Από τη σχέση

$\omega_R = s \cdot \omega_e$  η αντίδραση του δρομέα μπορεί να εκφραστεί ως:

$$X_R = \omega_R \cdot L_R = s \cdot \omega_e \cdot L_r = s \cdot X_{R0} \quad (1.24)$$

Όπου  $X_{R0}$  η αντίδραση του δρομέα όταν αυτός είναι ακινητοποιημένος.

Για το ρεύμα του δρομέα έχουμε:

$$I_R = \frac{E_R}{R_R + jX_R} \rightarrow I_R = \frac{E_{R0}}{\frac{R_R}{s} + jX_{R0}} \quad (1.25)$$

Το κύκλωμα μπορεί να θεωρηθεί ότι τροφοδοτείται από μια σταθερή πηγή τάσης  $E_{R0}$  και περιλαμβάνει μια ισοδύναμη μεταβλητή σύνθετη αντίσταση  $R_R/s=jX_{R0}$

Όταν η ολίσθηση είναι μικρή, η ωμική αντίσταση λαμβάνει μεγάλες τιμές και το ρεύμα μεταβάλλεται γραμμικά με την ολίσθηση.

Αντίθετα για μεγάλες τιμές ολίσθησης το ρεύμα προσεγγίζει μια σταθερή τιμή. Αν συνυπολογίσουμε το λόγο μετασχηματισμού  $a_{eff}$ , έχουμε :

- Η τάση  $E_{R0}$  του δρομέα ανηγμένη στη τάση  $E_1$  στη πλευρά του στάτη

$$E_1 = a_{eff} \cdot E_{R0} \quad (1.26)$$

- Το ρεύμα  $I_R$  του δρομέα ανηγμένο στο ρεύμα  $I_2$  του στάτη

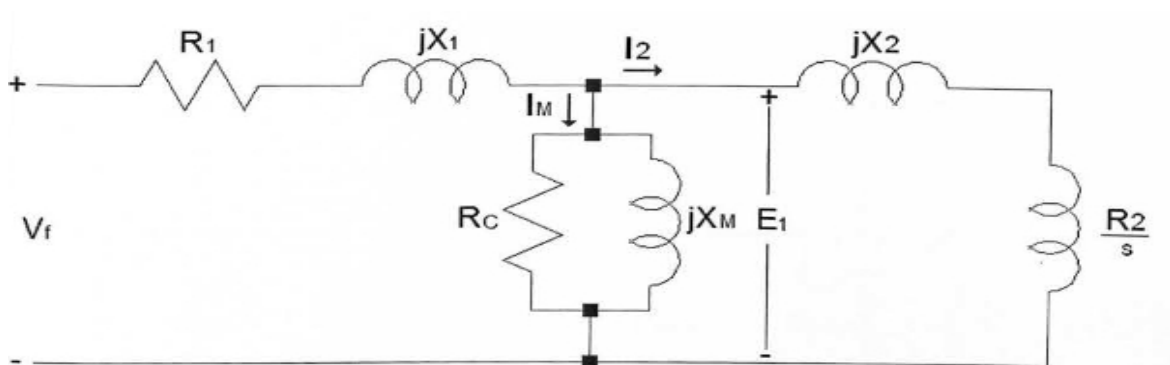
$$I_2 = \frac{I_R}{a_{eff}} \quad (1.27)$$

- Η συνολική σύνθετη αντίσταση  $Z_R = (R_R/s)+jX_{R0}$  του δρομέα μπορεί να ανηχθεί στη συνολική αντίσταση  $Z_2$  του δρομέα ανηγμένη στη πλευρά του στάτη

$$Z_2 = a_{eff}^2 \left( \frac{R_R}{s} + jX_{R0} \right) \quad (1.28)$$

Ορίζοντας  $R_2 = a_{eff}^2 \cdot R_R$  και  $X_2 = a_{eff}^2 \cdot X_{R0}$  και αντικαθιστώντας στην Εξίσωση 25 έχουμε:

$$Z_2 = \frac{R_2}{s} + jX_2 \quad (1.29)$$



Σχήμα 14: τελικό ισοδύναμο κύκλωμα κινητήρα επαγωγής ανηγμένο στο στάτη

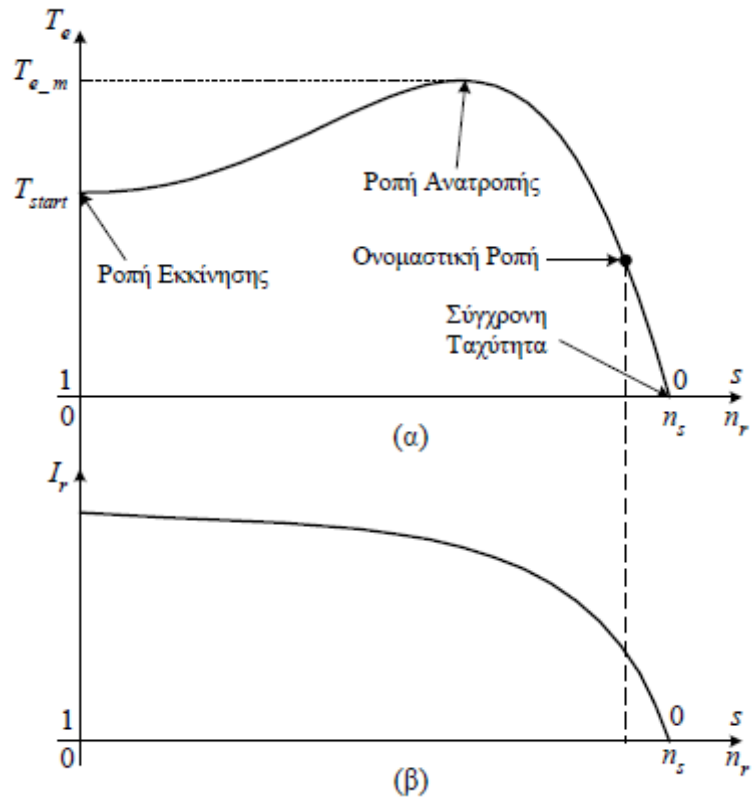
## 1.9 Χαρακτηριστική ταχύτητας-ροπής

Η ροπή που αναπτύσσει ένας επαγωγικός κινητήρας μεταβάλλεται με την ταχύτητα, με τον τρόπο που φαίνεται στο σχήμα 15α. Προκειμένου να ερμηνεύσουμε τη χαρακτηριστική αυτή, θεωρούμε ότι ο κινητήρας λειτουργεί αρχικά χωρίς φορτίο (σχήμα 16α). 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  $I_m$ . 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.

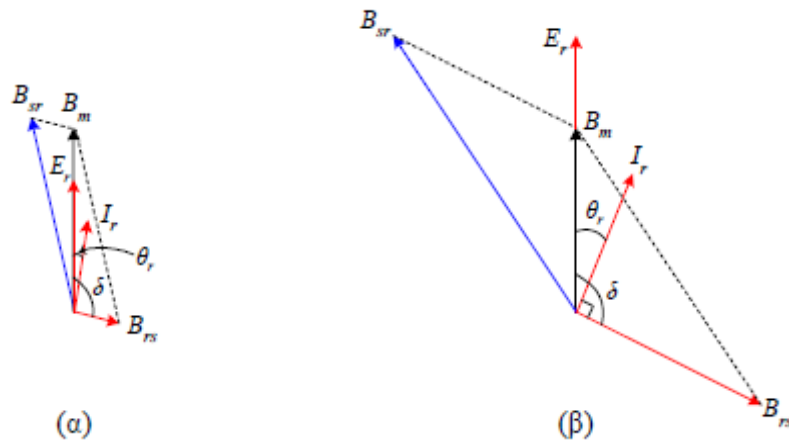
Επειδή η συχνότητα των επαγόμενων τάσεων είναι μικρή, η αντίδραση του δρομέα είναι πολύ μικρή σε σχέση με την ωμική του αντίσταση και η διαφορά φάσης μεταξύ  $I_r$  και  $E_r$  είναι ελάχιστη. Μολονότι το ρεύμα του δρομέα είναι πολύ μικρό στη λειτουργία χωρίς φορτίο, το ρεύμα τροφοδοσίας του στάτη είναι αρκετά μεγάλο, καθώς παρέχει το ρεύμα μαγνήτισης. Το μέτρο της αναπτυσσόμενης ροπής δίνεται από τη σχέση

$$T_e = C_T B_m B_{rs} \sin\delta \quad (1.30)$$

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



**Σχήμα 15: (α) Τυπική χαρακτηριστική ροπής–ταχύτητας των επαγωγικών κινητήρων και (β) μεταβολή του ρεύματος του δρομέα με την ταχύτητα**



**Σχήμα 16: Μεταβολή των μαγνητικών πεδίων όταν ο επαγωγικός κινητήρας λειτουργεί (α) χωρίς φορτίο και (β) με υψηλό φορτίο**

Όταν η ροπή του φορτίου αυξηθεί στην ονομαστική τιμή, η ταχύτητα του κινητήρα μειώνεται και η ολίσθηση αυξάνεται. 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.16β). Η αντίδραση του δρομέα  $sX_{lr}$  είναι τώρα παραπλήσια της ωμικής του αντίστασης  $R_r$ . Η αύξηση του πεδίου  $B_{rs}$  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  $B_{rs}$  υπερिσχύει της γωνίας  $\delta$ , μέχρι μια τιμή του φορτίου, η οποία αντιστοιχεί στη μέγιστη ροπή (σχήμα 15α). 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 στην σχήμα 15β. 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.

## 1.10 Η ροή ενέργειας στους επαγωγικούς κινητήρες

Το ποσό ισχύος  $P_{in} = \sqrt{3} V_{\text{Πολ-}r\text{ms}} I_{r\text{ms}} \cos(\theta_g)$  που θα μπει στο στάτη της μηχανής θα μειωθεί. Σαν πρώτη αιτία της μείωσης είναι η απώλεια ενέργειας λόγω των θερμικών απωλειών στα τυλίγματα του στάτη, οι οποίες οφείλονται στον χαλκό που χρησιμοποιούμε για του αγωγούς του ρεύματος. Θα τις συμβολίσουμε ως  $P_{SCL}$ .

Έπειτα κάποιο ποσό ενέργειας χάνεται εξαιτίας των απωλειών υστέρησης και των δινορρευμάτων που αναπτύσσονται στον στάτη του κινητήρα. Θα τις ονομάσουμε  $P_{core}$ . Η ισχύς που απομένει  $P_{in} - P_{SCL} - P_{core}$  θα περάσει το διάκενο της μηχανής και θα μεταφερθεί στο δρομέα της. Θα την ονομάσουμε ισχύ διακένου και θα συμβολιστεί ως  $P_g$  ( $P_g = P_{in} - P_{SCL} - P_{core}$ ).

Ένα μέρος της ισχύος  $P_g$  που μεταφέρεται στον δρομέα του κινητήρα θα χαθεί εξαιτίας των θερμικών απωλειών στα τυλίγματα του ρότορα, οι οποίες οφείλονται στον χαλκό που χρησιμοποιούμε για του αγωγούς του ρεύματος. Θα τις συμβολίσουμε ως  $P_{RCL}$  και η απομένουσα ισχύ  $P_{conv} = P_g - P_{RCL}$  (η οποία ονομάζεται αναπτυσσόμενη μηχανική ισχύς) θα μετατραπεί από ηλεκτρική σε μηχανική μορφή. Από αυτή την ισχύ θα έχουμε κάποιες απώλειες τριβής λόγω των τριβόμενων επιφανειών των εξαρτημάτων της μηχανής και κάποιες απώλειες εξαερισμού, γιατί πρέπει να ψύχεται η μηχανή για να μην υπερθερμανθεί. Θα τις συμβολίσουμε ως  $P_{F\&W}$ .

Επίσης υπάρχουν και οι κατανεμημένες απώλειες  $P_{misc}$ . Στον ρότορα θα υπάρχουν και απώλειες πυρήνα όμως είναι πολύ μικρές σε σχέση με αυτές του στάτη και θα αγνοηθούν. Οι  $P_{F\&W}$  και  $P_{misc}$  οφείλονται στην περιστροφή του κινητήρα και ονομάζονται απώλειες περιστροφής

$P_{ROTATIONAL}$  όπου  $P_{ROTATIONAL} = P_{F\&W} + P_{misc}$ .

Έτσι λοιπόν η ισχύς που θα εξέλθει από τον κινητήρα θα είναι η

$$P_{out} = P_{conv} - P_{ROTATIONAL} = P_g - P_{RCL} - P_{ROTATIONAL} = P_{in} - P_{SCL} - P_{core} - P_{RCL} - P_{ROTATIONAL} = P_{in} - P_{SCL} - P_{core} - P_{RCL} - P_{F\&W} + P_{misc}$$

Δουλεύοντας στο τελικό ανά φάση ισοδύναμο κύκλωμα παρατηρούμε ότι το ποσό ενέργειας που θα μπει στον στάτη της μηχανής θα μειωθεί. Η ισχύς που θα

περάσει το διάκενο της μηχανής  $P_g$  θα μεταφερθεί στο δρομέα της και θα καταναλωθεί εξολοκλήρου από την ωμική αντίσταση  $(R_2/s)$ , διότι είναι ο μόνος καταναλωτής ενέργειας. Δηλαδή  $P_g = 3P_{R_2/s}$  διότι έχουμε τρεις φάσεις.

Με  $P_g = 3P_{R_2/s} \Rightarrow P_g = 3R_2/s (I_{2rms})^2$  και  $P_{RCL} = 3P_{R_r} = 3/2R_2I_2^2 = 3R_2(I_{2rms})^2$  θα υπολογίσουμε την αναπτυσσόμενη μηχανική ισχύ ( $P_{conv}$ ) διότι δίνεται από τον τύπο  $P_{conv} = P_g - P_{RCL}$ .

Δηλαδή  $P_{conv} = P_g - P_{RCL} = 3R_2/s (I_{2rms})^2 - 3R_2(I_{2rms})^2 = 3R_2(I_{2rms})^2((1/s) - 1) = 3R_2(I_{2rms})^2((1-s)/s) = P_{RCL} ((1-s)/s) \Rightarrow sP_{conv} = P_{RCL} - sP_{RCL} \Rightarrow sP_{conv} + sP_{RCL} = P_{RCL} \Rightarrow s(P_{conv} + P_{RCL}) = P_{RCL} \Rightarrow sP_g = P_{RCL}$ .

Η αναπτυσσόμενη μηχανική ισχύ ( $P_{conv}$ ) μπορεί να εκφραστεί ως  $P_{conv} = P_g - P_{RCL} = P_g - sP_{AG} = (1-s)P_g \Rightarrow P_{conv} = (1-s)P_g$ .

Τελικά αν οι απώλειες τριβής, εξαερισμού και οι κατανεμημένες είναι γνωστές μπορούμε να υπολογίσουμε την ισχύ εξόδου του κινητήρα  $P_{out} = P_{conv} - P_{F\&W} - P_{misc}$ . Η αναπτυσσόμενη μηχανική ισχύ  $P_{conv} = 3R_2(I_{2rms})^2((1-s)/s) = 3(I_{2rms})^2R_2((1-s)/s)$  είναι ανάλογη με την ισχύ που καταναλώνει η αντίσταση  $R_{conv} = R_2((1-s)/s) = (R_2/s) - (sR_2/s) = (R_2/s) - R_2$  η οποία διαρρέεται από τριφασικό ρεύμα πλάτους  $I_2$ .

## 1.11 Κινητήρας με βραχυκυκλωμένο δρομέα

Όπως είναι γνωστό, οι ασύγχρονοι ηλεκτροκινητήρες βραχυκυκλωμένου δρομέα είναι οι πλέον διαδεδομένοι και οι απλούστεροι ηλεκτροκινητήρες. Τα μεγάλα πλεονεκτήματα των κινητήρων αυτών έναντι όλων των άλλων τύπων είναι το χαμηλό κόστος αγοράς και συντήρησής τους.

Λόγω των παραπάνω τα τελευταία χρόνια έγιναν προσπάθειες ώστε να καταστεί εφικτή, αποτελεσματική και πρακτικά εφαρμόσιμη η ρύθμιση των στροφών αυτών των κινητήρων. Τα αποτελέσματα είναι εντυπωσιακά. Με τη χρήση των αντιστροφών (inverters) όχι μόνο επιτευχθεί η ρύθμιση των στροφών των ασύγχρονων κινητήρων αλλά ταυτοχρόνως βελτιώθηκαν ή και εξαφανίσθηκαν τα μειονεκτήματά τους.

Πράγματι χρησιμοποιώντας ένα αντιστροφέα επιτυγχάνουμε εκτός από την

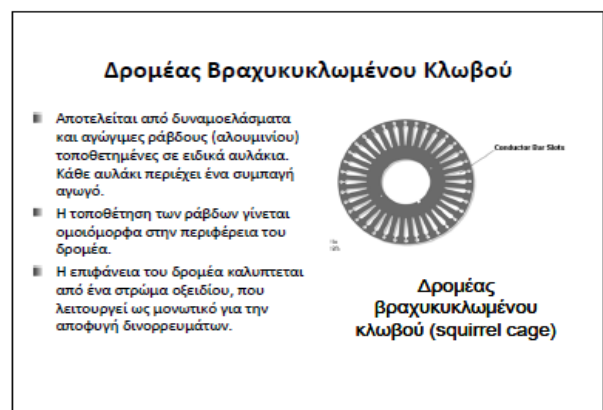
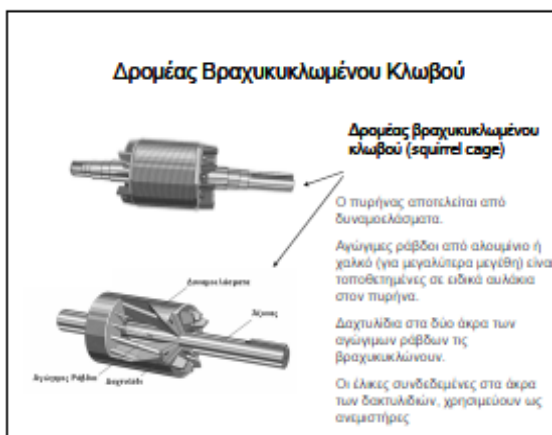


πλήρη ρύθμιση των στροφών και τα εξής επίσης σημαντικά:

- Ομαλή εκκίνηση και μάλιστα ρυθμιζόμενη με μικρό ρεύμα εκκίνησης
- Ομαλή πέδηση
- Αύξηση της ροπής εκκινήσεως
- Δυνατότητα αυτόματης ή προγραμματιζόμενης ρύθμισης
- Πλήρη έλεγχο των στροφών
- Εξοικονόμηση ενέργειας
- Δυνατότητα αλλαγής φοράς περιστροφής χωρίς επιπλέον διακόπτες
- Αυξημένη προστασία του κινητήρα

Τέλος με τη χρήση των ηλεκτρονικών ρυθμιστών στροφών (inverter) μπορούμε, χρησιμοποιώντας ως πηγή τροφοδοσίας το δίκτυο των 50 Hz, να έχουμε κινητήρες βραχυκυκλωμένου δρομέα με ταχύτητα περιστροφής άνω των 3000 στρ/λεπτό.

Η απαρίθμηση αυτών και μόνο των πλεονεκτημάτων, τα οποία μέχρι προ ολίγων ετών εθεωρούντο φαντασία, καταδεικνύει την μεγάλη υπεροχή της ρυθμίσεως των στροφών μέσω αντιστροφένων (inverter) έναντι όλων των άλλων παλαιών μεθόδων (π.χ. μηχανική ρύθμιση). Τέλος η χρήση αντιστροφένων καθιστά τους κινητήρες βραχυκυκλωμένου δρομέα πλεονεκτικούς και έναντι άλλων τύπων κινητήρων π.χ. κινητήρες δακτυλιοφόρου δρομέα - κινητήρες συνεχούς ρεύματος ακόμα και σε ειδικές εφαρμογές.



Σχήμα 17

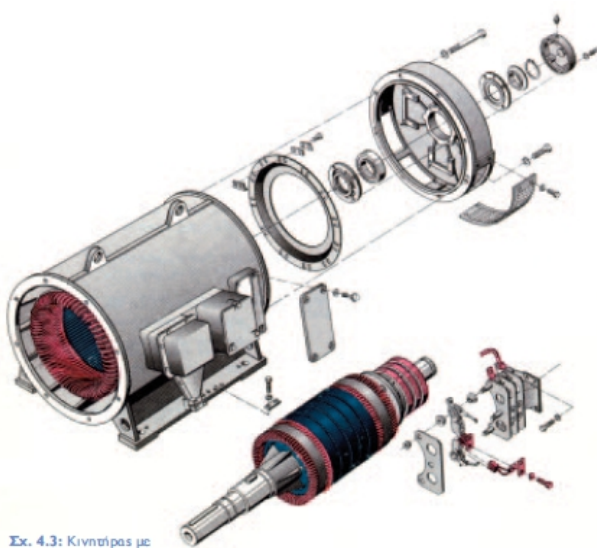
## 1.12 Κινητήρας με δακτυλιοφόρο δρομέα

Ο στάτης του είναι όπως ο στάτης του κινητήρα βραχυκυκλωμένου κλωβού με τριφασική περιέλιξη. Ο δρομέας είναι κατασκευασμένος όπως ο στάτης, έχει δηλαδή τριφασική περιέλιξη με κανονική μόνωση, τοποθετημένη στα αυλάκια του δρομέα. Η περιέλιξη του δρομέα έχει σχεδόν πάντα συνδεσμολογία “Υ”. Ο αστέρας είναι συγκολλημένος και τα άλλα τρία άκρα της περιέλιξης καταλήγουν στους τρεις δακτύλιους ολίσθησης που αποτελούνται από κράματα ορείχαλκου. Επάνω ολισθαίνουν οι ψύκτρες (που είναι τοποθετημένες στις ψυκτροθήκες) οι οποίες είναι συνδεδεμένες με τα άκρα U2, V2, W2, στο ακροκιβώτιο του κινητήρα.

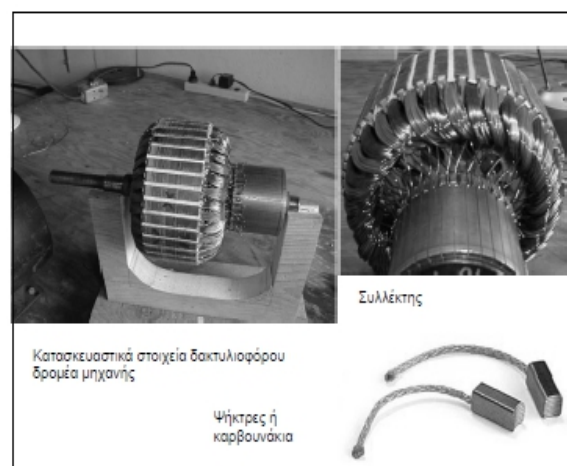
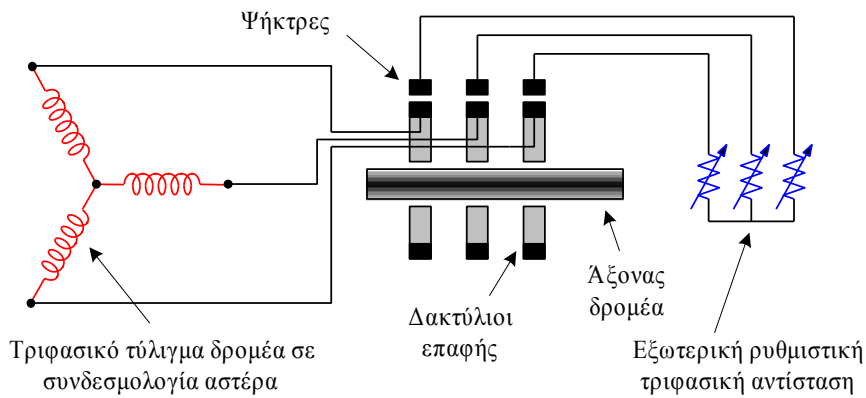
Τα άκρα αυτά συνδέονται με μια τριφασική, βαθμωτή, εξωτερική αντίσταση με τη βοήθεια της οποίας καθιστάται δυνατή η ρύθμιση της αντίστασης στα κυκλώματα του δρομέα.

Για την εκκίνηση που έχει μικρή χρονική διάρκεια, χρησιμοποιείται η ελαιόψυκτη αντίσταση εκκίνησης, ενώ για τη ρύθμιση της περιστροφικής ταχύτητας στη συνεχή λειτουργία χρησιμοποιείται η αερόψυκτη αντίσταση ελέγχου.

Σε δύσκολες εκκινήσεις, στις οποίες απαιτείται μικρό ρεύμα εκκίνησης και μεγάλη ροπή, απαιτήσεις που δεν μπορούν να ικανοποιηθούν με βραχυκυκλωμένο κλωβό και διακόπτη Υ/Δ, χρησιμοποιείται ο ασύγχρονος κινητήρας δακτυλιοφόρου δρομέα.



Σχ. 4.3: Κινητήρας με δακτυλιοφόρο δρομέα.



**Σχήμα 18: Κινήτηρας δακτυλιοφόρου δρομέα**

### 1.13 Κατηγορίες ασύγχρονων κινητήρων κλωβού

Ανάλογα με τα χαρακτηριστικά λειτουργίας, οι ασύγχρονοι κινητήρες κλωβού **κατηγοριοποιούνται** σε τέσσερις κατηγορίες (σύμφωνα με την Ένωση Κατασκευαστών Ηλεκτρολογικού Εξοπλισμού NEMA των ΗΠΑ).

#### 1.13.1 Κατηγορία A

Αποτελούν τη βασική κατασκευή για κάτω από 7,5 HP πάνω από 200 HP. Έχουν χρήση σε ηλεκτροκίνηση με σταθερό αριθμό στροφών και χαμηλή ροπή εκκίνησης (π.χ. ανεμιστήρες, φυσητήρες, αντλίες, εργαλειομηχανές).

Η ολίσθηση πλήρους φορτίου είναι χαμηλή, ενώ η απόδοση στο πλήρες φορτίο είναι υψηλή. Το ρεύμα εκκίνησης ποικίλει από 500 έως 800% του ρεύματος πλήρους φορτίου (εκκίνηση με ονομαστική τάση)

### 1.13.2 Κατηγορία B

Κατασκευάζεται για ισχύ μεταξύ 7,5 και 200 HP

Έχουν την ίδια περίπου ροπή εκκίνησης με την κατηγορία A.

Η ολίσθηση πλήρους φορτίου είναι χαμηλή, ενώ η απόδοση στο πλήρες φορτίο είναι υψηλή. Έχουν τις ίδιες εφαρμογές όπως και στην κατηγορία A, με τη διαφορά ότι το ρεύμα εκκίνησης είναι περίπου το 75% αυτού που απαιτείται στην κατηγορία A.

### 1.13.3 Κατηγορία C

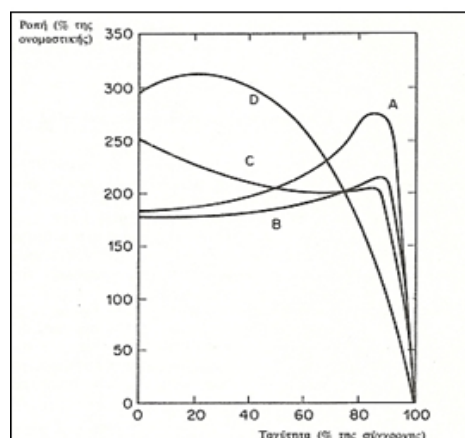
Κατασκευάζονται για ισχύ μεταξύ των 10 έως 300 HP

Έχουν υψηλή ροπή εκκίνησης με χαμηλό ρεύμα εκκίνησης

Η ολίσθηση είναι υψηλότερη εκείνης των κατηγοριών A & B σε κανονική λειτουργία (επομένως έχουν χαμηλότερη απόδοση) Βρίσκουν εφαρμογές σε συμπιεστές και μεταφορικές ταινίες.

### 1.13.4 Κατηγορία D

Κατασκευάζονται για ισχύ από 5 έως μερικές εκατοντάδες HP. Αναπτύσσουν πολύ μεγάλη ροπή εκκίνησης με χαμηλό ρεύμα εκκίνησης. Σε λειτουργία πλήρους φορτίου (ονομαστική ροπή) η ολίσθηση είναι μεγάλη (από 7 έως 11%) συνεπώς έχουν χαμηλή απόδοση λειτουργίας. Βρίσκουν εφαρμογή κυρίως σε φορτία που απαιτούν υψηλή επιτάχυνση και φορτία κρούσεων (π.χ. κρουστικές πρέσες). Η μέγιστη ροπή αναπτύσσεται σε ολίσθηση 50 έως 100%.



Σχήμα 19

# **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2ο**

## **ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ**

### **2.1 Ηλεκτρονόμοι (Ρελέ) ή τηλεχειριζόμενοι διακόπτες**

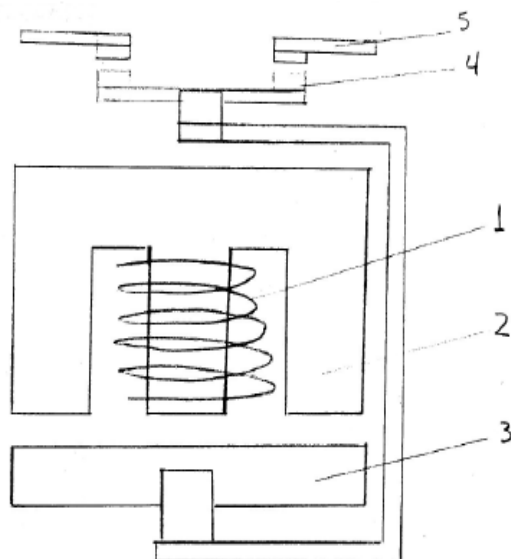
Οι ηλεκτρονόμοι (ΡΕΛΕ) αποτελούν βασικό στοιχείο στα κυκλώματα του κλασσικού αυτοματισμού.

Με την χρήση των ηλεκτρονόμων έχουμε την δυνατότητα να συνδέουμε και να αποσυνδέουμε μεγάλα φορτία στα ελεγχόμενα κυκλώματα (κυκλώματα ισχύος), όχι με άμεσο τρόπο, αλλά έμμεσα με τον χειρισμό βοηθητικών κυκλωμάτων (ή κυκλωμάτων αυτοματισμού), τα οποία μπορούν να λειτουργούν με τάση ανεξάρτητη της τάσεως λειτουργίας των ελεγχόμενων φορτίων.

Αυτό μας παρέχει την δυνατότητα να ελέγχουμε μεγάλα φορτία από απόσταση (τηλεχειρισμός) και με συνθήκες υψηλής ασφάλειας, αφού μπορούμε να επιλέξουμε μία χαμηλή τάση, ως τάση λειτουργίας του κυκλώματος αυτοματισμού (π.χ. 42 V).

### **2.2 Λειτουργία ηλεκτρονόμου**

Όταν το πηνίο (1) του ηλεκτρονόμου βρεθεί υπό τάση, τότε δημιουργείται γύρω από αυτό μαγνητικό πεδίο. Η σιδερένια μάζα επί της οποίας έχει τοποθετηθεί το πηνίο, ευρισκόμενη εντός του μαγνητικού πεδίου γίνεται μαγνήτης (2) και αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την έλξη του οπλισμού (3) του ηλεκτρονόμου προς τον μαγνήτη. Αυτή η κίνηση του οπλισμού μεταφέρεται με κατάλληλη μηχανική σύνδεση στις κινητές επαφές (4) του ηλεκτρονόμου, η κίνηση των οποίων έχει σαν αποτέλεσμα την αγωγή σύνδεση των σταθερών ή κύριων επαφών Α και Β (5) μέσω των οποίων τροφοδοτείται το ελεγχόμενο φορτίο.



Σχήμα 20: Δομή ηλεκτρονόμου

### 2.3 Θερμικά

Κατά τη λειτουργία των κινητήρων το ρεύμα, το οποίο διαρρέει τους αγωγούς τροφοδοσίας σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας, είναι ίσο με το ρεύμα λειτουργίας των κινητήρων. Υπάρχουν όμως περιπτώσεις κατά τις οποίες, είτε για μηχανικούς λόγους (αυξημένες τριβές, υπερβάλλον φορτίο κ.λ.π.), είτε λόγω βλάβης των τυλιγμάτων του κινητήρα το ρεύμα το οποίο θα διαρρέει το κύκλωμα είναι μεγαλύτερο του ρεύματος λειτουργίας του κινητήρα.

Αυτή η κατάσταση ονομάζεται υπερφόρτιση ή υπερένταση και ασφαλώς πρέπει να ελέγχεται και να διακόπτεται το κύκλωμα τροφοδοσίας του κινητήρα, διαφορετικά θα δημιουργηθούν βλάβες τόσο στον κινητήρα όσο και στο κύκλωμα τροφοδοσίας του.

Στο σημείο αυτό πρέπει να τονίσουμε, ότι οι ασφάλειες βραδείας τήξεως προστατεύουν το κύκλωμα τροφοδοσίας του κινητήρα από βραχυκυκλώματα δεν παρέχουν προστασία έναντι υπερεντάσεων, διότι όπως προκύπτει από τις χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας αυτών των ασφαλειών, ο χρόνος που θα χρειαστεί είναι μεγάλος ιδιαίτερα για μικρές υπερεντάσεις.

Για την προστασία των κινητήρων από υπερεντάσεις χρησιμοποιούμε στα

κυκλώματα τροφοδοσίας αυτών ειδικούς μηχανισμούς που ονομάζονται θερμικά.

## **2.4 Χρονικά**

Σε πολλές περιπτώσεις όταν σχεδιάζουμε ένα κύκλωμα αυτοματισμού είναι απαραίτητο να εξασφαλίσουμε την δυνατότητα ελέγχου της τροφοδοσίας ενός ή περισσοτέρων στοιχείων του κυκλώματος ύστερα από ένα ορισμένο ελεγχόμενο χρόνο ή αντίθετα της διακοπής τροφοδοσίας ενός ή περισσοτέρων στοιχείων του κυκλώματος ύστερα από ένα ορισμένο ελεγχόμενο χρόνο.

Τη δυνατότητα αυτή μας την προσφέρουν ειδικοί μηχανισμοί, οι οποίοι ονομάζονται χρονικά. Τα χρονικά αποτελούνται από ένα πηνίο, το οποίο όταν βρεθεί υπό τάση, ελέγχει μέσω ενός ελατηριωτού ή πνευματικού μηχανισμού, την λειτουργία μίας μεταγωγικής επαφής, η οποία συνδέεται κατάλληλα στο κύκλωμα αυτοματισμού.

## **2.5 Εισαγωγή στα Ημιαγώγιμα στοιχεία ισχύος**

Με τον όρο «ηλεκτρονικά ισχύος» περιγράφεται μια ποικιλία εφαρμογών ημιαγωγικών στοιχείων για τον έλεγχο και την μετατροπή της ηλεκτρικής ισχύος (οι σχετικές διατάξεις δε, καλούνται και μετατροπείς ισχύος). Οι διατάξεις αυτές έχουν ιδιαίτερα πλεονεκτήματα σε σχέση με παλαιότερες ηλεκτρομηχανικής λογικής (π.χ. σύστημα Ward-Leonard) καθώς έχουν μικρότερο όγκο/βάρος/κόστος, υψηλότερη απόδοση, μεγαλύτερη ακρίβεια και ταχύτητα ελέγχου και μικρότερες απαιτήσεις συντήρησης. Από την άλλη παρουσιάζουν και συγκεκριμένα μειονεκτήματα με το κύριο να αφορά την εισαγωγή ανώτερων αρμονικών, γεγονός που έχει ποικίλα αρνητικά αποτελέσματα (αύξηση απωλειών, αύξηση άεργης ισχύος, ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές κ.α.).

Όσον αφορά την ιστορική διαδρομή, η αφετηρία θα πρέπει να αναζητηθεί πίσω στην ανάπτυξη του ανορθωτή ατμών υδραργύρου (1900), με ειδική αναφορά στην εφεύρεση του τρανζίστορ (1947).

Ουσιαστικά όμως η «επανάσταση» των ηλεκτρονικών ισχύος ξεκινά με την

εφεύρεση του θυρίστορ (thyristor) (1956). Τα θυρίστορ ήταν ο αδιαμφισβήτητος κυρίαρχος της αγοράς για σημαντικό χρονικό διάστημα. Έπρεπε να περάσουν πάνω από δύο δεκαετίες μέχρι την ανάπτυξη νέων στοιχείων που μπορούσαν να αμφισβητήσουν την πρωτοκαθεδρία τους, αρχικά σε περιορισμένες εφαρμογές και σταδιακά σε όλο και περισσότερες. Μια βασική κατηγοριοποίηση μας δίνει τρεις διαφορετικές οικογένειες στοιχείων:

- (1) τις διόδους ισχύος
- (2) τα στοιχεία που ανήκουν στην οικογένεια των τρανζίστορ (BJT, MOSFET ισχύος, IGBT κ.α.)
- (3) τα στοιχεία που ανήκουν στην οικογένεια των θυρίστορ (SCR, GTO, IGCT κ.α.)

## 2.6 Διακοπτική λειτουργία

Θα πρέπει να γίνει μια βασική διευκρίνιση που αφορά την συμπεριφορά όλων των στοιχείων στα ηλεκτρονικά ισχύος. Σε αντίθεση με την συνήθη λογική στην μικροηλεκτρονική που αφορά κυρίως λειτουργία στην γραμμική περιοχή, στα ηλεκτρονικά ισχύος τα στοιχεία λειτουργούν ως ηλεκτρονικοί διακόπτες: βρίσκονται είτε σε κατάσταση αγωγής (ON) είτε σε κατάσταση αποκοπής (OFF). Για αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται και οι όροι ηλεκτρονικοί διακόπτες ή διακόπτες στερεάς κατάστασης (εφόσον εκτελούν διακοπτική λειτουργία αλλά δεν έχουν κινούμενα μέρη). Ένας βασικός διαχωρισμός βάσει του βαθμού ελέγχου δίνει επίσης τρεις βασικές κατηγορίες:

- (1) τα μη ελεγχόμενα στοιχεία (δίοδοι)
- (2) τα μερικώς ελεγχόμενα (SCR)
- (3) τα πλήρως ελεγχόμενα (GTO, MOSFET ισχύος, IGBT κ.α.).

Τα χαρακτηριστικά ενδιαφέροντος στους ηλεκτρονικούς διακόπτες ισχύος είναι τα γενικά χαρακτηριστικά που ενδιαφέρουν σε κάθε διακόπτη, δηλαδή η τάση που μπορεί να δεχθεί (ορθά ή ανάστροφα) χωρίς να καταρρεύσει, το μέγιστο ρεύμα αγωγής και αποκοπής, το ορθό και ανάστροφο ρεύμα διαρροής, οι χρόνοι απόκρισης, η μέγιστη δυνατή διακοπτική συχνότητα και η αντοχή σε απότομες μεταβολές τάσης



και ρεύματος.

## **2.7 Κυκλώματα προστασίας (snubbers)**

Για την προστασία των ηλεκτρονικών διακοπών χρησιμοποιούνται κυκλώματα προστασίας που είναι γνωστά με τον όρο snubbers. Τα κυκλώματα αυτά συνήθως αποτελούνται από παθητικά στοιχεία (αντιστάσεις, πυκνωτές, πηνία) και διόδους. Τα κυκλώματα προστασίας δεν εμπίπτουν αυστηρά στην περιοχή των ηλεκτρονικών ισχύος, πλην όμως στην πράξη η χρήση τους είναι συχνά απαραίτητη. Η ανάγκη χρήσης κυκλωμάτων προστασίας (καθώς και η πολυπλοκότητά τους) είναι ένα πρόσθετο στοιχείο αξιολόγησης των διατάξεων ηλεκτρονικών ισχύος. Γενικά, η χρήση των snubber μειώνει τις διακοπτικές απώλειες αλλά όχι τις συνολικές απώλειες (κάποιες από τις διακοπτικές απώλειες «μεταφέρονται» στα snubber).

## **2.8 Άλλες διατάξεις προστασίας**

Πέρα από τα κυκλώματα προστασίας, μια πρακτική υλοποίηση διατάξεων ηλεκτρονικών ισχύος μπορεί να περιλαμβάνει και άλλες διατάξεις προστασίας (θωράκιση για παρεμβολές, ασφάλειες προστασίας, συστήματα ψύξης κλπ).

## **2.9 Φίλτρα**

Ένα πρόσθετο στοιχείο αξιολόγησης των διατάξεων ηλεκτρονικών ισχύος είναι και τα απαιτούμενα φίλτρα. Όπως αναφέρθηκε στην παραπάνω παράγραφο, το κυριότερο μειονέκτημα των μετατροπέων ισχύος είναι οι ανεπιθύμητες αρμονικές. Για την απομάκρυνσή τους και γενικά για την καλύτερη λειτουργία των μετατροπέων ισχύος χρησιμοποιούνται φίλτρα (παθητικά και ενεργητικά) τα οποία συνδέονται στην είσοδο ή στην έξοδο τους. Με τον όρο «παθητικά φίλτρα» περιγράφονται κυκλωματικές διατάξεις (πηνία και πυκνωτές) με συγκεκριμένη συνδεσμολογία ώστε να προκύπτει μεγάλη αντίσταση σε ορισμένες συχνότητες και συνεπώς η αποκοπή τους. Με τον όρο «ενεργητικά φίλτρα» περιγράφονται διατάξεις που έχουν την

ιδιότητα να μηδενίζουν τις «διαταραχές» που δημιουργούνται από την λειτουργία των μετατροπέων ισχύος, συνεισφέροντας κάθε στιγμή άλλες ίσες και αντίθετες από τις υπάρχουσες.

## 2.10 Δίοδοι ισχύος

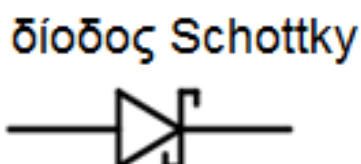
Οι δίοδοι έχουν δύο ακροδέκτες: την άνοδο (A) και την κάθοδο (K). Η βασική αρχή λειτουργίας μιας διόδου είναι ότι αυτή άγει όταν η τάση στην άνοδο είναι μεγαλύτερη από την τάση στην κάθοδο (η διάδος τότε είναι ορθά πολωμένη).



**Σχήμα 21: δίοδος**

Οι δίοδοι ισχύος χωρίζονται σε τρεις βασικές κατηγορίες:

- (1) τις διόδους γενικού σκοπού (ή διόδους δικτύου) κατάλληλες για μεγάλες τάσεις και ρεύματα αλλά όχι για μεγάλες συχνότητες (εξ ου και ο χαρακτηρισμός «δικτύου» καθώς συνίσταται η επιλογή τους για εφαρμογές που απαιτούν την λειτουργία των διόδων στην συχνότητα του δικτύου)
- (2) τις διόδους Schottky με κύριο χαρακτηριστικό την μικρότερη πτώση τάσης κατά την αγωγή και την υψηλή απόδοση σε μικρές στάθμες τάσης και ρεύματος



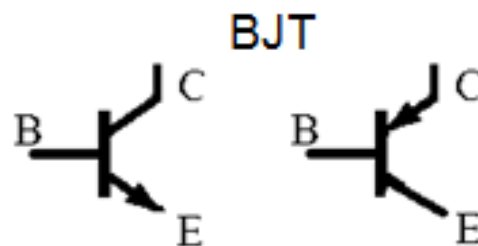
**Σχήμα 22: Δίοδος Schottky**

(3) τις διόδους ταχείας αποκατάστασης με δυνατότητα λειτουργίας σε υψηλές διακοπτικές συχνότητες

Στην γενικότερη οικογένεια των διόδων προφανώς συμπεριλαμβάνονται και άλλα είδη (δίοδοι Zener, φωτοδιόδοι κ.α.)

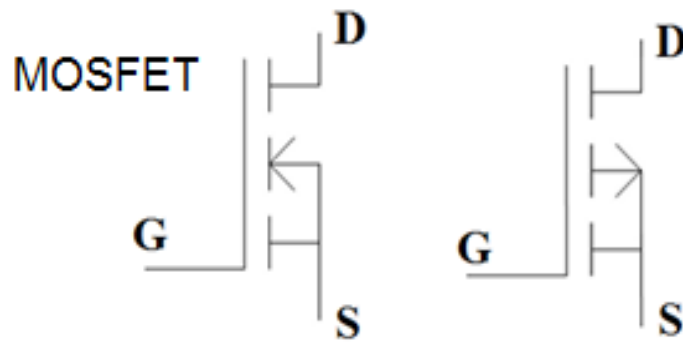
## 2.11 Οικογένεια των τρανζίστορ (BJT, power MOSFET, IGBT)

Τα διπολικά τρανζίστορ επαφής (Bipolar Junction Transistor ή BJT) έχουν τρεις ακροδέκτες: την βάση (B), τον εκπομπό (E) και τον συλλέκτη (C). Είναι διατάξεις ελεγχόμενες από ρεύμα (για να μείνουν σε αγωγή πρέπει το ρεύμα βάσης να είναι μεγαλύτερο από ένα όριο) και γνωρίζουν μικρή εφαρμογή σε διατάξεις ισχύος.



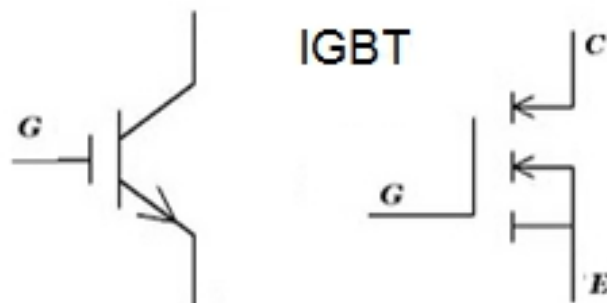
Σχήμα 23: BJT

Από την οικογένεια των τρανζίστορ μεγάλη εφαρμογή σε διατάξεις ισχύος γνωρίζουν τα IGBT και τα MOSFET ισχύος. Τα MOSFET ισχύος (τρανζίστορ μεταλλικών οξειδίων ημιαγωγών με επίδραση πεδίου ή Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) είναι διατάξεις ελεγχόμενες από τάση επίσης με τρεις ακροδέκτες που ονομάζονται πύλη (G), πηγή (S) και υποδοχή (D).



**Σχήμα 24: MOSFET**

Τα IGBT (διπολικά τρανζίστορ με μονωμένη πύλη (Insulated Gate Bipolar Transistor) έχουν επίσης τρεις ακροδέκτες με παρόμοια ονομασία με αυτούς των BJT (πύλη-εκπομπός-συλλέκτης) αλλά ελέγχονται από τάση, όπως τα MOSFET. Αποτελούν ένα συνδυασμό των BJT και MOSFET ισχύος ώστε να παραχθεί ένα στοιχείο με ανώτερη απόδοση σε συγκεκριμένες εφαρμογές και έχουν σε μεγάλο ποσοστό αντικαταστήσει τα BJT στις διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος.



**Σχήμα 25: IGBT**

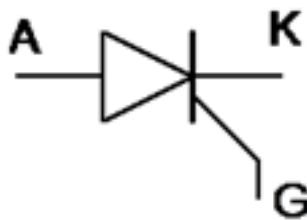
Εδώ να σημειωθεί ότι και άλλα στοιχεία έχουν αναπτυχθεί που ανήκουν στην οικογένεια των τρανζίστορ (π.χ. SITs) τα οποία όμως ακόμα γνωρίζουν ελάχιστη εφαρμογή.

## 2.12 Οικογένεια των θυρίστορ (SCR, GTO, IGCT)

Τα θυρίστορ στην απλούστερη μορφή τους λέγονται και ελεγχόμενοι

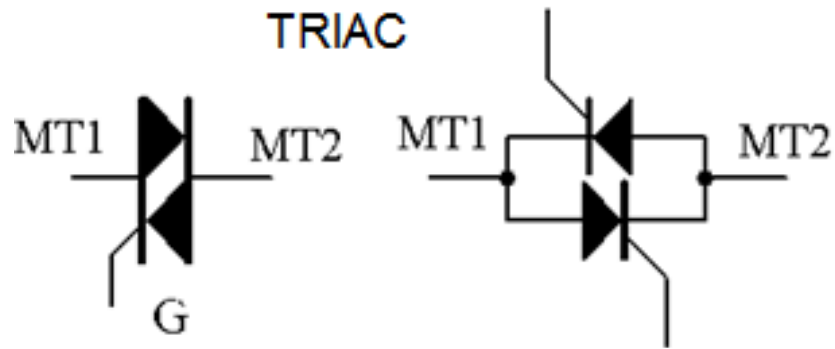
ανορθωτές πυριτίου (Silicon Controlled Rectifiers ή SCR) και έχουν τους δύο ακροδέκτες ανόδου (A) και καθόδου (K) όπως μια διάδος με την προσθήκη όμως και ενός τρίτου ακροδέκτη που ονομάζεται πύλη (G). Για να μεταβεί ένα θυρίστορ σε κατάσταση αγωγής πρέπει να είναι ορθά πολωμένο (η τάση ανόδου να είναι μεγαλύτερη από την τάση καθόδου) και να δεχτεί κατάλληλο παλμό στην πύλη του. Η σβέση γίνεται αντίστοιχα με την διάοδο. Συνεπώς ένα SCR είναι ένα μερικώς ελεγχόμενο στοιχείο (ελέγχεται η έναυση αλλά όχι η σβέση του). Παρόλα αυτά, με προσθήκη ενός κατάλληλου κυκλώματος σβέσης είναι δυνατή η κατασκευή ενός πλήρως ελεγχόμενου διακόπτη με χρήση θυρίστορ (για παράδειγμα ένα δεύτερο θυρίστορ μπορεί να χρησιμοποιηθεί ώστε να παράσχει τάση στην κάθοδο του πρώτου, ελέγχοντας έτσι την σβέση του). Τέτοιες διατάξεις έχουν το μειονέκτημα του πρόσθετου κόστους για την κατασκευή τους αλλά και την επίτευξη χαμηλότερης διακοπτικής συχνότητας σε σχέση με τα νεώτερα στοιχεία (MOSFET, IGBT). Έτσι παρόλο που χρησιμοποιούνταν ευρέως σε πληθώρα εφαρμογών μέχρι σχετικά πρόσφατα (π.χ. έλεγχο DC μηχανών), η χρήση τους περιορίστηκε με την εισαγωγή και ευρεία χρήση των νεώτερων στοιχείων.

### SCR



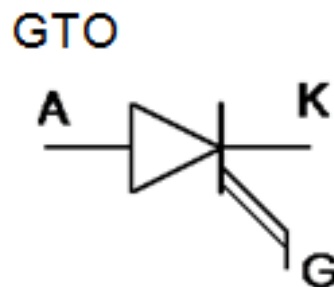
Σχήμα 26: SCR

Ειδική αναφορά πρέπει να γίνει στα αμφίδρομα τριαδικά θυρίστορ ή TRIAC που ισοδυναμούν με δύο αντιπαράλληλα συνδεδεμένα θυρίστορ (χρησιμοποιούνται για έλεγχο δύο κατευθύνσεων).



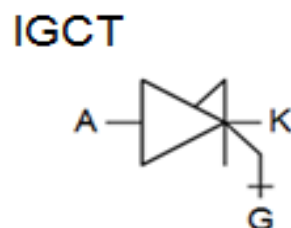
**Σχήμα 27: TRIAC**

Τα θυρίστορ με σβέση από την πύλη (Gate Turn Off Thyristor ή GTO) αποτελούν μετεξέλιξη των απλών SCR με την διαφορά ότι η σβέση τους μπορεί να ελεγχθεί από τον ακροδέκτη-πύλη (με αρνητικό παλμό). Έχουν όμως μειονεκτήματα όπως την ανάγκη χρήσης κυκλωμάτων προστασίας (snubbers) και τον όχι τόσο στιβαρό έλεγχο. Βελτίωση του GTO μπορεί να θεωρηθεί το ολοκληρωμένο θυρίστορ με μεταγωγή από την πύλη (Integrated Gate Commutated Thyristor ή IGCT).



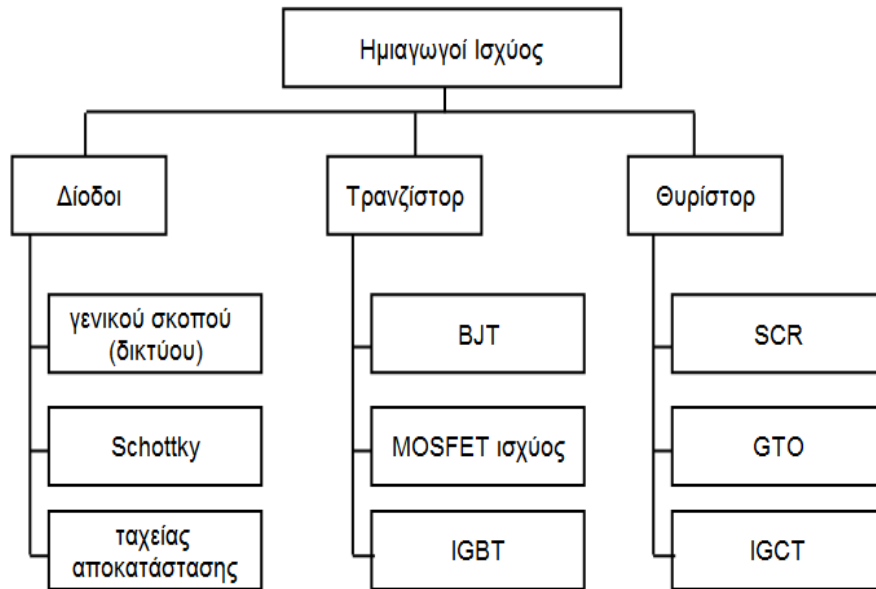
**Σχήμα 28: GTO**

Τα στοιχεία αυτά (IGCTs) μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην πλειοψηφία των εφαρμογών χωρίς να απαιτούν κυκλώματα προστασίας, επιτυγχάνουν μεγαλύτερη διακοπτική συχνότητα και γνωρίζουν αυξανόμενη χρήση σε διατάξεις ισχύος.



**Εικόνα 29: IGCT**

Αξίζει να σημειωθεί ότι έχουν αναπτυχθεί και άλλα στοιχεία που ανήκουν στην ευρύτερη οικογένεια των θυρίστορ (π.χ. MCT και MTO) με την χρήση τους όμως να είναι ιδιαίτερα περιορισμένη, έως ανύπαρκτη, ακόμα.



**Σχήμα 30: Κατηγορίες ημιαγωγίμων στοιχείων**

### 2.13 Περιοχές ισχύος και διακοπτικής συχνότητας

Η επιλογή των κατάλληλων ημιαγωγικών στοιχείων για κάθε εφαρμογή γίνεται με βάση τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους, κυρίως την διακοπτική συχνότητα και την στάθμη τάσης και ρεύματος (ή αλλιώς την ισχύ) που μπορούν να διαχειριστούν. Μία αυστηρή κατάταξη δεν είναι δυνατή καθώς οι κατασκευαστές συνεχίζουν να αναπτύσσουν νέα προϊόντα με βελτιωμένα χαρακτηριστικά. Ο γενικός κανόνας, με βάση τα βασικά στοιχεία και την χρήση τους σε εφαρμογές, είναι ότι τα δύο άκρα καταλαμβάνονται από τα θυρίστορ (πολύ υψηλή ισχύ και χαμηλή διακοπτική συχνότητα) και τα MOSFET ισχύος (χαμηλή ισχύ και πολύ υψηλή διακοπτική συχνότητα) με τα υπόλοιπα στοιχεία να καταλαμβάνουν τον ενδιάμεσο χώρο.

### 2.14 Συνεχή και εναλλασσόμενα μεγέθη

Ένα μέγεθος (π.χ. η τάση) καλείται συνεχές όταν δεν λαμβάνει ετερόσημες τιμές. Αντίστοιχα, όταν λαμβάνει ετερόσημες τιμές, καλείται εναλλασσόμενο. Δεν θα

πρέπει να γίνεται σύγκριση μεταξύ ενός σταθερού συνεχούς μεγέθους και ενός απλά συνεχούς. Στην περίπτωση που ένα μέγεθος έχει σταθερή τιμή τότε είναι και συνεχές.

Δεν ισχύει όμως το αντίθετο (δηλαδή, κάθε συνεχές μέγεθος δεν είναι αναγκαστικά σταθερό). Άλλη συνήθης παρανόηση που πρέπει να αποφεύγεται είναι η σύγκριση μεταξύ εναλλασσόμενου και ημιτονοειδώς μεταβαλλόμενου μεγέθους. Ένα ημιτονοειδώς μεταβαλλόμενο μέγεθος είναι προφανώς εναλλασσόμενο αλλά δεν ισχύει το αντίστροφο (δηλαδή, κάθε εναλλασσόμενο μέγεθος δεν είναι αναγκαστικά ημιτονοειδώς μεταβαλλόμενο).

## 2.15 Ημιτονοειδής μορφή και ενεργός (RMS) τιμή

Η βασική εναλλασσόμενη τάση στις ηλεκτρικές εφαρμογές (η τάση δικτύου) είναι ημιτονοειδώς μεταβαλλόμενη. Σε ισοδύναμη παράσταση με στρεφόμενο διάνυσμα, αυτό σημαίνει ότι η τιμή της τάσης κάθε στιγμή προκύπτει ως η τεταγμένη ενός σημείου που αντιστοιχεί στην κορυφή ενός διανύσματος σταθερού μήκους που στρέφεται αριστερόστροφα με μια συγκεκριμένη ταχύτητα (που συνδέεται προφανώς με την περίοδο του σήματος).

Το μήκος του διανύσματος ισοδυναμεί με την μέγιστη τιμή που μπορεί να πάρει η τάση (όταν το διάνυσμα πέσει πάνω στον άξονα των τεταγμένων). Η γωνία που σχηματίζει κάθε φορά το διάνυσμα με τον οριζόντιο άξονα καλείται και φάση και συμβολίζεται συνήθως με  $\varphi$ . Συνεπώς η τεταγμένη της κορυφής (δηλαδή η στιγμιαία τιμή της φάσης) προκύπτει ως το γινόμενο του πλάτους επί του ημιτόνου της φάσης.

Στην περίπτωση της τάσης του δικτύου (στην Ελλάδα), το πλάτος της τάσης είναι (περίπου) 325 Volts και η συχνότητα 50 Hz. Προφανώς ούτε η μέση τιμή (που είναι μηδέν), ούτε η μέγιστη τιμή μπορούν να δώσουν μια σαφή εικόνα της φυσικής σημασίας του μεγέθους. Έτσι χρησιμοποιείται η ενεργός τιμή (ή RMS τιμή). Το φυσικό νόημα αυτού του μεγέθους είναι ότι αντιπροσωπεύει την ισοδύναμη τιμή μιας συνεχούς τάσης.



## 2.16 Ισχύς

Η ισχύ είναι ένα φυσικό μέγεθος που εκφράζει την δυνατότητα παραγωγής έργου (ή αλλιώς η ενέργεια στην μονάδα χρόνου). Όσον αφορά τα ηλεκτρικά μεγέθη, ορίζεται η στιγμιαία ισχύς ως το γινόμενο τάσης και έντασης κάθε στιγμή ( $p=v \cdot i$ ) το οποίο όμως δεν έχει κάποια ιδιαίτερη φυσική σημασία στα εναλλασσόμενα μεγέθη. Έτσι χρησιμοποιείται η μέση τιμή της ισχύος ή μέση ισχύς ή πραγματική ισχύς ως:

$$P = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T v(t) \cdot i(t) dt$$

## 2.17 Βασικές κατηγορίες μετατροπών ισχύος

Η βασική εφαρμογή των διατάξεων ηλεκτρονικών ισχύος είναι η διαχείριση της ηλεκτρικής ισχύος. Με την χρήση του όρου «διαχείριση» υπογραμμίζεται αρχικά το γεγονός ότι οι διατάξεις αυτές δεν παράγουν ισχύ αλλά την διαχειρίζονται, έχοντας και τις σχετικές απώλειες όπως κάθε τέτοια διάταξη. Η λειτουργία αυτών των διατάξεων μπορεί να διαχωριστεί σε τέσσερις βασικές κατηγορίες:

- (1) την μετατροπή AC τάσης σε DC τάση (ανόρθωση)
- (2) την μετατροπή DC τάσης σε AC τάση (αντιστροφή)
- (3) την μετατροπή AC τάσης σε AC τάση με διαφορετικά χαρακτηριστικά
- (4) την μετατροπή DC τάσης σε DC τάση με διαφορετικά χαρακτηριστικά

## 2.18 Τριφασικός AC ρυθμιστής

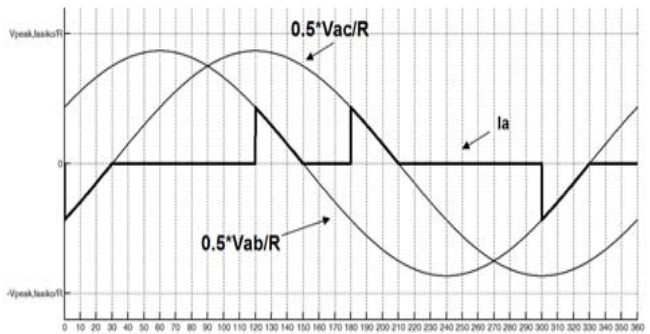
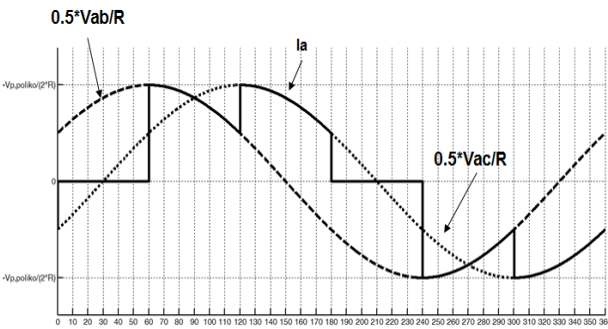
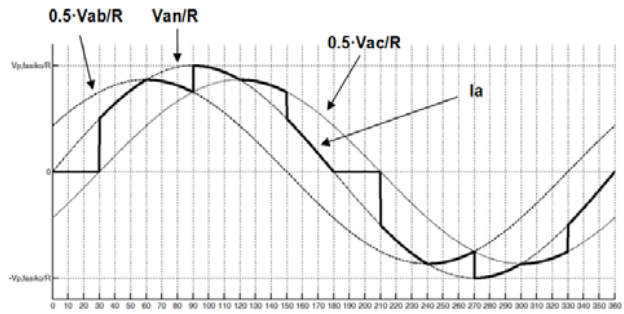
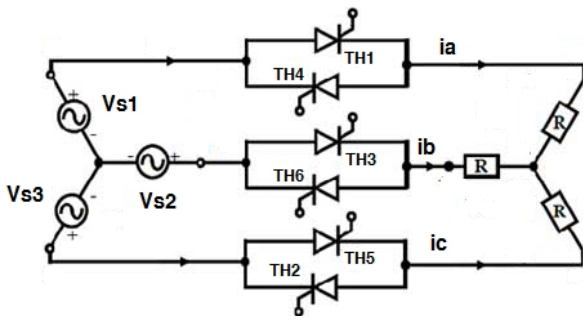
Η συνηθέστερη συνδεσμολογία είναι αστέρα-αστέρα (Y-Y) όπως φαίνεται στο Σχ.31 χωρίς αυτό να σημαίνει ότι δεν είναι δυνατόν να υλοποιηθούν και άλλες. Για να λειτουργήσει ορθά η συγκεκριμένη διάταξη θα πρέπει να υπάρχουν σταθερές σχέσεις που να συνδέουν τις γωνίες έναυσης κάθε θυρίστορ. Η λογική είναι παρόμοια με αυτή του τριφασικού ανορθωτή έξι παλμών. Το άνω θυρίστορ κάθε δυάδας (TH1, TH3, TH5) πρέπει να λάβουν παλμούς με διαφορά που να αντιστοιχεί στην διαφορά φάσης μεταξύ των τριών φάσεων (δηλαδή  $\alpha$ ,  $\alpha+120^\circ$  και  $\alpha+240^\circ$

αντίστοιχα). Τα κάτω θυρίστορ κάθε δυάδας (TH4, TH6, TH2) πρέπει να δεχθούν παλμό με διαφορά 180ο από τα αντίστοιχα άνω της συγκεκριμένης δυάδας (δηλαδή α+180ο, α+300ο, α+60ο αντίστοιχα).

Η σειρά ενεργοποίησης αντικατοπτρίζεται και στην ονομασία των θυρίστορ. Η λειτουργία ενός τριφασικού ρυθμιστή είναι αρκετά πολύπλοκη καθώς ανάλογα την γωνία έναυσης μπορεί να άγουν θυρίστορ από κανέναν από τους μονοφασικούς ρυθμιστές ή από δύο ή από τρεις. Αν άγουν δύο ρυθμιστές τότε η τάση εξόδου στα άκρα κάθε φορτίου είναι το μισό της αντίστοιχης πολικής (αυτής μεταξύ των δύο φάσεων που αντιστοιχούν στους δύο ρυθμιστές). Αν άγουν τρεις ρυθμιστές τότε η τάση εξόδου στα άκρα κάθε φορτίου είναι ίση με την αντίστοιχη φασική.

Συνήθως εξετάζονται τα ρεύματα πάνω σε κάθε γραμμή (ia, ib και ic στο σχήμα 31), τα οποία προφανώς σε περίπτωση ωμικού φορτίου θα έχουν κυματομορφή ίδιου σχήματος (αλλά διαφορετικού πλάτους) με την αντίστοιχη τάση στα άκρα της αντίστασης. Ορίζονται τέσσερις διαφορετικές φάσεις λειτουργίας (με όρια τις 60°, 90° και 150°) ανάλογα με την τιμή της γωνίας έναυσης. Προφανώς γενικά η ενεργός τιμή του ρεύματος εξόδου (και της αντίστοιχης φάσης) μειώνεται καθώς η γωνία έναυσης αυξάνεται.

Ορισμένες ενδεικτικές κυματομορφές απεικονίζονται στο σχήμα 31 ενώ οι πίνακες ενεργοποίησης για τις τρεις φάσεις λειτουργίας (στην τέταρτη φάση δεν άγει κανένα θυρίστορ). Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στην τρίτη φάση καθώς όπως φαίνεται υπάρχουν δύο διαστήματα αγωγής για κάθε θυρίστορ. Για τον λόγο αυτό συνηθίζεται να δίνονται δύο παλμοί σε κάθε θυρίστορ με διαφορά 60° μεταξύ τους.



Σχήμα 31: Τριφασικός AC ρυθμιστής συνδεσμολογίας Y-Y με ωμικό φορτίο, κυματομορφή του ρεύματος που διέρχεται από την φάση 1 για  $\alpha=30^\circ$ ,  $\alpha=60^\circ$  και  $\alpha=120^\circ$

|     |                         |                         |                         |                         |                          |                         |                         |                          |                          |                          |                          |                          |
|-----|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
|     | $240+\alpha$<br>~<br>30 | 30<br>~<br>$300+\alpha$ | $300+\alpha$<br>~<br>90 | 90<br>~<br>$360+\alpha$ | $360+\alpha$<br>~<br>150 | 150<br>~<br>$60+\alpha$ | $60+\alpha$<br>~<br>210 | 210<br>~<br>$120+\alpha$ | $120+\alpha$<br>~<br>270 | 270<br>~<br>$180+\alpha$ | $180+\alpha$<br>~<br>330 | 330<br>~<br>$240+\alpha$ |
| TH1 |                         |                         |                         |                         | ON                       |                         | ON                      |                          |                          |                          |                          |                          |
| TH2 |                         |                         |                         |                         |                          |                         | ON                      |                          | ON                       |                          |                          |                          |
| TH3 |                         |                         |                         |                         |                          |                         |                         | ON                       |                          | ON                       |                          |                          |
| TH4 | ON                      |                         |                         |                         |                          |                         |                         |                          |                          |                          | ON                       |                          |
| TH5 | ON                      |                         | ON                      |                         |                          |                         |                         |                          |                          |                          |                          |                          |
| TH6 |                         |                         | ON                      |                         | ON                       |                         |                         |                          |                          |                          |                          |                          |

|     |                                  |                                  |                                   |                                   |                                   |                                   |
|-----|----------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
|     | $360+\alpha$<br>~<br>$60+\alpha$ | $60+\alpha$<br>~<br>$120+\alpha$ | $120+\alpha$<br>~<br>$180+\alpha$ | $180+\alpha$<br>~<br>$240+\alpha$ | $240+\alpha$<br>~<br>$300+\alpha$ | $300+\alpha$<br>~<br>$360+\alpha$ |
| TH1 | ON                               | ON                               |                                   |                                   |                                   |                                   |
| TH2 |                                  | ON                               | ON                                |                                   |                                   |                                   |
| TH3 |                                  |                                  | ON                                | ON                                |                                   |                                   |
| TH4 |                                  |                                  |                                   | ON                                | ON                                |                                   |
| TH5 |                                  |                                  |                                   |                                   | ON                                | ON                                |
| TH6 | ON                               |                                  |                                   |                                   |                                   | ON                                |

|     |                    |                     |                        |                         |                          |                          |                          |                          |                          |                          |                          |                              |
|-----|--------------------|---------------------|------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|------------------------------|
|     | 0<br>~<br>$\alpha$ | $\alpha$<br>~<br>60 | 60<br>~<br>$60+\alpha$ | $60+\alpha$<br>~<br>120 | 120<br>~<br>$120+\alpha$ | $120+\alpha$<br>~<br>180 | 180<br>~<br>$180+\alpha$ | $180+\alpha$<br>~<br>240 | 240<br>~<br>$240+\alpha$ | $240+\alpha$<br>~<br>300 | 300<br>~<br>$300+\alpha$ | $300+\alpha$<br>~<br>360 (0) |
| TH1 |                    | ON                  | ON                     | ON                      | ON                       | ON                       |                          |                          |                          |                          |                          |                              |
| TH2 |                    |                     |                        | ON                      | ON                       | ON                       | ON                       | ON                       |                          |                          |                          |                              |
| TH3 |                    |                     |                        |                         |                          | ON                       | ON                       | ON                       | ON                       | ON                       |                          |                              |
| TH4 |                    |                     |                        |                         |                          |                          |                          | ON                       | ON                       | ON                       | ON                       | ON                           |
| TH5 | ON                 | ON                  |                        |                         |                          |                          |                          |                          |                          | ON                       | ON                       | ON                           |
| TH6 | ON                 | ON                  | ON                     | ON                      |                          |                          |                          |                          |                          |                          |                          | ON                           |

Σχήμα 32: Πίνακες ενεργοποίησης των θυρίστωρ για τον τριφασικό AC ρυθμιστή στις 3 φάσεις λειτουργίας

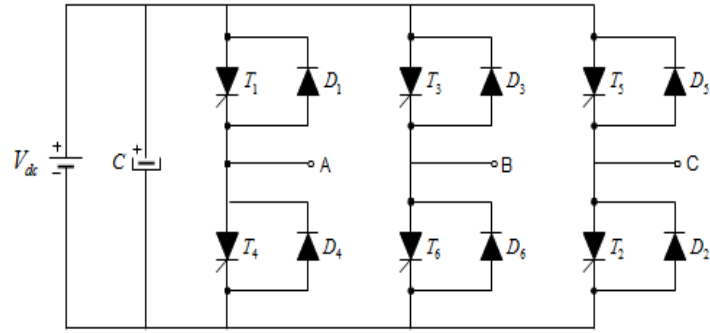
## 2.19 Τριφασικός DC- AC ρυθμιστής (αντιστροφέας)

Αντιστροφείς που τροφοδοτούνται από πηγή Συνεχούς Τάσης (VSI ) και οι οποίοι μπορούν να χωριστούν στις παρακάτω κατηγορίες.

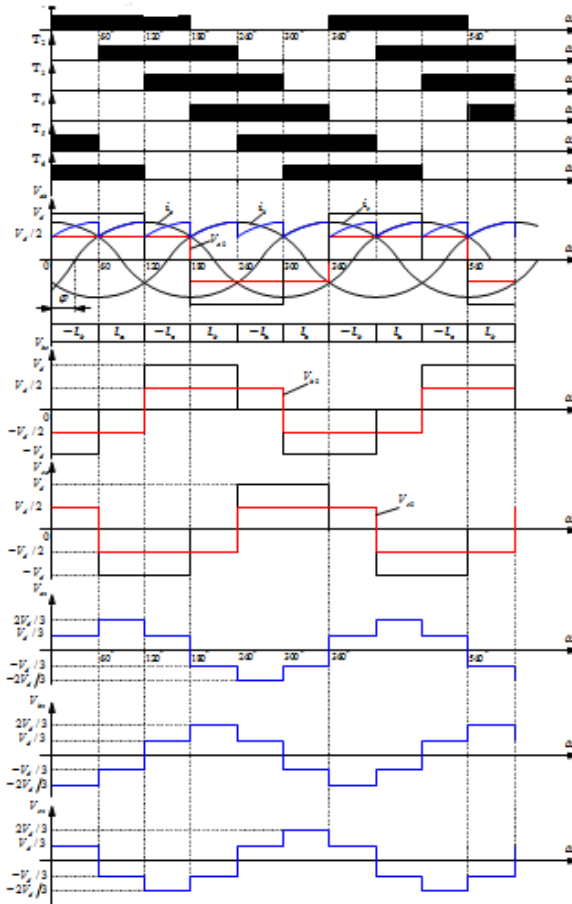
*Αντιστροφείς με Διαμόρφωση Εύρους Παλμών ( PWM ).* Η συνεχής τάση εισόδου έχει σταθερό πλάτος και για την ανόρθωση της τάσης του δικτύου, χρησιμοποιείται μία ανορθωτική διάταξη με διόδους. Ο αντιστροφέας στην έξοδο του, ελέγχει το πλάτος και την συχνότητα της εναλλασσόμενης τάσης, μέσω της διαμόρφωσης του εύρους των παλμών των διακοπών του αντιστροφέα .

*Αντιστροφείς με Τετραγωνική Κυματομορφή.* Για τον έλεγχο του πλάτους της εναλλασσόμενης τάσης εξόδου, ελέγχεται το πλάτος της συνεχούς τάσης εισόδου. Έτσι, ο αντιστροφέας πρέπει να ελέγξει μόνο τη συχνότητα της τάσης εξόδου. Η εναλλασσόμενη τάση εξόδου έχει μια κυματομορφή παρόμοια με τετραγωνική.

Αντιστροφείς οι οποίοι τροφοδοτούνται από πηγή Συνεχούς Ρεύματος(CSI ). Στην είσοδο χρησιμοποιείται ένας ελεγχόμενος μετατροπέας AC/DC. Επειδή στην συνεχή ζεύξη τοποθετείται μια μεγάλη αυτεπαγωγή, η είσοδος εμφανίζεται ως πηγή ρεύματος. Ο αντιστροφέας χρησιμοποιεί θυρίστορ, διόδους και πυκνωτές για την εξαναγκασμένη μετάβαση.



Σχήμα 33: Τριφασικός αντιστροφέας με πηγή Συνεχούς τάσης



Σχήμα 34: Λειτουργία 3Φ αντιστροφέα

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3ο

### ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΚΚΙΝΗΣΗΣ

#### 3.1 Αυτόματος διακόπτης Αστέρα-Τριγώνου (Y-Δ)

Οι ασύγχρονοι κινητήρες βραχυκυκλωμένου δρομέα είναι απλοί στην κατασκευή και έχουν χαμηλό κόστος συντήρησης. Για το λόγο αυτό η χρήση τους είναι πλατιά διαδεδομένη. Το ρεύμα εκκίνησης τους είναι 4 έως 8 φορές μεγαλύτερο από το ρεύμα κανονικής λειτουργίας. Για το λόγο αυτό, η απ'ευθείας εκκίνηση του κινητήρα σε συνδεσμολογία τριγώνου, που είναι η συνδεσμολογία λειτουργίας τους, δημιουργεί προβλήματα στο δίκτυο (πτώση τάσης). Για να περιοριστεί το ρεύμα εκκίνησης, αλλά και για την προστασία τους, χρησιμοποιείται ο αυτόματος διακόπτης αστέρα-τριγώνου (Y-Δ) (star delta switch), που για συντομία αναφέρεται ως **αστεροτρίγωνο**. Συνήθως χρησιμοποιείται σε κινητήρες ισχύος πάνω από τρεις ίππους (περίπου 2 KW). Οι κινητήρες αυτοί έχουν τρία τυλίγματα, τα άκρα των οποίων ονομάζονται U1-U2, V1-V2 και W1-W2.

Στο ξεκίνημα του κινητήρα τα τρία τυλίγματα πρέπει να συνδεθούν σε συνδεσμολογία αστέρα. Για το σκοπό αυτό συνδέονται μαζί τα άκρα U2, V2 και W2 μεταξύ τους, ενώ τα άκρα U1, V1 και W1 συνδέονται με τις φάσεις L1, L2 και L3 αντίστοιχα. Αφού ο κινητήρας λειτουργήσει για ένα χρονικό διάστημα, ώστε να φτάσει περίπου την ονομαστική ταχύτητα περιστροφής του, ο αυτόματος διακόπτης αλλάζει την συνδεσμολογία του κινητήρα από αστέρα σε τρίγωνο. Αυτό γίνεται γεφυρώνοντας τα άκρα U1-W2, V1-U2 και W1-V2 και συνδέοντας τα στις φάσεις L1, L2, L3 αντίστοιχα. Το ρεύμα εκκίνησης ενός κινητήρα σε συνδεσμολογία αστέρα, είναι 3 φορές μικρότερο από το ρεύμα εκκίνησης σε συνδεσμολογία τριγώνου.

$$I_{\Delta} = \sqrt{3} I_{\Psi} = \frac{\sqrt{3} V}{Z}$$

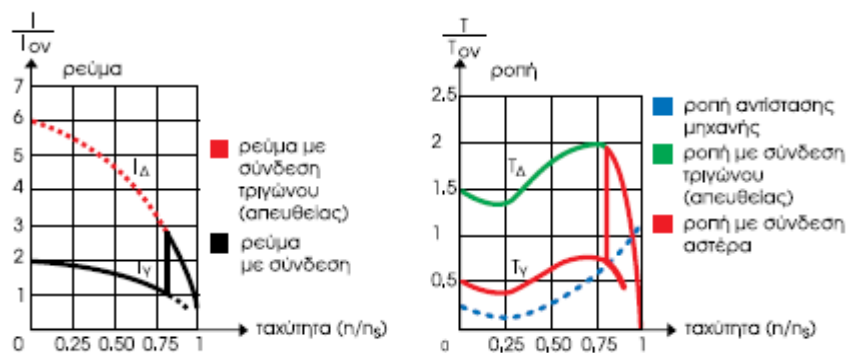
Τα χαρακτηριστικά του είναι:

Το ρεύμα εκκίνησης  $I_{εκ}=2I_{ov}$

Η ροπή εκκίνησης  $T_{εκ}=0,5T_{ov}$ , μικρή ροπή εκκίνησης

Παρατηρούνται αιχμές ρεύματος και ροπής κατά την μεταλλαγή απο αστέρα σε τρίγωνο

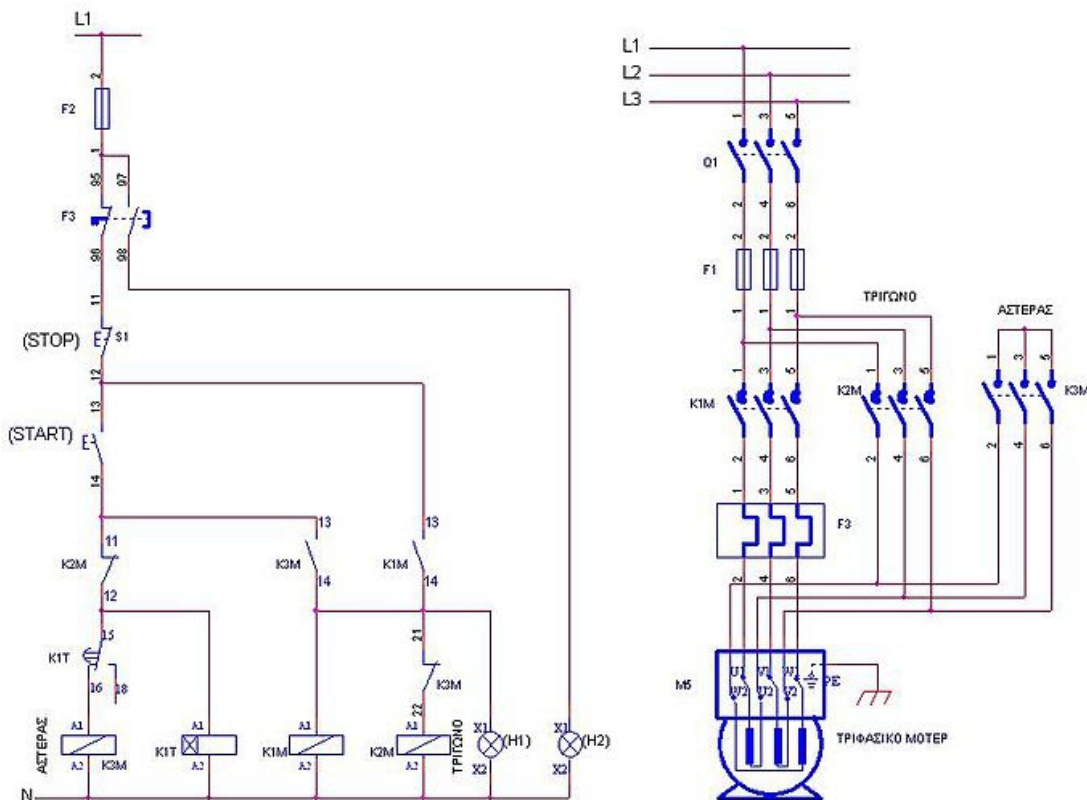
Σύνθετος εξοπλισμός, αδυναμία ρύθμισης



Σχήμα 35: χαρακτηριστικές λειτουργίας ασύγχρονου κινητήρα με διακόπτης Αστέρα-Τριγώνου

### 3.2 Συνδεσμολογία και εξήγηση λειτουργίας εκκίνησης Αστέρα-Τριγώνου

Ο ηλεκτρονόμος K1M λέγεται ηλεκτρονόμος δικτύου και συνδέει τις φάσεις L1, L2 και L3 με τους ακροδέκτες U1, V1 και W1 του κινητήρα αντίστοιχα. Ο ηλεκτρονόμος K2M λέγεται ηλεκτρονόμος τριγώνου επειδή, όταν ενεργοποιείται συνδέει τα τυλίγματα σε συνδεσμολογία τριγώνου (γεφυρώνει ανά δύο τα άκρα U1-W2, V1-U2 και W1-V2). Τέλος ο ηλεκτρονόμος K3 λέγεται ηλεκτρονόμος αστέρα διότι με την ενεργοποίησή του, γεφυρώνει τα άκρα U2, V2 και W2 των τυλιγμάτων, συνδέοντας τα σε συνδεσμολογία αστέρα.



Σχήμα 36: κύκλωμα ελέγχου και κύκλωμα ισχύος

Οι ηλεκτρονόμοι K2M και K3M δεν πρέπει ποτέ να ενεργοποιηθούν ταυτόχρονα, γιατί τότε προκαλείται βραχυκύκλωμα των τριών φάσεων στις θέσεις 1,3,5 του ηλεκτρονόμου K3M.

Για να μπει σε λειτουργία ο κινητήρας, πρέπει πρώτα να κλείσει χειροκίνητα ο διακόπτης Q1 και στη συνέχεια να πατηθεί το μπουτόν εκκίνησης (START). Τότε διέρχεται ηλεκτρικό ρεύμα από τα πηνία του ηλεκτρονόμου K3M και του χρονικού K1T ενεργοποιώντας τα.

Ας εξετάσουμε τώρα τι συμβαίνει με την ενεργοποίηση του ηλεκτρονόμου K3M. Με την ενεργοποίηση του ηλεκτρονόμου:

κλείνουν οι κανονικά ανοικτές επαφές ισχύος 1-2, 3-4, 5-6 του K3M

κλείνει η κανονικά ανοικτή επαφή του 13-14

ανοίγει η κανονικά κλειστή επαφή του 21-22



Το κλείσιμο των επαφών 1-2, 3-4 και 5-6 του K3M, συνδέει τα τυλίγματα του κινητήρα σε συνδεσμολογία αστέρα. Το κλείσιμο της επαφής 13-14 έχει σαν συνέπεια την ενεργοποίηση του ρελέ K1M, που μέσω των επαφών 1-2, 3-4 και 5-6 ισχύος του συνδέει, μέσω του θερμικού, τις τρεις φάσεις L1, L2, L3 του δικτύου με τους ακροδέκτες U1, V1, W1 των τυλιγμάτων του κινητήρα. Έτσι ο κινητήρας ξεκινά σε συνδεσμολογία αστέρα. Το άνοιγμα της επαφής 21-22 του K3M, αποκλείει την ενεργοποίηση του ηλεκτρονόμου K2M παράλληλα με τον K3M, που θα είχε σαν συνέπεια την βραχυκύκλωση των τριών φάσεων.

Με την ενεργοποίηση του ηλεκτρονόμου K1M:

κλείνει η κανονικά ανοικτή επαφή του 13-14 τροφοδοτώντας με ρεύμα το κύκλωμα ελέγχου του αυτοματισμού και μετά την απελευθέρωση του κομβίου εκκίνησης START. Αυτή είναι η επαφή αυτοσυγκράτησης ανάβει η ενδεικτική λυχνία H1 λειτουργίας του κινητήρα.

Όπως αναφέρθηκε με πάτημα του START, ενεργοποιήθηκε επίσης το χρονικό K1T. Όταν περάσει ο χρόνος για τον οποίο έχει ρυθμιστεί, ανοίγει η επαφή του 15-16. Τότε απενεργοποιείται ο ηλεκτρονόμος αστέρα K3M, με αποτέλεσμα να κλείσει η επαφή του 21-22 ενεργοποιώντας τον ηλεκτρονόμο τριγώνου K2M, που ενώνει τα τυλίγματα του κινητήρα σε συνδεσμολογία τριγώνου.

Η ενεργοποίηση του K2M, ανοίγει την επαφή του 11-12, αποκλείοντας έτσι την ταυτόχρονη ενεργοποίηση του ηλεκτρονόμου αστέρα K3M.

Τέλος πατώντας το κομβίο STOP, διακόπτεται η τροφοδοσία όλου του κυκλώματος ελέγχου, απενεργοποιώντας όλους τους ηλεκτρονόμους και διακόπτοντας τη λειτουργία του κινητήρα. Τότε σβήνει και η ενδεικτική λυχνία λειτουργίας H1.

### 3.3 Εκκίνηση με αντιστάσεις στο στάτη

Για την εκκίνηση με αντιστάσεις στο στάτη, χρησιμοποιείται εκκινητής που αποτελείται από τρεις αντιστάσεις, οι οποίες παρεμβάλλονται στον κύκλωμα που τροφοδοτεί το στάτη του τριφασικού κινητήρα.

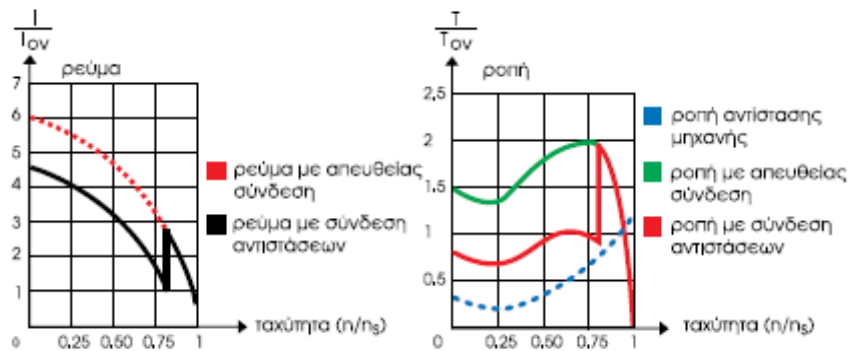
Ο κινητήρας μ' αυτόν τον τρόπο, ξεκινάει με ελαττωμένη τάση και συνεπώς και με ελαττωμένη ένταση. Προοδευτικά όσο αυξάνεται η ταχύτητα του κινητήρα, αφαιρούνται σταδιακά οι αντιστάσεις, έως ότου ο κινητήρας αποκτήσει τις κανονικές στροφές, οπότε ο εκκινητής τίθεται εκτός λειτουργίας. Έτσι στην κανονική λειτουργία του κινητήρα, όλες οι αντιστάσεις του εκκινητή είναι εκτός κυκλώματος. Η απαιτούμενη αντίσταση  $R$ , ώστε το  $I_{εκ}$  να μην υπερβαίνει ορισμένη τιμή, δίνεται από τη σχέση

Τα χαρακτηριστικά του είναι:

Το ρεύμα εκκίνησης  $I_{εκ}=4,5I_{ον}$

Η ροπή εκκίνησης  $T_{εκ}=0,75T_{ον}$ , μικρή ροπή εκκίνησης

Σύνθετος εξοπλισμός, αδυναμία ρύθμισης



Σχήμα 37: χαρακτηριστικές λειτουργίας ασύγχρονου κινητήρα με αντιστάσεις στο στάτη

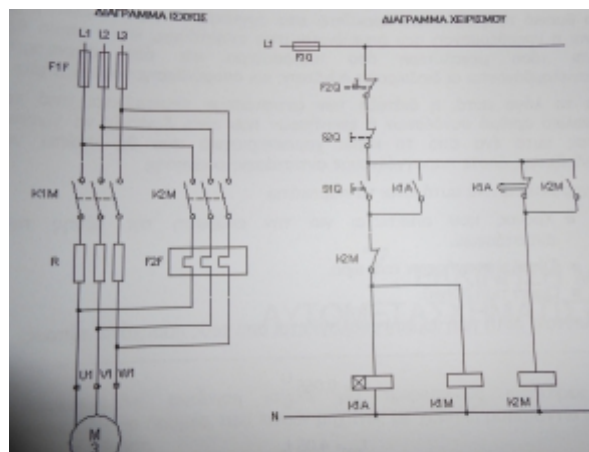
### 3.4 Συνδεσμολογία και εξήγηση λειτουργίας εκκίνησης με αντιστάσεις στο στάτη

Σκοπός αυτής της εκκίνησης με αντιστάσεις στο στάτη είναι να περιοριστεί η ποσότητα του ρεύματος που καταναλώνεται την αρχική στιγμή της εκκίνησης. Αφού ο κινητήρας αναπτύξει μια συγκεκριμένη ταχύτητα, ο αυτοματισμός ελέγχου θα βραχυκυκλώσει τις αντιστάσεις, δηλαδή θα τις ακυρώσει και επομένως ο κινητήρας θα αποκτήσει τις ονομαστικές τιμές τάσης και έντασης.

Τα στοιχεία που χρησιμοποιούνται είναι τα εξής:

- F1F, ασφάλειες προστασίας.
- K1M, K2M, τριφασικοί επαφείς.
- R, τριφασικές αντιστάσεις.
- F2F, θερμικό ρελέ προστασίας.
- K1A, χρονιστής σύνδεσης.
- M, τριφασικός κινητήρας με βραχυκυκλωμένο δρομέα.

Η διαφορά του παρακάτω διαγράμματος ελέγχου με τα προηγούμενα διαγράμματα είναι ο χρονιστής σύνδεσης (χρονικό ρελέ) K1A.



Σχήμα 38: κύκλωμα ισχύος και κύκλωμα ελέγχου

Η λειτουργία έχει ως εξής:

Πατώντας το μπουτόν S1Q ο κινητήρας τίθεται σε λειτουργία μέσω του επαφέα K1M και του χρονιστή K1A και έτσι ο κινητήρας τροφοδοτείται μέσω των αντιστάσεων R.

Αφού παρέλθει συγκεκριμένο χρονικό διάστημα το οποίο καθορίζεται από εμάς, ο χρονιστής K1A συνδέει τον επαφέα K2M.

Καθώς συνδέεται ο επαφέας K2M, ο επαφέας K1M και ο χρονιστής K1A αποσυνδέονται με αποτέλεσμα ο κινητήρας να λειτουργεί με τις ονομαστικές του τιμές.

Το βασικό πρόβλημα που προκύπτει από το παραπάνω τρόπο εκκίνησης είναι η υπερθέρμανση αντιστάσεων στο στάτη, η οποία είναι τόσο μεγαλύτερη όσο συχνότερα επαναλαμβάνονται οι διαδικασίες σύνδεσης και αποσύνδεσης του κινητήρα.

Σε αυτή την περίπτωση πρέπει να λαμβάνουμε υπόψη μας τα εξής χαρακτηριστικά:

- Χρόνος που απαιτείται για την ανύψωση της τάσης των αντίστασεων.
- Σύνολο εκκινήσεων ανά ώρα.
- Ωμική τιμή (Ohm).

Η ωμική τιμή υπολογίζεται από τους παρακάτω τύπους:

$$R=0,055U/I_n$$

$$I_{med}=4,05 I_n$$

Όπου:

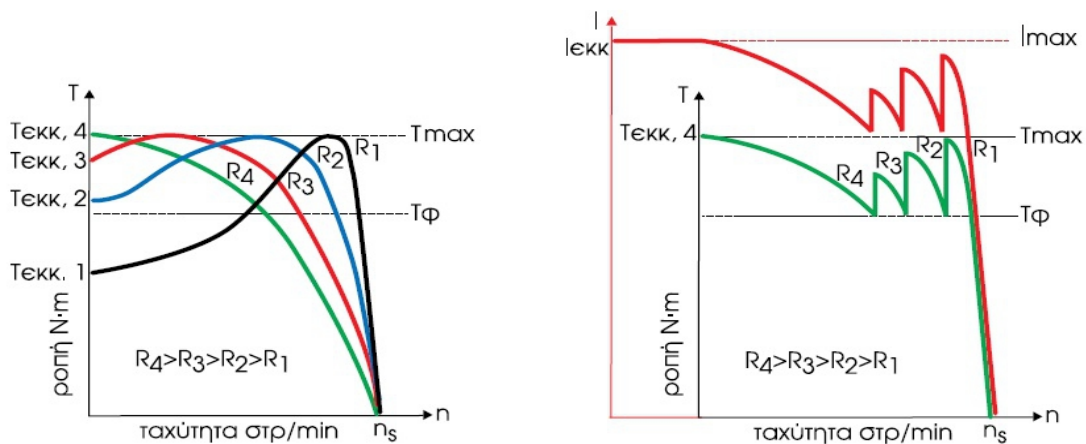
- R, αντίσταση ανά φάση σε Ω.
- U, τάση δικτύου σε V.
- I<sub>n</sub>, ονομαστική ένταση κινητήρα σε A.
- I<sub>med</sub>, μέση ένταση σε A.

### 3.5 Εκκίνηση κινητήρα με αντιστάσεις στο δρομέα

Στη μέθοδο αυτή, συνδέουμε εξωτερικές ωμικές αντιστάσεις στο τύλιγμα του δρομέα, εφόσον βέβαια ο κινητήρας είναι δακτυλιοφόρος, όσο αυξάνεται η ταχύτητα του κινητήρα, αφαιρούνται σταδιακά οι αντιστάσεις, έως ότου ο κινητήρας αποκτήσει τις κανονικές στροφές.

Τα χαρακτηριστικά του είναι:

- Μεγαλώνει (μέχρις ενός ορίου) η ροπή εκκίνησης
- Η μέγιστη ροπή  $T_{max}$ , της οποίας το μέγεθος δεν εξαρτάται από την ολική αντίσταση του δρομέα  $R$  μετατοπίζεται σε μικρότερο αριθμό στροφών και
- Η ολίσθηση του κινητήρα για το κανονικό φορτίο αυξάνεται, δηλαδή μειώνεται η ταχύτητα  $n$ .



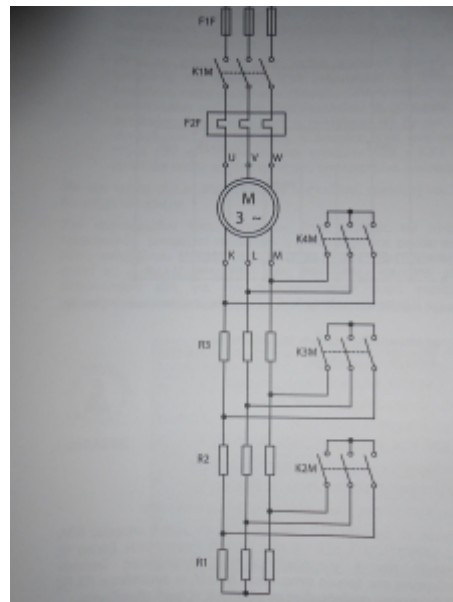
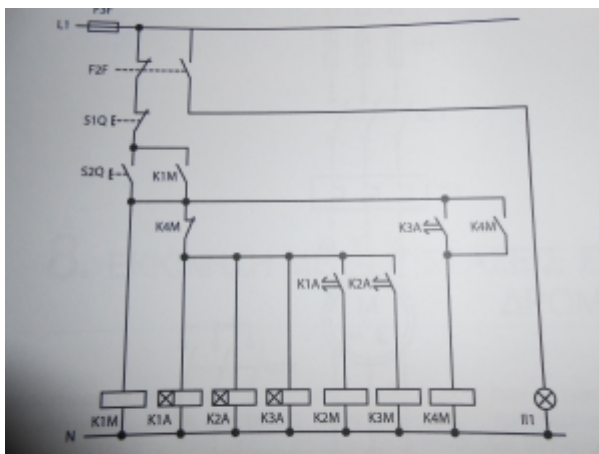
Σχήμα 39: χαρακτηριστικές λειτουργίας ασύγχρονου κινητήρα με αντιστάσεις στο δρομέα

### 3.6 Συνδεσμολογία και εξήγηση λειτουργίας εκκίνησης με αντιστάσεις στον δρομέα

Όπως στην προηγούμενη περίπτωση, έτσι και εδώ η εκκίνηση κινητήρα με αντιστάσεις στο δρομέα γίνεται για να περιοριστεί η ποσότητα του ρεύματος που καταναλώνεται την αρχική στιγμή της εκκίνησης. Αφού ο κινητήρας αναπτύξει μια συγκεκριμένη ταχύτητα, ο αυτοματισμός ελέγχου θα βραχυκυκλώσει σταδιακά τις

αντιστάσεις και επομένως ο δρομέας θα βραχυκυκλωθεί, οπότε ο κινητήρας θα αποκτήσει τις ονομαστικές τιμές τάσης και έντασης.

Στο παρακάτω διάγραμμα ισχύος παρατηρούμε έναν τριφασικό κινητήρα με αντιστάσεις στο δρομέα και με τρία στάδια εκκίνησης. Εφόσον υπάρχουν τρία στάδια εκκίνησης θα έχουμε τρεις χρονιστές σύνδεσης (χρονικά ρελέ), ώστε να επιτευχθεί σταδιακή εκκίνηση, μέχρι να βραχυκυκλωθεί ο δρομέας και ο κινητήρας να αποκτήσει τις ονομαστικές τιμές τάσης και έντασης. Κατά την εκκίνηση οι αντιστάσεις θερμαίνονται, οπότε θα πρέπει οι διάφορες εκκινήσεις να απέχουν χρονικά μεταξύ τους, έτσι ώστε οι αντιστάσεις να μην φτάνουν σε επικίνδυνες θερμοκρασίες.



Σχήμα 40: κύκλωμα ελέγχου και κύκλωμα ισχύος

Από το παραπάνω διάγραμμα ελέγχου έχουμε τα εξής στοιχεία:

- F1F, ασφάλειες προστασίας.
- K1M, K2M, K3M, K4M, τριφασικοί επαφείς.
- R1, R2, R3, τριφασικές αντιστάσεις.
- F2F, θερμικό ρελέ.
- K1A, K2A, K3A, χρονικά ρελέ.
- M, τριφασικός κινητήρας.

•H1, λυχνία σήμανσης θερμικής βλάβης.

Πατώντας το μπουτόν S2Q, ο επαφέας K1M τίθεται σε λειτουργία μαζί με τους χρονιστές K1A, K2A και K3A. Αυτό σημαίνει ότι ο κινητήρας τίθεται σε λειτουργία με τις αντιστάσεις R1, R2, R3 συνδεδεμένες στο δρομέα.

Αφού παρέλθει καθορισμένο χρονικό διάστημα  $t_1$ , το χρονικό ρελέ K1A ενεργοποιεί την επαφή του, οπότε συνδέεται ο επαφέας K2M, με αποτέλεσμα να βραχυκυκλώνεται η τριφασική αντίσταση R1 οπότε και αποσυνδέεται από το κύκλωμα.

Αφού παρέλθει και άλλο καθορισμένο χρονικό διάστημα  $t_2$ , το χρονικό ρελέ K2A ενεργοποιεί την επαφή του, οπότε συνδέεται ο επαφέας K3M, με αποτέλεσμα να βραχυκυκλώνεται η τριφασική αντίσταση R2 οπότε και αυτή αποσυνδέεται από το κύκλωμα.

Αφού παρέλθει ένα ακόμα καθορισμένο χρονικό διάστημα  $t_3$ , το χρονικό ρελέ K3A ενεργοποιεί την επαφή του, οπότε συνδέεται ο επαφέας K4M, με αποτέλεσμα να βραχυκυκλώνεται η τριφασική αντίσταση R3 οπότε και αποσυνδέεται από το κύκλωμα, ενώ απενεργοποιούνται τα χρονικά ρελέ και οι επαφείς K2M και K3M αφού δεν έχουν κανένα ρόλο στο κύκλωμα.

Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η σταδιακή εκκίνηση του κινητήρα.

### 3.7 Απ' ευθείας εκκίνηση

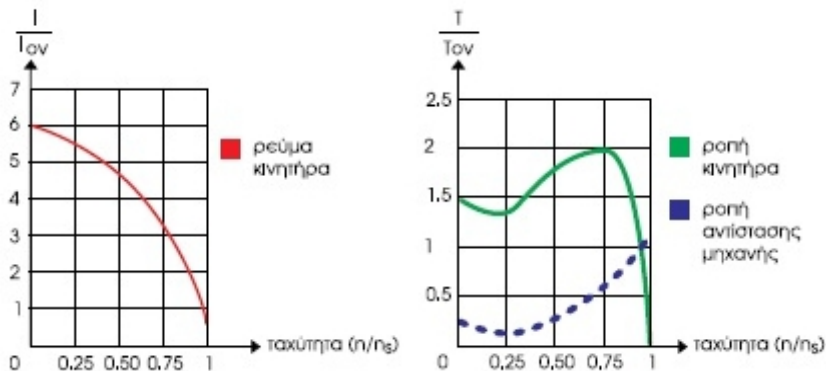
Ο απλούστερος τρόπος εκκίνησης τριφασικών κινητήρων, είναι η απ' ευθείας εκκίνηση με τη χρήση μόνο ενός απλού τριπολικού διακόπτη. Η μέθοδος αυτή, εφαρμόζεται σε ορισμένες περιπτώσεις στη βιομηχανία και κυρίως για κινητήρες μικρής ισχύος μέχρι 1,5 – 2 KW. Υπάρχουν περιπτώσεις όμως, όπου η ΔΕΗ επιτρέπει την απευθείας εκκίνηση κινητήρων μεγαλύτερης ισχύος (βλέπε κανονισμό ΔΕΗ), τόσο στη χαμηλή όσο και στη μέση τάση.

Τα χαρακτηριστικά του είναι:

Το ρεύμα εκκίνησης  $I_{εκ}=6I_{ov}$ , που δημιουργεί πτώση τάσης στο δίκτιο

Η ροπή εκκίνησης  $T_{εκ}=1,5T_{ov}$ , δυνατότητα εκκίνησης με φορτίο

Απλός εξοπλισμός, αδυναμία ρυθμίσης

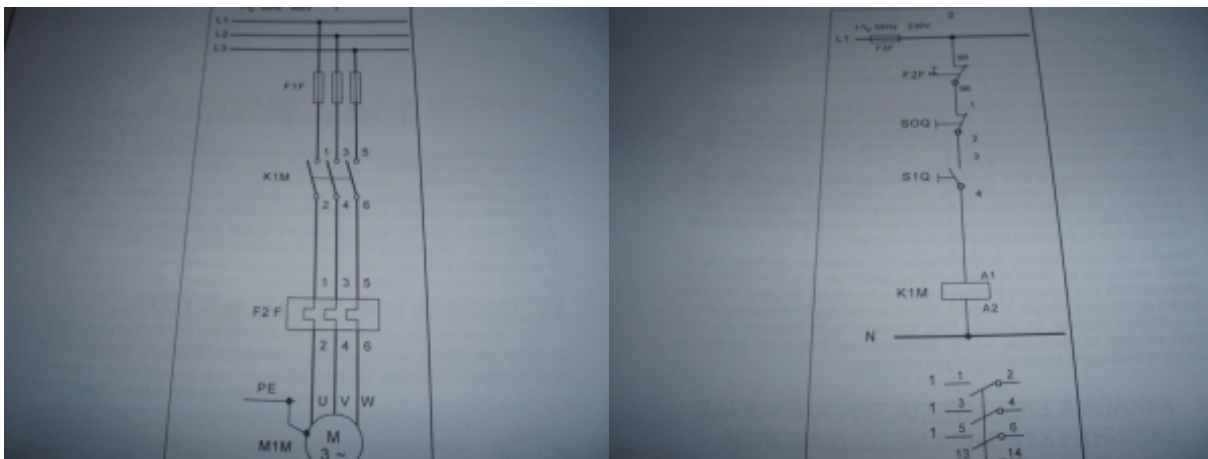


Σχήμα 41: χαρακτηριστικές λειτουργίας ασύγχρονου κινητήρα με απ' ευθείας εκκίνηση

### 3.8 Συνδεσμολογία και εξήγηση λειτουργίας απ' ευθείας εκκίνησης

Σε αυτού του είδους την κατασκευή ο κινητήρας τίθεται σε λειτουργία με απλή κίνηση, πιέζοντας ένα μπουτόν. Αφήνοντας ελεύθερο το μπουτόν ο κινητήρας θα σταματήσει.

Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζεται το διάγραμμα ισχύος και το διάγραμμα ελέγχου.



Σχήμα 42: κύκλωμα ισχύος και κύκλωμα ελέγχου

Όταν έχουμε ένα ηλεκτρικό σχέδιο, αυτό που πρέπει να κάνουμε είναι να αναλύσουμε το διάγραμμα ελέγχου.

Θα παρατηρήσουμε ότι το διάγραμμα ελέγχου αποτελείται από τα εξής στοιχεία:



- Την επαφή F2F του θερμικού στοιχείου προστασίας, το οποίο συνδέεται σε σειρά με το κύκλωμα. Όταν το θερμικό ανιχνεύσει ένα πρόβλημα στον κινητήρα, η επαφή αυτή ανοίγει, με αποτέλεσμα να απομονώνεται το ρελέ ισχύος από την τάση και να διακόπτεται η λειτουργία του κινητήρα.
- Το μπουτόν S0Q, του οποίου η επαφή είναι σε φυσιολογική θέση κλειστή. Το συγκεκριμένο μπουτόν ονομάζεται έκτακτης ανάγκης. Είναι υποχρεωτική η τοποθέτηση αυτού του εξαρτήματος σε όλες τις ηλεκτρικές συσκευές, αφού επιτρέπει το ολικό σταμάτημα της μηχανής σε περίπτωση ανάγκης.
- Το μπουτόν S1Q, το οποίο είναι το μπουτόν ενεργοποίησης του κινητήρα.
- Το πηνίο K1M, το οποίο εκκινεί τον κινητήρα.

Η λειτουργία του παραπάνω κυκλώματος ελέγχου έχει ως εξής: Μόλις πατήσουμε το μπουτόν S1Q ενεργοποιείται το πηνίο K1M, και με αυτόν τον τρόπο ο κινητήρας M1M. Μόλις σταματήσουμε να πατάμε το μπουτόν και το αφήσουμε ελεύθερο, το πηνίο του ρελέ ισχύος K1M απενεργοποιείται και επομένως ο κινητήρας M1M σταματά να λειτουργεί.

### 3.9 Εκκίνηση με αυτομετασχηματιστή

Για την εκκίνηση μεγάλων ασύγχρονων κινητήρων βραχυκυκλωμένου δρομέα, χρησιμοποιείται συνήθως τριφασικός αυτομετασχηματιστής.

Με τη μέθοδο αυτή, μας δίνεται η δυνατότητα να έχουμε ελαφρώς μεγαλύτερη ροπή εκκίνησης απ' ό,τι στην εκκίνηση με αντιστάσεις στο στάτη.

Με την παραδοχή ιδανικής λειτουργίας του αυτομετασχηματιστή, έχουμε

$$V_{εκ} = \frac{V}{k}, I_{εκ} = \frac{V_{εκ}}{Z}$$

όπου  $V$  = η τάση ανά φάση στο εξωτερικό κύκλωμα, (V)

$I_{ε}$  = το ρεύμα εκκίνησης ανά φάση στο εξωτερικό κύκλωμα, (A)

$V_{εκ}$  = η τάση εκκίνησης, (V)

$I_{εκ}$  = το ρεύμα εκκίνησης ανά φάση στον κινητήρα, (A)

$k$  = η σχέση μεταφοράς στον αυτομετασχηματιστή και

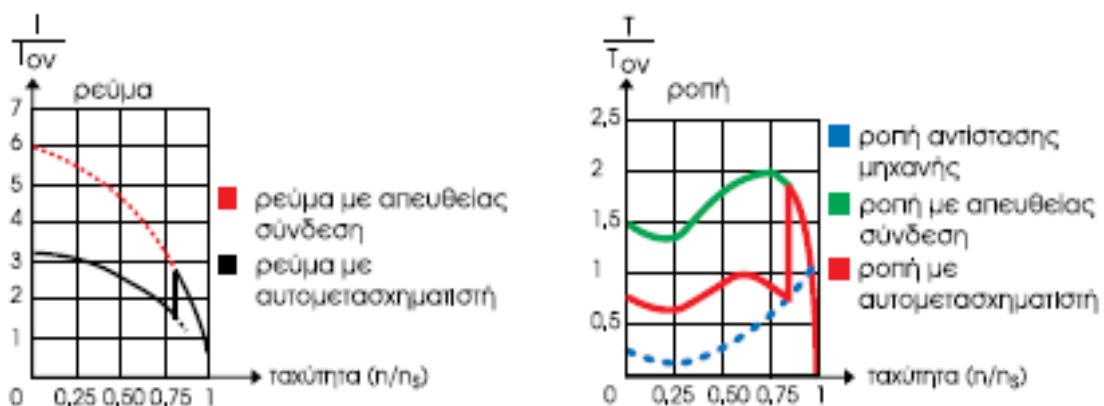
$Z$  = η ανά φάση σύνθετη αντίσταση του κινητήρα κατά την εκκίνηση ( $s=1$ ), ( $\Omega$ )

Τα χαρακτηριστικά του είναι:

Το ρεύμα εκκίνησης  $I_{εκ}=3,5I_{ov}$

Η ροπή εκκίνησης  $T_{εκ}=0,8T_{ov}$ , μικρή ροπή εκκίνησης

Σύνθετος εξοπλισμός, αδυναμία ρυθμισης



Σχήμα 43: χαρακτηριστικές λειτουργίας ασύγχρονου κινητήρα με αυτομετασχηματιστή

### 3.10 Συνδεσμολογία και εξήγηση λειτουργίας εκκίνησης με αυτομετασχηματιστή

Με τον αυτομετασχηματιστή η πλήρης τάση παρέχεται κλιμακωτά, αφού ο κινητήρας έχει φτάσει την ονομαστική του ταχύτητα. Κατόπιν, αποσυνδέουμε τον αυτομετασχηματιστή μέσω του διακόπτη διπλής ενέργειας  $\Delta 1$  και συνδέουμε τον κινητήρα απ' ευθείας με το δίκτυο για την κανονική του λειτουργία.

Στο παρακάτω σχήμα δείχνει το κύκλωμα της εκκίνησης με τριφασικό αυτομετασχηματιστή. Αυτό το είδος της εκκίνησης το κύκλωμα χρησιμοποιεί ένα αυτομετασχηματιστή να εφαρμόζει μειωμένη τάση στα άκρα των τυλιγμάτων του κινητήρα κατά την εκκίνηση. Τρεις αυτομετασχηματιστές συνδέονται κατά αστέρα με την πηγή τροφοδοσίας, για να παρέχει ένα επαρκές ρεύμα εκκίνησης για τον

κινητήρα.

Μετά από ένα ορισμένο χρονικό διάστημα, εφαρμόζουμε την πλήρη τάση στον κινητήρα παρακάμπτοντας τους αυτομετασχηματιστές.

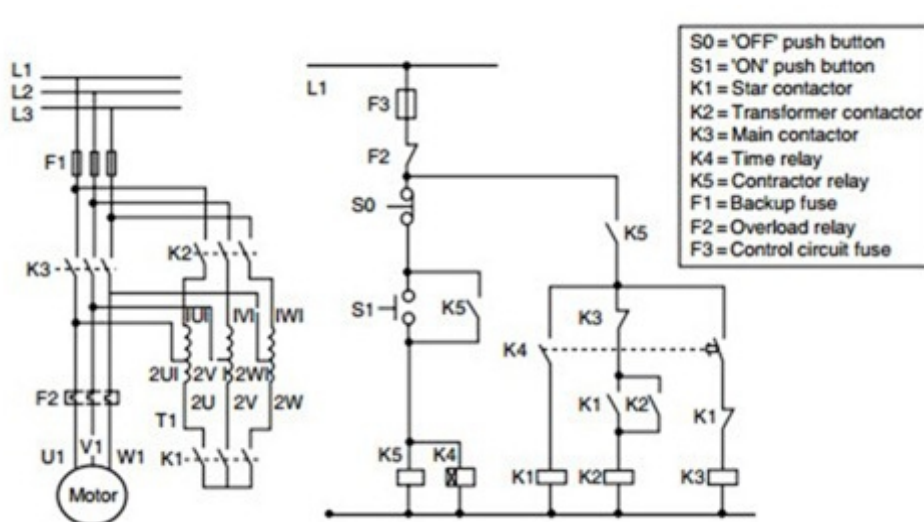
### 3.11 Η λειτουργία ενός αυτομετασχηματιστή

Η ασφάλεια (F1) και το ρελέ υπερφόρτωσης (F2) παρέχουν προστασία στο κύριο κύκλωμα. Ομοίως, το κύκλωμα ελέγχου έχει την ασφάλεια (F3) και ρελέ υπερφόρτωσης επαφής (F2) NC.

### 3.12 Μειωμένη διαμόρφωση τάσης

Σε αυτό το κύκλωμα, το ρελέ (K5) ενεργοποιείται όταν το κουμπί έναρξης πιεστεί και θα παραμείνει ασφαλισμένο μέχρι να πατηθεί το κουμπί διακοπής ή οι ασφάλειες στο κύκλωμα ελέγχου ή ρελέ υπερφόρτωσης.

Όταν το ρελέ K5 ενεργοποιηθεί, θα ενεργοποιήσει το πηνίο ρελέ χρονοδιακόπτη (K4). Αυτό με τη σειρά του θα ενεργοποιήσει το ρελέ K1. Το κλείσιμο της επαφής ρελέ K1 θα ενεργοποιήσει το ρελέ K2. Έτσι, ρελέ K5, K4, K1, K2 και είναι σε ενεργοποιημένη κατάσταση σε αυτό το στάδιο. Αυτό θα οδηγήσει σε εκκίνηση του κινητήρα μέσω ενός αυτομετασχηματιστή με μειωμένη τάση και με σύνδεση κατά αστέρα, λόγω του K1 και K2 επαφεία.



Σχήμα 44: κύκλωμα ισχύος και κύκλωμα ελέγχου

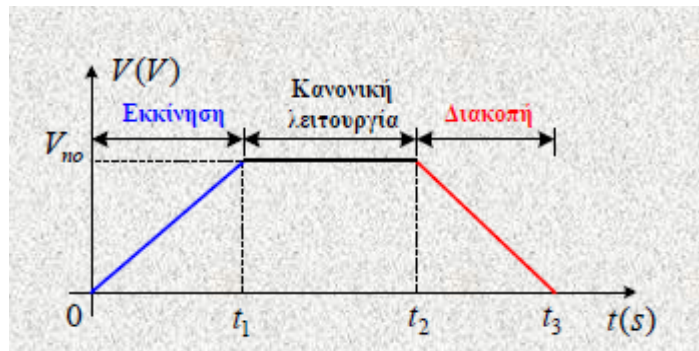
### 3.13 Διαμόρφωση πλήρους τάσης

Όταν το χρονόμετρο ρελέ (K4) τη πάροδο του χρόνου, θα απενεργοποιήσει το ρελέ K1. Ταυτόχρονα, το ρελέ K3 θα ενεργοποιηθεί, αυτό με τη σειρά του θα απενεργοποιήσει το ρελέ K2.

Ο κινητήρας θα λειτουργεί πλέον σε πλήρη τάση με το ρελέ K3 να είναι σε ενεργή κατάσταση .

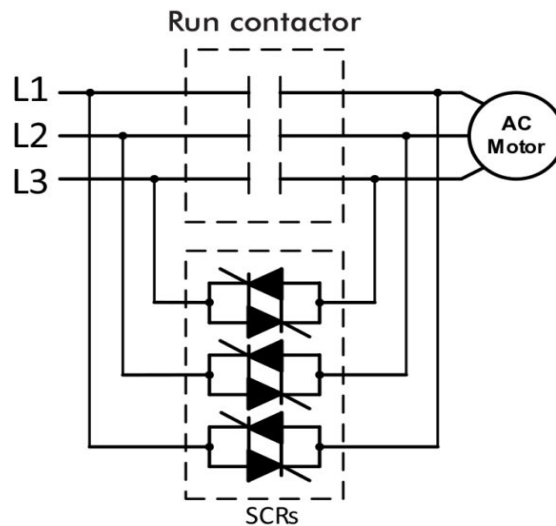
### 3.14 Ηλεκτρονική εκκίνηση

Ο ηλεκτρονικός ρυθμιστής τάσης, μέσω των θυρίστορ αυξάνει ομαλά την εναλλασσόμενη τάση τροφοδοσίας και η εκκίνηση γίνεται με χαμηλά ρεύματα. Υπάρχει η δυνατότητα επίσης για ομαλό σταμάτημα.

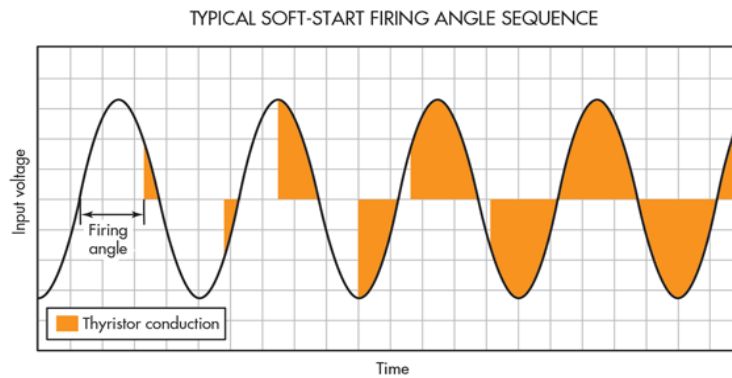


Σχήμα 45: γραμμική μεταβολή της τάσης εκκίνησης,λειτουργίας και διακοπής σε σχέση με τον χρόνο

Ο εκκινητής ψαλιδίζει την τάση δικτύου, ελέγχοντας τη γωνία έναυσης των θυρίστορ. Με αυτό τον τρόπο ελέγχει το πλάτος της τάσης που εφαρμόζεται στα άκρα του κινητήρα τη στιγμή της εκκίνησης. Η γωνία έναυσης των θυρίστορ ελέγχεται απο έναν μικροεπεξεργαστή, ο οποίος παρακολουθεί και ελέγχει όλες τις παραμέτρους εκκίνησης του κινητήρα. Ο μικροεπεξεργαστής συνεχίζει να παρακολουθεί τον κινητήρα και μετά το στάδιο της εκκίνησης.



**Σχήμα 46: κύκλωμα ηλεκτρονικού εκκινητή**



**Σχήμα 47: τάση τροφοδότησης κινητήρα**

Η μειωμένη τάση στον ηλεκτρονικό εκκινητή βοηθάει στην προστασία του κινητήρα και του συνδεδεμένου εξοπλισμού από βλάβη, ελέγχοντας την τάση κινητήρα. Αυτό περιορίζει το αρχικό ρεύμα εκκίνησης και μειώνει το μηχανικό σοκ που σχετίζεται με την εκκίνηση, παρέχοντας παράλληλα μια πιο σταδιακή εκκίνηση σε πλήρη ταχύτητα. Ο ηλεκτρονικός ρυθμιστής τάσης είναι επίσης ευεργετική για τα ηλεκτρικά συστήματα με περιορισμένη τρέχουσα ικανότητα, δεδομένου ότι περιορίζει το ρεύμα εκκίνησης για τον κινητήρα.

Το soft-starter παράγει μια πιο οργανωμένη επιτάχυνση του κινητήρα σε πλήρη ταχύτητα με την αύξηση της τάσης του ηλεκτροκινητήρα σταδιακά. Μπορούν επίσης να παρέχουν μια σταδιακή επιβράδυνση για να σταματήσει όταν μια ξαφνική διακοπή μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα στον συνδεδεμένο εξοπλισμό.

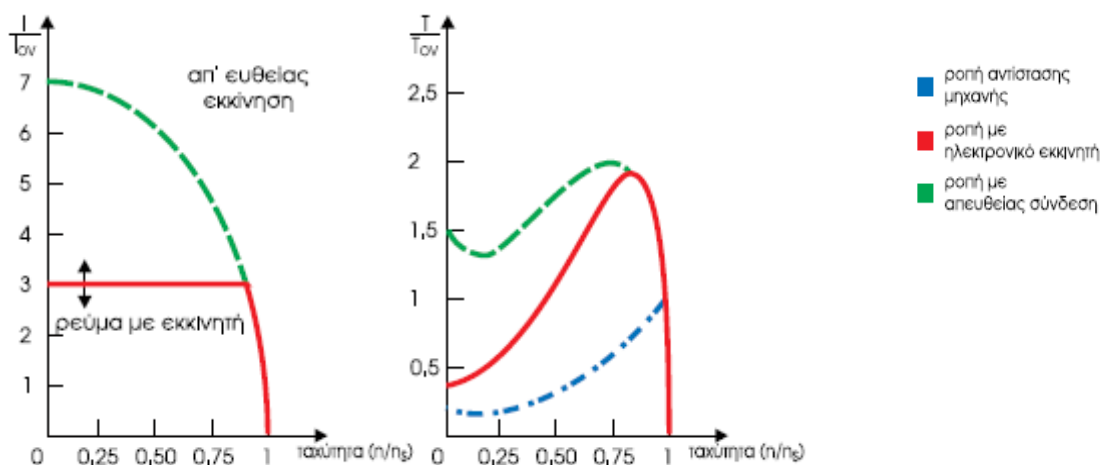
Αν η ροπή που χρειάζεται κατά την εκκίνηση είναι αρκετά μεγάλη δεν συνιστάται η χρήση του soft-starter.

Τα soft-starter χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπου:

- Ταχύτητα αναδιατάσσουν και ελέγχου ροπής είναι επιθυμητή κατά την έναρξη ή τη διακοπή της.
- Υψηλά ρεύματα εκκίνησης με την έναρξη σε μεγάλους κινητήρες θα πρέπει να περιορίζεται για την αποφυγή προβλημάτων δικτύου.
- Σταδιακή και ελεγχόμενη εκκίνηση είναι απαραίτητη για να αποφευχθεί η μεγάλη ροπή, αιχμές και ένταση σε μηχανικά συστήματα, όπως μεταφορείς, συστήματα κίνησης με μάντα, εργαλεία και σύνδεσμοι.
- Αποφυγή κυμάτων πίεσης ή σφυρηλάτηση σε συστήματα σωληνώσεων (όταν στο υγρό αλλάζει η ταχύτητα πολύ γρήγορα) που πρέπει να αποφεύγονται.

Τα χαρακτηριστικά του είναι:

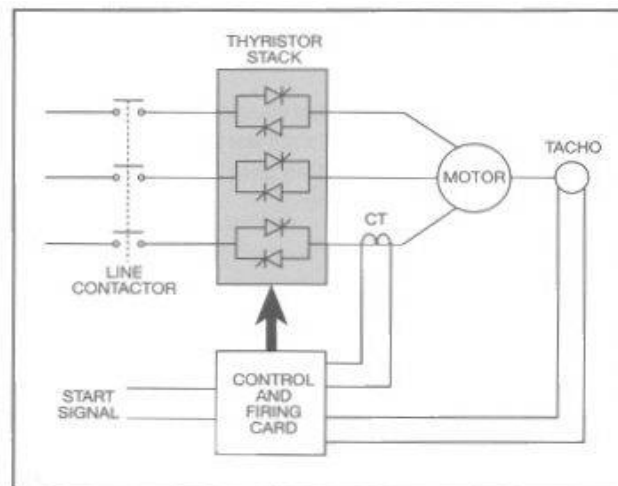
- Το ρεύμα εκκίνησης  $I_{εκ} = 2 \div 5 I_{ον}$
- Η ροπή εκκίνησης  $T_{εκ} = 0,5 \div 1 T_{ον}$
- Δυνατότητα ρύθμισης των παραπάνω παραμέτρων με τις ράμπες επιτάχυνσης και επιβράδυνσης



Σχήμα 48: χαρακτηριστικές λειτουργίας ασύγχρονου κινητήρα με ηλεκτρονική εκκίνηση

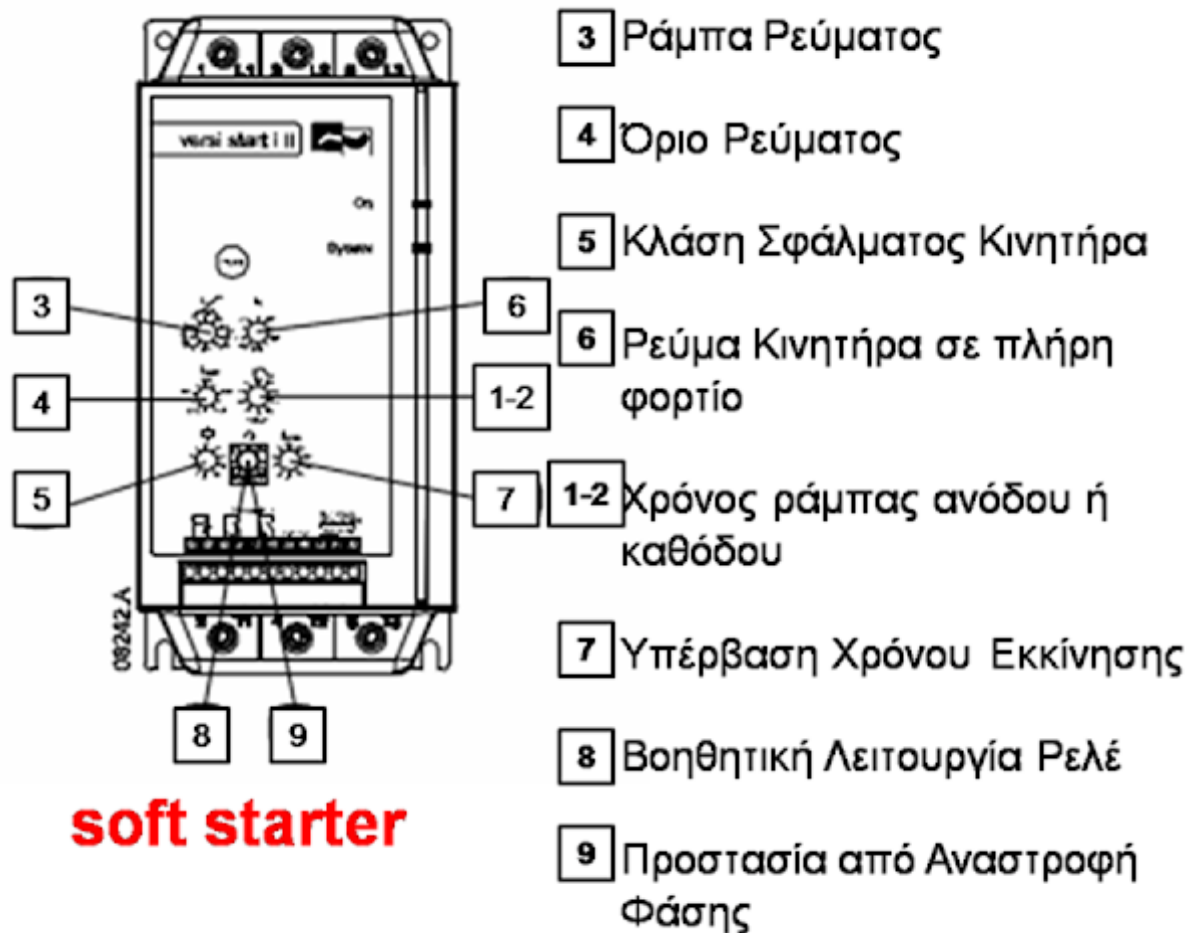
### 3.15 Συνδεσμολογία και εξήγηση λειτουργίας ηλεκτρονικής εκκίνησης

Με την εντολή εκκίνησης και την τροφοδότηση με τις τρεις φάσεις, ενώνει την μία φάση απευθείας στην έξοδο του με γέφυρα. Τις δύο άλλες φάσεις τις έλεγχει, ως προς την τιμή της τάσης τους, με στοιχεία ηλεκτρονικών ισχύος έτσι ώστε σε καθορισμένο και ρυθμιζόμενο χρόνο να φτάσουν στην μέγιστη και κανονική τιμή τους. Στο τέλος αυτής της διαδικασίας εκκίνησης και οι δύο φάσεις ενώνονται με ρελέ απευθείας στα τυλίγματα του κινητήρα.



Σχήμα 49: κύκλωμα ισχύος

Με άλλα λόγια ο κινητήρας συνδέεται κατευθείαν σε συνδεσμολογία τριγώνου και για μερικά δευτερόλεπτα η τάση, και το ρεύμα περιορίζονται με ελεγχόμενη σταδιακή αύξηση τους. Η ροπή και οι στροφές αυξάνονται σταδιακά εως τις ονομαστικές του στροφές.



Σχήμα 50: έλεγχος ηλεκτρονικού εκκινητή

1. Χρόνος ράμπας ανόδου: επιλογή του χρόνου ράμπας ομαλής εκκίνησης ονομάζεται ο χρόνος στον οποίο ο ηλεκτρονικός εκκινητής αποκτά την πλήρη τιμή τάσης ξεκινώντας από την αρχική τιμή τάσης.
2. Χρόνος ράμπας καθόδου: επιλογή του χρόνου ράμπας ομαλούς σταματήματος ονομάζεται ο χρόνος στον οποίο ο ηλεκτρονικός εκκινητής αποκτά την αρχική τιμή τάσης ξεκινώντας από την πλήρη τιμή τάσης .
3. Ράμπα ρεύματος: Επιλογή του αρχικού ρεύματος εκκίνησης σε σχέση με το ονομαστικό ρεύμα και του χρόνου ράμπας ανόδου.
4. Όριο ρεύματος: Επιλογή του όριου ρεύματος ονομάζεται το όριο ρεύματος που είναι το ανώτατο επίπεδο ρεύματος εκκίνησης σε σχέση με το ονομαστικό ρεύμα που ο ηλεκτρονικός εκκινητής θα στείλει στον κινητήρα κατά την διάρκεια της



ομαλής εκκίνησης.

5. Κλάση σφάλματος κινητήρα: Επιλογή της κλάσης σφάλματος για την προστασία υπερφόρτωσης του κινητήρα. Είναι ο χρόνος λειτουργίας ξεπερνώντας το μέγιστο ρεύμα λειτουργίας.

6. Ρεύμα κινητήρα σε πλήρη φορτίο: Ρύθμιση του ηλεκτρονικού εκκινητή σύμφωνα με την ισχύ του κινητήρα σε πλήρη φορτίο.

7. Υπέρβαση χρόνου εκκίνησης: Ρύθμιση της προστασίας υπέρβασης του χρόνου εκκίνησης.

8. Βοηθητική λειτουργία ρελέ: Ρύθμιση της λειτουργίας των προγραμματιζόμενων εξόδων του ηλεκτρονικού εκκινητή.

9. Προστασία απο ανάστροφη φάση: Ρύθμιση της προστασίας ακολουθίας φάσης του ηλεκτρονικού εκκινητή απο την τροφοδοσία.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4ο

### ΡΥΘΜΙΣΗ ΤΩΝ ΣΤΡΟΦΩΝ

#### 4.1 Έλεγχος της ταχύτητας των επαγωγικών κινητήρων

Η μεταβολή των στροφών ενός ασύγχρονου 3Φ κινητήρα επιτυγχάνεται από τη σχέση:  $n = n_s(1-s)$

Αντικαθιστώντας τη σύγχρονη ταχύτητα  $n_s$  έχουμε:

$$n = \frac{60 \cdot f}{p} \cdot (1 - s) \quad (4.1)$$

f: είναι η συχνότητα της τάσης τροφοδοσίας σε Hz

p: το πλήθος των ζευγών των μαγνητικών πόλων

s: η ολίσθηση

Για να αλλάξει η ταχύτητα σ'έναν ασύγχρονο κινητήρα όπως παρατηρούμε στη σχέση θα πρέπει να αλλάξει η συχνότητα ή το πλήθος των ζευγών των μαγνητικών πόλων.

Η ολίσθηση αλλάζει κυρίως με το φορτίο.

Η ρύθμιση των στροφών ενός ασύγχρονου 3Φ κινητήρα επιτυγχάνεται:

α) Με τη τοποθέτηση περισσότερων του ενός τυλιγμάτων στο στάτη με διαφορετικό αριθμό πόλων (π.χ. κινητήρας δυο ταχυτήτων, συνδεσμολογία Dahlander, ανελκυστήρες κ.λπ.)

β) Με τη γραμμική μεταβολή της συχνότητας τροφοδοσίας του στάτη χρησιμοποιώντας ηλεκτρονικά ισχύος (αντιστροφείς)

#### 4.2 Ρύθμιση των στροφών με αλλαγή του πλήθους των ζευγών των μαγνητικών πόλων

-μέθοδος διαδοχικών πόλων

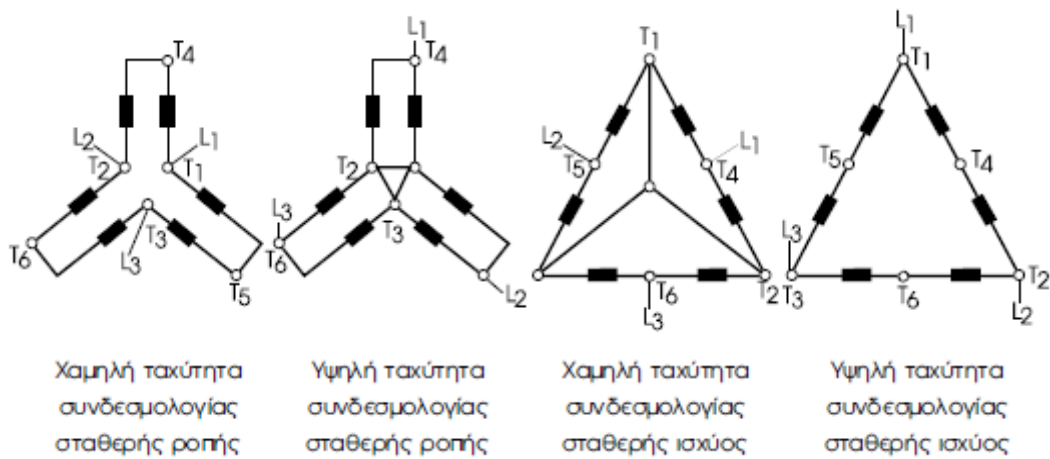
-πολλαπλά τυλίγματα στο στάτη

-διαμόρφωση πλάτους του πόλου(PAM)

Η μέθοδος διαδοχικών πολών βασίζεται στη δυνατότητα διπλασιασμού κάθε φορά των πόλων με απλές αλλαγές στη συνδεσμολογία των πηνίων διέγερσης. ( κινητήρες 2 ταχυτήτων)

Η μέθοδος πολλαπλών τυλιγμάτων στο στάτη γίνεται με την παρεμβολή του ενός του άλλου τυλίγματος μας δίνει διαφορετική ταχύτητα.( κινητήρες 4 ταχυτήτων)

Η μέθοδος διαμόρφωση πλάτους του πόλου(PAM) είναι ένας τρόπος αλλαγής του πλήθους των πόλων του στάτη με λόγο διαφορετικό από 2 προς 1, που επιτυγχάνεται με τη μεταβολή των συνδέσεων στα έξι άκρα του στάτη.



**Εικόνα 51: Διάφορες συνδεσμολογίες ασύγχρονου 3Φ κινητήρα**

| Λόγος ζευγών πόλων | Σύγχρονη ταχύτητα: $n_s = 60f/p$ (στρ/min)<br>$f=50\text{Hz}$ |
|--------------------|---|
| 1:4                | 3000/750  |
| 2:3                | 1500/1000   |
| 2:5                | 1500/600  |
| 3:4                | 1000/750  |
| 3:5                | 1000/600  |
| 4:5                | 750/600   |
| 4:6                | 750/500   |
| 5:6                | 600/500   |

**Σχήμα 51: Λόγος ζευγών πόλων με τις αντίστοιχες σύγχρονες ταχύτητες**

### 4.3 Ρύθμιση των στροφών με τη γραμμική μεταβολή της συχνότητας τροφοδοσίας του στάτη χρησιμοποιώντας ηλεκτρονικά ισχύος (αντιστροφείς)

#### 4.3.1 Επίδραση της ρύθμισης του λόγου V/f

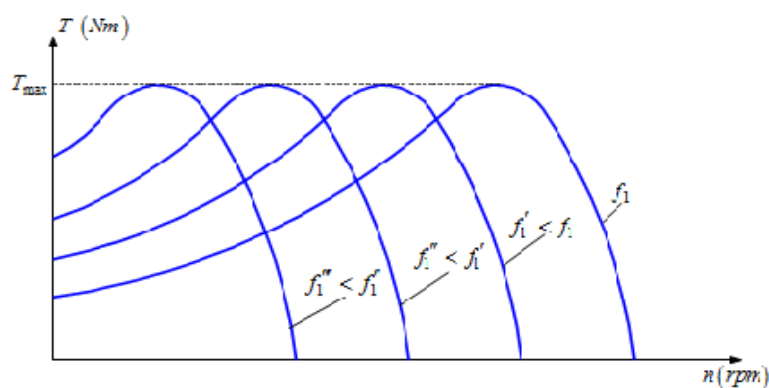
Με τη μεταβολή της συχνότητας της τάσης τροφοδοσίας ( συνηθέστερος και πλέον αποδοτικός τρόπος ), επιτυγχάνεται συνεχής ρύθμιση των στροφών, από μηδέν έως και τη μέγιστη επιτρεπόμενη ταχύτητα. Συνήθως, για την καλύτερη αξιοποίηση των μαγνητικών χαρακτηριστικών του σιδηρομαγνητικού κυκλώματος, η μεταβολή της συχνότητας συνοδεύεται από αντίστοιχη μεταβολή του μεγέθους της τάσης, έτσι ώστε η μαγνητική ροή διακένου να είναι η μέγιστη δυνατή.

Ένας άλλος τρόπος ελέγχου των στροφών, είναι με τη μεταβολή του μεγέθους της τάσης τροφοδοσίας. Η μέθοδος αυτή, λόγω των αρκετά υψηλών απωλειών χαλκού στον δρομέα, χρησιμοποιείται σε κινητήρες μικρής ισχύος και σε περιοχή στροφών κοντά στις ονομαστικές.

Ένα επιπλέον μειονέκτημα, είναι η περιορισμένη ρύθμιση των στροφών στην περιοχή

$$s_{\max T} < s < 0$$

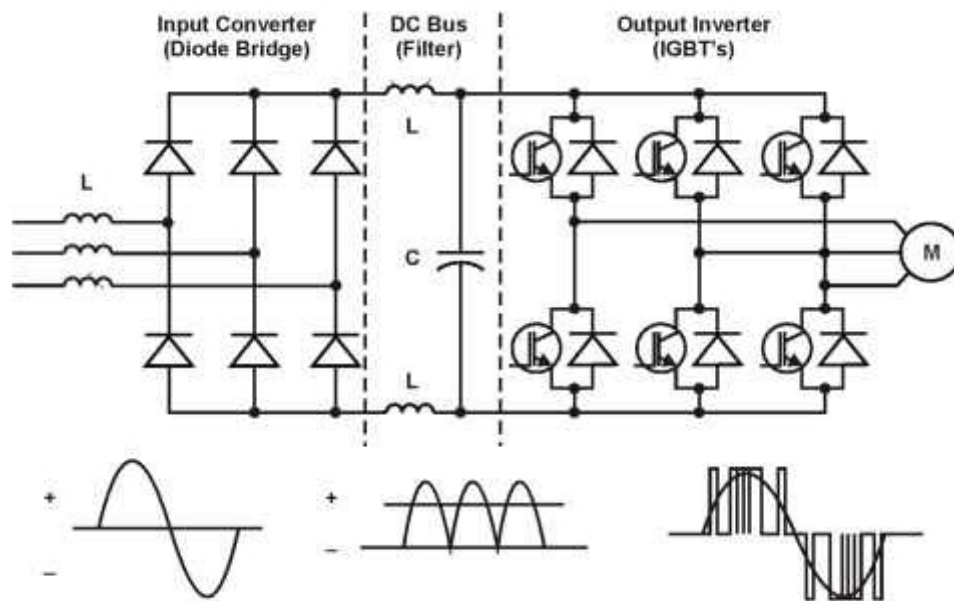
έτσι ώστε να μην ξεπεραστεί το σημείο ανατροπής, το οποίο θα οδηγήσει τον κινητήρα στην ασταθή περιοχή λειτουργίας.



Σχήμα 52: μεταβολή της καμπύλης ροπής-στροφών ενός ασύγχρονου κινητήρα καθώς η συχνότητα λειτουργίας του μεταβάλλεται

#### 4.4 Η συσκευή ελέγχου μεταβλητής συχνότητας

Μια συσκευή ελέγχου του κινητήρα προστατεύει και ελέγχει την ταχύτητα των επαγωγικών κινητήρων εναλλασσόμενου ρεύματος. Μια συσκευή ελέγχου μπορεί να ελέγξει την ταχύτητα του κινητήρα κατά τη διάρκεια του κύκλου εκκίνησης και στάσης, καθώς και σε όλο τον κύκλο λειτουργίας. Η συσκευή αναφέρεται επίσης σε έλεγχο όπως μεταβλητής ταχύτητας (συστήματα μεταβλητής ταχύτητας)



Σχήμα 53: κύκλωμα ισχύος και κυματομορφές ενός ηλεκτρονικού ρυθμιστή στροφών

4.5 Πώς λειτουργεί μια συσκευή ελέγχου

Η συσκευές ελέγχου μετατρέπουν την σταθερή συχνότητα και την ισχύ εισόδου τάσης σε ρυθμιζόμενη συχνότητα και τάσης για τον έλεγχο της ταχύτητας των κινητήρων επαγωγής εναλλασσόμενου ρεύματος. Η συχνότητα της ισχύος που εφαρμόζεται σε έναν κινητήρα εναλλασσόμενου ρεύματος καθορίζει την ταχύτητα του κινητήρα, με βάση την ακόλουθη εξίσωση:

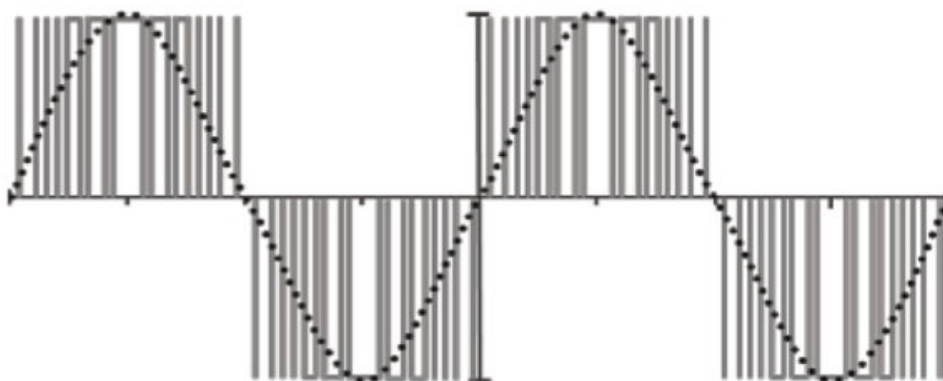
$$N = \frac{120f}{p} \quad (4.2)$$

$N$ =ταχύτητα(rpm).

$f$ =συχνότητα(Hz).

$p$  = αριθμός πόλων του κινητήρα.

Η παροχή ρεύματος προέρχεται από το δίκτυο του ρεύματος (συνήθως 230, 380, 415, 480, 575 ή 690V με 50 ή 60Hz AC). Ο ανορθωτής μετατρέπει το δίκτυο εναλλασσόμενου ρεύματος σε συνεχές ρεύμα. Τα πηνία και οι πυκνωτές μαζί εξομαλύνουν το ανορθωμένο ρεύμα DC για να παρέχει καθαρή ενέργεια DC στο μετατροπέα με χαμηλή περιεκτικότητα κυματισμού. Ένας μετατροπέας χρησιμοποιεί συνεχές ρεύμα, τα τρανζίστορ μπορούν να ανάβουν και να σβήνουν για να δημιουργήσει μια κυματομορφή της τάσης εναλλασσόμενου ρεύματος που παρέχει ενέργεια στον κινητήρα. Τα τρανζίστορ δημιουργούν μια κυματομορφή ρεύματος με τη χρήση παλμών πλάτους (PWM) μεταγωγής. Η συχνότητα με την οποία λαμβάνει χώρα η εναλλαγή, η οποία διαφέρει από κατασκευαστή σε κατασκευαστή, ονομάζεται "φέρουσα συχνότητα."



**Σχήμα 54: κυματομορφή διαμορφωμένου παλμού**

Οφέλη από τη μονάδα μεταβλητής συχνότητας:

- Πλήρως ρυθμιζόμενη ταχύτητα για τις αντλίες, μεταφορείς.
- Ελεγχόμενη εκκίνηση, διακοπή και επιτάχυνση.
- Δυναμικό έλεγχο ροπής.
- Ομαλή κίνηση για εφαρμογές όπως ανελκυστήρες και κυλιόμενες σκάλες.

- Σταθεροποιεί την ταχύτητα, κάνοντας κινήσεις ιδανικά για την κατασκευή εξοπλισμού και βιομηχανικού εξοπλισμού, όπως μίξερ, μύλοι και θραυστήρες.
- Αυτο-διάγνωση και επικοινωνιών.
- Προηγμένη προστασία υπερφόρτωσης.
- PLC-όπως λειτουργικότητα και προγραμματισμού λογισμικού.
- Ψηφιακές εισόδους / εξόδους (DI / DO).
- Αναλογικές εισόδους / εξόδους (AI / AO).
- εξόδους ρελέ.
- Μείωση κατά τις ώρες αιχμής της ζήτησης ενέργειας.
- Μια μείωση της ισχύος όταν δεν απαιτείται.

## 4.6 Συνδεσμολογία και εξήγηση λειτουργίας

### 4.6.1 Οι Ρυθμιστές Στροφών της Σειράς iC5

Οι ρυθμιστές στροφών της σειράς iC5 τροφοδοτούνται από μονοφασική τάση 230Vac, καλύπτουν ισχύεις από **0.37kW** έως **3kW** και αποτελούν την ιδανική λύση για τον έλεγχο των στροφών τριφασικών κινητήρων μικρής ισχύος.



Σχήμα 55: ηλεκτρονικός ρυθμιστής στροφών

Οι ρυθμιστές στροφών της σειράς iC5 διαθέτουν, μεταξύ άλλων:

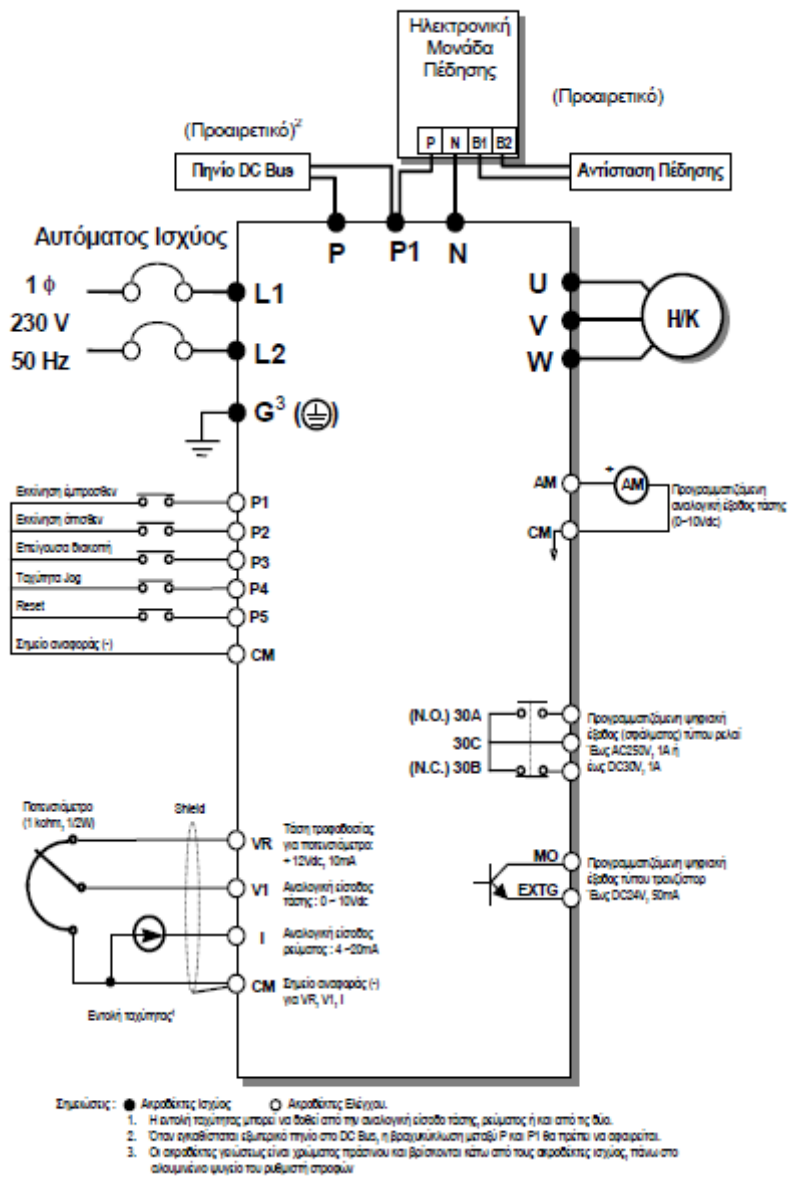
- Ενσωματωμένο ποτενσιόμετρο και πλήκτρα Start – Stop
- 5 ψηφιακές εισόδους, 3 ψηφιακές εξόδους, 2 αναλογικές εισόδους και 1 αναλογική έξοδο.
- Εύκολο προγραμματισμό των παραμέτρων τους μέσω ψηφιακού χειριστηρίου το οποίο περιλαμβάνει οθόνη 3 ψηφίων (επτά σημείων) και ειδικό πλήκτρο πέντε κατευθύνσεων (πλήκτρο πλοήγησης).
- Δυνατότητα σειριακής επικοινωνίας τύπου RS485 (Modbus RTU).
- Αύξηση της ροπής στις χαμηλές στροφές.
- 8 ανεξάρτητες ράμπες επιτάχυνσης - επιβράδυνσης.
- Ειδικά προγράμματα για την εξοικονόμηση ενέργειας σε εφαρμογές αντλιών & ανεμιστήρων.
- Πρόγραμμα αυτόματης αντιστάθμισης ολισθήσεως.
- Αυτόματη επανεκκίνηση μετά από διακοπή σφάλματος ή τάσεως.
- Αυτόματη αντιμετώπιση υπερφόρτισης χωρίς τη διακοπή της λειτουργίας.
- 8 προγραμματιζόμενα βήματα προεπιλεγμένων ταχυτήτων.
- Ενσωματωμένο ρυθμιζόμενο ηλεκτρονικό θερμικό για την προστασία του ηλεκτροκινητήρα.
- Ενσωματωμένο κλειστό βρόχο τύπου PID.
- Εξαιρετικά μικρό βάρος και διαστάσεις.



#### 4.6.2 Τεχνικά Χαρακτηριστικά της σειράς iC5

| Τύπος  |                          | SV004iC5-1   | SV008iC5-1           | SV015iC5-1          | SV022iC5-1           |
|--|--------------------------|--|----------------------|---------------------|----------------------|
| <b>Ισχύς Κινητήρα</b>                        | <b>HP</b>                | <i>0.5 &amp; 0.75</i>  | <i>1.0 &amp; 1.5</i> | <i>2.0</i>          | <i>3.0 &amp; 4.0</i> |
| <b>Έξοδος</b>                                | <i>Ρεύμα</i>             | 3 Amp  | 5 Amp                | 8 Amp               | 12 Amp               |
|  | Καλώδιο                  | 1.5 mm <sup>2</sup>  |                      | 2.5 mm <sup>2</sup> |                      |
|  | Συχνότητα                | 0.5 - 400 Hz   |                      |                     |                      |
|  | Τάση                     | Τριφασικό : 0 – Τάση εισόδου (230V)  |                      |                     |                      |
| <b>Είσοδος</b>                               | Συχνότητα                | 50 - 60 (±5%) Hz   |                      |                     |                      |
|  | Τάση                     | Μονοφασικό : 200 - 230 Volt (±10%)   |                      |                     |                      |
|  | Ασφάλεια                 | 1Φ / 10 A  | 1Φ / 16 A            | 1Φ / 25 A           | 1Φ / 32 A            |
|  | Καλώδιο                  | 2.5 mm <sup>2</sup>  |                      | 4 mm <sup>2</sup>   |                      |
| <b>Μέθοδος Ελέγχου</b>                       |                          | Διανυσματικός έλεγχος με PWM (Sensorless Vector Control)   |                      |                     |                      |
| <b>Ανάλυση Ρύθμισης</b>                      |                          | 0.01 Hz  |                      |                     |                      |
| <b>Ακρίβεια Συχνότητας Εξόδου</b>            |                          | ±0.01% της μέγιστης ορισθείσας συχνότητας (με ψηφιακή ρύθμιση)<br>±0.1% της μέγιστης ορισθείσας συχνότητας (με αναλογική ρύθμιση)  |                      |                     |                      |
| <b>Υπερφόρτιση</b>                           |                          | 150% για 1 λεπτό (μία κάθε 10 λεπτά)   |                      |                     |                      |
| <b>Ρύθμιση Συχνότητας</b>                    |                          | Αναλογική: 0 - 10 V / 0 ή 4 - 20 mA / Ποτενσιόμετρο<br>Ψηφιακή: Ψηφιακό χειριστήριο  |                      |                     |                      |
| <b>Χρόνος Επιτάχυνσης &amp; Επιβράδυνσης</b> |                          | 0.1 - 6000 Δευτερόλεπτα  |                      |                     |                      |
| <b>Είσοδοι</b>                               |                          | Πέντε (5) ψηφιακές & Δύο (2) αναλογικές (0-10Vdc / 0 ή 4 – 20mA)   |                      |                     |                      |
| <b>Έξοδοι</b>                                |                          | Δύο (2) ψηφιακές & μία (1) αναλογική (0-10Vdc)   |                      |                     |                      |
| <b>Προστασίες</b>                            |                          | Υπέρταση, Υπόταση, Υπερένταση, Υπερθέρμανση ρυθμιστή στροφών, Υπερφόρτιση κινητήρα, Διαρροή ρεύματος προς τη γη, Έλλειψη φάσης, Εξωτερικό σφάλμα, Βλάβη ανεμιστήρα και Σφάλμα κάρτας ελέγχου |                      |                     |                      |
| <b>Προστασία Κελύφους</b>                    |                          | IP20   |                      |                     |                      |
| <b>Συνθήκες Λειτουργίας</b>                  | <i>Θερμοκρ. Περιβάλ.</i> | -10 °C ÷ +40 °C (Fs≥7kHz)<br>-10 °C ÷ +50 °C (Fs≤6kHz)   |                      |                     |                      |
|  | <i>Υγρασία</i>           | Έως 90 %   |                      |                     |                      |
|  | <i>Υψόμετρο</i>          | Έως 1000 m   |                      |                     |                      |
| <b>Ψύξη</b>                                  |                          | Με ενσωματωμένο ανεμιστήρα   |                      |                     |                      |

### 4.6.3 Σχέδιο Καλωδιώσεων της Σειράς iC5



#### 4.6.4 Περιγραφή Ακροδεκτών της Σειράς iC5

|                               | Συμβολισμός | Λειτουργία   |
|-------------------------------|-------------|--|
| <b>Ακροδέκτες<br/>Ισχύος</b>  | L1, L2      | Ακροδέκτες <b>μονοφασικής</b> τροφοδοσίας (σύνδεση με το δίκτυο) |
|                               | U, V, W     | Ακροδέκτες τριφασικής εξόδου (σύνδεση με τον κινητήρα)           |
|                               | P, P1       | Ακροδέκτες σύνδεσης εξωτερικού πηνίου εξομάλυνσης                |
|                               | P1, N       | Ακροδέκτες σύνδεσης ηλεκτρονικής μονάδας πέδησης                 |
| <b>Ακροδέκτες<br/>Ελέγχου</b> | V1          | Είσοδος για ρύθμιση ταχύτητας μέσω πηγής τάσης (0-10Vdc)         |
|                               | VR          | Τάση τροφοδοσίας ποτενσιόμετρου ρύθμισης ταχύτητας (12Vdc)       |
|                               | I           | Είσοδος για ρύθμιση ταχύτητας μέσω πηγής ρεύματος(4-20mA)        |
|                               | AM          | Προγραμματιζόμενη αναλογική έξοδος τάσης (0-10Vdc)               |
|                               | P1          | Είσοδος για εκκίνηση με ορθή φορά περιστροφής                    |
|                               | P2          | Είσοδος για εκκίνηση με ανάστροφη φόρα περιστροφής               |
|                               | P3          | Είσοδος επείγουσας εντολής σταματήματος του κινητήρα             |
|                               | P4          | Είσοδος για την ενεργοποίηση της ταχύτητας «JOG»                 |
|                               | P5          | Είσοδος για την επαναφορά μετά από σφάλμα (Reset)                |
|                               | CM          | Σημείο αναφοράς (-) MONO για τα παραπάνω 9 σήματα                |
|                               | 30A-30C     | Ψηφιακή έξοδος σφάλματος (επαφή ανοικτή σε ηρεμία – NO)          |
|                               | 30B-30C     | Ψηφιακή έξοδος σφάλματος (επαφή κλειστή σε ηρεμία – NC)          |
|                               | MO-EXTG     | Προγραμματιζόμενη ψηφιακή έξοδος τύπου τρανζίστορ                |

#### 4.7 Οι Ρυθμιστές Στροφών της Σειράς iG5A

Οι ρυθμιστές στροφών της σειράς iG5A καλύπτουν ισχύεις από **0.37kW** έως **7.5kW** και αποτελούν την ιδανική λύση για τον έλεγχο των στροφών κινητήρων μικρής ισχύος.



Σχήμα 55: ηλεκτρονικός ρυθμιστής στροφών

Οι ρυθμιστές στροφών της σειράς iG5A διαθέτουν, μεταξύ άλλων:

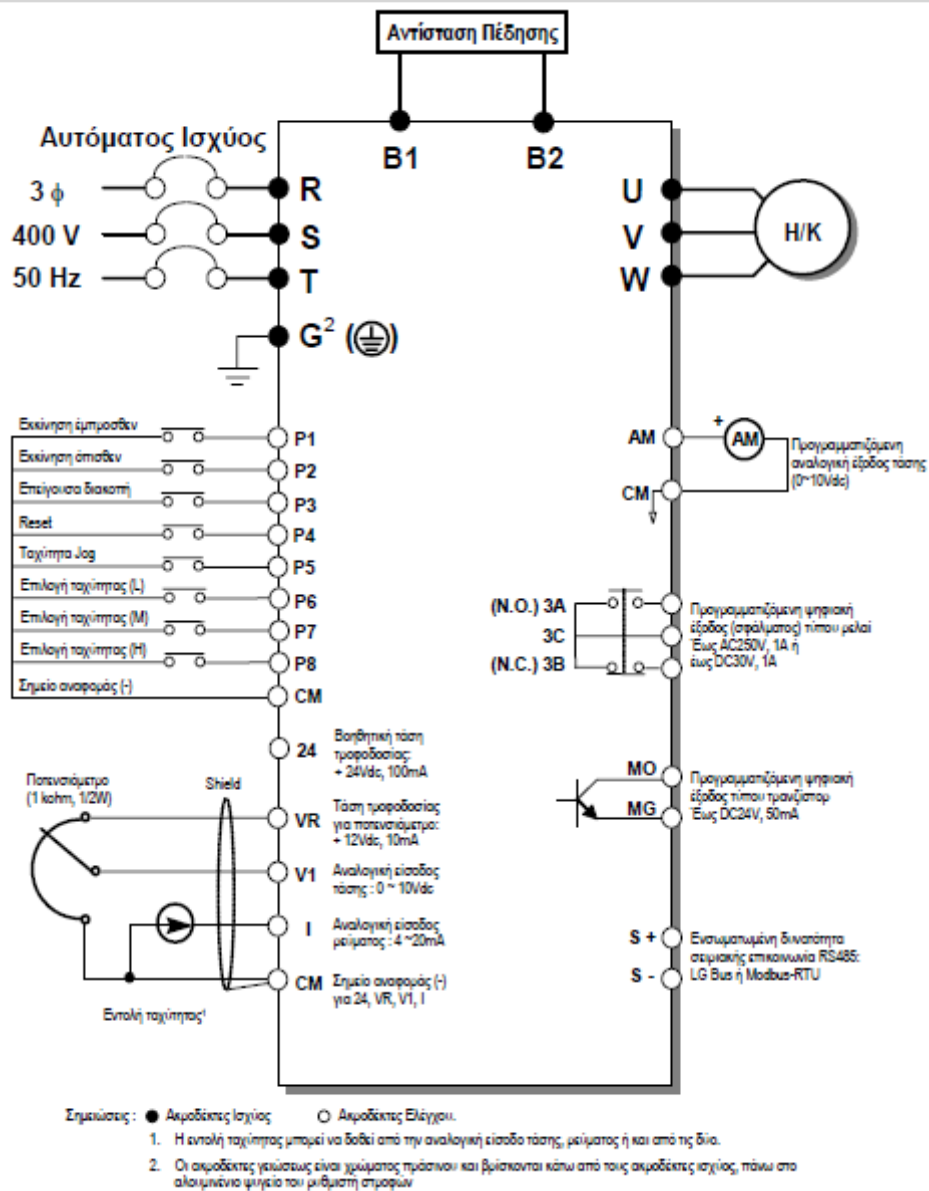
- 8 ψηφιακές εισόδους, 3 ψηφιακές εξόδους, 2 αναλογικές εισόδους, και 1 αναλογική έξοδο.
- Ηλεκτρονικό σύστημα πεδήσεως με αντίσταση αλλά και με συνεχή τάση.
- Εύκολο προγραμματισμό των παραμέτρων τους μέσω ψηφιακού χειριστηρίου το οποίο περιλαμβάνει οθόνη 4 ψηφίων (επτά σημείων) και 5 πλήκτρα λειτουργίας.
- Ενσωματωμένη δυνατότητα σειριακής επικοινωνίας RS485 (Modbus RTU).
- Αύξηση της ροπής στις χαμηλές στροφές.
- 8 ανεξάρτητες ράμπες επιτάχυνσης – επιβράδυνσης και βήματα ταχυτήτων.
- Ειδικά προγράμματα για την εξοικονόμηση ενέργειας σε εφαρμογές αντλιών & ανεμιστήρων.

- Πρόγραμμα αυτόματης αντιστάθμισης ολισθήσεως.
- Αυτόματη επανεκκίνηση μετά από διακοπή σφάλματος ή τάσεως.
- Αυτόματη αντιμετώπιση υπερφόρτισης χωρίς τη διακοπή της λειτουργίας.
- Ελεγχόμενος ανεμιστήρας ψύξης.
- Ενσωματωμένο ρυθμιζόμενο ηλεκτρονικό θερμικό για την προστασία του ηλεκτροκινητήρα
- Εξαιρετικά μικρό βάρος και διαστάσεις.

#### 4.7.1 Τεχνικά Χαρακτηριστικά της σειράς iG5A

| Τύπος  |   | SV004<br>iG5A-4  | SV008<br>iG5A-4 | SV015<br>iG5A-4 | SV022<br>iG5A-4     | SV040<br>iG5A-4 | SV055<br>iG5A-4   | SV075<br>iG5A-4 |
|--|---|--|-----------------|-----------------|---------------------|-----------------|-------------------|-----------------|
| <b>Ισχύς<br/>Κινητήρα</b>                                | <i>HP</i>   | 0.5  | 1               | 2               | 3                   | 5.5             | 7.5               | 10              |
|  | <i>KW</i>   | 0.37   | 0.75            | 1.5             | 2.2                 | 4               | 5.5               | 7.5             |
| <b>Έξοδος</b>  | <i>Ρεύμα<br/>[A]</i>  | 1.25   | 2.5             | 4               | 6                   | 9               | 12                | 16              |
|  | <i>Καλώδιο</i>  | 1.5 mm <sup>2</sup>                                    |                 |                 | 2.5 mm <sup>2</sup> |                 | 4 mm <sup>2</sup> |                 |
|  | <i>Συχνότητα<br/>[Hz]</i>   | 0.5 - 400  |                 |                 |                     |                 |                   |                 |
|  | <i>Τάση<br/>[V]</i>   | 3 Ø 0 – Τάση εισόδου                                   |                 |                 |                     |                 |                   |                 |
| <b>Είσοδος</b>   | <i>Συχνότητα<br/>[Hz]</i>   | 50 – 60 (±5%)  |                 |                 |                     |                 |                   |                 |
|  | <i>Τάση<br/>[V]</i>   | 3 Ø 380 – 460 (±10%)                                   |                 |                 |                     |                 |                   |                 |
|  | <i>Ασφάλεια</i>   | 10 Amp   |                 |                 | 16 Amp              |                 | 20 Amp            |                 |
|  | <i>Καλώδιο</i>  | 1.5 mm <sup>2</sup>                                    |                 |                 | 2.5 mm <sup>2</sup> |                 | 4 mm <sup>2</sup> |                 |
| <b>Μέθοδος<br/>Ελέγχου</b>                               | Διανυσματικός έλεγχος με PWM (Sensorless Vector Control)  |  |                 |                 |                     |                 |                   |                 |
| <b>Ανάλυση<br/>Ρύθμισης</b>                              | 0.01 Hz   |  |                 |                 |                     |                 |                   |                 |
| <b>Ακρίβεια<br/>Συχνότητας<br/>Εξόδου</b>                | ±0.01% της μέγιστης ορισθείσας συχνότητας (με ψηφιακή ρύθμιση)<br>±0.1% της μέγιστης ορισθείσας συχνότητας (με αναλογική ρύθμιση) |  |                 |                 |                     |                 |                   |                 |
| <b>Δυνατότητα<br/>Υπερφόρτισης</b>                       | 150% για 1 λεπτό  |  |                 |                 |                     |                 |                   |                 |
| <b>Τρόπος<br/>Ρύθμισης<br/>Συχνότητας</b>                | Αναλογικός: 0 - 10 V / 4 - 20 mA/ρεοστάτης<br>Ψηφιακός: Ψηφιακό χειριστήριο   |  |                 |                 |                     |                 |                   |                 |
| <b>Χρόνος<br/>Επιτάχυνσης<br/>&amp;<br/>Επιβράδυνσης</b> | 0.01 – 60000 Δευτερόλεπτα   |  |                 |                 |                     |                 |                   |                 |
| <b>Ροπή<br/>Πεδήσεως</b>                                 | 20 %  |  |                 |                 |                     |                 |                   |                 |
| <b>Προστασίες</b>  | Υπέρταση, Υπόταση, Υπερένταση, Υπερθέρμανση Ρυθμιστού στροφών,<br>Υπερθέρμανση Κινητήρα και Σφάλμα κάρτας ελέγχου                 |  |                 |                 |                     |                 |                   |                 |
| <b>Συνθήκες<br/>Λειτουργίας</b>                          | <i>Θερμοκρ.<br/>Περιβάλ.</i>  | -10 °C ÷ +40 °C (Fs≥7kHz)<br>-10 °C ÷ +50 °C (Fs≤6kHz) |                 |                 |                     |                 |                   |                 |
|  | <i>Υγρασία</i>  | Έως 90 %   |                 |                 |                     |                 |                   |                 |
|  | <i>Υψόμετρο</i>   | Έως 1000 m   |                 |                 |                     |                 |                   |                 |
|  | <i>Ψύξη</i>   | Με ανεμιστήρα  |                 |                 |                     |                 |                   |                 |

## 4.7.2 Σχέδιο Καλωδιώσεων της Σειράς iG5A



### 4.7.3 Περιγραφή Ακροδεκτών της Σειράς iG5A

|                               | Συμβολισμός | Λειτουργία  |
|-------------------------------|-------------|---|
| <i>Ακροδέκτες<br/>Ισχύος</i>  | R, S, T     | Ακροδέκτες τριφασικής τροφοδοσίας (σύνδεση με το δίκτυο)    |
|                               | U, V, W     | Ακροδέκτες τριφασικής εξόδου (σύνδεση με τον κινητήρα)      |
|                               | B1, B2      | Ακροδέκτες σύνδεσης αντίστασης για δυναμική πέδηση.         |
| <i>Ακροδέκτες<br/>Ελέγχου</i> | 24          | Βοηθητική τάση τροφοδοσίας 24Vdc / 100mA                    |
|                               | V1          | Είσοδος για ρύθμιση ταχύτητας μέσω πηγής τάσης (0-10Vdc)    |
|                               | VR          | Τάση τροφοδοσίας ποτενσιόμετρου ρύθμισης ταχύτητας (12Vdc)  |
|                               | I           | Είσοδος για ρύθμιση ταχύτητας μέσω πηγής ρεύματος(4-20mA)   |
|                               | AM          | Προγραμματιζόμενη αναλογική έξοδος τάσης (0-10Vdc)          |
|                               | P1          | Είσοδος για εκκίνηση με ορθή φορά περιστροφής               |
|                               | P2          | Είσοδος για εκκίνηση με ανάστροφη φορά περιστροφής          |
|                               | P3          | Είσοδος επείγουσας εντολής σταματήματος του κινητήρα        |
|                               | P4          | Είσοδος για την επαναφορά μετά από σφάλμα (Reset)           |
|                               | P5          | Είσοδος για την ενεργοποίηση της ταχύτητας «JOG»            |
|                               | P6 έως P8   | Είσοδοι για την ενεργοποίηση των προγραμματιζόμενων ταχ/των |
|                               | CM          | Σημείο αναφοράς (-) MONO για τα ανωτέρω 13 σήματα           |
|                               | 3A-3C       | Ψηφιακή έξοδος σφάλματος (επαφή ανοικτή σε ηρεμία – NO)     |
|                               | 3B-3C       | Ψηφιακή έξοδος σφάλματος (επαφή κλειστή σε ηρεμία – NC)     |
|                               | MO-MG       | Προγραμματιζόμενη ψηφιακή έξοδος τύπου τρανζίστορ           |
|                               | S +         | Θετικός πόλος σειριακής επικοινωνίας τύπου RS485            |
|                               | S -         | Αρνητικός πόλος σειριακής επικοινωνίας τύπου RS485          |



#### 4.8 Εκκίνηση και Στάση του Ηλεκτροκινητήρα

Η εκκίνηση και η στάση του ηλεκτροκινητήρα, μέσω του ρυθμιστή στροφών, μπορεί να γίνει από το πληκτρολόγιο του ψηφιακού χειριστηρίου ή από τις ψηφιακές εισόδους P1 και P2.

1) Εκκίνηση - Στάση μέσω του ψηφιακού χειριστηρίου Ρυθμίστε την παράμετρο Drv, της ομάδας βασικών ρυθμίσεων, στον έλεγχο της εκκίνησης και στάσης του κινητήρα, από το ψηφιακό χειριστήριο (Drv= «0»). Πατήστε το πλήκτρο RUN, για να εκκινήσετε τον ηλεκτροκινητήρα. Η λυχνία FWD ή REV (ανάλογα με τη φορά περιστροφής) ανάβει και ο κινητήρας επιταχύνει ομαλά, μέχρι η συχνότητα λειτουργίας του να γίνει ίση με αυτή που φαίνεται στην οθόνη (στην πρώτη παράμετρο της ομάδας βασικών ρυθμίσεων). Όση ώρα ο κινητήρας επιταχύνει, η λυχνία RUN αναβοσβήνει και όταν ο κινητήρα φτάσει στην τελική ταχύτητά του, μένει διαρκώς αναμμένη. Πατήστε το πλήκτρο STOP/RESET, για να σταματήσετε τον ηλεκτροκινητήρα. Ο κινητήρας επιβραδύνει ομαλά, μέχρι η συχνότητα λειτουργίας του να γίνει ίση με το μηδέν. Όση ώρα ο κινητήρας επιβραδύνει, η λυχνία RUN αναβοσβήνει. Αφού ο κινητήρας έχει σταματήσει η λυχνία RUN και η λυχνία FWD ή REV σβήνουν.

2) Εκκίνηση - Στάση μέσω των ακροδεκτών P1 και P2 Ρυθμίστε την παράμετρο Drv στον έλεγχο της εκκίνησης και στάσης του κινητήρα από τις ψηφιακές εισόδους (Drv=«1» ή Drv=«2»). Drv= «1» Βραχυκυκλώστε μόνο την επαφή P1, με την επαφή CM, για να εκκινήσετε τον ηλεκτροκινητήρα με την ορθή φορά περιστροφής. Ο κινητήρας επιταχύνει ομαλά, μέχρι η συχνότητα λειτουργίας του να γίνει ίση με αυτή που φαίνεται στην οθόνη. Βραχυκυκλώστε μόνο την επαφή P2, με την επαφή CM, για να εκκινήσετε τον ηλεκτροκινητήρα με την αντίστροφη φορά περιστροφής. Ο κινητήρας επιταχύνει ομαλά, μέχρι η συχνότητα λειτουργίας του να γίνει ίση με αυτή που φαίνεται στην οθόνη. Αποσυνδέστε τις επαφές P1 και P2, από την επαφή CM, για να σταματήσετε τον ηλεκτροκινητήρα. Ο κινητήρας επιβραδύνει ομαλά, μέχρι η συχνότητα λειτουργίας του να γίνει ίση με το μηδέν. Οι

λυχνίες RUN, FWD και REV λειτουργούν όπως ακριβώς και προηγουμένως. Dgn= «2» Βραχυκυκλώστε την επαφή P1, με την επαφή CM, για να εκκινήσετε τον ηλεκτροκινητήρα. Ο κινητήρας επιταχύνει ομαλά, μέχρι η συχνότητα λειτουργίας του να γίνει ίση με αυτή που φαίνεται στην οθόνη. Βραχυκυκλώστε και την επαφή P2, με την επαφή CM, για να επιλέξετε την ανάστροφη φορά περιστροφής του ηλεκτροκινητήρα. Αποσυνδέστε την επαφή P2, από την επαφή CM, για να επιλέξετε ξανά την ορθή φορά περιστροφής του ηλεκτροκινητήρα. Αποσυνδέστε την επαφή P1, από την επαφή CM, για να σταματήσετε τον ηλεκτροκινητήρα. Ο κινητήρας επιβραδύνει ομαλά, μέχρι η συχνότητα λειτουργίας του να γίνει ίση με το μηδέν. Οι λυχνίες RUN, FWD και REV λειτουργούν όπως ακριβώς και προηγουμένως.

#### **4.9 Έλεγχος των Στροφών του Ηλεκτροκινητήρα**

Ο έλεγχος των στροφών του ηλεκτροκινητήρα, μέσω του ρυθμιστή στροφών, μπορεί να γίνει από το ψηφιακό χειριστήριο (πλήκτρα πλοήγησης) ή από τις αναλογικές εισόδους V1 και I.

1) Έλεγχος των στροφών μέσω του ψηφιακού χειριστηρίου Ρυθμίστε την παράμετρο Frq, της ομάδας βασικών ρυθμίσεων, στον έλεγχο των στροφών του κινητήρα από το ψηφιακό χειριστήριο (Frq= «0» ή Frq= «1»). Χρησιμοποιήστε τα πλήκτρα πλοήγησης, για να τροποποιήσετε τη συχνότητα λειτουργίας του κινητήρα που αναγράφεται στην οθόνη. Όταν ο κινητήρας δεν βρίσκεται σε λειτουργία, ο ρυθμιστής στροφών απλώς ενημερώνεται για την συχνότητα που πρόκειται να εφαρμοσθεί στον κινητήρα, όταν αυτός εκκινηθεί. Όταν ο κινητήρας βρίσκεται σε λειτουργία, ο ρυθμιστής στροφών αλλάζει την συχνότητα λειτουργίας του κινητήρα, ή απευθείας (Frq= «1») ή από την στιγμή που το πλήκτρο ENT πατηθεί δύο φορές (Frq= «0»).

2) Έλεγχος των στροφών μέσω των αναλογικών εισόδων V1 και I Ρυθμίστε την παράμετρο Frq, της ομάδας βασικών ρυθμίσεων, στον έλεγχο των στροφών του κινητήρα από τις αναλογικές εισόδους (Frq= «2», «3» ή «4»). Στην περίπτωση αυτή,

οι στροφές του ηλεκτροκινητήρα μπορούν να ελεγχθούν με τρεις διαφορετικούς τρόπους. • Συνδέοντας μία πηγή συνεχούς τάσεως -10 έως 10 Vdc στους ακροδέκτες V1 και CM. Στην περίπτωση αυτή η παράμετρος Frg θα πρέπει να έχει τεθεί σε κατάσταση «2». • Συνδέοντας μία πηγή συνεχούς τάσεως 0 έως 10 Vdc στους ακροδέκτες V1(+) και CM(-), ή ένα εξωτερικό ποτενσιόμετρο (10kOhm/0.5W) στους ακροδέκτες VR, V1 και CM, όπως φαίνεται και στο σχέδιο καλωδιώσεων. Στην περίπτωση αυτή η παράμετρος Frg θα πρέπει να έχει τεθεί σε κατάσταση «3». • Συνδέοντας μία πηγή συνεχούς ρεύματος 0 ή 4 έως 20 mAdc στους ακροδέκτες I(+) και CM(-). Στην περίπτωση αυτή η παράμετρος Frg θα πρέπει να έχει τεθεί σε κατάσταση «4». Οι παραπάνω τρόποι ελέγχου των στροφών μπορούν να χρησιμοποιηθούν και αθροιστικά.

#### 4.10 Τελευταίες εξελίξεις

Η πρόοδος στον τομέα των ρυθμιστών στροφών ασύγχρονων κινητήρων, τρέχει στις μέρες μας με ιλιγγιώδεις ρυθμούς και αφορά τόσο το λογισμικό όσο και το ηλεκτρονικό κύκλωμα του αντιστροφέα που τροφοδοτεί τον κινητήρα. Η χρησιμοποίηση εξαιρετικά γρήγορων και με μεγάλη υπολογιστική ισχύ μικροεπεξεργαστών, κάνει δυνατή τη χρήση πολύπλοκων αλγορίθμων ελέγχου και εξειδικευμένων μαθηματικών μοντέλων. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η μέθοδος ελέγχου του διανύσματος της μαγνητικής ροής (Vector Control). Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο και με τη βοήθεια ενός μαθηματικού μοντέλου, το οποίο περιγράφει τον κινητήρα, επιτυγχάνεται η πρόβλεψη και ο έλεγχος της μαγνητικής ροής του κινητήρα.

Αυτό με τη σειρά του σημαίνει:

- αύξηση της ροπής εκκίνησης κατά 50% έως 80% και διατήρησή της καθ' όλη τη διάρκεια της επιτάχυνσης του κινητήρα.
- εξοικονόμηση ενέργειας οδηγώντας τον κινητήρα στο αποδοτικότερο σημείο λειτουργίας του για όλο το φάσμα των ταχυτήτων.

- κατακόρυφη βελτίωση της ταχύτητας απόκρισης του συστήματος Κινητήρα - Φορτίου, τόσο ώστε ο κοινός τριφασικός κινητήρας έχει πλέον την ίδια ίσως και καλύτερη δυναμική συμπεριφορά με εκείνη ενός αντίστοιχου κινητήρα συνεχούς ρεύματος.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα του τελευταίου αποτελεί η δυνατότητα ταυτόχρονης ελευθέρωσης του συστήματος πέδησης και η εκκίνηση του κινητήρα, σε ανελκυστήρα αφού ο κινητήρας φτάνει σε μέγιστη ροπή μέσα σε 30 μόλις χιλιοστά του δευτερολέπτου.

Η συνεχής ανάπτυξη των ηλεκτρονικών ισχύος οδήγησαν σε διακοπτικά ημιαγωγικά στοιχεία με πολύ μικρούς χρόνους έναυσης και σβέσης και μεγάλης αντοχής σε ρεύμα και τάση. Χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιων στοιχείων είναι τα IGBT. Τα στοιχεία αυτά δίνουν τη δυνατότητα σε ρυθμιστές στροφών ισχύος από 0.55 kW έως και 315 kW να λειτουργούν με μεγαλύτερη διακοπτική συχνότητα.

Αυτό με τη σειρά του έχει σαν αποτέλεσμα:

- την βελτίωση του βαθμού αποδόσεως.
- την μείωση του όγκου και του βάρους.
- την εμφάνιση των ανώτερων αρμονικών σε υψηλότερες συχνότητες και κατά συνέπεια την εξάλειψη του μαγνητικού θορύβου, την μείωση των απωλειών και την ομαλότερη λειτουργία του κινητήρα.
- τον ακόμα πιο ακριβή έλεγχο και την δυνατότητα αξιοποίησης όλων των τελευταίων εξελίξεων στο λογισμικό ελέγχου που αναφέρθηκαν παραπάνω. Ενώ λοιπόν οι Ρυθμιστές Στροφών Ασύγχρονων Κινητήρων είναι ήδη σε ένα πολύ εξελιγμένο στάδιο οι μελλοντικές τους βελτιώσεις έχουν στόχο:
  - την εξομάλυνση και την σταθεροποίηση της λειτουργίας τους σε ιδιαίτερα χαμηλές συχνότητες (0.1 έως 1 Hz) καθώς και στα 0 Hz σε λειτουργία κλειστού και ανοικτού βρόχου.

- την περαιτέρω μείωση των ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών τους καθώς επίσης και της παραγωγής αρμονικών στο δίκτυο παροχής ηλεκτρικής ισχύος.
- την περαιτέρω μείωση του μεγέθους και του κόστους κατασκευής.
- την ενσωμάτωσή τους πάνω στους ασύγχρονους κινητήρες.
- την κατάργηση του ενδιάμεσου σταδίου μετατροπής της τάσης του δικτύου σε συνεχή η οποία με τη σειρά της θα οδηγήσει στην αφαίρεση των τεράστιων ηλεκτρολυτικών πυκνωτών οι οποίοι είναι ογκώδεις και αποτελούν συχνά αιτία βλάβης.

#### **4.11 Σύγχρονες τεχνικές ελέγχου**

Τα συστήματα ηλεκτρικής κίνησης με ηλεκτρικές μηχανές επαγωγής συγκεντρώνουν σήμερα στο παγκόσμιο γίνεσθαι ιδιαίτερα σημαντικό ενδιαφέρον το γεγονός αυτό οφείλεται κατά κύριο λόγο στις πολύπλοκες πρακτικές εφαρμογές τους αλλά και στα πολυεπίπεδα πλεονεκτήματα που συνεπάγεται η χρήση τους. Με δεδομένο το κύκλωμα ισχύος το ζητούμενο είναι η ανάπτυξη και η χρησιμοποίηση ενός κατάλληλου αλγόριθμου ελέγχου για το εν λόγω σύστημα ηλεκτρικής κίνησης. Θα πρέπει δηλαδή να επιλέγει μια διαδικασία αυτόματου ελέγχου του ηλεκτρικού μετατροπέα ισχύος, η οποία θα επιτυγχάνει τις απαιτούμενες προδιαγραφές ακρίβειας και επίδοσης στο μηχανικό φορτίο, που είναι συνήθως στο οποίο επιζητούμε να δούμε το αποτέλεσμα του ελέγχου. Κάθε σύστημα ηλεκτρικής κίνησης υψηλών προδιαγραφών, χρησιμοποιεί ανάλογα συστήματα ελέγχου τα οποία έχουν ως στόχο τον ακριβή και αυτοματοποιημένο έλεγχο της μηχανής, τη βέλτιστη απόκριση του συστήματος, τη λειτουργία με υψηλό βαθμό απόδοσης και τη βέλτιστη συνεργασία και αλληλεπίδραση με τα υπόλοιπα υπερκείμενα και υποκείμενα συστήματα. Για τον έλεγχο ασύγχρονων ηλεκτρικών κινητήρων επαγωγής που οδηγούνται με τη βοήθεια αντιστροφικών πηγών τάσης οι τεχνικές αυτές κατά χρονολογική σειρά παρουσίασης είναι οι παρακάτω.

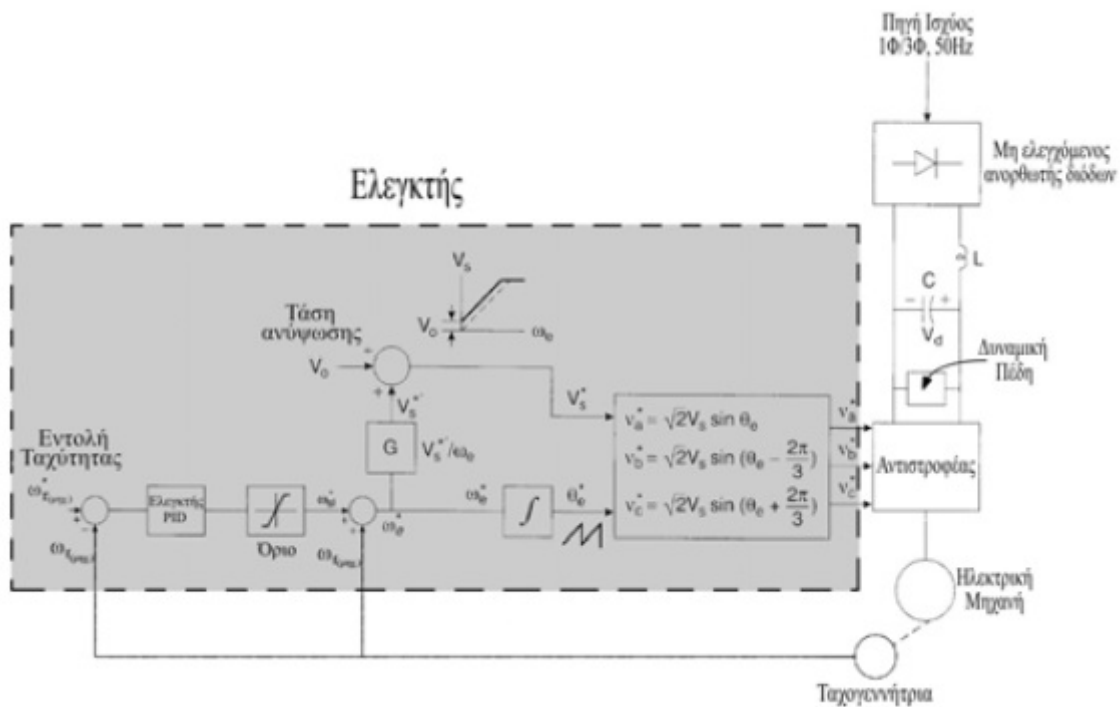
#### 4.11.1 Μονόμετρος ή Βαθμωτός έλεγχος

Η πρώτη χρονολογικά προσέγγιση που επιχειρήθηκε ήταν ο μονόμετρος ή βαθμωτός έλεγχος (Scalar control). Η πλέον καθιερωμένη τεχνική που εμπίπτει σε αυτή την κατηγορία είναι ο έλεγχος με προδιαγεγραμμένο λόγο τάσης προς συχνότητα τροφοδοσίας ( $V/f$ ). Έτσι το μέτρο της τάσης τροφοδοσίας της μηχανής χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της μαγνητικής ροής εντός της μηχανής και η συχνότητα της τάσης τροφοδοσίας ή ισοδύναμα η ολίσθηση χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της ροπής της μηχανής και συνεπώς της ταχύτητάς της.

$$\lambda_s = \frac{V_s}{\omega_s} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{V_s}{f} \quad (4.3)$$

Αυτό όμως δεν είναι απόλυτο ορθό και ακριβές αφού τόσο η ροπή όσο και η μαγνητική ροή είναι αμφοτέρως συναρτήσεις τόσο της συχνότητας όσο και του πλάτους της τάσης τροφοδοσίας. Συγκεκριμένα αυξάνοντας τη συχνότητα της τάσης τροφοδοσίας μεταβάλλουμε τη σύγχρονη ταχύτητα για τη μηχανή, δηλαδή την ταχύτητα περιστροφής του κύματος μαγνητικής ροής εντός της. Αυτό θεωρητικώς θα είχε ως αποτέλεσμα μια ανάλογη μεταβολή στην ταχύτητα του δρομέα της μηχανής. Στην πραγματικότητα όμως η μεταβολή αυτή δεν είναι η θεωρητικά αναμενόμενη, καθώς η μεταβολή της συχνότητας μεταβάλλει και τις επαγωγικές αντιδράσεις του στάτη και συνεπώς ακολουθούν τα ρεύματα στάτη μεταβάλλοντας τελικά και το πλάτος του κύματος της μαγνητικής ροής της μηχανής. Το αποτέλεσμα είναι ο έλεγχος να μην έχει τα αναμενόμενα αποτελέσματα και τα επιθυμητά χαρακτηριστικά ενώ ορισμένες φορές το σύστημα οδηγείται σε αστάθεια. Λόγω του παραπάνω φαινομένου που πηγάζει από τη συζευγμένη μορφή των εξισώσεων των μοντέλων της μηχανής, η απόκριση του συστήματος στις εντολές μεταβολής της ταχύτητας δεν είναι βέλτιστη και συνοδεύεται από ταλαντωτική συμπεριφορά με υπέρυψωση κατά τη μεταβατική κατάσταση, μέχρις ότου η μαγνητική ροή και η ταχύτητα να ισορροπήσουν στις τιμές που επιβάλλει το νέο σημείο λειτουργίας. Επομένως η

ταχύτητα και η ποιότητα της απόκρισης δεν είναι γενικά ικανοποιητικές για εφαρμογές που απαιτούν υψηλής επίδοσης έλεγχο ακριβείας. Στην εν λόγω τεχνική ελέγχου είναι δυνατόν να εφαρμοστεί η τεχνική ημιτονοειδούς διαμόρφωσης εύρους παλμών (SPWM) για τον έλεγχο του αντιστροφέα.



Σχήμα 56: λειτουργικό διάγραμμα της τεχνικής του μονόμετρου ελέγχου

Η τεχνική αυτή προσφέρει μειωμένη αρμονική παραμόρφωση στα ρεύματα της μηχανής, αφού οι αρμονικές συνιστώσες περιορίζονται σε συχνότητες περίξ της συχνότητας της τριγωνικής κυματομορφής φορέα και άνω (για τριφασικό αντιστροφέα) Οι αρμονικές αυτές συνιστώσες οι οποίες βρίσκονται σε υψηλές συχνότητες δεν απαιτούν στις συνήθεις εφαρμογές την χρήση φίλτρων για την καταστολή τους, αφού τις περισσότερες φορές φιλτράρονται σε ικανοποιητικό βαθμό απο την επαγωγική αντίδραση των τυλιγμάτων του στάτη.

#### 4.11.2 Διανυσματικός έλεγχος

Η μέθοδος αυτή ουσιαστικά αποτελεί εφαρμογή του διανυσματικού ελέγχου σε συστήματα οδήγησης επαγωγικών κινητήρων. Ώθηση για τη βελτίωση της μεθόδου

αυτής αποτέλεσε η εξέλιξη στην κατασκευή μικροεπεξεργαστών και επεξεργαστών ψηφιακών σημάτων (DSP) υψηλής ταχύτητας και ανάλυσης.

Τα συστήματα αυτά χαρακτηρίζονται από υψηλή απόδοση τόσο σε στατικές όσο και δυναμικές συνθήκες, και στα τέσσερα τεταρτημόρια, ακόμη και σε χαμηλές ταχύτητες. Ο έλεγχος της ροπής γίνεται μέσω του ρεύματος του στάτη, το οποίο δημιουργεί τη ροή διακένου, καθώς και της συνιστώσας εκείνης του ρεύματος που μαζί με τη ροή παράγουν την ηλεκτρική ροπή.

Με τη διαδικασία αυτή γίνεται δυνατός ο διαχωρισμός του ρεύματος του στάτη (με την ανάλυσή του σε συγκεκριμένο πλαίσιο αναφοράς) σε δύο συνιστώσες, τη συνιστώσα που ευθύνεται για τη δημιουργία της ροής διακένου και τη συνιστώσα που ευθύνεται για την παραγωγή της ηλεκτρικής ροπής.

Με διάφορες τεχνικές αποσύζευξης καθίσταται δυνατός ο ανεξάρτητος έλεγχος των κυκλωμάτων ελέγχου των δύο επιμέρους συνιστωσών. Με τον τρόπο αυτό η δυναμική συμπεριφορά του επαγωγικού κινητήρα είναι ανάλογη με εκείνη ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος ξένης διέγερσης. Ανάλογα με το πλαίσιο αναφοράς στο οποίο γίνεται η ανάλυση του ρεύματος διακρίνουμε τις εξής μεθόδους διανυσματικού ελέγχου:

- Έλεγχος με προσανατολισμό στο διάνυσμα της συνολικής πεπλεγμένης ροής του δρομέα ή μέθοδος του προσανατολισμένου πεδίου
- Έλεγχος με προσανατολισμό στο διάνυσμα της πεπλεγμένης ροής του στάτη
- Έλεγχος με προσανατολισμό στο διάνυσμα της πεπλεγμένης ροής μαγνήτισης.

### **Βασικές αρχές του διανυσματικού ελέγχου**

Για αν γίνει σαφής η βασική αρχή του διανυσματικού ελέγχου κάνουμε την παραδοχή ότι η θέση του διανύσματος της συνολικής πεπλεγμένης ροής του δρομέα



$\lambda_r$  είναι γνωστή. Το διάνυσμα  $\lambda_r$  βρίσκεται σε μία γωνία  $\theta_f$  από ένα στάσιμο σύστημα αναφοράς. Η γωνία  $\theta_f$  θα αναφέρεται ως «γωνία του πεδίου» εφεξής και τα τρία ρεύματα του στάτη μπορούν να μετασχηματιστούν στα αντίστοιχα ρεύματα στους  $\mathbf{d}$  και  $\mathbf{q}$  άξονες του σύγχρονα στρεφόμενου συστήματος αναφοράς μέσω του μετασχηματισμού:

$$\begin{bmatrix} i_{qs}^{-e} \\ i_{ds}^{-e} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta_s) & \cos(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_s + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\theta_s) & \sin(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta_s + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Για το μέτρο του διανύσματος του ρεύματος του στάτη προκύπτει:

$$i_s = \sqrt{(i_{qs}^{-e})^2 + (i_{ds}^{-e})^2} \quad (4.5)$$

και για τη γωνία :

$$\theta_s = \arctan \left\{ \frac{i_{qs}^{-e}}{i_{ds}^{-e}} \right\} \quad (4.6)$$

Όπου  $i_{ds}^{-e}$  και  $i_{qs}^{-e}$  είναι τα  $\mathbf{d}$  και  $\mathbf{q}$  ρεύματα στο σύγχρονα στρεφόμενο σύστημα αναφοράς, τα οποία προκύπτουν από την προβολή του διανύσματος του ρεύματος του στάτη στους  $\mathbf{d}$  και  $\mathbf{q}$  άξονες του σύγχρονα στρεφόμενου συστήματος αναφοράς αντίστοιχα. Από το σχήμα 57 προκύπτει ότι το μέτρο του διανύσματος του ρεύματος του στάτη παραμένει το ίδιο ανεξάρτητα από την επιλογή του συστήματος αναφοράς.



με τη σύγχρονη ταχύτητα. Ο προσανατολισμός του διανύσματος της συνολικής πεπλεγμένης ροής του δρομέα  $\lambda_r$  ισοδυναμεί με τη θεώρηση ότι το σύγχρονα στρεφόμενο σύστημα αξόνων και κατ' επέκταση οι συνιστώσες του ρεύματος που παράγουν ροή και ροπή, είναι **dc** ποσότητες. Ακριβώς επειδή είναι **dc** ποσότητες είναι ιδανικές για να χρησιμοποιηθούν ως μεταβλητές ελέγχου. Βασική προϋπόθεση για τη χρήση του διανυσματικού ελέγχου είναι η καταγραφή της στιγμιαίας θέσης του διανύσματος της ροής  $\theta_f$ . Η γωνία του πεδίου μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$\theta_s = \theta_r \cdot \theta_{sl} \quad (4.8)$$

όπου  $\theta_f$  η θέση του δρομέα και  $\theta_{sl}$  η γωνία της ολίσθησης. Η γωνία του πεδίου σαν συνάρτηση των ταχυτήτων και του χρόνου γράφεται:

$$\theta_f = \int (\omega_r + \omega_{sl}) dt = \int \omega_s dt \quad (4.9)$$

### **Μέθοδος του προσανατολισμένου πεδίου**

Ανάλογα με τον τρόπο υπολογισμού του χωρικού διανύσματος της πεπλεγμένης ροής του δρομέα (μέτρο και γωνία), υπάρχουν δύο παραλλαγές της μεθόδου, ο άμεσος και ο έμμεσος διανυσματικός έλεγχος. Στον άμεσο έλεγχο είτε έχουμε απευθείας μέτρηση της ροής μέσω ειδικών αισθητηρίων (τα οποία τοποθετούνται σε ειδικές θέσεις στο εσωτερικό της μηχανής), είτε υπολογιστικά μέσω ενός μοντέλου ροής από τις τάσεις και τα ρεύματα ακροδεκτών. Στον έμμεσο έλεγχο ο υπολογισμός της ροής γίνεται συνήθως μέσω των ρευμάτων του στάτη και της γωνιακής περιστροφής του δρομέα. Η γωνία χώρου του διανύσματος της ροής προκύπτει από το άθροισμα της γωνίας του δρομέα και μιας γωνίας ολίσθησης, η οποία εκφράζει τη σχετική θέση του διανύσματος με τον οριζόντιο άξονα του πλαισίου αναφοράς του στρεφόμενου με την ταχύτητα του δρομέα.

Ο διανυσματικός έλεγχος συνοψίζεται στον παρακάτω αλγόριθμο:

1. Εξασφάλισε τη γωνία του πεδίου.
2. Υπολόγισε τη συνιστώσα του ρεύματος που παράγει τη ροή,  $i_f^*$ , για μια απαιτούμενη πεπλεγμένη ροή του δρομέα  $i_f^*$ . Ελέγχοντας μόνο το ρεύμα του πεδίου ελέγχεται η πεπλεγμένη ροή του δρομέα. Μοιάζει με τη dc μηχανή ξένης διέγερσης όπου το ρεύμα διέγερσης ελέγχει τη ροή του πεδίου, ενώ το ρεύμα τυμπάνου δεν έχει καμία επίδραση σ' αυτή.
3. Από την πεπλεγμένη ροή του δρομέα  $i_f^*$  και την απαιτούμενη ροπή  $T_e^*$  υπολόγισε τη συνιστώσα του ρεύματος που παράγει τη ροπή,  $i_T^*$ . Ελέγχοντας αυτήν τη συνιστώσα του ρεύματος, όταν το διάνυσμα της πεπλεγμένης ροής του δρομέα είναι σταθερό, έχουμε έναν ανεξάρτητο έλεγχο της ηλεκτρομαγνητικής ροπής. Μοιάζει με την περίπτωση του ρεύματος τυμπάνου που ελέγχει τη ροπή σε μια dc μηχανή ξένης διέγερσης όπου το ρεύμα διέγερσης παραμένει σταθερό. Τα βήματα 1 και 2 επιτρέπουν μια πλήρη απόζευξη των καναλιών παραγωγής της ροής και της ροπής σε μία επαγωγική μηχανή.
4. Υπολόγισε το μέτρο του διανύσματος του ρεύματος του στάτη  $i_s^*$  από το διανυσματικό άθροισμα των  $i_T^*$  και  $i_f^*$ .
5. Υπολόγισε τη γωνία της ροπής από τις συνιστώσες του ρεύματος του στάτη που παράγουν τη ροή και τη ροπή  $\theta_s = \arctan\left(\frac{i_T^*}{i_f^*}\right)$ .
6. Πρόσθεσε τις  $\theta_f$  και  $\theta_T$  για να πάρεις τη γωνία του διανύσματος του ρεύματος του στάτη  $\theta_s$ .
7. Χρησιμοποιώντας τη γωνία του διανύσματος του ρεύματος του στάτη και το μέτρο του,  $i_s^*$  και  $\theta_s$ , οι απαιτούμενοι παράμετροι του ρεύματος στάτη βρίσκονται από το **dq0** μετασχηματισμό στις **abc** μεταβλητές:

$$i_{as}^* = i_s^* \cdot \sin(\theta_s) \quad (4.10)$$

$$i_{bs}^* = i_s^* \cdot \sin\left(\theta_s - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (4.11)$$

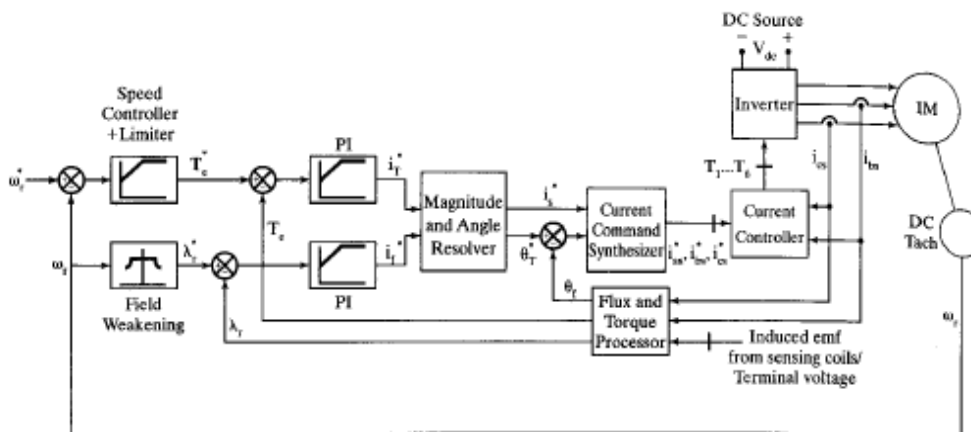
$$i_{cs}^* = i_s^* \cdot \sin\left(\theta_s + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (4.12)$$

8. Συνέθεσε αυτά τα ρεύματα χρησιμοποιώντας έναν αντιστροφέα.

Όταν τροφοδοτούνται στο στάτη μιας επαγωγικής μηχανής παράγονται οι απαιτούμενες τιμές της πεπλεγμένης ροής και της ροπής.

#### 4.11.2.1 Άμεσος διανυσματικός έλεγχος

Ένα διάγραμμα βαθμίδων (block diagram) μιας διάταξης άμεσου διανυσματικού ελέγχου με αντιστροφέα πηγής ρεύματος παρουσιάζεται στο σχήμα 58.



Σχήμα 58 Διάγραμμα βαθμίδων άμεσου διανυσματικού ελεγκτή

Η ηλεκτρική ταχύτητα του δρομέα,  $\omega_r$ , συγκρίνεται με την ταχύτητα αναφοράς,  $\omega_r^*$ , και το σχετικό σφάλμα ενισχύεται και περιορίζεται για να παραχθεί η ροπή αναφοράς  $T_e^*$ . Η αναφορά της πεπλεγμένης ροής του δρομέα  $\lambda_r^*$  προκύπτει από την ταχύτητα του δρομέα μέσω μιας γεννήτριας συνάρτησης

απόλυτης τιμής. Η  $\lambda_r^*$  διατηρείται 1 p.u. για ταχύτητα δρομέα από 0 έως 1 p.u. Πάνω από 1 p.u. μεταβάλλεται σαν συνάρτηση της ταχύτητας του δρομέα. Αυτό γίνεται για να διασφαλιστεί ότι η ταχύτητα δρομέα επεκτείνεται και πέρα από τη βασική ταχύτητα με τη διαθέσιμη συνεχή τάση στον αντιστροφέα, εξασθενίζοντας την πεπλεγμένη ροή του δρομέα και συνεπώς μειώνοντας την επαγόμενη ΗΕΔ κάτω από αυτή της διαθέσιμης τάσης εξόδου του αντιστροφέα. Μειώνοντας την πεπλεγμένη ροή του δρομέα για την ίδια συνιστώσα του ρεύματος του στάτη που παράγει τη ροπή, η ηλεκτρομαγνητική ροπή μειώνεται, το οποίο σε συνδυασμό με την αυξανόμενη ταχύτητα του δρομέα, μπορεί να ελεγχθεί για να παραχθεί σταθερή ισχύς εξόδου, για παράδειγμα στην ονομαστική τιμή της μηχανής στη στάσιμη κατάσταση.

Η αναφορά της ροπής και της πεπλεγμένης ροής του δρομέα συγκρίνονται με τη ροπή  $T_e$  και την πεπλεγμένη ροή του δρομέα αντίστοιχα  $\lambda_r$ . Οι αποκλίσεις ενισχύονται και περιορίζονται για να παραχθούν οι αναφορές των συνιστωσών του ρεύματος στάτη που παράγουν τη ροπή και τη ροή,  $i_T^*$  και  $i_f^*$  αντίστοιχα. Το διανυσματικό άθροισμα των  $i_T^*$  και  $i_f^*$  αποφέρει το διάνυσμα αναφοράς του ρεύματος του στάτη  $i_s^*$  και η γωνία μεταξύ των  $i_T^*$  και  $i_f^*$  δίνει τη γωνία αναφοράς της ροπής  $\theta_T^*$ . Το άθροισμα της γωνίας της ροπής και της γωνίας του πεδίου δίνει τη θέση του διανύσματος του ρεύματος του στάτη  $\theta_s$ . Μαζί με το  $i_s^*$  παράγονται τα φασικά ρεύματα αναφοράς του στάτη  $i_{as}^*$ ,  $i_{bs}^*$  και  $i_{cs}^*$ . Αυτά τα ζητούμενα φασικά ρεύματα στάτη απλοποιούνται χρησιμοποιώντας έναν αντιστροφέα και βρόχους ανάδρασης του ρεύματος. Οι βρόχοι ανάδρασης του ρεύματος μπορούν να χρησιμοποιήσουν τις παρακάτω διακοπτικές τεχνικές:

1. PWM
2. Υστέρηση (hysteresis)
3. Διαμόρφωση χωρικού διανύσματος (space-vector modulation SVM)

Με μία από αυτές τις τεχνικές ελέγχου τα ρεύματα εξόδου του αντιστροφέα διαμορφώνονται για να αντιστοιχούν στις εισόδους αναφοράς. Οι μεταβλητές

ανάδρασης  $\theta_f$ ,  $T_e$  και  $\lambda_r$  λαμβάνονται από τη βαθμίδα επεξεργασίας της ροής και της ροπής. Αυτό είναι και το βασικό σημείο της διάταξης του άμεσου διανυσματικού ελέγχου. Η υλοποίηση των παραπάνω βαθμίδων θα εξετασθεί στη συνέχεια.

### A. Υπολογισμός της ροής του δρομέα

Δύο πολικές τάσεις μπορούν να μετρηθούν, από τις οποίες μπορούν να υπολογισθούν οι φασικές τάσεις, με την προϋπόθεση ότι οι τάσεις είναι ισορροπημένες. Οι  $\mathbf{d}$  και  $\mathbf{q}$  τάσεις του στάτη στο σύστημα αναφοράς του στάτη προκύπτουν από τις φασικές τάσεις ως εξής:

$$v_{qs} = v_{as} \quad (4.13)$$

$$v_{ds} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (v_{cs} - v_{bs}) \quad (4.14)$$

Παρόμοια, τα ρεύματα προκύπτουν με τον ίδιο τρόπο, αφού οι παραπάνω εξισώσεις ισχύουν και γι'αυτά. Από τις εξισώσεις στο σύστημα αναφοράς του στάτη μιας επαγωγικής μηχανής, οι εξισώσεις του στάτη είναι:

$$v_{qs} = (R_s + L_s \cdot p) \cdot i_{qs} + L_m \cdot p i_{qr} \quad (4.15)$$

$$v_{ds} = (R_s + L_s \cdot p) \cdot i_{ds} + L_m \cdot p i_{dr} \quad (4.16)$$

Από τις οποίες τα ρεύματα του δρομέα υπολογίζονται:

$$i_{qr} = \frac{1}{L_m} \cdot \left\{ \int (v_{qs} - R_s \cdot i_{qs}) dt - L_s \cdot i_{qs} \right\} \quad (4.17)$$

$$i_{dr} = \frac{1}{L_m} \cdot \left\{ \int (v_{ds} - R_s \cdot i_{ds}) dt - L_s \cdot i_{ds} \right\} \quad (4.18)$$

Από όλα τα ρεύματα του δρομέα και του στάτη, η ροπή, η ροή και η γωνία του πεδίου μπορούν να υπολογισθούν ως εξής:

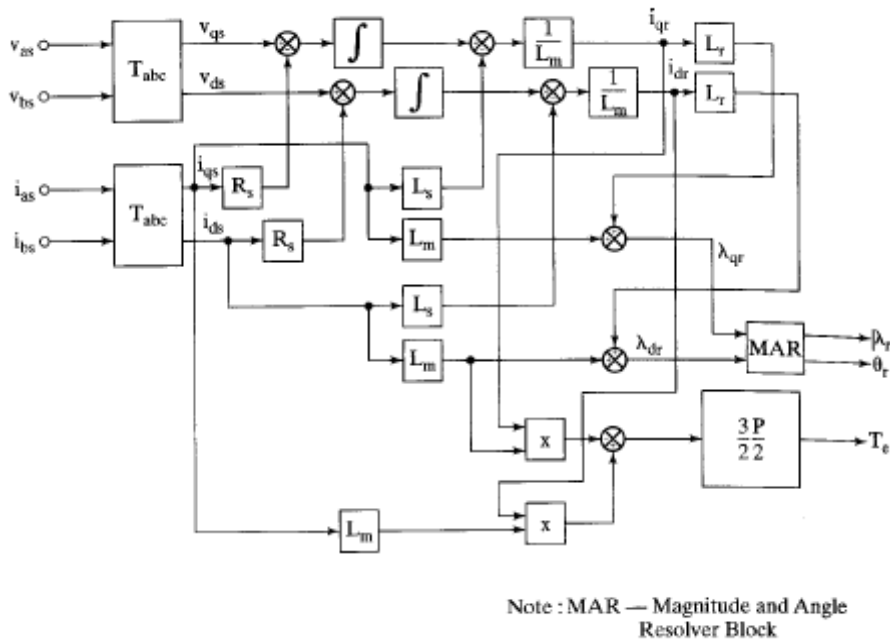
$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \cdot L_m \cdot (i_{qs} \cdot i_{dr} - i_{ds} \cdot i_{qr}) \quad (4.19)$$

$$\lambda_{qr} = L_r \cdot i_{qr} + L_m \cdot i_{qr} \quad (4.20)$$

$$\lambda_{dr} = L_r \cdot i_{dr} + L_m \cdot i_{dr} \quad (4.21)$$

$$\lambda_r = \sqrt{(\lambda_{qr})^2 + (\lambda_{dr})^2} \quad (4.22)$$

Οι εξισώσεις (4.13) έως (4.14) μπορούν να υλοποιηθούν με υπολογιστικά κυκλώματα, όπως φαίνεται στο σχήμα 59.



Σχήμα 59 :Υλοποίηση του επεξεργαστή ροής και ροπής

Το ίδιο διάγραμμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάπτυξη του κώδικα στην υλοποίηση ενός επεξεργαστή σε ένα μόνο ολοκληρωμένο κύκλωμα. Ας επισημάνουμε την εξάρτηση του κυκλώματος από τις παραμέτρους της μηχανής  $R_s$ ,  $L_s$ ,  $L_r$ ,  $L_m$ . Οι μεταβολές στην αντίσταση του στάτη μπορούν έμμεσα να εντοπισθούν από όχι ακριβούς αισθητήρες θερμοκρασίας. Όσον αφορά τις αυτεπαγωγές, αυτές δεν έχουν σημαντικές διακυμάνσεις σε αυτή τη διάταξη διότι



εφαρμόζεται έλεγχος της ροής. Ως εκ τούτου η ευαισθησία των παραμέτρων δεν θα επιδράσει σημαντικά στην ακρίβεια των μετρήσεων και του υπολογισμού της ροής, της ροπής και της γωνίας του πεδίου.

## B. Υπολογισμός της ροής του στάτη

Τα υπολογιστικά βήματα και η εξάρτηση από πολλές παραμέτρους της μηχανής μπορούν να περιορισθούν σημαντικά με τη χρήση της πεπλεγμένης ροής του στάτη και υπολογίζοντας την ηλεκτρομαγνητική ροπή χρησιμοποιώντας μόνο την πεπλεγμένη ροή του στάτη και τα ρεύματα του στάτη. Κατά συνέπεια, μόνο οι αντιστάσεις του στάτη εμπλέκονται στον υπολογισμό της πεπλεγμένης ροής του στάτη, και εξαλείφεται η εξάρτηση από τις αυτεπαγωγές και τις αμοιβαίες επαγωγές του δρομέα της μηχανής. Τα βήματα που εμπλέκονται συνοψίζονται ως εξής:

$$\lambda_{ds} = \int (v_{ds} - R_s \cdot i_{ds}) dt \quad (4.23)$$

$$\lambda_{qs} = \int (v_{qs} - R_s \cdot i_{qs}) dt \quad (4.24)$$

$$\lambda_s = \sqrt{(\lambda_{qr})^2 + (\lambda_{dr})^2} \angle \theta_{fs} \quad (4.25)$$

$$\theta_{fs} = \arctan\left(\frac{\lambda_{qs}}{\lambda_{ds}}\right) \quad (4.26)$$

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{\cdot P}{2} \cdot (i_{qs} \cdot \lambda_{ds} - i_{ds} \cdot \lambda_{qs}) \quad (4.27)$$

Σ' αυτή την περίπτωση ο βρόχος της ροής μπορεί να κλείσει με την πεπλεγμένη ροή του στάτη αντί αυτής του δρομέα. Η ακρίβεια των υπολογισμών μπορεί να μην είναι μεγάλη, παρόλο που ο αλγόριθμος αυτός εξαρτάται μόνο από την αντίσταση του στάτη αντί τόσων άλλων παραμέτρων της μηχανής, όπως αποδεικνύει και το παρακάτω παράδειγμα. Η ευαισθησία της μεταβολής της αντίστασης του στάτη και η επίδραση αυτής στην ακρίβεια της πεπλεγμένης ροής του στάτη, και κατά συνέπεια

στην ηλεκτρομαγνητική ροπή, είναι μεγάλη όταν οι τάσεις του στάτη είναι μικρές και συγκρίσιμες με τις πτώσεις τάσεις πάνω στις αντιστάσεις. Αυτό συμβαίνει στις μικρές ταχύτητες. Κατά συνέπεια η δυναμική λειτουργία σε αυτές τις ταχύτητες είναι ελλιπής σε αυτή τη διάταξη ελέγχου. Ας θεωρήσουμε τις επαγόμενες ΗΕΔ στον **d** και **q** άξονα  $e_{ds}$  και  $e_{qs}$  αντίστοιχα. Οι πεπλεγμένες ροές του στάτη  $\lambda_{ds}$  και  $\lambda_{qs}$  αντίστοιχα, προσδιορίζονται ως εξής:

$$\lambda_{qs} = L_s \cdot i_{qs} + L_m \cdot i_{qr} \quad (4.28)$$

$$\lambda_{ds} = L_s \cdot i_{ds} + L_m \cdot i_{dr} \quad (4.29)$$

Σαν συναρτήσεις των επαγόμενων ΗΕΔ είναι:

$$\lambda_{qs} = \int e_{qs} dt \quad (4.30)$$

$$\lambda_{ds} = \int e_{ds} dt \quad (4.31)$$

Από τις οποίες προκύπτουν τα **d** και **q** ρεύματα του δρομέα:

$$i_{qr} = \frac{\lambda_{qs}}{L_m} - \frac{L_s}{L_m} \cdot i_{qs} = \frac{1}{L_m} \cdot \left\{ \int e_{qs} dt - L_s \cdot i_{qs} \right\} \quad (4.32)$$

$$i_{dr} = \frac{\lambda_{ds}}{L_m} - \frac{L_s}{L_m} \cdot i_{ds} = \frac{1}{L_m} \cdot \left\{ \int e_{ds} dt - L_s \cdot i_{ds} \right\} \quad (4.33)$$

Από τα **d** και **q** ρεύματα του δρομέα και τις πεπλεγμένες ροές του στάτη προκύπτει για τις πεπλεγμένες ροές του δρομέα και τη ροπή:

$$\lambda_{qr} = L_r \cdot i_{qr} + L_m \cdot i_{qs} \quad (4.34)$$

$$\lambda_{dr} = L_r \cdot i_{dr} + L_m \cdot i_{ds} \quad (4.35)$$

$$\lambda_r = \sqrt{(\lambda_{qr})^2 + (\lambda_{dr})^2} \angle \theta_f \quad (4.36)$$

$$\theta_f = \arctan\left(\frac{\lambda_{qr}}{\lambda_{dr}}\right) \quad (4.37)$$

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \cdot (i_{qs} \cdot \lambda_{ds} - i_{ds} \cdot \lambda_{qs}) \quad (4.38)$$

Παρατηρούμε ότι η εξίσωση της ροπής δεν εμπλέκει παραμέτρους της μηχανής για τον υπολογισμό της. Οι πεπλεγμένες ροές του δρομέα και η γωνία πεδίου εξαρτώνται από παραμέτρους της μηχανής :  $L_m$ ,  $L_s$  και  $L_r$ . Όταν υπάρχει μεταβολή (λόγω του κορεσμού) σε αυτές τις παραμέτρους θα υπεισέλθει ένα σφάλμα στον υπολογισμό των πεπλεγμένων ροών του δρομέα και της γωνίας πεδίου.

Συγκεκριμένα, το σφάλμα στον υπολογισμό της γωνίας πεδίου θα προκαλέσει σημαντικό σφάλμα στο διανυσματικό έλεγχο. Αυτή είναι η πιο σημαντική πληροφορία για τον έλεγχο. Η υλοποίηση των επεξεργασιών της ροής και της ροπής με τα αισθητήρια πηνία ή τα αισθητήρια Hall έχει μερικά πλεονεκτήματα και μερικά μειονεκτήματα, τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω.

Τα πλεονεκτήματα αυτού του τύπου της μέτρησης και υπολογισμού της πεπλεγμένης ροής του δρομέα, της θέσης του και της ηλεκτρομαγνητικής ροπής είναι τα εξής:

i) Τα αισθητήρια χρησιμοποιούν μόνο ηλεκτρονικούς μετατροπείς σήματος και όχι άλλου είδους με κινούμενα ή περιστρεφόμενα μέρη, όπως *synchros* ή οπτικούς κωδικοποιητές. Η απουσία κινούμενων μερών στους μετατροπείς σήματος κάνει πιο στιβαρή την αξιοπιστία αυτών των συστημάτων έναντι των μηχανικών/οπτικών μετατροπέων.

ii) Επιπλέον, η δαπανηρή διαδικασία της μηχανικής ενσωμάτωσης και η σπατάλη σε πολύτιμο χώρο και όγκο εντός ή εκτός του περιβλήματος της μηχανής, για τα στρεφόμενα αισθητήρια μέρη, αποφεύγονται. Η κατάληψη μικρού χώρου που επιτυγχάνεται αυξάνει τη συνολική ένταση ισχύος του κινητήριου συστήματος. Η εξοικονόμηση σε εργασία και εξαρτήματα κάνει αυτές τις διατάξεις των αισθητηρίων

πιο ελκυστικές σε βιομηχανικές εφαρμογές χαμηλού κόστους και χαμηλής ισχύος.

Κάποια μειονεκτήματα είναι τα εξής:

i) Σε μηδενική συχνότητα στάτη δεν υπάρχει επαγόμενη ΗΕΔ σε όλες τις μετρητικές διατάξεις. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να μην είναι διαθέσιμες ούτε οι πεπλεγμένες ροές ούτε οι θέσεις τους για το διανυσματικό έλεγχο. Κατά συνέπεια η παραγωγή της ροπής σε μηδενική συχνότητα δεν είναι επακριβώς ελεγχόμενη, καθιστώντας τη διάταξη ακατάλληλη για εφαρμογές τοποθέτησης, όπως τα servos.

ii) Το ίδιο πρόβλημα, σε διαφορετική μορφή, εμφανίζεται στις χαμηλές ταχύτητες. Σε αυτές τις ταχύτητες τα σήματα των επαγόμενων ΗΕΔ μπορεί να είναι τόσο μικρά που να μην μπορούν να τα επεξεργασθούν τα κυκλώματα επεξεργασίας σημάτων. Είναι συγκρίσιμα με τα σφάλματα κβάντισης στα ψηφιακά κυκλώματα και επηρεάζονται από την ολίσθηση στα αναλογικά κυκλώματα. Αυτό, σε συνδυασμό με τον παράγοντα i) καθιστά τον άμεσο διανυσματικό έλεγχο ακατάλληλο για τοποθέτηση ακριβείας και λειτουργία σε χαμηλές ταχύτητες.

iii) Η εγκατάσταση αισθητηρίων τυλιγμάτων ή αισθητηρίων φαινομένου Hall, παρόλο που είναι μη δαπανηρή παραγωγική διαδικασία, προσθέτει στον αριθμό των καλωδίων που εξέρχονται από το κέλυφος της μηχανής. Αυτό δεν είναι αποδεκτό σε εφαρμογές μεγάλου όγκου όπως είναι οι HVAC, εξαιτίας του κόστους που απαιτείται για ερμητικό σφράγισμα της μηχανής. Τα επιπλέον καλώδια δεν είναι επίσης επιθυμητά σε εφαρμογές υψηλής αξιοπιστίας, όπως σε μηχανισμούς κίνησης αμυντικών συστημάτων

και σε κινητήρια συστήματα αντλιών σε πυρηνικούς σταθμούς.

iv) Στην περίπτωση χρήσης μετατροπέων σήματος τάσης και ρεύματος, το απαιτούμενο φιλτράρισμα για τη λήψη της βασικής αρμονικής στις υψηλές συχνότητες, θα προκαλέσει μια μεγάλη μετατόπιση φάσης και ένα σφάλμα στον υπολογισμό της γωνίας του πεδίου, το οποίο θα εκφυλίσει την απόζευξη των ελέγχων της ροής και της ροπής.

#### 4.11.2.2 Έμμεσος διανυσματικός έλεγχος

Σ' αυτή την ενότητα ο έμμεσος διανυσματικός έλεγχος προκύπτει από τις εξισώσεις της δυναμικής συμπεριφοράς της επαγωγικής μηχανής στο σύγχρονα στρεφόμενο σύστημα αναφοράς. Για να απλοποιηθεί η διαδικασία από την οποία προκύπτουν οι εξισώσεις θεωρούμε έναν αντιστροφέα πηγής ρεύματος. Σ' αυτή την περίπτωση τα φασικά ρεύματα του στάτη χρησιμεύουν σαν είσοδοι. Συνεπώς μπορεί να αμεληθεί η δυναμική συμπεριφορά του στάτη. Δηλαδή, αυτό οδηγεί στην απαλοιφή των εξισώσεων του στάτη. Οι εξισώσεις του δρομέα της επαγωγικής μηχανής, οι οποίες συμπεριλαμβάνουν τις πεπλεγμένες ροές σαν μεταβλητές, είναι οι εξής:

$$R_r \cdot i_{qr}^e + p \cdot \lambda_{qr}^e + \omega_{sl} \cdot \lambda_{dr}^e = 0 \quad (4.39)$$

$$R_r \cdot i_{dr}^e + p \cdot \lambda_{dr}^e - \omega_{sl} \cdot \lambda_{qr}^e = 0 \quad (4.40)$$

Όπου :

$$\omega_{sl} = \omega_s + \omega_r \quad (4.41)$$

$$\lambda_{qr}^e = L_m \cdot i_{qs}^e + L_r \cdot i_{qr}^e \quad (4.42)$$

$$\lambda_{dr}^e = L_m \cdot i_{ds}^e + L_r \cdot i_{dr}^e \quad (4.43)$$

Στις παραπάνω εξισώσεις τα διάφορα σύμβολα υποδηλώνουν τα εξής:  $R_r$  είναι η αντίσταση ανά φάση του δρομέα, αναφερόμενη στο στάτη,  $L_m$  η αμοιβαία επαγωγή ανά φάση,  $L_r$  η αυτεπαγωγή ανά φάση του δρομέα, αναφερόμενη στο στάτη,  $i_{dr}^e$  και  $i_{qr}^e$  τα ρεύματα στον ορθό και εγκάρσιο άξονα αντίστοιχα, αναφερόμενα στο στάτη και  $p$  ο διαφορικός τελεστής  $d/dt$ .  $\omega_{sl}$  είναι η ταχύτητα ολίσθησης σε rad/sec,  $\omega_s$  είναι η ηλεκτρική συχνότητα του στάτη σε rad/sec,  $\omega_r$  είναι η ηλεκτρική ταχύτητα δρομέα σε rad/sec και  $\lambda_{dr}^e$  και  $\lambda_{qr}^e$  οι πεπλεγμένες ροές στον ορθό και εγκάρσιο άξονα αντίστοιχα. Η συνισταμένη πεπλεγμένη ροή του δρομέα  $\lambda_r$ , η οποία ονομάζεται και διάνυσμα πεπλεγμένων ροών του δρομέα, θεωρούμε ότι βρίσκεται πάνω στον ορθό

άξονα , για να μειωθεί ο αριθμός των μεταβλητών στις εξισώσεις κατά μία. Επιπλέον, αυτή η θεώρηση είναι και η πιο ρεαλιστική γιατί οι πεπλεγμένες ροές του δρομέα είναι μονή μεταβλητή. Συνεπώς, ευθυγραμμίζοντας τον ορθό άξονα με το διάνυσμα της ροής του δρομέα προκύπτει:

$$\lambda_{dr}^e = \lambda_r \quad (4.44)$$

$$\lambda_{dr}^e = 0 \quad (4.45)$$

$$p\lambda_{dr}^e = 0 \quad (4.46)$$

Αντικαθιστώντας τις εξισώσεις (4.44) έως (4.46) στην (4.39) και (4.40) προκύπτουν οι νέες εξισώσεις του δρομέα:

$$R_r \cdot i_{qr}^e + \omega_{sl} \cdot \lambda_r = 0 \quad (4.47)$$

$$R_r \cdot i_{dr}^e + p \cdot \lambda_r = 0 \quad (4.48)$$

Τα ρεύματα του δρομέα σαν συνάρτηση των ρευμάτων του στάτη προκύπτουν από τις εξισώσεις (4.42) και (4.43):

$$i_{qr}^e = - \frac{L_m}{L_r} \cdot i_{qs}^e \quad (4.49)$$

$$i_{dr}^e = \frac{\lambda_r}{L_r} - \frac{L_m}{L_r} \cdot i_{ds}^e \quad (4.50)$$

Αντικαθιστώντας στις εξισώσεις (4.47) (4.48) τα ρεύματα του δρομέα στους d και q άξονες από τις εξισώσεις (4.49) και (4.50) προκύπτουν τα ακόλουθα:

$$i_f = \frac{1}{L_m} \cdot [1 + T_r \cdot p] \cdot \lambda_r \quad (4.51)$$

$$\omega_{sl} = K_{it} \cdot \left[ \frac{L_r}{T_r} \right] \cdot \left[ \frac{T_e}{\lambda_r^2} \right] = K_{it} \cdot R_r \cdot \left[ \frac{T_e}{\lambda_r^2} \right] = \frac{L_m}{T_r} \frac{i_T}{\lambda_r} \quad (4.52)$$

Όπου:

$$i_f = i_{ds}^e \quad (4.53)$$

$$i_T = i_{qs}^e \quad (4.54)$$

$$T_r = \frac{L_r}{R_r} \quad (4.55)$$

$$K_{it} = \frac{2}{3} \frac{2}{P} \quad (4.56)$$

Τα ρεύματα στους q και d άξονες μετονομάζονται σε συνιστώσες του διανύσματος του ρεύματος του στάτη που παράγουν ροπή ( $i_T$ ) και ροή ( $i_f$ ) αντίστοιχα.  $T_r$  είναι η χρονική σταθερά του δρομέα. Η εξίσωση (4.51) μοιάζει με την εξίσωση της διέγερσης σε μια μηχανή συνεχούς ρεύματος ξένης διέγερσης, της οποίας η χρονική σταθερά είναι συνήθως της τάξης των δευτερολέπτων. Αντίστοιχα, επισημαίνεται ότι η χρονική σταθερά του δρομέα μιας επαγωγικής μηχανής είναι της τάξης των δευτερολέπτων.

Από την αντικατάσταση των ρευμάτων του δρομέα από τις εξισώσεις (4.49) και (4.50) στην έκφραση της ροπής, προκύπτει η ηλεκτρομαγνητική ροπή ως εξής:

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{L_m}{L_r} \cdot (i_{qs}^e \cdot \lambda_{ds}^e - i_{ds}^e \cdot \lambda_{qs}^e) = \frac{3}{2} \cdot \frac{P}{2} \cdot \frac{L_m}{L_r} \cdot (i_{qs}^e \cdot \lambda_{dr}^e) = K_{te} \cdot i_{qs}^e \cdot \lambda_r = K_{te} \cdot i_T \cdot \lambda_r \quad (4.57)$$

Όπου η σταθερά της ροπής ορίζεται ως εξής:

$$K_{te} = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{L_m}{L_r} \quad (4.58)$$

Παρατηρούμε ότι η ροπή είναι ανάλογη του γινομένου των πεπλεγμένων ροών του δρομέα και του ρεύματος του στάτη στον q άξονα. Αυτό μοιάζει με την έκφραση τη ροπής διακένου σε μία μηχανή συνεχούς ρεύματος, η οποία είναι ανάλογη του γινομένου των πεπλεγμένων ροών της διέγερσης και του ρεύματος του τυμπάνου.

Εάν η τιμή των πεπλεγμένων ροών του δρομέα παραμένει σταθερή τότε η ροπή είναι απλά ανάλογη της συνιστώσας του διανύσματος του ρεύματος του στάτη που παράγει ροπή, όπως στην περίπτωση μιας μηχανής συνεχούς ρεύματος ξένης διέγερσης με έλεγχο του ρεύματος τυμπάνου, όπου η ροπή είναι ανάλογη του ρεύματος τυμπάνου όταν το ρεύμα διέγερσης διατηρείται σταθερό. Παρόμοια με τη χρονική σταθερά του τυμπάνου μιας μηχανής συνεχούς ρεύματος, η οποία είναι της τάξης των χιλιοστών του δευτερολέπτου, η χρονική σταθερά της συνιστώσας του διανύσματος του ρεύματος του στάτη που παράγει ροπή αποδεικνύεται να είναι της ίδιας τάξεως μεγέθους και είναι ίση με τη χρονική σταθερά του στάτη. Οι εξισώσεις για τις πεπλεγμένες ροές του δρομέα και τη ροπή διακένου που δίνονται με στις (4.52) και (4.57) αντίστοιχα, συμπληρώνουν το μετασχηματισμό μιας επαγωγικής μηχανής σε μια ισοδύναμη μηχανή συνεχούς ρεύματος ξένης διέγερσης όσον αφορά τον αυτόματο έλεγχο. Το διάνυσμα του ρεύματος του στάτη είναι το διανυσματικό άθροισμα των q και d συνιστωσών σε οποιοδήποτε σύστημα αναφοράς, δίνεται δε από τον τύπο:

$$i_s = \sqrt{(i_{qs}^e)^2 + (i_{ds}^e)^2} \quad (4.59)$$

Και η σχέση των q και d συνιστωσών με τα φασικά abc ρεύματα προκύπτει:

$$\begin{bmatrix} i_{qs}^{-e} \\ i_{ds}^{-e} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta_f) & \cos(\theta_f - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_f + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\theta_f) & \sin(\theta_f - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta_f + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} \quad (4.60)$$

Ή αλλιώς:

$$i_{qd} = [T] [i_{abc}] \quad (4.61)$$

Όπου:

$$i_{qd} = [i_{qs}^e \quad i_{ds}^e]^t \quad (4.62)$$



$$i_{abc} = [i_{as} \quad i_{bs} \quad i_{cs}]^t \quad (4.63)$$

$$[T] = \frac{2}{3} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta_f) & \cos(\theta_f - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_f + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\theta_f) & \sin(\theta_f - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta_f + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (4.64)$$

Όπου  $i_{as}$ ,  $i_{bs}$  και  $i_{cs}$  είναι τα τρία φασικά ρεύματα του στάτη. Ας σημειωθεί ότι τα στοιχεία στον πίνακα  $T$  είναι ημιτονοειδείς συναρτήσεις της ηλεκτρικής γωνίας  $f$   $\theta$ . Σ' αυτή την περίπτωση η ηλεκτρική γωνία του πεδίου προκύπτει από το άθροισμα της γωνίας του δρομέα και της ολίσθησης :

$$\theta_f = \theta_r + \theta_{sl} \quad (4.65)$$

και η γωνία ολίσθησης προκύπτει από την ολοκλήρωση της ταχύτητας ολίσθησης:

$$\theta_{sl} = \int \omega_{sl} dt \quad (4.66)$$

Από τα παραπάνω μπορεί να σχεδιασθεί ένα κινητήριο σύστημα και το διανυσματικό του διάγραμμα.

### Σχεδίαση έμμεσου διανυσματικού ελέγχου

Ένας διανυσματικός ελεγκτής δέχεται τις απαιτήσεις σε ροπή και ροή και δημιουργεί τις εντολές για τις συνιστώσες του διανύσματος του ρεύματος του στάτη που παράγουν τη ροπή και τη ροή και τη γωνία ολίσθησης  $\theta_{sl}$ . Οι τιμές των απαιτήσεων/εντολών και οι παράμετροι του ελεγκτή σημειώνονται παρακάτω με αστερίσκο. Από τις εξισώσεις (4.51), (4.52) και (4.56) οι εντελλόμενες τιμές των  $i_T$ ,  $i_f$  και  $\omega_{sl}$  είναι :

$$i_T^* = \frac{T_e^*}{K_{te} \cdot \lambda_r^*} = \frac{T_e^*}{\lambda_r^*} \frac{L_r^*}{L_m^*} \left(\frac{2}{3}\right) \left(\frac{2}{P}\right) = K_{it} \left(\frac{T_e^*}{\lambda_r^*}\right) \left(\frac{L_r^*}{L_m^*}\right) \quad (4.67)$$

$$i_f^* = \frac{\lambda_r^*}{L_m^*} [1 + T_r^* p] \quad (4.68)$$

$$\omega_{sl} = K_{it} \left[ \frac{L_r^*}{T_r^*} \right] \left[ \frac{T_e^*}{(\lambda_r^*)^2} \right] = K_{it} R_r^* \left[ \frac{T_e^*}{(\lambda_r^*)^2} \right] = \frac{L_m^*}{T_r^*} \frac{i_T^*}{\lambda_r^*} \quad (4.69)$$

Η εντελλόμενη γωνία ολίσθησης  $\theta_{sl}^*$  δημιουργείται με την ολοκλήρωση της  $\omega_{sl}^*$ . Η εντολή της γωνίας της ροπής προκύπτει από το τόξο εφαπτομένη των  $i_T^*$  και  $i_f^*$ . Η γωνία του πεδίου προκύπτει από το άθροισμα των εντολών της γωνίας ολίσθησης και της γωνίας του δρομέα. Με τις εντολές για τις συνιστώσες του διανύσματος του ρεύματος του στάτη που παράγουν τη ροπή και τη ροή και τη γωνία του πεδίου προκύπτουν οι εντολές των ρευμάτων στους qd άξονες (και συνεπώς και οι εντολές των φασικών abc ρευμάτων) ως εξής:

$$\begin{bmatrix} i_{qs}^* \\ i_{ds}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_f) & \sin(\theta_f) \\ -\sin(\theta_f) & \cos(\theta_f) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_T^* \\ i_f^* \end{bmatrix} \quad (4.70)$$

Και

$$\begin{bmatrix} i_{as}^* \\ i_{bs}^* \\ i_{cs}^* \end{bmatrix} = [T^{-1}] \begin{bmatrix} i_{qs}^* \\ i_{ds}^* \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.71)$$

Όπου:

$$[T^{-1}] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \end{bmatrix} \quad (4.72)$$

Με τη χρήση των εξισώσεων (4.70) έως (4.72) προκύπτουν οι εντολές των ρευμάτων του στάτη στους q και d και abc άξονες ως εξής:

$$i_{qs}^* = |i_s^*| \sin \theta_s^* \quad (4.73)$$

$$i_{ds}^* = |i_s^*| \cos \theta_s^* \quad (4.74)$$

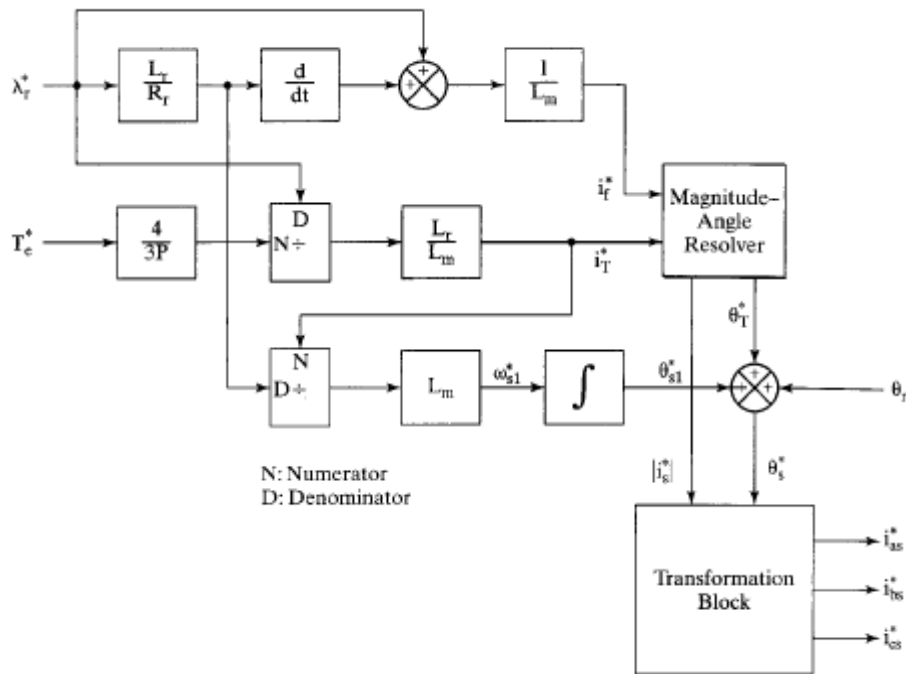
$$i_{bs}^* = |i_s^*| \sin\left(\theta_s^* - \frac{2}{3}\pi\right) \quad (4.75)$$

$$i_{bs}^* = |i_s^*| \sin\left(\theta_s^* + \frac{2}{3}\pi\right) \quad (4.76)$$

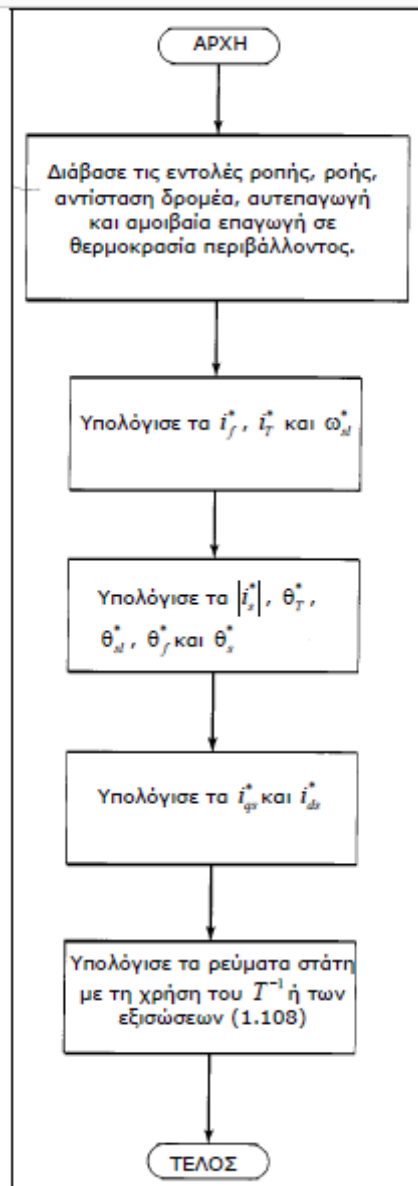
Όπου:

$$\theta_s^* = \theta_T^* + \theta_f = \theta_T^* + \theta_r + \theta_{sl}^* \quad (4.77)$$

Οι εντολές των ρευμάτων επιβάλλονται από τον αντιστροφέα με κατάλληλες τεχνικές ελέγχου. Μια υλοποίηση του σχεδίου σε διάγραμμα βαθμίδων παρουσιάζεται στο σχήμα 59. Το διάγραμμα ροής για την παραγωγή των μεταβλητών ελέγχου στον έμμεσο διανυσματικό έλεγχο δίνεται στο σχήμα 60.



**Σχήμα 59:** Λειτουργικό διάγραμμα βαθμίδων ενός έμμεσου διανυσματικού ελεγκτή πηγής ρεύματος



Σχήμα 60: Διάγραμμα ροής επαγωγικής μηχανής στην οποία εφαρμόζεται έμμεσος διανυσματικός έλεγχος

## Βιβλιογραφία και πηγές από το διαδίκτυο

Αληφραγκής Ιωάννης, ηλεκτρονόμος εφαρμογές σχέδια, slide share <https://www.slideshare.net/GiannisAlifragis/ss-43386104>

ΑΝΤΩΝΑΚΗΣ ΤΑΣΟΣ, Ηλεκτρολόγοι 1ής ΕΠΑΣ ΟΑΕΔ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ, blogger <https://oaedhlectrologoi.blogspot.gr/>

ΒΑΛΙΑΔΗΣ, Ελληνικοί ηλεκτροκινητήρες, Ρυθμιστές Στροφών LG <http://www.valiadis.gr>

Βυλλιώτης Ηρακλής, Σημειώσεις Ηλεκτρικές Μηχανές ΙΙ (Ενότητα 2: Ασύγχρονος Τριφασικός Κινητήρας Αρχή Λειτουργίας) <http://eclass.teipir.gr/openeclass/modules/document/index.php?course=ELEC106&openDir=/54b29a86BRPL>

Γαντζούδης Σωτήρης, Λαγουδάκος Μιχαήλ, Μπινιάρης Αθανάσιος, Ηλεκτρικές μηχανές (Τεχνικά Επαγγελματικά Εκπαιδευτήρια, Τομέας Ηλεκτρολογικός, Β΄ Τάξη 1ου κύκλου) Ο.Ε.Δ.Β. Αθήνα, Κεφάλαιο 4 [http://hlektrologia.weebly.com/uploads/6/7/1/5/6715419/p209\\_284.pdf](http://hlektrologia.weebly.com/uploads/6/7/1/5/6715419/p209_284.pdf)

Ηλεκτρολόγος μηχανικός, Blogger <http://greekelectrician.blogspot.gr/2011/10/blog>

ΚΑΡΛΗΣ Δ. ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ, ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΕΣ ΠΑΡΑΔΟΣΕΙΣ ΤΟΥ ΜΑΘΗΜΑΤΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ ΓΙΑ ΚΙΝΗΣΗ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΗ ΙΙ [https://eclass.duth.gr/modules/document/file.php/TMA289/ΣΗΜΚΗ\\_II.pdf](https://eclass.duth.gr/modules/document/file.php/TMA289/ΣΗΜΚΗ_II.pdf)

Μαλατέστας Παντελής, Εργαστηριακές Ασκήσεις Ηλεκτρικών Ηλεκτρικής κίνησης  
Π.Μαλατέστας,Α Μανιάς. Ηλεκτρική κίνηση, 2η Έκδοση Εκδόσεις Τζιόλα

Μανωλάς Στ.Ιάκωβος , Σύγχρονες Τεχνικές Ελεγχού Ηλεκτρικών Μηχανών  
Επαγωγής

[http://users.sch.gr/~kimnikos/pdf/Kim/MOT\\_control.pdf](http://users.sch.gr/~kimnikos/pdf/Kim/MOT_control.pdf)

Μαρινάκης Ιωάννης, Σημειώσεις Τεχνολογικές ενότητες/Μηχανές/Ηλεκτρικοί  
κινητήρες

[http://users.sch.gr/imarinakis/electric\\_engines.htm](http://users.sch.gr/imarinakis/electric_engines.htm)

Σημειώσεις Ηλεκτρικές Μηχανές ΙΙ

[http://electrical-dep.teipir.gr/LotusQuickr/elec\\_mach\\_ii/Main.nsf/\\$defaultview/C6E41493A029015BC2257DCD002A197D/\\$File/%CE%91%CE%A3%CE%A5%CE%93%CE%A7%CE%A1%CE%9F%CE%9D%CE%9F%CE%99%203%CE%A6%20%CE%9A%CE%99%CE%9D%CE%97%CE%A4%CE%97%CE%A1%CE%95%CE%A3.pdf?OpenElement](http://electrical-dep.teipir.gr/LotusQuickr/elec_mach_ii/Main.nsf/$defaultview/C6E41493A029015BC2257DCD002A197D/$File/%CE%91%CE%A3%CE%A5%CE%93%CE%A7%CE%A1%CE%9F%CE%9D%CE%9F%CE%99%203%CE%A6%20%CE%9A%CE%99%CE%9D%CE%97%CE%A4%CE%97%CE%A1%CE%95%CE%A3.pdf?OpenElement)

Πυλαρινός Δ.,ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΙΣΧΥΟΣ

[http://talos-ts.com/files/PEGA\\_PYLARINOS.pdf](http://talos-ts.com/files/PEGA_PYLARINOS.pdf)

ΤΡΙΦΑΣΙΚΟΙ ΑΣΥΓΧΡΟΝΟΙ – ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΙ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ,ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

[http://elearning.teicm.gr/file.php/318/trifasikos\\_asynxronos\\_kinitiras.pdf](http://elearning.teicm.gr/file.php/318/trifasikos_asynxronos_kinitiras.pdf)

ΤΡΩΓΑΔΑΣ Π.ΝΙΚ.,ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΑΣΚΗΣΕΙΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ  
Α.Σ

<http://users.teilar.gr/~trogadas/MIXANES/ERGASTHRIO%20MIXANES%20AC/ergastirioAC.pdf>

WHAT-WHEN-HOW, In Depth tutorials and Information, AC Drives (Motors and Drives)

<http://what-when-how.com/motors-and-drives/ac-drives-motors-and-drives/>

<https://el.wikipedia.org/wiki/Αστεροτρίγωνο>