



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:

«ΕΛΕΓΧΟΣ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΣΤΗΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ»

ΟΝΟΜΑ ΦΟΙΤΗΤΗ : ΜΠΕΚΙΟΣ ΙΩΑΝΝΗΣ 71446169

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΠΑΠΟΥΤΣΙΔΑΚΗΣ ΜΙΧΑΗΛ

ΔΙΔΑΧΗ ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2021

ΜΕΛΗ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗΣ

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

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Μπέκιος Ιωάννης του Αντωνίου, με αριθμό μητρώου 71446169 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

Μπέκιος Ιωάννης



Ευχαριστίες

Ευχαριστώ θερμά τους γονείς μου, τους φίλους και συμφοιτητές μου Θανάση και Κώστα για την υποστήριξη τους όλο το διάστημα των σπουδών μου, τους υπεύθυνους καθηγητές μου κ.Θεοχάρη Ευστάθιο και κ.Μιχαήλ Παπουτσιδάκη για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του στην μελέτη της πτυχιακής εργασίας. Τέλος θέλω να ευχαριστήσω τους συναδέλφους μου και την εταιρεία Prima Optis Ltd για την βοήθεια τους όλα αυτά τα χρόνια.

Περιεχόμενα

Εισαγωγή	7
1.Περιγραφή λειτουργίας Soft Starter για οδήγηση AC κινητήρα	9
1.1 Λειτουργία ,εφαρμογές soft starter	9
1.2 Μέθοδοι εκκίνησης	9
2.Περιγραφή λειτουργίας VFD για οδήγηση AC κινητήρα	14
2.1 Αρχή λειτουργίας	14
2.2 Βασικά μέρη	19
2.3 Μέθοδοι ελέγχου	21
2.3.1 PWM	21
2.3.2 Στρατηγική κλιμακωτού ελέγχου (Scalar Control Methods)	23
2.3.2.1 V/ f (volts-per-hertz)	23
2.3.2.2 V / f με encoder	25
2.3.3 Στρατηγική Διανυσματικού ελέγχου (Vector Control Methods)	25
2.3.3.1 Ανοιχτού βρόχου	25
2.3.3.2 Κλειστού Βρόχου	27
2.4 Πρωτόκολλα Επικοινωνίας	28
2.4.1 Profibus	28
2.4.1.1 Αρχιτεκτονική πρωτοκόλλου Profibus	29
2.4.2 Modbus	31
2.4.3 Profinet	34
2.4.3.1 Σύγκριση Profibus - Profinet	37
3. Περιγραφή λειτουργίας Servo Drive για οδήγηση Servo κινητήρα	39
3.1 Τύποι σερβοκινητήρων	40
3.1.1 Επαγωγικοί σερβοκινητήρες	41
3.1.1.1 Δομή AC κινητήρα	41
3.1.1.2 Λειτουργία Ac κινητήρα	41
3.1.2 Σερβοκινητήρες συνεχούς ρεύματος	42
3.1.2.1 Δομή DC κινητήρα	42
3.1.3 Σύγχρονοι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη	44
3.1.4 Υδραυλικός σερβοκινητήρας	46
3.1.5 Πνευματικός σερβοκινητήρας	46
3.2 Οδήγηση και αίσθηση	47
3.2.1 Σερβοενισχυτής (servo drivers)	47
3.2.2 Μέθοδος οδήγηση κινητήρα συνεχούς ρεύματος	54
3.2.2.1 Πλήρως ελεγχόμενη τριφασική γέφυρα	58
3.2.3 Μέθοδος οδήγηση κινητήρα επαγωγικού ρεύματος	59
3.3 Ανάδραση σερβοκινητήριων συστημάτων	60

3.3.1 Ταχογεννήτρια	60
3.3.2 Resolver	61
3.3.3 Encoders	63
3.3.3.1 Optical Rotary Encoder	63
3.3.3.2 Linear Encoders	65
3.3.4 Αισθητήρες θέσης Hall	66
4. Περιγραφή λειτουργίας Stepper κινητήρα	68
4.1 Τύποι stepper motor	68
4.1.1 Μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης (variable-reluctance)	69
4.1.2 Μόνιμου μαγνήτη (permanent magnet)	73
4.1.3 Υβριδικοί κινητήρες (hybrid)	74
4.2 Οδήγηση Βηματικού κινητήρα	75
5. Εφαρμογή (Διπλωτική μηχανή χνουδωτών)	79
5.1 Περιγραφή του συστήματος	79
5.2 Μέρη του συστήματος	80
5.2.1 Το VFD (Variable Frequency Driver)	83
5.2.2 HMI Screen	84
5.2.3 Ρελέ Solid State	85
5.2.4 Φωτοκύτταρο	85
5.3 Τρόπος ελέγχου VFD	86
5.4 Human interface	90
5.5 Ηλεκτρολογικό Σχέδιο εφαρμογής	97
Συμπέρασμα	102
Βιβλιογραφίες	103

Εισαγωγή

Στην παρούσα Διπλωματική εργασία το αντικείμενο μελέτης είναι τα σύγχρονα συστήματα ελέγχου κινητήρων στην βιομηχανία. Θα παρουσιαστεί ο τρόπος λειτουργίας, η δομή και ο έλεγχος κινητήρων με Soft Starters και Variable Frequency Drivers σε ένα σύστημα αυτοματισμού. Στην συνέχεια θα παρουσιαστούν οι Servo Drivers ,οι σερβοκινητήρες και το πώς γίνεται ο έλεγχος τους. Το θεωρητικό κομμάτι θα κλείσει με την περιγραφή της λειτουργίας των Stepper κινητήρων. Τέλος γίνεται παρουσίαση μιας εφαρμογής ενός συστήματος αυτοματισμού με την χρήση Variable Frequency Drivers και PLC - Scada για μια μηχανή αυτόματου διπλώματος ματισμού.

Abstract

In the present thesis the object of study is the modern motor control systems in the industry. At the beginning will be presented the operation, structure and control of motors with Soft Starters and Variable Frequency Drivers in an automation system. In addition will be presented the Servo Drivers, servomotors and how to control them. The theoretical part will close with the description of the operation of Stepper motors. Finally the thesis will close with the application of an automation system using Variable Frequency Drivers and PLC - Scada for an automatic clothing folding machine.

1.Περιγραφή λειτουργίας Soft Starter για οδήγηση AC κινητήρα

1.1 Λειτουργία ,εφαρμογές soft starter

Οι soft starters ή αλλιώς ομαλοί εκκινητές έχουν τη δυνατότητα να επιταχύνουν σε πλήρη ταχύτητα αλλά και να επιβραδύνουν κινητήρες τριών φάσεων. Η λειτουργία τους αυτή, προστατεύει τους κινητήρες από την ηλεκτρική και μηχανική καταπόνηση. Αυτό συμβαίνει, διότι η ομαλή αύξηση της ταχύτητας σημαίνει ότι τα φορτία του ρεύματος θα είναι μικρότερα, με αποτέλεσμα να έχουμε μικρότερες θερμοκρασίες στον κινητήρα. Με την λειτουργία τους μπορούμε να επιτύχουμε μεγάλη εξοικονόμηση ενέργειας, λόγω του προσαρμοσμένου ελέγχου του κινητήρα και του πλήθους των δυνατοτήτων που μας δίνει ο προγραμματισμός τους (έλεγχος ροπής, φρενάρισμα του κινητήρα).[1]

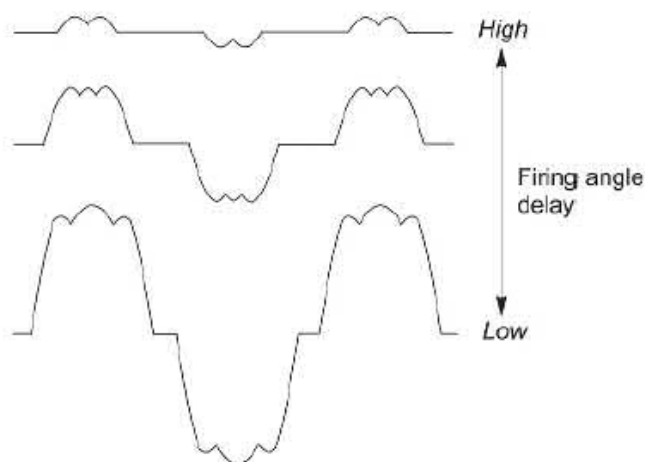
Οι soft starter έχουν φανεί πολύ χρήσιμοι για την βιομηχανία, γιατί με την εφαρμογή τους δεν επιτρέπουν πτώση τάσης στο δίκτυο, αποφεύγεται η φθορά του μηχανικού εξοπλισμού (αλυσίδες, ιμάντες, μειωτήρες). Επιπρόσθετα, είναι χρήσιμοι για εφαρμογές που η εκκίνηση δε γίνεται με πλήρη τάση αλλά και για αποφυγή απότομων αλλαγών στην εκκίνηση.[1][5]

Εφαρμογή που υπάρχει χρήση soft starter μπορεί να είναι ένας φυγοκεντρικός ανεμιστήρας εξαερισμού, ο οποίος λόγω του μεγάλου χρόνου αδράνειας κατά την εκκίνηση του είναι δυνατόν να υπάρχει πτώση τάσης στη βιομηχανία. Πολλοί ανεμιστήρες έχουν ιμάντες μετάδοσης κίνησης, οι οποίοι φθείρονται λόγω του ότι ολισθαίνουν. Για την επίλυση τέτοιων προβλημάτων πρέπει να μειωθεί η ροπής εκκίνησης του κινητήρα κατά την εκκίνηση.[2]

1.2 Μέθοδοι εκκίνησης

- Solid state

Η solid state είναι η πιο διαδεδομένη μέθοδος ομαλής εκκίνησης κινητήρων. Ο εκκινητής αυξάνει βηματικά το ρεύμα και την ροπή στον κινητήρα και ο χρόνος της επιτάχυνσης ρυθμίζεται σχετικά εύκολα μέσω του προγραμματισμού. Αυτός ο τρόπος οδήγησης έχει μειονέκτημα, ότι τα ρεύματα που οδηγούν τον κινητήρα δεν είναι τέλεια ημιτονοειδή και έτσι υπάρχει περίπτωση να έχουμε κάποιες παρεμβολές σε εξοπλισμό που βρίσκεται στην ίδια γραμμή ρεύματος. [3]



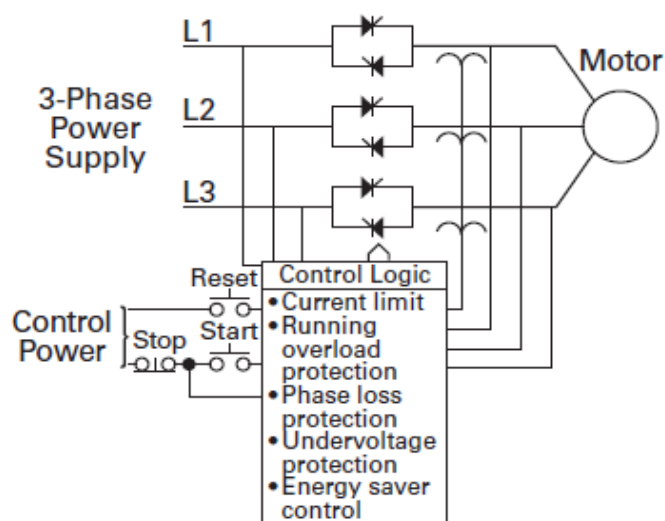
Σχήμα 1.2α Κυματομορφές ρεύματος soft-starter[3]

Η διάταξη που βλέπουμε πιο συχνά είναι τα τρία ζεύγη thyristor ή triacs που είναι σε σειρά συνδεδεμένα με τις 3 γραμμές τροφοδοσίας. Κάθε thyristor ενεργοποιείται μια φορά κάθε μισό κύκλο και η έναυση του παλμού για τη λειτουργία του συγχρονίζεται με την τροφοδοσία. Η γωνία έναυσης είναι μεταβλητή και έτσι κάθε ζεύγος thyristor μπορεί να ελέγχει τον κύκλο λειτουργίας του. Οι κυματομορφές δεν είναι πλήρως ημιτονοειδείς, αλλά μπορούν να δουλέψουν αρκετά καλά σε έναν ασύγχρονο κινητήρα. Υπάρχει μεγάλη ποικιλία στην φιλοσοφία του ελέγχου ενός ασύγχρονου κινητήρα και η επιλογή του γίνεται σύμφωνα με την πιο συμφέρουσα από την πλευρά του κόστους. [3]

Η φθηνότερη και πιο απλή είναι η αλλαγή της γωνίας λειτουργίας του thyristor γραμμικά με τον χρόνο, έτσι ώστε κατά την επιτάχυνση να αυξάνεται η τάση που οδηγεί το μοτέρ. Αυτή η προσέγγιση είναι λειτουργική, όταν το φορτίο παραμένει ίδιο και δεν μεταβάλλεται. Ο χρόνος της ράμπας μπορεί να βρεθεί με δοκιμές για να υπάρχει ένα

ικανοποιητικό αποτέλεσμα, δηλαδή να μη ξεπερνιέται ποτέ κατά την εκκίνηση το μέγιστο επιτρεπτό ρεύμα για την λειτουργία του εξοπλισμού. Ο προγραμματισμός τους μπορεί ωστόσο να φανεί δύσκολος σε περίπτωση που τα φορτία κατά την εκκίνηση είναι υψηλά και δεν υπάρχει κίνηση του κινητήρα στην αρχή της ράμπας. Αυτό σημαίνει, ότι το ροπή του κινητήρα δεν επαρκεί. Τα τελευταία χρόνια έχουμε δει και πιο εξελιγμένες μεθόδους ελέγχου ανοικτού βρόχου που φαίνονται χρήσιμοι σε τέτοιου είδους φορτία. [3]

Με την εξέλιξη των συστημάτων ελέγχου, πλέον έχουμε στη διάθεση μας πιο πολλά εργαλεία που προσφέρουν πιο αυστηρό έλεγχο της επιτάχυνσης βάζοντας έναν εσωτερικό βρόχο ελέγχου ρεύματος. Έτσι, το ρεύμα διατηρείται σταθερό κατά τη διάρκεια της επιτάχυνσης, ενώ η γωνία λειτουργίας (έναυσης) των thyristor προσαρμόζεται ανάλογα με την αντίσταση που βρίσκει ο κινητήρας . [3]



Σχήμα 1.2β Κύκλωμα θυρίστορ ομαλού εκκινήτη (soft-starter)[5]

- Selectable kick start

Σε αυτή την μέθοδο παρέχεται μεγάλη ώθηση (Τα thyristor έχουν μεγάλη γωνία) κατά την εκκίνηση, για να μπορέσει ο κινητήρας να ξεκολλήσει τα φορτία που χρειάζονται στιγμιαία ροπή για να μειωθούν. Έτσι, κατά την εκκίνηση βλέπουμε έναν μεγάλο παλμό ρεύματος, που εμείς ορίζουμε τη διάρκεια για συγκεκριμένο χρόνο.

- Current limit start

Σε αυτή την μέθοδο ο χρήστης δίνει τιμή στο μέγιστο ρεύμα που μπορεί ο soft starter να παρέχει και χρησιμοποιείται, όταν είναι απαραίτητο να περιοριστεί το μέγιστο ρεύμα εκκίνησης. [4]

- Dual-ramp start

Με τη Dual-ramp start ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να συνδυάσει δύο ξεχωριστά προφίλ, προγραμματίζοντας ξεχωριστά χρόνους ράμπας και δίνοντας αρχικές ρυθμίσεις για την ροπή του συστήματος. Αυτή η μέθοδος έχει χρησιμότητα σε εφαρμογές που υπάρχουν ποικίλα φορτία και διαφορετικές ροπές εκκίνησης. Σε συνδυασμό με τις άλλες δύο παραμέτρους είναι σημαντικός και ο χρόνος έναρξης της κίνησης. [4]

- Full-voltage start

Αυτή η μέθοδος μοιάζει με την απόκριση που έχει ένας κινητήρας με οδήγηση από ρελέ. Δίνεται πλήρες ρεύμα απευθείας στον κινητήρα. Το soft starter προγραμματίζεται, έτσι ώστε να δοθεί απευθείας πλήρες φορτίο στο μοτέρ σε μηδενικό χρόνο.

- Linear speed acceleration

Με τη μέθοδο Linear speed acceleration το σύστημα ανατροφοδότησης κλειστού βρόχου διατηρεί την επιτάχυνση του κινητήρα σταθερή με την βοήθεια ενός DC στροφόμετρο συνδεδεμένο με τον κινητήρα. Το στροφόμετρο δίνει ένα αναλογικό σήμα στον κλειστό βρόχο και έτσι γίνεται ο έλεγχος.

- Preset slow speed

Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται για εφαρμογές που χρειάζεται μικρή ταχύτητα και ακρίβεια στην κίνηση. Δίνεται η δυνατότητα να περιοριστεί ο κινητήρας σε μικρές ταχύτητες της τάξης του 7% ίσως και 15%, για συγκεκριμένο χρόνο και έτσι είναι εύκολος ο προγραμματισμός τους.

- Soft Stop

Η επιλογή soft stop μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές που απαιτούν χρόνο διακοπής. Ο χρόνος αύξησης τάσης μπορεί να ρυθμιστεί με τιμή από 0 έως 120

δευτερόλεπτα. Το φορτίο θα σταματήσει, όταν η τάση πέσει σε σημείο όπου η ροπή του φορτίου είναι μεγαλύτερη από τη ροπή του κινητήρα. [4]

2.Περιγραφή λειτουργίας VFD για οδήγηση AC κινητήρα

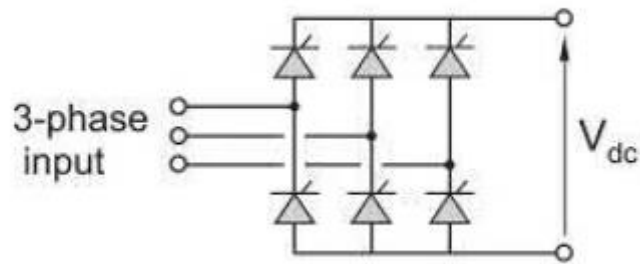
Οι επαγωγικοί κινητήρες είναι οι πιο συνηθισμένοι τριφασικοί κινητήρες που χρησιμοποιούνται σε εμπορικές και βιομηχανικές εφαρμογές. Η προτιμώμενη μέθοδος ελέγχου ταχύτητας για κινητήρες επαγωγής, είναι να αλλάξουν τη συχνότητα της τάση τροφοδοσίας και με αυτόν τον τρόπο να μπορέσουν να ελέγξουν ένα κινητήρα τέτοιου είδους. Εκτός από το όνομα VFD πολύ συχνά μπορούμε να το συναντήσουμε σε διάφορες βιβλιογραφίες και σαν adjustable-speed drive (ASD), adjustable-frequency drive (AFD), variable-speed drive (VSD), and frequency converter (FC). Ένα VFD ελέγχει την ταχύτητα, τη ροπή και την κατεύθυνση ενός επαγωγικού κινητήρα AC. Είναι πολύ σημαντικό για τη λειτουργία του να υπάρχει σταθερή τάση και συχνότητα τροφοδοσίας του εξοπλισμού αλλιώς υπάρχουν προβλήματα κατά την μετατροπή της τάσης και συχνότητας εξόδου του driver.

2.1 Αρχή λειτουργίας

Η λειτουργία κάθε μπλοκ έχει ως εξής:

- **Converter:**

Είναι ένας ανορθωτής πλήρους κύματος που μετατρέπει το εφαρμοσμένο ρεύμα AC τροφοδοσίας σε DC. Τα στοιχεία της ανόρθωσης φαίνονται στη φωτογραφία 2.1.α . Η τριφασική γέφυρα ανόρθωσης έχει 6 thyristor για την τριφασική ανόρθωση. Για κάθε ημιτονοειδές κύκλο υπάρχουν έξι παλμοί για την λειτουργία των thyristor. Τα thyristor ενεργοποιούνται σε ζευγάρια των 2, ένα στην πάνω μεριά της γέφυρας και ένα στην κάτω. Το κάθε ζεύγος thyristor λειτουργεί για το ένα τρίτο του χρόνου του κύκλου.



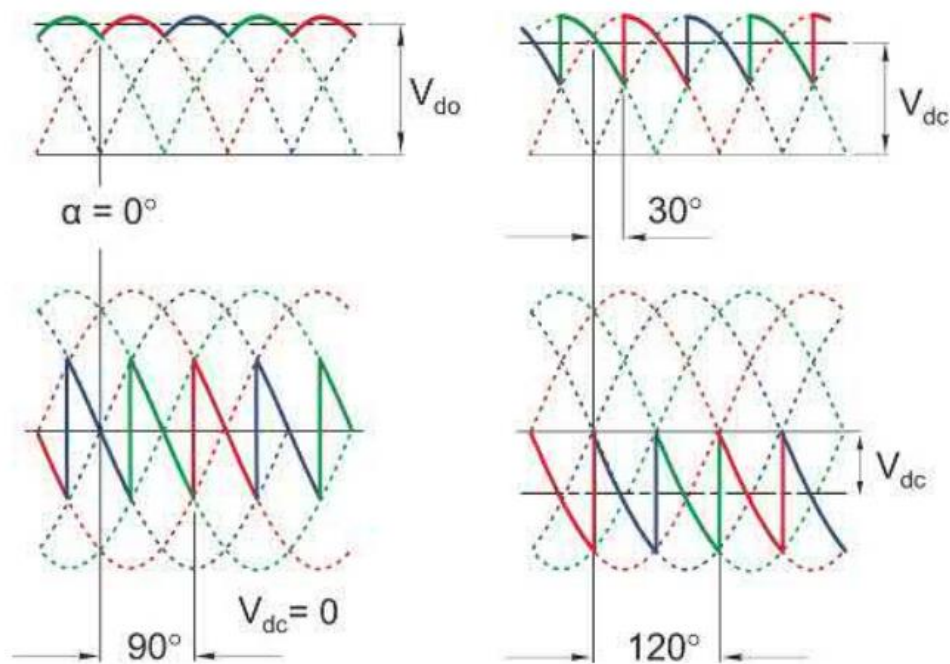
Σχήμα 2.1.α Γέφυρα ανόρθωσης [3]

Ανάλογα με τον χρόνο καθυστέρησης της γωνία έναυσης των thyristor αλλάζουμε την ανόρθωση, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.1.β . Στα τριφασικά συστήματα η γωνία έναυσης των thyristor ρυθμίζεται σε $\alpha=0$ μοίρες, διότι έτσι πετυχαίνουμε ικανοποιητική ανόρθωση. Έχοντας τόσο καλή ανόρθωση από το τριφασικό ρεύμα, που συνεπάγεται καλό DC ρεύμα, μας βοηθάει να πετύχουμε πολύ καλύτερο έλεγχο στην δημιουργία της εξόδου του inverter στον αντιστροφέα.

Μερικές φορές θεωρείτε, ότι το DC ρεύμα από την ανόρθωση δεν είναι ικανοποιητικό, γι' αυτό σε μεγάλα συστήματα μπορούμε να παρατηρήσουμε, ότι υπάρχουν και δυο γέφυρες από έξι thyristor. Αλλάζοντας την γωνία έναυσης, επειδή έχουμε αυτή τη φορά 12 παλμούς, μπορούμε και έχουμε καλύτερο DC ρεύμα προς τον αντιστροφέα. [3]

Ο υπολογισμός του ρεύματος DC της εξόδου της γέφυρας ανόρθωση με τα τα έξι thyristor δίνεται από τον τύπο:

$$V_{dc} = V_{d0} \cos \alpha = \frac{3}{\pi} \sqrt{2} V_{rms} \cos \alpha$$



Σχήμα 2.1.β Κυματομορφές από διάφορες γωνίες (Variable Frequency Driver)[3]

- **DC bus:**

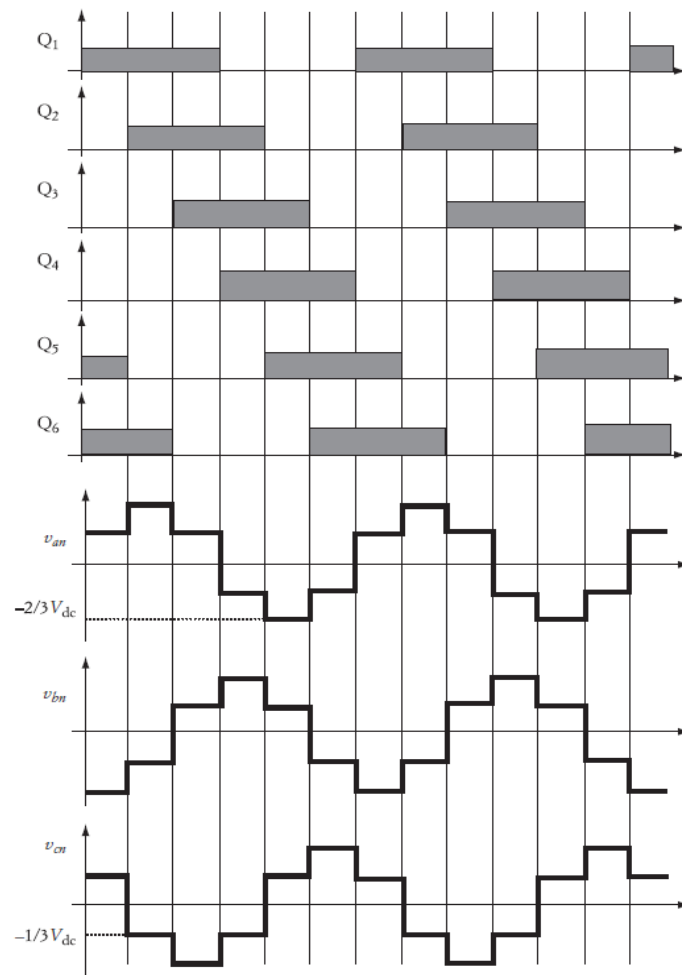
Το DC bus ή αλλιώς DC link χρησιμοποιείται σε inverters για να αποτρέψουμε τις παρενέργειες της επαγωγής του DC στον αντιστροφέα. Το DC bus δίνει ένα επαγωγικό φορτίο το οποίο αντιστέκεται στις διακυμάνσεις του ρεύματος των transistor στον αντιστροφέα. Οι γρήγορες διακυμάνσεις του ρεύματος προέρχονται από την έναυση των transistor από τα σήματα PWM που τα δίνει ο ελεγκτής. Οι πυκνωτές υπολογίζονται σύμφωνα με τα φορτία που υπάρχουν για την οδήγηση του μοτέρ. Το DC link παίζει σημαντικό ρόλο και στην μείωση του επαγωγικής διαρροής που υπάρχει στις γέφυρες των transistor. [7]

- **Inverter:**

Για να οδηγήσουμε ένα ασύγχρονο κινητήρα πρέπει να φτιαχτεί μια κυματομορφή AC και αυτό γίνεται με τον αντιστροφέα. Ο αντιστροφέας αποτελείται από έξι διακόπτες ισχύος και έξι διόδους. Οι διόδοι χρησιμοποιούνται για να επιστρέφεται η ενέργεια πίσω στο φορτίο και να μη γυρνάει στην πηγή. Αυτό συμβαίνει, διότι όταν σταματάει η τροφοδοσία του μοτέρ δημιουργείται μεγάλη τάση στα άκρα του διακόπτη από τα

επαγωγικά φορτία του μοτέρ. Εάν δεν υπήρχαν οι διόδους θα καταστρέφονταν τα transistor (διακόπτες). Το μεσαίο σημείο κάθε σκέλους του αντιστροφέα συνδέεται με την αντίστοιχη έξοδο προς το φορτίο. Τα transistor ενεργοποιούνται σε συγκεκριμένες ακολουθίες πάντα σε διαφορετικό σκέλος του αντιστροφέα γιατί έτσι αποφεύγεται κάποιο τυχόν βραχυκύκλωμα.

Κάθε κύκλος λειτουργίας χωρίζεται σε έξι διαστήματα με διάρκεια 60 το καθένα. Το κάθε transistor ενεργοποιείται για 3 διαστήματα δηλαδή για 180 °. Τα transistor ενεργοποιούνται ανά τριάδες και κατά αύξουσα σειρά. Το ότι ενεργοποιούνται μαζί δε σημαίνει, ότι έχουμε μόνο θετικό ή μόνο αρνητικό δυναμικό αλλά μπορεί για παράδειγμα να έχουμε θετικό στο πρώτο και δεύτερο σκέλος του αντιστροφέα και αρνητικό στο τρίτο.



Σχήμα 2.1.γ Παλμοί transistor- Κυματομορφές εξόδου αντιστροφέα (Variable Frequency Driver)[3]

Η τάση της κάθε εξόδου μπορεί να υπολογιστεί ως εξής για όταν τα transistors Q1, Q5, and Q6 είναι ενεργοποιημένα :

$$V_{ab} = V_a - V_b = V_{dc}$$

$$V_{bc} = V_b - V_c = -V_{dc}$$

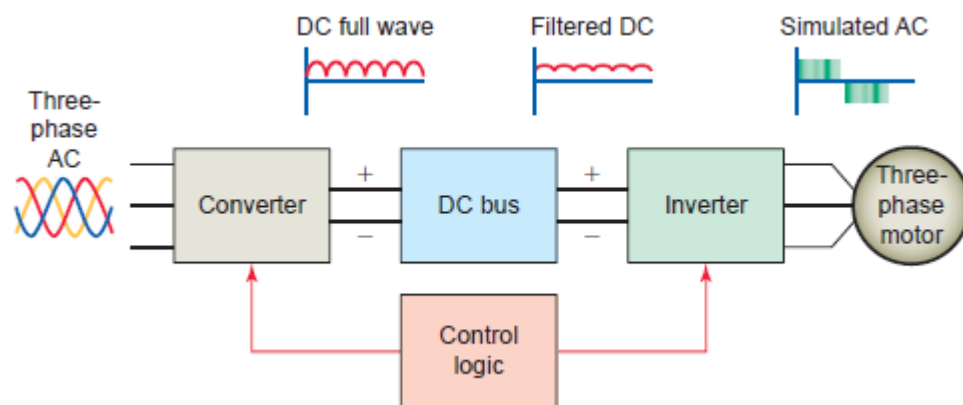
$$V_{ca} = V_c - V_a = 0$$

όπου V_{dc} είναι η τάση του ανορθωμένου ρεύματος. Οι τάσεις υπολογίζονται με τον ίδιο τρόπο σε όλα τα χρονικά διαστήματα. Η συχνότητα της τάσης φορτίου μπορεί να ρυθμιστεί αλλάζοντας την περίοδο του διαστήματος μεταγωγής T_{seg} . Όσο μικρότερο είναι το διάστημα εναλλαγής των ζευγών έναυσης, τόσο υψηλότερη είναι η συχνότητα. Η συχνότητα υπολογίζεται με τον τύπο:

$$f = 1 / 6 T_{seg} [6]$$

- **Control logic:**

Το σύστημα ελέγχου δημιουργεί τους απαραίτητους παλμούς που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της λειτουργίας των thyristor και των transistor που είναι απαραίτητοι για την ανόρθωση, την επιμέρους δημιουργία και τον έλεγχο των κυματομορφών AC. [7]



Σχήμα 2.1.δ Κύκλωμα ελέγχου (Variable Frequency Driver)[4]

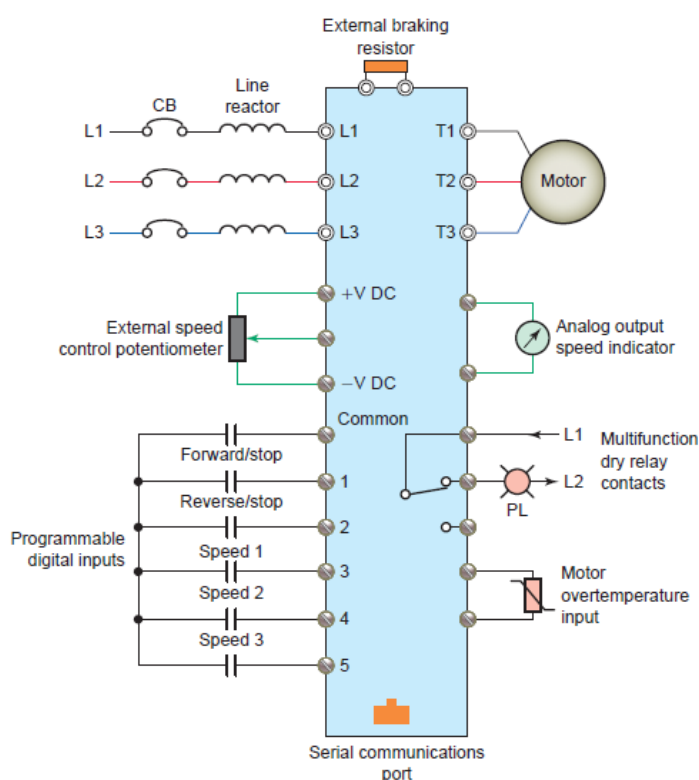
2.2 Βασικά μέρη

Υπάρχει ένας embedded μικροελεγκτής, ο οποίος είναι υπεύθυνος για τη διεπαφή χρήστη (user interface) VFD, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.2.α. Το user interface είναι ένα μέσο για τον χειριστή να ξεκινήσει, να σταματήσει και να ρυθμίσει την ταχύτητα λειτουργίας του κινητήρα. Πρόσθετες λειτουργίες ελέγχου χειριστή μπορεί να περιλαμβάνουν εναλλαγή της κίνησης ή και εναλλαγή μεταξύ χειροκίνητης ρύθμισης ταχύτητας και αυτόματου ελέγχου από εξωτερικό σήμα ελεγκτή. Το user interface περιλαμβάνει συχνά αλφαριθμητική οθόνη, ενδεικτικούς λυχνίες και μετρητές για την παροχή πληροφοριών σχετικά με τη λειτουργία του VFD. Όταν χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές που υπάρχουν μεγάλες αποστάσεις συνήθως υπάρχει δίκτυο που συνδέει το VFD με ένα κεντρικό σύστημα παρακολούθησης και από εκεί γίνεται και ο έλεγχος. Το λογισμικό που υποστηρίζει ο υπολογιστής του χρήστη είναι πλήρως εφαρμοσμένο στις λειτουργίες του VFD και προσφέρει μεγαλύτερη ευελιξία, καθώς και πιο λεπτομερείς πληροφορίες σχετικά με τις παραμέτρους της μονάδας. Τέλος μπορούν να προβληθούν ταυτόχρονα στην οθόνη. Οι τρόποι λειτουργίας μπορεί να περιλαμβάνουν πρόγραμμα, παρακολούθηση και online εκτέλεση. [7]



Σχήμα 2.2.α VFD user interface[4]

Όλα τα VFD έχουν κάποιες τυπικές εισόδους ισχύος, ελέγχου και σημεία τερματισμού εξόδου. Η τριφασική τροφοδοσία συνδέεται στους ακροδέκτες εισόδου γραμμής L1, L2 και L3 και οι αγωγοί τροφοδοσίας του κινητήρα συνδέονται με τους ακροδέκτες της εξόδου T1, T2 και T3. Τα περισσότερα VFD περιέχουν κάποιους ακροδέκτες ελέγχου για εξωτερική σύνδεση, τόσο για ψηφιακές, όσο και για αναλογικές εισόδους και εξόδους. Ο αριθμός και ο τύπος των εισόδων-εξόδων ποικίλλουν ανάλογα με την πολυπλοκότητα της εφαρμογής, το κόστος του εξοπλισμού και την κατασκευάστρια εταιρεία. Οι εισοδοί και οι εξοδοί είναι ψηφιακά ή αναλογικά σήματα που μεταβάλλονται με τον κατάλληλο προγραμματισμό του VFD και επιτελούν τις διεργασίες. Οι ψηφιακές εισοδοί και εξοδοί έχουν δύο καταστάσεις, (είτε ενεργοποιημένες είτε απενεργοποιημένες), ενώ οι αναλογικές εισοδοί και εξοδοί έχουν πολλές καταστάσεις που ποικίλλουν σε ένα εύρος τιμών ανάλογα με τον τύπο της εισόδου.



Σχήμα 2.2.β Μονάδα ισχύος & ελέγχου drive[4]

Οι ψηφιακές εισοδοί χρησιμοποιούνται για τη διασύνδεση του VFD με κουμπιά λειτουργίας για τους χειριστές, με βοηθητικούς διακόπτες κυκλωμάτων αλλά και ψηφιακές εξόδους από PLC. Σε κάθε ψηφιακή είσοδος μπορεί να εκχωρηθεί μια

προκαθορισμένη εντολή, όπως για παράδειγμα εκκίνηση/ διακοπή, εμπρός/ πίσω, σφάλματα και προκαθορισμένες ταχύτητες. Οι έξοδοι ψηφιακού/ ρελέ είναι σήματα δύο θέσεων (ενεργοποιημένο +24 Volts η απενεργοποιημένο 0 Volts) έχουν έξοδο από το VFD σε συσκευές όπως ενδεικτικούς λυχνίες, συναγερμούς, βοηθητικά ρελέ, ηλεκτρομαγνητικές βαλβίδες και ψηφιακές εισόδους PLC. Οι ψηφιακές έξοδοι έχουν δυναμικό τάσης (π.χ. 24 V DC) που προέρχονται από τον ελεγκτή του VFD.

2.3 Μέθοδοι ελέγχου

Μια τυπική μονάδα VFD μπορεί να έχει πάρα πολλές παραμέτρους από εκατοντάδες έως και χιλιάδες. Λόγω των απεριόριστων δυνατοτήτων προγραμματισμού που δίνουν τα VFD, είναι πρακτικά αδύνατο να γνωρίζει ο μηχανικός όλες τις λειτουργίες τους. Υπάρχουν παράμετροι που είναι σημαντικοί για τον έλεγχο του κινητήρα, αλλά υπάρχουν και κάποιοι άλλοι οι οποίοι δεν είναι τόσο γνωστοί, αν και παίζουν ρόλο στην μέθοδο ελέγχου του κινητήρα. Η ρύθμιση ενός VFD για τη σωστή μέθοδο ελέγχου μπορεί να δώσει σημαντικά πλεονεκτήματα, αλλά σε περίπτωση που δεν γίνει σωστή επιλογή μπορούν να δημιουργηθούν προβλήματα στον εξοπλισμό αλλά και την εφαρμογή. Η μέθοδος ελέγχου επιλέγεται σύμφωνα με τις ανάγκες και τις προδιαγραφές που υπάρχουν.

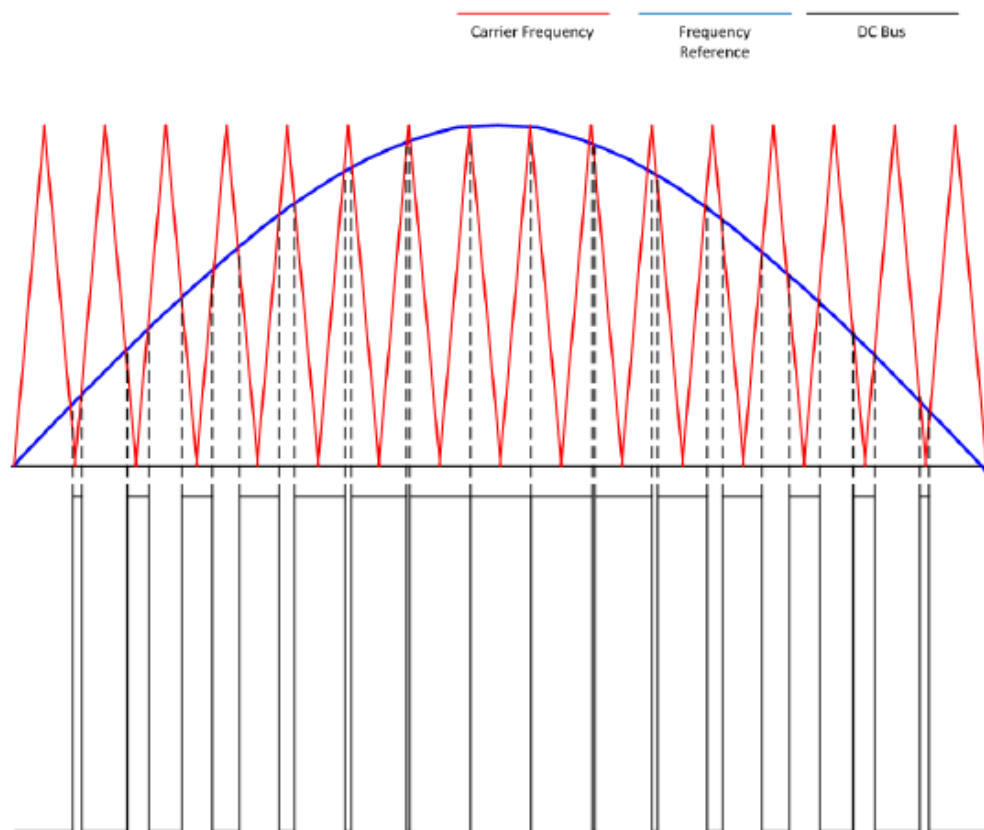
Υπάρχουν 4 τύποι μεθόδων ελέγχου κινητήρα που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο ασύγχρονων κινητήρων συνδεδεμένων σε VFD. Αυτοί είναι:

- Στρατηγική κλιμακωτού ελέγχου (Scalar Control Methods)
 - V / f (volts-per-hertz),
 - V / f με encoder
- Στρατηγική Διανυσματικού ελέγχου (Vector Control Methods)
 - Ανοιχτού βρόχου
 - Κλειστού βρόχου

2.3.1 PWM

Προτού οριστεί το κάθε είδος ελέγχου είναι σημαντικό να αναφέρουμε το κοινό σημείο τους που είναι η Διαμόρφωση Παλμού-Πλάτους (PWM). Το PWM είναι μια τεχνική που μεταβάλλει το πλάτος ενός σταθερού σήματος ρυθμίζοντας τη διάρκεια παλμού και με

τον κατάλληλο τρόπο να μπορεί να εκφράζει ένα αναλογικό σύστημα. Το PWM εφαρμόζεται στα VFD χρησιμοποιώντας σταθερή τάση DC από τους το DC link του VFD. Ένα σύνολο διπολικών τρανζίστορ (IGBT's) σαν διακόπτες στην έξοδο ενεργοποιείται σε μικρά χρονικά διαστήματα, για να παράγει παλμούς. Μεταβάλλοντας το πλάτος των παλμών εξόδου στην κυματομορφή τάσης εξόδου, κατασκευάζεται ένα αρκετά πιστό ημιτονοειδές κύμα AC. Ακόμα, εάν η κυματομορφή τάσης εξόδου μονάδων αποτελείται από τετραγωνικά κύματα λόγω παλμού DC, η τρέχουσα κυματομορφή θα δουλέψει, αφού ο κινητήρας είναι επαγωγικός. Όλες οι μέθοδοι ελέγχου κινητήρα χρησιμοποιούν κυματομορφή τάσης PWM σαν το πιο σημαντικό τους εργαλείο για τον έλεγχο του κινητήρα. Η διαφορά μεταξύ των μεθόδων ελέγχου έγκειται στη διαδικασία που χρησιμοποιείται για τις ανάγκες που έχει ο κινητήρας σε κάθε δεδομένη στιγμή. [8]



Σχήμα 2.3.1α PWM παλμοί[8]

2.3.2 Στρατηγική κλιμακωτού ελέγχου (Scalar Control Methods)

2.3.2.1 V/ f (volts-per-hertz)

Τα Volt ανά hertz είναι η απλούστερη μέθοδος ελέγχου κινητήρα με VFD και είναι η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη λόγω του μικρού χρόνου εφαρμογής που παίρνει να υλοποιηθεί. Αυτή η μέθοδος θεωρείται plug and play δεδομένου ότι απαιτούνται πολύ λίγα δεδομένα κινητήρα από το VFD. Δεν απαιτείται συντονισμός του VFD (το λεγόμενο autotuning) στο συνδεδεμένο κινητήρα (αλλά συνιστάται ακόμα) και δεν απαιτείται encoder για τον έλεγχο του. Ένας encoder κινητήρα είναι μια απλή ηλεκτρομηχανική συσκευή που συνήθως τοποθετείται στο πίσω μέρος ενός περιβλήματος κινητήρα και συνδέεται με τον άξονα του κινητήρα. Καθώς ο άξονας του κινητήρα περιστρέφεται η κίνηση μεταδίδεται στο encoder με αποτέλεσμα να δημιουργείται μια σειρά ηλεκτρικών παλμών ανά περιστροφή. Αυτοί οι παλμοί μεταδίδονται πίσω στο VFD και χρησιμοποιούνται ως ανάδραση ταχύτητας για τον έλεγχο των στροφών του κινητήρα. Η μέθοδος ελέγχου V/ f δεν χρησιμοποιεί encoder και αυτό έχει ως αποτέλεσμα χαμηλότερο κόστος εφαρμογής και λιγότερη καλωδίωση. Τη μέθοδο ελέγχου V/ f τη συναντάμε πιο συχνά, όταν υπάρχει ζήτηση από υψηλές συχνότητες που θα μπορούσαν εύκολα να ξεπεράσουν τα 1000 Hz. Οι περισσότερες εφαρμογές εργαλειομηχανών, ανεμιστήρων χρησιμοποιούν τη μέθοδο ελέγχου V/ f για αυτό το πλεονέκτημα.

Ένα ακόμη σημαντικό πλεονέκτημα είναι, ότι με την μέθοδο V/ f επιτρέπει η οδήγηση πολλών κινητήρων από ένα μόνο VFD. Όταν το VFD οδηγεί περισσότερους από έναν κινητήρα αυτό σημαίνει, ότι όλοι οι κινητήρες θα πρέπει να ακολουθούν τις ίδιες κινήσεις και να έχουν τις ίδιες ταχύτητες.

Στα μειονεκτήματα έχουμε, ότι ο VFD λόγω του ότι δεν υπάρχει κάποιο αισθητήριο όπως encoder για να αντιλαμβάνεται κίνηση δεν μπορεί να γνωρίζει ότι ο άξονας κίνησης του πραγματικά κινείται. Η ροπή εκκίνησης του κινητήρα περιορίζεται σε 150% στα 3 Hz που είναι αρκετή για τις εφαρμογές τις οποίες συναντάμε τέτοια μέθοδο. Στις μέρες μας σχεδόν κάθε εφαρμογή που περιέχει έλεγχο ταχύτητας σε ανεμιστήρες και αντλίες χρησιμοποιεί τη μέθοδο ελέγχου V/ f.

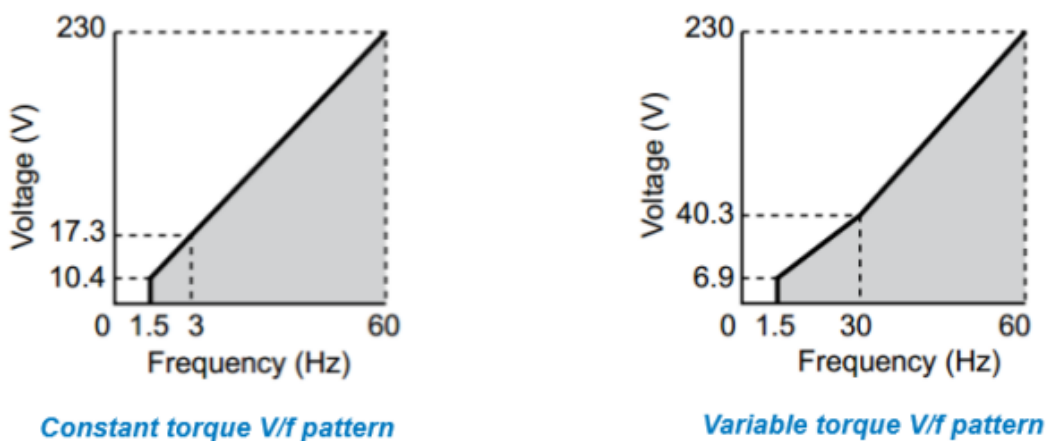
Αυτή η μέθοδος αν και έχει σχετικά πιο χαλαρές προδιαγραφές από τις άλλες μεθόδους έχει αποδειχθεί ότι ανταποκρίνεται αρκετά καλά σε ότι έχει να κάνει σε απότομες

αλλαγές συχνότητας που ίσως να χρειάζονται. Η απόκριση και η ρύθμιση της ταχύτητας είναι συνήθως +/- 2 έως 3% της μέγιστης συχνότητας υπάρχουσας λειτουργίας.

Δεδομένου ότι το V / f είναι μια σχετικά απλή μέθοδος ελέγχου, έχει επίσης κάποιες "πιο χαλαρές" προδιαγραφές. Η ρύθμιση ταχύτητας είναι συνήθως +/- 2 έως 3% της μέγιστης συχνότητας. Η απόκριση ταχύτητας βαθμολογείται στα 3 Hz. Η απόκριση ταχύτητας ορίζεται ως το πόσο καλά μπορεί το VFD να ανταποκριθεί σε μια αλλαγή στην αναφορά συχνότητας. Η αύξηση της απόκρισης ταχύτητας οδηγεί σε ταχύτερη απόκριση κινητήρα όταν αλλάζει η αναφορά συχνότητας.

Σε όλες τις μεθόδους ελέγχου κινητήρα υπάρχει ένα εύρος ελέγχου, που σύμφωνα με την αναλογία που δίνεται από τον κατασκευαστή αντικατοπτρίζει τον έλεγχο των V / f σε έναν κινητήρα. Για παράδειγμα, εάν ένα VFD έχει μέγιστη συχνότητα ελέγχου 60 Hz και αναλογία 1 προς 40 το VFD μπορεί να ελέγξει τον κινητήρα μέχρι και τα 1,5 Hz.

Λόγω του ότι η μέθοδος ελέγχου χρησιμοποιεί ένα μοτίβο αναλογίας τάσης προς συχνότητα V / f , έτσι προσδιορίζεται η τάση που αποστέλλεται στον κινητήρα για οδήγηση. Δηλαδή, ανάλογα με τη ταχύτητα χρειάζεται να κινείται ο κινητήρας, τόση θα είναι και η τροφοδοσία των Volts για να επιτευχθεί η επιθυμητή συχνότητα στο φορτίο. Η αναλογία αυτή βελτιστοποιείται, όταν δημιουργείται ένα προφίλ ελέγχου με προκαθορισμένες ρυθμίσεις για την εφαρμογή του κινητήρα.[8]



Σχήμα 2.3.2.1α Διαφορετικά διαγράμματα V / f από εφαρμογές με βέλτιστη απόδοση[8]

2.3.2.2 V / f με encoder

Με τη μέθοδο ελέγχου V/ f με encoder μπορεί να επιτευχθεί ελαφρώς καλύτερος έλεγχος και ικανότητα για εκτέλεση σε υψηλότερες συχνότητες αναφοράς. Με τον encoder είναι δυνατόν να επιτύχουμε καλύτερη ρύθμιση ταχύτητας στην μέγιστη συχνότητα της τάξης του +/- 0,03% .

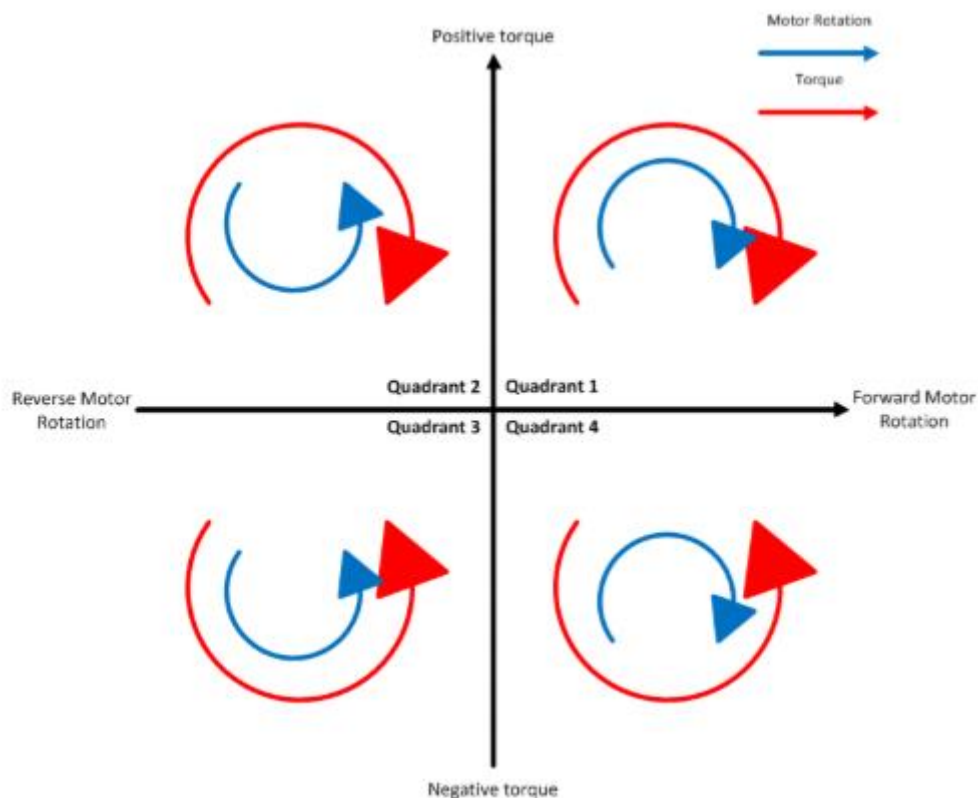
Λόγω του ότι η τάση και η συχνότητα είναι προκαθορισμένες αναλογικά, επιτρέπεται ο έλεγχος σε υψηλές ταχύτητες χωρίς υψηλή δυναμική απόκριση. Η απόκριση της ταχύτητας, η ροπή εκκίνησης και το εύρος ελέγχου είναι σχεδόν όμοια με την μέθοδο του V/ f και η υψηλότερη συχνότητα λειτουργίας περιορίζεται από τον encoder. Αυτή η μέθοδος δεν εφαρμόζεται συχνά, διότι τα πλεονεκτήματα ελέγχου που παρέχει σε σχέση με την προηγούμενη κατηγορία δεν είναι τόσο σημαντικά, ώστε να ανέβει το κόστος αγοράζοντας encoder και κάρτα ελέγχου ανατροφοδότησης για τις εφαρμογές.

2.3.3 Στρατηγική Διανυσματικού ελέγχου (Vector Control Methods)

2.3.3.1 Ανοιχτού βρόχου

Αυτή η στρατηγική ελέγχου είναι εντελώς διαφορετική με τις προηγούμενες. Αν και δεν εμπεριέχει encoder για να υπάρχει ανατροφοδότηση (γι' αυτό άλλωστε ονομάζεται και open loop), αυτή η μέθοδος επιτυγχάνει πολύ καλό και δυναμικό έλεγχο στον κινητήρα. Ο διανυσματικός έλεγχος λειτουργεί διαφοροποιώντας τον έλεγχο της κίνησης και της ροπής όπως συμβαίνει και στους DC κινητήρες.

Όταν ο κινητήρας οδηγείται με μέθοδο ανοικτού βρόχου η ροπή φτάνει τα 200 % στα 0,3 Hz. Ο έλεγχος γίνεται με την μέθοδο των τεσσάρων τεταρτημορίων ανάλογα με το τι κατεύθυνση έχει η στρέψη του κινητήρα και η κατεύθυνση της ροπής. Έτσι επιτυγχάνεται έλεγχος ανάλογα την εφαρμογή και τις αναγκαιότητες που δημιουργούνται στην λειτουργία και προστατεύεται ο εξοπλισμός από ζημιές που μπορεί να προκληθούν από την ροπή. Λόγω του ότι η απόκριση της ταχύτητας σε υψηλές συχνότητες φτάνει το 10% υπάρχει καλύτερη δυναμική απόκριση σε φορτία κρούσης.



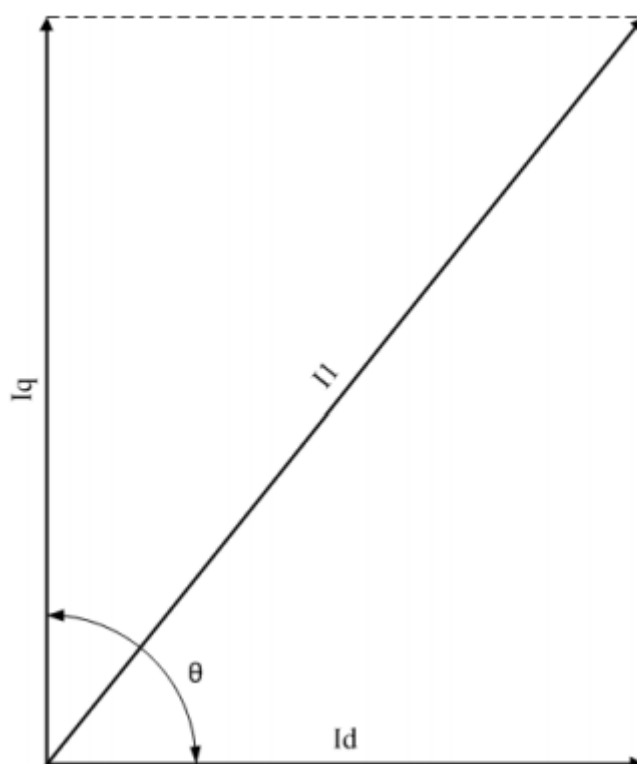
Σχήμα 2.3.3.1α Τεταρτημόρια ελέγχου ροπής[8]

Ο τρόπος οδήγησης του κινητήρα θεωρείται ξεχωριστός, διότι αντί για ένα σταθερό μοτίβο V/ f η μέθοδος ανοικτού βρόχου χρησιμοποιεί έναν αλγόριθμο για να βρει την καλύτερη δυνατή τάση και συχνότητα εξόδου που είναι απαραίτητη για τη λειτουργία του κινητήρα. Ο έλεγχος των διανυσμάτων γίνεται σύμφωνα με την τρέχουσα ανατροφοδότηση που έχει από τον κινητήρα σε συνδυασμό με παραμέτρους που έχουν δοθεί στον inverter. Κατά την ρύθμιση γίνεται η διαδικασία του auto-tuning για να καταχωρηθούν μετρήσεις που παίρνει το VFD από τον κινητήρα. Με διανυσματικά μαθηματικά υπολογίζεται σαν διάνυσμα το μαγνητικό ρεύμα (I_d) και το ρεύμα παραγωγής ροπής (I_q). Σύμφωνα με αυτό το διάνυσμα η γωνία θ που έχει ο ελεγκτής του VFD κάνει τον έλεγχο στον κινητήρα.

Για να μπορέσει το VFD να οδηγήσει τον κινητήρα με μέγιστη απόδοση και ροπή θα πρέπει η γωνία μεταξύ αυτών των δύο διανυσμάτων να είναι πάντα στις 90 μοίρες. Αυτό

γιατί το ημίτονο των 90 μοιρών είναι ίσο με την μονάδα, άρα έχουμε μέγιστη απόδοση, όπως φαίνεται και στην εικόνα 2.3.3.1β .

Τα αποτελέσματα αυτής της μεθόδου είναι να επιτυγχάνεται ρύθμιση της ταχύτητας κοντά στο $\pm 0,2\%$ της μέγιστης συχνότητας και το εύρος ελέγχου ταχύτητας να φτάνει το 1:200 .



Σχήμα 2.3.3.1β Ο έλεγχος διανυσμάτων βελτιστοποιεί τη μέγιστη ροπή ανά ενισχυτή διατηρώντας την παραγωγή ροπής[8]

2.3.3.2 Κλειστού Βρόχου

Η τελευταία μέθοδος που θα αναλύσουμε είναι η Closed Loop Vector που είναι και η μέθοδος που έχει την υψηλότερη απόδοση σε σχέση με τις προηγούμενες. Σε αυτή την μέθοδο χρησιμοποιείται ένας αλγόριθμος διανύσματος όπως και στην μέθοδο ανοικτού βρόχου για να προσδιοριστεί η τάση οδήγησης του κινητήρα με τη διαφορά, ότι στο

σύστημα ελέγχου έχει προστεθεί και ένας encoder. Η ανάδραση που δίνεται από τον encoder σε συνδυασμό με τη μέθοδο του ελέγχου από το διάλυμα, δίνει τη δυνατότητα να έχουμε μια ροπή εκκίνησης που φτάνει και το 200%. Η ανάδραση του encoder βοηθάει στην απόκριση ταχύτητας που βαθμονομείται στα 50 hz και την υψηλότερη περιοχή ελέγχου ταχύτητας που φτάνει το 1:1500 . Τέλος, αυτή η μέθοδος δίνει τη δυνατότητα σε λειτουργία ελέγχου ροπής που υπάρχει άμεσος έλεγχος της ροπής του κινητήρα, έναντι της ταχύτητας στις ανάλογες εφαρμογές.

2.4 Πρωτόκολλα Επικοινωνίας

Ένας άλλος πολύ σημαντικός τρόπος ελέγχου ενός driver προκειμένου να δουλεύει σε ένα σύστημα αυτοματισμού είναι να βρίσκεται σε ένα δίκτυο. Η επικοινωνία του driver με το σύστημα του αυτοματισμού δίνει την δυνατότητα στον ελεγκτή (PLC, PC), να αλλάζει τους παραμέτρους του driver κάθε στιγμή, σύμφωνα με τις αναγκαιότητες που υπάρχουν, να τους φορτώνει και να τους αποθηκεύει. Ο ελεγκτής έχει πρόσβαση στο ιστορικό των alarm του driver και απευθείας χειροκίνητο έλεγχο στον driver.[21]

Η χρήση δικτύου για τον έλεγχο έχει πολλά πλεονεκτήματα:

- Η καλωδίωση μπορεί να μειωθεί σημαντικά.
- Οι λειτουργίες ελέγχου μπορούν να αλλάξουν χωρίς αλλαγές στη σύνδεση.
- Οι παράμετροι μπορούν να ρυθμιστούν και να αλλάξουν μέσω του controller.
- Η απόδοση του εξοπλισμού μπορεί να παρακολουθείται και να ελέγχεται συνεχώς.[22]

Υπάρχουν πολλά διαφορετικά πρωτόκολλα επικοινωνίας για τον έλεγχο κάθε driver ανάλογα με την εταιρεία κατασκευής και την επιλογή του μοντέλου. Τα πιο σημαντικά είναι το Profibus, Modbus, Profinet.

2.4.1 Profibus

Το Profibus εφαρμόζεται σε πολλές εφαρμογές στη βιομηχανία και μέσα σε αυτούς και προγραμματιζόμενους λογικούς ελεγκτές (PLC). Επειδή, είναι ένα ανοιχτό πρωτόκολλο χρησιμοποιείται από μεγάλο αριθμό κατασκευαστών χωρίς προβλήματα διαμόρφωσης. Το Profibus έχει τρεις εκδόσεις:

- Profibus FMS (Fieldbus Message Specification)

Είναι μια γενική λύση για εργασίες επικοινωνίας στο cell level. Οι υπηρεσίες FMS προσφέρουν μια ευρεία περιοχή εφαρμογών στο χρήστη και εξασφαλίζουν μεγάλη ευελιξία.

- Profibus DP (Decentralized Periphery)

Είναι για υψηλές ταχύτητες σύνδεσης και οικονομικό για τη σύνδεση των συσκευών. Η έκδοση DP έχει σχεδιαστεί ειδικά για τη επικοινωνία μεταξύ συστημάτων ελέγχου αυτοματισμού και περιφερειακών I/O. Επίσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παράλληλη μετάδοση σήματος 24Volts DC ή 0-20 mA.

- Profibus PA(Process Automation)

Είναι ειδικά σχεδιασμένο για αυτοματοποιήσεις διαδικασιών. Επιτρέπει αισθητήρες και ενεργοποιητές να είναι συνδεδεμένοι στον ίδιο δίαυλο. Επιτρέπει την επικοινωνία δεδομένων και την τροφοδοσία του διαύλου χρησιμοποιώντας τεχνολογία 2 καλωδίων σύμφωνα με το διεθνές πρότυπο IEC 1158-2. [23]

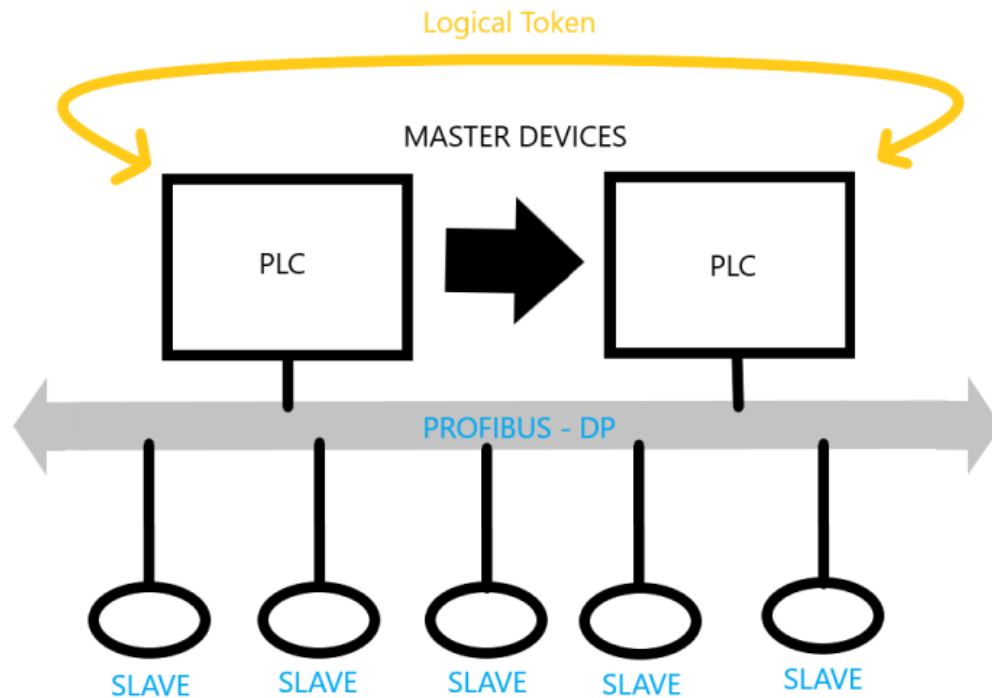
2.4.1.1 Αρχιτεκτονική πρωτοκόλλου Profibus

Ο σχεδιασμός του PROFIBUS προσανατολίζεται προς το μοντέλο επιπέδου OSI (Open Systems Interconnection Reference Model) σύμφωνα με το πρότυπο ISO 7498. Αυτό το πρότυπο αποτελείται από 7 επίπεδα που το κάθε ένα υλοποιεί συγκεκριμένες διεργασίες. Το επίπεδο 1 καθορίζει την τεχνολογία μεταφοράς και τα χαρακτηριστικά της μετάδοσης και φτάνει μέχρι και το επίπεδο 7 που είναι το επίπεδο εφαρμογής, διεπαφής με την εφαρμογή. Το PROFIBUS χρησιμοποιεί τα επίπεδα 1, 2 και 7:

- Το επίπεδο 1 ορίζει τη φυσική μετάδοση. Το PROFIBUS λειτουργεί σε υπάρχων εκδόσεις καλωδίων (RS485 και MBP), με οπτική ίνα και ασύρματη μετάδοση.
- Το επίπεδο 2 καθορίζει την περιγραφή της μεθόδου πρόσβασης στο δίαυλο επικοινωνίας, συμπεριλαμβανομένης της ασφάλειας δεδομένων. Με το PROFIBUS, αυτή είναι η μέθοδος master-slave σε συνδυασμό με τη μέθοδο token.
- Το επίπεδο 7 σχηματίζει τη διεπαφή της εφαρμογής και έτσι αντιπροσωπεύει τη σύνδεση μεταξύ της εφαρμογής και της επικοινωνίας. Με το PROFIBUS, χρησιμοποιείται το πρωτόκολλο επικοινωνίας PROFIBUS DP.

Χρειάζεται μόνο ένα καλώδιο για τη σύνδεση των επιμέρους συσκευών στο σύστημα και επιτρέπει τον εντοπισμό πιθανής αστοχίας σε κάποιον εξοπλισμό. Το Profibus υποστηρίζεται με RS485, γεγονός που του προσφέρει ευελιξία και καθιστά δυνατή την προσθήκη ή αφαίρεση συσκευών χωρίς να επηρεάζεται η διαμόρφωση ή το λειτουργικό σύστημα. [23]

Το Profibus είναι ένα πρωτόκολλο τύπου master-slave, αλλά με ένα πρόσθετο σύστημα token που του δίνει την δυνατότητα για πολλαπλά master. Επίσης, σε αντίθεση με το Modbus, όλες οι συσκευές παίρνουν μια ακολουθία εκκίνησης κατά την οποία «συμμετέχουν» στο δίκτυο. Κάθε slave διατηρεί έναν failsafe timer. Εάν ο master δεν του μιλήσει εντός συγκεκριμένου χρονικού ορίου, ο slave μπαίνει σε λειτουργία ασφαλούς κατάστασης. Ο master πρέπει στη συνέχεια να περάσει ξανά από την ακολουθία εκκίνησης που είχε προτού μπορέσει να συμβεί περαιτέρω ανταλλαγή δεδομένων. Αυτό, σε συνδυασμό με ένα χρονόμετρο παρακολούθησης στο master, διασφαλίζει ότι κάθε επικοινωνία πραγματοποιείται σε κάθε κύκλο διαύλου με συγκεκριμένη τιμή χρόνου.

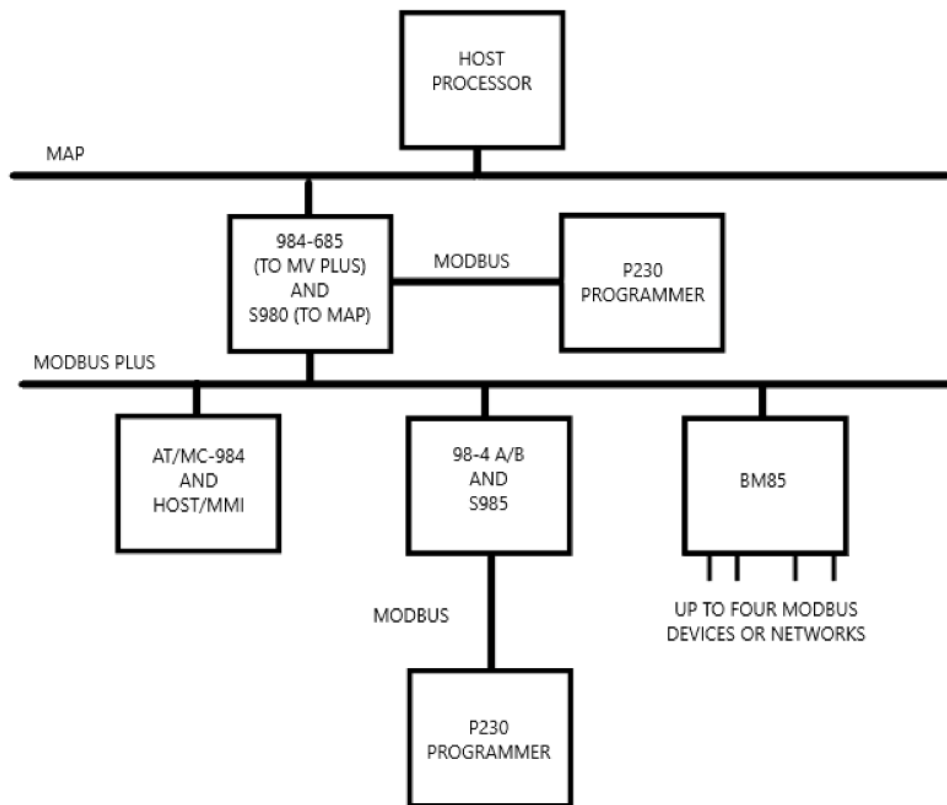


Σχήμα 2.4.1.1a Δίκτυο Profibus

Στο παραπάνω σχήμα φαίνεται ένα δίκτυο με 2 master και 5 slave. Το πρώτο PLC λαμβάνει το διακριτικό και έχει τον έλεγχο του διαύλου και ανταλλάσσει πληροφορίες με τους slaves. Όταν ολοκληρωθεί η επικοινωνία και η μεταφορά πληροφοριών με όλους τους slaves ξεχωριστά, τότε το πρώτο PLC θα δώσει το token στο επόμενο master εφόσον υπάρχει και θα συνεχίσει και αυτό να επικοινωνεί ξεχωριστά με κάθε έναν από τους slave.

2.4.2 Modbus

Το πρωτόκολλο Modbus που υποστηρίζεται από την εταιρεία Modicon χρησιμοποιείται μαζί και με άλλα πρωτόκολλα της ίδιας εταιρείας για τον έλεγχο και την επικοινωνία εξοπλισμού σαν λογικούς ελεγκτές και συσκευές ελέγχου στη βιομηχανία.



Σχήμα 2.4.2a Δίκτυο Modbus

Το Modbus καθορίζει την δομή μηνυμάτων η οποία αναγνωρίζεται και χρησιμοποιείται από τις συσκευές ανεξάρτητα από τον τύπο δικτύου που επικοινωνούν. Περιγράφει τη διαδικασία με την οποία ο ελεγκτής έχει πρόσβαση στα δεδομένα των συσκευών, τον τρόπο που θα ανταποκριθεί σε αιτήσεις επικοινωνίας από άλλες συσκευές και το πως αναφέρονται, ανιχνεύονται τα σφάλματα στις επιμέρους συσκευές.

Το Modbus θέτει την μορφή και τα όρια για μια φόρμα που περιέχει την πληροφορία των μηχανημάτων. Σε περίπτωση που το μήνυμα πρέπει να περάσει σε άλλο δίκτυο, τα μηνύματα του Modbus ενσωματώνονται στο πακέτο ή την δομή του άλλου δικτύου. Οι συσκευές που συμμετέχουν στην επικοινωνία, επικοινωνούν με την μέθοδο του master-slave όπου μία και μοναδική συσκευή (master) μπορεί να ξεκινήσει τη μετάδοση των δεδομένων. Οι άλλες συσκευές που βρίσκονται στο δίκτυο απαντούν με βάση τα ζητούμενα του master και εκτελούν τις ενέργειες που ζητάει. Οι αιτήσεις που γίνονται

από τον master είναι προς μία συσκευή ή και προς όλες τις συσκευές. Σε περίπτωση που το μήνυμα έχει αποδέκτη μόνο ένα συγκεκριμένο ελεγκτή τότε ο ελεγκτής απαντά στο αίτημα. Σε άλλη περίπτωση που το μήνυμα έχει αποδέκτη όλες τις συσκευές του δικτύου οι slaves δεν απαντούν καθόλου.

Στην δομή του μηνύματος από τον master προσδιορίζεται τοποθετώντας σε αυτό την διεύθυνση της συσκευής που χρειάζεται να γίνει η επικοινωνία, τον κωδικό λειτουργίας που από αυτό καθορίζεται η ενέργεια που πρέπει να εκτελεστεί από τον slave και τα δεδομένα προς αποστολή και ένα πεδίο ελέγχου λαθών. Το μήνυμα που έρχεται ως απάντηση από τον slave έχει ακριβώς την ίδια δομή και σε περίπτωση που δεν είναι δυνατόν να εκτελεστεί η ενέργεια που ζητήθηκε από τον master τότε ο slave στέλνει ως απάντηση ένα μήνυμα που δηλώνει σφάλμα.

Η επικοινωνία μεταξύ δύο συσκευών στο δίκτυο Modbus γίνεται με δυο τρόπους ανάλογα με το τι επιθυμεί ο χρήστης. Η επιλογή του τρόπου επικοινωνίας γίνεται με ρύθμιση των παραμέτρων της σειριακής επικοινωνίας. Ο πρώτος τρόπος μετάδοσης είναι με ASCII (American Standard Code for Information Interchange). Στην ASCII μετάδοση το κάθε byte στέλνεται ως δυο χαρακτήρες ASCII. Με αυτόν τον τρόπο υπάρχει σαν πλεονέκτημα, ότι επιτρέπονται οι χρονικές παύσεις μεταξύ των χαρακτήρων και δεν εμφανίζεται λάθος. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί κυκλικό έλεγχο CRC (Cyclical Redundancy Check) και η μετάδοση αρχίζει με χαρακτήρα άνω και κάτω τελεία ενώ τελειώνει με έναν διπλό χαρακτήρα νέας ή επιστροφής γραμμής.

START	ADDRESS	FUNCTION	DATA	LRC CHECK	END
1 CHAR	2 CHARS	2 CHARS	n CHARS	2 CHARS	2 CHARS CRLF

Σχήμα 2.4.2β Modbus ASCII

Στην RTU κάθε byte περιέχει δύο δεκαεξαδικούς των 4 bit και η μεγαλύτερη πυκνότητα των χαρακτήρων επιτρέπει ταχύτερη μεταφορά δεδομένων σε σχέση με την ASCII αν και έχουν την ίδια ταχύτητα μετάδοσης. Η μέθοδος RTU κάνει διαμήκη έλεγχο LRC (Longitudinal Redundancy Check) και η μετάδοση του μηνύματος περιέχει ένα νεκρό

διάστημα χρόνου τουλάχιστον 3.5 χαρακτήρων. Τέλος οι δύο τρόποι επικοινωνίας διαφέρουν στο πεδίο ελέγχου λαθών. [24]

START	ADDRESS	FUNCTION	DATA	LRC CHECK	END
T1-T2-T3-T4	8 BITS	8 BITS	n x 8 BITS	16 BITS	T1-T2-T3-T4

Σχήμα 2.4.2γ Modbus RTU

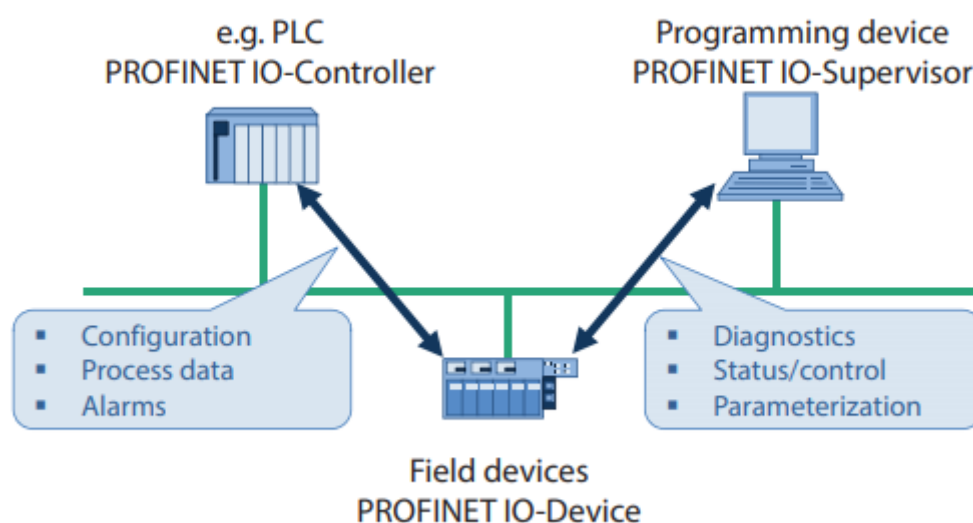
2.4.3 Profinet

Το Profinet είναι ένα βιομηχανικό πρωτόκολλο για την επικοινωνία εξοπλισμού μέσω Industrial Ethernet, σχεδιασμένο να συλλέγει και να ελέγχει βιομηχανικά συστήματα, με ιδιαίτερη ισχύ στην παράδοση δεδομένων υπό αυστηρούς χρονικούς περιορισμούς. Το πρωτόκολλο υποστηρίζεται από την PROFIBUS & PROFINET International (PI). Στο πρωτόκολλο συνδέονται τριών ειδών συσκευές οι IO controllers (PLCs), IO Devices (αισθητήρες, drivers κ.α.) και ένας IO supervisor που θέτει παραμέτρους και ελέγχει σφάλματα από τις συσκευές τους δικτύου. Το Profinet λειτουργεί σε 3 διαφορετικά κανάλια επικοινωνίας για την επικοινωνία των IO Controller και IO Devices. Το κανάλι TCP/ IP χρησιμοποιείται για παραμετροποίηση, διαμόρφωση και για λειτουργίες εγγραφής ανάγνωσης. Το δεύτερο ονομάζεται κανάλι RT ή Real Time που χρησιμοποιείται για κυκλική μεταφορά δεδομένων και μηνυμάτων σφαλμάτων. Και το τελευταίο είναι το Isochronous Real Time (IRT) που είναι υψηλής ταχύτητας που χρησιμοποιείται για motion control. Το Profinet είναι άμεσα συνδεδεμένο με την τεχνολογία Ethernet και η διευθυνσιοδότηση γίνεται με την IP, την MAC address και το όνομα της κάθε συσκευής. [25]

Το PROFINET είναι το ανοιχτό πρότυπο για το Industrial Ethernet που πληρεί όλες τις απαιτήσεις για τις τεχνολογίες αυτοματισμών. Με το PROFINET, μπορούν να

εφαρμοστούν λύσεις για αυτοματοποίηση εργοστασίων και διεργασιών, για εφαρμογές ασφάλειας και για ολόκληρη τη γκάμα της τεχνολογίας του motion control.

Το πρωτόκολλο PROFINET ακολουθεί την λογική παρόχου/ καταναλωτή για την ανταλλαγή των δεδομένων μεταξύ των συσκευών που υπάρχουν στο δίκτυο. Ο πάροχος που συνήθως είναι μια συσκευή που επιδρά στον αυτοματισμό (I/O Device) παρέχει δεδομένα διεργασίας σε έναν καταναλωτή που συνήθως είναι μια λογική μονάδα ελέγχου που εμπεριέχει και το πρόγραμμα του αυτοματισμού. Σε πολλές περιπτώσεις μια συσκευή PROFINET IO μπορεί να παίζει ρόλο παρόχου αλλά και καταναλωτή και οι διαδικασίες να αλλάζουν ανάλογα.



Σχήμα 2.4.3a Δίκτυο Profinet[26]

- Ελεγκτής IO:

Ο ελεγκτής IO είναι συνήθως ένας προγραμματιζόμενος λογικός ελεγκτής ο οποίος εκτελεί το πρόγραμμα αυτοματισμού. Ο ελεγκτής IO στο δίκτυο έχει τον ρόλο του master στο Profibus. Δίνει εντολές ενέργειας και παρέχει δεδομένα εξόδου στις διαμορφωμένες συσκευές IO ως πάροχος. Επίσης, είναι ο καταναλωτής των δεδομένων εισαγωγής συσκευών IO. [25]

- Συσσκευή IO:

Η συσκευή IO είναι μια συσκευή εισόδου/ εξόδου που είναι συνδεδεμένη σε έναν ή περισσότερους ελεγκτές IO μέσω PROFINET IO. Παίζει το ρόλο του slave στο δίκτυο και είναι ο πάροχος δεδομένων εισόδου και ο καταναλωτής της παραγωγής δεδομένων.

- Επόπτης IO:

Μπορεί να είναι μια συσκευή προγραμματισμού (PD), προσωπικός υπολογιστής (PC) ή συσκευή διεπαφής ανθρώπου (HMI) για χρήση ή διαγνωστικούς σκοπούς και αντιστοιχεί σε ένα master στο δίκτυο PROFIBUS. Μια μονάδα εγκατάστασης έχει τουλάχιστον έναν ελεγκτή IO και μία ή περισσότερες συσκευές IO. Οι συσκευές επόπτες IO συνήθως ενσωματώνονται μόνο προσωρινά για χρήση ή για αντιμετώπιση προβλημάτων του δικτύου.

Οι συσκευές του δικτύου PROFINET IO επικοινωνούν και διαχωρίζονται μέσα στο δίκτυο χρησιμοποιώντας διευθύνσεις MAC και διευθύνσεις IP.

Για συσκευές δικτύου PROFINET IO, η διεύθυνση της συσκευής βασίζεται στο συμβολικό όνομα της συσκευής, στην οποία έχει εκχωρηθεί μια μοναδική διεύθυνση MAC. Μετά τη διαμόρφωση του συστήματος, φορτώνονται όλες τις πληροφορίες που απαιτούνται για την ανταλλαγή δεδομένων στον IO Controller, συμπεριλαμβανομένων των διευθύνσεων IP των συνδεδεμένων συσκευών IO. Με βάση το όνομα που έχει κάθε συσκευή και τη σχετική διεύθυνση MAC, ένας ελεγκτής IO μπορεί να αναγνωρίσει τις διαμορφωμένες συσκευές δικτύου και να τους εκχωρήσει τις καθορισμένες διευθύνσεις IP χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο DCP (Discovery and Configuration Protocol) που είναι ενσωματωμένο στο PROFINET IO. Σε άλλη περίπτωση η συνδεσιμότητα μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω διακομιστή DHCP. Μετά τον ορισμό των διευθύνσεων, το σύστημα ενεργοποιείται και οι παράμετροι μεταδίδονται στις συσκευές IO. Το σύστημα είναι στη συνέχεια έτοιμο προς κυκλοφορία δεδομένων. [26]

Το PROFINET IO χρησιμοποιεί τρία διαφορετικά κανάλια επικοινωνίας για να επικοινωνεί με τις συσκευές που υπάρχουν στο δίκτυο και συνήθως είναι λογικοί ελεγκτές και άλλες συσκευές όπως αναφέρθηκαν παραπάνω.

- Το κανάλι TCP/ IP λειτουργεί για παραμετροποιήσεις και ακυκλικές λειτουργίες ανάγνωσης ,εγγραφής δεδομένων.
- Το κανάλι RT ή Real Time χρησιμοποιείται για την τυπική κυκλική μεταφορά δεδομένων και για την μεταφορά σφαλμάτων. Οι επικοινωνίες RT παρακάμπτουν την τυπική διεπαφή TCP/ IP για να επιταχύνουν την ανταλλαγή δεδομένων με προγραμματιζόμενους ελεγκτές.
- Το τελευταίο κανάλι ισόχρονου πραγματικού χρόνου (IRT) είναι υπεύθυνο και χρησιμοποιείται για εφαρμογές ελέγχου κίνησης λόγο του ότι η μετάδοση της πληροφορίας γίνεται με πολύ υψηλή ταχύτητα. [26]

2.4.3.1 Σύγκριση Profibus - Profinet

Τα δίκτυα PROFIBUS συνήθως χαρακτηρίζεται από μωβ καλωδίωση ενός ζεύγους RS-485 και ο σύνδεσμος που χρησιμοποιείται είναι DB9 ή M12. Στα δίκτυα PROFINET οι καλωδιώσεις βιομηχανικής ποιότητας ethernet χαρακτηρίζονται από πράσινο χρώμα και οι σύνδεσμοι που χρησιμοποιούνται είναι RJ45 και M12 για περιβάλλοντα σε υψηλή έκθεση.

Το PROFIBUS που βασίζεται σε RS-485 και οι ταχύτητες που φτάνει είναι 12 Mbit/s αν και οι περισσότερες εφαρμογές έχουν μικρότερες ταχύτητες. Το telegram έχει μέγεθος 224 byte και μπορεί να υπάρχουν στο δίκτυο μέχρι και 126 συσκευές. Στα δίκτυα PROFINET ταχύτητες φτάνουν τα 1 Gbit/ s, το μέγεθος του telegram είναι 1440 byte και στο δίκτυο δεν υπάρχει περιορισμός στις συσκευές.

Μια άλλη σημαντική διαφορά μεταξύ του PROFIBUS και του PROFINET είναι ο μηχανισμός ανταλλαγής δεδομένων. Το PROFIBUS χρησιμοποιεί το μοντέλο master-slave, ενώ το PROFINET χρησιμοποιεί ένα μοντέλο παρόχου-καταναλωτών.

Στο PROFIBUS η επικοινωνία master-slave επιτρέπει μονοκατευθυντικό έλεγχο στις συσκευές και τις διαδικασίες και master θα έχει πάντα τον έλεγχο της επικοινωνίας. Το μοντέλο PROFINET είναι πιο ευέλικτο δηλαδή οι συσκευές που βρίσκονται στο δίκτυο

μπορεί να αναλάβουν ρόλους καταναλωτή αλλά και παρόχου έτσι αξιοποιείται η αμφίδρομη φύση του ethernet. [23][24]

3. Περιγραφή λειτουργίας Servo Drive για οδήγηση Servo κινητήρα

Οι σερβοκινητήρες χρησιμοποιούνται εδώ και αρκετά χρόνια στον τομέα ελέγχου κίνησης και σε εφαρμογές ελέγχου θέσης, ταχύτητας και ροπής άξονα. Με τους σερβοκινητήρες εκτός από απλό έλεγχο της ταχύτητας μπορείς να κάνεις και έλεγχο θέσης άξονα με την βοήθεια αισθητήρων (positioning). Αυτά τα αισθητήρια βρίσκονται στο σώμα του κινητήρα και ελέγχεται η ταχύτητα και η θέση του άξονα του κινητήρα. Με το πέρασ των χρόνων οι κινητήρες αυτοί λόγω του συνόλου των δυνατοτήτων που έδιναν σε έλεγχο κίνησης και ταχύτητας έγιναν η βάση για την κατασκευή και εξέλιξη της ρομποτικής. [10]

Οι κινητήρες αυτοί δεν είναι δυνατόν να σταθούν και να ολοκληρώσουν μόνοι τους μια εφαρμογή αλλά είναι ένα στοιχείο ενός συνόλου συστημάτων αυτοματισμού που επιτελούν λειτουργίες. Στο σύνολο του συστήματος εκτός από τον σερβοκινητήρα υπάρχει ο servo driver που αποτελεί τον συνδετικό κρίκο του συστήματος μεταξύ της μονάδας ελέγχου και του κινητήρα.

Οι σερβοκινητήρες δε μοιάζουν με τους κοινούς κινητήρες που υπάρχουν στην βιομηχανία. Ενσωματώνουν ένα σύστημα ανάδρασης που στέλνει πληροφορίες στο σύστημα οδήγησης του κινητήρα (servodrive) και σύμφωνα με αυτές τις πληροφορίες (θέση, ταχύτητα) υλοποιείται ο έλεγχος της ροπής και η ταχύτητα. Ο servo drive ή αλλιώς σερβοενισχυτής είναι αναπόσπαστο κομμάτι της λειτουργίας του σερβοκινητήρα. [10]

Οι σερβοκινητήρες από τη σκοπιά των ηλεκτροκινητήρων έχουν σαν κύριο χαρακτηριστικό την ικανότητα να αναπτύσσουν μεγάλη επιτάχυνση όταν ξεκινάνε από πλήρη ακινησία, δηλαδή να έχουν μεγάλη ροπή στρέψης και μικρή ροπή αδράνειας πράγμα που τους κάνει εξαιρετικά χρήσιμους σε ποικίλες εφαρμογές της βιομηχανίας. Για να επιτευχθούν αυτά τα δυο θα πρέπει:

1. Ο ρότορας να έχει μεγάλο μήκος και μικρή διάμετρο.
2. Να υπάρχουν περιελίξεις αντισταθμίσεως οι οποίες επιτρέποντας ανάπτυξη μεγαλύτερων ρευμάτων και αυξάνουν τη ροπή στρέψης.

3. Για μικρή ισχύος κινητήρες προβλέπεται μόνιμος μαγνήτης μέσα στους πόλους του οποίου και γύρω από ένα μόνιμο στέλεχος (όπως στα όργανα κινητού πλαισίου) περιστρέφεται το τύλιγμα του ρότορα .
4. Να είναι μειωμένη η σταθερά χρόνου $L.R$ του τυλίγματος του ρότορα. [10]



Σχήμα 3.α Σερβοσύστημα[15]

3.1 Τύποι σερβοκινητήρων

Η ισχύς του φορτίου σε συνδυασμό με τις τριβές που υπάρχουν είναι οι βασικοί παράμετροι για την επιλογή του σωστού σερβοκινητήρα για την εφαρμογή. Πέρα όμως από αυτά σημαντικό ρόλο παίζει και η επιθυμητή επιτάχυνση του ρότορα που χρειάζεται η εφαρμογή για το φορτίο. Οι σερβοκινητήρες που εμφανίζονται στην βιομηχανία χωρίζονται σε τέσσερις μεγάλες κατηγορίες. [10]

3.1.1 Επαγωγικοί σερβοκινητήρες

3.1.1.1 Δομή AC κινητήρα

Οι σερβοκινητήρες AC είναι οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενοι servo κινητήρες. Διατίθενται σε μονοφασικούς και τριφασικούς και για βιομηχανικές εφαρμογές διατίθενται από κλάσματα του ίππου έως και εκατοντάδες ίππους. Ο δρομέας είναι κατασκευασμένος από έναν πολυστρωματικό χάλυβα. Πάνω στον δρομέα βρίσκονται οι ράβδοι αγωγίου υλικού που είναι συνήθως αλουμινίου, χαλκού και βραχυκυκλώνονται και στα δύο άκρα. Ο στάτορας είναι κατασκευασμένος με πολυστρωματικό χάλυβα και έχει σχεδιαστεί κατάλληλα για να έχει εγκοπές πάνω του. Σε αυτές τις υποδοχές βλέπουμε έναν συγκεκριμένο αριθμό περιελίξεων οι οποίες συνδέονται με την τροφοδοσία για να δημιουργούνται τα μαγνητικά πεδία για την κίνηση του σερβοκινητήρα. [9]



Σχήμα 3.1.1a Ac servo[14]

3.1.1.2 Λειτουργία Ac κινητήρα

Στον στάτη του σερβοκινητήρα εφαρμόζεται τριφασική παροχή ρεύματος και έτσι αυτά τα ρεύματα παράγουν το μαγνητικό πεδίο του στάτη. Η τάση στα άκρα των αγωγών του δρομέα προκαλείται από την ακολουθία του δρομέα ως προς μαγνητικό πεδίο του στάτορα. Εάν η κίνηση του ρότορα είναι ίδια με την σύγχρονη ταχύτητα των τυλιγμάτων δεν θα υπάρχει κίνηση των αγωγών του δρομέα στο μαγνητικό πεδίο του στάτορα και έτσι δεν θα δημιουργούνται τάση από επαγωγή στα άκρα τους. Αν και ο ρότορας περιστρέφεται σύμφωνα με τα μαγνητικά πεδία του στάτορα ποτέ δεν είναι δυνατόν να εφαρμοστεί ταχύτητα ακριβώς ίση με την σύγχρονη ταχύτητα. Οι στάτες των επαγωγικών κινητήρων έχουν ίδια δομή με αυτούς των σύγχρονων κινητήρων. Η διαφορά βρίσκεται στον δρομέα. Υπάρχουν δύο τύποι δρομέων που βρίσκουμε σε επαγωγικούς κινητήρες. Ο πρώτος είναι ο δρομέας βραχυκυκλωμένου κλωβού (squirrel cage rotor) και ο δεύτερος είναι ο δακτυλιοφόρου δρομέα (wound rotor). Στο δακτυλιοφόρο δρομέα υπάρχουν ολισθαίνουσες επιφάνειες πάνω του σε συνδυασμό με ψύκτρες, ενώ στον δρομέα βραχυκυκλωμένου κλωβού δεν υπάρχουν ψύκτρες. [13]

3.1.2 Σερβοκινητήρες συνεχούς ρεύματος

3.1.2.1 Δομή DC κινητήρα

Οι μονοφασικοί σερβοκινητήρες συνεχούς ρεύματος χωρίζονται σε τέσσερις τύπους:

Στον πρώτο τύπο τα τυλίγματα του στάτορα τροφοδοτούνται από πηγή σταθερής τάσης ή και ρεύματος, ενώ το τύλιγμα του ρότορα που είναι ουσιαστικά αυτό που κάνει τον έλεγχο της κίνησης από μια τάση ελέγχου. Σε αυτούς τους σερβοκινητήρες αν διατηρούμε σταθερή την τάση ελέγχου, με την αύξηση της γωνιακής ταχύτητας ω του κινητήρα η ροπή στρέψης μικραίνει γραμμικά.

Ο δεύτερος τύπος σερβοκινητήρα είναι ελεγχόμενος από το στάτορα σε αντίθεση με τον προηγούμενο τύπο. Σε αυτόν τον τύπο το τύλιγμα του ρότορα, ο ρότορας τροφοδοτείται από μια σταθερή πηγή τάσεως ενώ οι περιελίξεις του στάτορα από τάση για τον έλεγχο της κίνησης. Σε αυτούς τους σερβοκινητήρες η γωνιακή ταχύτητα είναι ανεξάρτητη από

τη ροπή στρέψης του στάτορα και εξαρτάται μόνο από το ρεύμα που διαρρέει τον στάτορα και τη σταθερά K. Εντούτοις αν το μαγνητικό υλικό εργάζεται στον κόρο, η γωνιακή ταχύτητα του στάτορα επηρεάζει την ροπή στρέψης και σε πολύ μεγάλες γωνιακές ταχύτητες η ροπή γίνεται μικρότερη διότι αυξάνεται σε υψηλά επίπεδα η αντιηλεκτροεγερτική δύναμη.

Ο τρίτος τύπος σερβοκινητήρα είναι αυτός με τα τυλίγματα του στάτορα και του ρότορα συνδεδεμένα σε σειρά. Οι σερβοκινητήρες αυτοί εμφανίζονται με διπλό τυλίγμα στο στάτορα και βρίσκονται σε συνδεσμολογία σειράς με την περιέλιξη του δρομέα με τη βοήθεια ηλεκτρονόμων. Το μέγεθος του ρεύματος ελέγχου και της γωνιακής ταχύτητας προσδιορίζει τη ροπή στρέψης που μεταβάλλεται εκθετικά. Η ροπή στρέψης έχει μεγάλη τιμή όταν ξεκινάει ο σερβοκινητήρας οπότε η γωνιακή ταχύτητα είναι μικρή και όταν η γωνιακή ταχύτητα τέλος μεγαλώσει η ροπή θα μικρύνει απότομα. Αυτού του είδους οι σερβοκινητήρες χρησιμοποιούνται κυρίως σε εφαρμογές όπου απαιτείται μεγάλη ροπή στην εκκίνηση του σερβοκινητήρα αφού η γραμμικότητα δεν παίζει κανένα ρόλο. [9][10]

Τέλος, υπάρχει και ένας ιδιαίτερος τύπος σερβοκινητήρα, αυτός με τον μόνιμο μαγνήτη. Αυτός ο σερβοκινητήρας αντί για τυλίγματα στο στάτορα έχει ένα μόνιμο μαγνήτη και ο ρότορας κάνει τον έλεγχο της κίνησης μέσω των δικών του τυλιγμάτων. Είναι αρκετά συνήθεις σε εφαρμογές συστημάτων πάνω σε αεροπλάνα και έχει ομοιότητες με τους σύγχρονους κινητήρες παράλληλης διέγερσης. Ο μικρός όγκος του κινητήρα εξηγείται από το ειδικό κράμα μόνιμου μαγνήτη που έχει.

3.1.3 Σύγχρονοι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη



Σχήμα 3.1.3a Σύγχρονος κινητήρας Μόνιμου Μαγνήτη

Πάνω από 5 δισεκατομμύρια κινητήρες κατασκευάζονται κάθε χρόνο και έχουν μεγάλη σημαντικότητα στην ζωή του σύγχρονου ανθρώπου. Λόγω της αυξημένης ζήτησης σε εφαρμογές η εξέλιξη των τεχνολογιών βοήθησε για την δημιουργία κινητήρων που αποτελούνται από ημιαγωγικά στοιχεία και μόνιμους μαγνήτες υψηλής απόδοσης σε συνδυασμό με αρκετά μικρό κόστος. Οι σύγχρονοι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη αποτελούν μια πλέον αναγκαία και δημοφιλή λύση για διάφορες εφαρμογές ανάλογα την αναγκαιότητα τους. Αυτοί οι κινητήρες είναι γνωστοί και ως Brushless DC (BLDC) . [19]

Οι σύγχρονοι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη είναι κατασκευασμένοι με τριφασική περιέλιξη στον στάτορα και στον δρομέα έχουν μόνιμο μαγνήτη. Το πλεονέκτημα αυτών των κινητήρων είναι ότι δεν υπάρχει αντίσταση στον δρομέα λόγο του μόνιμου μαγνήτη και έτσι η απόδοση είναι αρκετά μεγάλη και η ροπή τους προς όγκο μηχανής είναι μεγαλύτερη σε σχέση με τους επαγωγικούς κινητήρες. Οι κινητήρες αυτοί έχουν σαν μειονέκτημα την δυσκολία απαγωγής της θερμοκρασίας από τους μόνιμους μαγνήτες που

βρίσκονται στον δρομέα. Λόγο του ότι οι μαγνήτες επηρεάζονται σημαντικά από την θερμοκρασία βλέποντας αλλαγές στο βαθμό απομαγνητισμού τους, έτσι είναι πολύ σημαντικό να επικρατούν χαμηλές θερμοκρασίες. Υπάρχουν δύο ειδών κινητήρες μόνιμου μαγνήτη, οι ημιτονοειδής και οι τραπεζοειδής ή και αλλιώς τετραγωνικού παλμού. Ονομάζονται έτσι ανάλογα με την μορφή της μαγνητεγερτικής δύναμης των τυλιγμάτων τους αλλά και την τεχνική ελέγχου τους. Οι ημιτονοειδής κινητήρες ονομάζονται έτσι γιατί τα ρεύματα του στάτη είναι τριφασικά ημιτονοειδή και η λειτουργία τους βασίζεται στο στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο του διάκενου. Οι κινητήρες τετραγωνικού παλμού τροφοδοτούνται με τριφασικά ρεύματα τετραγωνικού παλμού στον στάτη και η αρχή λειτουργίας τους μοιάζει με αυτή των κλασσικών μηχανών DC ρεύματος.

Οι μαγνήτες των κινητήρων αυτών είναι τοποθετημένοι στο εσωτερικό του δρομέα (interior type) ή στην επιφάνεια του (surface type). Στους κινητήρες τετραγωνικού παλμού οι μαγνήτες που χρησιμοποιούνται είναι τοποθετημένοι στην επιφάνεια του δρομέα ενώ στους κινητήρες ημιτονοειδούς τάσης οι μαγνήτες προσδιορίζουν τη λειτουργία τους σαν κινητήρες έκτυπων πόλων ή σαν κινητήρες συμβατικούς με τύλιγμα διέγερσης.

Οι κύριοι μόνιμοι μαγνήτες που χρησιμοποιούνται στα σερβοκινητήρα συστήματα αλλά και γενικά στις ηλεκτρικές μηχανές είναι:

- Οι κεραμικοί μαγνήτες οι οποίοι συνίστανται από οξείδιο του σιδήρου και καρβίδιο του βαρίου ή του στροντίου. Οι κεραμικοί μαγνήτες χρησιμοποιούνται σε κινητήρες μικρής σχετικά ισχύος για μη ενεργοβόρες διαδικασίες ελέγχου.
[12]
- Οι μαγνήτες AlNiCo, δηλαδή οι μαγνήτες αλουμινίου-κοβαλτίου, οι οποίοι είναι δυνατόν να περιέχουν ίχνη από σίδηρο, χαλκό και τιτάνιο. Σήμερα δεν περιλαμβάνονται στο σχεδιασμό των καινούργιων κινητήρων εξαιτίας του υψηλού κόστους τους και της σχετικά εύκολης απομαγνήτισής τους σε συνθήκες ανοικτού κυκλώματος.

- Οι μαγνήτες Σαμαριού Κοβαλτίου, οι οποίοι λόγω του μεγάλου κόστους τους χρησιμοποιούνται μόνο σε εφαρμογές, στις οποίες η υψηλή θερμοκρασία και η αντοχή σε διάβρωση αποτελούν κρίσιμες παραμέτρους.
- Οι μαγνήτες Νεοδύμιου Σιδήρου Βορίου (NdFeB) είναι οι πιο σύγχρονη γενιά μαγνητών. Οι εξαιρετικές μαγνητικές τους ιδιότητες τους καθιστούν παράλληλα κατάλληλους και για συμπαγείς κατασκευές σε χρήσεις που απαιτούν μικρότερα κόστη κατασκευής. Το μεγάλο τους μειονέκτημα είναι ότι διαβρώνονται πολύ εύκολα. [10]

3.1.4 Υδραυλικός σερβοκινητήρας

Οι υδραυλικοί σερβοκινητήρες αποτελούνται από έναν κυλινδρικό κινητήρα, είτε από ένα ρευστό κινητήρα που για να φέρει εις πέρας μηχανολογικές λειτουργίες χρησιμοποιεί την υδραυλική του δύναμη. Οι κινήσεις που μπορεί να κάνει ένα τέτοιο μηχανολογικό σύστημα είναι γραμμικές, περιστροφικές αλλά και ταλαντωτικές. Λόγω των ιδιοτήτων των υγρών που είναι σχετικά ασυμπίεστα οι υδραυλικοί κινητήρες ασκούν πολύ μεγάλες δυνάμεις αλλά υπάρχει περιορισμός στην επιτάχυνση. Η αρχή λειτουργίας του κινητήρα είναι πολύ απλή. Ένα έμβολο που κινείται κατά μήκος μέσα σε έναν κυλινδρικό σωλήνα. Υπάρχουν δύο ειδών κινητήρες οι μονής και διπλής ενέργειας. Στους κινητήρες μονής ενέργειας η πίεση του ρευστού εφαρμόζεται μόνο σε μία πλευρά του εμβόλου και για να επανέλθει στην αρχική του θέση χρησιμοποιείται συνήθως ένα ελατήριο. Σε αντίθεση με τους κινητήρες διπλής ενέργειας η πίεση εφαρμόζεται και στις δύο πλευρές του εμβόλου και έτσι μπορεί και γίνεται έλεγχος ανάλογα σε ποιά μεριά πιέζει το ρευστό. Οι κινητήρες αυτοί έχουν την δυνατότητα για μεταφορική αλλά και περιστροφική κίνηση.

3.1.5 Πνευματικός σερβοκινητήρας

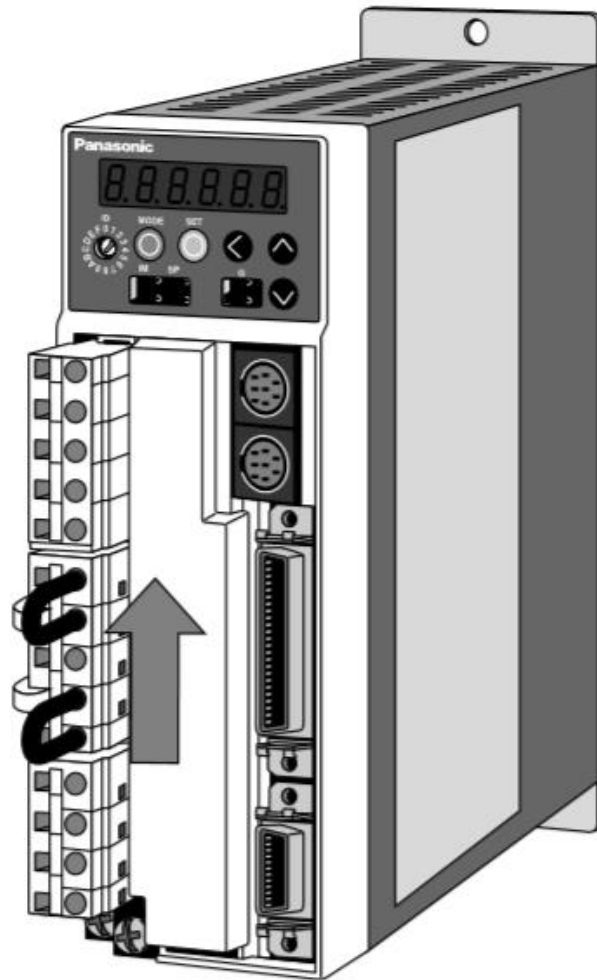
Οι πνευματικοί σερβοκινητήρες εκμεταλλεύονται τη διαφορά της πίεσης μεταξύ δύο περιοχών και τη μετατρέπουν σε περιστροφική, είτε γραμμική κίνηση. Η πνευματική ενέργεια είναι απαραίτητη για να γίνει έλεγχος στον κινητήρα και αξιοποιείται στην εκκίνηση και στο σταμάτημα της μηχανής. Η πνευματική ενέργεια δε χρειάζεται να υπάρχει σε απόθεμα για να λειτουργήσει η μηχανή εξάλλου οι πνευματικοί κινητήρες

μπορούν και παράγουν μεγάλες δυνάμεις από μικρές μεταβολές στην πίεση τους. Αυτές οι δυνάμεις είναι συνήθως υπεύθυνες για την μετακίνηση διαφραγμάτων μέσα σε βαλβίδες που επηρεάζουν την ροή υγρών που περνάνε από μέσα τους. Η ισχύς που παράγεται είναι αποτέλεσμα της μετατροπής την πίεσης των πνευματικών σερβοκινητήρων. Ο έλεγχος αυτών των σερβοκινητήρων είναι αρκετά δύσκολος λόγω της συμπεριστασίας των ρευστών. Για αυτό το λόγο οι πιο συνήθεις εφαρμογές που χρησιμοποιούνται αυτά τα συστήματα, είναι εφαρμογές μικρής ακρίβειας.

3.2 Οδήγηση και αίσθηση

3.2.1 Σερβοενισχυτής (servo drivers)

Οι σέρβο μονάδες ακολουθούν εντολές από τον κεντρικό ελεγκτή και ελέγχουν τη ροπή εξόδου, την ταχύτητα περιστροφής ή τη θέση των κινητήρων. Η θέση, η ταχύτητα και η ροπή ελέγχονται σύμφωνα με τις εισόδους από έναν ελεγκτή κίνησης, έναν κωδικοποιητή ανατροφοδότησης και τον ίδιο τον σερβοκινητήρα. Η σέρβο μονάδα παρέχει τις κατάλληλες ποσότητες ισχύος στον σερβοκινητήρα στις κατάλληλες στιγμές. Η βασική αρχή λειτουργίας είναι η ίδια όπως για έναν μετατροπέα, που ο κινητήρας λειτουργεί μετατρέποντας την ισχύ εναλλασσόμενου ρεύματος σε ισχύ DC σε συγκεκριμένη συχνότητα. [11]



Σχήμα 3.2.1α Σερβοενισχυτής[15]

Μια σέρβο μονάδα έχει επίσης τις ακόλουθες λειτουργίες:

- Επικοινωνία με τον ελεγκτή κίνησης
- Ανάγνωση ανατροφοδότησης κωδικοποιητή και έλεγχος κλειστού βρόχου σε πραγματικό χρόνο και προσαρμογή.
- Επεξεργασία εισόδου / εξόδου για εξαρτήματα ασφαλείας, εισόδους λειτουργίας και σήματα εξόδου κατάστασης λειτουργίας. [11]

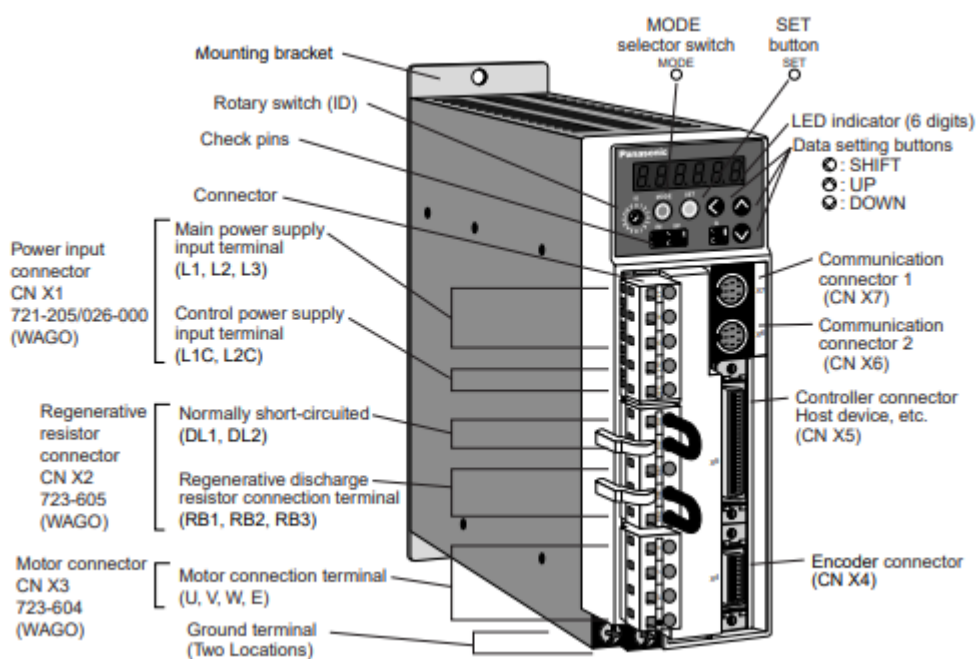
Ο έλεγχος ενός σερβοκινητήρα γίνεται με τον έλεγχο της θέσης του κινητήρα και την ρύθμιση της ταχύτητας του. Η ρύθμιση αυτή βασίζεται στα συστήματα ανάδρασης που έχει ο σερβοκινητήρας. Η ροπή του κινητήρα προσδιορίζεται από το κύκλωμα της ταχύτητας (σερβοκύκλωμα) που ο ρόλος του είναι να παράγει σήματα που προσδιορίζουν το σφάλμα μεταξύ της αρχικής εντολοδότησης για την ταχύτητα και της ταχύτητας που λαμβάνει στιγμιαία το κύκλωμα. Λόγω του ότι ο έλεγχος δεν περιορίζεται μόνο στην ταχύτητα, σε σειρά με το κύκλωμα της ταχύτητας υπάρχει και το κύκλωμα για τον έλεγχο της θέσης.

Σημαντική παράμετρος για τον έλεγχο ενός σερβοκινητήρα παίζει και η ένταση του σήματος ανάδρασης. Συχνά χρησιμοποιούνται φίλτρα που συνδέονται σε σειρά με τα κυκλώματα ελέγχου ταχύτητας, διότι σε περιπτώσεις, που η ρύθμιση του σήματος ανάδρασης είναι σε υψηλή στάθμη το σύστημα γίνεται σχετικά ασταθές.

Ο έλεγχος των σερβοκινητήρων γίνεται με την εντολοδότηση των κατάλληλων σημάτων ροπής που έρχονται από τον servo driver. Σε κινητήρες που έχουν ψύκτρες και κατά κύριο λόγο είναι κινητήρες DC ρεύματος, ο έλεγχος του κινητήρα γίνεται στέλνοντας ρεύμα στα τυλίγματα του σερβοκινητήρα επειδή η ροπή είναι σχεδόν ανάλογη του ρεύματος των τυλιγμάτων. Τα κυκλώματα που κάνουν τον έλεγχο του ρεύματος μοιάζουν με τα κυκλώματα του ελέγχου της ταχύτητας αλλά λειτουργούν σε υψηλότερες συχνότητες (μεγαλύτερη δειγματοληψία). Το κύκλωμα ρεύματος παίρνει εντολοδότηση ρεύματος από το servo drive και κάνει real time σύγκριση με τα ρεύματα που έρχονται σαν ανάδραση από τον κινητήρα. Ανάλογα με τα δεδομένα ελέγχου που υπάρχουν την εκάστοτε στιγμή, δηλαδή εάν ο κινητήρας χρειάζεται να αναπτύξει μεγαλύτερη ή μικρότερη ροπή, αυξάνεται ή αντιστοίχως μειώνεται η εφαρμοσμένη τάση στον κινητήρα για να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα στο ρεύμα των τυλιγμάτων. Αυτά τα δεδομένα ελέγχου και γενικότερα ο έλεγχος του κινητήρα γίνεται με πολύπλοκους αλγορίθμους που υπολογίζουν τα ρεύματα που θα παράξει η πηγή ισχύος για να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις των κυκλωμάτων ελέγχου ταχύτητας και θέσης. [11,15]

Ο σερβοενισχυτής διαθέτει μια σειρά θυρών για να συνδέεται με το συνολικό σερβοσύστημα. Όπως είχαμε αναφέρει και στη αρχή του κεφαλαίου ο σερβοενισχυτής είναι ο συνδετικός κρίκος του σερβοκινητήρα με το συνολικό κύκλωμα αυτοματισμού. Ο servo drive λοιπόν διαθέτει :

- Θύρα τροφοδοσίας: Οπού από εκεί τροφοδοτείται ο servo driver με τριφασική πηγή ρεύματος.
- Θύρα τροφοδοσίας κινητήρα για πηγή ρεύματος του σερβοκινητήρα.
- Θύρα σύνδεσης αντιστάσεων για λειτουργία φρεναρίσματος σερβοκινητήρα.
- Θύρα σύνδεσης encoder σερβοκινητήρα (ανάδραση).
- Θύρα επικοινωνίας servo drive με Plc για τον κεντρικό έλεγχο από το σύστημα αυτοματισμού.
- Θύρα επικοινωνίας με H/Y μέσω του οποίου προγραμματίζονται οι παράμετροι για βέλτιστο έλεγχο.[15]



Σχήμα 3.2.1β Servo Drive Connection[15]

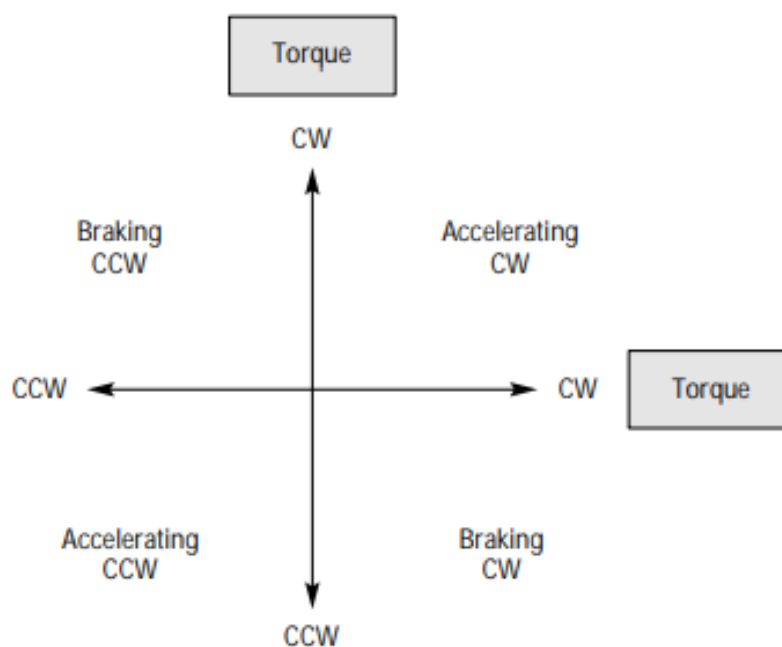
Πολλοί σερβοενισχυτές διαθέτουν θύρες εισαγωγής σημάτων που χρησιμεύουν για σχεδιαστικές επιλογές όπως για παράδειγμα σύνδεση επιπλέον proximity, μπουτόν, τερματικών που δεν υπάρχει αναγκαιότητα να περνάνε από το PLC. [15,11]

Οι σερβοενισχυτές τόσο για DC brushed όσο και για σερβοκινητήρες Brushless είναι, είτε αναλογικοί, είτε ψηφιακοί. Η αναλογική μονάδα χρησιμοποιείται πολλά χρόνια τώρα, ενώ η ψηφιακή μονάδα είναι η διαδοχή της. Και οι δύο τύποι εμφανίζουν πλεονεκτήματά ανά τις εφαρμογές. Στον αναλογικό σερβοενισχυτή, η ταχύτητα του κινητήρα είναι ανάλογη μιας αναλογικής τάσης εισόδου στον σερβοενισχυτή και είναι συνήθως στην περιοχή ± 10 Volt. Η μεγαλύτερη ταχύτητα που μπορεί να δώσει ο σερβοενισχυτής αντιπροσωπεύεται από +10volt στην μία πλευρά κίνησης (clockwise) και η πλήρης αντίστροφη ταχύτητα κατά -10volts(anticlockwise). Στα μηδενικά 0 Volt το σύστημα βρίσκεται σε σταθερή ακίνητη κατάσταση και οι ενδιάμεσες τάσεις αντιπροσωπεύουν ταχύτητες ανάλογες με την μέγιστη τάση. Οι ρυθμίσεις που απαιτούνται για το συντονισμό ενός αναλογικού servo driver γίνονται συνήθως με ποτενσιόμετρα και κλασικούς αυτοματισμούς. Η σωστή παραμετροποίηση των ποτενσιόμετρων στις κατάλληλες τιμές μπορεί να γίνει αρκετά γρήγορα αλλά σε μερικές δύσκολες εφαρμογές μπορεί να αποδειχθεί αρκετά περίπλοκο.

Από την άλλη πλευρά τα ψηφιακά πλέον servodrive έφεραν μια εναλλακτική λύση στο αναλογικό σύστημα στα οποία πραγματοποιείται συντονισμός στέλλοντας δεδομένα από ένα P1c μέσω πρωτοκόλλου ή σημάτων ή και έναν βιομηχανικό υπολογιστή. Με τον ψηφιακό σερβοενισχυτή η επανάληψη μεταξύ μονάδων και δεδομένων είναι εύκολη και λόγω του ότι χρησιμοποιούνται μικροπολογιστικά συστήματα οι δυνατότητες είναι τεράστιες από άποψη συντονισμού. Επίσης, τα σήματα των εισόδων σε έναν σερβοενισχυτή μπορούν να είναι αναλογικά αλλά μπορεί εξίσου να έχουν τη μορφή ψηφιακών σημάτων. Οι ψηφιακοί σερβοενισχυτές χρησιμοποιούνται συχνότερα σε συνδυασμό με σερβοκινητήρες Brushless παρά με κινητήρες συνεχούς ρεύματος DC. Αυτοί οι σερβοενισχυτές είναι σχεδόν εξ ολοκλήρου ψηφιακοί, με εξαίρεση το στάδιο ισχύος που παρέχει ρεύμα στον κινητήρα. Η ανάδραση της ταχύτητας προέρχεται είτε από έναν encoder είτε από ένα κύκλωμα ανάλυσης ρευμάτων που επεξεργάζεται τα σήματα που δέχεται ως ψηφιακές πληροφορίες.

Στους αναλογικούς σερβοενισχυτές η ταχύτητα του κινητήρα μετρείται από μια ταχογεννήτρια που είναι προσαρμοσμένη πάνω στον άξονα του σερβοκινητήρα. Η ταχογεννήτρια παράγει μια τάση ανάλογη προς την ταχύτητα που κινείται ο κινητήρας και συγκρίνεται με το ρεύμα που διατρέχει τον σερβοκινητήρα. Το αποτέλεσμα αυτής

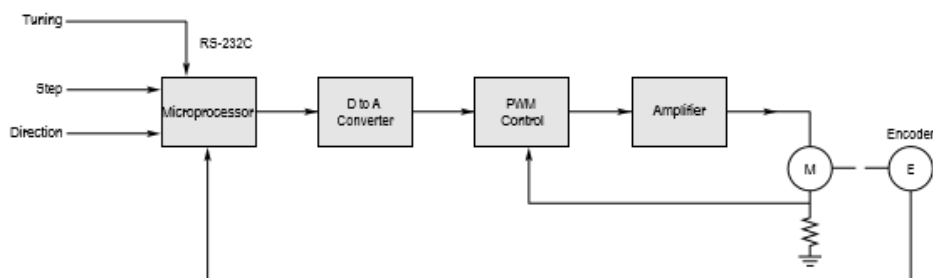
της σύγκρισης είναι ένας έλεγχος ροπής που έχει σαν αποτέλεσμα τον συνολικό έλεγχο του κινητήρα. Σε περίπτωση που η ταχύτητα είναι χαμηλότερη από την αναμενόμενη ο σερβοκινητήρας θα δώσει περισσότερο ρεύμα για να φτάσει την επιθυμητή. Ομοίως σε περίπτωση που η ταχύτητα του σερβοκινητήρα είναι μεγαλύτερη από ότι έχει οριστεί την συγκεκριμένη στιγμή από τον σερβοενισχυτή θα δοθεί λιγότερο ρεύμα προς τον σερβοκινητήρα και θα έχουμε ένα φαινόμενο πέδησης φτάνοντας τελικά στην επιθυμητή ταχύτητα. Αυτός ο τύπος ενισχυτή αναφέρεται συχνά και ως μονάδα τεσσάρων τεταρτημορίων επειδή μπορεί να παράγει ροπή επιτάχυνσης και πέδησης και στις δύο κατευθύνσεις περιστροφής. Εάν σχεδιαστεί ένα διάγραμμα που αντιπροσωπεύει την κατεύθυνση περιστροφής σε έναν άξονα και την κατεύθυνση της ροπής στον άλλον θα δειχθεί ότι ο έλεγχος γίνεται σε τέσσερα τελικά «τεταρτημόρια».



Σχήμα 3.2.1γ Έλεγχος σε Τεταρτημόρια[16]

Ο ενισχυτής της ταχογεννήτριας έχει υψηλό κέρδος ρεύματος και έτσι είναι αρκετά ευαίσθητος σε διακυμάνσεις της ταχύτητας με αποτέλεσμα να μπορεί να παράξει ένα μεγάλο σήμα σφάλματος προς τον σερβοενισχυτή. Λόγου αυτού η ακρίβεια του ελέγχου ταχύτητας είναι πολύ υψηλή ακόμα και όταν υπάρχουν μεγάλες αλλαγές στο φορτίο. Η ανάγκη για ροπή από τον ενισχυτή ικανοποιείται δίνοντας περισσότερο ρεύμα στον

κινητήρα και ο έλεγχος του ρεύματος γίνεται μέσω ενός βρόχου ανάδρασης που συγκρίνει τη ζήτηση ροπής του συστήματος με το υπάρχον ρεύμα στον κινητήρα. Αυτό το ρεύμα μετριέται από μια αντίσταση αίσθησης R, η οποία στα άκρα της έχει μία ανάλογη τάση ως προς τα ρεύματα που διαρρέουν τον σερβοκινητήρα. Αυτός ο εσωτερικός βρόχος ανατροφοδότησης ονομάζεται ενισχυτής ροπής λόγω του ότι δημιουργεί ροπή σαν ανάδραση σε μια απαίτηση από τον ενισχυτή ταχύτητας. [16]



Σχήμα 3.2.1δ Control digital Servodrive[16]

Στο σχήμα 3.2.1δ φαίνεται το πως λειτουργεί μια μονάδα ψηφιακού σερβοενισχυτή για να οδηγήσει ένα σερβοκινητήρα. Οι κύριες λειτουργίες ελέγχου εκτελούνται από έναν μικροεπεξεργαστή οποίος οδηγεί έναν μετατροπέα D-σε-A που δουλειά του είναι να παράγει αναλογικό σήμα που δείχνει την ζήτηση ροπής για τον κινητήρα. Από εκεί και πέρα το σύστημα ελέγχου μοιάζει με αυτό του αναλογικού σερβοενισχυτή. Οι ανατροφοδότηση έρχεται από τον κωδικοποιητή που είναι εφαρμοσμένος πάνω στον άξονα του κινητήρα και δημιουργεί ένα ρεύμα παλμού. Το σήμα αυτό λαμβάνετε από τον επεξεργαστή, ο οποίος μπορεί και προσδιορίζει την απόσταση και την ταχύτητα από την συχνότητα των παλμών που κινήθηκε ο σερβοκινητήρας. Η αρχή λειτουργίας του ψηφιακού σερβοενισχυτή είναι όμοια με του αναλογικού, με τη διαφορά ότι ο έλεγχος γίνεται με μια σειρά από εξισώσεις και αλγορίθμους που έχουν συμπεριφορά ανάλογη του αναλογικού συστήματος. Στο συνολικό έλεγχο εκτός από τους αλγορίθμους σημαντικό ρόλο παίζουν και οι παράμετροι που έχει δώσει ο χειριστής (ταχύτητα εξόδου, ρυθμός αλλαγής εισόδου, ρυθμίσεις συντονισμού). Η ρύθμιση των παραμέτρων γίνεται με κουμπιά στο user interface του σερβοενισχυτή ή και με αποστολή δεδομένων από ένα PLC ή υπολογιστή. Σε εφαρμογές που τα φορτία είναι μεταβλητά συχνά χρειάζεται να

αλλάζονται παράμετροι στον σερβοενισχυτή για να επιτυγχάνεται σταθερή απόδοση. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την συνεχή ενημέρωση από ένα σύστημα PLC ή υπολογιστή που υπάρχει μέσα στο σύστημα αυτοματισμού. Για την επίλυση όλων των εξισώσεων που τρέχουν στον μικροεπεξεργαστή χρειάζονται ταχύτητες μεταξύ των 100μs και 2ms και κατά τον υπολογισμό για την προσαρμογή του συστήματος η έξοδος παραμένει σταθερή στην προηγούμενη τιμή. Ο χρόνος αυτός καθίσταται πολύ σημαντικός για τον έλεγχο του συστήματος και την απόδοση ενός καλού υψηλής απόδοσης σερβομηχανισμού. [16]

3.2.2 Μέθοδος οδήγηση κινητήρα συνεχούς ρεύματος

Οι διατάξεις αυτές μετατρέπουν την εναλλασσόμενη τάση εισόδου σε μια ελεγχόμενου μεγέθους τάση DC, μεταβάλλοντας την γωνία έναυσης διακοπτικών στοιχείων ισχύος (θυρίστορ). Η μεταγωγή ή αλλιώς η μετάβαση, δηλαδή η εναλλαγή του ρεύματος από το ένα θυρίστορ στο επόμενο είναι σχετικά εύκολη με την φυσική μεταγωγή (**natural or line commutation**) που οφείλεται στην εναλλασσόμενη τάση του δικτύου. Όταν ένα θυρίστορ έχει έναυση την κατάλληλη χρονική στιγμή προκαλείται ανάστροφη πόλωση με αποτέλεσμα να έχουμε σβέση του προηγούμενου θυρίστορ και έτσι δεν απαιτείται χρήση επιπλέον κυκλωμάτων για δημιουργία κάποιας εξαναγκασμένης μεταγωγής. Αυτό βοηθάει στο χαμηλό κόστος των εφαρμογών αλλά και στη μικρή πολυπλοκότητα της κατασκευής τους. Η απόδοση των διακοπτικών στοιχείων θεωρείται αρκετά καλή που μερικές φορές περνάει και το 90% και οι σχετικές μικρές απώλειες οφείλονται στην κατασκευή και στις θερμοκρασίες. Οι μετατροπείς σχεδιάζονται μονοφασικοί αλλά και τριφασικοί ανάλογα με τις απαιτήσεις ρεύματος (για μικρές ισχύς έως 20 hp μονοφασικοί-τριφασικοί έως 150 hp) ,το αν υπάρχει αναγκαιότητα από αντιστροφής (έλεγχος πολλών τεταρτημορίων) και από το μέγεθος διακύμανσης της ανορθωμένης τάσης. Υπάρχουν τρεις βασικοί τύποι λειτουργίας στα τεταρτημόρια :

ΚΥΚΛΩΜΑ	ΤΥΠΟΣ	ΤΥΠΙΚΗ ΙΣΧΥΣ	ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΚΥΜΑΤΩΣΗΣ	ΤΕΤΑΡΤΗΜΟΡΙΟ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ
	ΑΠΛΗ ΑΝΟΡΘΩΣΗ ΜΕΣΟΥ ΚΥΜΑΤΟΣ	έως 1 Hp	f	
	ΜΟΝΟΦΑΣΙΚΗ ΗΜΙΕΛΕΓΧΟΜΕΝΗ ΓΕΦΥΡΑ	έως 20 Hp	2f	
	ΠΛΗΡΟΣ ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΗ ΜΟΝΟΦΑΣΙΚΗ ΓΕΦΥΡΑ	έως 20 Hp	2f	
	ΜΟΝΟΦΑΣΙΚΟΣ ΔΙΠΛΟΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑΣ	έως 20 Hp	2f	

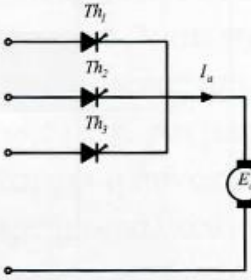
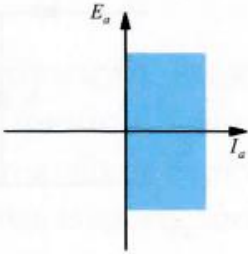
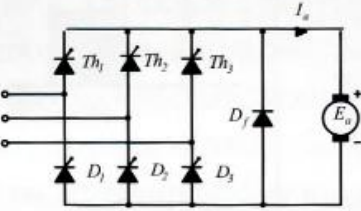
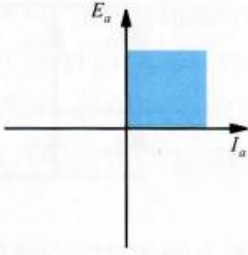
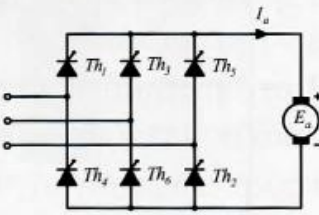
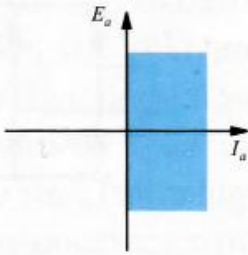
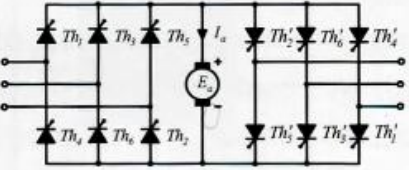
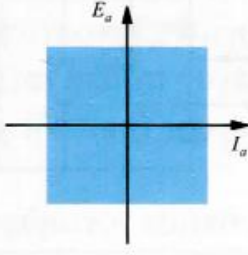
Σχήμα 3.2.2a Μονοφασικές Διατάξεις Ελέγχου Κινητήρα Συνεχούς ρεύματος[17]

- Οι ημιελεγχόμενες διατάξεις όπου η λειτουργία τους βρίσκεται στο πρώτο τεταρτημόριο που σημαίνει ότι η τάση και το ρεύμα έχουν καθορισμένη πολικότητα από την πλευρά του συνεχούς ρεύματος.
- Οι πλήρης ελεγχόμενες διατάξεις λειτουργούν σε δυο τεταρτημόρια, διότι σε αυτούς του μετατροπείς είναι δυνατόν να αντιστραφεί η πολικότητα της τάσης όχι όμως η φορά του ρεύματος γιατί οι διόδοι και τα θυρίστορ είναι στοιχεία που φέρουν μια φορά λειτουργίας.

- Η τρίτη κατηγορία διάταξης λειτουργίας μετατροπέα είναι οι διπλοί μετατροπείς που λειτουργούν σε 4 τεταρτημόρια και αυτή την φορά φέρουν δύο ζεύγη από αντεστραμμένες γέφυρες για να υπάρχουν δύο φορές λειτουργίας.

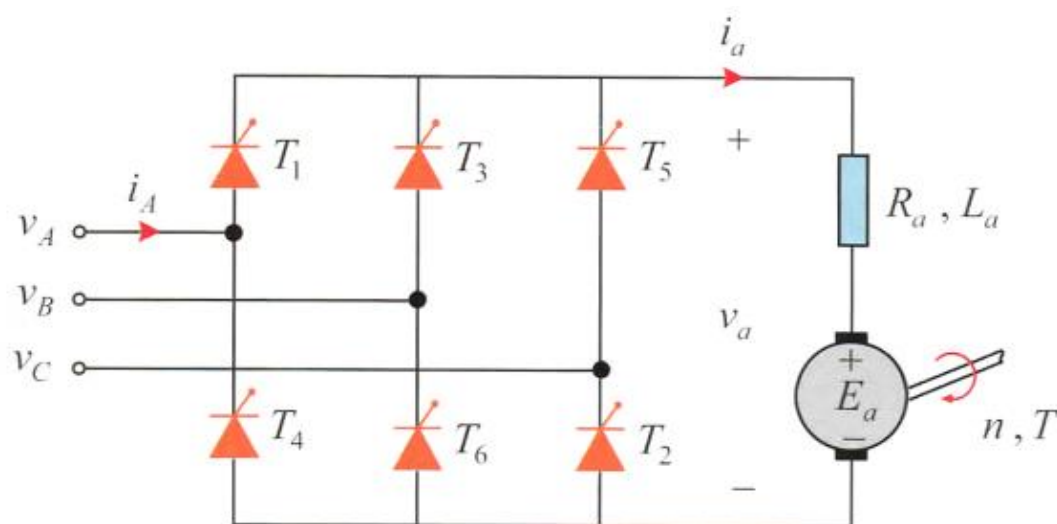
Είναι συχνό φαινόμενο να παρατηρείται μια διάδοσ στα άκρα των τυλιγμάτων του τυμπάνου του κινητήρα που είναι πολωμένη ανάποδα. Το όνομα αυτής της διάδοσ είναι διάδοσ ελεύθερης ροής και ο λόγος ύπαρξης της είναι να καταναλώνει την ενέργεια της αυτεπαγωγής των πηνίων του τυμπάνου όταν τα θυρίστορ δεν άγουν.

Αυτές οι διάδοσ είναι εξαιρετικά γρήγορες στην αναδιάταξη των φορέων τους και σαν αποτέλεσμα έχουν να μην κινδυνεύει το κύκλωμα από υπερτάσεις. Οι μετατροπείς μισού κύματος δεν χρησιμοποιούνται συχνά λόγω του ότι τις περισσότερες φορές η αγωγή του τυμπάνου είναι ασυνεχής λόγω της μικρής τους αυτεπαγωγής. Στις άλλες δύο διατάξεις μονοφασικών μετατροπέων η αγωγή του ρεύματος μπορεί να είναι συνεχείς ή και ασυνεχής. Σε αντίθεση με τους τριφασικούς μετατροπείς τα ρεύματα των τυμπάνων στο σύνολο των περιπτώσεων είναι συνεχή. Τέλος είναι σημαντικό να διευκρινιστεί ότι στη ρύθμιση της ταχύτητας όπως και επίσης στη δυναμική απόκριση του μετατροπέα σημαντικό ρόλο παίζει το είδος της αγωγής του ρεύματος. [17]

ΚΥΚΛΩΜΑ	ΤΥΠΟΣ	ΤΥΠΙΚΗ ΙΣΧΥΣ	ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΚΥΜΑΤΩΣΗΣ	ΤΕΤΑΡΤΗΜΟΡΙΟ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ
	ΤΡΙΦΑΣΙΚΗ ΑΝΟΡΘΩΣΗ ΜΙΣΟΥ ΚΥΜΑΤΟΣ	έως 50 Hp	3f	
	ΤΡΙΦΑΣΙΚΗ ΗΜΙΕΛΕΓΧΟΜΕΝΗ ΓΕΦΥΡΑ	έως 150 Hp	6f	
	ΠΛΗΡΩΣ ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΗ ΤΡΙΦΑΣΙΚΗ ΓΕΦΥΡΑ	έως 150 Hp	6f	
	ΤΡΙΦΑΣΙΚΟΣ ΔΙΠΛΟΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑΣ	έως 150 Hp	6f	

Σχήμα 3.2.2β Τριφασικές Διατάξεις Ελέγχου Κινητήρα Συνεχούς ρεύματος[17]

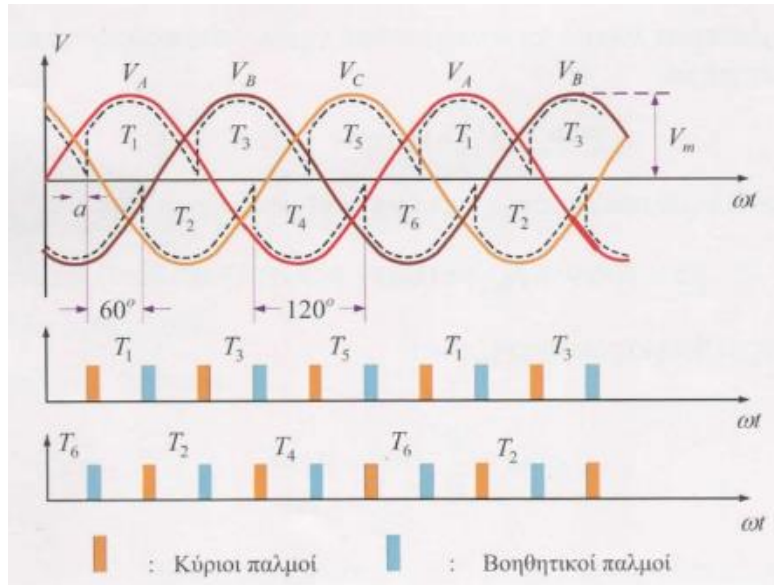
3.2.2.1 Πλήρως ελεγχόμενη τριφασική γέφυρα



Σχήμα 3.2.2.1a Πλήρως Ελεγχόμενη Τριφασική Γέφυρα[17]

Είναι η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος για την οδήγηση κινητήρων μεγάλων φορτίων. Μια περίοδος λειτουργίας της γέφυρας αποτελείται από έξι παλμούς που άγουν τα θυρίστορ για να δημιουργήσουν το ρεύμα στην έξοδο της. Δηλαδή σε περίπτωση που έχουμε μια τάση τροφοδοσίας τριφασικού ρεύματος στα 50Hz η συχνότητα της θεμελιώδους συνιστώσας φτάνει και τα 300Hz. Με την αύξηση της συχνότητας οι χρόνοι για να υπάρξει εκφόρτιση ρεύματος από τα πηνία των κινητήρων είναι πολύ μικροί και ως αποτέλεσμα βλέπουμε μια συνέχεια στην αγωγή του κινητήρα.

Τα διαστήματα που άγουν οι διακόπτες σε συνεχή λειτουργία είναι 120 μοίρες και οι παλμοί έναυσης στην ίδια ακολουθία θυρίστορ είναι 60 μοίρες μεταξύ τους. Κάθε χρονική στιγμή άγουν πάντα δυο θυρίστορ σε διαφορετικούς κλάδους αλλιώς έχουμε βραχυκύκλωμα[17].



Σχήμα 3.2.2.1β Παλμοί ένασης transistor-Κυματομορφές Γέφυρας[17]

3.2.3 Μέθοδος οδήγηση κινητήρα επαγωγικού ρεύματος

Ο επαγωγικός σερβοκινητήρας οδηγείται με παρόμοιο τρόπο από τον σερβοενισχυτή όπως ένας απλός κινητήρα επαγωγικού ρεύματος από έναν Inverter με την διαφορά ότι στους σερβοκινητήρες υπάρχει και το κύκλωμα ανάδρασης, ώστε ο έλεγχος του κινητήρα να γίνεται σε κλειστό βρόχο. Η μονάδα ισχύος μέσω ενός τριφασικού κυκλώματος ανορθωτή πλήρους γέφυρας ή τριφασικής εισόδου δικτύου ανορθώνεται για να πάρει σχετικό DC και στη συνέχεια μετατρέπεται με transistor IGBT σε εναλλασσόμενου ρεύματος μεταβαλλόμενης συχνότητας που κινείται από τριφασικό ημιτονοειδές μετατροπέα πηγής τάσης PWM.

3.3 Ανάδραση σερβοκινητήριων συστημάτων

Οι συσκευές ανατροφοδότησης συχνά παίζουν κρίσιμο ρόλο στον κλειστό βρόχο συστημάτων ελέγχου. Υπάρχουν πολλοί τύποι αισθητήρων για την ανάδραση ενός σερβοκινητήρα και ανάλογα με την φύση του σερβοκινητήρα επιλέγονται οι κατάλληλοι για να υπάρχει μέγιστη ακρίβεια ταχύτητας και θέσης.

3.3.1 Ταχογεννήτρια

Η διαδικασία μέτρησης και ελέγχου της περιστροφής αξόνων είναι πλέον αρκετά εύκολη υπόθεση με την εξέλιξη των αισθητήρων κίνησης θέσης που μπορούν να διεξαχθούν με αρκετούς τρόπους. Ένας από τους πιο γνωστούς και εύκολους είναι η κλασσική ταχογεννήτρια DC ρεύματος. Η ταχογεννήτρια αποτελείται από τον δρομέα που έχει τοποθετηθεί πάνω του ένας μόνιμος μαγνήτης και από έναν στάτη που το διαρρέει τριφασική τάση στα τυλίγματα του. Ο άξονας της ταχογεννήτριας είναι συνδεδεμένος με τον άξονα του κινητήρα και στα τυλίγματα του στάτη λόγω της γωνιακής ταχύτητας του κινητήρα δημιουργείται μια τριφασική τάση η οποία οδηγείται σε μια γέφυρα διόδων. Τέλος, λόγω ανόρθωσης έχουμε ένα σταθερό ρεύμα DC που είναι ανάλογο με την ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα. Αν και το όργανο παρέχει πολύ καλή μέτρηση της ταχύτητας με μόνο αρνητικό την μικρή ακρίβεια μέτρησης στις μικρές ταχύτητες θεωρείται ακατάλληλο για τον προσδιορισμό της θέσης αφού δεν περιέχει άμεσες πληροφορίες για αυτήν. Σε περίπτωση που απαιτείται προσδιορισμός θέσης θα πρέπει να υποστεί χρονική ολοκλήρωση που αυτό εμφανίζει δυο μειονεκτήματα, τη μη καλή συμπεριφορά των αναλογικών συστημάτων ολοκλήρωσης αλλά και την συσσώρευση των σφαλμάτων. [18]



Σχήμα 3.3.1a Ταχογεννήτρια[4]

3.3.2 Resolver

Οι resolvers, μαζί με τους encoders, χειρίζονται την πλειονότητα των εργασιών ελέγχου κίνησης κλειστού βρόχου. Ο Resolver είναι ένας περιστροφικός μετασχηματιστής με ένα πρωτεύον και δύο δευτερεύοντα πηνία. Το πρωτεύον τροφοδοτείται με μια τάση AC.

$$U=A\sin(\omega t) \quad (1)$$

Τα δευτερεύοντα πηνία επάγονται κάποια ανάλογη τάσης εισόδου μετρικά, ανάλογα με τη θέση του άξονα της μορφής.

$$U_1=KA\sin(\omega t+\delta)\sin\theta \quad (2)$$

$$U_2=KA\sin(\omega t+\delta)\cos\theta, \quad (3)$$

Όπου:

K: σταθερά του resolver

θ : σχετική θέση του δρομέα ως προς του στάτη.



Σχήμα 3.3.2a Resolvers [14]

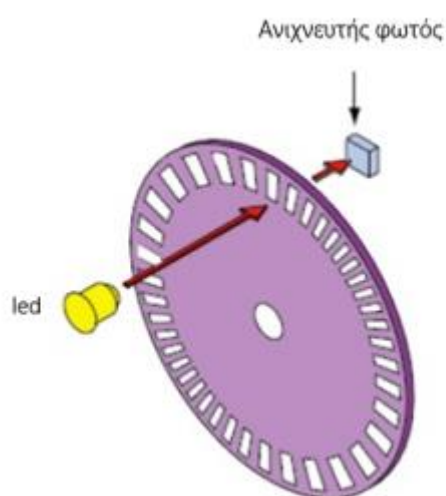
Τα προκύπτοντα ημιτονοειδή σήματα, ημιτόνου και συνημίτονου, μετατρέπονται σε ψηφιακά σήματα στον drive controller με μετατροπείς resolver to digital converters (RDCs) ή με την βοήθεια ειδικού λογισμικού. Ένας διπολικός resolver παρέχει ένα σήμα απόλυτης θέσης σε μια περιστροφή του κινητήρα. Επειδή οι resolvers είναι βασικά αναλογικές συσκευές, παρέχουν σχετικά καθαρά σήματα εξόδου. Το εύρος υψηλής τάσης τους καθιστά επίσης λιγότερο ευαίσθητους στον θόρυβο και η ανάλυση της εξόδου μετατροπής καθορίζεται γενικά στον driver και μπορεί να είναι έως και 16 bit. Ωστόσο, η ανάλυση μπορεί να περιορίζεται από την ταχύτητα του κινητήρα λόγω ενός μέγιστου περιορισμού συχνότητας. Οι resolvers μπορεί να είναι μονής ταχύτητας ή πολλαπλής ταχύτητας, που αναφέρονται στον αριθμό των ηλεκτρικών κύκλων ανά μηχανική περιστροφή.

Οι resolvers έχουν πολλά θετικά χαρακτηριστικά: είναι ανθεκτικές συσκευές που είναι ιδιαίτερα ανθεκτικές στον θόρυβο και παρουσιάζονται ανεκτικοί σε θερμότητα, και κραδασμούς. Ωστόσο, απαιτούν περισσότερα ηλεκτρονικά για μετατροπή σήματος από ό, τι απαιτείται για συστήματα που βασίζονται σε encoder. Επιπλέον, οι αναλυτές έχουν σχετικά χαμηλότερο κόστος από τους οπτικούς κωδικοποιητές, αλλά ορισμένες εκδόσεις, γνωστές ως μονάδες tooth-wound, έχουν ανταγωνιστική τιμή. Τα Resolvers συνήθως φτάνουν να αντέχουν θερμοκρασίες και στους 155° C, με ειδικά μοντέλα ικανά να

αντέχουν στους 230° C, ή ακόμη και να έχουν σκληρυνθεί με ακτινοβολία. Οι τύποι χωρίς ψήκτρες και χωρίς πλαίσιο χρησιμοποιούνται συνήθως σε σερβοκινητήρες λόγω μειωμένων αναγκών συντήρησης και μιας μεγάλης διάτρησης που μπορεί να φιλοξενήσει τροποποιήσεις κινητήρα και πρόσθετες επιλογές επέκτασης άξονα.[14][18]

3.3.3 Encoders

3.3.3.1 Optical Rotary Encoder



Σχήμα 3.3.3.1a Optical Rotary encoder

Οι οπτικοί περιστροφικοί κωδικοποιητές αποτελούνται από μια πηγή φωτός, έναν περιστρεφόμενο δίσκο κώδικα και έναν αιχνευτή φωτός. Ο δίσκος έχει είτε σχισμές είτε διαβαθμίσεις που τον χωρίζουν σε περιοχές με ίσες αποστάσεις σκοτεινού και φωτεινού μέρους. Αυτές οι σημάνσεις αναφέρονται συχνά ως γραμμές, εξ ου και η μονάδα μέτρησης, γραμμές ανά περιστροφή (LPR). Αυτή η μέτρηση υποδεικνύει την ανάλυση.

Η ακρίβεια για τους κωδικοποιητές ορίζεται ως όσα συν (+) ή μείον (-) τόσοι και οι παλμοί μέτρησης. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η ακρίβεια και η ανάλυση είναι διαφορετικά χαρακτηριστικά, αν και συχνά σχετίζονται. Με τους κωδικοποιητές, η ακρίβεια συνήθως αυξάνεται με τις σχισμές, καθώς η ακρίβεια ορίζεται ως +/- τόσοι παλμοί. Καθώς αυξάνεται η ποιότητα των μετρήσεων με περισσότερους παλμούς, το ίδιο

ισχύει και για την ανάλυση. Με τους resolvers, ωστόσο, η αύξηση της ανάλυσης μεγέθους, για παράδειγμα 16 bit έναντι 12 bit, δεν αυξάνει την ακρίβεια.

Καθώς τα συνδεδεμένα εξαρτήματα περιστρέφονται, ο ανιχνευτής φωτός καταγράφει το μοτίβο απενεργοποίησης-ενεργοποίησης του φωτός που διέρχεται από το δίσκο. Ο ανιχνευτής μετατρέπει αυτό το μοτίβο απενεργοποίησης σε ηλεκτρονικό, ψηφιακό σήμα που μοιάζει με τετράγωνα κύματα. Συνήθως, δύο σειρές σχισμών ή σημάνσεων αντισταθμίζονται από το μισό του πλάτους τους ή το ένα τέταρτο ενός πλήρους κύκλου (90 ηλεκτρικές μοίρες), δημιουργώντας δύο ηλεκτρικά σήματα γνωστά ως Channel A και Channel B. Αυτή η μετατόπιση επιτρέπει στον driver να καθορίσει την κατεύθυνση της περιστροφής του άξονα. Αυτή είναι μια σημαντική πληροφορία για τον driver κατά την εκκίνηση που είναι απαραίτητη για τα σέρβο συστήματα που παρέχουν αμφίδρομη κίνηση.

Αντί να χρησιμοποιούν μόνο δύο κανάλια, ορισμένοι κωδικοποιητές χρησιμοποιούν επιπλέον κανάλια για να παρακολουθούν τη θέση του άξονα ή να βοηθούν στην μείωση του θορύβου. Αυτά τα κανάλια περιλαμβάνουν αυτό που αναφέρεται ως κανάλια συμπλήρωσης.

Ανάλογα με τον τρόπο που ο κωδικοποιητής μετρά τα κανάλια A και B, η ανάλυση μπορεί να αυξηθεί τέσσερις φορές. Αυτό θα προκύψει όταν το κύκλωμα μέτρησης παρακολουθεί τόσο τις πτώσεις όσο και την εναύσεις στις άκρες και των δύο σημάτων, που αναφέρονται επίσης ως ανιχνευτές τετραγώνου. Η αύξηση της ανάλυσης θα αυξήσει την ποιότητα μέτρησης του συστήματος. Η υψηλή ανάλυση της μέτρησης επιτρέπει επίσης υψηλότερο κέρδος για βρόχους θέσης και ταχύτητας, εξασφαλίζοντας ανώτερη ποιότητα ελέγχου συστήματος. Οι αναλύσεις κωδικοποιητή 50 έως 5.000 γραμμών ανά κύκλο ρότορα είναι συχνές μεταξύ των περισσότερων προμηθευτών, αλλά οι αριθμοί γραμμών έως 100.000 ανά κύκλο είναι διαθέσιμες. Σε εφαρμογές υψηλής ακρίβειας, η ακρίβεια του συστήματος επηρεάζεται από σφάλματα από άλλες πηγές, όπως θερμική επέκταση ή λύσιμο, αντιστροφή παξιμαδίων. Οι γραμμικοί κωδικοποιητές μπορούν να ξεπεράσουν αυτές τις προκλήσεις. [14]

3.3.3.2 Linear Encoders

Οι γραμμικοί κωδικοποιητές περιέχουν ένα γραμμικό ίχνος και μια κεφαλή ανάγνωσης, και χρησιμοποιούνται συνήθως με συστήματα που παρακολουθούν τη γραμμική κίνηση, όπως τις διαστάσεις X-Y στους πίνακες θέσης. Η γραμμική διαδρομή μπορεί να κυμαίνεται σε μήκος από μερικά κλάσματα του χιλιοστού μέχρι και εκατοστά. Είναι διαδρομή χαραγμένη σε μικρά βαθμονομημένα κομμάτια που σαρώνονται από μία κεφαλή ανάγνωσης καθώς κινούνται τα στοιχεία κίνησης. Η κεφαλή ανάγνωσης ανιχνεύει πολλά κανάλια για να παρέχει δεδομένα θέσης και κατεύθυνσης. Οι κωδικοποιητές με ημιτονοειδείς εξόδους χρησιμοποιούν επιπλέον κύκλωμα παρεμβολής για να βελτιώσουν ηλεκτρονικά την ανάλυση.

Για εξοπλισμό που απαιτεί ιδιαίτερα υψηλή ανάλυση, οι γραμμικοί κωδικοποιητές είναι η καλύτερη επιλογή στην κατηγορία τους. Η ανάλυση αρχίζει από 0,1 εκατομμυριοστά του μέτρου και με ορισμένα συστήματα να προσφέρουν ανάλυση έως 20 νανόμετρα. Η ακρίβεια, συνήθως είναι 20 micron ανά μέτρο και μπορεί να μειωθεί γραμμικά κατά την απόσταση διαδρομής της γραμμής. Ωστόσο, αυτό μπορεί να αντισταθμιστεί με διόρθωση σφαλμάτων κλίσης για να έρθει οποιοδήποτε σφάλμα κάτω από 5 micron ανά μέτρο. Τα μηχανήματα που λειτουργούν σε υψηλές ταχύτητες χρησιμοποιούν γραμμικούς encoders για ανατροφοδότηση επειδή αυτές οι συσκευές λειτουργούν συνήθως με υψηλότερες ταχύτητες από άλλες συσκευές ανάδρασης. Ο πρωταρχικός παράγοντας που μπορεί δυνητικά να περιορίσει την ταχύτητα είναι αν τα ηλεκτρονικά κυκλώματα μέτρησης μπορούν να συμβαδίζουν. [14]

3.3.4 Αισθητήρες θέσης Hall



Σχήμα 3.3.4a Hall sensor[14]

Όταν ένα μηχάνημα δεν απαιτεί ακριβή έλεγχο ταχύτητας ή υψηλή ανάλυση από το σύστημα κίνησης, οι αισθητήρες ανάδρασης χαμηλού κόστους όπως οι συσκευές Hall-effect είναι η κατάλληλη επιλογή. Αυτοί οι ψηφιακοί αισθητήρες on-off ανιχνεύουν την παρουσία μαγνητικών πεδίων, είτε μετρώντας την ισχύ ενός ηλεκτρομαγνητικού είτε μόνιμου μαγνητικού πεδίου. Σε κάθε διέλευση ενός μαγνητικού πεδίου παράγουν έναν παλμό. Οι συσκευές Hall-Effect έρχονται σε έτοιμα ξεχωριστά μέρη που είναι τοποθετημένα μέσα στο περίβλημα του σερβοκινητήρα. Σε σερβοκινητήρες χωρίς ψήκτρες, αυτοί οι αισθητήρες είναι μερικές φορές ενσωματωμένοι στις περιελίξεις του στάτη και ενεργοποιούνται από τους μαγνήτες του ρότορα. Αυτοί οι αισθητήρες αναφέρουν τη θέση του άξονα, η οποία μπορεί επίσης να μετατραπεί σε δεδομένα ταχύτητας ή επιτάχυνσης με την κατάλληλη επεξεργασία του ψηφιακού σήματος. Σε εφαρμογές σερβοκινητήρων, η πιο κοινή λειτουργία για συσκευές Hall είναι η λειτουργία έξι βημάτων, ένας τύπος ηλεκτρονικής διάταξης που απαιτεί σχετικά απλά ηλεκτρονικά στον driver. Αυτό μπορεί να μην ταιριάζει σε ορισμένες βιομηχανικές εφαρμογές σέρβο επειδή μπορεί να είναι λιγότερο αποτελεσματικό στην παραγωγή ροπής, και στην χειρότερη περίπτωση μπορεί να δημιουργήσει κυματισμό υψηλής ροπής. Σε αυτήν την περίπτωση, ο κυματισμός ροπής προκύπτει από απότομες μεταβάσεις ρεύματος με

αποτέλεσμα μικρές διακυμάνσεις ροπής, οι οποίες συνήθως παράγουν λεπτές αλλά ανιχνεύσιμες μεταβολές ταχύτητας. Σε ορισμένες περιπτώσεις, οι διακυμάνσεις της ροπής μπορεί να επιδεινώσει σοβαρά τη συνολική απόδοση ενός συστήματος κίνησης διότι αλλάζει ο έλεγχος από τον driver. Με τις ημιτονοειδείς μονάδες ρεύματος, οι αισθητήρες Hall μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συνδυασμό με αυξητική ανατροφοδότηση από encoder για την παροχή ακριβής μετατροπής ημιτονοειδούς ρεύματος. Σε servo drives, οι αισθητήρες Hall λειτουργούν επίσης ως αισθητήρες για να κλείσουν κάποιον τρέχοντα βρόχο. Σε άλλες εφαρμογές του βιομηχανικού κλάδου, αντιλαμβάνονται τη θέση αξόνων, συντεταγμένες των εργαλειομηχανών ή άλλων μηχανικών συσκευών. [14]

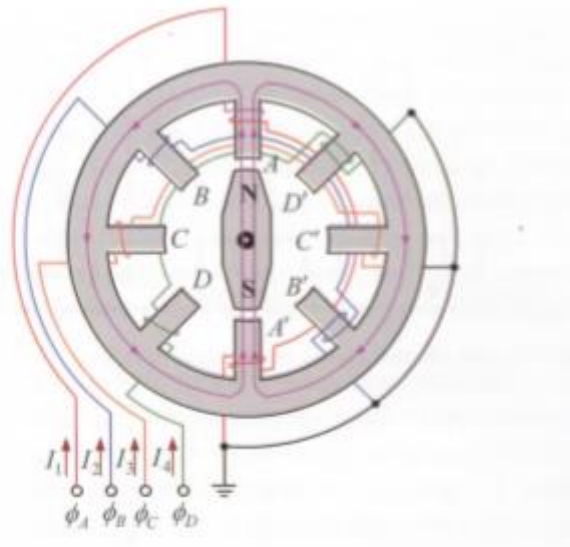
4. Περιγραφή λειτουργίας Stepper κινητήρα

Οι ειδικοί τύπου βηματικοί κινητήρες (stepper motors) χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές που είναι αναγκαία η μεγάλη ακρίβεια θέσης και η ταχύτητας περιστροφής του άξονα. Αυτού του τύπου οι κινητήρες περιστρέφονται με διακεκριμένα βήματα (dicrete steps) όπως άλλωστε προέρχεται και από το όνομα τους. Αυτό σημαίνει ότι κάθε παλμός ρεύματος που πηγαίνει σε μία από την περιέλιξη διέγερσης που θα στρέφει τον άξονα κατά ένα συγκεκριμένο βήμα. Η φορά κίνησης του άξονα αλλάζει σύμφωνα με τον εύρος του παλμού στην περιέλιξη του κινητήρα. Μέσω του κυκλώματος ελέγχου γίνεται η καταμέτρηση των παλμών στα τυλίγματα διέγερσης αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η θέση του δρομέα να είναι πάντα απόλυτα καθορισμένη. Όσο πιο μικρό είναι το βήμα της κίνησης του άξονα του κινητήρα, τόσο πιο καθορισμένη είναι η ακρίβεια της θέσης του δρομέα. Δηλαδή η βασική λειτουργία του βηματικού κινητήρα είναι να μετατρέπει τους παλμούς του DC ρεύματος σε σταθερές γωνιακές κινήσεις του δρομέα. Τα γωνιακά βήματα του δρομέα ανά παλμό ρεύματος αρχίζουν από 0,75 μοίρες και φτάνουν μέχρι και 180 μοίρες και μπορούν να οδηγηθούν από 1000 έως και 20000 παλμούς ανά δευτερόλεπτο. Οι κινητήρες κατασκευάζονται με ισχύς από κάποια W έως και μερικά KW. Μεγάλη χρησιμότητα των βηματικών κινητήρων υπάρχει σε εφαρμογές ρομποτικών μηχανισμών στην βιομηχανία, όπως και σε εφαρμογές εκτυπωτικών μηχανημάτων και κεραιών.

4.1 Τύποι stepper motor

Υπάρχουν 3 είδη βηματικών κινητήρων που χρησιμοποιούνται ανάλογα με την εφαρμογή: Οι Μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης (variable-reluctance stepper motors), Οι μόνιμου μαγνήτη (permanent -magnet stepper motors). Και οι Υβριδικοί κινητήρες (hybrid stepper motors)

4.1.1 Μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης (variable-reluctance)



Σχήμα 4.1.1a Βηματικός κινητήρας μαγνητικής αντίστασης[17]

Η κατηγορία βηματικών κινητήρων μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης χωρίζεται σε δύο τύπους, αυτούς με ένα τμήμα δρομέα (single stack rotor) στην άτρακτο και τους κινητήρες με πολλαπλά τμήματα δρομέα (multi stack rotor) που βρίσκονται στην ίδια άτρακτο. Στο σχήμα 4.1a φαίνεται κομμένο στο κέντρο ένα μαγνητικό κύκλωμα κινητήρα μαγνητικής αντίστασης και ο δρομέας του. Ο σιδηρομαγνητικός στάτης και δρομέας είναι ελασματοποιημένος και έτσι οι γρήγορες αλλαγές του μαγνητικού πεδίου έχουν πολύ μικρές απώλειες από δινορεύματα. Η μαγνητική ροή του στάτη στο διάκενο είναι ακτινική και αυτό οφείλεται, στο ότι οι περιελίξεις των φάσεων είναι τοποθετημένες σε έκτυπους πόλους των αντίστοιχων τμημάτων του στάτη. Στο σχήμα 4.1.a ο δρομέας βρίσκεται ευθυγραμμισμένος στην θέση A που τα τυλίγματα εκείνη την στιγμή είναι ενεργοποιημένα και το κάθε βήμα του συγκεκριμένου κινητήρα είναι 15 μοίρες. Η γωνιακή κίνηση του άξονα του κινητήρα, εξαρτάται από την σειρά που θα ενεργοποιηθεί η φόρτιση των πηνίων. Σε περίπτωση που η ακολουθία φόρτισης των τυλιγμάτων είναι A-B-C-D-A-B... η κίνηση του άξονα θα είναι δεξιόστροφη σε άλλη περίπτωση που η ακολουθία είναι A-D-C-B-A-D-C... ο άξονας του κινητήρα θα κινηθεί αριστερόστροφα. Γενικά ισχύει ότι :

$$Pr = \frac{360}{Nr}$$

$$P_s = \frac{360}{N_s}$$

όπου:

N_r = αριθμός οδόντων δρομέα

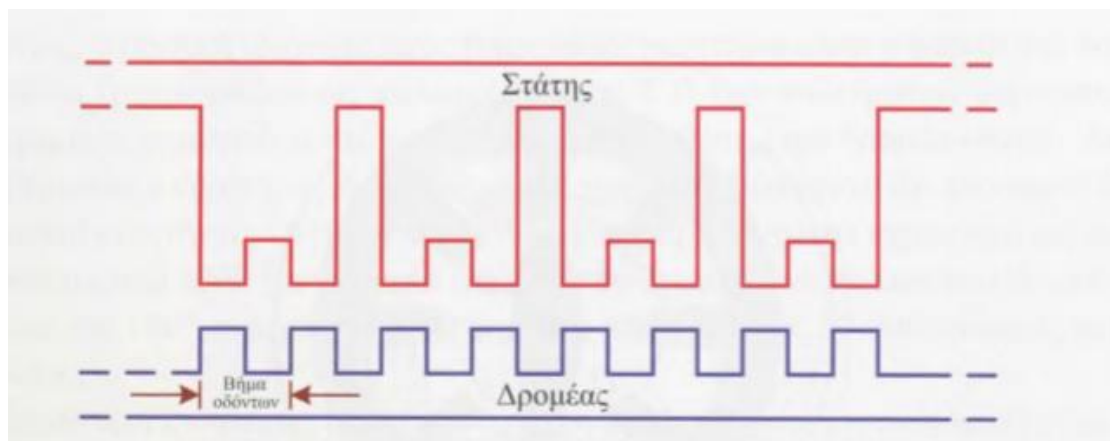
N_s = αριθμός οδόντων στάτη

N_p = αριθμός φάσεων των τυλιγμάτων του στάτη

P_r = βήμα οδόντων δρομέα (rotor tooth pitch), σε μοίρες,

P_s = βήμα οδόντων στάτη (stator tooth pitch), σε μοίρες.

Σε κάθε αριθμό N_p παλμών διέγερσης, οι οδόντες του δρομέα που στην αρχή ήταν πλήρως ευθυγραμμισμένοι με τους οδόντες του στάτη ύστερα από την κίνηση του δρομέα θα ευθυγραμμιστούν πάλι με κάποιους άλλους οδόντες του στάτη. Ο δρομέας λοιπόν θα διανύσει μια γωνία ίση με το βήμα των οδόντων του κατά την διάρκεια αυτών των N_p παλμών.



Σχήμα 4.1.1β Όδοντες βηματικού κινητήρα[17]

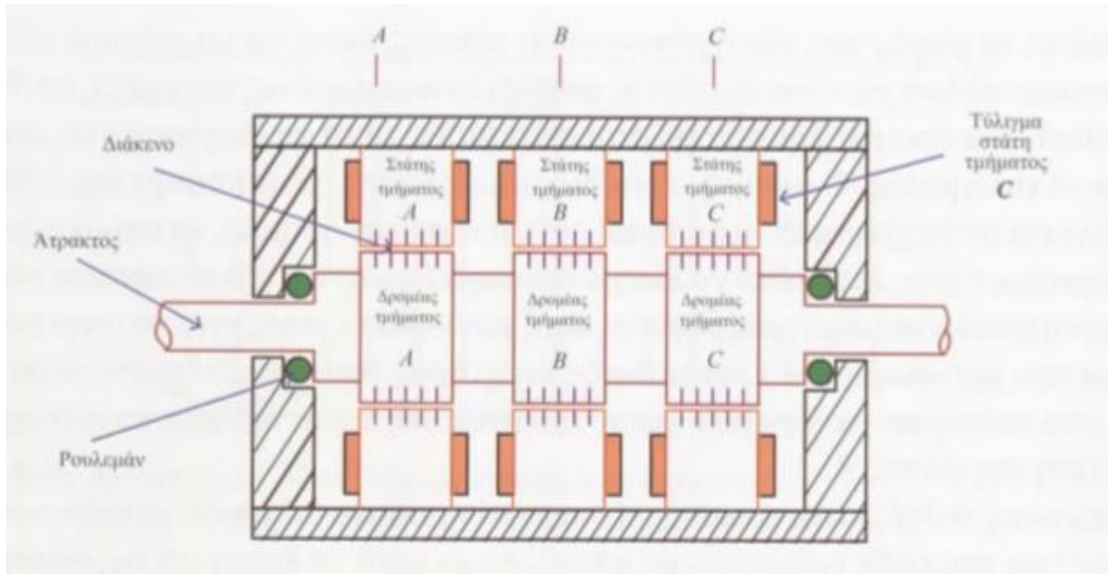
Έτσι ισχύει :

$$\theta_r = \frac{P_r}{N_p} = \frac{360}{N_r N_p}$$

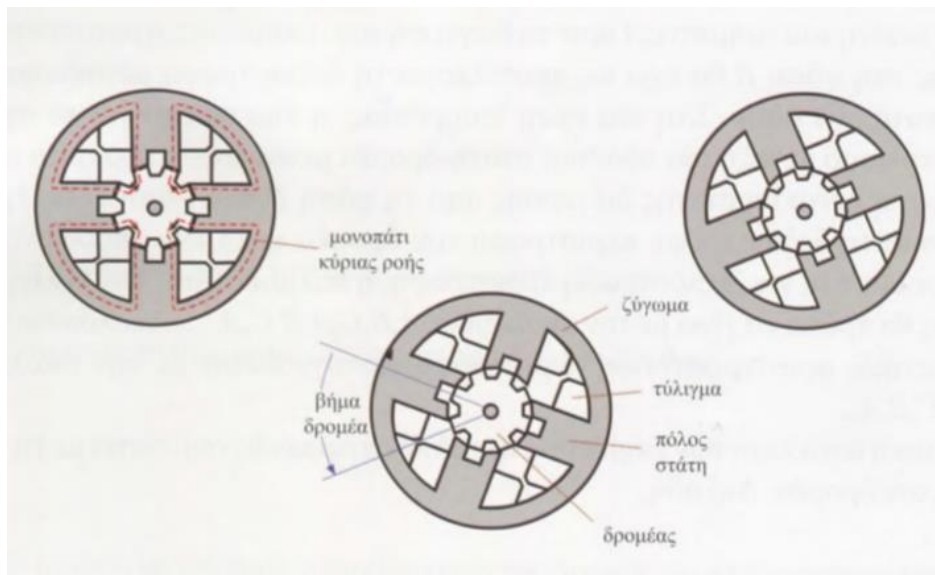
Οι βηματικοί κινητήρες μαγνητικής αντίστασης πολλαπλών τμημάτων είναι κινητήρες που περιέχουν μέσα τους τρία stack. Το κάθε stack έχει ξεχωριστό τύλιγμα στάτη

,ανεξάρτητο δρομέα αν και βρίσκονται και τα τρία stack στον ίδιο άξονα και λειτουργεί με δικό του ξεχωριστό μαγνητικό κύκλωμα.

Τα τυλίγματα είναι τοποθετημένα έτσι, ώστε τα μαγνητικά πεδία δύο γειτονικών πόλων να είναι αντίθετης φοράς (διακεκομμένες γραμμές). Μετά τη διέγερση του εκάστοτε τυλίγματος μπορεί να προσδιοριστεί με μεγάλη ακρίβεια που βρίσκεται ο δρομέας. Το positioning δηλαδή ο προσδιορισμός της θέσης του άξονα γίνεται με την ευθυγράμμιση όλων των όδοντων στάτη δρομέα. Όταν ευθυγραμμιστούν πλήρως οι όδοντες του στάτη και του δρομέα ελαχιστοποιείται η μαγνητική αντίσταση του σιδηρομαγνητικού κυκλώματος στο τμήμα που έχει διεγερθεί. Ο στάτης και ο δρομέας επίσης σε αυτού του τύπου τους βηματικούς κινητήρες έχουν τον ίδιο αριθμό οδόντων. Στο βηματικό κινητήρα του σχήματος 4.1.δ ο στάτης και ο δρομέας έχουν οκτώ όδοντες και η θέση του δρομέα εκείνη την χρονική στιγμή δείχνει ότι έχει διεγερθεί η φάση Α. Σε περίπτωση που διεγερθεί το τυλίγμα του στάτη Β λόγω της διαφορετικής γωνιακής τοποθεσίας των πόλων του στάτη Α και Β θα έχουμε κίνηση των όδοντων του δρομέα δεξιά κατά ένα βήμα μέχρις ότου ευθυγραμμιστούν οι όδοντες του Β στάτη με τον δρομέα. Εάν στην συνέχεια ενεργοποιηθεί η τρίτη φάση στον στάτη C θα έχουμε και πάλι μετακίνηση δεξιόστροφα έως ότου ευθυγραμμιστούν πάλι πλήρως οι όδοντες του δρομέα και του στάτη. Για να υπάρχει μια συνεχής κίνηση του κινητήρα δεξιόστροφα θα πρέπει η ακολουθία ενεργοποίησης των τυλιγμάτων να είναι Α-Β-С-Α-В-С... . Αντιστοίχως για την αριστερόστροφη κίνηση θα πρέπει να υπάρχει η ακολουθία Α-С-В-Α-С-В... . Πολλοί κατασκευαστές δίνουν στους βηματικούς κινητήρες που κατασκευάζουν την δυνατότητα εισαγωγής προσθέτων τμημάτων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να έχει ο χρήστης την δυνατότητα να επιλέγει αυτός το μήκος του βήματος. Έτσι ένας κινητήρας που για παράδειγμα έχει 16 όδοντες και μήκος βήματος 7,5 μοίρες με την εισαγωγή ενός ακόμη τμήματος να υπάρξει ελάττωση βήματος στις 5,625 μοίρες.



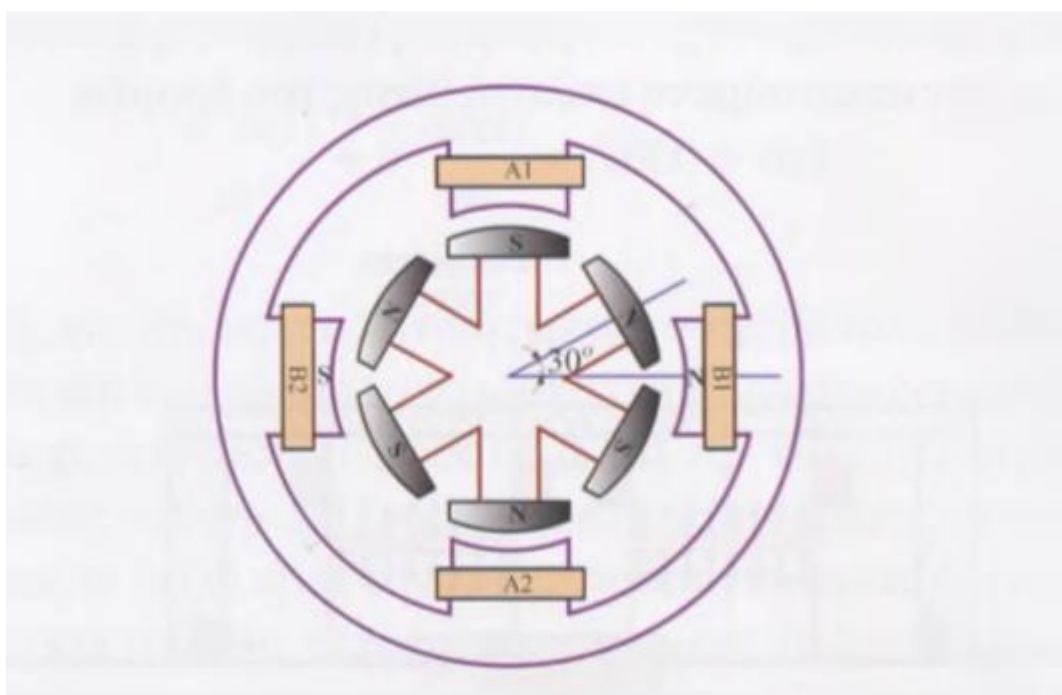
Σχήμα 4.1.1γ Βηματικός κινητήρας τριών τμημάτων τομή παράλληλη [17]



Σχήμα 4.1.1δ Βηματικός κινητήρας τριών τμημάτων τομή κάθετη [17]

4.1.2 Μόνιμου μαγνήτη (permanent magnet)

Οι βηματικοί κινητήρες μόνιμου μαγνήτη διαφέρουν αρκετά σε σχέση με τους κινητήρες μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης. Οι δρομείς αυτών των κινητήρων δεν έχουν οδοντώσεις όπως των προηγούμενων αλλά αντί για αυτές, έχουν μόνιμους μαγνήτες και είναι κυλινδρικοί. Λόγω των μόνιμων μαγνητών στον δρομέα οι κινητήρες αυτοί, έχουν ροπή συγκράτησης και μέσω του μαγνητικού πεδίου τους ο κινητήρας παραμένει στην θέση του τελευταίου πόλου που είχε διεγερθεί.

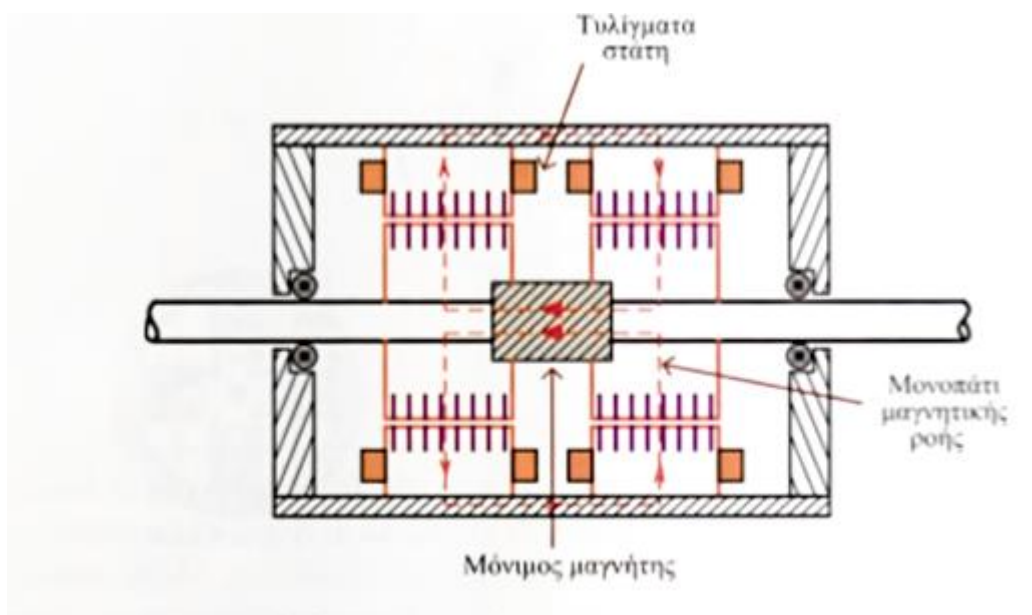


Σχήμα 4.1.2α Βηματικός κινητήρας μόνιμου μαγνήτη[17]

Τα απέναντι τυλίγματα A1 και A2 του σχήματος 4.1.2.α είναι συνδεδεμένα σε σειρά όπως και τα τυλίγματα B1 και B2. Με την διέγερση των τυλιγμάτων B1,B2 θα έχουμε μια κίνηση 30 μοιρών στο δρομέα και η φορά είναι εξαρτώμενη από την πολικότητα του ρεύματος στα τυλίγματα. Σε αυτούς του τύπου κινητήρες τα βήματα του δρομέα είναι από 7,5 μοίρες έως και 90.

4.1.3 Υβριδικοί κινητήρες (hybrid)

Οι υβριδικοί κινητήρες είναι κατασκευασμένοι και αυτοί από μόνιμους μαγνήτες στο δρομέα και ο στάτης τους μοιάζει με αυτών από τους κινητήρες μεταβλητής αντίστασης. Στο σχήμα 4.1.3 οι κόκκινες γραμμές με τα βέλη αναπαριστούν τη μαγνητική ροή. Η μαγνητική ροή κατευθύνεται από τον βόρειο πόλο του μόνιμου μαγνήτη δια μέσω των πόλων του δρομέα στους έκτυπους πόλους του στάτη. Στη συνέχεια μέσω του νότιου πόλου του μόνιμου μαγνήτη κλείνουν κύκλωμα. Με τα τυλίγματα των έκτυπων πόλων του στάτη είναι δυνατόν να αυξηθεί ή να μειωθεί η κύρια ροή σε συνάρτηση με το πρέπει να βρίσκεται ο δρομέας.

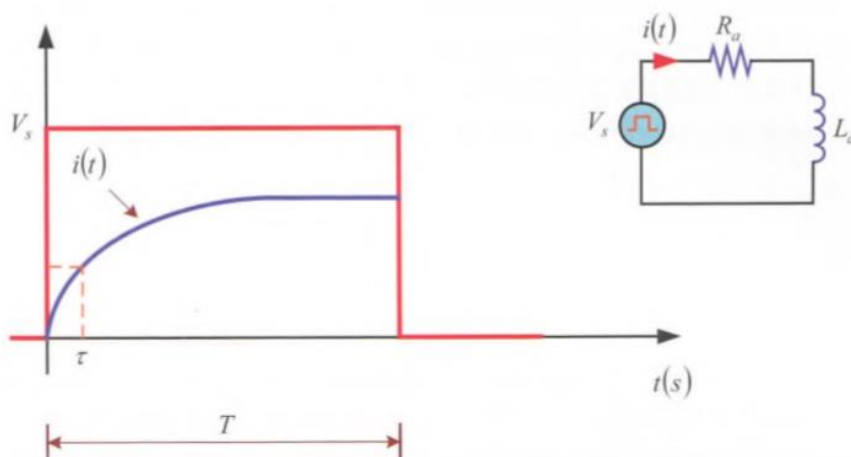


Σχήμα 4.1.2β Βηματικός κινητήρας μόνιμου μαγνήτη[17]

Λόγω της κατασκευής του δρομέα που έχει έναν μόνιμο μαγνήτη μεταξύ των δύο τμημάτων, το ένα τμήμα συμπεριφέρεται ως βόρειος πόλος και το άλλο ως νότιος. Αυτό είναι ένα από τα σημαντικά χαρακτηριστικά των βηματικών κινητήρων μόνιμων μαγνητών.

4.2 Οδήγηση Βηματικού κινητήρα

Οι περιελίξεις των πόλων των βηματικών κινητήρων διεγείρονται με παλμικές συνεχείς τάσεις και λόγω της αυτεπαγωγής που έχουν παρουσιάζουν σημαντικές τιμές στις σταθερές χρόνου.



Σχήμα 4.2α Βηματικός κινητήρας μόνιμου μαγνήτη[17]

Στο σχήμα 4.2α για την χρονική μεταβολή του ρεύματος ισχύει :

$$i(t) = I_0(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) = \frac{V_s}{R_a}(1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$$

όπου:

T = η χρονική διάρκεια της παλμικής τάσης που εφαρμόζεται στο τύλιγμα

t = σταθερά χρόνου τυλίγματος

όπου:

$$\tau = \frac{L_a}{R_a}$$

Για να έρθει ένα κύκλωμα πρώτης τάξης σε μόνιμη κατάσταση, πρέπει να περάσει περίπου ο πενταπλάσιος χρόνος της σταθεράς τυλίγματος. Ο χρόνος αυτός είναι πολύ

σημαντικός, γιατί προσδιορίζει την μέγιστη συχνότητα πλαμοδότησης της τάσης.

$$F_{\max} = \frac{1}{\Delta t}$$

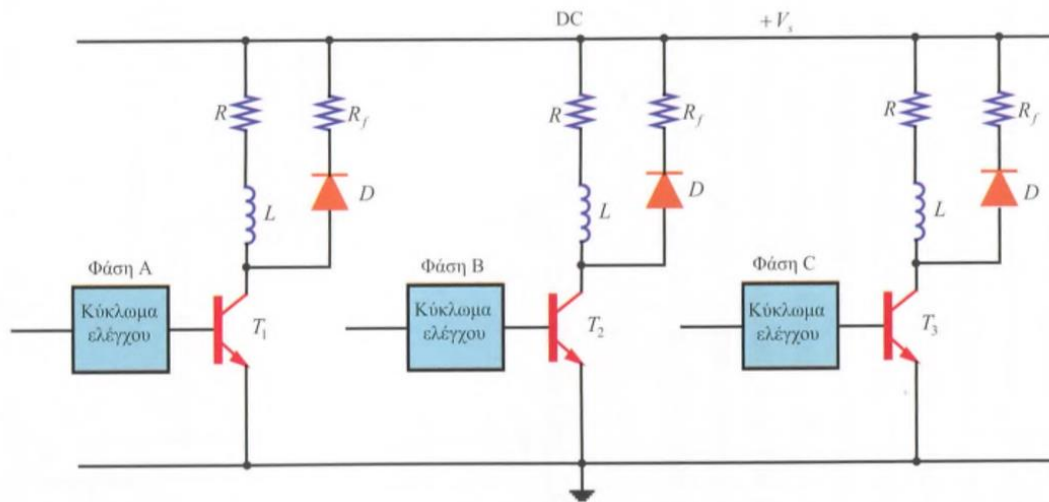
Για να λειτουργεί το σύστημα ικανοποιητικά σε υψηλές συχνότητες θα πρέπει το ρεύμα και κατ' επέκταση η ροπή στις μεταβολές της τάσης να είναι όσο γίνεται πιο γρήγορη. Για τη βελτίωση του συστήματος συνήθως εφαρμόζεται μια αντίσταση σε συνδεσμολογία σειράς με το τυλίγμα, έτσι μειώνεται η σταθερά χρόνου. Σε άλλη περίπτωση θα ήταν δυνατό να αυξηθεί το μέγεθος της τάσης τροφοδοσίας.

$$\tau' = \frac{La}{R+Ra} < \tau$$

Τα κυκλώματα οδήγησης βηματικών κινητήρων εμπεριέχουν διακοπτικά στοιχεία που συνήθως είναι τρανζίστορ ισχύος τύπου IGBT, MOSFET, BTJ. Η κίνηση του κινητήρα είναι ανεξάρτητη από την πολικότητα του ρεύματος μιας και σημασία έχει ποια θα είναι η διαδοχική σειρά ενεργοποίησης των τυλιγμάτων. Οι βηματικοί κινητήρες διαθέτουν τουλάχιστον τρεις φάσεις. Για να λειτουργήσει ένας κινητήρας μαγνητικής αντίστασης δεν χρειάζεται να υπάρχει εναλλαγή των πόλων στα τυλίγματα της κάθε φάσης με αποτέλεσμα να μπορεί να οδηγηθεί ο κινητήρας και με μονοπολικό σύστημα οδήγησης. Στο μονοπολικό σύστημα οδήγησης το κύκλωμα της κάθε φάσης είναι ξεχωριστό και ελέγχεται από ένα transistor που κλείνει παίρνοντας σήμα από έναν ελεγκτή. Όταν εφαρμόζεται τάση στο τυλίγμα ρεύμα του τυλίγματος με την αντίσταση R_a θα ισχύει:

$$I = \frac{Vs}{R+Ra}$$

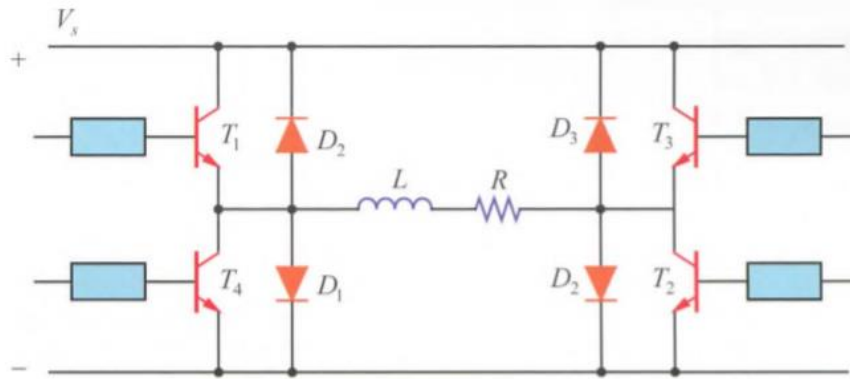
Με την προσθήκη της αντίστασης θα πρέπει να αυξηθεί και η τάση σε ανάλογα επίπεδα για να διατηρηθεί το ρεύμα στην ονομαστική του τιμή.



Σχήμα 4.2β Βηματικός κινητήρας μόνιμου μαγνήτη[17]

Η απαιτούμενη τάση τροφοδοσίας δίνεται βάση του ονομαστικού ρεύματος του κινητήρα. Όταν το transistor σβήνει η αυτεπαγωγή του πηνίου δημιουργεί μεγάλα ρεύματα και είναι αρκετά πιθανό να καεί το transistor. Για αυτό τον λόγο προστίθεται πάντα ένα βρόχος ελεύθερης ροής μέσω της διόδου και της αντίστασης R_f για να εκφορτίζεται το πηνίο .

Οι κινητήρες που περιλαμβάνουν μόνιμους μαγνήτες σε αντίθεση με τους κινητήρες μαγνητικής αντίστασης έχουν δύο φάσεις. Για να λειτουργήσουν αυτού του είδους βηματικοί κινητήρες χρειάζονται bipolar drivers διότι απαιτείται περιοδική εναλλαγή των πόλων της κάθε φάσης. Που αυτό σημαίνει εναλλαγές στις πολικότητες των αντίστοιχων ρευμάτων άρα κυκλώματα πιο σύνθετα.



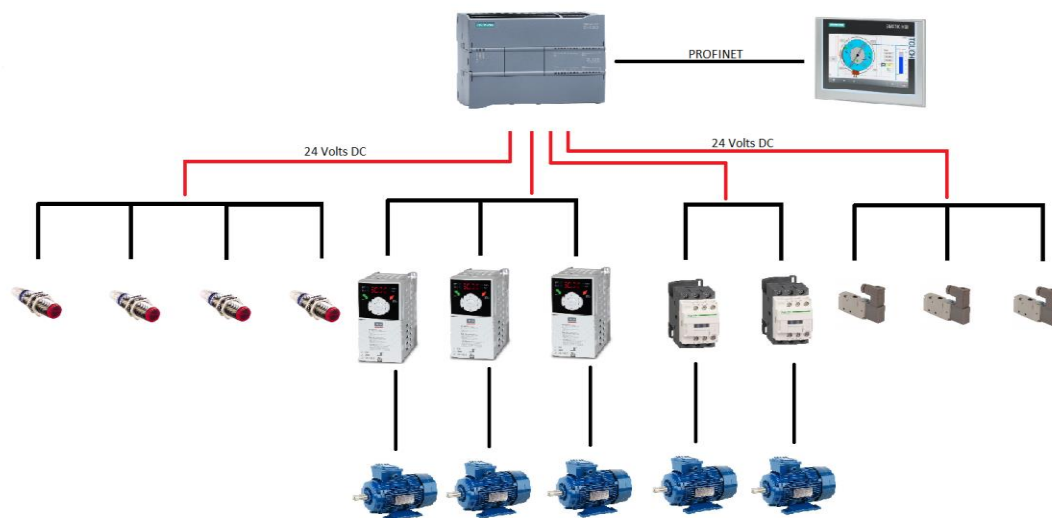
Σχήμα 4.2γ κύκλωμα ισχύος για τον έλεγχο της μιας φάσης ενός υβριδικού ή μόνιμου μαγνήτη βηματικού κινητήρα[17]

Για παράδειγμα στο κύκλωμα 4.2.γ η αγωγή των τρανζίστορ T1 και T2 δίνει την αντίθετη πολικότητα σε περίπτωση που έχουμε ταυτόχρονη αγωγή των τρανζίστορ T3 και T4. Οι δίοδοι D1,D2,D3,D4 παίζουν προστατευτικό ρόλο στο κύκλωμα όπως εξηγήθηκε και πριν και πολώνονται ορθά ανά δυάδες για να επιστρέφεται στο δίκτυο μέρος της αυτεπαγωγικής ενέργειας που έχει το πηνίο μετά τον κύκλο εκφόρτισης του. Σε αυτά τα συστήματα η χρήση αντίστασης ελεύθερης ροής δεν είναι αναγκαία.

5. Εφαρμογή (Δίπλωτική μηχανή χνουδωτών)

5.1 Περιγραφή του συστήματος

Σε αυτή την ενότητα θα γίνει περιγραφή μιας εφαρμογής με σχετικό εξοπλισμό ελέγχου κινητήρα σε ένα ολοκληρωμένο σύστημα αυτοματισμού. Δηλαδή θα γίνει έλεγχος κινητήρων με VFD (Variable Frequency Driver) από ένα PLC (Programmable logical controller) που θα επιτελεί διάφορες διεργασίες. Ο στόχος της εφαρμογής είναι το αυτόματο δίπλωμα χνουδωτών υφασμάτων με ακρίβεια και διάφορους τρόπους δίπλωμάτων και η στοίβαξη τους ανάλογα με τον μέγεθος του ιματισμού. Η εφαρμογή αυτή υλοποιείται σε εργοστάσια που επεξεργάζονται-πλένουν μεγάλες ποσότητες ιματισμούς ξενοδοχειακών μονάδων, νοσοκομείων, κρουαζιερόπλοιων και άλλων μονάδων. Η παραγωγικότητα του μηχανήματος από έναν χειριστή μπορεί να φτάσει έως και 800 τεμάχια λύνοντας το πρόβλημα της μικρής παραγωγής, της καταπόνησης αλλά και τον αριθμό των εργατών που χρειάζεται αυτή η διαδικασία.

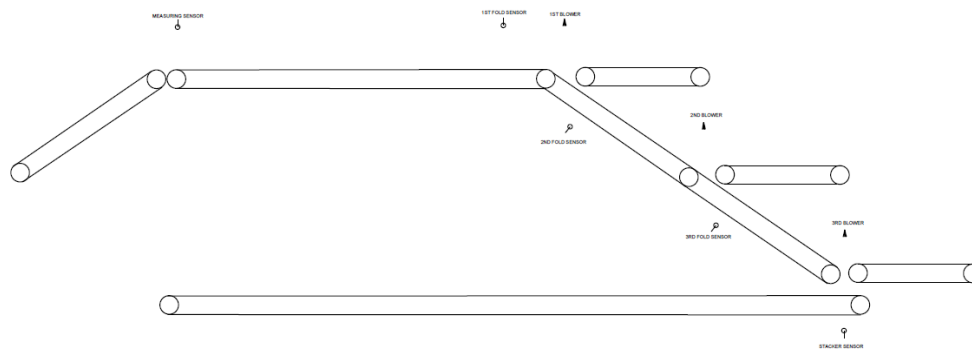


Σχήμα 5.1.α Automation system

Το δίπλωμα επιτυγχάνεται δίνοντας κίνηση σε ένα μηχανολογικό σύστημα από ιμάντες που κινούνται σύμφωνα με την φορά στρέψης των αξόνων που περνάνε. Οι άξονες αυτοί παίρνουν κίνηση από ξεχωριστά μοτέρ που ελέγχονται μέσω των VFD. Για να γίνει ένα δίπλωμα αρκεί ένας από τους 2 ιμάντες που βρίσκεται το κομμάτι ιματισμού την κατάλληλη στιγμή να αλλάξει φορά περιστροφής και ταυτόχρονα να γίνει μια

υποβοήθηση από αέρα για να πραγματοποιηθεί. Ο υπολογισμός των διπλωμάτων γίνεται σύμφωνα με το μήκος του κομματιού. Ένα φωτοκύτταρο ενεργοποιείται καθώς περνάει το κομμάτι ιματισμού από αυτό και έτσι μετριέται το μήκος του ανάλογα με την ταχύτητα του ιμάντα που το μεταφέρει. Στην συνέχεια το PLC υπολογίζει κατάλληλα τα μήκη των διπλωμάτων και περιμένει παλμό από τα φωτοκύτταρα για να αρχίσει της διαδικασία του διπλώματος.

Τέλος ο ιματισμός μεταφέρεται από έναν ιμάντα προς τα stacker. Στην εικόνα 5.1.β φαίνεται το μηχανολογικό σχέδιο ενός συστήματος που επιτελεί τρία διπλώματα και στην συνέχεια πηγαίνει τον ιματισμό για στοίβαξη.



Σχήμα 5.1.β Folding system

5.2 Μέρη του συστήματος

Το σύστημα που θα περιγράψουμε παρακάτω αποτελείται από τα εξής μέρη:

3 VFD LS iG5A

3 Βαλβίδες πνευματικές 24Vdc

5 κινητήρες

4 φωτοκύτταρα 12-24V DC

Τροφοδοτικό 24VDC

1 Μονάδα CPU Siemens 1215 DC/DC/DC

1 Επέκταση SM1222 DQ 8 X 24VDC

- 1 Οθόνη HMI 7” Comfort
- 3 Ηλεκτρονόμοι τριών πόλων
- 12 Solid State με βάση

Τα πρωτόκολλα επικοινωνίας που χρησιμοποιούνται για την λειτουργία του συστήματος αυτοματισμού είναι το profinet που συνδέει το PLC με το HMI screen που είναι το user interface για να γίνετε η επικοινωνία μεταξύ τους.

Το PLC που είναι το κεντρικό σημείο του συστήματος αυτοματισμού μας όπου κινεί όλα τα νήματα για να λειτουργήσει η αυτοματοποιημένη διαδικασία. Ο προγραμματισμός του PLC έγινε μέσα από το πρόγραμμα TIA Portal V16 .



Σχήμα 5.2.α Siemens CPU PLC 1215 DC/DC/DC

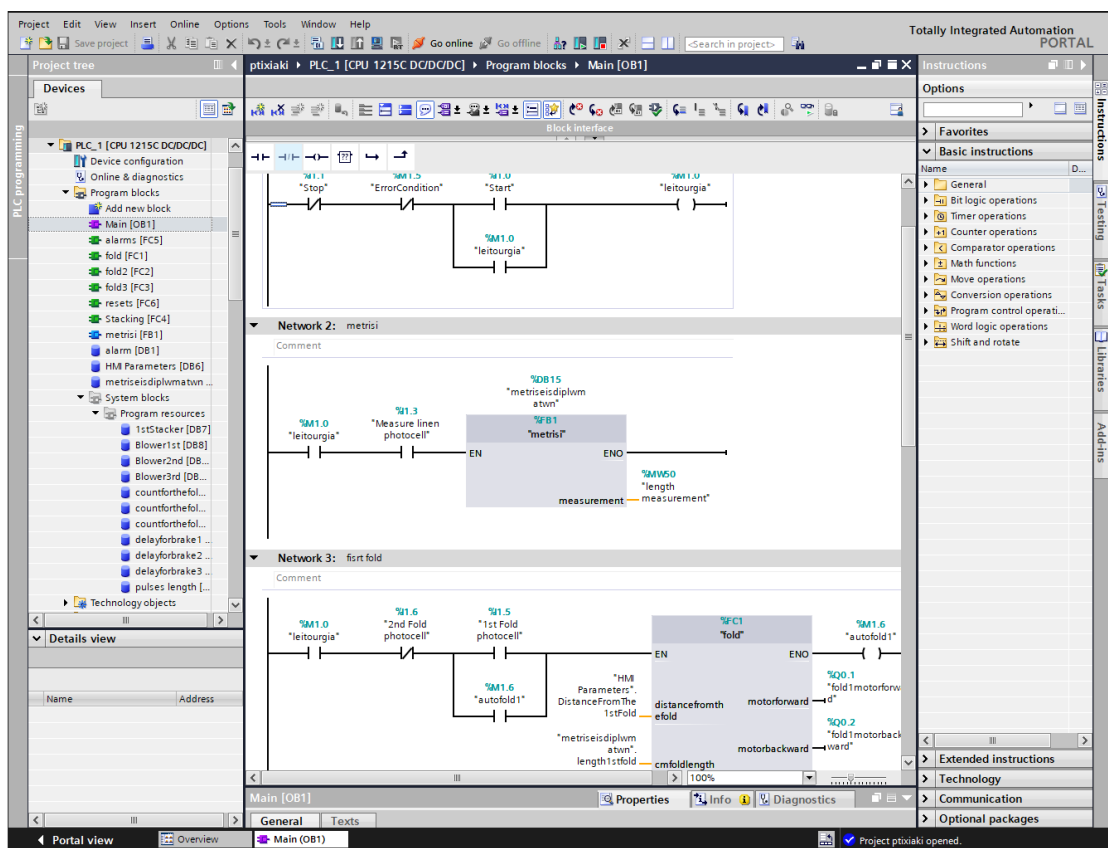
Μέσω του PLC γίνεται ο έλεγχος των driver για την οδήγηση των κινητήρων. Το PLC ελέγχει το ξεκίνημα, το σταμάτημα και την φορά περιστροφής του κινητήρα. Επίσης το PLC με την κατάλληλη συνδεσμολογία ελέγχει εάν υπάρχει κάποιο σφάλμα στον driver

Το PLC διαβάζει τις καταστάσεις των αισθητήρων με τις ψηφιακές εισόδους και ελέγχει τον εξοπλισμό δίνοντας ψηφιακές εξόδους σε αυτών ανάλογα με την λειτουργία που πρέπει να εκτελεστεί.

Επικοινωνεί μέσω του πρωτοκόλλου profinet με το HMI screen και έτσι ο χειριστής ενημερώνεται για την πορεία της παραγωγής, την κατάσταση του μηχανήματος (σφάλματα), και μπορεί να επέμβει στις ρυθμίσεις του προγράμματος του PLC μέσω αυτού.

Υπολογίζει το σωστό μήκος για τα διπλώματα του ιματισμού.

Υπολογίζει το μήκος του ιματισμού.



Σχήμα 5.2.β TIA portal Programming

5.2.1 To VFD (Variable Frequency Driver)



Σχήμα 5.2.γ LsIs VFD iG5A

- Έχει την κατάλληλη ισχύ σύμφωνα με τον κινητήρα που πρέπει να οδηγήσει. Για την οδήγηση του κινητήρα χρειάζεται ένα και μόνο inverter.
- Ο έλεγχος του driver γίνεται μέσω ψηφιακών σημάτων από το PLC.
- Οι παράμετροι είναι στην μνήμη του driver και λειτουργεί σύμφωνα με αυτά που έχουμε εμείς επιλέξει.
- Υπάρχει εύκολη επικοινωνία με τον χρήστη από την στιγμή που το VFD έχει ενσωματωμένο ψηφιακό χειριστήριο που περιλαμβάνει μια οθόνη 7 segment τεσσάρων χαρακτήρων. Επίσης στο χειριστήριο υπάρχουν πλήκτρα πλοήγησης στο μενού και μπουτόν Start ,stop για τον ευκολότερο χειρισμό του.
- Έλεγχος ρεύματος και τάσης εξόδου. Ο συνεχής έλεγχος του ρεύματος κάνει δυνατή τη γρήγορη επιτάχυνση της μηχανής ή τη στιγμιαία υπερφόρτωση της, χωρίς τη διακοπή της λειτουργίας αυτής λόγω υπερεντάσεων. Η τάση εξόδου ελέγχεται διαρκώς από τον μικροεπεξεργαστή, προκειμένου να διασφαλίζεται η ομαλή λειτουργία του κινητήρα.
- Ο συνεχής έλεγχος και επιτήρηση στο ρεύμα και των τριών φάσεων εξόδου του ρυθμιστή στροφών, προστατεύοντας την πλήρως από κάθε είδους βραχυκύκλωμα στην έξοδο της.

5.2.2 HMI Screen



Σχήμα 5.2.δ Οθόνη Siemens HMI 7” Comfort

- Μέσω του HMI Screen γίνεται η επικοινωνία του ανθρώπινου παράγοντα με την μηχανή το PLC
- Στο HMI εμφανίζεται ο αριθμός του διπλωμένου ιματισμού.
- Μπορούν να ρυθμιστούν οι παράμετροι για κάθε επιμέρους πρόγραμμα και να κάνει εναλλαγή του προγράμματος
- Ο χρήστης μπορεί να δημιουργεί δικά του προγράμματα σύμφωνα με τις αναγκαιότητες του κάθε διαφορετικού είδους ιματισμού

5.2.3 Ρελέ Solid State



Σχήμα 5.2.ε Finder Solid state relay with mount

- Χρησιμοποιείται solid state ρελέ που έχει πολύ μεγάλη ταχύτητα ενεργοποίησης για να δίνονται όσο το δυνατόν πιο γρήγορα τα σήματα για την εναλλαγή των κινήσεων του inverter .
- Η αντοχή τους είναι μεγάλη

5.2.4 Φωτοκύτταρο

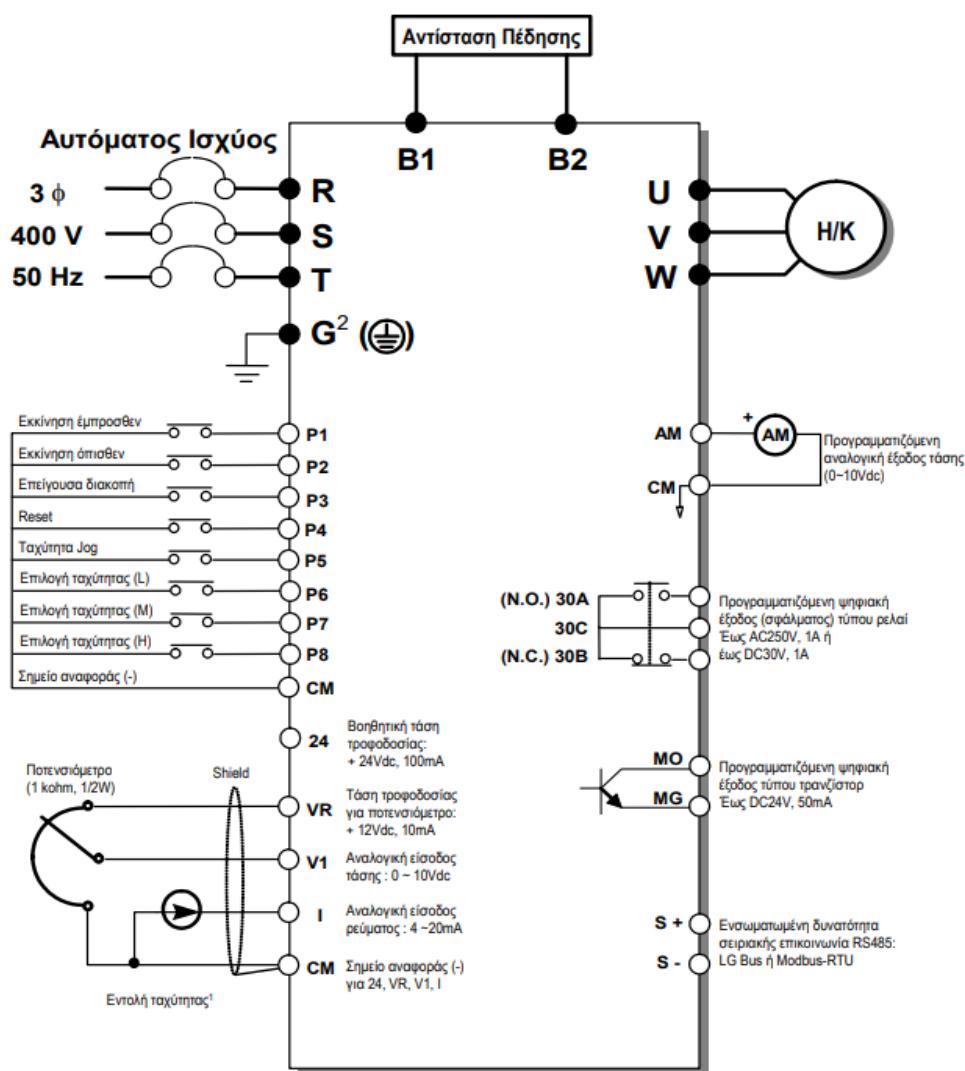


Σχήμα 5.2.στ Photoelectric sensor[4]

- Η επαφή του φωτοκύτταρου κλείνει κατά την διάρκεια που περνάει ιματισμός από αυτό και έτσι το PLC μπορεί και μετράει χρόνο υπολογίζοντας το τελικό μήκος του ιματισμού.
- Το φωτοκύτταρο δίνει είσοδο στο PLC για να αντιληφθεί ότι ένα κομμάτι έρχεται προς κάθε δίπλωμα ξεχωριστά.

5.3 Τρόπος ελέγχου VFD

Ο τρόπος ελέγχου των VFD γίνεται μέσω των επαφών:



Σχήμα 5.3.α Σχέδιο καλωδιώσεων VFD

- P1: Είναι η είσοδος του VFD για την εμπρόσθια κίνηση του κινητήρα. Μόλις ενεργοποιηθεί το solid state relay που έχουμε εγκαταστήσει, η ανοιχτή επαφή

που ελέγχει θα κλείσει. Έτσι θα γίνει βραχυκύκλωμα μεταξύ του CM με την είσοδο P1 του VFD. Μόλις το VFD πάρει είσοδο θα εκκινήσει τον κινητήρα κατά την εμπρόσθια κίνηση σύμφωνα με τις παραμέτρους που έχουμε ορίσει.

- P2: Είναι η είσοδος του VFD για την όπισθεν κίνηση του κινητήρα. Μόλις ενεργοποιηθεί το solid state relay που έχουμε εγκαταστήσει, η ανοιχτή επαφή που ελέγχει θα κλείσει. Έτσι θα γίνει βραχυκύκλωμα μεταξύ του CM με την είσοδο P2 του VFD. Μόλις το VFD πάρει είσοδο θα εκκινήσει τον κινητήρα κατά την οπίσθια κίνηση σύμφωνα με τις παραμέτρους που έχουμε ορίσει. Σε περίπτωση που ενεργοποιηθεί αυτή η εντολή θα πρέπει αναγκαστικά η εντολή της εμπρόσθιας κίνησης να μην είναι ενεργοποιημένη. Στην συγκεκριμένη εφαρμογή το PLC θα δίνει σήμα για να γίνει η αλλαγή της κίνησης όταν αυτό κρίνει σύμφωνα με το μήκος του ιματισμού ότι πρέπει να γίνει δίπλωμα. Λόγο του ότι χρειάζεται μεγάλη ακρίβεια για να έχουμε ένα ικανοποιητικό δίπλωμα, χρησιμοποιούμε τα solid state σαν βοηθητικές επαφές. Η όπισθεν κίνηση ακολουθεί πάντα μετά από μια εμπρόσθια για να λειτουργήσει η εφαρμογή.
- P3: Στην ψηφιακή είσοδο P3 θέτουμε αλλάζοντας την παράμετρο ελέγχου λειτουργίας της (P19=11) το φρένο του κινητήρα. Μόλις λοιπόν δοθεί παλμός εισόδου από το PLC το VFD θα εφαρμόσει μια DC τάση στον κινητήρα μειώνοντας την ροπή του. Αυτή την λειτουργία την χρησιμοποιούμε για να μπορούμε στιγμιαία να μειώσουμε την ταχύτητα του κινητήρα για να αλλάξει απότομα η φορά περιστροφής του. Στην συγκεκριμένη εφαρμογή θα χρησιμοποιήσουμε δυναμική πέδηση (dynamic braking).
- P4(Reset): Σε περίπτωση που κάτι πάει στραβά και το VFD έρθει σε κατάσταση σφάλματος η ανοιχτής επαφής ρελέ 30C-30A θα κλείσει και το PLC από μια ψηφιακή είσοδο θα αντιληφθεί ότι κάποιος από τους Drivers βρίσκεται σε σφάλμα.

Ο χειριστής θα πρέπει στην συνέχεια να βρει που υπάρχει το πρόβλημα, να το διορθώσει και στην συνέχεια να πατήσει στην HMI οθόνη του συστήματος αυτοματισμού reset. Για να γίνει όλη αυτή η διαδικασία μια ψηφιακή έξοδος από

το PLC θα ενεργοποιηθεί και το βοηθητικό solid state relay θα κλείσει την επαφή του βραχυκυκλώνοντας την CM(Common) με την είσοδο P4. Αυτό θα μηδενίσει τα σφάλματα του driver και το driver θα είναι έτοιμο για χρήση ξανά.

- 30A,30B,30C: Αυτές οι επαφές του ρελέ χρησιμοποιούνται για την έξοδο του σφάλματος. Είναι 2 ψυχρές επαφές τύπου ρελέ με κοινό το 30C. Δηλαδή σε περίπτωση σφάλματος του driver θα ενεργοποιηθεί το ρελέ σφάλματος και να κλείσει η επαφή. Στην δική μας εφαρμογή η επαφή χρησιμοποιείται η επαφή 30A-30C και είναι συνδεδεμένη με μια ψηφιακή είσοδο του PLC.

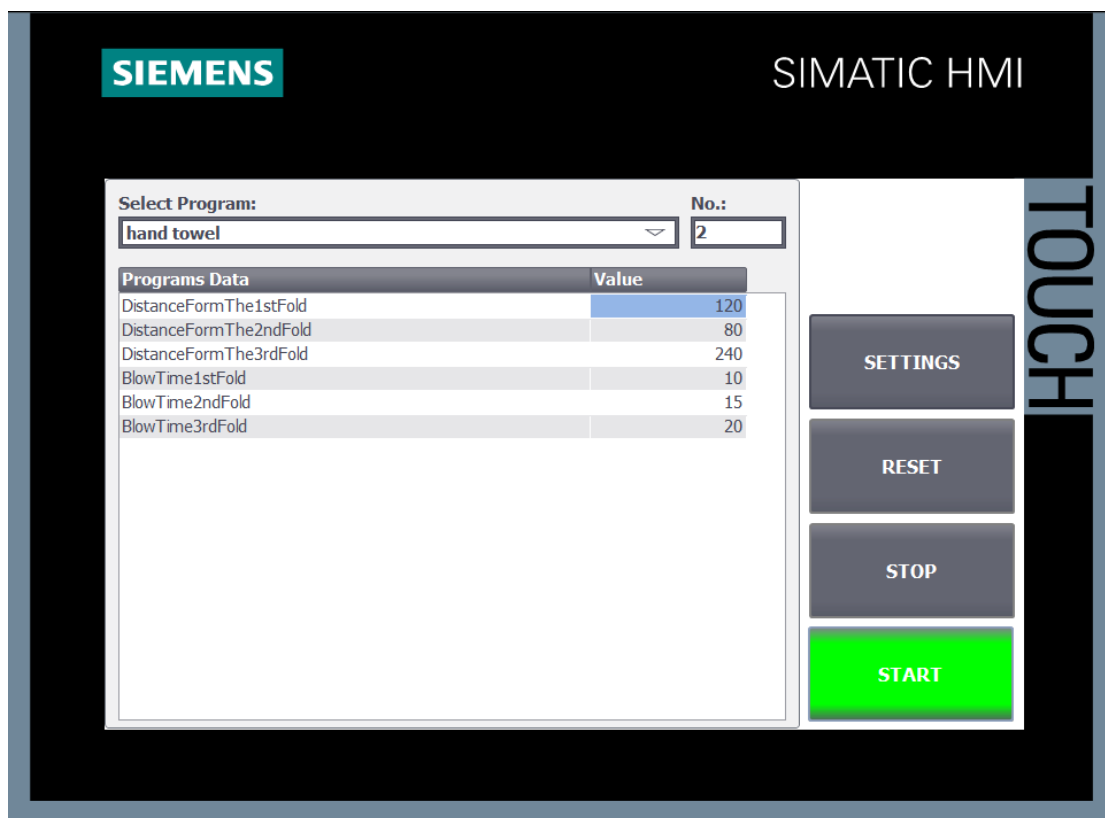
Βασικοί παράμετροι του VFD που θα πρέπει να δώσουμε ιδιαίτερη σημασία

- St1: Είναι η συχνότητα λειτουργίας του που ορίζουμε για να δουλέψει ο κινητήρας στην πρώτη προγραμματιζόμενη ταχύτητα. Το εύρος τιμών της φτάνει από τα 0 έως και τα 400Hz. Η εφαρμογή ρυθμίστηκε με αυτήν την παράμετρο, ώστε η ταχύτητα των κινητήρων των διπλωμάτων να συνάπτει με την ταχύτητα του συστήματος μοτέρ-ιμάντων μεταφοράς ιματισμού από την εισαγωγή.
- ACC: Είναι ο χρόνος επιτάχυνσης του κινητήρα από την στιγμή που πάρει σήμα για έναυση. Λόγο του ότι χρειαζόμαστε γρήγορες εναλλαγές η ταχύτητα που θα θέσουμε είναι όσο το δυνατόν πιο μικρή (0sec).
- DEC: Είναι ο χρόνος επιβράδυνσης του κινητήρα από την στιγμή που δεν υπάρχει πλέον είσοδος στον driver. Λόγο του ότι χρειαζόμαστε γρήγορες εναλλαγές η ταχύτητα που θα θέσουμε είναι όσο το δυνατόν πιο μικρή (0sec).
- drn: Σε αυτήν την παράμετρο δηλώνουμε τον τρόπο ελέγχου του εκκίνησης και στάσης του κινητήρα. Για παράδειγμα, στην εφαρμογή ο έλεγχος θα γίνει από τις εισόδους άρα πρέπει να δηλωθεί ο κατάλληλος αριθμός.

- Frg: Είναι ο τρόπος ελέγχου συχνότητας κινητήρα και δηλώνεται με τον κατάλληλο αριθμό ανάλογα με τον τρόπο που είναι κατάλληλος.
- F56:Με αυτή την παράμετρο ενεργοποιείται το σφάλμα υπερφόρτωσης του κινητήρα
- F57:Είναι το ποσοστό σφάλματος για την ρύθμιση της υπερφόρτωσης .
- H27: Νεκρός χρόνος αυτόματων επανεκκινήσεων
- H30: Ονομαστική ισχύς ηλεκτροκινητήρα
- F4: Εδώ ορίζεται ο τρόπος σταματήματος του κινητήρα
- F8: Σε αυτή την παράμετρο θέτουμε τα Hz που θα γίνει ενεργοποίηση της λειτουργίας φρένου
- F9:Νεκρός χρόνος πριν την εφαρμογή DC τάσης
- F10: Αυτή η παράμετρος καθορίζει την ποσότητα DC τάση που εφαρμόζεται σε έναν κινητήρα.
- F11: Αυτή η παράμετρος καθορίζει το χρόνο που εφαρμόζεται το ρεύμα DC στον κινητήρα όταν βρίσκεται σε κατάσταση πέδησης.

5.4 Human interface

Η δημιουργία του προγράμματος της HMI οθόνης έγινε με το TIA PORTAL V16 της εταιρείας Siemens.



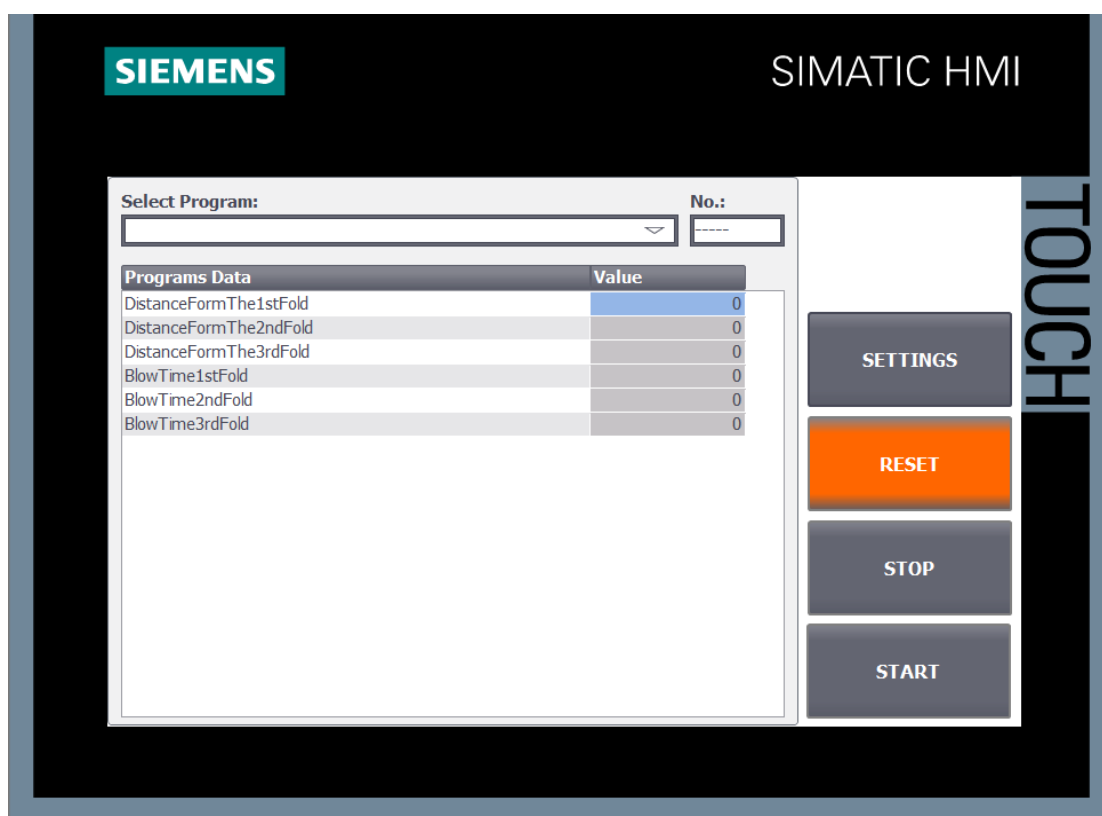
Σχήμα 5.4.α Αρχική οθόνη PLC σε Start

Το μπουτόν Start που βρίσκεται πάνω στην αρχική οθόνη του προγράμματος δίνει έναρξη στο σύστημα αυτοματισμού. Μόλις πατηθεί το κουμπί start αρχίζει και αναβοσβήνει με πράσινο χρώμα ώστε ο χρήστης να καταλαβαίνει ο χειριστής της μηχανής ότι το μηχάνημα βρίσκεται επιτυχώς σε λειτουργία σε λειτουργία.

Το μπουτόν Stop σταματάει την λειτουργία του μηχανήματος και για να γίνει από την αρχή εκκίνηση πάλι, θα πρέπει να πατηθεί το μπουτόν Start.

Το μπουτόν Reset αναβοσβήνει σε περίπτωση που υπάρξει κάποιο πρόβλημα στο μηχάνημα και το σύστημα μας έχει μπει σε κατάσταση σφάλματος. Κάποιο σφάλμα

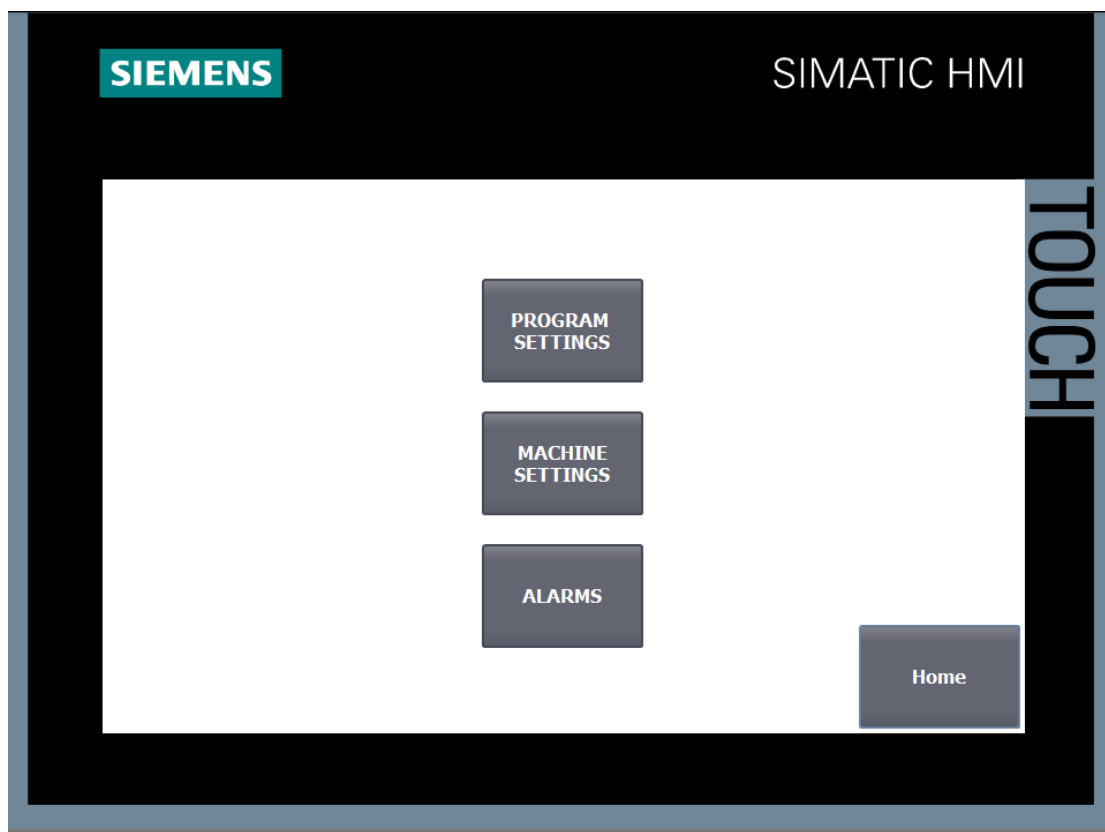
μπορεί να δημιουργηθεί κατά την λειτουργία του μηχανήματος. Για παράδειγμα σε περίπτωση που ιματισμός κολλήσει στο σύστημα διπλώματος αυτό θα οδηγήσει σε υπερφόρτωση ενός από τα VFD. Για να επανέλθει το PLC και το VFD σε κατάσταση λειτουργίας και να σβηστούν τα σφάλματα θα πρέπει να πατηθεί το reset αφού βέβαια ο χρήστης έχει ξεμπλοκάρει τον ιματισμό. Μόλις πατηθεί το πλήκτρο reset οι ψηφιακές έξοδοι του PLC στέλνουν παλμό στα VFD και γίνεται reset. Στην συνέχεια το μηχάνημα είναι έτοιμο προς λειτουργία και πάλι.



Σχήμα 5.4.β Αρχική οθόνη PLC σε Error Condition

Στο πάνω μέρος της οθόνης υπάρχει μια μπάρα επιλογής όπου ο χειριστής μπορεί να επιλέξει το είδος ιματισμού θέλει να τροφοδοτήσει στο μηχάνημα. Λόγο του ότι υπάρχουν πολλά είδη ιματισμού με διαφορετικές ιδιότητες το καθένα υπάρχει η δυνατότητα να φτιαχτούν αριθμός προγραμμάτων που θα ανταπεξέρχονται στο κάθε ιματισμό ξεχωριστά. Πατώντας λοιπόν το κάθετο βέλος της μπάρας ο χειριστής βλέπει τα διαθέσιμα προγράμματα και από κάτω υπάρχει μια λίστα με τις παραμέτρους του κάθε προγράμματος.

Πατώντας το μπουτόν settings στην αρχική οθόνη ο χειριστής του μηχανήματος μεταβαίνει σε ένα menu με 3 επιλογές πλοήγησης στο πρόγραμμα του HMI.

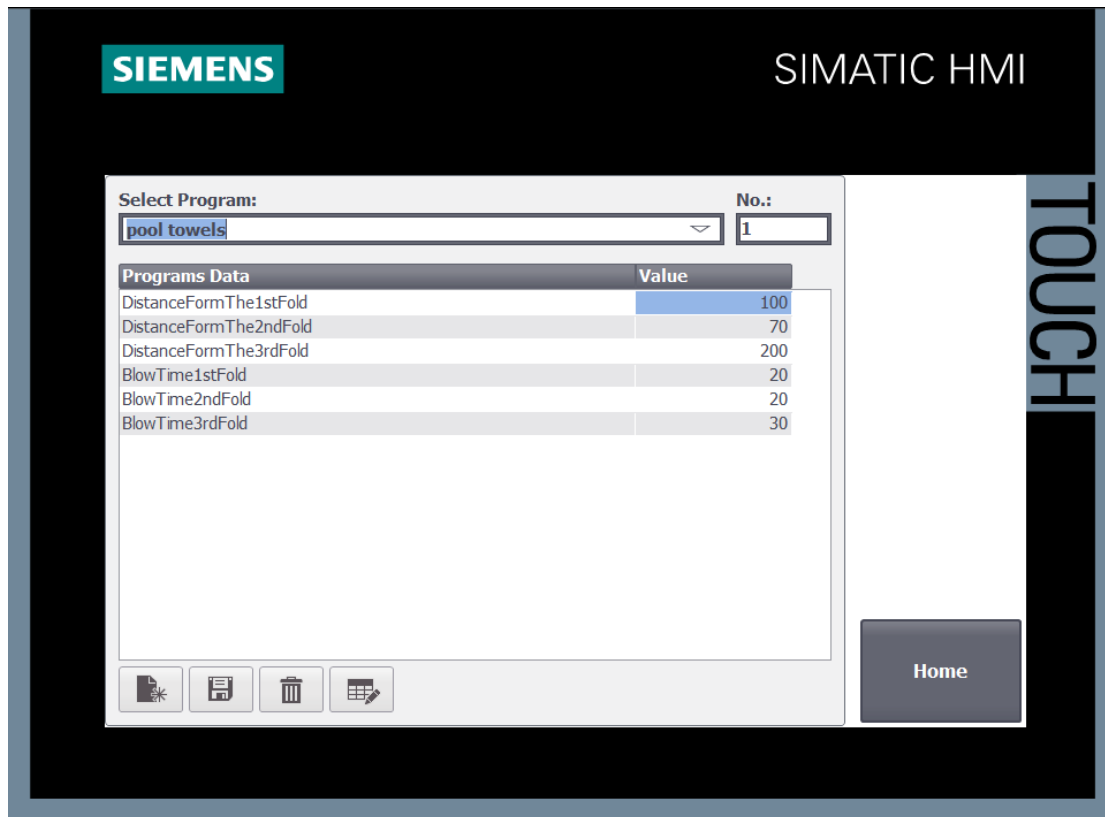


Σχήμα 5.4.γ Μενου Settings

Στην πρώτη επιλογή πλοήγησης υπάρχει μια λίστα όπου από εκεί ο χρήστης μπορεί να δημιουργήσει, να διαγράψει και να αλλάξει κάποιο πρόγραμμα ή τις παραμέτρους των προγραμμάτων ανάλογα με τις αναγκαιότητες του κάθε ιματισμού.

Οι παράμετροι των προγραμμάτων είναι:

- DistanceFromTheFold: Ανάλογα με το αποτέλεσμα του διπλώματος αυτή η παράμετρος μπορεί να αλλάξει το μήκος του κάθε διπλώματος ξεχωριστά.
- BlowTimeFold: Ορίζει την διάρκεια που γίνεται ενεργοποίηση του αέρα που βοηθάει το κάθε δίπλωμα.



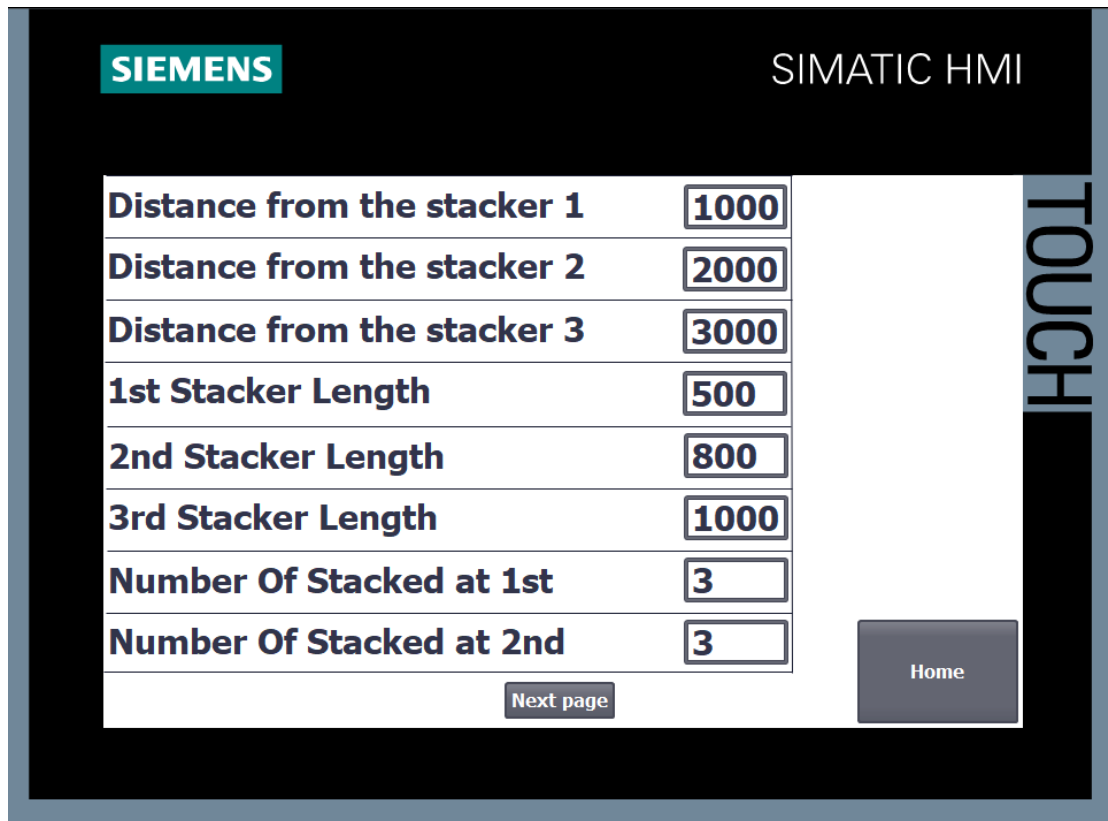
Σχήμα 5.4.δ Program Settings

Η δεύτερη επιλογή πλοήγησης (Machine settings) οδηγεί σε μια λίστα παραμέτρων όπου ο χειριστής μπορεί να αλλάζει τιμές και να ορίζει διάφορα πεδία των διαδικασιών του μηχανήματος. Οι τιμές αυτών των παραμέτρων ισχύουν ανεξάρτητα για όλα τα προγράμματα που έχει στην διάθεση του ο χρήστης.

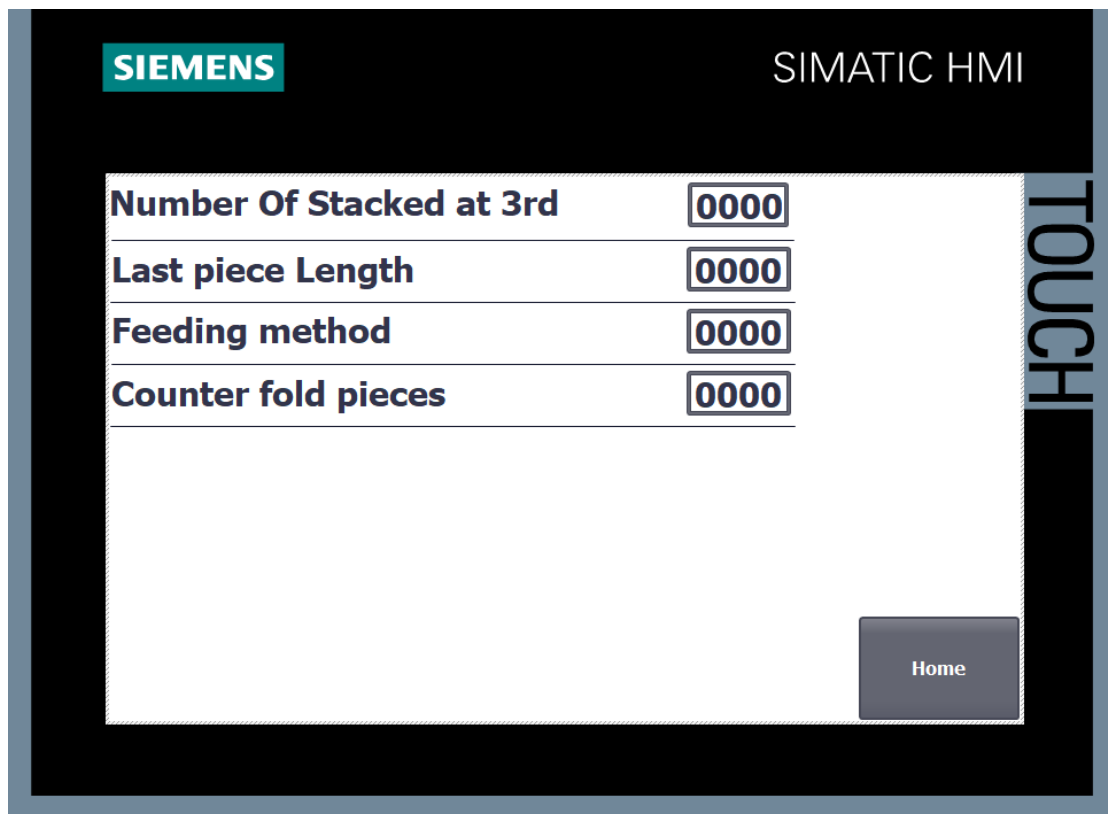
Οι βασικοί παράμετροι που βρίσκονται σε αυτή την λίστα είναι:

- Distance from the stacker: Αυτή η παράμετρος ορίζει το χρόνο που θα δουλέψει ο κινητήρας μεταφοράς του ιματισμού στο κατάλληλο stacker
- Stacker Length: Ορίζει μέχρι ποιο μέγεθος δέχεται το κάθε stacker
- Number of Stacked: Ορίζει τα κομμάτια του κάθε stacker
- Last piece length: Δείχνει στον χειριστή το μέγεθος του τελευταίου κομματιού ιματισμού που τροφοδοτήθηκε
- Feeding method: Ορίζει τον τρόπο τροφοδοσίας

- Counter fold pieces: Δείχνει το πόσο κομμάτια έχουν τροφοδοτηθεί.

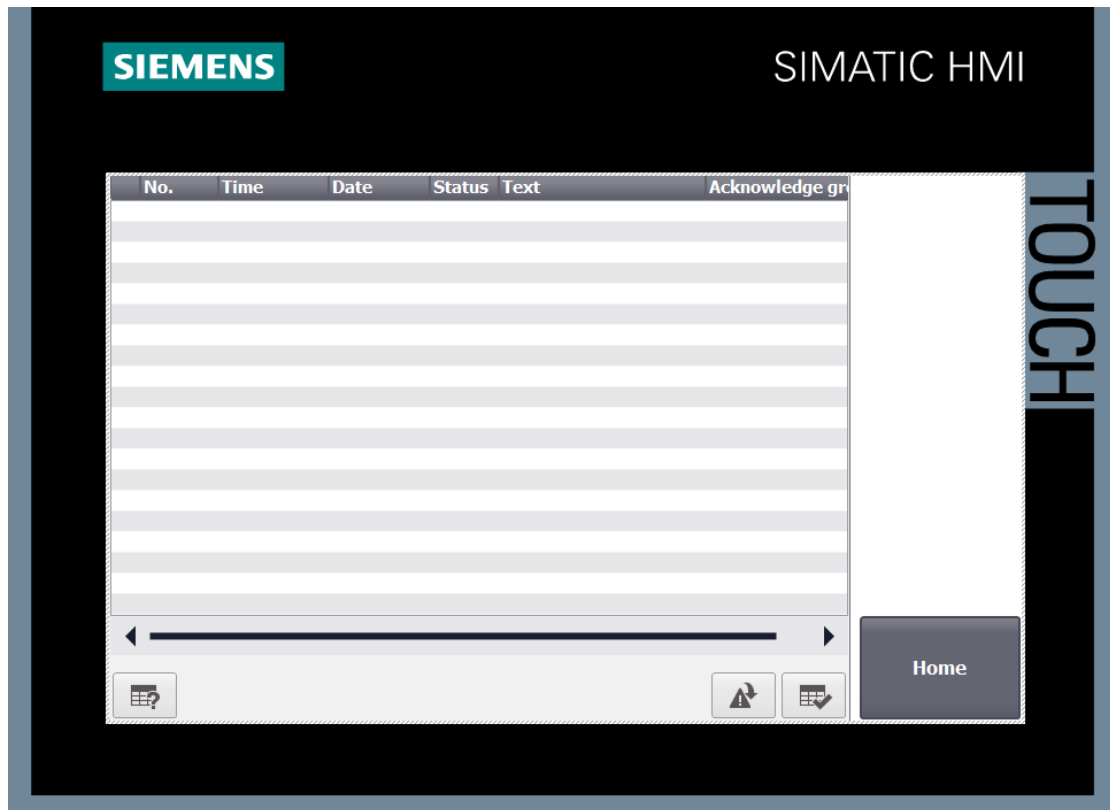


Σχήμα 5.4.ε Machine Settings 1



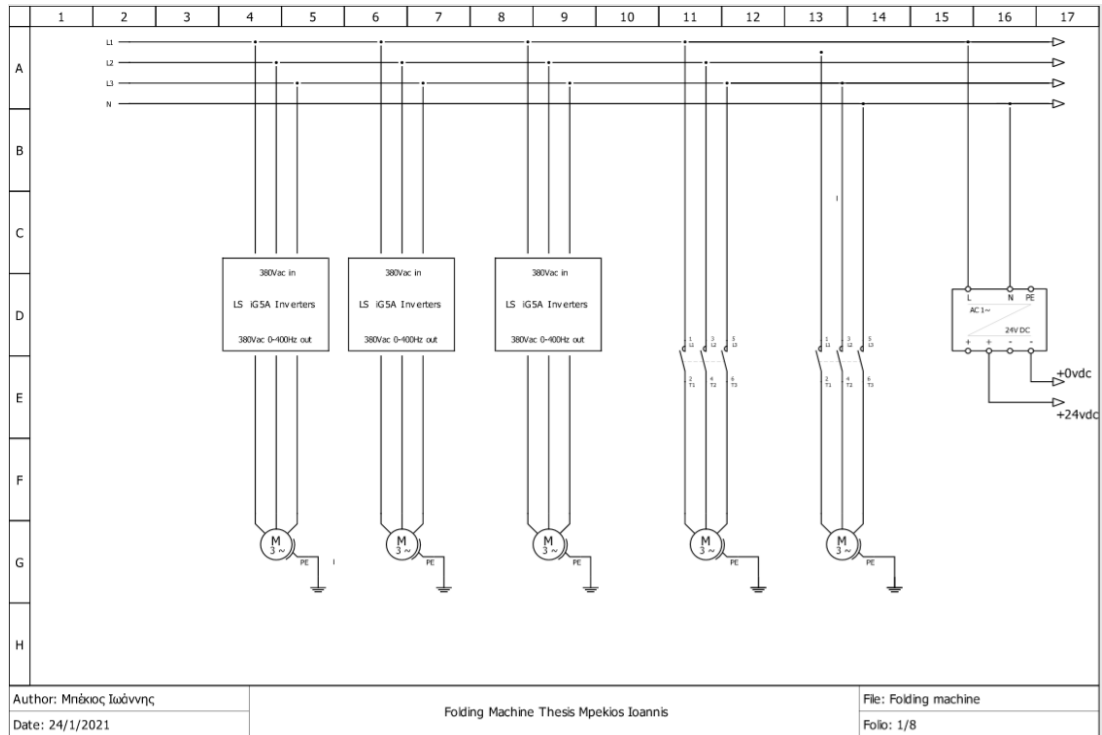
Σχήμα 5.4.στ Machine Settings 2

Στην τρίτη επιλογή Alarms ο χειριστής μπορεί να ενημερώνετε από τα σφάλματα που υπάρχουν την συγκεκριμένη στιγμή στο μηχάνημα για να προβεί σε διόρθωση.

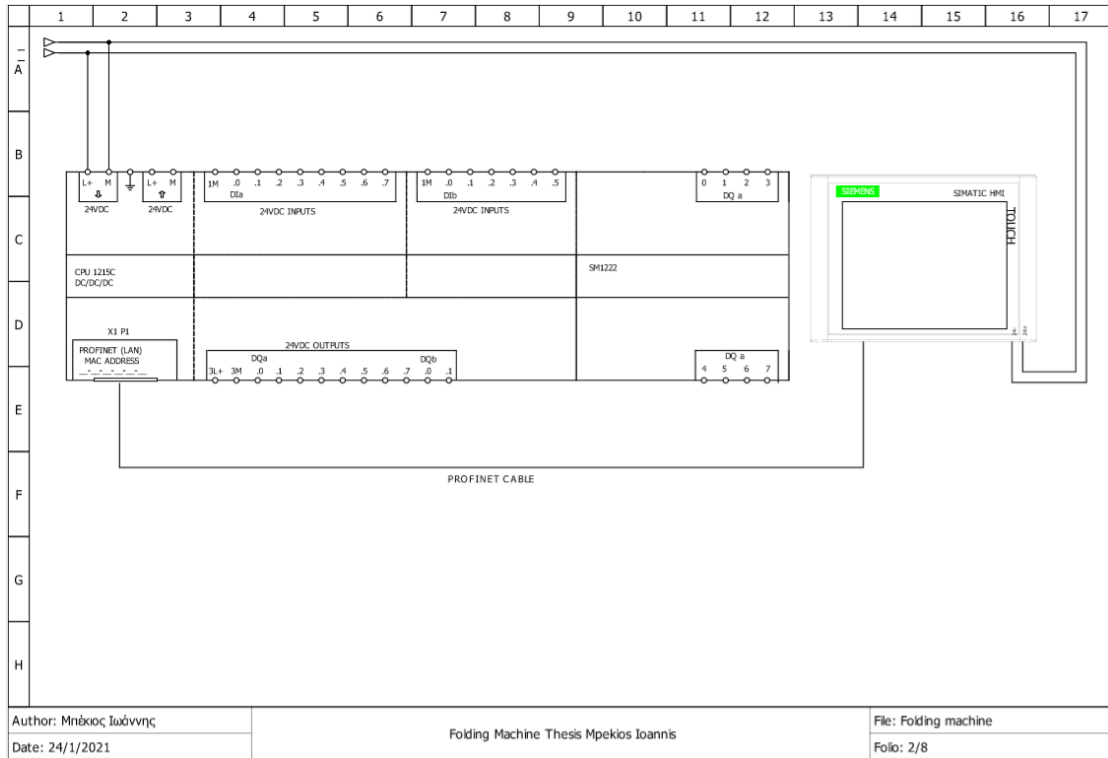


Σχήμα 5.4.ζ Αρχική οθόνη PLC σε Error Condition

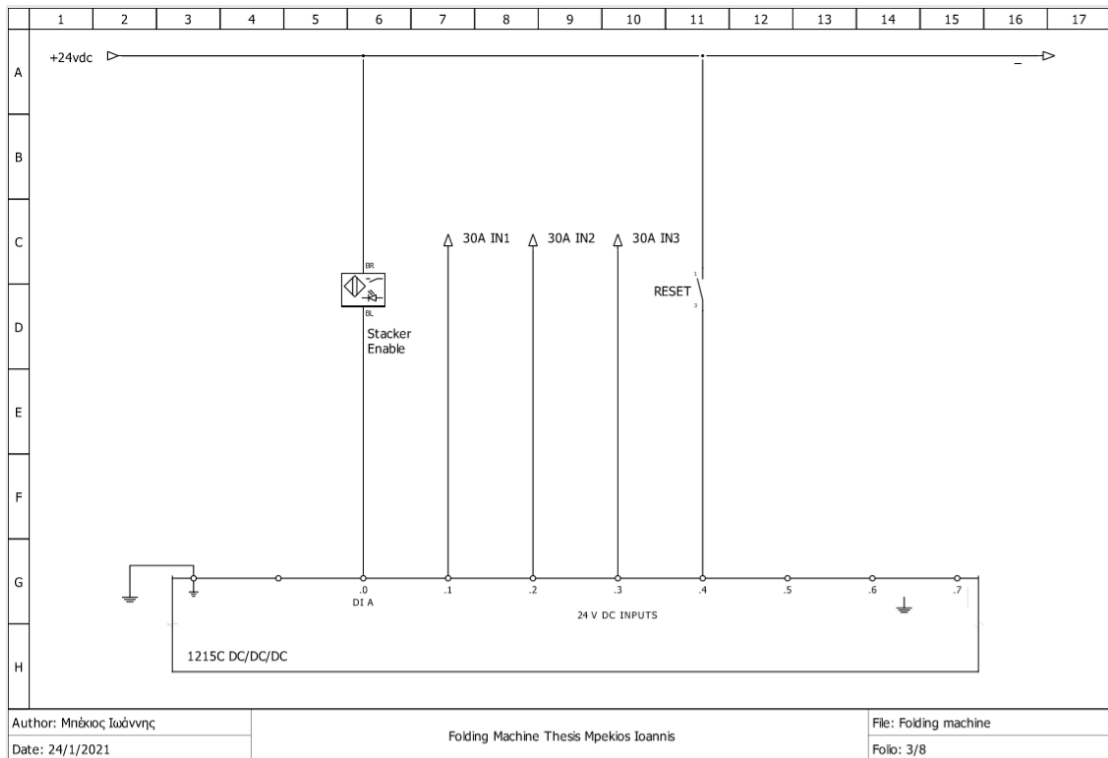
5.5 Ηλεκτρολογικό Σχέδιο εφαρμογής



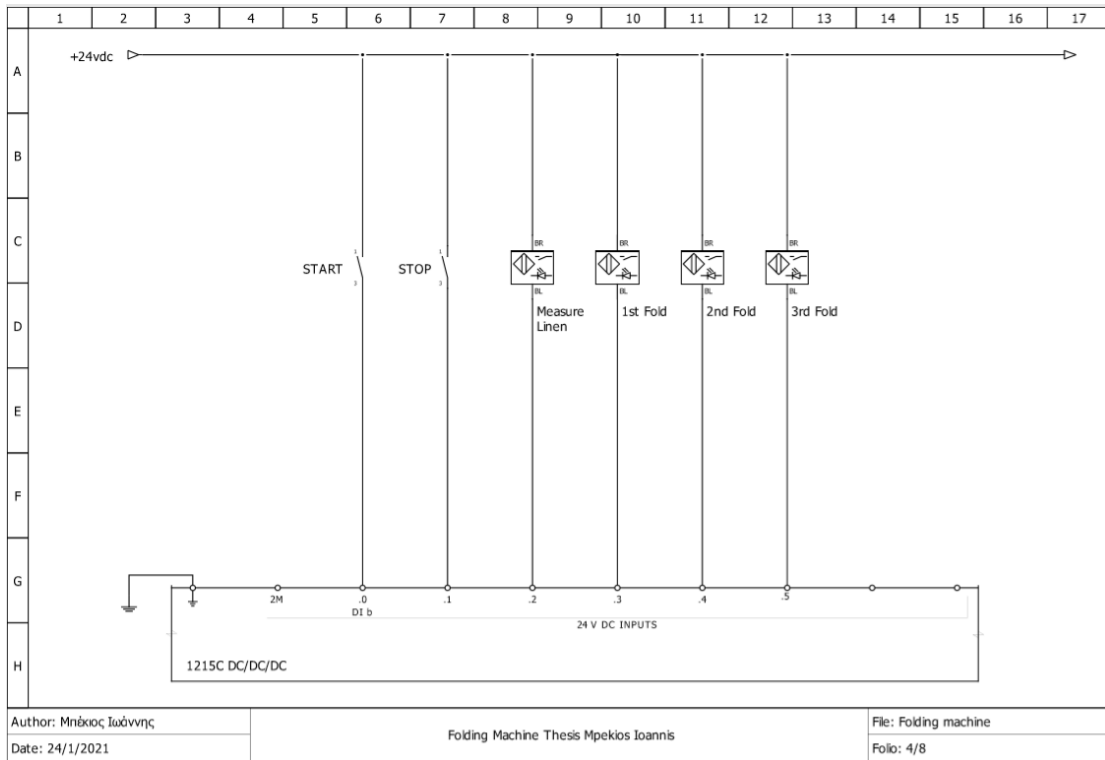
Σχήμα 5.5.1 Σχέδιο Πρακτικής Εφαρμογής 1



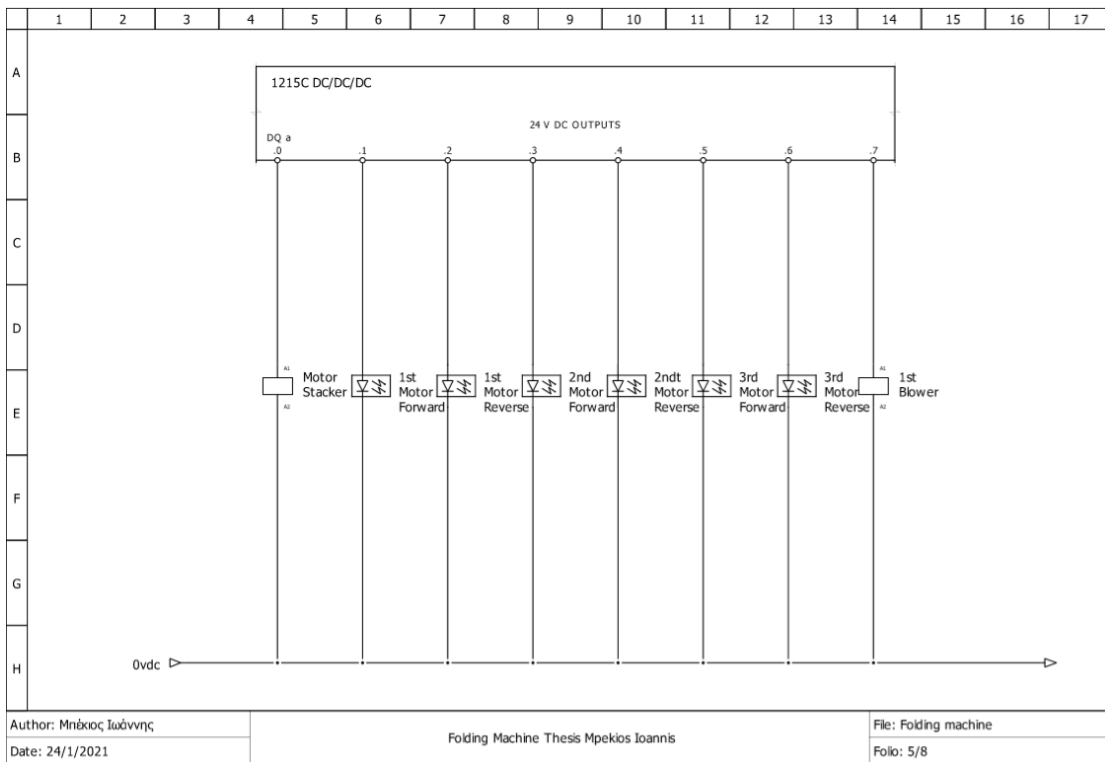
Σχήμα 5.5.2 Σχέδιο Πρακτικής Εφαρμογής 2



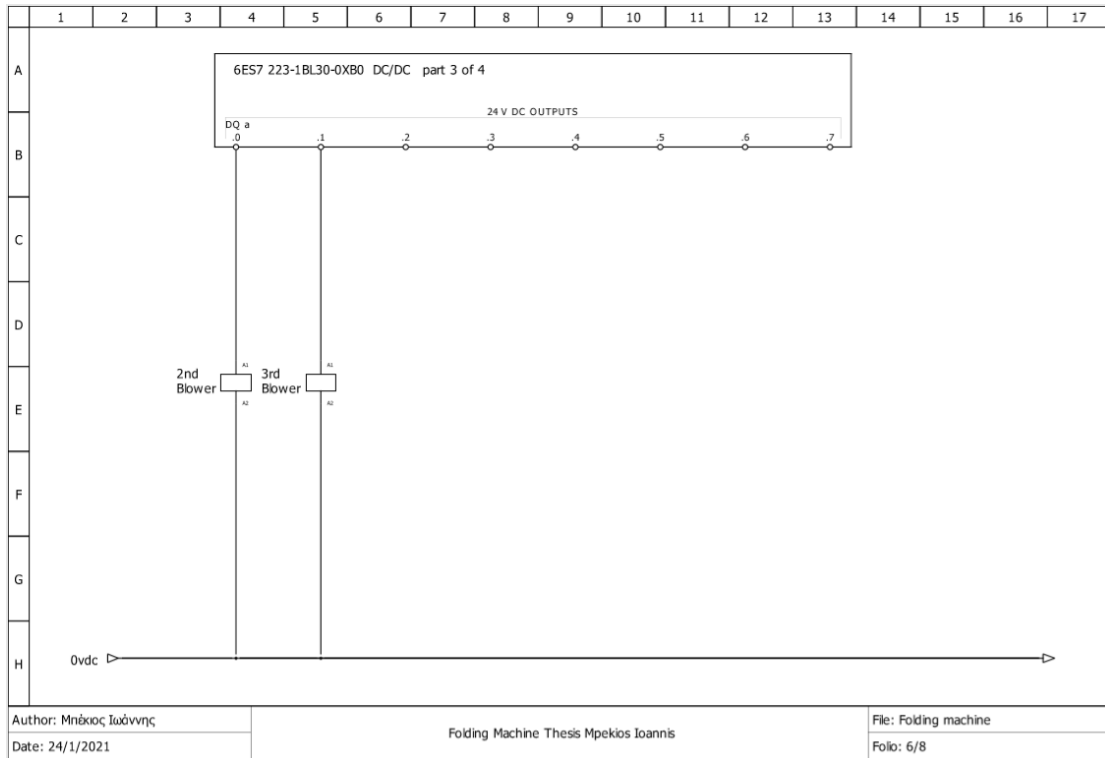
Σχήμα 5.5.3 Σχέδιο Πρακτικής Εφαρμογής 3



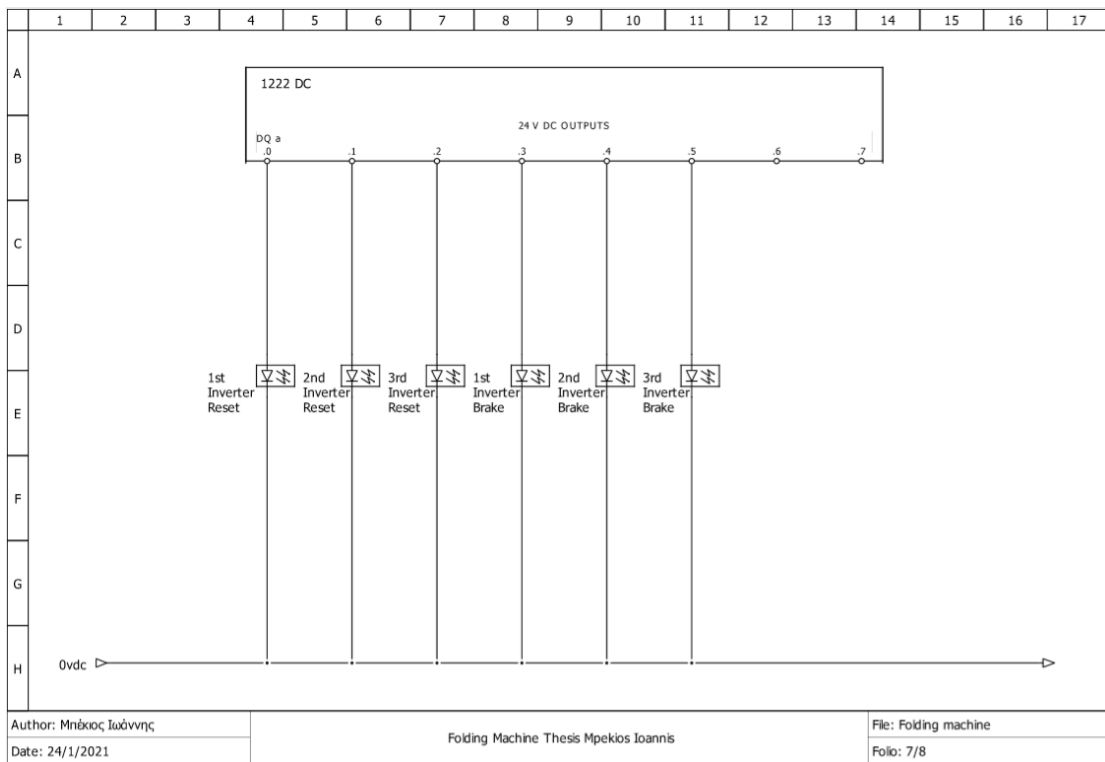
Σχήμα 5.5.4 Σχέδιο Πρακτικής Εφαρμογής 4



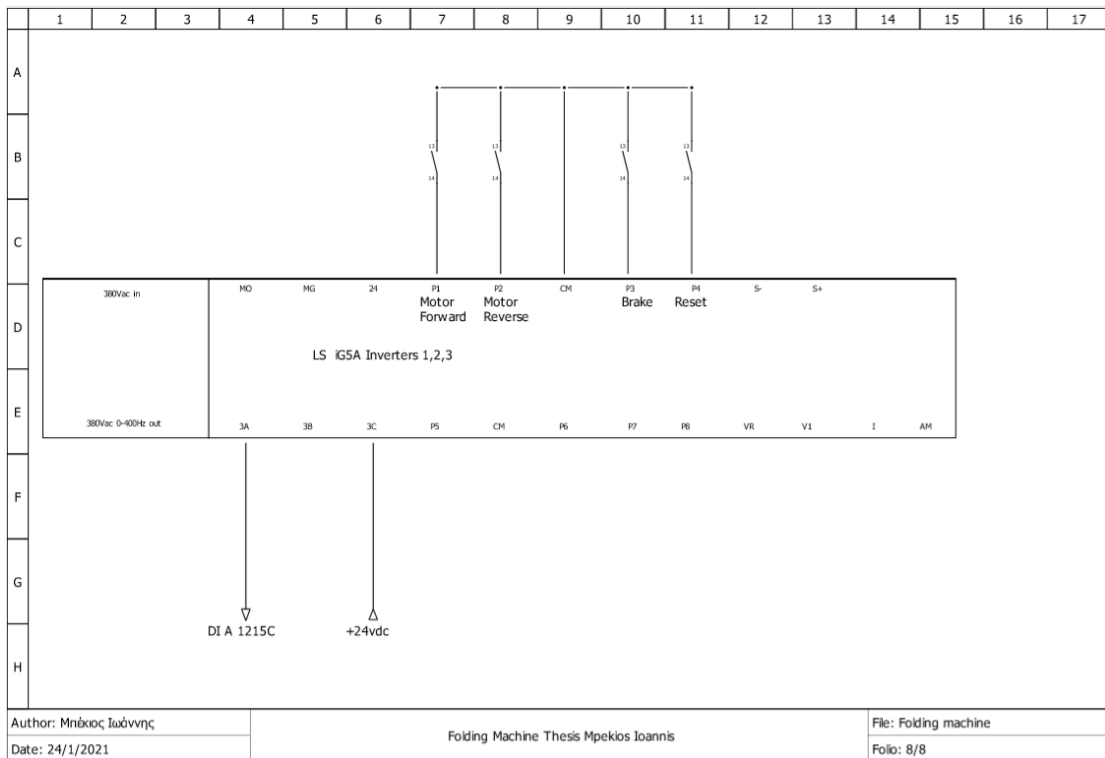
Σχήμα 5.5.5 Σχέδιο Πρακτικής Εφαρμογής 5



Σχήμα 5.5.6 Σχέδιο Πρακτικής Εφαρμογής 6



Σχήμα 5.5.7 Σχέδιο Πρακτικής Εφαρμογής 7



Σχήμα 5.5.8 Σχέδιο Πρακτικής Εφαρμογής 8

Συμπέρασμα

Στην πτυχιακή εργασία αναλύθηκαν μέθοδοι και τρόποι ελέγχου κινητήρων με σύγχρονους εξοπλισμούς για τη βιομηχανία. Βασικό συμπέρασμα στο οποίο καταλήγουμε είναι, ότι οι σύγχρονες εφαρμογές στη βιομηχανία που απαιτούν πολύπλοκες διαδικασίες με κινητήρες, μπορούν να έρθουν εις πέρας χρησιμοποιώντας κατάλληλο εξοπλισμό για τον έλεγχο των κινητήρων. Παλαιότερα η δυνατότητα αυτή δεν υπήρχε και σαν αποτέλεσμα υπήρχε το κόστος των εφαρμογών να είναι τεράστιο και ο τρόπος ελέγχου των κινητήρων να ήταν δύσκολος έως και αδύνατος πολλές φορές, καθιστώντας πολλές εφαρμογές ανέφικτες. Με τα Soft starter, VFD, Stepper Drivers, Servo drivers και τα νέα είδη κινητήρων οι ταχύτητες παραγωγής μηχανημάτων μεγάλωσαν σε μεγάλο βαθμό, ο έλεγχος των συστημάτων έγινε απλός βάζοντας γερές βάσεις για εφαρμογές που έλυσαν σοβαρά προβλήματα μέσα στις βιομηχανίες. Συνολικά καταλήγουμε, ότι οι σύγχρονοι μέθοδοι ελέγχων των κινητήρων είναι αναπόσπαστο κομμάτι και εργαλείο στην βιομηχανία.

Βιβλιογραφίες

[1]ABB.Ρυθμιστές στροφών (drives) και ομαλοί εκκινητές (softstarters) εναλλασσόμενου ρεύματος χαμηλής τάσης (2020). [Online] Available: <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=1TXB698210B2301&LanguageCode=el&DocumentPartId=&Action=Launch>

[2]*Softstarter Handbook*,ABB AB,Västerås,Sweden,2010

[3]A. Hughes, B. Drury. (2019, Aug.) "Electric Motors and Drives, Fundamentals, Types and Applications "(5th ed.). [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/C2017-0-03226-3>

[4]F. D. Petruzella, *Electric Motors and Control Systems*, 1st edition. Mc Graw Hill: New York, 2010.

[5]Solid-state soft start motor controller and starter. Eaton Corporation,Cleveland,OH,USA ,2011

[6]M. El-Sharkawi, *Fundamentals of Electric Drives*, 2nd edition. USA: Cengage, 2017.

[7]Michael Salcone,Joe Bond, "Selecting Film Bus Link Capacitors For High Performance Inverter Applications",presented at the 2009 IEEE International Electric Machines and Drives Conference, Miami,FL,USA,3-6 May 2009

[8]Steve Petersen.Variable Frequency Drive Control Methods.(2014).[Online]. Available: <https://www.yaskawa.com/delegate/getAttachment?documentId=WP.AFD.13&command=documents&documentName=WP.AFD.13.pdf>

[9]R. Firoozian, *Servo Motors and Industrial Control Theory*, 2nd ed. Springer: Switzerland, 2014.

[10]Τμήμα Βιομηχανικής Σχεδίασης και Παραγωγής,"Σημειώσεις Εργαστηρίου Βιομηχανικών Εγκαταστάσεων", 2017

[11]OMRON.Technical Explanation for Servomotors and Servo Drive. [Online]. Available: https://www.ia.omron.com/data_pdf/guide/14/servo_tg_e_1_1.pdf

[12]X. Μαδεμλης, *Σερβοκινητήρια Συστήματα*, Τζιόλα: Θεσσαλονίκη, 2010.

[13]Stephen J. Chapman. *Ηλεκτρικές Μηχανές AC-DC*, 3η έκδοση. Τζιόλα: Θεσσαλονίκη, 2003.

[14]Gene Matthews,"Feedback Sensors Keep Servomotors on Target",Radford, VA, Kollmorgen, WhitePaper, 2018. [Online]. Available: https://www.kollmorgen.com/sites/default/files/images/FeedbackSensors_02_14.pdf

[15]Panasonic.Ac Servo Motor Driver Minus AIII Series.(2004). [Online]. Available: https://industrial.panasonic.com/content/data/MT/PDF/A3_series_all.pdf

[16]Step Motor and Servo Motor Systems and Controls,1996-1997 Edition,Parker Hannifin Corporation,Irwin,PA,USA,1996. [Online]. Available: <http://www.parkermotion.com/catalog/catalogA/SectionA.pdf>

[17]Π., Β. Μαλατέστας, *Ηλεκτρική Κίνηση*, 4^η έκδοση. Τζιόλα: Θεσσαλονίκη, 2015.

[18]Παντελής Ευθυμιάτος, Αθανάσιος Σαφάκας "Οι αισθητήρες σε ηλεκτρικά κινητήρια συστήματα ελεγχόμενα μέσω ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος. "ΤΕΕ, 2η έκτακτη έκδοση,1994

[19]Π. Β. Μαλατέστας και Σ. Ν. Μάνιας, *Συστήματα Οδήγησης Κινητήρων*. Συμεών: Αθήνα, 1997.

[20] Σ. Οικονόμου, *Μηχατρονική*, Ινστιτούτο τεχνολογίας υπολογιστών και εκδόσεων «Διόφαντος».

[21]Danfoss, Nodborg, Denmark, *VLT 5000 Communication Protocol*, [Online]. Available: <https://files.danfoss.com/download/Drives/175R5360Rev1VLT5000SerialCommuncationProtocolIM.pdf>

[22]Siemens Standard Drives-Application Handbook, Siemens, Congleton, England, 1997.

[23]Profibus Nutzerorganisation e. V., Karlsruhe, Germany. *Profibus System Description Technology and Application*, (2016). [Online]. Available: <https://www.profibus.com/index.php?eID=dumpFile&t=f&f=52380&token=4868812e468cd5e71d2a07c7b3da955b47a8e10d>

[24]Modicon, Massachusetts, USA, *Modbus Protocol Reference Guide*, PI-MBUS-300 Rev. J, (1996). [Online]. Available: https://www.modbus.org/docs/PI_MBUS_300.pdf

[25]Profibus Nutzerorganisation e. V., Karlsruhe, Germany. *Profinet System Description Technology and Application*, (2014). [Online]. Available: <http://donar.messe.de/exhibitor/hannovermesse/2017/U100056/pi-profinet-system-description-eng-423938.pdf>

[26]Profibus Nutzerorganisation e. V., Karlsruhe, Germany. *Profinet System Description*, (2009). [Online]. Available: https://www.mmu.ac.uk/media/mmuacuk/content/documents/ascent/B01_PROFINET_system_en.pdf