



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
& ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

Σχεδιασμός μικρής κλίμακας συστήματος βαρυτικής αποθήκευσης ενέργειας

ΤΟΥ

Κεχαγιά Αναστάσιου

Επιβλέπων: Βλαχόπουλος Δημήτριος
Ε.ΔΙ.Π

Κοζάνη Μάρτιος 2023



HELLENIC DEMOCRACY
UNIVERSITY OF WESTERN MACEDONIA
SCHOOL OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF ELECTRICAL
& COMPUTER ENGINEERING

Design of a small-scale gravity energy storage system

Kechagias Anastasios

SUPERVISOR: Dimitrios Vlachopoulos

Special Laboratory Teaching Staff

Kozani March 2023



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
& ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΔΗΛΩΣΗ ΜΗ ΛΟΓΟΚΛΟΠΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΗΨΗΣ ΠΡΟΣΩΠΙΚΗΣ ΕΥΘΥΝΗΣ

Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν. 1599/1986 και τα άρθρα 2,4,6 παρ. 3 του Ν. 1256/1982, η παρούσα Διπλωματική Εργασία με τίτλο “ **Σχεδιασμός μικρής κλίμακας συστήματος βαρυτικής αποθήκευσης ενέργειας** ” καθώς και τα ηλεκτρονικά αρχεία και πηγαίοι κώδικες που αναπτύχθηκαν ή τροποποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας και αναφέρονται ρητώς μέσα στο κείμενο που συνοδεύουν, και η οποία έχει εκπονηθεί στο Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας, υπό την επίβλεψη του μέλους του Τμήματος κ. **Βλαχόπουλο Δημήτριο** αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής εργασίας και δεν προσβάλλει κάθε μορφής πνευματικά δικαιώματα τρίτων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον. Τα σημεία όπου έχω χρησιμοποιήσει ιδέες, κείμενο, αρχεία ή / και πηγές άλλων συγγραφέων, αναφέρονται ευδιάκριτα στο κείμενο με την κατάλληλη παραπομπή και η σχετική αναφορά περιλαμβάνεται στο τμήμα των βιβλιογραφικών αναφορών με πλήρη περιγραφή. 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 μόνο.

Copyright (C) Κεχαγιάς Αναστάσιος, Βλαχόπουλος Δημήτριος, 2023, Κοζάνη

Copyright (C) Kechagias Anastasios, Vlahopoulos Dimitrios, 2023, Kozani

Υπογραφή Φοιτητή: _____

Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας πτυχιακής εργασίας αποτελεί η εύρεση του πιο αποδοτικού κινητήρα, με τα κατάλληλα ηλεκτρονικά ισχύος για την οδήγηση του, για την κατασκευή ενός μικρής κλίμακας συστήματος βαρυτικής αποθήκευσης ενέργειας. Στα πλαίσια της εργασίας παρουσιάζονται οι τρόποι οδήγησης διαφόρων τεχνολογιών κινητήρων όπως των σύγχρονων κινητήρων μόνιμου μαγνήτη (PMSM) και των επαγωγικών κινητήρων (Induction Motor) με τα αντίστοιχα ηλεκτρονικά ισχύος και συγκρίνονται ως προς την αποδοτικότητα τους με στόχο την επιλογή του αποδοτικότερου για την υλοποίηση του συστήματος. Πιο συγκεκριμένα γίνεται η ανάλυση τεσσάρων διαφορετικών περιπτώσεων. Στην πρώτη περίπτωση εξετάστηκε ο συνδυασμός επαγωγικών κινητήρων με VFD, στην δεύτερη περίπτωση ο συνδυασμός επαγωγικών κινητήρων με AFE, στην τρίτη περίπτωση ο συνδυασμός PMSM με VFD και στην τέταρτη και τελευταία περίπτωση, ο συνδυασμός PMSM με μειωτήρα.

Λέξεις Κλειδιά

Βαρυτική αποθήκευση ενέργειας, VFD-Variable Frequency Drive, AFE-Active Front End, σύγχρονος κινητήρας μόνιμου μαγνήτη, PMSM-Permanent Magnet Synchronous Motor, επαγωγικός κινητήρας, Induction Motor, απόδοση

Abstract

The object of this thesis is to find the most efficient motor, with the appropriate power electronics to drive it, for the implementation of a small-scale gravitational energy storage system. In the framework of the work, the ways of driving various motor technologies such as the permanent magnet synchronous motors (PMSM) and the induction motors (Induction Motor) with the corresponding power electronics are presented and compared in terms of their efficiency with the aim of choosing the most efficient one for the implementation. More specifically, four different cases were analyzed. In the first case the combination of induction motors with VFD was considered, in the second case the combination of induction motors with AFE, in the third case the combination of PMSM with VFD and in the fourth and last case, the combination of PMSM with a reducer.

Keywords

Gravity Energy Storage, VFD-Variable Frequency Drive, AFE-Active Front End, PMSM-Permanent Magnet Synchronous Motor, Induction Motor, Efficiency

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	7
Abstract	8
Κατάλογος Εικόνων	11
Πρόλογος.....	12
Κεφάλαιο 1: Κινητήρια Συστήματα	13
1.1 : Κινητήρες.....	13
1.2 : Drives.....	14
Κεφάλαιο 2: Ηλεκτρονικά Ισχύος.....	16
2.1 : Επεξήγηση των περιπτώσεων	16
2.2 : Four quadrant operation	20
Κεφάλαιο 3: Σύστημα Τροχαλίας	23
3.1 : Υπολογισμός του βαθμού απόδοσης του συστήματος της τροχαλίας.....	23
3.2 : Υπολογισμός της δύναμης εκφυλισμού που ασκείται στο συρματόσχοινο.....	23
3.3 : Συρματόσχοινο	24
3.4 : Κατασκευή για την ανύψωση του σκυροδέματος	25
Κεφάλαιο 4 : Υπολογισμοί Ισχύος και Ενέργειας.....	26
4.1 : Υπολογισμός ταχύτητας ανεβοκατεβάσματος φορτίου	26
4.2 : Υπολογισμός της απαιτούμενης ισχύος για την ανύψωση του φορτίου	26
4.3 : Υπολογισμός της μέγιστης δυνατής ενέργειας που μπορεί να παραχθεί	27
Κεφάλαιο 5: Ανάλυση Περιπτώσεων	28
5.1 : Πρώτη περίπτωση – Επαγωγικοί κινητήρες με VFD	28
5.2 : Δεύτερη περίπτωση – Επαγωγικοί κινητήρες με AFE	29
5.3 : Τρίτη περίπτωση – Σύγχρονοι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη με VFD.....	29
5.4 : Τέταρτη περίπτωση – Σύγχρονοι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη με μειωτήρα.....	30
Κεφάλαιο 6: Grid Services	31
6.1: Energy arbitrage και Peak shaving	31
6.2: Black start, Spinning reserves και Load following	31
6.3: Capacity firming και Renewable time shift	31
Κεφάλαιο 7: Συμπεράσματα	33
7.1: Συμπεράσματα	33
Βιβλιογραφία.....	34

Κατάλογος Εικόνων

ΕΙΚΟΝΑ 1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΣΥΓΧΡΟΝΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΜΟΝΙΜΟΥ ΜΑΓΝΗΤΗ (ΠΗΓΗ 3).....	13
ΕΙΚΟΝΑ 2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ (ΠΗΓΗ 3)	14
ΕΙΚΟΝΑ 3 ΤΟ ΑΦΕ ΚΑΙ VFD ΤΗΣ ΕΤΑΙΡΕΙΑΣ POWER ELECTRONICS (ΠΗΓΗ 5)	15
ΕΙΚΟΝΑ 4 Η ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ ΤΩΝ ΕΠΑΓΩΓΙΚΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΜΕ VFD ΣΤΟ LIBRECAD	16
ΕΙΚΟΝΑ 5 Η ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ ΤΩΝ ΕΠΑΓΩΓΙΚΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΜΕ ΑΦΕ ΣΤΟ LIBRECAD.....	17
ΕΙΚΟΝΑ 6 Η ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ ΤΩΝ ΡΜSΜ ΜΕ VFD ΣΤΟ LIBRECAD	18
ΕΙΚΟΝΑ 7 Η ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ ΤΩΝ ΡΜSΜ ΜΕ ΜΕΙΩΤΗΡΑ ΣΤΟ LIBRECAD	19
ΕΙΚΟΝΑ 8 ΟΙ 4 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΕΣ ΕΝΟΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΣΕ ΤΕΤΑΡΤΗΜΟΡΙΑ (ΠΗΓΗ 10).....	20
ΕΙΚΟΝΑ 9 ΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΤΟΥ ΣΥΡΜΑΤΟΣΧΟΙΝΟΥ ΠΟΥ ΕΠΙΛΕΧΘΗΚΕ (ΠΗΓΗ 14)	24
ΕΙΚΟΝΑ 10 ΑΝΥΨΩΣΗ ΟΙΚΟΔΟΜΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΩΝΤΑΣ ΤΟ SG 80 BLOCK GRAB (ΠΗΓΗ 15).....	25

Πρόλογος

Το ζήτημα της αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας αφορά τόσο τα συμβατικά όσο και τα ανανεώσιμα συστήματα παραγωγής ενέργειας, με το μεγαλύτερο πρόβλημα να είναι ο συντονισμός μεταξύ της παραγωγής και της ζήτησης της ηλεκτρικής ενέργειας. Το δίκτυο θα πρέπει να βρίσκεται σε ετοιμότητα όσον αφορά την ανταπόκρισή του στις αναμενόμενες περιοδικές και στις απότομες αυξομειώσεις της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας. Ένας τρόπος για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος είναι η αποθήκευση μέρους της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται σε διαστήματα χαμηλής ζήτησης (π.χ. νύχτα) και η κατανάλωση της αποθηκευμένης αυτής ενέργειας σε διαστήματα υψηλής ζήτησης (π.χ. μεσημεριανές ώρες). Όλες οι μέθοδοι αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας έχουν να κάνουν με την μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε άλλη μορφή ενέργειας, και όταν ξανά χρειαστεί γίνεται το αντίστροφο. Για παράδειγμα, οι συσσωρευτές μετατρέπουν την ηλεκτρική ενέργεια σε χημική προκειμένου να την αποθηκεύσουν, οι εγκαταστάσεις αντλήσεως – ταμιεύσεως αποθηκεύουν την ηλεκτρική ενέργεια σε βαρυτική δυναμική ενέργεια κ.α. Στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας το θέμα της αποθήκευσης ενέργειας είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε συστήματα τα οποία δεν είναι διασυνδεδεμένα στο κεντρικό δίκτυο, δηλαδή είναι είτε απομονωμένα είτε τροφοδοτούν μικρά τοπικά δίκτυα. Η ανάγκη ύπαρξης μονάδων αποθήκευσης ενέργειας σε τέτοια συστήματα ανανεώσιμων πηγών οφείλεται στην στοχαστικότητά τους, δηλαδή το γεγονός ότι δεν είναι καθορισμένη η ενέργεια που μπορούν να παρέχουν κάθε χρονική στιγμή καθώς βασίζονται σε ενεργειακές ροές οι οποίες δεν είναι ούτε συνεχώς διαθέσιμες ούτε σταθερές. Η παρούσα πτυχιακή εργασία αποτελεί μία μελέτη για ένα σύστημα βαρυτικής αποθήκευσης ενέργειας με χρήση γερανού το οποίο αποτελείται από έναν σύγχρονο κινητήρα μόνιμου μαγνήτη σε συνεργασία με ένα VFD. Εκμεταλλευόμενοι την περίσσεια ενέργεια των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε διαστήματα χαμηλής ζήτησης μπορούμε να ανυψώσουμε ένα μπλοκ σκυροδέματος σε συγκεκριμένο ύψος έτσι ώστε το αντικείμενο αυτό να αποκτήσει δυναμική ενέργεια από την διαφορά ύψους λόγω της βαρύτητας. Στην συνέχεια όταν έχουμε αυξημένη ζήτηση, μετατρέπουμε την δυναμική αυτή ενέργεια ξανά σε ηλεκτρική μετατρέποντας τον κινητήρα σε γεννήτρια χαμηλώνοντας το.[1]

Κεφάλαιο 1: Κινητήρια Συστήματα

1.1 : Κινητήρες

Σύγχρονος κινητήρας μόνιμου μαγνήτη (PMSM)

Ο σύγχρονος κινητήρας μόνιμου μαγνήτη που επιλέχθηκε είναι της εταιρείας WEG. Πιο συγκεκριμένα είναι της σειράς W22 και κατηγορίας IE5 Ultra-Premium και έχει σημαντικά πλεονεκτήματα συγκριτικά με έναν επαγωγικό κινητήρα ίδιας ισχύος. Αυτά τα πλεονεκτήματα έχουν να κάνουν τόσο με τον βαθμό απόδοσης του κινητήρα στο 97% όσο και με την ισχύ προς βάρος του καθώς μπορεί να είναι έως και 77% μικρότερος σε μέγεθος. Επιπλέον κατέχει προστασία IP55 καθιστώντας τον ιδανικό για βιομηχανική χρήση παρέχοντας προστασία από χώμα, σκόνη και άλλα μη διαβρωτικά υλικά αλλά και νερό.[2],[3]

Characteristics
• Frame: 355M/L
• Output: 260 kW
• Frequency: 50 Hz
• Poles: 6
• Full load speed: 1000
• Slip: 0.00 %
• Voltage: 400 V
• Rated current: 515 A
• Locked rotor current: ---
• Locked rotor current (I _L /I _n): ---
• No load current: ---
• Full load torque: 2484 Nm
• Locked rotor torque: ---
• Breakdown torque: 0 %
• Design: ---
• Insulation class: F
• Temperature rise: 80 K
• Locked rotor time: --- (hot)
• Service Factor: 1.00
• Duty cycle: S1
• Ambient temperature: -20°C – +40°C
• Altitude: 1000 m
• Degree of Protection: IP55
• Approximate weight: 1715 kg
• Moment of inertia: 12.616 kgm ²
• Noise level: ---

Εικόνα 1 Χαρακτηριστικά του σύγχρονου κινητήρα μόνιμου μαγνήτη (πηγή 3)

Επαγωγικός κινητήρας (Induction Motor)

Η επιλογή του επαγωγικού κινητήρα είναι της εταιρείας WEG. Είναι της σειράς W40 και κατηγορίας IE3 Premium Efficiency με βαθμό απόδοσης που φτάνει μέχρι και 95,8% σε full load ενώ στο 75% και 50% load είναι 95,5% και 95% αντίστοιχα.[3]

Characteristics

- Frame: 280L
- Output: 260 kW
- Frequency: 50 Hz
- Poles: 2
- Full load speed: 2970
- Slip: 1.00 %
- Voltage: 230/400 V
- Rated current: 765/440 A
- Locked rotor current: 5050/2900 A
- Locked rotor current (I_L/I_n): 6.6
- No load current: 216/124 A
- Full load torque: 836 Nm
- Locked rotor torque: 180 %
- Breakdown torque: 280 %
- Design: ---
- Insulation class: F
- Temperature rise: 80 K
- Locked rotor time: 11 s (hot)
- Service Factor: 1.00
- Duty cycle: S1
- Ambient temperature: -20°C – +40°C
- Altitude: 1000 m
- Degree of Protection: IP23
- Approximate weight: 885 kg
- Moment of inertia: 1.5062 kgm²
- Noise level: 84 dB(A)

Εικόνα 2 Χαρακτηριστικά επαγωγικού κινητήρα (πηγή 3)

1.2 : Drives

AFE

Εφαρμογές όπως γερανοί, ανεμιστήρες και ανελκυστήρες μπορούν να παράγουν τεράστιες ποσότητες ενέργειας σε περιόδους πέδησης με την ενέργεια αυτή να διαχέεται παραδοσιακά σε μονάδες πέδησης οι οποίες αποτελούνται από αντιστάσεις. Το AFE SD700FR της εταιρείας Power Electronics μας δίνει την δυνατότητα έγχυσης ισχύος πίσω στο δίκτυο σε αυτές τις περιόδους προσφέροντας έτσι τεράστια οικονομικά οφέλη σε κάθε τέτοια εφαρμογή. Ακόμη, διαθέτει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά ασφαλείας και απόδοσης για γεραμούς και ανελκυστήρες που εξασφαλίζουν μεγάλη διάρκεια ζωής όπως μηχανικό έλεγχο πέδησης MBC για αποφυγή παλινδρόμησης φορτίου. Επιπλέον κατέχει βαθμό απόδοσης ίσο με 97% καθιστώντας το έτσι ένα από τα πιο αποδοτικά AFE στην αγορά. Η ισχύς του AFE θα πρέπει να είναι αρκετή για να καλύψει την τροφοδοσία των δύο drive που θα χρησιμοποιηθούν για τον έλεγχο των κινητήρων επομένως το AFE που επιλέχθηκε είναι 400V-630kW.[4]

VFD

Το VFD που επιλέχθηκε είναι και αυτό της εταιρείας Power Electronics και το μοντέλο SD700 το οποίο κατέχει προστασία IP54. Η επιστροφή ισχύος πίσω στο δίκτυο δεν είναι εφικτή παρά μόνο εάν υπάρξει συνεργασία με τα κατάλληλα ηλεκτρονικά ισχύος. Ο βαθμός απόδοσης του είναι ελάχιστα καλύτερος από αυτόν του AFE αγγίζοντας το 98%. Το VFD είναι 400V-315kW και καλύπτει την ανάγκη τροφοδοσίας των κινητήρων.[4]

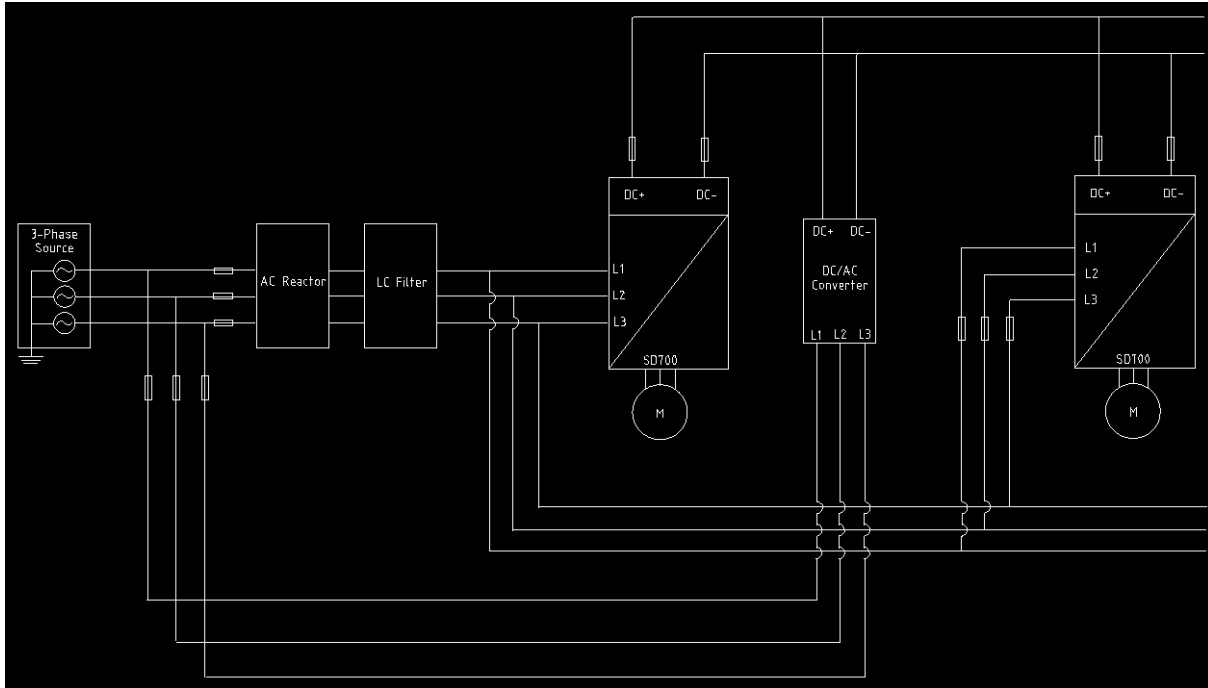


Εικόνα 3 Το AFE και VFD της εταιρείας Power Electronics (πηγή 5)

Κεφάλαιο 2: Ηλεκτρονικά Ισχύος

2.1 : Επεξήγηση των περιπτώσεων

Επαγωγικοί κινητήρες με VFD



Εικόνα 4 Η συνδεσμολογία των επαγωγικών κινητήρων με VFD στο LibreCAD

Η πρώτη περίπτωση αφορά τον συνδυασμό επαγωγικών κινητήρων με VFD για την υλοποίηση του μικρής κλίμακας συστήματος βαρυτικής αποθήκευσης ενέργειας. Σε όλα τα συστήματα όπου υπάρχει συνεργασία ενός VFD με ένα κινητήρα που είναι υπεύθυνος για την ανύψωση και το κατέβασμα ενός φορτίου (π.χ. ανελκυστήρες, γερανοί, κυλιόμενες σκάλες κ.α.) παρατηρείται η επιστροφή ισχύος πίσω στο VFD. Το γεγονός ότι το ρεύμα μπορεί να ρέει πίσω κατά μήκος των IGBT αλλά όχι κατά μήκος του ανορθωτή που υπάρχει σε ένα VFD καθιστά την ένταξη μιας αντίστασης πέδησης για την διάχυση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας αναγκαία, με μια τέτοια διαδικασία όμως να συνεπάγεται με σπατάλη ενέργειας. Η αξιοποίηση του κοινού DC Bus σε συνδυασμό με ένα DC – AC Converter μας δίνει την δυνατότητα να εκμεταλλευτούμε την ενέργεια που παράγεται σε τέτοιες περιόδους και να την επιστρέψουμε πίσω στο δίκτυο ή ακόμη και να την μοιράσουμε μεταξύ των δύο VFD δηλαδή ο ένας κινητήρας που βρίσκεται στο σημείο κατεβάσματος του σκυροδέματος θα μπορεί να τροφοδοτεί τον άλλον κινητήρα που ανεβάζει το σκυρόδεμα. Το σύστημα βαρυτικής αποθήκευσης ενέργειας έχει δύο λειτουργίες. Η πρώτη λειτουργία αφορά την ισχύ που δέχεται ο κινητήρας από το drive και την μετατροπή της σε ροπή για την ανύψωση του σκυροδέματος βάρους 503,336 τόνων στο ύψος των 80 μέτρων, με την αύξηση του υψομέτρου να συνεπάγεται και με την αύξηση των βαρυτικών δυνάμεων που ασκούνται στο σκυρόδεμα. Η δεύτερη λειτουργία αφορά την μετατροπή της δυναμικής ενέργειας που έχει αποκτήσει και κατά συνέπεια αποθηκεύσει το σκυρόδεμα από την διαφορά του ύψους λόγω της βαρύτητας ξανά σε ηλεκτρική χαμηλώνοντας το σκυρόδεμα στο έδαφος. Η μετατροπή

αυτή επιτυγχάνεται καθώς ο κινητήρας που είναι υπεύθυνος για την ανύψωση του σκυροδέματος στο σημείο αυτό λειτουργεί ως γεννήτρια. Όταν το σκυρόδεμα χαμηλώνει η βαρυτική δύναμη που ασκείται σε αυτό παράγει ένα επιπλέον φορτίο στον άξονα του κινητήρα επομένως ο ρότορας περιστρέφεται γρηγορότερα από την ταχύτητα που του έχει οριστεί από το VFD μετατρέποντας τον έτσι σε γεννήτρια. Σε αυτό το σημείο το παραγόμενο ρεύμα από την πλέον γεννήτρια διέρχεται πίσω στο VFD όπου και συναντάει τα IGBT's τα οποία μετατρέπουν το ρεύμα αυτό από AC σε DC. Έπειτα στέλνεται στο κοινό DC Bus όπου και μας δίνεται η επιλογή είτε να τροφοδοτήσουμε τον 2ο κινητήρα εάν αυτός βρίσκεται στην κατάσταση ανύψωσης του σκυροδέματος με την μετατροπή του DC ρεύματος από το DC Bus σε AC μέσω των IGBT's του 2ου VFD είτε να μετατρέψουμε το ρεύμα σε AC με την αξιοποίηση ενός DC – AC Converter και κατά συνέπεια να στείλουμε ισχύ πίσω στο δίκτυο. Η τάση στο DC Bus υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$DC=AC \cdot \sqrt{2}$$

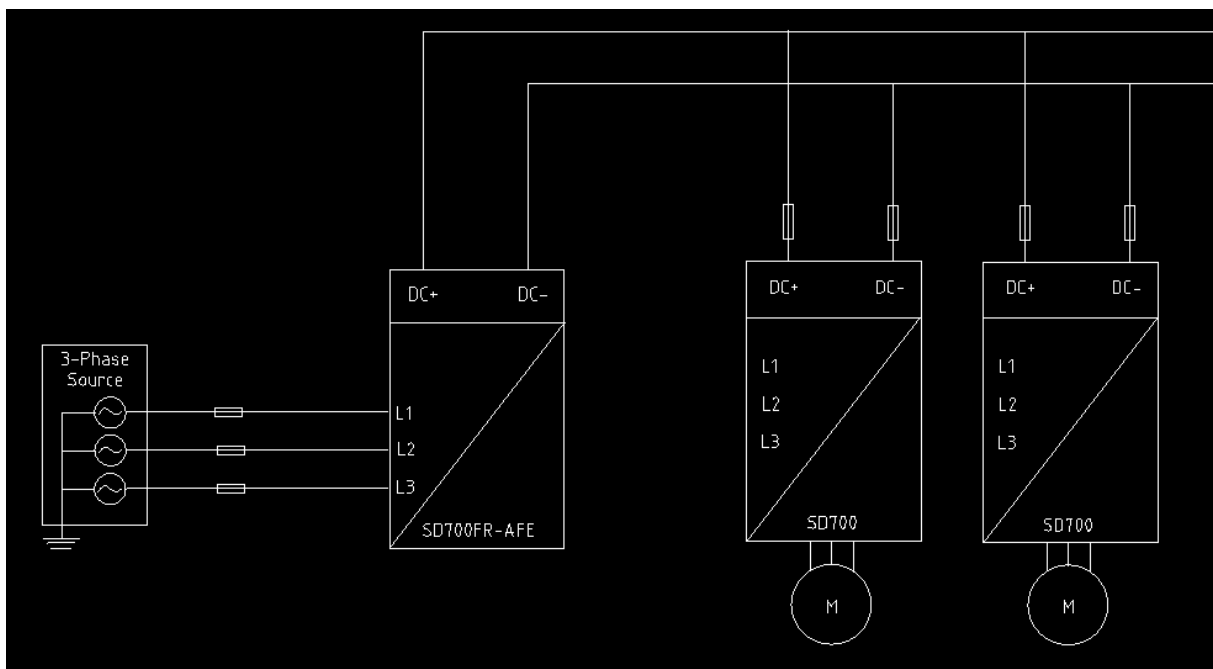
Όπου:

DC: η συνεχής τάση στο DC Bus σε V

AC: η τάση εισόδου σε V

Επομένως είναι: $DC=AC \cdot \sqrt{2} \Leftrightarrow DC = 400 \cdot \sqrt{2} = 565,6V$ DC η τάση του DC Bus και θα είναι η ίδια σε όλες τις περιπτώσεις που θα αναλύσουμε καθώς η τάση εισόδου είναι πάντοτε 400V AC.[6]

Επαγωγικοί κινητήρες με AFE

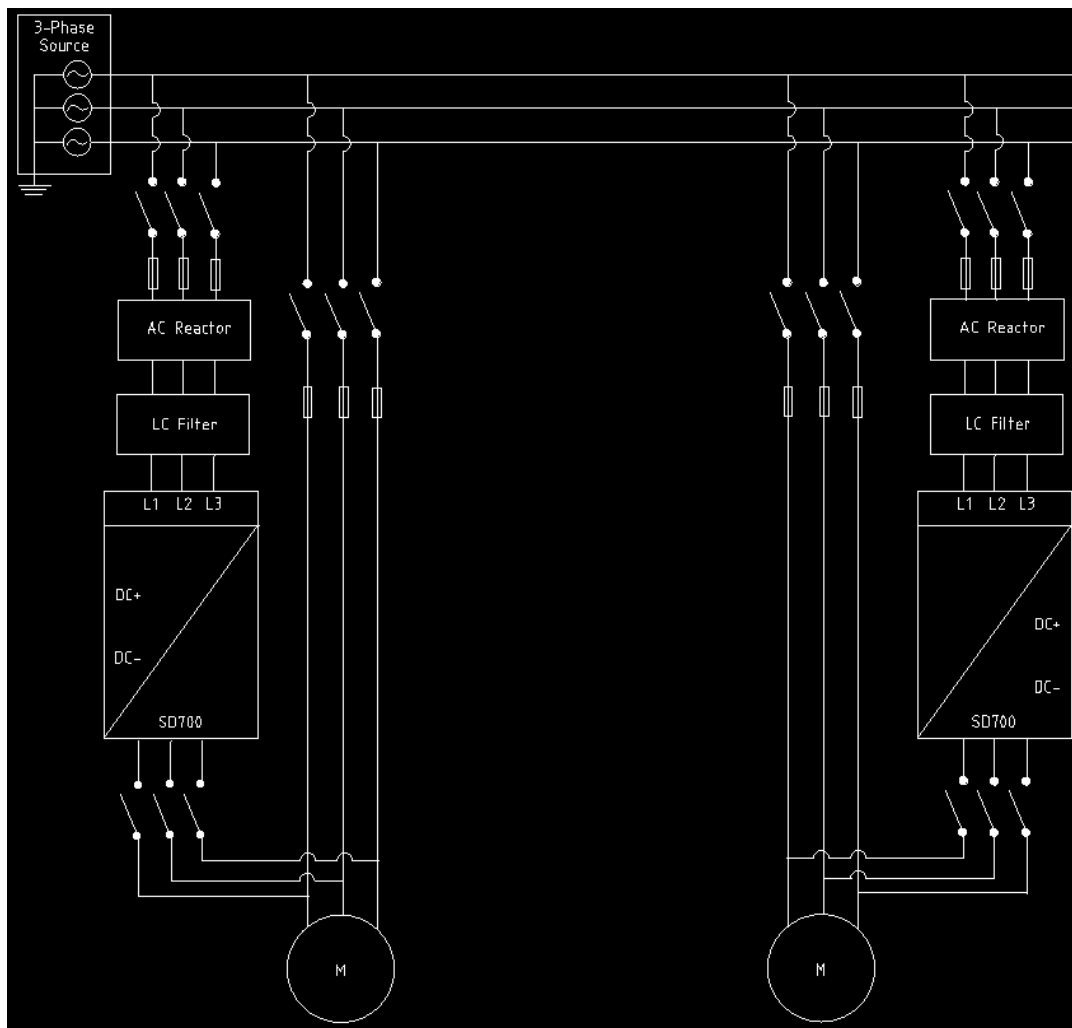


Εικόνα 5 Η συνδεσμολογία των επαγωγικών κινητήρων με AFE στο LibreCAD

Σε αυτή την περίπτωση έχουμε τον συνδυασμό επαγωγικών κινητήρων με AFE και το γεγονός ότι έχουμε τοποθετήσει ένα AFE στο σύστημα αποθήκευσης μας παρέχει τα εξής πλεονεκτήματα: Πρώτον, το AFE χρησιμοποιεί IGBT's και στην είσοδο και στην έξοδο του κυκλώματος του σε αντίθεση με το VFD που στην είσοδο του έχει διόδους για την μετατροπή του AC σε DC. Επομένως ένα AFE μπορεί να επιτρέψει την παραγόμενη ισχύ να εγχυθεί πίσω στο δίκτυο εξαλείφοντας την

ανάγκη ύπαρξης ενός DC – AC Converter. Με αυτό τον τρόπο αυξάνουμε δραστικά την αποδοτικότητα του συστήματος καθώς ο βαθμός απόδοσης ενός AFE είναι κατά πολύ καλύτερος απ’ ότι ενός DC – AC Converter. Δεύτερον, ένα AFE κατέχει ήδη φίλτρα για την αντιμετώπιση των αρμονικών επομένως δεν χρειαζόμαστε AC Reactor ούτε άλλα παθητικά φίλτρα ενισχύοντας με αυτό τον τρόπο το Round Trip Efficiency του συστήματος. Επομένως στο συγκεκριμένο σύστημα η παραγόμενη ισχύς σε περιόδους που χαμηλώνουμε το σκυρόδεμα εισέρχεται όπως και στην προηγούμενη περίπτωση στα IGBT’s του VFD για την μετατροπή της σε DC και την εισχώρηση της στο DC Bus, στην συνέχεια μας δίνεται η επιλογή πάλι είτε να τροφοδοτήσουμε τον 2ο κινητήρα μετατρέποντας την ισχύ σε AC από DC μέσω των IGBT’s του 2ου VFD ή να διοχετεύσουμε την ισχύ αυτή πίσω στο δίκτυο μέσω του AFE. Δηλαδή να μετατρέψουμε την ισχύ του DC Bus από DC σε AC μέσω των IGBT’s στην είσοδο του AFE.

Σύγχρονοι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη με VFD

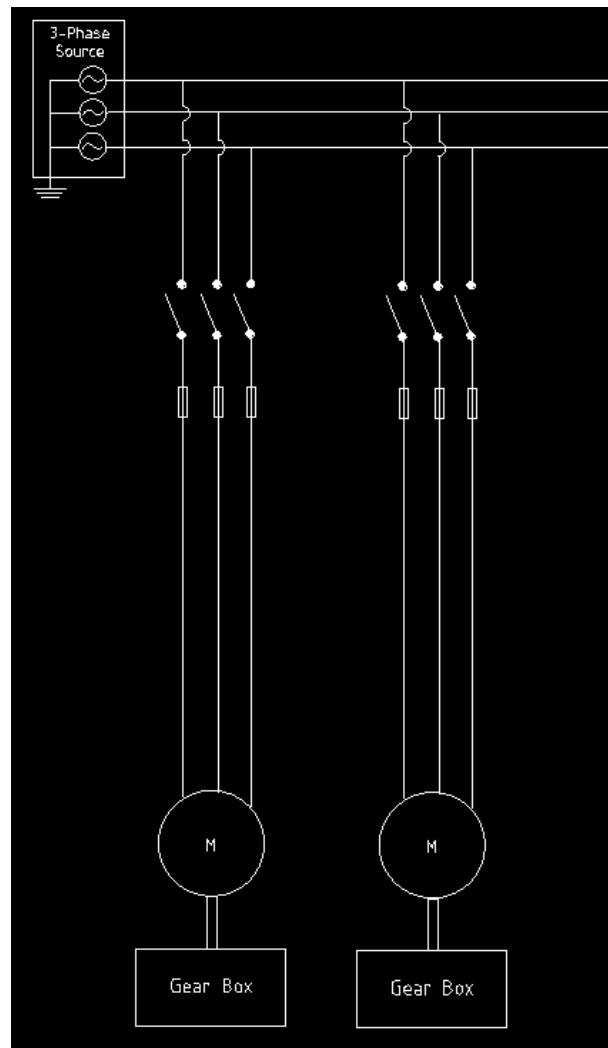


Εικόνα 6 Η συνδεσμολογία των PMSM με VFD στο LibreCAD

Επειδή ο βαθμός απόδοσης του σύγχρονου κινητήρα μόνιμου μαγνήτη που επιλέχθηκε είναι υψηλός στο 97% συμβάλει στην δυνατότητα που έχουμε να τον συνδέσουμε απευθείας στο ηλεκτρικό δίκτυο. Το γεγονός ότι οι σύγχρονοι κινητήρες αδυνατούν να ξεκινήσουν μόνοι τους από το δίκτυο καθώς δεν έχουν ροπή εκκίνησης και δεν μπορούν να παράγουν ροπή παρά μόνο εάν περιστρέφονται στην σύγχρονη ταχύτητα συμβάλει στην εκκίνηση τους με την βοήθεια ενός

VFD. Επηρεάζοντας την συχνότητα σε συνδυασμό με την χαμηλή ταχύτητα του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου του τυλίγματος τυμπάνου δίνεται η δυνατότητα στις στρεφόμενες μάζες του δρομέα να κερδίσουν τη μηχανική αδράνεια επομένως οι πόλοι του τυλίγματος του δρομέα ακολουθούν τους στρεφόμενους πόλους του τυλίγματος του στάτη. Αυξάνοντας την συχνότητα σταθερά ο κινητήρας πλησιάζει σταδιακά στη σύγχρονη ταχύτητα. Επομένως στην συγκεκριμένη περίπτωση δεν υπάρχουν ηλεκτρονικά ισχύος που να επηρεάζουν την απόδοση του συστήματος στην παραγωγική διαδικασία.[7]

Σύγχρονοι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη με μειωτήρα

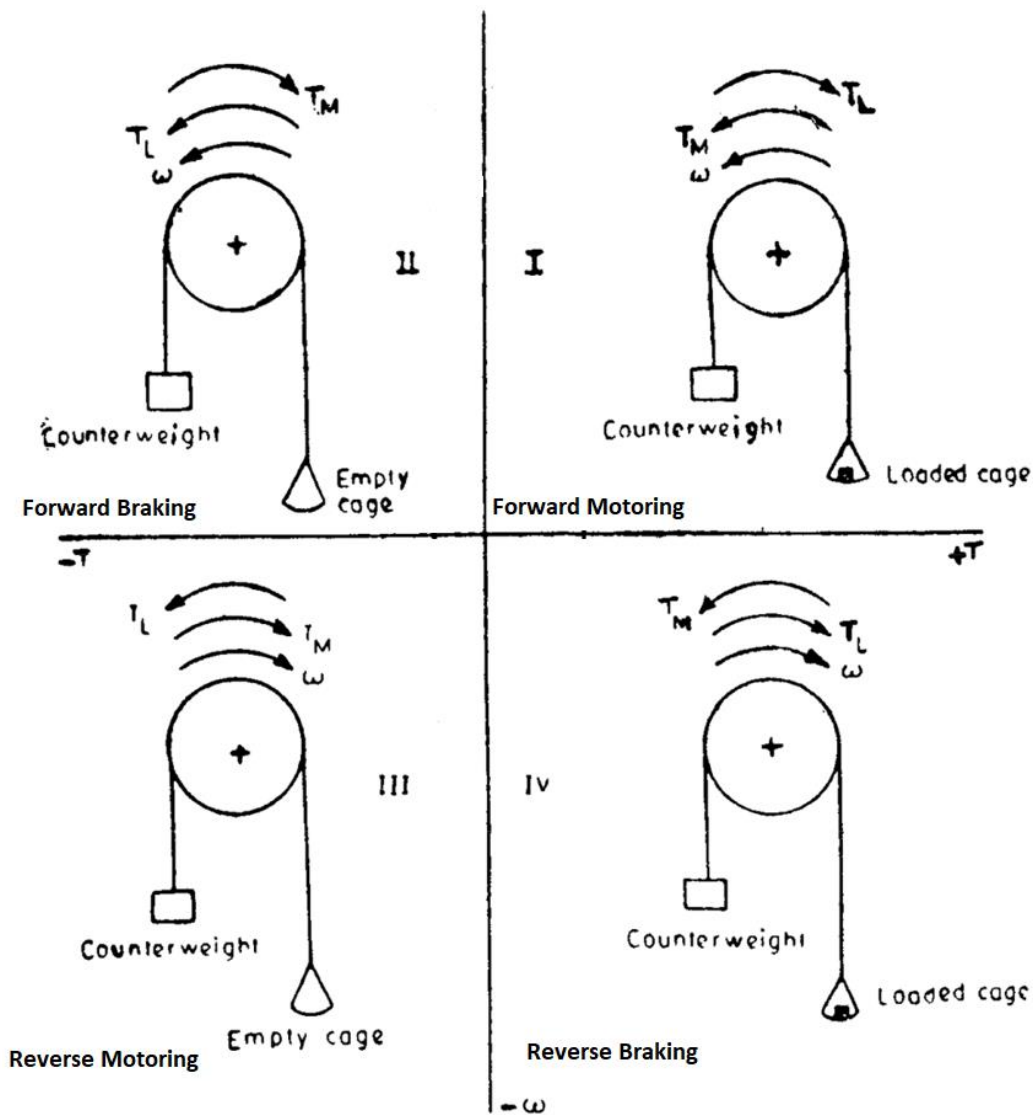


Εικόνα 7 Η συνδεσμολογία των PMSM με μειωτήρα στο LibreCAD

Στην τελευταία περίπτωση έχουμε σύγχρονους κινητήρες μόνιμου μαγνήτη με μειωτήρα. Σε αυτό το σύστημα οι σύγχρονοι κινητήρες δεν χρησιμοποιούν VFD για τον έλεγχο των στροφών τους αλλά στην θέση του VFD έχουμε έναν μειωτήρα. Για την εκκίνηση του σύγχρονου κινητήρα μόνιμου μαγνήτη χρησιμοποιούμε τυλίγματα απόσβεσης (Dampner Windings) τα οποία αποτελούν ένα πρόσθετο τύλιγμα κλωβού που τοποθετείται σε ειδικά αυλάκια στα πέλματα των μαγνητικών πόλων του δρομέα, προσφέροντας έτσι ροπή εκκίνησης στον σύγχρονο κινητήρα. Επομένως ο σύγχρονος κινητήρας λειτουργεί ως ασύγχρονος κατά την εκκίνηση του μέχρι να φτάσει την σύγχρονη ταχύτητα όπου και έπειτα συνδέεται η συνεχής τάση στο τύλιγμα του δρομέα, εμπλέκεται το φορτίο και πλέον ο κινητήρας λειτουργεί με σύγχρονη ταχύτητα. Η επιλογή του

μειωτήρα που θα τοποθετηθεί στον άξονα του κινητήρα για τον έλεγχο των στροφών θα είναι της κατηγορίας R/F/K δηλαδή θα αποτελεί μειωτήρα με κωνικά και ελικοειδή γρανάζια καθώς έχουν τον υψηλότερο βαθμό απόδοσης. Άρα και σε αυτή την περίπτωση δεν υπάρχουν ηλεκτρονικά ισχύος που να επηρεάζουν την αποδοτικότητα του συστήματος, αλλά επικρατούν μηχανικές απώλειες λόγω του μειωτήρα.[8],[9]

2.2 : Four quadrant operation



Εικόνα 8 Οι 4 λειτουργίες ενός κινητήρα σε τεταρτημόρια (πηγή 10)

Ένας κινητήρας μπορεί να έχει έως και τέσσερις διαφορετικές λειτουργίες ανάλογα με το σύστημα στο οποίο βρίσκεται. Οι τέσσερις αυτές λειτουργίες μπορούν να αναλυθούν σε τεταρτημόρια όπως φαίνεται στην παραπάνω εικόνα. Για την κατανόηση των λειτουργιών σε τεταρτημόρια θα πρέπει πρώτα να ορίσουμε σε ποια κατεύθυνση η φορά περιστροφής της γωνιακής ταχύτητας και της ροπής είναι θετική. Στην προκειμένη περίπτωση θα θεωρήσουμε πως η θετική γωνιακή ταχύτητα και ροπή συνεπάγεται με την αντίθετη κατεύθυνση από την φορά του ρολογιού δηλαδή η ανύψωση του φορτίου γίνεται με αριστερόστροφη περιστροφή.

Στην παραπάνω εικόνα βρίσκεται ένα σύστημα αξόνων όπου στον άξονα x και y έχουμε:

ω : γωνιακή ταχύτητα σε rad/second

T: ροπή του κινητήρα σε N*m

Για την επεξήγηση και των τεσσάρων λειτουργιών θα αναφερθούμε σε ένα σύστημα ανελκυστήρα με αντίβαρο όπου υπάρχουν και οι τέσσερις διαφορετικές περιπτώσεις. Η πρώτη περίπτωση αφορά την ανύψωση του γεμάτου θαλάμου του ανελκυστήρα ο οποίος είναι πιο βαρύτες από το αντίβαρο. Η δεύτερη περίπτωση αφορά την ανύψωση του θαλάμου ο οποίος είναι πιο ελαφρύτες από το αντίβαρο. Η τρίτη περίπτωση αφορά το κατέβασμα του θαλάμου ο οποίος είναι πιο ελαφρύτες από το αντίβαρο. Και τέταρτη και τελευταία περίπτωση το κατέβασμα του θαλάμου ο οποίος είναι πιο βαρύτες από το αντίβαρο.

Forward Motoring

Στην πρώτη περίπτωση έχουμε την ανύψωση του γεμάτου θαλάμου ο οποίος είναι πιο βαρύτες από το αντίβαρο. Η ροπή που δημιουργείται από τον θάλαμο είναι μεγαλύτερη από αυτή του αντίβαρου, με την ροπή που δημιουργείται από τον θάλαμο να είναι αντίθετη σε κατεύθυνση από αυτή που έχουμε θέσει ως θετική. Επομένως προκειμένου να ανυψωθεί ο θάλαμος θα πρέπει η κατεύθυνση της ροπής του κινητήρα να είναι αριστερόστροφη, ενέργεια η οποία συνεπάγεται και με αριστερόστροφη γωνιακή ταχύτητα. Motoring ονομάζουμε την λειτουργία στην οποία η γωνιακή ταχύτητα και η ροπή έχουν την ίδια κατεύθυνση περιστροφής δηλαδή το γινόμενο τους είναι θετικό και συνεπάγεται με την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας και την μετατροπή της σε μηχανική.

Forward Braking

Στην δεύτερη περίπτωση έχουμε την ανύψωση του θαλάμου που είναι πιο ελαφρύτες από το αντίβαρο. Επομένως η ροπή που δημιουργείται από το αντίβαρο είναι αρκετή για την ανύψωση του θαλάμου και έχει αριστερόστροφη περιστροφή όπως και η γωνιακή ταχύτητα, με τον κινητήρα να παράγει ροπή πέδησης για την μείωση της ταχύτητας ανεβάσματος του θαλάμου η οποία θα έχει αντίθετη κατεύθυνση άρα δεξιόστροφη. Braking ονομάζουμε την λειτουργία στην οποία η γωνιακή ταχύτητα έχει αντίθετη κατεύθυνση από την ροπή δηλαδή το γινόμενο τους είναι αρνητικό και συνεπάγεται με την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την μηχανική.

Reverse Motoring

Στην τρίτη περίπτωση έχουμε το κατέβασμα του θαλάμου ο οποίος είναι πιο ελαφρύτες από το αντίβαρο. Προκειμένου να ανυψωθεί το αντίβαρο και κατά συνέπεια να κατεβεί ο θάλαμος, ο κινητήρας παράγει δεξιόστροφη ροπή, με την ροπή που ασκεί το φορτίο να είναι αριστερόστροφη. Αποτελεί Motoring λειτουργία γιατί έχουμε κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας και την μετατροπή της σε μηχανική για την ανύψωση του αντίβαρου.

Reverse Braking

Στην τέταρτη και τελευταία περίπτωση έχουμε το κατέβασμα του θαλάμου ο οποίος είναι πιο βαρύτες από το αντίβαρο. Επομένως η ροπή που δημιουργείται από τον θάλαμο είναι αρκετή για την ανύψωση του αντίβαρου με τον κινητήρα να παράγει αριστερόστροφη ροπή πέδησης για την μείωση της ταχύτητας κατεβάσματος του θαλάμου. Αποτελεί Braking λειτουργία καθώς έχουμε παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την μηχανική.

Το γεγονός ότι στο σύστημα βαρυτικής αποθήκευσης ενέργειας το βάρος του φορτίου παραμένει σταθερό σε όλες τις περιπτώσεις σημαίνει πως ο κινητήρας λειτουργεί μονάχα σε δύο από τα τέσσερα τεταρτημόρια. Δηλαδή στο 1ο τεταρτημόριο όπου και έχουμε την κατανάλωση της ηλεκτρικής ενέργειας και την μετατροπή της σε μηχανική για την ανύψωση του σκυροδέματος και στο 4ο τεταρτημόριο όπου και είναι η μετατροπή της μηχανικής ενέργειας ξανά σε ηλεκτρική με το κατέβασμα του σκυροδέματος.

Κεφάλαιο 3: Σύστημα Τροχαλίας

3.1 : Υπολογισμός του βαθμού απόδοσης του συστήματος της τροχαλίας

Η απόδοση του συστήματος τροχαλίας δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$\eta_s = \eta_r^{(n_u)} * ((1 - \eta_r^{(n_m)}) / (n_m * (1 - \eta_r)))$$

Όπου:

η_s : η απόδοση του συστήματος τροχαλίας

η_r : η απόδοση σχοινίου τροχαλίας η οποία εξαρτάται από το ρουλεμάν και παίρνει τις τιμές 0,96 ή 0,98. Με το 0,98 να αποτελεί την απόδοση από κυλινδρικό ρουλεμάν με αυλακώσεις.

n_u : είναι ο αριθμός των τροχαλιών που συναντώνται στο σύστημα, με το δικό μας σύστημα να αποτελείται από μία μόνο τροχαλία.

n_m : αντιστοιχεί στον αριθμό των σχοινιών πάνω στην τροχαλία

Οπότε είναι: $\eta_s = 0,98^{1} * ((1 - 0,98^{1}) / (1 * (1 - 0,98))) = 0,98 * (1 - 0,98 / (1 * (0,02))) = 0,98 * (0,02 / 0,02) = 0,98$ η απόδοση του συστήματος της τροχαλίας.[11]

3.2 : Υπολογισμός της δύναμης εκφυλισμού που ασκείται στο συρματόσχοινο

Ο τύπος που μας δίνει την δύναμη εκφυλισμού που ασκείται στο συρματόσχοινο είναι ο εξής:

$$F_s = m_h * 9,81 * (1 / (n_m * n_r * \eta_s))$$

Όπου:

F_s : η δύναμη εκφυλισμού που ασκείται στο συρματόσχοινο σε kN

m_h : το βάρος του φορτίου σε τόνους

n_r : αποτελεί το νούμερο των συρματόσχοινων που βρίσκονται στο τύμπανο

η_s : ο βαθμός απόδοσης της τροχαλίας

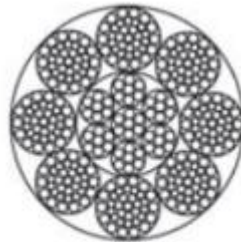
Επομένως έχουμε: $F_s = 503,336 * 9,81 * (1 / (1 * 1 * 0,98)) = (503,336 * 9,81) * 1,02 = 5038,49$ kN ή 5038490 N η δύναμη που θα δέχεται το συρματόσχοινο[11]

3.3 : Συρματόσχοινο

Το κριτήριο επιλογής συρματόσχοινου για το σύστημα γερανού αποτελεί η δύναμη εκφυλισμού που ασκείται στο συρματόσχοινο για την ανύψωση του φορτίου και ισούται με 5038,49 kN. Το συρματόσχοινο που επιλέχθηκε είναι της εταιρείας Nantong Guangming Steel Wire Products με διάμετρο 100mm, μήκους 80 μέτρων και κατηγορίας 8x36WS+IWRC δηλαδή αποτελεί συνδυασμό Warrington Seale και Independent Wire Rope Cores.

Warrington Seale ονομάζεται η κατασκευή συρματόσχοινου που έχει δύο στρώσεις συρμάτων γύρω από ένα κέντρο με την μεγαλύτερη διάμετρο να βρίσκεται στο εξωτερικό στρώμα και την μικρότερη διάμετρο στο εσωτερικό.

Independent Wire Rope Cores αποτελεί το ξεχωριστό συρματόσχοινο που χρησιμοποιείται ως πυρήνας στο κύριο συρματόσχοινο.[12],[13],[14]



8x36WS+IWRC

Εικόνα 9 Το εσωτερικό του συρματόσχοινου που επιλέχθηκε (πηγή 14)

3.4 : Κατασκευή για την ανύψωση του σκυροδέματος

Για το ανέβασμα και το κατέβασμα του σκυροδέματος το οποίο θα χρησιμοποιήσουμε στο σύστημα γερανού θα αξιοποιήσουμε το SG 80 Block Grab της εταιρείας Whitney το οποίο έχει τη δυνατότητα τοποθέτησης σε γάντζο γερανού και είναι ειδικά σχεδιασμένο για την ανύψωση μπλοκ.[15]



Εικόνα 10 Ανύψωση οικοδομικών υλικών χρησιμοποιώντας το SG 80 Block Grab (πηγή 15)

Κεφάλαιο 4 : Υπολογισμοί Ισχύος και Ενέργειας

Οι παρακάτω υπολογισμοί αφορούν ένα σύστημα γερανού με φορτίο βάρους 500 τόνων, ύψος ανύψωσης φορτίου 80 μέτρων και χρόνο ανόδου αλλά και καθόδου ίσο με 30 λεπτά.

4.1 : Υπολογισμός ταχύτητας ανεβοκατεβάσματος φορτίου

Αφού ο χρόνος ανόδου και καθόδου είναι ίσος με 30 λεπτά ή 1800 sec, η ταχύτητα με την οποία θα ανεβοκατεβαίνει το φορτίο για ύψος 80 μέτρων θα ισούται με:

$$U = h / t$$

Όπου:

U: η ταχύτητα ανεβάσματος ή κατεβάσματος του φορτίου σε m/s

h: το ύψος ανύψωσης του φορτίου σε μέτρα (m)

t: ο χρόνος στον οποίο ολοκληρώνεται το ανέβασμα ή κατέβασμα του φορτίου σε δευτερόλεπτα (s)

Οπότε είναι: $U = 80/1800 \Leftrightarrow U = 0,0444 \text{ m/s}$

4.2 : Υπολογισμός της απαιτούμενης ισχύος για την ανύψωση του φορτίου

Το βάρος του φορτίου ισούται με 500 τόνους, αλλά λαμβάνοντας υπόψιν και το βάρος του συρματόσχοινου ανερχόμαστε σε βάρος ίσο με 503,336 τόνους καθώς το συρματόσχοινο που επιλέχθηκε στα 80 μέτρα μήκους ζυγίζει 3336 κιλά. Για τον υπολογισμό της ισχύος που απαιτείται για την ανύψωση του φορτίου πρέπει να λάβουμε υπόψιν τους παρακάτω τύπους:

$$W = F * d$$

Όπου:

W: η ενέργεια που ασκείται σε ένα αντικείμενο σε συγκεκριμένη απόσταση σε Joule

F: η δύναμη που ασκείται στο αντικείμενο σε Newton

d: η απόσταση στη οποία ταξιδεύει το αντικείμενο σε μέτρα (m)

$$P = W / t$$

Όπου:

P: η ισχύς σε Watt

W: η ενέργεια που ασκείται σε ένα αντικείμενο σε συγκεκριμένη απόσταση σε Joule

t: ο χρόνος σε δευτερόλεπτα (s)

Συνδυάζοντας τους παραπάνω τύπους προκύπτει:

$$P = (F * d) / t$$

Όμως το φορτίο στην περίπτωση του συστήματος αποθήκευσης βρίσκεται στον αέρα, η απόσταση την οποία διανύει αποτελεί συγκεκριμένο ύψος h και παράλληλα του ασκούνται βαρυτικές δυνάμεις που παρεμποδίζουν την μεταφορά του επομένως ο τύπος γίνεται:

$$P = (m * g * h) / t$$

Όπου:

P: η ισχύς σε Watt

m: η μάζα σε κιλά (kg)

g: η επιτάχυνση της βαρύτητας σε m/s²

h: το ύψος σε μέτρα (m)

t: ο χρόνος σε δευτερόλεπτα (s)

Οπότε είναι: $P = (m * g * h) / t = (503336 * 9,81 * 80) / 1800 \Leftrightarrow P = 219454W$ ή 219,454kW η ισχύς που απαιτείται για να ανυψωθεί το σκυρόδεμα των 503,336 τόνων σε ύψος 80 μέτρων σε χρόνο 30 λεπτών.[16]

4.3 : Υπολογισμός της μέγιστης δυνατής ενέργειας που μπορεί να παραχθεί

Η μέγιστη δυνατή δυναμική ενέργεια που μπορούμε να εκμεταλλευτούμε με το σύστημα βαρυτικής αποθήκευσης δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$E = m * g * h$$

Όπου:

E: η δυναμική ενέργεια που μπορεί να αποθηκευτεί σε Joule

m: η μάζα του φορτίου σε κιλά (kg)

g: η επιτάχυνση της βαρύτητας σε m/s²

h: το ύψος σε μέτρα (m)

Οπότε: $E = m * g * h = 503336 * 9,81 * 80 = 395018092,8$ Joule

Το 1Joule ισούται με 0,0000002778 kWh επομένως οι μέγιστες kWh που μπορούμε να εκμεταλλευτούμε είναι: $E = 395018092,8 * 0,0000002778 = 109,73$ kWh

Κεφάλαιο 5: Ανάλυση Περιπτώσεων

Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναλύσουμε την αποδοτικότητα των τεσσάρων διαφορετικών περιπτώσεων που προκύπτουν από τον συνδυασμό των τεχνολογιών που αναλύσαμε προηγουμένως. Αυτές οι περιπτώσεις είναι οι εξής:

Πρώτη περίπτωση, συνδυασμός επαγωγικών κινητήρων με VFD.

Δεύτερη περίπτωση, συνδυασμός επαγωγικών κινητήρων με AFE.

Τρίτη περίπτωση, συνδυασμός σύγχρονων κινητήρων μόνιμου μαγνήτη με VFD.

Τέταρτη περίπτωση, συνδυασμός σύγχρονων κινητήρων μόνιμου μαγνήτη με μειωτήρα.

Στις περιπτώσεις όπου έχουμε την λειτουργία του επαγωγικού κινητήρα ως γεννήτρια λαμβάνουμε τον βαθμό απόδοσης ως 95,7% έναντι του 95,8% που είναι ο βαθμός απόδοσης του κινητήρα καθώς στην παραγωγική διαδικασία οι στροφές της πλέον γεννήτριας είναι λιγότερες από αυτές που συναντάμε στο 100% load, με την απόδοση στο 75% load να είναι 95,5%.

5.1 : Πρώτη περίπτωση – Επαγωγικοί κινητήρες με VFD

Στο 4ο κεφάλαιο υπολογίσαμε τις μέγιστες kWh που μπορούμε να εκμεταλλευτούμε από το βάρος των 503,336 τόνων στο υψόμετρο των 80 μέτρων και σε χρόνο 30 λεπτών οι οποίες ισούνται με 109,73kWh.

Στην πρώτη περίπτωση όπου έχουμε επαγωγικούς κινητήρες με VFD, τα ηλεκτρονικά ισχύος και οι μηχανισμοί που επηρεάζουν την αποδοτικότητα του συστήματος είναι οι παρακάτω:

Σύστημα τροχαλίας με βαθμό απόδοσης 98%

VFD με βαθμό απόδοσης 98%

Η πλέον γεννήτρια με βαθμό απόδοσης 95,7%

DC – AC Converter με βαθμό απόδοσης 92% [17]

Επομένως η ισχύς που έχουμε την δυνατότητα να παράγουμε με αυτό το σύστημα ισούται με:

$$P=219,454*0,98*0,98*0,957*0,92=185,56 \text{ kW}$$

Για την μετατροπή της ισχύος αυτής σε kWh χρησιμοποιούμε τον παρακάτω τύπο:

$$E=P*t$$

Όπου:

E: Η ενέργεια σε kWh

P: Η ισχύς σε Watt

t: Ο χρόνος σε ώρες

Άρα είναι: $E=P*t=185,56*0,5=92,78\text{kWh}$

Επομένως από τις 109,73kWh που μπορούμε να αξιοποιήσουμε θεωρητικά από το σύστημα αποθήκευσης, με τον συνδυασμό επαγωγικών κινητήρων με VFD παίρνουμε πίσω 92,78kWh επομένως το σύστημα στην 1η περίπτωση έχει απόδοση 84,55%

5.2 : Δεύτερη περίπτωση – Επαγωγικοί κινητήρες με AFE

Στην δεύτερη περίπτωση όπου έχουμε επαγωγικούς κινητήρες με AFE, τα ηλεκτρονικά ισχύος και οι μηχανισμοί που επηρεάζουν την αποδοτικότητα του συστήματος είναι οι παρακάτω:

Σύστημα τροχαλίας με βαθμό απόδοσης 98%

AFE με βαθμό απόδοσης 97%

VFD με βαθμό απόδοσης 98%

Η πλέον γεννήτρια με βαθμό απόδοσης 95,7%

Επομένως η ισχύς που έχουμε την δυνατότητα να παράγουμε με αυτό το σύστημα ισούται με:

$P=219,454*0,98*0,97*0,98*0,957=195,65\text{ kW}$

Για την μετατροπή της ισχύος αυτής σε kWh χρησιμοποιούμε τον παρακάτω τύπο:

$$E=P*t$$

Άρα είναι: $E=P*t=195,65*0,5=97,82\text{kWh}$

Επομένως από τις 109,73kWh που μπορούμε να αξιοποιήσουμε θεωρητικά από το σύστημα αποθήκευσης, με τον συνδυασμό επαγωγικών κινητήρων με AFE παίρνουμε πίσω 97,82kWh επομένως το σύστημα στην 2η περίπτωση έχει απόδοση 89,14%

5.3 : Τρίτη περίπτωση – Σύγχρονοι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη με VFD

Στην τρίτη περίπτωση όπου έχουμε σύγχρονους κινητήρες μόνιμου μαγνήτη με VFD, όπου και δεν έχουμε ηλεκτρονικά ισχύος που να επηρεάζουν την απόδοση του συστήματος στην παραγωγική διαδικασία. Άρα οι μηχανισμοί που επηρεάζουν την αποδοτικότητα του συστήματος είναι οι παρακάτω:

Σύστημα τροχαλίας με βαθμό απόδοσης 98%

Η πλέον γεννήτρια με βαθμό απόδοσης 97%

Επομένως η ισχύς που έχουμε την δυνατότητα να παράγουμε με αυτό το σύστημα ισούται με:

$$P=219,454*0,98*0,97=208,61 \text{ kW}$$

Για την μετατροπή της ισχύος αυτής σε kWh χρησιμοποιούμε τον παρακάτω τύπο:

$$E=P*t$$

Άρα είναι: $E=P*t=208,61*0,5=104,3\text{kWh}$

Επομένως από τις 109,72kWh που μπορούμε να αξιοποιήσουμε θεωρητικά από το σύστημα αποθήκευσης, με τον συνδυασμό επαγωγικών κινητήρων με AFE παίρνουμε πίσω 104,3kWh επομένως το σύστημα στην 3η περίπτωση έχει απόδοση 95,05%

5.4 : Τέταρτη περίπτωση – Σύγχρονοι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη με μειωτήρα

Στην τέταρτη περίπτωση όπου έχουμε σύγχρονους κινητήρες μόνιμου μαγνήτη με μειωτήρα δεν έχουμε ηλεκτρονικά ισχύος και οι μόνοι μηχανισμοί που επηρεάζουν την αποδοτικότητα του συστήματος είναι οι εξής:

Σύστημα τροχαλίας με βαθμό απόδοσης 98%

Η πλέον γεννήτρια με βαθμό απόδοσης 97%

Μειωτήρας R/F/K με βαθμό απόδοσης 98% [9]

Επομένως η ισχύς που έχουμε την δυνατότητα να παράγουμε με αυτό το σύστημα ισούται με:

$$P=219,454*0,98*0,98*0,97=204,44 \text{ kW}$$

Για την μετατροπή της ισχύος αυτής σε kWh χρησιμοποιούμε τον παρακάτω τύπο:

$$E=P*t$$

Άρα είναι: $E=P*t=204,44*0,5=102,22 \text{ kWh}$

Επομένως από τις 109,72kWh που μπορούμε να αξιοποιήσουμε θεωρητικά από το σύστημα αποθήκευσης, με τον συνδυασμό επαγωγικών κινητήρων με VFD παίρνουμε πίσω 102,22kWh επομένως το σύστημα στην 4η περίπτωση έχει απόδοση 93,15%

Κεφάλαιο 6: Grid Services

Οι παρακάτω υπηρεσίες δικτύου εξυπηρετούνται από το σύστημα βαρυτικής αποθήκευσης ενέργειας επειδή πληρούνται οι απαιτήσεις που έχουν τεθεί για κάθε μία υπηρεσία με τις απαιτήσεις αυτές να έχουν να κάνουν με την ονομαστική ισχύ του συστήματος αποθήκευσης η οποία μπορεί να αυξηθεί κλιμακωτά, με τον χρόνο εκ φόρτισης που στο συγκεκριμένο σύστημα είναι ίσος με 30 λεπτά αλλά και με τον χρόνο απόκρισης του συστήματος αποθήκευσης που είναι ίσος με 3,8 δευτερόλεπτα.

6.1: Energy arbitrage και Peak shaving

Σε περιόδους στις οποίες υπάρχει υπερβολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και η τιμή του ρεύματος μειώνεται το σύστημα αποθήκευσης έχει την δυνατότητα να εκμεταλλευτεί αυτή την μείωση για την ανύψωση του φορτίου και κατά συνέπεια την αποθήκευση ενέργειας έτσι ώστε να διοχετευθεί αργότερα στο δίκτυο όταν το κόστος έχει αυξηθεί χαμηλώνοντας το φορτίο. Η ονομασία αυτής της υπηρεσίας είναι energy arbitrage. Αντίθετα με το energy arbitrage, το peak shaving έχει να κάνει με την διοχέτευση αυτής της ενέργειας πίσω στο δίκτυο σε περιόδους στις οποίες το κόστος του ρεύματος είναι χαμηλό. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται η μείωση ή εξάλειψη των βραχυπρόθεσμων αιχμών ζήτησης που ευθύνονται για την αύξηση του κόστους του ρεύματος. Οι δύο αυτές υπηρεσίες είναι γνωστές και ως Bulk Energy services.[18],[19]

6.2: Black start, Spinning reserves και Load following

Σε περίπτωση black out κάποιου εργοστασίου παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας το σύστημα αποθήκευσης έχει την δυνατότητα να βοηθήσει στην επαναφορά του. Χαμηλώνοντας φορτία που είχαν ήδη ανυψωθεί μπορεί να διοχετευθεί ισχύ πίσω στο δίκτυο, με την υπηρεσία αυτή να ονομάζεται black start.

Το σύστημα αποθήκευσης είναι διαθέσιμο να εξυπηρετήσει οποιαδήποτε απροσδόκητη απώλεια παραγωγής καθώς έχει χρόνο απόκρισης ίσο με 3,8sec με την υπηρεσία αυτή να ονομάζεται spinning reserve.

Οι γεννήτριες μπορούν να αλλάξουν αυτόματα την έξοδο τους έτσι ώστε να αντισταθμίσουν τις διάφορες διακυμάνσεις του φορτίου με αποτέλεσμα να ρυθμίσουν την συχνότητα του συστήματος. Η υπηρεσία αυτή είναι γνωστή και ως load following.

Και οι τρεις παραπάνω υπηρεσίες ανήκουν στην κατηγορία υπηρεσιών Ancillary services δηλαδή έχουν να κάνουν με την δυνατότητα του συστήματος αποθήκευσης να διασφαλίζει την σταθερότητα του δικτύου.[18],[20],[21],[22]

6.3: Capacity firming και Renewable time shift

Σε περιόδους όπου η παραγωγή των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι μεγαλύτερη από την υπάρχουσα ζήτηση το σύστημα αποθήκευσης μπορεί να αντιμετωπίσει την απρόβλεπτη αυτή

παραγωγή εξομαλύνοντας την έξοδο του καταπολεμώντας έτσι τις γρήγορες ταλαντώσεις της τάσης. Η υπηρεσία αυτή είναι γνωστή και ως capacity firming.

Η υπηρεσία renewable time shift, παρόμοια με την energy arbitrage, αφορά την δυνατότητα που μας παρέχει το σύστημα αποθήκευσης για την ελαχιστοποίηση του κόστους αγοράς της ηλεκτρικής ενέργειας καθώς μπορεί να αποθηκεύσει ηλεκτρική ενέργεια σε περιόδους χαμηλών τιμολογίων ανυψώνοντας και κρατώντας το φορτίο σε συγκεκριμένο υψόμετρο.

Και οι δύο αυτές υπηρεσίες ανήκουν στην κατηγορία υπηρεσιών Integration of renewable energies και αφορά τις υπηρεσίες που έχουν να κάνουν με την αδυναμία ανταπόκρισης των μονάδων ΑΠΕ.[18],[23]

Κεφάλαιο 7: Συμπεράσματα

7.1: Συμπεράσματα

Η πτυχιακή εργασία είχε ως στόχο τον συνδυασμό διαφόρων τεχνολογιών κινητήρων με τα αντίστοιχα ηλεκτρονικά ισχύος για την οδήγηση τους με σκοπό την εύρεση του αποδοτικότερου για την υλοποίηση ενός μικρής κλίμακας συστήματος βαρυτικής αποθήκευσης ενέργειας.

Αρχικά υπολογίστηκε ο βαθμός απόδοσης του συστήματος βαρυτικής αποθήκευσης ενέργειας όπου συνδυάζονται επαγωγικοί κινητήρες με VFD ο οποίος και είναι 84,55%. Έπειτα υπολογίστηκε ο βαθμός απόδοσης του συστήματος βαρυτικής αποθήκευσης ενέργειας όπου συνδυάζονται επαγωγικοί κινητήρες με AFE ο οποίος ισούται με 89,14%. Στην συνέχεια υπολογίστηκε ο βαθμός απόδοσης του συστήματος βαρυτικής αποθήκευσης ενέργειας όπου συνδυάζονται σύγχρονοι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη με VFD ο οποίος ανέρχεται στο 95,05%. Τέλος υπολογίστηκε ο βαθμός απόδοσης του συστήματος βαρυτικής αποθήκευσης ενέργειας όπου συνδυάζονται σύγχρονοι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη με μειωτήρα ο οποίος είναι ίσος με 93,15%.

Συμπερασματικά, ο συνδυασμός σύγχρονων κινητήρων μόνιμου μαγνήτη με VFD αποτελεί τον πιο αποδοτικό συνδυασμό από όλους τους συνδυασμούς που μελετήθηκαν επομένως θα είναι και ο συνδυασμός που επιλέγεται για την υλοποίηση του συστήματος βαρυτικής αποθήκευσης ενέργειας μικρής κλίμακας. Ακόμη, το γεγονός ότι ο χρόνος απόκρισης του συστήματος είναι 3,8sec, μας δίνεται η δυνατότητα να αυξήσουμε την ισχύ κλιμακωτά εντάσσοντας περισσότερους κινητήρες, το σύστημα αποθήκευσης μπορεί να λειτουργεί μέχρι και 40 έτη καθώς αποτελείται κυρίως από μηχανικά εξαρτήματα και τέλος μπορεί να τοποθετηθεί σχεδόν παντού από βιομηχανικές έως μη αστικές η και προαστιακές τοποθεσίες το καθιστά ως ένα αξιόπιστο σύστημα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας.

Βιβλιογραφία

- [1] Θεοχάρης Δ. Τσούτσος, Ιωάννης Ν. Κανάκης, Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας Τεχνολογίες και Περιβάλλον, Αθήνα, 2013, σελίδα 443-445
- [2] <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/hd8/h31/WEG-W22-magnet-drive-system-permanent-magnet-motors-50085095-brochure-english-web.pdf>
- [3] https://ecatalog.weg.net/tec_cat/tech_motor_sel_web.asp
- [4] https://www.valiadis.gr/pool/ftp/attachments/PowerElectronics_SD700_Series_Brochure.pdf
- [5] <https://www.directindustry.com/prod/power-electronics/product-37109-1536015.html>
- [6] <https://www.fluke.com/en-us/learn/blog/motors-drives-pumps-compressors/how-to-measure-output-voltage-from-a-vfd-to-a-motor>
- [7] Παντελής Β. Μαλατέστας, Ηλεκτρικές Μηχανές, 3^η Έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη 2015, σελίδα 620
- [8] Παντελής Β. Μαλατέστας, Ηλεκτρικές Μηχανές, 3^η Έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη 2015, σελίδα 619
- [9] <https://download.sew-eurodrive.com/download/pdf/11359005.pdf>
- [10] <https://electricalyatra.com/quadrant-diagram-of-speed-torque-characteristics/electric-drive-english/>
- [11] <https://www.liebherr.com/shared/media/components/documents/systems/liebherr-design-manual-winch-systems-product-catalogue-en-web.pdf>
- [12] https://www.marlev.fr/private10/images/article/document_produit_document_en/61.pdf
- [13] <https://www.unionrope.com/Portals/0/Documents/Technical/Wire-Rope-Basics/importance-of-rope-strands.pdf>
- [14] <https://www.ntgmcable.com/product/62.html>
- [15] <https://www.whitneyeng.com/product/SG-80-Block-Grab/0/28/>
- [16] <https://www.motioncontroltips.com/how-to-calculate-required-input-power-for-a-gearmotor/>

- [17] https://www.researchgate.net/publication/221926555_Development_of_Energy_Efficiency_Aware_Applications_Using_Commercial_Low_Power_Embedded_Systems
- [18] <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1269847/FULLTEXT01.pdf>
- [19] <https://www.idealenergysolar.com/peak-shaving-solar-storage/>
- [20] <https://www.nrel.gov/grid/black-start.html>
- [21] <https://energyknowledgebase.com/topics/spinning-reserves.asp>
- [22] <https://aemo.com.au/energy-systems/electricity/wholesale-electricity-market-wem/participate-in-the-market/information-for-current-participants/lfas-market-participation>
- [23] <https://www.ge.com/gas-power/applications/grid-firming>