ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ-ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΡΕΥΣΤΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ

ΙΩΑΝΝΗΣ ΓΟΥΝΑΡΙΔΗΣ

ΑΝΤΛΙΕΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ ΣΤΡΟΦΩΝ
ΘΕΩΡΙΑ- ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ- ΤΥΠΟΙ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Ι. ΑΝΑΓΝΩΣΤΟΠΟΥΛΟΣ

ΑΘΗΝΑ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2008

ΙΩΑΝΝΗΣ ΓΟΥΝΑΡΙΔΗΣ

ΑΝΤΛΙΕΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ ΣΤΡΟΦΩΝ
ΘΕΩΡΙΑ- ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ- ΤΥΠΟΙ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Ι. ΑΝΑΓΝΩΣΤΟΠΟΥΛΟΣ

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα 1

ΠΡΟΛΟΓΟΣ 3

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. Εισαγωγή 6
1.1 Αντλίες και αντλητικά συστήματα. 6
1.2 Αντλίες μεταβλητών στροφών. Η Βασική Ιδέα. 9
1.3 Αντλητικά συστήματα και απαιτήσεις. 11
1.4 Δομή της παρούσας εργασίας 12

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. Επίδραση της Μεταβολής των Στροφών στην Επίδοση των Φυγοκεντρικών Αντλιών 14
2.1. Περιγραφή φυγοκεντρικής αντλίας 15
2.2 Προσδιορισμός του σημείου λειτουργίας μιας αντλητικής εγκατάστασης 17
2.3. Ανάπτυξη σπηλαίωσης της φυγόκεντρης αντλίας 19
2.4 Δυνατότητες ελέγχου της διακινούμενης παροχής 25
2.4.1 Χρήση βάνας στραγγαλισμού 27
2.4.2 Εφαρμογή κλάδου παράκαμψης By-pass 29
2.4.3. Μείωση διαμέτρου της πτερωτής 31
2.4.4 Μείωση της ταχύτητας περιστροφής της αντλίας 35
2.4.5 Σύγκριση μεθόδων ρύθμισης 39
2.5. Επίδραση της μεταβαλλόμενης ταχύτητας στα χαρακτηριστικά της αντλίας. . 40

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. Κινητήρες και Δυνατότητες Μεταβολής των Στροφών τους 45
3.1 Αρχή Λειτουργίας ηλεκτρικών κινητήρων 45
3.2 Σύγχρονοι Κινητήρες 48
3.3 Επαγωγικοί Κινητήρες 51
3.3.1 Η Ολίσθηση 53
3.3.2 Ισχύς των Επαγωγικών Κινητήρων 53
3.3.3 Σχέση Ροπής– Ταχύτητας Περιστροφής 54
3.3.4 Υπολογισμός της Αναπτυσσόμενης Ροπής 57
3.4 Έλεγχος της ταχύτητας περιστροφής των επαγωγικών κινητήρων 58
3.4.1 Έλεγχος της ταχύτητας με ρύθμιση της αντίστασης του δρομέα 59
3.4.2 Έλεγχος της ταχύτητας με ρύθμιση της τάσης του στάτη 60
3.4.3 Έλεγχος της ταχύτητας με μεταβολή του αριθμού των πόλων 62
3.4.4 Έλεγχος της ταχύτητας με μεταβολή της συχνότητας 63
3.5. Κινητήρες κυκλοφορητών μεταβλητών στροφών 66

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. Εφαρμογές των Αντλιών Μεταβλητών Στροφών 71

4.1 Ηλεκτρονικοί κυκλοφορητές. 71
4.1.1. Παραδοσιακοί κυκλοφορητές 72
4.1.2. Η ανάγκη για κυκλοφορητές μεταβλητών στροφών 74
4.1.3. Ηλεκτρονικοί κυκλοφορητές μεταβλητών στροφών 77
4.1.4 Λειτουργία του ηλεκτρονικού κυκλοφορητή 81
4.1.5. Χαρακτηριστικά κυκλοφορητών μεταβλητών στροφών 83
4.1.6 Σύγκριση κυκλοφορητών σταθερών και μεταβλητών στροφών 85
4.2 Άλλες εφαρμογές. 97
4.2.1 Εφαρμογή 1: Εγκατάσταση ΑΜΣ σε εργοστάσιο οικιακών συσκευών 97
4.2.2 Εφαρμογή 2: Εγκατάσταση ΑΜΣ σε συγκρότημα άντλησης υγρών αποβλήτων 99
4.2.3 Εφαρμογή 3: Αναβάθμιση διυλιστηρίου με εισαγωγή αντλιών 100
4.2.4 Εφαρμογή 4: Εγκατάσταση ΑΜΣ σε χημική βιομηχανία 101

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. Αξιολόγηση των Συστημάτων Άντλησης Μεταβλητών Στροφών .. 103

5.1 Πλεονεκτήματα, μειονεκτήματα και λειτουργικά θέματα 103
5.1.1 Πλεονεκτήματα για τον χρήστη 103
5.1.2 Πιθανά μειονεκτήματα των Α.Μ.Σ 105
5.2 Ανάλυση κόστους κύκλου ζωής 107
5.3 Παράδειγμα υπολογισμού του κόστους κύκλου ζωής συστήματος αντλιών μεταβλητής ταχύτητας περιστροφής. 112
5.4 Συμπεράσματα 114
5.5 Προτάσεις για μελλοντική μελέτη 115

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 117

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Οι αντλίες συνιστούν ένα από τα πιο ενδιαφέροντα αντικείμενα της μηχανολογίας και αποτελούν την καρδιά ενός μεγάλου τομέα βιομηχανικών αλλά και δημοσίων δικτύων, των δικτύων σωληνώσεων. Υπάρχει ένα μεγάλο φάσμα τύπων αντλιών αρκετά διαφορετικών μεταξύ τους ως προς την αρχή λειτουργίας, τη δομή και τις εφαρμογές, τις οποίες καλύπτουν. Ενδεικτικά, αναφέρουμε τις φυγοκεντρικές αντλίες, τις παλινδρομικές, τις περιστροφικές, τις αντλίες κενού, τα τζιφάρια, αλλά και ειδικές αντλίες όπως αντλίες ατμού και αερίων.

Υπολογίζεται ότι το 20% περίπου της παγκόσμιας κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας αποδίδεται στην χρήση διαφόρων αντλητικών συστημάτων γεγονός που καθιστά σαφές, ότι υπάρχει πεδίο για σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας λειτουργώντας τις αντλίες αποτελεσματικότερα και πιο αποδοτικά.

Για την επιλογή της κατάλληλης αντλίας σε κάθε εφαρμογή, είναι σημαντικό να έχουν μελετηθεί με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια οι απαιτήσεις πίεσης και παροχής τις οποίες θα πρέπει να είναι σε θέση να καλύψει το αντλητικό σύστημα. Με τη χρήση αντλητικών συστημάτων με ρύθμιση της ταχύτητας περιστροφής τους, η λειτουργία των αντλιών είναι σε θέση να προσαρμόζεται στις εκάστοτε απαιτήσεις εξοικονομώντας με αυτόν τον τρόπο τεράστια ποσά ενέργειας.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα εξοικονόμησης ενέργειας είναι η εφαρμογή αντλιών μεταβλητής ταχύτητας ως κυκλοφορητές σε συστήματα θέρμανσης.

Στην παρούσα εργασία μελετάται η λειτουργία των αντλητικών συστημάτων μεταβλητής ταχύτητας, περιγράφονται εφαρμογές τους και παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα τους.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω τον αναπληρωτή καθηγητή κ. Ιωάννη Αναγωστόπουλο, για την ευκαιρία που μου έδωσε να συνεργαστώ μαζί του στα πλαίσια της εκπόνησης αυτής της διπλωματικής εργασίας, καθώς επίσης και για για την καθοδήγηση και τις συμβουλές που μου προσέφερε καθόλη τη διάρκεια της εργασίας.

Ιωάννης Γουναρίδης

Μάρτιος 2008

ABSTRACT

Pumps recommend one of the most interesting objects of mechanical engineering and constitute the heart of industrial but also public networks, which are called piping networks. There is a big variety of pumps, with differences in the way they operate, their structure and the applications, which they cover. The two basic categories are the rotodynamic pumps, and the positive displacement pumps (rotary and reciprocating).

It is calculated that roughly the 20% of world electric energy consumption is attributed in the use of various pump systems, meaning that functioning the pumps more effectively and more efficiently makes the existing field for important saving of energy quite big.

In order to choose the suitable pump for each application, it is important that the requirements of pressure and flow, which must be covered by the pumping system, have been calculated with as bigger precision as possible. With the use of pumping systems with regulation of their rotation speed, the operation of pumps can be adaptable in each requirement, saving in this way enormous sums of energy.

Characteristic example of energy saving is the application of variable speed pumps as circulators in heating systems.

This thesis studies the operation of variable speed pumping systems, describes their applications and presents their advantages and disadvantages.

In this point I would like to thank professor Mr Ioannis Anagnostopoulos, for his guidance and collaboration in the frames of this diploma thesis development.

Ioannis Gounaridis

March 2008

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Εισαγωγή

1.1 Αντλίες και αντλητικά συστήματα.

Οι δύο βασικές κατηγορίες αντλιών που χρησιμοποιούνται στην πρακτικές εφαρμογές είναι οι φυγοκεντρικές και οι αντλίες θετικού εκτοπίσματος, στις οποίες υπάγονται οι παλινδρομικές και οι περιστροφικές αντλίες.

Η επιλογή των αντλητικών συστημάτων συχνά στηρίζεται στη λογική της κάλυψης μιας μέγιστη προβλεφθείσας ροής, η οποία όμως ενδέχεται να μην παρουσιαστεί ποτέ. Η αρχή αυτή της υπερδιαστασιολόγησης χρησιμοποιείται συχνά στη βιομηχανία, και οδηγεί συνήθως σε μεγάλες σπατάλες ενέργειας καθώς και σε βλάβες στα επιμέρους μέρη της αντλητικής εγκατάστασης. Αν και το κόστος προμήθειας του εξοπλισμού που σχετίζεται με τις αντλίες σε μια τυπική βιομηχανική εγκατάσταση ανέρχεται, τις περισσότερες φορές, σε λιγότερο από το 1% της συνολικής επένδυσης, η ποιότητα στη λειτουργία μιας αντλίας μπορεί να είναι ο αποφασιστικός παράγοντας για τη λειτουργία όλης της εγκατάστασης, καθώς και ο ρυθμιστής του ύψους των τρεχουσών δαπανών της.

Η χρήση συστημάτων μεταβλητών στροφών στη λειτουργία αντλιών είναι πλέον μια ώριμη τεχνολογία, που υπό συνθήκες μπορεί να παράγει μεγάλα οφέλη στο χρήστη και να εφαρμοστεί στην παραγωγή τόσο σε φυγοκεντρικές αντλίες όσο και σε αντλίες θετικής μετατόπισης.

Τα βασικά πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν αυτά τα συστήματα μπορούν να συνοψιστούν στα παρακάτω:

- Μείωση του ενεργειακού κόστους
- Βελτίωση της αξιοπιστίας
- Ομαλότερη λειτουργία
- Απλούστευση της κατασκευής του αντλητικού συστήματος (λιγότερες βαλβίδες ελέγχου και γραμμές παράκαμψης)
- Μειωμένη απαίτηση συντήρησης

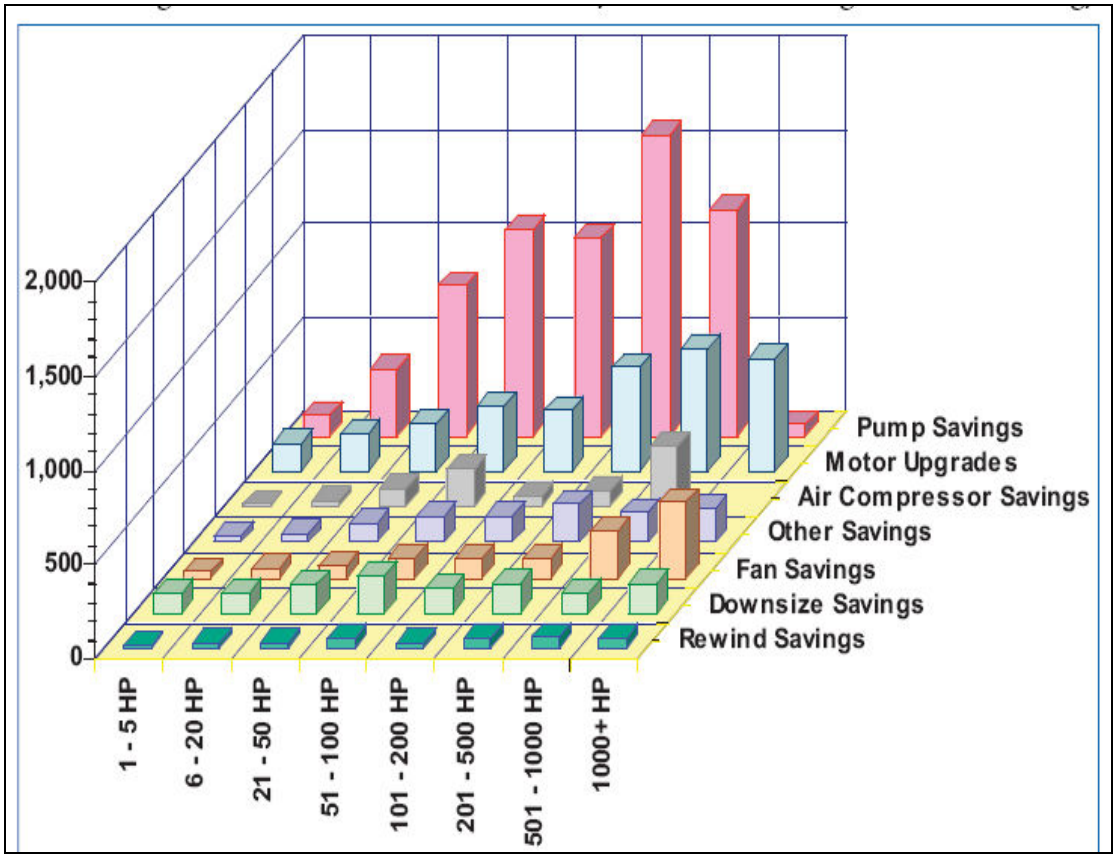
Από τα σπουδαιότερα πλεονεκτήματα της χρήσης των συστημάτων μεταβλητών στροφών είναι η ενεργειακή εξοικονόμηση, γεγονός που δημιουργεί οικονομικά οφέλη στους χρήστες αλλά και σημαντικά περιβαλλοντικά οφέλη.

Σχήμα 1.1 Παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας.

Ακούγεται παράξενο και όμως το 20% περίπου της παγκόσμιας κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας αποδίδεται στην χρήση αντλητικών συστημάτων [6]. Σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι το 30% - 50% αυτής της ενέργειας θα μπορούσε να εξοικονομηθεί. Σε ορισμένες βιομηχανικές εγκαταστάσεις άνω των 50% της

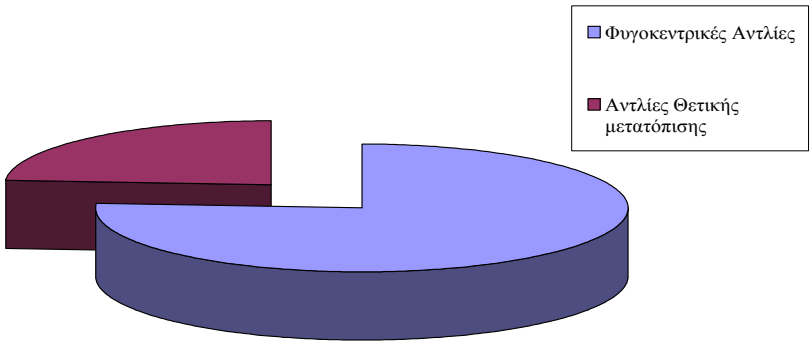
ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιείται από τις μηχανές μπορεί να είναι για τις ανάγκες των αντλητικών συστημάτων.

Το σχήμα 1.2 παρουσιάζει για τυπικές βιομηχανικές εγκαταστάσεις την κατανομή των ενεργειακών αναγκών στα επιμέρους τμήματα του μηχανολογικού εξοπλισμού τους [2]. Είναι σαφές ότι υπάρχει πεδίο για σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας λειτουργώντας τις αντλίες αποτελεσματικότερα και πιο αποδοτικά.



Σχήμα 1.2 Κατανομή ενεργειακών αναγκών τυπικής βιομηχανικής εγκατάστασης.

Το σχήμα 1.3 παρουσιάζει την κατανομή της κατανάλωσης ενέργειας στις δύο κύριες κατηγορίες αντλιών. Στις φυγοκεντρικές αντλίες αντιστοιχεί το 73% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας από αντλίες, ενώ το 27% της καταναλισκόμενης ενέργειας χρησιμοποιείται από τις αντλίες θετικής μετατόπισης [1].



Σχήμα 1.3 Κατανομή της κατανάλωσης ενέργειας στις δύο κύριες κατηγορίες αντλιών.

Οι δύο τύποι αντλιών παρουσιάζουν αρκετά διαφορετικά χαρακτηριστικά στη λειτουργία τους με μεταβλητή ταχύτητα. Στην παρούσα εργασία θα μελετηθούν μόνο οι φυγοκεντρικές αντλίες.

Παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματα αυτών των συστημάτων μέχρι σήμερα η χρήση τους είναι σχετικά περιορισμένη. Έτσι, σε μεγάλο ποσοστό εξακολουθούν να χρησιμοποιούνται οι παραδοσιακές μέθοδοι ελέγχου, ενώ συναντώνται και αρκετά παραδείγματα μη σωστής εφαρμογής της κίνησης με μεταβλητή ταχύτητα, που οδήγησε σε κατασκευή μη αποδοτικών αλλά και ακριβών εγκαταστάσεων.

1.2 Αντλίες μεταβλητών στροφών. Η Βασική Ιδέα.

Η χρήση αντλητικών συστημάτων με ρύθμιση της ταχύτητας περιστροφής τους, (για συντόμευση ΑΜΣ, Αντλίες Μεταβλητών Στροφών) υπαγορεύεται όχι μόνο από την ανάγκη να μπορεί να προσαρμόζεται η λειτουργία των αντλιών στη ζήτηση ή την προσφορά, αλλά και από την προοπτική των οικονομικών οφελών, πρώτιστα συνδεόμενων με την εξοικονόμηση ενέργειας και με τον περιορισμό της συντήρησης τους. Στα οφέλη αυτών των συστημάτων συμπεριλαμβάνεται επίσης και η βελτίωση της αξιοπιστίας τους αλλά και η δυνατότητά τους να εκκινούν και να σταματούν πιο ομαλά. Κέρδος επίσης αποτελεί και η μείωση που παρουσιάζεται στην διαρροή από ένα σύστημα όταν αυτό λειτουργεί σε μειωμένη πίεση ενώ σίγουρα πλεονέκτημα των συστημάτων αυτών είναι και ο καλύτερος έλεγχος της αντλητικής λειτουργίας. Σε μια

ολοκληρωμένη μελέτη τα πλεονεκτήματα αυτά θα πρέπει να αξιολογηθούν σε αντιδιαστολή με τις κύριες δαπάνες ,που συνδέονται με την αγορά και την λειτουργία του εξοπλισμού ενός τέτοιου συστήματος.

Η εξοικονόμηση ενέργειας είναι αδιαμφισβήτητη στα συστήματα εκείνα στα οποία παρουσιάζονται μεγάλες απώλειες τριβής, όπως είναι τα συστήματα κλειστής κυκλοφορίας νερού. Σε τέτοια συστήματα, οι αντλίες πρέπει να λειτουργούν με σταθερό βαθμό απόδοσης ανεξάρτητα από την ταχύτητα περιστροφής τους. Από την άλλη, σε συστήματα που χαρακτηρίζονται από υψηλές στατικές πιέσεις, ο βαθμός απόδοσης των αντλιών αλλάζει με την ταχύτητα. Έτσι, μειώνεται χαρακτηριστικά στις χαμηλότερες ταχύτητες και ως εκ τούτου η εξοικονόμηση ενέργειας δεν είναι πάντα προφανής.

Υπάρχουν επίσης μερικά πιθανά προβλήματα με τη χρήση ηλεκτρονικού ελέγχου της ταχύτητας περιστροφής στα αντλητικά συστήματα, τα οποία συσχετίζονται με τις ηλεκτρομαγνητικές εκπομπές, οι οποίες πρέπει να φιλτραριστούν προσεκτικά για να αποφευχθούν παρεμβολές και να εξασφαλιστεί συμβατότητα. Μια άλλη κατηγορία προβλημάτων συνδέεται με την άντληση υγρών που περιέχουν στερεά, όπως οι βιομηχανικοί πηλοί ή τα απόβλητα. Προκειμένου να μεταφερθούν τα στερεά εντός των υγρών, το μίγμα πρέπει να κινηθεί με ταχύτητα υψηλότερη από μια καθορισμένη κρίσιμη ταχύτητα κάτω από την οποία τα στερεά κατακάθονται. Εάν τα στερεά επικαθίσουν στους σωλήνες, οι απώλειες τριβής αυξάνονται σταδιακά ενώ η διαθέσιμη διατομή ροής μειώνεται. Επίσης, οι αντλίες μπορούν να φράξουν με τα στερεά, όταν αυτές λειτουργούν με μειωμένη ταχύτητα περιστροφής. Η άντληση υπό τέτοιους όρους όχι μόνο συνοδεύεται από μεγάλη σπατάλη ενέργειας, αλλά μπορεί να προκαλέσει εμπλοκή ολόκληρου του συστήματος των αντλιών.

Κατά την εξέταση των διαφόρων επιλογών για τον έλεγχο της λειτουργίας αντλιών, πρέπει να δοθεί προσοχή τόσο στην τεχνική λειτουργία του συστήματος συνολικά, όσο και στις σχετικές δαπάνες. Οι ΑΜΣ προσφέρουν πολλά πλεονεκτήματα, αλλά τα πιθανά μειονεκτήματά τους δεν πρέπει να αγνοηθούν.

1.3 Αντλητικά συστήματα και απαιτήσεις.

Κατά το σχεδιασμό ενός αντλητικού συγκροτήματος είναι σημαντικό να έχουν μελετηθεί με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια οι απαιτήσεις πίεσης και παροχής τις οποίες θα πρέπει να είναι σε θέση να καλύψει το σύστημα. Οι απαιτήσεις αυτές θα υπαγορεύσουν την επιλογή της πλέον κατάλληλης αντλίας, αλλά και του ενδεδειγμένου τρόπου ελέγχου της. Η ανάγκη να ελεγχθεί η λειτουργία μιας αντλίας ποικίλλει αναλόγως εάν το αντλητικό σύστημα είναι σύστημα ελεγχόμενης ζήτησης ή ελεγχόμενης προσφοράς.

Τα συστήματα ελεγχόμενης ζήτησης πρέπει να είναι σε θέση να προσαρμόζουν την λειτουργία τους σύμφωνα με την μεταβαλλόμενη παροχή εισροής, και ως εκ τούτου ενδέχεται να απαιτήσουν τη λειτουργία τους με μεταβλητές στροφές. Εάν η παροχή μεταβάλλεται, μία ή περισσότερες αντλίες σταθερής ταχύτητας περιστροφής μπορούν συνήθως να διαχειριστούν αυτές τις μεταβολές, με την προϋπόθεση ότι υπάρχει μια ενδιάμεση δεξαμενή αποθήκευσης, σημαντικού όγκου, του διακινούμενου υγρού. Εντούτοις, αυτού του είδους η αντιμετώπιση μπορεί να μην είναι πάντα η πιο οικονομική, ούτε η πιο αποδοτική λύση. Ένα αντλητικό σύστημα με δυνατότητα συνεχούς μεταβολής της παροχής του μπορεί να είναι η πλέον ενδεδειγμένη λύση.

Παραδείγματα συστημάτων ελεγχόμενης ζήτησης αποτελούν τα συστήματα ανεφοδιασμού, άντλησης λυμάτων, τα συστήματα διακίνησης υγρών που χρησιμοποιούνται σε βιομηχανικές διεργασίες και τα συστήματα προστασίας για την απομάκρυνση νερού ή πλημμυρών.

Στα συστήματα ελεγχόμενης προσφοράς οι αντλίες διακινούν υγρά σε ένα κλειστό κύκλωμα μιας διεργασίας ή προς κάποιους αποδέκτες με ένα σταθερό ή μεταβλητό ρυθμό ανάλογα με τις απαιτήσεις. Τέτοια παραδείγματα είναι εκείνα που αντλούν πόσιμο νερό, ή εκείνα που διακινούν ψυκτικά μέσα ή υγρά βιομηχανικών διεργασιών. Και σε αυτήν την περίπτωση, οι μεταβολές στη ζήτηση μπορούν να αντιμετωπιστούν, είτε με αντλίες μεταβλητής ταχύτητας περιστροφής, είτε με χρήση ενδιάμεσης αποθήκευσης σε συνδυασμό με αντλίες σταθερής ταχύτητας περιστροφής.

Σε ένα αντλητικό συγκρότημα ο προσδιορισμός του κόστους λειτουργίας του αλλά και η αξιολόγηση της πιθανής εξοικονόμησης ενέργειας, θα είναι ακριβείς και

σωστοί μόνο εάν ο αναλυτής λάβει υπόψη του ότι όλα τα στοιχεία του συστήματος είναι αλληλοεξαρτώμενα.

Συνεπώς, κατά την ανάλυση ή το σχεδιασμό ενός αντλητικού συστήματος, πρέπει να καθοριστούν πρώτα οι απαιτήσεις της διαδικασίας είτε με τη μορφή ενός διαγράμματος φορτίων είτε, με το διάγραμμα διάρκειας παροχής. Στη συνέχεια πρέπει να επιλεγεί ο τρόπος ελέγχου του συστήματος (χρήση βαλβίδων, κλάδων παράκαμψης, ή συστημάτων μεταβλητών στροφών), ώστε να μπορεί να συνδυαστεί με τις χαρακτηριστικές καμπύλες της αντλίας κατά τέτοιο τρόπο που να ελαχιστοποιείται η καταναλισκόμενη ενέργεια και να μειώνεται το κόστος λειτουργίας για το πλήρες σύστημα.

Γενικά ο έλεγχος της διακίνησης οποιουδήποτε τύπου υγρού, μπορεί να επιτευχθεί με αντλίες με μεταβλητή ταχύτητα περιστροφής, αντί της χρήσης των βαλβίδων ή των σύνθετων διατάξεων παράκαμψης. Εντούτοις, πρέπει να είναι ξεκάθαρο, ότι η χρήση των συστημάτων μεταβλητής ταχύτητας, αν και είναι χρήσιμη για τη βελτίωση της ακρίβειας και της ευελιξίας του ελέγχου της διεργασίας, δεν επιτυγχάνει πάντα τον στόχο της για την επίτευξη του ελάχιστου κόστους λειτουργίας.

1.4 Δομή της παρούσας εργασίας

Στην παρούσα εργασία μελετάται αποκλειστικά η λειτουργία φυγοκεντικών αντλιών με μεταβλητές στροφές.

Συγκεκριμένα, στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύεται αρχικά η δομή και τα χαρακτηριστικά μιας φυγοκεντρικής αντλίας. Στη συνέχεια περιγράφεται ο τρόπος με τον οποίο προσδιορίζεται το σημείο λειτουργίας μιας αντλητικής εγκατάστασης καθώς και οι πρακτικές που χρησιμοποιούνται για τον έλεχγο της διακινούμενης παροχής. Τέλος αναλύεται η επίδραση της μεταβλητής ταχύτητας στα χαρακτηριστικά μιας φυγοκεντρικής αντλίας.

Στο τρίτο κεφάλαιο μελετώνται τα διάφορα είδη κινητήρων που έχουν αναπτυχθεί μέχρι σήμερα. Έτσι, αρχικά αναλύεται η λειτουργία των σύγχρονων και των επαγωγικών κινητήρων στη συνέχεια περιγράφονται οι δυνατότητες ελέγχου της ταχύτητας περιστροφής των επαγωγικών κινητήρων και τελειώνοντας το τρίτο

κεφάλαιο παρουσιάζονται οι κινητήρες νέας γενιάς που χρησιμοποιούνται σήμερα για την λειτουργία των ηλεκτρονικών κυκλοφορητών (κυκλοφορητές με μεταβλητές στροφές).

Στο τέταρτο κεφάλαιο αναλύονται διάφορες εφαρμογές των φυγοκεντρικών αντλιών μεταβλητής ταχύτητας περιστροφής. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην χρήση τους ως κυκλοφορητές με μεταβλητή ταχύτητα περιστροφής. Στο τελευταίο κεφάλαιο της εργασίας παρουσιάζεται μια αξιολόγηση των αντλητικών συστημάτων μεταβλητών στροφών. Συγκεκριμένα αναλύονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της χρήσης τους και μελετάται το κόστος του κύκλου ζωής τους. Τέλος περιγράφεται ένα παράδειγμα υπολογισμού του κόστους κύκλου ζωής ενός συστήματος αντλίων μεταβλητής ταχύτητας περιστροφής σε αντιδιαστολή, με το κόστος ενός αντίστοιχου σταθερής ταχύτητας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ

2

Επίδραση της Μεταβολής των Στροφών στην Επίδοση των Φυγοκεντρικών Αντλιών

Πολλά αντλητικά συστήματα απαιτείται να εργάζονται υπό μεταβαλλόμενες πιέσεις και παροχές. Για να καταστεί κάτι τέτοιο δυνατό θα πρέπει να μεταβληθεί, είτε η χαρακτηριστική καμπύλη της αντλίας, είτε η χαρακτηριστική καμπύλη της εγκατάστασης, έτσι ώστε από την τομή τους να προκύψει το νέο σημείο λειτουργίας. Στις περιπτώσεις εκείνες, στις οποίες μια αντλία καλείται να ικανοποιήσει μεταβαλλόμενες παροχές ή πιέσεις, η διαστασιολόγησή της έχει γίνει με τέτοιο τρόπο τις περισσότερες φορές ώστε να είναι σε θέση να ανταπεξέρχεται στη μέγιστη ζήτηση. Έτσι, συνήθως έχει υπερδιαστασιολογηθεί και κατά συνέπεια, λειτουργεί σε περιπτώσεις χαμηλής ζήτησης μη αποδοτικά . Συνεπώς, σε αυτές τις καταστάσεις λειτουργίας, η εφαρμογή συστημάτων ελέγχου των στροφών της αντλίας δίνει τη δυνατότητα να εξοικονομηθεί ενέργεια.

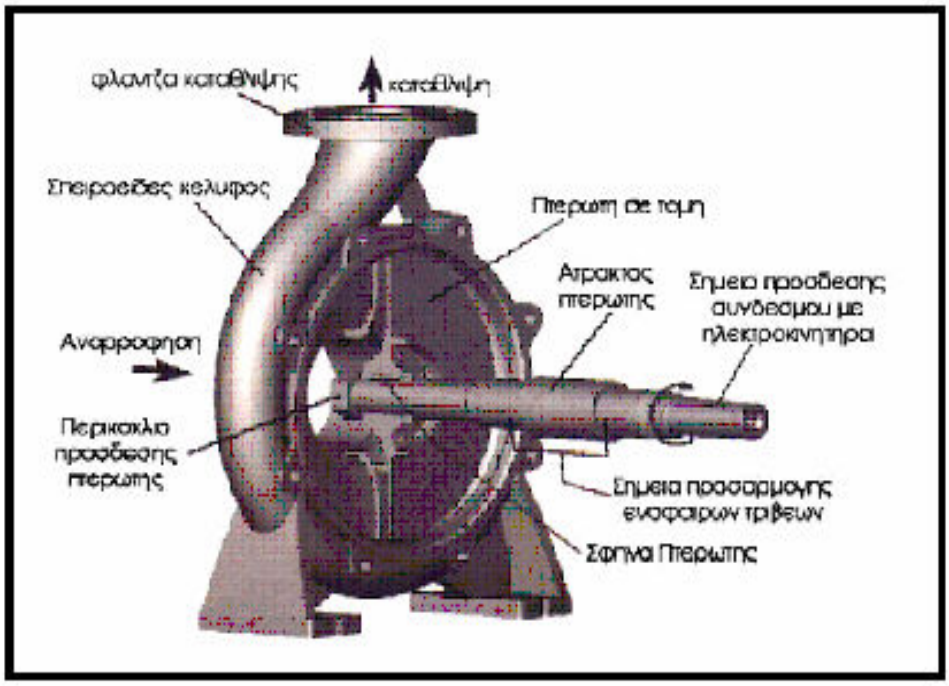
Μια οικονομικά συμφέρουσα λύση για την επίτευξη μεταβλητής λειτουργίας είναι συνήθως η μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής της αντλίας, που παρότι έχει

υψηλό κόστος κτήσης, περιορίζει το κόστος της όλης εγκατάστασης μειώνοντας τα απαιτούμενα εξαρτήματα.

Παρακάτω, αφού αναλύσουμε το σχεδιασμό των φυγοκεντρικών αντλιών, θα εξετάσουμε την επίδραση της μεταβλητής ταχύτητας περιστροφής στις χαρακτηριστικές παραμέτρους της λειτουργίας τους.

2.1. Περιγραφή φυγοκεντρικής αντλίας

Οι φυγοκεντρικές αντλίες χρησιμοποιούν την φυγόκεντρο δύναμη που δημιουργείται από έναν περιστρεφόμενο δίσκο πάνω στον οποίο υπάρχουν πτερύγια ειδικής μορφής και ο οποίος είναι γνωστός ως στροφείον ή πτερωτή (Σχήμα 2.1.).



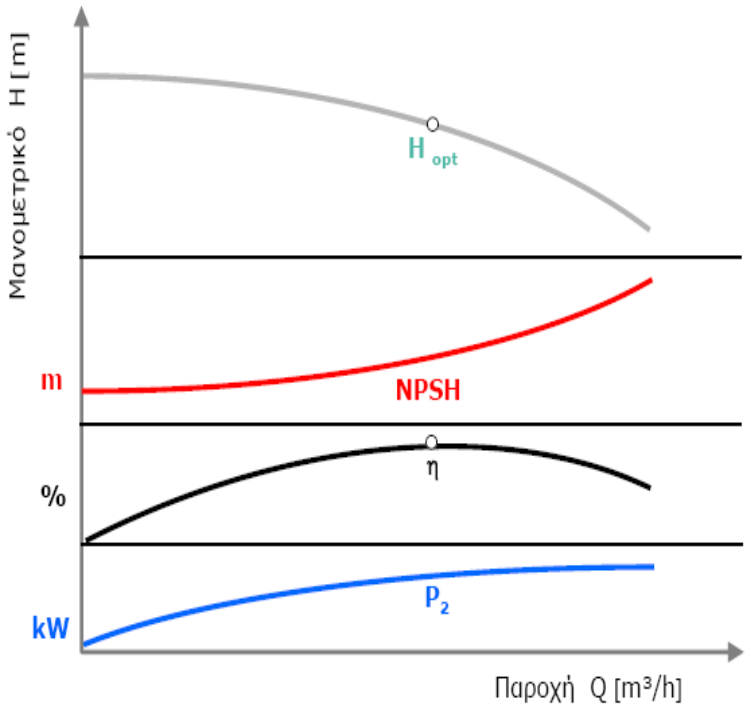
Σχήμα 2.1. Σπειροειδές κέλυφος, πτερωτή και άτρακτος σε θέση λειτουργίας.

Οι φυγοκεντρικές αντλίες αποτελούνται από περιστρεφόμενες μονάδες υψηλής ταχύτητας περιστροφής και μεγάλης δυναμικότητας, οι οποίες κινούνται είτε από μηχανές εσωτερικής καύσης, είτε από ηλεκτρικούς κινητήρες, ή ακόμα και από ατμοστρόβιλους.

Η ροή του υγρού στις φυγοκεντρικές αντλίες δημιουργείται από την κινητική ενέργεια που δημιουργεί η περιστροφική κίνηση του στροφείου. Το αναρροφούμενο υγρό φτάνει στο άνοιγμα αναρρόφησης και παρασύρεται στην περιστροφή οδηγούμενο από τα πτερύγια. Η περιστροφική κίνηση της πτερωτής προσδίδει περιστροφή στη μάζα του υγρού, η οποία οδηγείται από τα πτερύγια. Το υγρό υποχρεώνεται να διέλθει μεταξύ των πτερυγίων και να φυγοκεντριστεί έξω από την πτερωτή. Το υγρό μόλις διαφύγει από την πτερωτή, συλλέγεται σε έναν εσωτερικό χώρο της αντλίας, ο οποίος έχει σπειροειδή μορφή με συνεχώς αυξανόμενη διατομή, και τελικά φεύγει από την έξοδο της αντλίας.

Μια αντλία παράγει το ίδιο ύψος υγρού ανεξάρτητα από την πυκνότητα του υγρού που διακινεί. Η μορφή και το σχήμα τόσο της πτερωτής όσο και του περιβλήματος είναι καθοριστικής σημασίας στην επίτευξη υψηλών βαθμών απόδοσης.

Οι χαρακτηριστικές καμπύλες οι οποίες περιγράφουν την λειτουργία μιας φυγοκεντρικής αντλίας περιλαμβάνουν διαγράμματα, τα οποία στον οριζόντιο άξονα μετρούν την διακινούμενη παροχή, ενώ στον κάθετο το παραγόμενο ύψος. Επίσης χαρακτηριστικές καμπύλες σχεδιάζονται και για την μεταβολή συναρτήσει της παροχής του βαθμού απόδοσης και της ισχύος. (Σχήμα 2.2.)



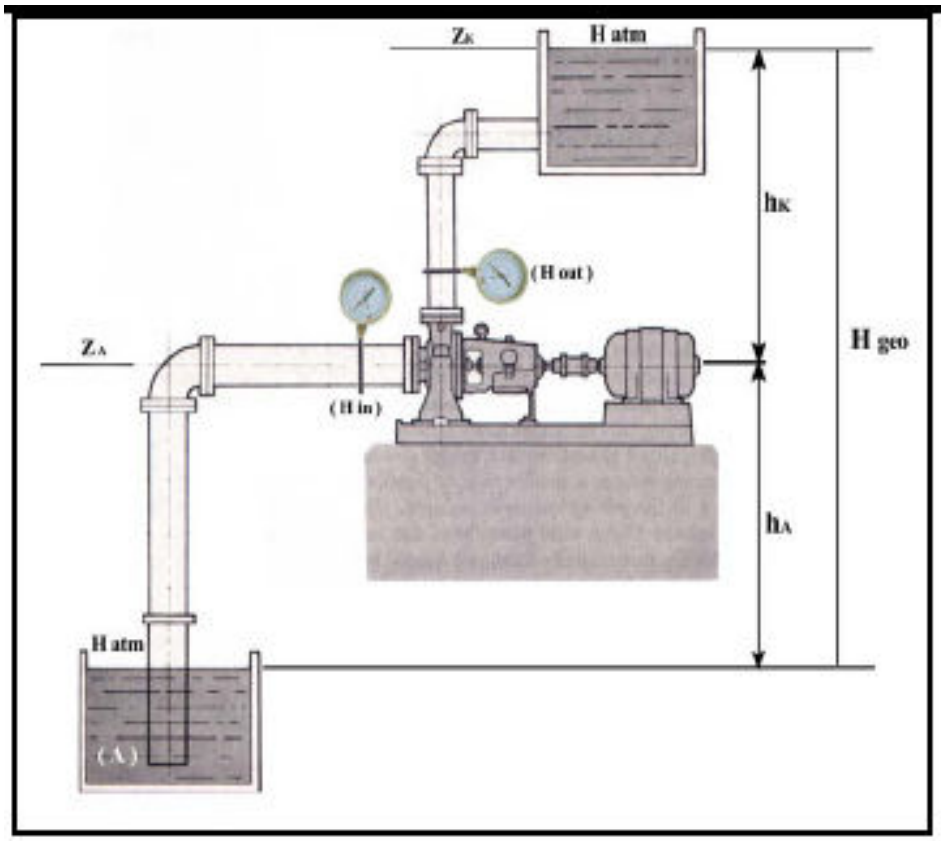
Σχήμα 2.2. Χαρακτηριστικές καμπύλες φυγοκεντρικής αντλίας

2.2 Προσδιορισμός του σημείου λειτουργίας μιας αντλητικής εγκατάστασης

Για τη διακίνηση παροχής Q κατά μήκος δεδομένης αντλητικής εγκατάστασης όπως αυτή που παρουσιάζεται στο σχήμα 2.3 (με τριβές και γεωδαιτικό ύψος ανύψωσης), το υγρό ανά μονάδα μάζας πρέπει να παραλαμβάνει ενέργεια (ύψος Η) που περιγράφεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$H = H_{\Sigma} = H_{geo} + \zeta_{EA} \bullet Q^2$$

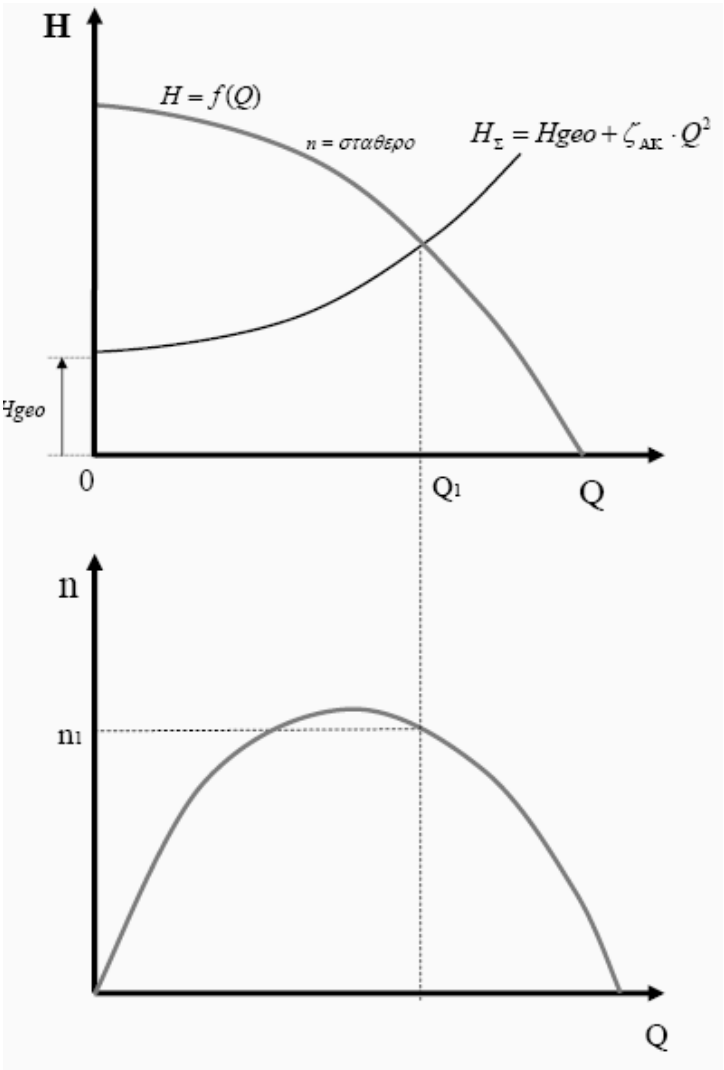
όπου, H_{geo} το γεωμετρικό ύψος ανύψωσης, δηλαδή η διαφορά στάθμης μεταξύ της δεξαμενής κατάθλιψης και της δεξαμενής αναρρόφησης και $\zeta_{EA} \bullet Q^2$ το σύνολο των υδραυλικών απωλειών της σωλήνωσης.



Σχήμα 2.3. Τυπική αντλητική εγκατάσταση με γεωδαιτικό ύψος ανύψωσης.

Η εξίσωση αυτή εκφράζει την χαρακτηριστική καμπύλη της σωλήνωσης, δηλαδή την ανά μονάδα μάζας ενέργεια που πρέπει να προσδίδεται στο υγρό έτσι ώστε αυτό να διακινείται μέσω της σωλήνωσης με παροχή Q.

Η ενέργεια αυτή H_{Σ}, είναι ίση προς το άθροισμα της δυναμικής ενέργειας h κατά την οποία αυξάνεται η ανά μονάδα μάζας ενέργεια του υγρού και της ενέργειας δh_{fEA} που δαπανάται στην κάλυψη των υδραυλικών απωλειών που εμφανίζονται στο σύνολο της σωλήνωσης.



Σχήμα 2.4. Προσδιορισμός του σημείου λειτουργίας μιας εγκατάστασης.

Το σημείο λειτουργίας της αντλητικής εγκατάστασης, δηλαδή η διακινούμενη παροχή Q, το ύψος H και ο βαθμός απόδοσης της αντλίας, με δεδομένη τη χαρακτηριστική (H, Q) της αντλίας θα είναι αυτό για την οποία η ενέργεια H= f(Q) που προσδίδει η αντλία είναι ίση με αυτή που απαιτείται για την διακίνηση της παροχής στην αντλητική εγκατάσταση και η οποία περιγράφεται από την χαρακτηριστική της σωλήνωσης H_{Σ}= f(Q).

Άρα το σημείο λειτουργίας της δεδομένης αντλητικής εγκατάστασης με τη δεδομένη αντλία θα προκύπτει ως το σημείο τομής της χαρακτηριστικής (H, Q) της αντλίας με την χαρακτηριστική (H_{Σ}, Q) της σωλήνωσης (σχήμα 2.4).

Η απαιτούμενη ισχύς από την αντλία υπολογίζεται κατά τα γνωστά από τη σχέση:

$$P = \frac{\rho \cdot g \cdot H \cdot Q}{\eta}$$

στην οποία είναι,

ρ, η πυκνότητα του διακινούμενου υγρού

g, η επιτάχυνση της βαρύτητας, g= 9,81 m/ s^2

H, το προσδιδόμενο ύψος στο υγρό από την αντλία

Q, η διακινούμενη παροχή και

η, ο βαθμός απόδοσης της αντλίας

2.3. Ανάπτυξη σπηλαίωσης της φυγόκεντρης αντλίας

Το φαινόμενο της σπηλαίωσης αναπτύσσεται σε μια ροή υγρού όταν σε μία περιοχή της ροής η στατική πίεση τείνει τοπικά να γίνει μικρότερη από την πίεση ατμοποίησης του υγρού.

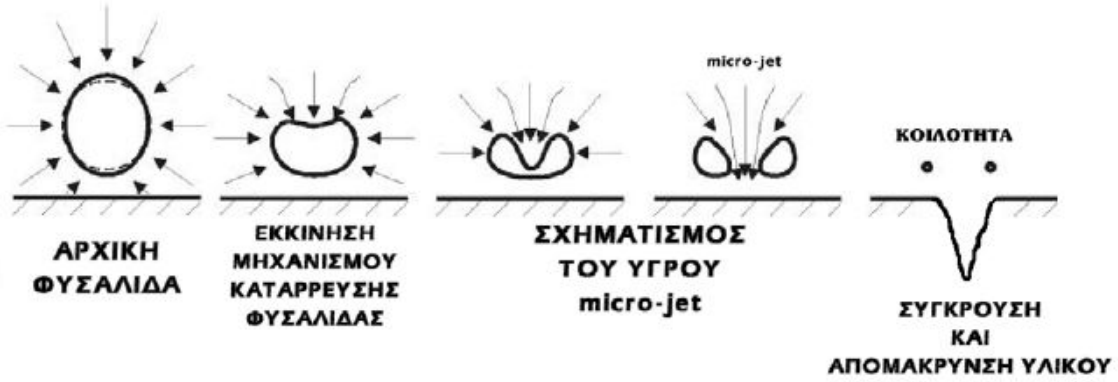
Έτσι το πρώτο βήμα για την ανάπτυξη της σπηλαίωσης είναι ο σχηματισμός φυσαλίδων στο εσωτερικό του υγρού, όταν αυτό ατμοποιείται. Στη συνέχεια, εκτός και αν υπάρχει αλλαγή στις συνθήκες λειτουργίας, νέες φυσαλίδες σχηματίζονται διαρκώς ενώ οι παλιές αυξάνονται σε μέγεθος. Οι φυσαλίδες παρασύρονται από το

υγρό καθώς αυτό ρέει από το "μάτι" του στροφείου προς το άκρο εξόδου του στροφείων κατά μήκος του πτερυγίου έως το χείλος εκφυγής (vane trailing edge).

Καθώς οι φυσαλίδες ατμού κινούνται κατά μήκος των πτερυγίων του στροφείου, η πίεση γύρω από τις φυσαλίδες αρχίζει να αυξάνεται έως ότου επιτυγχάνεται ένα σημείο όπου η πίεση έξω από τη φυσαλίδα είναι μεγαλύτερη από την πίεση μέσα σε αυτή. Έτσι, στο σημείο αυτό θα πρέπει να επαναυγροποιηθεί η μάζα του ατμού. Αυτό που ακολουθεί είναι η κατάρρευση της φυσαλίδας (σχήμα 2.4) [11].

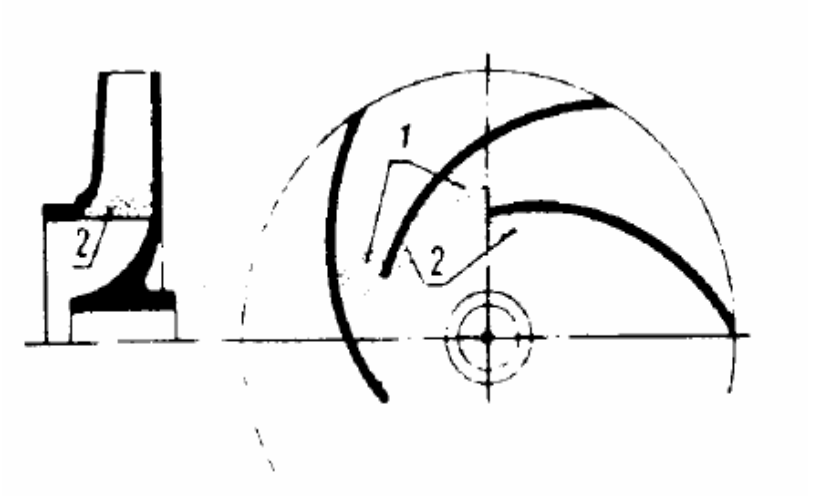
Εκατοντάδες φυσαλίδες καταρρέουν (53 περίπου στο ίδιο σημείο κάθε πτερυγίου του στροφείου). Λόγω ακριβώς της μεγάλης διαφοράς στην πυκνότητα μεταξύ της υγρής φάσης και της φάσης ατμού, το φαινόμενο της επανυγροποίησης συνοδεύεται τοπικά από σημαντική αύξηση της στατικής πίεσης κρουστικής μορφής. Η αύξηση της κρουστικής μορφής στατικής πίεσης εξηγείται ποιοτικά από το ότι κατά την επανυγροποίηση μιας φυσαλίδας ατμού, ο όγκος υγρού που αντιστοιχεί στην μάζα του ατμού είναι πολύ μικρός. Άρα με την επανυγροποίηση της φυσαλίδας σχηματίζεται ένα κενό που τείνει να καταληφθεί με ορμή από το περιβάλλοντα υγρό το οποίο επιταχύνεται γρήγορα υπό την μορφή υγρού micro-jet για να γεμίσει το κενό που δημιουργήθηκε. Τότε, το micro-jet διαρρηγνύει τη φυσαλίδα με δύναμη που δρα σαν σφυρηλάτηση. Η απότομη αυτή επιβράδυνση των υγρών στοιχείων αντιστοιχεί σύμφωνα με το θεώρημα της ορμής σε υπερβολική τοπική αύξηση της στατικής του πίεσης. Έχουν αναφερθεί πιέσεις κατάρρευσης φυσαλίδων μεγαλύτερες από 1GPa.

Κατά την κατάρρευση της φυσαλίδας, εκπέμπεται ηχητικό κύμα που πηγάζει από το σημείο της κατάρρευσης. Ο κύκλος ζωής μιας φυσαλίδας έχει υπολογιστεί ότι είναι της τάξεως των 0,003 δευτερολέπτων.



Σχήμα 2.4. Η εξέλιξη του φαινομένου της σπηλαίωσης.

Οι πλέον πιθανές περιοχές ανάπτυξης σπηλαίωσης είναι επομένως αυτές στις οποίες η στατική πίεση είναι ήδη χαμηλή, άρα στην περίπτωση των φυγοκεντρικών αντλιών είναι στη διατομή εισόδου της πτερωτής, δηλαδή κοντά στην ακμή πρόσπτωσης των πτερυγίων και μάλιστα στην πλευρά υποπίεσης.



Σχήμα 2.5. Περιοχές εμφάνισης σπηλαίωσης.

Το φαινόμενο της σπηλαίωσης συνοδεύεται από αρνητικές συνέπειες, με κυριότερες τις ακόλουθες:

1. Οι αναπτυσσόμενες φυσαλίδες μπορούν να διαβρώσουν την επιφάνεια του πτερυγίου ειδικά όταν το διακινούμενο υγρό περιέχει διαβρωτικές ουσίες (οξυγόνο ή οξέα). Αρχικά η επιφάνεια των μετάλλων σκληραίνει και η τοπική υψηλή θερμοκρασία (μέχρι 10.000 °C) έχει επιπτώσεις στο υλικό ακριβώς κάτω από την επιφάνεια του, καθιστώντας το λίγο "σπογγώδες", έτσι ώστε οι ρωγμές της επιφάνειας να επιτρέψουν την όξινη επίθεση στο εσωτερικό του δημιουργώντας του μια επιφάνεια με «κρατήρες». Η φθορά που προέρχεται από τη σπηλαίωση διαφέρει μακροσκοπικά από τις συνήθεις διαβρώσεις των μετάλλων γιατί εμφανίζεται μόνο σε ορισμένα σημεία και όχι σε όλο το μήκος των γραμμών ροής του υγρού. Η αντοχή των μετάλλων στη σπηλαίωση εξαρτάται από τη χημική τους σύνθεση και από το βαθμό λειάνσεως της επιφάνειάς τους. Από πειραματικά αποτελέσματα (Schroter, 1953)

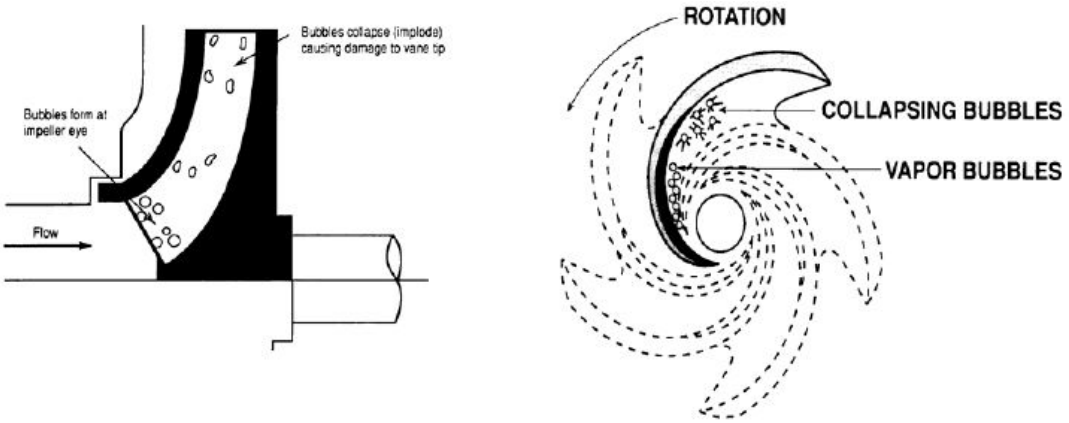
διαπιστώθηκε ότι τα διάφορα υλικά έχουν διαφορετικό βαθμό αντοχής στη σπηλαίωση. Η κατάταξή τους κατά σειρά αυξανόμενης ανθεκτικότητας είναι:

- Μόλυβδος
- Χυτοσίδηρος
- Ορείχαλκος
- Αλουμίνιο με άνθρακα
- Ανοξείδωτο ατσάλι

2. Αυξάνονται σημαντικά τα επίπεδα θορύβου που προκαλείται από την πρόσκρουση του υγρού στις μεταλλικές επιφάνειες κατά την απότομη συμπύκνωση των φυσαλίδων.

3. Οι διαδοχικές αυξομειώσεις της πιέσεως του υγρού προκαλούν κραδασμούς, που μεταφέρονται σε όλα τα εξαρτήματα της αντλίας ακόμη και στη βάση στήριξής της. Οι κραδασμοί αυτοί προκαλούνται από τις ταλαντώσεις των τμημάτων στα οποία προσκρούει το υγρό. Όσο μεγαλύτερη είναι η αντλία τόσο πιο έντονοι είναι οι θόρυβοι και οι κραδασμοί αυτοί.

4. Εάν το φαινόμενο είναι έντονο, η ανάπτυξη των φυσαλίδων μπορεί να δημιουργήσει αρχικά τοπικό στραγγαλισμό της ροής και να μειώσει την απόδοση της αντλίας. Σε ακραίες περιπτώσεις είναι δυνατόν να παρατηρηθεί ολική απώλεια του ύψους της αντλίας και διακοπή της λειτουργίας της.



Σχήμα 2.6. Ανάπτυξη σπηλαίωσης σε φυγοκεντρικές αντλίες [13].

Το ελάχιστο μανομετρικό ύψος, που απαιτείται ώστε να αποφευχθεί η σπηλαίωση σε μία αντλία που διακινεί ένα δεδομένο υγρό και για μια δεδομένη παροχή καλείται «απαιτούμενο καθαρό θετικό ύψος αναρρόφησης» ή «Net Positive Suction Head required» (NPSHr). Σε ένα αντλητικό σύστημα, η διαφορά μεταξύ της πραγματικής πίεσης ή του διαθέσιμου μανομετρικού ύψους (μετρημένο από την φλάντζα αναρρόφησης της αντλίας) και της πίεσης ατμών του συγκεκριμένου υγρού καλείται «διαθέσιμο καθαρό θετικό ύψος αναρρόφησης» ή «Net Positive Suction Head available» (NPSHa).

Το μέγεθος NPSHr είναι χαρακτηριστικό της λειτουργίας και της σχεδίασης της αντλίας και ιδιαίτερα της ακμής πρόπτωσης και άρα η καμπύλη του συναρτήσει της διακινούμενης παροχής Q, δηλαδή η χαρακτηριστική καμπύλη σπηλαίωσης για σταθερή ταχύτητα περιστροφής της αντλίας, αποτελεί μία από τις χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας (σχήμα 2.2 και σχήμα 2.7). Από την καμπύλη (NPSHr, Q) γίνεται φανερή η συνεχής αύξηση της τιμής του NPSHr συναρτήσει της διακινούμενης παροχής Q και μάλιστα παραβολικά σχεδόν. Το γεγονός αυτό εξηγείται από την παρακάτω σχέση που εκφράζει την εξίσωση Bernoulli από την είσοδο της αντλίας μέχρι τη θέση ελάχιστης πίεσης στο πτερύγιο:

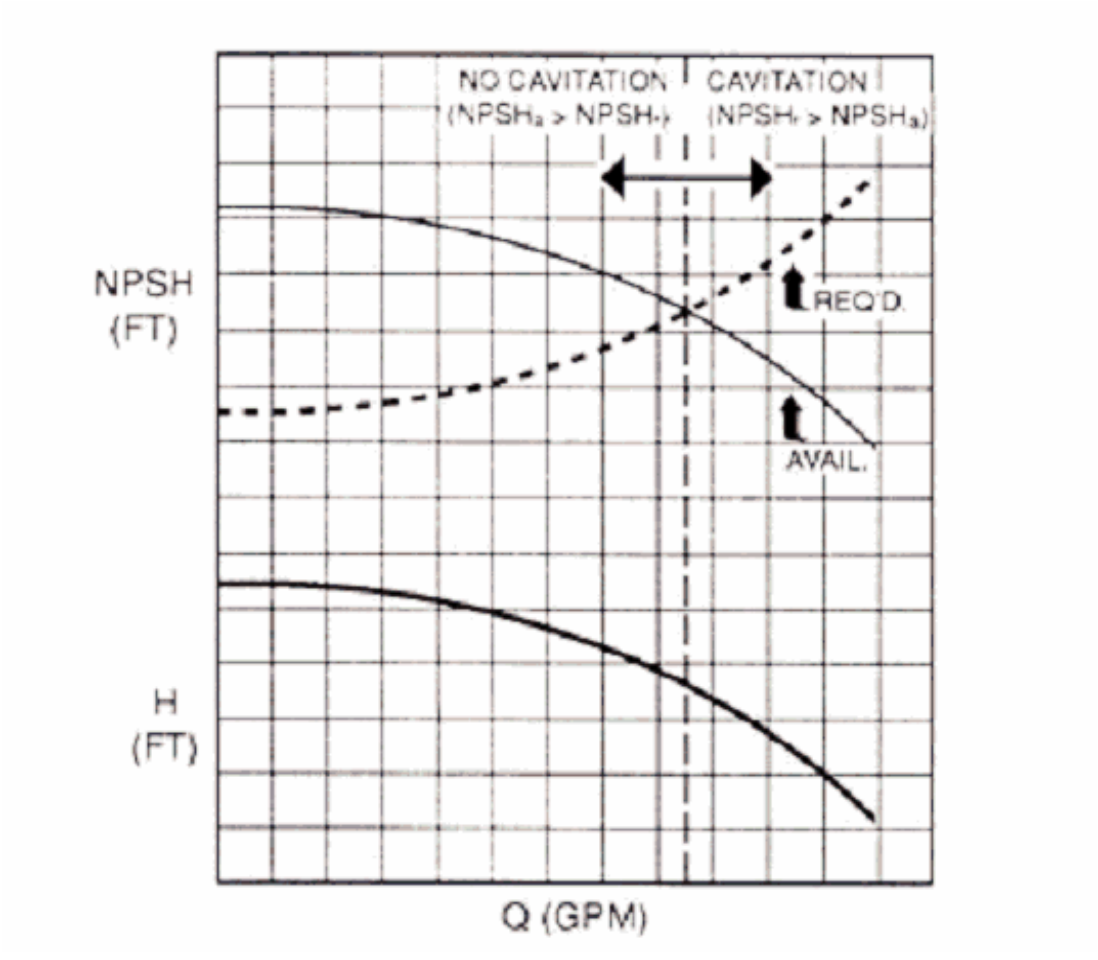
$$\text{NPSHr} = (\alpha+\zeta)\bullet\frac{c_1^2}{2g}$$

Έτσι θεωρώντας, σε πρώτη προσέγγιση, τις τιμές των συντελεστών απωλειών α και ζ της εξίσωσης ανεξάρτητες της παροχής, και εφόσον ο όρος της ταχύτητας στην είσοδο της πτερωτής c_1^2 είναι ανάλογος της παροχής Q^2, σύμφωνα με την εξίσωση της συνέχειας, προκύπτει το συμπέρασμα ότι η τιμή του NPSHr μεταβάλλεται σχεδόν παραβολικά με το τετράγωνο της διακινούμενης παροχής (σχήμα 2.7) [1].

Από την άλλη το διαθέσιμο καθαρό θετικό ύψος αναρρόφησης χαρακτηρίζει την εγκατάσταση της αντλίας. Για αντλία που αναρροφά από δεξαμενή απόλυτης στατικής πίεσης H_E η τιμή του NPSHa εκφράζεται από την εφαρμογή της γενικευμένης εξίσωσης Bernoulli:

$$\text{NPSHa} = H_{oe} - H_s = H_E - h_e - \zeta_e \bullet Q^2 - H_s$$

στην οποία με $h_e = z_a - z_E$ συμβολίζεται το ύψος αναρρόφησης, με $\zeta_e \bullet Q^2$ οι υδραυλικές απώλειες της σωλήνωσης αναρρόφησης, συμπεριλαμβανομένων των απωλειών εισόδου του υγρού στην σωλήνωση και με H_s η πίεση ατμοποίησης του υγρού (σε m).



Σχήμα 2.7. Μεταβολή των NPSHa NPSHr συναρτήσει της παροχής.

Για δεδομένη αντλητική εγκατάσταση η μεταβολή του NPSHa συναρτήσει της παροχής Q, για σταθερά τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά, είναι μια φθίνουσα παραβολή [1] (σχήμα 2.7). Αντίθετα το κρίσιμο ύψος σπηλαίωσης NPSHr, της αντλίας αυξάνει σχεδόν παραβολικά με την διακινούμενη παροχή. Άρα όσο η παροχή Q είναι μικρότερη από την παροχή Q_κ για την οποία NPSHa≈ NPSHr η λειτουργία της αντλίας είναι απαλλαγμένη σπηλαίωσης.

Το απαιτούμενο καθαρό θετικό ύψος αναρρόφησης μεταβάλλεται κατά προσέγγιση με το τετράγωνο της ταχύτητας με τον ίδιο τρόπο όπως και το ύψος της αντλίας και η μετατροπή του από μια ταχύτητα σε μια άλλη βασίζεται στις παρακάτω εξισώσεις:

$$Q \propto N$$
$$NPSHr \propto N^2$$

Από τα παραπάνω προκύπτει το συμπέρασμα ότι σε περιπτώσεις αντλιών μεταβλητών στροφών είναι ουσιαστικό να εξεταστεί η μεταβολή του απαιτούμενου καθαρού θετικού ύψους αναρρόφησης με την ταχύτητα περιστροφής.

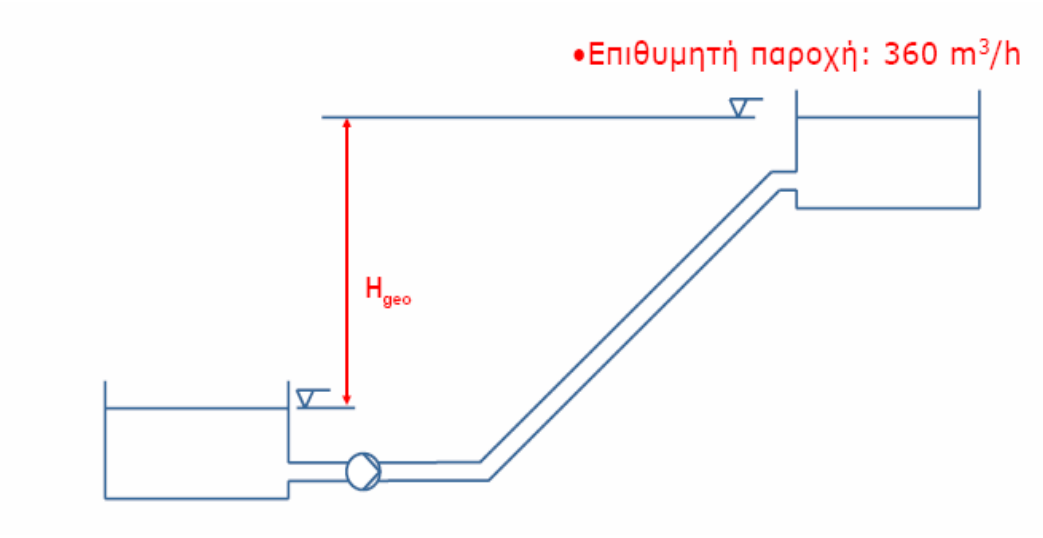
2.4 Δυνατότητες ελέγχου της διακινούμενης παροχής

Όπως έχει ήδη αναφερθεί παραπάνω, ένα συχνό πρόβλημα που συναντά κανείς στις περισσότερες αντλητικές εγκαταστάσεις είναι η υπερδιαστασιολόγηση των αντλιών που χρησιμοποιούνται. Οι κύριες αιτίες που οδηγούν στην υπερδιαστασιολόγηση συνοψίζονται στις εξής:

- Επιλογή μεγάλης αντλίας για κάλυψη μελλοντικών αναγκών
- Υπερβολική προσαύξηση συντελεστών ασφαλείας στον υπολογισμό του απαιτούμενου μανομετρικού ύψους
- Επιλογή αντλίας για κάλυψη μέγιστου φορτίου και κακή ή ανύπαρκτη προσαρμογή σε συνθήκες μερικού φορτίου
- Επιλογή μεγάλης αντλίας από ανάγκη επίλυσης άλλων προβλημάτων του συστήματος (υδραυλική εξισορρόπηση, διατήρηση πίεσης, περιεκτικότητα αέρα ή/και σωματιδίων στο νερό, κλπ.).

Προκειμένου να γίνουν προφανή τα οφέλη από τη λειτουργία μια αντλίας σε μεταβλητές στροφές παρουσιάζονται στη συνέχεια και αξιολογούνται οι διάφορες δυνατότητες εξοικονόμησης ηλεκτρικής ενέργειας που προτείνονται στην προσπάθεια μείωσης της παροχής μιας τυπικής αντλητικής εγκατάστασης. Στο παράδειγμα που

επιλέχθηκε να εξεταστεί περιγράφεται ένα ανοικτό σύστημα ανύψωσης νερού όπως αυτό που παρουσιάζεται στο σχήμα 2.8.



Σχήμα 2.8. Τυπική αντλητική εγκατάσταση ανύψωσης νερού.

Η αντλία που επιλέχθηκε παρέχει 420 m^3/h ενώ για την κάλυψη των αναγκών του συστήματος απαιτούνται μόνο 360 m^3/h.

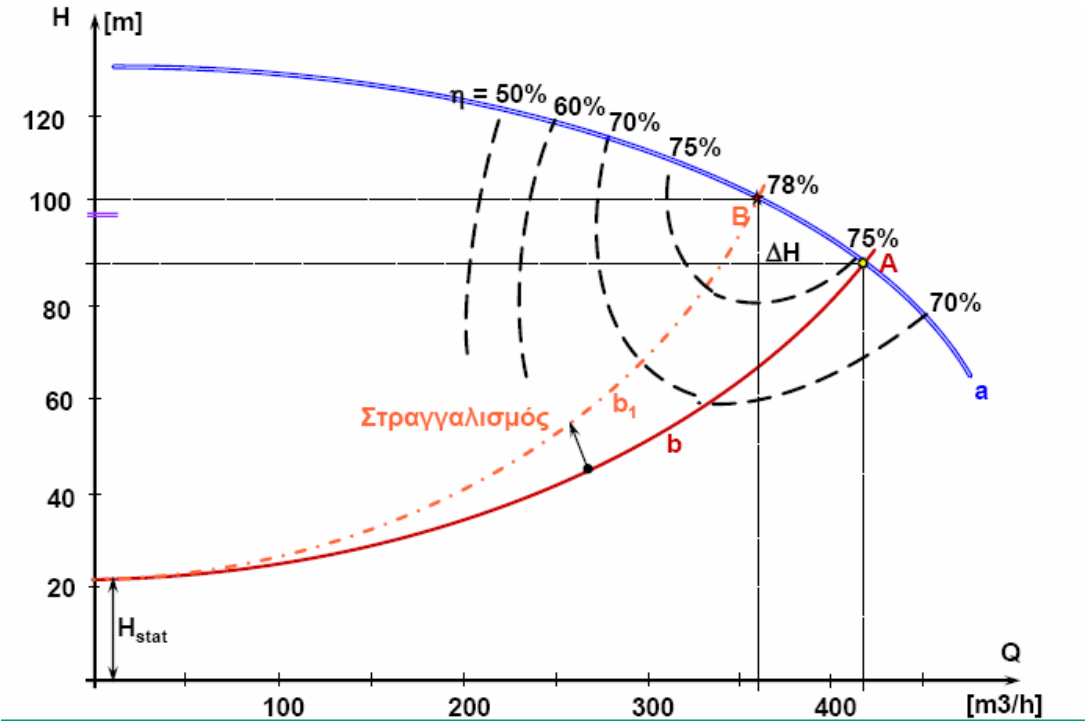
Θεωρώντας για το παράδειγμά μας ως διακινούμενο υγρό το νερό με πυκνότητα ίση με ρ= 1000 kg/m^3 και θεωρώντας ως αρχικό αποδεκτό βαθμό απόδοσης για την επιλογή της αντλίας την τιμή η = 74,5%, προσδιορίζεται η θέση του αρχικού σημείου λειτουργίας Α από την τομή της χαρακτηριστικής καμπύλης της εγκατάστασης (καμπύλη b) με την χαρακτηριστική καμπύλη της αντλίας (σχήμα 2.9).

Προκύπτει έτσι για το σημείο Α παροχή,

$$Q = 420\ m^3/h$$

και απαιτούμενη ισχύς από τον κινητήρα ίση με:

$$\mathbf{P = 138kW}$$



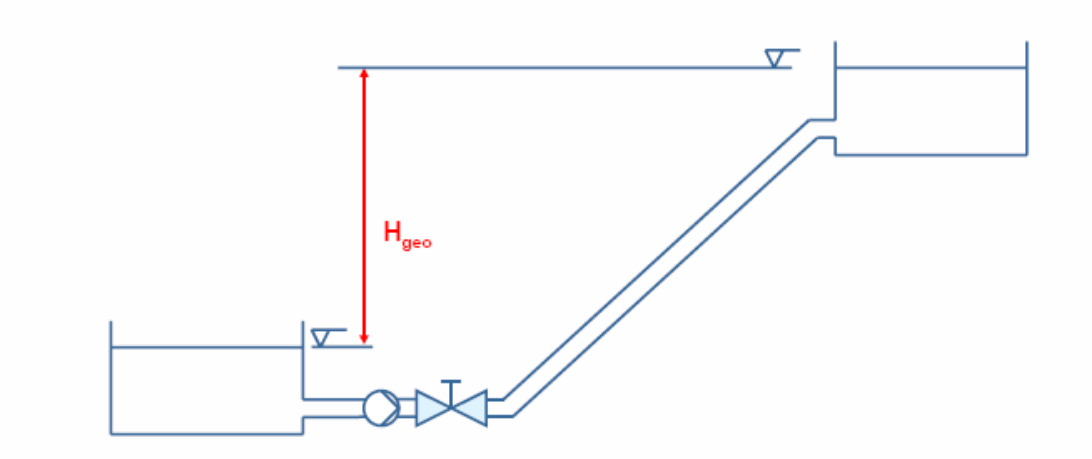
Σχήμα 2.9. Αρχικό σημείο λειτουργίας (*σημείο Α*) και σημείο λειτουργίας μετά από στραγγαλισμό (*σημείο Β*).

Παρακάτω θα αναλύσουμε τους εναλλακτικούς τρόπους με τους οποίους μπορεί να επιτευχθεί η επιθυμητή μείωση της διακινούμενης παροχής,

•Στραγγαλισμός
•By-pass
•Μείωση της διαμέτρου της πτερωτής
•Μείωση της ταχύτητας περιστροφής της αντλίας

2.4.1 Χρήση βάνας στραγγαλισμού

Για τον περιορισμό της διακινούμενης παροχής στις πλέον συνηθισμένες εφαρμογές στραγγαλισμού τοποθετείται κατάλληλη βάνα στον αγωγό κατάθλιψης της αντλίας.



Σχήμα 2. 10. Αντλητική διάταξη με βάνα στραγγαλισμού για την ρύθμιση της παροχής.

Με τον τρόπο αυτό αυξάνεται η υδραυλική αντίσταση της εγκατάστασης και μεταβάλλεται η χαρακτηριστική καμπύλη της εγκατάστασης η οποία γίνεται περισσότερο απότομη (καμπύλη b1, σχήμα 2.9).

Στο νέο σημείο λειτουργίας B (σχήμα 2.9) επιτυγχάνεται η επιθυμητή παροχή,

$$Q = 360\ m^3/h$$

με μανομετρικό ύψος

$$H = 103\ m$$

και βαθμό απόδοσης ίσο με

$$\eta = 78\% .$$

Η ισχύς στον κινητήρα υπολογίζεται σε αυτή την περίπτωση ίση με:

$$\mathbf{P = 130\ kW}.$$

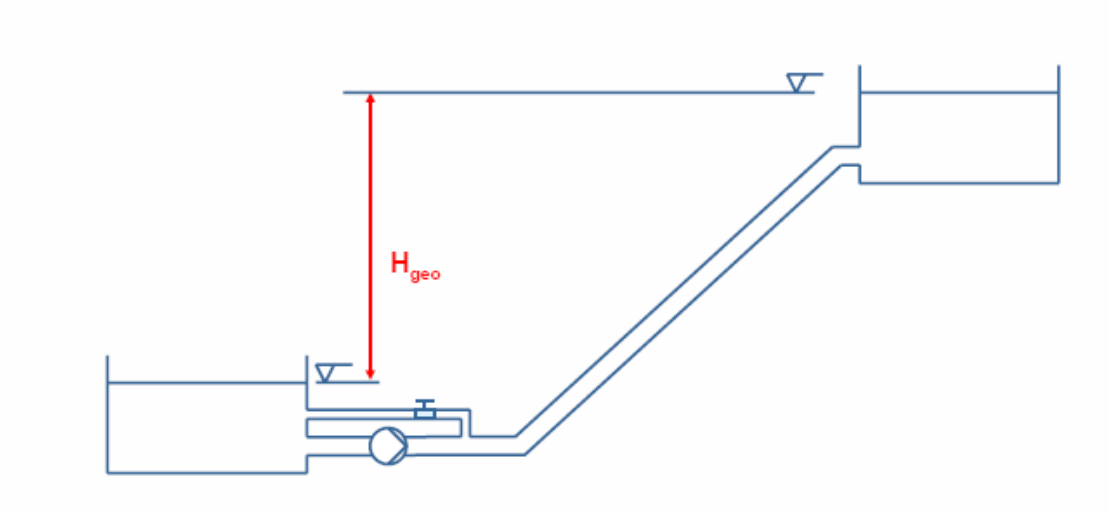
Η παραπάνω μέθοδος ρύθμισης παρουσιάζει σημαντικές απώλειες και συνεπάγεται υψηλό κόστος λειτουργίας γιατί το ολικό ύψος που δημιουργεί η αντλία στην χαμηλή παροχή μόνο μερικώς ζητείται από την σωλήνωση και το υπόλοιπο μετατρέπεται σε θερμότητα του υγρού. Ο στραγγαλισμός πρέπει πάντοτε να λαμβάνει

χώρα στην πλευρά της κατάθλιψης της αντλίας και όχι στην αναρρόφησή της για αποφυγή σπηλαίωσης.

Ο στραγγαλισμός είναι μια φθηνή μέθοδος από άποψη κόστους εγκατάστασης αλλά η οικονομία στη λειτουργία πρέπει να διερευνηθεί προτού υιοθετηθεί ιδιαίτερα στις περιπτώσεις αντλιών μεγάλης ισχύος. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται κυρίως για την ρύθμιση της παροχής μικρών φυγοκεντρικών αντλιών.

2.4.2 Εφαρμογή κλάδου παράκαμψης By-pass

Κατά τη λειτουργία με By-Pass ένα μέρος της παροχής οδηγείται μέσω διάταξης από την κατάθλιψη της αντλίας απ'ευθείας στην αναρρόφησή της.



Σχήμα 2. 11. Αντλητική διάταξη με κλάδο παράκαμψης για την ρύθμιση της παροχής.

Η αντίσταση της εγκατάστασης μειώνεται και κατά αυτόν τον τρόπο διαμορφώνεται η νέα καμπύλη της εγκατάστασης b_2 και προκύπτει το καινούργιο σημείο λειτουργίας C με τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

μανομετρικό ύψος, H =67 m και

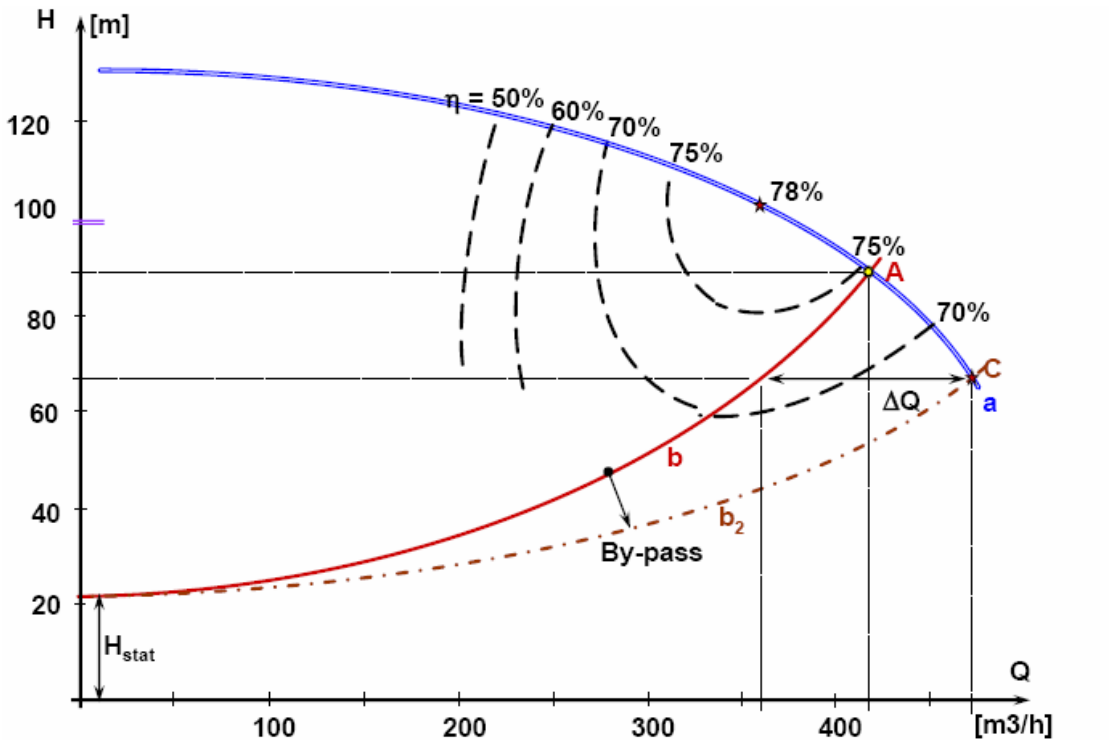
διακινούμενη παροχή, Q = 480 m^3/h.

Βαθμός απόδοσης, η =65%

Από αυτή την παροχή μια ποσότητα ΔQ ίση με 120 m^3/h επιστρέφει «άχρηστη» πίσω μέσω του By-pass.

Υιοθετώντας τη λύση αυτή καταναλώνεται για την λειτουργία της αντλίας ισχύς κινητήρα ίση με,

P = 135 kW.



Σχήμα 2.12. Σημείο λειτουργίας της εγκατάστασης με κλάδο παράκαμψης (*σημείο C*)

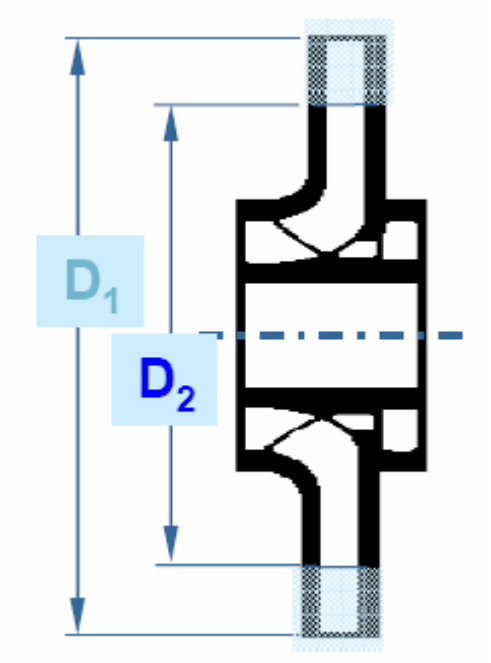
Αυτή η μέθοδος ρύθμισης έχει αξία κυρίως σε αντλίες των οποίων η ισχύς ελαττώνεται με την αύξηση της παροχής δηλαδή σε αξονικές και σε αναγεννητικές αντλίες.

Η παράκαμψη εφαρμόζεται επίσης όταν επιβάλλεται η λειτουργία της αντλίας σε πολύ μικρές παροχές οπότε δημιουργούνται προβλήματα στην λειτουργία της όπως για παράδειγμα αύξηση της θερμοκρασίας στην αντλία. Σε αυτήν την

περίπτωση με την παράκαμψη και την ανακυκλοφορία ενός μέρους του υγρού από την αντλία επιτυγχάνεται μια τεχνητή αύξηση της παροχής από την αντλία χωρίς να αυξάνεται η παροχή στο σύστημα.

2.4.3. Μείωση διαμέτρου της πτερωτής

Με τη μείωση της διαμέτρου της πτερωτής επηρεάζουμε τη χαρακτηριστική καμπύλη της αντλίας. Ας θεωρήσουμε πτερωτή αντλίας ακτινικής ροής στην διατομή εξόδου (δηλαδή χαμηλού ειδικού αριθμού στροφών, συνήθως n_q<4200, Q σε m^3/h), εξωτερικής διαμέτρου D_2 και πλάτους b_2.



Σχήμα 2.13. Τρόχισμα της πτερωτής αντλίας.

Εάν η πτερωτή τροχισθεί σε διάμετρο $D_{2x}<D_2$ τότε λόγω της ακτινικής ροής κατά την έξοδο και για μικρή μείωση της διαμέτρου είναι εύλογη η διατύπωση των ακόλουθων σχέσεων:

$$b_{2x} \approx b_2 \text{ και}$$

$$\beta_{2\chi} \approx \beta_2$$

Για σταθερή ταχύτητα περιστροφής n (RPM) και την ίδια πτερωτή εξωτερικής διαμέτρου D_2 και D_{2x} τα τρίγωνα ταχυτήτων στην έξοδο της πτερωτής είναι όμοια μεταξύ τους για παροχή Q και Q_x αντίστοιχα:

$$\frac{Qu_x}{Qu} = \frac{\pi D_{2x} b_{2x} c_{h2x}}{\pi D_2 b_2 c_{n2}} \approx \frac{Q_x}{Q}$$

Λαμβάνοντας υπόψη ότι $b_{2x} \approx b_2$ και $\frac{c_{n2x}}{c_{n2}} = \frac{u_{2x}}{u_2} = \frac{D_{2x}}{D_2}$ η εξίσωση γράφεται:

$$\frac{Q_x}{Q} = \left(\frac{D_{2x}}{D_2}\right)^2$$

Θεωρώντας ότι μεταξύ των πτερωτών διαμέτρου D_2 και D_{2x} ο βαθμός απόδοσης της πτερύγωσης n_i παραμένει ουσιαστικά αμετάβλητος από την εξίσωση Euler προκύπτει για το θεωρητικό ύψος της πτερωτής λαμβάνοντας επιπλέον υπόψη την ομοιότητα των τριγώνων στην έξοδο της πτερωτής ότι :

$$\frac{H_{ux}}{H_u} = \frac{u_{2x} \cdot c_{n2x}}{u_2 \cdot c_{n2}} = \left(\frac{D_{2x}}{D_2}\right)^2$$

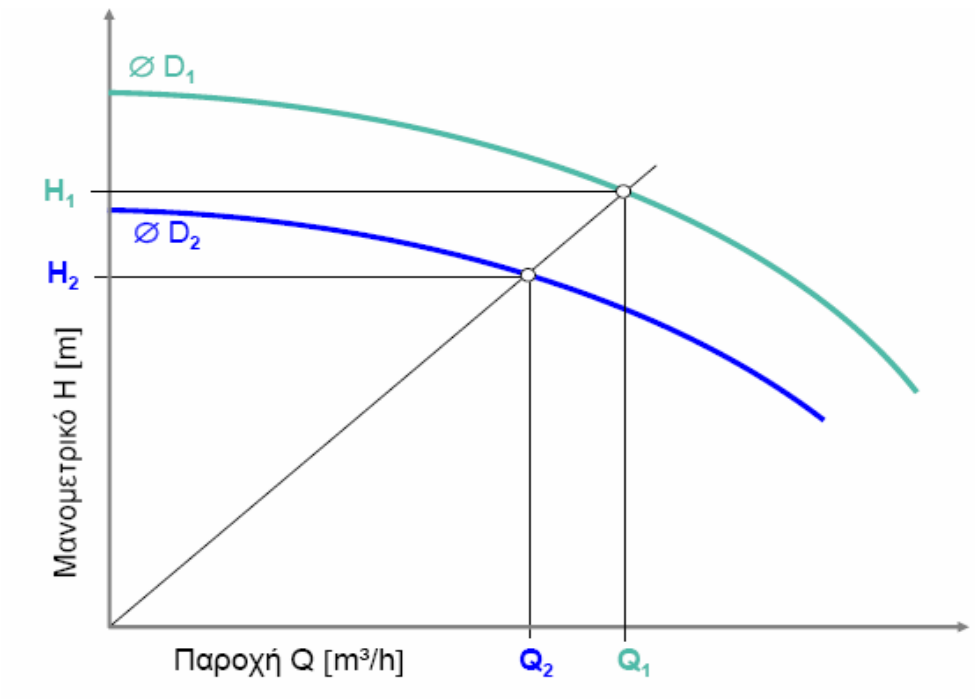
Θεωρώντας ότι για μικρή μείωση της διαμέτρου της πτερωτής ο υδραυλικός βαθμός απόδοσης παραμένει ουσιαστικά αμετάβλητος έχουμε:

$$\frac{H_x}{H} = \left(\frac{D_{2x}}{D_2}\right)^2$$

Από τις εξισώσεις προκύπτει ότι για τα «αντίστοιχα» (ως προς τη διατομή εξόδου μόνο) σημεία λειτουργίας ισχύει η σχέση :

$$\frac{Q_x}{Q} = \frac{H_x}{H} = \left(\frac{D_{2x}}{D_2}\right)^2,$$

δηλαδή τα σημεία αυτά συνδέονται στο διάγραμμα (H,Q) με ευθεία γραμμή που διέρχεται από την αρχή των αξόνων (H=0, Q=0) (σχήμα 2.14).



Σχήμα 2.14. Μεταβολή της χαρακτηριστικής της αντλίας λόγω μείωσης της διαμέτρου.

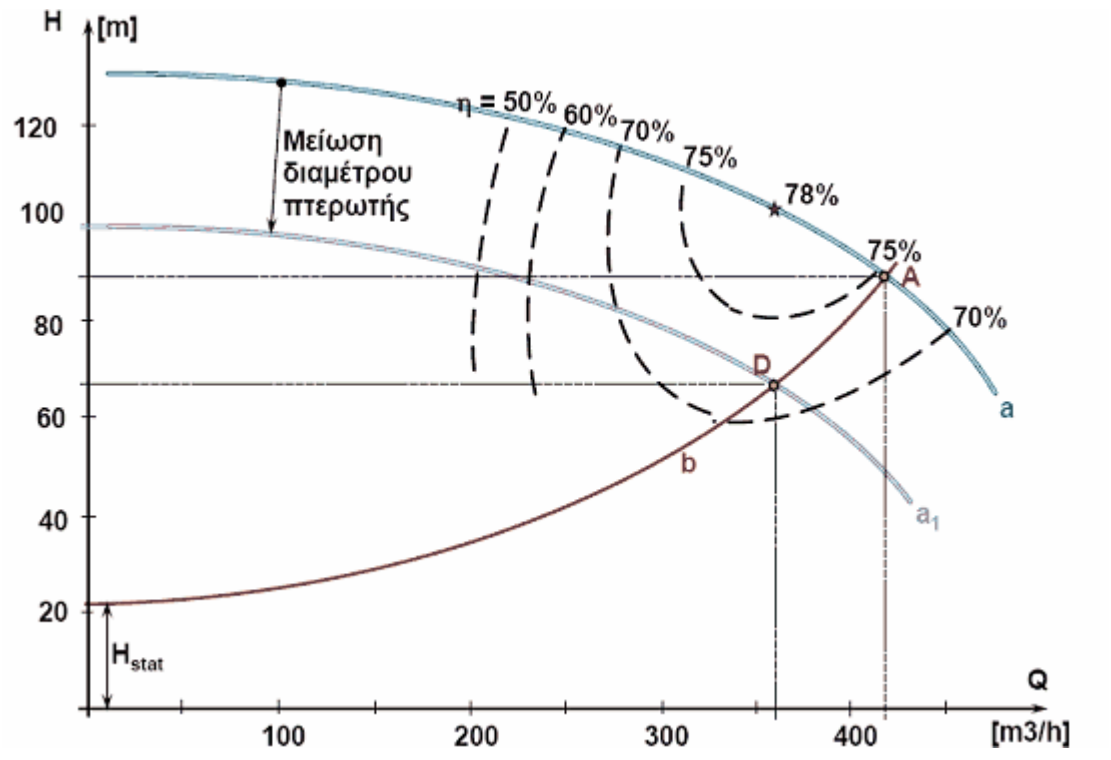
Από την εξίσωση και για δεδομένο λόγο $\left(\frac{D_{2x}}{D_2}\right)$ προσδιορίζεται σε πρώτη προσέγγιση η χαρακτηριστική $(H, Q)_x$ της δεδομένης αντλίας με δεδομένη την χαρακτηριστική (H, Q) στην αρχική διάμετρο (και για την ίδια ταχύτητα περιστροφής) (σχήμα 2.14).. Αντίστροφα, εάν είναι δεδομένο το επιθυμητό σημείο λειτουργίας της αντλίας από την εφαρμογή της εξίσωσης προσδιορίζεται η διάμετρος D_{2x} στην οποία πρέπει να τροχιστεί η αρχική πτερωτή της αντλίας.

Για να ισχύουν τα προηγούμενα θα πρέπει η μείωση της διαμέτρου να μην ξεπερνά το 20% της D_2. Στην πράξη αποδεικνύεται ότι μείωση του ολικού ύψους κατά 10% επιτυγχάνεται χωρίς ουσιαστική πτώση του ολικού βαθμού απόδοσης ενώ η μείωση του H κατά 20% συνοδεύεται με πτώση του βαθμού απόδοσης κατά 2-3%.

Έτσι, στο παράδειγμά μας προκύπτει η νέα χαρακτηριστική καμπύλη a1 (σχήμα 2.15) της αντλίας και καταλήγουμε στο σημείο λειτουργίας D με τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

μανομετρικό ύψος, H = 67 m και

διακινούμενη παροχή, Q =360 m^3/ h.



Σχήμα 2.15. Σημείο λειτουργίας της εγκατάστασης μετά από τρόχισμα της πτερωτής της αντλίας (σημείο D)

Μειονέκτημα αυτής της μεθόδου αποτελεί η συνακόλουθη μείωση του βαθμού απόδοσης της αντλίας, που στην περίπτωσή μας γίνεται ίσος με:

η= 72%.

Η ισχύς που προκύπτει από την εφαρμογή αυτής της μεθόδου είναι σημαντικά μειωμένη σε σχέση με την αρχική και ισούται με

P = 91 kW.

Το πιο σημαντικό όμως μειονέκτημα του κοψίματος της πτερωτής είναι ότι η τροποποίηση είναι μόνιμη και δεν υπάρχει δυνατότητα μελλοντικής αύξησης της επίδοσης της αντλίας.

.

2.4.4 Μείωση της ταχύτητας περιστροφής της αντλίας

Με τη μείωση των στροφών της αντλίας (χρησιμοποιώντας κινητήρα μεταβλητών στροφών) επηρεάζουμε και σε αυτή την περίπτωση την χαρακτηριστική καμπύλη της αντλίας (σχήμα 2.16). Η ανάλυση αφορά σημεία λειτουργίας μεταξύ των οποίων ικανοποιείται η συνθήκη ομοιότητας της ροής, στα οποία δηλαδή τα αντίστοιχα τρίγωνα ταχυτήτων είναι όμοια μεταξύ τους και η ροή είναι πλήρως τυρβώδης. Τα σημεία λειτουργίας υπό διαφορετική ταχύτητα περιστροφής στα οποία ικανοποιείται η συνθήκη ομοιότητας της ροής ονομάζονται αντίστοιχα σημεία λειτουργίας.

Έστω λοιπόν αντλία η οποία λειτουργεί σε αντίστοιχα σημεία λειτουργίας στρεφόμενη με στροφές n’ και n’’. Τα αντίστοιχα τρίγωνα ταχυτήτων στην έξοδο είναι όμοια και συνεπώς θα ισχύει [3]:

$$\frac{n'}{n''} = \frac{u_2'}{u_2''} = \frac{(c_{u2})'}{(c_{u2})''} = \frac{c_{n2}'}{c_{n2}''} = \left(\frac{H_u'}{H_u''}\right)^{1/2} = \frac{Q_u'}{Q_u''}$$

Οι ογκομετρικές απώλειες δQ για δεδομένη γεωμετρία των λαβυρίνθων, μπορούν να εκφραστούν ως:

$$\left(p_2 - p_1\right) = k_q \cdot \delta Q^2$$

Λαμβάνοντας υπόψη ότι η διαφορά στατικής πίεσης είναι ανάλογη του θεωρητικού ύψους H_u της πτερωτής προκύπτει:

$$\delta Q \sim k_q^{'} \cdot H_u^{1/2} \text{ με } k_q^{'} \text{ σταθερό συντελεστή.}$$

Για τις στροφές n' και n'' θα ισχύει άρα:

$$\frac{\delta Q^{'}}{\delta Q^{''}} = \left(\frac{H_u^{'}}{H_u^{''}} \right)^{1/2}$$

η οποία συνδυαζόμενη με την παραπάνω εξίσωση δίνει:

$$\frac{n^{'}}{n^{''}} = \frac{\delta Q^{'}}{\delta Q^{''}} = \frac{Q_u^{'}}{Q_u^{''}} = \frac{Q^{'}}{Q^{''}} = \left(\frac{H_u^{'}}{H_u^{''}} \right)^{1/2} \text{ λαμβάνοντας υπόψη ότι } Q = Q_u - \delta Q$$

Το ολικό ύψος H της αντλίας προκύπτει από το H_u εάν αφαιρεθούν οι υδραυλικές απώλειες

$$\delta h_{fea} = \delta h_\alpha + \delta h_\tau$$

δηλαδή είναι,

$$H = H_u - (\delta h_\tau + \delta h_\alpha)$$

Οι υδραυλικές απώλειες τριβής εκφράζονται στην μορφή $\delta h_\alpha = \zeta_\tau \bullet Q^2$, όπου ο συντελεστής ζ_τ είναι σταθερός για δεδομένη αντλία στην περιοχή της πλήρους τυρβώδους ροής. Θα είναι λοιπόν:

$$\frac{\delta h_\tau^{'}}{\delta h_\tau^{''}} = \left(\frac{Q^{'}}{Q^{''}} \right)^2$$

Από την ομοιότητα των τριγώνων εισόδου προκύπτει επίσης η ακόλουθη σχέση μεταξύ των αντίστοιχων optimum παροχών στις στροφές n' και n'':

$$\frac{n^{'}}{n^{''}} = \frac{Q_{uA}^{'}}{Q_{uA}^{''}} = \frac{Q_A^{'}}{Q_A^{''}} \text{ από την οποία προκύπτει:}$$

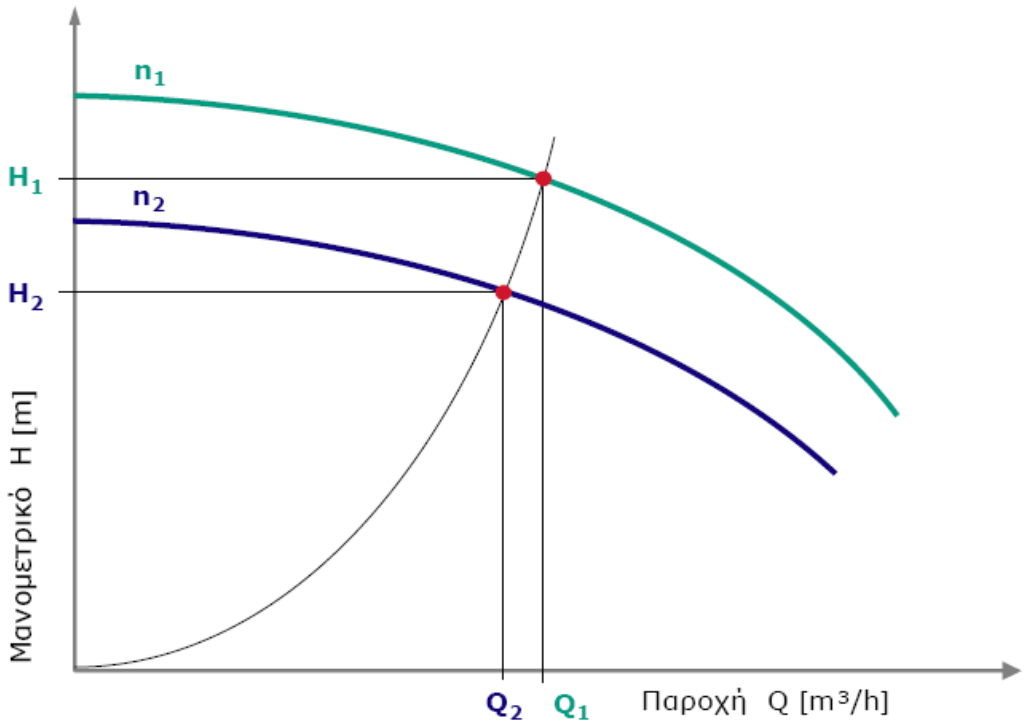
$$\frac{Q_u^{'}}{Q_{uA}^{'}} = \frac{Q_u^{''}}{Q_{uA}^{''}}$$

Από την προηγούμενη εξίσωση για τις υδραυλικές απώλειες κρούσης προκύπτει:

$$\frac{\delta h_a^{'}}{\delta h_a^{''}} = \left(\frac{u_1^{'}}{u_1^{''}}\right)^2 = \left(\frac{n^{'}}{n^{''}}\right)^2$$

Από τις παραπάνω σχέσεις έχουμε:

$$\frac{n^{'}}{n^{''}} = \frac{Q^{'}}{Q^{''}} = \left(\frac{H_u^{'}}{H_u^{''}}\right)^{1/2} = \left(\frac{\delta h_\tau^{'}}{\delta h_\tau^{''}}\right)^{1/2} = \left(\frac{\delta h_a^{'}}{\delta h_a^{''}}\right)^{1/2} = \left(\frac{H^{'}}{H^{''}}\right)^{1/2}$$



Σχήμα 2.16. Μεταβολή της χαρακτηριστικής της αντλίας λόγω αλλαγής των στροφών της.

Δηλαδή σε αντίστοιχα σημεία λειτουργίας υπό ταχύτητα περιστροφής n’ και n’’ θα ισχύει:

$$\frac{n^{'}}{n^{''}} = \frac{Q^{'}}{Q^{''}} = \left(\frac{H^{'}}{H^{''}}\right)^{1/2}$$

Σύμφωνα με την εξίσωση στο διάγραμμα (H, Q) (σχήμα 2.16) τα αντίστοιχα σημεία λειτουργίας βρίσκονται επί παραβολών που διέρχονται από την αρχή των αξόνων (H=0, Q=0), δηλαδή είναι της μορφής $H=\kappa Q^2$, όπου ο συντελεστής κ είναι σταθερός για όλα τα αντίστοιχα σημεία λειτουργίας.

Με το τρόπο αυτό διαμορφώνεται η τροποποιημένη χαρακτηριστική καμπύλη της αντλίας στις καινούργιες στροφές (καμπύλη a1, σχήμα 2.17) και προσδιορίζεται το νέο σημείο λειτουργίας D (σχήμα 2.17) της εγκατάστασης με χαρακτηριστικά:

μανομετρικό ύψος, H = 67 m και
διακινούμενη παροχή, $Q = 360 m^3/h$

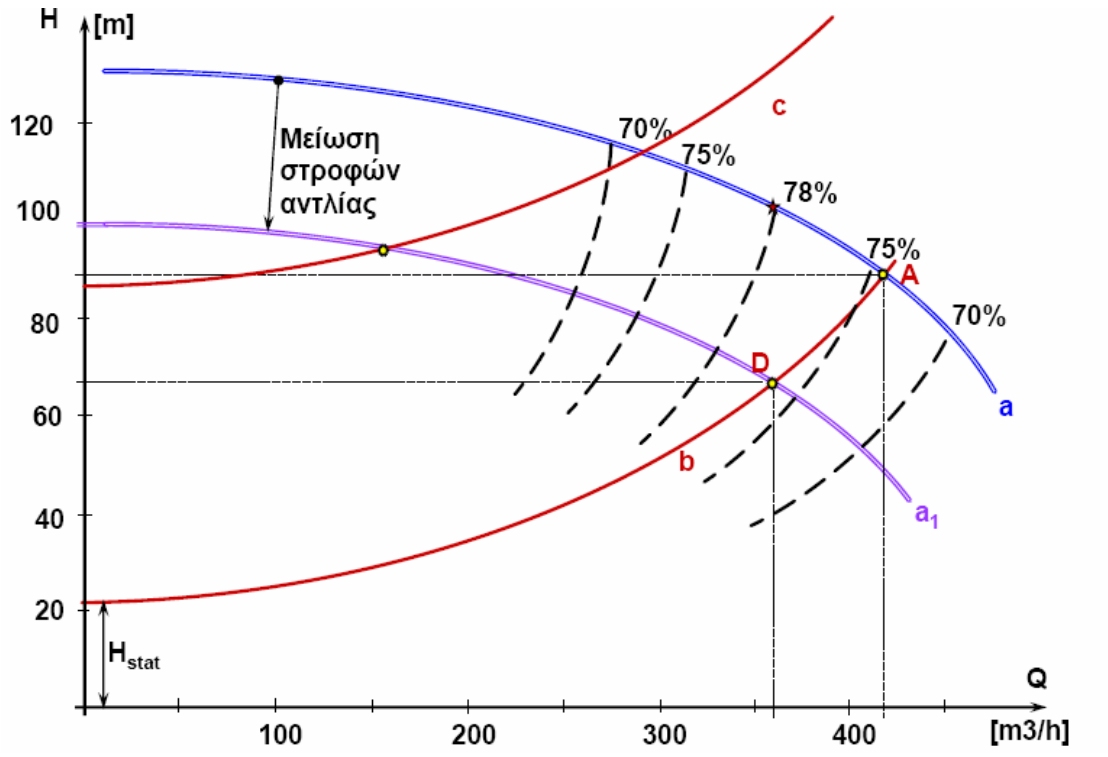
Αν και τα παραπάνω μεγέθη έχουν τις ίδιες τιμές όπως και με τη μείωση της διαμέτρου της αντλίας στην περίπτωση της μεταβολής της ταχύτητας περιστροφής ο βαθμός απόδοσης της αντλίας δεν αλλάζει σε σχέση με τη μέγιστη τιμή που είχε στο αρχικό σημείο λειτουργίας (αφού κινούμαστε πάνω σε παραβολές που ξεκινούν από το 0).

Οπότε για το σημείο λειτουργίας D προκύπτει βαθμός απόδοσης ίσος με:

$$\eta = 76\ \%$$

Συνέπεια όλων των παραπάνω είναι η μείωση ακόμα περισσότερο της απορροφούμενης ισχύος η οποία τώρα υπολογίζεται ίση με:

P = 86.5 kW.



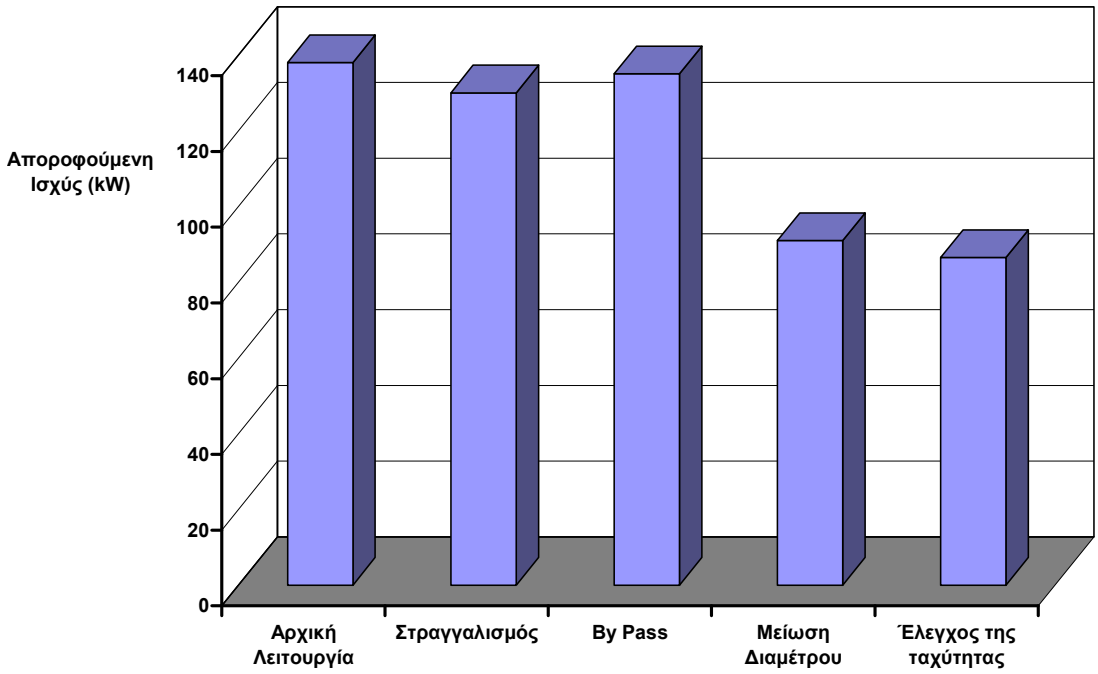
Σχήμα 2.17. Σημείο λειτουργίας της εγκατάστασης μετά από αλλαγή στροφών της αντλίας (σημείο D)

Παρόλα αυτά ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται σε εγκαταστάσεις με μεγάλα γεωδαιτικά ύψη (όπως για παράδειγμα δείχνει η καμπύλη c) στις οποίες είναι δυνατόν ακόμα και μικρές μειώσεις των στροφών της αντλίας να οδηγήσουν σε επικίνδυνα μικρές παροχές, κάτω από το όριο ασφαλούς λειτουργίας της αντλίας.

2.4.5 Σύγκριση μεθόδων ρύθμισης

Από τα παραπάνω προκύπτει το συμπέρασμα ότι στις φυγοκεντρικές αντλίες η ρύθμιση με παράκαμψη αποτελεί την πλέον ενεργοβόρα μέθοδο για την ελάττωση της παροχής, ενώ από την άλλη η μέθοδος ρύθμισης με μεταβολή των στροφών είναι αντίστοιχα η πιο οικονομική συνδυάζοντας και τα υπόλοιπα πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου (σχήμα 2.18). Όμως σε κάθε περίπτωση για την επιλογή της βέλτιστης μεθόδου θα πρέπει να συνεκτιμηθεί και το κόστος επένδυσης κεφαλαίου το οποίο είναι συνήθως μεγαλύτερο στις μεθόδους με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας.

Στο παρακάτω σχήμα συνοψίζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν για την απορροφούμενη ισχύ με βάση την κάθε μέθοδο περιορισμού της διακινούμενης παροχής και ρύθμισής της στην επιθυμητή τιμή.



Σχήμα 2.18. Σύγκριση από πλευράς κατανάλωσης ενέργειας των μεθόδων ρύθμισης της παροχής.

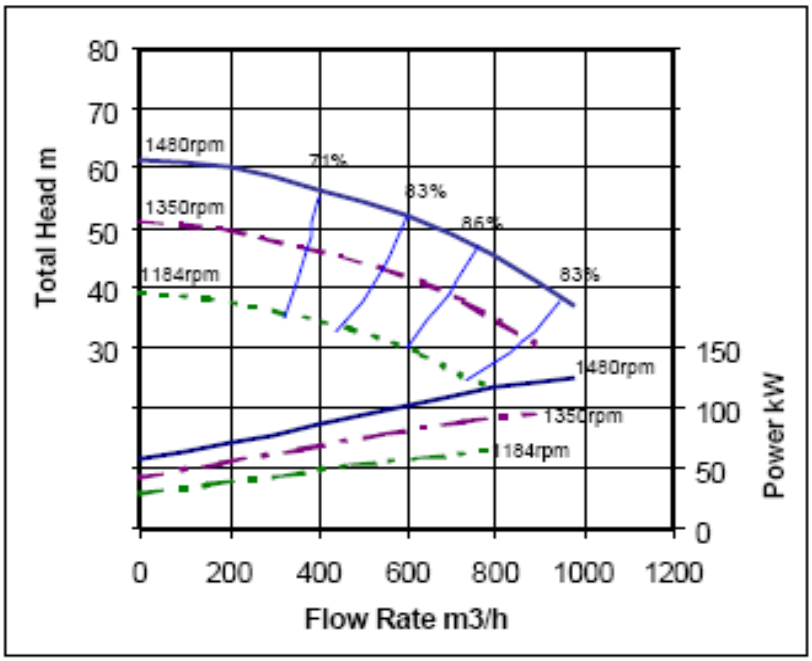
2.5. Επίδραση της μεταβαλλόμενης ταχύτητας στα χαρακτηριστικά της αντλίας.

Όπως σημειώθηκε παραπάνω, μια φυγοκεντρική αντλία παράγει ύψος χρησιμοποιώντας μια περιστρεφόμενη πτερωτή. Είναι επομένως σαφές ότι υπάρχει συσχέτιση μεταξύ της περιφερειακής ταχύτητας της πτερωτής και του παραγόμενου ύψους. Η περιφερειακή ταχύτητα είναι ανάλογη με τη γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του άξονα και συνεπώς για δεδομένη διάμετρο πτερωτής η μεταβολή της γωνιακής ταχύτητας επιδρά άμεσα στην απόδοση της αντλίας. Οι τιμές όλων των χαρακτηριστικών παραμέτρων της λειτουργίας της αντλίας θα αλλάξουν με τη μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής και είναι σημαντικό να υπάρχει μία εκτίμηση

του πώς θα μεταβληθούν αυτές, έτσι ώστε να είναι δυνατός ο ασφαλής έλεγχος της αντλίας σε διάφορες ταχύτητες περιστροφής.

Οι εξισώσεις που συνδέουν τις χαρακτηριστικές παραμέτρους της λειτουργίας μιας φυγόκεντρης αντλίας με την ταχύτητα περιστροφής είναι οι νόμοι της ομοιότητας και έχουν ήδη αναφερθεί.

Από τις σχέσεις αυτές για την μεταβολή του ύψους και της ισχύος είναι προφανές (σχήμα 2.19) [1] ότι σχετικά μικρές μεταβολές στην ταχύτητα περιστροφής επιφέρουν σημαντικές αλλαγές στις τιμές αυτών των δύο μεγεθών, τα οποία είναι ανάλογα με το τετράγωνο και τον κύβο αντιστοίχως της ταχύτητας περιστροφής.



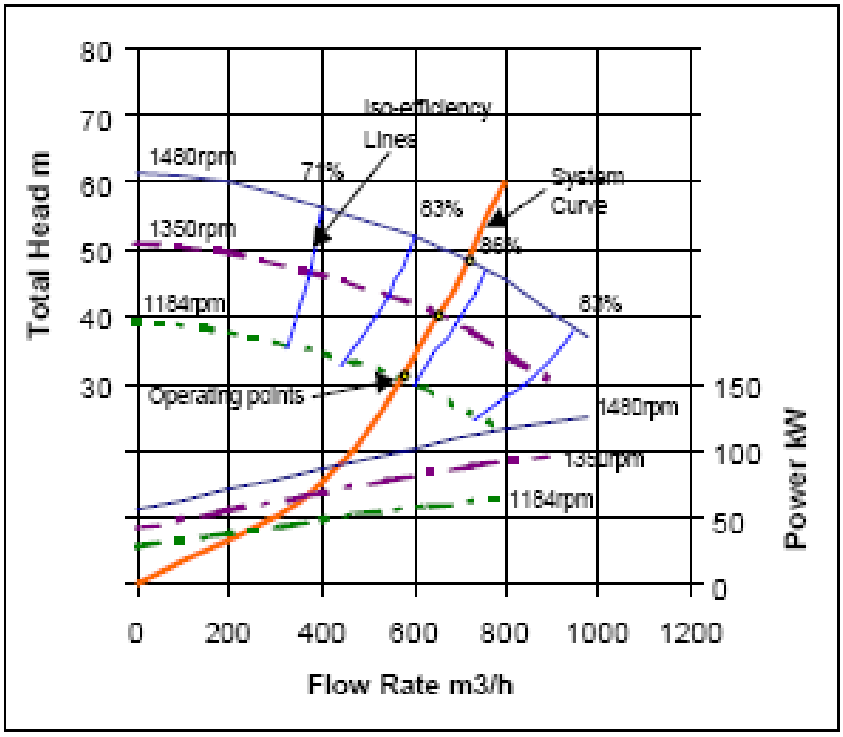
Σχήμα 2.19. Χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας αντλίας (H, Q) και (N, Q) για μεταβλητές στροφές.

Στο Σχήμα 2.19 παρουσιάζονται και οι ισοϋψείς καμπύλες του βαθμού απόδοσης οι οποίες καταδεικνύουν το γεγονός ότι απόδοση παραμένει σταθερή για μικρές μεταβολές της ταχύτητας και με αυτό τον τρόπο η αντλία μπορεί να συνεχίζει να λειτουργεί σε σημείο κοντά στο κανονικό σημείο λειτουργίας της.

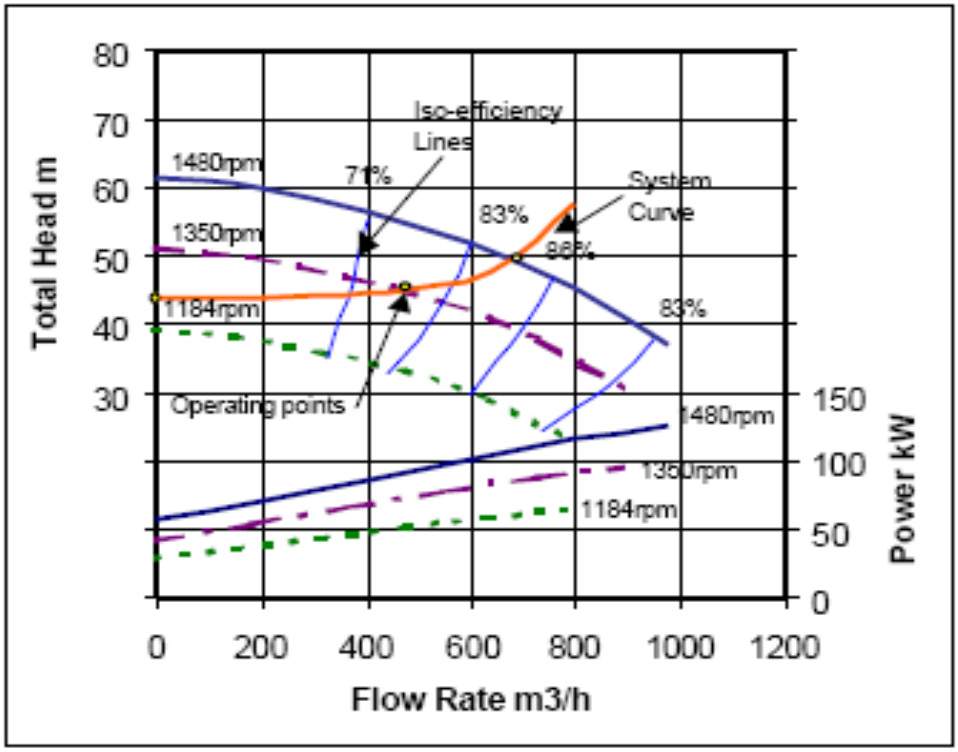
Οι νόμοι της ομοιότητας παρέχουν μια καλή εκτίμηση για το πως οι χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας μεταβάλλονται συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής, αλλά προκειμένου να καθοριστεί η πραγματική απόδοση της αντλίας σε

ένα σύστημα θα πρέπει να ληφθεί υπόψη και η χαρακτηριστική καμπύλη της εγκατάστασης.

Προκειμένου να μελετηθεί ο τρόπος με τον οποίο επιδρά η μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής στο σημείο λειτουργίας της εγκατάστασης, στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζονται σε κοινό διάγραμμα οι χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας της αντλίας και της εγκατάστασης για δύο περιπτώσεις αντλητικών συγκροτημάτων [1].



Σχήμα 2.20. Χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας της αντλίας και της σωλήνωσης για εγκατάσταση κλειστού κυκλώματος.



Σχήμα 2.21. Χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας της αντλίας και της σωλήνωσης για εγκατάσταση με σημαντική ανύψωση υγρού.

Έτσι τα δύο σχήματα αντιστοιχούν σε μία εγκατάσταση κλειστού κυκλώματος (μόνο απώλειες τριβής) (σχήμα 2.20) και σε μία εγκατάσταση με σημαντική ανύψωση υγρού σε σχέση με τις αναπτυσσόμενες τριβές (σχήμα 2.21). Είναι προφανές ότι τα οφέλη είναι διαφορετικά στις δύο περιπτώσεις.

Συγκεκριμένα, στο σχήμα 2.20 παρατηρούμε ότι μειώνοντας την ταχύτητα περιστροφής της αντλίας, το σημείο λειτουργίας της εγκατάστασης κινείται πάνω σε μία καμπύλη σταθερού βαθμού απόδοσης και έτσι η αντλία συνεχίζει να λειτουργεί στην περιοχή των υψηλών βαθμών απόδοσης. Σύμφωνα με τους Νόμους της Ομοιότητας, προκύπτει το συμπέρασμα ότι η απορροφούμενη ισχύς από την αντλία είναι σημαντικά μικρότερη ως αποτέλεσμα της μείωσης της παροχής και του ύψους. Επομένως, η μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής είναι η ιδανική λύση ελέγχου ενός συστήματος στο οποίο παρουσιάζονται μόνο τριβές.

Από την άλλη μεριά, στα αντλητικά συστήματα τα οποία εξυπηρετούν επιπλέον σημαντική ανύψωση υγρού (σχήμα 2.21), με την μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής παρατηρείται μετακίνηση του σημείου λειτουργίας τους σε σχέση με τις γραμμές σταθερής απόδοσης. Η μείωση της διακινούμενης παροχής δεν είναι πλέον

ανάλογη με την ταχύτητα και μια μικρή μείωση της ταχύτητας περιστροφής μπορεί να αποφέρει μια σημαντική μείωση τόσο της παροχής όσο και του βαθμού απόδοσης της αντλίας, σε τέτοιο βαθμό μάλιστα όπου η λειτουργία της αντλίας να γίνει προβληματική. Για παράδειγμα, στη χαμηλή ταχύτητα περιστροφής του σχήματος 2.21 (1184 RPM) η αντλία δεν είναι πλέον σε θέση να διακινήσει παροχή υγρού, αφού δεν παράγει ικανοποιητικό ύψος.

Η μείωση του βαθμού απόδοσης που παρατηρείται σε τέτοιου είδους συστήματα περιορίζει τα οικονομικά οφέλη που προκύπτουν από τον έλεγχο της ταχύτητας περιστροφής και συνεπώς η εφαρμογή αυτής της μεθόδου θα πρέπει να ακολουθείται μετά από λεπτομερή οικονομική ανάλυση της κάθε περίπτωσης.

Συνήθως σ' αυτές τις περιπτώσεις, προτιμάται η επιλογή της αντλίας να γίνει έτσι ώστε η χαρακτηριστική καμπύλη της εγκατάστασης να τέμνει την καμπύλη της αντλίας που αντιστοιχεί στη μέγιστη ταχύτητα σε σημείο λίγο δεξιότερα του μέγιστου βαθμού απόδοσης, έτσι ώστε ο βαθμός απόδοσης αρχικά να αυξηθεί με την μείωση της ταχύτητας και στη συνέχεια να μειωθεί. Με αυτό τον τρόπο σε συστήματα με σημαντικό ύψος ανύψωσης μπορεί να επεκταθεί η περιοχή στην οποία ο έλεγχος της ταχύτητας περιστροφής προσφέρει αποδοτική λειτουργία της εγκατάστασης. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να σημειωθεί, ότι για λειτουργία σε μεταβλητές παροχές είναι πάντοτε πιο αποδοτική η λύση της μεταβλητής ταχύτητας απ' ότι η χρήση βαλβίδων ελέγχου.

Κατά την λειτουργία του αντλητικού συστήματος σε μειωμένες στροφές παρουσιάζονται και άλλα οφέλη εκτός από την εξοικονόμηση ενέργειας. Οι υδραυλικές δυνάμεις που αναπτύσσονται πάνω στην πτερωτή εξαιτίας της κατανομή της πίεσης, μειώνονται αναλογικά περίπου με το τετράγωνο της ταχύτητας. Οι δυνάμεις αυτές μεταφέρονται στα έδρανα στήριξης και επομένως η μείωση του μέτρου τους συνεισφέρει στην αύξηση της διάρκειας ζωής των εδράνων. Αποδεικνύεται πως στην περίπτωση μιας φυγόκεντρης αντλίας η διάρκεια ζωής των εδράνων είναι αντιστρόφως ανάλογη της έβδομης δύναμης της ταχύτητας περιστροφής [1].

Αντιθέτως, αν και η αντλία και ο κινητήρας που την τροφοδοτεί θα πρέπει να διαστασιολογούνται με βάση τη μέγιστη ταχύτητα στην οποία πρέπει να λειτουργήσει η αντλία, μικρή αύξηση στην ταχύτητα περιστροφής μιας αντλίας επιφέρει, όπως είναι λογικό, σημαντική αύξηση τόσο της απορροφούμενης ισχύος, όσο και των δυνάμεων που καταπονούν τον άξονα και τα έδρανα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ

3

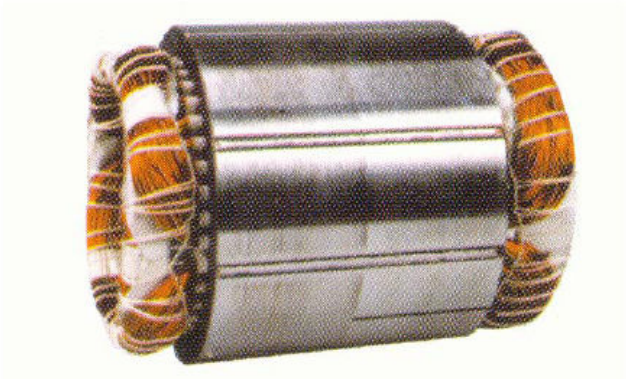
Κινητήρες και Δυνατότητες Μεταβολής των Στροφών τους

3.1 Αρχή λειτουργίας ηλεκτρικών κινητήρων

Αν και υπάρχουν πολλές διαφορετικές μέθοδοι κίνησης μιας αντλίας όπως με τη βοήθεια εμβολοφόρων μηχανών και ατμοστροβίλων, η πλειονότητα των αντλιών λειτουργεί χρησιμοποιώντας ηλεκτρικούς κινητήρες. Πρέπει να σημειωθεί ότι σε μία τυπική βιομηχανική εγκατάσταση η λειτουργία κινητήρων ευθύνεται για τα δύο τρίτα της ηλεκτρικής κατανάλωσής της και επομένως οποιαδήποτε βελτίωση στο βαθμό απόδοσής τους επιφέρει μεγάλη ενεργειακή εξοικονόμηση. Η επιλογή του κατάλληλου τύπου κινητήρα γίνεται με κριτήριο την ταχύτητα περιστροφής και την απαιτούμενη ισχύ, ενώ στη κατασκευή του θα πρέπει να ληφθεί υπόψη το περιβάλλον της εγκατάστασης και οι δυνατότητες ψύξης του κινητήρα.

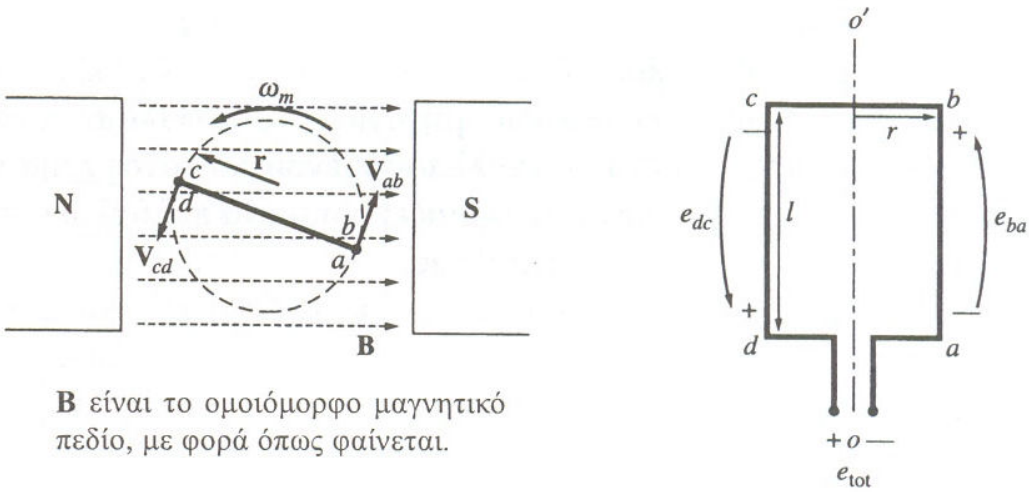
Οι ηλεκτρικοί κινητήρες αποτελούν μια κατηγορία στρεφόμενων ηλεκτρικών μηχανών. Το βασικό στοιχείο μιας στρεφόμενης ηλεκτρικής μηχανής είναι η μετατροπή ενέργειας από ηλεκτρική σε μηχανική μορφή. Η λειτουργία τους στηρίζεται στη ηλεκτρομαγνητική επαγωγή. Με βάση λοιπόν το φαινόμενο της επαγωγής όταν ένας αγωγός (δηλαδή ένα αγώγιμο ηλεκτρικά υλικό) κινείται μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο τότε μέσα στον αγωγό αναπτύσσεται ηλεκτρεγερτική δύναμη από επαγωγή δηλαδή ηλεκτρικό δυναμικό το οποίο είναι και το αίτιο εμφάνισης

ηλεκτρικού ρεύματος στον αγωγό. Στους κινητήρες αξιοποιείται επίσης και το φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής σύμφωνα με το οποίο όταν ένας αγωγός που διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα βρεθεί μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο τότε πάνω του ασκείται από το μαγνητικό πεδίο μια δύναμη που τείνει να τον κινήσει. Η δύναμη αυτή είναι ανάλογη με την ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος, την ένταση του μαγνητικού πεδίου, αλλά και το μήκος του αγωγού.



Σχήμα 3.1. Κατασκευαστική δομή του στάτη, των τριφασικών μηχανών.

Κατά τη λειτουργία ενός κινητήρα παρέχεται ηλεκτρική ενέργεια στο κύριο τύλιγμα της μηχανής, που λέγεται τύλιγμα τυμπάνου και αποδίδεται μηχανική ενέργεια εξόδου πάνω σε μια περιστρεφόμενη άτρακτο. Μια εξωτερικά επιβαλλόμενη ηλεκτρική τάση **V** οδηγεί ένα ρεύμα **i** μέσα στο τύλιγμα τυμπάνου ενάντια σε μια εσωτερικά επαγόμενη αντιηλεκτρεγερτική δύναμη **e**.



Σχήμα 3.2. Η αρχή λειτουργίας ενός ηλεκτρικού κινητήρα.

Το τύλιγμα τυμπάνου γίνεται έτσι ικανό να απορροφά ηλεκτρική ενέργεια με ρυθμό e x i. Το πεδίο ζεύξεως ασκεί μια στιγμιαία ηλεκτρομαγνητική ροπή $T_{πεδ}$ πάνω στο περιστρεφόμενο μέλος της μηχανής που λέγεται δρομέας (ρότορας). Αν ο δρομέας στρέφεται με γωνιακή ταχύτητα ω τότε η στιγμιαία ισχύς εξόδου που αποδίδεται στην άτρακτο θα είναι $T_{πεδ}$ x ω**.** Η εξωτερικά εφαρμοζόμενη ροπή φορτίου $T_{εξ}$ δρα με φορά αντίστροφη από εκείνη της περιστροφής και καθιστά το φορτίο ικανό ν' απορροφά μηχανική ενέργεια. Ισχύει προφανώς ότι:

$$T_{πεδ} - T_{εξ} = J \times d\omega/dt$$

όπου J είναι η ροπή αδρανείας του δρομέα και του μηχανικού του φορτίου (η κίνηση του οποίου είναι ο τελικός σκοπός της ύπαρξης του κινητήρα). Όταν $T_{πεδ} = T_{εξ}$ τότε $d\omega/dt = 0$ και η μηχανή περιστρέφεται με σταθερή γωνιακή ταχύτητα. Στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας έχουμε ότι:

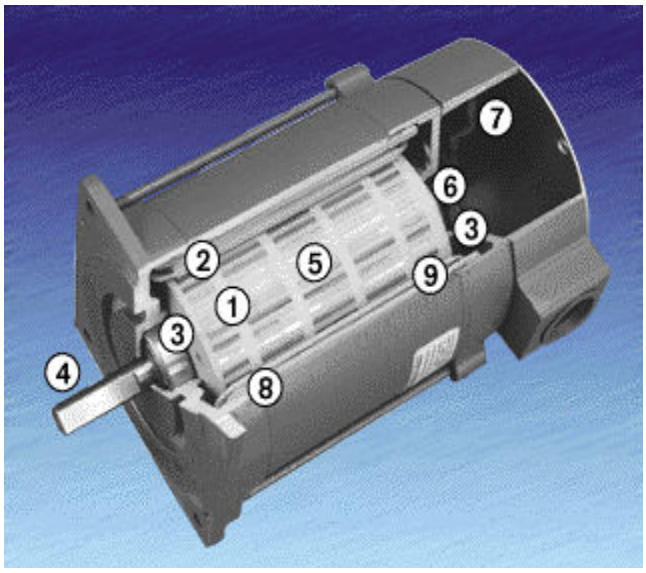
$$(\omega \times T_{πεδ})_{μέση\ τιμή} = (e \times i)_{μέση\ τιμή}$$

Δεδομένου ότι στο τύλιγμα τυμπάνου αναπτύσσεται μια ηλεκτρεγερτική δύναμη, χρειαζόμαστε ένα μαγνητικό πεδίο διεγέρσεως που συνηθέστατα (εκτός από την περίπτωση μόνιμου μαγνήτη στις μικρές μηχανές), στην πράξη παρέχεται από τυλίγματα διεγέρσεως ή τα τυλίγματα πεδίου. Στη μόνιμη λειτουργία των συνήθων μηχανών της πράξης, οι οποίες έχουν χωριστά τροφοδοτούμενο τύλιγμα διέγερσης, η μέση τιμή της ισχύος που τροφοδοτεί το τύλιγμα αυτό δαπανάται υπό μορφή θερμότητας.

Οι ηλεκτροκινητήρες διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες στους κινητήρες συνεχούς ρεύματος και στους κινητήρες εναλλασσομένου ρεύματος, οι οποίοι καλύπτουν και την πλειοψηφία των εφαρμογών. Οι μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες: τις σύγχρονες (synchronous) και τις ασύγχρονες ή επαγωγικές μηχανές. Οι σύγχρονες μηχανές, αντίθετα από τις επαγωγικές, χρησιμοποιούνται κυρίως ως γεννήτριες. Στους σύγχρονους κινητήρες η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα είναι ίση με την ταχύτητα που στρέφεται το πεδίο του στάτη. Αντίθετα, στους ασύγχρονους κινητήρες, η ταχύτητα του δρομέα είναι μικρότερη από εκείνη του στρεφόμενου πεδίου του στάτη και εξαρτάται από το μέγεθος του φορτίου.

3.2 Σύγχρονοι κινητήρες

Οι σύγχρονες μηχανές που μετατρέπουν ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική ονομάζονται σύγχρονοι κινητήρες. Παρακάτω περιγράφονται τα βασικά χαρακτηριστικά λειτουργίας των σύγχρονων κινητήρων. Ένας σύγχρονος κινητήρας απεικονίζεται στο σχήμα 3.3.

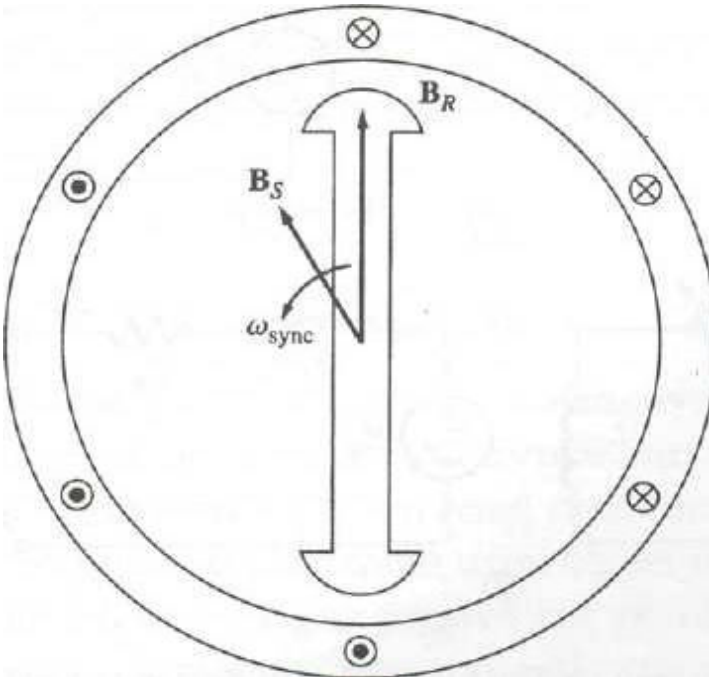


1. Μόνιμος μαγνήτης
2. Τύλιγμα σπειρών
3. Δύο ρουλεμάν
4. Άξονας ακρίβειας
5. Ρότορας 50 δοντιών
6. Διπλό ελατήριο
7. Τελικό κιβώτιο
8. Σπείρες που τυλίγονται σε ισχύ
9. Στάτορας 8 δοντιών

Σχήμα 3.3. Τα επιμέρους στοιχεία ενός σύγχρονου κινητήρα.

Το σχήμα 3.4, δείχνει ένα σύγχρονο κινητήρα δυο πόλων, όπου το μαγνητικό πεδίο του δρομέα (B_R) παράγεται από το ρεύμα διέγερσης I_F.

Στο στάτη της μηχανής εφαρμόζεται ένα τριφασικό σύστημα ρευμάτων το οποίο παράγει στο εσωτερικό της στρεφόμενο ομογενές μαγνητικό πεδίο B_S. Έτσι στο εσωτερικό του κινητήρα υφίστανται δυο πεδία που τείνουν να ευθυγραμμιστούν, όπως ακριβώς δυο μαγνητικοί ράβδοι.



Σχήμα 3.4. Σύγχρονος κινητήρας δύο πόλων.

Επειδή όμως, το πεδίο του στάτη περιστρέφεται συνεχώς, το πεδίο του δρομέα (και ο ίδιος ο δρομέας) προσπαθεί συνέχεια να το ακολουθήσει. Όσο μεγαλύτερη είναι η γωνία μεταξύ των δυο πεδίων τόσο μεγαλύτερη είναι η ροπή που ασκεί στο δρομέα το μαγνητικό του πεδίο. Αυτή ακριβώς είναι η αρχή λειτουργίας του σύγχρονου κινητήρα: Το μαγνητικό πεδίο του δρομέα "κυνηγάει" συνεχώς το πεδίο του στάτη, χωρίς ποτέ να καταφέρνει να το φτάσει.

Το φορτίο ενός σύγχρονου κινητήρα είναι συνήθως μια διάταξη που πρέπει να περιστρέφεται με ταχύτητα. Γενικά η τάση εισόδου και η συχνότητα παραμένουν σταθερές και ανεξάρτητες από την ισχύ εξόδου του κινητήρα.

Ακόμη, η ταχύτητα του κινητήρα προσδιορίζεται από τη συχνότητα της τάσης τροφοδοσίας και έτσι δεν εξαρτάται καθόλου από το φορτίο του. Υπάρχει μια τιμή της ροπής (ροπή ανατροπής) οπού αν η ροπή του κινητήρα γίνει μεγαλύτερη από αυτήν τότε το πεδίο του στάτη και το συνολικό μαγνητικό πεδίο δεν μπορούν πλέον να συγκρατήσουν τον δρομέα της μηχανής. Έτσι, ο δρομέας αρχίζει να επιβραδύνεται και το πεδίο του μένει πολύ πίσω από το πεδίο του στάτη. Συγκεκριμένα, κάθε φορά που το πεδίο του στάτη υπερβαίνει κατά μια περιστροφή το πεδίο του δρομεα, η φορά της επαγομένης ροπής αλλάζει πρόσημο. Αυτές οι απότομες και πολύ μεγάλες

αλλαγές στη ροπή προκαλούν ισχυρές δονήσεις στον κινητήρα και αναφέρονται ως ¨απώλεια συγχρονισμού¨.

Οι σύγχρονοι κινητήρες χρησιμοποιούνται για αύξηση του συντελεστή ισχύος σε ένα σύστημα Η προσπάθεια για αύξηση του συντελεστή ισχύος ενός συστήματος με σύγχρονους κινητήρες ή με άλλες μεθόδους ονομάζεται διόρθωση του συντελεστή ισχύος. Σε συστήματα που μπορούν να λειτουργήσουν με σταθερή ταχύτητα και απαιτούν διόρθωση του συντελεστή ισχύος τους, χρησιμοποιούνται σύγχρονοι κινητήρες, ακόμη κι όταν αυτοί δεν είναι απολύτως απαραίτητοι. Επίσης, αν και οι σύγχρονοι κινητήρες είναι πιο ακριβοί από τους επαγωγικούς, η ικανότητα τους να λειτουργούν με χωρητικό συντελεστή ισχύος τους κάνει εμπορεύσιμους και αποδοτικούς για βιομηχανικά δίκτυα, όπου είναι απαραίτητη η διόρθωση του συντελεστή ισχύος.

Τέλος, όλες οι σύγχρονες μηχανές λειτουργούν σε υπερδιέγερση, τόσο για τη βελτίωση του συντελεστή ισχύος, όσο και για την αύξηση της μέγιστης ροπής τους. Αυτό όμως σημαίνει πως το ρεύμα διέγερσης τους θα είναι αρκετά υψηλό. Γι' αυτό το λόγο πάντα θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη το όριο υπερθέρμανσης του τυλίγματος του δρομέα τους και ποτέ το ρεύμα διέγερσης δεν πρέπει να υπερβαίνει την ονομαστική του τιμή. Υπάρχουν φορές που ένας σύγχρονος κινητήρας χρησιμοποιείται χωρίς κανένα απολύτως φορτίο και έχει ως μοναδικό σκοπό τη βελτίωση του συντελεστή ισχύος.

Ένας σύγχρονος κινητήρας δεν μπορεί να εκκινήσει χωρίς κάποια εξωτερική επίδραση. Οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την επίδραση ενός κινητήρα είναι οι εξής:

1. Μείωση της συχνότητας της τάσης τροφοδοσίας του σε κάποιο ασφαλές επίπεδο εκκίνησης.

2. Χρήση μιας κινητήριας μηχανής.

3. Τοποθέτηση τυλιγμάτων απόσβεσης στον κινητήρα για την επιτάχυνση του και σύνδεση του κυκλώματος διέγερσης τη στιγμή που η ταχύτητα της μηχανής πλησιάζει τη σύγχρονη ταχύτητα.

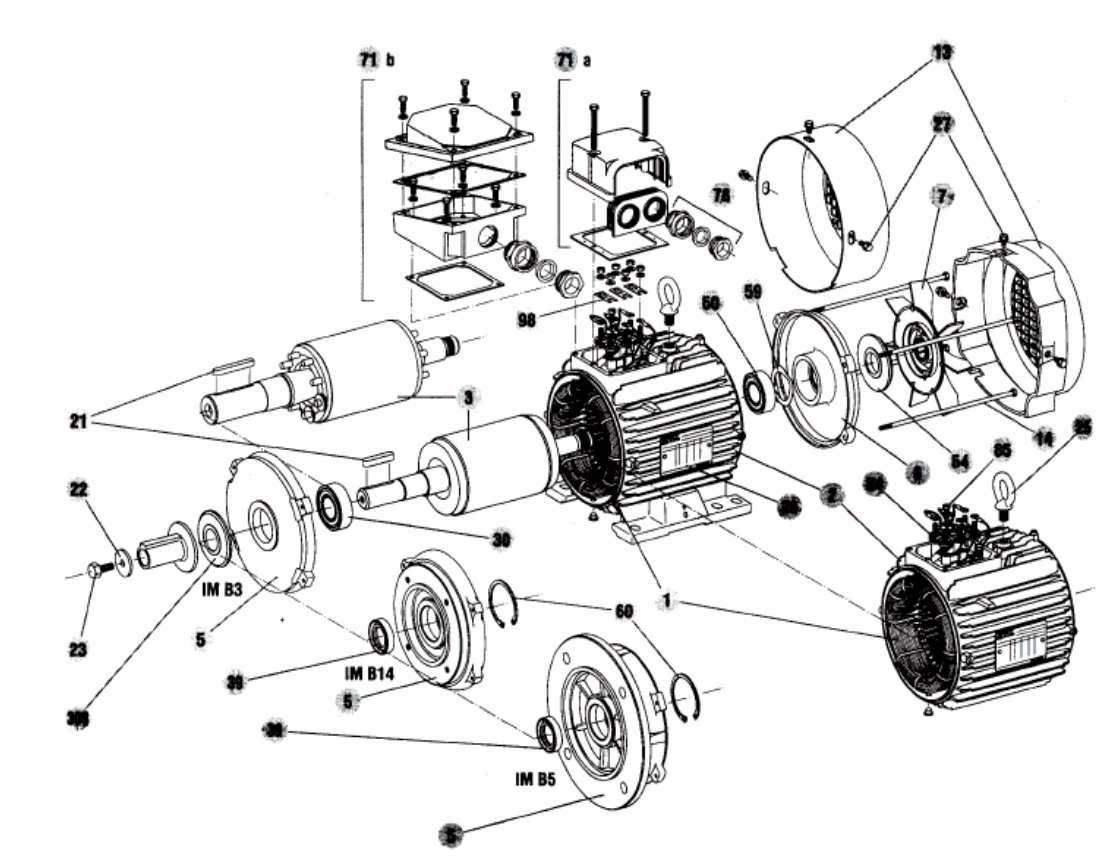
Ειδικά τα τυλίγματα απόσβεσης, που είναι αγώγιμες ράβδοι ο οποίες τοποθετούνται σε εγκοπές των πλεγμάτων του δρομαία και βραχυκυκλώνονται στα άκρα τους μέσω μεγάλων δακτυλίων, αυξάνουν κατά πολύ την ευστάθεια ενός κινητήρα και τον προστατευθούν από ανεπιθύμητες καταστάσεις στη διάρκεια μεταβατικών φαινόμενων. Τα τυλίγματα απόσβεσης χρησιμεύουν όχι μονό για την επιτάχυνση ενός αργού κινητήρα αλλά και για την επιβράδυνση ενός γρήγορου.

3.3 Επαγωγικοί Κινητήρες

Οι επαγωγικοί κινητήρες διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, ανάλογα με την κατασκευαστική δομή του δρομέα τους: σε κινητήρες με βραχυκυκλωμένο δρομέα ή κλωβό (squirrel cage rotor) και σε κινητήρες με δακτυλιοφόρο δρομέα (wound rotor).

Οι κινητήρες με βραχυκυκλωμένο κλωβό είναι οι πλέον διαδεδομένοι (σχήμα 3.5). Ο δρομέας των κινητήρων αυτών αποτελείται από ελάσματα μονωμένα μεταξύ τους, τα οποία προσαρμόζονται στον άξονα. Τα ελάσματα φέρουν οδοντώσεις, οι οποίες σχηματίζουν αυλάκια κατά μήκος του δρομέα. Η γεωμετρική μορφή των αυλακώσεων καθορίζει την ηλεκτρική συμπεριφορά του κινητήρα, δηλαδή τη χαρακτηριστική ταχύτητας–ροπής. Στα αυλάκια του δρομέα τοποθετούνται ράβδοι από χαλκό ή ορείχαλκο, τα άκρα των οποίων συνδέονται μεταξύ τους με δακτυλίους βραχυκύκλωσης (shorting rings). Έτσι, σχηματίζεται το τύλιγμα κλωβού του δρομέα.

Στους επαγωγικούς κινητήρες μικρής ισχύος, το τύλιγμα κλωβού κατασκευάζεται με χύτευση αλουμινίου στα αυλάκια του δρομέα. Στην περίπτωση αυτή, οι δακτύλιοι βραχυκύκλωσης και τα πτερύγια εξαερισμού χυτεύονται μαζί με τους αγωγούς του κλωβού, οι οποίοι δεν είναι μονωμένοι ως προς το σίδηρο του δρομέα. Όμως, τα ρεύματα κυκλοφορούν κυρίως από τον κλωβό, καθώς η αγωγιμότητα του αλουμινίου είναι πολύ μεγαλύτερη από εκείνη του σιδήρου. Είναι φανερό ότι, ο δρομέας του επαγωγικού κινητήρα με βραχυκυκλωμένο κλωβό, δεν συνδέεται ηλεκτρικά με καμία πηγή. Στο γεγονός αυτό οφείλεται η απλή κατασκευή και η ευρεία χρήση του επαγωγικού κινητήρα βραχυκυκλωμένου κλωβού.



Τριφασικός επαγωγικός κινητήρας με βραχυκυκλωμένο κλωβό. (α) Διακρίνονται τα παρακάτω μέρη: 1–Πτερύγια ψύξης του στάτη, 2–Ελάσματα του στάτη και το τύλιγμα, 3–Δρομέας, 4–Άξονας, 5–9–Κέλυφος, 6–7– Ρουλεμάν, 8–Ανεμιστήρας, 10–Κιβώτιο ηλεκτρικής σύνδεσης. (β) Λεπτομερής σχεδιαστική καταγραφή των επιμέρους τμημάτων του κινητήρα

Σχήμα 3.5. Επαγωγικός κινητήρας.

Ο δρομέας των επαγωγικών κινητήρων με δακτυλιοφόρο δρομέα φέρει αυλακώσεις, μέσα στις οποίες τοποθετείται ένα τριφασικό τύλιγμα, αντίστοιχο μ' εκείνο του στάτη. Οι τρεις φάσεις του τυλίγματος στο δρομέα συνδέονται σχεδόν πάντα σε αστέρα. Τα τρία άκρα του τυλίγματος αστέρα καταλήγουν σε ισάριθμους δακτυλίους, που φέρει ο δρομέας. Μέσω των δακτυλίων και των ψηκτρών που εφάπτονται σ' αυτούς, είναι δυνατή η σύνδεση ρυθμιστικών αντιστάσεων στο τύλιγμα του δρομέα. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η τροποποίηση της χαρακτηριστικής ταχύτητας–ροπής του κινητήρα, ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας.

3.3.1 Η Ολίσθηση

Η ταχύτητα περιστροφής του μαγνητικού πεδίου του στάτη, εξαρτάται από τη συχνότητα του ρεύματος τροφοδοσίας f_e και τον αριθμό των πόλων P. Η ταχύτητα του στρεφόμενου πεδίου ονομάζεται σύγχρονη ταχύτητα n_s και ορίζεται από την παρακάτω σχέση σε rpm,

$$n_s = \frac{120 f_e}{p}$$

Στον επαγωγικό κινητήρα το πεδίο του δρομέα οφείλεται στις τάσεις εξ επαγωγής, οι οποίες αναπτύσσονται στο δρομέα μόνο όταν υπάρχει σχετική κίνηση μεταξύ του δρομέα και του στρεφόμενου πεδίου. Επομένως, η ταχύτητα του δρομέα δεν μπορεί να είναι ίση με τη σύγχρονη, καθώς τότε δεν θα επάγονταν τάσεις στο δρομέα, με συνέπεια το ρεύμα και η ροή του δρομέα να ήταν μηδενικά. Έτσι, η ροπή θα μηδενίζονταν και η ταχύτητα του κινητήρα θα μειωνόταν σε μια τιμή μικρότερη από τη σύγχρονη.

Η ποσοστιαία διαφορά της ταχύτητας του κινητήρα από τη σύγχρονη ταχύτητα ονομάζεται ολίσθηση (slip)

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \times 100\%$$

Όταν ο κινητήρας είναι ακίνητος, η ολίσθηση είναι ίση με τη μονάδα (s = 1). Αν ο δρομέας στρέφονταν με τη σύγχρονη ταχύτητα, η ολίσθηση θα ήταν μηδέν (s = 0).

3.3.2 Ισχύς των Επαγωγικών Κινητήρων

Ο τριφασικός επαγωγικός κινητήρας μετατρέπει την ηλεκτρική ισχύ εισόδου σε μηχανική. Η ισχύς που απομένει, αν από την ισχύ εισόδου αφαιρεθούν οι απώλειες χαλκού και οι μαγνητικές απώλειες στο στάτη, είναι η ισχύς που μέσω του διακένου μεταφέρεται στο δρομέα. Η ισχύς αυτή ονομάζεται ισχύς διακένου (air gap power). Ένα τμήμα της ισχύος διακένου χάνεται ως απώλειες χαλκού στο δρομέα και ένα

τμήμα ως απώλειες σιδήρου στο δρομέα. Η ισχύς που απομένει, μετατρέπεται σε μηχανική. Συνήθως, οι απώλειες σιδήρου του δρομέα ενσωματώνονται στις μαγνητικές απώλειες του στάτη.

Η ωφέλιμη ισχύς εξόδου του επαγωγικού κινητήρα, είναι μικρότερη από την αναπτυσσόμενη ισχύ κατά τις μηχανικές και τις κατανεμημένες απώλειες

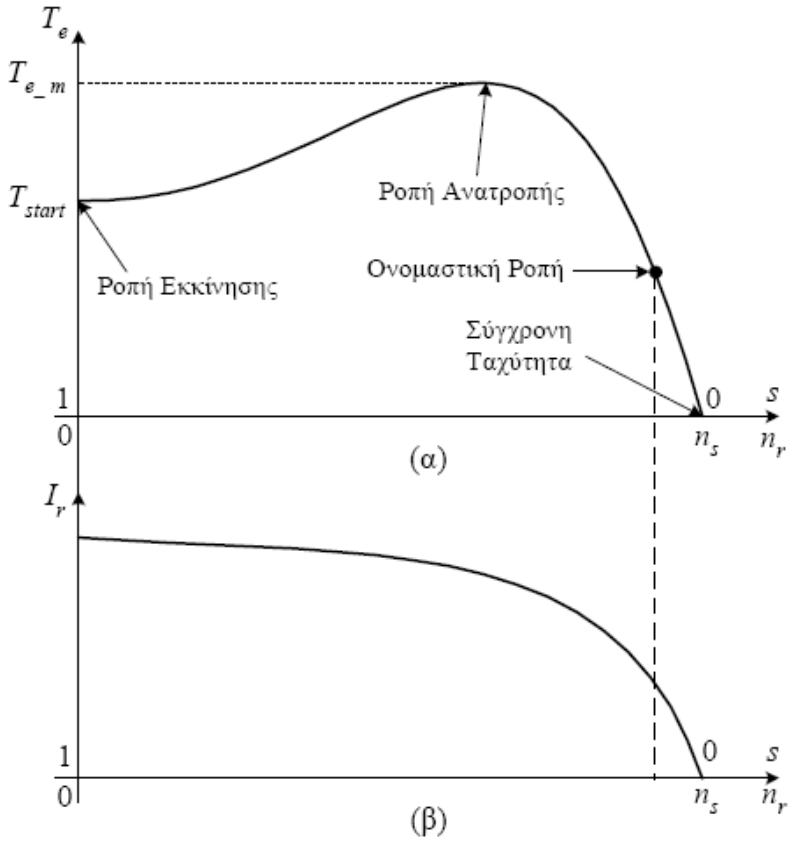
Αντίστοιχα, η πραγματική ροπή στον άξονα του κινητήρα, εξαιτίας των τριβών και των κατανεμημένων απωλειών είναι μικρότερη από την εσωτερική ροπή. Η εσωτερική ροπή ονομάζεται αναπτυσσόμενη ή ηλεκτρομαγνητική ροπή (developed torque). Η ηλεκτρομαγνητική ροπή ορίζεται από την αναπτυσσόμενη μηχανική ισχύ και την κυκλική ταχύτητα του κινητήρα, ή ισοδύναμα από την ισχύ διακένου και τη σύγχρονη ταχύτητα

3.3.3 Σχέση Ροπής– Ταχύτητας Περιστροφής

Η ροπή, την οποία αναπτύσσει ένας επαγωγικός κινητήρας μεταβάλλεται με την ταχύτητα, με τον τρόπο που εικονίζεται στο σχήμα 3.6α. Προκειμένου να ερμηνεύσουμε τη χαρακτηριστική αυτή, θεωρούμε ότι ο κινητήρας λειτουργεί αρχικά χωρίς φορτίο. Τότε, η ταχύτητα του κινητήρα είναι περίπου ίση με τη σύγχρονη.

Η τάση που επάγεται στο τύλιγμα του δρομέα Er είναι πολύ μικρή, εξαιτίας της μικρής ολίσθησης. Έτσι, το ρεύμα του δρομέα Ir και το πεδίο που αυτό αναπτύσσει, είναι μικρά. Επειδή η συχνότητα των επαγόμενων τάσεων είναι μικρή, η αντίδραση του δρομέα είναι πολύ μικρή σε σχέση με την ωμική του αντίσταση και η διαφορά φάσης μεταξύ Ir και Er είναι ελάχιστη. Μολονότι το ρεύμα του δρομέα είναι πολύ μικρό στη λειτουργία χωρίς φορτίο, το ρεύμα τροφοδοσίας του στάτη είναι αρκετά μεγάλο, καθώς παρέχει το ρεύμα μαγνήτισης

Επειδή το μαγνητικό πεδίο είναι μικρό, η ροπή που αναπτύσσει ο κινητήρας είναι τόση όση να υπερνικήσει τις απώλειές του. Η μεταβολή του ρεύματος του δρομέα με την ταχύτητα εικονίζεται στο σχήμα 3.6β. Σε μικρές τιμές της ολίσθησης, η μεταβολή του ρεύματος στο δρομέα και της ροπής είναι γραμμική με την ολίσθηση.



Σχήμα 3.6. Τυπική χαρακτηριστική ροπής–ταχύτητας των επαγωγικών κινητήρων (α) και μεταβολή του ρεύματος του δρομέα με την ταχύτητα (β).

Σε ροπές μεγαλύτερες από την ονομαστική, η συχνότητα των ρευμάτων στο δρομέα είναι αρκετά μεγάλη. Η μεταβολή του ρεύματος του δρομέα και της ροπής περιορίζεται, σε ροπές μεγαλύτερες από την ονομαστική. Σε ροπές υψηλότερες από τη ροπή ανατροπής, ο συντελεστής ισχύος του δρομέα γίνεται πολύ μικρός και η ροπή μειώνεται αντί να αυξάνει. Ακόμη, το ρεύμα του δρομέα είναι περίπου σταθερό.

Η ροπή που αναπτύσσει ο κινητήρας στη μηδενική ταχύτητα ονομάζεται ροπή εκκίνησης (Tstart). Η ροπή εκκίνησης είναι μεγαλύτερη από την ονομαστική ροπή, συνήθως της τάξης του 150% της ονομαστικής.

Το σύστημα κινητήρα- αντλία βρίσκεται σε συνθήκες ευσταθούς λειτουργίας, όταν μετά από μία παροδική μεταβολή μιας παραμέτρου του, εμφανίζει τάση επαναφοράς στο αρχικό σημείο λειτουργίας. Σε αντίθετη περίπτωση το σύστημα ονομάζεται ασταθές.

Οι ασύγχρονοι ηλεκτροκινητήρες λειτουργούν στην ευσταθή περιοχή λειτουργίας τους, στην οποία η μεταβολή της κινητήριας ροπής T_e συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής έχει αρνητική κλίση. Η ευσταθής περιοχή λειτουργίας στο σχήμα 3.6 είναι μεταξύ της ταχύτητας περιστροφής στη οποία εμφανίζεται η μέγιστη ροπή μέχρι τη σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής, στην οποία η ροπή μηδενίζεται. Στην μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, το σύστημα κινητήρα– αντλίας στρέφεται με σταθερή ταχύτητα περιστροφής για την οποία η ανθιστάμενη ροπή T_a της αντλίας είναι ίση προς την κινητήρια ροπή T_e.

Σύμφωνα με τον Θεμελιώδη Νόμο της Μηχανικής, η ισορροπία του στρεφόμενου συστήματος καθορίζεται από την εξίσωση:

$$T_e - T_a = I \cdot \frac{d\omega}{dt}$$

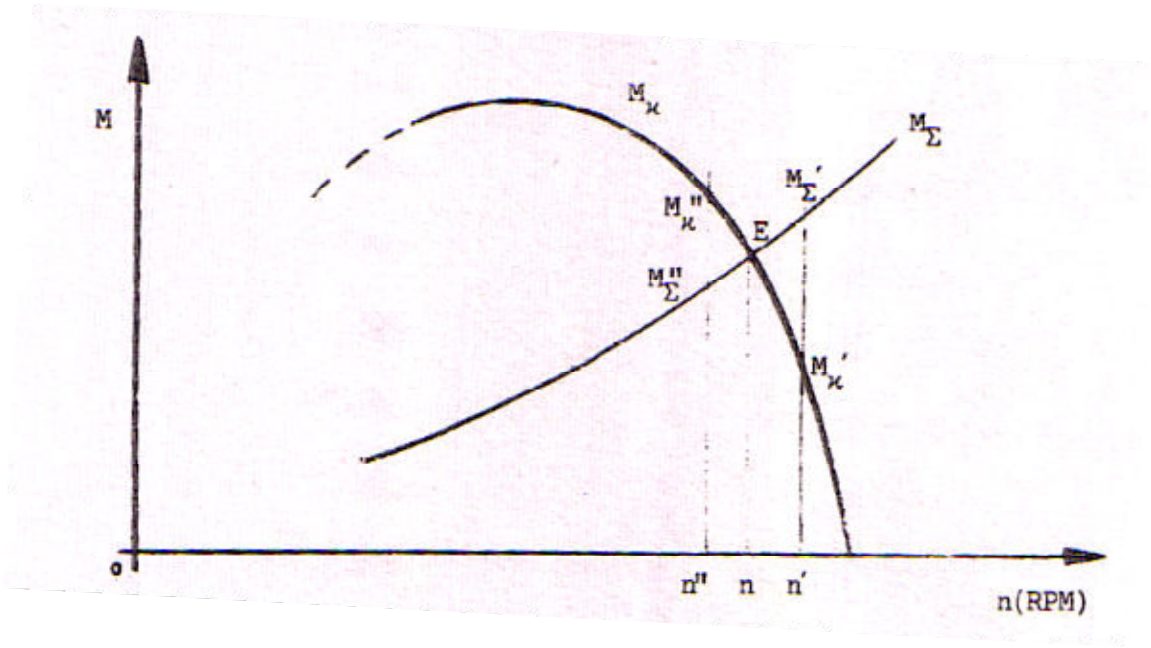
στην οποία με I παριστάνεται η ροπή αδράνειας των στρεφόμενων μαζών.

Όταν $T_e > T_a$ τότε η αντλία τείνει να επιταχυνθεί, ενώ επιβραδύνεται όταν $T_e < T_a$. Η ανθιστάμενη ροπή της αντλίας εξαρτάται από το σημείο λειτουργίας της και δίνεται από τη σχέση:

$$\mathrm{T_a} = \frac{N}{\omega} = \frac{\gamma HQ}{\eta\omega}$$

Η ανθιστάμενη ροπή της αντλίας εξαρτάται άρα και από την ταχύτητα περιστροφής της. Με δεδομένα τη χαρακτηριστική ροπής – στροφών του κινητήρα, τις χαρακτηριστικές της αντλίας στις στροφές αναφοράς και την χαρακτηριστική της σωλήνωσης, είναι δυνατόν να καθοριστεί η πραγματική ταχύτητα περιστροφής του συστήματος.

Για το σκοπό αυτό, προσδιορίζεται αρχικά η καμπύλη ροπής αντίστασης – στροφών της αντλίας, η οποία εξαρτάται από τη χαρακτηριστική της σωλήνωσης και χαράσσεται σε κοινό διάγραμμα με την καμπύλη του κινητήρα (σχήμα 3.7). Η τομή των δύο καμπυλών στο σημείο Ε, στο οποίο εξασφαλίζεται η συνθήκη ισορροπίας $T_e = T_a$ προσδιορίζει την ταχύτητα περιστροφής του μόνιμου σημείου λειτουργίας του συστήματος αντλία– σωλήνωση– κινητήρας .

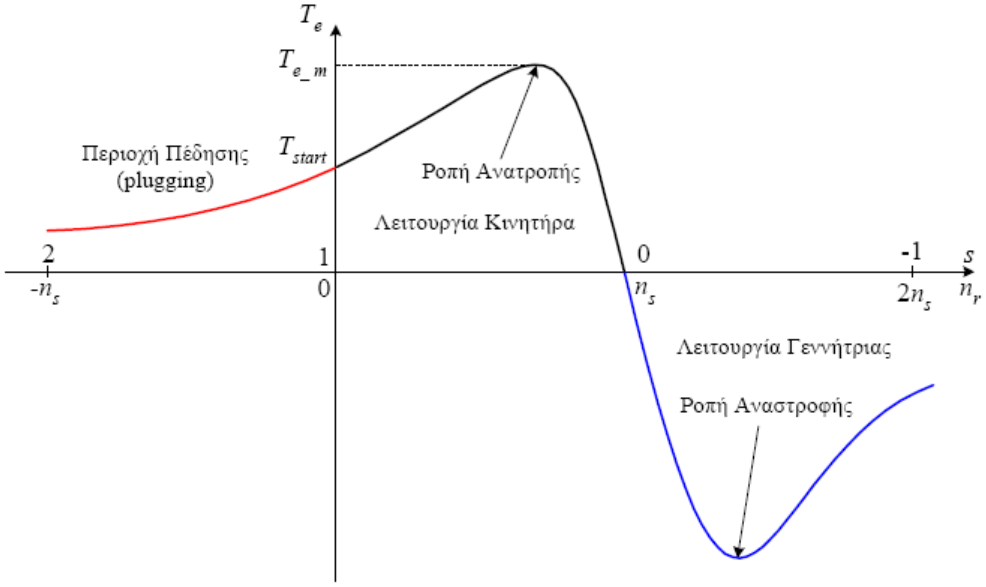


Σχήμα 3.7. Προσδιορισμός του σημείου λειτοργίας του συστήματος αντλίας σωλήνωσης κινητήρα.

3.3.4 Υπολογισμός της Αναπτυσσόμενης Ροπής

Για τον υπολογισμό της ροπής που αναπτύσσει ο επαγωγικός κινητήρας, απαιτείται η γνώση της ισχύος διακένου. Ο υπολογισμός της ισχύος διακένου προϋποθέτει τον υπολογισμό του ρεύματος στο δρομέα. Στο σχήμα 3.8 εικονίζεται η πλήρης χαρακτηριστική ροπής– ταχύτητας του επαγωγικού κινητήρα. Η επαγωγική μηχανή λειτουργεί ως γεννήτρια, όταν η ταχύτητα του δρομέα είναι μεγαλύτερη από τη σύγχρονη, οπότε η ολίσθηση γίνεται αρνητική. Η ολίσθηση είναι μεγαλύτερη από τη μονάδα όταν η φορά περιστροφής του κινητήρα είναι αντίθετη από τη φορά του στρεφόμενου πεδίου του στάτη. Ο κινητήρας αναπτύσσει τη μέγιστη ροπή όταν η ισχύς διακένου, είναι μέγιστη.

Εξάλλου η τιμή της ολίσθησης στη ροπή ανατροπής είναι ανάλογη με την αντίσταση του δρομέα επομένως, όσο μεγαλύτερη είναι η αντίσταση του δρομέα, σε τόσο μικρότερη ταχύτητα θα εμφανίζεται η μέγιστη ροπή.



Σχήμα 3.8. Πλήρης χαρακτηριστική ροπής–ταχύτητας του επαγωγικού κινητήρα.

Η ροπή ανατροπής είναι ανάλογη με το τετράγωνο της τάσης τροφοδοσίας και αντιστρόφως ανάλογη των αντιδράσεων του στάτη και του δρομέα. Έτσι, οι αντιδράσεις σκέδασης πρέπει να είναι μικρές, όταν είναι επιθυμητή μια μεγάλη ροπή ανατροπής.

3.4 Έλεγχος της ταχύτητας περιστροφής των επαγωγικών κινητήρων

Όταν ένας τριφασικός επαγωγικός κινητήρας τροφοδοτείται από το δίκτυο σταθερής τάσης και συχνότητας, στρέφεται με μια ταχύτητα η οποία είναι λίγο μικρότερη από τη σύγχρονη. Η διαφορά της ταχύτητας από τη σύγχρονη εξαρτάται από το φορτίο και είναι τόσο μεγαλύτερη όσο υψηλότερη είναι η αντίσταση του δρομέα. Όμως, η λειτουργία του κινητήρα με μειωμένη ταχύτητα σημαίνει αύξηση της ολίσθησης και των απωλειών χαλκού στο δρομέα (P = sP),

Ο έλεγχος της ταχύτητας των επαγωγικών κινητήρων επιτυγχάνεται με δύο τρόπους:

- Με τη ρύθμιση της ολίσθησης

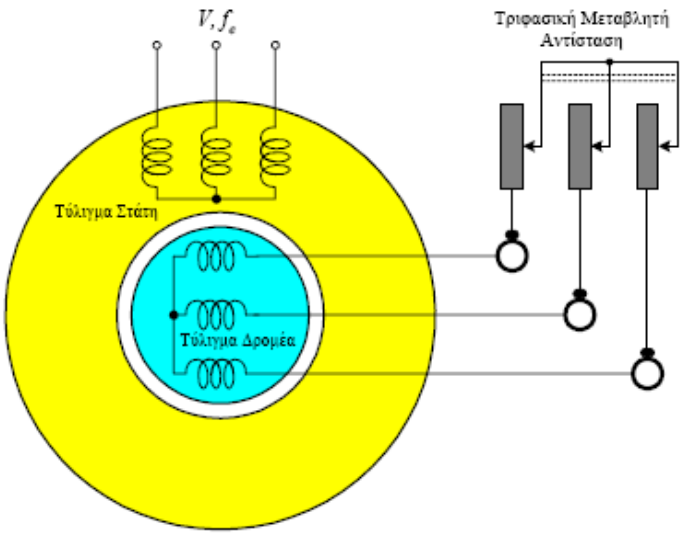
- Με τη ρύθμιση της σύγχρονης ταχύτητας.

Η ρύθμιση της ολίσθησης, για δεδομένη ροπή φορτίου, επιτυγχάνεται με τη μεταβολή της αντίστασης του δρομέα στον κινητήρα δακτυλιοφόρου δρομέα και με τον έλεγχο της τάσης τροφοδοσίας στον κινητήρα βραχυκυκλωμένου κλωβού.

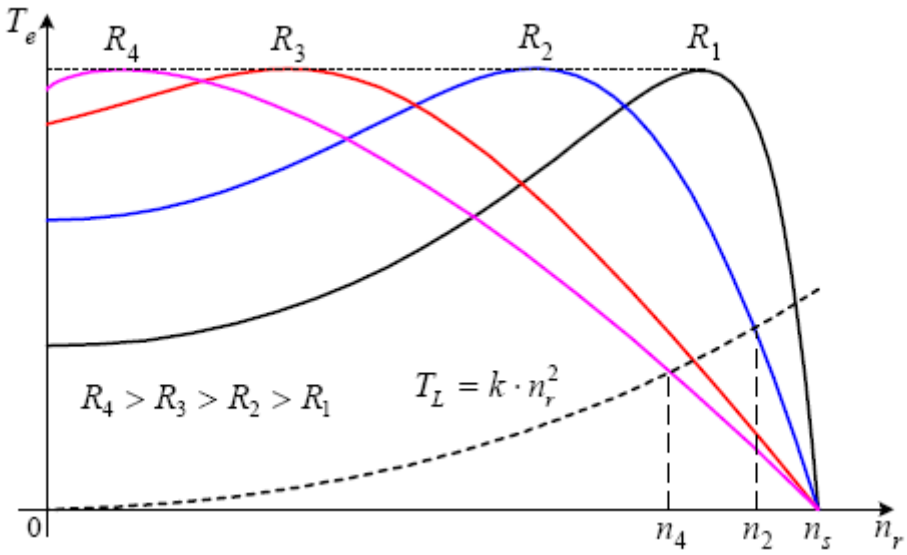
Η ρύθμιση της σύγχρονης ταχύτητας από τη σχέση $n_s = 120\ f_e / P$, επιτυγχάνεται είτε με τη μεταβολή του αριθμού των πόλων του τυλίγματος του στάτη, ή με τη μεταβολή της συχνότητας τροφοδοσίας.

3.4.1 Έλεγχος της ταχύτητας με ρύθμιση της αντίστασης του δρομέα

Η ταχύτητα των επαγωγικών κινητήρων με δακτυλιοφόρο δρομέα ρυθμίζεται με την εισαγωγή μεταβλητών αντιστάσεων στο τύλιγμα του δρομέα, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 3.9. Με τον τρόπο αυτό μεταβάλλεται η μορφή της χαρακτηριστικής ροπής– ταχύτητας του κινητήρα.



Σχήμα 3.9. Εισαγωγή ρυθμιστικών αντιστάσεων στο δρομέα, για τη ρύθμιση της ταχύτητας του κινητήρα με δακτυλιοφόρο δρομέα

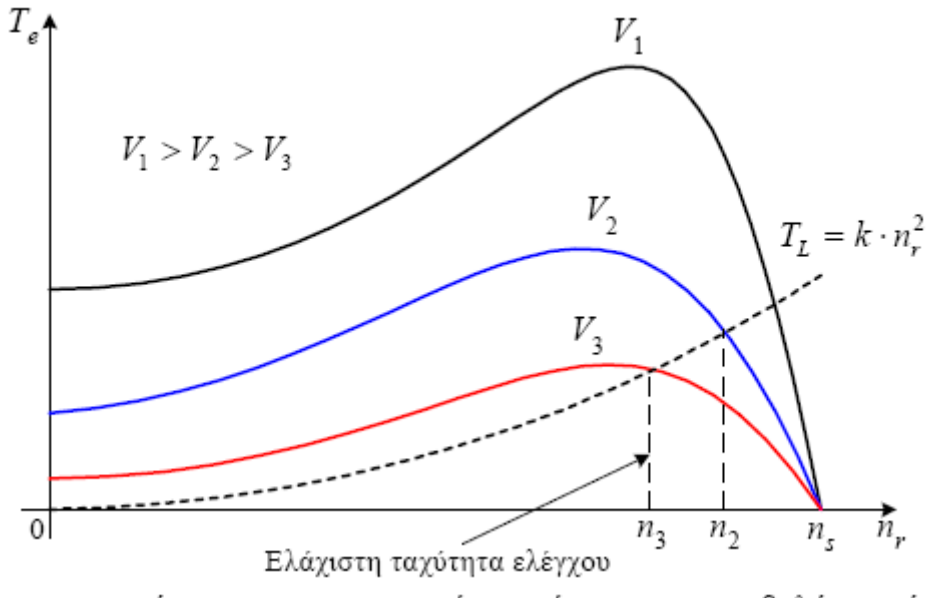


Σχήμα 3.10. Έλεγχος της ταχύτητας του επαγωγικού κινητήρα με δακτυλιοφόρο δρομέα, με τη μεταβολή της αντίστασης του δρομέα

Στο σχήμα 3.10 εικονίζονται οι χαρακτηριστικές του κινητήρα για τέσσερις τιμές της αντίστασης του δρομέα, μαζί με τη χαρακτηριστική του φορτίου. Η ροπή του φορτίου μεταβάλλεται ανάλογα με το τετράγωνο της ταχύτητας περιστροφής. Αυτή η μορφή χαρακτηριστικής φορτίου είναι πολύ συνηθισμένη και απαντάται στις αντλίες, τους ανεμιστήρες και τα ανυψωτικά (pump, fan, crane). Η μεταβολή της ταχύτητας με τη ρύθμιση της αντίστασης είναι φανερή. Η ταχύτητα του κινητήρα μειώνεται από την τιμή n_2 όταν $R_r = R_2$ στην τιμή n_4 όταν $R_r = R_4$. Το μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι, ο βαθμός απόδοσης της διάταξης μειώνεται με τη μείωση των στροφών, εξαιτίας των εξωτερικών αντιστάσεων.

3.4.2 Έλεγχος της ταχύτητας με ρύθμιση της τάσης του στάτη

Στους επαγωγικούς κινητήρες βραχυκυκλωμένου κλωβού, η ρύθμιση της ολίσθησης (ταχύτητας) επιτυγχάνεται με τη μεταβολή της τάσης τροφοδοσίας των τυλιγμάτων του στάτη. Η συχνότητα των τάσεων είναι σταθερή και ίση με τη συχνότητα του δικτύου. Καθώς η ροπή που αναπτύσσει ο επαγωγικός κινητήρας είναι ανάλογη με το τετράγωνο της τάσης του στάτη, οι χαρακτηριστικές ροπής–ταχύτητας μεταβάλλονται όπως στο σχήμα 3.11, για διάφορες τιμές της τάσης. Η ροπή του φορτίου είναι ανάλογη με το τετράγωνο της ταχύτητας.



Σχήμα 3.11 Έλεγχος της ταχύτητας του επαγωγικού κινητήρα, με τη μεταβολή της τάσης του στάτη

Από το σχήμα 3.11 είναι φανερό ότι, η ταχύτητα του κινητήρα δεν μπορεί να ελεγχθεί σε τιμές πολύ μικρότερες από τη σύγχρονη. Η ελάχιστη δυνατή ταχύτητα είναι η n_3, που αντιστοιχεί στη ροπή ανατροπής για την τάση V_3. Ακόμη, το ρεύμα του κινητήρα είναι ανάλογο της τάσης. Έτσι, ο λόγος ροπής προς ρεύμα, η μέγιστη ροπή, ο συντελεστής ισχύος και ο βαθμός απόδοσης, μειώνονται με τη μείωση της ταχύτητας. Επομένως, ο έλεγχος της ταχύτητας των επαγωγικών κινητήρων με τη ρύθμιση της τάσης του στάτη δεν είναι αποτελεσματικός.

Ο έλεγχος της τάσης στα τυλίγματα του στάτη επιτυγχάνεται με κατάλληλους μετατροπείς ισχύος, οι οποίοι ονομάζονται ρυθμιστές εναλλασσόμενης τάσης (ac voltage controllers). Τα τυλίγματα του κινητήρα μπορεί να είναι σε σύνδεση αστέρα ή τριγώνου.

Οι ρυθμιστές εναλλασσόμενης τάσης χρησιμοποιούνται συνήθως στον έλεγχο της ταχύτητας επαγωγικών κινητήρων κλάσης D, σε εφαρμογές αντλιών και ανεμιστήρων, όπου δεν απαιτείται έλεγχος της ταχύτητας σε μικρές τιμές. Όμως, η κυριότερη εφαρμογή τους είναι στην εκκίνηση των επαγωγικών κινητήρων όλων των κατηγοριών, οπότε ονομάζονται soft starters. Οι ηλεκτρονικοί εκκινητές έχουν αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους εκκίνησης, με αυτομετασχηματιστή ή διακόπτη αστέρα– τριγώνου. Κάποια από τα πλεονεκτήματα είναι: η ομαλή επιτάχυνση και επιβράδυνση, ο έλεγχος του ρεύματος, η μειωμένη

συντήρηση, η προστασία από έλλειψη ή ασυμμετρία των φάσεων. Επιπλέον, ένας εκκινητής με ρυθμιστή εναλλασσόμενης τάσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην ελαχιστοποίηση των απωλειών του επαγωγικού κινητήρα, λειτουργώντας τον κινητήρα με μειωμένη τάση σε μικρά φορτία. (Ο επαγωγικός κινητήρας λειτουργεί με το μέγιστο βαθμό απόδοσης στο ονομαστικό φορτίο, όπου η κατανομή των επιμέρους απωλειών του είναι η βέλτιστη. Όταν το φορτίο μειώνεται, η βέλτιστη κατανομή των απωλειών διαταράσσεται και ο βαθμός απόδοσης μειώνεται. Μεταβάλλοντας την τάση τροφοδοσίας του κινητήρα ανάλογα με το φορτίο του, ώστε η μαγνητική ροή στο διάκενο να έχει πάντα τη βέλτιστη τιμή, επιτυγχάνουμε το μέγιστο βαθμό απόδοσης. Η βέλτιστη τιμή της μαγνητικής ροής εξαρτάται από το φορτίο και την ταχύτητα του κινητήρα).

3.4.3 Έλεγχος της ταχύτητας με μεταβολή του αριθμού των πόλων

Ο αριθμός των μαγνητικών πόλων που δημιουργούνται από το τριφασικό τύλιγμα του στάτη μπορεί να μεταβληθεί, με τη μέθοδο των διαδοχικών πόλων (consequent poles), ή τοποθετώντας πολλαπλά τυλίγματα στο στάτη (multiple stator windings).

Στη μέθοδο των διαδοχικών πόλων, με κάποιες απλές αλλαγές στη σύνδεση των ομάδων του τυλίγματος του στάτη, ο αριθμός των πόλων του μεταβάλλεται με ένα λόγο 2 προς 1. Έτσι, ο επαγωγικός κινητήρας μπορεί να έχει δύο ή τέσσερις πόλους και η σύγχρονη ταχύτητα να είναι 3000rpm ή 1500rpm αντιστοίχως..

Όταν ο λόγος 2 προς 1 στην ταχύτητα δεν είναι βολικός, τοποθετούνται στο στάτη περισσότερα από ένα ανεξάρτητα τριφασικά τυλίγματα, με τον επιθυμητό αριθμό πόλων. Ανάλογα με τη ζητούμενη ταχύτητα, τροφοδοτείται κάθε φορά το κατάλληλο τύλιγμα. Το μειονέκτημα των πολλαπλών τυλιγμάτων είναι ότι αυξάνουν το κόστος του κινητήρα. Ακόμη, η μέθοδος των πολλαπλών τυλιγμάτων μπορεί να συνδυασθεί με τη μέθοδο των διαδοχικών πόλων, για τη λειτουργία του κινητήρα σε περισσότερες ταχύτητες.

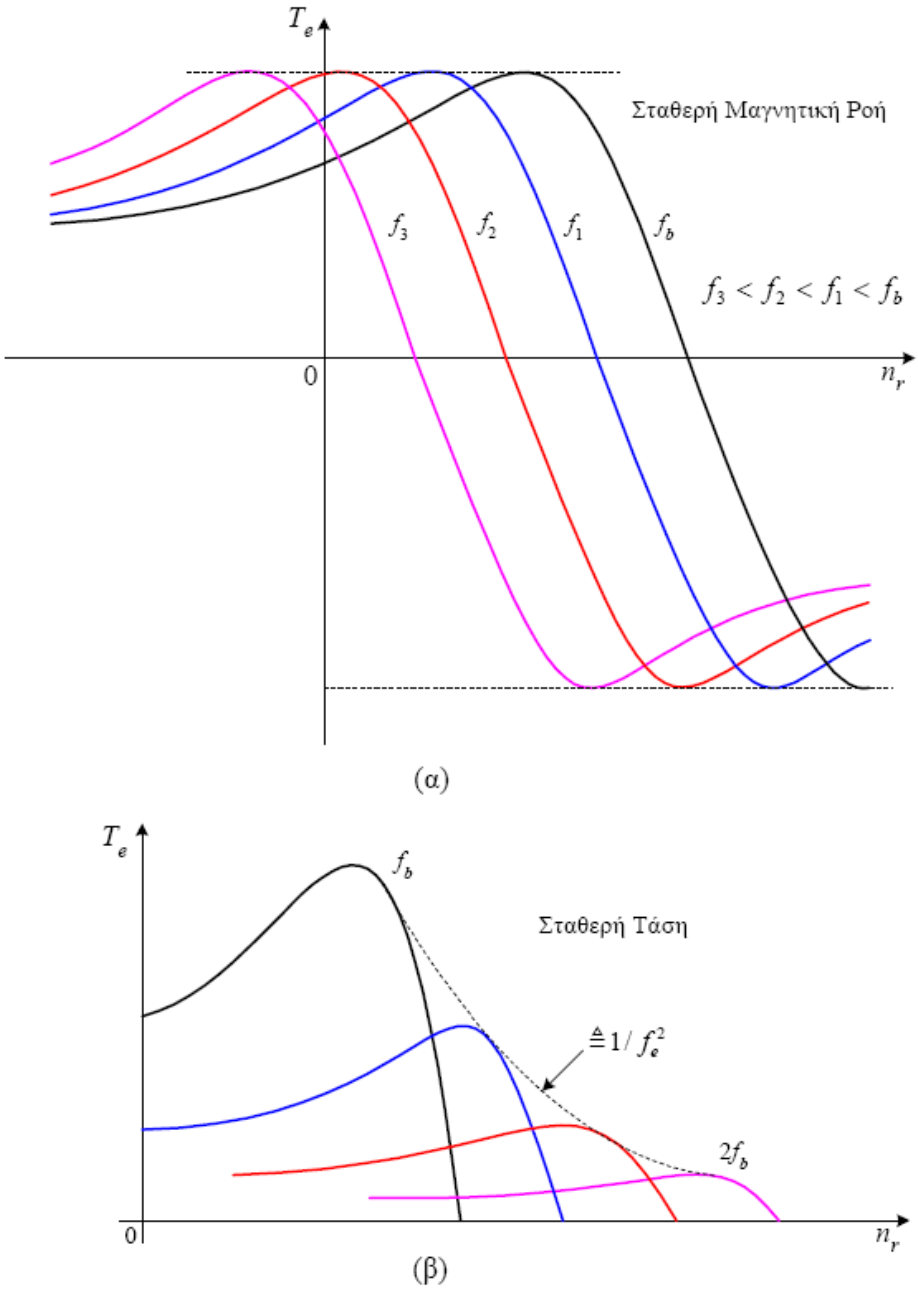
Πρέπει να σημειωθεί ότι η μέθοδος ελέγχου της ταχύτητας με τη μεταβολή του αριθμών των πόλων μπορεί να εφαρμοστεί μόνο σε επαγωγικούς κινητήρες με βραχυκυκλωμένο κλωβό. Ο δρομέας των κινητήρων αυτών αναπτύσσει πάντα τόσους πόλους, όσοι είναι και οι πόλοι του στάτη. Αυτό δεν ισχύει στους κινητήρες με

δακτυλιοφόρο δρομέα, όπου το τύλιγμα του δρομέα αναπτύσσει ένα καθορισμένο αριθμό πόλων, από την κατασκευή του.

3.4.4 Έλεγχος της ταχύτητας με μεταβολή της συχνότητας

Η βέλτιστη μέθοδος για τον έλεγχο της ταχύτητας περιστροφής των επαγωγικών κινητήρων κάθε είδους, είναι με ρύθμιση της συχνότητας τροφοδοσίας του στάτη. Έτσι, μεταβάλλεται η σύγχρονη ταχύτητα, δηλαδή η ταχύτητα περιστροφής των μαγνητικών πεδίων και μαζί τους η ταχύτητα του κινητήρα. Η σύγχρονη ταχύτητα που αντιστοιχεί στην ονομαστική συχνότητα f_b, ονομάζεται βασική (base).

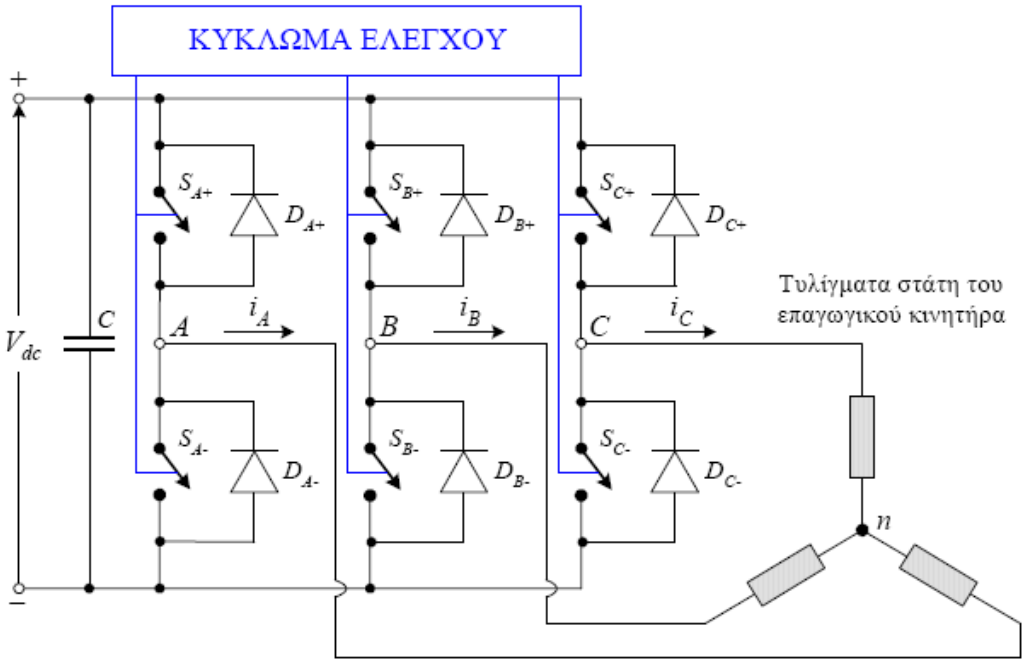
Καθώς η συχνότητα των τάσεων τροφοδοσίας μπορεί να ρυθμιστεί σε τιμές μικρότερες αλλά και μεγαλύτερες της ονομαστικής, η ταχύτητα του κινητήρα μπορεί να μεταβληθεί από το μηδέν, μέχρι μια τιμή πολλαπλάσια της βασικής. Το άνω όριο της ταχύτητας περιορίζεται από τη μηχανική αντοχή του κινητήρα. Εκτός από την ευρεία περιοχή ρύθμισης της ταχύτητας, η μέθοδος εξασφαλίζει τη λειτουργία του κινητήρα με μικρή ολίσθηση σε κάθε ταχύτητα. Έτσι, ο βαθμός απόδοσης διατηρείται υψηλός.



Σχήμα 3.12 Έλεγχος της ταχύτητας του επαγωγικού κινητήρα με τη μεταβολή της συχνότητας, σε τιμές μικρότερες από τη βασική, με σταθερή τη μαγνητική ροή (α) και σε τιμές μεγαλύτερες από τη βασική, με σταθερή την τάση (β)

Όταν η ταχύτητα του κινητήρα ρυθμίζεται σε τιμές μικρότερες της βασικής, η μείωση της συχνότητας συνοδεύεται από αντίστοιχη μείωση της τάσης. Ειδικότερα, ο λόγος της τάσης προς τη συχνότητα V/fe διατηρείται σταθερός. Με τον τρόπο αυτό η μαγνητική ροή στο διάκενο του κινητήρα παραμένει περίπου σταθερή.

Στο σχήμα 3.12α εικονίζονται οι χαρακτηριστικές ροπής– ταχύτητας του κινητήρα, σε διάφορες συχνότητες μικρότερες από τη βασική, όταν μαγνητική ροή διατηρείται σταθερή. Παρατηρούμε ότι η ροπή ανατροπής (μέγιστη ροπή), δεν μεταβάλλεται με τη μεταβολή της συχνότητας. Έτσι, ο κινητήρας μπορεί να ελέγξει φορτία, τα οποία απαιτούν μεγάλη ροπή σε μικρές ταχύτητες. Επιπλέον, η δυναμική συμπεριφορά του κινητήρα είναι εξαιρετική. Στην ονομαστική ταχύτητα, ο κινητήρας τροφοδοτείται με την ονομαστική τάση και τη βασική συχνότητα. Για την αύξηση της ταχύτητας, σε τιμές πέρα από την ονομαστική, η συχνότητα γίνεται μεγαλύτερη από τη βασική. Όμως, η τάση τροφοδοσίας διατηρείται σταθερή στην ονομαστική τιμή, για την προστασία της μόνωσης των τυλιγμάτων. Επειδή η τάση δεν ακολουθεί την αύξηση της συχνότητας, η μαγνητική ροή μειώνεται καθώς η συχνότητα αυξάνει. Το αποτέλεσμα είναι η μείωση της μέγιστης ροπής ανατροπής με το τετράγωνο της συχνότητας, όπως εικονίζεται στο σχήμα 3.12β. Αν και η μέθοδος ελέγχου της ταχύτητας με τη ρύθμιση της συχνότητας προσφέρει πολύ καλύτερα χαρακτηριστικά λειτουργίας απ' όλες τις άλλες μεθόδους, η χρήση της έχει γενικευτεί μόλις τα τελευταία χρόνια. Αυτό οφείλεται στην κατασκευή των κατάλληλων μετατροπέων ισχύος, οι οποίοι ονομάζονται αντιστροφείς (inverters), με λογικό κόστος και υψηλή αξιοπιστία. Στο Σχ. 5.31 εικονίζεται η δομή του τριφασικού αντιστροφέα πηγής τάσης.



Σχήμα 3.13. Κυκλωματική δομή του τριφασικού αντιστροφέα πηγής τάσης.

Ο αντιστροφέας ονομάζεται πηγής τάσης, επειδή τροφοδοτείται από μια πηγή συνεχούς τάσης. Η συνεχής τάση εισόδου του αντιστροφέα, προέρχεται από την ανόρθωση της τάσης του δικτύου, την οποία εξομαλύνει ο πυκνωτής C. Οι αντιστροφείς που τροφοδοτούνται από πηγές συνεχούς ρεύματος ονομάζονται αντιστροφείς πηγής ρεύματος και χρησιμοποιούνται στον έλεγχο κινητήρων μεγάλης ισχύος. Οι έξι διακόπτες του αντιστροφέα πηγής τάσης, είναι συνήθως MOSFET ισχύος (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) ή IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor).

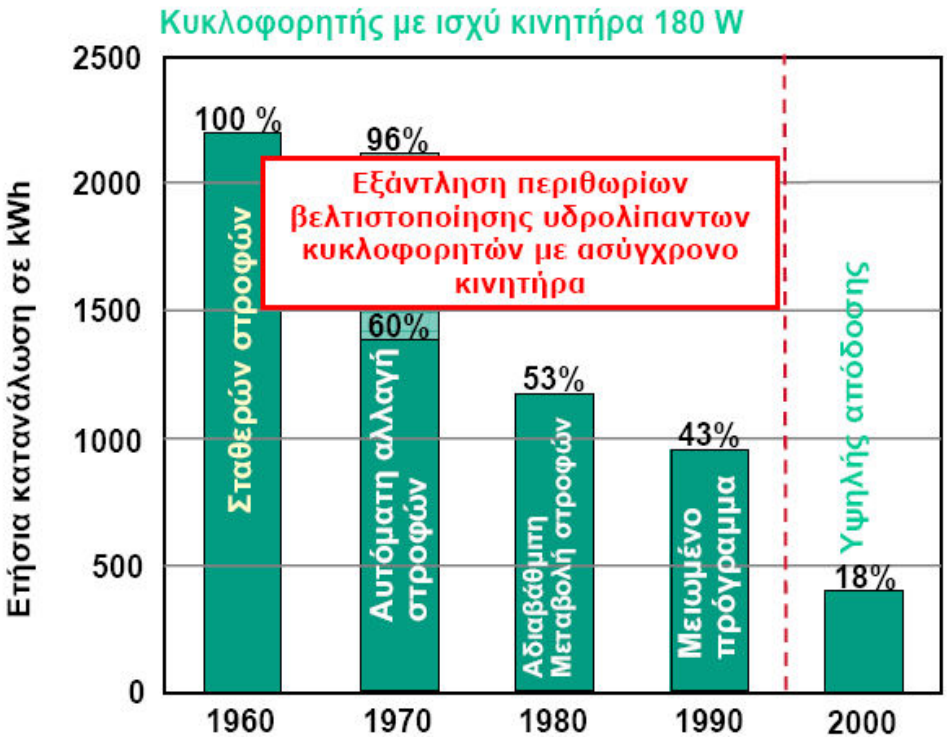
Αντιπαράλληλα με κάθε διακόπτη συνδέεται μια δίοδος, η οποία εξασφαλίζει την αμφίδρομη ροή της ισχύος μεταξύ της dc εισόδου και της ac εξόδου. Οι διακόπτες οδηγούνται από το κύκλωμα ελέγχου, με κάποια από τις πολλές τεχνικές διαμόρφωσης εύρους παλμού PWM (Pulse Width Modulation).

Το χαρακτηριστικό όλων των τεχνικών PWM είναι η ρύθμιση εκτός από τη συχνότητα και της τάσης τροφοδοσίας του κινητήρα. Όμως, οι διακόπτες του αντιστροφέα λειτουργούν με μια συχνότητα fs, η οποία είναι πολύ μεγαλύτερη από τη θεμελιώδη fe. Η συχνότητα fs ονομάζεται συχνότητα μετάβασης (switching frequency).

Ο κινητήρας εξαιτίας της επαγωγικής συμπεριφοράς του, φιλτράρει τις συνιστώσες υψηλής συχνότητας των ρευμάτων και ανταποκρίνεται μόνο στη θεμελιώδη συνιστώσα τους. Τα μικρά αρμονικά ρεύματα αυξάνουν τις απώλειες χαλκού και σιδήρου του κινητήρα.

3.5. Κινητήρες κυκλοφορητών μεταβλητών στροφών

Ο σχετικά χαμηλός βαθμός απόδοσης των υδρολίπαντων κινητήρων (εξαιτίας του ανοξείδωτου χιτωνίου και του μεγάλου διάκενου μεταξύ ρότορα και στάτορα) έθετε όρια στην περαιτέρω ενεργειακή βελτιστοποίηση των υδρολίπαντων κυκλοφορητών. Και αυτά τα όρια είχαν εξαντληθεί μέχρι το τέλος της δεκαετίας του ΄90 (σχήμα 3.14) [9].



Σχήμα 3.14 Εξάντληση περιθωρίων βελτιστοποίησης υδρολίπαντων κυκλοφορητών με ασύγχρονο κινητήρα.

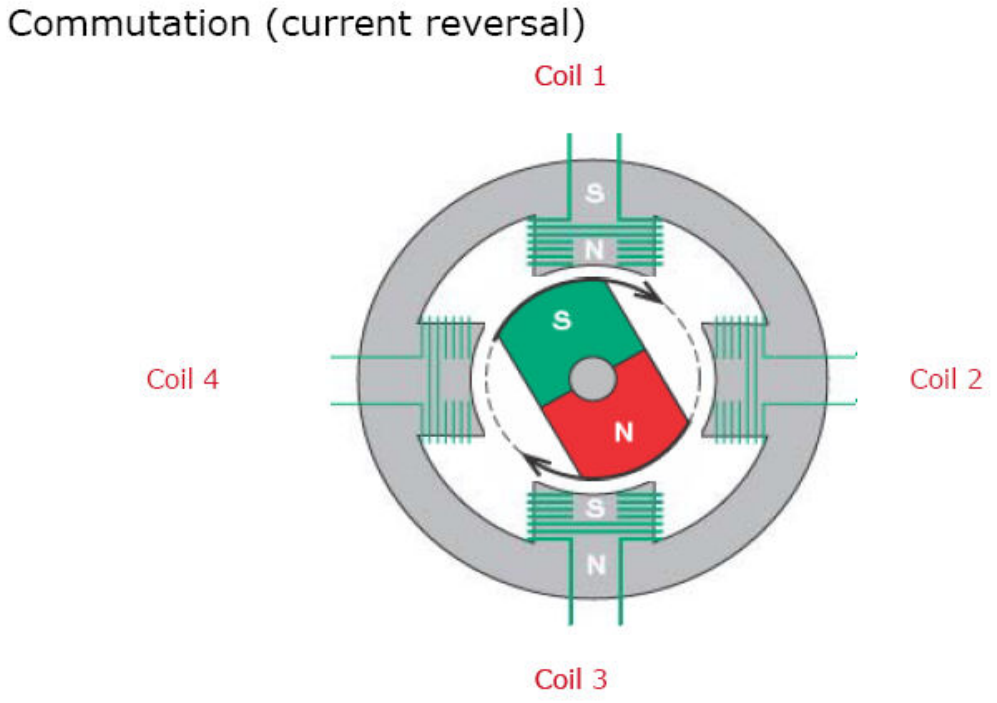
Το τεχνολογικό άλμα ήρθε με την αρχή της νέας χιλιετίας με την παραγωγή του κυκλοφορητής υψηλής απόδοσης με κινητήρα EC (Electric Commutated Motor). Ο κινητήρας αυτός στην πραγματικότητα είναι ένας σύγχρονος κινητήρας με μόνιμο μαγνήτη για ρότορα (αντί του γνωστού ασύγχρονου κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα).

Η αρχή λειτουργίας ηλεκτρονικά ελεγχόμενων κινητήρων με μόνιμο μαγνήτη βασίζεται στις παρακάτω φυσικές αρχές. Η μαγνητική ροή στον κινητήρα παράγεται από τον μόνιμο μαγνήτη στο ρότορα τόσο κατά την ακινησία όσο και κατά την περιστροφή. Η άσκηση δύναμης δημιουργείται από την αλληλεπίδραση μεταξύ της μαγνητικής ροής του μόνιμου μαγνήτη και της ηλεκτρικής ροής μέσα από τα τυλίγματα, ή αλλιώς μεταξύ ηλεκτρικών (στάτορας) και μαγνητικών πόλων (ρότορας) (έλξη αντίθετων πόλων, N- S). Η συνεχής περιστροφική κίνηση επιτυγχάνεται με περιοδική αλλαγή των τυλιγμάτων του στάτορα σε συνάρτηση με τη θέση του ρότορα (ηλεκτρονικός έλεγχος του ρεύματος). Η ταχύτητα περιστροφής είναι σύγχρονη με την ταχύτητα αλλαγής των τυλιγμάτων (σύγχρονος κινητήρας) και ρυθμίζεται

αδιαβάθμιτα μέσω ενός μετατροπέα. Ο εντοπισμός της θέσης του ρότορα πραγματοποιείται με τη βοήθεια αισθητηρίων (π.χ. αισθητήριο Hall) ή με μοντέρνες μεθόδους χωρίς αισθητήρια.

Η επαγωγική τάση στα τυλίγματα του στάτορα δημιουργείται από την περιστροφή του μόνιμου μαγνήτη στον ρότορα σε συνάρτηση με την ταχύτητα περιστροφής, αλλά ανεξάρτητα από την ηλεκτρική ροή (σχήμα 3.15). Αυτή η ιδιότητα έχει μεγάλη σημασία για τις διαφορετικές μεθόδους ηλεκτρονικού ελέγχου και χρησιμοποιείται για τον καθορισμό της θέσης του ρότορα χωρίς αισθητήριο.

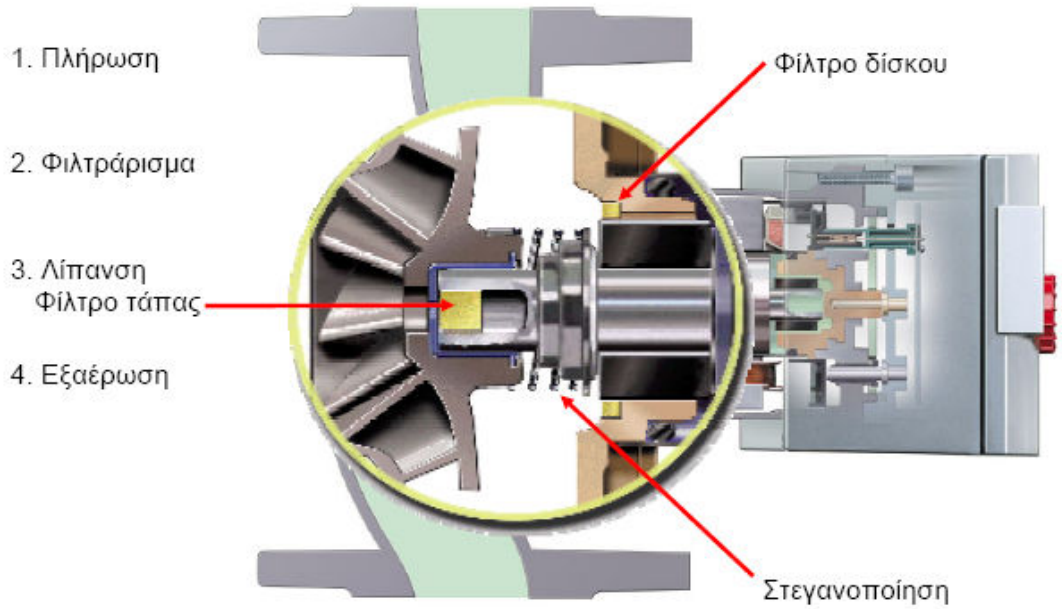
Ο ηλεκτρονικός έλεγχος πραγματοποιείται με μετατροπέα ο οποίος παρεμβάλλεται μεταξύ ηλεκτρικής τροφοδοσίας και κινητήρα. Για μείωση του θορύβου η ημιτονοειδής ηλεκτρική ροή δημιουργείται μέσω ηλεκτρονικά ισχύος, τα οποία είναι ενσωματωμένα σε μοντέρνους κινητήρες. Η απευθείας σύνδεση στο δίκτυο είναι σε αντίθεση με ασύγχρονους κινητήρες αδύνατη. Ο ηλεκτρονικός έλεγχος πρέπει να ενεργοποιεί τα ακίνητα τυλίγματα του στάτορα κάθε φορά όταν βρίσκονται ως προς το περιστρεφόμενο πεδίο του μαγνήτη σε ευνοϊκή θέση για τη δημιουργία ροπής περιστροφής.



Σχήμα 3.15. Σύγχρονος ηλεκτροκινητήρας (EC-Motor)

Η με αυτόν τον τρόπο χρονικά μεταβαλλόμενη μαγνητική πολικότητα στα τυλίγματα οδηγεί σε αλληλεπίδραση με τη σταθερή πολικότητα του μαγνήτη- ρότορα

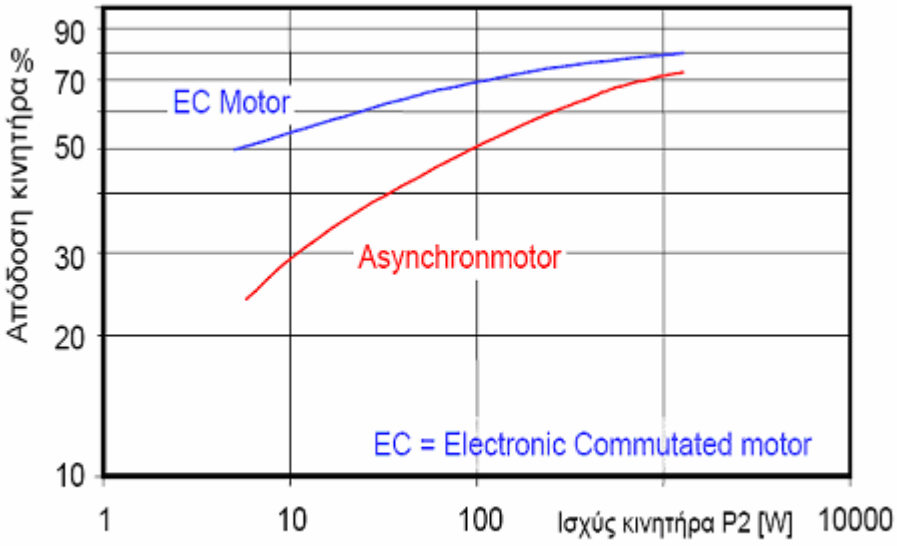
σε ελκτικές και απωθητικές δυνάμεις και έτσι σε περιστροφική κίνηση. Ανάλογα με την εκάστοτε κατεύθυνση της ηλεκτρικής ροής σχηματίζεται ένα μαγνητικό πεδίο στον στάτορα με θετικό και αρνητικό πόλο. Ο μόνιμος μαγνήτης-ρότορας που εδράζεται εντός αυτού του μαγνητικού πεδίου αρχίζει να περιστρέφεται από ελκτικές ή απωθητικές δυνάμεις ομοίων ή αντίθετων πόλων. Η ομοιόμορφη περιστροφική κίνηση προκύπτει από την ομαλά χρονικά μεταβαλλόμενη ηλεκτρική ροή των ξεχωριστών τυλιγμάτων.



Σχήμα 3.16. Κυκλοφορητές υψηλής απόδοσης με EC-κινητήρα.

Τα αποτελέσματα πολλών ερευνών έδειξαν ξεκάθαρα ένα πλεονέκτημα στην εξέλιξη των σύγχρονων EC- κινητήρων με μόνιμο μαγνήτη ως ρότορα σαν τους μελλοντικούς κινητήρες κυκλοφορητών, μια και αυτοί έχουν ξεκάθαρα πιο υψηλή απόδοση από τους σύγχρονους κινητήρες που χρησιμοποιούνταν στο παρελθόν. Οι κινητήρες EC γνωστοί και ως Brushless Motors) χρησιμοποιούνται ήδη σε ελαιολίπαντες κατασκευές όπως σε ανεμιστήρες. Δεν υπάρχουν ακόμα πολλά χρόνια εμπειρίας για αυτούς τους κινητήρες με ισχύ που κυμαίνεται από 50W- 1000W. Οι μεγάλες ποσότητες περιορίζονται σε ισχύ κάτω των 50Watt και ταχύτητες πάνω των 10,000rpm. Στο σχήμα 3.17 παρουσιάζεται η σύγκριση του βαθμού απόδοσης ενός τυπικού ασύγχρονου κινητήρα και ενός EC κινητήρα σε σχέση με την αποδιδόμενη

ισχύ. Είναι προφανής η υπεροχή του EC κινητήρα ιδιαίτερα για τις χαμηλές τιμές της ισχύος [9].



Σχήμα 3.17. Σύγκριση των βαθμών απόδοσης ασύγχρονου και EC κινητήρα

Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι προϊόντα με υψηλότερους βαθμούς απόδοσης και συνεπώς χαμηλότερης κατανάλωσης ενέργειας είναι κατά κανόνα πιο ακριβά στην κατασκευή και επομένως στην τιμή πώλησης από ότι τα συμβατικά προϊόντα. Παρόλα αυτά Η EC τεχνολογία του κινητήρα συνδυάζει υψηλά οφέλη για τον καταναλωτή με μικρό χρόνο απόσβεσης του επιπλέον κόστους– ειδικά λαμβάνοντας υπόψη το κόστος κύκλου ζωής. Διότι τα έξοδα λειτουργίας κατά τη διάρκεια ζωής των κυκλοφορητών, δηλαδή ειδικότερα η κατανάλωση ρεύματος, ανέρχονται σε πολλαπλάσιο του κόστους αγοράς.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ

4

Εφαρμογές των Αντλιών Μεταβλητών Στροφών

4.1 Ηλεκτρονικοί κυκλοφορητές.

Για να θερμανθεί ένας χώρος όπως ακριβώς προβλέπει η μηχανολογική μελέτη, θα πρέπει το κάθε σώμα να τροφοδοτηθεί με ποσότητα νερού που εξαρτάται:

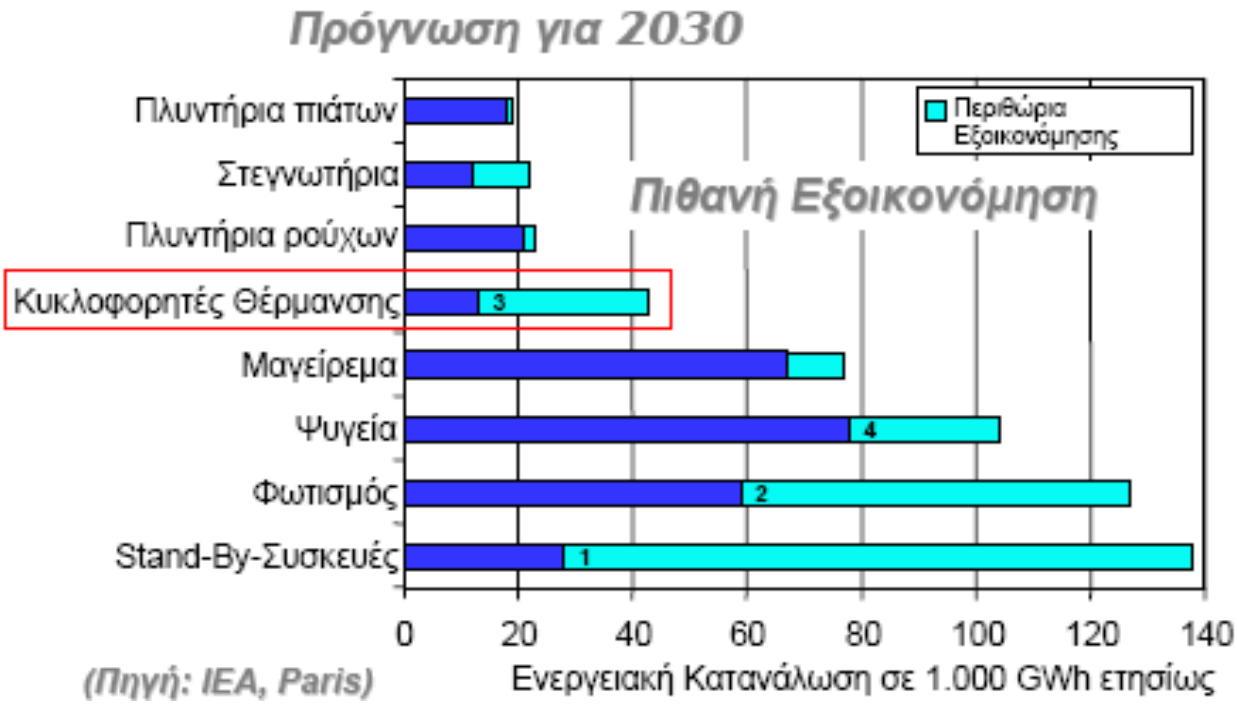
α) από την ισχύ του σώματος και
β) από τη θερμοκρασιακή πτώση του νερού στο σώμα

Σε εγκαταστάσεις όπου τα θερμαντικά σώματα φέρουν θερμοστατικές κεφαλές όταν ο χώρος πλησιάζει την επιθυμητή θερμοκρασία, η θερμοστατική κεφαλή αρχίζει να κλείνει το διακόπτη του σώματος μειώνοντας την παροχή του νερού μέχρι πλήρους διακοπής, όταν ο χώρος ζεσταθεί ικανοποιητικά. Επίσης, σε περιτώσεις αυτονομίας με πολυζωνικά συστήματα κάποιες ηλεκτροβάνες, ελεγχόμενες συνήθως από θερμοστάτες χώρου κλείνουν, και σταματά η τροφοδότηση με νερό κάποιων σωμάτων.

Και στις δύο παραπάνω περιπτώσεις η απαιτούμενη παροχή επομένως, μεταβάλλεται ανάλογα με τις ανάγκες θέρμανσης των χώρων. Η ιδανική λύση σε τέτοιες περιπτώσεις είναι ο ηλεκτρονικός κυκλοφορητής. Ένας τέτοιος κυκλοφορητής έχει τη δυνατότητα να μεταβάλλει τις στροφές του κατά τέτοιο τρόπο ώστε η πίεση στην κατάθλιψη να παραμένει σταθερή. Η μεταβολή των στροφών τους ανάλογα με τις απαιτήσεις της εγκατάστασης γίνεται εφικτή μέσω ενός συστήματος inverter το οποία επιτρέπει συνεχή ρύθμιση των στροφών, με την αντίστοιχη ρύθμιση της συχνότητας του ρεύματος.

4.1.1. Παραδοσιακοί κυκλοφορητές

Στην Ευρώπη λειτουργούν περίπου 120.000.000 κυκλοφορητές που καταναλώνουν ετησίως περίπου 60.000 GWh. Σύμφωνα με την IEA (International Energy Agency Paris), υπάρχει στον τομέα των κυκλοφορητών περιθώριο εξοικονόμησης ενέργειας περίπου 70%. Αυτό αντιστοιχεί [9] (σχήμα 4.1) ετησίως σε εξοικονόμηση 42.000×0.7= 29400GWh που ισοδυναμεί με την ετήσια κατανάλωση ενέργειας όλων των πλυντηρίων ρούχων και πιάτων στην Ευρώπη (σχήμα 4.1).



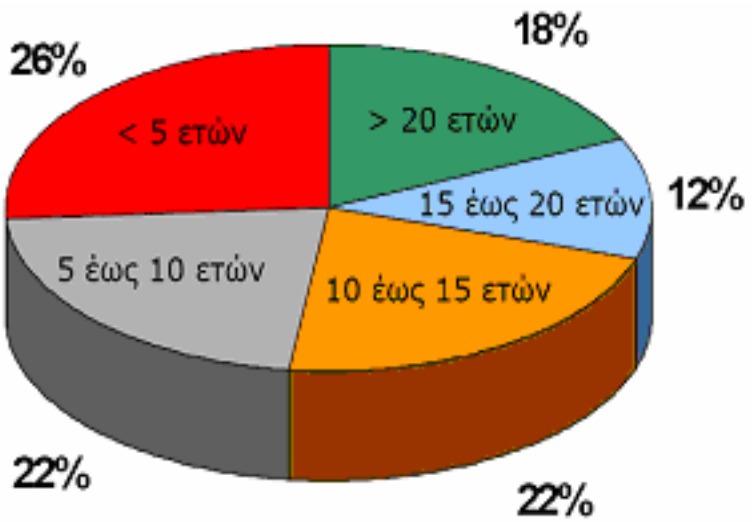
Σχήμα 4.1. Ενεργειακή κατανάλωση στην Ευρώπη και πιθανή εξοικονόμηση.

Οι κυκλοφορητές που είναι εγκατεστημένοι στην Ευρώπη είναι σε συντριπτικό βαθμό υδρολίπαντοι. Αυτή η ειδική κατασκευή του ηλεκτρικού κινητήρα επικράτησε από τη δεκαετία του ΄60, αφού αποδείχθηκε ιδανική λύση για τους κυκλοφορητές που απαιτούνται στα περισσότερα κτίρια και που σπάνια ξεπερνούν τα 1500Watt σε ισχύ (συνήθως είναι μεταξύ 50 και 200Watt).

Οι κύριοι λόγοι της απόλυτης επικράτησης των υδρολίπαντων κυκλοφορητών σε βάρος των ελαιολίπαντων ήταν η μη ανάγκη συντήρησης (αφού απουσιάζουν ρουλεμάν και στεγανοποίηση άξονα) και η αθόρυβη λειτουργία τους (απουσιάζει η θορυβώδης πτερωτή αέρος των αερόψυκτων κινητήρων). Όμως ο βαθμός απόδοσης των υδρολίπαντων κινητήρων, εξαιτίας του ανοξείδωτου χιτωνίου και του μεγάλου διάκενου μεταξύ ρότορα και στάτορα, παραμένει σχετικά χαμηλός.

Ο συνήθης βαθμός απόδοσης των υδρολίπαντων κινητήρων κυμαίνεται στο κατώτατο επίπεδο ισχύος P2 < 100 Watt από 7% έως 30% ενώ κινητήρες με ισχύ από P2 = 100W έως P2 = 500 W επιτυγχάνουν αποδόσεις 45% έως 65%. Κυκλοφορητές με αυτούς τους κινητήρες χρησιμοποιούνται ευρέως εξαιτίας της κατασκευής νέων κτιρίων και τον εκσυγχρονισμό εγκαταστάσεων θέρμανσης. Γύρω στα 10 εκατομμύρια κυκλοφορητές εγκαθίστανται ετησίως στην Ευρώπη. Από αυτούς περισσότεροι από 70% χρησιμοποιούνται για αντικατάσταση και ανακατασκευή.

Στο σχήμα 4.2 [9] παρουσιάζεται η εικόνα που επικρατεί στις μέρες μας ως προς την ηλικία των κυκλοφορητών που βρίσκονται σε λειτουργία σε Ευρωπαϊκό επίπεδο.



Σχήμα 4.2. Η «ηλικία» των κυκλοφορητών που εργάζονται σήμερα.

Παρατηρούμε ότι από το σύνολο των εν λειτουργία κυκλοφορητών, μόνο το 26% αυτών είναι σύγχρονης τεχνολογίας ενώ η πλειονότητά τους (18+12+22= 52%) είναι παλαιότητας μεγαλύτερης των 10 χρόνων. Είναι εύκολο κανείς να καταλάβει πόσο σημαντική από πλευράς συνολικής ενεργειάκης εξοικονόμησης είναι η αντικατάσταση των παλαιών κυκλοφορητών με νέους ηλεκτρονικούς αυξημένης απόδοσης

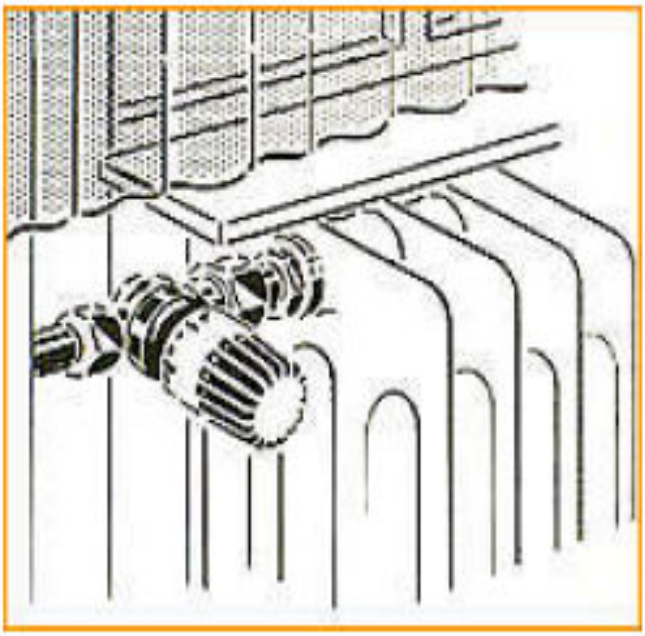
Οι κυκλοφορητές που βρίσκονται σε λειτουργία, αποδεδειγμένα ξεπερνούν κατά δυο έως τρεις φορές τις πραγματικές απαιτήσεις μιας εγκατάστασης θέρμανσης–ψύξης και αυτό με τις πιο μετριοπαθείς εκτιμήσεις. Σε εγκαταστάσεις στην Ελλάδα συναντάμε συχνά σε πολυκατοικίες κυκλοφορητές μεγαλύτερους κατά πέντε έως έξι φορές από τους απαιτούμενους στην πραγματικότητα. Οι αιτίες της υπερδιαστασιολόγησης μπορούν να αναζητηθούν σε πολλούς παράγοντες όπως είναι για παράδειγμα η απουσία μηχανολογικής μελέτης και η επιλογή με βάση την εμπειρία του εγκαταστάτη– συντηρητή– εμπόρου με βάση τη διατομή των σωληνώσεων ή το ύψος του κτιρίου. Σε άλλες περιπτώσεις ο υπερδιαστασιολογημένος (σε παροχή, μανομετρικό και ισχύ) κυκλοφορητής επιλέγεται σκόπιμα για να επιλύσει άλλα προβλήματα όπως κακοτεχνίες της εγκατάστασης ή/και κακή έως ανύπαρκτη υδραυλική εξισορρόπηση. Όμως και η συγκεκριμένη τακτική μόνο προβλήματα προκαλεί και η δυνατότητα επιλογής μεταξύ τριών σταθερών ταχυτήτων σπάνια μπορεί να δώσει λύση μετά την τοποθέτηση.

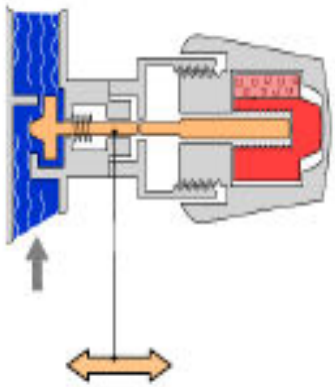
Ας σημειωθεί στο σημείο αυτό ότι σε εγκαταστάσεις θέρμανσης με θερμαντικά σώματα η μείωση της παροχής νερού σε ένα σώμα κατά 10% κάτω από την ονομαστική θα επιφέρει αμελητέα μείωση της απόδοσής του, κατά 2%. Αντίθετα η προσαγωγή κατά 10% περισσότερης παροχής με τη χρήση μεγάλου κυκλοφορητή θα οδηγήσει σε ανύπαρκτο κέρδος (2%) αλλά και σε διπλάσια ηλεκτρική κατανάλωση.

4.1.2. Η ανάγκη για κυκλοφορητές μεταβλητών στροφών

Η ανάγκη για αυτόματη προσαρμογή της απόδοσης των κυκλοφορητών στις μεταβαλλόμενες συνθήκες φορτίου, γεννήθηκε όταν καθιερώθηκαν σε χώρες όπως τη

Γερμανία οι θερμοστατικοί διακόπτες θερμαντικών σωμάτων (σχήμα 4.3). Το σταδιακό κλείσιμο των διακοπτών σε συνθήκες μερικού φορτίου προκαλεί αύξηση του μανομετρικού (και συνεπώς θόρυβο στους διακόπτες) αλλά και πολύ παραπάνω διακινούμενη παροχή από τον κυκλοφορητή από ότι πραγματικά απαιτείται για την κάλυψη των θερμικών αναγκών στα σώματα της εγκατάστασης.





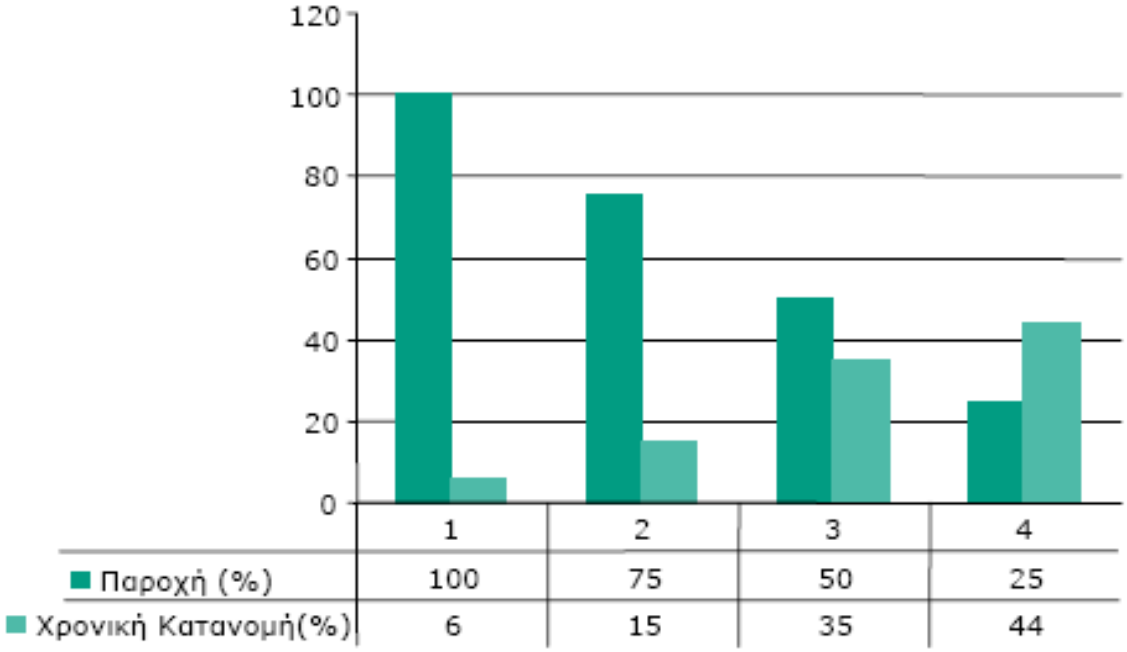
Σχήμα 4.3. Θερμοστατικοί διακόπτες σωμάτων και ανύψωσης πίεσης

Συνεπώς η χρήση κυκλοφορητών σταθερών στροφών σε μεταβαλλόμενα κυκλώματα οδηγεί σε θορύβους ροής, αέρα, πρόωρη φθορά εξαρτημάτων και φυσικά σε σπατάλη ηλεκτρικής ενέργειας. Είναι ακριβώς τα φαινόμενα που επικρατούν στις περισσότερες κατοικίες της Ελλάδας που έχουν χτιστεί από τη δεκαετία του 1980 και μετά, όπου επικρατεί το λεγόμενο μονοσωλήνιο σύστημα με δίοδες βάνες αυτονομίας.

Οι αλλαγές στις κλιματικές συνθήκες και στην εξωτερική θερμοκρασία, η αύξηση της ηλιακής θερμότητας σε συνδυασμό με τις εσωτερικές πηγές θέρμανσης στα κτίρια από ανθρώπους και συσκευές έχουν σαν συνέπεια το σχεδιασμένο και το μέγιστο φορτίο στον κυκλοφορητή και στο σύστημα θέρμανσης να υφίσταται μόνο μερικές μέρες το χρόνο. Η κανονική κατάσταση λειτουργίας είναι στην πραγματικότητα λειτουργία μερικού φορτίου του κυκλοφορητή και του συστήματος,

το οποίο σε ετήσιο μέσο όρο, ανέρχεται σε λιγότερο από το μισό του φορτίου σχεδίασης.

Ένας αριθμός θεωρητικών μελετών και πρακτικών ελέγχων σε υπάρχοντα κτίρια οδηγούν σε στάνταρ προφίλ φορτίου (βλέπε γράφημα) – επίσης γνωστό ως «Προφίλ Φορτίου Μπλέ Άγγελος» - το οποίο έχει γίνει ευρέως αποδεκτό ως προφίλ φορτίου για κυκλοφορητές θέρμανσης στις Ευρωπαϊκές κλιματικές ζώνες (Σχήμα 4.4) [10].



Σχήμα 4.4. Ετήσια κατανομή φορτίου θέρμανσης, ποσοστιαία κατανομή φορτίου Blue Angel

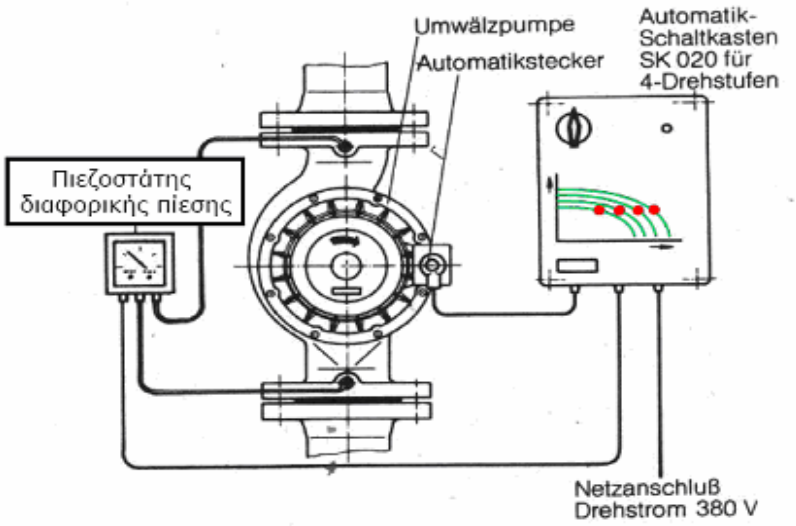
Αυτό το μοντέλο βασίζεται σε μια περίοδο λειτουργίας 6800 ωρών το χρόνο (η τιμή αυτά αναφέρεται για την κεντρική Ευρώπη, στον Ελλαδικό χώρο εκτιμάται στις 1500 ώρες). Αυτή η περίοδος λειτουργίας είναι απολύτως φυσιολογική στο κεντρικό Ευρωπαϊκό κλίμα και οδηγεί στο συμπέρασμα ότι ένας μέσος όρος 10% της ενεργειακής κατανάλωσης σε ένα κτίριο απαιτείται για τη λειτουργία των κυκλοφορητών.

Το μοντέλο αποδεικνύει ότι η παροχή του κυκλοφορητή που απαιτείται για θέρμανση ποικίλει κατά τη διάρκεια του χρόνου ανάμεσα στο 100% σε μια αναλογία χρόνου μόνο 6% και 25% παροχή σε μια αναλογία χρόνου 44%. Με τη βοήθεια αυτού του στάνταρ μοντέλου φορτίου είναι δυνατό να γνωρίζουμε προκαταβολικά

την ετήσια ενεργειακή κατανάλωση και τα κόστη για τη λειτουργία του κυκλοφορητή.

4.1.3. Ηλεκτρονικοί κυκλοφορητές μεταβλητών στροφών

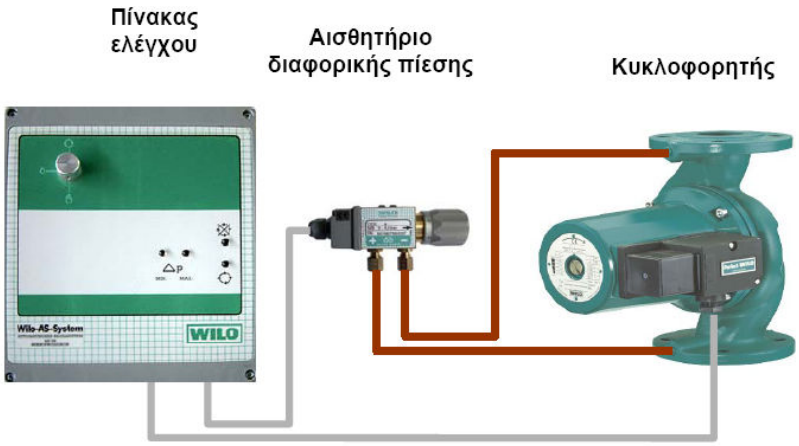
Τη δεκαετία του ΄70 εφαρμόστηκαν τα πρώτα συστήματα αυτόματης μεταπήδησης μεταξύ τεσσάρων διαφορετικών ταχυτήτων περιστροφής



Σχήμα 4.5. Αυτόματη αλλαγή τεσσάρων ταχυτήτων

.

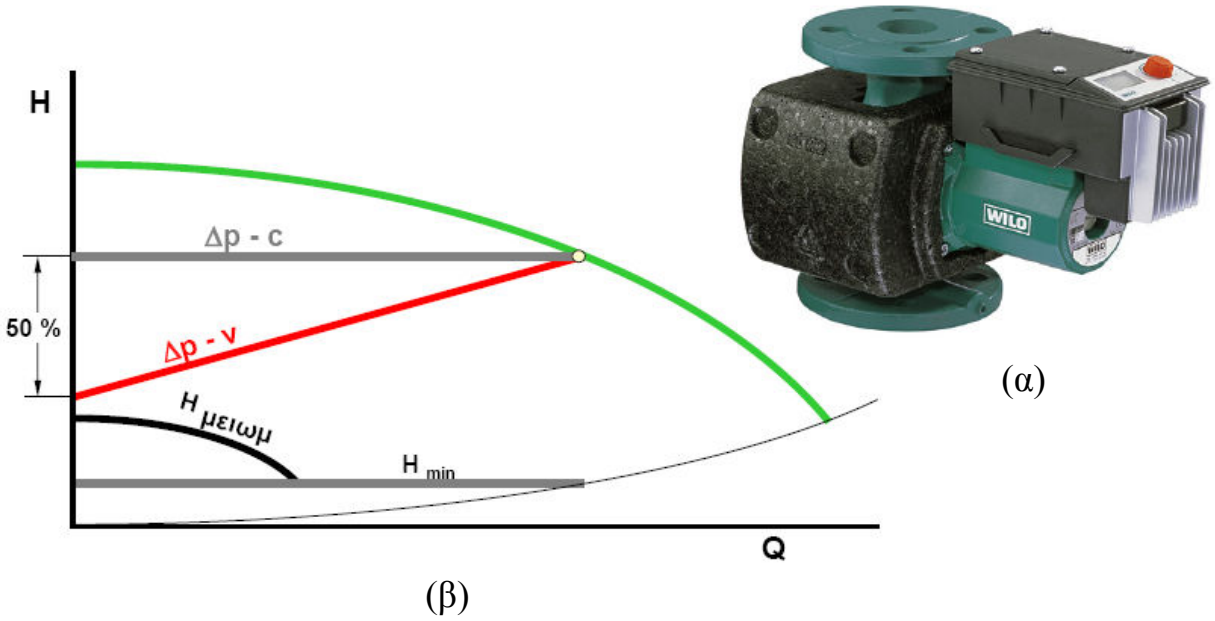
Οι πρώτες προσπάθειες για κυκλοφορητές με αδιαβάθμιτη μεταβολή στροφών πραγματοποιήθηκαν την δεκαετία του ΄80. Οι αλλαγές στην ταχύτητα καθορίζονταν αυτόματα με εξωτερικό έλεγχο χρησιμοποιώντας αισθητήριο διαφορικής πίεσης.



Σχήμα 4.6. Αδιαβάθμιτη αλλαγή στροφών

Το 1988 παράγεται ο πρώτος πλήρως ηλεκτρονικός κυκλοφορητής ο οποίος μέσα στη δεκαετία του ΄90 εξελίσσεται με την εισαγωγή πρόσθετων λειτουργιών ρύθμισης όπως:

- Δp-c. Διαφορική πίεση σταθερή
- Δp-variable: Μεταβλητό μανομετρικό
- Autopilot: Αυτόματη μετάβαση σε μειωμένο πρόγραμμα
- Δp-T: Αυτόματη αλλαγή επιθυμητού μανομετρικού σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία του νερού.



Σχήμα 4.7. Κυκλοφορητές εξοικονόμησης ενέργειας (α) και χαρακτηριστικές τους καμπύλες ανάλογα με τον τρόπο ρύθμισης τους (β).

Παρακάτω θα περιγράψουμε συνοπτικά τους διαφορετικούς τρόπους με τους οποίους μπορεί να ρυθμιστεί η λειτουργία ενός ηλεκτρονικού κυκλοφορητή (σχήμα 4.7).

1. Δp-c. Διαφορική πίεση σταθερή

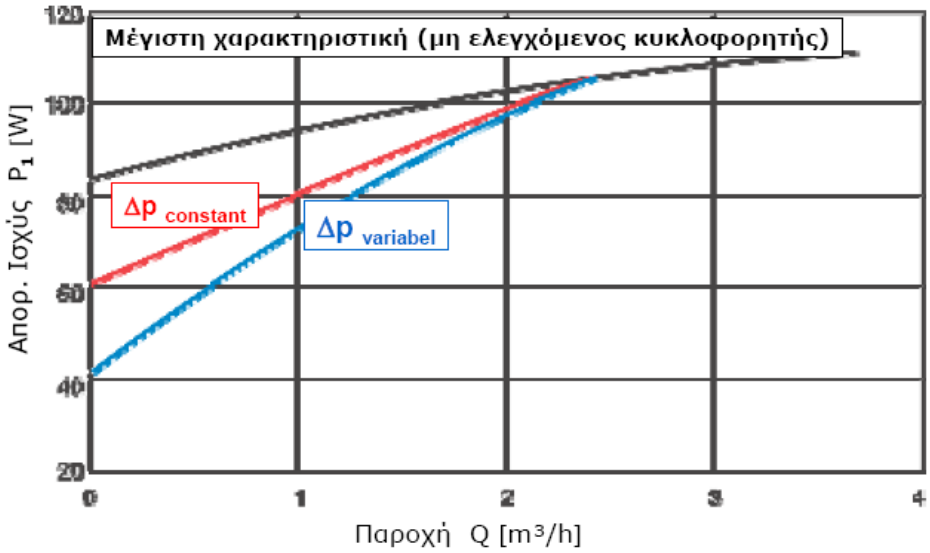
Το μανομετρικό που παράγεται από τον κυκλοφορητή (Hset value) διατηρείται σταθερό σε όλο το επιτρεπτό εύρος παροχής Επιλέγεται ως τρόπος

ρύθμισης σε μεταβλητά συστήματα όταν η πτώση πίεσης στο κύκλωμα προσαγωγής-επιστροφής (στις κεντρικές στήλες) κατά το μέγιστο φορτίο είναι χαμηλή σε σύγκριση με την πτώση πίεσης στους παράλληλους κλάδους (δίοδες βάνες, διακόπτες σωμάτων, FCU, κλπ.). Ανεξάρτητα από τον αριθμό των παράλληλων κλάδων που είναι ανοικτοί το απαιτούμενο μανομετρικό παραμένει σταθερό.

2. Δp-v(variable). Μεταβλητή διαφορική πίεση.

Σε αυτή την ρύθμιση η διαφορική πίεση είναι μεταβλητή. Το μανομετρικό ύψος που παράγεται από τον κυκλοφορητή μεταβάλλεται γραμμικά μεταξύ Hset value και ½ Hset value. Συνήθως επιλέγεται ως τρόπος ρύθμισης σε μεταβλητά συστήματα όταν η πτώση πίεσης στο κύκλωμα προσαγωγής-επιστροφής (στις κεντρικές στήλες) κατά το μέγιστο φορτίο είναι μεγαλύτερη από την πτώση πίεσης στους παράλληλους κλάδους (δίοδες βάνες, διακόπτες σωμάτων, FCU, κλπ.). Σε αυτή την λειτουργία το απαιτούμενο μανομετρικό ύψος μειώνεται ραγδαία καθώς μειώνεται η παροχή. Με τον τρόπο ρύθμισης Δp-v πρέπει να σημειωθεί ότι υπάρχει η πιθανότητα υποτροφοδοσίας κάποιου κλάδου.

Στο σχήμα 4.8 συγκρίνεται η απορροφούμενη ισχύς για τη λειτουργία ενός κυκλοφορητή χωρίς έλεγχο στροφών με δυο ηλεκτρονικούς κυκλοφορητές ρυθμισμένους αντίστοιχα σε Δp- c και Δp- v. Είναι εμφανές ότι όσο η διακινούμενη παροχή μειώνεται τόσο είναι πιο οικονομική η λειτουργία του κυκλοφορητή με ρύθμιση Δp-v.



Σχήμα 4.8. Σύγκριση κατανάλωσης ενέργειας για ρύθμιση Δp-c και Δp-v.

3. Autopilot– Μετάβαση σε μειωμένο πρόγραμμα

Η ρύθμιση αυτή βρίσκει εφαρμογή σε συστήματα θέρμανσης με θερμοστατικούς διακόπτες σωμάτων και μειωμένο νυκτερινό πρόγραμμα θέρμανσης. Οι θερμοστατικοί διακόπτες ανοίγουν σε περιόδους μείωσης θερμοκρασίας του νερού προσαγωγής. "Autopilot" διαθέτουν μόνο οι υδρολίπαντοι ηλεκτρονικοί κυκλοφορητές λόγω του ότι διαθέτουν ενσωματωμένο αισθητήριο θερμοκρασίας νερού.

Ο κυκλοφορητής αναγνωρίζει αυτόματα τη μείωση θερμοκρασίας προσαγωγής και μεταπίπτει σε σταθερές χαμηλές στροφές. Ο ηλεκτρονικός κυκλοφορητής καταγράφει με fuzzy-logic και ενσωματωμένο αισθητήριο θερμοκρασίας νερού το προφίλ θέρμανσης της εγκατάστασης και η μείωση σε σταθερές στροφές γίνεται αυτόματα. Για να εκτελεστεί η μετάβαση από κανονικό πρόγραμμα ρύθμισης σε εκείνο με μειωμένες στροφές και το αντίστροφο πρέπει να καταγραφεί αλλαγή θερμοκρασίας νερού τουλάχιστον κατά 5-7°C για 45 min.

Η ικανότητα αυτή των ηλεκτρονικών κυκλοφορητών έχει βρει εφαρμογή και στην Ελλάδα παρόλο που εγκαταστάσεις με θερμοστατικές κεφαλές και μειωμένη θερμοκρασία προσαγωγής κατά τη νύχτα είναι σπάνιες. Έτσι στον ελλαδικό χώρο βρίσκει εφαρμογή, όταν σε εγκαταστάσεις θέρμανσης με αυτονομίες, ο καυστήρας λάβει εντολή από τον πίνακα αυτονομίας να κόψει επειδή όλες οι βάνες έκλεισαν, αλλά ο κυκλοφορητής συνεχίζει να λειτουργεί ώσπου να σταματήσει μέσω υδροστάτη. Τότε ο ηλεκτρονικός κυκλοφορητής αναγνωρίζει την απότομη πτώση της θερμοκρασίας νερού και μεταπίπτει σε σταθερές χαμηλές στροφές.

4. Έλεγχος στροφών κυκλοφορητών. Δp - T

Κατά τη ρύθμιση αυτή πραγματοποιείται έλεγχος του μανομετρικού ύψους συναρτήσει της θερμοκρασίας νερού. Ο κυκλοφορητής διατηρεί σταθερό μανομετρικό ύψος αλλά το set-point μεταβάλλεται σε συνάρτηση της θερμοκρασίας του νερού που μετριέται με το ενσωματωμένο αισθητήριο θερμοκρασίας νερού. Η ρύθμιση αυτή βρίσκει εφαρμογή:

- Σε μη μεταβαλλόμενα κυκλώματα (κυκλοφορητής στην επιστροφή).
- Σε κυκλώματα μεταβαλλόμενης θερμοκρασίας προσαγωγής (αντιστάθμιση– κυκλοφορητής στην προσαγωγή).
- Σε λέβητες συμπυκνωμάτων (κυκλοφορητής στην επιστροφή).

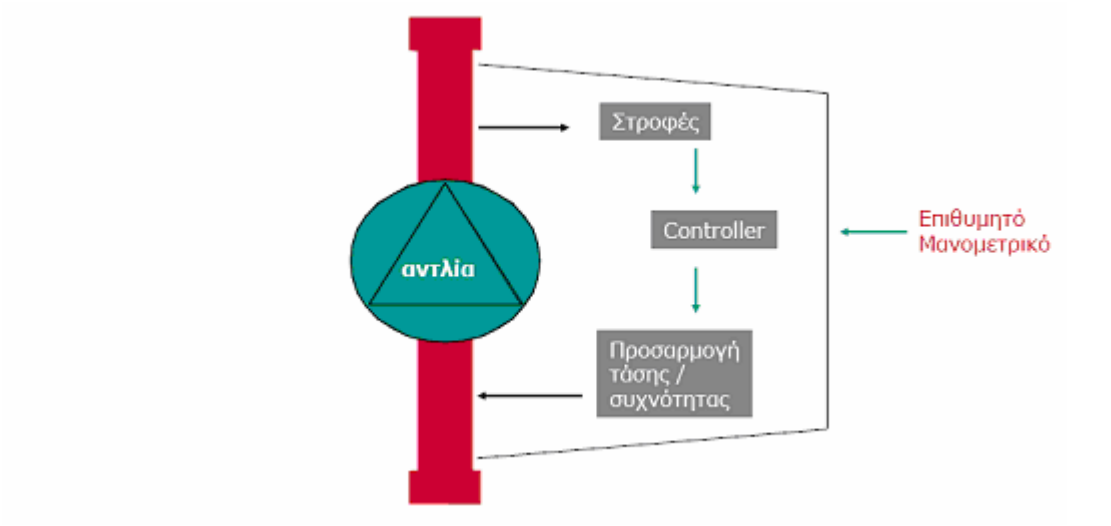
Ρύθμιση "Δp-T" διαθέτουν μόνο οι υδρολίπαντοι ηλεκτρονικοί κυκλοφορητές που διαθέτουν ενσωματωμένο αισθητήριο θερμοκρασίας νερού. Οι σύγχρονοι υδρολίπαντοι ηλεκτρονικοί κυκλοφορητές μεταβλητών στροφών διαθέτουν ενσωματωμένο αισθητήριο θερμοκρασίας με το οποίο μετράνε τη θερμοκρασία του νερού. Έτσι μπορούν να μεταβάλλουν το επιθυμητό μανομετρικό ύψος σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία του νερού, είτε της προσαγωγής είτε της επιστροφής ανάλογα με τη θέση τοποθέτησης του κυκλοφορητή. Αυτός ο τρόπος λειτουργίας συμβολίζεται με «Δp- T» και το μεγάλο πλεονέκτημα έγκειται στο γεγονός ότι δεν απαιτούνται πρόσθετα αισθητήρια (διαφορικής πίεσης, θερμοκρασίας) και θέσεις μέτρησης στην εγκατάσταση.

4.1.4 Λειτουργία του ηλεκτρονικού κυκλοφορητή

Η αρχή λειτουργίας των ηλεκτρονικών κυκλοφορητών είναι σχετικά απλή. Το κλείσιμο δίοδων βανών σε παράλληλους κλάδους οδηγεί σε αύξηση του μανομετρικού ύψους του κυκλοφορητή, ο οποίος το αντιλαμβάνεται μέσω του ενσωματωμένου συστήματος μέτρησης (οι υδρολίπαντοι ηλεκτρονικοί κυκλοφορητές καταγράφουν το πραγματικό μανομετρικό έμμεσα, μετρώντας στροφές και απορροφώμενη ισχύ, ενώ οι «μεγάλοι» ηλεκτρονικοί ελαιολίπαντοι κυκλοφορητές μετράνε το μανομετρικό άμεσα με ενσωματωμένο αισθητήριο διαφορικής πίεσης).

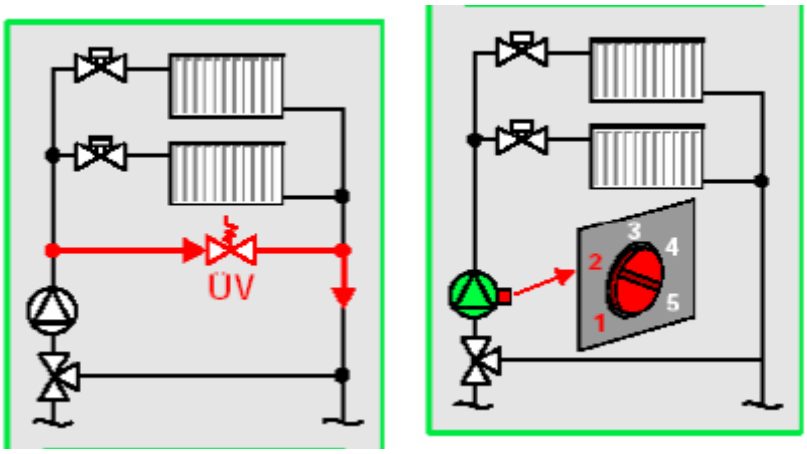
Ο κυκλοφορητής ακολούθως μειώνει στροφές προσπαθώντας να διατηρήσει το μανομετρικό σταθερό σε μια προεπιλεγμένη τιμή (τρόπος λειτουργίας Δp–constant).

Με αυτόν τον τρόπο ελαττώνεται και η παροχή στο πραγματικά απαιτούμενο επίπεδο, ενώ μειώνεται ταυτόχρονα και ο θόρυβος της ροής και η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας.



Σχήμα 4.8. Λειτουργία ηλεκτρονικού κυκλοφορητή.

Στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται ηλεκτρονικοί κυκλοφορητές οι οποίοι προσαρμόζουν τις στροφές τους ανάλογα με τη ζήτηση με κριτήριο το μανομετρικό (Δp) αυτοί δεν πρέπει να συνεργάζονται με βαλβίδες διαφορικής πίεσης αφού το ένα αναιρεί τη λειτουργία του άλλου. Οι βαλβίδες αυτές βρίσκουν εφαρμογή κατά τη μεταβολή της παροχής σε κυκλοφορητές σταθερών στροφών. Σε αυτές τις περιπτώσεις η βαλβίδα ενεργοποιεί ένα κλάδο by-pass μεταξύ προσαγωγής και επιστροφής όταν το μανομετρικό του κυκλοφορητή σταθερών στροφών αυξάνεται επειδή κλείνουν ηλεκτροβάνες αυτονομίας ή θερμοστατικές κεφαλές σωμάτων.



Σχήμα 4.9. Ηλεκτρονικός κυκλοφορητής και βαλβίδα διαφορικής πίεσης

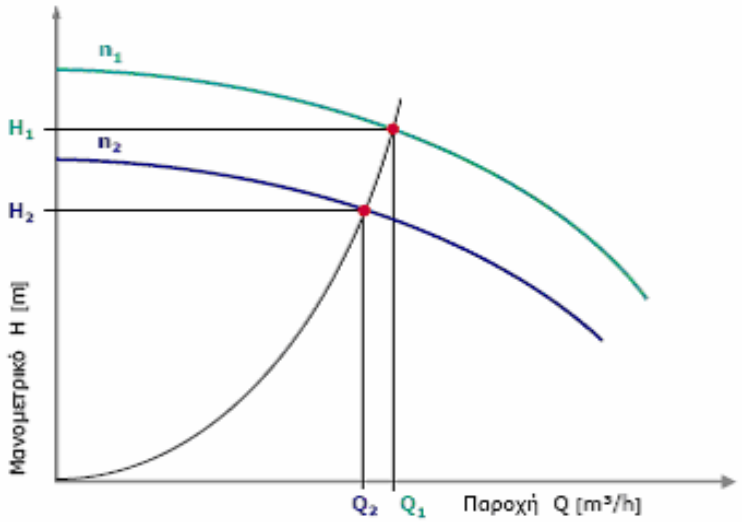
Σε κυκλώματα με ηλεκτρονικούς κυκλοφορητές πρέπει να υπάρχει by-pass στην εγκατάσταση (σχήμα 4.9) όταν δεν θέλουμε να διακόψουμε αμέσως την

κυκλοφορία του κυκλοφορητή σε περιπτώσεις που δεν υπάρχει ζήτηση (π.χ. εξαιτίας κινδύνου υπερθέρμανσης του λέβητα). Επίσης πρέπει να υπάρχει αν δεν εξασφαλίζεται μια ικανοποιητική ελάχιστη παροχή του κυκλοφορητή (5-10% της ονομαστικής του) σε συνθήκες πολύ μικρής ζήτησης. Και στις δύο περιπτώσεις θα πρέπει να εξασφαλίζεται ότι η πτώση πίεσης του by-pass δεν πρέπει να είναι χαμηλότερη από την πτώση πίεσης στους παράλληλους κλάδους αυτονομίας, αλλιώς το νερό θα περνάει ανεξέλεγκτα από εκεί χωρίς να ικανοποιούνται κλάδοι και χωρίς να μειώνει στροφές ο ηλεκτρονικός κυκλοφορητής.

Αξίζει να σημειωθεί εδώ ότι ένας ηλεκτρονικός κυκλοφορητής παράγει ακόμα το μανομετρικό που του έχουμε ζητήσει και συνεπώς δεν πέφτει ούτε στις ελάχιστες δυνατές στροφές του. Επίσης δεν σταματάει από μόνος του όταν κλείσουν όλες οι βάνες αυτονομίας αλλά συνεχίζει να εργάζεται γιατί δεν μπορεί να ξέρει αν είναι κάτι ανοιχτό ακόμα ή όχι, ή αν υπάρχει κάπου by-pass ή όχι καθώς αντιλαμβάνεται μόνο μανομετρικό, δηλαδή μόνο διαφορική πίεση. Θα διακόψει τη λειτουργία μόνο, αν δεχτεί τέτοια εντολή (π.χ. από πίνακα αυτονομίας, μέσω υδροστάτη, χρονοδιακόπτη, BMS, κλπ.).

4.1.5. Χαρακτηριστικά κυκλοφορητών μεταβλητών στροφών

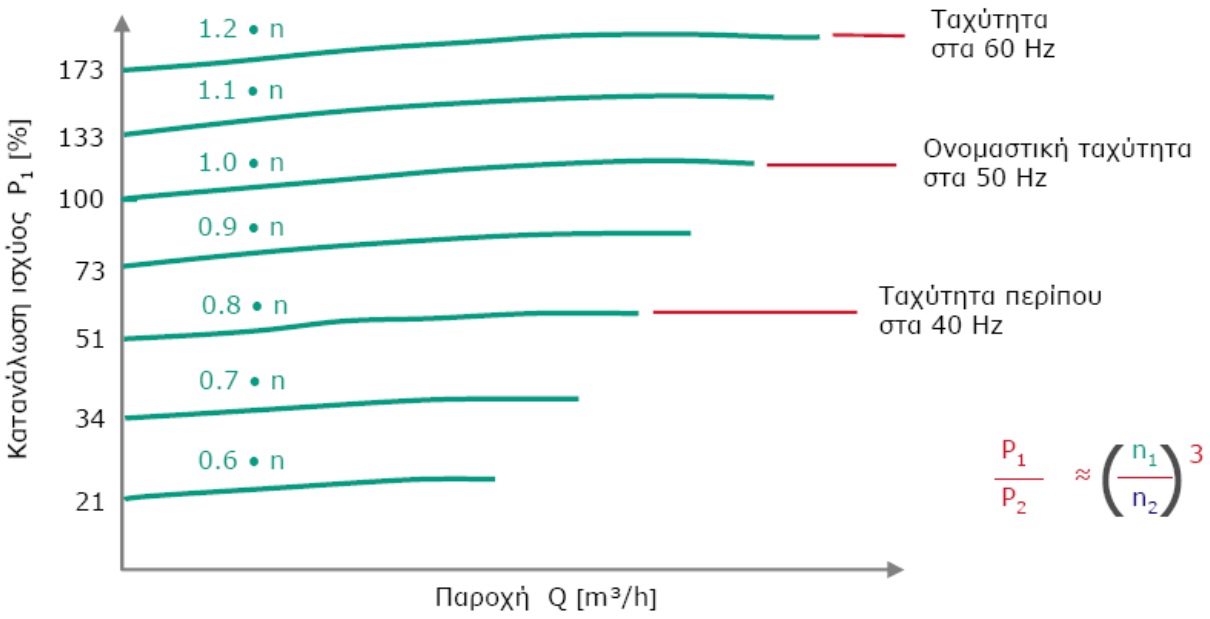
Οι γνωστοί νόμοι ομοιότητας ισχύουν με καλή προσέγγιση κατά την αλλαγή των στροφών μόνο μεταξύ δύο σημείων λειτουργίας που βρίσκονται πάνω σε μια παραβολή στο διάγραμμα H – Q (σχήμα 4.10).



Σχήμα 4.10. Μεταβολή στροφών σε κυκλοφορητές

Επομένως μπορούν να εφαρμοστούν σε κλειστά κυκλώματα μη μεταβαλλόμενα τα οποία περιγράφονται με σταθερή παραβολικής μορφής χαρακτηριστική καμπύλη σωλήνωσης.

Στο διάγραμμα που ακολουθεί (σχήμα 4.11) διακρίνεται η ακόμα πιο μεγάλη επίδραση της ταχύτητας περιστροφής ενός κυκλοφορητή στην κατανάλωση ισχύος. Η μείωση στροφών στο 70% (κατά 30%) συνεπάγεται μείωση της κατανάλωσης κατά 66%.

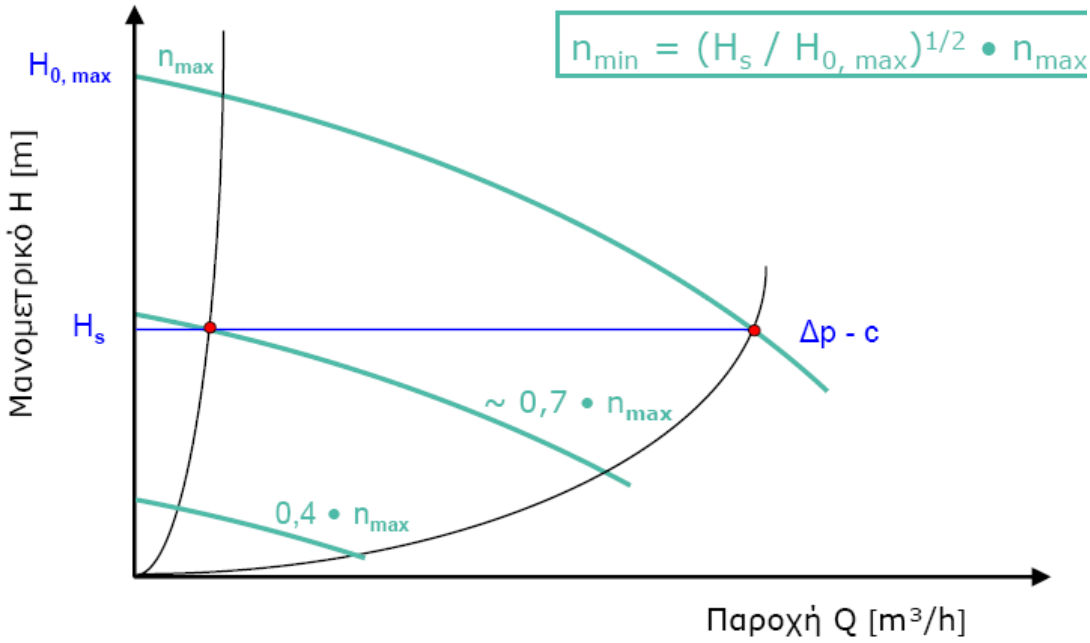


Σχήμα 4.11. Μεταβολή στροφών σε κυκλοφορητές

Τέλος στο διάγραμμα του σχήματος 4.12 παρουσιάζει τις μεταβολές στροφών σε μεταβαλλόμενο κύκλωμα. Από το διάγραμμα αυτό μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι το ποσοστό μείωσης της απαιτούμενης παροχής σε ένα μεταβαλλόμενο κύκλωμα δεν είναι ανάλογο του ποσοστού μείωσης των στροφών. Στο παράδειγμα εδώ φαίνεται πως ενώ η παροχή έχει μειωθεί στο 10% της μέγιστης παροχής, οι στροφές δεν έχουν πέσει κάτω από 70%.

Συνεπώς η γνώση των στροφών ενός κυκλοφορητή σε ένα μεταβαλλόμενο κύκλωμα δεν μας φανερώνει την παροχή που κυκλοφορεί. Ο μαθηματικός τύπος δείχνει ότι οι ελάχιστες στροφές στις οποίες θα πέσει ο ηλεκτρονικός κυκλοφορητή όταν η παροχή θα τείνει προς το 0 εξαρτώνται μόνο από το επιθυμητό μανομετρικό ύψος και την κλίση της καμπύλης του κυκλοφορητή.

Στο παράδειγμα που εξετάζεται στο σχήμα 4.12 το επιθυμητό μανομετρικό ύψος είναι περίπου το μισό του μέγιστου μανομετρικού του κυκλοφορητή. Η τετραγωνική ρίζα του 0,5 είναι περίπου 0,7 (70%). Αν οι στροφές του κυκλοφορητή έπεφταν στο 40% το μανομετρικό θα κατέρρεε (αφού $0,4^2 = 0,16$ θα έπρεπε $H_s = 0,16 \cdot H_{0,max}$) και συνεπώς θα σταματούσε και η τροφοδοσία του νερού.



Σχήμα 4.12. Έλεγχος στροφών κυκλοφορητών

4.1.6 Σύγκριση κυκλοφορητών σταθερών και μεταβλητών στροφών

Οι κυκλοφορητές σε λειτουργία, όπως έχει ήδη αναφερθεί, αποδεδειγμένα ξεπερνούν κατά δυο έως τρεις φορές τις πραγματικές απαιτήσεις μιας εγκατάστασης θέρμανσης– ψύξης. Και αυτό με τις πιο μετριοπαθείς εκτιμήσεις. Σε εγκαταστάσεις στην Ελλάδα συναντάμε συχνά σε πολυκατοικίες κυκλοφορητές μεγαλύτερους κατά πέντε έως έξι φορές.

Στην παράγραφο αυτή θα συγκρίνουμε ενεργειακά δύο μοντέλα κυκλοφορητών της ίδιας εταιρίας [8]. Ένα συμβατικό σταθερών στροφών και έναν αντίστοιχο ηλεκτρονικό υψηλής ενεργειακής απόδοσης μεταβλητών στροφών.

Επίσης θα κάνουμε μια ανάλυση του κόστους κύκλου ζωής των κυκλοφορητών αυτών (LCC) σε ένα βάθος χρόνου 10 ετών.

Αρχικά εξετάζουμε τις παραδοχές που έγιναν για την σύγκριση. Συγκεκριμένα θεωρήθηκε ότι εξετάζεται η περίπτωση μιας τυπικής πολυκατοικίας 5 ορόφων με 10 διαμερίσματα και με λέβητα 120.000Kcal (max παροχή περίπου $8m^3$/ h). Θα αναλυθούν ξεχωριστά οι δύο περιπτώσεις που συναντώνται συχνότερα στην πράξη:

- αυτονομία θέρμανσης (μονοσωλήνιο σύστημα, Μ.Σ για συντομία) και
- κλασικό σύστημα (δισωλήνιο σύστημα, Δ.Σ για συντομία).

Το απαιτούμενο μανομετρικό ανά περίπτωση εκτιμάται στα 5m για το Μ.Σ. και 3m για το Δ.Σ.

Αυτός ο διαχωρισμός είναι αναγκαίος στην μελέτη λόγω της διαφορετικής απαίτησης των συστημάτων αυτών σε παροχή κατά τη διάρκεια του χρόνου. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται συνοπτικά οι παραδοχές για τις ώρες λειτουργίας σύμφωνα με τα προφίλ κατανάλωσης WILO, STANDARD και Blue Angel (σχήμα 4.13)

	Λέβητας (Kcal)	Παροχή (m3/h)	Μανομετρικό (m)	Ώρες λειτουργίας	Προφίλ κατανάλωσης
Μονοσωλήνιο	120.000	8	5	3000	WILO
Δισωλήνιο	120.000	8	3	1800	STANDARD

Σχήμα 4.13. Ώρες λειτουργίας και παραδοχές για τα προφίλ κατανάλωσης WILO, STANDARD.

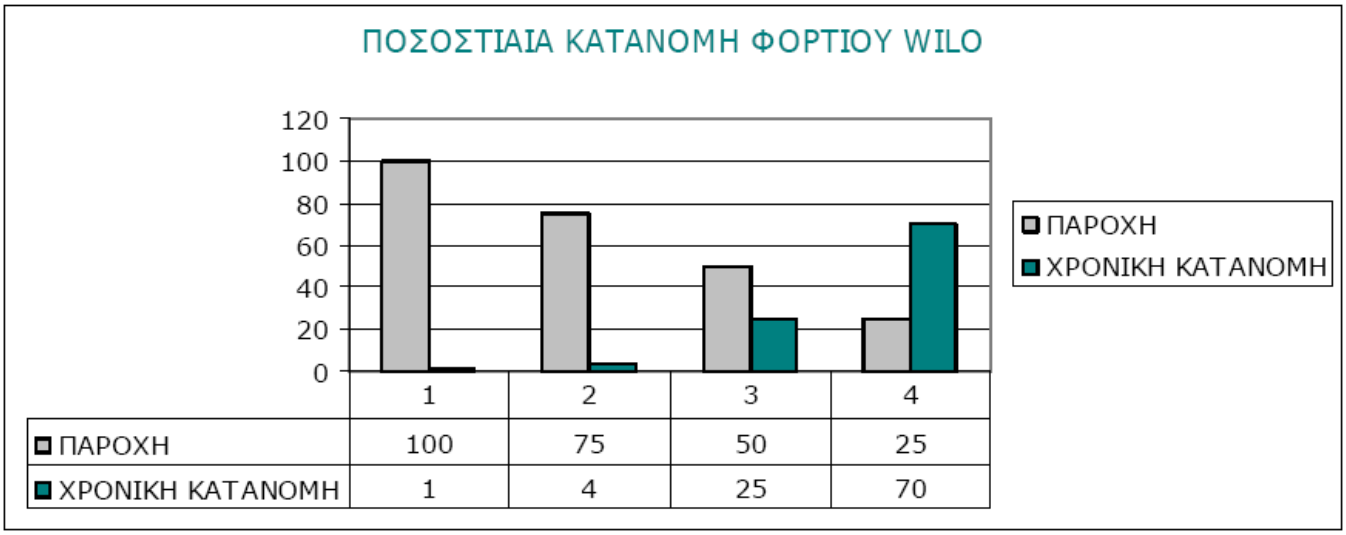
Οι παραπάνω τιμές προέκυψαν με την λογική ότι η διάρκεια της θέρμανσης μέσα σε ένα έτος θα είναι έξι μήνες και ότι για τις ώρες λειτουργίας ανά σύστημα θα ισχύει:

Μονοσωλήνιο : 6 μήνες X 30 μέρες X 16 h = 2880 h/a (~3000h)
Δισωλήνιο : 6 μήνες X 30 μέρες X 10 h = 1800 h/a (~2000h)

Τα προφίλ κατανάλωσης WILO και STANDARD χρησιμοποιήθηκαν με βάση παραδοχές που έγιναν για να ανταποκρίνονται αυτά στις ανάγκες θέρμανσης για το κλίμα της χώρας μας. Στο προφίλ WILO, που το χρησιμοποιήσαμε για τις ανάγκες θέρμανσης με αυτονομίες, θεωρείται ότι όλα τα διαμερίσματα ζητάνε θέρμανση μόνο το 1% του συνολικού χρόνου λειτουργίας της σε ένα τυπικό ελληνικό σπίτι, παραδοχή που ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα για τις κλιματικές συνθήκες που επικρατούν στον ελλαδικό χώρο. Επίσης δεχτήκαμε ότι μόλις το 25% της παροχής έχει τη μεγαλύτερη χρονική κατανομή, κάτι που είναι απολύτως λογικό δεδομένου ότι τις περισσότερες ώρες της μέρας τα περισσότερα διαμερίσματα μιας τυπικής πολυκατοικίας είναι άδεια και επομένως δεν ζητάνε θέρμανση. Με παρόμοια λογική προέκυψαν και τα υπόλοιπα ποσοστά λειτουργίας της κεντρικής θέρμανσης στο προφίλ WILO.

Για το Μ.Σ. σύστημα θεωρήσαμε το προφίλ κατανάλωσης WILO για 3000 ώρες λειτουργίας ανά έτος όπως αυτό παρουσιάζεται στο σχήμα 4.14. Στο σχήμα αυτό παρουσιάζεται το ποσοστό του χρόνου για το οποίο απαιτείται συγκεκριμένο ποσοστό του φορτίου.

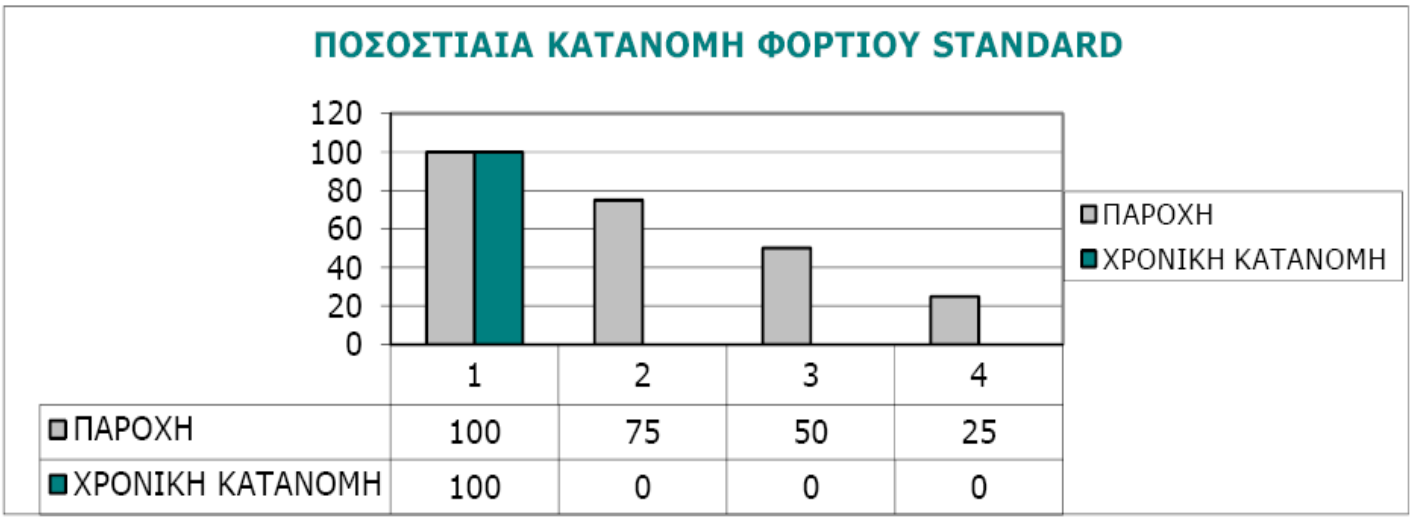
Έτσι σύμφωνα με αυτό το προφίλ, το 100% του φορτίου απαιτείται μόνο για το 1% του χρόνου λειτουργίας ενώ, το μεγαλύτερο ποσοστό του χρόνου λειτουργίας της θέρμανσης ααντιστοιχεί στο 25% της ζήτησης, γεγονός που ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα για τις κλιματικές συνθήκες της χώρας μας.



	1	2	3	4
ΠΑΡΟΧΗ	100	75	50	25
ΧΡΟΝΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ	1	4	25	70

Σχήμα 4.14. Ποσοστιαία ετήσια κατανάλωση φορτίου WILO

Αντίστοιχα, για το Δ.Σ. σύστημα χρησιμοποιήσαμε δύο προφίλ για την κατανάλωση: το STANDARD (σχήμα 4.15), στο οποίο θεωρείται ότι το 100% της ζήτησης είναι για το 100% των ωρών λειτουργίας και το προφίλ Blue Angel που αναλύεται στη συνέχεια.



	1	2	3	4
ΠΑΡΟΧΗ	100	75	50	25
ΧΡΟΝΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ	100	0	0	0

Σχήμα 4.15. Ποσοστιαία ετήσια κατανάλωση φορτίου STANDARD

Χρησιμοποιώντας αυτά τα δεδομένα διαπιστώνουμε ότι για το Μ.Σ. σύστημα και για τους κυκλοφορητές της μελέτης έχουμε ένα ποσοστό ενεργειακής εξοικονόμησης της τάξης του 65%. Συγκεκριμένα, προβλέπονται [8] οι παρακάτω ετήσιες καταναλώσεις ενέργειας:

Συμβατικός κυκλοφορητής: 815 KWh

Ηλεκτρονικός κυκλοφορητής: 289 KWh

Επομένως, επιτυγχάνεται ενεργειακό κέρδος ίσο με:

(815- 289)/ 815= 65%

Αντίστοιχα για το Δ.Σ. σύστημα χρησιμοποιώντας το προφίλ STANDARD της κατανάλωσης προκύπτει ένα ποσοστό ενεργειακής εξοικονόμησης 57 %. Αυτή η

μείωση σε σχέση με το Μ.Σ. είναι αναμενόμενη αφού στο Δ.Σ. ακόμα και ο ηλεκτρονικός κυκλοφορητής δουλεύει στο 100% της ισχύος του.

Παρόλα αυτά έχουμε σημαντική εξοικονόμηση. Αυτό επιτυγχάνεται χάρη στην νέα τεχνολογία ηλεκτροκινητήρα με μόνιμο μαγνήτη για ρότορα (EC motor) και στον πρωτοποριακό τρισδιάστατο σχεδιασμό του υδραυλικού μέρους. Συγκεκριμένα, προβλέπονται [8] οι παρακάτω ετήσιες καταναλώσεις ενέργειας:

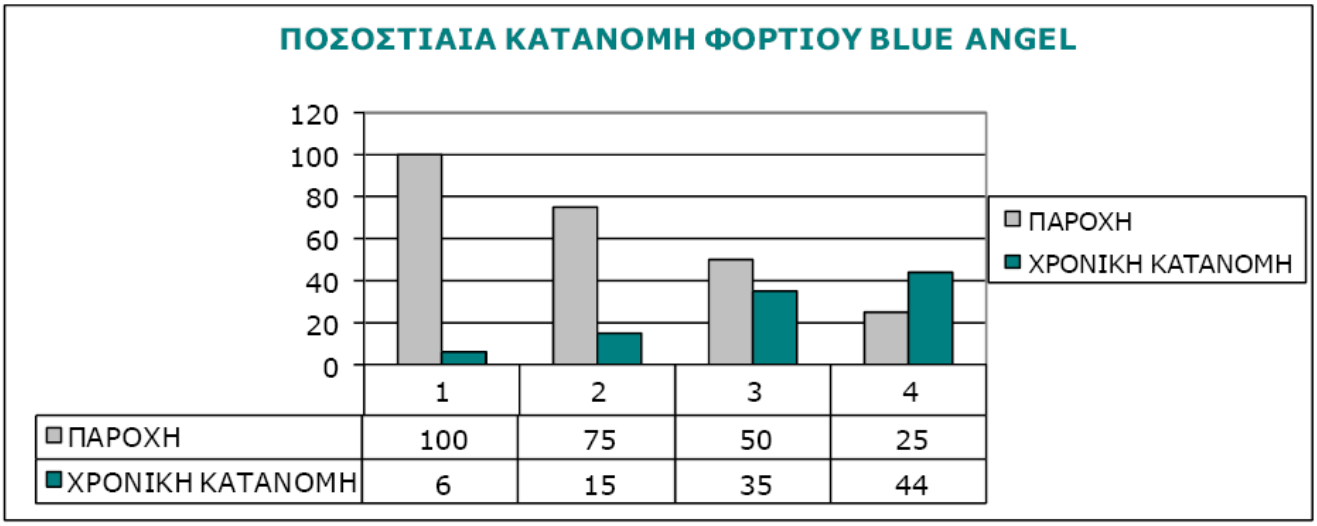
Συμβατικός κυκλοφορητής: 545KWh

Ηλεκτρονικός κυκλοφορητής: 237 KWh

Επομένως, επιτυγχάνεται ενεργειακό κέρδος ίσο με:

(545- 237)/ 545= 57%

Το ενεργειακό κέρδος για το Δ.Σ. μπορεί να αυξηθεί αν θεωρήσουμε το προφίλ κατανάλωσης Blue Angel (σχήμα 4.16) που ανταποκρίνεται στις κλιματολογικές συνθήκες της Ελλάδας. Το μοντέλο αυτό αποδεικνύει ότι η απαιτούμενη παροχή του κυκλοφορητή που απαιτείται για θέρμανση ποικίλει κατά τη διάρκεια του χρόνου ανάμεσα στο 100% σε μια αναλογία χρόνου μόνο 6% και 25% παροχή σε μια αναλογία χρόνου 44%.



Σχήμα 4.16. Ποσοστιαία ετήσια κατανάλωση φορτίου BLUE ANGEL

Χρησιμοποιώντας αυτό το προφίλ κατανάλωσης για το Δ.Σ. και ρυθμίζοντας τον ηλεκτρονικό κυκλοφορητή με βάση την θερμοκρασία (ρύθμιση ΔΡ-Τ) προκύπτουν εξαιρετικά αποτελέσματα για την ενεργειακή κατανάλωση που αποδίδονται με το ποσοστό εξοικονόμησης ενέργειας 75%.

Η ρύθμιση ΔΡ-Τ επιτρέπει στον κυκλοφορητή να προσαρμόζει αυτόματα την απόδοσή του με κριτήριο τη θερμοκρασία νερού θέρμανσης. Με αυτόν τον τρόπο, προβλέπονται [8] οι παρακάτω ετήσιες καταναλώσεις ενέργειας:

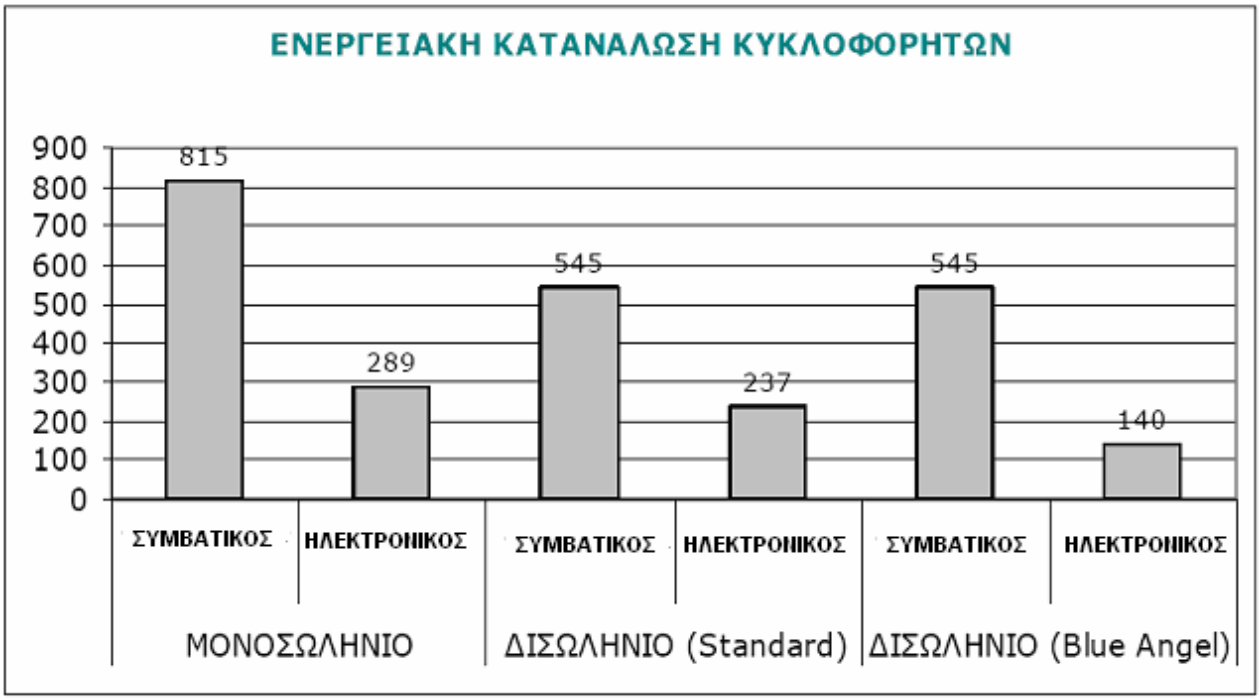
Συμβατικός κυκλοφορητής: 545KWh

Ηλεκτρονικός κυκλοφορητής: 140 KWh

Επομένως, επιτυγχάνεται ενεργειακό κέρδος ίσο με:

(545- 140)/ 140= 75%

Τα αποτελέσματα αυτά προέκυψαν βάσει των τεχνικών χαρακτηριστικών του κάθε κυκλοφορητή. Τα παραπάνω συμπεράσματα συνοψίζονται στον πίνακα του σχήματος 4.17.



Σχήμα 4.17. Σύγκριση ετήσιας ενεργειακής κατανάλωσης κυκλοφορητών

Συγκρίνοντας την μέση ενεργειακή κατανάλωση των κυκλοφορητών σε σχέση με τις πιο συνηθισμένες οικιακές συσκευές προκύπτει ότι ο συμβατικός κυκλοφορητής είναι πιο ενεργοβόρος από όλες σχεδόν τις οικιακές συσκευές. Είναι εκπληκτικό το γεγονός ότι ακόμα και στο Δ.Σ. που δεν έχει αυτονομίες η εξοικονόμηση ενέργειας είναι μεγάλη και μπορεί να αυξηθεί σημαντικά αν χρησιμοποιήσουμε την ρύθμιση ΔΡ-Τ του ηλεκτρονικού κυκλοφορητή.

Μάλιστα στην περίπτωση της ρύθμισης ΔΡ-Τ ο κυκλοφορητής πλέον έχει την χαμηλότερη ετήσια ενεργειακή κατανάλωση σε σχέση με τις υπόλοιπες οικιακές συσκευές (σχήματα 4.18 και 4.19).

Σχήμα 4.18. Ετήσια κατανάλωση ενέργειας οικιακών συσκευών σε μονοσωλήνιο σύστημα.

Σχήμα 4.19. Ετήσια κατανάλωση ενέργειας οικιακών συσκευών σε δισωλήνιο σύστημα.

Για την ανάλυση LCC για το Μ.Σ. θα κάνουμε τις εξής παραδοχές που ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα:

1. Επισκευή μία φορά τουλάχιστον στην δεκαετία του συμβατικού, λόγω κακών συνθηκών λειτουργίας.

2. Απαιτείται, για τον συμβατικό, ετήσια συντήρηση για τυχόν ξεμπλοκάρισμα .

3. Υπερδιπλάσιο ενεργειακό κόστος σχετικά με τον ηλεκτρονικό κυκλοφορητή.

4. Ορθότερη λειτουργία της εγκατάστασης με τον ηλεκτρονικό κυκλοφορητή.

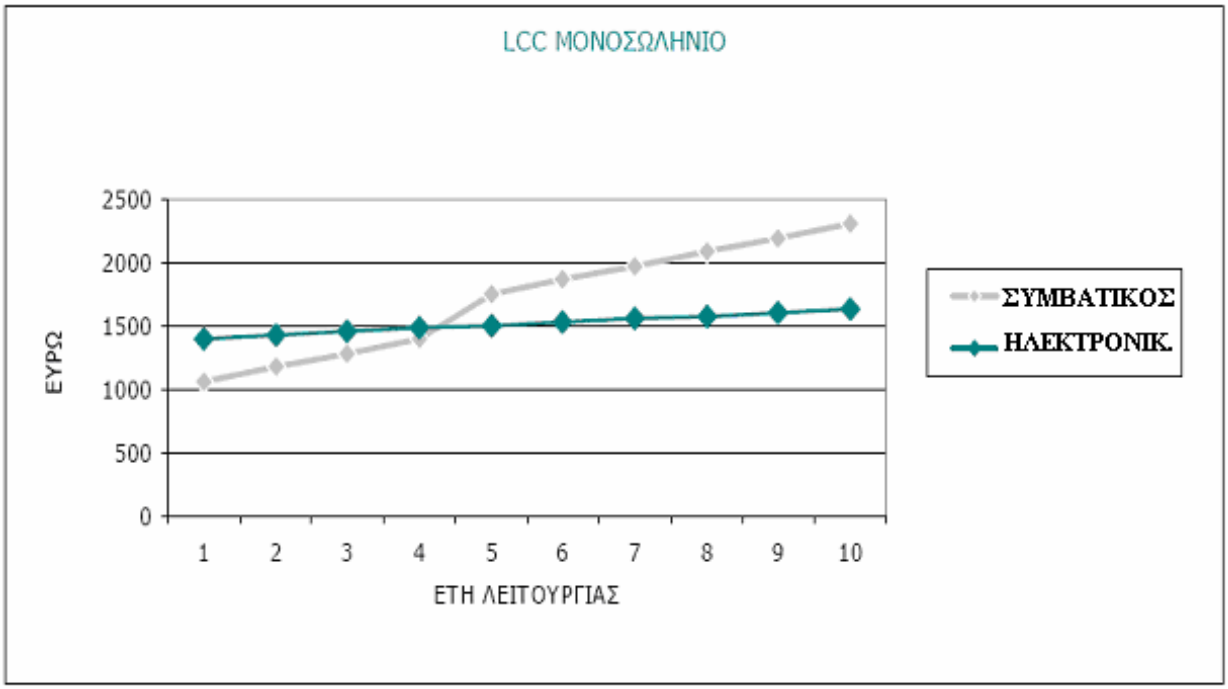
5. Δεν απαιτείται ετήσια συντήρηση για τον ηλεκτρονικό κυκλοφορητή (αυτόματο σύστημα deblocking για ξεμπλοκάρισμα του κυκλοφορητή και προστασία από διακυμάνσεις ηλεκτρικής τάσης)

Τα παραπάνω συνοψίζονται στο σχήμα 4.20 όπου εμφανίζονται τα κόστη που προέκυψαν από μια έρευνα της αγοράς.

	ΑΓΟΡΑ (€)	ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ (€)	ΕΤΗΣΙΟ ΚΟΣΤΟΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (€)	ΚΟΣΤΟΣ ΕΠΙΣΚΕΥΗΣ (5ος ΧΡΟΝΟΣ) (€)	ΕΤΗΣΙΟ ΚΟΣΤΟΣ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ (€)
ΣΥΜΒΑΤΙΚΟΣ ΚΥΚΛ.	562	500	62	250	50
ΗΛΕΚΤΡΟΝ. ΚΥΚΛ.	903	500	25	0	0

Σχήμα 4.20. Ανάλυση κόστους για τον συμβατικό και τον ηλεκτρονικό κυκλοφορητή

Η ανάλυση LCC για βάθος χρόνου δέκα ετών φαίνεται στο σχήμα 4.21:



Σχήμα 4.21. Ανάλυση LCC για τον συμβατικό και τον ηλεκτρονικό κυκλοφορητή σε μονοσωλήνιο σύστημα

Αντίστοιχα για το Δ.Σ. έχουμε (σχήμα 4.22):

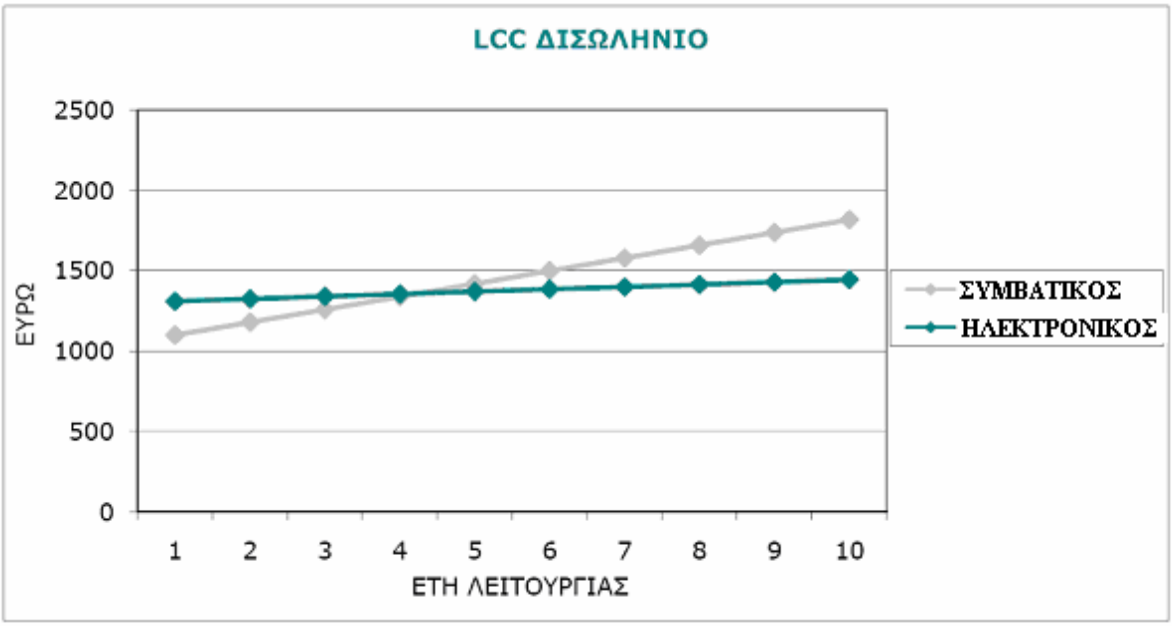
1. Απαιτείται ετήσια συντήρηση του συμβατικού για τυχόν ξεμπλοκάρισμα

2. Υπερδιπλάσιο ενεργειακό κόστος σχετικά με ηλεκτρονικό κυκλοφορητή

	ΑΓΟΡΑ (€)	ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ (€)	ΕΤΗΣΙΟ ΚΟΣΤΟΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (€)	ΚΟΣΤΟΣ ΕΠΙΣΚΕΥΗΣ (5ος ΧΡΟΝΟΣ) (€)	ΕΤΗΣΙΟ ΚΟΣΤΟΣ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ (€)
ΣΥΜΒΑΤΙΚΟΣ	599	500	40	0	50
ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟΣ	810	500	15	0	0

Σχήμα 4.22. Ανάλυση κόστους για τον συμβατικό και τον ηλεκτρονικό κυκλοφορητή σε δισωλήνιο σύστημα

Η ανάλυση LCC για βάθος χρόνου δέκα ετών για το Δ.Σ. φαίνεται στο σχήμα 4.23.



Σχήμα 4.23. Ανάλυση LCC για τον συμβατικό και τον ηλεκτρονικό κυκλοφορητή σε δισωλήνιο σύστημα

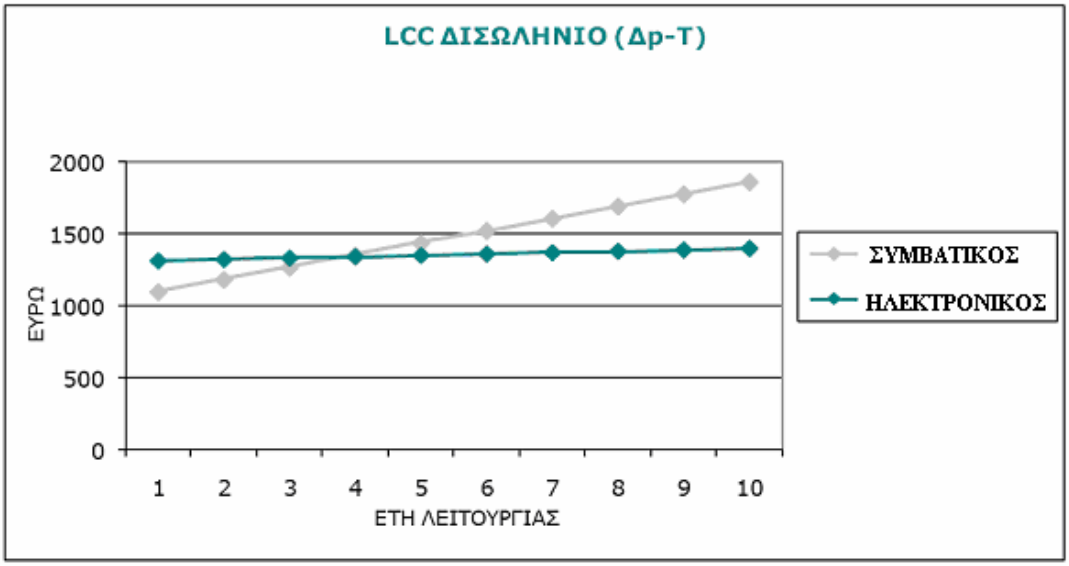
Αν τώρα για το Δ.Σ. ρυθμίσουμε τον ηλεκτρονικό κυκλοφορητή στη ρύθμιση ΔΡ-Τ έχουμε ακόμα πιο γρήγορη απόσβεση (σχήματα 4.24 και 4.25).

1. Απαιτείται ετήσια συντήρηση για τυχόν ξεμπλοκάρισμα του συμβατικού

2. Υπερδιπλάσιο ενεργειακό κόστος σχετικά με Stratos

	ΑΓΟΡΑ (€)	ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ (€)	ΕΤΗΣΙΟ ΚΟΣΤΟΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (€)	ΚΟΣΤΟΣ ΕΠΙΣΚΕΥΗΣ (5ος ΧΡΟΝΟΣ) (€)	ΕΤΗΣΙΟ ΚΟΣΤΟΣ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ (€)
ΣΥΜΒΑΤΙΚΟΣ ΚΥΚΛ.	599	500	40	0	50
ΗΛΕΚΤΡΟΝ. ΚΥΚΛ.	810	500	10	0	0

Σχήμα 4.24. Ανάλυση κόστους για τον συμβατικό και τον ηλεκτρονικό κυκλοφορητή (ρύθμιση ΔΡ- Τ) σε δισωλήνιο σύστημα



Σχήμα 4.25. Ανάλυση LCC για τον συμβατικό και τον ηλεκτρονικό κυκλοφορητή (ρύθμιση ΔΡ- Τ) σε δισωλήνιο σύστημα

Σε σχέση με το περιβάλλον και τις εκπομπές CO_2 αξίζει να αναφερθεί ότι μόλις 1KWh ηλεκτρικού ρεύματος που χρησιμοποιείται εκπέμπει 0,18 kgCO_2. Χρησιμοποιώντας έναν μόνο κυκλοφορητή υψηλής απόδοσης εκπέμπονται περίπου 57 kg CO_2 λιγότερα. Για να γίνει κατανοητό το μέγεθος αυτό αξίζει να τονιστεί ότι περίπου 57 kg CO_2 εκπέμπονται στη διάρκεια ενός μεγάλου ταξιδιού των 400 χλμ με αυτοκίνητο. Με απλά λόγια αν 150 άτομα εγκαταστήσουν έναν ηλεκτρονικό κυκλοφορητή θα έχουμε μέσα μόνο σε έναν χρόνο 8,5 τόνους λιγότερο CO_2. Αυτό αρκεί για να γυρίσει κανείς την Γη 1 ½ φορά με αυτοκίνητο. Αυτοί οι 8,5 τόνοι για να

αντισταθμιστούν πρέπει να φυτευτούν 1600 δέντρα, δηλαδή 11 δέντρα ανά άτομο από τα 150 που είπαμε προηγουμένως.

Αξίζει να σημειωθεί ότι ένας ηλεκτρονικός κυκλοφορητής είναι συνληθως ενεργειακής κλάσης Α γεγονός που δικαιολογεί απόλυτα την τεράστια εξοικονόμηση που μπορούμε να πετύχουμε σε σχέση με τους απλούς κυκλοφορητές που είναι ενεργειακής κλάσης C ή D. Η διαφορά σε KWh μεταξύ ενός προϊόντος ενεργειακής κλάσης Α και ενός κατηγορίας C είναι μια ετήσια εξοικονόμηση ενέργειας της τάξης των 240 KWh.

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα βλέπουμε ότι αν και ο ηλεκτρονικός κυκλοφορητής έχει πιο μεγάλο αρχικό κόστος αγοράς, έχουμε απόσβεση μόλις σε 4 χρόνια. Επίσης παρατηρούμε ότι ακόμα και στο Δ.Σ. υπάρχουν μεγάλα περιθώρια εξοικονόμησης ενέργειας. Απαιτούνται λιγότερες εργασίες συντήρησης στα υπόλοιπα εξαρτήματα της εγκατάστασης λόγω σωστής λειτουργίας του κυκλοφορητή. Έχουμε υπερδιπλάσια εξοικονόμηση ετήσιου ενεργειακού κόστους που μπορεί να φτάσει έως 75% καθώς και σημαντική εξοικονόμηση στις εκπομπές CO_2 ανά έτος.

4.2 Άλλες εφαρμογές.

Στην ενότητα αυτήν παρουσιάζονται πρακτικές εφαρμογές στη βιομηχανία των αντλιών μεταβλητών στροφών, έτσι ώστε να τονιστούν οι δυνατότητες εξοικονόμησης ενέργειας αλλά και η συνολική βελτίωση της αξιοπιστίας του αντλητικών συστημάτων. Έτσι στη συνέχεια περιγράφονται οι χρήσεις των αντλιών στις βιομηχανίες στις οποίες αντικαταστάθηκαν οι αντλίες σταθερών στροφών με νέες ΑΜΣ, καθώς και τα οφέλη που προέκυψαν από αυτή την αντικατάσταση. Πρέπει να σημειωθεί ότι το χρηματικό ποσό της εξοικονόμησης σε κάθε περίπτωση είναι ενδεικτικό αφού εξαρτάται από το κόστος της ενέργειας για το συγκεκριμένο χρήστη/ βιομηχανία.

4.2.1 Εφαρμογή 1: Εγκατάσταση ΑΜΣ σε εργοστάσιο οικιακών συσκευών

Σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας επιτεύχθηκε με τη χρήση δύο αντλιών μεταβλητής ταχύτητας, οι οποίες τροφοδοτούν το περιφερειακό δίκτυο νερού ενός εργοστασίου παραγωγής οικιακών συσκευών.

Το δίκτυο διανομής του νερού στο εργοστάσιο αποτελείται από σωλήνες χυτοσιδήρου διαμέτρου 150mm, οι οποίοι τροφοδοτούνται από δύο πηγές:

- Από το τοπικό δίκτυο ύδρευσης αντλούνται μέσω της μίας εκ των δύο αντλιών 910.000 λίτρα ανά έτος, τα οποία οδηγούνται στη δεξαμενή αποθήκευσης νερού της βιομηχανίας. Κάθε αντλία χρησιμοποιεί για την κίνησή της έναν επαγωγικό κινητήρα ισχύος 15kW. Οι αντλίες ήταν σταθερών στροφών και ήταν σε θέση να παρέχουν πολύ μεγαλύτερες πιέσεις και παροχές από τις απαιτούμενες στην εγκατάσταση.
- Από την ιδιόκτητη γεώτρηση της βιομηχανίας αντλούνταν νερό απ' ευθείας προς το εσωτερικό δίκτυο διανομής με τη χρήση υποβρύχιας αντλίας με κινητήρα 30kW.

Στο κύκλωμα από το τοπικό δίκτυο ύδρευσης, ο έλεγχος της διακινούμενης παροχής και της πίεσης πραγματοποιούνταν με χρήση βαλβίδων και κλάδου παράκαμψης. Όταν η απαιτούμενη παροχή από την εγκατάσταση μειωνόταν, τότε μέσω του κλάδου παράκαμψης το πλεόνασμα της παροχής επέστρεφε στη δεξαμενή. Κατά αυτό τον τρόπο, η αντλία εργαζόταν συνεχώς στο πλήρες φορτίο.

Με την εγκατάσταση της αντλίας μεταβλητών στροφών η διακινούμενη παροχή ρυθμίζεται με την μεταβολή των στροφών της αντλίας. Η ρύθμιση της παροχής στην επιθυμητή τιμή επιτυγχάνεται με την χρήση αυτόματου ελέγχου κατά τον οποίο ένας μεταλλάκτης πίεσης συνδεδεμένος στο δίκτυο διανομής του νερού, τροφοδοτεί την ΑΜΣ με σήμα αντίστοιχο στην επιθυμητή παροχή.

Η ετήσια ενεργειακή εξοικονόμηση από τη λειτουργία αυτής της αντλίας ανέρχεται στις 111.750kWh, η οποία αντιστοιχεί σε μείωση κατά 88% της αρχικής κατανάλωσης.

Για τον έλεγχο της παροχής στο κύκλωμα της γεώτρησης είχε τοποθετηθεί βαλβίδα στραγγαλισμού ανάμεσα στην αντλία και στο εσωτερικό δίκτυο της βιομηχανίας, η οποία δημιουργούσε σημαντικές ενεργειακές απώλειες.

Με την εγκατάσταση των ΑΜΣ η διακινούμενη παροχή ρυθμίζεται πλέον με την μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής, έτσι δεν υπάρχει ανάγκη για τη βαλβίδα στραγγαλισμού και συνεπώς μειώνεται σημαντικά η κατανάλωση ενέργειας από τον κινητήρα. Ο κινητήρας που χρησιμοποιείται υπό τις νέες συνθήκες έχει ισχύ 27kW. Ο έλεγχος των στροφών της αντλίας επιτυγχάνεται με χειροκίνητη ρύθμιση ενός ποτενσιόμετρου, το οποίο παρέχει στον κινητήρα σήμα ανάλογο με την επιθυμητή ταχύτητα περιστροφής. Αρχικά, εξετάστηκε η χρήση αυτόματου ελέγχου των στροφών αλλά τελικά προέκυψε το συμπέρασμα δεν είναι απαραίτητο, μιας και για τη συγκεκριμένη αντλία μεταβολή στροφών απαιτείται στην περίπτωση φθοράς της αντλίας και στην περίπτωση, στην οποία υπάρχουν περιορισμοί κατά την άντληση του νερού από τη γεώτρηση.

Η εξοικονόμηση ενέργειας με την νέα αντλία υπολογίζεται στις 79.300kWh ανά έτος, που αντιστοιχεί στο 30% της αρχικής κατανάλωσης ενέργειας.

Συνολικά με την εγκατάσταση και στα δύο κυκλώματα νερού ΑΜΣ η εξοικονόμηση ενέργειας έφτασε στο 48% της αρχικής κατανάλωσης.

Το κόστος της επένδυσης για την αντικατάσταση των αντλιών με ΑΜΣ ανήλθε στα 11.350€. Εκτιμάται ότι η εξοικονόμηση ενέργειας που επετεύχθει

ανέρχεται ετησίως στα 191.000 kWh ενέργεια, που αντιστοιχεί σε 9.700€. Έτσι, η απόσβεση της επένδυσης υπολογίζεται εντός 14 μηνών.

4.2.2 Εφαρμογή 2: Εγκατάσταση ΑΜΣ σε συγκρότημα άντλησης υγρών αποβλήτων

Αντικαθιστώντας σε ένα αντλητικό σύστημα υγρών αποβλήτων τις αντλίες σταθερών στροφών με αντίστοιχες μεταβλητών, από τη μία επιτυγχάνεται εξοικονόμηση ενέργειας και από την άλλη μειώνονται τα επίπεδα θορύβου στην εγκατάσταση. Με αυτόν τον τρόπο, η διακινούμενη παροχή από την αντλία είναι σε κάθε περίπτωση η ακριβώς απαιτούμενη μειώνοντας στο ελάχιστο τις απώλειες τριβής στις σωληνώσεις.

Αντλίες μεταβλητών στροφών χρησιμοποιήθηκαν για να αντικαταστήσουν τις συμβατικές σε μία μονάδα βιολογικού καθαρισμού. Στην εγκατάσταση αυτή, τα υγρά απόβλητα, μεταφέρονται μέσω των αντλιών κατά μήκος μίας απόσταση 2,5 χιλιομέτρων μέχρι το σταθμό του βιολογικού καθαρισμού. Στη συμβατική εγκατάσταση, ο έλεγχος της παροχής γίνονταν απλά ανοιγοκλείνοντας τους διακόπτες των κινητήρων, ενώ για την μέτρηση της διακινούμενης παροχής χρησιμοποιούταν πλωτήρας.

Με την εγκατάσταση των αντλιών μεταβλητών στροφών, τοποθετήθηκαν για την μέτρηση της διακινούμενης παροχής όργανα μέτρησης με υπερήχους. Τα όργανα αυτά δημιουργούν ένα σήμα αναφοράς, το οποίο τροφοδοτεί το σύστημα ελέγχου των αντλιών, το οποίο σύστημα μεταβάλλει ανάλογα την ταχύτητα περιστροφής των αντλιών. Κατ' αυτόν τον τρόπο το διάστημα στο οποίο λειτουργούν οι κινητήρες κυμαίνεται μεταξύ 73%- 88% του μέγιστου φορτίου τους, περιοχή στην οποία επιτυγχάνεται η βέλτιστη λειτουργία των αντλιών από πλευράς εξοικονόμησης ενέργειας. Προκειμένου να εξοικονομηθεί περισσότερη ενέργεια, αντικαταστάθηκαν επίσης και οι χρησιμοποιούμενοι κινητήρες με καινούργιους χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης.

Το εγκατεστημένο αντλητικό συγκρότημα διακινούσε 14 m^3 υγρών αποβλήτων ανά kWh. Μετά την τοποθέτηση των νέων αντλιών και των κινητήρων, λειτουργώντας στις ίδιες στροφές με τις παλαιές, η διακινούμενη παροχή αυξήθηκε

στα 21 m^3 υγρών αποβλήτων ανά kWh. Τοποθετώντας και το σύστημα ελέγχου των στροφών στους κινητήρες, η παροχή αυξήθηκε περαιτέρω φθάνοντας τα 30 m^3 υγρών αποβλήτων ανά kWh.

Η απόδοση του αντλητικού συγκροτήματος εκτιμάται ότι διπλασιάστηκε με την τοποθέτηση των ΑΜΣ. Αν και ακριβή οικονομικά στοιχεία δεν είναι διαθέσιμα, εκτιμάται ότι η περίοδος απόσβεσης είναι μικρότερη των δύο ετών και σε βάθος επένδυσης είκοσι ετών, θα εξοικονομηθούν 131.000 €. Η συνολική ηλεκτρική κατανάλωση πέφτει περίπου 53% με το 33% της μείωσης να οφείλεται στην αλλαγή των αντλιών και των κινητήρων και το υπόλοιπο 20% στις μεταβλητές στροφές. Σημαντικό όφελος του νέου συστήματος είναι το ότι ο συνεχής έλεγχος της διακινούμενης παροχής στο σύστημα βοηθά στην έγκαιρη διάγνωση πιθανών προβλημάτων στις αντλίες και κατ' αυτόν τον τρόπο στην καλύτερη οργάνωση των διαστημάτων συντήρησης. Τέλος, σημαντικό στοιχείο, μιας και η εγκατάσταση ήταν κοντά σε κατοικημένη περιοχή, είναι η μείωση των επιπέδων του θορύβου, η οποία επιτυγχάνεται με τη χρήση των ΑΜΣ.

4.2.3 Εφαρμογή 3: Αναβάθμιση διυλιστηρίου με εισαγωγή αντλιών

Ένα διυλιστήριο στο Σαν Φραντζίσκο αντικατέστησε το αντλητικό του συγκρότημα με αντλίες μεταβλητών στροφών. Το αντλητικό συγκρότημα περιλαμβάνει αντλίες διακίνησης των προϊόντων διϋλησης και αντλίες τροφοδοσίας του πετρελαίου (πρώτη ύλη). Περιορίστηκαν σε μεγάλο βαθμό οι μηχανικές ταλαντώσεις του συστήματος και έτσι περιορίστηκε η φθορά των ρουλεμάν και των υπολοίπων μηχανικών τμημάτων της εγκατάστασης.

Η επιχείρηση Ηλεκτρισμού συμφώνησε με το διυλιστήριο και ανέλαβε εξ' ολοκλήρου το κόστος της αναβάθμισης της εγκατάστασης, με αντάλλαγμα μερίδιο από την εξοικονόμηση ενέργειας. Το συνολικό κόστος της επένδυσης της ανήλθε στο 1.200.000 €. Εκτιμάται ότι με την αντικατάσταση των αντλιών από ΑΜΣ, εξοικονομήθηκαν ανά έτος 120.000€ από τις αντλίες των προϊόντων και 220.000€ από τις αντλίες τροφοδοσίας, ενώ από την αναβάθμιση του συνόλου της εγκατάστασης 750.000€. Η απόσβεση της επένδυσης εκτιμάται στους 18 μήνες εάν

και αυτή αφορά την επιχείρηση ηλεκτρισμού, αφού το διυλιστήριο είχε άμεσα κέρδη χωρίς κόστος.

Πριν την αναβάθμιση της εγκατάστασης, οι αντλίες που χρησιμοποιούνταν ήταν υπερδιαστασιολογημένες και έτσι λειτουργούσαν συχνά στο 40% του βέλτιστου σημείου λειτουργίας τους με αποτέλεσμα χαμηλή απόδοση, υπερβολικές ταλαντώσεις και αντικατάσταση των εδράνων στήριξης και των στυπιοθλιπτών σε ετήσια βάση. Η αναβάθμιση της εγκατάστασης περιελάμβανε:

- εγκατάσταση ΑΜΣ για την κύρια τροφοδοσία ισχύος 1650 kW και ΑΜΣ διακίνησης προϊόντων ισχύος 500 kW
- αντικατάσταση των αντλιών δευτερεύουσας τροφοδοσίας (1650 kW).
- Αλλαγή στη διαδικασία λειτουργίας των αντλιών τροφοδοσίας (2x1650 kW) και των αντίστοιχων εφεδρικών (3000 kW)

Η εξοικονόμηση ενέργειας με την εισαγωγή των ΑΜΣ οφείλεται στην ελαχιστοποίηση των απωλειών της ροής διαμέσου των βαλβίδων ελέγχου και εκτιμάται στις 500.000 kWh ανά μήνα. Με τις ΑΜΣ περιορίστηκαν και οι φθορές των εδράνων στήριξης και των στυπιοθλιπτών.

4.2.4 Εφαρμογή 4: Εγκατάσταση ΑΜΣ σε χημική βιομηχανία

Με την τοποθέτηση αντλίας μεταβλητών στροφών για τον έλεγχο της ανακυκλοφορίας των διακινούμενων υγρών, η χημική βιομηχανία περιόρισε σημαντικά το κόστος συντήρησης ελαχιστοποιώντας τις αστοχίες στα μηχανικά μέρη του αντλιοστασίου. Παράλληλα, πέτυχε αύξηση της παραγωγής της και σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας. Το κόστος της επένδυσης ανήλθε, για την αντικατάσταση των αντλιών, στα 25.000€ ενώ εκτιμάται ότι με τις ΑΜΣ εξοικονομούνται 62.000€ ανά έτος Η απόσβεση της επένδυσης εκτιμάται σε λιγότερο από 5 μήνες.

Η συγκεκριμένη βιομηχανία παράγει αρωματικά χημικά, τα οποία χρησιμοποιούνται σε διάφορα προϊόντα όπως απορρυπαντικά και σαπούνια. Μιας και τα περισσότερα από αυτά τα διακινούμενα υγρά είναι άκρως διαβρωτικά, η αντλία ανακυκλοφορίας κατασκευάστηκε από ανοξείδωτο χάλυβα και είναι φυγοκεντρικής

μορφής. Η αντλία διακινεί τα υγρά που χρησιμοποιούνται μέσα από ένα εναλλάκτη θερμότητας και τα επιστρέφει σε έναν αναθερμαντή για να τα διατηρεί σε υψηλή θερμοκρασία.

Κατά την λειτουργία της σε σταθερές στροφές (1170 RPM), η αντλία άδειαζε μία δεξαμενή αναρρόφησης ώστε να καλύψει τις ανάγκες της παραγωγής μιας παρτίδας προϊόντος. Καθώς το επίπεδο του υγρού μειωνόταν, το ύψος της αναρρόφησης μεταβαλλόταν από το 100% στην αρχή της διαδικασίας σε 0% στο τέλος της με αποτέλεσμα, οι συνθήκες στις οποίες λειτουργούσε η αντλία να αλλάζουν συνεχώς. Αποτέλεσμα αυτού ήταν κατά τη διάρκεια της τελευταίας ώρας του κάθε κύκλου λειτουργίας, όπου το επίπεδο της αναρρόφησης είχε πέσει σε χαμηλές τιμές, η αντλία να λειτουργεί σε συνθήκες έντονης σπηλαίωσης. Σε αυτές τις «επίπονες» συνθήκες λειτουργίας, απαιτούνταν η αντικατάσταση κάθε 17 ημέρες ενός στυπιοθλίπτη.

Με την τοποθέτηση των αντλιών μεταβλητών στροφών, περιορίστηκε η λειτουργία της αντλίας υπό καταστροφικές για αυτήν συνθήκες. Αυτό κατέστη δυνατόν λόγω του αυτομάτου συστήματος ελέγχου, το οποίο διαθέτουν οι ΑΜΣ και είναι σε θέση αντιδρώντας στις μεταβολές των συνθηκών παραγωγής, να επιδρά κατάλληλα στο σημείο λειτουργίας της αντλίας. Έτσι, αντιδρώντας στο χαμηλό ύψος αναρρόφησης το σύστημα ελέγχου βαθμιαία επιβραδύνει την ταχύτητα περιστροφής της αντλίας, ώστε να αποτρέψει το φαινόμενο της σπηλαίωσης και τις φθορές στους στυπιοθλίπτες.

Το αρχικό σύστημα με την αντλία σταθερής ταχύτητας περιστροφής είχε κατανάλωση 30kW λειτουργώντας στις 1170 RPM, ενώ με τη λύση της ΑΜΣ η απορροφούμενη ισχύς κυμαίνεται από 5– 7,5kW ενώ περιστρέφεται από 550– 700 RPM. Η ενεργειακή εξοικονόμηση από τον περιορισμό της ισχύος εκτιμάται ετησίως στα 8.500€, ενώ η εξοικονόμηση από την αποφυγή της αστοχίας των στυπιοθλιπτών εκτιμάται στα 54.000€ ετησίως.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ

5

Αξιολόγηση των Συστημάτων Άντλησης Μεταβλητών Στροφών

5.1 Πλεονεκτήματα, μειονεκτήματα και λειτουργικά θέματα

Κατά το σχεδιασμό ενός συστήματος, το οποίο αξιοποιεί την τεχνολογία της μεταβλητής ταχύτητας περιστροφής, θα υπάρχουν κάποια οφέλη τα οποία σχετικά εύκολα μπορούν να ποσοτικοποιηθούν και κάποια τα οποία είναι λιγότερο απτά. Όπως είναι αναμενόμενο ενδέχεται να εμφανιστούν και κάποια προβλήματα, τα οποία θα πρέπει να αποφευχθούν.

5.1.1 Πλεονεκτήματα για τον χρήστη

1. **Εξοικονόμηση ενέργειας**

Με τις εγκαταστάσεις δυναμικών αντλιών, έχει επιτευχθεί σε πολλές περιπτώσεις εγκατάστασης Α.Μ.Σ εξοικονόμηση ενέργειας που κυμαίνεται μεταξύ 30% και 50%. Εάν «υιοθετηθούν» όλες οι κατά το δυνατόν καλύτερες πρακτικές όσον αφορά στις

βελτιώσεις του συστήματος, τότε ενδέχεται το ποσοστό της εξοικονόμησης ενέργειας να φτάσει το 90% .

2. Βελτιωμένος έλεγχος διαδικασίας

Εάν εξαρτάται η παροχή ή η πίεση στην κατάθλιψη σε μία αντλία με τις απαιτήσεις μιας διαδικασίας, τότε οι μικρές αποκλίσεις μπορούν να διορθωθούν σε πολύ μικρότερο χρόνο με την χρήση κινητήρων μεταβλητών στροφών απ' ότι με άλλους τρόπους ελέγχου, ώστε να βελτιωθεί η απόδοση της εγκατάστασης.

Υπάρχει μικρότερη πιθανότητα διακύμανσης της παροχής ή της πίεσης όταν η συσκευή ελέγχου παρέχει ρυθμούς μεταβολής, οι οποίοι είναι στην πραγματικότητα απείρως ευμετάβλητοι.

3. Βελτιωμένη αξιοπιστία του συστήματος

Οποιαδήποτε μείωση στην ταχύτητα, η οποία επιτυγχάνεται με τη χρήση μιας Α.Μ.Σ, έχει μείζονα πλεονεκτήματα όσον αφορά στην μείωση της φθοράς της αντλίας, ειδικότερα στα έδρανα κύλισης και στα στεγανωτικά παρεμβύσματα, και κατά αυτόν τον τρόπο ο επιπλέον χρόνος μεταξύ των συντηρήσεων μπορεί να προγραμματιστεί με ακρίβεια.

Θεωρείται γενικά ότι η φθορά στα έδρανα κύλισης και στις επιφάνειες τριβής μειώνεται με την έβδομη δύναμη της ταχύτητας και ως εκ τούτου μπορούν να πραγματοποιηθούν μεγάλα οφέλη με το να λειτουργεί μια αντλία με μικρότερη ταχύτητα.

4. Επιπλέον οφέλη

Τα παρακάτω επιπρόσθετα οφέλη εφαρμόζονται ειδικά στις VCD

- Τα μοντέρνα ηλεκτρονικά ισχύος είναι πολύ αξιόπιστα
- Ευκολία στην αναβάθμιση
- Ομαλή εκκίνηση και τερματισμός μειώνουν τις τάσεις στον κινητήρα, στην αντλία, στους συνδέσμους και στο δίκτυο τροφοδοσίας.

- Πολλές Α.Μ.Σ ενσωματώνουν κυκλώματα ελέγχου: αναλογικά, διαφορικά και ολοκληρωτικά. Έτσι ο έλεγχος δεν απαιτεί την παρουσία του μηχανικού, αλλά μπορεί να γίνεται αυτόματα και από απόσταση.

5.1.2 Πιθανά μειονεκτήματα των Α.Μ.Σ

- Οι αναστροφείς μπορούν να προσαρμοστούν στους περισσότερους κινητήρες που υπάρχουν στην Ευρώπη και σε άλλες περιοχές, όπου χρησιμοποιείται δίκτυο ηλεκτρικής τάσης 400V. Παρ' όλα αυτά, αυτό δεν ισχύει στην ΗΠΑ, στις οποίες η τάση υπερβαίνει το 440V και συνεπώς ο κινητήρας «ενισχύεται» με τη χρήση αναστροφέα.

- Λόγω του ότι πολλοί οδηγοί χρησιμοποιούν μία απλή δίοδο γέφυρα εισόδου, μπορεί να υπάρξουν κάποιες ανεπιθύμητες αρμονικές διαταραχές.

- Μπορεί να προκληθούν ηλεκτρικές τάσεις πάνω στους άξονες μεγαλύτερων κινητήρων που πιθανά να οδηγήσουν σε ηλεκτρικά ρεύματα, τα οποία μπορούν να καταστρέψουν τα έδρανα. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν διορθωτικά μέτρα όπως:

    - Μονωμένα μη οδηγά έδρανα προτείνεται να χρησιμοποιούνται για όλους τους κινητήρες με έξοδο πάνω από 100kW (150 hp)
    - Μπορεί να απαιτείται η χρήση επιπρόσθετων φίλτρων για υψηλότερες ισχύς και τάσεις.

- Ο μετατροπέας θα έχει απώλειες, έτσι οι απαιτήσεις εξαερισμού για τα ηλεκτρονικά έχουν ιδιαίτερη σημασία: η διάρκεια ζωής του converter είναι γενικά ανάλογη με τη θερμοκρασία των εσωτερικών στοιχείων, ειδικά των πυκνωτών.

Όπως έχει αναφερθεί παραπάνω, στις φυγοκεντρικές αντλίες σχετικά μικρές μεταβολές των στροφών τους μπορούν να επιφέρουν σημαντικές αλλαγές στις

χαρακτηριστικές παραμέτρους λειτουργίας τους, όπως στην απαρροφούμενη ισχύ και στο απαιτούμενο καθαρό θετικό ύψος αναρρόφησης.

Γενικά, οι αντλίες μεταβλητών στροφών χρησιμοποιούνται για τη μείωση της ταχύτητας περιστροφής σε τιμές κάτω της κανονικής. Παρ' όλα αυτά, είναι δυνατή η χρήση τους και για την αύξηση των στροφών. Σε αυτές τις περιπτώσεις, πρέπει να ληφθούν υπόψη για τη σωστή λειτουργία και οι παρακάτω περιορισμοί:

- Η αύξηση των στροφών σε μία αντλία μπορεί να είναι επικίνδυνη σε εκείνες τις περιπτώσεις που εκ των προτέρων δεν έχει εξασφαλιστεί η μηχανική της αντοχή.

- Με αυξανόμενες στροφές, θα παρατηρηθεί αύξηση των επιπέδων του θορύβου και των ταλαντώσεων της αντλίας και του κινητήρα, οι οποίες θα πρέπει να ελεγχθούν ως προς τις επιτρεπόμενες τιμές τους.

- Εάν η αντλία διακινεί υγρό που περιέχει στερεά σωματίδια, τότε η αύξηση της παροχής θα προκαλέσει αντίστοιχη αύξηση στις τριβές και στην καταπόνηση του συστήματος.

- Με την αύξηση των στροφών θα πρέπει να γίνεται έλεγχος του διαθέσιμου καθαρού θετικού ύψους NPSHa, ώστε να μην εμφανίζεται σπηλαίωση. Ο έλεγχος αυτός είναι σημαντικός, καθώς με την αύξηση των στροφών και της διακινούμενης παροχής, η πτώση πίεσης στον αγωγό αναρρόφησης μεγαλώνει, με συνέπεια μείωση της τιμής του NPSHa. Παράλληλα, η αύξηση των στροφών, όπως έχουμε αναφέρει, επιφέρει αύξηση στην τιμή του NPSHr κάνοντας απολύτως επιτακτική την ανάγκη ελέγχου έναντι σπηλαίωσης.

.

5.2 Ανάλυση κόστους κύκλου ζωής

Η Ανάλυση του Κόστους Κύκλου Ζωής (Life Cycle Cost, LCC) είναι ένα εργαλείο διαχείρισης μιας μηχανής ή μιας εγκατάστασης το οποίο μπορεί να βοηθήσει στην ελαχιστοποίηση των απωλειών και στη μεγιστοποίηση της ενέργειας ή της απόδοσης για πολλούς τύπους συστημάτων, συμπεριλαμβανομένων και των αντλητικών.

Καθημερινά καλούμαστε να κάνουμε επιλογές ανάμεσα σε ποικίλα προσφερόμενα προϊόντα, είτε αυτά είναι τα μικρά καθημερινά στα ράφια μιας υπεραγοράς είτε μεγάλες προσφορές για εξοπλισμό μιας κατοικίας ή ενός μεγάλου κτιρίου. Η επιλογή γίνεται πιο δύσκολη ανάμεσα σε προϊόντα που φαινομενικά και μόνο έχουν τα ίδια τεχνικά χαρακτηριστικά. Μέχρι πρόσφατα σε αυτό το σημείο καθοριστικό ρόλο έπαιζε το κόστος αγοράς του προϊόντος, η τιμή του. Στις μέρες μας όμως η αυξανόμενη ανάγκη για μεγιστοποίηση των κερδών μας με τους ελάχιστους πόρους αντικατέστησε το κόστος αγοράς ενός προϊόντος με το Κόστος Κύκλου Ζωής του (Life Cycle Cost (LCC)). Η ανάλυσης του Κόστους Κύκλου Ζωής είναι ιδιαίτερα χρήσιμη όταν αξιολογούνται εναλλακτικές λύσεις που ικανοποιούν τις ίδιες απαιτήσεις απόδοσης, αλλά διαφέρουν όσον αφορά τις αρχικές και λειτουργικές δαπάνες και πρέπει να συγκριθούν προκειμένου να επιλεγεί αυτή που μεγιστοποιεί την καθαρή αποταμίευση.

Ο υπολογισμός του LCC είναι ζωτικής σημασίας για κάθε μηχανικό, μελετητή, εργολάβο ή ακόμα περισσότερο για τον τελικό χρήστη που καλείται να αποφασίσει και να επιλέξει κατά τον σχεδιασμό νέων εγκαταστάσεων είτε σε ανάγκη επισκευής είτε σε περίπτωση αντικατάστασης υπαρχόντων συστημάτων.

Στο εμπόριο υπάρχουν λογισμικά που υπολογίζουν το κόστος κύκλου ζωής ενός προϊόντος και εφαρμογής. Εντούτοις είναι καλύτερα να δημιουργείται ένα μοντέλο υπολογισμού που θα ανταποκρίνεται στις ιδιαιτερότητες και τη φύση του κάθε προϊόντος. Εδώ θα επικεντρωθούμε στο Κόστος Κύκλου Ζωής των αντλιών και των αντλητικών συστημάτων.

Σχήμα 5.1 Επιμερισμός των βασικών δαπανών τυπικής εγκατάστασης

Το Κόστος Κύκλου Ζωής είναι το άθροισμα όλων των δαπανών που προκύπτουν καθ' όλη τη διάρκεια ζωής μιας αντλητικής εγκατάστασης, δηλαδή το άθροισμα του κόστους αγοράς, εγκατάστασης, λειτουργίας, συντήρησης και πιθανής αντικατάστασης ή απόρριψης της αντλίας έως το τέλος της ζωής της.

Μαθηματικά το LCC δίνεται από την εξίσωση:

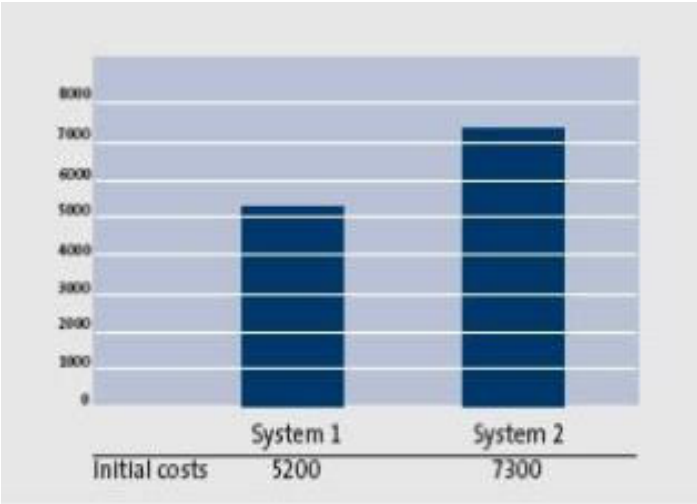
$$LCC = C_{ic} + C_{in} + C_e + C_o + C_{env} + C_m + C_s + C_d$$

Όπου:

C_{ic}: Αρχικό κόστος (κόστος αγοράς).

Περιλαμβάνει το σύνολο του εξοπλισμού που απαιτείται για τη λειτουργία του αντλητικού συστήματος, δηλαδή αντλίες, μετατροπείς συχνότητας (inverter),ηλεκτρικούς πίνακες, αισθητήρια σήματος κ.τ.λ. Πρέπει να λαμβάνουμε υπόψη μας ότι στο κόστος αγοράς συχνά ενσωματώνονται έννοιες που δεν είναι άμεσα μετρήσιμες, έχουν όμως τεράστια σημασία, όπως η ενεργειακή απόδοση καθώς και η αξιοπιστία των αντλιών, δεδομένου ότι πολλές φορές ακριβότερα υλικά παρέχουν μεγαλύτερο χρόνο ζωής ή χαμηλότερη κατανάλωση ισχύος συγκριτικά με φθηνότερα υλικά– προϊόντα.

Στο σχήμα 5.2 παρουσιάζονται ενδεικτικά τα αρχικά κόστη, αντλητικού συγκροτήματος σταθερής ταχύτητας λειτουργίας (system 1) και αντλητικού συγκροτήματος με μεταβαλλόμενη ταχύτητα (system 2) [12].



Σχήμα 5.2. Αρχικό κόστος αντλητικού συγκροτήματος σταθερής ταχύτητας (system 1) και αντλητικού συγκροτήματος με μεταβαλλόμενη ταχύτητα (system 2) [12].

Παρότι από το σχήμα φαίνεται ότι το κόστος αγοράς ενός συστήματος μεταβαλλόμενης ταχύτητας είναι περίπου 30% μεγαλύτερο από αυτό ενός αντίστοιχου σταθερών στροφών, η διαφορά αυτή μπορεί να ισοσκελιστεί από την εξοικονόμηση που επιτυγχάνεται από την απλούστευση της εγκατάστασης αφού απαιτούνται λιγότερες βάνες ελέγχου και κλάδοι παράκαμψης.

C_{in}: Κόστος εγκατάστασης

Το κόστος εγκατάστασης περιλαμβάνει την εγκατάσταση των αντλιών, τις ηλεκτρολογικές συνδέσεις, τις συνδέσεις των διαφόρων άλλων οργάνων, την επίβλεψη και την εκκίνηση του συστήματος (start-up). Όπως στο αρχικό κόστος, έτσι και εδώ οφείλουμε να ελέγχουμε και να λαμβάνουμε υπόψη τυχόν πλεονεκτήματα που προκύπτουν από τις επιλογές μας, π.χ. σε περίπτωση επιλογής αντλιών in-line με ενσωματωμένες μονάδες inverter και αισθητήρια, πολλά από τα απαιτούμενα υλικά/ εξαρτήματα όπως μονάδα inverter, φίλτρα διαχωρισμού, ηλεκτρομαγνητική προστασία του inverter για αποφυγή διάδοσης αρμονικών συχνοτήτων, και αισθητήρια διαφορικής πίεσης βρίσκονται ήδη πάνω στις αντλίες (factory assembled). Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα υψηλότερο κόστος αγοράς αλλά ταυτόχρονα πολύ χαμηλό κόστος εγκατάστασης του συνολικού εξοπλισμού.

Στα συστήματα μεταβλητών στροφών ενδέχεται το κόστος εγκατάστασης να είναι μεγαλύτερο από αυτό ενός συμβατικού συστήματος καθώς απαιτείται

περισσότερος χρόνος για την εγκατάσταση και την βαθμονόμηση των συστημάτων ελέγχου του.

C_e: Ενεργειακό κόστος

Στις πλείστες περιπτώσεις εφαρμογών όπου λειτουργούν περισσότερο από 2.000 ώρες ετησίως, η κατανάλωση ενέργειας αποτελεί τη μεγαλύτερη επιβάρυνση στο κόστος κύκλου ζωής οποιουδήποτε συστήματος άντλησης. Αξίζει να αναφέρουμε επιγραμματικά κάποιους παράγοντες που επηρεάζουν σημαντικά την κατανάλωση ενέργειας μιας αντλίας:

- Κατανομή φορτίου (load profile)
- Βαθμός απόδοσης της αντλίας – υπολογισμός σημείου λειτουργίας
- Βαθμός απόδοσης ηλεκτροκινητήρα (διαφέρει σημαντικά μεταξύ ηλεκτροκινητήρων κλάσης EFF1 και άλλων standard ηλεκτροκινητήρων EFF2 και EFF3.
- Διαστασιολόγηση αντλίας (συνήθως η υπερδιαστασιολόγηση αντλιών για λόγους ασφαλείας καταλήγει σε ενεργειακά δαπανηρή λύση).
- Άλλες παράμετροι όπως σωληνώσεις, βαλβίδες, συλλέκτες.
- Επιλογή συστημάτων μεταβλητής συχνότητας (inverter), η χρήση των οποίων μπορεί να μειώσει την κατανάλωση ενέργειας μέχρι και 50% στη βιομηχανία.

Η σωστή εγκατάσταση και λειτουργία ενός συστήματος μεταβλητών στροφών μπορεί να αποφέρει τεράστια εξοικονόμηση στο ενεργειακό κόστος, αφού η αντλία μπορεί να μεταβάλλει τις στροφές της ανάλογα με την εκάστοτε ζήτηση από το σύστημα. Επίσης σε ένα τέτοιο σύστημα η αντλία είναι εφικτό να λειτουργεί τις περισσότερες φορές κοντά στο σημείο με την βέλτιστη απόδοση.

C_o: Κόστος λειτουργίας, απασχόλησης εργαζόμενων.

Αναφέρεται στα έξοδα απασχόλησης εργαζομένων που υποστηρίζουν αντλητικά συστήματα. Λόγω της τεχνολογικής εξέλιξης τα έξοδα αυτά είναι αμελητέα χάρη στους σύγχρονους τρόπους παρακολούθησης των διαφόρων εφαρμογών με αντλίες, όπως είναι το Building Management System (BMS),η σειριακή σύνδεση, και πρωτόκολλα επικοινωνίας όπως GENIbus και LONbus. Τα

αντλητικά συστήματα μεταβλητής ταχύτητας δεν παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές στο ύψος του κόστους λειτουργίας σε σχέση με τα συμβατικά συστήματα σταθερών στροφών.

C_{env}: Κόστος περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

Το κόστος των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που σχετίζονται με την χρήση αντλητικών συστημάτων δεν απορρέει μόνο από την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας και τα συνεπακόλουθά της. Σε αυτό τον παράγοντα του LCC λαμβάνουμε υπόψη επιπτώσεις στο φυσικό περιβάλλον και από την απόρριψη των αντλιών ή μέρους αυτών (άχρηστα ανταλλακτικά) ή ακόμη από την αλλοίωση της χημικής σύστασης και καθαρότητας του αντλούμενου υγρού/νερού από τα βρεχόμενα μέρη της αντλίας.

C_m: Κόστος συντήρησης και επισκευής.

Είναι προφανές ότι έχει να κάνει με την συντήρηση και επισκευή της αντλίας π.χ. παροχή τεχνικής υποστήριξης, κόστος απασχόλησης ειδικευμένου τεχνικού, ανταλλακτικά, μεταφορά, δοκιμή σε δοκιμαστήριο και έλεγχος σωστής απόδοσης της επισκευασμένης αντλίας. Η βέλτιστη λύση για να έχουμε την μέγιστη διάρκεια ζωής μιας αντλίας αποκλείοντας ζημιές και έκτακτες βλάβες είναι η προληπτική συντήρηση σε τακτά χρονικά διαστήματα

Καθώς στα αντλητικά συγκροτήματα με μεταβλητές στροφές η απαιτούμενη συντήρηση είναι πολύ περιορισμένη το ύψος αυτού του κόστους είναι πολύ μικρότερα σε αυτά τα συστήματα σε σύγκριση με τα συστήματα σταθερών στροφών.

C_s: Κόστος απώλειας παραγωγής (downtime costs).

Εξαιρετικά σημαντικό όταν η αντλία χρησιμοποιείται σε γραμμή βιομηχανικής παραγωγής ή καλείται να εξασφαλίσει την επιθυμητή θερμοκρασία χώρου σε ένα κτίριο γραφείων. Στην περίπτωση της βιομηχανίας το κόστος παύσης της παραγωγής λόγω βλάβης σε αντλία είναι απαγορευτικό ενώ στην περίπτωση του κτιρίου γραφείων οι επιπτώσεις στους εργαζομένους είναι αναπόφευκτα αρνητικές. Προκειμένου να διασφαλιστούμε σε κάθε εφαρμογή όπου δεν μπορούμε να διανοηθούμε αντλία χαλασμένη χωρίς άμεση κάλυψη, συνιστάται η εγκατάσταση εφεδρικών αντλιών οι οποίες εξασφαλίζουν την απρόσκοπτη και ασφαλή λειτουργία της εγκατάστασης σε περίπτωση βλάβης της κύριας αντλίας.

Τα αντλητικά συγκροτήματα μεταβλητής ταχύτητας περιστροφής εμφανίζουν πολύ χαμηλότερο κόστος απώλειας παραγωγής σε σχέση με τα συμβατικά, αφού από τη μία λειτουργούν σε ηπιότερες συνθήκες λειτουργίας (μειωμένη ταχύτητα περιστροφής για μεγάλα χρονικά διαστήματα) και από την άλλη έχουν ομαλότερη εκκίνηση και σταμάτημα.

C_d: Κόστος απόρριψης, διάθεσης.

Ουσιαστικά κρίνεται περισσότερο ο εκάστοτε κατασκευαστής αντλιών για το κόστος απόρριψης, παρά ο τελικός χρήστης. Να αναφέρουμε ότι υπάρχει πρότυπο περιβαλλοντικής διαχείρισης, το ISO EN 14001, που σκοπό έχει να βοηθήσει τους κατασκευαστές να ανακυκλώνουν τα άχρηστα υλικά κατά την παραγωγή μειώνοντας έτσι το κόστος απόρριψης.

5.3 Παράδειγμα υπολογισμού του κόστους κύκλου ζωής συστήματος αντλιών μεταβλητής ταχύτητας περιστροφής.

Όπως αναφέραμε πιο πάνω παίρνοντας το άθροισμα των επιμέρους συντελεστών (C_{ic}, C_{in}, C_e, C_o, C_{env}, C_m, C_s, C_d) έχουμε το ζητούμενο LCC για την διάρκεια ζωής ενός αντλητικού συστήματος που τυπικά ανέρχεται από 10 έως 20 έτη.

Για τον κάθε αναλυτή κάποιοι παράγοντες θα έχουν μεγαλύτερη βαρύτητα από άλλους που πιθανόν να θεωρούνται αμελητέοι. Για αυτό τον λόγο από την αρχή τονίσαμε ότι είναι σημαντικό η ανάλυση να γίνεται για την κάθε περίπτωση ξεχωριστά και η μαθηματική εξίσωση να προσαρμόζεται ανάλογα. Για τους σκοπούς του παραδείγματος, θα πάρουμε μόνο τους πιο σημαντικούς και εύκολα μετρήσιμους από αυτούς τους παράγοντες. Για το παράδειγμα μας το κόστος κύκλου ζωής δίνεται από την πιο κάτω απλουστευμένη εξίσωση:

$$\mathbf{LCC = C_{ic} + C_e + C_m}$$

Ένα πολυτελές ξενοδοχειακό συγκρότημα εν όψει των Ολυμπιακών Αγώνων Αθήνα 2004, προέβη σε ριζική ανακαίνιση των συστημάτων ψύξης- θέρμανσης και

στα δύο συγκροτήματά του [12]. Το συγκεκριμένο έργο απαιτούσε αντλίες με αυτόματη μεταβολή στροφών (inverter) προκειμένου να εξασφαλιστεί η μέγιστη εξοικονόμηση ενέργειας σε συνδυασμό με την πλήρη άνεση του χρήστη.

Οι αρχικοί υπολογισμοί έγιναν λαμβάνοντας υπόψη ότι το κόστος αγοράς αντλιών με inverter θα ήταν σχεδόν διπλάσιο από το κόστος των αντλιών σταθερής ταχύτητας. Οι υπολογισμοί έδειξαν ότι η επιλογή αντλιών με inverter θα είχε σαν αποτέλεσμα την εξοικονόμηση ενέργειας κατά 40%. Η επένδυση στο σύνολο της περιγράφεται ως εξής:

- 16 ώρες λειτουργίας ανά ημέρα
- 250 ημέρες λειτουργίας ετησίως
- κύκλος ζωής 10 ετών (περίοδος υπολογισμού)

Βασιζόμενοι σε αυτά τα στοιχεία ο υπολογισμός του κόστους κύκλου ζωής και στις δυο πιθανές λύσεις φαίνεται στον πιο κάτω πίνακα (σχήμα 4.3).

ΤΥΠΟΣ ΑΝΤΛΙΩΝ		ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ	ΜΕΤΑΒΑΛΛΟΜΕΝΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ
ΜΕΣΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΙΣΧΥΟΣ	kW	658	437
ΩΡΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΗΜΕΡΗΣΙΩΣ	ΩΡΕΣ	16	16
ΗΜΕΡΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΕΤΗΣΙΩΣ	ΗΜΕΡΕΣ	250	250
ΠΕΡΙΟΔΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ	ΕΤΗ	10	10
ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	kWh	26.320.000	17.480.000
ΤΙΜΗ kWh	€/kWh	0,07	0,07
ΚΟΣΤΟΣ ΑΓΟΡΑΣ ΑΝΤΛΙΩΝ	€	107.500,00	205.000,00
ΚΟΣΤΟΣ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ	€	10.000,00	10.000,00
ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΚΟΣΤΟΣ	€	1.842.400,00	1.223.600,00
ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ	**€**	**1.959.900,00**	**1.438.600,00**

Σχήμα 5.3. Ανάλυση του κόστους κύκλου ζωής για τα δύο συστήματα.

Από τον παραπάνω πίνακα φαίνεται ότι η εξοικονόμηση χρημάτων από τη μειωμένη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας που προκύπτει από τη χρήση inverter ανέρχεται σε €618.800 (€1.842.400 - €1.223.600) που μεταφράζεται σε εξοικονόμηση €61.880 ετησίως.

Έτσι, το επιπλέον κόστος των €97.500 για την αγορά των ακριβότερων αντλιών αποσβένεται σε 1,5 περίπου χρόνο. Επιπρόσθετα, εφόσον αποσβεστεί το αρχικό επιπλέον κόστος, ο τελικός χρήστης κερδίζει ακόμη €525.980 στο υπόλοιπο διάστημα του κύκλου ζωής (10 χρόνια) από τη μειωμένη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας.

Αναλύοντας το συνολικό κόστος κύκλου ζωής των αντλιών είναι φανερό ότι η αρχικά ασύμφορη λύση (λαμβάνοντας υπόψη μόνο την τιμή αγοράς), είναι κατά 36% πιο συμφέρουσα από την άλλη. Αυτό αποτελεί απτό παράδειγμα για του πόσο μπορεί το αρχικό κόστος να μας παραπλανήσει και του πόσο απαραίτητη είναι η ανάλυση του Κόστους Κύκλου Ζωής των αντλιών.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η ανάλυση του παραδείγματος είχε καθαρά οικονομική πτυχή, ενώ αξιολογώντας μια πιθανή λύση θα πρέπει να λαμβάνουμε υπόψη μας πολύ περισσότερους παράγοντες. Στο πιο πάνω παράδειγμα η κατά πολύ μειωμένη κατανάλωση ενέργειας έχει σαν αποτέλεσμα σημαντικά μειωμένες εκπομπές ρύπων στην ατμόσφαιρα με όλα τα θετικά συνεπακόλουθα. Επιπλέον με την επιλογή αντλιών με μετατροπέα συχνότητας προσφέρουμε στον τελικό χρήστη πλήρη άνεση διατηρώντας σταθερή αναλογική πίεση.

5.4 Συμπεράσματα

Η χρήση συστημάτων μεταβλητών στροφών στη λειτουργία αντλητικών συγκροτημάτων είναι στις μέρες μας μια ώριμη τεχνολογία, που υπό συνθήκες είναι σε θέση να εφαρμοστεί στην παραγωγή, σε όλα τα είδη αντλιών και να παράγει μεγάλα οφέλη στο χρήστη.

Τα οφέλη αυτά, δεν επικεντρώνονται μόνο στην μεγάλη εξοικονόμηση ενέργειας που μπορούν να πετύχουν τα συστήματα αυτά (από 30 μέχρι και 90% [1]), αλλά περιλαμβάνουν επίσης και άλλα σημαντικά οφέλη όπως, η αύξηση της

αξιοπιστίας του συστήματος (λιγότερες φθορές και μικρότερη συντήρηση) και ο απλούστερος έλεγχος των διαδικασιών.

Παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματα αυτών των συστημάτων, μέχρι σήμερα η χρήση τους είναι σχετικά περιορισμένη. Έτσι, σε μεγάλο ποσοστό εξακολουθούν να χρησιμοποιούνται οι παραδοσιακές μέθοδοι ελέγχου της παροχής, ενώ συναντώνται και αρκετά παραδείγματα μη σωστής εφαρμογής της κίνησης μεταβλητής ταχύτητας, που οδηγούν σε κατασκευή μη αποδοτικών αλλά και ακριβών εγκαταστάσεων.

Για την αποφυγή τέτοιων δυσμενών και ασύμφορων κατασκευών, θα πρέπει κατά την ανάλυση ή το σχεδιασμό ενός αντλητικού συστήματος, να καθοριστούν πρώτα οι απαιτήσεις της διαδικασίας, στη συνέχεια να εκτιμηθεί το κόστος επένδυσης κεφαλαίου και έπειτα να επιλεγεί ο τρόπος ελέγχου του συστήματος, ο οποίος σε συνδυασμό με τις χαρακτηριστικές καμπύλες της αντλίας, θα ελαχιστοποιήσει το κόστος λειτουργίας του συστήματος.

5.5 Προτάσεις για μελλοντική μελέτη

Σε γενικές γραμμές τα αντλητικά συστήματα με μεταβλητή ταχύτητα περιστροφής είναι σε θέση να ελένξουν αποτελεσματικά τις έντονες αλλαγές στην διακινούμενη παροχή.

Στις εφαρμογές τους για την κυκλοφορία υγρών σε κάθε είδους κλειστά συστήματα, μειώνουν σε πολύ μεγάλο ποσοστό τη λειτουργική δαπάνη σε σύγκριση με τις παραδοσιακές μεθόδους ελέγχου. Έτσι, η επιλογή συστημάτων μεταβλητής ταχύτητας για την υλοποίηση τέτοιων εφαρμογών (λειτουργία κυκλοφορητή), ή η αντικατάσταση σε υφιστάμενες εφαρμογές των συμβατικών αντλιών με αντίστοιχες μεταβλητών στροφών, είναι η πλέον ενδεδειγμένη λύση, η οποία θα προσφέρει σημαντικά οφέλη τόσο σε οικονομικό όσο και σε λειτουργικό επίπεδο.

Από την άλλη, σε ανοιχτά συστήματα με σημαντική αύξηση στο γαιωδετικό ύψος, απαιτείται πρόσθετη προσοχή κατά την εφαρμογή της λύσης της μεταβλητής ταχύτητας περιστροφής για την ρύθμιση της απαιτούμενης παροχής. Έτσι, αφού αναλυθούν προσεχτικά οι απαιτήσεις του συστήματος θα πρέπει να ληφθεί μέριμνα ώστε να αποφευχθεί η λειτουργία του αντλητικού συστήματος με χαμηλή απόδοση και σε επικίνδυνα χαμήλες τιμές της διακινούμενης παροχής.

Συνοψίζοντας τα παραπάνω, μπορούμε να καταλήξουμε στο συμπέρασμα ότι η ολοένα και πιο επιτακτική ανάγκη για εξοικονόμιση ενέργειας, σε συνδιασμό με την συνεχή ανάπτυξη της τεχνολογίας των κινητήρων και των ηλεκτρονικών συστημάτων ελέγχου, οδηγεί στην χρήση αντλιών μεταβλητής ταχύτητας σε ολοένα και περισσότερες εφαρμογές, όπου απαιτείται έλεγχος της διακινούμενης παροχής.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. British Pump Manufacturers Association, “Variable Speed Driven Pumps Best Practice Guide”, Brussels, Belgium.

2. Robert Asdal, “The Time Has Come:Pump Systems Do Matter”, PUMPS & SYSTEMS, 40 NOVEMBER 2007, www.pump-zone.com.

3. Παπαντώνης Δ. Ε., ΄΄Υδροδυναμικές μηχανές Αντλίες- Υδροστρόβιλοι’’, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα 1995.

4. Παπαντώνης Δ. Ε., “Υδροδυναμικές εγκαταστάσεις”, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα 1998.

5. Μαυρούδης Μ. Ι., “Αντλίες και Σωληνώσεις”, εκδόσεις Σταμούλης, Αθήνα 2000.

6. Βασιλείου Ε., “Ανάλυση Κόστους Κύκλου Ζωής (LCC) Αντλητικών Συγκροτημάτων”, e.vassiliou@mavromatis.com.cy.

7. Μποζατζίδης Χρήστος, “Βελτιστοποίηση κόστους κύκλου ζωής αντλιών μέσω ηλεκτρονικού ελέγχου στροφών”, 4th Maintenance Forum.

8. Χριστοφοράκης Παναγιώτης, “Η Εξοικονόμηση Ενέργειας Με Αριθμούς, WILO HELLAS ABEE”.

9. Μποζατζίδης Χρήστος, “Ενεργειακός Έλεγχος Αντλιών σε εγκαταστάσεις θέρμανσης- ψύξης”, ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ASHRAE ΕΚΔΗΛΩΣΗ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΕΝΗΜΕΡΩΣΗΣ, 18 ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΥ 2006.

10. Μποζατζίδης Χρήστος, “Εξοικονόμηση ενέργειας σε αντλίες”, ΗΜΕΡΙΔΑ ΚΑΠΕ ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑ ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΟΥΜΕΝΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΣΤΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ

11. Σέμψης Λάμπρος Μεταπτυχιακή εργασία, “Μελέτη του φαινομένου της σπηλαίωσης σε φυγοκεντρική αντλία”, Επιβλέπων καθηγητής Δημήτριος Ε.Παπαντώνης, ΑΘΗΝΑ 2007

12. Μελέτη εφαρμογής του ΑΣΤΗΡ ΠΑΛΛΑΣ ΒΟΥΛΙΑΓΜΕΝΗ ΑΞΕ, Π.Γ. ΚΑΜΑΡΙΝΟΣ και ΛΔΚ ΣΥΜΒΟΥΛΟΙ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΙΑΚΩΝ ΕΡΓΩΝ ΕΠΕ, ΔΕΛΤΙΟ ΠΑΝΕΛΛΗΝΙΟΥ ΣΥΛΛΟΓΟΥ ΔΙΠΛΩΜΑΤΟΥΧΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ, Απρίλιος 2007.

13. Nelson E. W. P.E.: “Understanding Pump Cavitation”, Published in:Chemical Processing, Date published:1/2/1999.