



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:

«ΠΡΟΗΓΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΚΙΝΗΣΗΣ»

ΟΝΟΜΑ ΦΟΙΤΗΤΗ : ΚΑΜΠΑΡΙΖΑΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ 71444307

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΘΕΟΧΑΡΗΣ ΕΥΣΤΑΘΙΟΣ

ΑΠΓΑΛΕΩ ΜΑΡΤΙΟΣ 2023

Πίνακας περιεχομένων

Εισαγωγή.....	8
Κεφάλαιο 1. Βιομηχανικοί Κινητήρες.....	9
1.1 Ιστορική Αναδρομή.....	9
1.2 Υδραυλικοί Κινητήρες.....	12
1.3 Πνευματικοί Κινητήρες.....	14
1.4 Ηλεκτρικοί Κινητήρες.....	19
1.4.1 Ασύγχρονοι-Επαγωγικοί Κινητήρες.....	21
1.4.2 Σύγχρονοι Κινητήρες.....	21
1.4.3 Βηματικοί Κινητήρες.....	22
Κεφάλαιο 2. Βιομηχανικά Συστήματα Κίνησης.....	28
2.1 Δομή Βιομηχανικών Συστημάτων Κίνησης.....	28
2.2 Ομαλός Εκκινητής (Soft Starter)	32
2.3 Μετατροπέας μεταβλητής συχνότητας-Αντιστροφέας (Variable Frequency Drive)	
39	
2.3.1 Τεχνικές Παλμοδότησης Αντιστροφέα.....	41
2.3.2 Τεχνικές Ελέγχου Αντιστροφέα.....	47
2.3.3 Λειτουργία ασφαλούς διακοπής λειτουργίας Safe Torque Off(STO)	51
2.4 Σερβοκινητήρας (Servo Motor)	53
2.4.1 Δομή Σερβοκινητήρα.....	53
2.4.2 Ανάδραση σημάτων ταχύτητας -Ταχογεννήτρια, Encoders, Resolver, Αισθητήρες HALL.....	55
2.4.3 Τεχνική Οδήγησης Σερβοκινητηρίων Συστημάτων	60
Κεφάλαιο 3. Προγραμματιζόμενος Λογικός Ελεγκτής (Programmable Logic Controller)	
62	
3.1 Δομή Προγραμματιζόμενου Λογικού Ελεγκτή (Programmable Logic Controller- PLC) 62	
3.2 Προγραμματισμός Προγραμματιζόμενου Λογικού Ελεγκτή.....	65
3.3 Εφαρμογές Προγραμματιζόμενων Λογικών Ελεγκτών στη σημερινή βιομηχανία 67	

Κεφάλαιο 4. Βιομηχανικά Δίκτυα	71
4.1 Βασικές Αρχές Δικτύων	71
4.4.1 Τοπολογίες Δικτύων	71
4.4.2 Μοντέλο OSI.....	73
4.4.3 Μέθοδοι Διασύνδεσης και Επικοινωνίας.....	74
4.4.4 Πρότυπα Συσκευών Δικτύου	75
4.2 Δομή Βιομηχανικών Δικτύων	76
4.3 Δίκτυα FieldBus	77
4.3.1 ControlNet.....	78
4.3.2 DeviceNet	79
4.3.3 Foundation Fieldbus H1	79
4.3.4 HART.....	79
4.3.5 Modbus	79
4.3.6 PROFIBUS	80
4.3.7 CAN	80
4.4 Βιομηχανικό Ethernet.....	81
4.4.1 Profinet.....	82
4.4.2 EtherNet/IP	84
4.4.3 EtherCAT	85
Κεφάλαιο 5. Εφαρμογή (Γραμμικός οδηγός 2 αξόνων)	87
5.1 Περιγραφή συστήματος	87
5.2 Μέρη του συστήματος	88
5.3 PLC (Programmable logical controller).....	89
5.4 Human machine interface.....	90
5.4.1 Οθόνες χειρισμού συστήματος	91
5.5 Σύστημα Κίνησης.....	93
5.5.1 Σερβοενισχυτές	93
5.5.2 Σύνδεση σερβοενισχυτή με σερβοκινητήρα	94

5.5.3 Σερβοκινητήρες.....	95
Συμπέρασμα.....	96
Βιβλιογραφία	97

ΜΕΛΗ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗΣ

Παπουτσιδάκης Μιχαήλ, Αναπληρωτής Καθηγητής	
Θεοχάρης Ευστάθιος, ΕΔΠ	
Σορτ Ανδρέας Ρόναλντ, ΕΔΠ	

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Καμπαρίζας Δημήτριος του Παντελεήμων, με αριθμό μητρώου 71447307 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Βιομηχανικής Σχεδίασης και Παραγωγής, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Ο Δηλών
Καμπαρίζας Δημήτριος



Ευχαριστίες

Ευχαριστώ από καρδιάς την οικογένεια μου που όλα αυτά τα χρόνια είναι διπλά μου σε κάθε μου βήμα, τους υπεύθυνους καθηγητές μου κ. Θεοχάρη Ευστάθιο κ. Μιχαήλ Παπουτσιδάκη και κ. Σορτ Ανδρέα για την πολύτιμη βοήθεια και τις γνώσεις που μου προσέφεραν κατά τη διάρκεια των σπουδών μου. Τέλος θέλω να ευχαριστήσω τους συναδέλφους μου και την εταιρία Sofikitis Automation για την πολύτιμη βοήθεια και τη τεχνογνωσία που μου πρόσφεραν όλα αυτά τα χρόνια.

Εισαγωγή

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την μελέτη και ανάλυση του προηγμένου ελέγχου κίνησης στις σημερινές βιομηχανικές εφαρμογές. Ξεκινώντας από μια σύντομη ιστορική αναδρομή, περιγράφεται η εξέλιξη των βιομηχανικών και κινητηρίων συστημάτων μέχρι την σημερινή εποχή. Περιγράφονται οι χρησιμοποιούμενοι κινητήρες στη σημερινή βιομηχανία, η δομή και η λειτουργία των πνευματικών, υδραυλικών και ηλεκτρικών κινητήρων. Επεξηγείται η λειτουργία και σημαντικότητα των ομαλών εκκινήτων (soft-starters), των αντιστροφών (inverters), των σερβοκινητήρων (servo), των βηματικών κινητήρων (stepper motor) καθώς και των αισθητήρων (π.χ. encoder) που εισάγονται στη δομή του προηγμένου σχήματος ελέγχου. Όσον αφορά τον έλεγχο, γίνεται ανάλυση των προγραμματιζόμενων λογικών ελεγκτών (PLC) που αποτελούν τον εγκέφαλο των συστημάτων ελέγχου κίνησης. Πραγματοποιείται ανάλυση στη δομή και στο τρόπο λειτουργίας των βιομηχανικών δικτύων. Τέλος γίνεται η παρουσίαση μιας εφαρμογής ενός γραμμικού οδηγού 2 αξόνων με PLC και σερβοκινητήρες.

Κεφάλαιο 1. Βιομηχανικοί Κινητήρες

Πλήθος εφαρμογών στη καθημερινή ζωή μέχρι τις πιο εξειδικευμένες βιομηχανικές διεργασίες απαιτούν κινητήριες μηχανές. Από τα πρώτα χρόνια ανάπτυξης του ανθρώπινου πολιτισμού η ανάγκη για κίνηση και έλεγχο αυτής ήταν υπαρκτή. Με την πάροδο των χρόνων και τις βιομηχανικές επαναστάσεις που ακολούθησαν έχουμε φτάσει σήμερα στην ύπαρξη πολλαπλών μορφών κινητήρων. Βασικές κατηγορίες αυτών είναι οι πνευματικοί, οι υδραυλικοί και οι ηλεκτρικοί κινητήρες, που αποτελούν την σημαντικότερη και ευρεία χρησιμοποιούμενη κατηγορία.

1.1 Ιστορική Αναδρομή

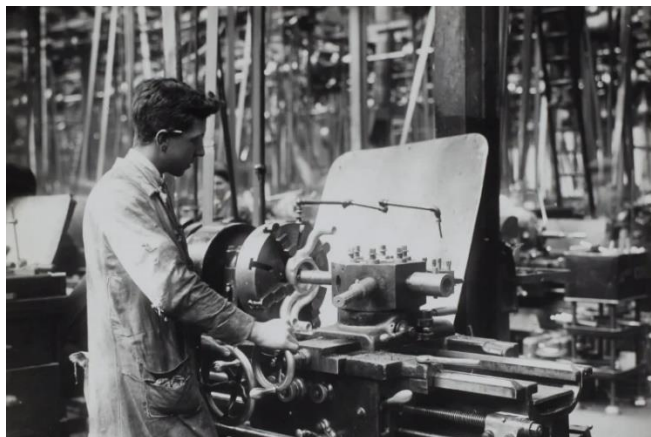
Από τον 1^ο αιώνα π.Χ. η έννοια της αυτοματοποιημένης διαδικασίας και του ελέγχου της κίνησης ήταν απαραίτητη για πολλές καθημερινές εφαρμογές. Μύλοι νερού χρησιμοποιούνταν κυρίως για τον έλεγχο και την αξιοποίηση της ροής του νερού. Αργότερα, τον 9^ο αιώνα μ.Χ. κατασκευάστηκαν και εγκαταστάθηκαν οι πρώτοι ανεμόμυλοι. Οι ανεμόμυλοι αξιοποιούσαν την δύναμη του αέρα για να δώσουν κίνηση σε διάφορες διαδικασίες όπως την μεταφορά αντικειμένων, την άλεση υλικών κ.α.

Τον 17^ο και 18^ο αιώνα ξεκίνησε η βιομηχανική επανάσταση, με βάση την δυτική Ευρώπη. Η μεγάλη κινητήρια δύναμη ήταν η εφεύρεση των ατμομηχανών και των μηχανών εσωτερικής καύσης. Οι εφαρμογές ανεμόμυλων και νερόμυλων αντικαταστάθηκαν από τα παραπάνω.



Εικόνα 1-Ατμομηχανή

Το 1800, τα πρώτα εργοστάσια που περιείχαν αυτοματισμούς για βιομηχανικές διαδικασίες περιείχαν κυρίως μηχανικές κατασκευές με μάντες. Οι κινητήριες μηχανές αποτελούνταν από συμπλέκτες, γρανάζια, μηχανισμούς μετάδοσης και άλλα ενώ η κινητήρια δύναμη συνήθως προερχόταν από τον άνθρωπο όπως για παράδειγμα το πάτημα ενός πεντάλ από τον χρήστη.



Εικόνα 2-Βιομηχανική διαδικασία με επίβλεψη ανθρώπινου παράγοντα

Από το 1900 ξεκινούν να εισάγονται εφαρμογές ηλεκτρικής ενέργειας. Η επανάσταση ξεκίνησε με την εφεύρεση της γεννήτριας DC από τον Τόμας Έντισον το 1870 και των AC κινητήρων από τον Νικόλα Τέσλα, το 1880. Την ίδια εποχή, το 1900, ο Χένρι Φορντ ξεκίνησε την εγκατάσταση των πρώτων γραμμών παραγωγής που περιλάμβαναν πολλαπλά εξαρτήματα μετάδοσης κίνησης και μεταφοράς αντικειμένων.

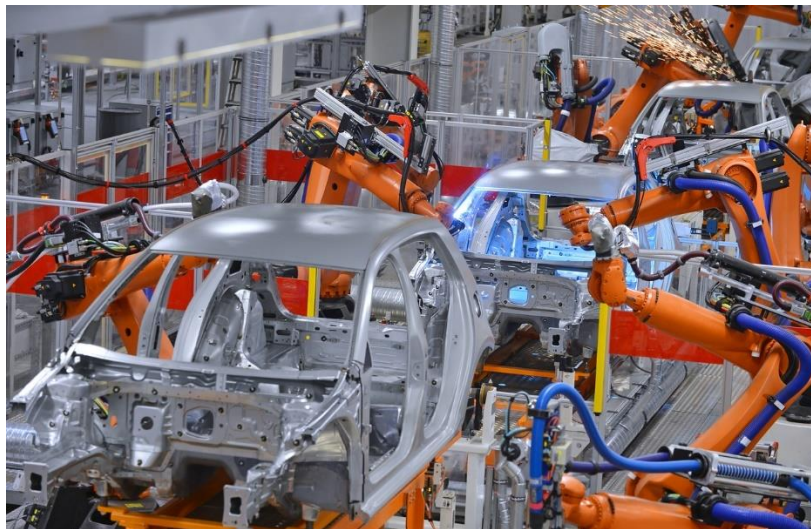
Το 1927 ο Χαρολντ Μπλακ χρησιμοποίησε την έννοια της ανάδρασης στον τομέα των επικοινωνιών, για την βελτίωση της ποιότητας του σήματος εξόδου των ενισχυτών. Ενώ η έννοια της ανάδρασης υπήρχε και είχε χρησιμοποιηθεί τα προηγούμενα χρόνια για ατμομηχανές, θερμοστάτες κ.α. , η εφαρμογή του Μπλακ αποτέλεσε την αφορμή για την εισαγωγή της έννοιας στον βιομηχανικό έλεγχο κίνησης. Νωρίτερα, το 1886 είχε δημοσιευτεί το πρώτο ερευνητικό έργο σχετιζόμενο με τον Proportional-Integral-Derivative(PID) έλεγχο. Ωστόσο η χρήση του PID ελέγχου και η εισαγωγή της έννοιας της ανάδρασης άρχισαν να αξιοποιούνται αρκετά χρόνια αργότερα, περί το 1940-1950.

Στα πλαίσια του παγκοσμίου πολέμου αλλά και της εξέλιξης της αεροδιαστημικής τα συστήματα ελέγχου αναπτύχθηκαν ραγδαία. Στη συγκεκριμένη κατεύθυνση συνέβαλαν τα υλικά στερεάς κατάστασης και η εξέλιξη των μικροεπεξεργαστών. Η εξέλιξη του

αυτόματου και ψηφιακού ελέγχου εγκαθίδρυσε τεχνολογίες όπως οι Προγραμματιζόμενοι Λογικοί Ελεγκτές(PLC) στην βιομηχανία.

Από το 1971 η εκθετική αύξηση της υπολογιστικής ισχύος έφερε την ανάπτυξη των υλικών και λογισμικών ως προς την ταχύτητα, το κόστος και την απόδοση. Περισσότερες εντολές, μετρήσεις και αυτοματοποιημένες διαδικασίες ήταν δυνατόν να γίνουν σε σύντομο χρονικό διάστημα. Το 1969 εμφανίστηκαν οι πρώτες εφαρμογές ρομποτικής με την εφεύρεση του ‘Stanford Arm’ από τον Βίκτορ Σεινμαν.

Οι σημερινές αυτοματοποιημένες βιομηχανικές διαδικασίες περιλαμβάνουν υλικολογισμικό υψηλής υπολογιστικής ισχύος, πολλαπλών ειδών κινητήριες μηχανές, ρομποτικές εφαρμογές, πολλαπλά πρωτόκολλα επικοινωνίας και τεχνητή νοημοσύνη ελαχιστοποιώντας την επέμβαση του ανθρώπινου παράγοντα.

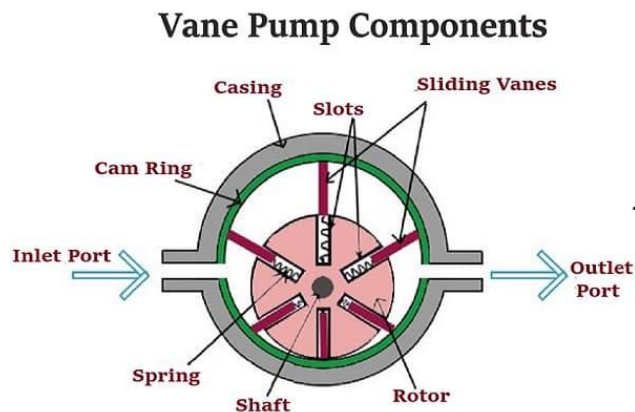


Εικόνα 3-Σύγχρονη αυτοκινητοβιομηχανία με ρομποτικούς βραχίονες και πολλαπλά υποσυστήματα

1.2 Υδραυλικοί Κινητήρες

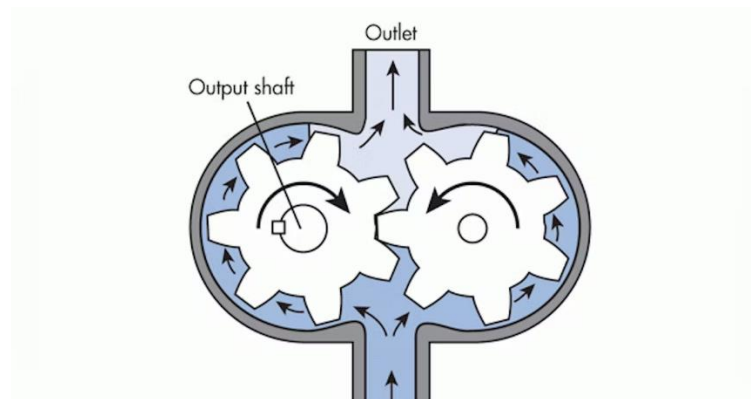
Οι υδραυλικοί κινητήρες αποτελούν υδραυλικές μηχανικές συσκευές που μετατρέπουν την υδραυλική ενέργεια σε μηχανική ενέργεια. Η υδραυλική ενέργεια ή η υδραυλική πίεση προέρχεται από την δύναμη του νερού. Ο υδραυλικός κινητήρας σχεδιάζεται έτσι ώστε να μπορεί να συνδεθεί με υδραυλικές αντλίες και κυκλώματα. Οι τύποι υδραυλικών κινητήρων είναι οι εξής[2]:

- Κινητήρες πτερυγίων (Vane Motors): Αποτελούνται από έναν έκκεντρο ρότορα που περιστρέφεται μέσα στο κυκλικό πλαίσιο που τον περικλείει.



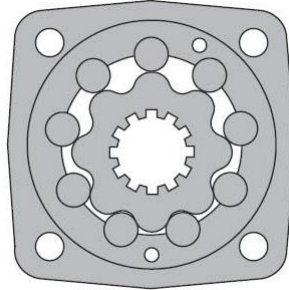
Εικόνα 4-Κινητήρας πτερυγίων

- Κινητήρες Μετάδοσης-Γρανάζιου (Gear Motors): Αποτελείται συνήθως από δύο γρανάζια, στα οποία μεταφέρεται κίνηση από το ένα στο άλλο, προς αξιοποίηση σε επόμενη μονάδα.



Εικόνα 4-Κινητήρας γραναζιών

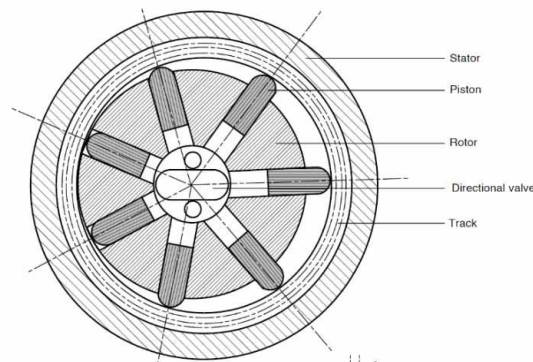
- Κινητήρες Gerotor (Gerotor Motors): Αποτλούνται από ρότορα με διακριτά δόντια στην περιφέρειά του, τα οποία εισέρχονται διαδοχικά σε διακριτές θέσεις στην περιφέρεια του στατικού πλαισίου.



Εικόνα 5-Κινητήρας Gerotor

- Κινητήρες ακτινικών εμβόλων (Radial Pistons Motors): Αποτελούνται από έμβολα-πιστόνια τα οποία κινούνται στην ακτινική διεύθυνση του ρότορα.

RADIAL-PISTON TYPE MOTOR



Εικόνα 6-Κινητήρας ακτινικών εμβόλων

- Κινητήρες αξονικών εμβόλων (Axial Pistons Motors): Αποτελούνται από έμβολα που κινούνται στην ακτινική διεύθυνση για την περιστροφή του φορτίου.



Εικόνα 7-Κινητήρας αξονικών εμβόλων

1.3 Πνευματικοί Κινητήρες

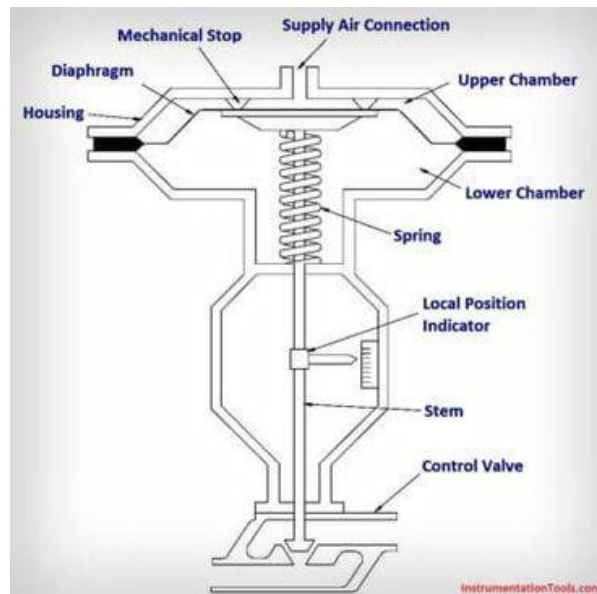
Οι πνευματικοί κινητήρες ή αλλιώς πνευματικοί ενεργοποιητές χρησιμοποιούν πεπιεσμένο αέρα σαν μέσο κίνησης. Η αξιοποίηση του αέρα σαν μέσο για την κίνηση μηχανισμών χρησιμοποιείται από τα αρχαία χρόνια (π.χ. ανεμόμυλοι). Στα σημερινά αυτοματοποιημένα βιομηχανικά συστήματα χρησιμοποιούνται πνευματικοί κινητήρες οι οποίοι στηρίζονται σε πεπιεσμένο αέρα. Η ευρεία χρήση τους έγκειται στα πλεονεκτήματα του πεπιεσμένου αέρα, τα οποία είναι τα εξής[2]:

- Ο αέρας σαν μέσο υπάρχει παντού και είναι άφθονος.
- Η συμπίεση του αέρα μπορεί να γίνει με γρήγορο και απλό τρόπο.
- Ο συμπιεσμένος αέρας μπορεί να μεταφερθεί και να αποθηκευτεί με εύκολο τρόπο από μικρές έως μεγάλες ποσότητες.
- Αποτελεί ‘καθαρό’ μέσο καθώς δεν περιέχει οργανικά υλικά ή ουσίες που απαιτούν καθαριότητα.
- Δεν εμπεριέχει κινδύνους ανάφλεξης ή έκρηξης.
- Αποτελεί ανανεώσιμη πηγή ενέργειας.

Η παραγωγή πεπιεσμένου αέρα για την χρήση στους πνευματικούς κινητήρες γίνεται στους συμπιεστές. Υπάρχουν οι συμπιεστές-εμβολοφόροι, οι οποίοι αποτελούνται από μία κινητήρια δύναμη (συνήθως ηλεκτροκινητήρας) που συμπιέζει μέσω εμβόλου τον αέρα σε ένα δοχείο. Υπάρχουν και οι συμπιεστές τουρμπίνας που συμπιέζουν τον αέρα μέσω επιτάχυνσης της μάζας του.

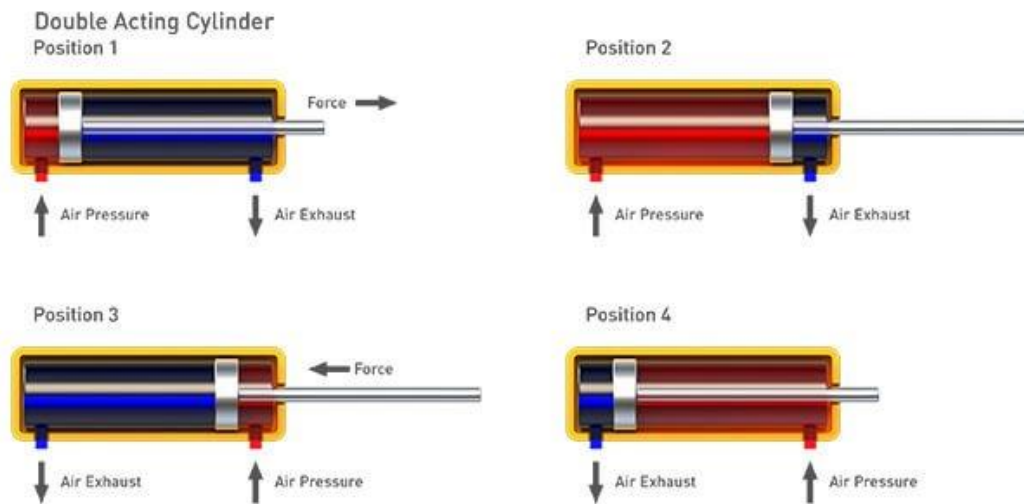
Μετά την παραγωγή του, ο πεπιεσμένος αέρας αποθηκεύεται σε πιεστικό δοχείο. Η διανομή του αέρα γίνεται μέσω σωλήνων. Τα χαρακτηριστικά του σωλήνα, όπως το υλικό, η διάμετρος και το μήκος σχεδιάζονται με βάση την επιθυμητή πίεση αέρα.

Οι πνευματικές συσκευές διακρίνονται σε 2 μεγάλες κατηγορίες, τις πνευματικές συσκευές που μετατρέπουν την δύναμη από τον πεπιεσμένο αέρα σε ευθύγραμμη ή περιστροφική κίνηση και τις πνευματικές συσκευές που ρυθμίζουν την ροή του πεπιεσμένου αέρα, όπως οι βαλβίδες. Στην εικόνα 8 φαίνεται ένας πνευματικός κύλινδρος απλής δράσης. Τα βασικά του μέρη είναι η βαλβίδα ελέγχου, η ράβδος μετακίνησης, το ελατήριο επαναφοράς και οι θάλαμοι αέρα. Με τον έλεγχο του πεπιεσμένου αέρα, η ράβδος μετακινείται από την αρχική θέση ηρεμίας στην επιθυμητή θέση. Μετά το ελατήριο επαναφέρεται στην αρχική της θέση.



Εικόνα 8-Πνευματικός Κύλινδρος απλής δράσης

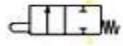

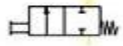
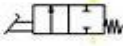
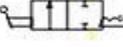


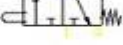


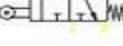

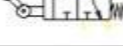
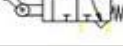
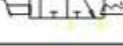
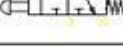
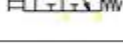
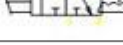
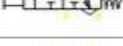
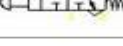
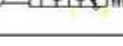
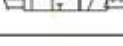
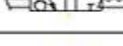
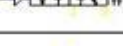
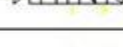



Στην εικόνα 9 φαίνεται ένας κύλινδρος διπλής δράσης καθώς και η αρχή λειτουργίας του. Ο κύλινδρος περιέχει δύο τομές από όπου μπορεί να εισέλθει και να εξέλθει ο αέρας. Έτσι η κίνηση του έμβολου μπορεί να γίνει προς τις δύο κατευθύνσεις και δεν χρειάζεται ελατήριο για την επαναφορά του.



Εικόνα 9-Πνευματικός κύλινδρος διπλής δράσης

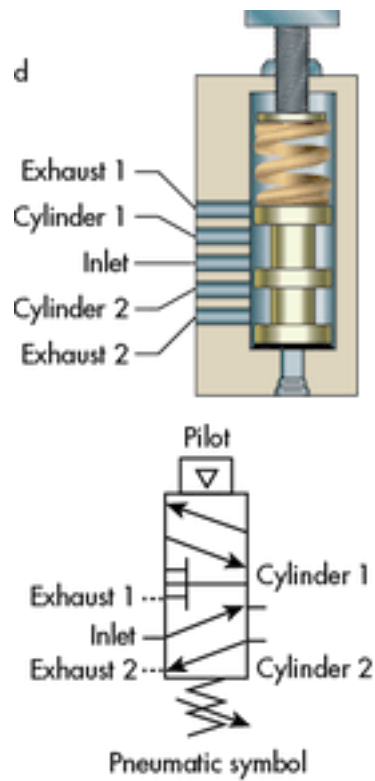
Για τον έλεγχο των παραπάνω πνευματικών κυλίνδρων απαιτούνται βαλβίδες ελέγχου της ροής του πεπιεσμένου αέρα. Υπάρχουν οι βαλβίδες κατεύθυνσης, αντεπιστροφής, ελέγχου πίεσης, ογκομετρικής ροής και απομόνωσης.

Η σημαντικότερη κατηγορία βαλβίδων είναι η βαλβίδα κατεύθυνσης. Η λειτουργία της έγκειται στον έλεγχο της κατεύθυνσης της ροής του αέρα. Χαρακτηρίζεται από τον αριθμό των οδών αέρα που μπορούν να συνδεθούν σε αυτή και τον αριθμό των διακοπτικών της καταστάσεων. Στην εικόνα 10 φαίνονται διάφορες κατηγορίες και συμβολισμοί των βαλβίδων κατεύθυνσης. Η ενεργοποίηση της βαλβίδας μπορεί να γίνει είτε μηχανικά, είτε ηλεκτρικά, είτε πνευματικά είτε με συνδυασμούς των παραπάνω.

	2/2 mechanical valve - basic		2/2 mechanical valve - mushroom
	2/2 mechanical valve - push button		2/2 mechanical valve - foot pedal
	2/2 mechanical valve - twist selector		2/2 mechanical valve - roller level
	2/2 hand valve		3/2 mechanical valve - basic NC
	3/2 mechanical valve - basic		3/2 mechanical valve with integrated exhaust port - basic
	3/2 mechanical valve - roller level		3/2 mechanical valve with integrated exhaust port - roller level
	3/2 mechanical valve - one way roller level		3/2 mechanical valve with integrated exhaust port - one way roller level
	3/2 manual valve - twist selector		3/2 mechanical valve - mushroom
	3/2 mechanical valve - flash mushroom		3/2 mechanical valve - twist selector/toggle lever/mushroom
	3/2 mechanical valve with integrated exhaust port - flash push button		3/2 mechanical valve with integrated exhaust port - push button
	3/2 mechanical valve - foot pedal		3/3 mechanical valve
	3/2 hand valve		3/2 air operated valve
	3/2 air operated valve NC		3/2 air operated valve NO
	5/2 mechanical valve - basic		5/2 mechanical valve - roller level

Εικόνα 10-Κατηγορίες βαλβίδων κατεύθυνσης

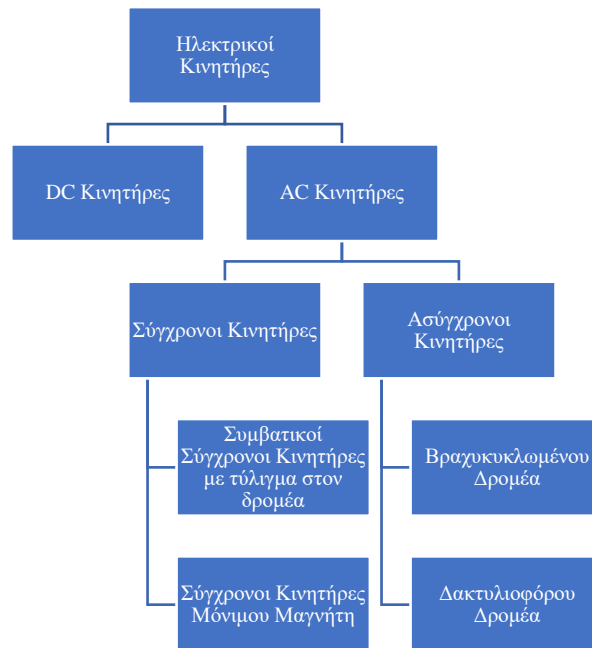
Στην εικόνα 11 φαίνεται μια πνευματική συσκευή καθώς και το σύμβολο αυτής. Αποτελείται από βαλβίδα μηχανικής ενεργοποίησης, ελατήριο επαναφοράς, 2 γραμμές πεπιεσμένου αέρα και 2 γραμμές εκτόνωσης.



Εικόνα 11-Πνευματική συσκευή και συμβολισμός

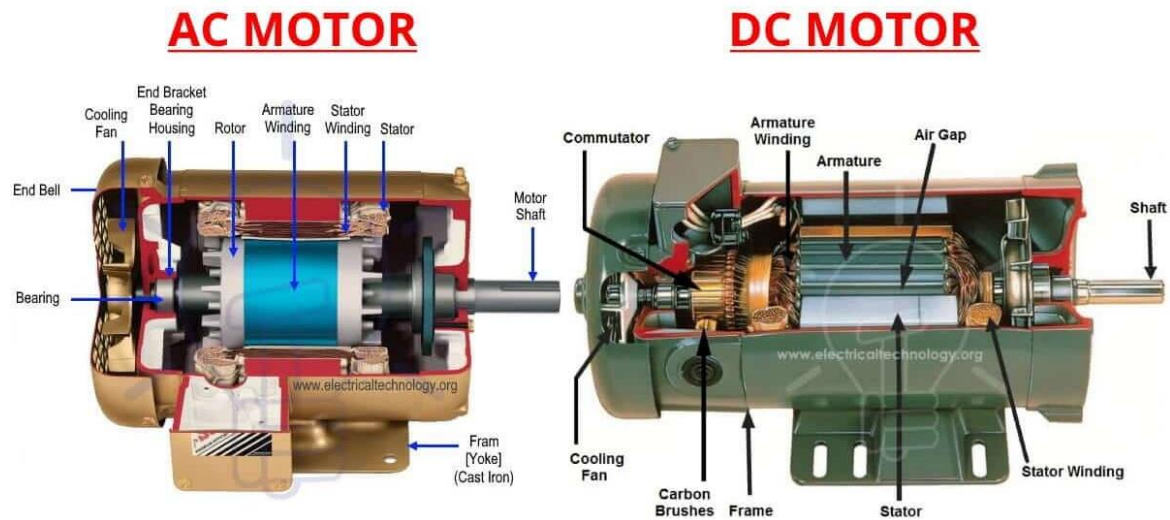
1.4 Ηλεκτρικοί Κινητήρες

Οι ηλεκτρικοί κινητήρες κατηγοριοποιούνται ανάλογα με την μορφή της τάσης τροφοδοσίας. Έτσι υπάρχουν οι κινητήρες DC και οι κινητήρες AC.[5]



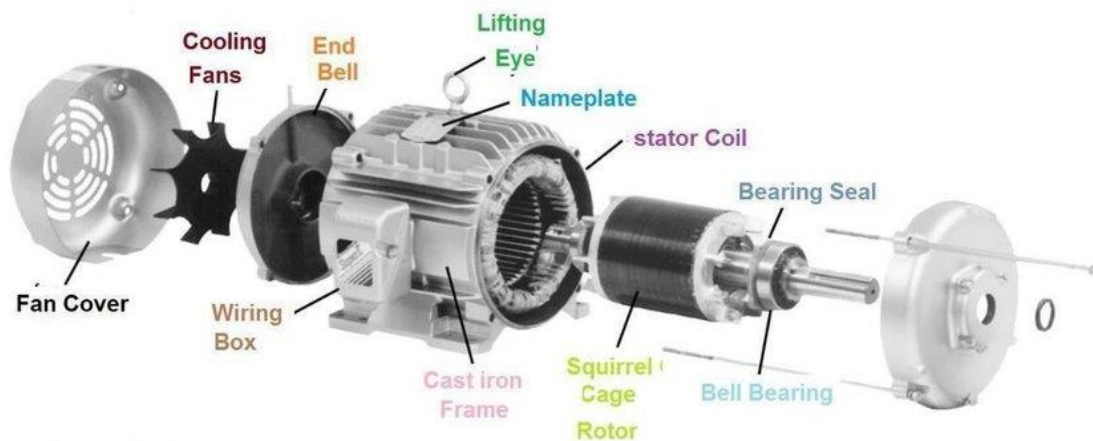
Εικόνα 12-Κατηγοριοποίηση Ηλεκτρικών Κινητήρων

Οι κινητήρες DC αποτελούν την πιο ώριμη τεχνολογία ηλεκτροκινητήρων και χρησιμοποιούνται σε πληθώρα εφαρμογών εδώ και δεκαετίες. Ο έλεγχος των κινητήρων DC είναι απλός και εύκολα υλοποιήσιμος. Τυπικές εφαρμογές του κινητήρα DC στη βιομηχανία είναι η ανύψωση φορτίων, η κίνηση τροχαλιών, τα συστήματα θραύσης, κ.α. Τα κυριότερα μειονεκτήματα των κινητήρων DC συνδέονται με το σύστημα ψηκτρών συλλέκτη που περιέχει για την μεταγωγή της πολικότητας στα άκρα του. Το σύστημα ψηκτρών συλλέκτη αποτελείται από υλικά όπως το κάρβουνο. Έτσι, απαιτείται συνεχής επιτήρηση του συστήματος και συχνή συντήρηση ή αντικατάσταση αυτών. Άμεσο αποτέλεσμα είναι η μείωση της απόδοσης του συνολικού ηλεκτρικού κινητηρίου συστήματος.[5]



Εικόνα 13-Δομή κινητήρων AC και DC

Οι κινητήρες AC αποτελούν τεχνολογία που εμφανίστηκε λίγα χρόνια μετά τους κινητήρες DC. Ωστόσο, η δυσκολία ελέγχου της λειτουργίας τους δεν επέτρεψε την ευρεία υιοθέτησή τους, όπως έγινε με τους κινητήρες DC. Με την εξέλιξη των ηλεκτρονικών ισχύος και της θεωρίας ελέγχου τα τελευταία χρόνια οι κινητήρες AC έχουν αντικαταστήσει τους κινητήρες DC σε πολλές εφαρμογές. Συγκριτικά με τους κινητήρες DC προσφέρουν μεγαλύτερη απόδοση, μεγαλύτερη πυκνότητα ισχύος, μικρότερες απώλειες και μεγαλύτερες δυνατότητες ελέγχου ως προς ταχύτητα, θέση και ροπή. Οι δύο βασικές κατηγορίες κινητήρων AC είναι οι Σύγχρονοι και οι Ασύγχρονοι Κινητήρες. [1]



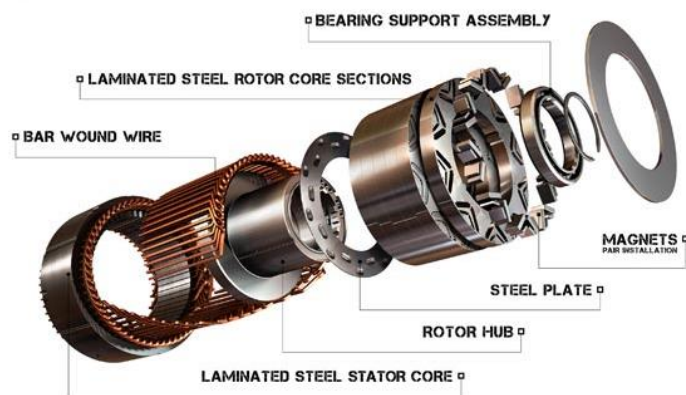
Εικόνα 14-Δομή του επαγωγικού κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα

1.4.1 Ασύγχρονοι-Επαγωγικοί Κινητήρες

Οι ασύγχρονοι κινητήρες ή αλλιώς επαγωγικοί κινητήρες στηρίζονται στην εξής βασική αρχή λειτουργίας: Το τριφασικό τύλιγμα του στάτη τροφοδοτείται με εναλλασσόμενη τάση. Έτσι δημιουργείται περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό της μηχανής. Ο δρομέας μπορεί να αποτελείται είτε από βραχυκυκλωμένα τυλίγματα είτε από τυλίγματα συνδεδεμένα σε τριφασική αντίσταση. Το περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από τον στάτη διαρρέει τον δρομέα και επάγει σε αυτόν τάση και ρεύμα. Έτσι, έχουμε έναν ρευματοφόρο αγωγό(δρομέας) σε μαγνητικό πεδίο(στάτης). Στον δρομέα θα ασκηθεί δύναμη Laplace και θα αρχίσει να περιστρέφεται. Ανάλογα με την κατασκευή του δρομέα, οι επαγωγικοί κινητήρες διακρίνονται σε επαγωγικούς κινητήρες βραχυκυκλωμένου κλωβού και δακτυλιοφόρου δρομέα. Ο επαγωγικός κινητήρας δακτυλιοφόρου δρομέα χρησιμοποιεί σύστημα ψηκτρών παρόμοιο με τις μηχανές DC. Ο επαγωγικός κινητήρας βραχυκυκλωμένου κλωβού δεν περιέχει σύστημα ψηκτρών.

1.4.2 Σύγχρονοι Κινητήρες

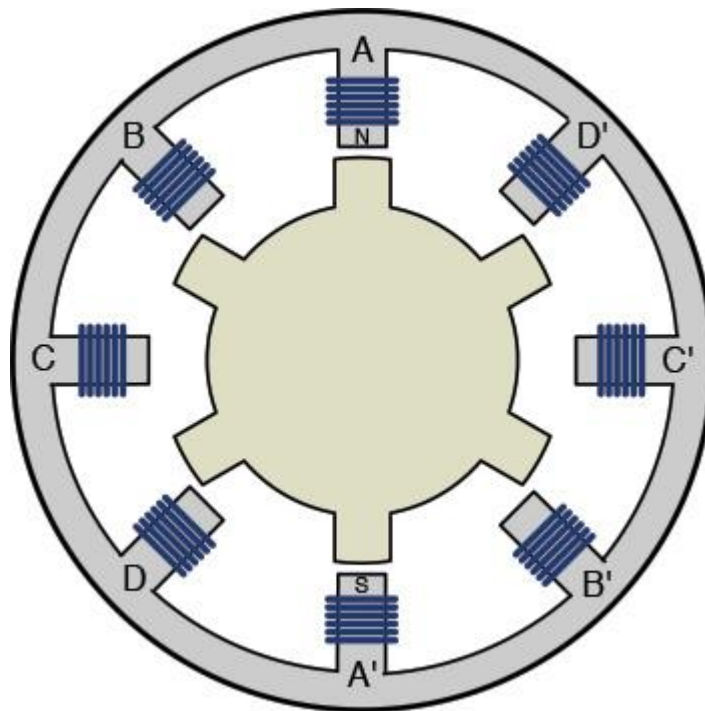
Οι συμβατικοί σύγχρονοι κινητήρες χρησιμοποιούν τύλιγμα διέγερσης στο κύκλωμα του δρομέα και συνεπώς σύστημα ψηκτρών. Σήμερα, έχουν αναπτυχθεί σύγχρονοι κινητήρες με μόνιμο μαγνήτη, που αντικαθιστούν τους ηλεκτρομαγνήτες. Οι σύγχρονοι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη είναι γνωστοί ως Brushless AC και Brushless DC. Ανάλογα με την τοποθέτηση των μαγνητών και την εφαρμογή, ο σχεδιασμός τους μπορεί να διαφοροποιείται. Οι συγκεκριμένοι κινητήρες προσφέρουν υψηλή απόδοση, υψηλή πυκνότητα ισχύος και ευρύ φάσμα ελέγχου. Χρησιμοποιούνται σε ευρύ φάσμα σύγχρονων σημερινών εφαρμογών όπως ηλεκτροκίνηση, βιομηχανικές διεργασίες, ρομπότ κ.α. [4]



Εικόνα 15-Δομή σύγχρονου κινητήρα μόνιμου μαγνήτη

1.4.3 Βηματικοί Κινητήρες

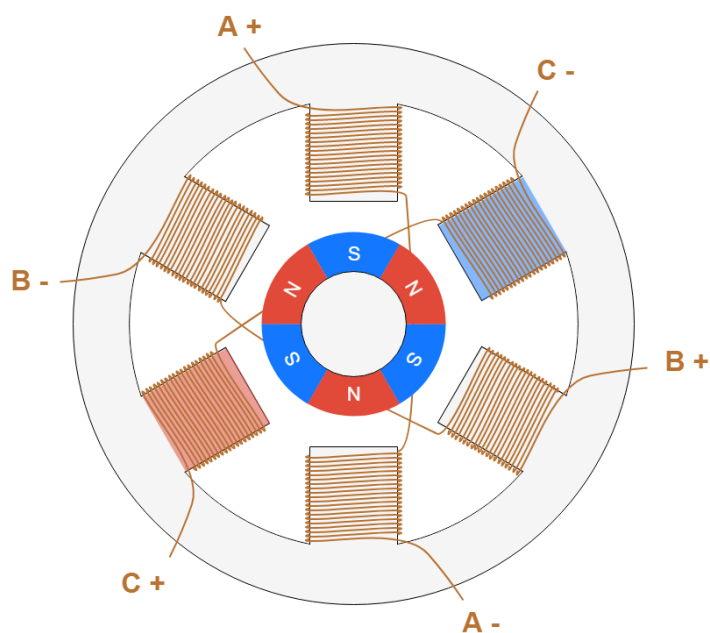
Σε βιομηχανικές εφαρμογές όπου χρειάζεται ακριβής έλεγχος θέσης και ταχύτητας χρησιμοποιούνται οι βηματικοί κινητήρες. Αποτελούν ιδιαίτερα δημοφιλής κατηγορία κινητήρων AC σε σημερινές εφαρμογές. Δημοφιλές παράδειγμα αποτελούν οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές (3D Printers). Οι βηματικοί κινητήρες ανήκουν στην κατηγορία των εναλλασσόμενων κινητήρων και μπορεί να περιέχουν μόνιμους μαγνήτες στην δομή τους αν και αυτό δεν είναι απαραίτητο. Ο στάτης ενός βηματικού κινητήρα αποτελείται από έκτυπους πόλους όπου τυλίγεται το τύλιγμα διέγερσης. Ο δρομέας του αποτελείται από πολλαπλούς έκτυπους πόλους. Ο δρομέας μπορεί να αποτελείται μόνο από σιδηρομαγνητικό υλικό ή να περιέχει και μαγνήτες. Με βάση την δομή του δρομέα διακρίνονται σε τρεις τύπους κινητήρων, τους βηματικούς κινητήρες μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης(Variable Reluctance), μόνιμου μαγνήτη(Permanent Magnet) και υβριδικούς(Hybrid). Στην εικόνα 16 φαίνεται ένας βηματικός κινητήρας μαγνητικής αντίδρασης, στην εικόνα 17 ένας βηματικός κινητήρας με μόνιμο μαγνήτη και στην εικόνα 18 ένας υβριδικός βηματικός κινητήρας.[9]



Εικόνα 16-Δομή Βηματικού κινητήρα μαγνητικής αντίδρασης

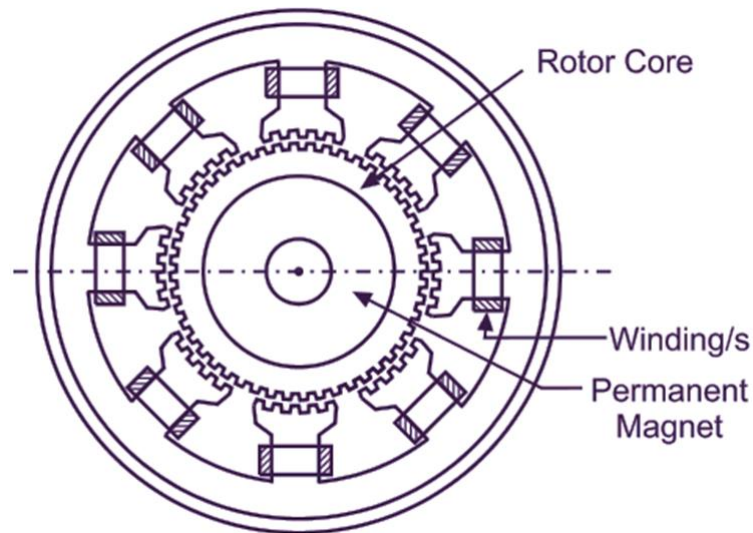
Ο βηματικός κινητήρας μπορεί να χαρακτηριστεί από τον αριθμό των πόλων στον στάτη και στον δρομέα. Για παράδειγμα, ο κινητήρας της εικόνας 16 έχει 8 πόλους στον στάτη

και 6 στον δρομέα. Μπορεί να χαρακτηριστεί σαν βηματικός κινητήρας μαγνητικής αντίστασης 8/6. Η αρχή λειτουργίας του βηματικού κινητήρα μαγνητικής αντίστασης έγκειται στην έλξη του δρομέα από τον στάτη. Έστω ότι έχουμε την θέση του ρότορα-στάτη του σχήματος 16. Με την τροφοδότηση του τυλίγματος B, ο δρομέας θα μετακινηθεί προς τα δεξιά έτσι ώστε να ευθυγραμμιστεί ο πόλος του τυλίγματος B με το αντίστοιχο πόλο του δρομέα. Έτσι είναι δυνατή η μετατόπιση του δρομέα κατά συγκεκριμένη γωνία ανάλογα με τον αριθμό πόλων στάτη-δρομέα. Αντίστοιχα με την τροφοδότηση του επόμενου τυλίγματος μπορεί να μετακινηθεί ο δρομέας στην επιθυμητή θέση.[9][1]



Εικόνα 17-Δομή βηματικού κινητήρα με μόνιμους μαγνήτες στο δρομέα

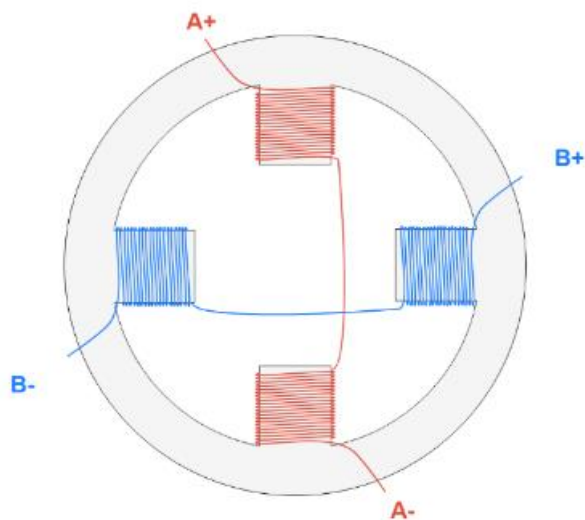
Ο βηματικός κινητήρας μόνιμων μαγνητών δεν έχει την έκτυπη μορφή του δρομέα όπως του βηματικού κινητήρα μαγνητικής αντίστασης καθώς για την έλξη του δρομέα χρησιμοποιούνται οι μαγνήτες που βρίσκονται σε αυτόν. Με την τροφοδότηση του κάθε τυλίγματος ο δρομέας θα κινηθεί στην αντίστοιχη θέση. Ο συγκεκριμένος σχεδιασμός του δρομέα εμφανίζει περιορισμούς ως προς την ταχύτητα περιστροφής και την ακρίβεια.



Εικόνα 18 Υβριδικός Βηματικός Κινητήρας

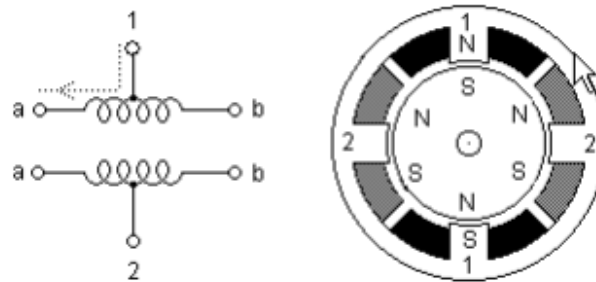
Ο υβριδικός βηματικός κινητήρας συνδυάζει τα χαρακτηριστικά και τα πλεονεκτήματα των δύο παραπάνω τεχνολογιών. Συνήθως ο δρομέας περιέχει μόνιμο μαγνήτη στο κέντρο της δομής του και πολλαπλούς έκτυπους πόλους στην περιφέρειά του. Έτσι, οι υβριδικοί βηματικοί κινητήρες εμφανίζουν βελτιωμένα χαρακτηριστικά ταχύτητας, ροπής, ακρίβειας θέσης και καλύτερη δυναμική απόκριση.

Οι παραπάνω βηματικοί κινητήρες αποτελούνται από τριφασικό τύλιγμα στον στάτη. Υπάρχουν βηματικοί κινητήρες που αποτελούνται από διφασικό τύλιγμα στον στάτη. Στην εικόνα φαίνεται ο στάτης ενός βηματικού κινητήρα με διφασικό τύλιγμα(A-B).



Εικόνα 19-Διφασικό τύλιγμα στάτη

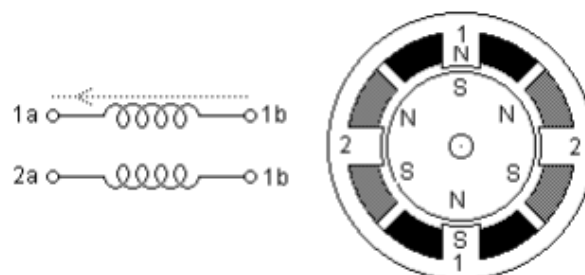
Οι μονοπολικοί βηματικοί κινητήρες(Unipolar Stepper Motors) αποτελούνται από διφασικό τύλιγμα στον στάτη. Το κάθε τύλιγμα έχει ακροδέκτη εξόδου στο μέσο του τυλίγματος. Οι δύο ακροδέκτες του μέσου από κάθε τύλιγμα είτε συνδέονται μεταξύ τους είτε δίνονται ως εξοδοί από την μηχανή. Στην εικόνα φαίνεται ένας μονοπολικός βηματικός κινητήρας.



Εικόνα 20-Μονοπολικός βηματικός κινητήρας μόνιμου μαγνήτη[9]

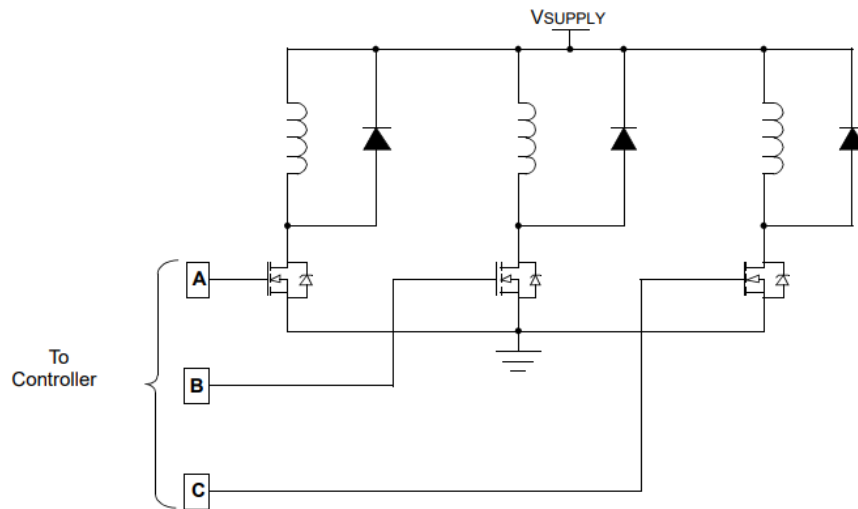
Η λειτουργία του μονοπολικού βηματικού κινητήρα εξαρτάται από το μισό μέρος του κάθε τυλίγματος που τροφοδοτείται. Ανάλογα με την τροφοδοσία του κάθε μέρους αλλάζει η κατεύθυνση του ρεύματος και συνεπώς της κατεύθυνσης περιστροφής. Ελέγχοντας την τροφοδοσία του κάθε μισού για κάθε τύλιγμα γίνεται κατάλληλη περιστροφή του κινητήρα στην επιθυμητή θέση.

Οι διπολικοί βηματικοί κινητήρες (Bipolar Stepper Motors) αποτελούνται από διφασικό τύλιγμα στον στάτη χωρίς να έχουν επιπλέον ακροδέκτη στο μέσο του τυλίγματος. Στην εικόνα φαίνεται ένας τυπικός διπολικός βηματικός κινητήρας και τα τυλίγματα τροφοδοσίας του. Έτσι σε κάθε κύκλο τροφοδοτείται το συνολικό τύλιγμα. Αυτό οδηγεί σε μεγαλύτερη παραγωγή ηλεκτρομαγνητικής ροπής για το ίδιο μέγεθος του κινητήρα. Η περιστροφή του κινητήρα εναλλάσσεται με την αλλαγή της κατεύθυνσης του ρεύματος τροφοδοσίας των τυλιγμάτων.



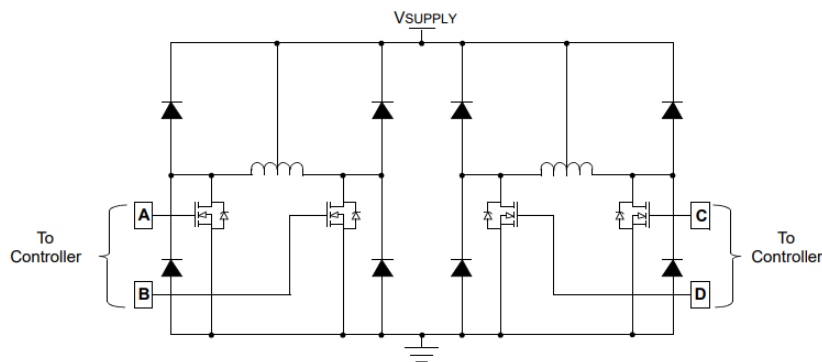
Εικόνα 21 Διπολικός Βηματικός Κινητήρας μόνιμου μαγνήτη[9]

Τα κυκλώματα οδήγησης των βηματικών κινητήρων διαφέρουν ανάλογα με το είδος του βηματικού κινητήρα. Για έναν βηματικό κινητήρα μαγνητικής αντίστασης με τριφασικό τυλίγμα χρησιμοποιείται το κύκλωμα της εικόνας. Αποτελείται από 3 ημιαγωγικά στοιχεία ισχύος(π.χ. MOSFET) και 3 διόδους. Με τον έλεγχο των παλμών τροφοδοσίας των ημιαγωγικών στοιχείων ελέγχεται αγωγή τους και συνεπώς η τροφοδοσία του κάθε τυλίγματος. Οι διόδοι χρησιμοποιούνται για την αποφυγή απότομων αιχμών τάσης που μπορούν να βλάψουν τα ημιαγωγικά στοιχεία. Οι απότομες αιχμές τάσης προκαλούνται από την επαγωγική λειτουργία των τυλιγμάτων του κινητήρα και τις απότομες μεταβολές του ρεύματος κατά την έναυση και σβέση του στοιχείου.



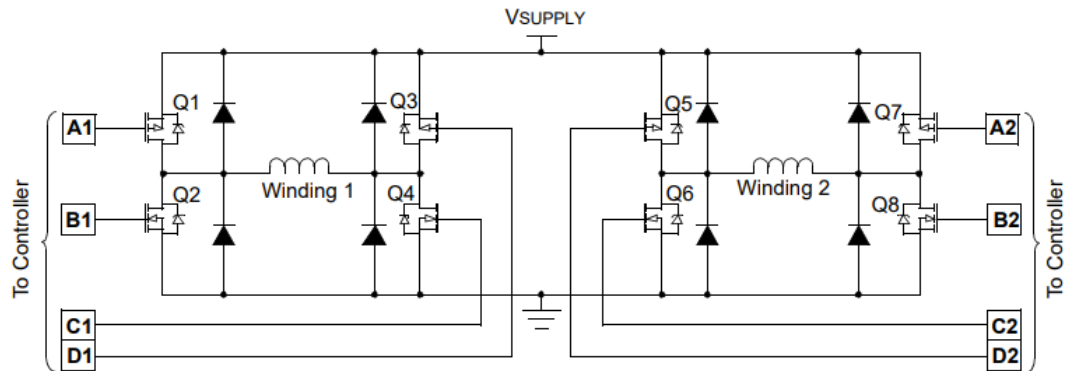
Εικόνα 22-Κύκλωμα οδήγησης βηματικού κινητήρα μαγνητικής αντίστασης[9]

Για την οδήγηση του μονοπολικού βηματικού κινητήρα χρησιμοποιείται το κύκλωμα του σχήματος . Αποτελείται από 4 ημιαγωγικά στοιχεία και 8 διόδους προστασίας. Με τον έλεγχο αγωγής του κάθε ημιαγωγικού στοιχείου ελέγχεται η τροφοδοσία του κάθε μισού του κάθε τυλίγματος.



Εικόνα 23-Κύκλωμα οδήγησης μονοπολικού βηματικού κινητήρα[9]

Για την οδήγηση του διπολικού βηματικού κινητήρα χρησιμοποιούνται 8 ημιαγωγικά στοιχεία ισχύος και 8 δίοδοι προστασίας. Στο κύκλωμα της εικόνας φαίνεται η διάταξη οδήγησης του. Ονομάζεται γέφυρα-H (H-bridge). Για την τροφοδοσία του κάθε τυλίγματος πρέπει να άγουν ταυτόχρονα δύο στοιχεία. Για παράδειγμα, με θετικό παλμό στο A1 και στο C1 το τυλίγμα 1 τροφοδοτείται από την τάση V supply ως προς την γείωση αναφοράς. Για την αναστροφή του ρεύματος του τυλίγματος, πρέπει να δοθεί θετικός παλμός στα D1 και C1.



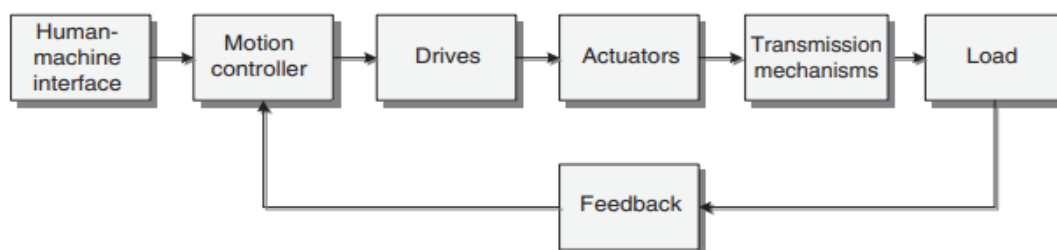
Εικόνα 24-Κύκλωμα οδήγησης διπολικού βηματικού κινητήρα[9]

Κεφάλαιο 2. Βιομηχανικά Συστήματα Κίνησης

Η δομή των σημερινών βιομηχανικών συστημάτων κίνησης έχει αλλάξει έντονα τα τελευταία χρόνια καθώς οι απαιτήσεις των βιομηχανικών διεργασιών αυξάνονται. Παράλληλα, νέες τεχνολογίες εισάγονται στον τομέα των βιομηχανικών συστημάτων κίνησης και έτσι απαιτείται συνεργασία και ομαλή λειτουργία όλων. Η ηλεκτρική κίνηση αποτελεί την κυρίαρχη μορφή κίνησης στα βιομηχανικά συστήματα. Για την ανάπτυξη των συστημάτων ηλεκτρικής κίνησης είναι απαραίτητη η εξοικονόμηση ενέργειας, η αύξηση της απόδοσης και η διεύρυνση των δυνατοτήτων και εφαρμογών. Σε αυτήν την κατεύθυνση αναπτύχθηκαν τεχνολογίες όπως οι Ομαλοί Εκκινήτες (Soft Starters), οι Μετατροπείς Μεταβλητής Συχνότητας (Variable Frequency Drive) και οι Σερβοκινητήρες (Servo). [2]

2.1 Δομή Βιομηχανικών Συστημάτων Κίνησης

Κάθε βιομηχανική διεργασία χρησιμοποιεί συστήματα κίνησης για την μεταφορά και ανύψωση φορτίων, για την διεργασία υλικών, για χημικές διεργασίες κ.α. Η τυπική δομή ενός βιομηχανικού συστήματος κίνησης φαίνεται στην εικόνα 25.[6]



Εικόνα 25-Δομή Σύγχρονου Βιομηχανικού Συστήματος Κίνησης[6]

Τα υποσυστήματα του συνολικού συστήματος είναι τα εξής:

- Διεπαφή μηχανής-ανθρώπου (Human-machine Interface): Χρησιμοποιείται για την επικοινωνία του χρήστη με το σύστημα και περιλαμβάνει διαδικασίες όπως αποστολή εντολών και προγραμματισμό ελεγκτή κίνησης. Το υλικό διεπαφής που χρησιμοποιείται για την επικοινωνία του χρήστη μπορεί να περιλαμβάνει κουμπιά, ενδεικτικές λυχνίες και διακόπτες. Διαφορετικά μπορεί να χρησιμοποιείται οθόνη αφής που περιλαμβάνει τις λειτουργίες που επιτελεί το παραπάνω υλικό. Το πρόγραμμα (software) που είναι εγκατεστημένο στην μονάδα διεπαφής μπορεί να περιλαμβάνει, ανάλογα με την εφαρμογή, επιλογές ελέγχου του κινητήριου συστήματος, ένδειξη διαφόρων μεγεθών κ.α. Στην εικόνα 26 φαίνονται δύο είδη διεπαφών, μία με τυπικά κουμπιά διακόπτες και λυχνίες και μία με οθόνη αφής.



Εικόνα 26-Διεπαφή (Interface)[2]

- Ελεγκτής ταχύτητας(Motion Controller): Αποτελεί την καρδιά του συστήματος καθώς δίνει τα απαραίτητα σήματα για κίνηση, μετρά σήματα του συστήματος και επιτηρεί την παρούσα κατάστασή του. Η λειτουργία του στηρίζεται στην δημιουργία σημάτων σφάλματος μεταξύ της επιθυμητής λειτουργίας και της μετρούμενης λειτουργίας. Το σφάλμα που δημιουργεί στέλνεται στην επόμενη βαθμίδα (οδηγητής-drive). Για παράδειγμα, μια εντολή αύξησης στην ταχύτητα θα έχει ως αποτέλεσμα ο ελεγκτής να παράγει ένα σφάλμα ταχύτητας μεταξύ της αναφοράς και της μετρούμενης ταχύτητας. Ο ελεγκτής ταχύτητας συνήθως αποτελείται από μία υπολογιστική μονάδα (π.χ. μικροελεγκτής), περιφερειακά για τις εισόδους και εξόδους του συστήματος, και επικοινωνιακά πρωτόκολλα και συνδέσεις (π.χ. Ethernet). Στην εικόνα 27 φαίνεται ένας τυπικός ελεγκτής ταχύτητας.



Εικόνα 27- Ελεγκτής ταχύτητας(Motion Controller)[2]

- Οδηγητές (Drives): Καθώς τα σήματα του ελεγκτή ταχύτητας είναι μικρής ισχύος, πρέπει να υπάρχει η κατάλληλη διάταξη μεταξύ αυτού και του ενεργοποιητή (actuator) έτσι ώστε τα σήματα να μπορούν να τον ενεργοποιήσουν και οδηγήσουν. Σε σύγχρονους σχεδιασμούς συστημάτων οι οδηγητές ενσωματώνονται στην μονάδα του ελεγκτή κίνησης. Στην εικόνα 28 φαίνεται ένας τυπικός οδηγητής ενεργοποιητών.



Εικόνα 28-Οδηγητής (Driver)[2]

- Ενεργοποιητές (Actuators): Οι ενεργοποιητές εκτελούν την κίνηση του φορτίου. Μπορεί να είναι πνευματικοί, υδραυλικοί ή ηλεκτρομηχανικοί. Στο κεφάλαιο 1 αναλύονται οι πνευματικοί και υδραυλικοί ενεργοποιητές αλλά και οι ηλεκτρομηχανικοί, που αποτελούν τους ηλεκτρικούς κινητήρες.
- Ανάδραση (Feedback): Η ανάδραση των σημάτων κατάστασης της μηχανής είναι απαραίτητη για την υλοποίηση του ελέγχου. Το συνηθέστερο σήμα ανάδρασης που αξιοποιείται από τον ελεγκτή κίνησης είναι το σήμα ταχύτητας του κινητήρα. Ο σερβοκινητήρας (κεφ. 2.4) αποτελεί έναν κινητήρα εναλλασσόμενου ρεύματος που ενσωματώνει αισθητήρα ταχύτητας για την ανάδραση του σήματος της ταχύτητας. Στην εικόνα 29 φαίνεται ένας σερβοκινητήρας AC, όπου φαίνονται στο πάνω μέρος, ο ακροδέκτης τροφοδοσίας και ο ακροδέκτης ανάδρασης ταχύτητας.



Εικόνα 29-Σερβοκινητήρας[2]

- Μηχανισμός μετάδοσης (Transmission Mechanism): Περιλαμβάνει τον άξονα μετάδοσης, γρανάζια, ρουλεμάν, ιμάντες μετάδοσης ανάλογα με την εφαρμογή και η λειτουργία του αφορά την μετάδοση κίνησης για συγκεκριμένο προφίλ φορτίου. Στην εικόνα 30 φαίνεται μια τυπική εφαρμογή ιμάντων για την μετάδοση κίνησης μεταξύ ηλεκτροκινητήρα και φορτίου.

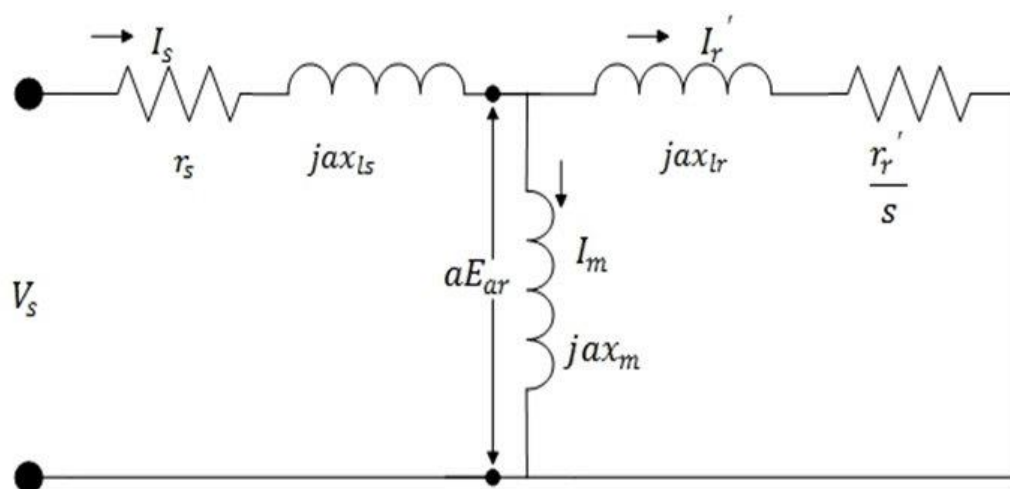


Εικόνα 30-Μηχανισμός ιμάντα μετάδοσης κίνησης

- **Φορτίο (Load):** Το φορτίο ποικίλει ανάλογα με την εφαρμογή. Κάθε φορτίο χαρακτηρίζεται από ένα προφίλ φορτίου που συνήθως είναι μια καμπύλη ροπής-ταχύτητας. Εναλλακτικά, χρησιμοποιούνται χαρακτηριστικές ταχύτητας χρόνου, επιτάχυνσης-χρόνου ή θέσης-χρόνου. Η συγκεκριμένη χαρακτηριστική φορτίου χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του κινητήρα που θα χρησιμοποιηθεί καθώς και για τον σχεδιασμό του συστήματος μετάδοσης.

2.2 Ομαλός Εκκινητής (Soft Starter)

Σε πολλά από τα σημερινά συστήματα προηγμένου ελέγχου κίνησης χρησιμοποιείται ο ομαλός εκκινητής(soft-starter). Κατά την εκκίνηση, οι ηλεκτρικοί κινητήρες, όπως ο επαγωγικός κινητήρας βραχυκυκλωμένου κλωβού, 'τραβούν' μεγάλο ρεύμα. Αυτό οφείλεται στην αρχή λειτουργίας του κινητήρα. Στην εικόνα 31 φαίνεται το ισοδύναμο κύκλωμα ενός επαγωγικού κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα. [7]



Εικόνα 31-Ισοδύναμο επαγωγικού κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα[7]

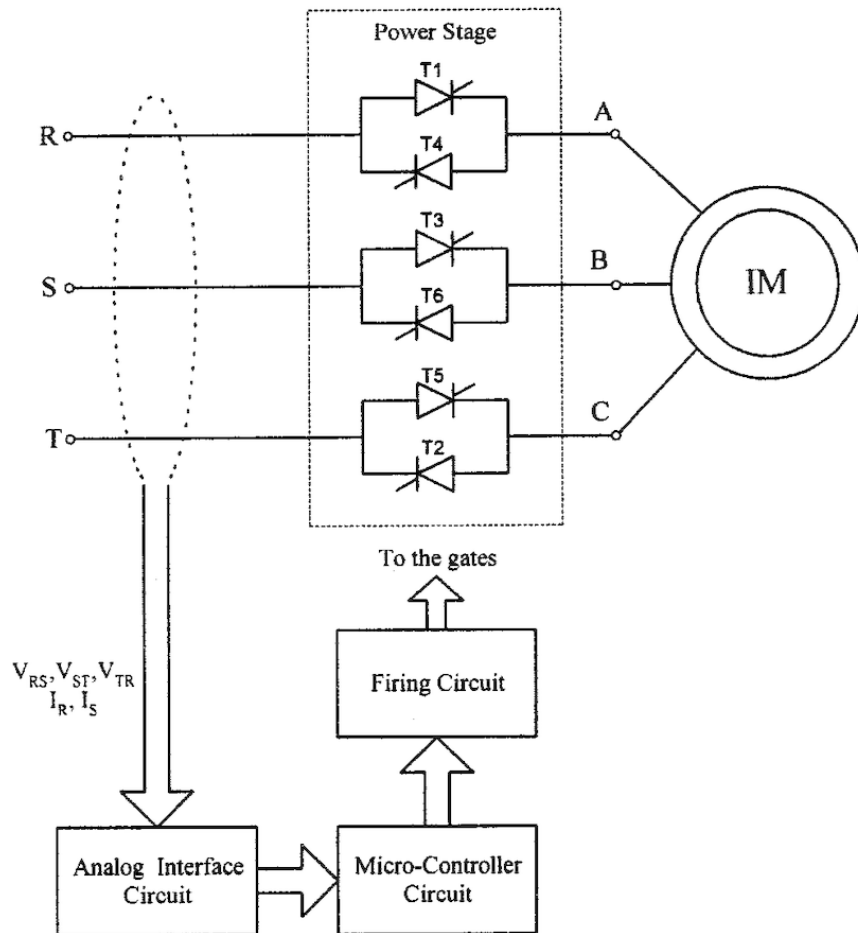
Η τάση τροφοδοσίας συμβολίζεται με V_s , η αντίσταση στάτη με r_s , η επαγωγή του στάτη με x_{l_s} , η επαγωγή του δρομέα με x_{l_r} , η αντίσταση του δρομέα με r_r' , η αμοιβαία επαγωγή με x_m και η ολίσθηση με s . Η ολίσθηση ορίζεται ως $s = \frac{n_{sync} - nm}{n_{sync}}$, όπου n_{sync} είναι η ταχύτητα περιστροφής του μαγνητικού πεδίου και nm είναι η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα. Ο ο συντελεστής a αποτελεί σταθερά που περιγράφει την σύζευξη στάτη δρομέα.

Το αυξημένο ρεύμα εκκίνησης μπορεί να γίνει κατανοητό αν αναλογιστούμε το παραπάνω ισοδύναμο κύκλωμα. Κατά την εκκίνηση, η ολίσθηση s είναι 1 καθώς η ταχύτητα του κινητήρα είναι $nm=0$. Συνεπώς η αντίσταση r_r' δεν επηρεάζεται από την τιμή της ολίσθησης s . Καθώς αυξάνεται η ταχύτητα, η ολίσθηση μειώνεται και η αντίσταση r_r'/s αυξάνεται. Έτσι, αυξάνεται η συνολική αντίσταση που 'φαίνεται' από την τροφοδοσία του κινητήρα. Συνεπώς, το ρεύμα μειώνεται.

Το αυξημένο ρεύμα κατά την εκκίνηση μπορεί να προκαλέσει πτώση τάσης στο δίκτυο, να επιβαρύνει σημαντικά τα τυλίγματα τροφοδοσίας και να αποτελέσει κίνδυνο για τον

ανθρώπινο παράγοντα. Με την χρήση του ομαλού εκκινήτη περιορίζεται το ρεύμα εκκίνησης. Έτσι, αποφεύγονται τα παραπάνω ανεπιθύμητα φαινόμενα και επιπλέον, γίνεται ελεγχόμενη επιτάχυνση του κινητήρα, μπορούν να γίνουν πολλαπλές εκκινήσεις και παύσεις του, αυξάνεται το προσδόκιμο ζωής του κινητήρα και των περιφερειακών συστημάτων του(καλώδια τροφοδοσίας, αυτοματισμοί, διακόπτες, κ.α.) και μειώνεται η ενεργειακή κατανάλωση του συστήματος.

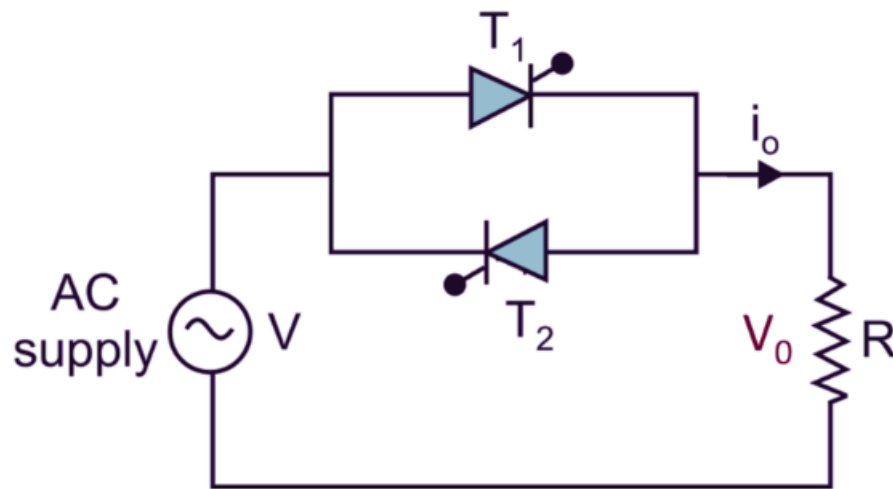
Στην εικόνα 32 φαίνεται η τοπολογία ενός ομαλού εκκινητή που τροφοδοτεί έναν επαγωγικό κινητήρα.



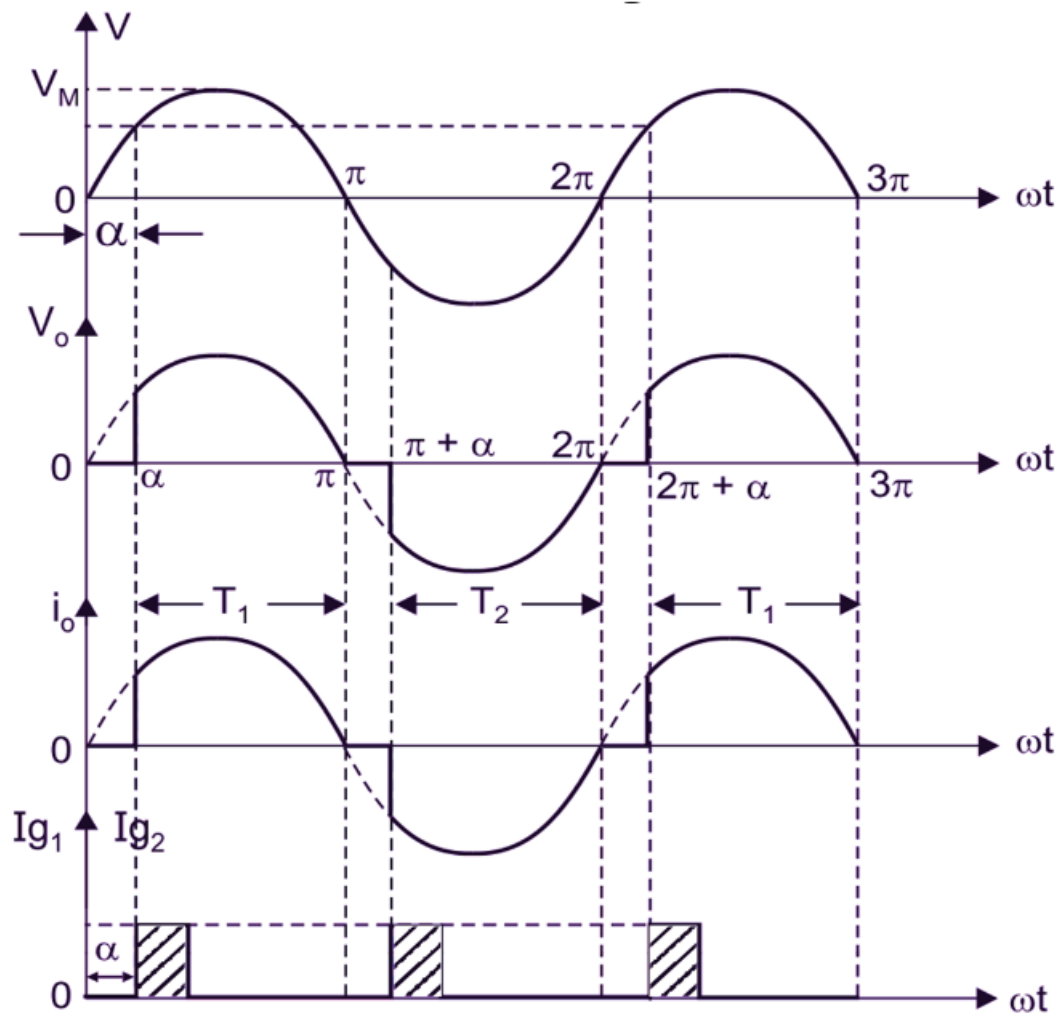
Εικόνα 32-Κύκλωμα Soft Starter[5]

Το κύκλωμα ισχύος του ομαλού εκκινητή αποτελείται από 6 θυρίστορ. Τα θυρίστορ αποτελούν ημιαγωγικά στοιχεία ισχύος, που λειτουργούν σαν διακόπτες για τον έλεγχο της τροφοδοσίας του κινητήρα. Είναι συνδεδεμένα ανά δύο και αντιπαράλληλα. Για τον έλεγχο τα αγωγής του κάθε θυρίστορ χρησιμοποιείται η γωνία έναυσης, που συμβολίζεται με α .

Στην εικόνα 33 φαίνεται ένας μονοφασικός ρυθμιστής τάσης αποτελούμενος από 2 αντιπαράλληλα θυρίστορ. [5]



Εικόνα 33-Μονοφασικός ρυθμιστής AC



Εικόνα 34-Κυματομορφές λειτουργίες μονοφασικού ρυθμιστή AC

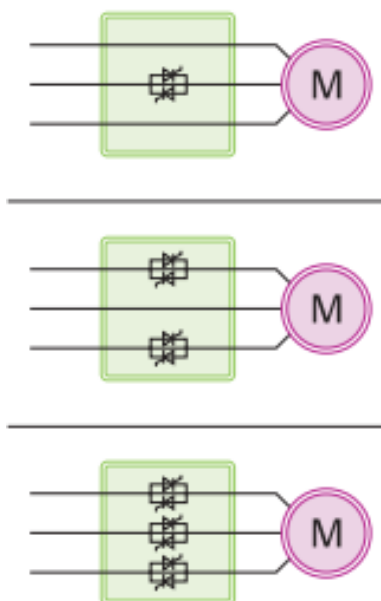
Με τον έλεγχο της γωνίας έναυσης α ελέγχεται η τάση που τροφοδοτεί το ωμικό φορτίο. Στην εικόνα 34 φαίνεται η εναλλασσόμενη τάση εισόδου V_m , τάση εξόδου V_o , το ρεύμα φορτίου i_o και ο παλμός I_{g1} που δίνεται για την έναυση του θυρίστορ.

Όταν η πολικότητα της τάσης εισόδου είναι θετική δίνεται παλμός έναυσης για την επιθυμητή γωνία α στο θυρίστορ T_1 . Για το χρονικό διάστημα αγωγής του θυρίστορ T_1 η τάση εισόδου εφαρμόζεται στο φορτίο. Όταν η πολικότητα της τάσης εισόδου γίνει αρνητική τότε δίνεται παλμός έναυσης στο θυρίστορ T_2 το οποίο άγει. Έτσι η τάση εισόδου εφαρμόζεται στο φορτίο.

Η αρχή λειτουργίας του ομαλού εκκινητή στηρίζεται στην παραπάνω αρχή λειτουργίας του μονοφασικού ρυθμιστή τάσης.

Πέραν του κυκλώματος ισχύος των θυρίστορ, χρησιμοποιούνται βοηθητικά κυκλώματα που είναι υπεύθυνα για την παλμοδότηση των θυρίστορ. Η μονάδα Analog Interface Circuit που φαίνεται και στην εικόνα είναι υπεύθυνη για την ανάκτηση των ρευμάτων και τάσεων εισόδου. Αυτά τα σήματα είναι απαραίτητα για την δημιουργία του ελέγχου στον μικροελεγκτή. Ο μικροελεγκτής υλοποιεί τον αλγόριθμο ελέγχου των θυρίστορ. Με βάση την μεθοδολογία που επιλέγεται δίνονται οι κατάλληλες εντολές γωνίας έναυσης α για κάθε στοιχείο του μετατροπέα. Για την οδήγηση των θυρίστορ είναι απαραίτητη η ενίσχυση των εντολών-παλμών που δίνει ο μικροελεγκτής, δηλαδή η ενίσχυση των παλμών σε υψηλότερο επίπεδο τάσης. Επιπλέον, είναι απαραίτητη η απομόνωση του κυκλώματος ισχύος των θυρίστορ από το κύκλωμα του μικροελεγκτή. Τα παραπάνω κυκλώματα τοποθετούνται στο υποσύστημα ‘Firing Circuit’.

Η παραπάνω δομή του ομαλού εκκινητή περιέχει τρεις κλάδους θυρίστορ για τον έλεγχο της τροφοδοσίας. Ωστόσο, υπάρχουν εκκινητές που περιέχουν έναν ή δύο κλάδους θυρίστορ, όπως φαίνεται στην εικόνα 35.



Εικόνα 35-Τοπολογίες Soft Starter

Οι ομαλοί εκκινητές με ένα κλάδο ημιαγωγικών στοιχείων μειώνουν την έντονη ροπή εκκίνησης, χωρίς να μειώνουν το ρεύμα εκκίνησης. Είναι γνωστοί και ως περιοριστές ή ελεγκτές ροπής εκκίνησης. Οι ομαλοί εκκινητές με δύο κλάδους ημιαγωγικών στοιχείων μειώνουν το ρεύμα εκκίνησης και περιορίζουν απότομες μεταβολές τις ροπής. Οι

τριφασικοί ομαλοί εκκινητές έχουν την μορφή που περιεγράφηκε και παραπάνω και αποτελούν την καλύτερη λύση για ομαλή εκκίνηση και αποφυγή ανεπιθύμητων φαινομένων.

Ανάλογα με το μέγεθος που ελέγχεται κατά την εκκίνηση υπάρχουν διαφορετικές μεθοδολογίες ελέγχου που υλοποιεί ο ομαλός εκκινητής. Ειδικότερα:

- Εκκίνηση με χρονομεταβαλλόμενη ράμπα τάσης (Timed Voltage Ramp Starting): Η εκκίνηση γίνεται με ομαλή αύξηση της τάσης από χαμηλό επίπεδο έως το επιθυμητό επίπεδο τάσης λειτουργίας. Έτσι μειώνεται το υψηλό ρεύμα εκκίνησης και οι απότομες μεταβολές στην ροπή και στο μηχανικό μέρος.
- Εκκίνηση με περιορισμό του ρεύματος (Current Limit Starting): Ο ομαλός εκκινητής τροφοδοτεί με αυξανόμενη τάση τον κινητήρα και μετρά το ρεύμα που απορροφά. Η τάση αυξάνεται μέχρι ένα δεδομένο ρεύμα. Η αύξηση της τάσης σταματά και μόλις το ρεύμα μειωθεί τότε συνεχίζεται η αύξηση έως το επιθυμητό επίπεδο τάσης.
- Εκκίνηση με σταθερό ρεύμα εκκίνησης (Constant Current Starting): Ο ομαλός εκκινητής ξεκινά την τροφοδοσία της μηχανής έως ότου το ρεύμα φτάσει σε μια συγκεκριμένη τιμή. Το ρεύμα περιορίζεται σε αυτή την τιμή μέχρι ο κινητήρας να επιταχυνθεί και το ρεύμα να μειωθεί.
- Εκκίνηση με χρονομεταβαλλόμενη ράμπα ρεύματος (Current Ramp Starting): Ο ομαλός εκκινητής ξεκινά την τροφοδοσία της μηχανής αυξάνοντας το ρεύμα από μία σταθερή τιμή έως ένα μέγιστο σημείο ή ένα επιθυμητό σημείο λειτουργίας.
- Εκκίνηση με έλεγχο ροπής (Torque Control Starting): Ο ομαλός εκκινητής τροφοδοτεί τον κινητήρα με προφίλ σταθερά αυξανόμενης ροπής.
- Προσαρμοζόμενο προφίλ εκκίνησης (Adaptive Control Starting): Ο ομαλός εκκινητής ελέγχει το ρεύμα εκκίνησης με βάση τον χρόνο επιθυμητό προφίλ λειτουργίας της μηχανής και τον χρόνο που έχει παρέλθει από την εκκίνηση.

Ενδεικτικές εφαρμογές του ομαλού εκκινητή είναι οι εξής[7]:

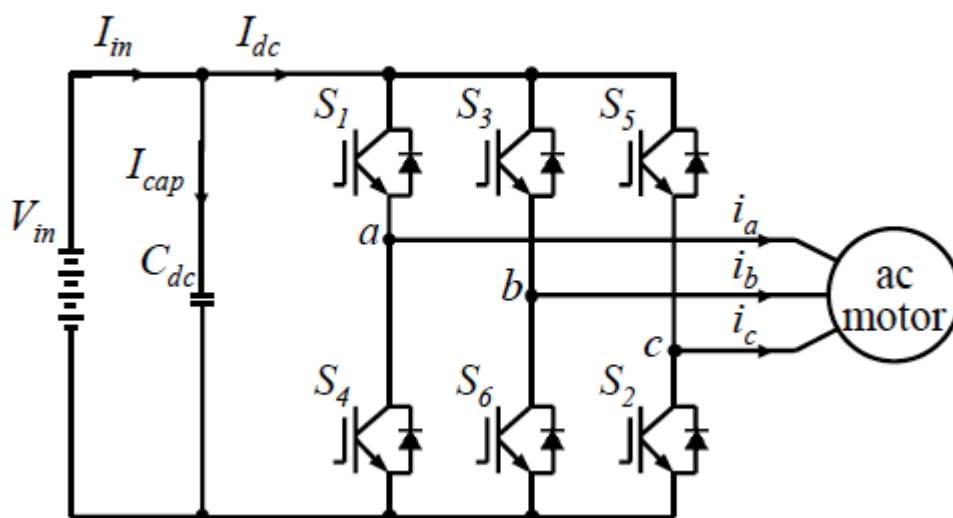
- Φυγοκεντρικές αντλίες
- Υποβρύχιες αντλίες
- Ανεμιστήρες
- Συμπιεστές
- Μεταφορικές ταινίες
- Θραυστικά μηχανήματα

2.3 Μετατροπέας μεταβλητής συχνότητας-Αντιστροφέας (Variable Frequency Drive)

Για την οδήγηση των κινητήρων AC μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο αντιστροφέας ισχύος ή αλλιώς μετατροπέας μεταβλητής συχνότητας. Ο αντιστροφέας ισχύος αποτελεί μετατροπέα ισχύος και αποτελείται από ημιαγωγικά στοιχεία ισχύος.

Τα ημιαγωγικά στοιχεία ισχύος που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή του αντιστροφέα συνήθως είναι MOSFET ή IGBT. Τα MOSFET προορίζονται για εφαρμογές με τυπικές ονομαστικές τιμές τάσης 500V, ρεύματος 100 A και συχνότητας 20-30kHz. Τα IGBT προορίζονται για εφαρμογές με ονομαστικές τιμές τάσης 5-6kV, 3.5kA και 2-10kHz. Συνεπώς, τα MOSFET προτιμώνται όταν θέλουμε υψηλές συχνότητες λειτουργίας και χαμηλότερη ισχύ ενώ για υψηλότερη ισχύ προτιμώνται τα IGBT αλλά με χαμηλότερες συχνότητες λειτουργίας. [4]

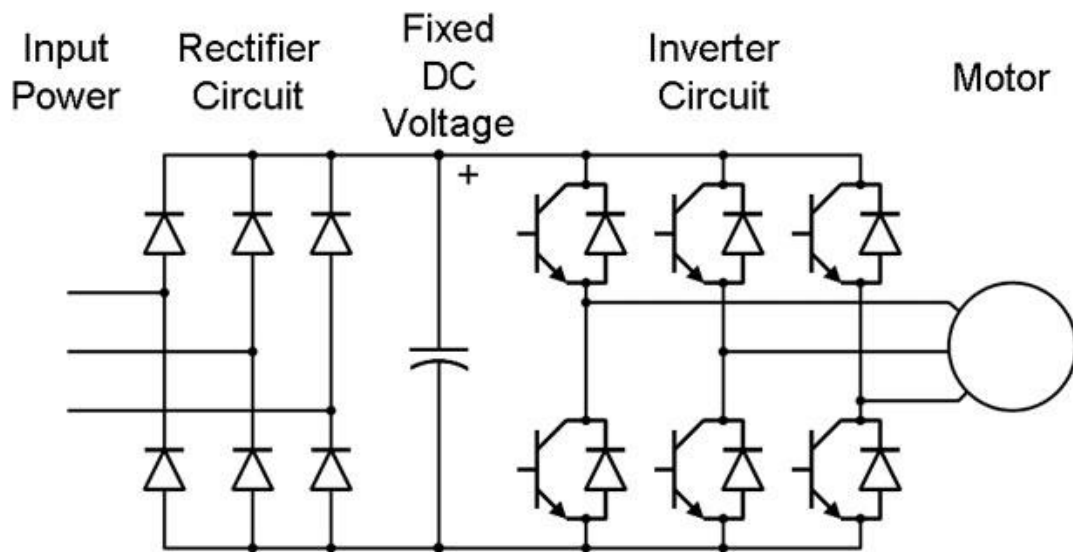
Στο κύκλωμα της εικόνας 36 φαίνεται ένας αντιστροφέας ισχύος που τροφοδοτεί έναν τριφασικό κινητήρα. Αποτελείται από έξι ημιαγωγικά στοιχεία, δύο ανά κλάδο και έναν πυκνωτή στην είσοδο για την σταθεροποίηση της DC τάσης εισόδου.



Εικόνα 36-Αντιστροφέας Ισχύος και AC Κινητήρας

Πολλοί μετατροπέες μεταβλητής συχνότητας περιλαμβάνουν και κύκλωμα ανόρθωσης για την παροχή της DC τάσης εισόδου. Το συγκεκριμένο κύκλωμα φαίνεται στην εικόνα 37. Η τριφασική τάση εισόδου ανορθώνεται μέσω του κυκλώματος ανόρθωσης και στη

συνέχεια η συνεχής τάση τροφοδοτεί τον αντιστροφέα. Ο αντιστροφέας μετατρέπει την DC τάση σε AC και τροφοδοτεί τον κινητήρα.

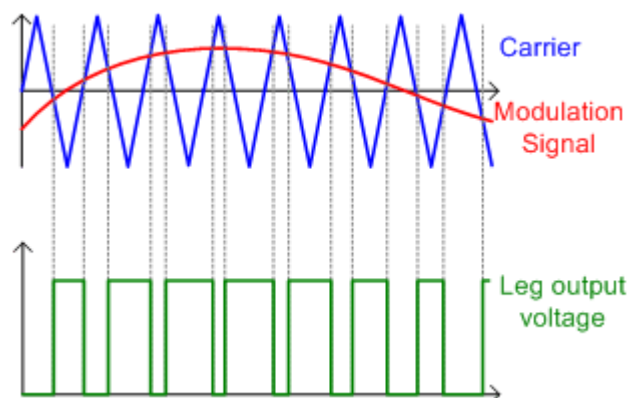


Εικόνα 37-Τριφασικός Αντιστροφέας Ισχύος με κύκλωμα ανόρθωσης τάσης

Ο αντιστροφέας που περιεγράφηκε παραπάνω αποτελεί αντιστροφέα πηγής τάσης. Υπάρχουν και αντιστροφείς πηγής ρεύματος αλλά ο αντιστροφέας πηγής τάσης αποτελεί την συνηθέστερη μορφή αντιστροφέα.

2.3.1 Τεχνικές Παλμοδότησης Αντιστροφέα

Ανάλογα με την τεχνική ελέγχου διακρίνονται σε αντιστροφείς PWM πηγής τάσης, αντιστροφείς PWM ελέγχου ρεύματος και αντιστροφείς διαμόρφωσης διανύσματος χώρου. Οι αντιστροφείς PWM πηγής τάσης στηρίζονται στην τεχνική διαμόρφωσης του εύρους παλμών(PWM-Pulse Width Modulation). Οι παλμοί που τροφοδοτούν το κάθε ημιαγωγικό στοιχείο προέρχονται από την σύγκριση ενός ημιτονοειδούς σήματος αναφοράς με ένα φέρον τριγωνικό σήμα, όπως φαίνεται στην εικόνα 38. Όταν το ημιτονοειδές σήμα αναφοράς γίνει μεγαλύτερο από το τριγωνικό σήμα τότε παράγεται θετικός παλμός ενώ όταν γίνει μικρότερο από τριγωνικό σήμα τότε δεν παράγεται παλμός. [4]

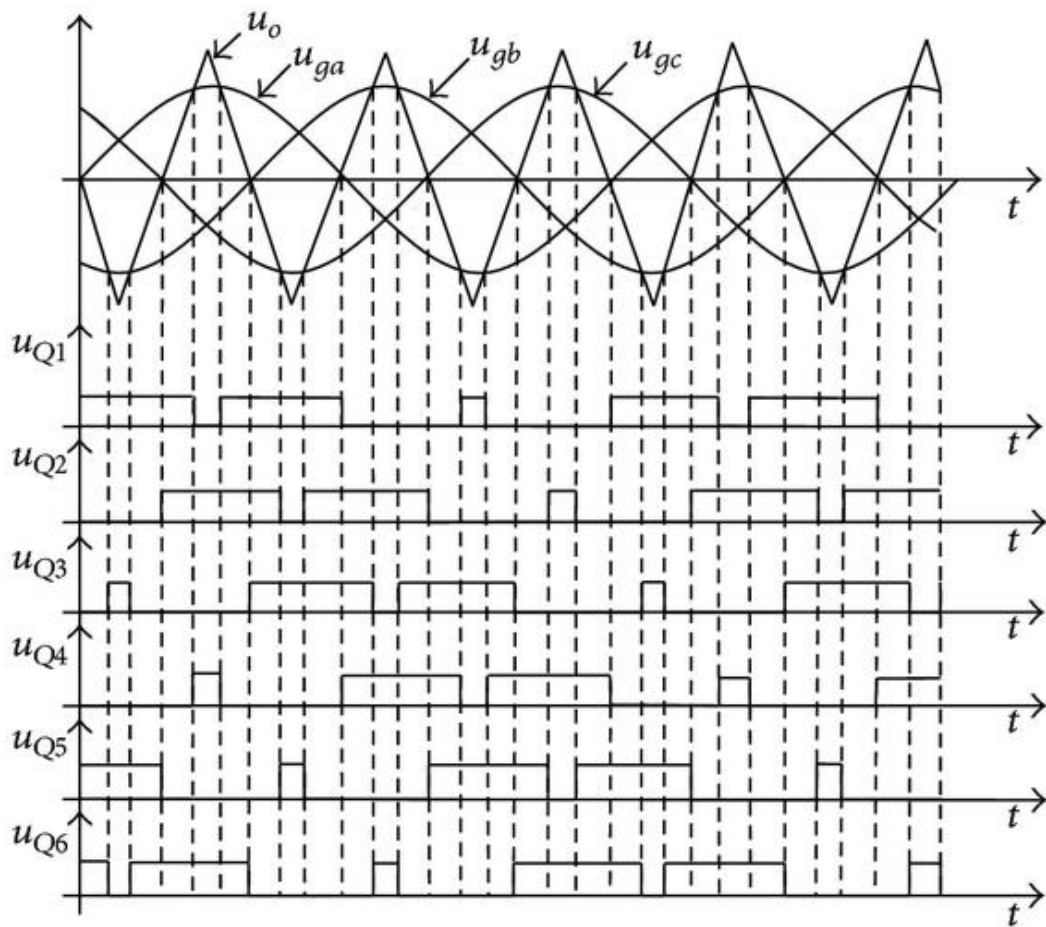


Εικόνα 38-Τεχνική παλμοδότησης PWM

Η ρύθμιση των παλμών γίνεται μέσω των συντελεστών πλάτους M_a και συχνότητας M_f , οι οποίοι ορίζονται ως εξής[5]:

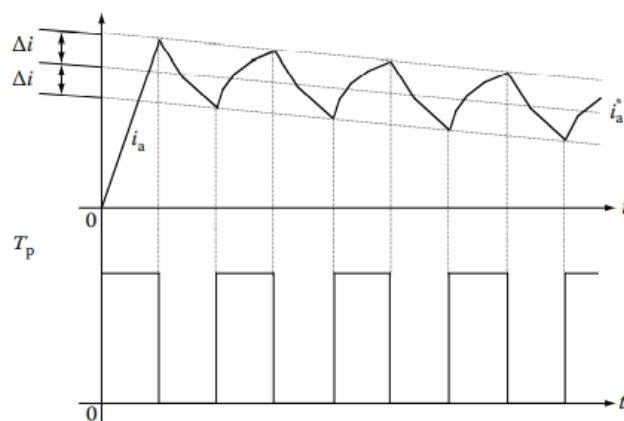
$$m_a = \frac{\text{πλάτος ημιτόνου αναφοράς}}{\text{πλάτος τριγωνικού φορέα}}$$
$$m_f = \frac{\text{συχνότητα τριγωνικού φορέα}}{\text{συχνότητα ημιτόνου αναφοράς}}$$

Με την ρύθμιση του συντελεστή m_a ρυθμίζεται η διάρκεια των παλμών ενώ με το συντελεστή m_f ρυθμίζεται η συχνότητα του σήματος εξόδου του αντιστροφέα. Για την παλμοδότηση του τριφασικού αντιστροφέα χρησιμοποιούνται τρία ημίτονα αναφοράς ένα για κάθε κλάδο του, όπως φαίνεται στην εικόνα 39. Η λογική παραγωγής των παλμών είναι η ίδια όπως και με τη μονοφασική PWM.



Εικόνα 39-Τεχνική τριφασικής παλμοδότησης PWM

Οι αντιστροφείς PWM ελέγχου ρεύματος στηρίζονται στον έλεγχο του ρεύματος του αντιστροφέα. Η αρχή λειτουργίας του φαίνεται στην εικόνα 40.[4]



Εικόνα 40-τεχνική PWM ελέγχου ρεύματος[4]

Το μετρούμενο ρεύμα συγκρίνεται με το ρεύμα αναφοράς. Επίσης ορίζεται ένα εύρος Δi που αποτελεί το σφάλμα ρεύματος. Το ρεύμα αναφοράς προέρχεται από το κύκλωμα ελέγχου με βάση τις εντολές του χρήστη. Αυτό συγκρίνεται με την πραγματική τιμή του ρεύματος. Όταν το μετρούμενο ρεύμα βρεθεί στο κατώτερο όριο ($i_a^* - \Delta i$) τότε παράγεται θετικός παλμός. Όταν το μετρούμενο ρεύμα βρεθεί στο ανώτερο όριο ($i_a^* + \Delta i$) τότε διακόπτεται ο παλμός. Με αυτόν τον τρόπο ρυθμίζεται άμεσα η τιμή του ρεύματος με βάση την αναφορά.

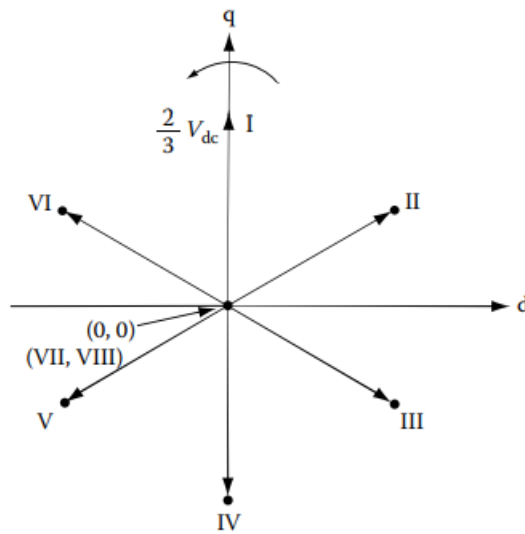
Ο αντιστροφέας διαμόρφωσης διανύσματος χώρου αποτελεί το πιο ευρεία χρησιμοποιούμενο αντιστροφέα στα συστήματα προηγμένου ελέγχου κίνησης. Με βάση την κατάσταση του κάθε διακόπτη και του κάθε κλάδου του αντιστροφέα ορίζονται διακριτές καταστάσεις. Με βάση τις διακριτές καταστάσεις έχουμε διακριτές τιμές τάσεων στην έξοδο του αντιστροφέα. Χρησιμοποιώντας τον μετασχηματισμό Park μπορούμε να μεταφέρουμε τα τριφασικά διακριτά μεγέθη σε διφασικές τιμές. Έτσι, θα έχουμε διανύσματα τάσης στο σύστημα δύο αξόνων dq που θα αναπαριστούν την λειτουργία του αντιστροφέα. [6]

Στην εικόνα 41 φαίνονται οι καταστάσεις του αντιστροφέα, οι φασικές και πολικές τάσεις εξόδου καθώς οι τάσεις στους άξονες Park d και q.

States	S_a	S_b	S_c	V_a	V_b	V_c	V_{ab}	V_{bc}	V_{ca}	V_{as}	V_{bs}	V_{cs}	V_{qs}	V_{ds}
I	1	0	0	V_{dc}	0	0	$-V_{dc}$	0	$-V_{dc}$	$\frac{2V_{dc}}{3}$	$-\frac{V_{dc}}{3}$	$-\frac{V_{dc}}{3}$	$\frac{2V_{dc}}{3}$	0
II	1	0	1	V_{dc}	0	V_{dc}	V_{dc}	$-V_{dc}$	0	$\frac{V_{dc}}{3}$	$-\frac{2V_{dc}}{3}$	$\frac{V_{dc}}{3}$	$\frac{V_{dc}}{3}$	$\frac{V_{dc}}{\sqrt{3}}$
III	0	0	1	0	0	V_{dc}	0	$-V_{dc}$	V_{dc}	$-\frac{V_{dc}}{3}$	$-\frac{V_{dc}}{3}$	$\frac{2V_{dc}}{3}$	$-\frac{V_{dc}}{3}$	$\frac{V_{dc}}{\sqrt{3}}$
IV	0	1	1	0	V_{dc}	V_{dc}	$-V_{dc}$	0	V_{dc}	$-\frac{2V_{dc}}{3}$	$\frac{V_{dc}}{3}$	$\frac{V_{dc}}{3}$	$-\frac{2V_{dc}}{3}$	0
V	0	1	0	0	V_{dc}	0	$-V_{dc}$	V_{dc}	0	$-\frac{V_{dc}}{3}$	$\frac{2V_{dc}}{3}$	$-\frac{V_{dc}}{3}$	$-\frac{V_{dc}}{3}$	$-\frac{V_{dc}}{\sqrt{3}}$
VI	1	1	0	V_{dc}	V_{dc}	0	0	V_{dc}	$-V_{dc}$	$\frac{V_{dc}}{3}$	$\frac{V_{dc}}{3}$	$-\frac{2V_{dc}}{3}$	$\frac{V_{dc}}{3}$	$-\frac{V_{dc}}{\sqrt{3}}$
VII	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
VIII	1	1	1	V_{dc}	V_{dc}	V_{dc}	0	0	0	0	0	0	0	0

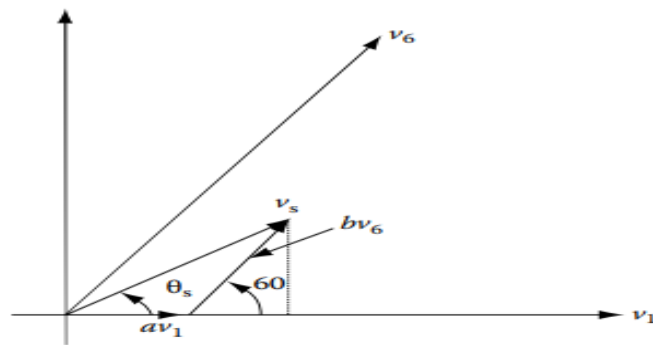
Εικόνα 41-Λειτουργικές καταστάσεις αντιστροφέα για την τεχνική SVPWM[4]

Για παράδειγμα, για $S_a=1$ έχουμε αγωγή του άνω στοιχείου του 1^{ου} κλάδου του αντιστροφέα στην εικόνα . έτσι η τάση στα άκρα του κάτω διακοπτικού στοιχείου V_a θα είναι ίση με την τάση τροφοδοσίας V_{dc} . Η φασική τάση V_{as} θα είναι ίση με $2v_{dc}/3$ και η φασική τάση V_{bs} θα είναι ίση με $-v_{dc}/3$. Συνεπώς η πολική τάση V_{ab} θα είναι ίση με V_{dc} . Οι τάσεις στον μετασχηματισμό Park θα είναι $v_q=2*V_{dc}/3$ και $v_d=0$. Στο σύστημα dq οι διαφορετικές λειτουργικές καταστάσεις αναπαρίστανται από 6 διαφορετικά διανύσματα και 2 μηδενικά διανύσματα, όπως φαίνεται στο σχήμα 42.



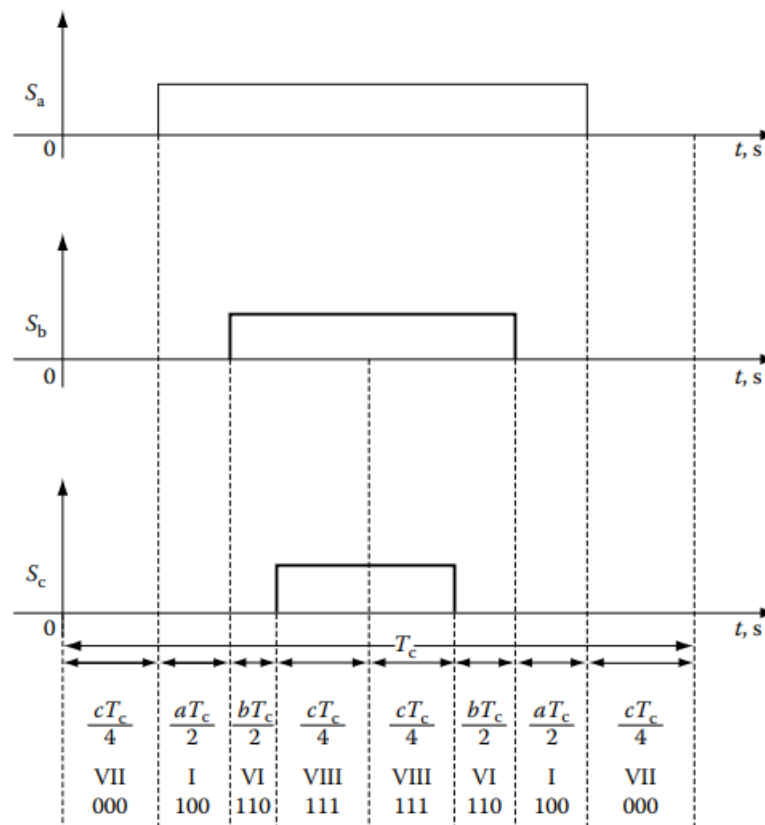
Εικόνα 42-Τομείς και διανύσματα τάσεων στο διφασικό σύστημα dq

Η εντολή τάσης για τον έλεγχο του αντιστροφέα εκφράζεται με βάση τα 8 διαφορετικά πιθανά διανύσματα του αντιστροφέα. Ανάλογα με το πλάτος και την γωνία της τάσης αναφοράς επιλέγονται τα κατάλληλα διανύσματα. Για παράδειγμα, στο σχήμα 43 φαίνεται το διάνυσμα αναφοράς V_s . Με βάση το πλάτος και την γωνία του, επιλέγονται τα διανύσματα V_1 και V_6 .



Εικόνα 43-Συνιστώσες τάσεων για την αναφορά τάσης V_s

Σε μια διακοπτική περίοδο του αντιστροφέα το κάθε διάνυσμα εφαρμόζεται για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Αν T_c είναι η διακοπτική περίοδος του αντιστροφέα τότε ισχύει ότι $T_c = (a+b+c) \cdot T_c$, όπου aT_c είναι ο χρόνος εφαρμογής του διανύσματος v_1 , bT_c είναι ο χρόνος εφαρμογής του διανύσματος v_2 και cT_c είναι ο χρόνος εφαρμογής του μηδενικού διανύσματος. Στο σχήμα 44 φαίνεται η διαδοχή των λειτουργικών καταστάσεων για μια διακοπτική περίοδο και οι παλμοί που εφαρμόζονται σε κάθε άνω στοιχείο του αντιστροφέα (S_a, S_b, S_c). Παρατηρούμε ότι πριν και μετά την εφαρμογή των διανυσμάτων V_1 και V_6 εφαρμόζονται τα μηδενικά διανύσματα.



Εικόνα 44-Διαδοχή λειτουργικών καταστάσεων για μια διακοπτική περίοδο

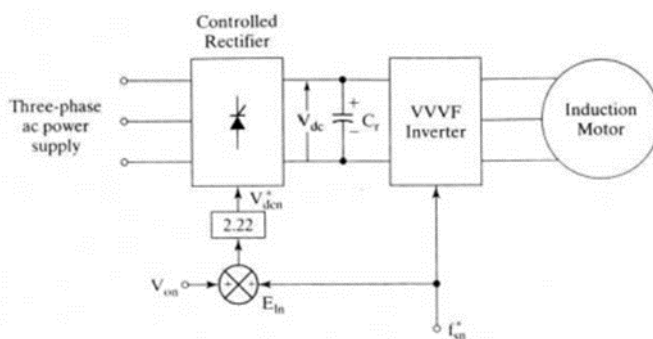
Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται τα συγκριτικά χαρακτηριστικά των τριών τεχνικών ελέγχου.[5]

	Ρεύμα Υστέρησης	PWM	Διαμόρφωση Διανύσματος Χώρου
Διακοπτική Συχνότητα	Μεταβαλλόμενη	Σταθερή	Σταθερή
Δυναμική Απόκριση	Πολύ υψηλή	Υψηλή	Πολύ Υψηλή
Κυμάτωση Ρεύματος	Προσαρμοζόμενη	Σταθερή	Σταθερή
Μέγεθος φίλτρου	Εξαρτάται από το σφάλμα Δi	Συνήθως μικρό	Συνήθως μικρό
Διακοπτικές Απώλειες	Υψηλές	Χαμηλές	Χαμηλές

2.3.2 Τεχνικές Ελέγχου Αντιστροφέα

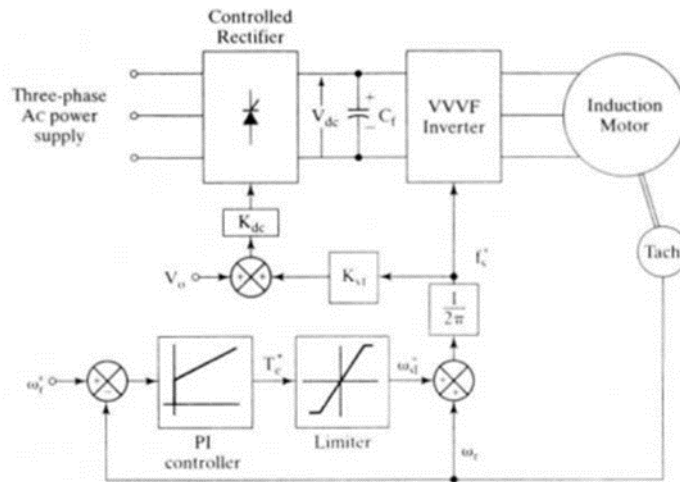
Οι παραπάνω τεχνικές ελέγχου αφορούν την παλμοδότηση των ημιαγωγικών στοιχείων του αντιστροφέα. Η κάθε τεχνική ελέγχου δέχεται σήματα αναφοράς με βάση τα μετρούμενα μεγέθη του κινητήρα (ρεύμα, τάση, ταχύτητα, κ.λπ.) και την επιθυμητή λειτουργία. Οι αναφορές των σημάτων δημιουργούνται με βάση 3 μεθοδολογίες ελέγχου, τον βαθμωτό V/f έλεγχο (V/f Scalar Control), τον διανυσματικό έλεγχο (Vector Control) και τον άμεσο έλεγχο ροπής (Direct Torque Control).

Ο βαθμωτός έλεγχος V/f στηρίζεται στην παράλληλη ρύθμιση του λόγου τάσης προς συχνότητα V/f έτσι ώστε αυτός να παραμένει σταθερός. Η αναφορά του συστήματος δίνεται από την αναφορά της συχνότητας. Η ταχύτητα περιστροφής εξαρτάται από την συχνότητα της τάσης τροφοδοσίας. Έτσι με ρύθμιση της συχνότητας μπορεί να ρυθμιστεί η ταχύτητα του κινητήρα. Με βάση την αναφορά συχνότητας ρυθμίζεται η τάση τροφοδοσίας έτσι ώστε να παραμένει ο λόγος σταθερός. Αυτό είναι απαραίτητο καθώς με την αλλαγή της συχνότητας μεταβάλλονται τα επαγωγικά μεγέθη της μηχανής. Αυτό οφείλει να αντισταθμίζεται από την τάση διότι σε διαφορετική περίπτωση εμφανίζονται μεγάλα ρεύματα που καταπονούν τον κινητήρα. Στην εικόνα 45 φαίνεται ένα σχήμα ελέγχου V/f ανοιχτού βρόχου.



Εικόνα 45-Έλεγχος V/f [6]

Για την αναβάθμιση της λειτουργίας του συστήματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί σύστημα κλειστού βρόχου. Αυτό φαίνεται στην εικόνα 46. Το σήμα ταχύτητας του κινητήρα αξιοποιείται για την παραγωγή του σφάλματος ταχύτητας που δέχονται οι ελεγκτές PI. Με βάση το σφάλμα εξάγεται η συχνότητα αναφοράς και η τάση αναφοράς για την λειτουργία του συστήματος.



Εικόνα 46-Έλεγχος V/f κλειστού βρόχου[6]

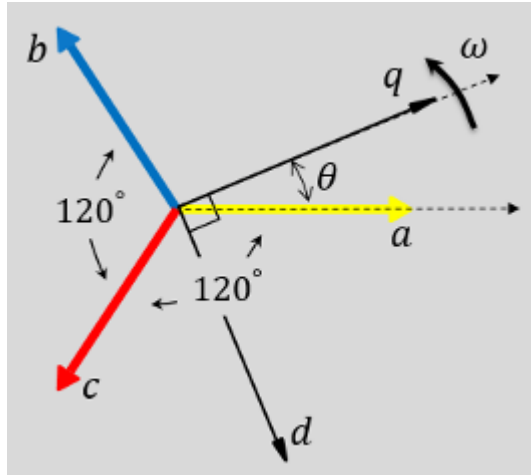
Ο διανυσματικός έλεγχος αντικαθιστά όλο και περισσότερο των βαθμωτό έλεγχο καθώς παρουσιάζει καλύτερα δυναμικά χαρακτηριστικά απόδοσης και λειτουργίας. Στηρίζεται στον μετασχηματισμό των τριφασικών μεγεθών σε μεγέθη δύο αξόνων μέσω του μετασχηματισμού Park. Η γενική μορφή του πίνακα μετασχηματισμού Park είναι η εξής[6]:

$$\begin{bmatrix} q \\ d \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \sin\theta & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix}$$

, όπου τα τριφασικά μεγέθη A,B,C μετασχηματίζονται στα μεγέθη d,q,0. Η γωνία θ αποτελεί την γωνία στροφής και επιλέγεται ανάλογα με το επιθυμητό σύστημα μετασχηματισμού. Ο αντίστροφος μετασχηματισμός d-q ορίζεται ως:

$$\begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 1 \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} q \\ d \\ C0 \end{bmatrix}$$

Στην εικόνα 47 φαίνεται το τριφασικό σύστημα abc, το σύστημα μετασχηματισμού dq και η γωνία αναφοράς θ :



Εικόνα 47-Μετασχηματισμός Park

Ανάλογα με την επιλογή της γωνίας θ προκύπτουν τρεις πίνακες μετασχηματισμού:

1. Μετασχηματισμός από abc σε ακίνητο σύστημα αναφοράς ($\theta=0$)
(Μετασχηματισμός Clarke):

$$\begin{bmatrix} q \\ d \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) \\ 0 & -\sin\left(\frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix}$$

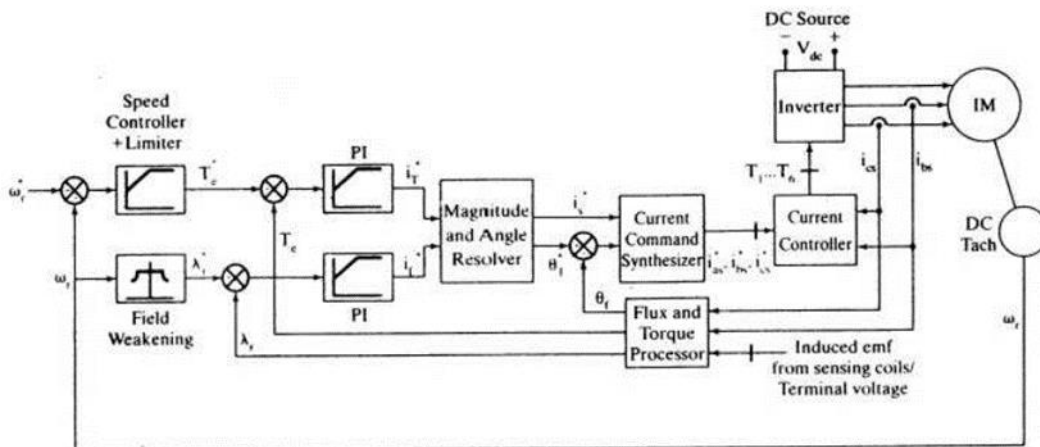
2. Μετασχηματισμός από abc σε στρεφόμενο σύστημα αναφοράς του δρομέα ($\theta=\theta_r$, όπου θ_r η γωνία στροφής του δρομέα του κινητήρα):

$$\begin{bmatrix} q \\ d \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta_r & \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \sin\theta_r & \sin\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta_r - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix}$$

3. Μετασχηματισμός από abc σε σύγχρονα στρεφόμενο σύστημα αναφοράς ($\theta=\theta_e$, σύγχρονη γωνία στροφής):

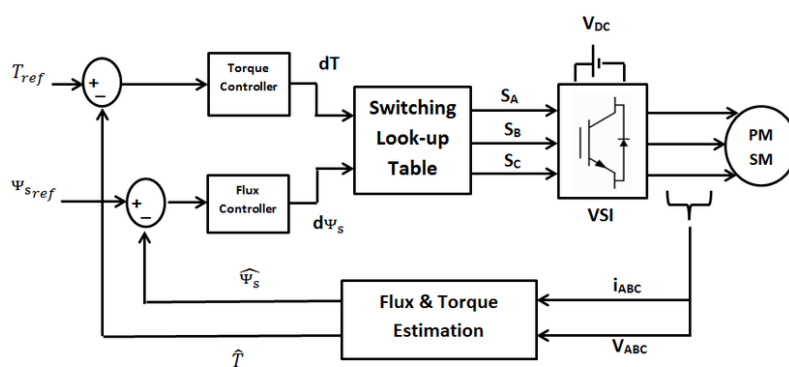
$$\begin{bmatrix} q \\ d \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta_e & \cos\left(\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_e - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \sin\theta_e & \sin\left(\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta_e - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix}$$

Με βάση τον μετασχηματισμό Park τα τριφασικά μεγέθη της μηχανής απλοποιούνται σε διφασικά μεγέθη. Έτσι μπορεί να γίνει ξεχωριστός έλεγχος ροπής και ταχύτητας με βάση τα δύο ρεύματα στους άξονες Park d και q. Στο σχήμα 48 φαίνεται το σχήμα διανυσματικού ελέγχου. Με βάση το σφάλμα ταχύτητας που προκύπτει από την αναφορά ταχύτητας και την ανάδραση της μετρούμενης ταχύτητας δημιουργούνται οι αναφορές ροπής και ροής. Αυτές συγκρίνονται με τις πραγματικές τιμές που προκύπτουν από έναν εκτιμητή που στηρίζεται στο μοντέλο της μηχανής. Τα σφάλματα ροπής και ροής εισάγονται στους PI ελεγκτές από όπου εξάγονται οι αναφορές των δύο ρευμάτων κατά Park. Στη συνέχεια χρησιμοποιείται ο αντίστροφος μετασχηματισμός Park για τον μετασχηματισμό των μεγεθών στο τριφασικό σύστημα abc. Με βάση την τις αναφορές ρευμάτων υλοποιείται ο έλεγχος ρεύματος υστέρησης και δίνονται τα σήματα παλμών αναφοράς στον αντιστροφέα που οδηγεί τον κινητήρα.



Εικόνα 48-Διανυσματικός έλεγχος επαγωγικού κινητήρα[6]

Η επόμενη μεθοδολογία που χρησιμοποιείται είναι ο άμεσος έλεγχος ροπής (Direct Torque Control). Στηρίζεται στην τεχνική διαμόρφωσης διανυσμάτων χώρου που περιγράφηκε προηγουμένως για τον αντιστροφέα. Στο σχήμα 49 φαίνεται το κύκλωμα ελέγχου. Με βάση τις αναφορές ροπής και ροής και τις εκτιμήσεις που προκύπτουν από τα μετρούμενα μεγέθη της μηχανής παράγονται τα σφάλματα που εισάγονται στους ελεγκτές ροπής και ροής. Αυτοί μπορεί να αποτελούν ελεγκτές PI. Τα σφάλματα ροπής και ροής εξάγονται από τους ελεγκτές και οδηγούνται στην μονάδα διαμόρφωσης διανυσμάτων χώρου του αντιστροφέα. Οι παλμοί δίνονται σύμφωνα με την διαδικασία που περιγράφηκε στην τεχνική διαμόρφωση διανυσμάτων χώρου στην αρχή του κεφαλαίου.

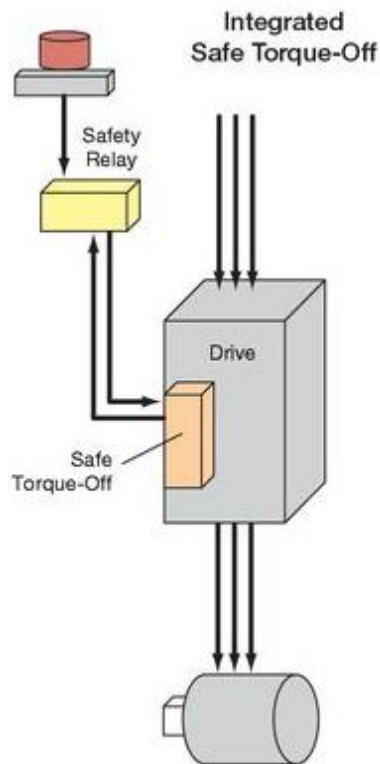


Εικόνα 49-Άμεσος Έλεγχος ροπής

2.3.3 Λειτουργία ασφαλούς διακοπής λειτουργίας Safe Torque Off(STO)

Οι αντιστροφείς που χρησιμοποιούνται σε βιομηχανικές διαδικασίες και ιδιαίτερα σε ευαίσθητες εφαρμογές ως προς την ασφάλεια και την αξιοπιστία οφείλουν να περιλαμβάνουν λειτουργίες ασφάλειας και ομαλής λειτουργίας. Οι Αντιστροφείς εισάγουν την λειτουργία ‘Safe Torque Off’ (STO) η οποία λειτουργεί ως εξής:

Σε περίπτωση παύσης έκτακτης ανάγκης ενός συστήματος που περιέχει βιομηχανικούς αντιστροφείς πρέπει να γίνει ασφαλής παύση των κινητήρων που χρησιμοποιούνται. Η λειτουργία του Safe Torque Off μπορεί να υλοποιηθεί στην πύλη(Gate) των ημιαγωγικών στοιχείων του αντιστροφέα μέσω επιπλέον κυκλώματος κύκλωμα των οδηγητών(Drivers). Όταν προκύψει σφάλμα στην λειτουργία του συστήματος που απαιτεί την διακοπή λειτουργίας του κινητήρα πρέπει να σταματήσει η τροφοδοσία του και να έλθει σε μια ασφαλή θέση. Έτσι, αν δοθεί σήμα έκτακτης ανάγκης ενεργοποιείται το κύκλωμα STO το οποίο ‘σβήνει’ τα ημιαγωγικά στοιχεία. Έτσι, σταματά η λειτουργία του κινητήρα.



Εικόνα 50-Λειτουργία Safety Torque Off[20]

Η λειτουργία Safety Torque Off που εισάγεται στον αντιστροφέα εξαλείφει την ανάγκη για εισαγωγή επιπλέον υλικού όπως ρελέ και αυτοματισμούς. Δεν χρειάζεται επιπλέον συνδεσμολογία ή κύκλωμα για το συνολικό σύστημα. Γενικά, η λειτουργία STO προλαμβάνει σημαντικές επιπτώσεις στο σύστημα που μπορεί να οφείλονται σε σφάλματα όπως για παράδειγμα η αστοχία ενός καλωδίου τροφοδοσίας. [20]

Γενικά, ο μετατροπέας μεταβλητής συχνότητας βρίσκει εφαρμογή σε όλες τις εφαρμογές που χρησιμοποιούν AC κινητήρα. Ενδεικτικές εφαρμογές μπορεί να είναι οι αντλίες, οι ανεμιστήρες, τα συστήματα ανύψωσης, τα συστήματα συμπίεσης, τα συστήματα κοπής υλικών, η ρομποτική, τα συστήματα εξαερισμού και άλλες αυτοματοποιημένες διαδικασίες.[2]

Με την χρήση του μετατροπέα μεταβλητής συχνότητας βελτιώνεται ο έλεγχος της λειτουργίας του κινητήρα ως προς ταχύτητα και ροπή. Ανάλογα με τις λειτουργικές συνθήκες του συστήματος ο μετατροπέας μεταβλητής συχνότητας προσαρμόζει την λειτουργία του κινητήρα. Αυτό αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα καθώς οδηγεί σε βελτίωση της απόδοσης, μείωση των απωλειών, διευρυμένο έλεγχο λειτουργίας, ομαλά

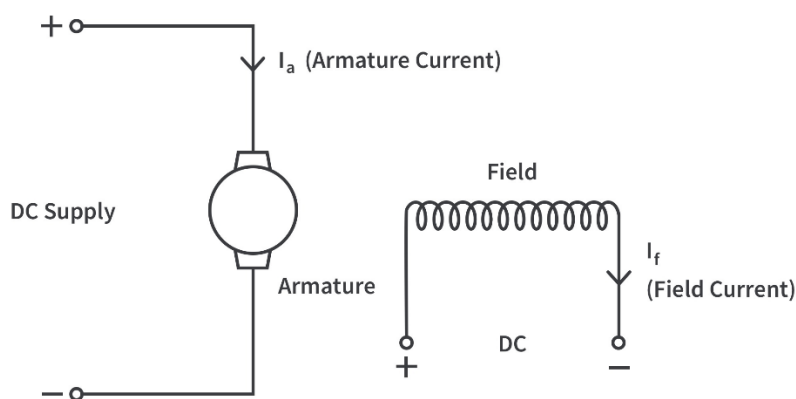
μεταβατικά φαινόμενα, διαγνωστικά αντικείμενα και επιτήρηση του συστήματος. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα που πηγάζει από τα παραπάνω είναι η μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης του συστήματος και η οικονομία ενέργειας. [5]

2.4 Σερβοκινητήρας (Servo Motor)

Τα σερβοκινητήρια συστήματα απέκτησαν ιδιαίτερο ενδιαφέρον λόγω της ανάγκης για έλεγχο κίνησης σε όλο και περισσότερες εφαρμογές. Τα πλεονεκτήματα έγκειται στην εξοικονόμηση ενέργειας, στον ακριβή έλεγχο ταχύτητας και θέσης και στην βελτίωση των δυναμικών χαρακτηριστικών του συστήματος. [4]

2.4.1 Δομή Σερβοκινητήρα

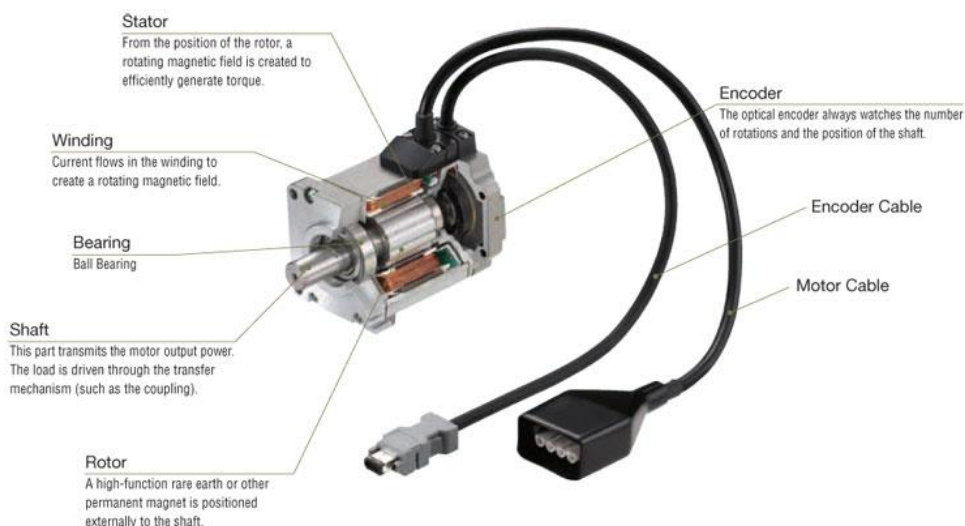
Ο σερβοκινητήρας αποτελείται από έναν AC ή DC κινητήρα με προσαρτημένο τον αισθητήρα ταχύτητας για ανάδραση του σήματος ταχύτητας. Σε πολλές περιπτώσεις περιλαμβάνεται η μονάδα ελέγχου καθώς και το σύστημα μετάδοσης προσαρμοσμένα μέσα το σύστημα. Ο κινητήρας DC μπορεί να είναι ένας κινητήρας ξένης διέγερσης που η τροφοδοσία της διέγερσης ελέγχεται εξωτερικά ή να είναι ένας κινητήρας ξένης διέγερσης μόνιμου μαγνήτη. Στην εικόνα 51 φαίνεται το ισοδύναμο ενός κινητήρα DC που αποτελείται από το τύλιγμα διέγερσης και το τύλιγμα τυμπάνου. Σε περίπτωση που χρησιμοποιείται μόνιμος μαγνήτης αυτός αντικαθιστά το πεδίο διέγερσης(Field) και ο έλεγχος γίνεται μέσω του κυκλώματος τυμπάνου.



Εικόνα 51-Ισοδύναμο κινητήρα DC[7]

Λόγω των μειονεκτημάτων που συνδέονται με το σύστημα ψηκτρών-συλλέκτη στους κινητήρες DC χρησιμοποιούνται κυρίως κινητήρες AC στα σημερινά σερβοκινητήρια συστήματα. Οι AC Κινητήρες ή αλλιώς Brushless AC που χρησιμοποιούνται σε σερβοκινητήρια είναι κυρίως σύγχρονοι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη. Αποτελούνται από μόνιμο μαγνήτη στον δρομέα και τριφασικό τύλιγμα στον στάτη.

Στην εικόνα 52 φαίνεται ένας σερβοκινητήρας σύγχρονου κινητήρα μόνιμου μαγνήτη (Brushless AC). Φαίνονται τα δύο βασικά μέρη του ηλεκτροκινητήρα, ο στάτης που αποτελείται από τα τυλίγματα τροφοδοσίας και ο δρομέας που αποτελείται από μόνιμους μαγνήτες. Η ανάδραση της ταχύτητας γίνεται μέσω ενός κωδικοποιητή θέσης(encoder). Στο σύστημα υπάρχουν και τα απαραίτητα μηχανικά μέρη, ο άξονας μετάδοσης, τα ρουλεμάν και τα γρανάζια μετάδοσης.

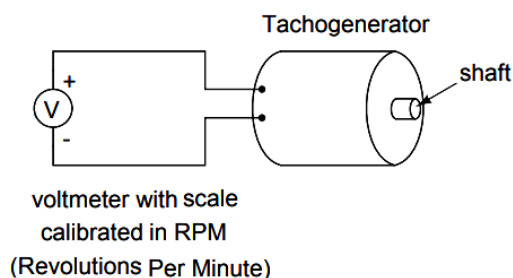


Εικόνα 52-Σερβοκινητήρας και μέρη αυτού: Στάτης, Ρότορας, Τυλίγματα, Άξονας, Ρουλεμάν, Κωδικοποιητής, Καλώδια.

2.4.2 Ανάδραση σημάτων ταχύτητας -Ταχογεννήτρια, Encoders, Resolver, Αισθητήρες HALL

Η ανάδραση της ταχύτητας προέρχεται από έναν αισθητήρα ταχύτητας/θέσης προσαρτημένο στον σερβοκινητήρα. Ο αισθητήρας θέσης συνήθως είναι κωδικοποιητής θέσης(encoder). Ωστόσο υπάρχουν και άλλοι αισθητήρες ταχύτητας και θέσης όπως η ταχογεννήτρια, ο ηλεκτρομαγνητικός μετρητής θέσης(resolver) και οι αισθητήρες Hall.

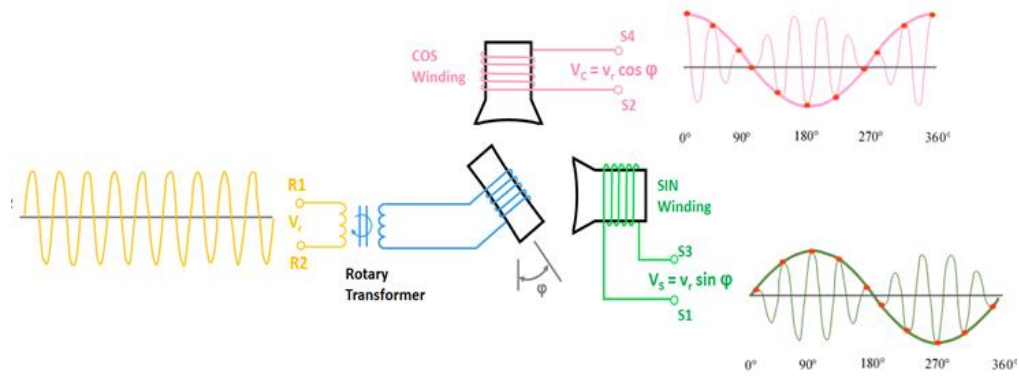
Η ταχογεννήτρια αποτελεί μια μικρής ισχύος γεννήτρια, που συνήθως είναι συνεχούς ρεύματος με μόνιμο μαγνήτη. Ο άξονας της ταχογεννήτριας συνδέεται με τον άξονα της μηχανής της οποίας θέλουμε να μετρήσουμε την ταχύτητα. Η ταχογεννήτρια παράγει ένα σήμα το οποίο είναι ανάλογο της ταχύτητας περιστροφής. Με την γνώση της σταθερά αναλογίας ταχύτητας περιστροφής και παραγόμενης τάσης μπορούμε να μετρήσουμε την ταχύτητα περιστροφής. [4]



Εικόνα 53-Ταχογεννήτρια

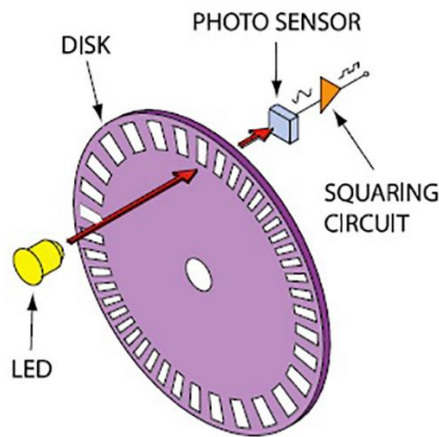
Ο resolver αποτελεί έναν στρεφόμενο μετασχηματιστή που συνδέεται πάνω στον άξονα περιστροφής. Αποτελείται από έναν στάτη και έναν δρομέα. Στον στάτη βρίσκονται δύο τύλιγματα, όπου τροφοδοτούνται με ένα ημίτονο και ένα συνημίτονο ίδιου πλάτους και συχνότητας. Ο δρομέας περιστρέφεται με την ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα. Ο δρομέας λειτουργεί σαν το δευτερεύον ενός μετασχηματιστή. Στον δρομέα υπάρχει ένα επιπλέον τύλιγμα στο οποίο παράγεται ημιτονοειδή τάση. Η τάση αυτή έχει πλάτος ανάλογο του λόγου μετασχηματιστή και του πλάτους του ημιτόνου και συνημίτονου του στάτη ενώ παρουσιάζει και διαφορά φάσης ανάλογη της θέσης του δρομέα. [4]

Όπως φαίνεται στην εικόνα 54, αν τροφοδοτήσουμε τον στάτη με ένα σήμα $V_s = V_r * \sin(\omega t)$ και ένα σήμα $V_c = V_r * \cos(\omega t)$ τότε στο τύλιγμα R1-R2 του δρομέα θα έχουμε ένα σήμα $V = K * V_r * \sin(\omega t - \theta)$, όπου θ είναι η γωνία θέσης του δρομέα.



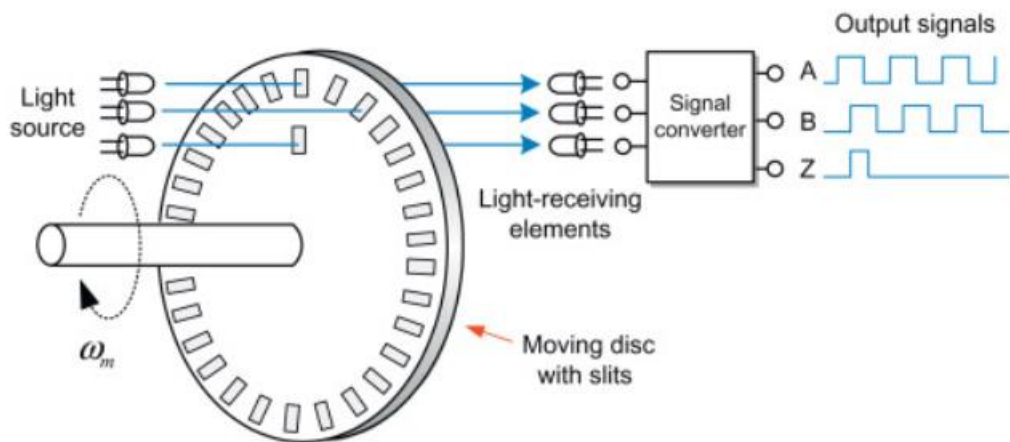
Εικόνα 54-Λειτουργία Resolver

Ο οπτικός κωδικοποιητής θέσης αποτελείται από έναν δίσκο με διακριτές εγκοπές, ο οποίος συνδέεται πάνω στον άξονα περιστροφής, από μια πηγή φωτεινού σήματος και από ένα φωτό-τρανζίστορ. Όπως φαίνεται στην εικόνα 55, μια πηγή φωτός εκπέμπει μέσα από τις εγκοπές του δίσκου. Καθώς ο δίσκος περιστρέφεται με την ταχύτητα περιστροφής, το φωτό-τρανζίστορ δέχεται μια παλμοσειρά σημάτων φωτός τα οποία μετατρέπει σε παλμοσειρά τάσης. Στη συνέχεια εξάγεται η συχνότητα αυτής της παλμοσειράς και προκύπτει η ταχύτητα περιστροφής. [4]



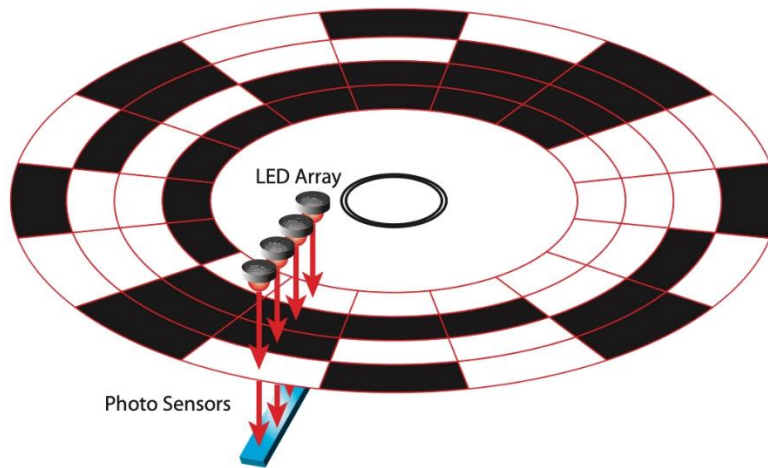
Εικόνα 55-Οπτικός Κωδικοποιητής Θέσης

Οι κωδικοποιητές διακρίνονται σε κωδικοποιητές σχετικής θέσης (incremental encoders) και κωδικοποιητές απόλυτης θέσης (absolute encoders). Στην εικόνα 56 φαίνεται ο κωδικοποιητής σχετικής θέσης. Η πηγή φωτός διακόπτει τον δίσκο με τις εγκοπές κατά την περιστροφή του. Στην απέναντι πλευρά οι δέκτες φωτός δέχονται το φως που περνά μέσα από τις εγκοπές. Στη συνέχεια χρησιμοποιείται ο μετατροπέας που εξάγει 3 σήματα παλμών, τα A, B, Z. Τα σήματα A, B χρησιμοποιούνται για την εύρεση της ταχύτητας περιστροφής και φοράς περιστροφής. Το σήμα Z αποτελεί σήμα αναφοράς και γίνεται θετικό όταν ο δίσκος περνά από ένα συγκεκριμένο σημείο αναφοράς. Το συγκεκριμένο σήμα μπορεί να αξιοποιηθεί για την εύρεση της σχετικής θέσης του δρομέα. [4]



Εικόνα 56-Λειτουργία κωδικοποιητή σχετικής θέσης

Ο κωδικοποιητής απόλυτης θέσης παράγει στην έξοδο ψηφιακό αριθμό των 8, 16 ή 24 bit. Ο δίσκος του κωδικοποιητή απόλυτης θέσης διαφέρει ως την μορφή του με τον κωδικοποιητή σχετικής θέσης. Ο δίσκος περιέχει εγκοπές με διαφορετικό μέγεθος όπως φαίνεται στην εικόνα. Ο αριθμός τροχιών που έχει ο δίσκος καθορίζει τον αριθμό των bit που δίνει στην έξοδο ο κωδικοποιητής. Για παράδειγμα, στην εικόνα 57 ο κωδικοποιητής δίνει στην έξοδο έναν ψηφιακό αριθμό 2^4 , δηλαδή 16-bit. Ο κάθε ψηφιακός αριθμός αντιστοιχείται σε μια γωνία στροφής μέσω ενός πίνακα κωδικοποίησης. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί απλός δυαδικός κώδικας ή κώδικας Gray. Στον κώδικα Gray αλλάζει ένα bit ανά θέση και έτσι μπορούν να αποφευχθούν σφάλματα στην λειτουργία του. [4]



Εικόνα 57-Λειτουργία κωδικοποιητή απόλυτης θέσης

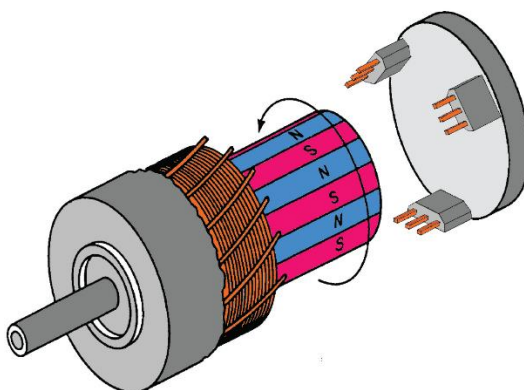
Για παράδειγμα, στην εικόνα 58 φαίνεται η αντιστοίχιση ψηφιακού αριθμού εξόδου των 3-bit σε συγκεκριμένη γωνία στροφής.

Sensor Output	Angle
011	45°
001	90°
000	135°
100	180°
010	225°
101	270°
110	315°
111	360°

Εικόνα 58-Αντιστοίχιση ψηφιακού 3-bit αριθμού σε γωνία στροφής του encoder και του δρομέα

Οι κωδικοποιητές σχετικής θέσης είναι οικονομικότεροι αλλά απαιτούν επιπλέον ψηφιακό μετατροπέα. Οι κωδικοποιητές απόλυτης θέσης είναι ακριβότεροι αλλά δίνουν την απόλυτη θέση του δρομέα με ακρίβεια, χωρίς περαιτέρω χρήση ψηφιακού μετατροπέα. Οι αισθητήρες Hall στηρίζονται στο ομώνυμο φαινόμενο. Όταν ένα ημιαγωγικό υλικό που διαρρέεται από ρεύμα βρεθεί μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο τότε παράγει στα άκρα του τάση που είναι ανάλογη του πεδίου και του διαρρεόμενου ρεύματος. Ο αισθητήρας Hall αποτελείται από έναν δίσκο με μαγνήτες και τρεις αισθητήρες ημιαγωγικού υλικού. Ο δίσκος συνδέεται πάνω στον άξονα μηχανής και περιστρέφεται. Καθώς αλλάζει η θέση του

δίσκου και των μαγνητών ως προς τους αισθητήρες αλλάζει το μαγνητικό πεδίο, οπότε και η παραγόμενη τάση στα άκρα του ημιαγωγικού υλικού. Στην εικόνα 59 φαίνονται 3 αισθητήρες Hall προς τοποθέτηση στην μηχανή.[4]



Εικόνα 59-Αισθητήρας HALL

Ο αισθητήρας ταχύτητας και θέσης προσθέτει επιπλέον κόστος για το σερβοκινητήριο σύστημα αν και είναι απαραίτητος για την υλοποίηση του κλειστού βρόχου του συστήματος. Ωστόσο σήμερα έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι που δεν χρησιμοποιούν αισθητήρα ταχύτητας αλλά εκτιμούν την ταχύτητα μέσω φίλτρων ή μαθηματικών μοντέλων. Τα συστήματα αυτά ονομάζονται Σερβοκινητήρια Συστήματα Χωρίς Αισθητήρες Ταχύτητας/Θέσης (Sensorless Servo). Η εκτίμηση της ταχύτητας σε αυτά τα συστήματα γίνεται κυρίως μέσω εκτίμησης της επαγόμενης τάσης του κινητήρα. Σε έναν ηλεκτρικό κινητήρα η απλοποιημένη ηλεκτρική εξίσωση λειτουργίας του είναι :

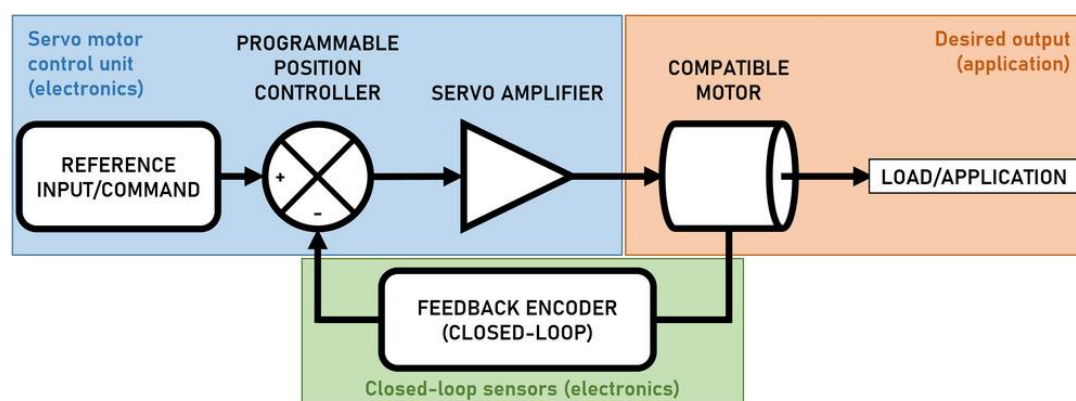
$$V = E + I * R$$

, όπου V η τάση τροφοδοσίας, E η επαγόμενη τάση, I το ρεύμα στάτη του κινητήρα και R η αντίσταση στάτη. Αξιοποιώντας την τάση τροφοδοσίας, το ρεύμα τροφοδοσίας και την αντίσταση του στάτη μπορεί να γίνει εκτίμηση της επαγόμενης τάσης E.

Επειδή η επαγόμενη τάση E είναι ανάλογη της ταχύτητας μπορεί να εξαχθεί μια εκτίμηση για την ταχύτητα του κινητήρα και να απαλειφθεί ο αισθητήρας ταχύτητας/θέσης.

2.4.3 Τεχνική Οδήγησης Σερβοκινητηρίων Συστημάτων

Η οδήγηση του σερβοκινητήρα γίνεται μέσω του ελεγκτή-οδηγητή σερβοκινητήρα (Servo Drive). Ο οδηγητής σερβοκινητήρα δέχεται τα σήματα ανάδρασης από τον αισθητήρα του σερβοκινητήρα. Επίσης, μπορεί να δέχεται και σήματα ανάδρασης τάσης και ρεύματος από ακροδέκτες μηχανής. Με βάση την αναφορά του χρήστη για την επιθυμητή λειτουργία (π.χ. συγκεκριμένη ταχύτητα λειτουργίας) υπολογίζει τα απαιτούμενα σήματα τροφοδοσίας του σερβοκινητήρα. Το σύστημα ελέγχου μπορεί να υλοποιεί διάφορους αλγορίθμους. Οι συνηθέστερες μεθοδολογίες ελέγχου είναι ο διανυσματικός έλεγχος και ο άμεσος έλεγχος ροπής. Στην εικόνα 60 φαίνεται το σχήμα ελέγχου του συνολικού συστήματος. Ο σερβοκινητήρας αποτελείται από τον κινητήρα και τον αισθητήρα που δίνει την ανάδραση των σημάτων του κινητήρα. Ο οδηγητής του σερβοκινητήρα δέχεται τα σήματα ανάδρασης και με βάση την αναφορά του χρήστη προσαρμόζει την τροφοδοσία του σερβοκινητήρα. [6]



Εικόνα 60-Σχήμα ελέγχου Σερβοκινητήριου Συστήματος

Η αναφορά του χρήστη μπορεί να είναι μια ταχύτητα αναφοράς ή μια θέση αναφοράς. Για παράδειγμα, στην ηλεκτροκίνηση η αναφορά μπορεί να προέρχεται από το πεντάλ γκαζιού όπου ο χρήστης καθορίζει την επιθυμητή ταχύτητα. Σε μια εφαρμογή τρισδιάστατης εκτύπωσης(3D printers) η αναφορά προέρχεται από ένα πρόγραμμα η αλγόριθμο που δίνει αναφορές θέσης σε έναν κινητήρα έτσι ώστε να κινήσει τον βραχίονα ή τον άξονα στην επιθυμητή θέση. Παρόμοια, σε έναν ρομποτικό βραχίονα δίνονται οι κατάλληλες εντολές θέσης και ταχύτητας έτσι ώστε να μετατοπιστεί ο βραχίονας στην επιθυμητή θέση.

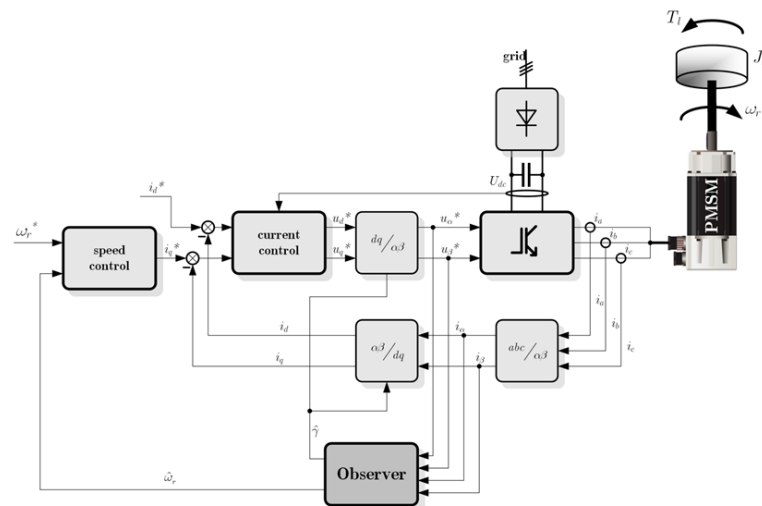
Η μονάδα ελέγχου ή ο ελεγκτής του σχήματος αποτελείται συνήθως από έναν PI ελεγκτή. Ο ελεγκτής PI αποτελείται από δύο όρους, τον αναλογικό και τον ολοκληρωτικό όρο.

Δέχεται σαν είσοδο το σφάλμα του ελεγχόμενου μεγέθους(π.χ. σφάλμα ταχύτητας). Η συνάρτηση μεταφοράς ενός PI ελεγκτή είναι:

$$G(s) = Kp + \frac{Ki}{s}$$

Σημειώνεται ότι αποφεύγεται ο όρος d του κλασσικού PID ελεγκτή καθώς εισάγει επιπλέον θόρυβο στο σύστημα. Για την ρύθμιση του συστήματος ελέγχου και των κερδών του ελεγκτή PI (Kp,Ki) γίνεται προσέγγιση των υποσυστημάτων ως συστήματα πρώτης η δεύτερης τάξης. Το απλούστερο σερβοκινητήριο σύστημα αποτελείται από τον μετατροπέα ισχύος και τον κινητήρα. Προσεγγίζοντας με μια συνάρτηση μεταφοράς το σύστημα μετατροπέα ισχύος και κινητήρα ρυθμίζονται τα κέρδη του ελεγκτή PI.[4]

Στην εικόνα 61 φαίνεται ένα σχήμα ελέγχου ενός σερβοκινητηρίου συστήματος χωρίς αισθητήρα θέσης. Χρησιμοποιούνται δύο ελεγκτές, που μπορεί να είναι ελεγκτές PI, για τον έλεγχο της ταχύτητας και του ρεύματος αναφοράς. Στη συνέχεια χρησιμοποιείται ο μετασχηματισμός Park για την απλοποίηση των εξισώσεων του κινητήρα και την υλοποίηση του ελέγχου. Οι αναφορές των τάσεων δίνονται στον αντιστροφέα που μπορεί να υλοποιεί μια τεχνική PWM για την τροφοδοσία του κινητήρα. Παρατηρούμε ότι δεν χρησιμοποιείται αισθητήρας ταχύτητας/θέσης αλλά αξιοποιούνται τα σήματα τάσης και ρεύματος των ακροδεκτών του κινητήρα. Με βάση αυτά ο παρατηρητής(Observer) δίνει μια εκτίμηση για την ταχύτητα και θέση του κινητήρα.[4][6]



Εικόνα 61-Σερβοκινητήριο σύστημα χωρίς αισθητήρα ταχύτητας/θέσης

Κεφάλαιο 3. Προγραμματιζόμενος Λογικός Ελεγκτής (Programmable Logic Controller)

Οι προγραμματιζόμενοι λογικοί ελεγκτές εισήχθησαν στην βιομηχανία λόγω της ανάγκης για έλεγχο κίνησης και αυτοματοποίηση. Αντικαθιστούν τα ρελέ και τα πνευματικά στοιχεία που χρησιμοποιούνταν παλαιότερα σε βιομηχανικά συστήματα. Σε μια βιομηχανία μπορεί να υπάρχουν πολλαπλοί PLC για τον έλεγχο των συσκευών που ενεργούν και την επικοινωνία μεταξύ αλλά και με τον χρήστη.

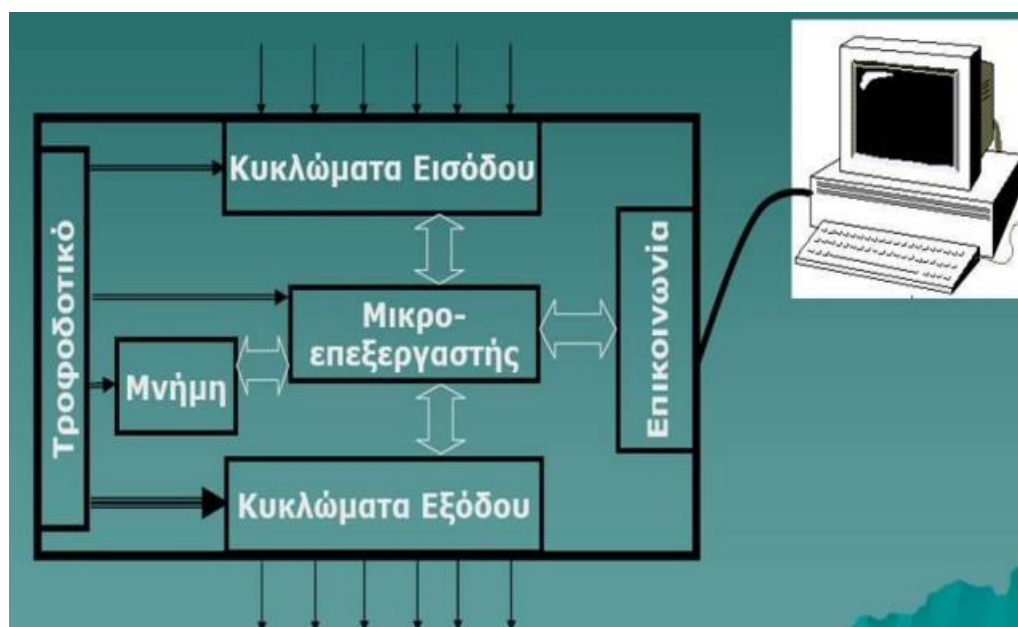
Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα που οδήγησαν στην ευρεία υιοθέτηση τους είναι τα εξής[8]:

- Δεν έχουν υψηλό κόστος.
- Έχουν υψηλή αξιοπιστία.
- Προσφέρουν μεγάλο εύρος επιλογών για την υλοποίηση διαδικασιών.
- Η μηχανική δομή τους είναι συμπαγής και εύκολη ως τοποθέτηση. Αντέχει δονήσεις, σκόνη και περιβαλλοντικές συνθήκες βιομηχανίας.
- Είναι εύκολο στην εκμάθηση της λειτουργίας του.
- Είναι εύκολο στον προγραμματισμό του καθώς και στην εύρεση λαθών στο πρόγραμμα(debugging).
- Προσφέρει ασφάλεια όσον αφορά τα δεδομένα που διαχειρίζεται και τον προγραμματισμό του.
- Προσφέρει δυνατότητες απομακρυσμένης επικοινωνίας και ελέγχου.
- Μπορεί να διαχειριστεί πλήθος βιομηχανικών συσκευών.
- Αποτελεί συσκευή που μπορεί να προσαρμοστεί σε αλλαγές στην βιομηχανία. (π.χ. αλλαγή χρησιμοποιούμενων κινητήρων).

3.1 Δομή Προγραμματιζόμενου Λογικού Ελεγκτή (Programmable Logic Controller-PLC)

Ο προγραμματιζόμενος λογικός ελεγκτής αποτελεί έναν βιομηχανικό ελεγκτή διαδικασιών που βασίζει την λειτουργία του σε έναν μικροεπεξεργαστή, στον οποίο 'τρέχουν' εντολές με βάση πρόγραμμα που είναι αποθηκευμένο στην μνήμη του ελεγκτή. Το πρόγραμμα συνήθως είναι μια σειρά εντολών που οδηγούν τον ελεγκτή στην εκτέλεση συγκεκριμένων διαδοχικών εργασιών. Στην εικόνα 62 φαίνεται η βασική δομή του προγραμματιζόμενου λογικού ελεγκτή. Ο εγκέφαλος του συστήματος είναι ο μικροεπεξεργαστής. Ο μικροεπεξεργαστής σήμερα αποτελεί ένα ισχυρό υπολογιστικό εργαλείο υψηλών ταχυτήτων, μικρού μεγέθους και υψηλής αξιοπιστίας. Οι συσκευές εισόδου συνδέονται στα κυκλώματα εισόδου. Οι συσκευές αυτές μπορεί να είναι διακόπτες, αισθητήρες κ.α.

Τα κυκλώματα εισόδου έχουν ως σκοπό την ανάκτηση των σημάτων εισόδου και την οδήγηση αυτών στην επόμενη βαθμίδα, που συνήθως είναι ο μικροεπεξεργαστής. Τα κυκλώματα εξόδου έχουν ως σκοπό την οδήγηση των εντολών από τον μικροεπεξεργαστή στις συσκευές εξόδου. Οι συσκευές εξόδου μπορεί να είναι ρελέ, ασφάλειες, βαλβίδες, κινητήρες, κ.α. Τα κυκλώματα εισόδου και εξόδου του PLC παρέχουν και ηλεκτρική απομόνωση μεταξύ του PLC και των συνδεδεμένων συσκευών σε αυτό. Οι εντολές και η κατάσταση λειτουργίας του μικροεπεξεργαστή καθώς και οι πληροφορίες που χρειάζεται για την υλοποίηση της επιθυμητής διαδικασίας που αποθηκεύονται στην μνήμη. Ανάλογα με το μέγεθος της εφαρμογής και του PLC επιλέγονται τα ανάλογα χαρακτηριστικά μεγέθους και ταχύτητα μνήμης για την κάλυψη των απαιτήσεων διαδικασίας. Το τροφοδοτικό του αποτελεί την πηγή ενέργειας του PLC. Τροφοδοτεί με τις κατάλληλες τιμές τάσεων τα περιφερειακά του συστήματος και τον μικροεπεξεργαστή. Το κάθε περιφερειακό μπορεί να απαιτεί διαφορετική τιμή τάσης για την λειτουργία του. Τέλος, για την αποστολή οδηγιών στο PLC, την επιτήρηση για την λειτουργίας και την εισαγωγή διαγνωστικών, χρησιμοποιείται δίαυλος επικοινωνίας. Συνήθως αποτελεί μια διεπαφή σύνδεσης με έναν υπολογιστή στον οποίο υπάρχει κάποιο πρόγραμμα για την ρύθμιση του PLC. Σήμερα, υπάρχουν PLC που ενσωματώνουν και ασύρματες επικοινωνίες, όπως το Wi-Fi και το Bluetooth. [10]



Εικόνα 62-Δομή Προγραμματιζόμενου Λογικού Ελεγκτή (PLC)

Οι συσκευές εισόδου του προγραμματιζόμενου λογικού ελεγκτή χαρακτηρίζονται από τα εξής:

- Είδος ρεύματος (AC, DC)
- Τιμή ρεύματος
- Τιμή τάσης
- Πολικότητα

Τα παραπάνω χαρακτηριστικά πρέπει να συμφωνούν με τις προδιαγραφές του PLC και των κυκλωμάτων εισόδου. Οι συσκευές εισόδου μπορεί να είναι:

- Επιλογικός διακόπτης
- Διακόπτης ρόδας
- Οριακός διακόπτης
- Θερμοστάτης
- Διακόπτης πίεσης
- Διακόπτης στάθμης
- Αισθητήρας προσέγγισης
- Φωτοηλεκτρικός αισθητήρας

Τα κυκλώματα εξόδου του PLC πρέπει να είναι σε θέση να μπορούν να ελέγχουν τις συσκευές εξόδου που θα συνδεθούν σε αυτό. Οι απαιτήσεις τις κάθε συσκευής εξόδου είναι το ρεύμα η τάση και η πολικότητα, κ.λ.π. πρέπει να καλύπτονται από το PLC. Οι συσκευές εξόδου μπορεί να είναι:

- Αυτόματος διακόπτης
- Ρελέ
- Βαλβίδα με σωληνοειδές
- Ενδεικτική λυχνία
- Εκκινητές Κινητήρων

Στην εικόνα 63 φαίνονται διάφορες συσκευές εισόδου και εξόδου του PLC.



Εικόνα 63-Διάφορες συσκευές εισόδου και εξόδου σε PLC

3.2 Προγραμματισμός Προγραμματιζόμενου Λογικού Ελεγκτή

Η λειτουργία του προγραμματιζόμενου λογικού ελεγκτή καθορίζεται από το πρόγραμμα που υπάρχει στη μνήμη. Ο προγραμματισμός μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους-γλώσσες. [10]

Οι 4 βασικές γλώσσες προγραμματισμού ενός PLC είναι:

1. Λίστα εντολών-Instruction List (IL)
2. Δομημένο Κείμενο-Structured Text (ST)
3. Διάγραμμα Κλίμακας-Ladder Diagram (LD)
4. Μπλοκ διαγραμμάτων λειτουργίας-Function Block Diagram (FBD)

Οι δύο πρώτες γλώσσες αποτελούν κειμενοστραφείς γλώσσες ενώ οι δυο τελευταίες αποτελούν γραφικές γλώσσες προγραμματισμού.

Η λίστα εντολών αποτελεί γλώσσα που περιλαμβάνει εντολές σε μορφή γλώσσας μηχανής. Κάθε εντολή προς εκτέλεση δίνεται σειρά-σειρά και περιλαμβάνει το βήμα, την εντολή και την επιθυμητή διεύθυνση. Στην εικόνα 64 φαίνεται ένα παράδειγμα εντολών.

Step	Instruction
0	A(
1	A I0.0
2	AN I0.1
3)
4	O(
5	AN
6	A I0.0
7) I0.1
8	¼ Q2.0

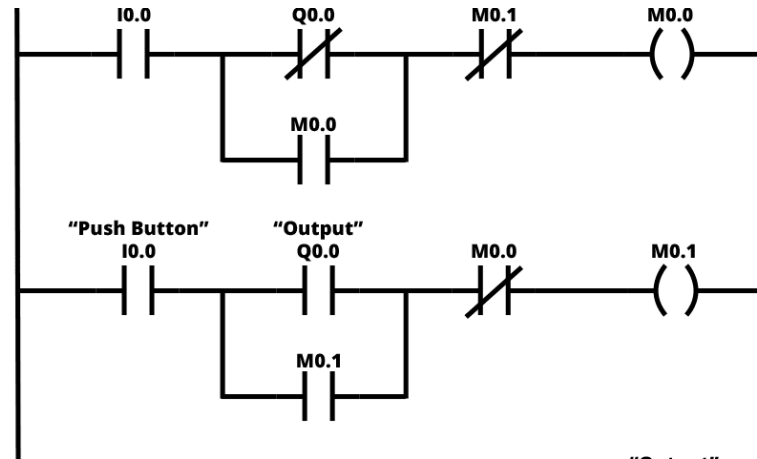
Εικόνα 64-Παράδειγμα εντολών λίστας εντολών(Instruction List-IL)

Η γλώσσα δομημένου κειμένου αποτελεί γλώσσα προγραμματισμού που μοιάζει με συνήθεις γλώσσες όπως η C. Αποτελείται από εντολές που δίνονται μέσω δομή if-else ή while. Στην εικόνα 65 φαίνεται ένα τυπικό παράδειγμα.

```
IF Start THEN
  Start:=FALSE; //Remove Start Latch
  WHILE Initialised = FALSE DO
    System_Prime:=TRUE; //Set Output On For System Primer
  END_WHILE
  System_Prime:=FALSE; //Turn Off Output For System Primer Once Initialised
END_IF
```

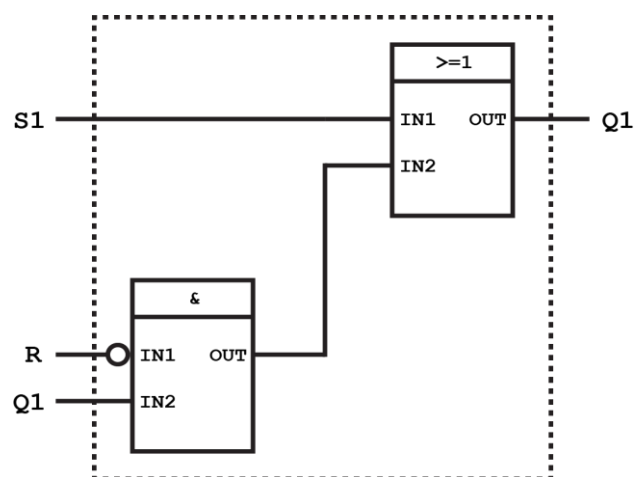
Εικόνα 65-Παράδειγμα εντολών γλώσσας δομημένου κειμένου(Structured Text)

Το διάγραμμα κλίμακας (Ladder Diagram) αποτελεί ίσως το πιο δημοφιλές γραφικό εργαλείο για τον προγραμματισμό του PLC. Αποτελείται από σύμβολα τα οποία περιγράφουν την κάθε λειτουργία. Κάθε διαδικασία αποτελείται από μία γραμμή. Στην γραμμή τοποθετούνται με την σειρά το κάθε σύμβολο που επιτελεί την ανάλογη εντολή. Στο σχήμα 66 φαίνεται ένα τυπικό παράδειγμα εντολών σε διάγραμμα κλίμακας.



Εικόνα 66-Παράδειγμα εντολών διαγράμματος κλίμακας (Ladder Diagram)

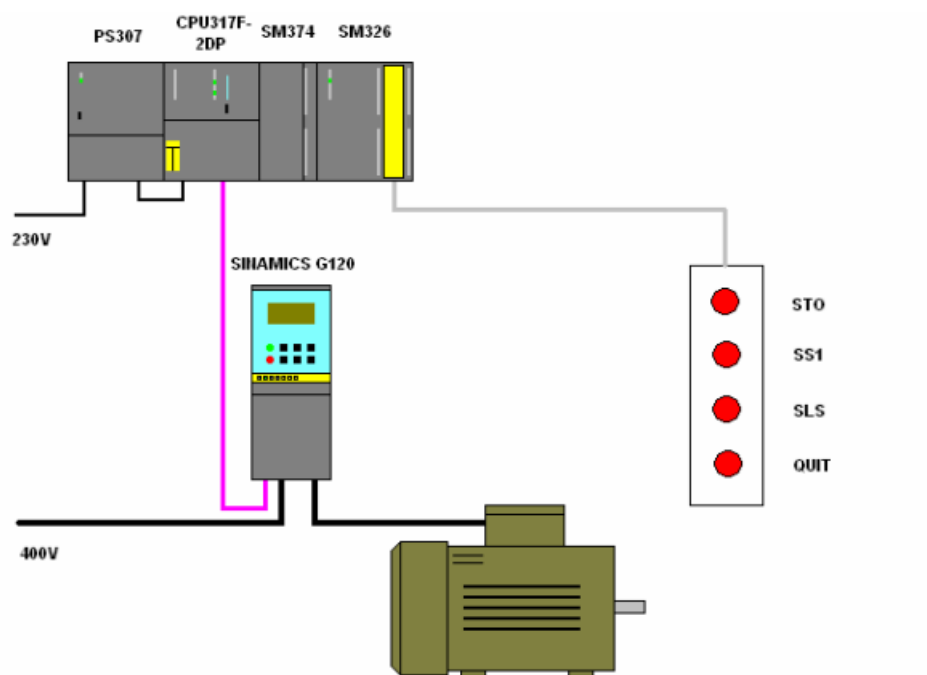
Ο προγραμματισμός μέσω μπλοκ διαγράμματος λειτουργίας (Function Block Diagram) χρησιμοποιεί μπλοκ όπου ορίζονται οι διάφορες επιθυμητές λειτουργίες. Στο κάθε μπλοκ εισάγεται η επιθυμητή είσοδος και εξάγεται η έξοδος της προγραμματισμένης συνάρτησης. Τα διάφορα μπλοκ μπορούν να συνδέονται μεταξύ τους. Γενικά, υπάρχει πλήθος συναρτήσεων που υλοποιούνται σε μπλοκ ενώ ο χρήστης μπορεί να υλοποιήσει ότι χρειαστεί. Στην εικόνα 67 φαίνεται ένα τυπικό πρόγραμμα σε μπλοκ διαγραμμάτων λειτουργίας.



Εικόνα 67-Παράδειγμα εντολών σε πρόγραμμα μπλοκ διαγραμμάτων λειτουργίας (Function Block Diagram)

3.3 Εφαρμογές Προγραμματιζόμενων Λογικών Ελεγκτών στη σημερινή βιομηχανία

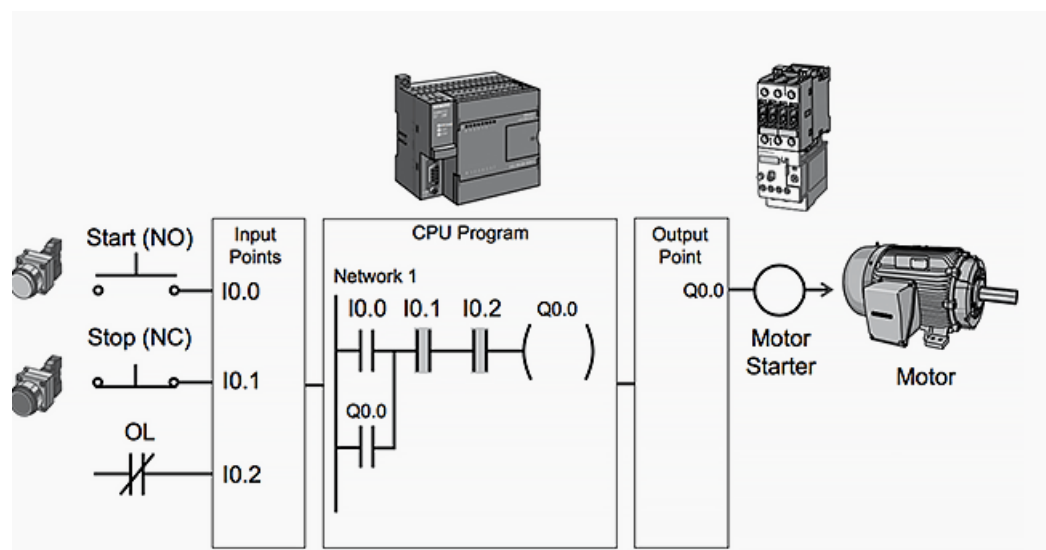
Οι προγραμματιζόμενοι λογικοί ελεγκτές χρησιμοποιούνται στην σημερινή βιομηχανία για πληθώρα διαδικασιών. Η εκκίνηση και ο έλεγχος ταχύτητας των κινητήρων αποτελεί μια από τις πιο συνήθεις εφαρμογές των PLC. Στην εικόνα 68 φαίνεται μια τυπική εφαρμογή ενός PLC της εταιρείας SIEMENS για τον έλεγχο της λειτουργίας ενός κινητήρα.



Εικόνα 68-Τυπική εφαρμογή PLC, Κινητήρα, εισόδων και διεπαφών χρήστη.

Το PLC αποτελεί το μοντέλο SINAMICS της SIEMENS. Στο PLC είναι συνδεδεμένος εξωτερικός επεξεργαστής, ο CPU317F-2DP. Ο συγκεκριμένος επεξεργαστής δέχεται εντολές από τα περιφερειακά SM374 και SM326. Το SM326 αποτελεί μια μονάδα εισόδου σημάτων. Δέχεται ψηφιακά σήματα από 4 εξωτερικές συσκευές εισόδου. Το SM374 αποτελεί την διεπαφή για την οδήγηση των ψηφιακών σημάτων από την είσοδο στον επεξεργαστή. Η μονάδα PS307 αποτελεί την τροφοδοσία του επεξεργαστή και των περιφερειακών. Τα σήματα του επεξεργαστή εισάγονται στο PLC. Το PLC δέχεται τροφοδοσία 230V και είναι συνδεδεμένο σε έναν κινητήρα. Ανάλογα με τα σήματα που δέχεται το PLC και το πρόγραμμα που τρέχει σε αυτόν ελέγχεται η λειτουργία του κινητήρα. [17]

Στην εικόνα 69 φαίνεται ένα τυπικό παράδειγμα ελέγχου λειτουργίας του κινητήρα, για την εκκίνηση και την παύση του. Σαν συσκευές εισόδου χρησιμοποιούνται δύο κουμπιά Start και Stop καθώς και μια αυτόματη ασφάλεια η οποία ανοίγει και απενεργοποιεί τον κινητήρα σε περίπτωση υπερθέρμανσης. Η κάθε συσκευή εισόδου συνδέεται στο PLC και λαμβάνει μια ένδειξη-διεύθυνση (I0.0 για το Start, I0.1 για το STOP και I0.2 για την ασφάλεια). Το πρόγραμμα υλοποιείται σε γλώσσα Ladder. Η διαδικασία που περιγράφει το πρόγραμμα της εικόνας είναι το εξής. Με το πάτημα του Start (Είσοδος I0.0) ενεργοποιήσε το ρελέ εξόδου (έξοδος Q0.0) για την κίνηση του κινητήρα, εφόσον οι επαφές Stop (είσοδος I0.1) και η ασφάλεια (είσοδος I0.2) είναι κλειστές. Το ρελέ εξόδου περιλαμβάνει και βοηθητικό ρελέ συγκράτησης που συνδέεται παράλληλα με το I0.0 για την συνέχιση της λειτουργίας μετά το πάτημα του Start. Σε περίπτωση που πατηθεί το Stop η ενεργοποιηθεί η ασφάλεια υπερθέρμανσης, το κύκλωμα τροφοδοσίας της εξόδου Q0.0 απενεργοποιείται και σταματά η λειτουργία.



Εικόνα 69-Παράδειγμα ελέγχου κινητήρα με PLC

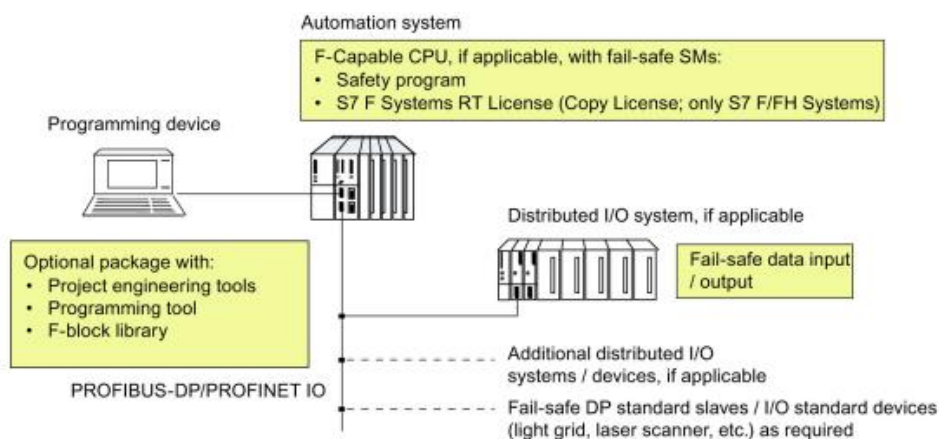
Το παραπάνω παράδειγμα αποτελεί μια απλή διαδικασία, ωστόσο μπορούν να εισαχθούν πολλά παραπάνω, όπως η ενεργοποίηση του κινητήρα όταν ενεργοποιηθεί ένας αισθητήρας, η ενεργοποίηση λυχνιών διάφορων ενδείξεων, η εισαγωγή δεύτερου κινητήρα ή άλλων συσκευών κίνησης, κ.α. Από το παράδειγμα μπορούμε να δούμε ότι η λογική λειτουργίας του PLC και ο προγραμματισμός του αποτελεί μια δομημένη εργασία με πολλαπλές δυνατότητες που λύνει σύνθετα προβλήματα μιας βιομηχανικής διαδικασίας.[8]

Στον έλεγχο του κινητήρα παραπάνω χρησιμοποιήθηκε απλή λογική AND και OR για την υλοποίηση του ελέγχου. Ωστόσο ένα PLC παρέχει πολλές περισσότερες λειτουργίες και συναρτήσεις, όπως :

- Εσωτερικά Ρελέ: Τα εσωτερικά ρελέ βρίσκονται μέσα στο PLC και χρησιμοποιούνται βοηθητικά για την υλοποίηση συναρτήσεων στο πρόγραμμα, όπως την αποθήκευση προσωρινών αποτελεσμάτων ή την συγκράτηση μιας τιμής για κάποιους κύκλους εντολών.
- Flip-Flop: Μπορεί να είναι SR flip-flop, T flip-flop ή J-K flip flop. Μπορεί να ενεργοποιούνται με διαφορετική παρυφή του σήματος ή με διαφορετική μορφή σήματος. Υλοποιούν την επιθυμητή λειτουργία με βάση τις εισόδους που δέχονται.
- Χρονιστές (Timers): Αποτελούν μια από τις σημαντικότερες υπό-μονάδες του PLC. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εισαγωγή καθυστερήσεων (delays) και ότι άλλη λειτουργία εμπλέκει χρόνο και χρονικά διαστήματα.
- Μετρητές (Counters): Μαζί με τους Timers, αποτελούν σημαντικές μονάδες, και δείκτες της απόδοσης του κάθε PLC. Οι μετρητές έχουν ως σκοπό την μέτρηση σημάτων από διάφορες συσκευές και αισθητήρες του συστήματος. Σήμερα, με την εισαγωγή πολλαπλών αισθητήρων και την εξέλιξη του Internet Of Things, είναι απαραίτητη η άντληση δεδομένων από πολλαπλούς αισθητήρες με υψηλές συχνότητες δειγματοληψίας. Γι' αυτό τον λόγο χρησιμοποιούνται οι High-Speed Counters. Μπορούν να φτάσουν σε συχνότητες δειγματοληψίας έως 100kHz ενώ μπορεί να υπάρξουν και πολλαπλά κανάλια σε κάθε PLC. Χρησιμοποιούνται για αισθητήρες προσέγγισης, κωδικοποιητές θέσης, αισθητήρες Laser κ.α.[17][18]

Πολλές από τις βιομηχανικές εφαρμογές στις οποίες εμπλέκεται ένας προγραμματιζόμενος λογικός ελεγκτής περιλαμβάνουν ευαίσθητα συστήματα ως προς ασφάλεια και αξιοπιστία. Στους σημερινούς βιομηχανικούς PLC εισάγονται λειτουργίες ασφάλειας όπως την ασφαλή διακοπή του συστήματος σε περίπτωση γενικού 'shutdown'. Τα συστήματα αυτά είναι γνωστά ως Fail-Safe (F-Systems), και έχουν ως σκοπό την ομαλή και άμεση παύση του συστήματος έτσι ώστε να μην κινδυνέψει ο ανθρώπινος παράγοντας. Τα συστήματα Fail-Safe περιλαμβάνουν μεθόδους εντοπισμού και διάγνωσης σφαλμάτων.

Στην εικόνα 70 φαίνεται ένα σύστημα Fail Safe ή αλλιώς F-System.



Εικόνα 70-Fail Safe System

Το σύστημα Fail-Safe αποτελείται από τα εξής:

- Συσκευή Προγραμματισμού(Programming Device): Αποτελεί την διεπαφή του συστήματος με τον άνθρωπο. Περιλαμβάνει τα εργαλεία που χρειάζονται για τον προγραμματισμό του συστήματος καθώς και τις απαραίτητες βιβλιοθήκες συναρτήσεων για την λειτουργία του Fail-Safe PLC.
- Σύστημα Αυτοματισμού(Automation System): Περιλαμβάνει τον εγκέφαλο του συστήματος, την μονάδα επεξεργασίας (CPU). Στα συστήματα Fail Safe χρησιμοποιείται η Fail-Safe ή F-Capable CPU. Στην F-Capable CPU υπάρχει η δυνατότητα να προγραμματιστεί πρόγραμμα ασφαλείας για λειτουργία σε περίπτωση σφάλματος από τον χρήστη.
- Κατανεμημένα συστήματα εισόδου/εξόδου(Distributed Systems I/O): Αποτελούν συσκευές που χρησιμοποιούνται για την ανάκτηση σημάτων εισόδου, την αποστολή σημάτων εξόδου και την επικοινωνία αυτών με την κεντρική μονάδα επεξεργασίας. Εμπλέκουν λειτουργίες ασφαλείας για τα σήματα εισόδου και εξόδου.

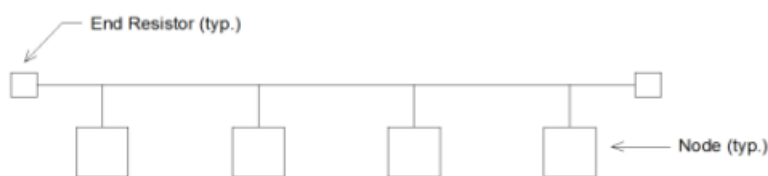
Κεφάλαιο 4. Βιομηχανικά Δίκτυα

Οι συσκευές που βρίσκονται σε ένα βιομηχανικό περιβάλλον είναι απαραίτητο να επικοινωνούν μεταξύ τους. Επιπλέον, ο χρήστης και ο διαχειριστής του συστήματος πρέπει να ελέγχει και να προγραμματίζει κατάλληλα την κάθε συσκευή και διαδικασία. Θα πρέπει να παρέχονται πληροφορίες σχετικά με την λειτουργία μηχανών, αισθητήρων, ελεγκτών κ.α. Αυτό είναι σημαντικό για την επίβλεψη της λειτουργίας, την πρόληψη και διάγνωση σφαλμάτων, αλλά και την αποσφαλμάτωση. Συνεπώς, κρίνεται απαραίτητο να υπάρχει ένα δίκτυο επικοινωνίας μέσα σε αυτό το περιβάλλον με υψηλές ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων, υψηλή αξιοπιστία, εύκολη τοποθέτηση, χαμηλού κόστους και προσαρμόσιμο σε αλλαγές. Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφεται η δομή των σημερινών βιομηχανικών δικτύων, τα πρότυπα σχεδιασμού και οι μέθοδοι διασύνδεσης. Οι δύο βασικές κατηγορίες βιομηχανικών δικτύων είναι τα δίκτυα Fieldbus και Βιομηχανικού Ethernet.[11]. Για κάθε κατηγορία αναλύεται η δομή και λειτουργία τους και τα σημαντικότερα πρωτόκολλα.

4.1 Βασικές Αρχές Δικτύων

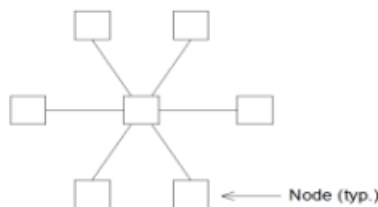
4.4.1 Τοπολογίες Δικτύων

Ένα δίκτυο αποτελείται από πολλαπλές διασυνδέσεις υπολογιστών, μικροϋπολογιστών και συσκευών που συνδέονται μεταξύ τους. Η κάθε συσκευή αποτελεί έναν κόμβο του δικτύου. Οι τοπολογίες ενός δικτύου μπορεί να είναι κατά δίαυλο(Bus), κατά αστέρα(Star) ή κατά δαχτυλίδι(Ring). Η δομή των παραπάνω δικτύων φαίνονται στις εικόνες 71,72,73 αντίστοιχα.[11]



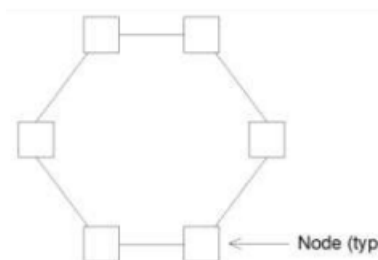
Εικόνα 71-Τοπολογία κατά δίαυλο (Bus)

Η τοπολογία Bus αποτελείται από πολλαπλούς κόμβους συνδεδεμένους σε μία διαδρομή-Bus. Κάθε κόμβος έχει πρόσβαση στην πληροφορία που διακινείται στην διαδρομή αυτή. Στα άκρα του bus χρησιμοποιούνται κόμβοι ή ‘end resistors’ που επιτελούν λειτουργίες ελέγχου της γραμμής ή αναβάθμισης της ποιότητας της.



Εικόνα 72-Τοπολογία Αστέρα(Star)

Στη τοπολογία αστέρα(Star) όλοι οι κόμβοι συνδέονται σε έναν κεντρικό κόμβο ή ‘Switch’ όπως ονομάζεται συνήθως. Ο κεντρικός κόμβος μπορεί να συλλέγει και να αποστέλλει πληροφορίες ή να αποτελεί απλά ένα μέσο της διαδρομής των δεδομένων. Σε περίπτωση που προκληθεί σφάλμα στον κεντρικό κόμβο, οι υπόλοιπες συσκευές δεν μπορούν να επικοινωνήσουν μεταξύ τους.



Εικόνα 73-Τοπολογία Δαχτυλιδιού(Ring)

Η τοπολογία δαχτυλιδιού (Ring) αποτελείται από κόμβους συνδεδεμένους κυκλικά. Ο κάθε κόμβος στέλνει και δέχεται δεδομένα από οποιοδήποτε άλλο κόμβο. Η πληροφορία μπορεί να περάσει μέσα από διάφορους κόμβους πριν φτάσει στον προορισμό της. Σε περίπτωση που προκληθεί σφάλμα σε έναν κόμβο της διαδρομής, η πληροφορία μπορεί να αποσταλεί από την αντίθετη φορά.

Στα περισσότερα αν όχι σε όλα τα δίκτυα υπάρχει ένας κεντρικός υπολογιστής με μεγάλες δυνατότητες αποθηκευτικού χώρου και γρήγορη πρόσβαση σε δεδομένα. Ονομάζεται Server και συγκεντρώνει τις πληροφορίες και τις λειτουργίες του συνολικού δικτύου. Η κάθε συσκευή που συνδέεται στο δίκτυο μπορεί να απαιτήσει ή να στείλει πληροφορίες στον κεντρικό υπολογιστή. Η κάθε συσκευή αποτελεί τον Client. Στην βιομηχανία χρησιμοποιείται η παραπάνω αρχιτεκτονική έτσι ώστε να συγκεντρώνονται στον Server

δεδομένα λειτουργίας real-time, δεδομένα παρελθόντος χρόνου και δυνατότητες επιτήρησης του συστήματος από τον χρήστη.

4.4.2 Μοντέλο OSI

Το μοντέλο OSI(Open Systems Interconnect) περιγράφει την λειτουργία ενός συστήματος επικοινωνιών. [11]. Διαχωρίζει την λειτουργία του συστήματος σε 7 επίπεδα:

1. Φυσικό Επίπεδο: Περιλαμβάνει την φυσική σύσταση του συστήματος, δηλαδή τα καλώδια, τα επίπεδα τάσεων, τους διακομιστές κ.α.
2. Επίπεδο Ζεύξης Δεδομένων: Περιλαμβάνει τα μέσα για την μεταφορά των δεδομένων από το φυσικό επίπεδο στο επίπεδο δικτύου.
3. Επίπεδο Δικτύου: Εκτελεί λειτουργίες μεταφοράς και δρομολόγησης πακέτων για την μεταφορά της πληροφορίας. Το IP (Internet Protocol) αποτελεί πρωτόκολλο επιπέδου δικτύου.
4. Επίπεδο Μεταφοράς: Είναι υπεύθυνο για την αξιόπιστη μεταφορά δεδομένων από την προέλευση στον προορισμό. Το TCP(Transmission Control Protocol) αποτελεί το πιο δημοφιλές πρωτόκολλο επιπέδου μεταφοράς.
5. Επίπεδο Συνόδου: Ελέγχει την κατάσταση της σύνδεσης-συνόδου μεταξύ των επικοινωνούντων σημείων.
6. Επίπεδο Παρουσίασης: Είναι υπεύθυνο για την μετατροπή, κωδικοποίηση, συμπίεση και διαμόρφωση των δεδομένων για την αξιοποίηση τους από το επίπεδο εφαρμογών.
7. Επίπεδο Εφαρμογών: Αποτελεί την διεπαφή επικοινωνίας του χρήστη με το σύστημα του δικτύου. Μέσω αυτού του επιπέδου ο χρήστης διαχειρίζεται πληροφορία.

Οι διασυνδέσεις των στοιχείων του συστήματος περιλαμβάνουν υλικό όπως:

- Καλώδια: Μπορεί να είναι ομοαξονικά, συνεστραμμένου ζεύγους, Ethernet-χαλκού ή οπτικά. Η επιλογή γίνεται με βάση την επιθυμητή ταχύτητα μεταφοράς και την απόσταση αποστολής των δεδομένων.
- Συσκευές Δικτύου : Περιλαμβάνουν τα Switches που δέχονται πολλαπλά σήματα από άλλες συσκευές και τα διαχειρίζονται για την αποστολή τους στο επόμενο επίπεδο, τους μετατροπείς που μπορούν να διαχειριστούν πολλαπλά είδη καλωδίων και τους ασύρματους πομποδέκτες που μπορούν να προσθέσουν ασύρματες δυνατότητες επικοινωνίας στο σύστημα.
- Συσκευές δικτύου σε επίπεδο υπολογιστή και ελεγκτή: Περιλαμβάνουν σειριακές θύρες που μεταφέρουν την πληροφορία ανά bit για αξιοποίηση από τον υπολογιστή, θύρες 8P8C σε καλώδια Ethernet, κάρτες δικτύου (NIC) για την σύνδεση του υπολογιστή με το δίκτυο και SFP(Small Form-factor Pluggable) μονάδες που εισάγονται σε κάρτες δικτύων και διακομιστές για την μεταφορά σημάτων που προέρχονται συνήθως από οπτικά καλώδια.

4.4.3 Μέθοδοι Διασύνδεσης και Επικοινωνίας

Οι μέθοδοι διασύνδεσης και επικοινωνίας των μονάδων ενός συστήματος είναι η μέθοδος Master-Slave, η μέθοδος Token-Ring και η μέθοδος Ethernet. Στην μέθοδο Master-Slave επιλέγεται μια συσκευή του συστήματος (συνήθως η συσκευή ελέγχου) ως Master. Ανά μικρό χρονικό διάστημα η συσκευή Master αποστέλλει ένα σήμα στην επιθυμητή συσκευή και αναμένει απόκριση έτσι ώστε να δει αν έχει υπάρξει αλλαγή στην είσοδο ή σφάλμα. Η συσκευή που στέλνει την απόκριση ονομάζεται Slave.

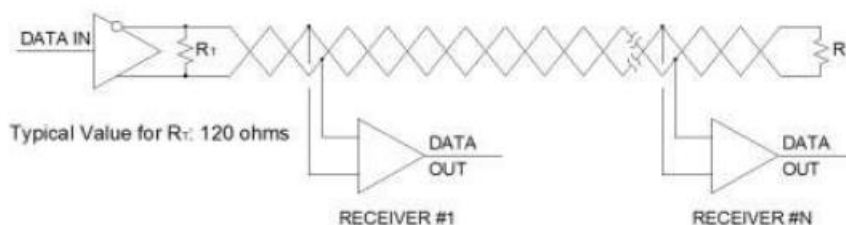
Η μέθοδος Token-Ring περιλαμβάνει ένα σύμβολο το οποίο αποστέλλεται σε κάθε κόμβο-συσκευή. Σε περίπτωση που ο κόμβος έχει το σύμβολο μπορεί να αποστείλει δεδομένα. Δεν αποτελεί ιδιαίτερα δημοφιλής μέθοδο.

Η μέθοδος Ethernet χρησιμοποιεί την λογική Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection (CSMA/CD). Στα δίκτυα Ethernet ο κάθε κόμβος μπορεί να αποστείλει δεδομένα σε κάθε άλλο κόμβο. Η λογική λειτουργίας είναι η εξής: Αν ένας κόμβος θέλει να στείλει πληροφορία σε έναν άλλο τότε στέλνει ένα σήμα για να δει αν είναι απασχολημένος ο επιθυμητός κόμβος προορισμού. Αν είναι απασχολημένος τότε προσπαθεί αργότερα. Αν δεν είναι αποστέλλει την πληροφορία. Λόγω της φύσης λειτουργίας της μεθόδου προκύπτουν συγκρούσεις δεδομένων (Data Collision) για τις οποίες ο κάθε κόμβος που θέλει να αποστείλει δεδομένα αναμένει κάποιο χρόνο για την αποστολή των δεδομένων του.

4.4.4 Πρότυπα Συσκευών Δικτύου

Τα βασικά πρότυπα συσκευών δικτύου είναι το USB, το RS-485 και το 8P8C. Το USB (Universal Serial Bus) αποτελεί δημοφιλές πρότυπο διεπαφή που χρησιμοποιείται εκτενώς για την επικοινωνία των υπολογιστών με περιφερειακά όπως εκτυπωτές, ποντίκια και πληκτρολόγια. Στην βιομηχανία χρησιμοποιείται για περιφερειακά διεπαφής όπως οθόνες κ.α. Επιτρέπει ταχύτητες έως 40Gbps.

Το RS-485 αποτελεί διεπαφή διασύνδεσης κόμβων με ένα κεντρικό δίαυλο-bus. Ο κεντρικός δίαυλος αποτελείται από καλώδιο συνεστραμμένου ζεύγους. Στα άκρα του δίαυλου χρησιμοποιούνται αντιστάσεις που χρησιμεύουν στον περιορισμό ανεπιθύμητων φαινομένων όπως αλλοίωση σήματος. Χρησιμοποιείται για μεγάλες αποστάσεις και είναι ανεπαίσθητο σε ηλεκτρικούς θορύβους. Μπορεί να φτάσει σε ταχύτητες 1Mbps σε 100 μέτρα απόσταση καλωδίου.[14]

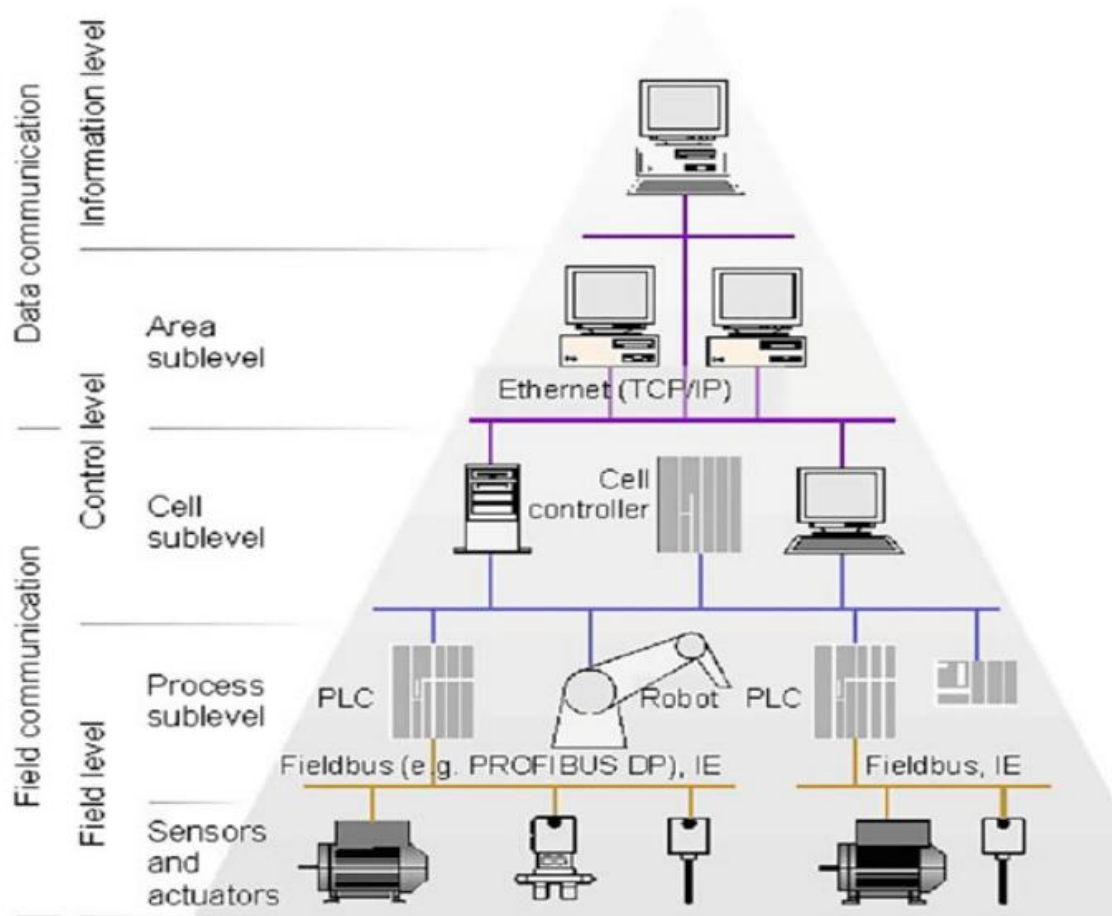


Εικόνα 74-Διασύνδεση κατά RS-485

Λόγω της ανάγκης ύπαρξης πολλαπλών καλωδίων και θυρών εισόδου σε διάφορες συσκευές του δικτύου υπάρχουν μετατροπείς από θύρες USB σε θύρες RS-485 και αντίστροφα.

4.2 Δομή Βιομηχανικών Δικτύων

Στην εικόνα 75 φαίνεται η βασική δομή των σημερινών βιομηχανικών δικτύων.



Εικόνα 75-Δομή βιομηχανικών δικτύων[11]

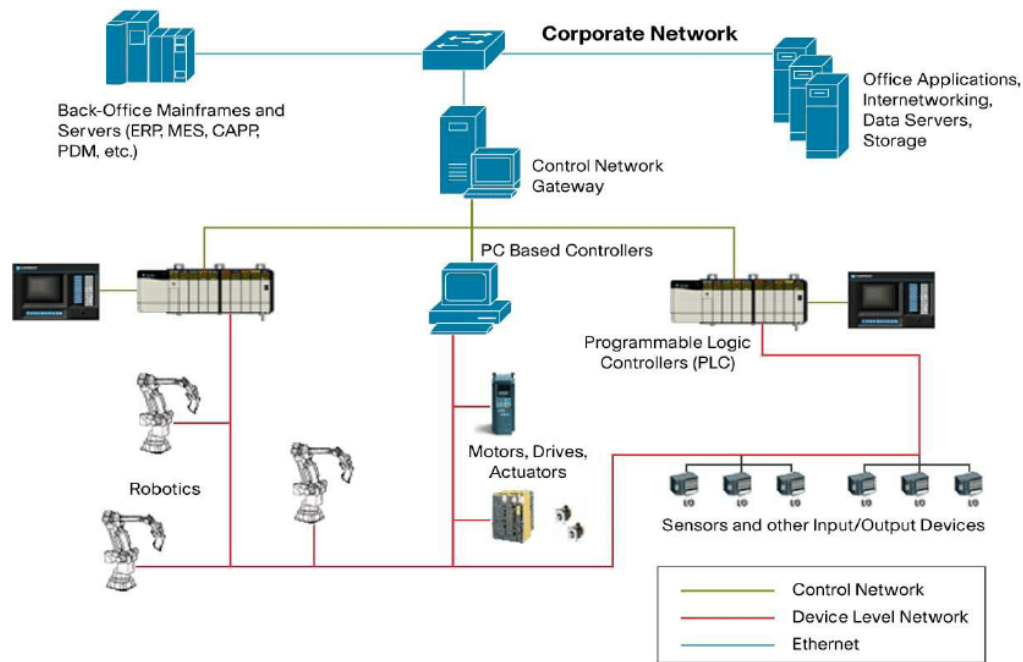
Τα επίπεδα χωρίζονται σε 3:

1. Επίπεδο εφαρμογής: Στο επίπεδο εφαρμογής περιλαμβάνονται οι συσκευές και οι μηχανές που λειτουργούν σε μια βιομηχανική διαδικασία καθώς και οι απαραίτητοι προγραμματιζόμενοι λογικοί ελεγκτές για τον έλεγχο αυτών. Έτσι, το επίπεδο εφαρμογής μπορεί να περιλαμβάνει ηλεκτρικούς κινητήρες, αισθητήρες, ενεργοποιητές, ρομποτικούς βραχίονες, PLC, κ.α.
2. Επίπεδο ελέγχου: Στο επίπεδο ελέγχου περιλαμβάνονται τα υποσυστήματα ελέγχου λειτουργίας του συστήματος και επικοινωνίας. Δηλαδή περιλαμβάνονται τα συστήματα ανάκτησης και ελέγχου των σημάτων από τα υποσυστήματα του επιπέδου εφαρμογής. Το σύστημα που υλοποιείται στο επίπεδο ελέγχου είναι το SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition). Για παράδειγμα, για μια εφαρμογή κινητήρα, το μοντέλο του και οι πληροφορίες για τα σήματα που περιγράφουν την λειτουργία του επεξεργάζονται στο σύστημα SCADA. Στο συγκεκριμένο σύστημα συγκεντρώνονται και προγραμματίζονται οι παράμετροι

- του συστήματος, παρουσιάζεται η κατάσταση λειτουργίας του, διατηρείται ιστορικό λειτουργίας και αποστέλλονται πληροφορίες στο επίπεδο πληροφορίας.
3. Επίπεδο πληροφορίας: Στο επίπεδο πληροφορίας συγκεντρώνονται πληροφορίες από τα παρακάτω επίπεδα. Η πληροφορία μπορεί να περιέχει δεδομένα που περιγράφουν την τωρινή η προηγούμενη κατάσταση λειτουργίας του συστήματος. Στο συγκεκριμένο επίπεδο υλοποιούνται τα δίκτυα επικοινωνίας μεγάλου εύρους, όπως για παράδειγμα το Ethernet WAN.

4.3 Δίκτυα FieldBus

Στο επίπεδο εφαρμογής οι συσκευές και οι μηχανές που επιτελούν μια διεργασία πρέπει να επικοινωνούν με τα ανώτερα επίπεδα και να μεταφέρουν πληροφορίες για την λειτουργία τους. Παλαιότερα αυτό γινόταν με την χρήση αναλογικών συστημάτων και την χρήση του RS-232. Το Rs-232 αποτελεί πρότυπο μεταφοράς δεδομένων για την σύνδεση δύο συστημάτων. Με την αύξηση των συστημάτων και της πολυπλοκότητας αυτών, αναπτύχθηκαν και χρησιμοποιούνται ψηφιακά συστήματα. Τα δίκτυα Fieldbus είναι πρωτόκολλα και ψηφιακά δίκτυα που έχουν ως σκοπό την διασύνδεση και επικοινωνία πολλαπλών υπολογιστών, ελεγκτών, μηχανών, ενεργοποιητών, αισθητήρων κ.α. σε ένα τοπικό βιομηχανικό δίκτυο (Industrial LAN). Στην εικόνα 76 φαίνεται ένα τυπικό δίκτυο Fieldbus. Αποτελείται από πολλαπλές συσκευές που λειτουργούν σε μια βιομηχανική διαδικασία, όπως μονάδες εισόδου/εξόδου, ρομποτικούς βραχίονες, κινητήρες, ενεργοποιητές, αισθητήρες κ.α. Οι περιφερειακές συσκευές συνδέονται σε προγραμματιζόμενους λογικούς ελεγκτές PLC. Οι συσκευές αλλά και οι μονάδες ελέγχου(PLC) συνδέονται σε δίαυλους επικοινωνίας(Busses). Σε ανώτερο επίπεδο υπάρχουν οι υπολογιστές επιτήρησης και διαχείρισης των δεδομένων, μονάδες αποθήκευσης και servers. [11]



Εικόνα 76-Δίκτυο FieldBus

Τα δίκτυα Fieldbus ορίζονται από το πρότυπο IEC-61158. Τα σημαντικότερα πρωτόκολλα και συστήματα Fieldbus είναι τα εξής[11]:

- ControlNet
- DeviceNet
- Foundation Fieldbus H1
- HART
- Modbus
- PROFIBUS
- CAN

4.3.1 ControlNet

Το πρωτόκολλο ControlNet αποτελεί πρωτόκολλο ανοικτής πρόσβασης για την σύνδεση δικτύων σε βιομηχανικές εφαρμογές. Το φυσικό επίπεδο (Physical Layer) αποτελείται από ομοαξονικά καλώδια τύπου RG-6. Το επίπεδο διασύνδεσης (Link Layer) είναι σχεδιασμένο για την επεξεργασία δεδομένων με κυκλικό τρόπο. Ο χρόνος ανανέωσης δεδομένων (NUT-Network Update Time) που χαρακτηρίζει την λειτουργία του επιπέδου διασύνδεσης μπορεί να είναι από 2 έως 100 ms. Το επίπεδο εφαρμογής (Application Layer) αποτελείται από το βιομηχανικό πρότυπο CIP-Common Industrial Protocol που χρησιμοποιείται από τα περισσότερα συστήματα δικτύων στην βιομηχανία. [11]

4.3.2 DeviceNet

Το πρωτόκολλο DeviceNet χρησιμοποιείται σε βιομηχανικές εφαρμογές που απαιτούν την εισαγωγή πολλαπλών συσκευών ελέγχου και αποστολή και λήψη δεδομένων. Είναι ανοικτής πρόσβασης και μοιάζει με το ControlNet. Το φυσικό επίπεδο περιλαμβάνει καλώδια και κόμβους που συνδέονται με την λογική 'trunk line-drop line'. Το επίπεδο διασύνδεσης (Link Layer) περιλαμβάνει το CAN-Controller Area Network, που αποτελεί έναν διάυλο επικοινωνίας για την επικοινωνία διαφορετικών συσκευών χωρίς την ύπαρξη κεντρικού υπολογιστή. Η ταχύτητα διακίνησης των δεδομένων μπορεί να φτάσει έως τα 1Mbit/s.[11]

4.3.3 Foundation Fieldbus H1

Το Foundation Fieldbus H1 αποτελεί πρωτόκολλο της οικογένειας Foundation Fieldbus. Στηρίζεται σε πρότυπα που έχουν θεσπιστεί από την Διεθνή Κοινότητα Αυτοματισμών (ISA). Χρησιμοποιείται σε βιομηχανικά περιβάλλοντα για την επικοινωνία πολλαπλών συσκευών μεταξύ τους καθώς και με την συσκευή ελέγχου (PLC). Η έκδοση H1 φτάνει σε ταχύτητες διακίνησης δεδομένων έως 31.25kbit/s.[11]

4.3.4 HART

Αποτελεί πρωτόκολλο ανοικτής πρόσβασης που στηρίζεται σε αμφίδρομη επικοινωνία μεταξύ πολλαπλών κόμβων. Συνδυάζει αναλογικά και ψηφιακά κυκλώματα και σήματα. Φτάνει σε ταχύτητα διακίνησης δεδομένων έως 1200bit/s. Μπορεί να αντικαταστήσει ή να λειτουργήσει παράλληλα με παλαιότερες τεχνολογίες που χρησιμοποιούσαν εξοπλισμό καλωδίων 4-20mA και γι' αυτό χρησιμοποιείται αρκετά σήμερα. [11]

4.3.5 Modbus

Το Modbus χρησιμοποιείται αρκετά στα σημερινά βιομηχανικά συστήματα για την επικοινωνία με τους προγραμματιζόμενους λογικούς ελεγκτές. Η αποστολή δεδομένων γίνεται σειριακά, ανά bit. Χρησιμοποιεί την λογική master-slave, όπου ο αποστολέας ή λήπτης δεδομένων ορίζεται σαν master και αντίστοιχα ο λήπτης ή αποστολέας σαν slave. Ο master κόμβος αποστέλλει ένα αίτημα και ο slave αναμένει και δέχεται το αίτημα στο οποίο απαντά. Χρησιμοποιεί διασυνδέσεις Rs-485, Rs-422 ή Rs-232. Για την μεταφορά δεδομένων αξιοποιεί δίκτυα TCP/IP Ethernet ενώ υπάρχουν και ασύρματα δίκτυα.

Υποστηρίζει έως και 200 συσκευές σε κάθε δίκτυο και φτάνει σε διασυνδέσεις έως 1 km. Οι παραλλαγές του Modbus είναι το Modbus RTU και το Modbus TCP/IP. Το Modbus RTU χρησιμοποιεί δίκτυα βασισμένα στο πρότυπο RS-485, λογική Master-Slave και έλεγχο σφαλμάτων και λαθών. Το Modbus TCP/IP μπορεί να προσαρμοστεί σε δίκτυα Ethernet. Τα δεδομένα διαμορφώνονται σε πλαίσια σύμφωνα με το TCP. Στη συνέχεια αποστέλλονται σύμφωνα με το IP και τις διευθύνσεις που καθορίζονται από αυτό. [11]

4.3.6 PROFIBUS

Το Profibus αποτελεί δίκτυο επικοινωνίας Fieldbus για βιομηχανικές εφαρμογές. Ακολουθεί το πρότυπο IEC 61158. Υπάρχουν δύο εκδόσεις Profibus, το Profibus Decentralized Peripherals-DP και το Profibus Process Automation-PA. Το Profibus DP χρησιμοποιείται για την συλλογή δεδομένων από πολλαπλές συσκευές και αισθητήρες σε έναν κεντρικό ελεγκτή ενώ το Profibus PA χρησιμοποιείται για την μέτρηση των σημάτων από αισθητήρες και συσκευές σε βιομηχανικά περιβάλλοντα που μπορεί να υπάρξουν δυσμενείς συνθήκες για την λειτουργία ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού. Στο επίπεδο διασύνδεσης δεδομένων χρησιμοποιεί την λογική master-slave. Το Profibus χρησιμοποιεί τις προδιαγραφές που ορίζονται από το RS-485 για την διασύνδεση των σειριακών δίαυλων επικοινωνίας. Επιπλέον χρησιμοποιούνται διασυνδέσεις οπτικών κυκλωμάτων καθώς και τεχνολογία διασύνδεσης MBP(Manchester Bus Powered), όπου γίνονται αποστολές και λήψεις δεδομένων από το ίδια καλώδια με την τροφοδοσία. Το Profibus DP μπορεί να φτάσει έως τα 12Mbit/s ενώ το Profibus PA λειτουργεί στα 31.25kBit/s.[19]

4.3.7 CAN

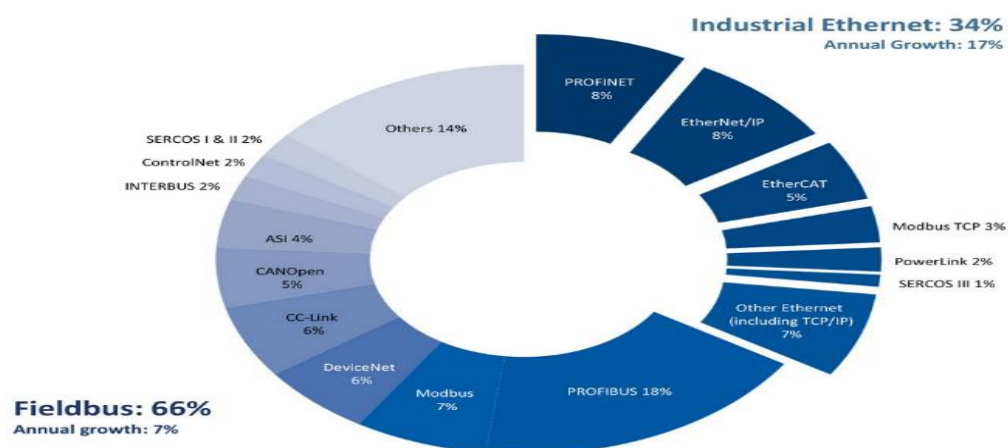
Το CAN-Controller Area Network ξεκίνησε από την αυτοκινητοβιομηχανία για την συγκέντρωση, αποστολή και λήψη πολλαπλών σημάτων από πολλαπλούς εγκατεστημένους αισθητήρες χωρίς την χρήση κεντρικού υπολογιστή. Στην βιομηχανία χρησιμοποιείται σαν Fieldbus λόγω των πολλαπλών πλεονεκτημάτων του, όπως το χαμηλό κόστος, η αξιοπιστία του, η σθεναρότητά του, οι χαμηλές απαιτήσεις υλικό-λογισμικού και η λειτουργία του σε πραγματικό χρόνο. Η δομή του περιλαμβάνει πολλαπλούς κόμβους που συνδέονται σε έναν βασικό δίαυλο. Ο κάθε κόμβος περιλαμβάνει μια κεντρική μονάδα επεξεργασίας, έναν ελεγκτή και έναν αποστολέα δεδομένων. Στην βιομηχανία

χρησιμοποιείται το CANopen. Στην ουσία αποτελεί το πρωτόκολλο CAN με ένα πρόσθετο για την επεξεργασία και διαχείριση του δικτύου του CAN. [11]

4.4 Βιομηχανικό Ethernet

Η τεχνολογία CAN και τα διάφορα Fieldbus αποτελούν την κυρίαρχη λύση σε βιομηχανικές εφαρμογές δικτύων καθώς προσφέρουν χαμηλό κόστος και εύκολη λειτουργία. Ωστόσο, το βιομηχανικό Ethernet αποτελεί διαφορετική αρχιτεκτονική βιομηχανικού δικτύου, προσφέρει τα παραπάνω και περιορίζει μειονεκτήματα αυτών των τεχνολογιών, όπως τον περιορισμένο ρυθμό μετάδοσης πληροφοριών και τα περιορισμένα μήκη μετάδοσης. Το βιομηχανικό Ethernet ακολουθεί τα πρότυπα IEEE 802.3, τα οποία ορίζουν τον τρόπο λειτουργίας του φυσικού επιπέδου και του επιπέδου διασύνδεσης του δικτύου. Στην εικόνα 77 φαίνεται το ποσοστό που καταλαμβάνουν τα δίκτυα βιομηχανικού Ethernet και Fieldbus σήμερα καθώς και ο ρυθμός αύξησής τους.[11]

Fieldbus vs. Industrial Ethernet



Εικόνα 77-Σύγκριση Fieldbus και Βιομηχανικού Ethernet

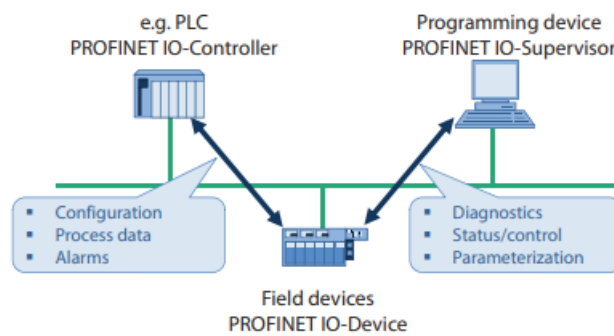
Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα του βιομηχανικού Ethernet είναι τα εξής :

1. Μπορεί να υποστηρίξει έως και 1000 συσκευές στο ίδιο δίκτυο. Οι τεχνολογίες fieldbus φτάνουν μέχρι 40 συσκευές.
2. Ο εξοπλισμός για την εγκατάσταση ενός βιομηχανικού Ethernet είναι φθηνότερος από την εγκατάσταση Fieldbus.
3. Μπορεί να φτάσει σε ταχύτητες έως 1Gbit/s, το οποίο είναι αρκετά υψηλότερο από την ταχύτητα που μπορούν να φτάσουν τα Fieldbus.
4. Προσφέρει εκτεταμένες δυνατότητες συνδεσιμότητας και μεταφοράς δεδομένων τόσο μεταξύ συσκευών όσο και με το Internet. Αυτό καθίστανται ιδιαίτερα σημαντικό λόγω της 4^{ης} βιομηχανικής επανάστασης με την εισαγωγή πολλαπλών αισθητήρων, αυτοματισμών και εφαρμογών τεχνητής νοημοσύνης.

Τα διαφορετικά δίκτυα βιομηχανικού Ethernet που χρησιμοποιούνται σήμερα είναι το Profinet, το EtherNet/IP, το EtherCAT, το Modbus TCP και το PowerLink.

4.4.1 Profinet

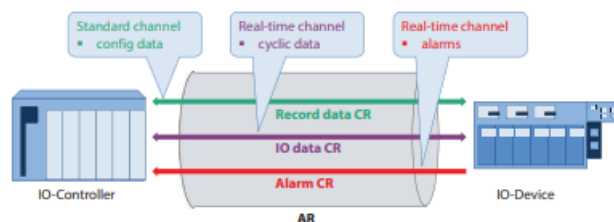
Το Profinet αποτελεί δίκτυο βιομηχανικού Ethernet ανοικτής πρόσβασης. Βρίσκεται στο επίπεδο εφαρμογής(Application Layer) του μοντέλου OSI. Υλοποιεί αποστολή δεδομένων σε Real-Time και διαμορφώνει τον χρόνο αποστολής ανάλογα με τις απαιτήσεις της κάθε εφαρμογής. Τα δεδομένα στέλνονται απευθείας από το επίπεδο ζεύξης δεδομένων στο επίπεδο εφαρμογής προσπερνώντας τα υπόλοιπα επίπεδα. Το Profinet αποτελείται από τον Ελεγκτή IO(IO Controller), τις Συσκευές IO(IO Devices) και τις Συσκευές Επίβλεψης IO(IO Supervisor).[12]



Εικόνα 78-Συσκευές Profinet

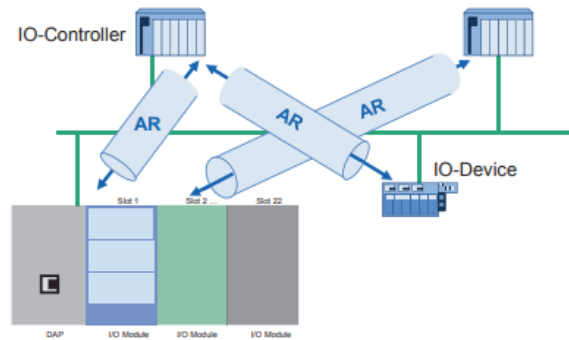
Το PLC αποτελεί συνήθως τον ελεγκτή IO, οι συσκευές IO βρίσκονται στην εκάστοτε βιομηχανική εγκατάσταση και αλληλοεπιδρούν με τον ελεγκτή και τον επιβλέπων, ενώ ο επιβλέπων IO βρίσκεται στην πλευρά του χρήστη και δέχεται ή παρουσιάζει πληροφορίες και εντολές.

Η επικοινωνία των συσκευών IO με τον ελεγκτή IO γίνεται με την χρήση των AR(Application Relation) και CR (Communication Relation).



Εικόνα 79-Επικοινωνία συσκευών Profinet

Πολλαπλοί ελεγκτές μπορούν να συνδεθούν στην ίδια συσκευή IO.



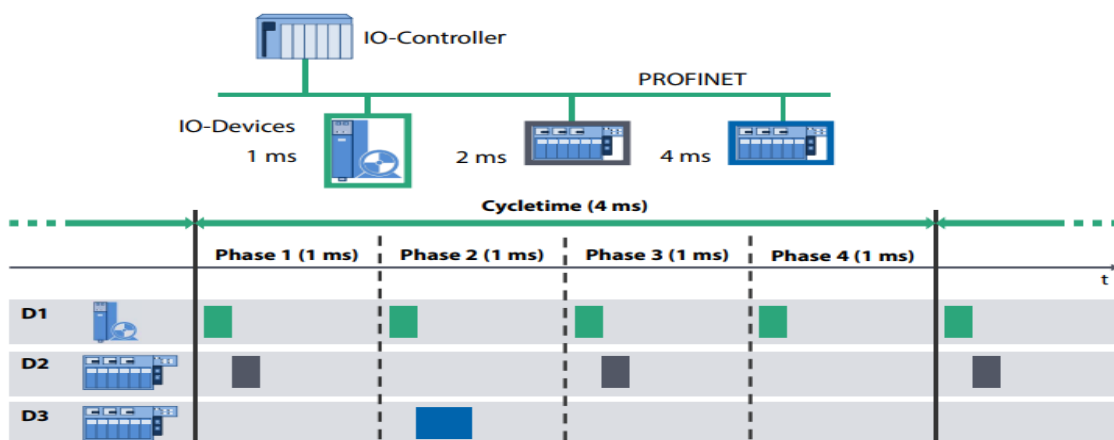
Εικόνα 80-Πολλαπλή διασύνδεση Profinet

Για την διευθυνσιοδότηση των συστημάτων στο Profinet χρησιμοποιούνται οι διευθύνσεις MAC. Η κάθε συσκευή χαρακτηρίζεται από έναν μοναδικό κωδικό MAC αποτελείται από τον κωδικό της εταιρείας(Company Code) και έναν συνεχή αναγνωριστικό αριθμό(Consecutive number).

Bit value 47 ... 24			Bit value 23 ... 0		
00	0E	CF	XX	XX	XX
Company code -> OUI			Consecutive number		

Εικόνα 81-Αναγνωριστικό Profinet

Οι βασικές λειτουργίες του Profinet περιλαμβάνουν την κυκλική διακίνηση δεδομένων, την μη κυκλική παραμετροποίηση και αναγνώρισης συστήματος και την διαγνωστική λειτουργία συσκευών και δικτύου. Στην κυκλική διακίνηση δεδομένων όλα τα δεδομένα εισόδου και εξόδου από τον ελεγκτή, τις συσκευές και τα υπόλοιπα υποσυστήματα μεταδίδονται σε έναν κύκλο λειτουργίας. Μια τυπική διαδικασία φαίνεται στην εικόνα 82.



Εικόνα 82-Τυπική Διαδικασία επικοινωνίας Profinet σε έναν κύκλο λειτουργίας

Η μη κυκλική διακίνηση δεδομένων περιλαμβάνει την παραμετροποίηση των υποσυστημάτων, την επίβλεψη της λειτουργίας ενός συστήματος και διαγνωστικές διαδικασίες σφαλμάτων. Η διάγνωση δικτύου και συσκευών αποτελεί μια τυποποιημένη διαδικασία συλλογής δεδομένων από τα διάφορα υποσυστήματα έτσι ώστε να διαμορφωθεί μια συνολική εικόνα λειτουργίας του συστήματος και να προγραμματιστεί τυχόν συντήρησή του. [13]

4.4.2 EtherNet/IP

Το Ethernet/IP συμμορφώνεται με το πρότυπο CIP-Common Industrial Protocol που ορίζει προδιαγραφές λειτουργίας για βιομηχανικές εφαρμογές αυτοματισμού. Η λειτουργία του στηρίζεται σε κόμβους που επικοινωνούν μέσω Ethernet. Υπάρχει η δυνατότητα υλοποίησης τοπολογίας αστέρα(star) ή διαύλου(bus). Η ταχύτητα λειτουργίας μπορεί να φτάσει τα 10,100Mbps η 1Gbps. Σύμφωνα με το μοντέλο OSI, το Ethernet/IP υλοποιείται από το επίπεδο συνόδου(Session Layer) και άνω, δηλαδή το επίπεδο παρουσίασης (Presentation Layer) και εφαρμογής (Application Layer). Από τον επίπεδο μεταφοράς(Transport Layer) και κάτω υλοποιούνται οι αρχιτεκτονικές που ορίζονται από το πρότυπο CIP. Στο φυσικό επίπεδο(Physical Layer) το δίκτυο υλοποιείται συνήθως με συνδέσεις σημείο προς σημείο και τοπολογία αστέρα. Χρησιμοποιούνται μεταγωγείς (Switches) οι οποίοι συνδέουν και απομονώνουν συσκευές του συστήματος μέσω καλωδίων χαλκού, χαλκού υψηλής ταχύτητας, οπτικές ίνες καλώδια συνεστραμμένου ζεύγους ενώ ανάλογα με το περιβάλλον λειτουργίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν καλώδια αντοχής σε υγρασία, σκόνη και θόρυβο.

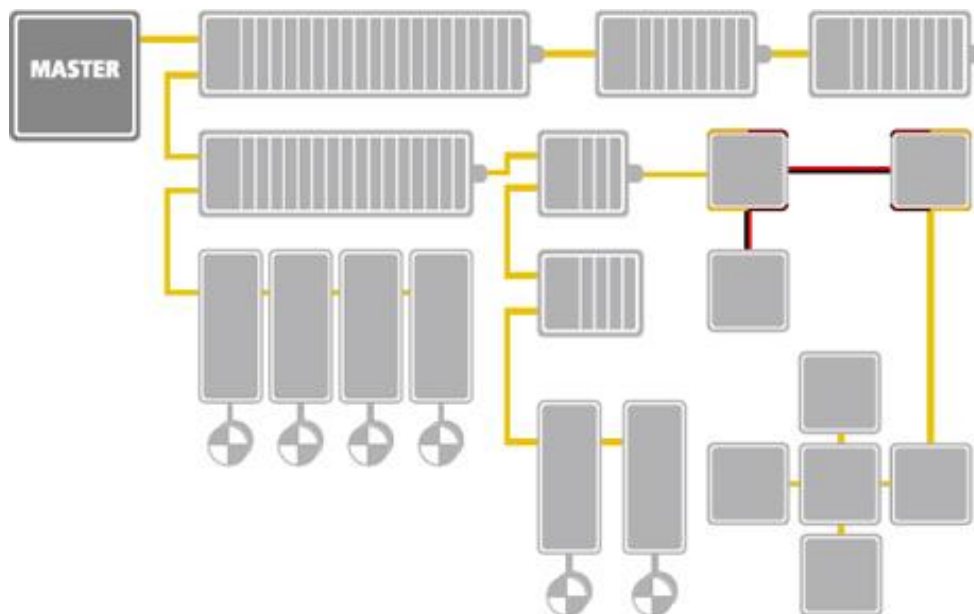
Στο επίπεδο ζεύξης δεδομένων υλοποιείται η μέθοδος CSMA/CD(Carrier Sense Multiple Access/Collision Detection), η οποία καθορίζει τον τρόπο που κάθε συσκευή αξιοποιεί τα μέσα μεταφοράς των δεδομένων(καλώδια και διασυνδέσεις) και αντιμετωπίζει τις συγκρούσεις δεδομένων. Χρησιμοποιεί σύστημα Ethernet διπλής όψης(Full Duplex) που επιτρέπει σε κάθε συσκευή του συστήματος να στέλνει και να λαμβάνει πληροφορίες την ίδια χρονική στιγμή. Η διευθυνσιοδότηση γίνεται με βάση το πρωτόκολλο Media Access Control(MAC). Η κάθε συσκευή έχει μοναδικό χαρακτηριστικό. [15]

Στο επίπεδο δικτύου(Network Layer) και μεταφοράς (Transport Layer) υλοποιείται το TCP/IP(Transmission Control Protocol/Internet Protocol), που υλοποιεί τους μηχανισμούς για την διασύνδεση των συσκευών και την μεταφορά δεδομένων. Πέρα του TCP/IP

υπάρχει η δυνατότητα υλοποίησης και του UDP/IP έτσι ώστε να υπάρχει μεταφορά δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Αυτό είναι απαραίτητο σε εφαρμογές που απαιτούν γρήγορη μεταφορά δεδομένων λόγω ευαισθησίας σε χρονικά περιθώρια. Στα ανώτερα επίπεδα η υλοποίηση του συστήματος στηρίζεται σε αντικειμενοστραφές πρωτόκολλο. Κάθε αντικείμενο του συστήματος έχει συγκεκριμένα δεδομένα, συγκεκριμένες υπηρεσίες που επιτελεί και συγκεκριμένη λειτουργία-συμπεριφορά. Επίσης, υπάρχουν προφίλ λειτουργίας. Το κάθε προφίλ υλοποιεί μια συγκεκριμένη ρουτίνα που αξιοποιεί διάφορα αντικείμενα του συστήματος, συσκευές εισόδου εξόδου κ.α. [15]

4.4.3 EtherCAT

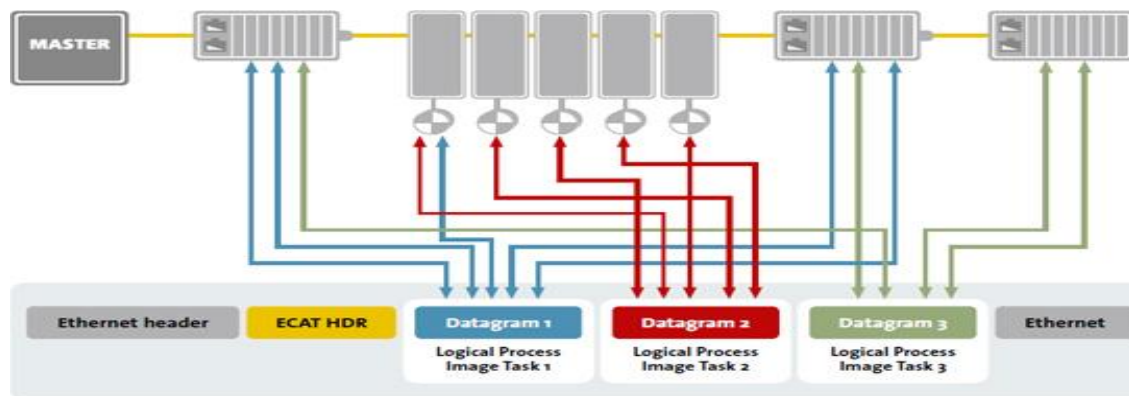
Το EtherCAT(Ethernet for Control Automation Technology) αναπτύχθηκε από την ομώνυμη εταιρεία το 2003. Χρησιμοποιεί την λογική master-slave. Ο κόμβος που αποτελεί τον master στέλνει μήνυμα που περνά από όλους τους κόμβους slave. Ο κάθε κόμβος slave αντλεί από το μήνυμα την πληροφορία που αντιστοιχεί στην λειτουργία του. Όταν το μήνυμα φτάσει στον τελευταίο κόμβο του δικτύου, τότε το μήνυμα στέλνεται πίσω στον master. Ο ρυθμός μετάδοσης των δεδομένων στο μήνυμα που αποστέλλει ο master μπορεί να φτάσει άνω των 100Mbit/s. Η χρήση των πρωτοκόλλων TCP/IP και UDP μπορούν προαιρετικά να χρησιμοποιηθούν. Το EtherCAT μπορεί να υλοποιήσει όλες τις πιθανές τοπολογίες δικτύων με αρκετούς κόμβους σε σύνδεση. [16]



Εικόνα 83-Διαφορετικές τοπολογίες EtherCAT[16]

Κατά την εκκίνηση του δικτύου, ο κόμβος Master υλοποιεί την σύνδεση με τους κόμβους slave. Ρυθμίζει τις οδούς και την πληροφορία για αποστολή σε κάθε κόμβο. Η κάθε σύνδεση μπορεί να περιέχει διαφορετικό τύπο δεδομένων, διαφορετική ποσότητα και διαφορετική ταχύτητα. Ο master χρησιμοποιεί πλαίσιο δεδομένων Ethernet (Ethernet Frames). Σε αυτό καθορίζονται αναγνωριστικά πλαίσιοι, διευθύνσεις των συσκευών και δεδομένα.

Το EtherCAT προσφέρει ταχύτητα, ασφαλή μετάδοση δεδομένων, μειωμένο συνωστισμό στο δίκτυο και μειωμένο κόστος υλικού.

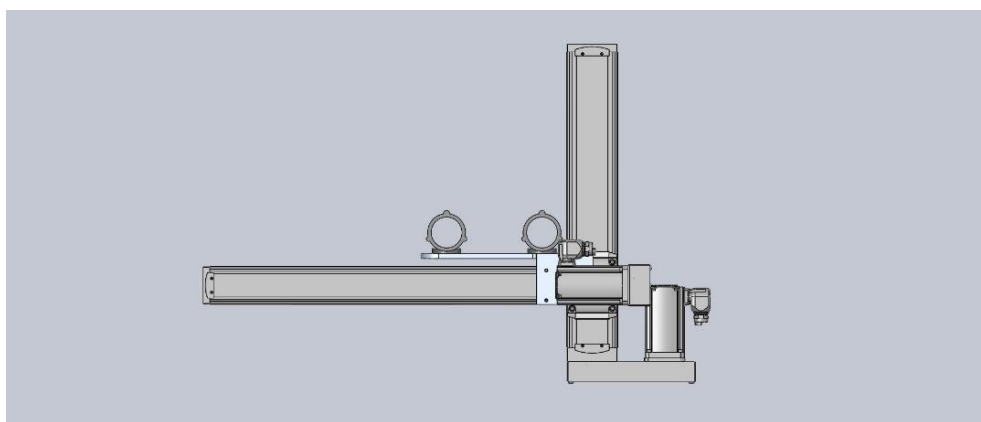


Εικόνα 84-Πλαίσιο δεδομένων(Data Frame) Ethernet

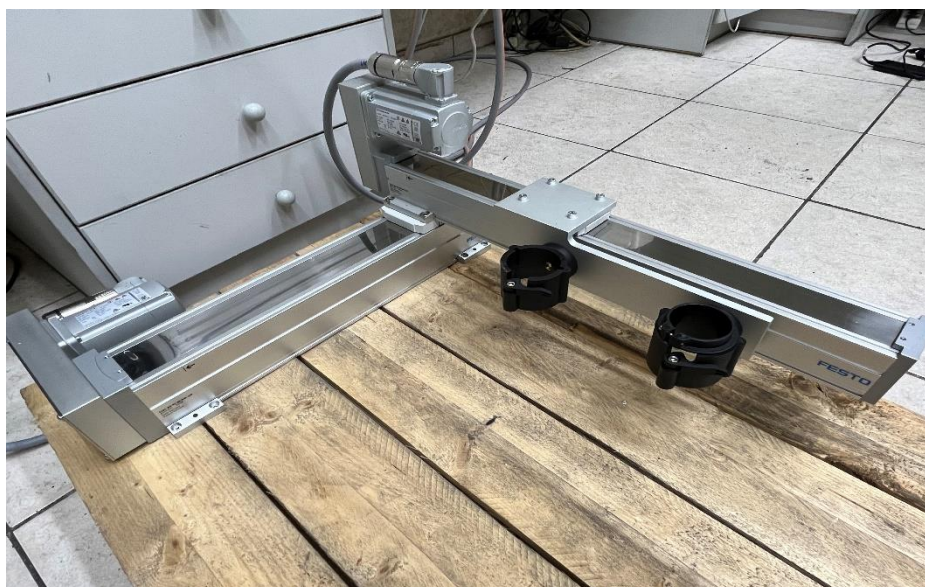
Κεφάλαιο 5. Εφαρμογή (Γραμμικός οδηγός 2 αξόνων)

5.1 Περιγραφή συστήματος

Σε αυτή την ενότητα θα γίνει περιγραφή της εφαρμογής του τρόπου ελέγχου των σερβοκινητήρων μέσω ενός ολοκληρωμένου συστήματος αυτοματισμού. Δηλαδή θα γίνει έλεγχος των σερβοκινητήρων μέσω ενός PLC (Programmable logical controller) που θα εκτελεί διάφορες διεργασίες. Ο σκοπός της εφαρμογής είναι η πολλαπλή εκτύπωση ετικετών με μεγάλη ακρίβεια σε πολλαπλά σημεία. Η εφαρμογή αυτή υλοποιείται σε εργοστάσια παρασκευής τροφίμων ή φαρμάκων όπου χρειάζεται να τυπωθεί η ετικέτα με διάφορες πληροφορίες για το προϊόν.



Εικόνα 85- CAD Γραμμικού οδηγού 2 αξόνων



Εικόνα 86-Γραμμικός οδηγός 2 αξόνων

5.2 Μέρη του συστήματος

Το σύστημα που θα περιγράψουμε αποτελείται από τα εξής μέρη:

- 1 μονάδα CPU Festo CPX-E-CEC-C1
- 1 Κάρτα εισόδων CPX-E-16DI
- 1 Κάρτα εξόδων CPX-E-8DO
- 2 Σερβοεπισχητές Festo CMMT-AS-CE-3-11A-P3-EC-S1
- 2 καλώδια σερβοκινητήρων NEBM-M23G15-EH-10-Q7N-R3LEG14
- 2 Σερβοκινητήρες Festo EMMT-AS-60-S-HS-RM
- 1 Γραμμικό οδηγό Festo ELGC-BS-KF-80-300-16P
- 1 Γραμμικό οδηγό Festo ELGC-BS-KF-60-400-12P
- 1 οθόνη HMI 7” Festo CDPX-X-B-W-7
- 1 Τροφοδοτικό 24VDC
- 1 μονάδα ρελέ ασφαλείας
- 4 Ηλεκτρονόμους

5.3 PLC (Programmable logical controller)

Τα πρωτοκολλά επικοινωνίας που χρησιμοποιούνται για την λειτουργία του συστήματος αυτοματισμού είναι το EtherCAT το οποίο συνδέει το Plc με του σερβοενισχητές και μέσω ethernet το πρωτόκολλο CODESYS V3.0 για την επικοινωνία του HMI με το PLC.

Το PLC είναι το κεντρικό σημείο του συστήματος αυτοματισμού όπου εκτελεί όλες τις διεργασίες του συστήματος αλλά και όλους τους υπολογισμούς για τις θέσεις των σερβοκινητήρων. Ο προγραμματισμός του PLC έγινε μέσα από το πρόγραμμα Festo Automation Suite.



Εικόνα 87- Festo CPU CPX-E-CEC-C1

Μέσω του Plc πραγματοποιείτε ο έλεγχος των σερβοκινητήρων. Το plc ελέγχει το ξεκίνημα το σταμάτημα και διαβάζει την ακριβή θέση των σερβοκινητήρων πάνω στους γραμμικούς οδηγούς. Επικοινωνεί μέσω του πρωτοκόλλου codesys v3.0 με το HMI screen και έτσι επιτρέπει στο χειριστή να ενημερώνεται για την θέση των σερβοκινητήρων για την πορεία της παραγωγής για την κατάσταση του γραμμικού οδηγού αλλά τον ενημερώνει και για πιθανά σφάλματα. Επίσης επιτρέπει στο χειριστή να κάνει αλλαγές στις ρύθμισης ταχύτητας των σερβοκινητήρων να επιλέξει διαφορετικές συνταγές αλλά και να κάνει αλλαγές στα σημεία της εκτύπωσης ανάλογα με το προϊόν.

5.4 Human machine interface



Εικόνα 88- HMI 7" Festo CDPX-X-B-W-7

- Μέσω του Human machine γίνεται η επικοινωνία του ανθρώπινου παράγοντα με το σύστημα.
- Στο HMI φαίνεται η ταχύτητα με την οποία κινούνται οι σερβοκινητήρες και τα πολλαπλά σημεία εκτυπώσεων η κατάσταση την οποία βρίσκεται ο γραμμικός οδηγός αλλά και η λίστα των ενεργών σφαλμάτων.
- Ο χειριστής μπορεί να δημιουργεί δίκες του ρυθμίσεις και συνταγές ανάλογα με το εκάστοτε προϊόν .

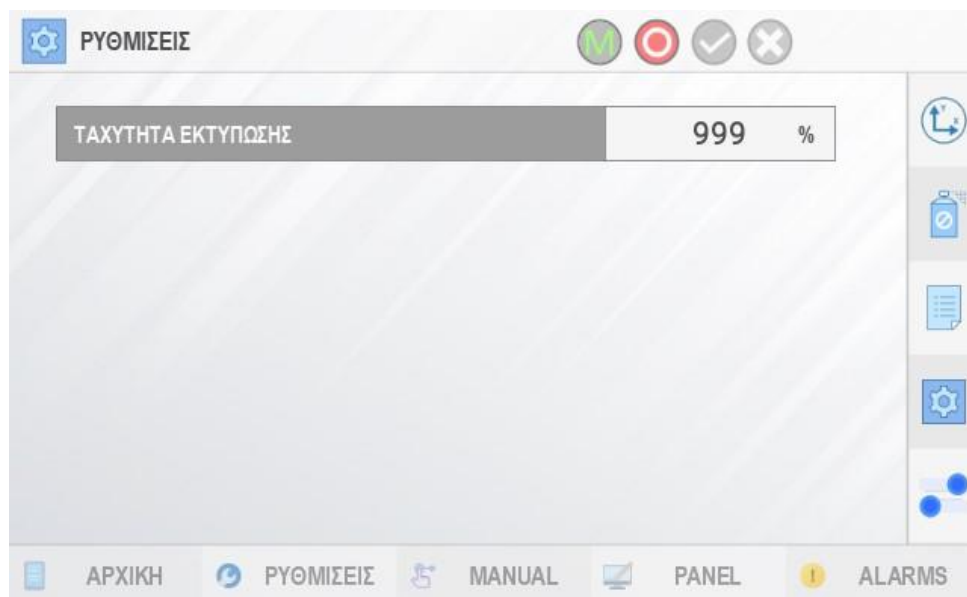
5.4.1 Οθόνες χειρισμού συστήματος

- Σε αυτή την οθόνη ο χειριστής μπορεί να ορίσει τα σημεία τα οποία θα γίνουν οι εκτυπώσεις του γραμμικού οδηγού σε κανονική κίνηση αλλά και κατά την επιστροφή του.
- Με την επιλογή ON/OFF μπορεί να ενεργοποιήσει ή να απενεργοποιήσει τις κεφαλές εκτύπωσης.



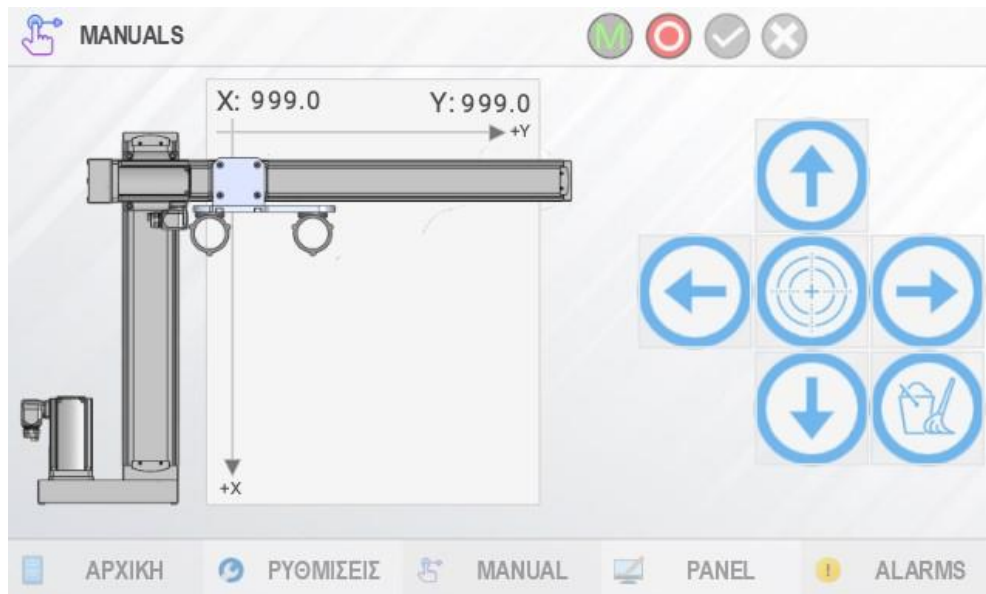
Εικόνα 89- HMI 7" Festo CDPX-X-B-W-7

- Σε αυτήν την οθόνη ο χειριστής μπορεί να ορίσει την ταχύτητα εκτύπωσης του γραμμικού οδηγού.



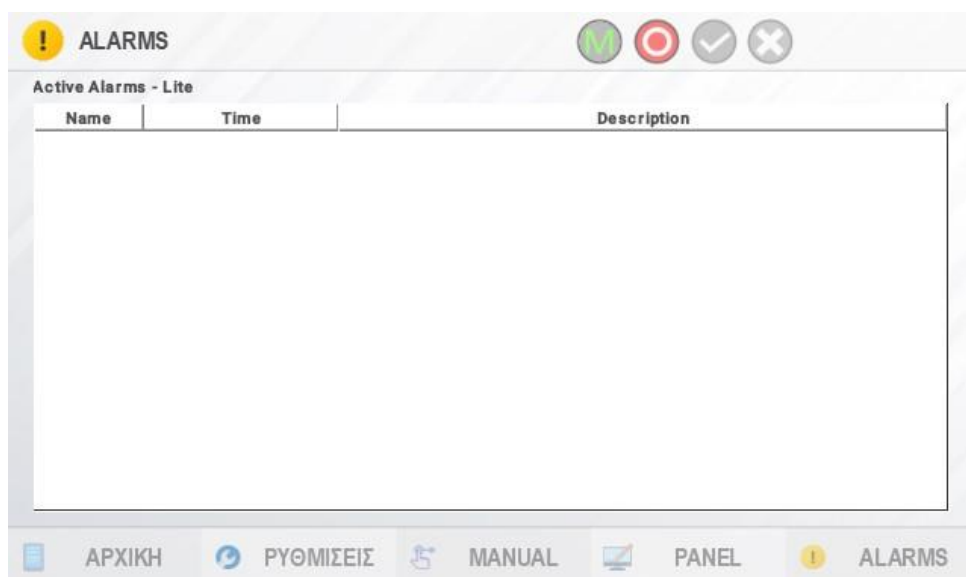
Εικόνα 90- HMI 7" Festo CDPX-X-B-W-7

- Σε αυτήν τη οθόνη ο χειρίστης μπορεί με την λειτουργία χειροκίνητα να μετακινήσει τον γραμμικό οδηγό σε οποίο σημείο επιθυμεί και να βλέπει σε πραγματικό χρόνο που ακριβώς βρίσκεται.



Εικόνα 91- HMI 7" Festo CDPX-X-B-W-7

- Επιλογή Alarms ο χειριστή μπορεί να παρατηρεί τα ενεργά σφάλματα του συστήματος αλλά και το ιστορικό των σφαλμάτων.



Εικόνα 92- HMI 7" Festo CDPX-X-B-W-7

5.5 Σύστημα Κίνησης

5.5.1 Σερβοενισχυτές

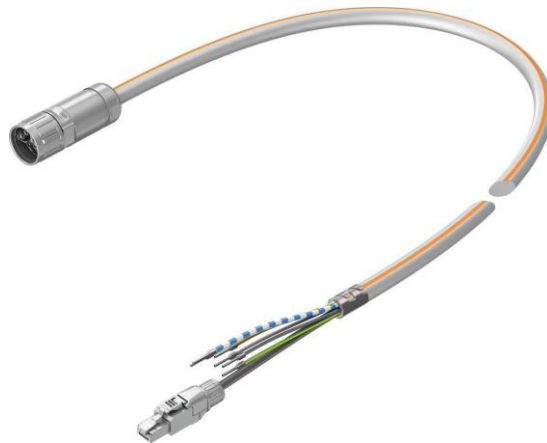
- Διαθέτει μεγάλο εύρος για οδήγηση συγχρόνων σερβοκινητήρων.
- Έχει ενσωματωμένα φίλτρα για προστασία από παράσιτα άλλων τάσεων.
- Έχει ενσωματωμένη λειτουργία ασφαλείας.
- Ελέγχει την ακριβή θέση του σερβοκινητήρα.
- Την ακριβή ταχύτητα.
- Έχει μεγάλο εύρος για τον έλεγχο παραμέτρων του σερβοκινητήρα.
- Υποστηρίζει όλα τα βιομηχανικά δίκτυα όπως EtherCAT, Profinet , Ethernet/IP, Modbus TCP.



Εικόνα 93- FESTO CMMT-AS-CE-3-11A-P3-EC-SI

5.5.2 Σύνδεση σερβοενισχυτή με σερβοκινητήρα

- Το καλώδιο αυτό βασίζεται στο πρωτόκολλο EN-61984.
- Έχει βαθμό προστασίας IP67.
- Είναι θωρακισμένο.
- Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μεγάλο εύρος θερμοκρασίας.
- Περιλαμβάνει τα καλώδια τροφοδοσίας του σερβοκινητήρα αλλά και το καλώδιο δικτύου EtherCAT.



Εικόνα 94- NEBM-M23G15-EH-10-Q7N-R3LEG14

5.5.3 Σερβοκινητήρες

Ο συγκεκριμένος σερβοκινητήρας χαρακτηρίζεται από ακριβή και γρήγορη παραγωγή κίνησης και πολύ υψηλή αντοχή στην καταπόνηση κατά την λειτουργία του.

Τεχνικά χαρακτηριστικά σερβοκινητήρα :

- Μήκος κίνησης: 60mm
- Ροπή: 90 N
- Ακρίβεια επανάληψης: $\pm 0,03\text{mm}$
- Ταχύτητα: 0,07 έως 0,22 m/s
- Κατανάλωση : 4.8 W
- Κατηγορία προστασίας: IP40
- Θερμοκρασία λειτουργίας: $0^{\circ}\text{C} - 55^{\circ}\text{C}$
- Υλικό περιβλήματος: Αλουμίνιο ανοδιωμένο



Εικόνα 95- FESTO EMMT-AS-60-S-HS-RM

Συμπέρασμα

Στη διπλωματική εργασία αναλυθήκαν τρόποι ελέγχου κινητήρων με σύγχρονα μέσα για τη βιομηχανία. Βασικό συμπέρασμα στο οποίο καταλήγουμε είναι ότι οι σύγχρονες και πολύπλοκες εφαρμογές μπορούν να επιτευχθούν με το κατάλληλο εξοπλισμό. Ενώ παλιότερα ο έλεγχος ενός κινητήρα ήταν μια δύσκολη διαδικασία πλέον με την εξέλιξη της τεχνολογίας και μέσω των Soft starter, VFD, Servo drives και τα νέα είδη κινητήρων είναι ευκολά προσιτά στο προγραμματισμό τους και πιο απλοποιημένα για περισσότερους ανθρώπους και επίσης οι ταχύτητες παραγωγής των μηχανών έχουν αυξηθεί σε τεράστιο βαθμό. Καταλήγουμε στο ότι ο έλεγχος κίνησης είναι τεράστιο και πολύ σημαντικό κομμάτι της βιομηχανίας.

Βιβλιογραφία

- [1] A. Hughes and B. Drury. *Electric Motors and Drives: Fundamentals, Types and Applications*. Elsevier Science, ISBN: 9780080993683, 2013.
- [2] H. Gurocak. *Industrial Motion Control: Motor Selection, Drives, Controller Tuning, Applications*. Wiley, ISBN: 9781118403204, 2015.
- [3] C. Liu, “Emerging Electric Machines and Drives — An Overview,” in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 33, no. 4, pp. 2270-2280, Dec. 2018, doi: 10.1109/TEC.2018.2852732.
- [4] Μαδεμλής Χ.(2016). *Σερβοκινητήρια Συστήματα: Επαγωγικοί Κινητήρες και Σύγχρονοι Κινητήρες Μόνιμου Μαγνήτη*. Εκδόσεις Τζιόλα.
- [5] B.K. Bose. *Modern Power Electronics and AC Drives*. Prentice Hall PTR, ISBN: 9789332557550, 2002.
- [6] Krishnan R. (2001). *Electric Motor Drives: Modeling, Analysis and Control*. Prentice Hall.
- [7] Chapman S. (2005). *Electric Machinery Fundamentals*. Mc Graw Hill.
- [8] K. Kamel and E. Kamel. *Programmable Logic Controllers: Industrial Control*. McGraw Hill LLC, ISBN: 9780071810470,2013.
- [9] Microchip Technology (2004). *Stepping Motor Fundamentals-AN907*.
- [10] J.F. Hooper. *Introduction to PLCs*. Carolina Academic Press, ISBN: 9780890893890, 2005
- [11] D.S. Kim and H. Tran-Dang. *Industrial Sensors and Controls in Communication Networks: From Wired Technologies to Cloud Computing and the Internet of Things*. Springer International Publishing, series: Computer Communications and Networks, ISBN: 9783030049263, 2019.
- [12] R. Pigan and M. Metter. *Automating with PROFINET: Industrial Communication Based on Industrial Ethernet*. Wiley, ISBN: 9783895789502, 2015.
- [13] Profinet Technology. <https://us.profinet.com/technology/profinet/>.
- [14] M.Soltero, J.Zhang and Cockrill.(2010). *RS-422 and RS-485 Standards Overview and System Configurations*. Texas Instruments.
- [15] EtherNet/IP TM-CIP on Ethernet Technology (2021). ODVA.
- [16] EtherCAT Technology Group. (n.d.). *EtherCAT Technology Group EtherCAT*. <https://www.ethercat.org/en/technology.html>
- [17] Siemens (2016). *SINAMICS Safety Integrated*.
- [18] Siemens (2016). *S7-1200: Application Examples for High-Speed Counters (HSC)*.
- [19] PROFIBUS System Description. *Technology and Application North America* (2016).
- [20] Safety Torque off <https://www.wolfautomation.com/blog/sto/>
- [21] https://www.festo.com/gr/en/c/products/industrial-automation/motors-and-servo-drives-id_pim13/