



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ**

**ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε**

---

**ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΟΜΑΛΗΣ  
ΕΚΚΙΝΗΣΗΣ ΚΑΙ ΠΕΛΗΣΗ ΤΡΙΦΑΣΙΚΟΥ  
ΑΣΥΓΧΡΟΝΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΜΕΣΩ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟΥ  
ΟΜΑΛΟΥ ΕΚΚΙΝΗΤΗ (SOFT – STARTER).**

**STUDY AND DEVELOPMENT OF THREE-PHASE SOFT  
STARTING AND BREAKING SYSTEM FOR THREE PHASE  
AC MOTORS**

---

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

---

Εισηγητές: Παναγιώτου Παντελής AM:42539  
Σούρμπης Δημοσθένης AM: 39551

Επιβλέπων: Βυλλιώτης Ηρακλής

**2018**

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα πτυχιακή έχει ως στόχο να παρουσιάσει τους τριφασικούς ασύγχρονους κινητήρες (λειτουργία, εκκίνηση – πέδηση, έλεγχος στροφών) ενώ εστιάζει στην λειτουργία των ομαλών ηλεκτρονικών εκκινήτων, οι οποίοι και αποτελούν το κυρίαρχο αντικείμενο αυτής και της κατασκευής που την συνοδεύει.

Στο πρώτο κεφάλαιο δίνεται μια περιγραφή των τριφασικών ασύγχρονων κινητήρων διαχωρίζοντας τους σε δύο κατηγορίες (βραχυκυκλωμένου δρομέα και δακτυλιοφόρου δρομέα). Παράλληλα περιγράφεται η κατασκευαστική τους δομή και η αρχή λειτουργίας τους. Στην συνέχεια του κεφαλαίου μέσα από πλήθος εξισώσεων, σχέσεων και τύπων αποδίδεται ο τρόπος λειτουργίας των τριφασικών ασύγχρονων κινητήρων καθώς και επίσης ο τρόπος υπολογισμού των επιμέρων τιμών των παραμέτρων και μεταβλητών που υπεισέρχονται κατά τη λειτουργία ενός τέτοιου κινητήρα.

Στο δεύτερο κεφάλαιο εξετάζονται οι βασικές ηλεκτρικές και ηλεκτρονικές διατάξεις εκκίνησης των ασύγχρονων τριφασικών κινητήρων. Παράλληλα γίνεται μια σύγκριση ανάμεσα σ' αυτούς τους τρόπους σε σχέση με την ροπή και το ρεύμα εκκίνησης καθώς και την ευκολία κατασκευής τους.

Το τρίτο κεφάλαιο καταπιάνεται με τους τρόπους πέδησης και ελέγχου των στροφών των ασύγχρονων τριφασικών κινητήρων. Μέσω διαγραμμάτων αποδίδουμε διάφορα συμπεράσματα για κάθε ένα από τους τρόπους.

Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται μια αναλυτικότερη περιγραφή της εκκίνησης με ομαλό ηλεκτρονικό εκκινήτη. Αναλύει την κατασκευή, την δομή και την αρχή λειτουργίας αυτού. Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο αναλύεται μέσω διαγραμμάτων η λειτουργία της ομαλής εκκίνησης και πέδησης του κινητήρα.

Το πέμπτο και τελευταίο κεφάλαιο της πτυχιακής εργασίας αποτελεί την επί χάρτου προβολή της κατασκευής που συνοδεύει αυτή. Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφονται αναλυτικά τα τεχνικά χαρακτηριστικά του ομαλού εκκινήτη καθώς και των υπολοίπων υλικών του πίνακα. Επισυνάπτατε το μονογραμμικό σχέδιο του πίνακα καθώς και προτεινόμενες συνδεσμολογίες του κατασκευαστή. Συμπληρωματικά επισυνάπτεται και ένας αναλυτικός πίνακας κόστους.

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

#### ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1.ΣΥΝΤΟΜΗ ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ.....	5
1.2.Ασύγχρονοι Κινητήρες.....	6
1.2.1Κινητήρες βραχυκυκλωμένου δρομέα .....	6
1.2.2. Κινητήρες δακτυλιοφόρου δρομέα .....	7
1.3.Κατασκευάστρες κλάσεις κινητήρα.....	9
1.4. Ισοδύναμο κύκλωμα ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα.....	10
1.5. Στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο – Δημιουργία ροπής.....	11
1.6. Καμπύλη ροπής- ταχύτητας.....	14
1.6.1 Περιοχή χαμηλής ολίσθησης.....	15
1.6.2 Περιοχή υψηλής ολίσθησης .....	16
1.6.3 Περιοχή πέδησης .....	17
1.7. Συντελεστής Απόδοσης.....	17
1.8. Απώλειες κινητήρα.....	18

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

#### ΤΡΟΠΟΙ ΕΚΚΙΝΗΣΗΣ ΑΣΥΓΧΡΟΝΟΥ ΤΡΙΦΑΣΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ

2.1. Εισαγωγή.....	22
2.2. Απευθείας εκκίνηση (σε πλήρη τάση φορτίου).....	23
2.3. Εκκίνηση με διακόπτη αστέρα-τριγώνου (Y/Δ).....	24
2.4. Εκκίνηση με αντιστάσεις στο στάτη .....	27
2.5. Εκκίνηση με αυτομετασχηματιστή.....	28
2.6. Εκκίνηση με ηλεκτρονικά ισχύος.....	31
2.6.1 Ημιαγωγικό στοιχείο θυρίστορ.....	31

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

#### ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΤΡΟΠΟΙ ΠΕΔΗΣΗΣ

3.1. Έλεγχος της ταχύτητας ασύγχρονων τριφασικών κινητήρων.....	35
3.1.1. Έλεγχος της ταχύτητας με ρύθμιση της αντίστασης του δρομέα .....	35
3.1.2. Έλεγχος της ταχύτητας με ρύθμιση της τάσης του στάτη. ....	36
3.1.3. Έλεγχος της ταχύτητας με μεταβολή του αριθμού των πόλων .....	39
3.1.4. Έλεγχος της ταχύτητας με τη μεταβολή της συχνότητας .....	39
3.2. Τρόποι πέδησης ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα .....	42
3.2.1. Δυναμική πέδηση .....	42
3.2.2. Ελεύθερη πέδηση .....	43
3.2.3. Δυναμική πέδηση με συνεχές ρεύμα .....	43

3.2.4. Μηχανική Πέδηση (Ηλεκτρική πέδη σιαγόνων) .....	44
--	----

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4**

### **ΟΜΑΛΟΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟΙ ΕΚΚΙΝΗΤΕΣ**

4.1. Ομαλοί Ηλεκτρονικοί Εκκινητές.....	46
4.1.1. Εφαρμογές .....	46
4.1.2. Αρχή λειτουργίας .....	47
4.1.3. Λειτουργίες του ομαλού ηλεκτρονικού εκκινητή .....	49
4.1.4. Ομαλή εκκίνηση (Soft-Starting) .....	51
4.1.5. Σταμάτημα κινητήρα με εντολή για ομαλό σταμάτημα (soft-stop). .....	52

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5**

### **ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ**

8.1.1 Σκοπός κατασκευής .....	54
8.1.2 Δυνατότητες κατασκευής .....	54
8.2. Ανάλυση τεχνικών χαρακτηριστικών ομαλού εκκινητή .....	57
8.2.1 Ομαλός εκκινητής ALTISTART 01 .....	58
8.2.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά .....	59
8.2.3 Παραδείγματα εφαρμογών του Altistart 01.....	63
8.3 Αναλυτικός Πίνακας Κόστους Κατασκευής. ....	64

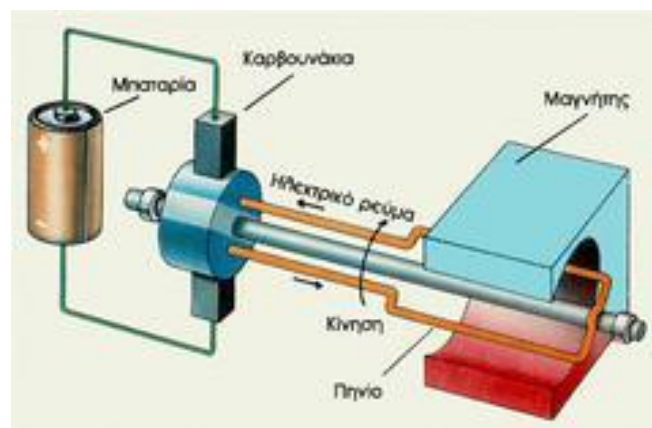
## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

### ΕΙΣΑΓΩΓΗ

#### 1.1 ΣΥΝΤΟΜΗ ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ

Η αλληλοσύνδεση του ηλεκτρισμού και του μαγνητισμού είναι ένα γεγονός που προώθησε την επιστημονική έρευνα και επέφερε σημαντικές αλλαγές στην καθημερινή μας ζωή. Σ' αυτόν οφείλονται ο ηλεκτροκινητήρας, ο ηλεκτρομαγνήτης, οι ασύρματες επικοινωνίες κ.λ.π. Τη συγγένεια των ηλεκτρικών και μαγνητικών δυνάμεων διαπίστωσε πρώτος ο Έρστεντ (Hans Christian Oersted). Αυτό έγινε τυχαία όταν, καθώς έδινε μια διάλεξη, συνέδεσε ένα σύρμα με τους πόλους μιας μπαταρίας. Προς μεγάλη του έκπληξη παρατήρησε ότι η βελόνα μιας πυξίδας που βρισκόταν κοντά στο σύρμα στράφηκε από την αρχική της θέση. Έτσι ο Δανός φυσικός συνειδητοποίησε ότι ο ηλεκτρισμός μπορούσε να παράγει μαγνητισμό. Τις παρατηρήσεις του Έρστεντ περιέγραψε και ερμήνευσε θεωρητικά ο Αμπέρ (Andre Mari Ampere).



*Σχήμα 1.1. Σχηματικό διάγραμμα λειτουργίας ενός ηλεκτρικού κινητήρα.*

Ο ηλεκτρικός κινητήρας δεν είναι τίποτε άλλο παρά μια μηχανή που δημιουργεί κίνηση καταναλώνοντας ηλεκτρισμό. Σ' έναν απλό ηλεκτροκινητήρα, το ηλεκτρικό ρεύμα διαρρέει μια συρμάτινη περιέλιξη (θηλειά), η οποία βρίσκεται ανάμεσα στους πόλους ενός ηλεκτρομαγνήτη. Όμως κάθε ρευματοφόρος αγωγός, που βρίσκεται μέσα σε μαγνητικό πεδίο, δέχεται κάποια δύναμη. Στην περίπτωση αυτή οι δυνάμεις που ασκούνται στην περιέλιξη, σπρώχνουν τη μια πλευρά της προς τα πάνω και την άλλη προς τα κάτω, με αποτέλεσμα αυτή να περιστρέφεται. Γι' αυτό και το σύρμα λέγεται "ρότορας", ενώ ο ηλεκτρομαγνήτης "στάτορας".

Αυτός αντιστρέφει τη φορά του ρεύματος δύο φορές σε κάθε περιστροφή, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται σταθερή φορά περιστροφής του ρότορα.

## 1.2.ΑΣΥΓΧΡΟΝΟΙ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ

Οι ασύγχρονοι κινητήρες έχουν ευρεία εφαρμογή κυρίως στις βιομηχανικές εγκαταστάσεις. Αυτό οφείλεται στο χαμηλό κόστος κατασκευής και συντήρησης τους, στην απλότητα της κατασκευής τους, και στην μεγάλη συγκέντρωση ισχύος.

Ονομάζονται και επαγωγικοί κινητήρες γιατί το ρεύμα διέγερσης του δρομέα δημιουργείται από επαγωγή και όχι από κάποια ηλεκτρική σύνδεση με κάποια πηγή πχ: μπαταριά.

Χωρίζονται σε δύο κατηγορίες :

1. τους μονοφασικούς
2. τους τριφασικούς

Οι τριφασικοί τους οποίους θα μελετήσουμε χωρίζονται σε δύο επιπλέον κατηγορίες οι οποίες ξεχωρίζουν σύμφωνα με τον τρόπο κατασκευής του δρομέα τους και είναι οι εξής:

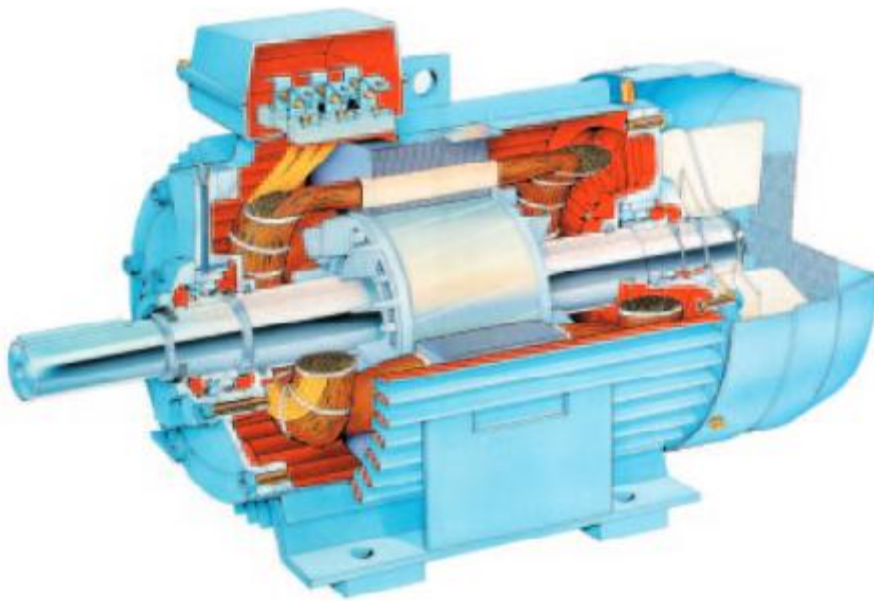
A) ασύγχρονοι κινητήρες βραχυκυκλωμένου δρομέα ή τύπου κλώβου

B) ασύγχρονοι κινητήρες τυλιγμένου δρομέα ή δακτυλιοφόροι

### 1.2.1 Κινητήρες βραχυκυκλωμένου δρομέα

Στην περίπτωση του βραχυκυκλωμένου δρομέα το τύλιγμα δρομέα αποτελείται από χάλκινες ράβδους(ή αλουμινένιες) κατά μήκος των αυλακώσεων τα άκρα των οποίων βραχυκυκλώνονται από δύο δακτυλίδια βραχυκύκλωσης. Η σύνδεση των χάλκινων ράβδων με τα δακτυλίδια βραχυκύκλωσης επιτυγχάνεται είτε με την μέθοδο της συγκόλλησης είτε με την μέθοδο της χύτευσης. Το ρεύμα που κυκλοφορεί στον δρομέα είναι αποκλειστικά από επαγωγή λόγω του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου. Αυτό σημαίνει ότι ο δρομέας δεν συνδέεται ηλεκτρικά με κάποιο άλλο τμήμα του κινητήρα.

Επιπλέον μπορούμε να θέσουμε ακόμα δύο υποκατηγορίες στον τύπο ασύγχρονου κινητήρα τύπου κλώβου σύμφωνα με τον τρόπο κατασκευής του στο τύμπανο του δρομέα. Αν οι αυλακώσεις στο τύμπανο του δρομέα είναι απλές(μονές) έχουμε την κατηγορία του απλού κλώβου. Αν είναι διπλές έχουμε διπλού κλώβου ενώ αν οι αυλακώσεις είναι βαθειές έχουμε τύλιγμα με βαθειά αυλάκια. Λόγω του ότι ο δρομέας απλού κλώβου έχει μεγάλο ρεύμα εκκίνησης με αντίστοιχα μικρή ροπή εκκίνησης σε συγκεκριμένες περιπτώσεις που απαιτούνται υψηλές ροπές κατά την εκκίνηση χρησιμοποιείται δρομέας τύπου κλώβου.



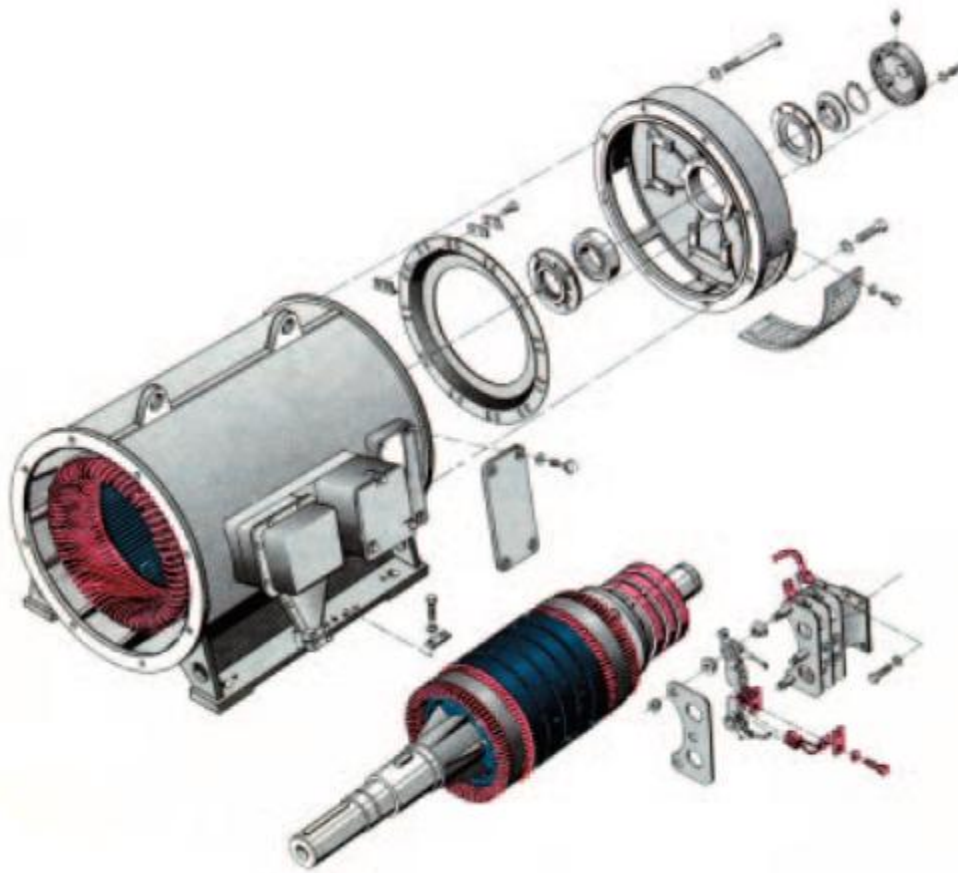
**Σχήμα 1.2 Εσωτερική άποψη κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα.**

Πλεονεκτήματα του κινητήρα με βραχυκυκλωμένο δρομέα έναντι του δακτυλιοφόρου είναι το χαμηλό κόστος κατασκευής και συντήρησης ο μικρότερος όγκος και η πιο στιβαρή κατασκευή του. Επιπλέον ο ίδιος ο δρομέας τύπου κλώβου μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε κινητήρα με μονοφασικό τύλιγμα στάτη.

### **1.2.2.Κινητήρες δακτυλιοφόρου δρομέα**

Είτε στην περίπτωση βραχυκυκλωμένου δρομέα είτε δακτυλιοφόρου ο στάτης κατασκευαστικά παραμένει ίδιος.

Η μόνη διαφορά είναι στον δρομέα. Στον κινητήρα δακτυλιοφόρου δρομέα ο δρομέας αποτελείται από μαγνητικά ελάσματα με εγκοπές που σχηματίζουν οδοντώσεις μέσα στις οποίες τοποθετείται το τύλιγμα. Το τύλιγμα είναι ένα διανεμημένο τριφασικό τύλιγμα του ίδιου αριθμού πόλων με το τύλιγμα τυμπάνου του στάτη. Το τύλιγμα στον δρομέα είναι είτε συνδεδεμένο σε αστέρα είτε συνδεδεμένο σε τρίγωνο τα άκρα του οποίου συνδέονται σε τρία μονωμένα μεταξύ τους δακτυλίδια πάνω στον άξονα του δρομέα. Πάνω στα δακτυλίδια τοποθετούνται οι ψήκτρες. Μέσω των ψηκτρών η κάθε φάση του δρομέα συνδέεται με την αντίσταση ενός τριφασικού εκκινητή. Μέσω αυτών των αντιστάσεων του εκκινητή επιτυγχάνουμε εκκίνηση με μεγάλη ροπή και χαμηλό ρεύμα.



*Σχήμα 1.3. Εσωτερική άποψη κινητήρα δακτυλιοφόρου δρομέα.*



### 1.3. Κατασκευαστικές κλάσεις κινητήρων

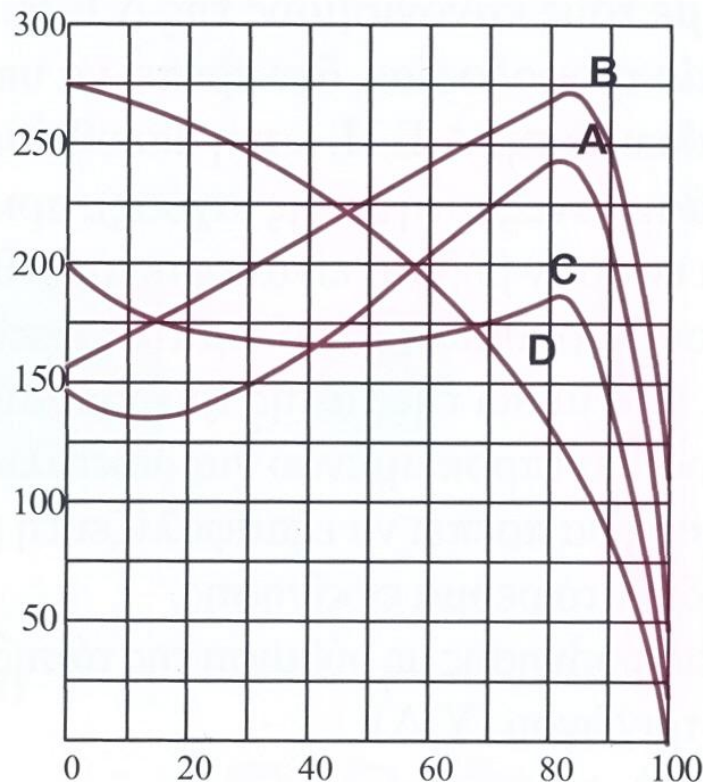
Οι κατασκευαστές προσπαθούν να μεταβάλλουν την αντίσταση και την αντίδραση των τυλιγμάτων του δρομέα μεταβάλλοντας το μέγεθος, την μορφή και το βάθος των αυλακιών του. Έτσι επιτυγχάνουν μεγάλη ροπή εκκίνησης και μικρό ρεύμα εκκίνησης του κινητήρα. Αυτά είναι απαραίτητα για την ομαλή εκκίνηση του και την ανεπιθύμητη πτώση τάσης του δικτύου, που προκαλεί ταλαντώσεις στην λειτουργία διπλανών συσκευών. Έχει γίνει διαχωρισμός των κινητήρων σε τέσσερις κλάσεις ανάλογα με την συμπεριφορά τους κατά την εκκίνηση και την κανονική λειτουργία

**Κλάση A:** Κανονική ροπή εκκίνησης και κανονικό ρεύμα εκκίνησης. Έχουν τυλίγματα απλού κλωβού και διακρίνονται για την καλή επίδοση λειτουργίας σε βάρος της εκκίνησης. Η μέγιστη ροπή είναι μεγαλύτερη του  $2.5T_{ov}$  και σε ταχύτητα πάνω από  $0.8n_s$  που σημαίνει ολίσθηση μικρότερη του 0,2. Το ρεύμα εκκίνησης είναι μεγάλο ίσο με  $5/8I_{ov}$ . Χρησιμοποιούνται για κίνηση μηχανημάτων σταθερής ταχύτητας χωρίς μεγάλη ροπή εκκίνησης, όπως εργαλειομηχανές, αντλίες, ανεμιστήρες.

**Κλάση B:** Κανονική ροπή εκκίνησης ίδια με την κλάση A, μικρή ολίσθηση και ρεύμα εκκίνησης το 75% της κλάσης A. Το ρεύμα εκκίνησης μειώθηκε με σχεδιασμό τυλίγματος υψηλής αντίδρασης σκέδασης ενώ η ροπή εκκίνησης είναι ίδια με την κλάση A με κατασκευή όμως διπλού κλωβού ή κλωβού με βαθιά αυλάκια. Οι εφαρμογές τους είναι ίδιες με την κλάση A και έχουν αντικαταστήσει στην σύγχρονη τεχνολογία τους κινητήρες κλάσης A, λόγω του χαμηλότερου ρεύματος εκκίνησης.

**Κλάση C:** Έχουν τύλιγμα δρομέα απλού κλωβού μεγαλύτερης αντίστασης από την A και την B κλάση. Αναπτύσσουν μεγαλύτερη ροπή εκκίνησης, χρειάζονται μικρότερο ρεύμα εκκίνησης, έχουν μικρότερο βαθμό απόδοσης και μεγαλύτερη ολίσθηση από τις δύο προηγούμενες κλάσεις. Έχουν μεγαλύτερο κόστος και χρησιμοποιούνται σε φορτία που χρειάζονται μεγάλη ροπή εκκίνησης όπως συμπιεστές, μεταφορικές ταινίες, ισχύος 10PS μέχρι 300PS.

**Κλάση D:** Έχουν τύλιγμα απλού κλωβού με ράβδους από ορείχαλκο, μικρότερης διατομής για να παρουσιάζουν μεγαλύτερη αντίσταση. Αναπτύσσουν πολύ μεγάλη ροπή εκκίνησης με χαμηλό ρεύμα εκκίνησης. Η μέγιστη ροπή ξεπερνά την τριπλάσια της ονομαστικής και επιτυγχάνεται σε χαμηλές ταχύτητες με ολίσθηση 0,5 έως 0,11 με χαμηλό βαθμό απόδοσης. Χρησιμοποιούνται για κίνηση διακοπτόμενων φορτίων που χρειάζονται μεγάλη επιτάχυνση και για κρουστικά φορτία όπως πρέσες, διατρητικά μηχανήματα, ψαλίδια και μηχανήματα με σφόνδυλο.

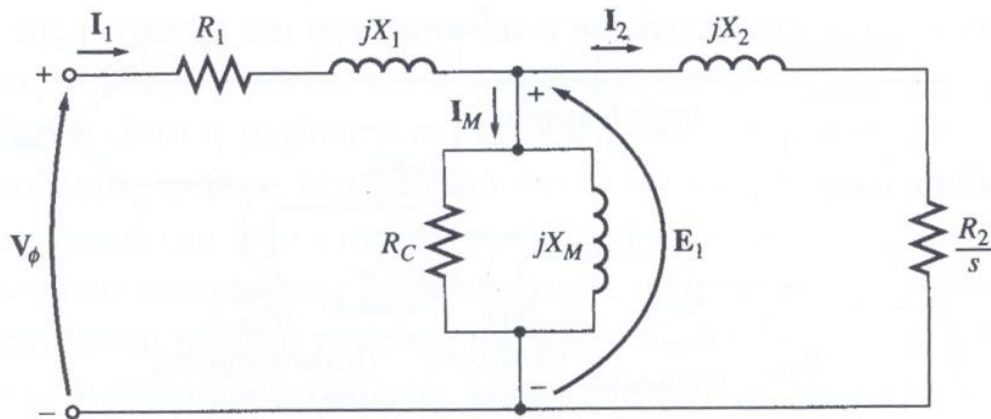


Σχήμα 1.4. Διάγραμμα ροπής –στροφών για τις κλάσεις κινητήρα.

#### 1.4.Ισοδύναμο κύκλωμα ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα

Η λειτουργία του κινητήρα βασίζεται στις τάσεις και τα ρεύματα που παράγονται εξ επαγωγής στο δρομέα και οφείλονται στο μαγνητικό πεδίο του στάτη. Επειδή, κατά την παραγωγή των τάσεων και των ρευμάτων ο επαγωγικός κινητήρας λειτουργεί εντελώς όμοια με έναν μετασχηματιστή, το ισοδύναμο κύκλωμα του κινητήρα θα μοιάζει αρκετά με αυτό του μετασχηματιστή. Η μελέτη του ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα λόγω της τριφασικής συμμετρίας που παρουσιάζει μπορεί να επιτευχθεί με την μελέτη του ισοδύναμου κυκλώματος της μίας μόνο φάσης. Ο επαγωγικός κινητήρας ονομάζεται και μηχανή διέγερσης επειδή τροφοδοτείται με ισχύ μόνο το κύκλωμα του στάτη. Επειδή ο επαγωγικός κινητήρας δεν διαθέτει ξεχωριστό κύκλωμα διέγερσης, στο ισοδύναμο κύκλωμα του δεν υπάρχει εσωτερική πηγή τάσης, όμοια με την εσωτερική τάση των σύγχρονων μηχανών. Το ισοδύναμο κύκλωμα του επαγωγικού κινητήρα είναι δυνατό να εξαχθεί, αν είναι γνωστή η λειτουργία των μετασχηματιστών και οι κανόνες που διέπουν τη μεταβολή της συχνότητας στο δρομέα με την ταχύτητα περιστροφής ενός επαγωγικού κινητήρα.

Παρακάτω παρουσιάζεται το ισοδύναμο κύκλωμα μίας εκ των τριών φάσεων ενός σύγχρονου τριφασικού κινητήρα:



**Σχήμα 1.5. Ισοδύναμο κύκλωμα επαγωγικού κινητήρα.**

**Τα μεγέθη που παριστάνονται στο ισοδύναμο κύκλωμα είναι τα εξής:**

$V_{\phi}$ : τάση ακροδεκτών στάτη

$I_1$ : ρεύμα στάτη

$R_1$ : πραγματική αντίσταση στάτη

$X_1$ : αντίδραση σκέδασης στάτη

$I_M$ : συνιστώσα ρεύματος διέγερσης

$X_M$ : η αντίδραση μαγνήτισης

$X_2$ : αντίδραση σκεδάσεως δρομέα ανοιγμένη στο στάτη

$E_1$ : αντι-ΗΕΔ που αναπτύσσεται από τη συνισταμένη ροή διακένου

$R_2/s$ : ανακλώμενη αντίσταση, συνδυασμένη επίδραση του φορτίου στον άξονα και της αντιστάσεως του δρομέα.

**Ισχύει η σχέση:**

$$V_1 = I_1(R_1 + jX_1) + E_1$$

Επισημαίνεται ότι όταν τα ρεύματα και οι τάσεις του δρομέα ανακλώνται στο στάτη, η συχνότητα τους μετατρέπεται σε συχνότητα στάτη. Όλα τα ηλεκτρικά φαινόμενα του δρομέα, όταν παρατηρούνται στο στάτη, γίνονται φαινόμενα συχνότητας στάτη, διότι το τύλιγμα του στάτη απλώς βλέπει κύματα ΜΕΔ και ροής να οδεύουν στη σύγχρονη ταχύτητα.

### **1.5.Στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο – Δημιουργία ροπής**

Για τη δημιουργία ροπής σε έναν ηλεκτροκινητήρα, είναι απαραίτητη η αλληλεπίδραση δυο μαγνητικών πεδίων, ενός περιστρεφόμενου μαγνητικού πεδίου στο στάτη και ενός άλλου στο

δρομέα. Το στρεφόμενο πεδίο του στάτη, λειτουργώντας σαν μόνιμος μαγνήτης, παρασύρει το πεδίο του δρομέα, δημιουργώντας κατάλληλη ροπή και αναγκάζοντάς τον να περιστραφεί. Για τη δημιουργία ενός στρεφόμενου πεδίου στο στάτη, είναι απαραίτητη η ύπαρξη δυο τουλάχιστον χωρικά μετατοπισμένων πηνίων τα οποία να διαρρέονται από κατάλληλα χρονικά μετατοπισμένα ρεύματα. Με τον τρόπο αυτό διεγείροντας εναλλάξ τα δύο τυλίγματα με κατάλληλα ρεύματα μπορεί να παραχθεί ένα κινούμενο μαγνητικό πεδίο στο διάκενο. Το συμμετρικό τριφασικό σύστημα είναι ένα σύστημα τριών χρονικά μετατοπισμένων τάσεων και ρευμάτων. Εάν ένα τέτοιο σύστημα τροφοδοτήσει τρία διαφορετικά πηνία, τοποθετημένα στο στάτη, με απόσταση 120 μοίρες το ένα από το άλλο, τότε στο διάκενο της μηχανής εμφανίζεται ένα συνιστάμενο περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο. Γίνεται λόγος στην περίπτωση αυτή για στρεφόμενο πεδίο στο διάκενο. Η κατανομή των τριών τυλιγμάτων στον στάτη ενδέχεται να μην καλύπτει όλη την περιφέρειά του, αλλά μια υποδιαίρεσή της και να επαναλαμβάνεται, δημιουργώντας έτσι περισσότερους από 2 μαγνητικούς πόλους, δηλαδή 4, 6, ..., 2p. Στην περίπτωση αυτή ο κινητήρας έχει p ζεύγη πόλων. Η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του πεδίου είναι σταθερή και εξαρτάται μόνο από τη συχνότητα του ρεύματος τροφοδοσίας και το πλήθος των ζευγών των πόλων. Η σχέση που δίνει την καλούμενη σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής (synchronous speed) σε rad/s είναι,

$$n = 2\pi f / p = 100\pi / p \quad [rad/s]$$

για τη συχνότητα  $f = 50$  Hz του Ελληνικού δικτύου. Μία πιο συνηθισμένη μονάδα μέτρησης της ταχύτητας περιστροφής είναι η rpm (revolutions per minute). Θεωρώντας ότι  $1 \text{ rev} = 2\pi \text{ rad}$ , τότε για  $f = 50$  Hz.

$$n = 3000 / p \quad [rpm]$$

Καθώς το πεδίο που προκαλείται από το στάτη περιστρέφεται στο διάκενο, επάγει μια εναλλασσόμενη τάση στα πηνία του ακίνητου δρομέα. Η συχνότητα της επαγόμενης τάσης εξαρτάται από το ρυθμό της μεταβολής του πεδίου, δηλαδή για ακίνητο δρομέα είναι ίδια με εκείνη του στάτη. Το πεδίο του δρομέα συνεπώς δεν προέρχεται από ηλεκτρική τροφοδότηση του τυλίγματός του, αλλά από επαγωγή, όπως σε ένα μετασχηματιστή. Εξαιτίας του φαινομένου αυτού, ο κινητήρας αυτός ονομάζεται επαγωγικός (induction motor). Τα πηνία του δρομέα είναι βραχυκυκλωμένα, είτε με κλωβό είτε μέσω εξωτερικών αντιστάσεων. Συνεπώς η επαγόμενη τάση προκαλεί τη ροή ισχυρών ρευμάτων στο δρομέα. Τα ρεύματα αυτά δημιουργούν μαγνητεγερτικές δυνάμεις οι οποίες αλληλεπιδρούν με το στρεφόμενο πεδίο του στάτη και δημιουργούν μηχανική ροπή, η οποία αναγκάζει το δρομέα να κινηθεί προς την κατεύθυνση της κίνησης του στρεφόμενου πεδίου. Καθώς η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα αυξάνει, ο ρυθμός της μεταβολής του πεδίου του στάτη, όπως αυτός φαίνεται από το δρομέα, ελαττώνεται. Το σύστημα των πηνίων στάτη και δρομέα

εξακολουθεί να λειτουργεί σαν ένας στρεφόμενος μετασχηματιστής που διεγείρεται από μια εναλλασσόμενη τάση η συχνότητα της οποίας ελαττώνεται, όσο αυξάνει η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα. Σε κάποια χρονική στιγμή η επαγόμενη στο δρομέα τάση φτάνει σε μια χαμηλή τιμή, ώστε η ΜΕΔ που δημιουργείται από τα ρεύματα στα πηνία του δρομέα, να δίνει μια ροπή ίση με εκείνη του επιβαλλόμενου μηχανικού φορτίου. Τότε ο κινητήρας έχει φτάσει στο σημείο λειτουργίας του και η ταχύτητα περιστροφής είναι λίγο μικρότερη από τη σύγχρονη ταχύτητα του πεδίου στο διάκενο. Εάν ο κινητήρας λειτουργεί εν κενώ, δηλαδή χωρίς μηχανικό φορτίο στον άξονα, τότε η παραγόμενη ηλεκτρομαγνητική ροπή ισούται με τις τριβές της περιστροφής του άξονα του κινητήρα. Στο σημείο αυτό είναι απαραίτητο να γίνει κατανοητό ότι όσο υπάρχει ένα μηχανικό φορτίο στο κινητήρα, οσοδήποτε μικρό, η ταχύτητα περιστροφής του θα είναι πάντοτε μικρότερη από τη σύγχρονη. Καθώς η λειτουργία του κινητήρα στηρίζεται στην εξ επαγωγής διέγερση του δρομέα, απαραίτητη προϋπόθεση είναι να υπάρχει, έστω και ελάχιστη, διαφορά ταχύτητας περιστροφής μεταξύ του πεδίου στο διάκενο και του δρομέα της μηχανής. Εάν οι δυο αυτές ταχύτητες ήταν ίσες τότε τα πηνία του δρομέα θα 'έβλεπαν' μια σταθερή τάση στο πρωτεύον και, φυσικά, η επαγόμενη τάση θα ήταν μηδέν. Η διαφορά στη ταχύτητα περιστροφής, ή ολίσθηση (slip) ορίζεται σαν

$$\text{ολίσθηση} = n_s - n_m / n_s$$

όπου  $n_m$  η πραγματική μηχανική ταχύτητα του δρομέα σε rpm. Ο όρος ολίσθηση χρησιμοποιείται για να εκφράσει ότι, από έναν παρατηρητή που στρέφεται με σύγχρονη ταχύτητα στο διάκενο, ο δρομέας φαίνεται να ολισθαίνει προς τα πίσω. Η ολίσθηση εκφράζεται συνηθέστερα σαν ποσοστό της σύγχρονης ταχύτητας, σύμφωνα με τη σχέση.

$$s = n_s - n_m / n_s$$

Η ολίσθηση ενός κινητήρα μπορεί, θεωρητικά, να μεταβάλλεται μεταξύ 0 και 1. Στην πράξη, είναι ιδιαίτερα χαμηλή και κυμαίνεται μεταξύ μερικών δεκάτων % έως το πολύ 10%. Η συχνότητα ρευμάτων και τάσεων στο δρομέα εξαρτάται από τη σχετική ταχύτητα μεταξύ του σύγχρονου στρεφόμενου πεδίου και του δρομέα, δηλαδή από την ολίσθηση και δίνεται από τη σχέση,

$$f_2 = s f_1$$

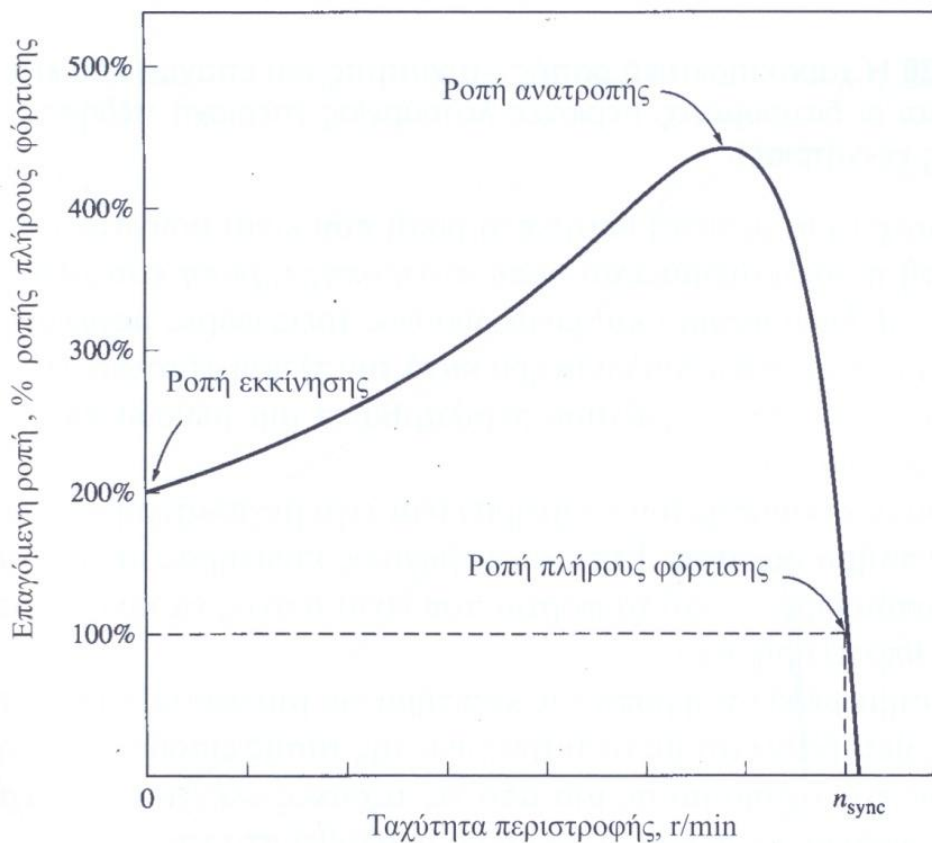
όπου  $f_2$  η συχνότητα στο δρομέα και  $f_1$  η συχνότητα τροφοδοσίας του στάτη. Στην ιδιότητα του δρομέα να περιστρέφεται με ταχύτητα διάφορη της σύγχρονης οφείλεται και η ονομασία ασύγχρονη μηχανή (asynchronous machine).

### 1.6.Καμπύλη ροπής- ταχύτητας

Η γενική εξίσωση για τη σχέση της επαγόμενης ροπής του κινητήρα με την ταχύτητα περιστροφής του, εξάγεται από το ισοδύναμο κύκλωμα και το διάγραμμα ροής ισχύος. Η σχέση αυτή είναι:

$$T_{\text{int}} = \frac{3V_{TH}^2 R_2 / s}{\omega_s (R_{TH} + R_2 / s)^2 + (X_{TH} + X_2)^2}$$

Η χαρακτηριστική της ροπής – ταχύτητας παρουσιάζεται παρακάτω:



**Σχήμα 1.6. Χαρακτηριστική ροπής – στροφών επαγωγικού κινητήρα.**

Η καμπύλη ροπής-ταχύτητας του επαγωγικού κινητήρα που φαίνεται στο σχήμα δίνει μερικές σημαντικές πληροφορίες για την λειτουργία των επαγωγικών κινητήρων.

- Η επαγόμενη ροπή του επαγωγικού κινητήρα είναι ίση με 0 στη σύγχρονη ταχύτητα.
- Μεταξύ των σημείων λειτουργίας χωρίς φορτίο και υπό πλήρες φορτίο η καμπύλη ροπής-ταχύτητας είναι σχεδόν γραμμική. Σ' αυτήν την περιοχή η αντίσταση του δρομέα είναι πολύ μεγάλη από την αντίδρασή του και έτσι το ρεύμα του δρομέα, το μαγνητικό πεδίο του δρομέα και η επαγόμενη ροπή αυξάνονται γραμμικά με την αύξηση της ολίσθησης.
- Υπάρχει μία μέγιστη επιτρεπτή ροπή που είναι αδύνατον να ξεπεραστεί. Αυτή η ροπή ονομάζεται ροπή ανατροπής ή ροπή κατάρρευσης και είναι δύο έως τρεις φορές μεγαλύτερη από την ονομαστική ροπή του κινητήρα κατά την πλήρη φόρτιση.
- Η ροπή εκκίνησης του κινητήρα είναι λίγο μεγαλύτερη από τη ροπή κατά την πλήρη φόρτιση. Έτσι ο επαγωγικός κινητήρας μπορεί να ξεκινήσει με οποιαδήποτε από τα φορτία που είναι ικανός να κινήσει στη λειτουργία υπό πλήρη ισχύ.
- Η ροπή για μία δεδομένη ισχύ της ολίσθησης μεταβάλλεται με τετράγωνο της τάσης εισόδου. Το γεγονός αυτό είναι πολύ χρήσιμο σε μία από τις τεχνικές ελέγχου της ταχύτητας .
- Αν ο δρομέας του επαγωγικού κινητήρα περιστρέφεται με ταχύτητα μεγαλύτερη από τη σύγχρονη ταχύτητα η φορά περιστροφής της επαγόμενης ροπής αντιστρέφεται με αποτέλεσμα η μηχανή να λειτουργεί ως γεννήτρια.

Αν η φορά περιστροφής του κινητήρα είναι αντίθετη από τη φορά περιστροφής των μαγνητικών πεδίων στο εσωτερικό του, η επαγόμενη ροπή θα σταματήσει τον κινητήρα και θα προσπαθήσει να τον περιστρέψει προς την αντίθετη φορά. Όμως επειδή η φορά περιστροφής των μαγνητικών πεδίων στον επαγωγικό κινητήρα μπορεί να πραγματοποιηθεί πολύ απλά με την αντιμετάθεση των συνδέσεων σε δύο από τις τρεις φάσεις, η παραπάνω παρατήρηση είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί με σκοπό το απότομο σταμάτημα του κινητήρα.

#### **1.6.1. Περιοχή χαμηλής ολίσθησης:**

Εδώ παρατηρείται σχεδόν γραμμική αύξηση της ολίσθησης του κινητήρα καθώς το φορτίο αυξάνει, ενώ η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα μειώνεται σχεδόν γραμμικά με το φορτίο. Η αντίδραση του δρομέα είναι αμελητέα, ο συντελεστής ισχύος του δρομέα είναι ίσος περίπου με τη μονάδα και το ρεύμα δρομέα αυξάνεται γραμμικά με την ολίσθηση. Το τελικό εύρος της κανονικής ευσταθούς λειτουργίας ενός επαγωγικού κινητήρα περιλαμβάνεται σε αυτή την περιοχή γραμμικής και χαμηλής ολίσθησης. Στην κανονική λειτουργία ο

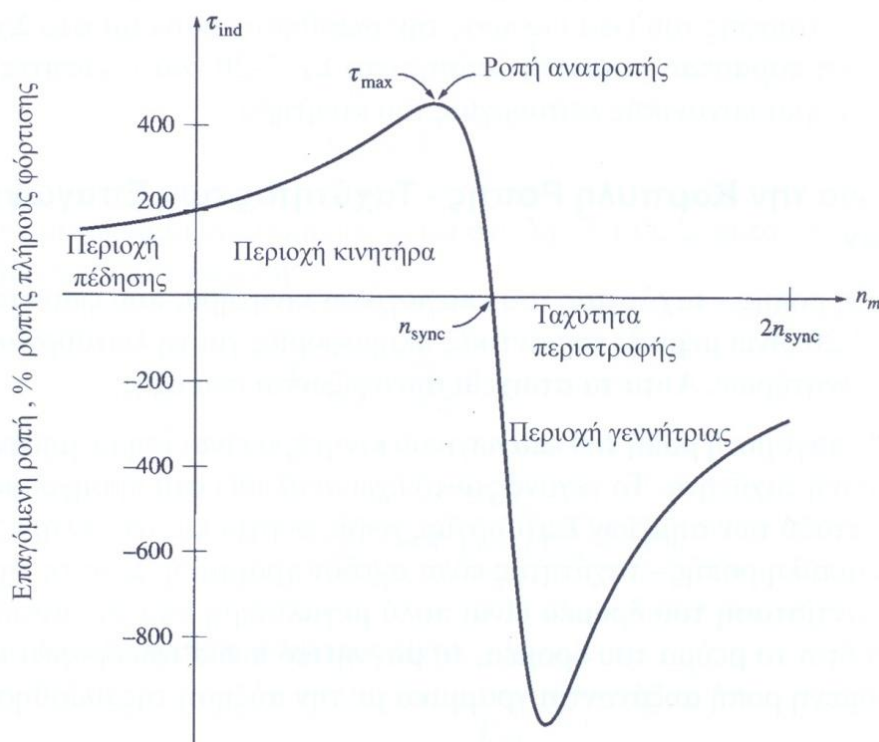
επαγωγικός κινητήρας παρουσιάζει γραμμική πτώση της ταχύτητας του, από τη γενική εξίσωση προκύπτει ότι η ολίσθηση σε αυτή την περιοχή δίνεται από τη σχέση

$$T_{\max} = (3/2\omega_s) \left[ V_{TH}^2 / R_{TH} + \sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_2)^2} \right]$$

### 1.6.2. Περιοχή υψηλής ολίσθησης:

Η επαγόμενη ροπή μειώνεται με την αύξηση του φορτίου καθώς η αύξηση του ρεύματος στο δρομέα επικαλύπτεται από τη μείωση του συντελεστή ισχύος στο δρομέα. Επίσης σε αυτό το διάγραμμα παρατηρούνται και τα παρακάτω: Στη σύγχρονη ταχύτητα η επαγόμενη ροπή είναι μηδενική. Η ροπή εκκίνησης είναι λίγο μεγαλύτερη από τη ροπή πλήρους φόρτισης, πράγμα που κάνει τον κινητήρα να μπορεί να ξεκινήσει με οποιοδήποτε από τα φορτία που είναι ικανός να κινήσει στη λειτουργία υπό πλήρη ισχύ.

Παρακάτω φαίνεται η χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας με διευρυμένη περιοχή λειτουργίας. Δηλαδή διακρίνεται η περιοχή πέδησης και η περιοχή επαγωγικής γεννήτριας



**Σχήμα 1.7. Περιοχές της χαρακτηριστικής ροπής – στροφών επαγωγικού κινητήρα.**



### 1.6.3. Περιοχή πέδησης.

Σε αυτή την περιοχή η φορά περιστροφής του κινητήρα είναι αντίθετη από τη φορά περιστροφής των μαγνητικών πεδίων στο εσωτερικό του. Αποτέλεσμα αυτού είναι η επαγομένη ροπή να σταματήσει τον κινητήρα και να προσπαθήσει να τον περιστρέψει προς την αντίθετη φορά. Με αντιμετάθεση των συνδέσεων σε δύο από τις τρεις φάσεις του κινητήρα, αλλάζει η φορά περιστροφής των μαγνητικών πεδίων με αποτέλεσμα την ακαριαία πέδηση του κινητήρα. Η πέδηση ενός ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους:

1. **Μηχανική πέδηση:** Πραγματοποιείται μέσω ειδικών σιαγόνων που πιέζουν τον άξονα της μηχανής. Παρουσιάζουν συχνά φθορές και απαιτείται μεγάλος χρόνος πέδησης.
2. **Ελεύθερη πέδηση:** Διακόπτεται η τάση τροφοδοσίας και ο κινητήρας σταματά μετά από αρκετό χρόνο όμως χωρίς καταπονήσεις.
3. **Ομαλή πέδηση:** Διακόπτεται βαθμιαία η τάση τροφοδοσίας προς αποφυγή απότομης παύσης λειτουργίας της μηχανής (π.χ. σε αντλίες, μεταφορικές ταινίες, γεραμούς). Η πραγματοποίηση της μεθόδου προϋποθέτει ύπαρξη ράμπας επιβράδυνσης που υπάρχει μόνο στους ηλεκτρονικούς εκκινητές. Η ενεργοποίηση της ράμπας επιτρέπει:
  - A. Ομαλή επιβράδυνση σύμφωνα με το χρόνο που έχει επιλεγεί μέσω του ποτενσιόμετρου του εκκινητή,
  - B. Ελεγχόμενη πέδηση με μείωση των μηχανικών κτυπημάτων
  - C. Προοδευτική μείωση της τάσης.
4. **Δυναμική πέδηση:** Ο στάτης αποσυνδέεται από το τριφασικό δίκτυο και τροφοδοτείται με συνεχή τάση από πηγή ή μέσω ανορθωτή. Η δυναμική πέδηση μετατρέπει τον ασύγχρονο κινητήρα σε σύγχρονη γεννήτρια και όλη η ενέργεια της πέδησης απορροφάται από το δρομέα. Ο έλεγχος της ροπής πέδησης επιτυγχάνεται ρυθμίζοντας τη συνεχή τάση. Η μέθοδος αυτή επιλέγεται, όταν έχουμε μηχανές με μεγάλη αδράνεια.

### 1.7. Συντελεστής Απόδοσης

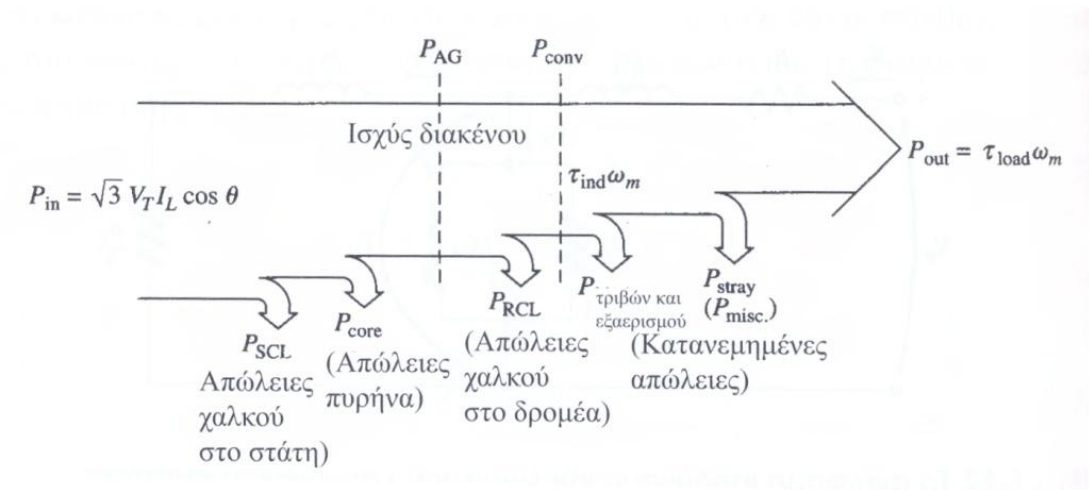
Ο συντελεστής απόδοσης ενός επαγωγικού κινητήρα είναι ίσος με το λόγο της ωφέλιμης μηχανικής ισχύος εξόδου του κινητήρα προς την ηλεκτρική ισχύ εισόδου του:

$$\eta = \frac{P_{OUT}}{P_{IN}}$$

### 1.8. Απώλειες κινητήρα.

Οι κατηγορίες απωλειών σε έναν επαγωγικό κινητήρα είναι οι ακόλουθες

1. Απώλειες χαλκού στο στάτη και στο δρομέα
2. Απώλειες πυρήνα ή απώλειες σιδήρου
3. Μηχανικές απώλειες
4. Κατανεμημένες απώλειες



Σχήμα 1.8. Ισολογισμός ισχύων επαγωγικού κινητήρα.

Οι απώλειες χαλκού είναι οι απώλειες θερμότητας στους αγωγούς του στάτη και του δρομέα της μηχανής.

Συγκεκριμένα οι απώλειες χαλκού στον τριφασικό στάτη (stator copper losses- SCL) ενός επαγωγικού στάτη δίνονται από τη σχέση:

$$P_{SCL} = 3I^2 S T R_{ST}$$

$R_{ST}$  = η συνολική ωμική αντίσταση των αγωγών της κάθε φάσης του στάτη

$I_{ST}$  = το ρεύμα της κάθε φάσης του στάτη

Οι απώλειες χαλκού στο δρομέα (rotor copper losses - RCL) δίνονται από τη σχέση:

$$P_{RCL} = 3I_R^2 R_R = sP_{AG} = (s/(1-s))P_{CONV}$$

$R_R$  = η συνολική ωμική αντίσταση των αγωγών της κάθε φάσης του δρομέα

$I_R$  = το ρεύμα της κάθε φάσης του δρομέα

$s$  = η ολίσθηση

$P_{AG}$  = η ισχύς του διακένου

$P_{CONV}$  = η μετατρεπόμενη μηχανική ισχύς

Οι ωμικές αντιστάσεις του στάτη και του δρομέα εξαρτώνται από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του κινητήρα (όπως το μήκος και τη διατομή των τυλιγμάτων του, την ποιότητα του χαλκού του, την κλάση μόνωσης) καθώς και από τη θερμοκρασιακή κατάστασή του. Επίσης οι τιμές των ωμικών αντιστάσεων επηρεάζονται και από το επιδερμικό φαινόμενο.

Οι απώλειες πυρήνα  $P_{CORE}$  (ή αλλιώς σιδήρου) οφείλονται στα φαινόμενα υστέρησης και δινορρευμάτων που αναπτύσσονται στα σιδηρομαγνητικά υλικά των κινητήρων.

Οι απώλειες υστέρησης (hysteresis losses)  $P_{CORE,h}$  αναφέρονται στη μαγνητική ενέργεια που καταναλώνεται κατά τη μαγνήτιση του πυρήνα, δηλαδή την αναδιάταξη των μαγνητικών τμημάτων του όπως αυτή συμβαίνει σε κάθε περίοδο της εναλλασσόμενης τάσης τροφοδοσίας του κινητήρα. Μπορεί ν' αποδειχτεί ότι οι απώλειες ενέργειας σε κάθε περίοδο είναι ανάλογες του εμβαδού που καλύπτει ο βρόχος υστέρησης. Όσο μικρότερη είναι η μέγιστη τιμή της μαγνητεγερτικής δύναμης που εφαρμόζεται στον πυρήνα, τόσο μικρότερο είναι το εμβαδό του βρόχου υστέρησης, άρα και οι αντίστοιχες απώλειες

Οι απώλειες δινορρευμάτων (eddy current losses)  $P_{core,e}$  αποτελούν μια ακόμα κατηγορία απωλειών προκαλούμενων από τις μεταβολές της επιβαλλόμενης μαγνητεγερτικής δύναμης σ' έναν πυρήνα. Οφείλονται στην ανάπτυξη δινορρευμάτων στον πυρήνα από τάσεις που επάγει μια χρονικά μεταβαλλόμενη μαγνητική ροή και είναι ουσιαστικά οι θερμικές απώλειες που καταναλώνονται στην αντίσταση του μετάλλου του πυρήνα. Εξαρτώνται από τη γεωμετρία του πυρήνα, την ηλεκτρική αγωγιμότητα του υλικού του, την πυκνότητα του ρεύματος και το πάχος των δυναμοελασμάτων.

Πρακτικά ο διαχωρισμός των απωλειών πυρήνα σε απώλειες υστέρησης και απώλειες δινορρευμάτων είναι πολύ δύσκολος. Γι' αυτό το λόγο οι απώλειες υστέρησης και οι απώλειες δινορρευμάτων δεν υπολογίζονται ανεξάρτητα, αλλά δίνονται στο σύνολό τους από τη σχέση των απωλειών πυρήνα:

$$P_{CORE} = 3E_1^2 G_C = (3E_1^2) / R_C$$

όπου  $E_1$  είναι η εσωτερική τάση του στάτη (δηλαδή η τάση που προκύπτει στο στάτη μετά την πτώση τάσης στην αντίσταση και την αντίδραση διαρροής της περιέλιξής του), και  $R_C$  και  $G_C$  η ισοδύναμη αντίσταση και αγωγιμότητα του πυρήνα αντίστοιχα

Οι μηχανικές απώλειες ενός επαγωγικού κινητήρα συνίστανται στις απώλειες λόγω τριβών μεταξύ των μηχανικών τμημάτων της μηχανής (friction losses)  $P_F$  και στις απώλειες εξαερισμού (windage losses)  $P_w$ . Οι τελευταίες είναι οι απώλειες που προκύπτουν από τις τριβές των μηχανικών τμημάτων του κινητήρα με τον αέρα λόγω περιστροφής. Για τις μηχανικές απώλειες χρησιμοποιείται ο συμβολισμός  $P_{F+W}$ . Κατά προσέγγιση θεωρούνται ανάλογες του κύβου της περιστροφικής ταχύτητας του κινητήρα.

Τέλος στις κατανεμημένες απώλειες  $P_{STRAY}$  περιλαμβάνονται όλες οι απώλειες που δεν μπορούν να υπολογιστούν σε καμία από τις προηγούμενες κατηγορίες και συνήθως οφείλονται στην αύξηση της μαγνητικής ροής σκέδασης κατά την αύξηση φορτίου και στις υψίσυχνες διακυμάνσεις της ροής αυτής (οι διακυμάνσεις της ροής προέρχονται από την παραμόρφωση της ημιτονοειδούς ιδανικά κατανομής της μαγνητικής επαγωγής στο διάκενο, λόγω της κατανομής των αγωγών στα αυλάκια). Τέτοιες μη υπολογίσιμες απώλειες μπορεί να είναι:

Απώλειες δινορρευμάτων στις περιελίξεις εξαιτίας του επιδερμικού φαινομένου που προκαλεί η μαγνητική ροή σκέδασης, με συνέπεια την μείωση της ενεργού διατομής των αγωγών και άρα την αύξηση της ωμικής των αντιστάσεως.

Απώλειες δινορρευμάτων λόγω της μαγνητικής ροής σκέδασης στις κεφαλές των τυλιγμάτων του στάτη, με αποτέλεσμα την αύξηση των απωλειών πυρήνα και την πρόκληση απωλειών σιδήρου στο περίβλημα και σε άλλα μη ενεργά μέρη του κινητήρα. Οι απώλειες αυτές εξαρτώνται από τη γεωμετρία των κεφαλών του κινητήρα.

Η τιμή τους προσδιορίζεται συμβατικά ως το 1% επί της ισχύος εξόδου του κινητήρα κατά τη λειτουργία με πλήρες φορτίο.

Οι μηχανικές απώλειες και οι απώλειες πυρήνα συνήθως υπολογίζονται μαζί και ονομάζονται απώλειες χωρίς φορτίο ή απώλειες της εν κενώ λειτουργίας.

Οι απώλειες πυρήνα, οι μηχανικές και οι κατανεμημένες απώλειες πολλές φορές προστίθενται όλες μαζί και ονομάζονται απώλειες περιστροφής (rotational losses). Ο λόγος είναι ότι οι τιμές των παραπάνω απωλειών εξαρτώνται από την ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα. Έτσι όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα, τόσο μεγαλύτερες είναι οι απώλειες τριβών, εξαερισμού και οι κατανεμημένες απώλειες. Από την

άλλη μεριά οι απώλειες πυρήνα μειώνονται με την αύξηση της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα (όταν δηλαδή η  $N_m$  προσεγγίζει την  $N_{sync}$ ).

Παρά την παραπάνω εξάρτηση των επιμέρους απωλειών περιστροφής από την ταχύτητα περιστροφής, η συνολική τιμή τους θεωρείται σταθερή ακόμα και για μεταβαλλόμενη περιστροφική ταχύτητα κινητήρα, αφού οι επιμέρους απώλειες μεταβάλλονται προς αντίθετες κατευθύνσεις

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.

### Τρόποι εκκίνησης ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα.

#### 2.1. Εισαγωγή

Για να αρχίσει να περιστρέφεται ένας κινητήρας πρέπει να αναπτυχθεί σ αυτόν εσωτερική ροπή εκκίνησης μεγαλύτερη από το άθροισμα των ροπών αντιδράσεως, δηλαδή τις ροπές τριβής και ωφέλιμου φορτίου. Το ρεύμα που χρειάζεται για να δημιουργηθεί η ροπή εκκίνησης είναι πολύ μεγαλύτερο από το ονομαστικό ρεύμα λειτουργίας του κινητήρα. Το μεγάλο αυτό ρεύμα εκκίνησης προκαλεί μεγάλες απώλειες ισχύος για το μικρό χρόνο εκκίνησης καθώς και υπολογίσιμη πτώση τάσης(βύθιση τάσης) που δημιουργεί προβλήματα σε κινητήρες, ηλεκτρονικά μηχανήματα (το ρεύμα εκκίνησης για εκκίνηση με πλήρες φορτίο είναι:

$$I_{εκ}=\{(4\div 8)*I_{ov}\}$$

Η βύθιση τάσης που δημιουργείται από το από το ρεύμα εκκίνησης και η οποία δημιουργεί ανωμαλίες στη σωστή λειτουργία συσκευών που θέλουν σταθερή τάση λειτουργίας, δεν εξαρτάται μόνο από το ρεύμα εκκίνησης, αλλά και από την ικανότητα του εκάστοτε ηλεκτρικού δικτύου ηλεκτροδότησης. Για το λόγο αυτό θεσπίζονται κανονισμοί ώστε τη αναλογία  $I_{εκ}/I_{ov}$  να μην ξεπερνά κάποιες ορισμένες τιμές. Οι οδηγίες της ΔΕΗ αναφέρουν ότι επιτρέπεται η εγκατάσταση τριφασικών κινητήρων εφόσον:

- $I_{εκ}/I_{ov}<2$ , για κινητήρες μικρότερους από 10 HP
- $I_{εκ}/I_{ov}<1,6$  για κινητήρες μεγαλύτερους από 10 HP

Μια διάταξη εκκίνησης, έχει ως στόχο την εξασφάλιση ομαλής εκκίνησης, εξασφαλίζοντας την απαιτούμενη ροπή εκκίνησης του φορτίου με όσο δυνατό μικρότερο ρεύμα. Στην περίπτωση που η αναπτυσσόμενη ροπή εκκίνησης, είναι μικρότερη από την αντίστοιχη ροπή εκκίνησης του φορτίου, ο κινητήρας δεν θα αναπτύξει ταχύτητα. Αντίθετα, πολύ μεγάλη ροπήεκκίνησης σε σχέση με το φορτίο κατά την εκκίνηση θα μας έδινε απότομο ξεκίνημα.

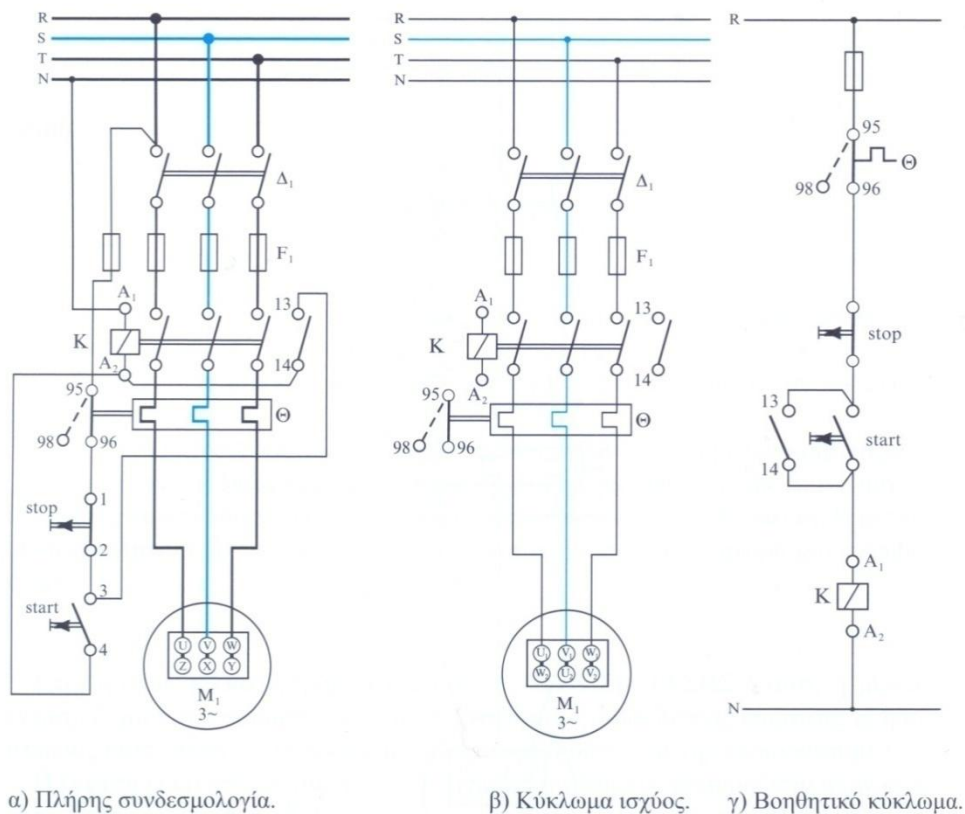
Η εκκίνηση ενός ασύγχρονου κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα μπορεί να επιτευχθεί με έναν από τους παρακάτω τρόπους:

- Απευθείας εκκίνηση (σε πλήρη τάση δικτύου)
- Εκκίνηση με αντιστάσεις στο στάτη
- Εκκίνηση με αυτομετασχηματιστή

- Εκκίνηση με διακόπτη αστέρα-τριγώνου
- Εκκίνηση με μεταβαλλόμενη αντίσταση στους δακτυλίους του δρομέα

## 2.2. Απευθείας εκκίνηση (σε πλήρη τάση φορτίου)

Αποτελεί τον απλούστερο τρόπο εκκίνησης τριφασικών ασύγχρονων κινητήρων, καθώς η σύνδεση με το δίκτυο γίνεται με την χρήση ενός τριπολικού διακόπτη.



**Σχήμα 2.1. Απευθείας εκκίνηση 3Φ επαγωγικού κινητήρα.**

$\Delta 1$  = Τριπολικός διακόπτης φορτίου ή ραδιοδιακόπτης

$F1$  = Ασφάλειες βραδείας τήξης ή αυτόματες τριπολικές ασφάλειες

$Q1$  = Αυτόματος διακόπτης προστασίας κινητήρων (θερμική και μαγνητική προστασία)

$M1$  = Τριφασικός κινητήρας βραχυκυκλωμένου δρομέα.

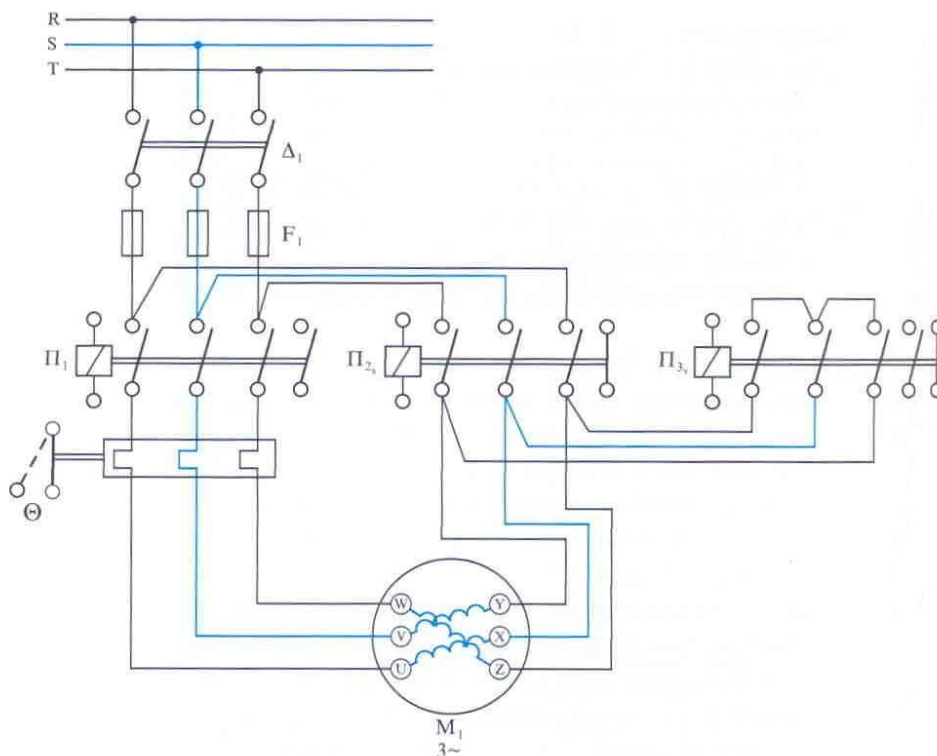
Κατά τη μέθοδο αυτή ο στάτης του κινητήρα συνδέεται απευθείας με το δίκτυο. Όταν ο κινητήρας τεθεί σε λειτουργία, αυτός αντλεί στιγμιαία ένα μεγάλο ρεύμα εκκίνησης το οποίο όπως αναφέραμε και παραπάνω είναι 4-8 φορές παραπάνω από το ονομαστικό.

Η μέθοδος αυτή είναι ιδανική από την στιγμή που το ρεύμα αυτό δεν μας δημιουργεί προβλήματα και η αρχική ροπή εκκίνησης είναι επαρκής για την κίνηση του κινητήρα. Παρόλα αυτά λόγω των παραπάνω προβλημάτων που αναφέραμε δεν έχει ευρεία εφαρμογή.

Χαρακτηριστικά λειτουργίας.

- Ρεύμα εκκίνησης:  $I_{εκ} = 6 \cdot I_{ov}$  (μεγάλο ρεύμα εκκίνησης, δημιουργία πτώσης τάσης)
- Ροπή εκκίνησης:  $T_{εκ} = 1,5 T_{ov}$  (μεγάλη ροπή εκκίνησης, δυνατότητα εκκίνησης φορτίου)
- Απλός εξοπλισμός
- Αδυναμία ρύθμισης

### 2.3. Εκκίνηση με διακόπτη αστέρα-τριγώνου (Y/Δ)



**Σχήμα 2.2. Εκκίνηση με διακόπτη Y/Δ 3Φ επαγωγικού κινητήρα.**

$\Delta 1$  = Τριπολικός διακόπτης φορτίου.

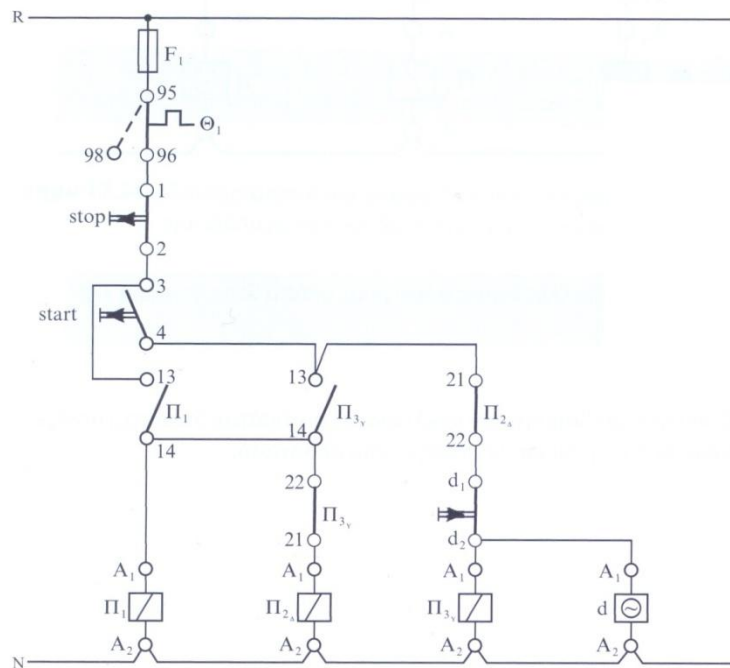
$F1$  = Ασφάλειες.

$\Pi 1, \Pi 2\Delta, \Pi 3Y$  = Ρελέ ισχύος (  $\Pi 1$  = Ρελέ χαμηλής ταχύτητας,  $\Pi 2$  = Ρελέ τριγώνου,  $\Pi 3$  = ρελέ αστέρα)

$\Theta$  = Θερμικό.

$M1$  = Τριφασικός κινητήρας βραχυκυκλωμένου δρομέα.

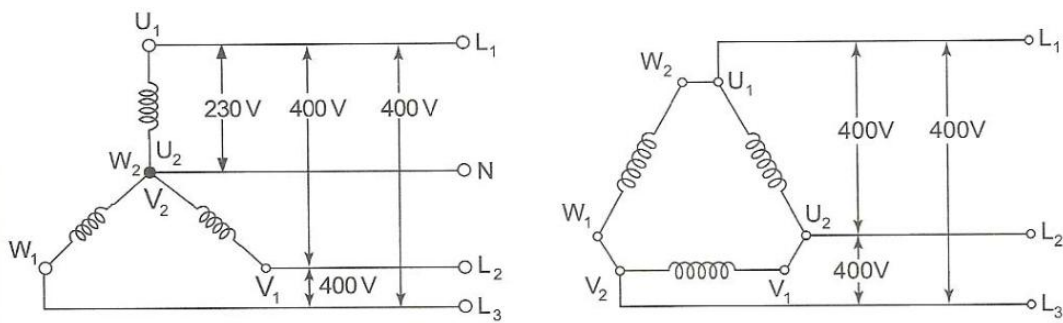




**Σχήμα 2.3. Αυτοματισμός εκκίνησης με διακόπτη Υ/Δ 3Φ επαγωγικού κινητήρα.**

### Λειτουργία

Πατώντας start το ρεύμα από την επαφή 4 πάει στην κλειστή επαφή 22 του Π<sub>2Δ</sub> (ρελέ τριγώνου), από εκεί πάει στην κλειστή επαφή d1-d2 του χρονικού και επίσης τροφοδοτεί με ρεύμα την επαφή A<sub>1</sub> του Π<sub>3Y</sub> (ρελέ αστέρα). Το ρελέ Π<sub>3Y</sub> οπλίζει και κλείνει η επαφή 13-14. Το ρεύμα από την επαφή 13-14 τροφοδοτεί με ρεύμα από την επαφή 4 του start μέσω της κλειστής πλέον επαφής 13-14 τροφοδοτεί με ρεύμα την επαφή A<sub>1</sub> του Π<sub>1</sub> (κυρίως ρελέ). Οπλίζοντας το Π<sub>1</sub> κλείνει την επαφή του 13-14 και κάνει αυτοσυγκράτηση παραμένοντας σε διέγερση μόλις αφήσουμε ελεύθερο το start. Μετά την παρέλευση του χρόνου ρύθμισης στο χρονικό, ανοίγει η επαφή του d1-d2 και σταματάει η τροφοδοσία ρεύματος τόσο στο πηνίο του χρονικού, όσο και στο πηνίο του Π<sub>3Y</sub> (αστέρα). Μόλις απενεργοποιηθεί το Π<sub>3Y</sub> ανοίγει η επαφή 13-14 και κλείνει η επαφή 21-22. Το ρεύμα δια μέσου της επαφής 13-14 του ενεργοποιημένου ρελέ Π<sub>1</sub> πάει στην 22-21 του ρελέ Π<sub>3Y</sub> και από εκεί τροφοδοτεί την επαφή A<sub>1</sub> του Π<sub>2Δ</sub> (τριγώνου) οπότε ενεργοποιείται και ο κινητήρας εργάζεται πλέον σε τρίγωνο.



**Σχήμα 2.4. Συνδεσμολογία 3Φ επαγωγικού κινητήρα σε αστέρα και τρίγωνο.**

Υποθέτοντας ότι κατά την εκκίνηση δεν χρησιμοποιούσαμε διακόπτη Y/Δ αλλά κάναμε απευθείας ζεύξη των τριών φάσεων σε τρίγωνο το ρεύμα που θα διέρρηε το τύλιγμα κάθε φάσης θα ήταν:

$$I_{\phi} = V_{\pi} / Z$$

όπου:

$V_{\pi}$  : η πολική τάση του δικτύου

$Z$  : η σύνθετη αντίσταση ανά φάση του στάτη του κινητήρα

Άρα η ένταση του ρεύματος στο δίκτυο είναι:

$$I_{\Delta} = \sqrt{3} I_{\phi} = \frac{\sqrt{3} V_{\pi}}{Z}$$

Στην περίπτωση όπου πραγματοποιούμε την εκκίνηση κάνοντας χρήση του διακόπτη Y/Δ (σύνδεση φάσεων σε αστέρα), σε κάθε φάση επικρατεί τάση:

$$V_{\phi} = \frac{V_{\pi}}{\sqrt{3}}$$

Άρα η ένταση του ρεύματος σε κάθε φάση θα είναι:

$$I_Y = \frac{V_{\phi}}{Z} = \frac{V_{\pi}}{\sqrt{3} Z}$$

Συνεπώς θα έχουμε:

$$\frac{I_Y}{I_{\Delta}} = \frac{1}{3} \Rightarrow I_Y = \frac{I_{\Delta}}{3}$$

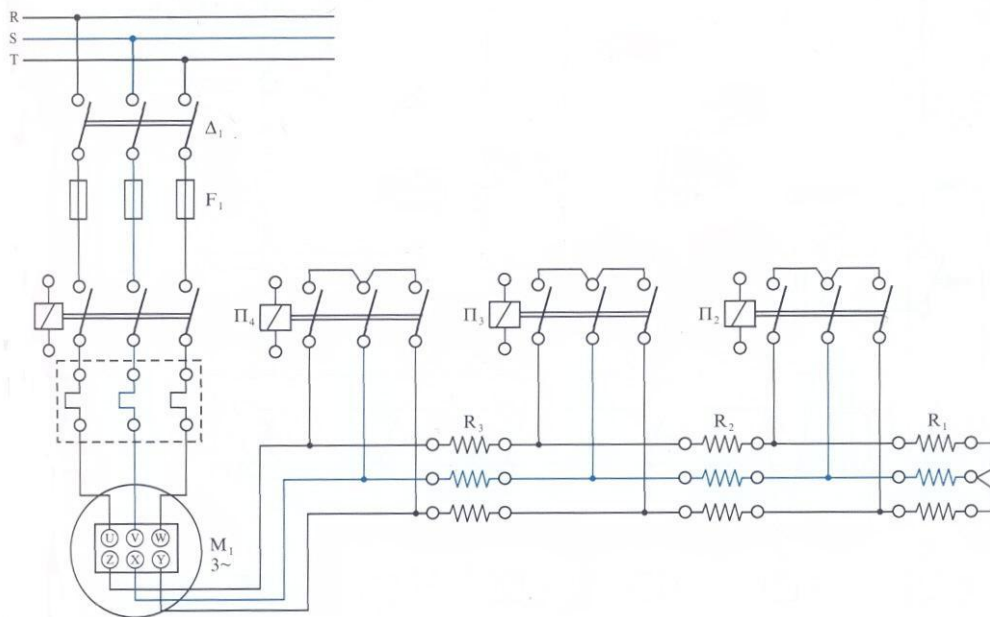
Με την συνδεσμολογία αστέρα ο κινητήρας μειώνει τρεις φορές το ρεύμα εκκίνησης σε σχέση με τη συνδεσμολογία τριγώνου.

Χαρακτηριστικά λειτουργίας:

- Ρεύμα εκκίνησης:  $I_{εκκ} = 2I_{ov}$
- Ροπή εκκίνησης:  $T_{εκκ} = 0,5T_{ov}$  (δηλαδή η ροπή εκκίνησης μειώθηκε κατά τρεις φορές και πρέπει η εκκίνηση να γίνει χωρίς φορτίο ή με μικρή ροπή φορτίου).
- Παρατηρούνται αιχμές ρεύματος και ροπής κατά τη μεταλλαγή από αστέρα σε τρίγωνο.
- Σύνθετος εξοπλισμός
- Αδυναμία ρύθμισης

#### 2.4. Εκκίνηση με αντιστάσεις στο στάτη

Η συγκεκριμένη μέθοδος εκκίνησης, παρεμβάλλουμε στο κύκλωμα που τροφοδοτεί το στάτη του τριφασικού κινητήρα, εκκινήτη αποτελούμενο από τρεις αντιστάσεις (προσθέτουμε σε σειρά με τα τυλίγματα του στάτη συμμετρικές αντιστάσεις) προκειμένου να περιορίσουμε το ρεύμα εκκίνησης (εκκινεί με ελαττωμένη τάση).



**Σχήμα 2.5. Εκκίνηση με αντιστάσεις 3Φ δακτυλιοφόρου επαγωγικού κινητήρα.**

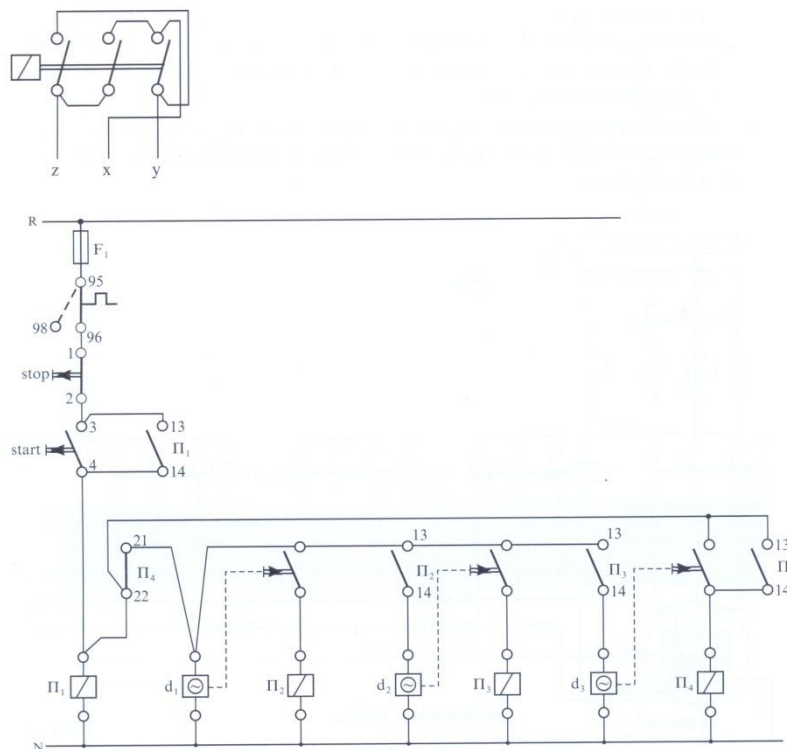
$\Delta 1$  = Τριπολικός διακόπτης φορτίου.

$\Pi 1, \Pi 2, \Pi 3, \Pi 4$  = Ρελέ ισχύος.

$F1$  = Ασφάλειες.

$\Theta$  = Θερμικό.

$M1$  = Τριφασικός κινητήρας βραχυκυκλωμένου δρομέα με σύνδεση τυλιγμάτων σε τρίγωνο.



**Σχήμα 2.6. Αυτοματισμός εκκίνησης με αντιστάσεις 3Φ δακτυλιοφόρου επαγωγικού κινητήρα.**

Όσο αυξάνεται η ταχύτητα του κινητήρα, αφαιρούμε σταδιακά τις αντιστάσεις έως ότου ο κινητήρας αποκτήσει τις κανονικές του στροφές, χρονική στιγμή κατά την οποία θέτουμε εκτός τον εκκινητή.

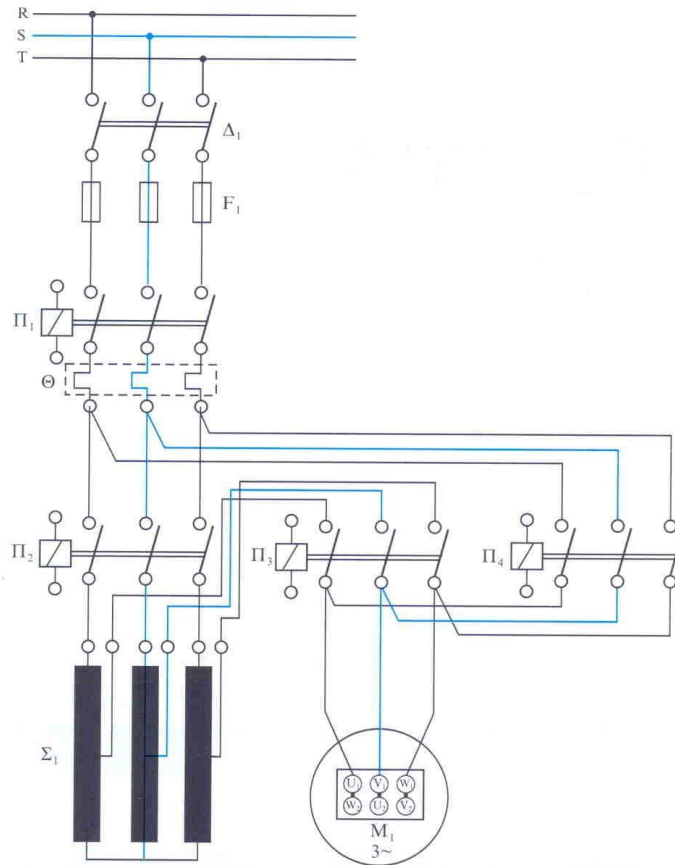
Η μέθοδος αυτή είναι κατάλληλη μόνο για κινητήρες μικρής ισχύος και για περιπτώσεις που δεν είναι ουσιαστικό το μέτρο της ροπής εκκίνησης. Χαρακτηριστικά λειτουργίας

- Ρεύμα εκκίνησης:  $I_{εκκ} = 4,5 I_{ov}$ .
- Ροπή εκκίνησης:  $T_{εκκ} = 0,75 T_{ov}$  (έχουμε μικρή ροπή εκκίνησης).
- Σύνθετος εξοπλισμός.
- Αδυναμία ρύθμισης.

## 2.5. Εκκίνηση με αυτομετασχηματιστή.

Για την εκκίνηση κινητήρων βραχυκυκλωμένου δρομέα χρησιμοποιούμε συνήθως τριφασικούς μετασχηματιστές. Ο κινητήρας ξεκινάει με την ενδιάμεση λήψη του αυτομετασχηματιστή που μας δίνει περίπου το 50% της ονομαστική τάσης του κινητήρα. Η ένταση που απορροφά στην περίπτωση αυτή είναι το 50% της έντασης που θα απορροφούσε αν ξεκινήσουμε με την ονομαστική του τάση. Το ρεύμα (πρωτεύον ρεύμα) που απορροφά

στην περίπτωση αυτή ο αυτομετασχηματιστής από το δίκτυο είναι το 25% του ρεύματος που θα απορροφούσε ο κινητήρας αν συνδεόταν απευθείας στο δίκτυο.



**Σχήμα 2.7. Εκκίνηση με αυτομετασχηματιστή 3Φ επαγωγικού κινητήρα.**

$\Delta 1$  = Τριπολικός διακόπτης φορτίου.

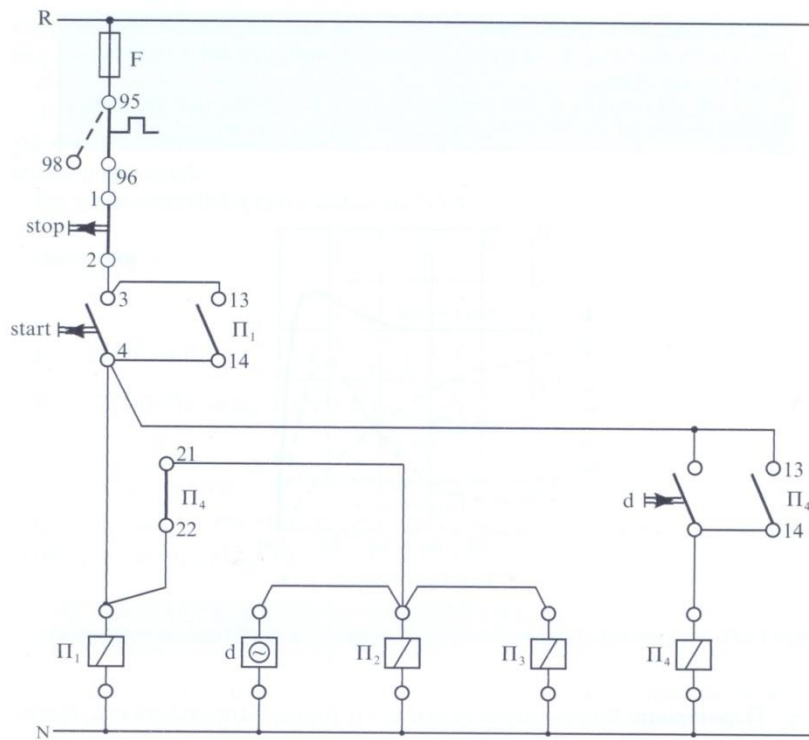
$\Pi 1, \Pi 2, \Pi 3, \Pi 4$  = Ρελέ ισχύος.

$F 1$  = Ασφάλειες.

$\Theta$  = Θερμικό.

$\Sigma 1$  = Τριφασικός μετασχηματιστής.

$M 1$  = Τριφασικός κινητήρας βραχυκυκλωμένου δρομέα με σύνδεση τυλιγμάτων σε τρίγωνο.



**Σχήμα 2.8. Αυτοματισμός εκκίνησης με αυτομετασχηματιστή επαγωγικού κινητήρα.**

Η ελαττωμένη τάση με την οποία ξεκινάει ο κινητήρας, μπορεί να φτάσει και μέχρι το  $1/3$  της ονομαστικής τάσης. Η ένταση που απορροφά από το δίκτυο στην περίπτωση αυτή ο κινητήρας είναι το  $1/9$  της έντασης που θα απορροφούσε αν ξεκινούσε με την ονομαστική τάση. Το πρόβλημα στην περίπτωση αυτή είναι η μεγάλη μείωση που έχουμε στη ροπή εκκίνησης γνωρίζοντας ότι αυτή είναι ανάλογη του τετραγώνου της τάσης που εφαρμόζουμε στον κινητήρα. Είναι ευνόητο ότι το πρόβλημα αυτό δεν υπάρχει αν ο κινητήρας ξεκινήσει χωρίς φορτίο ή με πολύ ελαττωμένο φορτίο.

Η συγκεκριμένη μέθοδος εκκίνησης είναι κατάλληλη για φορτία που απαιτούν μικρή ροπή εκκίνησης.

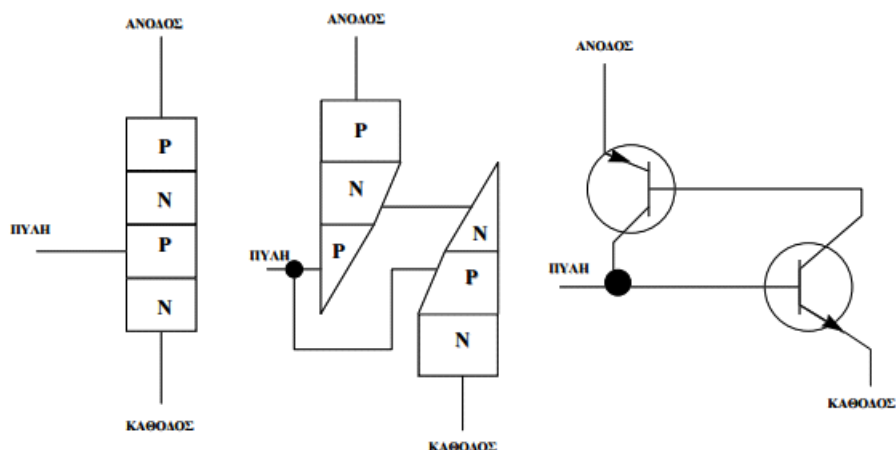
Χαρακτηριστικά λειτουργίας

- Ρεύμα εκκίνησης:  $I_{εκκ}=3,5 I_{ov}$ .
- Ροπή εκκίνησης:  $T_{εκκ}=0,8 T_{ov}$  (έχουμε μικρή ροπή εκκίνησης).
- Σύνθετος εξοπλισμός.
- Αδυναμία ρύθμισης.

## 2.6. Εκκίνηση με ηλεκτρονικά ισχύος

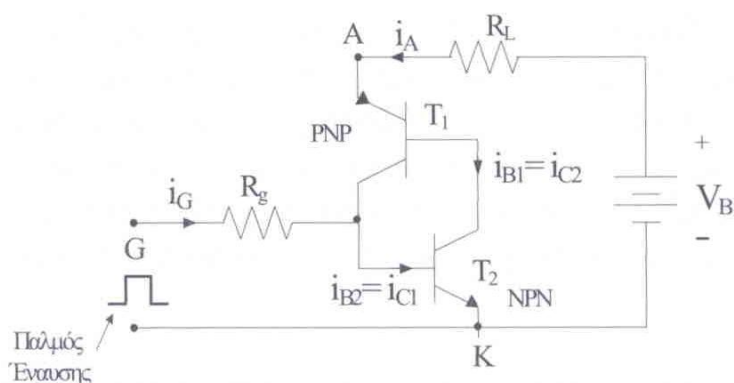
### 2.6.1. Ημιαγωγικό στοιχείο Θυρίστορ (SiliconControlledRectifier, SCR)

Από πλευράς δομής, το θυρίστορ, το οποίο έχει πάρει το όνομα του (από το θύρα) είναι ένας ελεγχόμενος ανορθωτής πυριτίου τεσσάρων στρωμάτων (p-n-p-n), το οποίο μπορεί να θεωρηθεί σαν συνδυασμός δύο τρανζίστορ.



Σχήμα 2.9. Ημιαγωγικό στοιχείο Θυρίστορ.

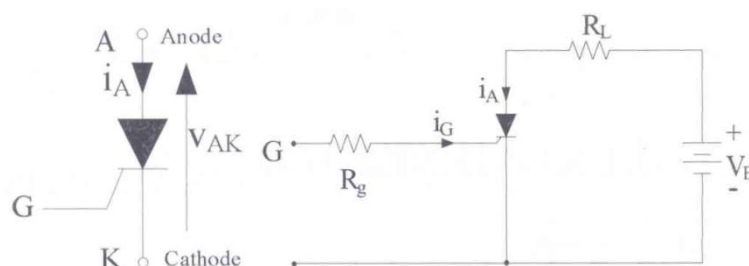
Όταν στην πύλη (Gate) του θυρίστορ δεν υπάρχει παλμός έναυσης, ακόμα και αν είναι θετικά πολωμένη, τότε δεν υπάρχει ροή ρεύματος μέσω του θυρίστορ. Για να μεταβεί το θυρίστορ σε κατάσταση αγωγής, πρέπει στην πύλη να δοθεί παλμός έναυσης με την προϋπόθεση ότι το θυρίστορ είναι θετικά πολωμένο.



Σχήμα 2.10. Παραγωγή παλμού για έναυση του θυρίστορ.

Ένα τέτοιο στοιχείο όταν βρεθεί στην κατάσταση αγωγής, μετά την εφαρμογή του παλμού έναυσης, θα εξακολουθεί να παραμένει στην κατάσταση αυτή, ακόμα και αν ο παλμός

έναυσης θα αφαιρεθεί. Η κατάσταση αγωγής μπορεί να διακοπεί μόνο όταν το ρεύμα το οποίο ρέει μέσα από το θυρίστορ μηδενιστεί ή η πολικότητα της ανόδου γίνει αρνητική σε σχέση με την κάθοδο. Όταν δεν υπάρχει παλμός έναυσης στην πύλη του θυρίστορ τότε βρίσκεται σε κατάσταση αποκοπής με αποτέλεσμα να εμποδίζουν τη διέλευση ρεύματος μεταξύ της καθόδου και της ανόδου. Όταν όμως εφαρμοστεί ένας παλμός έναυσης στην πύλη του, ο οποίος είναι θετικός σε σχέση με την κάθοδο τότε το θυρίστορ αρχίζει να άγει και έτσι επιτέπει τη διέλευση ρεύματος μέσω. Έτσι ένα ρεύμα  $I_{SCR}$  αρχίζει να ρέει από το εξωτερικό κύκλωμα προς το στοιχείο. Οι συνθήκες αυτές δημιουργούν την διαδικασία μανδάλωσης του θυρίστορ με αποτέλεσμα το στοιχείο να διατηρείται σε κατάσταση αγωγής και όταν ακόμα αφαιρεθεί ο παλμός έναυσης από την πύλη. Για να μεταβεί το θυρίστορ σε κατάσταση αποκοπής, το ρεύμα ανόδου  $I_{SCR}$ , πρέπει να ελλατωθεί στο μηδέν. Στην πραγματικότητα όμως, η αποκοπή του θυρίστορ γίνεται σε μια τιμή του ρεύματος που είναι λίγο μεγαλύτερη από το μηδέν και το ρεύμα αυτό ονομάζεται ρεύμα συγκράτησης.

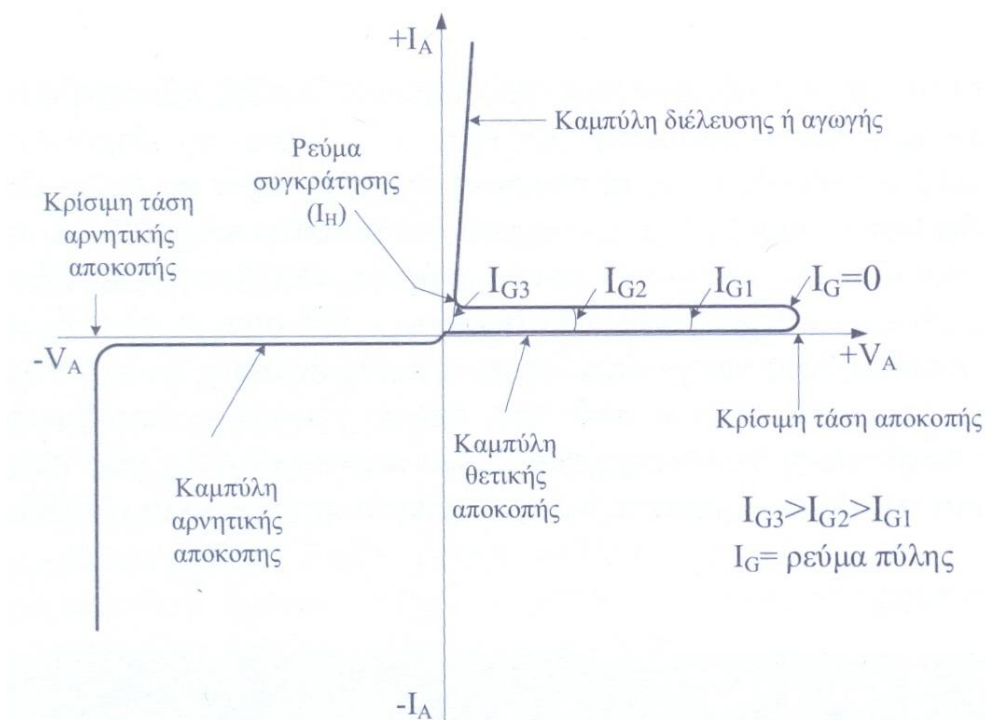


**Σχήμα 2.11. Έναυση Θυρίστορ.**

Αυτό συμβαίνει, γιατί καθώς το ρεύμα ανόδου ελατώνεται στο μηδέν, η διαδικασία μανδάλωσης του θυρίστορ δεν μπορεί να είναι πια αποτελεσματική. Επίσης πρέπει να σημειωθεί ότι για να μεταβεί το θυρίστορ σε κατάσταση αγωγής απαιτείται ένα ελάχιστο ρεύμα ανόδου, το οποίο δημιουργείται μέσω του εξωτερικού κυκλώματος του και ονομάζεται ρεύμα μανδάλωσης.

Το ρεύμα συγκράτησης και το ρεύμα μανδάλωσης είναι το 1% του ονομαστικού ρεύματος του θυρίστορ. Η χαρακτηριστική καμπύλη τάσης ρεύματος (V-I) ενός θυρίστορ παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα

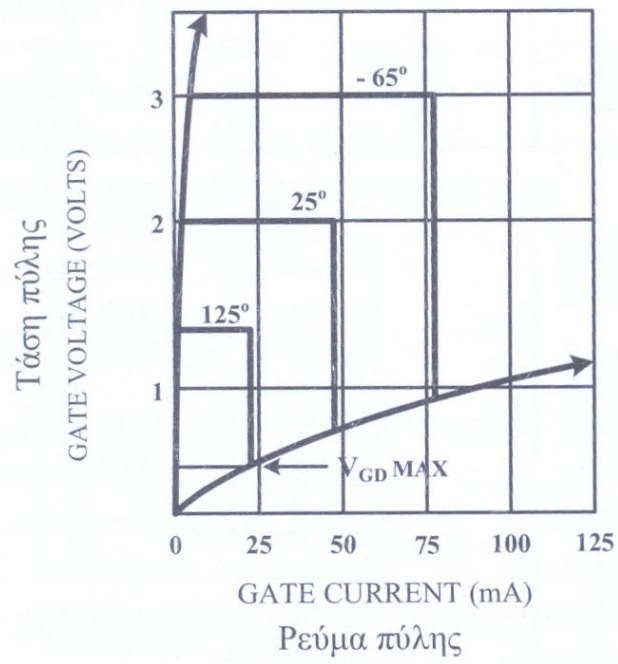




**Σχήμα 2.12. Χαρακτηριστική ένα θυρίστορ.**

Όπως διαπιστώνεται από τη χαρακτηριστική ένα θυρίστορ μπορεί να βρίσκεται σε μία από τις ακόλουθες τρεις καταστάσεις:

1. Κατάσταση αγωγής (conduction state): όπου το θυρίστορ άγει και ρεύμα ρέει από την άνοδο προς την κάθοδο.
2. Κατάσταση θετικής αποκοπής (forward blocking state): όπου το θυρίστορ είναι θετικά πολωμένο, αλλά βρίσκεται σε κατάσταση αποκόπης. Αν δοθεί παλμός έναυσης στο θυρίστορ τότε μεταβαίνει στην κατάσταση διέλευσης.
3. Κατάσταση αρνητικής αποκοπής (reverse blocking state): το θυρίστορ μεταβαίνει στην κατάσταση αυτή όταν μια αρνητική τάση εφαρμοστεί μεταξύ ανόδου και καθόδου. Για παράδειγμα αν το θυρίστορ βρίσκεται στην κατάσταση αγωγής και εφαρμοστεί μία αρνητική τάση μεταξύ ανόδου και καθόδου, τότε το θυρίστορ μεταβαίνει στην κατάσταση αρνητικής αποκοπής και έτσι επιτυγχάνεται η σβέση του.



**Σχήμα 2.13. Χαρακτηριστική ένα θυρίστορ για διάφορες θερμοκρασίες.**

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### 3.1. Έλεγχος της ταχύτητας ασύγχρονων τριφασικών κινητήρων

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

Ο έλεγχος της ταχύτητας των κινητήρων επιτυγχάνεται με δύο τρόπους:

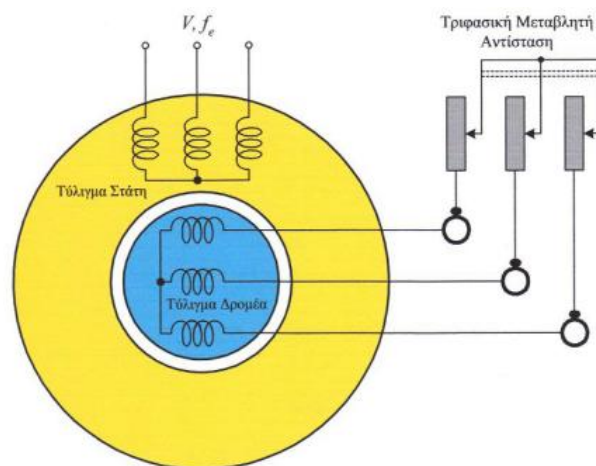
- Με την ρύθμιση της ολίσθησης
- Με την ρύθμιση της σύγχρονης ταχύτητας

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

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

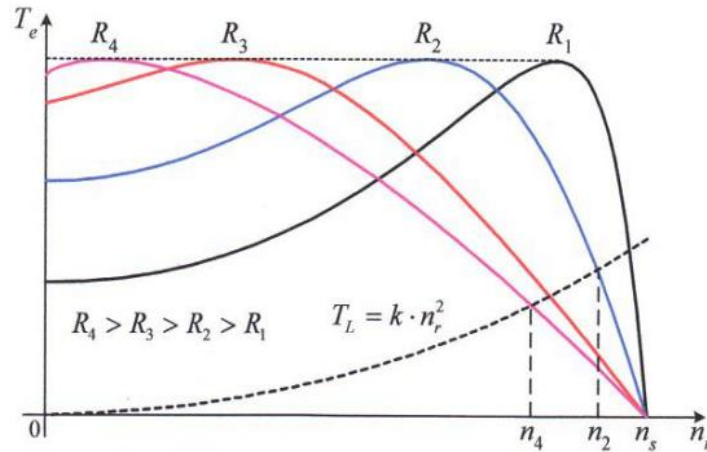
#### 3.1.1. Έλεγχος της ταχύτητας με ρύθμιση της αντίστασης του δρομέα

Η ταχύτητα των επαγωγικών κινητήρων με δακτυλιοφόρο δρομέα, ρυθμίζεται με την εισαγωγή μεταβλητών αντιστάσεων στο τυλίγμα του δρομέα. Με την εισαγωγή των εξωτερικών αντιστάσεων στο δρομέα, μεταβάλλεται η μορφή της χαρακτηριστικής ροπής-ταχύτητας του κινητήρα.



### Σχήμα 3.1. Τριφασικός δακτυλιοφόρος κινητήρας.

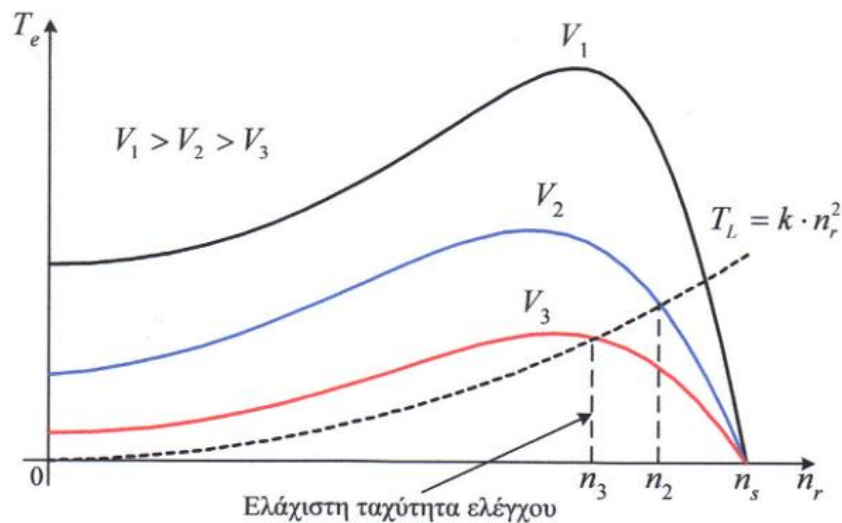
Η ροπή του φορτίου μεταβάλλεται ανάλογα με το τετράγωνο της ταχύτητας. Η ταχύτητα του κινητήρα μειώνεται από την τιμή  $\omega_2$ , όταν  $R_1=R_2$ , στην  $\omega_3$  όταν  $R_1=R_3$ . Το μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι ο βαθμός απόδοσης της διάταξης μειώνεται, με τη μείωση της ταχύτητας, εξαιτίας των εξωτερικών αντιστάσεων.



Σχήμα 3.2. Χαρακτηριστικές ροπής – στροφών δακτυλιοφόρου κινητήρα συναρτήσει της αντίστασης του δρομέα.

#### 3.1.2. Έλεγχος της ταχύτητας με ρύθμιση της τάσης του στάτη.

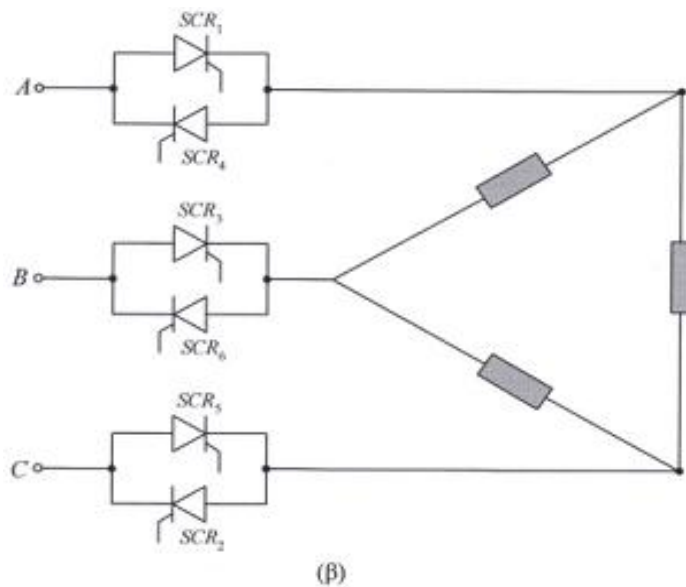
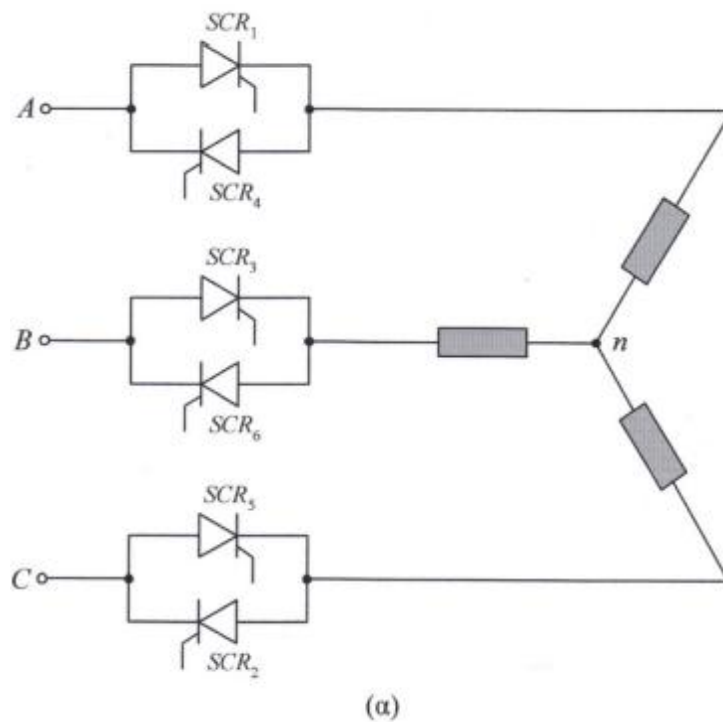
Στους επαγωγικούς κινητήρες βραχυκυκλωμένου κλωβού, η ρύθμιση της ολίσθησης επιτυγχάνεται με τη μεταβολή της τάσης τροφοδοσίας των τυλιγμάτων του στάτη. Η συχνότητα των τάσεων είναι σταθερή και ίση με τη συχνότητα του δικτύου. Καθώς η ροπή που αναπτύσσει ο επαγωγικός κινητήρας είναι ανάλογη με το τετράγωνο της τάσης του στάτη, οι χαρακτηριστικές ροπής-ταχύτητας μεταβάλλονται για διάφορες τιμές της τάσης.



**Σχήμα 3.3.** Χαρακτηριστικές ροπής – στροφών επαγωγικού κινητήρα συναρτήσει της τάσης τροφοδοσίας.

Η ροπή του φορτίου είναι ανάλογη με το τετράγωνο της ταχύτητας. Από το παραπάνω σχήμα είναι φανερό ότι, η ταχύτητα του κινητήρα δεν μπορεί να ελέγχει σε τιμές πολύ μικρότερες από τη σύγχρονη. Η ελάχιστη δυνατή ταχύτητα είναι η  $n_3$ , που αντιστοιχεί στη ροπή στη ροπή ανατροπής για την τάση  $V_3$ . Ακόμη το ρεύμα του κινητήρα είναι ανάλογο της τάσης. Έτσι, ο λόγος ροπής προς το ρεύμα η μέγιστη ροπή, ο συντελεστής ισχύος και ο βαθμός απόδοσης, μειώνονται με τη μείωση της ταχύτητας. Επομένως, ο έλεγχος της ταχύτητας των επαγωγικών κινητήρων με τη ρύθμιση της τάσης του στάτη δεν είναι αποτελεσματικός.

Ο έλεγχος της τάσης στα τυλίγματα του στάτη επιτυγχάνεται με κατάλληλους μετατροπείς ισχύος, οι οποίοι ονομάζονται ρυθμιστές εναλλασσόμενης τάσης (ac voltage controllers). Τα τυλίγματα του κινητήρα μπορεί να είναι συνδεδεμένα είτε σε αστέρα είτε σε τρίγωνο. Η κυκλωματική δομή του τριφασικού ρυθμιστή εναλλασσόμενης τάσης εικονίζεται στο παρακάτω σχήμα:



**Σχήμα 3.4. Τριφασικός ρυθμιστής εναλλασσόμενης τάσης, με φορτίο σε σύνδεση (α) αστέρα και (β) τρίγωνο.**

Ο ρυθμιστής αποτελείται από έξι ελεγχόμενους ανορθωτές πυριτίου (SCR), οι οποίοι συνδέονται ανά δύο αντιπαράλληλα. Σε μικρές ισχύς χρησιμοποιούνται ως διακόπτες TRIAC, στη θέση των έξι SCR. Το TRIAC συμπεριφέρεται όπως δύο αντιπαράλληλοι ελεγχόμενοι ανορθωτές πυριτίου, όμως έχει πολύ μικρότερη ικανότητα χειρισμού ισχύος απ'

αυτούς. Οι SCR δέχονται παλμούς έναυσης με τη σειρά αρίθμησης τους με διαφορά φάσης 60°.

Οι ρυθμιστές εναλλασσόμενης τάσης χρησιμοποιούνται κυρίως στον έλεγχο επαγωγικών κινητήρων κλάσης D. Όμως η κυριότερη εφαρμογή τους είναι στην εκκίνηση των επαγωγικών κινητήρων όλων των κατηγοριών και είναι οι γνωστοί soft starters. Οι ηλεκτρονικοί εκκινητές έχουν αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους εκκίνησης, με αυτομετασχηματιστή ή διακόπτη αστέρα-τριγώνου. Κάποια επιπλέον πλεονεκτήματα είναι ότι η ομαλή επιτάχυνση και επιβράδυνση, ο έλεγχος του ρεύματος, η μειωμένη συντήρηση, η προστασία από έλλειψη ή ασυμμετρία των φάσεων. Επιπλέον, ένας εκκινητής με ρυθμιστή εναλλασσόμενης τάσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην ελαχιστοποίηση των απωλειών του επαγωγικού κινητήρα, λειτουργώντας τον κινητήρα με μειωμένη τάση σε μικρά φορτία.

### **3.1.3. Έλεγχος της ταχύτητας με μεταβολή του αριθμού των πόλων.**

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

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

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

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

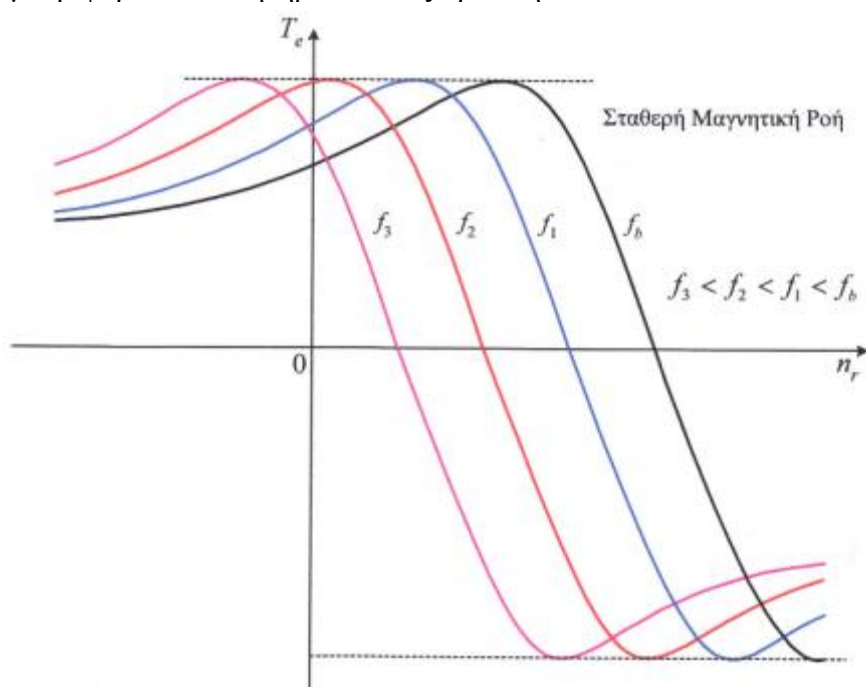
### **3.1.4. Έλεγχος της ταχύτητας με τη μεταβολή της συχνότητας.**

Η βέλτιστη μέθοδος για τον έλεγχο της ταχύτητας των επαγωγικών κινητήρων κάθε είδους, είναι με τη ρύθμιση της συχνότητας τροφοδοσίας του στάτη. Έτσι, μεταβάλλεται η σύγχρονη ταχύτητα, δηλαδή η ταχύτητα περιστροφής των μαγνητικών πεδίων και μαζί τους η ταχύτητα

του κινητήρα. Η σύγχρονη ταχύτητα που αντιστοιχεί στην ονομαστική συχνότητα  $f_b$ , ονομάζεται βασική (base).

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

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

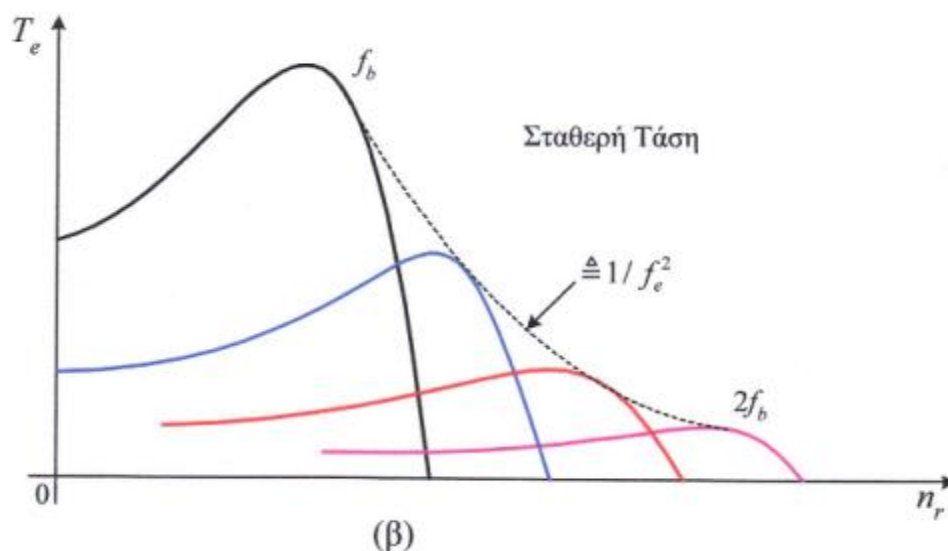


**Σχήμα 3.5.** Χαρακτηριστικές ροπής- ταχύτητας επαγωγικού κινητήρα σε διάφορες συχνότητες μικρότερες από τη βασική, όταν η μαγνητική ροή διατηρείται σταθερή.

Στην ονομαστική ταχύτητα, ο κινητήρας τροφοδοτείται με την ονομαστική τάση και τη βασική συχνότητα. Για την αύξηση της ταχύτητας σε τιμές πέρα από την ονομαστική, η συχνότητα γίνεται μεγαλύτερη από τη βασική. Όμως, η τάση τροφοδοσίας διατηρείται

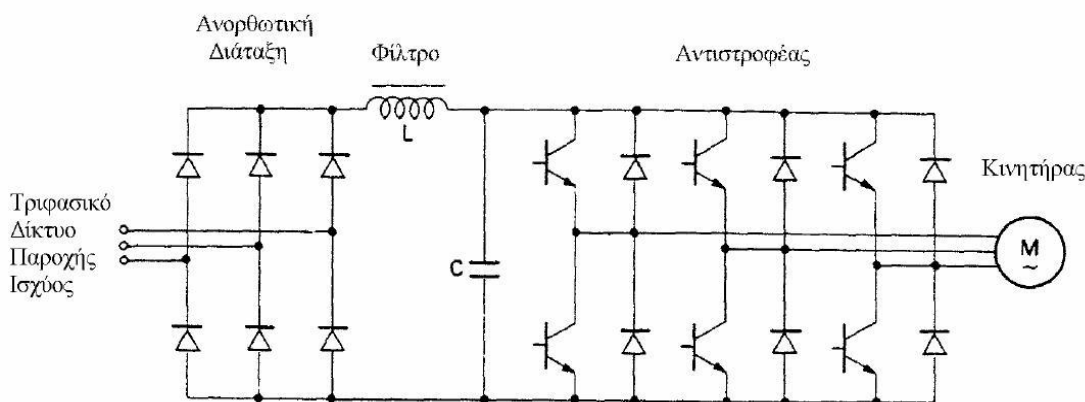


σταθερή στη ονομαστική τιμή, για την προστασία της μόνωσης των τυλιγμάτων. Επειδή η τάση δεν ακολουθεί την αύξηση της συχνότητας, η μαγνητική ροή μειώνεται καθώς η συχνότητα αυξάνει. Το αποτέλεσμα είναι η μείωση της μέγιστης ροπής ανατροπής με το τετράγωνο της συχνότητας, όπως εικονίζεται παρακάτω.



**Σχήμα 3.6.** Χαρακτηριστικές ροπής-ταχύτητας επαγωγικού κινητήρα σε διάφορες συχνότητες, όταν η τάση τροφοδοσίας διατηρείται σταθερή.

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



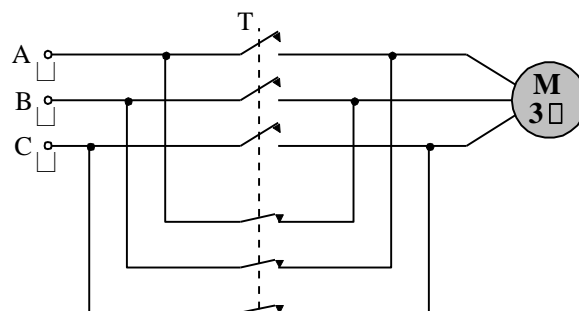
**Σχήμα 3.7.** Δομή του τριφασικού αντιστροφέα πηγής τάσης

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

### 3.2. Τρόποι πέδησης ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα.

#### 3.2.1. Δυναμική πέδηση

Η μέθοδος αυτή είναι αρκετά αποτελεσματική και επιτυγχάνεται με την απότομη αλλαγή της φοράς περιστροφής του μαγνητικού πεδίου του τυλίγματος του στάτη, αλλάζοντας τη διαδοχή δύο οποιονδήποτε από τις τρεις φάσεις της τάσης τροφοδοσίας

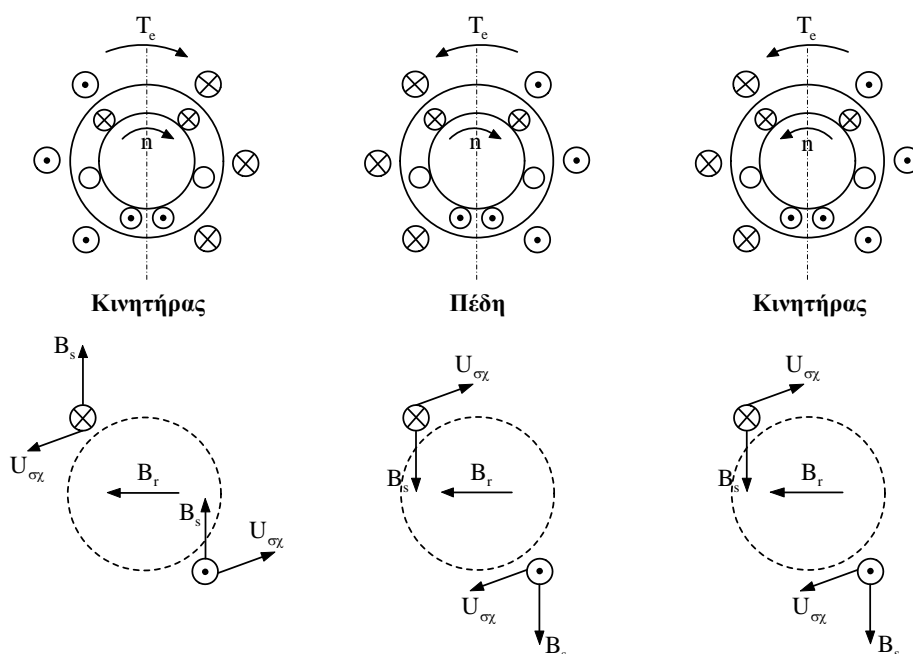


**Σχήμα 3.8.** Συνδεσμολογία δυναμικής πέδησης. Αλλαγή της διαδοχής των φάσεων

Ας υποθέσουμε ότι, αρχικά η ασύγχρονη μηχανή λειτουργεί ως κινητήρας, με ολίσθηση " $s$ ", αριστερόστροφα. Τη στιγμή της εναλλαγής της φοράς περιστροφής του πεδίου, ο δρομέας, ο οποίος συνεχίζει και κινείται αριστερόστροφα, αποκτά ολίσθηση " $2-s$ ". Η αναπτυσσόμενη ηλεκτρική ροπή αλλάζει και αυτή πρόσημο, και μαζί με τη ροπή του φορτίου (εφόσον υπάρχει) προστίθεται αλγεβρικά, ώστε να επαναφέρει τον κινητήρα στη σωστή φορά περιστροφής (δηλαδή, τη φορά εκείνη που συμπίπτει με τη φορά περιστροφής του κύριου μαγνητικού πεδίου).

Η παραγόμενη μηχανική ισχύς, στην περιοχή λειτουργίας,  $2 < s < 1$ , είναι αρνητική. Οι απώλειες χαλκού του δρομέα είναι αρκετά υψηλές, καθόσον είναι ίσες με το άθροισμα της ισχύος διακένου και της μηχανικής ισχύος στον άξονα περιστροφής ( $P_g = -P_L + P_{cur}$ ).

Απαραίτητη προϋπόθεση για το σταμάτημα του κινητήρα, είναι η ύπαρξη ενός αισθητήριου ταχύτητας, έτσι ώστε μόλις οι στροφές φτάσουν κοντά στο μηδέν, μέσω κατάλληλου αυτοματισμού να αποσυνδεθεί ο κινητήρας από το δίκτυο. Σε αντίθετη περίπτωση, θα έχουμε αλλαγή τεταρτημορίου και λειτουργία του κινητήρα με αντίθετη φορά περιστροφής.



**Σχήμα 3.9. Λειτουργικές καταστάσεις τριφασικού επαγωγικού κινητήρα**

### 3.2.2. Ελεύθερη πέδηση.

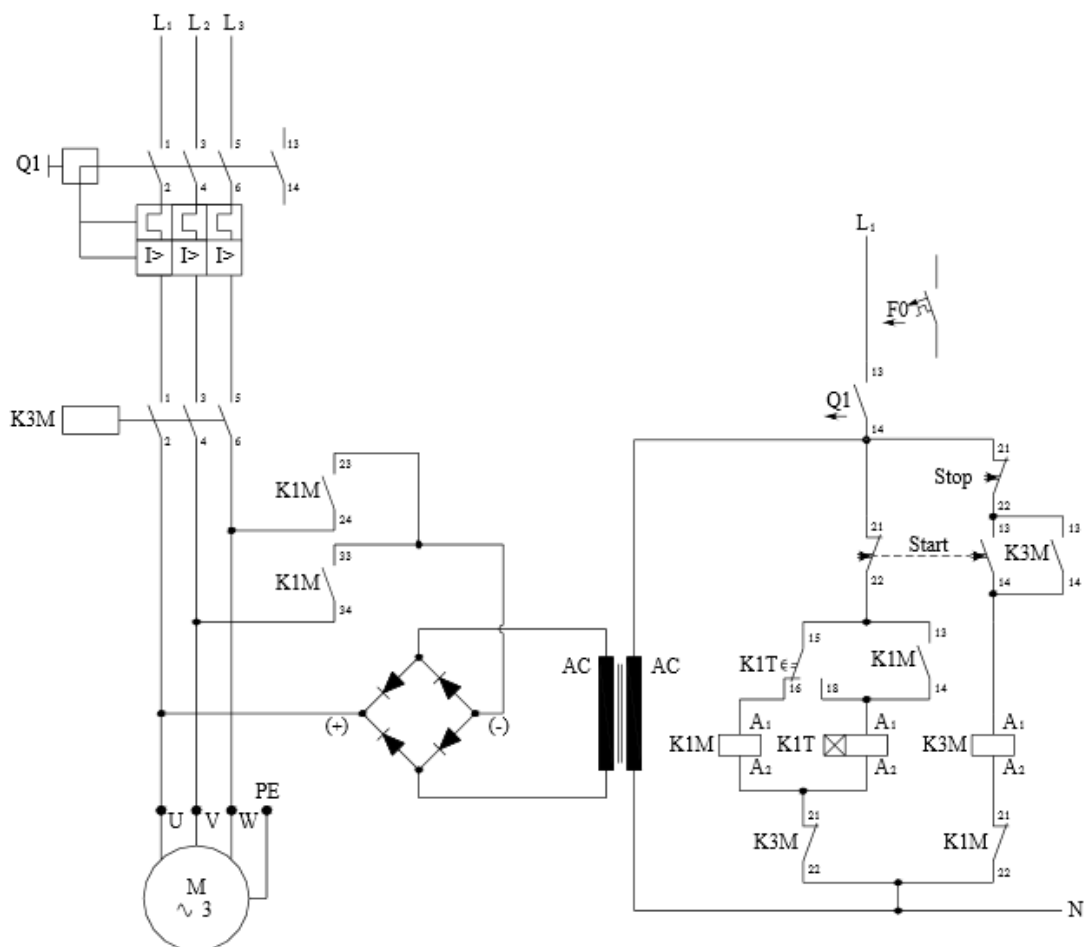
Διακόπτεται η τάση τροφοδοσίας και ο κινητήρας σταματά μετά από αρκετό χρόνο, χωρίς όμως καταπονήσεις.

### 3.2.3. Δυναμική πέδηση με συνεχές ρεύμα.

Η αρχή της ηλεκτρικής πέδησης εφαρμόζεται στους ασύγχρονους κινητήρες βραχυκυκλωμένου δρομέα και στους δακτυλιοφόρους επαγωγικούς κινητήρες.

Όταν ένας τέτοιος κινητήρας πρέπει να σταματήσει, συνεχές ρεύμα εφαρμόζεται σε μια ή σε δύο από τις φάσεις του στάτη αφού πρώτα διακοπεί η εναλλασσόμενη τάση. Σαν αποτέλεσμα αυτού ο κινητήρας οδηγείται γρήγορα και ομαλά σε ακινησία.

Μια τέτοια διάταξη ηλεκτρικής πέδησης δίδει ένα ομαλότερο θετικό βήμα, διότι η ροπή πέδησης μειώνεται γρήγορα καθώς η ταχύτητα πλησιάζει στο μηδέν. Η ροπή πέδησης γενικά μπορεί να ρυθμιστεί με την χρήση αντιστάσεων με λήψεις.



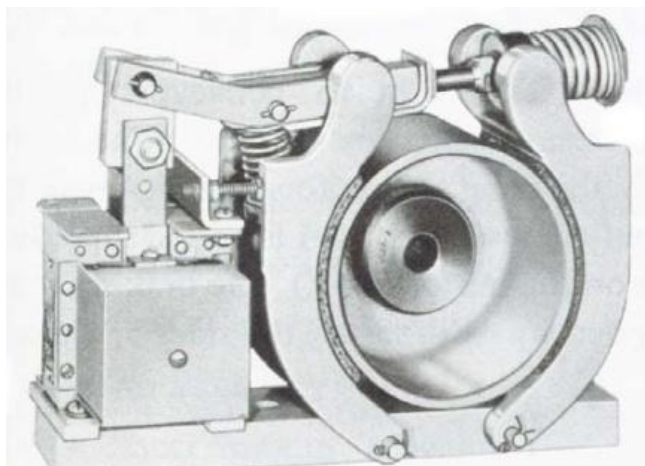
**Σχήμα 3.10. Αυτοματισμός δυναμικής πέδησης με συνεχές ρεύμα**

Ένα χρονικό ρελέ χρησιμοποιείται για να δίνει αξιόπιστο χρόνο του κύκλου της πέδησης. Ένας κανονικός διακόπτης αναστροφής μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να δώσει ισχύ στον κινητήρα. Στην πρώτη θέση έχουμε εναλλασσόμενη τάση κατά την διάρκεια κανονικής λειτουργίας. Στην δεύτερη θέση έχουμε συνεχής τάση κατά την διάρκεια της πέδησης. Τα άκρα της διάταξης είναι διαθέσιμα για τον κινητήρα και τις άλλες συνθέσεις. Η επιλογή της υψηλής ή χαμηλής ροπής πέδησης γίνεται από τις λήψεις των αντιστάσεων σε μεγάλη περιοχή. Η διάταξη περιέχει ένα μετασχηματιστή και ένα ανορθωτή που δίνουν το απαιτούμενο συνεχές ρεύμα για την πέδηση.

### 3.2.4. Μηχανική Πέδηση (Ηλεκτρική πέδη σιαγόνων).

Μια ηλεκτρική πέδη γενικά αποτελείται από δύο επιφάνειες τριβής (σιαγόνες) οι οποίες είναι κατασκευασμένες έτσι ώστε να αγκαλιάζουν ένα τύμπανο συνδεδεμένο στον άξονα του κινητήρα. Η ένταση του ελατηρίου κρατάει τις σιαγόνες πάνω στο τύμπανο και επέρχεται η

πέδηση σαν αποτέλεσμα της τριβής μεταξύ των σιαγόνων και του τυμπάνου. Ένας σωληνοειδής μηχανισμός απαιτείται για να απελευθερώνει τις σιαγόνες.



**Σχήμα 3.11. Ηλεκτρική πέδη σιαγόνων**

Σε μια μαγνητική λειτουργούσα πέδη οι σιαγόνες κρατιούνται σε μια ελεύθερη θέση με ένα μαγνήτη, τόσο χρόνο όσο το μαγνητικό πηνίο είναι ενεργοποιημένο. Εάν σε κάποια στιγμή ένα σφάλμα διακόψει την ισχύ ή υπάρχει απώλεια ισχύος, τότε οι σιαγόνες πέδης εφαρμόζονται ακαριαία και δίδουν ένα γρήγορο σταμάτημα. Τα άκρα του πηνίου μιας μαγνητικής πέδης εναλλασσομένου ρεύματος συνδέονται κανονικά στα άκρα του κινητήρα. Μόλις τα άκρα του κινητήρα πάρουν τάση, αμέσως ενεργοποιείται το πηνίο της πέδης και απελευθερώνει το τύμπανο από τις σιαγόνες. Οι μαγνητικές πέδες δίδουν ένα ομαλό σταμάτημα το οποίο κάνει αυτές ιδιαίτερα εναρμονισμένες σε υψηλής αδράνειας φορτία. Αφού αυτές οι πέδες εφαρμόζουν και μετακινούν την πίεση πέδησης ομαλά σε άλλη διεύθυνση, αυτές συχνά χρησιμοποιούνται σε ανυψωτικά μηχανήματα και άλλες μηχανές όπου αυτό είναι επιθυμητό.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### 4.1. Ομαλοί Ηλεκτρονικοί Εκκινητές

Οι ηλεκτρονικοί ομαλοί εκκινητές και οι ρυθμιστές στοφών αρχίζουν να υιοθετούνται όλο και περισσότερο σε διάφορους τομείς της βιομηχανίας, της βιοτεχνίας και την αγροτικής παραγωγής. Οι ηλεκτρονικοί ομαλοί εκκινητές είναι η πρωτοπορία της τεχνικής στον τομέα της εκκίνησης του κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα. Η χρησιμοποίησή τους ενδείκνυται όταν:

- Η εκκίνηση με πλήρη τάση(κλασικοί τρόποι εκκίνησης) δεν είναι δυνατή.
- Πρέπει να περιοριστεί η πτώση τάσης της γραμμής τροφοδοσίας, μέσα στα καθορισμένα και επιτρεπτά όρια.
- Πρέπει να αποφευχθούν γρήγορες και απότομες αλλαγές ταχύτητας κατά την εκκίνηση.
- Πρέπει να μην υπάρξουν τα μεταβατικά φαινόμενα που δημιουργούνται στο δίκτυο και στον κινητήρα με τον κλασικό εκκινητή.
- Πρέπει να αποφευχθεί η υπερβολική φθορά στα μηχανικά μέρη που μεταδίδουν την κίνηση όπως οι ηλεκτρομειωτήρες, οι αλυσίδες, οι ιμάντες κλπ.

Οι σπουδαιότερες λειτουργίες των Soft Starter:

- Ομαλή εκκίνηση.
- Περιορισμός ρεύματος εκκίνησης.
- Εξοικονόμηση ενέργειας σε λειτουργία με μερικό φορτίο.
- Ομαλή στάση.
- Πέδηση με συνεχές ρεύμα.
- Ειδικό πρόγραμμα εκκίνησης και σταματήματος αντλιών για την αποφυγή των υδραυλικών πληγμάτων.

#### 4.1.1. Εφαρμογές

Χάρη στις πολλαπλές τους δυνατότητες ρύθμισης και τις ενσωματωμένες τους λειτουργίες, μπορούν να τοποθετηθούν πρακτικά σχεδόν παντού π.χ. σε:

- Ανεμιστήρες.
- Αντλίες.
- Συμπιεστές.
- Μεταφορικές ταινίες.
- Μύλους, σπαστήρες.

- Μηχανές ακονίσματος.
- Πριόνια.
- Μηχανές κλωστοϋφαντουργίας.
- Αναδευτήρες.
- Πρέσσες, κ.λ.π.

#### 4.1.2. Αρχή λειτουργίας.

Ο ηλεκτρονικός ομαλός εκκινητής επιτρέπει τη σταδιακή επιτάχυνση του κινητήρα από τη στάση έως την ονομαστική ταχύτητα έχοντας σαν παράμετρο την αρχική τάση – που μπορεί να είναι μικρή – και το χρόνο εκκίνησης που μπορεί να φτάσει έως και μερικά λεπτά.

Ο εκκινητής έχει τη δυνατότητα και σταδιακής επιβράδυνσης του κινητήρα, που επιτρέπει ομαλή μείωση της ταχύτητας έως τη στάση. Η δυνατότητα αυτή που προσδίδει ιδιαίτερη χρησιμότητα στις υδραυλικές εγκαταστάσεις – για την αποφυγή του πλήγματος – στις μεταφορικές ταινίες και σ' όλες τις εγκαταστάσεις όπου η στάση του κινητήρα πρέπει να γίνεται ομαλά.

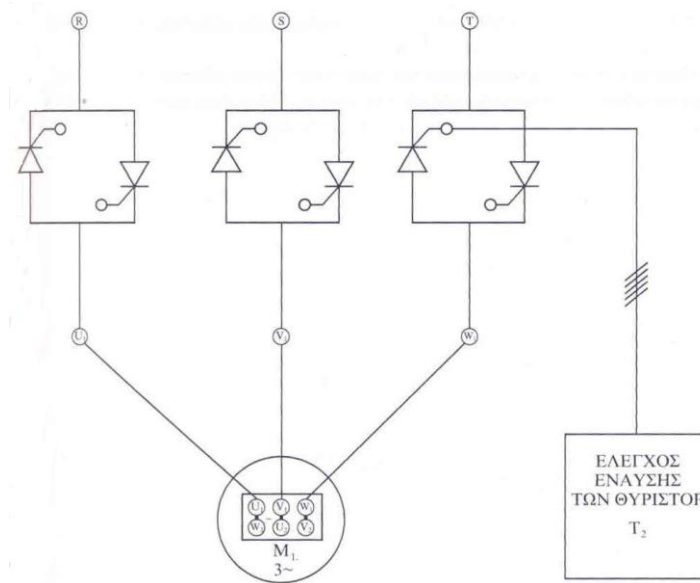
Στην επιβράδυνση το ρεύμα του κινητήρα είναι συνάρτηση της ροπής του φορτίου και του επιλεγόμενου χρόνου επιβράδυνσης.

Οι ηλεκτρονικοί ομαλοί εκκινητές αποτελούνται:

- Από το κύκλωμα ισχύος με θυρίστορ.
- Από το κύκλωμα ελέγχου έναυσης των θυρίστορ.

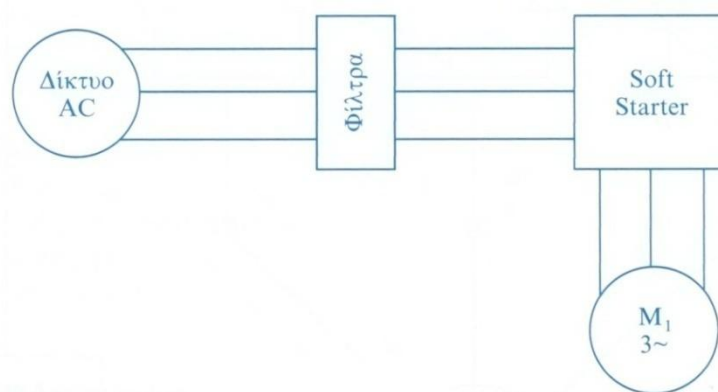
Ο εκκινητής ψαλιδίζει την τάση του δικτύου ελέγχοντας τη γωνία έναυσης των θυρίστορ. Με αυτό τον τρόπο ελέγχει το ύψος της τάσης που εφαρμόζεται στις άκρες του κινητήρα τη στιγμή της εκκίνησης.

Η γωνία έναυσης των θυρίστορ ελέγχεται από έναν μικροεπεξεργαστή, ο οποίος παρακολουθεί και ελέγχει όλες τις παραμέτρους εκκίνησης του κινητήρα. Ο επεξεργαστής συνεχίζει να παρακολουθεί τον κινητήρα και μετά το στάδιο της εκκίνησης.



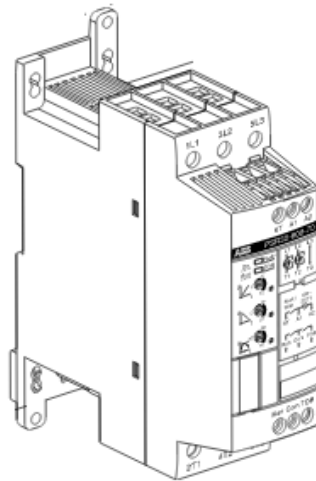
**Σχήμα 4.1. Τριφασικός μετατροπέας AC/AC για την ρύθμιση της τάσης επαγωγικού κινητήρα**

Κατά τη διάρκεια της κανονικής λειτουργίας ο μικροεπεξεργαστής ελέγχει τη γωνία ανάμεσα στην τάση του δικτύου και την ένταση του ρεύματος που διαρρέει τον κινητήρα, δηλαδή ελέγχει το συντελεστή ισχύος (συνφ) του κινητήρα. Όταν έχουμε μείωση του φορτίου, επομένως και μείωση του συνφ του κινητήρα, ο μικροεπεξεργαστής επεμβαίνει στην τάση τροφοδοσίας του κινητήρα, διατηρώντας το συνφ περίπου στη μέγιστη τιμή, με αποτέλεσμα ο βαθμός απόδοσης να παραμένει υψηλός.



**Σχήμα 4.2. Τριφασικός soft starter εκκινητής για επαγωγικό κινητήρα**





**Σχήμα 4.3. Μορφή Τριφασικού soft starter εκκινητή.**

Όλα τα συστήματα που κάνουν ψαλίδισμό της τάσης δικτύου προκαλούν σ' αυτό αρμονικές. Τα softstarter πρέπει να κατασκευάζονται έτσι ώστε, να μη δημιουργούνται ή να ελαχιστοποιούνται τα αρμονικά ρεύματα από την αρχή.

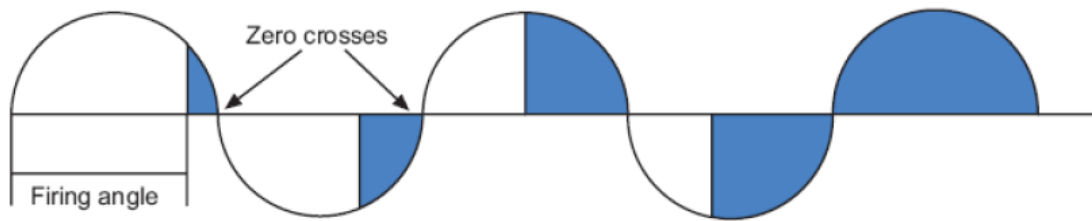
Από τις μετρήσεις που έχουν διεξέλθει αποδεικνύεται ότι ο συντελεστής αρμονικών που προκαλούν είναι μικρός. Όταν θέλουμε να αποτρέψουμε την είσοδο των αρμονικών στο δίκτυο, όπου προκαλούν απώλειες ισχύος και αλληλεπίδραση με άλλες συσκευές, θα πρέπει να τοποθετούμε ειδικά φίλτρα.

#### **4.1.3. Λειτουργίες του ομαλού ηλεκτρονικού εκκινητή**

Ο softstarter περιλαμβάνει τον μικρο-επεξεργαστή για τον έλεγχο των θυρίστορ των τριών φάσεων τροφοδοσίας του ασύγχρονου κινητήρα και της βασικής τάσης τροφοδοσίας, ώστε να παρέχει:

1. Ομαλή εκκίνηση και σταμάτημα του κινητήρα.
2. Άριστο ομαλό σταμάτημα.
3. Φρενάρισμα με συνεχές ρεύμα.
4. Εξοικονόμηση ενέργειας στις διακυμάνσεις του φορτίου.

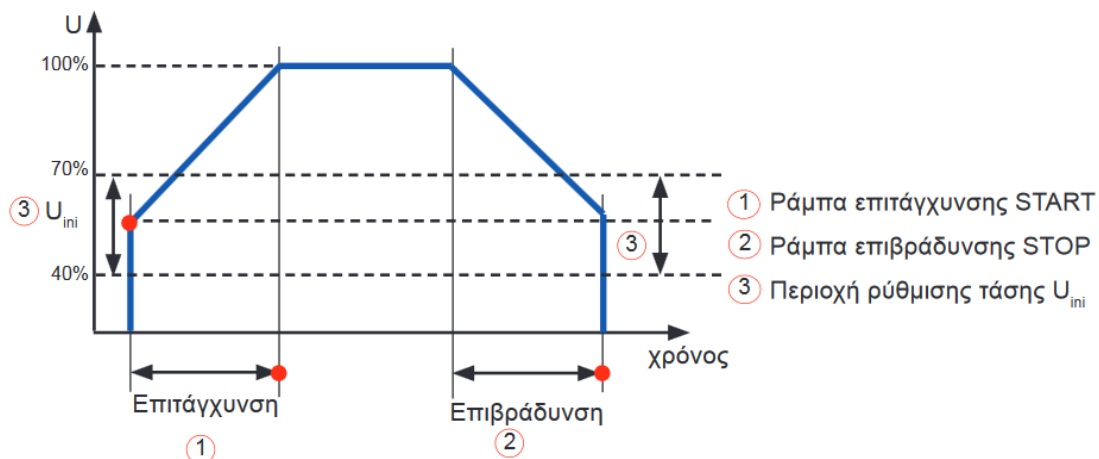
Κάθε μία από τις τρεις φάσεις ( $L_1, L_2, L_3$ ), ελέγχεται από ένα συνδυασμό δύο θυρίστορ, σε αντιπαράλληλη διάταξη, για να έχουμε μία ολοκληρωμένη μεταβολή της τάσης. Ρυθμίζουν αυξάνοντας ή μειώνοντας την τάση κατά την εκκίνηση και την πέδηση ανάλογα με τον χρόνο ράμπας που έχουμε επιλέξει.



**Σχήμα 4.4. Αναλυτική περιγραφή ενός θυρίστορ εντός ενός ομαλού εκκινητή.**

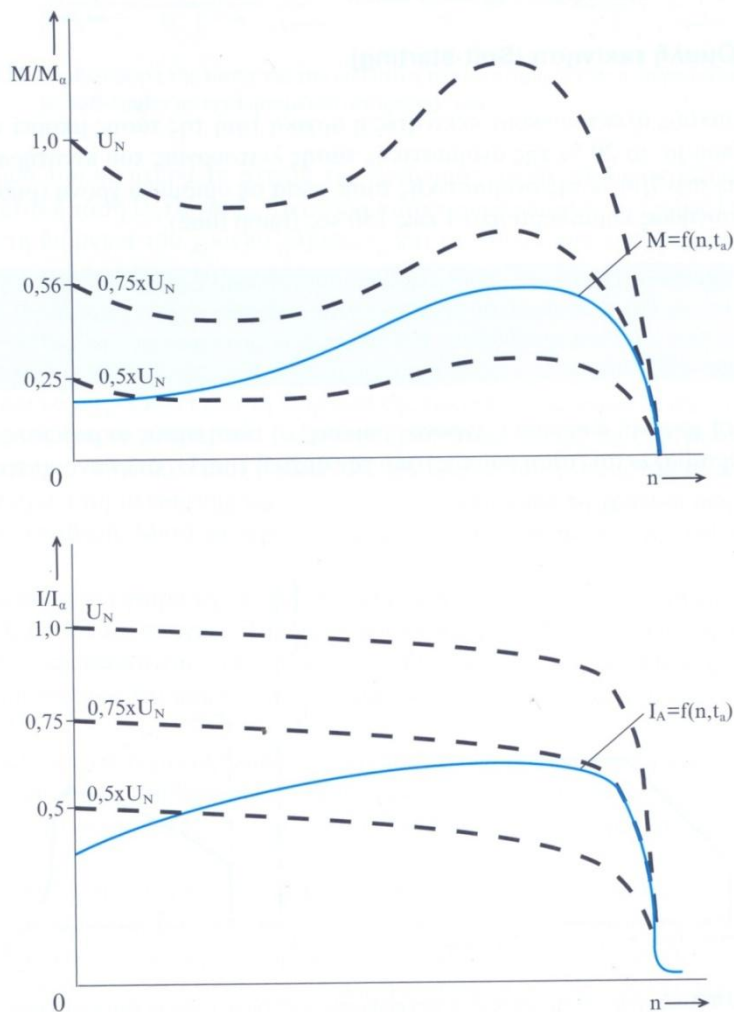
Όπως γνωρίζουμε η ροπή του κινητήρα είναι ανάλογη του τετραγώνου της τάσης που εφαρμόζουμε στους δύο ακροδέκτες του, ενώ το ρεύμα που απορροφά ο κινητήρας, είναι ανάλογο της τάσης που εφαρμόζουμε στους ακροδέκτες του.

Το αρχικό ρεύμα εκκίνησης (και κατ' επέκταση και η ροπή εκκίνησης) περιορίζεται ελέγχοντας αποτελεσματικά την τιμή της τάσης που εφαρμόζεται στους ακροδέκτες του κινητήρα.



**Σχήμα 4.5. Χαρακτηριστική τάσης χρόνου για μία πλήρη λειτουργία ενός ομαλού εκκινητή.**

Με τον ομαλό εκκινητή επεμβαίνουμε στην τάση τροφοδοσίας του κινητήρα διατηρώντας τη συχνότητα του ρεύματος σε σταθερή τιμή. Όταν ο κινητήρας αρχίζει να περιστρέφεται τα θυρίστορ εργάζονται με έλεγχο της γωνιάς έναυσης από τον επεξεργαστή. Αν σταματήσουμε την λειτουργία του κινητήρα, οι εντολές έναυσης των θυρίστορ διακόπτονται με τέτοιο τρόπο που να μην δημιουργούνται σπινθήρες ρεύματος. Αν ξεκινήσουμε τον κινητήρα με μία σταθερή τιμή της τάσης σε ποσοστό πάνω στην ονομαστική τάση λειτουργίας του κινητήρα, θα έχουμε τις παρακάτω χαρακτηριστικές ροπής στροφών του κινητήρα  $\{M=f(n)\}$  και ρεύματος, στροφών του κινητήρα  $\{I=f(n)\}$ .



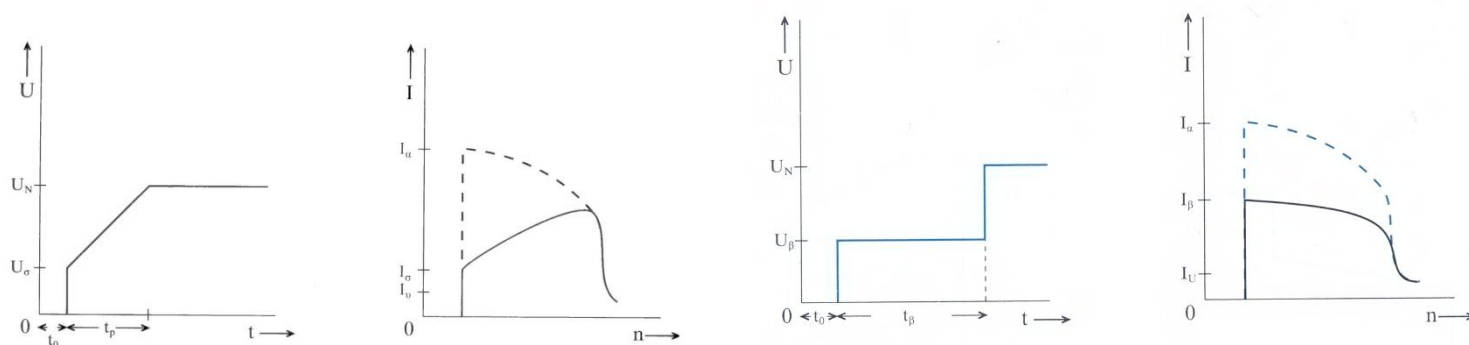
**Σχήμα 4.6.** Χαρακτηριστικές ροπής-στροφών και ρεύματος-στροφών του κινητήρα με σταθερή τιμή τάσης σε ποσοστό πάνω στην ονομαστική τάση λειτουργίας του κινητήρα.

Οι συνεχόμενες γραμμές προέρχονται από μία αρχική τάση που είναι ποσοστό της ονομαστικής και η οποία αυξάνεται σε συνάρτηση με το χρόνο. Για να μπορέσουμε να έχουμε αυτές τις καμπύλες θα πρέπει να εφαρμόσουμε στους ακροδέκτες του κινητήρα μία ελεγχόμενη μεταβαλλόμενη τάση μέσω ενός ομαλού ηλεκτρονικού εκκινητή. Ο μικροεπεξεργαστής του soft-starter αυξάνει την τάση τροφοδοσίας του κινητήρα μέσα σε ένα ορισμένο χρόνο που τον ορίζουμε εμείς και είναι γνωστός ως χρόνος ράμπας.

#### 4.1.4. Ομαλή εκκίνηση (Soft-Starting)

Στους ομαλούς ηλεκτρονικούς εκκινητές η αρχική τιμή της τάσης μπορεί να είναι ίση περίπου με το 20% της ονομαστικής τάσης λειτουργίας του κινητήρα και να καταλήγει στο

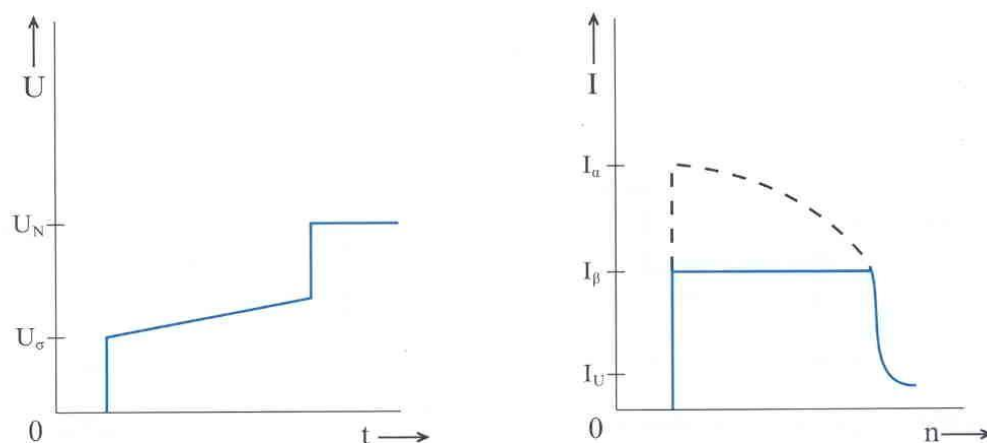
100% της ονομαστικής τιμής μέσα σε ορισμένο χρόνο και κυμαίνεται από 1 έως 180 sec (ramptime)



**Σχήμα 4.7.** Χαρακτηριστικές τάσης-χρόνου και ρεύματος-στροφών ενός soft starter εκκινήτη.

Κατά τη χρονική διάρκεια  $t_B$  (ορισμένος χρόνος), η τάση στους ακροδέκτες του κινητήρα έχει μειωμένη τιμή  $U_B$ . Η τάση αυτή κατά τη χρονική διάρκεια  $t_B$  παραμένει σταθερή. Μετά το πέρας του χρόνου  $t_B$  η τάση παίρνει την ονομαστική τιμή  $U_N$ .

Το ρεύμα του κινητήρα τη στιγμή της εκκίνησης έχει τιμή  $I_B$  και κατά τη χρονική διάρκεια  $t_B$  μειώνεται συνεχώς. Τη στιγμή που στους ακροδέκτες του κινητήρα εφαρμόζεται η ονομαστική τιμή της τάσης  $U_N$  (τέλος του χρόνου  $t_B$ ), το ρεύμα μειώνεται ακόμα περισσότερο και παίρνει την ονομαστική τιμή  $I_U$ .



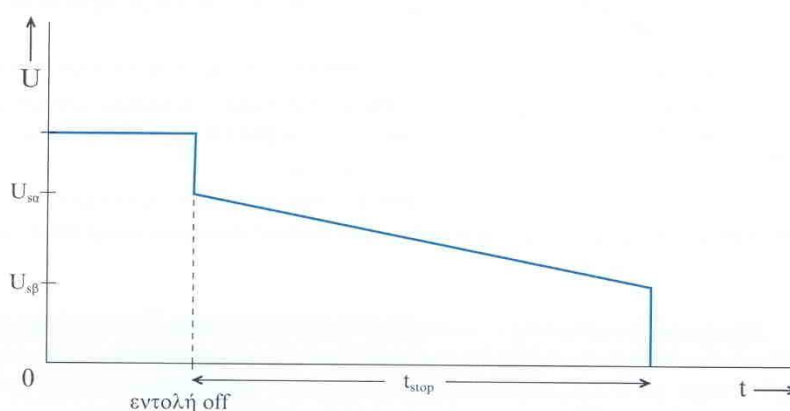
**Σχήμα 4.8.** Χαρακτηριστικές τάσης-χρόνου και ρεύματος-στροφών ενός soft starter εκκινήτη με περιορισμό του ρεύματος.

Όταν θέλουμε κατά τη διάρκεια της εκκίνησης να έχουμε ένα περιορισμένο ρεύμα, σταθερό όμως για τη χρονική διάρκεια  $t_p$ , θα πρέπει να δώσουμε τις κατάλληλες εντολές στο soft-starter για να έχουμε τις μεταβολές του.

Στην περίπτωση αυτή, για ένα ορισμένο χρόνο  $t_p$ , η τάση από την αρχική τιμή  $U_\sigma$ , μέχρι την ονομαστική τιμή  $U_N$ , μεταβάλλεται κατά τέτοιο τρόπο, ώστε η τιμή του ρεύματος  $I_B$  να παραμένει σταθερή. Τη στιγμή που η τάση παίρνει την τιμή  $U_N$ , το ρεύμα μειώνεται απότομα και παίρνει την τιμή  $I_U$  (ονομαστικό ρεύμα κινητήρα)

#### 4.1.5. Σταμάτημα κινητήρα με εντολή για ομαλό σταμάτημα (soft-stop).

Με την εντολή stop του soft starter δεν έχουμε διακοπή της τάσης του κινητήρα, αλλά μία σταδιακή μείωση, σε ένα χρονικό διάστημα, που με τη βοήθεια ποτενσιόμετρου, μπορεί να κυμαίνεται από 1 έως 20 sec.



**Σχήμα 4.9. Χαρακτηριστική τάσης-χρόνου για ομαλό σταμάτημα επαγωγικού κινητήρα.**

Η αρχική τάση της ράμπας σταματήματος  $U_{sa}$  είναι περίπου ίση με το 90% της ονομαστικής τιμής της τάσης τροφοδοσίας του κινητήρα. Η τελική τάση της ράμπας σταματήματος  $U_{sb}$ , είναι περίπου ίση με το 70% της τάσης τροφοδοσίας του κινητήρα.

Αν κατά τη διάρκεια σταματήματος, με εντολή soft -stop, δώσουμε εντολή ON, η λειτουργία σταματήματος αμέσως διακόπτεται και ο κινητήρας ξαναρχίζει από την αρχή.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5**

### **ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ**

#### **5.1.1 Σκοπός κατασκευής**

Η κατασκευή του συγκεκριμένου στεγανού πίνακα είναι η ομαλή εκκίνηση και πέδηση ενός ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα με την χρήση ηλεκτρονικού ομαλού εκκινητή (softstarter). Μέσω αυτής της κατασκευής θα μας δοθεί η δυνατότητα να μελετήσουμε την μεταβολή του ρεύματος εκκίνησης σε σχέση με σχέση με το ονομαστικό ρεύμα του κινητήρα, την δυνατότητα ρύθμισης του χρόνου εκκίνησης και πέδησης, καθώς και την αλλαγή φοράς περιστροφής μέσω του softstarter.

#### **5.1.2 Δυνατότητες κατασκευής**

Η συγκεκριμένη διάταξη εξυπηρετεί την εκκίνηση και την πέδηση ασύγχρονων κινητήρων με τα παρακάτω χαρακτηριστικά

- Ονομαστική Ισχύς λειτουργίας: 5kW
- Ονομαστικό Ρεύμα λειτουργίας: 13A
- Ονομαστική τάση λειτουργίας: 400V

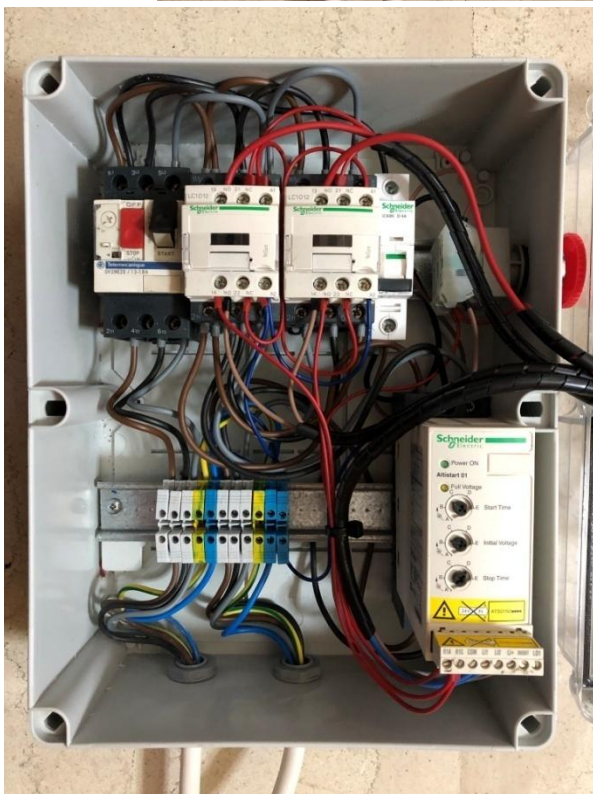
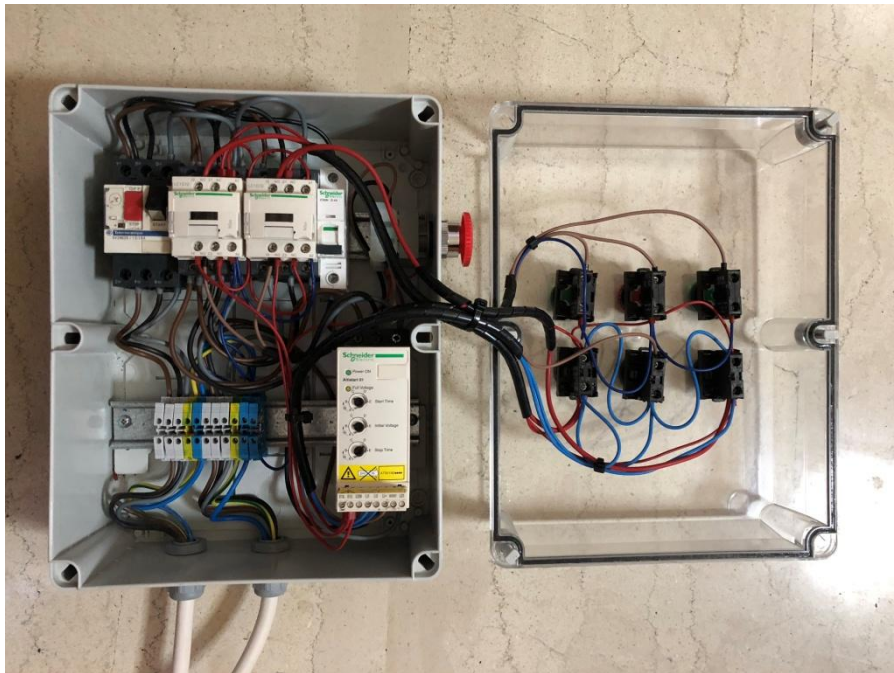
Παρέχονται:

- Προστασία στο κινητήρα από βραχυκύκλωμα (16KA)
- Προστασία στο κινητήρα από υπερένταση (13A)
- Ένδειξη σφάλματος
- Ένδειξη φοράς περιστροφής
- Ρύθμιση ράμπας εκκίνησης (1-10s)
- Ρύθμιση ράμπας πέδησης (1-10s)
- Ρύθμιση περιοχής τάσης (30%-80%)

***Η συνδεσμολογία της συγκεκριμένης διάταξης περιγράφεται με το παρακάτω μονογραμμικό σχέδιο:***



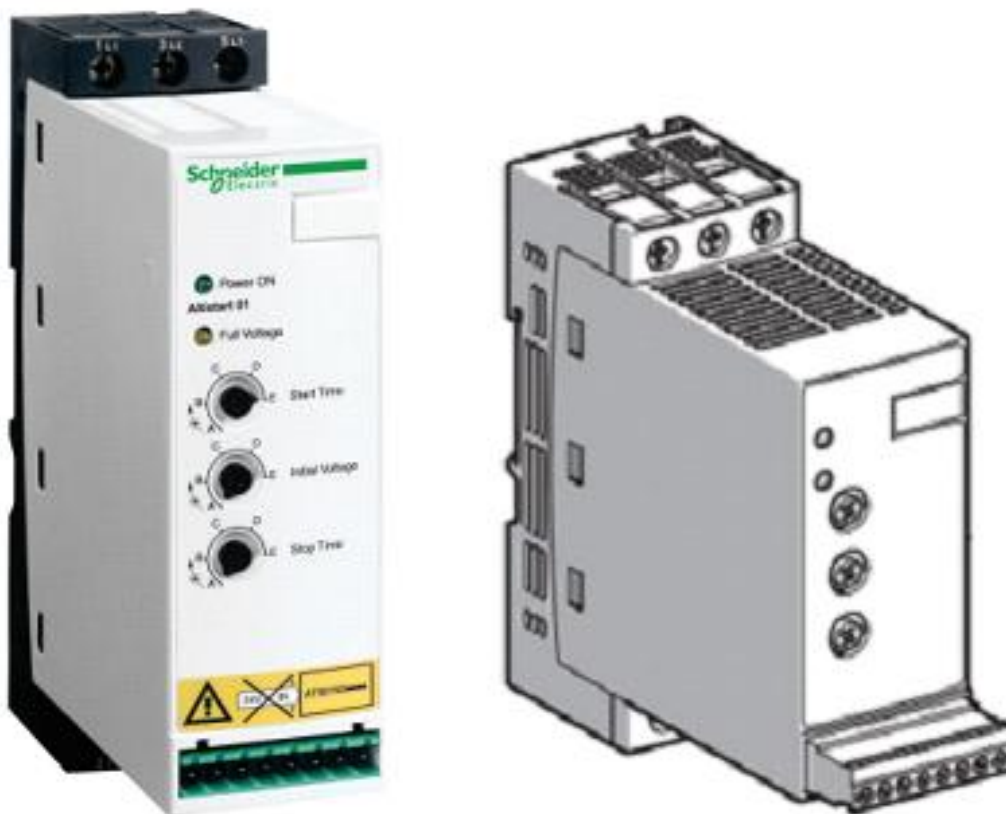
*Παρακάτω ακολουθούν φωτογραφίες της διάταξης που ολοκληρώσαμε:*





## 5.2. ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΟΜΑΛΟΥ ΕΚΚΙΝΗΤΗ.

### 5.2.1 Ομαλός εκκινητής ALTISTART 01



*Σχήμα 5.1. Soft starter Altistart 01*

Η χρήση των ομαλών εκκινητών είναι πολύ διαδεδομένη στη βιομηχανία αλλά και σε ποιο απλές εφαρμογές που συναντάμε στη καθημερινότητα καθώς με την χρήση τους πετυχαίνουμε την αντιμετώπιση πολλών μηχανικών και ηλεκτρικών προβλημάτων. Με την χρήση της συγκεκριμένης μεθόδου πετυχαίνουμε υψηλή απόδοση, οικονομία και υψηλού χρόνου ζωής των κινητήρων.

Οι συμβατικοί τρόποι εκκίνησης μίας μηχανής βραχυκυκλωμένου δρομέα παρουσιάζουν προβλήματα όπως:

- Προβλήματα στο δίκτυο λόγο των ρευμάτων εκκίνησης.
- Προβλήματα σε μηχανικά ή υδραυλικά φορτία λόγο των ροπών
- Αδυναμία πέδησης του κινητήρα
- Αυξημένες θερμικές απώλειες
- Σοβαρές φθορές στον κινητήρα

- Αδυναμία προσαρμογής σε διάφορες εφαρμογές
- Η συνεχή ανάγκη συντήρησης
- Η ανάγκη χρήσης πολλών υλικών

### **5.2.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά.**

- Ονομαστική τάση λειτουργίας: Κύκλωμα Ισχύος 200...480V (+/-10%)
- Ονομαστική συχνότητα λειτουργίας: 50 ή 60 Hz (+/- 5%)
- Ονομαστική ισχύς λειτουργίας:5,5KW
- Ονομαστικό ρεύμα λειτουργίας :12A
- Αριθμός εκκινήσεων ανά ώρα: 20
- Θερμοκρασία λειτουργίας:-10..40°C
- Βαθμός προστασίας:IP20
- Ράμπα εκκίνησης:1-10s
- Ράμπα πέδησης:1-10s
- Περιοχή ρύθμιση τάσης:30%-80% της ονομαστικής τάσης

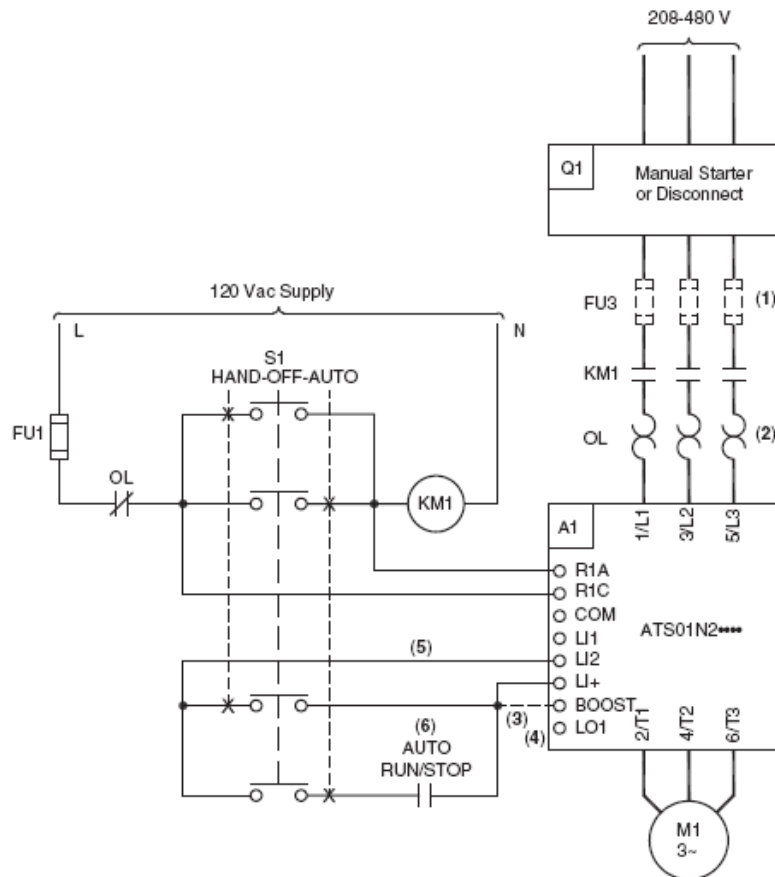
**ΠράσινοLED:** Soft Starter σε λειτουργία.

**Κίτρινο LED:** Η ράμπα της τάσης ολοκληρώθηκε, αύξηση ταχύτητας της μηχανής.

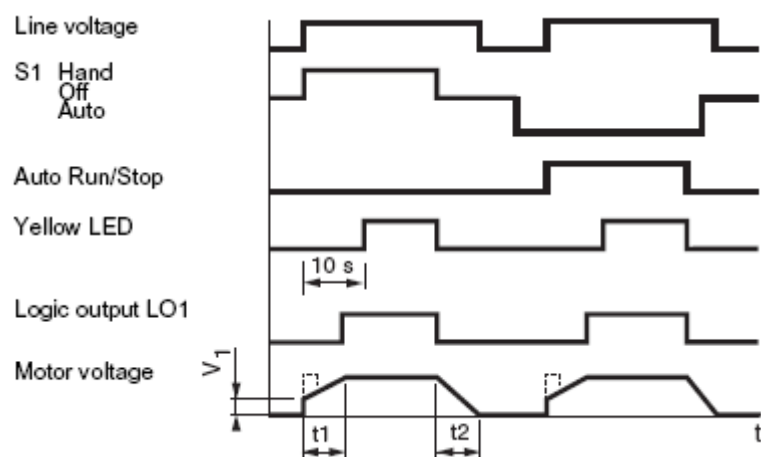
**Το καλώδιο που χρησιμοποιήθηκε για την συγκεκριμένη εφαρμογή έχει διατομή 2,5mm<sup>2</sup>.**

### 5.2.3 Παραδείγματα εφαρμογών του Altistart 01.

#### 1. Με διακόπτη χειροκίνητη λειτουργία ή αυτόματη.

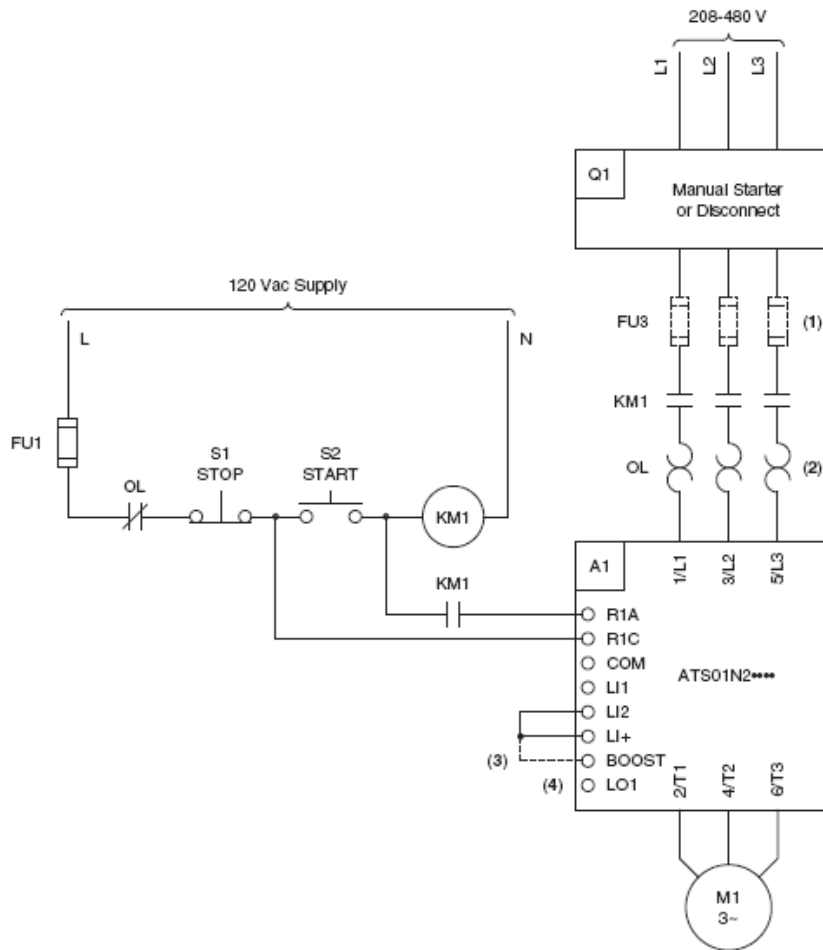


Σχήμα 5.2. Κύκλωμα με διακόπτη χειροκίνητη λειτουργία ή αυτόματη.

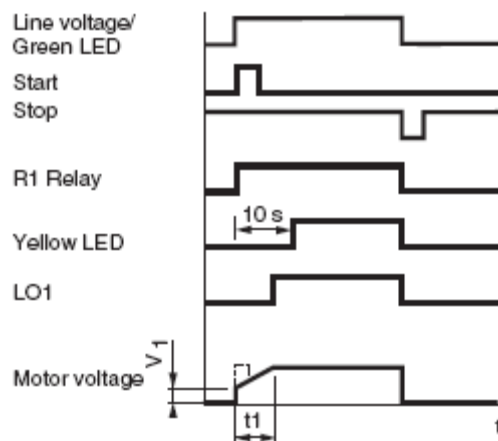


Σχήμα 5.3 Κυματομορφές τάσης-χρόνου ανάλογα με την επιλογή χειροκίνητη και αυτόματη λειτουργία.

2. Με δυο μπουτόν Start-Stop και ελεύθερη πέδηση.

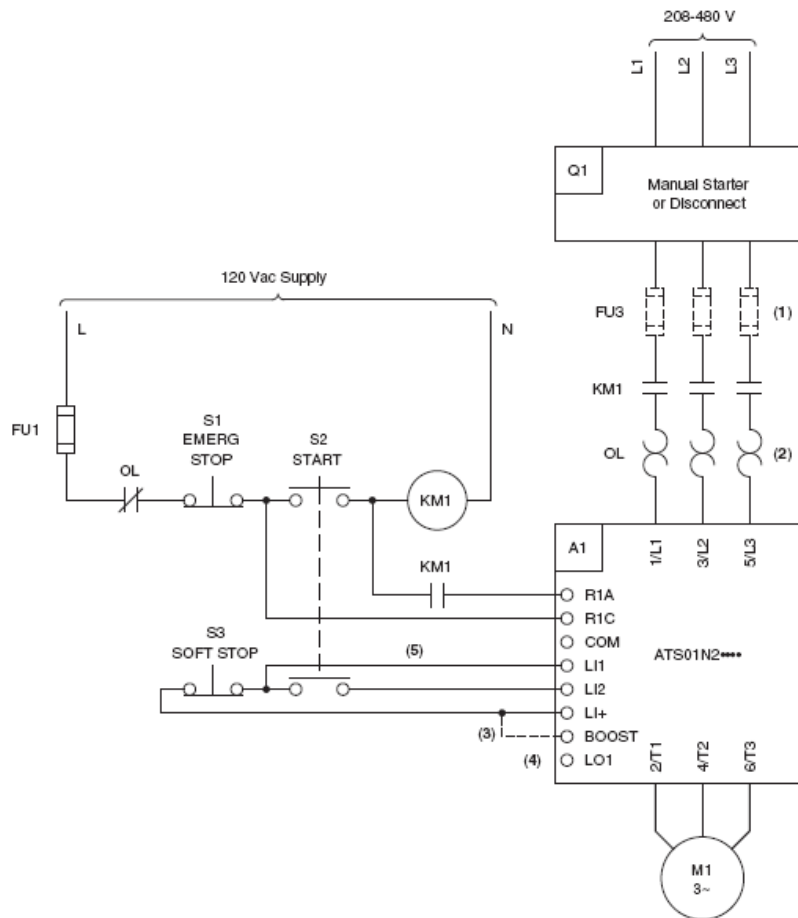


Σχήμα 5.4 Κόκλωμα με δύο μπουτόν Start-Stop.

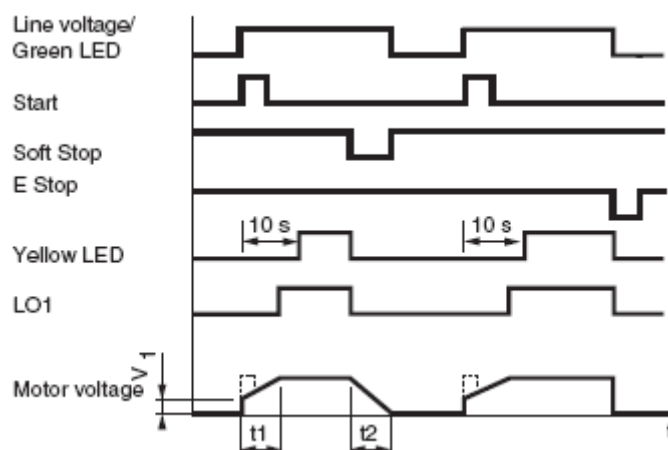


Σχήμα 5.5 Κοματομορφή τάσης-χρόνου με τη χρήση δύο μπουτόν Start-Stop.

### 3. Με δυο μπουτόν Start-Stopκαι λειτουργία Soft Stop.

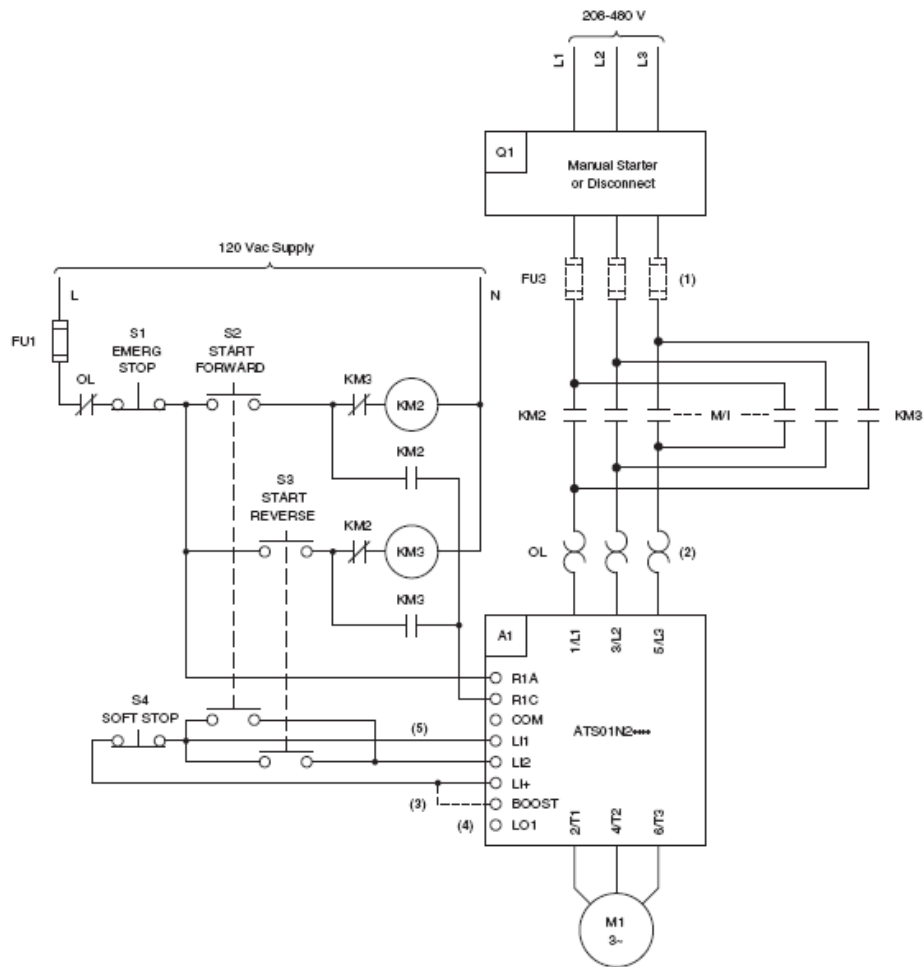


Σχήμα 5.6 Κύκλωμα με δύο μπουτόν Start-Stopκαι Soft Stop.

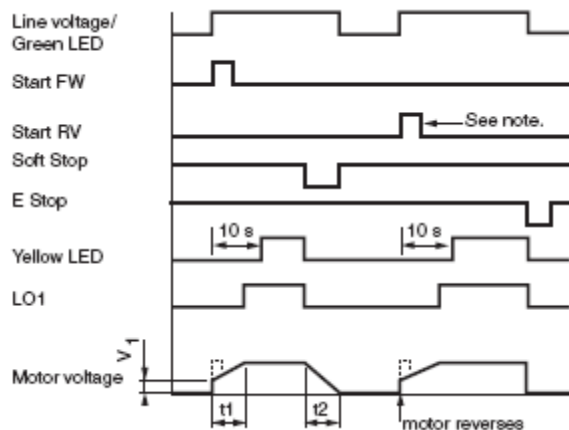


Σχήμα 5.7 Κομματομορφή τάσης χρόνου με δυο μπουτόν Start-Stopκαι Soft Stop.

4. Με δυνατότητα αλλαγής φοράς περιστροφής και λειτουργία Soft Stop.



Σχήμα 5.8 Κύκλωμα με δυνατότητα αλλαγής φοράς περιστροφής και λειτουργία Soft Stop.



Σχήμα 5.9 Κυματομορφή τάσης-χρόνου με δυνατότητα αλλαγής φοράς περιστροφής και λειτουργία Soft Stop.

### 5.3 Αναλυτικός Πίνακας Κόστους Κατασκευής.

Περιγραφή προϊόντος	Κατασκευαστής	Ποσότητα	Κόστος μονάδος	Συνολικό κόστος
Κουτί διακλάδωσης IP55 310*240*160(mm)	ABB	1	20,99	20,99
Ράγα αλουμινίου DIN	ABB	2	4,16	8,32
Αυτόματος θερμομαγνητικός διακόπτης 9-14A	Schneider	1	32,04	32,04
Ρελέ Ισχύος 3P 12A 5,5KW 230VAC, 1NC 1NO	Schneider	2	24,29	48,58
Ομαλός εκκινήτης ALTISTART 01	Schneider	1	120,98	120,98
Κεφαλές ενδεικτικής λυχνίας κόκκινο/πράσινο	Schneider	3	2,39	7,17
Λυχνιολαβή Φ22 LED 220VAC κόκκινο/πράσινο	Schneider	3	5,69	17,07
Βοηθητικό μπλόκ επαφών 1NO 6A	Schneider	2	4,38	8,76
Βοηθητικό μπλόκ επαφών 1NC 6A	Schneider	1	4,38	4,38
Κεφαλή μπουτόν μανιτάρι πλήρης 1NC 1NO Φ22	Schneider	1	22,75	22,75
Κεφαλή μπουτόν κόκκινο πράσινο IP22 Φ22	Schneider	3	3,93	11,79
Βιομηχανικό φικς αρσενικό 5P 16A IP44	MENNEKES	1	2,96	2,96
Κλέμμες ράγας 2,5mm <sup>2</sup> μπεζ πράσινο μπλε	ABB	11	0,26	2,86
Στυπιοθλίπτης PG29 πλαστικός	ADELEQ	2	1,1	2,2
Καλώδια τύπου NYMHY 5*2,5mm	NEXANS	7	1,74	12,18
Καλώδια τύπου NYAF 1*2,5mm	NEXANS	5	0,18	0,9
Καλώδια τύπου NYAF 1*1,5mm	NEXANS	5	0,18	0,9

**ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ: 276,25€**

## Βιβλιογραφία.

1. S. Charman, << Ηλεκτρικές Μηχανές>>, 4<sup>η</sup> έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα, 2009
2. Π. Μαλατέστας, <<Ηλεκτρικές Μηχανές>>, 3<sup>η</sup> έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα, 2015
3. Π. Μαλατέστας, Η. Βυλλιώτης, <<Φροντιστηριακές Ασκήσεις Ηλεκτρικών Μηχανών>>, 1<sup>η</sup> έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλας, 2015
4. Σ. Τούλογλου, << Ηλεκτρικές βιομηχανικές εγκαταστάσεις κίνησης και υποσταθμοί μέσης τάσης>>, 1<sup>η</sup> έκδοση, Εκδόσεις Ίων, 2001
5. F.LThomas, <<Ηλεκτρονικά στοιχεία. Σχεδίαση & τεχνολογία εξαρτημάτων.>>, 1<sup>η</sup> έκδοση, Εκδόσεις Ίων, 2015
6. R.H. Myhammad,<< Ηλεκτρονικά ισχύος. Κυκλώματα, ρυθμίσεις και εφαρμογές.>>, 1<sup>η</sup> έκδοση, Εκδόσεις Ίων, 2015
7. Δ. Β. Μπιτζιώνης, << ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ, Κίνηση Αυτοματισμός Εναλλακτικές Μορφές Ενέργειας Υποσταθμοί>>, 2<sup>η</sup> έκδοση, εκδόσεις Τζιόλα, 2015
8. Π. Μαλατέστας, << Ηλεκτρική Κίνηση>>, 4<sup>η</sup> έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα, 2014
9. Π. Μαλατέστας, Η. Βυλλιώτης, << Ασκήσεις Ηλεκτρικής Κίνησης με συνοπτική θεωρία>>, 1<sup>η</sup> έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα, 2005

## Διαδικτυακές πηγές.

<https://www.schneider-electric.com>

<https://new.abb.com/gr>

<https://electricalnews.gr/>

<https://www.eeweb.com/forum>

<https://ilektroytomatismoι.blogspot.com/>