



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ

Διπλωματική Εργασία

Άρτεμις Λιακοπούλου

Επιβλέπων: Δημήτριος Μπαργιώτας

Βόλος 2020



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ

Διπλωματική Εργασία

Άρτεμις Λιακοπούλου

Επιβλέπων: Δημήτριος Μπαργιώτας

Βόλος 2020



UNIVERSITY OF THESSALY

SCHOOL OF ENGINEERING

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING

ENERGY REDUCTION IN INDUSRTY

Diploma Thesis

Artemis Liakopoulou

Supervisor: Dimitrios Bargiotas

Volos 2020

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ ή ΣΧΟΛΙΑ

Θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα καθηγητή μου Δημήτριο Μπαργιώτα για τη δυνατότητα που μου έδωσε να πραγματοποιήσω την πτυχιακή μου εργασία καθώς και για τις πολύτιμες συμβουλές που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησής της.

Στη συνέχεια, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους του καθηγητές του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας για τις πολύτιμες γνώσεις που μου προσέφεραν όλα αυτά τα χρόνια.

Τέλος, θέλω να εκφράσω ένα τεράστιο ευχαριστώ στην οικογένεια μου για την στήριξη και την εμπιστοσύνη που μου έδειξε όλα αυτό το διάστημα, φροντίζοντας για την καλύτερη δυνατή μόρφωσή μου.

**ΥΠΕΥΘΥΝΗ ΔΗΛΩΣΗ ΠΕΡΙ ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΗΣ ΔΕΟΝΤΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΠΝΕΥΜΑΤΙΚΩΝ
ΔΙΚΑΙΩΜΑΤΩΝ**

Με πλήρη επίγνωση των συνεπειών του νόμου περί πνευματικών δικαιωμάτων, δηλώνω ρητά ότι η παρούσα διπλωματική εργασία, καθώς και τα ηλεκτρονικά αρχεία και πηγαίοι κώδικες που αναπτύχθηκαν ή τροποποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας, αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής μου εργασίας, δεν προσβάλλει κάθε μορφής δικαιώματα διανοητικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας και προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχει έργα/εισφορές τρίτων για τα οποία απαιτείται άδεια των δημιουργών/δικαιούχων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον και πληρούν τους κανόνες της επιστημονικής παράθεσης. 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. Αναλαμβάνω πλήρως, ατομικά και προσωπικά, όλες τις νομικές και διοικητικές συνέπειες που δύναται να προκύψουν στην περίπτωση κατά την οποία αποδειχθεί, διαχρονικά, ότι η εργασία αυτή ή τμήμα της δεν μου ανήκει διότι είναι προϊόν λογοκλοπής.

Η Δηλούσα

(Υπογραφή)

Άρτεμις Αιακοπούλου

22/06/2020

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το ενεργειακό πρόβλημα αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα ζητήματα της σύγχρονης εποχής καθώς η αντιμετώπισή του συγκαταλέγεται στις πρωταρχικές προτεραιότητες. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με τη διαρκώς αυξανόμενη ζήτηση ενέργειας στο βιομηχανικό χώρο δημιούργησε την επιτακτική ανάγκη μελέτης της εξοικονόμησης ενέργειας στη βιομηχανία.

Επιπλέον, οι διαρκώς εξελισσόμενες τεχνολογικές δυνατότητες αποτέλεσαν πρόσφορο έδαφος, προκειμένου να δημιουργηθούν τόσο καινοτόμα και ανεπτυγμένα συστήματα και προγράμματα εξοικονόμησης ενέργειας εκ νέου, όσο και μέθοδοι εκσυγχρονισμού της ήδη υπάρχουσας τεχνολογίας, με στόχο την εξοικονόμηση ενέργειας.

Αναλυτικότερα, συνιστώσα της σύγχρονης τεχνολογίας εξοικονόμησης ενέργειας σε βιομηχανίες αποτελούν οι μέθοδοι βελτίωσης του συντελεστή ισχύος ενός τριφασικού επαγωγικού κινητήρα, τα ανεπτυγμένα συστήματα που χρησιμοποιούν τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, και συγκεκριμένα τη γεωθερμική, την ηλιακή και την αιολική, τα ενεργειακά προγράμματα ζήτησης-απόκρισης, τα «έξυπνα» συστήματα φωτισμού καθώς και τα συστήματα αυτοματισμού και συγκεκριμένα τα συστήματα διαχείρισης κτιριακής ενέργειας και το σύστημα ελέγχου της μαγνητικής ροής ενός επαγωγικού κινητήρα, με στόχο τη βελτίωση της απόδοσής του και την γρήγορη απόκριση της στροφορμής του.

Η ενσωμάτωση αυτών των ανεπτυγμένων τεχνολογιών στο βιομηχανικό χώρο αποτελεί βασική παράμετρο για την επίτευξη του στόχου της εξοικονόμησης ενέργειας σε αυτόν. Παρόλα αυτά, οι συνεχώς αυξανόμενες ενεργειακές ανάγκες στις βιομηχανίες σε συνδυασμό με τη ραγδαία τεχνολογική ανάπτυξη, οδηγεί στην ανάγκη μελλοντικών ερευνών, με απώτερο στόχο τη δημιουργία πιο «έξυπνων» συστημάτων εξοικονόμησης ενέργειας, των οποίων η λειτουργία βασίζεται στην τεχνητή νοημοσύνη.

ABSTRACT

The energy problem is one of the most crucial issues of the modern era and its solution is one of the top priorities. This fact, combined with the ever-increasing demand for energy in the industrial sector, has created the urgent need to study energy savings in industry.

Moreover, the ever-evolving technological potential has been a breeding ground for both innovative and developed energy-saving systems and programs, as well as for methods of modernizing existing technology, with the aim of saving energy.

More specifically, a component of modern energy-saving technology in industries are the methods of improving the power factor of a three-phase inductive motor, the developed systems using renewable energy sources, namely geothermal, solar and wind, demand-response energy programs, "smart" lighting systems as well as automation systems, namely building energy management systems and the flux control system of an inductive motor, with the aim for improvement of its performance and quick response of its torque.

The integration of these developed technologies into the industrial sector is a key parameter for achieving the goal of energy saving in it. Nevertheless, the ever-increasing energy needs in industries combined with rapid technological development, leads to the need for future research, with the ultimate goal of creating smarter energy-saving systems, the operation of which is based on artificial intelligence.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	vi
ABSTRACT	vii
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ	viii
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	1
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	4
ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΙΣΧΥΟΣ ΣΕ ΤΡΙΦΑΣΙΚΟΥΣ ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΥΣ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ	4
2.1 Σημασία βελτίωσης του συντελεστή ισχύος	4
2.2 Ορισμός συντελεστή ισχύος	4
2.2.1. Μειονεκτήματα χαμηλού συντελεστή ισχύος.....	5
2.3 Τριφασικός επαγωγικός κινητήρας τύπου “squirrel cage”	7
2.3.1. Ο τρόπος λειτουργίας του τριφασικού επαγωγικού κινητήρα.....	7
2.3.2. Ο τρόπος κατασκευής του τριφασικού επαγωγικού κινητήρα	10
2.3.3. Εκκίνηση λειτουργίας τριφασικού επαγωγικού κινητήρα.....	13
2.3.4. Ταχύτητα τριφασικού επαγωγικού κινητήρα	13
2.4 Αίτια μικρής τιμής του συντελεστή ισχύος	16
2.4.1. Αφόρτιστος τριφασικός επαγωγικός κινητήρας	16
2.4.2. Φορτισμένος τριφασικός επαγωγικός κινητήρας	17
2.5 Τρόποι διόρθωσης του συντελεστή ισχύος	17
2.5.1. Στατικοί πυκνωτές.....	17
2.5.2. Σύγχρονοι συμπτυκνωτές	18
2.5.3. Πρωθητές φάσης	20
2.6 Εύρεση τιμής συντελεστή ισχύος για σωστή διόρθωσή του	22
2.6.1. Ισοδύναμο κύκλωμα τριφασικού επαγωγικού κινητήρα	22
2.6.2. Μέθοδος Kriging	23
2.6.3. Εφαρμογή της μεθόδου Kriging.....	25
2.7 Συμπέρασμα	26
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	27
ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	27
3.1 Εισαγωγή	27
3.2 Σημαντικότητα εισαγωγής ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στη βιομηχανία	27
3.3 Γεωθερμική ενέργεια	28
3.3.1. Τρόπος λειτουργίας συστήματος γεωθερμικών αντλιών.....	30
3.3.2. Κατασκευή γεωθερμικού συστήματος σε συνδυασμό με βοηθητικό ηλιακό σύστημα	31
3.3.3. Σύγχρονες αντλίες θερμότητας τύπου PSF	32
3.3.4. Αντλίες θερμότητας πολλαπλών ταχυτήτων	34
3.4 Ηλιακή ενέργεια	37

3.4.1. Τεχνολογία συγκεντρωμένης ηλιακής ενέργειας	37
3.4.2. Φωτοβολταϊκά συστήματα.....	39
3.4.3. Σύγχρονα ηλιακά πάνελ.....	42
3.5 Αιολική Ενέργεια	45
3.5.1. Περιγραφή συστήματος ανεμογεννήτριας.....	45
3.5.2. Υβριδικό σύστημα ενέργειας	46
3.5.3. Γεννήτρια αιολικής ενέργειας με σχέδιο μέγιστης παραγωγής ισχύος	50
3.6 Προοπτική ενσωμάτωσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στη βιομηχανία	53
3.7 Συμπέρασμα.....	54
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.....	55
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΖΗΤΗΣΗΣ (Demand Side Management - DSM)	
.....	55
4.1 Εισαγωγή.....	55
4.2 Σημαντικότητα ενσωμάτωσης προγραμμάτων διαχείρισης ενεργειακής ζήτησης (DSM) στο βιομηχανικό χώρο	55
4.3 Προγράμματα διαχείρισης φορτίου (LM) στο βιομηχανικό χώρο.....	56
4.3.1. Μέθοδος εναλλαγής φορτίου	56
4.3.2. Μέθοδος ελέγχου φορτίου.....	60
4.3.3. Μέθοδος διαχείρισης φορτίου “Peak Clipping”	64
4.3.4. Μέθοδος διαχείρισης φορτίου “Valley Filling”	64
4.4 Προγράμματα Ενεργειακής Αποδοτικότητας (EE) στο βιομηχανικό χώρο	65
4.5 Σημαντικότητα ενσωμάτωσης προγραμμάτων ζήτησης-απόκρισης (DR) στο βιομηχανικό χώρο	66
4.5.1. Πολυπρακτορικά συστήματα στη βιομηχανία	67
4.5.1.1. Σύστημα διανομής παραγόμενης ενέργειας	68
4.5.1.2. Ενσωμάτωση του προγράμματος ζήτησης-απόκρισης στο μοντέλο διανομής παραγόμενης ενέργειας	70
4.5.1.3. Αποτελέσματα εφαρμογής του προγράμματος ζήτησης-απόκρισης στο μοντέλο διανομής παραγόμενης ενέργειας.....	73
4.6 Συμπέρασμα.....	75
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.....	76
ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΦΩΤΙΣΜΟΥ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	76
5.1 Ορισμός των «έξυπνων» συστημάτων.....	76
5.2 Σημασία ενσωμάτωσης «έξυπνων» συστημάτων φωτισμού στο βιομηχανικό χώρο	76
5.3 Περιγραφή «έξυπνων» συστημάτων φωτισμού	77
5.3.1. Ιδιότητες «έξυπνων» συστημάτων φωτισμού.....	77
5.3.2. Δομή «έξυπνων» συστημάτων φωτισμού	78
5.3.3. Σύστημα ελέγχου «έξυπνων» συστημάτων φωτισμού	79
5.4 «Έξυπνο» σύστημα φωτισμού που χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο αυτόνομης και βέλτιστης κατανομής.....	80
5.4.1. Αλγόριθμος αυτόνομης και βέλτιστης κατανομής	81
5.5 «Έξυπνο» σύστημα φωτισμού που εκμεταλλεύεται το φυσικό φως.....	85

5.5.1. Δομή «έξυπνου» συστήματος φωτισμού που εκμεταλλεύεται το φυσικό φως	85
5.5.2. Λειτουργία «έξυπνου» συστήματος φωτισμού που εκμεταλλεύεται το φυσικό φως.....	87
5.6 Σύστημα φωτισμού με λαμπτήρες τύπου LED που λειτουργεί με ηλιακή ενέργεια	90
5.6.1. Σχέδιο της τεχνικής nMPPO για την μέγιστη παραγωγή ενέργειας από το φωτοβολταϊκό σύστημα.....	91
5.6.2. Σύστημα ελέγχου φόρτισης της μπαταρίας	93
5.6.3. Σύστημα ελέγχου εκφόρτισης της μπαταρίας για την παροχή φωτισμού με χρήση λαμπτήρων τύπου LED	95
5.6.4. Σύστημα ελέγχου εκφόρτισης των λαμπτήρων τύπου LED.....	98
5.6.5. Κεντρικό σύστημα ελέγχου του συστήματος φωτισμού με λαμπτήρες τύπου LED που λειτουργεί με ηλιακή ενέργεια.....	99
5.7 Συμπέρασμα.....	100
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6.....	102
ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ.....	102
6.1 Η έννοια του αυτοματισμού.....	102
6.2 Η σημασία ενσωμάτωσης των συστημάτων κτιριακής ενεργειακής διαχείρισης (BEMS) στα βιομηχανικά κτίρια	102
6.3 Σύστημα διαχείρισης κτιριακής ενέργειας που χρησιμοποιεί πολυπρακτορική μεθοδολογία ελέγχου λήψης απόφασης	103
6.3.1. Δομή συστήματος διαχείρισης κτιριακής ενέργειας που χρησιμοποιεί πολυπρακτορική μεθοδολογία ελέγχου λήψης απόφασης	103
6.3.2. Ενεργειακή διαστασολόγηση του βιομηχανικού κτιρίου.....	105
6.3.3. Πράκτορες συστήματος BEMS.....	106
6.4 Σύστημα διαχείρισης κτιριακής θερμικής ενέργειας μέσω του ελέγχου του συστήματος αποθήκευσης της θερμικής ενέργειας	108
6.4.1. Δομή και λειτουργία του ελέγχου του συστήματος αποθήκευσης της θερμικής ενέργειας που βασίζεται στις τεχνικές CI	108
6.5 Σύστημα ελέγχου επαγωγικού κινητήρα για τη βέλτιστη απόκριση και αποδοτικότητα του.....	111
6.5.1. Δυναμική συμπεριφορά του επαγωγικού κινητήρα	112
6.5.2. Έλεγχος διανύσματος μαγνητικής ροής του στάτορα μέσω ενός PWM εναλλάκτη για την υψηλή αποδοτικότητα του.....	115
6.5.3. Έλεγχος της στροφορμής για γρήγορη απόκριση του κινητήρα	118
6.5.4. Συνδυασμός ελεγκτών για την επιλογή του διανύσματος τάσης του PWM εναλλάκτη από τον πίνακα λειτουργίας.....	120
6.6 Συμπέρασμα.....	121
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7.....	123
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	123
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	124

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ανέκαθεν η χρήση της ενέργειας αποτελούσε έναν από τους ισχυρότερους παράγοντες ανάπτυξης των χωρών. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με την ενεργειακή κρίση στη Δύση στις αρχές του 1974, συντέλεσε στη δημιουργία του έντονου προβλήματος της συνεχώς αυξανόμενης ζήτησης ενέργειας και επομένως στην αδυναμία απόκρισης στις ενεργειακές ανάγκες, λόγω περιορισμένης ενεργειακής παραγωγής. Ως αποτέλεσμα αυτού, έγινε συνειδητό ότι τα ενεργειακά αποθέματα δεν είναι ανεξάντλητα καθώς δημιουργήθηκε η επιτακτική ανάγκη επίλυσης του ενεργειακού προβλήματος.

Για την επίτευξη αυτού του στόχου, από τη δεκαετία του 1970 μέχρι σήμερα η εξοικονόμηση και η ορθολογική χρήση της ενέργειας αποτελεί ζήτημα πρωταρχικής προτεραιότητας. Επιπλέον, δεδομένου της αύξησης των ενεργειακών αναγκών των αναπτυσσόμενων χωρών, οι οποίες εκτιμάται ότι θα πολλαπλασιαστούν με την πάροδο των χρόνων, γίνεται αντιληπτό ότι η εξοικονόμηση ενέργειας αποτελεί τη σημαντικότερη ενεργειακή πηγή.

Ο όρος της εξοικονόμησης της ενέργειας αφορά τόσο στον περιορισμό της αλόγιστης κατανάλωσης, όσο και στην αποδοτική χρήση της ενέργειας, με στόχο την αποτελεσματική εκτέλεση μιας διεργασίας με μικρότερη κατανάλωση ενέργειας. Στη σύγχρονη εποχή, ιδιαίτερα στην Ελλάδα, υπάρχουν μεγάλα περιθώρια εξοικονόμησης ενέργειας στους περισσότερους τομείς.

Ο σημαντικότερος τρόπος αξιοποίησης της ενέργειας είναι η ενεργειακή βελτιστοποίηση, η οποία αποτελεί έναν από τους βασικότερους στόχους που παρουσιάζονται στο βιομηχανικό χώρο. Οι δυνατότητες που παρέχονται, προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η ενεργειακή αποδοτικότητα σε αυτόν σχετίζονται τόσο με την ενσωμάτωση καινοτόμων τεχνολογιών, που στοχεύουν στον έλεγχο της παραγωγής, της αποθήκευσης, της διανομής, της κατανάλωσης της ενέργειας στο βιομηχανικό χώρο, στην εγκατάσταση συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όσο και με τον εκσυγχρονισμό των ήδη υπάρχοντων ενεργειακών συστημάτων που απαντιούνται σε αυτόν.

Η εξοικονόμηση ενέργειας σε βιομηχανίες επιτυγχάνεται σε τρία επίπεδα πρακτικών μέτρων. Τα μέτρα αυτά αφορούν στην τεχνολογική επένδυση καθώς και στον ανθρώπινο παράγοντα και είναι τα εξής:

1. Τα μέτρα μηδενικού κόστους, όπως η επαναρύθμιση των συστημάτων ελέγχου και το κλείσιμο των διακοπών σε τμήματα που δεν λειτουργούν, έχουν ως παράμετρο τον ανθρώπινο παράγοντα και αποφέρουν έως 10% εξοικονομούμενης ενέργειας.
2. Τα μέτρα χαμηλού κόστους, όπως η συντήρηση εγκαταστάσεων και τα απλά συστήματα ελέγχου, έχουν ως παράμετρο τόσο τον ανθρώπινο παράγοντα, όσο την επένδυση σε τεχνολογίες χαμηλού κόστους, και αποφέρουν έως 15% εξοικονομούμενης ενέργειας.
3. Τα μέτρα υψηλού κόστους, όπως πολύπλοκες και καινοτόμες τεχνολογίες που βασίζονται σε στρατηγικές ελέγχου, έχουν ως παράμετρο την επένδυση σε τεχνολογίες με υψηλό κόστος και αποφέρουν έως 20% εξοικονομούμενης ενέργειας.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα μελετήσουμε μεθόδους βελτίωσης της αποδοτικότητας των ήδη υπάρχοντων ενεργειακών συστημάτων, που συναντάμε στο βιομηχανικό χώρο, την ενσωμάτωση νέων τεχνολογιών, που χρησιμοποιούν τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, που βασίζονται σε στρατηγικές ελέγχου, προκειμένου να γίνει η βέλτιστη διαχείριση της ενέργειας που παράγεται, διανέμεται, αποθηκεύεται και καταναλώνεται σε αυτόν καθώς και την ενσωμάτωση προγραμμάτων που διαχειρίζονται την ενεργειακή ζήτηση και απόκριση.

Στο κεφάλαιο 2 γίνεται αναφορά στην βελτίωση του συντελεστή ισχύος σε τριφασικούς επαγωγικούς κινητήρες, οι οποίοι χρησιμοποιούνται ευρέως στον βιομηχανικό χώρο. Αρχικά, αναφέρεται η σημασία βελτίωσης του συντελεστή ισχύος καθώς γίνεται μελέτη των αιτίων της χαμηλής του τιμής. Στη συνέχεια, αναλύεται ο τρόπος λειτουργίας του τριφασικού επαγωγικού κινητήρα καθώς και οι τρόποι βελτίωσης του συντελεστή ισχύος του μέσω εγκατάστασης συγκεκριμένου εξοπλισμού. Τέλος, παρουσιάζονται δύο μέθοδοι εύρεσης τιμής του συντελεστή ισχύος, προκειμένου να επιτευχθεί η διόρθωσή του.

Στο κεφάλαιο 3 γίνεται αναφορά στο σημαντικό ρόλο των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο βιομηχανικό χώρο και ύστερα η περιγραφή τριών βασικών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Επιπλέον, γίνεται περιγραφή των σύγχρονων τεχνολογιών που χρησιμοποιούν ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και συγκεκριμένα τη γεωθερμική, την ηλιακή και την αιολική ενέργεια. Τέλος, γίνεται αναφορά στην προοπτική ενσωμάτωσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο βιομηχανικό χώρο.

Στο κεφάλαιο 4 γίνεται αναφορά στο σημαντικό ρόλο των προγραμμάτων διαχείρισης ενεργειακής ζήτησης (DSM) και συγκεκριμένα αυτού της διαχείρισης φορτίου (LM) και της ενεργειακής αποδοτικότητας (EE), ως μέσο βελτίωσης της αποδοτικότητας των ενεργειακών συστημάτων στο βιομηχανικό χώρο και επομένως εξοικονόμησης ενέργειας σε αυτόν. Στη συνέχεια, γίνεται αναφορά στα προγράμματα ζήτησης-απόκρισης (DR) στο βιομηχανικό χώρο. Τέλος, γίνεται η περιγραφή των πολυπρακτορικών συστημάτων, στα οποία γίνεται η εφαρμογή των τεχνολογιών απόκρισης-ζήτησης.

Στο κεφάλαιο 5 αναφέρεται ο ορισμός των «έξυπνων» συστημάτων και η σημασία ενσωμάτωσης των «έξυπνων» συστημάτων φωτισμού στο βιομηχανικό χώρο. Στη συνέχεια, γίνεται η περιγραφή τους και η μελέτη του «έξυπνου» συστήματος φωτισμού που χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο αυτόνομης και βέλτιστης κατανομής, του «έξυπνου» συστήματος φωτισμού που εκμεταλλεύεται το φυσικό φως και τέλος του συστήματος φωτισμού με λαμπτήρες τύπου LED που λειτουργεί με ηλιακή ενέργεια.

Στο κεφάλαιο 6 γίνεται αναφορά στην έννοια του αυτοματισμού και στη σημασία ενσωμάτωσης συστημάτων διαχείρισης κτιριακής ενέργειας στο βιομηχανικό χώρο. Στη συνέχεια, γίνεται μελέτη τριών διαφορετικών συστημάτων αυτοματισμού και συγκεκριμένα του συστήματος διαχείρισης κτιριακής ενέργειας που χρησιμοποιεί πολυπρακτορική μεθοδολογία ελέγχου λήψης απόφασης, του συστήματος διαχείρισης κτιριακής θερμικής ενέργειας μέσω του ελέγχου του συστήματος αποθήκευσης της θερμικής ενέργειας καθώς και του συστήματος ελέγχου επαγωγικού κινητήρα για τη βέλτιστη απόκριση και αποδοτικότητα του.

Τέλος, στο Κεφάλαιο 7 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα κυριότερα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας, οι λόγοι πρωτοτυπίας της έρευνας και της προσέγγισης, η συμβολή της στη διερεύνηση του θέματος και πιθανές προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση του θέματος στο μέλλον.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

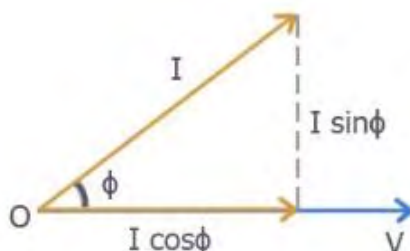
ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΙΣΧΥΟΣ ΣΕ ΤΡΙΦΑΣΙΚΟΥΣ ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΥΣ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ

2.1 Σημασία βελτίωσης του συντελεστή ισχύος

Η ηλεκτρική ενέργεια είναι άμεσα συνυφασμένη με την παραγωγή, την μετάδοση και την κατανομή του εναλλασσόμενου ρεύματος. Προκειμένου να επιτευχθεί ο στόχος του περιορισμού κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας στον βιομηχανικό χώρο κρίνεται απαραίτητο να ερευνηθεί η βελτίωση του συντελεστή ισχύος διάφορων φορτίων, που παρατηρούμε στον βιομηχανικό χώρο και έχουν χαμηλό συντελεστή ισχύος. Η μικρή τιμή του συντελεστή ισχύος ενός φορτίου είναι ανεπιθύμητη καθώς ευθύνεται για την αύξηση του ρεύματος και συνεπώς για τη δαπάνη ενέργειας σε όλα τα συστήματα ενέργειας τόσο στις γεννήτριες παραγωγής ενέργειας, όσο και στις συσκευές χρήσης. Έχοντας στόχο τη βέλτιστη ενεργειακή και οικονομική απόδοση, είναι σημαντικό να διασφαλίσουμε την πλησιέστερη στη μονάδα τιμή του συντελεστή ισχύος [1].

2.2 Ορισμός συντελεστή ισχύος

Η έννοια του συντελεστή ισχύος σχετίζεται με τη γωνία που σχηματίζεται μεταξύ του διανύσματος της τάσης και του ρεύματος σε ένα κύκλωμα εναλλασσόμενου ρεύματος. Πιο συγκεκριμένα, το συνημίτονο της γωνίας αυτής ονομάζεται συντελεστής ισχύος. Η γωνία μεταξύ της τάσης και του ρεύματος ενός κυκλώματος παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.1. Εάν το κύκλωμα είναι επαγωγικό, τότε το διάνυσμα της τάσης προηγείται από αυτό του ρεύματος και ο συντελεστής ισχύος ονομάζεται επαγωγικός. Αντιθέτως, εάν το διάνυσμα του ρεύματος προηγείται από αυτό της τάσης, τότε ο συντελεστής ισχύος ονομάζεται χωρητικός [1].



Σχήμα 2.1. Γωνία συντελεστή ισχύος

2.2.1 Μειονεκτήματα χαμηλού συντελεστή ισχύος

Ο ρόλος του συντελεστή ισχύος είναι καθοριστικός για την ενεργειακή αποδοτικότητα του βιομηχανικού χώρου, καθώς η ενεργειακή κατανάλωση εξαρτάται από την τιμή του. Γνωρίζοντας τους μαθηματικούς τύπους της ενεργούς ισχύος και του ρεύματος ενός τριφασικού κυκλώματος, γίνεται αντιληπτό ότι για συγκεκριμένη τιμή ισχύος και τάσης, η τιμή του ρεύματος είναι αντιστρόφως ανάλογη της τιμής του συντελεστή ισχύος. Άρα, όσο χαμηλότερη τιμή έχει ο συντελεστής ισχύος, τόσο μεγαλύτερη θα είναι η τιμή του ρεύματος και αντιστρόφως.

Ο τύπος της ενεργούς ισχύος τριφασικού κυκλώματος είναι: $P = \sqrt{3} * V_L * I_L * \cos\phi$

Ο τύπος του ρεύματος τριφασικού κυκλώματος είναι: $I_L = \frac{P}{\sqrt{3} * V_L * \cos\phi}$

, όπου P = η ενεργός ισχύς του κυκλώματος με μονάδες μέτρησης τα Watt,

V_L = η τάση του κυκλώματος με μονάδες μέτρησης τα Volt,

I_L = το ρεύμα του κυκλώματος, με μονάδες μέτρησης τα Ampere και

$\cos\phi$ = ο συντελεστής ισχύος.

Τα μειονεκτήματα ενός συντελεστή ισχύος με χαμηλή τιμή είναι [1]:

1. Η μεγάλη τιμή της φαινομένης (ολικής) ισχύος, με μονάδες μέτρησης τα kVA, σε μηχανές που χρησιμοποιούνται στις βιομηχανίες. Αυτό είναι προφανές, αφού $kVA = kW / \cos\phi$. Ως αποτέλεσμα αυτού, ένα φορτίο με μεγάλη τιμή φαινομένης ισχύος είναι μεγαλύτερο και ακριβότερο.
2. Η χρήση μεγαλύτερου μεγέθους αγωγών για μεταφορά ρεύματος, σε συνθήκες όπου η τιμή του συντελεστή ισχύος είναι μικρή και η τάση σταθερή, προκειμένου να μεταφερθεί ή να διανεμηθεί συγκεκριμένο ποσό ενέργειας.

a. Παράδειγμα:

Αν σε μία βιομηχανία ένας μονοφασικός κινητήρας λειτουργεί με ενεργό ισχύ $P = 10\text{kW}$, τάση $V = 250\text{Volt}$ και μοναδιαίο συντελεστή ισχύος, τότε η τιμή του ρεύματος υπολογίζεται ως $I_L = P/V$, επομένως οι αγωγοί του κινητήρα θα χρειαστούν ρεύμα με τιμή $10000/250 = 40\text{Ampere}$. Αν όμως αντί για μοναδιαίο συντελεστή ισχύος, ο κινητήρας λειτουργούσε με τιμή συντελεστή ισχύος 0.8 , τότε με τον ίδιο τρόπο που υπολογίσαμε την τιμή του ρεύματος προηγουμένως, παρατηρούμε ότι οι αγωγοί του κινητήρα θα χρειαστούν ρεύμα με τιμή 50 Ampere . Επομένως, μικρός συντελεστής ισχύος συνεπάγεται χρήση μεγάλων αγωγών μεταφοράς ρεύματος.

3. Η αύξηση των απωλειών σε μηχανές με χάλκινη κατασκευή. Το υψηλό ρεύμα σε συνδυασμό με μικρό συντελεστή ισχύος οδηγεί στις απώλειες στην ενεργό ισχύ της μηχανής και επομένως στην χαμηλή ενεργειακή της αποδοτικότητα.
4. Η αδυναμία ρύθμισης της τάσης. Πιο συγκεκριμένα, η μεγάλη τιμή ρεύματος και ταυτόχρονα ο μικρός συντελεστής ισχύος οδηγεί σε μεγάλες πτώσεις της τάσης στις γραμμές μεταφοράς, στους διανομείς ρεύματος και στους μετασχηματιστές. Επομένως, προκαλείται αδυναμία λειτουργίας των συσκευών χρήσης. Προκειμένου να αποφευχθεί αυτό, είναι απαραίτητη η χρήση επιπλέον εξοπλισμού, όπως ρυθμιστών τάσεων.
5. Η μείωση χειρισμού της χωρητικότητας συστημάτων. Αναλυτικότερα, το ρεύμα της άεργου ισχύος αποτρέπει την ολική χρήση της ήδη υπάρχουσας χωρητικής ενέργειας.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, γίνεται κατανοητή η σημασία βελτίωσης του συντελεστή ισχύος, προκειμένου να επιτευχθεί ο στόχος της αύξησης της ενεργειακής αποδοτικότητας στον βιομηχανικό χώρο. Ένας τρόπος να οδηγηθούμε στην μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης είναι η αύξηση της αποδοτικότητας μηχανών, όπως οι τριφασικοί επαγωγικοί κινητήρες, που χρησιμοποιούνται ευρέως στο βιομηχανικό χώρο. Προκειμένου να πετύχουμε την βελτίωση τους κρίνεται απαραίτητο να γνωρίσουμε αρχικά τον τρόπο λειτουργίας τους και κατασκευής τους.

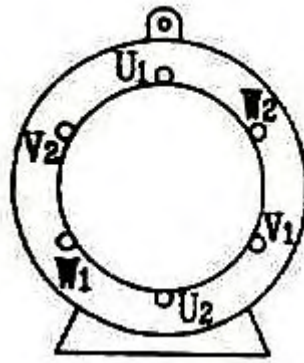
2.3 Τριφασικός επαγωγικός κινητήρας τύπου “squirrel cage”

Ο ηλεκτρικός κινητήρας είναι μια ηλεκτρομηχανική συσκευή, η οποία μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική ενέργεια. Στην περίπτωση που παρέχεται τριφασικό εναλλασσόμενο ρεύμα, ο πιο διαδεδομένος κινητήρας που χρησιμοποιείται στην ηλεκτρική μηχανική είναι ο τριφασικός επαγωγικός κινητήρας τύπου “squirrel cage”. Πιο συγκεκριμένα, σχεδόν το 80% της μηχανικής ενέργειας που χρησιμοποιείται στις βιομηχανίες παρέχεται από τους τριφασικούς επαγωγικούς κινητήρες λόγω των χαρακτηριστικών τους. Αναλυτικότερα, αυτού του τύπου οι κινητήρες έχουν απλή και ανθεκτική κατασκευή, χαμηλό κόστος, καλά λειτουργικά χαρακτηριστικά, είναι υπεύθυνοι για την αλλαγή του ηλεκτρικού ρεύματος καθώς και την καλή ρύθμιση της ταχύτητας. Σε αυτόν τον κινητήρα, η ενέργεια μεταφέρεται από τον στάτορα στο ρότορα μέσω επαγωγής. Τέλος, ο επαγωγικός κινητήρας ονομάζεται αλλιώς και ασύγχρονος κινητήρας, αφού η ταχύτητα με την οποία κινείται διαφέρει από τη σύγχρονη [2,3].

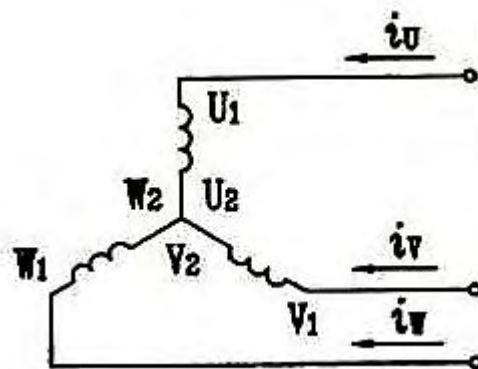
2.3.1 Ο τρόπος λειτουργίας του τριφασικού επαγωγικού κινητήρα

Αρχικά, ο τρόπος λειτουργίας του τριφασικού επαγωγικού κινητήρα βασίζεται στην ηλεκτρομαγνητική επαγωγή. Πιο συγκεκριμένα, όταν στις σπείρες του στάτορα παρέχεται τριφασικό εναλλασσόμενο ρεύμα, παράγεται στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο μεταξύ του στάτορα και του ρότορα. Λόγω του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου, παράγεται επαγωγική ηλεκτρεγερτική δύναμη και ρεύμα στο ρότορα. Το ρεύμα στους αγωγούς του ρότορα προκαλεί την περιστροφή του με την ίδια κατεύθυνση περιστροφής του μαγνητικού πεδίου, που συμβαδίζει με αυτή της φοράς των δεικτών του ρολογιού [4].

Στη συνέχεια, θα αναλύσουμε τον τρόπο παραγωγής μαγνητικού πεδίου στον τριφασικό επαγωγικό κινητήρα. Πιο συγκεκριμένα, στον τριφασικό επαγωγικό κινητήρα οι σπείρες βρίσκονται στον στάτορα και έχουν την δομή των τριών φάσεων U/V/W, οι οποίες διαφέρουν μεταξύ τους 120 μοίρες, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2. Επιπλέον, έχουν παροχή συμμετρικού τριφασικού εναλλασσόμενου ρεύματος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.3.

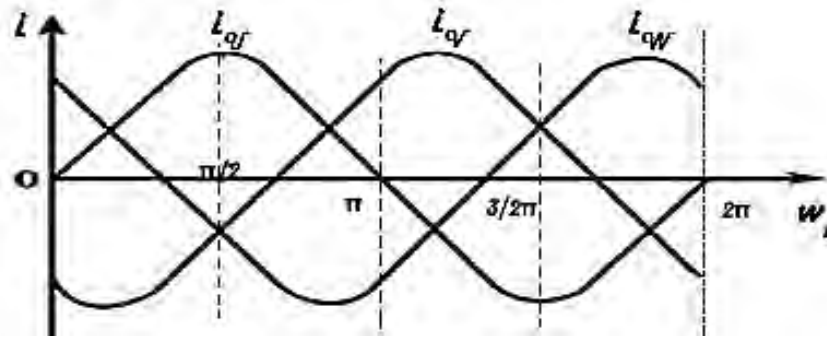


Σχήμα 2.2. Φάσεις σπειρών στάτορα



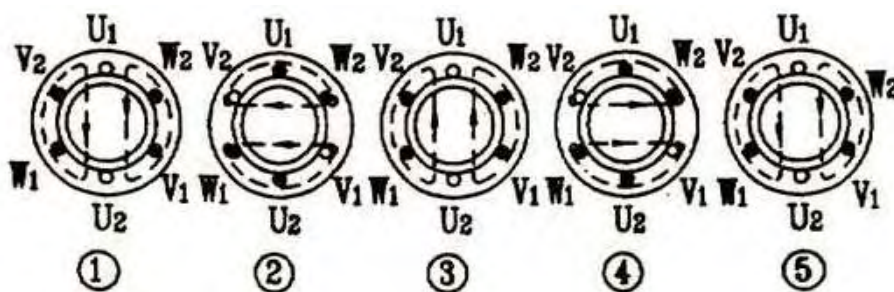
Σχήμα 2.3. Ροή ρεύματος στις φάσεις του στάτορα

Αναλυτικότερα, όταν το ρεύμα έχει θετική τιμή, ρέει από τον πόλο U_1 στο U_2 , από τον πόλο V_1 στο V_2 και από τον πόλο W_1 στο W_2 . Όταν το ρεύμα έχει αρνητική τιμή, όπως φαίνεται στην γραφική παράσταση του Σχήματος 2.4, η ροή του είναι διαφορετική. Συγκεκριμένα, όταν $\omega_t = 0$, τότε $i_u = 0$, η τιμή του i_v είναι αρνητική και η τιμή του i_w είναι θετική. Επομένως, το ρεύμα ρέει από τον πόλο V_2 στο V_1 , από τον πόλο W_1 στο W_2 , ενώ για τη φάση U το ρεύμα είναι μηδέν [5,6].



Σχήμα 2.4. Γραφική συνάρτηση ρεύματος

Σύμφωνα με τον κανόνα του δεξιού χεριού, η κατεύθυνση περιστροφής του μαγνητικού πεδίου, που παράγεται λόγω του ρεύματος τη χρονική στιγμή όπου $\omega_t = 0$, αποτελεί συνάρτηση της κατεύθυνσης περιστροφής του άξονα που δημιουργείται από δύο πόλους κάθε φάσης. Πιο συγκεκριμένα, ο άξονας της φάσης U έχει δύο πόλους, τον Βόρειο U1 και τον Νότιο U2. Αντίστοιχα, το ίδιο ισχύει για τις φάσεις V και W. Σύμφωνα με το Σχήμα 2.5, τη χρονική στιγμή όπου $\omega_t = \pi/2$, η τιμή του i_u μεγιστοποιείται και το ρεύμα ρέει από τον U1 στον U2. Η τιμή του i_v παραμένει αρνητική, επομένως και η ροή του ρεύματος παραμένει η ίδια. Η τιμή του i_w είναι αρνητική, άρα η ροή του ρεύματος γίνεται από τον W2 στον W1. Η κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου περιστρέφεται σύμφωνα με την κατεύθυνση των δειχτών του ρολογιού κατά 90 μοίρες. Με την ίδια αναλυτική μέθοδο, μπορούμε να καταγράψουμε την κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου τις χρονικές στιγμές όπου $\omega_t = \pi$, $\omega_t = 2\pi/3$, $\omega_t = 2$, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.5. Τέλος, όπως παρατηρούμε σε αυτό, η κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου σταδιακά περιστρέφεται σύμφωνα με την κατεύθυνση περιστροφής των δεικτών του ρολογιού με ολική περιστροφή 360 μοιρών [6].



Σχήμα 2.5. Κατεύθυνση περιστροφής μαγνητικού πεδίου

Όπου: i_v = το ρεύμα που παρέχεται στη φάση V,

i_u = το ρεύμα που παρέχεται στη φάση U,

i_w = το ρεύμα που παρέχεται στη φάση W και

ω_t = η γωνιακή ταχύτητα του μαγνητικού πεδίου.

Προκειμένου να κατανοήσουμε καλύτερα τον τρόπο λειτουργίας ενός τριφασικού επαγωγικού κινητήρα, είναι αναγκαίο να γνωρίσουμε την κατασκευή του. Αρχικά, όπως είναι γνωστό, ένας κινητήρας τέτοιου τύπου αποτελείται από ένα στάτορα και ένα ρότορα.

2.3.2 Ο τρόπος κατασκευής του τριφασικού επαγωγικού κινητήρα

Ο στάτορας, όπως υποδεικνύει και η ονομασία του, είναι ένα στατικό μέρος του επαγωγικού κινητήρα. Ο σπείρες τοποθετούνται στο στάτορα του επαγωγικού κινητήρα και στη συνέχεια του δίνεται η τριφασική παροχή ρεύματος. Ο στάτορας τριφασικού επαγωγικού κινητήρα αποτελείται από τρία κύρια μέρη: τον σκελετό του στάτορα, τον κορμό του στάτορα και τις σπείρες [7,8].



Σχήμα 2.6. Σύστημα στάτορα

Σκελετός του στάτορα:

Αναλυτικότερα, ο σκελετός του στάτορα αποτελεί το εξωτερικό μέρος του τριφασικού επαγωγικού κινητήρα. Βασική του λειτουργία είναι να στηρίζει τον κορμό και τις σπείρες του στάτορα. Πιο συγκεκριμένα, συμπεριφέρεται ως μέσο κάλυψης παρέχοντας προστασία και μηχανική δύναμη σε όλα τα εσωτερικά μέρη του επαγωγικού κινητήρα. Έχοντας ως στόχο ένα δυνατό και άκαμπτο σκελετό στάτορα και συνεπώς ομοκεντρία μεταξύ ρότορα και στάτορα, προς αποφυγή μη ισορροπημένου μαγνητικού πεδίου, η κατασκευή του σκελετού του στάτορα είναι είτε χυτοπρεσσαριστή είτε ατσάλινη [7,8].



Σχήμα 2.7. Σκελετός στάτορα

Κορμός του στάτορα:

Η βασική λειτουργία του κορμού του στάτορα είναι να μεταδίδει την εναλλασσόμενη ροή του ρεύματος. Ο κορμός του στάτορα προστατεύεται με πλαστικές δομές, προκειμένου να μειωθούν οι απώλειες του δινορεύματος. Αυτές οι πλαστικές δομές ομαδοποιούνται με τη χρήση πυριτιούχου χάλυβα που έχει πάχος από 0.4 μέχρι 0.5 χιλιοστά και σχηματίζουν τον κορμό του στάτορα, ο οποίος στεγάζεται στο σκελετό του στάτορα. Η χρήση πυριτιούχου χάλυβα ενδείκνυται, προκειμένου να μειωθούν οι απώλειες υστέρησης στον κινητήρα [7,8].

Απώλειες Υστέρησης δίνονται ως: $W_h = K_h * f(B_m)^{1.6}$ watts

, όπου K_h = σταθερά της υστέρησης.

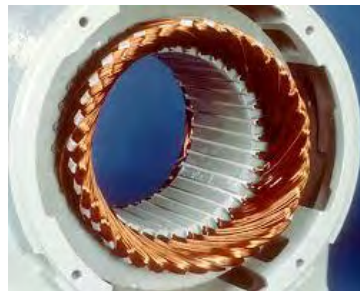
Η φυσική εξήγηση των απωλειών υστέρησης αφορά στη χρήση πυριτιούχου χάλυβα στο στάτορα. Ο χάλυβας είναι αγωγός του ηλεκτρισμού και μαγνητίζεται εύκολα. Αυτό σημαίνει ότι, όταν υπάρχει μαγνητική ροή στον κορμό, αυτός συμπεριφέρεται σαν μαγνήτης. Τα σιδηρομαγνητικά υλικά αποτελούνται από κάποια ηλεκτρικά δίπολα τα οποία είναι τυχαία ταξινομημένα. Όταν όμως η μαγνητική ροή εφαρμοστεί στον κορμό, τότε τα ηλεκτρικά δίπολα οργανώνονται παράλληλα στον άξονα εφαρμογής της μαγνητικής δύναμης. Στη συνέχεια, παρόλο που η μαγνητική δύναμη σταματάει να υφίσταται, κάποια δίπολα παραμένουν οργανωμένα και ο κορμός μαγνητίζεται μόνιμα. Προκειμένου να γίνει ο απομαγνητισμός του, χρειάζεται να εφαρμοστεί αντίθετη μαγνητική δύναμη και άρα και να καταναλωθεί ηλεκτρική ενέργεια. Αυτή η κατανάλωση της ενέργειας είναι γνωστή ως απώλειες υστέρησης [7,8].



Σχήμα 2.8. Κορμός στάτορα

Σπείρες:

Στις σχισμές της περιφέρειας του κορμού του στάτορα τριφασικού επαγωγικού κινητήρα υπάρχουν οι τριφασικές σπείρες. Κατά τη λειτουργία του τριφασικού επαγωγικού κινητήρα παρέχεται τριφασικό εναλλασσόμενο ρεύμα στις σπείρες του στάτορα. Οι σπείρες, όπως αναφέραμε προηγουμένως, έχουν τη δομή των τριών φάσεων και συνδεσμολογία είτε αστέρα, είτε τριγώνου. Συνήθως, ο κινητήρας τύπου “squirrel cage”, αρχίζει να κινείται με συνδεσμολογία αστέρα, επομένως ο στάτορας αυτού του κινητήρα είναι όμοια συνδεδεμένος. Όταν αρχίσει η παροχή τριφασικού εναλλασσόμενου ρεύματος στις σπείρες, τότε θα παραχθεί περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο [7,8].

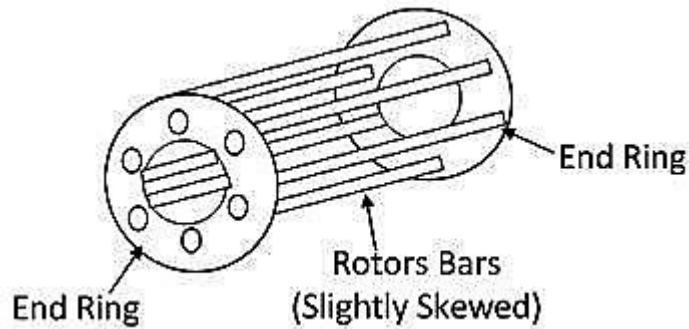


Σχήμα 2.9. Σπείρες στάτορα

Κατασκευή ρότορα:

Η κατασκευή του ρότορα επαγωγικού κινητήρα τύπου “squirrel cage” είναι ανθεκτική και απλή. Πιο συγκεκριμένα, ο ρότορας αποτελείται από ένα κυλινδρικά πλαστικοποιημένο κορμό με κυκλικές σχισμές, ενώ κάθε πλευρά είναι βραχυκυκλωμένη με τη χρήση χαλκού ή αλουμινίου. Οι σχισμές του ρότορα δεν είναι παράλληλες μεταξύ τους, με στόχο την μείωση θορύβου κατά τη λειτουργία του κινητήρα, την αύξηση της αντίστασης του ρότορα, χάρη στο μεγάλο μήκος των αγωγών του ρότορα και την ομαλή

περιστροφή του ρότορα. Επιπλέον, στα προτερήματα αυτού του τύπου κινητήρα συγκαταλέγεται η μείωση του αριθμού των συντηρήσεων, χάρη στο γεγονός ότι ο ρότορας αυτού του τύπου δεν έχει βούρτσες, καθώς και η αύξηση αποδοτικότητας μέσω του περιορισμού των απωλειών στο ρότορα [3].



Σχήμα 2.10. Ρότορας κινητήρα τύπου “squirrel cage”

2.3.3 Εκκίνηση λειτουργίας τριφασικού επαγωγικού κινητήρα

Αυτός ο τύπος κινητήρα δεν χρειάζεται πρόσθετη συσκευή για εκκίνηση. Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με τα παραπάνω, σε ένα τριφασικό σύστημα κινητήρα επαγωγής υπάρχουν τρεις μονοφασικές γραμμές με διαφορά φάσης 120 μοίρες μεταξύ τους. Επομένως, το περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο έχει την ίδια διαφορά φάσης, γεγονός που συντελεί στην αρχή λειτουργίας του κινητήρα. Αναλυτικότερα, αν υποθέσουμε ότι οι τρεις φάσεις είναι η α , β και γ φάση, τότε όταν η φάση α μαγνητιστεί, ο ρότορας θα κινηθεί προς την κατεύθυνση αυτής της φάσης. Στη συνέχεια, όταν η φάση β μαγνητιστεί θα έλκει με τον ίδιο τρόπο τον ρότορα προς τη δική της κατεύθυνση, ενώ το ίδιο θα συμβεί κατά το μαγνητισμό της φάσης γ . Κατά αυτόν τον τρόπο, επιτυγχάνεται η συνεχής κίνηση του ρότορα και επομένως η λειτουργία του τριφασικού επαγωγικού κινητήρα [7].

2.3.4 Ταχύτητα τριφασικού επαγωγικού κινητήρα

Οι τριφασικοί επαγωγικοί κινητήρες ονομάζονται αλλιώς και ασύγχρονοι κινητήρες, καθώς λειτουργούν με ταχύτητα διαφορετική από τη σύγχρονη. Πιο συγκεκριμένα, η σύγχρονη ταχύτητα είναι αυτή με την οποία περιστρέφεται το μαγνητικό πεδίο σε μία περιστρεφόμενη μηχανή και εξαρτάται από τη συχνότητα του κινητήρα. Ας υποθέσουμε ότι η ταχύτητα του ρότορα είναι ίδια με αυτή του μαγνητικού πεδίου. Λόγω του ότι και

οι δύο περιστρέφονται με την ίδια ταχύτητα, δεν υπάρχει σχετική κίνηση μεταξύ ρότορα και μαγνητικού πεδίου. Κατά αυτόν τον τρόπο, δε θα αναπτυχθεί ηλεκτρεγερτική δύναμη επαγωγής και επομένως ούτε και ρεύμα. Αυτό σημαίνει μηδενική δύναμη στις ράβδους του ρότορα και έτσι αυτός θα επιβραδύνει σταδιακά. Καθώς αυτός επιβραδύνει, θα αναπτυχθεί σχετική κίνηση μεταξύ του μαγνητικού πεδίου και του ρότορα. Ως αποτέλεσμα αυτού, το επαγόμενο ρεύμα και η ηλεκτρεγερτική δύναμη θα αυξηθούν πάλι και ο ρότορας θα επιταχύνει. Όπως γίνεται αντιληπτό, ο ρότορας δε θα είναι ποτέ σε θέση να φτάσει την ταχύτητα του μαγνητικού πεδίου, δηλαδή θα περιστρέφεται με μια συγκεκριμένη ταχύτητα, η οποία είναι ελαφρώς μικρότερη από τη σύγχρονη ταχύτητα. Η διαφορά μεταξύ της σύγχρονης ταχύτητας και της ταχύτητας του ρότορα είναι γνωστή ως ολίσθηση [6].

Η ολίσθηση ορίζεται ως:

$$\text{Ολίσθηση} = \frac{V_{\text{stator}} - V_{\text{rotor}}}{V_{\text{stator}}}$$

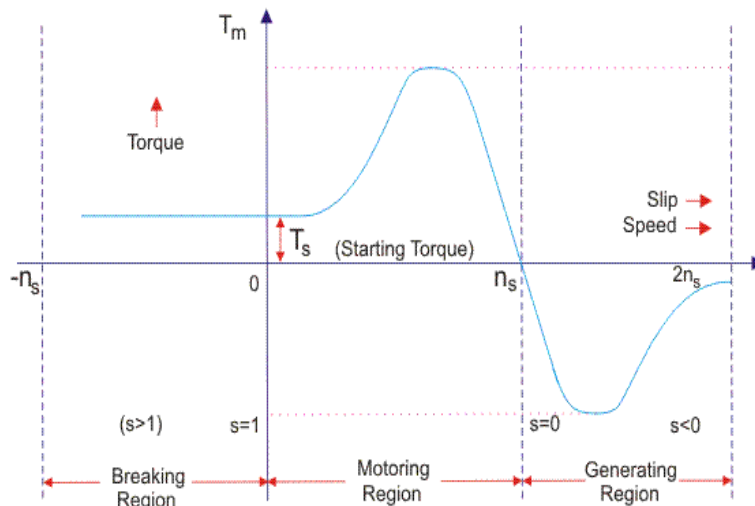
Όπου: V_{stator} = Ταχύτητα του στάτορα και

V_{rotor} = Ταχύτητα του ρότορα.

Επίσης, η τιμή της ολίσθησης βρίσκεται μεταξύ των τιμών μηδέν και ένα, δηλαδή $0 < \text{ολίσθηση} < 1$.

Παρατηρούμε ότι αν ο ρότορας λειτουργεί με σύγχρονη ταχύτητα, τότε η τιμή της ολίσθησης είναι μηδενική, ενώ αν ο ρότορας είναι στάσιμος, τότε η τιμή ολίσθησης είναι η μοναδιαία. Επίσης, η ολίσθηση μπορεί να εκφραστεί και ως ποσοστό (%) πολλαπλασιάζοντας την τιμή της ολίσθησης με 100. Συνήθως, το ποσοστό της ολίσθησης κυμαίνεται μεταξύ 2% και 6%. Τέλος, παρατηρούμε ότι η ολίσθηση είναι μία αναλογία και δεν έχει μονάδες μέτρησης [6].

Η γραφική παράσταση της καμπύλης της ολίσθησης κατά τη λειτουργία ενός τριφασικού επαγωγικού κινητήρα μας δίνει πληροφορίες για τις εναλλαγές της τιμής της ολίσθησης, επομένως και της ταχύτητας του ρότορα και του στάτορα. Όπως φαίνεται και στην γραφική παράσταση, η καμπύλη της ολίσθησης μπορεί να περιγραφεί σε τρεις καταστάσεις λειτουργίας [9]:



Σχήμα 2.11. Γραφική αναπαράσταση της ολίσθησης

1. Για τιμές της ολίσθησης μεγαλύτερης της μονάδας, ο κινητήρας αρχίζει να περιστρέφεται με κατεύθυνση αντίθετη από αυτή της κίνησης των δεικτών του ρολογιού και ως αποτέλεσμα αυτού, ο κινητήρας σταματάει να κινείται. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται όταν είναι απαραίτητη η διακοπή λειτουργίας του κινητήρα σε μικρό χρονικό διάστημα. Η κινητική ενέργεια που αποθηκεύεται μετατρέπεται σε θερμική. Ακόμα, η δύναμη που δέχεται ο κινητήρας από τον στάτορα μετατρέπεται και αυτή σε θερμική ενέργεια. Ως αποτέλεσμα, ο κινητήρας αναπτύσσει μεγάλα ποσά θερμικής ενέργειας.
2. Για τιμές της ολίσθησης μεταξύ του μηδενός και της μονάδας, ο κινητήρας περιστρέφεται με ταχύτητα μικρότερη από τη σύγχρονη.
3. Για τιμές της ολίσθησης μικρότερης του μηδενός, η ταχύτητα του κινητήρα είναι μεγαλύτερη από τη σύγχρονη ταχύτητα και απαιτείται εγκατάσταση μηχανής εκκίνησης. Πιο συγκεκριμένα, οι σπείρες του στάτορα συνδέονται σε τριφασική παροχή, στην οποία παρέχουν ηλεκτρική ενέργεια. Σε αυτή την περίπτωση, ο κινητήρας δέχεται μηχανική ενέργεια και παρέχει ηλεκτρική ενέργεια. Συνήθως, οι κινητήρες επαγωγής δεν χρησιμοποιούνται σαν γεννήτριες, γιατί χρειάζονται άεργο ισχύς για την λειτουργία τους και εάν η ταχύτητά τους πάρει τιμή μικρότερη από τη σύγχρονη ταχύτητα, τότε η μηχανή αρχίζει να καταναλώνει ηλεκτρική ενέργεια.
4. Για τιμή ίση με το μηδέν δεν υπάρχει φορτίο στον κινητήρα.

5. Για τιμή ίση με τη μονάδα ο κινητήρας δεν κουνιέται.

Έχοντας αρχικά αναφερθεί στα προβλήματα που οδηγεί η μικρή τιμή του συντελεστή ισχύος και έχοντας κατανοήσει τον σημαντικό του ρόλο στην ενεργειακή αποδοτικότητα των μηχανών και συνεπώς στην εξοικονόμηση ενέργειας στο βιομηχανικό χώρο, δημιουργείται η ανάγκη να ερευνησουμε τα αίτια που οδηγούν στην μικρή τιμή του συντελεστή ισχύος.

2.4 Αίτια μικρής τιμής του συντελεστή ισχύος

Οι συχνότερες περιπτώσεις όπου παρατηρείται χαμηλή τιμή του συντελεστή ισχύος είναι στα επαγωγικά φορτία. Πιο συγκεκριμένα, τα φορτία τα οποία συχνότερα ευθύνονται για την χαμηλή τιμή του επαγωγικού φορτίου είναι οι τριφασικοί επαγωγικοί κινητήρες, τους οποίους μελετήσαμε παραπάνω και αποτελούν το σημαντικότερο μέρος των επαγωγικών φορτίων που συναντάμε στις βιομηχανίες. Οι τριφασικοί κινητήρες καταναλώνουν όχι μόνο ενεργή, αλλά και άεργο ισχύ. Το κύριο πρόβλημα πηγάζει από το γεγονός ότι αυτού του τύπου οι κινητήρες καταναλώνουν μεγάλα ποσά άεργου ισχύος, με αποτέλεσμα τις ενεργειακές απώλειες καθώς και την πτώση τάσης. Επιπλέον, οι τιμές τόσο της ενεργούς, όσο και της άεργου ισχύος αλλάζουν κατά τη διάρκεια φόρτισης και εκφόρτισης του κινητήρα, με αποτέλεσμα την αλλαγή του συντελεστή ισχύος [1].

2.4.1 Αφόρτιστος τριφασικός επαγωγικός κινητήρας

Όταν ο κινητήρας βρίσκεται στην κατάσταση εκφόρτισης, δεν υπάρχει μηχανική αντίσταση. Οι μόνες απώλειες που παρατηρούνται οφείλονται στην αντίσταση λόγω μαγνητικού πεδίου και στην αντίσταση του κινητήρα. Επομένως, το ρεύμα στον στάτορα του κινητήρα θα μοιραστεί στο ενεργό και στο άεργο ρεύμα, προκειμένου να προμηθεύσει τόσο τη μηχανική αντίσταση, όσο την αντίσταση λόγω μαγνητικού πεδίου. Δεδομένου ότι οι απώλειες αντίστασης, λόγω της τριβής των σπειρών στο στάτορα, είναι πολύ μικρές, μόνο ένα μικρό ποσοστό ενεργού ρεύματος περνάει από τις αντιστάσεις. Το υπόλοιπο άεργο ρεύμα του στάτορα ρέει στην αντίσταση λόγω μαγνητικού πεδίου. Ως αποτέλεσμα, η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ του διανύσματος του ρεύματος που ρέει στον στάτορα και αυτού της τάσης στον στάτορα παίρνει τιμές από 75 μοίρες μέχρι 85

μοίρες. Συνεπώς, ο συντελεστής ισχύος του αφόρτιστου στάτορα θα έχει τιμή μεταξύ του εύρους τιμών 0.1 και 0.3 [6].

2.4.2 Φορτισμένος τριφασικός επαγωγικός κινητήρας

Στη συνέχεια, η μηχανική αντίσταση αρχίζει να μεγαλώνει. Επομένως, παρατηρείται η σταδιακή αύξηση του ενεργού ρεύματος, της ενεργούς ισχύος και της ροής του ρεύματος στον ρότορα για την προμήθεια της μηχανικής αντίστασης. Ως αποτέλεσμα αυτού, η γωνία μεταξύ του διανύσματος του ρεύματος που ρέει στον στάτορα και αυτού της τάσης του στάτορα μειώνεται και επομένως παρατηρείται η βελτίωση του συντελεστή ισχύος. Οι τιμές του συντελεστή ισχύος ενός φορτισμένου τριφασικού επαγωγικού κινητήρα είναι μεταξύ 0.8 και 0.9 [6].

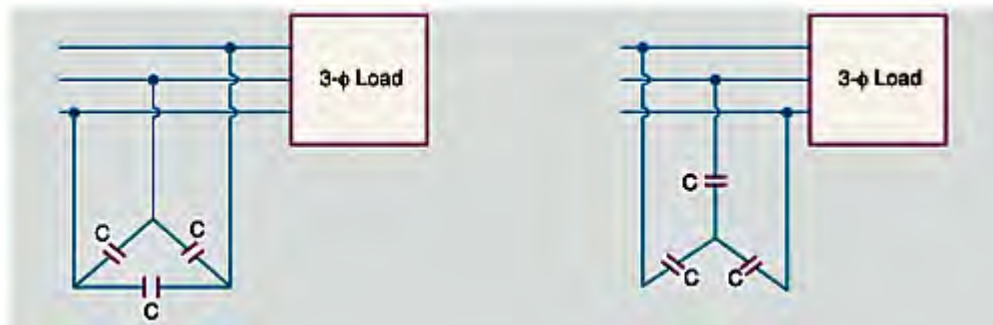
Γνωρίζοντας τα αίτια χαμηλής τιμής συντελεστή ισχύος κατά τη λειτουργία του τριφασικού επαγωγικού κινητήρα και έχοντας ήδη αναφερθεί στα μειονεκτήματα της μικρής τιμής του συντελεστή ισχύος, προκειμένου να πετύχουμε το στόχο για βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης στον βιομηχανικό χώρο, είναι απαραίτητο να αναφέρουμε τρόπους αντιμετώπισης της χαμηλής τιμής του συντελεστή ισχύος.

2.5 Τρόποι διόρθωσης του συντελεστή ισχύος

Η βελτίωση του μικρού συντελεστή ισχύος, κατά τη χρονική περίοδο όπου ο τριφασικός επαγωγικός κινητήρας είναι αφόρτιστος, γίνεται με τη χρήση συγκεκριμένου εξοπλισμού. Πιο συγκεκριμένα, αυτός μπορεί να είναι στατικοί πυκνωτές, σύγχρονοι συμπυκνωτές και προωθητές φάσης [1].

2.5.1 Στατικοί πυκνωτές

Οι στατικοί πυκνωτές συμβάλλουν στην αύξηση της τιμής του συντελεστή ισχύος με την παράλληλη σύνδεσή τους με τη μηχανή που λειτουργεί με επαγωγικό συντελεστή ισχύος. Αναλυτικότερα, ο πυκνωτής σχηματίζει ένα χωρητικό ρεύμα και εξουδετερώνει μερικώς ή ολικώς το επαγωγικό άεργο ρεύμα. Ως αποτέλεσμα αυτού, η τιμή του συντελεστή ισχύος αυξάνεται. Στα τριφασικά φορτία, η συνδεσμολογία των πυκνωτών είναι είτε κατά αστέρα, είτε κατά τρίγωνο, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.12 [1].



Σχήμα 2.12. Συνδεσμολογία στατικών πυκνωτών

Συνήθως, οι πυκνωτές χρησιμοποιούνται για την βελτίωση του συντελεστή ισχύος σε επαγωγικά φορτία στον βιομηχανικό χώρο.

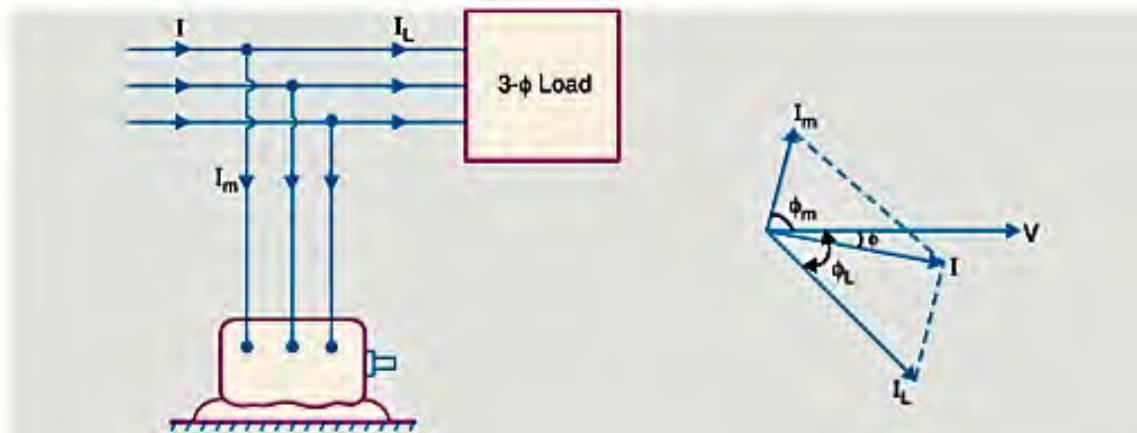
Τα πλεονεκτήματα της χρήσης πυκνωτών για τη βελτίωση του συντελεστή ισχύος επαγωγικών φορτίων είναι το μικρό ποσοστό απωλειών, η περιορισμένη ανάγκη συντήρησής τους, αφού δεν περιστρέφονται, η ευκολία εγκατάστασής τους, χάρη στο ελαφρύ τους βάρος, και η δυνατότητα λειτουργίας τους κάτω από συνήθεις ατμοσφαιρικές συνθήκες [1].

Τα μειονεκτήματα της χρήσης πυκνωτών για τη βελτίωση του συντελεστή ισχύος επαγωγικών φορτίων είναι η μικρή διάρκεια ζωής τους, η οποία κυμαίνεται από 8 μέχρι 10 χρόνια, η ευκολία καταστροφής τους σε περίπτωση που η τιμή της τάσης υπερβεί την προκαθορισμένη και η ανάγκη αλλαγής τους, όταν αυτοί καταστραφούν [1].

2.5.2 Σύγχρονοι συμπυκνωτές

Οι σύγχρονοι συμπυκνωτές είναι σύγχρονοι κινητήρες που τους παρέχεται χωρητικό ρεύμα και συμπεριφέρονται σαν πυκνωτές. Αυτός ο τύπος εξοπλισμού συμβάλει στην βελτίωση του συντελεστή ισχύος, αν συνδεθεί παράλληλα με το τριφασικό επαγωγικό φορτίο. Πιο αναλυτικά, το χωρητικό ρεύμα του πυκνωτή εξουδετερώνει μερικώς το επαγωγικό ρεύμα του επαγωγικού φορτίου. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.13, το τριφασικό επαγωγικό φορτίο στο οποίο παρέχεται επαγωγικό ρεύμα I_L έχει μικρή τιμή συντελεστή ισχύος. Ο κινητήρας παρέχει στο επαγωγικό φορτίο τριφασικό χωρητικό ρεύμα I_m . Ως αποτέλεσμα αυτού, πλέον, στο επαγωγικό φορτίο παρέχεται ένα νέο ρεύμα I , που αποτελεί τη σύνθεση των δύο ρευμάτων I_L και I_m . Η γωνία ϕ_L μεταξύ του διανύσματος του επαγωγικού τριφασικού ρεύματος I_L και του διανύσματος της τάσης V του επαγωγικού τριφασικού φορτίου είναι μεγαλύτερη από τη γωνία ϕ μεταξύ του διανύσματος του νέου τριφασικού ρεύματος I και του διανύσματος της τάσης V του

τριφασικού επαγωγικού φορτίου. Επομένως, ο νέος συντελεστής ισχύος του επαγωγικού τριφασικού φορτίου θα έχει τιμή μεγαλύτερη από την αρχική του [1].



Σχήμα 2.13. Συνδεσμολογία σύγχρονων συμπυκνωτών



Σχήμα 2.14. Σύγχρονος συμπυκνωτής

Τα πλεονεκτήματα των σύγχρονων συμπυκνωτών για τη βελτίωση του συντελεστή ισχύος τριφασικών επαγωγικών φορτίων είναι [1]:

1. Η αλλαγή του υπάρχοντος μαγνητικού πεδίου που προκαλεί διαφορετική μαγνήτιση του ρεύματος του κινητήρα. Κατά αυτόν τον τρόπο, επιτυγχάνεται ο συνεχής έλεγχος της τιμής του συντελεστή ισχύος που θέλουμε να βελτιώσουμε.
2. Η υψηλή θερμική αντοχή των σπειρών στο στάτορα του κινητήρα σε ρεύματα βραχυκύκλωσης.
3. Η δυνατότητα αντιμετώπισης και απομάκρυνσης λαθών.

Τα μειονεκτήματα των σύγχρονων συμπυκνωτών για τη βελτίωση του συντελεστή ισχύος τριφασικών επαγωγικών φορτίων είναι [1]:

1. Η ύπαρξη σημαντικών απωλειών στον τριφασικό κινητήρα που παρέχει χωρητικό ρεύμα στο τριφασικό επαγωγικό φορτίο.
2. Το υψηλό κόστος συντήρησης του τριφασικού κινητήρα.
3. Το αυξημένο επίπεδο θορύβου που παράγει ο τριφασικός κινητήρας κατά τη λειτουργία του.
4. Το μεγαλύτερο κόστος αυτού του τύπου κινητήρα σε σχέση με το κόστος στατικών πυκνωτών ίδιας απόδοσης, όταν η φαινομένη ισχύς του έχει τιμή μικρότερη από 500 kVA.
5. Η ανάγκη επιπλέον εξοπλισμού για εκκίνηση του κινητήρα, δεδομένου ότι ο κινητήρας είναι σύγχρονος.

Αξίζει να σημειωθεί ότι το ποσό της άεργους ισχύος, που παρέχεται από ένα σύγχρονο τριφασικό κινητήρα σε ένα επαγωγικό τριφασικό φορτίο, εξαρτάται από το υπάρχον πεδίο συνεχούς ρεύματος και το μηχανικό φορτίο που παρέχει ο σύγχρονος κινητήρας. Προκειμένου να αποδοθεί μέγιστη χωρητική ισχύς από ένα σύγχρονο κινητήρα, πρέπει το πεδίο συνεχούς ρεύματος να έχει μέγιστη τιμή και το μηχανικό φορτίο να είναι μηδενικό [1].

2.5.3 Προωθητές φάσης

Οι προωθητές φάσης χρησιμοποιούνται προκειμένου να βελτιστοποιήσουν την τιμή του συντελεστή ισχύος επαγωγικών κινητήρων. Όπως είπαμε και προηγουμένως, η χαμηλή τιμή του συντελεστή ισχύος στους επαγωγικούς κινητήρες οφείλεται στο γεγονός ότι στις σπείρες στον στάτορα ρέει επαγωγικό ρεύμα. Πιο συγκεκριμένα, η γωνία του διανύσματος του ρεύματος στο στάτορα μεταξύ αυτού της τάσης του στάτορα έχει τιμή από 75 μέχρι 85 μοίρες. Προκειμένου να αυξηθεί η τιμή του συντελεστή ισχύος του επαγωγικού κινητήρα, θα πρέπει να απαλλαγούν οι σπείρες του στάτορα από το επαγωγικό ρεύμα μέσω της παροχής ρεύματος στις σπείρες του στάτορα από κάποια άλλη εναλλασσόμενη πηγή ρεύματος. Αυτή την διεργασία την εκτελεί ο προωθητής φάσης, ο οποίος λειτουργεί σαν παροχή εναλλασσόμενου ρεύματος. Πιο συγκεκριμένα, ο προωθητής φάσης είναι συνδεδεμένος με τον κεντρικό άξονα του κινητήρα, δηλαδή με τον ρότορα, και παρέχει ρεύμα. Επομένως, δημιουργείται κινητήρια μαγνητική δύναμη

στο ρότορα με συχνότητα ίδια με αυτή της ολίσθησης. Αν ο προωθητής φάσης παρέχει περισσότερο ρεύμα από αυτό που χρειάζεται, τότε ο επαγωγικός κινητήρας δε θα λειτουργεί με επαγωγικό αλλά με χωρητικό ρεύμα, δηλαδή θα λειτουργεί σαν ένας υπερδιεγερμένος σύγχρονος κινητήρας [1].

Τα βασικά πλεονεκτήματα της χρήσης προωθητών φάσης, προκειμένου να αυξηθεί η τιμή του συντελεστή ισχύος επαγωγικών κινητήρων είναι δύο. Πιο συγκεκριμένα:

1. Μέσω της παροχής ρεύματος στις σπείρες του στάτορα με συχνότητα ίδια με αυτή της ολίσθησης, η επαγωγική θερμική ισχύς (kVAR) του κινητήρα μειώνεται σημαντικά.
2. Επίσης, οι προωθητές φάσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν, όταν η χρήση σύγχρονων κινητήρων δεν ενδείκνυται [1].

Το βασικό μειονέκτημα στη χρήση προωθητών φάσης, προκειμένου να βελτιωθεί ο συντελεστής ισχύος των επαγωγικών κινητήρων, είναι το αυξημένο κόστος τους, όταν αυτοί χρησιμοποιούνται σε επαγωγικούς κινητήρες που λειτουργούν με ισχύ μικρότερη των 200 H.P. [1].

Συμπερασματικά, όπως αναφέραμε παραπάνω η διόρθωση του συντελεστή ισχύος σε επαγωγικά φορτία γίνεται με τη χρήση εξοπλισμού, όπως οι στατικοί πυκνωτές, οι σύγχρονοι συμπυκνωτές και οι προωθητές φάσης. Όπως έγινε αντιληπτό προκειμένου να αυξηθεί η τιμή του συντελεστή ισχύος των επαγωγικών φορτίων χρειάζεται η παροχή χωρητικού ρεύματος, όταν αναφερόμαστε στους στατικούς πυκνωτές και τους σύγχρονους συμπυκνωτές, ενώ χρειάζεται παροχή εναλλασσόμενου ρεύματος, όταν αναφερόμαστε στους προωθητές φάσης.

Είναι όμως σημαντικό η διόρθωση του συντελεστή ισχύος να γίνει σωστά, δηλαδή να μην δημιουργηθεί ούτε μικρότερη αλλά ούτε περισσότερη διαφορά στην τιμή διόρθωσης σε σχέση με την προσδοκώμενη. Προκειμένου να επιτευχθεί αυτό, είναι απαραίτητη η βέλτιστη παροχή ρεύματος σε κάθε επαγωγικό φορτίο. Πιο συγκεκριμένα, αν η διόρθωση του συντελεστή ισχύος ενός επαγωγικού κινητήρα είναι μικρότερη από την προσδοκώμενη, τότε η τιμή του θα παραμείνει χαμηλή και δε θα επιτευχθεί ο στόχος της βέλτιστης ενεργειακής απόδοσης. Αντιθέτως, εάν η διόρθωση του συντελεστή ισχύος

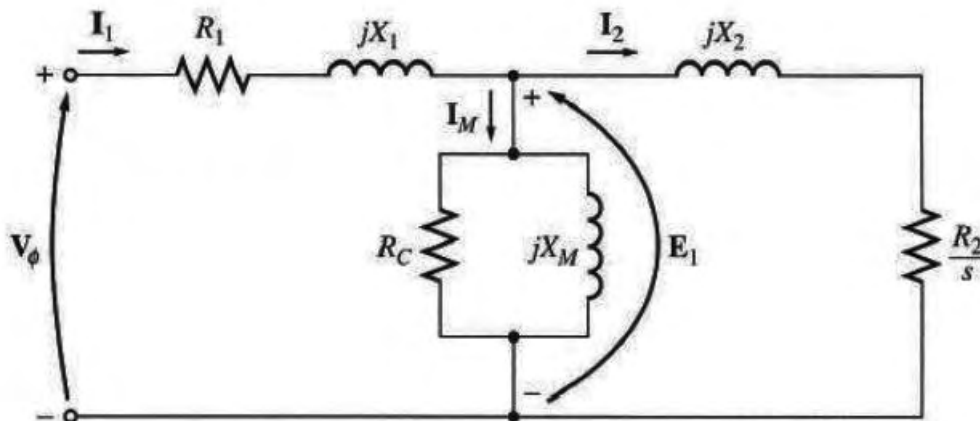
ενός επαγωγικού κινητήρα είναι μεγαλύτερη από αυτή που ενδείκνυται, τότε θα δημιουργηθεί υπερδιέγερση στους επαγωγικούς κινητήρες [11].

2.6 Εύρεση τιμής συντελεστή ισχύος για σωστή διόρθωσή του

Έχοντας ως στόχο την βελτιστοποίηση του συντελεστή ισχύος στους επαγωγικούς κινητήρες με τη χρήση πυκνωτών είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε το μέγεθος των πυκνωτών που χρειάζεται να χρησιμοποιήσουμε, προκειμένου να γίνει παροχή της κατάλληλης ποσότητας άεργου ισχύος. Για να επιτευχθεί αυτό, είναι σημαντικό να γνωρίζουμε την τιμή του συντελεστή ισχύος σε κάθε τιμή του φορτίου με την οποία λειτουργεί ο επαγωγικός κινητήρας. Η τιμή του συντελεστή ισχύος ενός επαγωγικού κινητήρα μπορεί να εκτιμηθεί γνωρίζοντας το ισοδύναμο κύκλωμα του επαγωγικού κινητήρα, όπου παρουσιάζονται οι παράμετροι του στάτορα και του ρότορα του κινητήρα [10].

2.6.1 Ισοδύναμο κύκλωμα τριφασικού επαγωγικού κινητήρα

Το ισοδύναμο κύκλωμα του τριφασικού επαγωγικού κινητήρα κατασκευάζεται ως εξής [2]:



Σχήμα 2.15. Ισοδύναμο κύκλωμα τριφασικού επαγωγικού κινητήρα

, όπου R_1 = η αντίσταση που παρουσιάζεται στο στάτορα του κινητήρα,

R_2 = η αντίσταση που παρουσιάζεται στο ρότορα του κινητήρα,

X_1 = η αντίσταση διαρροής ηλεκτρικού ρεύματος στο στάτορα,

X_2 = η αντίσταση διαρροής ηλεκτρικού ρεύματος στο ρότορα,

X_m = η αντίσταση της μαγνητικής δύναμης,

R_c = η αντίσταση απωλειών στον κορμό του κινητήρα,

I_1 = το ρεύμα που ρέει στον στάτορα,

I_2 = το ρεύμα που ρέει στον ρότορα,

I_M = το ρεύμα του μαγνητικού πεδίου,

s = η ολίσθηση του κινητήρα,

V_ϕ = η τάση που παρέχεται στον κινητήρα.

Η διαδικασία, η οποία ακολουθείται για τον υπολογισμό του συντελεστή ισχύος κατά τη λειτουργία του επαγωγικού κινητήρα για κάθε τιμή φορτίου μέσω του ισοδύναμου κυκλώματος, είναι αρκετά δύσκολη. Για αυτό το λόγο και προκειμένου να επιτευχθεί ο στόχος της σωστής διόρθωσης του συντελεστή ισχύος, είναι απαραίτητη η διερεύνηση άλλων μεθόδων υπολογισμού του για κάθε συνθήκη λειτουργίας του επαγωγικού κινητήρα. Μία από τις πιο γνωστές μεθόδους, στην οποία θα αναφερθούμε, είναι η μέθοδος του Kriging.

2.6.2 Μέθοδος Kriging

Η μέθοδος του Kriging είναι μια γεωστατική μέθοδος, η οποία εκτιμά άγνωστες τιμές βασιζόμενη σε γνωστές τιμές που βρίσκονται σε κοντινή περιοχή και τις ζυγίζει, προκειμένου να περιορίσει την περίπτωση λάθους εκτίμησης. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται συνήθως σε περιπτώσεις όπου η απόσταση μεταξύ της γνωστής και της εκτιμούμενης τιμής είναι γνωστή. Επομένως, η γενική μορφή της εξίσωσης της μεθόδου Kriging είναι η [10]:

$$Z_{(S_0)} = \sum_{i=1}^N W_i * Z_{(S_i)}$$

, όπου $Z_{(S_i)}$ = η γνωστή τιμή στην i -οστή περιοχή,

W_i = το άγνωστο βάρος του σημείου της γνωστής τιμής συντελεστή ισχύος στην i -οστή περιοχή,

S_0 = η περιοχή της εκτιμώμενης τιμής του συντελεστή ισχύος,

N = ο αριθμός των γνωστών τιμών συντελεστή ισχύος.

Προκειμένου να υπολογιστεί η τιμή του βάρους, χρησιμοποιούνται διάφορα μοντέλα. Συγκεκριμένα, για την εκτίμηση του συντελεστή ισχύος του επαγωγικού κινητήρα εφαρμόζεται αυτό της εκθετικής συνάρτησης, η οποία περιγράφεται ως:

$$\gamma(h) = c * (1 - e^{(-3h/a)})$$

, όπου c = η τιμή του συντελεστή ισχύος του κινητήρα για μέγιστο φορτίο,

h = η απόσταση μεταξύ όλων των φορτίων λειτουργίας του επαγωγικού κινητήρα,

a = η τιμή του μέγιστου φορτίου λειτουργίας του κινητήρα.

Στη συνέχεια, θα εφαρμοστεί ο πίνακας του Lagrange, προκειμένου να υπολογίσουμε το βάρος των σημείων των εκτιμώμενων τιμών του συντελεστή ισχύος. Σε αυτόν θα χρησιμοποιηθούν δύο διανύσματα. Το πρώτο είναι το αποτέλεσμα του μοντέλου της εκθετικής συνάρτησης που αναφέρθηκε προηγουμένως και το δεύτερο είναι η απόσταση μεταξύ των σημείων της εκτιμώμενης τιμής και της γνωστής τιμής του συντελεστή ισχύος. Πιο συγκεκριμένα, ο πίνακας του Lagrange είναι:

$$\begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ \vdots \\ W_n \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma_{11} & \gamma_{12} & \cdots & \gamma_{1n} & 1 \\ \gamma_{21} & \gamma_{22} & \cdots & \gamma_{2n} & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \gamma_{m1} & \gamma_{m2} & \cdots & \gamma_{mn} & 1 \\ 1 & 1 & \cdots & 1 & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \gamma_{10} \\ \gamma_{20} \\ \vdots \\ \gamma_{n0} \\ 1 \end{bmatrix}$$

, όπου W_i = διάνυσμα που αναφέρεται στο βάρος μεταξύ σημείων της εκτιμώμενης και της γνωστής τιμής του συντελεστή ισχύος,

γ_i = $(m * n)$ πίνακας που αναφέρεται στο αποτέλεσμα του μοντέλου εκθετικής συνάρτησης,

γ_{n0} = διάνυσμα που αναφέρεται στην απόσταση μεταξύ των σημείων των φορτίων με άγνωστη τιμή συντελεστή ισχύος και εκτιμώμενη τιμή συντελεστή ισχύος.

Επομένως, γνωρίζοντας πλέον της τιμές του βάρους των σημείων των εκτιμώμενων τιμών συντελεστή ισχύος, ο άγνωστος συντελεστής ισχύος μπορεί να υπολογιστεί με τη χρήση της εξίσωσης:

$$PF = W_1 * F_1 + W_2 * F_2 + W_3 * F_3 + \dots + W_n * F_n$$

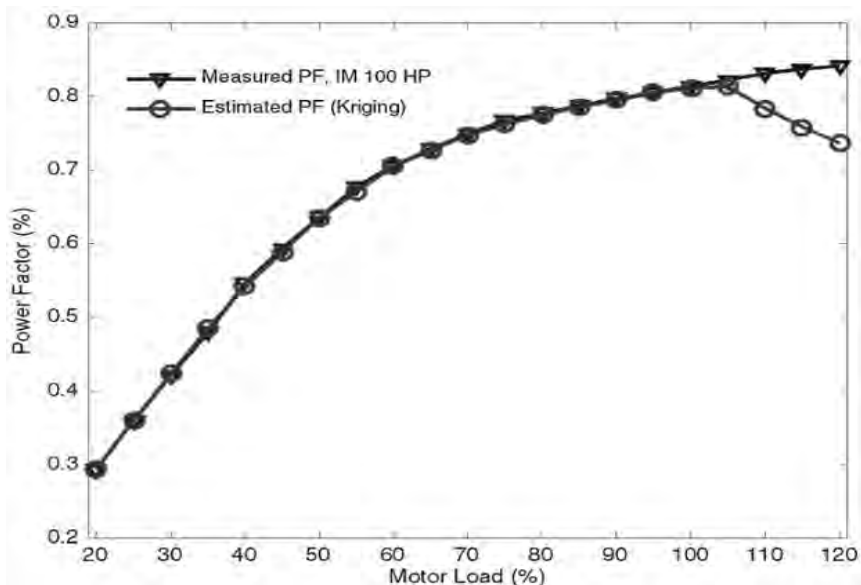
, όπου W_i = διάνυσμα που αναφέρεται στο βάρος μεταξύ σημείων της εκτιμώμενης και της γνωστής τιμής του συντελεστή ισχύος,

F_i = διάνυσμα που αναφέρεται στη τιμή του γνωστού συντελεστή ισχύος.

Πολλαπλασιάζοντας τα διανύσματα W και F , τότε υπολογίζουμε τον συντελεστή ισχύος σε ένα δεδομένο σημείο. Με την επαναλαμβανόμενη εφαρμογή του αλγορίθμου του Kriging μπορούμε να εκτιμήσουμε την τιμή του συντελεστή ισχύος του επαγωγικού κινητήρα, κατά τη λειτουργία του με οποιοδήποτε φορτίο

2.6.3 Εφαρμογή της μεθόδου Kriging

Προκειμένου να εξετάσουμε την αποτελεσματικότητα της μεθόδου Kriging την εφαρμόσαμε σε ένα τριφασικό επαγωγικό κινητήρα με ισχύ λειτουργίας 100 H.P. Αρχικά, έγινε η μέτρηση των τιμών του συντελεστή ισχύος του επαγωγικού κινητήρα για διάφορες τιμές του φορτίου και στη συνέχεια αυτές οι τιμές συγκρίθηκαν με τις αντίστοιχες τιμές που υπολογίστηκαν με την εφαρμογή της μεθόδου Kriging. Παρατηρώντας και αναλύοντας τα αποτελέσματα της μεθόδου στην γραφική παράσταση του Σχήματος 2.16, γίνεται αντιληπτό ότι για την λειτουργία του επαγωγικού κινητήρα μεταξύ του μηδενικού και του πλήρους φορτίου, οι τιμές του συντελεστή ισχύος που είχαν μετρηθεί ήταν σχεδόν ίδιες με τις τιμές του συντελεστή ισχύος που είχαν υπολογιστεί με την εφαρμογή της μεθόδου του Kriging. Επιπλέον, παρατηρείται ότι κατά τη λειτουργία του τριφασικού επαγωγικού κινητήρα σε συνθήκες φορτίου μεγαλύτερο από το πλήρες, τότε οι τιμές του συντελεστή ισχύος που είχαν μετρηθεί διαφέρουν πάρα πολύ από τις αντίστοιχες τιμές που είχαν υπολογιστεί μέσω της εφαρμογής της μεθόδου του Kriging [10].



Σχήμα 2.16. Γραφική παράσταση εκτιμώμενης και μετρήσιμης τιμής συντελεστή ισχύος

Συμπερασματικά, δεδομένου των αποτελεσμάτων του πειράματος, καταλήγουμε στο γεγονός ότι η μέθοδος του Kriging είναι αποτελεσματική στον υπολογισμό τιμών του συντελεστή ισχύος σε τριφασικούς επαγωγικούς κινητήρες, μόνο όταν αυτοί λειτουργούν σε συνθήκες από μηδενικό μέχρι πλήρες φορτίο.

2.7 Συμπέρασμα

Σε αυτό το κεφάλαιο κατανοήσαμε το σημαντικό ρόλο του συντελεστή ισχύος για την βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας επαγωγικών φορτίων και συγκεκριμένα του τριφασικού επαγωγικού κινητήρα και επομένως για τη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης στον βιομηχανικό χώρο. Ταυτόχρονα, γνωρίσαμε τον τρόπο κατασκευής και λειτουργίας ενός τριφασικού επαγωγικού κινητήρα. Επιπλέον, μάθαμε όχι μόνο τα αίτια χαμηλής τιμής του συντελεστή ισχύος αλλά και τους τρόπους βελτίωσής του. Τέλος, αποκτήσαμε γνώση για την εύρεση της τιμής του συντελεστή ισχύος κατά τη διάρκεια λειτουργίας του τριφασικού επαγωγικού κινητήρα σε διάφορες συνθήκες φορτίου, μέσω της μεθόδου Kriging, προκειμένου να προσδιορίσουμε τον κατάλληλο τύπο πυκνωτή, ο οποίος είναι υπεύθυνος για τη σωστή διόρθωση του συντελεστή ισχύος ενός τριφασικού επαγωγικού κινητήρα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

3.1 Εισαγωγή

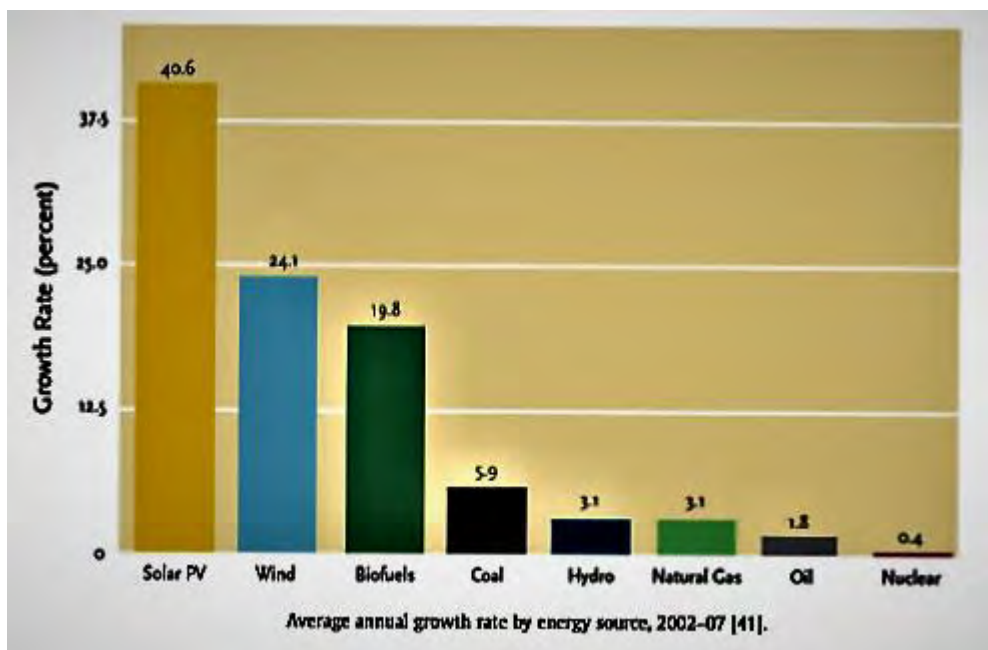
Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας σχετίζονται με την ενέργεια που προέρχεται από απεριόριστες πηγές. Η σωστή χρήση τους αποτελεί ένα φλέγον ζήτημα στην σημερινή εποχή. Για αυτό το λόγο, κρίνεται απαραίτητο να γνωρίζουμε ποια πηγή ενέργειας θα χρησιμοποιήσουμε, αλλά και το λόγο που την επιλέξαμε. Στην επιλογή μας πρέπει να λάβουμε υπόψη παράγοντες, όπως η αποδοτικότητα, η σταθερότητα, το κόστος καθώς και η περιβαλλοντική επίπτωση της πηγής. Δυστυχώς, κάποιες βιομηχανίες χρησιμοποιούν ορυκτά καύσιμα για την κάλυψη των ηλεκτρικών ενεργειακών τους αναγκών, χωρίς να υπολογίσουν τους παραπάνω παράγοντες. Ως αποτέλεσμα αυτού, είναι απαραίτητη η εισαγωγή των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο βιομηχανικό χώρο με στόχο όχι μόνο τον περιορισμό της ενεργειακής κατανάλωσης, αλλά και την μείωση των περιβαλλοντικών προβλημάτων [11].

3.2 Σημαντικότητα εισαγωγής ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στη βιομηχανία

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι ανεξάρτητες των αποθεμάτων των ορυκτών καυσίμων. Ως αποτέλεσμα αυτού, όταν εγκατασταθεί η κατάλληλη τεχνολογία στο βιομηχανικό χώρο, προκειμένου να γίνει σωστή χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, τότε θα μειωθεί το ενεργειακό κόστος της βιομηχανίας. Πιο συγκεκριμένα, τα αποθέματα των πηγών ενέργειας, όπως το πετρέλαιο, το φυσικό αέριο και ο άνθρακας, συνεχώς μειώνονται και επομένως αυξάνεται και η τιμή τους. Κατανοώντας την σημασία των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στις βιομηχανίες και έχοντας στόχο τον περιορισμό ενεργειακής κατανάλωσης σε αυτές, δημιουργείται η ανάγκη ενσωμάτωσης τους σε αυτές [11].

Αξίζει να σημειωθεί ότι στη σύγχρονη εποχή, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας καλύπτουν το 21% της παγκόσμιας ενεργειακής ζήτησης, ενώ το 1998 αυτές κάλυπταν μόνο το 2% αυτής.

Στο Σχήμα 3.1, παρουσιάζεται το ποσοστό αύξησης χρήσης διαφορετικών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Οι τιμές αυτές αντικατοπτρίζουν μετρήσεις που έγιναν μία φορά το χρόνο κατά τη διάρκεια πέντε χρόνων και συγκεκριμένα από το 2002 μέχρι το 2007 [12].



Σχήμα 3.1. Διάγραμμα ποσοστού αύξησης χρήσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας

Η συνεχώς αυξανόμενη χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε συνδυασμό με τη σημαντική συμβολή τους στον ενεργειακό κλάδο οδηγεί στην ανάγκη ενσωμάτωσή τους στο βιομηχανικό χώρο.

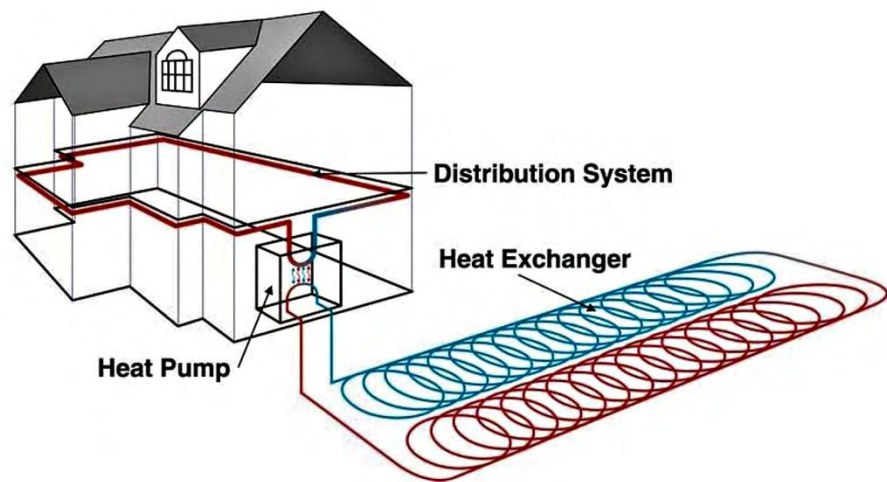
Κάποιες από τις βασικότερες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι η γεωθερμική, η ηλιακή και η αιολική, η εφαρμογή των οποίων στον βιομηχανικό χώρο θα συμβάλει τόσο στην μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας που παράγεται από ορυκτά καύσιμα, όσο και στην αύξηση της ενεργειακής αποδοτικότητας.

3.3 Γεωθερμική ενέργεια

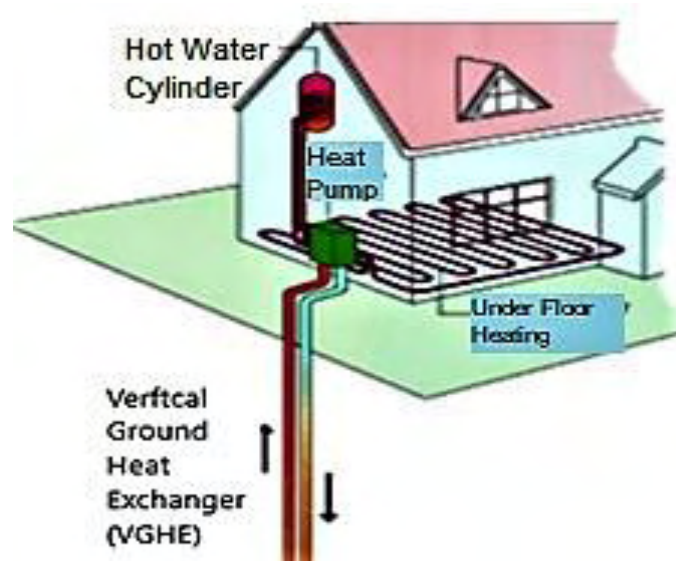
Πιο συγκεκριμένα, η γεωθερμική ενέργεια χρησιμοποιείται στις βιομηχανίες, για παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας. Στα προηγούμενα χρόνια, η γεωθερμική ενέργεια μπορούσε να αποφέρει κέρδος μόνο σε περιοχές, όπου το ζεστό νερό ή ο ατμός βρισκόταν συγκεντρωμένα σε βάθος μικρότερο από τρία χιλιόμετρα από την επιφάνεια του εδάφους. Αυτό το γεγονός όμως έχει αλλάξει στη σύγχρονη εποχή χάρη στην ανάπτυξη της τεχνολογίας εφαρμογής των γεωθερμικών αντλιών θερμότητας, χρησιμοποιώντας το έδαφος ως πηγή θερμότητας για την παραγωγή είτε θερμότητας το χειμώνα, είτε ψύξης το καλοκαίρι. Ως αποτέλεσμα αυτού, πλέον οι γεωθερμικές αντλίες θερμότητας μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε οποιαδήποτε περιοχή. Επιπλέον, αξίζει να

αναφέρουμε ότι αυτές συγκαταλέγονται ανάμεσα στον πιο ενεργειακά αποδοτικό εξοπλισμό των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής. Αυτό συμβαίνει λόγω της ικανότητάς τους να καλύπτουν πολλές διαφορετικές ενεργειακές ανάγκες. Τέλος, είναι γεγονός ότι όλο και περισσότερες χώρες, όπως η Γερμανία και η Ελβετία αρχίζουν να ενσωματώνουν τις γεωθερμικές αντλίες ως πηγή ενέργειας για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών τους και ιδιαίτερα στο βιομηχανικό χώρο [13].

Στα Σχήματα 3.2 και 3.3 παρουσιάζονται δύο συστήματα γεωθερμικής αντλίας, με οριζόντιες και κάθετες γεωτρήσεις ως προς το επίπεδο αντίστοιχα.



Σχήμα 3.2. Οριζόντιο γεωθερμικό σύστημα



Σχήμα 3.3. Κάθετο γεωθερμικό σύστημα

3.3.1. Τρόπος λειτουργίας συστήματος γεωθερμικών αντλιών

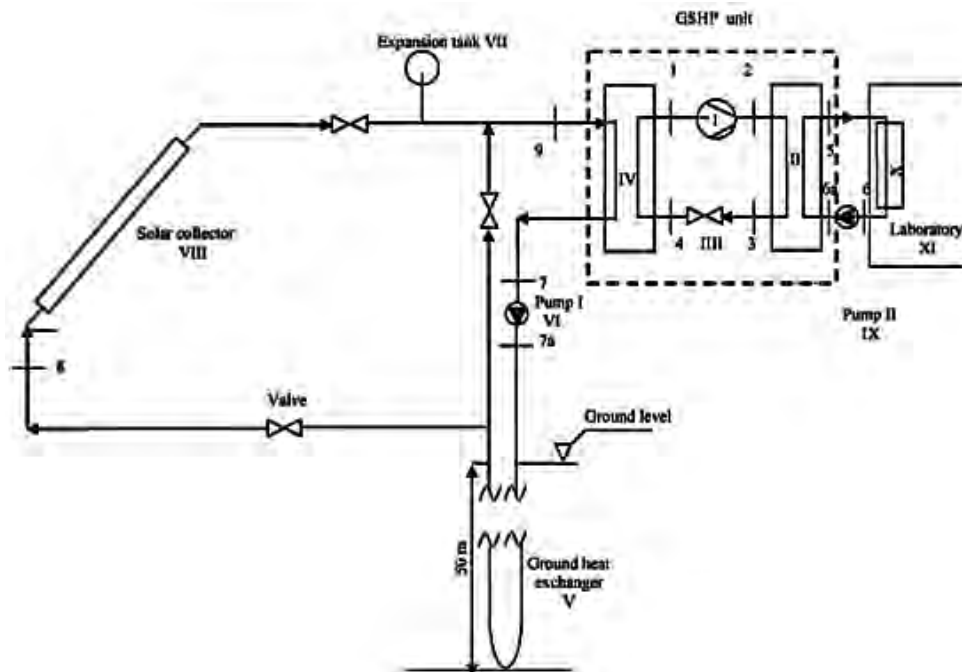
Όπως αναφέραμε και προηγουμένως, το σύστημα γεωθερμικών αντλιών χρησιμοποιείται όλο και περισσότερο για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών της θέρμανσης και της ψύξης τόσο εμπορικών, όσο και βιομηχανικών κτιρίων. Πιο αναλυτικά, αυτά τα συστήματα αποτελούνται από έναν αεροστεγή, βρογχοειδή σωλήνα, που έχει θαφτεί στο έδαφος και στη συνέχεια έχει συνδεθεί με μία αντλία θερμότητας μέσω της οποίας κυκλοφορεί νερό ή ένα υγρό υλικό που δεν παγώνει. Οι σωλήνες που βρίσκονται θαμμένοι και λειτουργούν ως εναλλάκτες θερμότητας, συνήθως τοποθετούνται κάθετα ως προς το επίπεδο του εδάφους και όχι οριζόντια, προκειμένου να μειωθεί η έκταση του οριζόντιου εδάφους που χρησιμοποιείται. Κάθε κάθετη γεώτρηση, στην οποία βρίσκεται ο εναλλάκτης θερμότητας, περιέχει ένα κυλινδρικό σωλήνα τύπου U. Το βάθος της γεώτρησης κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 40 και 150 μέτρων από την επιφάνεια του εδάφους και η διάμετρος της έχει τιμή μεταξύ 0,075 και 0,15 μέτρων. Οι τρύπες των γεωτρήσεων πρέπει να καλυφθούν περιμετρικά από υλικά που παρέχουν τη θερμική επαφή μεταξύ του σωλήνα και του περιβάλλοντος του εδάφους καθώς και την προστασία του υπόγειου νερού από πιθανή μόλυνση. Η αποδοτικότητα των συστημάτων γεωθερμικών αντλιών είναι καλή καθώς το έδαφος έχει την ιδιότητα να διατηρεί μία σχετικά σταθερή θερμοκρασία [14].

Ο στόχος αυτών των συστημάτων είναι η χρήση του εδάφους ως πηγή θερμότητας ή ως πηγή ψύξης. Κατά τη διάρκεια λειτουργίας τους για την κάλυψη των αναγκών ψύξης, η θερμότητα απορροφάται από το περιβάλλον που θέλουμε να ψύξουμε και μεταφέρεται στο έδαφος, μέσω των υπόγειων εναλλακτών θερμότητας. Αναλυτικότερα, το σύστημα γεωθερμικής αντλίας εναλλάσσει θερμότητα με το έδαφος και διατηρεί ένα υψηλό επίπεδο αποδοτικότητας ακόμα και σε ακραίες κλιματικές συνθήκες.

Προκειμένου να εξεταστεί η αποδοτικότητα των γεωθερμικών αντλιών θερμότητας, έγινε έρευνα στο σχεδιασμό και στην μοντελοποίηση ενός γεωθερμικού συστήματος σε συνδυασμό με την χρήση ηλιακών συστημάτων.

3.3.2. Κατασκευή γεωθερμικού συστήματος σε συνδυασμό με βοηθητικό ηλιακό σύστημα

Η κατασκευή του γεωθερμικού συστήματος που θέλουμε να μελετήσουμε ως προς την ενεργειακή του αποδοτικότητα περιγράφεται στο Σχήμα 3.4.



Σχήμα 3.4. Γεωθερμικό σύστημα με βοηθητικό ηλιακό σύστημα

Το παραπάνω σύστημα αποτελείται από τρία ξεχωριστά βασικά κυκλώματα. Το πρώτο είναι το κύκλωμα με τον ηλιακό συλλέκτη και τοποθετείται στο επίπεδο του εδάφους. Το συγκεκριμένο κύκλωμα περιέχει αλατόνερο ή υγρό υλικό προκειμένου να αποφευχθεί η ψύξη του νερού που χρησιμοποιείται σε αυτό. Το δεύτερο κύκλωμα είναι αυτό της ψύξης, που λειτουργεί σαν συμπιεστής ατμού. Το τρίτο κύκλωμα αποτελείται από fan-coils, τα οποία χρησιμοποιούν νερό για τη λειτουργία τους και έχουν στόχο την παροχή θερμικής ενέργειας. Η αλλαγή από τη λειτουργία του συστήματος για την παροχή θέρμανσης, στη λειτουργία του συστήματος για την παροχή ψύξης γίνεται με την βοήθεια μίας βαλβίδας τεσσάρων κατευθύνσεων. Προκειμένου να αποφευχθεί το πάγωμα του νερού κατά τη λειτουργία του συστήματος ή κατά τη χρονική περίοδο του χειμώνα, ένα ποσοστό 10% αιθυλικής γλυκόλης αναμειγνύεται με το νερό. Στο δεύτερο κύκλωμα, δηλαδή σε αυτό της ψύξης, το υλικό που χρησιμοποιείται είναι το R-22.

Το νερό το οποίο εξέρχεται από το επίπεδο του εδάφους και εισέρχεται στη μονάδα της γεωθερμικής αντλίας θα έχει θερμοκρασία μικρότερη από τη φυσιολογική θερμοκρασία του εδάφους. Αυτό γίνεται χάρη στην μεταφορά θερμότητας από το κυκλοφορούμενο νερό στο εξωτερικό περιβάλλον. Η πραγματική λειτουργία του συστήματος αποτελεί συνάρτηση της θερμοκρασίας του νερού που παράγεται από τους εναλλάκτες θερμότητας που βρίσκονται στο έδαφος [14].

Το παραπάνω σύστημα συγκρίθηκε με ένα παρόμοιο σύστημα γεωθερμικών αντλιών, όπου οι γεωτρήσεις είχαν γίνει οριζόντια σε σχέση με το επίπεδο του εδάφους. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα γίνεται αντιληπτό ότι η αποδοτικότητα του συστήματος με κάθετες γεωτρήσεις ως προς το επίπεδο του εδάφους είναι μεγαλύτερη από αυτή του συστήματος με οριζόντιες γεωτρήσεις.

Σύμφωνα με μετρήσεις που έγιναν ύστερα από εφαρμογή του παραπάνω συστήματος οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι η λειτουργία του είναι αποδοτική και για αυτό το λόγο θα μπορούσε να αποτελέσει πηγή παροχής τόσο θερμικής ενέργειας, όσο και ψύξης στο χώρο της βιομηχανίας, προκειμένου να μειωθεί το κόστος παραγωγής ενέργειας καθώς και η ενεργειακή παραγωγή από μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας [14].

3.3.3. Σύγχρονες αντλίες θερμότητας τύπου PSF

Προκειμένου να έχουμε ένα ενεργειακά αποδοτικότερο γεωθερμικό σύστημα αντλιών θερμότητας, πρέπει να αναπτυχθούν οι υπάρχουσες αντίστοιχες τεχνολογίες. Μια πιο σύγχρονη τεχνολογία είναι η φυγοκεντρική αντλία θερμότητας τύπου PSF (Permanent-magnetic Synchronous Frequency-convertible), της οποίας η ενσωμάτωση στο γεωθερμικό σύστημα που περιγράψαμε παραπάνω, αντικαθιστώντας τις συμβατικές αντλίες θερμότητας, θα συμβάλει στην βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας του συστήματος [15].

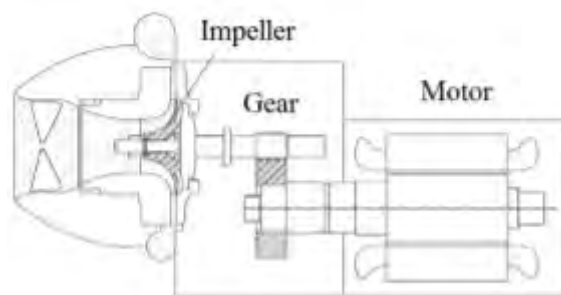
Οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται από την αντλία θερμότητας τύπου PSF είναι:

1. Η συμπίεση των δύο σταδίων με έγχυση ατμού. Σε σύγκριση, με τη συμπίεση ενός σταδίου αποδείχτηκε καλύτερη, αφού η αποδοτικότητα του συστήματος αυξήθηκε κατά 8%.
2. Η χρήση συμπιεστή πεπιεσμένου αέρα για κάθε συνθήκη λειτουργίας του συστήματος. Ο συνήθης συμπιεστής είναι σχεδιασμένος και κατασκευασμένος

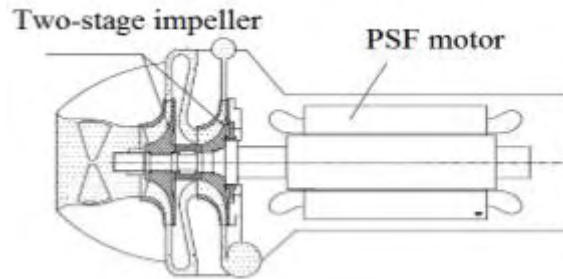
σύμφωνα με μία συγκεκριμένη κατάσταση λειτουργίας. Αντιθέτως, ο συμπιεστής τύπου PSF είναι σχεδιασμένος να λειτουργεί σε καταστάσεις μερικού φορτίου αλλά και ολικού φορτίου. Αυτό σε συνδυασμό με κάποια ειδικά κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του συμπιεστή, όπως το μεγάλο μήκος της λεπίδας του στροβίλου, η ύπαρξη ανεμιστήρα και μιας κρικοειδούς θύρας έγχυσης για ψύξη έχει ως αποτέλεσμα η αδιαβατική αποδοτικότητα του συμπιεστή να είναι μεγαλύτερη από 85%.

3. Ο στρόβιλος δύο σταδίων, ο οποίος συνδέεται άμεσα με τον κινητήρα υψηλής ταχύτητας. Το γρανάζι που είναι συνδεδεμένο με τον κινητήρα στο συμβατικό μοντέλο συμπιεστή, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.5, αφαιρείται. Επομένως, μειώνονται οι μηχανικές απώλειες του συμπιεστή κατά 25% στο σύγχρονο συμπιεστή.
4. Ο κινητήρας τύπου PSF, ο οποίος λειτουργεί με υψηλή ταχύτητα. Η αποδοτικότητα του κινητήρα είναι μεγαλύτερη από 96% και αν αυτός λειτουργεί για κάθε φορτίο η τιμή της μπορεί να φτάσει το 97.5%.
5. Ένας διορθωτής τεσσάρων τεταρτοκυκλίων. Ως αποτέλεσμα, ο μετατροπέας ισχύος έχει συντελεστή ισχύος 0.998 και η αποδοτικότητά του είναι περίπου 97%. Επιπλέον, δεν υπάρχει ανάγκη επιπλέον εγκατάστασης για την απομόνωση των αρμονικών στο μετατροπέα συχνότητας.

Στα Σχήματα 3.5 και 3.6 απεικονίζεται η δομή ενός παραδοσιακού συμπιεστή και ενός σύγχρονου συμπιεστή τύπου PSF αντίστοιχα.

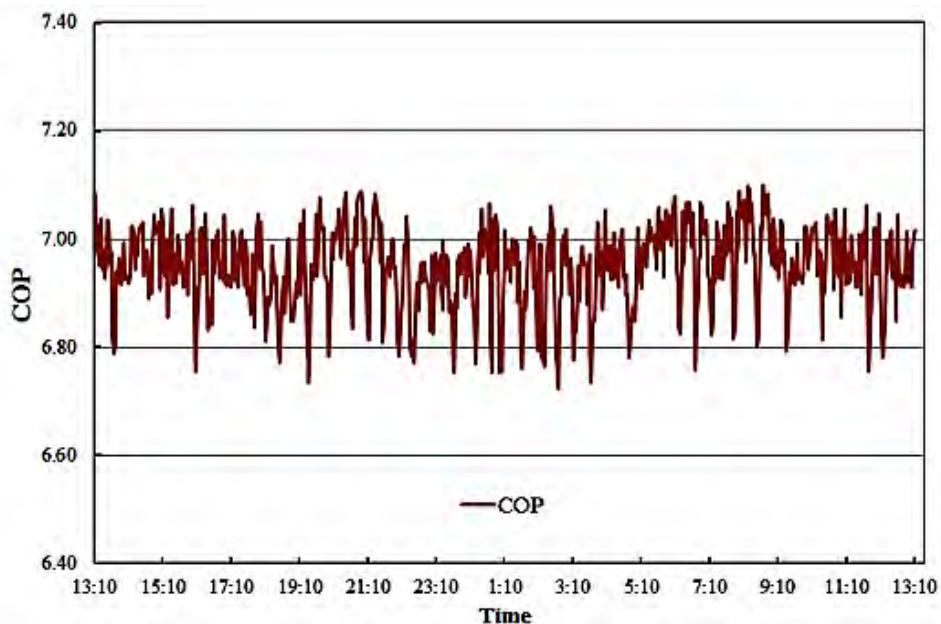


Σχήμα 3.5. Παραδοσιακός συμπιεστής



Σχήμα 3.6. Σύγχρονος συμπιεστής

Σύμφωνα με μετρήσεις που έγιναν από την εφαρμογή αυτής της τεχνολογίας σε ένα σύστημα παραγωγής θερμότητας διεξάχθηκαν τα αποτελέσματα που φαίνονται στο Σχήμα 3.7.



Σχήμα 3.7. Διάγραμμα COP του συμπιεστή PSF

Σύμφωνα με τη γραφική παράσταση, οι τιμές της αποδοτικότητας λειτουργίας των αντλιών θερμότητας τύπου PSF είναι σταθερές και κυμαίνονται μεταξύ των τιμών $6.95-0.25$ και $6.95+0.25$, όπου 6.95 η μέση τιμή [15].

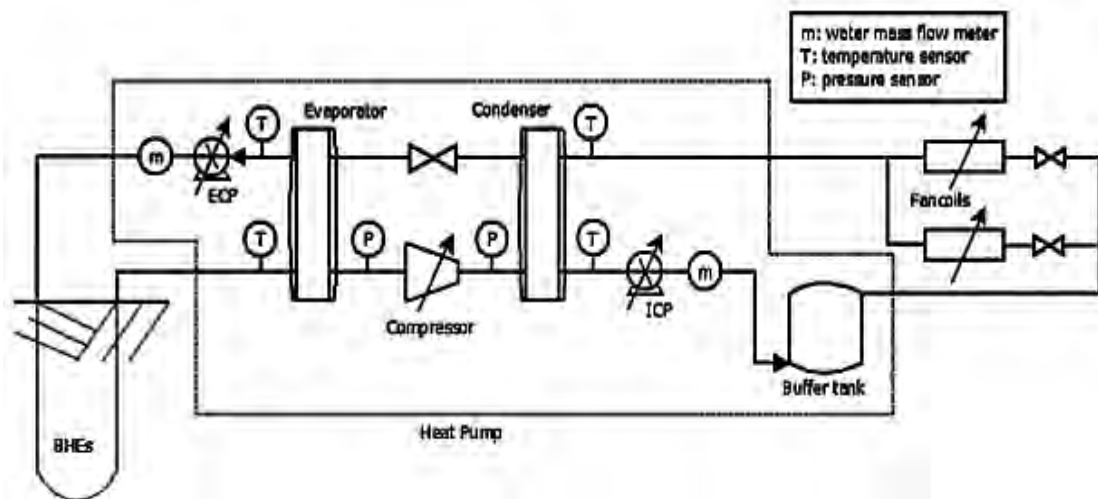
3.3.4. Αντλίες θερμότητας πολλαπλών ταχυτήτων

Μία πρόσθετη σύγχρονη τεχνολογία που συμβάλει στην αύξηση της αποδοτικότητας των γεωθερμικών συστημάτων είναι οι αντλίες θερμότητας που λειτουργούν σε πολλαπλές ταχύτητες.

Οι περισσότερες αντλίες θερμότητας λειτουργούν σε κατάσταση on/off, προκειμένου να προσαρμόσουν τη χωρητικότητα θερμότητας και ψύξης στο ενεργειακό φορτίο που ζητείται από το κτίριο. Κατά αυτόν τον τρόπο, οι αντλίες θερμότητας πρέπει να παρέχουν θερμότητα μεγάλης θερμοκρασίας, όταν λειτουργούν στην κατάσταση on, έτσι ώστε να παρέχουν τη θερμική ενέργεια που απαιτείται κατά τη διάρκεια όλου του κύκλου [16].

Αντιθέτως, αν χρησιμοποιηθεί ένας συμπιεστής πολλών ταχυτήτων, τότε η αντλία λειτουργεί παρέχοντας το ενεργειακό φορτίο που χρειάζεται το κτίριο κάθε χρονική στιγμή, εκμεταλλευόμενη τα μερικά φορτία των μεγάλων εναλλακτών θερμότητας και επομένως συντελώντας στην αύξηση της ενεργειακής αποδοτικότητας του συστήματος. Πιο συγκεκριμένα, το μέγιστο φορτίο σε ένα κτίριο ζητείται μόνο για λίγες ώρες το χρόνο, επομένως οι αντλίες θερμότητας λειτουργούν για μερικά φορτία. Για αυτό το λόγο, είναι αναγκαίο να προσαρμόσουμε την χωρητικότητα της θερμότητας και της ψύξης στο μερικό φορτίο που κάθε φορά ζητείται. Με στόχο να έχουμε την μέγιστη εποχιακή ενεργειακή αποδοτικότητα μιας γεωθερμικής αντλίας με πολλαπλές ταχύτητες, είναι σημαντικό να έχουμε τη βέλτιστη συνεργασία όλων των συστημάτων στα διαφορετικά μερικά φορτία. Για να επιτευχθεί αυτό, έγιναν διάφορα πειράματα για να εκτιμηθεί η αποδοτικότητα του συμπιεστή και η λειτουργία των εναλλακτών θερμότητας σε διαφορετικά μερικά φορτία καθώς και η επίδραση της θερμοκρασίας του παρεχόμενου νερού [16].

Με στόχο την κατανόηση λειτουργίας του συγκεκριμένου γεωθερμικού συστήματος, που στοχεύει στην κάλυψη των ενεργειακών αναγκών θέρμανσης, ψύξης του χώρου καθώς και την παροχή ζεστού νερού, θα περιγράψουμε το μοντέλο του, το οποίο αναπαρίσταται στο Σχήμα 3.8.



Σχήμα 3.8. Μοντέλου γεωθερμικού συστήματος αντλιών θερμότητας πολλών ταχυτήτων

Πιο αναλυτικά, οι αντλίες θερμότητας παρέχουν ψύξη στο χώρο σε συνδυασμό με fan coils. Επιπλέον, αυτές παρέχουν θερμότητα στο χώρο μέσω του κυκλοφορούμενου νερού στους αγωγούς. Αυτοί αποτελούνται από δύο μονούς σωλήνες τύπου U και δύο διπλούς σωλήνες τύπου U συνδεδεμένοι παράλληλα [16].

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.8, το σύστημα αντλιών θερμότητας αποτελείται από πολλές παραμέτρους πολλαπλής ταχύτητας. Αναλυτικότερα, αυτές είναι ένας συμπιεστής που λειτουργεί με ασύγχρονο ηλεκτρικό κινητήρα, οι φυγοκεντρικές αντλίες που λειτουργούν με κινητήρες συνεχούς ρεύματος και τα fan coils που λειτουργούν με κινητήρες συνεχούς ρεύματος.

Στην αντλία θερμότητας του συστήματος είναι ενσωματωμένος ένας συμπιεστής, ο οποίος μπορεί να απορροφήσει μικρές ποσότητες υγρού χωρίς να καταστρέφονται οι σπείρες του. Αυτό γίνεται εφικτό με τη συμβολή των σπειρών σε δύο επίπεδα [16]:

1. Στην ακτινική προσαρμογή. Αναλυτικότερα, αν απορροφηθεί μολυσμένο νερό, οι σπείρες χωρίζονται στην κατεύθυνση των ακτινών με στόχο να επιτρέψουν το πέρασμά του.
2. Στην αξονική προσαρμογή. Αναλυτικότερα, αν απορροφηθεί μεγάλη ποσότητα υγρού, οι υπάρχουσες σπείρες μετακινούνται στην κορυφή, προκειμένου να επιτρέψουν την αποβολή του υγρού στο θάλαμο στροφορμής του κινητήρα.

Η βαλβίδα διαστολής είναι μία ηλεκτρονικά ελεγχόμενη βαλβίδα, η οποία επιτρέπει την εναρμόνιση μεγαλύτερης χωρητικότητας από τις κοινές θερμοστατικές βαλβίδες. Τα fan-

coils, όπως αναφέραμε και προηγουμένως, λειτουργούν με ηλεκτρικούς κινητήρες συνεχούς ρεύματος καθώς διαθέτουν και έναν μικρο-επεξεργαστή ελέγχου. Πιο συγκεκριμένα, αυτός επιτρέπει τη μέτρηση της θερμοκρασίας και της υγρασίας του αέρα καθώς και τη μέτρηση της θερμοκρασίας του εισερχόμενου νερού. Επιπλέον, αυτός έχει τη δυνατότητα απομακρυσμένου ελέγχου του ανεμιστήρα και το άνοιγμα της βαλβίδας [16].

Ως αποτέλεσμα, καταλαβαίνουμε ότι οι παράμετροι που αποτελούν ένα σύστημα αντλίας θερμότητας, όπως το παραπάνω, και επηρεάζουν την αποδοτικότητα του είναι η συχνότητα του συμπιεστή, η συχνότητα της αντλίας νερού που βρίσκεται στις γεωτρήσεις μαζί με τους εναλλάκτες θερμότητας, η συχνότητα της αντλίας νερού στο κτίριο, η ταχύτητα των ανεμιστήρων καθώς και η θερμοκρασία του παρεχόμενου νερού. Εάν όλες αυτές οι παράμετροι συνδυαστούν σωστά, τότε θα έχουμε την βέλτιστη απόδοση του συστήματος.

Κατά τη διάρκεια κάποιων πειραμάτων που διεξήχθησαν, με στόχο τη βέλτιστη λειτουργία του συστήματος, παρατηρήθηκε ότι αν οι ασύγχρονοι κινητήρες του συμπιεστή αντικατασταθούν από κινητήρες συνεχούς ρεύματος, τότε επιτυγχάνεται η αύξηση αποδοτικότητας του συστήματος χάρη στην αποδοτικότερη λειτουργία αυτών των κινητήρων σε μερικά φορτία [16].

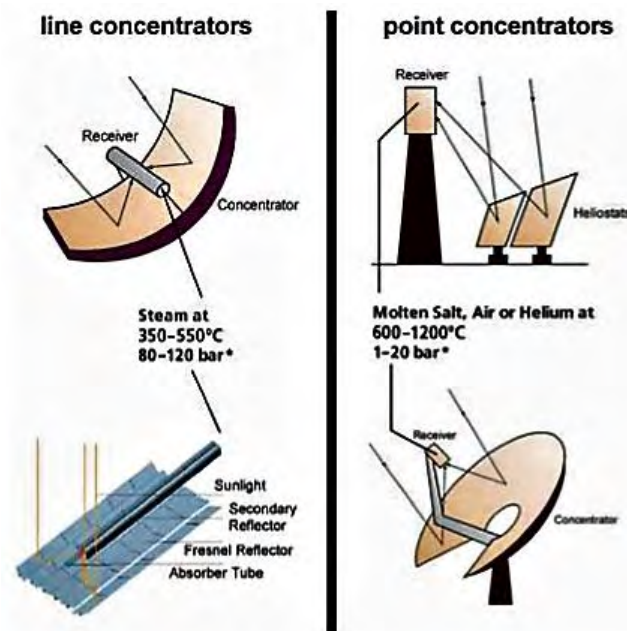
3.4 Ηλιακή ενέργεια

Μία άλλη ανανεώσιμη πηγή ενέργειας που είναι ευρέως διαδεδομένη είναι η ηλιακή ενέργεια. Αυτή η πηγή ενέργειας, σε συνδυασμό με τον εξοπλισμό για την αποθήκευση της ηλιακής ενέργειας, αν ενσωματωθεί στο βιομηχανικό χώρο, τότε θα συντελέσει στην εκπλήρωση του στόχου εξοικονόμησης ενέργειας σε αυτόν.

3.4.1. Τεχνολογία συγκεντρωμένης ηλιακής ενέργειας

Η τεχνολογία που εφαρμόζεται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιώντας την ηλιακή ακτινοβολία που βρίσκεται συγκεντρωμένη σε ένα μέρος είναι γνωστή ως τεχνολογία συγκεντρωμένης ηλιακής ενέργειας. Κατά την εφαρμογή αυτής της τεχνολογίας χρησιμοποιούνται καθρέπτες ή φακοί προκειμένου να αντανακλάσουν το φως του ήλιου σε έναν πρωταρχικό κύκλωμα που λειτουργεί ως αποδέκτης θερμικής ενέργειας. Η θερμική ενέργεια είτε χρησιμοποιείται αμέσως, είτε

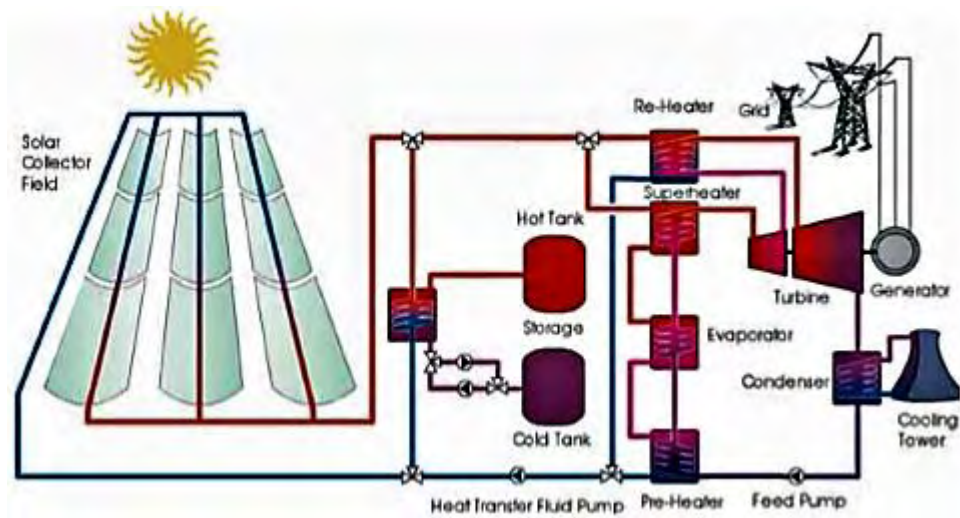
μεταφέρεται σε ένα δευτερεύον κύκλωμα, όπου παράγεται ηλεκτρική ενέργεια με τη χρήση μιας τουρμπίνας [17].



Σχήμα 3.9. Κατασκευή τεχνολογίας συγκέντρωσης ηλιακής ενέργειας

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.9 το σύστημα γραμμικής συγκέντρωσης, που συναντάται στα ηλιακά συστήματα για την συγκέντρωση της ηλιακής ακτινοβολίας, αποτελείται από έναν καμπυλωτό καθρέφτη και έναν σιδερένιο σωλήνα με ειδική επικάλυψη, ο οποίος λειτουργεί σαν απορροφητήρας και μετατρέπει το φως του ήλιου σε χρήσιμη θερμική ενέργεια. Οι καμπυλωτοί καθρέφτες έχουν σχεδιαστεί έτσι προκειμένου να λαμβάνουν την μέγιστη ηλιακή ενέργεια [18].

Στη συνέχεια, αν στόχος μας δεν είναι μόνο η παραγωγή θερμικής αλλά και ηλεκτρικής ενέργειας, τότε γίνεται χρήση μιας τουρμπίνας. Πιο συγκεκριμένα, το υγρό, το οποίο βρίσκεται στο εσωτερικό της τουρμπίνας και συνήθως είναι συνθετικό λάδι ή νερό, μεταφέρει τη θερμική ενέργεια σε ένα συμβατικό ενεργειακό κύκλο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.10.



Σχήμα 3.10. Κύκλος παραγωγής ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας μέσω συλλεκτών ηλιακής ενέργειας

Πιο αναλυτικά, το νερό ή το συνθετικό λάδι, το οποίο μεταφέρει τη θερμική ενέργεια, χρησιμοποιείται για την παραγωγή υπερθερμασμένου ατμού σε πίεση 5 με 10 MPa. Στη συνέχεια, αυτός ο ατμός τροφοδοτεί μία τουρμπίνα ατμού που συνδέεται με μία γεννήτρια για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας [18].

Μια επιπλέον τεχνολογία που εκμεταλλεύεται την ηλιακή ενέργεια για την παραγωγή ηλεκτρικής, εκτός από την τεχνολογία συγκέντρωσης ηλεκτρικής ενέργειας που αναλύσαμε παραπάνω, είναι αυτή των φωτοβολταϊκών.

3.4.2. Φωτοβολταϊκά συστήματα

Η χρήση φωτοβολταϊκών για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στο χώρο της βιομηχανίας, εκμεταλλεύοντας την ηλιακή ενέργεια, αποτελεί την πιο «κομψή» μέθοδο, δεδομένου ότι δεν χρειάζεται η μεταφορά του υπάρχοντος εξοπλισμού, δεν υπάρχει παραγωγή θορύβου καθώς και εκπομπών καυσαερίων ή ρύπων [19].

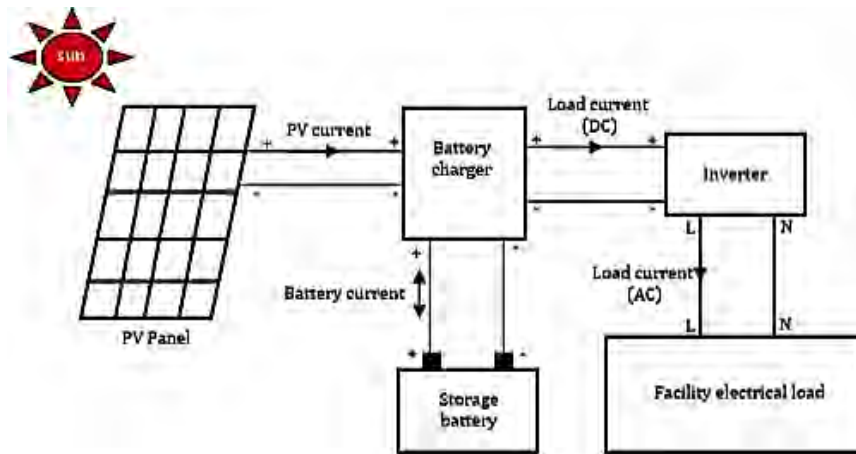
Προκειμένου να κατανοήσουμε τον τρόπο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με την εφαρμογή των φωτοβολταϊκών, θα αναλύσουμε ένα τέτοιο σύστημα, το οποίο δεν είναι συνδεδεμένο στο δίκτυο ενέργειας.

Το φωτοβολταϊκό σύστημα αποτελείται, εκτός από τα φωτοβολταϊκά πάνελ, και από άλλα ποικίλα συστήματα, τα οποία συνδέονται με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να

σχηματίσουν ένα ολοκληρωμένο λειτουργικό σύστημα που θα παράγει ηλεκτρική ενέργεια. Τα επιπλέον συστήματα είναι τα εξής [20]:

1. Τα φωτοβολταϊκά κελιά, το οποία αποτελούν τις βασικές μονάδες εναλλαγής της ηλιακής ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα, αυτά είναι φτιαγμένα από ημιαγωγούς και έχουν ως ρόλο την μετατροπή του ηλιακού φωτός, που προσπίπτει σε αυτά, σε ηλεκτρική ενέργεια. Προκειμένου να αυξηθεί η ενεργειακή απόδοση των φωτοβολταϊκών κελιών, αυτά συνδέονται μεταξύ τους και σχηματίζουν μεγαλύτερες μονάδες, που ονομάζονται ενότητες. Με τη σειρά τους αυτές οι μονάδες, συνδέονται είτε παράλληλα, είτε σε σειρά μεταξύ τους με στόχο να σχηματίσουν μία ακόμη μεγαλύτερη μονάδα που ονομάζεται πάνελ.
2. Το σύστημα αποθήκευσης της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά, που λειτουργεί σαν μπαταρία. Ως αποτέλεσμα αυτού, δίνεται η δυνατότητα παροχής της ηλεκτρικής ενέργειας τις βραδινές ώρες και τις συννεφιασμένες μέρες, όπου η ηλεκτρική ενέργεια δεν επαρκεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.
3. Ο ρυθμιστής τάσης, ο οποίος εναλλάσσει το ρεύμα αποτρέποντας κατά αυτό τον τρόπο είτε την περισσότερη φόρτιση, είτε την λιγότερη φόρτιση της μπαταρίας.
4. Τον μετατροπέα, ο οποίος μετατρέπει το χαμηλό συνεχές ρεύμα σε χρήσιμο εναλλασσόμενο ρεύμα.
5. Τα φορτία συνεχούς και εναλλασσόμενου ρεύματος, εφαρμογές και συσκευές, οι οποίες καταναλώνουν την ηλεκτρική ενέργεια, η οποία παράγεται από το φωτοβολταϊκό σύστημα.

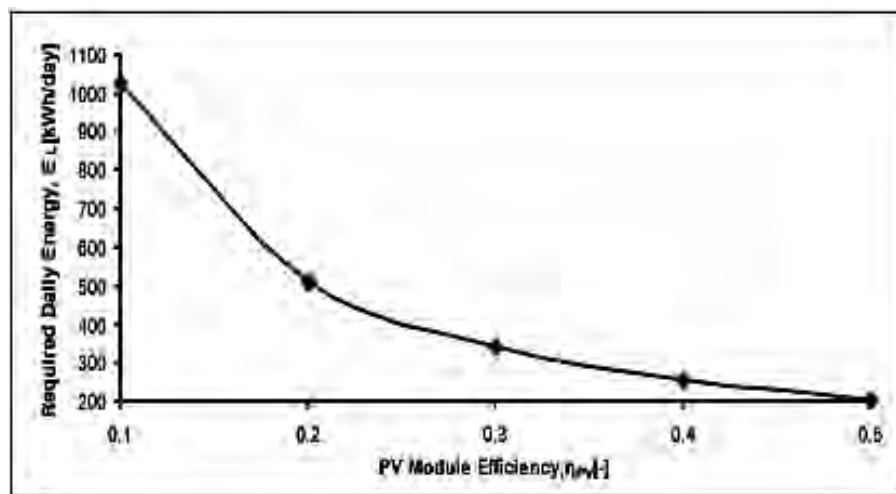
Το φωτοβολταϊκό σύστημα που περιγράψαμε απεικονίζεται στο Σχήμα 3.11.



Σχήμα 3.11. Σύνθετο φωτοβολταϊκό σύστημα

Προκειμένου να εξετάσουμε την αποδοτικότητα του παραπάνω φωτοβολταϊκού συστήματος, είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε τον συντελεστή αποδοτικότητας του συστήματος σε σχέση με τη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας ενός εργοστασίου.

Έχοντας ως δεδομένο το συγκεκριμένο φωτοβολταϊκό σύστημα και τις καιρικές συνθήκες κάτω από τις οποίες έγιναν οι μετρήσεις, εξάγουμε κάποια συμπεράσματα που απεικονίζονται στο Σχήμα 3.12.



Σχήμα 3.12. Διάγραμμα αποδοτικότητας του σύνθετου φωτοβολταϊκού συστήματος

Στην παραπάνω γραφική παράσταση απεικονίζεται η σχέση μεταξύ της καθημερινής ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία παράγεται από το φωτοβολταϊκό σύστημα, και της αποδοτικότητάς του. Σύμφωνα με το Σχήμα 3.12, παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας, τόσο μειώνεται η απόδοση του συστήματος και αντιστρόφως. Αυτό το αποτέλεσμα προκύπτει καθώς για την αύξηση της αποδοτικότητας του συστήματος χρειάζεται η παραγωγή περισσότερης ηλεκτρικής ενέργειας. Επομένως,

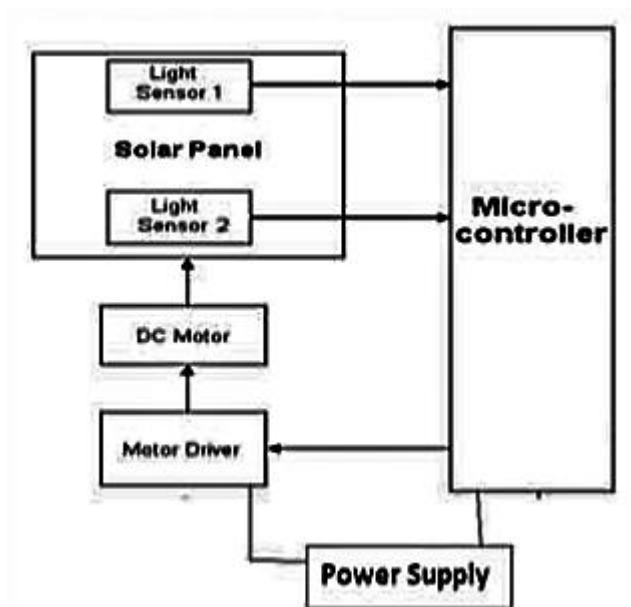
γίνεται προφανές ότι χρειάζεται εντατική έρευνα, προκειμένου να παραχθούν φωτοβολταϊκά πάνελ, που είναι ικανά να μετατρέπουν περισσότερη ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική. Εάν αυτό επιτευχτεί, τα φωτοβολταϊκά συστήματα θα μπορούν να ανταγωνιστούν οποιαδήποτε άλλη τεχνολογία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας [20].

3.4.3. Σύγχρονα ηλιακά πάνελ

Μία πρόσθετη σύγχρονη τεχνολογία που συμβάλει στην βελτίωση της αποδοτικότητας των συστημάτων ηλιακής ενέργειας είναι τα σύγχρονα ηλιακά πάνελ.

Τα συνήθη ηλιακά πάνελ είναι σταθερά, δηλαδή δεν κινούνται. Αντιθέτως, τα σύγχρονα ηλιακά πάνελ έχουν τη δυνατότητα να κινούνται σύμφωνα με την κατεύθυνση του ηλιακού φωτός, με στόχο την παραγωγή παραπάνω από 30% περισσότερης ενέργειας από αυτή που παράγουν τα συνήθη σταθερά ηλιακά πάνελ. Ο βασικός μηχανισμός που χρησιμοποιείται είναι οι LDR αισθητήρες φωτός, οι οποίοι κινούν το ηλιακό πάνελ, έτσι ώστε αυτό να είναι κάθετο στον ήλιο [21].

Προκειμένου να κατανοήσουμε τη λειτουργία αυτού του συστήματος είναι σημαντικό να αναλύσουμε το μοντέλο του, το οποίο απεικονίζεται στο Σχήμα 3.13.



Σχήμα 3.13. Μοντέλο σύγχρονου ηλιακού πάνελ

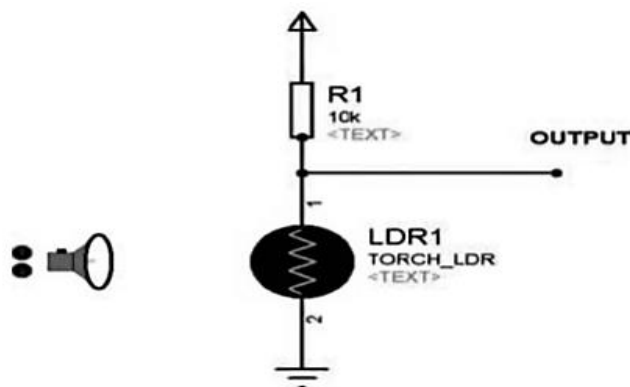
Το συστήματα εντοπισμού ηλιακού φωτός μπορεί να είναι δύο τύπων [21]:

1. Να αποτελούνται από ένα μονό άξονα εντοπισμού. Σε αυτά τα συστήματα, η γωνία περιστροφής του άξονα είναι συγκεκριμένη.
2. Να αποτελούνται από διπλό άξονα εντοπισμού. Σε αυτά τα συστήματα, οι άξονες περιστρέφονται ως προς δύο επίπεδα. Ο πρωταρχικός άξονας είναι αυτός που βρίσκεται στο έδαφος και ο άλλος είναι ο δευτερεύον.

Οι βασικοί παράμετροι που αποτελούν ένα τέτοιο σύστημα είναι ο μικρο-ελεγκτής Arduino UNO, οι αισθητήρες τύπου LDR, ένας κινητήρας και το ηλιακό πάνελ.

Πιο αναλυτικά, το σύστημα του Arduino UNO είναι αρκετά σύνθετο και ο ρόλος του είναι να ελέγχει όλο το σύστημα δίνοντας διαταγές στις υπόλοιπες συσκευές που χρησιμοποιούνται σε αυτό. Συγκεκριμένα, όταν ο μικρο-ελεγκτής έχει πληροφορίες από τους αισθητήρες για την ένταση του ηλιακού φωτός, δίνει εντολή για περιστροφή του άξονα του ηλιακού πάνελ, σύμφωνα με την κατεύθυνση του ηλιακού φωτός [21].

Οι αισθητήρες τύπου LDR λειτουργούν σαν αντιστάτες εξαρτώμενοι από το ηλιακό φως, των οποίων η αντίσταση ποικίλει ανάλογα με την αλλαγή της έντασης του ηλιακού φωτός που προσπίπτει σε αυτούς. Το υλικό από το οποίο είναι φτιαγμένοι είναι το σουλφιδικό κάδμιο. Η αρχή λειτουργίας τους είναι η εξής: όταν ο αισθητήρας εκτεθεί στα ηλεκτρόνια του φωτός, λαμβάνει ενέργεια. Όσο η ένταση του φωτός αυξάνει, περισσότερο ρεύμα θα ρέει στο κύκλωμα του αισθητήρα και επομένως η αντίσταση μειώνεται κατά την πρόσπτωση του φωτός στον αισθητήρα. Το κύκλωμα του αισθητήρα τύπου LDR φαίνεται στο Σχήμα 3.14.

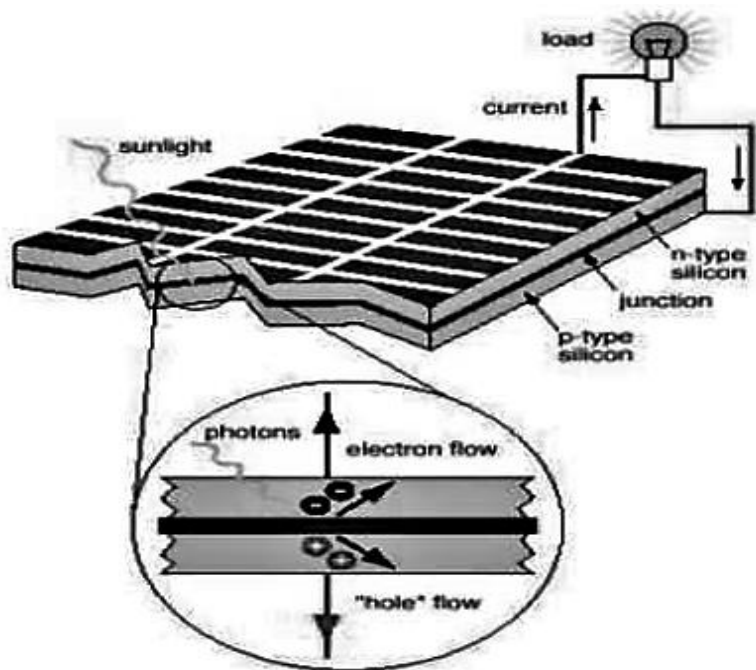


Σχήμα 3.14. Κύκλωμα αισθητήρα LDR

Ο κινητήρας του συστήματος είναι μία βοηθητική μηχανή που έχει στόχο να ελέγχει τη γραμμική ή την γωνιακή θέση των αξόνων του ηλιακού πάνελ, την ταχύτητα καθώς και την επιτάχυνσή τους. Στον κινητήρα είναι ενσωματωμένος ένας κωδικοποιητής, ο οποίος εισάγει στον κινητήρα τις εντολές κίνησης του μικρο-ελεγκτή. Η τελική γωνία περιστροφής των αξόνων με τη βοήθεια του κινητήρα συγκρίνεται με τη γωνία περιστροφής που ορίστηκε από τον μικρο-ελεγκτή. Αν η πρώτη διαφέρει από τη δεύτερη, τότε υπάρχει λάθος και επομένως ο κινητήρας κινεί τους άξονες στην αντίθετη κατεύθυνση. Οι κινητήρες μπορεί να λειτουργούν είτε με συνεχές, είτε με εναλλασσόμενο ρεύμα [21].

Το ηλιακό πάνελ έχει στόχο να μετατρέψει την ενέργεια του φωτός σε ηλεκτρική ενέργεια. Πιο συγκεκριμένα, τα ηλιακά κελιά αποτελούνται από μία δίοδο PN σε γυάλινη επιφάνεια, έτσι ώστε το λεπτό υλικό του τύπου P να βοηθήσει τα φωτόνια να κινηθούν εύκολα μέχρι τη διασταύρωση με το υλικό τύπου N. Το ρεύμα που παράγεται σε αυτή είναι ανάλογο των αντανάκλασεων του ηλιακού φωτός καθώς και του μεγέθους της γυάλινης επιφάνειας [21].

Η αναπαράσταση ενός ηλιακού πάνελ φαίνεται στο Σχήμα 3.15.



Σχήμα 3.15. Λειτουργία σύγχρονου ηλιακού πάνελ

Έχοντας αναλύσει τον τρόπο συμβολής τόσο της γεωθερμικής, όσο και της ηλιακής ενέργειας στην παραγωγή θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας και έχοντας κατανοήσει τον ρόλο τους στο βιομηχανικό χώρο κρίνεται απαραίτητο να αναφερθούμε σε μία πρόσθετη ανανεώσιμη πηγή ενέργειας με εξίσου σημαντικό ρόλο. Αυτή η είναι η αιολική ενέργεια.

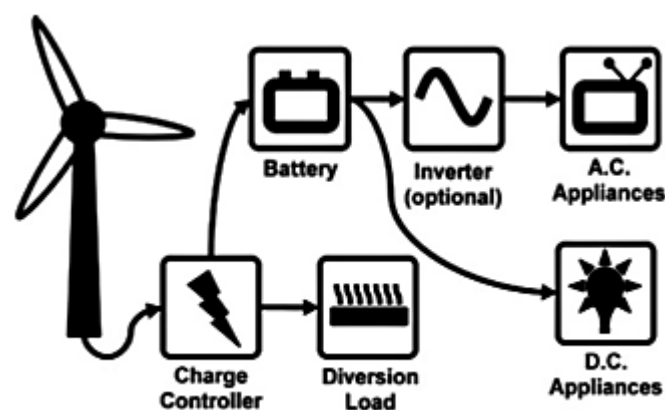
3.5 Αιολική ενέργεια

Η αιολική ενέργεια είναι μια ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, η οποία χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Τις τελευταίες δεκαετίες όλο και περισσότερες προσπάθειες γίνονται για την ανάπτυξη των τεχνολογιών που εφαρμόζονται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιώντας την αιολική. Πιο συγκεκριμένα, μια από τις πιο διαδεδομένες τεχνολογίες αποτελεί το σύστημα ανεμογεννητριών. Αυτό, σε συνδυασμό με ένα σύστημα αποθήκευσης ενέργειας, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί στο βιομηχανικό χώρο, προκειμένου να καλυφθούν οι ανάγκες ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας και να εξοικονομηθεί η παραγωγή της από τα ορυκτά καύσιμα [13].

Προκειμένου να κατανοήσουμε την τεχνολογία του συστήματος ανεμογεννητριών, πρέπει αρχικά να αναλύσουμε την λειτουργία του και την κατασκευή του.

3.5.1. Περιγραφή συστήματος ανεμογεννήτριας

Στην κατανόηση της περιγραφής του συστήματος ανεμογεννητριών θα βοηθήσει η απεικόνισή του, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.16.



Σχήμα 3.16. Σύστημα ανεμογεννήτριας

Πιο συγκεκριμένα, σε αυτό παρουσιάζονται όλα τα υποσυστήματα που συμμετέχουν στη δημιουργία ενός τυπικού συστήματος αιολικής ενέργειας, το οποίο δεν είναι συνδεδεμένο στο δίκτυο ενέργειας.

Όσον αφορά στη λειτουργία του συστήματος, η ανεμογεννήτρια μετατρέπει την κινητική ενέργεια του αέρα σε ηλεκτρική. Επιπλέον, το σύστημα αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από την ανεμογεννήτρια λειτουργεί σαν μπαταρία. Αυτή χρησιμοποιείται με στόχο να παρέχει ηλεκτρική ενέργεια, όταν η αιολική ενέργεια δεν είναι επαρκής. Η μπαταρία μπορεί να παρέχει είτε συνεχές ρεύμα σε διάφορα φορτία και συσκευές συνεχούς ρεύματος, είτε εναλλασσόμενο ρεύμα σε αντίστοιχα φορτία και συσκευές εναλλασσόμενου ρεύματος. Για την παροχή εναλλασσόμενου ρεύματος είναι απαραίτητη η χρήση ενός μετατροπέα, ο οποίος μετατρέπει το συνεχές ρεύμα της μπαταρίας σε χρήσιμο εναλλασσόμενο. Ένα πρόσθετο σύστημα, που συμμετέχει στη σωστή λειτουργία του συστήματος αιολικής ενέργειας, είναι ο ρυθμιστής τάσης (ελεγκτής φόρτισης), ο οποίος εναλλάσει τη ροή του ρεύματος, προκειμένου να μειωθεί ο κίνδυνος περισσότερης ή λιγότερης φόρτισης της μπαταρίας [22].

Προκειμένου να κάνουμε συγκρίσεις τεχνολογιών, μία βασική παράμετρος που πρέπει να λάβουμε υπόψη μας, η οποία βρίσκεται σε άμεση συνάρτηση με την αποδοτικότητα της εξεταζόμενης τεχνολογίας είναι η ταχύτητα του αέρα. Η ταχύτητα του αέρα που απαιτείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε ένα συγκεκριμένο σύστημα αιολικής ενέργειας συνήθως καθορίζεται από τον κατασκευαστή του.

3.5.2. Υβριδικό σύστημα ενέργειας

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η αποδοτικότητα ενός συστήματος αιολικής ενέργειας εξαρτάται από την ταχύτητα του αέρα. Προκειμένου να ελέγξουμε και να ομαλοποιήσουμε την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας με τη χρήση της αιολικής ενέργειας, θα ενσωματώσουμε στο υπάρχον σύστημα αιολικής ενέργειας ένα υβριδικό σύστημα ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα, αυτός ο τύπος συστήματος έχει δύο βασικούς ρόλους [23]:

1. Να εξισορροπήσει ή να απορροφήσει τη διαφορά μεταξύ της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από την ανεμογεννήτρια και της ηλεκτρικής ενέργειας που

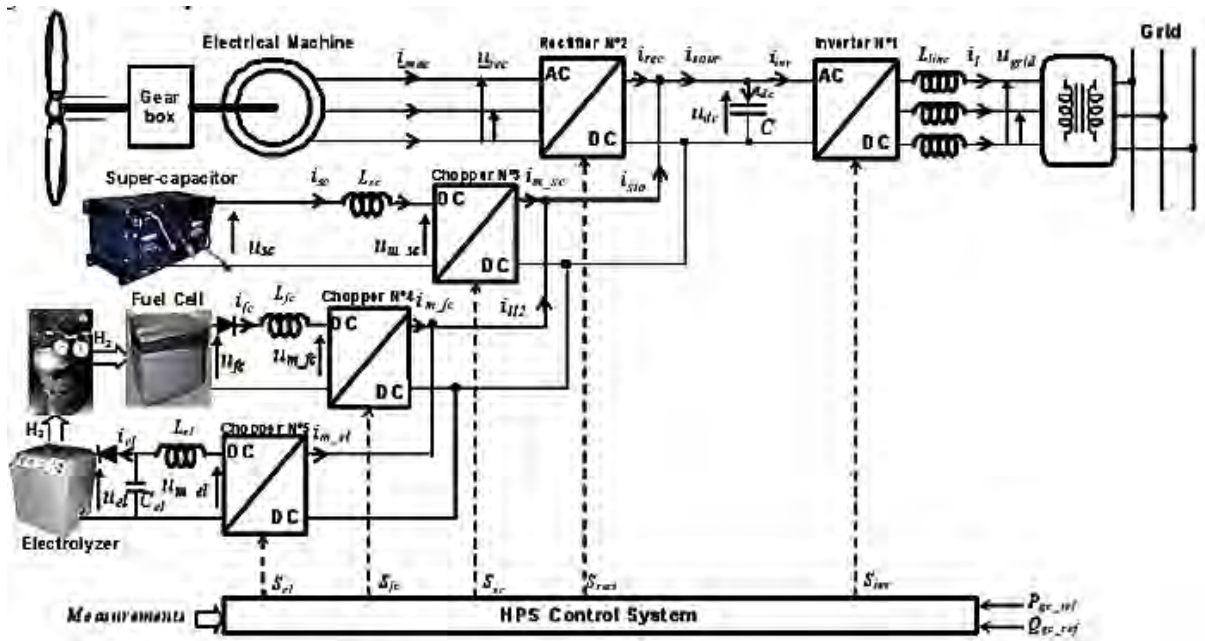
χρειάζεται να αποδοθεί στο δίκτυο. Αυτό εκπληρώνεται μέσω της χρήσης συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας.

2. Να ενσωματώσει στρατηγικές διαχείρισης της παραγόμενης ενέργειας, προκειμένου να ελέγχεται η εναλλαγή ενέργειας μεταξύ διαφορετικών πηγών και να εξυπηρετούνται οι ανάγκες ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας του δικτύου.

Όσον αφορά στον τρόπο λειτουργίας των υβριδικών συστημάτων, η τεχνολογία τους βασίζεται στη χρήση κελιών καυσίμων και ηλεκτρολυτών με δεξαμενές υδρογόνου. Πιο αναλυτικά, ο ηλεκτρολύτης μετατρέπει την περίσσεια ενέργεια σε υδρογόνο μέσω μίας χημικής αντίδρασης. Το υδρογόνο που παράγεται αποθηκεύεται στη δεξαμενή οξυγόνου για μελλοντική χρήση. Στην περίπτωση από έχουμε λιγότερη αιολική ενέργεια από αυτή που χρειαζόμαστε, τότε το αποθηκευμένο υδρογόνο μπορεί να χρησιμοποιηθεί με στόχο την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτή επιτυγχάνεται με τη βοήθεια των κελιών καυσίμου και έτσι καλύπτονται οι ανάγκες ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας του δικτύου οποιαδήποτε χρονική στιγμή. Παρόλα αυτά, τα κελιά καυσίμου και οι ηλεκτρολύτες λειτουργούν αργά. Επομένως, είναι απαραίτητη η ενσωμάτωση ενεργειακών αποθηκών με γρήγορη λειτουργία, προκειμένου να αντιμετωπιστούν οι γρήγορες αυξομειώσεις της αιολικής ενέργειας [23].

Για αυτό το λόγο, η πρόσφατη τεχνολογική ανάπτυξη, συνέβαλε στην αντιμετώπιση του προβλήματος με την ενσωμάτωση πυκνωτών στο υβριδικό σύστημα, με στόχο τη γρήγορη αποθήκευση ενέργειας καθώς και την ομαλοποίηση της αυξομειούμενης ενεργειακής παραγωγής. Οι πυκνωτές, σε σύγκριση με τις μπαταρίες, έχουν την ικανότητα να φορτίσουν και να εκφορτίσουν πολύ γρήγορα. Ταυτόχρονα, οι πυκνωτές σε σχέση με τις μπαταρίες έχουν καλύτερο συντελεστή αποδοτικότητας και μεγαλύτερη ανοχή σε υψηλές θερμοκρασίες.

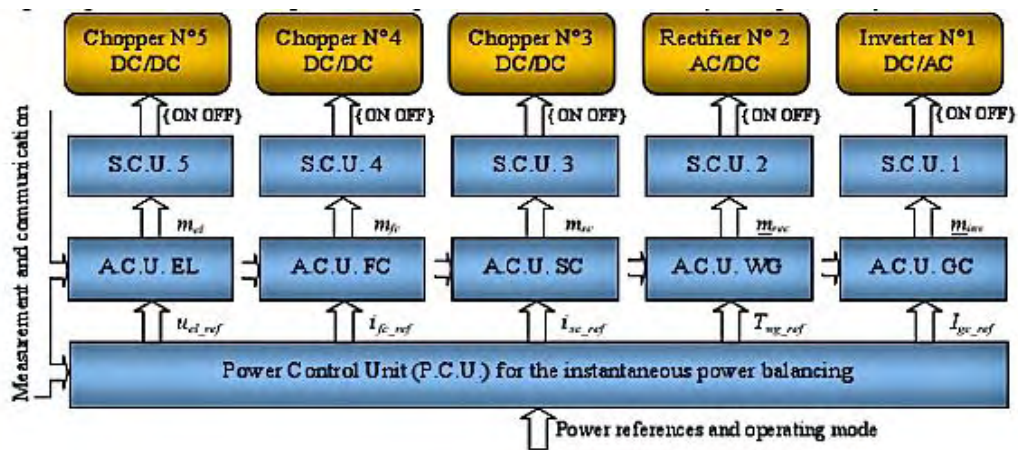
Στην καλύτερη κατανόηση του περιγραφόμενου υβριδικού συστήματος, θα βοηθήσει η απεικόνισή του, η οποία φαίνεται στο Σχήμα 3.17.



Σχήμα 3.17. Δομή υβριδικού συστήματος

Αναλυτικότερα, σύμφωνα με την παραπάνω αναπαράσταση του υβριδικού συστήματος, παρατηρείται η χρήση μίας διπλής δομής συνεχούς ρεύματος, με στόχο να διαχωριστούν οι τάσεις και οι συχνότητες που προέρχονται από άλλες πηγές. Επιπλέον, όλα τα υποσυστήματα είναι συνδεδεμένα με ένα δίαυλο συνεχούς ρεύματος μέσω ενός εναλλάκτη, πριν αυτά συνδεθούν στο δίκτυο. Τέλος, κάθε πηγή είναι ηλεκτρικά συνδεδεμένη με έναν ηλεκτρονικό μετατροπέα, με σκοπό να υπάρχει η δυνατότητα ελέγχου του συστήματος, μέσω των στρατηγικών διαχείρισης του υβριδικού συστήματος [23].

Η δομή του συστήματος ελέγχου του εξεταζόμενου υβριδικού συστήματος απεικονίζεται στο Σχήμα 3.18.



Σχήμα 3.18. Δομή συστήματος έλεγχου υβριδικού συστήματος

Σύμφωνα με το Σχήμα 3.18, οι μετατροπείς ενέργειας κάθε πηγής έχουν μία είσοδο, μέσω της οποίας συνδέεται το υβριδικό σύστημα με το σύστημα ελέγχου.

Πιο συγκεκριμένα, η δομή του συστήματος ελέγχου μπορεί να διαιρεθεί σε τρία διαφορετικά επίπεδα. Αυτά είναι τα εξής [23]:

1. Το πρώτο επίπεδο, το οποίο αποτελείται από μία μονάδα ελέγχου λειτουργίας. Αυτή είναι ειδικά σχεδιασμένη για κάθε μετατροπέα. Πιο συγκεκριμένα, το τρανζίστορ της μονάδας λειτουργεί αν η συνάρτηση λειτουργίας πάρει την τιμή 1, ενώ δεν λειτουργεί, όταν η συνάρτηση λειτουργίας πάρει την τιμή 0.
2. Το δεύτερο επίπεδο, το οποίο αποτελείται από μία μονάδα αυτόματου ελέγχου. Αυτή είναι σχεδιασμένη για κάθε πηγή ενέργειας. Πιο αναλυτικά, σε αυτή τη μονάδα, οι αλγόριθμοι ελέγχου υπολογίζουν την τιμή εισόδου για κάθε μετατροπέα. Αυτή η τιμή εισόδου μπορεί να είναι είτε 0, είτε 1. Αυτός ο υπολογισμός γίνεται μέσω της ρύθμισης ορισμένων φυσικών ποσοτήτων σύμφωνα με τις τιμές αναφοράς τους.
3. Το τρίτο επίπεδο, το οποίο αποτελείται από μία μονάδα ελέγχου ενέργειας. Αυτή η μονάδα είναι σχεδιασμένη, έτσι ώστε όλο το υβριδικό σύστημα να λειτουργεί ομαλά και ισορροπημένα. Πιο συγκεκριμένα, σε αυτή τη μονάδα είναι ενσωματωμένοι κάποιοι ισορροπητικοί αλγόριθμοι ενέργειας, προκειμένου να συντονίσουν τη λειτουργία των διαφορετικών πηγών ενέργειας με τα συστήματα μετατροπής της κάθε μίας. Αυτός ο αλγόριθμος μπορεί να αποτελεί ένα συνδυασμό διαφορετικών ισορροπητικών αλγορίθμων ενέργειας, ο οποίος

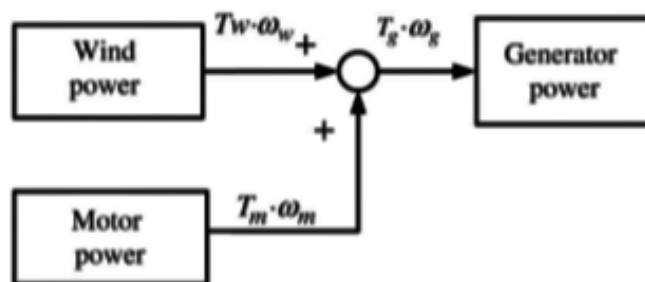
στοχεύει στην εύρεση ενός αριθμού πιθανών καταστάσεων λειτουργίας του υβριδικού συστήματος.

Μία πρόσθετη καινοτόμα τεχνολογία που συμβάλει στην ανάπτυξη συστημάτων αιολικής ενέργειας είναι η σύγχρονη γεννήτρια αιολικής ενέργειας με σχέδιο μέγιστης παραγωγής ισχύος.

3.5.3. Γεννήτρια αιολικής ενέργειας με σχέδιο μέγιστης παραγωγής ισχύος

Το σύστημα αυτό αποτελείται από μία σύγχρονη γεννήτρια, ένα συνεχώς μαγνητισμένο σύγχρονο βοηθητικό κινητήρα, αισθητήρες σήματος καθώς και από συστήματα ελέγχου. Πιο συγκεκριμένα, η αιολική ενέργεια και η ενέργεια που παράγεται από τον κινητήρα ενσωματώνονται μεταξύ τους και μεταφέρονται στη γεννήτρια του συστήματος μέσω από μία κατασκευή κοινού άξονα. Όταν η ταχύτητα του αέρα ποικίλει, ο βοηθητικός κινητήρας παρέχει ενέργεια, προκειμένου να παραμείνει σταθερή η ταχύτητα της γεννήτριας. Όλη η ενέργεια που παρέχεται από τον κινητήρα μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια. Επιπλέον, με τη χρήση μιας συνάρτησης παρακολούθησης της φάσης, το σύστημα ελέγχου του βοηθητικού κινητήρα μειώνει την αλλαγή φάσης της τάσης της γεννήτριας λόγω της διαφορετικής ροής του αέρα. Στη συνέχεια, το σχέδιο μέγιστης παροχής ισχύος ελέγχει το πεδίο ρεύματος, προκειμένου να εξασφαλίσει ότι η γεννήτρια θα απορροφήσει πλήρως την αιολική ενέργεια και θα την μετατρέψει σε ηλεκτρική ενέργεια [24].

Αν υποθέσουμε ότι το παραπάνω σύστημα λειτουργεί ιδανικά, δηλαδή δεν έχουμε μηχανικές απώλειες στην ανεμογεννήτρια, στο βοηθητικό κινητήρα και στη γεννήτρια, τότε στο Σχήμα 3.19 παρουσιάζεται η ροή της ισχύος του συστήματος.



Σχήμα 3.19. Ροή ισχύος ιδανικού συστήματος γεννήτριας αιολικής ενέργειας με σχέδιο μέγιστης παραγωγής ισχύος

Όπου, T_w = η στροφορμή της ανεμογεννήτριας,

T_m = η στροφορμή του βοηθητικού κινητήρα,

T_g = η στροφορμή της γεννήτριας,

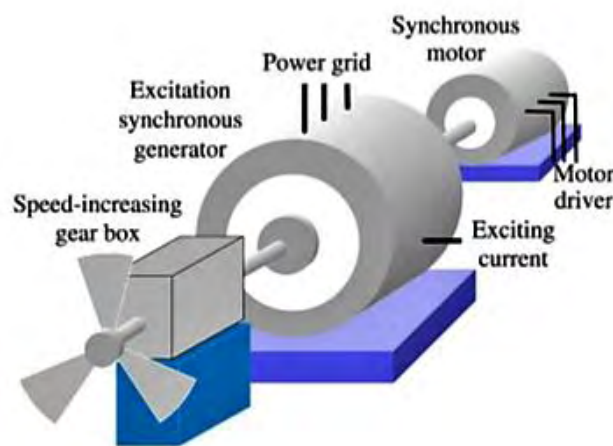
ω_w = η γωνιακή ταχύτητα της ανεμογεννήτριας,

ω_m = η γωνιακή ταχύτητα του βοηθητικού κινητήρα,

ω_g = η γωνιακή ταχύτητα της γεννήτριας.

Επιπλέον, από το Σχήμα 3.19, προκύπτει ότι $T_g * \omega_g = T_w * \omega_w + T_m * \omega_m$.

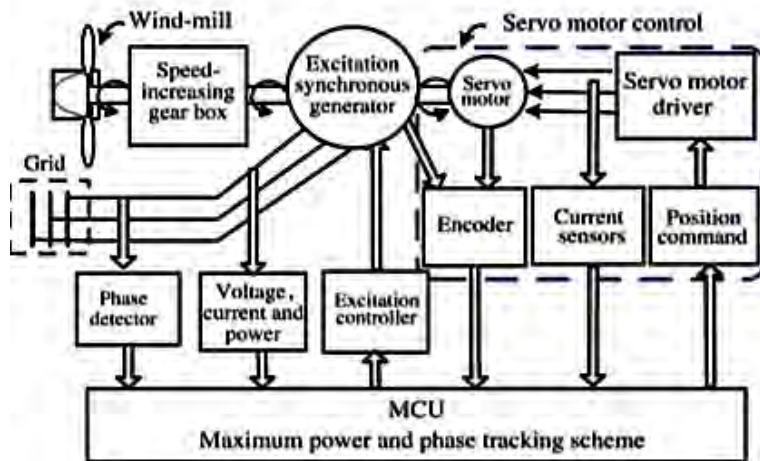
Στο Σχήμα 3.20, φαίνεται η κατασκευή του κοινού άξονα της ανεμογεννήτριας, της γεννήτριας και του βοηθητικού κινητήρα.



Σχήμα 3.20. Κοινός άξονας ανεμογεννήτριας, γεννήτριας και βοηθητικού κινητήρα

Πιο συγκεκριμένα, το ένα άκρο εισόδου της γεννήτριας δέχεται τη στροφορμή του γρاناζιού με αυξανόμενη ταχύτητα. Το άκρο εξόδου της γεννήτριας συνδέεται με το βοηθητικό κινητήρα. Η ενέργεια που παρέχεται στη γεννήτρια αποτελεί το άθροισμα της ενέργειας που παρέχεται από τον βοηθητικό κινητήρα και της αιολικής ενέργειας. Η ταχύτητα καθώς και η κατεύθυνση περιστροφής των τριών αυτών συστημάτων είναι η ίδια, με αποτέλεσμα να μειώνονται οι απώλειες μετάδοσης ενέργειας [24].

Το μοντέλο του περιγραφόμενου συστήματος αιολικής ενέργειας παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.21.



Σχήμα 3.21. Μοντέλο συστήματος γεννήτριας αιολικής ενέργειας με σχέδιο μέγιστης παραγωγής ισχύος

Το σύστημα ελέγχου του κινητήρα έχει ως στόχο να διατηρήσει την ισορροπία ροής της ισχύος στην είσοδο και στην έξοδο της γεννήτριας, και επομένως να συγχρονίσει τη λειτουργία της γεννήτριας με βάση τη ζήτηση ενέργειας του δικτύου. Τα σήματα ελέγχου του συστήματος, που συμπεριλαμβάνουν την τάση και το ρεύμα της γεννήτριας, τη φάση του δικτύου, τον κωδικοποιητή του κινητήρα και την ισχύ εξόδου της γεννήτριας, λαμβάνονται και μεταδίδονται στη μονάδα ελέγχου του μικρο-επεξεργαστή. Ο ελεγκτής του βοηθητικού κινητήρα έχει πολύ σημαντικό ρόλο στην παραγόμενη ισχύ της γεννήτριας και στην παρακολούθηση της εναλλαγής φάσης του δικτύου. Αν κατά τη λειτουργία του συστήματος, ο ελεγκτής παρατηρήσει αύξηση της ισχύος στο βοηθητικό κινητήρα, τότε αυτό σημαίνει την μειωμένη ταχύτητα του αέρα. Επομένως, το σύστημα διαμορφώνει το ρεύμα, έτσι ώστε να μειωθεί η παραγόμενη ισχύς από τη γεννήτρια. Κατά τις χρονικές περιόδους όπου γίνεται η εξισορρόπηση της ενέργειας, ο βοηθητικός κινητήρας καταναλώνει μικρά ποσά ενέργειας για την εξισορρόπηση της ταχύτητας. Όταν λοιπόν επιτευχθεί η ιδανική λειτουργία του συστήματος, τότε μπορούμε να γνωρίσουμε την μέγιστη παραγόμενη ισχύ και την ταχύτητα λειτουργίας του συστήματος μέσω του σχεδίου ελέγχου [24].

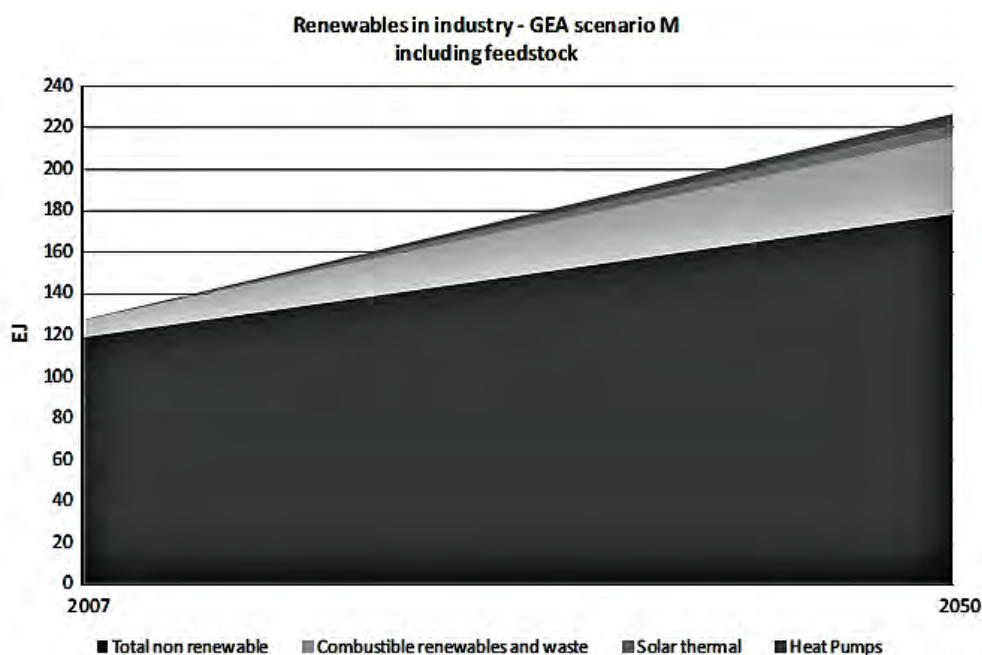
Έχοντας ήδη κατανοήσει τον τρόπο λειτουργίας, τόσο των συμβατικών συστημάτων αιολικής ενέργειας, όσο και των τεχνολογικά ανεπτυγμένων συστημάτων αιολικής ενέργειας, δηλαδή των υβριδικών συστημάτων, τα οποία χαρακτηρίζονται από δύο καινοτόμες βελτιώσεις σύμφωνα με όσα αναλύσαμε προηγουμένως, καθώς και του

συστήματος γεννήτριας αιολικής ενέργειας με σχέδιο μέγιστης παραγωγής ισχύος, αυτό που απομένει είναι η ενσωμάτωσή τους στο βιομηχανικό χώρο.

Γνωρίζοντας λοιπόν τρία βασικά είδη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και συγκεκριμένα αυτά της γεωθερμικής, της ηλιακής και της αιολικής ενέργειας, και αναλύοντας διάφορες καινοτόμες τεχνολογίες των παραπάνω ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, με στόχο την παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας, κατανοήσαμε τη σημασία εφαρμογής τους στις βιομηχανίες, η οποία αφορά στην εξοικονόμηση της ενέργειας που παράγεται από ορυκτά καύσιμα καθώς και στη βέλτιστη ενεργειακή αποδοτικότητα.

3.6 Προοπτική ενσωμάτωσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στη βιομηχανία

Στο Σχήμα 3.22 παρουσιάζεται η προοπτική ενσωμάτωσης διάφορων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο βιομηχανικό χώρο μέχρι το 2050.



Σχήμα 3.22. Διάγραμμα προοπτικής ενσωμάτωσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στις βιομηχανίες

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα τα οποία προέκυψαν από έρευνες και παρουσιάζονται στο παραπάνω διάγραμμα, η χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στις βιομηχανίες έχει την προοπτική να αυξηθεί. Πιο συγκεκριμένα, η τιμή της ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές αυξάνεται από 7 EJ το χρόνο το 2007 σε περίπου 50 EJ το χρόνο το

2050. Το γεγονός αυτό σημαίνει ότι η κάλυψη του 8% των ενεργειακών αναγκών από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας το 2007 αυξάνεται στο 21% το 2050.

Πιο συγκεκριμένα, στο βιομηχανικό χώρο μέχρι το 2050 εκτιμάται ότι η ενέργεια που θα παράγεται από τεχνολογίες που χρησιμοποιούν τη βιομάζα θα έχει τιμή 37 EJ το χρόνο. Ταυτόχρονα, η ενέργεια, που θα παράγεται από τεχνολογίες φωτοβολταϊκών που χρησιμοποιούν την ηλιακή ενέργεια για παραγωγή θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας, εκτιμάται ότι θα έχει τιμή 5.6 EJ το χρόνο. Αυτή η τιμή ενδέχεται να αυξηθεί σε 8 EJ το χρόνο, αν λάβουμε υπόψη μας την εφαρμογή της τεχνολογίας συγκέντρωσης ηλιακής ενέργειας. Τέλος, η τιμή της ενέργειας που εκτιμάται ότι θα παραχθεί από την τεχνολογία γεωθερμικών αντλιών μέχρι το 2050 είναι 4.9 EJ το χρόνο [25].

Αυτές οι εκτιμήσεις αποτελούν συνάρτηση της ανάπτυξης των τεχνολογιών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας μέχρι το 2050.

3.7 Συμπέρασμα

Σύμφωνα με τα παραπάνω οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι η ενσωμάτωση των συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο βιομηχανικό χώρο αποτελεί ένα βασικό μέσο εξοικονόμησης ενέργειας η οποία παράγεται από τη χρήση των ορυκτών καυσίμων. Επιπλέον, προκειμένου να επιτευχθεί η ενεργειακή αποδοτικότητα στις βιομηχανίες απαιτείται η αντικατάσταση των ήδη υπαρχόντων συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με εκσυγχρονισμένες τεχνολογίες. Στόχος των καινοτόμων τεχνολογιών που αναλύσαμε αποτελεί η μέγιστη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω της εκμετάλλευσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και συγκεκριμένα της γεωθερμικής, της ηλιακής και της αιολικής. Η επίτευξη αυτού του στόχου συνεπάγεται την βέλτιστη ενεργειακή αποδοτικότητα στο βιομηχανικό χώρο και επομένως την εξοικονόμηση ενέργειας σε αυτόν.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΖΗΤΗΣΗΣ (Demand Side Management – DSM)

4.1 Εισαγωγή

Η ηλεκτρική ενέργεια αποτελεί αναγκαίο «συστατικό» για τη βιομηχανική ανάπτυξη, ενώ αποτελεί γεγονός ότι στις περισσότερες χώρες ένα μεγάλο ποσοστό της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας καταναλώνεται στο βιομηχανικό χώρο. Ταυτόχρονα, η συνεχής αύξηση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας σε αυτόν έχει ως αποτέλεσμα τον περιορισμό της δυνατότητας απόκρισης στις ενεργειακές ανάγκες του. Ένας τρόπος επίλυσης αυτού του προβλήματος, αποτελεί η εγκατάσταση εξοπλισμού αποθήκευσης ενέργειας με μεγάλη χωρητικότητα. Το γεγονός όμως του μεγάλου κόστους που απαιτεί η εγκατάσταση και η χρήση αυτού του εξοπλισμού, δημιούργησε την ανάγκη ενσωμάτωσης προγραμμάτων ενεργειακής διαχείρισης.

4.2 Σημαντικότητα ενσωμάτωσης προγραμμάτων διαχείρισης ενεργειακής ζήτησης (DSM) στο βιομηχανικό χώρο

Η διαχείριση της ενέργειας των πολύπλοκων συστημάτων που συναντάμε στο βιομηχανικό χώρο έχει ως στόχο τη βέλτιστη λειτουργία αυτών των συστημάτων, προκειμένου να αυξηθεί η αποδοτικότητά τους και επομένως να επιτευχθεί ο στόχος της εξοικονόμησης ενέργειας στις βιομηχανίες. Πιο συγκεκριμένα, παρόλο που υπάρχει ο εκσυγχρονισμός των ενεργειακών συστημάτων, ο κλάδος που αποτελεί σημαντικό ζήτημα των βιομηχανιών είναι η ανάπτυξη των τεχνολογιών που σχετίζονται με τη διαχείριση της ενέργειας στη μεριά της ζήτησης κατά τη διάρκεια λειτουργίας ενός πολύπλοκου συστήματος για διαφορετικές χρονικές περιόδους. Για αυτόν το λόγο, απαιτείται η ενσωμάτωση των σύγχρονων προγραμμάτων διαχείρισης της ενέργειας στον τομέα της ζήτησης (DSM), έτσι ώστε να μειωθεί η κατανάλωση ενέργειας κατά τη λειτουργία των ενεργειακών συστημάτων. Στόχος αυτών των προγραμμάτων είναι η μείωση της ζήτησης κατά τη διάρκεια λειτουργίας τους σε μέγιστη ζήτηση [26].

4.3 Προγράμματα διαχείρισης φορτίου (LM) στο βιομηχανικό χώρο

Μία γνωστή μέθοδος διαχείρισης της ενέργειας στον τομέα της ζήτησης αποτελεί η διαχείριση του φορτίου. Ο στόχος των προγραμμάτων διαχείρισης φορτίου είναι να διατηρούν, όσο αυτό είναι εφικτό, ένα σταθερό επίπεδο φορτίου, έτσι ώστε ο συντελεστής του φορτίου του συστήματος να πλησιάζει την τιμή 100%. Τα σημαντικά πλεονεκτήματα ενσωμάτωσης αυτών των προγραμμάτων στο βιομηχανικό χώρο είναι η μείωση της μέγιστης ζήτησης ενέργειας, η μείωση των απωλειών ισχύος, η καλύτερη χρήση του εξοπλισμού και η δυνατότητα αποθήκευσης φορτίου κατά τη λειτουργία ζήτησης πολύ μεγάλου φορτίου [27].

4.3.1 Μέθοδος εναλλαγής φορτίου

Μία από τις πιο εύκολες μεθόδους της διαχείρισης φορτίου που συναντάμε αποτελεί αυτή της εναλλαγής φορτίου. Στόχος αυτής της μεθόδου η μείωση της ζήτησης ενέργειας κατά τη μέγιστη λειτουργία του συστήματος, εναλλάσσοντας τη χρήση συσκευών και εξοπλισμού σε μερικό φορτίο. Κατά την εφαρμογή αυτής της μεθόδου τα φορτία δεν τίθενται εκτός λειτουργίας, αλλά μόνο εναλλάσσονται ή προγραμματίζονται εκ νέου. Πιο συγκεκριμένα, τα προγράμματα εναλλαγής φορτίου προγραμματίζουν τα φορτία με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε αυτά να μη λειτουργούν κατά τη χρονική περίοδο υψηλής ζήτησης αλλά σε αυτή της χαμηλής ζήτησης, βελτιώνοντας τον συντελεστή αποδοτικότητας του φορτίου. Επειδή δεν είναι δυνατός ο εκ νέου προγραμματισμός όλων των φορτίων, η μέθοδος της εναλλαγής φορτίων πρέπει να επιλέξει κάποια συγκεκριμένα [27].

Η μέθοδος αυτή θεωρείται χρήσιμη, αφού η τελική παραγωγή ενέργειας δεν επηρεάζεται καθώς η ενσωμάτωσή της στη βιομηχανία είναι εύκολη.

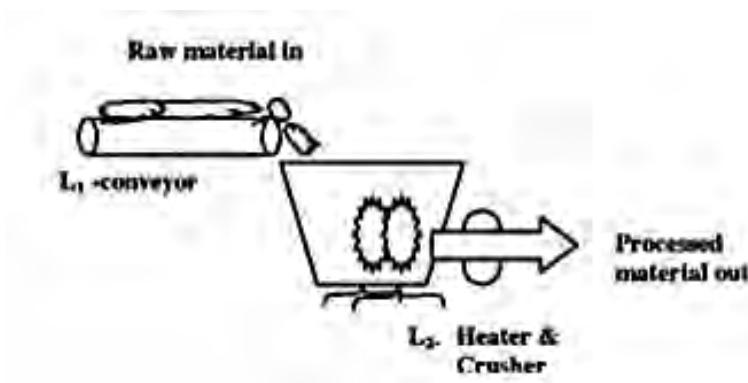
Δυστυχώς, κατά την εφαρμογή αυτής της μεθόδου στις βιομηχανίες υπάρχουν κάποιοι περιορισμοί, δεδομένου ότι μερικές φορές δεν είναι δυνατή η εναλλαγή ενός ξεχωριστού φορτίου που αποτελεί συνιστώσα ενός μεγαλύτερου συστήματος φορτίων. Αυτό γίνεται λόγω της ταυτόχρονης εκτέλεση κάποιων διεργασιών. Συνεπώς, τα φορτία που συμμετέχουν σε αυτές της διεργασίες πρέπει να ελεγχθούν από κοινού. Επιπλέον, σε κάποιες περιπτώσεις, μεταξύ δύο διεργασιών μπορεί να υπάρχει ένα σύστημα

αποθήκευσης ενέργειας, του οποίου η χωρητικότητα αποτελεί παράμετρο των περιορισμών.

Άρα οι δύο περιορισμοί είναι οι εξής [27]:

1. Οι ταυτόχρονες διεργασίες:

Προκειμένου να κατανοήσουμε την έννοια των ταυτόχρονων διεργασιών αξίζει να γίνει η παράθεση ενός παραδείγματος, το οποίο απεικονίζεται στο Σχήμα 4.1.



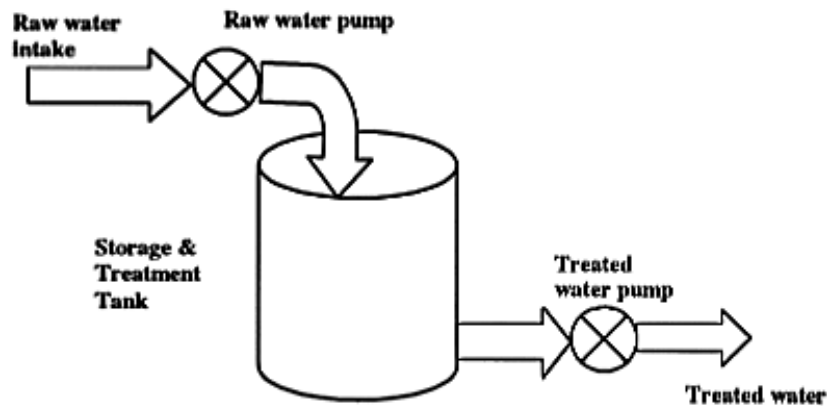
Σχήμα 4.1. Ταυτόχρονη διαδικασία

Στο συγκεκριμένο παράδειγμα λειτουργούν δύο φορτία, το L_1 που μεταφέρει το υλικό και το L_2 , που παρέχει θερμότητα για την επεξεργασία λιπάσματος. Το φορτίο L_1 , όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.1, φορτώνει υλικό στο φορτίο L_2 . Ως αποτέλεσμα, τα δύο αυτά φορτία αποτελούν συνιστώσες μιας συνεχούς και ταυτόχρονης διεργασίας και δεν μπορούν να ελεγχτούν ανεξάρτητα από τη μέθοδο εναλλαγής φορτίου. Άρα, η εφαρμογή της θα πρέπει να αφορά στην εναλλαγή του συνόλου του συστήματος των δύο φορτίων.

2. Σύστημα αποθήκευσης μεταξύ φορτίων:

Όπως αναφέραμε προηγουμένως, μπορεί να υπάρξει ένα σύστημα αποθήκευσης μεταξύ των συνεργαζόμενων φορτίων. Σύμφωνα με το παράδειγμα του Σχήματος 4.2, ένα φορτίο που λειτουργεί ως αντλία νερού, αντλεί νερό από μία πηγή και το μεταφέρει σε ένα σύστημα αποθήκευσης. Στη συνέχεια, ένα επιπλέον φορτίο, που λειτουργεί σαν αντλία, αντλεί το νερό που έχει αποθηκευτεί. Προκειμένου να εφαρμοστεί η μέθοδος εναλλαγής φορτίου πρέπει να γνωρίζουμε τη χωρητικότητα του χώρου αποθήκευσης του συστήματος των δύο φορτίων. Πιο

συγκεκριμένα, σε αυτό το παράδειγμα, το πρώτο φορτίο πρέπει να σταματήσει να λειτουργεί, όταν το σύστημα αποθήκευσης γεμίσει. Επιπλέον παράμετρος στην εναλλαγή φορτίων αποτελεί ο ρυθμός ροής των αντλιών.



Σχήμα 4.2. Σύστημα αποθήκευσης μεταξύ δύο φορτίων

Η μέθοδος της εναλλαγής φορτίου εφαρμόστηκε σε μία χημική βιομηχανία λιπασμάτων. Σε αυτή είχαν ενσωματωθεί προγράμματα TOU (Time of Use).

Πιο αναλυτικά, αυτά τα προγράμματα έχουν ως στόχο να υπολογίζουν την ενεργειακή κατανάλωση και επομένως την ενεργειακή ζήτηση στις διαφορετικές ώρες κάθε ημέρας, παρέχοντας πληροφορίες για τις ενεργειακές ανάγκες ενός συστήματος [28].

Προκειμένου να γίνει η ενσωμάτωση της μεθόδου εναλλαγής φορτίου, συλλέχθηκαν όλα τα δεδομένα για τα διαφορετικά φορτία που λειτουργούν στη συγκεκριμένη βιομηχανία μία τυπική ημέρα. Επιπλέον, μέσω του προγράμματος TOU υπολογίστηκε το σύνολο της ηλεκτρικής ενέργειας που καταναλώθηκε πριν την εναλλαγή των φορτίων.

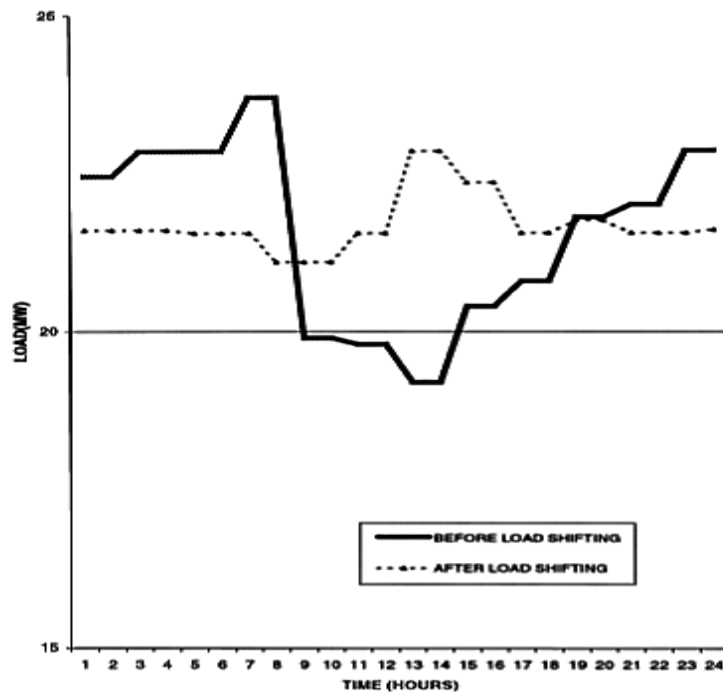
Πιο αναλυτικά η εναλλαγή των φορτίων που έγινε βασίζεται στον εξής αλγόριθμο [27]:

1. Σύλλεξε τα δεδομένα των φορτίων κατά τη λειτουργία τους σε διαφορετικές χρονικές περιόδους. Πιο αναλυτικά, αρχικά απαιτείται η γνώση ύπαρξης μέγιστης ζήτησης από κάποιο φορτίο ή κάποιο όριο μέγιστης ζήτησης. Στη συνέχεια, γίνεται ο υπολογισμός της ενεργειακής κατανάλωσης με την βοήθεια του προγράμματος TOU για μία δεδομένη χρονική περίοδο. Τέλος, εντοπίζονται τα φορτία που δεν μπορούν να εναλλαχθούν λόγω συγκεκριμένων περιορισμών (πχ. χωρητικότητα αποθηκευτικού συστήματος μεταξύ φορτίων).

2. Υπολόγισε τη μέγιστη ζήτηση κάθε χρονική στιγμή και επομένως το ημερήσιο ενεργειακό κόστος.
3. Εάν ισχύει ότι η μέγιστη ζήτηση όλων των φορτίων μία δεδομένη στιγμή είναι υποσύνολο της μέγιστης ζήτησης μεμονωμένων φορτίων την ίδια δεδομένη χρονική στιγμή, τότε βρες όλα αυτά τα φορτία που λειτουργούν εκείνη τη συγκεκριμένη στιγμή, εξαιρώντας αυτά στα οποία δεν μπορεί να γίνει η εναλλαγή, και διάλεξε το μικρότερο.
4. Έλεγξε την ύπαρξη περιορισμών:
 - a. Αν το φορτίο που επιλέχθηκε αποτελεί συνιστώσα μιας ταυτόχρονης διεργασίας φορτίων, τότε επέλεξε όλα τα φορτία της διεργασίας.
 - b. Αν υπάρχουν περιορισμοί που αφορούν στο σύστημα αποθήκευσης μεταξύ των φορτίων, τότε κάνε την εναλλαγή φορτίου σύμφωνα με τους περιορισμούς.
5. Εφάρμοσε την εναλλαγή φορτίου στα επιλεγμένα φορτία. Στη συνέχεια, υπολόγισε τη νέα μέγιστη ζήτηση όλων των φορτίων με τα καινούργια δεδομένα μέσω του προγράμματος TOU.
6. Επανέλαβε τα παραπάνω βήματα για όλα τα πιθανά φορτία για κάθε διαφορετική χρονική στιγμή, έτσι ώστε το άθροισμα της ενεργειακής κατανάλωσης των φορτίων να είναι το ελάχιστο δυνατό.

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα από τον υπολογισμό του συνόλου της ενεργειακής κατανάλωσης των φορτίων για διαφορετικές χρονικές περιόδους της ημέρας με τη χρήση του προγράμματος TOU πριν την εφαρμογή της μεθόδου εναλλαγής φορτίων, με αυτά από τον υπολογισμό του συνόλου της ενεργειακής κατανάλωσης των φορτίων για διαφορετικές χρονικές περιόδους μέσω του ίδιου προγράμματος μετά από την εφαρμογή της μεθόδου εναλλαγής φορτίου οδηγηθήκαμε στα παρακάτω συμπεράσματα.

Αυτά παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.3, όπου απεικονίζεται η γραφική παράσταση της ενεργειακής κατανάλωσης των φορτίων της βιομηχανίας σε σχέση με τις διαφορετικές ώρες της ημέρας πριν και μετά την εφαρμογή της μεθόδου εναλλαγής φορτίου [27].



Σχήμα 4.3. Διάγραμμα ενεργειακής κατανάλωσης πριν και μετά την εφαρμογή της μεθόδου εναλλαγής φορτίου

Πιο αναλυτικά, σύμφωνα με αυτή παρατηρούμε ότι μετά την εφαρμογή της μεθόδου εναλλαγής φορτίου ο συντελεστής της αποδοτικότητας του φορτίου βελτιώθηκε κατά 4.5%. Επιπλέον, επιτεύχθηκε ο στόχος της μείωσης της μέγιστης ζήτησης και επομένως αυτός του περιορισμού της ενεργειακής κατανάλωσης στο βιομηχανικό χώρο.

4.3.2 Μέθοδος ελέγχου φορτίου

Μία πρόσθετη μέθοδος διαχείρισης φορτίου που χρησιμοποιείται στο βιομηχανικό χώρο προκειμένου να μειωθεί η ζήτηση ενέργειας κατά τη διάρκεια λειτουργία ενός συστήματος σε συνθήκες μέγιστης ζήτησης είναι αυτή του ελέγχου του φορτίου.

Πιο συγκεκριμένα, η αύξηση της ενεργειακής ζήτησης στα συστήματα ψύξης του χώρου κατά τη θερινή περίοδο οδηγεί στην εφαρμογή της μεθόδου ελέγχου φορτίου σε αυτά, με στόχο τον περιορισμό της.

Ο βασικός στόχος κατά τη λειτουργία ενός συστήματος ψύξης του χώρου αποτελεί η παροχή θερμικής άνεσης. Επομένως, πρωταρχικός ρόλος της μεθόδου ελέγχου φορτίου είναι η επίτευξη αυτού του στόχου. Δυστυχώς, η εφαρμογή αυτής της μεθόδου έχει πολλούς περιορισμούς, οι οποίες αφορούν στις εναλλαγές του καιρού και στα φορτία επιστροφής. Επομένως, στόχος είναι ο προγραμματισμός και ο έλεγχος των φορτίων του

συστήματος προκειμένου να αμβλυνθούν οι επιδράσεις των παραπάνω περιορισμών [29].

Όπως αναφέραμε προηγουμένως, βασικός στόχος του προγράμματος ελέγχου του φορτίου είναι η εξασφάλιση της θερμικής άνεσης στο χώρο. Επομένως, είναι βασικό να μελετήσουμε την εφαρμογή του συγκεκριμένου προγράμματος στην κάλυψη των θερμικών αναγκών του χώρου.

Αρχικά, κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού υπάρχει μία συγκεκριμένη θερμοκρασία που απαιτείται στον εσωτερικό χώρο προκειμένου να καλυφθεί το επίπεδο θερμικής άνεσης. Σύμφωνα με τη συγκεκριμένη θερμοκρασία, όσο η σχετική υγρασία του χώρου μειώνεται, η θερμοκρασία του χώρου πρέπει να αυξηθεί με στόχο τη θερμική άνεση στο χώρο. Αυτή η διαφορά μεταξύ της αυξημένης θερμοκρασίας και της ιδανικής, έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της ροής του εισερχόμενου αέρα από τη μονάδα fan-coil του συστήματος και επομένως τον περιορισμό της καταναλισκόμενης ενέργειας σε συνθήκες θερμικής άνεσης [29].

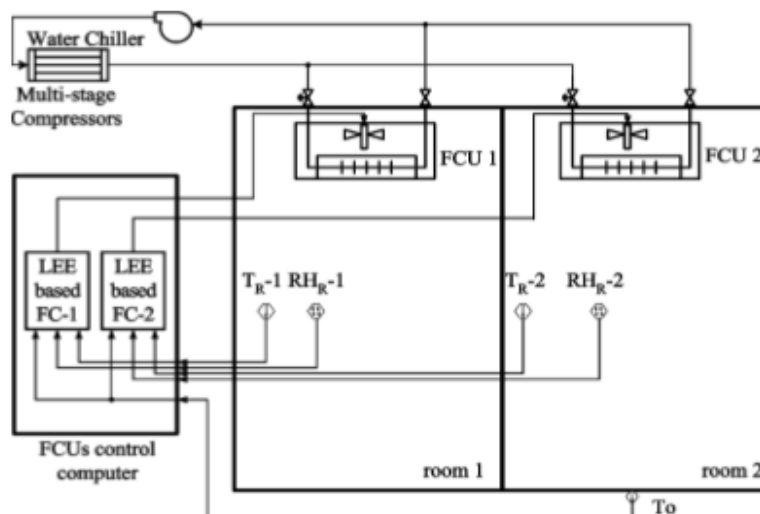
Η αλλαγή στο φορτίο του συστήματος ψύξης συνεπάγεται την αλλαγή της ενθαλπίας του αέρα. Η ενθαλπία του αέρα μπορεί να χρησιμοποιηθεί προκειμένου να προβλεφθεί η ενεργειακή ζήτηση. Για αυτό το λόγο, εφαρμόζεται η μέθοδος της ελάχιστης εκτιμώμενης ενθαλπίας (LEE) γνωρίζοντας τη θερμοκρασία και την υγρασία του χώρου, με στόχο να δημιουργηθεί ένα κατάλληλο περιβάλλον θερμικής άνεσης και εξοικονόμησης ενέργειας. Επιπλέον, για τον ίδιο σκοπό χρησιμοποιείται ένας ελεγκτής στην μονάδα fan-coil του συστήματος [29].

Πιο συγκεκριμένα, αυτός ο ελεγκτής αποτελείται από δύο λογικούς κανόνες και συσχετισμένες λογικές που διαμορφώνουν την τιμή του σήματος ελέγχου της εξόδου του fan-coil για συγκεκριμένα δεδομένα εισόδου. Οι διαφορές μεταξύ της θερμοκρασίας και της υγρασίας του χώρου με τις αντίστοιχες τιμές που απαιτούνται για την ελάχιστη εκτιμώμενη ενθαλπία του αέρα υπολογίζονται και αποτελούν τα δεδομένα εισόδου για τον πρώτο κανόνα του ελεγκτή. Στη συνέχεια, αυτά χρησιμοποιούνται από τον ελεγκτή της μονάδας fan-coil, προκειμένου να προκύψουν δεδομένα εξόδου τα οποία μειώνουν τη διαφορά της θερμοκρασίας και της υγρασίας [29].

Ο δεύτερος λογικός κανόνας του ελεγκτή εφαρμόζεται για την πρόβλεψη καιρικών αλλαγών. Τα δεδομένα εισόδου αυτού του κανόνα είναι η εξωτερική θερμοκρασία και οι ιδανικές συνθήκες θερμικής άνεσης στο χώρο. Τελικά, τα δεδομένα εξόδου που προκύπτουν από τον πρώτο κανόνα του ελεγκτή τροποποιούνται από τα δεδομένα εξόδου του δεύτερου κανόνα του ελεγκτή, με στόχο την παραγωγή των δεδομένων εξόδου του ελεγκτή της μονάδας fan-coil [29].

Οι αλλαγές στην εξωτερική θερμοκρασία καθώς και στην θερμοκρασία του παγωμένου νερού έχουν αρνητική επίδραση στη διατήρηση της θερμικής άνεσης του χώρου. Προκειμένου να επιλυθεί αυτό το πρόβλημα, εφαρμόζεται η εκτίμηση της ελάχιστης ενθαλπίας του αέρα. Οι αλλαγές των θερμικών συνθηκών στον εσωτερικό χώρο, οι οποίες συσχετίζονται με την εσωτερική αύξηση της θερμοκρασίας, τις εναλλαγές του καιρού και την θερμοκρασία του παγωμένου νερού, προβλέπονται από την εφαρμογή της εκτιμώμενης ενθαλπίας και με βάση αυτές τις προβλέψεις αποκρίνεται η μονάδα fan-coil. Επομένως, μέσω της συνεργασίας της εφαρμογής της ελάχιστης ενθαλπίας και της μονάδας fan-coil, υπολογίζεται η θερμοκρασία και η υγρασία του εσωτερικού χώρου και στη συνέχεια γίνεται η απόκριση στις εναλλαγές της εξωτερικής θερμοκρασίας [29].

Στο Σχήμα 4.4 απεικονίζονται δύο δωμάτια που χρησιμοποιούν ένα κοινό σύστημα κλιματιστικής μονάδας που ελέγχεται. Πιο συγκεκριμένα, κάθε δωμάτιο αποτελείται από fan-coils και από έναν ελεγκτή θερμικής άνεσης που βασίζεται στην εφαρμογή της ελάχιστης εκτιμώμενης ενθαλπίας.



Σχήμα 4.4. Σύστημα κλιματιστικής μονάδας

, όπου T_{R-1} = η θερμοκρασία του πρώτου δωματίου ως δεδομένο εξόδου της πρώτης μονάδας ελέγχου fan-coil, η οποία βασίζεται στην εφαρμογή ελάχιστης εκτιμώμενης ενθαλπίας,

RH_{R-1} = η ενθαλπία του πρώτου δωματίου ως δεδομένο εξόδου της πρώτης μονάδας ελέγχου fan-coil, η οποία βασίζεται στην εφαρμογή ελάχιστης εκτιμώμενης ενθαλπίας,

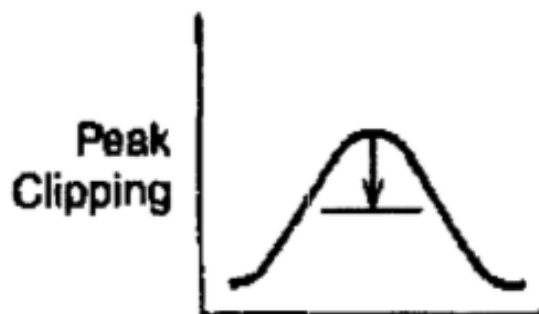
T_{R-2} = η θερμοκρασία του δεύτερου δωματίου ως δεδομένο εξόδου της δεύτερης μονάδας ελέγχου fan-coil, η οποία βασίζεται στην εφαρμογή ελάχιστης εκτιμώμενης ενθαλπίας,

RH_{R-2} = η ενθαλπία του δεύτερου δωματίου ως δεδομένο εξόδου της δεύτερης μονάδας ελέγχου fan-coil, η οποία βασίζεται στην εφαρμογή ελάχιστης εκτιμώμενης ενθαλπίας.

4.3.3 Μέθοδος διαχείρισης φορτίου “Peak Clipping”

Μία πρόσθετη μέθοδος διαχείρισης φορτίου που παρατηρείται στο βιομηχανικό χώρο και συμβάλει στην εξοικονόμηση ενέργειας είναι η μέθοδος “Peak Clipping”. Πιο συγκεκριμένα, αυτή στοχεύει στη μείωση του φορτίου τις χρονικές περιόδους όπου παρατηρείται η μέγιστη ζήτηση ενέργειας από τα φορτία της βιομηχανίας, έτσι ώστε το μειωμένο πλέον φορτίο να λειτουργεί συμβάλλοντας στην βέλτιστη ενεργειακή απόδοση με την ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται προκειμένου να μειωθούν οι απαιτήσεις αύξησης χωρητικότητας των συστημάτων αποθήκευσης, το λειτουργικό κόστος καθώς και η εξάρτηση από καύσιμα [30,31].

Η γραφική παράσταση του φορτίου κατά την εφαρμογή της μεθόδου “Peak Clipping” φαίνεται στο Σχήμα 4.5.



Σχήμα 4.5. Γραφική παράσταση φορτίου κατά την εφαρμογή της μεθόδου “Peak Clipping”

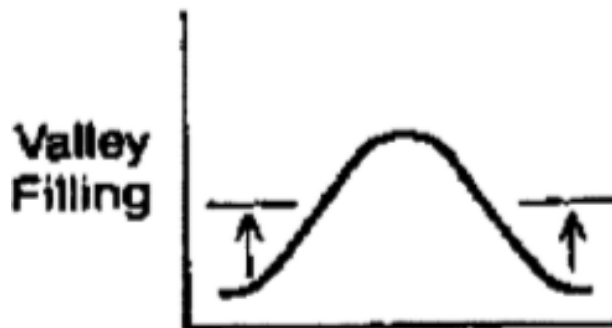
4.3.4 Μέθοδος διαχείρισης φορτίου “Valley Filling”

Μία επιπλέον μέθοδος διαχείρισης φορτίου που συμβάλει στην εξοικονόμηση ενέργειας σε μία βιομηχανία είναι η μέθοδος “Valley Filling”. Πιο συγκεκριμένα, αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται με στόχο τη δημιουργία φορτίων κατά τη διάρκεια λειτουργίας του συστήματος, όπου η ζήτηση ενέργειας είναι πολύ χαμηλή.

Η εφαρμογή αυτής της μεθόδου εξυπηρετεί υπηρεσίες, όπου το αυξητικό κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας που καταναλώνουν είναι μικρότερο από το μέσο αντίστοιχο κόστος.

Στο βιομηχανικό χώρο, η ενσωμάτωση αυτής της μεθόδου κρίνεται σημαντική στην μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης, δεδομένου ότι κατά την εφαρμογή της, τα φορτία που χρησιμοποιούν ορυκτά καύσιμα για την παραγωγή ενέργειας αντικαθιστούνται από ηλεκτρική ενέργεια, η οποία έχει παραχθεί από τα φορτία που έχει δημιουργήσει η μέθοδος “Valley Filling” κατά τη λειτουργία του συστήματος σε ώρες μη αιχμής [30,31].

Η γραφική παράσταση του φορτίου κατά την εφαρμογή της μεθόδου “Valley Filling” φαίνεται στο Σχήμα 4.6.



Σχήμα 4.6. Γραφική παράσταση του φορτίου κατά την εφαρμογή της μεθόδου “Valley Filling”

Τα προγράμματα διαχείρισης της ενεργειακής ζήτησης συνήθως χρησιμοποιούνται, όπως έγινε αντιληπτό και από τα παραπάνω, με στόχο τη μείωση της ολικής ζήτησης των φορτίων στα συστήματα της βιομηχανίας, κατά τη λειτουργία τους σε περιόδους μέγιστης ζήτησης, προκειμένου να διασφαλιστεί τόσο η προστασία του συστήματος, όσο και η εξοικονόμηση ενέργειας στο βιομηχανικό χώρο.

4.4 Προγράμματα Ενεργειακής Αποδοτικότητας (EE) στο βιομηχανικό χώρο

Μία πρόσθετη καινοτόμα τεχνολογία που αποτελεί υποκατηγορία των προγραμμάτων διαχείρισης ενεργειακής ζήτησης είναι τα προγράμματα ενεργειακής αποδοτικότητας (Energy Efficiency) των οποίων η ενσωμάτωση στο βιομηχανικό χώρο είναι κρίσιμη, αφού μέσω αυτών επιτυγχάνεται η βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας των βιομηχανικών συστημάτων [32].

Πιο συγκεκριμένα, η εφαρμογή αυτών των προγραμμάτων είναι ιδιαίτερα χρήσιμη στα συστήματα ατμών, τα οποία συγκαταλέγονται στα συστήματα τα οποία ευθύνονται για τις περισσότερες ενεργειακές απώλειες στο βιομηχανικό χώρο. Η ενεργειακή αποδοτικότητα ενός συστήματος ατμών αποτελεί συνιστώσα της αποδοτικότητας τεσσάρων παραμέτρων του συστήματος και συγκεκριμένα αυτής της παραγωγής του ατμού, της διανομής του, της τελικής του χρήσης καθώς και της ανάκτησής του.

Μια από τις πολλές εφαρμογές των προγραμμάτων ενεργειακής αποδοτικότητας αποτελεί η χρήση τους κατά τη διανομή του ατμού στο σύστημα ατμών στο βιομηχανικό χώρο.

Πιο αναλυτικά, ένας αποδοτικός τρόπος να μειωθεί η απώλεια ενέργειας στο δίκτυο διανομής του ατμού σε ένα σύστημα ατμού αποτελεί η μείωση της πίεσης του ατμού. Κατά αυτόν τον τρόπο, η βαλβίδα μείωσης της πίεσης μπορεί να προσαρμόσει την πίεση του ατμού σε χαμηλότερη τιμή και επομένως να μειώσει άμεσα τις ενεργειακές απώλειες που συμβαίνουν στη βαλβίδα αυτή. Ένα παράδειγμα πιθανής αποθήκευσης ενέργειας από την μείωση της πίεσης του ατμού παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.7 [33].

Combustion loss	0.6% of fuel input
Boiler radiation and convection loss	0.2% of fuel input
Boiler blowdown loss	0.1% of fuel input
High pressure steam trap leakage	0.6% of fuel input
Enthalpy savings effect	4.1% of fuel input
High pressure steam piping heat loss	Increasing with the length of pipe

Note: the operating pressure at the boiler was reduced from 130 psig to 80 psig.

Σχήμα 4.7. Πιθανή μείωση ενέργειας μέσω της μείωσης της πίεσης του ατμού

Κατά τη μείωση της πίεσης του ατμού πρέπει να ληφθούν υπό όψη κάποιοι παράμετροι που αφορούν στη λειτουργικότητα του λέβητα του συστήματος ατμών. Πιο συγκεκριμένα, αυτός θα αντιμετωπίσει διάφορες αρνητικές επιπτώσεις κατά τη λειτουργία του σε ατμό χαμηλής πίεσης, όπως η υπερθέρμανσή του καθώς και η ανάπτυξη υγρού ατμού σε αυτό. Επομένως, κατά την μείωση της πίεσης του ατμού είναι απαραίτητη η γνώση των λειτουργικών χαρακτηριστικών του λέβητα, προκειμένου να αποφευχθεί η παρεμπόδιση της ομαλής του λειτουργίας.

Εκτός από τη μείωση της πίεσης του ατμού, ένας πρόσθετος τρόπος αύξησης της ενεργειακής αποδοτικότητας του συστήματος ατμού αποτελεί η χρήση μίας τουρμπίνας ατμού, η οποία δεν εκτελεί συμπίκνωση του ατμού αλλά εκτελεί την μείωση της πίεσης ατμού όπως και η βαλβίδα μείωσης ατμού. Πιο συγκεκριμένα, αυτή η τουρμπίνα ατμού μετατρέπει την ενέργεια ατμού σε ηλεκτρική ενέργεια. Η εγκατάσταση αυτών των συστημάτων τουρμπίνας ενδέχεται να αρχίσει να προσφέρει οικονομικά στο σύστημα μετά από ένα με δύο χρόνια από την εγκατάστασή του ενώ η διάρκεια ζωής των συγκεκριμένων συστημάτων εκτιμάται στα είκοσι χρόνια [33].

Σύμφωνα με τα παραπάνω, γίνεται αντιληπτό ότι μέσω της εφαρμογής των προγραμμάτων ενεργειακής αποδοτικότητας για την βελτίωση λειτουργίας του συστήματος ατμού, το οποίο οφείλεται για ένα μεγάλο ποσοστό των ενεργειακών απωλειών στο βιομηχανικό χώρο, επιτυγχάνεται η μείωση απωλειών ενέργειας κατά τη λειτουργία του συγκεκριμένου συστήματος στο επίπεδο της διανομής του ατμού. Επομένως, επιτυγχάνεται ο στόχος εξοικονόμησης ενέργειας στο βιομηχανικό χώρο.

4.5 Σημαντικότητα ενσωμάτωσης προγραμμάτων ζήτησης-απόκρισης (DR) στο βιομηχανικό χώρο

Η ενσωμάτωση προγραμμάτων ζήτησης-απόκρισης, που είναι μέρος των προγραμμάτων διαχείρισης της ενεργειακής ζήτησης, στον βιομηχανικό χώρο αποτελεί μια λύση για την ανάπτυξη της αξιοπιστίας των συστημάτων ενέργειας όχι μόνο μέσω της παρακολούθησης της ενεργειακής παροχής τους, αλλά και μέσω της γρήγορης αντίδρασης σε απρόοπτες καταστάσεις λειτουργίας τους. Για αυτό το λόγο, η έννοια της ζήτησης-απόκρισης θεωρείται ως ένα είδος διαχείρισης της ενεργειακής κατανάλωσης. Η χρήση προγραμμάτων ζήτησης-απόκρισης από τους βιομηχανικούς καταναλωτές συνεισφέρει στην μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης και επομένως στη μείωση του

ενεργειακού κόστους, αφού πλέον δε θα χρειάζεται η χρήση εξοπλισμού αποθήκευσης ενέργειας και εφεδρικών εγκαταστάσεων ενέργειας [34].

Αναλυτικότερα, μέχρι τώρα οι βιομηχανικοί καταναλωτές διαχειρίζονται την ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιώντας διανομείς παραγόμενης ενέργειας, εξοπλισμό αποθήκευσης ενέργειας, εναλλαγής, διακοπής φορτίων, όπως φορτίων φωτισμού, εξαερισμού καθώς και προσωρινής διακοπής μίας ή περισσότερης διαδικασίας. Οι συσκευές αποθήκευσης ενέργειας έχουν στόχο να παρέχουν ενέργεια σε περιπτώσεις όπου οι ενεργειακές ανάγκες της βιομηχανίας δεν μπορούν να καλυφθούν από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, που ενδεχομένως να χρησιμοποιεί μια βιομηχανία ως παροχή ενέργειας.

Δυστυχώς, η χρήση αυτών των συσκευών είναι πολύ ακριβή και για αυτό το λόγο κρίνεται αποδοτική η χρήση προγραμμάτων ζήτησης-απόκρισης, με στόχο την εύρεση βέλτιστων τρόπων κάλυψης των ενεργειακών αναγκών των βιομηχανιών [34].

Στο βιομηχανικό χώρο συνήθως πολλά συστήματα συνεργάζονται μεταξύ τους δημιουργώντας ένα μεγαλύτερο σύστημα για την περάτωση μιας εργασίας, όπως για παράδειγμα η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Το σύστημα αυτό αποτελεί ένα πολυπρακτορικό σύστημα και σε αυτό γίνεται η εφαρμογή των προγραμμάτων ζήτησης-απόκρισης.

4.5.1 Πολυπρακτορικά συστήματα στη βιομηχανία

Πιο αναλυτικά, τα πολυπρακτορικά συστήματα είναι υπολογιστικά συστήματα, στα οποία μια ομάδα αυτόνομων πρακτόρων αλληλεπιδρούν μεταξύ τους προκειμένου να λύσουν ένα συγκεκριμένο πρόβλημα. Πράκτορες, που έχουν τη δυνατότητα να επικοινωνούν, να συνεργάζονται και να διαπραγματεύονται μεταξύ τους, μπορούν να επιλέξουν όχι μόνο να συνεργαστούν αλλά και να ανταγωνιστούν προκειμένου να μεγιστοποιήσουν το κέρδος μιας διεργασίας. Γενικά, οι πράκτορες έχουν τη δυνατότητα να επικοινωνήσουν και να αντιδράσουν τόσο μεταξύ τους, όσο και με το εξωτερικό περιβάλλον [35].

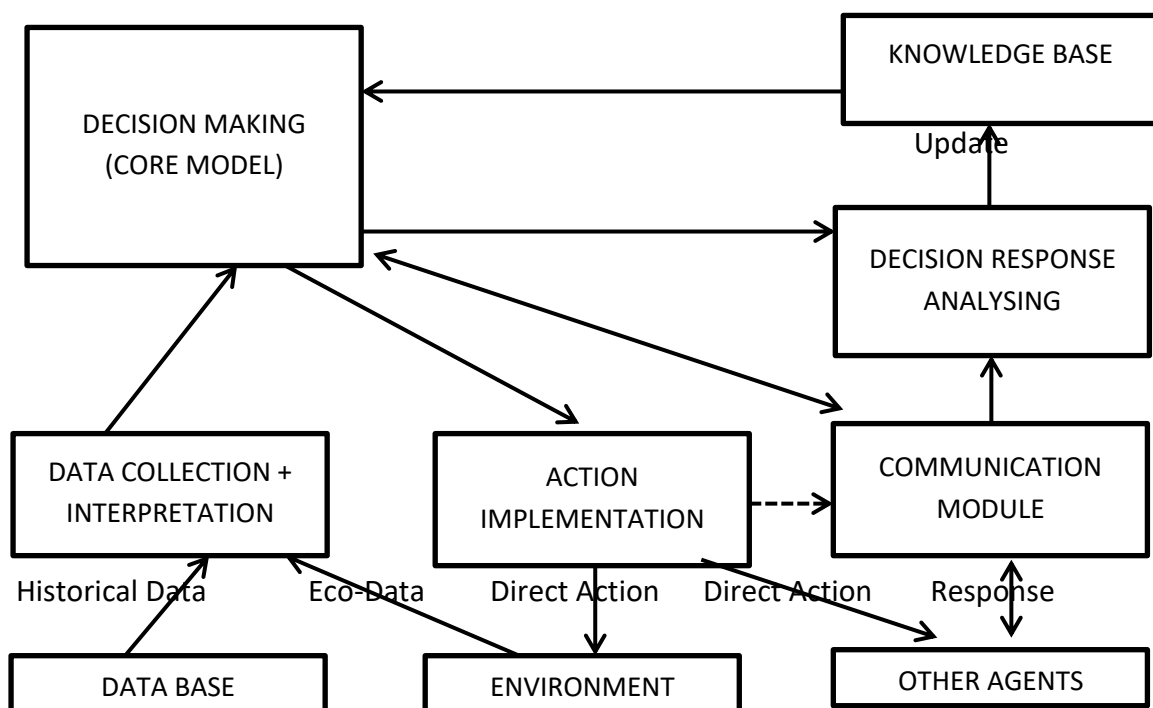
Για πολλές δεκαετίες, τα πολυπρακτορικά συστήματα χρησιμοποιούνται ευρέως στην έρευνα συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, όπως τα συστήματα παραγωγής, διανομής, αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας και βέλτιστης ροής ισχύος [35].

Ένα πολυπρακτορικό σύστημα το οποίο συναντάμε στον βιομηχανικό χώρο, λόγω των τεράστιων καταναλώσεων θερμικής ενέργειας, αποτελεί το σύστημα διανομής παραγόμενης ενέργειας.

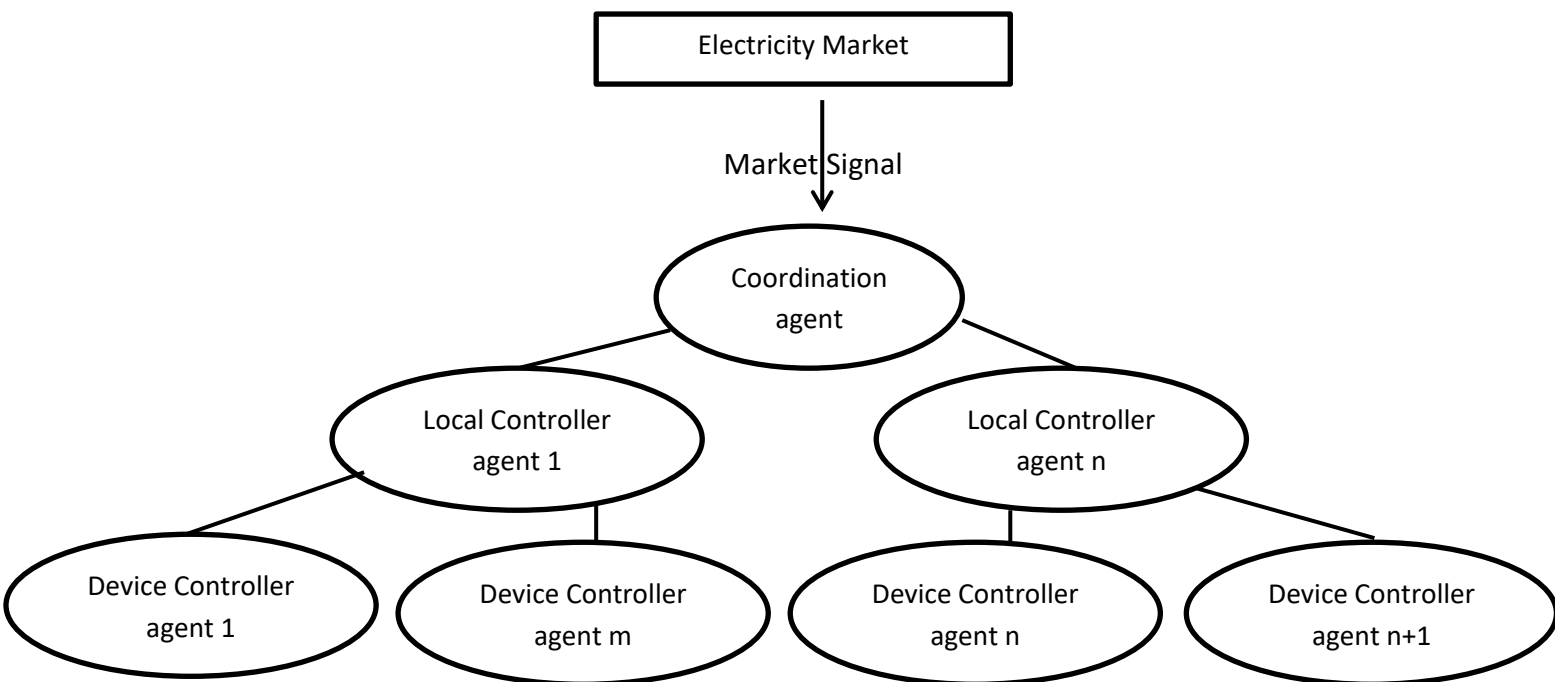
4.5.1.1 Σύστημα διανομής παραγόμενης ενέργειας

Πιο αναλυτικά, το πολυπρακτορικό σύστημα διανομής παραγόμενης ενέργειας είναι ένα σύστημα το οποίο χρησιμοποιεί τεχνολογίες που συνδυάζουν την παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας καθώς και τεχνολογίες που συνδυάζουν την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, θερμικής ενέργειας και ψύξης. Ακόμα, οι περισσότερες βιομηχανίες διαθέτουν εξοπλισμό, όπως στροβίλους (τουρμπίνες), που συντελούν στην εφαρμογή των παραπάνω τεχνολογιών χωρίς πρόσθετο κόστος.

Στο Σχήμα 4.8 παρουσιάζεται η αρχιτεκτονική των πολυπρακτορικών συστημάτων διανομής ενέργειας ενώ στο Σχήμα 4.9 η δομή τους.



Σχήμα 4.8. Αρχιτεκτονική συστήματος διανομής ενέργειας



Σχήμα 4.9. Δομή συστήματος διανομής ενέργειας

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.9, στο επίπεδο διανομής της ενέργειας η βασική αρχιτεκτονική του πολυπρακτορικού συστήματος έχει μία δομή τριών επιπέδων ελέγχου. Πιο αναλυτικά, στο πρώτο επίπεδο βρίσκεται ο πράκτορας συντονιστής, δηλαδή αυτός που συντονίζει την κατανάλωση ενέργειας από άλλους τοπικούς πράκτορες ελέγχου. Στο δεύτερο επίπεδο του σχήματος βρίσκονται οι τοπικοί πράκτορες ελέγχου, οι οποίοι είναι υπεύθυνοι για τον έλεγχο μίας ομάδα συσκευών ηλεκτρικής ενέργειας. Τέλος, στο τρίτο επίπεδο βρίσκονται οι πράκτορες ελέγχου των συσκευών ηλεκτρικής ενέργειας, οι οποίοι σταματούν ή διακόπτουν τη λειτουργία των συσκευών καθώς προγραμματίζουν την ενεργειακή τους κατανάλωση [35].

Προκειμένου να κατανοήσουμε τη λειτουργία αυτού του συστήματος αξίζει να μελετήσουμε το μοντέλο του.

Μεταξύ των πολλών παραμέτρων που θα μπορούσαν να προσαχθούν σε μια εγκατάσταση διανομής παραγόμενης ενέργειας, το εξεταζόμενο σύστημα αποτελείται από τρεις βασικές παραμέτρους: την ηλεκτρική ενέργεια, την θερμική ενέργεια και την ψύξη [36].

Πιο συγκεκριμένα, το συγκεκριμένο σύστημα διανομής ενέργειας έχει παροχή ενέργειας από το σύστημα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας (EDS) και από το σύστημα διανομής καυσίμων (FDS). Η σύνδεση του εξεταζόμενου συστήματος με το σύστημα διανομής

ηλεκτρικής ενέργειας θεωρείται αμφίδρομη, αφού η ηλεκτρική ενέργεια είτε αγοράζεται, είτε πουλιέται στο σύστημα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας ανάλογα με τα βέλτιστα λειτουργικά αποτελέσματα. Αντιθέτως, τα καύσιμα μπορούν μόνο να αγοραστούν από το σύστημα διανομής καυσίμων. Ο σκοπός του συστήματος είναι η παροχή ηλεκτρισμού, θερμότητας και ψύξης οποιαδήποτε ώρα της ημέρας ανάλογα με την ζήτηση ενέργειας τη δεδομένη χρονική στιγμή. Ο κορμός του συστήματος είναι μια γεννήτρια που παρέχει ταυτόχρονη παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας (CHP) [36].

4.5.1.2 Ενσωμάτωση του προγράμματος ζήτησης-απόκρισης στο μοντέλο διανομής παραγόμενης ενέργειας

Η ζήτηση θερμικής ενέργειας μπορεί να υπολογιστεί λαμβάνοντας υπόψη τρεις παραμέτρους που λειτουργούν ταυτόχρονα. Πιο αναλυτικά, αυτές είναι το θερμικό προϊόν του συστήματος ταυτόχρονης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας, ένα βοηθητικό boiler που λειτουργεί με καύσιμα που του παρέχονται από το σύστημα διανομής καυσίμων και ένα σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής θερμότητας, που λειτουργεί για την παραγωγή θερμού αέρα. Η ζήτηση ψύξης μπορεί να υπολογιστεί με τη χρήση δύο παραμέτρων που λειτουργούν ταυτόχρονα. Η πρώτη παράμετρος αφορά στη μονάδα ψύξης προσροφούμενου ή απορροφούμενου νερού (WRAG). Η δεύτερη παράμετρος αναφέρεται στο σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής θερμότητας (EHP), που λειτουργεί για την παραγωγή ψυχρού αέρα. Η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να υπολογιστεί αν γνωρίζουμε το ηλεκτρικό προϊόν του συστήματος ταυτόχρονης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας καθώς και το ποσό ηλεκτρικής ενέργειας που παρέχεται από το σύστημα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Το σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής θερμότητας μπορεί να λειτουργήσει με δύο τρόπους, είτε παράγοντας θερμό αέρα, είτε ψυχρό ανάλογα με τις ανάγκες ζήτησης. Ως αποτέλεσμα, αυτό αποτελεί έναν εξοπλισμό προς εκμετάλλευση, αφού μπορούν να εφαρμοστούν διαφορετικές στρατηγικές στην πάροδο του χρόνου [36].

Προκειμένου να βρεθούν οι πιο ενεργειακά αποτελεσματικές σχέσεις μεταξύ των παραμέτρων του συστήματος, για κάθε μία από αυτές γίνεται ένας διαφορετικός υπολογισμός. Στη συνέχεια, μειώνοντας την πολυπλοκότητα του συστήματος, δηλαδή τις παραμέτρους του, περιγράφουμε το ενεργειακό μας σύστημα.

Αυτό γίνεται μέσω πινάκων που περιγράφουν την αποδοτικότητα του συστήματος σύμφωνα με τα δεδομένα εισόδου και εξόδου του. Πιο συγκεκριμένα, υποθέτουμε ότι v_o^X είναι ο πίνακας που αποτελείται από τα διανύσματα των ενεργειακών δεδομένων εξόδου του συστήματος και v_i^X είναι ο πίνακας που αποτελείται από τα διανύσματα των ενεργειακών δεδομένων εισόδου του συστήματος για τις διάφορες παραμέτρους. Ακόμα, X είναι το σύνολο των παραμέτρων της εγκατάστασης, δηλαδή το σύστημα ταυτόχρονης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας, το βοηθητικό boiler, η μονάδα ψύξης απορροφούμενου και προσροφούμενου νερού και το σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής θερμότητας. Προκειμένου να γνωρίζουμε τη σχέση μεταξύ του πίνακα v_o^X και του πίνακα v_i^X , είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε τον πίνακα αποδοτικότητας του συστήματος, ο οποίος είναι ο H^X . Επομένως, η εξίσωση που περιγράφει τη σχέση μεταξύ των δεδομένων εισόδου και των δεδομένων εξόδου του συστήματος είναι η: $v_o^X = H^X * v_i^X$.

Εστιάζοντας στην εγκατάσταση του εξεταζόμενου συστήματος για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας W , θερμικής ενέργειας Q και ψύξης R , με μέσο παροχής τα καύσιμα F , τότε οι πίνακες διανυσμάτων δεδομένων εισόδου και εξόδου του συστήματος v_i^X και v_o^X αντίστοιχα καθορίζονται από μια συγκεκριμένη σειρά διανυσμάτων ενέργειας. Επομένως, ισχύουν οι εξής σχέσεις: $v_o^X = [F_o^X, W_o^X, Q_o^X, R_o^X]^T$ και ομοίως $v_i^X = [F_i^X, W_i^X, Q_i^X, R_i^X]^T$.

Τα χαρακτηριστικά απόδοσης των παραμέτρων του συστήματος είναι η ηλεκτρική αποδοτικότητα του συστήματος ταυτόχρονης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας n_w , όπου $n_w = W_y/F_y$, η θερμική αποδοτικότητα του συστήματος ταυτόχρονης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας n_Q , όπου $n_Q = Q_y/F_y$, η θερμική αποδοτικότητα του βοηθητικού boiler n_t , όπου $n_t = Q^{AB}/F^{AB}$, ο συντελεστής αποδοτικής λειτουργίας του συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής θερμότητας κατά τη λειτουργία παραγωγής θερμού αέρα COP_t^{EHP} , όπου $COP_t^{EHP} = Q^{EHP}/W^{EHP}$, ο συντελεστής αποδοτικής λειτουργίας του συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής θερμότητας κατά τη λειτουργία παραγωγής ψυχρού αέρα COP_c^{EHP} , όπου $COP_c^{EHP} = R^{EHP}/W^{EHP}$ και ο συντελεστής αποδοτικής λειτουργίας της μονάδας ψύξης απορροφούμενου και προσροφούμενου νερού COP_c^{WARG} , όπου $COP_c^{WARG} = R^{WARG}/Q^{WARG}$. Οι αποδοτικότητες και οι συντελεστές

αποδοτικής λειτουργίας του συστήματος αποτελούν συνάρτηση των λειτουργικών του συνθηκών [36].

Σύμφωνα με το εξεταζόμενο πολυπρακτορικό σύστημα προσφέρονται πολλοί τρόποι αποδοτικής απόκρισης στις συνεχώς μεταβαλλόμενες ενεργειακές ανάγκες που προκύπτουν κατά τη λειτουργία του συστήματος σε πραγματικό χρόνο. Χάρη στη γνώση της ζήτησης ενέργειας σε πραγματικό χρόνο, είναι εφικτός ο καθορισμός ενός μοντέλου βέλτιστης λειτουργίας του πολυπρακτορικού συστήματος. Αυτό το μοντέλο βέλτιστης λειτουργίας αποτελεί συνάρτηση κάποιων βασικών παραμέτρων. Αυτές είναι ο πίνακας α που αποτελείται από συγκεκριμένα διανύσματα. Πιο συγκεκριμένα, $\alpha = [\alpha_w^{EDS}, \alpha_F^{FDS}, \alpha_w^{CHP}, \alpha_Q^{CHP}, \alpha_Q^Y, \alpha_Q^{AB}]^T$

, όπου: α_w^{EDS} = μέρος προϊόντος ηλεκτρικής ενέργειας κατά τη λειτουργία του συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής θερμότητας,

α_F^{FDS} = μέρος προϊόντος καυσίμων που παρέχεται από το σύστημα διανομής καυσίμων,

α_w^{CHP} = μέρος προϊόντος ηλεκτρικής ενέργειας κατά τη λειτουργία του συστήματος ταυτόχρονης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας,

α_Q^{CHP} = μέρος προϊόντος θερμικής ενέργειας κατά τη λειτουργία του συστήματος ταυτόχρονης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας,

α_Q^Y = μέρος προϊόντος θερμικής ενέργειας κατά τη λειτουργία του συστήματος ταυτόχρονης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας, προκειμένου να χρησιμοποιηθεί στη μονάδα ψύξης απορροφούμενου και προσροφούμενου νερού,

α_Q^{AB} = μέρος προϊόντος θερμικής ενέργειας κατά τη λειτουργία του βοηθητικού boiler.

Επιπλέον παράμετροι που αποτελούν συνάρτηση του βέλτιστου μοντέλου λειτουργίας του εξεταζόμενου συστήματος είναι τα διανύσματα εισαγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και καυσίμων, W_i και F_i αντίστοιχα, τα διανύσματα εξαγωγής ενέργειας W_y, Q_y, Q_t, R_e, R_w , τα οποία αναφέρονται στις διαφορετικές παραμέτρους του εξεταζόμενου συστήματος, με το διάνυσμα R_e να εμφανίζεται, όταν το σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας λειτουργεί για την παραγωγή ψυχρού αέρα, και το διάνυσμα Q_e να εμφανίζεται, όταν το σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας λειτουργεί για την παραγωγή θερμού αέρα.

Το πρόβλημα καθορισμού βέλτιστου προγράμματος λειτουργίας του δεδομένου συστήματος έχει ως βασική παράμετρο την ενεργειακή ζήτηση κατά τη διάρκεια μιας τυπικής μέρας. Πιο συγκεκριμένα, η επίλυσή του προέρχεται με τη χρήση της φόρμουλας ελαχιστοποίησης του ενεργειακού κόστους ανά χρονικά διαστήματα μισής ώρας. Η μαθηματική της έκφραση είναι η εξής:

$$\min(\alpha) \{ \rho^{\text{FDS}} * F_i + \rho_i^{\text{FDS}} * \max\{W_i, 0\} + \rho_o^{\text{FDS}} * \min\{W_i, 0\} \}$$

$$f(a) = 0$$

$$g(a) \leq 0$$

, όπου ρ^{FDS} = η τιμή του καυσίμου,

ρ_i^{EDS} = η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας που παρέχεται από το σύστημα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας,

ρ_o^{EDS} = η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας που πουλιέται στο σύστημα διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας.

Οι μονάδες μέτρησης των τιμών (ρ) είναι η $\mu\text{u}/\text{MWh}$, όπου μu = χρηματικές μονάδες.

Οι παράμετροι της εξίσωσης $f(a) = 0$, είναι τιμές που προσφέρουν ενεργειακή ισορροπία για όλες τις παραμέτρους που αποτελούν το εξεταζόμενο σύστημα.

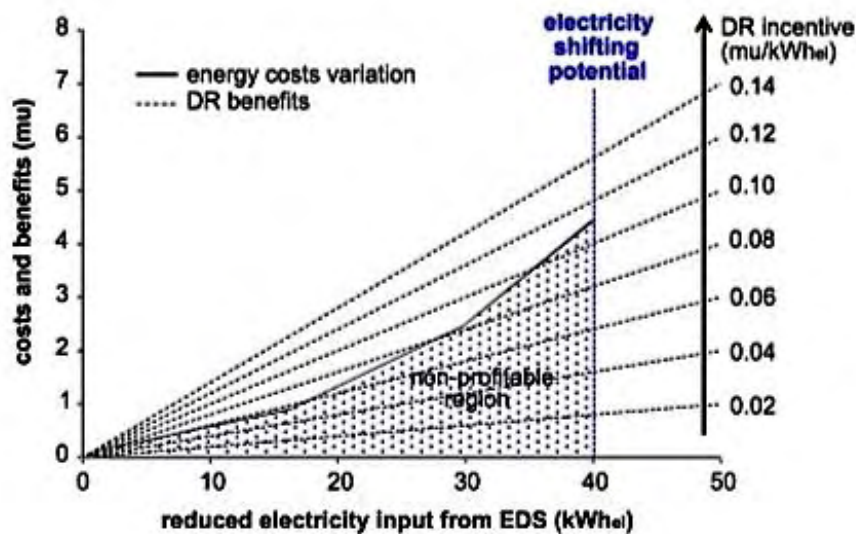
Οι παράμετροι της ανισότητας $g(a) \leq 0$, είναι τιμές ορίων διάφορων συναρτήσεων.

Αυτό το μοντέλο που περιγράψαμε παραπάνω χρησιμοποιείται προκειμένου, μέσω των παραπάνω υπολογισμών, να επιλυθεί το πρόβλημα της βέλτιστης ενεργειακής λειτουργίας του εξεταζόμενου συστήματος, δηλαδή να έχουμε τη βέλτιστη απόκριση στη συνεχώς εναλλασσόμενη ζήτηση ενέργειας κάθε χρονική περίοδο. Αυτό το μοντέλο επίλυσης του εξεταζόμενου συστήματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για πιο περίπλοκα πολυπρακτορικά συστήματα που έχουν περισσότερες παραμέτρους [36].

4.5.1.3 Αποτελέσματα εφαρμογής του προγράμματος ζήτησης-απόκρισης

Η γραφική παράσταση, η οποία απεικονίζεται στο Σχήμα 4.10 χρησιμοποιείται στο βιομηχανικό χώρο, προκειμένου να εκτιμηθεί η αποδοτικότητα του συγκεκριμένου προγράμματος απόκρισης-ζήτησης. Για διαφορετικές τιμές ενεργειακής ζήτησης και

απόκρισης εκτελούνται πολλές στρατηγικές εναλλαγής ενέργειας μεταξύ των συστημάτων του πολυπρακτορικού συστήματος κατά τη λειτουργία του, προκειμένου να επιτευχθεί η ελάχιστη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας. Η αποδοτικότητα αυτών των στρατηγικών αποτυπώνεται μέσω της γραφικής παράστασης του Σχήματος 4.10.



Σχήμα 4.10. Διάγραμμα σχέσης κερδών και ζητούμενης ενέργειας κατά την εφαρμογή του προγράμματος ζήτησης-απόκρισης στο σύστημα διανομής παραγόμενης ενέργειας

Πιο συγκεκριμένα, η συνεχής καμπύλη, που βρίσκεται στον οριζόντιο άξονα του διαγράμματος, εκφράζει τη δυνατότητα μείωσης της ηλεκτρικής ενέργειας που αγοράζεται από το σύστημα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, προκειμένου να αυξηθούν τα χρηματικά κέρδη. Τα κέρδη που σχετίζονται με τις διάφορες εφαρμογές του προγράμματος ζήτησης-απόκρισης, με μονάδα μέτρησης $\mu\text{u}/\text{kWh}_{\text{ei}}$, εκφράζονται μέσω των μη συνεχών ευθειών γραμμών. Σύμφωνα με το διάγραμμα, παρατηρούμε ότι για συγκεκριμένες τιμές ηλεκτρικής ενέργειας, σε συνδυασμό με συγκεκριμένες τιμές που προκύπτουν από τον υπολογισμό του προγράμματος ζήτησης-απόκρισης, δεν υπάρχει όφελος, αφού οι ενεργειακές ανάγκες δεν καλύπτονται [36].

Όπως γίνεται κατανοητό, τα παραπάνω διαγράμματα είναι χρήσιμα εργαλεία προκειμένου να υπολογίσουμε τη χρυσή τομή μεταξύ της τιμής που υπολογίζεται από το πρόγραμμα ζήτησης-απόκρισης και της απαιτούμενης ηλεκτρικής ενέργειας που θα

χρησιμοποιήσουμε προκειμένου οι βιομηχανίες να επωφεληθούν τόσο χρηματικά, όσο και ενεργειακά.

Παράδειγμα:

Σύμφωνα με το Σχήμα 4.10, αν θέλουμε να έχουμε ενεργειακή μείωση κατά 40kWh_{el} σε ένα πολυπρακτορικό σύστημα διανομής μιας βιομηχανίας, που είναι όμοιο με το εξεταζόμενο σύστημα, τότε οι τιμές που προκύπτουν από την εφαρμογή του προγράμματος ζήτησης-απόκρισης πρέπει να είναι μεγαλύτερες από $0,11 \text{ m}\mu/\text{kWh}_{el}$.

Με την εφαρμογή του προγράμματος ζήτησης-απόκρισης στο πολυπρακτορικό σύστημα διανομής, το οποίο έχει ως έχει ως βασική παράμετρο την ενεργειακή ζήτηση κατά τη διάρκεια μιας τυπικής μέρας και η επίλυσή του προέρχεται με τη χρήση της φόρμουλας ελαχιστοποίησης του ενεργειακού κόστους ανά χρονικά διαστήματα μισής ώρας, κατανοούμε τη σημαντικότητα γνώσης της σχέση ζήτησης-απόκρισης στο βιομηχανικό χώρο, η οποία αποτελεί μέσο βελτίωσης αποδοτικότητας των βιομηχανικών συστημάτων.

4.6 Συμπέρασμα

Σύμφωνα με τα παραπάνω οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι τα προγράμματα διαχείρισης της ενεργειακής ζήτησης αποτελούν ένα σημαντικό και χρήσιμο εργαλείο στο βιομηχανικό χώρο, αφού η ζήτηση της ηλεκτρικής ενέργειας σε αυτόν συνεχώς αυξάνεται. Επομένως, η ενσωμάτωση προγραμμάτων διαχείρισης ενέργειας στις βιομηχανίες, που αφορούν στην ζήτηση και στην κατανάλωση της ενέργειας, για διαφορετικές χρονικές περιόδους της ημέρας, αποτελεί ένα φλέγον ζήτημα. Στην εφαρμογή τεχνολογιών διαχείρισης ζήτησης οδήγησε η ανάγκη εξοικονόμησης ενέργειας μέσω της βελτίωσης της αποδοτικότητας των ενεργειακών συστημάτων της βιομηχανίας. Γίνεται λοιπόν κατανοητό ότι για την επίτευξη του στόχου περιορισμού της καταναλισκόμενης ενέργειας στο βιομηχανικό χώρο απαιτείται η ενσωμάτωση προγραμμάτων διαχείρισης ενεργειακής ζήτησης, κάποια από τα οποία μελετήσαμε σε αυτό το κεφάλαιο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΦΩΤΙΣΜΟΥ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

5.1 Ορισμός των «έξυπνων» συστημάτων

Ο όρος «έξυπνα» συστήματα αφορά στα συστήματα που έχουν την ικανότητα να μεταβάλλουν τη συμπεριφορά τους με δεδομένο και ελεγχόμενο τρόπο, μέσω μιας διέγερσης. Πιο αναλυτικά, ο όρος «έξυπνα» σχετίζεται με την προσαρμοστικότητα του συστήματος στις ανάγκες του φορτίου που αυτό εξυπηρετεί και με το βαθμό διαδραστικότητας με τον ανθρώπινο παράγοντα. Προκειμένου να χαρακτηρίσουμε ένα σύστημα «έξυπνο», απαιτείται να συνυπολογίσουμε το βαθμό διείδυσης της τεχνολογίας των αισθητήρων σε αυτό. Ως αποτέλεσμα αυτού, συνήθως, τα «έξυπνα» συστήματα αναφέρονται και ως «sensing systems». Επιπλέον, χαρακτηριστική ιδιότητα ενός «έξυπνου» συστήματος αποτελεί η ικανότητα αυτοματοποίησης και πρόβλεψης πιθανών ενδεχομένων. Μία πρόσθετη δυνατότητα αυτών των συστημάτων είναι η εξοικονόμηση ενέργειας. Η ύψιστη ανάγκη περιορισμού της καταναλισκόμενης ενέργειας τα τελευταία χρόνια, η οποία παρατηρείται συνεχώς στο βιομηχανικό χώρο, οδήγησε στην τεχνολογική ανάπτυξη των ήδη υπάρχοντων συστημάτων με στόχο των αύξηση ενσωμάτωσης των «έξυπνων» συστημάτων σε αυτόν.

5.2 Σημασία ενσωμάτωσης «έξυπνων» συστημάτων φωτισμού στο βιομηχανικό χώρο

Η σημασία ενσωμάτωσης «έξυπνων» συστημάτων φωτισμού στο βιομηχανικό χώρο σχετίζεται άμεσα με τη βελτίωση της ποιότητας του φωτισμού. Η καλή ποιότητα φωτισμού αποτελείται από πολλές παραμέτρους, όπως το επίπεδο έντασης του φωτισμού με στόχο τη δυνατότητα όρασης (αποφυγή θάμπωσης), η αρμονική διάχυση φωτός, η απόδοση χρωμάτων και η κατεύθυνση φωτός. Εκτός από τη συμβολή των «έξυπνων» συστημάτων στην κάλυψη των συνθηκών άνεσης φωτισμού, αυτά έχουν σημαντικό ρόλο και στην εξοικονόμηση της ενέργειας.

Στις κτιριακές εγκαταστάσεις περίπου το 28% της ενέργειας που καταναλώνεται σχετίζεται με το φωτισμό. Επιπλέον, έχει παρατηρηθεί ότι σε πολλές βιομηχανίες χρησιμοποιούνται συστήματα φωτισμού παλιάς τεχνολογίας, τα οποία έχουν σημαντική επίπτωση στην ενεργειακή της αποδοτικότητα. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με τα μεγάλα ποσά ενέργειας που καταναλώνονται για την κάλυψη των αναγκών φωτισμού

οδηγεί στη σημαντικότητα υιοθέτησης αποδοτικής τεχνολογίας. Πιο συγκεκριμένα, προκειμένου να επιτευχτεί ο στόχος της εξοικονόμησης ενέργειας στο βιομηχανικό χώρο κρίνεται απαραίτητη η ενσωμάτωση «έξυπνων» συστημάτων φωτισμού σε αυτόν.

Έχοντας κατανοήσει το σημαντικό ρόλο των «έξυπνων» συστημάτων φωτισμού καθώς και την επιτακτική ανάγκη ενσωμάτωσής τους στο βιομηχανικό χώρο, με στόχο την εξοικονόμηση ενέργειας, θα μελετήσουμε τη δομή και τη λειτουργία συγκεκριμένων «έξυπνων» συστημάτων φωτισμού.

5.3 Περιγραφή «έξυπνων» συστημάτων φωτισμού

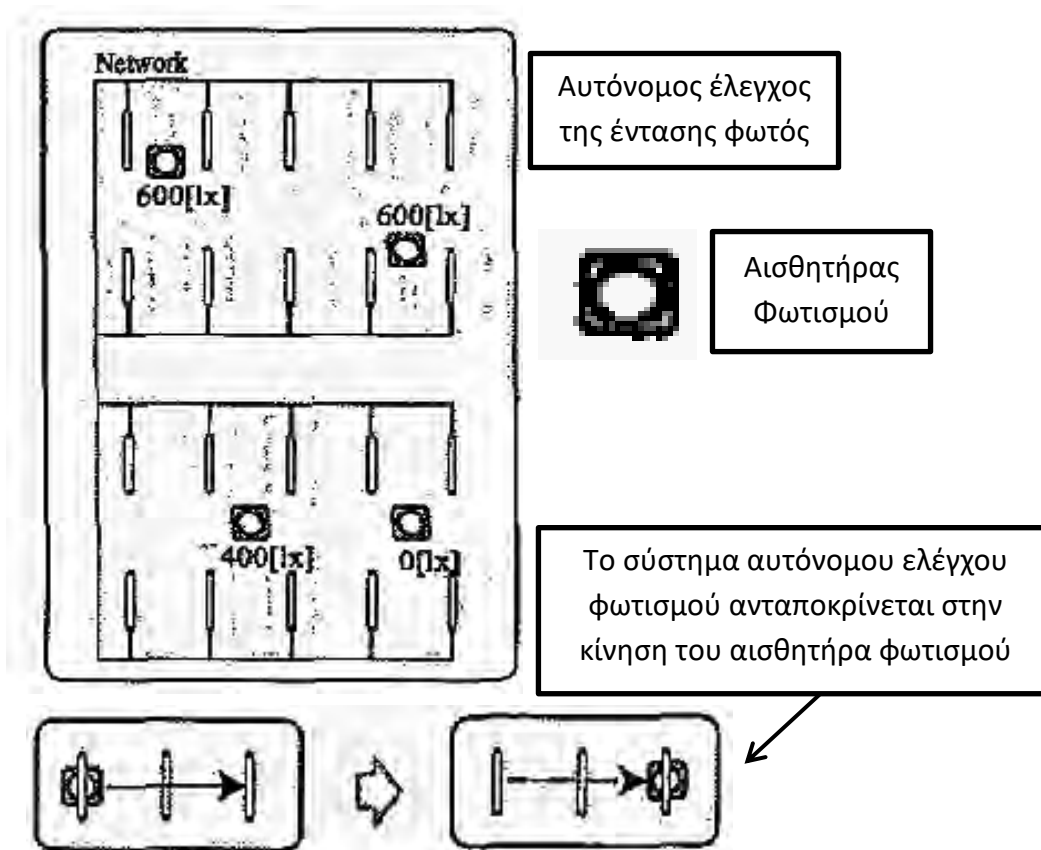
5.3.1 Ιδιότητες «έξυπνων» συστημάτων φωτισμού

Ο όρος «έξυπνο σύστημα φωτισμού» αναφέρεται σε ένα σύστημα, όπου ποικίλες εγκαταστάσεις φωτισμού συνδέονται σε ένα δίκτυο και μέσω της συνεργασίας τους επιτυγχάνεται η κάλυψη αναγκών φωτισμού. Τα χαρακτηριστικά ενός τέτοιου συστήματος είναι τα εξής [37]:

1. Ο αυτόνομος έλεγχος. Πιο αναλυτικά, ένα «έξυπνο» σύστημα φωτισμού δεν ελέγχεται από κανένα άλλο φορτίο. Η ένταση του φωτός σε κάθε σημείο του χώρου ελέγχεται κατά τη λειτουργία του φωτιστικού που υπάρχει στο συγκεκριμένο σημείο. Η έλλειψη μίας κεντρικής μονάδας ελέγχου έχει ως αποτέλεσμα τη μικρή πιθανότητα δυσλειτουργίας του συστήματος φωτισμού και επομένως την υψηλή αξιοπιστία του ακόμα και σε μεγάλες κτιριακές εγκαταστάσεις. Επιπλέον, μια ιδιότητα αυτού του συστήματος είναι η εύκολη εισαγωγή πρόσθετων εγκαταστάσεων φωτισμού και αισθητήρων φωτισμού σε αυτές.
2. Η δυνατότητα παροχής ή διακοπής λειτουργίας ανεξάρτητα από τη συνδεσμολογία. Πιο αναλυτικά, μέσω των «έξυπνων» συστημάτων φωτισμού, δίνεται η δυνατότητα δημιουργίας ενός αυθόρμητου σχεδίου λειτουργίας των φωτιστικών ξεχωριστά, χωρίς αυτή να εξαρτάται από τη συνδεσμολογία τους. Επιπλέον, παρέχεται η δυνατότητα λειτουργίας των φωτιστικών με οποιαδήποτε ένταση φωτός. Επομένως, το σύστημα εξοικονομεί ενέργεια μέσω του περιορισμού λειτουργίας επιπλέον φωτιστικών.

3. Η δυνατότητα αυτόνομου ελέγχου φωτισμού. Πιο συγκεκριμένα, μέσω των «έξυπνων» συστημάτων φωτισμού, ο χρήστης θέτει μια θεμιτή ένταση φωτισμού και στη συνέχεια το σύστημα μπορεί από μόνο του να καθορίσει το ποσό του φωτός που θα παρέχει στο συγκεκριμένο χώρο. Ο έλεγχος του φωτισμού γίνεται με τη βοήθεια των κινούμενων αισθητήρων φωτισμού.

Στο Σχήμα 5.1 παρουσιάζεται ένα υποθετικό διάγραμμα ενός συστήματος αυτόνομου ελέγχου φωτισμού.

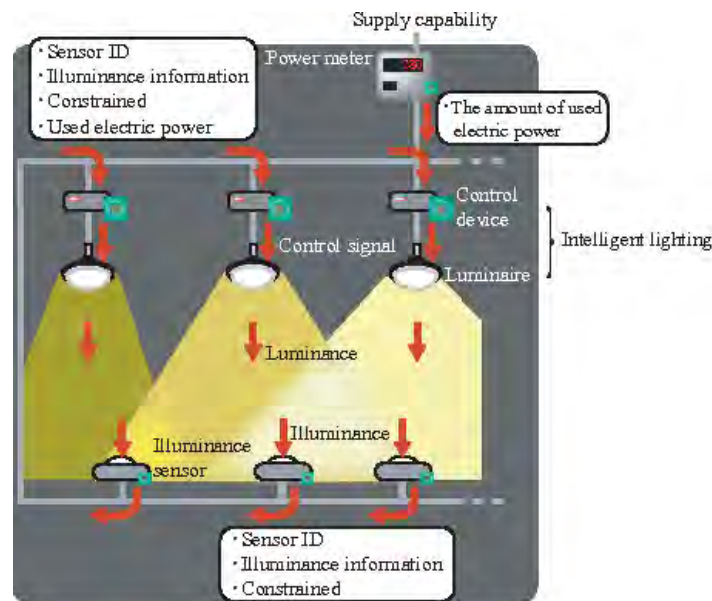


Σχήμα 5.1. Σύστημα αυτόνομου ελέγχου φωτισμού

5.3.2 Δομή «έξυπνων» συστημάτων φωτισμού

Η δομή των «έξυπνων» συστημάτων φωτισμού αποτελείται από πολλές παραμέτρους. Πιο συγκεκριμένα, αυτές είναι πολλές «έξυπνες» εγκαταστάσεις φωτισμού, πολλοί αισθητήρες φωτισμού με δυνατότητα κίνησης καθώς και μετρητές ενέργειας. Στη συνέχεια, όλες αυτές οι παράμετροι συνδέονται σε ένα κοινό δίκτυο. Ο όρος «έξυπνες εγκαταστάσεις φωτισμού» αναφέρεται σε εγκαταστάσεις φωτισμού, οι οποίες αποτελούνται από έναν ελεγκτή, ο οποίος έχει το ρόλο μιας μηχανής μάθησης. Αυτός παρέχει τη δυνατότητα σε κάθε εγκατάσταση φωτισμού να λειτουργεί αυτόνομα [37,38].

Στο Σχήμα 5.2 παρουσιάζεται η δομή ενός «έξυπνου» συστήματος φωτισμού.



Σχήμα 5.2. Δομή «έξυπνου» συστήματος φωτισμού

5.3.3 Σύστημα ελέγχου «έξυπνων» συστημάτων φωτισμού

Ένα «έξυπνο» σύστημα φωτισμού ελέγχεται μέσω της αυτόνομης προσαρμογής της έντασης του φωτισμού σε διαφορετικά κάθε φορά σημεία. Η διαδικασία ελέγχου περιγράφεται ως εξής [37,38]:

1. Θέσε σε λειτουργία το «έξυπνο» σύστημα φωτισμού και δημιουργήσε το στόχο της ελαχιστοποίησης της ποσότητας ενέργειας, ο οποίος χρησιμοποιείται στη συσκευή μάθησης, δηλαδή στον ελεγκτή της κάθε «έξυπνης» εγκατάστασης φωτισμού. Επιπλέον, θέσε το στόχο της παροχής φωτισμού πάνω από μία συγκεκριμένη τιμή σε κάθε αισθητήρα φωτισμού.
2. Κάθε ξεχωριστός αισθητήρας φωτισμού ανιχνεύει το φωτισμό που παρέχεται μια δεδομένη στιγμή.
3. Κάθε ξεχωριστός αισθητήρας φωτισμού στέλνει τα δεδομένα της προσδοκώμενης παροχής φωτισμού και της υπάρχουσας παροχής φωτισμού, μια συγκεκριμένη στιγμή, στο δίκτυο στο οποίο είναι συνδεδεμένος.
4. Κάθε «έξυπνη» εγκατάσταση φωτισμού, που είναι συνδεδεμένη στο δίκτυο, παίρνει ως δεδομένα το ποσό της χρησιμοποιούμενης ενέργειας, την τιμή

παροχής του προσδοκώμενου και του ήδη υπάρχοντος φωτισμού του κάθε αισθητήρα φωτισμού μια συγκεκριμένη στιγμή.

5. Η συσκευή μάθησης (ελεγκτής) κάθε «έξυπνης» εγκατάστασης φωτισμού ελέγχει την ένταση του φωτισμού σύμφωνα με έναν αλγόριθμο ελέγχου του φωτισμού, οποίος χρησιμοποιεί ως δεδομένα το ποσό της χρησιμοποιούμενης ενέργειας του αισθητήρα φωτισμού καθώς και την τιμή της προσδοκώμενης και της υπάρχουσας παροχής φωτισμού.
6. Μέσω της επανάληψης των βημάτων από 2 μέχρι 5, το σύστημα λαμβάνει συνεχώς πληροφορίες από το περιβάλλον του χώρου και παρέχει έλεγχο, έτσι ώστε να καλυφθούν οι συνθήκες άνεσης φωτισμού και η εξοικονόμηση ενέργειας.

Μέσω της συνεχούς χρήσης της παραπάνω διαδικασίας που περιγράψαμε, το «έξυπνο» σύστημα φωτισμού μπορεί να ανταποκριθεί τόσο στην προσθήκη και στη δυσλειτουργία των φώτων, όσο στην προσθήκη και στην κίνηση των αισθητήρων φωτισμού, λαμβάνοντας συνεχώς πληροφορίες από το περιβάλλον του χώρου.

Έχοντας κατανοήσει τη βασική λειτουργία και τη δομή των πολλών διαφορετικών «έξυπνων» συστημάτων φωτισμού, αξίζει να μελετήσουμε μεμονωμένα κάποια από αυτά.

5.4 «Έξυπνο» σύστημα φωτισμού που χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο αυτόνομης και βέλτιστης κατανομής

Ένα από τα ποικίλα «έξυπνα» συστήματα φωτισμού είναι αυτό που χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο αυτόνομης και βέλτιστης κατανομής, όπως περιγράφεται παρακάτω. Στόχος του συγκεκριμένου συστήματος αποτελεί η εξοικονόμηση ενέργειας καθώς και ο έλεγχος του φωτός, προκειμένου να επιτευχτεί η κατάλληλη παροχή φωτισμού στην κατάλληλη περιοχή του χώρου.

Προκειμένου να κατανοήσουμε τη λειτουργία του συγκεκριμένου συστήματος, απαιτείται να περιγράψουμε τον αλγόριθμο που χρησιμοποιεί.

5.4.1 Αλγόριθμος αυτόνομης και βέλτιστης κατανομής

Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιείται στο συγκεκριμένο «έξυπνο» σύστημα φωτισμού είναι ο αλγόριθμος αυτόνομης και βέλτιστης κατανομής, ως αλγόριθμος ελέγχου του φωτισμού, ο οποίος βασίζεται στη στοχαστική μέθοδο “hill climbing”.

Οι στόχοι του «έξυπνου» συστήματος φωτισμού, που χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο αυτόνομης και βέλτιστης κατανομής, είναι δύο [38]:

1. Η μείωση της διαφοράς μεταξύ της υπάρχουσας έντασης φωτισμού μία συγκεκριμένη χρονική στιγμή κάθε αισθητήρα φωτισμού στο χώρο και της προσδοκώμενης έντασης φωτισμού του αντίστοιχου αισθητήρα τη δεδομένη χρονική στιγμή σε αυτόν.
2. Η μείωση της ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιεί το συγκεκριμένο σύστημα φωτισμού, με στόχο την εξοικονόμηση ενέργειας.

Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος εφαρμόζεται με τον υπολογισμό κάποιων μαθηματικών συναρτήσεων. Η βασική συνάρτηση που χρησιμοποιείται είναι αυτή που περιγράφεται στην εξίσωση (1).

$$f = \sum_{i=1}^n g(i) + w * \sum_{j=1}^m Br(j) \quad (1)$$

, όπου $g(i)$ = συνάρτηση που προσδιορίζει τη διαφορά μεταξύ της υπάρχουσας έντασης φωτισμού και της προσδοκώμενης,

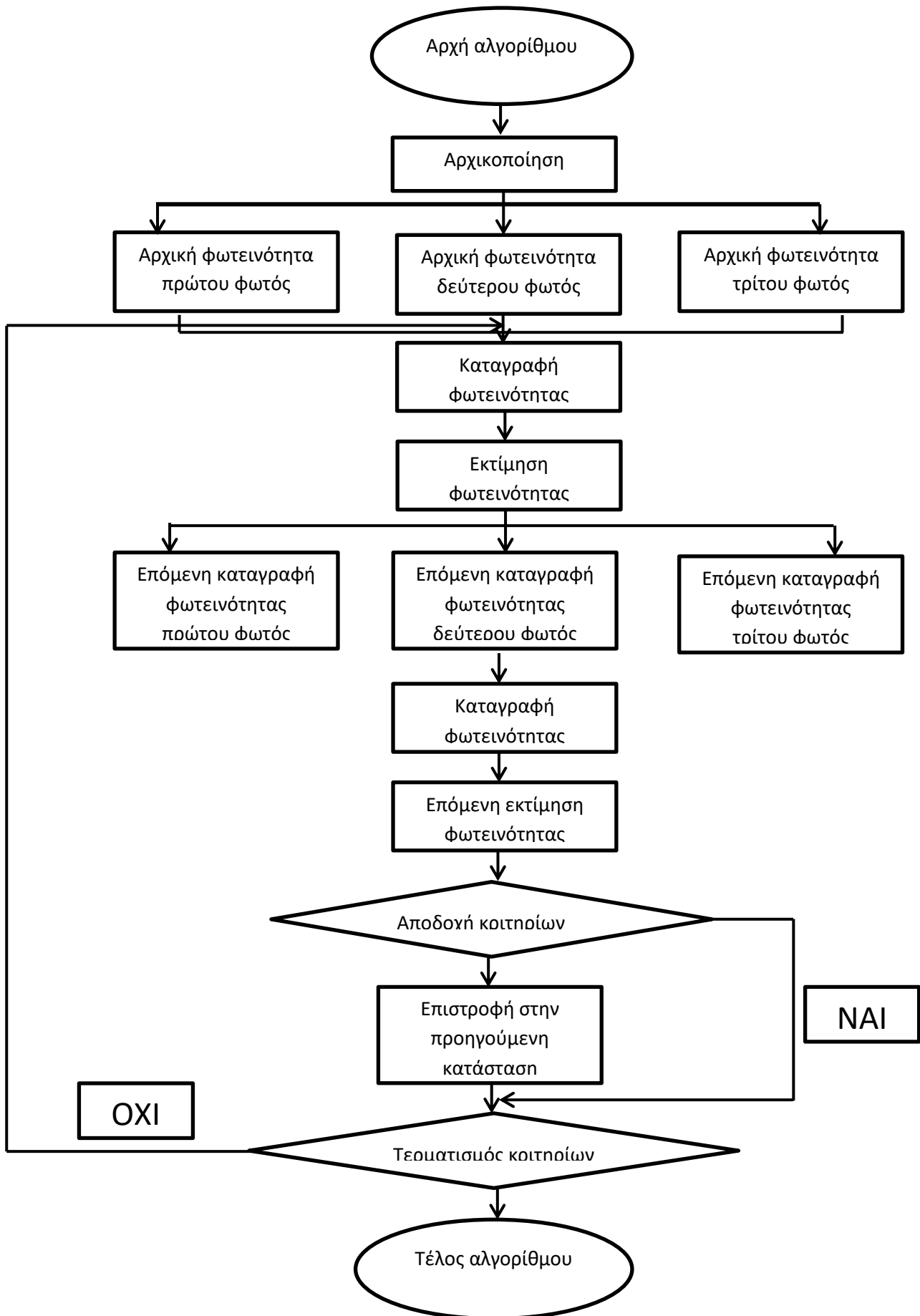
$B_r(j)$ = συνάρτηση που προσδιορίζει τη φωτεινότητα που παρέχεται από κάθε αισθητήρα φωτισμού.

Κατά την εφαρμογή αυτού του αλγορίθμου βασικός στόχος είναι η ελαχιστοποίηση της τιμής της συνάρτησης f , της εξίσωσης (1). Σύμφωνα με την παραπάνω εξίσωση, η τιμή της συνάρτησης f εξαρτάται από το άθροισμα της διαφοράς μεταξύ της υπάρχουσας έντασης φωτισμού και της προσδοκώμενης κάθε αισθητήρα φωτισμού καθώς και από το άθροισμα της φωτεινότητας κάθε αισθητήρα φωτισμού. Η διαφορά μεταξύ της υπάρχουσας έντασης φωτισμού και της προσδοκώμενης προστίθεται μόνο όταν αυτή έχει αρνητική τιμή. Επομένως, γίνεται κατανοητό ότι η παροχή φωτισμού αυξάνεται άμεσα, όταν η υπάρχουσα παροχή φωτισμού του αισθητήρα φωτισμού μία συγκεκριμένη χρονική στιγμή είναι μικρότερη από την αντίστοιχη προσδοκώμενη [38].

Η φωτεινότητα αποτελεί γραμμική συνάρτηση της καταναλισκόμενης ενέργειας του συστήματος. Όπως όμως αναφέραμε προηγουμένως, ο στόχος του συστήματος είναι διπλός και συγκεκριμένα η παροχή της προσδοκώμενης έντασης φωτισμού καθώς και η εξοικονόμηση ενέργειας.

Για αυτό το λόγο, όπως φαίνεται και στην εξίσωση (1), η φωτεινότητα πολλαπλασιάζεται με ένα βάρος w . Η τιμή αυτού του βάρους καθορίζει εάν θα αποδοθεί προτεραιότητα στην βελτίωση της έντασης του φωτισμού ή στην εξοικονόμηση της καταναλισκόμενης ενέργειας από το σύστημα φωτισμού.

Το μοντέλο του αλγορίθμου που χρησιμοποιεί το σύστημα παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.3.



Σχήμα 5.3. Μοντέλο αλγορίθμου αυτόνομης και βέλτιστης κατανομής

Ο αλγόριθμος αυτόνομης και βέλτιστης κατανομής περιγράφεται ως εξής [37]:

1. Θέσε σε λειτουργία το σύστημα ανάβοντας όλα τα φώτα με την αρχική τους ένταση φωτισμού και όρισε την προσδοκώμενη ένταση φωτισμού.
2. Υπολόγισε τη διαφορά μεταξύ της υπάρχουσας και της προσδοκώμενης παροχής φωτισμού κάθε αισθητήρα φωτισμού και στη συνέχεια χρησιμοποίησε τη συνάρτηση (1) του αλγορίθμου.
3. Υπολόγισε το ποσό της διακύμανσης του φωτισμού και θέσε σε λειτουργία κάθε εγκατάσταση φωτισμού στην νέα παροχή φωτισμού.
4. Υπολόγισε την τιμή της συνάρτησης (1) γνωρίζοντας, εκτός από τη τιμή της διαφοράς μεταξύ της υπάρχουσας και της προσδοκώμενης παροχής φωτισμού, και τη διαφορά μεταξύ της διαφορετικής κάθε φορά έντασης φωτισμού και της προσδοκώμενης έντασης φωτισμού. Εάν η τιμή της συνάρτησης (1) είναι ικανοποιητική, τότε θέσε τη νέα παροχή φωτισμού και πήγαινε στο βήμα 2.
5. Εάν η τιμή της συνάρτησης (1) χειροτερεύσει στο βήμα 4, ακύρωσε το παρεχόμενο ποσό φωτισμού και πήγαινε στο βήμα 2.

Ο λόγος για τον οποίο η παραπάνω διαδικασία δεν πηγαίνει στο βήμα 3, όταν η παροχή φωτός έχει οριστεί στο βήμα 4, είναι η απόκριση του συστήματος στις περιβαλλοντικές αλλαγές, όπως η αλλαγή της φωτεινότητας του εξωτερικού φωτός, όταν ο αλγόριθμος βρίσκεται στο βήμα 4. Επομένως, με την εφαρμογή του παραπάνω αλγορίθμου, θα επιτευχθεί η απόδοση της ιδανικής κάθε φορά έντασης του φωτισμού.

Σύμφωνα με διάφορα πειράματα που διεξήχθησαν κατά την εφαρμογή του «έξυπνου» συστήματος φωτισμού που χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο βέλτιστης και αυτόνομης κατανομής, επιβεβαιώθηκε η κατάλληλη λειτουργία του συστήματος. Ως αποτέλεσμα, το εξεταζόμενο σύστημα φωτισμού θεωρείται ένα αποδοτικό και αξιόπιστο σύστημα, το οποίο ανταγωνίζεται επιτυχώς τα υψηλού επιπέδου σύγχρονα συστήματα φωτισμού.

Ένα πρόσθετο «έξυπνο» σύστημα φωτισμού, το οποίο αξίζει να μελετήσουμε, είναι το «έξυπνο» σύστημα φωτισμού που εκμεταλλεύεται το φυσικό φως.

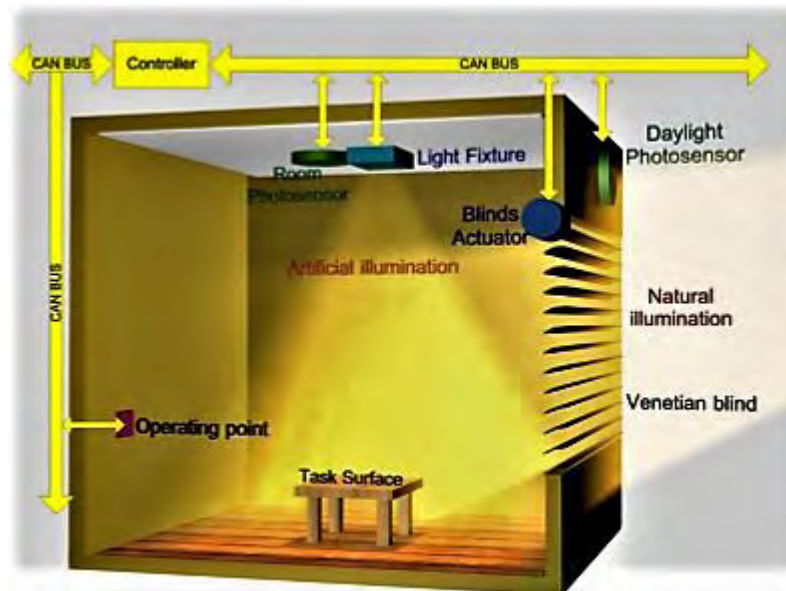
5.5 «Έξυπνο» σύστημα φωτισμού που εκμεταλλεύεται το φυσικό φως

Το «έξυπνο» σύστημα φωτισμού που εκμεταλλεύεται το φυσικό φως έχει σχεδιαστεί με σκοπό την εξοικονόμηση της ηλεκτρικής ενέργειας μέσω του ελέγχου της έντασης του τεχνητού φωτός καθώς και μέσω της χρήσης του φυσικού φωτός, όταν αυτό είναι εφικτό. Επιπλέον, στόχος του συγκεκριμένου συστήματος είναι η βέλτιστη εκμετάλλευση του ηλιακού φωτός, μέσω των έλεγχου των περσίδων στα παράθυρα του χώρου, εάν αυτό υπάρχει. Ο έλεγχος του ηλιακού φωτός που εισάγεται στο χώρο γίνεται μέσω του ελέγχου της γωνίας ανοίγματος των περσίδων. Ο έλεγχος του έντασης του τεχνητού φωτισμού γίνεται μέσω του ελέγχου του ποσού της ενέργειας που παρέχεται στο λαμπτήρα. Προκειμένου να επιτευχθεί αυτό, για τους λαμπτήρες συνεχούς ρεύματος χρησιμοποιείται η τεχνική διαμόρφωσης του πλάτους του παλμού PWM, ενώ για τους λαμπτήρες εναλλασσόμενου ρεύματος η τεχνική «κοψίματος» της εναλλασσόμενης κυματικής συνάρτησης. Επιπλέον, το σύστημα χρησιμοποιεί έναν ελεγκτή της περιοχής δικτύου (CAN), ως μέσο επικοινωνίας των αισθητήρων και των ενεργοποιητών. Το πλεονέκτημα του συγκεκριμένου σχεδίου του συστήματος είναι ότι παρέχει στο χρήστη μία μόνο λειτουργία, η οποία είναι να ορίσει το επιθυμητό ποσό φωτισμού. Ο ελεγκτής είναι υπεύθυνος να καθορίσει έναν τρόπο, προκειμένου να ικανοποιηθεί το επιθυμητό ποσό φωτισμού με την ελάχιστη ενεργειακή κατανάλωση [39].

Η ενσωμάτωση του συγκεκριμένου συστήματος στο βιομηχανικό χώρο είναι ιδιαίτερα χρήσιμη, δεδομένου ότι κοινός στόχος αυτού του συστήματος φωτισμού και της βιομηχανίας αποτελεί η εξοικονόμηση ενέργειας.

5.5.1 Δομή «έξυπνου» συστήματος φωτισμού που εκμεταλλεύεται το φυσικό φως

Όπως παρατηρούμε από το Σχήμα 5.4, το σύστημα αποτελείται από δύο διαφορετικούς αισθητήρες φωτισμού, ενεργοποιητές (σύστημα κινητήρα), εσωτερικό τεχνητό φως, ένα σημείο λειτουργίας (διακόπτης) και έναν κύριο ελεγκτή. Όλες οι παράμετροι του συστήματος επικοινωνούν με ένα κανάλι.

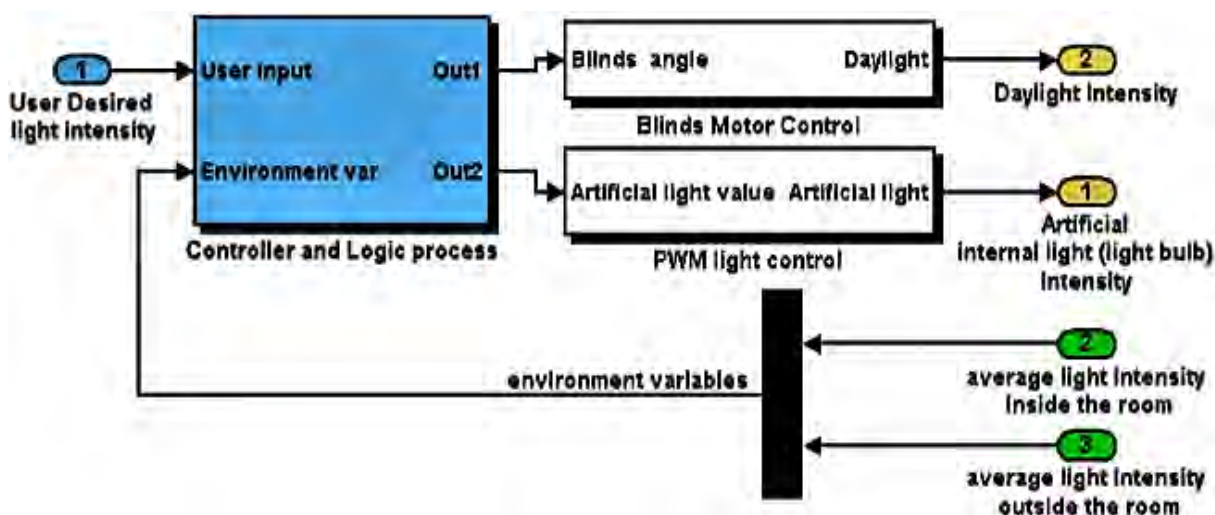


Σχήμα 5.4. Παράμετροι «έξυπνου» συστήματος φωτισμού που εκμεταλλεύεται το φυσικό φως

Οι αισθητήρες χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της έντασης του φυσικού και του τεχνητού φωτισμού. Ο αισθητήρας τεχνητού φωτισμού πρέπει να τοποθετηθεί στο χώρο με τέτοιο τρόπο, έτσι ώστε να μην έρχεται σε άμεση επαφή με πηγές φωτισμού, ενώ ταυτόχρονα να μετράει την ένταση φωτισμού που βρίσκεται στη δεδομένη κάθε φορά επιφάνεια εργασίας. Μια συνήθης τοποθεσία του αισθητήρα τεχνητού φωτισμού είναι στην οροφή του χώρου, πάνω από την επιφάνεια εργασίας. Ο αισθητήρας φυσικού φωτισμού μπορεί να τοποθετηθεί έξω από τις περσίδες του παραθύρου του χώρου, προκειμένου να μετρήσει την ένταση του ηλιακού φωτός. Οι αισθητήρες φυσικού και τεχνητού φωτισμού μπορούν να λειτουργήσουν σαν μία ομάδα αισθητήρων, προκειμένου να υπολογιστεί η μέση τιμή της έντασης του φωτισμού του χώρου. Οι ενεργοποιητές των περσίδων του παραθύρου χρησιμοποιούνται με στόχο να ελέγξουν την γωνία των περσίδων από την οποία περνάει το φυσικό φως στο χώρο ή να εμποδίσουν το πέρασμά του σε αυτόν. Η επιθυμητή ένταση φωτισμού προσαρμόζεται μέσω της μονάδας σημείου λειτουργίας. Η πηγή εσωτερικού φωτός μπορεί να είναι είτε ένας λαμπτήρας συνεχούς, είτε εναλλασσόμενου ρεύματος, η οποία ελέγχεται με την τεχνική PWM ή με την τεχνική «κοψίματος» της εναλλασσόμενης κυματικής συνάρτησης, αντίστοιχα. Ο κύριος ελεγκτής επικοινωνεί με όλες τις παραμέτρους του συστήματος μέσω του καναλιού CAN [39,40].

5.5.2 Λειτουργία «έξυπνου» συστήματος φωτισμού που εκμεταλλεύεται το φυσικό φως

Η λειτουργία του «έξυπνου» συστήματος φωτισμού που εκμεταλλεύεται το φυσικό φως παρουσιάζεται στο διάγραμμα του Σχήματος 5.5.



Σχήμα 5.5. Διάγραμμα λειτουργίας του «έξυπνου» συστήματος φωτισμού που εκμεταλλεύεται το φυσικό φως

Πιο αναλυτικά, η μονάδα του ελεγκτή και της λογικής επεξεργασίας είναι υπεύθυνη να συλλέξουν δεδομένα που σχετίζονται με την ένταση του φυσικού φωτός, την ένταση του τεχνητού φωτός καθώς και τα δεδομένα που εισάγει ο χρήστης, τα οποία αφορούν στην επιθυμητή παροχή φωτισμού στο χώρο. Ο ελεγκτής θα επεξεργαστεί όλο τα δεδομένα εισόδου και στη συνέχεια θα παράγει την βέλτιστη λύση φωτισμού του χώρου με βασικό στόχο την ελάχιστη δυνατή κατανάλωση ενέργειας.

Εάν ο χρήστης θελήσει να αυξήσει την ένταση του φωτισμού στον εσωτερικό χώρο, ο ελεγκτής πρώτα θα ελέγξει το ποσό του δυνατού παρεχόμενου φωτισμού από το ηλιακό φως και τότε θα υπάρχουν δύο ενδεχόμενα [39,40,41]:

1. Εάν αυτό επαρκεί, τότε ο ελεγκτής θα αρχίσει να ανοίγει τις περσίδες του παραθύρου, με στόχο να εισαχθεί το επιθυμητό ποσό του ηλιακού φωτός στο χώρο.
2. Εάν η συνεισφορά του ηλιακού φωτός δεν είναι επαρκής, έτσι ώστε να καλυφθούν οι ανάγκες φωτισμού του χρήστη, τότε ο ελεγκτής θα χρησιμοποιήσει

μερικώς το τεχνητό φως ως βοηθητική πηγή, προκειμένου να επιτευχθεί το επίπεδο του επιθυμητού φωτισμού.

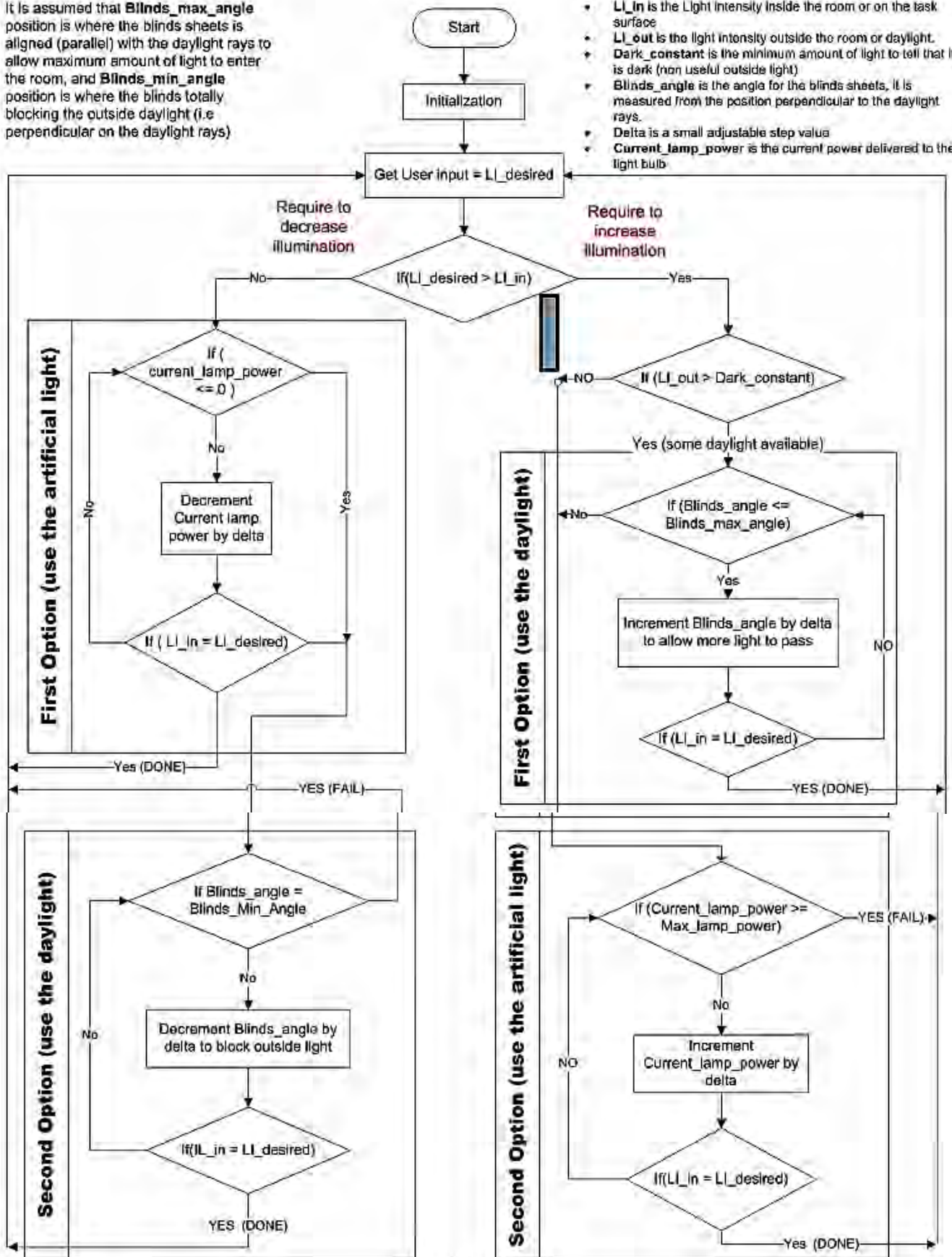
Ο κύριος ελεγκτής θα λειτουργήσει, όπως το διάγραμμα λήψης απόφασης. Επιπλέον, αυτός θα πρέπει να διαχειριστεί όλα τα μηνύματα του καναλιού CAN.

Τέλος, το σύστημα του κινητήρα των περσίδων του παραθύρου είναι υπεύθυνο να προσαρμόσει σωστά τη γωνία των περσίδων, έτσι ώστε να εισέρχεται στο χώρο το κατάλληλο ποσό ηλιακού φωτός. Το σύστημα αυτό αποτελείται από έναν ελεγκτή και έναν ενισχυτή, προκειμένου να αποδοθεί ενέργεια στον κινητήρα για τη λειτουργία του [41].

Το διάγραμμα λήψης απόφασης φαίνεται στο Σχήμα 5.6 [39].

It is assumed that **Blinds_max_angle** position is where the blinds sheets is aligned (parallel) with the daylight rays to allow maximum amount of light to enter the room, and **Blinds_min_angle** position is where the blinds totally blocking the outside daylight (i.e perpendicular on the daylight rays)

- **LI_desired** is the Light intensity desired by the user
- **LI_in** is the Light Intensity Inside the room or on the task surface
- **LI_out** is the light intensity outside the room or daylight.
- **Dark_constant** is the minimum amount of light to tell that it is dark (non useful outside light)
- **Blinds_angle** is the angle for the blinds sheets, it is measured from the position perpendicular to the daylight rays.
- **Delta** is a small adjustable step value
- **Current_lamp_power** is the current power delivered to the light bulb



Σχήμα 5.6. Διάγραμμα λήψης απόφασης

Υστερα από τη διεξαγωγή διαφορετικών πειραμάτων για την παρατήρηση της σωστής αλλά και αποδοτικής λειτουργίας του συγκεκριμένου συστήματος, διαπιστώθηκε η αξιοπιστία του συστήματος, αφού αυτό λειτουργεί χωρίς προβλήματα καθώς πετυχαίνει

το στόχο της εξοικονόμησης ενέργειας. Επομένως, γίνεται κατανοητό ότι η ενσωμάτωση του συγκεκριμένου συστήματος στο βιομηχανικό χώρο θα συντελέσει στον περιορισμό της καταναλισκόμενης ενέργειας, λόγω της κάλυψης των αναγκών φωτισμού του [42].

Ένα πρόσθετο σύστημα φωτισμού που δεν χαρακτηρίζεται ως «έξυπνο», αλλά συμβάλει στην ενεργειακή εξοικονόμηση στο βιομηχανικό χώρο και αξίζει να μελετήσουμε αποτελεί το αυτόνομο σύστημα φωτισμού με λαμπτήρες τύπου LED που λειτουργεί με ηλιακή ενέργεια.

5.6 Σύστημα φωτισμού με λαμπτήρες τύπου LED που λειτουργεί με ηλιακή ενέργεια

Το σύστημα φωτισμού με λαμπτήρες τύπου LED που λειτουργεί με ηλιακή ενέργεια αποτελείται από τρεις βασικές παραμέτρους, οι οποίες είναι ένα αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα, μια μπαταρία και λαμπτήρες τύπου LED.

Το συγκεκριμένο αυτόνομο σύστημα φωτισμού λειτουργεί εξυπηρετώντας τρεις βασικούς στόχους, οι οποίοι είναι οι εξής [43]:

1. Η υψηλή αποδοτικότητα του αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος που χρησιμοποιείται προκειμένου να μετατρέψει την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική, η οποία θα χρησιμοποιηθεί από το εξεταζόμενο σύστημα φωτισμού.
2. Ο καλός έλεγχος φόρτισης της μπαταρίας που χρησιμοποιείται με στόχο την πλήρη φόρτισή της, προκειμένου να παρέχει αρκετά ποσά αποθηκευμένης ενέργειας καθώς και να προστατέψει την μπαταρία από πιθανή υπερφόρτιση.
3. Ο καλός έλεγχος αποφόρτισης της μπαταρίας προκειμένου να αποφευχθεί η καταστροφή των λαμπτήρων LED καθώς και να επιτευχθεί η επαρκής παροχή έντασης φωτός κατά τις βραδινές ώρες λειτουργίας του συστήματος.

Το αυτόνομο σύστημα φωτισμού με λαμπτήρες τύπου LED που λειτουργεί με ηλιακή ενέργεια βασίζεται στην παροχή ηλεκτρικής ενέργειας από ένα φωτοβολταϊκό σύστημα, η οποία αποθηκεύεται σε μία μπαταρία και στη συνέχεια, μέσω της εκφόρτισής της κατά τις βραδινές ώρες, παρέχεται φωτισμός με τη χρήση των λαμπτήρων τύπου LED. Το γεγονός ότι η ενέργεια που παράγεται και καταναλώνεται στο συγκεκριμένο σύστημα είναι αποσυνδεδεμένη από το δίκτυο παρέχει πολλά πλεονεκτήματα. Πιο συγκεκριμένα, εξοικονομείται ενέργεια λόγω της απουσίας τοπικών μετατροπών, γραμμών μεταφοράς και ενεργειακών απωλειών κατά τη διανομή της ενέργειας. Επιπλέον, έχει αποδειχθεί ότι

η κάλυψη του κόστους εγκατάστασης αυτού του συστήματος μπορεί να καλυφθεί από το ενεργειακό κόστος που εξοικονομείται κατά τη λειτουργία του εξεταζόμενου συστήματος [43].

Στο εξεταζόμενο σύστημα είναι ενσωματωμένες διαφορετικές τεχνικές. Πιο αναλυτικά, στο φωτοβολταϊκό σύστημα εφαρμόζεται ένα σχέδιο λειτουργίας με μέγιστη ενεργειακή απόδοση (ηMPPO), με στόχο την αντικατάσταση της τεχνικής της μέγιστης ενέργειας που εντοπίζεται (MPPT) από έναν ελεγκτή, μέσω της κατάλληλης σύνδεσης της συγκεκριμένης μονάδας του φωτοβολταϊκού συστήματος με την τάση της μπαταρίας. Επιπλέον, με στόχο την πλήρη φόρτιση της μπαταρίας, το σύστημα ελέγχου φόρτισης και εκφόρτισης της μπαταρίας χρησιμοποιεί την τεχνική διαμόρφωσης του πλάτους του παλμού (PWM). Ως αποτέλεσμα, επιτυγχάνεται η μείωση του κόστους, των ενεργειακών απωλειών, ενώ ταυτόχρονα αυξάνεται η αξιοπιστία του συστήματος [43].

Προκειμένου να επιτευχθεί η πλήρης φόρτιση της μπαταρίας, εφαρμόζεται ένα σύστημα ελέγχου φόρτισης της, το οποίο χρησιμοποιεί την τεχνική διαμόρφωσης του πλάτους των παλμών. Κατά την εκφόρτισή της, με στόχο την παροχή ενέργειας στους λαμπτήρες LED, χρησιμοποιείται το ίδιο σύστημα ελέγχου.

5.6.1 Σχέδιο της τεχνικής ηMPPO για την μέγιστη παραγωγή ενέργειας από το φωτοβολταϊκό σύστημα

Το φωτοβολταϊκό σύστημα που χρησιμοποιήθηκε αποτελείται έκτος από το φωτοβολταϊκό πάνελ, και από κάποιους συγκεντρωτές δύο πλευρών, οι οποίοι έχουν ανακλαστικές ιδιότητες. Η χρήση αυτών των συγκεντρωτών έχουν ως αποτέλεσμα την αύξηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας κατά 23% σε σύγκριση με τα φωτοβολταϊκά συστήματα που δε διαθέτουν τέτοιου τύπου συγκεντρωτές. Το φωτοβολταϊκό σύστημα που χρησιμοποιήθηκε φαίνεται στο Σχήμα 5.7.

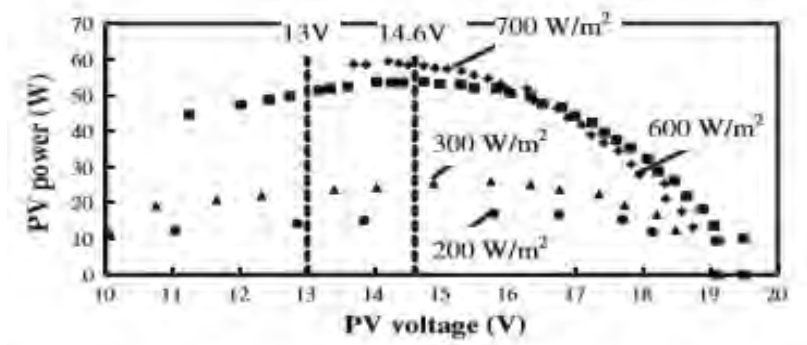


Σχήμα 5.7. Φωτοβολταϊκό σύστημα που αποτελείται από συγκεντρωτές με ανακλαστικές ιδιότητες

Η ενσωμάτωση της τεχνικής MPPT στο αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα, όπως αναφέραμε προηγουμένως, έχει ως στόχο τον εντοπισμό της λειτουργίας του στην μέγιστη παραγωγή ενέργειας. Για το συγκεκριμένο αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα, το σχέδιο που εφαρμόζεται προκειμένου να συνδεθούν μεταξύ τους η μπαταρία, η φωτοβολταϊκή μονάδα και οι λαμπτήρες τύπου LED, είναι αρκετά περίπλοκο. Συνήθως, σε αυτό απαιτείται η προσθήκη ενός συστήματος ενεργειακής διαχείρισης με στόχο να ελέγχει τη λειτουργία των τριών συνδεδεμένων παραμέτρων του συστήματος κατά τη διάρκεια φόρτισης και εκφόρτισης σύμφωνα με το φορτίο που απαιτείται κάθε φορά (ενέργεια για λειτουργία των λαμπτήρων LED). Κατά αυτόν τον τρόπο, θα επιτευχθεί η σταθερή λειτουργία της τεχνικής MPPT [44].

Όπως καταλαβαίνουμε, η ενσωμάτωση της τεχνικής MPPT στο συγκεκριμένο αυτόνομο φωτοβολταϊκό για τον εντοπισμό της μέγιστης ενεργειακής απόδοσης του αυξάνει το κόστος του συστήματος και μειώνει την αξιοπιστία του. Για αυτό το λόγο, αναπτύχθηκε ένα άλλο σχέδιο μέγιστης λειτουργίας του φωτοβολταϊκού συστήματος, που δε χρησιμοποιεί την τεχνική MPPT, αλλά στοχεύει στην κατάλληλη σύνδεση της φωτοβολταϊκής μονάδας με την τάση της μπαταρίας, έτσι ώστε να αντικατασταθεί η λειτουργία της τεχνικής MPPT [45].

Στο Σχήμα 5.8 παρουσιάζεται η ενεργειακή παραγωγή της φωτοβολταϊκής μονάδας, σε περιβαλλοντικές συνθήκες θερμοκρασίας περίπου 26°C.



Σχήμα 5.8. Ενεργειακή παραγωγή φωτοβολταϊκού συστήματος

Η περιοχή που σχηματίζεται μεταξύ των δύο κάθετων διακεκομμένων γραμμών στον οριζόντιο άξονα του σχήματος, σχετίζεται με τις τιμές τάσης στις οποίες λειτουργεί η μπαταρία του συστήματος. Σύμφωνα με το Σχήμα 5.6, γίνεται κατανοητό ότι η μπαταρία θα λειτουργήσει κοντά στη μέγιστη παραγωγή ενέργειας του φωτοβολταϊκού συστήματος, όταν τα φωτοβολταϊκά κελιά αναπτύξουν θερμοκρασία κοντά στους 50°C [43].

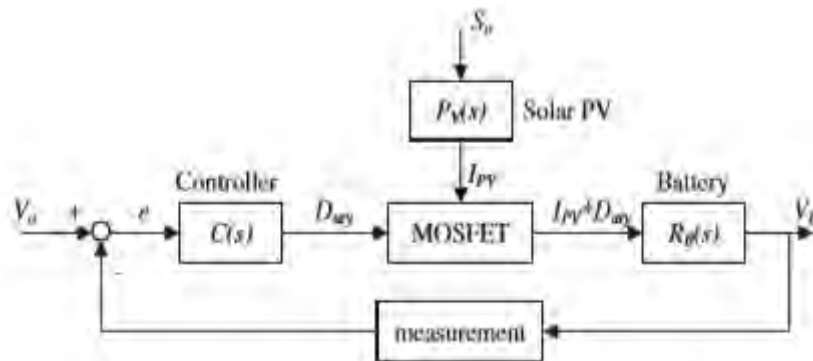
Επομένως, το σύστημα ενσωματώνει το σχέδιο nMPPO στη θέση του ελεγκτή MPPT.

5.6.2 Σύστημα ελέγχου φόρτισης της μπαταρίας

Το σύστημα ελέγχου φόρτισης της μπαταρίας είναι ένα πολύ σημαντικό θέμα. Συνήθως, η μπαταρία φορτίζεται, μέσω της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από το αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα που περιγράψαμε, μόνο στο 80% του επιπέδου δυνατής φόρτισής της, προκειμένου να αποφευχθεί η υπερφόρτιση, η οποία έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της χωρητικότητας της καθώς και της διάρκειας ζωής της. Ο περιορισμός φόρτισης της μπαταρίας έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της χωρητικότητας αποθήκευσης της καθώς και της αποδοτικότητας του συστήματος. Ο τρόπος με τον οποίο μπορεί να προστατευτεί η μπαταρία από υπερφόρτιση είναι η μείωση του ρεύματος φόρτισης, όταν η τάσης της μπαταρίας φτάσει την τάση υπερφόρτισής της.

Στο συγκεκριμένο σύστημα ελέγχου της μπαταρίας χρησιμοποιείται ένα σύστημα ελέγχου, το οποίο χρησιμοποιεί, όπως αναφέραμε και προηγουμένως, την τεχνική διαμόρφωσης του πλάτους των παλμών PWM, με στόχο τη μείωση του ρεύματος φόρτισης και τη διατήρηση της τάσης της μπαταρίας κάτω από την τιμή τάσης υπερφόρτισης V_o [43].

Προκειμένου να κατανοήσουμε καλύτερα τη λειτουργία του συστήματος ελέγχου της μπαταρίας, αυτό απεικονίζεται στο Σχήμα 5.9.



Σχήμα 5.9. Σύστημα ελέγχου μπαταρίας

Το MOSFET που παρουσιάζεται στο σχήμα είναι ένα τρανζίστορ μεταλλικού ημιαγωγού, ο οποίος χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με την τεχνική PWM, έτσι ώστε να διακόψει ή να συνεχίσει την παροχή του ρεύματος φόρτισης που παράγεται από το φωτοβολταϊκό σύστημα. Το ρεύμα που περνάει από το τρανζίστορ μπορεί να μειωθεί μέσω της μείωσης της τιμής D_{uty} , η οποία παράγεται από τον ελεγκτή [43,46].

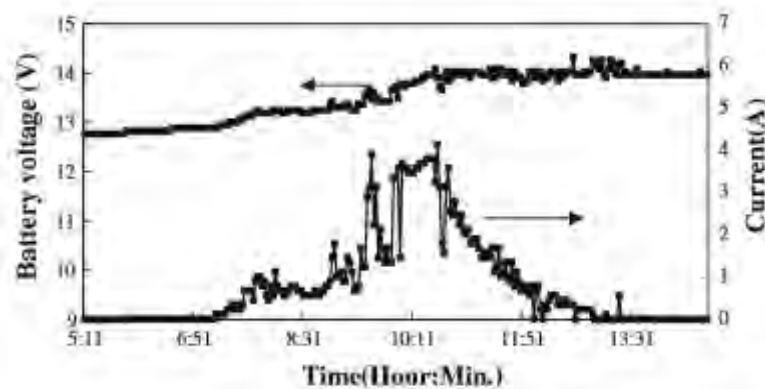
Συμπερασματικά, σύμφωνα με το Σχήμα 5.9 η λειτουργία του συστήματος ελέγχου της μπαταρίας είναι η εξής:

1. Αρχικά, το φωτοβολταϊκό σύστημα παράγει ηλεκτρική ενέργεια και επομένως τροφοδοτεί με ρεύμα φόρτισης I_{PV} το τρανζίστορ MOSFET.
2. Το τρανζίστορ MOSFET ανάλογα με την τιμή του ρεύματος I_{PV} διακόπτει ή συνεχίζει τη ροή του.
3. Η παροχή νέου μειωμένου ρεύματος I_{PV}' στην μπαταρία, για την αποφυγή υπερφόρτισης, επιτυγχάνεται από την εφαρμογή της σχέσης $I_{PV}' \cdot D_{uty}$, όπου $I_{PV}' = I_{PV} \cdot D_{uty}$.
4. Γνωρίζοντας το νέο παρεχόμενο ρεύμα στην μπαταρία I_{PV}' , το σύστημα υπολογίζει την νέα τάση V_B της μπαταρίας.
5. Η νέα τάση V_B της μπαταρίας συγκρίνεται με την τάση υπερφόρτισης V_o της μπαταρίας.

6. Εάν $V_B > V_o$, τότε ο ελεγκτής παράγει νέα μειωμένη τιμή D_{uty} , η οποία αποτελεί συνάρτηση του νέου μειωμένου ρεύματος I_{PV}' .

Επομένως, με την εφαρμογή του παραπάνω συστήματος ελέγχου της μπαταρίας, η τιμή της τάσης της μπαταρίας μπορεί να διατηρηθεί κάτω από την τιμή της τάσης υπερφόρτισης της, μέσω του ελέγχου του διαφορετικού κάθε φορά ρεύματος φόρτισης της [46].

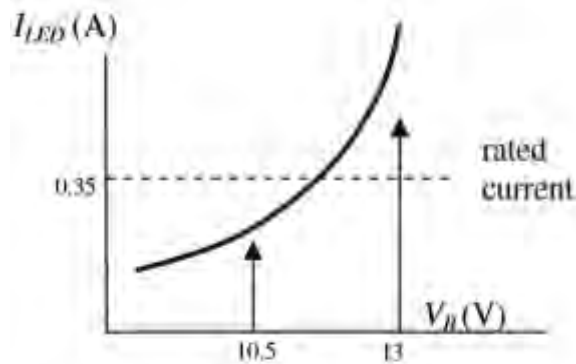
Ύστερα από την εφαρμογή του συγκριμένου συστήματος ελέγχου της μπαταρίας για να δοκιμαστεί η αξιοπιστία του, προέκυψε η ανταπόκριση του στις ανάγκες προστασίας της μπαταρίας από υπερφόρτιση. Αυτό φαίνεται και στο Σχήμα 5.10, όπου παρατηρούμε ότι η τάση της μπαταρίας δεν ξεπέρασε ποτέ την τιμή της τάσης υπερφόρτισης της, η οποία ήταν τα 14V.



Σχήμα 5.10. Δοκιμή λειτουργίας συστήματος ελέγχου μπαταρίας

5.6.3 Σύστημα ελέγχου εκφόρτισης της μπαταρίας για την παροχή φωτισμού με χρήση λαμπτήρων τύπου LED

Η χρήση των λαμπτήρων τύπου LED συμβάλουν στην αποδοτικότητα του συστήματος, χάρη στα χαρακτηριστικά τους φόρτισης με συνεχές ρεύμα. Πιο συγκεκριμένα, στο εξεταζόμενο σύστημα τα φωτιστικά τύπου LED έχουν την ικανότητα να συνδεθούν άμεσα με την μπαταρία. Δυστυχώς όμως, αυτό το γεγονός μπορεί να δημιουργήσει κάποια προβλήματα, τα οποία οφείλονται στο γεγονός ότι οι λαμπτήρες τύπου LED είναι «ευαίσθητοι» στην τάση. Πιο αναλυτικά, αυτό παρατηρείται στο Σχήμα 5.11.



Σχήμα 5.11. Γραφική παράσταση συνάρτησης της τάσης της μπαταρίας με το ρεύμα στους λαμπτήρες τύπου LED

Σύμφωνα με το Σχήμα 5.11 παρατηρούμε ότι για μικρή αύξηση της τάσης της μπαταρίας, συνεπάγεται πολύ μεγάλη αύξηση (εκθετική) της τιμής του ρεύματος I_{LED} , που παρέχεται στους λαμπτήρες τύπου LED. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με την αλλαγή της τάσης της μπαταρίας κατά τα διαφορετικά στάδια φόρτισής της με ρεύμα που εξαρτάται από την ηλιακή ακτινοβολία δημιουργεί πρόβλημα στην ομαλή λειτουργία του συστήματος, το οποίο πρέπει να αντιμετωπιστεί.

Μια μπαταρία προκειμένου να αρχίσει να αποθηκεύει ενέργεια μέχρι να εξαντληθεί η δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας λειτουργεί συνήθως με τιμές τάσης από 10.5V, όπου η μπαταρία αρχίζει να φορτίζεται, μέχρι 13V, όπου αν ξεπεραστεί αυτή η τιμή, η μπαταρία υπερφορτίζεται. Όπως παρατηρούμε και από το Σχήμα 5.10, οι λαμπτήρες με ρεύμα μέγιστης λειτουργίας 0.35 A θα καταστραφούν για τιμές τάσης της μπαταρίας από περίπου 12V και πάνω.

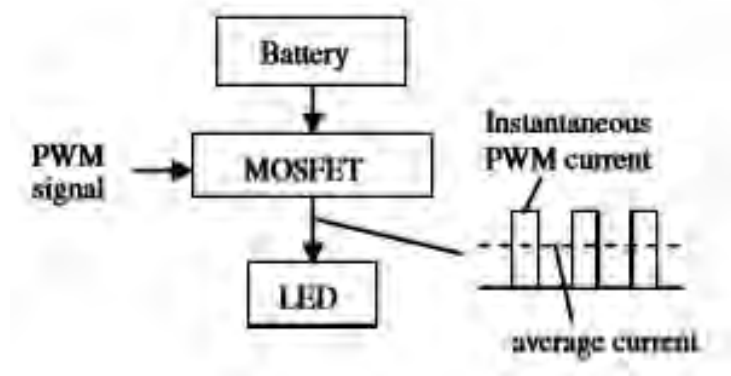
Επομένως, για να διασφαλίσουμε τόσο την καλή λειτουργία του φωτοβολταϊκού συστήματος, τη φόρτιση της μπαταρίας, όσο και την εκφόρτιση της μπαταρίας, προκειμένου να επιτευχθεί η ομαλή λειτουργία του συστήματος, είναι απαραίτητη η ενσωμάτωση ενός συστήματος ελέγχου εκφόρτισης της μπαταρίας για την παροχή φωτισμού με τη χρήση λαμπτήρων τύπου LED.

Ένας τρόπος να ελεγχθεί το σύστημα εκφόρτισης της μπαταρίας αποτελεί η ενσωμάτωση ενός μετατροπέα στους λαμπτήρες τύπου LED του συστήματος. Πιο αναλυτικά, η λειτουργία των συγκεκριμένων μετατροπέων αφορά στην μετατροπή της ασταθούς τάσης της μπαταρίας σε ένα συνεχές ρεύμα που θα παρέχεται στους λαμπτήρες. Ως αποτέλεσμα εφαρμογής αυτού του σχεδίου ελέγχου εκφόρτισης της μπαταρίας, θα δημιουργηθεί ένα ποσό απωλειών ενέργειας περίπου στο 15% της συνολικής

παρεχόμενης ενέργειας από τη μπαταρία στους λαμπτήρες, ενώ ταυτόχρονα θα μειωθεί η αξιοπιστία του συστήματος λόγω πρόσθετων παραμέτρων [43].

Επομένως, προς αποφυγή των παραπάνω, προτάθηκε ένα διαφορετικό σύστημα ελέγχου εκφόρτισης της μπαταρίας, του οποίου η λειτουργία βασίζεται στην τεχνική διαμόρφωσης του πλάτους του παλμού PWM. Πιο συγκεκριμένα, αυτή η τεχνική ενσωματώνεται στους λαμπτήρες τύπου LED, προκειμένου να διατηρηθεί η μέση τιμή του παρεχόμενου σε αυτούς ρεύματος κάτω από την τιμή ρεύματος καταστροφής τους. Επομένως, μέσω αυτού του συστήματος ελέγχου εκφόρτισης της μπαταρίας θα επιτευχθεί η άμεση σύνδεση των λαμπτήρων τύπου LED με την μπαταρία, χωρίς να περιορίζεται η ομαλή λειτουργία του συστήματος [43].

Στο Σχήμα 5.12 παρουσιάζεται το τελικό σύστημα ελέγχου εκφόρτισης μπαταρίας που περιγράψαμε.



Σχήμα 5.12. Σύστημα ελέγχου εκφόρτισης της μπαταρίας

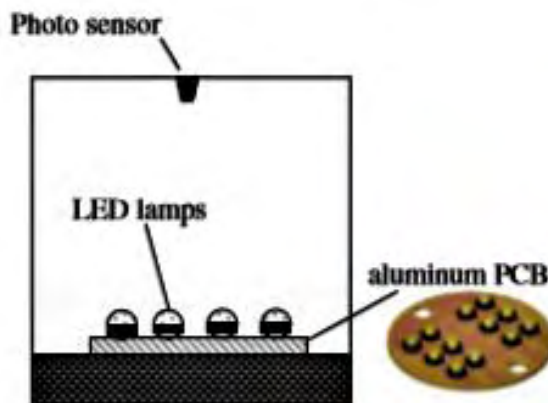
Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με το μοντέλο του συστήματος ελέγχου που παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.12, η μπαταρία λειτουργεί ως πηγή τάσης, η οποία παρέχει ένα ρεύμα I_B στο τρανζίστορ MOSFET. Αυτό με τη σειρά του σε συνδυασμό με ένα σήμα που λαμβάνει από την τεχνική PWM, εάν η τιμή του παρεχόμενου ρεύματος I_B είναι μεγαλύτερη από την τιμή του ρεύματος μέγιστης λειτουργίας I_{max} του λαμπτήρα τύπου LED, τότε παράγει ένα νέο ρεύμα I_B' , όπου $I_B' < I_{max}$. Τέλος, το νέο ρεύμα I_B' , παρέχεται στους λαμπτήρες τύπου LED για τη λειτουργία τους και επομένως για την παροχή φωτισμού.

Προκειμένου να διαπιστωθεί η αξιοπιστία του περιγραφόμενου συστήματος ελέγχου εκφόρτισης της μπαταρίας, έγιναν κάποια πειράματα. Πιο συγκεκριμένα, στόχος αυτών των πειραμάτων ήταν η διαπίστωση πιθανής καταστροφής των λαμπτήρων τύπου LED,

μέσω της χρήσης ενός αισθητήρα, ο οποίος μετράει την ένταση του φωτός των λαμπτήρων.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του πειράματος δεν διαπιστώθηκε καμία καταστροφή λαμπτήρα και επομένως μπορούμε να θεωρήσουμε το εξεταζόμενο σύστημα ελέγχου εκφόρτισης μπαταρίας αξιόπιστο.

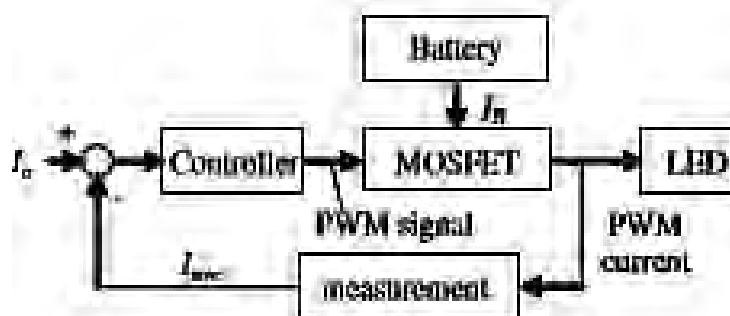
Στο Σχήμα 5.13 απεικονίζεται ο χώρος του πειράματος.



Σχήμα 5.13. Χώρος πειράματος

5.6.4 Σύστημα ελέγχου εκφόρτισης των λαμπτήρων τύπου LED

Το σύστημα ελέγχου εκφόρτισης των λαμπτήρων τύπου LED παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.14.



Σχήμα 5.14. Σύστημα ελέγχου εκφόρτισης των λαμπτήρων τύπου LED

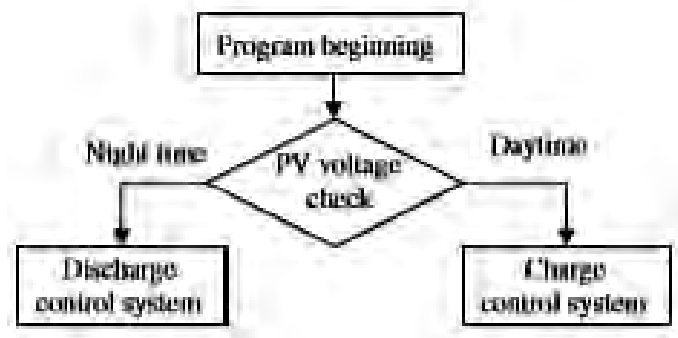
Πιο αναλυτικά, σύμφωνα με το παραπάνω σχήμα, ο ελεγκτής, ο οποίος χρησιμοποιεί την τεχνική PWM, ενσωματώνεται σε έναν μικρο-επεξεργαστή, προκειμένου να παράγει ένα σήμα PWM. Αυτό το σήμα μεταφέρεται στο τρανζίστορ MOSFET, το οποίο παράγει και παρέχει ρεύμα προσαρμοσμένο I_{PWM} σύμφωνα με το μέγιστο ρεύμα λειτουργίας I_o του λαμπτήρα. Στη συνέχεια, γίνονται αναλύσεις του ρεύματος I_{PWM} , με στόχο τον καθορισμό

της μέσης τιμής του ρεύματος I_{ave} που παρέχεται στους λαμπτήρες. Τέλος, το I_{ave} συγκρίνεται με το I_o , και εάν $I_{ave} > I_o$, τότε το ρεύμα προσαρμόζεται [43].

5.6.5 Κεντρικό σύστημα ελέγχου του συστήματος φωτισμού με λαμπτήρες τύπου LED που λειτουργεί με ηλιακή ενέργεια

Ο κεντρικός έλεγχος του εξεταζόμενου συστήματος μπορεί να επιτευχθεί μέσω της ενσωμάτωσης σε αυτό ενός μικρο-επεξεργαστή. Πιο αναλυτικά, η λειτουργία του βασίζεται σε έναν αναλογικό-ψηφιακό μετατροπέα (ADC), οποίος έχει τη δυνατότητα να ανιχνεύσει την ώρα ανατολής του ήλιου (αρχή της ημέρας) καθώς και την ώρα δύσης του ηλίου (αρχή της νύχτας), μέσω της μέτρησης της τάσης του φωτοβολταϊκού συστήματος.

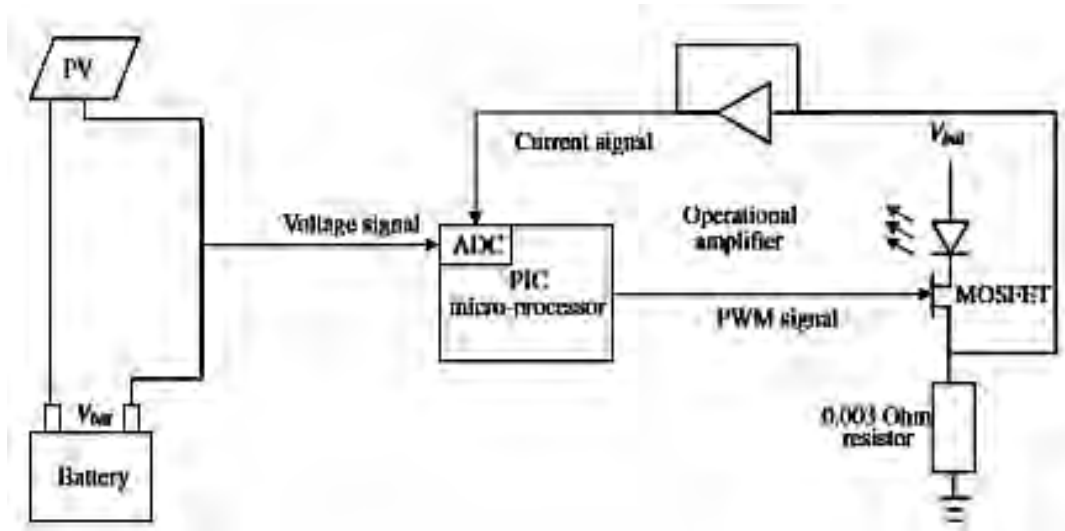
Ο αλγόριθμος του κεντρικού συστήματος ελέγχου παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.15.



Σχήμα 5.15. Αλγόριθμος κεντρικού συστήματος ελέγχου

Εκτός από τη δυνατότητα του μικρο-επεξεργαστή να μετράει την τάση του φωτοβολταϊκού συστήματος, αυτός έχει την ικανότητα να μετράει την τάση της μπαταρίας κατά τη λειτουργία φόρτισης. Επιπλέον, το κεντρικό σύστημα ελέγχου του εξεταζόμενου συστήματος έχει τη δυνατότητα να μετράει το ρεύμα κατά την εκφόρτιση της μπαταρίας, μέσω μίας αντίστασης 0.003Ω . Αυτή συνδέεται με το τρανζίστορ MOSFET, που χρησιμοποιεί την τεχνική PWM και την τάση της μπαταρίας, και μέσω του νόμου του Ohm υπολογίζεται το ρεύμα εκφόρτισης. Επιπλέον, στο κεντρικό σύστημα ελέγχου χρησιμοποιείται ένας ενισχυτής, που στοχεύει στην ενίσχυση του σήματος της τάσης, που χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με την αντίσταση 0.003Ω , για τον υπολογισμό του ρεύματος εκφόρτισης. Τέλος, τα δεδομένα του ρεύματος εκφόρτισης της μπαταρίας και της τάσης φόρτισης της μπαταρίας στέλνονται στη μονάδα του μικρο-επεξεργαστή [43].

Το κύκλωμα του κεντρικού συστήματος ελέγχου του συστήματος φωτισμού με λαμπτήρες τύπου LED που λειτουργεί με ηλιακή ενέργεια, που περιγράψαμε, παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.16.



Σχήμα 5.16. Κύκλωμα κεντρικού συστήματος ελέγχου

Έχοντας μελετήσει το σύστημα φωτισμού με λαμπτήρες τύπου LED που λειτουργεί με ηλιακή ενέργεια, το οποίο χαρακτηρίζεται από το υψηλής απόδοσης σύστημα ελέγχου φόρτισης και εκφόρτισης της μπαταρίας και των λαμπτήρων, από τη χρήση του σχεδίου nMPPO, για την βέλτιστη απόδοση του φωτοβολταϊκού συστήματος καθώς και την εφαρμογή της τεχνικής PWM, για έλεγχο της φόρτισης και εκφόρτισης της μπαταρίας, καθώς γνωρίζοντας την αξιοπιστία και την αποδοτικότητά του, μέσω των πειραμάτων που έγιναν, γίνεται αντιληπτή η συμβολή της ενσωμάτωσής του στο βιομηχανικό χώρο, προκειμένου να επιτευχθεί ο στόχος της εξοικονόμησης ενέργειας σε αυτόν.

5.7 Συμπέρασμα

Στη σύγχρονη εποχή, η εξοικονόμηση ενέργειας αποτελεί ένα από τα πιο απαιτητικά θέματα που ερευνούνται. Ταυτόχρονα, είναι γεγονός ότι τα μεγαλύτερα ποσά ανεκμετάλλευτης ενέργειας είναι αποτέλεσμα της μη αποδοτικής χρήσης της ηλεκτρικής ενέργειας που καταναλώνεται από συσκευές τεχνητού φωτισμού, προκειμένου να καλυφθούν οι ανάγκες παροχής φωτισμού. Επιπλέον, η δυσκολία ελέγχου της ανεκμετάλλευτης ενέργειας, λόγω της αδυναμίας ελέγχου της έντασης του παρεχόμενου φωτισμού σε ένα χώρο, σε συνδυασμό με την αναξιοπιστία των χρηστών να διακόψουν χειρονακτικά την παροχή φωτισμού, όταν αυτή δεν χρειάζεται, προκειμένου να

εξοικονομηθεί ενέργεια, οδήγησε στην ανάγκη ενσωμάτωσης «έξυπνων» και υψηλά αποδοτικών συστημάτων φωτισμού στο βιομηχανικό χώρο. Ο στόχος της εισαγωγής των νέων αυτών τεχνολογιών στα βιομηχανικά κτίρια, κάποιες από τις οποίες αναλύσαμε σε αυτό το κεφάλαιο, είναι ο περιορισμός της κατανάλωσης ανεκμετάλλευτης ενέργειας καθώς και η βέλτιστη απόκριση στις ανάγκες φωτισμού σε αυτά.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ

6.1 Η έννοια του αυτοματισμού

Η έννοια του αυτοματισμού αφορά στην τυποποίηση μιας διαδικασίας μέσω της εύρεσης συγκεκριμένων βημάτων, τα οποία πρέπει να εκτελεστούν προκειμένου να παραχθεί το ανάλογο επιθυμητό αποτέλεσμα. Συνεπώς, ο αυτοματισμός σχετίζεται με τη δημιουργία ενός αλγορίθμου, κατά την εφαρμογή του οποίου θα εκτελεστούν οι προσδοκώμενες κάθε φορά διεργασίες. Ταυτόχρονα, η έννοια του αυτοματισμού αφορά στην κατασκευή ενός αυτόνομου μηχανισμού, ο οποίος αφού λάβει τα κατάλληλα δεδομένα εισόδου, θα εφαρμόσει τον παραπάνω αλγόριθμο χωρίς την ανθρώπινη παρέμβαση.

Τα συστήματα αυτοματισμού σχετίζονται άμεσα με την εξοικονόμηση ενέργειας και χρησιμοποιούν τεχνολογίες, όπως εξειδικευμένους υπολογιστές υψηλής αντοχής ή προγραμματιζόμενους λογικούς ελεγκτές (PLC). Ο στόχος αυτών των τεχνολογιών είναι ο συγχρονισμός των δεδομένων εισόδων από αισθητήρες με την παροχή εντολών σε συσκευές εξόδου. Επιπλέον, η ντετερμινιστική λειτουργία των συστημάτων αυτοματισμού έχει ως αποτέλεσμα τον αυστηρό έλεγχο διεργασιών, μέσω του κατάλληλου προγραμματισμού των λογικών ελεγκτών.

6.2 Η σημασία ενσωμάτωσης των συστημάτων κτιριακής ενεργειακής διαχείρισης (BEMS) στα βιομηχανικά κτίρια

Τα συστήματα κτιριακής ενεργειακής διαχείρισης (BEMS) αποτελούν μια υποκατηγορία των συστημάτων αυτοματισμού (MAS) ή αλλιώς των συστημάτων κτιριακού ελέγχου (BCS). Πιο συγκεκριμένα, ο ρόλος τους αφορά στον έλεγχο των συστημάτων θέρμανσης, εξαερισμού, κλιματισμού και φωτισμού, μέσω του ελέγχου των κύριων παραμέτρων τους. Τα συστήματα κτιριακής ενεργειακής διαχείρισης αποτελούν απαραίτητη συνιστώσα των μοντέρνων βιομηχανικών κτιρίων, προκειμένου να καλυφθεί η ανάγκη εξοικονόμησης ενέργειας και ταυτόχρονα να διατηρηθούν οι συνθήκες άνεσης σε αυτά. Το γεγονός ότι το 60% της καταναλισκόμενης ηλεκτρικής ενέργειας δαπανάται για την κάλυψη των κτιριακών απαιτήσεων οδηγεί στην ανάγκη ενσωμάτωσης των συστημάτων

κτιριακής ενεργειακής διαχείρισης στα κτίρια των βιομηχανιών, με απώτερο σκοπό την εξοικονόμηση ενέργειας [47].

Έχοντας κατανοήσει την έννοια του αυτοματισμού καθώς και την καθοριστική συμβολή των συστημάτων κτιριακής ενεργειακής διαχείρισης στην εξοικονόμηση ενέργειας στο βιομηχανικό χώρο, θα μελετήσουμε ένα σύστημα διαχείρισης κτιριακής ενέργειας, το οποίο χρησιμοποιεί μία πολυπρακτορική μεθοδολογία ελέγχου λήψης απόφασης.

6.3 Σύστημα διαχείρισης κτιριακής ενέργειας που χρησιμοποιεί πολυπρακτορική μεθοδολογία ελέγχου λήψης απόφασης

Το σύστημα διαχείρισης κτιριακής ενέργειας που χρησιμοποιεί πολυπρακτορική μεθοδολογία ελέγχου λήψης απόφασης έχει ως στόχο τον έλεγχο των συστημάτων θέρμανσης, ψύξης και της ηλεκτρικής ενέργειας, που χρησιμοποιούνται στο βιομηχανικό χώρο.

6.3.1 Δομή συστήματος διαχείρισης κτιριακής ενέργειας που χρησιμοποιεί πολυπρακτορική μεθοδολογία ελέγχου λήψης απόφασης

Οι κτιριακές μονάδες παραγωγής, αποθήκευσης καθώς και κατανάλωσης ενέργειας του συστήματος στις οποίες ενσωματώνεται το εξεταζόμενο BEMS, προκειμένου να επιτευχτεί η υψηλή ενεργειακή αποδοτικότητα και εξοικονόμηση, παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.1.

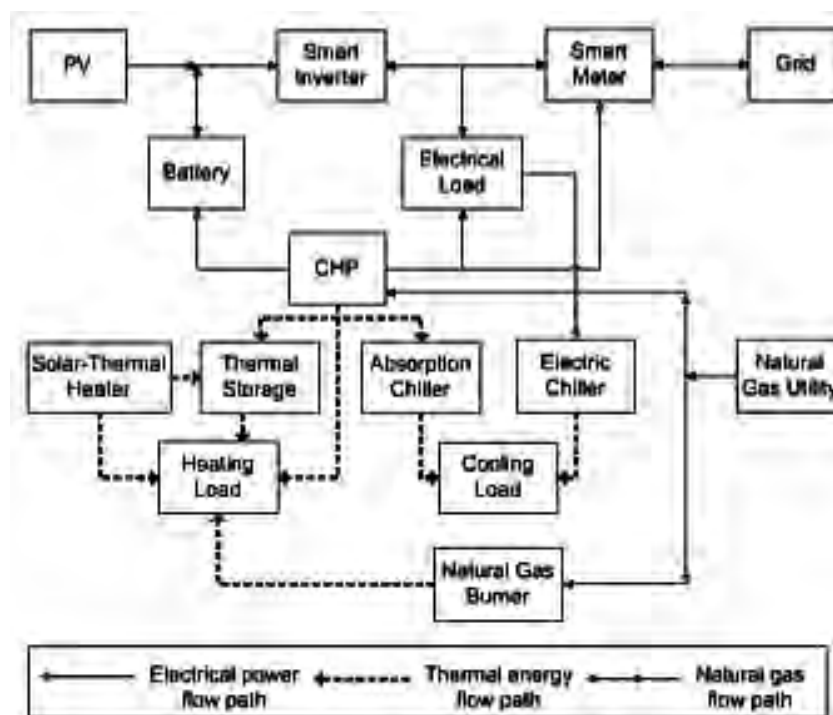
Όπως είπαμε και προηγουμένως, το περιγραφόμενο BEMS έχει τρεις ζώνες ενδιαφέροντος και συγκεκριμένα τη ζώνη θέρμανσης, ψύξης και ηλεκτρικής παραγωγής, κατανάλωσης και αποθήκευσης. Η κάλυψη των αναγκών ηλεκτρικής ενέργειας θα μπορούσε να γίνει μέσω της χρήσης συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, με στόχο τη μέγιστη ενεργειακή εξοικονόμηση.

Στο συγκεκριμένο σύστημα, η ηλεκτρική παραγωγή γίνεται από ένα φωτοβολταϊκό σύστημα (PV) συνδεδεμένο στο δίκτυο και από ένα σύστημα συμπαραγωγής θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας (CHP). Οι μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας συνδυάζονται με μία μονάδα αποθήκευσης ενέργειας, και πιο συγκεκριμένα μια μπαταρία. Μέσω των συστημάτων παραγωγής και αποθήκευσης, γίνεται η τροφοδοσία ηλεκτρικής ενέργειας στα φορτία του συστήματος [48].

Η μονάδα θέρμανσης του κτιρίου αποτελείται από ένα ηλιακό σύστημα θέρμανσης και από την ανακτώμενη θερμότητα της μονάδας συμπαραγωγής ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας, η οποία λειτουργεί με φυσικό αέριο. Επιπλέον, αυτή αποτελείται από ένα σύστημα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας. Τα φορτία θέρμανσης διαχωρίζονται ανάλογα με το μέγεθος του χώρου που χρειάζεται θέρμανση και τις ανάγκες που υπάρχουν για ζεστό νερό.

Η μονάδα ψύξης αποτελείται από μία κλιματιστική μονάδα και έναν ψύκτη απορρόφησης, ο οποίος χρησιμοποιεί την ανακτώμενη θερμική ενέργεια από τη μονάδα συμπαραγωγής ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας, προκειμένου να παρέχει κάλυψη του αναγκών ψύξης του χώρου.

Το εξεταζόμενο BEMS δεν είναι απαραίτητο να ενσωματωθεί μόνο σε ένα σύστημα που αποτελείται από τις μονάδες που περιγράψαμε, αφού η επιλογή του κάθε συστήματος αποτελεί συνάρτηση του μεγέθους του βιομηχανικού κτιρίου και των ενεργειακών του αναγκών [48].



Σχήμα 6.1. Παράμετροι συστήματος στο οποίο ενσωματώνεται το BEMS

6.3.2 Ενεργειακή διαστασολόγηση του βιομηχανικού κτιρίου

Αρχικά, με στόχο την εξοικονόμηση ενέργειας σε ένα βιομηχανικό κτίριο απαιτείται η ενεργειακή διαστασολόγηση των τριών ζωνών που αναφέραμε προηγουμένως, έτσι ώστε ταυτόχρονα με τη λειτουργία του συστήματος παραγωγής ενέργειας να χρησιμοποιηθεί η ανεκμετάλλευτη ανακτώμενη θερμική ενέργεια, προκειμένου να αποφευχθεί η μείωση της ενεργειακής αποδοτικότητας του συστήματος. Η ενεργειακή διαστασολόγηση αφορά σε τρεις βασικές παραμέτρους και συγκεκριμένα στην παρακολούθηση του ηλεκτρικού φορτίου, στην παροχή του ηλεκτρικού φορτίου καθώς και στην ακολουθία του θερμικού φορτίου [48].

Κατά τη διάρκεια διαστασολόγησης, μέσω της παρακολούθησης του ηλεκτρικού φορτίου, το κτίριο θα πρέπει να θεωρηθεί αποκομμένο από το δίκτυο, έτσι ώστε να είναι ενεργειακά ανεξάρτητο από την υπηρεσία παροχής ενέργειας. Το γεγονός αυτό δεν είναι αποδοτικό για τα κτίρια που είναι σχεδιασμένα να συνδεθούν στο δίκτυο. Πιο αναλυτικά, σε αυτά τα κτίρια, υπάρχει η δυνατότητα πώλησης ενέργειας στο δίκτυο, η οποία δεν χρησιμοποιείται από το κτίριο τις ώρες που η ζήτηση ενέργειας είναι πολύ χαμηλή, με στόχο να αντισταθμιστεί η αγοραζόμενη ενέργεια από το δίκτυο κατά τη λειτουργία του κτιρίου σε υψηλή ενεργειακή ζήτηση.

Επιπλέον, η ζήτηση θερμικής ενέργειας είναι υψηλή κατά τη διάρκεια της ημέρας, ενώ αυτή μειώνεται σημαντικά κατά τη διάρκεια της νύχτας. Το γεγονός αυτό οδηγεί στην αύξηση του ποσού της ανεκμετάλλευτης θερμικής ενέργειας κατά τις νυχτερινές ώρες και στην ανάγκη συμπληρωματικών boiler την ημέρα. Ως αποτέλεσμα αυτού, αποτελεί το πρόσθετο ενεργειακό κόστος και κόστος εγκατάστασης.

Για αυτό το λόγο, στο συγκεκριμένο σύστημα η ενεργειακή διαστασολόγηση του κτιρίου αφορά, κατά κύριο λόγο, στην ακολουθία του θερμικού φορτίου. Η παραγωγή θερμικής ενέργειας βασίζεται σε ένα boiler, το οποίο παρέχει ζεστό νερό για τη θέρμανση του κτιρίου και αποτελεί πηγή θερμικής ενέργειας του ψύκτη απορρόφησης, προκειμένου να καλυφθούν οι ανάγκες ψύξης του κτιρίου.

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί ένα πρόσθετο σύστημα, το οποίο μπορεί να ισορροπήσει μερικώς τις ανάγκες ζήτησης ενέργειας καθ' όλη τη διάρκεια λειτουργίας του συστήματος, μέσω της επιστροφής της περίσσειας ενέργειας του κτιρίου στο δίκτυο

στο οποίο είναι συνδεδεμένο. Δεδομένου ότι το θερμικό φορτίο σε ένα βιομηχανικό κτίριο μπορεί να είναι μεγαλύτερο από το ηλεκτρικό, η ενεργειακή του διαστασολόγηση με βάση το θερμικό του φορτίο συντελεί στην μέγιστη ενεργειακή απόδοση του συστήματος διαχείρισης ενέργειας του κτιρίου που θα ενσωματωθεί σε αυτό [48].

6.3.3 Πράκτορες συστήματος BEMS

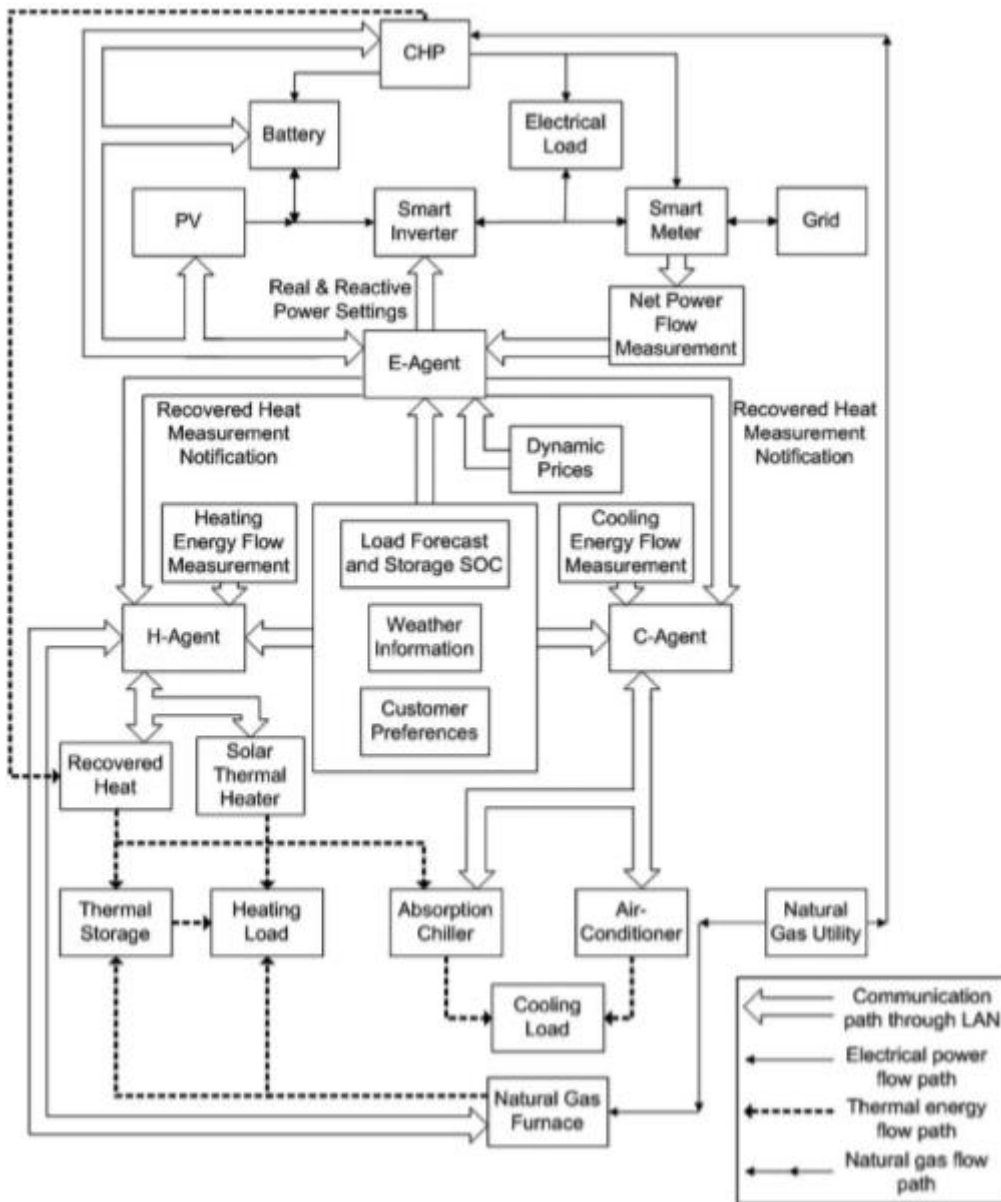
Η διαχείριση της ενέργειας του κτιρίου επιτυγχάνεται μέσω ενός πολυπρακτορικού συστήματος. Σε κάθε διαφορετική ζώνη ενδιαφέροντος του κτιρίου, δηλαδή αυτών της θέρμανσης, της ψύξης και της ηλεκτρικής ενέργειας, οι διεργασίες μετατροπής, αποθήκευσης και κατανάλωσης της ενέργειας ελέγχονται από τον πράκτορα που βρίσκεται στη αντίστοιχη ζώνη.

Πιο αναλυτικά, οι πράκτορες που συμμετέχουν στο συγκεκριμένο σύστημα διαχείρισης είναι τρεις [48]:

1. Ο πράκτορας E, ο οποίος είναι υπεύθυνος για τη ζώνη ηλεκτρικής ενέργειας,
2. Ο πράκτορας H, οποίος είναι υπεύθυνος για τη ζώνη θέρμανσης και
3. Ο πράκτορας C, ο οποίος είναι υπεύθυνος για τη ζώνη ψύξης.

Αυτοί οι τρεις πράκτορες επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω ενός τοπικού δικτύου, όταν η ενεργειακή διαχείριση δεν μπορεί να γίνει από έναν πράκτορα, αλλά απαιτείται η συνεργασία των πρακτόρων για την εκτέλεση μιας σειράς διεργασιών.

Στο Σχήμα 6.2 παρουσιάζεται το σύστημα διαχείρισης της ενέργειας του κτιρίου μέσω των τριών πρακτόρων που αναφέραμε.



Σχήμα 6.2 Σύστημα διαχείρισης κτιριακής ενέργειας μέσω ενός πολυπρακτορικού συστήματος

Αφού αναφερθήκαμε στο σύστημα διαχείρισης κτιριακής ενέργειας που χρησιμοποιεί πολυπρακτορική μεθοδολογία λήψης απόφασης, με στόχο τη διαχείριση της ενέργειας θέρμανσης, ψύξης καθώς και της ηλεκτρικής ενέργειας, που χρησιμοποιείται στο βιομηχανικό κτίριο, αξίζει να μελετήσουμε ένα πρόσθετο σύστημα, που έχει εξειδικευμένη λειτουργία και πρόκειται για το σύστημα διαχείρισης της κτιριακής

θερμικής ενέργειας μέσω του ελέγχου του συστήματος αποθήκευσης θερμικής ενέργειας [50].

6.4 Σύστημα διαχείρισης κτιριακής θερμικής ενέργειας μέσω του ελέγχου του συστήματος αποθήκευσης της θερμικής ενέργειας

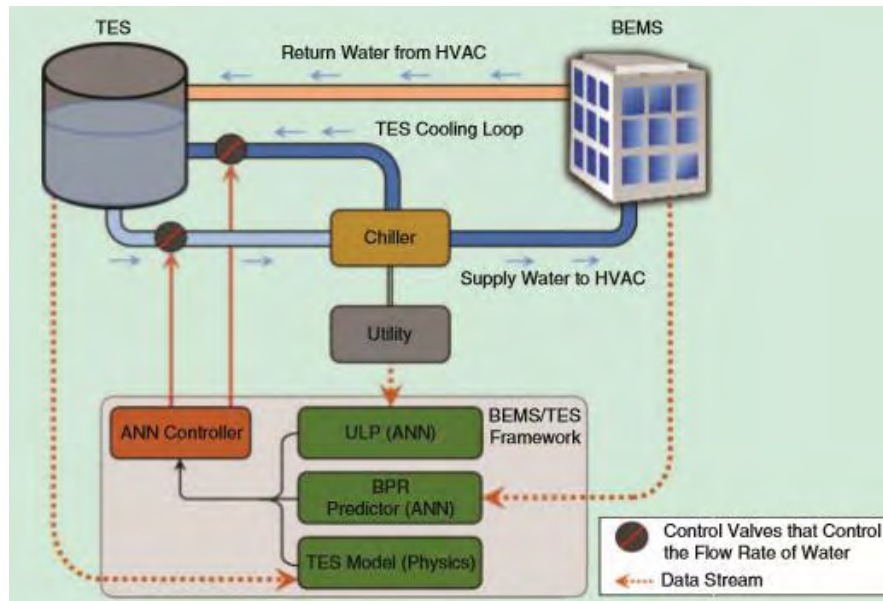
Στο εξεταζόμενο σύστημα, η διαχείριση της κτιριακής θερμικής ενέργειας επιτυγχάνεται μέσω του ελέγχου του συστήματος αποθήκευσης θερμικής ενέργειας (TES). Αυτός ο έλεγχος βασίζεται στις τεχνικές CI.

6.4.1 Δομή και λειτουργία του ελέγχου του συστήματος αποθήκευσης της θερμικής ενέργειας που βασίζεται στις τεχνικές CI

Οι αλγόριθμοι CI έχουν τη δυνατότητα να διαχειριστούν πολλά δεδομένα, ενώ μπορούν να εντοπίσουν πιθανή ανώμαλη λειτουργία ενός συστήματος, να προβλέψουν μια διεργασία και να βελτιώσουν τη λειτουργικότητα ενός συστήματος. Κάποιες τεχνικές που αποτελούν υποκατηγορία των CI τεχνικών και χρησιμοποιούνται στον έλεγχο του συστήματος αποθήκευσης της θερμικής ενέργειας αποτελεί η τεχνική ANN, η τεχνική πρόβλεψης κτιριακής ενέργειας (BPR) καθώς και η τεχνική πρόβλεψης της χρησιμότητας του φορτίου (ULP) [47].

Βασικός λόγος επιλογής του συστήματος ελέγχου που χρησιμοποιεί τις τεχνικές CI, με στόχο τη διαχείριση της κτιριακής θερμικής ενέργειας, αποτελεί η εκμετάλλευση της αποδοτικότητας των «έξυπνων» στρατηγικών ελέγχου.

Στο Σχήμα 6.3 παρουσιάζεται η αρχιτεκτονική του εξεταζόμενου συστήματος ελέγχου για την κάλυψη των αναγκών ψύξης.



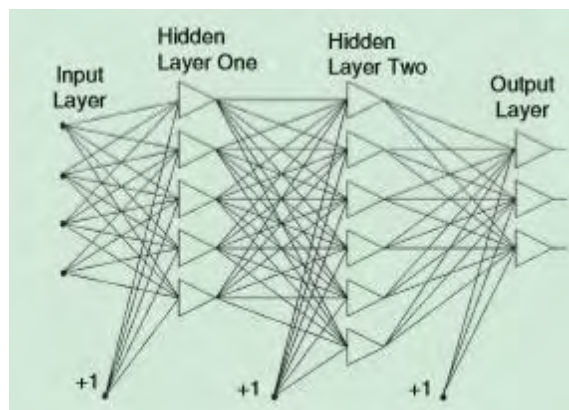
Σχήμα 6.3. Αρχιτεκτονική του ελέγχου του συστήματος της αποθήκευσης θερμικής ενέργειας

Η τεχνική πρόβλεψης BPR παρέχει πληροφορίες για τις μελλοντικές ενεργειακές ανάγκες του κτιρίου σε έναν ελεγκτή, προκειμένου αυτός να αποφασίσει αν θα χρησιμοποιήσει το σύστημα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα, διεξάγει προβλέψεις βασιζόμενη σε κάποια μοτίβα, που αφορούν στην ενέργεια που χρησιμοποιείται για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του κτιρίου και στον καιρό. Προκειμένου να χρησιμοποιηθούν τα δεδομένα για τις ενεργειακές ανάγκες του κτιρίου και τον καιρό, η τεχνική BPR χρησιμοποιεί τα δεδομένα εξόδου των αισθητήρων του συστήματος διαχείρισης κτιριακής ενέργειας. Στη συνέχεια, σύμφωνα με αυτά καθορίζει το υπάρχον ενεργειακό επίπεδο του κτιρίου σε σχέση με τις μελλοντικές του ενεργειακές ανάγκες [47].

Η τεχνική ULP παρέχει στον ελεγκτή τα δεδομένα εξόδου από τις προβλέψεις που αφορούν στη χρήση συγκεκριμένων φορτίων. Πιο συγκεκριμένα, αυτή η τεχνική έχει στόχο να παρέχει πληροφορίες στον ελεγκτή, που αφορούν στο μέγιστο φορτίο κατά τη λειτουργία του συστήματος μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Αυτές οι πληροφορίες συντελούν στην «περικοπή» (μείωση) των μέγιστων φορτίων. Ένας τρόπος να επιτευχθεί αυτό είναι ο σχεδιασμός του ελεγκτή να χρησιμοποιεί περισσότερη ενέργεια από το σύστημα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας, όταν παρουσιάζεται μέγιστο φορτίο [47].

Ο ελεγκτής, που βασίζεται στην τεχνική ANN, χρησιμοποιεί ως δεδομένα εισόδου τα δεδομένα εξόδου των τεχνικών πρόβλεψης BPR και ULP καθώς και την ενεργειακή διαθεσιμότητα στο σύστημα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας.

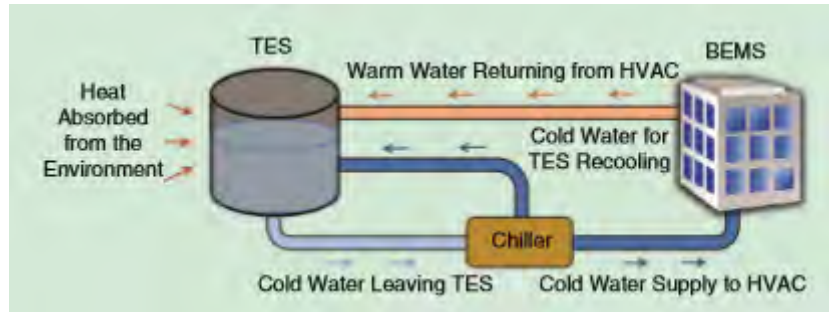
Πιο συγκεκριμένα, αυτή η τεχνική βασίζεται στη λειτουργία των νευρωνικών δικτύων, τα οποία έχουν τη δυνατότητα να παράγουν δεδομένα εξόδου, βασιζόμενα στα πολλά δεδομένα εισόδου. Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα οργανώνονται σε πολλά διασυνδεδεμένα επίπεδα, το οποία μπορεί να είναι επίπεδα εισόδου, εξόδου ή κρυμμένα επίπεδα. Τα δεδομένα εισόδου συνδέονται στο επίπεδο εισόδου του νευρωνικού δικτύου και τα δεδομένα εξόδου παράγονται από το επίπεδο εξόδου του νευρωνικού δικτύου. Τα κρυμμένα επίπεδα βρίσκονται μεταξύ των επιπέδων εισόδου και εξόδου και μπορεί να είναι παραπάνω από ένα. Κατά αυτόν τον τρόπο, δημιουργείται ένα διασυνδεδεμένο δίκτυο από νευρώνες, οι οποίοι συνδυάζονται, προκειμένου να παράγουν ένα αποτέλεσμα, βασιζόμενοι σε πολλά δεδομένα και συγκρίσεις. Ένα τεχνητό νευρωνικό δίκτυο ANN παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.4.



Σχήμα 6.4. Τεχνητό νευρωνικό δίκτυο ANN

Η μεθοδολογία που περιγράψαμε έχει ως στόχο τη βέλτιστη διαχείριση της ενέργειας που χρησιμοποιείται από το σύστημα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας για την διαχείριση των αναγκών θέρμανσης και ψύξης του κτιρίου. Πιο αναλυτικά, στόχος του περιγραφόμενου συστήματος αποτελεί ο έλεγχος του συστήματος αποθήκευσης θερμικής ενέργειας, έτσι ώστε να επιτευχθεί η βέλτιστη ισορροπία μεταξύ της ενέργειας που χρησιμοποιείται από τη μονάδα θέρμανσης του κτιρίου και του συστήματος αποθήκευσης θερμικής ενέργειας [51].

Στο Σχήμα 6.5 παρουσιάζεται η ροή της ενέργειας που εισέρχεται και εξέρχεται στο σύστημα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας κατά τη λειτουργία του συστήματος για την κάλυψη των αναγκών ψύξης.



Σχήμα 6.5. Ροή εισερχόμενης και εξερχόμενης ενέργειας στο σύστημα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας

Ένα πρόσθετο σύστημα αυτοματισμού, που διαφέρει από τα συστήματα διαχείρισης κτιριακής ενέργειας, τα οποία αναλύσαμε προηγουμένως, αποτελεί το σύστημα αυτοματισμού, το οποίο στοχεύει στον έλεγχο ενός επαγωγικού κινητήρα, η χρήση του οποίου παρατηρείται ευρέως στο βιομηχανικό χώρο.

Δεδομένου ότι η ομαλή και αποδοτική λειτουργία ενός επαγωγικού τριφασικού κινητήρα, μέσω του συστήματος ελέγχου που ενσωματώνεται σε αυτόν, είναι άμεσα συνδεδεμένη με την εξοικονόμηση ενέργειας στο βιομηχανικό χώρο, κρίνεται απαραίτητο να μελετήσουμε το συγκεκριμένο σύστημα αυτοματισμού προκειμένου να κατανοήσουμε τη λειτουργία του.

6.5 Σύστημα ελέγχου επαγωγικού κινητήρα για τη βέλτιστη απόκριση και αποδοτικότητα του

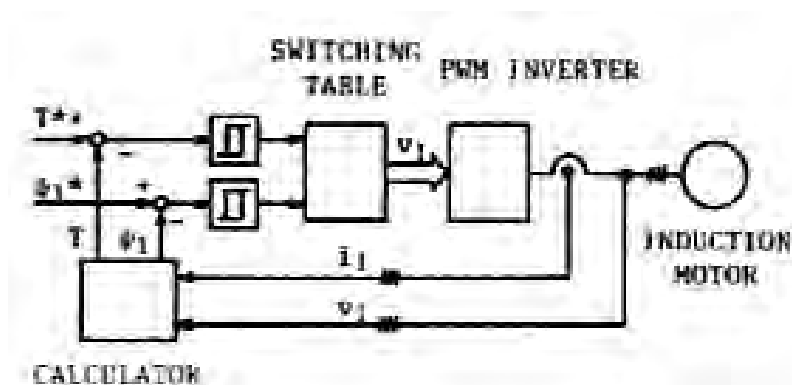
Το σύστημα ελέγχου επαγωγικού κινητήρα, που θα μελετήσουμε, έχει ως βασικό στόχο την άμεση απόκριση του κινητήρα κατά τη λειτουργία του στις διαφορετικές ανάγκες παραγωγής μηχανικής ενέργειας καθώς και στην υψηλή του αποδοτικότητα. Πιο αναλυτικά, το εξεταζόμενο σύστημα ελέγχου βασίζεται [53]:

1. Στον έλεγχο της ροής και της στροφορμής του κινητήρα, μέσω της χρήσης της βέλτιστης τάσης εξόδου ενός εναλλάκτη, που χρησιμοποιεί το σύστημα διαμόρφωσης του πλάτους του παλμού (PWM). Σε αυτό το σύστημα, ενσωματώνεται ένας πίνακας ελέγχου λειτουργίας, προκειμένου να επιλεγεί το

βέλτιστο διάνυσμα τάσης εξόδου του εναλλάκτη, με στόχο την γρήγορη απόκριση του κινητήρα.

2. Στην βέλτιστη απόδοση στην κατάσταση σταθερής λειτουργίας του, μέσω του ελέγχου της αλλαγής της μαγνητικής ροής του στάτορα, με στόχο την επιθυμητή κάθε φορά στροφορμή του κινητήρα.

Στο Σχήμα 6.6 παρουσιάζεται η δομή του συστήματος ελέγχου του επαγωγικού κινητήρα, του οποίου η λειτουργία θα αναλυθεί στη συνέχεια. Σε αυτό το σύστημα, οι στιγμιαίες τιμές της ροής και της στροφορμής υπολογίζονται και ελέγχονται άμεσα και ανεξάρτητα, μέσω της επιλογής της βέλτιστης κατάστασης λειτουργίας του εναλλάκτη. Αυτή η επιλογή συμβάλει στην βέλτιστη απόκριση της στροφορμής και στη μέγιστη απόδοση κάθε στιγμή λειτουργίας του κινητήρα. Επιπλέον, στο εξεταζόμενο σύστημα ελέγχου είναι ενσωματωμένο ένα σύστημα ελέγχου, το οποίο είναι υπεύθυνο να ελέγχει τη σωστή επιλογή των διανυσμάτων τάσης του εναλλάκτη.



Σχήμα 6.6. Δομή λειτουργίας του συστήματος ελέγχου του επαγωγικού κινητήρα

Προκειμένου να ελέγξουμε τη ροή και τη στροφορμή του κινητήρα, είναι σημαντικό να γνωρίζουμε τη συμπεριφορά του στις καταστάσεις λειτουργίας του.

6.5.1 Δυναμική συμπεριφορά του επαγωγικού κινητήρα

Η δυναμική συμπεριφορά του επαγωγικού κινητήρα τόσο κατά τη διάρκεια λειτουργίας του σε σταθερή κατάσταση, όσο και σε μεταβαλλόμενη, μπορεί να εκφραστεί μέσω των στιγμιαίων διανυσμάτων. Προκειμένου να μελετήσουμε την απόκριση της στροφορμής, κατά τη διάρκεια λειτουργίας του κινητήρα σε μεταβαλλόμενη κατάσταση, γίνεται η εφαρμογή των διανυσμάτων στις χαρακτηριστικές εξισώσεις.

Η αρχική τάση στις σπείρες του στάτορα u_1 υπολογίζεται από την εξίσωση (1), όπου οι u_{1a} , u_{1b} και u_{1c} είναι οι αρχικές τάσεις της τριφασικής γραμμής του ουδετέρου [52].

$$U_1 = \sqrt{2/3} * [u_{1a} + u_{1b} * \exp(j2\pi/3) + u_{1c} * \exp(j4\pi/3)] \quad (1)$$

Αντίστοιχα, το αρχικό ρεύμα i_1 , δηλαδή το ρεύμα που παρέχεται από την πηγή και ρέει στον στάτορα, και το δευτερεύον ρεύμα i_2 , δηλαδή αυτό το ρεύμα που ρέει στο ρότορα, δίνονται από τις εξισώσεις (2) και (3) αντίστοιχα [52].

$$I_1 = \sqrt{2/3} * [i_{1a} + i_{1b} * \exp(j2\pi/3) + i_{1c} * \exp(j4\pi/3)] \quad (2)$$

$$I_2 = \sqrt{2/3} * [i_{2a} + i_{2b} * \exp(j2\pi/3) + i_{2c} * \exp(j4\pi/3)] \quad (3)$$

Αυτά τα διανύσματα της τάσης και του ρεύματος της τριφασικής γραμμής του ουδετέρου του επαγωγικού κινητήρα αναπαρίστανται σε ένα σύστημα δύο αξόνων d, q. Χρησιμοποιώντας των συμβολισμό των διανυσμάτων, οι εξισώσεις ενός κινητήρα με αριθμό πόλων p, περιγράφονται από τις εξισώσεις (4) και (5) [52,53].

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 + pL_{11} & pM \\ (p - j\dot{\theta}_m)M & R_2 + (p - j\dot{\theta}_m)L_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$T = \psi_1 \cdot (-j * i_1) \quad (5)$$

, όπου: R_1 = η αντίσταση του στάτορα του κινητήρα,

R_2 = η αντίσταση του ρότορα του κινητήρα,

L_{11} = η αυτεπαγωγή του στάτορα του κινητήρα,

L_{22} = η αυτεπαγωγή του ρότορα του κινητήρα,

M = αμοιβαία επαγωγή μεταξύ του στάτορα και του ρότορα του κινητήρα,

θ_m = μηχανική γωνιακή ταχύτητα,

T = ηλεκτρομαγνητική περιστροφή,

$\dot{}$ = το εσωτερικό γινόμενο των δύο διανυσμάτων,

ψ_1 = διάνυσμα αρχικής μαγνητικής ροής, δηλαδή της μαγνητικής ροής στο στάτορα του κινητήρα.

Το διάνυσμα της αρχικής μαγνητικής ροής, περιγράφεται από την εξίσωση (6).

$$\Psi_1 = L_{11} * i_1 + M_{12} \quad (6)$$

Εάν η εναλλαγή της μαγνητικής ροής Ψ_1 είναι σταθερή, δηλαδή η αλλαγή του ρεύματος μαγνήτισης του στάτορα i_o είναι σταθερή, θα εξετάσουμε την απόκριση της στροφορμής του κινητήρα.

Η εξίσωση του ρεύματος μαγνήτισης του στάτορα i_o (7), προκύπτει από τη διαίρεση της αρχικής μαγνητικής ροής με την αυτεπαγωγή του στάτορα.

$$i_o = \Psi_1 / L_{11} = i_1 + (M / L_{11}) * i_2 \quad (7)$$

Τόσο το ρεύμα μαγνήτισης του στάτορα i_o , όσο το ρεύμα που παρέχεται από την πηγή και ρέει στο στάτορα i_1 , μπορούν να εκφραστούν ως πολικές συντεταγμένες, όπως φαίνεται στην εξίσωση (8) [52,53].

$$i_o = I_o * \exp(j * \theta_o), \quad i_1 = I_1 * \exp(j * \theta_o) \quad (8)$$

, όπου θ_o = η γωνία μεταξύ του διανύσματος του ρεύματος μαγνήτισης του στάτορα i_o και του άξονα d (κάθετος άξονας του συστήματος δύο αξόνων d-q).

Αν αντικαταστήσουμε την σχέση (4), όσον αφορά μόνο στην εξίσωση του ρότορα, δηλαδή στην $0 = i_1[(p-j\theta_m)M] + i_2[R_2+(p-j\theta_m)L_{22}]$, στην εξίσωση (8), προκύπτει η εξίσωση (9).

$$I_1 = [(R_2 + (p + j\theta_s) * L_{22}) / (R_2 + ((p + j\theta_s) * I))] * I_o \quad (9)$$

, όπου $I = (L_{11}L_{22} - M^2) / L_{11}$ και $\theta_s = \theta_o - \theta_m$ η στιγμιαία ολίσθηση της γωνιακής συχνότητας της μαγνητικής ροής του στάτορα που σχετίζεται με τον ρότορα.

Αν αντικαταστήσουμε τις εξισώσεις (7) και (8) στην εξίσωση (5), τότε προκύπτει μία νέα εξίσωση (10), η οποία περιγράφει την ηλεκτρομαγνητική περιστροφή του κινητήρα.

$$T = L_{11} * I_o * L^{-1}\{Im I_1(s)\} \quad (10)$$

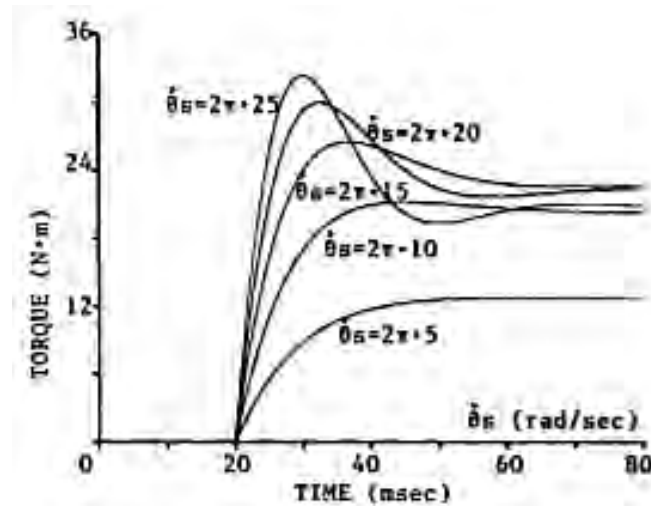
, όπου $L^{-1}\{Im I_1(s)\}$ ο αντίστροφος μετασχηματισμός Laplace του φανταστικού μέρους του μιγαδικού αριθμού I_1 .

Στη συνέχεια, αντικαθιστώντας την εξίσωση (9) στη (10) και παραγωγίζοντας συναρτίσει του χρόνου t , ο ρυθμός της αυξανόμενης στροφορμής την χρονική στιγμή $t = 0$, περιγράφεται από την εξίσωση (11). Σε αυτή την εξίσωση παρουσιάζεται και η απόκριση της στροφορμής στην αλλαγή της στιγμιαίας ολίσθησης της γωνιακής συχνότητας της

μαγνητικής ροής του στάτορα θ_s , κατά τη λειτουργία του κινητήρα με σταθερή μαγνητική ροή του στάτορα ψ_1 [52].

$$dT/dt|(t=0) = (L_{11} * I_o / l) * \{ [L_{22} * I_o - l * \text{Re}(I_1 | t=0)] * \theta_s - R_2 * \text{Im}(I_1 | t=0) \} \quad (11)$$

Δεδομένου ότι η θ_s είναι ανάλογη με την απόκριση της στροφορμής του κινητήρα, όσο αυξάνουμε την θ_s , τόσο θα αυξάνεται και η απόκριση της στροφορμής του κινητήρα. Το γεγονός αυτό παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.7.

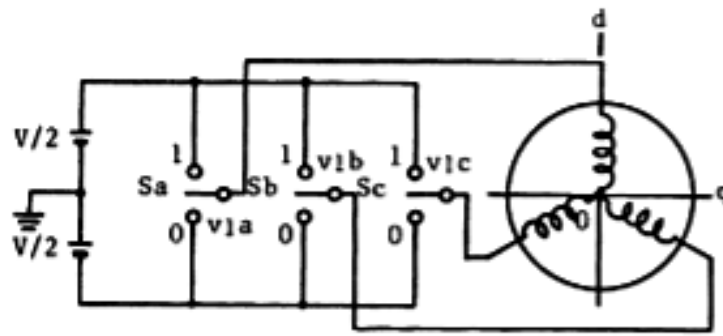


Σχήμα 6.7. Γραφική παράσταση απόκρισης της στροφορμής του κινητήρα σε σχέση με την θ_s

Αφού μελετήσαμε την συμπεριφορά του επαγωγικού κινητήρα, βασιζόμενοι στις χαρακτηριστικές εξισώσεις λειτουργίας του, και κατανοήσαμε τη συμπεριφορά της ροής και της απόκρισης της στροφορμής του κινητήρα, μέσω τις εξίσωσης (6) και (11) αντίστοιχα, θα αναφερθούμε στη μέθοδο ελέγχου της ροής του κινητήρα.

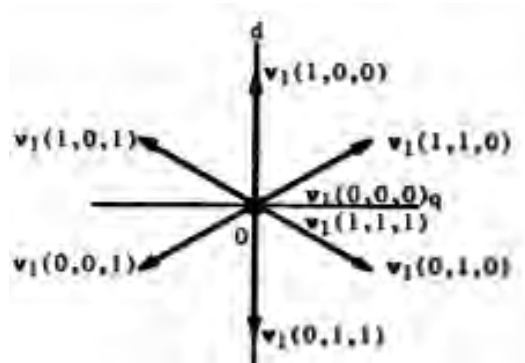
6.5.2 Έλεγχος διανύσματος μαγνητικής ροής του στάτορα μέσω ενός PWM εναλλάκτη για την υψηλή αποδοτικότητα του

Ο έλεγχος της ροής του κινητήρα πραγματοποιείται μέσω ενός PWM εναλλάκτη, δηλαδή ενός εναλλάκτη που χρησιμοποιεί την τεχνική διαμόρφωσης πλάτους του παλμού PWM. Προκειμένου να κατανοηθεί η λειτουργία του συγκεκριμένου συστήματος ελέγχου, παρατίθεται στο Σχήμα 6.8 το σχηματικό διάγραμμα του PWM εναλλάκτη



Σχήμα 6.8. Σχηματικό διάγραμμα PWM εναλλάκτη

, όπου u_{1a} , u_{1b} , u_{1c} είναι οι τάσεις της τριφασικής γραμμής του ουδετέρου του PWM εναλλάκτη, οι τιμές των οποίων καθορίζονται από την κατάσταση λειτουργίας του εναλλάκτη, που συμβολίζεται με S . Οι καταστάσεις λειτουργίας κάθε φασικής τάσης μπορεί να είναι δύο και συγκεκριμένα μη λειτουργία, όπου η S παίρνει την τιμή 0, ή λειτουργία, όπου η S παίρνει την τιμή 1. Επομένως, συνδυάζοντας τις δύο καταστάσεις λειτουργίας του εναλλάκτη και τις τρεις φασικές τάσεις, τα πιθανά διανύσματα τάσης που προκύπτουν είναι 8 ειδών. Από αυτά, τα δύο διανύσματα $u_1(0,0,0)$ και $u_1(1,1,1)$ είναι μηδενικά, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.9 [52,54].



Σχήμα 6.9. Διανύσματα τάσης εναλλάκτη σύμφωνα με την κατάσταση λειτουργίας S

Χρησιμοποιώντας την εξίσωση (1), η εξίσωση που περιγράφει τη σχέση των φασικών τάσεων u_{1a} , u_{1b} και u_{1c} με τις αντίστοιχες καταστάσεις λειτουργίας της κάθε μίας S_a , S_b και S_c είναι η (12).

$$U_1(S_a, S_b, S_c) = \sqrt{2/3} * V[S_a + S_b * \exp(j2\pi/3) + S_c * \exp(j4\pi/3)] \quad (12)$$

, όπου V είναι η πηγή τάσης του PWM εναλλάκτη.

Προκειμένου να βρούμε τη συνάρτηση του διανύσματος της μαγνητικής ροής του στάτορα ψ_1 με το διάνυσμα της τάσης, αντικαθιστούμε την εξίσωση (6) στην μαθηματική σχέση του στάτορα της εξίσωσης (4), δηλαδή στην εξίσωση

$$u_1 = i_1[R_1 + pL_{11}] + i_2pM \text{ και παράγεται η επιθυμητή εξίσωση (13).}$$

$$\Psi_1 = \int (u_1 - R_1 * i_1) dt \quad (13)$$

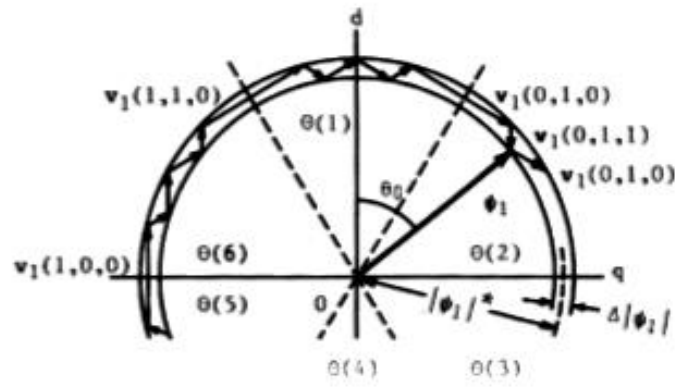
Στη συνέχεια, ενσωματώνοντας την εξίσωση (12) στην εξίσωση (13), δημιουργείται η εξίσωση (14).

$$\Psi_1 = \sqrt{2/3} * V[S_a + S_b * \exp(j2\pi/3) + S_c * \exp(j4\pi/3)] - R_1 * \int i_1 dt + \Psi_1|_{t=0} \quad (14)$$

Θεωρώντας ότι η πτώση τάσης στις σπείρες του κινητήρα είναι μικρή, η μαγνητική ροή του στάτορα κινείται σύμφωνα με την κατεύθυνση του διανύσματος τάσεως του εναλλάκτη. Πιο αναλυτικά, όταν το διάνυσμα τάσης του εναλλάκτη είναι μη μηδενικό, η μαγνητική ροή του στάτορα κινείται με σταθερή ταχύτητα, η οποία είναι ανάλογη της τιμής του διανύσματος τάσης. Εάν το διάνυσμα τάσης είναι μηδενικό, τότε η ταχύτητα της μαγνητικής ροής του στάτορα είναι πολύ μικρή και θεωρείται μηδενική [52].

Επομένως, μέσω της σωστής επιλογής των διανυσμάτων τάσης, ελέγχεται τόσο η κατεύθυνση, όσο και η τιμή της ταχύτητας της μαγνητικής ροής του στάτορα και επομένως ο ρυθμός περιστροφής του κινητήρα.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.10, μέσω της κατάλληλης επιλογής διανύσματος τάσης, η ταχύτητα της μαγνητικής ροής μπορεί να παραμείνει σταθερή στην επιθυμητή τιμή κάθε φορά [53].



Σχήμα 6.10. Διανύσματα που καθορίζουν την ταχύτητα της μαγνητικής ροής του στάτορα
 Συμπερασματικά, τόσο η στιγμιαία ολίσθηση της γωνιακής συχνότητας της μαγνητικής ροής του στάτορα θ_s , όσο και η μαγνητική ροή του στάτορα ψ_1 , σχετίζονται με τη δυναμική συμπεριφορά της στροφορμής και επομένως με την αποδοτικότητα του κινητήρα. Συνεπώς, αν η στρεφόμενη ταχύτητα της μαγνητικής ροής του στάτορα αλλαχθεί σύμφωνα με την επιθυμητή κάθε φορά, τότε θα επιτευχτεί ο έλεγχος της στροφορμής του κινητήρα και η μείωση των απωλειών κατά την λειτουργία του.

Έχοντας πλέον πετύχει την μείωση των απωλειών κατά τη λειτουργία του κινητήρα και τον έλεγχο της μαγνητικής ροής του στάτορα για την υψηλή αποδοτικότητα του κινητήρα, μέσω του PWM εναλλάκτη, θα αναφερθούμε στην μέθοδο ελέγχου της στροφορμής για την επίτευξη της γρήγορης απόκρισης του κινητήρα.

6.5.3 Έλεγχος της στροφορμής για γρήγορη απόκριση του κινητήρα

Προκειμένου να γίνει ο έλεγχος της μαγνητικής ροής του στάτορα ψ_1 , έτσι ώστε η τιμή της να πλησιάσει την επιθυμητή τιμή ψ_1^* , πρέπει η νέα τιμή της ψ_1 να καλύπτει του περιορισμούς των ανισοτήτων (15).

$$|\psi_1|^* - \Delta|\psi_1|/2 \leq |\psi_1| \leq |\psi_1|^* + \Delta|\psi_1|/2 \quad (15)$$

, όπου $\Delta|\psi_1|$ = η διαφορά της νέας τιμής ψ_1 , η οποία είναι πιο κοντά στην επιθυμητή, και της ήδη υπάρχουσας ψ_1 .

Ταυτόχρονα, εκτός από τους περιορισμούς στην τιμή της νέας ψ_1 , υπάρχουν περιορισμοί που αφορούν στην κατεύθυνσή της.

Δεδομένου ότι η τα διανύσματα τάσης του εναλλάκτη αλλάζουν περιοδικά με συχνότητα $\pi/3$ rad/sec, διαιρούμε τον κύκλο που σχηματίζεται από το σύστημα των δύο αξόνων σε έξι κομμάτια, και συγκεκριμένα στα $\theta(1)$ μέχρι $\theta(6)$, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.11, προκειμένου να ισχύουν οι περιορισμοί που περιγράφονται στις ανισότητες (16).

$$(2N-3)*\pi/6 \leq \Theta(N) \leq (2N-1)*\pi/6 \quad (16)$$

, όπου $N = 1, \dots, 6$.

Επομένως, εάν θέλουμε η μαγνητική ροή να βρίσκεται στην περιοχή $\Theta(2)$, να ακολουθεί την κατεύθυνση κίνησης των δεικτών του ρολογιού και ταυτόχρονα να καλυφθούν οι περιορισμοί της (15), επιλέγονται τα διανύσματα τάσης $u_1(0,1,0)$ και $u_1(0,1,1)$. Όταν η τιμή της μαγνητικής ροής φτάσει την μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή, τότε επιλέγεται το διάνυσμα $u_1(0,1,1)$, ενώ όταν η τιμή της μαγνητικής ροής φτάσει την ελάχιστη επιτρεπόμενη τιμή, τότε επιλέγεται το διάνυσμα $u_1(0,1,0)$ [52,54].

Εάν θέλουμε η μαγνητική ροή να βρίσκεται στην περιοχή $\Theta(2)$, να ακολουθεί την αντίθετη κατεύθυνση από αυτή της κίνησης των δεικτών του ρολογιού, τότε επιλέγονται διανύσματα τάσης που βρίσκονται στην περιοχή του κύκλου που είναι συμμετρική ως προς την αρχή των δύο αξόνων $O(0,0,0)$. Επομένως, σε αυτή την περίπτωση επιλέγονται τα διανύσματα $u_1(1,0,0)$ και $u_1(1,0,1)$, τα οποία βρίσκονται στην περιοχή $\Theta(5)$ [54].

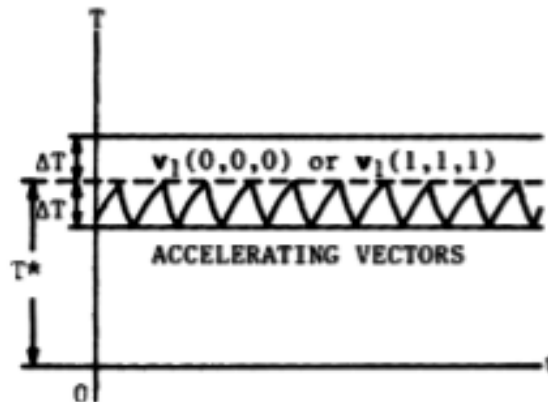
Επιπλέον, όπως παρατηρήσαμε από την σχέση (12), η ολίσθηση της γωνιακής συχνότητας της μαγνητικής ροής του στάτορα θ_s είναι ανάλογη με το ρυθμό αύξησης της στροφορμής T . Επομένως, όταν η τιμή T της στροφορμής είναι μικρότερη από την επιθυμητή τιμή T^* , τότε πρέπει να αυξήσουμε την τιμή της θ_s , μέσω της αύξησης της τιμής της θ_o , δηλαδή της γωνίας μεταξύ του διανύσματος του ρεύματος μαγνήτισης του στάτορα i_o και του άξονα d , αφού $\theta_s = \theta_o - \theta_m$. Ταυτόχρονα, πρέπει να καλύπτονται οι εξής περιορισμοί [52]:

$T^* - \Delta T \leq T \leq T^*$ (17), όταν η ψ_1 κινείται στην ίδια κατεύθυνση κίνησης των δεικτών του ρολογιού,

$T^* \leq T \leq T^* + \Delta T$ (18), όταν η ψ_1 κινείται στην αντίθετη κατεύθυνση κίνησης των δεικτών του ρολογιού.

Επομένως, αν υποθέσουμε ότι η μαγνητική ροή του στάτορα ψ_1 , κινείται σύμφωνα με τη φορά των δεικτών του ρολογιού, όταν η τιμή της στροφορμής T φτάσει την επιθυμητή T^* , τότε επιλέγεται ένα από τα δύο μηδενικά διανύσματα τάσης, προκειμένου να μειωθεί η ταχύτητα της ψ_1 και επομένως και η τιμή της στροφορμής T . Εάν η τιμή της στροφορμής φτάσει την ελάχιστη τιμή, τότε επιλέγεται ένα από τα μη μηδενικά διανύσματα τάσης που αυξάνουν την ταχύτητα της ψ_1 , καλύπτοντας τους περιορισμούς

(15) και (16). Στο Σχήμα 6.11 παρουσιάζεται η επιλογή των διανυσμάτων τάσης για την γρήγορη απόκριση της στροφορμής [52].

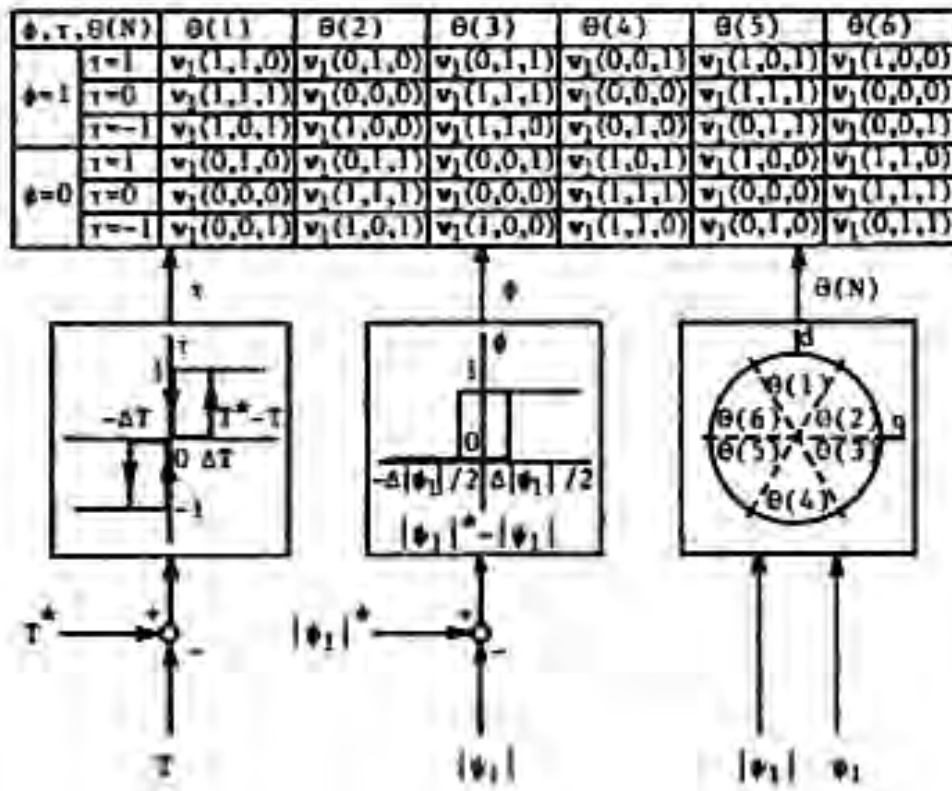


Σχήμα 6.11. Επιλογή διανυσμάτων τάσης για τη γρήγορη απόκριση της στροφορμής

6.5.4 Συνδυασμός ελεγκτών για την επιλογή του διανύσματος τάσης του PWM εναλλάκτη από τον πίνακα λειτουργίας

Στο Σχήμα 6.12 παρουσιάζεται ο συνδυασμός των τριών ελεγκτών του συστήματος ελέγχου. Ο πρώτος έχοντας ως δεδομένα εισόδου την υπάρχουσα τιμή της στροφορμής T και την επιθυμητή της τιμή T^* , ελέγχει αν τηρούνται οι περιορισμοί (17) και (18) και παράγει ένα αποτέλεσμα τ . Ο δεύτερος έχοντας ως δεδομένα εισόδου την τιμή της μαγνητικής ροής του στάτορα ψ_1 και την επιθυμητή της τιμή ψ_1^* , ελέγχει αν καλύπτονται οι περιορισμοί (15) και παράγει ένα αποτέλεσμα ϕ . Τέλος, ο τρίτος έχοντας ως δεδομένα εισόδου την τιμή και την κατεύθυνση της υπάρχουσας μαγνητικής ροής του στάτορα ψ_1 , ελέγχει αν καλύπτονται οι περιορισμοί (16) και παράγει ένα αποτέλεσμα $\Theta(N)$.

Στη συνέχεια, αυτά τα αποτελέσματα τ , ϕ και $\Theta(N)$ στέλνονται στον πίνακα λειτουργίας και επιλέγεται το κατάλληλο διάνυσμα τάσης. Αυτό το διάνυσμα στέλνεται στον PWM εναλλάκτη και με τη σειρά του αυτός το παράγει και το στέλνει στον επαγωγικό κινητήρα. Κατά αυτόν τον τρόπο, γίνεται ο έλεγχος της μαγνητικής ροής του στάτορα και επομένως της στροφορμής, με στόχο την βέλτιστη αποδοτικότητα του επαγωγικού κινητήρα και την άμεση απόκρισή του στις ανάγκες διαφορετικής λειτουργίας του [52,55].



Σχήμα 6.12. Συνδυασμός των τριών ελεγκτών για την επιλογή του κατάλληλου διανύσματος τάσης του εναλλάκτη

6.6 Συμπέρασμα

Γνωρίζοντας τη σημαντικότητα των αναγκών που αφορούν στη βέλτιστη αποδοτικότητα των ενεργειακών συστημάτων και στην εξοικονόμηση ενέργειας στο βιομηχανικό χώρο, κρίνεται απαραίτητη η ενσωμάτωση τεχνολογικά ανεπτυγμένων και σύγχρονων συστημάτων σε αυτόν, προκειμένου να γίνει η διαχείριση της ενέργειας. Έχοντας αυτόν τον στόχο, σημαντική είναι η συμβολή των καινοτόμων συστημάτων αυτοματισμού, τα οποία εκμεταλλεύονται τις πολύπλοκες στρατηγικές ελέγχου, με στόχο τον περιορισμό της καταναλισκόμενης ενέργειας. Κάποια από αυτά τα συστήματα, τα οποία μελετήσαμε σε αυτό το κεφάλαιο, είναι το σύστημα διαχείρισης κτιριακής ενέργειας που χρησιμοποιεί πολυπρακτορική μεθοδολογία ελέγχου λήψης απόφασης, το σύστημα διαχείρισης κτιριακής θερμικής ενέργειας μέσω του ελέγχου του συστήματος αποθήκευσης της θερμικής ενέργειας και το σύστημα ελέγχου επαγωγικού κινητήρα για βέλτιστη απόκριση και αποδοτικότητα του. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα διάφορων ερευνών, που απέδειξαν την αποτελεσματικότητα και την αξιοπιστία αυτών των

συστημάτων αυτοματισμού, η ενσωμάτωση τους στο βιομηχανικό χώρο αποτελεί έναν τρόπο εξοικονόμησης ενέργειας σε αυτόν.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Δεδομένου της αυξημένης ενεργειακής ζήτησης στο βιομηχανικό χώρο, με στόχο την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών σε αυτόν, η εξοικονόμηση ενέργειας αποτελεί κυρίαρχη προτεραιότητα. Για αυτό το λόγο, στα προηγούμενα κεφάλαια έγινε έρευνα που βασίζεται στη μελέτη των καινοτόμων τεχνολογιών και μεθόδων που συμβάλουν στην βέλτιστη ενεργειακή αποδοτικότητα των ενεργειακών βιομηχανικών συστημάτων.

Πιο συγκεκριμένα, η συμβολή της παρούσας διπλωματικής εργασίας στη διερεύνηση του ζητήματος της εξοικονόμησης ενέργειας στις βιομηχανίες αφορά στην προτροπή ενσωμάτωσης σύγχρονων συστημάτων και προγραμμάτων, τα οποία μελετήσαμε, στο βιομηχανικό χώρο. Πιο συγκεκριμένα, κάποιους από τους τρόπους εξοικονόμησης ενέργειας σε αυτόν αποτελεί η βελτιστοποίηση του συντελεστή ισχύος στους επαγωγικούς τριφασικούς κινητήρες, η ενσωμάτωση ανεπτυγμένων συστημάτων που χρησιμοποιούν τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και συγκεκριμένα τη γεωθερμική, την ηλιακή και την αιολική ενέργεια, η εφαρμογή προγραμμάτων ζήτησης-απόκρισης, η ενσωμάτωση «έξυπνων» συστημάτων φωτισμού καθώς και συστημάτων αυτοματισμού τόσο για τη διαχείριση της κτιριακής ενέργειας και συγκεκριμένα της θερμικής, της ψύξης και της ηλεκτρικής, όσο και για τη διαχείριση της μαγνητικής ροής του στάτορα ενός επαγωγικού κινητήρα, με στόχο τη βελτίωση της αποδοτικότητάς του.

Παρά τις προσπάθειες που έχουν γίνει τα τελευταία χρόνια να αναπτυχθούν τα υπάρχοντα ενεργειακά συστήματα, με στόχο τη βελτίωση της αποδοτικότητάς τους, καθώς και να δημιουργηθούν εκ νέου μέθοδοι εξοικονόμησης ενέργειας, η ραγδαία τεχνολογική ανάπτυξη σε συνδυασμό με την συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση ενέργειας, ειδικά στο βιομηχανικό χώρο, δημιουργεί την ανάγκη παραγωγής πιο «έξυπνων» συστημάτων, που αξιοποιούν την τεχνητή νοημοσύνη και συμβάλλουν σημαντικά στην άρση του ενεργειακού προβλήματος. Επομένως, στόχος στο μέλλον αποτελεί η περαιτέρω ανάπτυξη των συστημάτων, που αναφέραμε, με απώτερο σκοπό τη δημιουργία νέων συστημάτων που βασίζονται στην τεχνητή νοημοσύνη.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Mehta V.K., Principles of Power System: Including Generation, Transmission, Distribution, Switchgear and Protection, New Delhi: S Chand & Co Ltd.
- [2] Chapman S.J., Electric Machinery Fundamentals, New York, NY: McGraw-Hill, 2012.
- [3] Thomson W.T. and Culbert I., Current Signature Analysis for Condition Monitoring of Cage Induction Motors: Industrial Application and Case Histories, New Jersey: John Wiley & Sons, 2017.
- [4] Ryder F.A. and Randall R.D., ELECTRIC MOTOR, United States Patent Office, 1952.
- [5] Morris B., F. Foiadelli and D. Zaninelli, Electrical Railway Transportation Systems, New Jersey: John Wiley & Sons, 2018.
- [6] Thornton E.J and Armintor J.K., THE FUNDAMENTALS OF AC ELECTRIC INDUCTION MOTOR DESIGN AND APPLICATION.
- [7] Stone G.C., I. Culbert, E.A. Boulter and H. Dhirani, Electrical Insulation for Rotating Machines: Design, Evaluation, Aging, Testing, and Repair, New Jersey: John Wiley & Sons, 2014.
- [8] Denk J., CLAM-SHELL STATOR CONSTRUCTION FOR ELECTRICAL MACHINES, United States Patent Office, 1990.
- [9] Blair T.H., Energy Production Systems Engineering: An Introduction for Electrical Engineers to Electrical Power Generation Facilities, Systems, and Equipment, New Jersey: John Wiley & Sons, 2017.
- [10] Khodapanah M., A.F. Zobaa and M. Abbod, "Estimating power factor of Induction motors at any loading conditions using support vector regression (SVR), Electrical Engineering, vol. 100, pp. 2579-2588, 2018.
- [11] Shahzad U., "The Need For Renewable Energy Sources", International Journal of Information Technology and Electrical Engineering, 2015.
- [12] Muhammad A., U. Tugrul, "Application of technology roadmaps for renewable energy sector", Technological Forecasting & Social Change, vol. 77, pp.1355-1370, 2010.

- [13] Anderson D., Energy and the challenge of sustainability, Washington, D.C.: Communications Development Incorporated, 2002.
- [14] Ozgener O., A. Hepbasli, "Modeling and performance evaluation of ground source (geothermal) heat pump systems", Energy and Buildings, vol. 39, pp.66-75, 2006.
- [15] B. Hu, H. Liu, R.Z. Wang, H. Li, Z. Zhang and S. Wang, "A High-Efficient Centrifugal Heat Pump with Industrial Waste Heat Recovery for District Heating", Applied Thermal Engineering, 2017.
- [16] Del Col D., M. Azzolin, G. Benassi, M. Mantovan, "Energy efficiency in a ground source heat pump with variable speed drives", Energy and Buildings, vol. 91, pp.105-114, 2015.
- [17] Akhtar H., S.M. Arif, M. Aslam, "Emerging renewable and sustainable energy technologies: State of the art", Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 71, pp. 12-28, 2017.
- [18] Muller-Steinhagen H. and Trieb F, Concentrating solar power.
- [19] Winfried H., "PV solar electricity industry: Market growth and perspective", Solar Energy Materials & Solar Cells, vol.90, pp. 3285-3311, 2006.
- [20] C.O.C. Oko, E.O. Diemuodeke, N.F. Omunakwe and E. Nnamdi, "Design and Economic Analysis of Photovoltaic System: A Case Study", Int.Journal of Renewable Energy Development, vol.3, pp. 65-73, 2012.
- [21] Kalyani T., A. Sudhakhar, D. Krishna, G. Reddy, S. Sowmya and V. Bharghavi, "Energy Efficient Sun Synchronous Solar Panels", in Proc. Inventive Systems and Control, 2018.
- [22] Leary J., A. While, R. Howell, "Locally manufactured wind power technology for sustainable rural electrification", Energy Policy, vol.43, pp. 173-183, 2012.
- [23] Tao Z., P. Li, B. Francois, "Power Management Strategies of DC-Coupled Hybrid Power System in Microgrid for Decentralized Generation", 2011.
- [24] Tzuen C., P.L. Pan, Y.L. Chern, W.T. Chern and W.M. Lin, "Excitation Synchronous Wind Power Generators With Maximum Power Tracking Scheme", IEEE Transactions of sustainable energy, vol. 5, no. 4, 2014.

- [25] Taibi E., D. Gielen, M. Bazilian, "The potential for renewable energy in industrial applications", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, pp. 734-744, 2012.
- [26] Seng L.Y. and Taylor P., "Innovative Application of Demand Side Management to Power Systems", *First International Conference on Industrial and Information Systems*, Sri Lanka, 2006.
- [27] Ashok S. and Banerjee R., "Load-management applications for the industrial sector", *Applied Energy*, vol. 66, pp. 105-111, 2000.
- [28] Palensky P. and Dietmar D., "Demand Side Management: Demand Response, Intelligent Energy Systems, and Smart Loads", *IEEE Trans. on industrial informatics*, vol. 7, no. 3, 2011.
- [29] Chu C.M and Jong T.L., "A Novel Direct Air-Conditioning Load Control Method", *IEEE Trans. on power systems*, vol. 23, no. 3, 2008.
- [30] Paracha Z. and Doulai P., "LOAD MANAGEMENT Techniques and Methods in Electric Power System, IEEE Catalogue No: 98EX137, pp. 213-217, 1998.
- [31] Gellings C.W., "The Concept of Demand-Side Management for Electric Utilities", in *Proc. of the IEEE*, vol. 73, no. 10, 1985.
- [32] Khalid A., N. Javaid, A. Mateen, B. Khalid, Z. Khan and U. Qasim, "Demand Side Management using Hybrid Bacterial Foraging and Genetic Algorithm Optimization Techniques", in *10th International Conference on Complex, Intelligent, and Software Intensive Systems*, 2016.
- [33] Jahedul I.C., Y. Hu, I. Haltas, N. Balta-Ozkan, G. Jr. Matthew and L. Varga, "Reducing industrial energy demand in the UK: A review of energy efficiency technologies and energy saving potential in selected sectors", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 94, pp. 1153-1178, 2018.
- [34] Shoreh M.H., P. Siano, M. Shafie, V. Loia and P.S. Catalao, "A survey of industrial of Demand Response", *Electric Power Systems Research*, vol. 141, pp. 31-49, 2016.
- [35] Li H. and Nirmal C., "Multi-Agent Systems and Demand Response: A Systematic Review", 2015.

- [36] Pierluigi M. and Gianfranco C., "Real-Time Demand Response From Energy Shifting in Distributed Multi-Generation", IEEE Trans. on smart grid, vol. 4, no. 4, 2013.
- [37] Mitsunori M., H. Tomoyuki and K. Imazato, "Proposal for an Intelligent Lighting System, and Verification of Control Method Effectiveness", in Proc. IEEE Conference on Cybernetics and Intelligent Systems, 2004.
- [38] Kasahara Y., M. Mitsunori and Y. Masato, "Preliminary Evaluation of the Intelligent Lighting System with Distributed Control Modules", in IEEE, 2011.
- [39] Matta S., S.M. Mahmud, "An Intelligent Light Control System for Power Saving", in IEEE, 2010.
- [40] Galasiu A.D., G.R. Newsham, C. Suvagau and D.M. Sander, "Energy Saving Lighting Control Systems for Open-Plan Offices: A Field Study", in LEUKOS The Journal of the Illuminating Engineering Society of North America, vol. 4, pp. 7-29, 2013.
- [41] Chen Y., L. Huai and C. Xueliang, "Venetian Blind Control System Based on Fuzzy Neural Network for Indoor Daylighting", in IEEE Second International Conference on Computer and Electrical Engineering, 2009.
- [42] Becker C.E., "The New IEEE Standard 739: Energy Conservation and Cost Effective Planning in Industrial Facilities", IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 21, no. 2, 1985.
- [43] Huang B.J., M.S. Wu, P.C. Hsu, J.W. Chen and K.Y. Chen, "Development of high-performance solar LED lighting system", Energy Conversion and Management, vol. 51, pp. 1669-1675, 2010.
- [44] Ziyad M.S., F. Dagher and W.A. Lynch, "STEP-DOWN MAXIMUM POWER POINT TRACKER FOR PHOTOVOLTAIC SYSTEMS", Solar Energy, vol. 46, no. 5, pp. 279-282, 1991.
- [45] Huang B.J., F.S. Sun and R.W. Ho, "Near-maximum-power-point-operation (nMPPO) design of photovoltaic power generation system", Solar Energy, vol. 80, pp. 1003-1020, 2006.
- [46] Koutroulis E. and Kalaitzakis K., "Novel battery charging regulation system for photovoltaic applications", IEEE Proc. Electrical Power Applications, vol. 151, no. 2, 2004.

- [47] Manic M., D. Wijayasekara, K. Amarasinghe and J.R.A. Juan, "Building Energy Management Systems The Age of Intelligent and Adaptive Buildings", IEEE INDUSTRIAL ELECTRONICS MAGAZINE, 2016.
- [48] Zhao P., S. Suryanarayanan and M.G. Simoes, "An Energy Management System for Building Structures Using a Multi-Agent Decision-Making Control Methodology", IEEE Trans. On Industry Applications, vol. 49, no. 1, 2013.
- [49] Davidsson P. and Wernstedt F., "A multi-agent system architecture for coordination of just-in-time production and distribution", The Knowledge Engineering Review, vol. 17, pp. 317-329, 2002.
- [50] Salsbury T.I., "A SURVEY OF CONTROL TECHNOLOGIES IN THE BUILDING AUTOMATION INDUSTRY", 16th Triennial World Congress, Prague, Czech Republic, 2005.
- [51] Amarasinghe K., D. Wijayasekara and M. Manic, "Neural Network Based Downscaling of Building Energy Management System Data", in IEEE, 2014.
- [52] Takahashi I. and Toshihiko N., " A New Quick-Response and High-Efficiency Control Strategy of an Induction Motor", IEEE Trans. On Industry Applications, vol. 22, no. 5, 1986.
- [53] Nabae A., K. Otsuka, H. Uchino and R. Kurosawa, "An Approach to Flux Control of Induction Motors Operated with Variable-Frequency Power Supply", IEEE Trans. On Industry Applications, vol. 16, no. 3, 1980.
- [54] Kazmierkowski M.P. and Kasprowicz A.B., "Improved Direct Torque and Flux Vector of PWM Inverter-Fed Induction Motor Drives", IEEE Trans. On Industrial Electronics, vol. 42, no. 4, 1995.
- [55] Juhasz G., S. Halasz and K. Veszpremi, "New Aspects of Direct Torque Controlled Induction Motor Drive", in IEEE, 2000.