



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ  
ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

## Εκκίνηση Ασύγχρονου Τριφασικού Κινητήρα με χρήση Αυτοματισμού PLC

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ορφανός Νικόλαος

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια : Δρ. Μαρία-Παρασκευή Ιωαννίδου  
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2017





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ  
ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

## Εκκίνηση Ασύγχρονου Τριφασικού Κινητήρα με χρήση Αυτοματισμού PLC

### ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Επιβλέπουσα Καθηγήτρια :** Δρ. Μαρία-Παρασκευή Ιωαννίδου  
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή.

.....  
Μαρία Παρασκευή Ιωαννίδου  
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

.....  
Νικόλαος Θεοδώρου  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Παναγιώτης Τσαραμπάρης  
Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2017

.....  
Ορφανός Νικόλαος

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Ορφανός Νικόλαος, 2017.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι ηλεκτρικοί κινητήρες αποτελούν σημαντικά ηλεκτρικά συστήματα για τη μετατροπή της ηλεκτρικής σε μηχανική ενέργεια, με στόχο την εκτέλεση έργου. Σημαντική υποδιαίρεση αυτών, αποτελούν οι ασύγχρονοι τριφασικοί κινητήρες, οι οποίοι εκμεταλλεύονται τη σημαντική προσφορά ισχύος από το σύστημα των 3 φάσεων τροφοδοσίας. Οι τριφασικοί ασύγχρονοι κινητήρες, εκτός των πλεονεκτημάτων που προσφέρουν, δημιουργούν σημαντικά θέματα για τη λειτουργία τους, δεδομένου ότι χρειάζονται ειδικό χειρισμό κατά τη φάση εκκίνησης τους, καθώς και κατά τη φάση αποκατάστασης της επιθυμητής γωνιακής ταχύτητας περιστροφής, για την εξωτερικά επιβληθείσα ροπή φορτίου. Για τον επιτυχή χειρισμό των φάσεων εκκίνησης και μόνιμης λειτουργίας, χρησιμοποιούνται ειδικές διατάξεις, οι οποίες μεταβάλλουν τη συνδεσμολογία διασύνδεσης των τυλιγμάτων του κινητήρα, γνωστές ως μετατροπές τυλιγμάτων αστέρα – τριγώνου.

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι, η ανάπτυξη αυτοματοποιημένης διάταξης με χρήση ψηφιακού ελεγκτή (PLC - Programmable Logic Controller), ο οποίος επιτρέπει την αυτοματοποιημένη μεταγωγή των τυλιγμάτων πηνίου από αστέρα, στις αρχικές φάσεις εκκίνησης του κινητήρα, σε τρίγωνο, όταν εγκατασταθεί το επιθυμητό σημείο λειτουργίας του κινητήρα. Η ανίχνευση της διαδικασίας αποκατάστασης, αφορά στα επίπεδα μεταβολής του ρεύματος που απαιτείται από την τροφοδοσία του κινητήρα ανά φάση.

Με την χρησιμοποίηση, κατάλληλης συνδεσμολογίας και κάνοντας χρήση ηλεκτρονικών ισχύος, μικροεπεξεργαστών, αλλά και αμιγώς ηλεκτρολογικών εξαρτημάτων, επιτυγχάνεται η ομαλή εκκίνηση ενός ηλεκτροκινητήρα, πραγματοποιώντας τη μετάβαση των τυλιγμάτων πηνίου (πρωτεύον – δευτερεύον κύκλωμα) σε βέλτιστο χρόνο. Κριτήριο για την αντίδραση και μεταγωγή των κυκλωμάτων πηνίου από αστέρα σε τρίγωνο είναι, ο έλεγχος για εγκατάσταση ρεύματος ανά φάση τροφοδοσίας, το οποίο είναι διπλάσιο του ονομαστικού, και βαίνει μειούμενο προς αποκατάσταση της λειτουργίας, σε διάταξη τριγώνου για την ομαλή ανάληψη του φορτίου – ροπής, επί του άξονα του κινητήρα. Η μετάβαση θα γίνει αυτοματοποιημένα, με χρήση διάταξης PLC, η οποία βασίζει την απόφαση μετάβασης, στα επίπεδα συγκεκριμένων σημάτων, που προέρχονται από τα κυκλώματα του ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα.

Η διάταξη ελέγχου, επιπλέον των φάσεων εκκίνησης και αποκατάστασης ομαλής λειτουργίας, μπορεί να παραμείνει σε διασυνεχή λειτουργία και κατά τον υπόλοιπο χρόνο, ανιχνεύοντας μεταβολές επί της ροπής φορτίου και ενεργοποιώντας αυτοματοποιημένα μεταβάσεις στα τυλίγματα για την αποκατάσταση σταθερής γωνιακής ταχύτητας περιστροφής. Έτσι, το εν λόγω σύστημα εκτός από διάταξη βέλτιστης εκκίνησης, αποτελεί ένα σημαντικό σύστημα ελέγχου διασφάλισης σταθερής γωνιακής περιστροφής του κινητήρα σε χρονικά μεταβαλλόμενο φορτίο.

Λέξεις κλειδιά

Ασύγχρονοι 3φασικοί κινητήρες, αστέρας – τρίγωνο, διάταξη PLC, ονομαστικό ρεύμα, μεταβαλλόμενο φορτίο, φάση εκκίνησης και μόνιμης κατάστασης.

# Abstract

Electric power motors are important electrical systems used for the conversion of electrical to mechanical power. A significant category of electrical motors consists of 3-phase asynchronous motors, taking advantage of the enhanced 3-phase power system provision. Beyond the induced advantages for these motors, some issues of major importance are related to their operation, due to special handling actions required during start-up and steady state phases of operation, according induced mechanical torque-load. In order to handle properly of the startup phases, special circuits required modifying inductance over motor based on star to delta circuit topologies.

Purpose of current work is the design and development of an automated electrical/electronic environment using a Programmable Logic Controller device – PLC, responsible for automated switching of primary and secondary motor inductance circuits, from star to delta topology and vice versa, according induced conditions over motor's load. Detection and decisioning of switching process based on the level of currents absorbed during operation over each phase of power provisioning system.

Control topology is realized using power and low-voltage analogue electronic components, as well as digital parts such PLC device, targeting to smooth acceleration of motor axis, using transient switching on inductance circuitry in optimum time thresholds. Reaction and switching of afford-mentioned circuits is based onto real-time monitoring of current levels absorbed over each phase, limiting switching when these currents become twice of the typical operation values for the motor, as these defined by manufacturer. Circuitry switching process is purely automated based on embedded PLC device and real sub-circuits controlled by low-voltage digital signals.

Control circuitry additionally to the predefined operation during startup phase of motor, can remain active also during steady state phase of operation, detecting variations on angular velocity of the rotor. In the event that modifications are determined due to variations of applied torque – load over motor, control system modifies inductance circuits accordingly, allowing smooth operation maintaining this way constant angular velocity for the rotor. In this case, control circuitry used as a concurrent logic control subsystem that monitors continuously motor's optimal operation in real time, over a variety of induced loads, serving as a purely control system for the motor.

## Key words

Asynchronous 3phase motors, star – delta topology, PLC devices, typical operation current values, variant torque load, motor startup and steady state phases of operation.

# Ευχαριστίες

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στην Καθηγήτριά μου Κα. Μαρία-Παρασκευή Ιωαννίδου, τόσο για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντάς μου την διεκπεραίωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, όσο και για την άριστη συνεργασία μας κατά τη διάρκεια εκπόνησης της, συμβάλλοντας σημαντικά στην επιτυχημένη ολοκλήρωσή της.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, που με περίσσεια κατανόηση, υποστήριξη και αγάπη, με ώθησε στην ολοκλήρωση του στόχου αυτού, καθώς και στα πολύ κοντινά μου πρόσωπα, που με την αμέριστη βοήθεια και υποστήριξη τους, βοήθησαν ώστε να φέρω εις πέρας την ακαδημαϊκή μου αυτή αποστολή.

Τέλος, σε όσους διαβάζουν το κείμενο αυτό, σας εύχομαι διαύγεια, ευτυχία και την ευχή, να κάνετε πραγματικότητα κάθε σας παιδικό όνειρο.

# Πίνακας Περιεχομένων

Περίληψη

Abstract

Ευχαριστίες

Περιεχόμενα

Κατάλογος σχημάτων

Κατάλογος πινάκων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 <sup>ο</sup> .....	- 13 -
1 Εισαγωγή.....	- 13 -
1.1 Δομή του Ασύγχρονου Τριφασικού Κινητήρα.....	- 14 -
1.2 Ισοδύναμο Κύκλωμα Ασύγχρονου Τριφασικού Κινητήρα.....	- 17 -
1.3 Εκκίνηση του Ασύγχρονου Τριφασικού Κινητήρα.....	- 22 -
1.3.1 Εισαγωγή.....	- 22 -
1.3.2 Εκκίνηση Αστέρα – Τριγώνου (Υ-Δ).....	- 23 -
1.3.3 Φάση Αστέρα (Υ).....	- 23 -
1.3.4 Φάση Μετάβασης των Τυλιγμάτων.....	- 24 -
1.3.5 Φάση Τριγώνου (Δ).....	- 25 -
1.3.6 Θέση και Ρύθμιση του Θερμικού.....	- 27 -
1.3.7 Ρύθμιση του Χρόνου Μεταγωγής των Τυλιγμάτων.....	- 28 -
1.4 Μειονεκτήματα χρήσης του Μοντέλου με Χρονικό Διακόπτη Μετάβασης των Τυλιγμάτων.....	- 30 -
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 <sup>ο</sup> .....	- 32 -
2 Διάταξη Εκκίνησης του Κινητήρα με χρήση PLC.....	- 32 -
2.1 Προγραμματιζόμενοι Λογικοί Ελεγκτές.....	- 32 -
2.1.1 Δομικά Στοιχεία ενός Προγραμματιζόμενου Λογικού Ελεγκτή.....	- 33 -
2.1.2 Κύκλος εκτέλεσης ενός Προγράμματος.....	- 34 -
2.1.3 Πλεονεκτήματα των Προγραμματιζόμενων Λογικών Ελεγκτών.....	- 34 -
2.2 Μια εναλλακτική λύση με χρήση Αυτοματισμού PLC.....	- 36 -
2.3 Ειδικά Θέματα στην Περιγραφή Τοπολογίας.....	- 38 -
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 <sup>ο</sup> .....	- 40 -
3 Ηλεκτρικά Θέματα Λειτουργίας της Διάταξης.....	- 40 -
3.1 Επιλογή Κινητήρα για τη Διάταξη Εφαρμογής.....	- 41 -
3.2 Παρουσίαση του Κυκλώματος Μετατροπέα.....	- 44 -
3.2.1 Προσομοίωση του Κυκλώματος Μετατροπέα.....	- 48 -
3.3 Ισοδύναμο Ηλεκτρικό Μοντέλο για το Κύκλωμα Εκκίνησης.....	- 51 -
3.3.1 Προσομοίωση του Κυκλώματος Εκκίνησης με συνδεσμολογία Αστέρα.....	- 52 -
3.3.2 Προσομοίωση του Κυκλώματος Εκκίνησης με συνδεσμολογία Τριγώνου.....	- 53 -
3.4 Συνολικό Ηλεκτρικό Μοντέλο για το Κύκλωμα Εκκίνησης.....	- 55 -
3.4.1 Προσομοίωση του Συνολικού Κυκλώματος Εκκίνησης.....	- 56 -
3.5 Έλεγχος Ευσταθούς Λειτουργίας με αλλαγή Φορτίου.....	- 58 -
3.5.1 Προσομοίωση του Συνολικού Κυκλώματος Εκκίνησης.....	- 58 -
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 <sup>ο</sup> .....	- 61 -
4 Επιδόσεις Συνολικού Συστήματος.....	- 61 -
4.1 Επίδοση Συστήματος κατά τη Φάση Εκκίνησης.....	- 61 -
4.2 Επίδοση Συστήματος κατά τη Φάση Λειτουργίας.....	- 63 -



4.3 Συμπεράσματα από τις Επιδόσεις .....	- 65 -
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 <sup>ο</sup> .....	- 67 -
5 Γενικά Συμπεράσματα επί του Ελέγχου Κινητήρων.....	- 67 -
5.1 Πλεονεκτήματα από τη Λειτουργία και το Σχεδιασμό.....	- 69 -
5.2 Ανοικτά Θέματα και Μελλοντικές Επεκτάσεις.....	- 69 -
Παραρτήματα .....	- 71 -
Παράρτημα Α – LOGO 12/24RC [15] [16] [17].....	- 71 -
Παράρτημα Β – Πραγματικά Κυκλώματα και Συνθήκες Λειτουργίας Κινητήρα .....	- 77 -
Εγκατάσταση.....	- 77 -
Περίβλημα Προστασίας και χαρακτηριστικά Κινητήρα .....	- 77 -
Διασύνδεση Τροφοδσίας.....	- 78 -
Ενδείκτες Κινητήρα.....	- 79 -
Ασφάλειες και Χρονικό Μεταλλαγής Τυλιγμάτων .....	- 79 -
Βιβλιογραφία.....	- 80 -

# Κατάλογος Σχημάτων

- Σχήμα 1: Στάτης ενός τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα  
Σχήμα 2: Δρομέας ενός τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα  
Σχήμα 3: Δομή ενός τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα  
Σχήμα 4: Τομή ενός τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα  
Σχήμα 5: Ισοδύναμο κύκλωμα του στάτη πολυφασικού κινητήρα επαγωγής  
Σχήμα 6. Στάδια ανάπτυξης του ισοδύναμου κυκλώματος δρομέα πολυφασικού κινητήρα επαγωγής: (α) τάση δρομέα, συχνότητα δρομέα, (β) τάση στάτη, συχνότητα δρομέα, (γ) τάση στάτη, συχνότητα στάτη  
Σχήμα 7. Ισοδύναμο κύκλωμα πολυφασικού κινητήρα επαγωγής  
Σχήμα 8: Συνδεσμολογία αστέρα - τριγώνου (Y-Δ)  
Σχήμα 9: Θερμικό ρελέ  
Σχήμα 10: Χρονικό ρελέ  
Σχήμα 11: Block διάγραμμα της υλοποίησης του κυκλώματος εκκίνησης με PLC  
Σχήμα 12: Σύμβολο ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα στο περιβάλλον Multisim ®  
Σχήμα 13: Σύμβολο φορτίου μηχανικού τύπου στο περιβάλλον Multisim ®  
Σχήμα 14: Διασύνδεση του μοντέλου κινητήρα με το μοντέλο φορτίου σταθερής ροπής  
Σχήμα 15: Ηλεκτρικό ισοδύναμο κύκλωμα του ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα  
Σχήμα 16: Κύκλωμα μετατροπής του ρεύματος σε σήμα τάσης  
Σχήμα 17: Κύκλωμα μετασχηματιστή υποβιβασμού του σήματος τάσης  
Σχήμα 18: Ανορθωτής πλήρους κύματος για τη μετατροπή του σήματος τάσης σε dc  
Σχήμα 19: Κύκλωμα συγκριτή για την παραγωγή του ψηφιακού σήματος διέγερσης  
Σχήμα 20: Μετρήσεις ρεύματος – τάσης στη μόνιμη κατάσταση - κύκλωμα εισόδου  
Σχήμα 21: Μετρήσεις ρεύματος – τάσης στη μόνιμη κατάσταση - κύκλωμα αναφοράς  
Σχήμα 22: Μετρήσεις ρεύματος – τάσης στη μόνιμη κατάσταση - έξοδος μετασχηματιστή  
Σχήμα 23: Μέτρηση τάσης στη μόνιμη κατάσταση - έξοδος ανορθωτή  
Σχήμα 24: Μέτρηση τάσης μεταβατικής κατάστασης στο σήμα εξόδου V\_comp  
Σχήμα 25: Απλοποιημένο κυκλωματικό μοντέλο για τον έλεγχο του ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα  
Σχήμα 26: Σήμα τάσης εξόδου φορτίου για συνδεσμολογία τυλιγμάτων αστέρα  
Σχήμα 27: Ρεύμα επί του τυλίγματος σε συνδεσμολογία αστέρα  
Σχήμα 28: Σήμα τάσης εξόδου φορτίου για συνδεσμολογία τυλιγμάτων αστέρα  
Σχήμα 29: Ρεύμα επί του τυλίγματος σε συνδεσμολογία αστέρα  
Σχήμα 30: Συνολικό ηλεκτρικό μοντέλο ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα και κύκλωμα μετατροπέα  
Σχήμα 31: Συνολική προσομοίωση κυκλώματος. Σήμα τάσεως εξόδου κινητήρα  
Σχήμα 32: Συνολική προσομοίωση κυκλώματος. Ρεύμα τυλίγματος κινητήρα  
Σχήμα 33: Συνολική προσομοίωση κυκλώματος. Σήμα μετατροπέα  
Σχήμα 34: Συνολική προσομοίωση κυκλώματος. Έμφαση στο σήμα μετατροπέα  
Σχήμα 35: Σήμα τάσεως εξόδου κινητήρα για φορτίο 200 Nm  
Σχήμα 36: Ρεύμα τυλίγματος κινητήρα για φορτίο 200 Nm  
Σχήμα 37: Σήμα μετατροπέα για φορτίο 200 Nm  
Σχήμα 38: Χρονικό διάγραμμα ρεύματος κινητήρα κατά τη φάση εκκίνησης (Φορτίο 50 Nm)  
Σχήμα 39: Χρονικό διάγραμμα ρεύματος κινητήρα κατά τη φάση εκκίνησης (Φορτίο 200 Nm)  
Σχήμα 40: Ανάλυση αρμονικών του ρεύματος τυλιγμάτων στη φάση εκκίνησης

Σχήμα 41: Χρονικό διάγραμμα ρεύματος κινητήρα κατά τη φάση λειτουργίας (φορτίο 50 Nm)

Σχήμα 42: Χρονικό διάγραμμα ρεύματος κινητήρα κατά τη φάση λειτουργίας (φορτίο 200 Nm)

Σχήμα 43: Χρονικό διάγραμμα ρεύματος κινητήρα κατά τη φάση λειτουργίας μετά τη μεταλλαγή τυλιγμάτων σε τρίγωνο (φορτίο 50 Nm)

Σχήμα 44: Χρονικό διάγραμμα ρεύματος κινητήρα κατά τη φάση λειτουργίας μετά τη μεταλλαγή τυλιγμάτων σε τρίγωνο (φορτίο 200 Nm)

# Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Παράμετροι λειτουργίας του ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα στο περιβάλλον Multisim ®

Πίνακας 2: Τύποι υποστηριζόμενων μηχανικών φορτίων στο περιβάλλον Multisim ®

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>

### 1 Εισαγωγή

Οι τριφασικοί ασύγχρονοι κινητήρες θεωρούνται ανάμεσα στις πλέον αξιόπιστες ηλεκτρικές μηχανές, από το σύνολο των ηλεκτρικών μηχανών που χρησιμοποιούνται για την μετατροπή ηλεκτρικής σε μηχανική ενέργεια. Οι παραπάνω κινητήρες, μπορούν να λειτουργούν σε πολυετή βάση, με ελάχιστο κόστος συντήρησης, παρέχοντας τη δυνατότητα προσαρμογής τους σε διαφορετικές επιδόσεις, σύμφωνα με τις απαιτήσεις τόσο της παραγωγής, όσο και τις εφαρμογές υπηρεσιών τις οποίες καλούνται να εξυπηρετήσουν. [1]

Όπως αναφέρθηκε, οι κινητήρες αυτού του τύπου βρίσκουν εφαρμογή σε διαφορετικούς βιομηχανικούς τομείς, όπως η βιομηχανία τροφίμων, η χημική βιομηχανία, οι μεταλλουργικές βιομηχανίες, οι βιομηχανίες χάρτου ή επεξεργασίας ύδατος, καθώς και στα απαιτούμενα συστήματα εξόρυξης. Οι εφαρμογές αποτελούνται από τον ηλεκτρικό εξοπλισμό, σε συνδυασμό με μηχανικά μέρη, λειτουργώντας σε σταθερές ή μεταβλητές ταχύτητες, όπως π.χ. στα μηχανήματα ανύψωσης, τους ανελκυστήρες και τα ανυψωτικά εμπορευμάτων, τα συστήματα μεταφοράς, όπως οι ταινιόδρομοι, τα συστήματα εξαερισμού και στις εγκαταστάσεις κλιματισμού, λαμβάνοντας πάντα υπ' όψη τη πιο διαδεδομένη χρήση τους στις αντλίες και τους συμπιεστές.

Από τις παραπάνω εφαρμογές, είναι εύκολο να αντιληφθούμε ότι οι τριφασικοί ασύγχρονοι κινητήρες μπορούν να θεωρηθούν ως οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες ηλεκτρικές μηχανές για βιομηχανικές χρήσεις (η κατανάλωση ενέργειας των εν λόγω ηλεκτροκινητήρων συνιστά το 75% περίπου της συνολικής κατανάλωσης στο πεδίο των βιομηχανικών διεργασιών). Με βάση αυτό, είναι εύκολο να κατανοήσουμε πόσο σημαντική είναι η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας, τόσο στη διαχείριση των επιχειρήσεων (το κόστος ενός κινητήρα κατά την διάρκεια του κύκλου ζωής του, που οφείλεται στην κατανάλωση ενέργειας, αποτελεί το 98%, ενώ τα έξοδα αγοράς και συντήρησης του, μόλις το εναπομείναν 2%), όσο και για τη βελτίωση της κατανάλωσης ισχύος από πλευράς δικτύου παραγωγής γενικότερα. Μείωση στα επίπεδα κατανάλωσης μπορεί να προκύψει σε σημαντικό βαθμό, κάνοντας χρήση συστημάτων μετάδοσης μεταβλητής ταχύτητας με μετατροπείς ή με εφαρμογή διόρθωσης του συντελεστή ισχύος, για να μειώσουμε την άεργο ισχύ που οι τελευταίοι δεσμεύουν από το δίκτυο κατά την λειτουργία τους. Τα ανακύπτοντα οφέλη είναι άμεσα οικονομικά, με μείωση της κατανάλωσης και συμμόρφωση με τα διεθνή πρότυπα, ώστε να αποφευχθεί η επιβολή προστίμων. Ακόμα πιο άμεσα, χρησιμοποιώντας κινητήρες υψηλής απόδοσης, οι οποίοι αναγνωρίζονται από τον κώδικα “EFF1” και στους οποίους προσδίδονται ιδιαίτερα προηγμένα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά και υλικά, μπορεί να επιτευχθεί μείωση της κατανάλωσης ενέργειας έως και 20%.

Ένας επιπλέον λόγος για τον οποίο απαιτείται μείωση των επιπέδων κατανάλωσης των ασύγχρονων κινητήρων, πέρα από την ευρεία εφαρμογή και εξάπλωση τους, είναι η καλύτερη συμπεριφορά τους ως στοιχεία κατανάλωσης ισχύος από το δίκτυο (μη εμφανίζοντας ακραία επίπεδα απαίτησης ισχύος), καθώς επίσης και η βελτίωση της διάρκειας ζωής του, καθώς τα τμήματα και υλικά που αποτελούν την διάταξη του ασύγχρονου κινητήρα, δεν καταπονούνται με υπερβολικά ρεύματα και τάσεις.

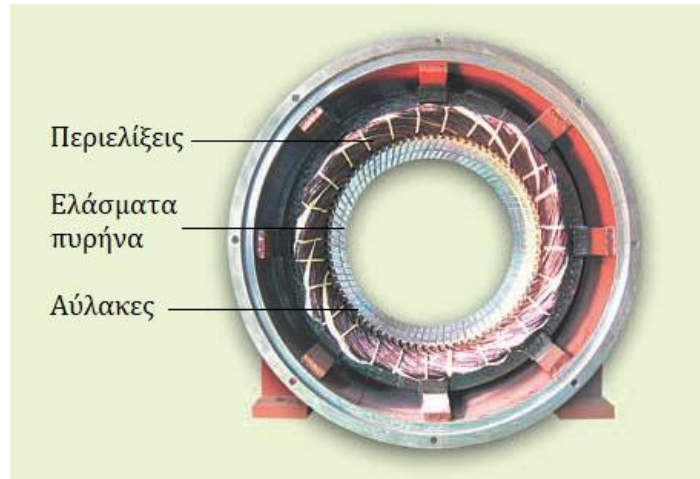
Στην συνέχεια θα παρουσιαστεί συνοπτικά σε επίπεδο διατάξεων αλλά και κυκλωματικό επίπεδο, η δομή των ασύγχρονων κινητήρων 3 φάσεων.

### **1.1 Δομή του Ασύγχρονου Τριφασικού Κινητήρα**

Προκειμένου να κατανοήσουμε καλύτερα τη δομή ενός ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα, παραθέτουμε μια σύντομη περιγραφή των κυρίων τμημάτων που αποτελούν τη στρεφόμενη μηχανή [2] [3] [4]. Δηλαδή, τα μέρη όπου παράγονται ηλεκτρικά φαινόμενα, από τα οποία προέρχεται και η λειτουργία.

Το πρώτο και σημαντικότερο τμήμα ενός τέτοιου κινητήρα είναι ο στάτης. Ο στάτης, μπορεί να περιγραφεί σαν την υλοποίηση των σταθερών τμημάτων που εκτελούν τη λειτουργία της στήριξης, έστω μερικώς, του κινητήρα, αλλά ουσιαστικά αποτελεί το μέρος του μαγνητικού κυκλώματος το οποίο περιλαμβάνει τις επαγωγικές περιελίξεις που στεγάζονται σε ειδικές αύλακες, υλοποιημένες σε αρμονία με την εσωτερική επιφάνεια. Ο στάτης, που απεικονίζεται στο σχήμα που ακολουθεί, αποτελείται από κράμα πυριτίου ή από χαλύβδινα φύλλα, μονωμένα από άκρη σε άκρη. Από τη γεωμετρική δομή του, εξαρτάται η συμπεριφορά του στις χρονικά μεταβαλλόμενες μαγνητικές διακυμάνσεις, οι οποίες προκαλούν απώλειες λόγω φαινομένων υστέρησης (που συνδέονται με την απόκλιση από την γραμμική μαγνήτιση του υλικού) και καταλήγουν να προκαλούν δινορεύματα, τα οποία με τη σειρά τους οδηγούν σε ανάπτυξη θερμότητας στα φύλλα του στάτη και κατά συνέπεια αύξηση των απωλειών του κινητήρα.

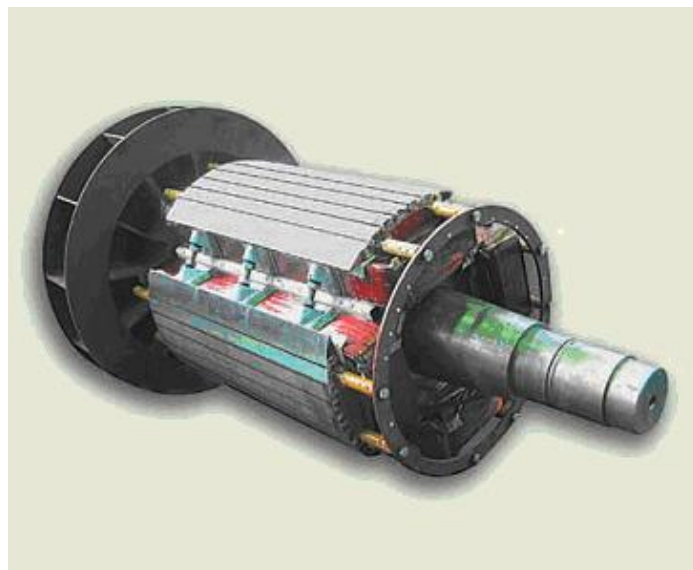
Στις υποδοχές που παρατηρούνται στη δομή των ελασμάτων, εισάγονται τρία πρωτεύοντα τυλίγματα (έκαστο των οποίων αποτελείται από περισσότερα πηνία, διαφορετικά συνδεδεμένα μεταξύ τους), όπου η τάση τροφοδοσίας εφαρμόζεται και δημιουργεί το μαγνητικό πεδίο που θα χρησιμοποιηθεί για την στρέψη. Τα τριφασικά τυλίγματα του στάτη μπορούν να συνδεθούν σε δύο συνδεσμολογίες, είτε κατά αστέρα, είτε κατά τρίγωνο. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με κινητήρες κατάλληλα εξοπλισμένους με κουτί υποδοχής ακροδεκτών με 6 τερματικές επαφές, ούτως ώστε να είναι δυνατόν να τροφοδοτήσουμε τον ίδιο κινητήρα με διαφορετικές τριφασικές τάσεις δικτύου. Ένα τέτοιο παράδειγμα διπλής ένδειξης, θα μπορούσε να είναι 230VΔ - 400VΥ ή 400VΔ - 690VΥ, όπου το σύμβολο Υ ή Δ αναφέρεται αντίστοιχα στη σύνδεση των περιελίξεων του στάτη σε αστέρα ή τρίγωνο. Λαμβάνοντας υπ' όψη τη δεύτερη περίπτωση (400VΔ - 690VΥ), η ένδειξη σημαίνει ότι οι περιελίξεις κατά τρίγωνο του κινητήρα, μπορούν να συνδεθούν σε ένα τριφασικό δίκτυο των 400V (τάση ανά φάση), ενώ για τον ίδιο κινητήρα, οι περιελίξεις είναι συνδεδεμένες κατά αστέρα, ο κινητήρας μπορεί να συνδεθεί σε δίκτυο των 690V (οι περιελίξεις κατά αστέρα μπορούν να υποβληθούν σε τάση δικτύου  $\sqrt{3}$  φορές μικρότερη).



**Σχήμα 1: Στάτης ενός τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα**

Το δεύτερο δομικό υποσύστημα που συνθέτει την λειτουργία του κινητήρα είναι ο δρομέας, ο οποίος είναι τοποθετημένος (εμφωλευμένος) στο στάτη και αποτελεί το επαγωγικό κύκλωμα του κινητήρα. Για έναν κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα, ο δρομέας, παρουσιάζεται στο σχήμα που ακολουθεί. Ο δρομέας συνίσταται από ένα σύστημα ράβδων (κατασκευασμένες από χαλκό ή αλουμίνιο), που είναι ομοαξονικά τοποθετημένα στον άξονα περιστροφής και είναι χυτοπρεσσαριστά στους αύλακες κατά μήκος της εξωτερικής σιδηρομαγνητικής περιφέρειας. Τα συγκεκριμένα τμήματα είναι κλειστά σε βραχυκυκλωμένη διάταξη, από δύο έδρανα που βρίσκονται στα άκρα, συνιστώντας ακόμα μία μηχανική στήριξη. Με την διάταξη αυτή, παράγεται ένας συμπαγής και ισχυρός δρομέας, στον οποίο τοποθετείται ο άξονας περιστροφής του κινητήρα.

Το επαγόμενο μαγνητικό πεδίο, που αποτελεί την αρχή λειτουργίας του κινητήρα, περιστρέφει τον άξονα του κινητήρα, μετατρέποντας έτσι την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική.



**Σχήμα 2: Δρομέας ενός τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα**

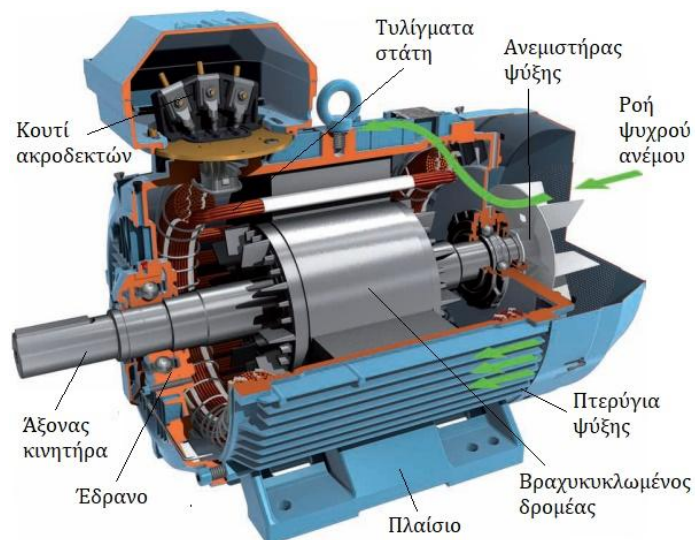
Τα υπόλοιπα μηχανικά μέρη από τα οποία αποτελείται ο κινητήρας, (με έμφαση στα κυριότερα), είναι:

- Τα δύο έδρανα, που είναι τοποθετημένα στο στάτη και φέρουν τη λειτουργία στήριξης του άξονα του κινητήρα
- Το πλαίσιο που, χάρη στα πτερύγια ψύξης διαχέει την παραγόμενη θερμότητα, (ειδικά την αναπτυσσόμενη στον στάτη), στο οποίο επίσης στεγάζεται το κουτί των ακροδεκτών
- Τον ανεμιστήρα, ο οποίος παρέχει ψύξη

Μια γενική παρουσίαση της δομής του κινητήρα, καθώς και μια τομή με τα επιμέρους στοιχεία του, παρατίθενται στα σχήματα 3 και 4 αντίστοιχα.



**Σχήμα 3: Δομή ενός τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα**



**Σχήμα 4: Τομή ενός τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα**



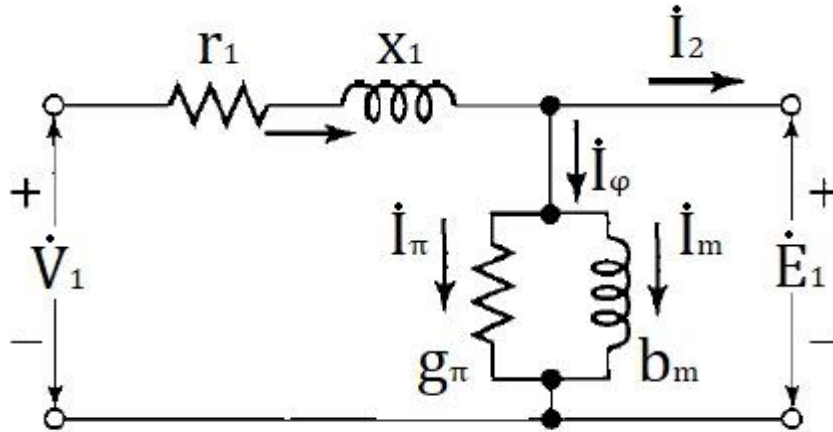
## 1.2 Ισοδύναμο Κύκλωμα Ασύγχρονου Τριφασικού Κινητήρα

Για τη λειτουργία του κινητήρα από ηλεκτρικής άποψης, η μελέτη μπορεί να περιορισθεί μόνο σε μια φάση, δεδομένου ότι η συμπεριφορά και των 3 φάσεων σε ένα συμμετρικό πολυφασικό σύστημα είναι ίδια. Η μόνη διάκριση μεταξύ των αναπτυσσόμενων τάσεων - ρευμάτων, είναι η χαρακτηριστική διαφορά φάσεως χρόνου, η οποία προέρχεται από την πυροδότηση των φάσεων του τριφασικού συστήματος. Για τριφασικούς κινητήρες, θεωρείται ότι το τύλιγμα του στάτη είναι συνδεδεμένο κατά αστέρα. Η παραδοχή αυτή καθιστά τη μελέτη πιο εύκολη, εφόσον το ρεύμα γραμμής συμπίπτει με το ρεύμα της φάσεως του κινητήρα, ενώ η τάση της φάσεως έχει την τιμή της τάσεως γραμμής προς τον ουδέτερο. Γίνεται επίσης η παραδοχή, ότι όλα τα ρεύματα και οι τάσεις έχουν ημιτονοειδή μορφή κύματος. Οι επιδράσεις των αρμονικών χώρου στη διανομή της ροής αγνοούνται, εκτός από όταν απαιτούνται για τον υπολογισμό των αντιδράσεων σκεδάσεως στάτη και δρομέα.

Αρχικά, θεωρείται ο στάτης. Το κύμα ροής του διακένου, το οποίο στρέφεται στο διάκενο με τη σύγχρονη ταχύτητα, παράγει συμμετρικές πολυφασικές αντι-ηλεκτρεγερτικές δυνάμεις στις φάσεις του στάτη. Η τάση ακροδεκτών του στάτη, διαφέρει από την αντι-ΗΕΔ κατά την πτώση τάσεως στη σύνθετη αντίσταση σκεδάσεως του στάτη. Η ανυσματική σχέση ανά φάση είναι:

$$\dot{V}_1 = \dot{E}_1 + \dot{I}_1(r_1 + jx_1) \quad (\text{Εξ. 1})$$

Όπου  $\dot{V}_1$  η τάση ακροδεκτών του στάτη,  $\dot{E}_1$  η αντι-ΗΕΔ που αναπτύσσεται από τη συνιστάμενη ροή διακένου,  $\dot{I}_1$  το ρεύμα του στάτη,  $r_1$  η πραγματική αντίσταση του στάτη και,  $x_1$  η αντίδραση σκεδάσεως του στάτη. Η θετική φορά που καταδεικνύεται στο ισοδύναμο κύκλωμα του παρακάτω σχήματος, ορίζει τη λειτουργία κινητήρα. Η συνιστάμενη ροή διακένου δημιουργείται από τις συνδυασμένες ΗΕΔ των ρευμάτων του στάτη και του δρομέα. Ακριβώς όπως στο ανάλογο του μετασχηματιστή, το ρεύμα του στάτη μπορεί να αναλυθεί σε δύο συνιστώσες. Μια συνιστώσα φορτίου και μια συνιστώσα διεγέρσεως. Η συνιστώσα φορτίου  $\dot{I}_2$  παράγει ΜΕΔ, η οποία αντιτίθεται ακριβώς στην ΗΕΔ του ρεύματος του δρομέα. Η συνιστώσα διεγέρσεως  $\dot{I}_\phi$  είναι το πρόσθετο ρεύμα του στάτη, το οποίο απαιτείται για τη δημιουργία της συνισταμένης ροής διακένου και είναι συνάρτηση της ΗΕΔ  $\dot{E}_1$ . Το ρεύμα διεγέρσεως μπορεί να αναλυθεί σε μία συνιστώσα απωλειών πυρήνα  $\dot{I}_\pi$  σε φάση με την  $\dot{E}_1$  και μία συνιστώσα μαγνητίσεως  $\dot{I}_m$ , μεταπορευόμενη την  $\dot{E}_1$  κατά  $90^\circ$ . Στο ισοδύναμο κύκλωμα, το ρεύμα διεγέρσεως μπορεί να περιληφθεί μέσω παράλληλου κλάδου, που σχηματίζεται από την αγωγιμότητα  $g_\pi$  των απωλειών πυρήνα και από μια μαγνητίζουσα αγωγιμότητα  $b_m$  εν παραλλήλω με την τάση  $\dot{E}_1$ , (βλ. σχήμα 1). Τόσο το  $g_\pi$  όσο και το  $b_m$ , συνήθως καθορίζονται στην ονομαστική συχνότητα του στάτη και για μία τιμή του  $\dot{E}_1$  πλησίον της αναμενόμενης τιμής λειτουργίας.



Σχήμα 5. Ισοδύναμο κύκλωμα του στάτη πολυφασικού κινητήρα επαγωγής

Γίνεται η παραδοχή ότι και τα δύο παραμένουν σταθερά για τις μικρές αποκλίσεις από την τιμή αυτή, η οποία σχετίζεται με την κανονική λειτουργία του κινητήρα.

Μέχρι εδώ, το ισοδύναμο κύκλωμα για τα φαινόμενα του στάτη είναι ακριβώς το ίδιο με το ισοδύναμο κύκλωμα πρωτεύοντος ενός μετασχηματιστή. Προς συμπλήρωση του ισοδυνάμου κυκλώματος πρέπει να ενσωματωθεί η επίδραση του δρομέα. Ο δρομέας μπορεί να είναι ή με τύλιγμα κλωβού ή του τυλιγμένου τύπου με τύλιγμα συμμετρικό πολυφασικό. Σε αμφότερες τις περιπτώσεις, τα βασικά φαινόμενα είναι ίδια.

Θεωρώντας τις συνθήκες οι οποίες υφίστανται, ο δρομέας στρέφεται με ταχύτητα, αντιστοιχούσα σε μία ανά μονάδα ολίσθησης  $s$ . Η θεμελιώδης συνιστώσα χώρου του κύματος της συνισταμένης ροής διακένου  $\Phi_R$  οδεύει ως προς το δρομέα στην ταχύτητα ολίσθησης και επάγει ΗΕΔ, συχνότητας της ολίσθησης στα κυκλώματα του δρομέα. Οι ΗΕΔ αυτές παράγουν ρεύματα συχνότητας ολίσθησης στις βραχυκυκλωμένες φάσεις του δρομέα ή ράβδους. Εάν ο δρομέας είναι του τυλιγμένου τύπου, πρέπει να έχει τον ίδιο αριθμό πόλων, όπως ο στάτης, αν και δεν είναι απαραίτητο να διαθέτει τον ίδιο αριθμό φάσεων. Στον τυλιγμένο δρομέα, τα ρεύματα του δρομέα συχνότητας ολίσθησης, παράγουν ένα κύμα ΜΕΔ, του οποίου η θεμελιώδης συνιστώσα χώρου έχει τον ίδιο αριθμό πόλων όπως το επάγον κύμα ροής και το οποίο οδεύει στην ταχύτητα ολίσθησης ως προς το δρομέα. Η γωνία φάσεως χώρου μεταξύ του κύματος επάγουσας ροής και του κύματος ΜΕΔ του δρομέα, είναι η γωνία ροπής.

Η γωνία ροπής  $\delta$ , είναι κατά  $90^\circ$  μεγαλύτερη από τη γωνία  $\varphi_2$  του Σ.Ι. του δρομέα. Επίσης, τονίζεται ότι ο βραχυκυκλωμένος δρομέας, όταν ενεργεί υπό την επίδραση της ροής του διακένου, αυτομάτως καθίσταται πολυφασικό τύλιγμα, που έχει αριθμό πόλων ίσο προς τον αριθμό πόλων στο πεδίο του διακένου.

Για τον καθορισμό του ισοδυνάμου κυκλώματος, θεωρούμε ένα τυλιγμένο δρομέα με ίδιο αριθμό πόλων όπως αυτό που διαθέτει ο στάτης. Ο αριθμός των ενεργών ελιγμάτων ανά φάση στο τύλιγμα του στάτη, είναι  $a$  φορές τον αριθμό στο τύλιγμα του δρομέα. Τα ενεργά ελίγματα ορίζονται όπως τα υπάρχοντα ελίγματα, διορθωμένα ως προς τις επιδράσεις των θεμελιωδών συντελεστών βήματος  $k_p$  και πλάτους  $k_b$ . Συγκρίνοντας τη μαγνητική επίδραση του δρομέα αυτού, με ένα δρομέα μαγνητικά ισοδύναμο, έχοντας τον ίδιο αριθμό ελιγμάτων, όπως ο στάτης, για την ίδια ροή και ταχύτητα, η σχέση μεταξύ της τάσεως  $\dot{E}_r$  που επάγεται στον πραγματικό δρομέα και της τάσης  $\dot{E}_{2s}$  που επάγεται στον ισοδύναμο δρομέα είναι

$$\dot{E}_{2s} = \alpha \dot{E}_r \quad (\text{Εξ. 2})$$

Εάν οι δρομείς είναι μαγνητικά ισοδύναμοι, τα αμπερ-ελίγματα τους πρέπει να είναι ίσα, οπότε η σχέση μεταξύ του πραγματικού ρεύματος του δρομέα  $\dot{I}_r$  και του ρεύματος  $\dot{I}_{2s}$  στον ισοδύναμο δρομέα πρέπει να είναι

$$\dot{I}_{2s} = \frac{\dot{I}_r}{\alpha} \quad (\text{Εξ. 3})$$

Συνεπώς, η σχέση μεταξύ της σύνθετης αντίστασης σκέδασης στη συχνότητα ολίσθησης  $\dot{Z}_{2s}$  του ισοδύναμου δρομέα και της σύνθετης αντίστασης σκέδασης στη συχνότητα ολίσθησης  $\dot{Z}_r$  του πραγματικού δρομέα πρέπει να είναι

$$\dot{Z}_{2s} = \frac{E_{2s}}{\dot{I}_{2s}} = \frac{\alpha^2}{\dot{I}_r} = \alpha^2 \dot{Z}_r \quad (\text{Εξ. 4})$$

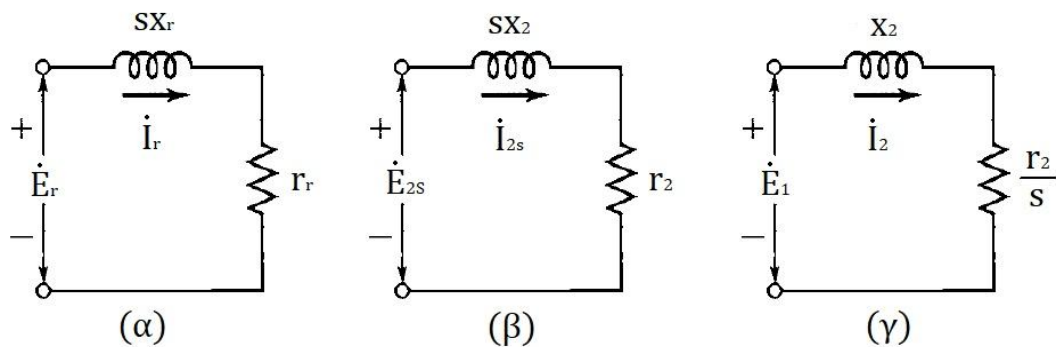
Οι τάσεις, ρεύματα και σύνθετες αντιστάσεις στον ισοδύναμο δρομέα ορίζονται ως οι τιμές του, που αναφέρονται στο στάτη. Η μέθοδος είναι ίδια όπως στο μετασχηματιστή, όπου τα μεγέθη του δευτερεύοντος αναφέρονται στο πρωτεύον. Οι παράγοντες αναφοράς, είναι λόγοι των ενεργών ελιγμάτων, ουσιαστικά όμοιοι προς τους λόγους των μετασχηματιστών.

Οι παράγοντες αναφοράς πρέπει βεβαίως να είναι γνωστοί όταν ενδιαφερόμαστε ιδιαίτερα να δούμε, τι συμβαίνει στα κυκλώματα του δρομέα. Από την άποψη του στάτη όμως, οι αντανακλώμενες επιδράσεις του δρομέα εμφανίζονται συναρτήσει των αναχθέντων ποσοτήτων και η θεωρία, τόσο των τυλιγμένων, όσο και των δρομέων κλωβού, μπορεί να διατυπωθεί συναρτήσει του αναχθέντος δρομέα. Στο παρόν κεφάλαιο υποτίθεται ότι οι αναχθείσες σταθερές του δρομέα είναι γνωστές.

Εφόσον ο δρομέας είναι βραχυκυκλωμένος, η ανυσματική σχέση μεταξύ της ΗΕΔ συχνότητας ολίσθησης  $\dot{E}_{2s}$ , που αναπτύσσεται στη θεωρούμενη φάση του αναχθέντος δρομέα και του ρεύματος  $\dot{I}_{2s}$  στη φάση αυτή είναι

$$\frac{\dot{E}_{2s}}{\dot{I}_{2s}} = \dot{Z}_{2s} = r_2 + jsX_2 \quad (\text{Εξ. 5})$$

Όπου  $\dot{Z}_{2s}$  είναι η ανά φάση σύνθετη αντίσταση του δρομέα στη συχνότητα ολίσθησης, αναχθείσα στο στάτη,  $r_2$  η αναχθείσα πραγματική αντίσταση και  $sX_2$  η αναχθείσα αντίδραση σκέδασης στη συχνότητα ολίσθησης. Η αντίδραση εκφράζεται κατ' αυτόν τον τρόπο διότι, είναι ανάλογη προς τη συχνότητα του δρομέα και ως εκ τούτου της ολίσθησης. Έτσι, το  $X_2$  ορίζεται ως η τιμή την οποία θα είχε η αναχθείσα αντίδραση σκέδασης του δρομέα στη συχνότητα του στάτη. Έτσι, εάν  $r_r$ ,  $sX_r$  η αντίσταση και η αντίδραση σκέδασης του δρομέα στην τάση  $\dot{E}_r$  και συχνότητα  $s\dot{f}_1$  του δρομέα, τότε το ισοδύναμο κύκλωμα μια φάσης του δρομέα παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.



Σχήμα 6. Στάδια ανάπτυξης του ισοδύναμου κυκλώματος δρομέα πολυφασικού κινητήρα επαγωγής: (α) τάση δρομέα, συχνότητα δρομέα, (β) τάση στάτη, συχνότητα δρομέα, (γ) τάση στάτη, συχνότητα στάτη

Όπου  $\mathbf{X}_r$  ορίζεται πάλι στη συχνότητα του στάτη. Με βάση τις εξισώσεις (2) έως (5) το ισοδύναμο κύκλωμα μιας φάσης του δρομέα παίρνει τη μορφή του σχήματος 2(β). Σε αυτό, όλα τα μεγέθη είναι ανηγμένα στο στάτη, ενώ η συχνότητα εξακολουθεί να παραμένει ίδια με της ολίσθησης. Για τη σύνθετη αντίσταση σκέδασης ισχύει ότι  $\mathbf{r}_2 = \alpha^2 \mathbf{r}_r$  και  $(\mathbf{sx}_2) = \alpha^2 (\mathbf{sx}_r)$ .

Ο στάτης βλέπει ένα κύμα ροής και ένα κύμα ΜΕΔ, περιστρεφόμενα στη σύγχρονη ταχύτητα. Το κύμα ροής επάγει την τάση  $\dot{\mathbf{E}}_{2s}$  στο δρομέα στη συχνότητα ολίσθησης και στο στάτη την αντι-ΗΕΔ  $\dot{\mathbf{E}}_1$ . Εάν δεν υπήρχε η επίδραση της ταχύτητας, η αναχθείσα τάση δρομέα θα ήταν ίση προς την τάση του στάτη, εφ' όσον το αναχθέν τύλιγμα του δρομέα είναι πανομοιότυπο με το τύλιγμα του στάτη. Λόγω του ότι η σχετική ταχύτητα του κύματος ροής ως προς το δρομέα είναι  $\mathbf{s}$  φορές την ταχύτητα του ως προς το στάτη, η σχέση μεταξύ των πραγματικών τιμών των ΗΕΔ στάτη και δρομέα είναι

$$\dot{\mathbf{E}}_{2s} = \mathbf{s} \dot{\mathbf{E}}_1 \quad (\text{Εξ. 6})$$

Στο κύμα ΜΕΔ του δρομέα αντιτίθεται η ΜΕΔ της συνιστώσας ρεύματος φορτίου  $\dot{\mathbf{I}}_2$ , του ρεύματος του στάτη και για αυτό, για ενδεδειγμένες τιμές ισχύει

$$\mathbf{I}_{2s} = \mathbf{I}_2 \quad (\text{Εξ. 7})$$

Διαίρεση της εξίσωσης (6) με την εξ. (7) δίνει για ενδεδειγμένες τιμές

$$\frac{\mathbf{E}_{2s}}{\mathbf{I}_{2s}} = \frac{\mathbf{sE}_1}{\mathbf{I}_2} \quad (\text{Εξ. 8})$$

Τα δύο κύματα ΜΕΔ του στάτη και του δρομέα, που οφείλονται αντίστοιχα στα ρεύματα  $\mathbf{I}_2$  και  $\dot{\mathbf{I}}_{2s}$ , στρέφονται με τη σύγχρονη ταχύτητα ενώ συγχρόνως, όπως και στο μετασχηματιστή, πρέπει να είναι ίσα και αντίθετα. Έτσι, η ύπαρξη ρεύματος φορτίου δεν μεταβάλλει ουσιαστικά την ισορροπία στο μαγνητικό πεδίο της μηχανής.

Συνεπώς, το κύμα ΜΕΔ, το δημιουργούμενο από το ρεύμα φορτίου  $\mathbf{I}_2$  πρέπει να είναι μετατεθειμένο στο χώρο, όπως το συνιστάμενο κύμα ροής κατά την ίδια γωνία χώρου, όπως αυτή μεταξύ του κύματος ΜΕΔ του δρομέα και του συνιστάμενου κύματος ροής.

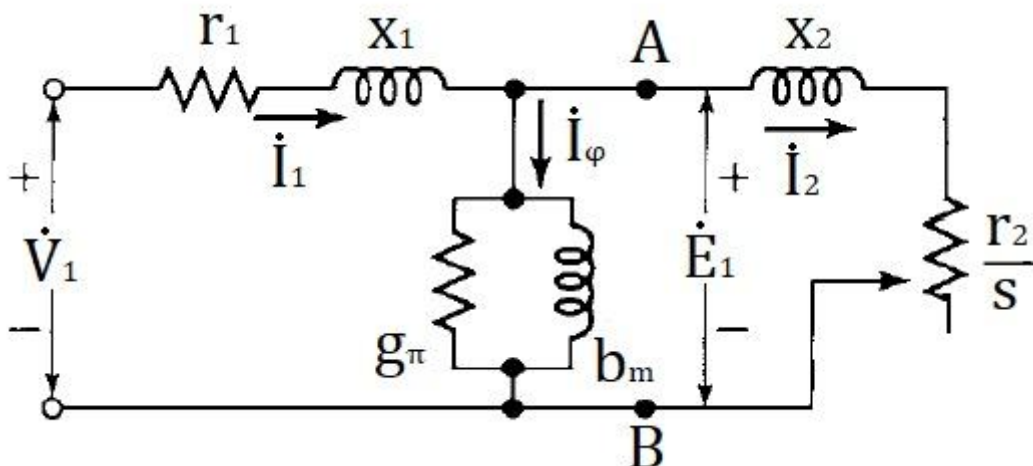
Δηλαδή, τη γωνία ροπής  $\delta$ . Η γωνία φάσεως χρόνου μεταξύ της τάσης στάτη  $\dot{E}_1$  και του ρεύματος φορτίου στάτη  $\dot{I}_2$ , ως εκ τούτου πρέπει να ισούται με την αντίστοιχη γωνία Σ.Ι. του δρομέα  $\varphi_2$ . Το γεγονός ότι οι ΜΕΔ στάτη και δρομέα πρέπει να είναι σε αντίθεση, λαμβάνεται υπ' όψη, εφ' όσον το ρεύμα δρομέα  $\dot{I}_{2s}$  δημιουργείται από την ΗΕΔ του δρομέα  $\dot{E}_{2s}$ , ενώ το ρεύμα του στάτη  $\dot{I}_2$  ρέει αντίθετα προς την αντι-ΗΕΔ του στάτη  $\dot{E}_1$ . Για αυτό το λόγο, η (Εξ. 8) αληθεύει όχι μόνο για ενδεδειγμένες τιμές, αλλά και στην ανυσματική έννοια. Αντικατάσταση της (Εξ. 5) στην ανυσματική ισοδύναμη της (Εξ 8) δίνει:

$$\frac{s\dot{E}_1}{\dot{I}_2} = \frac{\dot{E}_{2s}}{\dot{I}_{2s}} = r_2 + jsX_2 \quad (\text{Εξ. 9})$$

Διαιρώντας δια  $s$  και τα δύο μέλη, προκύπτει

$$\frac{\dot{E}_1}{\dot{I}_2} = \frac{r_2}{s} + jX_2 \quad (\text{Εξ. 10})$$

Δηλαδή, ο στάτης βλέπει μαγνητικές συνθήκες στο διάκενο, οι οποίες έχουν ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη αντι-ΗΕΔ  $\dot{E}_1$  στο στάτη και του ρεύματος φορτίου  $\dot{I}_2$  στο στάτη. Επίσης, προκύπτει από την (Εξ. 10), ότι οι συνθήκες αυτές είναι ταυτόσημες με το αποτέλεσμα συνδέσεως μιας σύνθετης αντίστασης  $\frac{r_2}{s} + jX_2$  συχνότητας του στάτη στην  $\dot{E}_1$ . Συνεπώς, η επίδραση του δρομέα του σχήματος 2(γ) μπορεί να ενσωματωθεί στο ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 1, δια συνδέσεως της αντίστασης αυτής στους ακροδέκτες ΑΒ. Το τελικό αποτέλεσμα παρουσιάζεται στο σχήμα 3.



Σχήμα 7. Ισοδύναμο κύκλωμα πολυφασικού κινητήρα επαγωγής

Η συνδυασμένη επίδραση του φορτίου στον άξονα και της αντίστασης του δρομέα, εμφανίζεται ως ανακλώμενη αντίσταση  $\frac{r_2}{s}$ , μία συνάρτηση της ολίσθησης και ως εκ τούτου, του μηχανικού φορτίου. Το ρεύμα στην ανακλώμενη σύνθετη αντίσταση του δρομέα, ισούται με τη συνιστώσα φορτίου  $\dot{I}_2$  του ρεύματος του στάτη. Η τάση στη σύνθετη

αντίσταση ισούται προς την ΗΕΔ  $\dot{E}_1$  του στάτη. Πρέπει να σημειωθεί ότι όταν τα ρεύματα και οι τάσεις του δρομέα ανακλώνται στο στάτη, η συχνότητά τους μετατρέπεται επίσης σε συχνότητα του στάτη. Όλα τα ηλεκτρικά φαινόμενα του δρομέα, όταν παρατηρούνται από το στάτη, γίνονται φαινόμενα συχνότητας του στάτη, διότι το τύλιγμα του στάτη απλώς βλέπει κύματα ΜΕΔ και ροής να οδεύουν στη σύγχρονη ταχύτητα.

### **1.3 Εκκίνηση του Ασύγχρονου Τριφασικού Κινητήρα**

#### **1.3.1 Εισαγωγή**

Κατά τη φάση εκκίνησης ενός κινητήρα και για την επίτευξη ομαλής γωνιακής ταχύτητας επί του φορτίου, απαιτείται σημαντικό ρεύμα που προέρχεται από τις φάσεις τροφοδοσίας του συστήματος. Το ρεύμα αυτό μπορεί να ξεπερνά ακόμη και το 7πλάσιο της ονομαστικής τιμής λειτουργίας ενός κινητήρα. Στην περίπτωση αυτή, το σύστημα τροφοδοσίας καλείται να ανταπεξέλθει στην απαιτούμενη παροχή ισχύος από τη διάταξη του κινητήρα. Στόχος του συστήματος εκκίνησης είναι, η διευκόλυνση της παροχής ισχύος από την γραμμή τροφοδοσίας προς τον κινητήρα.

Σημαντική πτυχή που πρέπει να ληφθεί υπ' όψη κατά την επιλογή και υλοποίηση ενός συστήματος για την εκκίνηση και τον έλεγχο του κινητήρα είναι η ασφάλεια και η αξιοπιστία της λύσης που αυτό παρέχει. Τα κύρια αίτια αστοχίας των κινητήρων είναι τα βραχυκυκλώματα, τα οποία συμβαίνουν για παράδειγμα, λόγω υγρασίας, γράσου, σκόνης μεταξύ των ελιγμάτων ή λόγω υπερφόρτισης. Οι υπερτάσεις που προκύπτουν από σφάλματα, δημιουργούν αύξηση της θερμοκρασίας, η οποία μπορεί να προκαλέσει ανεπανόρθωτη ζημιά στον κινητήρα, με πιθανότητα, την πρόκληση πυρκαγιάς στον περιβάλλοντα χώρο.

Λόγω του μεγάλου πλήθους φαινομένων και των ενδεχόμενων αστοχιών στην λειτουργία, η εκκίνηση αποτελεί μια ιδιαίτερα κρίσιμη φάση, τόσο για τον ίδιο τον κινητήρα όσο και για την εγκατάσταση που τον τροφοδοτεί, ενώ η ονομαστική λειτουργία απαιτείται να παρακολουθείται επαρκώς και να προστατεύεται σε περίπτωση δυσλειτουργίας, καθ' όλη την χρονική διάρκεια όπου ο κινητήρας είναι σε ενεργή κατάσταση. Για το λόγο αυτό, κρίνεται απαραίτητο και σημαντικό, να γίνεται μέτρηση και ορθή επιλογή των ηλεκτρικών συσκευών, για να επιτευχθεί η εκκίνηση του κινητήρα και η μετάβαση των ελιγμάτων. Το πρότυπο αναφοράς "IEC 60947-4-1" "Ηλεκτρομηχανικές επαφές και εκκινητήρες κινητήρων" αποτελεί τη βάση για την πιστοποίηση των συνθηκών που απαιτούνται για τις φάσεις εκκίνησης, διαδικασία η οποία ισχύει τόσο στις επαφές εναλλασσομένου ρεύματος, όσο και συνεχούς, καθώς και στους εκκινητήρες κινητήρων εναλλασσομένου ρεύματος, των οποίων οι επαφές πρόκειται να συνδεθούν σε κυκλώματα με ονομαστικές τάσεις που δεν υπερβαίνουν τα 1000V ac ή τα 1500V dc.

Στην συνέχεια, θα παρουσιαστούν οι μεθοδολογίες για την εκκίνηση ενός κινητήρα με χρήση κατάλληλων συνδεσμολογιών για τα κυκλώματα πηνίων.



### 1.3.2 Εκκίνηση Αστέρα – Τριγώνου (Y-Δ)

Η εκκίνηση Αστέρα – Τριγώνου, αποτελεί το πιο γνωστό και ίσως το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο σύστημα εκκίνησης με μειωμένη τάση. Συνήθως, χρησιμοποιείται για να εκκινήσει τον κινητήρα, μειώνοντας τις μηχανικές καταπονήσεις και περιορίζοντας τις τιμές των ρευμάτων κατά την εκκίνηση, με τίμημα όμως, να παρέχει μια μειωμένη ροπή στρέψης.

Αυτό το σύστημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κινητήρες με κιβώτιο ακροδεκτών, με 6 ακροδέκτες και διπλής τροφοδότησης. Είναι ιδιαίτερος κατάλληλος για εκκίνηση χωρίς φορτίο ή με χαμηλή και σταθερή ροπή φορτίου ή για ελαφρώς αυξανόμενη ροπή φορτίου, όπως στις περιπτώσεις ανεμιστήρων ή φυγοκεντρικών αντλιών χαμηλής ισχύος. Αναφερόμενοι στο σχήμα 8, η λειτουργία εκκίνησης προβλέπει την αρχική φάση με σύνδεση αστέρα των ελιγμάτων, ώστε να γίνει αντιληπτό μέσω του κλεισίματος του αυτόματου διακόπτη της επαφής KL και της επαφής KY. Μετά από μια κατάλληλα προκαθορισμένη χρονική περίοδο, με το άνοιγμα της επαφής KY και το κλείσιμο της επαφής KΔ, επιτρέπεται η μετάβαση στη σύνδεση τριγώνου, η οποία αποτελεί τη διαμόρφωση της κανονικής λειτουργίας.

Αυτά τα στοιχεία επηρεάζονται από τα ρεύματα που σχετίζονται με τις διαφορετικές φάσεις εκκίνησης. Αυτά τα ρεύματα είναι χαμηλότερα από το ονομαστικό ρεύμα του κινητήρα, όπως απεικονίζεται παρακάτω. Επίσης, η θερμική προστασία, η οποία συνήθως είναι τοποθετημένη στη πλευρά του φορτίου, στον κόμβο μετάβασης Y/Δ, θα πρέπει να τεθεί σε μια τιμή ρεύματος, μικρότερη από το ονομαστικό ρεύμα του κινητήρα.

Επιπλέον, η θερμική προστασία τοποθετημένη σε αυτή τη θέση, είναι ευαίσθητη στα ρεύματα της τρίτης αρμονικής, που δημιουργούνται εξ' αιτίας του κορεσμού του σιδήρου και παραμένει κλειστή μέσα στο κύκλωμα τριγώνου.

Στην συνέχεια, θα αναλύσουμε τις διάφορες φάσεις της εκκίνησης του κινητήρα με λεπτομέρεια.

### 1.3.3 Φάση Αστέρα (Y)

Αποτελεί την αρχική κατάσταση εκκίνησης για τα τυλίγματα πηνίων του κινητήρα [20] [22]. Τα τυλίγματα του κινητήρα είναι συνδεδεμένα σε σχήμα αστέρα και η τάση πάνω σε αυτά είναι  $\frac{V_L}{\sqrt{3}}$ . Το ρεύμα που διαρρέει τα τυλίγματα του κινητήρα και τη γραμμή προκύπτει

$$I_{MY} = \frac{V_L}{\sqrt{3} * Z_W} \quad (\text{Εξ. 11})$$

όπου  $Z_W$  είναι η σύνθετη αντίσταση.

Όπως αναφέρθηκε ήδη, αυτή η φάση της εκκίνησης συμπίπτει με τη φάση της επιτάχυνσης και κρατάει αρκετά ώστε να επιτευχθεί σχεδόν η επιθυμητή σύγχρονη ταχύτητα. Μια πολύ σύντομη διάρκεια, δεν επιτρέπει τη μείωση των πιέσεων που χαρακτηρίζουν αυτή την τυπολογία εκκίνησης. Ως εκ τούτου, αυτές οι πιέσεις θα εμφανιστούν ξανά στην αμέσως επόμενη φάση, αυτή του τριγώνου, αναπαράγοντας έτσι, συνθήκες εκκίνησης παρόμοιες με την απευθείας σύνδεση. Επιπλέον, λόγω του

αυτοματοποιημένου χρονικού καθορισμού της μετάβασης, το σύστημα δε διαθέτει γνώση της πραγματικής ταχύτητας περιστροφής του φορτίου και κατά πόσον αυτή έχει επιτευχθεί. Ειδικότερα, σε μεταβαλλόμενα χρονικά ή σε κυμαινόμενα φορτία, η διαδικασία χρονικής εφαρμογής της συνδεσμολογίας αστέρα, μπορεί να μην επαρκεί δεδομένου ότι η ταχύτητα εγκατάστασης της επιθυμητής ταχύτητας περιστροφής, μπορεί να μην έχει προλάβει να επιτευχθεί.

Το σύστημα που βασίζεται στην χρονική λειτουργία επίτευξης, θα μεταβεί στην κατάσταση τριγώνου, την οποία θα αναλύσουμε στη συνέχεια.

### 1.3.4 Φάση Μετάβασης των Τυλιγμάτων

Σε αυτή τη φάση, μέσω ανοίγματος και κλεισίματος αποκλειστικών επαφών (με χρήση relays), πραγματοποιείται η μετάβαση από τη φάση αστέρα στη φάση τριγώνου. Η διάρκεια μετάβασης και η βαθμονόμηση των δημιουργούμενων ρευμάτων, είναι από τα πλέον σημαντικά ζητήματα κατά τη φάση αυτή. Ο χρόνος μετάβασης πρέπει να είναι τέτοιος, που να εγγυάται την εξάλειψη του ηλεκτρικού τόξου στην επαφή του αστέρα και να αποτρέψει την κατάσταση βραχυκυκλώματος που μπορεί να προκληθεί από ένα πρόωρο κλείσιμο της επαφής του τριγώνου. Το τελευταίο, εφόσον δεν προσεχθεί, μπορεί να καταστρέψει τα κυκλώματα των τυλιγμάτων, και διασφαλίζεται από την υψηλή ταχύτητα μεταγωγής του διακόπτη. Από την άλλη, μια αργοπορία στη μετάβαση από την Υ σε Δ φάση, θα προκαλούσε την επιβράδυνση του κινητήρα, συντελώντας έτσι σε υψηλά στιγμιαία ρεύματα στη φάση τριγώνου. Επομένως, μπορεί να γίνει εύκολα αντιληπτό ότι και ο χρόνος μεταγωγής, αλλά και η διάρκεια μεταγωγής των κυκλωμάτων τυλίγματος είναι σημαντικά για τη λειτουργία του κινητήρα και την επίτευξη της επιθυμητής ροπής φορτίου. Ενδεχόμενα λοιπόν, το να βασιστεί η διαδικασία μετάβασης σε καθαρά και αποκλειστικά χρονικό πλαίσιο μπορεί να μην είναι επαρκές για την βελτιστοποίηση της λειτουργίας του κινητήρα.

Η μετάβαση ρυθμίζεται από αναλογικούς ή ψηφιακούς χρονικούς μετρητές και, σαν ένδειξη, ο χρόνος μετάβασης μπορεί να οριστεί σε μια μέση τιμή των 50ms (για καθορισμένη κατηγορία κινητήρων και φορτίου). Στο χρονικό μετρητή, ορίζεται επίσης η χρονική διάρκεια της φάσης του αστέρα, όπου η επιτάχυνση ή χρόνος εκκίνησης, γενικά μιλώντας, μπορεί να θεωρηθεί ως μια συνάρτηση της διαφοράς μεταξύ της μέσης ροπής στρέψης του κινητήρα και της ροπής μέσου φορτίου της μονάδας του κινητήρα.

Μια καλή μετάβαση, η οποία είναι απαραίτητη για να γίνουν εφικτά τα πλεονεκτήματα, τα οποία θεωρητικά χαρακτηρίζουν την εκκίνηση Υ/Δ, πρέπει να γίνεται, λαμβάνοντας υπ' όψη τη φορά περιστροφής και την αλληλουχία των συνδέσεων των τυλιγμάτων στους συνδέσμους του κινητήρα, περνώντας από τη θέση Υ στη θέση Δ.

Αν η μετάβαση πραγματοποιηθεί, όταν ο υπολειμματικός μαγνητισμός του δρομέα είναι σε φάση αντίθετη από αυτή του μαγνητικού πεδίου που παράγεται από το ρεύμα του στάτη, η απαίτηση σε ρεύμα μπορεί να είναι πολύ υψηλή, με τιμές οι οποίες θα μπορούν να φτάσουν ακόμα και 20 φορές την ονομαστική. Οι επιπτώσεις που προέρχονται από μια κακή βαθμονόμηση στη μετάβαση, επηρεάζει όχι μόνο τον κινητήρα, αλλά επίσης και τη συμπεριφορά των εξαρτημάτων, τα οποία συνιστούν το συντονισμό και προκαλούν ανεπιθύμητες και απρόβλεπτες στρέψεις.

Μετά την χρονική φάση μετάβασης των τυλιγμάτων, θα εξετάσουμε αναλυτικά την εγκατάσταση της φάσης τριγώνου, όπου θεωρείται ότι η επιθυμητή ροπή στρέψης έχει



αναπτυχθεί επί του φορτίου και σε σημαντικό βαθμό, η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα έχει επιτευχθεί.

### 1.3.5 Φάση Τριγώνου ( $\Delta$ )

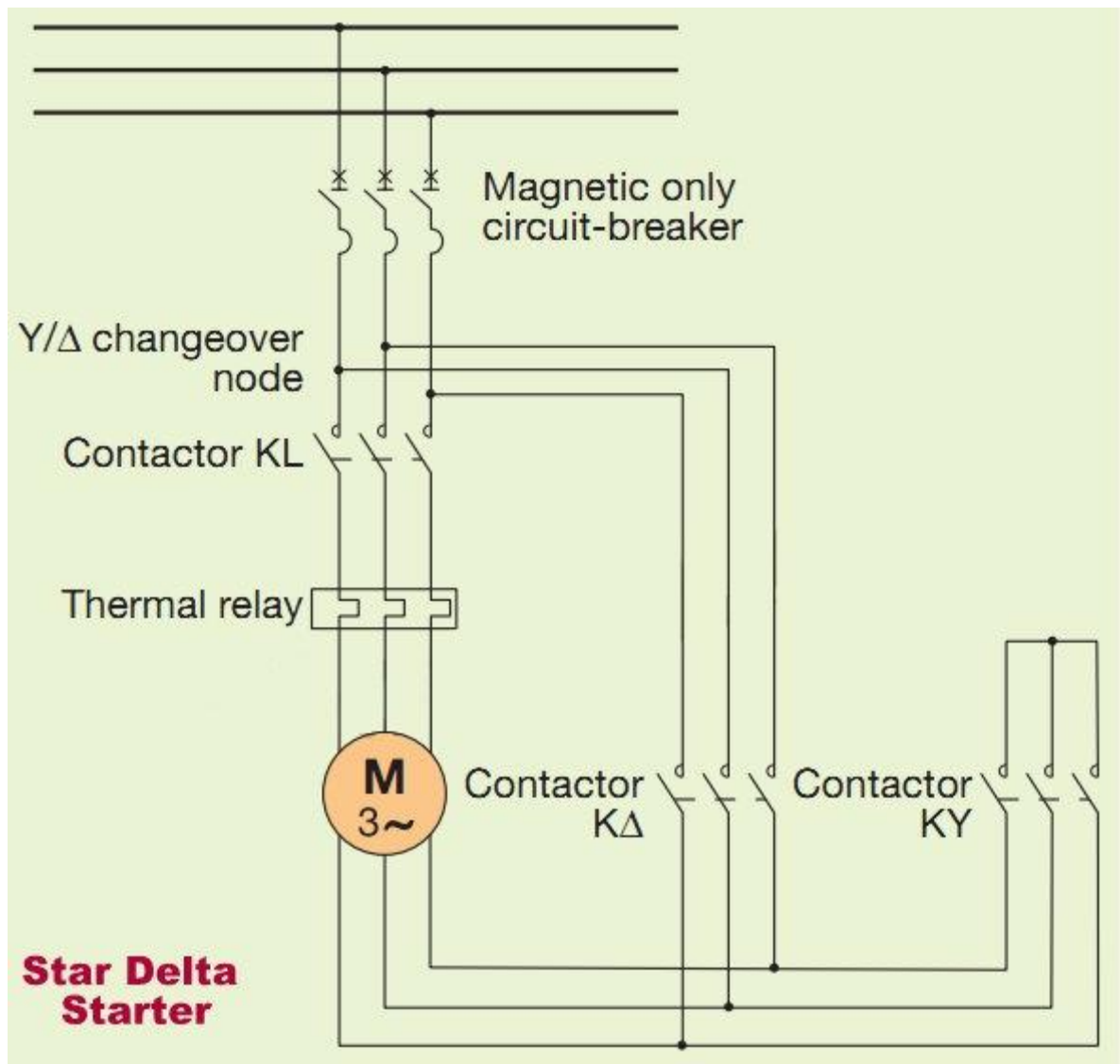
Όταν η μετάβαση των τυλιγμάτων έχει ολοκληρωθεί, η τελική φάση της εκκίνησης έχει επιτευχθεί [21] [22]. Αντιπροσωπεύει επίσης, την σταθερή κατάσταση λειτουργίας, στην οποία τα τυλίγματα του στάτη είναι σε σύνδεση τριγώνου και υπόκεινται στην πλήρη τάση δικτύου  $V_L$  και ο κινητήρας αποκτά ξανά την πλήρη ροπή, όπου η ροή του ρεύματος διαμέσου των τυλιγμάτων είναι:

$$I_{M\Delta} = \frac{V_L}{Z_W} \quad (\text{Εξ. 12})$$

Το ρεύμα που απορροφάται από τη γραμμή (ονομαστικό ρεύμα “ $I_e$ ” του κινητήρα) είναι:

$$I_{LM\Delta} = \frac{V_L}{Z_W} * \sqrt{3} \quad (\text{Εξ. 13})$$

Μία κυκλωματική αναπαράσταση του ασύγχρονου κινητήρα 3 φάσεων σε συνδυασμό με τα κυκλώματα τυλιγμάτων  $Y$  και  $\Delta$ , παρουσιάζεται στο σχήμα που ακολουθεί:



Σχήμα 8: Συνδεσμολογία αστέρα - τριγώνου (Y-Δ)

Αναλύοντας τους παραπάνω τύπους εύρεσης ρεύματος και τάσης, μπορούμε να διακρίνουμε πως κατά τη φάση εκκίνησης Y, προκύπτει μια τιμή τάσης ίση με 0.577 φορές την τάση της γραμμής  $V_L$  και απαιτεί μια απορρόφηση ρεύματος (τόσο για τη γραμμή, όσο και για τα τυλίγματα του αστέρα) η οποία είναι 0.33 φορές μικρότερη από την τιμή του ρεύματος που θα απορροφούσε ο κινητήρας από τη γραμμή, σε περίπτωση απ' ευθείας σύνδεσης και σύνδεσης κατά τρίγωνο. Από την παραπάνω σχέση, αναφερόμενοι στο ρεύμα κατά τη φάση Y και στο ρεύμα γραμμής κατά τη φάση Δ, μπορεί να εξαχθεί ότι:

$$I_{MY} = \frac{V_{LM\Delta}}{3} \quad . \quad (Εξ. 14)$$

Από τους ηλεκτροτεχνικούς νόμους, μπορεί να συναχθεί ότι, η μείωση στο ρεύμα που απορροφάται, μειώνει σε ίδιο βαθμό τις ηλεκτροδυναμικές πιέσεις, όπου η πτώση τάσης μειώνει τετραγωνικά την αρχική ροπή (δηλαδή κατά 3 φορές).

Σε διάφορες μελέτες ή τεχνικές παρατηρήσεις, οι λόγοι και τα χαρακτηριστικά που αποδόθηκαν στη χρήση του συστήματος εκκίνησης Y/Δ, (συγκεκριμένα, τη μείωση της υψηλής πτώσης τάσης που προκαλείται από την απότομη εισροή ρεύματος και τη μείωση

της αρχικής ροπής, η οποία θα προκαλούσε ζημιά του συνδέσμου ζεύξης του εξοπλισμού) συχνά δε λαμβάνονται υπ' όψη σαν σημαντικά και ουσιώδη ζητήματα για την αξιολόγηση της μεθόδου Υ/Δ, ως μια καλή μέθοδο εκκίνησης. Ωστόσο, το θέμα είναι ότι μια τέτοια μέθοδος είναι συχνά χρησιμοποιούμενη στις πιο κλασικές βιομηχανικές εφαρμογές, οι οποίες μας παρέχουν τη χρήση ασύγχρονων κινητήρων. Το τελευταίο έχει ως αποτέλεσμα, τα προβλήματα που αναφέρθηκαν να αποτελούν σημαντικά στοιχεία αξιολόγησης και επίδοσης της λύσης Υ/Δ, όταν αυτή βασίζεται σε αμιγώς χρονικό καθορισμό της διαδικασίας μετάβασης των τυλιγμάτων.

Όπως καθίσταται εμφανές από την προηγούμενη ανάλυση, οι χρονικές συνθήκες για τη μεταγωγή είναι δύσκολο να καθορισθούν αυστηρά, δεδομένου ότι ποικίλουν με βάση ένα σημαντικό αριθμό παραγόντων, όπως τα επίπεδα τροφοδοσίας του συστήματος την τρέχουσα χρονική στιγμή, το επίπεδο της ροπής στρέψεως που έχει επιτευχθεί από τον άξονα του κινητήρα, τη μεταβλητότητα του φορτίου που συνδέεται στον κινητήρα, την επαγόμενη κατάσταση των ΜΕΔ του πεδίου, κλπ.

Στη συνέχεια, θα αναλυθούν οι ρυθμίσεις που αφορούν στη λειτουργία της θερμικής προστασίας. Η τελευταία, επιδρά επίσης στη διάταξη επίλυσης, δεδομένου ότι για τον καθορισμό της λειτουργίας της, απαιτείται ο καθορισμός ρεύματος αναφοράς σε σχέση με τις τυπικές τιμές λειτουργίας του κινητήρα.

### 1.3.6 Θέση και Ρύθμιση του Θερμικού

Σκοπός της χρησιμοποίησης των θερμικών είναι, η προστασία του κινητήρα από συνεχή υπερφόρτιση, η οποία μπορεί να καταστρέψει τα τυλίγματα του. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 8, το θερμικό τοποθετείται μεταξύ του ηλεκτρονόμου του δικτύου και των ακροδεκτών των τυλιγμάτων του κινητήρα. Το κύκλωμα ισχύος του θερμικού τοποθετείται σε σειρά με τα τυλίγματα του κινητήρα και διαρρέεται από το ρεύμα των τυλιγμάτων  $I_{T\Delta}$  και όχι από το ρεύμα γραμμής  $I_{\Gamma\Delta}$ , που είναι το ονομαστικό ρεύμα του κινητήρα ( $I_{ov}$ ). Άρα, το θερμικό θα πρέπει να ρυθμισθεί στο ρεύμα που διαρρέει τα τυλίγματα του κινητήρα.

Είναι γνωστό ότι:

$$I_{T\Delta} = \left( \frac{1}{\sqrt{3}} \right) * I_{\Gamma\Delta} = 0.58 * I_{\Gamma\Delta}, \text{ δηλαδή } I_{T\Delta} = 0.58 * I_{ov} \quad (\text{Εξ. 15})$$

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να αναφερθεί ότι, το ρεύμα του θερμικού του αυτόματου διακόπτη Υ-Δ ρυθμίζεται στο  $0.58 * I_{ov}$ , όπου  $I_{ov}$  είναι το ονομαστικό ρεύμα λειτουργίας του κινητήρα. Μετά την εξάλειψη του αιτίου που προκάλεσε την υπερφόρτιση του κινητήρα, για να μπορέσει να ξαναλειτουργήσει ο κινητήρας, απαιτείται παρέμβαση του χειριστή με επανατοποθέτηση του κομβίου εκκίνησης για το θερμικό.



Σχήμα 9: Θερμικό ρελέ

Η λειτουργία του θερμικού συστήματος προστασίας είναι εξαιρετικά σημαντική για τη διασφάλιση της ομαλής λειτουργίας, καθώς και την προστασία των τυλιγμάτων του κινητήρα. Η μη ορθή ρύθμιση του, μπορεί να οδηγήσει σε ανεπιθύμητες συνθήκες λειτουργίας, τόσο για τον κινητήρα, όσο και για τον περιβάλλοντα χώρο.

### 1.3.7 Ρύθμιση του Χρόνου Μεταγωγής των Τυλιγμάτων

Όπως παρουσιάστηκε και στις προηγούμενες παραγράφους για την ανάλυση της λειτουργίας, η ρύθμιση του χρόνου μεταγωγής των τυλιγμάτων απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή. Όπως προαναφέρθηκε, η μεταγωγή πρέπει να γίνει όταν ο κινητήρας αποκτήσει την ονομαστική ταχύτητα λειτουργίας του.

- Σε περίπτωση που η μεταγωγή γίνει νωρίτερα, μπορεί να οδηγήσει σε καταστροφή των ασφαλειών τήξης και μετά από μερικές εκκινήσεις σε καταστροφή των επαφών του ηλεκτρονόμου τριγώνου.
- Σε περίπτωση που η μεταγωγή γίνει καθυστερημένα, έχουμε μείωση της ισχύος και της ροπής στρέψης του κινητήρα, το οποίο δημιουργεί σημαντικά προβλήματα στην εφαρμογή που χρησιμοποιείται ο κινητήρας.

Δεδομένου ότι, για τη διάταξη δεν χρησιμοποιούνται σήματα αναφοράς που να επιβεβαιώνουν την κατάσταση του κινητήρα, ο χρόνος μεταγωγής μπορεί να υπολογιστεί εμπειρικά από το θόρυβο του κινητήρα, καθώς επιταχύνεται. Ακριβέστερα όμως, μπορεί να υπολογιστεί μετρώντας το ρεύμα του κινητήρα. Η μεταγωγή πρέπει να γίνει, όταν το ρεύμα εκκίνησης, καθώς μειώνεται, πέσει στο διπλάσιο του ονομαστικού ρεύματος του κινητήρα. Αυτό το ρεύμα μπορεί να μετρηθεί με χρήση ενός αμπερομέτρου και έτσι να εντοπισθεί με ακρίβεια ο χρόνος μεταγωγής.

Υπάρχουν δύο βασικοί τρόποι για να ορίσουμε το ορθό σημείο, ώστε ο εξοπλισμός ελέγχου να αλλάξει τα τυλίγματα του κινητήρα από αστέρα (φάση έναρξης) σε τρίγωνο (κανονική λειτουργία). Εξίσου και οι δύο μέθοδοι ορίζουν το σημείο, στο οποίο ο δρομέας

έχει αποκτήσει τη μέγιστη του ταχύτητα σε αστέρα, οπότε και το σημείο στο οποίο ο εκκινητής μπορεί να εναλλαχθεί σε τρίγωνο.

Η πρώτη μέθοδος βασίζεται σε μέτρηση της έντασης του ρεύματος. Αρχικά, θέτουμε το χρονικό στη φάση του αστέρα στη μέγιστη ρύθμιση. Τοποθετούμε ένα αμπερόμετρο με συνδετήρα - κλιπ (Αμπεροτσιμπίδα) στη μία φάση τροφοδοσίας του εκκινητή. Ενεργοποιούμε την εκκίνηση ενός χρονομέτρου, ταυτόχρονα με το κομβίο εκκίνησης. Παρακολουθούμε ότι η τιμή του αμπερομέτρου θα κορυφωθεί απότομα κατά την εκκίνηση, ενώ στη συνέχεια το ρεύμα θα αρχίσει να μειώνεται, καθώς το φορτίο θα επιταχύνεται. Τη στιγμή που το ρεύμα αποσβέσει, σταματάμε το χρονοόμετρο. Σε αυτό το σημείο (περίπου στο 85% της ταχύτητας πλήρους φορτίου), ο κινητήρας δεν μπορεί να κάνει τίποτα περισσότερο από το να παραμείνει σε σύνδεση αστέρα και αυτό είναι το κομβικό σημείο, στο οποίο πρέπει να γίνει η μετάβαση σε σύνδεση τριγώνου.

Η δεύτερη μέθοδος για τον καθορισμού του βέλτιστου χρόνου μετάβασης των τυλιγμάτων, βασίζεται στην τοποθέτηση ενός ταχυμέτρου στον άξονα του κινητήρα (μηχανικό ή οπτικό). Ξανά, κάνοντας χρήση ενός χρονομέτρου. Παρατηρούμε το ταχύμετρο. Τα χαρακτηριστικά της επιτάχυνσης διαφέρουν, ανάλογα το φορτίο οδήγησης, αλλά η ταχύτητα θα αποκατασταθεί (ξανά, γύρω στο 85% της ταχύτητας πλήρους φορτίου). Σε αυτό το σημείο, σταματάμε το χρονοόμετρο. Ορίζουμε το μετρητή μετάβασης στον καταγεγραμμένο χρόνο του χρονομέτρου.

Στη φάση τριγώνου, συνήθως λαμβάνουμε υπ' όψη ότι το φορτίο και η ροπή του κινητήρα εξισώνονται, όταν ο κινητήρας προσεγγίσει το 75-85% της ταχύτητας του. Σε αυτό το σημείο, σταματάμε τη σύνδεση αστέρα και πηγαίνουμε στη σύνδεση τριγώνου. Το χρονικό διάστημα είναι περίπου 30 με 50 ms, για να αποφευχθεί βραχυκύκλωμα. Αλλά, όταν ο κινητήρας είναι συνδεδεμένος κατά τρίγωνο, στην αρχή έχουμε μια προσωρινή κορύφωση της έντασης ρεύματος, λόγω αντί-ΗΕΔ.

Και στις δύο προαναφερόμενες μεθοδολογίες απαιτείται παρέμβαση εξωτερικού χειριστή – μηχανικού και η επιβολή μετρήσεων η οποία αναφέρεται στον συγκεκριμένο τύπο κινητήρα με το καθορισμένο φορτίο, με στόχο την βέλτιστη επίτευξη του σημείου χρονικής μεταγωγής.

Εναλλακτικά, για να αποφύγουμε, τις παραπάνω διαδικασίες μπορούμε να καθυστερήσουμε 1 ή 2 δευτερόλεπτα το χρόνο μεταξύ αστέρα και τριγώνου, αλλά ωστόσο ο χρόνος εξαρτάται και από την αδράνεια του φορτίου.

Άλλη μια εναλλακτική λύση είναι, να τοποθετήσουμε μια αντίσταση σε σειρά με τη σύνδεση τριγώνου, για χρόνο περίπου 3 δευτερολέπτων, ώστε να περιορίσουμε την κορύφωση της έντασης ρεύματος. Ενώ μια άλλη είναι, να τοποθετήσουμε αντίσταση κατευθείαν σε σειρά με τον κινητήρα στη φάση αποσύνδεσης του αστέρα.

Οι μέθοδοι προσδιορίζουν τη μέγιστη περίοδο που ένας κινητήρας μπορεί να αφηθεί σε συνδεσμολογία τυλιγμάτων αστέρα. Υψηλά αδρανειακά φορτία μπορούν να επιτρέψουν να φτάσουμε σε αυτό το σημείο.

Διαφορετικές εφαρμογές, όπως οι ανεμιστήρες ή οι φυγοκεντρικές αντλίες, όπου μπορούν να αναπτύξουν ταχύτητα με αποσβεστήρες ή βαλβίδες, έχουν τη δυνατότητα να μεταβούν σε αστέρα πολύ νωρίτερα. Και αυτό διότι, το μόνο φορτίο που επιταχύνεται είναι η φυσική μάζα του στροφάλου ή του περυγίου.



Σχήμα 10: Χρονικό ρελέ

Όπως γίνεται εμφανές από την χρήση των ανωτέρω περιγραφόμενων μεθοδολογιών, ο εντοπισμός του σημείου μεταγωγής εξαρτάται από τον τύπο του κινητήρα και το διασυνδεδεμένο φορτίο, οπότε μόνο εμπειρικά και κατά προσέγγιση μπορούν να υπολογίσουν το επιθυμητό σημείο, συμβάλλοντας με τον τρόπο αυτό σε μεγιστοποίηση των φάσεων κατανάλωσης, καθώς και σε επαγόμενη φθορά για τα τυλίγματα του κινητήρα.

#### ***1.4 Μειονεκτήματα χρήσης του Μοντέλου με Χρονικό Διακόπτη Μετάβασης των Τυλιγμάτων***

Η χρήση χρονικού διακόπτη, αποτελεί αδιαμφισβήτητα μία λύση, επαρκή και ασφαλή κατά ένα βαθμό, για τη μετάβαση των τυλιγμάτων από συνδεσμολογία αστέρα, σε συνδεσμολογία τριγώνου. Αποτελεί τη συχνότερα χρησιμοποιούμενη μέθοδο για βιομηχανικές διατάξεις μικρής και μεγάλης κλίμακας, αφού η εφαρμογή της καλύπτεται από σημαντική βιβλιογραφία, πληθώρα επιστημονικών και τεχνικών μελετών, καθώς επίσης, υπάρχει αρκετή εμπειρική γνώση παλαιότερων μηχανικών επάνω στην εφαρμογή της. Αυτό, την καθιστά μια γρήγορη και απλή επιλογή σε περιπτώσεις εκκίνησης.

Ο χρονισμός του χρονικού διακόπτη όμως, όπως παραθέσαμε και σε προηγούμενες παραγράφους, απαιτεί ένα συγκεκριμένο αριθμό δοκιμών. Ο οποίος, σε συνδυασμό με τη χρήση οργάνων μέτρησης (με παθητικά στοιχεία στο εσωτερικό τους), καθώς και τη γρήγορη αντίληψη και λήψη αποφάσεων του επιβλέποντα μηχανικού, βοηθούν ώστε να ρυθμιστεί το ιδανικό χρονικό σημείο για την εναλλαγή των τυλιγμάτων του κινητήρα. Όμως, ακόμα και αυτές οι ελάχιστες δοκιμές που πραγματοποιούνται, δίχως πρότερη προστασία του συστήματος από υπερφόρτιση, μπορούν να οδηγήσουν σε υπερφόρτιση, έστω και στιγμιαία, των τυλιγμάτων. Επιπλέον, θα πρέπει να τονιστεί ότι, η μέθοδος απαιτεί επανα-εφαρμογή και εκ νέου ρύθμιση, στην περίπτωση που ο κινητήρας συνδεθεί σε άλλο φορτίο ή μεταβληθούν οι συνθήκες λειτουργίας του.

Κατά συνέπεια, αυτό έχει ως αποτέλεσμα την καταπόνηση και τη φθορά των κινητήρων, η οποία μπορεί να καταστεί και μεγαλύτερη, καθώς η κλίμακα και η ισχύς του κινητήρα αυξάνει. Οπότε, η εφαρμογή των ανωτέρω μεθοδολογιών συντελεί στη φθίνουσα

πορεία της λειτουργικής κατάστασης του κινητήρα από τις πρώτες του κιόλας εκκινήσεις. Επίσης, αξίζει να επισημανθεί πως, με αυτή τη διαδικασία δεν μπορούμε να είμαστε σίγουροι ότι κάθε φορά η μετάβαση γίνεται την κατάλληλη στιγμή, όπου έχει επιτευχθεί η ιδανική ροπή στρέψης του κινητήρα, δηλ. με τις κατάλληλες στροφές στον άξονα, παρά μόνο κατά προσέγγιση. Αυτό οφείλεται όπως αναλύσαμε, διότι δε γνωρίζουμε τη δεδομένη χρονική στιγμή, την τάση τροφοδοσίας, ούτε την κατάσταση του κινητήρα, αλλά ούτε και τη συνεισφορά στο θόρυβο των εξωτερικών πηγών ενέργειας (τροφοδοτικά, γεννήτριες, τάση δικτύου, κ.α.).

Η μέθοδος αυτή, αν και αυτοματοποιημένη, δε μας παρέχει εγγύηση όσον αφορά την ορθή εφαρμογή της, καθώς και την εξάλειψη των προβλημάτων που καλείται να αντιμετωπίσει. Σε περίπτωση σφάλματος, δεν καθίσταται εύκολη η διάγνωση του προβλήματος, παρά μόνο με μετρητική μελέτη των επιμέρους στοιχείων της διάταξης, το οποίο κρίνεται χρονοβόρο, δαπανηρό και θέτει τον κινητήρα και την εφαρμογή που ο τελευταίος εξυπηρετεί εκτός λειτουργίας. Η χρήση χρονικού μας εξασφαλίζει ότι, έστω και προσεγγιστικά, ο κινητήρας εισέρχεται σε φάση τριγώνου. Σε περίπτωση όμως διαταραχών του φορτίου ή της λειτουργίας του κινητήρα, οπότε το σύστημα περιστρέφεται στη μη ονομαστική – επιθυμητή λειτουργία, ο κινητήρας απαιτείται να εισέλθει και πάλι σε κατάσταση αστέρα για τα τυλίγματα του, διευκολύνοντας την αποκατάσταση της επιθυμητής λειτουργίας του. Οι προηγούμενες μεθοδολογίες δεν μπορούν να ανταπεξέλθουν και να αποκαταστήσουν προβλήματα όπως το προηγούμενο, δεδομένου ότι δεν παρακολουθούν διασυνεχώς το σύστημα, παρά μόνο κατά τη φάση εκκίνησης του κινητήρα.

Επιπροσθέτως, η γνωστή σε όλους μας διάταξη Y/Δ απαιτεί 3 σετ ρελέ για τη μετάβαση των τυλιγμάτων. Ένα κοινό, για την απευθείας σύνδεση, ένα όπου οι επαφές του βραχυκυκλώνονται κατάλληλα, ώστε να σχηματιστεί η σύνδεση αστέρα και ένα, όπου οι επαφές του βραχυκυκλώνονται ανά μία φάση, ώστε να σχηματιστεί η σύνδεση τριγώνου. Και όπως γνωρίζουμε, κάθε επιπλέον ρελέ, πέραν του ότι προσθέτει κόστος στην υλοποίηση, εισάγει ένα επιπλέον υλικό που μπορεί να δημιουργήσει σφάλμα κατά τη δυσλειτουργία του.

Εξετάζοντας λοιπόν την παρεχόμενη λύση για την αποκατάσταση της λειτουργίας στο επιθυμητό επίπεδο στροφών για έναν κινητήρα, παρατηρούμε ότι αυτές παρέχουν μία πρώτη προσέγγιση στη λύση του συγκεκριμένου προβλήματος. Εισάγουν όμως, σημαντικά επιμέρους προβλήματα στην ακρίβεια εφαρμογής της διαδικασίας μετάβασης, καθώς και στην έλλειψη διασυνεχούς παρακολούθησης του κινητήρα, ο οποίος είναι υποκείμενος σε μεταβλητές συνθήκες κατά τη λειτουργία του. Στην περίπτωση αυτή, τα κυκλώματα μεταγωγής αδυνατούν να παρακολουθήσουν τη μεταβαλλόμενη ροπή στον άξονα του κινητήρα και προφανώς, να επανεισάγουν αυτόν σε συνθήκες εκ νέου έναρξης, για την αποκατάσταση του επιπέδου λειτουργίας του. Οι λύσεις αυτές επιπλέον, απαιτούν διαρκώς ανθρώπινη παρέμβαση για την εφαρμογή μετρήσεων και την εγκατάσταση τους.

Στο κεφάλαιο που ακολουθεί, θα παρουσιαστούν τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των συσκευών PLC καθώς και η προτεινόμενη υλοποίηση για το σύστημα εκκίνησης του ασύγχρονου κινητήρα.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>

### 2 Διάταξη Εκκίνησης του Κινητήρα με χρήση PLC

Η διάταξη εκκίνησης 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) [21] 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. Κατά κύριο λόγο, η χρήση της προτεινόμενης διάταξης με συσκευή PLC [23], 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.

Στην συνέχεια του παρόντος κεφαλαίου, θα γίνει μια συνοπτική παρουσίαση των χαρακτηριστικών και των ευρύτερων δυνατοτήτων που οι ελεγκτές PLC παρέχουν.

#### **2.1 Προγραμματιζόμενοι Λογικοί Ελεγκτές**

Ένας Προγραμματιζόμενος Λογικός Ελεγκτής - PLC ή Λογικός Ελεγκτής, είναι ένας βιομηχανικός ψηφιακός υπολογιστής, ο οποίος αποτελεί ένα ανθεκτικό και προσαρμοσμένο στοιχείο για τον έλεγχο παραγωγικών διαδικασιών, όπως γραμμές παραγωγής, ή ρομποτικές συσκευές ή οποιαδήποτε δραστηριότητα απαιτεί έλεγχο μεγάλης αξιοπιστίας, εύκολο στον προγραμματισμό και στη διάγνωση των διαδικαστικών σφαλμάτων [6] [7].

Οι ελεγκτές PLC, αρχικά αναπτύχθηκαν στην αυτοκινητοβιομηχανία, για να παρέχουν ευέλικτους, ανθεκτικούς και εύκολα προγραμματιζόμενους ελεγκτές, ώστε να αντικαταστήσουν τα καλωδιωμένα ρελέ και τα χρονικά. Έκτοτε, έχουν υιοθετηθεί ευρέως, ως υψηλής αξιοπιστίας αυτόματοι ελεγκτές, ιδανικοί για απαιτητικά περιβάλλοντα εφαρμογής ελέγχου. Ένα PLC, είναι ένα καλό παράδειγμα ενός «άμεσου» πραγματικού-χρόνου συστήματος, καθώς τα αποτελέσματα της εξόδου πρέπει να παράγονται συναρτήσει της κατάστασης και των συνθηκών εισόδου, μέσα σε περιορισμένο χρονικό διάστημα, ειδάλως προκύπτει ανεπιθύμητη λειτουργία. Η ταχύτητα αντίδρασης ενός PLC είναι συνάρτηση πλήρως οριζόμενη από τα χαρακτηριστικά και την τεχνολογία κατασκευής του τελευταίου, δεδομένου ότι η εσωτερική δομή ενός PLC βασίζεται σε χρήση κυκλωμάτων



ψηφιακών μικροελεγκτών (microcontrollers). Έτσι, ο μηχανικός σχεδιαστής του συστήματος ελέγχου, μπορεί να διαλέξει την κατάλληλη συσκευή PLC, βασισμένος στις εξωτερικές διεπαφές (σήματα εισόδου – εξόδου) που αυτό διαθέτει, τον τύπο των διεπαφών (αναλογικά – ψηφιακά σήματα), τις τάσεις και τα ρεύματα λειτουργίας (περιβάλλον εφαρμογής ac/dc), τον εσωτερικό μικροεπεξεργαστή (microcontroller), κλπ. Καθίσταται λοιπόν εμφανές, ότι η σωστή εκλογή ενός PLC, αποτελεί ένα πολυπαραμετρικό πρόβλημα που ο μηχανικός σχεδιαστής καλείται να επιλύσει, βασισμένος πάντα στην εμπειρία που αυτός διαθέτει καθώς και τον τύπο της εφαρμογής στον οποίο στοχεύει να επιβάλλει την διάταξη ελέγχου.

### 2.1.1 Δομικά Στοιχεία ενός Προγραμματιζόμενου Λογικού Ελεγκτή

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 [7] [12].

- Μονάδα τροφοδοσίας
- Κεντρική μονάδα επεξεργαστή (CPU) με μικροεπεξεργαστή και μνήμη για το πρόγραμμα
- Μονάδες εισόδων
- Μονάδες εξόδων

Τα ανωτέρω δομικά blocks αποτελούν ηλεκτρονικά – ηλεκτρικά υποσυστήματα σε μορφή αναλογικών – ψηφιακών κυκλωμάτων που συλλειτουργούν 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 ελεγκσιμότητα για το συνολικό σύστημα. Ο συγκεκριμένος χρόνος καθορίζεται από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά που θα αναλυθούν στις παραγράφους που ακολουθούν.

## 2.1.2 Κύκλος εκτέλεσης ενός Προγράμματος

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 Προγράμματος
3. 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.

## 2.1.3 Πλεονεκτήματα των Προγραμματιζόμενων Λογικών Ελεγκτών

Τα πλεονεκτήματα των προγραμματιζόμενων λογικών ελεγκτών ποικίλουν και αποτελούν και τον κύριο λόγο που επιλέγονται στις σύγχρονες βιομηχανικές εφαρμογές ολοένα και περισσότερο. Κατ' αρχάς, η ταχύτητα τους βελτιώνει τους ρυθμούς των διεργασιών με ικανοποιητικό χρονικό όφελος για την υλοποίηση. Παρουσιάζουν ευελιξία, τόσο στη σχεδίαση, όσο και στο χειρισμό, κατά τη διάρκεια της μελέτης, της εγκατάστασης ή και αργότερα, καθιστώντας τα κυρίαρχα στις περισσότερες περιπτώσεις αυτοματισμού. Επίσης, η αξιοπιστία τους κρίνεται ζωτικής σημασίας, λόγω της απουσίας κινούμενων μηχανικών μερών, που θα προκαλούσαν απώλειες τριβών ή και αύξηση της θερμοκρασίας καθώς επίσης θα μείωναν σημαντικά τη διάρκεια ζωής του. Η χαμηλή κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, παρουσιάζει σημαντικό οικονομικό όφελος σε περιπτώσεις πολλαπλών συστημάτων σε μια βιομηχανία. Ακόμα, λόγω των ασθενών ρευμάτων που τα

διαρρέουν, έχουν απεριόριστη διάρκεια ζωής, με μικρό ρίσκο φθοράς και καταστροφής. Ενώ, μπορούν να τοποθετηθούν ακόμα και σε πεδία ισχύος χωρίς κίνδυνο. Επιπλέον, στην κατασκευή τους λαμβάνεται πρόνοια για περιβάλλοντα, τα οποία μπορεί να απαιτούν ιδιαίτερες συνθήκες χειρισμού (υψηλά ποσοστά υγρασίας, αυξημένες θερμοκρασίες, χημικά διαβρωτικά περιβάλλοντα, κλπ). Είναι εύκολα στη συντήρηση, λόγω της κατασκευής τους σε δομικά επίπεδα. Η ανίχνευση σφαλμάτων διευκολύνεται, καθότι για κάθε εξωτερική εντολή, υπάρχει αντίστοιχος οπτικός ενδείκτης (LED), ενώ η ροή του αυτοματισμού παρακολουθείται εύκολα με τη βοήθεια συσκευής προγραμματισμού. Δεν υπάρχει πρόβλημα επάρκειας εισόδων/εξόδων κατά τη διάρκεια της μελέτης, καθώς υπάρχει η δυνατότητα επέκτασης με κάρτες εισόδων/εξόδων (I/O), τις οποίες το ίδιο το PLC θα αναγνωρίσει και θα ενσωματώσει στη λειτουργία του. Τα PLC είναι ικανά να επεξεργάζονται και να διαχειρίζονται ακόμα και τις πιο δύσκολες λογικές διεργασίες. Παρέχονται πλήρη και ολοκληρωμένα εγχειρίδια χρήσης, εκμάθησης, τοποθέτησης και συντήρησης με γλώσσα προγραμματισμού προσαρμοσμένη στους πίνακες κλασικού αυτοματισμού. Μπορούν να συνδεθούν σε Η/Υ για ανταλλαγή στοιχείων, επιτήρηση και έλεγχο. Παράλληλα δε, τα ίδια τα PLC κρατούν στη μνήμη τους, το τελευταίο αποθηκευμένο πρόγραμμα, το οποίο μπορούμε να διαβάσουμε, είτε σε κάποια συσκευή προγραμματισμού, είτε σε έντυπη εκτυπωμένη μορφή. Όλες οι κάρτες βρίσκονται στον ίδιο διάλοο επικοινωνίας για την άμεση ανταλλαγή πληροφοριών. Ακόμη όμως, μπορούν να χειριστούν αναλογικά σήματα, και προγραμματισμό ελέγχου κλειστού βρόχου. Η γλώσσα προγραμματισμού είναι προσιτή για το μέσο προγραμματιστή, χωρίς να απαιτεί ιδιαίτερες προγραμματιστικές τεχνικές. Μπορούν να υλοποιήσουν δομές μετρητών, χρονικών και συγκριτών. Ο αυτοματισμός μελετάται την ίδια ώρα της τοποθέτησης, οπότε μειώνεται ο χρόνος παράδοσης της εγκατάστασης. Συνοψίζοντας, τα PLC συμβάλλουν σημαντικά στη μείωση του χώρου (λόγω του μικρού μεγέθους και της απώλειας εξωτερικών τμημάτων και κινούμενων μερών), του χρόνου (μελέτης, υλοποίησης, εγκατάστασης, λειτουργίας και συντήρησης), καθώς και της κατανάλωσης ενέργειας (διαρρέονται από ασθενή ρεύματα και κυρίως ψηφιακά σήματα).

Τα PLCs (Programmable Logic Controllers) αποτελούν συστήματα ελέγχου μικρής, μεσαίας και μεγάλης κλίμακας κυκλωματικών διατάξεων, τα οποία ενσωματώνουν τόσο την δυνατότητα χειρισμού αναλογικών, όσο και ψηφιακών σημάτων. Με βάση τις εξελίξεις της τεχνολογίας γύρω από τον χώρο του αυτοματισμού, τα PLCs διαθέτουν Μονάδα Κεντρικού Επεξεργαστή, σε συνδυασμό με κυκλώματα δειγματοληψίας για τη διακριτοποίηση των σημάτων εισόδου τους. Επιπλέον, λόγω της ψηφιακής τεχνολογίας κατασκευής τους, παρέχουν στο χρήστη τη δυνατότητα προγραμματισμού των ενεργειών τους, τόσο με χρήση συμβολικών γλωσσών (LADDER), όσο και με χρήση κώδικα (STL) [13] [14].

Για το λόγο αυτό, τα PLCs αποτελούν ιδανικές συσκευές ελέγχου διατάξεων κινητήρων, δεδομένου ότι παρέχουν τη δυνατότητα προγραμματισμού με λογικές συνθήκες, παράλληλα με την δυνατότητα χειρισμού εξωτερικών σημάτων (είσοδοι – έξοδοι).

Στην επόμενη παράγραφο, θα παρουσιαστεί η προτεινόμενη τοπολογία για την παρακολούθηση και εφαρμογή των διεργασιών εκκίνησης για τον ασύγχρονο τριφασικό κινητήρα με χρήση δομής PLC.

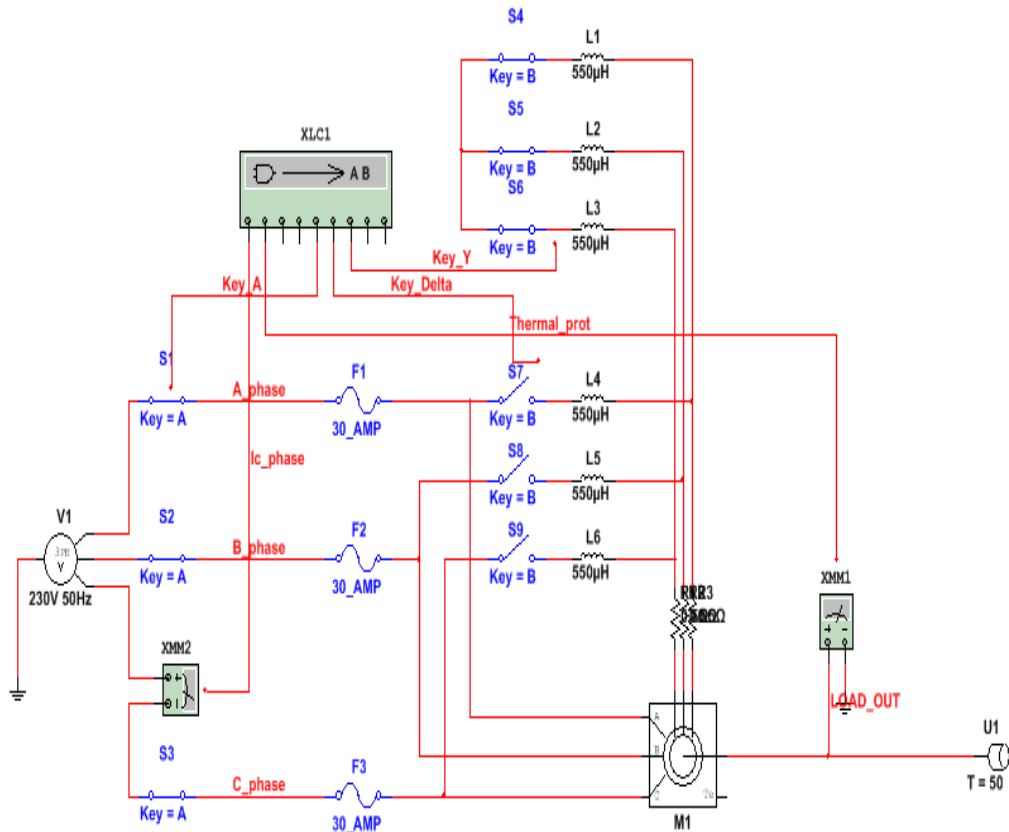
## 2.2 Μια εναλλακτική λύση με χρήση Αυτοματισμού PLC

Στόχος της χρήσης λοιπόν, μίας συσκευής ελέγχου PLC για την διαδικασία εκκίνησης και παρακολούθησης της γωνιακής ταχύτητας περιστροφής ενός κινητήρα, είναι να εκμεταλλευτεί τις δυνατότητες χρήσεις εξωτερικών σημάτων, που παρέχονται από τον κινητήρα (π.χ. ρεύματα γραμμής) και με χρήση λογικών διεργασιών (προγράμματος), η συσκευή να αποφασίσει αυτοματοποιημένα για τη μεταλλαγή των κυκλωμάτων αστέρα – τριγώνου σε πραγματικό χρόνο, χωρίς την παρέμβαση ανθρώπινου παράγοντα. Η μεταλλαγή θα γίνει με τη χρήση λογικών σημάτων – εξόδου από το PLC, τα οποία θα οδηγήσουν κυκλώματα relays, που θα μεταβάλλουν στο δευτερεύον τους, τη συνδεσμολογία των τυλιγμάτων του κινητήρα [18 – 20].

Η μέχρι τώρα χρήση των PLC στην εκκίνηση των ασύγχρονων τριφασικών κινητήρων με μετάβαση τυλιγμάτων από αστέρα σε τρίγωνο, ενώ αποτελεί μια έξυπνη λύση, επιδέχεται περαιτέρω βελτίωση. Στις πιο παλιές λύσεις που βασίζονταν σε χρήση PLC, η εφαρμογή εκμεταλλευόταν την παροχή εσωτερικού χρονομέτρου (χρονιστή) που διέθετε το PLC, μηχανισμός ο οποίος έκανε την μεταλλαγή, πάλι με ρύθμιση από τον μηχανικό παρακολούθησης του κινητήρα. Επομένως, ενώ γινόταν χρήση ψηφιακής συσκευής, με όλα τα πλεονεκτήματα που αυτή διέθετε, η χρήση της δε διέφερε από εκείνη του χρονοδιακόπτη που περιγράψαμε στις προηγούμενες παραγράφους.

Όπως προαναφέρθηκε στην αρχή της παραγράφου, στην προτεινόμενη λύση, στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, στόχος είναι η αξιοποίηση των παρεχομένων σημάτων εισόδου – εξόδου που διαθέτει το PLC, έτσι ώστε να σχεδιαστεί διάταξη με αναλογικά και ψηφιακά ηλεκτρονικά τμήματα, εποπτεύοντας διασυνεχώς τη λειτουργία του κινητήρα. Δεδομένου ότι, το επίπεδο των ρευμάτων και τάσεων του κινητήρα μπορεί να είναι της τάξης δεκάδων Ampere και εκατοντάδων Volts, προσοχή κατά τον σχεδιασμό θα πρέπει να δοθεί στα πλαίσια ασφαλούς λειτουργίας, τόσο για τη διάταξη ελέγχου, όσο και για τον ίδιο τον κινητήρα. Για το λόγο αυτό, θα περιορίσουμε αρχικά το εύρος των σημάτων λειτουργίας σε επίπεδο χαμηλών τάσεων και ρευμάτων, συγκρίσιμα με αυτά που λειτουργούν οι αμιγώς ηλεκτρονικές διατάξεις. Για τα τμήματα επικοινωνίας με υψηλότερες τάσεις (AC), θα χρησιμοποιηθεί η δυνατότητα των relays ελέγχου, τα οποία διασφαλίζουν έλεγχο από ένα κύκλωμα χαμηλής τάσης, δίνοντας τη δυνατότητα ελέγχου ενός δευτερεύοντος με υψηλότερη τάση/ρεύμα. Η υλοποίηση θα χρησιμοποιήσει ως κεντρικό πυρήνα της, τη συσκευή PLC. Με την υλοποίηση μας, εξασφαλίζουμε την ιδανική μετάβαση από Y σε Δ, αφού μετά τη κορύφωση, όταν το ρεύμα γραμμής του κινητήρα, πέσει στο 2πλάσιο του ονομαστικού, το PLC με σήματα ελέγχου από τις εξόδους του θα κάνει την μεταλλαγή των τυλιγμάτων.

Μία εποπτική οργάνωση block υποσυστημάτων παρουσιάζεται στο σχήμα που ακολουθεί:



Σχήμα 11: Block διάγραμμα της υλοποίησης του κυκλώματος εκκίνησης με PLC

Από το block διάγραμμα του κυκλώματος εκκίνησης, παρουσιάζονται τα δομικά στοιχεία ελέγχου της διάταξης. Η διάταξη τροφοδοσίας του κινητήρα, αποτελείται από τις γραμμές τροφοδοσίας με τους ηλεκτρομηχανικούς αποζεύκτες και τις ασφάλειες τυπικής λειτουργίας. Η τροφοδοσία, η μονωτική ικανότητα των αποζευκτών, καθώς και οι ασφάλειες για τη λειτουργία, εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά του προς έλεγχο, ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα. Το PLC διασυνδέεται με χρήση των σημάτων εισόδου, με όλα τα σημεία από τα οποία πρέπει να λάβει πληροφορία σημάτων εισόδου, όπως το επίπεδο του ρεύματος γραμμής, η θερμική κατάσταση του κινητήρα, κλπ. Το PLC ελέγχει την θέση των τυλιγμάτων του κινητήρα, μέσω σημάτων εξόδου, τα οποία οδηγούνται στα κυκλώματα relays, που επιδρούν στην συνδεσμολογία για τη μεταλλαγή τους.

Γενικότερα, με τη χρήση των PLC εξασφαλίζουμε καλύτερη εποπτεία της όλης διάταξης, με προσθήκη ενδεικτικών λυχνιών ή και μέσω της οθόνης που το τελευταίο παρέχει, ούτως ώστε σε περίπτωση βλάβης ή διακοπής λειτουργίας του κινητήρα, να μπορούμε άμεσα να εντοπίσουμε το τμήμα από το οποίο προήλθε. Επομένως, με τη χρήση των PLC, ο επόπτης μηχανικός εξοικονομεί χρόνο για την αποσφαλμάτωση της λειτουργίας του κινητήρα, χρησιμοποιώντας την διάταξη του PLC ως διαγνωστικό εργαλείο.

Η δυνατότητα μη στατικού προγραμματισμού του PLC, με την αλλαγή του προγράμματος το οποίο αυτό εκτελεί, δίνει μία εξαιρετική δυναμικότητα για τροποποιήσεις και μεταβολές στο σύστημα. Έτσι, στη λειτουργία του ασύγχρονου κινητήρα, μπορούν να προστεθούν επιπλέον διαγνωστικές λειτουργίες για την κατάσταση και τη φάση που βρίσκεται, σε κατάσταση τόσο φόρτισης, όσο καθώς αυτός μπορεί να βρίσκεται κενός φορτίου.

Η προτεινόμενη διάταξη, σαφώς αποτελεί μία πιο πολύπλοκη διάταξη σε σχέση με τις προηγούμενες μεθόδους που περιγράφηκαν, εντούτοις όμως, προσφέρει μία σημαντική πληθώρα χαρακτηριστικών και πλεονεκτημάτων, τα οποία συμβάλλουν στον αρτιότερο έλεγχο του κινητήρα. Κατά συνέπεια, η επαγόμενη πολυπλοκότητα ελέγχου, αντισταθμίζεται από τα αποκομιζόμενα οφέλη. Αξίζει να τονιστεί ότι, η διασυνεχής λειτουργία που το PLC παρέχει στη διάταξη ελέγχου, καθώς το τελευταίο με βάση το πρόγραμμα εκτέλεσης του, δεν αδρανοποιείται μετά την φάση εκκίνησης του κινητήρα και μπορεί να συνεχίζει να παρακολουθεί την ομαλή λειτουργία του. Έτσι, στην περίπτωση που ο κινητήρας, λόγω μεταβολών φορτίου, ή τάσεων/ρευμάτων τροφοδοσίας καταλήξει σε κατάσταση ανάλογη της φάσης εκκίνησης (απώλεια στρεπτικής ικανότητας), η διάταξη επαναεισάγει τον κινητήρα σε φάση εκκίνησης, με αυτοματοποιημένη εναλλαγή των τυλιγμάτων πηνίου από τρίγωνο σε αστέρα, χωρίς την εξωτερική παρέμβαση χρήστη.

Για τους παραπάνω λόγους, η προτεινόμενη λύση αποτελεί περισσότερο, ένα σύστημα διασυνεχούς ελέγχου λειτουργίας του κινητήρα, με πλεονέκτημα τον ψηφιακό έλεγχο, παρά μια απλή συσκευή εκκίνησης ενός ασύγχρονου κινητήρα 3 φάσεων.

### **2.3 Ειδικά Θέματα στην Περιγραφή Τοπολογίας**

Το παρατιθέμενο block διάγραμμα, περιγράφει πλήρως τις επιμέρους διατάξεις και στοιχεία για την επίτευξη του στόχου μας. Πιο συγκεκριμένα, το κύκλωμα αποτελείται από μηχανικό αποζεύκτη (1), το μηχανικό master on-off.

Οι φάσεις του δικτύου οδηγούνται σε ασφάλειες (2), κατάλληλης ονομαστικής τιμής, η τιμή των οποίων υπολογίζεται με βάση τη μέγιστη ισχύ που απαιτείται από την τριφασική τροφοδοσία (π.χ.  $\max = 7 \cdot O_n$ ).

Προαιρετικά και για εποπτικούς καθαρά λόγους, συμπεριλαμβάνουμε και ένα αναλογικό βολτόμετρο (3) ώστε να είμαστε απόλυτα σίγουροι ότι έχουμε ιδανική τάση ανά φάση.

Σημαντικό στοιχείο της τοπολογίας μας, αποτελεί το ψηφιακό τριφασικό αμπερόμετρο/ελεγκτής (4) ή τριφασικό αναλογικό αμπερόμετρο, του οποίου η έξοδος ύστερα από ένα είδους φιλτράρισμα, αποτελεί την είσοδο του PLC.

Από την έξοδο του αμπερομέτρου λαμβάνεται σήμα, το οποίο είναι αναλογικό και αποτελεί ρεύμα αναφοράς για τη μία φάση. Οδηγείται σε κύκλωμα Chopper (7), με ποτενσιόμετρο ισχύος (5) και κύκλωμα μετασχηματιστή καθορισμένου λόγου (6), το οποίο διασφαλίζει καθορισμένο επίπεδο διάσπασης (slicing). Η διάταξη του συνδυασμού ποτενσιόμετρου με μετασχηματιστή είναι και αυτό που φιλτράρει την είσοδο του PLC για τη μετάβαση των τυλιγμάτων.

Το κύκλωμα ρελέ (8) που ελέγχει τη ροή ισχύος πάνω στον ηλεκτροκινητήρα (9) και ελέγχεται από το PLC.

Αποτελεί αυτοματοποιημένο on-off, ελεγχόμενο από το PLC σε περίπτωση που ή δώσει σήμα το θερμικό (10) ή από malfunction το PLC δεν έχει εκκινήσει.

Το κύκλωμα ρελέ για συνδεσμολογία των τυλιγμάτων κατά αστέρα (11) και το αντίστοιχο για συνδεσμολογία κατά τρίγωνο (12). Τα αντίστοιχα πακέτα ρελέ ελέγχουν τις συνδεσμολογίες του interface U1,V1,W1,U2,V2,W2. Τα ρελέ αυτά ελέγχονται από ένα κοινό σήμα ελέγχου, με χρήση αντιστροφέα, τέτοιου ώστε η λειτουργία τους να είναι αμοιβαία αποκλειόμενη.

Το PLC (13) δέχεται ως εισόδους τα σήματα αναφοράς από τον chopper και το σήμα κατάστασης από το θερμικό και παράγει ως εξόδους, το σήμα ελέγχου για τα ρελέ Υ-Δ και το τελικό on-off για το 1<sup>ov</sup> του ηλεκτροκινητήρα.

Στο κεφάλαιο που ακολουθεί θα αναλυθούν τα ειδικά ηλεκτρικά θέματα για τη λειτουργία της διάταξης, τα οποία αφορούν τόσο στο κύκλωμα μετατροπής αναλογικού σε ψηφιακό σήμα από το ρεύμα γραμμής του κινητήρα, όσο και στη συνολική προσομοίωση της τοπολογίας.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>

### 3 Ηλεκτρικά Θέματα Λειτουργίας της Διάταξης

Όπως έχει περιγραφεί στα προηγούμενα κεφάλαια της παρούσας εργασίας, η προτεινόμενη διάταξη για την επίλυση του προβλήματος εκκίνησης και παρακολούθησης ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα, χρειάζεται να συναρμολογεί στη λειτουργία της, τόσο αναλογικά, όσο και ψηφιακά τμήματα τεχνολογίας. Τα αναλογικά υποσυστήματα, μπορούν να διαχωριστούν στα τμήματα που εμπλέκονται άμεσα στις τάσεις και τα ρεύματα του κινητήρα (ac ισχύος), καθώς και στα απαιτούμενα κυκλώματα που χρειάζονται για να προσαρμόσουν τα επίπεδα ισχύος, στα κατάλληλα μεγέθη που να μπορούν να γίνουν αντικείμενο επεξεργασίας ψηφιακών συστημάτων, τα οποία παραδοσιακά λειτουργούν σε χαμηλότερες τάσεις (<10 V). Η λειτουργία της διάταξης και η λήψη αποφάσεων για τη μεταλλαγή των τυλιγμάτων του κινητήρα, βασίζεται στο επίπεδο του ρεύματος που ο κινητήρας απορροφά κατά τη λειτουργία του, από τις φάσεις τροφοδοσίας. Το κριτήριο για να θεωρήσουμε ότι ο κινητήρας έχει επιταχυνθεί ικανοποιητικά και το φορτίο αποκτά την ονομαστική ροπή περιστροφής του, αποτελεί το 2πλάσιο του ονομαστικού ρεύματος λειτουργίας, το οποίο συνεχίζει μειούμενο για το υπόλοιπο της διαδικασίας. Στο σημείο αυτό, όπως εξηγήθηκε λεπτομερώς, το PLC θα πρέπει να αντιληφθεί την εισερχόμενη κατάσταση και να παράγει σήμα μεταλλαγής των τυλιγμάτων του κινητήρα. Το παραγόμενο σήμα δεν θα συζευχθεί με τις υψηλές τάσεις λειτουργίας του κινητήρα, δεδομένου ότι θα κάνει την διαδικασία μεταλλαγής μέσω συστημάτων relays, τα οποία χρησιμοποιούνται για να αποσυνδέσουν τις διεπαφές ισχύος με τις διεπαφές ψηφιακών σημάτων.

Οι οικογένειες των PLC προβλέπουν, τόσο συσκευές που μπορούν να λειτουργήσουν σε υψηλές τάσεις (230 V AC – π.χ. LOGOi 230), καθώς και άλλες συσκευές οι οποίες λειτουργούν σε περιβάλλον χαμηλότερων DC τάσεων (π.χ. LOGOi 12/24 V) [15 – 17].

Στα πλαίσια του σχεδιασμού της διάταξης επιλέξαμε:

- Ασύγχρονο τριφασικό κινητήρα ισχύος 30 HP 230 V AC με χαρακτηριστικά ηλεκτρικού κυκλώματος  $r_1=0.294\Omega$ ,  $r_2=0.144\Omega$ ,  $x_1=0.503\Omega$ ,  $x_2=0.209\Omega$  και  $x_\phi=13,25\Omega$  με ονομαστικό ρεύμα λειτουργίας ανά φάση τιμής 33A.
- PLC LOGOi 12V
- Σχεδίαση του ψηφιακού κυκλώματος σε αμιγώς χαμηλό περιβάλλον τάσεων και ρευμάτων (<12V και ικανότητα οδήγησης σε ρεύμα <20mA)

Ειδικότερα, η τελευταία σχεδιαστική εκλογή, θα μειώσει τον κίνδυνο ζεύξεως συστημάτων ισχύος με ηλεκτρονικά συστήματα τάσεων ac, μειώνοντας την πιθανότητα αστοχιών, τόσο για τον κινητήρα υπό έλεγχο, όσο και για τον ελεγκτή.

Στην συνέχεια, θα παρουσιαστούν τα χαρακτηριστικά του ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα, τα κυκλώματα μετατροπής των σημάτων από διεπαφή 230 V AC σε αμιγώς DC σήματα με πλάτος < 12V, καθώς και η συνολική διάταξη σημάτων ελεγκτή και κινητήρα.



Τα κυκλώματα θα προσομοιωθούν στο περιβάλλον σχεδιασμού και ηλεκτρονικής προσομοίωσης Multisim®.

Το περιβάλλον Multisim® [8] [9] προσφέρει ένα ολοκληρωμένο σύστημα για το σχεδιασμό, την προσομοίωση, την εξαγωγή μετρήσεων και την αποσφαλμάτωση, τόσο αναλογικών, όσο και βασικών ψηφιακών κυκλωμάτων και κινητήρων (dc – ac). Παρέχει βιβλιοθήκες, οι οποίες αποτελούνται από πραγματικά ηλεκτρικά/ηλεκτρονικά στοιχεία, με παραμέτρους που προέρχονται από τις εταιρείες κατασκευής τους. Επομένως, οι διαδικασίες προσομοίωσης είναι εξαιρετικά ακριβείς και αξιόπιστες. Επιπλέον, το περιβάλλον προσφέρει τη χρήση μετρητικών συσκευών (όπως πολύμετρα, παλμογράφους ενός και πολλών καναλιών, αναλυτές και γεννήτριες συχνοτήτων, κλπ), τα οποία δίνουν τη δυνατότητα μετρήσεων στο χρήστη, ενώ το κύκλωμα βρίσκεται σε λειτουργία. Το συγκεκριμένο χαρακτηριστικό, είναι ιδιαίτερα χρήσιμο διότι, υποκαθιστά σε πρώτη φάση την ανάγκη κατασκευής πρωτοτύπου κυκλώματος για την επιβολή μετρήσεων. Η κατασκευή του ηλεκτρικού/ηλεκτρονικού κυκλώματος έπεται στην συνέχεια, εφόσον έχει βεβαιωθεί και αποσφαλματωθεί η λειτουργία του.

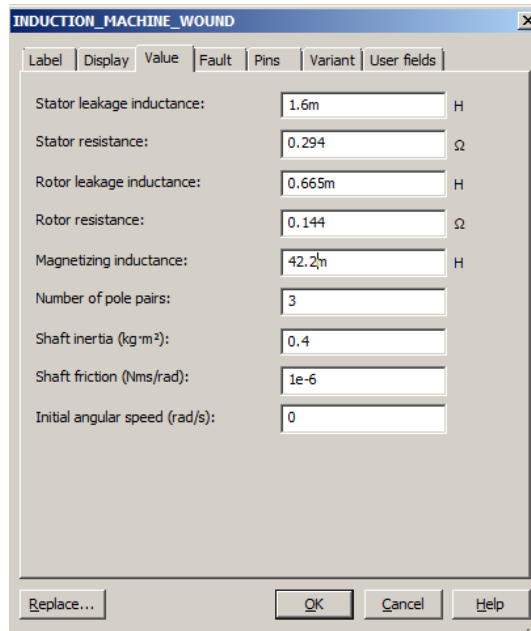
Εκτός από τη δυνατότητα μετρήσεων πραγματικού χρόνου, το περιβάλλον Multisim® προσφέρει τη δυνατότητα επιβολής off-line αναλύσεων (όπως χρονικά μεταβατική ανάλυση συμπεριφοράς κυκλώματος, ανάλυση συχνοτήτων, Bode διαγράμματα, ανάλυση Monte Carlo, θερμοκρασιακή ανάλυση, κλπ).

Για τους παραπάνω λόγους, το περιβάλλον προσομοίωσης Multisim® παρέχει μία ιδανική σουίτα (suite) σχεδιασμού και μετρήσεων, παρέχοντας από τις διαδικασίες προσομοίωσης, αξιόπιστα αποτελέσματα, τα οποία βελτιστοποιούν το χρόνο ανάπτυξης πρωτοτύπων κυκλωμάτων. Όπως τονίστηκε και προηγουμένως, η ύπαρξη βιβλιοθηκών με πραγματικά στοιχεία (components) [10] κάνει ρεαλιστική τη σχεδίαση, καθώς και τα επιμετρούμενα χαρακτηριστικά επί των προσομοιώσεων. Οι βιβλιοθήκες είναι επεκτάσιμες και διαρκώς εξελισσόμενες, δίνοντας τη δυνατότητα στο χρήστη για περαιτέρω ενημέρωση τους ή και τη μεταβολή παραμέτρων, από υπάρχοντα στοιχεία και τη δημιουργία ειδικών στοιχείων.

Τα κυκλώματα που θα χρησιμοποιηθούν για τη συνολική υλοποίηση του ελεγκτή εκκίνησης και παρακολούθησης του ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα, προσομοιώθηκαν και μετρήθηκαν στο εν λόγω περιβάλλον.

### **3.1 Επιλογή Κινητήρα για τη Διάταξη Εφαρμογής**

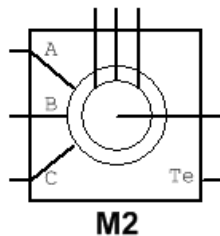
Ο ασύγχρονος τριφασικός κινητήρας που χρησιμοποιήθηκε για την εφαρμογή των προσομοιώσεων προέρχεται από την βιβλιοθήκη του περιβάλλοντος Multisim® και είναι πλήρως παραμετροποιήσιμος, προσφέροντας στον χρήστη την δυνατότητα μέσω ενός μενού επιλογών, να καθορίσει επακριβώς τα ηλεκτρικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά του. Στην συνέχεια παρατίθεται ένας αναλυτικός πίνακας από τις παραμέτρους που μπορούν να καθοριστούν από τον χρήστη για τον ασύγχρονο τριφασικό κινητήρα, όπως υποστηρίζεται στο περιβάλλον προσομοίωσης:



**Πίνακας 1: Παράμετροι λειτουργίας του ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα στο περιβάλλον Multisim ®**

Οι τιμές των παραμέτρων για τον παραπάνω κινητήρα, καθορίστηκαν από τα ισοδύναμα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά τα οποία προδιαγράφηκαν στην προηγούμενη παράγραφο (αντιστάσεις και αντιδράσεις στάτη – δρομέα και μαγνητικής ζεύξης), λαμβάνοντας υπόψη για τον προσδιορισμό των αντιδραστικών συμπεριφορών ότι, η συχνότητα του δικτύου παροχής ισχύος είναι 50 Hz.

Το μοντέλο για τον ασύγχρονο τριφασικό κινητήρα περιγράφεται με το ακόλουθο σύμβολο:

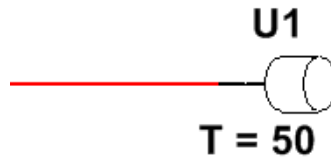


**Σχήμα 12: Σύμβολο ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα στο περιβάλλον Multisim ®**

Το σύμβολο του ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα διαθέτει ακροδέκτες, για τη διασύνδεση των φάσεων τροφοδοσίας (ακροδέκτες a, b, c – πρωτεύον κύκλωμα) και αντίστοιχους ακροδέκτες για το δευτερεύον κύκλωμα (οι οποίοι σχηματίζονται στο πάνω μέρος του συμβόλου). Στις δύο αυτές ομάδες ακροδεκτών, θα πρέπει να μεταλλαγούν οι συνδεσμολογίες τυλιγμάτων αστέρα – τριγώνου για τη διευκόλυνση της αρχικής επιτάχυνσης του κινητήρα, με στόχο την αποκατάσταση της ονομαστικής ροπής στον άξονα του.

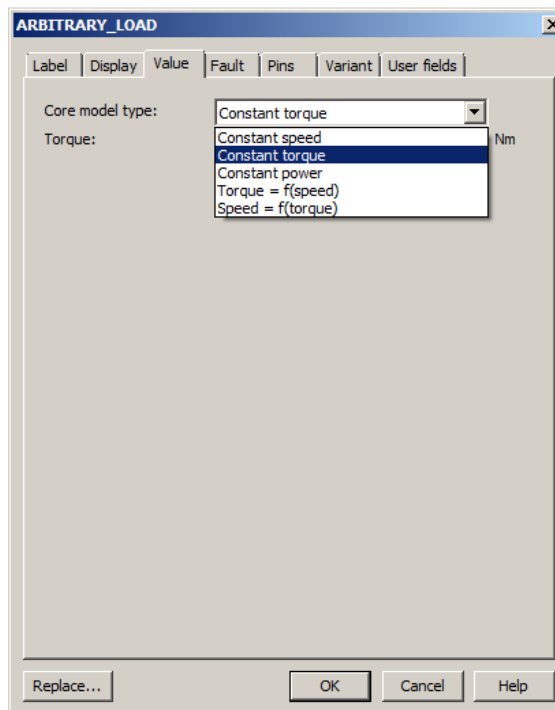
Το μοντέλο του κινητήρα διαθέτει έξοδο, στην οποία μπορεί να συνδεθεί μεταβλητός τύπος φορτίων. Ο μεταβλητός τύπος φορτίων περιλαμβάνει, τη δυνατότητα καθορισμού σταθερής ταχύτητας, σταθερής ροπής, σταθερής ισχύος, ροπής ανάλογης της συχνότητας και ροπής ανάλογης της ταχύτητας για τον τύπο του φορτίου. Για τη διαδικασία

προσομοίωσης, έχουμε επιλέξει τη χρήση σταθερής ροπής, καθορισμένης στα 50 και 200 Nm. Στο σχήμα που ακολουθεί, παρουσιάζεται το σύμβολο του μηχανικού φορτίου που υποστηρίζεται στο περιβάλλον Multisim®.



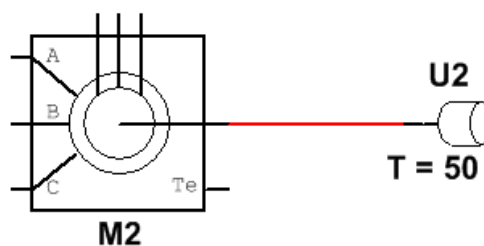
Σχήμα 13: Σύμβολο φορτίου μηχανικού τύπου στο περιβάλλον Multisim®

Οι παράμετροι καθορισμού του μηχανικού φορτίου όπως περιγράφηκαν, παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί:



Πίνακας 2: Τύποι υποστηριζόμενων μηχανικών φορτίων στο περιβάλλον Multisim®

Στο σχήμα που ακολουθεί, παρουσιάζεται το μοντέλο του ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα συνδεδεμένου με το φορτίο σταθερής ροπής:



Σχήμα 14: Διασύνδεση του μοντέλου κινητήρα με το μοντέλο φορτίου σταθερής ροπής

Όπως αναφέρθηκε και στην παρουσίαση του block διαγράμματος του ελεγκτή, η λειτουργία του PLC για την απόφαση μεταλλαγής των τυλιγμάτων του κινητήρα από αστέρα σε τρίγωνο, βασίζεται σε σήμα αναφοράς, που αφορά στο επίπεδο του ρεύματος γραμμής, προερχόμενο από τις φάσεις του κινητήρα. Το συγκεκριμένο ρεύμα, αρχικά λαμβάνει σχετικά μεγάλη τιμή, η οποία δύναται να φτάνει έως και το 7 - 10πλάσιο της ονομαστικής τιμής ρεύματος λειτουργίας. Αυτό συμβαίνει κατά την αρχική φάση επιταχύνσεως του κινητήρα, ο οποίος εκκινεί από αρχικά στατική κατάσταση. Στη συνέχεια και καθώς ο κινητήρας επιταχύνεται, το ρεύμα αναμένεται να μειωθεί και να αποκατασταθεί στην ονομαστική τιμή λειτουργίας. Με βάση τα καθορισμένα επίπεδα, δημιουργήθηκε κύκλωμα μετατροπέα από το ρεύμα γραμμής, σε αμιγώς ψηφιακό σήμα, το οποίο θα χρησιμοποιηθεί για τη διέγερση (ως σήμα εισόδου) του PLC, κανονίζοντας την χρονική στιγμή μεταλλαγής.

Το κύκλωμα αυτό, οι σχεδιαστικές επιλογές, καθώς και η λειτουργικότητα του, περιγράφονται στην παράγραφο που ακολουθεί.

### **3.2 Παρουσίαση του Κυκλώματος Μετατροπέα**

Το κύκλωμα του μετατροπέα, καλείται να μετατρέψει ένα καθαρό σήμα ισχύος (ac), όπως είναι το ρεύμα της μίας από τις 3 γραμμές τροφοδοσίας (το οποίο ανέρχεται σε αρκετά Amperes), από την AC διεπαφή λειτουργίας, σε αμιγώς ψηφιακό σήμα, το οποίο να ανέρχεται σε στάθμη  $dc < 12 V$ , με ικανότητα οδήγησης της τάξης των milliAmperes. Ο απαιτούμενος λόγος για τη συγκεκριμένη μετατροπή είναι ότι, η λειτουργία του PLC βασίζεται σε αναλογικά ή ψηφιακά σήματα, που με βάση την επιλογή μας (LOGOi 12V) [15 - 17], δεν πρέπει να ξεπερνούν την ονομαστική τιμή τροφοδοσίας της συσκευής. Αξίζει να σημειωθεί ότι, όλες οι προσφερόμενες οικογένειες PLC διαθέτουν εσωτερικά κυκλώματα προστασίας από υπερτάσεις και υπερ-ρεύματα, με στόχο την προστασία της συσκευής (clamp diodes). Όμως, σε καμία περίπτωση, τα σήματα εισόδου δεν θα πρέπει σκόπιμα να ξεπερνούν τις επιτρεπόμενες τάσεις λειτουργίας, όπως αυτές ορίζονται από τον κατασκευαστή των συγκεκριμένων συσκευών.

Από τους πίνακες λειτουργίας της συσκευής, το PLC αναγνωρίζει στάθμες  $< 5V$  ως λογικό '0' ενώ στάθμες  $> 8V$  ως λογικό '1'. Τα συγκεκριμένα αυτά χαρακτηριστικά, καθορίζουν και το πλαίσιο λειτουργίας της εξόδου του μετατροπέα.

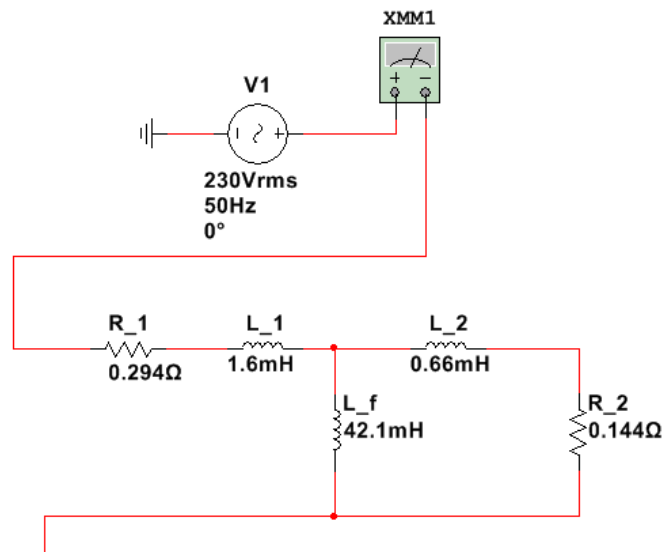
Στο σημείο αυτό, αξίζει να αναφέρουμε ότι η επιλογή του συγκεκριμένου PLC, το οποίο λειτουργεί αμιγώς σε περιβάλλον χαμηλών  $dc$  τάσεων και ρευμάτων, έγινε με σχεδιαστικό στόχο την αποσύζευξη, όπως ήδη τονίστηκε, των διεπαφών ισχύος του συστήματος (ac) με τα ψηφιακά υποσυστήματα. Οι λόγοι για τη συγκεκριμένη εκλογή, αφορούν καθαρά στην ευελιξία και στην ευκολία αποσφαλμάτωσης λειτουργίας, που παρέχουν τα ψηφιακά υποσυστήματα, σε σχέση με τις αντίστοιχες διεπαφές ισχύος, καθώς και στην εξάλειψη κινδύνου αστοχιών στη λειτουργία, οι οποίοι μπορούν να θέσουν σε κίνδυνο και ενδεχόμενη καταστροφή, τόσο τη διάταξη ελέγχου, όσο και τον κινητήρα.

Αναλυτικότερα, το κύκλωμα του μετατροπέα αποτελείται από τα ακόλουθα υποσυστήματα [5]:

- Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα κινητήρα
- Κύκλωμα μετατροπής σήματος ρεύματος σε τάση
- Μείωση επιπέδου τάσεως

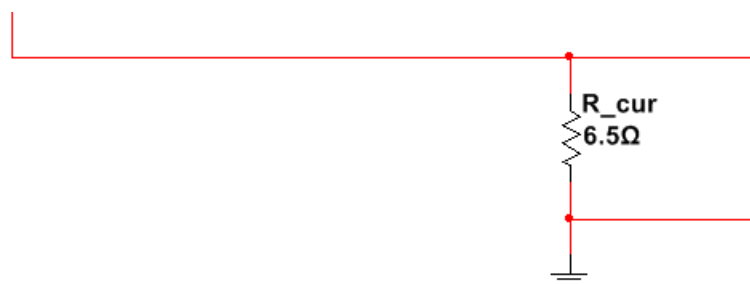
- Ανόρθωση γέφυρας πλήρους κύματος
- Κύκλωμα συγκριτή με ρυθμιζόμενη τάση αναφοράς

Ειδικότερα, το ισοδύναμο κύκλωμα για τη λειτουργία του ασύγχρονου κινητήρα, χρησιμοποιήθηκε αρχικά για να αντικαταστήσει τον τελευταίο στη διαδικασία αρχικού σχεδιασμού και προσομοίωσης. Οι αριθμητικές τιμές των στοιχείων για τον στάτη και τον δρομέα, είναι αυτές που προέκυψαν από τους υπολογισμούς των προηγούμενων παραγράφων. Στο σχήμα που ακολουθεί, παρουσιάζεται το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα του κινητήρα:



Σχήμα 15: Ηλεκτρικό ισοδύναμο κύκλωμα του ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα

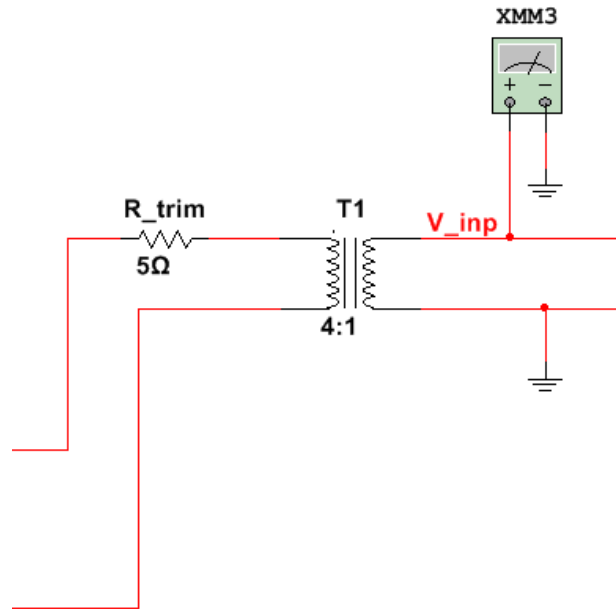
Στο κύκλωμα του ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα, διακρίνεται σύνδεση με τη μία τάση τροφοδοσίας. Στη συνέχεια, για τη μετατροπή του σήματος ρεύματος που διαρρέει τον κινητήρα σε σήμα τάσης, χρησιμοποιείται ένας αντιστάτης καθορισμένης τιμής. Το κύκλωμα παρουσιάζεται στο σχήμα που ακολουθεί:



Σχήμα 16: Κύκλωμα μετατροπής του ρεύματος σε σήμα τάσης

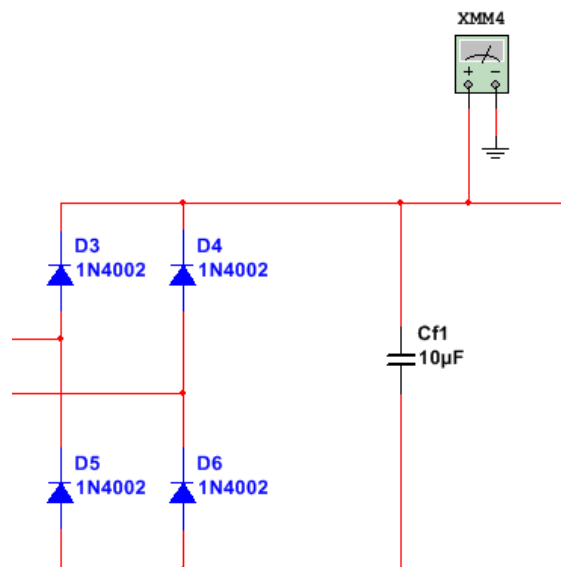
Η αντίσταση για τη μετατροπή είναι αρκετά υψηλότερη, συγκρινόμενη με τις αντιστάσεις του κινητήρα, με στόχο να απορροφά τη μέγιστη ονομαστική τιμή της τάσης, ως διαιρέτης τάσης. Στη συνέχεια, το σήμα τάσης οδηγείται στο κύκλωμα του μετασχηματιστή, για τη διαδικασία υποβιβασμού της τάσης του. Ο λόγος σπειρών του μετασχηματιστή, καθορίστηκε σε 4:1 για τον υποβιβασμό της τάσης στα κατάλληλα επίπεδα, μέσω δοκιμών από τη διαδικασία προσομοίωσης. Επιπλέον, στο πρωτεύον του

μετασχηματιστή, συνδέθηκε σε σειρά αντίσταση  $5\ \Omega$ , με στόχο την αύξηση της αντίστασης εισόδου του κυκλώματος, καθώς και τη μείωση των επιπέδων ρεύματος, τόσο για το πρωτεύον, όσο και για το δευτερεύον του μετασχηματιστή, έτσι ώστε τα παραγόμενα ρεύματα να έλθουν στα κατάλληλα επίπεδα τάξης των (mA), για τα υποσυστήματα που ακολουθούν. Το κύκλωμα του μετασχηματιστή υποβιβασμού παρουσιάζεται στο σχήμα που ακολουθεί:



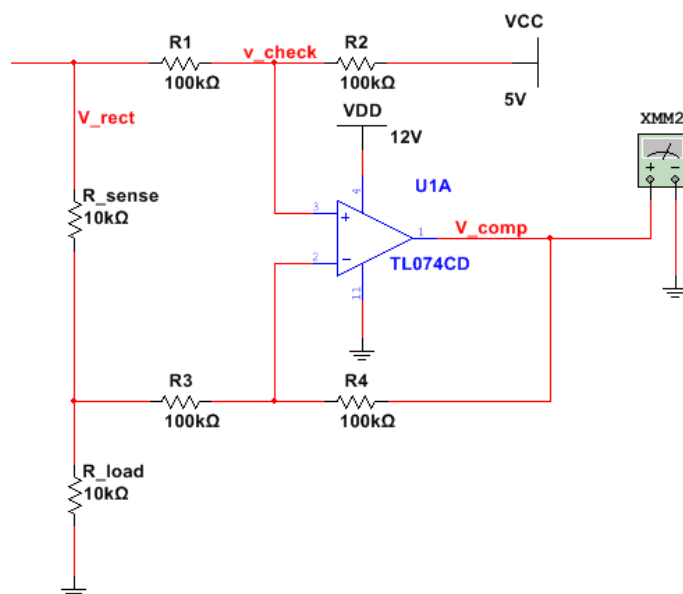
Σχήμα 17: Κύκλωμα μετασχηματιστή υποβιβασμού του σήματος τάσης

Το παραγόμενο σήμα τάσης από την έξοδο του μετασχηματιστή, οδηγείται σε κύκλωμα ανορθωτή πλήρους κύματος, με στόχο τη διαδικασία ανόρθωσης του και μετατροπής του σε συνεχές dc. Ο ανορθωτής και η συνδεσμολογία εξόδου, παρουσιάζονται στο σχήμα που ακολουθεί:



Σχήμα 18: Ανορθωτής πλήρους κύματος για τη μετατροπή του σήματος τάσης σε dc

Στην έξοδο του ανορθωτή, συνδέθηκε πυκνωτής εξομάλυνσης σε τιμή 10  $\mu\text{F}$ , για να εξομαλύνει τις ενδεχόμενες κυμάνσεις από τη διαδικασία ανόρθωσης του σήματος και να δημιουργήσει, όσο το δυνατόν, πιο σταθερό επίπεδο για το σήμα εξόδου. Στη συνέχεια, το παραγόμενο συνεχές σήμα οδηγείται σε έναν συγκριτή, με τάση αναφοράς για την παραγωγή του σήματος εξόδου, που αποτελεί και το σήμα αναφοράς για τη διέγερση της εισόδου του PLC. Το κύκλωμα του συγκριτή παρουσιάζεται στο σχήμα που ακολουθεί:



Σχήμα 19: Κύκλωμα συγκριτή για την παραγωγή του ψηφιακού σήματος διέγερσης

Ο συγκριτής, χρησιμοποιεί το παραγόμενο σήμα για τον μη αναστρέφοντα ακροδέκτη του, με τάση αναφοράς +5 V. Οι τάξεις των αντιστάσεων για τους διαιρέτες, έχουν επιλεγεί στην κλίμακα των  $\text{k}\Omega$ , έτσι ώστε να εμφανίζουν υψηλή αντίσταση και να διευκολύνουν τη λειτουργία του προηγούμενου σταδίου εξομάλυνσης από τον πυκνωτή του ανορθωτή (στην περίπτωση που επιλεγούν τιμές στην κλίμακα των  $\Omega$  θα οδηγούσαν σε μεγάλη κυμάτωση το στάδιο του πυκνωτή εξομάλυνσης, ο οποίος μέσω αυτών εκφορτίζει πολύ γρήγορα).

Ο συγκριτής, συγκρίνει τα επίπεδα τάσεων στους ακροδέκτες εισόδου του τελεστικού +/- και δίνει έξοδο σχεδόν +12 V όταν  $V_+ > V_-$  και +5 V όταν  $V_+ < V_-$ . Οι αντιστάσεις των κλάδων του συγκριτή, είναι της τάξης  $\text{k}\Omega$ , σε αντίθεση με τις αντιστάσεις αναφοράς στην είσοδο, που είναι της τάξης των  $\Omega$ , για να μην επιδρούν στη δημιουργία των σημάτων αναφοράς που συγκρίνουν.

Το κύκλωμα του μετατροπέα είναι ιδιαίτερα απαιτητικό διότι, θα πρέπει να μετατρέπει τα ρεύματα της τάξης λειτουργίας (A), σε σήματα χαμηλών τάσεων και οδήγησης, για να μπορούν με αυτά, να λειτουργήσουν τα ψηφιακά κυκλώματα του PLC που ακολουθούν. Επιπλέον, το κύκλωμα του μετατροπέα αποσυζεύγει τη λειτουργία του κινητήρα με τον ελεγκτή, καθιστώντας ασφαλή τη σχεδίαση, εφόσον υψηλότερες τάσεις δεν έρχονται σε επαφή με χαμηλότερες τάσεις λειτουργίας, διασφαλίζοντας, τόσο τη λειτουργία του ελεγκτή, καθώς και του περιβάλλοντος του κινητήρα. Επιπλέον, χρήση ψηφιακών επιπέδων λειτουργίας, διευκολύνει τη διαδικασία μετρήσεων και αποσφαλμάτωσης για το σύστημα του ελεγκτή, μειώνοντας τους κινδύνους για το μηχανικό σχεδιαστή του κυκλώματος. Επιπλέον, για τη λειτουργία του μετατροπέα, έχουν επιλεγεί μόνο δύο τάσεις (5 και 12 V). Η τάση των 12 V είναι κοινή και για την συσκευή του PLC ενώ η τάση των 5

V, που απαιτείται για το σημείο αναφοράς, μπορεί να δημιουργηθεί με χρήση ενός ολοκληρωμένου κυκλώματος DC-DC Converter, επιλύοντας την ανάγκη διαφορετικών τροφοδοσιών για τη διάταξη.

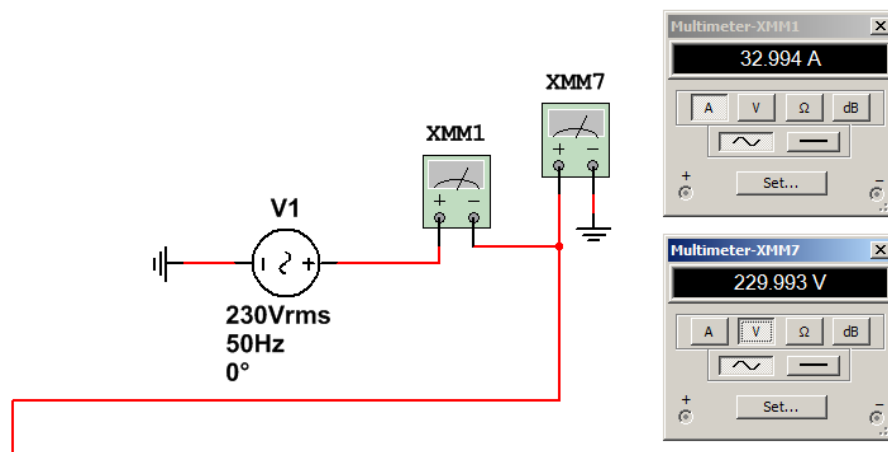
Στην συνέχεια, θα παρουσιαστεί η διαδικασία προσομοίωσης του κυκλώματος του μετατροπέα, δίνοντας ενδεικτικές τιμές τάσεων και ρευμάτων στα διάφορα σημεία του κυκλώματος, καθώς και παρουσιάζοντας το σήμα εξόδου, που αποτελεί το ψηφιακό σήμα διέγερσης για την είσοδο του PLC.

### 3.2.1 Προσομοίωση του Κυκλώματος Μετατροπέα

Για την εφαρμογή της διαδικασίας προσομοίωσης, όπως αναφέρθηκε, το περιβάλλον Multisim ® διαθέτει όργανα μετρήσεων (multimeters, oscilloscopes), καθώς και χρονικές τεχνικές ανάλυσης μεταβατικής συμπεριφοράς κυκλώματος (transient analysis). Οι δυνατότητες αυτές, αξιοποιήθηκαν κατά τη χρονική διάρκεια προσομοίωσης. Σε διαφορετικά σημεία της τοπολογίας, έχουν εισαχθεί πολύμετρα (βολτόμετρα/αμπερόμετρα) για μετρήσεις επί του ρεύματος των κλάδων και των συγκεκριμένων τάσεων, που αναπτύσσονται σε επιλεγμένους κόμβους. Επιπλέον, η αναλυτική κυματομορφή της εξόδου του κυκλώματος μελετήθηκε, με τη διαδικασία της χρονικής ανάλυσης μεταβατικής συμπεριφοράς (transient analysis).

Αναλυτικότερα, στα διάφορα στάδια του κυκλώματος εμφανίζονται μετρημένες οι ακόλουθες τιμές:

Στην είσοδο της γραμμής τροφοδοσίας σε μόνιμη κατάσταση:

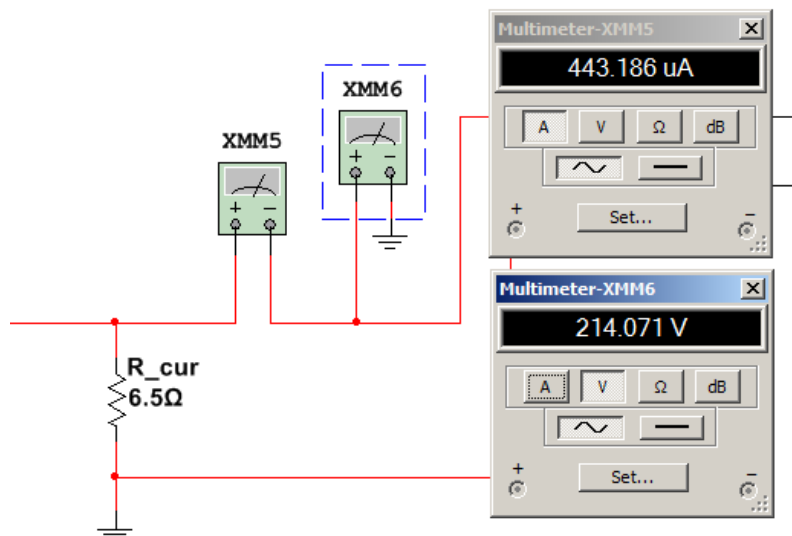


Σχήμα 20: Μετρήσεις ρεύματος – τάσης στη μόνιμη κατάσταση - κύκλωμα εισόδου

Παρατηρούμε ότι, ο κινητήρας απορροφά στη μόνιμη κατάσταση από τη φάση τροφοδοσίας, ρεύμα 32.9 A, όπως προβλεπόταν και από τα θεωρητικά χαρακτηριστικά του κινητήρα.

Στην είσοδο της αντίστασης R\_cur αναφοράς:

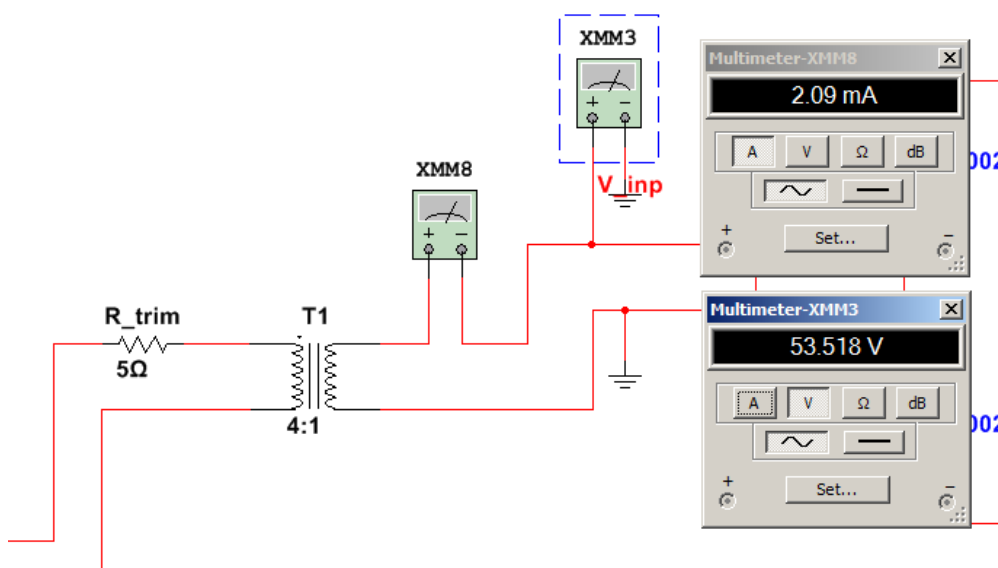




Σχήμα 21: Μετρήσεις ρεύματος – τάσης στη μόνιμη κατάσταση - κύκλωμα αναφοράς

Από το κύκλωμα γίνεται εμφανές ότι, η αντίσταση  $R_{cur}$ , διαβάζει το ρεύμα του κλάδου και το μετατρέπει σε τάση. Το προκύπτον ρεύμα, που θα οδηγηθεί στην είσοδο του μετασχηματιστή υποβιβασμού, είναι εξαιρετικά χαμηλό, έχοντας μετατρέψει τα επίπεδα των αρχικών σημάτων ισχύος.

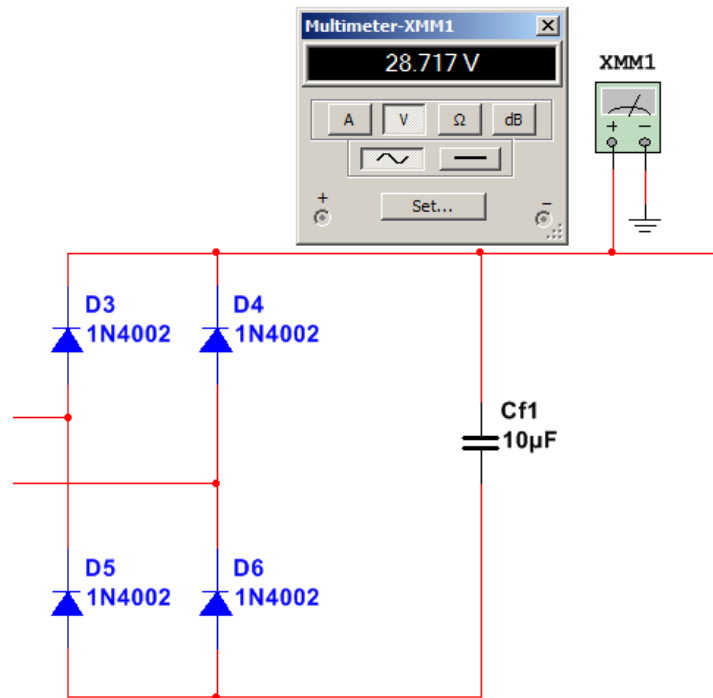
Στην έξοδο του μετασχηματιστή:



Σχήμα 22: Μετρήσεις ρεύματος – τάσης στη μόνιμη κατάσταση - έξοδος μετασχηματιστή

Από τις τιμές των μετρήσεων, τόσο για την τάση, αλλά επίσης και για το ρεύμα, τα συστήματα έχουν περιέλθει σε χαμηλότερα επίπεδα, σε σχέση με τις αρχικές τιμές από το ac τμήμα της διάταξης. Το εισερχόμενο ρεύμα προς την διάταξη του ανορθωτή πλήρους κύματος, είναι της τάξης των mA, ενώ η εισερχόμενη τάση έχει υποβιβαστεί στα 53V, με βάση το λόγο σπειρών του μετασχηματιστή 4:1.

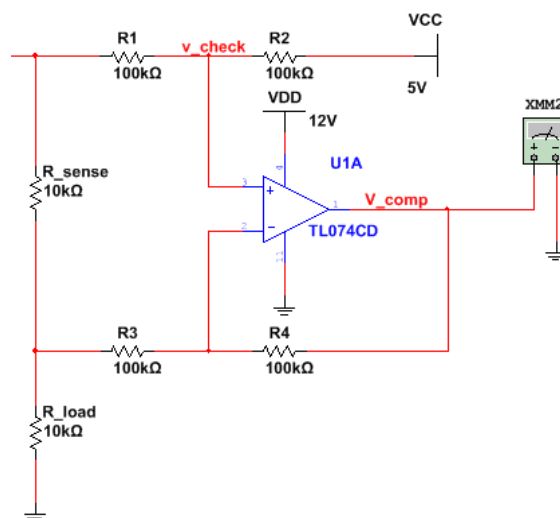
Στην έξοδο του ανορθωτή πλήρους κύματος:

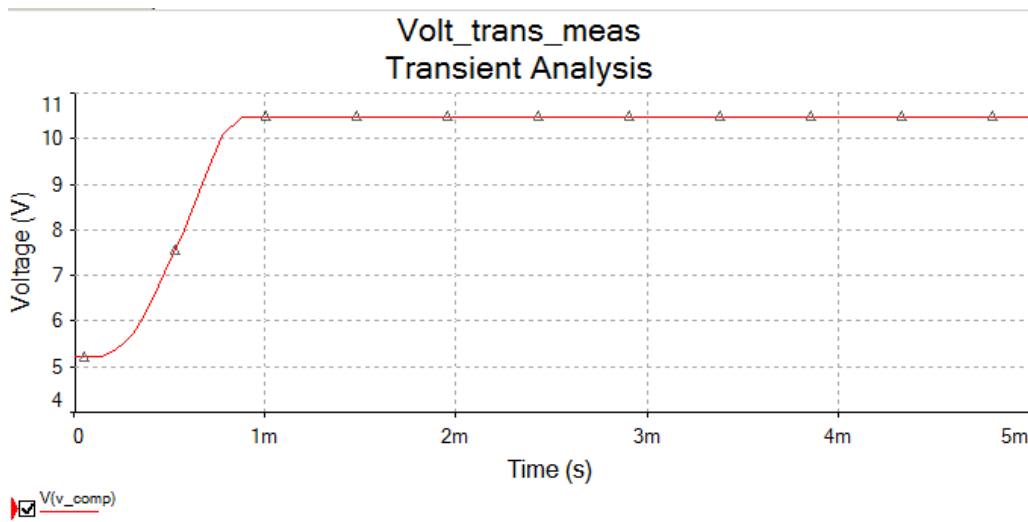


Σχήμα 23: Μέτρηση τάσης στη μόνιμη κατάσταση - έξοδος ανορθωτή

Παρατηρούμε ότι, η τάση που παράγεται στην έξοδο του ανορθωτή, έχει υποβιβαστεί στο επίπεδο των 28 V. Η μέτρηση με το όργανο σε dc, παράγει μικρή κύμανση στην τάση και δίνει μέτρηση γύρω στα 24 V. Οπότε, το παραγόμενο σήμα είναι έτοιμο να εισέλθει προς περαιτέρω επεξεργασία στη βαθμίδα του συγκριτή.

Στην έξοδο του συγκριτή:





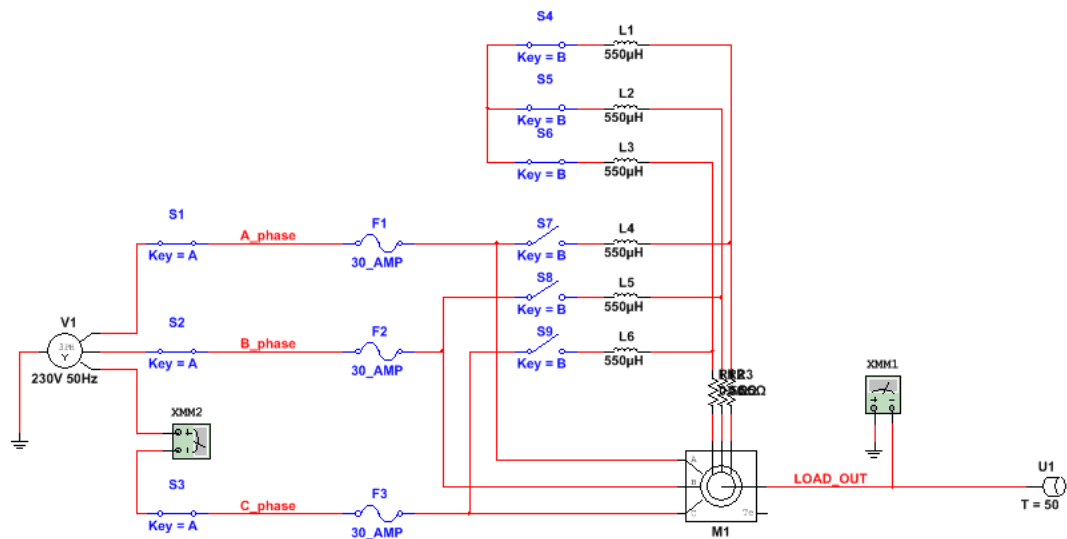
Σχήμα 24: Μέτρηση τάσης μεταβατικής κατάστασης στο σήμα εξόδου V\_comp

Από τη μεταβατική χρονική απόκριση του κυκλώματος στο στάδιο του συγκριτή, παρατηρούμε ότι παράγει σήμα που, αρχικά παραμένει κάτω από το επίπεδο των 8 V, οπότε η συσκευή PLC αντιλαμβάνεται το ψηφιακό σήμα ως λογικό '0', και καθώς ο χρόνος εξελίσσεται και το ρεύμα αποκαθίσταται, το σήμα καταλήγει σε σταθερή τιμή 11 V, όπου η συσκευή PLC αντιλαμβάνεται ως λογικό '1'. Το τελευταίο έχει ως αποτέλεσμα, το συγκεκριμένο σήμα, μέσω του PLC, να παράγει ψηφιακό σήμα εξόδου για τη μεταγωγή μέσω relays των τυλιγμάτων του κινητήρα, από αστέρα σε τρίγωνο.

### 3.3 Ισοδύναμο Ηλεκτρικό Μοντέλο για το Κύκλωμα Εκκίνησης

Δεδομένου ότι, η συνολική υλοποίηση απαιτεί την ένταξη της συσκευής PLC στο κύκλωμα, αυτό θα απαιτούσε ένα συνολικά εκτενές σύστημα για τη διαδικασία του ελέγχου λειτουργίας και προσομοίωσης. Για το λόγο αυτό, το κύκλωμα ελέγχου του κινητήρα, έχει απλουστευθεί χρησιμοποιώντας τις δομές τυλιγμάτων αστέρα – τριγώνου, υλοποιώντας τις χρονικές μεταλλαγές μέσω κυκλωμάτων διακόπτη. Το PLC είναι η συσκευή, η οποία είναι υπεύθυνη για την παραγωγή αυτών των σημάτων, τα οποία εκτελούν τις μεταλλαγές φάσεων στους διακόπτες. Για απλούστευση όμως, παρατίθεται ένα ισοδύναμο απλοποιημένο μοντέλο όπου, τα σήματα ελέγχου μεταλλαγής των διακοπών προέρχονται από το χρήστη.

Ακόμη όμως και με το απλουστευμένο μοντέλο, η διαδικασία της μελέτης και προσομοίωσης του κυκλώματος μπορεί να αποδώσει ρεαλιστικά, τους απαιτούμενους χρόνους για την επίτευξη λειτουργίας ισορροπίας για τον κινητήρα. Επιπλέον, για να καταδείξουμε τα επίπεδα του απαιτούμενου ρεύματος, εκτός από την εφαρμογή της διαδικασίας μεταβατικής χρονικής απόκρισης, στο μοντέλο προσομοίωσης έχουν προστεθεί ασφάλειες τήξεως με καθορισμένες ονομαστικές τιμές λειτουργίας. Κατά συνέπεια, η διαδικασία της προσομοίωσης αλλάζει χρώματα στις ασφάλειες, στη φάση όπου υπερρεύματα αναπτύσσονται στους κλάδους των φάσεων, τα οποία υπερβαίνουν την ονομαστική τιμή τους, προειδοποιώντας το χρήστη, για τα εύρη λειτουργίας των σημάτων ισχύος. Το ισοδύναμο κυκλωματικό μοντέλο για την προσομοίωση του ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα, παρουσιάζεται στο σχήμα που ακολουθεί:



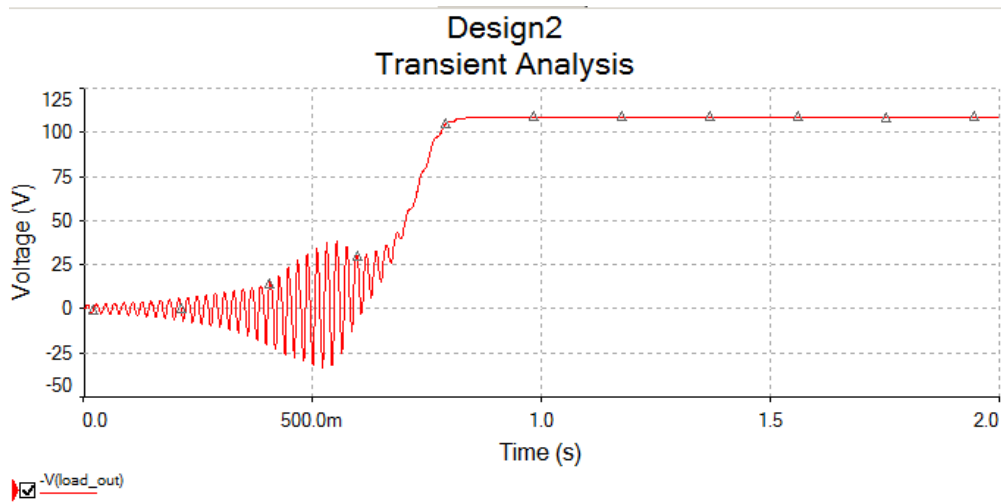
Σχήμα 25: Απλοποιημένο κυκλωματικό μοντέλο για τον έλεγχο του ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα

Από το σχήμα που περιγράφει το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα για τον χειρισμό των τυλιγμάτων του κινητήρα παρατηρούμε ότι, όταν οι διακόπτες S1, S2, S3 είναι ανοικτοί, ο κινητήρας είναι αποσυνδεδεμένος από τις γραμμές τροφοδοσίας. Όταν οι διακόπτες S4, S5 και S6 είναι κλειστοί, οι διακόπτες S7, S8 και S9 (αμοιβαία αποκλειόμενη λειτουργία για να αποφευχθεί ταυτόχρονη ζεύξη τυλιγμάτων αστέρα – τριγώνου) είναι ανοικτοί και τα τυλίγματα του κινητήρα τίθενται σε συνδεσμολογία αστέρα. Αντίθετα, στην περίπτωση όπου οι διακόπτες S4, S5 και S6 είναι ανοικτοί, οι διακόπτες S7, S8 και S9 είναι κλειστοί και τα τυλίγματα του κινητήρα τίθενται σε συνδεσμολογία τριγώνου. Η μεταλλαγή της φάσης των διακοπών, γίνεται με την παρέμβαση του χρήστη, ο οποίος μπορεί σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή να μεταβάλλει τη θέση τους. Στην συνέχεια, θα παρουσιαστεί η διαδικασία προσομοίωσης του κυκλώματος ελέγχου, καθώς και των τιμών που επιτυγχάνονται για τη χρονική αποκατάσταση του ρεύματος στον κινητήρα, καθώς και την αποκατάσταση των στροφών του φορτίου επί του άξονα.

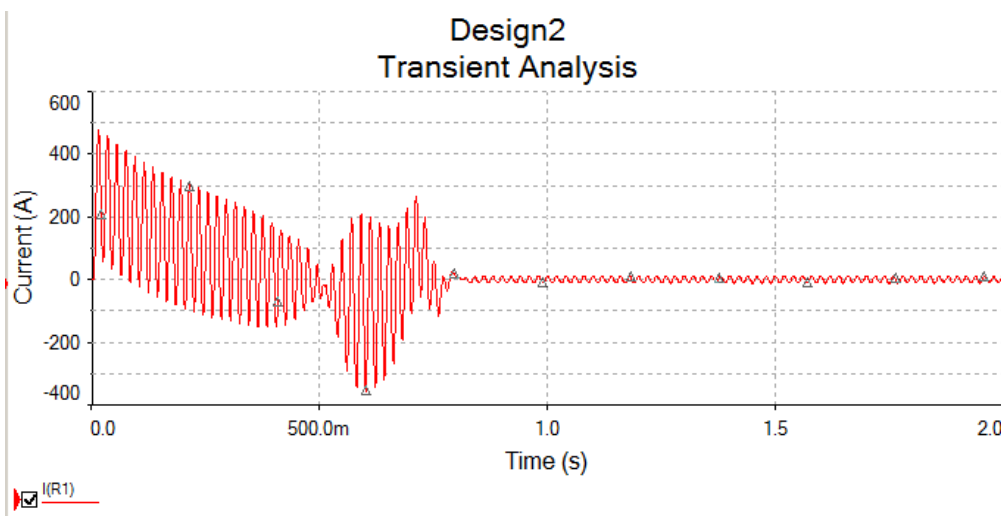
### 3.3.1 Προσομοίωση του Κυκλώματος Εκκίνησης με συνδεσμολογία Αστέρα

Στην προσομοίωση του κυκλώματος, για τη συνδεσμολογία των τυλιγμάτων του κινητήρα σε μορφή αστέρα, οι διακόπτες έχουν τεθεί, όπως περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Ο στόχος της διαδικασίας προσομοίωσης είναι, να καταδείξει τον απαιτούμενο χρόνο, τόσο για την αποκατάσταση του ρεύματος γραμμής από μία εκ των 3 φάσεων τροφοδοσίας, όσο και την αποκατάσταση του ρεύματος του κινητήρα στο δευτερεύον, δηλαδή, κατά τις φάσεις χειρισμού του φορτίου. Για το λόγο αυτό, η διαδικασία της προσομοίωσης θα κάνει χρήση μεταβατικής χρονικής απόκρισης για το κύκλωμα (transient analysis). Το φορτίο επί του άξονα του κινητήρα που χρησιμοποιήθηκε για τη διαδικασία της προσομοίωσης, τέθηκε στα 50 Nm (σταθερό).

Τα αποτελέσματα από τη διαδικασία προσομοίωσης, για το σήμα της τάσης εξόδου επί του τυλιγματος, παρουσιάζονται στο σχήμα που ακολουθεί:



Σχήμα 26: Σήμα τάσης εξόδου φορτίου για συνδεσμολογία τυλιγμάτων αστέρα



Σχήμα 27: Ρεύμα επί του τυλιγματος σε συνδεσμολογία αστέρα

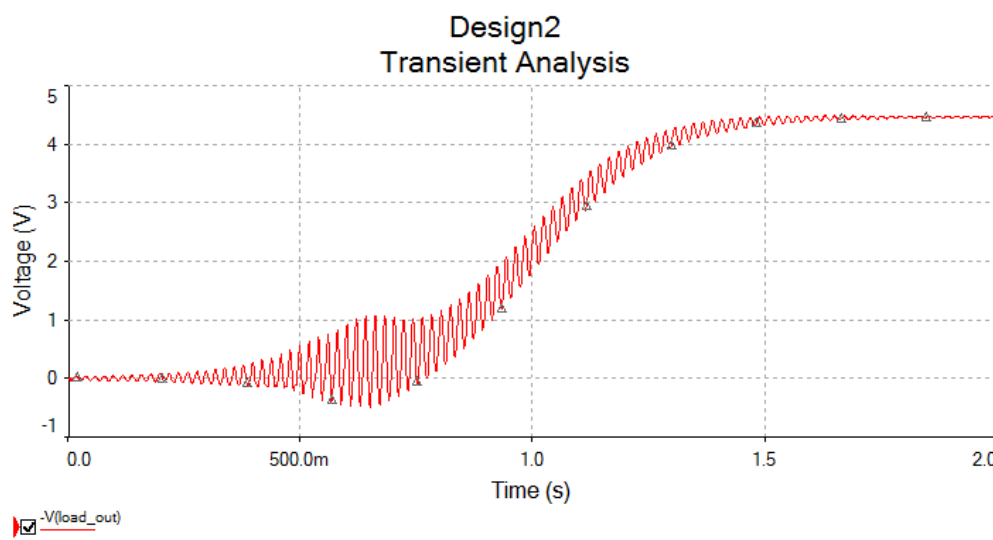
Από τα στοιχεία της προσομοίωσης παρατηρούμε ότι, η τάση στο φορτίο, καθώς και το ρεύμα του τυλιγματος σε συνδεσμολογία αστέρα, έχουν αποκατασταθεί επιτυχάνοντας την επιθυμητή ροπή στον άξονα σε χρονικό διάστημα 0.8 sec περίπου, μετά την εκκίνηση του κινητήρα. Ο χρόνος για την αποκατάσταση είναι αποδεκτός, αν λάβουμε υπόψη μας ότι, ο ασύγχρονος τριφασικός κινητήρας, έχει ονομαστική ισχύ 30 HP για ένα σταθερό φορτίο της τάξης των 50 Nm. Στον ίδιο χρόνο, παρατηρούμε ότι, η τάση και τα ρεύματα επί των τυλιγμάτων του αστέρα, αποκαθίστανται στις ονομαστικές τιμές λειτουργίας, γεγονός που σημαίνει και τη βάση για τη διαδικασία μεταλλαγής των τυλιγμάτων.

### 3.3.2 Προσομοίωση του Κυκλώματος Εκκίνησης με συνδεσμολογία Τριγώνου

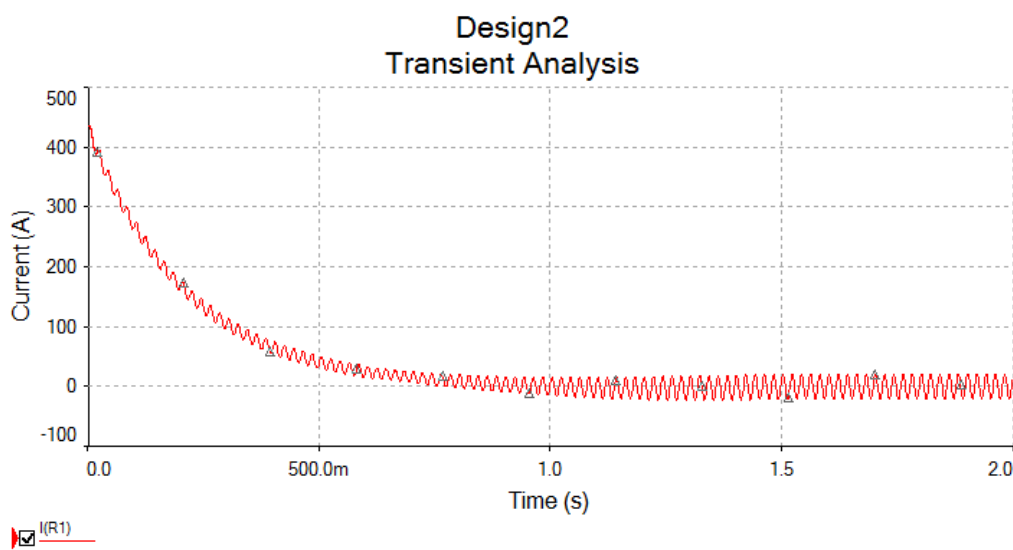
Στην προσομοίωση του κυκλώματος για τη συνδεσμολογία των τυλιγμάτων του κινητήρα σε μορφή τριγώνου, οι διακόπτες έχουν τεθεί όπως περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Ο στόχος της διαδικασίας προσομοίωσης είναι, να καταδείξει τον απαιτούμενο χρόνο, τόσο για την αποκατάσταση του ρεύματος γραμμής από μία εκ των 3 φάσεων τροφοδοσίας, όσο και την αποκατάσταση του ρεύματος του κινητήρα στο

δευτερεύον, δηλαδή, κατά τις φάσεις χειρισμού του φορτίου. Αναμένεται ότι, η διαδικασία εκκίνησης με τα τυλίγματα σε συνδεσμολογία τριγώνου, σαφώς θα απαιτήσει περισσότερο χρόνο και δεν θα είναι το ίδιο αποδοτική, όπως η συνδεσμολογία αστέρα. Για το λόγο αυτό, η διαδικασία της προσομοίωσης θα κάνει χρήση μεταβατικής χρονικής απόκρισης για το κύκλωμα (transient analysis). Το φορτίο επί του άξονα του κινητήρα που χρησιμοποιήθηκε για τη διαδικασία της προσομοίωσης, τέθηκε στα 50 Nm (σταθερό).

Τα αποτελέσματα από τη διαδικασία προσομοίωσης, για το σήμα της τάσης εξόδου επί του τυλίγματος, παρουσιάζονται στο σχήμα που ακολουθεί:



Σχήμα 28: Σήμα τάσης εξόδου φορτίου για συνδεσμολογία τυλιγμάτων αστέρα



Σχήμα 29: Ρεύμα επί του τυλίγματος σε συνδεσμολογία αστέρα

Από τα διαγράμματα της διαδικασίας προσομοίωσης παρατηρούμε ότι, η τάση επί του φορτίου στη συνδεσμολογία τυλιγμάτων τριγώνου, περιέρχεται σε σταθερή τιμή περίπου μετά από 1.4 sec, δηλαδή, αργότερα από την αντίστοιχη αποκατάσταση για τη συνδεσμολογία τυλιγμάτων αστέρα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι, τα προσφερόμενα ρεύματα στο δευτερεύον του κινητήρα με την συνδεσμολογία τριγώνου, είναι μικρότερα όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε και από τα αντίστοιχα διαγράμματα ρεύματος στο χρόνο. Πιο συγκεκριμένα, σε συνδεσμολογία αστέρα, τα ρεύματα φτάνουν σε εξαιρετικά υψηλές τιμές μεγαλύτερες από 400 A, ενώ αντίστοιχα, στη συνδεσμολογία τριγώνου, τα

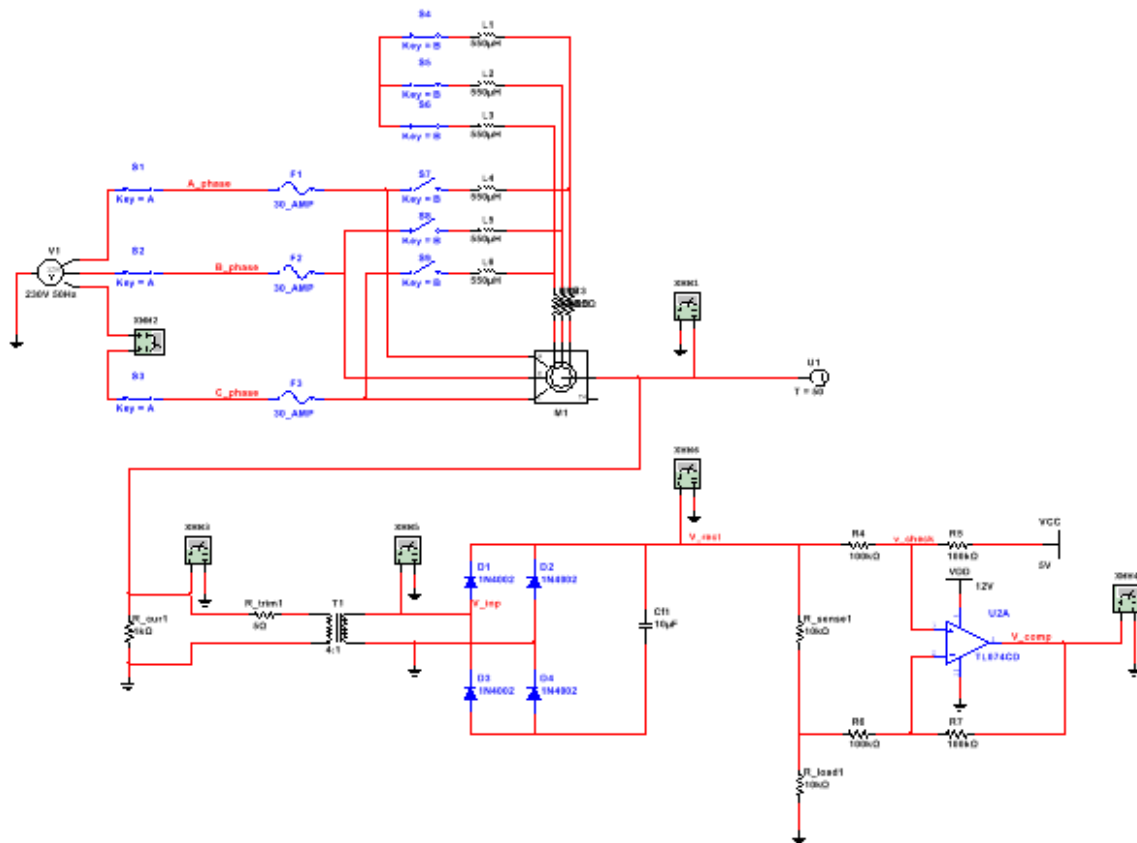
ρεύματα περιορίζονται σε τιμές κάτω των 400 A. Και στις δύο περιπτώσεις, ο ασύγχρονος τριφασικός κινητήρας παρουσιάζει αρκετή ισχύ για την αποκατάσταση στρεπτικής ροπής στο φορτίο. Από τα παραπάνω γίνεται εμφανές ότι, η διαδικασία εκκίνησης του συστήματος δεν πρέπει να γίνεται σε συνδεσμολογία τριγώνου, δεδομένου ότι οδηγεί σε μεγαλύτερους χρόνους αποκατάστασης, καθώς και σε ρεύματα τυλιγμάτων, τα οποία εμφανίζονται μετά την αποκατάσταση να έχουν μεγαλύτερη κύμανση από την ονομαστική.

### 3.4 Συνολικό Ηλεκτρικό Μοντέλο για το Κύκλωμα Εκκίνησης

Στη συνέχεια της διαδικασίας ελέγχου της συνολικής διάταξης, συνδυάστηκε το κύκλωμα οδήγησης του ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα, με το μοντέλο του μετατροπέα, ο οποίος είναι υπεύθυνος για την παραγωγή σήματος ελεγχόμενου επιπέδου, το οποίο μπορεί να γίνει αντιληπτό από την συσκευή του PLC, έτσι ώστε το τελευταίο να θεωρηθεί ως το σήμα έναυσμα (triggering signal) για τη διαδικασία μεταλλαγής των relays, που ελέγχουν τη συνδεσμολογία τυλιγμάτων του κινητήρα.

Κατά τη διαδικασία συναρμογής των δύο κυκλωμάτων, το τμήμα που προσομοιώνει τη λειτουργία του κινητήρα (ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα), αποσυνδέθηκε, εφόσον στη θέση του συνδέθηκε το πραγματικό ηλεκτρικό ισοδύναμο, μέσω του μοντέλου του κινητήρα. Επιπλέον, για καλύτερη λειτουργία, η αντίσταση (αισθητήρας – R\_cur), επάνω στην οποία αναλογούσε η αναπτυσσόμενη τάση, αυξήθηκε.

Το συνολικό κύκλωμα του συστήματος παρουσιάζεται στο σχήμα που ακολουθεί:



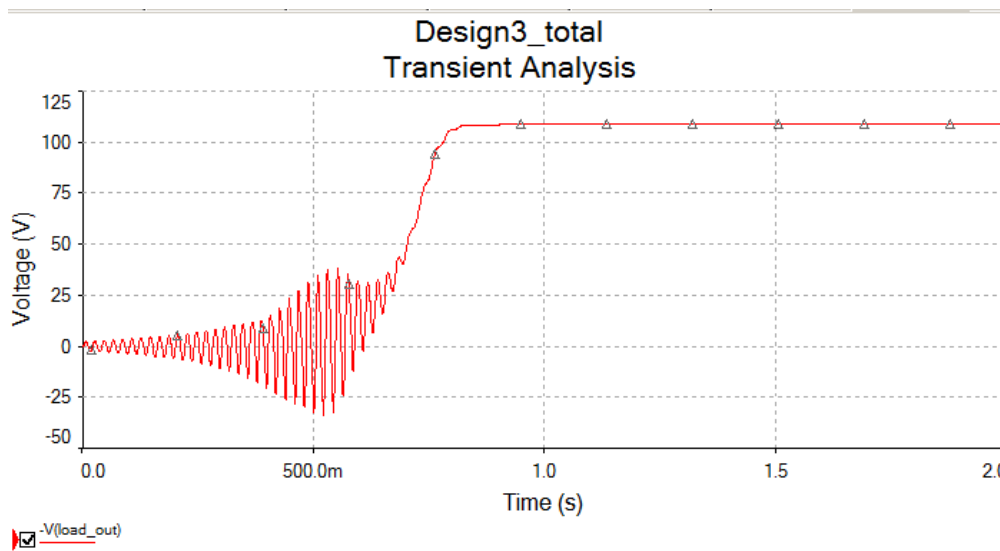
Σχήμα 30: Συνολικό ηλεκτρικό μοντέλο ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα και κύκλωμα μετατροπέα

Με βάση τη δημιουργία του συνολικού κυκλώματος, θα μπορέσουμε να ελέγξουμε συνολικά, τη λειτουργία του κυκλώματος, αλλά και του μετατροπέα, κάνοντας μικρορυθμίσεις στον τελευταίο, για την διασφάλιση της λειτουργίας του. Επιπλέον, ο μετατροπέας θα λειτουργήσει με όσο το δυνατόν πιο αξιόπιστα σήματα τάσεων και ρευμάτων, εφόσον λαμβάνει αυτά από το υποσύστημα του μοντέλου του κινητήρα, καθιστώντας τη διαδικασία της προσομοίωσης και ρύθμισης αξιόπιστη. Στην παράγραφο που ακολουθεί, θα εφαρμοστούν διαδικασίες προσομοίωσης της μεταβατικής χρονικής συμπεριφοράς του συνολικού συστήματος.

### 3.4.1 Προσομοίωση του Συνολικού Κυκλώματος Εκκίνησης

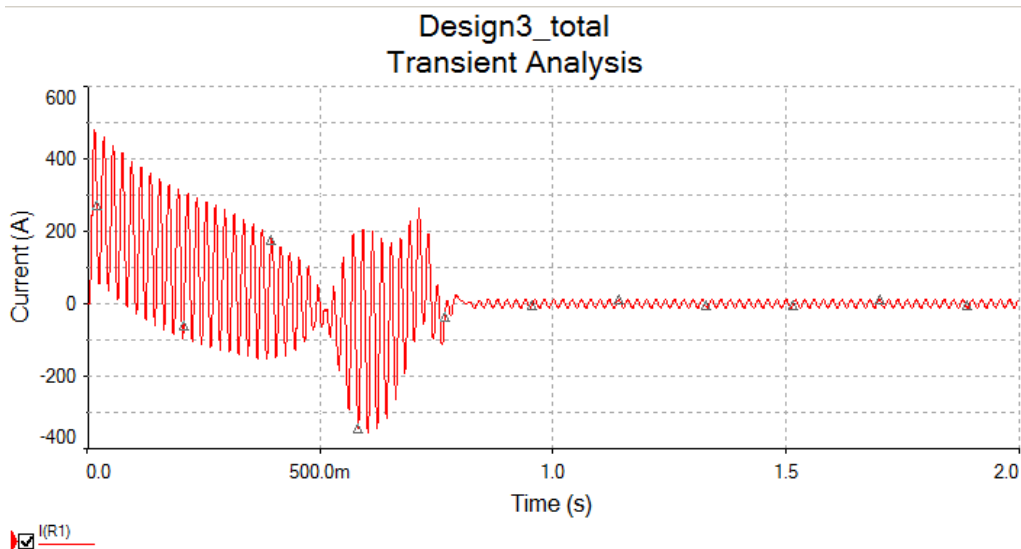
Για τον έλεγχο της ορθότητας λειτουργίας, οι διακόπτες έχουν αρχικά τεθεί σε κατάσταση όπου, τα τυλίγματα των πηνίων είναι σε συνδεσμολογία αστέρα (default). Στόχος, κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης μεταβατικού χρόνου είναι, να παρατηρήσουμε τις συνθήκες δημιουργίας του ψηφιακού σήματος, σε συμφωνία με την επίτευξη της ονομαστικής ροπής στην έξοδο του κινητήρα. Επιπλέον, θα πρέπει να διασφαλιστεί ότι, το κύκλωμα του μετατροπέα δεν επηρεάζει τη λειτουργία του κινητήρα, μεταβάλλοντας τα ρεύματα και τις τάσεις του τελευταίου, κατά τον ίδιο τρόπο, όπως μία μετρητική διάταξη δεν θα πρέπει να επιδρά επί του υπό μέτρηση κυκλώματος. Για το λόγο αυτό, στη διαδικασία της προσομοίωσης, θα ελέγξουμε τη δημιουργία των κυματομορφών, τόσο της τάσης επί του φορτίου, όσο και του ρεύματος των τυλιγμάτων στον κινητήρα και το παραγόμενο σήμα από το μετατροπέα.

Από τη διαδικασία εφαρμογής μεταβατικής χρονικής απόκρισης για το κύκλωμα, προέκυψαν οι κυματομορφές που ακολουθούν στα σχήματα:



Σχήμα 31: Συνολική προσομοίωση κυκλώματος. Σήμα τάσεως εξόδου κινητήρα

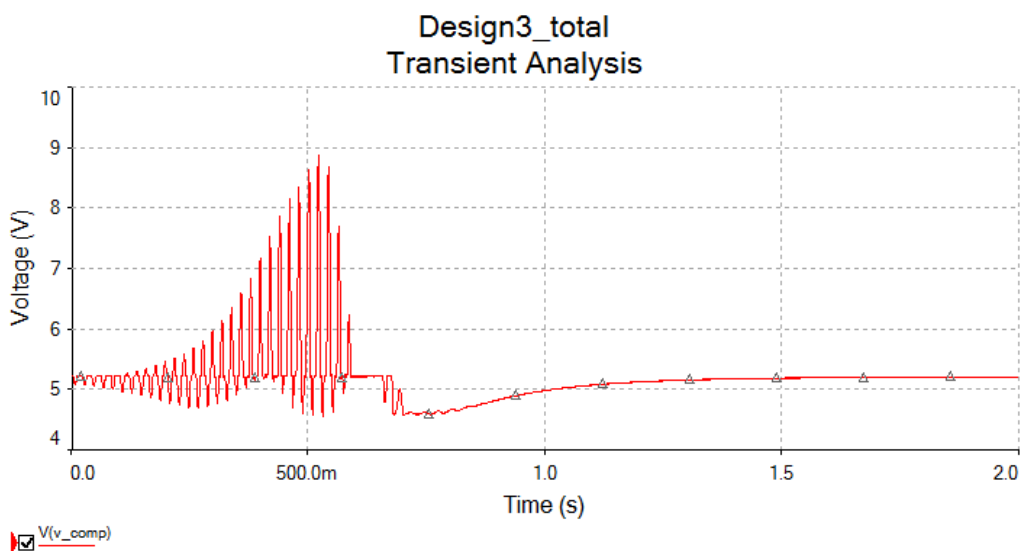




Σχήμα 32: Συνολική προσομοίωση κυκλώματος. Ρεύμα τυλίγματος κινητήρα

Από την παρουσίαση των κυματομορφών για την αναπτυσσόμενη τάση επί της εξόδου του κινητήρα, καθώς και από το αναπτυσσόμενο ρεύμα επί των τυλιγμάτων του κινητήρα, παρατηρούμε ότι τα τελευταία δε μεταβλήθηκαν με την προσθήκη του κυκλώματος του μετατροπέα, κατά τη διασύνδεση του με το σύστημα. Κατά συνέπεια, το κύκλωμα του μετατροπέα, δεν επηρεάζει την ορθή λειτουργία της διατάξεως του ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα, όπως αναμένεται κατά την προσθήκη οποιουδήποτε κυκλώματος μετρήσεων επί ενός συστήματος.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται στο σχήμα που ακολουθεί το παραγόμενο σήμα από το κύκλωμα του μετατροπέα:

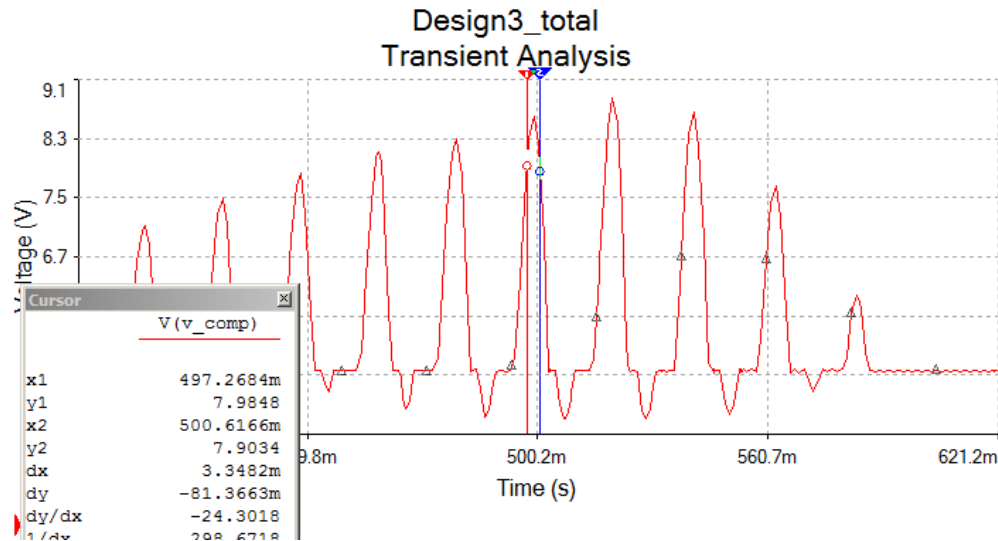


Σχήμα 33: Συνολική προσομοίωση κυκλώματος. Σήμα μετατροπέα

Από την προσομοίωση παρατηρούμε ότι, το κύκλωμα του μετατροπέα παρουσιάζει παλμούς ικανοποιητικού επιπέδου (δηλ.  $>8\text{ V}$  που αποτελεί τη συνθήκη για την ανίχνευση ψηφιακού σήματος εισόδου από το PLC), γύρω στη χρονική γειτονιά των  $0.5 - 0.55\text{ sec}$ . Πριν από αυτό το χρονικό διάστημα, το κύκλωμα του μετατροπέα, είτε δεν παράγει παλμούς, είτε το πλάτος αυτών είναι σημαντικά χαμηλότερο από την τάση ανίχνευσης του

PLC, οπότε αυτοί να λογίζονται ως λογικό '0' για το σύστημα. Η συγκεκριμένη χρονική στιγμή, αποτελεί την έναυση για τη συσκευή του PLC, έτσι ώστε να αλλάξει την κατάσταση των relays που ελέγχουν τα τυλίγματα πηνίων του κινητήρα, από αστέρα σε τρίγωνο.

Επικεντρώνοντας, για να εντοπίσουμε με ακρίβεια τα χαρακτηριστικά των παλμών του μετατροπέα, εξετάζουμε το χρονικό διάστημα γύρω στα 0.5 sec. Τα χαρακτηριστικά του οποίου, παρουσιάζονται στο σχήμα που ακολουθεί:



Σχήμα 34: Συνολική προσομοίωση κυκλώματος. Έμφαση στο σήμα μετατροπέα

Με χρήση των probes μέτρησης για πλάτος και χρόνο, που το περιβάλλον Multisim® υποστηρίζει, ανιχνεύουμε ότι η χρονική διάρκεια αυτών των παλμών ξεπερνά τα 3ms, χρονικό διάστημα ικανοποιητικό για την αντίδραση της συσκευής του PLC.

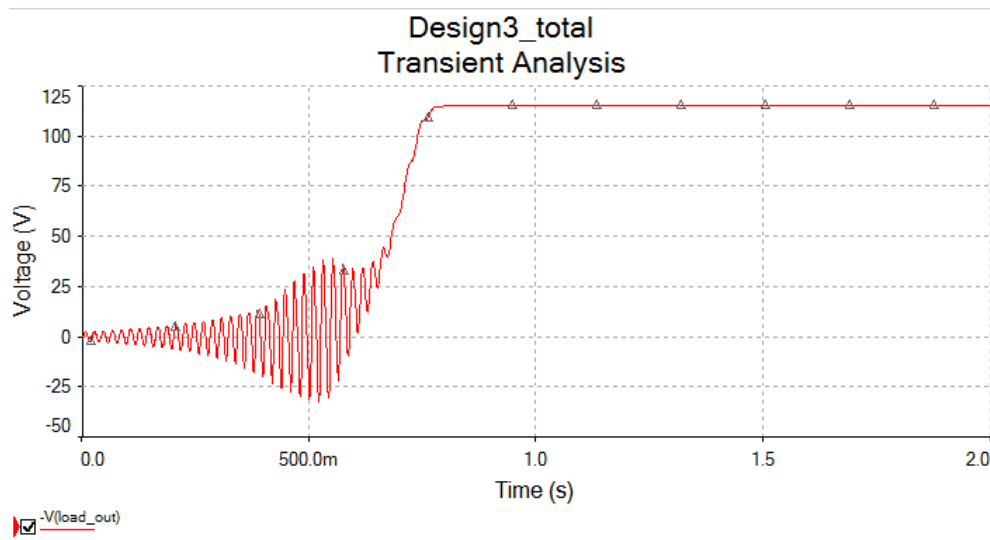
### 3.5 Έλεγχος Ευσταθούς Λειτουργίας με αλλαγή Φορτίου

Στην συνέχεια, μελετήσαμε την ευσταθή συμπεριφορά της συνολικής διάταξης σε ενδεχόμενη μεταβολή του φορτίου. Το νέο φορτίο που συνδέθηκε στον άξονα του κινητήρα είναι 4πλάσιο του αρχικού, δηλαδή παρουσιάζει τιμή ροπής 200 Nm.

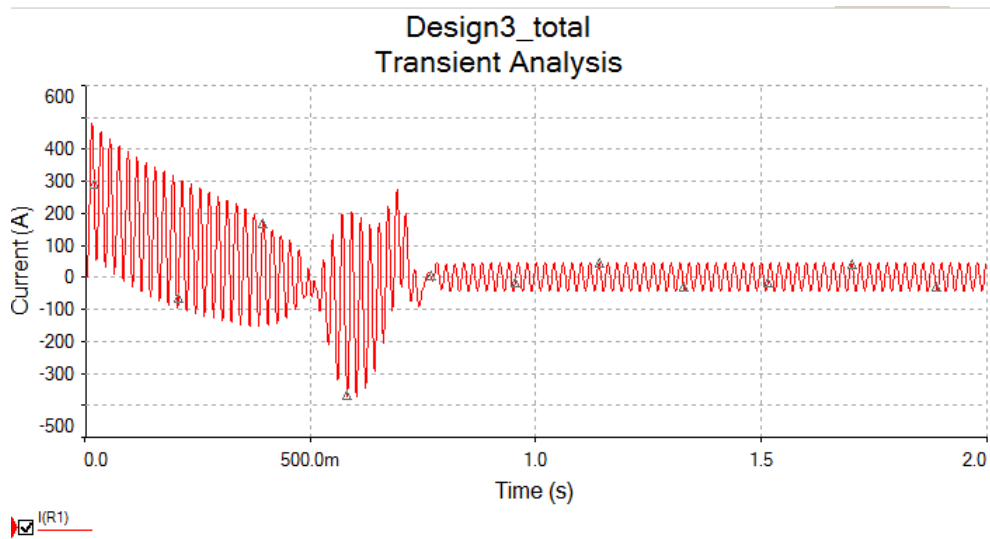
#### 3.5.1 Προσομοίωση του Συνολικού Κυκλώματος Εκκίνησης

Για τον έλεγχο της ορθότητας λειτουργίας, οι διακόπτες έχουν αρχικά τεθεί σε κατάσταση όπου, τα τυλίγματα των πηνίων είναι σε συνδεσμολογία αστέρα. Στόχος, κατά την προσομοίωση με το νέο φορτίο είναι, η κατάδειξη της μεταβολής των χρονικών στιγμών για την αποκατάσταση της ονομαστικής ροπής λειτουργίας του κινητήρα. Η προσομοίωση αφορά στην τάση φορτίου, στο ρεύμα των τυλιγμάτων πηνίου, καθώς και στο

σήμα μετατροπής από τη διάταξη του μετατροπέα. Οι κυματομορφές παρουσιάζονται στα σχήματα που ακολουθούν:

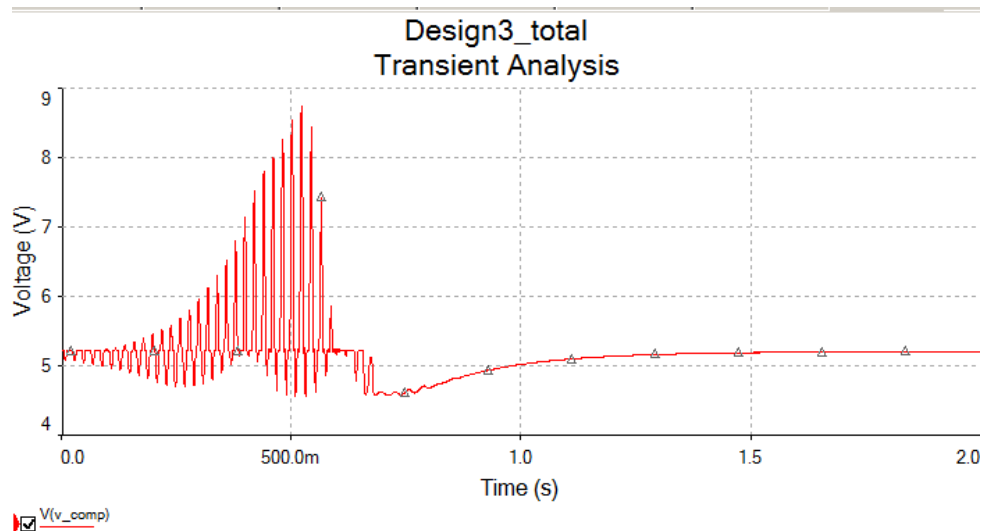


Σχήμα 35: Σήμα τάσεως εξόδου κινητήρα για φορτίο 200 Nm



Σχήμα 36: Ρεύμα τυλίγματος κινητήρα για φορτίο 200 Nm

Από τις κυματομορφές παρατηρούμε ότι, η αποκατάσταση φορτίου έχει συμβεί στη χρονική γειτονιά των 0.6 – 0.65 sec. Ομοίως, αυτό παρουσιάζεται και στο ρεύμα των τυλιγμάτων του πηνίου του ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα. Όμως, ο κινητήρας διαθέτει αρκετή ισχύ για την περιστροφή του φορτίου, οπότε αποκαθιστά και πάλι η απαιτούμενη γωνιακή ταχύτητα περιστροφής σε σύντομο χρονικό διάστημα. Το απαιτούμενο ρεύμα για τη διατήρηση της ταχύτητας περιστροφής, παρουσιάζει μεγαλύτερη διακύμανση, σε σχέση με πριν, ακόμη και για τη μόνιμη κατάσταση, όπου έχει αποκατασταθεί η ισορροπία. Το παραγόμενο σήμα από τον μετατροπέα παρουσιάζεται στο σχήμα που ακολουθεί:



Σχήμα 37: Σήμα μετατροπέα για φορτίο 200 Nm

Ομοίως, παρατηρούμε μία μικρή ολίσθηση της τάξης των 50 ms για το παραγόμενο σήμα ανίχνευσης της αποκατάστασης ισορροπίας από τον μετατροπέα. Τα επίπεδα του σήματος, διατηρούνται εξίσου πάνω από την τάση των 8 V, όπου η συσκευή PLC ανιχνεύει λογική τιμή '1' για το εισερχόμενο σήμα, οδηγώντας το PLC σε μεταβολή των σημάτων για τον έλεγχο των relays, που αφορούν στη συνδεσμολογία τυλιγμάτων πηνίων από αστέρα σε τρίγωνο.

Επομένως, οι μεταβολές στη λειτουργία του συστήματος κινητήρα – μετατροπέα είναι εμφανείς για μία ισοδύναμη μεταβολή φορτίου. Το σύστημα είναι εύρωστο, έτσι ώστε τυχόν τέτοιες μεταβολές, δε μεταβάλλουν την ικανότητα λειτουργίας του, η οποία παραμένει αποδοτική, με τις χρονικές επιδράσεις οι οποίες αναμένονταν από τη μεταβολή του φορτίου.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>

### 4 Επιδόσεις Συνολικού Συστήματος

Η διάταξη εκκίνησης και παρακολούθησης, καθώς και ο τριφασικός ασύγχρονος κινητήρας, συνιστούν ένα συνολικό σύστημα, του οποίου τα τμήματα αλληλεπιδρούν, με στόχο τη διασφάλιση σταθερής ροπής φορτίου. Το σύστημα παρακολουθεί τη διαδικασία εκκίνησης και λειτουργίας και παρεμβαίνει, με σήματα μεταλλαγής επί των relays τυλιγμάτων, όταν η ροπή του φορτίου έχει αποκατασταθεί ή διαταραχθεί από εξωτερικό παράγοντα. Στην συνέχεια, θα αναλύσουμε τις επιδόσεις των προσομοιώσεων που εκτελέστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, διακρίνοντας δύο φάσεις για τη διαδικασία παρέμβασης: τη φάση εκκίνησης και τη φάση λειτουργίας υπό διαταραχή.

Η μελέτη των επιδόσεων για το συνολικό σύστημα, δεν θα βασιστεί μόνο στη χρονική ανιχνευτική ικανότητα του συστήματος, να διακρίνει τις χρονικές στιγμές ανάγκης παρέμβασης, αλλά θα επεκταθεί και σε χαρακτηριστικά τάσεως – ρεύματος και απορρόφησης ισχύος, όπως αυτά συμβαίνουν στη φάση επιτάχυνσης, κατά την ομαλή λειτουργία και κατά τη φάση μεταλλαγής. Επιπλέον, έχει ενδιαφέρον να εξεταστεί η επίδραση των δημιουργούμενων αρμονικών στο ρεύμα του κινητήρα, καθώς αποτελεί ενδεικτική ομαλής λειτουργίας και καλής προσαρμογής του φορτίου στην τροφοδοσία. Οι διαταραχές στις αρμονικές, συνιστούν επίσης έναν παράγοντα ο οποίος, όταν το φορτίο του κινητήρα είναι σημαντικό, μπορεί να επιδράσει στο σύστημα τροφοδοσίας (γεννήτρια), δημιουργώντας ένα συνολικό φαινόμενο, που εμπλέκει και το σύστημα τροφοδοσίας.

#### **4.1 Επίδοση Συστήματος κατά τη Φάση Εκκίνησης**

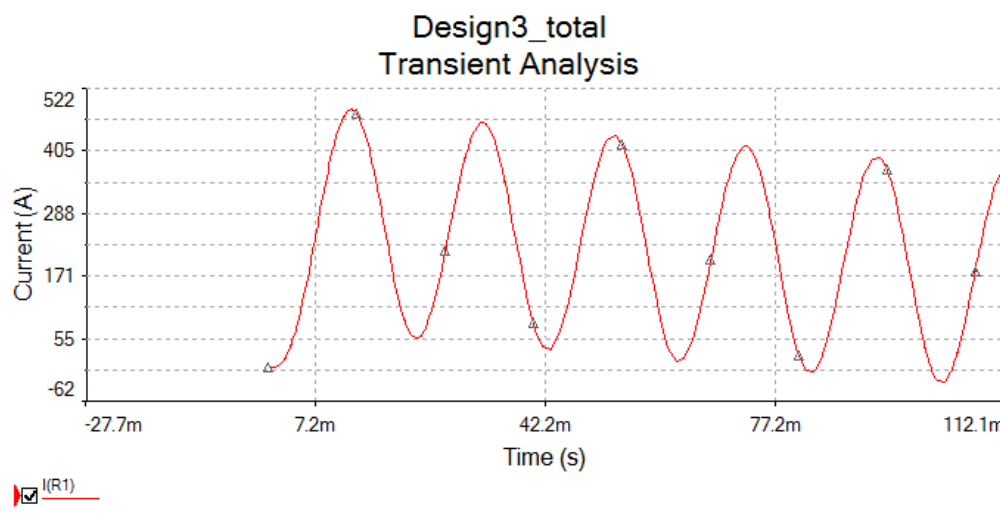
Στην φάση εκκίνησης αρχικά, το συνολικό σύστημα τελεί σε ηρεμία, θεωρώντας ότι ο κινητήρας δεν περιστρέφεται. Με το κλείσιμο του διακόπτη και την παροχή ισχύος στον κινητήρα, αρχικά θεωρούμε ότι οι διακόπτες μεταλλαγής έχουν προεπιλέξει συνδεσμολογία τυλίγματος αστέρα. Η μελέτη των επιδόσεων του συνολικού συστήματος κατά τη φάση εκκίνησης, έγινε με χρήση δύο διαφορετικών φορτίων. Το πρώτο φορτίο ήταν της τάξης των 50 Nm, ενώ το δεύτερο φορτίο αυξήθηκε σε τιμή 4πλάσια δηλ. 200 Nm. Και στις δύο περιπτώσεις, η ροπή του φορτίου ήταν σταθερή.

Από τη μελέτη των προσομοιώσεων παρατηρήσαμε ότι τα ρεύματα των τυλιγμάτων, εμφάνισαν ρεύμα της τάξης των 400 A για τη γρήγορη αποκατάσταση της περιστροφής του κινητήρα. Από μελέτες και πειραματικές μετρήσεις, το ιδιαίτερο αυτό χαρακτηριστικό είναι αναμενόμενο και πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη, κατά το σχεδιασμό των κυκλωμάτων υποστήριξης ενός κινητήρα, καθώς και για τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά και την απόδοση ισχύος, μέσω των καλωδίων που τροφοδοτούν τον κινητήρα. Επιπλέον το υπερ-ρεύμα, το οποίο αναπτύσσεται κατά τη φάση εκκίνησης, θα πρέπει να μπορεί να τροφοδοτήσει τον κινητήρα χωρίς την παρέμβαση των ασφαλειών προστασίας του

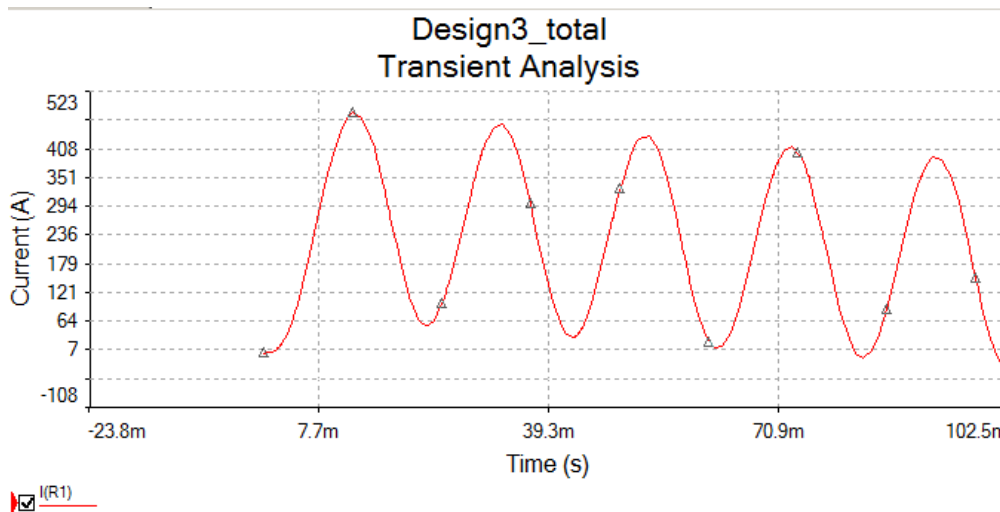
συστήματος. Και στις δύο περιπτώσεις, τα ρεύματα ήταν συγκρίσιμα, ξεπερνώντας το θεωρητικά αναμενόμενο του 7πλάσιου ονομαστικού ρεύματος λειτουργίας.

Με βάση τα χαρακτηριστικά και τη τροφοδοσία του κινητήρα, από θεωρητικής πλευράς, αναμενόταν ονομαστικό ρεύμα της τάξης των 33 A. Το γεγονός αυτό, οφείλεται στο συνολικό κύκλωμα κινητήρα και μετατροπέα, σε συνδυασμό με άλλα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του μοντέλου προσομοίωσης.

Στην συνέχεια, στο σχήμα που ακολουθεί, θα παρουσιαστεί η κύμανση του ρεύματος στα τυλίγματα του κινητήρα, κατά τις φάσεις εκκίνησης, δηλαδή με έμφαση στην αρχική χρονική στιγμή  $t=0$ , όπου το σύστημα συνδέεται στην παροχή ισχύος.



Σχήμα 38: Χρονικό διάγραμμα ρεύματος κινητήρα κατά τη φάση εκκίνησης (Φορτίο 50 Nm)

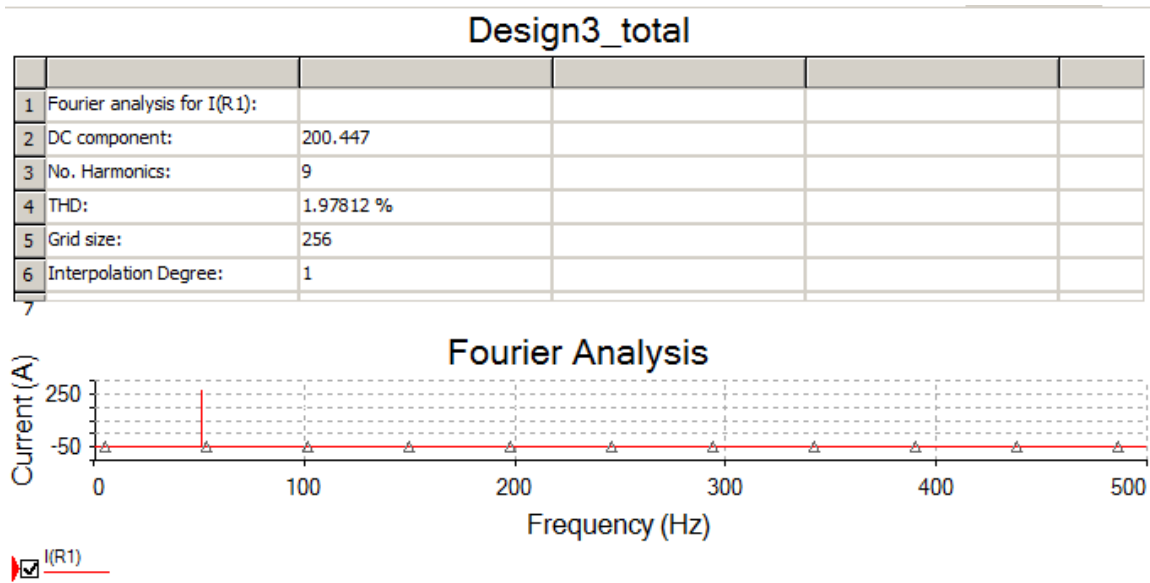


Σχήμα 39: Χρονικό διάγραμμα ρεύματος κινητήρα κατά τη φάση εκκίνησης (Φορτίο 200 Nm)

Από το διάγραμμα παρουσιάζεται μία γρήγορη κύμανση των ρευμάτων, η οποία κατά πλάτος μεταβάλλει το ρεύμα σε επίπεδο άνω των 450 A, με ταχύτητα μεταβολής της τάξης των 20 ms (συχνότητα η οποία συμπίπτει με τη συχνότητα παροχής ισχύος από το τριφασικό σύστημα των 50 Hz). Τα ρεύματα στη χρονική εξέλιξη βαίνουν μειούμενα, ενώ η ταχύτητα κύμανσης τους δε φαίνεται να μεταβάλλεται σημαντικά.

Στην συνέχεια, εξετάζουμε την ύπαρξη αρμονικών στο ρεύμα των τυλιγμάτων του κινητήρα, με στόχο την ανάδειξη της απορρόφησης ισχύος, καθώς και των διαταραχών που

η φάση εκκίνησης εισάγει στο σύστημα τροφοδοσίας. Για το λόγο αυτό, η φασματική ανάλυση θα περιοριστεί στο χρονικό διάστημα  $t=0$  έως  $0.1$  sec, στο μεγαλύτερο φορτίο των 200 Nm. Τα αποτελέσματα από τη διαδικασία ανάλυσης αρμονικών (Fourier analysis), παρουσιάζεται στο διάγραμμα που ακολουθεί:

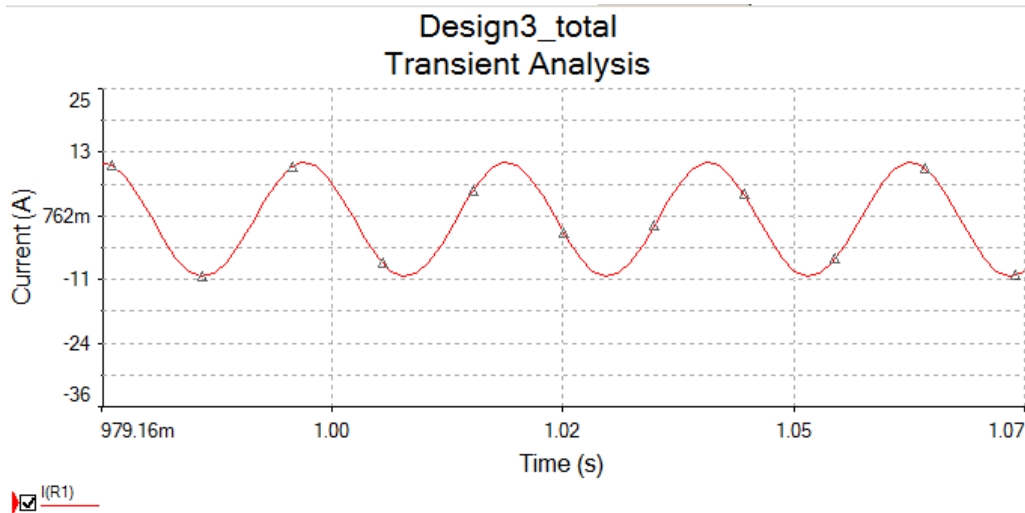


Σχήμα 40: Ανάλυση αρμονικών του ρεύματος τυλίγματος στη φάση εκκίνησης

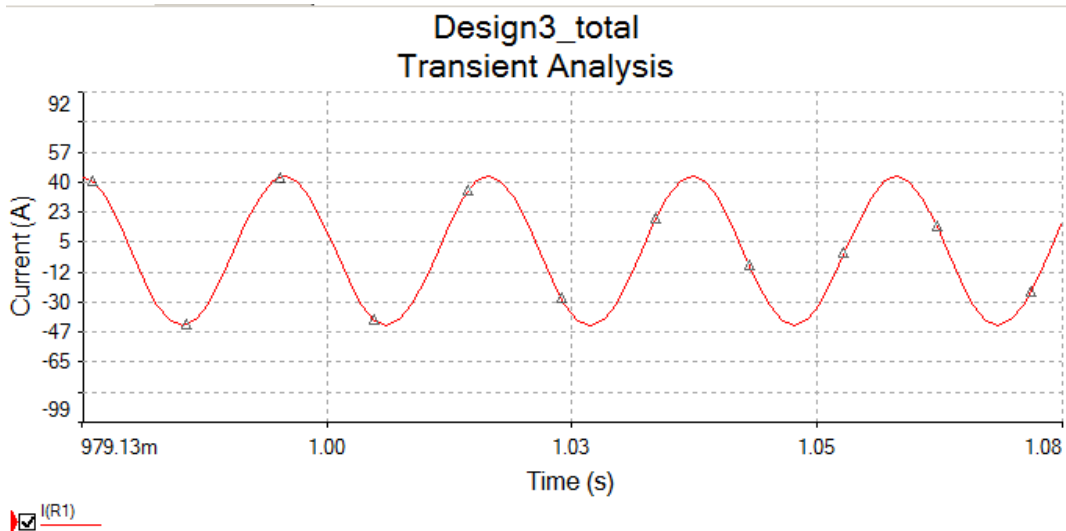
Από τη φασματική ανάλυση, στο σήμα του επαγόμενου ρεύματος στα τυλίγματα κατά την φάση εκκίνησης, παρατηρούμε ότι, η κυρίαρχη συχνότητα παραμένει η συχνότητα των 50 Hz (συχνότητα τροφοδοσίας του δικτύου). Η Συνολική Αρμονική Παραμόρφωση (Total Harmonic Distortion – THD) παρουσιάζει τιμή μόλις 1.9%, η οποία είναι εξαιρετικά μικρή και φανερώνει καλή απορρόφηση ισχύος από το συνολικό κύκλωμα του κινητήρα και του μετατροπέα.

#### 4.2 Επίδοση Συστήματος κατά τη Φάση Λειτουργίας

Στη φάση λειτουργίας, ο ασύγχρονος τριφασικός κινητήρας έχει αποκαταστήσει τη στρεπτική ικανότητα του άξονα, οπότε το απορροφώμενο ρεύμα (και κατά συνέπεια η παρεχόμενη ισχύς από την τροφοδοσία του), καλείται να διατηρήσει τη ροπή του φορτίου. Τα επίπεδα ισχύος είναι σαφώς χαμηλότερα, εφόσον έχει αποκατασταθεί το μεταβατικό φαινόμενο. Τα τυλίγματα πηνίου είναι σε αστέρα, έτοιμα για μεταλλαγή σε τρίγωνο. Τα διαγράμματα που ακολουθούν, δίνουν τη μεταβατική χρονική απόκριση του απορροφώμενου ρεύματος στα τυλίγματα, για τα δύο φορτία της προσομοίωσης (50 Nm και 200 Nm αντίστοιχα).



Σχήμα 41: Χρονικό διάγραμμα ρεύματος κινητήρα κατά τη φάση λειτουργίας (φορτίο 50 Nm)

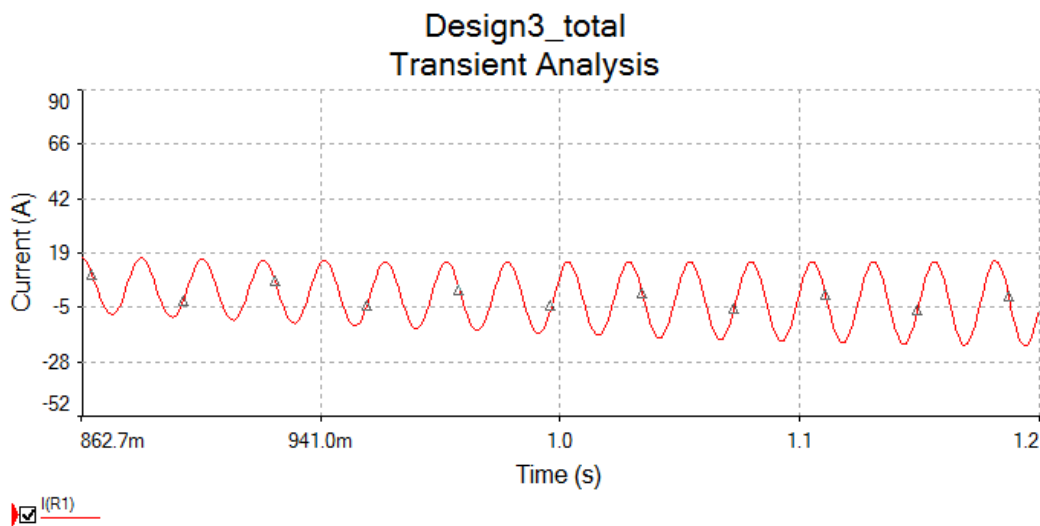


Σχήμα 42: Χρονικό διάγραμμα ρεύματος κινητήρα κατά τη φάση λειτουργίας (φορτίο 200 Nm)

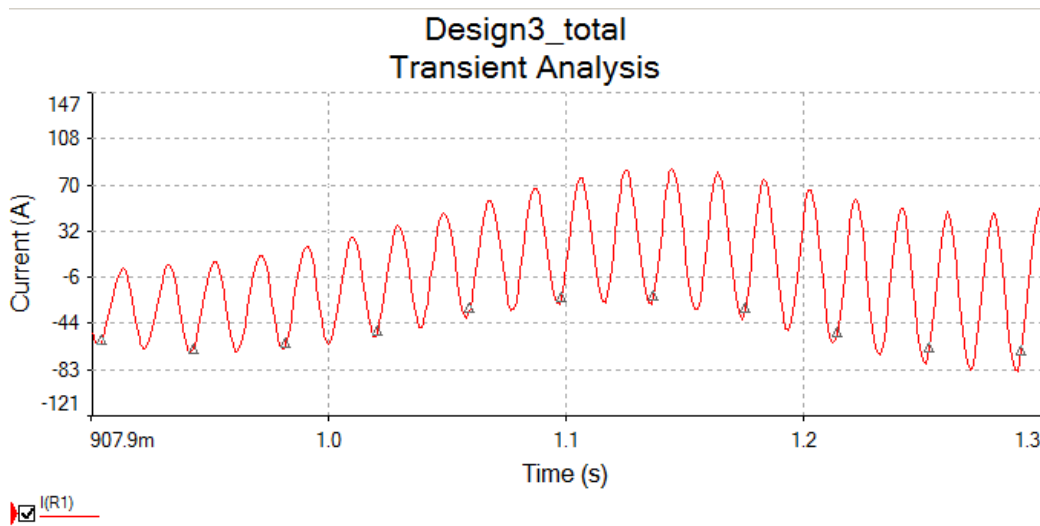
Από τα δύο φορτία παρατηρούμε ότι, τα επίπεδα του ρεύματος διατηρούν πλάτος σε 13 A και 43 A αντίστοιχα, όπως αναμένεται μεσοσταθμικά. Οι ημιτονοειδείς κυματοσείες της απορρόφησης, αναφέρονται σε βασική αρμονική των 50 Hz, χωρίς την ύπαρξη άλλων αρμονικών. Το τελευταίο συντείνει στη βελτιστοποιημένη συναρμογή φορτίου του κυκλώματος, το οποίο απορροφά βέλτιστα τα απαιτούμενα ποσά ισχύος για τη διατήρηση της γωνιακής ταχύτητας του άξονα.

Στην συνέχεια, θα παρατηρήσουμε τα επίπεδα του ρεύματος μετά τη φάση μεταλλαγής και για τα δύο φορτία:





Σχήμα 43: Χρονικό διάγραμμα ρεύματος κινητήρα κατά τη φάση λειτουργίας μετά τη μεταλλαγή τυλιγμάτων σε τρίγωνο (φορτίο 50 Nm)



Σχήμα 44: Χρονικό διάγραμμα ρεύματος κινητήρα κατά τη φάση λειτουργίας μετά τη μεταλλαγή τυλιγμάτων σε τρίγωνο (φορτίο 200 Nm)

Από τα διαγράμματα κατά τις φάσεις μεταλλαγής των τυλιγμάτων παρατηρούμε ότι, τα απορροφώμενα ρεύματα στα τυλίγματα εμφανίζουν μία τοπική διαταραχή, η οποία τείνει να αποκατασταθεί, καθώς ο χρόνος λειτουργίας προσ αυξάνει. Από τη διαδικασία της προσομοίωσης παρατηρούμε ότι αυτό είναι πιο έντονο, καθώς το φορτίο προς χειρισμό είναι μεγαλύτερο, ενώ η εμφανιζόμενη διαταραχή είναι σαφώς μικρότερη για το χαμηλότερο φορτίο.

### 4.3 Συμπεράσματα από τις Επιδόσεις

Από τις επιδόσεις της συνολικής διάταξης μετατροπέα και μοντέλου ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα, με χρήση τυλιγμάτων σε αστέρα και τρίγωνο, καταδείχθηκε η λειτουργία για την αποκατάσταση στρεπτικής ροπής στον άξονα του κινητήρα, σε βέλτιστο χρόνο. Ο κινητήρας εμφανίζεται να απορροφά περισσότερη ισχύ, όσο μεγαλύτερο είναι το

συνδεδεμένο φορτίο επί του άξονα του. Καθώς το σύστημα διανύει τις φάσεις εκκίνησης και μεταβαίνει στην κανονική λειτουργία, για να μετρήσουμε τις επιδόσεις του συστήματος, μελετήσαμε τα απορροφώμενα ρεύματα στα τυλίγματα του κινητήρα. Η διαδικασία προσομοίωσης κατέδειξε ότι, για σημαντικό χρονικό διάστημα, τα αναπτυσσόμενα ρεύματα μπορεί να ξεπερνούν το εμπειρικά καθορισμένο όριο του 7πλάσιου ονομαστικού ρεύματος, γεγονός που πρέπει να ληφθεί υπόψη, τόσο για την ικανότητα οδήγησης σε ρεύμα από την παροχή τροφοδοσίας, όσο και για τον καθορισμό των υπερ-ρευμάτων για τις ασφάλειες και τους αποζεύκτες που θα χρησιμοποιηθούν, για τη διασφάλιση λειτουργίας των γραμμών τροφοδοσίας. Παρατηρήσαμε ότι, τα ρεύματα αποκαθίστανται βέλτιστα στην ονομαστική προβλεπόμενη τιμή τους, μετά την πάροδο του χρόνου επιτάχυνσης του κινητήρα. Η ανάλυση συχνοτήτων των κυματομορφών κατέδειξε ότι, το συνολικό σήμα συνίσταται κατά κύριο λόγο από τη βασική αρμονική του δικτύου (της τάξης των 50 Hz), ενώ ανώτερης τάξης αρμονικές είναι καταπιεσμένες σε μέγιστο βαθμό, δεδομένου ότι ο δείκτης Συνολικής Αρμονικής Παραμόρφωσης (THD) είναι μικρότερος του 2%. Το τελευταίο καταδεικνύει ότι, το φορτίο είναι προσαρμοσμένο στο δίκτυο και η απορρόφηση ισχύος γίνεται μονοκατευθυντικά και με ομαλό τρόπο, χωρίς να διαταράσσει τη λειτουργία του συνολικού περιβάλλοντος και κατά συνέπεια και της γεννήτριας τροφοδοσίας.

Αξίζει επίσης να επισημανθεί ότι, μέσω της προσομοίωσης καταδεικνύεται ότι, η διαδικασία μεταλλαγής των τυλιγμάτων, όταν το σύστημα έχει περιέλθει σε μόνιμη κατάσταση είναι ομαλή και δεν διαταράσσει σημαντικά τα ρεύματα των τυλιγμάτων, ειδικότερα για τα χαμηλής κλίμακας φορτία (50 Nm). Για τα πιο ισχυρά φορτία, η προσομοίωση κατέδειξε ότι, το επαγόμενο ρεύμα στα τυλίγματα διαταράσσεται προσωρινά στη φάση μεταλλαγής, δημιουργώντας μία μικρή υπερύψωση του ρεύματος απορρόφησης, η οποία όμως τείνει να αποκατασταθεί ομαλά προς την ονομαστική τιμή, με την πάροδο μικρού χρονικού διαστήματος. Αύξηση του ρεύματος επί των τυλιγμάτων, αναμένεται να οδηγήσει το κύκλωμα του μετατροπέα στην γέννηση εκ νέου παλμών, για τη μεταλλαγή τυλιγμάτων. Η συγκεκριμένη διαδικασία δεν προσομοιώθηκε και είναι πλήρης συνάρτηση του κώδικα χειρισμού, ο οποίος θα χρησιμοποιηθεί για τον προγραμματισμό του PLC.

Η συνολική λειτουργία του συστήματος κρίνεται εξαιρετικά ικανοποιητική, συνταιριάζοντας τόσο τμήματα ισχύος του κινητήρα, με επίπεδα ψηφιακών σημάτων. Επιπλέον, η προτεινόμενη διάταξη επιλύει με βέλτιστο τρόπο το χρονικό καθορισμό της θέσης αποκατάστασης ροπής φορτίου, αποφεύγοντας εμπειρικές μεθόδους, που βασίζονται σε χρονικά διαστήματα, τα οποία μπορεί να είναι ασαφή, μεταβαλλόμενα, ή υποκείμενα σε συνθήκες λειτουργίας διαταραχών, οι οποίες παραλλάσσουν τους χρόνους λήψης απόφασης.

Στο κεφάλαιο που ακολουθεί, θα παρουσιαστούν τα γενικότερα συμπεράσματα από την εφαρμογή της μεθοδολογίας σχεδιασμού και τις επιδόσεις του συστήματος, συμβάλλοντας τόσο στο να καταδείξει το βέλτιστο τρόπο λειτουργίας, καθώς και στο να παρουσιάσει μελλοντικές επεκτάσιμες εφαρμογές που μπορούν να γίνουν με βάση την προτεινόμενη διάταξη.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup>

### 5 Γενικά Συμπεράσματα επί του Ελέγχου Κινητήρων

Η προτεινόμενη διάταξη για τον έλεγχο του ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα, βασιζόταν στη μεταλλαγή των κυκλωμάτων τυλιγμάτων πηνίου για τον κινητήρα, από αστέρα σε τρίγωνο. Η διάταξη του αστέρα παρείχε την απαιτούμενη τάση για την ταχεία αποκατάσταση της γωνιακής ταχύτητας περιστροφής του φορτίου, ενώ η μεταλλαγή σε κατάσταση τριγώνου, αναφέρεται κυρίως σε σταθερές τάσεις πιο μικρής κλίμακας με δυνατότητα μεταβολής του ρεύματος. Ο χειρισμός της διεργασίας μεταλλαγής των κυκλωμάτων είναι ευρείας χρήσης και έχει τύχει πάρα πολλών διαφορετικών εφαρμογών, οι οποίες, όπως παρουσιάστηκε και στα αρχικά κεφάλαια της συγκεκριμένης εργασίας, κυρίως βασίζονται στη διαδικασία της μεταλλαγής σε χρονικά όρια, χωρίς να λαμβάνουν υπόψη τις ακριβείς συνθήκες λειτουργίας του κινητήρα, κατά την φάση της μεταλλαγής.

Στην προτεινόμενη διάταξη, χρησιμοποιήθηκε ειδικό κύκλωμα ανίχνευσης της κατάστασης ρεύματος φάσης του κινητήρα, με στόχο να ανιχνεύσει τότε το συγκεκριμένο ρεύμα περιέρχεται σε κατάσταση ισορροπίας, η οποία δικαιολογεί τη δυνατότητα μετάβασης. Η διάταξη όμως δε βασίζεται απλά σε μία διαδικασία μεταλλαγής των κυκλωμάτων κατά την φάση εκκίνησης, καθώς με χρήση συσκευής PLC, μπορεί να παρακολουθεί διασυνεχώς τη λειτουργία του κινητήρα και να παρέμβει και πάλι με την αντίστροφη διαδικασία, στην περίπτωση που για οποιονδήποτε λόγο υπάρξουν μεταβολές της ροπής του φορτίου ή του άξονα του κινητήρα (διαταραχές).

Η χρήση του PLC διευκολύνει σημαντικά τον χειρισμό και τον έλεγχο μίας τέτοιας διάταξης διότι, δίνει μία ανοικτή προγραμματιστική πλατφόρμα, η οποία μπορεί να συνδυάσει τη λειτουργικότητα του PLC, με μία πληθώρα άλλων εφαρμογών (π.χ. έλεγχος ρευμάτων του κινητήρα, εντοπισμός χρονικών σημείων διαταραχής φορτίου, καταγραφή τυχαίων μεταβολών, κλπ). Τα PLCs, ως προγραμματιζόμενες συσκευές, είναι αρκετά ώριμες τεχνολογικά λύσεις για την υποστήριξη βιομηχανικού ελέγχου, καθώς και ελέγχου μικρής κλίμακας. Όπως παρουσιάστηκε, ένα PLC διαθέτει την απαιτούμενη επεξεργαστική ικανότητα, καθώς και το απαιτούμενο σύνολο των διεπαφών για την παρακολούθηση των σημάτων μιας διεργασίας, για την ανάληψη χειρισμών. Από την πληθώρα κατασκευαστών και συσκευών PLC, ο χρήστης μπορεί να εντοπίσει λύσεις, οι οποίες μπορούν να χειριστούν απευθείας AC σήματα (πιο μεγάλης ισχύος, σε σχέση με τα κλασικά ψηφιακά σήματα χαμηλού επιπέδου τάσης). Εντούτοις, όπως εξηγήθηκε και στην εισαγωγική παρουσίαση της διάταξης, προτιμήθηκε η δημιουργία ενός αμιγώς περιβάλλοντος ελέγχου, που να βασίζεται τη λειτουργία του σε διεπαφές ψηφιακών σημάτων χαμηλής ισχύος.

Από την άλλη όμως πλευρά, η αναγκαιότητα επικοινωνίας και συναρμογής κυκλωμάτων, τόσο ισχύος (ασύγχρονος τριφασικός κινητήρας), όσο αναλογικών ηλεκτρονικών χαμηλής ισχύος (γέφυρες ανόρθωσης, συγκριτές, κλπ) και ψηφιακή τεχνολογία (PLC), επιτάσσει τον προσεκτικό σχεδιασμό του συνόλου της διάταξης, για να αποφευχθούν ανεπιθύμητες καταστάσεις, τόσο για το περιβάλλον, όσο και για το υπό έλεγχο σύστημα. Τα ψηφιακά ηλεκτρονικά επιβάλλουν συνήθως χαμηλές τάσεις και ρεύματα λειτουργίας (ανάλογα με τον τύπο και τα πρότυπα των διεπαφών σημάτων –

interfaces). Ευρύτατα διαδεδομένες ψηφιακές τεχνολογίες είναι οι TTL, LVTTTL, CMOS, LVCMOS, ECL, κλπ. Όμως, όλες οι ανωτέρω τεχνολογίες επιβάλλουν λειτουργία σε τάσεις μικρότερες των 5 V και ρεύματα μικρότερα των 30 mA. Γι' αυτόν το λόγο σχεδιαστικά, λήφθηκε η απόφαση αποσύζευξης των διεπαφών ισχύος με τις αντίστοιχες διεπαφές χαμηλής τάσης, κατά τη διαδικασία της συνολικής σχεδίασης. Η συσκευή PLC επελέγη, για να υποστηρίξει αμιγώς ψηφιακή διασύνδεση, με τροφοδοσία της τάξης των 12 V (LOGOi 12), δίνοντας τη βάση για μία πλήρη αποσύζευξη των σημάτων επικοινωνίας, εφόσον η συσκευή δεν είναι δυνατόν να συνδεθεί άμεσα με σήματα ισχύος AC. Παρά το γεγονός ότι, η τεχνολογία των PLs υποστηρίζει και συσκευές με μικτές διεπαφές, οι οποίες έχουν σχεδιασθεί για αμιγώς εφαρμογές ισχύος, με διασύνδεση σημάτων 230 V AC, κρίθηκε σκόπιμο να αποφευχθεί μία τέτοια προσέγγιση δεδομένων των παρακάτω:

- Συστήματα χαμηλής ισχύος δεν επιδρούν σημαντικά στην διαμόρφωση της συνολικής κατανάλωσης.
- Τα συστήματα χαμηλής ισχύος διευκολύνουν την αποσφαλμάτωση τους δεδομένου ότι, ο μηχανικός σχεδιαστής μπορεί να παρέμβει άμεσα στην λειτουργία τους.
- Μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν, ακόμη και στο χειρισμό μεγαλύτερης ισχύος κινητήρων, εφόσον δεν επιβάλλουν απευθείας ζεύξη των σημάτων ισχύος με τα ψηφιακά σήματα.

Για τους παραπάνω λόγους, η αποσύζευξη της ψηφιακής λογικής διευκολύνει τη συνολική αποσφαλμάτωση του συστήματος κινητήρα – ελέγχου. Από την άλλη πλευρά όμως, η ανάγκη επικοινωνίας με σήματα χαμηλών τάσεων, δημιουργεί την ανάγκη κυκλωμάτων μετατροπής για το όλο σύστημα. Έτσι, ο μετατροπέας αρχικά λαμβάνει σήμα αναφοράς από την τάση του συστήματος, το οποίο υποχρεούται αρχικά να υποβιβάσει και στη συνέχεια, να χρησιμοποιήσει ως λογικό σήμα για την παραγωγή παλμών, οι οποίοι θα διεγείρουν τη διάταξη του PLC.

Ο έλεγχος βασίζεται στην ανάκτηση του συγκεκριμένου σήματος και το χειρισμό του από το PLC. Η ευελιξία του παρεχόμενου ελέγχου, έγκειται στις προγραμματιστικές τεχνικές ελέγχου, που μπορούν επίσης να κάνουν χρήση και άλλων σημάτων από το περιβάλλον του κινητήρα, με στόχο την παροχή μιας πιο πλήρους εφαρμογής για το χρήστη.

Η διασυνεχής παρακολούθηση, μετατρέπει την προτεινόμενη διάταξη από ένα απλό σύστημα εκκίνησης, σε μία διάταξη ελέγχου, η οποία μπορεί να παρέμβει σε κάθε χρονική στιγμή, αποκαθιστώντας την ομαλή λειτουργία της γωνιακής ταχύτητας του κινητήρα σε οποιαδήποτε φάση διαταραχής ανιχνευθεί. Τα αίτια διαταραχών μπορεί να είναι ποικίλα, από απλές μεταβολές του φορτίου στον άξονα, έως μεταβολές των τάσεων τροφοδοσίας της γεννήτριας, την αλλαγή βήματος μηχανικών διατάξεων, ζεύξεις γραναζιών, κλπ. Έτσι, η προτεινόμενη διάταξη διασφαλίζει την ομαλή λειτουργία του κινητήρα, χωρίς να επιβάλλει την παρέμβαση του ανθρώπινου παράγοντα για την εφαρμογή της αυτοματοποιημένης διαδικασίας.

Το προγραμματιστικό περιβάλλον ενός PLC, επιτρέπει την επεκτάσιμη ανάπτυξη εφαρμογών, η οποία μπορεί να μετεξελιχθεί σε ολοκληρωμένο σύστημα παρακολούθησης της λειτουργίας ενός ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα, με δυνατότητες ακόμη και καταγραφής συμβάντων για το περιβάλλον λειτουργίας. Οι ταχύτητες αντίδρασης που απαιτούνται, αφορούν στην κλίμακα των χιλιοστών δευτερολέπτου (ms), που για ένα προγραμματιζόμενο περιβάλλον είναι εύκολα επιτεύξιμες, ενώ αντίστοιχα ο ανθρώπινος παράγοντας επιβάλλει αντιδράσεις, εφόσον είναι ενήμερος των συνθηκών, της τάξης του 0.5 sec. Σε καμία περίπτωση λοιπόν, η αυτοματοποιημένη διάταξη δεν μπορεί να

αντικατασταθεί από τις εμπειρικές ή μη αυτοματοποιημένες μεθόδους οι οποίες βασίζονταν στην ανθρώπινη παρέμβαση.

Η διάταξη εκκίνησης και παρακολούθησης, αναμένεται να συντείνει στην επέκταση της διάρκειας ζωής των κινητήρων που τελούν υπό έλεγχο, δεδομένου ότι οι έντονες και μη ακριβείς αυξομειώσεις των ρευμάτων φθείρουν τα τυλίγματα του κινητήρα και περιορίζουν τη συνολική διάρκεια ζωής ολόκληρης της διάταξης. Επιπλέον, το βέλτιστο της χρονικής αντίδρασης, μειώνει τα επίπεδα κατανάλωσης που αναπτύσσονται σε ένα δίκτυο τροφοδοσίας, το οποίο καθημερινά και επί 24ώρου βάσεως καλείται να αντιμετωπίσει τις ανάγκες ισχύος χρηστών που κυμαίνονται από απλούς οικιακούς χρήστες, μέχρι τα μηχανήματα και τους κινητήρες που χρησιμοποιούνται στη βαριά βιομηχανία.

### **5.1 Πλεονεκτήματα από τη Λειτουργία και το Σχεδιασμό**

Επιγραμματικά και συγκεντρωτικά, τα πλεονεκτήματα που αφορούν στη χρήση διάταξης για την παρακολούθηση και τον έλεγχο εκκίνησης και λειτουργίας τριφασικού κινητήρα, αναφέρονται στα παρακάτω:

- Βέλτιστη χρονική αντίδραση του συστήματος.
- Αποκατάσταση ισορροπίας φορτίου και διασυνεχής παρακολούθηση του.
- Μείωση των επιπέδων κατανάλωσης ισχύος του κινητήρα.
- Μεγαλύτερη διάρκεια ζωής και αξιοπιστία.
- Δυνατότητα προγραμματιζόμενου ελέγχου.
- Εξάλειψη εμπειρικών μεθόδων για την ακρίβεια ελέγχου.
- Αποσύζευξη των συστημάτων ισχύος από την ψηφιακή προγραμματιζόμενη λογική.
- Επεκτασιμότητα της διάταξης και του ελέγχου σε μεγέθη κλίμακας και ισχύος διαφόρων τύπων κινητήρων.
- Επεκτασιμότητα στην διαλειτουργικότητα και το χειρισμό επιπλέον σημάτων μέσω επέκτασης των προσφερόμενων διεπαφών σημάτων από το PLC.
- Καταγραφή συνθηκών διαταραχών.
- Δυνατότητα προσομοιώσεων λειτουργίας του υποσυστήματος ελέγχου.
- Επιβολή ειδικών συνθηκών χειρισμού σε προγραμματιζόμενο επίπεδο από τον επιβλέποντα μηχανικό.
- Μικρορυθμίσεις (tuning) της διάταξης για εναλλαγές κινητήρα – η γεννητριών τροφοδοσίας.
- Αξιοπιστία στις συνθήκες και μηχανισμούς ελέγχου.
- Εύκολη προτυποποίηση των διεργασιών λειτουργίας και ελέγχου με βάση τα ισχύοντα και μελλοντικές προδιαγραφές (standards).

### **5.2 Ανοικτά Θέματα και Μελλοντικές Επεκτάσεις**

Η προτεινόμενη διάταξη μέσω των διαδικασιών προσομοίωσης, χρησιμοποιήθηκε για να αντιμετωπίζει ικανοποιητικά το πρόβλημα ελέγχου λειτουργίας και φάσεων

εκκίνησης κινητήρα. Η διάταξη βασίζει τη λειτουργία της, σε ακριβείς μεθόδους προσδιορισμού των ρευμάτων τυλίγματος, για τον καθορισμό των φάσεων μεταλλαγής αστέρα – τριγώνου. Μελλοντικές τάσεις, θα μετατρέψουν διατάξεις του συγκεκριμένου τύπου, σε συστήματα ελέγχου πλήρως αυτοματοποιημένα και παραμετρικά, τα οποία είναι δυνατόν να προσαρμοστούν με πολύ εύκολο τρόπο σε μία πληθώρα τύπων κινητήρων διαφορετικών εφαρμογών και ισχύος. Η διαχείριση πολύπλοκων συνθηκών είναι άμεσα επεκτάσιμη, με την προσθήκη κατάλληλων σημάτων (με ή χωρίς ανάγκη μετατροπής από διεπαφές ισχύος σε διεπαφές χαμηλής τάσης), τα οποία θα δώσουν τη δυνατότητα χειρισμού και καταγραφών ιδιαίτερων συνθηκών. Η κλίμακα των PLC, καθώς και η επεξεργαστική τους ικανότητα, σε συνδυασμό με το επεκτάσιμο των σημάτων τους, κρίνονται ικανοποιητικά ως διατάξεις ελέγχου, για την εφαρμογή βιομηχανικού επιπέδου ελέγχου. Η διαδικασία προτυποποίησης και ελέγχου ειδικών προδιαγραφών, είναι σαφώς πιο εύκολα εφαρμόσιμη και επεκτάσιμη, με χρήση προγραμματιζόμενων διατάξεων. Η δυνατότητα διασύνδεσης των συσκευών PLC με ηλεκτρονικούς υπολογιστές, αποτελεί ένα επίσης σημαντικό βήμα μετάβασης από τα καθαρά ηλεκτρικά – ηλεκτρονικά κυκλώματα ισχύος στην εποχή χειρισμού μέσω ΗΥ. Τα πλεονεκτήματα από μία τέτοια μετάβαση έχουν αναλυθεί εκτενώς σε μία πολύ μεγάλη κλίμακα εφαρμογών, που άπτονται διαφόρων θεμάτων.

Η παρούσα διερεύνηση είναι ανοικτή σε μελλοντικές προσθήκες και διαδικασίες, οι οποίες μπορούν εύκολα να ενσωματωθούν στον πυρήνα της υλοποίησης, τόσο με μικρές αλλαγές στον κώδικα προγραμματισμού του PC, καθώς και μέσω προσθήκης των επιπλέον σημάτων για τη λήψη αποφάσεων. Μία επέκταση της τρέχουσας αρχιτεκτονικής μπορεί να αφορά στη δημιουργία αυτόνομων κυκλωμάτων μετατροπής των σημάτων ισχύος, σε αντίστοιχα σήματα ψηφιακής λογικής για τη διευκόλυνση επέκτασης των διεργασιών. Επιπλέον, η διάταξη μπορεί να συμπληρωθεί με μετρητικές διατάξεις, οι οποίες μπορούν να δίνουν επακριβώς τις τιμές των τάσεων και των ρευμάτων από τις διεπαφές ισχύος, πληροφώντας το χειριστή του συστήματος για την κατάσταση λειτουργίας και κατανάλωσης. Η κλίμακα ενός τέτοιου επιπέδου σχεδιασμού, προφανώς ξεφεύγει από τα όρια της παρούσας μελέτης δεδομένου ότι, εισάγει επιπλέον πολυπλοκότητα για την υλοποίηση της.

Στο άμεσο μέλλον, οι διατάξεις όπως αυτή που περιγράφηκε και προσομοιώθηκε στην παρούσα εργασία, αναμένεται να υιοθετηθούν και να επεκταθούν πλήρως, συμβάλλοντας στη διασύνδεση παλαιότερης και νεότερης τεχνολογίας κινητήρων. Επομένως, βιομηχανικές εφαρμογές που βασίζουν τη λειτουργία τους σε ασύγχρονους τριφασικούς κινητήρες, οι οποίοι δε διέθεταν διεπαφές προγραμματισμού και ελέγχου σε ψηφιακό επίπεδο, μπορεί να κάνουν χρήση της προτεινόμενης, επεκτείνοντας τη λειτουργία τους, κατά ένα βήμα προς την τελική ολοκλήρωση των συστημάτων ελέγχου και παρακολούθησης με Η/Υ. Οι σύγχρονες τάσεις της τεχνολογίας, καθώς και η μεγάλη κλίμακα δυνατότητα ολοκλήρωσης που αυτή παρέχει, συντείνουν στην ανάπτυξη ψηφιακού ελέγχου εφαρμογών για όλα τα περιβάλλοντα ηλεκτροκίνησης και ηλεκτρομηχανολογικής μετατροπής ενέργειας. Έτσι, κινητήρες παλαιότερου τύπου, μπορεί να αξιοποιηθούν περαιτέρω, συμβάλλοντας στον καλύτερο χειρισμό, χωρίς να εκτοπιστούν, μειώνοντας σημαντικά τα κόστη λειτουργίας, από μία ενδεχόμενη άμεση αντικατάσταση τους. Η τελευταία, μπορεί να προκύψει ως προϊόν των διαρκώς αναβαθμιζόμενων συνθηκών που δημιουργούνται, με τις διαδικασίες προτυποποίησης και ελέγχου για τους κινητήρες.

## Παραρτήματα

### Παράρτημα Α – LOGO 12/24RC [15] [16] [17]

#### *Γνωρίζοντας το LOGO!*

---

##### **Τι νέοι τύποι συσκευών είναι διαθέσιμοι;**

Το LOGO! διατίθεται σε δύο τύπους τάσεων:

- Τύπος 1 < 24 V, δηλαδή, 12 V DC, 24 V DC, 24 V AC
- Τύπος 2 > 24 V, δηλαδή, 115...240 V AC/DC

Σε εκδόσεις:

- **Με οθόνη:** 8 είσοδοι και 4 έξοδοι.
- **Χωρίς οθόνη:** 8 είσοδοι και 4 έξοδοι.

Όλα τα μοντέλα έχουν διαστάσεις 72 x 90 x 55 mm (4 Μ.Ε. - "Μονάδες Επιφανείας") και έχουν διαθέσιμες 36 ενσωματωμένες και έτοιμες για χρήση λειτουργίες

##### **Ποιές μονάδες επέκτασης είναι τώρα διαθέσιμες;**

- Οι μονάδες ψηφιακών σημάτων που διατίθενται στα 12 V DC, 24 V AC/DC και 115...240 V AC/DC, με 4 εισ./εξ. ή 8 εισ./εξ.
- Οι μονάδες ψηφιακών σημάτων DM16, που διατίθενται στα 12 V DC και 24 V DC, με 8 εισ./εξ.
- Οι μονάδες αναλογικών σημάτων που διατίθενται στα 12 V DC και 24 V DC, με 2 εισόδους ή 2 εισόδους Pt100 ή 2 εξόδους.
- Οι μονάδες επικοινωνίας LOGO! όπως για παράδειγμα η μονάδα ASi (AS interface bus), καθώς και η μονάδα επικοινωνίας (CM) EIB/KNX.

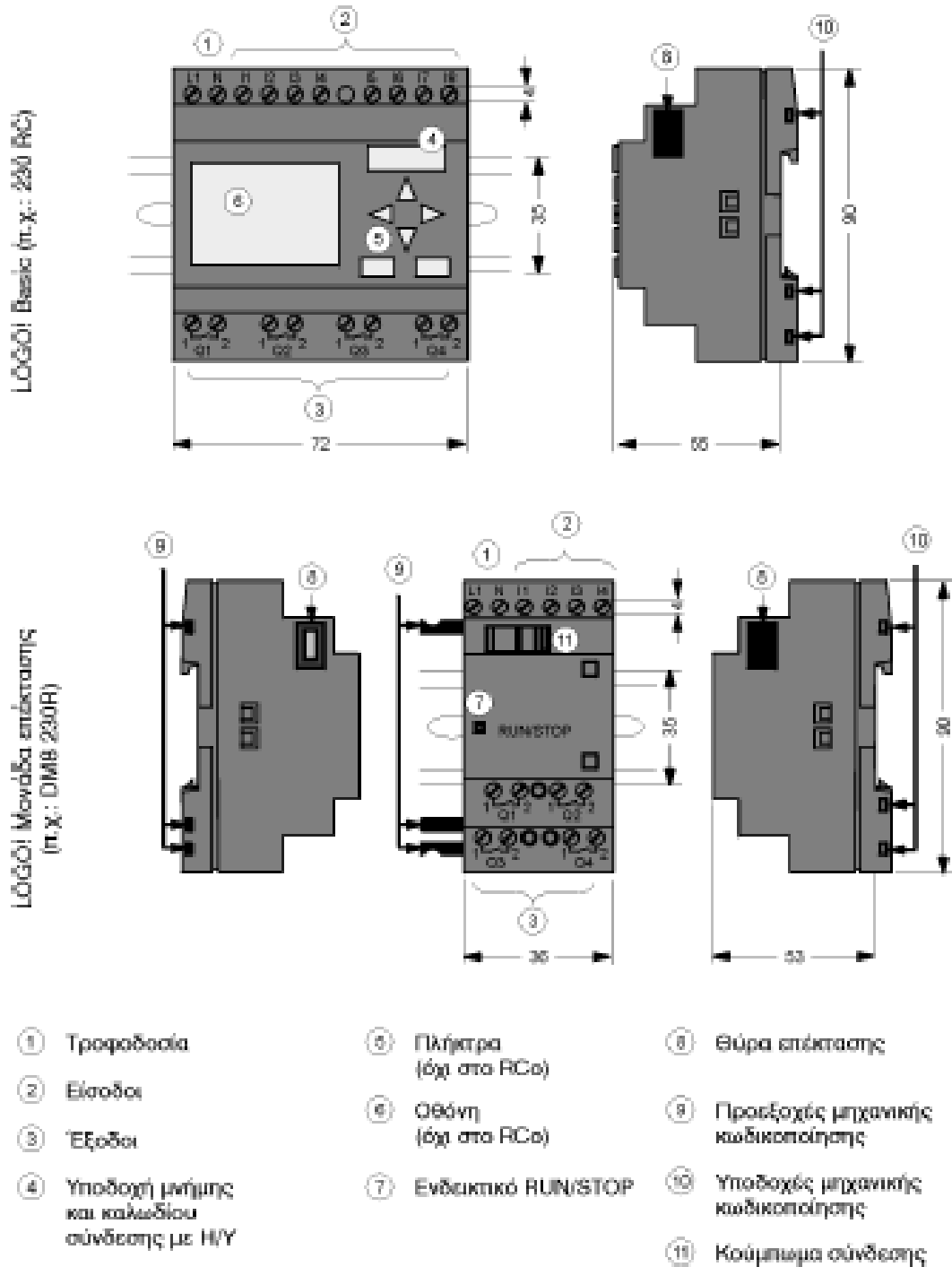
Οι μονάδες επέκτασης σημάτων έχουν διαστάσεις 36 x 90 x 55 mm (2 ή 4 Μ.Ε.). Κάθε μία, διαθέτει δύο θύρες για σύνδεση και άλλων μονάδων επέκτασης.

##### **Ποιές μονάδες επικοινωνίας είναι τώρα διαθέσιμες ;**

- Οι μονάδες επικοινωνίας LOGO! όπως για παράδειγμα η μονάδα ASi (AS interface bus), καθώς και η μονάδα επικοινωνίας (CM) EIB/KNX.

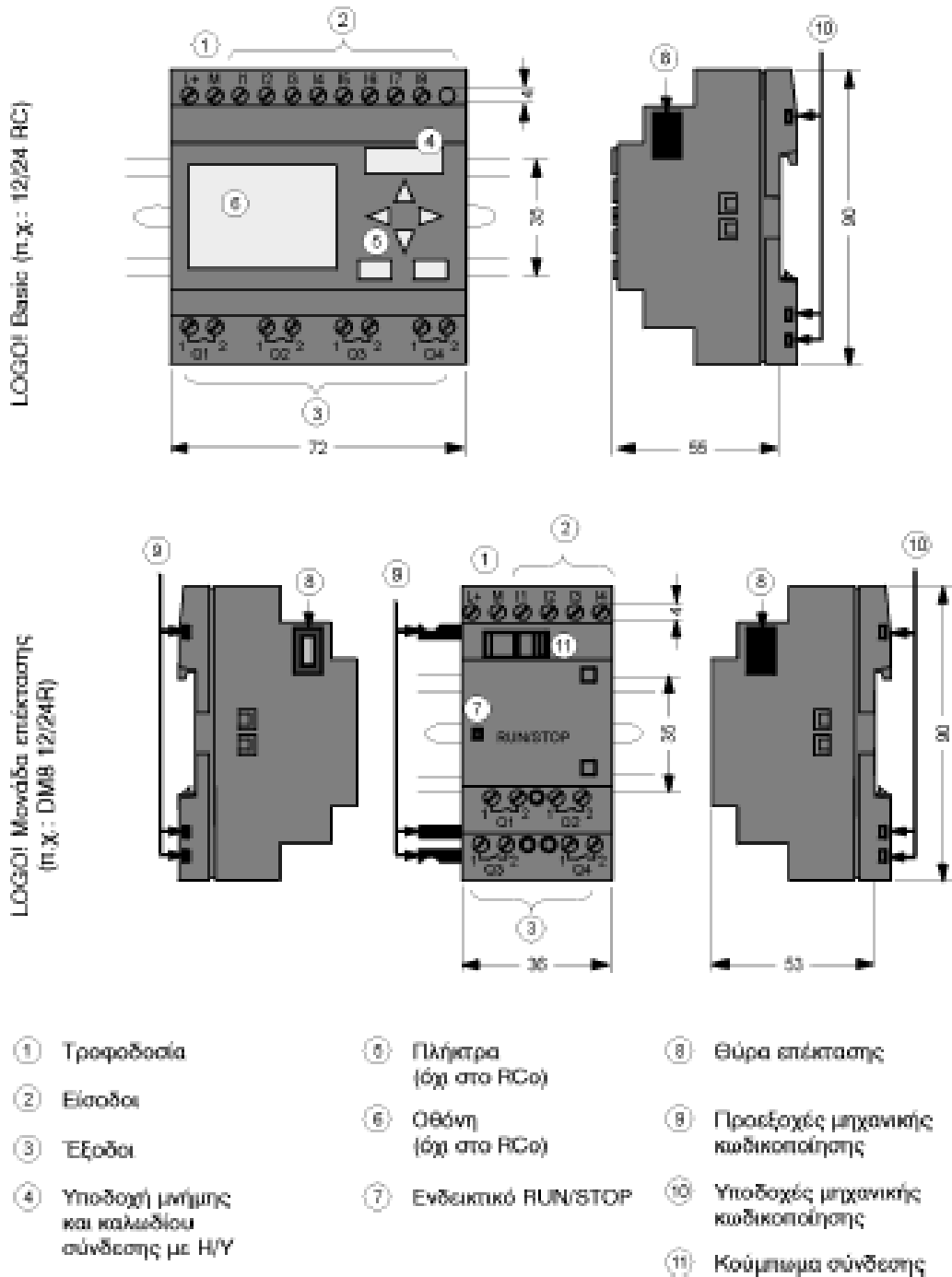
## Γνωρίζοντας το LOGO!

### Η δομή του LOGO!



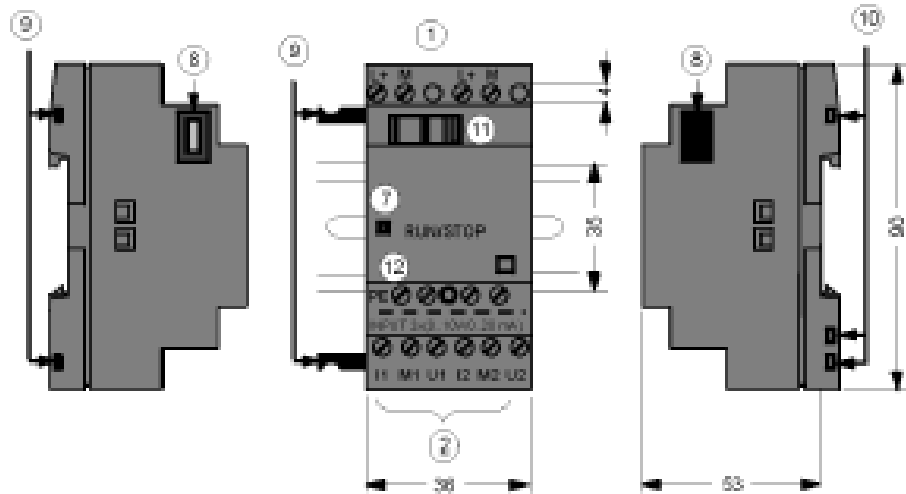


## Γνωρίζοντας το LOGO!



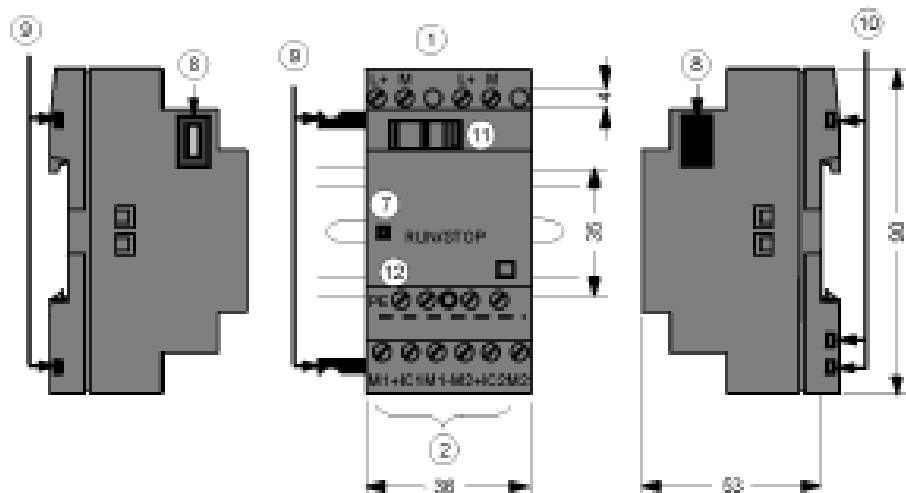
## Γνωρίζοντας το LOGO!

### LOGO! AM2



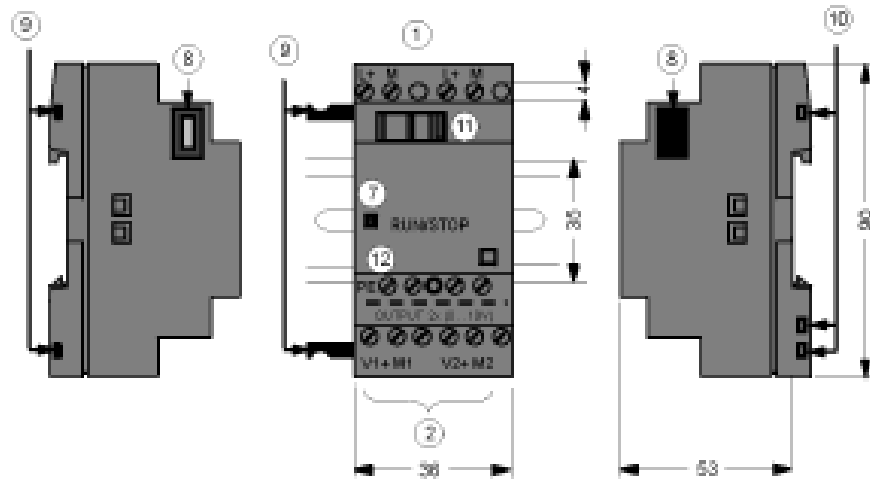
- |                       |                                     |   |
|-----------------------|-------------------------------------|---|
| ① Τροφοδοσία          | ⑧ Προεξοχές μηχανικής κωδικοποίησης | ⑫ Κλέμμα γείωσης για σύνδεση γης και θωράκιση καλωδίου αναλογικού σήματος |
| ② Είσοδοι             | ⑩ Υποδοχές μηχανικής κωδικοποίησης  |   |
| ⑦ Ενδεικτικό RUN/STOP | ⑪ Κούμπωμα σύνδεσης                 |   |
| ⑧ Θύρα επέκτασης      |                                     |   |

### LOGO! AM2 PT100



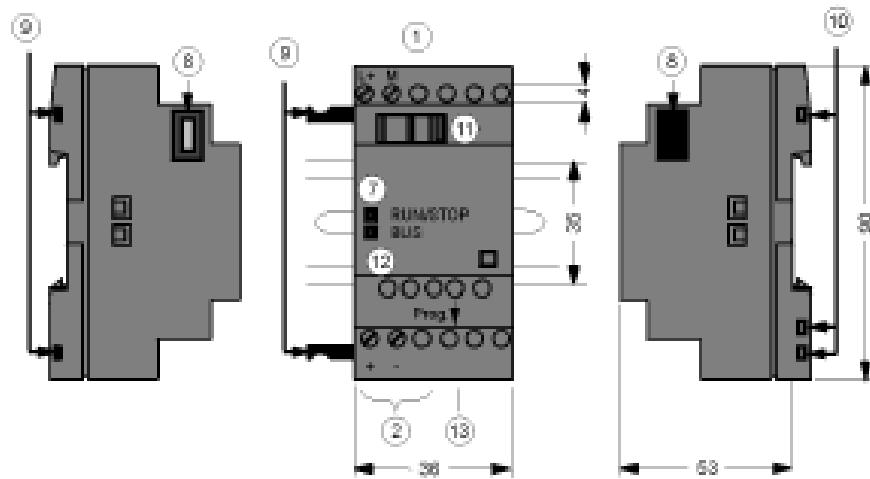
- |                       |                                     |   |
|-----------------------|-------------------------------------|---|
| ① Τροφοδοσία          | ⑧ Προεξοχές μηχανικής κωδικοποίησης | ⑫ Κλέμμα γείωσης για σύνδεση γης και θωράκιση καλωδίου αναλογικού σήματος |
| ② Είσοδοι             | ⑩ Υποδοχές μηχανικής κωδικοποίησης  |   |
| ⑦ Ενδεικτικό RUN/STOP | ⑪ Κούμπωμα σύνδεσης                 |   |
| ⑧ Θύρα επέκτασης      |                                     |   |

LOGO! AM 2 AQ



- |                       |                                     |   |
|-----------------------|-------------------------------------|---|
| ① Τροφοδοσία          | ⑨ Προεξοχές μηχανικής κωδικοποίησης | ⑫ Κλέμμα γείωσης για σύνδεση γης και θωράκιση καλωδίου αναλογικού σήματος |
| ② Είσοδοι             | ⑩ Υποδοχές μηχανικής κωδικοποίησης  | ⑬ Κουμπι προγραμματισμού  |
| ⑦ Ενδεικτικό RUN/STOP | ⑪ Καύμπωμα σύνδεσης                 |   |
| ⑧ Θύρα επέκτασης      |                                     |   |

LOGO! CM EIB/KNX



- |                       |                                     |   |
|-----------------------|-------------------------------------|---|
| ① Τροφοδοσία          | ⑨ Προεξοχές μηχανικής κωδικοποίησης | ⑫ Κλέμμα γείωσης για σύνδεση γης και θωράκιση καλωδίου αναλογικού σήματος |
| ② Είσοδοι             | ⑩ Υποδοχές μηχανικής κωδικοποίησης  | ⑬ Κουμπι προγραμματισμού  |
| ⑦ Ενδεικτικό RUN/STOP | ⑪ Καύμπωμα σύνδεσης                 |   |
| ⑧ Θύρα επέκτασης      |                                     |   |

## Τα μοντέλα του LOGO! – Βασικές συσκευές

Διατίθενται οι παρακάτω βασικές συσκευές LOGO!

Σύμβολο	Όνομασία	Τροφο- δοσία	Είσοδοι	Έξοδοι	Χαρακτη- ριστικά
	LOGO! 12/24RC	12/24 V DC	8 ψηφιακές <sup>(1)</sup>	4 ρελέ 230 V x 10 A	
	LOGO! 24	24 V DC	8 ψηφιακές <sup>(1)</sup>	4 τρανζίστορ 24 V x 0.3 A	χωρίς ρολόι
	LOGO! 24RC <sup>(2)</sup>	24 V AC	8 ψηφιακές	4 ρελέ 230 V x 10 A	
	LOGO! 230RC <sup>(2)</sup>	115...240 V AC/DC	8 ψηφιακές	4 ρελέ 230 V x 10 A	
	LOGO! 12/24RCo	12/24 V DC	8 ψηφιακές <sup>(1)</sup>	4 ρελέ 230 V x 10 A	χωρίς οθό- νη/ηλέκτρα
	LOGO! 24RCo <sup>(2)</sup>	24 V AC	8 ψηφιακές	4 ρελέ 230 V x 10 A	χωρίς οθό- νη/ηλέκτρα
	LOGO! 230RCo <sup>(2)</sup>	115...240 V AC/DC	8 ψηφιακές	4 ρελέ 230 V x 10 A	χωρίς οθό- νη/ηλέκτρα

(1): Εναλλακτικά, 2 αναλογικές εισόδους (0...10V) και 2 γρήγορες εισόδους μπορούν να χρησιμοποιηθούν.

(2): Μοντέλα 230 V AC: Οι εισόδους χωρίζονται σε δύο ομάδες των 4 σημείων. Ανά ομάδα μπορούμε να πάρουμε σήμα από διαφορετική φάση - στην ίδια ομάδα από την ίδια φάση.

(3): Οι ψηφιακές εισόδους μπορεί να χρησιμοποιηθούν είτε ως τύπου "P" ή "N".

## Παράρτημα Β – Πραγματικά Κυκλώματα και Συνθήκες Λειτουργίας Κινητήρα

Στο συγκεκριμένο παράρτημα παρουσιάζεται εγκατάσταση τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα σε περιβάλλον αγροτικών εφαρμογών (αντλιοστασίου).

### *Εγκατάσταση*



### *Περίβλημα Προστασίας και χαρακτηριστικά Κινητήρα*





*Διασύνδεση Τροφοδοσίας*



## *Ενδείκτες Κινητήρα*



## *Ασφάλειες και Χρονικό Μεταλλαγής Τυλιγμάτων*



## Βιβλιογραφία

- [1] Μαρία Γ. Ιωαννίδου, ‘Συστήματα Ελέγχου Ηλεκτρικών Μηχανών’, ΕΜΠ, Αθήνα 2008
- [2] Ι. Α. Τεγόπουλος, Ηλεκτρικές Μηχανές, Μέρος Β’ Μόνιμη Κατάσταση, Εκδόσεις Συμμετρία, 1991, pp 165-171
- [3] Στέφανος Ν. Μανιάς, ‘Ηλεκτρονικά Ισχύος’, Εκδόσεις Συμμετών 2000
- [4] Stephen J. Chapman, ‘Ηλεκτρικές Μηχανές DC-AC’, Εκδόσεις Τζιόλα 2003
- [5] Sedra/Smith, Μικροηλεκτρονικά Κυκλώματα , 2004
- [6] W. Bolton, “Programmable Logic Controllers”, Newnes (ELSEVIER), fifth edition, 2009
- [7] Hans Berger Erlagen, ‘Σχεδίαση Εφαρμογών Αυτοματισμού με τη γλώσσα STEP 7 σε LAD και FBD, Εκδόσεις Τζιόλα 2009
- [8] Mathworks, Matlab & Simulink Online Tutorials
- [9] Multisim ® Tutorial 2017
- [10] National Instruments Circuit Design Technical Library <http://www.ni.com/tutorial/5579/en/>
- [11] ABB, Three-Phase Asynchronous Motors – Generalities and ABB Proposals for Coordination of Protective Devices, Technical Application Papers, vol. 7, June 2008, pp 3, 5-6, 7, 11-13
- [12] Process Automation SIEMENS © DCS – PLC DCS - PLC-gr.pdf
- [13] Simatic Controller SIEMENS © PLC\_Beginners\_Manual\_1283505.pdf
- [14] SIMATIC S7-200 Simatic MicroAutomation SIEMENS © S7-200 Getting Started-gr 2008.pdf
- [15] LOGOi Αυτοματισμοί – Εύκολα – Γρήγορα – Οικονομικά SIEMENS © Message\_Handling\_LOGO\_2009.pdf
- [16] SIEMENS © LOGOi Εγχειρίδιο Λειτουργίας Έκδοση 09/2007 LogoManual2007grhigh.pdf
- [17] LOGOi Σειρά 0BA6 Συμπληρωματικό Εγχειρίδιο Λειτουργίας Έκδοση 2009 SIEMENS © Addon\_Logo\_Manual\_2009\_el.pdf
- [18] P. Kumar, A. Vinoth Kumar, M. Vignesh, KumarS, Automatic Bidirectional Starter for Induction Motor, International Journal of Electrical Engineering, ISSN 0974 -2158 Volume 8 Number 2 (2015) pp. 103 – 113
- [19] Jorg Randermann Moller, Starting and Control of three-phase asynchronous motors, Technical Paper, MSC.DS.MMAX.ver968en.pdf
- [20]  
<https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%91%CF%83%CF%84%CE%B5%CF%81%CE%BF%CF%84%CF%81%CE%AF%CE%B3%CF%89%CE%BD%CE%BF>
- [21] [https://en.wikipedia.org/wiki/Programmable\\_logic\\_controller](https://en.wikipedia.org/wiki/Programmable_logic_controller)



[22] <http://www.gohz.com/motor-star-delta-changeover-time-delay>

[23] <https://automationforum.in/t/applications-and-advantages-of-plc-programmable-logic-controllers/467>