

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	σελ. 2
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : Πληροφορίες για τα έδρανα	
1.1 Γενικές πληροφορίες για τα έδρανα	σελ. 3-4
1.2 Σκοπός και είδη εδράνων	σελ. 5-7
1.3 Χαρακτηριστικά εδράνων κυλίσεως και είδη	σελ. 8-9
1.4 Διάρκεια ζωής των εδράνων	σελ. 10-13
1.5 Παράγοντες που προκαλούν φθορά στα έδρανα κυλίσεως	σελ. 14-15
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : Αστοχία εδράνων λόγω φαινομένου EDM	
2.1 Εμφάνιση EDM ρευμάτων στα έδρανα	σελ. 16-17
2.2 Μηχανισμοί αστοχίας εδράνων λόγω ρεύματος	σελ. 18-20
2.3 Ενδεικτικό αστοχίας – Τάση	σελ. 21-23
2.4 Ενδεικτικό αστοχίας – Τιμή του ρεύματος	σελ. 24
2.5 Ενδεικτικό αστοχίας – Επιφάνεια επαφής του Εδράνου	σελ. 25-26
2.6 Πυκνότητα ρεύματος εδράνου και ελάττωση διάρκειας ζωής αυτού	σελ. 27-29
2.7 Επιρροή των μεταβλητών του συστήματος κίνησης στο ηλεκτροστατικό ρεύμα εδράνου	σελ. 30
2.7.1 Επιρροή των μεταβλητών του κινητήρα στο ηλεκτροστατικό ρεύμα εδράνου	σελ. 31-33
2.7.2 Επιρροή των μεταβλητών του οδηγού στο ηλεκτροστατικό ρεύμα εδράνου	σελ. 34-45
2.8 Πρόβλεψη διάρκειας ζωής των εδράνων με ESIM	σελ. 46-48

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Τα έδρανα κάθε μορφής αποτελούν πολύ σημαντικό τμήμα της μηχανολογίας και είσαι σοφό να μελετούμε τα ζητήματα αστοχίας τους.

Στην παρούσα εργασία θα δούμε κάποια στοιχεία πειραμάτων και μελετών που έχουν γίνει αναφορικά με την επίδραση του διαφεύγοντος και του ηλεκτροστατικού ρεύματος στα έδρανα κινητήρων Υψηλής Τάσης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ

Πληροφορίες για τα έδρανα

1.1 Γενικές πληροφορίες για τα έδρανα

Έδρανο στη μηχανολογία λέγεται το στοιχείο μιας μηχανής όπου στηρίζεται ένας άξονας και σκοπεύει στη μεταβίβαση προς το έδαφος ή προς άλλες κατασκευές του φορτίου που εφαρμόζεται σε αυτόν. Τα έδρανα εν γένει χρησιμεύουν σαν «υποδοχείς» των αξόνων και των ατράκτων, ενώ επιτρέπουν τη σχετική κίνηση μεταξύ δύο κομματιών προς μία ή περισσότερες κατευθύνσεις με την ελάχιστη τριβή και παράλληλα αποτρέπουν την κίνηση προς την κατεύθυνση του εφαρμοζόμενου φορτίου.

Τα έδρανα ή τριβείς αποτελούν φορείς στήριξης και οδήγησης κινούμενων μηχανολογικών μερών, όπως είναι οι άξονες και οι άτρακτοι. Τα έδρανα, λοιπόν, παραλαμβάνουν τις δυνάμεις που αναπτύσσονται κατά τη λειτουργία των μηχανών και τις μεταφέρουν στα σταθερά τους μέρη όπως τα θεμέλια, τα κιβώτια μειωτήρων κλπ.

Τα έδρανα λιπαίνονται για να διατηρούνται όσο το δυνατόν πιο χαμηλά οι απώλειες τριβών και οι θερμοκρασίες. Το μέγεθος της τριβής εμφανίζεται είτε ως τριβή κίνησης (που εμποδίζει την αντίθετης κατεύθυνσης σχετική κίνηση δύο επιφανειών), είτε ως τριβή ακινησίας στην περίπτωση που το εμπόδιο της τριβής είναι τέτοιου μεγέθους που καθιστά αδύνατη την κίνηση.

Στην περίπτωση της τριβής κίνησης εμφανίζονται τρεις καταστάσεις τριβής. Η ξηρή τριβή με ή χωρίς ενδιάμεσα υλικά, κατά την οποία τα στερεά σώματα έρχονται σε άμεση επαφή ή πάνω στις επιφάνειές τους βρίσκεται στρώση ξένων σωμάτων ή στερεών λιπαντικών σωμάτων. Η υγρή τριβή κατά την οποία οι δύο τριβόμενες επιφάνειες δεν έρχονται απευθείας σε επαφή αλλά μεσολαβεί ένα στρώμα φέροντος υγρού και μέσω του ιξώδους του δημιουργείται τριβή. Τέλος, υπάρχει η μικτή τριβή η οποία δημιουργείται όταν υπάρχει εν μέρει τριβή στερεού σώματος και εν μέρει υγρού.

1.2 Σκοπός και είδη εδράνων

Σκοπός των εδράνων γενικά είναι να στηρίζουν τις ατράκτους, τους άξονες και γενικά οποιαδήποτε άλλα περιστρεφόμενα ή ταλαντευόμενα στοιχεία μηχανών. Από τις δυνάμεις και ροπές φορτίσεως των στηριζόμενων στοιχείων δημιουργούνται στα έδρανα εγκάρσιες και αξονικές δυνάμεις στηρίξεως. Όταν ένα έδρανο παραλαμβάνει μόνο εγκάρσιες δυνάμεις, τότε ονομάζεται εγκάρσιο έδρανο. Όταν παραλαμβάνει μόνο αξονικές, τότε ονομάζεται αξονικό ή ωστικό έδρανο.

Τα έδρανα χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες:

- (α) Στα έδρανα **ολίσθησης** ή «**κουζινέτα**» (στην περίπτωση που αποτελούνται από δύο χωριστά τεμάχια) και
- (β) Στα **έδρανα κύλισης** ή «**ρουλεμάν**».

Εκείνο το τμήμα ενός στοιχείου που στηρίζεται σε ένα έδρανο (συνήθως κάποιος άξονας) ονομάζεται στροφέας. Ένα έδρανο ολίσθησης αποτελείται από το σώμα, το κάλυμμα, τον τριβέα, το σύστημα λίπανσης και το σύστημα στεγανότητας για τη διατήρηση του λιπαντικού μέσα στο έδρανο. Στα έδρανα ολίσθησης ο στροφέας περιστρέφεται ή ολισθαίνει μέσα στον τριβέα (συνήθως ένα κέλυφος ή περίβλημα). Ανάμεσα στο στροφέα και τον τριβέα υπάρχει το λιπαντικό υλικό που ελαττώνει την τριβή(ολίσθησης) που αναπτύσσεται κατά την περιστροφή του στροφέα και τη φθορά, το οποίο υλικό που μπορεί να είναι στερεό, υγρό ή αέριο. Αντίθετα, στα έδρανα κύλισης όπου αναπτύσσεται τριβή κύλισης, επιτυγχάνεται περιστροφή του στροφέα ως προς τον εξωτερικό

δακτύλιο του εδράνου με την κύλιση των στοιχείων κύλισης.



Σχήμα 1.1: (α) Έδρανο ολίσθησης (β) έδρανο κύλισης

Γενικά τα έδρανα κύλισης προτιμώνται:

- Για εδράσεις με κανονικές απαιτήσεις και κατά δυνατόν ασφαλείς και χωρίς συνθήκες λειτουργιάς. Π.χ. εργαλειομηχανές, κιβώτια μειωτήρων, κινητήρες, οχήματα, ανεμιστήρες, αντλίες, στοιχεία μεταφορικών μηχανών και παρόμοια.
- Για εδράσεις που πρέπει να εργάζονται σε λίγες στροφές με μικρές τριβές και να ξεκινούν με υψηλό φορτίο όπως άγκιστρα γερανών, περιστρεφόμενοι πύργοι και παρόμοια. Για έσφαιρα έδρανα ο συντελεστής τριβής είναι $\mu = 0,0008$ έως $0,0017$, έναντι των $\mu = 0,14$ των εδράνων ολίσθησης. Εκκίνηση και στάση χωρίς φθορά.

Γενικά τα έδρανα ολίσθησης προτιμώνται:

- Για εδράσεις με πολλές στροφές, υψηλά φόρτια και μεγάλη διάρκεια ζωής π.χ. δρομείς συνεχούς λειτουργιάς όπως υδροστρόβιλοι, ατμοστρόβιλοι, γεννήτριες, φυγόκεντρες αντλίες, βαρέα έδρανα ατράκτων πλοίων και παρόμοιες περιπτώσεις δηλαδή εκεί όπου αποφασιστικό ρόλο παίζει η συνεχής, χωρίς φθορά, λειτουργία στην περιοχή της υγρής τριβής.
- Για εδράσεις με μικρές απαιτήσεις π.χ. ανυψωτικές και αγροτικές μηχανές, οικιακές συσκευές.
- Για εδράσεις οι οποίες σε στάση ή σε λίγες στροφές δέχονται ήσυχες κρούσεις και κραδασμούς π.χ. διατηρητικές μηχανές, πρέσες, κλπ.

Το μεγαλύτερο ενδιαφέρον για την παρούσα διπλωματική αφορά τα έδρανα κυλίσεως , για τα οποία θα γίνει εκτενέστερη αναφορά παρακάτω.

1.3 Χαρακτηριστικά εδράνων κυλίσεως και είδη

Τα έδρανα κύλισης γενικά αποτελούνται από δύο δακτυλίους ή δίσκους εσωτερικό και στο εξωτερικό, διαμορφωμένοι έτσι ώστε ανάμεσα τους να οδηγούνται στοιχεία κύλισης. Ο εσωτερικός δακτύλιος στερεώνεται πάνω στην άτρακτο, ενώ ο εξωτερικός(δακτύλιο της έδρας) στηρίζεται πάνω στη λεία επιφάνεια της βάσης του εδράνου. Τα στοιχεία κυλίσεως μπορούν να έχουν μορφή σφαίρας, κυλίνδρου, βαρελοειδούς κυλίνδρου, κόλουρου κώνου, βαρελοειδούς κόλουρου κώνου ή βελόνας. Έτσι διακρίνουμε, ανάλογα με τη μορφή των στοιχείων κυλίσεως:

- Σφαιρικά ή ένσφαιρα έδρανα κύλισης
- Κυλινδρικά έδρανα κύλισης
- Κωνικά έδρανα κύλισης
- Βαρελοειδή έδρανα κύλισης
- Βελονοειδή έδρανα κύλισης

Σε όλα τα είδη, τα στοιχεία κύλισης συγκρατούνται μέσω ενός κλωβού σε ορισμένη απόσταση μεταξύ τους, που σε περίπτωση σφαιρικών σωμάτων κυλίσεως ονομάζεται και σφαιροθήκη.

Για τα ρουλεμάν, αυτό που παίζει ρόλο είναι η τριβή κύλισης. Προς το σκοπό αυτό υπολογίζεται ακόμα και η τριβή εκκίνησης κατά την αρχή της κίνησης και η τριβή τερματισμού στο τέλος της κίνησης. Στην τριβή της κίνησης των εδράνων κύλισης έχουμε δύο περιπτώσεις. Την τριβή κύλισης και την τριβή κυλινδραρίσματος. Η τριβή κύλισης εμφανίζεται όταν δύο ελαστικά σώματα (π.χ. από χάλυβα) κυλίνονται το ένα πάνω στο

άλλο. Μέσω της ελαστικής παραμόρφωσης δημιουργείται από το θεωρητικό σημείο επαφής ή τη γραμμή επαφής μια επιφανειακή επαφή, η οποία μάλιστα στην ελεύθερη κύλιση δύο στοιχείων μεταξύ τροχιών οδήγησης δίνει ένα ποσοστό ολίσθησης. Η τριβή κυλινδρίσματος εμφανίζεται όταν δύο σώματα κυλίνονται το ένα επί του άλλου, όπου υπάρχουν και ποσοστά κύλισης και ποσοστά ολίσθησης με βάση τους βασικούς νόμους της μηχανικής.

Τα απλά σφαιρικά ρουλεμάν (ή μονόσφαιρα) που είναι και αυτά που μας απασχολούν στην παρούσα εργασία έχουν πολλαπλές εφαρμογές. Είναι απλά στο σχεδιασμό, δεν διασπώνται και είναι κατάλληλα για υψηλές ή ακόμα και πολύ υψηλές ταχύτητες, είναι ανθεκτικά στη λειτουργία τους και απαιτούν μικρή συντήρηση. Μια ιδιαίτερη κατασκευαστική μορφή απλών ένσφαιρων ρουλεμάν αποτελούν τα έδρανα τεσσάρων σημείων. Αυτά μπορούν να δεχτούν τις δυνάμεις σε τέσσερα σημεία και έτσι επιτυγχάνουν μια υψηλή σταθερότητα. Στα έδρανα αυτά ο εσωτερικός δακτύλιος είναι χωρισμένος. Έτσι μπορούν να τοποθετηθούν πολλά σφαιρίδια, τα οποία σε συνδυασμό με τα ψηλά ερείσματα των δακτυλίων προσδίδουν στα ρουλεμάν αυτά μεγάλη ικανότητα έδρασης. Τα μονόσφαιρα ρουλεμάν είναι τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα ρουλεμάν και διατίθενται σε διάφορους τύπους και μεγέθη. Σχετικά με την αύλακα στους δακτυλίους, τα σφαιρικά ρουλεμάν διακρίνονται σε : μονόσφαιρα με βαθύ αυλάκι, μονόσφαιρα, λυόμενα, γωνιώδους επαφής, σταθερά μονόσφαιρα γωνιακής επαφής, σταθερά δίσφαιρα, γωνιώδους επαφής και δίσφαιρα αυτορυθμιζόμενα. Στο εξής όταν γίνεται λόγος για έδρανα κύλισης θα εννοούνται τα απλά ένσφαιρα έδρανα κύλισης.

1.4 Διάρκεια ζωής των εδράνων

Ένα έδρανο παραλαμβάνει εγκάρσιο F_r και αξονικό F_a φορτίο. Το ισοδύναμο φορτίο P είναι το υποθετικό φορτίο (σταθερό σε μέγεθος και κατεύθυνση) που δρα ακτινικά σε εγκάρσια έδρανα και αξονικά σε αξονικά έδρανα, και το οποίο αν εφαρμοσθεί θα έχει τα ίδια αποτελέσματα διάρκειας ζωής του εδράνου τα οποία θα έχουν τα πραγματικά φορτία F_r και F_a όταν δρουν ταυτόχρονα. Το ισοδύναμο φορτίο υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση :

$$P = X * F_r + Y * F_a \quad (\text{εξ.1})$$

Όπου X και Y είναι οι συντελεστές εγκάρσιου και αξονικού φορτίου αντίστοιχα, δίδονται σε αντίστοιχους καταλόγους και εξαρτώνται από τη μορφή του ρουλεμάν.

Ανάλογα με τον τρόπο επενέργειας του εγκάρσιου φορτίου ορίζονται:

1. Το περιστρεφόμενο φορτίο επί του εσωτερικού δακτυλίου του εδράνου που αναφέρεται σε :
 - άξονα περιστροφής ο οποίος περιστρέφεται μαζί με τον εσωτερικό δακτύλιο του εδράνου, ενώ ο εξωτερικός δακτύλιος και το φορτίο παραμένουν ακίνητα.
 - άξονα που μαζί με τον εσωτερικό δακτύλιο του εδράνου ακινητούν, ενώ ο εξωτερικός δακτύλιος μαζί με το φορτίο περιστρέφονται.

Για τις περιπτώσεις αυτές ισχύουν τύποι δυναμικού φορτίου. Το Δυναμικό φορτίο C (δυναμικός συντελεστής έδρασης) είναι το σταθερό φορτίο κάτω από την επίδραση του οποίου το έδρανο επιτυγχάνει μία ονομαστική διάρκεια ζωής 106 στροφών ή 500 ώρες λειτουργίας στις 33-1/3 RPM. Το φορτίο αυτό δίνεται στους καταλόγους των εδράνων.

2. Το σταθερό φορτίο επί του εσωτερικού δακτυλίου που αναφέρεται και ως φορτίο σημείου και αντιστοιχεί σε μια από τις παρακάτω περιπτώσεις :

- το έδρανο είναι ακίνητο και υφίσταται κρουστικά φορτία.
- το έδρανο παλινδρομεί με φορτίο μικρού εύρους γύρω από μια θέση.
- το έδρανο περιστρέφεται με φορτίο μικρής ταχύτητας και απαιτείται μεγάλη διάρκεια ζωής.
- το έδρανο κατά την περιστροφή του υφίσταται ισχυρά κρουστικά φορτία, πέραν των συνθηκών λειτουργίας.

Για τις περιπτώσεις αυτές ισχύουν τύποι στατικού φορτίου. Το Στατικό φορτίο C_0 είναι το καθαρά ακτινικό (για αξονικά έδρανα , αξονικό) φορτίο το οποίο προκαλεί σε ακίνητα έδρανα μια παραμένουσα παραμόρφωση ίση με 0,01% της διαμέτρου του στοιχείου κύλισης, στη θέση επαφής που καταπονείται περισσότερο μεταξύ του δακτυλίου και του στοιχείου κύλισης. Δίνεται και αυτό στους καταλόγους των εδράνων.

Η διάρκεια ζωής ενός εδράνου διατυπώνεται και ως «δυναμική ικανότητα έδρασης» και είναι ο αριθμός των περιστροφών, ή οι ώρες λειτουργίας που αντέχει το έδρανο χωρίς ένδειξη μιας κόπωσης του

υλικού κατασκευής είτε στους δακτυλίους, ή στους δίσκους, είτε στα σώματα κύλισης. Η κόπωση του υλικού μπορεί να φανεί στην αρχή με μορφή μικρών ρωγμών, οι οποίες αργότερα μπορούν να φτάσουν σε θρυμματισμούς. Η πείρα απέδειξε ότι έδρανα ίδιου μεγέθους κατασκευής και υλικού έχουν διαφορετική διάρκεια ζωής ακόμα και όταν λειτουργούν κάτω από απόλυτα ίδιες συνθήκες λειτουργίας.

Για τον υπολογισμό της διάρκειας ζωής ενός εδράνου καθορίζεται ένας δυναμικός συντελεστής έδρασης. Ο συντελεστής αυτός ορίζεται σαν η ισοδύναμη δύναμη φόρτισης κατά την οποία το 90% όλων των εδράνων φτάνουν σε μια ονομαστική διάρκεια ζωής $L_{10} \times 10^6$ περιστροφών (σε ώρες είναι $L_h = \frac{L_{10} \times 10^6}{60 \times n}$ με n =στροφές ανά λεπτό(RPM)) , δηλαδή αριθμός των στροφών που συμπληρώθηκαν από το 90% των εδράνων ίδιας σειράς πριν από τα πρώτα σημάδια της κόπωσης. Αν τώρα η εμφανιζόμενη κατά την εκάστοτε λειτουργία ισοδύναμη δύναμη φόρτισης είναι μικρότερη από το δυναμικό συντελεστή έδρασης τότε αυτό σημαίνει πως η διάρκεια ζωής του εδράνου θα ξεπεράσει το ένα εκατομμύριο περιστροφές. Η μέση διάρκεια ζωής L_m είναι ο αριθμός των στροφών, για τον οποίο το 50% ενός μεγάλου πλήθους εδράνων της ίδιας σειράς (ίδιο είδος και ίδιες διαστάσεις) εμφανίζουν σημεία κόπωσης , όταν λειτουργούν με τις ίδιες συνθήκες φόρτισης.

Πειραματικά, έχει βρεθεί ότι:
$$L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^K \quad (\text{εξ.2})$$

για ισοδύναμο φορτίο P και δυναμικό φορτίο C , με $k=3$ στην περίπτωση των σφαιρικών ρουλεμάν.

Η μέση διάρκεια ζωής των εδράνων κυλίσεως είναι περίπου πενταπλάσια της ονομαστικής διάρκειας ζωής. Από το γεγονός αυτό φαίνεται, ότι η διασπορά των πειραματικών αποτελεσμάτων για τη διάρκεια ζωής των εδράνων είναι πολύ μεγάλη. Η πραγματική διάρκεια ζωής ενός εδράνου μπορεί επομένως να είναι πολλαπλάσια της ονομαστικής.

1.5 Παράγοντες που προκαλούν φθορά στα έδρανα κυλίσεως

Ο χρόνος λειτουργίας των εδράνων κυλίσεως εξαρτάται από έναν αριθμό παραγόντων, οι σημαντικότεροι από τους οποίους είναι ο τρόπος κατασκευής, ο τρόπος μεταφοράς, ο τρόπος αποθήκευσης, ο τρόπος εγκατάστασης και τέλος ο τρόπος λειτουργίας του εδράνου. Παρακάτω μια συνοπτική ανάλυση των παραγόντων αυτών :

- Ο παράγοντας της κατασκευής περιλαμβάνει την ανομοιογένεια των υλικών καθώς επίσης και τις κακές ανοχές της κατασκευής.
- Ο παράγοντας της μεταφοράς και της αποθήκευσης περιλαμβάνει το κακό πακετάρισμα και τους κραδασμούς κατά τη μεταφορά και την αποθήκευση.
- Ο παράγοντας της εγκατάστασης περιλαμβάνει την παραμόρφωση του εδράνου, τον κακό τρόπο φόρτισης, τις κακές ανοχές και τα σφάλματα ευθυγράμμισης.
- Ο παράγοντας της λειτουργίας περιλαμβάνει την υπερφόρτιση, την κακή λίπανση, την παρουσία σκόνης, την παρουσία χημικών αερίων, την υγρασία, την υπερθέρμανση αλλά και το διαφεύγον ηλεκτρικό και ηλεκτροστατικό ρεύμα.

Οι παραπάνω παράγοντες συναρτήσεως του χρόνου οδηγούν στην καταστροφή των εδράνων κύλισης. Τα αίτια καταστροφής των εδράνων κύλισης είναι :

- Η φθορά

- Η μακροχρόνια λειτουργία
- Η διάβρωση
- Η παραμόρφωση
- Τα σπασίματα στα στοιχεία κυλίσεως
- Οι ρωγμές στους δακτυλίους των εδράνων
- Η υπερθέρμανση

Σε περίπτωση βλάβης το ρουλεμάν δεν επισκευάζεται αλλά αντικαθίσταται ολόκληρο. Οι βλάβες αυτές εμφανίζονται είτε στον εξωτερικό ή στον εσωτερικό δακτύλιο, είτε στον κλωβό ή τέλος στα στοιχεία κυλίσεως.



Σήμα 1.4: τύποι βλαβών σε ένσφαιρο ρουλεμάν

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ

Αστοχία εδράνων λόγω φαινομένου EDM

2.1 Εμφάνιση EDM ρευμάτων στα έδρανα

Τα τελευταία χρόνια, η τροφοδοσία των επαγωγικών κινητήρων από μονάδες μεταβλητής συχνότητας έχει γίνει πολύ συχνή. Παρόλο που οι επαγωγικοί κινητήρες είναι γερές κατασκευές, τα έδρανα αντιμετωπίζουν επιπλέον κινδύνους αστοχίας λόγω ύπαρξης ρεύματος σε αυτά. Το ρεύμα στα έδρανα ήταν γνωστό και συνηθισμένο φαινόμενο στους κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος. Είχε γίνει αντιληπτό πως η αιτία ήταν οι μαγνητικές ανωμαλίες στην κατασκευή του κινητήρα, οι οποίες οδηγούσαν σε παραγωγή καταστροφικών ρευμάτων στα έδρανα.

Η έρευνα γύρω από το ρεύμα εδράνων, έχει αρχίσει από το 1920 από τον Alger. Μέχρι σήμερα έχουν γίνει πολλές μελέτες με πιο πρόσφατη συνεισφορά αυτή των Costello και Lawson. Τελευταία, μελετάται η επιρροή των μονάδων PWM (pulse width modulation) στους κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος, καθώς επίσης και των μετατροπών BJT (bipolar junction transistor) και IGBT (insulated gate bipolar transistor) που παρουσιάζουν ρεύματα εδράνων.

Δύο είναι τα κύρια σημεία στη μελέτη :

- 1) Υπό ποιες συνθήκες τάσης διασπάται το μονωτικό φίλτρο λαδιού.
- 2) Κατά πόσο αυτές οι συνθήκες και οι αντίστοιχες πυκνότητες ρεύματος επηρεάζουν το χρόνο ζωής των εδράνων.

Έχει μεγάλο ενδιαφέρον να ασχοληθούμε με τη σύνδεση των μετατροπέων PWM και του ρεύματος εδράνων. Σε αντίθεση με τις συνήθεις επιδράσεις που συναντώνται σε ημιτονοειδώς κινούμενα μηχανήματα, οι PWM μετατροπείς διεγείρουν την πυκνωτική σύζευξη μεταξύ ρότορα και στάτορα. Αυτή η σύζευξη συνδυαζόμενη με τα υψηλής συχνότητας ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του εδράνου, επιτρέπει την τάση στον άξονα του κινητήρα να φτάνει στιγμιαία σε δυναμικά ακόμα και 20 φορές μεγαλύτερα από αυτά που έχουν παρατηρηθεί σε ημιτονοειδείς λειτουργίες.

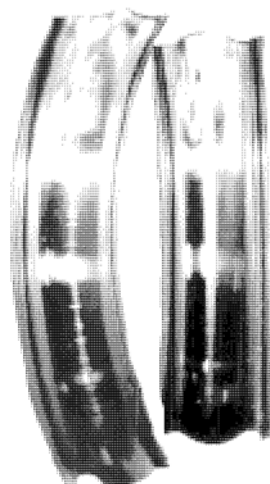
Το ρεύμα που προκαλείται από την τάση του άξονα του κινητήρα είναι περιορισμένο λόγω της αντίστασης του εδράνου. Καθώς η ταχύτητα του κινητήρα αυξάνεται, η αντίσταση του εδράνου φθάνει σε τιμές της κλίμακας των megaohm (MΩ). Γνωρίζουμε πως όσο αυξάνεται η ταχύτητα δημιουργείται ένα στρώμα λαδιού γύρω από τα σφαιρίδια του εδράνου, το οποίο λειτουργεί σαν σύνορο ανάμεσα στα σφαιρίδια και τον δακτύλιο , με εξαίρεση τη στιγμιαία επαφή τους σε κάποια σημεία λόγω τραχύτητας.

2.2 Μηχανισμοί αστοχίας εδράνων λόγω ρεύματος

Όπως είδαμε παραπάνω , οι αστοχίες των εδράνων αποδίδονται σε παραδοσιακούς μηχανικούς και θερμικούς μηχανισμούς ή σε επαγόμενα ρεύματα εδράνων. Οι μηχανικοί μηχανισμοί αστοχίας παράγονται από υπερβολική δόνηση, ενώ οι θερμικές αστοχίες είναι αποτέλεσμα υπερφορτώσεων οι οποίες αυξάνουν την θερμοκρασία των εδράνων και μειώνουν την διάρκεια ζωής αυτών. Τα επαγόμενα ρεύματα είναι αποτέλεσμα του σχεδιασμού της μηχανής ή της εφαρμογής της.

Οι μηχανές έχουν μαγνητικές ασυμμετρίες που παράγουν ημιτονοειδή αξονική τάση σε όλη την επιφάνεια του άξονα του ρότορα. Το επαγόμενο ρεύμα εδράνων δεν υφίσταται, ούτε αυτό ούτε η μηχανική φθορά που δημιουργεί, εάν η τάση είναι μικρότερη από την κρίσιμη τάση θραύσης V_{th} η οποία απαιτείται για την φθορά του μονωτικού φίλτρου λαδιού (ενδεικτικά 0,2 έως 1 volt σε συχνότητα μικρότερη των 60 Hz ημιτονοειδούς λειτουργίας). Μικρά εδρανικά ρεύματα παράγονται όταν η τάση στον άξονα είναι ελάχιστα μεγαλύτερη από την V_{th} και προκαλεί χημικές αλλαγές στη σύσταση των λιπαντικών (γράσο) χαμηλής ανθεκτικότητας και αντίστασης, και εν τέλει μειώνεται η διάρκεια ζωής λόγω διάβρωσης με αυλακώσεις. Η υψηλή τάση στον άξονα παράγει καταστροφικές τιμές ρευμάτων ηλεκτροδιάβρωσης EDM , λόγω του ότι τα φίλτρα λαδιού λειτουργούν ως πυκνωτές σε υψηλής αντίστασης λιπαντικά και φορτίζονται σε επίπεδα ανοικτού κυκλώματος. Όταν εφάπτονται τα σημεία επαφής, λόγω τραχύτητας, των σφαιρών και του δακτυλίου, το ηλεκτρικό πεδίο του φίλτρου λαδιού αυξάνεται οδηγώντας

σε ρήξη με υψηλά ρεύματα αποφόρτισης που δημιουργούν τοπικά αυξημένες θερμοκρασίες του δακτυλίου και εν συνεχεία σε τηγμένα κοιλώματα. Με αυτό τον τρόπο καταλήγουμε σε φθορές όπως αυτές του σχήματος 2.1



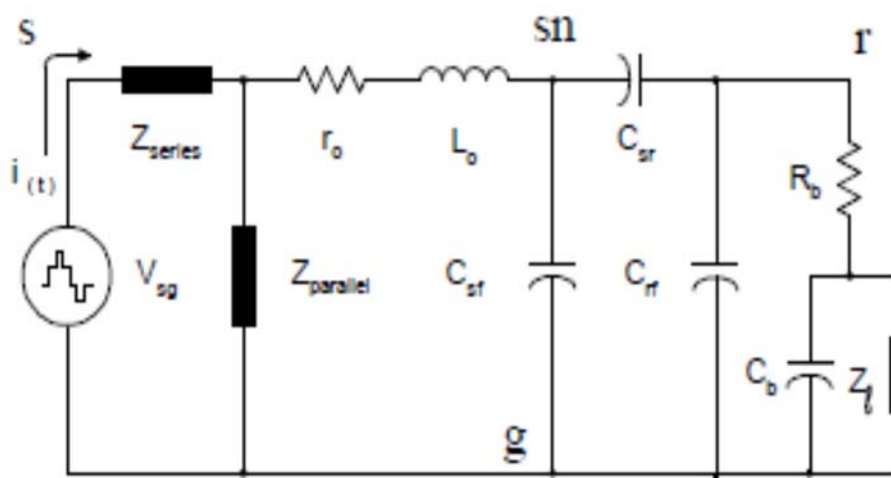
Σχήμα 2.1: Ραβδώσεις σε έδρανο κινητήρα εναλλασσόμενου ρεύματος

Οι μικρές μηχανές μπορούν τυπικά να υποστηρίξουν τάσεις στον άξονα μικρότερες του V_{th} , ενώ οι μεγάλες μπορούν να μειώσουν τις τιμές της EDM με την βοήθεια λιπαντικών με αυξημένο V_{th} .

Όλες οι μηχανές με ρότορες κινούμενους με μάντες ή ιονισμένο αέρα είναι γνωστό ότι φορτίζουν ηλεκτροστατικά την χωρητικότητα του εδράνου Cb και είναι πιθανό να οδηγήσουν σε καταστροφικά ρεύματα ηλεκτροδιάβρωσης.

Αυτές που κινούνται με PWM κινητήρα είναι γνωστό ότι φυσικώς φορτίζουν την χωρητικότητα του εδράνου (Cb) διαμέσου της χωρητικής ένωσης του ρότορα με τον στάτορα. Η τάση ανάμεσα στη γείωση και το

ρότορα καθορίζεται από τον διαιρετή τάσης ανάμεσα στο C_{sr} (παράλληλη σύνδεση του ρότορα με το C_{rf} και το C_b) και την ουδέτερα φορτισμένη τάση ανάμεσα στη γείωση και το στάτορα (V_{sng}), όπως φαίνεται στο σχήμα 2.2.

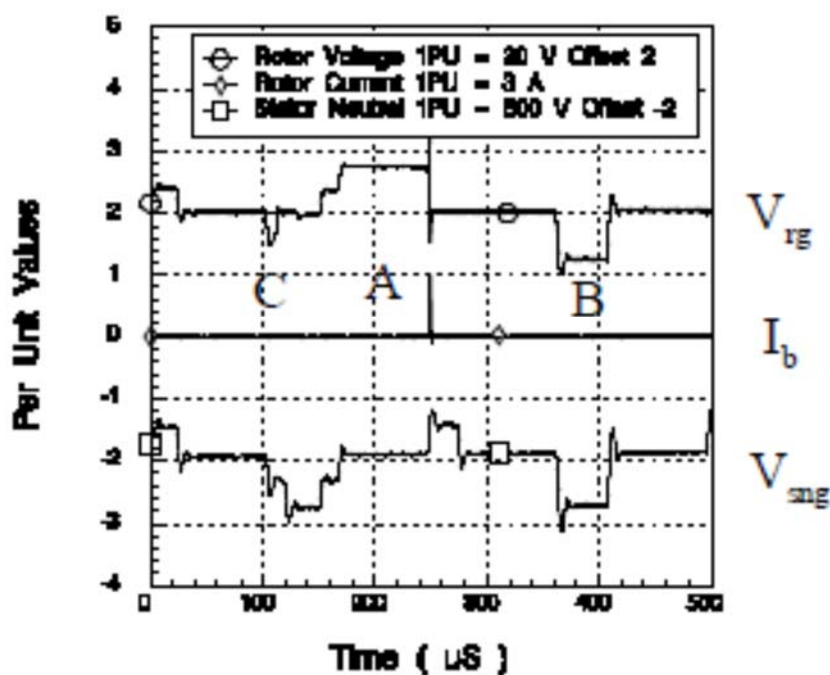


Σχήμα 2.2: Ισοδύναμο κύκλωμα κοινής λειτουργίας

Εφόσον οι τιμές του V_{sng} κινούνται γύρω από το 0, με κορυφές το $\frac{1}{2}$ της κύριας τάσης του κυκλώματος, η αξονική τάση του ρότορα φορτίζεται σε υψηλές τάσεις ανοικτού κυκλώματος, πριν η τραχύτητα του εδράνου οδηγήσει σε φθορά το φίλτρου λαδιού. Με υψηλές τιμές V_{sng} , οι PWM inverters παράγουν υψηλότερα ρεύματα ηλεκτροδιάβρωσης από αυτά που παρατηρήθηκαν με ημιτονοειδή λειτουργία. Επιπλέον η V_{sng} προκαλεί ρεύματα dv/dt στο φίλτρο λαδιού καθώς και στα σημεία τραχύτητας του εδράνου όταν αυτά εφάπτονται.

2.3 Ενδεικτικό αστοχίας - Τάση

Όταν η αξονική τάση σε όλο το μήκος του άξονα είναι μεγαλύτερη των 200 mVrms, όπου Vrms είναι η ενεργός ωφέλιμη τάση που εφαρμόζεται σε ένα κύκλωμα, σε ημιτονοειδούς κύματος διεγέρσεις τότε υπάρχει μαγνητική ασυμμετρία, η οποία δημιουργεί τοπικά ρεύματα στο έδρανο. Αντίστοιχα, ένδειξη μαγνητικής ασυμμετρίας στις μηχανές με PWM είναι η αξονική τάση του ρότορα. Στο σχήμα 2.3 θα δούμε τρία διαφορετικά φαινόμενα αξονικής τάσης στο έδρανο.



Σχήμα 2.3.: Παραδείγματα μηχανισμών που οδηγούν σε αστοχία λόγω αστοχίας λιπαντικού , ρευμάτων dv/dt και σημείων επαφής τραχύτητας

1. Περιοχή A

Η V_{sng} και το C_{sr} φορτίζουν το μεγάλης αντίστασης φίλτρο ορυκτέλαιου σχηματίζοντας C_b . Είναι σταθερή τιμή, η οποία καθορίζεται από το C_{sr} και το διαιρετή χωρητικότητας και θα εξηγήσουμε αργότερα πως προκύπτει. Στο τέλος της περιοχής A, η V_{sng} κυμαίνεται σε υψηλότερα επίπεδα προκαλώντας την αύξηση της V_{rg} . Το φίλτρο λαδιού καταρρέει στα 35 V_{rk} δημιουργώντας έναν 3 A_{pk} EDM παλμό. Το πάχος του φίλτρου είναι τυπικά από 0,2 μm έως 2 μm, ανάλογα με την θερμοκρασία του λαδιού. Όσο μεγαλύτερη η θερμοκρασία του εδράνου, άρα και του λαδιού, τόσο μικρότερο το πάχος του φίλτρου. Η αστοχία ενός φίλτρου με πάχος 2 μm στους 25 °C με 400 V/mil ορυκτέλαιου είναι 32 V_{rk}. Ωστόσο, οι τιμές της τάσης αστοχίας μειώνονται από 2 έως 6 volts όσο η μηχανή θερμαίνεται, σύμφωνα με την θεωρία.

2. Περιοχή B

Η V_{sng} και το C_{sr} φορτίζουν το C_b μέσω της δράσης του διαιρετή χωρητικότητας. Η σταθερή τιμή είναι μικρότερη της κρίσιμης τάσης 32 V_{rk}, επομένως δεν δημιουργείται ρεύμα ηλεκτροδιάβρωσης. Η V_{rg} αναπαράγεται από την δράση του διαιρέτη καθώς το V_{sng} επιστρέφει στο 0. Ο χρόνος ενεργοποίησης της συσκευής που μας δίνει ενέργεια καθορίζει το επίπεδο των dv/dt ρευμάτων. Η μέγιστη τιμή ρεύματος dv/dt των IGBT drives είναι μεταξύ 200 mA με 500 mA, ενώ των BJT drives είναι μικρότερη των 50 mA.

3. Περιοχή C

Το V_{sng} και το C_{sr} φορτίζουν το C_b μέσω της δράσης του διαιρέτη χωρητικότητας αλλά σε χαμηλότερες τιμές από την 35 V_{rk} που παρατηρήσαμε στην περιοχή A. Ακόμα πριν η V_{sng} αρχίσει να έχει ανοδική πορεία η σταθερή τιμή των 10 V_{rk} στιγμιαία πέφτει, ενδεικτικό αποφόρτισης λόγω ηλεκτροδιάβρωσης. Οι κυλιόμενες άκρες λόγω τραχύτητας μειώνουν την ανθεκτικότητα και το πάχος του φίλτρου λαδιού οδηγώντας σε V_{th} μικρότερη από την V_{th} του φίλτρου στην περιοχή A.

Η ύπαρξη περιοχών όπου η V_{rg} είναι 0 και η V_{sng} είναι σε υψηλά επίπεδα παρατηρείται λόγω του ότι τα σημεία επαφής λόγω τραχύτητας βραχυκυκλώνουν το C_b . Η συχνότητα με την οποία τα σημεία αυτά εφάπτονται στον εσωτερικό και εξωτερικό κύλινδρο είναι 33 μS με 100 μS σε χαμηλές ταχύτητες και 12 μS με 40 μS σε υψηλές ταχύτητες αντίστοιχα. Τα ρεύματα dv/dt της τάξης των 100 – 500 mA συμβαίνουν επίσης κατά την βραχυκύκλωση, λόγω τραχύτητας, του C_b όταν αλλάζει η V_{sng} .

2.4 Ενδεικτικό αστοχίας - Τιμή του ρεύματος

Είναι δύσκολο να οριοθετήσουμε το μέγιστο επιτρεπόμενο ρεύμα στο έδρανο χωρίς να γνωρίζουμε την επιφάνεια επαφής του διερχόμενου ρεύματος καθώς και τη σύσταση του λιπαντικού. Ένα μη επιστρεφόμενο έδρανο μπορεί να επιτρέψει τη διέλευση μεγάλης έντασης ρεύματος , ημιτονοειδούς μορφής , χωρίς να φθαρεί λόγω ευρύτερης επιφάνειας επαφής. Επίσης , οι μηχανισμοί αστοχίας λόγω του ρεύματος στο έδρανο εξαρτώνται από τον τύπο του λιπαντικού. Όπως είπαμε και παραπάνω , τα υψηλής αντίστασης λιπαντικά λειτουργούν σαν πυκνωτές με υψηλή τάση θραύσης , παράγουν ρεύματα ηλεκτροδιάβρωσης και ηλεκτρικά τόξα όταν αποφορτίζονται. Καλύτερη ανάλυση του φαινομένου γίνεται με βάση την πυκνότητα του ρεύματος εδράνου. Όταν έχουμε μικρά ρεύματα σε υψηλής αντίστασης λιπαντικά , μπορεί να μην υπάρχει ηλεκτρικό τόξο αλλά είναι πιθανή η παραγωγή τριβής. Η τριβή μαλακώνει το ατσάλι και μειώνει της σκληρότητα της επιφάνειας του. Τα χαμηλής αντίστασης λιπαντικά λιθίου δεν εμφανίζουν τάση θραύσης αλλά δρουν ως αντιστάτες. Ρεύματα των 189 mA rms (267 mA peak) προκαλούν αποσύνθεση του λιπαντικού σε μεταλλικό οξειδίο του λιθίου , οδηγώντας σε αυξημένη φθορά και αστοχία του εδράνου. Τιμές των 0,5 A rms επιταχύνουν την διάβρωση και την τριβή. Άρα , τα ρεύματα ηλεκτροδιάβρωσης και dv/dt θα πρέπει να αναλύονται όσον αφορά τις διαβρωτικές και καταστροφικές τους επιπτώσεις για μικρότερες από τη μέγιστη επιτρεπόμενη πυκνότητα ρεύματος εδράνου , η οποία είναι 267 mA peak.

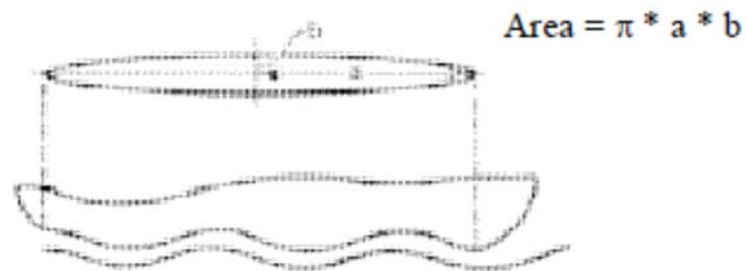
2.5 Ενδεικτικό αστοχίας – Επιφάνεια επαφής του εδράνου

Σε ένα στατικό έδρανο ή σε ένα περιστρεφόμενο με χαμηλή ταχύτητα έδρανο η επιφάνεια επαφής μεταξύ του κυλίνδρου και των σφαιριδίων είναι μεγαλύτερη , επιφάνεια αποτελούμενη κυρίως από ημιμεταλλικές επιφάνειες οι οποίες διαπερνούν το φίλτρο λαδιού. Μεγαλύτερες επιφάνειες επαφής στο έδρανο (mm^2) απαιτούν μεγαλύτερα επίπεδα ρευμάτων (A) σε αυτό προκειμένου να επιτευχθούν μεγάλες θερμοκρασίες , τέτοιες ώστε να λιώσει ή να προκαλέσει αυλακώσεις στον κύλινδρο.

Η μικρότερη δυνατή επιφάνεια επαφής συναντάται σε εφαρμογές με περιστρεφόμενα έδρανα με μηδενικό αξονικό φορτίο , όπου το βάρος του άξονα μόνο μπορεί να χωριστεί ισάριθμα σε ένα έως τρία σφαιρίδια. Επίσης, η πυκνότητα του ρεύματος στο έδρανο (A/mm^2) είναι από τους καταλληλότερους δείκτες για την διάρκεια ζωής του εδράνου όσον αφορά στην φθορά με αυλακώσεις και ραβδώσεις.

Η ακριβής μέτρηση της πραγματικής επιφάνειας επαφής ενός περιστρεφόμενου είναι δύσκολη , καθώς εξαρτάται από την τραχύτητα , τα τμήματα επαφής λόγω τραχύτητας και στο πάχος του φίλτρου λαδιού , το οποίο με τη σειρά του είναι συνάρτηση του ιξώδους και της θερμοκρασίας του λιπαντικού , της ταχύτητας και του φορτίου της μηχανής.

Το σχήμα 2.4 δείχνει ένα ισοδύναμο Ερτζιανής ελλειπτικής περιοχής υπό επιφανειακή τραχύτητα με συνδεόμενα σημεία. Η επιφάνεια επαφής υπολογίζεται με την βοήθεια μία σειράς εξισώσεων όπως ορίζει η θεωρία Ερτζιανών σημείων επαφής.



Σχήμα 2.4.: Ισοδύναμο Ερτζιανής ελλειπτικής περιοχής υπό επιφανειακή τραχύτητα με συνδεόμενα σημεία

2.6 Πυκνότητα ρεύματος εδράνου και ελάττωση διάρκειας ζωής αυτού

Η πυκνότητα ρεύματος στο έδρανο , σε μηχανές κινούμενες με ημιτονοειδές κύμα , έχει προταθεί προκειμένου να προβλέψουμε την διάρκεια ζωής του εδράνου (υπό την επήρεια του ρεύματος που το διαπερνά). Παρακάτω θα δούμε κάποιες από τις θεωρίες που έχουν αναπτυχθεί γύρω από την επιρροή της πυκνότητας του ρεύματος στην διάρκεια ζωής των εδράνων.

- Ο Haus καθόρισε ότι η διάρκεια ζωής ενός εδράνου είναι 50000 ώρες υπό την επήρεια $0,7 \text{ A/mm}^2$, ενώ όταν η πυκνότητα είναι διπλάσια $1,4 \text{ A/mm}^2$ η διάρκεια ζωής μειώνεται ραγδαίως σε 500 ώρες.
- Ο Krumpolz καθόρισε ότι $0,1 \text{ A/mm}^2$ είναι απολύτως ασφαλής πυκνότητα.
- Ο Kulda ορίζει ως ασφαλής πυκνότητα ρεύματος την $1,0 \text{ A/mm}^2$, την $1,4 \text{ A/mm}^2$ ως καταστροφική πυκνότητα σε ώρες λειτουργίας μεγαλύτερες των 500 ωρών και υπολογίζει ότι πυκνότητα μεγαλύτερη από $2,0 \text{ A/mm}^2$ καταστρέφει το έδρανο μετά από 5 ώρες λειτουργίας.
- Ο Endo ορίζει ως κρίσιμη πυκνότητα την $1,0 \text{ A/mm}^2$, ενώ βάση εμπειρίας πυκνότητα με τιμή $1,8 \text{ A/mm}^2$ καταστρέφει το έδρανο εντός 2 ωρών. Για πυκνότητες μεταξύ $0,15 \text{ A/mm}^2$ και $0,39 \text{ A/mm}^2$ έχει αποδειχτεί με τον χρόνο ότι είναι ασφαλές περιθώριο, καθώς δεν έχει παρατηρηθεί ίχνος αυλακώσεων.

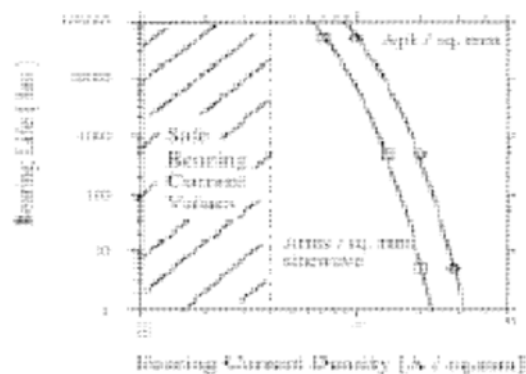
Ο έλεγχος του ρεύματος στο έδρανο , ιστορικά , γίνεται στις εξής συνθήκες:

- Συχνότητα 60 Hz
- Ημιτονοειδές κύμα
- RMS έντασης ρεύματα
- Καθορισμένη ταχύτητα περιστροφής του εδράνου
- Λιπαντικό υψηλής αντίστασης και ανθεκτικότητας

Επομένως , η διάρκεια ζωής των εδράνων βασίζεται στα καταστροφικά ρεύματα ηλεκτροδιάβρωσης , τα οποία δημιουργούνται λόγω της χωρητικής αποφόρτισης και των βραχυκυκλώσεων σε υψηλής αντίστασης λιπαντικά.

Αντλώντας πληροφορίες από το σχήμα 2.5 καταλήγουμε στην παρακάτω εξίσωση για τον υπολογισμό της διάρκειας ζωής ηλεκτρικού εδράνου.

$$ElectricalBearingLife [hr] = 7867204 \times 10^{-\left(2,17 \left(\frac{Apk}{mm^2}\right)\right)} \quad (\text{εξ.3})$$



Σχήμα 2.5.: Πυκνότητα ρεύματος εδράνου – Διάρκεια ζωής εδράνου

Η μετατροπή της πυκνότητας σε Amp peak/mm^2 απαιτείται ώστε να μπορούμε να υπολογίσουμε τις αντίστοιχες κρίσιμες τιμές πυκνότητας ρευμάτων ηλεκτροδιάβρωσης και dv/dt σε λειτουργία PWM. Και σε αυτήν την περίπτωση η διάρκεια ζωής των εδράνων εξαρτάται από την ταχύτητα, το φορτίο και την θερμοκρασία του λιπαντικού, η οποία θερμοκρασία όπως είδαμε είναι ανάλογη της πυκνότητας του ρεύματος που διαπερνά το έδρανο. Στις μηχανικές βιομηχανικές εφαρμογές η ελάχιστη απαίτηση για την διάρκεια ζωής των εδράνων κυμαίνεται από 20000 έως 40000 ώρες, ενώ η επιθυμητή διάρκεια ζωής κυμαίνεται από 40000 έως 60000 ώρες.

Τελικώς προτείνεται η μέγιστη επιτρεπόμενη πυκνότητας ρεύματος εδράνου σε λειτουργία PWM ως η τιμή 0,8 (Apeak/mm^2) προκειμένου να διασφαλίζεται ότι το ρεύμα στο έδρανο δεν επηρεάζει και δεν περιορίζει την διάρκεια ζωής αυτού.

2.7 Επιρροή των μεταβλητών του συστήματος κίνησης στο ηλεκτροστατικό ρεύμα εδράνου

Προκειμένου να αναλύσουμε και να κατανοήσουμε την επιρροή των ρευμάτων ηλεκτροδιάβρωσης σε μηχανικά συστήματα μετάδοσης κίνησης με λειτουργία PWM , θα πρέπει να εξετάσουμε ένα ισοδύναμο μοντέλο. Έστω το τριφασικό μοντέλο του σχήματος 2.2. Από αυτό παρατηρούμε ότι η ύπαρξη των ρευμάτων ηλεκτροδιάβρωσης εξαρτάται από :

- (1) Την πηγή της διέγερσης , η οποία παρέχεται από την τάση ανάμεσα στην πηγή και την γείωση V_{sg} .
- (2) Έναν μηχανισμό χωρητικότητας, πυκνωτή, στο μοντέλο μας αυτός είναι το C_{sr} .
- (3) Επαρκής αύξηση του φορτίου του ρότορα, μία τυχαία συγκυρία που εξαρτάται από το C_b .

Όλες οι παραπάνω συνθήκες πρέπει να ικανοποιούνται ταυτόχρονα προκειμένου να υπάρξει ηλεκτροδιαβρωτικό ρεύμα.

2.7.1 Επιρροή των μεταβλητών του κινητήρα στο ηλεκτροστατικό ρεύμα εδράνου

1. Μηχανικές μεταβλητές

Οι πιθανότητες ύπαρξης αξονικού φορτίου και ρεύματος στο έδρανο εξαρτάται όπως είπαμε από το Cb. Επιπλέον, η αντίσταση του εδράνου γίνεται χωρητική, πυκνωτική μόνο όταν υπάρχει φίλτρο λαδιού και λιπαντικό στις περιοχές όπου εφάπτονται τα σφαιρίδια ή οι κύλινδροι με τον δακτύλιο. Το minimum πάχος του φίλτρου δίνεται από την παρακάτω σχέση :

$$H^0 = \frac{2.65 \bar{U}^{-0.7} g^{0.54}}{\bar{Q}_z^{-0.13}} \quad (\text{εξ.4})$$

Στην εξίσωση (4), το \bar{U} είναι συνάρτηση της ταχύτητας και του ιξώδους του υγρού, g είναι συνάρτηση του συντελεστή του ιξώδους και του μέτρου ελαστικότητας και τέλος το \bar{Q} είναι η δύναμη ή το φορτίο που ασκείται στο σφαιρίδιο ή τον κύλινδρο. Η χωρητικότητα του εδράνου επομένως είναι συνάρτηση του ακτινωτού φορτίου, της ταχύτητας, της θερμοκρασίας T , της διηλεκτρικής δύναμης του λιπαντικού ϵ_r και του ιξώδους λ .

2. Ηλεκτρικές μεταβλητές – αντίσταση συστήματος

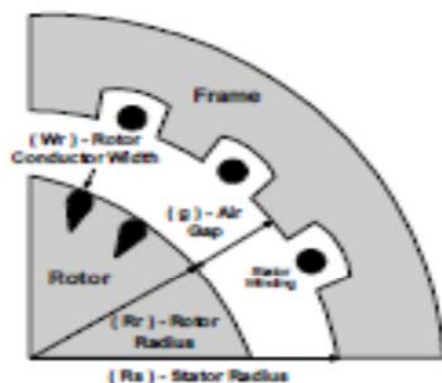
Η αντίσταση του συστήματος του σχήματος 2.2 αποτελείται από τον πυκνωτή C_{sf} , την περιέλιξη του στάτορα μηδενικής ακολουθίας και αντίστασης L_0 and R_0 , το C_{sr} , το C_{rf} και το C_b .

3. L_0 and R_0 : Αντίσταση απλής λειτουργίας ή μηδενικής ακολουθίας.

Η αντίσταση απλής λειτουργίας ή μηδενικής ακολουθίας της μηχανής ισούται με το ένα τρίτο ($1/3$) της αντίστασης του στάτορα σε σειρά με το $1/3$ της επαγωγής της διαρροής του στάτορα.

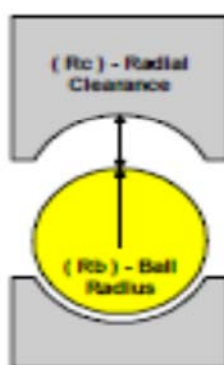
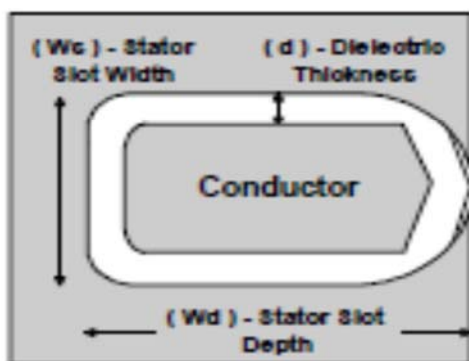
4. Πυκνωτές συστήματος

Βάσει πειραμάτων θα δούμε αποτελέσματα μέτρησης πυκνωτών για μεγάλο εύρος ιπποδύναμης θεωρώντας γεωμετρικά σχήματα ενός συνηθισμένου επαγωγικού κινητήρα με συνηθισμένο ένσφαιρο έδρανο. Το σχήμα 2.6 απεικονίζει κάθε έναν πυκνωτή ξεχωριστά , στο (a) C_{sf} και C_{rf} , στο (b) C_{sf} και στο (c) C_b . Το σχήμα 2.7 δείχνει τις υπολογισμένες τιμές για κάθε έναν από τους ανωτέρω σε μηχανές με λειτουργία από 5 – 900 hp. Αυτοί οι υπολογισμοί βασίστηκαν σε μοντέλο τετράχρονου επαγωγικού κινητήρα 460 Vac με ανάλογων σχετικών διαστάσεων εδράνου.



Capacitance	Value
Csf	11 nF
Crf	1.1 nF
Csr	100 pF
Cb	200 pF

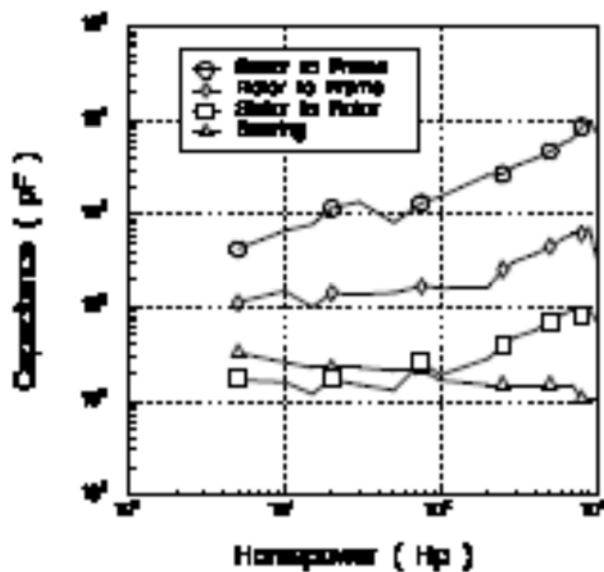
a) Stator to Rotor and Rotor to Frame Capacitance



b) Stator to Frame Capacitance

c) Bearing Capacitance

Σχήμα 2.6.: Περιγραφές φυσικών χωρητικότητων



Σχήμα 2.7: Τιμές χωρητικότητας μηχανών και εδράνων

2.7.2 Επιρροή των μεταβλητών του οδηγού στο ηλεκτροστατικό ρεύμα εδράνου

1. Μοντέλο συστήματος και ανάλυση

Με δεδομένη την απλή συνήθη λειτουργία του μοντέλου, μπορούμε να προχωρήσουμε σε ανάλυση των επιδράσεων που προκαλούν οι διάφορες παράμετροι του συστήματος στο αξονικό φορτίο και στα ρεύματα του εδράνου. Το μοντέλο του σχήματος 2 επιτρέπει την έρευνα των κοινών πηνίων ή μετασχηματιστών, αντιδραστήρων και μακρών καλωδίων κατά την μεταβολή των στοιχείων της αντίστασης σε σειρά και σε παράλληλη σύνδεση. Παρέχει, επίσης, τη δυνατότητα να εξετάσουμε τους τρόπους διαμόρφωσης του PWM, τον ρυθμό αύξησης της μηχανής ισχύος καθώς και τα επίπεδα της τάσης.

2. Σταθερό επίπεδο αξονικής τάσης

Με συχνότητες PWM μικρότερες από τις αντίστοιχες συχνότητες αντίστασης μηδενικής ακολουθίας του συστήματος, οι πυκνωτές διαιρούν το $V_{sn g}$ και ακολουθούν την παρακάτω αλγεβρική σχέση για το BVR :

$$BVR = \frac{Vrg}{Vsn g} = \frac{Csr}{(Csr + Cb + Crf)} \quad (\text{εξ.5})$$

Η εξίσωση (5) αν και απλή παρέχει πολύ βασικές πληροφορίες για την φόρτιση του εδράνου και τα φαινόμενα κατά την αποφόρτιση, προκειμένου να εξετάσουμε τις δυνατότητες βελτίωσης.

Η οριακή τάση V_{th} υπάρχει για κάθε τιμή πάχους του φίλτρου λαδιού για την οποία δεν έχουμε διηλεκτρική αστοχία ηλεκτροδιάβρωσης. Αυτό το όριο εξαρτάται από διάρκεια του παλμού και τα χαρακτηριστικά του λιπαντικού. Για παράδειγμα, όταν έχουμε διηλεκτρική δύναμη της τάξεως των 15 Vrk/μm και λιπαντικό με φίλτρο πάχους ανάμεσα σε 0.2 και 2 μm, η οριακή τάση κυμαίνεται μεταξύ 3 Vrk και 30 Vrk.

Η εξίσωση (5) εισηγείται ότι ένα μεγάλο C_b μειώνει το V_{rg} προκειμένου να διατηρήσει την τάση του εδράνου κάτω από την οριακή τάση V_{th} , η οποία είναι η μέγιστη υποστηρικτική τάση πριν να επέλθει διηλεκτρική αστοχία από ηλεκτροδιάβρωση. Με αυτόν τον τρόπο αυξάνει την σχετική διαπερατότητα του λιπαντικού.

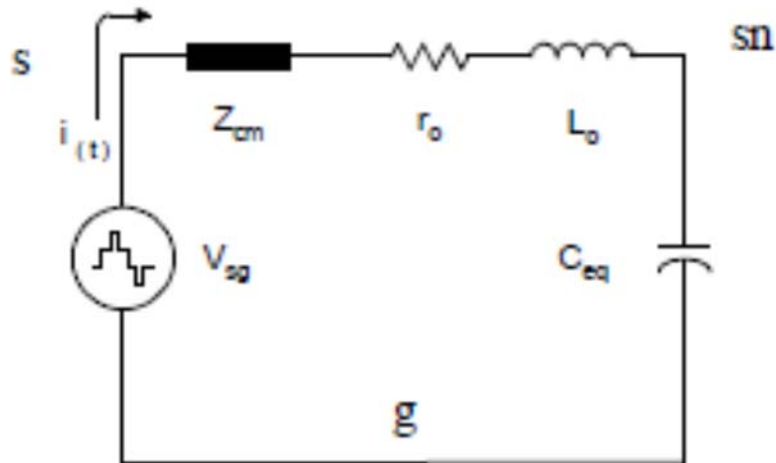
Αυτή η έκφραση δείχνει επίσης τον τρόπο με τον οποίο μία ηλεκτροστατικά προστατευμένη επαγωγική μηχανή ESIM μηδενίζει την πιθανότητα και δυνατότητα εμφάνισης και ανάπτυξης στατικής τάσης στον άξονα ή στο έδρανο. Έχοντας δηλαδή το C_{sr} ίσο με το 0 στην εξίσωση (5). Επιπροσθέτως, ο χωρητικός διαιρέτης τάσεως υποδεικνύει ότι ένα μονωμένο περίβλημα ή φράγμα μπορεί να επιδεινώσει την φόρτιση του εδράνου μέχρις ότου αυτό μειώσει το ενεργό C_b .

Στο σχήμα 2.3 βλέπουμε μία τυπική ακολουθία του V_{sng} , του ρεύματος εδράνου I_b και ίχνη του V_{rg} για μηχανές 15 ίππων. Το BVR υπολογίζεται διαιρώντας την αξονική τάση προς το V_{sng} σε ένα σημείο κατά το οποίο ο ρότορας της μηχανής εφάπτεται στο λιπαντικό, περιοχή A στο σχήμα.

Η μέτρηση βάσει πειραμάτων μας δίνει την τιμή 0.064, ενώ ο θεωρητικός υπολογισμός μας δίνει 0.074. Τα αποτελέσματα είναι πολύ κοντά.

3. Μία δεύτερη διάταξη μοντέλου

Το μοντέλο απλής και συνήθους λειτουργίας του σχήματος 2.2 είναι επαρκές στο να περιγράφει την πλειονότητα των παρατηρούμενων φαινομένων που σχετίζονται με την αξονική τάση και τα κοινά ρεύματα. Ωστόσο, η πολυπλοκότητα αυτού του μοντέλου συχνά επισκιάζει τα αίτια και τις επιπτώσεις στις τάσεις και τα ρεύματα του άξονα και των εδράνων κατά τη λειτουργία PWM μετατροπών πηγαίας τάσεως. Μία διάταξη μειωμένη, εάν στηθεί με το σωστό τρόπο, θα μπορούσε να έχει σαφές πλεονέκτημα απέναντι στο κύκλωμα του σχήματος 2.2. Για παράδειγμα, τα κοινά πηνία, οι αντιδραστήρες σειράς και τα φίλτρα εξόδου χρησιμοποιούνται συνήθως για να μειωθεί η ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή από PWM μετατροπείς πηγαίας τάσεως. Επίσης, πολλές εφαρμογές απαιτούν μεγάλα μήκη καλωδίων ανάμεσα στο μετατροπέα και την πηγή. Το μειωμένο μοντέλο του σχήματος 2.8 μας επιτρέπει την εύκολη αξιολόγηση και εκτίμηση της επίδρασης των επιμέρους στοιχείων στο V_{sn} της μηχανής.



Σχήμα 2.8: Μειωμένο μοντέλο κοινής λειτουργίας

Το μειωμένο μοντέλο του σχήματος 2.8 έχει ως γενική λύση την παρακάτω:

$$V_{sn g} = V_{sg} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 - \zeta^2}} e^{-\zeta \omega_n t} \sin(\omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} t + \psi) \right) \quad (\text{εξ.6})$$

$$i(t) = \frac{V_{sg}}{\sqrt{1 - \zeta^2} Z_0} e^{-\zeta \omega_n t} \sin(\omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} t) \quad (\text{εξ.7})$$

Όπου,

$$\omega_n = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_{eq}}}$$

$$\zeta = \frac{r_0}{2} \sqrt{\frac{C_{eq}}{L_0}}$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L_0}{C_{eq}}}$$

$$\psi = A \tan \left(\frac{\sqrt{1 - \zeta^2}}{\zeta} \right)$$

Στις παραπάνω σχέσεις, ω_n είναι η φυσική ταλάντωση (χωρίς απόσβεση), Z είναι ο ρυθμός απόσβεσης και Z_0 είναι η χαρακτηριστική σύνθετη αντίσταση.

Η ισοδύναμη χωρητικότητα C_{eq} ισοδυναμεί με :

Η χωρητικότητα της σύνδεσης στάτορα με frame C_{sf} είναι σε παράλληλη σύνδεση με (α) την χωρητικότητα στάτορα ρότορα C_{sr} και (β) την παράλληλη σύνδεση της χωρητικότητας ρότορα με frame C_{rf} με την χωρητικότητα του εδράνου C_b . (α) και (β) είναι συνδεδεμένα σε σειρά.

Συνοπτικά, είναι :

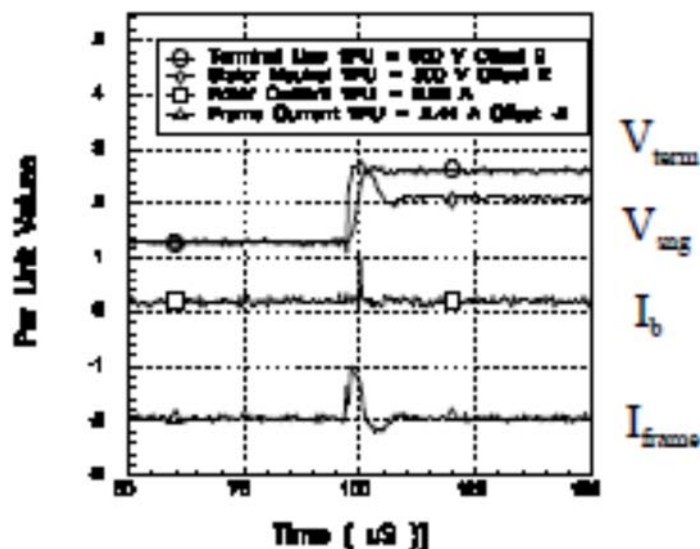
$$C_{sf} \parallel (C_{sr} + C_{rf} \parallel C_b)$$

Αυτή η διατύπωση του προβλήματος μας επιτρέπει επίσης μία εύκολη ανάλυση του χρόνου αύξησης του V_{sg} , την επίδραση της συχνότητας του PWM και την επίδραση των παραμέτρων του συστήματος στην απόσβεση της φυσικής ταλάντωσης ή της υπέρβασης αυτής. Αν ο χρόνος αύξησης ως την ευθεία γραμμή είναι ο μισός από το μισό χρόνο της ταλάντωσης τότε το ρεύμα της μηδενικής ακολουθίας μειώνεται δραματικά. Έτσι μειώνεται το ρεύμα dv/dt ανάμεσα στο έδρανο και το πλαίσιο. Επιπρόσθετα, η αύξηση της απλής λειτουργίας της επαγωγής - με την χρήση πηνίων και αντιδραστήρων σειράς - χωρίς να υπολογίζουμε

την επίδραση στην απόσβεση οδηγεί στην αύξηση του φορτίου του κυκλώματος. Όταν έχουμε μεγάλη τιμή φορτίου και μικρή συχνότητα μπορεί να επιτευχθεί συντονισμός με την κυματομορφή του μετατροπέα PWM.

4. Εκτίμηση του μειωμένου μοντέλου

Στο σχήμα 2.9 βλέπουμε τα αποτελέσματα ενός τυπικού πειράματος σε έναν IGBT PWM μετατροπέα τάσης σε επαγωγική μηχανή.



Σχήμα 2.9: Πειραματικά αποτελέσματα σε IGBT

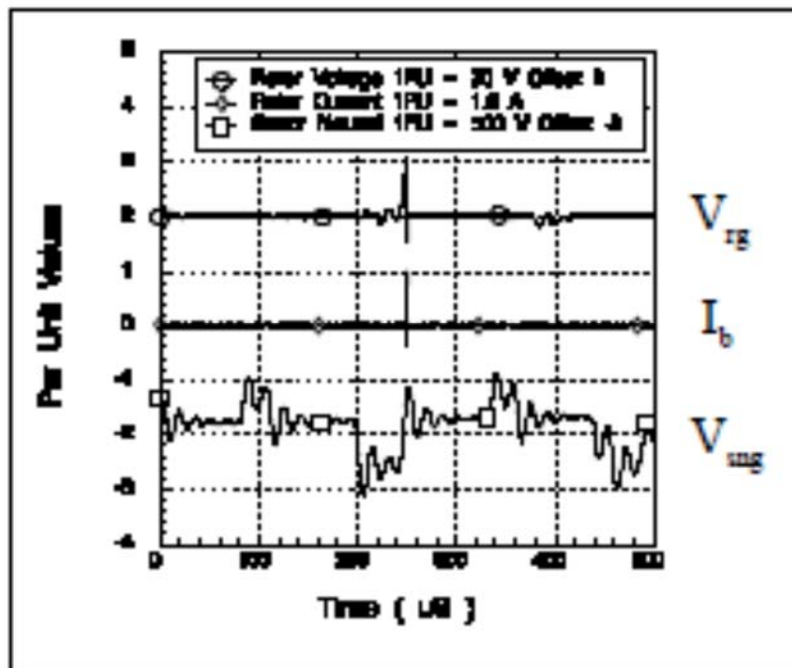
Η πάνω γραμμή μας δείχνει την τερματική τάση της μηχανής στη γείωση V_{term} και ακολουθεί η τάση V_{sng} . Η τερματική τάση εμφανίζεται ως ένα βήμα και η ουδέτερη τάση ανταποκρίνεται όπως σε κύκλωμα RLC. Η ταλάντωση του V_{sng} στα 100 kHz έχει ρυθμό απόσβεσης 0,21. Χρησιμοποιώντας το μειωμένο μοντέλο και τις C_{eq} , L_o και R_o μίας

μηχανής 15 ίππων, οι υπολογιζόμενες τιμές είναι 84,3 kHz και ρυθμός απόσβεσης ίσος με 0,26 αντίστοιχα. Το μειωμένο μοντέλο είναι ακριβές στον υπολογισμό της V_{sng} σε ρεύματα απλής λειτουργίας και μας προσφέρει ένα απλό σχέδιο για μελέτη, ανάλυση και εκτίμηση της σύνδεσης της πηγαίας τάσης με την φόρτιση του άξονα και του εδράνου.

5. Επίδραση των αντιδραστήρων σειράς και του μήκους καλωδίων

Η ανακάλυψη των μετατροπέων IGBT έφερε στο προσκήνιο το σημαντικό πρόβλημα του θορύβου κατά την απλή λειτουργία. Η τοποθέτηση κοινών πηνίων και μετασχηματιστών γίνεται μεταξύ της εξόδου του μετατροπέα και του κινητήρα προκειμένου να κερδίσουμε επιπρόσθετη αντίσταση στο ρεύμα απλής λειτουργίας χωρίς να επιβαρύνουμε να επηρεάζουμε το βασικό κύκλωμα. Άλλος τρόπος είναι η τοποθέτηση τριφασικού αντιδραστήρα σειράς αλλά με κόστος τη μειωμένη αρχική τάση της μηχανής.

Το σχήμα 2.10 δείχνει την ανταπόκριση του V_{sng} , V_{rg} και του ρεύματος του εδράνου I_b με απλό πηνίο 270 μH και 2,6 Ω τοποθετημένο ανάμεσα στον μετατροπέα και στον κινητήρα. Η τάση γείωσης ταλαντώνεται στη συχνότητα των 60 kHz με ρυθμό απόσβεσης 0,12. Χρησιμοποιώντας το μειωμένο μοντέλο οι υπολογιζόμενες τιμές είναι 62,7 kHz η συχνότητα και ο ρυθμός απόσβεσης είναι ο ίδιος 0,12.



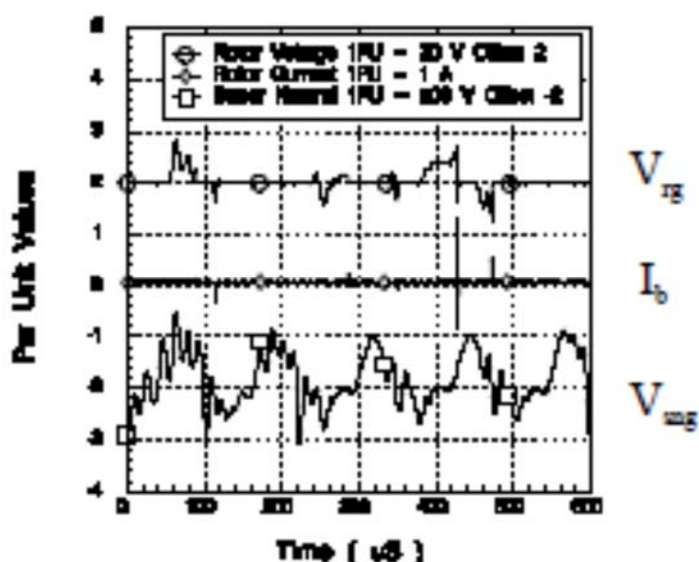
Σχήμα 2.10: Πειραματικά αποτελέσματα με κοινά πηνία

Αν τοποθετήσουμε το πηνίο προκειμένου να μειώσουμε το ρεύμα dv/dt επηρεάζονται ταυτόχρονα τα V_{sup} και V_{rg} . Η μειωμένη απόσβεση προκαλεί την τάση γείωσης να υπερβεί την σταθερή τιμή της στιγμιαία για κάθε εναλλαγή. Επίσης, παρέχει στο ρότορα την ευκαιρία να φορτίζεται όταν το λιπαντικό του εδράνου ξεθωριάζει και τα σημεία τραχύτητας εφάπτονται.

Για να εξετάσουμε τις επιδράσεις της μειωμένης απόσβεσης σε βάθος τοποθετήθηκε ένας τριφασικός αντιδραστήρας σε σειρά, με επαγωγική ηλεκτρική αντίσταση $600 \mu\text{H}$ σε απλή λειτουργία, ανάμεσα στον μετατροπέα και τον κινητήρα. Η υπολογισμένη συχνότητα της

ταλάντωσης και ο ρυθμός απόσβεσης του συστήματος ήταν 50,3 kHz και 0,0158 αντίστοιχα.

Αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα για τη μηχανή των 15 ίππων δείχνουν μια ελαφρώς αποσβεννυμένη ταλάντωση με συχνότητα 50 kHz , όπως βλέπουμε στο σχήμα 2.11.

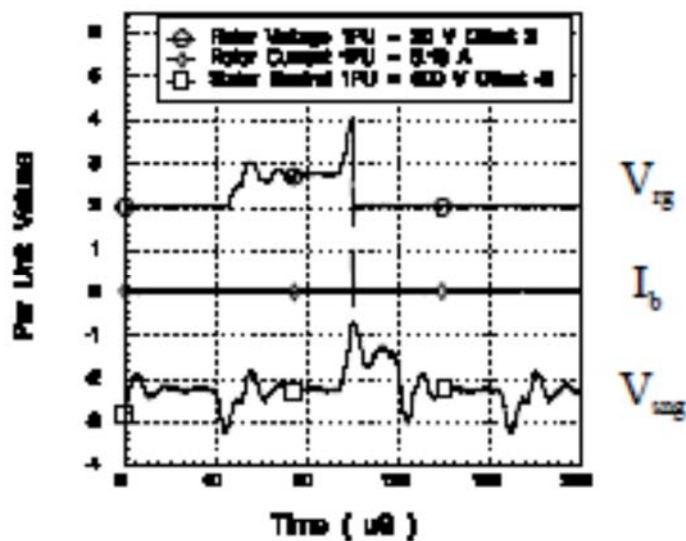


Σχήμα 2.11: Πειραματικά αποτελέσματα με κοινούς αντιδραστήρες

Η μείωση της απόσβεσης αυξάνει την πιθανότητα της φόρτισης του C_b . Επειδή η χωρητικότητα του συστήματος ποτέ δεν μπαίνει σε σταθερή κατάσταση φόρτισης σύμφωνα με τη συνάρτηση λειτουργίας , κάθε φορά που υπάρχει επαφή του σφαιριδίου του εδράνου με τον δακτύλιο παρά την ύπαρξη του λιπαντικού , η τοπολογία του συστήματος αλλάζει και ο καταμερισμός της τάσης διαφοροποιείται ανάλογα και αντίστοιχα

με την αλλαγή της επιμέρους αντίστασης. Συγκεκριμένα στη μηχανή των 15 ίππων η V_{sng} υπερβαίνει τα 590 Vpk , τιμή η οποία είναι μεγαλύτερη κατά 280 Vpk από το μισό της V_{bus} .

Το μήκος των καλωδίων έχει σημαντική επιρροή στο ρεύμα dv/dt και εξίσου σημαντική επιρροή στη δημιουργία και αύξηση της αξονικής τάσης και της αποφόρτισης του ρεύματος εδράνου. Στο σχήμα 2.12 εμφανίζεται το V_{sng} , το V_{rg} και το ρεύμα εδράνου για ένα καλώδιο μήκους 600 ft (περίπου 183 m).



Σχήμα 2.11: Πειραματικά αποτελέσματα με μεγάλου μήκους καλωδιώσεις

Στο εύρος των συχνοτήτων που μας ενδιαφέρει , το καλώδιο παρουσίασε ένα ισοδύναμο αντίστασης σε σειρά της τάξεως των 3,2 Ω και 80 μΗ , ενώ σε παράλληλη αντίσταση της τάξεως των 3,0 Ω (σε σειρά με

χωρητικότητα των 22 nF). Το ισοδύναμο Thevenin ισοδυναμεί με αντίσταση 10,9 Ω σε σειρά με 129 μH. Οι υπολογισμένες τιμές του μειωμένου μοντέλου του σχήματος 8, αποσβεννυμένη φυσική συχνότητα 71,7 kHz και ρυθμός απόσβεσης 0,18, είναι καλά συγκρίσιμες με τις πειραματικές τιμές που είναι 70,6 η συχνότητα και 0,19 ο ρυθμός απόσβεσης.

Η στιγμιαία ανταπόκριση του μεγάλου μήκους καλωδιακού συστήματος δείχνει ότι το V_{sn} φθάνει σε τιμές μεγαλύτερες των 600 V_{pk}, με ονομαστικά 630 V_{dc} bus. Το έδρανο διαπερνά το φίλτρο του λιπαντικού και φορτίζεται στα 25 V_{pk} μόλις πριν τη μέγιστη φόρτιση του V_{sn} . Όταν ο στάτορας ξεκινάει να φορτίζεται στη μέγιστη τιμή του, 600 V_{pk}, το V_{rg} αντιδρά με μία μικρή καθυστέρηση και επιτυγχάνεται σχεδόν 65 V_{pk} κορυφή πριν την επίτευξη της κορυφής των 3,2 A ηλεκτροδιαβρωτικού ρεύματος. Παρόμοια πειραματικά αποτελέσματα επιβεβαιώνουν ότι μεγαλύτερα από του φυσιολογικού επιπέδου αξονικά φορτία είναι πιθανά λόγω των καλωδιώσεων μεγάλου μήκους. Με βάση τα αποτελέσματα οι πυκνότητες του ρεύματος κυμαίνονται ανάμεσα στα 5,16 ως 2,48 A_{pk}/mm², που σημαίνει ότι είναι στο πεδίο εκείνο των πυκνοτήτων όπου μειώνεται η διάρκεια ζωής των εδράνων.

6. Επίδραση της τάσης V_{bus} , της διάρκειας του παλμού και των τεχνικών προσαρμογής

Πραγματοποιήθηκαν πειράματα σε κινητήρα 15 ίππων σε διάφορα επίπεδα τάσεων V_{bus} , συχνοτήτων και τεχνικών προσαρμογής. Τα αποτελέσματα έδειξαν την ύπαρξη αξονικών τάσεων και ρευμάτων στον άξονα για κάθε επίπεδο τάσεων , δηλαδή για κινητήρες 230 Vac , 460 Vac και 575 Vac , καθώς και για διάφορες στρατηγικές προσαρμογής. Η διάρκεια του παλμού πάντως καθορίζει την δημιουργία μίας μορφής αποφόρτισης EDM , αποφόρτιση λόγω κατάρρευσης του λιπαντικού.

Η διηλεκτρική ικανότητα ενός υλικού εξαρτάται από την διάρκεια του παλμού της τάσης που εφαρμόζεται. Μία έρευνα για την οριακή τάση για ηλεκτροδιάβρωση έδειξε ότι με 275 V_{bus} και διάρκεια παλμού 100 μs το φαινόμενο της ηλεκτροδιάβρωσης τελικώς μηδενίστηκε. Η τάση του ρότορα ήταν 10 V_{pk}. Αυξάνοντας την V_{bus} τόσο ώστε η τάση του ρότορα να αυξηθεί και να φτάσει τα 18 V_{pk} και συγκρίνοντας τις τιμές του ρεύματος EDM για συχνότητες 2 kHz και 8 kHz έδειξαν λειτουργία σε συχνότητα 2 kHz με αποφορτίσεις EDM 8 φορές περισσότερες.

2.8 Πρόβλεψη διάρκειας ζωής των εδράνων με ESIM

Η επιφάνεια επαφής των εδράνων μετρήθηκε για δύο διαφορετικές περιπτώσεις. Η πρώτη χωρίς αξονικό φορτίο (μόνο το βάρος του ρότορα) και η δεύτερη περίπτωση με βάρος 3 φορές αυτό του ρότορα. Η πυκνότητα του ρεύματος το εδράνου υπολογίστηκε με την χρήση των υπολογισμένων κορυφών των ρευμάτων EDM και dv/dt καθώς και της υπολογισμένης επιφάνειας επαφής. Η διάρκεια ζωής υπολογίστηκε από το σχήμα 2.5. Η ίδια διαδικασία ακολουθήθηκε για EDM και dv/dt ρεύματα με την χρήση ESIM.

Ο πίνακας 1 δείχνει ρεύματα dv/dt τα οποία δε μειώνουν την διάρκεια ζωής των εδράνων. Μη φορτισμένοι κινητήρες είναι πιο επιρρεπείς σε αστοχία λόγω ρευμάτων EDM από τους φορτισμένους κινητήρες. Ο υπολογισμός της διάρκειας ζωής δεν πρέπει να λαμβάνεται ως απόλυτα ακριβής καθώς δεν μας το επιτρέπει η δυσκολία της μέτρησης της επιφάνειας επαφής και το γεγονός ότι θεωρήσαμε ως χειρότερη πιθανή εκδοχή την επαφή του ενός εκ των σφαιριδίων του εδράνου. Η δύναμη μπορεί να διανεμηθεί σε 1 έως 3 σφαιρίδια του εδράνου, αυξάνοντας έτσι την επιφάνεια επαφής ενώ διανέμεται το ρεύμα ηλεκτροδιάβρωσης.

Οι πυκνότητες του ρεύματος ηλεκτροδιάβρωσης στα έδρανα όταν είναι ανάμεσα σε 0,6 και 0,8 A_{pk}/mm^2 δεν μειώνουν την διάρκεια ζωής του εδράνου. Η ακριβής πρόβλεψη της διάρκειας ζωής είναι δύσκολη λόγω της απότομης κλίσης της καμπύλης, για παράδειγμα από τα 0,8 έως 2,0 A_{pk}/mm^2 η διάρκεια ζωής του εδράνου μειώνεται κατακόρυφα. Επομένως κάποια πιθανά λάθη μικρής κλίμακας στον υπολογισμό των παραμέτρων μπορεί να μας δώσουν λανθασμένη εικόνα μεγάλης κλίμακας.

Στον πίνακα 1 βλέπουμε ότι το ESIM εμφανίζεται ως μία υποσχόμενη λύση όσον αφορά το ρεύμα στα έδρανα καθώς μας δείχνει ότι τα καταστροφικά ρεύματα ηλεκτροδιάβρωσης μηδενίζονται και τα ρεύματα dv/dt μειώνονται σε τιμές μικρότερες από 50 mA_{pk} . Επίσης αν τα dv/dt

ρεύματα είναι κάτω από το μέγιστο όριο των 267 mArk δεν αντιμετωπίζουμε πρόβλημα στις μικρού επιπέδου διαβρώσεις και τριβές. Έτσι , φορτισμένα ή μη φορτισμένα , τα έδρανα έχουν διάρκεια ζωής περίπου 100000 ώρες. Αυτό είναι δυνατό με την αντίστοιχη οριοθέτηση και προσοχή των μηχανικών παραμέτρων που καθορίζουν την διάρκεια ζωής των εδράνων.

Table 1. Calculated Bearing Life with PWM IGBT Drives and 15 hp Motor

Parameter	Units	STADARD AC MOTOR		ESIM MOTOR	
		Rotor Weight	3Times Rotor Weight	Rotor Weight	3 Times Rotor Weight
EDM Current	Apk	2.2	2.2	0	0
Contact Area	mm ²	0.62	1.29	0.62	1.29
Current Density	Apk/mm ²	3.5	1.7	0	0
Calculated Life	hrs	< 10	1,570	> 100,000	> 100,000
dv/dt Current	Apk	0.2 - 0.5	0.2 - 0.5	0.05	0.05
Contact Area	mm ²	0.62	1.29	0.62	1.29
Current Density	Apk/mm ²	0.32 - 0.8	0.15 - 0.38	0.08	0.04
Calculated Life	hrs	> 100,000	> 100,000	> 100,000	> 100,000

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Gregor Vidmar, Jurij Pfajfar , Dusan Agrez, Damijan Miljavec : ISSN 0033-2097, R. 89 NR 2b/2013
- [2] Jay Erdman, Russel J. Kerkman, Dave Schlegel, and Gary Skibinski : Effect of PWM Inverters on AC Motor Bearing Currents and Shaft Voltages
- [3] Doyle Busse, Jay Erdman, Russel J. Kerkman, Dave Schlegel, and Gary Skibinski : Bearing Currents and Their Relationship to PWM Drives
- [4] Hugh Boyanton : Bearing damage due to electrical discharge
- [5] Prashad, H., "Theoretical Analysis of Capacitive Effect of Roller Bearings on Repeated Starts and Stops of a Machine Under the Influence of Shaft Voltages", Journal of Tribology.
- [6] NEMA MG-1 Specification Part 31, Section IV , 1993
- [7] Ammann, C. , Reichert,K., Joho, R., Posedel, Z., "Shaft Voltages in Generators with Static Excitation Systems-Problems and Solutions", 1987 IEEE Power Eng. Society Summer Mtg.
- [8] Andreason, S. "Passage of Electrical Current thru Rolling Bearings", SKF Gothenburg
- [9] Harris,T. Rolling Bearing Analysis, Wiley, 1984
- [10] Prashad, H., "Theoretical Evaluation of Capacitance, Resistanace and their Effects on Performance of Hydrodynamic Journal Bearings , Journal of Tribology, Oct. 1990
- [11] Prashad, H. "Theoretical Analysis of the Effects of Instantaneous Charge Leakage On Roller Bearings Lubricated with High Resistivity Lubricants under the Influence of Electric Current" , Journal of Tribology Jan.1990.