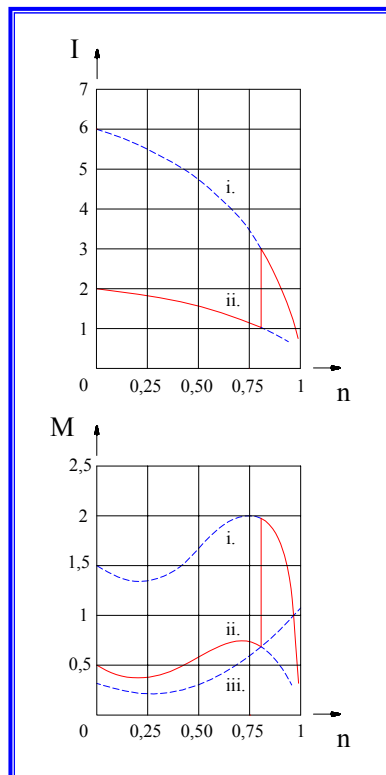


ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΑΣΚΗΣΕΙΣ
ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ Α.Σ.



:

Περιεχόμενα.

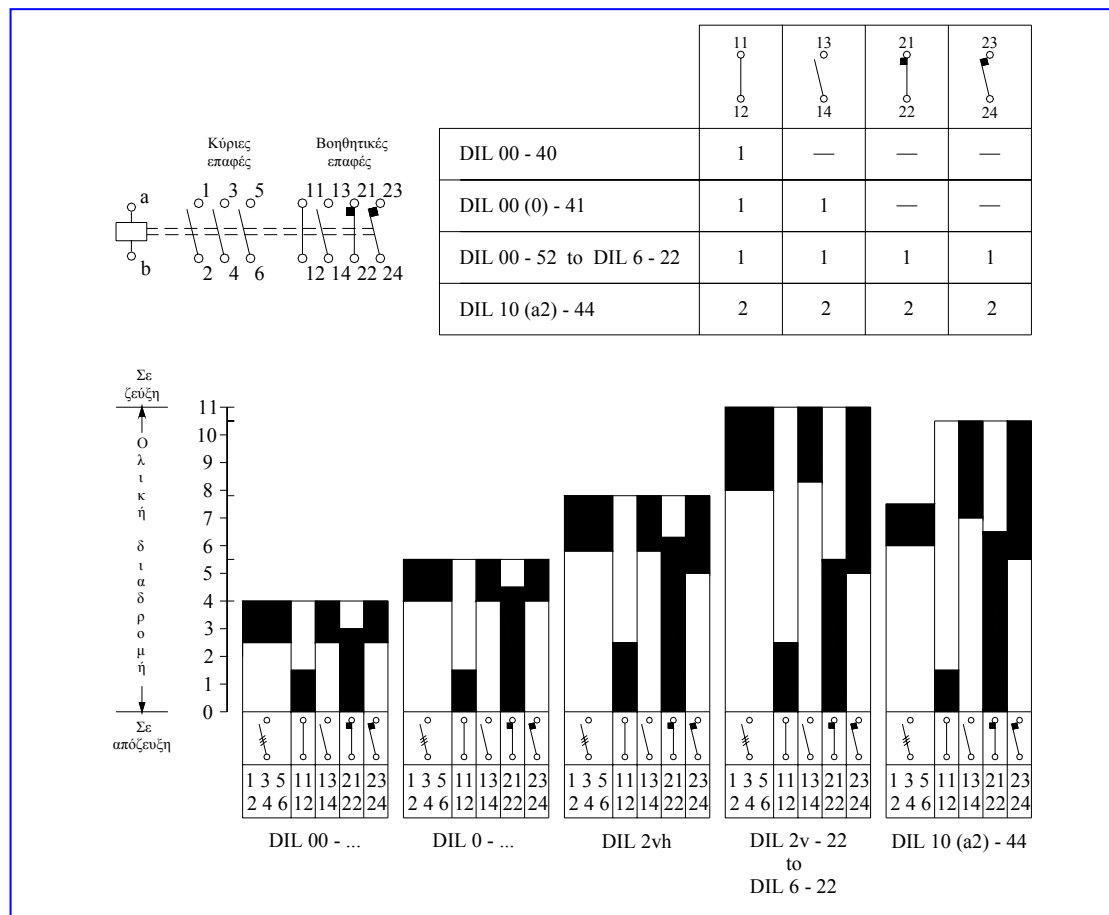
| | |
|--|----|
| • Συσκευές αυτοματισμού. Ηλεκτρονόμοι & ρελέ..... | 3 |
| • Προστασία κυκλωμάτων..... | 8 |
| • Ασύγχρονοι (ή επαγωγικοί) τριφασικοί κινητήρες..... | 12 |
| <u>1.</u> Απευθείας εκκίνηση τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα..... | 15 |
| <u>2.</u> Εκκίνηση κινητήρα με αστέρα (Y) - τρίγωνο (Δ) | 18 |
| <u>3.</u> Εκκίνηση ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα βραχυκυκλ. δρομέα με αντιστάσεις στον στάτη | 22 |
| <u>4.</u> Εκκίνηση ασύγχρονου κινητήρα βραχυκυκλ. δρομέα με αυτομετασχηματιστή | 26 |
| <u>5.</u> Εκκίνηση τριφασικού επαγωγικού δακτυλιοφόρου κινητήρα με μεταβαλλόμενη αντίσταση στους δακτυλίους του δρομέα..... | 29 |
| <u>6.</u> Τριφασικοί επαγωγικοί κινητήρες με δακτυλίδια. Αυτόματη εκκίνηση με αντιστάσεις στο τύλιγμα του δρομέα. | 32 |
| <u>7.</u> Αλλαγή φοράς περιστροφής ασύγχρονου κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα (με και χωρίς μεσολάβηση Stop)..... | 37 |
| <u>8.</u> Ηλεκτρική πέδηση I. Δυναμική πέδηση τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα | 41 |
| <u>9.</u> Ηλεκτρική πέδηση II. Ηλεκτρική πέδηση τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα δακτυλιοφόρου δρομέα. | 46 |
| <u>10.</u> Μεταβολή ταχύτητας ασύγχρονου κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα. | 48 |
| <u>11.</u> Ισχύς, απώλειες, βαθμός απόδοσης και συντελεστής ισχύος κινητήρων..... | 52 |
| <u>12.</u> Κινητήρας βραχυκυκλωμένου δρομέα I. Μέτρηση του βαθμού απόδοσης και της χαρακτηριστικής της ροπής. | 54 |
| <u>13.</u> Κινητήρας βραχυκυκλωμένου δρομέα II. Ρεύμα εκκίνησης με ακινητοποιημένο δρομέα και αντιστροφή. | 57 |
| <u>14.</u> Κινητήρας βραχυκυκλωμένου δρομέα III. Εξέταση των συνολικών απωλειών και έλεγχος των προδιαγραφών..... | 60 |
| <u>15.</u> Κινητήρας βραχυκυκλωμένου δρομέα IV. Μελέτη της ροπής εκκίνησης. | 64 |
| <u>16.</u> Κινητήρας βραχυκυκλωμένου δρομέα V. Υπολογισμός της ροπής ανατροπής. | 67 |
| <u>17.</u> Κινητήρας δακτυλιοφόρου δρομέα I. Γενικά. | 69 |
| <u>18.</u> Κινητήρας δακτυλιοφόρου δρομέα II. Μελέτη της εκκίνησης και της πέδησης. Μέτρηση της απόδοσης και εύρεση της χαρακτηριστικής της ροπής. | 73 |
| <u>19.</u> Κινητήρας δακτυλιοφόρου δρομέα III. Δοκιμή των προδιαγραφών. | 77 |

| | |
|---|-----|
| 20. Προσδιορισμός παραμέτρων ισοδύναμου κυκλώματος ασύγχρονου επαγωγικού κινητήρα. | 82 |
| •... α) Κυκλικό διάγραμμα..... | 89 |
| •... β) Κατασκευή κυκλικού διαγράμματος Heyland ασύγχρονης μηχανής από στοιχεία δοκιμών. Χαρακτηριστικές ευθείες του Ossanna στο κυκλικό διάγραμμα..... | 92 |
| 21. Σύγχρονη τριφασική γεννήτρια. Μέτρηση των χαρακτηριστικών της γεννήτριας (χωρίς φορτίο, βραχυκύκλωσης και με φορτίο. | 100 |
| 22. Σύγχρονος τριφασικός κινητήρας. Εκκίνηση του κινητήρα και σκέδισση των καμπυλών "V" στη λειτουργία εν κενό και υπό φορτίο..... | 103 |

Συσκευές αυτοματισμού. Ηλεκτρονόμοι & ρελέ.

Γενικά για τους ηλεκτρονόμους.

Ηλεκτρονόμους ονομάζουμε τις συσκευές οι οποίες αποτελούνται από ένα μαγνητικό κύκλωμα το οποίο έχει σταθερό και κινητό μέρος, ένα πηνίο για την διέγερση του μαγνητικού κυκλώματος και τέλος από κύριες και βοηθητικές επαφές ή μόνο κύριες.



Στο παραπάνω σχήμα βλέπουμε ένα ηλεκτρονόμο με 3 κύριες ανοικτές επαφές και 4 βοηθητικές εκ των οποίων η 11-12 είναι κλειστή, η 13-14 ανοικτή, η 21-22 είναι βραδείας απόζευξης και η 23-24 βραδείας ζεύξης. Επίσης βλέπουμε ένα πινακάκι με το είδος και τον αριθμό των βοηθητικών επαφών κάποιων ηλεκτρονόμων και τέλος, ένα σχεδιάγραμμα διάρκειας κατάστασης επαφών από την ζεύξη στην απόζευξη και αντίστροφα.

Επιλογή ηλεκτρονόμου (επαφές).

Για την επιλογή ενός ηλεκτρονόμου λαμβάνουμε υπόψη μας τα παρακάτω στοιχεία:

- Τον τύπο και την τάση τροφοδότησης.
- Τις χαρακτηριστικές φορτίου.
- Τις απαιτήσεις διέγερσης.

Η επιλογή αυτή προϋποθέτει γνώση των διαφόρων χαρακτηριστικών του επαφέα όπως:

- Την ονομαστική τάση λειτουργίας.
- Το ονομαστικό ρεύμα λειτουργίας.
- Το μέγιστο θερμικό ρεύμα.
- Την κατηγορία χρησιμοποίησης του (π.χ. ο AC1 για κύκλωμα αντιστάσεων, ο AC3 για εκκίνηση κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα κ.τ.λ.).

Φυσικά εκτός απ' τα παραπάνω πρέπει να λάβουμε υπόψη μας και τα ειδικά χαρακτηριστικά, δηλαδή τα μεταβατικά φαινόμενα σχετιζόμενα με το κύκλωμα φορτίου (χωρητικότητα, επαγωγή), τη διάρκεια ανοίγματος και κλεισίματος των επαφών, την ηλεκτρική αντοχή, την ζωή των πόλων, καθώς και τις περιβαλλοντικές συνθήκες εργασίας του επαφέα όπως την θερμοκρασία, το υψόμετρο κ.λ.π..

Παρακάτω αναφέρονται χαρακτηριστικά και προδιαγραφές ηλεκτρονόμων ανάλογα με κάποια παραδειγματικά κύκλωμα χρησιμοποίησης τους. Έτσι,

- **Για κύκλωμα διανομής.**

Αυτό προϋποθέτει την μεταφορά του ρεύματος χωρίς να θερμαίνει τους πόλους και τις επαφές πάνω από τα επιτρεπόμενα όρια. Να είναι δηλαδή επαρκώς φτιαγμένα για να αντέχουν στην κατάσταση λειτουργίας.

Η παραμονή των επαφών στο κύκλωμα είναι μεγάλη και ο αριθμός λειτουργιών μικρός.

- **Για κύκλωμα θέρμανσης.**

Αυτός ο επαφέας είναι στην κατηγορία του AC1 (δηλαδή για βιομηχανική θέρμανση, ξήρανση, πισίνες).

Απαιτούνται λίγες λειτουργίες, γίνεται απόξεση με φορτίο, το συνφ είναι κοντά στην μονάδα.

Επίσης, αφού η συσκευή είναι συνήθως κλεισμένη μέσα στο κάλυμμα θα πρέπει να υπολογίζεται η εσωτερική θερμοκρασία. Π.χ. για μια θερμοκρασία δωματίου 40 °C η θερ/σια γύρω από τον επαφέα είναι 55-60 °C.

- **Για κύκλωμα φωτισμού με λαμπτήρες πυρακτώσεως.**

Απαιτούνται λίγες λειτουργίες. Χρειάζεται μόνο η θερμική τιμή να παρθεί υπ' όψιν στον υπολογισμό αφού το συνφ = 1.

Το μεγαλύτερο ρεύμα μπορεί να φθάσει 15-20 φορές το I_{ov} και αυτό συμβαίνει όταν κλείνει το κύκλωμα (κρύα και μικρή αντίσταση στα νήματα).

- **Για κύκλωμα φωτισμού με λαμπτήρες αλογόνου (με ή χωρίς αντιστάθμιση).**

Απαιτούνται λίγες λειτουργίες. Η θερμική τιμή μπορεί να μην είναι μεγάλη όμως στον υπολογισμό θα πρέπει να παρθεί υπ' όψιν διότι το συνφ = 0,5. Αυτό συμβαίνει σ' ένα κύκλωμα επαγωγής στο οποίο θα δημιουργηθεί ένα μεγάλο τόξο την στιγμή της απόξεσης.

Το μεγαλύτερο ρεύμα είναι 1-1,6 φορές το I_{ov} .

- **Για κύκλωμα φωτισμού με λαμπτήρες φθορισμού, νατρίου και αλογόνου με διόρθωση του συντελεστή ισχύος.**

Απαιτούνται λίγες λειτουργίες. Η πρόσθεση πυκνωτών βελτιώνει το συνφ το οποίο αλλάζει από 0,5 σε 1.

Όταν κλείνει το κύκλωμα δημιουργείται ένα ρεύμα της τάξεως 15-20 φορές το I_{ov} και γι' αυτό χρειάζεται προσοχή για την επιλογή του επαφά. Εδώ ο επαφάς πρέπει να' χει μεγάλη ικανότητα στο ρεύμα ζεύξης που είναι υψηλό.

- **Για να διακόπτει το πρωτεύον ενός μετασχηματιστή.**

Αυτή η χρήση εξαρτάται πρώτα απ' όλα απ' το συνδεδεμένο φορτίο στο δευτερεύον. Κάποιες φορές όταν εφαρμόζεται ισχύς στο πρωτεύον, η κορυφή του ρεύματος μαγνητίσεως μπορεί να φθάσει 25-30 φορές το I_{ov} και αυτό διαρκεί για μισό κύκλο. Αυτό πρέπει να παρθεί υπ' όψιν στον υπολογισμό όταν αποφασίζετε για το μέγεθος και για την τιμή της ασφάλειας προστασίας.

- **Για τη σύμπλεξη πυκνωτών.**

Αυτή η σύνδεση χρησιμοποιείται για να βελτιώνει τον συντελεστή ισχύος μιας εγκατάστασης. Εδώ επειδή παρουσιάζονται μεταβατικά φαινόμενα κατά την φόρτωση ή εκφόρτωση των πυκνωτών χρειάζεται να παρθεί υπ' όψιν το μέγεθος του επαφά.

- **Για κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα ή δακτυλιοφόρο για απόζευξη φορτίου κατά την διάρκεια ομαλής λειτουργίας σε ονομαστική ταχύτητα.**

Για τους δακτυλιοφόρους κινητήρες επιλέγουμε τον AC2 ή τον AC'2 σύμφωνα με τα στάνταρ VDE. Για τους κινητήρες βραχυκυκλωμένου δρομέα τον AC3.

Δεν είναι αναγκαίο να παρθεί στον υπολογισμό η κορυφή του ρεύματος εκκίνησης γιατί αυτό είναι μικρότερο από την ικανότητα απόζευξης του επαφά.

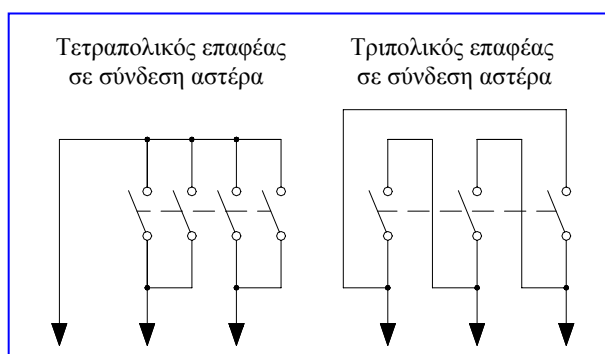
- **Για κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα ή δακτυλιοφόρο για απόζευξη κατά τη διάρκεια εκκίνησης.**

Για τους δακτυλιοφόρους τον AC'2 σύμφωνα με τα στάνταρ VDE και τον AC2 σύμφωνα με τα IEC και UTE. Για τους κινητήρες βραχυκυκλωμένου δρομέα τον AC4.

Η χρήση αυτή συνεπάγεται μεγάλο αριθμό λειτουργιών. Το ρεύμα απόζευξης είναι υψηλό με αποτέλεσμα οι επαφές να φθείρονται πιο γρήγορα αφού σε κάθε απόζευξη δημιουργείται τόξο που καταστρέφει μικρό τμήμα των επιφανειών τους.

- **Για βραχυκύκλωση των αντιστάσεων στο δρομέα.**

Εδώ επειδή μεταξύ δύο διαδοχικών εκκινήσεων το ρεύμα είναι μεγάλο χρησιμοποιούμε διαφορετικές συνδεσμολογίες στον επαφά. Τη σύνδεση αστέρα σε τετραπολικό επαφά και τη σύνδεση τριγώνου σε τριπολικό. Εδώ το ρεύμα που περνά από τον κάθε πόλο είναι $1/\sqrt{3}$ του I γραμμής.



| Χαρακτηριστικά εφαρμογής | Κατηγορία | Καταστάσεις ομαλής λειτουργίας σε ζεύξη & απόζευξη | | | |
|-------------------------------------|-----------|--|----------|--------------|---------------|
| | | I_{ov} | U_{ov} | I_{ov} | U_{ov} |
| Αντιστάσεις (επαγωγικά ή μη φορτία) | AC1 | I_{ov} | U_{ov} | I_{ov} | U_{ov} |
| <u>Δακτυλιοφόροι κινητήρες</u> | | | | | |
| Απόζευξη όταν λειτουργεί | AC'2 | $2,5 I_{ov}$ | U_{ov} | I_{ov} | $0,4 U_{ov}$ |
| Απόζευξη όταν μπλοκαριστεί | AC2 | $2,5 I_{ov}$ | U_{ov} | $2,5 I_{ov}$ | U_{ov} |
| <u>Κινητήρες βραχυκυκλ. δρομέα</u> | | | | | |
| Απόζευξη όταν λειτουργεί | AC3 | $6 I_{ov}$ | U_{ov} | I_{ov} | $0,17 U_{ov}$ |
| Απόζευξη όταν μπλοκαριστεί | AC4 | $6 I_{ov}$ | U_{ov} | $6 I_{ov}$ | U_{ov} |

Συγκεντρωτικό πίνακάκι των παραπάνω.

Γενικά για τα ρελέ

Ρελέ ονομάζουμε τις συσκευές οι οποίες ρυθμίζονται. Π.χ. το χρονικό ρελέ όπου ρυθμίζουμε τον χρόνο στον οποίο θα γίνει η ζεύξη ενός κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα από σύνδεση αστέρα σε σύνδεση τρίγωνο.

Τα ρελέ είναι απ' τα πιο ουσιώδη στοιχεία στους αυτοματισμούς. Χρησιμοποιούνται εκτεταμένα με μηχανισμό ηλεκτρονόμου. Αυτά ρυθμίζουν ένα αριθμό λειτουργιών όπως επιλογή στο κύκλωμα, συχνότητα λειτουργίας, ασφάλεια, σήμανση κ.τ.λ..

Σχεδιάζονται για να διακόπτουν μικρά ρεύματα. Πάραυτα, επειδή η ακριβής λειτουργία του όλου αυτοματισμού εξαρτάται απ' αυτά θα πρέπει να είναι αξιόπιστα. Έτσι η κατασκευή τους απαιτεί μηχανή και ηλεκτρική ζωή μεγαλύτερη απ' αυτήν του ηλεκτρονόμου.

Σε μερικά ρελέ είναι δυνατό να αλλάξεις το πηνίο τους, να μετατρέψεις μια κανονική κλειστή επαφή σε ανοικτή και αντίστροφα, να προσθέσεις γρήγορα χρονικό και να προσθέσεις πόλους ισχύος.

Θερμικό ρελέ υπερφόρτισης.

Ρυθμίζουμε την ένταση του ρεύματος με την οποία θα μας διακόψει την λειτουργία του κινητήρα όταν υπερφορτισθεί. Υπάρχουν:

- Ηλεκτρομαγνητικό ρελέ υπερφόρτισης.
- Ρελέ έλλειψης τάσεως.
- Ρελέ υπερέντασης κ.τ.λ..

Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται διάφοροι τύποι από ρελέ με διαφορετικό αριθμό βοηθητικών επαφών. Επίσης φαίνεται και η διαδρομή ζεύξης απόζευξης.

| | | | |
|-------------|--|---|--|
| DIL 00 L-22 | | 2 επαφές ζεύξης, 2 βραδείας απόζευξης | |
| DIL 00 L-31 | | 3 επαφές ζεύξης, 1 απόζευξης | |
| DIL 00 L-44 | | 4 επαφές ζεύξης, 4 απόζευξης | |
| DIL 00 L-53 | | 5 επαφές ζεύξης, 2 απόζευξης & 1 βραδείας απόζευξης | |
| DIL 00 L-62 | | 6 επαφές ζεύξης, 2 απόζευξης | |

ανοικτ
 κλειτ
 ζ: σε ζεύ
 α: σε α

Προστασία κυκλωμάτων.

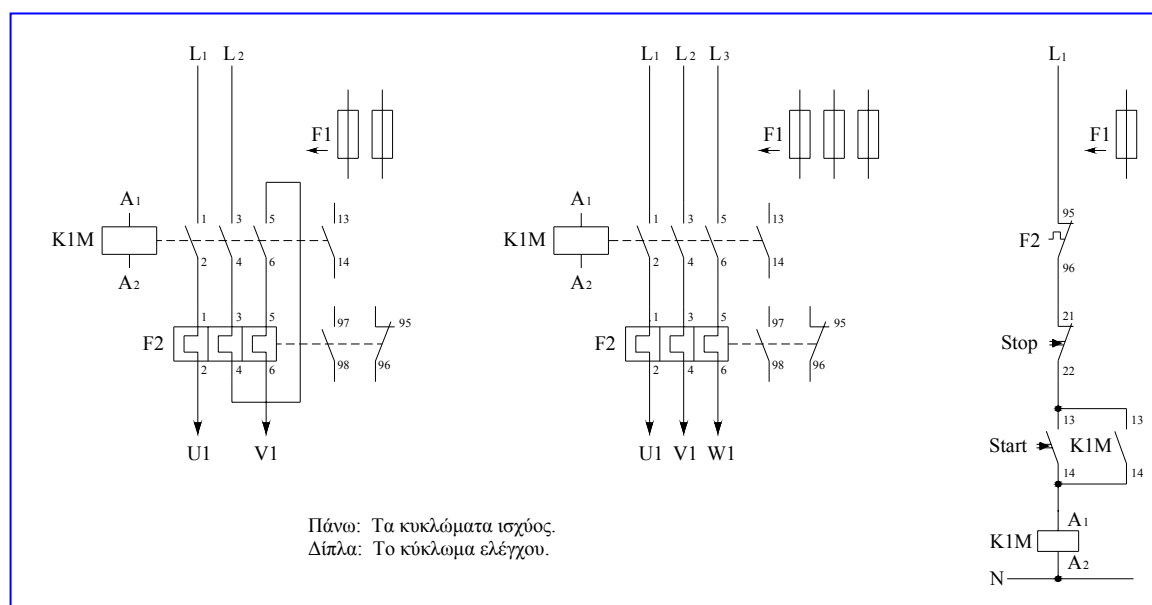
Εδώ θα εξετάσουμε τους διάφορους τρόπους με τους οποίους προστατεύουμε τα κυκλώματα των διάφορων αυτοματισμών από υπερφορτίσεις, βραχυκυκλώματα και μεγάλες αδράνειες.

Προστασία από υπερφόρτιση.

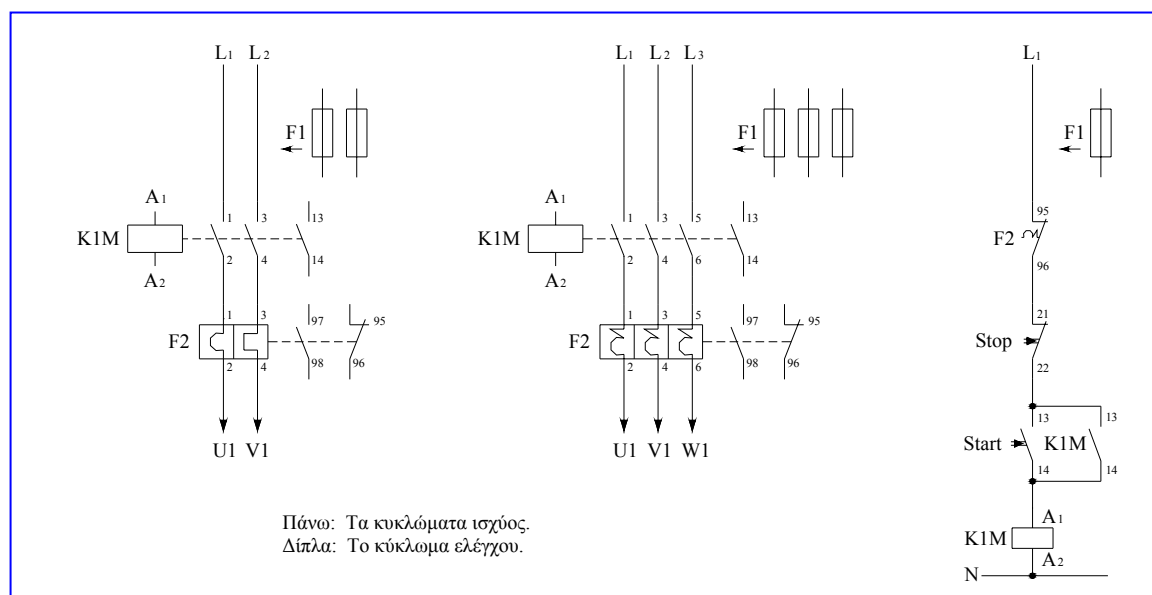
Σημείωση: Τα παρακάτω κυκλώματα με τη χρήση ασφαλειών προστατεύονται συγχρόνως και από βραχυκύκλωμα.

Επίσης, όπως βλέπουμε, τα αριστερά κυκλώματα ισχύος είναι για προστασία D.C. ή μονοφασικών κινητήρων ενώ τα δεξιά τριφασικών. Έτσι,

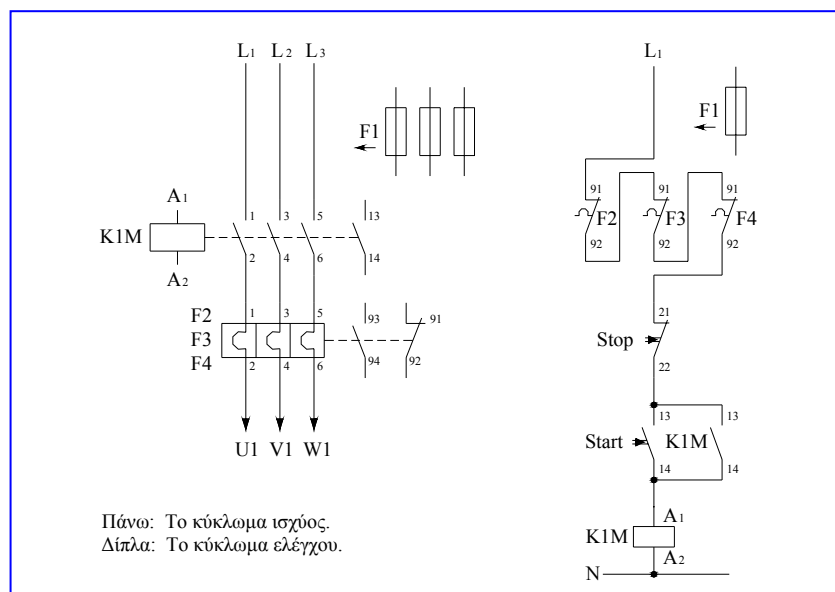
- Με απλό θερμικό ρελέ.



- Με θερμικό μαγνητικό ρελέ.



- Με ηλεκτρομαγνητικό ρελέ.



Τα ηλεκτρομαγνητικά ρελέ υπερφόρτισης σχεδιάζονται έτσι ώστε να παρέχουν προστασία από μεγάλες υπερφορτίσεις, στις εγκαταστάσεις που υπόκεινται σε συνεχές εξάρσεις ρεύματος (εκκίνηση δακτυλιοφόρου κινητήρα με

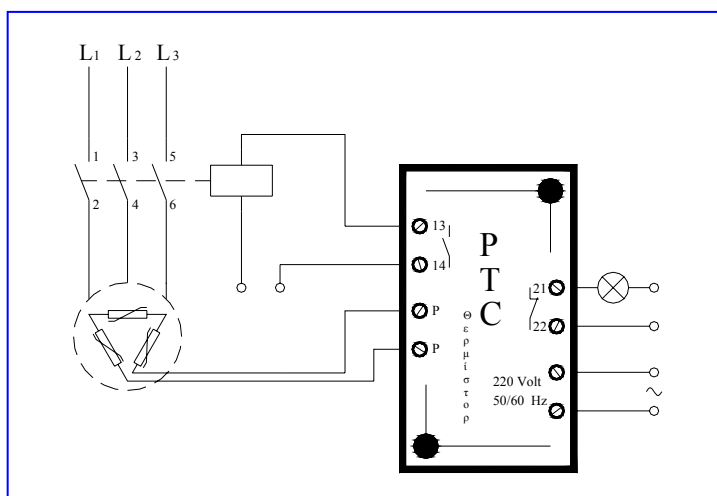
εξοπλισμό ανύψωσης για παράδειγμα). Αυτά μπορούν να προστατεύσουν κινητήρες από πολύ συχνές εκκινήσεις, αιφνίδιες αποκλίσεις στη ροπή φορτίου ή όπου τα τυπικά θερμικά ρελέ δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν.

- Με θερμοίστορ ρελέ.

Αυτή η προστασία στηρίζεται στην αρχή της αμέσου επιτηρήσεως της θερμοκρασίας της περιελίξεως με την τοποθέτηση, μέσα στις κεφαλές της περιελίξεως, τριών ψυχρών αγωγών (ένας ανά φάση) των οποίων ο όγκος δεν υπερβαίνει τα 25 mm^3 . Οι ψυχροί αυτοί αγωγοί συνδέονται σε σειρά και καταλήγουν σε δύο ακροδέκτες στο ακροκιβώτιο του κινητήρα.

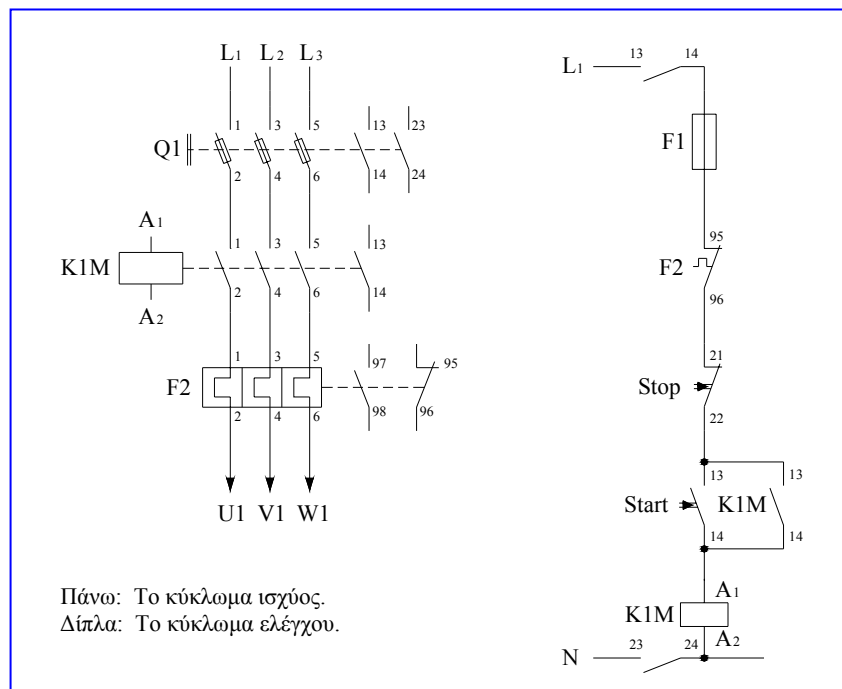
Η χαρακτηριστική ιδιότητα των ψυχρών αγωγών είναι ότι μεταβάλλουν την αντίστασή τους ανάλογα με την θερμοκρασία και παρέχουν την δυνατότητα ανάλογα με την σύνθεση των κρυστάλλων να επιλέγονται διάφορες περιοχές θερμοκρασίας ώστε να είναι δυνατή η προστασία περιελίξεων όλων των κλάσεων μονώσεως. Η σημαντική αύξηση της αντίστασης με αύξηση της θερμοκρασίας μόνο λίγων βαθμών χρησιμοποιείται για την διακοπή της τάσεως στο πηνίο ενός ευαίσθητου ηλεκτρονόμου και σε συνέχεια με κατάλληλη σύνδεση την πτώση του ηλεκτρονόμου.

Αυτός ο τρόπος προστασίας προστατεύει τον ηλεκτροκινητήρα από διαφασική λειτουργία, πτώση τάσεως, υπέρταση, δύσκολη εκκίνηση, και υψηλή θερμοκρασία περιβάλλοντος.



Προστασία από βραχυκύκλωμα.

- **Με ασφάλειες.**



Συνδυασμός ενός απομονωτή (ο χειροκίνητος διακόπτης Q1), ηλεκτρονόμου και ενός θερμικού ρελέ.

- Ο απομονωτής με ασφάλειες προστατεύει τον κινητήρα, τον εξοπλισμό και τις γραμμές εισόδου από βραχυκύκλωμα.
- Ο ηλεκτρονόμος προστατεύει από

έλλειψη τάσεως ή μεγάλης πτώσεως τάσεως.

- Το θερμικό ρελέ προστατεύει από μικρές και συνεχείς υπερφορτίσεις διακοπής φάσεως και ανισορροπία φάσεων. Στο σχέδιο βλέπουμε τη διάταξη που περιγράψαμε.

Άλλος τρόπος προστασίας από βραχυκύκλωμα είναι ένας χειροκίνητος διακόπτης που περιέχει τα εξής στοιχεία.

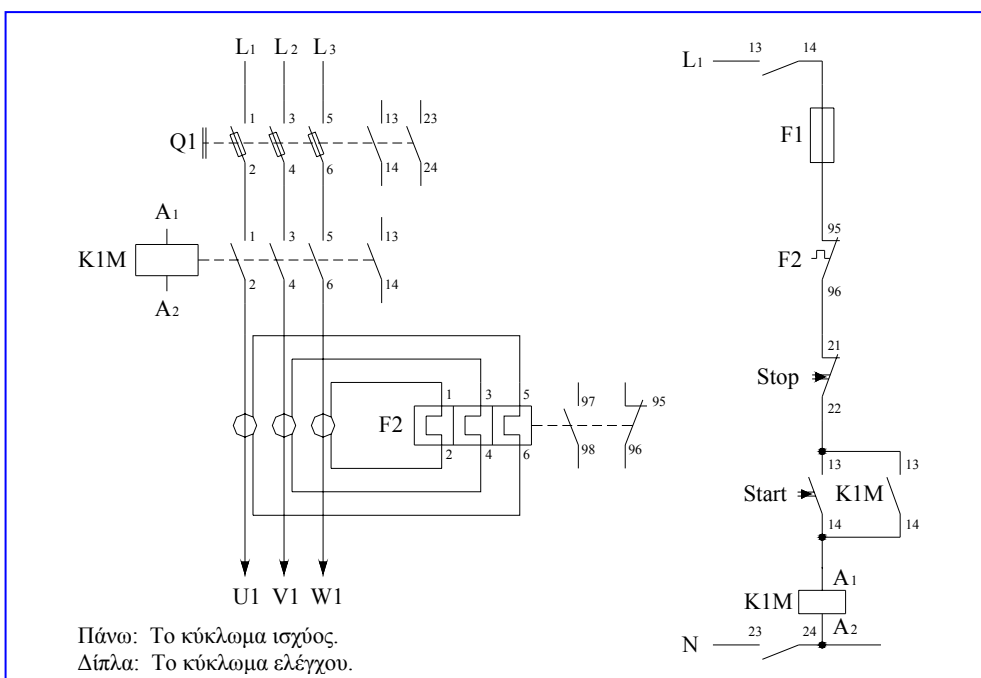
- Ένα θερμικό στοιχείο που προστατεύει από υπερφορτίσεις.
- Ένα ηλεκτρομαγνητικό στοιχείο που προστατεύει από βραχυκύκλωμα. Αυτόν τον διακόπτη τον ονομάζουμε **αυτόματο προστασίας** γιατί βγαίνει αυτόματα εκτός (off), όταν συμβεί κάποια από τις δύο αιτίες.

Προστασία από μεγάλη αδράνεια.

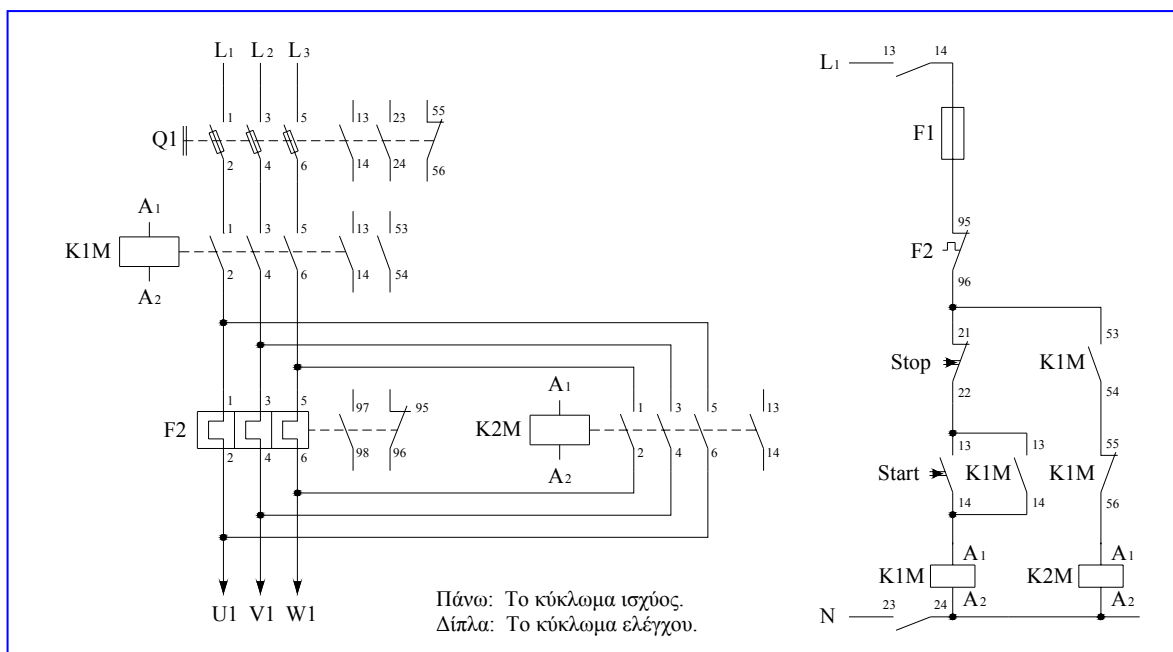
Μεγάλης αδράνειας κινητήρες, είναι δύσκολο να προστατευθούν αφού το θερμικό ρελέ υπερφόρτισης πέφτει πριν τελειώσει ο κύκλος της εκκίνησης. Η χρήση ενός υπερμεγέθους ρελέ θα μπορούσε να επιτρέψει να περάσει το μεγάλο ρεύμα εκκίνησης αλλά μετά, όταν ο κινητήρας πάρει το κανονικό του ρεύμα, η προστασία του θα ήταν ανεπαρκής. Έτσι, οι λύσεις στο πρόβλημα είναι οι παρακάτω:

- **Χρήση μηχανισμού** προστασίας θερμίστορ που αναφέραμε στα προηγούμενα.
- **Χρήση ενός θερμικού ρελέ** τροφοδοτούμενο από το δευτερεύον ενός τριφασικού μετασχηματιστή ρεύματος. Κατά την διάρκεια της εκκίνησης και πριν το ρεύμα μεγαλώσει πολύ, οι μετασχηματιστές τροφοδοτούν τα διμεταλλικά στοιχεία του θερμικού με ρεύμα που αυξάνεται λιγότερο απ' ό,τι στο προστατευόμενο κύκλωμα.

- Χρήση ενός ηλεκτρονόμου παράλληλα στο θερμικό και απενεργοποίηση αυτού όταν ο κινητήρας πάρει το κανονικό του ρεύμα. Παρακάτω δίνονται τα σχέδια της προστασίας αυτής.



Με χρήση θερμικού ρελέ τροφοδοτούμενου απ' το δευτερεύον τριφασικού μετασχηματιστή εντάσεως (πάνω) και με χρήση ενός ηλεκτρονόμου παράλληλα στο θερμικό (κάτω).



Ασύγχρονοι (ή επαγωγικοί) τριφασικοί κινητήρες.

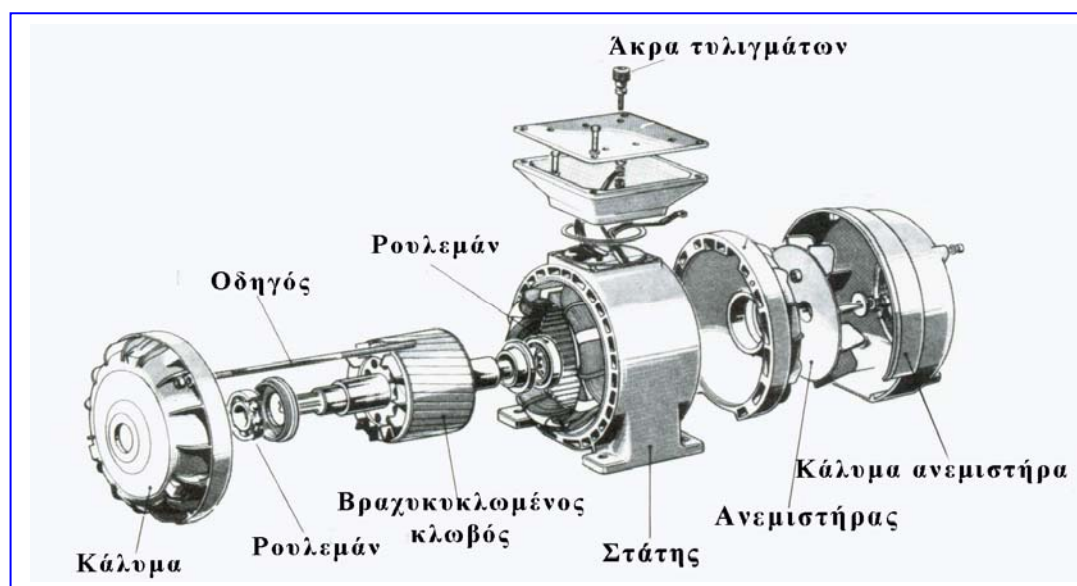
Ονομάζονται ασύγχρονοι κινητήρες γιατί δεν στρέφονται με την σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής όπως οι σύγχρονοι κινητήρες αλλά με ταχύτητα διαφορετική από αυτή.

Αποτελούνται από το ακίνητο μέρος που ονομάζεται στάτης και το κινούμενο που ονομάζεται ρότορας ή δρομέας.

Επίσης οι ασύγχρονοι κινητήρες ονομάζονται και επαγωγικοί γιατί η μεταβίβαση της ενέργειας από τον στάτη στον μη τροφοδοτούμενο δρομέα γίνεται μέσω επαγωγικών φαινομένων.

Ο στάτης.

Ο στάτης ενός ασύγχρονου κινητήρα αποτελείται από ένα κυλινδρικό σώμα ελασμάτων τα οποία είναι διαμορφωμένα κατά τέτοιο τρόπο έτσι ώστε στο εσωτερικό μέρος του να δημιουργούνται αυλάκια. Μέσα στα αυλάκια τοποθετείται το τριφασικό τύλιγμα για να αναπτύσσεται το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο.



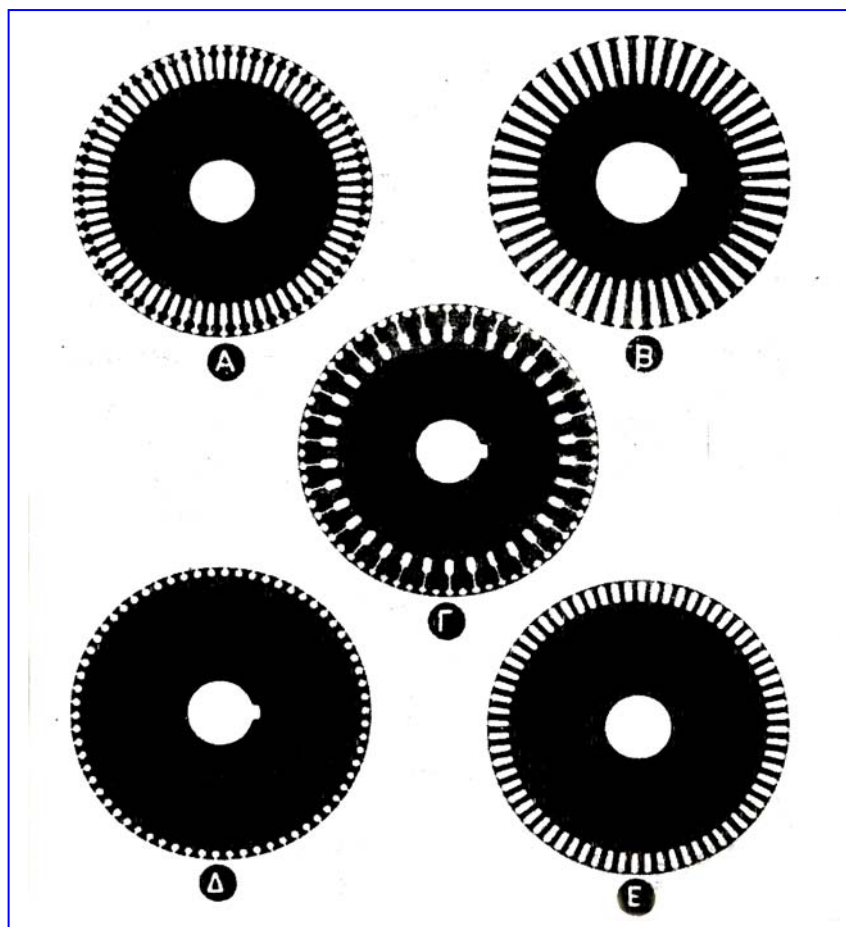
Η ανατομία ενός ασύγχρονου κινητήρα.

Ο δρομέας.

Ο δρομέας αποτελείται από ένα τύμπανο ελασμάτων. Τα ελάσματα είναι διαμορφωμένα κατά τέτοιο τρόπο ώστε να δημιουργούν στην εξωτερική επιφάνεια του τυμπάνου και κατά την διεύθυνση του άξονα του κινητήρα, αυλάκια. Μέσα σ' αυτά χύνονται ράβδοι χαλκού ή αλουμινίου και γεφυρώνονται μεταξύ τους με δύο στεφάνες.

Το τύλιγμα αυτό μοιάζει με κλουβί και γι' αυτό ο ασύγχρονος κινητήρας αυτού του είδους ονομάζεται κινητήρας με δρομέα κλωβού ή κινητήρας βραχυκυκλωμένου δρομέα.

Για την ελάττωση του μαγνητικού θορύβου, ο αριθμός των αυλακιών του δρομέα είναι πάντοτε διαφορετικός από τον αριθμό αυλακιών του στάτη. Το ίδιο αποτέλεσμα έχουμε και όταν τα αυλάκια του δρομέα έχουν μια μικρή κλίση ως προς τα αυλάκια του στάτη.

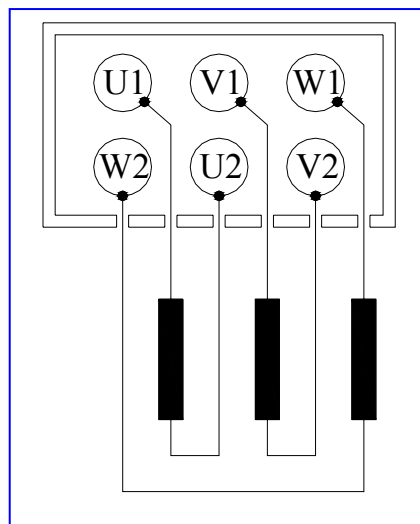


Παραπάνω βλέπουμε διάφορους τύπους μαγνητικών ελασμάτων για την κατασκευή δρομέα ασύγχρονου επαγωγικού κινητήρα.

- Α. Τύπος ελάσματος για την κατασκευή κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα ομαλής ροπής και μικρού ρεύματος εκκίνησης.
- Β. Τύπος ελάσματος για την κατασκευή δρομέα δακτυλιοφόρου κινητήρα.
- Γ. Τύπος ελάσματος για την κατασκευή κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα μεγάλης ροπής και μικρού ρεύματος εκκίνησης.
- Δ. Τύπος ελάσματος για την κατασκευή κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα μεγάλης ροπής και μεγάλης ολίσθησης.
- Ε. Τύπος ελάσματος για την κατασκευή κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα ομαλής ροπής και ομαλού ρεύματος εκκίνησης.

Παρακάτω βλέπουμε το ακροκιβώτιο των τυλιγμάτων του στάτη. Το ακροκιβώτιο είναι ένα μονωμένο κουτί στην εξωτερική πλευρά του κινητήρα απ' όπου ξεκινούν και καταλήγουν οι αρχές και τα τέλη των φάσεων. Οι αρχές των τυλιγμάτων δηλώνονται με τα γράμματα U1, V1, W1 και τα τέλη με τα γράμματα U2, V2 και W2.

- Το τύλιγμα U1-U2 είναι η 1^η φάση.
- Το τύλιγμα V1-V2 είναι η 2^η φάση.
- Το τύλιγμα W1-W2 είναι η 3^η φάση.



Εκκίνηση ασύγχρονων τριφασικών κινητήρων.

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 και υπολογίσιμη πτώση τάσεως. Το ρεύμα εκκίνησης για εκκίνηση με πλήρες φορτίο είναι: $I_{εκ} = (4 \text{ έως } 8) \times I_{ov}$.

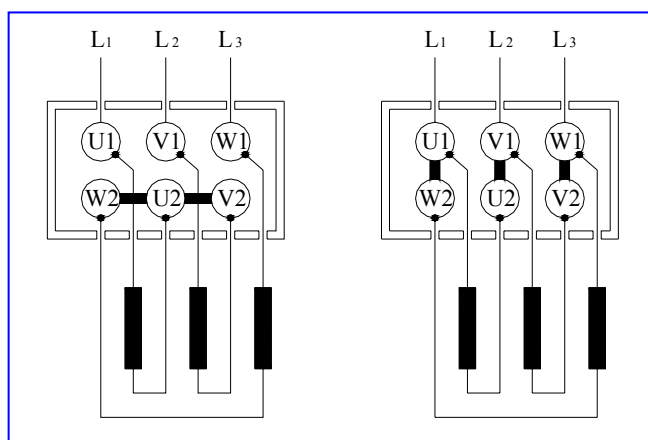
Στην εκκίνηση μας ενδιαφέρουν δύο μεγέθη:

- α. Η ροπή εκκίνησης και
- β. Το ρεύμα εκκίνησης.

Το ζητούμενο στην εκκίνηση είναι να έχουμε όσο το δυνατόν μικρότερο ρεύμα εκκίνησης και ροπή κατάλληλη για ομαλή εκκίνηση. Πολύ μεγάλη ροπή εκκίνησης σε σχέση με το φορτίο κατά την εκκίνηση θα μας έδινε απότομο ξεκίνημα. Ροπή εκκίνησης μικρότερη από την ροπή φορτίου δεν θα επέτρεπε στον κινητήρα να αναπτύξει στροφές.

Οι τρόποι εκκίνησης ενός ασύγχρονου κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα είναι:

- Απευθείας εκκίνηση σε πλήρη τάση δικτύου.
- Εκκίνηση με αστέρα – τρίγωνο.
- Εκκίνηση με αντιστάσεις στο τύλιγμα του στάτη.
- Εκκίνηση με αυτομετασχηματιστή.



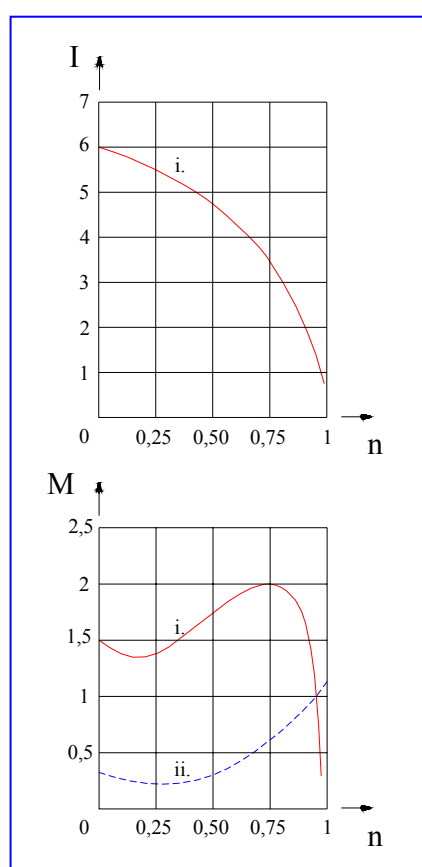
Πάνω βλέπουμε τις βασικές συνδεσμολογίες των τυλιγμάτων ενός ασύγχρονου κινητήρα. Αυτές είναι σε αστέρα (αριστερά) και σε τρίγωνο (δεξιά).

Απευθείας εκκίνηση τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα

βραχυκυκλωμένου δρομέα

Θεωρητικά.

Κατά τη μέθοδο, ο στάτης του κινητήρα συνδέεται απευθείας στο δίκτυο. Όταν θέσουμε σε λειτουργία τον κινητήρα αυτός να αντλεί στιγμιαία ένα μεγάλο ρεύμα εκκίνησης ($I_{εκ}$) το οποίο είναι τέσσερις έως οχτώ φορές μεγαλύτερο από το ονομαστικό ρεύμα ($I_{ον}$), δηλ. $I_{εκ} = (4-8) \times I_{ον}$. Η μέθοδος είναι ιδανική απ' τη στιγμή που το ρεύμα αυτό δεν μας δημιουργεί προβλήματα και η αρχική ροπή εκκίνησης είναι επαρκής για να κινήσει τον κινητήρα.



Δίπλα φαίνονται οι χαρακτηριστικές του ρεύματος και της ροπής του κινητήρα συναρτήσει της ταχύτητας. Έτσι,

- Στην $I = f(n)$ βλέπουμε:
με i. το ρεύμα του κινητήρα.
- Στην $M = f(n)$ βλέπουμε:
με i. τη ροπή του κινητήρα.
με ii. τη ροπή του φορτίου του

κινητήρα.

Συνήθως, η ροπή κατά τη διάρκεια της εκκίνησης είναι μεγαλύτερη από την ονομαστική ροπή και γίνεται ακόμα μεγαλύτερη όταν ο κινητήρας φθάσει περίπου στο 80% της ταχύτητας του ενώ ταυτόχρονα το ρεύμα εκκίνησης έχει μειωθεί αισθητά.

Αυτή η μέθοδος προϋποθέτει η εκκίνηση των μηχανών να γίνεται σε πλήρες φορτίο και χρησιμοποιείται για μηχανές μικρής και μεσαίας ισχύος.

Σκοπός της άσκησης είναι η κατανόηση του τρόπου εκκίνησης σε πλήρη τάση δικτύου και η εξάσκηση στον τρόπο συνδεσμολογίας του κυκλώματος.

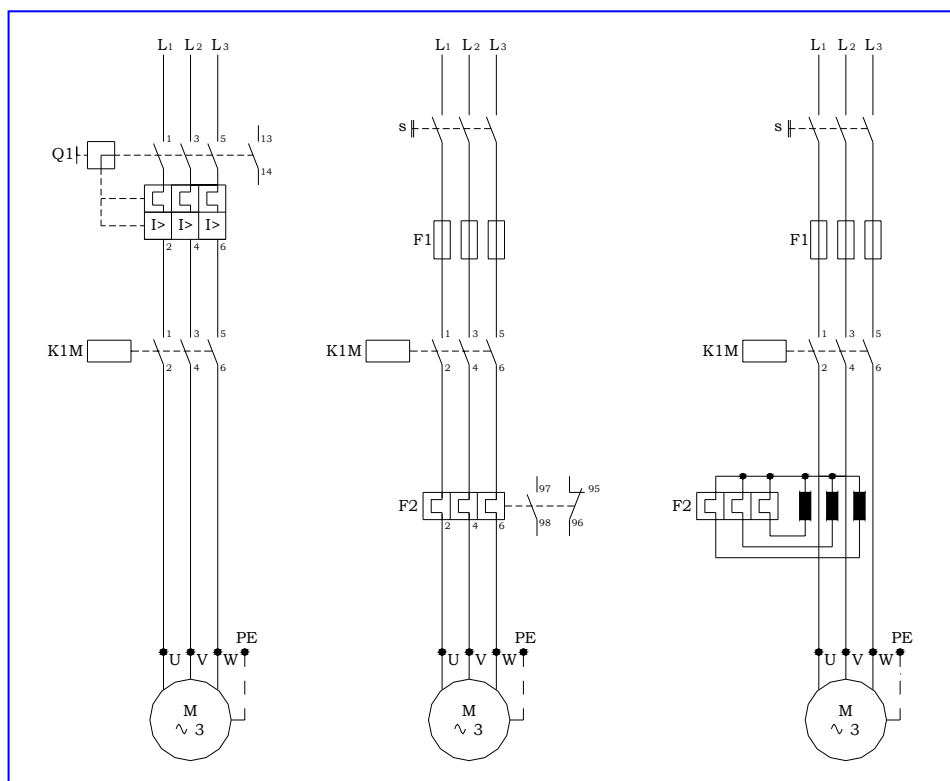
Κυκλώματα.

- **Κύκλωμα ισχύος.**

Όπως βλέπουμε το κύκλωμα ισχύος μπορεί να συνδεσμολογηθεί με τρεις διαφορετικούς τρόπους. Αυτοί είναι ισοδύναμοι μεταξύ τους και εξυπηρετούν την ίδια δουλειά. Η διαφορά τους έγκειται στο τρόπο προστασίας του κυκλώματος.

Το πρώτο από αριστερά κύκλωμα χρησιμοποιεί ένα χειροκίνητο διακόπτη προστασίας από υπερφόρτιση και βραχυκύκλωμα τον Q1, ενώ τα άλλα δύο, τις

ασφάλειες F1 για προστασία από βραχυκύκλωμα και ένα ρελέ υπερφόρτισης το F2 (θερμικό) για προστασία από υπερφόρτιση. Το μεν ρελέ υπερφόρτισης μπορεί να συνδεθεί απ' ευθείας πάνω στο κύκλωμα ή και έμμεσα με αυτό μέσω ενός μετασχηματιστή εντάσεως όπως βλέπουμε στο δεξί κύκλωμα.

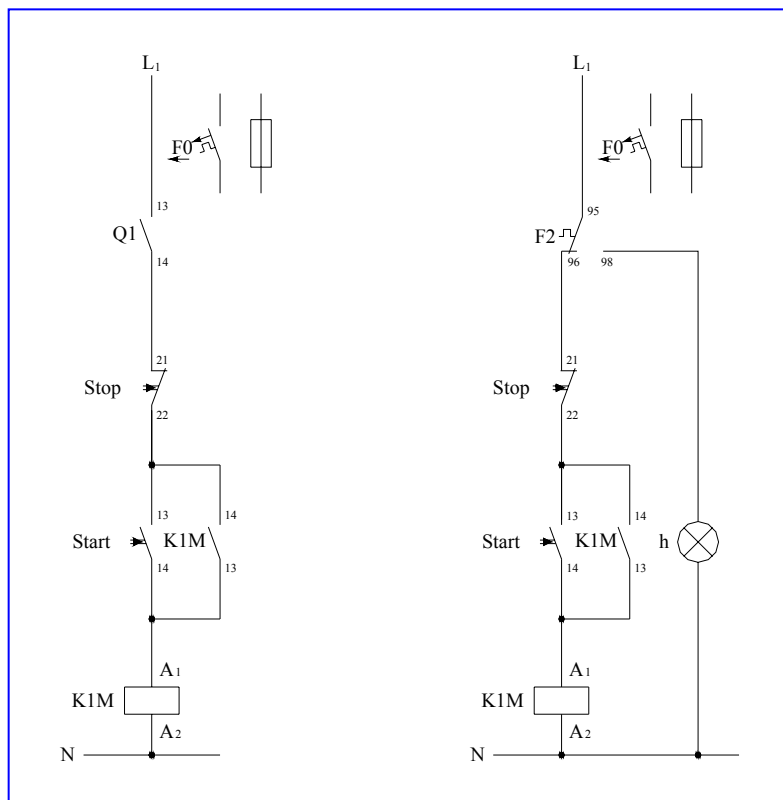


Το κύκλωμα που θα χρησιμοποιήσουμε εμείς για την εκτέλεση της άσκησης είναι το μεσαίο.

• **Κύκλωμα ελέγχου**

Η επιλογή του κυκλώματος ελέγχου εξαρτάτε απ' το χρησιμοποιηθέντα κύκλωμα ισχύος. Έτσι, αφού εμείς επιλέξαμε κύκλωμα ισχύος που φέρει ρελέ υπερφόρτισης θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε κύκλωμα ελέγχου που φέρει την επαφή του ρελέ υπερφόρτισης και αυτό είναι το δεξί με την F2.

Το αριστερό κύκλωμα που φέρει την επαφή Q1 σημαίνει ότι συμπλέκετε με τον χειροκίνητο διακόπτη προστασίας Q1 του αριστερού κυκλώματος ισχύος.



Απαιτούμενα όργανα και συσκευές.

- Ένα απλό τριφασικό χειροκίνητο διακόπτη (s).
- Τέσσερις ασφάλειες (F1).
- Ένα ηλεκτρονόμο (KM).
- Ένα ρελέ υπερφόρτισης (F2), (θερμικό).
- Ένα τριφασικό ασύγχρονο κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα (M).
- Μία μπουτονιέρα με μπουτόν στάσης και εκκίνησης (Stop-Start).
- Μία ενδεικτική λυχνία (h).
- Εύκαμπτους αγωγούς 2,5mm² για το κύκλωμα ισχύος και
- Εύκαμπτους αγωγούς 1,5mm² για το κύκλωμα ελέγχου.

Λειτουργία του αυτοματισμού.

Θέτουμε εντός τον διακόπτη s και πιέζουμε το Start. Το ρεύμα ακολουθεί τον δρόμο L₁-F2-Stop-Start-K1M-N και εφαρμόζεται τάση στο πηνίο του ηλεκτρονόμου K1M 220 Volts όπου και διεγείρεται (κλείνουν οι 3 κύριες επαφές του και η μία βοηθητική).

Αφήνοντας το Start αυτό επανέρχεται στη θέση ηρεμίας του, όπως φαίνεται στο σχέδιο, αλλά ο ηλεκτρονόμος K1M παραμένει σε διέγερση μέσω κυκλώματος που κλείνει με την K1M 13-14 επαφή αυτοσυγκράτησης.

Ο κινητήρας ξεκίνησε από την στιγμή που έκλεισαν οι τρεις κύριες επαφές λειτουργίας και συνεχίζει την λειτουργία του γιατί όπως αναφέραμε ο ηλεκτρονόμος παραμένει σε διέγερση έστω και αν αφήσαμε το Start.

Σε περίπτωση κατά την οποία υπερφορτισθεί ο κινητήρας λόγω μεγάλου φορτίου ή διακοπής μιας φάσης τότε επενεργεί το ρελέ υπερφόρτισης (θερμικό) F2 και διακόπτει το κύκλωμα ελέγχου (αποδιεγείρεται ο ηλεκτρονόμος K1M, οι τρεις κύριες επαφές λειτουργίας του επανέρχονται στη θέση ηρεμίας τους και σταματάει ο κινητήρας) ενώ παράλληλα κλείνει το κύκλωμα της λυχνίας h για να ειδοποιηθούμε για το γεγονός.

Αν η τάση του δικτύου πέσει πολύ τότε η έλξη του ηλεκτρομαγνήτη του K1M εξασθενεί σε τέτοιο βαθμό με αποτέλεσμα να ανοίξει ο ηλεκτρονόμος και να σταματήσει ο κινητήρας. Για να τον ξεκινήσουμε και πάλι θα πρέπει να πιέσουμε το Start.

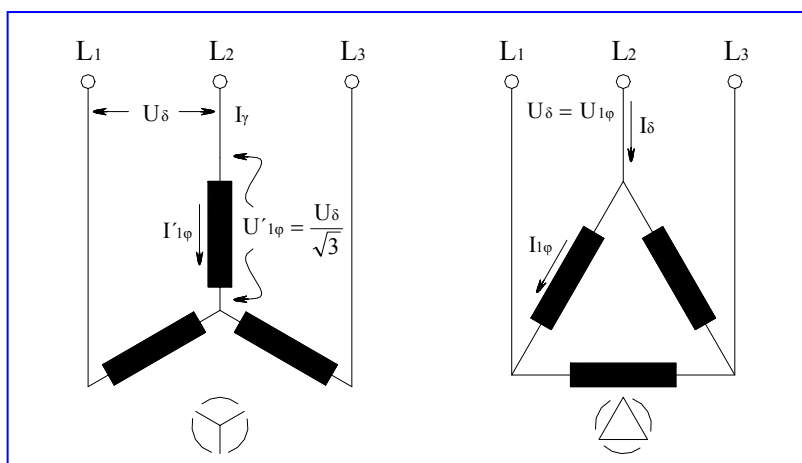
Για να σταματήσουμε τον κινητήρα πιέζουμε το Stop.

Εκκίνηση κινητήρα με αστέρα (Y) - τρίγωνο (Δ)

Θεωρητικά.

Στη κανονική λειτουργία του κινητήρα τα πηνία του συνδέονται σε τρίγωνο οπότε και η φασική τάση U_1 του ισοδύναμου κυκλώματος είναι ίση με την πολική τάση του δικτύου, $U_{1\Delta} = U_{1\phi} = U_1 = U_\delta$.

Στην εκκίνηση όμως έχουμε τάση $U'_{1\phi} = U_{1Y} = \frac{U_\delta}{\sqrt{3}}$.



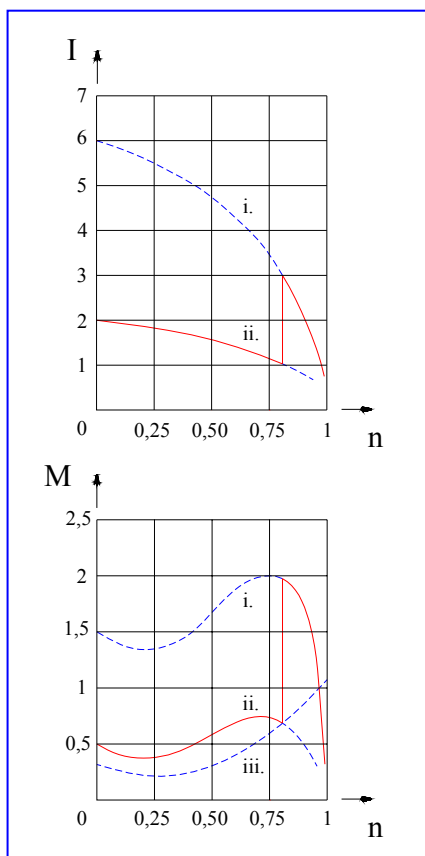
Επίσης έχουμε, $\frac{U'_{1\phi}}{U_{1\phi}} = \alpha$, όπου α ο συντελεστής υποβιβασμού της τάσης.

$$\alpha = \frac{U'_{1\phi}}{U_{1\phi}} = \frac{U_\delta/\sqrt{3}}{U_\delta} = \frac{1}{\sqrt{3}} \text{ και}$$

$$I'_{1\epsilon\kappa} = \alpha \cdot I_{\epsilon\kappa} \Rightarrow I_{1\epsilon\kappa Y} = \alpha \cdot I_{\epsilon\kappa} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot I_{\epsilon\kappa\phi} = \frac{1/\sqrt{3} \cdot I_{\epsilon\kappa\Delta}}{\sqrt{3}} \Leftrightarrow I_{1\epsilon\kappa Y} = \frac{1}{3} \cdot I_{\epsilon\kappa\Delta}.$$

Η ροπή είναι $M'_{1\epsilon\kappa} = \alpha^2 \cdot M_{\epsilon\kappa}$, δηλαδή ανάλογη του τετραγώνου της τάσεως και ίση με το 1/3 της ροπής εκκίνησης σε τρίγωνο, δηλ. $M_{\epsilon\kappa Y} = \frac{1}{3} \cdot M_{\epsilon\kappa\Delta}$. Αυτό φαίνεται και από τις χαρακτηριστικές $I = f(n)$ και $M = f(n)$ που ακολουθούν παρακάτω. Με άλλα λόγια αν το ρεύμα εκκίνησης με απ' ευθείας εκκίνηση είναι δπλάσιο του ονομαστικού ρεύματος, στην εκκίνηση με αστέρα είναι 2πλάσιο, $I_{1\epsilon\kappa Y} = 2 \times I_{ov}$ και γι' αυτό το λόγο τα φυσίγγια των ασφαλειών της γραμμής μπορούν να είναι της αμέσως ανώτερης τάξης του I_{ov} .

Για να εφαρμόσουμε την μέθοδο αυτή θα πρέπει ο κινητήρας να είναι κατασκευασμένος για σύνδεση των τυλιγμάτων του σε τρίγωνο και η ονομαστική του τάση να συμπίπτει με την πολική τάση του δικτύου (στοιχεία που αναγράφονται στη πινακίδα της μηχανής). Έτσι, για το δίκτυο της ΔΕΗ 380/220 Volts θα πρέπει η πινακίδα της μηχανής να γράφει 380 Volts Δ ή 380/660 Volts Δ/Y. Αν η πινακίδα γράφει 220/380 Volts Δ/Y ο κινητήρας δεν μπορεί να εκκινήσει μ' αυτή τη μέθοδο.



Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για την εκκίνηση μηχανών που φέρουν από μηδενικό ως χαμηλό φορτίο.

Παρακάτω φαίνονται οι χαρακτηριστικές του ρεύματος και της ροπής του κινητήρα συναρτήσει της ταχύτητας.

Έτσι,

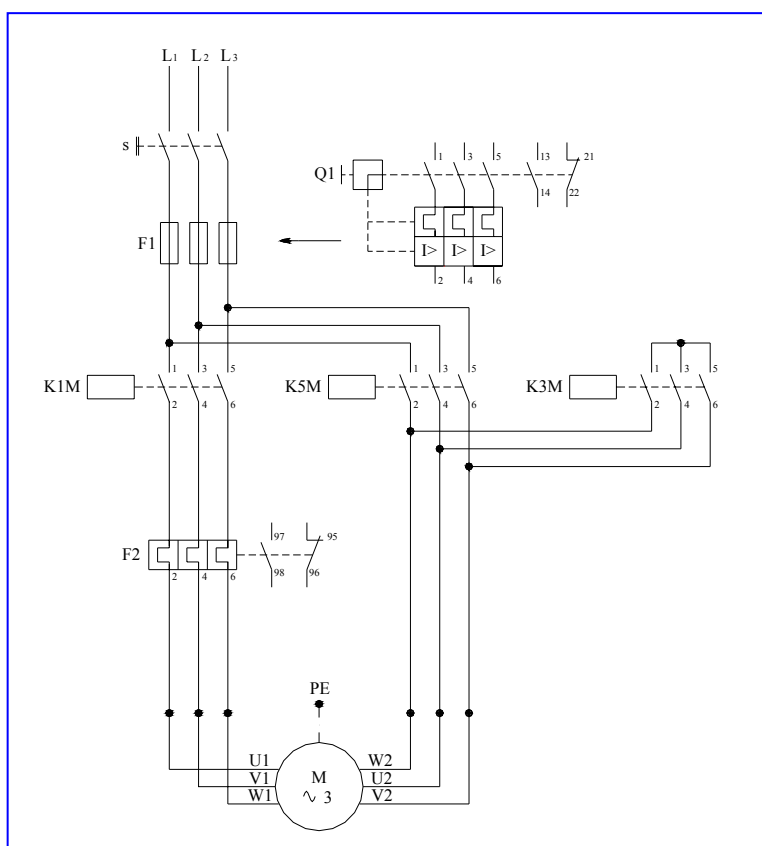
- Στην $I = f(n)$ βλέπουμε:
 - με i. το ρεύμα του κινητήρα σε απευθείας Δ.
 - με ii. το ρεύμα του κινητήρα σε Υ.
- Στην $M = f(n)$ βλέπουμε:
 - με i. τη ροπή του κινητήρα σε απευθείας Δ.
 - με ii. τη ροπή του κινητήρα σε Υ.
 - με iii. τη ροπή του φορτίου του κινητήρα.

Σκοπός της άσκησης είναι να καταλάβει ο σπουδαστής το γιατί χρησιμοποιούμε αυτή την μέθοδο εκκίνησης και να εξασκηθεί στην συνδεσμολογία του αυτοματισμού.

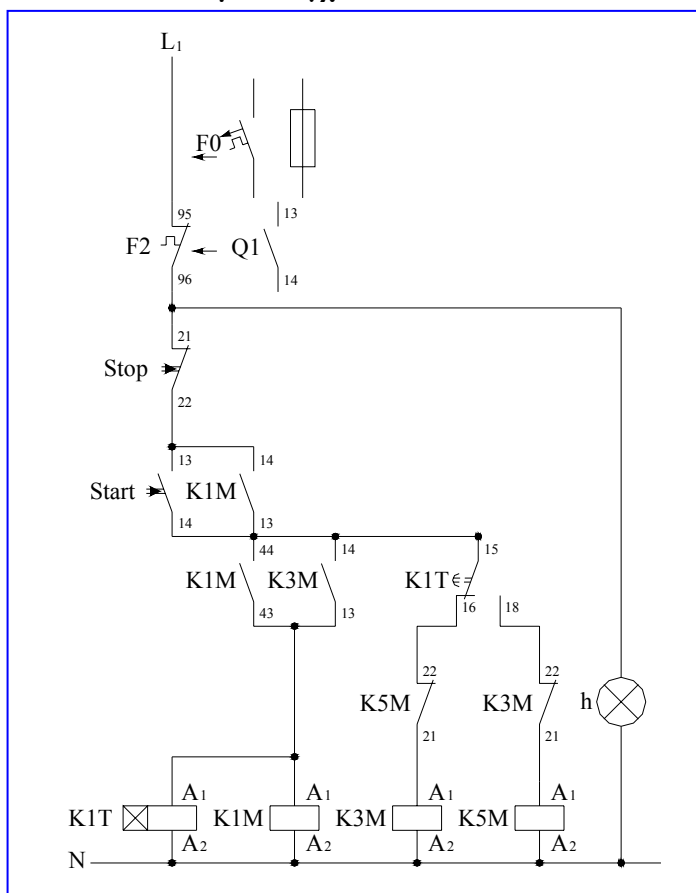
Κοκλώματα.

- **Κύκλωμα ισχύος.**

Βλέπουμε ότι και εδώ μπορούμε να αντικαταστήσουμε τις ασφάλειες F1 και το θερμικό F2 με τον διακόπτη προστασίας από υπερφόρτιση και βραχυκύκλωμα Q1.



• **Κύκλωμα ελέγχου.**



Απαιτούμενα όργανα και συσκευές.

- Ένα απλό τριφασικό χειροκίνητο διακόπτη (s).
- Τέσσερις ασφάλειες (F1).
- Τρεις ηλεκτρονόμους (KM).
- Ένα χρονικό ρελέ (KT).
- Ένα θερμικό ρελέ (F2).
- Μία μπουτονιέρα με μπουτόν στάσης και εκκίνησης (Stop-Start).
- Ένα τριφασικό ασύγχρονο κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα (M).
- Μία ενδεικτική λυχνία (h).
- Εύκαμπτους αγωγούς σύνδεσης $2,5\text{mm}^2$ για το κύκλωμα ισχύος και
- Εύκαμπτους αγωγούς σύνδεσης $1,5\text{mm}^2$ για το κύκλωμα ελέγχου.

Σημείωση: Αφού πρόκειται για σύνδεση τριγώνου το θερμικό ρελέ το ρυθμίζουμε στην ένταση $0,58 \times I_{ov}$. Στο ονομαστικό ρεύμα θα το ρυθμίζαμε εάν η σύνδεση ήταν σε αστέρα.

Λειτουργία του αυτοματισμού.

Θέτουμε εντός τον διακόπτη s και πιέζουμε το Start. Το ρεύμα ακολουθεί τον δρόμο $L_1 - F2 - \text{Stop} - \text{Start} - K1T - \text{κλειστή } K5M - \text{πηνίο } K3M - N$ με αποτέλεσμα ο ηλεκτρονόμος K3M να διεγερθεί και να σχηματίσει τον αστέρα στο κύκλωμα ισχύος.

Ταυτόχρονα, το κλείσιμο της ανοιχτής επαφής του K3M διεγείρει τον ηλεκτρονόμο K1M με αποτέλεσμα να τροφοδοτηθεί ο κινητήρας και να λειτουργήσει σε σύνδεση αστέρα.

Αφήνοντας το Start να επιστρέψει στην αρχική ανοιχτή του θέση το κύκλωμα

διατηρείται σε λειτουργία μέσω της βοηθητικής επαφής του K1M.

Μόλις περάσει κάποιος χρόνος από 3-12 sec το χρονικό ρελέ K1T αλλάζει την κατάσταση των επαφών του και ο K3M αποδιεγείρεται ενώ παράλληλα διεγείρεται ο K5M με αποτέλεσμα ο κινητήρας να λειτουργεί τώρα σε σύνδεση τριγώνου.

Για να σταματήσουμε τον κινητήρα πιέζουμε το Stop.

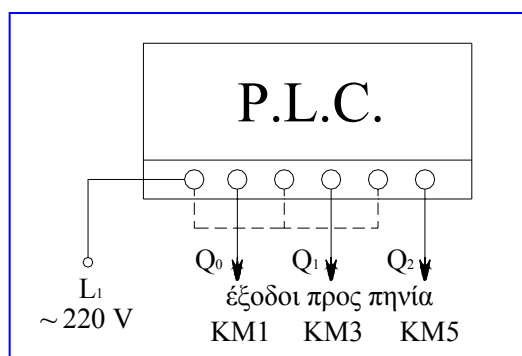
Λειτουργία του αυτοματισμού με P.L.C.

Για τη λειτουργία του αυτοματισμού με P.L.C. μας είναι απαραίτητο μόνο το κύκλωμα ισχύος αφού το κύκλωμα ελέγχου αντικαθίσταται από αυτό. Επειδή η σωστή λειτουργία του αυτοματισμού εξαρτάται από το σωστό προγραμματισμό του P.L.C., και το κύκλωμα ελέγχου αντικατοπτρίζεται σε αυτό, θα πρέπει το πρόγραμμα

| | | | | | | | | |
|-----|----|-------|-----|---|-------|-----|-----|-------|
| 000 | L | I 0.0 | 012 | A | M 0.1 | 024 | AN | Q 0.1 |
| 001 | AN | I 0.1 | 013 | = | Q 0.1 | 025 | A | M 1.3 |
| 002 | = | M 0.0 | 014 | L | I 0.2 | 026 | = | Q 0.2 |
| 003 | L | Q 0.0 | 015 | A | Q 0.1 | 027 | TR0 | |
| 004 | A | Q 0.1 | 016 | O | Q 0.0 | | *S | Q 0.1 |
| 005 | O | I 0.2 | 017 | A | M 0.0 | | *IW | KW 69 |
| 006 | A | M 0.0 | 018 | = | Q 0.0 | | *EQ | M 0.2 |
| 007 | = | M 0.1 | 019 | L | M 0.0 | 028 | TR1 | |
| 008 | LN | Q 0.0 | 020 | A | Q 0.0 | | *S | M 0.3 |
| 009 | O | Q 0.1 | 021 | = | M 0.3 | | *IW | KW 70 |
| 010 | AN | Q 0.2 | 022 | L | M 0.0 | | *EQ | M 1.3 |
| 011 | AN | M 0.2 | 023 | A | Q 0.0 | | | |

να είναι πλήρως βασισμένο στη λογική λειτουργίας του κυκλώματος ελέγχου.

Παραπάτω φαίνεται το πρόγραμμα για την εκκίνηση κινητήρα με Y-Δ και ακολουθεί η συνδεσμολογία του P.L.C..



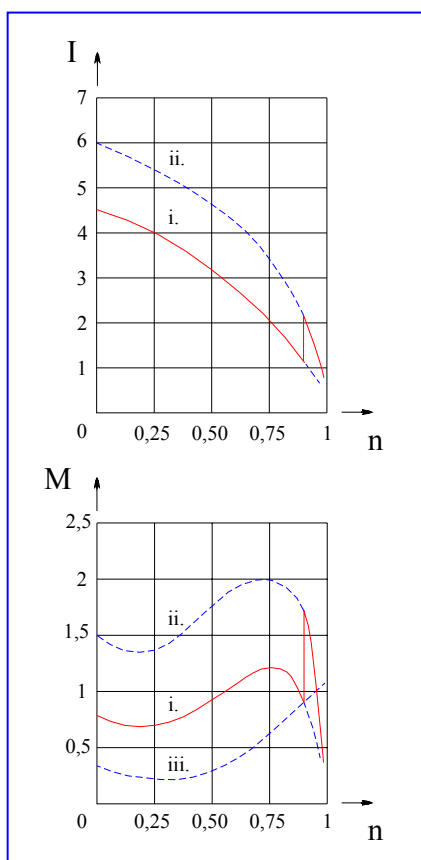
Σχέδιο συνδεσμολογίας του P.L.C..

Σημείωση: Τα ελεύθερα άκρα των πηνίων συνδέονται μαζί για να αποτελέσουν τον ουδέτερο.

**Εκκίνηση ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα βραχυκυκλ. δρομέα με
αντιστάσεις στον στάτη**

Θεωρητικά.

Σ' αυτή τη μέθοδο εκκίνησης προσθέτουμε σε σειρά με τα τυλίγματα του στάτη συμμετρικές αντιστάσεις, για να περιορίσουμε το ρεύμα εκκίνησης. Παρακάτω φαίνονται οι χαρακτηριστικές του κινητήρα $I=f(n)$ και $M=f(n)$ που δείχνουν τις μεταβολές του ρεύματος συναρτήσει της ταχύτητας στο πρώτο και στο δεύτερο βήμα λειτουργίας καθώς και την μεταβολή της ροπής.



Έτσι,

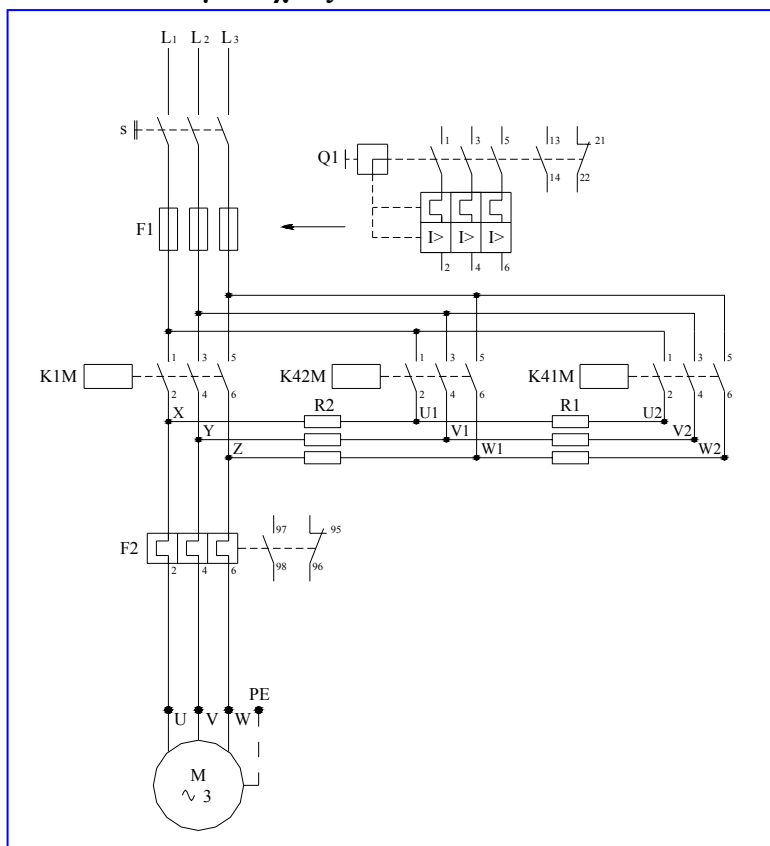
- Στην $I = f(n)$ βλέπουμε:
 - με i. το ρεύμα του κινητήρα στο 1^ο βήμα (με αντίσταση).
 - με ii. το ρεύμα του κινητήρα στο 2^ο βήμα (χωρίς αντίσταση – απευθείας).
- Στην $M = f(n)$ βλέπουμε:
 - με i. τη ροπή του κινητήρα στο 1^ο βήμα (με αντίσταση).
 - με ii. τη ροπή του κινητήρα στο 2^ο βήμα (χωρίς αντίσταση – απευθείας).
 - με iii. τη ροπή του φορτίου του κινητήρα.

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για μηχανές φορτίου με αυξανόμενη ροπή ή ροπή γύρω στο μισό της ονομαστικής ροπής που περιέχουν μεγάλη αδράνειας μηχανές.

Σκοπός της άσκησης είναι να καταλάβει ο σπουδαστής τον τρόπο εκκίνησης με αντιστάσεις στον στάτη και να εξασκηθεί στην συνδεσμολογία του κυκλώματος.

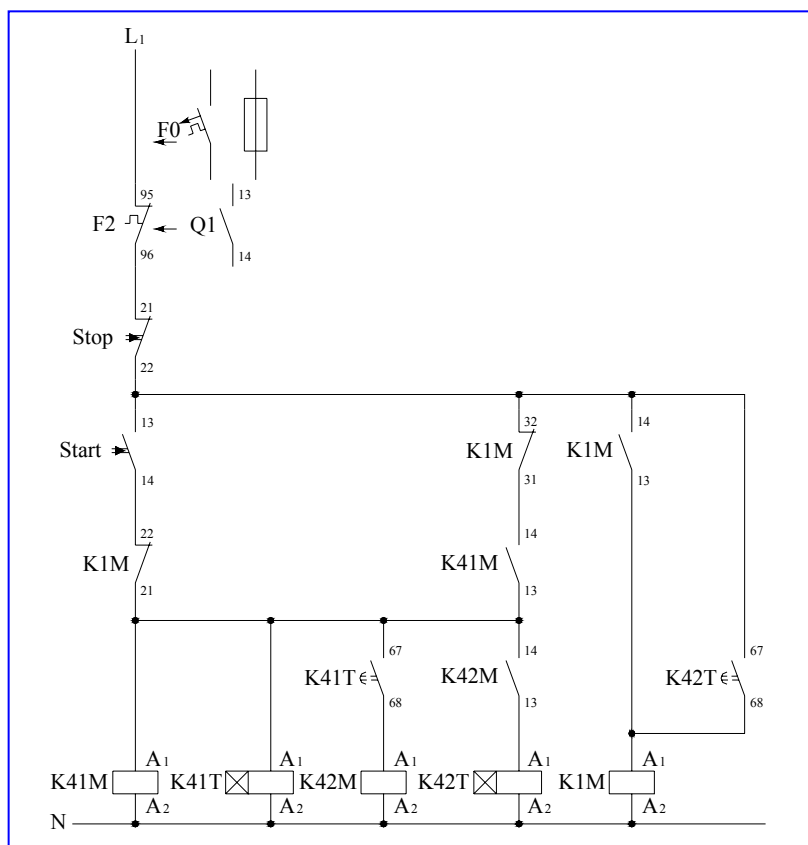
Κοκλώματα.

• **Κύκλωμα ισχύος.**



Βλέπουμε ότι στο διπλανό κύκλωμα ισχύος χρησιμοποιούνται δύο βαθμίδες αντιστάσεων (τρία βήματα) αντί για μία (δύο βήματα) όπως περιγράφετε από τις παραπάνω χαρακτηριστικές, κάτι που έχει σαν αποτέλεσμα την επιπλέον μείωση του ρεύματος κατά την εκκίνηση. Εμείς πάντως για την διεξαγωγή της άσκησης θα υλοποιήσουμε το διπλανό κύκλωμα με μία βαθμίδα αντιστάσεων.

• **Κύκλωμα ελέγχου.**



Απαιτούμενα όργανα και συσκευές.

- Ένα απλό τριφασικό χειροκίνητο διακόπτη (s).
- Τέσσερις ασφάλειες (F1).
- Τρεις ηλεκτρονόμους (KM).
- Δύο χρονικά ρελέ (KT).
- Ένα θερμικό ρελέ (F2).
- Έξι συμμετρικές αντιστάσεις (σε δύο ομάδες των τριών R1 & R2).
- Μία μπουτονιέρα με μπουτόν στάσης και εκκίνησης (Stop-Start).
- Ένα τριφασικό ασύγχρονο κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα (M).
- Εύκαμπτους αγωγούς σύνδεσης 2,5mm² για το κύκλωμα ισχύος και
- Εύκαμπτους αγωγούς σύνδεσης 1,5mm² για το κύκλωμα ελέγχου.

Λειτουργία του αυτοματισμού.

Πιέζουμε το Start και το ρεύμα μέσω των F2 – Stop – Start – κλειστή K1M (22 – 21) διεγείρει τον ηλεκτρονόμο K41M ο οποίος και θέτει, στο κύριο κύκλωμα, σε σειρά με το τύλιγμα του στάτη τις αντιστάσεις R1 και R2 με αποτέλεσμα ο κινητήρας να εκκινεί με μειωμένη τάση.

Αφήνοντας το Start, αυτό επιστρέφει πίσω στην normal open κατάσταση του και τώρα το ρεύμα περνάει από τις F2 – Stop – κλειστή K1M (32 – 31) – τέως ανοιχτή K41M (14 – 13) επαφές.

Παράλληλα διεγείρετε και το χρονικό K41T το οποίο μετά από λίγα δευτερόλεπτα κλείνει την επαφή χρονοκαθυστερήσης (67 – 68) και διεγείρει τον ηλεκτρονόμο K42M για να βγουν εκτός οι R1 αντιστάσεις και να μείνουν μόνο οι R2 σε σειρά με το τύλιγμα του στάτη (προφανώς, η τάση τώρα στον στάτη είναι αυξημένη και ο κινητήρας βρίσκετε στο δεύτερο βήμα εκκίνησης).

Η ανοιχτή επαφή (14 – 13) του K42M κλείνει και διεγείρετε το χρονικό K42T το οποίο μετά από λίγα δευτερόλεπτα κλείνει την επαφή χρονοκαθυστερήσης (67 – 68) και διεγείρει τον ηλεκτρονόμο K1M.

Με τη διέγερση του ηλεκτρονόμου K1M οι βοηθητικές του επαφές αλλάζουν κατάσταση. Οι κλειστές του (22 – 21) και (32 – 31) ανοίγουν και οι ηλεκτρονόμοι και τα χρονικά K41M, K42M, K41T και K42T αντίστοιχα αποδιεγείροντε. Κατά συνέπεια ανοίγει και η βοηθητική (67 – 68) του χρονικού K42T. Επίσης η ανοιχτή του K1M (14 – 13) κλείνει για να μπορέσει το κύκλωμα να έχει συνέχεια.

Τώρα βγήκαν και οι δύο αντιστάσεις R1 & R2 εκτός, ο στάτης βρίσκετε υπό πλήρη τάση και ο κινητήρας στο τρίτο και τελευταίο βήμα εκκίνησης.

Για να σταματήσουμε τον κινητήρα πιέζουμε το Stop.

Παρατήρηση: Επειδή οι αντιστάσεις είναι υπολογισμένες για την βραχύχρονη λειτουργία της εκκίνησης θα πρέπει σε κάθε ξεκίνημα να ελέγχουμε ότι έκλεισε ο

ηλεκτρονόμος αποσυμπλεξής τους. Αν οι αντιστάσεις μείνουν σε λειτουργία περισσότερο χρόνο από τον επιτρεπόμενο θα καούν. Ο επιτρεπόμενος χρόνος λειτουργίας των αντιστάσεων καθορίζει την τιμή και την ισχύ τους και εξαρτάται από το ρεύμα εκκίνησης και την συχνότητα εκκινήσεων του κινητήρα. Γι' αυτό ο αριθμός εκκινήσεων ανά ώρα έχει ουσιώδη σημασία. Οι αντιστάσεις εκκίνησης είναι μεταλλικές (σύρματος ή χυτοσίδηρες) ή ελαίου και η χρησιμοποίησή τους δημιουργεί πρόσθετες θερμικές απώλειες.

Έλεγχος του αυτοματισμού μέσω P.L.C..

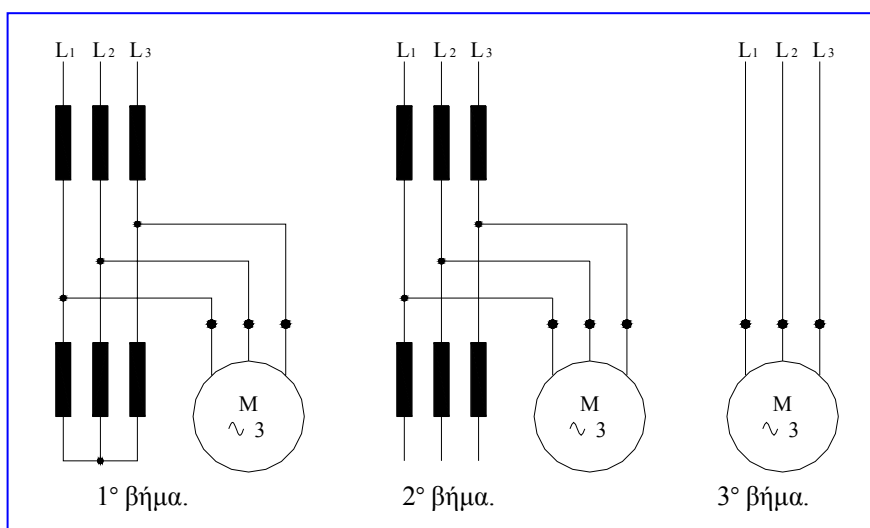
Το πρόγραμμα του PLC για μία βαθμίδα αντιστάσεων στο κύκλωμα ισχύος έχει ως εξής.

| | | | | | |
|-----|----|-------|-----|-----|-------|
| 000 | L | I 0.0 | 008 | = | Q 0.0 |
| 001 | AN | I 0.1 | 009 | L | M 0.1 |
| 002 | = | M 0.0 | 010 | A | M 1.1 |
| 003 | L | I 0.2 | 011 | = | Q 0.1 |
| 004 | O | Q 0.0 | 012 | TR0 | |
| 005 | A | M 0.0 | | *S | M 0.1 |
| 006 | = | M 0.1 | | *IW | KW 30 |
| 007 | L | M 0.1 | | *EQ | M 1.1 |

Εκκίνηση ασύγχρονου κινητήρα βραχοκυκλ. δρομέα
με αυτομετασχηματιστή.

Θεωρητικά.

Ο κινητήρας τροφοδοτείται με μεταβαλλόμενη τάση μέσω ενός αυτομετασχηματιστή ο οποίος βγαίνει εκτός κυκλώματος όταν η εκκίνηση γίνει πλήρης. Η εκκίνηση αποτελείται από τα παρακάτω τρία βήματα.

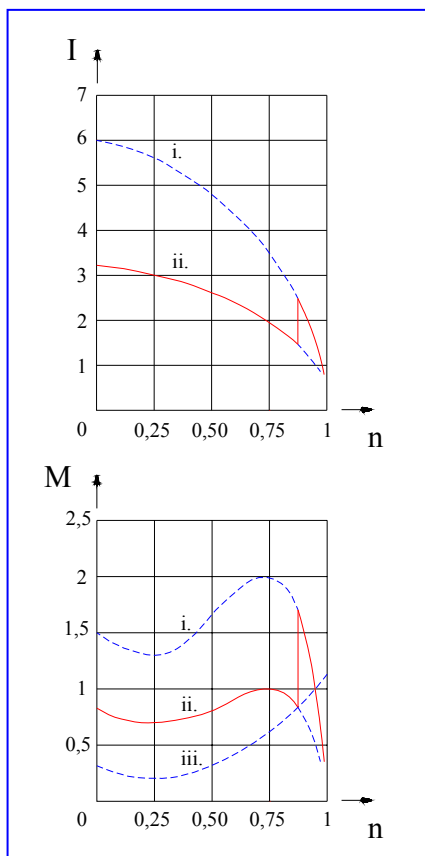


- **Βήμα 1^ο:** Σύνδεση αστέρα όταν κλείσει ο ηλεκτρονόμος της γραμμής. Ο κινητήρας ξεκινάει με μειωμένη τάση.
- **Βήμα 2^ο:** Άνοιγμα του ουδέτερου κόμβου. Ένα τμήμα του τυλίγματος του αυτομετασχηματιστή συνδέεται σε σειρά με κάθε φάση στον στάτη κάνοντας έτσι μια επαγωγική αντίσταση.
- **Βήμα 3^ο:** Ένας τρίτος ηλεκτρονόμος συνδέει τον κινητήρα σε πλήρη τάση δικτύου και κάνει τους δύο ηλεκτρονόμους να ανοίξουν.

Με αυτό τον μηχανισμό, ο κινητήρας δεν μένει χωρίς τάση, το ρεύμα δεν διακόπτεται και οι μεταβατικές καταστάσεις περιορίζονται.

Κατά την διάρκεια του πρώτου βήματος η ροπή μειώνεται ανάλογα με το τετράγωνο της τάσεως και το ρεύμα γραμμής σε όμοια αναλογία αλλά ελαφρώς υψηλότερα λόγω του ρεύματος μαγνητίσεως του αυτομετασχηματιστή ενώ το ρεύμα μέσα σε κάθε τύλιγμα (είναι σαν να λέμε στο δευτερεύον του αυτομετασχηματιστή) μειώνεται μόνο σε σχέση με το λόγο της τάσεως.

Στο δεύτερο βήμα εκκίνησης για να αποφύγουμε κάποιο ενδεχόμενο μεγάλο πέσιμο της επαγωγικής αντίστασης των τυλιγμάτων του αυτομετασχηματιστή, θα πρέπει η επαγωγική αντίσταση να είναι μικρή και προσαρμοσμένη στον κινητήρα. Για να πετύχουμε την κατάλληλη τιμή της επαγωγικής αντίστασης είναι αναγκαίο να βάλουμε ένα αυτομετασχηματιστή του οποίου ο μαγνητικός πυρήνας να έχει κενό αέρα. Το δεύτερο βήμα έχει σαν προορισμό να μετριάξει τις μεταβατικές καταστάσεις που είναι μικρές σε διάρκεια (χρόνος της αλλαγής των λήψεων).



Δίπλα φαίνονται οι χαρακτηριστικές του ρεύματος και της ροπής του κινητήρα συναρτήσει της ταχύτητας. Έτσι,

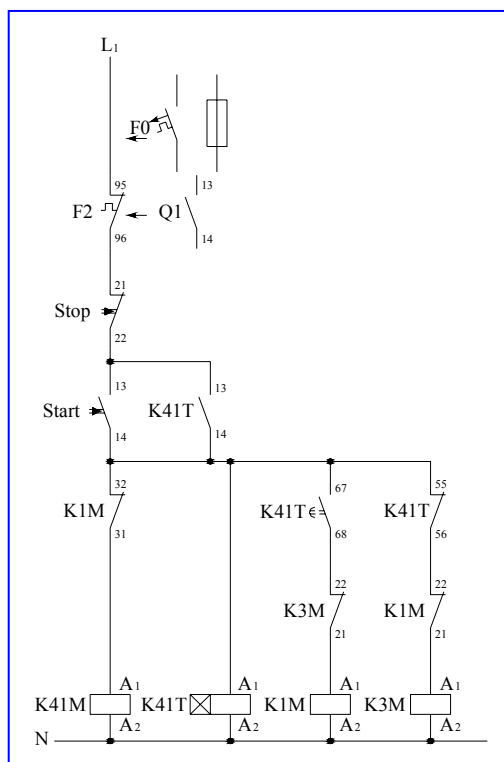
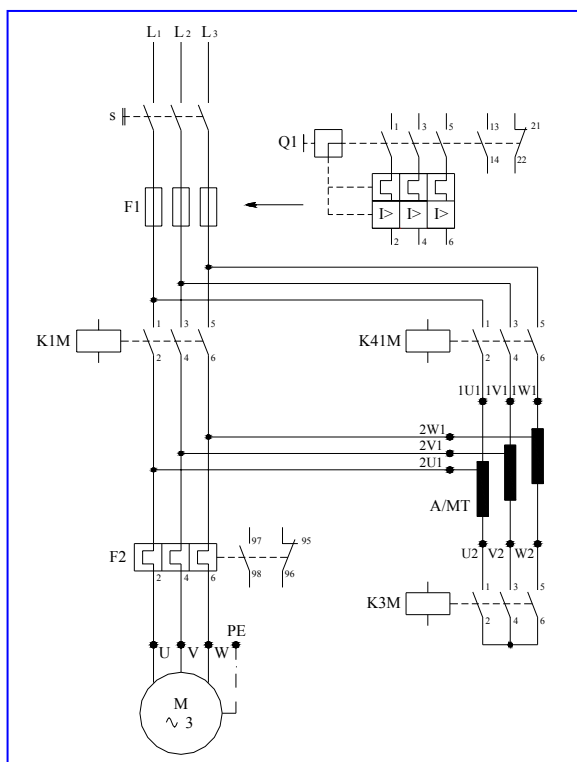
- Στην $I = f(n)$ βλέπουμε:
 - με i. το ρεύμα του κιν. σε απευθείας σύνδεση.
 - με ii. το ρεύμα του κινητήρα με αυτομετ/στή.
- Στην $M = f(n)$ βλέπουμε:
 - με i. τη ροπή του κιν. σε απευθείας σύνδεση.
 - με ii. τη ροπή του κινητήρα με αυτομετ/στή.
 - με iii. τη ροπή του φορτίου του κινητήρα.

Αυτή η μέθοδος εκκίνησης χρησιμοποιείται για υψηλής ισχύος κινητήρες, γιατί συγκρινόμενη με την εκκίνηση με αντιστάσεις αυτή προσφέρει μια μεγάλη ροπή εκκίνησης και ένα χαμηλό ρεύμα κορυφής ενώ παράλληλα προσθέτοντας μερικές διαθέσιμες λήψεις στον αυτομετασχηματιστή η τάση εκκίνησης μπορεί να ρυθμιστεί σε σχέση με το φορτίο.

Σκοπός της άσκησης είναι να καταλάβει ο σπουδαστής την μέθοδο εκκίνησης με αυτομετασχηματιστή και να εξασκηθεί στο κύκλωμα αυτοματισμού της.

Κυκλώματα.

- **Κυκλώματα ισχύος & ελέγχου.**



Απαιτούμενα όργανα και συσκευές.

- Ένα απλό τριφασικό χειροκίνητο διακόπτη (s).
- Τέσσερις ασφάλειες (F1).
- Τρεις ηλεκτρονόμους (KM).
- Ένα χρονικό (KT).
- Ένα ρελέ υπερφόρτισης (F2), (θερμικό).
- Ένα αυτομετασχηματιστή (A/MT).
- Ένα τριφασικό ασύγχρονο κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα (M).
- Μία μπουτονιέρα με μπουτόν στάσης και εκκίνησης (Stop-Start).
- Εύκαμπτους αγωγούς 2,5mm² για το κύκλωμα ισχύος και
- Εύκαμπτους αγωγούς 1,5mm² για το κύκλωμα ελέγχου.

Λειτουργία του αυτοματισμού.

Το μπουτόν Start διεγείρει τον επαφέα του αστέρα K3M, τον επαφέα βήματος K41M και το χρονικό K41T ταυτόχρονα, ενώ το κύκλωμα διατηρείται σε συνέχεια μέσω της K41T/13-14.

Όταν η ρύθμιση του χρονικού K41T παρέλθει, η κλειστή επαφή K41T/55-56 ανοίγει και αποδιεγείρει τον επαφέα του αστέρα K3M και η ανοιχτή επαφή K41T/67-68 κλείνει και διεγείρει τον κύριο επαφέα K1M.

Ακολούθως, η κλειστή επαφή K1M/32-31 ανοίγει και αποδιεγείρει τον K41M ώστε να αποσυνδεθεί ο A/MT και να λειτουργήσει ο κινητήρας στις ονομαστικές του στροφές.

Η επανεκκίνηση του κινητήρα είναι εφικτή μόνο όταν έχει πατηθεί πρώτα το Stop ή, στην περίπτωση μίας υπερφόρτισης όπου ο κινητήρας θα έχει σταματήσει από το άνοιγμα της κλειστής επαφής F2/95-96 του θερμικού.

Έλεγχος του αυτοματισμού μέσω P.L.C..

Το πρόγραμμα του PLC έχει ως εξής.

| | | | | | | | | |
|-----|----|-------|-----|----|-------|-----|-----|-------|
| 000 | L | I 0.0 | 011 | A | M 0.1 | 022 | = | Q 0.0 |
| 001 | AN | I 0.1 | 012 | = | M 0.2 | 023 | TR0 | |
| 002 | = | M 0.0 | 013 | L | M 0.2 | | *S | M 0.1 |
| 003 | L | I 0.2 | 014 | AN | M 1.2 | | *IW | KW 40 |
| 004 | O | Q 0.1 | 015 | = | Q 0.1 | | *EQ | M 1.1 |
| 005 | O | Q 0.2 | 016 | L | M 0.2 | 024 | TR1 | |
| 006 | A | M 0.0 | 017 | AN | Q 0.0 | | *S | M 0.2 |
| 007 | = | M 0.1 | 018 | = | Q 0.2 | | *IW | KW 70 |
| 008 | L | Q 0.1 | 019 | L | M 0.1 | | *EQ | M 1.2 |
| 009 | O | Q 0.2 | 020 | AN | M 1.1 | | | |
| 010 | O | Q 0.0 | 021 | AN | Q 0.2 | | | |

Εκκίνηση τριφασικού επαγωγικού δακτυλιοφόρου κινητήρα με μεταβαλλόμενη αντίσταση στους δακτυλίους του δρομέα.

Θεωρητικά.

Κύριο χαρακτηριστικό αυτών των κινητήρων είναι το γεγονός ότι στον δρομέα τους φέρουν τριφασικό τύλιγμα. Οι τρεις φάσεις του τυλίγματος συνδέονται σε αστέρα ενώ τα τρία ελεύθερα άκρα του αστέρα συνδέονται με τρεις ορειχάλκινους δακτυλίους που είναι στερεωμένοι στον άξονα του δρομέα, εξού και λέγονται δακτυλιοφόροι κινητήρες. Ο στάτης φέρει τριφασική περιέλιξη όπως και ο βραχυκυκλωμένου δρομέα.

Στους δακτυλίους, που είναι ηλεκτρικά μονωμένοι μεταξύ τους και με τον άξονα, εφάπτονται ψήκτρες των οποίων οι ψηκτροθήκες στερεώνονται στο κάλυμμα της μηχανής. Οι ψήκτρες δεν χρησιμεύουν σε τίποτε άλλο παρά μόνο στο να συνδέουν μεταξύ τους τις τρεις φάσεις (τυλίγματα) του δρομέα. Για να μην φθείρονται οι ψήκτρες στην κανονική λειτουργία πολλοί δακτυλιοφόροι κινητήρες είναι εφοδιασμένοι με το λεγόμενο σύστημα ανύψωσης των ψηκτρών. Το σύστημα αυτό έχει την δυνατότητα να βραχυκυκλώνει τους δακτυλίους μεταξύ των προ της ανύψωσης.

Αυτού του είδους οι κινητήρες χρησιμοποιούνται πολύ στις βιομηχανικές εγκαταστάσεις γιατί έχουν τα παρακάτω πλεονεκτήματα.

- Μεγάλη ροπή εκκίνησης.
- Δυνατότητα ρύθμισης της ταχύτητας περιστροφής στην κανονική λειτουργία.
- Δυνατότητα ρύθμισης του ρεύματος εκκίνησης.

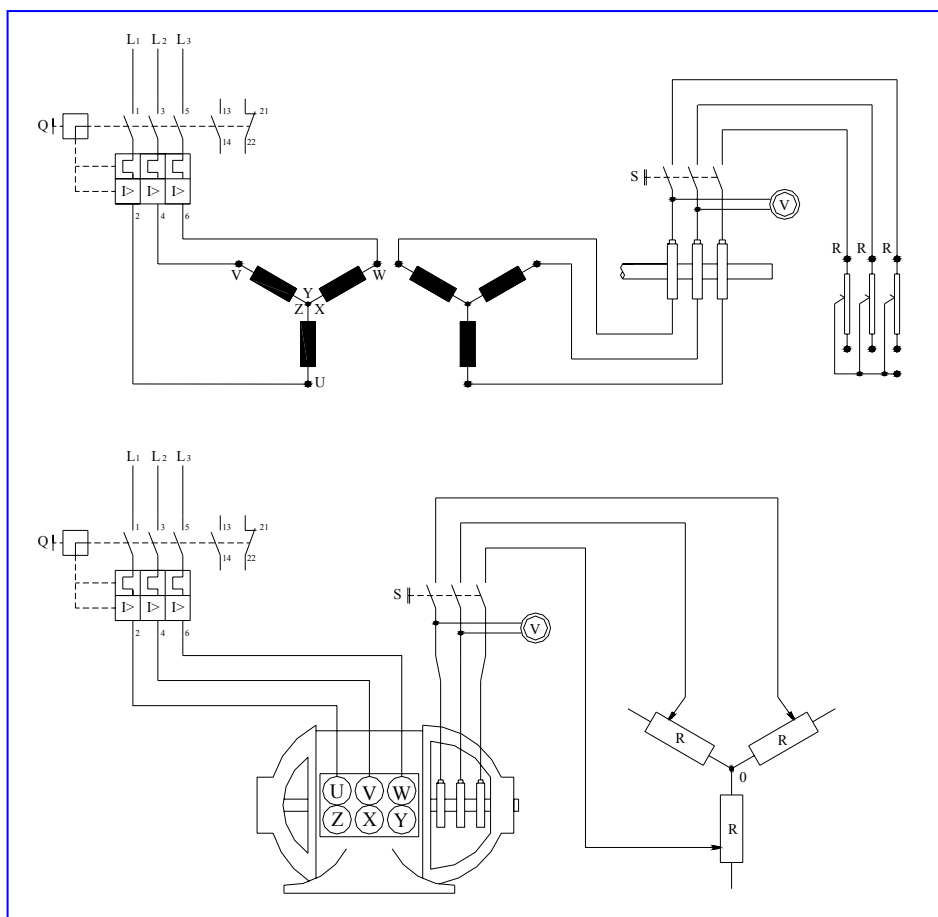
Σκοπός της άσκησης είναι η εκμάθηση του χειροκίνητου τρόπου εκκίνησης του δακτυλιοφόρου κινητήρα.

Απαιτούμενα όργανα και συσκευές.

- Ένα τριφασ. διακόπτη προστασίας από υπερφόρτιση και βραχυκύκλωμα (Q).
- Ένα απλό τριφασικό χειροκίνητο διακόπτη (s).
- Τρεις συμμετρικές αντιστάσεις εκκίνησης (R).
- Ένα τριφασικό ασύγχρονο δακτυλιοφόρο κινητήρα (M).
- Εύκαμπτους αγωγούς $2,5\text{mm}^2$ για το κύκλωμα.

Κυκλώματα.

Παρακάτω βλέπουμε το κύκλωμα της άσκησης (θα λέγαμε από δύο οπτικές γωνίες).



Πειραματικά.

Βάζουμε το σύστημα για την ανύψωση των ψηκτρών σε θέση τέτοια ώστε οι ψήκτρες να εφάπτονται στους δακτυλίους του δρομέα (εδώ δεν υπάρχει).

Βάζουμε την μεγαλύτερη τιμή των αντιστάσεων εκκίνησης στο κύκλωμα. Δηλαδή πρέπει οι δρομείς της αντίστασης να βρεθούν στη θέση όπου οι αντιστάσεις εκκίνησης να είναι συνδεδεμένες σε σειρά και να εισάγουν την μέγιστη αντίσταση στα τυλίγματα των φάσεων του δρομέα.

Κλείνουμε τον διακόπτη του στάτη Q και ο κινητήρας λειτουργεί. Παρατηρούμε ότι περιστρέφεται αργά και αυτό διότι τα ρεύματα στο τύλιγμα του δρομέα είναι μικρά επειδή έχουμε μεγάλη αντίσταση εκκίνησης.

Μεταφέρουμε βαθμωτά τις λήψεις των αντιστάσεων εκκίνησης προς τον κόμβο 0. Η θέση 0 είναι η θέση κανονικής λειτουργίας, διότι όλες οι αντιστάσεις έχουν αφαιρεθεί από το κύκλωμα και τα τυλίγματα των τριών φάσεων του δρομέα έχουν ήδη βραχυκυκλωθεί.

Για να σταματήσουμε τον κινητήρα ανοίγουμε τον διακόπτη Q.

Επαναφέρουμε τις αντιστάσεις εκκίνησης στη θέση εκείνη στην οποία παρουσιάζουν στο κύκλωμα του δρομέα την μεγαλύτερη αντίσταση.

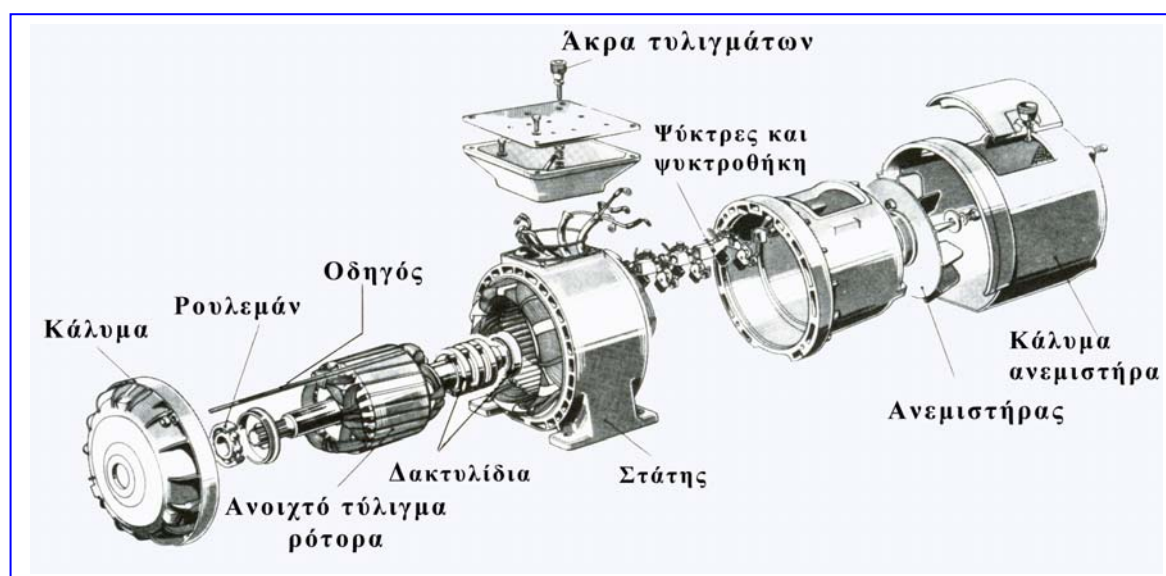
Παρατήρηση: Η ρύθμιση της ταχύτητας περιστροφής στους δακτυλιοφόρους κινητήρες επιτυγχάνεται με μια ρυθμιστική τριφασική αντίσταση όμοια με εκείνη που χρησιμοποιείται για την εκκίνηση με την διαφορά όμως ότι όταν μια τριφασική αντίσταση πρόκειται να χρησιμοποιηθεί σαν ρυθμιστής στροφών υπολογίζεται κατά τρόπο ώστε να μην καταστραφεί από υπερθέρμανση όταν θα βρεθεί στο κύκλωμα κατά τη λειτουργία του κινητήρα.

Οι αντιστάσεις εκκίνησης είναι μεταλλικές (σύρματος ή χυτοσίδηρες) με αέρα ή λάδι ή άμμο σαν ψυκτικό μέσο.

Σε κινητήρες μεγάλης ισχύος ή υψηλής τάσεως χρησιμοποιούνται πολύ συχνά αντιστάσεις ηλεκτρολυτικές. Ο ηλεκτρολύτης είναι διάλυμα καθαρής σόδας (Na_2CO_3) σε νερό.

Τριφασικοί επαγωγικοί κινητήρες με δακτυλίδια.**Αυτόματη εκκίνηση με αντιστάσεις στο τύλιγμα του δρομέα.****Θεωρητικά:**

Η παραγωγή Η.Ε.Δ. και ρεύματος, εξ' επαγωγής, οφείλεται πάντοτε στην ταχύτητα μεταβολής της μαγνητικής ροής, δηλ. $\varepsilon = -d\Phi/dt$. Στην περίπτωση μας η ταχύτητα μεταβολής της μαγνητικής ροής στους αγωγούς του δρομέα όπου και παράγεται η Η.Ε.Δ. ε_2 και το ρεύμα I_2 εξ' επαγωγής, είναι ίση προς την σχετική ταχύτητα του δρομέα ως προς την ταχύτητα του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου του στάτη.



Ανατομία δακτυλιοφόρου επαγωγικού κινητήρα.

Το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο Φ_1 του στάτη που παράγεται από το ρεύμα I_1 του στάτη συχνότητας f_1 και το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο του δρομέα Φ_2 που παράγεται από το ρεύμα I_2 συχνότητας f_2 συνδέονται με την παρακάτω σημαντική σχέση

$$f_2 = s \cdot f_1 \quad \text{όπου} \quad s = \frac{n_s - n}{n_s}$$

,όπου διακρίνουμε τα παρακάτω.

- Για μηδενική ταχύτητα ($n=0$), δηλαδή τη στιγμή της εκκίνησης, θα έχουμε:

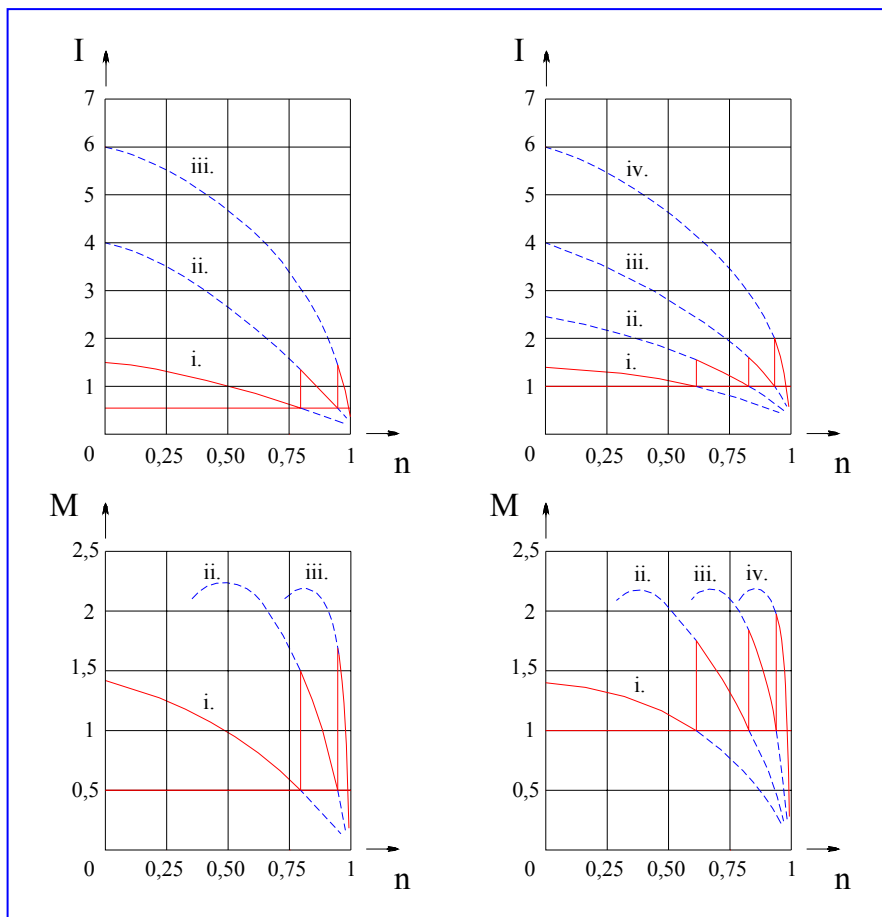
$$s = \frac{n_s - 0}{n_s} = 1 \Rightarrow f_2 = 1 \cdot f_1 \Leftrightarrow f_2 = f_1 = 50 \text{ Hz}$$

- Για $s = 5\%$ θα έχουμε: $f_2 = \frac{5}{100} \cdot f_1 = \frac{5}{100} \cdot 50 = 2,5 \text{ Hz}$, δηλ. ρεύμα χαμηλής συχνότητας.

- Για $s = 0$ θα έχουμε: $s = 0 = \frac{n_s - n}{n_s} \Leftrightarrow 0 = n_s - n \Leftrightarrow n_s = n$ και

$f_2 = s \cdot f_1 = 0 \cdot f_1 = 0$, δηλ. σ' αυτή την περίπτωση συνεχές ρεύμα και συνεπώς σύγχρονη μηχανή.

Παρακάτω βλέπουμε τις χαρακτηριστικές ρεύματος και ροπής τις μεθόδου. Οι αριστερές είναι για εκκίνηση τριών βημάτων ,δηλαδή με δύο βαθμίδες αντιστάσεων ενώ οι δεξιές είναι για εκκίνηση τεσσάρων βημάτων ,δηλαδή με τρεις βαθμίδες αντιστάσεων.



Έτσι αριστερά,

- Στην $I = f(n)$ βλέπουμε:
 - με i. το ρεύμα του κινητήρα στο 1^ο βήμα (με δύο βαθμίδες αντιστάσεων).
 - με ii. το ρεύμα του κινητήρα στο 2^ο βήμα (με μία βαθμίδα αντιστάσεων).
 - με iii. το ρεύμα του κινητήρα στο 3^ο βήμα (χωρίς αντιστάσεις – απευθείας).

απευθείας).

- Στην $M = f(n)$ βλέπουμε:
 - με i. τη ροπή του κινητήρα στο 1^ο βήμα (με δύο βαθμίδες αντιστάσεων).
 - με ii. τη ροπή του κινητήρα στο 2^ο βήμα (με μία βαθμίδα αντιστάσεων).
 - με iii. τη ροπή του κινητήρα στο 3^ο βήμα (χωρίς αντιστάσεις – απευθείας).

και δεξιά,

- Στην $I = f(n)$ βλέπουμε:
 - με i. το ρεύμα του κινητήρα στο 1^ο βήμα (με τρεις βαθμίδες αντιστάσεων).
 - με ii. το ρεύμα του κινητήρα στο 2^ο βήμα (με δύο βαθμίδες αντιστάσεων).
 - με iii. το ρεύμα του κινητήρα στο 3^ο βήμα (με μία βαθμίδα αντιστάσεων).
 - με iv. το ρεύμα του κινητήρα στο 4^ο βήμα (χωρίς αντιστάσεις – απευθείας).

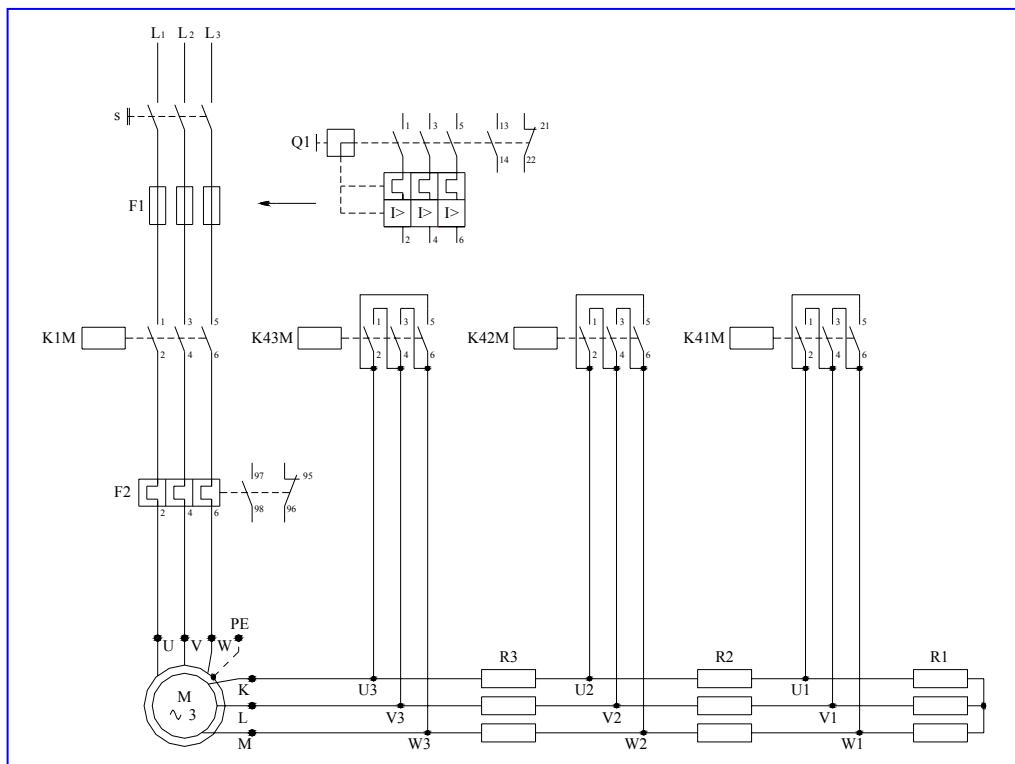
απευθείας).

- Στην $M = f(n)$ βλέπουμε:
 - με i. τη ροπή του κινητήρα στο 1^ο βήμα (με τρεις βαθμίδες αντιστάσεων).

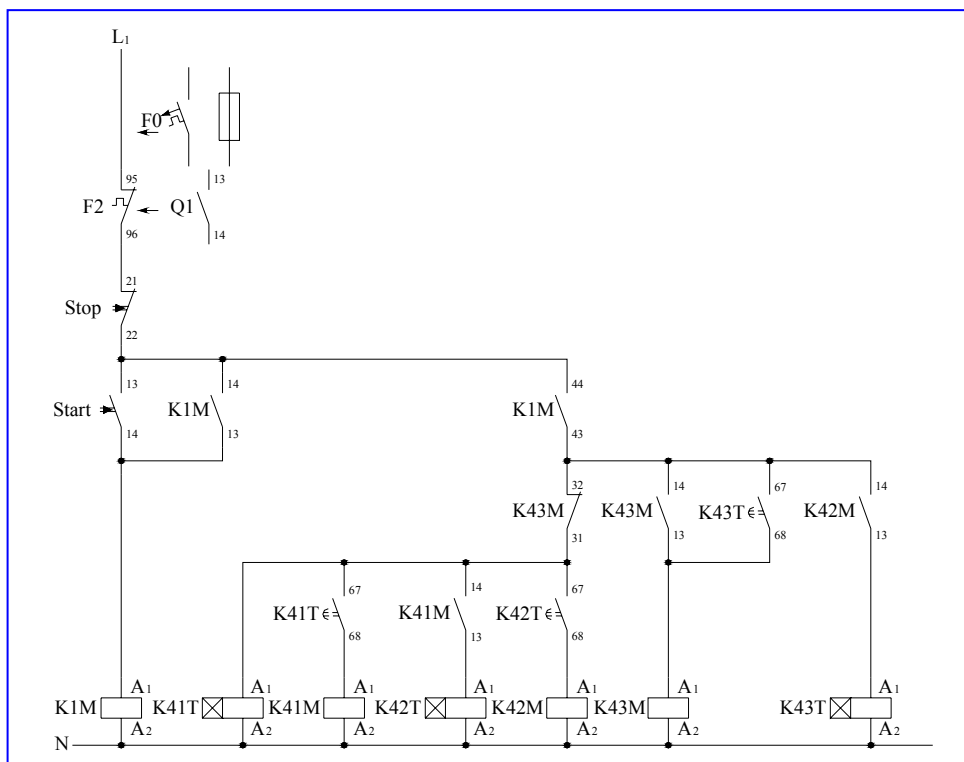
- με ii. τη ροπή του κινητήρα στο 2^ο βήμα (με δύο βαθμίδες αντιστάσεων).
- με iii. τη ροπή του κινητήρα στο 3^ο βήμα (με μία βαθμίδα αντιστάσεων).
- με iv. τη ροπή του κινητήρα στο 4^ο βήμα (χωρίς αντιστάσεις – απευθείας).

Κοκλώματα.

- **Κύκλωμα ισχύος.**



- **Κύκλωμα ελέγχου.**



Σημείωση: Η άσκηση θα πραγματοποιηθεί με δύο βαθμίδες αντιστάσεων αντί τριών που φαίνετε στα κυκλώματα.

Απαιτούμενα όργανα και συσκευές.

- Ένα απλό τριφασικό χειροκίνητο διακόπτη (s).
- Τέσσερις ασφάλειες (F1).
- Τέσσερις ηλεκτρονόμους (KM).
- Τρία χρονικά ρελέ (KT).
- Ένα θερμικό ρελέ (F2).
- Εννέα συμμετρικές αντιστάσεις (σε τρεις ομάδες των τριών R1 R2 & R3).
- Μία μπουτονιέρα με μπουτόν στάσης και εκκίνησης (Stop-Start).
- Ένα τριφασικό ασύγχρονο δακτυλιοφόρο κινητήρα (M).
- Εύκαμπτους αγωγούς σύνδεσης 2,5mm² για το κύκλωμα ισχύος και
- Εύκαμπτους αγωγούς σύνδεσης 1,5mm² για το κύκλωμα ελέγχου.

Λειτουργία του αυτοματισμού.

Πατώντας το Start διεγείρετε ο ηλεκτρονόμος K1M και οι ανοιχτές βοηθητικές του επαφές K1M/14-13 και /44-43 κλείνουν. Η K1M/14-13 διατηρεί το κύκλωμα σε συνέχεια ενώ η /44-43 διεγείρει το χρονικό K41T. Παράλληλα, τροφοδοτείτε ο κινητήρας έχοντας και τις τρεις βαθμίδες αντιστάσεων R1, R2, R3 σε σειρά με το τύλιγμα του δρομέα.

Όταν η ρύθμιση του χρονικού K41T παρέλθει, η ανοιχτή του επαφή χρονοκαθυστέρησης K41T/67-68 κλείνει και διεγείρει τον επαφέα βήματος K41M ο οποίος βγάζει εκτός την βαθμίδα αντιστάσεων R1 και παράλληλα ,μέσω της ανοιχτής βοηθητικής επαφής του K41M/14-13 που κλείνει, διεγείρει το χρονικό K42T.

Όταν η ρύθμιση του χρονικού K42T παρέλθει, η ανοιχτή του επαφή χρονοκαθυστέρησης K42T/67-68 κλείνει και διεγείρει τον επαφέα βήματος K42M ο οποίος βγάζει εκτός την βαθμίδα αντιστάσεων R2 και παράλληλα ,μέσω της ανοιχτής βοηθητικής επαφής του K42M/14-13 που κλείνει, διεγείρει το χρονικό K43T.

Όταν η ρύθμιση του χρονικού K43T παρέλθει, η ανοιχτή του επαφή χρονοκαθυστέρησης K43T/67-68 κλείνει και διεγείρει τον επαφέα του τελικού βήματος K43M ο οποίος βγάζει εκτός την τελευταία βαθμίδα αντιστάσεων R3 με αποτέλεσμα ο κινητήρας να δουλεύει στις ονομαστικές του στροφές. Ο K43M παραμένει διεγερμένος μέσω της ανοιχτής βοηθητικής επαφής του K43M/14-13 που έχει κλείσει.

Οι επαφείς βήματος K41M και K42M και τα χρονικά K41T, K42T και K43T απόδιδεγείρονται μέσω της βοηθητικής κλειστής επαφής K43M/32-31 που ανοίγει.

Η επανεκκίνηση του κινητήρα είναι εφικτή μόνο όταν έχει πατηθεί πρώτα το Stop ή, στην περίπτωση μίας υπερφόρτισης όπου ο κινητήρας θα έχει σταματήσει από το άνοιγμα της κλειστής επαφής F2/95-96 του θερμικού.

Έλεγχος του αυτοματισμού μέσω P.L.C..

Το πρόγραμμα του PLC για δύο βαθμίδες αντιστάσεων στο κύκλωμα ισχύος έχει ως εξής.

| | | | | | | | | |
|-----|----|-------|-----|---|-------|-----|-----|-------|
| 000 | L | I 0.0 | 010 | = | M 0.1 | 020 | A | Q 0.0 |
| 001 | AN | I 0.1 | 011 | L | M 0.1 | 021 | = | Q 0.2 |
| 002 | = | M 0.0 | 012 | A | M 1.1 | 022 | TR0 | |
| 003 | L | I 0.2 | 013 | = | Q 0.1 | | *S | M 0.1 |
| 004 | O | Q 0.0 | 014 | L | M 0.1 | | *IW | KW 50 |
| 005 | A | M 0.0 | 015 | A | Q 0.1 | | *EQ | M 1.1 |
| 006 | = | Q 0.0 | 016 | = | M 0.2 | 023 | TR1 | |
| 007 | L | M 0.0 | 017 | L | M 1.2 | | *S | M 0.2 |
| 008 | A | Q 0.0 | 018 | O | Q 0.2 | | *IW | KW 50 |
| 009 | AN | Q 0.2 | 019 | A | M 0.0 | | *EQ | M 1.2 |

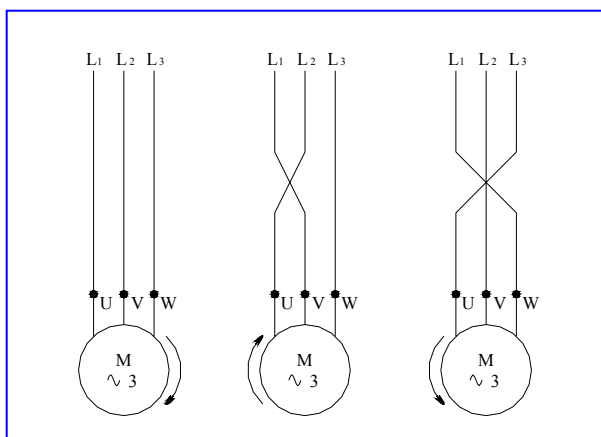
| Συνοπτικά χαρακτηριστικά διαφόρων μεθόδων εκκίνησης. | | | | | |
|---|---|---|---|--|---|
| | Κινητήρες βραχυκυκλωμένου δρομέα. | | | | Δακτυλιοφόροι κινητήρες. |
| | Απευθείας εκκίνηση. | Εκκίνηση Υ-Δ. | Εκκίνηση με αντιστάσεις στον στάτη. | Εκκίνηση με Α/ΜΤ. | Εκκίνηση με αντιστάσεις στον δρομέα. |
| Αρχικό ρεύμα εκκίνησης. | • 4 έως 8 φορές το I_{ov} | • 1.3 έως 2.6 φορές το I_{ov} | • 4.5 φορές το I_{ov} | • 1.7 έως 4 φορές το I_{ov} | • < 2.5 φορές το I_{ov} |
| Αρχική ροπή εκκίνησης. | • 0.6 έως 1.5 φορές η T_{ov} | • 0.2 έως 0.5 φορές η T_{ov} | • 0.6 έως 0.85 φορές η T_{ov} | • 0.4 έως 0.85 φορές η T_{ov} | • < 2.5 φορές η T_{ov} |
| Πλεονεκτήματα. | <ul style="list-style-type: none"> • Απλή και αδόπανη μέθοδος. • Μεγάλη ροπή εκκίνησης. | <ul style="list-style-type: none"> • Σχετικά φθηνή μέθοδος. | <ul style="list-style-type: none"> • Δυνατότητα ρύθμισης των τιμών εκκίνησης. • Κατά την εκκίνηση δεν συνδέεται απευθείας στο δίκτυο. | <ul style="list-style-type: none"> • Έχει καλή ροπή αναλογικά με το ρεύμα. • Δυνατότητα ρύθμισης των τιμών εκκίνησης. • Κατά την εκκίνηση δεν συνδέεται απευθείας με το δίκτυο. | <ul style="list-style-type: none"> • Έχει πολύ καλή ροπή αναλογικά με το ρεύμα. • Δυνατότητα ρύθμισης των τιμών εκκίνησης. • Κατά την εκκίνηση δεν συνδέεται απευθείας με το δίκτυο. |
| Μειονεκτήματα. | <ul style="list-style-type: none"> • Πολύ μεγάλο ρεύμα & ροπή εκκίνησης. • Έχει γρήγορη και απότομη εκκίνηση. | <ul style="list-style-type: none"> • Χαμηλή ροπή εκκίνησης. • Δεν υπάρχει δυνατότητα ρύθμισης. • Συνδέεται στο δίκτυο όταν αλλάζει συνδεσμολογία | <ul style="list-style-type: none"> • Μικρή ελάττωση ρεύματος εκκίνησης. • Απαιτούνται αντιστάσεις. | <ul style="list-style-type: none"> • Απαιτείται ένας ακριβός Α/ΜΤ. | <ul style="list-style-type: none"> • Είναι περισσότερο δαπανηροί. • Απαιτούνται αντιστάσεις. |
| Συνηθισμένος χρόνος εκκίνησης. | • 2 με 3 sec. | • 3 με 7 sec. | • 7 με 12 sec. | • 7 με 12 sec. | <ul style="list-style-type: none"> • 2.5 sec. για εκκίνηση τριών βημάτων. • 5 sec. για εκκίνηση τεσσάρων και πέντε βημάτων. |
| Τυπικές εφαρμογές. | <ul style="list-style-type: none"> • Μικρές μηχανές που εκκινούν με πλήρες φορτίο. | <ul style="list-style-type: none"> • Μηχανές που εκκινούν χωρίς φορτίο. • Μικροί ανεμιστήρες και φυγοκεντρικές αντλίες. | <ul style="list-style-type: none"> • Μηχανές μεγάλης αδράνειας χωρίς ιδιαίτερη ροπή, ή προβλήματα με το ρεύμα εκκίνησης. | <ul style="list-style-type: none"> • Μηχανές μεγάλης ισχύος ή μεγάλης αδράνειας όταν η ελάττωση του ρεύματος εκκίνησης είναι ένας σημαντικός παράγοντας. | <ul style="list-style-type: none"> • Μηχανές που εκκινούν προοδευτικά με πλήρες φορτίο. |

Αλλαγή φοράς περιστροφής ασύγχρονου κινητήρα**βραχυκυκλωμένου δρομέα.****(με και χωρίς μεσολάβηση Stop)****Θεωρητικά.**

Για να αλλάξουμε φορά περιστροφής σ' ένα κινητήρα, πρέπει να αλλάξουμε την φορά περιστροφής του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου. Για να αλλάξουμε την φορά περιστροφής του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου αρκεί να αντιμεταθέσουμε δύο από τις τρεις φάσεις R,S,T. Δείτε την διπλανή εικόνα.

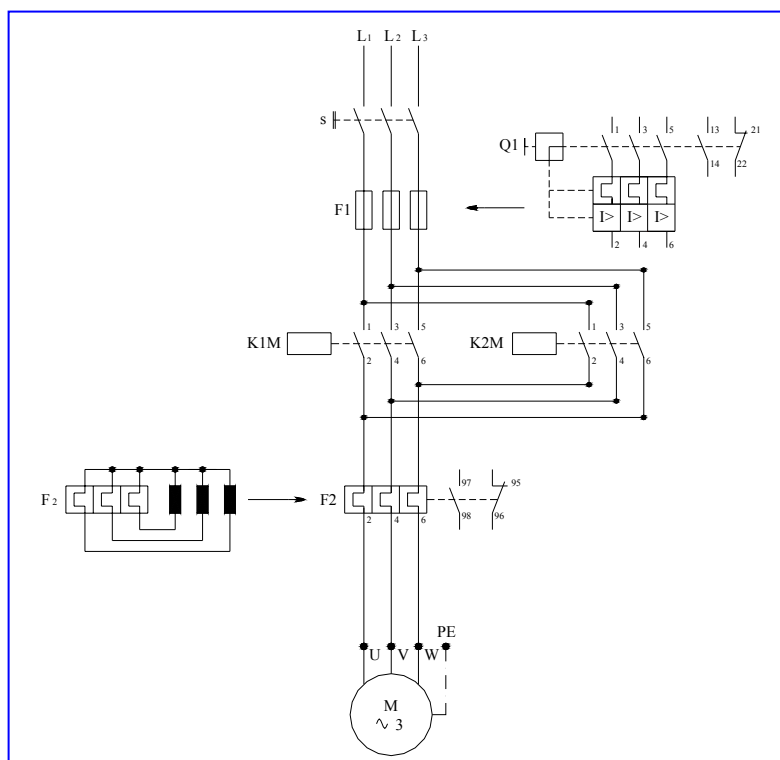
Στην αυτόματη αλλαγή περιστροφής η αντιμετάθεση των δύο φάσεων γίνεται μεταξύ των δύο ηλεκτρονόμων.

Σκοπός της άσκησης είναι να καταλάβει ο σπουδαστής πως γίνεται η αλλαγή φοράς περιστροφής και τι είναι η ηλεκτρική και η μηχανική μανδάλωση.

**Κοκλώματα.**

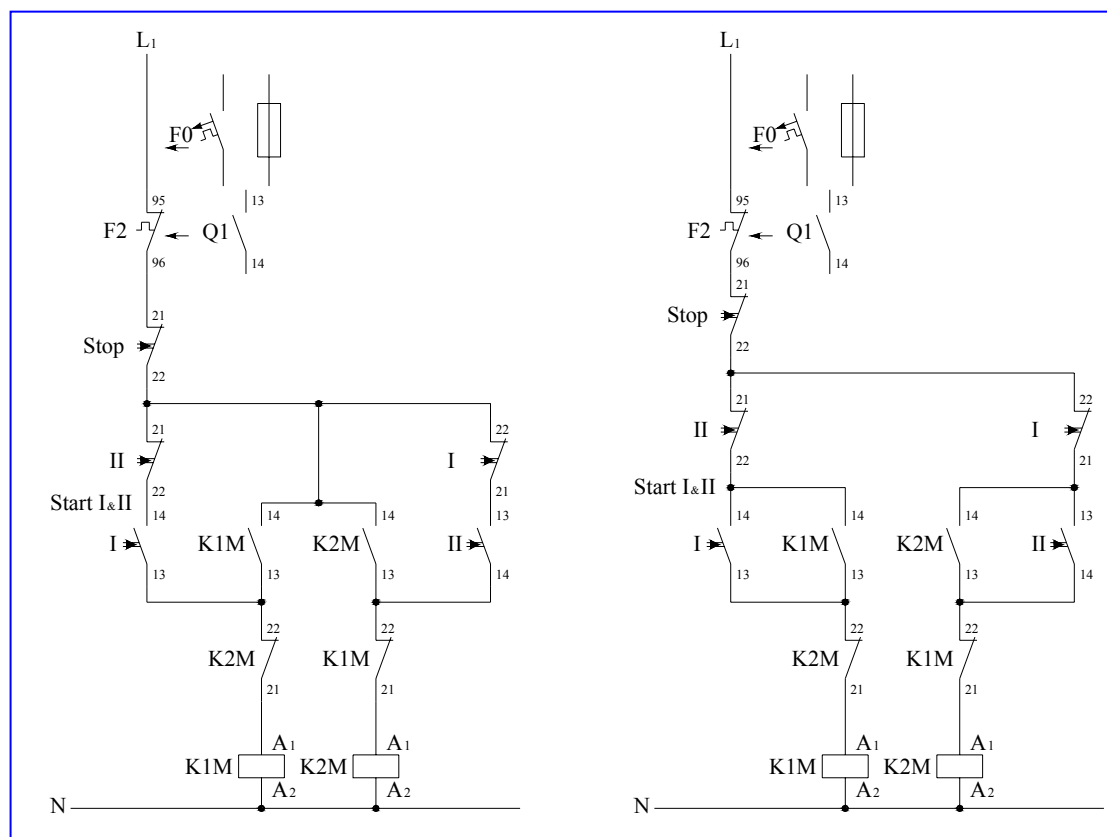
- **Κύκλωμα ισχύος.**

Βλέπουμε ότι το κύκλωμα ισχύος μπορεί να προστατευθεί είτε από συνδυασμό ασφαλειών με θερμικό, είτε μόνο από τον διακόπτη προστασίας Q1, είτε από συνδυασμό ασφαλειών με θερμικό συνδεδεμένο στο κύκλωμα μέσω μετασηματιστή εντάσεως.



- **Κυκλώματα ελέγχου.**

Το αριστερό κύκλωμα αλλάζει τη φορά περιστροφής με μεσολάβηση του Stop, δηλαδή αφού σταματήσει ο κινητήρας, ενώ το δεξιό χωρίς διαμεσολάβηση Stop, δηλαδή ενώ ο κινητήρας βρίσκεται ακόμα σε λειτουργία.



Λειτουργία του αυτοματισμού.

Πατώντας το Start I διεγείρεται ο επαφέας K1M και ο κινητήρας περιστρέφεται δεξιόστροφα. Η ανοιχτή βοηθητική επαφή K1M/14-13 που έκλεισε διατηρεί τώρα το κύκλωμα σε συνέχεια ενώ η κλειστή K1M/22-21 που άνοιξε αποτρέπει την διέγερση του K2M. Το τελευταίο, δηλαδή

Πατώντας το Start II διεγείρεται ο επαφέας K2M και ο κινητήρας αλλάζει φορά περιστροφής.

Το αν η αλλαγή φοράς περιστροφής γίνει με ή χωρίς τη μεσολάβηση του Stop εξαρτάτε αποκλειστικά από τη συνδεσμολογία του κυκλώματος ελέγχου.

Σημείωση: Η εξασφάλιση της μη διέγερσης κάποιου ηλεκτρονόμου από κάποιον άλλο που βρίσκετε είδη σε διέγερση αποτελεί την ηλεκτρική μανδάλωση.

Επίσης, εκτός της ηλεκτρική μανδάλωση υπάρχει και η μηχανική μανδάλωση όπου οι ηλεκτρονόμοι συνδέονται μηχανικά.

Απαιτούμενα όργανα και συσκευές.

- Ένα απλό τριφασικό χειροκίνητο διακόπτη (s).
- Τέσσερις ασφάλειες (F1).

- Δύο ηλεκτρονόμους (KM).
- Ένα θερμικό ρελέ (F2).
- Μία μπουτονιέρα με μπουτόν στάσης και εκκίνησης (Stop-Start).
- Ένα τριφασικό ασύγχρονο κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα (M).
- Εύκαμπτους αγωγούς σύνδεσης 2,5mm² για το κύκλωμα ισχύος και
- Εύκαμπτους αγωγούς σύνδεσης 1,5mm² για το κύκλωμα ελέγχου.

Έλεγχος του αυτοματισμού με P.L.C..

Παρακάτω είναι το πρόγραμμα για την αλλαγή φοράς περιστροφής.

| | | |
|-----|----|-------|
| 000 | L | I 0.0 |
| 001 | A | I 0.1 |
| 002 | = | M 0.0 |
| 003 | L | I 0.2 |
| 004 | AN | I 0.3 |
| 005 | O | Q 0.0 |
| 006 | AN | Q 0.1 |
| 007 | A | M 0.0 |
| 008 | = | Q 0.0 |
| 009 | L | I 0.3 |
| 010 | AN | I 0.2 |
| 011 | O | Q 0.1 |
| 012 | AN | Q 0.0 |
| 013 | A | M 0.0 |
| 014 | = | Q 0.1 |

Ηλεκτρική πέδηση Ι.**Δυναμική πέδηση ασύγχρονου κινητήρα
βραχυκυκλωμένου δρομέα.****Θεωρητικά.**

Η αυξανόμενη χρήση του ηλεκτρισμού έχει επιφέρει την ανάγκη για περισσότερη λειτουργία των κινητήρων σε μεγάλες ταχύτητες. Αυτοί οι κινητήρες συχνά απαιτούν ταχύτερα μέσα σταματήματος, απ' ό,τι επιτυγχάνεται με την μέθοδο αποσύνδεσης της ισχύος του κινητήρα. Όταν μηχανήματα απαιτούν περισσότερους κινητήρες και ακριβέστερο κοντρόλ και όταν υπάρχει λιγότερος χρόνος διαθέσιμος, τότε η αναγκαιότητα να προνοήσουμε μεθόδους γρήγορου σταματήματος γίνεται ακόμη μεγαλύτερη. Οι ηλεκτρικές πεδήσεις, καλούμενες επίσης και μαγνητικές πεδήσεις τριβής και μηχανικές πεδήσεις είναι σε χρήση από την αρχή του 19^{ου} αιώνα.

➤ Ηλεκτρική πέδη σιαγόνων.

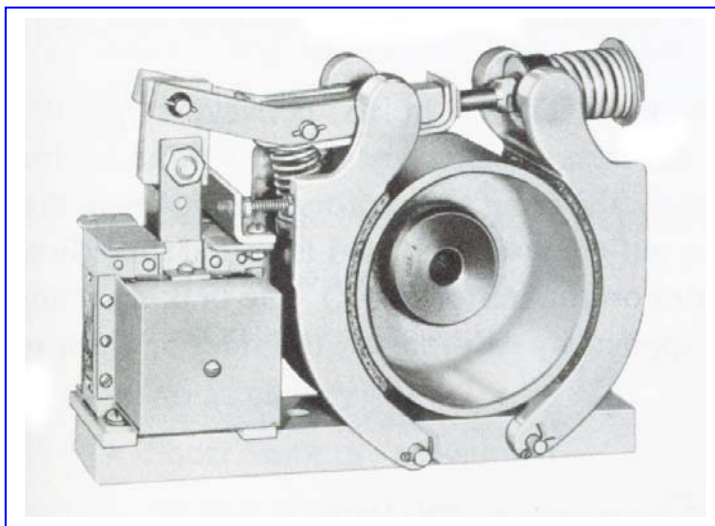
Μια ηλεκτρική πέδη γενικά αποτελείται από δύο επιφάνειες τριβής (σιαγόνες) οι οποίες είναι κατασκευασμένες έτσι ώστε να αγκαλιάζουν ένα τύμπανο συνδεδεμένο στον άξονα του κινητήρα. Η ένταση του ελατηρίου κρατάει τις σιαγόνες πάνω στο τύμπανο και επέρχεται η πέδηση σαν αποτέλεσμα της τριβής μεταξύ των σιαγόνων και του τυμπάνου. Ένας σωληνοειδής μηχανισμός απαιτείται για να απελευθερώνει τις σιαγόνες.

Σε μια μαγνητική λειτουργούσα πέδη οι σιαγόνες κρατιούνται σε μια ελεύθερη θέση με ένα μαγνήτη, τόσο χρόνο όσο το μαγνητικό πηνίο είναι ενεργοποιημένο.

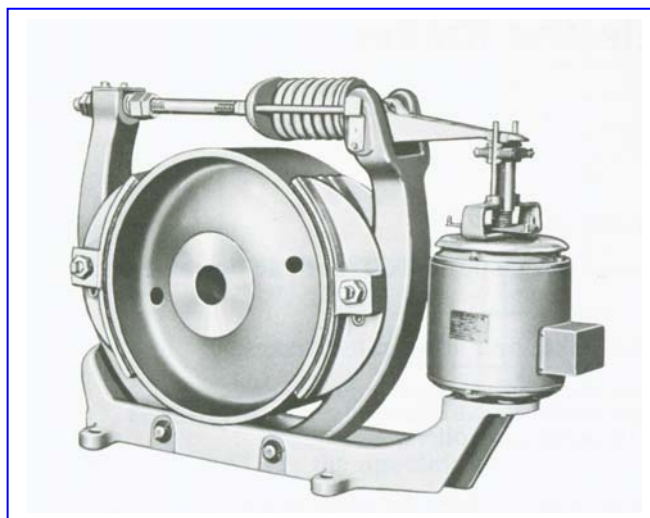
Εάν σε κάποια στιγμή ένα σφάλμα διακόψει την ισχύ ή υπάρχει απώλεια ισχύος, τότε οι σιαγόνες πέδης εφαρμόζονται ακαριαία και δίδουν ένα γρήγορο σταμάτημα. Τα άκρα του πηνίου μιας μαγνητικής πέδης εναλλασσομένου ρεύματος συνδέονται κανονικά στα άκρα του κινητήρα. Μόλις τα άκρα του κινητήρα πάρουν τάση, 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. Μια πέδη κατάλληλη για τέτοια υπηρεσία δείχνει



το παρακάτω σχέδιο. Αυτή η πέδη λειτουργεί με ένα κατακόρυφα τοποθετημένο κινητήρα ροπής. Όταν η ισχύς εφαρμοστεί σ' αυτόν τον κινητήρα ροπής πέδης, ο άξονας του κινητήρα περιστρέφει και σηκώνει τον λειτουργούντα μοχλό του ανυψωτήρα και απελευθερώνει τον άξονα του κύριου κινητήρα. Όταν η πέδη είναι πλήρως ελευθερωμένη ο κινητήρας λειτουργεί κανονικά. Όταν διακοπεί η ισχύς πέδης, μια δυνατή συμπίεση ελατηρίου επαναφέρει τον ανυψωτικό μοχλό έτσι ώστε η πέδηση πετυχαίνεται γρήγορα.

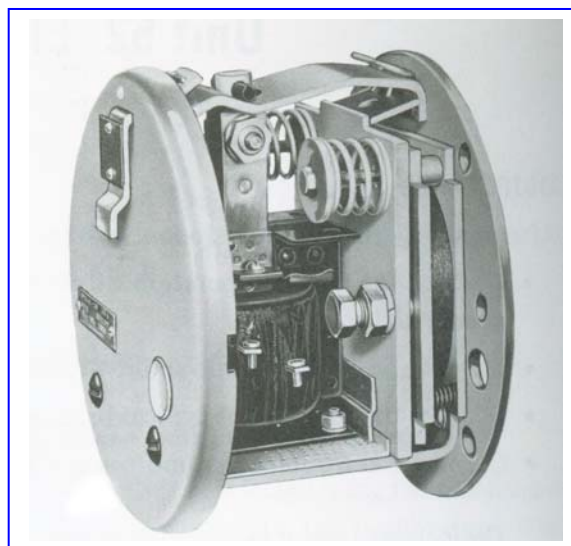


➤ **Ηλεκτρική πέδη μαγνητικού δίσκου.**

Γενικά, οι πέδες δίσκων μπορούν να εγκατασταθούν όπου και οι πέδες σιαγόνων. Επιπρόσθετα, οι πέδες δίσκων μπορούν να εγκατασταθούν όπου λόγοι εμφάνισης και χώρος απαγορεύει την χρήση πέδης σιαγόνων. Πέδες μαγνητικών δίσκων χρησιμοποιούνται σε μηχανές επεξεργασίας, γερανούς, πρέσσες τύπωσης, πριόνια επεξεργασίας, και άλλες εγκαταστάσεις.

Η ρύθμιση της ροπής και η τοποθέτηση των δίσκων πέδης είναι προσεγγιστικά το ίδιο όπως και στις πέδες σιαγόνων.

Μια πέδη δίσκου και μια αυτοπεριεχόμενη μονάδα τοποθετείται ακριβώς στο τέλος του πλατώ του κινητήρα. Αυτό το πλατώ κινείται από τον κινητήρα. Η ενέργεια πέδησης αποτελείται από πίεση οδηγούμενη με ένα σωληνοειδή και εφαρμόζεται με ένα ελατήριο στις πλευρές του δίσκου ή των δίσκων.



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

Όταν ένας τέτοιος κινητήρας πρέπει να σταματηθεί, συνεχές ρεύμα εφαρμόζεται σε

μια ή σε όλες 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.

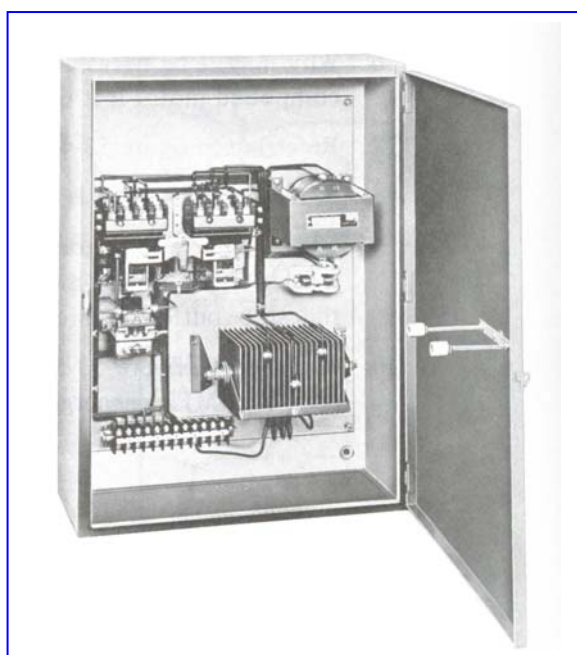
Η ροπή πέδησης γενικά μπορεί να ρυθμιστεί με την χρήση αντιστάσεων με λήψεις.

Όταν συγκρίνουμε με την μέθοδο της μονοφασικής πέδησης που είναι κοινά χρησιμοποιούμενη, η τριφασική πέδηση βελτιώνει την απόδοση του σταματήματος και ρυθμίζει την θέρμανση του στάτη του κινητήρα.

Ένα σταμάτημα του κινητήρα ισοδυναμεί με ένα κανονικό ξεκίνημα. Γι' αυτό ο επιτρεπόμενος αριθμός των εκκινήσεων που μπορεί να γίνει χωρίς υπερθέρμανση του κινητήρα πρέπει να ρυθμιστεί ανάλογα.

Ηλεκτρικές πεδήσεις μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν σε ανυψωτήρες, τόννους, ξυλουργικές μηχανές, υφαντουργικές μηχανές, επεξεργαστές καουτσούκ και άλλα μηχανήματα παραγωγής.

Οι διατάξεις ηλεκτρικής πέδησης μπορούν εύκολα να εγκατασταθούν σε νέες ή υπάρχουσες μηχανές. Για παράδειγμα είναι δύσκολο μερικές φορές να εγκαταστήσεις τυπικές ηλεκτρομαγνητικές πέδες σε υπάρχοντα εξοπλισμό χωρίς εκτεταμένη ανοικοδόμηση. Επιπρόσθετα οι μηχανικές πέδες απαιτούν αξιοσημείωτη μηχανική προσαρμογή και περιοδική αντικατάσταση τμημάτων που οφείλονται σε φθαρμένα μέρη.



Μια αποδοτική και εξυπηρετική πέδηση για ρύθμιση της κίνησης ενός ασύγχρονου επαγωγικού κινητήρα δίδεται παρακάτω με μια διάταξη ηλεκτρικής πέδης. Ένα χρονικό ρελέ χρησιμοποιείται για να δίδει αξιόπιστο χρόνο του κύκλου της πέδησης. Ένας κανονικός διακόπτης αναστροφής μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για να δώσει ισχύ στον κινητήρα.

1^η Θέση. Εναλλασσόμενη τάση κατά την διάρκεια κανονικής λειτουργίας.

2^η Θέση. Συνεχής τάση κατά την διάρκεια της πέδησης.

Τα άκρα της διάταξης είναι διαθέσιμα για τον κινητήρα και τις άλλες συνδέσεις.

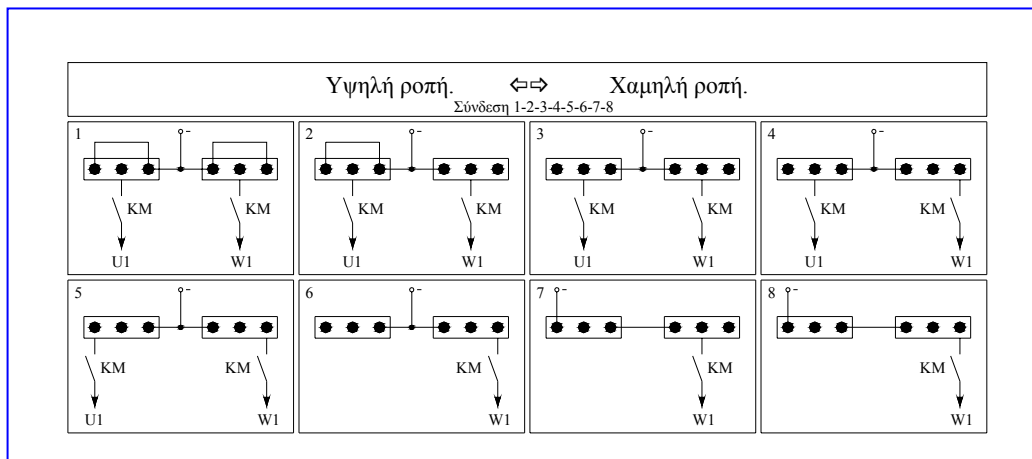
Η επιλογή της υψηλής ή χαμηλής ροπής πέδησης γίνεται από τις λήψεις

των αντιστάσεων σε μεγάλη περιοχή.

Η διάταξη περιέχει ένα μετασχηματιστή και ένα ανορθωτή που δίδουν το απαιτούμενο συνεχές ρεύμα για την πέδηση.

Αυτός ο τύπος της διάταξης σχεδιάζεται να σταματά κινητήρες που κινούν φορτία υψηλής αδράνειας.

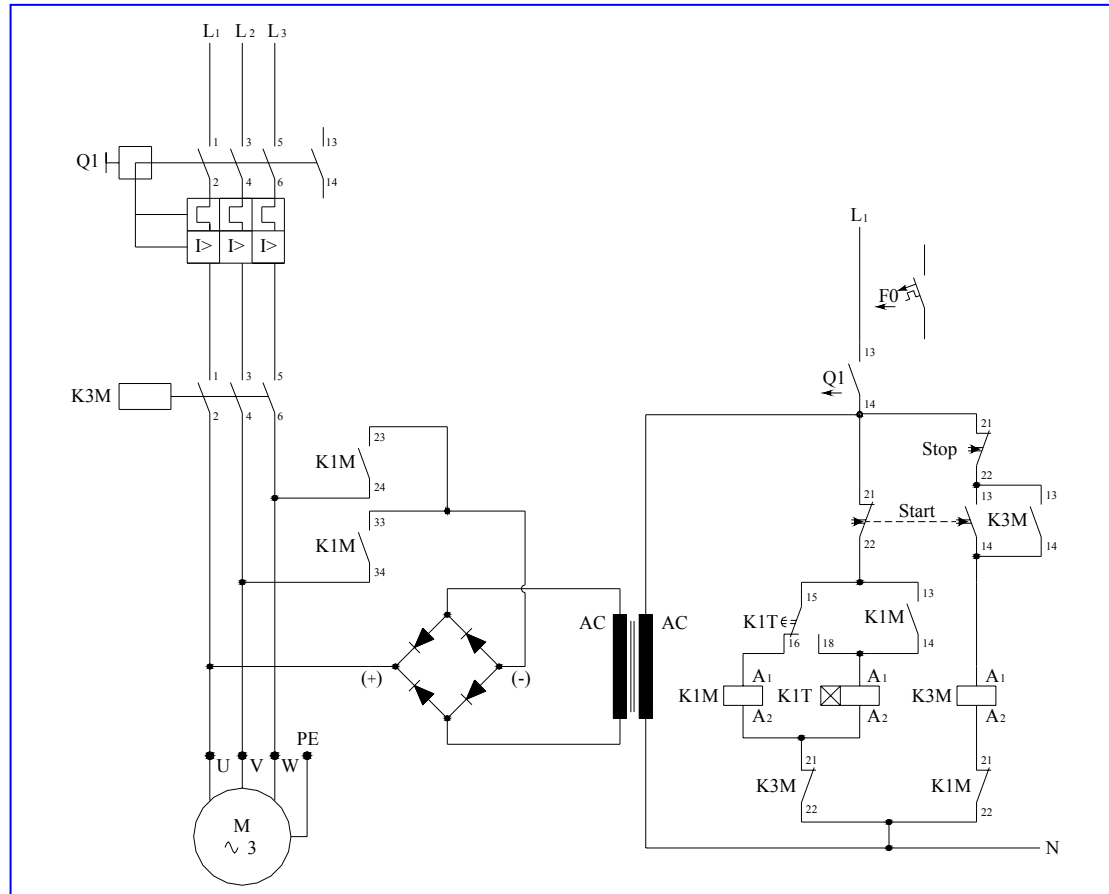
Παρακάτω δίδονται τα σχέδια της διάταξης και των αντιστάσεων.



Σκοπός της άσκησης είναι μετά την μελέτη αυτού του θέματος ο σπουδαστής να είναι ικανός να περιγράψει την μέθοδο λειτουργίας της ηλεκτρικής πέδησης, να διαπιστώσει τα προτερήματα της χρήσης της ηλεκτρικής πέδησης και να καταλάβει το πως γίνεται η πέδηση ενός τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα καθώς και να εξασκηθεί στην συνδεσμολογία.

Κύκλωμα αυτοματισμού.

- Κύκλωμα ισχύος και ελέγχου.



Σημείωση: Αφού γίνει η συνδεσμολογία όπως στο σχέδιο θέτουμε τον κύριο διακόπτη Q1 στη θέση "On" εφαρμόζοντας τριφασική εναλλασσόμενη τάση στο κύκλωμα και σ' ένα μετασχηματιστή στο δευτερεύον του οποίου συνδέεται ένας ανορθωτής που μετατρέπει την τάση σε συνεχές.

Η εναλλασσόμενη τάση και η συνεχής δεν εφαρμόζονται στον στάτη ταυτόχρονα.

Λειτουργία του αυτοματισμού.

Πιέζοντας το Start εφαρμόζεται τάση στο πηνίο του K3M, διεγείρεται και ο κινητήρας λειτουργεί με εναλλασσόμενη τάση. Παράλληλα οι κανονικά κλειστές επαφές του K3M ανοίγουν και ασφαλίζουν το πηνίο του K1M και το χρονικό ρελέ K1T να μη διεγερθούν ενώ μια από τις κανονικά ανοιχτές επαφές του κλείνει και αυτοσυγκρατεί τον K3M διεγερμένο μετά την επαναφορά του Start.

Όταν πιέσουμε το Stop ο ηλεκτρονόμος K3M αποδιεγείρεται και διακόπτει την εναλλασσόμενη τάση από τον στάτη του κινητήρα.

Η κανονικά κλειστή επαφή του K3M τροφοδοτεί με ρεύμα τον K1M και ο K1M ενεργοποιείται δια μέσω των κανονικά κλειστών επαφών του Start και του χρονικού K1T.

Μια από τις κανονικά ανοιχτές επαφές του K1M (τόρα κλειστές) τροφοδοτούν με ρεύμα το χρονικό K1T. Οι δύο κύριες ανοιχτές επαφές του K1M εφαρμόζουν μια συνεχή τάση στον στάτη του κινητήρα και έτσι έχουμε την δυναμική πέδηση.

Οι κανονικά κλειστές επαφές του K1M (τόρα ανοιχτές) ασφαλίζουν τον K3M ώστε να μην ενεργοποιηθεί, ενώ εφαρμόζεται η συνεχής τάση στον στάτη.

Όταν το χρονικό K1T ενεργοποιηθεί πλησιάζοντας τα 4 sec μετά την επαναφορά του Stop ο κινητήρας έχει σταματήσει, η συνεχής τάση στον στάτη έχει διακοπεί, αφού απενεργοποιείται ο K1M και το κύκλωμα επανέρχεται στην αρχική του κατάσταση.

Απαιτούμενα όργανα και συσκευές.

- Ένα τριφασικό χειροκίνητο διακόπτη προστασίας (Q).
- Δύο ηλεκτρονόμους (KM).
- Ένα χρονικό ρελέ (KT).
- Ένα μετασχηματιστή.
- Μία ανορθωτική γέφυρα.
- Μία μπουτονιέρα με μπουτόν στάσης και εκκίνησης (Stop-Start).
- Ένα τριφασικό ασύγχρονο κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα (M).
- Εύκαμπτους αγωγούς σύνδεσης 2,5mm² για το κύκλωμα ισχύος και
- Εύκαμπτους αγωγούς σύνδεσης 1,5mm² για το κύκλωμα ελέγχου.

Ηλεκτρική πέδηση ΙΙ.**Ηλεκτρική πέδηση δακτυλιοφόρου κινητήρα.****Θεωρητικά.**

Οι ταχύτητες πέδησης των κινητήρων εξαρτώνται από τα ονομαστικά στοιχεία τους και το συνεργαζόμενο φορτίο.

Η τάση πέδησης διατηρείται προσεγγιστικά στο 10% της τάσης του κινητήρα που αναγράφεται στην πινακίδα του.

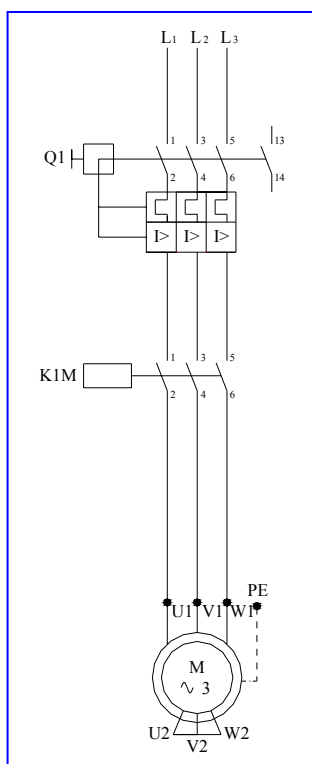
Για παράδειγμα, ένας κινητήρας 1 HP με ένα μεγάλης αδράνειας φορτίο μπορεί εύκολα να σταματήσει σε 1 sec ή και λιγότερο αν είναι αναγκαίο. Ένας 125 HP κινητήρας χαμηλής ταχύτητας μπορεί να σταματήσει σε 2-3 sec. Αυτή όμως η μέθοδος είναι αμφισβητήσιμη αν ο κινητήρας αιφνίδια σταματήσει από βλάβη ή από βλάβη στον κινούμενο εξοπλισμό. Το αποτέλεσμα αυτής της μεθόδου πέδησης είναι λιγότερο προνοητικό απ' ότι της μηχανικής πέδης τριβής.

Η ενέργεια πέδησης της ηλεκτρικής πέδης είναι ελαστική, κάπως σαν μια κινούμενη μάζα σιδήρου με ελαστική ταινία. Το maximum αποτέλεσμα αυτής της πέδησης επιτυγχάνεται στο 15-20% της ονομαστικής ταχύτητας του κινητήρα.

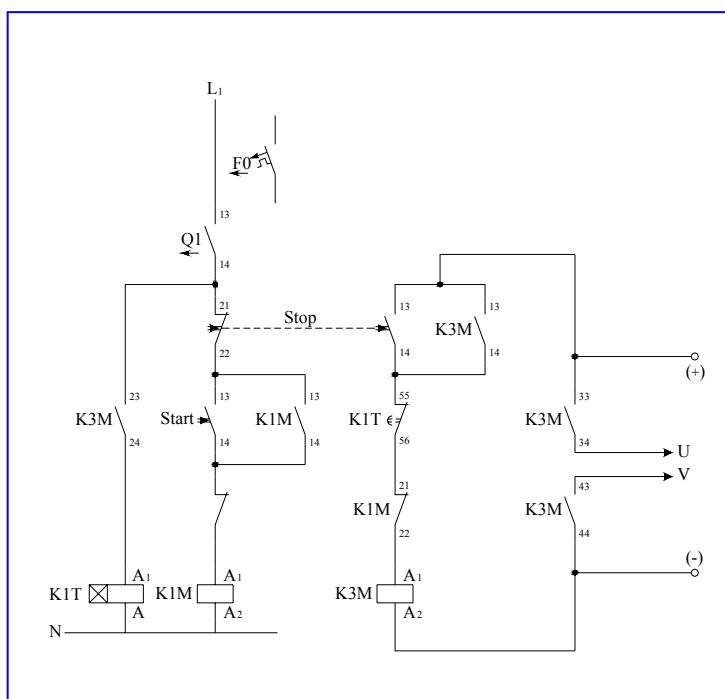
Σκοπός της άσκησης είναι να παρατηρήσει ο σπουδαστής για ποια τιμή της αντίστασης και για ποια τάση επιβραδύνεται ο κινητήρας.

Κοκλώματα.

- Κύκλωμα ισχύος και



- Κύκλωμα ελέγχου.



Σημείωση: Στο κύκλωμα ισχύος φαίνεται ότι οι αντιστάσεις εκκίνησης παραλείφθηκαν και τα δακτυλίδια είναι συνδεδεμένα μαζί.

Λειτουργία του αυτοματισμού.

Πιέζοντας το Start διεγείρετε ο ηλεκτρονόμος K1M και ο κινητήρας ξεκινάει να περιστρέφεται.

Για να τον σταματήσουμε απλά, πιέζουμε ελαφρά το Stop. Εάν θέλουμε ένα γρήγορο σταμάτημα πιέζουμε δυνατά το Stop. Αποτέλεσμα αυτού η ενεργοποίηση του ηλεκτρονόμου K3M μέσω της κλειστής επαφής του χρονικού K1T και της κανονικά κλειστής επαφής K1M. Η εναλλασσόμενη τάση που τροφοδοτεί τον στάτη διακόπτεται μέσω των κύριων επαφών του K1M και μια συνεχής τάση εφαρμόζεται μέσω των επαφών του K3M στον στάτη παράγοντας ένα στατικό μαγνητικό πεδίο με αποτέλεσμα να έχουμε μια γρήγορη επιβράδυνση του δρομέα.

Η χρονική επαφή K1T είναι ρυθμιζόμενη και πρέπει να ρυθμιστεί έτσι ώστε να βγάζει εκτός τον ηλεκτρονόμο K3M μόλις ο δρομέας σταματήσει. Η ροπή πέδησης και η ταχύτητα πέδησης μπορεί να μεταβληθεί με μεταβολή της εφαρμοζόμενης τάσης DC και των αντιστάσεων των συνδεδεμένων στον δρομέα.

Απαιτούμενα όργανα και συσκευές.

- Ένα τριφασικό χειροκίνητο διακόπτη προστασίας (Q).
- Δύο ηλεκτρονόμους (KM).
- Ένα χρονικό ρελέ (KT).
- Μία ανορθωτική διάταξη.
- Μία μπουτονιέρα με μπουτόν στάσης και εκκίνησης (Stop-Start).
- Ένα τριφασ. ασύγχρονο δακτυλιοφ. κινητήρα με αντιστάσεις εκκίνησης (M).
- Εύκαμπτους αγωγούς σύνδεσης $2,5\text{mm}^2$ για το κύκλωμα ισχύος και
- Εύκαμπτους αγωγούς σύνδεσης $1,5\text{mm}^2$ για το κύκλωμα ελέγχου.

**Μεταβολή ταχύτητας ασύγχρονου κινητήρα
βραχυκυκλωμένου δρομέα.**

(Συνδεσμολογία DAHLANDER).

Θεωρητικά.

Στους επαγωγικούς κινητήρες η ταχύτητα εξαρτάται από τον αριθμό των πόλων. Διάφορες ταχύτητες μπορούν να επιτευχθούν μεταβάλλοντας τον αριθμό των πόλων. Οι συνήθεις τύποι είναι:

- 2 ταχύτητες 1:2 – ένα τύλιγμα με λήψεις.
- 2 ταχύτητες όπου απαιτούνται – δύο ανεξάρτητα τυλίγματα.
- 3 ταχύτητες, ένα τύλιγμα με λήψεις 1:2 – ένα ανεξάρτητο τύλιγμα.
- 4 ταχύτητες δύο τυλίγματα με λήψεις 1:2.

Αναλυτικότερα:

➤ **2 ταχύτητες 1:2 – ένα τύλιγμα με λήψεις.**

Οι διάφορες συνδεσμολογίες των τυλιγμάτων με λήψεις δίνουν και διάφορους λόγους ταχυτήτων.

Τύποι συνδέσεων είναι Δ/ΥΥ, Υ/ΥΥ. Η διάταξη Δ/ΥΥ χρησιμοποιείται για τις ανάγκες της σταθερής ροπής. Αυτή έχει το πλεονέκτημα ότι εάν έχει εννέα άκρα διαθέσιμα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί με εκκίνηση Υ-Δ για μαλακό ξεκίνημα ή να περιορίσει το ρεύμα εκκίνησης για την κατάσταση της χαμηλής ταχύτητας.

Η διάταξη Υ/ΥΥ προτείνεται για κινητήρες που κινούν αντλίες, ανεμιστήρες, κομπρεςέρ, όπου η ροπή αυξάνεται ανάλογα με το τετράγωνο της ταχύτητας $M \sim n^2$.

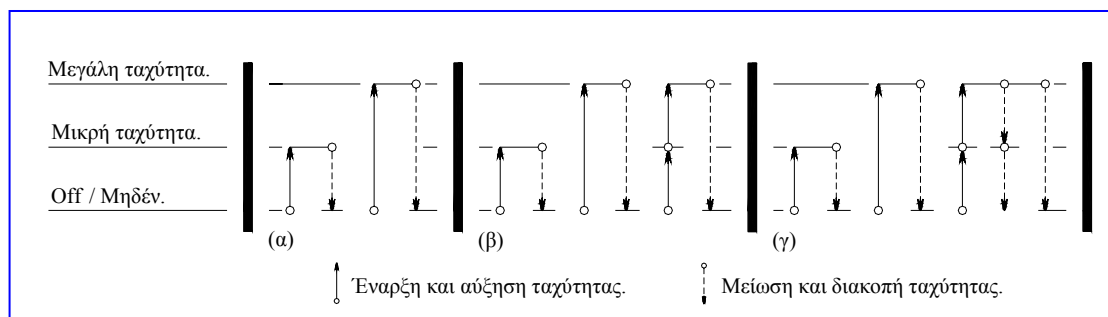
➤ **2 ταχύτητες – 2 ανεξάρτητα τυλίγματα.**

Στη θεωρία, κινητήρες με ανεξάρτητα τυλίγματα τα επιτρέπουν κάποιο συνδυασμό της ταχύτητας και κάποιο λόγο εξόδου. Και τα δύο τυλίγματα είναι κανονισμένα για σύνδεση αστέρα και είναι εντελώς ανεξάρτητα το ένα από το άλλο.

Συνδυασμοί προτεινόμενης ταχύτητας:

- Για κινητήρες με τυλίγματα λήψεων 1500/3000, 750/1500, 500/1000.
Αριθμός πόλων 4/2, 8/4, 12/6.
- Για κινητήρες με ανεξάρτητα τυλίγματα 1000/1500.
Αριθμός πόλων 6/4.

Κύκλωμα κινητήρα



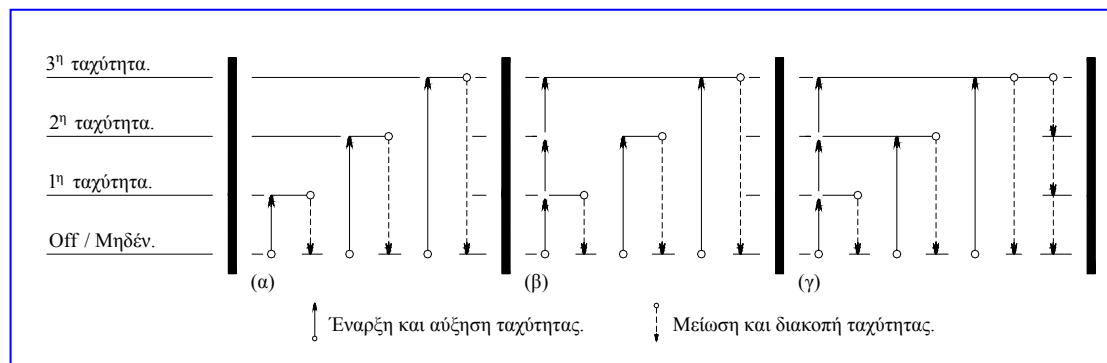
➤ **3 ταχύτητες, ένα τύλιγμα με λήψεις 1:2 – ένα ανεξάρτητο τύλιγμα.**

Εδώ έχουμε ένα τύλιγμα λήψεων για δύο ταχύτητες και ένα ανεξάρτητο για την άλλη ταχύτητα.

Προτεινόμενοι συνδυασμοί ταχύτητας και οι αριθμοί των πόλων είναι:

1000 / 1500 / 3000, 750 / 1000 / 1500, 750 / 1500 / 3000 ⇒ το ανεξάρτητο τύλιγμα.
6 / 4 / 2, 8 / 6 / 4, 8 / 4 / 2

Κύκλωμα κινητήρα.



Στο α έχουμε εκλογή μιας ταχύτητας από το μηδέν με επιστροφή μόνο στο μηδέν.

Στο β έχουμε εκλογή μιας ταχύτητας από το μηδέν ή από χαμηλή ταχύτητα με επιστροφή μόνο στο μηδέν.

Στο γ έχουμε εκλογή μιας ταχύτητας από το μηδέν ή από χαμηλή ταχύτητα με επιστροφή σε μια χαμηλότερη ταχύτητα (υψηλή ροπή πέδησης) ή στο μηδέν.

➤ **4 ταχύτητες, δύο τυλίγματα με λήψεις 1:2.**

Ο λόγος ταχυτήτων 1:2 μπορεί να ακολουθήσει την διαδοχική επικάλυψη όπως δείχνει το παρακάτω παράδειγμα:

1^ο τύλιγμα : 500 / 1000 & 2^ο τύλιγμα : 1500 / 3000 = 500 / 1000 / 1500 / 3000 ή

1^ο τύλιγμα : 500 / 1000 & 2^ο τύλιγμα : 750 / 1500 = 500 / 750 / 1000 / 1500.

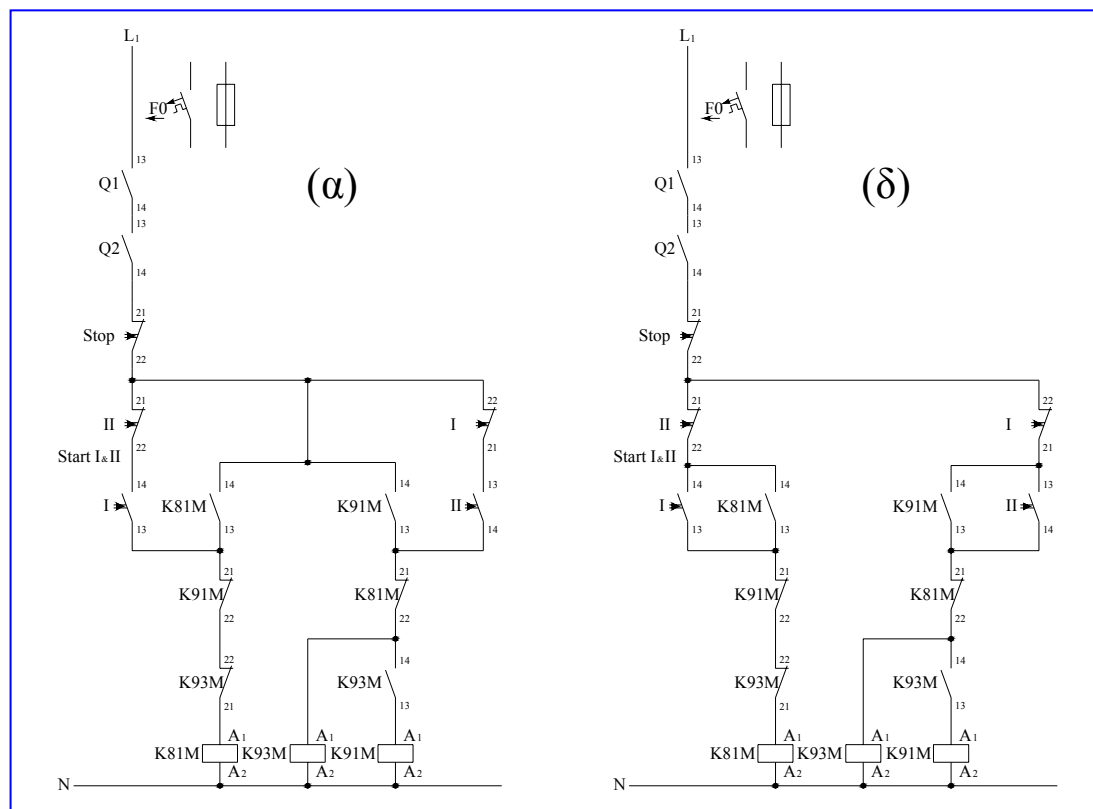
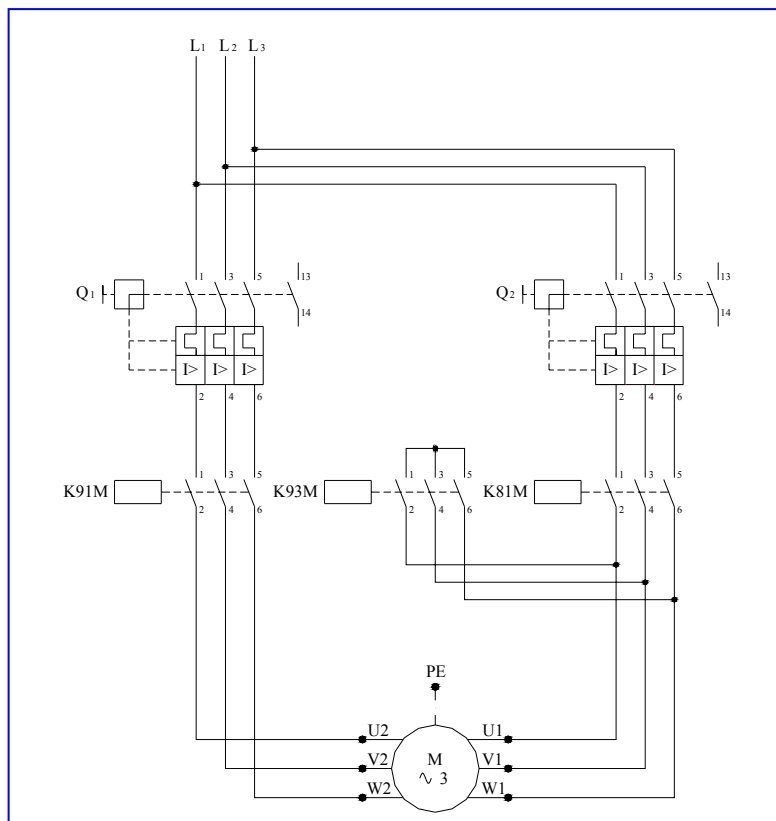
Σκοπός της άσκησης είναι να γνωρίσουν οι σπουδαστές το είδος αυτών των κινητήρων, την λειτουργία τους και να εξασκηθούν στην συνδεσμολογία του αυτοματισμού.

Απαιτούμενα όργανα και συσκευές.

- Δύο τριφασικούς χειροκίνητους διακόπτες (Q).
- Τρεις ηλεκτρονόμους (KM).
- Μία μπουτονιέρα με μπουτόν στάσης και εκκίνησης (Stop-Start).
- Ένα τριφασικό ασύγχρονο κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα διπλής ταχύτητας ή DAHLANDER (M).
- Εύκαμπτους αγωγούς σύνδεσης 2,5mm² για το κύκλωμα ισχύος και
- Εύκαμπτους αγωγούς σύνδεσης 1,5mm² για το κύκλωμα ελέγχου.

Κυκλώματα αυτοματισμού.

- **Κυκλώματα ισχύος & ελέγχου.**



Παρατηρείστε την διαφορά των σχημάτων -α και -δ.

Λειτουργία του αυτοματισμού.

Πιέζουμε το Start I το οποίο ενεργοποιεί τον ηλεκτρονόμο K81M (χαμηλή ταχύτητα) και παραμένει ενεργοποιημένος μέσω της επαφής K81M/13-14.

Πιέζουμε το Start II, απενεργοποιείται ο K81M και ενεργοποιείται ο K91M και μέσω της επαφής K91M/13-14 ενεργοποιείται ο ηλεκτρονόμος αστέρα K93M.

Οι ηλεκτρονόμοι K91M και K93M παραμένουν ενεργοποιημένοι μέσω της επαφής K93M/13-14. Εδώ έχουμε μετάβαση από την χαμηλή ταχύτητα στην υψηλή χωρίς μεσολάβηση του Stop. Δηλαδή από μηδέν ταχύτητα σε → χαμηλή ταχύτητα και από εκεί σε → υψηλή ταχύτητα ή και το αντίστροφο. Οι διαδικασίες αυτές φαίνονται καλύτερα στο θεωρητικό μέρος που προηγείται.

Έλεγχος του αυτοματισμού με P.L.C..

Παρακάτω είναι τα δύο πρόγραμμα για την μεταβολή της ταχύτητας.

- Του αριστερού κυκλώματος ελέγχου.

| | | | | | | | | |
|-----|----|-------|-----|----|-------|-----|----|-------|
| 000 | L | I 0.0 | 007 | A | M 0.0 | 014 | AN | Q 0.0 |
| 001 | A | I 0.1 | 008 | AN | Q 0.1 | 015 | A | M 0.0 |
| 002 | A | I 0.2 | 009 | AN | Q 0.2 | 016 | = | Q 0.1 |
| 003 | = | M 0.0 | 010 | = | Q 0.0 | 017 | L | M 0.0 |
| 004 | L | I 0.3 | 011 | LN | I 0.3 | 018 | AN | Q 0.3 |
| 005 | O | Q 0.0 | 012 | A | I 0.4 | 019 | A | Q 0.1 |
| 006 | AN | I 0.4 | 013 | O | Q 0.2 | 020 | = | Q 0.2 |

- Του δεξιού κυκλώματος ελέγχου.

| | | | | | | | | |
|-----|----|-------|-----|----|-------|-----|----|-------|
| 000 | L | I 0.0 | 009 | A | M 0.0 | 018 | L | M 0.0 |
| 001 | A | I 0.1 | 010 | = | Q 0.0 | 019 | AN | I 0.3 |
| 002 | A | I 0.2 | 011 | L | I 0.4 | 020 | A | Q 0.1 |
| 003 | = | M 0.0 | 012 | O | Q 0.2 | 021 | = | Q 0.2 |
| 004 | L | I 0.3 | 013 | AN | I 0.3 | 022 | L | Q 0.0 |
| 005 | O | Q 0.0 | 014 | A | M 0.1 | 023 | O | M 0.1 |
| 006 | AN | Q 0.1 | 015 | AN | Q 0.0 | 024 | A | M 0.0 |
| 007 | AN | Q 0.2 | 016 | A | M 0.0 | 025 | = | M 0.1 |
| 008 | AN | I 0.4 | 017 | = | Q 0.1 | | | |

**Ισχύς, απώλειες, βαθμός απόδοσης και
συντελεστής ισχύος κινητήρων.**

Θεωρητικά.

Οι απώλειες χαλκού (ωμικές) του στάτη είναι

$$P_{cu1} = 3R \cdot I^2_{1\phi} \quad (1)$$

Οι απώλειες σιδήρου P_{Fe} βρίσκονται με τις μετρήσεις στο κενό, το ίδιο και οι απώλειες τριβών $P_{τρ}$. Το άθροισμά τους αποτελεί τις απώλειες κενού P_o . Στην μέτρηση κενού ο κινητήρα απορροφά την ισχύ P_{om} που περιέχει και τις απώλειες χαλκού στο κενό P_{cu1o} .

$$P_{cu1o} = 3R_1 \cdot I^2_{1\phi o}$$

Επομένως οι απώλειες κενού είναι

$$P_o = P_{om} - P_{cu1o} \quad (2)$$

Οι πρόσθετες απώλειες $P_{\pi\rho}$ δεν μπορούν να υπολογισθούν, αλλά εκτιμώνται με την τιμή

$$P_{\pi\rho} = 0,005 \cdot P_1$$

Εάν από την απορροφούμενη ισχύ P_1 αφαιρεθούν οι απώλειες P_{cu1} , R_{Fe} και $P_{\pi\rho}$ προκύπτει η ισχύς διακένου P_δ , δηλαδή η ισχύς που διέρχεται το διάκενο.

$$P_\delta = P_1 - (P_{cu1} + P_{Fe} + P_{\pi\rho}) \quad (3)$$

Η ισχύς αυτή διχάζεται στις ωμικές απώλειες του δρομέα

$$P_{cu2} = s \cdot P_\delta \quad (4)$$

και στην μηχανική ισχύ

$$P_m = (1 - s) \cdot P_\delta \quad (5)$$

Έτσι μετρώντας ή υπολογίζοντας την ολίσθηση, μπορούμε να υπολογίσουμε τις P_{cu2} οι οποίες δεν μπορούν να υπολογισθούν με τον τύπο $P_{cu2} = 3R_2 \cdot I^2_{2\phi}$ γιατί το R_2 και το $I_{2\phi}$ δεν μπορούν να μετρηθούν στο βραχυκυκλωμένο κλωβό.

Η μηχανική ισχύς καλύπτει τις απώλειες τριβών $P_{τρ}$ και την ωφέλιμη ισχύ στον άξονα P .

$$P_m = P_{τρ} + P \quad (6)$$

Η εσωτερική ροπή στρέψης είναι $T_m = T_{τρ} + T$, όπου T η ωφέλιμη ροπή στον άξονα και υπολογίζεται από την

$$T_m = \frac{P_m}{\omega_m} = \frac{P_\delta}{\omega_{1m}} \quad (7)$$

όπου $\omega_m = \frac{2\pi n}{60}$ και $\omega_{1m} = \frac{2\pi n_1}{60}$.

Η σύγχρονη περιστροφική ταχύτητα είναι

$$n_1 = \frac{120 \cdot f_1}{2p} \quad (8)$$

όπου $2p$ ο αριθμός των πόλων.

Το άθροισμα των απωλειών γίνεται

$$\sum P = P_{cu1} + P_{cu2} + P_{Fe} + P_{τρ} + P_{\pi\rho} \quad (9)$$

Προφανώς ισχύει ότι

$$P = P_1 - \sum P \quad (10)$$

Ο βαθμός απόδοσης είναι

$$\eta = \frac{P}{P_1} \quad (11)$$

Ο τρόπος αυτός εύρεσης του βαθμού απόδοσης λέγεται **έμμεσος** και έχει το πλεονέκτημα ότι δεν χρειάζεται η άμεση μέτρηση της ροής του άξονα T.

Ο **άμεσος** τρόπος εύρεσης του βαθμού απόδοσης προϋποθέτει την ύπαρξη ροπομέτρου για την μέτρηση της ροπής T.

Έτσι υπολογίζεται η

$$P = \omega_m \cdot T \quad (12)$$

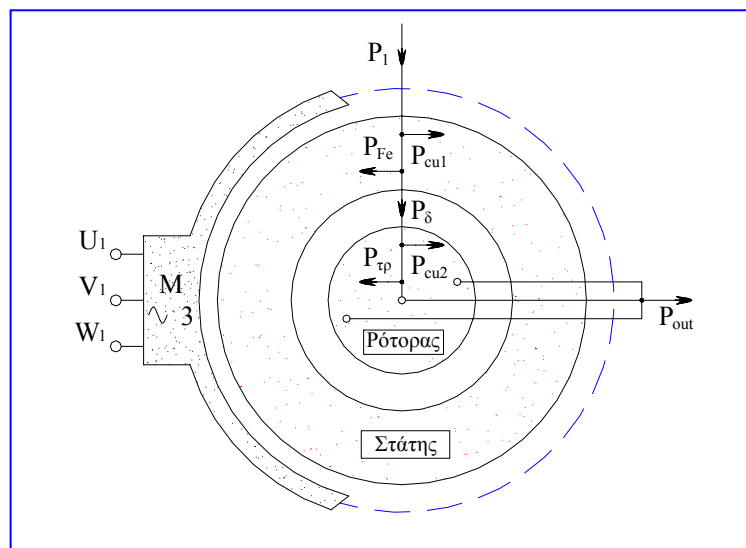
και ο βαθμός απόδοσης $\eta = \frac{P}{P_1}$.

Ο συντελεστής ισχύος $\cos\phi$ είναι χαμηλός λόγω της ύπαρξης του διακένου που αυξάνει τις απεπαγωγές.

Αντιστοιχίες συμβόλων.

$$P_1 = P_{in}, \quad P = P_{out}, \quad n = n_2, \quad T = M$$

$$I_{ov} = I_n, \quad T_{εσ} = T_m$$



Στο παραπάνω σχήμα βλέπουμε το διάγραμμα της ισχύος και των απωλειών.

Κινητήρας βραχυκυκλωμένου δρομέα Ι.**Μέτρηση του βαθμού απόδοσης και της χαρακτηριστικής της ροπής.****Θεωρητικά.**

Ο βαθμός απόδοσης η είναι ο λόγος της ισχύς εξόδου P_{out} προς την ισχύ εισόδου P_{in} .

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \cdot 100\%$$

Η ισχύς εξόδου P_{out} υπολογίζεται μετρώντας την ταχύτητα n_2 και τη ροπή M .

$$P_{out} = \frac{2\pi \cdot n_2}{60} \cdot M$$

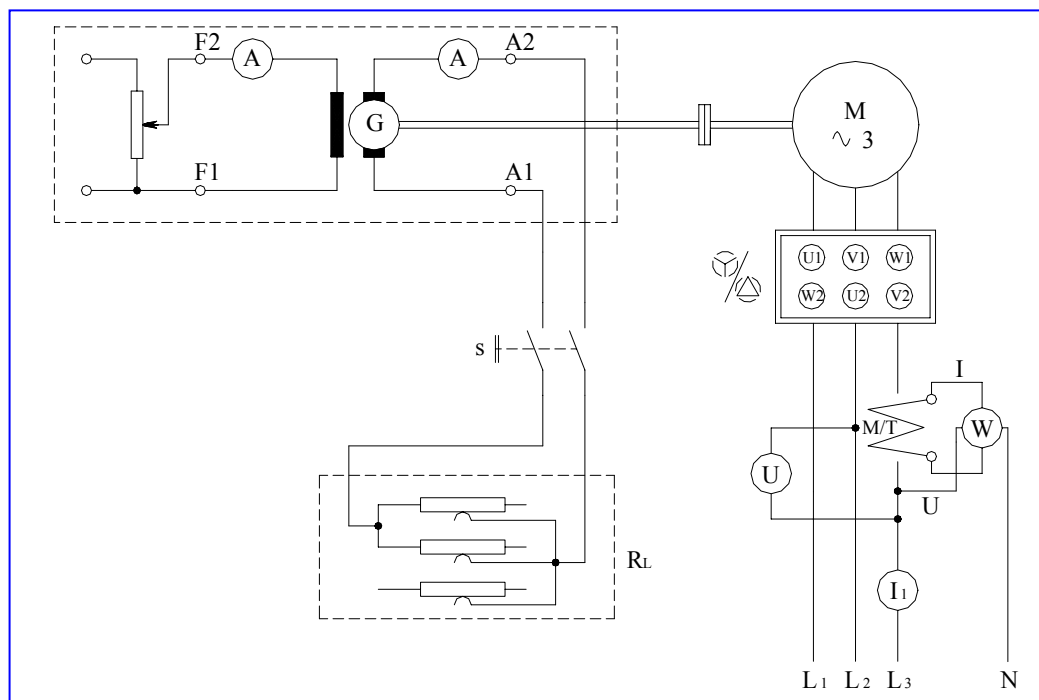
Όπου n_2 η ταχύτητα περιστροφής σε rpm και

M η ροπή σε Nm.

Η ισχύς εισόδου μετρείται με ένα βατόμετρο P σε μία φάση $P_{in} = 3P$, όπου P είναι η τιμή που διαβάζεται.

Η ολίσθηση s υπολογίζεται από την ταχύτητα $s = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$, όπου n_1 είναι η σύγχρονη ταχύτητα, δηλαδή εδώ για την τετραπολική μηχανή μας είναι $n_1 = 1500$ rpm.

Σκοπός της άσκησης είναι η μέτρηση του βαθμού απόδοσης με διαφορετικό φορτίο και μέτρηση της χαρακτηριστικής της ροπής $M=f(s)$ δηλαδή της μεταφερόμενης ροπής σαν συνάρτηση της ολίσθησης.

Κύκλωμα.

Σημείωση: Κατά τη σύνδεση,

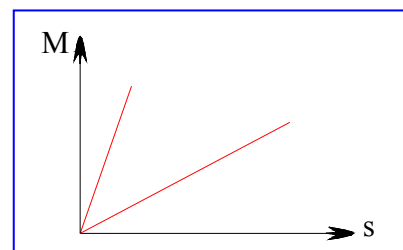
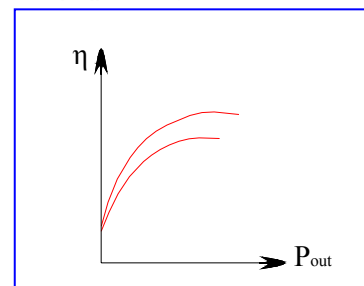
1. Συνδέστε το ροπόμετρο σαν γεννήτρια και τον επαγωγικό κινητήρα σαν κινητήρα σύμφωνα με το κύκλωμα. Ο διακόπτης s πρέπει να είναι ανοικτός (off) και ο διακόπτης αστέρα-τριγώνου στη θέση "0".
2. Σημειώστε από την πινακίδα τις ονομαστικές τιμές επαγωγικού κινητήρα.
3. Ο επιβλέπων πρέπει να ελέγξει τη συνδεσμολογία.

Απαιτούμενα όργανα και συσκευές.

- Μία γεννήτρια (G).
- Ένα επαγωγικό κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα (M).
- Ένα διακόπτης αστέρα – τριγώνου (Y/Δ).
- Μία αντίσταση φορτίου (R_L).
- Ένα απλό διακόπτης φορτίου (s).
- Ένα βολτόμετρο (U).
- Ένα αμπερόμετρο (I_1).
- Ένα βαττόμετρο (W).

Μέτρηση των χαρακτηριστικών απόδοσης και ροπής.

1. Ρυθμίστε τη μεταβλητή AC τάση στα 220 V πολική. Γυρίστε τον διακόπτη αστέρα – τριγώνου στη θέση "Y". Όταν η ταχύτητα του κινητήρα πάψει να αυξάνεται θέσετε το διακόπτη αστέρα – τριγώνου στη θέση "Δ".
2. Ρυθμίστε τη τάση U στα 220 V και κρατείστε τη σταθερή κατά τη διάρκεια των μετρήσεων. Διαβάστε τις ενδείξεις των οργάνων U, A, P, M, n_2 . Ελέγξτε αν η αντίσταση R_L είναι τοποθετημένη στη θέση ώστε να περνάει ελάχιστο ρεύμα. Κλείστε τον διακόπτη s (on).
3. Μεταβάλλεται το φορτίο με τον παράλληλο ροοστάτη του ροπομέτρου και την αντίσταση R_L , σε βήματα του 1 Nm μέχρι τα 10 Nm (M_{ov}). Για κάθε βήμα σημειώστε τις τιμές U, A, P, M και n_2 .
4. Ρυθμίστε την αντίσταση φορτίου για ελάχιστο ρεύμα, τη διέγερση $I_F = 0$ και ανοίξτε τον διακόπτη s (off).



➤ **Έλεγχος ταχύτητας.**

1. Ρυθμίστε την τάση U στα 176 V (80% του 220V).
2. Επαναλάβετε τις μετρήσεις 1 και 4 μέχρι τα 9 Nm.
3. Ανοίξτε (off) τους διακόπτες όλων των τάσεων.

Προβλήματα και ερωτήσεις.

1. Συμπληρώστε στον παρακάτω πίνακα τις "υπολογιζόμενες τιμές".
2. Σχεδιάστε την καμπύλη $n = f(P_{out})$ για τις μετρήσεις 2 και 3 στο ίδιο διάγραμμα.
3. Σχεδιάστε τις παρακάτω καμπύλες $\cos\phi = f(P_{out})$, $P_{in} = f(P_{out})$, $I_1 = f(P_{out})$, $M = f(P_{out})$ και $n = f(P_{out})$ για την μέτρηση 2.
4. Σχεδιάστε τις καμπύλες $M = f(s)$ και $I_1 = f(s)$ για τις μετρήσεις 2 και 3 στο ίδιο διάγραμμα. Προεκτείνετε τις καμπύλες μέχρι το σημείο $M=0$. Ποιά είναι η ολίσθηση και γιατί δεν είναι μηδέν;
5. Υπολογίστε την επί τοις εκατό τιμή του εν κενώ ρεύματος σε σχέση με το ονομαστικό (I_0/I_n 100%).
6. Υπολογίστε τον συντελεστή ισχύος $\cos\phi$ για πλήρη φόρτιση. Δικαιολογήστε την χαμηλή τιμή.
7. Σχεδιάστε το κύκλωμα του διακόπτη Y-Δ και περιγράψτε τη λειτουργία του διακόπτη.

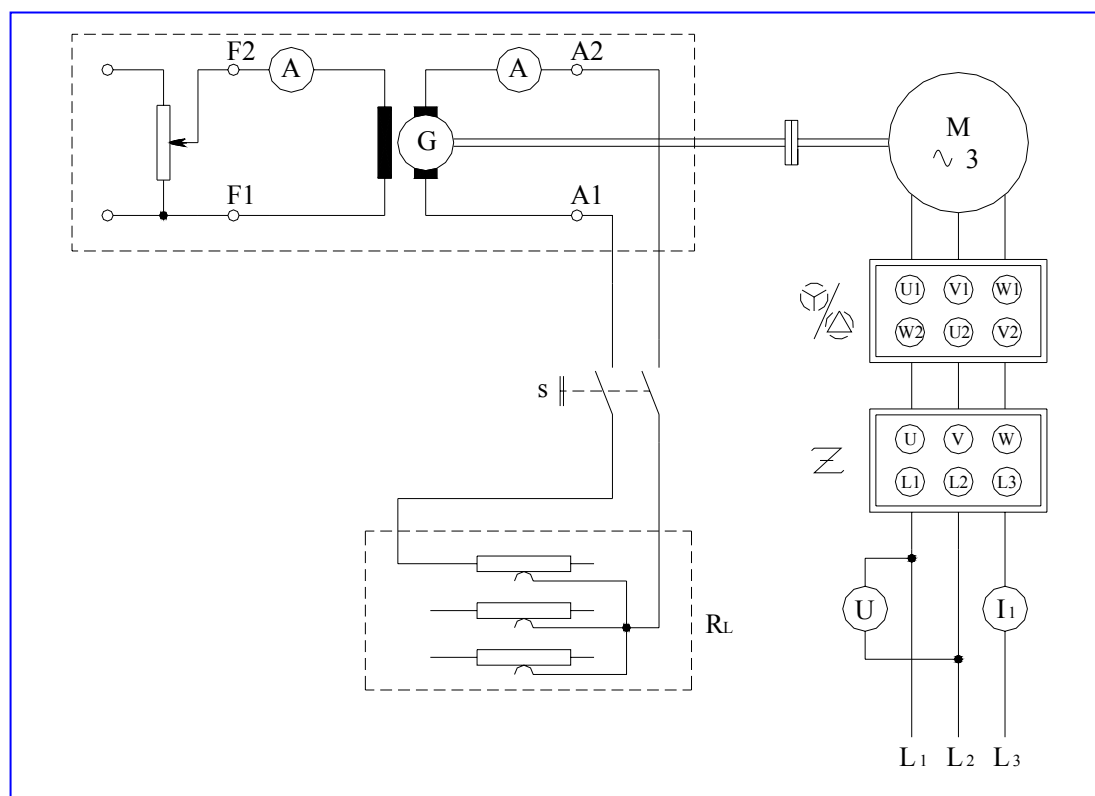
Πίνακας μετρήσεων.

| | Τιμές μετρήσεων | | | | | Υπολογισμοί | | | |
|----|-----------------|-----------------------|----------|-----------|-------------------------|-------------------------|------------------------|----------|----------|
| | U (V) | I ₁ (A) | P (W) | M (Nm) | n ₂ (rpm) | P _{out} (W) | P _{in} (W) | η (%) | s (%) |
| 2. | | | | | | | | | |
| 3. | | | | | | | | | |

Κινητήρας βραχυκυκλωμένου δρομέα ΙΙ.**Ρεύμα εκκίνησης με ακινητοποιημένο
δρομέα και αντιστροφή.****Θεωρητικά.**

Το ρεύμα εκκίνησης στον κινητήρα είναι τόσο μεγάλο που δεν μπορεί να μετρηθεί ακριβώς. Γι' αυτό μετράμε το ρεύμα σε χαμηλότερες τάσεις και προσδιορίζεται προεκτείνοντας την καμπύλη που σχηματίστηκε από τα σημεία που μετρήσαμε.

- **Εκκίνηση Αστέρα – Τριγώνου.** Πραγματοποιείται με αλλαγή των συνδέσεων. Το ρεύμα εκκίνησης, στην εκκίνηση Αστέρα – Τριγώνου, μειώνεται.
- **Αντιστροφή.** Πραγματοποιείται με αλλαγή δύο άκρων του κινητήρα. Προκαλείται έτσι μια ροπή στρέψης κατά την αντίθετη κατεύθυνση.

Κύκλωμα.

Σημείωση: Ο επαγωγικός κινητήρας συνδέεται σύμφωνα με το διάγραμμα του κυκλώματος. Η γεννήτρια δεν συνδέεται στο κύκλωμα αλλά μπορεί και να συνδεθεί με τον κινητήρα κατά την διάρκεια της δοκιμής χωρίς όμως φορτίο.

Απαιτούμενα όργανα και συσκευές.

- Μία γεννήτρια (G).
- Ένα επαγωγικό κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα (M).
- Ένα διακόπτη αστέρα – τριγώνου (Y/Δ).
- Ένα διακόπτη αντιστροφής (Z).
- Ένα βολτόμετρο (U).
- Ένα αμπερόμετρο (I_1).
- Ένα απλό διακόπτη φορτίου (s).

1. Ρεύμα εκκίνησης.

1. Θέστε τον διακόπτη αστέρα/τριγώνου στην θέση "Δ" και τον διακόπτη αντιστροφή στην θέση "1".
2. Δώστε A.C. τάση (διακόπτης τροφοδοτικού στη θέση "1"). Κρατείστε με το χέρι τον δρομέα έτσι ώστε ο κινητήρας να μην μπορεί να περιστραφεί.
3. Κλείστε τον διακόπτη της μεταβλητής τάσης (θέσης "1"). Αυξήστε τη μεταβλητή τάση αργά προσέχοντας ώστε το ρεύμα του κινητήρα να αυξάνεται με βήματα του 1A μέχρι την τιμή των 6A. Για κάθε βήμα σημειώστε τις τιμές των U και I_1 .
4. Μηδενίστε την μεταβλητή τάση.
5. Θέστε τον διακόπτη αστέρα/τριγώνου στην θέση "Y" και επαναλάβετε τις μετρήσεις 1.3 μέχρι το ρεύμα I_1 να γίνει 4A.
6. Παρατηρήστε ότι περιστρέφοντας με το χέρι αργά τον δρομέα μεταβάλλεται το ρεύμα εκκίνησης.

2. Αντιστροφή.

1. Θέστε τον διακόπτη αστέρα / τριγώνου στην θέση "0" και τον διακόπτη αντιστροφής στην θέση "1". Αυξήστε την μεταβλητή AC τάση μέχρι τα 100V.
2. Θέστε τον διακόπτη αστέρα / τριγώνου στην θέση "Y" οπότε ξεκινά ο κινητήρας. Όταν ο κινητήρας φθάσει στην ονομαστική του ταχύτητα, γυρίστε τον διακόπτη στη θέση "Δ".
3. Γυρίστε τον διακόπτη στην συνδεσμολογία "Y". Μετρήστε την ταχύτητα περιστροφής. Γυρίστε μετά τον διακόπτη αντιστροφής στη θέση "2" και παρατηρήστε τον χρόνο που περνά μέχρι να σταματήσει ο κινητήρας. Μηδενίστε την AC τάση.

Προβλήματα και ερωτήσεις.

1. Χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα της παραγράφου 1 σχεδιάστε την καμπύλη $I_1 = f(U)$ δηλαδή του ρεύματος εκκίνησης συναρτήσει της τάσης του στάτη. Ο άξονας της τάσης πρέπει να εκτείνεται μέχρι 220V. Προεκτείνετε την καμπύλη και σημειώστε το ρεύμα εκκίνησης για ονομαστική τάση.

2. Υπολογίστε τον λόγο του ρεύματος εκκίνησης για την σύνδεση τριγώνου και αστέρα. Ποια είναι η θεωρητική τιμή του;
3. Σχεδιάστε το κύκλωμα του αυτομάτου διακόπτη Y/Δ με ρελέ χρονοδιακόπτη και περιγράψτε την λειτουργία του.
4. Πόση είναι η τιμή της ολίσθησης τη στιγμή της αντιστροφής;
5. Υπολογίστε το σχετικό ρεύμα εκκίνησης I_1 / I_{1ov} σε Y και Δ .
6. Εξηγήστε την μεταβολή του ρεύματος εκκίνησης σε διαφορετικές θέσεις του δρομέα.

Πίνακας μετρήσεων.

| | | | | | | |
|-----------------------|--|--|--|--|--|--|
| Σε σύνδεση | | | | | | |
| Y. | | | | | | |
| U (V) | | | | | | |
| I ₁ (A) | | | | | | |
| Σε σύνδεση | | | | | | |
| Δ. | | | | | | |
| U (V) | | | | | | |
| I ₁ (A) | | | | | | |

Κινητήρας βραχυκυκλωμένου δρομέα ΙΙΙ.**Εξέταση των συνολικών απωλειών και
έλεγχος των προδιαγραφών επαγωγικού κινητήρα βραχ. δρομέα.****Θεωρητικά.**

Σύμφωνα με τις προδιαγραφές η απόδοση των τριφασικών κινητήρων μεγαλύτερων από 400W μπορεί να ορισθεί με την μέθοδο των συνολικών απωλειών, η οποία συνεπάγεται την μέτρηση των διαφόρων απωλειών ξεχωριστά.

Οι απώλειες σ' ένα επαγωγικό κινητήρα είναι:

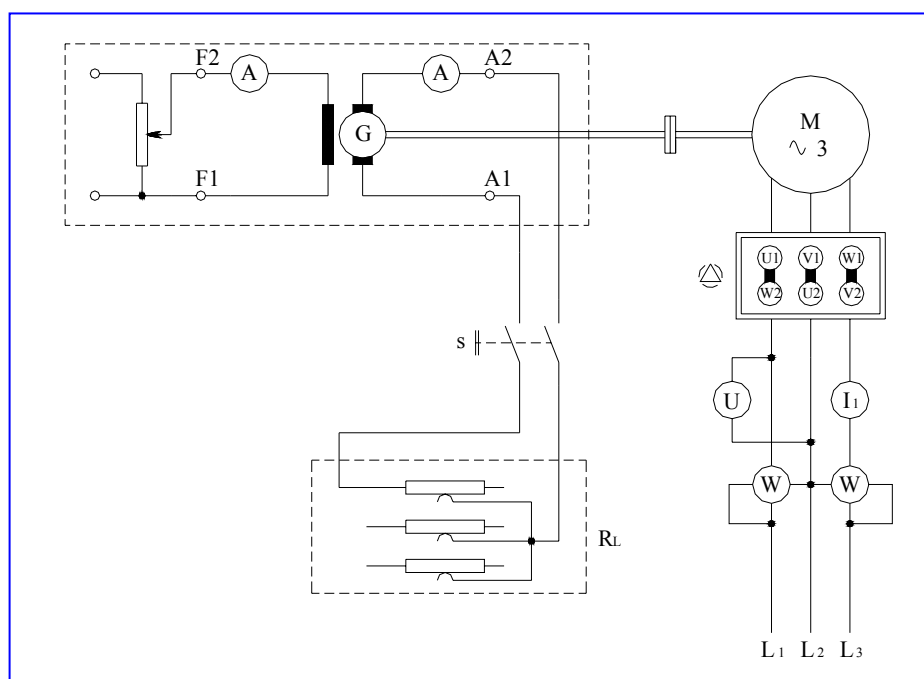
α) Απώλειες ανεξάρτητες από το ρεύμα του φορτίου.

- Απώλειες σιδήρου.
- Απώλειες τριβών στα έδρανα.
- Απώλειες αερισμού.
- Απώλειες τριβών στις ψήκτρες (μόνο στον δακτυλιοφόρου δρομέα).

β) Απώλειες που εξαρτώνται από το ρεύμα φορτίου.

- Ωμικές απώλειες στο πρωτεύον τύλιγμα.
- Ωμικές απώλειες στο δευτερεύον τύλιγμα.
- Ωμικές απώλειες στις ψήκτρες (μόνο στον δακτυλιοφόρου δρομέα).
- Πρόσθετες απώλειες στα σιδερένια τμήματα.
- Πρόσθετες απώλειες στους αγωγούς.

Η ισχύς θα μετρηθεί με την μέθοδο του ενός τριφασικού βατομέτρου και οι αντιστάσεις με την βοήθεια του ωμομέτρου. Αυτές οι μέθοδοι υποτίθεται ότι είναι γνωστές.

Κύκλωμα.

Απαιτούμενα όργανα και συσκευές.

- Μία γεννήτρια (G).
- Ένα επαγωγικό κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα (M).
- Ένα διακόπτη αστέρα – τριγώνου (Y/Δ).
- Μία αντίσταση φορτίου (R_L).
- Ένα βολτόμετρο (U).
- Ένα αμπερόμετρο (I_1).
- Δύο βαττόμετρα (W).
- Ένα απλό διακόπτη φορτίου (s).
- Ένα ωμόμετρο υψηλής ακριβείας, στην κλίμακα 1-10Ω.

1. Μέτρηση της αντίστασης.

Για να είμαστε σε θέση να υπολογίσουμε τις απώλειες σύμφωνα με την παράγραφο β) της θεωρίας πρέπει να μετρηθεί η αντίσταση στο πρωτεύον τυλιγμά, R_t στην κρύα κατάσταση.

1. Αποσυνδέστε όλα τα καλώδια από τον στάτη. Μετρήστε τις αντιστάσεις των τριών τυλιγμάτων μ' ένα ωμόμετρο.

2. Συνδεσμολογία.

1. Συνδέστε το ροπόμετρο σαν γεννήτρια και τον επαγωγικό κινητήρα σε σύνδεση "Δ" σύμφωνα με το διάγραμμα του κυκλώματος.
2. Σημειώστε τις ονομαστικές τιμές του κινητήρα.
3. Ο υπεύθυνος του εργαστηρίου πρέπει τώρα να ελέγξει τις συνδέσεις.

3. Δοκιμή χωρίς φορτίο.

Το σύνολο όλων των απωλειών σύμφωνα με την παράγραφο α) της θεωρίας μπορεί να οριστεί στην δοκιμή χωρίς φορτίο. Επειδή το αποτέλεσμα δεν πρέπει να επηρεαστεί από απώλειες στο ροπόμετρο, ο επαγωγικός κινητήρας πρέπει να αποσυνδεθεί από αυτό, κατά την διάρκεια αυτής της δοκιμής (σπρώχνοντας ελαφρά σε μια μεριά).

1. Κλείστε (on) τον διακόπτη της μεταβλητής AC τάσης και ρυθμίστε την τάση στα 220 V. Μετά απ' αυτό σημειώστε τις μετρήσεις των οργάνων και ύστερα κλείστε τον διακόπτη της AC τάσης.

4. Δοκιμή με φορτίο.

1. Συνδέστε τον επαγωγικό κινητήρα στη γεννήτρια και ελέγξτε την σύνδεση ώστε να είναι σύμφωνα με το διάγραμμα του κυκλώματος.
2. Γυρίστε τον διακόπτη της μεταβλητής AC τάσης και ρυθμίστε τον στα 220V.
3. Ελέγξτε ώστε ο διακόπτης S να είναι κλειστός (on). Ρυθμίστε τον μεταβλητό ροοστάτη της γεννήτριας στο ελάχιστο ρεύμα διέγερσης.

- Ρυθμίστε την τάση U στα 220 V. και κρατήστε την σταθερή κατά την διάρκεια της μέτρησης. Φορτίστε τον επαγωγικό κινητήρα ρυθμίζοντας τον μεταβλητό ροοστάτη της γεννήτριας και έπειτα την αντίσταση φορτίου R_L , έτσι ώστε να έχουμε ονομαστική ροπή 10 Nm. Σημειώστε τα ονομαστικά U , I_1 , P_{in} , M και n .
- Ελαττώστε το φορτίο για μια ακόμα φορά στο ελάχιστο και μηδενίστε όλες τις τάσεις.

5. Υπερφόρτιση.

Σύμφωνα με τις προδιαγραφές ένας επαγωγικός κινητήρας είναι δυνατόν να αναπτύξει ροπή 1,6 φορές της κανονικής ροπής μέσα σε 15 sec χωρίς να σταματήσει ή να αλλάξει απότομα η ταχύτητα.

- Υπολογίστε και σημειώστε την ροπή με την οποία θα δοκιμαστεί η μηχανή.

$$M = 1,6 \cdot M_n = \frac{1,6 \cdot P_n}{\omega n}$$

- Φορτίστε τον κινητήρα για 15 sec με την υπολογισμένη ροπή. Ο χρόνος της δοκιμής δεν πρέπει να υπερβεί τα 15 sec αλλιώς ο κινητήρας μπορεί να υπερθερμανθεί. Σημειώστε αν ο κινητήρα άντεξε στην δοκιμή ή όχι.

Προβλήματα και ερωτήσεις.

- Υπολογίστε τον συντελεστή ισχύος της μέτρησης 3.

$$\cos \varphi = \frac{P_{om}}{\sqrt{3} \cdot U \cdot I_1}, \text{ όπου } P_{om} = P.$$

- Υπολογίστε τη μέση τιμή της αντίστασης στις τρεις φάσεις κατά τη μέτρηση 1.
- Υπολογίστε τις απώλειες αντίστασης στον στάτη για τη δοκιμή χωρίς φορτίο, χρησιμοποιώντας τη σχέση:

$$P_{cu0} = 3R \cdot \left(\frac{I_1}{\sqrt{3}} \right)^2, \text{ όπου } R = R_{20}$$

όπου η R προκύπτει από την β) και I_1 είναι το ρεύμα του στάτη της μέτρησης 3.

- Υπολογίστε τις πραγματικές απώλειες, χωρίς φορτίο.

$$P_o = P_{om} - P_{cu0}.$$

- Υπολογίστε ξανά την αντίσταση της μέτρησης β) στους 75 °C χρησιμοποιώντας τη σχέση:

$$R_{75} = R_{20} (1 + 0,00392 \Delta\Theta)$$

όπου R_{20} είναι η μέση τιμή των αντιστάσεων R_1 , R_2 , R_3 στους 20 °C.

στ) Υπολογίστε τις ωμικές απώλειες στο στάτη για το ονομαστικό ρεύμα της μέτρησης 4 χρησιμοποιώντας τη σχέση:

$$P_{1con} = 3R_{75} \cdot \left(\frac{I_n}{\sqrt{3}} \right)^2.$$

- Υπολογίστε τις πρόσθετες απώλειες στο σίδηρο και στους αγωγούς μαζί για την μέτρηση 4 από τη σχέση:

$$P_{\pi p} = 0,005 P_{in}.$$

7. Υπολογίστε τις ωμικές απώλειες στον δρομέα χρησιμοποιώντας τη σχέση:

$$P_{2\text{cun}} = s_n P_\delta$$

όπου s_n η ολίσθηση για την ονομαστική ροπή και P_δ η ισχύς διακένου της μηχανής για τη μέτρηση 4, που βρίσκεται από τη σχέση:

$$P_\delta = P_1 - (P_{\text{Fe}} + P_{1\text{cun}} + P_{\text{πρ}}) \quad \text{με } P_1 = P_{\text{in}} \text{ και } P_{\text{Fe}} = P_{\text{τρ}} = \frac{P_o}{2}.$$

8. Υπολογίστε το άθροισμα των απωλειών για τη μέτρηση 4, από τη σχέση:

$$\sum P = P_o + P_{1\text{cun}} + P_{2\text{cun}} + P_{\text{πρ}}.$$

9. Υπολογίστε το βαθμό απόδοσης του κινητήρα για την πλήρη φόρτιση της μέτρησης 4, με την έμμεση μέθοδο:

$$\eta = P_{\text{in}} - \frac{\sum P}{P_{\text{in}}}.$$

10. Υπολογίστε για την μέτρηση 4, το βαθμό απόδοσης με την άμεση μέθοδο και τον συντελεστή ισχύος του κινητήρα.

11. Ποιά τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της απ' ευθείας μεθόδου.

Πίνακες μετρήσεων.

• Δοκιμή χωρίς φορτίο.

| Μετρούμενες τιμές | | | Υπολογιζόμενες τιμές | | | |
|-------------------|-----------------------|----------|------------------------|------|------|----------------|
| U (V) | I ₁ (A) | P (W) | P _{om} (W) | tanφ | cosφ | P _o |
| | | | | | | |

• Μετρήσεις αντιστάσεων.

| Μετρούμενες τιμές | | | Υπολογιζόμενες τιμές | | | | | | |
|-------------------------|-------------------------|-------------------------|----------------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|----------|----------|
| R ₁ (ohm) | R ₂ (ohm) | R ₃ (ohm) | R _{mean} (ohm) | R ₇₅ (ohm) | P _{cuo} (W) | P _{1cun} (W) | P _{2cun} (W) | P (W) | η (%) |
| | | | | | | | | | |

• Απευθείας μετρήσεις.

| Μετρούμενες τιμές | | | | | Υπολογιζόμενες τιμές | | | | |
|-------------------|-----------------------|------------------------|-----------|---------------|------------------------|-------------------------|----------|-------|-------|
| U (V) | I ₁ (A) | P _{in} (W) | M (Nm) | n (r.p.m.) | P _{in} (W) | P _{out} (W) | η (%) | tan φ | cos φ |
| | | | | | | | | | |

• Υπερφόρτιση.

M = Nm. Αντέχει ο κινητήρας στη δοκιμή ;

Κινητήρας βραχυκυκλωμένου δρομέα IV.**Μελέτη της ροπής εκκίνησης.****Θεωρητικά.**

Η ροπή εκκίνησης είναι δύσκολο να μετρηθεί απ' ευθείας, γι' αυτό χρειάζεται ένα ειδικά εξοπλισμένο ροπόμετρο. Σ' αυτή την περίπτωση χρησιμοποιείτε μια έμμεση μέθοδος στην οποία το ροπόμετρο δεν χρειάζεται να χρησιμοποιηθεί.

Στον επαγωγικό κινητήρα υπάρχει μια μεταφορά ισχύος από τον στάτη 1 στον δρομέα 2, που δίνεται από τη σχέση $P_{12} = \omega_1 M$, όπου ω_1 η σύγχρονη περιστροφική ταχύτητα και M η ροπή διακένου.

Η ισχύς ολίσθησης του κινητήρα δίνεται από τη σχέση $P_2 = \omega_2 M$, όπου ω_2 η περιστροφική ταχύτητα της ολίσθησης. Τη στιγμή της εκκίνησης $\omega_2 = 0$ και επομένως $P_2 = 0$. Αυτό μας διευκολύνει στο να ορίσουμε την ροπή εκκίνησης

$$M_{εκ} = \frac{P_{12}}{\omega_1}.$$

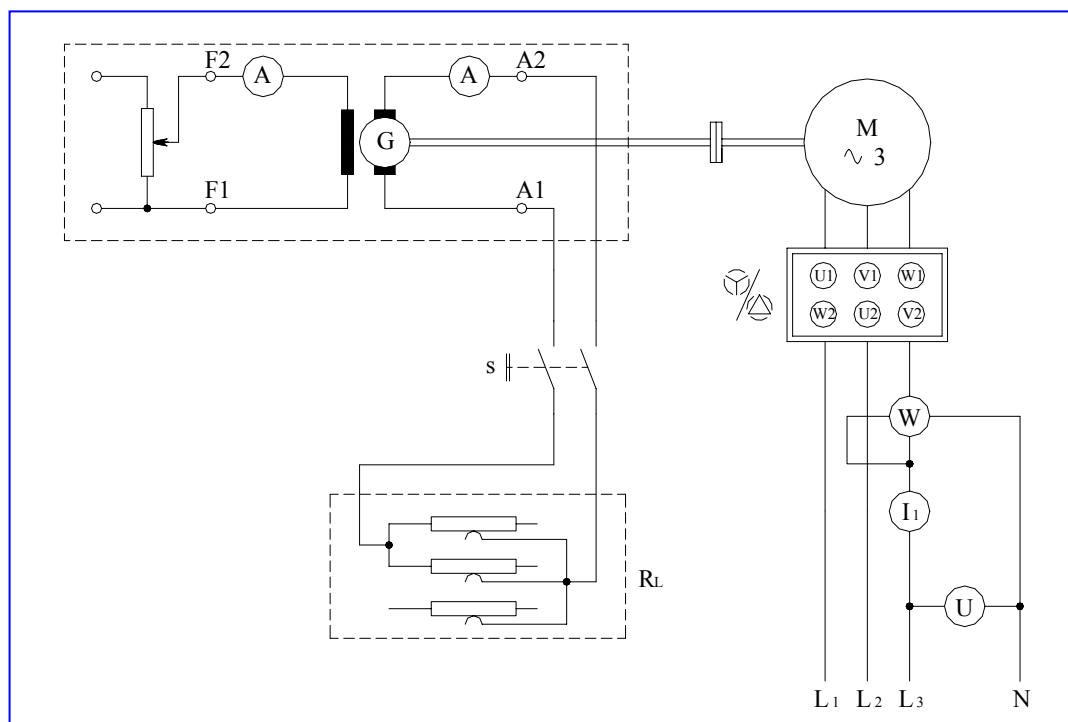
Η ισχύς του διακένου P_{12} δίνεται από τη σχέση $P_{12} = P_1 - P_{1cu} - P_{1Fe}$, όπου:

P_1 : η ισχύς εισόδου την στιγμή της εκκίνησης,

P_{1cu} : οι απώλειες χαλκού στο πρωτεύον τύλιγμα $P_{1cu} = 3R_1 I_1^2$ και

P_{1Fe} : οι απώλειες σιδήρου στο στάτη.

Επειδή το ρεύμα εκκίνησης του κινητήρα είναι μεγάλο, η μέτρηση υπολογίζεται με μια μειωμένη τάση και το αποτέλεσμα έπειτα ξανά υπολογίζεται για να μας δώσει το ρεύμα εκκίνησης που αντιστοιχεί στην ονομαστική τιμή της τάσης.

Κύκλωμα.

Απαιτούμενα όργανα και συσκευές.

- Μία γεννήτρια (G).
- Ένα επαγωγικό κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα (M).
- Ένα διακόπτη αστέρα – τριγώνου (Y/Δ).
- Μία αντίσταση φορτίου (R_L).
- Ένα βολτόμετρο (U).
- Ένα αμπερόμετρο (I_1).
- Ένα βαττόμετρο (W).
- Ένα απλό διακόπτη φορτίου (s).
- Ένα ωμόμετρο υψηλής ακριβείας, στην κλίμακα 1-10 Ω.

Σημείωση: Για να μην καταστραφεί το βαττόμετρο χρησιμοποιείτε έναν M/T ρεύματος. Το ρεύμα στην δοκιμή 3 είναι 6,6A.

Συνδεσμολογία και εκκίνηση.

1. Ο επαγωγικός κινητήρας συνδέεται σύμφωνα με το διάγραμμα του κυκλώματος. Η γεννήτρια δεν συνδέεται στο κύκλωμα αλλά μπορεί να συνδεθεί με τον κινητήρα κατά την διάρκεια της δοκιμής. Ο διακόπτης αστέρα-τριγώνου πρέπει να είναι στη θέση "Y".
2. Κλείστε (On) τον διακόπτη της μεταβλητής τάσης. Κρατήστε τον δρομέα με το χέρι, έτσι ώστε ο κινητήρας να μην μπορεί να ξεκινήσει. Σημειώστε ότι ο κινητήρας έχει χαμηλή ροπή στις τάσεις που χρησιμοποιούνται σ' αυτή την δοκιμή. Αυξήστε την μεταβλητή τάση αργά μέχρι το ρεύμα να γίνει το ίδιο με την τιμή του ρεύματος για τον κινητήρα με την σύνδεση αστέρα (3,8A), που αναφέρεται στην πινακίδα του. Διαβάστε και σημειώστε τις τιμές των I, U και P. Μηδενίστε την AC τάση.
3. Θέστε τον διακόπτη αστέρα-τριγώνου στη θέση "Δ". Αυξήστε την AC τάση αργά με τον ίδιο τρόπο όπως στην μέτρηση 2, μέχρι το ρεύμα να γίνει το ίδιο με το μέγεθος του ρεύματος για τον κινητήρα με σύνδεση "Δ". Διαβάστε και σημειώστε τις τιμές των I, U και P.
4. Μετρήστε την αντίσταση ενός από τα τυλίγματα του κινητήρα με το ωμόμετρο.

Προβλήματα και ερωτήσεις.

1. Υπολογίστε την $P_{1cu} = 3R_1 I_1^2$ για την μέτρηση 2.
2. Υπολογίστε την $P_{12} = 3P - P_{1cu}$ για την μέτρηση 2. Η P_{1Fe} μπορεί να παραληφθεί επειδή η τάση γι' αυτή τη δοκιμή είναι πολύ χαμηλή.
3. Υπολογίστε την ροπή εκκίνησης $M_{εκY} = \frac{P_{12}}{\omega_1}$ για την μέτρηση 2. Όπου $\omega_1 = \frac{2\pi \cdot 1500}{60}$ γι' αυτόν τον τετραπολικό κινητήρα.

4. Υπολογίστε την ροπή εκκίνησης σε Y για ονομαστική τάση:

$$M_{εκYov} = M_{εκY} \cdot \left(\frac{U_{\phi}}{U} \right)^2 .$$

5. Υπολογίστε την $P_{1cu} = 3R_1 \cdot \left(\frac{I_1}{\sqrt{3}} \right)^2$ για την μέτρηση 3. Είναι απαραίτητο να χρησιμοποιήσουμε την ρίζα τρία γιατί ο κινητήρας σ' αυτή τη δοκιμή είναι σε σύνδεση "Δ".
6. Υπολογίστε την ροπή εκκίνησης για τη σύνδεση "Δ" με τον τρόπο που περιγράφηκε στις 2-4.
7. Υπολογίστε τον λόγο των ροπών εκκίνησης για τις συνδέσεις τριγώνου και αστερά. Ν' αποδειχθεί η θεωρητική τιμή.
8. Υπολογίστε τις σχετικές τιμές $\frac{M_{εκYov}}{M_{ov}}$ και $\frac{M_{εκΔov}}{M_{ov}}$.

Πίνακας μετρήσεων.

| | Μετρούμενες τιμές | | | | Υπολογιζόμενες τιμές | | |
|---|-------------------|----------|----------|-----------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|
| | I (A) | U (V) | P (W) | R ₁ (Ω) | P _{1cu} (W) | P ₁₂ (W) | M _{εκ} (Nm) |
| 2 | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | |

$$M_{εκY} = \dots\dots\dots \text{ Nm.}$$

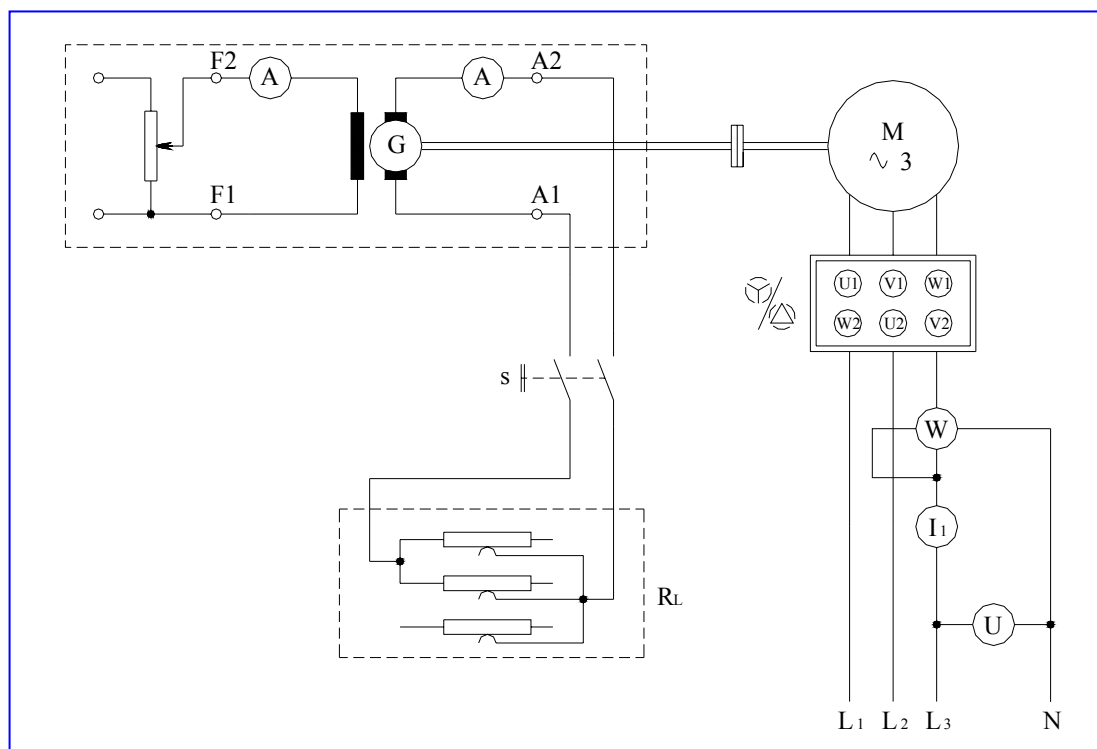
$$M_{εκΔ} = \dots\dots\dots \text{ Nm.}$$

$$\frac{M_{εκΔ}}{M_{εκY}} = \dots\dots\dots$$

Κινητήρας βραχυκυκλωμένου δρομέα V.**Υπολογισμός της ροπής ανατροπής.****Θεωρητικά.**

Αν προσπαθήσουμε να μετρήσουμε την μέγιστη ροπή ακριβώς, το ρεύμα του κινητήρα θα ανέβει πάρα πολύ. Γι' αυτό το λόγο η μέτρηση γίνεται έμμεσα με ρυθμιζόμενη τάση. Αποσκοπεί στο να σχεδιαστεί η μηχανική χαρακτηριστική και έμμεσα, μέσω αυτής, να βρούμε την ροπή ανατροπής.

Αν ο κινητήρας φορτιστεί με μεγαλύτερη ροπή της ροπής ανατροπής θα σταματήσει. Προκειμένου λοιπόν να αποφύγουμε την υπερθέρμανση του από την απότομη αύξηση του ρεύματος, του διακόπτουμε την τροφοδοσία.

Κύκλωμα.**Απαιτούμενα όργανα και συσκευές.**

- Μία γεννήτρια (G).
- Ένα επαγωγικό κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα (M).
- Ένα διακόπτη αστέρα – τριγώνου (Y/Δ).
- Μία αντίσταση φορτίου (R_L).
- Ένα βολτόμετρο (U).
- Ένα αμπερόμετρο (I_1).
- Ένα βαττόμετρο (W).
- Ένα απλό διακόπτη φορτίου (s).
- Ένα ωμόμετρο υψηλής ακριβείας, στην κλίμακα 1-10 Ω.

Σημείωση: Για να μην καταστραφεί το βατόμετρο χρησιμοποιείτε έναν Μ/Τ ρεύματος. Το ρεύμα στην δοκιμή 3 είναι 6,6Α.

Συνδεσμολογία και εκκίνηση.

1. Ανοίγουμε τον διακόπτη της μεταβλητής AC τάσεως και αυξάνουμε αυτή σταδιακά μέχρι τα 100V.
2. Φορτίζουμε τον κινητήρα ξεκινώντας με ελαφρύ φορτίο.
 - α) Φροντίζουμε η R_L να είναι σε θέση που να δίνει ελάχιστο ρεύμα στον κινητήρα και ενώ η γεννήτρια είναι διεγερμένη στην κανονική της λειτουργία.
 - β) Στην θέση της γεννήτριας μπορεί να κομπλαριστεί μία πέδη δινορευμάτων με την οποία μπορούμε επίσης να ρυθμίζουμε το φορτίο σταδιακά κατά βήματα του ενός Nm.
3. Κατά τη μεταβολή του φορτίου σε κάθε βήμα σημειώνουμε την ροπή και τις στροφές μέχρι το σημείο της μέγιστης ροπής του κινητήρα.
4. Διακόπτουμε την AC και DC τάση.

Προβλήματα και ερωτήσεις.

1. Σχεδιάστε την χαρακτηριστική $M = f(n)$ και σημειώστε σε αυτήν τη μέγιστη ροπή στα 100V.
2. Υπολογίστε τη μέγιστη ροπή του κινητήρα για 220V. Η ροπή είναι ανάλογη του τετραγώνου της τάσεως.

$$M_{\max 220} = M_{\max 100} \cdot \left(\frac{220}{100} \right)^2$$

$M_{\max 100} = \dots\dots\dots$ Nm.

$M_{\max 220} = \dots\dots\dots$ Nm.

Σημείωση: Αν δεν υπάρχει ροπόμετρο τότε θα πρέπει να βρούμε την ροπή έμμεσα με την μέθοδο διαχωρισμού των απωλειών, δηλαδή $P_1 = P_2 + \sum P_{\text{απ}}$, όπου η P_1 μετριέται με το βατόμετρο, η P_2 υπολογίζεται από την σχέση $P_2 = P_1 - \sum P$ (ισούται επίσης με $P_2 = M_2 \cdot \Omega$ απ' όπου συνεπάγεται ότι $M_2 = \frac{P_2}{\Omega}$).

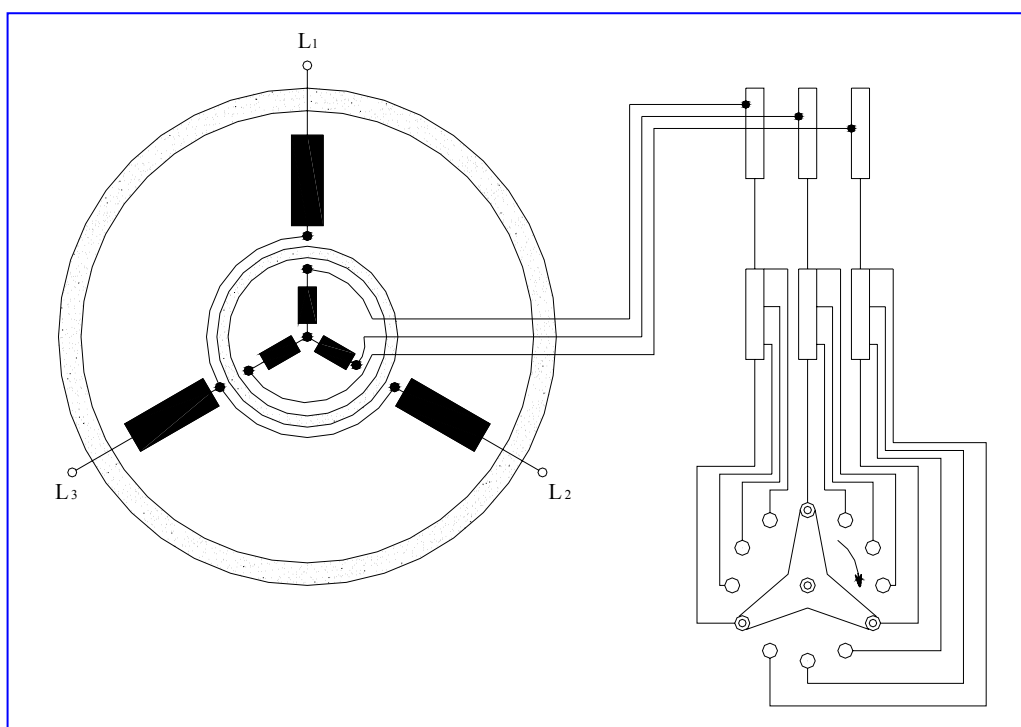
και τέλος το σύνολο των απωλειών από την $\sum P_{\text{απ}} = P_{\text{cu1}} + P_{\text{cu2}} + P_{\text{Fe}} + P_{\text{τρ}}$.

Πίνακας μετρήσεων.

| | Μετρούμενες τιμές | | | | Υπολογιζόμενες τιμές | | |
|---|-------------------|----------|----------|-----------------------|-------------------------|-----------------|-------------------------|
| | I (A) | U (V) | P (W) | R_1 (Ω) | $P_{1\text{cu}}$ (W) | P_{12} (W) | M_{EK} (Nm) |
| 2 | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | |

Κινητήρας δακτυλιοφόρου δρομέα Ι.**Γενικά.****Θεωρητικά.**

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 3 άκρα της περιέλιξη καταλήγουν στους 3 δακτυλίους ολίσθησης που αποτελούνται από κράματα ορειχάλκου. Επάνω ολισθαίνουν οι ψήκτρες (που είναι τοποθετημένες στις ψηκτροθήκες) οι οποίες είναι συνδεδεμένες με τα άκρα U2, V2 και W2 στο ακροκιβώτιο του κινητήρα.



Συμμετρικός εκκινητής 3 βαθμίδων (4 λήψεων) με στρόφαλο.

Τα άκρα αυτά συνδέονται με μια τριφασική, βαθμωτή εξωτερική αντίσταση (στο εργαστήριο μας είναι συνεχής), με τη βοήθεια της οποίας καθίσταται 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.

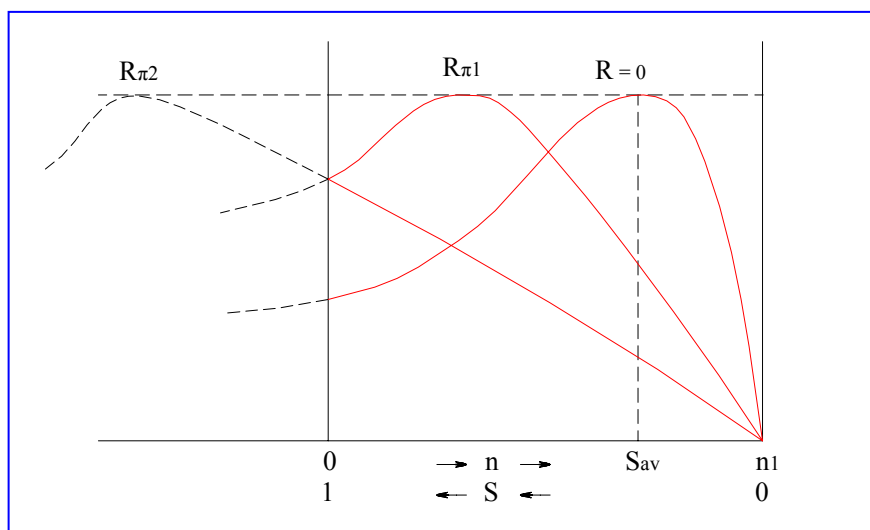
Σε δύσκολες εκκινήσεις, στις οποίες απαιτείται μικρό ρεύμα εκκίνησης και μεγάλη ροπή, απαιτήσεις που δεν μπορούν να ικανοποιηθούν με βραχυκυκλωμένο κλωβό και διακόπτη Υ/Δ, χρησιμοποιείται ο ασύγχρονος κινητήρας δακτυλιοφόρου δρομέα.

Αργή λειτουργία.

Από τη θεωρία των ασύγχρονων μηχανών προκύπτει ότι η ροπή ανατροπής είναι ανάλογη της ολικής ωμικής αντίστασης του δρομέα (εσωτερικής R_2 και εξωτερικής R_π)

$$S_{av} = c (R_2 + R_\pi)$$

ενώ η ροπή ανατροπής T_{av} δεν εξαρτάται αξιοσημείωτα από αυτή.



Με την παρεμβολή εξωτερικών αντιστάσεων $R_{\pi 1}$, $R_{\pi 2}$ μετακινείται το σημείο ανατροπής προς τα αριστερά ενώ για αρκετά μεγάλες τιμές των εξωτερικών αντιστάσεων, επιτυγχάνεται σχεδόν η γραμμικοποίηση της σχέσης ροπής και ολίσθησης στην ενδιαφέρουσα περιοχή $0 < s < 1$. Εύκολα αποδεικνύεται ότι και το ρεύμα γίνεται ανάλογο της ολίσθησης, άρα ρεύμα και ροπή γίνονται μεταξύ τους ανάλογα (δείτε το παρακάτω δεξιού σχήμα).

Λόγω της μεγάλης ωμικής αντίστασης η μηχανή έχει ωμική συμπεριφορά η οποία σε πρώτη προσέγγιση μπορεί να περιγραφεί με το πολύ απλοποιημένο κύκλωμα του παρακάτω αριστερού σχήματος όπου οι αντιδράσεις σκέδασης, η ωμική αντίσταση του στάτη R_1 και το ρεύμα μαγνήτισης έχουν αμεληθεί. Προσεγγιστικά λοιπόν έχουμε ότι

$$I_1 = \frac{U_1}{(R'_2 + R'_\pi) \cdot s} \quad (2)$$

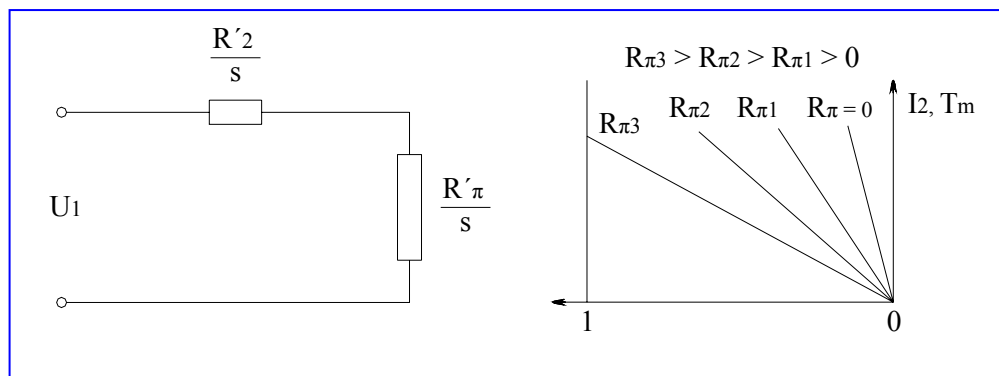
και

$$T_m = \frac{P_\delta}{\omega_{1m}} = \frac{3 \cdot U \cdot I_1}{\omega_{1m}} \quad (3)$$

ή

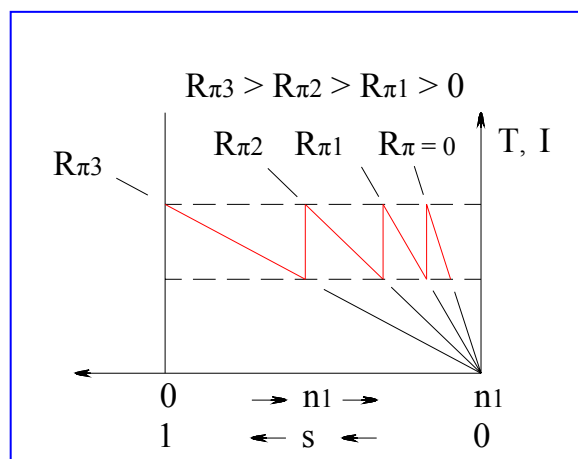
$$T_m = \frac{3 \cdot U_1^2}{\omega_{1m} \cdot S \cdot (R'_2 + R'_\pi)} \quad (4)$$

Οι αντιστάσεις R'_2 και R'_π είναι ανοιγμένες τιμές των R_2 και R_π αντίστοιχα, δηλαδή έχουν πολλαπλασιαστεί με το τετράγωνο της σταθερής σχέσης μεταφοράς.



Με την κατάλληλη εξωτερική αντίσταση R_{π} επιτυγχάνεται στην εκκίνηση οποιαδήποτε τιμή της ροπής, μικρότερη ή ίση φυσικά της T_{ov} . Το ρεύμα εκκίνησης μπορεί να μειωθεί σε οποιαδήποτε επιθυμητή τιμή (ανάλογα βέβαια θα μειωθεί και η ροπή εκκίνησης). Εάν π.χ. απαιτείται μια ροπή εκκίνησης $T_{εκ} = 1,4 T_{ov}$, το αντίστοιχο ρεύμα εκκίνησης θα είναι επίσης $I_{εκ} = 1,4 I_{ov}$, ενώ στην περίπτωση του βραχυκυκλωμένου κλωβού τόσο μεγάλη ροπή μπορεί να επιτευχθεί με ρεύμα εκκίνησης $I_{εκ} > 9I_{ov}$.

Τη στιγμή της εκκίνησης βρίσκεται ολόκληρη η εξωτερική αντίσταση εντός του κυκλώματος του δρομέα. Αυξανόμενης όμως της περιστροφικής ταχύτητας του δρομέα μειώνεται η ροπή στρέψης. Για το λόγο αυτό βραχυκυκλώνεται σταδιακά η R_{π} . Έτσι η ροπή και το ρεύμα έχουν την πριονωτή μορφή του διπλανού σχήματος. Η μέση τιμή της ροπής καθώς και τα μέγιστα και τα ελάχιστα της πρέπει να ικανοποιούν τις σχετικές απαιτήσεις.



Οι διακυμάνσεις του ρεύματος και της ροπής μειώνονται προφανώς με την αύξηση του αριθμού των βαθμίδων της εξωτερικής αντίστασης, μέτρο βέβαια που συνεπάγεται αυξημένη δαπάνη. Στην πράξη όμως αρκούν μερικές βαθμίδες.

Για τον έλεγχο (μείωση) της περιστροφικής ταχύτητας σε συνεχή λειτουργία φόρτισης εφαρμόζεται η ίδια μέθοδος αλλά οι αντιστάσεις είναι πολύ μικρότερες σε σχέση με τις αντιστάσεις εκκίνησης και είναι αερόψυκτες. Η περιοχή μείωσης είναι περίπου μέχρι και -20% σε σχέση με την σύγχρονη περιστροφική ταχύτητα. Μεγαλύτερη μείωση δεν ενδείκνυται γιατί εκτός από την μεγάλη ελάττωση της ωφέλιμης ισχύος και του βαθμού απόδοσης αυξάνεται η θέρμανση της μηχανής λόγω της κακής ψύξης σε μικρές περιστροφικές ταχύτητες. Σε τετραπολικό κινητήρα δακτυλιοφόρου δρομέα η ορθολογική περιοχή ελέγχου είναι $1500 - 1200 \text{ rpm}$.

Στις εφαρμογές ο δακτυλιοφόρος δρομέας χρησιμοποιείται συνήθως σε ισχύς άνω των 30 KW .

Μέτρηση του ρεύματος δρομέα.

Το ρεύμα του δρομέα έχει στη λειτουργία μικρή συχνότητα $f_2 = s f_1$ και είναι δύσκολο να μετρηθεί π.χ. με όργανο κινητού σιδήρου γιατί ο δείκτης του ταλαντώνεται με συχνότητα $2 f_2$. Η μέση τιμή της μέγιστης και ελάχιστης ένδειξης είναι η ενεργός τιμή της I_2 .

Χρησιμοποιώντας όμως ένα όργανο κινητού πηνίου (για συνεχές ρεύμα), μπορούμε να μετρήσουμε τη συχνότητα f_2 , επειδή ο δείκτης παρακολουθεί τη στιγμιαία τιμή του ρεύματος. Στην πράξη, σε μεγάλους κινητήρες κυρίως, υπολογίζουμε το ρεύμα του δρομέα χρησιμοποιώντας την παρακάτω σχέση

$$I_2 \approx \frac{0,9 \cdot U_1}{U_2 \cdot I_1} \quad (5)$$

,όπου I_1 το μετρημένο ρεύμα του στάτη και U_1, U_2 οι τάσεις του στάτη και του δρομέα που αναγράφονται στην πινακίδα στοιχείων του κινητήρα.

Κινητήρας δακτυλιοφόρου δρομέα ΙΙ.**Μελέτη της εκκίνησης και της πέδησης.****Μέτρηση της απόδοσης και εύρεση της χαρακτηριστικής της ροπής.****Θεωρητικά.**

Η απόδοση η είναι ο λόγος της ισχύος εξόδου προς την ισχύ εισόδου.

$$\eta = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}}$$

Η ισχύς εξόδου P_{out} ορίζεται σαν συνάρτηση της ταχύτητας Ω και της ροπής M .

$$P_{\text{out}} = \Omega \cdot M \Leftrightarrow P_{\text{out}} = \left(\frac{2\pi \cdot n}{60} \right) \cdot M$$

Η ισχύς εισόδου P_{in} μετριέται με ένα βαττόμετρο W σε μια φάση οπότε είναι: $P_{\text{in}} = 3P$.

Η ολίσθηση υπολογίζεται από τη σχέση:

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1}$$

όπου n_1 η σύγχρονη ταχύτητα, π.χ. για αυτή την τετραπολική μηχανή $n_1 = 1500$ rpm.

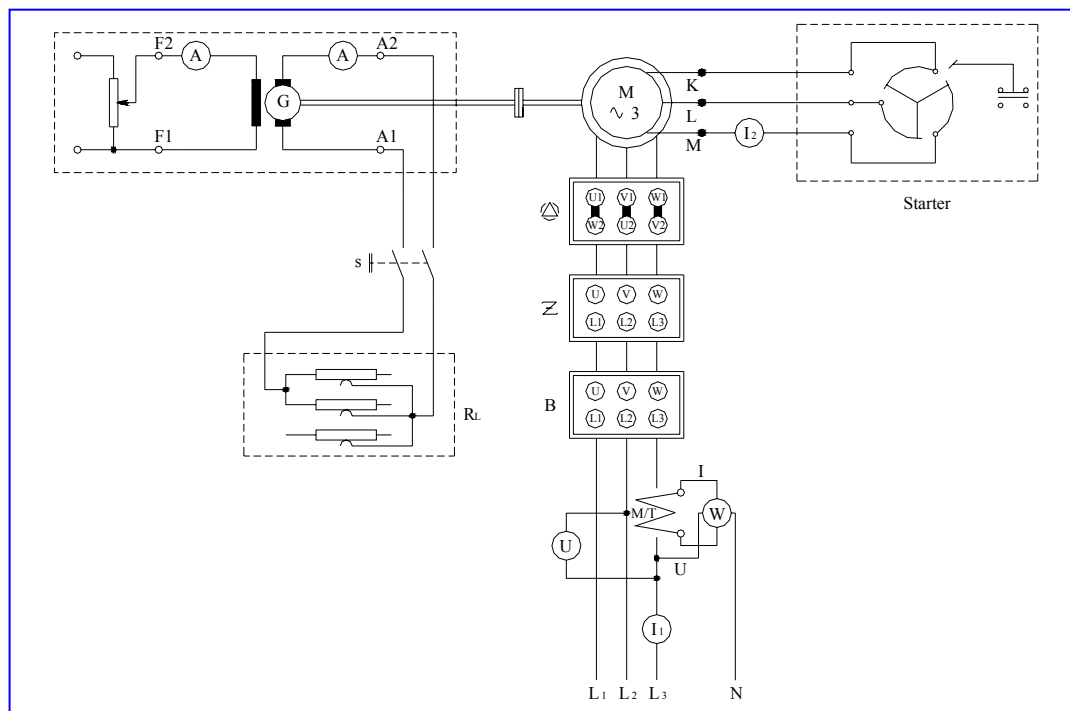
Όταν το φορτίο στον κινητήρα είναι μικρό η ταχύτητα είναι κοντά στις 1500 rpm και η ακρίβεια στον υπολογισμό της ολίσθησης θα είναι μικρή. Σ' αυτή την περίπτωση η συχνότητα του δρομέα ($f_2 = s f_1$) διαβάζεται αντί να υπολογίζεται, από τον αριθμό των ταλαντώσεων στη χρονική μονάδα στο αμπερόμετρο που είναι στο κύκλωμα του δρομέα.

$$s = \frac{f_2}{f_1}, \text{ όπου } f_1 \text{ η συχνότητα του δικτύου } 50\text{Hz.}$$

Πέδηση με αντίστροφη της πολικότητας επιτυγχάνεται με την αντιστροφή δύο άκρων του κινητήρα προκαλώντας έτσι μια τάση για περιστροφή στην αντίθετη κατεύθυνση.

Απαιτούμενα όργανα και συσκευές.

- Μία γεννήτρια (G).
- Ένα επαγωγικό κινητήρα δακτυλιοφόρου δρομέα (M).
- Ένα διακόπτη αστέρα – τριγώνου (Y/Δ).
- Ένα διακόπτη αντιστροφής (Z).
- Ένα τριπολικό διακόπτης (B).
- Ένα εκκινητή δρομέα (Starter).
- Μία αντίσταση φορτίου (R_L).
- Ένα βολτόμετρο (U).
- Δύο αμπερόμετρα (I).
- Ένα βαττόμετρο (W).
- Ένα απλό διακόπτη φορτίου (S).

Κύκλωμα.**1. Μέτρηση αντίστασης.**

Μετρήστε τις ωμικές αντιστάσεις του στάτη και του δρομέα σε κρύα κατάσταση (20°C). Οι τιμές αυτές χρειάζονται στο επόμενο πείραμα.

1. Μετρήστε τις τρεις αντιστάσεις μεταξύ U_1, U_2, V_1, V_2 και W_1, W_2 στα άκρα του στάτη με ένα ωμόμετρο.
2. Συνδέστε το ωμόμετρο με δύο άκρα του δρομέα. Γυρίστε τον δρομέα ελαφρά κατά την διάρκεια της μέτρησης και παρατηρήστε ότι οι ενδείξεις των οργάνων αλλάζουν. Αυτό συμβαίνει εξ' αιτίας της μεταβολής της αντίστασης των ψηκτρών. Για να το αποφύγετε αυτό, ανοίξτε το κάλυμμα των δακτυλιδιών ολίσθησης του κινητήρα και μετρήστε την αντίσταση απ' ευθείας πάνω στα δακτυλίδια. Μετρήστε τις τρεις αντιστάσεις ανάμεσα στα δακτυλίδια ολίσθησης.
3. Στον πίνακα 3 του επόμενου πειράματος οι R_1, R_2, R_3 είναι για τον στάτη. Οι φασικές αντιστάσεις για τον δρομέα είναι οι αντιστάσεις μεταξύ δύο άκρων του αστέρα, δηλαδή R_{KL}, R_{KM}, R_{LM} , δηλαδή $R_{\text{φασ}} = \frac{1}{2} R_{KL}$.

2. Συνδεσμολογία.

1. Συνδέστε το ροπόμετρο σαν γεννήτρια και τον επαγωγικό κινητήρα σαν κινητήρα, σε συνδεσμολογία "Δ" σύμφωνα με το διάγραμμα του κυκλώματος. Οι διακόπτες S και B πρέπει να είναι ανοικτοί (Off) και ο Z στην θέση "1".
2. Σημειώστε τις ονομαστικές τιμές του επαγωγικού κινητήρα που αναγράφονται στην πινακίδα του.
3. Ο επόπτης πρέπει να ελέγξει τώρα τις συνδέσεις.

3. Μέτρηση ρεύματος εκκίνησης.

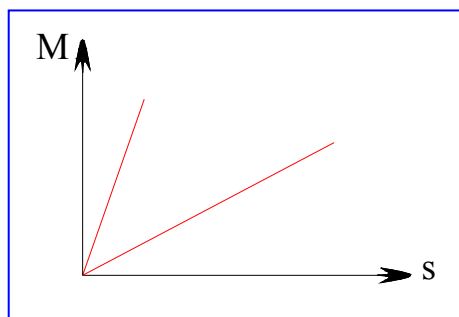
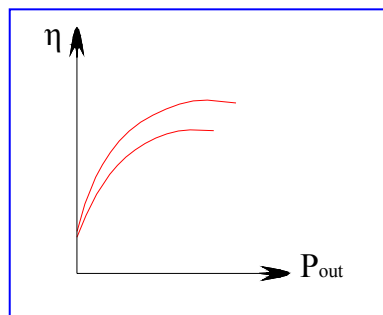
1. Θέστε τον Starter του δρομέα στην μικρότερη αντίσταση ($R = 0$) και κλείστε τον διακόπτη της μεταβλητής AC τάσης (On). Κρατείστε τον δρομέα με το χέρι, κλείστε τον διακόπτη B (On) και αυξήστε την τάση στα 50 V. Σημειώστε το ρεύμα I_1 και μηδενίστε την τάση.
2. Θέστε τον Starter του δρομέα στην μέγιστη αντίσταση. Κρατήστε τον δρομέα με το χέρι και ανεβάστε την τάση στα 50 V. Σημειώστε το ρεύμα I_1 και μηδενίστε την τάση.

4. Πέδηση με αναστροφή πολικότητας.

1. Θέστε τον Starter του δρομέα στην μέγιστη αντίσταση, τον διακόπτη αντιστροφής Z στο "1" και τον διακόπτη B στη θέση Off. Κλείστε τον διακόπτη της AC τάσης και ανεβάστε την στα V.
2. Γυρίστε τον διακόπτη B στην θέση On για να ξεκινήσει ο κινητήρας. Όταν ο κινητήρας φτάσει στην πλήρη ταχύτητα του γυρίστε τον διακόπτη Z στο "2" και μετρήστε τον χρόνο μέχρι να σταματήσει ο κινητήρας. Ανοίξτε τον διακόπτη της AC τάσης.

5. Μέτρηση της χαρακτηριστικής απόδοσης και της χαρακτηριστικής ροπής.

1. Θέστε τον Starter του δρομέα στην μέγιστη αντίσταση, τον διακόπτη αντιστροφής Z στη θέση "1" και τον διακόπτη B στη θέση "Off". Κλείστε τον γενικό διακόπτη της μεταβλητής AC τάσης και ρυθμίστε την στα 220 V. Βεβαιωθείτε ότι η αντίσταση φορτίου R_L είναι ρυθμισμένη στο ελάχιστο ρεύμα ($R_L = \text{Max}$). Κλείστε τον διακόπτη B (On) για να ξεκινήσει ο κινητήρας.
2. Κατά την διάρκεια των μετρήσεων κρατείστε την τάση σταθερά στα 220V. Στρέψτε το βολάν του Starter αργά μέχρι να βραχυκυκλωθεί η αντίσταση του και διαβάστε τα U , I_1 , P , M , n και την συχνότητα του δρομέα στο αμπερόμετρο I_2 .
3. Κλείστε τον διακόπτη S (On) θέτοντας έτσι το φορτίο στο κύκλωμα. Μεταβάλλετε το φορτίο με τον παράλληλο ροοστάτη της γεννήτριας και την αντίσταση φορτίου R_L με βήματα του 1 Nm μέχρι 10 Nm (M_{ov}). Για κάθε βήμα σημειώστε τα U_1 , I_1 , P , M και n .
4. Ρυθμίστε την αντίσταση φορτίου στο ελάχιστο ρεύμα. Ανοίξτε τον διακόπτη S.



6. Έλεγχος της ταχύτητας.

1. Ρυθμίστε τον Starter του δρομέα έτσι ώστε η μισή του αντίσταση να μείνει στο κύκλωμα.
2. Επαναλάβετε τις μετρήσεις της 5.3 και τις ενέργειες της 5.4.
3. Ανοίξτε τον διακόπτη της μεταβλητής AC τάσης και τον γενικό του τροφοδοτικού.

Προβλήματα και ερωτήσεις.

1. Συμπληρώστε τις υπολογισμένες τιμές στον πίνακα.
2. Σχεδιάστε τις καμπύλες $\eta = f(P_{out})$ για τις μετρήσεις 5 και 6 στο ίδιο διάγραμμα.
3. Σχεδιάστε τις καμπύλες $M = f(s)$ για τις μετρήσεις 5 και 6 στο ίδιο διάγραμμα. Προεκτείνετε τις καμπύλες μέχρι το σημείο $M = 0$. Ποια είναι η ολίσθηση s για $M = 0$.
4. Υπολογίστε τον συντελεστή ισχύος υπό πλήρες φορτίο. Εξηγήστε την χαμηλή του τιμή.
5. Σχεδιάστε το διάγραμμα του κυκλώματος για τον αντιστροφέα εκκίνησης και περιγράψτε την λειτουργία του.
6. Σχεδιάστε τις καμπύλες $I_1 = f(P_{out})$, $\cos\phi = f(P_{out})$, $M = f(P_{out})$, $P_{in} = f(P_{out})$ και $\eta = f(P_{out})$ για τις μετρήσεις της 5.

➤ Ρεύματα εκκίνησης για $U = 50 \text{ Volt}$.

| | $R_{Starter} = 0$ | $R_{Starter} = \max$ |
|--------------|-------------------|----------------------|
| I_1 (A) | | |

Κινητήρας δακτυλιοφόρου δρομέα ΙΙΙ.**Δοκιμή προδιαγραφών κινητήρα.****Θεωρητικά.**

Σύμφωνα με τις προδιαγραφές ο βαθμός απόδοσης για τριφασικούς κινητήρες με ισχύ μεγαλύτερη από 400W μπορεί να ορισθεί σύμφωνα με την μέθοδο του αθροίσματος των απωλειών η οποία συνεπάγεται μέτρηση των διαφορετικών απωλειών χωριστά. Οι απώλειες σ' έναν επαγωγικό κινητήρα διακρίνονται σε:

- α) Απώλειες ανεξάρτητες από το ρεύμα του φορτίου που είναι οι:
- Απώλειες σιδήρου P_{Fe} και οι
 - Απώλειες τριβών $P_{τρ}$. Αυτές διακρίνονται σε:
 - Απώλειες τριβών εδράνων (ρουλεμάν).
 - Απώλειες αερισμού.
 - Απώλειες τριβών ψηκτρών.
- β) Απώλειες που εξαρτώνται από το ρεύμα του φορτίου που είναι οι:
- Απώλειες αντιστάσεων στο πρωτεύον τύλιγμα.
 - Απώλειες αντιστάσεων στο δευτερεύον τύλιγμα.
 - Απώλειες αντιστάσεων στις ψήκτρες.
 - Πρόσθετες απώλειες στα σιδερένια τμήματα.
 - Πρόσθετες απώλειες στους αγωγούς.

Οι ισχύς θα μετρηθούν με ένα τριφασικό βαττόμετρο και οι αντιστάσεις με ένα ωμόμετρο.

Οι απώλειες αντιστάσεων (χαλκού) σ' ένα τριφασικό τύλιγμα ανεξάρτητα του κυκλώματος είναι:

$$P_{cu} = 3R I_{1\text{φασ}}^2$$

όπου R η μετρήσιμη αντίσταση μεταξύ δύο λήψεων μιας φάσεως του τριφασικού τυλίγματος και $I_{1\text{φασ}}$ το αντίστοιχο ρεύμα του τυλίγματος της φάσεως. Για σύνδεση

τριγώνου είναι:

$$P_{cu} = 3R \cdot \left(\frac{I_1}{\sqrt{3}} \right)^2$$

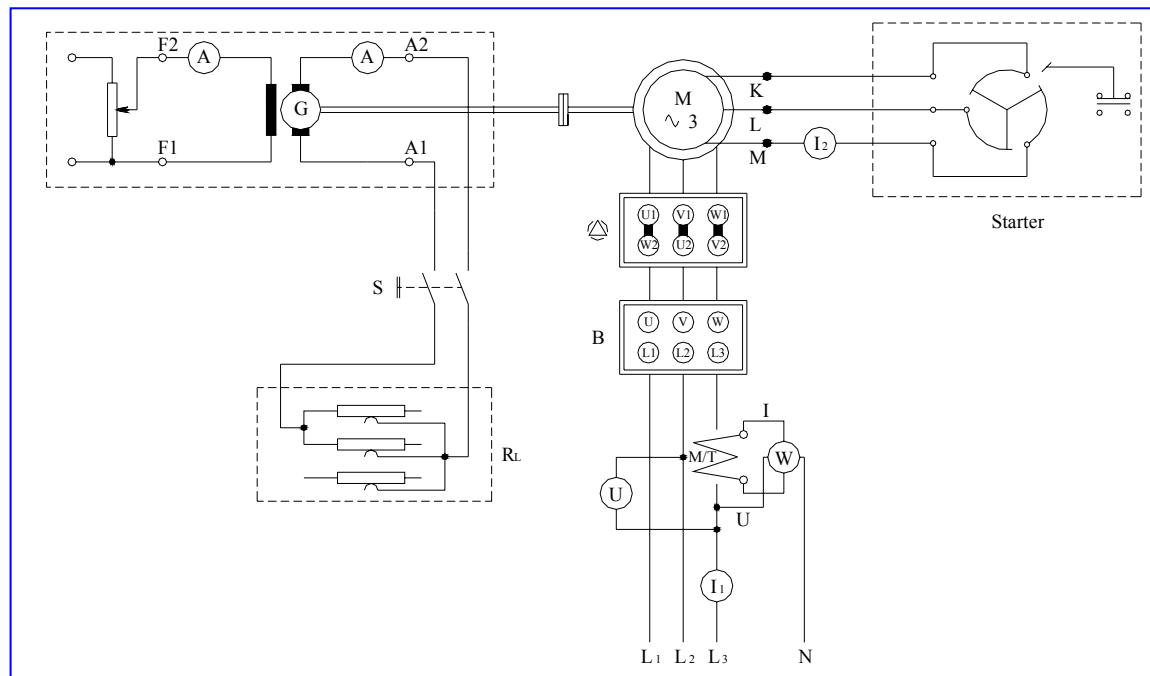
,όπου $R = R_{20}$ και I_1 ένα από τα ρεύματα γραμμής.

Απαιτούμενα όργανα και συσκευές.

- Μία γεννήτρια (G).
- Ένα επαγωγικό κινητήρα δακτυλιοφόρου δρομέα (M).
- Ένα διακόπτη αστέρα – τριγώνου (Y/Δ).
- Ένα τριπολικό διακόπτης (B).
- Ένα εκκινητή δρομέα (Starter).
- Μία αντίσταση φορτίου (R_L).
- Ένα βολτόμετρο (U).
- Δύο αμπερόμετρα (I).

- Ένα βατόμετρο (W).
- Ένα απλό διακόπτη φορτίου (S).
- Ένα ωμόμετρο (Ω).

Κύκλωμα.



1. Συνδεσμολογία.

1. Το ροτόμετρο πρέπει να συνδεθεί σαν γεννήτρια και ο επαγωγικός κινητήρας σε σύνδεση "Δ" σύμφωνα με το διάγραμμα του κυκλώματος.
2. Σημειώστε τις ονομαστικές τιμές του κινητήρα.
3. Ο υπεύθυνος του εργαστηρίου πρέπει τώρα να ελέγξει τις συνδέσεις.

2. Δοκιμή εν κενό (χωρίς φορτίο).

Το άθροισμα όλων των απωλειών σύμφωνα από το α) της θεωρίας μπορεί να υπολογισθεί με την δοκιμή εν κενό. Για να μην επηρεαστεί το αποτέλεσμα από τις απώλειες στη γεννήτρια, ο επαγωγικός κινητήρας πρέπει να αποσυνδεθεί από τη γεννήτρια κατά τη διάρκεια της δοκιμής.

1. Τοποθετήστε τον διακόπτη B στη θέση Off. Ελέγξτε αν ο εκκινητής του δρομέα είναι τοποθετημένος έτσι ώστε ολόκληρη η αντίσταση του να είναι συνδεδεμένη στο κύκλωμα του δρομέα. Κλείστε τον διακόπτη της μεταβλητής AC τάσης και ρυθμίστε την τάση στα 220V. Κλείστε τον διακόπτη B (On). Όταν ο κινητήρας έχει ξεκινήσει στρέψτε αργά το βολάν του εκκινητή έως ότου βραχυκυκλωθεί η αντίσταση του.
2. Κατά την διάρκεια των μετρήσεων κρατήστε την τάση U στα 220V σταθερή και σημειώστε όλες τις ενδείξεις των οργάνων. Σημειώστε ότι η

συχνότητα του δρομέα είναι τόσο χαμηλή ώστε το αμπερόμετρο στη γραμμή του δρομέα ακολουθεί τη στιγμιαία τιμή του ρεύματος δρομέα. Σημειώστε τη μέγιστη τιμή του.

3. Στρέψτε τον εκκινητή του δρομέα στην πλήρη αντίσταση και ανοίξτε τον διακόπτη της AC τάσης (Off).

3. Μέτρηση αντίστασης.

Για να μπορέσουμε να υπολογίσουμε τις απώλειες σύμφωνα με το β) της θεωρίας, πρέπει να μετρηθεί η αντίσταση στα τυλίγματα του στάτη και του δρομέα.

Χρειαζόμαστε όμως αυτές τις τιμές των αντιστάσεων στην κρύα κατάσταση του κινητήρα, δηλαδή στη θερμοκρασία περιβάλλοντος (20°C). Γι' αυτό παίρνουμε αυτές τις τιμές από την παράγραφο 1 του προηγούμενου πειράματος.

4. Απευθείας μέτρηση βαθμού απόδοσης.

1. Συνδέστε τον επαγωγικό κινητήρα στη γεννήτρια και ελέγξτε αν η σύνδεση είναι σύμφωνα με το διάγραμμα του κυκλώματος. Τοποθετήστε τον διακόπτη B στη θέση "Off".
2. Ελέγξτε εάν ο εκκινητής του δρομέα είναι τοποθετημένος έτσι ώστε όλη η αντίσταση του να είναι συνδεδεμένη στο κύκλωμα του δρομέα. Ελέγξτε αν ο διακόπτης S είναι στη θέση "Off". Κλείστε τον διακόπτη της μεταβλητής AC τάσης και ρυθμίστε την στα 220V. Κλείστε τον διακόπτη B (On). Όταν ο κινητήρας έχει αρχίσει να περιστρέφεται στρέψτε αργά το βολάν του εκκινητή έως ότου βραχυκυκλώσει η αντίστασή του.
3. Ελέγξτε αν ο διακόπτης S είναι στη θέση "Off". Τοποθετείστε τον ροοστάτη της διέγερσης της γεννήτριας για ελάχιστο ρεύμα διέγερσης και κλείστε (On) τον διακόπτη φορτίου S.
4. Ρυθμίστε την τάση U στα 220V και κρατήστε την σταθερή κατά την διάρκεια της μέτρησης. Φορτίστε τον επαγωγικό κινητήρα ρυθμίζοντας πρώτα τον ροοστάτη της γεννήτριας και έπειτα με την αντίσταση φορτίου R_L με βήματα των 2 Nm μέχρι τα 10 Nm (M_{ov}). Για κάθε βήμα σημειώστε τα U, I_1 , P_R , P_T , I_2 , M, και η , (για το I_2 σημειώστε την μέση τιμή).
5. Ελαττώστε το φορτίο ξανά στο ελάχιστο.

5. Υπερφόρτιση.

Σύμφωνα με τις προδιαγραφές ένας επαγωγικός κινητήρας μπορεί να αναπτύξει μια ροπή 1,6 φορές της ονομαστικής μέσα σε 15 sec χωρίς να σταματήσει ή να αλλάξει ξαφνικά ταχύτητα.

1. Υπολογίστε και σημειώστε τη ροπή με την οποία δοκιμάζεται η μηχανή.

$$M = 1,6 \cdot M_n = 1,6 \cdot \frac{P_n}{\omega_n}$$

2. Φορτίστε τον κινητήρα για 15 sec με την υπολογιζόμενη ροπή. Ο χρόνος δοκιμής δεν πρέπει όμως να ξεπεράσει τα 15 sec γιατί ο κινητήρας κινδυνεύει να υπερθερμανθεί.

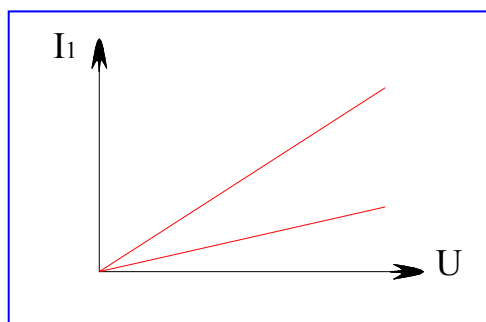
3. Σταματήστε τον κινητήρα γυρίζοντας την αντίσταση του εκκινητή του δρομέα και μετά διακόπτοντας την τροφοδοσία.

6. Ρεύμα εκκίνησης.

Γι' αυτόν τον κινητήρα το ρεύμα εκκίνησης είναι τόσο μεγάλο ώστε να μην μπορεί να μετρηθεί απ' ευθείας. Αντί αυτού μετριέται το ρεύμα σε κάποιες χαμηλότερες τάσεις και το ρεύμα εκκίνησης υπολογίζεται στη προέκταση της καμπύλης που προέκυψε από τα μετρημένα σημεία.

Για να αποφύγουμε την ανομοιομορφία, που οφείλεται στα αυλάκια του δρομέα και του στάτη, ο δρομέας θα περιστραφεί πολύ σιγά με το χέρι κατά τη διάρκεια της μέτρησης.

1. Θέστε την μεταβλητή τάση AC στο "0" και τον εκκινητή του δρομέα στη μηδενική αντίσταση.
2. Κλείστε (On) τον διακόπτη της AC τάσης, κρατείστε με το χέρι ακίνητο τον δρομέα και αυξήστε προσεκτικά την τάση, έτσι ώστε το ρεύμα του στάτη να αυξάνεται με βήματα του 1A ως το ονομαστικό ρεύμα. Για κάθε βήμα σημειώστε τα U και I₁. Μετά μηδενίστε την AC τάση.
3. Τοποθετήστε τον εκκινητή του δρομέα έτσι ώστε όλη η αντίσταση του να είναι συνδεδεμένη στο κύκλωμα του. Αυξήστε προσεκτικά την AC τάση έτσι ώστε το ρεύμα του στάτη να αυξάνεται με βήματα του 1A μέχρι τα 4A. Για κάθε βήμα σημειώστε τα U και I₁.
4. Ανοίξτε (Off) το διακόπτη της AC τάσης.



Προβλήματα και ερωτήσεις.

1. Υπολογίστε την ισχύ στο κενό P'ο και τον συντελεστή ισχύος cosφ για τη μέτρηση 2. $P'ο = 3P$ και $\cos\varphi = \frac{P'ο}{\sqrt{3} \cdot U \cdot I_1}$
2. Υπολογίστε τη μέση αντίσταση στις 3 φάσεις για τη μέτρηση 3.
3. Υπολογίστε τις απώλειες χαλκού στον στάτη και στον δρομέα, για τη μέτρηση 2, με αντίσταση αυτή που υπολογίσατε στο 2..
4. Υπολογίστε τις απώλειες τριβών και σιδήρου στο κενό $P_o = P'ο - P_{cuo}$.
5. Υπολογίστε ξανά τις αντιστάσεις του 2. στους 75°C χρησιμοποιώντας τη σχέση $R_{75} = R_{20} + (1 + 0,0039 \Delta\theta)$ όπου η θερμοκρασία t για την μέτρηση υποτίθεται ότι είναι 20°C.
6. Υπολογίστε τις απώλειες αντιστάσεων (χαλκού) στον στάτη και στο δρομέα: ονομαστικό ρεύμα από τη σχέση:

$$P_{2cu} = \frac{3}{2R_{KL75}} \cdot I_{2n}^2, \quad P_{1cu} = 3R_{75} \cdot \left(\frac{I_{1n}}{\sqrt{3}}\right)^2$$

7. Υπολογίστε τις ωμικές απώλειες αντιστάσεων στις ψήκτρες από τη σχέση: $P_{\psi\eta\kappa\tau\rho\acute{o}\nu} = 3 \cdot 0,3 I_{2n}^2$

όπου 0,3 είναι η πτώση τάσης σε μια ψήκτρα και I_{2n} το ρεύμα του δρομέα στο ονομαστικό φορτίο.

8. Υπολογίστε τις πρόσθετες απώλειες σιδήρου και αγωγών μαζί σαν $P_{\pi\alpha}$.

$$P_{\pi\alpha} = 0,005 \cdot P_{1n}$$

9. Υπολογίστε την απόδοση του κινητήρα υπό πλήρες φορτίο: $\eta = P_{1n} - \Sigma P_{\alpha\pi} / P_{1n}$.

$$\eta = \frac{P_{1n} - \sum P_{\alpha\pi}}{P_{1n}}$$

10. Διαβάστε τον βαθμό απόδοσης από την καμπύλη $\eta = f(P_{out})$ της μέτρησης 5. του προηγούμενου πειράματος για ονομαστικό φορτίο και συγκρίνετέ τον με την υπολογιζόμενη τιμή από την 9. αυτής της παραγράφου. Εξηγείστε τις διαφορές που τυχόν υπάρχουν.

11. Ποια τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της απ' ευθείας μεθόδου;

12. Σχεδιάστε για την μέτρηση 6. την καμπύλη $I_2 = f(U)$, δηλ. το ρεύμα εκκίνησης σαν συνάρτηση της τάσης του στάτη. Ο άξονας U πρέπει να φθάνει τα 220V. Προεκτείνετε την καμπύλη και βρείτε το ρεύμα εκκίνησης για ονομαστική τάση και $R = 0$ και $R \neq 0$.

Προσδιορισμός παραμέτρων ισοδύναμου κυκλώματος

ασύγχρονου επαγωγικού κινητήρα.

Θεωρητικά.

Το ισοδύναμο κύκλωμα ενός επαγωγικού κινητήρα αποτελεί ένα πολύ σημαντικό εργαλείο για τον προσδιορισμό της απόκρισης του κινητήρα στις αλλαγές του φορτίου του. Όμως για να χρησιμοποιηθεί το ισοδύναμο κύκλωμα του επαγωγικού κινητήρα, θα πρέπει να προσδιοριστούν οι τιμές των στοιχείων σ' αυτό το κύκλωμα. Πως όμως σε μια πραγματική μηχανή προσδιορίζονται τα R_1 , R'_2 , $X_{1\sigma}$, $X'_{2\sigma}$ και X_m ;

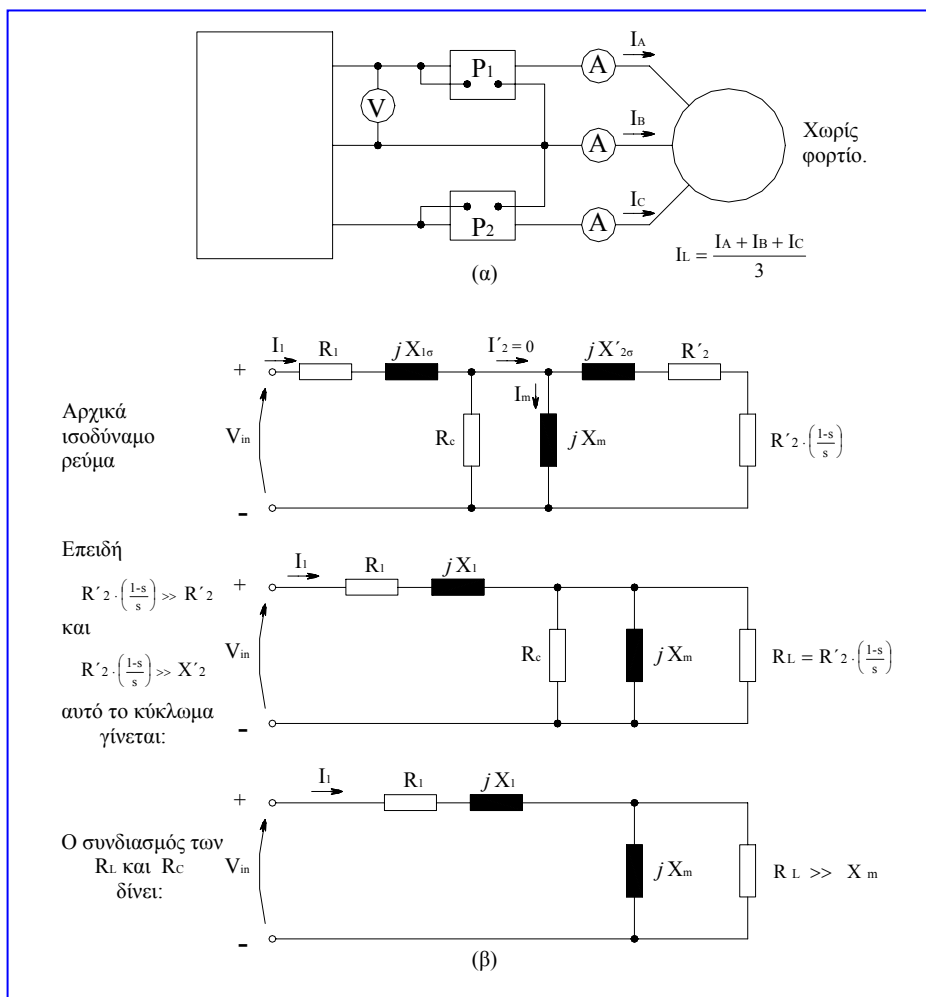
Αυτές οι πληροφορίες είναι δυνατό να εξαχθούν από έναν επαγωγικό κινητήρα αν αυτός υποβληθεί σε μια σειρά από πειράματα που είναι ανάλογα με τα πειράματα βραχυκύκλωσης και ανοιχτού κυκλώματος σ' ένα μετασχηματιστή. Τα πειράματα αυτά θα πρέπει να πραγματοποιούνται κάτω από συνθήκες αυστηρά ελεγχόμενες, επειδή οι αντιστάσεις μεταβάλλονται με τη θερμοκρασία και ειδικά η αντίσταση δρομέα R'_2/s μεταβάλλεται με τη συχνότητα στο δρομέα $S = \frac{f_2}{f_s}$. Αν και οι λεπτομέρειες της διαδικασίας των πειραμάτων είναι πολύ περίπλοκες οι βασικές αρχές του είναι σχετικά απλές και εξηγούνται στα επόμενα¹.

1. Πείραμα χωρίς φορτίο.

Στο πείραμα χωρίς φορτίο ενός επαγωγικού κινητήρα υπολογίζονται οι απώλειες περιστροφής του κινητήρα και παρέχονται πληροφορίες σχετικά με το ρεύμα μαγνήτισης. Η κυκλωματική διάταξη του πειράματος φαίνεται στο σχήμα 1-1α. Στον επαγωγικό κινητήρα που περιστρέφεται ελεύθερα συνδέονται δύο βολτόμετρα, ένα βολτόμετρο και τρία αμπερόμετρα. Το μοναδικό φορτίο για τον κινητήρα είναι οι απώλειες τριβών και εξαερισμού $P_{\tau p}$ με αποτέλεσμα όλη η εσωτερική ή επαγόμενη ισχύς $P_{εσ}$ να καταναλώνεται σ' αυτού του είδους τις μηχανικές απώλειες. Η ολίσθηση του κινητήρα είναι πολύ μικρή (ίσως μικρότερη και από 0,001). Το ισοδύναμο κύκλωμα του κινητήρα φαίνεται στο σχήμα 1-1β. Επειδή η ολίσθηση είναι πολύ μικρή η αντίσταση που αντιστοιχεί στην εσωτερική ισχύ $R'_2 \cdot \frac{(1-s)}{s}$ είναι πάρα πολύ μεγαλύτερη από την αντίσταση R'_2 που αντιστοιχεί στις απώλειες χαλκού στον δρομέα P_{2cu} και πολύ μεγαλύτερη από την αντίδραση X'_2 του δρομέα. Σ' αυτή την περίπτωση το ισοδύναμο κύκλωμα περιορίζεται προσεγγιστικά στο τελευταίο κύκλωμα του Σχήματος 1-1β.

Στο παρακάτω σχήμα (1-1) βλέπουμε το πείραμα χωρίς φορτίο σ' ένα επαγωγικό κινητήρα όπου, **(α)** Το πειραματικό κύκλωμα και **(β)** Το τελικό ισοδύναμο κύκλωμα του κινητήρα. Εδώ φαίνεται πως η αυτεπαγωγή του κινητήρα χωρίς φορτίο είναι ουσιαστικά ο συνδυασμός των R_1, jX_1 και jX_m συνδεδεμένων σε σειρά.

¹ Οι ακριβείς λεπτομέρειες σχετικά με τον τρόπο πραγματοποίησης των πειραμάτων σ' ένα επαγωγικό κινητήρα, ώστε να επιτυγχάνονται ακριβή αποτελέσματα, παρουσιάζονται στην Τυποποίηση 112 της IEEE.



Σ' αυτόν τον κινητήρα η ισχύς εισόδου που μετριέται με τα όργανα θα πρέπει να είναι ίση με τις απώλειες του κινητήρα. Οι απώλειες χαλκού στον δρομέα $P_{2cu} = 3I_2^2 R_2$ είναι αμελητέες, επειδή το ρεύμα I_2 είναι εξαιρετικά μικρό (αφού η αντίσταση φορτίου $R_2 \cdot \frac{(1-s)}{s}$ είναι μεγάλη) κι έτσι είναι δυνατό να αγνοηθούν. Οι απώλειες χαλκού στο στάτη δίνονται από τη σχέση:

$$P_{1cu} = 3I_1^2 R_1 \quad (1-1)$$

Έτσι η ισχύς εισόδου θα είναι ίση με:

$$P_1 = P_{1cu} + P_c + P_{τρ} + P_K = 3I_1^2 R_1 + P_{περ} \quad (1-2)$$

όπου $P_{περ}$ είναι οι απώλειες περιστροφής του κινητήρα:

$$P_{περ} = P_c + P_{τρ} + P_K \quad (1-3)$$

Άρα, αν είναι γνωστή η ισχύς εισόδου στον κινητήρα, μπορούν να υπολογιστούν οι απώλειες περιστροφής.

Το ισοδύναμο κύκλωμα που περιγράφει τον κινητήρα όταν λειτουργεί κάτω απ' αυτές τις συνθήκες, περιλαμβάνει τις αντιστάσεις R_c και $R_2 \cdot \frac{(1-s)}{s}$ που είναι συνδεδεμένες παράλληλα με την αντίδραση ενός μαγνητικού πεδίου στον επαγωγικό κινητήρα είναι αρκετά μεγάλο, αφού η μαγνητική αντίσταση του διακένου είναι μεγάλη. Έτσι η αντίδραση X_m θα είναι πολύ μικρότερη από τις αντιστάσεις που παραλληλίζονται μαζί της και ο συνολικός συντελεστής ισχύος θα είναι πολύ μικρός.

Επειδή λοιπόν παρουσιάζεται μεγάλο επαγωγικό ρεύμα, το μεγαλύτερο μέρος της πτώσης τάσης θα εμφανίζεται στα άκρα των επαγωγικών στοιχείων του κυκλώματος. Έτσι η προσεγγιστική τιμή της ισοδύναμης αντίστασης εισόδου θα είναι:

$$|Z_{εισ}| = \frac{V_{\Phi}}{I_1} = X_1 + X_m \quad (1-4)$$

Αν η X_1 μπορεί να προσδιοριστεί με κάποιον άλλον τρόπο (όπως θα δούμε παρακάτω), η αντίδραση μαγνήτισης X_m του κινητήρα θα είναι πια γνωστή.

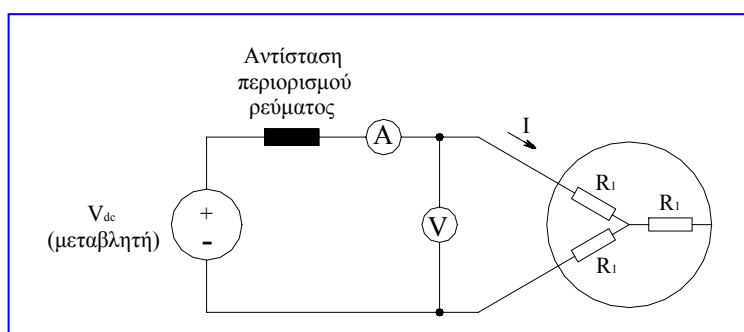
2. Υπολογισμός της αντίστασης του στάτη με το πείραμα συνεχούς ρεύματος.

Η αντίσταση του δρομέα R'_2 παίζει ένα πολύ σημαντικό ρόλο στη λειτουργία του επαγωγικού κινητήρα. Ανάμεσα σε άλλα η R'_2 προσδιορίζει τη μορφή της καμπύλης ροπής-ταχύτητας καθορίζοντας το σημείο της καμπύλης όπου εμφανίζεται η ροπή ανατροπής.

Μ' ένα τυποποιημένο πείραμα που ονομάζεται πείραμα ακινητοποιημένου δρομέα, είναι δυνατό να υπολογιστεί η συνολική αντίσταση του κυκλώματος του κινητήρα (αυτό το πείραμα παρουσιάζεται στην επόμενη ενότητα). Όμως μ' αυτό το πείραμα υπολογίζεται η συνολική αντίσταση του κυκλώματος. Για να βρεθεί με ακρίβεια η R'_2 , θα πρέπει να υπολογιστεί η R_1 και κατόπιν να αφαιρεθεί από τη συνολική αντίσταση.

Υπάρχει κάποιο πείραμα για τον υπολογισμό της R_1 ανεξάρτητα από τις R'_2 , X_1 και X'_2 . Αυτό ονομάζεται πείραμα συνεχούς ρεύματος. Στο τύλιγμα του στάτη ενός επαγωγικού κινητήρα εφαρμόζεται μια συνεχής τάση. Επειδή το ρεύμα είναι συνεχές, δεν επάγεται τάση στο κύκλωμα του δρομέα και το ρεύμα στο δρομέα είναι μηδέν. Επίσης η αντίδραση του κινητήρα είναι μηδέν εξαιτίας του συνεχούς ρεύματος. Έτσι το μόνο στοιχείο που περιορίζει το ρεύμα του κινητήρα είναι η αντίσταση του στάτη, που μπορεί να υπολογιστεί.

Το βασικό κύκλωμα για το πείραμα συνεχούς ρεύματος φαίνεται στο Σχήμα 2-1. Σ' αυτό το σχήμα μια πηγή συνεχούς τάσης συνδέεται στα δύο από τα τρία άκρα του επαγωγικού κινητήρα συνδεδεμένου σε αστέρα. Για την πραγματοποίηση του πειράματος το ρεύμα στα τυλίγματα του στάτη ρυθμίζεται στην ονομαστική του τιμή και μετριέται η τάση στ' άκρα του κινητήρα. Το ρεύμα στα τυλίγματα του στάτη ρυθμίζεται να έχει την ονομαστική του τιμή με σκοπό να θερμάνει τα τυλίγματα στη θερμοκρασία που θα έχουν στην κανονική λειτουργία (ας σημειωθεί ότι η αντίσταση του τυλίγματος είναι ανεξάρτητη της θερμοκρασίας).



Σχήμα σελ. 2-1: Το κύκλωμα για το πείραμα συνεχούς ρεύματος.

Το ρεύμα στο Σχήμα 2-1 διαρρέει τα δύο τυλίγματα του στάτη, οπότε η συνολική αντίσταση του κυκλώματος είναι $2R_1$.

Έτσι:

$$2R_1 = \frac{V_{DC}}{I_{DC}} \quad \text{ή} \quad R_1 = \frac{V_{DC}}{2I_{DC}} \quad (2-1)$$

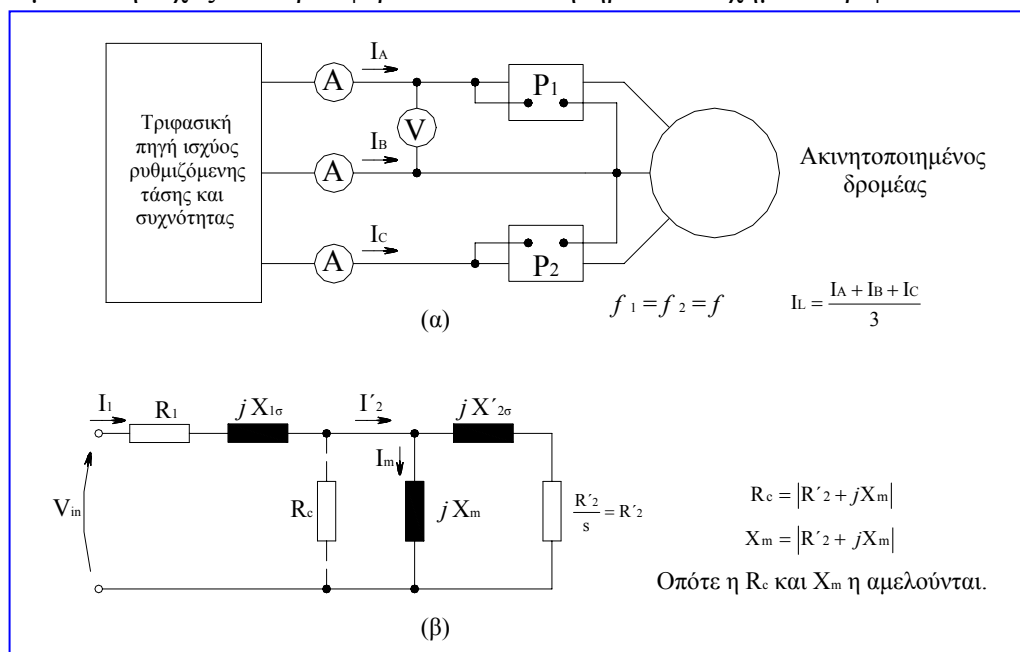
Με την τιμή της R_1 που υπολογίστηκε είναι δυνατό να προσδιοριστούν οι απώλειες χαλκού στο στάτη κατά τη λειτουργία χωρίς φορτίο, ενώ οι απώλειες περιστροφής υπολογίζονται από τη διαφορά των απωλειών χαλκού στο στάτη και της ισχύος εισόδου στη λειτουργία χωρίς φορτίο.

Η τιμή της R_1 που υπολογίστηκε με τον παραπάνω τρόπο δεν είναι εντελώς ακριβής, αφού αγνοεί το επιδερμικό φαινόμενο που παρουσιάζεται, όταν στο τύλιγμα εφαρμόζεται μια συνεχής τάση².

3. Πείραμα ακινητοποιημένου δρομέα.

Το τρίτο πείραμα που πραγματοποιείται σ' ένα επαγωγικό κινητήρα με σκοπό τον προσδιορισμό των παραμέτρων του κυκλώματος του ονομάζεται πείραμα ακινητοποιημένου δρομέα. Αυτό το πείραμα αντιστοιχεί στο πείραμα βραχυκύκλωσης που πραγματοποιείται σ' ένα μετασχηματιστή. Σ' αυτό το πείραμα ο δρομέας ακινητοποιείται, ώστε να μη μπορεί να κινηθεί, εφαρμόζεται μια τάση στον κινητήρα και κατόπιν μετριοούνται η τάση, το ρεύμα και η ισχύς.

Το Σχήμα 3-1α δείχνει τη συνδεσμολογία του πειράματος ακινητοποιημένου δρομέα. Κατά την υλοποίηση του πειράματος στο στάτη εφαρμόζεται εναλλασσόμενη τάση και ρυθμίζεται το ρεύμα, ώστε να είναι περίπου ίσο με το ρεύμα κατά την πλήρη φόρτιση. Όταν το ρεύμα αποκτά την τιμή πλήρους φόρτισης, μετριοούνται η τάση, το ρεύμα και η ισχύς που προσφέρεται στον κινητήρα. Στο σχήμα 3-1β φαίνεται το



Σχήμα 3-1α Το πείραμα ακινητοποιημένου δρομέα σ' ένα επαγωγικό κινητήρα.

(α) Πειραματικό κύκλωμα, (β) Ισοδύναμο κύκλωμα του κινητήρα.

ισοδύναμο κύκλωμα γι' αυτό το πείραμα. Ας σημειωθεί το γεγονός ότι, επειδή, ο

² Περισσότερες λεπτομέρειες που προσδιορίζουν κάποιες διορθώσεις της μεθόδου σχετικά με τη θερμοκρασία και το επιδερμικό φαινόμενο παρουσιάζονται στην Τυποποίηση 112 της IEEE.

δρομέας δεν κινείται η ολίσθηση είναι $s=1$ και έτσι η R'_2/s είναι ακριβώς ίση με R'_2 (αρκετά μικρή τιμή). Επειδή οι R'_2 και X'_2 είναι τόσο μικρές, σχεδόν όλο το ρεύμα εισόδου θα διαρρέει αυτές τις αντιστάσεις και όχι την πολύ μεγαλύτερη αντίδραση μαγνήτισης X_m . Έτσι στο κύκλωμα, κάτω από αυτές τις συνθήκες, οι X_1 , R_1 , X'_2 και R'_2 θα συμπεριφέρονται σαν να είναι συνδεδεμένες στη σειρά.

Όμως σ' αυτό το πείραμα υπάρχει κάποιο πρόβλημα. Η συχνότητα του στάτη στην κανονική λειτουργία είναι ίση με τη συχνότητα του συστήματος ισχύος (50Hz).

Η συχνότητα στο δρομέα κατά την εκκίνηση είναι κι αυτή ίση με τη συχνότητα του δικτύου. Όμως στην κανονική λειτουργία η ολίσθηση των περισσότερων κινητήρων είναι ίση το πολύ με 2 έως 4% κι έτσι το εύρος της συχνότητας στο δρομέα είναι από 1 έως 3Hz. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το εξής πρόβλημα: **η συχνότητα του δικτύου ισχύος δεν αντιπροσωπεύει τις κανονικές συνθήκες λειτουργίας στο δρομέα.** Αφού η ενεργός αντίσταση του δρομέα στους κινητήρας κλάσης B και Γ εξαρτάται σημαντικά από τη συχνότητα, η λανθασμένη συχνότητα στο δρομέα κατά τη διαδικασία του πειράματος μπορεί να οδηγήσει σε παραπλανητικά αποτελέσματα.

Ο τυπικός συμβιβασμός που γίνεται σ' αυτή την περίπτωση είναι η χρήση μιας συχνότητας μικρότερης από την ονομαστική κατά 25% ή και μικρότερης. Αν και αυτή η μέθοδος είναι αποδεκτή για τους δρομείς με σχεδόν σταθερή αντίσταση (κλάσης A και D) αφήνει πολλά κενά, όταν γίνεται προσπάθεια να υπολογιστεί η αντίσταση ενός δρομέα μεταβλητής αντίστασης. Εξαιτίας αυτών και κάποιων άλλων παρόμοιων προβλημάτων, όταν παίρνονται μετρήσεις απ' αυτά τα πειράματα θα πρέπει αν εφαρμόζονται με προσοχή οι κανονισμοί.

Μετά την οριστικοποίηση της τάσης και της συχνότητας του πειράματος, θα πρέπει το ρεύμα εισόδου στον κινητήρα να ρυθμιστεί γρήγορα στην ονομαστική τιμή και να μετρηθούν, η ισχύς η τάση και το ρεύμα εισόδου, πριν να θερμανθεί πάρα πολύ ο δρομέας. Η ισχύς εισόδου στον κινητήρα δίνεται από τη σχέση:

$$P_1 = \sqrt{3}V_{\pi}I_{\gamma\rho} \cdot \cos\theta \quad (3-1)$$

κι έτσι ο συντελεστής ισχύος ακινητοποιημένου δρομέα υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\cos\theta = \frac{P_1}{\sqrt{3}V_{\pi}I_{\gamma\rho}} \quad (3-2)$$

και η γωνία θ της σύνθετης αντίστασης είναι ίση με το $\cos\theta$.

Αυτή τη φορά το μέτρο της ολικής σύνθετης αντίστασης του κυκλώματος του κινητήρα είναι:

$$|Z_{ολ}| = \frac{V_{\Phi}}{I_1} = \frac{V_{\Pi}}{\sqrt{3}I_{\gamma\rho}} \quad (3-3)$$

και η φάση της ολικής σύνθετης αντίστασης είναι Θ , οπότε:

$$Z_{ολ} \angle \Theta = R_{ολ} + jX'_{ολ} = |Z_{ολ}| \cos\Theta + j|Z_{ολ}| \eta\mu\theta \quad (3-4)$$

Η αντίσταση ακινητοποιημένου δρομέα $R_{ολ}$ είναι ίση με:

$$R_{ολ} = R_1 + R'_2 \quad (3-5)$$

ενώ η αντίδραση ακινητοποιημένου δρομέα $X'_{ολ}$ είναι ίση με:

$$X'_{ολ} = X'_1 + X'_2 \quad (3-6)$$

όπου X'_1 και X'_2 είναι οι αντιδράσεις του στάτη και του δρομέα αντίστοιχα στη συχνότητα του πειράματος.

Τώρα η αντίσταση του δρομέα R'_2 υπολογίζεται ως εξής:

$$R'_2 = R_{o\lambda} - R_1 \quad (3-7)$$

όπου η R_1 υπολογίστηκε στο πείραμα συνεχούς ρεύματος. Μπορεί επίσης να προσδιοριστεί η ανοιγμένη στο στάτη ολική αντίδραση του δρομέα. Επειδή η αντίδραση είναι ανάλογη της συχνότητας, η ισοδύναμη ολική αντίδραση στην κανονική συχνότητα λειτουργίας μπορεί να προσδιοριστεί από τη σχέση:

$$X_{o\lambda} = \frac{f_{on}}{f_{test}} X'_{o\lambda} = X_1 + X'_2 \quad (3-8)$$

Δυστυχώς δεν υπάρχει κάποιος απλός τρόπος για τον ξεχωριστό υπολογισμό της συνεισφοράς των αντιδράσεως του δρομέα και του στάτη στη συνολική αντίδραση του κινητήρα. Μετά από πολλά χρόνια η εμπειρία έχει δείξει πως οι κινητήρες με συγκεκριμένο τρόπο σχεδίασης παρουσιάζουν συγκεκριμένη αναλογία μεταξύ των αντιδράσεων του στάτη και του δρομέα. Στον πίνακα 3-1 συνοψίζεται αυτή η εμπειρία. Στην καθημερινή πρακτική δεν παίζει ρόλο ο τρόπος που διαχωρίζεται η $X_{o\lambda}$, αφού η αντίδραση σ' όλες τις εξισώσεις της ροπής εμφανίζεται ως άθροισμα των X_1 και X'_2 .

| Rotor design | X_1 and X'_2 as functions of $X_{o\lambda}$ | |
|--------------|---|-------------------|
| | X_1 | X'_2 |
| Wound rotor | $0.5X_{o\lambda}$ | $0.5X_{o\lambda}$ |
| Design A | $0.5X_{o\lambda}$ | $0.5X_{o\lambda}$ |
| Design B | $0.4X_{o\lambda}$ | $0.6X_{o\lambda}$ |
| Design C | $0.3X_{o\lambda}$ | $0.7X_{o\lambda}$ |
| Design D | $0.5X_{o\lambda}$ | $0.5X_{o\lambda}$ |

Πίνακας 3-1. Εμπειρικοί κανόνες για τον διαχωρισμό της αντίδρασης του δρομέα από την αντίδραση του στάτη.

Μετρήσεις και υπολογισμοί.

Πειραματικό μέρος.

Σ' ένα επαγωγικό κινητήρα με τα εξής χαρακτηριστικά: Τριφασικός 220V / 1,4A σε Δ και 380V / 0,8A σε Y, 1,3Hp, 50Hz, 1454rpm εκτελούνται τα παρακάτω πειράματα (ο κινητήρας είναι της εταιρείας (ousulab)).

1. Πείραμα χωρίς φορτίο.

$$\begin{aligned} V_{II} &= 220 \text{ V} & f &= 50 \text{ Hz} & P_1 &= 70 \text{ Watt} \\ I_A &= 0.8 \text{ A} & I_B &= 0.85 \text{ A} & I_c &= 0.8 \text{ A} \end{aligned}$$

Ο κινητήρας είναι συνδεδεσμολογημένος σε τρίγωνο.

2. Πείραμα συνεχούς ρεύματος.

$$V_{DC} = 68 \text{ V} \quad I_{DC} = 1,4 \text{ A}$$

Ο κινητήρας είναι σε αστέρα.

3. Πείραμα ακινητοποιημένου δρομέα.

$$\begin{aligned} V_{II} &= 50 \text{ V} & f_{test} &= 17 \text{ Hz} & P_1 &= 120 \text{ W} \\ I_A &= 1,4 \text{ A} & I_B &= 1,3 \text{ A} & I_c &= 1,4 \text{ A} \end{aligned}$$

Η τάση μετρήθηκε με ένα από τα μπλε βολτόμετρα.

Ο κινητήρας είναι σε τρίγωνο.

Ζητούνται:

(α) Να σχεδιαστεί το ισοδύναμο μονοφασικό κύκλωμα του κινητήρα και να υπολογιστούν τα στοιχεία αυτού.

(β) Να βρεθεί η ολίσθηση που αντιστοιχεί στη ροπή ανατροπής και να υπολογιστεί η ίδια η ροπή ανατροπής.

Υπολογισμοί.

Από το πείραμα συνεχούς ρεύματος έχουμε:

$$R_1 = \frac{V_{DC}}{2I_{DC}} = \frac{55}{2 \cdot 1,4} = 19,6 \Omega$$

Από το πείραμα χωρίς φορτίο έχουμε:

$$I_o = \frac{I_A + I_B + I_C}{3} = \frac{0,8 + 0,85 + 0,8}{3} = 0,8 \text{ A}$$

$$V_\Phi = \frac{V_{II}}{\sqrt{3}} = \frac{220}{\sqrt{3}} = 127 \text{ V}$$

Έτσι, $|Z_{o\lambda}| = \frac{V_\Phi}{I_o} = \frac{127}{0,8} = X_1 + X_m = 158 \Omega$

Όταν η X_1 είναι γνωστή τότε και η X_m είναι δυνατό να υπολογισθεί.

Οι απώλειες χαλκού στο στάτη είναι:

$$P_{1cu} = 3R_1 \cdot I^2 = 3 \cdot 19,6 \cdot 0,8 = 37,6 \text{ W}$$

Οι απώλειες περιστροφής στη λειτουργία χωρίς φορτίο είναι:

$$P_{περ} = P_1 - P_{1cu} = 70 - 37,6 = 32,4 \text{ W}$$

Από το πείραμα ακινητοποιημένου δρομέα έχουμε:

$$I_{\gamma\rho} = \frac{I_A + I_B + I_C}{3} = \frac{1,4 + 1,35 + 1,4}{3} = 1,4 \text{ A}$$

Η σύνθετη αντίσταση ακινητοποιημένου δρομέα είναι:

$$|Z_{o\lambda}| = \frac{V_\Phi}{I_1} = \frac{V_{II}}{\sqrt{3} \cdot I_{\gamma\rho}} = \frac{50}{\sqrt{3} \cdot 1,4} = 20,6 \Omega$$

και η γωνία θ της σύνθετης αντίστασης είναι:

$$\theta = \cos^{-1} \frac{P_1}{\sqrt{3} \cdot V_{II} \cdot I_{\gamma\rho}} = \cos^{-1} \frac{120}{\sqrt{3} \cdot 50 \cdot 1,4} = 8,2^\circ$$

Έτσι $R_{o\lambda} = |Z_{o\lambda}| \sin \theta = 20,6 \sin 8,2 = 20,4 = R_1 + R'_2$

Όμως, επειδή $R_1 = 19,6 \Omega$, η R'_2 θα πρέπει να είναι ίση με $0,8 \Omega$.

Η αντίδραση στα 18Hz είναι:

$$X'_{o\lambda} = |Z_{o\lambda}| \eta \mu \theta = 20,6 \eta \mu 8,2 = 2,94 \Omega.$$

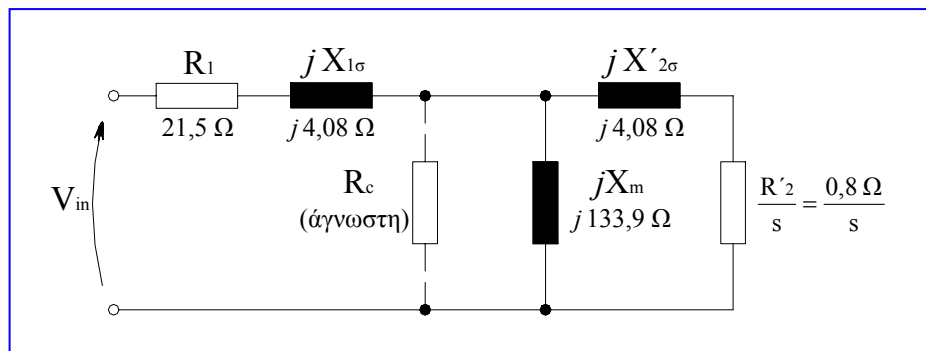
Η ισοδύναμη αντίσταση στα 50Hz είναι:

$$X_{o\lambda} = \frac{50}{18 \cdot 2,94} = 8,16 \Omega.$$

Στους επαγωγικούς κινητήρες κλάσης Α υποτίθεται ότι η αντίδραση μοιράζεται εξίσου στο στάτη και στο δρομέα. Οπότε:

$$X_1 = X'_2 = 4,08 \Omega \quad \text{και} \quad X_m = 153,9 \Omega.$$

Το τελικό ισοδύναμο μονοφασικό κύκλωμα του κινητήρα φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



(β) Υπολογίζονται οι ποσότητες του ισοδύναμου Thevenin για το προηγούμενο κύκλωμα.

$$V_{Th} = V_{\Phi} \cdot \frac{X_m}{X_1 + X_m} = 127 \cdot \frac{153,9}{158} = 123,7 \text{ V} .$$

$$R_{Th} = R_1 \cdot \left(\frac{X_m}{X_1 + X_m} \right)^2 = 21,5 \cdot \left(\frac{153,9}{158} \right)^2 = 20,4 \Omega .$$

$$X_{Th} = X_1 = 4,08 \Omega .$$

Έτσι η ολίσθηση που αντιστοιχεί στη ροπή ανατροπής έχει τιμή:

$$s_{av} = \frac{R'_2}{\sqrt{R_{Th}^2 + (X_{Th} + X'_2)^2}} = \frac{0,8}{\sqrt{20,4^2 + (4,08 + 4,08)^2}} = 0,0364 .$$

Η ροπή ανατροπής του συγκεκριμένου κινητήρα δίνεται από τη σχέση.

$$\begin{aligned} M_{av} &= \frac{3V_{Th}^2}{2\omega_{\sigma} \cdot R_{Th} + \sqrt{R_{Th}^2 + (X_{Th} + X'_2)^2}} = \\ &= \frac{3 \cdot 123,7^2}{\frac{2 \cdot 6,28 \cdot 1500}{60} \cdot 20,4 + \sqrt{20,4^2 + (4,08 + 4,08)^2}} = 1,68 \text{ Nm} \end{aligned}$$

α) Κυκλικό διάγραμμα.

Είναι γνωστό ότι το διάνυσμα I_1 του ρεύματος εισόδου της επαγωγικής μηχανής, αλλάζει συνέχεια μέγεθος και φάση όταν το μηχανικό φορτίο μεταβάλλεται.

Αποδεικνύεται όμως, ότι το άκρο του διανύσματος I_1 βρίσκεται πάντα σε περιφέρεια με συγκεκριμένη διάμετρο. Έτσι ο γεωμετρικός τόπος των άκρων των

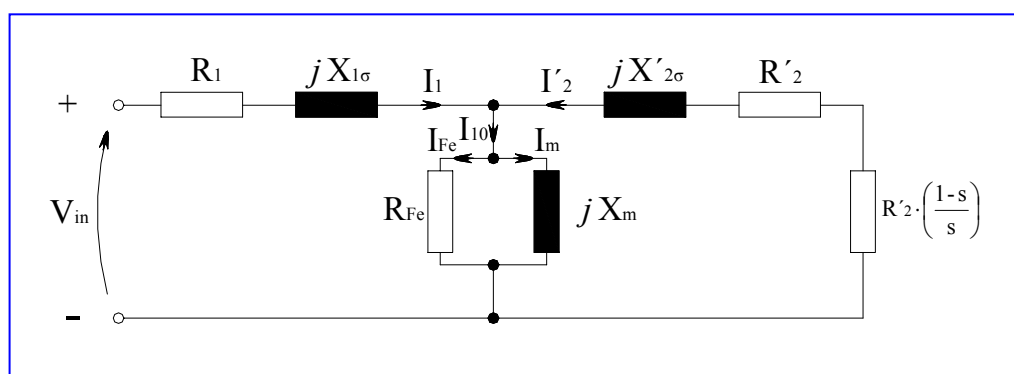
διανυσμάτων του πρωτεύοντος ρεύματος της επαγωγικής μηχανής, όταν μεταβάλλεται το φορτίο στον άξονά της, δίνει το λεγόμενο **κυκλικό διάγραμμα**. Επινοήθηκε το 1894 από τον Heyland και η μελέτη του ολοκληρώθηκε το 1900 από τον Ossana, που πρόσθεσε σ' αυτό τις χαρακτηριστικές ευθείες των ισχύων, των ροπών, των αντιστάσεων και τις ολίσθησης.

Το κυκλικό διάγραμμα αποτελεί την πιο απλή και γρήγορη μέθοδο για τον προσδιορισμό των κύριων ποσοτήτων της επαγωγικής μηχανής σε οποιαδήποτε κατάσταση φόρτισης. Επίσης, παρέχει μια συνολική εικόνα για την μεταβολή των χαρακτηριστικών μεγεθών της μηχανής, όταν αυτή λειτουργεί σαν κινητήρας, γεννήτριας ή πέδη.

Για την κατασκευή του, είναι αρκετό να πραγματοποιήσουμε τη δοκιμή χωρίς φορτίο και τη δοκιμή βραχυκύκλωσης (με μπλοκαρισμένο τον άξονα της μηχανής).

Μελέτη ισοδύναμου κυκλώματος επαγωγικής μηχανής – Κυκλικό διάγραμμα ρευμάτων.

Το ισοδύναμο κύκλωμα της επαγωγικής μηχανής με τα στοιχεία του δρομέα ανοιγμένα στο στάτη, είναι:



Οι διανυσματικές εξισώσεις του κυκλώματος είναι:

$$\begin{aligned} I_1 + I'_2 &= I_{10} \quad \text{ή} \quad I_1 = I_{10} - I'_2 \\ U_1 &= R_1 I_{10} - R_1 I'_2 + jX_{1\sigma} I_{10} - jX_{1\sigma} I'_2 - X'_{2\sigma} I'_2 - j \frac{R'_2}{S} I'_2 \end{aligned} \quad (26)$$

Με συνδυασμό των παραπάνω εξισώσεων προκύπτει:

$$U_1 - R_1 I_{10} - jX_{1\sigma} I_{10} = - \left(R_1 + \frac{R'_2}{S} \right) I'_2 - j(X_{1\sigma} + X'_{2\sigma}) I'_2 \quad (27)$$

Σε κάθε ασύγχρονη μηχανή, το ρεύμα I_{10} που απορροφάει η μηχανή από το δίκτυο όταν δουλεύει χωρίς φορτίο είναι σταθερό μέγεθος γιατί εξαρτάται από την τάση του δικτύου $U_1 = \text{σταθ.}$ (τροφοδοσία από άπειρο δίκτυο) και τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά R_1 , $X_{1\sigma}$, R_{Fe} και X_m της μηχανής. Ο δρομέας θεωρείται ανοιχτοκυκλωμένος γιατί χωρίς φορτίο τρέχει περίπου με τον σύγχρονο αριθμό στροφών δηλ. $n = n_s \Rightarrow s=0$ οπότε $R'_2 \cdot \frac{1-s}{s} = \infty$.

Έτσι αν θεωρήσουμε αμελητέα την επίδραση της εγκάρσιας αντίστασης σιδήρου $R_{Fe} = \infty$, η σταθερή τιμή του ρεύματος I_{10} δίνεται από τη σχέση:

$$I_{10} = \frac{U_1}{\sqrt{R_1^2 + (X_{16} + X_m)^2}} = \text{σταθερό} \quad (28)$$

Επομένως το πρώτο μέρος της εξίσωσης (27) είναι σταθερό και αν θέσουμε:

$$U_1 - R_1 I_{10} - jX_{16} I_{10} = U_{1a} \quad (\text{πολλές φορές είναι ικανοποιητική η προσέγγιση } U_{1a} = U_1)$$

$$R_1 + \frac{R'_2}{S} = R \quad (\text{μεταβάλλεται με τις στροφές})$$

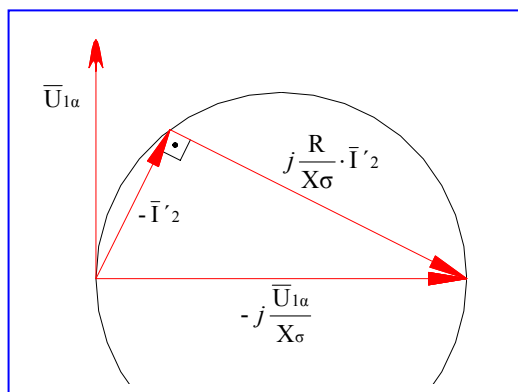
$$X_{1\sigma} + X'_{2\sigma} = X_\sigma \quad (\text{περίπου σταθερό})$$

προκύπτει:

$$U_{1a} = -R I'_2 - jX_\sigma I'_2 \quad (30)$$

Αν πολλαπλασιάσουμε τα μέλη της προηγούμενης εξίσωσης με το $-j \frac{1}{X_\sigma}$ θα

$$\text{έχουμε:} \quad -j \frac{U_{1a}}{X_\sigma} = j \frac{R}{X_\sigma} I'_2 - I'_2 \quad (31)$$



Από την εξίσωση (31) παρατηρούμε ότι το σταθερό ρεύμα $-j \frac{U_{1a}}{X_\sigma}$ (το οποίο έπεται της τάσης U_{1a} κατά 90°), συντίθεται από δύο συνιστώσες:

- Το ανοιγμένο στο πρωτεύον ρεύμα $-I'_2$ του δρομέα και
- Το ρεύμα $j \frac{R}{X_\sigma} \cdot I'_2$ που προηγείται του I'_2 κατά 90° .

Αυτό σημαίνει ότι το άκρο του διανύσματος $-I'_2$ θα βρίσκεται πάντοτε σε περιφέρεια κύκλου με διάμετρο

$$\left| \frac{U_{1a}}{X_\sigma} \right| \text{ σταθερή.}$$

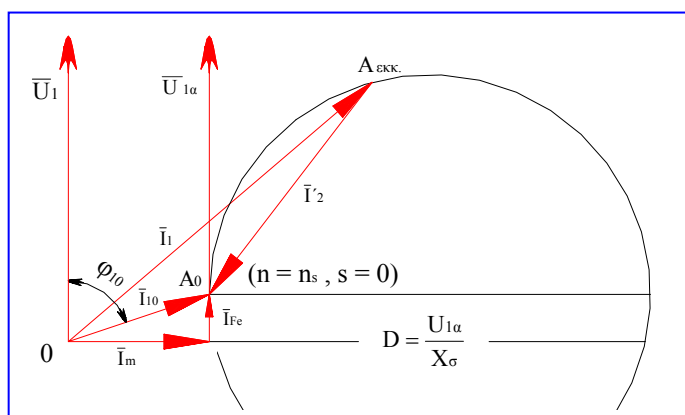
Η διάμετρος $\left| \frac{U_{1a}}{X_\sigma} \right|$ είναι

κάθετη στην τάση U_{1a} άρα κατά προσέγγιση και στην U_1 .

Επειδή όμως

$$I_1 + I'_2 = I_{10} = \text{σταθερό}$$

έπεται ότι και ο γ.τ. του άκρου του ρεύματος I_1 είναι η ίδια περιφέρεια αλλά με άλλη αρχή συντεταγμένων.



Αν τώρα λάβουμε υπόψη και την επίδραση της αντίστασης R_{Fe} από το ισοδύναμο κύκλωμα του Σχ. προκύπτει:

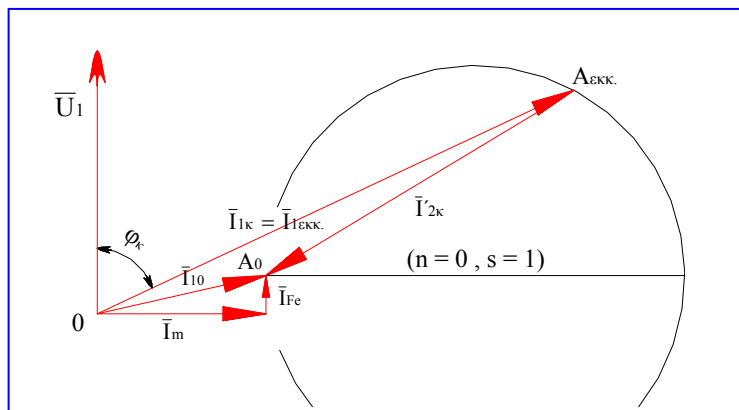
$$I_1 + I'_2 = I_{10} = I_m + I_{Fe} = \text{σταθερό} \quad (32)$$

κατά συνέπεια το διάγραμμα των ρευμάτων της επαγωγικής μηχανής παίρνει την

παρακάτω μορφή.

Το σημείο A_0 είναι σημείο της περιφέρειας και βρίσκεται από τη δοκιμή χωρίς φορτίο ($n=n_s, s=0$) είναι το άκρο του διανύσματος I_{10} .

Ένα δεύτερο σημείο της περιφέρειας είναι το $A_{εκκ}$ ($n=0, s=1$), που προσδιορίζεται από τη δοκιμή βραχυκύκλωσης και είναι το άκρο του διανύσματος $I_{1κ} = I_{1εκκ}$.



β) Κατασκευή κυκλικού διαγράμματος Heyland ασύγχρονης μηχανής από στοιχεία δοκιμών. Χαρακτηριστικές ευθείες του Ossanna στο κυκλικό διάγραμμα.

Πορεία εργασίας.

1. Κατασκευάζουμε το διάνυσμα U_1 αυθαίρετα, συνήθως κατακόρυφα στο αριστερό μέρος του φύλλου χαρτιού.
2. Με κατάλληλη κλίμακα του ρεύματος $\alpha_1 = \frac{x}{\Psi} \frac{A}{mm}^3$ προσδιορίζουμε τα σημεία A_0 ($U_1 = U_{1N}, n=n_s, s=0, I'_2=0$) και $A_{εκκ}$ ($n=0, s=1$) της περιφέρειας και τη χορδή $A_0, A_{εκκ}$ που παριστάνει το ρεύμα $I'_{2εκκ}$.

³ x = η τιμή του ρεύματος σε [A]

Ψ = το μήκος του διανύσματος του ρεύματος σε [mm].

3. Φέρουμε από το σημείο A_0 ευθεία κάθετη προς το διάνυσμα U_1 .
4. Φέρουμε τη μεσοκάθετη της χορδής $A_0A_{εκκ}$ που τέμνει την προηγούμενη ευθεία στο σημείο K που είναι το κέντρο του κύκλου.
5. Με κέντρο το K και ακτίνα $(KA_0) = (KA_{εκκ})$ γράφουμε την περιφέρεια του κύκλου.
6. Από τα σημεία A_0 και την αρχή O του διανύσματος U_1 , φέρουμε κάθετες στην U_1 που τέμνουν την περιφέρεια στα σημεία Z και H αντίστοιχα.

Μπορούμε τώρα να εξετάσουμε τις πληροφορίες που μπορεί να μας δώσει το κυκλικό διάγραμμα του Σχ. 24. Έστω A ένα σημείο της περιφέρειας που ορίζεται από το ρεύμα $I_1 = OA$ και $I_2 = AA_0$ μιας ορισμένης λειτουργικής κατάστασης.

Από τα σημεία A_0 , A και $A_{εκκ}$ φέρουμε κάθετες στην OH και ορίζουμε τα σημεία Δ_0 , A_1 , Γ_1 , Δ_1 , Γ και Δ . Τότε ισχύει:

$$I_1 \cos\varphi_I = A\Delta_1$$

$$I_1 \sin\varphi_I = O\Delta_1 \quad (33)$$

Επειδή η απορροφούμενη από το δίκτυο ισχύς είναι:

$$P_1 = 3U_{1\phi} I_{γρ} \cos\varphi_I \quad (\text{πραγματική ή βαττική ισχύς})$$

$$Q_1 = 3U_{1\phi} I_{γρ} \sin\varphi_I \quad (\text{άεργη ισχύς})$$

έπεται ότι:

$$P_1 \sim A\Delta_1$$

$$Q_1 \sim O\Delta_1 \quad (34)$$

Το σημείο A_0 είναι το σημείο της λειτουργίας σε κενό. Κατά τη λειτουργία σε κενό μπορούμε να θεωρήσουμε στο απλοποιημένο κύκλωμα ότι η ισχύς που παραλαμβάνει ο κινητήρας από το δίκτυο, καλύπτει τις μηχανικές απώλειες (τριβής + ανεμισμού) και τις μαγνητικές ή σιδήρου (υστέρησης + δινορρευμάτων).

Ο κινητήρας παραλαμβάνει και μια άεργη ισχύ για τη δημιουργία του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου. Τα αντίστοιχα ρεύματα είναι:

$$I_{Fe} = I_{10} \cos\varphi_{10}$$

$$I_m = I_{10} \sin\varphi_{10} \quad (35)$$

Έτσι έχουμε κατά συνέπεια:

$$P_{10} = P_{μηχ} + P_{Fe} = 3U_{1\phi} I_{10\phi} \cos\varphi_{10} = 3U_{1\phi} I_{Fe}^2$$

$$P_{10} = P_R \sim \Gamma_1\Delta_1 \sim \Gamma\Delta = \text{σταθερές} \quad (36).$$

Στην ειδική περίπτωση που $A = A_{εκκ}$ ($n=0$, $s=1$) δηλαδή τη στιγμή της εκκίνησης, ο κινητήρας δεν αποδίδει καμία μηχανική ισχύ στον άξονά του.

Τότε ισχύει:

$$P_{1εκκ} = P_{1κ} = P_{cu} + P_{Fe} + P_m \quad \text{ή}$$

$$P_{1εκκ} \sim (A_{εκκ}\Gamma) + (\Gamma\Delta) = A_{εκκ}\Delta \quad (37)$$

άρα

$$P_{cuεκκ} = P_{1εκκ} - P_{10} = 3 I_2'_{εκκ} (R_1 + R'_{20l}) \sim A_{εκκ}\Gamma.$$

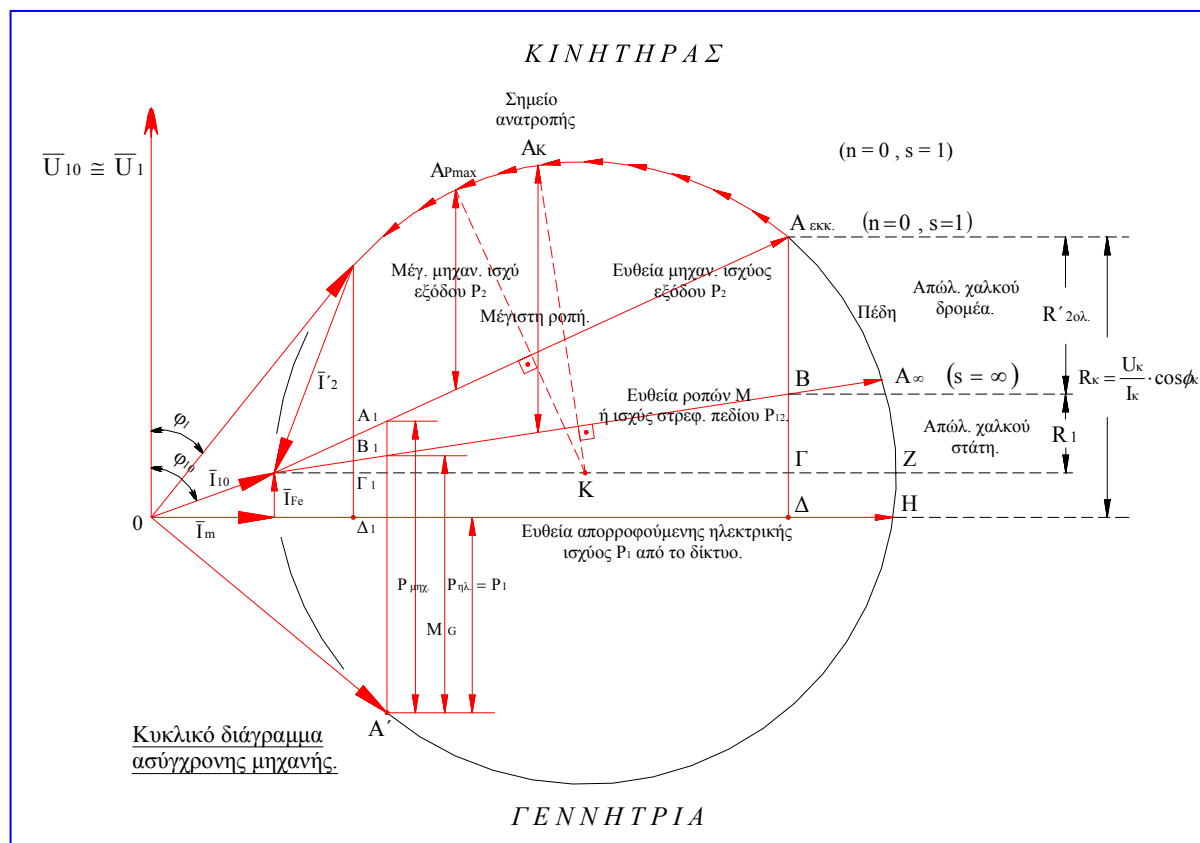
⁴ Στο ρεύμα σιδήρου I_{Fe} συμπεριλαμβάνεται και ένα βαττικό ρεύμα που απορροφάει ο κινητήρας, για να καλύψει τις μηχανικές απώλειες. Το ρεύμα μαγνήτισης I_m δημιουργεί το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο.

Από τα όμοια τρίγωνα $A_0A_1\Gamma_1$ και $A_0A_{εκκ}\Gamma$ και τα ορθογώνια τρίγωνα A_0AZ και $A_0A_{εκκ}Z$ έχουμε:

$$\frac{A_1\Gamma_1}{A_{εκκ}\Gamma} = \frac{A_0\Gamma_1}{A_0\Gamma} = \frac{(A_0\Gamma_1) \cdot (A_0Z)}{(A_0\Gamma) \cdot (A_0Z)} = \frac{(A_0A)^2}{(A_0A_{εκκ})^2} = \frac{I_2'^2}{I_{2εκκ}'^2} = \frac{3I_2'^2 \cdot (R_1 + R'_{2ολ})}{3I_{2εκκ}'^2 \cdot (R_1 + R'_{2ολ})} = \frac{P_{cuολικ}}{P_{cuεκκ}}$$

Επομένως για κάποιο μηχανικό φορτίο στον άξονα του κινητήρα για το οποίο το άκρο του διανύσματος του ρεύματος βρίσκεται στο σημείο A του κυκλικού διαγράμματος ισχύει:

$$P_{cuολ} \sim A_1\Gamma_1 \quad (38)$$



Σχήμα 24.

Η απόσταση του κάθε σημείου στον κύκλο από την ευθεία OH παριστάνει την πραγματική ισχύ P_1 που απορροφάει ο κινητήρας από το δίκτυο. Γι' αυτό η ευθεία αυτή λέγεται ευθεία απορροφούμενης ισχύος από το δίκτυο. Η ισχύς P_1 κατανέμεται ως εξής:

$$P_1 = P_{μχ} + P_{Fe} + P_{cu} + P_{12} = P_R + P_{cu1} + P_{cu2} + P_2 \quad \text{ή}$$

$$P_2 = P_{μχ. ισχ. εξόδου} = P_1 - P_R - P_{cuολ} \sim (A\Delta_1) - (\Gamma_1\Delta_1) - (A_1\Gamma_1)$$

οπότε:

$$P_2 = P_{μχ. ισχ. εξ.} \sim AA_1 \quad (39).$$

Στην ευθεία $A_0A_{εκκ}$ μετράμε την ωφέλιμη μηχανική ισχύ που αποδίδεται από τον άξονα του δρομέα, γι' αυτό η ευθεία αυτή λέγεται ευθεία μηχανικής ισχύος εξόδου. Προηγούμενα διαπιστώσαμε ότι:

$$P_{cuεκκ} = 3I_{2εκκ}'^2 (R_1 + R'_{2ολ}) \sim A_{εκκ}\Gamma$$

$$(R_1 + R'_{2ολ}) \sim A_{εκκ}\Gamma \quad (40).$$

επομένως :

Αν τώρα το ευθύγραμμο τμήμα $A_{εκκ}\Gamma$ που είναι ανάλογο του $R_1 + R'_{2ολ}$ το χωρίζουμε με το B σε μέρη ανάλογα προς τις αντιστάσεις $R'_{2ολ}$ και R_1 , προκύπτει η ευθεία A_0A_{00} .

Έχουμε λοιπόν ότι:

το $A_{εκκ}B$ είναι ανάλογο της $P_{cu2εκκ}$ και της $R'_{2ολ} = R'_2 + R'_{2s}$ και
το $B\Gamma$ είναι ανάλογο της $P_{cu1εκκ}$ και της R_1 .

Για τυχαίο ρεύμα $I_1 = OA$ ισχύει:

$$\begin{aligned} P_{cu1} &\sim B_1\Gamma_1 \\ P_{cu2} &\sim A_1B_1 \end{aligned} \quad (41)$$

Ισχύει όμως: $P_{12} = P_1 - P_{Fe} - P_{cu1} \sim A\Delta_1 - \Gamma_1\Delta_1 - B_1\Gamma_1$
οπότε: $P_{12} \sim AB_1$ (42)

Η ροπή στρέψης του ασύγχρονου κινητήρα δίνεται από τη σχέση:

$$M = \frac{P_{12}}{\Omega_s} = \frac{P_{12}}{2\pi n_s} \quad \text{οπότε}$$

$$M \sim AB_1 \quad (43)$$

Στην ευθεία A_0A_{00} μετράμε την ηλεκτρομαγνητική ισχύ P_{12} του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου και τη ροπή του κινητήρα γι' αυτό αυτή λέγεται ευθεία ισχύος στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου ή ευθεία ροπών.

Αξιοσημείωτες παρατηρήσεις.

- Αν από το κέντρο K του κύκλου, φέρουμε κάθετη στην ευθεία ροπών βρίσκουμε το σημείο A_k που είναι το σημείο ανατροπής.
- Αν από το K φέρουμε κάθετη στην ευθεία μηχανικής ισχύος εξόδου, βρίσκουμε το σημείο $A_{ρmax}$ που είναι το σημείο μέγιστης μηχανικής ισχύος.
- Αν από το O φέρουμε εφαπτόμενη της περιφέρειας, ορίζεται το σημείο εργασίας με το μεγαλύτερο $\cos\phi$. Συνήθως το ονομαστικό ρεύμα λειτουργίας του κινητήρα βρίσκεται κοντά στο σημείο αυτό.
- Περιοχή ευσταθούς λειτουργίας του κινητήρα είναι από το σημείο A_0 μέχρι το σημείο ανατροπής A_k .
- Ο βαθμός απόδοσης του κινητήρα είναι:

$$n = \frac{\text{μηχ. ισχύ εξόδου}}{\text{ηλεκτρ. ισχύ εισόδου}} = \frac{P_{ωφ.}}{P_{δσπ.}} = \frac{P_2}{P_1} = \frac{AA_1}{A\Gamma_1} \quad (44)$$

- Η ολίσθηση υπολογίζεται από τη σχέση:

$$S = \frac{P_{2\etaλ.εσ.}}{P_{12}} = \frac{P_{2cu}}{P_{12}} = \frac{A_1B_1}{AB_1} \quad (45)$$

$$S_{εκκ.} = \frac{A_{εκκ}B}{A_{εκκ}B} = 1$$

Επειδή το τμήμα A_1B_1 είναι συνήθως πολύ μικρό με αποτέλεσμα το σφάλμα ανάγνωσης να είναι μεγάλο, γι' αυτό κατασκευάζουμε στο κυκλικό διάγραμμα μια ευθεία ολίσθησης που βαθμονομούμε γραμμικά.

Κατασκευή της ευθείας ολίσθησης.

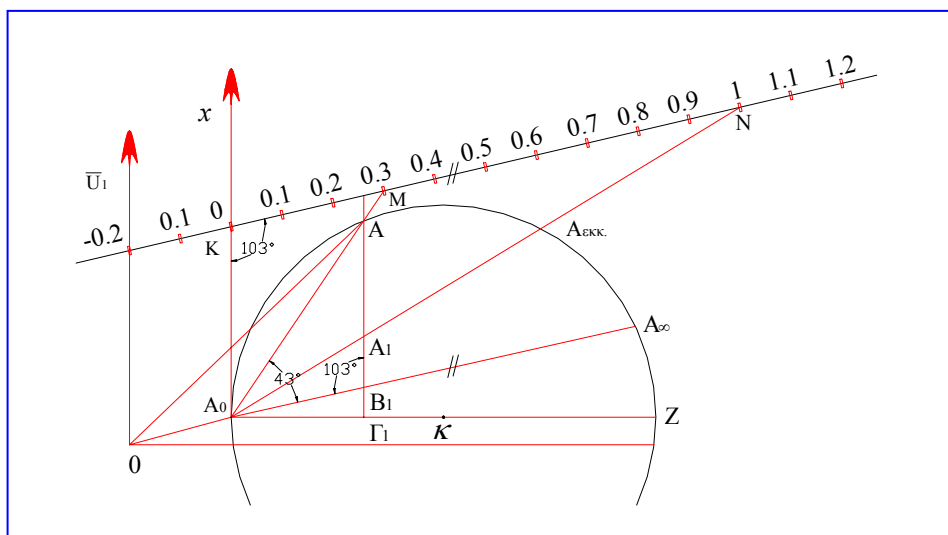
Από το σημείο A_0 φέρουμε την ευθεία A_0X εφαπτόμενη στην περιφέρεια (κάθετη στην A_0Z) Σχ. 25.

Στη συνέχεια φέρουμε την ευθεία $\Psi\Psi'$ παράλληλη στην ευθεία ροπών A_0A_{00} . Στην ευθεία αυτή, ορίζουμε τα σημεία K, M και N από τις προεκτάσεις των A_0X , A_0A και $A_0A_{εΚΚ}$.

Το ευθύγραμμο τμήμα KN χωρίζεται σε 10 ίσα τμήματα και βαθμονομείται κατάλληλα όπως διακρίνεται στο σχ. 25.

Η ολίσθηση του δρομέα της μηχανής για συγκεκριμένο φορτίο που προσδιορίζεται από το σημείο A της περιφέρειας είναι:

$$S = \frac{KM}{KN}$$

**Απόδειξη:**

Τα τρίγωνα $A_0A_1B_1$ και KA_0N είναι όμοια, επομένως:

$$\frac{A_1B_1}{KA_0} = \frac{A_0B_1}{KN}$$

Τα τρίγωνα A_0AB_1 και KMA_0 είναι επίσης όμοια μεταξύ τους, επομένως:

$$\frac{AB_1}{KA} = \frac{A_0B_1}{KM}$$

και διαιρώντας κατα μέλη τις πιο πάνω σχέσεις προκύπτει:

$$\frac{A_1B_1}{AB_1} = \frac{KM}{KN} = S$$

Το κυκλικό διάγραμμα σχεδιάστηκε με βάση μόνο την κλίμακα του ρεύματος

$$\alpha_1 = \frac{x}{\Psi} \left[\frac{A}{\text{mm}} \right]$$

Είναι απαραίτητο να ορίσουμε και την κλίμακα των ισχύων, ροπών και

αντιστάσεων για να μπορούμε να υπολογίζουμε τα μεγέθη αυτά από το κυκλικό διάγραμμα για κάθε λειτουργική κατάσταση.

- Κλίμακα ισχύος: $\alpha_p = 3U_{1\phi} \cdot \alpha_1 \quad [A/mm] \text{ σε } [W/mm]^5$
- Κλίμακα ισχύος: $\alpha_m = \frac{60}{2\pi n_s} \cdot \alpha_p \quad [W/mm] \text{ σε } [Nm/mm]$
- Κλίμακα αντιστάσεων: $\alpha_R = \frac{R_1 + R'_2}{A_{εκκ} \Gamma} \quad \text{σε } [\Omega/mm]$

(47)

Η παρατήρηση ότι το μήκος $A_{εκκ}B_1$ παριστάνει ροπή εκκίνησης και αντίσταση R'_2 του δρομέα μας δίνει και τη μετατόπιση του σημείου εκκίνησης όταν προσθέσουμε αντίσταση R'_{2s} εξωτερικά στο δρομέα (περίπτωση εκκίνησης ασύγχρονου κινητήρα με δακτυλιοφόρο δρομέα).

$$R'_{2s} = R_{2s} = \left(\frac{W_{1\xi_1}}{W_{2\xi_2}} \right)^2 = R_{2s} \cdot K^2 \quad \text{ή} \quad R_{2s} = \frac{R'_{2s}}{K^2} \quad (48)$$

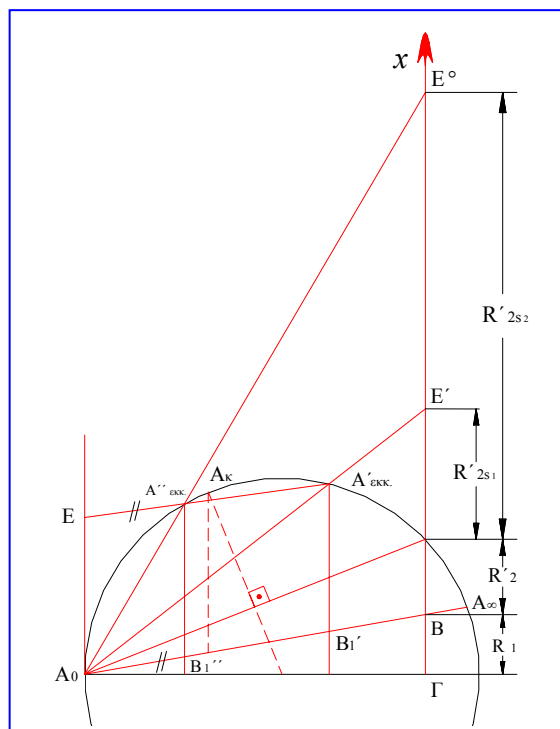
Το πρόβλημα που αντιμετωπίζεται συχνά είναι ο υπολογισμός της εξωτερικής αντίστασης R_{2s} του δρομέα με σκοπό να μειωθεί το ρεύμα εκκίνησης και να αυξηθεί η ροπή εκκίνησης ενός δακτυλιοφόρου κινητήρα σε καθορισμένη τιμή.

Παράδειγμα.

Σε ασύγχρονο δακτυλιοφόρο κινητήρα του οποίου κατασκευάζουμε το κυκλικό διάγραμμα από τη δοκιμή σε κενό και βραχυκύκλωμα, θέλουμε να πετύχουμε ροπή εκκίνησης

$$M_{εσ.εκκ.} = \lambda[krpm] < M_K.$$

Να βρεθεί η R_{2s} (αντίσταση εκκίνησης).



⁵ 1 ατμόϊππος ή ίππος (1cv ή PS) = 736 W.
1 βρετανικός ίππος (1 HP) = 746 W.

Από την κλίμακα των ροπών προκύπτει μήκος $\frac{\lambda}{\alpha_M}$ [mm].

Φέρουμε την εφαπτόμενη της περιφέρειας στο σημείο A_0 και ορίζουμε μήκος $A_0E = \frac{\lambda}{\alpha_M}$ [mm], δείτε παραπάνω σχήμα.

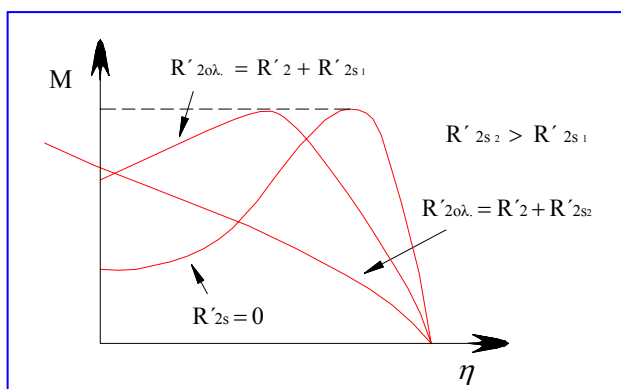
Από το E φέρουμε παράλληλη στην A_0A_{00} (ευθεία ροπών) η οποία τέμνει την περιφέρεια στα σημεία $A'_{εκκ}$ και $A''_{εκκ}$ που είναι τα νέα σημεία εκκίνησης.

Το ένα σημείο εκκίνησης $A'_{εκκ}$ αντιστοιχεί σε $R'_{2ολ} = R'_2 + R'_{2s1}$ μικρό και η χαρακτηριστική $M = f(s_1 R'_{2ολ})$ τέμνει την ευθεία $s=1$ με τον ανερχόμενο κλάδο της ($s_k < 1$),δες παρακάτω σχήμα.

Το άλλο σημείο εκκίνησης $A''_{εκκ}$ αντιστοιχεί σε $R'_{2ολ} = R'_2 + R'_{2s2}$ μεγάλο και η χαρακτηριστική $M = f(s_1 R'_{2ολ})$ τέμνει την ευθεία $s=1$ με τον κατερχόμενο κλάδο της ($s_k > 1$).

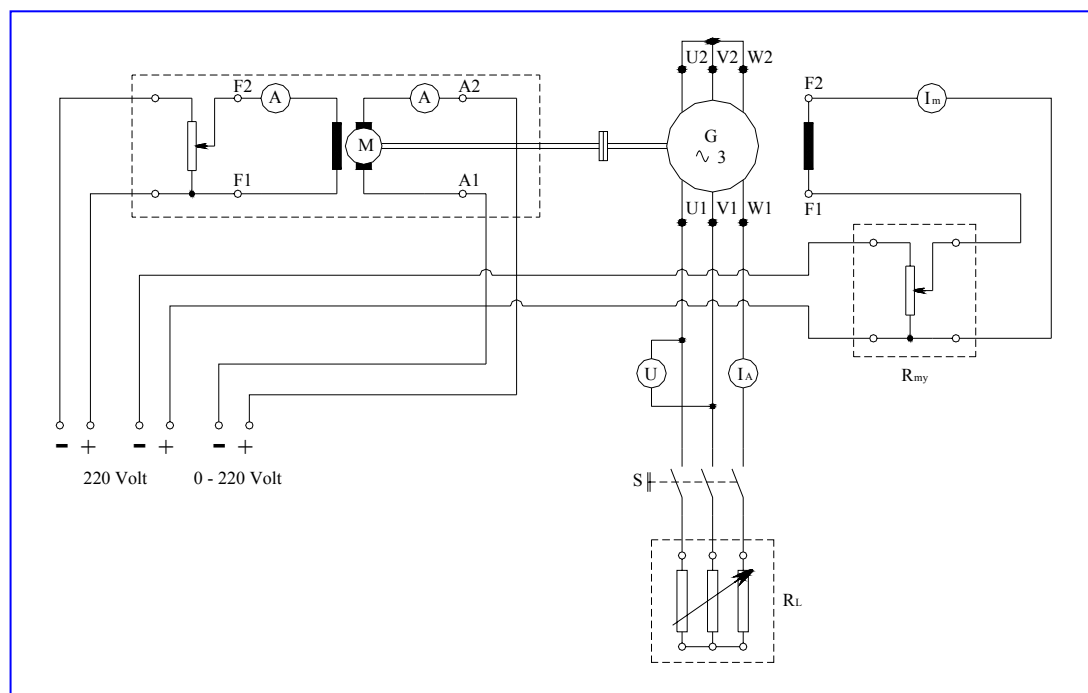
$$R_{2s1} = \frac{R'_{2s1}}{K^2} = \alpha_R \cdot \frac{(A_{εκκ} E') \text{ [mm]}}{K^2} \quad \left[\frac{\Omega}{\text{mm}} \right]$$

$$R_{2s2} = \frac{R'_{2s2}}{K^2} = \alpha_R \cdot \frac{(A_{εκκ} E'') \text{ [mm]}}{K^2} \quad \left[\frac{\Omega}{\text{mm}} \right]$$



Σύγχρονη τριφασική γεννήτρια.**Μέτρηση χαρακτηριστικών της γεννήτριας χωρίς φορτίο,****βραχυκύκλωσης και φορτίου.****1. Σύνδεση και εκκίνηση.**

1. Υλοποιήστε το παρακάτω κύκλωμα.
2. Σημειώστε τα στοιχεία της σύγχρονης μηχανής που είναι στην πινακίδα της. Τα ονομαστικά στοιχεία να μην τα υπερβείτε σε καμία διαδικασία των πειραμάτων που θα εκτελέσετε
3. Να ελεγχθεί η συνδεσμολογία από τον υπεύθυνο.
4. Ανοίξτε τον διακόπτη DC και ρυθμίστε τον ροοστάτη διέγερσης του κινητήρα έτσι ώστε να έχουμε το μεγαλύτερο ρεύμα διέγερσης. Ο διακόπτης S πρέπει να είναι κλειστός.
5. Αυξήστε σταδιακά την τάση DC του κινητήρα και ελέγξτε την φορά περιστροφής του. Αυτή πρέπει να είναι που συμπίπτει με τη φορά του βέλους του κινητήρα.
6. Ρυθμίστε τον κινητήρα στις ονομαστικές στροφές 1500rpm. Αυτή η ταχύτητα πρέπει να διατηρείται σταθερή στην διάρκεια της άσκησης.

**2. Μέτρηση της χαρακτηριστικής χωρίς φορτίο.**

(δηλαδή της επαγόμενης ΗΕΔ συναρτήση του ρεύματος διέγερσης)

1. Ο διακόπτης S πρέπει να είναι κλειστός. Μεταβάλλεται το ρεύμα διέγερσης με βήματα από 0 μέχρι το ονομαστικό. Για κάθε βήμα σημειώστε το ρεύμα I και την επαγόμενη τάση U από το βολτόμετρο.

3. Μέτρηση της χαρακτηριστικής βραχυκύκλωσης.

(δηλαδή του ρεύματος του δρομέα συναρτήση του ρεύματος διέγερσης όταν ο στάτης είναι βραχυκυκλωμένος)

1. Ρυθμίστε τον ροοστάτη διέγερσης της σύγχρονης μηχανής ώστε το ρεύμα διέγερσης να είναι μηδέν. Βραχυκυκλώστε τις 3 φάσεις στην πλευρά του διακόπτη S στον οποίο είναι συνδεδεμένες οι αντιστάσεις.
2. Ανοίξτε τον διακόπτη S . Μεταβάλλεται το ρεύμα του δρομέα σε βήματα με τον ροοστάτη διέγερσης της μηχανής και σημειώστε τις τιμές των ρευμάτων I_m, I_A . Ελέγξτε την ταχύτητα.
3. Ρυθμίστε τον ροοστάτη διέγερσης της σύγχρονης μηχανής ώστε να μηδενιστεί το ρεύμα διέγερσης. Κλείστε τον διακόπτη S και αποσυνδέστε το βραχυκύκλωμα φορτίου να μεταβάλλεται το ρεύμα του δρομέα από 0 μέχρι max . Για κάθε βήμα σημειώστε το ρεύμα I_A και η τάση U . Σταματήστε τις μετρήσεις όταν η τάση ανέβει στα $300V$. Ελέγξτε το ρεύμα διέγερσης και την ταχύτητα.

4. Μέτρηση των χαρακτηριστικών με φορτίο.

(δηλαδή την τάση της γεννήτριας συναρτήση του ρεύματος φορτίου)

1. Ρυθμίστε τον ροοστάτη διέγερσης της σύγχρονης μηχανής ώστε η τάση της γεννήτριας να είναι $220V$. Σημειώστε το ρεύμα διέγερσης της σύγχρονης μηχανής. Αυτή η τιμή καθώς και η τιμή της ταχύτητας πρέπει να διατηρηθούν σταθερές και πρέπει να ελέγχονται σε κάθε μέτρηση.
2. Ανοίξτε τον διακόπτη S και με τη βοήθεια της μεταβλητής αντίστασης μεταβάλλεται το ρεύμα του δρομέα με βήματα από 0 μέχρι το max . Για κάθε μέτρηση σημειώστε το ρεύμα I_A και την τάση U . Ελέγξτε το ρεύμα διέγερσης και την ταχύτητα.
3. Κλείστε τον διακόπτη S και συνδέστε φορτίο επαγωγικό.
4. Ανοίξτε τον διακόπτη S και με την βοήθεια του επαγωγικού φορτίου μεταβάλλεται το ρεύμα του δρομέα με βήματα από 0 μέχρι max . Για κάθε μέτρηση ελέγχετε το ρεύμα διέγερσης και την ταχύτητα.
5. Κλείστε τον διακόπτη S και αντικαταστήστε το επαγωγικό φορτίο με χωριτικό.
6. Ανοίξτε τον διακόπτη S και με την βοήθεια του μεταβλητού χωριτικών.

Εργασία.

1. Σχεδιάστε την χαρακτηριστική χωρίς φορτίο, την χαρακτηριστική βραχυκύκλωσης στο ίδιο διάγραμμα με κοινό άξονα τον I_m .
2. Σχεδιάστε τις χαρακτηριστικές με φορτίο στο ίδιο διάγραμμα με κοινό τον άξονα I_A .
3. Πάρε από την χαρακτηριστική χωρίς φορτίο το ρεύμα διέγερσης I_{m0} που αντιστοιχεί στην ονομαστική τάση.
4. Πάρε από την χαρακτηριστική βραχυκύκλωσης το ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{k0} που έχετε στο αντίστοιχο ρεύμα διέγερσης I_{m0} .

5. Υπολογίστε την σύγχρονη αντίδραση της γεννήτριας ανά φάση από τον τύπο.

$$X_s = \frac{U_n}{I_{ko}} = \frac{127}{I_{ko}} \quad \Omega/\text{φάση}$$

6. Υπολόγισε το λόγο βραχυκύκλωσης της γεννήτριας $K_C = KC = \frac{I_{KO}}{I_{ov}}$

όπου I_{ov} = το ονομαστικό ρεύμα της γεννήτριας.

7. Σχεδιάστε 3 διαγράμματα διανυσμάτων μιλιμετρέ με $E = 127V$, $I_A = 2A$ και $\varphi = 0, +90, -90$. Η X_s έχει υπολογιστεί από το 5.
8. Πάρε την τάση U από τα διαγράμματα και σύγκρινε τη με τις αντίστοιχες τιμές των χαρακτηριστικών φορτίου.

Σύγχρονος τριφασικός κινητήρας.Εκκίνηση σύγχρονου κινητήρα και σχεδίαση των καμπολών "V"στη λειτουργία εν κενό και υπό φορτίο.Θεωρητικά.

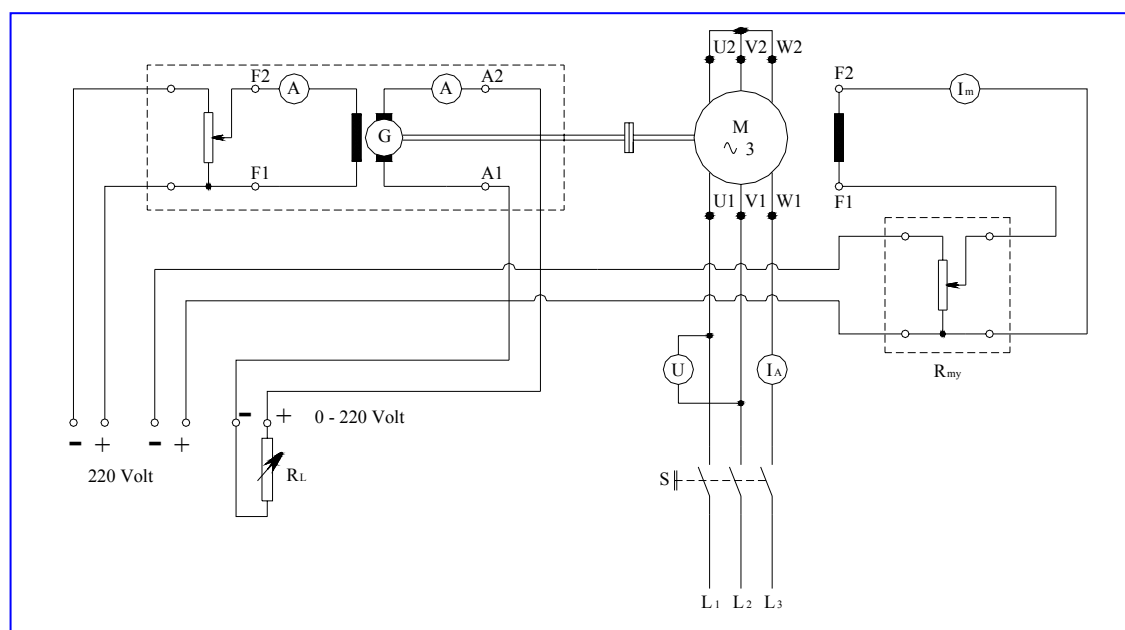
Η λειτουργία ενός σύγχρονου εναλλακτήρα μπορεί να αντιστραφεί και ο εναλλακτήρας να λειτουργήσει σαν κινητήρας. Σύγχρονος κινητήρας ονομάζεται εκείνος που περιστρέφεται με την ταχύτητα που έπρεπε να περιστρέφεται η μηχανή και εναλλακτήρας για να παράγει ρεύμα της ίδιας συχνότητας με το ρεύμα που την τροφοδοτεί.

Γενικά ένας σύγχρονος 3Φ κινητήρας είναι όμοιος με έναν εναλλακτήρα. Ο στάτης του παίρνει ρεύμα από τριφασική τροφοδοτική γραμμή και ο δρομέας του αποτελείται από ηλεκτρομαγνητικούς πόλους που τροφοδοτούνται από συνεχές ρεύμα.

Η ταχύτητα του κινητήρα είναι σταθερή και ανεξάρτητη του φορτίου. Εξαρτάται από την συχνότητα του ρεύματος τροφοδότησης και από τον αριθμό των πόλων του.

Σε μεγάλη υπερφόρτιση ο κινητήρας σταματά και υπάρχει κίνδυνος καταστροφής των τυλιγμάτων του, αν δεν προστατεύεται από ασφάλειες και αυτόματους διακόπτες.

Η εκκίνηση του κινητήρα γίνεται συνήθως χωρίς φορτίο και από εξωτερική δύναμη.



Διάγραμμα σύγχρονου κινητήρα.

Ο σύγχρονος κινητήρας δεν ξεκινά μόνος του αλλά χρειάζεται βοηθητικά μέσα για την εκκίνηση. Αυτά θα τα διαπιστώσετε στο εργαστήριο και είναι:

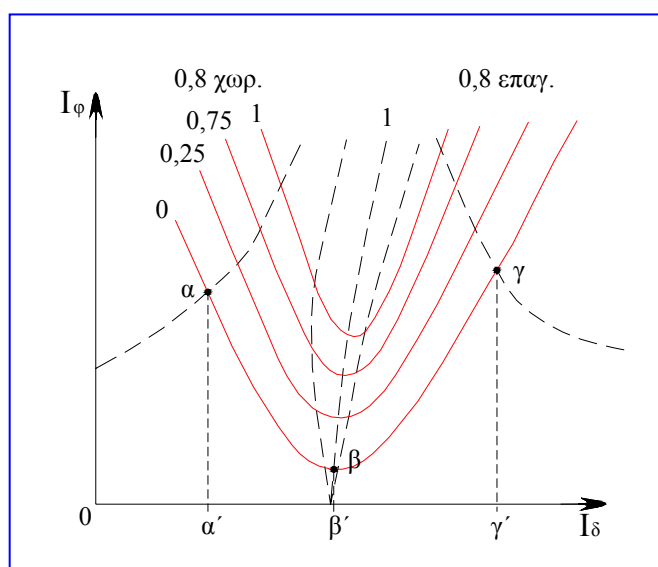
α) βοηθητικός κινητήρας εκκίνησης όπου μετά τον συγχρονισμό διακόπτουμε την τροφοδότηση του και αν είναι δυνατόν τον αποσυμπλέκουμε και

β) πρόσθετο τύλιγμα κλωβού. Οι μηχανές αυτές φέρουν από κατασκευής στα πέδιλα των μαγνητικών πόλων του δρομέα ένα τύλιγμα κλωβού, οπότε ξεκινούν σαν ασύγχρονοι και όταν η ταχύτητα περιστροφής φθάσει την τιμή 2-5% μικρότερη της σύγχρονης τροφοδοτείται το τύλιγμα του δρομέα με συνεχές ρεύμα και ο κινητήρας αυτοσυγχρονίζεται και αρχίζει να περιστρέφεται πλέον με τον σύγχρονο αριθμό στροφών.

Πορεία εργασιών.

1. Επιλέξτε όργανα και υλικά σύμφωνα με τα στοιχεία των μηχανών.
2. Ξεκινήστε τον κινητήρα σαν ασύγχρονο βραχυκυκλωμένου δρομέα και όταν αυτός πάρει τις ονομαστικές στροφές σαν ασύγχρονος τροφοδοτήστε από την ρυθμιζόμενη πηγή συνεχούς ρεύματος τον δρομέα του κινητήρα και θέστε τον διακόπτη στη σύγχρονη λειτουργία οπότε ο σύγχρονος κινητήρας διεγείρεται κανονικά και πηγαίνει μόνος του στις σύγχρονες στροφές τότε λέμε ότι ο κινητήρας αυτοσυγχρονίζεται. Χωρίς να έχουμε φορτίο στον κινητήρα με την μεταβολή της τάσης της πηγής συνεχούς ρεύματος στο κύκλωμα του δρομέα του σύγχρονου κινητήρα πετυχαίνουμε διάφορες τιμές της έντασης διέγερσης I_δ ενώ συγχρόνως διαβάστε και καταγράψτε τις τιμές I_ϕ , I_δ και V .
3. Μετά από αυτή την χαρακτηριστική, φορτίστε τον κινητήρα αφού πρώτα διεγείρετε την γεννήτρια ρεύματος και βάζοντας το μισό του ονομαστικού φορτίου. Επαναλάβετε τις μετρήσεις του προηγούμενου τεστ. Καταγράψτε τις τιμές των οργάνων U , I_ϕ , I_δ και τέλος φορτίστε τον κινητήρα με το ονομαστικό φορτίο και επαναλάβετε το παραπάνω βήμα για διάφορες τιμές του ρεύματος διέγερσης.
4. Από τα στοιχεία χαράξτε την καμπύλη $I_\phi = f(I_\delta)$ με $U, f = \text{σταθερά}$
 - για την κενή λειτουργία,
 - για το μισό φορτίο, και
 - για το ονομαστικό φορτίο.

Σημείωση: Οι καμπύλες να σχεδιαστούν στο ίδιο χαρτί μιλλιμετρέ.



Τέλος, προσεκτική παρατήρηση των καμπυλών του σχήματος καταλήγει στα εξής συμπεράσματα:

1. Όταν το ρεύμα διέγερσης μεταβάλλεται από 0 μέχρι β' τότε το ρεύμα στον στάτη παίρνει τις τιμές $\alpha\beta$, ακολουθεί την τάση, και το $\text{συν}\varphi$ είναι θετικό. Με άλλα λόγια ο κινητήρας φορτίζει το δίκτυο επαγωγικά.
2. Όταν το ρεύμα διέγερσης I_δ μεταβάλλεται από β' μέχρι γ' τότε το ρεύμα του στάτη παίρνει τις τιμές $\beta\gamma$, προπορεύεται της τάσης, και το $\text{συν}\varphi$ είναι αρνητικό. Με άλλα λόγια ο κινητήρας φορτίζει το δίκτυο χωριτικά.
3. Τέλος όταν το ρεύμα διέγερσης I_δ παίρνει την τιμή β' τότε το ρεύμα του στάτη γίνεται ελάχιστο, σε φάση με την τάση, και το $\text{συν}\varphi$ είναι ίσο με την μονάδα. Με άλλα λόγια ο κινητήρας φορτίζει το δίκτυο ωμικά.