

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ**

**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΤΜΗΜΑ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ**



**ΘΕΜΑ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ:**

**«ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΡΙΦΑΣΙΚΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ»**

**ΟΝΟΜΑΤΑ ΦΟΙΤΗΤΩΝ: ΚΑΠΛΑΝΗΣ ΛΟΥΚΑΣ 39780  
ΚΥΡΙΑΖΗΣ ΣΤΑΜΑΤΗΣ 39771**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΘΕΟΧΑΡΗΣ ΕΥΣΤΑΘΙΟΣ**

**ΑΙΓΑΛΕΩ ΜΑΡΤΙΟΣ 2019**

## ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο/Η κάτωθι υπογεγραμμένος/α ΚΑΤΙΛΑΝΗΣ ΛΟΥΚΑΣ, του ΠΑΥΛΙΣΤΗ φοιτητής του Τμήματος ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, πριν αναλάβω την εκπόνηση της Πτυχιακής Εργασίας μου, δηλώνω ότι ενημερώθηκα για τα παρακάτω:

«Η Πτυχιακή Εργασία (Π.Ε) αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο του συγγραφέα, όσο και του Ιδρύματος και θα πρέπει να έχει μοναδικό χαρακτήρα και πρωτότυπο περιεχόμενο.

Απαγορεύεται αυστηρά οποιοδήποτε κομμάτι κειμένου της να εμφανίζεται αυτούσιο ή μεταφρασμένο από κάποια άλλη δημοσιευμένη πηγή. Κάθε τέτοια πράξη αποτελεί προϊόν λογοκλοπής και εγείρει θέμα Ηθικής Τάξης για τα πνευματικά δικαιώματα του άλλου συγγραφέα. Αποκλειστικός υπεύθυνος είναι ο συγγραφέας της Π.Ε, ο οποίος φέρει και την ευθύνη των συνεπειών, ποινικών και άλλων, αυτής της πράξης.

Πέραν των όποιων ποινικών ευθυνών του συγγραφέα, σε περίπτωση που το Ίδρυμα του έχει απονείμει Πτυχίο, αυτό ανακαλείται με απόφαση της Συνέλευσης του Τμήματος. Η Συνέλευση του Τμήματος με νέα απόφασή της, μετά από αίτηση του ενδιαφερόμενου, του αναθέτει εκ νέου την εκπόνηση Π.Ε με άλλο θέμα και διαφορετικό επιβλέποντα καθηγητή. Η εκπόνηση της εν λόγω Π.Ε πρέπει να ολοκληρώσει εντός τουλάχιστον ενός ημερολογιακού 6μήνου από την ημερομηνία ανάθεσής της. Κατά τα λοιπά εφαρμόζονται τα προβλεπόμενα στο άρθρο 18. παρ.5 του ισχύοντος Εσωτερικού Κανονισμού».

Ο Δηλών



Ημερομηνία

28/03/2019

## ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο/Η κάτωθι υπογεγραμμένος/α ΚΥΡΙΑΖΗΣ ΣΤΑΜΑΤΗΣ του ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ, φοιτητής του Τμήματος ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, πριν αναλάβω την εκπόνηση της Πτυχιακής Εργασίας μου, δηλώνω ότι ενημερώθηκα για τα παρακάτω:

«Η Πτυχιακή Εργασία (Π.Ε) αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο του συγγραφέα, όσο και του ιδρύματος και θα πρέπει να έχει μοναδικό χαρακτήρα και πρωτότυπο περιεχόμενο.

Απαγορεύεται αυστηρά οποιοδήποτε κομμάτι κειμένου της να εμφανίζεται αυτούσιο ή μεταφρασμένο από κάποια άλλη δημοσιευμένη πηγή. Κάθε τέτοια πράξη αποτελεί προϊόν λογοκλοπής και εγείρει θέμα Ηθικής Τάξης για τα πνευματικά δικαιώματα του άλλου συγγραφέα. Αποκλειστικός υπεύθυνος είναι ο συγγραφέας της Π.Ε, ο οποίος φέρει και την ευθύνη των συνεπειών, ποινικών και άλλων, αυτής της πράξης.

Πέραν των όποιων ποινικών ευθυνών του συγγραφέα, σε περίπτωση που το ίδρυμα του έχει απονείμει πτυχίο, αυτό ανακαλείται με απόφαση της Συνέλευσης του Τμήματος. Η Συνέλευση του Τμήματος με νέα απόφασή της, μετά από αίτηση του ενδιαφερόμενου, του αναθέτει εκ νέου την εκπόνηση Π.Ε με άλλο θέμα και διαφορετικό επιβλέποντα καθηγητή. Η εκπόνηση της εν λόγω Π.Ε πρέπει να ολοκληρώσει εντός τουλάχιστον ενός ημερολογιακού δμήνου από την ημερομηνία ανάθεσής της. Κατά τα λοιπά εφαρμόζονται τα προβλεπόμενα στο άρθρο 18. παρ.5 του ισχύοντος Εσωτερικού Κανονισμού».

Ο Δηλών



Ημερομηνία

28/03/2019

## **Ευχαριστίες**

Ευχαριστούμε θερμά τους γονείς μας, για την αμέριστη υποστήριξη τους όλο αυτό τον καιρό, τον υπεύθυνο καθηγητή μας κ.Θεοχάρη Ευστάθιο για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του στην μελέτη αυτή, καθώς επίσης και την εταιρεία ABB S.A για τις πληροφορίες που μας παραχώρησε για να μπορέσει να πραγματοποιηθεί και να γίνει η προσομοίωση της μελέτης.

## Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή.....	5
2. Γενικά.....	6
3. Μέθοδοι οδήγησης τριφασικού κινητήρα.....	7
3.1 Κλασσικός τρόπος.....	7
3.1.1 Απευθείας εκκίνηση.....	7
3.1.2 Αστέρας – Τρίγωνο.....	10
3.1.3 Τριφασικός αυτομετασχηματιστής.....	13
3.2 Soft Starter.....	15
3.2.1 Εφαρμογές-Λειτουργίες.....	15
3.2.2 Ομαλή εκκίνηση κινητήρα (soft-starting).....	16
3.3 VFD (Variable Frequency Drive).....	18
3.3.1 Αρχή λειτουργίας VFD.....	19
3.3.2 Βασικά μέρη VFD.....	20
3.3.3 Διαμόρφωση εύρους παλμών (Pulse Width Modulation-PWM).....	33
3.3.4 Αρμονικές συχνότητες και δείκτες μέτρησης αρμονικών συχνοτήτων.....	35
4. Μέθοδοι ελέγχου τριφασικού κινητήρα.....	40
4.1 Κλασσικός αυτοματισμός.....	40
4.1.1 Έλεγχος στην απευθείας εκκίνηση.....	40
4.1.2 Έλεγχος Αστέρα-Τριγώνου.....	46
4.2 Έλεγχος με Soft Starter.....	50
4.2.1 Σταμάτημα κινητήρα με ελεύθερο ρολάρισμα (free coasting).....	51
4.2.2 Σταμάτημα κινητήρα με εντολή για ομαλό σταμάτημα (soft stop).....	52
4.2.3 Σταμάτημα κινητήρα με εντολή, σταμάτημα αντλίας (pump stop).....	54
4.2.4 Σταμάτημα κινητήρα με εντολή, φρενάρισμα με συνεχές ρεύμα (DC breaking).....	54
4.3 Variable Frequency Drive.....	55
4.3.1 Μέθοδοι κλιμακωτού ελέγχου (Scalar Control Methods).....	56
4.3.2 Διανυσματικοί μέθοδοι ελέγχου (Vector Control Methods).....	60
4.3.3 Παράμετροι ενός VFD.....	68
4.4 Έλεγχος με PLC.....	76
4.4.1 Δομή PLC (Προγραμμαζόμενοι Λογικοί Ελεγκτές).....	77

4.4.2	Κύκλος εκτέλεσης λειτουργίας προγράμματος με χρήση PLC.....	80
4.4.3	Πλεονεκτήματα των PLC.....	81
5.	Εφαρμογή (Συστήμα Ελέγχου Αντλιών νερού σε Πλοίο με την χρήση PLC και Variable Frequency Drive με σκοπό την εξοικονόμηση ενέργειας).....	83
5.1	Μέρη και περιγραφή του συστήματος .....	84
5.2	Αναβάθμιση αντλιών με την εγκατάσταση VFD.....	88
5.3	Αναβάθμιση ανεμιστήρων με την εγκατάσταση VFD.....	89
5.4	Εγκατάσταση του συστήματος .....	90
5.5	Εγκατάσταση και λειτουργία touch panel/HMI.....	99
5.6	Περιγραφή του προγράμματος.....	115
5.7	Περιγραφή βασικών παραμέτρων VFD.....	117
5.8	Παράρτημα.....	120
6.	Συμπέρασμα.....	131
	Βιβλιογραφία.....	132

## Εισαγωγή

Στην παρούσα πτυχιακή το αντικείμενο μελέτης είναι τα σύγχρονα συστήματα ελέγχου των επαγωγικών τριφασικών κινητήρων.

Αρχικά θα παρουσιάσουμε την αρχή λειτουργίας και τις διάφορες μεθόδους οδήγησης των τριφασικών κινητήρων, ξεκινώντας από τις βασικές και παλαιότερες μεθόδους, καταλήγοντας στις σημερινές σύγχρονες μεθόδους που χρησιμοποιούνται εκτεταμένα στην βιομηχανία.

Στην συνέχεια παρουσιάζονται μέθοδοι ελέγχου των τριφασικών κινητήρων, ξεκινώντας από τον κλασσικό αυτοματισμό ( κυκλώματα αστέρα – τριγώνου ), και στην συνέχεια σε πιο σύγχρονες μεθόδους όπως με την χρήση Soft Starter, Variable Frequency Drive (VFD), Servo Drive και μέσω συστημάτων PLC – Scada.

Τέλος γίνεται παρουσίαση μιας εφαρμογής ενός συστήματος ελέγχου με την χρήση PLC και Variable Frequency Drive (VFD), σε αντλίες πλοίου έχοντας ως στόχο την μέγιστη εξοικονόμηση ενέργειας.

## Γενικά

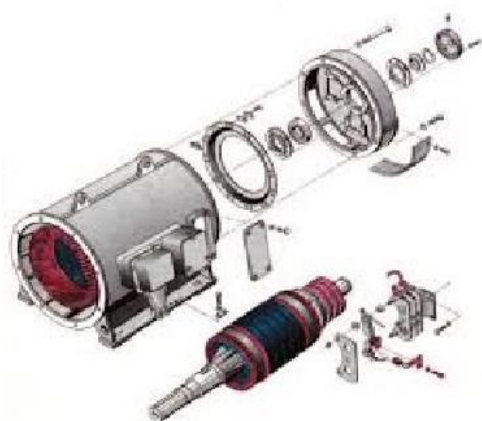
Οι ασύγχρονοι τριφασικοί κινητήρες ή αλλιώς επαγωγικοί κινητήρες είναι οι πιο διαδεδομένοι κινητήρες λόγω της μεγάλης εφαρμογής τους στην βιομηχανία. Το χαμηλό κόστος, η ελάχιστη συντήρηση καθώς και η μεγάλη συγκέντρωση ισχύος τους κάνουν ακόμα πιο προσιτούς. Διακρίνονται σε 2 είδη:

A) κινητήρας βραχυκυκλωμένο δρομέα,

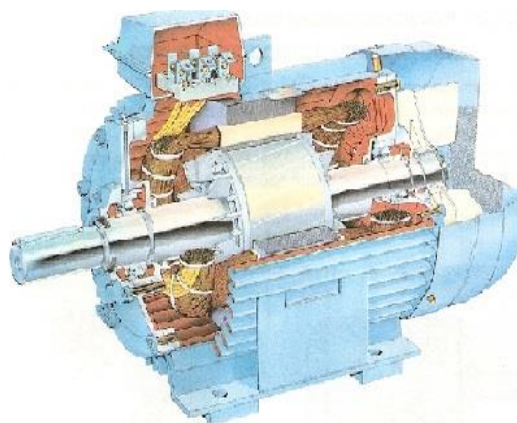
B) κινητήρας με δακτυλιοφόρο δρομέα.

Τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά ενός ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα είναι ο στάτης και ο δρομέας. Ο στάτης είναι ίδιος με αυτόν των σύγχρονων κινητήρων και ο δρομέας διακρίνεται σε 2 περιπτώσεις. Τον δακτυλιοφόρο δρομέα και τον δρομέα κλωβού.

Η αρχή λειτουργίας των ασύγχρονων τριφασικών κινητήρων έχει ως εξής: Στον στάτη εφαρμόζουμε τριφασική συμμετρική εναλλασόμενη τάση που δημιουργεί συμμετρικές εντάσεις. Αυτές οι εντάσεις δημιουργούν ένα στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο το οποίο επάγει τάσεις στις περιελίξεις του δρομέα. Οι περιελίξεις του δρομέα είναι βραχυκυκλωμένες μεταξύ τους και επομένως ρέουν διαμέσου του συμμετρικές εντάσεις οι οποίες δημιουργούν ένα στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο στον δρομέα. Η αλληλεπίδραση των δύο αυτών μαγνητικών πεδίων δημιουργεί μια ηλεκτρομαγνητική ροπή και ο δρομέας προσπαθεί να φτάσει την ταχύτητα περιστροφής του μαγνητικού πεδίου του στάτη.



α



β

Γ Πηγή: Υπουργείο Εθνικής Παιδείας και Θρησκευμάτων - Παιδαγωγικό Ινστιτούτο, "Ηλεκτρικές Μηχανές".



Σχήμα 2<sup>α</sup>: Ασύγχρονος τριφασικός κινητήρας δακτυλιοφόρου δρομέα

Σχήμα 2β: Ασύγχρονος τριφασικός κινητήρας βραχυκυκλωμένου δρομέα

## 3. Μέθοδοι Οδήγησης Τριφασικών Κινητήρων

### 3.1 Κλασσικός Τρόπος

Οι ηλεκτρικοί κινητήρες κατά την εκκίνηση τους απορροφούν μεγάλη ένταση ρεύματος, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται στιγμιαίες πτώσης τάσεις, γνωστές και ως βυθίσεις τάσεων.

Οι βυθίσεις τάσεων μπορούν να προκαλέσουν ανωμαλίες στο δίκτυο διανομής, σε συσκευές καθώς και στον φωτισμό και είναι ανάλογες των δυνατοτήτων του δικτύου και της συχνότητας τους. Για τον λόγο αυτό γίνεται έλεγχος για το αν ένας ηλεκτροκινητήρας είναι κατάλληλος να εγκατασταθεί στο δίκτυο ή όχι, με βάση τους κανονισμούς της IEC.

Για την αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού, δηλαδή τον περιορισμό της τάσης κατά την εκκίνηση αναπτύχθηκαν διάφοροι μέθοδοι εκκίνησης που θα αναλύσουμε στην συνέχεια.

#### 3.1.1 Απευθείας εκκίνηση

Ο απλούστερος τρόπος εκκίνησης τριφασικών ηλεκτροκινητήρων είναι η απευθείας εκκίνηση. Ο ηλεκτροκινητήρας συνδέεται απευθείας στο δίκτυο μέσω έναν τριπολικό διακόπτη, στην συνέχεια μεσολαβούν ασφάλειες βραδείας τήξης, καθώς και ένας αυτόματος θερμομαγνητικός διακόπτης προστασίας (Σχήμα 3β).

Ο απλός και μικρού κόστους εξοπλισμός είναι πλεονέκτημα της απευθείας εκκίνησης ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα σε αντίθεση με την αδυναμία ρύθμισης του κινητήρα.

Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται κυρίως σε κινητήρες μικρής ισχύος και σε ειδικές περιπτώσεις σε μεγαλύτερης ισχύος. Ο εκάστοτε πάροχος είναι αυτός που καθορίζει το μέγιστο ρεύμα εκκίνησης.

Το ρεύμα εκκίνησης υπολογίζεται από τον τύπο:

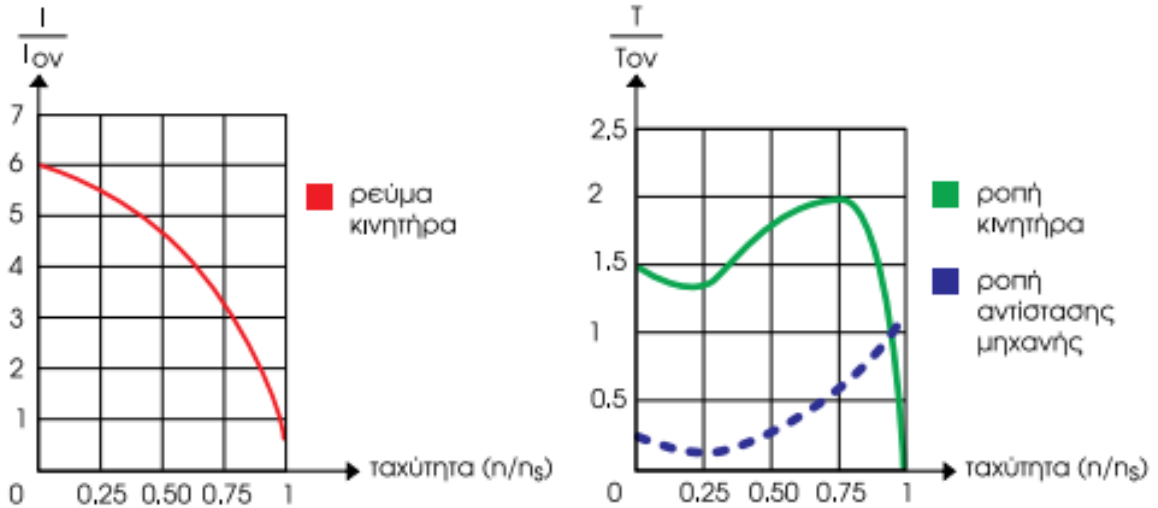
$$I_{EK} = 6 * I_{ov}$$

Από τον τύπο φαίνεται το υψηλό ρεύμα εκκίνησης άρα και δημιουργία πτώσης τάσης.

Η ροπή υπολογίζεται από τον τύπο:

$$T_{EK} = 1.5 * T_{OV}$$

Όπου φαίνεται μεγάλη ροπή εκκίνησης που μας δίνει την δυνατότητα εκκίνησης με φορτίο.

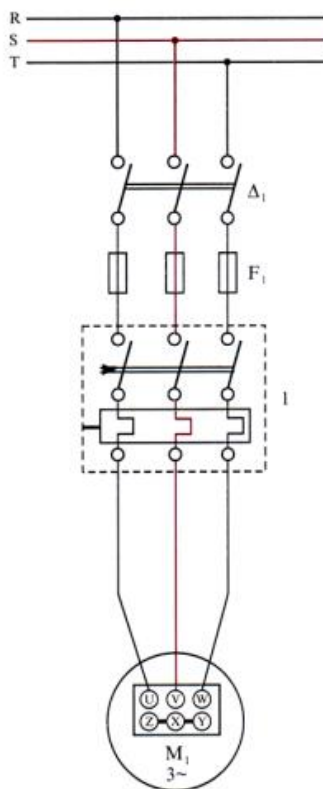


[Πηγή: Υπουργείο Εθνικής Παιδείας και Θρησκευμάτων - Παιδαγωγικό Ινστιτούτο, "Ηλεκτρικές Μηχανές".

Τεχνικά Επαγγελματικά Εκπαιδευτήρια Β' Τάξη 1ου κύκλου, ΟΕΔΒ, ISBN 960-06-0948-9]

Σχήμα 3.1.1<sup>α</sup>: Χαρακτηριστικές λειτουργίες ασύγχρονου κινητήρα με απευθείας εκκίνηση.

Στο σχήμα 3.1.1<sup>α</sup> φαίνεται η καμπύλη ροπής-στροφών ενός ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα και η καμπύλη ροπής-στροφών του φορτίου. Όσο ο κινητήρας βρίσκεται πριν την μέγιστη ροπή του λέμε ότι έχουμε ασταθής λειτουργία. Όταν ο κινητήρας περάσει απο την μέγιστη ροπή είναι ευσταθής και πλέον αρχίζει να προσαρμόζεται στις διακυμάνσεις του φορτίου. Όλη αυτή την διάρκεια η ροπή του κινητήρα παραμένει μεγαλύτερη από αυτή του φορτίου έως ότου φτάσει στο σημείο λειτουργίας, εκεί που οι ροπές “συναντιούνται”. Εφόσον ο κινητήρας φτάσει στο σημείο λειτουργίας η αλλιώς στην σύγχρονη ταχύτητα η ροπή του μειώνεται έως ότου μηδενιστεί.



[Πηγή: Βασίλειος Μπιτζιώνης, “Βιομηχανικές ηλεκτρικές εγκαταστάσεις”, 2011 Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ.]

Σχήμα 3.1.1β: Απευθείας εκκίνηση

$\Delta_1$  = Τριπολικός διακόπτης φορτίου ή ραγοδιακόπτης

$F_1$  = Ασφάλειες βραδείας τήξης ή αυτόματες τριπολικές ασφάλειες

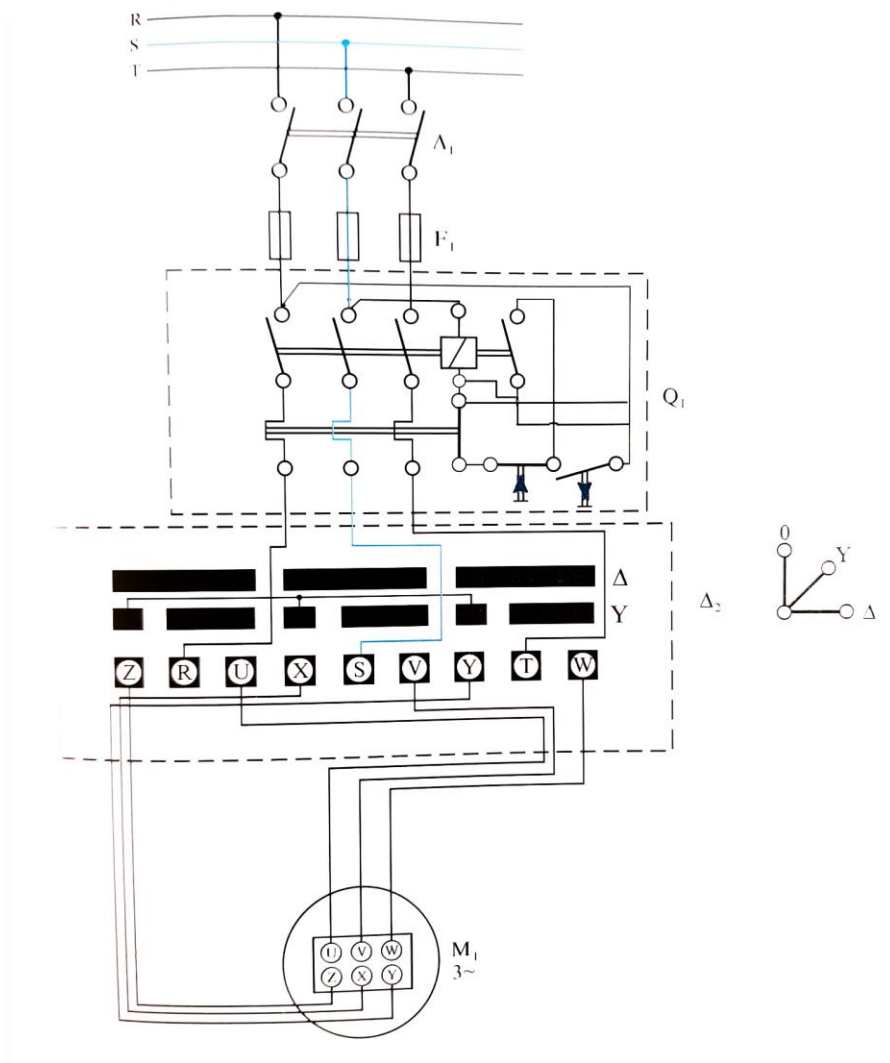
$Q_1$  = Αυτόματος διακόπτης προστασίας κινητήρων (θερμική και μαγνητική προστασία).

$M_1$  = Τριφασικός κινητήρας βραχυκυκλωμένου δρομέα (σύνδεση τυλιγμάτων σε αστέρα).

### 3.1.2 Αστέρας – Τρίγωνο

Ένας άλλος απλός τρόπος εκκίνησης και ίσως ο πιο δημοφιλής σε μικρής και μέσης ισχύος κινητήρες, είναι αυτός σε συνδεσμολογία αστέρα και τριγώνου (Y-Δ).

Χρησιμοποιώντας διακόπτη εκκίνησης αστέρα – τριγώνου, περιορίζουμε το ρεύμα εκκίνησης του κινητήρα έως και τρεις φορές σε σχέση με την συνδεσμολογία τριγώνου. Αυτό φυσικά απαιτεί στο να μεσολαβήσει το κατάλληλο χρονικό διάστημα όπου ο κινητήρας θα έχει πάρει το 90% των κανονικών του στροφών και στην συνέχεια γίνεται η μεταγωγή σε κύκλωμα τριγώνου.



[Πηγή: Βασίλειος Μπιτζιόνης, “Βιομηχανικές ηλεκτρικές εγκαταστάσεις”, 2011 Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ.]

Σχήμα 3.1.2<sup>α</sup>. Εκκίνηση τριφασικού κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα με χειροκίνητο διακόπτη αστέρα – τριγώνου και αυτόματο διακόπτη προστασίας κινητήρων.

Όπου στο σχήμα 3.1.2<sup>α</sup> :

$\Delta_1$ = Τριπολικός διακόπτης φορτίου

$F_1$ = Ασφάλειες

$Q_1$ = Ρελέ ισχύος με θερμικό

$\Delta_2$ = Χειροκίνητος διακόπτης αστέρα – τριγώνου

$M_1$ = Τριφασικός κινητήρας βραχυκυκλωμένου δρομέα.

Γενικά σε συνδεσμολογία τριγώνου ισχύει:

$$I_{\phi\Delta} = \frac{U}{Z} \text{ και } I_{\Delta} = \sqrt{3} * I_{\phi\Delta} \leftrightarrow I_{\Delta} = \frac{\sqrt{3} * U}{Z}$$

και σε συνδεσμολογία αστέρα ισχύει:

$$I_{\phi\gamma} = \frac{U_{\phi}}{Z} \leftrightarrow I_{\phi\gamma} = \frac{U}{\sqrt{3}Z} \leftrightarrow U_{\phi\gamma} = \frac{U}{\sqrt{3}}$$

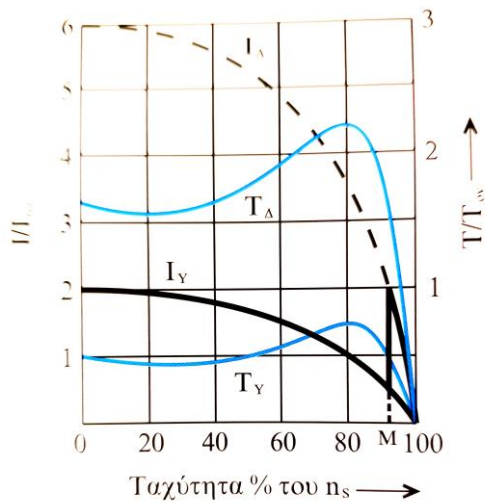
συνεπώς προκύπτει:

$$I_{\phi\gamma} = I_Y = \frac{U}{\sqrt{3} * Z}$$

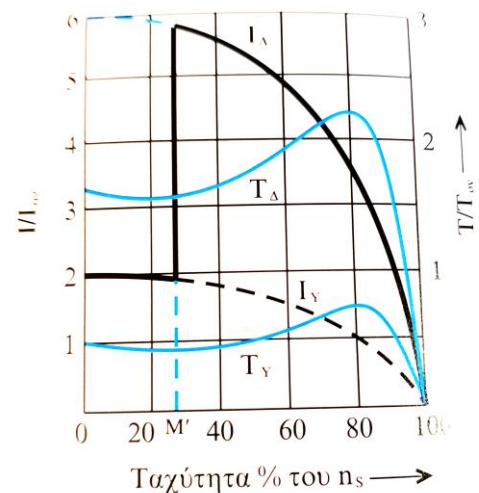
$$\frac{I_Y}{I_{\Delta}} = \frac{\frac{U}{\sqrt{3} * Z}}{\frac{\sqrt{3} * U}{Z}} \Rightarrow \frac{I_Y}{I_{\phi}} = \frac{U * Z}{3 * U * Z} \leftrightarrow \frac{I_Y}{I_{\Delta}} = \frac{1}{3} \leftrightarrow I_Y = \frac{I_{\Delta}}{3}$$

Επομένως η ένταση του ρεύματος που απορροφάται από το δίκτυο κατά την εκκίνηση ένας κινητήρας όντας σε αστέρα είναι το 1/3 της έντασης του ρεύματος που θα απορροφούσε σε συνδεσμολογία τριγώνου και κατ'αυτό τον τρόπο αποφεύγουμε την πτώση τάσης κατά την εκκίνηση.

Στην περίπτωση που η μετάβαση από αστέρα σε τρίγωνο γίνει πρόωρα, την στιγμή που ο κινητήρας έχει μόλις το 25% των κανονικών στροφών (σε αντίθεση με το 90% που χρειάζεται για να είναι οφέλιμη η μετάβαση από τον αστέρα στο τρίγωνο), θα έχουμε απότομη αύξηση της έντασης ( σχήμα 3.1.2β & 3.1.2γ) και συνεπώς δεν θα έχουμε κανένα όφελος από την εκκίνηση με διακόπτη αστέρα – τριγώνου.



3.1.2β. Κατάλληλος χρόνος μεταβολής της ζεύξης από αστέρα σε τρίγωνο.

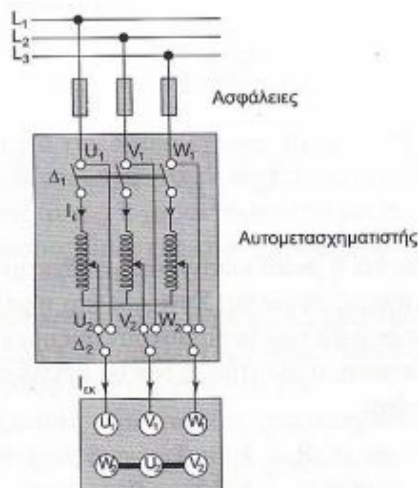


3.1.2γ. Πρόωρος χρόνος μεταβολής της Ζεύξης από αστέρα σε τρίγωνο.

[Πηγή: Βασίλειος Μπιτζιώνης, “Βιομηχανικές ηλεκτρικές εγκαταστάσεις”, 2011 Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ.]

### 3.1.3 Τριφασικός αυτομετασχηματιστής

Ακόμη ένας σύνηθες τρόπος εκκίνησης μεγάλων τριφασικών κινητήρων, είναι αυτός με τριφασικό αυτομετασχηματιστή. Με την μέθοδο αυτή ο κινητήρας ξεκινά με την ενδιάμεση παρέμβαση του αυτομετασχηματιστή ο οποίος του παρέχει μόνο το 50% της ονομαστικής του τάσης. Η ένταση και το ρεύμα που απορροφόνται από τον κινητήρα αντιστοιχούν περίπου στο 50% και 25% αντίστοιχα του δικτύου. Η τάση αυξάνεται κλιμακωτά και όταν φτάσει ο κινητήρας την ονομαστική του ταχύτητα ο αυτομετασχηματιστής παρακάμπτεται και ο κινητήρας επικοινωνεί απευθείας με το δίκτυο. Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα που μπορεί να αντιμετωπίσουμε είναι η χαμηλή ροπή εκκίνησης που μας περιορίζει στο μέγεθος του φορτίου. Αν το φορτίο είναι αρκετά μεγάλο ενδέχεται ο κινητήρας να μην ξεκινήσει. Παρ'όλα αυτά είναι ένας ασφαλής τρόπος για την ομαλή εκκίνηση του κινητήρα και την προστασία του δικτύου. Ο περιορισμός της τάσης μπορεί να φτάσει μέχρι και το 35% σε σχέση με την ονομαστική του κινητήρα και κατ'επέκταση η ένταση στο 15%. Η επιλογή μεγέθους του αυτομετασχηματιστή γίνεται με βάση τις απαιτήσεις του τριφασικού κινητήρα σε ισχύς και ρεύμα.



[Πηγή: Βασίλειος Μπιτζιόνης, "Βιομηχανικές ηλεκτρικές εγκαταστάσεις", 2011 Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ.]

3.1.3α. Κύκλωμα ισχύος με τριφασικό αυτομετασχηματιστή

Το ρεύμα εκκίνησης υπολογίζεται από τον τύπο:

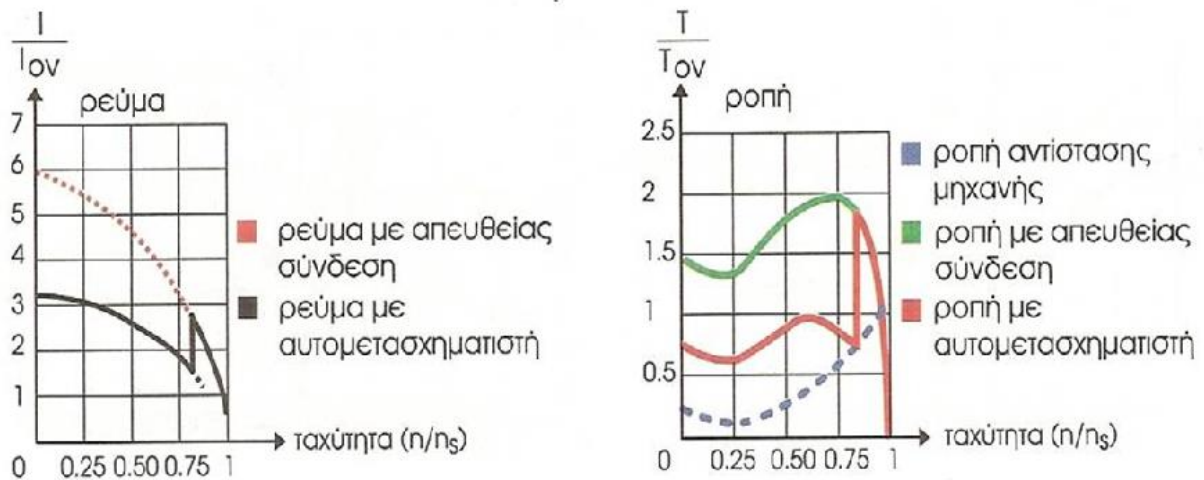
$$I_{εκ} = 3.5 * I_{ον}$$

Από τον τύπο διακρίνουμε τον περιορισμό του ρεύματος σε σχέση με το ρεύμα στην απευθείας εκκίνησης αποφεύγοντας τις πτώσεις τάσεις και την επιβάρυνση του δικτύου.

Η ροπή υπολογίζεται από τον τύπο:

$$T_{εκ} = 0.8 * T_{ον}$$

Από τον τύπο της ροπής φαίνεται η χαμηλή ροπή εκκίνησης του κινητήρα που μας περιορίζει στο μέγεθος του φορτίου που μπορούμε να έχουμε επάνω στον κινητήρα.



Πηγή: Υπουργείο Εθνικής Παιδείας και Θρησκευμάτων - Παιδαγωγικό Ινστιτούτο, "Ηλεκτρικές Μηχανές".

Τεχνικά Επαγγελματικά Εκπαιδευτήρια Β' Τάξη 1ου κύκλου, ΟΕΔΒ, ISBN 960-06-0948-91

### 3.1.3β. Χαρακτηριστικές λειτουργίας ασύγχρονου κινητήρα με τριφασικό αυτομετασχηματιστή

Από τις χαρακτηριστικές διακρίνεται το 'ψαλίδισμα' της έντασης του κινητήρα για την ομαλή εκκίνηση του περίπου στο 50% αλλά και την χαμηλή ροπή εκκίνησης που μας περιορίζει στο φορτίο.



## 3.2 Soft Starter (Ομαλός εκκινητής)

### 3.2.1 Εφαρμογές-Λειτουργίες

Το Soft Starter η αλλιώς, ομαλός εκκινητής αποτελεί πρωτοπόρα τεχνική εκκίνησης τριφασικών κινητήρων στην βιομηχανία, στην βιοτεχνία καθώς και στην αγροτική παραγωγή. Οι λόγοι που έχει βρει άριστη εφαρμογή σε αυτούς του τομείς είναι γιατί έχει πληθώρα τρόπων εφαρμογής της υπο συγκεκριμένες συνθήκες όπως:

- ❖ Αποφυγή πτώσης τάσης στο δίκτυο.
- ❖ Όταν η εκκίνηση με πλήρης τάση δεν είναι εφικτή.
- ❖ Αποφυγή φθοράς σε μηχανικά μέρη μετάδοσης κίνησης όπως μάντες, αλυσίδες, ηλεπτρομειωτήρες κλπ.
- ❖ Αποφυγή γρήγορων και απότομων αλλαγών κατά την εκκίνηση.



[Πηγή:

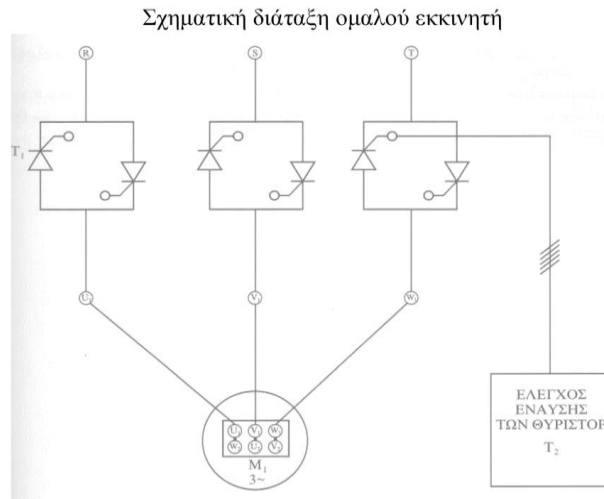
[https://www.schneiderelectric.com/resources/sites/SCHNEIDER\\_ELECTRIC/content/live/FAQS/171000/FA171495/en\\_US/ats22\\_user\\_manual\\_en\\_bbv51330\\_02.pdf](https://www.schneiderelectric.com/resources/sites/SCHNEIDER_ELECTRIC/content/live/FAQS/171000/FA171495/en_US/ats22_user_manual_en_bbv51330_02.pdf)

*Σχήμα 3.2.1α. Ηλεκτρονικός ομαλός εκκινητής (Soft Starter).*

Ο ομαλός εκκινητής έχει την δυνατότητα τοποθέτησης σχεδόν παντού λόγω των πολλαπλών δυνατοτήτων ρύθμισης και των διάφορων ενσωματωμένων λειτουργιών. Αντλίες, πριόνια συμπιεστές, ανεμιστήρες, μηχανές κλοστουφαντουργίας, σπαστήρες, πρέσες, εργαλειομηχανές, μύλοι και αναδευτήρες είναι μερικές από τις συσκευές που βρίσκουν εφαρμογή οι ομαλοί εκκινητές. Με τους ομαλούς εκκινητές μπορούμε να επιτύχουμε ομαλή εκκίνηση τριφασικών κινητήρων περιορίζοντας το ρεύμα εκκίνησης για την αποφυγή επιβάρυνσης του δικτύου όπως και στους αυτομετασχηματιστές, παράλληλα όμως ο ομαλός εκκινητής προσαρμόζει την ροπή εκκίνησης του κινητήρα στις ανάγκες του φορτίου αποφεύγοντας την δυσκολία ή καθόλου εκκίνησης του κινητήρα που μας περιόριζε ο αυτομετασχηματιστής, έχοντας ακόμα και την δυνατότητα εξοικονόμησης ενέργειας σε λειτουργία με μερικό φορτίο. Επίσης μας παρέχει λειτουργίες όπως το ομαλό ‘φρενάρισμα’ και σταμάτημα του κινητήρα καθώς και ειδικά προγράμματα εκκίνησης συστημάτων αντλιών για την αποφυγή φθορών σε ευπαθής υδραυλικά. Υπό συγκεκριμένες συνθήκες το soft starter μας επιτρέπει την εκκίνηση παραπάνω από έναν κινητήρα τον έναν μετά τον άλλον, ακόμη και παράλληλα. Σε αυτή την περίπτωση θα πρέπει το soft starter να είναι σε θέση να ανταπεξέλθει στο συνολικό άθροισμα των ρευμάτων εκκίνησης καθώς και στο άθροισμα των ονομαστικών ρευμάτων των κινητήρων.

### **3.2.2 Ομαλή εκκίνηση κινητήρα (Soft-starting)**

Ο ομαλός εκκινητής αποτελείται από ένα κύκλωμα ισχύος με θυρίστορ και από το κύκλωμα ελέγχου έναυσης αυτών. Ο εκκινητής περιορίζει την τάση του δικτύου ελέγχοντας την γωνία έναυσης των θυρίστορ και με αυτόν τον τρόπο μπορεί να καταφέρει αρχική τάση περίπου στο 20% της ονομαστικής του κινητήρα. Μετά από ορισμένο χρόνο ο οποίος είναι ρυθμιζόμενος έχουμε την δυνατότητα να καταλήξουμε στο 100% τα τάσης του κινητήρα. Ο μικροεπεξεργαστής ο οποίος είναι υπεύθυνος για τον έλεγχο των παραμέτρων εκκίνησης του κινητήρα συνεχίζει να παρακολουθεί τον κινητήρα και μετά την εκκίνηση του προσφέροντας την δυνατότητα ομαλής επιβράδυνσης και στάσης.



[Πηγή: Βασίλειος Μπιτζιώνης, "Βιομηχανικές ηλεκτρικές εγκαταστάσεις", 2011 Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ.]

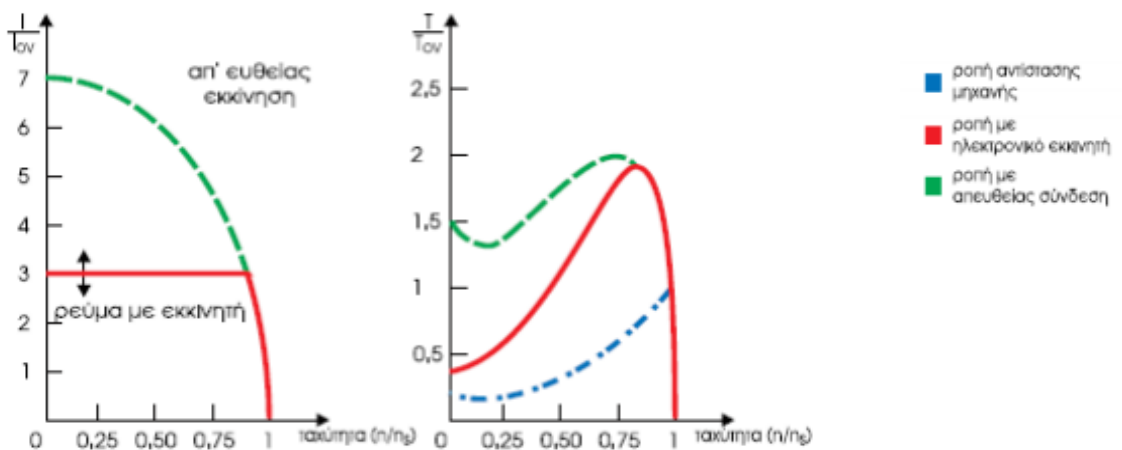
Σχήμα 3.2.2<sup>α</sup> Κύκλωμα θυριστορ ομαλού εκκινητή (soft-starter)

Το ρεύμα εκκίνησης υπολογίζεται από τον τύπο:

$$I_{εκ} = \frac{2}{5 * I_{ov}}$$

Η ροπή υπολογίζεται από τον τύπο:

$$T_{εκ} = \frac{0.5}{T_{ov}}$$



[Πηγή: Υπουργείο Εθνικής Παιδείας και Θρησκευμάτων - Παιδαγωγικό Ινστιτούτο, "Ηλεκτρικές Μηχανές".

Τεχνικά Επαγγελματικά Εκπαιδευτήρια Β' Τάξη 1ου κύκλου, ΟΕΔΒ, ISBN 960-06-0948-9]

Σχήμα 3.2.2<sup>α</sup> Χαρακτηριστικές λειτουργίας ασύγχρονου κινητήρα με soft starter.

### 3.3 Σύστημα οδήγησης μεταβλητής συχνότητας - Variable Frequency Drive (VFD)

Τα συστήματα οδήγησης μεταβλητής συχνότητας είναι ευρέως γνωστά και χρησιμοποιούνται εκτεταμένα στην βιομηχανία σε διατάξεις που απαιτείται η ρύθμιση της ταχύτητας, της ροπής, της κατεύθυνσης και ο έλεγχος ενός AC κινητήρα με μεγαλύτερη ακρίβεια, καθώς επίσης και για το πολύ μεγάλο ποσοστό εξοικονόμησης ενέργειας που επιτυγχάνουμε με την χρήση τους. Η ανάγκη αυτή οδήγησε στην ανάπτυξη πολλών διαφορετικών τεχνικών, μερικές από αυτές τις αναλύσαμε σε προηγούμενα κεφάλαια, ωστόσο η πιο δημοφιλής και αποτελεσματική τεχνική έλεγχου των στροφών ενός επαγωγικού κινητήρα επιτυγχάνεται με την παραγωγή μιας μεταβλητής τάσης τροφοδοσίας η οποία θα έχει σταθερό λόγο τάσης προς συχνότητα V/f.

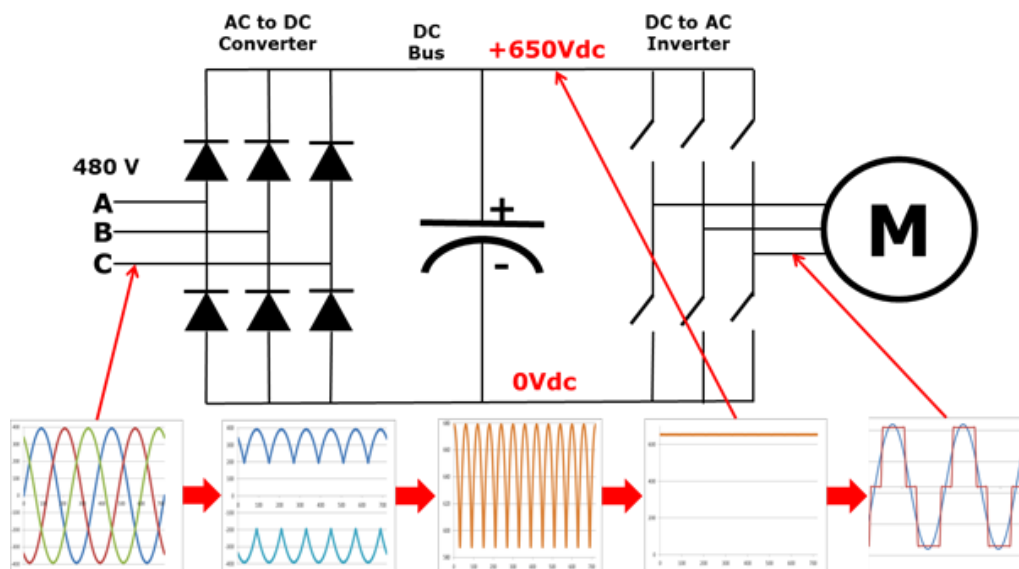


[Πηγή: <https://new.abb.com/drives/low-voltage-ac/industrial-drives/acs880-single-drives>]

Σχήμα 3.3<sup>α</sup> Variable frequency drive (VFD) της εταιρείας ABB

### 3.3.1 Αρχή λειτουργίας VFD

Στην είσοδο του μετατροπέας συχνότητας (VFD), εισέρχεται η τριφασική παροχή του δικτύου και περνάει από τον ανορθωτή (rectifier) όπου και ανορθώνετε σε συνεχή τάση (DC) με μια μικρή διακύμανση, στην συνέχεια το σήμα αυτό εξομαλύνετε καθώς περνάει από τα ενδιάμεσα κυκλώματα (DC Bus – Filter) και διατηρείται σε σταθερά επίπεδα. Το αποτέλεσμα είναι ότι έχουμε ενα σταθερό σήμα συνεχούς τάσης να καταλήγει στον αναστροφέα (inverter) όπου και εκει επιτυγχάνεται η μεταβολή της συχνότητας μέσω της λειτουργίας διαμόρφωσης εύρους παλμού (Pulse Width Modulation ή PWM), αυτό το διαμορφωμένο σήμα μετατρέπεται σε εναλλασόμενο (AC) και φτάνει τελικά στον ηλεκτροκινητήρα. (Σχήμα 3.3.1<sup>α</sup>).

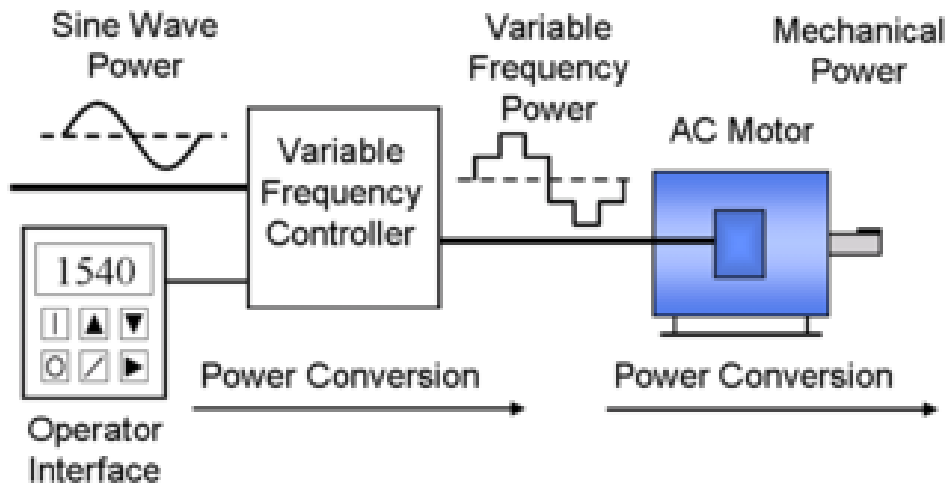


[Πηγή: <https://electronicsforu.com/electronics-projects/control-3-phase-induction-motors-vfd-plc/>]

Σχήμα 3.3.1<sup>α</sup> – Στάδια μετατροπής του σήματος τάσης εισόδου για την μεταβολή συχνότητας ηλεκτροκινητήρα.

### 3.3.2 Βασικά μέρη ενός VFD

Ένα σύστημα μεταβλητής συχνότητας αποτελείται από τον ηλεκτροκινητήρα, τον μετατροπέα ισχύος (inverter) και το σύστημα ελέγχου. Παρακάτω θα αναλύσουμε το κύκλωμα ενός VFD.



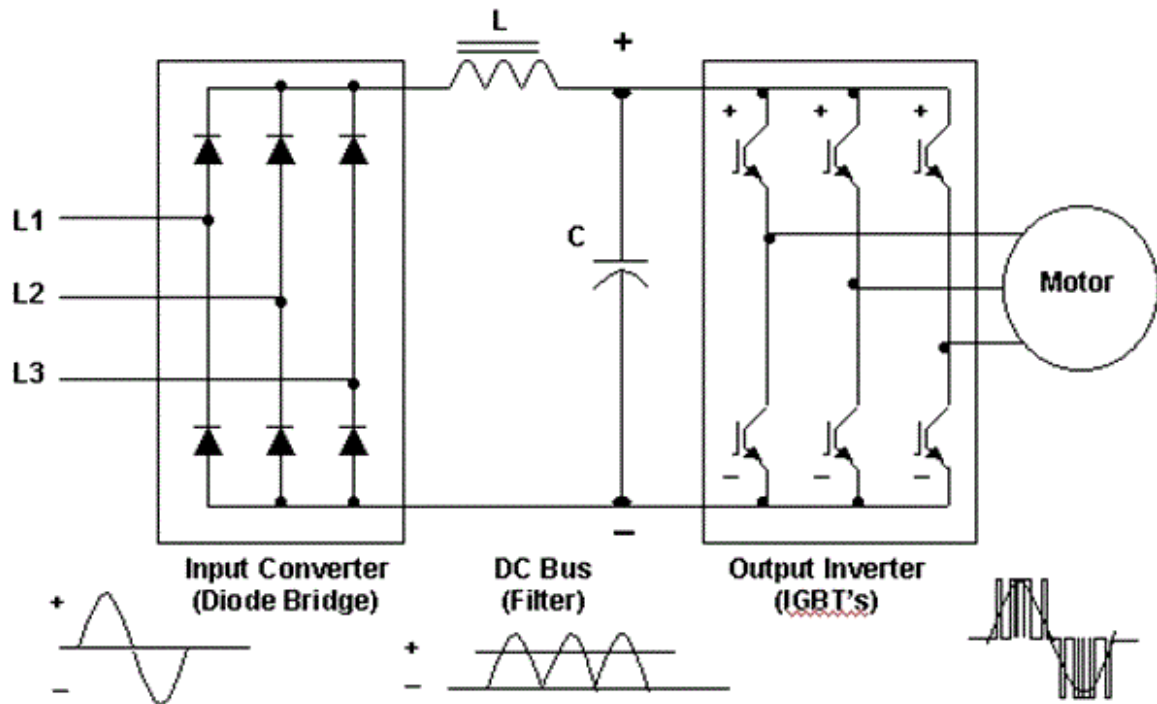
[Πηγή: [https://en.wikipedia.org/wiki/Variable-frequency\\_drive#/media/File:VFD\\_System.png](https://en.wikipedia.org/wiki/Variable-frequency_drive#/media/File:VFD_System.png)]

Σχήμα 3.3.2<sup>α</sup> Σύστημα οδήγησης 3φ ηλεκτροκινητήρα με VFD.

Τα βασικά τμήματα ενός VFD είναι:

- Ο ανορθωτής ( AC to DC Converter)
- DC Bus ή DC Link (Filter)
- Κύκλωμα πέδησης (Brake Circuit)
- Αναστροφέας (DC to AC Inverter)
- Έλεγχος & ρύθμιση συχνότητας

➤ **Ο Ανορθωτής**



[Πηγή: <http://www.automatedbuildings.com/news/jul01/art/abbd/abbd.htm>]

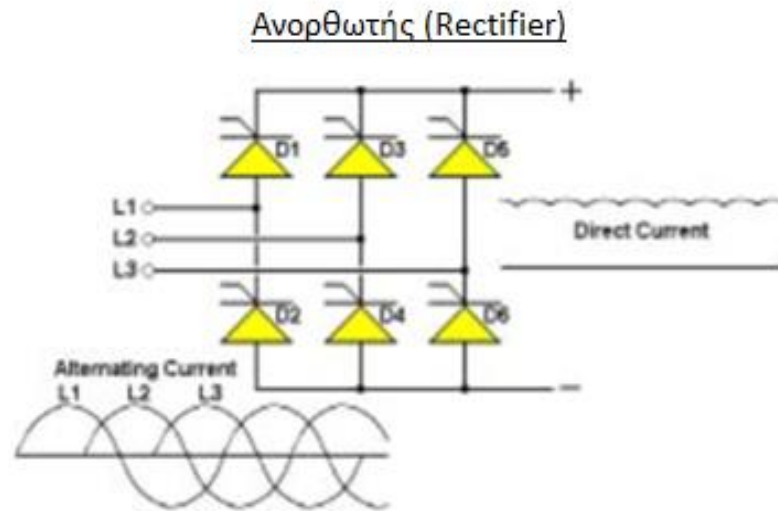
Σχήμα 3.3.2<sup>β</sup> Κύκλωμα λειτουργίας μετατροπέα συχνότητας

Ο σκοπός του ανορθωτή είναι η μετατροπή του ρεύματος εισόδου από εναλλασσόμενο (AC) σε συνεχές (DC). Περιλαμβάνει την είσοδο της τροφοδοσίας, την γέφυρα με τις διόδους και τις ψύκτρες. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.3.2<sup>γ</sup>, στην ουσία αποτελείται από έξι διόδους συνδεδεμένες με την συγκεκριμένη φορά, ώστε να επιτυγχάνεται ο σκοπός που χρειαζόμαστε. Οι διόδοι επιτρέπουν την ροή του ρεύματος για την κάθε φάση μόνο προς μία κατεύθυνση, για την φάση L<sub>1</sub> οι διόδοι D<sub>1</sub> & D<sub>2</sub> άγουν μόνο προς τα πάνω, δηλαδή η διάδος D<sub>1</sub> άγει για θετικές τιμές του εναλλασσόμενου ρεύματος εισόδου, ενώ η D<sub>2</sub> άγει στις αρνητικές τιμές. Αντίστοιχα συμβαίνει και για τις L<sub>2</sub> και L<sub>3</sub> και τις αντίστοιχες διόδους.

Η (DC) τάση που πέρνουμε στην έξοδο του συγκεκριμένου κυκλώματος είναι 1.35 φορές μεγαλύτερη από την (AC) τάση γραμμής που έχουμε στην είσοδο του κυκλώματος.

Για τον λόγο ότι η τάση του δικτύου και η ισχύς του φορτίου μεταβάλλονται τότε και η (DC) τάση θα κινείται μεταξύ των παρακάτω τιμών:

$V_{ac} = 240 \text{ V}$ , τότε παράγεται τάση  $324 \text{ V}_{dc}$ .  
 $V_{ac} = 380 \text{ V}$ , τότε παράγεται τάση  $513 \text{ V}_{dc}$ .  
 $V_{ac} = 400 \text{ V}$ , τότε παράγεται τάση  $540 \text{ V}_{dc}$ .  
 $V_{ac} = 575 \text{ V}$ , τότε παράγεται τάση  $776 \text{ V}_{dc}$ .

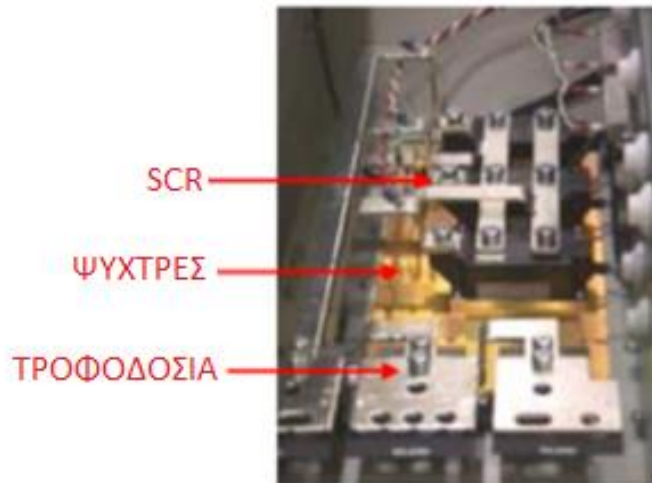


[Πηγή: DANFOSS, “Variable Frequency Drives (101) Fundamentals”, Technical Manual.]

Σχήμα 3.3.2' Κύκλωμα Ανορθωτή (Rectifier)

Από την ανόρθωση αυτή δημιουργείται μια σημαντική ποσότητα θερμότητας πάνω στην γέφυρα με τα θυρίστορ (ή διόδους), για τον λόγο αυτό η γέφυρα ανόρθωσης είναι τοποθετημένη επάνω σε μια ψύκτρα όπου τα πτερύγια της είναι στραμμένα προς την άλλη πλευρά μέσα σε έναν ειδικό αγωγό που μέσω της ροής του αέρα απομακρύνεται η θερμότητα από τον ανεμιστήρα που είναι τοποθετημένος στο επάνω μέρος του drive. Η θερμότητα είναι εχθρός και για τον κινητήρα αλλά και για το drive οπότε χρειάζονται αποτελεσματικοί τρόποι ώστε να μπορεί το drive και ο κινητήρας να λειτουργούν σε πιο χαμηλές θερμοκρασίες. Αυτό βοηθάει στην αποφυγή βλαβών αλλά και μεγαλώνει και η διάρκεια ζωής του εξοπλισμού.





[Πηγή: DANFOSS, “Variable Frequency Drives (101) Fundamentals”, Technical Manual.]

Σχήμα 3.3.2<sup>δ</sup> Ανορθωτής (Rectifier) εσωτερικά του drive

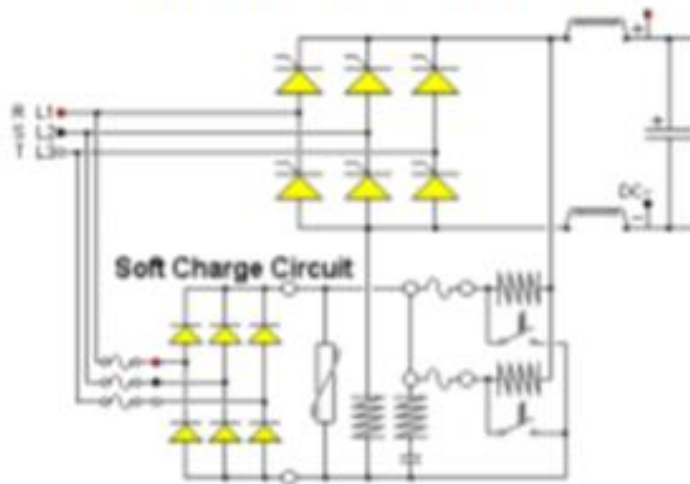
### ➤ Κύκλωμα φόρτισης (Soft Charge Circuit)

Σε μεγάλα drive 22 – 450kW, υπάρχει ακόμα ένα κύκλωμα που είναι μέρος του ανορθωτή γνωστό και ως Soft Charge Circuit ή κύκλωμα φόρτισης, το οποίο χρησιμοποιείται για την ενεργοποίηση της μονάδας. Όταν εφαρμοστεί ισχύς η εισερχόμενη ροή ρεύματος που πηγαίνει στους μεγάλου πυκνωτές του DC Link περιορίζεται από αυτό το κύκλωμα έτσι ώστε να φορτίζονται αργά. Στην περίπτωση απουσίας αυτού του κυκλώματος κάθε φορά που εκκινούσε το drive οι ασφάλειες γραμμής θα δημιουργούσαν βραχυκύκλωμα. Σε πολλά drive το κύκλωμα αυτό επίσης διαθέτει μια ή δύο ασφάλειες σε σειρά ώστε να επιτευχθεί αργά η φόρτιση των πυκνωτών, σε drive μεγαλύτερα από 350 Hp χρησιμοποιούνται IGBT αντί για αντιστάσεις για τον περιορισμό του ρεύματος που πηγαίνει στους πυκνωτές.

Αυτή η αντίσταση έχει την δική της ασφάλεια, δηλαδή ένα θερμικό διακόπτη που βραχυκυκλώνει σε περίπτωση που η τιμή του ρεύματος είναι πολύ υψηλή στο κύκλωμα φόρτισης και αποτρέπει την εκκίνηση της μονάδας.

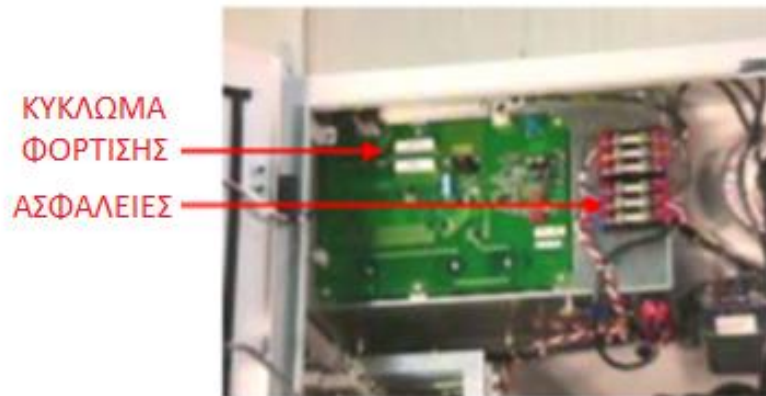
Συνολικά, μόλις εφαρμοστεί κύρια ισχύς στην μονάδα τα θυρίστορ του ανορθωτή παραμένουν ανενεργά και λειτουργεί το μικρότερο κύκλωμα ανόρθωσης του κυκλώματος φόρτισης, εφαρμόζοντας ισχύ συνεχούς ρεύματος (DC) στις αντιστάσεις και στην συνέχεια στους πυκνωτές του DC Link. Όταν οι πυκνωτές φτάσουν στην ελάχιστη τιμή τάσης συνεχούς ρεύματος, τότε η μονάδα ελέγχου ξεκινά την λειτουργία του ανορθωτή στο κεντρικό κύκλωμα.

### ΚΥΚΛΩΜΑ ΦΟΡΤΙΣΗΣ (SCC)



[Πηγή: DANFOSS, “Variable Frequency Drives (101) Fundamentals”, Technical Manual.]

Σχήμα 3.3.2<sup>ε</sup> Κύκλωμα φόρτισης ή Soft Charge Circuit



[Πηγή: DANFOSS, “Variable Frequency Drives (101) Fundamentals”, Technical Manual.]

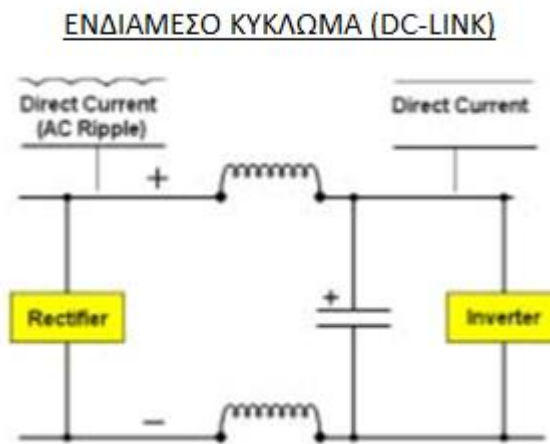
Σχήμα 3.3.2<sup>στ</sup> Κύκλωμα φόρτισης ή Soft Charge Circuit εσωτερικά του drive

#### ➤ Ενδιάμεσο κύκλωμα – DC Bus ή DC Link

Το ενδιάμεσο κύκλωμα ή αλλιώς DC Link μπορεί να θεωρηθεί ως μια μονάδα αποθήκευσης ισχύος για το επόμενο τμήμα, τον μετατροπέα (inverter). Αποτελείται από δύο βασικά στοιχεία, πυκνωτές και πηνία. Στα περισσότερα διαγράμματα απεικονίζεται μόνο ένας πυκνωτής αλλά στην πραγματικότητα είναι μια σειρά πυκνωτών. Μερικές εταιρείες χρησιμοποιούν πηνία συνεχούς ρεύματος γνωστά DC Line reactors, για τους λόγους ότι έχουν την δυνατότητα να μειώνουν τον θόρυβο με αρμονικό τρόπο κατά 40% καθώς και για

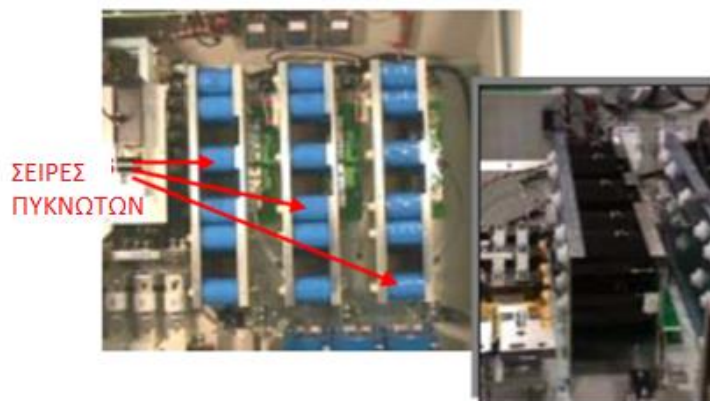
την δυνατότητα τους στο να συνεχίζεται η οδήγηση στην περίπτωση προσωρινής απώλειας ισχύος, επιτρέποντας στην μονάδα να αποφεύγει πολλές παύσεις διακοπής.

Όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.3.2<sup>ς</sup> στην είσοδο του DC Link έχουμε τάση εισόδου με διακυμάνσεις ενώ στην έξοδο του μας δίνει την φιλτραρισμένη τάση σταθερή. Η τάση που έχουμε στο DC Link είναι 1,35 φορές μεγαλύτερη από την τάση εισόδου και εμφανίζεται στην οθόνη (user interface) στο μπροστινό μέρος της μονάδας. Τα μεγαλύτερα VFD παράγουν μέχρι και 620 V<sub>dc</sub> στα 750 A, οπότε πάντα πρέπει να είμαστε πολύ προσεκτικοί όταν εργαζόμαστε με αυτά.



[Πηγή: DANFOSS, “Variable Frequency Drives (101) Fundamentals”, Technical Manual.]

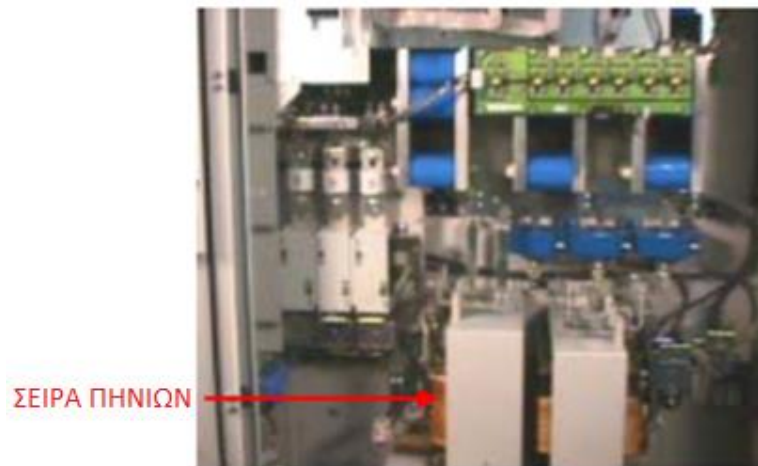
Σχήμα 3.3.2<sup>ς</sup> Ενδιάμεσο κύκλωμα ή DC Link



[Πηγή: DANFOSS, “Variable Frequency Drives (101) Fundamentals”, Technical Manual.]

Σχήμα 3.3.2<sup>η</sup> Σειρά πυκνωτών εσωτερικά του VFD.

Ο αριθμός των πυκνωτών διαφέρει ανάλογα με το μέγεθος της μονάδας. Στο σχήμα 3.3.2<sup>η</sup> οι μπλέ πυκνωτές είναι από drive 450kW (600Hp).



[Πηγή: DANFOSS, “Variable Frequency Drives (101) Fundamentals”, Technical Manual.]

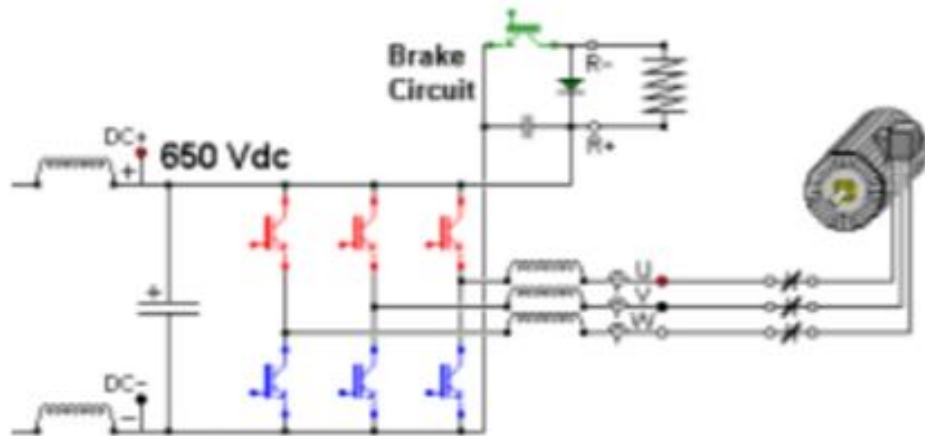
Σχήμα 3.3.2<sup>ο</sup> Σειρά πηνίων εσωτερικά του VFD.

Όπως φαίνεται στο σχήμα 3.3.2<sup>ο</sup> υπάρχουν δύο σετ με πηνία. Στα αριστερά είναι τα πηνία που έχουν δύο συνδέσεις (DC+, DC-) και είναι τα πηνία συνεχούς ρεύματος ή DC Reactors όπως αναφέραμε και παραπάνω. Για την μονάδα που βρίσκεται στα δεξιά θα αναλύσουμε στην συνέχεια που χρησιμεύει.

#### ➤ **Κύκλωμα πέδησης (Brake Circuit)**

Αυτή η επιλογή είναι γνωστή και ως δυναμική πέδηση και χρησιμοποιείται όταν υπάρχει ανάγκη από συσκευές που χρειάζεται να σταματούν ή να αλλάζουν γρήγορα κατεύθυνση, όπως για παράδειγμα ταινίες μεταφοράς, σε συστήματα ανύψωσης ή φυγοκεντρικά συστήματα. Στα drives που υπάρχει αυτή η επιλογή χρησιμοποιείται επιπλέον ένα τανζίστορ IGBT, για την αφαίρεση πρόσθετης ισχύος που επιστρέφει στην μονάδα όταν ο κινητήρας, που μπορεί να έχει μεγάλη αδράνεια, σταματά ή αλλάζει ταχύτητα. Όταν η τάση πάρει πολύ υψηλή τιμή στο DC Link, το φρένο IGBT ενεργοποιείται και στέλνει ισχύ στην αντίσταση του φρένου. Αυτή η λειτουργία δεν είναι δυνατή για μονάδες HVAC (Heating Ventilating and Air Conditioning) η μονή εφαρμογή σε HVAC που μπορεί να χρησιμοποιήσει δυναμική πέδηση είναι για ανεμιστήρες σε καύση λέβητα.

### ΚΥΚΛΩΜΑ ΠΕΔΗΣΗΣ (BRAKE CIRCUIT)



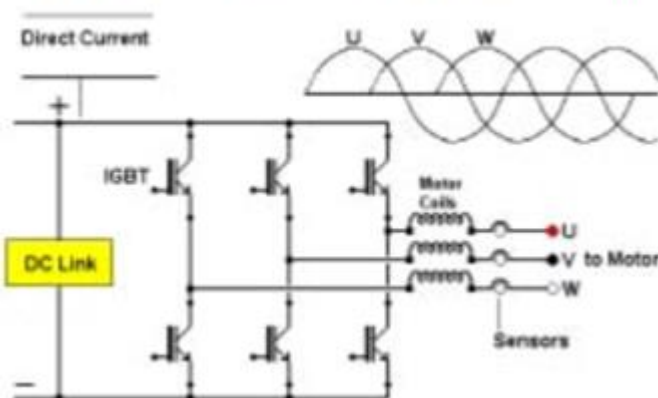
[Πηγή: DANFOSS, "Variable Frequency Drives (101) Fundamentals", Technical Manual.]

Σχήμα 3.3.2' Κόκλωμα πέδησης (Brake Circuit)

#### ➤ Αναστροφέας /Μετατροπέας (Inverter)

Το επόμενο τμήμα ενός VFD είναι το κύκλωμα του αναστροφέας ή inverter. Στο κύκλωμα εισέρχεται η τάση συνεχούς ρεύματος από το DC Link που περιγράψαμε παραπάνω και με την βοήθεια του τμήματος ελέγχου, ενεργοποιεί κάθε σετ IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) ή διπολικά τρανζίστορ με απομονωμένη πύλη, στις τρεις φάσεις (U,V,W) του κινητήρα ως AC σήμα. Αυτή η λειτουργία είναι γνωστή και ως διαμόρφωση εύρους παλμών ή PWM (Pulse Width Modulation) και θα αναλυθεί αναλυτικά στην συνέχεια.

### ΚΥΚΛΩΜΑ ΑΝΑΣΤΡΟΦΕΑ (INVERTER SECTION)



[Πηγή: DANFOSS, "Variable Frequency Drives (101) Fundamentals", Technical Manual.]

Σχήμα 3.3.2" Κόκλωμα αναστροφέα (inverter section)

Όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα 3.3.2<sup>κ</sup>, στην έξοδο του αναστροφέα έχουμε τους αισθητήρες που παρακολουθούν συνεχώς το ρεύμα που πηγαίνει στις τρεις φάσεις του κινητήρα. Κάποιες εταιρείες χρησιμοποιούν 2 αισθητήρες και υπολογίζουν την τρίτη φάση μέσω υπολογισμών και κάποιες ακόμα που παρακολουθούν τις εξόδους μόνο για βραχυκύκλωμα ή γείωση όταν δωθεί η πρώτη εντολή εκτέλεσης του κυκλώματος. Η διαδικασία αυτή επιβλέπεται από κάποιο λογισμικό που σε περίπτωση σφάλματος μας ενημερώνει μέσω κάποιου κωδικοποιημένου αριθμού σφάλματος (Alarm number), καθώς επίσης υπάρχει διακόπτης που μπορεί να αποσυνδέσει τον ηλεκτροκινητήρα από το drive. Δεν διαθέτουν όλα τα inverter έλεγχο με αποτέλεσμα την καταστροφή του κινητήρα σε περίπτωση βραχυκυκλώματος. Βέβαια οι υπόλοιπες λειτουργίες για προστασία του κινητήρα από υπερντάση ή υπερθέρμανση εξακολουθούν να υπάρχουν.

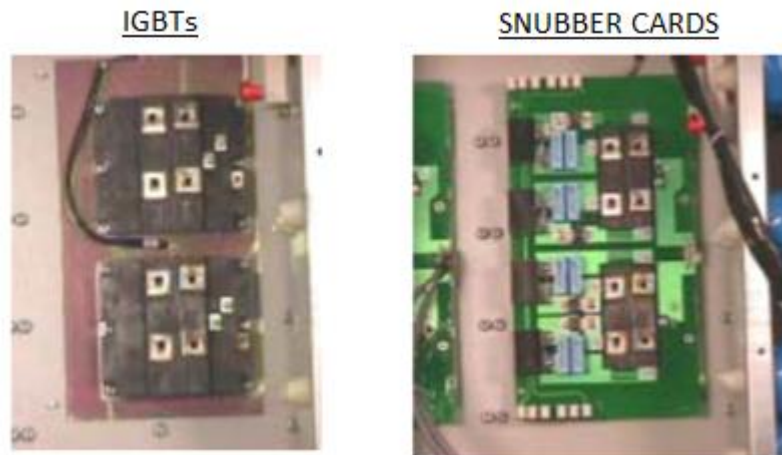
Σκοπός των πηνίων του κινητήρα είναι η εξομάλυνση της κυματομορφής που πηγαίνει στον κινητήρα διότι αυτό έχει ως αποτέλεσμα όταν το σήμα είναι πιο ομαλό να δημιουργείται λιγότερη θερμότητα στον κινητήρα άρα και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής του κινητήρα.



[Πηγή: DANFOSS, “Variable Frequency Drives (101) Fundamentals”, Technical Manual.]

Σχήμα 3.3.2<sup>λ</sup> Αισθητήρες ρεύματος (πηνία ελέγχου κινητήρα)





[Πηγή: DANFOSS, “Variable Frequency Drives (101) Fundamentals”, Technical Manual.]

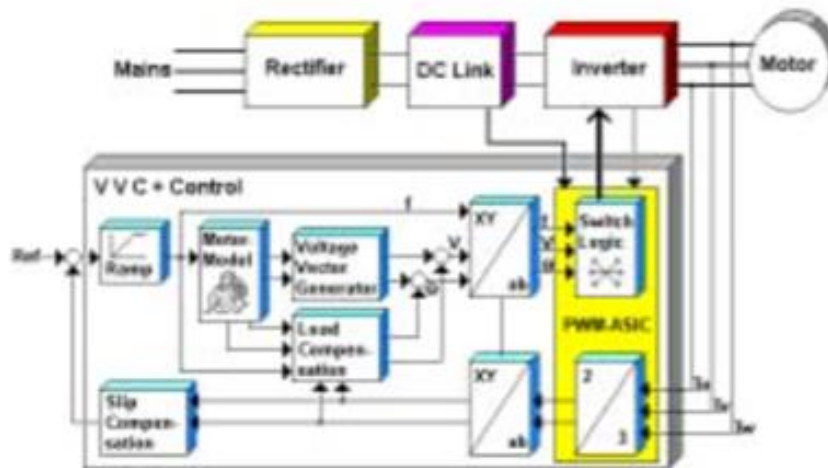
*Σχήμα 3.3.2<sup>η</sup> IGBTs και κάρτα snubber*

Οι αναστροφείς (inverters) τα IGBT και οι snubber cards ( σχήμα 3.3.2<sup>η</sup>) είναι τοποθετημένα στις ψύκτρες πίσω από τους πυκνωτές.

### ➤ Έλεγχος και ρύθμιση

Το σύστημα ελέγχου ενός drive συντονίζει και ρυθμίζει τα σήματα και γίνονται οι απαραίτητοι υπολογισμοί για την σωστή αλλαγή κατάστασης των IGBT. Αυτή η μονάδα χρησιμοποιεί την τεχνολογία Vector (διανυσματικά), η οποία διαχωρίζει το ρεύμα που παράγει ροπή από το ρεύμα μαγνητισμού. Αναφέρονται αναλυτικά οι μέθοδοι ελέγχου ενός drive σε επόμενο κεφάλαιο. Πολλές εταιρείες διαθέτουν μια λειτουργία κατά την οποία το drive κάνει αναγνώριση των στοιχείων του μοτέρ που είναι συνδεδεμένο. Η ονομασία από κατασκευαστή σε κατασκευαστή αλλάζει καθώς και ο τρόπος εκτέλεσης αυτής της λειτουργίας. Κάποιοι κατασκευαστές χρειάζεται να κάνουν μια δοκιμαστική εκκίνηση του μοτέρ για να γίνει η αναγνώριση και κατασκευή του μοντέλου, κάποιοι άλλοι πάλι υπολογίζουν την αντίσταση και την αντίδραση του στάτορα του κινητήρα και μέσω του μοντέλου αυτού υπολογίζουν το ρεύμα μαγνητισμού. Αυτά τα μοντέλα χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της ολίσθησης και της αντιστάθμισης του φορτίου. Συνοπτικά οι κάρτες που πραγματοποιούν έλεγχο αναλύονται στην συνέχεια.

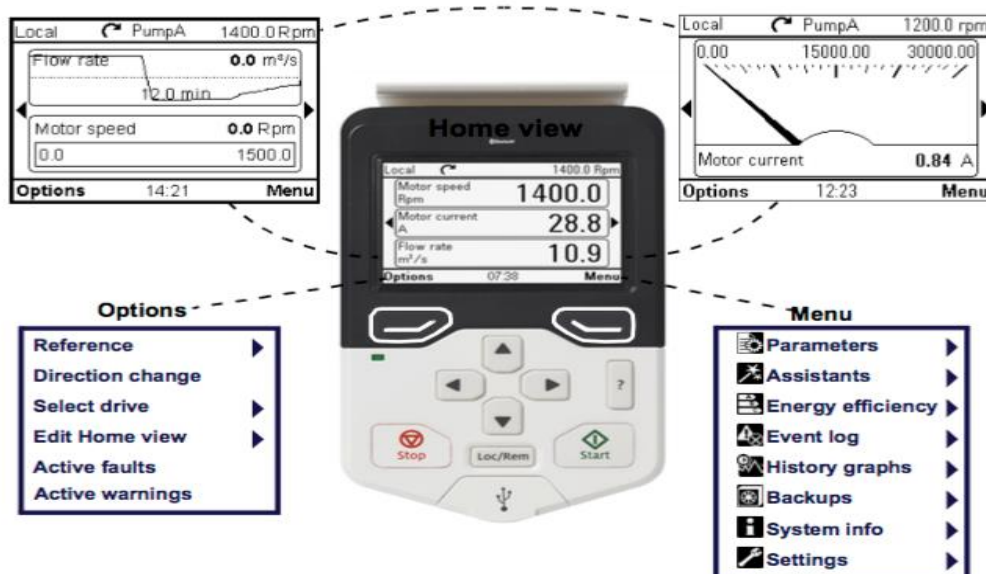
## ΕΛΕΓΧΟΣ ΚΑΙ ΡΥΘΜΙΣΗ



[Πηγή: DANFOSS, “Variable Frequency Drives (101) Fundamentals”, Technical Manual.]

Σχήμα 3.3.2<sup>ν</sup> Διάταξη μονάδας ελέγχου και ρύθμισης ενός drive.

Η κάρτα ελέγχου είναι η ίδια για όλα τα drive, από 0,75 μέχρι 450 kW (1 – 600 Hp). Ένα ακόμα στοιχείο που είναι μέρος της μονάδας ελέγχου είναι το τοπικό χειριστήριο (Local Control Panel), που βρίσκεται στο μπροστινό μέρος του drive και από εκεί ο χρήστης μπορεί να ελέγξει οποιαδήποτε στιγμή τα στοιχεία του κινητήρα ή να δει και να επεξεργαστεί τις παραμέτρους του. Επίσης υπάρχει και η δυνατότητα για απομακρυσμένο χειρισμό (Remote Control), που επιτυγχάνεται από κάποια άλλη συσκευή εκτός της μονάδας του drive. Συνήθως τον υπολογιστή του χρήστη που είναι συνδεδεμένος με το drive.



[Πηγή: [https://library.e.abb.com/public/84155b51c04a401581c9bab076292054/EN\\_AssistantPanel\\_UM\\_E\\_A4.pdf](https://library.e.abb.com/public/84155b51c04a401581c9bab076292054/EN_AssistantPanel_UM_E_A4.pdf)]

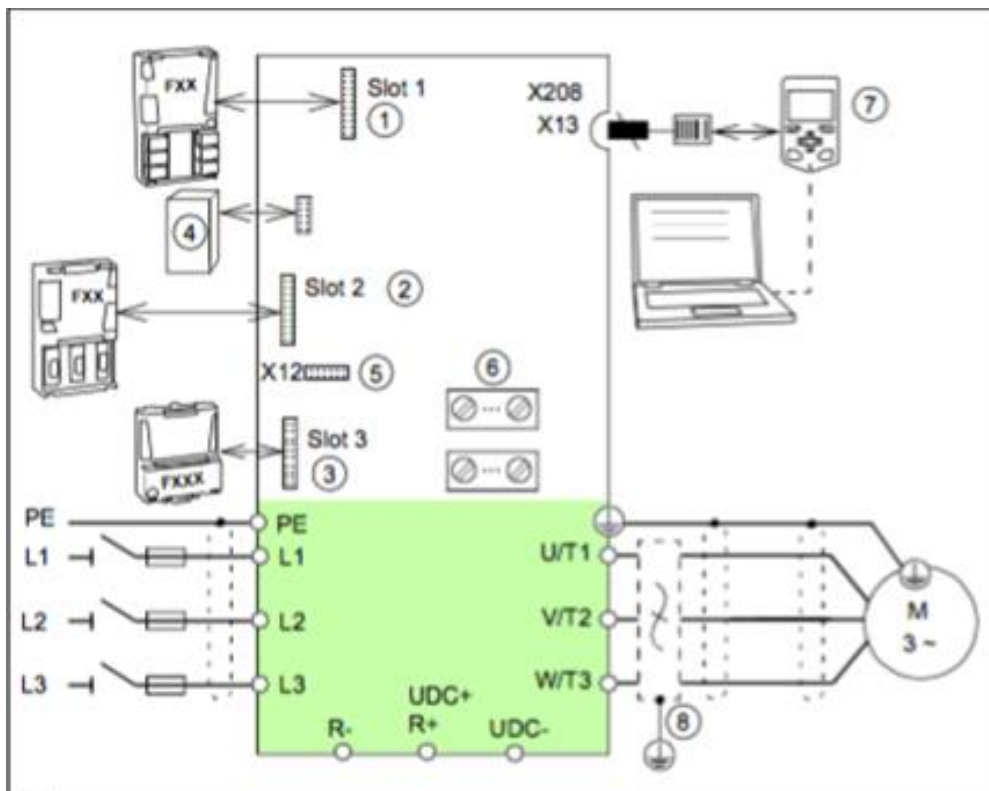
### 3.3.2<sup>ξ</sup> Τοπικό χειριστήριο drive (ABB\_ACx-AP-x)



Η κάρτα ισχύος η οποία είναι ξεχωριστή για κάθε drive ανάλογα το μέγεθος του, αναμεταδίδει σήματα στην κάρτα με τις IGBT πύλες, παρακολουθεί το ρεύμα από τους αισθητήρες των πηνίων του κινητήρα (που αναφέρθηκαν πιο πάνω), συντονίζει την λειτουργία των ανεμιστήρων του drive και μια σειρά άλλων λειτουργιών.

Τέλος η κάρτα με τις IGBT πύλες, που ο ρόλος της είναι η αποστολή σημάτων στα IGBT. Σε πολλά drive κυρίως μικρού μεγέθους αυτή η κάρτα είναι μαζί με την κάρτα ισχύος.

Όπως φαίνεται στο σχήμα 3.3.2<sup>ο</sup> η μονάδα ελέγχου και ισχύος ενός drive (ABB\_ACS-880-01), καθώς και τις επιμέρους κάρτες που βρίσκονται πάνω στην μονάδα ελέγχου. Στις θέσεις 1,2 και 3 της κάρτας μπορούμε να τις χρησιμοποιήσουμε για διάφορους σκοπούς, όπως για να συνδέσουμε κάποιο εξωτερική κάρτα με αναλογικές ή ψηφιακές εισόδους και εξόδους, αν χρειαζόμαστε επιπλέον για τις ανάγκες μιας εφαρμογής. Επιπλέον για να συνδέσουμε κάποια κάρτα επικοινωνίας (fieldbus) ή κάποια κάρτα που είναι απαραίτητη για να έχουμε ανατροφοδότηση από το σύστημα ( Encoder).



[Πηγή: ABB Industrial Drives, "ACS880-1 Drives (0.55 to 250 kW, 0.75 to 350 hp)", Hardware Manual.]

Σχήμα 3.3.2<sup>ο</sup> Μονάδα ισχύος & ελέγχου drive.

Στην θέση 4, τοποθετούμε την μνήμη του drive (σχήμα 3.3.2<sup>ο</sup>) όπου είναι απαραίτητη για την αποθήκευση των παραμέτρων που ορίζει ο χρήστης. Με την μεταφορά της μνήμης σε ένα

άλλο drive μπορούμε να περάσουμε τις παραμέτρους που έχει ήδη αποθηκευμένες μέσα. Κατα την εκκίνηση το drive ελέγχει τις παραμέτρους που έχει αποθηκευμένες στην μνήμη του και σε περίπτωση που βρεί διαφορές στις παραμέτρους μας ενημερώνει και στην συνέχεια προχωράει στην αντιγραφή αυτών στο drive. Η αντικατάσταση της μνήμης πρέπει να γίνεται μόνο όταν το drive αλλά και η μονάδα ελέγχου είναι απενεργοποιημένες. Η θέση 5, είναι για την σύνδεση καρτών που χρειάζονται για τον εκτεταμένο έλεγχο σε μερικές εφαρμογές (π.χ. σε γερανούς στην βιομηχανία), που μπορεί να χρειαζόμαστε μεγαλύτερη ασφάλεια και έλεγχο στο φρενάρισμα, στην διατήρηση της ροπής ή την αυτοσυγκράτηση του φορτίου σε περιπτώσεις που υπάρξει απώλεια τάσης ή κάποια έκτακτη διακοπή του συστήματος (Emergency stop). Σε εφαρμογές που είναι απαραίτητο να έχουμε πολλαπλές δικλύδες ασφαλείας, οι κάρτες αυτές μας δίνουν μια πληθώρα επιπλέον επιλογών που μπορούμε να καθορίσουμε.

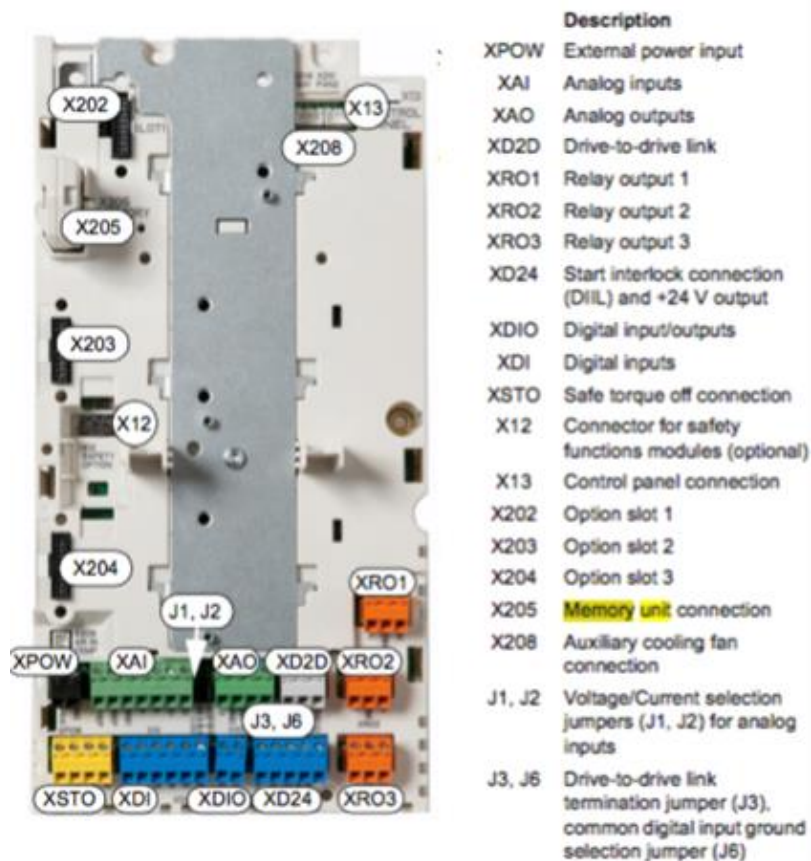


[Πηγή: ABB Industrial Drives, “ACS880-1 Drives (0.55 to 250 kW, 0.75 to 350 hp)”, Hardware Manual.]

*Σχήμα 3.3.2<sup>π</sup> Εξωτερική μνήμη ενός drive*

Στην θέση 6, έχουμε μια σειρά από εισόδους και εξόδους (I/O extension modules), που χρησιμοποιούμε για να συνδέσουμε συσκευές που θέλουμε να ελέγξουμε από και προς το drive (σχήμα 3.3.2<sup>ρ</sup>).

Στην θέση 7, βρίσκεται το τοπικό χειριστήριο ελέγχου, που αναφέρθηκε παραπάνω.



[Πηγή: ABB Industrial Drives, “ACS880-1 Drives (0.55 to 250 kW, 0.75 to 350 hp)”, Hardware Manual.]

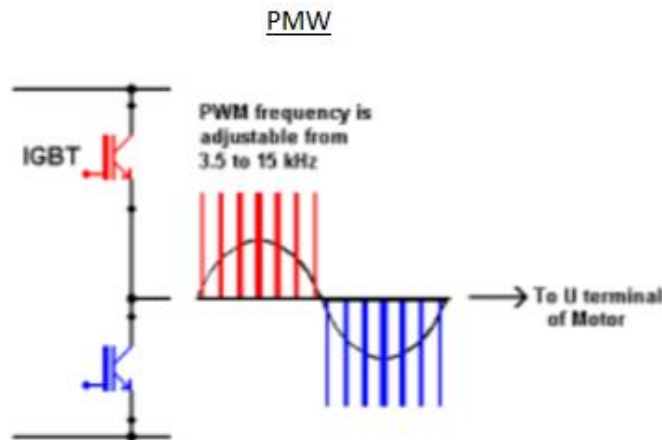
Σχήμα 3.3.2<sup>p</sup> Control Unit I/O Extension module.

Στην θέση 8, στην έξοδο του drive φαίνεται το σημείο που μπορεί να τοποθετηθεί φίλτρο du/dt ή αλλιώς φίλτρο αρμονικών συχνοτήτων.

### 3.3.3 Διαμόρφωση εύρους παλμών – Pulse Width Modulation (PWM)

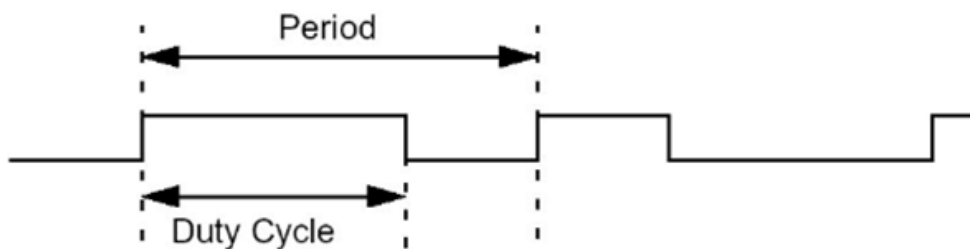
Όλες οι εταιρείες που κατασκευάζουν VFD χρησιμοποιούν την διαμόρφωση PWM. Όπως φαίνεται στο σχήμα 3.3.2<sup>v</sup> είναι μια κυματομορφή που πηγαίνει στον ηλεκτροκινητήρα και δείχνει την συχνότητα μεταγωγής των IGBT. Αυτό το σχήμα μεταγωγής όπως φαίνεται είναι γνωστό ως διαμόρφωση εύρους παλμού ή PWM. Μια κυματομορφή PWM αποτελείται από μια περιοδική κυματομορφή η οποία έχει δύο τμήματα, το ON (ενεργοποιημένο) και το OFF (απενεργοποιημένο). Όταν το σήμα είναι ON η κυματομορφή παίρνει την μέγιστη τιμή της και στο τμήμα OFF την τιμή μηδέν. Το ON ονομάζεται Duty Cycle και μετριέται σε μονάδες χρόνου (ms), είτε σε ποσοστό (%) επί της περιόδου. Εφαρμόζοντας μια διαμόρφωση PWM στην τροφοδοσία ενός φορτίου επιτυγχάνουμε να ελέγξουμε την ποσότητα της ισχύος που

πέφτει πάνω στο φορτίο. Για την περίπτωση που το φορτίο είναι ένας κινητήρας αυτό συνεπάγεται έλεγχο στροφών του κινητήρα.



[Πηγή: DANFOSS, “Variable Frequency Drives (101) Fundamentals”, Technical Manual.]

Σχήμα 3.3.3<sup>α</sup> Διαμόρφωση εύρους παλμού ή PWM

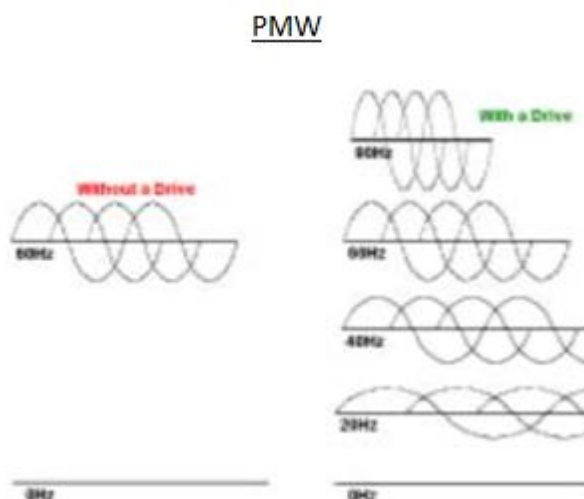


[Πηγή: [https://images.slideplayer.com/13/3869390/slides/slide\\_2.jpg](https://images.slideplayer.com/13/3869390/slides/slide_2.jpg)]

Σχήμα 3.3.3<sup>β</sup> Σήμα ON/OFF μιας διαμόρφωσης PWM.

Τα IGBT λειτουργούν επι της ουσίας σαν διακόπτες και λειτουργούν είτε στην περιοχή αποκοπής (OFF) είτε στην περιοχή κορεσμού. Τα IGBT έχουν επικρατήσει έναντι άλλων ημιαγωγών για τον λόγο ότι έχει πολύ γρήγορη απόκριση και μπορεί να φτάσει υψηλές συχνότητες. Στο σχήμα 3.3.3<sup>α</sup> εμφανίζονται μόνο 7 παλμοί σε κάθε πλευρά, αλλά στην πραγματικότητα 1750 παλμοί ή πεισσότεροι θα πρέπει να εμφανίζονται. Αυτή η PWM συχνότητα μπορεί να κυμαίνεται από 3,5 kHz έως 15 kHz, πράγμα που σημαίνει ότι μπορούμε να την ακούσουμε. Είναι επίσης γνωστό και ως φέρων συχνότητα ή σήμα, η οποία είναι μεταβλητή για κάθε εταιρεία κατασκευής VFD. Μια χαμηλή φέρουσα συχνότητα μπορεί να έχει ενοχλητικό θόρυβο, αλλά μια υψηλή φέρουσα έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της θερμότητας στο drive και τον ηλεκτροκινητήρα. Στην περίπτωση που ο θόρυβος της φέρουσας συχνότητας είναι πολύ δυνατός σε συνδυασμό με τους ανεμιστήρες τροφοδοσίας, μπορούν να χρησιμοποιηθούν φίλτρα LC μεταξύ του VFD και του κινητήρα για την εξουδετέρωση αυτού του θόρυβου. Χωρίς τα drive μας δίνετε η δυνατότητα να

λειτουργήσουμε έναν ηλεκτροκινητήρα μόνο σε πλήρη ταχύτητα ή να είναι σταματημένος, το μόνο σήμα που βλέπει ο κινητήρας είναι ON (50/60 Hz) ή OFF (0 Hz). Ενώ με την χρήση των drive πετυχαίνουμε έλεγχο των στροφών του κινητήρα ο οποίος μπορεί να βλέπει 20 Hz, 40 Hz, 60 Hz, 90 Hz ή οποιαδήποτε άλλη συχνότητα μεταξύ αυτών καθιστώντας τον πιο προσαρμόσιμο σε οποιαδήποτε εφαρμογή που χρειάζεται να μεταβάλλουμε την ταχύτητα του κινητήρα.



[Πηγή: DANFOSS, “Variable Frequency Drives (101) Fundamentals”, Technical Manual.]

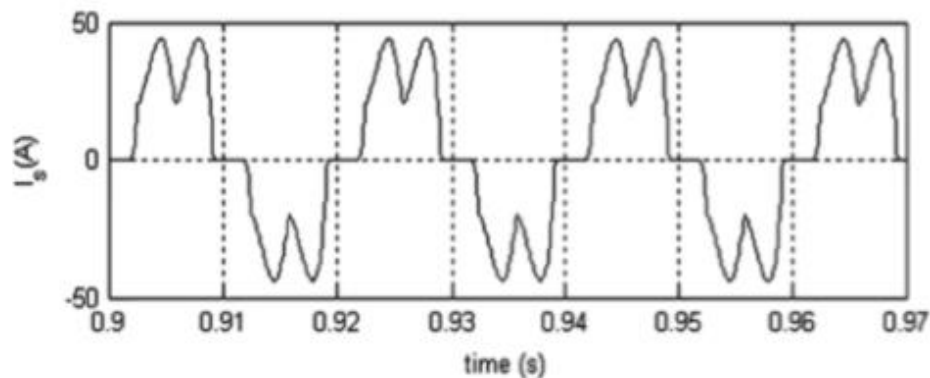
Σχήμα 3.3.3' Σήμα με διαμόρφωσης PWM με και χωρίς διαμόρφωση

Εκ πρώτης όψεως η λειτουργία των drive φαίνεται να είναι μπερδεμένη. Λαμβάνουν ένα σήμα εναλλασσόμενης τάσης AC 50Hz ή 60Hz στην είσοδο και στην συνέχεια το αλλάζουν σε σήμα τάσης συνεχούς ρεύματος DC και στην συνέχεια πάλι σε διαμορφωμένο σήμα AC. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι διότι η τάση συνεχούς ρεύματος DC είναι πολύ πιο εύκολο να μεταβληθεί και να προσαρμοστεί ώστε να επιτευχθεί έτσι ο έλεγχος του ηλεκτροκινητήρα.

### 3.3.4 Αρμονικές συχνότητες και δείκτες μέτρησης αρμονικών συχνοτήτων

Για τον λόγο του ότι οι ηλεκτρονικοί μετατροπείς ισχύος είναι μη γραμμικά ηλεκτρικά φορτία και απορροφούν από το δίκτυο ρεύματα τα οποία δεν είναι ημιτονοειδή και αποκλίνουν σε μικρότερο ή μεγαλύτερο βαθμό από την κυματομορφή του δικτύου, περιέχουν αρμονικές συνιστώσες. Οι συνιστώσες αυτές μπορούν να προκαλέσουν σοβαρές δυσλειτουργίες, τόσο στα ηλεκτρικά φορτία όσο και στα ηλεκτρικά δίκτυα μεταφοράς και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας. Για τον λόγο αυτό οφείλουμε με τις κατάλληλες

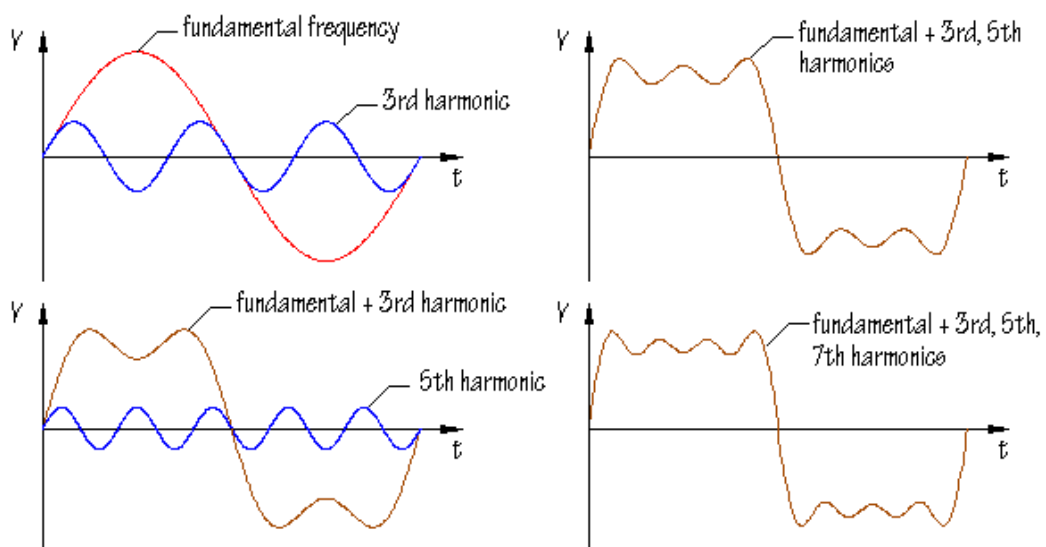
μετρήσεις να προσδιορίσουμε την ποσότητα των αρμονικών και να τις περιορίσουμε λαμβάνοντας τα κατάλληλα μέτρα.



[Πηγή: <https://eclass.pat.teiwest.gr/eclass/modules/document/file.php/487116/%CE%91%CE%A1%CE%9C%CE%9F%CE%9D%CE%99%CE%9A%CE%95%CE%A3.pdf>]

Σχήμα 3.3.4<sup>α</sup> Μη ημιτονοειδές AC ρεύμα 50 Hz (φορτίο VFD)

Με την χρήση φίλτρων περιορίζουμε το αρμονικό περιεχόμενο μιας κυματομορφής καθώς αυτή περνά από την είσοδο προς την έξοδο, δηλαδή αποσκοπούν στην εξομάλυνση των κυματομορφών (τάσης, ρεύματος), για την καλύτερη και αποδοτικότερη λειτουργία των ηλεκτρικών φορτίων, την αποτροπή διάχυσης αρμονικών συνιστώσεων στο δίκτυο καθώς επίσης και τον περιορισμό των παρεμβολών στις ραδιοσυχνότητες (Radio-Frequency Interference). Για κυματομορφές συνεχούς (DC) νοείται η σταθερή συνάρτηση, ενώ για εναλλασσόμενες κυματομορφές (AC) η ημιτονοειδής συνάρτηση.



[Πηγή: <https://www.quora.com/Why-is-it-necessary-to-remove-harmonics-from-an-electrical-system>]

Σχήμα 3.3.4<sup>β</sup> Αρμονικές συνιστώσες και θεμελιώδης συχνότητα

Όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.3.4<sup>β</sup> οι αρμονικές συνιστώσες είναι ημιτονοειδείς συναρτήσεις με συχνότητες ακέραια πολλαπλάσια της βασικής ή θεμελιώσης συχνότητας. Αν μιλάμε για κυματομορφή DC τότε κατόπιν ανάλυσης Fourier της κυματομορφής, θα προκύψει σταθερή συνιστώσα. Η ανάλυση μια κυματομορφής σε άθροισμα συνιστωσών κατά Fourier, στην γενική της μορφή είναι:

$$x = A_0 + A_n \sin(n\omega t - \varphi_n)$$

όπου :

$A_0$  : συνιστώσα DC.

$n$  : ακέραιος  $> 0$ , τάξης αρμονικής .

$n=1$  : θεμελιώδης συνιστώσα.

$A_n$  : πλάτος αρμονικής συνιστώσας.

$\varphi_n$  : διαφορά φάσης μεταξύ θεμελιώδους και αρμονικής συνιστώσας.

Στα δίκτυα μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας η θεμελιώδης συχνότητα είναι 50 Hz ή 60 Hz. Οι αρμονικές συχνότητες της ανάλυσης Fourier διακρίνονται σε:

- Περιττές αρμονικές (odd harmonics) = 5<sup>th</sup>, 7<sup>th</sup>, 11<sup>th</sup> ...
- Άρτιες αρμονικές (even harmonics) = 2<sup>nd</sup>, 4<sup>th</sup>, 6<sup>th</sup>...
- Τριπλές αρμονικές (triplen harmonics) = 3<sup>d</sup>, 9<sup>th</sup>, 15<sup>th</sup>..., δηλαδή περιττές συχνότητες που είναι πολλαπλάσια του 3.

Η ανάγκη της βιομηχανίας για τον καθορισμό της ποιότητας της ηλεκτρικής ενέργειας έχει αναπτύξει ορισμένες ενδεικτικές τιμές που μας βοηθούν να εκτιμήσουμε την ποιότητα του συστήματος μαζί με παραμορφώσεις που προκαλούνται από την παρουσία αρμονικών συχνοτήτων. Αυτές οι τιμές, ή οι αρμονικοί δείκτες, χρησιμεύουν ως μια χρήσιμη μέτρηση της απόδοσης του συστήματος. Οι δύο συχνότερα χρησιμοποιούμενες είναι η συνολική αρμονική παραμόρφωση (THD) και η συνολική παραμόρφωση της ρεύματος (TDD). Είναι μέτρα της πραγματικής τιμής μιας κυματομορφής και μπορούν να εφαρμοστούν τόσο στο ρεύμα όσο και στην τάση. Ο THD είναι ένας δείκτης της πραγματικής τιμής των αρμονικών συνιστωσών μιας παραμορφωμένης κυματομορφής. Μπορεί να υπολογιστεί είτε για ρεύμα είτε για τάση. Αν και πολλά από τα σημερινά όργανα μέτρησης μπορούν να παράσχουν τιμές THD, εξακολουθεί να είναι σημαντικό να κατανοήσουμε τον υπολογισμό του. Η βασική εξίσωση είναι η εξής:

$$THDV = \sqrt{\frac{\sum_{k=2}^{40} V_k^2}{V_1^2}} = \sqrt{\frac{\sum_{k=2}^{40} C_{V_k}^2}{C_{V_1}^2}} \quad THDI = \sqrt{\frac{\sum_{k=2}^{40} I_k^2}{I_1^2}} = \sqrt{\frac{\sum_{k=2}^{40} C_{I_k}^2}{C_{I_1}^2}}$$

Δηλαδή η παραπάνω εξίσωση μας δείχνει ότι ο δείκτης THD υπολογίζεται από τον λόγο του αθροίσματος των τετραγώνων του πλάτους κάθε αρμονικής συχνότητας, διαιρεμένο με το τετράγωνο της συνιστώσας στην θεμελιώδη συχνότητα (50 Hz ή 60 Hz), τόσο για τις τάση όσο και για τα ρεύματα. Όπου  $V_k = \frac{C_{V_k}}{\sqrt{2}}$ , είναι η ενεργός τιμή της τάσης της αρμονικής τάξεως k,  $V_1$  η ενεργός τιμή της τάσης της θεμελιώδους συνιστώσας,  $C_{V_k}$  το πλάτος της τάσης της αρμονικής τάξεως k και  $C_{V_1}$  το πλάτος της τάσης της θεμελιώδους συνιστώσας. Και όπου  $I_k = \frac{C_{I_k}}{\sqrt{2}}$ , είναι η ενεργός τιμή ρεύματος της αρμονικής τάξεως k,  $I_1$  η ενεργός τιμή του ρεύματος της θεμελιώδους συνιστώσας,  $C_{I_k}$  το πλάτος του ρεύματος της αρμονικής τάξεως k και  $C_{I_1}$  το πλάτος του ρεύματος της θεμελιώδους συνιστώσας για τάση και ρεύμα αντίστοιχα. Εφόσον αναλύσαμε τους τύπους της αρμονικής παραμόρφωσης τάσης και ρεύματος πιο πάνω, θα πρέπει να αναφέρουμε ότι αυτοί οι δύο δείκτες έχουν μια πολύ σημαντική διαφορά μεταξύ τους. Ενώ στον δείκτη της τάσης ο παρανομαστής είναι πάντα σταθερός (380V ή 400V), για τον λόγο του ότι οι εγκαταστάσεις λειτουργούν υπό σταθερή τάση, στον δεύτερο δείκτη του ρεύματος δεν ισχύει αυτό γιατί η ζήτηση της εγκατάστασης για ρεύμα ποικίλει σε σχέση με το χρόνο. Ο λόγος αυτός οδήγησε στην χρήση του δείκτη TDD (Total Demand Distortion).

$$TDD = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2}}{I_L}$$

Η διαφορά των δεικτών TDD και THDi είναι η τιμή του παρανομαστή, ο δείκτης TDD έχει την μέγιστη τιμή της έντασης της εγκατάστασης αντί της εκάστοτε τιμής έντασης. Δηλαδή ο δείκτης TDD υπολογίζει την αρμονική παραμόρφωση πάντοτε ως προς το μέγιστο ρεύμα λειτουργίας της εγκατάστασης, που είναι σταθερό μέγεθος, και όχι προς το στιγμιαίο ρεύμα λειτουργίας (που είναι διαρκώς μεταβαλλόμενο μέγεθος) όπως ο δείκτης THDi.

Όταν μετράμε τις αρμονικές ενός συστήματος, στόχος μας είναι ο εντοπισμός των μέγιστων τιμών των αρμονικών (δείκτης TDD), με την λογική της ανιχνεύσης του χειρότερου πιθανού σεναρίου που μπορεί να προκύψει και όπως φαίνεται και στον παρακάτω πίνακα (σχήμα 3.3.4'), αυτός είναι και ο λόγος που το πρότυπο IEEE 519, αναφέρεται στα όρια του δείκτη TDD και όχι του THDi.



Maximum Harmonic Current Distortion in % of $I_L$						
Individual Harmonic Order (Odd Harmonics)						
$I_{sc}/I_L$	< 11	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	TDD
<20*	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20<50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50<100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100<1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0
Even harmonics are limited to 25% of the odd harmonic limits. TDD refers to Total Demand Distortion and is based on the average maximum demand current at the fundamental frequency, taken at the PCC.						
* All power generation equipment is limited to these values of current distortion regardless of $I_{sc}$ $I_L$ .						
$I_{sc}$ = Maximum short circuit current at the PCC $I_L$ = Maximum demand load current (fundamental) at the PCC h = Harmonic number						

Current distortion limits in IEEE 519-1992.

[Πηγή: Application of IEEE STD 519-1992 Harmonic Limits]

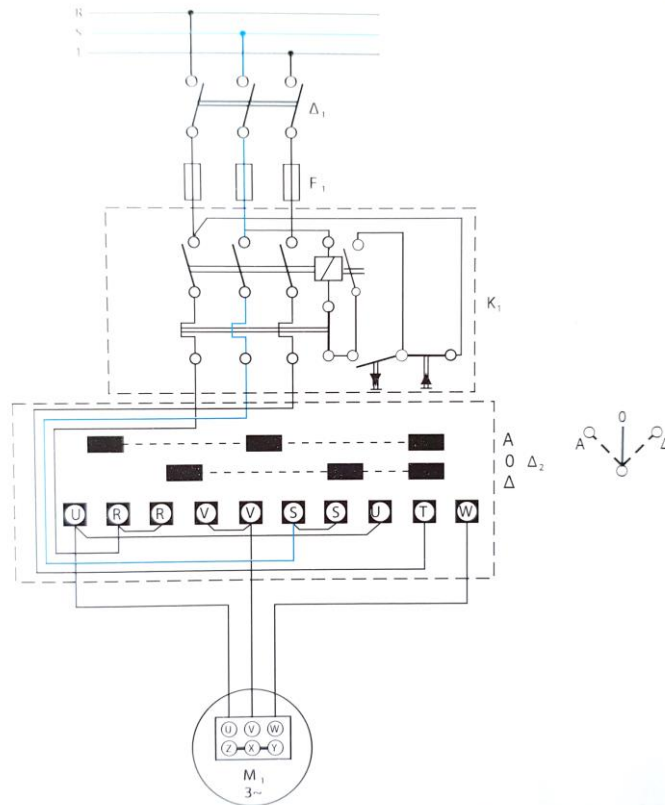
Σχήμα 3.3.4' Πίνακας τιμών TDD προτύπου IEEE 519

## 4. Μέθοδοι ελέγχου τριφασικού κινητήρα

### 4.1 Κλασικός αυτοματισμός

#### 4.1.1 Έλεγχος στην απευθείας εκκίνηση

Η αλλαγή φοράς περιστροφής ενός κινητήρα είναι μία από τις πιο σημαντικούς ελέγχους που απαιτούνται. Ο πιο απλός τρόπος για να συμβεί είναι χρησιμοποιώντας χειροκίνητους διακόπτες που κυκλοφορούν στο εμπόριο. Φυσικά η αλλαγή φοράς του κινητήρα με χειροκίνητο διακόπτη πρέπει αυστηρά να γίνει εφόσον ο κινητήρας είναι σταματημένος. Σε διαφορετική περίπτωση είναι σχεδόν βέβαιο ότι θα υπάρξουν σοβαρές βλάβες σε ηλεκτρικά και μηχανικά μέρη του κινητήρα, ακόμη και η πλήρης καταστροφή του.



Πηγή: Βασίλειος Μπιτζιώνης, “Βιομηχανικές ηλεκτρικές εγκαταστάσεις”, 2011 Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ.

Σχήμα 4.1.1α – Συνδεσμολογία τριφασικού κινητήρα με χειροκίνητο διακόπτη αλλαγής φοράς περιστροφής

$\Delta_1$  = Τριπολικός διακόπτης φορτίου.

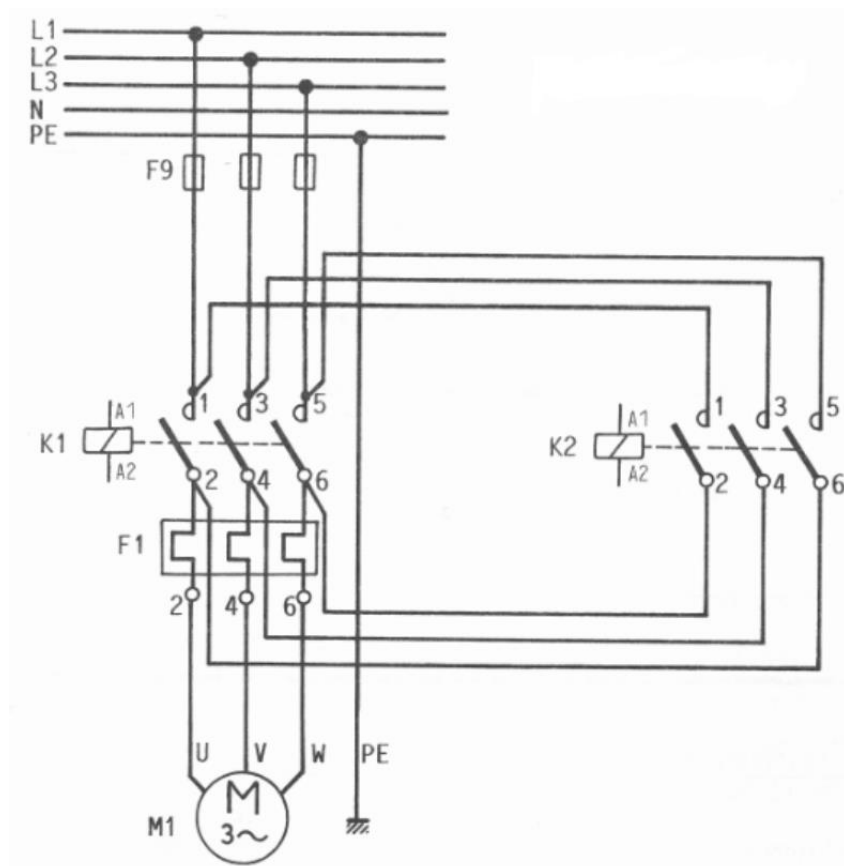
$F_1$  = Ασφάλειες.

$K_1$  = Αυτόματος διακόπτης προστασίας κινητήρων.

$\Delta_2$  = Χειροκίνητος διακόπτης αλλαγής φοράς περιστροφής.

$M_1$  = Τριφασικός κινητήρας βραχυκυκλωμένου δρομέα με σύνδεση των τυλιγμάτων του σε αστέρα.

Όπως αναφέραμε παραπάνω αυτός είναι ο πιο απλός τρόπος αλλαγής φοράς του κινητήρα και τις περισσότερες φορές αυτό δεν είναι πρακτικό εφόσον θα πρέπει να είναι πάντα κάποιος να χειρίζεται τον χειροκίνητο διακόπτη. Γι'αυτό τον λόγο ο χειροκίνητος διακόπτης αντικαταστάθηκε με τον αυτόματο διακόπτη αλλαγής φοράς περιστροφής με χρήση ρελέ ισχύος και θερμικού. Ενσωματώνουμε λοιπόν στο κύκλωμα ισχύος ένα βοηθητικό κύκλωμα με απλή ή διπλή ηλεκτρική μανδάλωση όπως βλέπουμε παρακάτω.



[Πηγή: Βασίλειος Μπιτζιώνης, "Βιομηχανικές ηλεκτρικές εγκαταστάσεις", 2011 Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ.1]

Σχήμα 4.1.1β – Συνδεσμολογία αυτόματης αλλαγής περιστροφής τριφασικού κινητήρα

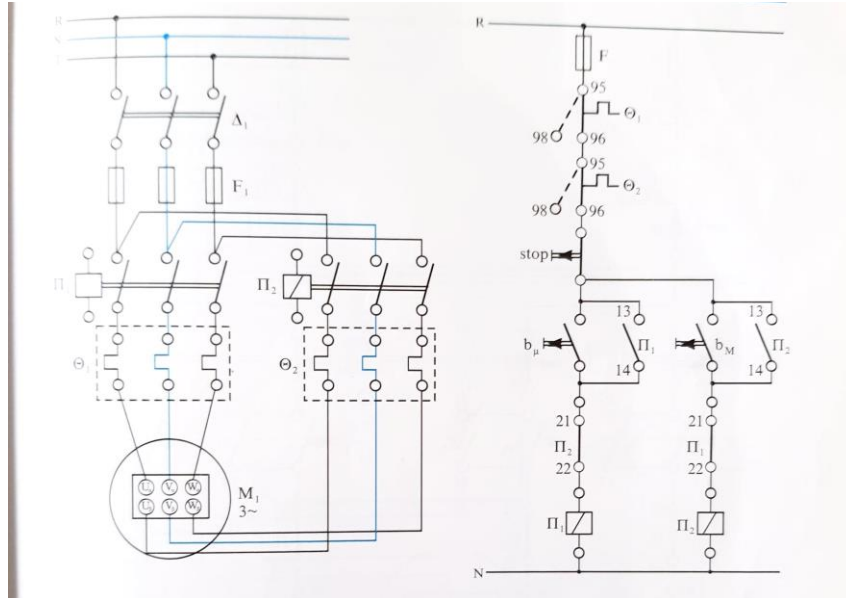
$F_9$  = Ασφάλειες.

$K_1, K_2$  = Ρελέ ισχύος.

$F_1$  = Θερμικό.

$M_1$  = Τριφασικός κινητήρας βραχυκυκλωμένου δρομέα με σύνδεση τυλιγμάτων σε τρίγωνο.

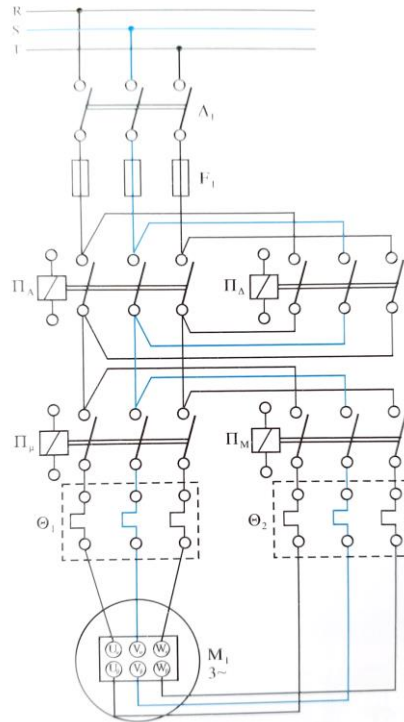
Μία ακόμη σημαντική λειτουργία είναι ο έλεγχος στην ταχύτητα του κινητήρα. Και αυτο επιτυγχάνεται με ένα βοηθητικό κύκλωμα που αποτελείται από ρελέ ισχύος, θερμικό και μπουτόν start, stop εξίσου.



[Πηγή: Βασίλειος Μπιτζιώνης, “Βιομηχανικές ηλεκτρικές εγκαταστάσεις”, 2011 Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ.]

Σχήμα 4.1.1γ – Συνδεσμολογία τριφασικού κινητήρα δύο ταχυτήτων με μια φορά περιστροφής και βοηθητικό κύκλωμα.

Σε συνδιασμό των δύο παραπάνω λειτουργιών μπορούμε να επιτύχουμε το ιδανικότερο αποτέλεσμα όσον αφορά τον έλεγχο στην απευθείας εκκίνηση του κινητήρα, έτσι ώστε να μπορούμε να ελέγξουμε και την φορά περιστροφής του κινητήρα καθώς και δύο ταχύτητες του με ένα κύκλωμα.



[Πηγή: Βασίλειος Μπιτζιώνης, “Βιομηχανικές ηλεκτρικές εγκαταστάσεις”, 2011 Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ.]

Σχήμα 4.1.1δ – Συνδεσμολογία τριφασικού κινητήρα δύο ταχυτήτων με δύο φορές περιστροφής.

$\Delta_1$  = Τριπολικός διακόπτης φορτίου.

$F_1$  = Ασφάλειες.

$\Pi_A$  = Ρελέ ισχύος αριστερόστροφης κίνησης.

$\Pi_\Delta$  = Ρελέ ισχύος δεξιόστροφης κίνησης.

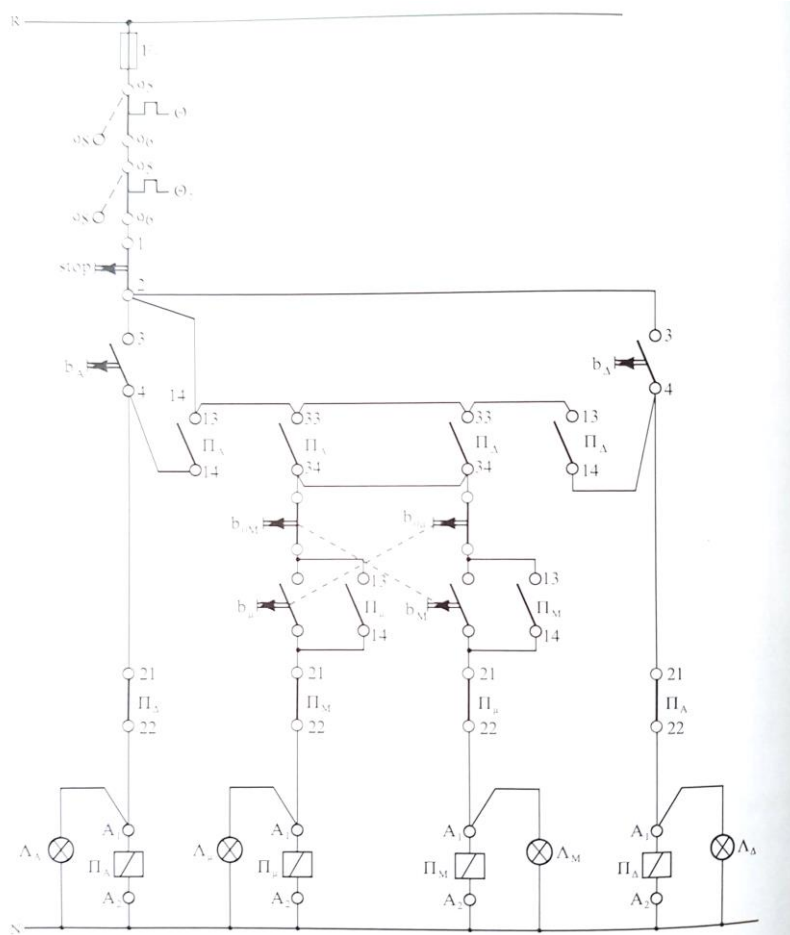
$\Pi_\mu$  = Ρελέ ισχύος χαμηλής ταχύτητας.

$\Pi_M$  = Ρελέ ισχύος υψηλής ταχύτητας.

$\Theta_1$  = Θερμικό χαμηλής ταχύτητας.

$\Theta_2$  = Θερμικό υψηλής ταχύτητας.

$M_1$  = Κινητήρας βραχυκυκλωμένου δρομέα, τριφασικός, δύο ταχυτήτων (με δυο τυλίγματα).



Πηγή: Βασίλειος Μπιτζιόνης, "Βιομηχανικές ηλεκτρικές εγκαταστάσεις", 2011 Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ.1

Σχήμα 4.1.1στ – Βοηθητικό κύκλωμα τριφασικού κινητήρα, δύο ταχυτήτων με δύο φορές περιστροφής.

$\Pi_A$  = Πηνίο αριστερόστροφης κίνησης.

$\Pi_\Delta$  = Πηνίο δεξιόστροφης κίνησης.

$b_A$  = Μπουτόν εντολής start αριστερόστροφης κίνησης.

$\Lambda_A$  = Ενδεικτική λυχνία σήμανσης αριστερόστροφης κίνησης.

$b_\Delta$  = Μπουτόν εντολής start δεξιόστροφης κίνησης.

$\Lambda_\Delta$  = Ενδεικτική λυχνία σήμανσης δεξιόστροφης κίνησης.

$\Pi_\mu$  = Πηνίο χαμηλής ταχύτητας περιστροφής.

$\Pi_M$  = Πηνίο υψηλής ταχύτητας πειστροφής.

$\Lambda_\mu$  = Ενδεικτική λυχνία σήμανσης χαμηλής ταχύτητας.

$\Lambda_M$  = Ενδεικτική λυχνία σήμανσης υψηλής ταχύτητας.

$b_\mu - b_{OM}$  = Διπλό μπουτόν start-stop χαμηλής ταχύτητας.

$b_M - b_{OM}$  = Διπλό μπουτόν start-stop υψηλής ταχύτητας.

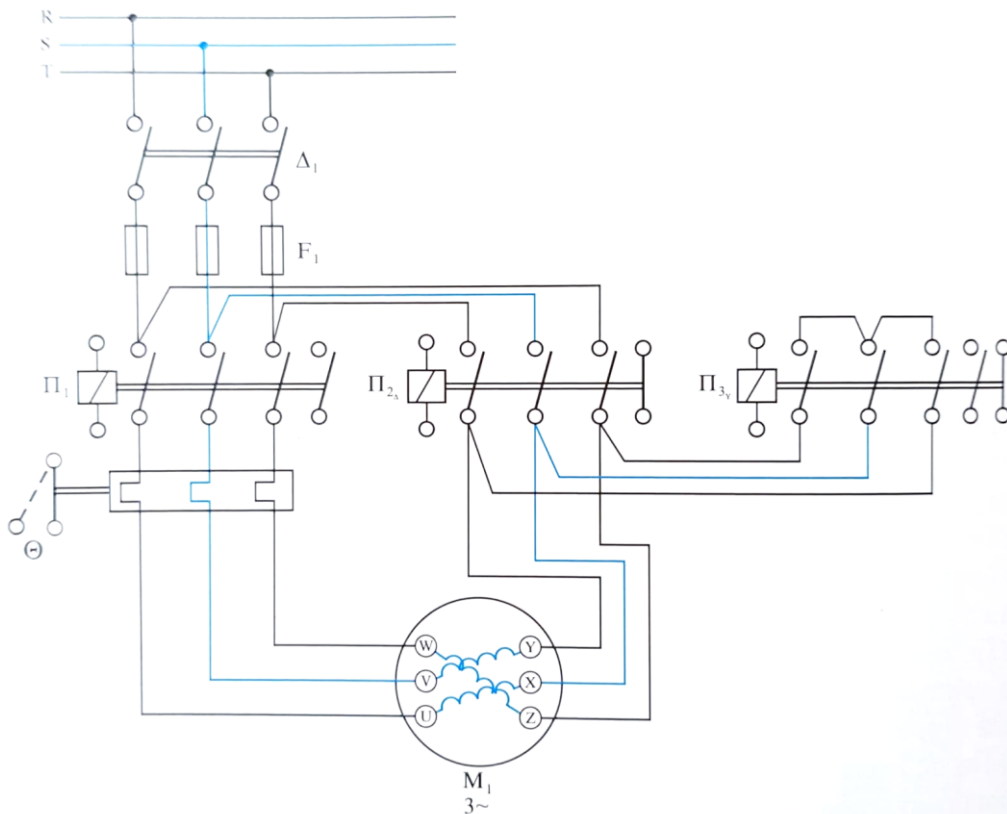
$\Theta_1$  = Θερμικό χαμηλής ταχύτητας.

$\Theta_2$  = Θερμικό υψηλής ταχύτητας.

Η λειτουργία του βοηθητικού κυκλώματος στο παραπάνω σχήμα για ταυτόχρονο έλεγχο κατεύθυνσης περιστροφής και ταχύτητας του κινητήρα έχει ως εξής: Πιέζοντας το μπουτόν  $b_A$  ενεργοποιείται το πηνίο  $\Pi_A$ . Αμέσως μετά η επαφή 13-14 του πηνίου  $\Pi_A$  κλείνει πετυχαίνοντας έτσι αυτοσυγκράτηση που μας επιτρέπει να αφήσουμε το μπουτόν. Η λυχνία  $\Lambda_A$  ανάβει που μας επισυμαίνει αριστερόστροφη κίνηση. Επίσης η επαφή 21-22 του πηνίου  $\Pi_A$  ανοίγει προστατεύοντας μας από πιθανό λάθος πίεσης του μπουτόν  $b_\Delta$ . Εφόσον και η επαφή 33-34 του πηνίου  $\Pi_A$  κλείνει προχωράμε στην επιλογή της ταχύτητας του κινητήρα από τα μπουτόν  $b_\mu$  (χαμηλή ταχύτητα) και  $b_M$  (υψηλή ταχύτητα). Αν επιλέξουμε για παράδειγμα χαμηλή ταχύτητα από το μπουτόν  $b_\mu$  ενεργοποιείται το πηνίο  $\Pi_\mu$  όπου και αυτό με την σειρά του ενεργοποιεί τις επαφές του. Η επαφή 13-14 του πηνίου  $\Pi_\mu$  κλείνει για να επιτευχθεί η αυτοσυγκράτηση, η επαφή 21-22 του πηνίου  $\Pi_\mu$  ανοίγει και κρατά απενεργοποιημένη την υψηλή ταχύτητα και η λυχνία  $\Lambda_\mu$  ανάβει. Η αντίστοιχη λειτουργία συμβαίνει και για την δεξιόστροφη κίνηση με ότι φυσικά αφορά το πηνίο  $\Pi_\Delta$  και τις επαφές του καθώς και αντίστοιχη λειτουργία έχουμε και στην υψηλή ταχύτητα με ότι αφορά το πηνίο  $\Pi_M$  και τις επαφές του. Για να αλλάξουμε κατεύθυνση θα πρέπει να πατήσουμε το μπουτόν stop για να σταματήσει ο κινητήρας τελείως, όμως αυτό δεν συμβαίνει στην περίπτωση της ταχύτητας αφού διαθέτουμε διπλα μπουτόν start-stop. Τοποθετώντας στα ρελέ κατεύθυνσης μηχανική μανδάλωση καταφέρνουμε μεγαλύτερη ασφάλεια.

### 4.1.2 Έλεγχος Αστέρα-Τριγώνου

Όπως είδαμε και στον έλεγχο της απευθείας εκκίνησης ο χειροκίνητος διακόπτης αποδικνύεται μη πρακτικός. Έτσι και στην λειτουργία αστέρα-τριγώνου έχουμε αυτόματο διακόπτη όπου πάλι ενσωματώνουμε ένα βοηθητικό κύκλωμα στο κύκλωμα ισχύος που αποτελείται από ρελέ, μπουτόν, χρονικό και θερμικό.



[Πηγή: Βασίλειος Μπιτζιόνης, "Βιομηχανικές ηλεκτρικές εγκαταστάσεις", 2011 Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ.]

Σχήμα 4.1.2α – Κύκλωμα ισχύος αυτόματου διακόπτη αστέρα-τριγώνου.

$\Delta_1$  = Τριπολικός διακόπτης.

$F_1$  = Ασφάλειες.

$\Pi_1$  = Κύριο ρελέ διακόπτη αστέρα-τριγώνου.

$\Pi_{2\Delta}$  = Ρελέ τριγώνου.

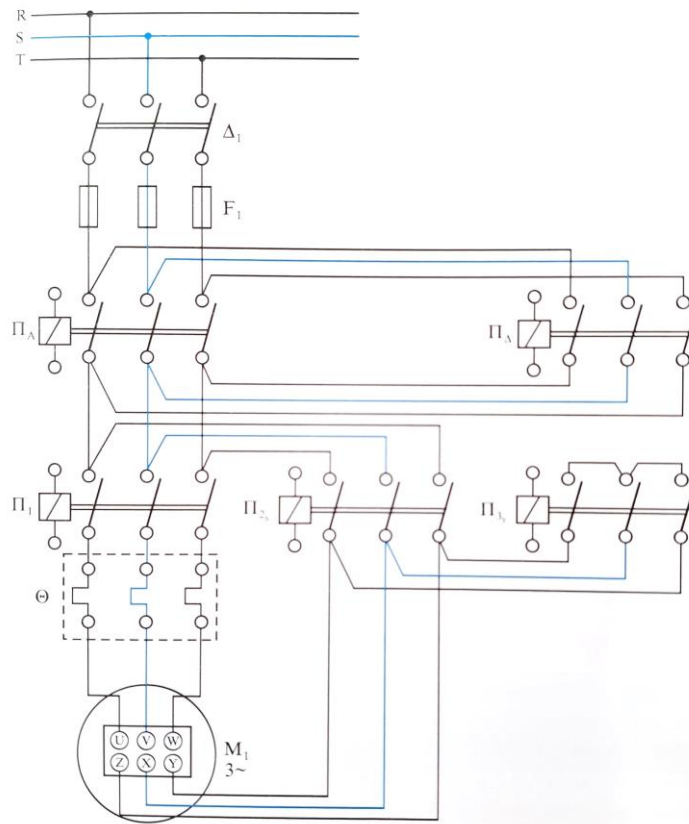
$\Pi_{3\gamma}$  = Ρελέ αστέρα.

$\Theta$  = Θερμικό.

$M_1$  = Τριφασικός κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα.



Στην εκκίνηση διακόπτη αστέρα-τριγώνου με κατάλληλο βοηθητικό κύκλωμα μπορούμε να πετύχουμε αλλαγή φοράς περιστροφής.



[Πηγή: Βασίλειος Μπιτζιόνης, "Βιομηχανικές ηλεκτρικές εγκαταστάσεις", 2011 Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ.1

4.1.2β – Συνδεσμολογία εκκίνησης τριφασικού κινητήρα με αυτόματο διακόπτη αστέρα τριγώνου και αλλαγή φοράς περιστροφής.

$\Delta_1$  = Τριπολικός διακόπτης.

$F_1$  = Ασφάλειες.

$\Pi_A$  = Ρελέ ισχύος αριστερόστροφης κίνησης.

$\Pi_{\Delta}$  = Ρελέ ισχύος δεξιόστροφης κίνησης.

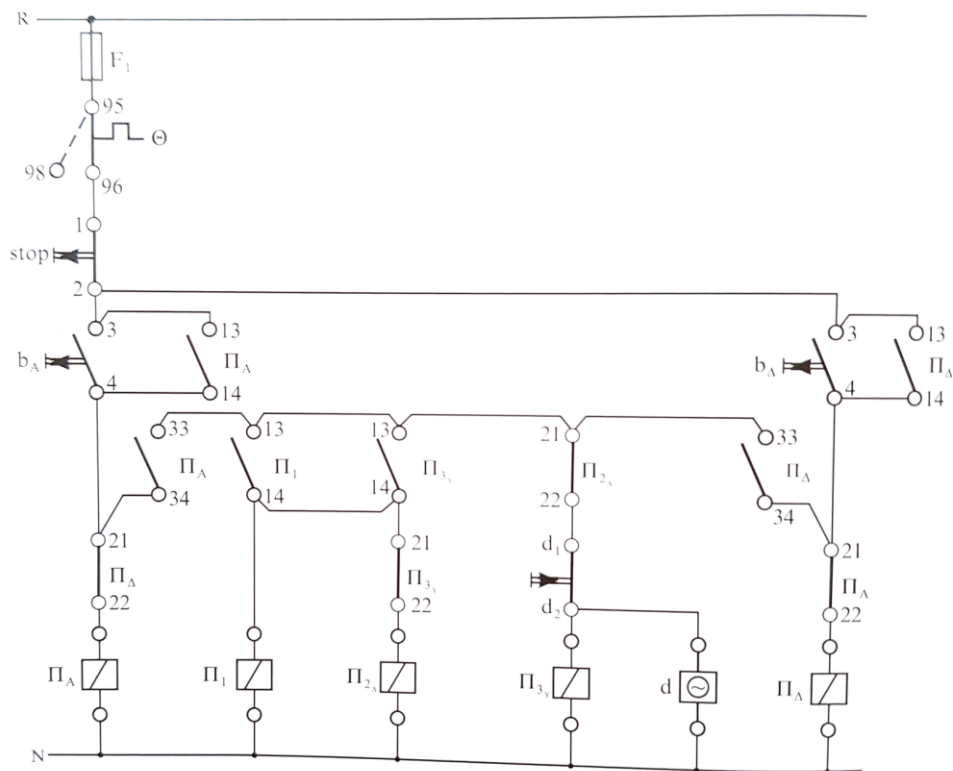
$\Pi_1$  = Κύριο ρελέ διακόπτη αστέρα-τριγώνου.

$\Pi_{2\Delta}$  = Ρελέ τριγώνου.

$\Pi_{3\gamma}$  = Ρελέ αστέρα.

$\Theta$  = Θερμικό.

$M_1$  = Τριφασικός κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα.



[Πηγή: Βασίλειος Μπιτζιώνης, “Βιομηχανικές ηλεκτρικές εγκαταστάσεις”, 2011 Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ.]

Σχήμα 4.1.2γ – Βοηθητικό κύκλωμα αυτόματου διακόπτη αστέρα τριγώνου και αλλαγή φοράς περιστροφής.

$F_1$  = Ασφάλειες.

$b_A$  = Μπουτόν αριστερόστροφης κίνησης.

$b_\Delta$  = Μπουτόν δεξιόστροφης κίνησης.

$\Pi_A$  = Ρελέ ισχύος αριστερόστροφης κίνησης.

$\Pi_\Delta$  = Ρελέ ισχύος δεξιόστροφης κίνησης.

$\Pi_1$  = Κύριο ρελέ διακόπτη αστέρα-τριγώνου.

$\Pi_{2\Delta}$  = Ρελέ τριγώνου.

$\Pi_{3\gamma}$  = Ρελέ αστέρα.

$\Theta$  = Θερμικό.

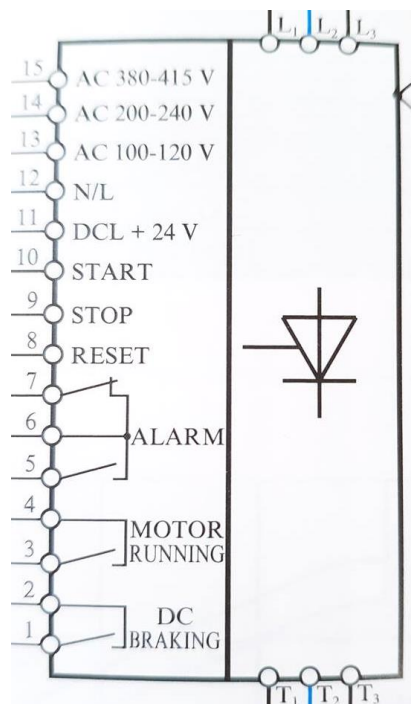
$d$  = Χρονικό.

Η λειτουργία του βοηθητικού κυκλώματος για την αλλαγή φοράς περιστροφής στην εκκίνηση διακόπτη αστέρα-τριγώνου έχει ως εξής: Πατώντας το μπουτόν  $b_A$  για αριστερόστροφη κίνηση το ρεύμα περνάει στο πηνίο  $\Pi_A$ . Εφόσον το πηνίο  $\Pi_A$  άγει η επαφή 13-14 κλείνει πετυχαίνοντας αυτοσυγκράτηση καθώς και η επαφή 33-34 όπου επιτρέπει το ρεύμα να περάσει στο ρελέ αστέρα και το χρονικό ενεργοποιείται και αρχίζει να μετράει. Εφόσον το ρελέ αστέρα είναι ενεργοποιημένο η επαφή του 13-14 οπλίζει, ανοίγει η επαφή του 21-22 και ενεργοποιείται το κύριο ρελέ αστέρα-τριγώνου και οπλίζει η επαφή 13-14 του  $\Pi_1$ . Μετά τον χρόνο που έχει οριστεί στο χρονικό απενεργοποιείται το  $\Pi_{3\gamma}$  και το χρονικό και το ρεύμα περνάει στο  $\Pi_{2\Delta}$ . Την αντίστοιχη ακολουθία έχουμε και στην περίπτωση που πατηθεί το μπουτόν για δεξιόστροφη κίνηση. Για να αρχίσει η αντίθετη κίνηση προηγείται πάτημα του μπουτόν stop. Η μηχανική μανδάλωση ανάμεσα στα  $\Pi_A$  και  $\Pi_{\Delta}$  παρέχει περισσότερη ασφάλεια.

## 4.2 Έλεγχος με soft starter

Όπως είδαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο το soft starter αποτελείται από ένα κύκλωμα ισχύος με θυρίστορ, τρεις φάσεις τροφοδοσίας και φυσικά την βασική τάση τροφοδοσίας. Για τον έλεγχο το soft starter εμπεριέχει επίσης έναν μικροελεγκτή ο οποίος ελέγχει όλα τα παραπάνω και μας προσφέρει διάφορες λειτουργίες ανάλογα τις ανάγκες του χρήστη. Συμαντικό κομμάτι στον έλεγχο των τριφασικών κινητήρων είναι το σταμάτημα τους καθώς και η εξοικονόμηση ενέργειας. Το soft starter μας παρέχει κυρίως τρεις τρόπους σταματήματος του κινητήρα.

- A) Σταμάτημα με ελεύθερο ρολάρισμα (free coasting).
- B) Ομαλό σταμάτημα (soft-stop).
- Γ) Σταμάτημα αντλίας (rump stop).
- Γ) Φρενάρισμα με συνεχές ρεύμα (DC Braking).

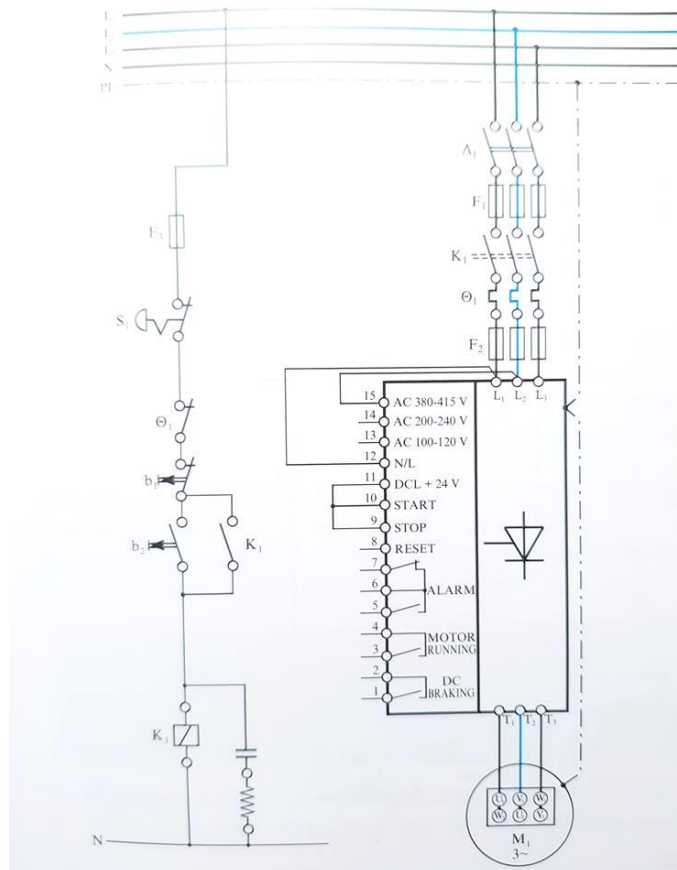


[Πηγή: Βασίλειος Μπιτζιόνης, "Βιομηχανικές ηλεκτρικές εγκαταστάσεις", 2011 Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ.]

4.2α – Μικροελεγκτής soft starter

### 4.2.1 Σταμάτημα κινητήρα με ελεύθερο ρολάρισμα (free coasting)

Ένα από του πιο απλούς τρόπους σταματήματος είναι αυτός με ελεύθερο ρολάρισμα. Για να συμβεί αυτό θα πρέπει να δοθεί η αντίστοιχη εντολή στον μικροεπεξεργαστή του ομαλού εκκινητή. Εφόσον δοθεί η εντολή αυτή, οι εντολές έναυσης των θυρίστρον διακόπτονται με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να μην δημιουργούνται σπινθήρες ρεύματος και ο χρόνος που θα κάνει ο κινητήρας για να σταματήσει εξαρτάται μόνο από την αδράνεια του συστήματος και τις όποιες τριβές υπάρχουν. Ο τρόπος αυτός ενδείκνυται μόνο σε περιπτώσεις που δεν δημιουργούνται προβλήματα σε μηχανικά μέρη του συστήματος. Για παράδειγμα σε αντλίες, μεταφορικές ταινίες, γερανούς, κυλιόμενες κλίμακες ο τρόπος αυτός είναι απαγορευτικός γιατί κατά μεγάλο ποσοστό θα προκαλέσει ζημιές σε μηχανικά μέρη.



[Πηγή: Βασίλειος Μπιτζιόνης, "Βιομηχανικές ηλεκτρικές εγκαταστάσεις", 2011 Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ.]

4.2.1a – Κόκλωμα soft starter με μπουτόν start-stop για σταμάτημα με ελεύθερο ρολάρισμα με θερμικό προστασίας

$\Delta_1$  = Διακόπτης φορτίου.

$F_1$  = Ασφάλειες βραδείας τήξης.

$F_2$  = Ημιαυτόματες ασφάλειες (ταχείας τήξης).

$F_3$  = Ασφάλειες βοηθητικού κυκλώματος.

$K_1$  = Ρελέ ισχύος.

$S_1$  = Διακόπτης έκτακτης ανάγκης.

$b_1$  = Μπουτόν start για έναρξη ενεργοποίησης εκκινητή.

$b_2$  = Μπουτόν stop απενεργοποίηση (σταμάτημα).

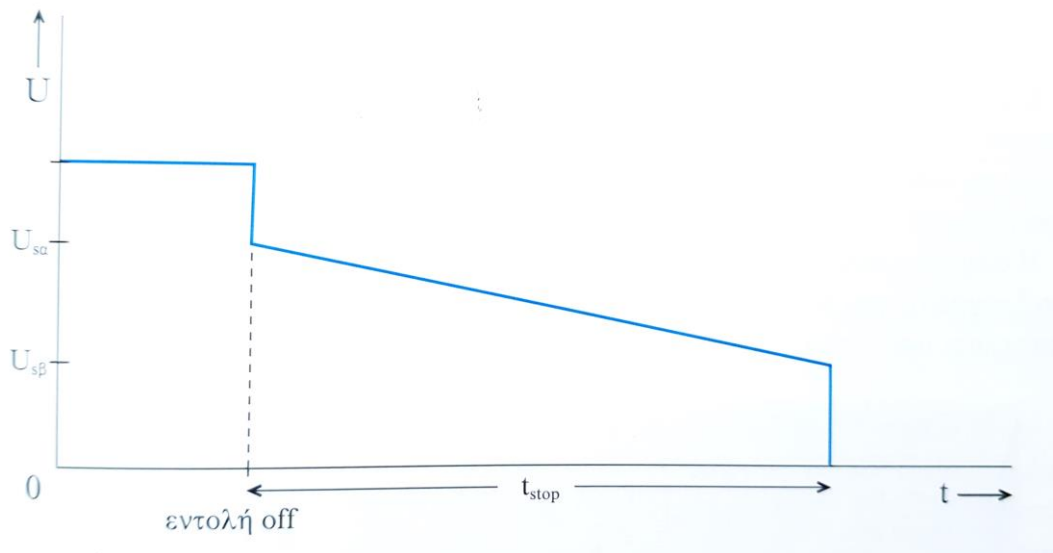
$\Theta_1$  = Θερμικό προστασίας.

$M_1$  = Τριφασικός κινητήρας βραχυκυκλωμένου δρομέα (σύνδεση τριγώνου).

Στο παραπάνω κύκλωμα το κύκλωμα ελέγχου του soft-starter η τροφοδοσία του κινητήρα γίνεται μέσω του ρελέ ισχύος  $K_1$  που τροφοδοτείται από το βοηθητικό κύκλωμα πατώντας το μπουτόν  $b_1$  (start). Σε περίπτωση που θέλουμε να σταματήσει ο κινητήρας με ελεύθερο ρολάρισμα θα πρέπει να πατηθεί το μπουτόν  $b_2$  (stop). Ο κινητήρας επίσης θα σταματήσει με ελεύθερο ρολάρισμα σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης, όταν πατηθεί δηλαδή το μπουτόν  $S_1$  ή σε περίπτωση πτώσης του θερμικού ( $\Theta_1$ )

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

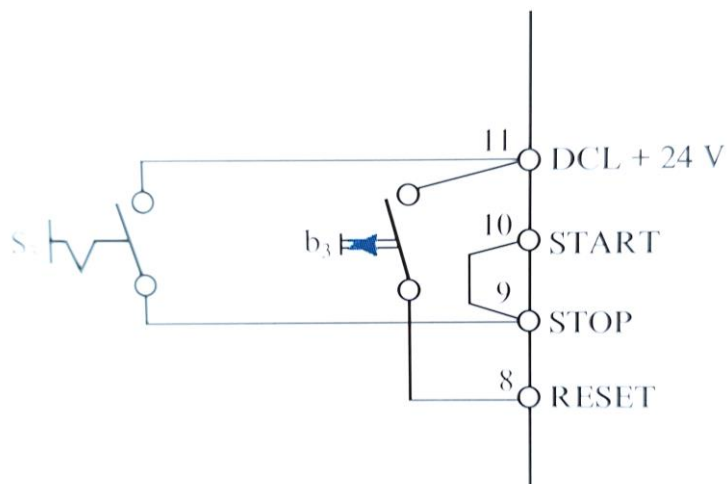
Όπως αναφέραμε παραπάνω το σταμάτημα με ελεύθερο ρολάρισμα δεν εξυπηρετεί σε περιπτώσεις που έχουμε ευαίσθητα μηχανικά μέρη. Το ομαλό σταμάτημα (soft-stop) μας επιτρέπει να μην έχουμε διακοπή τάσης του κινητήρα αλλά σταδιακή μείωση σε διάστημα που μπορεί να κυμανθεί από 1 μέχρι 20 δευτερόλεπτα. Με την χρήση ειδικών προγραμμάτων μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή μπορούμε να μεγαλώσουμε το διάστημα μας σε 1 με 1000 δευτερόλεπτα.



[Πηγή: Βασίλειος Μπιτζιώνης, “Βιομηχανικές ηλεκτρικές εγκαταστάσεις”, 2011 Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ.]

Σχήμα 4.2.2<sup>α</sup> Συμπεριφορά της τάσης στους ακροδέκτες του κινητήρα όταν στο soft-starter δώσουμε εντολή, ομαλό σταμάτημα.

Η αρχική τάση του κινητήρα όπως διακρίνουμε στο γράφημα μόλις δοθεί η εντολή soft stop κυμαίνεται περίπου στο 90% όπου ξεκινάει και η ράμπα εώς ότου φτάσει στην τελική, περίπου στο 70%. Ο κινητήρας σε περίπτωση διακοπής της τάσης δεν θα σταματήσει με ομαλό σταμάτημα αλλά με ελεύθερο ρολάρισμα. Προσθέτοντας στην παραπάνω διάταξη τον διακόπτη  $S_3$  με την κατάλληλη συνδεσμολογία όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα μπορούμε να επιτύχουμε ομαλό σταμάτημα (soft-stop) του κινητήρα αλλά και εκκίνηση. Ο συγκεκριμένος διακόπτης μπορεί να αντικατασταθεί και απο αυτόματη εντολή.



[Πηγή: Βασίλειος Μπιτζιώνης, “Βιομηχανικές ηλεκτρικές εγκαταστάσεις”, 2011 Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ.]

Σχήμα 4.2.2<sup>β</sup> Χειροκίνητος διακόπτης ON/OFF

### **4.2.3 Σταμάτημα κινητήρα με εντολή, σταμάτημα αντλίας (pump stop).**

Σε περιπτώσεις που έχουμε να αντιμετωπίσουμε σταμάτημα αντλιών είναι απαγορευτική η μέθοδος του ελεύθερου ρολαρίσματος. Όταν υπάρξει απότομη διακοπή της τάσης στις αντλίες, δημιουργούνται λόγω της αδράνειας, κύματα πίεσης ή αλλιώς κρουστικά κύματα στις σωληνώσεις. Αυτά έχουν ως αποτέλεσμα πρόκληση βλαβών στα μηχανικά μέρη και στις βαλβίδες του συστήματος. Γι αυτό τον λόγο το soft starter μας παρέχει έναν ακόμη αποδοτικό τρόπο σταματήματος για τις συνθήκες αντλιών. Ο μικροελεγκτής του soft starter παρακολουθώντας την ροπή του κινητήρα μεταβάλλει την τάση κατάλληλα και μας επιτρέπει να έχουμε μια ομαλή σταδιακή μετάβαση της τάσης στο μηδέν για ένα άριστο σταμάτημα, σε χρόνο μέχρι και 90 δευτερόλεπτα. Αυτό μπορεί να αυξηθεί σημαντικά έως και 200 δευτερόλεπτα σε περίπτωση που έχουμε σύνδεση μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή. Σημαντικό κομμάτι που πρέπει να προσέξουμε στο σταμάτημα κινητήρα με εντολή, σταμάτημα ανλίας (pump stop) είναι ότι το ρεύμα που περνάει μέσα από το soft starter είναι αρκετά υψηλό έως και τρεις φορές μεγαλύτερο από το ονομαστικό και πιθανό να αντιμετωπίσουμε προβλήματα αύξησης απωλειών θερμότητας. Γι' αυτό το λόγο καλό είναι να υπάρχει ειδική προστασία.

### **4.2.4 Σταμάτημα κινητήρα με εντολή, φρενάρισμα με συνεχές ρεύμα (DC breaking).**

Σε διάφορα μηχανήματα που χρειάζονται πολύ χρόνο για να σταματήσουν, χρησιμοποιούμε το σταμάτημα με συνεχές ρεύμα (DC breaking). Στέλνοντας ένα συνεχές ρεύμα στο τύλιγμα του στάτη καταφέρνουμε να δημιουργήσουμε ένα μαγνητικό πεδίο. Δίνοντας εντολή off στον κινητήρα ώστε να σταματήσει με ελεύθερο ρολάρισμα όσο ο κινητήρας κινείται δημιουργούνται επαγωγικά ρεύματα. Αυτά τα ρεύματα εμφανίζουν δυνάμεις πέδησης. Η ροπή αυτή είναι αντίθετη αυτής της ροπής περιστροφής και με αυτόν το τρόπο καταφέρνουμε να φρενάrouμε τον κινητήρα. Αναλόγως λοιπόν το συνεχές ρεύμα που στέλνουμε μπορούμε να ελέγξουμε και το μέγεθος αυτής της ροπής και ακολούθως τον χρόνο φρεναρίσματος.



### 4.3 Variable Frequency Drive

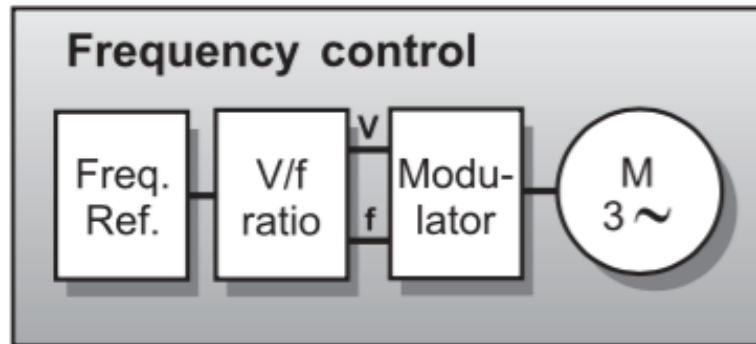
Μια τυπική μονάδα μετατροπής συχνότητας (VFD), μπορεί να έχει από μερικές εκατοντάδες παραμέτρους μέχρι μερικές χιλιάδες τις οποίες μπορεί ο χρήστης να ρυθμίσει σύμφωνα με τις ανάγκες της εφαρμογής του. Αυτό βέβαια καθιστά απαραίτητη την γνώση των παραμέτρων, ποιές είναι απαραίτητες και ποιές δευτερεύουσας σημασίας, καθώς και των δυνατοτήτων αυτών ώστε να μπορέσουμε να κάνουμε σωστή παραμετροποίηση. Η ομάδα παραμέτρων που αφορά της μεθόδους ελέγχου ενός drive, είναι μια από τις πιο σημαντικές και πολλές φορές αυτή που δεν είναι απολύτως κατανοητή από τους χρήστες. Στο κεφάλαιο αυτό θα προσπαθήσουμε να αναλύσουμε αυτές τις μεθόδους ελέγχου, να περιγράψουμε τις διαφορές τους ως προς την λειτουργία τους. Η ρύθμιση ενός drive στην σωστή μέθοδο ελέγχου, μπορεί να «φτιάξει» ή να «χαλάσει» μια εφαρμογή. Μόλις καθοριστεί η κατανόηση των πλεονεκτημάτων και των μειονεκτημάτων και των ιδιοτήτων για την κάθε μια μέθοδο ελέγχου, τότε η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου για την εφαρμογή μας θα είναι πολύ απλή. Με τον όρο μέθοδοι ελέγχου εννοούμε τον τρόπο λειτουργίας του VFD για να μπορέσει να πετύχει τον επιθυμητό έλεγχο του κινητήρα και όχι την απλή συνδεσμολογία για εκκίνηση ή σταμάτημα του κινητήρα (τις μεθόδους οδήγησης τις αναλύσαμε σε προηγούμενο κεφάλαιο). Οι μέθοδοι ελέγχου που θα αναλύσουμε είναι πέντε (5), οι οποίοι χωρίζονται σε δύο κατηγορίες :

- Μέθοδοι κλιμακωτού ελέγχου (**Scalar Control Methods**)
- Διανυσματικοί μέθοδοι ελέγχου (**Vector Control Methods**)

Πριν προχωρήσουμε στην ανάλυση των διαφορών μεταξύ αυτών των μεθόδων, θα πρέπει να αναφέρουμε πως υπάρχει ένα κοινό και για της πέντε μεθόδους και αυτό είναι η λειτουργία της διαμόρφωσης εύρους παλμών (PWM), που αναλύσαμε σε προηγούμενο κεφάλαιο. Όλες οι μέθοδοι χρησιμοποιούν την διαμόρφωση αυτή για τον έλεγχο του κινητήρα, η διαφορά μεταξύ τους βρίσκεται στην διαδικασία που χρησιμοποιεί η κάθε μια για τον υπολογισμό της τάσης που χρειάζεται ο κινητήρας την εκάστοτε δεδομένη στιγμή.

### 4.3.1 Μέθοδοι κλιμακωτού ελέγχου (Scalar Control Methods)

➤ Μέθοδος ελέγχου V/f.

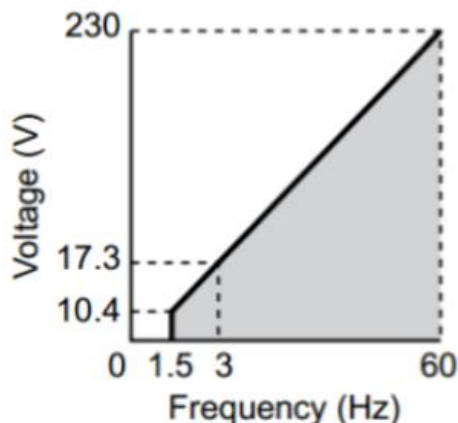


[Πηγή: ABB Drives, “Technical guide No.1, Direct Torque Control – The world’s most advanced AC drive technology”. 2011.]

Σχήμα 4.3.1<sup>α</sup> Βρόχος ελέγχου ενός AC drive με μέθοδο ελέγχου V/f και διαμόρφωση PWM.

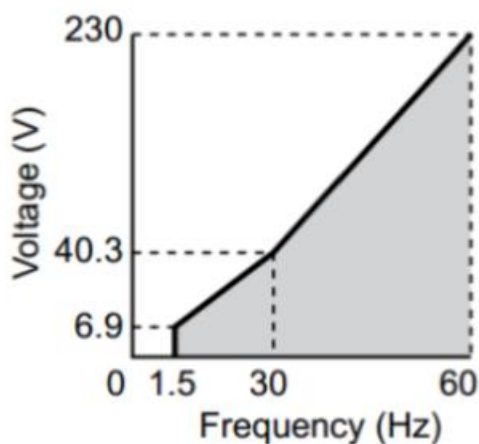
Η μέθοδος ελέγχου V/f (ή volts per hertz), μπορεί να θεωρηθεί ίσως η πιο απλή από τις μεθόδους ελέγχου. Χρησιμοποιείται συχνά λόγω της απλότητας της, το drive χρειάζεται πολύ λίγα δεδομένα από τον κινητήρα για τον έλεγχο, ακόμα και ο συντονισμός του drive με τον κινητήρα δεν είναι απαραίτητος αλλά είναι κάτι που συνιστάται. Ακόμα μπορεί να γίνει έλεγχος χωρίς την χρήση κάποιου κωδικοποιητή στον κινητήρα (encoder). Ο κωδικοποιητής είναι μια απλή ηλεκτρομηχανική συσκευή η οποία συνήθως τοποθετείται στο πίσω μέρος ενός κινητήρα και είναι συνδεδεμένη με τον άξονα του. Με την περιστροφή του άξονα παράγεται μια σειρά ηλεκτρικών παλμών ανα περιστροφή (PPR), που στην συνέχεια οι παλμοί μεταδίδονται πίσω στο VFD για ανατροφοδότηση της ταχύτητας του κινητήρα. Αυτή η μέθοδος δεν χρησιμοποιεί κωδικοποιητή και αυτό έχει ως αποτέλεσμα χαμηλότερο κόστος και λιγότερη καλωδίωση για την εγκατάσταση. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται όταν απαιτείται η λειτουργία σε υψηλές συχνότητες, ίσες ή και μεγαλύτερες των 1000 Hz. Συχνά έχει εφαρμογή σε εργαλειομηχανές και κυρίως εφαρμογές ανεμιστήρων μεταβλητής ροπής και αντλιών. Ένα ακόμα πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι, σε εφαρμογές που χρειαζόμαστε να ελέγξουμε πολλούς κινητήρες με την χρήση μόνο ενός drive μπορούμε να το πετύχουμε μόνο με χρησιμοποιώντας την μέθοδο αυτή. Όλοι οι κινητήρες θα έχουν την ίδια αναφορά ταχύτητας εφόσον θα είναι συνδεδεμένοι στο ίδιο drive, επομένως ο έλεγχος θα γίνει ταυτόχρονα (θα εκκινήσουν και θα σταματήσουν την ίδια στιγμή). Από την άλλη χρησιμοποιώντας την μέθοδο αυτή δεν είμαστε σίγουροι αν ο κινητήρας περιστρέφεται γιατί δεν πραγματοποιείται τέτοιου είδους έλεγχος. Επίσης η ροπή εκκίνησης του κινητήρα

περιορίζεται στο 150% στα 3 Hz, το οποίο δεν είναι απαραίτητος μειονέκτημα γιατί σε εφαρμογές μεταβλητής ροπής αυτή η ροπή είναι παραπάνω από αρκετή για την εκκίνηση του κινητήρα. Η ρύθμιση της ταχύτητας είναι συνήθως στο +/- 2 έως και 3% της μέγιστης συχνότητας και η ταχύτητα απόκρισης είναι στα 3 Hz. Η ταχύτητα απόκρισης ορίζεται από το πόσο καλά μπορεί να ανταποκριθεί το drive σε μια αλλαγή στην συχνότητα αναφοράς. Μια αύξηση στην ταχύτητα απόκρισης έχει ως αποτέλεσμα την ταχύτερη απόκριση του κινητήρα όταν αλλάζει η συχνότητα αναφοράς. Κάθε μέθοδος ελέγχου έχει επίσης μια κλίμακα ελέγχου της ταχύτητας το οποίο εκφράζεται ως αναλογία, δηλαδή το εύρος ελέγχου ταχύτητας που έχει η μέθοδος είναι 1:40. Αν πολλαπλασιάσουμε τον λόγο αυτό με την μέγιστη συχνότητα, μπορούμε να καθορίσουμε την ελάχιστη συχνότητα που μπορεί να έχει το drive και να διατηρεί ακόμα τον έλεγχο του κινητήρα. Για παράδειγμα με μια μέγιστη συχνότητα 60 Hz και 1:40 εύρος ελέγχου, ένα drive με την μέθοδο V/f μπορεί να ελέγξει έναν κινητήρα μέχρι τα 1,5 Hz. Το χαρακτηριστικό της μεθόδου αυτής είναι πως καθορίζεται η τάση εξόδου στον κινητήρα. Η μέθοδος αυτή βάσει της σχέσης V/f , ορίζεται μια αναλογία τάσης προς συχνότητα την οποία θα ακολουθήσει ο κινητήρας. Δηλαδή ορίζουμε την ταχύτητα αναφοράς στο drive και μια αντίστοιχη τάση θα φτάσει στον κινητήρα. Σε εφαρμογές που έχουμε φορτία μεταβλητής ροπής (ανεμιστήρες και αντλίες), θα πρέπει να ακολουθείται ένα πρότυπο της αναλογίας V/f , για να αποφύγουμε τυχόν σφάλματα και να μπορέσουμε να έχουμε αύξηση της αποδοτικότητας στο σύστημα μας. Για εφαρμογές που απαιτείται σταθερή ροπή, θα πρέπει να επιλέγεται μια αναλογία V/f που να μας δίνει σταθερή ροπή. Ο λόγος V/f όταν έχουμε φορτίο μεταβλητής ροπής, απαιτεί μειωμένο ρεύμα μαγνητισμού σε χαμηλότερες ταχύτητες προκειμένου να επιτευχθεί μεγαλύτερη απόδοση. Αντιθέτως ένα φορτίο σταθερής ροπής, απαιτεί πλήρες ρεύμα μαγνητισμού σε όλες τις ταχύτητες. Στο σχήμα 4.3.1<sup>β</sup>, φαίνεται η γραφική παράσταση δηλαδή μια ευθεία με σταθερή κλίση σε όλο το εύρος ταχύτητας για σταθερό φορτίο ροπής.



[Πηγή: WP.AFD.13, YASKAWA America, “Variable Frequency Drive Control Methods”.]

Σχήμα 4.3.1<sup>β</sup> Γραφική παράσταση του λόγου V/f για σταθερή ροπή.



[Πηγή: WP.AFD.13, YASKAWA America, “Variable Frequency Drive Control Methods”.]

Σχήμα 4.3.1<sup>γ</sup> Γραφική παράσταση του λόγου V/f για μεταβλητή ροπή.

➤ **Μέθοδος ελέγχου V/f με κωδικοποιητή (encoder).**

Στην περίπτωση που απαιτείται ελαφρώς καλύτερη ρύθμιση της ταχύτητας ενός κινητήρα, σε συνδυασμό με την δυνατότητα να μπορεί να λειτουργεί σε υψηλότερες συχνότητες αναφοράς (1000 Hz), τότε στην μέθοδο V/f που αναλύσαμε πιο πάνω θα προσθέσουμε και έναν κωδικοποιητή στον άξονα του κινητήρα. Η προσθήκη ενός κωδικοποιητή για ανατροφοδότηση στην μέθοδο V/f μπορεί να επιτύχει ρύθμιση της ταχύτητας μέχρι +/- 0,03% της μέγιστης συχνότητας. Η τάση εξόδου εξακολουθεί να καθορίζεται από τον λόγο V/f. Αυτό επιτρέπει τον υψηλής ταχύτητας έλεγχο χωρίς υψηλή δυναμική απόκριση, από την στιγμή που η τάση και η συχνότητα είναι προκαθορισμένες. Αυτή η μέθοδος ελέγχου δεν είναι πολύ συνηθισμένη, καθώς πρέπει επιπλέον να αγοραστεί ο κωδικοποιητής και μια

κάρτα ανάδρασης, άρα μεγαλώνει το κόστος χωρίς να έχουμε ιδιαίτερα πλεονεκτήματα έναντι της τυπικής μεθόδου ελέγχου V/f. Η ροπή εκκίνησης, η ταχύτητα απόκρισης και το εύρος ελέγχου της ταχύτητας είναι όμοια με την προαναφερόμενη μέθοδο V/f. Επίσης στην μέθοδο αυτή η υψηλότερη συχνότητα λειτουργίας περιορίζεται από το PPR (παλμών ανα περιστροφή) του κωδικοποιητή.

V/F CONTROL CHECKLIST		V/F WITH ENCODER CONTROL CHECKLIST	
ADVANTAGES	DISADVANTAGES	ADVANTAGES	DISADVANTAGES
Auto tuning not required (but recommended)	No guarantee motor shaft is responding due to lack of feedback	Auto tuning not required (but recommended)	Encoder and feedback card required
High Frequency Reference possible (>400 Hz)	Starting torque is 150% at 3Hz	High Frequency Reference possible (>400 Hz) but limited by encoder PPR	Starting torque is 150% at 3Hz
Several motors controlled from one VFD			
Simple closed-loop performance possible			
No encoder required		Better speed control than V/f control	
Good for motors with unknown data			
SPECS		SPECS	
Speed regulation: $\pm 2$ to 3% of max. frequency		Speed regulation: $\pm 0.03\%$ of max. frequency	
Speed response: 3 Hz		Speed response: 3 Hz	
Speed control range: 1:40		Speed control range: 1:40	
Output voltage determined by: V/f pattern		Output voltage determined by: V/f pattern	

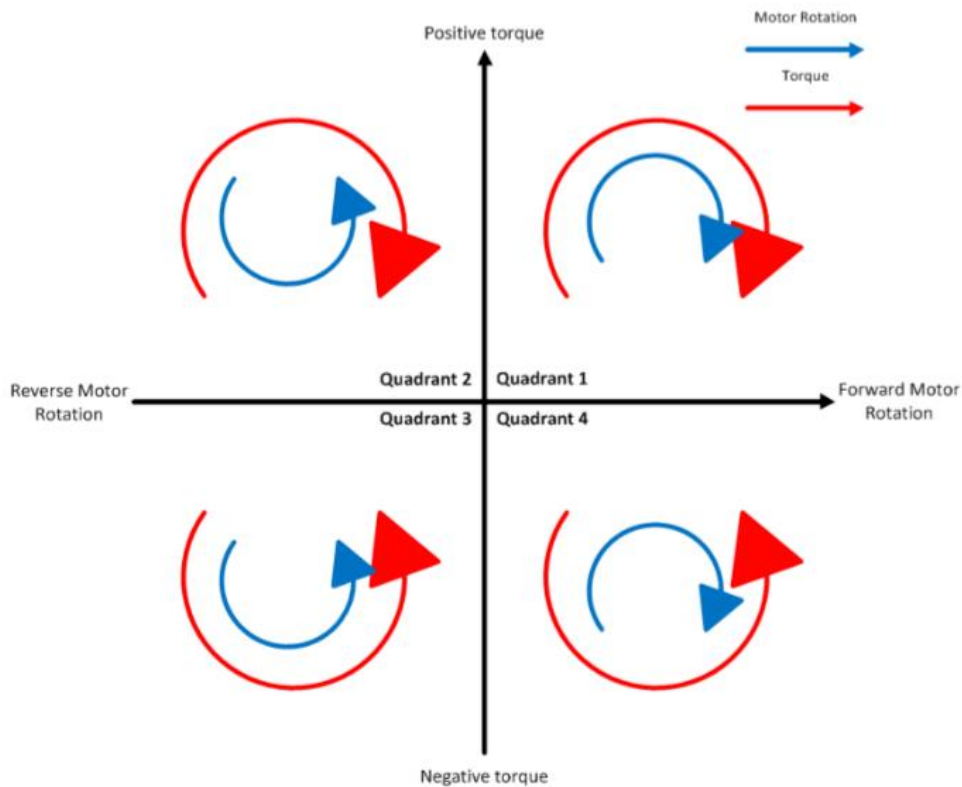
Πηγή: <https://www.machinedesign.com/motorsdrives/how-choose-right-control-method-vfds>

Σχήμα 4.3.1.2α Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των μεθόδων ελέγχου V/f & V/f με encoder.

### 4.3.2 Διανυσματικοί μέθοδοι ελέγχου (Vector Control Methods)

#### ➤ Διανυσματικός έλεγχος ανοικτού βρόχου (Open Loop Vector)

Αυτός ο έλεγχος είναι αρκετά διαφορετικός από την μέθοδο V/f που αναλύσαμε πιο πάνω. Όπως περιγράφει και το όνομα του, ανοικτός βρόχος σημαίνει ότι δεν χρησιμοποιείται κωδικοποιητής. Ο κύριος στόχος της μεθόδου αυτής είναι να επιτευχθεί μεγαλύτερος και πιο δυναμικός έλεγχος του κινητήρα. Ο διανυσματικός έλεγχος χρησιμοποιείται για να επιτευχθεί ανεξάρτητος έλεγχος της ταχύτητας και της ροπής ενός κινητήρα. Παρόμοιο με τον τρόπο ελέγχου ενός κινητήρα DC.

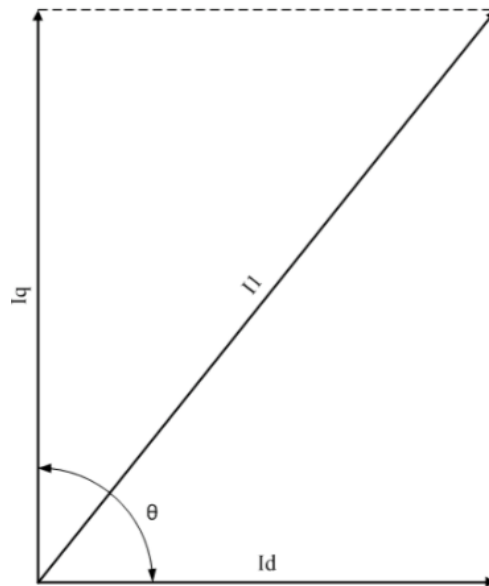


[Πηγή: WP.AFD.13, YASKAWA America, “Variable Frequency Drive Control Methods”.]

*Σχήμα 4.3.2<sup>α</sup> Η Μέθοδος διανυσματικού ελέγχου ανοικτού βρόχου, επιτρέπει την ρύθμιση των ορίων ροπής σε τέσσερα τεταρτημόρια.*

Κατα την εκτέλεση του ελέγχου αυτού, ο κινητήρας μπορεί να παράγει 200% ονομαστική ροπή στα 0.3 Hz. Η υψηλότερη ροπή εκκίνησης σε χαμηλότερες ταχύτητες ανοίγει την πόρτα για διάφορες εφαρμογές. Αυτή η μέθοδος ελέγχου επιτρέπει επίσης τη ρύθμιση των ορίων ροπής σε τέσσερα τεταρτημόρια. Τα όρια ροπής χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο για τον περιορισμό της ροπής του κινητήρα για την αποφυγή βλάβης σε εξοπλισμό, μηχανήματα ή σε

κάποιο προϊόν. Στρέφονται σε τέσσερα διαφορετικά τεταρτημόρια (σχήμα 4.3.2<sup>α</sup>) ανάλογα με την κατεύθυνση του κινητήρα (προς τα εμπρός ή προς τα πίσω) και αν ο κινητήρας κινείται ή βρίσκεται σε διαδικασία επανεκκίνησης. Ένα καπάκι μπουκαλιού που απαιτεί ένα όριο ροπής για να αποφευχθεί η υπερβολική στρέψη των καπακιών στις φιάλες, απαιτεί ρύθμιση ορίου ροπής για το τεταρτημόριο 1. Μια εφαρμογή εκτύλιξης υφάσματος, θα είχε περιστροφή κινητήρα προς τα εμπρός για τροφοδοσία της γραμμής, αλλά επίσης δημιουργείται μια αρνητική ροπή λόγω της τάσης που προκαλείται για να τεντώσει το ύφασμα. Αυτή η εφαρμογή απαιτεί ένα όριο ροπής που ορίζεται στο τεταρτημόριο 4. Εκτός από τα όρια ροπής, αυτή η μέθοδος ελέγχου έχει υψηλότερη ταχύτητα απόκρισης 10 Hz, η οποία επιτρέπει πιο δυναμική απόκριση στα φορτία πρόσκρουσης. Ένα παράδειγμα μιας εφαρμογής που μπορεί να έχει φορτία πρόσκρουσης θα ήταν ένας θραυστήρας πετρωμάτων. Το φορτίο αλλάζει διαρκώς ανάλογα με το μέγεθος και την ποσότητα των πετρωμάτων που υφίστανται επεξεργασία μέσω του θραυστήρα. Αυτό που κάνει τον έλεγχο διανύσματος ξεχωριστό και επιτρέπει τη λειτουργία υψηλής απόδοσης είναι το πώς το VFD καθορίζει την τάση εξόδου στον κινητήρα. Αντί για ένα σταθερό μοτίβο  $V / f$ , ο διανυσματικός έλεγχος ανοικτού βρόχου χρησιμοποιεί έναν διανυσματικό αλγόριθμο για να βρει την καλύτερη τάση εξόδου που απαιτείται για τη λειτουργία του κινητήρα. Ο έλεγχος διανυσμάτων επιτυγχάνει αυτό χρησιμοποιώντας ανατροφοδότηση του ρεύματος από τον κινητήρα. Βασικά μαθηματικά διανύσματα χρησιμοποιούνται για τον διαχωρισμό, των ρευμάτων μαγνητισμού των κινητήρων και του ρεύματος που παράγεται από την ροπή, σε διανύσματα. Δεδομένου ότι αυτή η μέθοδος ελέγχου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη δυναμική του κινητήρα, πρέπει να εκτελείται κάποιος τύπος αυτόματης αναγνώρισης του κινητήρα για να εξασφαλιστεί ότι το VFD έχει όσο το δυνατόν περισσότερα δεδομένα για τον κινητήρα που ελέγχει. Μετά την αυτόματη αναγνώριση του VFD για τον συνδεδεμένο κινητήρα, είναι τώρα δυνατός ο διανυσματικός έλεγχος. Με τη βοήθεια αξιόπιστων δεδομένων – παραμέτρων του κινητήρα, το VFD μπορεί τώρα να υπολογίσει το ρεύμα μαγνητισμού ( $I_d$ ) και το ρεύμα παραγωγής ροπής ( $I_q$ ). Αυτές οι τιμές είναι διανύσματα. Για μέγιστη απόδοση και ροπή στρέψης, το VFD πρέπει να διατηρεί αυτά τα δύο διανύσματα σε γωνία διαχωρισμού  $90^\circ$  μοίρες. Οι  $90^\circ$  μοίρες είναι σημαντικές για τον λόγο ότι το ημίτονο( $90^\circ$ ) = 1. Η τιμή 1, αντιπροσωπεύει τη μέγιστη ροπή του κινητήρα. (σχήμα 4.3.2<sup>β</sup>)



[Πηγή: WP.AFD.13, YASKAWA America, “Variable Frequency Drive Control Methods”.]

Σχήμα 4.3.2<sup>β</sup> Ο διανυσματικός έλεγχος πετυχαίνει την μέγιστη ροπή ανα ampere, κρατώντας την γωνία διαχωρισμού (90 °) μεταξύ Id και Iq.

Συνολικά, με την μέθοδο αυτή προκύπτει καλύτερος έλεγχος του κινητήρα χρησιμοποιώντας έναν διανυσματικό αλγόριθμο. Η ρύθμιση της ταχύτητας είναι στο +/- 0,2% της μέγιστης συχνότητας. Το εύρος ελέγχου της ταχύτητας μεταβαίνει σε 1:200, επιτρέποντας έτσι την λειτουργία σε χαμηλή ταχύτητα χωρίς να χαραμίζεται η παραγωγή της ροπής.

OPEN-LOOP VECTOR CONTROL CHECKLIST
Advantages
No encoder required
Good starting torque: 200% of rated torque at 0.3 Hz
Four-quadrant torque limits possible
Good for impact loads
Disadvantages
Auto-tuning required for best performance
No guarantee motor shaft is responding due to lack of feedback
Specs
Speed regulation: ± 0.2% of max. frequency
Speed response: 10 Hz
Speed control range: 1:200
Output voltage determined by: vector algorithm

[Πηγή: <https://www.machinedesign.com/motorsdrives/how-choose-right-control-method-vfds>]

Σχήμα 4.3.2<sup>γ</sup> Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της μεθόδου ελέγχου ανοικτού βρόχου.



### ➤ Διανυσματικός έλεγχος κλειστού βρόχου (Closed Loop Vector)

Η επόμενη μέθοδος ελέγχου που θα συζητήσουμε είναι πολύ υψηλής απόδοσης. Η μέθοδος ελέγχου κλειστού κυκλώματος βρόχου, χρησιμοποιεί έναν διανυσματικό αλγόριθμο για τον προσδιορισμό της τάσης εξόδου ακριβώς όπως η μέθοδος ανοικτού βρόχου. Η βασική τους διαφορά είναι πως τώρα είναι ενσωματωμένος και ένας κωδικοποιητής. Η ανατροφοδότηση του κωδικοποιητή σε συνδυασμό με τη μέθοδο ελέγχου διανύσματος επιτρέπει 200% ροπή εκκίνησης του κινητήρα σε 0 rpm. Αυτή η λειτουργία αποτελεί πολύ σημαντικό σημείο για εφαρμογές που απαιτούν τη διατήρηση φορτίου και τη μη κίνηση. Οι εφαρμογές αυτές μπορεί να είναι ανελκυστήρες, γερανοί και ανυψωτήρες.

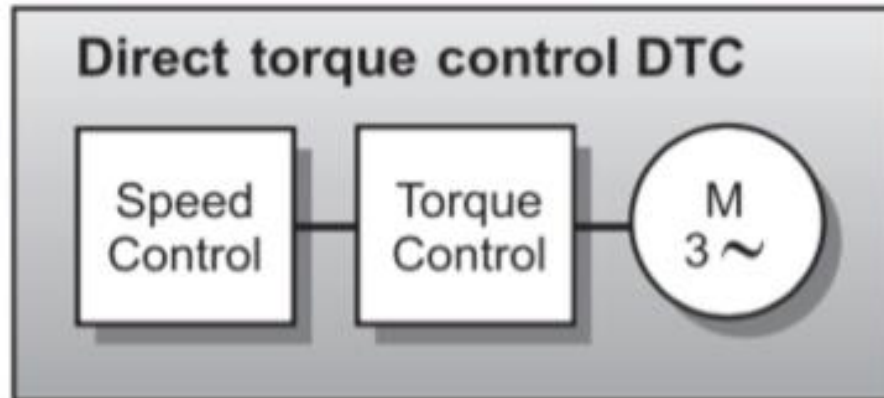
Η ανατροφοδότηση που μας παρέχει ο κωδικοποιητής επιτρέπει την υψηλότερη ταχύτητα απόκρισης, πάνω από 50 Hz, καθώς και μεγαλύτερο εύρος ελέγχου της ταχύτητας 1:1500. Εκτός από αυτές τις λειτουργίες υψηλής απόδοσης, η μέθοδος αυτή έχει επίσης τη δυνατότητα να «τρέχει» τον κινητήρα, σε λειτουργία ελέγχου ροπής. Ο τρόπος ελέγχου ροπής επιτρέπει στο VFD να ελέγχει άμεσα τη ροπή του κινητήρα αντί της ταχύτητας του κινητήρα. Αυτό είναι απαραίτητο για κάθε εφαρμογή όπου η ροπή στρέψης έχει προτεραιότητα έναντι της ταχύτητας.

CLOSED-LOOP VECTOR CONTROL CHECKLIST
Advantages
Can operate in torque-control mode
Excellent starting torque: 200% of rated torque at 0 rpm
For-quadrant torque limits possible
Best for impact loads
Zero-speed operation possible
Disadvantages
Auto-tuning required for best performance
Encoder and feedback card required
Specs
Speed regulation: $\pm 0.02\%$ of max. frequency
Speed response: >50 Hz
Speed control range: 1:1,500
Output voltage determined by: vector algorithm

[Πηγή: <https://www.machinedesign.com/motorsdrives/how-choose-right-control-method-vfds/>]

Σχήμα 4.3.2<sup>δ</sup> Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της μεθόδου ελέγχου κλειστού βρόχου.

➤ Άμεσος έλεγχος ροπής (Direct Torque Control-DTC)



[Πηγή: ABB Drives, "Technical guide book" Technical Manual, 2014.]

Σχήμα 4.3.2<sup>ε</sup> Βρόχος ελέγχου ενός AC drive με την μέθοδο ελέγχου DTC.

Η μέθοδος αυτή αναπτύχθηκε και παρουσιάστηκε για πρώτη φορά από την εταιρεία ABB το 1988. Ο έλεγχος επιτυγχάνεται χωρίς να υπάρχει βρόχος ανατροφοδότησης από τον κινητήρα στο VFD, αλλά χρησιμοποιεί την θεωρία των κινητήρων για τον υπολογισμό της ροπής του κινητήρα απευθείας, χωρίς να γίνεται η χρήση διαμόρφωσης. Οι μεταβλητές που ελέγχει είναι η ροή του μαγνητικού πεδίου (motor magnetizing flux) και η ροπή του κινητήρα (motor torque). Χρησιμοποιώντας την μέθοδο αυτή δεν χρειάζεται να υπάρχει κάποιος αισθητήρας για μέτρηση της ταχύτητας ή κάποιος κωδικοποιητής που να αναφέρει την ταχύτητα ή την θέση του άξονα του κινητήρα για οποιαδήποτε χρονική στιγμή. Η μέθοδος DTC χρησιμοποιεί εξοπλισμό για την επεξεργασία του ψηφιακού σήματος σε υψηλή ταχύτητα, σε συνδυασμό με μια προηγμένη μαθηματική μοντελοποίηση της λειτουργίας του κινητήρα. Το αποτέλεσμα είναι να έχουμε ένα VFD με απόκριση ροπής συνήθως 10 φορές πιο γρήγορη από οποιαδήποτε άλλο drive AC ή DC. Η δυναμική ακρίβεια της ταχύτητας των μονάδων που χρησιμοποιούν την μέθοδο DTC, είναι 8 φορές καλύτερη από οποιαδήποτε άλλη μέθοδο ανοικτού βρόχου ενός AC drive ή ακόμα και σε σύγκριση με ένα drive συνεχούς ρεύματος (DC) που διαθέτει και βρόχο ανατροφοδότησης.

Η δομή ελέγχου της μεθόδου DTC, μοιάζει με την δομή ελέγχου ενός drive συνεχούς ρεύματος (DC) με κάποιες όμως σημαντικές διαφορές. Αφενός και οι δυο μέθοδοι χρησιμοποιούν πραγματικές παραμέτρους του κινητήρα για να μπορέσουν να επιτύχουν άμεσα έλεγχο της ροπής, με την διαφορά ότι στην μέθοδο DTC δεν χρησιμοποιείται κάποια συσκευή ανατροφοδότησης από τον κινητήρα. (σχήμα 4.3.2<sup>στ</sup>)

DRIVE	CONTROL VARIABLES
DC DRIVES	Armature Current, $I_A$ Magnetising Current, $I_M$
AC DRIVES (PWM)	Output Voltage, $U$ Output Frequency, $f$
Direct Torque Control	Motor Torque, $T$ Motor Magnetising Flux, $\Psi$

[Πηγή: ABB Drives, "Technical guide book" Technical Manual, 2014.]

Σχήμα 4.3.2<sup>στ</sup> Πίνακας σύγκρισης των μεταβλητών ελέγχου.

Η μέθοδος DTC σε σύγκριση με τις άλλες μεθόδους ελέγχου (V/f, Vector Control) εμφανίζει αρκετές διαφορές, η κύρια είναι πως στην μέθοδο αυτή δεν χρησιμοποιείται διαμορφωτής. Στις μεθόδους που χρησιμοποιείται διαμόρφωση εύρους παλμών οι μεταβλητές που ελέγχονται είναι η συχνότητα και η τάση που όπως είδαμε περνάνε από διάφορα στάδια πριν εφαρμοστούν στον κινητήρα. Επομένως στις μεθόδους που χρησιμοποιείται διαμόρφωση εύρους παλμών, ο έλεγχος γίνεται μέσα στον ηλεκτρονικό ελεγκτή και όχι μέσα στον κινητήρα όπως γίνεται όταν χρησιμοποιούμε την μέθοδο DTC.

Τα κυρία οφέλη της μεθόδου DTC είναι:

- **Η απόκριση της ροπής**, δηλαδή πόσο γρήγορα μπορεί να ελεγχθεί η ροπή από μηδενική μέχρι και την ονομαστική ταχύτητα. Η τυπική απόκριση ροπής είναι 1 έως 2 ms κάτω από τα 40 Hz, σε σύγκριση με 10-20 ms τόσο για τις διανυσματικές μεθόδους όσο και για τους κινητήρες συνεχούς ρεύματος που διαθέτουν κωδικοποιητή. Με τις μονάδες PWM ανοικτού βρόχου ο χρόνος απόκρισης είναι συνήθως πολύ μεγαλύτερος από 100 ms. Στην πραγματικότητα, με την απόκριση ροπής, το drive έχει επιτύχει το φυσικό όριο. Με την διαθέσιμη τάση και ρεύμα, ο χρόνος απόκρισης δεν μπορεί να είναι μικρότερος. Ακόμη και στις νεότερες μονάδες που λειτουργούν "χωρίς αισθητήρες", η απόκριση ροπής είναι εκατοντάδες χιλιοστά του δευτερολέπτου.
- **Ο Ακριβής έλεγχος ροπής σε χαμηλές συχνότητες**, καθώς και η ροπή σε συνθήκες πλήρους φορτίου σε μηδενική ταχύτητα, χωρίς την ανάγκη για συσκευή ανατροφοδότησης όπως κωδικοποιητή ή ταχύμετρο. Με το DTC, η ταχύτητα μπορεί

να ρυθμιστεί σε συχνότητες κάτω από 0,5 Hz και εξακολουθεί να παρέχει 100% ροπή στρέψης μέχρι τη μηδενική ταχύτητα.

- **Η Επαναληψιμότητα της ροπής:** Δηλαδή το πόσο καλά ο κινητήρας επαναλαμβάνει τη ροπή εξόδου, με την ίδια ροπή αναφοράς. Η μέθοδος DTC, χωρίς κωδικοποιητή, μπορεί να παρέχει επαναληψιμότητα ροπής 1 έως 2 % της ονομαστικής ροπής σε ολόκληρο το εύρος στροφών. Αυτό είναι το μισό σε σχέση με αυτό που μπορούν να πετύχουν οι υπόλοιπες μέθοδοι ελέγχου ανοικτού βρόχου (AC) , και ίσο με αυτό που πετυχαίνουν οι μέθοδοι κλειστού βρόχου (AC).
- **Η Ακρίβεια της στατικής ταχύτητας του κινητήρα:** Το σφάλμα μεταξύ της ταχύτητας αναφοράς και της πραγματικής τιμής της ταχύτητας σε σταθερό φορτίο. Η ακρίβεια της ταχύτητας είναι το 10% της ολίσθησης του κινητήρα, η οποία για κινητήρα 11 kW ισοδυναμεί με το 0.3%. Με κινητήρα 110 kW, η ακρίβεια της ταχύτητας είναι 0,1% χωρίς κωδικοποιητή (σε ανοιχτό βρόχο πάντα). Αυτό ικανοποιεί την απαίτηση ακρίβειας στο 95% των εφαρμογών βιομηχανικών. Για να επιτύχουμε την ίδια ακρίβεια από τις μονάδες συνεχούς ρεύματος απαιτείται ένας κωδικοποιητής. Αντιθέτως, για drive που χρησιμοποιούν την διαμόρφωση PWM, η ακρίβεια της στατικής ταχύτητας κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 1 και 3%. Έτσι, οι δυνατότητες βελτίωσης μιας διαδικασίας είναι πιο εύκολο να γίνει με την μέθοδο DTC. Μια μονάδα DTC που χρησιμοποιεί έναν κωδικοποιητή με 1024 παλμούς ανα περιστροφή μπορεί να επιτύχει ακρίβεια ταχύτητας στο 0,01%.
- **Η Δυναμική ακρίβεια της ταχύτητας:** Δηλαδή το χρονικό ολοκλήρωμα της απόκλισης της ταχύτητας όταν εφαρμόζεται ονομαστική ταχύτητα ροπής (100%). Η δυναμική ακρίβεια της ταχύτητας της μεθόδου DTC είναι μεταξύ 0,3 και 0,4% δευτερόλεπτα. Αυτό βέβαια εξαρτάται από τα περιθώρια κέρδους του ελεγκτή, το οποίο μπορεί να προσαρμοστεί στις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής. Στις υπόλοιπες μεθόδους ελέγχου ανοικτού βρόχου, η δυναμική ακρίβεια είναι οκτώ φορές μικρότερη, περίπου 3% sec. Εάν έχουμε την μέθοδο DTC μαζί με κωδικοποιητή, θα έχουμε δυναμική ακρίβεια ταχύτητας στο 0,1% sec.

<b>FEATURE</b>	<b>RESULT</b>	<b>BENEFIT</b>
Rapid control DC link voltage.	Power loss ride through.	Drive will not trip. Less down time. Avoids process interruptions. Less waste in continuous process.
Automatic start (Direct restart).	Starting with motor residual inductance present. No restarting delay required.	Can start into a motor that is running without waiting for flux to decay. Can transfer motor from line to drive. No restart. No interruptions on process.
Automatic start (Flying start).	Synchronises to rotating motor.	No process interruptions. Smooth control of machinery. Resume control in all situations.
Flux braking.	Controlled braking between two speed points.	Investment cost savings. Better process control. No delay required as in DC braking. Can be used for decelerating to other than zero speed. Reduced need for brake chopper and resistor.
Flux optimization.	Motor losses minimised. Less motor noise.	Controlled motor.
Self identification/ Auto-tuning.	Tuning the motor to drive for top performance.	Easy and accurate set-up. No parameter tuning required. Less commissioning time. Guaranteed starting torque. Easy retrofit for any AC system.
No predetermined switching pattern of power devices.	Low noise. No fixed carrier, therefore acoustic noise reasonable due to "white" noise spectrum.	Cost savings in acoustic barriers in noise sensitive applications. No harmful mechanical resonances. Lower stresses in gearboxes, fans, pumps.
No limits on maximum acceleration and deceleration rate.	Can accelerate and decelerate in quickest time possible without mechanical constraints.	Better process control.

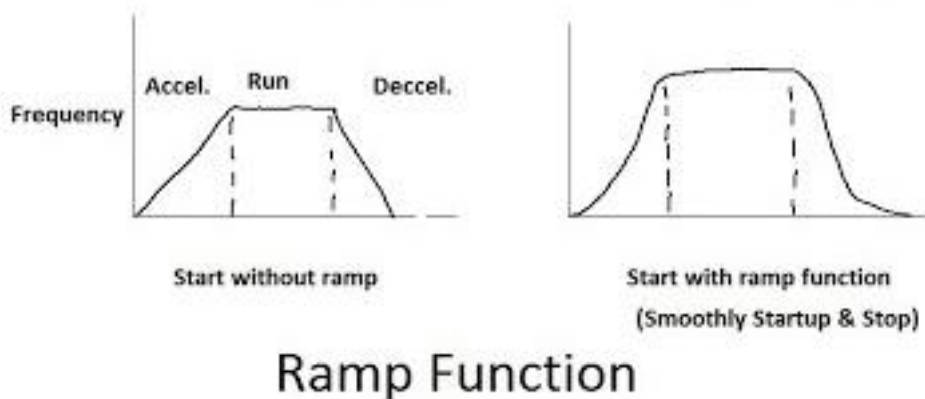
[Πηγή: ABB Drives, "Technical guide book" Technical Manual, 2014.]

Σχήμα 4.3.2<sup>ζ</sup> Χαρακτηριστικά και οφέλη που μας προσφέρει η τεχνολογία DTC

Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου ελέγχου για μια εφαρμογή θα επιτρέψει στον κινητήρα να λειτουργεί πιο αποτελεσματικά, μεγιστοποιώντας παράλληλα την παραγωγή ροπής και τη συνολική απόδοση. Ένας πιο αποτελεσματικός κινητήρας θα οδηγήσει σε λιγότερη κατανάλωση ενέργειας, μικρότερο χρόνο διακοπής λειτουργίας και υψηλότερη συνολική εξοικονόμηση.

### 4.3.3 Παράμετροι ενός VFD

Γενικά, υπάρχουν εκατοντάδες παράμετροι λειτουργίας σε ένα VFD για επιλογή. Στην πρακτική εφαρμογή, δεν είναι απαραίτητο να ορίσουμε κάθε παράμετρο, οι περισσότερες παράμετροι μπορούν να διατηρηθούν στις προεπιλεγμένες εργοστασιακές ρυθμίσεις. Στην συνέχεια θα αναφέρουμε μερικές από τις πιο σημαντικές παραμέτρους που χρειάζεται να ρυθμίσουμε σχεδόν σε κάθε εφαρμογή.



Σχήμα 4.3.3<sup>a</sup> Εκκίνηση κινητήρα με λειτουργία ράμπας

- **Χρόνος επιτάχυνσης και επιβράδυνσης. (Acceleration/deceleration time)**

Ο χρόνος επιτάχυνσης είναι ο χρόνος που απαιτείται για την συχνότητα εξόδου του drive να φτάσει από 0 Hz έως τη μέγιστη συχνότητα. Ο χρόνος επιβράδυνσης είναι το αντίθετο, δηλαδή από τη μέγιστη συχνότητα που έχει φτάσει να πέσει σε 0 Hz. Συνήθως χρησιμοποιείται το σήμα της συχνότητας (χρόνος ανόδου και χρόνος καθόδου) για να καθοριστεί ο χρόνος επιτάχυνσης και επιβράδυνσης. Χρειάζεται να περιοριστεί ο ρυθμός ανύψωσης της συχνότητας στην επιτάχυνση κατά την περίοδο εκκίνησης του ηλεκτροκινητήρα, προκειμένου να αποφευχθεί η υπέρταση και να περιοριστεί ο ρυθμός μείωσης της συχνότητας, προκειμένου να αποφευχθεί η υπερένταση κατά την περίοδο επιβράδυνσης.

Ρυθμίζοντας τον χρόνο επιτάχυνσης, περιορίζουμε το ρεύμα εκκίνησης ή επιτάχυνσης σε πιο χαμηλό όριο από αυτό που έχει το drive για προστασία σε περιπτώσεις υπέρτασης για να μην προκαλέσει την απενεργοποίηση του VFD. Ρυθμίζοντας τον χρόνο επιβράδυνσης είναι για να αποφευχθεί η υπερβολική τάση στο κύκλωμα εξομάλυνσης (DC Link), και η υπέρταση αυτή προκαλέσει την απενεργοποίηση του VFD. Οι χρόνοι αυτοί μπορούν να υπολογιστούν ανάλογα με το φορτίο, αλλά η πρακτική εμπειρία μας λέει πως είναι καλύτερο να ορίσουμε μεγαλύτερο χρόνο επιτάχυνσης/επιβράδυνσης κατά την ρύθμιση, για να διαπιστώσουμε εάν υπάρχουν κίνδυνοι υψηλών ρευμάτων ή υπερβολικής τάσης κατά την έναρξη / διακοπή του ηλεκτρικού κινητήρα. Στη συνέχεια, συντομεύουμε τους χρόνους αυτούς ώστε να έχουμε λειτουργία χωρίς κινδύνους υπέρτασης, αν επαναλάβουμε αρκετές φορές τις δοκιμές μπορούμε να καθορίσουμε τον καλύτερο χρόνο επιτάχυνσης και επιβράδυνσης της εκάστοτε εφαρμογής.

- **Ενίσχυση της ροπής. (Torque boosting)**

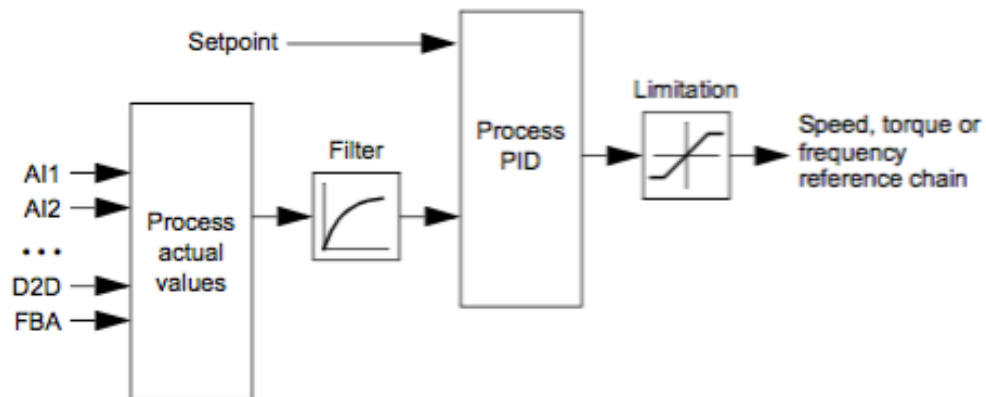
Η παράμετρος αυτή είναι επίσης γνωστή ως αντιστάθμιση της ροπής, δηλαδή η αντιστάθμιση στην μείωση της ροπής που έχουμε σε χαμηλές στροφές η οποία προκύπτει από την αντίσταση που δημιουργείται στον στάτη ενός κινητήρα εναλλασσόμενου ρεύματος, επιτυγχάνεται αυξάνοντας το εύρος των χαμηλών συχνοτήτων V/f. Επιτρέπει στην τάση κατά την επιτάχυνση να ανεβαίνει αυτόματα για να αντισταθμίζει την ροπή εκκίνησης όταν είναι ρυθμισμένη στο αυτόματο(AUTO), για να εξασφαλίσει την ομαλή επιτάχυνση του ηλεκτροκινητήρα. Ρυθμίζοντας το στην χειροκίνητη αντιστάθμιση, μπορείτε να αποκτήσετε καλύτερη καμπύλη μέσω δοκιμών σύμφωνα πάντα με τα χαρακτηριστικά του φορτίου, και πιο συγκεκριμένα τα χαρακτηριστικά εκκίνησης του φορτίου. Για μεταβλητά φορτία ροπής (ανεμιστήρες, αντλίες), η τάση εξόδου μπορεί να είναι υπερβολικά υψηλή σε χαμηλές ταχύτητες αν γίνουν λανθασμένες ρυθμίσεις, και να προκαλέσουμε άσκοπη σπατάλη ενέργειας.

- **Ηλεκτρονική προστασία από υπερφόρτωση. (Electronic thermal overload protection)**

Αυτή η λειτουργία ρυθμίζεται για να προστατεύσει τον ηλεκτροκινητήρα από υπερθέρμανση, υπολογίζει την αύξηση της θερμοκρασίας του μοτέρ AC από την CPU εσωτερικά του VFD, με βάση του ρεύματος λειτουργίας και της συχνότητας, ώστε να



επιτρέπει την προστασία από υπερθέρμανση. Αυτή η λειτουργία ισχύει μόνο στην περίπτωση που ένα VFD οδηγεί μόνο ένα μοτέρ, στην περίπτωση που ένα VFD ελέγχει πάνω από ένα μοτέρ θα πρέπει να εγκατασταθεί θερμικό ρελέ σε κάθε μοτέρ. Η τιμή ρύθμισης της ηλεκτρονικής θερμικής προστασίας (%) είναι ίση με το ονομαστικό ρεύμα του ηλεκτρικού κινητήρα προς το ονομαστικό ρεύμα εξόδου επί της εκατό.



[Πηγή: ABB Industrial Drives, “ACS880 Primary Control Program”, Firmware Manual.]

Σχήμα 4.3.3<sup>β</sup> VFD παραμετροποίηση PID & limitation

- **Περιορισμός συχνότητας. (Frequency limitation)**

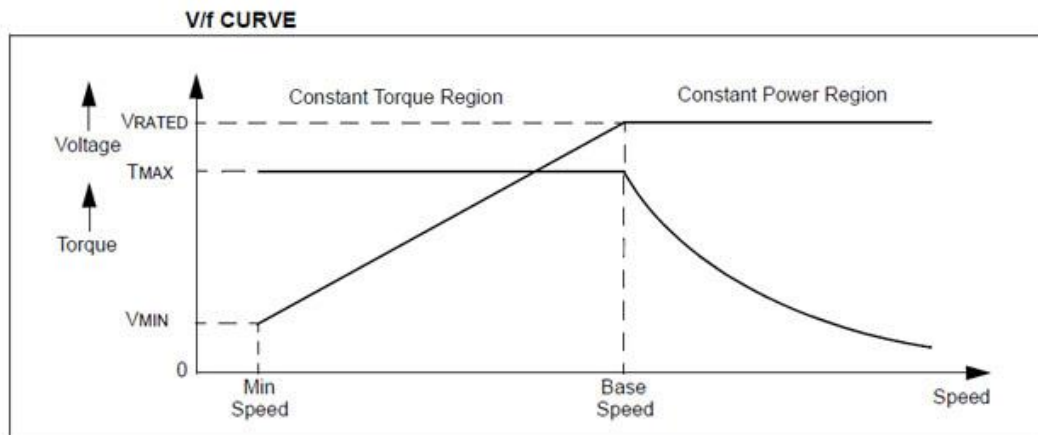
Περιορισμός της μέγιστης και της ελάχιστης τιμής της συχνότητας εξόδου. Ο περιορισμός της συχνότητας γίνεται για να αποφευχθεί η αποτυχία της λανθασμένης λειτουργίας ή για την αποφυγή ζημιών, από υπερβολικά υψηλή ή πολύ χαμηλή συχνότητα εξόδου, στις συσκευές που είναι συνδεδεμένες. Αυτή η παράμετρος μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για τον περιορισμό της ταχύτητας, όπως για παράδειγμα ένας ταινιόδρομος που δεν μεταφέρει τόσα πολλά υλικά, με την χρήση VFD μπορεί να μειώσει την ταχύτητα του κινητήρα άρα και την φθορά των μηχανών και των μάντων. Το drive ρυθμίζει την μέγιστη συχνότητα εξόδου σε μια συγκεκριμένη τιμή, αυτό επιτρέπει στον ταινιόδρομο να λειτουργεί σε μια κατάσταση σταθερής και χαμηλής ταχύτητας.

- **Ρύθμιση της απόκλισης της συχνότητας. (Deviation frequency)**

Ο σκοπός της είναι όταν η συχνότητα ρυθμίζεται από ένα εξωτερικό αναλογικό σήμα (τάση ή ρεύμα), χρησιμοποιείται η λειτουργία αυτή για να ρυθμιστεί η τιμή της



συχνότητας εξόδου όταν το εξωτερικό σήμα ρυθμίζει την συχνότητα σε ελάχιστη τιμή. Σε ορισμένα drive, η τιμή απόκλισης είναι από 0 έως  $f_{max}$  όταν το σήμα ρύθμισης συχνότητας είναι 0%. Κατά τη διαδικασία ρύθμισης του drive, όταν το σήμα ρύθμισης της συχνότητας είναι 0%, η συχνότητα εξόδου του VFD δεν θα είναι 0 Hz αλλά X Hz, οπότε η συχνότητα απόκλισης θα πρέπει να ρυθμιστεί σε αρνητική τιμή -X Hz για να μπορέσει να ενεργοποιηθεί η (0 Hz) συχνότητα εξόδου του drive.



[Πηγή: [http://lhp.co.in/images/img\\_vfd\\_11.jpg](http://lhp.co.in/images/img_vfd_11.jpg)]

Σχήμα 4.3.3' V/f curve

- **Όριο ροπής. (Torque limit)**

Μπορεί να χωριστεί σε περιορισμό της ροπής οδήγησης και περιορισμό της ροπής πέδης. Βασίζεται στις τιμές της τάσης εξόδου και ρεύματος ενός VFD και υπολογίζει τη ροπή. Η λειτουργία περιορισμού της ροπής μπορεί να επιτύχει αυτόματο έλεγχο επιτάχυνσης και επιβράδυνσης. Αν υποθέσουμε ότι ο χρόνος επιβράδυνσης είναι μικρότερος από τον χρόνο αδράνειας του φορτίου, μπορεί επίσης να εξασφαλίσει ότι ο κινητήρας επιταχύνεται και επιβραδύνεται αυτόματα σύμφωνα με τη ροπή που έχει ρυθμιστεί.

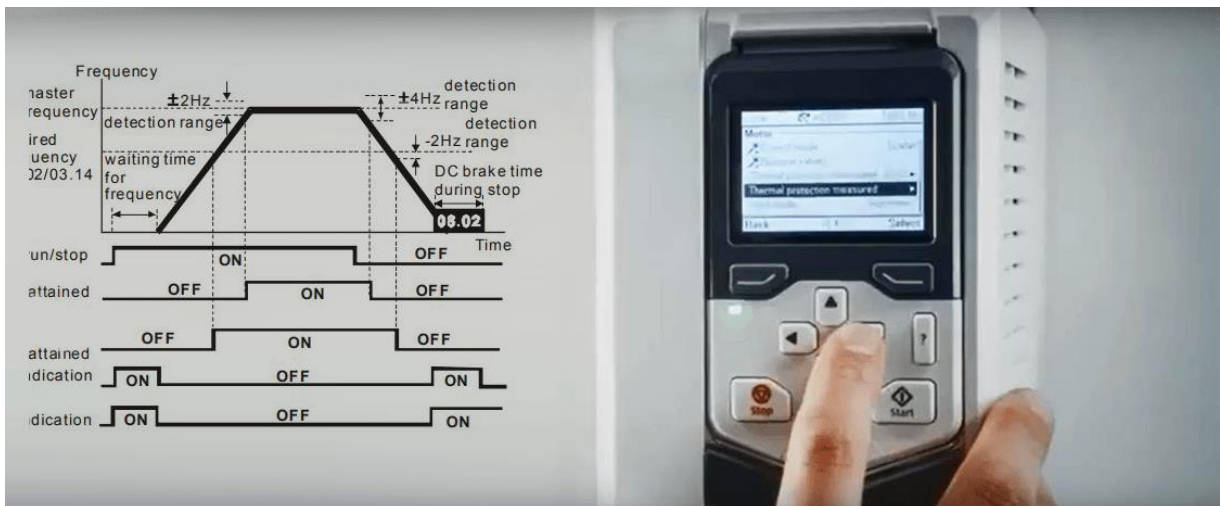
Η παράμετρος αυτή παρέχει μια ισχυρή ροπή εκκίνησης σε περιπτώσεις σταθερής κατάστασης, επίσης ελέγχει την ολίσθηση του κινητήρα και περιορίζει τη ροπή του κινητήρα εντός των ορίων που έχουμε ρυθμίσει.

Όταν η ροπή του φορτίου αυξάνεται ξαφνικά και ο χρόνος επιτάχυνσης είναι μικρός, δεν θα προκαλέσουν την απενεργοποίηση του drive. Όταν ο χρόνος επιτάχυνσης είναι πολύ μικρός, η ροπή του κινητήρα επίσης δεν θα υπερβεί την μέγιστη ρυθμισμένη τιμή. Η μεγάλη ροπή είναι καλύτερη για την εκκίνηση, η σωστή ρύθμιση του είναι

στο 80% με 100%. Όσο μικρότερη είναι η τιμή της ροπής πέδησης, τόσο μεγαλύτερη θα είναι και η δύναμη πέδησης, αυτή η ρύθμιση είναι κατάλληλη για εφαρμογές γρήγορης επιβράδυνσης.

- **Επιλογή λειτουργίας επιτάχυνσης/επιβράδυνσης (Acc/Dec mode selection)**

Επίσης γνωστή ως επιλογή καμπύλης. Το VFD έχει τρεις επιλογές για την καμπύλη λειτουργίας: γραμμική, μη γραμμική και καμπύλη S. Συνήθως οι περισσότεροι επιλέγουν την γραμμική καμπύλη, η μη γραμμική καμπύλη είναι κατάλληλη για μεταβλητά φορτία ροπής, όπως οι ανεμιστήρες κ.λπ. Η καμπύλη S είναι κατάλληλη για σταθερά φορτία ροπής, εδώ η επιτάχυνση και η επιβράδυνση αλλάζουν σχετικά αργά. Για να επιλέξετε την σωστή καμπύλη, θα πρέπει να ρυθμίσετε το drive σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά της ροπής του φορτίου. Βέβαια υπάρχουν και εξαιρέσεις, μπορεί να χρησιμοποιήσετε την μη γραμμική καμπύλη σε έναν ανεμιστήρα και το drive να απενεργοποιείται συνεχώς. Αν το αλλάξετε σε καμπύλη S μπορεί να λειτουργήσει μια χαρά. Ο λόγος είναι ότι ο ανεμιστήρας περιστρέφεται από μόνος του πριν ξεκινήσει λόγω της ροής των καυσαερίων. Όταν περιστρέφεται αντίστροφα προκύπτει αντίστροφο φορτίο, έχοντας επιλέξει την καμπύλη S, η συχνότητα αυξάνεται πιο αργά κατά την εκκίνηση αλλά αποφεύγοντας τη διακοπή του drive.

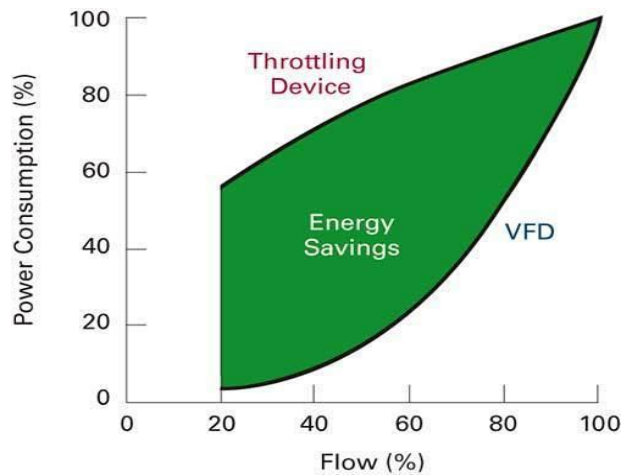


[Πηγή: ABB Industrial Drives, “ACS880 Primary Control Program”, Firmware Manual.]

Σχήμα 4.3.3<sup>δ</sup> VFD τοπικός χειρισμός (local control)

- **Επιλογή της μεθόδου ελέγχου, που αναλύσαμε στην προηγούμενη ενότητα.**  
Αναλόγως το σύστημα που έχουμε και τον βαθμό ελέγχου που θέλουμε να έχουμε, επιλέγουμε την μέθοδο ελέγχου που θέλουμε να έχουμε.
- **Βαθμονόμηση των παραμέτρων του ελεγκτή PID.**  
Τα περισσότερα VFD διαθέτουν ενσωματωμένο ελεγκτή PID, ώστε να παρέχουν μια εναλλακτική επιλογή που επιτρέπει τον ακριβή έλεγχο της διαδικασίας μέσω ενός ελεγκτή PID. Θα πρέπει να ορίσουμε τις επιθυμητές τιμές καθώς και τις πραγματικές τιμές που έχουμε, ο PID που διαθέτει το VFD επιτρέπει τον έλεγχο της διαδικασίας χωρίς άλλα εξαρτήματα. Με αυτόν τον τρόπο, η πίεση, η ροή όγκου ή ο έλεγχος της ταχύτητας μπορούν να εφαρμοστούν εύκολα.

Γενικά τα VFD λειτουργούν με έναν παράγοντα υψηλής απόδοσης. Οποιοσδήποτε κινητήρας επαγωγής έχει χαμηλό συντελεστή ισχύος περίπου στο μισό και τρία τέταρτα του φορτίου (0,75 έως 0,85). Αυτό μειώνει πραγματικά τη διάρκεια ζωής του κινητήρα, επειδή αυτή η άσκοπη αύξηση του ρεύματος προκαλεί την υπερθέρμανση των τυλιγμάτων του κινητήρα. Με την χρήση VFD παρακάμπτουμε αυτό το πρόβλημα γιατί μεταβάλλουμε την συχνότητα του φορτίου κάτω από την θεμελιώδη. Ο πιο προφανής λόγος για την χρήση VFD είναι ο έλεγχος της ταχύτητας. Αυτό γίνεται συνήθως γιατί το απαιτεί η διαδικασίες του συστήματος αλλά και για τον λόγο ότι έχει μεγάλα οικονομικά οφέλη. Ένα οικονομικό όφελος προέρχεται από τη μείωση της συντήρησης των κινητήρων με τη χρήση ενός VFD. Ειδικά σε εφαρμογές όπου έχουμε αντλίες και ανεμιστήρες τα οικονομικά οφέλη που προκύπτουν από την χρήση VFD είναι πολύ μεγάλα. Η ισχύς που καταναλώνει η αντλία ή ο ανεμιστήρας είναι ανάλογη με τον κύβο της ταχύτητας. Αυτό σημαίνει ότι εάν σε μια εφαρμογή μπορεί ο ανεμιστήρας να λειτουργεί στο 80% της πλήρους ταχύτητας, θεωρητικά χρησιμοποιεί το 51% της ισχύος του πλήρους φορτίου.



[Πηγή: <https://www.indiamart.com/proddetail/vfd-energy-savings-concept-19975726997.html>]

Σχήμα 4.3.3<sup>ε</sup> VFD εξοικονόμηση ενέργειας

Τα VFD βελτιστοποιούν επίσης τα χαρακτηριστικά εκκίνησης του κινητήρα. Μεταφέρουν γρήγορα τους κινητήρες σε πλήρη ταχύτητα και αντλώντας μόνο 100% έως 150% του πλήρους φορτίου. Αυτό το πετυχαίνουν με τη διαχείριση της μαγνητικής ροής ενός επαγωγικού κινητήρα. Η μαγνητική ροή είναι άμεσα ανάλογη προς την τάση και αντιστρόφως ανάλογη προς τη συχνότητα. Διατηρώντας τη ροή σταθερή, το ρεύμα εισόδου δεν υπερβαίνει την ονομαστική τιμή πλήρες φορτίου του κινητήρα και διατηρείται η πλήρης ροπή. Πρόκειται για μια σημαντική βελτίωση για μια ομαλή εκκίνηση, η οποία έχει σημαντικά προβλήματα πτώσης τάσης και δεν μπορεί να ξεκινήσει με πλήρες φορτίο.

Επίσης κάτι σημαντικό, είναι πως μας δίνεται η δυνατότητα να έχουμε σταθερή ροπή στην έξοδο ενός VFD. Έχουμε σταθερή ροπή και σταθερή ιπποδύναμη. Η περιοχή σταθερής ροπής είναι αρκετά αυτονόητη, το VFD ρυθμίζει τη ροή έτσι ώστε το ρεύμα να είναι σταθερό. Μόλις το VFD ξεπεράσει την ονομαστική συχνότητα του συστήματος, η τάση δεν μπορεί να αυξηθεί λόγω των φυσικών περιορισμών του συστήματος. Επειδή η τάση είναι στατική - και η συχνότητα αυξάνεται - η ροή αναγκάζεται να μειωθεί. Όταν συμβαίνει αυτό, το ρεύμα και η ροπή στρέψης αναγκάζονται να μειωθούν επίσης. Αυτό ονομάζεται αποδυνάμωση πεδίου. Εκτός από αυτή τη δυνατότητα, τα VFD μπορούν επίσης να λάβουν στην είσοδο τους οποιαδήποτε μορφή ισχύος, είτε πρόκειται για μονοφασικό εναλλασσόμενο ρεύμα, τριφασικό εναλλασσόμενο ρεύμα ή συνεχές (DC). Τα drive που τροφοδοτούνται από μια πηγή συνεχούς ρεύματος εξακολουθούν να τροφοδοτούν φορτίο εναλλασσόμενου ρεύματος απλά χωρίς την ύπαρξη ανορθωτή στο εσωτερικό τους.

## Obtain Even More Energy Savings by Using Drives on Variable Torque Loads

	Potential Energy Savings
Air conditioning	20-25%
Compressors	20-25%
Central refrigeration	25-35%
Blowers and fans	30-35%
Feedwater pumps	30-50%

Source: Wisconsin Center for Demand-Side Research



### *Σχήμα 4.3.3<sup>στ</sup> Εξοικονόμηση ενέργειας σε διάφορες εφαρμογές με την χρήση VFD*

Συνοπτικά, κάθε φορά που θέλουμε ένα φορτίο να έχει μεταβλητή ροπή ή μεταβλητή ταχύτητα, η χρήση VFD είναι η καλύτερη δυνατή. Επίσης σε περιπτώσεις που ένας μεγάλος κινητήρας έχει πρόβλημα με πτώση τάσης, ροπή ή ρεύμα εισόδου κατά την εκκίνηση. Παρόλο που οι VFD αναμφισβήτητα μας επιλύουν πολλά προβλήματα και παρέχουν σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας, πρέπει να λάβουμε σοβαρά υπόψιν μας την θερμότητα που παράγουν η οποία πρέπει να αντιμετωπιστεί όπως επίσης και οι αρμονικές που παράγουν πρέπει να μετριάζονται με τις διάφορες μεθόδους.

#### 4.4 Έλεγχος με PLC.

Η διάταξη εκίνησης ενός ασύγχρονου κινητήρα με χρήση συσκευής PLC, έχει ως στόχο να εξαλείψει τα μειονεκτήματα που αναφέρθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους και κατά κύριο λόγο, την ανθρώπινη παρέμβαση κατά τη διαδικασία αυτή. Οι συσκευές PLC (Programmable Logic Controllers) είναι βασισμένες στο σχεδιασμό, τις αρχές και τη λειτουργία ψηφιακών κυκλωμάτων, προσφέροντας δυνατότητα προγραμματισμού και επαναπρογραμματισμού για το περιβάλλον ελέγχου, χωρίς τη μεταβολή συνδέσεων και υλικού (hardware) για το σύστημα ελέγχου.



[Πηγή: <https://new.abb.com/plc/programmable-logic-controllers-plcs/acs500>]

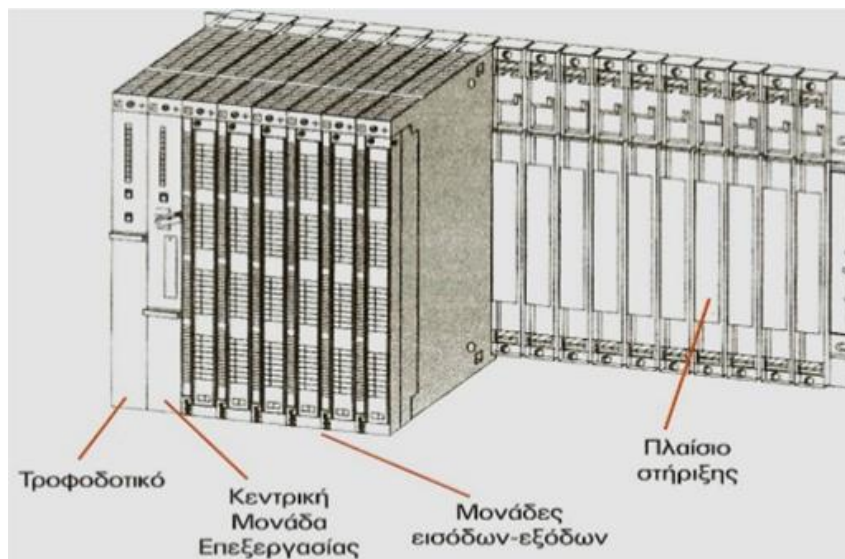
Σχήμα 4.5<sup>α</sup> PLC

Κατά κύριο λόγο, η χρήση της προτεινόμενης διάταξης με συσκευή PLC, στοχεύει στην αυτοματοποιημένη διαδικασία μεταλλαγής τυλιγμάτων από αστέρα σε τρίγωνο, η οποία θα γίνεται βασισμένη σε παραμέτρους λειτουργίας, όπως αυτές μετρώνται απευθείας από το κύκλωμα του κινητήρα. Το τελευταίο, θα εξαλείψει τόσο την αναγκαιότητα για διαρκή ανθρώπινη παρέμβαση και μικρορυθμίσεις, αλλά επιπλέον θα κάνει ακριβέστερη τη λειτουργία της εκκίνησης, δεδομένου ότι η μέθοδος που εισάγει, δεν θα βασίζεται σε κατ' εκτίμηση χρονικές συνθήκες, αλλά σε πραγματικές μετρήσεις των ρευμάτων γραμμής του κινητήρα, τα οποία διασφαλίζουν με τη μέγιστη ακρίβεια την κατάσταση λειτουργίας, στη φάση που ο κινητήρας βρίσκεται.

#### 4.4.1 Δομή PLC (Προγραμμαζόμενοι Λογικοί Ελεγκτές)

Σημαντικό κριτήριο επιλογής ενός προγραμματιζόμενου λογικού ελεγκτή (μάρκα, τύπος, επίπεδα τάσης τροφοδοσίας, τύπος σημάτων) αποτελεί το πλήθος των σημάτων εισόδου/εξόδου που απαιτούνται, καθώς και το πλήθος των διεργασιών (μέγεθος προγράμματος, αριθμός μπλοκ, τύπος CPU κ.α.) που αυτός πρέπει να μπορεί να εκτελέσει στο χρονικό παράθυρο αντίδρασης. Πέραν των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών που ο κάθε ελεγκτής διαθέτει, σε κάθε προγραμματιζόμενο λογικό ελεγκτή συναντάμε τα εξής βασικά δομικά στοιχεία.

- Μονάδα τροφοδοσίας
- Κεντρική μονάδα επεξεργασίας (CPU)
- Μονάδες εισόδων-εξόδων
- Πλαίσιο στήριξης



[Πηγή: W.Bolton, “Programmable Logic Controllers”, Newnes (ELSEVIER), 5th edition, 2009.]

Σχήμα 4.5.1<sup>α</sup> Δομή PLC

Τα ανωτέρω δομικά blocks αποτελούν ηλεκτρονικά – ηλεκτρικά υποσυστήματα σε μορφή αναλογικών – ψηφιακών κυκλωμάτων που συνλειτουργούν για την επίτευξη των διεργασιών του προγραμματιζόμενου ελεγκτή. Στην σύγχρονη αγορά, υπάρχει σημαντικός αριθμός από PLCs, τα οποία διαφοροποιούνται, ανάλογα με τον τύπο των εφαρμογών για τις οποίες προορίζονται, με συνεπαγόμενη μεταβολή αντίστοιχα, στο κόστος τους. Για μικρής κλίμακας

εφαρμογές, ένας ελεγκτής 4 εισόδων – 8 εξόδων είναι επαρκής, δεδομένου του απαιτούμενου ελέγχου που πρέπει να εφαρμοστεί. Πέραν όμως από τη φυσική ικανότητα διασύνδεσης σημάτων, σημαντική παράμετρος κατά τη διαδικασία επιλογής ενός PLC, είναι η ταχύτητα εκτέλεσης που αυτό παρέχει στον κώδικα προγραμματισμού του, γεγονός που καθορίζει το συνολικό χρόνο αντίδρασης του συστήματος ελέγχου. Για την επιτυχή συναρμογή και λειτουργία του συστήματος υπό έλεγχο και του συστήματος του PLC, προφανώς ο χρόνος αντίδρασης του τελευταίου θα πρέπει να είναι σημαντικά ταχύτερος των μεταβολών της διεργασίας που ελέγχει (π.χ. 10 φορές πιο γρήγορη αντίδραση από τον χρόνο μεταβολής των διεργασιών). Με το τελευταίο, διασφαλίζεται επαρκής χρόνος αντίδρασης και απόλυτη ελεγχσιμότητα για το συνολικό σύστημα. Ο συγκεκριμένος χρόνος καθορίζεται από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά που θα αναλυθούν στις παραγράφους που ακολουθούν.

#### ➤ **Μονάδα τροφοδοσίας.**

Η μονάδα τροφοδοσίας ενός PLC έχει σκοπό να δημιουργήσει από την τάση του δικτύου τροφοδοσίας τις απαραίτητες εσωτερικές τάσεις, που απαιτούνται για την τροφοδοσία των ηλεκτρονικών στοιχείων (τρανζίστορ, ολοκληρωμένα κυκλώματα κ.λπ.) του PLC. Οι τυπικές εσωτερικές τάσεις των PLC είναι συνήθως: DC 5V, DC 9V, DC 24V. Σε ορισμένα μοντέλα PLC, όταν το PLC δεν τροφοδοτείται από το δίκτυο, η μονάδα τροφοδοσίας διατηρεί το περιεχόμενο της μνήμης του PLC με την βοήθεια μιας μπαταρίας (συνήθως λιθίου), που διαθέτει. Σε άλλα μοντέλα PLC η παραπάνω μπαταρία βρίσκεται στην Κεντρική Μονάδα Επεξεργασίας(CPU). Χρειάζεται προσοχή ώστε να μην προκαλέσουμε υπερφόρτιση της μονάδας τροφοδοσίας. Για τον σκοπό αυτό συμβουλευόμαστε τα τεχνικά φυλλάδια της εταιρείας κατασκευής του PLC.

#### ➤ **Κεντρική μονάδα επεξεργασίας (CPU)**

Είναι η βασική μονάδα του PLC, η οποία είναι υπεύθυνη για τη λειτουργία του αυτοματισμού. Η κεντρική μονάδα επεξεργασίας είναι στην ουσία ένας μικροϋπολογιστής και διακρίνουμε σ' αυτήν όλα τα κύρια μέρη ενός μικροϋπολογιστή, δηλαδή τον μικροεπεξεργαστή και τη μνήμη. Ο μικροεπεξεργαστής είναι ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα, το οποίο αποτελεί τον "εγκέφαλο" κάθε μικροϋπολογιστή. Οι μικροεπεξεργαστές εξελίσσονται με ταχύτατους ρυθμούς, το όνομά τους δίνει συνήθως και το όνομα στο μοντέλο του μικροϋπολογιστή (π.χ λέμε



PC 386, 486, Pentium κ.λπ.). Στα PLC πολύ λίγο μας ενδιαφέρει να ξέρουμε ποιον μικροεπεξεργαστή χρησιμοποιεί η κεντρική μονάδα, αν και πολλές φορές μπορούμε να το διαβάσουμε στα χαρακτηριστικά που δίνουν οι εταιρείες. Ο μικροεπεξεργαστής για το PLC είναι ο κύριος υπεύθυνος για όλες τις λειτουργίες του

### ➤ Μονάδες εισόδων-εξόδων

Οι μονάδες των εισόδων και των εξόδων αποτελούν τις μονάδες επικοινωνίας της κεντρικής μονάδας με τον έξω κόσμο, δηλαδή με τους αισθητήρες, τους διακόπτες και τα μπουτόνς, που δίνουν τις πληροφορίες (εντολές), καθώς και με τους ηλεκτρονόμους ισχύος των κινητήρων, ηλεκτρομαγνητικές βαλβίδες, ενδεικτικές λυχνίες και γενικά τους αποδέκτες που εκτελούν τις εντολές του αυτοματισμού. Η κεντρική μονάδα μπορεί να δεχτεί ψηφιακά σήματα εισόδου και εξόδου χαμηλής τάσης και πολύ μικρού ρεύματος. Η τάση που δέχεται η κεντρική μονάδα είναι συνήθως 0 Volt για το λογικό "0" και 5 Volt για το λογικό "1". Το ρεύμα εισόδου καθώς και το ρεύμα εξόδου δεν μπορεί να περάσει τα μερικά mA.

Οι μονάδες εισόδων και εξόδων αναλαμβάνουν να προσαρμόσουν τα σήματα εισόδου και εξόδου, που έχουμε στον αυτοματισμό, με τα σήματα που μπορεί να δεχτεί η κεντρική μονάδα, τόσο από άποψη τάσεων όσο και από άποψη ρευμάτων. Η προσαρμογή αυτή γίνεται με τη χρήση ηλεκτρονικών στοιχείων ισχύος, δηλαδή τρανζίστορ ισχύος, θυρίστορ και triac, είτε ακόμη με τη χρήση κατάλληλων μικροηλεκτρονόμενων. Κάθε σύστημα PLC καταλήγει πάντα σε ακροδέκτες (κλέμες). Οι ακροδέκτες αυτοί ανήκουν στις μονάδες εισόδων και εξόδων του PLC. Στους ακροδέκτες εισόδων καταλήγουν οι αγωγοί που έρχονται από αισθητήρες (τερματικούς διακόπτες, πιεζοστάτες, κ.λπ.), διακόπτες, μπουτόνς κ.λπ. Στους ακροδέκτες εξόδων καταλήγουν οι αγωγοί που τροφοδοτούν πηνία ηλεκτρονόμων ισχύος, ηλεκτρομαγνητικές βαλβίδες, λυχνίες ένδειξης και λοιπούς αποδέκτες. Στους διάφορους τύπους των PLC οι μονάδες εισόδων και εξόδων αντιμετωπίζονται με διαφορετικό τρόπο. Γενικά ισχύουν τα παρακάτω:

- Μία μονάδα εισόδων ή εξόδων μπορεί να λειτουργεί με συνεχή τάση ή με εναλλασσόμενη τάση. Τυπικές τάσεις που συναντούμε στα PLC είναι: DC 24V, 48V, 60V και AC 24V, 48V, 115V, 230V, με συνηθέστερες τις DC 24V και AC 115V και 230V.
- Η τάση αυτή δεν παρέχεται συνήθως από τη μονάδα τροφοδοσίας του PLC. Πρέπει να τη δημιουργήσουμε εμείς με άλλη τροφοδοτική μονάδα.

- Τα κυκλώματα και οι τάσεις των εισόδων είναι τελείως ανεξάρτητα από τα κυκλώματα και τις τάσεις των εξόδων. Επομένως η τάση για τις εισόδους μπορεί να είναι διαφορετική από την τάση για τις εξόδους. Αν η τάση εξόδων είναι η ίδια με την τάση των εισόδων μπορεί να χρησιμοποιηθεί το ίδιο τροφοδοτικό (για τάσεις DC), ή μετασχηματιστής χειρισμού (για τάσεις AC) για τις εισόδους και τις εξόδους.
- Η τάση εισόδων (δηλαδή η τάση που θα φθάσει σε μια είσοδο, όταν ενεργοποιηθεί ο αντίστοιχος αισθητήρας) διαχωρίζεται συνήθως γαλβανικά από το υπόλοιπο εσωτερικό κύκλωμα του PLC. Τα ίδια ισχύουν και για τις εξόδους. Αν σε κάποιες μονάδες εισόδων ή εξόδων δεν έχουμε γαλβανική απομόνωση πρέπει να προσέξουμε ιδιαίτερα το θέμα των γειώσεων.

#### 4.4.2 Κύκλος εκτέλεσης λειτουργίας προγράμματος με χρήση PLC.

Ο κύκλος εκκίνησης ενός προγράμματος αφορά συνολικά στον χρόνο που απαιτείται από το PLC, έτσι ώστε να προλάβει να ανιχνεύσει την κατάσταση των εισόδων του, να εκτελέσει τον απαιτούμενο κώδικα και στην συνέχεια να ανάγει τις επιθυμητές τιμές με βάση τις λογικές συνθήκες, στα σήματα εξόδου του. Ένας κύκλος εκτέλεσης συνίσταται αναλυτικά από 5 κύρια βήματα:

1. Ανάγνωση Εισόδων
2. Εκτέλεση
3. Προγράμματος Διαχείριση Αιτημάτων Επικοινωνίας
4. Εκτέλεση Διάγνωσης της CPU
5. Εκτύπωση Αποτελεσμάτων

Για να αναγνώσει τις εισόδους, ο χρήστης εγγράφει τιμές στις θέσεις των κενών bytes στον πίνακα εισαγωγής στοιχείων εισόδου. Όταν εκτελείται το πρόγραμμα, ο κώδικας εκτελείται προσανατολισμένα από αριστερά προς τα δεξιά και από κάτω προς τα πάνω. Όταν οι εσωτερικές δομές του PLC διαχειρίζονται τα αιτήματα επικοινωνίας, ο χρήστης μεταβιβάζει όποιο μήνυμα λάβει από το δίαυλο επικοινωνίας. Για να εκτελεστεί στη CPU αυτοδιαγνωστικός έλεγχος, πρέπει να γίνει υλικολογισμικός έλεγχος, έλεγχος του προγράμματος και έλεγχος της κατάστασης των βαθμίδων.

Επομένως, γίνεται εμφανές ότι ένας προγραμματιζόμενος ελεγκτής, εκτελεί σημαντικό πλήθος εσωτερικών διεργασιών πριν ενημερώσει με βάση τον κώδικα προγραμματισμού, τις

εξόδους – σήματα ελέγχου. Ο κύκλος εκτέλεσης μπορεί να εκτελεστεί μία φορά ή να εκτελείται αενάως, με βάση τις επιλογές του προγραμματιστή. Το τελευταίο χαρακτηριστικό, δίνει τη δυνατότητα διασυνεχούς παρακολούθησης μίας διεργασίας υπό έλεγχο από ένα PLC, το οποίο με τη σειρά του, συμβάλλει στην ανάπτυξη ενός γενικότερου συστήματος ελέγχου. Με τον τρόπο αυτό, οι προγραμματιζόμενοι ελεγκτές αποτελούν τμήματα συνεργαζόμενα με το σύστημα υπό έλεγχο, που παρακολουθούν και ελέγχουν διαρκώς τη λειτουργία του. Στο ιδιαίτερο αυτό χαρακτηριστικό, στοχεύει και η προτεινόμενη υλοποίηση για το σύστημα εκκίνησης του ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα.

#### **4.4.3 Πλεονεκτήματα των PLC.**

Τα πρώτα μεγάλα πλεονεκτήματα των PLC είναι:

1. Το κόστος κατασκευής ενός PLC είναι σημαντικά μικρότερο από το κόστος παραγωγής ενός μεγάλου αριθμού βοηθητικών ηλεκτρονόμων, χρονικών και απαριθμητών.
2. Ο χρόνος κατασκευής του αυτοματισμού είναι μηδαμινός σε σχέση με την κατασκευή ενός κλασικού πίνακα αυτοματισμού. Υπάρχουν όμως πολλά πλεονεκτήματα που έχουν σχέση με τον τελικό χρήστη, τις βιομηχανίες δηλαδή που εφαρμόζουν τους αυτοματισμούς, και είναι αυτά που μας ενδιαφέρουν περισσότερο. Κατά σειρά σπουδαιότητας αναφέρουμε:
  - Τα PLC ελαχιστοποιούν το κόστος συντήρησης του πίνακα αυτοματισμού. Το κόστος αυτό αναλύεται ως εξής: Συχνότητα βλαβών, χρόνος εντοπισμού μιας βλάβης και αποκατάστασής της. Δηλαδή, όταν υπάρχει μια βλάβη στον πίνακα μιας εγκατάστασης κλασικού αυτοματισμού, υπάρχει καθυστέρηση στην παραγωγή μέχρι να εντοπιστεί η βλάβη. Αφού εντοπιστεί, πρέπει να έχουμε διαθέσιμο το κατάλληλο ανταλλακτικό στην αποθήκη, γιατί διαφορετικά θα υπάρξει σημαντική καθυστέρηση, αφού θα χρειαστεί να γίνει η σχετική παραγγελία και η προμήθεια. Στον αυτοματισμό με PLC δεν υπάρχει ουσιαστικό θέμα βλάβης εσωτερικά στον πίνακα της εγκατάστασης. Οι βλάβες είναι σπάνιες και οι εγγυήσεις που παρέχονται μεγάλες.

- Τα PLC είναι ευέλικτα στην τροποποίηση της λειτουργίας του αυτοματισμού. Δηλαδή, αν υποθέσουμε ότι θέλουμε να κάνουμε μια αλλαγή στον αυτοματισμό, αυτή μπορεί να γίνει μέσα σε λίγα λεπτά, αρκεί μόνο να αλλάξουμε το πρόγραμμα. Σε ένα πίνακα κλασικού αυτοματισμού, τέτοιου είδους αλλαγές είναι πράγμα πολύ δύσκολο και χρονοβόρο.
- Ο αυτοματισμός με PLC επεκτείνεται πολύ εύκολα. Αυτό γίνεται είτε απλά αλλάζοντας το πρόγραμμα, είτε με την τοποθέτηση νέων μονάδων εισόδων και εξόδων. Κάθε επέκταση στον κλασικό αυτοματισμό είναι πολύ δύσκολη.
- Ο αυτοματισμός με PLC μας παρέχει καταπληκτικές δυνατότητες. Μπορούμε να δημιουργούμε πολύ εύκολα πολύπλοκες και έξυπνες επεξεργασίες, οι οποίες στον κλασικό αυτοματισμό είναι εξαιρετικά δύσκολο να υλοποιηθούν.
- Σε μια εγκατάσταση, που χρησιμοποιεί αυτοματισμούς με PLC, σήμερα παρέχονται δυνατότητες σύνδεσης με κεντρικό ηλεκτρονικό υπολογιστή, σύνδεσης με το σύστημα αποθήκης, λογιστηρίου κ.λπ.
- Το PLC καταλαμβάνει ελάχιστο χώρο σε σχέση με τον αντίστοιχο πίνακα κλασικού αυτοματισμού. Βλέπουμε ότι από τη χρήση των PLC προκύπτουν μόνο πλεονεκτήματα. Υπάρχουν άραγε μειονεκτήματα; Θα μπορούσαμε ίσως να θεωρήσουμε μειονέκτημα την έλλειψη επαρκούς ενημέρωσης των τεχνικών όλων των βαθμίδων, ειδικά στην Ελλάδα, πράγμα το οποίο δυσκολεύει και δημιουργεί προβλήματα στην εφαρμογή των PLC. Η τελική ερώτηση, που προκύπτει, είναι: Πόσο κοστίζουν τελικά τα PLC; συμφέρει να χρησιμοποιούμε σε κάθε εγκατάσταση PLC; Η απάντηση είναι ότι οι τιμές "πέφτουν" καθημερινά και οι εταιρείες βγάζουν συνεχώς νέα μοντέλα που κάνουν για όλων των επιπέδων τις εφαρμογές. Παρ' όλα αυτά δεν συμφέρει ακόμη η χρήση του PLC, όταν έχουμε πολλούς κινητήρες (πολλούς ηλεκτρονόμους ισχύος) και απλό αυτοματισμό (λίγους βοηθητικούς ηλεκτρονόμους, χρονικά και απαριθμητές). Όμως είναι σίγουρο ότι η χρήση βοηθητικών ηλεκτρονόμων και άλλων κλασικών υλικών αυτοματισμού έχει περιορισθεί και θα περιορίζεται συνεχώς.

## 5. Εφαρμογή (Συστήμα Ελέγχου Αντλιών νερού σε Πλοίο με την χρήση PLC και Variable Frequency Drive.

Σε αυτή την ενότητα θα περιγράψουμε μία εφαρμογή σχετική με όσα αναφέραμε παραπάνω, δηλαδή μία εφαρμογή με χρήση μεθόδου VFD και PLC για τον έλεγχο ανεμιστήρων και αντλιών πλοίου, με στόχο την βέλτιστη εξοικονόμηση ενέργειας.

Η εξοικονόμηση ενέργειας είναι σημαντική για κάθε σύστημα τόσο στην βιομηχανία όσο και στην ναυτιλία, καθώς αυτή μεταφράζεται σε μεγάλα ποσά εξοικονόμησης χρημάτων χωρίς να υπάρχει μειωμένη απόδοση του συστήματος.

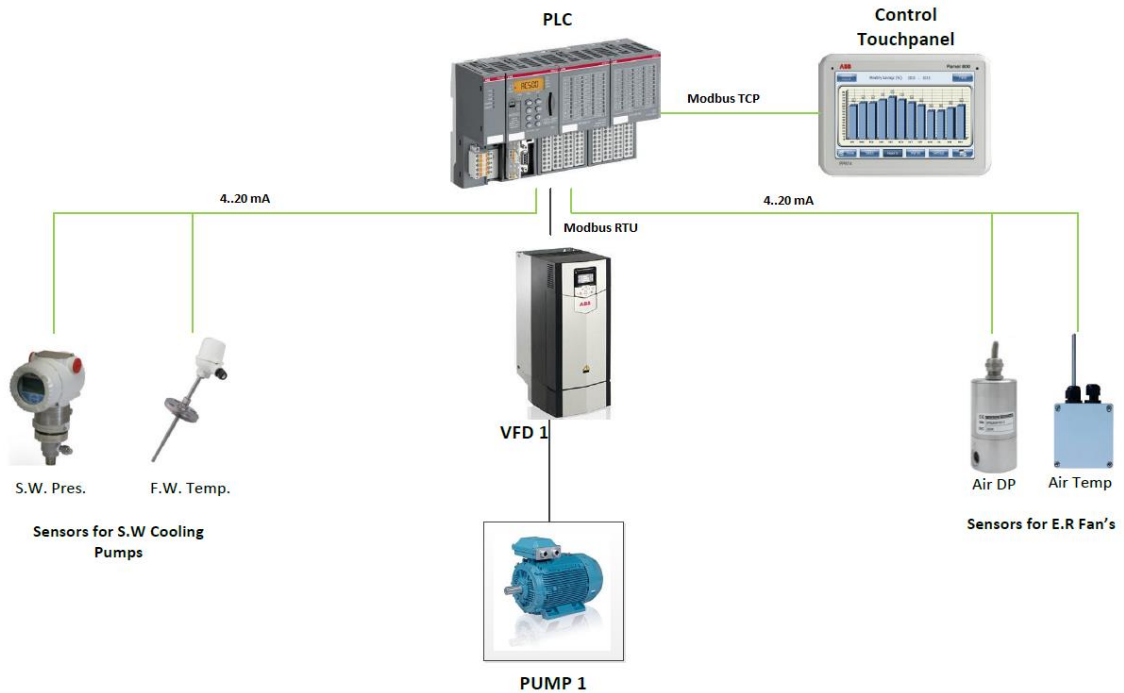
Γενικά, η εξοικονόμηση ενέργειας παίζει πολύ μεγάλο ρόλο στη μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub>, αντιπροσωπεύοντας μέχρι και το 53% στην μείωση των συνολικών εκπομπών CO<sub>2</sub>. Σε εφαρμογές αντλιών και ανεμιστήρων στα πλοία, η χρήση μονάδων μεταβλητής συχνότητας (VFD) μπορεί να μειώσει την κατανάλωση ενέργειας για αυτές τις εφαρμογές έως και 60%.

Τα συστήματα που συνήθως εφαρμόζουμε τεχνικές για εξοικονόμηση ενέργειας είναι συνήθως συστήματα με μεγάλες αντλίες και ανεμιστήρες, οι οποίοι δεν απαιτείται να λειτουργούν συνεχώς και με πλήρη ισχύ. Όταν το επιτρέπει η εφαρμογή να εγκαταστήσουμε VFD στους ηλεκτροκινητήρες, μπορούμε να έχουμε πιο αποδοτική λειτουργία στις αντλίες και στους ανεμιστήρες σε χαμηλές ταχύτητες πλεύσης που έχουμε μειωμένο φορτίο, ή όταν δεν υπάρχουν απαιτήσεις για αυξημένη λειτουργία των ανεμιστήρων.

Η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας μιας αντλίας σχετίζεται με την ογκομετρική ροή της αντλίας σύμφωνα με τους νόμους της ομοιότητας (affinity laws). Η μείωση της ταχύτητας της αντλίας θα επηρεάσει την πίεση του συστήματος. Για παράδειγμα, η μείωση της ταχύτητας της αντλίας κατά 10% θα εξοικονομήσει 27% της καταναλισκόμενης ισχύος.

$$\begin{aligned} \text{Flow } Q_1/Q_2 &= n_1/n_2 \\ \text{Head } H_1/H_2 &= (n_1/n_2)^2 \\ \text{Power } P_1/P_2 &= (n_1/n_2)^3 \end{aligned}$$

Σχήμα 5.1<sup>α</sup> Νόμοι ομοιότητας όπου  $Q$ =ροή,  $H$ =πίεση,  $P$ =ισχύς.



Σχήμα 5.1 Περιγραφή του συστήματος.

## 5.1 Μέρη και περιγραφή του συστήματος

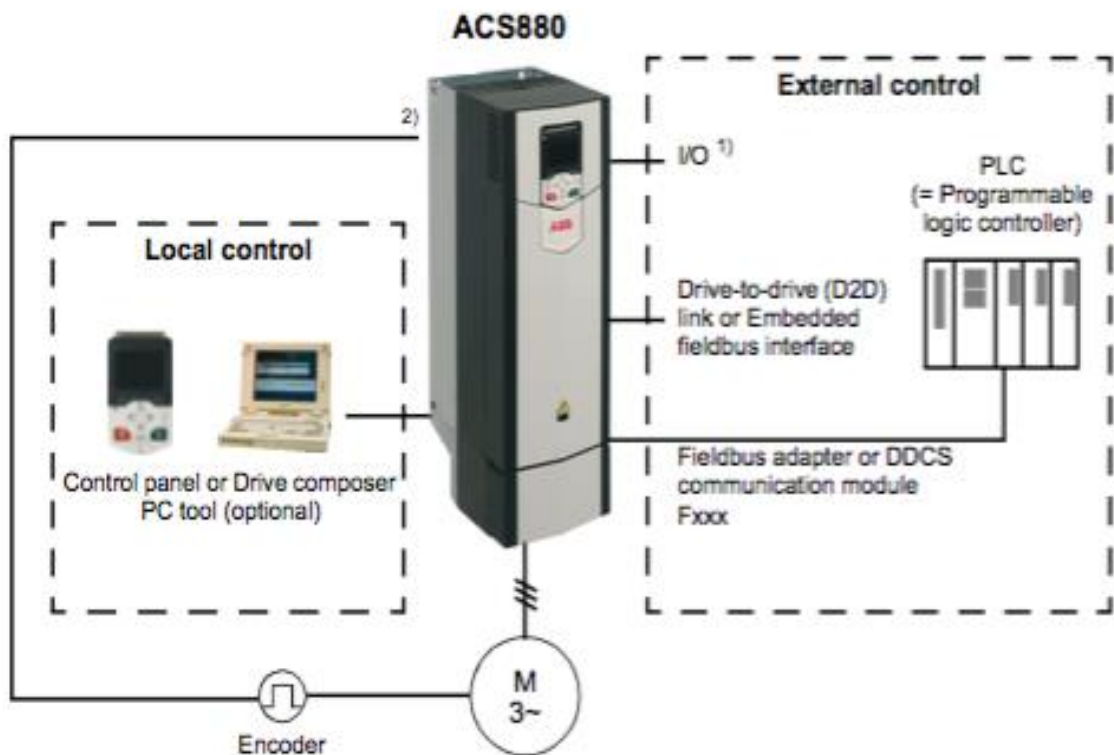
Το σύστημα που θα περιγράψουμε παρακάτω για τον έλεγχο δύο αντλιών και τεσσάρων ανεμιστήρων σε ένα πλοίο και αποτελείται από τα εξής μέρη:

- τα VFD (ABB ACS880-01)
- τα PLC (μονάδα CPU - ABB PM573-ETH για αντλίες & AC500 eco –ETH για τους ανεμιστήρες).
- I/O κάρτες, Αναλογικών εισόδων: AI523,  
Κάρτα επικοινωνίας :DC551  
Ψηφιακών εισόδων/εξόδων: DC523,  
Κάρτα επικοινωνίας Modbus: CM574 - RS
- Διακόπτης παράκαμψης του συστήματος (Direct On Line – DOL)
- Τροφοδοτικό 24V
- Touch Panel 7” (ABB PP874, 7”)
- Αισθητήρας μέτρησης θερμοκρασίας νερού (ABB TSP121)
- Αισθητήρας μέτρησης θερμοκρασίας αέρα (ABB TSBA R-500)

- Αισθητήρας μέτρησης διαφορικής πίεσης (SensorTechnics BTEL5000)
- Αισθητήρας μέτρησης πίεσης θαλασσινού νερού (ABB 266HSH)

Τα **πρωτόκολλα επικοινωνίας** της εφαρμογής όπως αναφέρονται και παραπάνω είναι:

- Modbus RTU, μεταξύ του PLC και των Drives.
- Modbus TCP, μεταξύ του PLC και του touch panel.
- Όλα τα αισθητήρια είναι 4..20 mA , που επικοινωνούν με το PLC.



[Πηγή: ABB Industrial Drives, “ACS880 Primary Control Program”, Firmware Manual.]

Σχήμα 5.1<sup>α</sup> VFD με PLC για τον έλεγχο ηλεκτροκινητήρα

Το **PLC**, το οποίο είναι το κεντρικό σημείο ελέγχου και επικοινωνίας του συστήματος. Πιο συγκεκριμένα ευθύνεται για :

- την επικοινωνία με όλα τα VFD μέσω του πρωτοκόλλου **Modbus RTU**. Όντας ο master του δικτύου επικοινωνίας ελέγχει το ξεκίνημα, σταμάτημα, την ταχύτητα των drive, διαβάζει τις μεταβλητές από τα drives καθώς επίσης είναι αυτό που διαχειρίζεται τα σφάλματα και κάνει τις απαραίτητες ενέργειες.
- Διαβάζει τις μετρήσεις όλων των αισθητήρων (πίεση, θερμοκρασία) με την χρήση των αναλογικών του εισόδων, η επικοινωνία γίνεται με **4..20 mA** (Analog I/O cards) .

- Επικοινωνεί με τα υπάρχον start panels των πλοίων, με την χρήση ψηφιακών καρτών επικοινωνίας (Digital I/O cards).
- Υπολογίζει την τιμή της ταχύτητας αναφοράς για όλα τα drives, καθώς και τις παραμέτρους του PID ελεγκτή με βάση τις ενδείξεις των αισθητηρίων.
- Επικοινωνεί μέσω **Modbus TCP**, με την οθόνη (touch panel/Scada), όπου ενημερώνει και καταγράφει, μέσω του γραφικού περιβάλλοντος που υπάρχει, τον χρήστη για την λειτουργία του συστήματος την δεδομένη στιγμή καθώς επίσης και για τυχόν επιπλοκές ή κινδύνους.



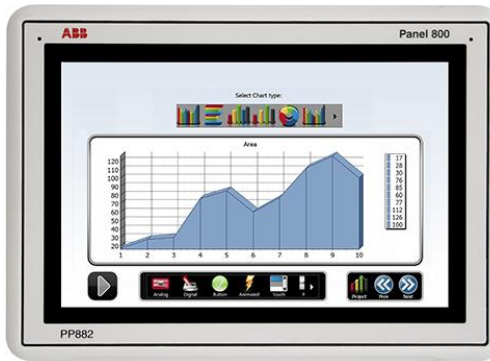
[Πηγή: <https://new.abb.com/plc/programmable-logic-controllers-plcs/ac5001>]

*Σχήμα 5.1<sup>β</sup> PLC (ABB PM573-ETH)*

#### **Τα Drives ,**

- είναι στις κατάλληλες διαστάσεις (ισχύς), για την οδήγηση των κινητήρων που είναι συνδεδεμένα, ένα για κάθε κινητήρα.
- Επικοινωνούν μέσω Modbus RTU με το PLC όπου από εκεί λαμβάνουν την ταχύτητα αναφοράς μαζί με υπόλοιπες παραμέτρους.
- Κάθε ένα από τα drive, προστατεύει τον κινητήρα που είναι συνδεδεμένος με αυτό από (υπέρταση, υπερβολικό ρεύμα, στην περίπτωση που χάσει μια από τις φάσεις, κ.α).





[Πηγή: <http://www.compacthardwareselector.com/pp882>]

Σχήμα 5.1<sup>γ</sup> Οθόνη αφής για τον έλεγχο του συστήματος

Το **touch panel**, τα **αναλογικά αισθητήρια** και οι **ηλεκτρονόμοι** (contactors),

- Στην οθόνη αφής (touch panel), γίνεται η γραφική απεικόνιση του συστήματος, όπου φαίνονται, η κατάσταση του συστήματος την δεδομένη στιγμή και επίσης γίνεται καταγραφή των δεδομένων και η δημιουργία αναφορών.
- Εμφανίζονται τα γεγονότα και οι τυχόν κίνδυνοι που μπορεί να προκύψουν, οι τιμές αναφοράς του συστήματος, οι παράμετροι του PID ελεγκτή, οι τιμές που διαβάζουν τα αναλογικά αισθητήρια.
- Οι ηλεκτρονόμοι χρησιμοποιούνται για μπορέσουμε να ενοθούμε με το υπάρχων σύστημα κλασσικού αυτοματισμού στα start panel του πλοίου, τα οποία παραμένουν σε λειτουργία. Τα μερικά από τα σήματα που ανταλλάσσονται είναι : VFD Run, VFD Stop, VFD Fault, VFD Alarm Indication, που ειδοποιούν τα για σφάλματα ή την κατάσταση του συστήματος.



[Πηγή: ABB Marine & Ports, “ S.W Cooling Pumps & Engine Room Ventilation Fans, VFD Upgrade” Installation Manual.]

Σχήμα 5.1<sup>δ</sup> Αισθητήρας θερμοκρασίας μηχανοστασίου (αριστερά), αισθητήρας διαφορικής πίεσης (δεξιά).

## 5.2 Αναβάθμιση αντλιών με την εγκατάσταση VFD.

Οι αντλίες του θαλασσινού νερού, θα εξοπλιστούν με ένα VFD η καθεμία. Στο σημείο αυτό να συμπληρώσουμε ότι στις περιπτώσεις των αντλιών, πάντα η μια εξ'αυτών παραμένει σε απευθείας σύνδεση, για λόγους ασφαλείας, δηλαδή στην περίπτωση που υπάρξει κάποιο τεχνικό πρόβλημα να συνεχίσει να υπάρχει η δυνατότητα λειτουργίας του συστήματος υδρόψυξης της μηχανής, καθώς μιλάμε για τις αντλίες που στέλνουν νερό για ψύξη των μηχανών. Ένας αισθητήρας θερμοκρασίας νερού (TS) πρόκειται να εγκατασταθεί στην κοινή πλευρά LT του εναλλάκτη θερμότητας, πριν την βαλβίδα τριόδη βαλβίδα, η οποία θα μετρήσει τη θερμοκρασία του γλυκού νερού. Επιπλέον, ένας αισθητήρας πίεσης (PT) θα εγκατασταθεί στην κοινή έξοδο του θαλασσινού νερού όλων των αντλιών, για την μέτρηση της υπάρχουσας πίεσης του θαλάσσιου νερού. Το σύστημα αυτοματισμού που βασίζεται στο PLC θα διαβάζει συνεχώς την θερμοκρασία στον κόμβο LT, και στην συνέχεια θα υπολογίζει και θα ελέγχει την ταχύτητα των VFD ώστε να διατηρεί τη θερμοκρασία στην προκαθορισμένη τιμή (π.χ. 36 βαθμούς Κελσίου). Ο ελεγκτής PID στο εσωτερικό του PLC είναι υπεύθυνος για όλη τη διαδικασία όπως αναφέραμε και πιο πριν. Το κατώφλι της χαμηλής ταχύτητας θα ρυθμιστεί με τη βοήθεια της μέτρησης που λαμβάνεται από τον αισθητήρα πίεσης με τέτοιο τρόπο ώστε η πίεση του νερού να είναι πάντοτε πάνω από το επίπεδο που υπάρχει κίνδυνος χαμηλής πίεσης. Η ταχύτητα του κινητήρα της αντλίας, η κατανάλωση ενέργειας και η εξοικονόμηση κατά τη λειτουργία DOL θα είναι διαθέσιμες στην οθόνη αφής (Human Machine Interface).

Η καμπίνα με τους κινητήρες των αντλιών, το PLC, το πάνελ αφής, τους διακόπτες χειροκίνητης παράκαμψης και τον σχετικό εξοπλισμό θα εγκατασταθούν κοντά στους κινητήρες. Τα καλώδια τροφοδοσίας από τα υπάρχοντα start panel που τροφοδοτούν τις αντλίες, θα αποσυνδεθούν από τους κινητήρες και θα συνδεθούν στην καμπίνα (ως είσοδος ισχύος στα VFD). Νέα καλώδια θα εγκατασταθούν από την καμπίνα και θα συνδεθούν με τους κινητήρες (ως έξοδο ισχύος των VFD).

### 5.3 Αναβάθμιση ανεμιστήρων με την εγκατάσταση VFD.

Οι κινητήρες που οδηγούν τους ανεμιστήρες θα αναβαθμιστούν με ένα VFD ο καθένας. Ένας αισθητήρας θερμοκρασίας (TS) πρόκειται να εγκατασταθεί στον χώρο του μηχανοστασίου, ο οποίος θα μετράει την θερμοκρασία του αέρα του περιβάλλοντος. Η τοποθέτηση του αισθητήρα πρέπει να είναι τέτοια ώστε να αποφεύγεται η ισχυρή επίδραση από την εκπομπή της θερμότητας από τον εξοπλισμό που λειτουργεί στον χώρο. Επιπλέον, θα εγκατασταθεί ένας αισθητήρας διαφορικής πίεσης στο μηχανοστάσιο. Το οποίο θα μετράει την διαφορά μεταξύ της εσωτερικής πίεσης στο μηχανοστάσιο και της εξωτερικής πίεσης στο επίπεδο της θάλασσας. Το σύστημα αυτοματισμού που βασίζεται στο PLC AC500 θα διαβάζει συνεχώς τη θερμοκρασία του αέρα και θα ελέγχει τα VFD για να διατηρεί τη θερμοκρασία στην καθορισμένη τιμή (π.χ. 30 βαθμούς Κελσίου). Με τη χρήση του πομπού διαφορικής πίεσης το PLC θα διατηρήσει μια υπερπίεση στο εσωτερικό του μηχανοστασίου σε σύγκριση με την πίεση αέρα στο επίπεδο της θάλασσας. Ο ελεγκτής PID στο PLC θα είναι υπεύθυνος για όλη τη διαδικασία. Η ταχύτητα των ανεμιστήρων, η κατανάλωση ενέργειας και η εξοικονόμηση κατά τη λειτουργία DOL (Direct On Line) θα είναι διαθέσιμες στο HMI.

Κάθε μια καμπίνα θα εγκατασταθεί κοντά σε κάθε ζεύγος ανεμιστήρων και θα περιλαμβάνει τα VFD, τους διακόπτες χειροκίνητης παράκαμψης (bypass) και όλα τα απαραίτητα στοιχεία για την ορθή λειτουργία του συστήματος. Τα καλώδια τροφοδοσίας από τα υπάρχοντα start panel που τροφοδοτούν τους ανεμιστήρες, θα αποσυνδεθούν από τους κινητήρες και θα συνδεθούν στην καμπίνα (ως είσοδος ισχύος στα VFD). Νέα καλώδια θα εγκατασταθούν από την καμπίνα και θα συνδεθούν με τους κινητήρες (ως έξοδο ισχύος των VFD).



[Πηγή: ABB Marine & Ports, “ S.W Cooling Pumps & Engine Room Ventilation Fans, VFD Upgrade” Installation Manual.]

Σχήμα 5.3<sup>α</sup> Αισθητήρας πίεσης θαλασσινού νερού (αριστερά), αισθητήρας θερμοκρασίας γλυκού νερού (δεξιά).

## 5.4 Εγκατάσταση του συστήματος

Πριν από την εγκατάσταση του εξοπλισμού, πρέπει να κάνουμε μια μικρή έρευνα στον χώρο του μηχανοστασίου προκειμένου: να προσδιοριστεί η τοποθεσία εγκατάστασης όλων των καμπίων, καθώς και του αισθητήρα που μετρά την πίεση του θαλασσινού νερού, του αισθητήρα θερμοκρασίας του γλυκού νερού, του αισθητήρα μέτρησης της θερμοκρασίας χώρου του μηχανοστασίου και του αισθητήρα διαφορικής πίεσης.

- **Εγκατάσταση καμπίων.**

Η καμπίνα με τα VFD και το PLC για τον έλεγχο των αντλιών πρέπει να εγκατασταθεί σε ένα μέρος όπου: Βρίσκεται κοντά στους κινητήρες των αντλιών. Με αυτόν τον τρόπο ελαχιστοποιούνται τα μήκη καλωδίων τροφοδοσίας, απλοποιούνται οι εργασίες εγκατάστασης και μειώνονται τα κόστη και πιθανά λάθη. Είναι απαραίτητο η καμπίνα να στερεωθεί όχι μόνο στο δάπεδο (με τη χρήση κατάλληλων στηριγμάτων), αλλά και στον τοίχο. Είναι σημαντικό όλες οι καμπίνες να είναι στερεωμένες και βιδωμένες καλά, για τη μείωση των κραδασμών. Η καμπίνα δεν θα πρέπει να εκτίθεται σε υπερβολική θερμότητα (από γειτονικές ηλεκτρομηχανικές μηχανές ή αγωγούς αέρα).



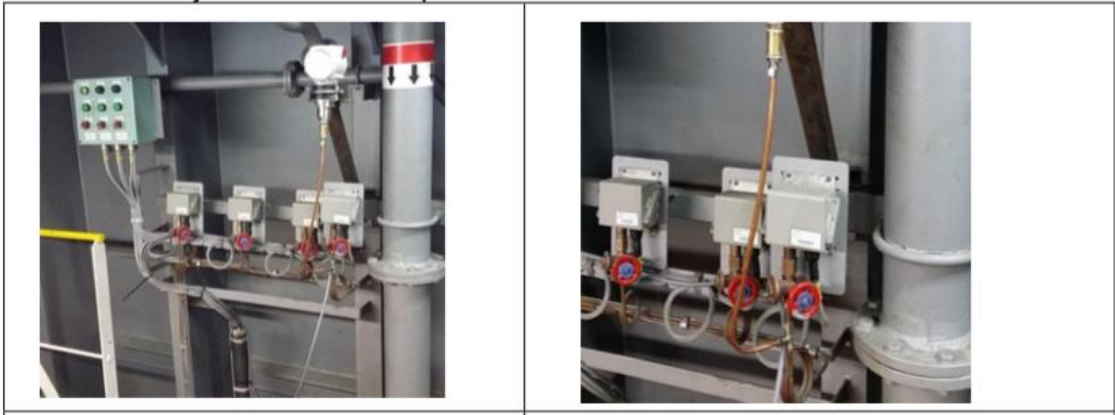
[Πηγή: ABB Marine & Ports, “S.W Cooling Pumps & Engine Room Ventilation Fans, VFD Upgrade” Installation Manual.]

*Σχήμα 5.4<sup>α</sup> Εγκατάσταση και στερέωση καμπίων συστήματος*

- **Εγκατάσταση αισθητήρα πίεσης θαλασσινού νερού.**

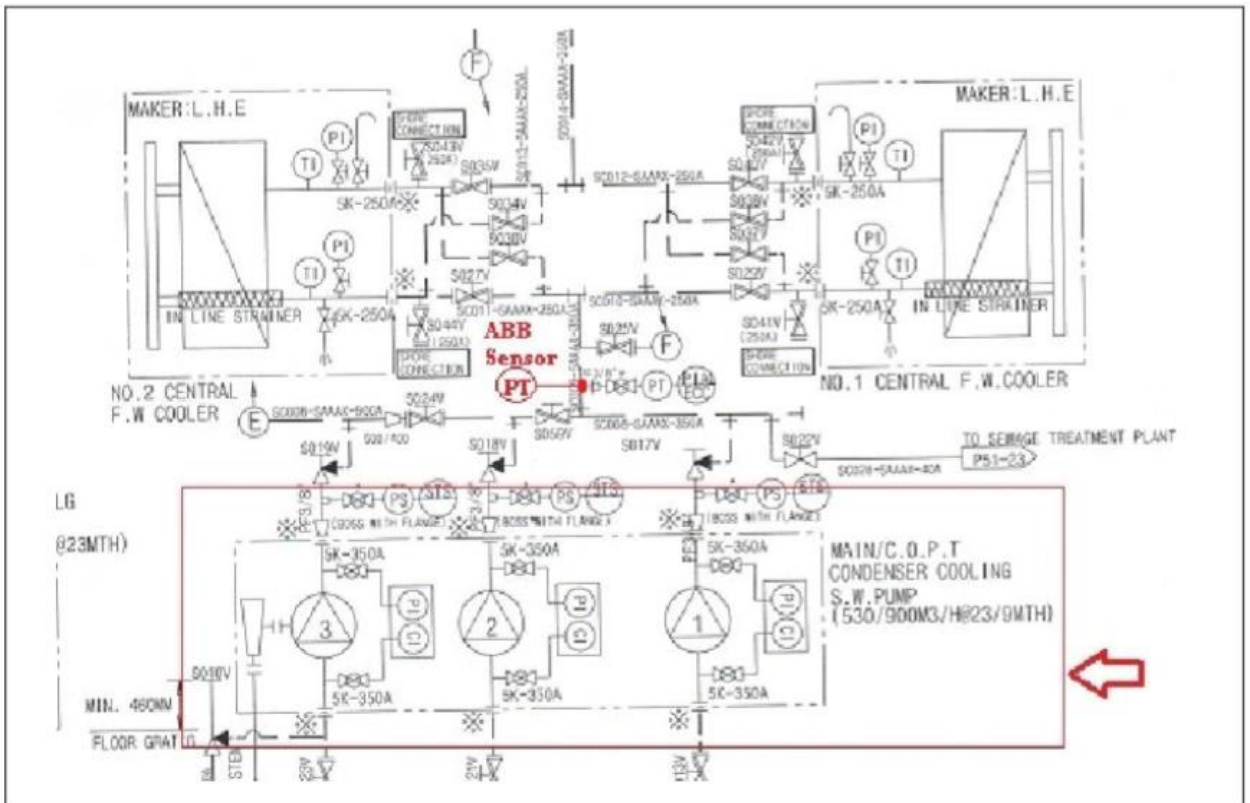
Ο αισθητήρας πίεσης του θαλασσινού νερού πρέπει να εγκατασταθεί στην κοινή έξοδο θαλασσινού νερού όλων των αντλιών για τη μέτρηση της πίεσης του.

Συνήθως αυτός ο πομπός είναι εγκατεστημένος δίπλα και σε ήδη εγκατεστημένο εξοπλισμό μέτρησης με τη χρήση ενός βύσματος (τύπου-T) όπως αυτό που φαίνεται στο σχήμα 5.4<sup>β</sup>.



[Πηγή: ABB Marine & Ports, “ S.W Cooling Pumps & Engine Room Ventilation Fans, VFD Upgrade” Installation Manual.]

Σχήμα 5.4<sup>β</sup> Σημείο εγκατάστασης αισθητήρα πίεσης (αριστερά), βύσμα τύπου-T (δεξιά).

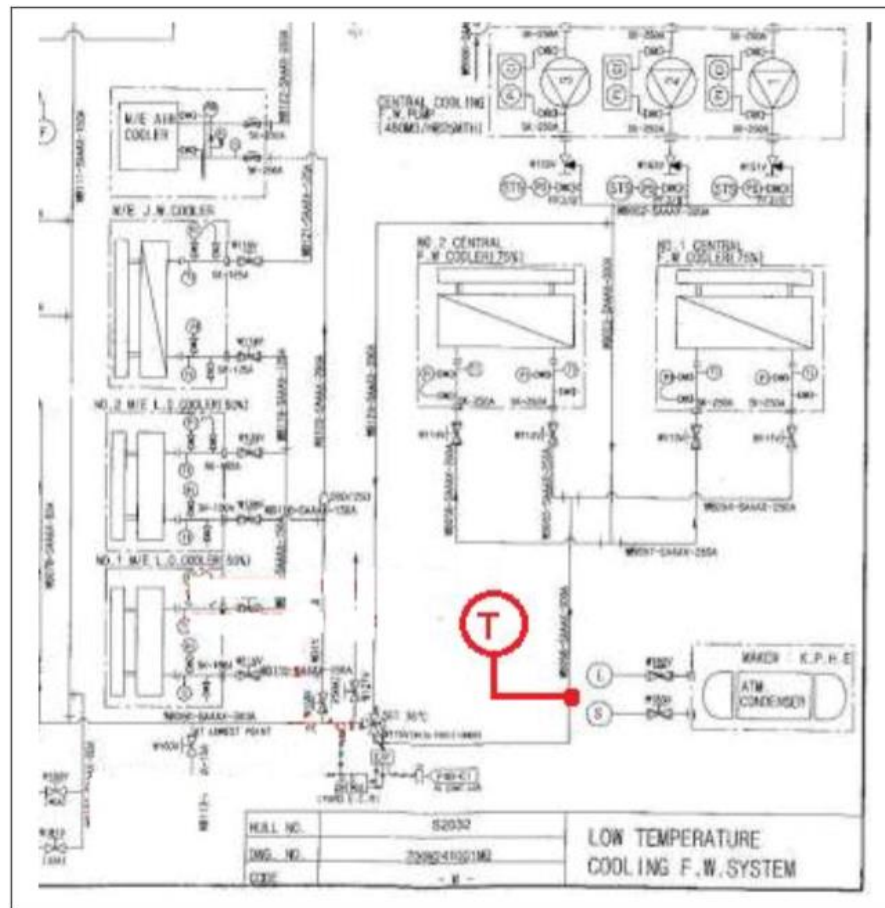


[Πηγή: ABB Marine & Ports, “ S.W Cooling Pumps & Engine Room Ventilation Fans, VFD Upgrade” Installation Manual.]

Σχήμα 5.4<sup>γ</sup> Διάγραμμα σωληνώσεων πλοίου και σημείο εγκατάστασης αισθητήρα.

- **Εγκατάσταση αισθητήρα θερμοκρασίας γλυκού νερού.**

Ο αισθητήρας μέτρησης θερμοκρασίας του γλυκού νερού θα εγκατασταθεί στον αγωγό γλυκού νερού, μετά την κοινή έξοδο των ψυκτών και πριν από την βαλβίδα τριών κατευθύνσεων όπως απεικονίζεται στο σχήμα 5.4<sup>δ</sup>. Ο αγωγός του γλυκού νερού θα πρέπει να τρυπηθεί και να προετοιμαστεί για την εγκατάσταση του αισθητήρα.



[Πηγή: ABB Marine & Ports, “ S.W Cooling Pumps & Engine Room Ventilation Fans, VFD Upgrade” Installation Manual.]

Σχήμα 5.4<sup>δ</sup> Διάγραμμα σωληνώσεων πλοίου και σημείο εγκατάστασης αισθητήρα.





[Πηγή: ABB Marine & Ports, “ S.W Cooling Pumps & Engine Room Ventilation Fans, VFD Upgrade” Installation Manual.]

*Σχήμα 5.4<sup>ε</sup> Σημείο εγκατάστασης αισθητήρα θερμοκρασίας.*

- **Αισθητήρας μέτρησης θερμοκρασίας μηχανοστασίου.**

Ένας αισθητήρας θερμοκρασίας θα εγκατασταθεί στο μηχανοστάσιο. Η επιλεγμένη θέση δεν πρέπει να εκτίθεται σε σημεία που υπάρχουν αεραγωγοί ή σημείο που επηρεάζεται η αξιοπιστία της μέτρησης από άλλο μέσο (χωρίς άμεση επαφή με αγωγούς αέρα) ή υπερβολική θερμότητα (όχι πολύ κοντά σε ηλεκτρομηχανικά μηχανήματα που παράγουν υπερβολική θερμότητα). Στις παρακάτω φωτογραφίες εμφανίζονται ορισμένοι εγκατεστημένοι αισθητήρες θερμοκρασίας χώρου κινητήρα.



[Πηγή: ABB Marine & Ports, “ S.W Cooling Pumps & Engine Room Ventilation Fans, VFD Upgrade” Installation Manual.]

*Σχήμα 5.4<sup>στ</sup> Σημείο εγκατάστασης αισθητήρα θερμοκρασίας μηχανοστασίου.*

- **Αισθητήρας διαφορικής πίεσης.**

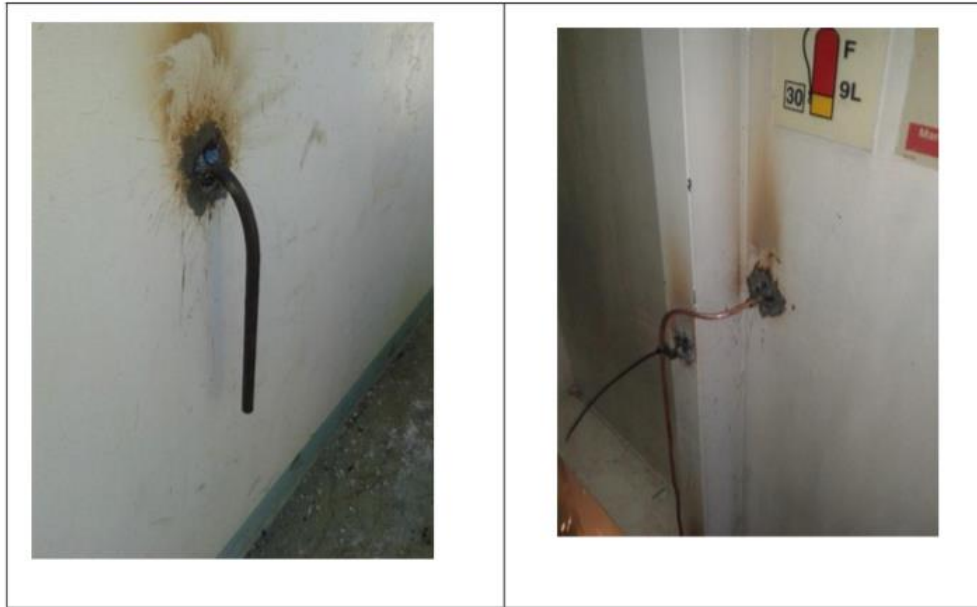
Ο πομπός διαφορικής πίεσης χρησιμοποιείται για να παρέχει στο PLC πληροφορίες σχετικά με τη διαφορά πίεσης μεταξύ της πίεσης του μηχανοστασίου και της εξωτερικής πίεσης περιβάλλοντος (πίεση στην στάθμη της θάλασσας). Για το λόγο αυτό η μονάδα διαθέτει 2 σημεία σύνδεσης των σωλήνων. Ο ένας ονομάζεται H (θύρα υψηλής πίεσης, η οποία μετρά την πίεση από το εσωτερικό του μηχανοστασίου) και ο άλλος ονομάζεται L (θύρα χαμηλής πίεσης, μέτρηση πίεσης από το εξωτερικό περιβάλλον). Η θέση της εγκατάστασης του διαφορικού αισθητήρα πρέπει να τέτοια ώστε να τηρείται το μέγιστο μήκος 7,5 μέτρων ανά σωλήνα, για τα σημεία σύνδεσης (H και L). Ο σωλήνας χαμηλής πίεσης έχει το άκρο του έξω από το μηχανοστάσιο σε μια θέση όπου μπορεί να γίνεται έλεγχος. Ο σωλήνας υψηλής πίεσης έχει το άκρο του στο εσωτερικό του μηχανοστασίου σε μια θέση που δεν επηρεάζεται από διακυμάνσεις πίεσης (όχι άμεση οπτική επαφή με αγωγούς αέρα, όχι κοντά στις πόρτες κ.λπ.). Η μονάδα πρέπει επίσης να βρίσκεται μακριά από οποιαδήποτε πηγή υπερβολικής θερμότητας (μακριά από ηλεκτρομηχανικά μηχανήματα που παράγουν υπερβολική θερμότητα).



[Πηγή: ABB Marine & Ports, “ S.W Cooling Pumps & Engine Room Ventilation Fans, VFD Upgrade” Installation Manual.]

Σχήμα 5.4<sup>ς</sup> Σημείο εγκατάστασης αισθητήρα διαφορικής πίεσης μηχανοστασίου.





[Πηγή: ABB Marine & Ports, “ S.W Cooling Pumps & Engine Room Ventilation Fans, VFD Upgrade” Installation Manual.]

Σχήμα 5.4<sup>η</sup> Σημεία εγκατάστασης σωλήνων.



[Πηγή: ABB Marine & Ports, “ S.W Cooling Pumps & Engine Room Ventilation Fans, VFD Upgrade” Installation Manual.]

Σχήμα 5.4<sup>θ</sup> Αισθητήρας διαφορικής πίεσης μηχανοστασίου (θύρες μέτρησης High και Low)

- **Οθόνη ελέγχου (touch panel/ HMI)**

Για την παρακολούθηση της σωστής λειτουργίας του συστήματος και της εξοικονόμησης ενέργειας θα εγκατασταθεί ένας πίνακας αφής στο δωμάτιο ελέγχου.



[Πηγή: ABB Marine & Ports, “ S.W Cooling Pumps & Engine Room Ventilation Fans, VFD Upgrade” Installation Manual.]

Σχήμα 5.4' Εγκατάσταση οθόνης ελέγχου συστήματος στο δωμάτιο ελέγχου του πλοίου.



[Πηγή: ABB Marine & Ports, “ S.W Cooling Pumps & Engine Room Ventilation Fans, VFD Upgrade” Installation Manual.]

Σχήμα 5.4κ Εγκατάσταση οθόνης ελέγχου συστήματος στο δωμάτιο ελέγχου του πλοίου.

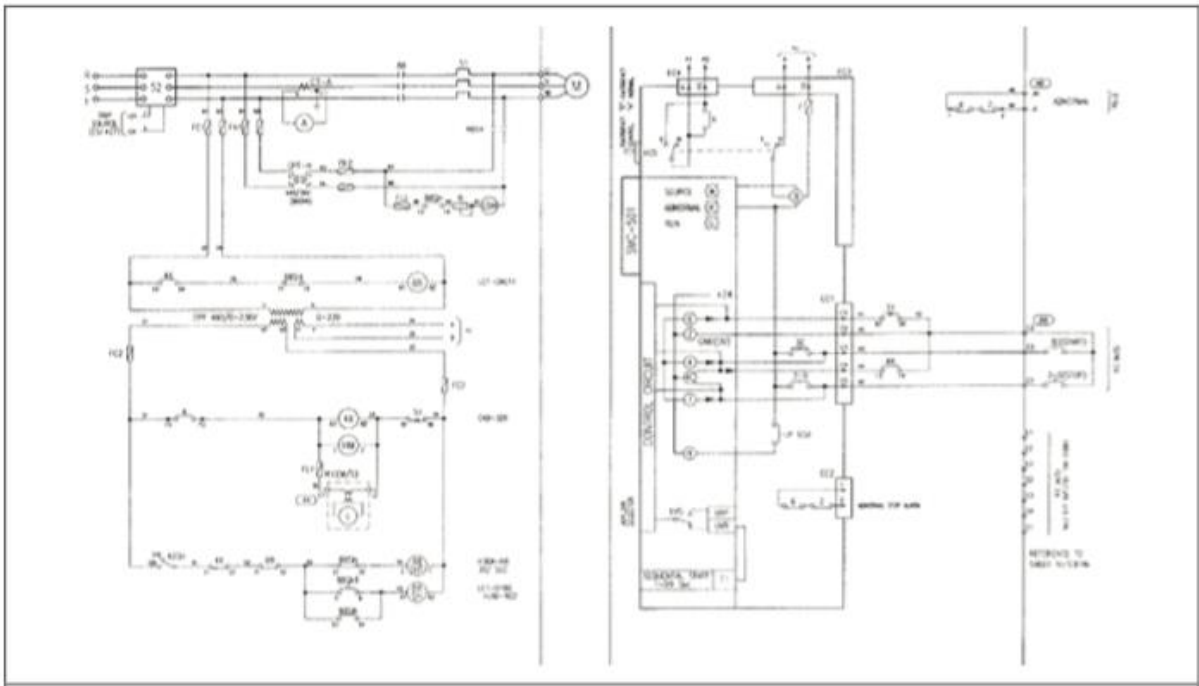
- **Εγκατάσταση των καλωδίων ελέγχου.**

Η εγκατάσταση των καλωδίων ελέγχου, δηλαδή: τα καλώδια επικοινωνιών Modbus, τα καλώδια από τις καμπίνες για την εκκίνηση των πινάκων, τα καλώδια από τις καμπίνα σε καμπίνα και τα καλώδια αισθητήρων, χρειάζονται ιδιαίτερη προσοχή. Πρέπει να αποφεύγεται η τοποθέτησή τους δίπλα στα καλώδια τροφοδοσίας. Θα

πρέπει να εγκατασταθούν δίπλα σε άλλα καλώδια ελέγχου. Όταν πρόκειται να τοποθετηθούν καλώδια ελέγχου μέσα σε κανάλια καλωδίων, θα πρέπει να προτιμηθούν τα κανάλια καλωδίων που περιέχουν πάλι καλώδια ελέγχου. Ο ηλεκτρομαγνητικός θόρυβος / παρεμβολή από καλώδια ισχύος, μπορεί να προκαλέσει σφάλματα στην επικοινωνία Modbus και συνεπώς υποβάθμιση της ποιότητας της επικοινωνίας που επηρεάζει την απόδοση του συστήματος.

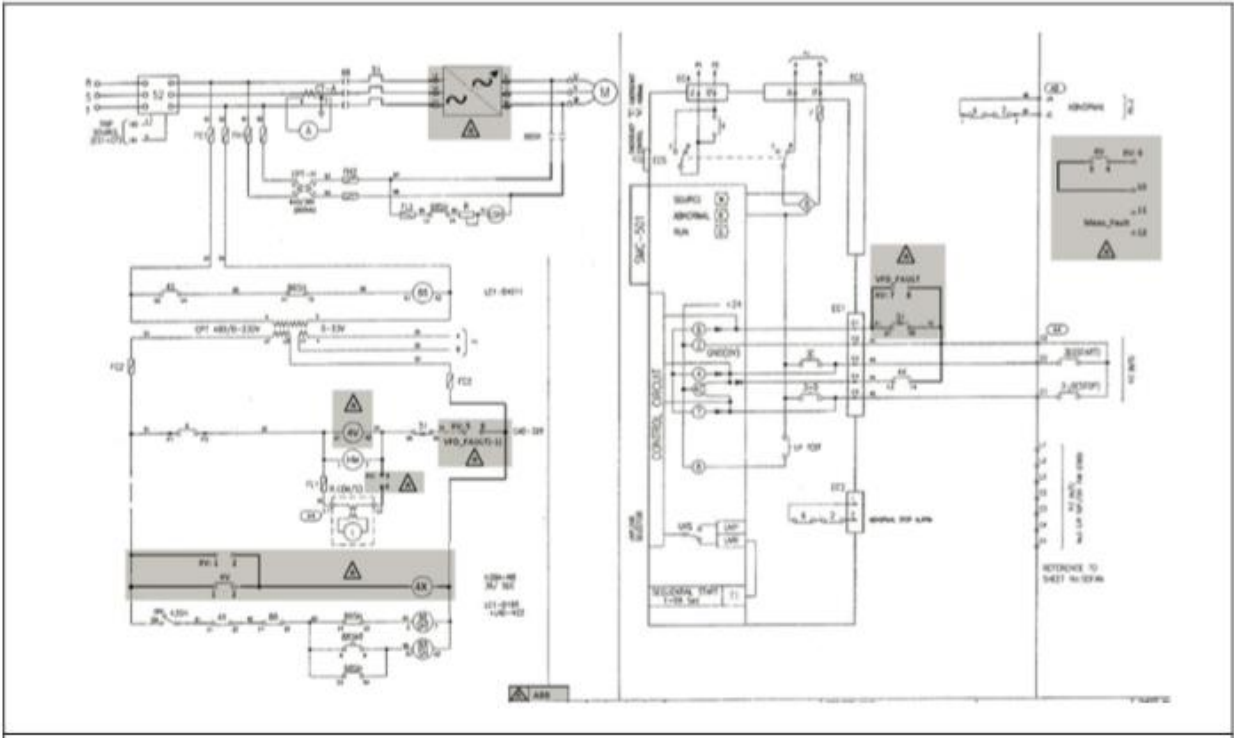
- **Τροποποιήσεις στο υπάρχων κύκλωμα του πλοίου.**

Οι τροποποιήσεις στο υπάρχων κύκλωμα του πλοίου γίνονται για να ενσωματωθούν τα VFD στο υπάρχον σύστημα αυτοματισμού. Η υπάρχουσα λειτουργία του συστήματος δεν επηρεάζεται. Η κατάσταση και τα σφάλματα του κινητήρα προς το σύστημα αυτοματισμού παραμένουν οι ίδιες και μόνο όταν ο διακόπτης είναι σε λειτουργία VFD ελέγχει τον κινητήρα το νέο σύστημα.



[Πηγή: ABB Marine & Ports, “ S.W Cooling Pumps & Engine Room Ventilation Fans, VFD Upgrade” Installation Manual.]

Σχήμα 5.4<sup>ι</sup> Υπάρχων κύκλωμα αυτοματισμού πλοίου.



[Πηγή: ABB Marine & Ports. "S.W Cooling Pumps & Engine Room Ventilation Fans, VFD Upgrade" Installation Manual.]

Σχήμα 5.4<sup>ο</sup> Τροποποιημένο κύκλωμα αυτοματισμού πλοίου.

## 5.5 Εγκατάσταση και λειτουργία touch panel/HMI.

Για την ανάπτυξη της εφαρμογής έχει γίνει στο πρόγραμμα της ABB Panel Builder 800.



[Πηγή: ABB Marine & Ports, “ S.W Cooling Pumps & Engine Room Ventilation Fans, VFD Upgrade” Installation Manual.]

*Σχήμα 5.5<sup>α</sup> Πλήκτρα περιήγησης της οθόνης ελέγχου.*

Το μπουτόν **Home**, μας μεταφέρει στην κεντρική οθόνη του συστήματος όπως αυτή φαίνεται στο παραπάνω σχήμα, όπου περιλαμβάνει τον τίτλο του συστήματος και τα υπόλοιπα μπουτόν πλοήγησης που θα αναλύσουμε στην συνέχεια.

Το μπουτόν **Status**, μας μεταφέρει σε επόμενη οθόνη όπου εκεί μπορούμε να επιλέξουμε το σύστημα, δηλαδή το σύστημα αντλιών ή ανεμιστήρων, που θέλουμε να μάθουμε σε τι κατάσταση βρίσκεται (βλ. Σχήμα 5.5<sup>β</sup>).



[Πηγή: ABB Marine & Ports, “S.W Cooling Pumps & Engine Room Ventilation Fans, VFD Upgrade” Installation Manual.]

Σχήμα 5.5<sup>β</sup> Πλήκτρα περιήγησης της οθόνης ελέγχου.

Επιλέγοντας το **σύστημα αντλιών**, μεταφερόμαστε στην οθόνη που φαίνεται η κατάσταση του συστήματος αυτού. Η πρώτη αντλία του συστήματος απεικονίζεται στην αριστερή πλευρά και οι πληροφορίες της δεύτερης αντλίας απεικονίζονται στη δεξιά πλευρά.

Οι πληροφορίες που εμφανίζονται έχουν να κάνουν με:

- Την ταχύτητα λειτουργίας (RPM) της αντλίας, η οποία απεικονίζεται γραφικά ως ποσοστό.
- Η επιλογή λειτουργίας (VFD ή DOL).
- Οι ώρες λειτουργίας του VFD.
- Η ονομαστική Ισχύς.
- Η πραγματική ισχύς.
- Η ενέργεια που έχουμε εξοικονομήσει.
- Η ενέργεια που έχουμε εξοικονομήσει ως ποσοστό της συνολικής ενέργειας.
- Το σημείο αναφοράς της θερμοκρασίας του γλυκού νερού.
- Η τιμή του σημείου αναφοράς (ελάχιστης) πίεσης θαλασσινού νερού.
- Η πραγματική τιμή της θερμοκρασίας του γλυκού νερού.
- Η πραγματική τιμή της πίεσης του θαλασσινού νερού.

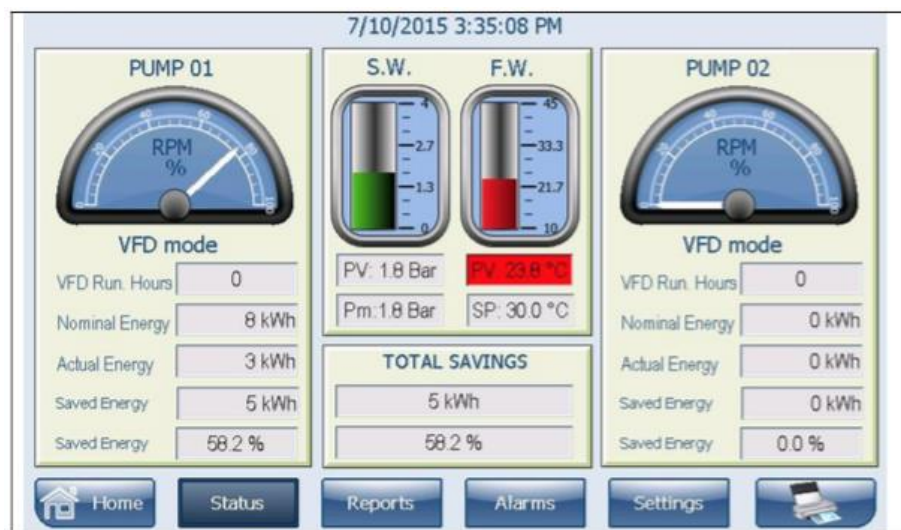
Επίσης εμφανίζεται η συνολική εξοικονόμηση ενέργειας του συστήματος αντλίας (σε kWh και ως ποσοστό).

Σε περίπτωση βλάβης στο σύστημα των αντλιών (π.χ. σφάλμα του VFD), η οθόνη κατάστασης ενημερώνει τον χειριστή με την χρήση του σήματος κινδύνου.

Ο χρήστης πρέπει να επιλύσει την αιτία του σφάλματος (μπορεί να χρησιμοποιήσει και την λίστα συναγερμών που περιγράφεται παρακάτω) και στη συνέχεια να πιάσει το σήμα κινδύνου που εμφανίστηκε, για επαναφορά του σφάλματος και επιστροφή στην κανονική λειτουργία.



Σχήμα 5.5<sup>γ</sup> Σήμα κινδύνου

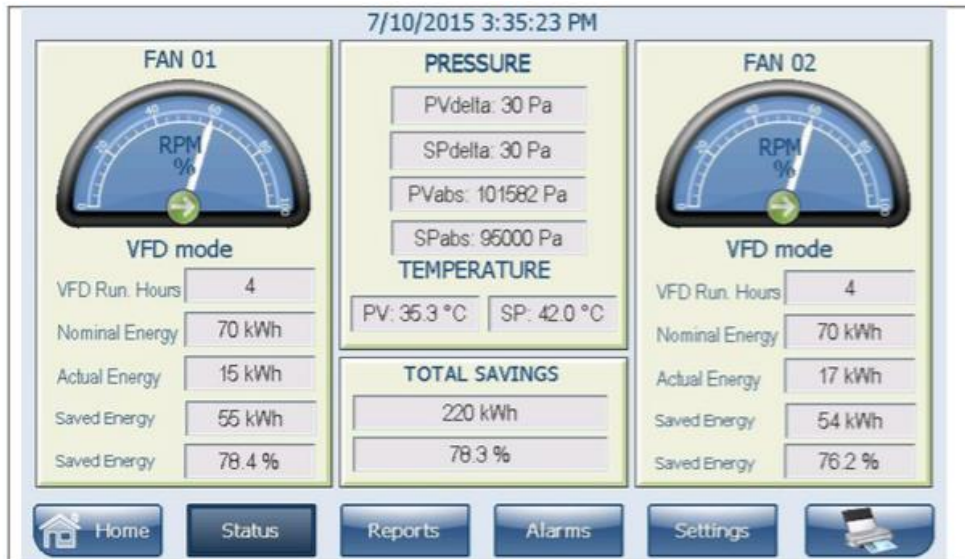


[Πηγή: ABB Marine & Ports, “S.W Cooling Pumps & Engine Room Ventilation Fans, VFD Upgrade” Installation Manual.]

Σχήμα 5.5<sup>δ</sup> Οθόνη λειτουργίας συστήματος αντλιών.

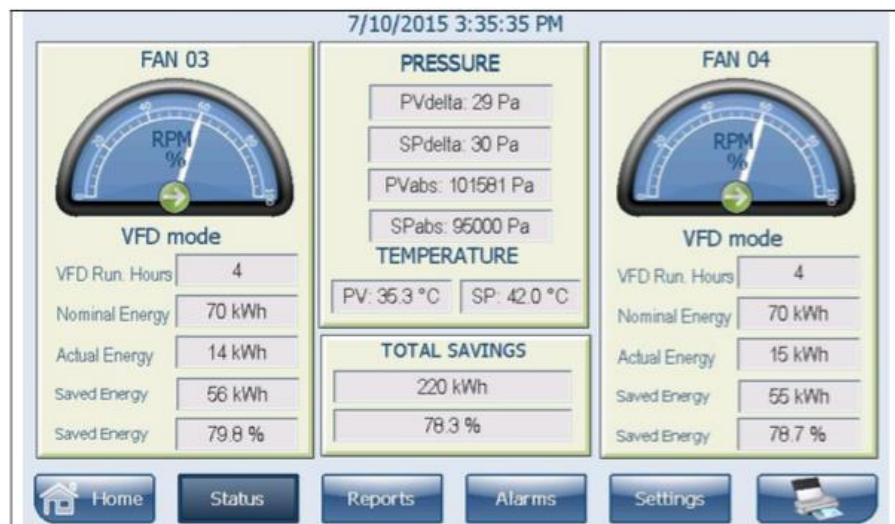
Στην οθόνη κατάστασης των ανεμιστήρων, ο χρήστης μπορεί να έχει μια επισκόπηση του συστήματος για 2 ανεμιστήρες (ανεμιστήρας 01 και 02 ή ανεμιστήρας 03 και 04).





[Πηγή: ABB Marine & Ports, “ S.W Cooling Pumps & Engine Room Ventilation Fans, VFD Upgrade” Installation Manual.]

Σχήμα 5.5<sup>ε</sup> Οθόνη λειτουργίας συστήματος ανεμιστήρων 1&2.



[Πηγή: ABB Marine & Ports, “ S.W Cooling Pumps & Engine Room Ventilation Fans, VFD Upgrade” Installation Manual.]

Σχήμα 5.5<sup>στ</sup> Οθόνη λειτουργίας συστήματος ανεμιστήρων 3&4.

Οι ανεμιστήρες 01&03 απεικονίζονται στην αριστερή πλευρά και οι πληροφορίες για τους ανεμιστήρες 02&04 απεικονίζονται στη δεξιά πλευρά.

Στην οθόνη αυτή ο χρήστης ενημερώνεται για τις εξής πληροφορίες:

- Την ταχύτητα λειτουργίας (RPM) των ανεμιστήρων, η οποία απεικονίζεται γραφικά ως ποσοστό.
- Η επιλογή λειτουργίας (VFD ή DOL)
- Τις ώρες λειτουργίας των VFD



- Την κατεύθυνση περιστροφής των ανεμιστήρων (αν παρέχουν αέρα ή αν χρησιμοποιούνται για την απομάκρυνση – εξαερισμός). Το πράσινο βέλος που δείχνει προς τα δεξιά αντιπροσωπεύει την παροχή αέρα, ενώ το πράσινο βέλος που δείχνει αριστερά αντιπροσωπεύει τον εξαερισμό.
- Την ονομαστική ισχύς.
- Την πραγματική ισχύς.
- Την ενέργεια που έχουμε εξοικονομήσει.
- Την αποθηκευμένη ενέργεια ως ποσοστό της συνολικής ενέργειας.
- Το σημείο αναφοράς του αισθητήρα απόλυτης πίεσης (σε χιλιάδες Paschal).
- Το σημείο αναφοράς του αισθητήρα διαφορικής πίεσης (σε Pa).
- Την πραγματική τιμή αισθητήρα απόλυτης πίεσης.
- Την πραγματική τιμή αισθητήρα διαφορικής πίεσης.
- Το σημείο αναφοράς της θερμοκρασίας.
- Την πραγματική τιμή της θερμοκρασίας

Επίσης εμφανίζεται η συνολική εξοικονόμηση (του συστήματος των 4 ανεμιστήρων) (σε kWh και ως ποσοστό). Σε περίπτωση που υπάρχει σφάλμα σε ένα σύστημα ανεμιστήρα ακολουθείται η ίδια διαδικασία όπως και στο σύστημα αντλιών.

Επιλέγοντας το μπουτόν **Reports (αναφορές)**, ο χρήστης κατευθύνεται στο Μενού Αναφορών όπου μπορεί να λαμβάνει αναφορές για το σύστημα αντλιών, ανεμιστήρων καθώς και την συνολική εξοικονόμηση του συστήματος.



[Πηγή: ABB Marine & Ports, “S.W Cooling Pumps & Engine Room Ventilation Fans, VFD Upgrade” Installation Manual.]

Σχήμα 5.5<sup>ς</sup> Μενού αναφορών συστήματος.

Εφόσον επιλέξουμε ποιο σύστημα θέλουμε, η επόμενη οθόνη που ανοίγει μας δείχνει το ποσοστό της μηνιαίας εξοικονόμησης. Ο 1ος μήνας που εμφανίζεται στην αριστερή πλευρά του πίνακα είναι πάντοτε ο προηγούμενος μήνας του τρέχοντος, και προς δεξιά εμφανίζονται και οι 11 παλαιότεροι μήνες. Έτσι, αυτός ο πίνακας εμφανίζει πάντα τους τελευταίους 12 μήνες (βλ σχήμα 5.5<sup>η</sup>).



[Πηγή: ABB Marine & Ports, “ S.W Cooling Pumps & Engine Room Ventilation Fans, VFD Upgrade” Installation Manual.]

Σχήμα 5.5<sup>η</sup> Ποσοστά εξοικονόμησης ενέργειας κατά τους τελευταίους δώδεκα μήνες.

Η οθόνη αναφορών περιέχει δύο κουμπιά στο επάνω μέρος της. Το κουμπί "Δημιουργία αναφοράς"(Generate Report), παράγει μια αναφορά των τελευταίων 12 μηνών λειτουργίας του συστήματος. Αυτή η αναφορά περιέχει καταγραφές ολόκληρου του έτους. Η ίδια αναφορά παράγεται επίσης αυτόματα στην αρχή κάθε νέου έτους. Επομένως, τουλάχιστον μία φορά το χρόνο αποθηκεύεται μια αναφορά στη μνήμη USB που περιέχει όλες τις πληροφορίες του τελευταίου έτους. Οι αναφορές αποθηκεύονται στον ομώνυμο φάκελο του USB stick. Δεξιά υπάρχει το πλήκτρο **Trend**, που εμφανίζει το συνολικό ονομαστικό ρεύμα συστήματος με την κόκκινη γραμμή και την πραγματική τροφοδοσία του συστήματος με την πράσινη γραμμή.

Τα κουμπιά που έχει στο επάνω μέρος της αυτή η οθόνης, δηλαδή, **Ιστορικό**, και **Μηνιαίες εξοικονομήσεις**, μας εμφανίζουν ένα παράθυρο στο οποίο έχουν ρυθμιστεί οι επιλογές χρόνου για το διάγραμμα, και το άλλο μας μεταφέρει πίσω στην οθόνη μηνιαίων αναφορών.



[Πηγή: ABB Marine & Ports, “ S.W Cooling Pumps & Engine Room Ventilation Fans, VFD Upgrade” Installation Manual.]

Σχήμα 5.5<sup>θ</sup> Διάγραμμα ονομαστικής και πραγματικής ισχύς συστήματος.



[Πηγή: ABB Marine & Ports, “ S.W Cooling Pumps & Engine Room Ventilation Fans, VFD Upgrade” Installation Manual.]

Σχήμα 5.5' Ρυθμίσεις ώρας ιστορικού.

Με το μπουτόν **Alarms (ειδοποιήσεις)**, ο χρήστης μεταβαίνει στη λίστα συναγερμών του συστήματος. Οι συναγερμοί και τα συμβάντα παρουσιάζονται με χρονολογική σειρά, όπως φαίνεται και στην παρακάτω φωτογραφία.

Active Time	Text	Acknowledged Time
5/29/2014 8:47:15 AM	Drive1 DC UnderVoltage Fault	
5/29/2014 8:46:52 AM	Drive1 Thermistor Fault	5/29/2014 8:46:59 AM
5/29/2014 8:46:34 AM	Drive1 ACS800 Temp Fault	
5/29/2014 8:46:32 AM	Drive1 DC OverVoltage Fault	
5/29/2014 8:46:32 AM	PP Pump1 VFD Op	
5/29/2014 8:46:32 AM	PP Pump1 Running	
5/29/2014 8:46:32 AM	PP Pump2 VFD Op	
5/29/2014 8:46:32 AM	PP Pump2 Running	
5/29/2014 8:46:31 AM	PP Pump1 Local Op	
5/29/2014 8:46:31 AM	PP Pump2 Local Op	
5/29/2014 8:46:28 AM	Drive1 DC OverVoltage Fault	
5/29/2014 8:46:19 AM	Drive1 Overcurrent Fault	
5/29/2014 8:45:16 AM	PP Pump1 Running	

Active: 6 Inactive: 996 Ack: 1 Normal: 71 [300 / 1074] Alarms State Filter Enabled

[Πηγή: ABB Marine & Ports, “ S.W Cooling Pumps & Engine Room Ventilation Fans, VFD Upgrade” Installation Manual.]

Σχήμα 5.5<sup>κ</sup> Οθόνη ειδοποιήσεων.

Η έννοια των χρωμάτων είναι η εξής:

Για τους συναγερμούς:

**ΚΟΚΚΙΝΟ:** Ενεργός συναγερμός.

**ΠΡΑΣΙΝΟ:** Ο συναγερμός επιβεβαιώθηκε αλλά εξακολουθεί να είναι ενεργός.

**ΚΙΤΡΙΝΟ:** Η κατάσταση συναγερμού δεν είναι ενεργή, αλλά δεν είναι επιβεβαιωμένη.

**ΛΕΥΚΟ:** Η ειδοποίηση είναι επιβεβαιωμένη και δεν είναι ενεργή.

Για γεγονότα:

**ΛΕΥΚΟ:** Παρουσιάστηκε συμβάν.

Πατώντας σε αυτή την οθόνη εμφανίζεται ένα μενού επιλογών στο οποίο είναι διαθέσιμη η επιλογή διαγραφή όλης της λίστας ειδοποιήσεων. Υπάρχει επίσης μια επιλογή για φιλτράρισμα, στην οποία μπορείτε να επιλέξετε ποιά από τα εμφανιζόμενα στοιχεία θέλετε να εμφανιστούν.

Με τα κουμπιά στην επάνω δεξιά πλευρά της οθόνης μπορούμε να επιλέξουμε τις εξής ενέργειες:

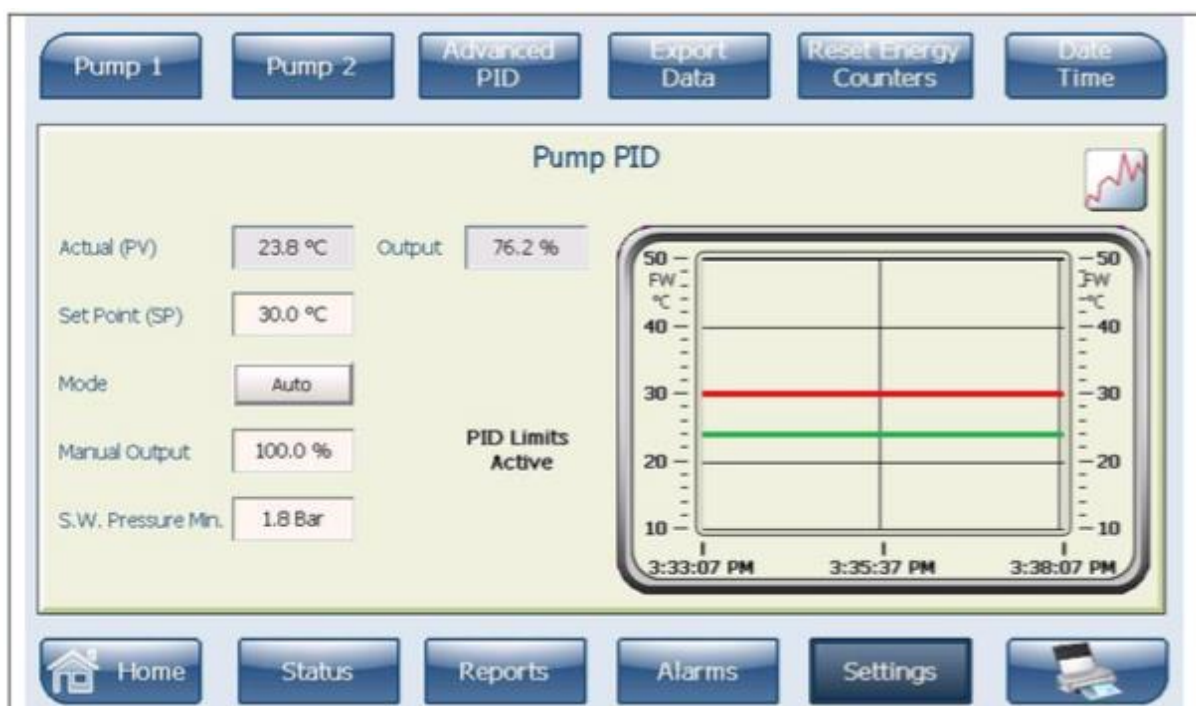
**Ack All:** επιβεβαιώνει όλους τους ενεργούς συναγερμούς που εμφανίζονται στη λίστα συναγερμών.

**Ack Selected:** αναγνωρίζει το επιλεγμένο από τον χρήστη συμβάν στη λίστα συναγερμών.

**Εξαγωγή λίστας συναγερμών:** Εξάγει την τρέχουσα λίστα συναγερμών στο stick USB.

Πατώντας το μενού **Ρυθμίσεις (Settings)**, ο χρήστης θα εισέλθει στο μενού ρυθμίσεων για το σύστημα αντλιών ή ανεμιστήρων. Στο μενού ρυθμίσεων ο χρήστης μπορεί να αλλάξει τις παραμέτρους του συστήματος, να πάρει τον έλεγχο των κινητήρων και να αλλάξει επίσης τις ρυθμίσεις του ελεγκτή PID. Για το λόγο αυτό μόνο το εξειδικευμένο προσωπικό θα πρέπει να έχει πρόσβαση σε αυτή τη λειτουργία, η οποία είναι επίσης προστατευμένη με κωδικό πρόσβασης.

Αν επιλέξουμε τις ρυθμίσεις του συστήματος των αντλιών, θα μεταφερθούμε στην οθόνη όπου ρυθμίζονται οι παράμετροι του PID ελεγκτή (βλ. Σχήμα 5.5<sup>λ</sup>).



[Πηγή: ABB Marine & Ports, “ S.W Cooling Pumps & Engine Room Ventilation Fans, VFD Upgrade” Installation Manual.]

Σχήμα 5.5<sup>λ</sup> Παράμετροι ελεγκτή PID συστήματος αντλιών.

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι το σύστημα (για αντλίες και ανεμιστήρες) παραδίδεται σε πλήρη αυτόματη κατάσταση. Αυτό σημαίνει ότι δηλαδή όλες οι αντλίες ελέγχονται από έναν ελεγκτή PID (όσον αφορά την ταχύτητά τους) και επίσης ο PID οδηγεί τις αντλίες με βάση τις ενδείξεις των οργάνων. Ο εξουσιοδοτημένος χρήστης μπορεί να :

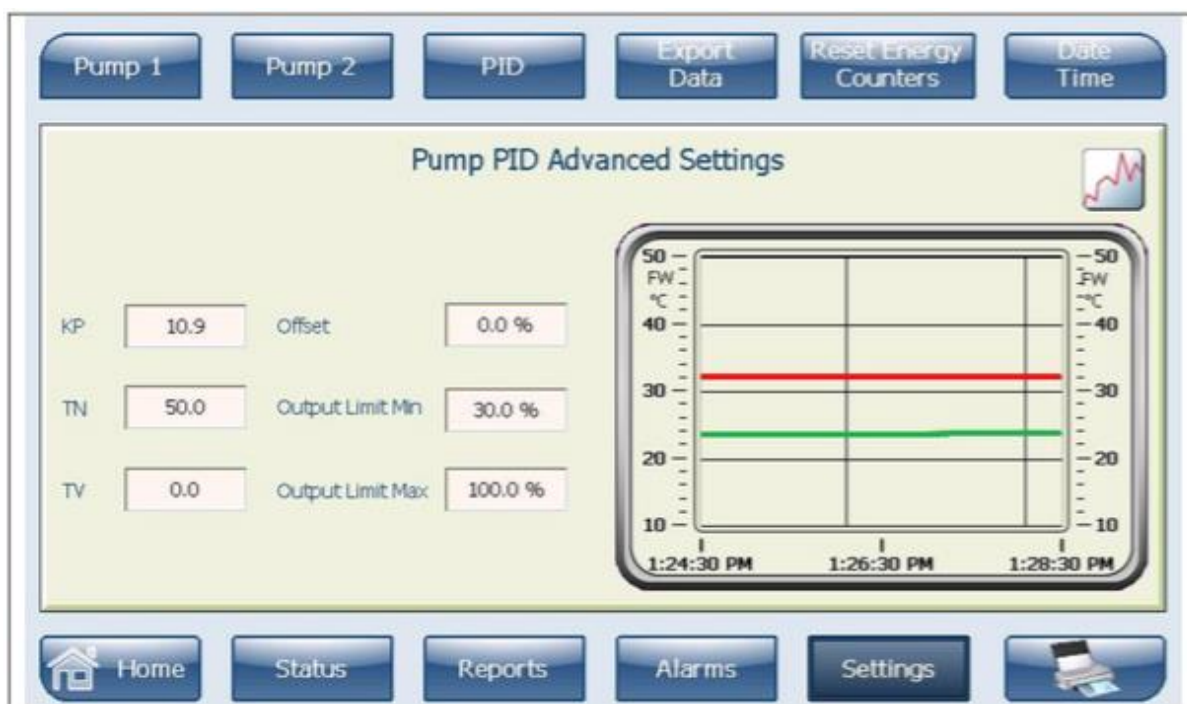
- 1) Αλλάξει την λειτουργία του PID από το αυτόματο (auto – με βάση τις ενδείξεις των οργάνων), σε χειροκίνητο (manual – χειροκίνητη ρύθμιση RPM για όλες τις αντλίες).
- 2) Τον χειροκίνητο έλεγχο κάθε αντλίας (στην περίπτωση αυτή η αντλία δεν ακολουθεί κανέναν ελεγκτή PID, αλλά περιστρέφεται σε ταχύτητα που δίνεται απευθείας από τον εξουσιοδοτημένο χρήστη).



Συνοπτικά, στην οθόνη αυτή ο εξουσιοδοτημένος χρήστης μπορεί:

- Να Αλλάξει την λειτουργία του ελεγκτή PID από Auto σε Manual.
- Να ρυθμίσει την χειροκίνητη έξοδο του PID σε ένα συγκεκριμένο ποσοστό.
- Να αλλάξει το σημείο αναφοράς ελάχιστης πίεσης του θαλασσινού νερού.
- Να αλλάξει το σημείο αναφοράς γλυκού νερού.
- Να δει την πραγματική τιμή της θερμοκρασίας του γλυκού νερού
- Να προβάλει την πραγματική τιμή της εξόδου PID (Σημαντική για την αυτόματη λειτουργία, αφού σε χειροκίνητη λειτουργία αυτό είναι το ίδιο με το "Manual Output").

Πατώντας το πλήκτρο, **Ρυθμίσεις για προχωρημένους (advanced settings screen)**, ο χρήστης μεταφέρεται στην οθόνη των ρυθμίσεων για το σύστημα αντλιών.



[Πηγή: ABB Marine & Ports, "S.W Cooling Pumps & Engine Room Ventilation Fans, VFD Upgrade" Installation Manual.]

Σχήμα 5.5<sup>μ</sup> Ρύθμιση παραμέτρων PID ελεγκτή για το σύστημα αντλιών.

Εκεί ο εξουσιοδοτημένος χρήστης μπορεί να αλλάξει τις παραμέτρους του PID ελεγκτή, όπως KP, TN, TV, να ρυθμίσει τις τιμές εξόδου Min και Max (π.χ Η ταχύτητα των αντλιών δεν μπορεί να πέσει κάτω από 30%) και το σημείο αναφοράς των τιμών του PID ελεγκτή.

Στην συνέχεια Πατώντας το πλήκτρο πάνω αριστερά "**Αντλία 1**" (**Pump 1**) ή αντλία 2 αντίστοιχα, ο χρήστης μεταφέρεται στην οθόνη που βρίσκονται οι υπόλοιπες ρυθμίσεις της πρώτης αντλίας.

Ο εξουσιοδοτημένος χρήστης μπορεί να:

- Αλλάξει την λειτουργία (για αυτή τη συγκεκριμένη αντλία) από αυτόματη λειτουργία σε χειροκίνητη. Αυτόματος χειρισμός σημαίνει ότι η ταχύτητα της αντλίας ελέγχεται από τον ελεγκτή PID. Η χειροκίνητη λειτουργία σημαίνει ότι ο χρήστης ρυθμίζει την ταχύτητα της αντλίας.
- Ρυθμίσει την χειροκίνητη ταχύτητα.
- Παρακολουθήσει την πραγματική ταχύτητα της αντλίας.
- Παρακολουθήσει την πραγματική ισχύ.
- Παρακολουθήσει το πραγματικό ρεύμα στην αντλία.

Με το πάτημα του κουμπιού **επαναφορά των μετρητών ενέργειας (reset energy counters)**, ο εξουσιοδοτημένος χρήστης θα επαναφέρει στην τιμή μηδέν όλους τους μετρητές ενέργειας του συστήματος αντλιών.

Πατώντας το πλήκτρο ρυθμίσεων **ώρας και ημερομηνίας (Date & Time)**, ο εξουσιοδοτημένος χρήστης θα μπορεί να,

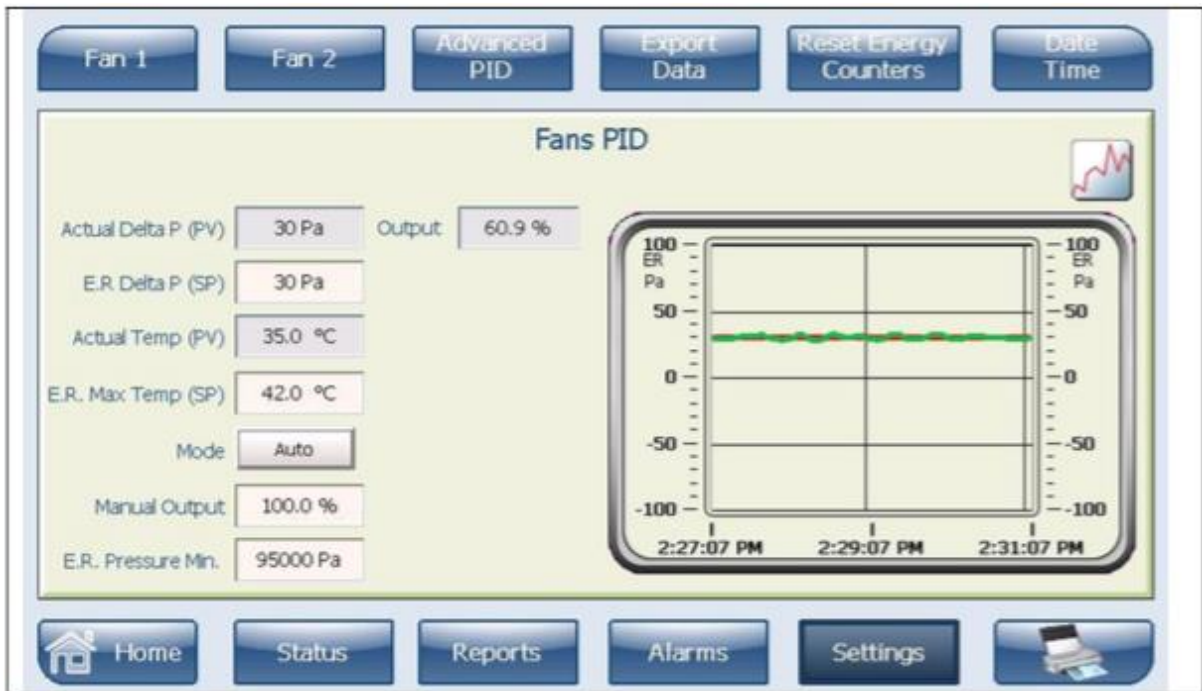
- Ορίσει την ώρα στον της οθόνης.
- Να συγχρονισει την ώρα του PLC με την ώρα της οθόνης. Το PLC και το Panel θα πρέπει να τρέχουν ταυτόχρονα με την ίδια ρύθμιση ώρας, η οθόνη θα είναι ο αυτός που θα δίνει την ώρα (master) και το PLC αυτός που θα την ακολουθεί (slave).

Ένα άλλο μπουτόν είναι για την **εξαγωγή και αποθήκευση των δεδομένων (Export data)**.

Όπου εδώ ο χρήστης ζητά από την οθόνη, να δημιουργήσει ένα αρχείο στο USB stick με τις τιμές των παραμέτρων του συστήματος.

Αντίστοιχα για τις ρυθμίσεις των παραμέτρων του συστήματος των ανεμιστήρων (1-2 & 3-4), ισχύουν τα ίδια με το σύστημα των αντλιών. Όλοι οι ανεμιστήρες ελέγχονται από μια διαδικασία PID (όσον αφορά την ταχύτητά τους) και επίσης ο PID ελεγκτής οδηγεί τους ανεμιστήρες με βάση τις ενδείξεις των οργάνων. Ο εξουσιοδοτημένος χρήστης μπορεί:

- 1) Αλλάξει την λειτουργία του PID από το αυτόματο (auto – με βάση τις ενδείξεις των οργάνων), σε χειροκίνητο (manual – χειροκίνητη ρύθμιση RPM για όλους τους ανεμιστήρες).
- 2) Τον χειροκίνητο έλεγχο κάθε ανεμιστήρα (στην περίπτωση αυτή ο κάθε ανεμιστήρας δεν ακολουθεί κανέναν ελεγκτή PID, αλλά περιστρέφεται σε ταχύτητα που δίνεται απευθείας από τον εξουσιοδοτημένο χρήστη).



[Πηγή: ABB Marine & Ports, "S.W Cooling Pumps & Engine Room Ventilation Fans, VFD Upgrade" Installation Manual.]

Σχήμα 5.5<sup>ν</sup> Παράμετροι ελεγκτή PID συστήματος ανεμιστήρων.

Ο εξουσιοδοτημένος χρήστης μπορεί να:

- Αλλάζει την λειτουργία PID από Auto σε Manual.
- Να ρυθμίσει χειροκίνητα την τιμή εξόδου του ελεγκτή PID σε ένα συγκεκριμένο ποσοστό.
- Να αλλάξει την ελάχιστη τιμή πίεσης στο μηχανοστάσιο.
- Να αλλάξει την τιμή αναφοράς της μέγιστης θερμοκρασίας του μηχανοστασίου.
- Να αλλάξει την τιμή αναφοράς της πίεσης του μηχανοστασίου (για τον διαφορικό αισθητήρα πίεσης).
- Να δεί ανα πάσα στιγμή την πραγματική τιμή του διαφορικού αισθητήρα πίεσης.
- Να δεί την πραγματική τιμή της θερμοκρασίας (με βάση τους 4 αισθητήρες θερμοκρασίας).
- Να προβάλλει την πραγματική τιμή της εξόδου του PID ελεγκτή (όπου είναι σημαντική για την αυτόματη λειτουργία, δεδομένου ότι στη χειροκίνητη λειτουργία αυτό είναι το ίδιο με το "Manual Output").

Πατώντας το πλήκτρο, **Ρυθμίσεις για προχωρημένους (advanced settings screen)**, ο χρήστης μεταφέρεται στην οθόνη των ρυθμίσεων για το σύστημα των ανεμιστήρων.



Εκεί ο εξουσιοδοτημένος χρήστης μπορεί να αλλάξει τις παραμέτρους του ελεγκτή PID των ανεμιστήρων όπως KP, TN, TV, Offset, Out Min και Max Limits. Πατώντας τις **ρυθμίσεις θερμοκρασίας** κουμπιών, ο εξουσιοδοτημένος χρήστης μεταφέρεται στην οθόνη θερμοκρασίας.

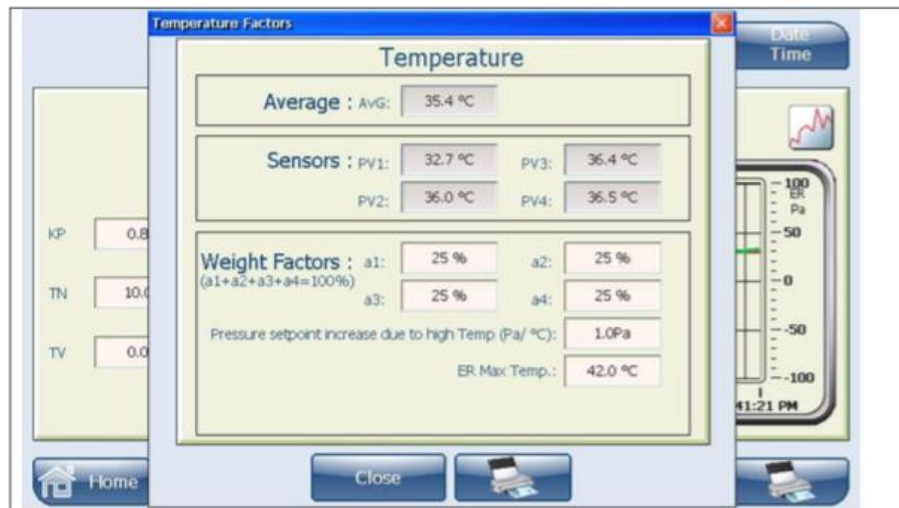


[Πηγή: ABB Marine & Ports, “S.W Cooling Pumps & Engine Room Ventilation Fans, VFD Upgrade” Installation Manual.]

Σχήμα 5.5<sup>ς</sup> Ρύθμιση παραμέτρων PID ελεγκτή για το σύστημα ανεμιστήρων.

Στην οθόνη θερμοκρασίας ο χρήστης μπορεί να δει τις πραγματικές τιμές των 4 αισθητήρων θερμοκρασίας (PV1 έως PV4), καθώς και της μέσης θερμοκρασίας (AVG). Είναι η τιμή που χρησιμοποιεί ο ελεγκτής PID. Ο εξουσιοδοτημένος χρήστης μπορεί να αλλάξει τους συντελεστές βάρους και να λάβει μια μέση τιμή που επηρεάζεται περισσότερο ή λιγότερο από ορισμένους από τους υπάρχοντες αισθητήρες θερμοκρασίας. Ο εξουσιοδοτημένος χρήστης μπορεί επίσης να αλλάξει την τιμή μέγιστη τιμή θερμοκρασίας του μηχανοστάσιο, το σημείο αναφοράς της θερμοκρασίας και το σημείο αναφοράς της πίεσης αυξάνονται λόγω της υψηλής θερμοκρασίας.

Πατώντας το κουμπί **Κλείσιμο (Close)**, ο χρήστης επιστρέφει στην προηγούμενη οθόνη (Ρυθμίσεις για προχωρημένου του ελεγκτή PID). Από εκεί, ο χρήστης μπορεί να πατήσει το κουμπί **Ρυθμίσεις**, και να επιλέξει την καμπίνα των ανεμιστήρων 1 & 2 ή 3 & 4 και τότε πιέζοντας το αντίστοιχο κουμπί αριθμού ανεμιστήρα, μπορεί να ανοίξει τη σχετική οθόνη ρυθμίσεων για τον ανεμιστήρα αυτόν.



[Πηγή: ABB Marine & Ports, “ S.W Cooling Pumps & Engine Room Ventilation Fans, VFD Upgrade” Installation Manual.]

*Σχήμα 5.5<sup>ο</sup> Μενού ρύθμισης θερμοκρασίας.*

Τα υπόλοιπα μπουτόν, **επαναφορά των μετρητών ενέργειας (reset energy counters)**, **ώρας και ημερομηνίας (Date & Time)**, **εξαγωγή και αποθήκευση των δεδομένων (Export data)**, έχουν ακριβώς τις ίδιες λειτουργίες όπως αυτά του συστήματος αντλιών.

Το κουμπί **εκτύπωσης** που υπάρχει σε όλες τις οθόνες, ο χρήστης μπορεί να χρησιμοποιήσει ανά πάσα στιγμή το κουμπί Print Screen (που βρίσκεται στην κάτω δεξιά πλευρά όλων των οθονών). Πατώντας αυτό, η εφαρμογή αντιγράφει την τρέχουσα οθόνη ως εικόνα στο USB stick, στον ομώνυμο φάκελο **Στιγμιότυπα** με ένα όνομα αρχείου συσχετισμένο με το πραγματικό όνομα οθόνης, την ημερομηνία και την ώρα.

### **Εκκίνηση και σταμάτημα του συστήματος.**

Οι λειτουργίες εκκίνησης και διακοπής για τις αντλίες και τους ανεμιστήρες, παραμένουν αμετάβλητες μετά την εγκατάσταση του συστήματος VFD. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι αλλαγές στα υπάρχον κύκλωμα αυτοματισμού της εγκατάστασης, είναι τέτοιες που αφήνουν την τρέχουσα λειτουργικότητα αμετάβλητη. Όλοι οι κινητήρες (αντλίες ή ανεμιστήρες) μπορούν να λειτουργούν σε ένα από τους δύο τρόπους:

- 1. Λειτουργία DOL (Direct-On-Line)**
- 2. Λειτουργία VFD (Drive Μεταβλητής Συχνότητας).**

Σε λειτουργία DOL, κάθε κινητήρας λειτουργεί απευθείας από τον πίνακα εκκίνησης χωρίς την παρέμβαση στη μονάδα. Η εργασία σε αυτή τη λειτουργία είναι σαν να έχετε το σύστημα VFD εντελώς ξεπερασμένο. Σε κατάσταση λειτουργίας VFD, κάθε κινητήρας κινείται από τη το drive που είναι συνδεδεμένος. Για να εκκινήσετε έναν κινητήρα (αντλία ή ανεμιστήρα) σε λειτουργία DOL:

1. Στον πίνακα εκκίνησης του κινητήρα απενεργοποιήστε τον κύριο διακόπτη τροφοδοσίας .
2. Χρησιμοποιώντας το σχετικό διακόπτη επιλογής της καμπίνας, επιλέξτε τη θέση DOL.
3. Στο πάνελ έναρξης του κινητήρα ενεργοποιήστε τον κύριο διακόπτη τροφοδοσίας.
4. Πατήστε το κουμπί Έναρξη στο πλαίσιο εκκίνησης του κινητήρα.
5. Ο κινητήρας αρχίζει στη λειτουργία DOL.
6. Για να σταματήσετε τον κινητήρα: Πατήστε το κουμπί Stop στο πλαίσιο εκκίνησης του κινητήρα.

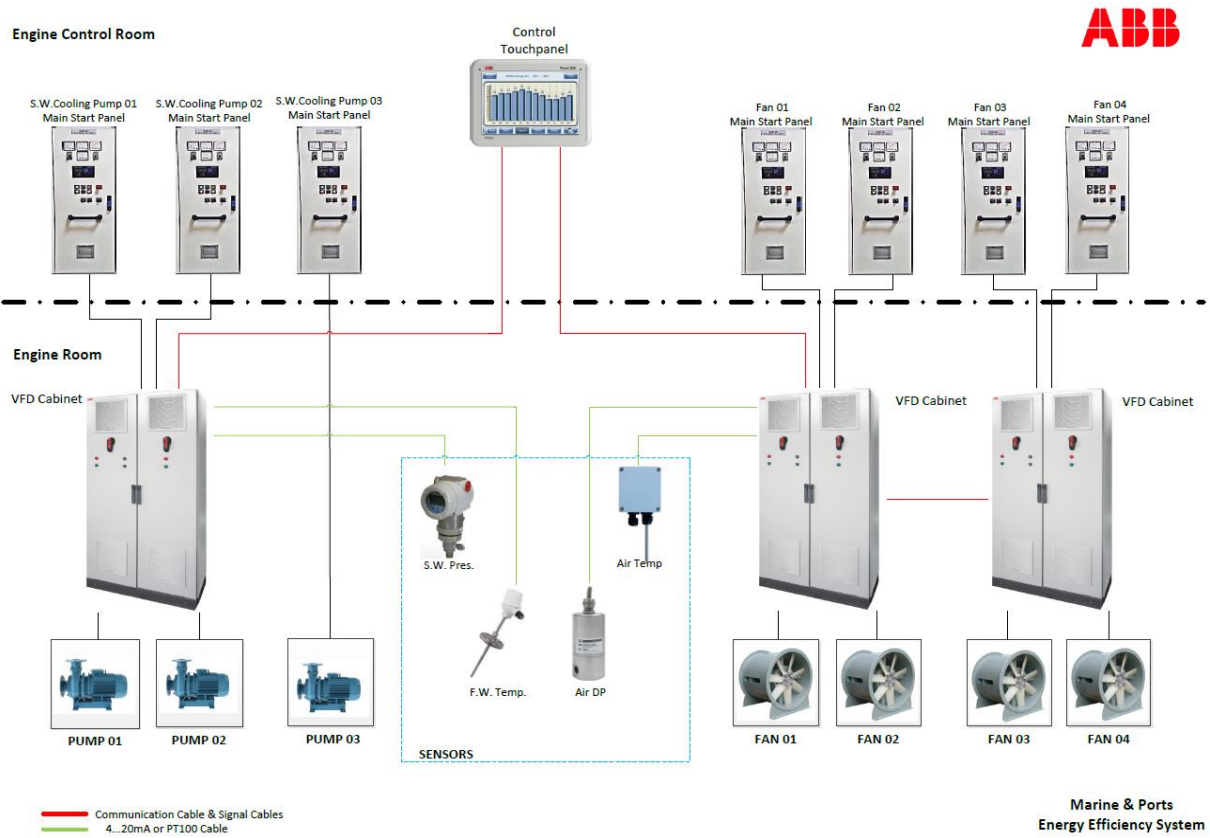
Για να εκκινήσετε έναν κινητήρα (αντλία ή ανεμιστήρα) σε λειτουργία VFD (ή αλλαγή λειτουργίας από DOL σε VFD):

1. Στον πίνακα εκκίνησης του κινητήρα πατήστε το STOP (εάν εκτελείται πριν) και απενεργοποιήστε τον κύριο διακόπτη τροφοδοσίας.
2. Χρησιμοποιώντας τον σχετικό διακόπτη επιλογής του θαλάμου ABB (βλ. Εικόνα 19) επιλέξτε τη θέση VFD.
3. Στο πάνελ έναρξης του κινητήρα ενεργοποιήστε τον κύριο διακόπτη τροφοδοσίας.
4. Πατήστε το κουμπί Έναρξη στο πλαίσιο εκκίνησης του κινητήρα.
5. Κινητήρας Εκκινεί σε λειτουργία VFD. Η σχετική κίνηση ελέγχει την ταχύτητα
6. Για να σταματήσετε τον κινητήρα: Πατήστε το κουμπί Stop στο πλαίσιο εκκίνησης του κινητήρα.



[Πηγή: ABB Marine & Ports, “ S.W Cooling Pumps & Engine Room Ventilation Fans, VFD Upgrade” Installation Manual.]

Σχήμα 5.5<sup>π</sup> Διακόπτης καμπίνας για την επιλογή λειτουργίας.



Σχήμα 5.5<sup>ρ</sup> Συνολική περιγραφή του συστήματος.

## 5.6 Περιγραφή του προγράμματος

Το πρόγραμμα του PLC αναπτύχθηκε στο Automation Builder της ABB και στην πλατφόρμα προγραμματισμού του Codesys. Ο προγραμματισμός του PLC έγινε σε γλώσσα προγραμματισμού Structured Text (ST) και CFC (Continuous Function Chart).

Η δομή του προγράμματος αποτελείται από ένα κεντρικό (main) πρόγραμμα που καλεί όλα τα υπο-προγράμματα και τις λειτουργίες (function blocks).

Στην αρχή το πρόγραμμα καλεί ένα υπο-πρόγραμμα στο οποίο ελέγχουμε τις τιμές των αισθητήρων καθώς και τις τιμές των παραμέτρων του ελεγκτή PID και τις αρχικοποιούμε.

Στην συνέχεια καλείται η επόμενη ρουτίνα που έχει να κάνει με την ώρα και την ημερομηνία (Real-time Clock) και συγχρονίζει το PLC με το touch-panel όπου καθορίζεται η ώρα και η ημερομηνία από τον χρήστη ή μέσω του SNTP server που έχουμε ορίσει.

Η επόμενη ρουτίνα που θα καλέσει το πρόγραμμα μας έχει να κάνει με τον έλεγχο των σφαλμάτων και τις ενδείξεις (Alarms & Indications). Εδώ διαβάζουμε ορισμένα σήματα από τα Drives που μας ενημερώνουν σε περίπτωση σφάλματος με αποστολή της ένδειξης στο touch panel καθώς και μέσω της ενδεικτικής λυχνίας που βρίσκεται εξωτερικά της καμπίνας. Επίσης ελέγχει εάν ο κινητήρας (αντλίας ή ανεμιστήρα) περιστρέφεται καθώς και την κατεύθυνση προς την οποία περιστρέφεται. Μια ακόμα λειτουργία που ορίζουμε σε αυτή την ρουτίνα είναι επαναφορά του σφάλματος (Fault Reset), όταν ο χρήστης επιλύσει το σφάλμα θα πρέπει να πατήσει το μπουτόν Fault Reset στο εξωτερικό μέρος της καμπίνας για να επαναφέρει το σύστημα στην αρχική του κατάσταση. Τέλος διαβάζουμε τις ενδείξεις των αισθητήρων και σε περίπτωση που οι τιμές που λαμβάνουμε ξεπεράσουν τα όρια που έχουμε ορίσει μας ενημερώνει ότι για παράδειγμα η θερμοκρασία είναι εκτός των επιθυμητών ορίων και αν το σύστημα μας είναι σε λειτουργία VFD ή DOL.

Στην συνέχεια καλείται η ρουτίνα η οποία διαβάζει τις αναλογικές τιμές που έρχονται από όλα τα αισθητήρια του συστήματος και στην συνέχεια μετασχηματίζει γραμμικά τις τιμές αυτές και μας επιστρέφει τις νέες πραγματικές τιμές στο εύρος που τις έχουμε ορίσει εμείς.

Οι δύο επόμενες ρουτίνες που καλούμε έχουν να κάνουν με την επικοινωνία των τεσσάρων Drive της εφαρμογής μας. Αρχικά ορίζουμε τις παραμέτρους για την επικοινωνία (COM Port, Slave ID, Timeout, Drive type) και ορίζουμε τον αριθμό των παραμέτρων που θέλουμε να διαβάζουμε και να γράφουμε από και προς το Drive.

Επίσης διαβάζουμε το Status World από το Drive και το αναλύουμε για να πάρουμε πληροφορίες σχετικά με την λειτουργία του Drive (ON, RUN, TRIPPED, OFF, ALARM

κ.α), καθώς και τα Drive Fault Word που μας δίνουν πληροφορίες σχετικά με τα σφάλματα που μπορεί να έχουμε στα Drive (Overcurrent, Overvoltage, Earth fault κ.α). Στο υποπρόγραμμα αυτό παίρνουμε από το Drive πληροφορίες σχετικά με την ταχύτητα, το ρεύμα και την ισχύ του κινητήρα, τις οποίες χρησιμοποιούμε μέσα στο πρόγραμμα.

Στην συνέχεια εφόσον ορίσαμε και τις παραμέτρους επικοινωνίας μεταξύ των drive και του PLC, καλούμε τα τις ρουτίνες που είναι υπεύθυνες για τον έλεγχο τους.

Συγκεκριμένα εδώ ορίζουμε τα σήματα και τις ρουτίνες για εκκίνηση και σταμάτημα του κινητήρα (start/stop), ορίζουμε την ταχύτητα αναφοράς τους (speed reference), την χειροκίνητη λειτουργία (manual operation), την μέγιστη ταχύτητα (max speed for reverse mode) όταν ο κινητήρας δουλεύει σε φορά αντίθετη από αυτή που έχουμε ορίσει (για τους ανεμιστήρες) καθώς επίσης και τις ρυθμίσεις για ομαλή μετάβαση του drive από αυτόματη σε χειροκίνητη λειτουργία και αντίστροφα.

Το επόμενο πρόγραμμα που καλούμε έχει να κάνει με την βαθμονόμηση του ελεγκτή PID. Εδώ υπολογίζονται οι συντελεστές P,I και D, σύμφωνα με τις τιμές που παίρνουμε από τα αισθητήρια θερμοκρασίας κατά μέσω όρο (average temperature) και την τιμή της πίεσης. Δηλαδή συγκρίνουμε τον μέσω όρο της πραγματικής θερμοκρασίας και του setpoint που έχει ορίσει ο χειριστής στο touch panel και η διαφορά που προκύπτει προστίθεται στο setpoint της πίεσης. Με αυτό τον τρόπο μεταβάλλουμε την θερμοκρασία μέσω της μέτρησης του αισθητήρα διαφορικής πίεσης.

Στο επόμενο πρόγραμμα υπολογίζουμε τις ώρες λειτουργίας και την εξοικονόμηση ενέργειας που έχουμε κάνει συνολικά καθώς και σε κάθε drive ξεχωριστά. Επίσης υπολογίζουμε την πραγματική και την ονομαστική ισχύ του συστήματος συνολικά αλλά και επιμέρους για κάθε drive, η οποία μέσω του touch panel απεικονίζεται στον χειριστή μαζί με το ποσοστό εξοικονόμησης ενέργειας.

Τέλος καλούμε ένα πρόγραμμα στο οποίο υπολογίζονται οι ώρες λειτουργίας, η πραγματική ισχύ και τα ποσοστά εξοικονόμησης ενέργειας για κάθε μήνα και ετησίως, τα οποία ο χειριστής χρησιμοποιεί για να δημιουργήσει τα μηνιαία ή ετήσια report (αναφορές) για την λειτουργία του συστήματος.

## 5.7 Περιγραφή βασικών παραμέτρων VFD

Παρακάτω θα περιγράψουμε μερικές από τις βασικές παραμέτρους ενός VFD στις οποίες πρέπει να δώσουμε προσοχή στην σωστή ρύθμιση τους.

- 10. Standard DI,RO
- 23.Speed Reference Ramp
- 30.Limits
- 32. Supervision
- 51.FBA A settings
- 52.FBA A Data in
- 95.HW Configuration
- 98. User Motor Parameters
- 99.Motor Data

### 10. Standard DI, RO

Η παράμετρος αυτή επιβλέπει την σωστή φορά περιστροφής του κινητήρα και μετά από το Setpoint, ενεργοποιεί την ψυχρή επαφή που κάνει αυτοσυγκράτηση από τον κοντάκτορα ισχύος της παροχής του Drive από το start panel του πλοίου.

Ελέγχει αν ο κινητήρας λειτουργεί δεξιόστροφα ή αριστερόστροφα (Forward ή Reverse). Σε συνδυασμό με την παράμετρο 32.Supervision, στην περίπτωση που ο κινητήρας είναι σε forward και κινηθεί στην αντίθετη κατεύθυνση, μόλις φτάσει την τιμή του ορίου που έχουμε ορίσει το Drive θα μας ενημερώσει με σφάλμα. Το ίδιο ισχύει και στην αντίθετη περίπτωση που ενώ θέλουμε να κινηθεί reverse ξεκινήσει προς την αντίθετη κατεύθυνση.

### 23.Speed Reference Ramp

Σε αυτή την παράμετρο ο χειριστής ορίζει τις παραμέτρους της ράμπας (χρόνους επιτάχυνσης και επιβράδυνσης) που θα ακολουθήσει ο κινητήρας.

### 30.Limits

Στην παράμετρο ο χειριστής ορίζει τα όρια του κινητήρα ελάχιστη, μέγιστη ταχύτητα του κινητήρα καθώς επίσης και το μέγιστο ρεύμα. Τα παραπάνω υπολογίζονται από τις ονομαστικές τιμές του κινητήρα ως εξής:

Motor nominal speed =  $1165 * 0,3 = 350$  rpm. (Ελάχιστο όριο ταχύτητας)

Motor nominal speed =  $1165 * 1,1 = 1281$  rpm. (Μέγιστο όριο ταχύτητας)

Motor nominal current =  $56,4 * 1,3 = 73,32$  A (Μέγιστο τιμή ρεύματος του κινητήρα)

Οι αρνητικές τιμές ταχύτητας που φαίνονται στην ελάχιστη ταχύτητα μερικώ κινητήρων (βλ. Fan 2), είναι επειδή ο ανεμιστήρας αυτός είναι διπλής φοράς περιστροφής, οπότε αν ορίσουμε πως η θετική του φορά είναι η φορά των δεικτών του ρολογιού όταν λειτουργεί αντίστροφα θα πρέπει να φαίνετε με αρνητικό πρόσημο διότι έτσι το αντιλαμβάνεται το Drive.

### **32. Supervision**

Στην παράμετρο αυτή ορίζονται τα όρια (της παραμέτρου 10) και οι τιμές που θέλουμε να επιβλέπονται από το Drive ώστε να μπορέσει να ενημερώσει σε περίπτωση σφάλματος. Εδώ το Drive θα ενημερώσει για σφάλμα στην περίπτωση που το Drive ξεπεράσει την μέγιστη ή ελάχιστη τιμή της ταχύτητας που του έχουμε ορίσει.

### **51.FBA A settings**

Στην παράμετρο αυτή ο χειριστής ορίζει τις παραμέτρους και τον τύπο της επικοινωνίας, στην εφαρμογή μας το πρωτόκολλο επικοινωνίας είναι MODBUS/RTU, γι'αυτό έχουμε ορίσει σειριακή επικοινωνία RS-485 στην οποία είναι βασισμένη το συγκεκριμένο πρωτόκολλο.

### **52.FBA A data in**

Ορίζονται οι πληροφορίες που θέλουμε το Drive να στέλνει στο PLC. Στην εφαρμογή μας το γκρούπ παραμέτρων 1.2 περιέχει τις πραγματικές τιμές του κινητήρα (ταχύτητα, φορά περιστροφής). Η παράμετρος 1.7 περιέχει τις τιμές του ρεύματος του κινητήρα. Στην παράμετρο 1.14 παίρνουμε την πληροφορία για την ισχύ του κινητήρα, στην 4.21 και 4.22 παίρνουμε διάφορα σφάλματα (faults & warnings).

### **95.HW Configuration**

Εδώ ορίζεται η τάση τροφοδοσίας από το δίκτυο και αν υπάρχει ξεχωριστή τάση τροφοδοσίας (24V) για την control unit του Drive.



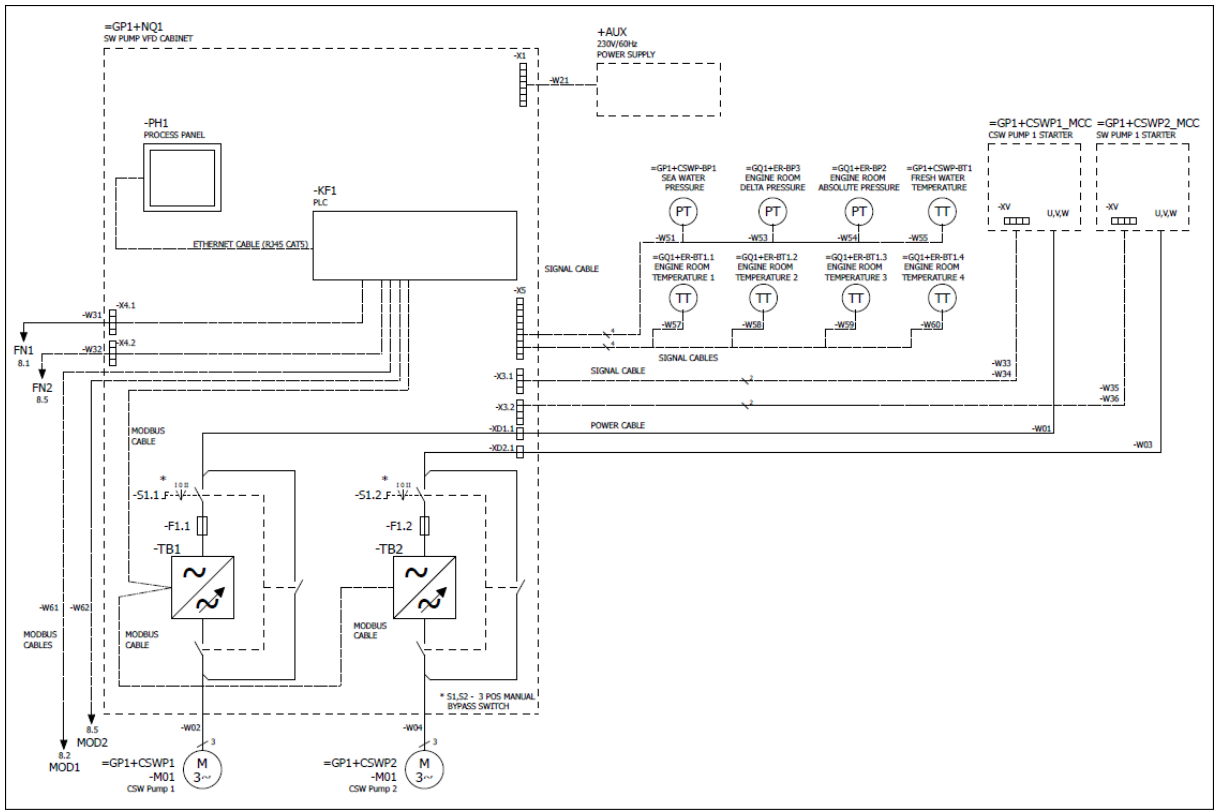
### **98. User Motor Parameters**

Στην παράμετρο αυτή είναι τα στοιχεία που προκύπτουν μετά το ID Run που κάνει το Drive. Με αυτό τον τρόπο το Drive γνωρίζει τον κινητήρα που είναι συνδεδεμένος στην έξοδο του και τις ιδιαιτερότητες που μπορεί να έχει ο κάθε κινητήρας.

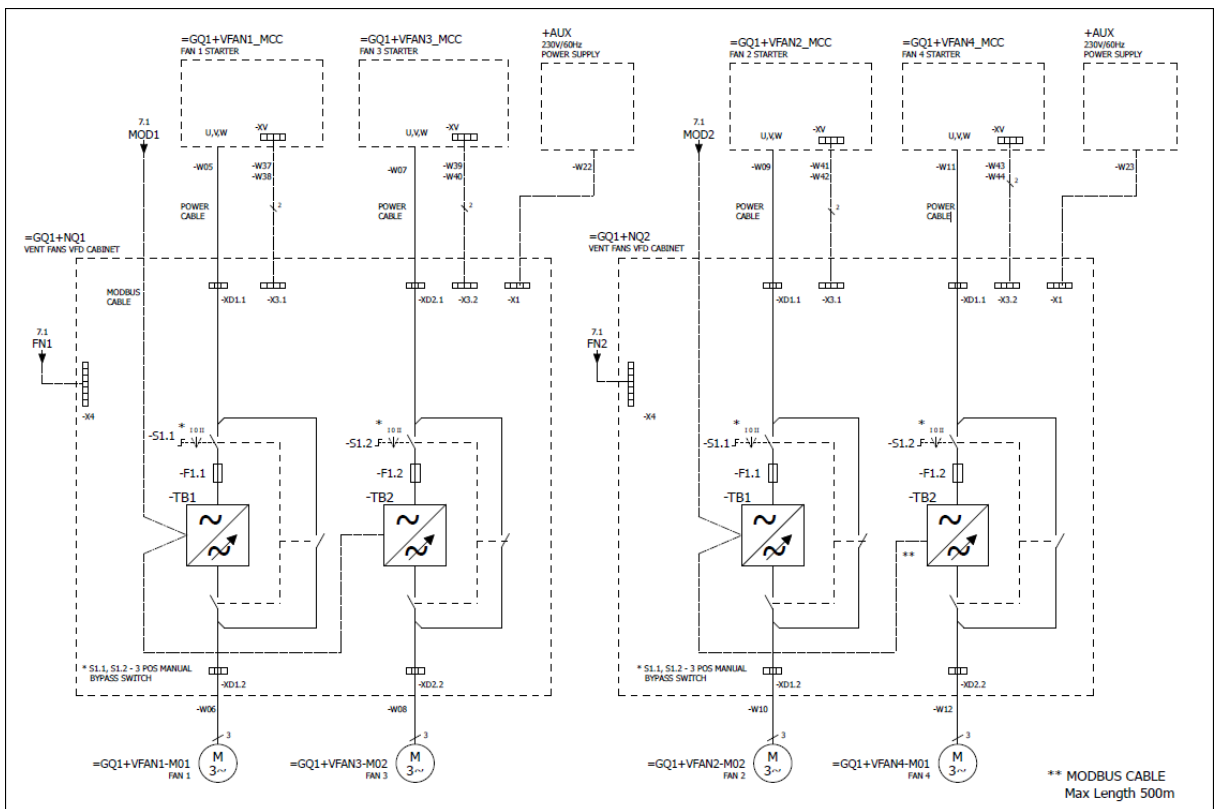
### **99.Motor Data**

Στην παράμετρο ορίζονται όλες οι ονομαστικές τιμές του κινητήρα.

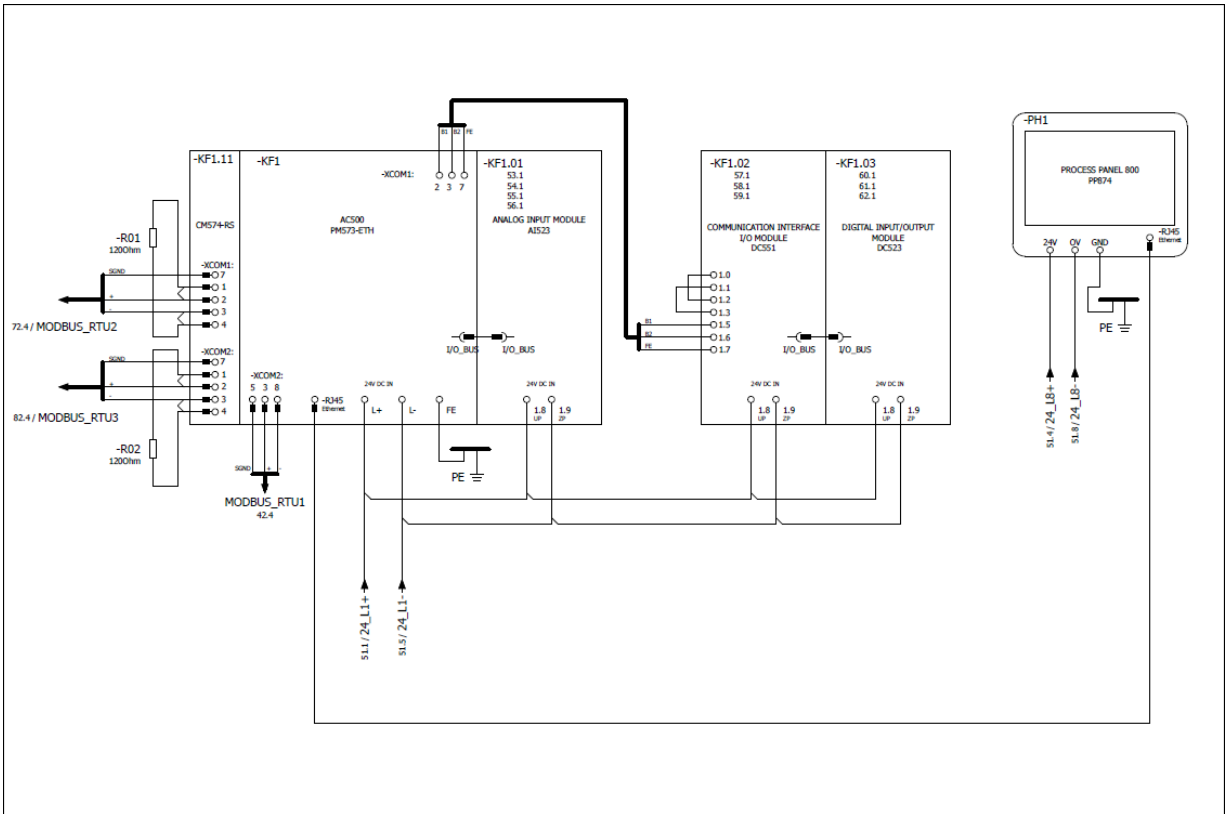
## 5.8 Παράρτημα



Σχήμα 5.8<sup>α</sup> Περιγραφή συνδεσμολογίας εξοπλισμού



Σχήμα 5.8<sup>β</sup> Περιγραφή συνδεσμολογίας εξοπλισμου.



Σχήμα 5.8' Συνδεσμολογία PLC

## • Παράμετροι VFD αντλίας

12/12/2018 2:43 PM

1 / 3

### Device Info

ACS880  
Type  
Model ACS880  
Serial AINF201x



### Drive parameters

Index	Name	Value	Unit	Min	Max	Default
20. Start/stop/direction						
1	Ext1 commands	Fieldbus A	NoUnit	0	22	In1 Start; In2 Dir
22. Speed reference selection						
11	Speed ref1 source	FB A ref1	NoUnit			AI1 scaled
22	Constant speed sel1	Not selected	NoUnit			DI5
23. Speed reference ramp						
11	Ramp set selection	Acc/Dec time 1	NoUnit			DI4
12	Acceleration time 1	10,000	s	0,000	1800,000	20,000
13	Deceleration time 1	10,000	s	0,000	1800,000	20,000
30. Limits						
11	Minimum speed	355,00	rpm	-30000,00	30000,00	-1500,00
12	Maximum speed	1300,00	rpm	-30000,00	30000,00	1500,00
17	Maximum current	131,30	A	0,00	30000,00	389,75
35. Motor thermal protection						
11	Temperature 1 source	Estimated temperature	NoUnit	0	11	Disabled
12	Temperature 1 fault limit	155	°C	-80	5000	130
13	Temperature 1 warning limit	130	°C	-80	5000	110
43. Brake chopper						
11	Brake resistor fault limit	105	%	0	150	105
46. Monitoring/scaling settings						
1	Speed scaling	1180,00	rpm	0,10	30000,00	1500,00
4	Power scaling	100,00	kW	0,10	30000,00	1000,00
5	Current scaling	100	A	0	30000	10000
50. Fieldbus adapter (FBA)						
1	FBAA enable	Option slot 1	NoUnit	0	3	Disable

Drive composer pro v. 1.11.2.5



Index	Name	Value	Unit	Min	Max	Default
2	FBAA comm loss func	Fault	NoUnit	0	5	No action
3	FBAA comm loss t out	3,0	s	0,3	6553,5	0,3
<b>51. FBAA settings</b>						
1	FBAA type	RS-485 comm	NoUnit	0	62944	None
2	Profile	ABB Enhanced	NoUnit	0	3	ABB Classic
3	Station ID	1	NoUnit	1	247	0
6	Modbus timeout	50	NoUnit	0	65535	0
7	Timeout mode	Any message	NoUnit	0	2	None
8	OK messages	1543	NoUnit	0	65535	0
23	Init status	1	NoUnit	0	65535	0
24	Protocol check	1	NoUnit	1	1	0
25	Protocol	Modbus	NoUnit	0	5	0
28	Protocol sw ver	163	NoUnit	163	163	0
<b>52. FBAA data in</b>						
1	FBAA data in1	1.2[16]	NoUnit			None
2	FBAA data in2	1.7[16]	NoUnit			None
3	FBAA data in3	1.14[16]	NoUnit			None
4	FBAA data in4	4.21[16]	NoUnit			None
5	FBAA data in5	4.22[16]	NoUnit			None
<b>95. HW configuration</b>						
1	Supply voltage	440...480 V	NoUnit	0	6	Not given
4	Control board supply	External 24V	NoUnit	0	1	Internal 24V
<b>96. System</b>						
1	Language	English	NoUnit	0	3082	Not selected
<b>98. User motor parameters</b>						
2	Rs user	0,02099	p.u.	0,00000	0,50000	0,00000
3	Rr user	0,01216	p.u.	0,00000	0,50000	0,00000
4	Lm user	2,44442	p.u.	0,00000	10,00000	0,00000
5	SigmaL user	0,20889	p.u.	0,00000	1,00000	0,00000

Drive composer pro v. 1.11.2.5



Index	Name	Value	Unit	Min	Max	Default
9	Rs user SI	0,04133	Ohm	0,00000	100,00000	0,00000
10	Rr user SI	0,02395	Ohm	0,00000	100,00000	0,00000
11	Lm user SI	12,77	mH	0,00	100000,01	0,00
12	SigmaL user SI	1,09	mH	0,00	100000,01	0,00
<b>99. Motor data</b>						
6	Motor nominal current	101,0	A	0,0	6400,0	0,0
7	Motor nominal voltage	440,0	V	0,0	800,0	0,0
8	Motor nominal frequency	60,00	Hz	0,00	500,00	0,00
9	Motor nominal speed	1180	rpm	0	30000	0
10	Motor nominal power	63,00	kW	0,00	10000,00	0,00
11	Motor nominal cos $\varphi$	0,89	NoUnit	0,00	1,00	0,00
13	ID run requested	Standstill	NoUnit	0	7	None
<b>200. Safety</b>						
254	CRC of the configuration	100	NoUnit	0	65535	0

- **Παράμετροι VFD ανεμιστήρων.**

## FAN 1.

12/12/2018 2:45 PM

1 / 3

### Device Info

ACS880  
Type  
Model ACS880  
Serial AINF201x



### Drive parameters

Index	Name	Value	Unit	Min	Max	Default
20. Start/stop/direction						
1	Ext1 commands	Fieldbus A	NoUnit	0	22	In1 Start; In2 Dir
22. Speed reference selection						
11	Speed ref1 source	FB A ref1	NoUnit			AI1 scaled
22	Constant speed sel1	Not selected	NoUnit			DI5
23. Speed reference ramp						
11	Ramp set selection	Acc/Dec time 1	NoUnit			DI4
12	Acceleration time 1	10,000	s	0,000	1800,000	20,000
13	Deceleration time 1	10,000	s	0,000	1800,000	20,000
30. Limits						
11	Minimum speed	350,00	rpm	-30000,00	30000,00	-1500,00
12	Maximum speed	1280,00	rpm	-30000,00	30000,00	1500,00
17	Maximum current	73,32	A	0,00	30000,00	155,55
35. Motor thermal protection						
11	Temperature 1 source	Estimated temperature	NoUnit	0	11	Disabled
12	Temperature 1 fault limit	155	°C	-60	1000	130
13	Temperature 1 warning limit	130	°C	-60	1000	110
43. Brake chopper						
11	Brake resistor fault limit	105	%	0	150	105
46. Monitoring/scaling settings						
1	Speed scaling	1165,00	rpm	0,10	30000,00	1500,00
4	Power scaling	100,00	kW	0,10	30000,00	1000,00
5	Current scaling	100	A	0	30000	10000
50. Fieldbus adapter (FBA)						
1	FBA A enable	Option slot 1	NoUnit	0	3	Disable

Drive composer pro v. 1.11.2.5



Index	Name	Value	Unit	Min	Max	Default
2	FBA A comm loss func	Fault	NoUnit	0	5	No action
3	FBA A comm loss t out	3,0	s	0,3	6553,5	0,3
<b>51. FBA A settings</b>						
1	FBA A type	RS-485 comm	NoUnit	0	62944	None
2	Profile	ABB Enhanced	NoUnit	0	3	ABB Classic
3	Station ID	11	NoUnit	1	247	0
6	Modbus timeout	50	NoUnit	0	65535	0
7	Timeout mode	Any message	NoUnit	0	2	None
23	Init status	1	NoUnit	0	65535	0
24	Protocol check	1	NoUnit	1	1	0
25	Protocol	Modbus	NoUnit	0	5	0
26	Protocol sw ver	163	NoUnit	163	163	0
<b>52. FBA A data in</b>						
1	FBA A data in1	1.2[16]	NoUnit			None
2	FBA A data in2	1.7[16]	NoUnit			None
3	FBA A data in3	1.14[16]	NoUnit			None
4	FBA A data in4	4.21[16]	NoUnit			None
5	FBA A data in5	4.22[16]	NoUnit			None
<b>61. D2D and DDCS transmit data</b>						
2	M/F data 2 selection	24.1[16]	NoUnit			Used speed reference
3	M/F data 3 selection	26.75[16]	NoUnit			Torque reference act 5
<b>95. HW configuration</b>						
1	Supply voltage	440...480 V	NoUnit	0	6	Not given
4	Control board supply	External 24V	NoUnit	0	1	Internal 24V
<b>96. System</b>						
1	Language	English	NoUnit	0	3082	Not selected
<b>99. Motor data</b>						
6	Motor nominal current	56,4	A	0,0	6400,0	0,0
7	Motor nominal voltage	440,0	V	0,0	800,0	0,0





Index	Name	Value	Unit	Min	Max	Default
8	Motor nominal frequency	60,00	Hz	0,00	500,00	0,00
9	Motor nominal speed	1165	rpm	0	30000	0
10	Motor nominal power	30,00	kW	0,00	10000,00	0,00
11	Motor nominal cos $\varphi$	0,85	NoUnit	0,00	1,00	0,00
13	ID run requested	Standstill	NoUnit	0	7	None
200. Safety						
254	CRC of the configuration	100	NoUnit	0	65535	0

## FAN 2.

Index	Name	Value	Unit	Min	Max	Default
12/12/2018 2:47 PM <span style="float: right;">1 / 3</span>						
<b>Device Info</b>						
	ACS880					
	Type					
	Model	ACS880				
	Serial	AINF201x				
<b>Drive parameters</b>						
<b>10. Standard DI, RO</b>						
24	RO1 source	Supervision 2	NoUnit			Ready run
27	RO2 source	Supervision 1	NoUnit			Running
<b>20. Start/stop/direction</b>						
1	Ext1 commands	Fieldbus A	NoUnit	0	22	In1 Start; In2 Dir
<b>22. Speed reference selection</b>						
11	Speed ref1 source	FB A ref1	NoUnit			All scaled
22	Constant speed sel1	Not selected	NoUnit			DI5
<b>23. Speed reference ramp</b>						
11	Ramp set selection	Acc/Dec time 1	NoUnit			DI4
12	Acceleration time 1	10,000	s	0,000	1800,000	20,000
13	Deceleration time 1	10,000	s	0,000	1800,000	20,000
<b>30. Limits</b>						
11	Minimum speed	-1280,00	rpm	-30000,00	30000,00	-1500,00
12	Maximum speed	1280,00	rpm	-30000,00	30000,00	1500,00
17	Maximum current	73,32	A	0,00	30000,00	155,55
<b>32. Supervision</b>						
5	Supervision 1 function	High	NoUnit	0	6	Disabled
7	Supervision 1 signal	Speed	NoUnit			Zero
10	Supervision 1 high	200,00	NoUnit	-21474830,00	21474830,00	0,00
15	Supervision 2 function	Low	NoUnit	0	6	Disabled
17	Supervision 2 signal	Speed	NoUnit			Zero
19	Supervision 2 low	-200,00	NoUnit	-21474830,00	21474830,00	0,00
<b>35. Motor thermal protection</b>						
11	Temperature 1 source	Estimated temperature	NoUnit	0	11	Disabled

Drive composer pro v. 1.11.2.5



Index	Name	Value	Unit	Min	Max	Default
12	Temperature 1 fault limit	155	°C	-80	5000	130
13	Temperature 1 warning limit	130	°C	-80	5000	110
<b>43. Brake chopper</b>						
11	Brake resistor fault limit	105	%	0	150	105
<b>46. Monitoring/scaling settings</b>						
1	Speed scaling	1165,00	rpm	0,10	30000,00	1500,00
4	Power scaling	100,00	kW	0,10	30000,00	1000,00
5	Current scaling	100	A	0	30000	10000
<b>50. Fieldbus adapter (FBA)</b>						
1	FBA A enable	Option slot 1	NoUnit	0	3	Disable
2	FBA A comm loss func	Fault	NoUnit	0	5	No action
3	FBA A comm loss t out	3,0	s	0,3	6553,5	0,3
<b>51. FBA A settings</b>						
1	FBA A type	RS-485 comm	NoUnit	0	62944	None
2	Profile	ABB Enhanced	NoUnit	0	3	ABB Classic
3	Station ID	12	NoUnit	1	247	0
6	Modbus timeout	50	NoUnit	0	65535	0
7	Timeout mode	Any message	NoUnit	0	2	None
23	Init status	1	NoUnit	0	65535	0
24	Protocol check	1	NoUnit	1	1	0
25	Protocol	Modbus	NoUnit	0	5	0
26	Protocol sw ver	163	NoUnit	163	163	0
<b>52. FBA A data in</b>						
1	FBA A data in1	1.2[16]	NoUnit			None
2	FBA A data in2	1.7[16]	NoUnit			None
3	FBA A data in3	1.14[16]	NoUnit			None
4	FBA A data in4	4.21[16]	NoUnit			None
5	FBA A data in5	4.22[16]	NoUnit			None
<b>61. D2D and DDCCS transmit data</b>						



Index	Name	Value	Unit	Min	Max	Default
2	M/F data 2 selection	24.1[16]	NoUnit			Used speed reference
3	M/F data 3 selection	26.75[16]	NoUnit			Torque reference act 5
<b>95. HW configuration</b>						
1	Supply voltage	440...480 V	NoUnit	0	6	Not given
4	Control board supply	External 24V	NoUnit	0	1	Internal 24V
<b>96. System</b>						
1	Language	English	NoUnit	0	3082	Not selected
<b>98. User motor parameters</b>						
2	Rs user	0,03190	p.u.	0,00000	0,50000	0,00000
3	Rr user	0,02062	p.u.	0,00000	0,50000	0,00000
4	Lm user	1,78659	p.u.	0,00000	10,00000	0,00000
5	SigmaL user	0,21308	p.u.	0,00000	1,00000	0,00000
9	Rs user SI	0,14628	Ohm	0,00000	100,00000	0,00000
10	Rr user SI	0,09455	Ohm	0,00000	100,00000	0,00000
11	Lm user SI	21,73	mH	0,00	100000,01	0,00
12	SigmaL user SI	2,59	mH	0,00	100000,01	0,00
<b>99. Motor data</b>						
6	Motor nominal current	56,4	A	0,0	6400,0	0,0
7	Motor nominal voltage	440,0	V	0,0	800,0	0,0
8	Motor nominal frequency	60,00	Hz	0,00	500,00	0,00
9	Motor nominal speed	1165	rpm	0	30000	0
10	Motor nominal power	30,00	kW	0,00	10000,00	0,00
11	Motor nominal cos φ	0,85	NoUnit	0,00	1,00	0,00
13	ID run requested	Standstill	NoUnit	0	7	None
<b>200. Safety</b>						
254	CRC of the configuration	100	NoUnit	0	65535	0

## **6. Συμπέρασμα.**

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία, αναλύθηκαν μέθοδοι για την οδήγηση και τον έλεγχο ενός ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα, ξεκινώντας από τις κλασσικές μεθόδους οι οποίες εξακολουθούν να εφαρμόζονται μέχρι και σήμερα σε αρκετές εφαρμογές λιγότερο απαιτητικές, φτάνοντας μέχρι τις σύγχρονες μεθόδους που χρησιμοποιούνται εκτεταμένα στην βιομηχανία και στην ναυτιλία. Βασικό συμπέρασμα στο οποίο καταλήγουμε είναι ότι στις σύγχρονες εφαρμογές έχουμε ως κύριο στόχο με μικρό κόστος εγκατάστασης και πλήρη έλεγχο του συστήματος μας να επιτύχουμε όσο το δυνατόν μεγαλύτερο ποσοστό εξοικονόμησης ενέργειας, κάτι το οποίο στο παρελθόν ήταν ανέφικτο καθώς δεν υπήρχε η αντίστοιχη τεχνολογία. Με την ανάπτυξη όμως της τεχνολογίας πλέον έχουμε όλα τα μέσα για πλήρη έλεγχο του συστήματος μας και συγκεκριμένα των ασύγχρονων τριφασικών κινητήρων με την χρήση VFD, με την μικρότερη δυνατή κατανάλωση από τις πιο απλές μέχρι πιο σύνθετες εφαρμογές. Συνολικά μπορούμε να έχουμε πλήρη έλεγχο, μικρή κατανάλωση ενέργειας, γρήγορη απόσβεση του κόστους εγκατάστασης, μικρότερο κόστος συντήρησης του εξοπλισμού μεγαλύτερη ασφάλεια και αποφυγή ατυχημάτων καθώς επίσης και μεγαλύτερη προστασία του κινητήρα με την χρήση VFD.

## • Βιβλιογραφία

- [1] Βασίλειος Μπιτζιώνης, , “Βιομηχανικές ηλεκτρικές εγκαταστάσεις”, 2011 Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ.
- [2] W.Bolton, “Programmable Logic Controllers”, Newnes (ELSEVIER), 5<sup>th</sup> edition, 2009.
- [3] Παντελής Β. Μαλατέστας, “ Ηλεκτρική Κίνηση”, 2013, 2010 Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ.
- [4] Γ. Πολίτης, Γ. Τσεκούρας, “Ηλεκτρικές Μηχανές”, ΤΕΙ Πειραιά, ΣΤΕΦ, Τμήμα Αυτοματισμού, Πειραιάς 2009.
- [5] DANFOSS, “Variable Frequency Drives (101) Fundamentals”, Technical Manual.
- [6] WP.AFD.13, YASKAWA America , “Variable Frequency Drive Control Methods”.
- [7] ABB, “Harmonic Distortions & Solutions”, 2010.
- [8] ABB Industrial Drives, “ACS880 Primary Control Program”, Firmware Manual.
- [9] ABB Industrial Drives, “ACS880-1 Drives (0.55 to 250 kW, 0.75 to 350 hp)”, Hardware Manual.
- [10] ABB Drives, “Technical guide No.1, Direct Torque Control – The world’s most advanced AC drive technology”. 2011.
- [11] ABB Drives, “Technical guide No.4, Guide to Variable Speed Drives”. 2011.
- [12] ABB Drives, “Technical guide book” Technical Manual, 2014.
- [13] ABB Marine & Ports, “ S.W Cooling Pumps & Engine Room Ventilation Fans, VFD Upgrade”.
- [14] Υπουργείο Εθνικής Παιδείας και Θρησκευμάτων - Παιδαγωγικό Ινστιτούτο, "Ηλεκτρικές Μηχανές", Τεχνικά Επαγγελματικά Εκπαιδευτήρια Β' Τάξη 1ου κύκλου, ΟΕΔΒ, ISBN 960-06-0948-9