



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**Διερεύνηση των εφαρμογών και της τεχνολογικής εξέλιξης
ηλεκτρομαγνητικών συστημάτων μετάδοσης ισχύος**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΓΚΕΛΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΤΣΟΛΑΚΗΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ

ΑΘΗΝΑ
ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ, 2021

Πίνακας περιεχομένων

1. Περίληψη	3
Υπογραφή καθηγητων	4
Εισαγωγή	5
2. Μαγνητική μετάδοση ισχύος	9
2.1. Εφαρμογές.....	9
2.2. Έρευνα και μελλοντικές εφαρμογές.....	23
2.3. Μέθοδοι παραγωγής.....	56
3. Ηλεκτρομαγνητική μετάδοση ταχυτήτων	58
3.1. Εφαρμογές.....	58
3.2. Έρευνα και μελλοντικές εφαρμογές.....	64
3.3. Μέθοδοι παραγωγής.....	77
4. Συγκριτική αξιολόγηση των μεταδόσεων ισχύος και συμπέρασμα.....	79
5.Βιβλιογραφία	80

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως στόχο την διερεύνηση των μεθόδων παραγωγής και των διαφόρων τοπολογιών και διατάξεων που χρησιμοποιούνται στα ηλεκτρομαγνητικά συστήματα μετάδοσης ισχύος (ΣΜΙ). Τα ηλεκτρομαγνητικά ΣΜΙ παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τα συμβατικά ΣΜΙ, όπως μειωμένο επίπεδο κραδασμών και θορύβου, χαμηλό κόστος συντήρησης και μεγαλύτερη αξιοπιστία λόγω της απουσίας επαφής μεταξύ των συνεργαζόμενων τμημάτων, κάτι που τα καθιστά κατάλληλα για πολλές εφαρμογές της βιομηχανίας. Ως εκ τούτου, τα τελευταία χρόνια προσελκύουν το ερευνητικό και το βιομηχανικό ενδιαφέρον. Στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας γίνεται μια εκτενής βιβλιογραφική ανασκόπηση των διαφόρων τοπολογιών που έχουν προταθεί και αναλύεται ο τρόπος λειτουργίας τους. Επιπλέον, παρουσιάζονται αναλυτικά οι μέθοδοι παραγωγής των ηλεκτρομαγνητικών ΣΜΙ και οι εφαρμογές τους.

Abstract

This thesis has the objective to broaden the production methods, the topologies and arrays used in electromagnetic gear power transmission systems (EMGPTS). The electromagnetic pts show decent advantages in comparison with traditional pts, like low vibrations, quiet operation, low cost of maintenance and great reliability due to contactless coupling, which enable them to be applied to the industry. Hence, in recent years electromagnetic pts attract research and industrial interest. In the context of this thesis an extensive bibliographic review is made through different topologies which have been proposed and their operation is analyzed. Also, production methods and applications of electromagnetic pts are presented.

Επιτηρητές	Υπογραφή
Τσολάκης Αντώνιος	
Ράπτης Κωνσταντίνος	
Μυλωνάς Γεώργιος	

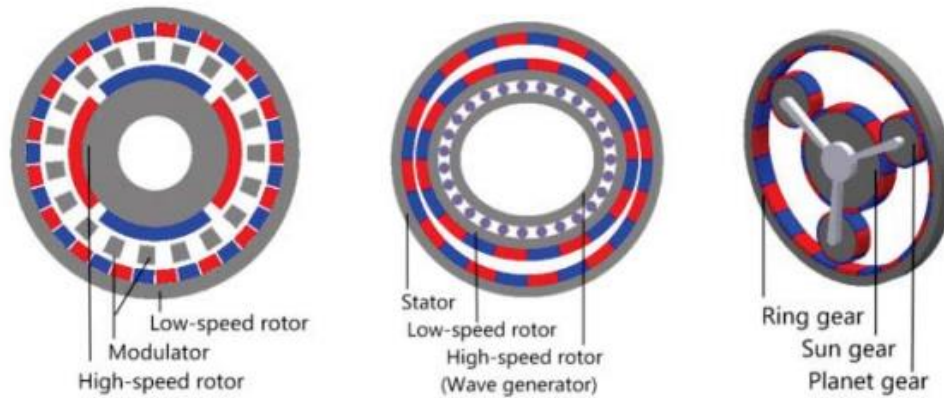
Εισαγωγή

Η μετάδοση ισχύος είναι μηχανική στις περισσότερες εφαρμογές και επιτυγχάνεται συνήθως με τη χρήση των κιβωτίων ταχυτήτων. Τα μηχανικά κιβώτια ταχυτήτων έχουν μεν υψηλή πυκνότητα ροπής, όμως εμφανίζουν τριβές στην επαφή που οδηγούν σε υπερβολική φθορά, υψηλές θερμοκρασίες στην επαφή που μειώνουν την απόδοση. Έτσι, η χρήση επαρκούς λίπανσης είναι απαραίτητη, η οποία οδηγεί σε υψηλά έξοδα συντήρησης. Επιπλέον, η απόδοση των συμβατικών οδοντωτών τροχών μειώνεται λόγω των υψηλών επιπέδων θορύβου και κραδασμών. Στις μέρες μας, ο φαινόμενος βαθμός απόδοσης είναι πιο κρίσιμος κατά το σχεδιασμό νέων συστημάτων για περιβαλλοντικούς και οικονομικούς λόγους. Με τη χρήση μαγνητικών / ηλεκτρομαγνητικών συστημάτων μετάδοσης ισχύος επιτυγχάνονται χαμηλότερα επίπεδα κραδασμών και θορύβου, ενώ δεν απαιτείται λίπανση, γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα καλύτερη απόδοση και χαμηλότερο κόστος συντήρησης.

Πιο συγκεκριμένα, τα μαγνητικά γρανάζια είναι νέοι τύποι οδοντωτών τροχών, που προσελκύουν την προσοχή της ερευνητικής κοινότητας και της βιομηχανίας λόγω της ικανότητάς τους να ξεπερνούν τα προβλήματα που αναφέρονται λεπτομερώς παρακάτω. Τα μαγνητικά γρανάζια δεν είναι τροχοί επαφής αλλά η μετάδοση ισχύος και ροπής επιτυγχάνεται με μαγνητικές δυνάμεις. Η τριβή, η φθορά και η κόπωση δεν υπάρχουν στα μαγνητικά γρανάζια, δεν απαιτείται λίπανση και μπορεί να χρησιμοποιηθούν ως προστατευτικός μηχανισμός έναντι υπερφόρτωσης. Μπορούν να λειτουργήσουν σε μεγάλη κλίμακα με εύρος θερμοκρασίας, από -270°C έως 350°C . Επιπλέον, η λειτουργία είναι αναστρέψιμη, με αποτέλεσμα η ίδια συσκευή, στην οποία είναι εγκατεστημένα, να μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως μειωτήρας στροφών και ως πολλαπλασιαστής [36]

Τα μαγνητικά γρανάζια (MG) προσελκύουν το ενδιαφέρον από τις αρχές του 20ού αιώνα με τους πρώτους σχεδιασμούς να είναι πολύ παρόμοιοι με τα συμβατικά μηχανικά γρανάζια με τους οδόντες των οδοντωτών τροχών να αντικαθίστανται με τα αντίστοιχα μαγνητικά [37, 38]. Ωστόσο, αυτοί οι σχεδιασμοί έλαβαν λίγη προσοχή, λόγω του χαμηλής επιτυχανόμενης πυκνότητας ροπής λόγω των διαθέσιμων υλικών μόνιμου μαγνήτη (PM) εκείνη την εποχή (δηλαδή SmCo_5) [89]. Το ενδιαφέρον ανανεώθηκε τη δεκαετία του 1980 με την ανάπτυξη του νεοδυμίου (NdFeB) χωρίς όμως αλλαγές στον σχεδιασμό τους, με αποτέλεσμα την κακή χρήση του PM. Γι' αυτό ποτέ δεν επιτεύχθηκε πυκνότητα ροπής αρκετά υψηλή για να ανταγωνιστεί τις παραδοσιακές μηχανικές εναλλακτικές λύσεις. [39, 40].

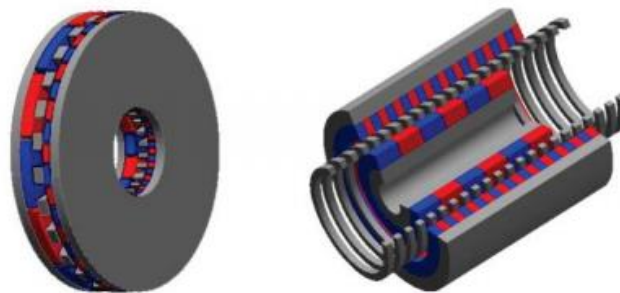
Πιο πρόσφατα, τρεις τύποι MG που μπορούν να θεωρηθούν σύγχρονοι καθώς έχουν πυκνότητα ροπής ίση με εκείνη των παραδοσιακών μηχανικών οδοντωτών τροχών ($50\text{-}150\text{ kNm/m}^3$ για ελικοειδή οδοντωτό τροχό [85] και $100\text{-}200\text{ kNm/m}^3$ για τροχούς με ευθείς οδόντες [90]). Αυτοί οι τύποι είναι οι “fieldflux modulator gear” (FMMG), harmonic gear και οι τύποι μαγνητικών πλανητικών συστημάτων (MPG) όπως φαίνεται στο σχήμα 1.



Εικόνα 1: Ομόκεντρος, Αρμονικός and Πλανητικός αοδοντωτός τροχός [36]

Ο κορυφαίος σχεδιασμός για MGs θεωρείται το ομόκεντρο μαγνητικό γρανάζι (CMG). Έχει υψηλές δυνατότητες μετάδοσης ροπής και μπορεί να επιτύχει πολύ μεγάλη πυκνότητα ροπής πάνω 100 kNm/m^3 [29].

Οι δυνατότητες της υψηλής ροπής του σχεδιασμού τους έχουν παρουσιαστεί αναλυτικά [36]. Το CMG εμπίπτει στην κατηγορία FFMG, δεδομένου ότι χρησιμοποιούν σιδηρομαγνητικά στο διάκενο μεταξύ των ροτόρων προκειμένου να ρυθμιστεί η μαγνητική ροή. Αυτός ο σχεδιασμός επέτρεψε την πλήρη αξιοποίηση όλου του PM υλικού και είχε ως αποτέλεσμα υψηλή πυκνότητα ροπής στην περιοχή 70-150 kNm/m^3 με σχετικά απλή σχεδιασμό. Στην, συνέχεια παρουσιάστηκαν δύο άλλες μορφές CMG, τα μοντέλα γραμμικού και αξονικού πεδίου [41], [42] όπως φαίνεται στο σχήμα 2



Εικόνα 2: Τύπου Δίσκου και Γραμμικός ομόκεντρος οδοντωτός τροχός (Τοπολογίες) [43]

Είναι γνωστά για την αποτελεσματικότητά τους, την υψηλή πυκνότητα ισχύος, την αξιοπιστία και την χαμηλή διάχυση θερμότητας [3]. Από άποψη ελέγχου, ταξινομούνται ως AC χωρίς ψήκτρες (BLAC) με ημιτονοειδές EMF ή DC χωρίς ψήκτρες (BLDC) τραπεζοειδές EMF [81]

Στη λειτουργία BLAC η πυκνότητα ροπής μεγιστοποιείται και ο παλμός ροπής ελαχιστοποιείται. Για να επιτευχθεί αυτό, η τρέχουσα κυματομορφή πρέπει να ελέγχεται με ακρίβεια, ως εκ τούτου ένας resolver ή ένας encoder για την ηλεκτρονική επικοινωνία [80].

Μια σύγχρονη μηχανή μόνιμου μαγνήτη μπορεί κανονικά να επιτύχει υψηλότερο συντελεστή ισχύος [37] [38], υψηλότερη πυκνότητα ροπής και υψηλότερη απόδοση από οποιαδήποτε άλλη τοπολογία μηχανών. Ένα υδρόψυκτο PM σύστημα μπορεί να επιτύχει συνεχή πυκνότητα ροπής άνω των 30 kNm/m^3 [94] [95].

Λειτουργία

Υπάρχουν δύο τρόποι λειτουργίας για αυτόν τον τύπο MG. Είτε κρατούνται οι σιδηρομαγνητικοί πόλοι ακίνητοι και οι εξωτερικοί και εσωτερικοί μαγνητικοί ρότορες είναι ελεύθεροι να περιστρέφονται, είτε οι σιδηρομαγνητικοί πόλοι επιτρέπεται να περιστρέφονται με έναν από τους δύο ρότορες να εδράζεται ακίνητος. Οι τρόποι λειτουργίας επηρεάζουν την πιθανή σχέση μετάδοσης και την κατεύθυνση περιστροφής. Ο αριθμός των σιδηρομαγνητικών τμημάτων και για τις τρεις τοπολογίες δίνεται από την σχέση:

$$n_e = p_l + p_h$$

Όπου n_e τα ζεύγη σιδηρομαγνητικών πόλων, p_l το μαγνητικό ζεύγος πόλων στην πλευρά χαμηλής ταχύτητας και p_h το μαγνητικό ζεύγος πόλων στην πλευρά υψηλής ταχύτητας

Ο λόγος μετάδοσης G_r , με τα σιδηρομαγνητικά τμήματα ακίνητα καθορίζεται στη συνέχεια από την σχέση:

$$G_r = \frac{p_l}{p_h} = -\frac{\omega_h}{\omega_l}$$

$G_r = p_l/p_h = -$ ή όπου ω_h και ω_l είναι οι ταχύτητες περιστροφής υψηλής και χαμηλής ταχύτητας των ροτόρων αντίστοιχα. Το σύμβολο μείον (-) εδώ δείχνει ότι οι ρότορες θα περιστραφούν σε αντίθετες κατευθύνσεις. Εναλλακτικά, με τα σιδηρομαγνητικά στοιχεία ελεύθερα να περιστραφούν και τον εξωτερικό ρότορα χαμηλής ταχύτητας εδραζόμενο η σχέση μετάδοσης έχει ως εξής:

$$G_r = \frac{n_s}{p_h} = \frac{\omega}{\omega_s}$$

Όπου ω_s είναι η ταχύτητα περιστροφής των σιδηρομαγνητικών τμημάτων. Έτσι οι ρότορες περιστρέφονται στην ίδια κατεύθυνση και μια ελαφρώς υψηλότερη σχέση μετάδοσης είναι εφικτή. Υπάρχει ένας περιοριστικός παράγοντας στον αριθμό των πόλων επειδή διαπιστώνεται ότι με υψηλότερες αναλογίες, οι μεγάλες αρμονικές διεγείρονται. Υπάρχουν επίσης φυσικοί περιορισμοί λόγω του ελάχιστου μεγέθους μαγνητικού πόλου [36]

Ο harmonic οδοντωτός τροχός [44] έχει υψηλές πυκνότητες ροπής στην περιοχή των 150 kNm/m^3 . Αν και ελκυστικό για την πυκνότητα ροπής, τις υψηλές σχέσεις μετάδοσης και την ομαλή μετάδοση ροπής, είναι περίπλοκο στην κατασκευή και βασίζεται σε έναν εύκαμπτο δρομέα χαμηλής ταχύτητας για να παράγει ένα χρονικά μεταβαλλόμενο ημιτονοειδή παλμό του μαγνητικού πεδίου στο διάκενο αέρα μεταξύ των δρομέων. Ο λόγος μετάδοσης του harmonic gear δίδεται ως εξής:

$$G_r = \frac{(-1)^{k+l} p_w}{p_i}$$

με p_i και p_w τον αριθμό των πόλων στον ρότορα χαμηλής ταχύτητας και τον αριθμό των ημιτονοειδών κύκλων μεταξύ ρότορα χαμηλής ταχύτητας και στάτορα αντίστοιχα και το k αντιπροσωπεύει τον διάφορο ασύγχρονο χώρο αρμονικών που σχετίζονται με κάθε αρμονική του μαγνητικού πεδίου που παράγεται από τους μόνιμους μαγνήτες [94].

Advantages

Τα πλεονεκτήματα της χρήσης μαγνητικών και ηλεκτρομαγνητικών μεταδόσεων, αντί για τους παραδοσιακούς οδοντωτούς τροχούς, αξίζει να αναφερθούν αναλυτικά. Ένα μαγνητικά συζευγμένο γρανάζι μπορεί να χρησιμοποιηθεί υπό κενό χωρίς λίπανση, ή σε εφαρμογές, όπως οι υποθαλάσσιες, όπου απαιτείται να είναι ερμητικά κλειστά. Αυτό είναι επίσης ένα πλεονέκτημα σε εκρηκτικά ή άλλα επικίνδυνα περιβάλλοντα όπου οι διαρροές συνιστούν πραγματικό κίνδυνο. Συνοπτικά, τα πλεονεκτήματα των ηλεκτρομαγνητικών μεταδόσεων είναι:

- Υψηλή απόδοση
- Χαμηλές απαιτήσεις συντήρησης
- Αθόρυβη λειτουργία
- Απουσία μηχανικής φθοράς / εμφανίζεται μόνο στα έδρανα
- Προφύλαξη από διατμητική υπερφόρτωση
- Δεν εμφανίζουν κόπωση επιφανείας (pitting)

Υψηλή απόδοση

Η αποδοτικότητα στις τοπολογίες μετάδοσης ισχύος είναι ο πιο σημαντικός παράγοντας της κάθε εφαρμογής υποδεικνύοντας την αξία της. Παρά το γεγονός ότι η πλειοψηφία των μεταδόσεων στη βιομηχανία είναι συμβατικά μεταλλικά γρανάζια, τα ηλεκτρομαγνητικά είναι το ίδιο αποτελεσματικά. Δεν είναι δυνατόν όλες οι τοπολογίες να ανταγωνιστούν τους συμβατικούς οδοντωτούς τροχούς, αλλά σε πολλές περιπτώσεις, είναι προτιμότερες

Χαμηλές απαιτήσεις συντήρησης

Για δεκαετίες οι οδοντωτοί τροχοί χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση ισχύος και η λίπανση είναι θεμελιώδης για κάθε τέτοια εφαρμογή. Σε κάθε εφαρμογή πρέπει να χρησιμοποιείται διαφορετικό λιπαντικό ανάλογα με τις απαιτήσεις σε ροπή και ταχύτητα περιστροφής. Ως εκ τούτου, η επιλογή λαδιού είναι ζωτικής σημασίας για την απόδοση του συστήματος. Αντιθέτως, τα ηλεκτρομαγνητικά γρανάζια, λόγω της μετάδοσης χωρίς επαφή, δεν απαιτούν λίπανση. Ως αποτέλεσμα χρόνος ζωής τέτοιων εφαρμογών είναι υψηλότερο από τα παραδοσιακά γρανάζια και ο χρόνος αντικατάστασης είναι μεγαλύτερη.

Αθόρυβη λειτουργία

Τυπικά κιβώτια ταχυτήτων μπορείτε να βρείτε στην αυτοκινητοβιομηχανία, τις βιομηχανικές εγκαταστάσεις και γενικά όπου η μετάδοση ισχύος είναι βασικός παράγοντας για τη λειτουργία. Καθώς η συνεργασία των συμβατικών τροχών γίνεται με επαφή, παράγουν θόρυβο κατά τη λειτουργία. Αντίθετα, η απουσία επαφής των ηλεκτρομαγνητικών οδοντωτών τροχών έχει ως αποτέλεσμα χαμηλότερα επίπεδα θορύβου. Έτσι, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε περιβάλλοντα, όπως σε εργαστήρια υψηλής ακρίβειας, όπου δεν είναι αποδεκτός ο θόρυβος

Απουσία μηχανικής φθοράς

Ανεξάρτητα το υλικό που χρησιμοποιείται για την κατασκευή οδοντωτών τροχών και το λιπαντικό για το σύστημα λίπανσης, τα οι συμβατικοί οδοντωτοί τροχοί είναι ευάλωτοι στη μηχανική φθορά. Από την

άλλη, τα ηλεκτρομαγνητικά γρανάζια είναι συστήματα χωρίς επαφή στα οποία η ισχύς μεταφέρεται από το εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται μεταξύ μαγνητών εισόδου και εξόδου. Ως αποτέλεσμα, δεν εμφανίζονται βλάβες στους μαγνήτες ή στους άξονες παρά μόνο στα έδρανα κύλισης της διάταξης όταν ρουλεμάν υπερβούν τη διάρκεια ζωής τους [78]. Η αλλαγή ρουλεμάν είναι συνήθως πρακτική τόσο για τα παραδοσιακά όσο και για ηλεκτρομαγνητικά γρανάζια. Έτσι, για τη δεύτερη περίπτωση απλώς αντικαθίστανται τα ρουλεμάν χωρίς να παρακολουθείται η μηχανική φθορά του συστήματος.

Προφύλαξη από διατμητική υπερφόρτωση

Κάθε κιβώτιο ταχυτήτων έχει όρια ροπής για να αντέξει. Η ροπή είναι ο βασικός παράγοντας για την επιλογή του κατάλληλου κιβωτίου ταχυτήτων. Τα μεταλλικά γρανάζια συνήθως αστοχούν λόγω κόπωσης κάμψης και πίεσης επιφάνειας. Ως εκ τούτου, σε περιπτώσεις υπερφόρτωσης, οι συμβατικοί τροχοί αστοχούν λόγω των ιδιοτήτων του υλικού τους [79]. Αντίθετα, τα ηλεκτρομαγνητικά γρανάζια έχουν τη ικανότητα να ολισθαίνουν όταν υπερφορτώνονται και να μην αστοχούν παρέχοντας έτσι ενσωματωμένη προστασία υπερφόρτωσης [1].

Δεν εμφανίζουν κόπωση επιφάνειας (pitting)

Το pitting είναι μια αστοχία κόπωσης της επιφάνειας ενός υλικού που παρατηρείται συνήθως στα έδρανα κύλισης και στους οδοντωτούς τροχούς. Είναι ένα σύνθετο πρόβλημα στο συμβατικά γρανάζια. Το pitting συμβαίνει όταν ξεκινούν ρωγμές κόπωσης στην επιφάνεια του δοντιού ή απλώς κάτω από την επιφάνεια. Συνήθως οι λάκκοι είναι αποτέλεσμα επιφανειακών ρωγμών που προκαλούνται από επαφή μετάλλου σε μέταλλο, ανωμαλιών ή ελαττωμάτων λόγω χαμηλού πάχους λιπαντικού φιλμ. Γρήγορες ταχύτητες με λείες επιφάνειες και το κατάλληλο μεγάλο πάχος λιπαντικού στην διεπιφάνεια ενδέχεται να οδηγήσουν σε εμφάνιση σχισμών λόγω ρωγμών κάτω από την επιφάνεια της κατατομής. Ωστόσο, τα μαγνητικά γρανάζια και τα ηλεκτρομαγνητικά γρανάζια δεν έχουν καμία επαφή, οπότε δεν η απουσία του pitting είναι πλήρης. Έτσι, σε εφαρμογές χαμηλής ταχύτητας/υψηλής ροπής η ηλεκτρομαγνητική μετάδοση προτιμάται.

2. Μαγνητική μετάδοση ισχύος

2.1. Εφαρμογές

Μεταφορά

Από τον 18ο αιώνα, η μηχανοποίηση επέτρεψε σε κάθε τρόπο μεταφοράς να γνωρίσει μια εξέλιξη στις μεθόδους κίνησης και στα οχήματα. Ο κινητήρας εσωτερικής καύσης (ICE) στα τέλη του 19ου αιώνα έφερε τη μηχανοργάνωση μεγάλης κλίμακας των τρόπων μεταφοράς, ιδιαίτερα των οδικών μεταφορών. Ακολούθησε η διάχυση αυτοκινήτων, λεωφορείων και φορτηγών που υποστηρίχθηκαν από την κατασκευή τεράστιων δικτύων αυτοκινητοδρόμων. Για τις σιδηροδρομικές μηχανές, οι ατμομηχανές ντίζελ αντικατέστησαν τις ατμομηχανές, βελτιώνοντας την ισχύ και την εμβέλεια. Ωστόσο, η ανάπτυξη των σιδηροδρόμων υψηλής ταχύτητας (HSR) βασίστηκε στον ηλεκτροκινητήρα λόγω της ικανότητάς του να παράγει μια ταχύτητα που ένας κινητήρας εσωτερικής καύσης δεν θα μπορούσε. Ως αποτέλεσμα, καταλήγουμε να κάνουμε τις μεταφορές μας φιλικές προς το περιβάλλον και εξασφαλίζουμε μακροζωία.

Κάθε μεταφορικό μέσο μπορεί να αλλάξει μαγνητικό γρανάτζι, εφόσον η ισχύς μεταδίδεται μέσω οδοντωτών τροχών.

Υπάρχουν πολλές εταιρείες που ασχολούνται με τη μεταφορά μαγνητικών οδοντωτών τροχών όχι μόνο για το θέμα της μετάδοσης ισχύος αλλά και για τις παραμέτρους λειτουργίας (σιδηροδρομική διαρροή κ.λπ.). Επινοούν συνεχώς νέους τρόπους εφαρμογών μαγνητικού πεδίου και η συμβολή τους στο θέμα είναι πολύ σημαντική. Στο [7], [35] η έρευνα προχωρά συνεχώς και προωθεί τις ιδέες τους.

Maglev χρησιμοποιείται σαν όρος αντί για μαγνητική άνωση (magnetic levitation) για συντομία [5]. Το σύστημα μεταφοράς Maglev είναι πιο σταθερό, ταχύτερο, οικονομικό και αποδοτικό [23]. Τα συστήματα Maglev χρησιμοποιούνται επί του παρόντος για εφαρμογές όπως ρουλεμάν, τρένα υψηλής ταχύτητας και κατασκευή. Το Maglev είναι μια μέθοδος πρόωσης που χρησιμοποιεί μαγνητική άνωση για να ωθήσει οχήματα με μαγνήτες και όχι με τροχούς, άξονες και ρουλεμάν. Με το maglev, ένα όχημα κινείται σε μικρή απόσταση από τον οδηγό χρησιμοποιώντας μαγνήτες για να δημιουργήσει τόσο ανύψωση όσο και ώθηση (η διέγερση δεν θα υπερβαίνει τα 10 εκατοστά).

Τα τρένα Maglev κινούνται πιο ομαλά και κάπως πιο αθόρυβα από άλλα συμβατικά τρένα. Δεν βασίζονται στην πρόσφυση ή την τριβή, η επιτάχυνση και η επιβράδυνση τους είναι ταχύτερα από τα συμβατικά τρένα, δεν επηρεάζονται από τις καιρικές συνθήκες. Η ισχύς που απαιτείται για τη διαρροή δεν είναι καθόλου η μεγάλη ποσότητα της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας. το μεγαλύτερο μέρος της ισχύος σε αυτά τα τρένα χρησιμοποιείται για να ξεπεραστεί η αντίσταση του αέρα (drag), όπως συμβαίνει με κάθε μεταφορά υψηλής ταχύτητας. Αυτά τα τρένα μπορούν να κινούνται συνεχώς σε υψηλές ταχύτητες από τα συμβατικά τρένα και γενικά η μαγνητική διέγερση διαθέτει μια πολύ προηγμένη και αποδοτική τεχνολογία. Αυτή η τεχνολογία χρησιμοποιεί μονοτρόχιες γραμμές με γραμμικούς κινητήρες [76], αυτοί οι συρμοί κινούνται σε ειδικές γραμμές και όχι στις συνηθισμένες συμβατικές γραμμές τρένων. Χρησιμοποιούν πολύ ισχυρούς ηλεκτρομαγνήτες για να φτάσουν σε υψηλότερες ταχύτητες, επιπλέον περίπου 1- 10 εκατοστά πάνω από τον οδηγό σε μαγνητικό πεδίο [75]. Αυτά τα τρένα κινούνται από τους οδηγούς. Μόλις το τρένο τραβηχτεί στο επόμενο τμήμα, ο μαγνητισμός μεταβαίνει έτσι ώστε το τρένο να τραβηχτεί ξανά [5]. Οι ηλεκτρομαγνήτες τρέχουν το μήκος του οδηγού. ΕΙΔΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ MAGLEV:

1 ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΑΝΑΡΤΗΣΗ

2 ΗΛΕΚΤΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΡΤΗΣΗ

3 ΣΥΣΤΗΜΑ INDUCTRACK

Η ηλεκτρομαγνητική ανάρτηση και η ηλεκτροδυναμική ανάρτηση θα συζητηθούν στο επόμενο κεφάλαιο αυτής της έρευνας.

Σύστημα Inductrack (Μόνιμη παθητική ανάρτηση μαγνήτη)

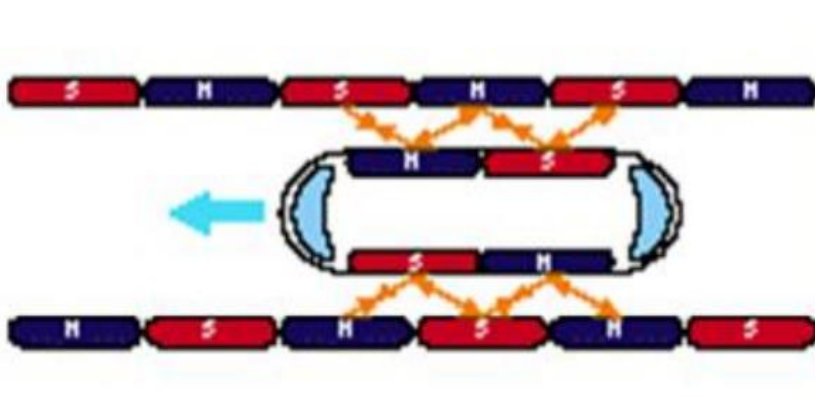
Είναι ένα σύστημα ανάρτησης βλάβης, δεν απαιτείται ισχύ για την ενεργοποίηση των μαγνητών. Το μαγνητικό πεδίο βρίσκεται κάτω από το αυτοκίνητο. μπορούν να παράγουν αρκετή δύναμη σε χαμηλές ταχύτητες (περίπου 5 χλμ./ώρα (3,1 μίλια/ώρα)) για να κινούν το τρένο maglev. Σε περίπτωση διακοπής ρεύματος τα αυτοκίνητα επιβραδύνουν μόνα τους με ασφάλεια. οι μόνιμοι μαγνήτες είναι διατεταγμένοι σε μια συστοιχία που βοηθά στην πρόωση των τρένων [34]. Απαιτούν είτε τροχούς είτε τμήματα τροχιάς που κινούνται όταν σταματήσει το όχημα. Ούτε το Inductrack ούτε η υπεραγώγιμη ηλεκτροδυναμική ανάρτηση είναι σε θέση να μεταφέρουν οχήματα σε ακινησία, αν και το Inductrack παρέχει ανύψωση σε πολύ χαμηλότερη ταχύτητα. απαιτούνται τροχοί για αυτά τα συστήματα. Τα συστήματα ηλεκτρομαγνητική ανάρτηση είναι χωρίς τροχούς [5].

Ανάπτυξη των τρένων Maglev

Υπάρχουν διάφοροι παράγοντες που χρησιμοποιούνται στην ανάπτυξη αμαξοστοιχιών maglev, αυτοί βοηθούν στην πρόωση, τη σταθερότητα, την καθοδήγηση κ.λπ. ενός τρένου.

Πρόωθηση

Ορισμένα συστήματα ηλεκτρομαγνητικής ανάρτησης όπως το HSST/Linimo μπορούν να παρέχουν τόσο διέγερση όσο και πρόωση χρησιμοποιώντας έναν ενσωματωμένο γραμμικό κινητήρα. Αλλά ορισμένα συστήματα ηλεκτροδυναμικής ανάρτησης και μερικά συστήματα ηλεκτρομαγνητικής ανάρτησης είναι σαν να μπορούν να μετακινήσουν το τρένο χρησιμοποιώντας τους μαγνήτες στο πλοίο, αλλά δεν μπορούν να το προωθήσουν. Ως εκ τούτου, τα οχήματα χρειάζονται κάποια άλλη τεχνολογία για την πρόωση. Ένας γραμμικός κινητήρας (πηνία πρόωσης) τοποθετημένος στη διαδρομή είναι μία λύση όπως φαίνεται στο σχήμα 3:



Εικόνα 3: Πρόωση τραίνων Maglev[5]

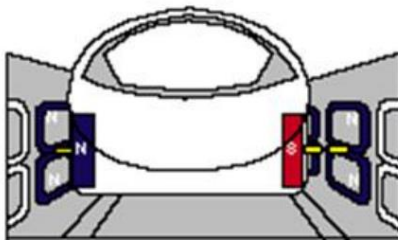
Σταθερότητα

Σύμφωνα με το θεώρημα του Earnshaw, οποιοσδήποτε συνδυασμός στατικών μαγνητών δεν μπορεί να βρίσκεται σε σταθερή ισορροπία. Επομένως απαιτείται δυναμικό μαγνητικό πεδίο για να επιτευχθεί σταθεροποίηση. Τα συστήματα EMS βασίζονται στην ενεργή ηλεκτρονική σταθεροποίηση που μετρά συνεχώς την απόσταση εδράνου και προσαρμόζει ανάλογα το ρεύμα του ηλεκτρομαγνήτη. Όλα τα συστήματα ηλεκτροδυναμικής ανάρτησης βασίζονται σε μεταβαλλόμενα μαγνητικά πεδία δημιουργώντας ηλεκτρικά ρεύματα, και αυτά μπορούν να δώσουν παθητική σταθερότητα. Επειδή τα οχήματα maglev ουσιαστικά πετούν, η σταθεροποίηση του βήματος, του ρολού και του χτυπήματος απαιτείται από τη μαγνητική τεχνολογία. Εκτός από την περιστροφή, την κίνηση προς τα εμπρός και προς τα πίσω, η ταλάντευση (πλάγια κίνηση) ή η ολίσθηση (κινήσεις πάνω και κάτω) μπορεί να είναι προβληματική με ορισμένες τεχνολογίες.

Καθοδήγηση

Ορισμένα συστήματα χρησιμοποιούν συστήματα Null Current (που μερικές φορές ονομάζονται επίσης συστήματα Null Flux). χρησιμοποιούν ένα πηνίο που τυλίγεται έτσι ώστε να εισέρχεται σε δύο αντίθετα, εναλλασσόμενα πεδία, έτσι ώστε η μέση ροή στον βρόχο να είναι μηδενική. Όταν το όχημα βρίσκεται στην ευθεία θέση, δεν ρέει ρεύμα, αλλά εάν κινείται εκτός γραμμής δημιουργεί μια μεταβαλλόμενη ροή

που δημιουργεί ένα πεδίο που φυσικά το ωθεί και το τραβάει πίσω στη γραμμή. Αυτό είναι το σύστημα καθοδήγησης των τρένων maglev [5].



Εικόνα 4: Καθοδήγηση ταϊνών Maglev[7]

Χρήση ενέργειας και ενέργειας

Η ενέργεια για τα τρένα maglev χρησιμοποιείται για την επιτάχυνση του τρένου και η ισχύς θα μπορούσε να ανακτηθεί όταν επιβραδύνει το τρένο ("αναγεννητική πέδηση"). Χρησιμοποιείται επίσης για να κάνει το τρένο να κινείται και να σταθεροποιεί την κίνηση του τρένου. Το κύριο μέρος της ενέργειας είναι απαραίτητο για να εξαναγκάσει το τρένο να παραμείνει στον αέρα ("αεροσυρμή"). Επίσης, κάποια ενέργεια χρησιμοποιείται για κλιματισμό, θέρμανση, φωτισμό και άλλα διάφορα συστήματα. Σε χαμηλές ταχύτητες το ποσοστό της ισχύος (ενέργεια ανά ώρα) που χρησιμοποιείται για μετεωρισμό μπορεί να είναι σημαντικό, καταναλώνοντας έως και 15% περισσότερη ενέργεια από μια υπηρεσία μετρό ή ελαφρού σιδηροδρόμου. Επίσης για πολύ μικρές αποστάσεις η ενέργεια που χρησιμοποιείται για την επιτάχυνση μπορεί να είναι σημαντική. Αλλά η ισχύς που χρησιμοποιείται για να ξεπεραστεί η αντίσταση του αέρα αυξάνεται με τον κύβο της ταχύτητας και επομένως κυριαρχεί με μεγάλη ταχύτητα.

Σύγκριση με συμβατικά τρένα

Ο συμβατικός σιδηρόδρομος είναι πιθανώς πιο αποτελεσματικός σε χαμηλότερες ταχύτητες. Αλλά λόγω της έλλειψης φυσικής επαφής μεταξύ της πίστας και του οχήματος, τα τρένα maglev δεν αντιμετωπίζουν αντίσταση κύλισης, αφήνοντας μόνο αντίσταση αέρα και ηλεκτρομαγνητική αντίσταση, βελτιώνοντας ενδεχομένως την αποδοτικότητα ισχύος. Ωστόσο, ορισμένα συστήματα όπως η Central Japan Railway Company SCMaglev χρησιμοποιούν ελαστικά ελαστικά σε χαμηλές ταχύτητες. Το βάρος των ηλεκτρομαγνητών σε πολλά σχέδια ηλεκτρομαγνητική ανάρτηση και ηλεκτροδυναμική ανάρτηση φαίνεται σαν ένα σημαντικό θέμα σχεδιασμού. Απαιτείται ένα ισχυρό μαγνητικό πεδίο για την απομάκρυνση ενός οχήματος maglev. Για το Transrapid (Γερμανικά maglev), αυτό είναι μεταξύ 1 και 2 κιλοβάτ ανά τόνο. Ένας άλλος δρόμος για μετεωρισμό είναι η χρήση μαγνητών υπεραγωγών για τη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης των ηλεκτρομαγνητών και το κόστος διατήρησης του πεδίου. Η περισσότερη χρήση ενέργειας για το TRS είναι για πρόωση και υπέρβαση της τριβής της αντίστασης του αέρα σε ταχύτητες άνω των 100 mph. Τα τρένα μεταφοράς θα ζύγιζαν λιγότερο από το maglev. Επειδή η κύρια πηγή θορύβου ενός τρένου maglev προέρχεται από εκτοπισμένο αέρα, τα τρένα maglev παράγουν λιγότερο θόρυβο από ένα συμβατικό τρένο σε ισοδύναμες ταχύτητες. Ωστόσο, μια μελέτη κατέληξε στο συμπέρασμα ότι ο θόρυβος maglev πρέπει να βαθμολογείται όπως η οδική κυκλοφορία, ενώ τα συμβατικά τρένα έχουν 5-10 dB "μπόνους", καθώς θεωρούνται λιγότερο ενοχλητικά στο ίδιο επίπεδο έντασης. Ο σχεδιασμός του Maglev εξαλείφει τη χρήση συρμάτων φρεναρίσματος και πάνω από το συρματοσχοίνο, παίρνουν την ηλεκτρική τους παροχή από το έδαφος, ο σχεδιασμός τους είναι τόσο αεροδυναμικός που φτάνουν περίπου τα 300 μίλια / ώρα πολύ γρήγορα από τα συρματοσχοίνα υψηλής ταχύτητας [5,6].

Συστήματα Ελέγχου

Δεν υπάρχουν συστήματα σηματοδότησης για συστήματα maglev υψηλής ή χαμηλής ταχύτητας. Δεν υπάρχει ανάγκη αφού όλα αυτά τα συστήματα ελέγχονται από υπολογιστή. Εξάλλου, στις εξαιρετικά υψηλές ταχύτητες αυτών των συστημάτων, κανένας χειριστής δεν θα μπορούσε να αντιδράσει αρκετά γρήγορα ώστε να επιβραδύνει ή να σταματήσει εγκαίρως. Αυτός είναι και ο λόγος που αυτά τα συστήματα απαιτούν αποκλειστικά δικαιώματα διέλευσης και συνήθως προτείνονται να υψωθούν αρκετά μέτρα πάνω από το επίπεδο του εδάφους. Δύο πύργοι μικροκυμάτων maglev είναι σε επαφή με ένα όχημα EMS ανά πάσα στιγμή για αμφίδρομη επικοινωνία μεταξύ του οχήματος και του κύριου υπολογιστή λειτουργίας του κεντρικού διοικητικού κέντρου. Δεν υπάρχει ανάγκη ούτε για σφυρίγματα τρένου ούτε για κόρνες.

Ευελιξία και αξιοπιστία

Τα αεροσκάφη είναι θεωρητικά ευέλικτα αλλά οι εμπορικές αεροπορικές διαδρομές δεν είναι. Τα maglev υψηλής ταχύτητας έχουν σχεδιαστεί για να ανταγωνίζονται σε χρόνους ταξιδιού με πτήσεις 800 χιλιομέτρων (500 μίλια) ή λιγότερο. Επιπλέον, ενώ οι maglev μπορούν να εξυπηρετήσουν αρκετές πόλεις μεταξύ αυτών των διαδρομών και να είναι εγκαίρως σε όλες τις καιρικές συνθήκες, οι αεροπορικές εταιρείες δεν μπορούν να πλησιάσουν τέτοια αξιοπιστία ή απόδοση [93]. Επειδή τα οχήματα maglev τροφοδοτούνται με ηλεκτρική ενέργεια και δεν μεταφέρουν καύσιμα, οι ναύλοι maglev είναι λιγότερο επιρρεπείς στις μεγάλες μεταβολές των τιμών που δημιουργούνται από τις αγορές πετρελαίου. Το ταξίδι μέσω maglev προσφέρει επίσης ένα σημαντικό περιθώριο ασφάλειας για τα αεροπορικά ταξίδια, καθώς τα maglev έχουν σχεδιαστεί για να μην προσκρούουν σε άλλα maglev ή δεν αφήνουν τους οδηγούς τους. Τα καύσιμα των αεροσκαφών αποτελούν σημαντικό κίνδυνο κατά την απογείωση και την προσγείωση καθώς υπάρχουν πιθανότητες για ατυχήματα. Σε πραγματικές καταστάσεις η ταχύτητα του maglev είναι μικρότερη από τα αεροσκάφη, αλλά το maglev εξακολουθεί να εξοικονομεί χρόνο λόγω του λιγότερου αριθμού εμποδίων που απαιτούνται για να ταξιδέψει κανείς σε αυτά σε σύγκριση με τα αεροπορικά ταξίδια. Με τα αεροπορικά ταξίδια, οι άνθρωποι πρέπει να περνούν χρόνο στα αεροδρόμια για check-in, ασφάλεια, επιβίβαση κ.λπ. Στα αεροπορικά ταξίδια, ο χρόνος καταναλώνεται επίσης (κυρίως σε πολυσύχναστα αεροδρόμια) από το αεροσκάφος για φορολόγηση, αναμονή στην ουρά για απογείωση και προσγείωση, τα οποία είναι αμελητέα σε περίπτωση maglev [7].

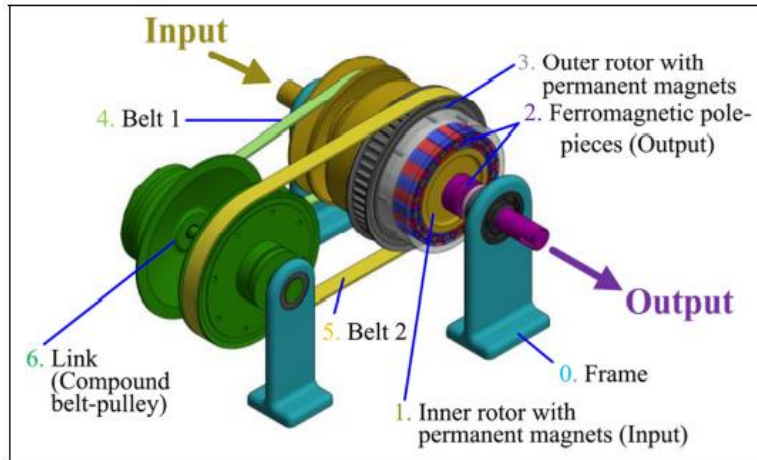
Ηλεκτρικά οχήματα

Τα μηχανικά γρανάζια και τα κιβώτια ταχυτήτων παίζουν ζωτικό ρόλο στα ηλεκτρικά οχήματα (EV). Με τη βοήθεια των μηχανικών οδοντωτών τροχών και κιβωτίων ταχυτήτων, η ροπή και η ταχύτητα μπορούν να ενισχυθούν για διάφορες πρακτικές εφαρμογές, όπως η ενίσχυση της ταχύτητας (μείωση της ροπής) και η ενίσχυση της ροπής (μείωση της ταχύτητας) για να ικανοποιηθούν οι διαφορετικές απαιτήσεις οδήγησης και οι συνθήκες του δρόμου. Ωστόσο, υποφέρουν από κάποια εγγενή μειονεκτήματα, όπως η φθορά, η τριβή επαφής, ο ενοχλητικός θόρυβος και η τακτική συντήρηση [2].

Προφανώς η εμφάνιση του μαγνητικού οδοντωτού τροχού αποδίδεται στην εφαρμογή υλικών μόνιμου μαγνήτη (PM) τα οποία μπορούν να παράγουν συνεχή ροή και μαγνητική δύναμη και να πραγματοποιούν μετάδοση ροπής χωρίς επαφή [87]. Είναι γνωστό ότι αυτά τα χαρακτηριστικά καθιστούσαν δυνατή την αντικατάσταση των μηχανικών οδοντωτών τροχών με μαγνητικά γρανάζια. Τα μαγνητικά γρανάζια προσφέρουν τα πλεονεκτήματα της φυσικής απομόνωσης, της αθόρυβης λειτουργίας, της δωρεάν συντήρησης και της εγγενούς προστασίας από υπερφόρτωση [3].

Μια συνεχώς μεταβλητή μετάδοση (CVT) είναι μια μηχανική μετάδοση με μεταβλητή ταχύτητα εξόδου και συνεχή αναλογία ταχύτητας, όπως φαίνεται στο σχήμα 5. Παρέχει ομαλή και συνεχή μεταβλητή ισχύ

εξόδου για να αυξήσει την ευκολία των μηχανικών λειτουργιών και να βελτιώσει τη μηχανική απόδοση. Έτσι, το CVT δεν έχει γίνει μόνο ένα δημοφιλές θέμα για μηχανικούς, ειδικούς και μελετητές, αλλά έχει επίσης αναπτυχθεί γρήγορα τις τελευταίες δεκαετίες. Συγκεκριμένα, αυτή η μελέτη εστιάζει σε έναν μηχανισμό CVT με ιμάντα V παρόμοιο με αυτόν που υπάρχει σε ένα σκούτερ.



Εικόνα 5: Μία προτότυπη συσκευή που συνδιάζει μαγνητικό οδοντωτό τροχό και συνεχώς μεταβαλλόμενο κιβώτιο ταχυτήτων(CVT)

Η μεθοδολογία δημιουργικού σχεδιασμού, όπως προτάθηκε από τον Yan [4] ενσωματώνει ένα ισχυρό σύνολο διαδικασιών ή σχεδιαστικών βημάτων για τη συστηματική επίλυση ενός καθορισμένου προβλήματος και τη δημιουργία όλων των εφικτών σχεδιαστικών εννοιών. Ένας μαγνητικός μηχανισμός οδοντωτών τροχών σε συνδυασμό με δύο σύνολα CVT με ιμάντα V χρησιμοποιείται ως παράδειγμα για τη σύνθεση όλων των εφικτών ολοκληρωμένων σχεδιαστικών εννοιών.

Μαγνητικός συμπλέκτης

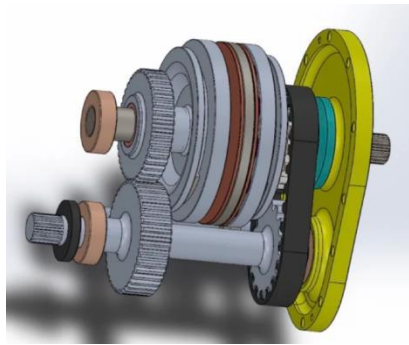
Επίσης στο άρθρο [8] μπορούμε να διαπιστώσουμε ότι αυτά τα ελαττώματα σχεδιασμού εξαλείφονται με την εισαγωγή της συνεχώς περιστρεφόμενης μαγνητικής μετάδοσης όπως φαίνεται στο σχήμα 6. Το πλεονέκτημα της σταθερής περιστροφής είναι ότι ένας περιστρεφόμενος κινητήρας δημιουργεί φαινόμενο σφόνδουλου λόγω της φυγόκεντρης δύναμης. Αυτή η δύναμη μετατρέπεται σε ροπή και μειώνει το ρεύμα που απαιτείται για τη διατήρηση της ορμής του οχήματος [77].

Το συγκρότημα συμπλέκτη αποτελείται από τρεις ξεχωριστές πλάκες δίσκου. Η κεντρική πλάκα αποτελείται από χάλυβα με χάλκινη όψη και είναι ενσωματωμένη με μόνιμους μαγνήτες. Αυτός ο δίσκος είναι προσαρτημένος στον άξονα εισόδου του κινητήρα [73]. Οι δύο εξωτερικές πλάκες αποτελούνται από χάλυβα και μόνιμους μαγνήτες και ελέγχονται από ράγα κουπιών και αλλαγής ταχυτήτων. Καθώς μία από τις εξωτερικές πλάκες μετακινείται πιο κοντά στην κεντρική πλάκα, αρχίζει να περιστρέφεται από κοινού με την κεντρική πλάκα και τον άξονα εισόδου. Το κενό μεταξύ των δύο πλακών ρυθμίζεται από το κουπί. Η μαγνητική δύναμη των δύο πλακών τους κάνει να περιστρέφονται χωρίς να κάνουν φυσική επαφή. Οι εξωτερικές πλάκες κινούνται συγχρονισμένα έτσι ώστε μόνο μία πλάκα να ελέγχει την κεντρική πλάκα. Τα πτερύγια μειώνουν ταυτόχρονα το κενό μεταξύ μιας από τις εξωτερικές πλάκες αυξάνοντας παράλληλα το κενό της απέναντι πλάκας [86].

Η αριστερή μαγνητική πλάκα συνδέεται με έναν ιμάντα κίνησης ο οποίος περιστρέφει τον άξονα εξόδου και παράγει μια μπροστινή ορμή του οχήματος. Η δεξιά μαγνητική πλάκα συνδέεται με ένα γρανάτζι περιστροφής και περιστρέφει τον άξονα εξόδου προς την αντίθετη κατεύθυνση για να παράγει την

αντίστροφη ορμή. Ο κινητήρας είναι σε θέση να περιστρέφεται με σταθερό RPM ανά πάσα στιγμή. Η ταχύτητα του οχήματος ρυθμίζεται χρησιμοποιώντας το κενό μεταξύ των δύο πινακίδων.

Τα πλεονεκτήματα αυτού του σχεδιασμού περιλαμβάνουν αυξημένο χρόνο λειτουργίας της μπαταρίας, παράταση της διάρκειας ζωής της μπαταρίας, αύξηση 60% της ενεργειακής απόδοσης και μεγαλύτερη εμβέλεια ταξιδιού για ηλεκτρικά αυτοκίνητα και περνοφόρα ανυψωτικά. Η έλλειψη επαφής μεταξύ των πλακών εξαλείφει τη φθορά που είναι χαρακτηριστική ενός σχεδιασμού που βασίζεται σε γρανάζια. Αυτή η μαγνητική μετάδοση είναι ελαφριά, επεκτάσιμη και φιλική προς την κατασκευή.



Εικόνα 6: Μαγνητικός συμπλέκτης

Μαγνητική μετάδοση σε ενεργοποιητές για εφαρμογές αεροδιαστημικής

Οι ενεργοποιητές μαγνητικού οδοντωτού τροχού (MGA) έχουν σχεδιαστεί για να εκτελούν εξαιρετικά αξιόπιστη, στιβαρή και ακριβή κίνηση σε δορυφορικές πλατφόρμες ή αεροδιαστημικά οχήματα. Ο σχεδιασμός επιτρέπει στα MGA να χρησιμοποιούνται για διάφορες εργασίες σε διαστημικές εφαρμογές. Σε αντίθεση με τους συμβατικούς μηχανισμούς μετάδοσης κίνησης, τα στοιχεία μετάδοσης δύναμης χωρίς επαφή και λίπανση οδηγούν σε σημαντική διάρκεια ζωής και εμβέλεια των συστημάτων κίνησης. Παρακάτω θα αναλυθούν οι βασικές αρχές των μαγνητικών ταλαντευόμενων οδοντωτών τροχών (MWG) και τα συναγόμενα εγγενή χαρακτηριστικά και συγκρίνει τα συμβατικά και μαγνητικά γρανάζια [9].

Οι ενεργοποιητές χρησιμοποιούνται ευρέως σε δορυφορικές πλατφόρμες και θα είναι απαραίτητοι για μελλοντικές διαστημικές αποστολές. Υπάρχουν πολλές πιθανές εφαρμογές ενεργοποιητών, όπως η κεραία και ηλιακοί πίνακες διεύθυνσης, ρομποτικοί βραχίονες, ρόβερ και οπτικά όργανα. Τα κιβώτια ταχυτήτων με συμβατικούς οδοντωτούς τροχούς είναι η πιο σύγχρονη λύση για τέτοιου είδους γρανάζια ενεργοποίησης [92].

Κατά τη διάρκεια της εκτόξευσης, τα υψηλά κραδασμικά φορτία και το άγχος οδηγούν σε πρόσφυση σε επαφή λόγω φθοράς των στερεών λιπαντικών. Στο κενό, η εξάτμιση οδηγεί σε απώλεια λαδιού και επακόλουθη μόλυνση δορυφορικών επιφανειών ή οπτικών εξαρτημάτων. Επιπλέον, η ακτινοβολία μπορεί να υποβαθμίσει ορισμένα πολυμερή ή να οξειδώσει στερεά λιπαντικά. Οι αυξημένες θερμοκρασίες μπορούν να προκαλέσουν αναποτελεσματική λίπανση σε ακραίες θερμοκρασίες. Ωστόσο, αυτά τα γρανάζια απαιτούν κάποιο είδος λίπανσης για να διατηρήσουν τη λειτουργικότητά τους καθ' όλη τη διάρκεια της ζωής τους [10] MWG με κοίλη είσοδο και άξονα εξόδου εμφανίζεται στη συνέχεια:



Εικόνα 7: Μαγνητικά ταλαντούμενοι οδοντωτοί τροχοί(MWG) with hollow Input and Output shaft

Το πρόβλημα της παραβίασης της διάρκειας ζωής και της υποβάθμισης στα γρανάζια μπορεί να προσδιοριστεί ως πρόβλημα επαφής των επιφανειών και της σωστής λίπανσης τους [9]. Σε διαφορετικά είδη οδοντωτών τροχών, η συρόμενη επαφή είναι ένα κρίσιμο ζήτημα. Οι απώλειες τριβής και η φθορά συχνά περιορίζουν την απόδοση και τη διάρκεια ζωής. Όπως είναι ευρέως γνωστό, η λίπανση και η διαστημική τριβολογία εξακολουθούν να είναι τομείς έντονης έρευνας που στοχεύουν στη μείωση των επιπτώσεων της φθοράς. Μέχρι τώρα, αυτές οι σκληρές περιβαλλοντικές συνθήκες και η διαθεσιμότητα κατάλληλων λιπαντικών καθιστούν συχνά δύσκολη την ικανοποίηση αυτών των αναγκών με ικανοποιητικό τρόπο.

Μαγνητικά ταλαντούμενοι οδοντωτοί τροχοί (Magnetic Wobbling Gears)

Με τα μαγνητικά ταλαντούμενα γρανάζια μπορούν να ξεπεραστούν τα προβλήματα λίπανσης γενικά, και ιδιαίτερα σε θέματα που σχετίζονται με το διάστημα. Εμπνευσμένο από μια ιδέα για ισχυρούς και ήσυχους κινητήρες, το MWG εμφανίστηκε πριν από αρκετά χρόνια με εκπληκτικές ιδιότητες. Εκτός από την ήσυχη λειτουργία, η οποία δεν αποτελεί κύριο στόχο για εφαρμογές που σχετίζονται με το διάστημα, η μετάδοση ισχύος χωρίς επαφή φαίνεται να ανταποκρίνεται στις περισσότερες ανάγκες στο διάστημα. Μόλις ξεπεραστεί το πρόβλημα της λίπανσης λόγω της έλλειψης αναγκών λίπανσης, τα συνήθη όρια των συμβατικών οδοντωτών τροχών δεν υπάρχουν πλέον. Τα εύρη θερμοκρασίας, οι κύκλοι ζωής και τα προβλήματα φθοράς μεταφέρονται στο ζήτημα της σωστής διάστασης των εδράνων, όπου υπάρχουν καθιερωμένες λύσεις, ξεκινώντας από λίγα Kelvins σε κρυογονικές θερμοκρασίες έως μερικές εκατοντάδες βαθμούς Κελσίου για εκτεταμένα εύρη θερμοκρασίας.

Ιστορικό των MWG

Για σύντομο χρονικό διάστημα, τα συμβατικά γρανάζια μπορούν να αντικατασταθούν από ισχυρά μαγνητικά συστήματα οδοντωτών τροχών. Στα μαγνητικά γρανάζια, τα παραδοσιακά στοιχεία που φέρουν φορτίο και τριβή αντικαθίστανται από κατά προτίμηση ισχυρούς μόνιμους μαγνήτες για τη μετάδοση ενέργειας [40]. Δεν υπάρχει καμία απολύτως επαφή μεταξύ των ενεργών μαγνητικών επιφανειών. Τα μέρη του οδοντωτού τροχού είναι χωρίς τριβές και λειτουργούν με συνέπεια χωρίς λίπανση. Όσον αφορά το μαγνητικό γρανάζι γενικά, υπάρχουν πολλές διαφορετικές αρχές λειτουργίας συγκρίσιμες με αυτές των συμβατικών οδοντωτών τροχών. Εκτός από το προτεινόμενο σύστημα MWG, οι πιθανοί υποψήφιοι για μαγνητικά γρανάζια περιλαμβάνουν μαγνητικά γρανάζια σκουληκιών [39], γρανάζια μαγνητικών στροφών, μαγνητικά λοξότμητα γρανάζια, μαγνητικά πλανητικά γρανάζια [27], μαγνητικά κυκλοειδή

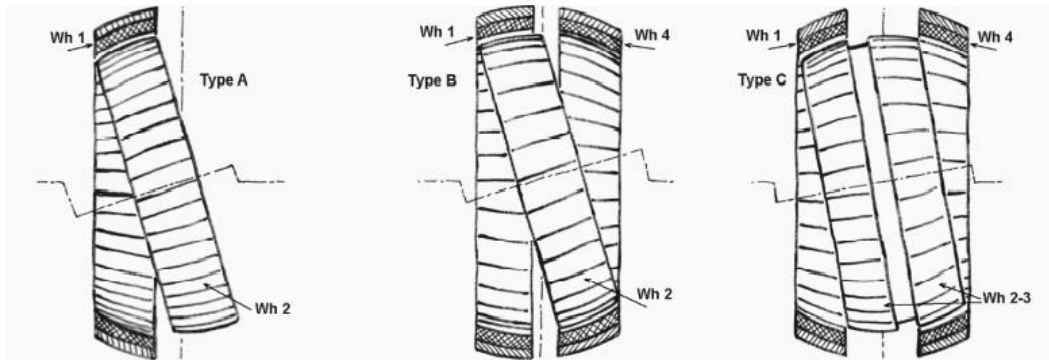
γρανάζια ακόμη και μαγνητικά υπεραγωγία αρμονικά γρανάζια [96]. Ο Πίνακας [1] δείχνει μια σύγκριση των επιδόσεων των συσκευών μετατροπής ροπής σε σχέση με διαφορετικά κριτήρια:

Table 1

Καθώς η απαιτούμενη ποσότητα χώρου σε μια δορυφορική πλατφόρμα φαίνεται να είναι σημαντική, το βάρος έχει πολύ μεγαλύτερη προτεραιότητα. Για να πάρουμε μια ιδέα για τη μαγνητική απόδοση, η πυκνότητα ροπής του μαγνητικού συστήματος που έχει οριστεί σε $[Nm/kg]$ περιγράφει την ποσότητα του υλικού του ίδιου του μαγνητικού συστήματος, η οποία είναι απαραίτητη για την παραγωγή της μέγιστης ροπής. Αποτελείται από μαγνήτες και πίσω σίδηρο και καθορίζει το βάρος. Αυτός φαίνεται να είναι ένας αποτελεσματικός τρόπος σύγκρισης της ισχύος διαφορετικών συσκευών μετατροπής ροπής, συμπεριλαμβανομένων των συμβατικών συστημάτων οδοντωτών τροχών καθώς και των μαγνητικών συστημάτων γενικά και των συστημάτων μαγνητικών οδοντωτών τροχών μόνο. Αυτή είναι επίσης μια καλύτερη μέθοδος από ό, τι αφορά μόνο το μαγνητικό σύστημα, βαθμολογημένο σε $[Nm/L]$, χωρίς ρουλεμάν, αλλά περιλαμβάνει την ποσότητα εσωτερικού μαγνητικού εύρους εργασίας.

Διαφορετικοί τύποι MWG

Υπάρχουν αρκετές δυνατότητες για τη ρύθμιση ενός μαγνητικού οδοντωτού τροχού που βασίζεται στην κινηματική ταλάντευσης (Εικ. 8). Ως βασική κινηματική, μια κίνηση ταλάντευσης πρέπει να δημιουργηθεί από έναν περιστρεφόμενο άξονα εισόδου, ο οποίος έχει μια στρεβλωμένη περιοχή (γραμμή με διακεκομμένες γραμμές) πάνω στην οποία είναι στερεωμένο το ρουλεμάν που κινείται. Η εξωτερική κούρσα του ρουλεμάν συνδυάζεται με τον μαγνητικό κυλιόμενο τροχό (Wh2, Wh2-3). Ο άξονας εισόδου περιστρέφεται με την ταχύτητα εισόδου. Ο κυλιόμενος τροχός εκτελεί την ταλάντευση με την ίδια συχνότητα με τον άξονα εισόδου και έχει επάλληλη περιστροφή με τη μειωμένη ταχύτητα του άξονα εξόδου. Και οι δύο μαγνητικοί τροχοί (Wh1, Wh2) είναι μαγνητικά συζευγμένοι πάνω από ένα διάκενο αέρα και εκτελούν τη μαγνητική ταχύτητα λόγω της διαφοράς μεταξύ των αριθμών «μαγνητικών πόλων στον τροχό» μεταξύ τους. Ο λόγος μετάδοσης στο MWG μπορεί να υπολογιστεί με τον ίδιο απλό τρόπο όπως και για τα συμβατικά γρανάζια, αντικαθιστώντας τον αριθμό των δοντιών με τον αριθμό των «ζευγών πόλων στον τροχό». Ενώ η βασική κινηματική των ταλαντευόμενων οδοντωτών τροχών είναι η ίδια και για τους τρεις τύπους MWG, υπάρχουν ορισμένες δυνατότητες δημιουργίας της πραγματικής περιστροφής του άξονα εξόδου. Καθώς η χρήσιμη περιστροφή του τροχού που κινείται επικαλύπτεται από την κίνηση ταλάντευσης, απαιτείται ένα λειτουργικό στοιχείο για δράση «αποσύνδεσης» και για τους τρεις τύπους MWG [10].



Εικόνα 8: Αρχή λειτουργίας τριών τύπων μαγνητικά ταλαντούμενων οδοντωτών τροχών

- Ο τύπος A αποτελείται από δύο μονά μαγνητικούς τροχούς. Ο Τροχός 1 (Wh1) είναι στερεωμένος μέσα στο περίβλημα του οδοντωτού τροχού. Το Wheel2 (Wh2) δημιουργεί την κίνηση εξόδου μέσω μαγνητικού οδοντωτού τροχού. Η κίνηση «αποσύνδεσης» γίνεται από μια γενική άρθρωση, όπως μια κάρδανα ή μια ομοκίνητη άρθρωση, που συνδέεται μεταξύ του Τροχού 2 και του άξονα εξόδου.
- Ο τύπος B δείχνει ένα MWG με τρεις διαφορετικούς τύπους μαγνητικών τροχών. Ενώ το Wheel 1 και το Wheel2 ενεργούν με τον ίδιο τρόπο όπως στον Τύπο A, το Wheel4 (Wh4) είναι μέρος του άξονα εξόδου. Η κίνηση «αποσύνδεσης» πραγματοποιείται από τη ρύθμιση του μαγνητικού συμπλέκτη των ζευγών τροχών Wh2 και Wh4.
- Ο τύπος C δείχνει μια διάταξη με τέσσερις διαφορετικούς μαγνητικούς τροχούς, στην οποία οι Wheel2 και Wheel3 είναι μηχανικά στερεωμένοι και τοποθετημένοι σε έναν κοινό, μονό κυλιόμενο τροχό Wh2-3. Σε αντίθεση με τη ρύθμιση συμπλέκτη τύπου B, το ζεύγος μαγνητικών τροχών Wh3-Wh4 λειτουργεί επίσης ως στάδιο μαγνητικού οδοντωτού τροχού. Ολόκληρη η μαγνητική ρύθμιση του Τύπου C παρέχει τη δυνατότητα δημιουργίας εξαιρετικά υψηλών αναλογιών μείωσης με τετραγωνική αναλογία το πολύ, σε σύγκριση με τον Τύπο A και τον Τύπο B.

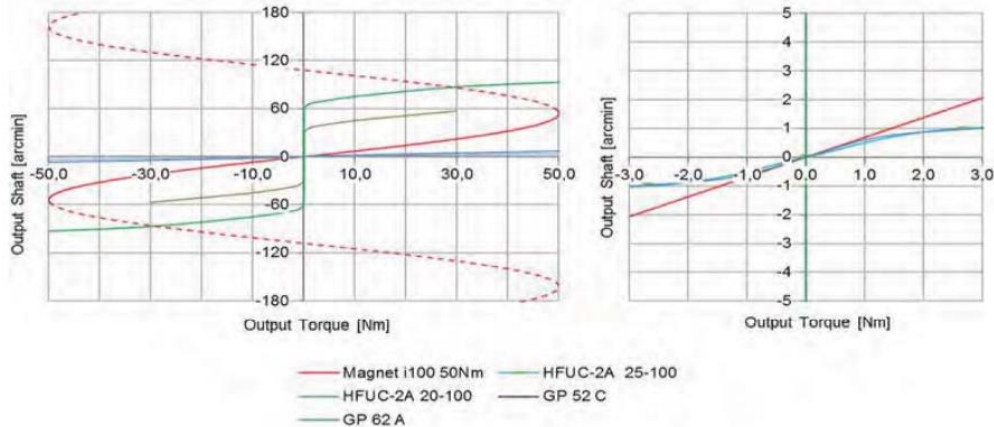
Και οι τρεις τύποι MWG επωφελούνται από μια ομαλή περιστροφή εξόδου χωρίς κυματισμούς. Για διαστημικές εφαρμογές, ο τύπος A και ο τύπος Γ είναι οι υποψήφιοι που ενδιαφέρονται:

- Ο τύπος A χαρακτηρίζεται από μία μόνο μαγνητική σύζευξη μεταξύ του τροχού 1 και του τροχού 2, με αποτέλεσμα τη μέγιστη ακαμψία της ροπής, καθώς και την πυκνότητα ροπής. Καθώς η κλίμακα MWG μπορεί εύκολα να κλιμακωθεί, είναι μια καλή επιλογή για βαθμίδες μετάδοσης παρέχοντας ισχυρή και ισχυρή κίνηση του άξονα εξόδου.
- Ο τύπος C επωφελείται από το δυναμικό των εξαιρετικά υψηλών αναλογιών μείωσης σε ένα μόνο στάδιο κιβωτίου ταχυτήτων και είναι χρήσιμος ως ένα μικρό και συμπαγές στάδιο πρώτης ταχύτητας για μείωση υψηλής ταχύτητας.

MWG Σε σύγκριση με τα υπερσύγχρονα μηχανικούς οδοντωτούς τροχούς

Λόγω των διαφορετικών διαθέσιμων δεδομένων για τα γρανάζια, είναι δύσκολο να συγκρίνουμε γρανάζια το ένα με το άλλο. Όλα τα δεδομένα ελήφθησαν από πραγματικούς καταλόγους και όλα τα γρανάζια συγκρίθηκαν με τις ίδιες αναλογίες μείωσης, τις ίδιες ονομαστικές ροπές και τις ίδιες συνθήκες λειτουργίας, αν ήταν δυνατόν.

Όπως φαίνεται στα [11] και [12], υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί ορισμοί των στρεπτικών φορτίων: «Όριο για στιγμιαία ροπή αιχμής», «Όριο επαναλαμβανόμενης μέγιστης ροπής», «Όριο μέσης ροπής», «Ονομαστική ροπή σε ονομαστική ταχύτητα», ή «Όριο για μέγιστη ροπή υπερφόρτωσης». Στο MWG, υπάρχει μόνο μία περιοριστική ροπή, η λεγόμενη «Μέγιστη ροπή». Επομένως, ο ορισμός των διαφορετικών ονομαστικών ροπών δεν είναι πλέον απαραίτητος στο MWG. Στο Σχ. 9 μπορούμε να δούμε τις διαφορές στη στρεπτική ακαμψία των MWG, HFUC και Planetary Gear.



Εικόνα 9: Στρεπτική ακαμψία με μπλοκαρισμένο άξονα εισόδου,

Σχέση μετάδοσης=100 και ονομαστική ροπή=50Nm

Ο οδοντωτός τροχός μπορεί να λειτουργήσει μέχρι συγκεκριμένη ροπή (50 Nm) σε πλήρη ταχύτητα εισόδου. Εάν ξεπεραστεί αυτή η ροπή, ο άξονας εξόδου θα χάσει τη στρεπτική σύζευξή του και το γρανάζι θα λειτουργήσει ως συμπλέκτης ασφαλείας (απεμπλοκή), εκτός εάν η ροπή έχει μειωθεί. Δεν θα προκύψει ζημιά μετά από μία βολή ή επαναλαμβανόμενη παράβαση της μέγιστης ροπής. Η λειτουργία στρέψης είναι το πιο σημαντικό έργο των οδοντωτών τροχών. Όπως φαίνεται στο προηγούμενο σχήμα, η στρεπτική ακαμψία σχετίζεται επίσης έντονα με τη μηχανική αντίδραση. Ενώ τα περισσότερα πλανητικά γρανάζια (GP52C, GP62A) δεν έχουν σχεδόν καμία ακαμψία στην περιοχή της μηδενικής μετάδοσης ροπής, το MWG και το HD είναι σχεδόν απαλλαγμένα από αντιδράσεις και ως εκ τούτου μπορούν να παρέχουν σημαντική ποσότητα στρεπτικής ακαμψίας. Αν και τα αρμονικά γρανάζια μετάδοσης κίνησης (HDG) είναι συνολικά πολύ πιο άκαμπτα από το MWG, μπορεί να παρατηρηθεί ένα ενδιαφέρον φαινόμενο γύρω από την περιοχή μηδενικής μετάδοσης ροπής (δεξιά). Η «Χαμένη κίνηση» στο HDG οδηγεί σε υποβάθμιση της στρεπτικής ακαμψίας αυτών των ταχυτήτων. Σε αυτήν την περιοχή, η ακαμψία των HDG και MWG είναι περίπου το ίδιο μέγεθος. Αυτό μπορεί να είναι σημαντικό σε σχέση με τις συχνότητες συντονισμού συζευγμένων μηχανισμών ή διαστημικών εφαρμογών.

Ανέπαφη σύζευξη μαγνητικών οδοντωτών τροχών σε ρομποτικές εφαρμογές

Τα μαγνητικά γρανάζια χρησιμοποιούνται ως μηχανισμός μετάδοσης δύναμης σε διάφορα μηχανήματα για σημαντικούς ρόλους, όπως μείωση ταχύτητας ή αλλαγή κατεύθυνσης του άξονα περιστροφής. Στα συμβατικά γρανάζια, η δύναμη μεταδίδεται μέσω επαφής μεταξύ των δοντιών. Μια τέτοια επαφή παράγει δυνάμεις τριβής, με αποτέλεσμα θόρυβο και σκόνη. Επιπλέον, τέτοια γρανάζια απαιτούν λίπανση και άλλη συντήρηση. Τα μαγνητικά γρανάζια έχουν προταθεί ως μηχανισμός μετάδοσης δύναμης χωρίς τέτοια προβλήματα [74]. Συνήθως, οι διαταραχές και άλλες επιρροές πρέπει να κατασταλούν στον έλεγχο ρομπότ. Ωστόσο, οι μαγνήτες χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση δύναμης σε μαγνητικά γρανάζια και η δυνατότητα ελέγχου χειροτερεύει λόγω της ολίσθησης του πόλου και της ροπής απόφραξης που εμφανίζονται όταν ξεπεραστεί η επιτρεπόμενη ροπή ή λόγω των χαρακτηριστικών του ελατηρίου που

σχετίζονται με την έλξη και την απόκρουση των μαγνητών [26]. Έχουν γίνει πολλές μελέτες για τα μηχανικά και μαγνητικά χαρακτηριστικά των μαγνητικών οδοντωτών τροχών [89]. Ο Huang και οι συνεργάτες του πραγματοποίησαν ηλεκτρομαγνητική ανάλυση (ανάλυση FEM) μαγνητικών πλανητικών οδοντωτών τροχών [84] και πραγματοποίησαν προσομοιώσεις και πειράματα με ροπή απόφραξης [45]. Ο Ikeda και οι συνεργάτες του εφάρμοσαν την ανάλυση 3D FEM στην απώλεια ρεύματος στα ομοαξονικά μαγνητικά γρανάζια που πρότειναν οι Atallah και Howe [29] και συζήτησαν στρατηγικές για τη μείωση των απωλειών.

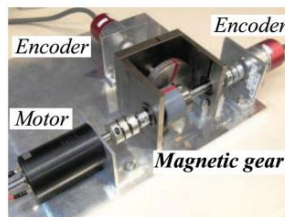
Έλεγχος ταχύτητας και ροπή απόφραξης

Όταν περιστρέφονται οι μαγνητικές ταχύτητες, η ροπή απόφραξης προκαλεί παλμό ταχύτητας, πράγμα που εμποδίζει τον κατάλληλο έλεγχο ταχύτητας. Προκειμένου να μετριάσουμε αυτό το φαινόμενο ροπής, ερευνήσαμε τα χαρακτηριστικά της ροπής απόφραξης σε πειράματα και προσπαθήσαμε να χρησιμοποιήσουμε τον έλεγχο προώθησης για να καταστείλουμε τη ροπή απόφραξης [74].

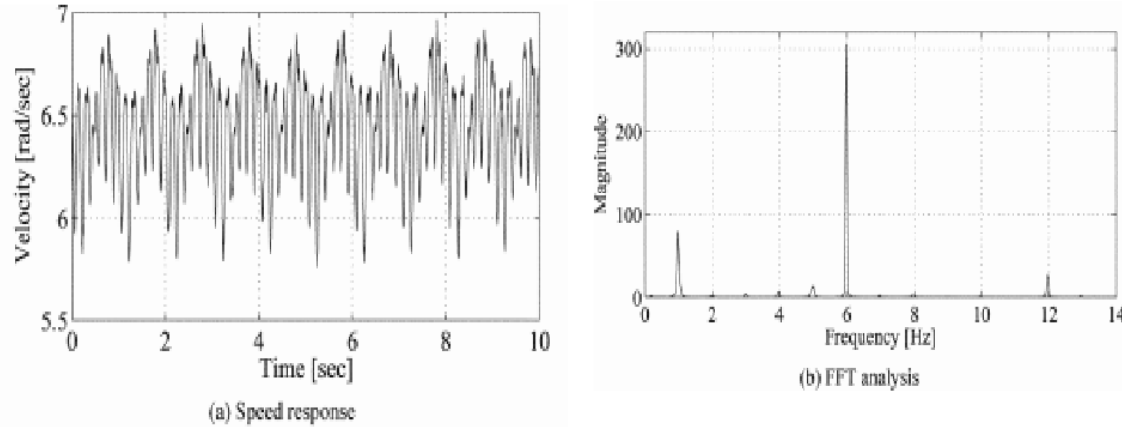
Αποτελέσματα προκαταρκτικών πειραμάτων για έλεγχο ταχύτητας

Στα πειράματα ελέγχου ταχύτητας, χρησιμοποιούμε τη μαγνητική σύζευξη ως μηχανισμό μετάδοσης σχήμα 10. Η μαγνητική σύζευξη κινήθηκε από έναν κινητήρα DC και η ταχύτητα του κινητήρα επιτεύχθηκε μετρώντας τη γωνία περιστροφής με έναν οπτικό κωδικοποιητή προσαρτημένο στον άξονα του κινητήρα. Η έξοδος του οπτικού κωδικοποιητή αποκτήθηκε σε τετραπλή ανάλυση (324.000 P/R). Ο χρόνος δειγματοληψίας στο σύστημα ελέγχου ήταν 0,1 ms. Το σχήμα 11 (α) δείχνει τα αποτελέσματα που ελήφθησαν για την απόκριση ταχύτητας υπό έλεγχο ταχύτητας PI με ταχύτητα στόχου 2π rad/s (μία περιστροφή ανά δευτερόλεπτο). Όπως φαίνεται από το διάγραμμα, η ταχύτητα του κινητήρα πάλλεται.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης FFT της απόκρισης ταχύτητας παρουσιάζονται στο Σχήμα 13 (β). Εδώ το κύριο συστατικό συχνότητας βρίσκεται κοντά στα 6 Hz. Στη μαγνητική σύζευξη που εξετάστηκε σε αυτή τη μελέτη, τόσο το γρανάζι όσο και το γρανάζι είναι εξοπλισμένα με έξι μαγνήτες το καθένα. δηλαδή, οι μαγνητικοί πόλοι επικαλύπτονται 6 φορές ανά περιστροφή. Έτσι, η συχνότητα του 6 που λαμβάνεται στην ανάλυση FFT μπορεί να αποδοθεί στην επίδραση της ροπής απόφραξης. Οι περιοδικές διαταραχές που προκαλούνται από τη ροπή απόφραξης έχουν ισχυρή επίδραση στους κινητήρες μαγνητικών οδοντωτών τροχών.



Εικόνα 10: Μαγνητικά καθοδηγούμενο σύστημα



Εικόνα 11: Αποτελέσματα προκαταρκτικών πειραμάτων ελέγχου ταχύτητας

Απόσβεση ταλάντωσης στον έλεγχο θέσης

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, σε ένα σύστημα μαγνητικής κίνησης, οι ελκυστικές δυνάμεις του μαγνήτη λειτουργούν ως στοιχεία ελατηρίου. Επιβεβαιώθηκε ότι τέτοια στοιχεία ελατηρίου προκαλούν ταλαντώσεις στον έλεγχο θέσης που υποβαθμίζουν την απόδοση καθίζησης και έτσι καταστέλλουμε τις ταλαντώσεις όπως εξηγείται παρακάτω.

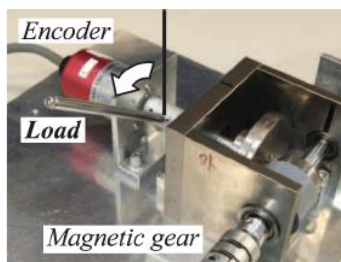
Αποτελέσματα προκαταρκτικών πειραμάτων σχετικά με τον έλεγχο της θέσης

Η πειραματική ρύθμιση για τον έλεγχο της θέσης φαίνεται στο Σχ. 12. Εδώ μια στρογγυλή ανοξείδωτη ράβδος (στερεά) προσαρτήθηκε ως φορτίο στην πλευρά εξόδου του μαγνητικού οδοντωτού τροχού. Ως αποτέλεσμα, η ροπή αδράνειας του φορτίου που φαίνεται στον πίνακα 1 έγινε $J_L = 0,99 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^2$. Για το σύστημα έλεγχου, ένας παρατηρητής διατάραξης (DOB) εφαρμόστηκε στον εσωτερικό βρόχο και ο έλεγχος PD στον εξωτερικό βρόχο, παρέχοντας έτσι σερβο έλεγχο με ανάδραση της γωνίας του κινητήρα. Η γωνία στόχου θ_{ref} εισήχθη σε βήματα των 30° . Τα αποτελέσματα των προκαταρκτικών πειραμάτων φαίνονται στο Σχ. 11. Όπως φαίνεται από το διάγραμμα, λαμβάνεται μια ταλαντωτική απόκριση σε σχέση με τη γωνία -στόχο 30° . Αυτά τα πειράματα επιβεβαίωσαν έντονες ταλαντώσεις που προκαλούνται από χαρακτηριστικά μαγνητικού ελατηρίου. Έτσι, ο έλεγχος απόσβεσης είναι απαραίτητος για τον έλεγχο θέσης ενός μαγνητικού κιβωτίου ταχυτήτων [74].

Μηχανισμός εκτίμησης δύναμης αντίδρασης

Όπως φαίνεται στο σχήμα 13, εξετάζουμε την περίπτωση κατά την οποία ένας κινητήρας είναι συνδεδεμένος σε ένα σύστημα μετάδοσης και η πλευρά εξόδου του συστήματος μετάδοσης είναι σε επαφή με το περιβάλλον. Τα διαγράμματα (α) και (β) αφορούν, αντίστοιχα, έναν συμβατικό μειωτήρα ταχυτήτων και έναν μαγνητικό μειωτήρα. Εδώ αγνοούμε τη βαρύτητα και άλλες ροπές διαταραχής. Στην περίπτωση του Σχ. 13 (α), η ακόλουθη σχέση ισχύει όπου T_m είναι η ροπή του κινητήρα, T_{reac} είναι η ροπή επαφής (δύναμη αντίδρασης) και T_{fric} είναι η στατική τριβή μέσα στον μειωτήρα ταχυτήτων:

$$T_m = T_{fric} + T^{reac}$$



Εικόνα 12: Πειραματική ρύθμιση για έλεγχο θέσης.

Σε αυτή την περίπτωση, η ροπή του κινητήρα μπορεί να υπολογιστεί από το ηλεκτρικό ρεύμα. Ωστόσο, η στατική τριβή T_{fric} είναι μια άγνωστη τιμή κάτω από τη μέγιστη στατική τριβή και μπορεί να βρεθεί μόνο από την ισορροπία ροπής, η οποία είναι δύσκολη. Δηλαδή, η αντίδραση T_{reac} δεν μπορεί να υπολογιστεί εφόσον η στατική τριβή T_{fric} είναι ασαφής. Από την άλλη πλευρά, στην περίπτωση ενός μειωτήρα μαγνητικών οδοντωτών τροχών, η στατική τριβή T_{fric} είναι εξαιρετικά μικρή και μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι μηδενική στην πράξη. Ωστόσο, η επίδραση της στρεπτικής ροπής $T_{tors}(\theta)$ που προκαλείται από τα χαρακτηριστικά του μαγνητικού ελατηρίου δεν μπορεί να αγνοηθεί, και ως εκ τούτου ισχύει η ακόλουθη σχέση για τον μειωτήρα μαγνητικών ταχυτήτων:

Εδώ η στρεπτική ροπή $T_{tors}(\theta)$ είναι $T_m = T_{tors}(\theta) + T^{reac}$ για με τη γωνία περιστροφής θ του μειωτήρα μαγνητικού οδοντωτού τροχού και μπορεί να εκτιμηθεί σε προκαταρκτική αναγνώριση. Έτσι, όταν χρησιμοποιείται μειωτής μαγνητικών οδοντωτών τροχών, η δύναμη αντίδρασης T_{reac} μπορεί να υπολογιστεί χωρίς τη χρήση αισθητήρων δύναμης. Στην πραγματικότητα, πρέπει επίσης να ληφθούν υπόψη και άλλα εξαρτήματα ροπής, όπως η ροπή βαρύτητας T_g , η ροπή τριβής Coulomb T_c ή η ιξώδης ροπή τριβής T_v . Αυτές οι ροπές διαταραχής μπορούν να εκτιμηθούν από τη θέση του κινητήρα και άλλες παραμέτρους, και ως εκ τούτου μπορούν να αντισταθμιστούν. Όσον αφορά τη ροπή διαταραχής που συμβαίνει όταν ο βραχίονας είναι σε επαφή με το περιβάλλον, η διαταραχή T_{dis} που υπολογίζεται από τον παρατηρητή διαταραχής συμπίπτει με τη δύναμη αντίδρασης T_{reac} υπό την προϋπόθεση ότι η αντίδραση παράγεται μόνο από το περιβάλλον. Ωστόσο, η ροπή διαταραχής περιλαμβάνει στρεπτική ροπή ροπής, ροπή βαρύτητας T_g και άλλα συστατικά εκτός της αντίδρασης T_{reac} , και έτσι εκτιμήσαμε τη δύναμη αντίδρασης αφαιρώντας τα αναφερόμενα συστατικά της διαταραχής από την εκτιμώμενη διαταραχή T_{dis} (Εικ. 14). Η δύναμη αντίδρασης υπολογίστηκε ως εξής:

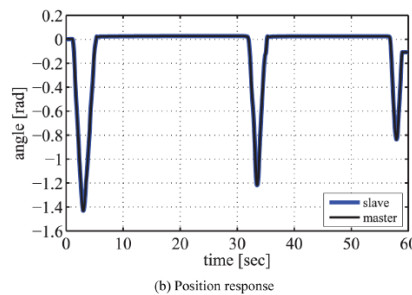
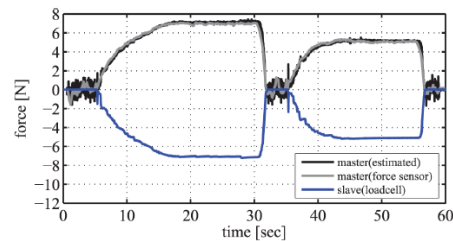
$$\hat{T}^{reac} = \hat{T}_{dis} - T_{tors}(\theta) - T_g(\theta) - T_c(\omega) - T_v(\omega)$$

Στο πείραμα [59], ο βραχίονας του πλοιάρχου χειρίστηκε για να φέρει δύο φορές το χέρι του σκλάβου σε επαφή με το περιβάλλον. Τα πειραματικά αποτελέσματα φαίνονται στο Σχ. 14 [(α): απόκριση δύναμης, (β): απόκριση θέσης]. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 14, στην πρώτη επαφή, η δύναμη εφαρμόστηκε σε περίπου 5 δευτερόλεπτα και η αντίδραση έφτασε περίπου τα 7 N. Μετά από αυτό, η δύναμη εφαρμόστηκε συνεχώς στο περιβάλλον για περίπου 15 δευτερόλεπτα. Στη δεύτερη επαφή, εφαρμόστηκε δύναμη σε περίπου 35 δευτερόλεπτα και η επαφή στα 5 N κράτησε για 10 δευτερόλεπτα. Αυτά τα

αποτελέσματα δείχνουν ότι η εκτιμώμενη αντίδραση του πλοιάρχου συμφωνεί καλά με την τιμή του αισθητήρα δύναμης. δηλαδή, η δύναμη αντίδρασης εκτιμήθηκε με μεγάλη ακρίβεια. Επιπλέον, η εκτίμηση συμφωνεί με την αντίδραση του σκλάβου επίσης, πράγμα που σημαίνει ότι η δύναμη αντίδρασης από την πλευρά του σκλάβου μεταδόθηκε στην κύρια πλευρά. Πραγματοποιήσαμε επίσης συγκριτικά πειράματα χρησιμοποιώντας ένα μηχανικό κιβώτιο ταχυτήτων ως κύρια πλευρά [90].

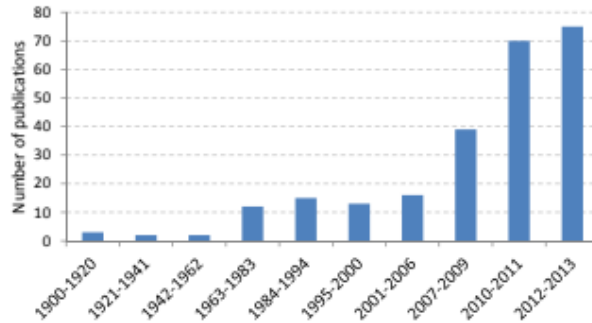
Εικόνα 14: Πειραματικά αποτελέσματα διμερούς ελέγχου χωρίς αισθητήρα.

2.2. Έρευνα και μελλοντικές εφαρμογές



Έρευνα

Ο S. Plali et al. [43] αναδρομεί την ιστορική και τρέχουσα εξέλιξη των τεχνολογιών των μαγνητικών οδοντωτών τροχών. Τα τελευταία χρόνια έχουν πραγματοποιηθεί σημαντικές δραστηριότητες έρευνας και ανάπτυξης σχετικά με τις τεχνολογίες μαγνητικών οδοντωτών τροχών. Ωστόσο, δεν είναι ακόμη σαφές εάν αυτή η τεχνολογία είναι έτοιμη για πιθανές βιομηχανικές εφαρμογές. Ο σκοπός αυτής της εργασίας είναι να συνοψίσει το ιστορικό και τρέχον έργο ανάπτυξης των τεχνολογιών μαγνητικών οδοντωτών τροχών σε μια προσπάθεια να δώσει στους αναγνώστες μια εικόνα για τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα, τις προκλήσεις, τις ευκαιρίες και την τεχνολογική ετοιμότητα.

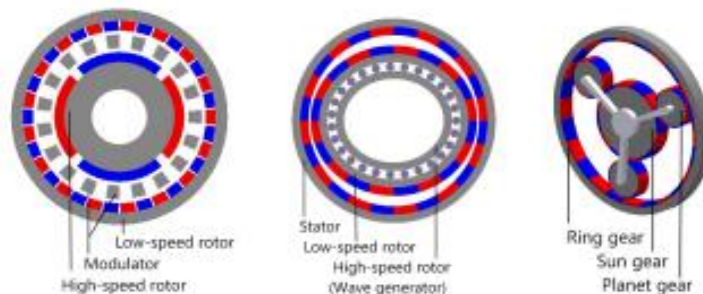


Εικόνα 15: Η δημοσιευμένη δραστηριότητα στους μαγνητικούς οδοντωτούς τροχούς (1900-2013).

Ο S. Tlali et al. στο άρθρο [43] αναλύει την ιστορική και τρέχουσα ανάπτυξη των τεχνολογιών μαγνητικών οδοντωτών τροχών με ιδιαίτερη έμφαση στο ομόκεντρο τύπου MG. Τα ξεχωριστά πλεονεκτήματα της τεχνολογίας μαγνητικών οδοντωτών τροχών διερευνώνται μαζί με τις προκλήσεις που σχετίζονται με αυτήν την τεχνολογία.

Οι οδοντωτοί τροχοί έχουν δυνητικά υψηλή απόδοση και αξιοπιστία λόγω της λειτουργίας τους χωρίς επαφή, της εγγενούς προστασίας από υπερφόρτωση και ελάχιστη έως καθόλου συντήρηση. Τα μηχανήματα με μαγνητικό γρανάτζι έχουν αναδειχθεί ως μια νέα κατηγορία ηλεκτρικών μηχανών με υψηλή πυκνότητα ροπής. Έχουν προταθεί διάφορες τοπολογίες και απαιτείται περαιτέρω έρευνα για να διαπιστωθούν τα πλεονεκτήματά τους.

Η τεχνολογία μαγνητικών οδοντωτών τροχών βρίσκεται ακόμη σε αρχικό στάδιο και η πρακτική επικύρωση είναι επιθυμητή για να εδραιώσει σταθερά την ετοιμότητά της στον βιομηχανικό κόσμο. Η σχετικά περίπλοκη δομή και διαδικασία σχεδιασμού των MG και των MGM, μαζί με την τιμή των PM, συνεπάγονται υψηλό κόστος κατασκευής. Τα πλεονεκτήματα που θα μπορούσε να φέρει αυτή η τεχνολογία είναι σημαντικά και δικαιολογούν περαιτέρω ανάπτυξη.



Εικόνα 16: Ομόκεντροι, αρμονικοί και πλανητικοί μαγνητικοί οδοντωτοί τροχοί.

Ο κύριος στόχος του Mattia Filippini [46] είναι να παρέχει αποτελεσματικές στρατηγικές μοντελοποίησης και βελτιστοποίησης για μια συγκεκριμένη ηλεκτρομαγνητική συσκευή γνωστή ως μαγνητικός οδοντωτός τροχός. Συγκεκριμένα, συζητούνται μαγνητικά, θερμικά και μηχανικά μοντέλα και εξετάζονται τα μοντέλα μη γραμμικών υλικών, συμπεριλαμβανομένων αλγορίθμων

απομαγνήτισης μόνιμων μαγνητών και μοντέλα υστέρησης σε πλαστικοποιημένα φύλλα. Από την άποψη της μαγνητικής μοντελοποίησης, παρουσιάζεται μια αναλυτική προσέγγιση για τον αρχικό απλοποιημένο σχεδιασμό οδοντωτών τροχών. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην υπολογιστική επιβάρυνση της μεθόδου που είναι ειδικά προσαρμοσμένη για διαδικασίες στοχαστικής βελτιστοποίησης. Για τη λεπτομερή ανάλυση των μαγνητικών οδοντωτών τροχών, προτείνεται ένας αλγόριθμος βασισμένος στη σύζευξη Πεπερασμένων Στοιχείων / Οριακών Στοιχείων, που περιλαμβάνει σιδηρομαγνητικά μη γραμμικότητες, μηχανικές συνηθισμένες διαφορικές εξισώσεις, ρεύματα στροβίλου και εξισώσεις κυκλώματος. Λεπτομερή μοντέλα εισάγονται και συζητούνται για την ανάλυση των επιπτώσεων της υστέρησης του μαλακού υλικού και της μαγνήτισης, απομαγνήτισης και ανάκρουσης των μόνιμων μαγνητών. Διερευνώνται επίσης μηχανισμοί απώλειας σε μαγνητικά γρανάζια και αναλύονται οι απώλειες μετάδοσης σε διαφορετικές ταχύτητες περιστροφής και γωνίες φορτίου.

Ένα απλοποιημένο μηχανικό μοντέλο του μαγνητικού οδοντωτού τροχού παρουσιάζεται και διατυπώνεται ως ένα σύνολο περιορισμών ανισότητας, δίνοντας έτσι έναν άμεσο σύνδεσμο με στρατηγικές βελτιστοποίησης. Οι μηχανικοί περιορισμοί περιλαμβάνουν τις μετατοπίσεις και τις τάσεις των σιδερένιων πόλων και τους περιορισμούς στην ταχύτητα περιστροφής λόγω υπερβολικών τάσεων, συντονισμών και κραδασμών. Παρουσιάζεται επίσης μια απλοποιημένη ανάλυση βασισμένη σε ισοδύναμο θερμικό δίκτυο, όπου λαμβάνεται υπόψη και η αξονική ροή ψύξης [88].

Οι τεχνικές στοχαστικής βελτιστοποίησης συζητούνται για ένα πολύ φυσικό βελτιστοποιημένο σχεδιασμό μηχανών και το αναλυτικό μοντέλο ενσωματώνεται σε ένα σχήμα διαφορικής εξέλιξης [82].

Τέλος, συζητούνται τα βελτιστοποιημένα αποτελέσματα και συγκρίνονται με τα εμπορικά μηχανικά κιβώτια ταχυτήτων. Μια λύση βασισμένη στη σύνδεση των ράβδων ακαμψίας προτείνεται και αναλύεται επίσης για να παρέχει ένα αποτέλεσμα απόσβεσης όταν η λειτουργία του οδοντωτού τροχού γίνεται ασύγχρονη.

Κατά τη διάρκεια του διδακτορικού, υπήρξε μια συνεχής προσπάθεια που στοχεύει στην κατασκευή ενός πρωτοτύπου για την επικύρωση των αριθμητικών μοντέλων, αλλά, για διαφορετικούς λόγους, κανένας από τους κατασκευαστές δεν ολοκλήρωσε το έργο. Έτσι, όλοι οι αλγόριθμοι έχουν επικυρωθεί συγκρίνοντας την παραγωγή τους με εμπορικούς κωδικούς ή, όταν είναι δυνατόν, με δεδομένα από πειράματα που έχουν ληφθεί από τη βιβλιογραφία. Για τους λόγους αυτούς και δεδομένου ότι ο κύριος στόχος αυτής της διπλωματικής εργασίας αφορά τις αριθμητικές τεχνικές για την προσομοίωση μαγνητικών οδοντωτών τροχών, έχουν υιοθετηθεί διαφορετικές μαγνητικές μεταδόσεις ως αριθμητικές περιπτώσεις δοκιμών για την επικύρωση των αλγορίθμων.

Ο Mattia Filippini παρουσιάζει μια πλήρη προσέγγιση μοντελοποίησης και βελτιστοποίησης για μαγνητικές μεταδόσεις [46]. Η προσέγγιση αποτελείται από ένα αρχικό εργαλείο σχεδιασμού μαγνητικών οδοντωτών τροχών που βασίζεται σε μια γρήγορη και απλοποιημένη μαγνητική ανάλυση, το οποίο συνδυάζεται με μηχανικούς και θερμικούς περιορισμούς και ενσωματώνεται

σε ένα σχήμα διαφορικής εξέλιξης. Αυτή η αποτελεσματική μέθοδος βελτιστοποίησης επιτρέπει σε κάποιον να προσδιορίσει το βέλτιστο σετ Pareto. Η λεπτομερής ανάλυση των σχεδίων στο μέτωπο του Pareto μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω της προτεινόμενης μεθόδου Πεπερασμένων Στοιχείων / Οριακών Στοιχείων, η οποία επιτρέπει τη συμπερίληψη μη γραμμικών γραμμών, κίνησης, στροβιλισμένων ρευμάτων, εξισώσεων κυκλώματος και μηχανικών εξισώσεων που παραμελούνται ή απλοποιούνται πολύ στο αναλυτικό μοντέλο. Μια ειδική προσπάθεια έχει αφιερωθεί στην αύξηση της αποδοτικότητας της αριθμητικής τεχνικής FEM/BEM: μια ισχυρή μέθοδος επιτάχυνσης (επιτάχυνση Anderson) εφαρμόστηκε και δοκιμάστηκε επιτυχώς σε διαφορετικές κατηγορίες ηλεκτρομαγνητικών προβλημάτων και εφαρμόστηκε, παρέχοντας μειώσεις επανάληψης έως και 75%. Το Μοντέλο για προσομοίωση υστέρησης σε θήκες με πολυστρωματικά φύλλα και για μη γραμμική προσομοίωση ΒΗ μόνιμων μαγνητών προτείνονται και επικυρώνονται στην περίπτωση μαγνητισμού επιτόπου ενός τμηματοποιημένου ρότορα PM. Όλοι οι προτεινόμενοι αλγόριθμοι συγκρίθηκαν με εμπορικούς κωδικούς Πεπερασμένων Στοιχείων ή με πειραματικά δεδομένα που ανακτήθηκαν από τη βιβλιογραφία.

Kang Li et al. στο [1] παρέχει μια ανασκόπηση των τρεχουσών και προηγούμενων εξελίξεων στον τομέα της τεχνολογίας περιστροφικών μαγνητικών οδοντωτών τροχών. Η απόδοση διερευνάται ως προς την πυκνότητα ροπής και τον λόγο μετάδοσης. Σκοπός της εργασίας είναι να παρουσιάσει ένα στιγμιότυπο της τρέχουσας κατάστασης της τέχνης σε αυτόν τον ταχέως αναπτυσσόμενο τομέα έρευνας.

Kang Li et al. προσπάθησε να αναδείξει όλα τα δημοσιευμένα περιστροφικά σχέδια MG που έχουν επιτύχει υπολογισμένη ή μετρημένη πυκνότητα ροπής > 50 Nm/L. Η ομοαξονική MG της ακτινικής τυπολογίας είναι η πιο μελετημένη MG και μέχρι σήμερα έχει επιτύχει την υψηλότερη πειραματικά μετρημένη πυκνότητα ροπής 239 Nm/L. Δεδομένου ότι πολλά μηχανικά κιβώτια ταχυτήτων μπορούν να λειτουργήσουν σε πυκνότητα ροπής άνω των 300 Nm/L, απαιτείται ακόμη έρευνα για περαιτέρω βελτίωση της απόδοσης πυκνότητας ροπής MG. Επιπλέον, απαιτείται περαιτέρω εργασία όσον αφορά την απόδειξη της αποτελεσματικότητας των MG. Τα δυναμικά χαρακτηριστικά απόδοσης των MG πολλαπλών σταδίων δεν έχουν ακόμη διερευνηθεί [1].

Ο Wang et al. στο άρθρο [3] αναλύουν πως οι συσκευές με οδοντωτούς τροχούς χρησιμοποιούνται συνήθως για να ταιριάζουν την ταχύτητα λειτουργίας και τη ροπή της πηγής ισχύος με το δεύτερο κινητήρα. Τέτοιες συσκευές με γρανάζι είναι συνήθως μηχανικά γρανάζια. Ως αντίστοιχα των συμβατικών μηχανικών οδοντωτών τροχών, τα μαγνητικά γρανάζια γίνονται πολλά υποσχόμενες συσκευές, κυρίως λόγω των πλεονεκτημάτων της φυσικής απομόνωσης μεταξύ των κινούμενων μερών, της λίπανσης των οδοντωτών τροχών, της μηχανικής κόπωσης, της εγγενούς προστασίας από υπερφόρτωση και της μειωμένης συντήρησης κ.λπ. Πρόσφατα, πολλές νέες τοπολογίες έχουν προτάθηκε για την επίτευξη καλύτερων επιδόσεων. Σε αυτό το

έγγραφο, παρουσιάζεται μια γενική ανασκόπηση των μαγνητικών οδοντωτών τροχών, συμπεριλαμβανομένης μιας συζήτησης για τις πιο συνηθισμένες και επερχόμενες τοπολογίες και μια περιγραφή της αρχής λειτουργίας. Πραγματοποιείται σύγκριση διαφορετικών τοπολογιών, όσον αφορά την σχέση μετάδοσης και την πυκνότητα ροπής. Παρατίθενται και περιγράφονται οι κύριες υπολογιστικές τεχνικές που χρησιμοποιούνται γενικά για ομοαξονικά μαγνητικά γρανάζια. Ορισμένες βασικές πτυχές που αφορούν το σχεδιασμό, τις υπάρχουσες προκλήσεις και τις πιθανές εφαρμογές συζητούνται επίσης. Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να παρέχει μια ολοκληρωμένη επισκόπηση των μαγνητικών οδοντωτών τροχών για τους αναγνώστες που εργάζονται σε αυτόν τον τομέα.

Ο Wang et al. στο παρουσιάζει μια ανασκόπηση για τα μαγνητικά γρανάζια. Συζητούνται οι κύριες τοπολογίες καθώς και οι αρχές λειτουργίας τους[3]. Δίνεται σύγκριση διαφορετικών τοπολογιών, όσον αφορά την σχέση μετάδοσης και την πυκνότητα ροπής. Παρατίθενται και συγκρίνονται οι πιο διαφορετικές διαδικασίες υπολογισμού που υιοθετήθηκαν στη βιβλιογραφία. Τέλος, συζητούνται οι σχεδιαστικές πτυχές, οι προκλήσεις και οι προοπτικές των ομοαξονικών MG. Συμπερασματικά, τα χαρακτηριστικά της υψηλής πυκνότητας ροπής, της εγγενούς προστασίας από υπερφόρτωση, δεν διαθέτουν λίπανση και φυσική απομόνωση ωφελούν τα MG για πολλές εφαρμογές. Παρ' όλα αυτά, τα MG βρίσκονται ακόμη στο στάδιο της προ-εμπορευματοποίησης και υπάρχουν αρκετές προκλήσεις:

- Εξαιρετικά υψηλή πυκνότητα ροπής με νέες τοπολογίες.
- Τοπολογία μαγνητικών οδοντωτών τροχών πολλαπλών σταδίων με σχέση μετάδοσης.
- μηχανική δομή, ειδικά ο σχεδιασμός των σιδερένιων στύλων.
- Μετριάσμος των απωλειών ρεύματος σε υψηλή ταχύτητα.
- παροδικές ταλαντώσεις.
- διαθεσιμότητα μαγνητών σπάνιας γης ή εναλλακτικών MG μη σπάνιων γαιών.

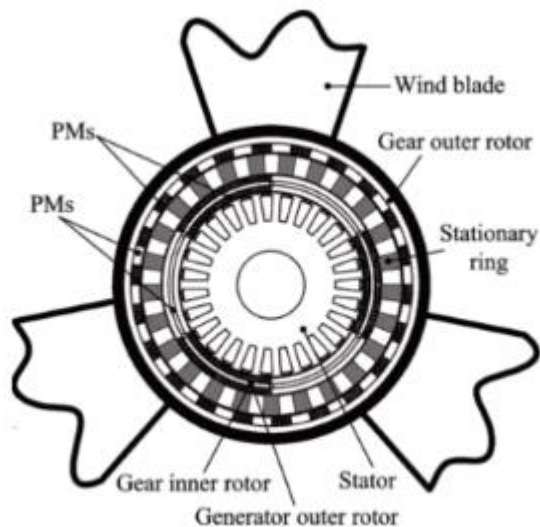
Ως εκ τούτου, απαιτούνται περαιτέρω προσπάθειες από τους ερευνητές και τις βιομηχανίες για τη μαζική εμπορευματοποίηση των MG.

Ο Atallah et al. στο άρθρο [29] δείχνει ότι τα μηχανικά κιβώτια ταχυτήτων χρησιμοποιούνται εκτενώς για να ταιριάζουν με την ταχύτητα λειτουργίας των κινούμενων με τις απαιτήσεις των φορτίων τους. Παρόλο που μπορούν να επιτευχθούν υψηλές πυκνότητες ροπής συστήματος, απαιτείται λίπανση και ψύξη των ταχυτήτων, ενώ ο θόρυβος, οι κραδασμοί και η αξιοπιστία μπορεί να είναι σημαντικά ζητήματα. Το έγγραφο περιγράφει το σχεδιασμό και την απόδοση ενός μαγνητικού οδοντωτού τροχού, το οποίο χρησιμοποιεί μαγνήτες σπάνιας γης, οι οποίες μελέτες προσομοίωσης έχουν δείξει ότι έχουν πυκνότητα ροπής που υπερβαίνει τα 100 kNm/m^3 .

Μια νέα τοπολογία για ένα μαγνητικό οδοντωτών τροχών υψηλής απόδοσης παρουσιάστηκε από τους Attallah et al. Έχει αποδειχθεί ότι, χρησιμοποιώντας μαγνήτες σπάνιας γαιών, μπορεί να επιτευχθεί πυκνότητα ροπής άνω των 100 kNm/m^3 . Έχει επίσης αποδειχθεί ότι η πυκνότητα ροπής του συστήματος (δηλ. Μαγνητικού οδοντωτού τροχού και ηλεκτρικού μηχανήματος) μπορεί να είναι συγκρίσιμη ή καλύτερη από εκείνη μιας μηχανής εγκάρσιου πεδίου [29]. Ο στόχος των McGilton et al. στο [13] είναι να παρουσιάσει μια περίληψη της τελευταίας τεχνολογίας στην τεχνολογία μαγνητικών οδοντωτών τροχών (MG) και στη συνέχεια να διερευνήσει τις ιδιαίτερες δυνατότητές της σε εφαρμογές συσκευών θαλάσσιας ενέργειας [91]. Ως εισαγωγή, δίνεται μια σύντομη ανάλυση της κατάστασης της βιομηχανίας θαλάσσιας ενέργειας και συζητείται το περιβάλλον στο οποίο λειτουργούν οι μετατροπείς θαλάσσιας ενέργειας (MEC). Δίνεται μια σύντομη επισκόπηση της ανάπτυξης της MG τον περασμένο αιώνα και στη συνέχεια οι κορυφαίες τεχνολογίες συζητούνται λεπτομερέστερα με τα πλεονεκτήματα των συστημάτων MG. Προκειμένου να καταδειχθεί το δυναμικό των MG σε θαλάσσιες εφαρμογές, τα μηχανήματα που επικρατούν, δηλαδή μηχανικά μηχανήματα και μηχανήματα άμεσης κίνησης, εξετάζονται ως προς το μέγεθος, την αξιοπιστία και την οικονομική αξία χρησιμοποιώντας προηγούμενες μελέτες σε παρόμοια τεχνολογία, συγκεκριμένα την αιολική. Τέλος, τα MG εφαρμόζονται εννοιολογικά σε τρεις τύπους MEC για να καταδείξουν πώς οι υπάρχουσες τεχνολογίες μπορούν να προσαρμοστούν εύκολα για να ενσωματώσουν την τεχνολογία και να αποκτήσουν τα αναφερόμενα πλεονεκτήματα.

Ο McGilton et al. απέδειξε πώς η τεχνολογία των οδοντωτών τροχών ταιριάζει άμεσα σε μια ποικιλία συσκευών θαλάσσιας ενέργειας. Η σύγκριση που πραγματοποιήθηκε μεταξύ συστημάτων με γρανάζι και χωρίς γρανάζι διαπίστωσε ότι αν και στα συστήματα χωρίς γρανάζι η O&M ωφελείται από την εξάλειψη ενός μηχανικού στοιχείου αύξησης της ταχύτητας, τα μηχανήματα που προκύπτουν είναι μεγάλα και ακριβά. Ο μαγνητικός οδοντωτός τροχός είναι ένας δυναμικά ιδανικός συμβιβασμός με τα οφέλη και των δύο τοπολογιών [13]. Για να αποδείξει περαιτέρω την εφαρμογή, η τεχνολογία εφαρμόστηκε εννοιολογικά σε 3 υπάρχουσες συσκευές θαλάσσιας ενέργειας με ποικίλα συστήματα PTO χρησιμοποιώντας υπάρχοντα προτεινόμενα σχέδια MG. Αν και επί του παρόντος ακριβά, μπορούν να αναμένονται μειώσεις με συστήματα μαζικής παραγωγής και με παρόμοιες τιμές ροπής όπως τα μηχανικά γρανάζια, μαζί με Μεγάλες μειώσεις στο κόστος O&M και προστασία από υπερφόρτωση, τα MG μπορούν να είναι μια οικονομικά και λειτουργικά ανώτερη επιλογή στα MEC. Περαιτέρω εργασία προτείνεται για τη σύγκριση του πραγματικού κόστους από τη χρήση μιας μηχανής MG με τα παραδοσιακά συστήματα. Αυτό θα συνεπαγόταν προβλεπόμενη εξοικονόμηση κόστους O&M που αντισταθμίζεται από το υψηλό κόστος υλικών και κατασκευής. Επιπλέον, τα σχέδια που

περιγράφονται εννοιολογικά σε αυτό το έγγραφο θα πρέπει να διερευνηθούν για την ανάπτυξη στρατηγικών για τη μαριναρίωση και τη γενική ενσωμάτωση MEC.

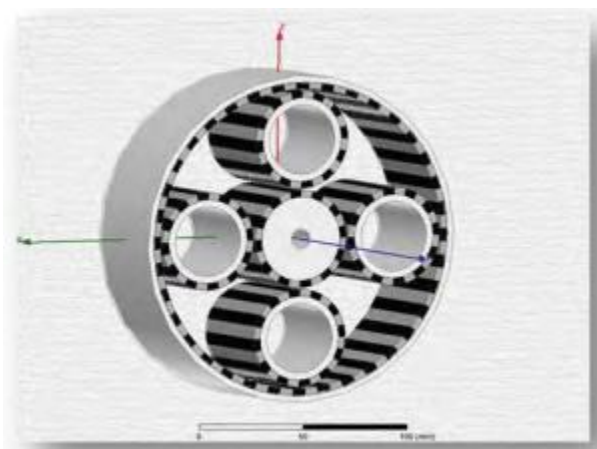


Εικόνα 17: Προτεινόμενη παλινδρομική τουρμπίνα
με οδοντωτό τροχό[13]

Ο Daniel Fodorean στο [48] εξηγεί συνοπτικά το πλεονέκτημα της χρήσης μαγνητικών οδοντωτών τροχών(MG) για εφαρμογές μεταφοράς. Συνήθως, μια μονάδα έλξης EV αποτελείται, εκτός από τον κινητήρα ή τον κινητήρα, από ένα μηχανικό γρανάζι. Έχουν τονιστεί τα μειονεκτήματα της χρήσης μηχανικών οδοντωτών τροχών, ιδίως σε σχέση με τη μηχανοκίνηση υψηλής ταχύτητας, όπου η υψηλή αναλογία μετάδοσης μπορεί να επιτευχθεί μόνο με τη σύνδεση πολλαπλών ταχυτήτων σε σειρά. Ένας μαγνητικός οδοντωτός τροχός είναι ικανός να ξεπεράσει αυτά τα ζητήματα. Το κεφάλαιο παρουσιάζει μια τεχνολογία των διαθέσιμων MG, με σταθερή ή μεταβλητή αναλογία μετάδοσης, επισημαίνοντας την εφαρμοσιμότητά τους. Στη συνέχεια, εισάγονται οι πιθανές προσεγγίσεις σχεδιασμού (αρμονικό, ισοδύναμο κύκλωμα μαγνητικής απροθυμίας και διανυσματικό δυναμικό). Επιπλέον, αξιολογούνται οι επιδόσεις εξόδου (ισχύς και ροπή) δύο τύπων μελετώμενων MG, με έμφαση στα κύρια κριτήρια απώλειας: απώλειες σιδήρου σε όλα τα ενεργά μέρη του MG. Τέλος, η επίδραση αρκετών υλικών παρατηρείται μέσω αριθμητικών υπολογισμών για να αποφασιστεί, με βάση συγκεκριμένη διαμόρφωση, την καταλληλότερη παραλλαγή για μεταφορές και αεροναυτικές εφαρμογές. Ο Daniel Fodorean προτείνει μια επισκόπηση των προκλήσεων στην εφαρμογή EV, όπου τα όρια ταχύτητας προωθήθηκαν την τελευταία δεκαετία [48]. Πρακτικά, όλοι οι κατασκευαστές αυτοκινήτων προτείνουν λύσεις κινητικότητας που βασίζονται σε ηλεκτρικά προωθούμενα συστήματα έλξης, τα οποία είναι περιορισμένα λόγω των μειονεκτημάτων του μηχανικού εργαλείου, το οποίο πρέπει να λιπαίνεται συνεχώς, παρουσιάζοντας σημαντικές θερμικές και τοπικές απώλειες. Επιπλέον, οι υψηλότερες ταχύτητες μειώνουν δραστικά την πυκνότητα ισχύος

της μηχανοκίνησης. Για να ξεπεραστούν αυτά τα μειονεκτήματα, οι ερευνητές προτείνουν την τελευταία δεκαετία πιθανές λύσεις που βασίζονται σε μαγνητικά γρανάζια (MG). Παρουσιάσαμε σε αυτό το κεφάλαιο την υπάρχουσα διαμόρφωση των σταθερών λόγων μετάδοσης MG, έχουμε επίσης αναφέρει μερικές αναφορές στις οποίες μελετήθηκε η μεταβλητή μετάδοση και οι κύριες αναλυτικές προσεγγίσεις παρουσιάστηκαν που χρησιμοποιούνται για το σχεδιασμό των MG: την αρμονική, ισοδύναμη μαγνητική απροθυμία εναλλακτικό κύκλωμα και διανυσματικοί δυνητικοί αλγόριθμοι. Σχετικά με αυτό το θέμα δόθηκε ένας οιονεί πλήρης κατάλογος αναφοράς. Στη συνέχεια, ερευνήσαμε δύο παραλλαγές MG, μία με ενσωματωμένο κινητήρα και μια δεύτερη για εφαρμογές υψηλής ταχύτητας και λόγο μετάδοσης 1/16. Μέσω αριθμητικών υπολογισμών διερευνούνται οι μηχανικές επιδόσεις εξόδου των MG που μελετήθηκαν, καθώς και το κύριο συστατικό απώλειας τέτοιων συσκευών: την απώλεια σιδήρου στα ενεργά μέρη του MG. Η επίδραση διαφορετικών υλικών στα ενεργά μέρη, που σημαίνει σιδηρομαγνητικός χάλυβας και μόνιμοι μαγνήτες, αξιολογήθηκε και απεικονίστηκε μια σύγκριση των επιτευχθέντων επιδόσεων. Η έρευνα για το MG έχει αποκτήσει ενδιαφέρον την τελευταία δεκαετία και αναμένουμε ότι με βάση τις εξελίξεις στα υλικά, οι επιδόσεις αυτών των συσκευών θα βελτιωθούν ακόμη περισσότερο και θα έχουν πραγματικό ενδιαφέρον, ειδικά στον τομέα των μεταφορών και της αεροναυπηγικής.

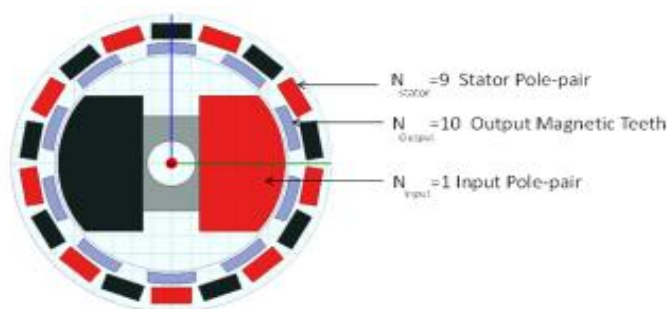
Τα μαγνητικά κιβώτια ταχυτήτων είναι μηχανισμοί χωρίς επαφή για τη μετατροπή της ταχύτητας ροπής. Δεν παρουσιάζουν καμία φθορά, καμία τριβή και καμία κόπωση. Δεν χρειάζονται λιπαντικό και μπορούν να προσαρμοστούν για άλλες μηχανικές ιδιότητες, όπως ακαμψία ή απόσβεση. Επιπλέον, μπορούν να προστατεύσουν δομές και μηχανισμούς από υπερφόρτωση, περιορίζοντας τη μεταδιδόμενη ροπή. Perez-Diaz et al. σε [49], οι διαμορφώσεις spur, planetary και "magdrive" ή "harmonic drive" συγκρίνονται λαμβάνοντας υπόψη τη χρήση τους σε αεροδιαστημικές εφαρμογές. Τα πιο πρόσφατα δεδομένα δοκιμών συνοψίζονται για να παρέχουν κάποια χρήσιμη βοήθεια στον μηχανικό σχεδιασμού.



Εικόνα 18: Μοντέλο για μαγνητικό πλανητικό γρανάζι 1: 5.

Perez-Diaz et al. δείχνουν ότι τα μαγνητικά γρανάζια γίνονται ανταγωνιστικές εναλλακτικές λύσεις σε σχέση με τα συμβατικά γρανάζια. Δεν παρουσιάζουν καμία επαφή και καμία φθορά. Δεν παράγουν συντρίμια και δεν απαιτούν λιπαντικό, καθώς μπορούν να λειτουργούν σε ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασιών που κυμαίνεται από -270°C έως 350°C . Παρουσιάζουν εγγενείς ιδιότητες αντιμπλοκαρίσματος και υπάρχει αποτέλεσμα συμπλέγματος εάν η εφαρμοζόμενη ροπή υπερβαίνει ένα όριο προστατεύοντας την έξοδο από υπερφόρτωση. Αυτό το αποτέλεσμα είναι πλήρως αναστρέψιμο χωρίς καμία φθορά ή φθορά. Το TRL αυτής της τεχνολογίας αυξάνεται προς το παρόν καθιστώντας το διαθέσιμο για εξέταση για αεροδιαστημικές χρήσεις. Η ριζικά διαφορετική συμπεριφορά έναντι των υπερφορτώσεων ροπής, η απομόνωση των κραδασμών, η απουσία συντήρησης, η συμβατότητα με άμμο ή σκόνη, το ευρύ φάσμα θερμοκρασιών και η ικανότητα διαπερατότητας του τοίχου είναι μερικές ιδιότητες που κάνουν αυτές τις συσκευές ελκυστικές για την αεροδιαστημική. [49]

Οι διαστημικές περιβαλλοντικές συνθήκες αναγκάζουν τη χρήση στερεών λιπαντικών οδοντωτών τροχών για πολλές εφαρμογές. Η χρήση στερεών λιπαντικών περιορίζει δραστικά τη χωρητικότητα ροπής και την απόδοση του κιβωτίου ταχυτήτων, καθιστώντας το συνολικό σύστημα σημαντικά βαρύτερο και ογκώδες. Επιπλέον, τα στερεά λιπαντικά γρανάζια υποφέρουν από φθορά, δημιουργία συντριμμίων και από ταχεία υποβαθμισμένη απόδοση. Τα μαγνητικά γρανάζια μεταδίδουν ροπή χωρίς επαφή, δεν απαιτείται λίπανση, δεν υφίστανται φθορά, δημιουργία συντριμμίων και θα μπορούσαν να παρέχουν μια πολύ σταθερή απόδοση κατά τη διάρκεια μιας μεγάλης διάρκειας ζωής. Οι προηγούμενες εξελίξεις του MG είναι πολύ βαριές, παρουσιάζουν κακή απόδοση και παρουσιάζουν υψηλότερη μαγνητική μόλυνση από τις απαιτήσεις ECSS. Η Esnoz-Larraya et al. παρουσιάζουν το MAGSOAR, στο πλαίσιο του έργου ESA ITI OPTIMAGDRIVE, το οποίο απέδειξε μια νέα γενιά μαγνητικών οδοντωτών τροχών σε σχετικό περιβάλλον (-40°C έως 70°C) με πρωτοφανή απόδοση (υψηλές αναλογίες μείωσης έως 1:75, υψηλή πυκνότητα ροπής έως 93 kN/m^3 και χαμηλή μαγνητική μόλυνση) καθιστώντας την τεχνολογία πολύ ελκυστική για διαστημικές εφαρμογές [50].



Εικόνα 19. Μοντέλο r 1:10 [50]

Στο [50], δοκιμάστηκαν τρία μοντέλα μαγνητικών οδοντωτών τροχών. Με βάση τα αποτελέσματα που ελήφθησαν, οι Esnoz-Larraya et al. κατέληξε στο συμπέρασμα ότι τα ανεπτυγμένα κιβώτια ταχυτήτων είναι ένα βήμα μπροστά στην υπερσύγχρονη τεχνολογία αυτής της τεχνολογίας. Η πραγματική πυκνότητα ροπής βελτιώθηκε σημαντικά, γεγονός που τα καθιστά ανταγωνιστικά έναντι των μηχανικών κιβωτίων ταχυτήτων ως προς το βάρος, ειδικά όταν η στερεή λίπανση είναι υποχρεωτική. Η αποδοτικότητα είναι επίσης ένα σαφές πλεονέκτημα της τεχνολογίας, ειδικά σε χαμηλές θερμοκρασίες. Το μοντέλο D34r10 παρουσιάζει έναν ελαφρύ σχεδιασμό, σε συνδυασμό με υψηλή αναλογία μείωσης και υψηλή ακρίβεια, σε ένα πολύ κοινό μέγεθος για κιβώτιο ταχυτήτων που χρησιμοποιείται σε διαστημικές εφαρμογές. Μπορούν να επιτευχθούν πολύ υψηλές αναλογίες μείωσης σε ένα μόνο στάδιο (έως 1:75), παρέχοντας υψηλή ροπή εξόδου (έως 27,9N) και πολύ υψηλή απόδοση σε χαμηλές θερμοκρασίες (αποδεικνύεται στους -40oC). Τα κύρια πλεονεκτήματα της τεχνολογίας είναι η καθαριότητά της (που κάνει την τέλεια λύση για μηχανισμούς κοντά σε οπτικά όργανα), η ικανότητά της να λειτουργεί σε ακραίες θερμοκρασιακές συνθήκες (από -200oC έως 300oC) και η μεγάλη διάρκεια ζωής της, που τα καθιστά πολύ κατάλληλα για μεγάλο χρονικό διάστημα. μακροπρόθεσμες αποστολές (το λίπος ή το λάδι τείνουν να εξατμίζονται μακροπρόθεσμα). Τέλος, η καλή ακρίβεια και η έλλειψη αντίδρασης είναι βασικά χαρακτηριστικά για χειριστές ακριβείας και ρομποτικά όργανα.

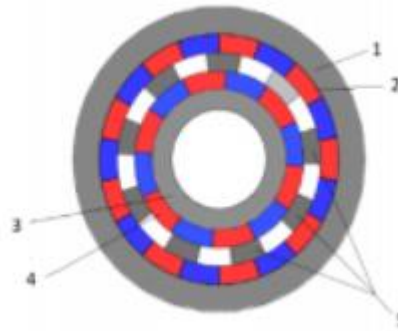
Ο Rahideh et al. στο [51] παρουσίασε ένα διδιάστατο (2-D) αναλυτικό μοντέλο για ομοαξονικούς μαγνητικούς οδοντωτούς τροχούς. Με βάση τις εξισώσεις του Μάξγουελ, το εξαγόμενο μοντέλο ελήφθη μέσω της λύσης των εξισώσεων Laplace και Poisson χρησιμοποιώντας τον διαχωρισμό της μεταβλητής τεχνικής για κάθε υποπεριοχή (εσωτερικοί και εξωτερικοί μαγνήτες, εσωτερικός και εξωτερικός διάκενος αέρα και σχισμές). Στη συνέχεια, οι ολοκληρωμένοι συντελεστές των γενικών λύσεων έχουν ληφθεί χρησιμοποιώντας τις οριακές συνθήκες και τη συνέχεια μεταξύ των υποπεριοχών. Το προτεινόμενο αναλυτικό μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εργαλείο σχεδιασμού και βελτιστοποίησης μαγνητικών οδοντωτών τροχών. Έχουν διερευνηθεί αναλυτικά οι επιρροές του αριθμού του ζεύγους πόλων, του σχήματος μαγνήτισης, του μεγέθους του ανοίγματος σχισμής και της αναλογίας τμημάτων του μοτίβου Halbach δύο τμημάτων στη μεταδιδόμενη ροπή και τις μη ισορροπημένες μαγνητικές δυνάμεις (UMF). Τέλος, για να απεικονιστεί η αποτελεσματικότητα του προτεινόμενου μοντέλου, τα αναλυτικά αποτελέσματα της κατανομής του μαγνητικού πεδίου, της μεταδιδόμενης ροπής και της μη ισορροπημένης μαγνητικής δύναμης συγκρίθηκαν με αυτά που ελήφθησαν από αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων.

Έχει προκύψει ένα αναλυτικό μοντέλο 2-D για ομοαξονικούς μαγνητικούς οδοντωτούς τροχούς με διαφορετικά σχέδια μαγνήτισης, δηλαδή ακτινικά, παράλληλα, ιδανικά Halbach και Halbach δύο τμημάτων. Τα αναλυτικά αποτελέσματα της πυκνότητας της μαγνητικής ροής, της μεταδιδόμενης ροπής και της μη ισορροπημένης μαγνητικής δύναμης συγκρίθηκαν με αυτά των αριθμητικών αποτελεσμάτων για να δείξουν την ακρίβεια του αναλυτικού μοντέλου. Σε γενικές

γραμμές, για τη βελτίωση της απόδοσης μιας μαγνητικής ταχύτητας όσον αφορά τη μέγιστη μεταδιδόμενη ροπή, τον ελάχιστο κυματισμό ροπής και το ελάχιστο UMF, ο τύπος του μοτίβου μαγνήτισης, ο λόγος ανοίγματος σχισμών και ο αριθμός των πόλων είναι από τις κρίσιμες μεταβλητές που πρέπει να επιλεγεί με τον καλύτερο δυνατό τρόπο. Επιπλέον, για το μοτίβο μαγνήτισης Halbach πολλαπλών τμημάτων, η αναλογία κάθε τμήματος παίζει σημαντικό ρόλο στην απόδοση της μαγνητικής ταχύτητας. Αν και ένας μαγνητικός οδοντωτός τροχός με το ιδανικό μοτίβο μαγνήτισης Halbach υπερτερεί των αντιπάλων του με άλλα μοτίβα μαγνήτισης, λόγω του υψηλού κόστους κατασκευής του ιδανικού Halbach, το μοτίβο μαγνήτισης Halbach δύο τμημάτων μπορεί να είναι μια εναλλακτική λύση εάν η απόδοση και το κόστος είναι και τα δύο πρωταρχικής σημασίας. Το Τέλος, για έναν καθορισμένο λόγο μετάδοσης και όγκο μαγνητικού οδοντωτού τροχού, ο αριθμός των τεμαχίων πόλων έχει μεγάλη επιρροή στην απόδοση των μαγνητικών οδοντωτών τροχών, δηλαδή της μεταδιδόμενης ροπής, του κυματισμού ροπής και του UMF [51].

Η αξιοπιστία ενός συστήματος γίνεται γενικά με μια λειτουργική ανάλυση (FA), η αποστολή της οποίας είναι να παρέχει μια βαθιά κατανόηση του αντικειμένου που σχεδιάζεται, να ανακαλύψει όλες τις πολύτιμες λύσεις, τρόπους και διαμορφώσεις και τέλος να επιλέξει τις καλύτερες επιλογές για το σχεδιασμό του συστήματος. Στη συνέχεια, η λειτουργική ανάλυση ταιριάζει με μια δυσλειτουργική ανάλυση, όπως η ανάλυση τρόπων και αποτελεσμάτων αποτυχίας, για την πρόβλεψη και τη λήψη μέτρων για την αποφυγή πιθανών δυσλειτουργιών του συστήματος και τον προσδιορισμό του καταλληλότερου μοντέλου. Σε αυτό το άρθρο, το διάγραμμα λειτουργικής ανάλυσης (FAD) χρησιμοποιείται στην εννοιολογική φάση της διαδικασίας σχεδιασμού ενός μαγνητικού οδοντωτού τροχού διαμόρφωσης ροής.

Η αξιοπιστία ενός συστήματος γίνεται γενικά με μια λειτουργική ανάλυση (FA), η αποστολή της οποίας είναι να παρέχει μια βαθιά κατανόηση του αντικειμένου που σχεδιάζεται, να ανακαλύψει όλες τις πολύτιμες λύσεις, τρόπους και διαμορφώσεις και τέλος να επιλέξει τις καλύτερες επιλογές για το σχεδιασμό του συστήματος. Στη συνέχεια, η λειτουργική ανάλυση ταιριάζει με μια δυσλειτουργική ανάλυση, όπως η ανάλυση τρόπων και αποτελεσμάτων αποτυχίας, για την πρόβλεψη και τη λήψη μέτρων για την αποφυγή πιθανών δυσλειτουργιών του συστήματος και τον προσδιορισμό του καταλληλότερου μοντέλου. Galnadi et al. Στο [52], το διάγραμμα λειτουργικής ανάλυσης (FAD) χρησιμοποιείται στην εννοιολογική φάση της διαδικασίας σχεδιασμού ενός μαγνητικού οδοντωτού τροχού με διαμορφωμένη ροή.



Εικόνα 20:ω Κατασκευαστικό σχήμα ομοαξονικής μαγνητικής μετάδοσης με διαμορφωτή ροής:

1,2-μαγνητικός πυρήνας και ακτινική PM του στάτη.

3,4-μαγνητικός πυρήνας και PM του ρότορα υψηλής ταχύτητας.

5-σιδηρομαγνητικά στύλοι του ρότορα χαμηλής ταχύτητας.

Ο Galmadi et al. παρουσιάζει μια επισκόπηση της ομόκεντρης μαγνητικής ταχύτητας με έναν διαμορφωτή ροής [52]. Αν και η έμφαση δόθηκε στην ομόκεντρη ακτινωτή ροή, οι άλλοι δύο τύποι απαιτούν περαιτέρω ανάλυση λόγω των πλεονεκτημάτων που παρουσιάζουν. Οι αυξανόμενες δυνατότητες αυτού του τύπου MG τα τελευταία χρόνια λόγω βελτιστοποιημένων τοπολογιών και καλύτερης χρήσης των ιδιοτήτων PM καθιστούν δυνατή τη σειριακή κατασκευή και την πρακτική εφαρμογή τους σε διάφορους κλάδους. Για το λόγο αυτό, έγινε μια Λειτουργική Ανάλυση που σχετίζεται με τη διαδικασία σχεδιασμού των MG's για να διευκολύνει τη Διαδικασία Σχεδιασμού του Μαγνητικού Gear. Η μέθοδος έχει δείξει τη δυνατότητα βελτιστοποίησης του σχεδιασμού των μαγνητικών εργαλείων και εμφανίζει μια πιθανή χρήση σε ένα διεπιστημονικό περιβάλλον λόγω της ποιότητάς του για να υποστηρίξει υψηλά επίπεδα κατανόησης μέσω της λειτουργικής αποσύνθεσης. Τα μελλοντικά έργα θα χρησιμοποιήσουν τα διαγράμματα λειτουργικής ανάλυσης αυτού του τύπου MG για να το χρησιμοποιήσουν στη διαδικασία της λειτουργίας αποτυχίας σχεδιασμού και ανάλυσης εφέ (DFMEA) ενός τέτοιου συστήματος.

Ο Jian et al. στο [53] προτείνει ένα ομοαξονικό μαγνητικό οδοντωτό τροχό που προσφέρει μεγαλύτερη πυκνότητα ροπής, χαμηλότερη ροπή οδόντωσης και μικρότερες απώλειες σιδήρου από τα αντίστοιχά του. Το κλειδί είναι να χρησιμοποιήσουμε πρόσφατα έναν πίνακα μόνιμου μαγνήτη Halbach (PM) για να αποτελούν τους πόλους PM στον εσωτερικό ρότορα και έναν μερικό πίνακα Halbach (δύο τμήματα ανά πόλο) για τον εξωτερικό ρότορα. Οι αντίστοιχες κατανομές μαγνητικού πεδίου, η μετάδοση ροπής και οι κυματισμοί ροπής συζητούνται αναλυτικά. Στη συνέχεια, οι αντίστοιχες επιδόσεις αξιολογούνται ποσοτικά χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

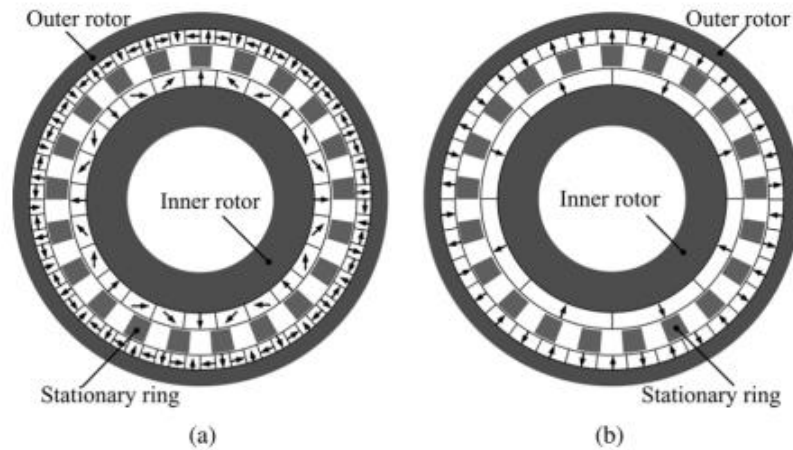
Συζητήθηκε η διαμόρφωση και η θεωρητική ανάλυση του προτεινόμενου μαγνητικού οδοντωτού τροχού. Χρησιμοποιώντας το FEM-βήμα, η ανάλυση απόδοσης ποσοτικά επαληθεύει ότι η

προτεινόμενη μαγνητική ταχύτητα μπορεί να προσφέρει τουλάχιστον 13% υψηλότερη πυκνότητα ροπής, έως 67% χαμηλότερη ροπή οδόντωσης και τυπικά 28% χαμηλότερες απώλειες σιδήρου από τη συμβατική.

Linni Jian et al. στο [55] συγκρίνει ποσοτικά δύο ομοαξονικά μαγνητικά γρανάζια (CMG) με διαφορετικές τοπολογίες, συγκεκριμένα, το CMG εγκατεστημένο με ακτινικά μαγνητισμένους μόνιμους μαγνήτες (CMGRM) και το CMG έχει εγκατασταθεί με μαγνητισμένους μόνιμους μαγνήτες Halbach (CMGHM). Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο τρισδιάστατων πεπερασμένων στοιχείων, διερευνάται το τελικό αποτέλεσμα και οι επιδόσεις και των δύο CMG. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης δείχνουν ότι το CMGHM μπορεί να προσφέρει υψηλότερη ροπή εξόδου, χαμηλότερο κυματισμό ροπής και μικρότερες απώλειες σιδήρου από το CMGRM. Τα πειραματικά αποτελέσματα δίνονται επίσης για επαλήθευση.

Δύο τελευταίες CMG, δηλαδή οι CMGHM και CMGRM, συγκρίθηκαν ποσοτικά.

Χρησιμοποιώντας το 3D-FEM, διερευνάται το τελικό αποτέλεσμα και οι επιδόσεις αυτών των CMG. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης επιβεβαιώνουν ότι το CMGHM μπορεί να προσφέρει υψηλότερη ροπή εξόδου, χαμηλότερο κυματισμό ροπής και χαμηλότερες απώλειες σιδήρου από το CMGRM. Μετά την πρωτοτυπία και των δύο CMG, τα πειραματικά αποτελέσματα δίνονται για την επαλήθευση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης [55].



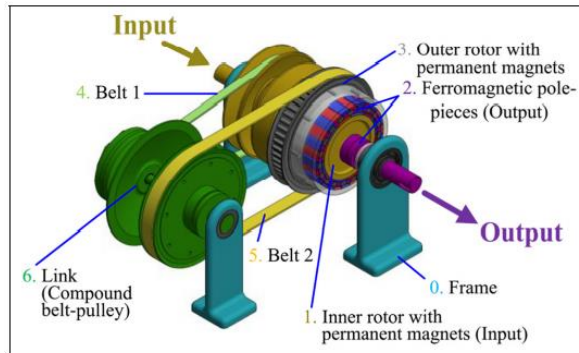
Εικόνα 21. Τοπολογίες. (α) Ομοαξονικός μαγνητικός οδοντωτός τροχός μαγνητισμένος με Halbach διάταξη. (β) Ομοαξονικός μαγνητικός οδοντωτός τροχός ακτινικά μαγνητισμένος

Ο Yi-Chang Wu et al. στο [2] παρουσιάζει μηχανισμούς μαγνητικών οδοντωτών τροχών, που χρησιμοποιούνται συνήθως σε συγκεκριμένες βιομηχανικές εφαρμογές και διαθέτουν τα πλεονεκτήματα της υψηλής απόδοσης μετάδοσης, της μη επαφής και της συντήρησης και

προστασίας από υπερφόρτωση. Ο σκοπός αυτής της μελέτης είναι να εφαρμόσει μια δημιουργική μεθοδολογία σχεδιασμού μηχανισμού για να καταλήξει σε νέες συσκευές που συνδυάζουν συνεχώς μεταβαλλόμενα κιβώτια ζωνών V με μηχανισμούς ομοαξονικού μαγνητικού οδοντωτού τροχού. Τα τοπολογικά χαρακτηριστικά της μαγνητικής ταχύτητας με ενσωματωμένη συνεχώς μεταβλητή μετάδοση αναλύονται εδώ. Οι απαιτήσεις και οι περιορισμοί σχεδιασμού ολοκληρώνονται και εφαρμόζονται για τη δημιουργία όλων των εφικτών εξειδικευμένων αλυσίδων. Συνολικά, αποκτήθηκαν 17 νέες σχεδιαστικές έννοιες με μηχανισμούς μαγνητικών οδοντωτών τροχών με ενσωματωμένες συνεχώς μεταβαλλόμενες μεταδόσεις. Το μαγνητοστατικό πεδίο του μηχανισμού μαγνητικών οδοντωτών τροχών αναλύεται επίσης για τον έλεγχο του μαγνητικού κορεσμού και τον υπολογισμό της μέγιστης μεταδιδόμενης ροπής με ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων.

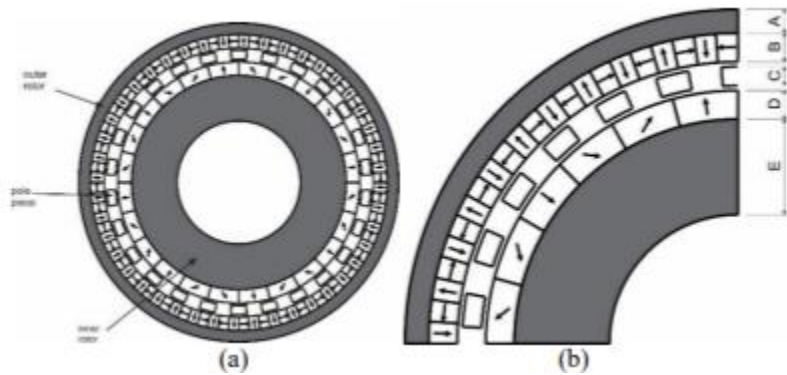
Αυτή η μελέτη [2] συνθέτει εφικτά μαγνητικά γρανάζια με ενσωματωμένα CVT που χρησιμοποιούνται για συστήματα μετάδοσης. Σύμφωνα με μια μεθοδολογία σχεδιασμού δημιουργικού μηχανισμού, λαμβάνονται 17 νέα μαγνητικά γρανάζια 7 συνδέσμων με ενσωματωμένα CVT. Το κύριο κινηματικό χαρακτηριστικό αυτών των ενσωματωμένων συσκευών είναι το ευρύ φάσμα της συνολικής σχέσης ταχύτητας, επειδή τα δύο μηχανικά σύνολα CVT και ο ομοαξονικός μηχανισμός μαγνητικού οδοντωτού τροχού διαθέτουν τη λειτουργία συνεχούς μεταβλητής μετάδοσης ταυτόχρονα. Μελλοντική εργασία σε αυτή τη μελέτη θα συμπεριλαμβάνει τον υπολογισμό του συνολικού λόγου ταχύτητας, της μεταδιδόμενης ισχύος και της μηχανικής απόδοσης αυτών των ενσωματωμένων συσκευών για περαιτέρω αξιολόγηση της απόδοσης.

Το έργο του κ. Akash Patel et al. [56] περιγράφει μια συνεχώς μεταβλητή συσκευή μετάδοσης, στην οποία η μετάδοση ροπής και ο μεταβλητός λόγος μετάδοσης επιτυγχάνονται με μαγνητικά μέσα. Αποτελείται από τρεις ομόκεντρες τροχαλίες: τροχαλία ελέγχου, τροχαλίες εισόδου και εξόδου. Και οι τρεις τροχαλίες έχουν έναν αριθμό ζευγών πόλων στις εξωτερικές επιφάνειες. Ο άξονας εξόδου από τον κινητήρα συνδέεται με την τροχαλία εισόδου. Η τροχαλία εξόδου συνδέεται με την τελική κίνηση μέσω ενός φυγοκεντρικού συμπλέκτη. Η πρώτη τροχαλία αρχίζει να περιστρέφεται με τη βοήθεια του κινητήρα. Χρησιμοποιούμε την τροχαλία ελέγχου για να λάβουμε παρόμοια κίνηση κατεύθυνσης από την τροχαλία εισόδου στην τροχαλία εξόδου. Με τη χρήση αυτού του μαγνητικού CVT μπορούμε να βελτιώσουμε τη συνολική απόδοση του οχήματος. Αυτός ο μαγνητικός CVT έχει πεδίο στο μέλλον ή μπορούμε να πούμε ότι είναι η μόνη επιλογή σχετικά με προβλήματα απόδοσης στα οχήματα αυτόματου κιβωτίου ταχυτήτων.



Εικόνα 22: Πρωτότυπη συσκευή που περιλαμβάνει μηχανισμό μαγνητικού οδοντωτού τροχού και ενσωματωμένη μετάδοση CVT

Η ανάλυση δείχνει ότι το μαγνητικό CVT κατασκευάζεται ευκολότερα, με χαμηλό κόστος κατασκευής, λιγότερη συντήρηση και το πιο σημαντικό πολύ λιγότερες τριβές κατά τη μετάδοση ισχύος και ροπής. Είναι χρήσιμο για τη μείωση της ρύπανσης καθώς αυξάνεται η αποδοτικότητα. Επίσης, μπορεί να παίζει σημαντικό ρόλο όταν δεν απαιτείται πολύ μεγάλη ταχύτητα. Ως εκ τούτου, είναι πολύ χρήσιμο για μελλοντικές εφαρμογές μεταφοράς [56]. Ο Nur Fajri et al. στο άρθρο [57] δείχνουν ότι τα μειονεκτήματα των μηχανικών οδοντωτών τροχών μπορούν να αντικατασταθούν από τα πλεονεκτήματα των μαγνητικών οδοντωτών τροχών (όσον αφορά τη ταχύτητα) που σχετίζονται με τη μεταφορά ροπής χωρίς μηχανική επαφή, χωρίς λίπανση οδοντωτών τροχών, χαμηλή μηχανική απώλεια, χαμηλούς κραδασμούς και εγγενή προστασία υπερφόρτωσης. Από τους τύπους μαγνητικών οδοντωτών τροχών, το ομοαξονικό μαγνητικό γρανάζι είναι ο πιο ανεπτυγμένος τύπος. Η διάταξη μόνιμου μαγνήτη Halbach σε μηχανισμό ομοαξονικού μαγνητικού οδοντωτού τροχού μπορεί να προσφέρει υψηλότερη στη μεταδιδόμενη ροπή και είναι επίσης ικανή να αυξήσει το μαγνητικό πεδίο σε σύγκριση με τον ακτινικά μαγνητισμένο. Στη συνέχεια, αυτό το έγγραφο στοχεύει να πραγματοποιήσει το χαρακτηριστικό του ομοαξονικού μαγνητικού οδοντωτού τροχού με το Halbach να μαγνητίζεται σε σταθερή κατάσταση. Επιπλέον, το μαγνητικό πεδίο και η μεταδιδόμενη ροπή ερευνήθηκαν από το εμπορικό λογισμικό ANSYS/Maxwell. Τέλος, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο 2-D πεπερασμένων στοιχείων, το αποτέλεσμα δείχνει τη μέγιστη ροπή με 2150,76 Nm.



Εικόνα 23 (α) Πίνακας μόνιμου μαγνήτη Halbach (β) Σχεδίαση παραμέτρων

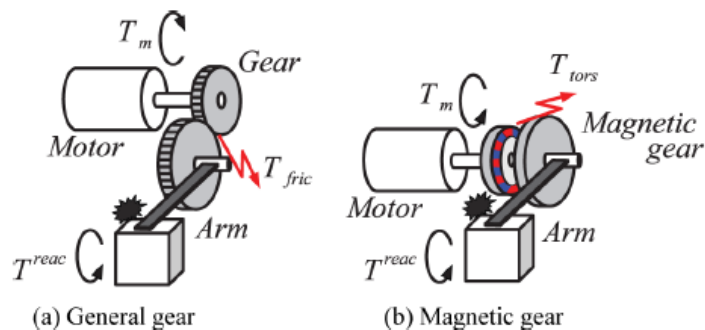
Ο Nur Fajri et al. επιτυγχάνουν τα αποτελέσματα για το χαρακτηριστικό του μαγνητικού οδοντωτού τροχού. Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο 2-D πεπερασμένων στοιχείων με το λογισμικό ANSYS/ Maxwell, παρουσιάστηκε η μοντελοποίηση, η προσομοίωση και η απεικόνιση ομοαξονικού μαγνητικού οδοντωτού τροχού με διάταξη μόνιμου μαγνήτη Halbach. Η μέγιστη εκπεμπόμενη ροπή είναι 2261,55 Nm. Η πυκνότητα της μαγνητικής ροής και το μαγνητικό πεδίο έχουν διαφορετικές τιμές σε διαφορετικές θέσεις, ανάλογα με την περιστροφή του εσωτερικού ρότορα και του μόνιμου μαγνήτη του εξωτερικού ρότορα. Γνωρίζοντας την αξία της μεταδιδόμενης ροπής και την απεικόνιση του μαγνητικού πεδίου, αυτή η έρευνα θα είναι συγκρίσιμη με άλλους τύπους μαγνητικών οδοντωτών τροχών. Επιπλέον, αυτή η έρευνα θα είναι ένα χρήσιμο βοηθητικό εργαλείο για το σχεδιασμό μαγνητικών οδοντωτών τροχών με ζήτηση μεταδιδόμενης ροπής. Οι μελλοντικές εργασίες που σχετίζονται με αυτήν τη μελέτη θα στοχεύσουν στη διερεύνηση της πυκνότητας ροής, των απωλειών σιδήρου, του κυματισμού ροπής και της αποτελεσματικότητας των ομοαξονικών μαγνητικών οδοντωτών τροχών και στην επίλυση του προβλήματος στην κατασκευή μαγνητισμένου τύπου Halbach.

Li Kang et al. στο [58] παρέχουν μια επισκόπηση των τρεχουσών και προηγούμενων εξελίξεων στον τομέα της τεχνολογίας περιστροφικών μαγνητικών οδοντωτών τροχών. Η απόδοση διερευνάται ως προς την πυκνότητα ροπής και τον λόγο μετάδοσης. Σκοπός της εργασίας είναι να παρουσιάσει ένα στιγμιότυπο της τρέχουσας κατάστασης της τέχνης σε αυτόν τον ταχέως αναπτυσσόμενο τομέα έρευνας.

Ο Li Kang et al. προσπάθησε να επισημάνει όλα τα δημοσιευμένα περιστροφικά σχέδια MG που έχουν επιτύχει υπολογισμένη ή μετρημένη πυκνότητα ροπής $> 50 \text{ N} \cdot \text{m/L}$. Η ομοαξονική MG της ακτινικής τυπολογίας είναι η πιο μελετημένη MG και μέχρι σήμερα έχει επιτύχει την υψηλότερη πειραματικά μετρημένη πυκνότητα ροπής $239 \text{ N} \cdot \text{m/L}$. Δεδομένου ότι πολλά μηχανικά κιβώτια ταχυτήτων μπορούν να λειτουργήσουν σε πυκνότητα ροπής άνω των $300 \text{ N} \cdot \text{m/L}$, απαιτείται ακόμη περισσότερη έρευνα για την περαιτέρω βελτίωση της απόδοσης πυκνότητας ροπής MG. Επιπλέον, απαιτείται περαιτέρω εργασία όσον αφορά την απόδειξη της

αποτελεσματικότητας των MG. Τα δυναμικά χαρακτηριστικά απόδοσης των MG πολλαπλών σταδίων δεν έχουν ακόμη διερευνηθεί.

Ο Komiyama et al. στο [59] περιγράφουν την εφαρμογή ενός μαγνητικού οδοντωτού τροχού σε ένα ρομπότ πληρώντας τις βασικές απαιτήσεις για τον έλεγχο ρομπότ, που είναι ο έλεγχος ταχύτητας, ο έλεγχος θέσης και ο έλεγχος δύναμης. Ένα μαγνητικό γρανάζι είναι μια συσκευή μετάδοσης που πραγματοποιεί τη μετάδοση ροπής χωρίς επαφή εφαρμόζοντας μαγνητική δύναμη. Όταν χρησιμοποιείτε μαγνητικό γρανάζι, πρέπει να ληφθούν υπόψη η ροπή απόφραξης και τα χαρακτηριστικά του ελατηρίου. Σε αυτό το έγγραφο, εισάγουμε ένα κατά προσέγγιση μοντέλο ροπής απόφραξης. Αυτό το μοντέλο χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της ταχύτητας για να μετριάσει τη διαταραχή λόγω ροπής απόφραξης. Στην περίπτωση ελέγχου θέσης, οι ταλαντώσεις που οφείλονται στο φαινόμενο του ελατηρίου της μαγνητικής ελκτικής δύναμης δημιουργούν πρόβλημα. Για να μειωθεί η αρνητική επίδραση που οφείλεται σε αυτές τις ταλαντώσεις, εφαρμόζεται έλεγχος του λόγου συντονισμού. Προτείνουμε επίσης να χρησιμοποιήσετε ένα μαγνητικό οδοντωτό τροχό για την πραγματοποίηση διμερούς ελέγχου της τηλε λειτουργίας χωρίς αισθητήρα δύναμης. Λόγω της μετάδοσης χωρίς τριβές ενός μαγνητικού οδοντωτού τροχού, η εκτίμηση της δύναμης χωρίς αισθητήρα δύναμης αντίδρασης μπορεί να πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας έναν παρατηρητή δύναμης αντίδρασης.



Εικόνα 24. Σύγκριση εκτίμησης δύναμης αντίδρασης.

Τα προβλήματα που ανακύπτουν κατά την εφαρμογή μαγνητικών οδοντωτών τροχών σε ρομπότ, εξετάστηκαν, συγκεκριμένα, η συνολική ροπή και τα χαρακτηριστικά του ελατηρίου που παράγονται από μαγνητικές δυνάμεις. Επιπλέον, εφαρμόσαμε έναν μαγνητικό μειωτήρα ταχυτήτων σε ένα ρομπότ master -slave και επινοήσαμε μια μέθοδο διμερούς ελέγχου χωρίς αισθητήρα δύναμης χρησιμοποιώντας τη μικρή τριβή σε μαγνητικά γρανάζια. Όσον αφορά τον έλεγχο ταχύτητας, επιβεβαιώθηκε ότι ο τροφοδοτικός έλεγχος που βασίζεται στο μοντέλο ροπής οδόντωσης μπορεί να καταστείλει αποτελεσματικά τη ροπή απόφραξης. Επιπλέον, στον έλεγχο θέσης, επιβεβαιώθηκε την επίδραση ταλάντωσης-απόσβεσης του ελέγχου αναλογίας συντονισμού που εφαρμόζεται σε μια κίνηση μαγνητικού οδοντωτού τροχού. Επιβεβαιώσαμε

επίσης πειραματικά ότι ο διμερής έλεγχος χωρίς αισθητήρα δύναμης μπορεί να εφαρμοστεί αναπτύσσοντας έναν μηχανισμό εκτίμησης δύναμης αντίδρασης όσον αφορά τη ροπή στρέψης. Ο Men Chun et al. [30] παρουσιάζουν την ανάπτυξη των μαγνητικών οδοντωτών τροχών για ηλεκτρικά οχήματα από μη σπάνιες γαίες. Πρώτον, συζητούνται οι μαγνητικοί οδοντωτοί τροχοί που υιοθετούν μόνιμους μαγνήτες μη σπάνιων γαιών και ύστερα από σπάνιες γαίες (PM). Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων, η ηλεκτρομαγνητική απόδοση αυτών των μαγνητικών οδοντωτών τροχών αξιολογείται και ποιοτικά συγκρίνεται με βάση την ίδια δομή. Επίσης, συγκρίνονται τα φυσικά μαγνητικά χαρακτηριστικά των μόνιμων μαγνητών των μη σπάνιων γαιών και των σπάνιων γαιών. Τέλος, πραγματοποιείται σύγκριση της αποδοτικότητας κόστους μεταξύ διαφορετικών τύπων μόνιμων μαγνητών. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το υλικό PM μη σπάνιων γαιών προτιμάται από το υλικό των μόνιμων μαγνητών σπάνιας γης για εφαρμογή σε μαγνητικά γρανάζια.

Η ανάπτυξη μαγνητικών οδοντωτών τροχών σπάνιων γαιών και μη σπάνιων γαιών έχει αναθεωρηθεί και συζητηθεί, με έμφαση στην απόδοση, το υλικό μαγνήτη και τις συγκρίσεις κόστους-αποτελεσματικότητας. Αναλύονται τρία μαγνητικά γρανάζια μεμονωμένα εγκατεστημένα με τα Alnico, NdFeB, SmCo. Μεταξύ των τριών διαφορετικών τύπων PM, το NdFeB προσφέρει τη μεγαλύτερη σταθερή ροπή έναντι των άλλων. Αν και ο τύπος Alnico διαθέτει τη χαμηλότερη απόδοση ροπής, προσφέρει τη χαμηλότερη τιμή ανά μονάδα ροπής που έχει αναπτυχθεί. Η εφαρμογή του μαγνητικού οδοντωτού τροχού έχει επίσης συζητηθεί [30]. Η έννοια των μαγνητικού οδοντωτών τροχών μπορεί να επεκταθεί ή ενσωματωμένο σε άλλες συσκευές υψηλής απόδοσης, όπως περιστροφικές ή γραμμικές μηχανές PM για να σχηματίσουν μια νέα γενιά ηλεκτρικών μηχανών για εφαρμογές EV. Λόγω των άφθονων αποθεμάτων και του χαμηλού κόστους πρώτων υλών της Alnico καθώς και της υψηλής αποδοτικότητας και απαλλαγμένης από πεδίο οπλισμού του μαγνητικού οδοντωτού τροχού Alnico, τα μαγνητικά γρανάζια μη σπάνιας γης προτιμώνται από τους μαγνητικούς οδοντωτούς τροχούς σπάνιας γης για εφαρμογές EV.

Ο Faysal et al. [60] ένας οδοντωτός τροχός είναι απαραίτητο συστατικό των περισσότερων μηχανικών ή ηλεκτρομηχανικών συστημάτων. Τα μηχανικά γρανάζια χρησιμοποιούνται εύκολα σε αυτοκίνητα και βιομηχανικές εφαρμογές για σκοπούς μετάδοσης ροπής και διαφοροποίησης ταχύτητας. Η πρόσφατη σημαντική αύξηση των δραστηριοτήτων έρευνας και ανάπτυξης για μαγνητικά γρανάζια (MG) υποδεικνύει τις δυνατότητές του στην αποτελεσματική αντικατάσταση των μηχανικών οδοντωτών τροχών από βιομηχανικές και άλλες εφαρμογές. Έτσι, οι σταδιακές εξελίξεις της MG και των μηχανημάτων με μαγνητικό εξοπλισμό άνοιξαν αναρίθμητες ευκαιρίες για μηχανικούς και ερευνητές. Ωστόσο, ως μια σχετικά νέα τεχνολογία, η έννοια του MG είναι ακόμα ασαφής για πολλούς πιθανούς ερευνητές. Αυτή η εργασία στοχεύει στην παρουσίαση μιας επισκόπησης της τελευταίας τεχνολογίας στην τεχνολογία MG, της

σταδιακής ανάπτυξης των τοπολογιών MG, των χαρακτηριστικών σχεδιασμού της, των τεχνικών βελτιστοποίησης και μιας οδηγίας για την επιλογή κατάλληλων υλικών για την κατασκευή εργαλείων. Η τεχνολογία MG βρίσκεται ακόμη στο αρχικό της στάδιο ανάπτυξης, αλλά έχει μια τεράστια ευκαιρία για περαιτέρω βελτίωση. Το MG δεν υπόσχεται μόνο την ικανότητα αντικατάστασης του μηχανικού οδοντωτού τροχού, αλλά προσφέρει επίσης πολλά άλλα πρόσθετα πλεονεκτήματα, όπως αυξημένη διάρκεια ζωής του μηχανήματος, μείωση κόστους συντήρησης και αξιόπιστη λειτουργία. Παρόλο που γίνονται εντατικές ερευνητικές εργασίες σε MG, αυτή τη στιγμή δεν είναι ακόμη σε θέση να αντικαταστήσει τα μηχανικά γρανάζια σε βιομηχανικές εφαρμογές λόγω της καθυστέρησης από τη βιομηχανική ετοιμότητα των MG. Οι περιορισμοί και οι μελλοντικές δυνατότητες που συζητήθηκαν στο τέλος αυτής της εργασίας θα μπορούσαν να ωφελήσουν τους αναγνώστες που ενδιαφέρονται να αναπτύξουν καινοτόμες ιδέες για μια έτοιμη για τη βιομηχανία έκδοση του MG.

Ο Faysal et al. μελέτησε την ανάπτυξη των τοπολογιών MG από την αρχή του ταξιδιού της. Τα μοναδικά χαρακτηριστικά, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των διαφόρων τοπολογιών οδοντωτών τροχών έχουν παρουσιαστεί, μαζί με την οικονομική αποδοτικότητα της χρήσης διαφορετικών υλικών PM. Αρκετές τεχνικές ανάλυσης για το σχεδιασμό οδοντωτών τροχών και οι διαδικασίες βελτιστοποίησης τους έχουν συζητηθεί εν συντομία. Από το τρέχον στάδιο ανάπτυξης, είναι σαφές ότι τα MG έχουν πλεονεκτήματα σε σχέση με τα τυπικά μηχανικά γρανάζια. Ωστόσο, η πρακτική χρήση των MG σε βιομηχανικές εφαρμογές εξακολουθεί να απαιτεί επικύρωση της ετοιμότητας στις αντίστοιχες λειτουργίες. Παρά το υψηλό κόστος παραγωγής MG, εάν μπορεί να επιτευχθεί βιώσιμη λύση για τη βιομηχανική του ετοιμότητα, μπορούν να προβλεφθούν σημαντικές αλλαγές για τη μελλοντική εξέλιξη.

Με την έλευση των μαγνητικών οδοντωτών τροχών, οι Xianglin Li et al. έχουν αναπτύξει ένα νέο είδος μηχανών μόνιμου μαγνήτη. Αυτές οι μηχανές μόνιμου μαγνήτη με μαγνητικό οδοντωτό τροχό ενσωματώνουν την έννοια του μαγνητικού οδοντωτού τροχού στις μηχανές μόνιμου μαγνήτη, οδηγώντας στην επίτευξη χαμηλής ταχύτητας, υψηλής ροπής και άμεσης κίνησης. Στο άρθρο [62], πραγματοποιείται αρχικά μια ποσοτική σύγκριση τριών βιώσιμων μηχανών με μαγνητικούς οδοντωτούς τροχούς μόνιμου μαγνήτη, αποκαλύπτοντας έτσι τα βασικά χαρακτηριστικά, τα πλεονεκτήματα, τα μειονεκτήματα και τις εφαρμογές τους. Αρχικά, επανεξετάζεται η ανάπτυξη των μαγνητικών οδοντωτών τροχών, συμπεριλαμβανομένων των μεταβαλλόμενων τοπολογιών και των τοπολογικών διαμορφωμένων τοπολογιών. Στη συνέχεια, προσδιορίζονται και συζητούνται τρεις βιώσιμες μηχανές με μαγνητικό γρανάζι μόνιμου μαγνήτη. Κατά συνέπεια, οι αντίστοιχες επιδόσεις αναλύονται και συγκρίνονται ποσοτικά. Τα αποτελέσματα και οι συζητήσεις αποτελούν ένα σημαντικό θεμέλιο για την έρευνα σε συστήματα άμεσης κίνησης χαμηλής ταχύτητας υψηλής ροπής.

Ο Xianglin Li et al. αναλύουν και να επανεξετάζουν την ανάπτυξη των μαγνητικών οδοντωτών τροχών και κατά συνέπεια των μηχανών MGPM, με έμφαση στην παροχή ανάλυσης απόδοσης και ως εκ τούτου μια ποσοτική σύγκριση τριών βιώσιμων μηχανών MGPM. Μεταξύ των δύο μεγάλων οικογενειών MG, τα CMG με διαμόρφωση πεδίου προτιμώνται από τα MG που έχουν μετατραπεί λόγω της καλύτερης χρήσης τους από υλικό PM και συνεπώς υψηλότερης πυκνότητας ροπής καθώς και της ικανότητάς τους να ενσωματωθούν στις μηχανές χωρίς ψήκτρες PM για να σχηματίσουν τις μηχανές MGPM. Μεταξύ των τριών κυριότερων τοπολογιών των μηχανημάτων MGPM, η τοπολογία του κενού ενός αέρα είναι η πλέον κατάλληλη για εφαρμογές άμεσης κίνησης χαμηλής ταχύτητας υψηλής ροπής λόγω της υψηλότερης πυκνότητας ροπής, της ελάχιστης χρήσης υλικού PM και της απλούστερης δομής. Παρ'όλα αυτά, η τοπολογία των τριών αεραγωγών έχει τη δυνατότητα να χρησιμοποιήσει δύο ρότορες για να εκτελέσει ηλεκτρική μεταβλητή μετάδοση για υβριδικά οχήματα.

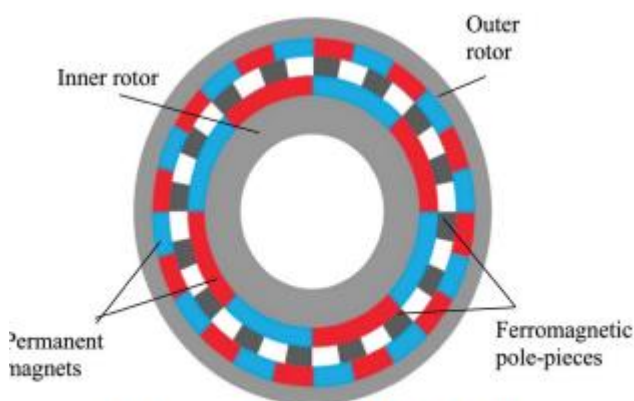


FIGURE 2. Proposed coaxial magnetic gear (CMG)
Adapted from the design of Atallah & Howe (2001)

Εικόνα 25. Προτεινόμενο ομοαξονικός μαγνητικός οδοντωτός τροχός (CMG)

Εμπνευσμένο από το σχέδιο των Attallah & Howe (2001)

Ο Desvaux et al. στο άρθρο [63] εστιάζει στο σχεδιασμό και τη βελτιστοποίηση μαγνητικών και μηχανικών (δομικών) τμημάτων μαγνητικών οδοντωτών τροχών για εφαρμογές ανεμογεννητριών. Ειδικότερα, αυτός ο σχεδιασμός λαμβάνει υπόψη τις δομικές πτυχές των μαγνητικών οδοντωτών τροχών καθώς και τους μηχανικούς περιορισμούς του συστήματος (παραμόρφωση και τάση). Οι γεωμετρικές παράμετροι έχουν βελτιστοποιηθεί προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί το κόστος υλικών για μια ανεμογεννήτρια 3,9 MW, 15 στροφές / λεπτό. Αυτή η στρατηγική βελτιστοποίησης περιλαμβάνει τόσο μαγνητοστατικές όσο και μηχανικές αναλύσεις

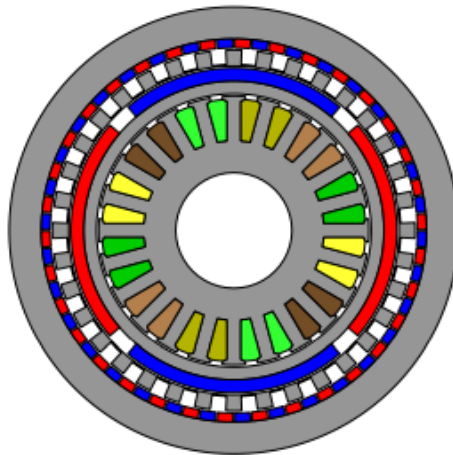
στατικών πεπερασμένων στοιχείων. Τα αποτελέσματα βελτιστοποίησης υπογραμμίζουν την ανάγκη να ληφθούν υπόψη οι μηχανικοί περιορισμοί, ειδικά για τα σταθερά τεμάχια σιδηρομαγνητικών πόλων.

Ο Desvaux et al. περιγράφει μια νέα προσέγγιση στο συνολικό σχεδιασμό και βελτιστοποίηση των μαγνητικών οδοντωτών τροχών (μαγνητικά μέρη και δομικά μέρη). Λαμβάνει υπόψη τόσο τους περιορισμούς της διάταξης όσο και τους μηχανικούς (παραμόρφωση και τάση) για εφαρμογές ανεμογεννητριών.

Ο Gerber στο άρθρο [64] προτείνει μια αποτελεσματική μεθοδολογία βελτιστοποίησης σχεδιασμού, που απευθύνεται ειδικά σε μηχανές με μαγνητική ταχύτητα (MGM). Αυτή η σχεδιαστική προσέγγιση επιτρέπει στα στοιχεία αυτών των ενσωματωμένων μηχανών να ταιριάζουν κατάλληλα. Διερευνώνται προκλήσεις που σχετίζονται με την ακριβή μοντελοποίηση αυτών των ειδικών μηχανών, όπως η πρόβλεψη των επιπτώσεων των τελικών επιδράσεων και το υψηλό υπολογιστικό κόστος προσομοίωσης της κίνησης. Η προτεινόμενη μεθοδολογία σχεδιασμού εφαρμόζεται επιτυχώς στο σχεδιασμό δύο διαφορετικών MGM, εκ των οποίων το ένα διαθέτει νέα δομή ρότορα. Τα πρωτότυπα που βασίζονται στα σχέδια έχουν κατασκευαστεί και αξιολογηθεί πειραματικά. Υπάρχει γενικά μια καλή συσχέτιση μεταξύ των προβλεπόμενων και μετρημένων αποτελεσμάτων απόδοσης. Παρουσιάζεται επίσης μια μέθοδος ανάλυσης των σημείων λειτουργίας αυτών των μηχανών. Εκτός από τα δύο MGM, σχεδιάζεται, κατασκευάζεται και αξιολογείται πειραματικά μια μηχανή vernier, η οποία βασίζεται σε παρόμοιες αρχές λειτουργίας. Διεξάγεται μια λεπτομερής σύγκριση αυτών των μηχανών με μια πιο συμβατική μηχανή μόνιμου μαγνήτη άμεσης κίνησης, προκειμένου να εκτιμηθούν τα αντίστοιχα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματά τους. Η σύγκριση εξετάζει μικρά μηχανήματα με ενεργό μήκος στοίβας 50 mm και εξωτερική διάμετρο 140 mm. Σε αυτήν τη σύγκριση σταθερού όγκου, διαπιστώνεται ότι τα MGM είναι ανώτερα ως προς την ικανότητα και την απόδοση ροπής τους. Το μηχάνημα vernier έχει επίσης καλή απόδοση και παράγει την υψηλότερη ροπή ανά όγκο υλικού μαγνήτη. Με βάση τα πλεονεκτήματα των MGM που αποδεικνύονται σε αυτή τη μελέτη, απαιτείται περαιτέρω ανάπτυξη αυτών των μηχανών.

[64] Τα MG και τα MGM διαθέτουν πολλά ελκυστικά χαρακτηριστικά που δικαιολογούν το ενδιαφέρον αυτών των συσκευών. Η ικανότητα μεταφοράς ροπής χωρίς τριβές υποδηλώνει ότι αυτές οι συσκευές έχουν τη δυνατότητα να έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής με μικρές απαιτήσεις συντήρησης. Η απουσία τριβής επιτρέπει επίσης σε αυτές τις συσκευές να λειτουργούν αθόρυβα. Ένα άλλο σημαντικό χαρακτηριστικό είναι η προστασία από υπερφόρτωση που είναι εγγενής σε αυτές τις συσκευές. Ένα μαγνητικό γρανάζι το οποίο είναι υπερφορτωμένο γλιστρά χωρίς να καταστραφεί το γρανάζι. Αυτή η δυνατότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την προστασία ολόκληρου του συρμού από συνθήκες υπερφόρτωσης, μειώνοντας τους απαιτούμενους παράγοντες ασφαλείας για άλλα εξαρτήματα. Σε αυτή τη μελέτη, έχει αποδειχθεί ότι τα MG και

τα MGM μπορούν να επιτύχουν σημαντικά υψηλότερη πυκνότητα ροπής από τα πιο συμβατικά μηχανήματα PM. Αυτή η δυνατότητα καθιστά αυτές τις συσκευές ελκυστικές σε εφαρμογές όταν ο χώρος είναι περιορισμένος.



Εικόνα 26: Split MGM: Μερικώς συνδεδεμένη διαμόρφωση

Τελικά αποτελέσματα

Τα τελικά αποτελέσματα έχουν σημαντικό αντίκτυπο στην ικανότητα ροπής στασιμότητας των μαγνητικών οδοντωτών τροχών και των μηχανημάτων μαγνητικής ταχύτητας. Μια σε βάθος ανάλυση έδειξε ότι ο εξαιρετικά μεγάλος αντίκτυπος των τελικών επιδράσεων μπορεί εν μέρει να αποδοθεί σε ένα φαινόμενο που ονομάζεται διαφυγή. Ο μεγάλος αντίκτυπος των τελικών εφέ απαιτεί τη χρήση τρισδιάστατης μοντελοποίησης για ακριβή υπολογισμό της απόδοσης. Ωστόσο, λόγω του υψηλού υπολογιστικού κόστους της τρισδιάστατης μοντελοποίησης, προτείνεται η βελτιστοποίηση να πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας κυρίως 2D FEM αναλύσεις. Λόγω των τελικών αποτελεσμάτων που υπάρχουν σε MG και MGM, έχει διαπιστωθεί ότι η κακή σχεδίαση του περιβλήματος μπορεί να θέσει σε σοβαρό κίνδυνο την απόδοση αυτών των συσκευών από την άποψη της ροπής και της απόδοσης. Κατά το σχεδιασμό περιβλήματος για MG και MGM, πρέπει να χρησιμοποιούνται μη σιδηρούχα υλικά και/ή πρέπει να διασφαλίζεται ότι το διάστημα γύρω από την ενεργή στοιβία είναι αρκετά μεγάλο ώστε η ροή διαρροών να μην συνδέεται με το περίβλημα. Μια έρευνα σχετικά με ένα πρωτότυπο μαγνητικό οδοντωτό τροχό που δεν κατάφερε να επιτύχει τις προδιαγραφές σχεδιασμού του επικυρώνει αυτά τα ευρήματα. Με τον επανασχεδιασμό του περιβλήματος του πρωτοτύπου και μόνο, η ροπή στάθμης αυξήθηκε κατά 30 % ενώ οι απώλειες στον οδοντωτό τροχό μειώθηκαν κατά περίπου 70 %.

Βέλτιστη αντιστοίχιση εξαρτημάτων σε μηχανές με μαγνητικό οδοντωτό τροχό

Ο συντελεστής φορτίου του στάτορα παρουσιάστηκε ως ένα χρήσιμο μέτρο της ισορροπίας μεταξύ της μαγνητικής ταχύτητας και των εξαρτημάτων ηλεκτρικών μηχανών ενός MGM. Έχει αποδειχθεί μια μέθοδος σχεδιασμού καλά ισορροπημένων MGM μέσω αριθμητικής βελτιστοποίησης με περιορισμό του συντελεστή φορτίου στάτορα. Επιπλέον, έχει αποδειχθεί ότι αυτές οι βελτιστοποιήσεις μπορούν να πραγματοποιηθούν χρησιμοποιώντας μόνο δύο σημειακές προσομοιώσεις πεπερασμένων στοιχείων στην ανάλυση. Αυτό περιορίζει το υπολογιστικό κόστος της βελτιστοποίησης των MGM.

Η επιλογή του συντελεστή φόρτωσης του στάτορα εξαρτάται από τη φύση της εφαρμογής, αλλά η τιμή θα πρέπει να είναι κάτω από τη μονάδα για να γίνει αποτελεσματική χρήση του στάτη. Σε εφαρμογές με υψηλά φορτία αιχμής, μια τιμή πολύ χαμηλότερη από τη μονάδα μπορεί να είναι κατάλληλη εάν ο στάτης μπορεί προσωρινά να υπερφορτωθεί.

Ο Brönn περιγράφει στο [66] πώς σχεδιάζεται, κατασκευάζεται και αξιολογείται πειραματικά ο πρώτος γεννήτριας μόνιμου μαγνήτη αξονικής ροής με μαγνητική ταχύτητα (MGAFG). Τα μαγνητικά γρανάζια (MG) επιτρέπουν τη μεταφορά ισχύος χωρίς επαφή και τη λειτουργία χωρίς λιπαντικά, γεγονός που μπορεί να λύσει τις ανησυχίες αξιοπιστίας με τους μετατροπείς αιολικής ενέργειας που είναι μηχανικά ρυθμιζόμενοι. Ωστόσο, η σύνθετη δομή των MGs μπορεί να παρουσιάσει σοβαρές προκλήσεις στο σχεδιασμό του. Έτσι, θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στη μηχανική διάταξη και την ηλεκτρομαγνητική επίδραση κάθε εξαρτήματος. Το MGAFG μπορεί να διαμορφωθεί για μαγνητική σύζευξη ή αποσύνδεση. Στη συζευγμένη διαμόρφωση, οι μόνιμοι μαγνήτες (PM) του MG συμβάλλουν στη σύνδεση της συνολικής ροής στη γεννήτρια PM (PMG). Η συζευγμένη διαμόρφωση είναι επομένως πιο αποτελεσματική. Ο χρόνος επεξεργασίας που απαιτείται για τη βελτιστοποίηση της αποσυνδεδεμένης διαμόρφωσης είναι ωστόσο πολύ ταχύτερος, καθώς το MG και το PMG μπορούν να βελτιστοποιηθούν χωριστά. Τα βελτιστοποιημένα αποτελέσματα δείχνουν ότι θα μπορούσε να επιτευχθεί πυκνότητα ροπής άνω των 100kNm/m³, η οποία είναι σημαντικά υψηλότερη από οποιαδήποτε από τις γνωστές ηλεκτρικές μηχανές. Ωστόσο, λόγω των υπερβολικών απωλειών στις δομές μηχανικής στήριξης, το πρωτότυπο παρουσίασε χαμηλότερη πυκνότητα ροπής και χαμηλή απόδοση. Οι σχετικές με το σχεδιασμό πτυχές και ζητήματα αναλύονται και συζητούνται λεπτομερώς σε μια προσπάθεια να σκιαγραφήσουν προβληματικοί τομείς στη διαδικασία σχεδιασμού. Δίνονται επίσης σχετικές συστάσεις για μελλοντικές βελτιώσεις στο σχεδιασμό. Το κόστος του μαγνητικού υλικού αντιπροσωπεύει πάνω από το πενήντα τοις εκατό του συνολικού κόστους του πρωτοτύπου. Συνεπώς, για να καταστεί η κατασκευή του MGAFG πιο οικονομικά βιώσιμου μαγνητικού υλικού θα πρέπει να ελαχιστοποιηθεί κατά τη διαδικασία σχεδιασμού.

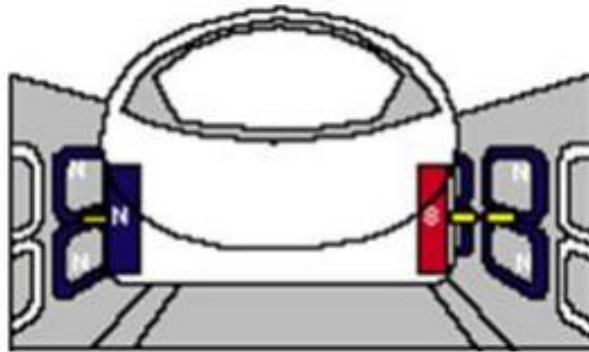
Ο Yi-Chang et al. στο άρθρο [68] προτείνει ένα νέο τρόπο μαγνητικής μετάδοσης για ποδήλατα, η οποία αποτελείται από έναν ομοαξονικό μηχανισμό μαγνητικού οδοντωτού τροχού που θα χρησιμεύσει ως συσκευή αλλαγής ταχύτητας και έναν μηχανισμό ελέγχου ταχύτητας για τον έλεγχο της βαθμίδας μετάδοσης. Ένα κιβώτιο μαγνητικού διανομέα 3 ταχυτήτων, που περιλαμβάνει ταχύτητα χαμηλής ταχύτητας, γρανάτζι άμεσης κίνησης και ταχύτητα, σχεδιάζεται και εγκαθίσταται στον πίσω κόμβο ενός ποδηλάτου, το οποίο επιτρέπει στον αναβάτη να επιλέγει διαφορετικές ταχύτητες για να προσαρμόζεται η δύναμη πεταλιού. Για ένα νέο είδος μετάδοσης πίσω διανομέα, η κινηματική ανάλυση και η ανάλυση διαδρομής ισχύος είναι απαραίτητες για την επικύρωση του λόγου ταχύτητας και της διαδρομής ισχύος σε κάθε στάδιο μετάδοσης. Είναι επίσης τα θεμελιώδη στοιχεία για την ανάλυση μηχανικής απόδοσης. Εδώ, η κινηματική εξίσωση ενός συστήματος, η οποία είναι μια αναλυτική προσέγγιση και είναι ανάλογη με την κινηματική ενός βασικού πλανητικού συρμού, για τον παρουσιαζόμενο ομοαξονικό μηχανισμό μαγνητικών οδοντωτών τροχών προκύπτει χωρίς να ληφθούν υπόψη οι περίπλοκες αρμονικές χώρου της κατανομής πυκνότητας μαγνητικής ροής που παρουσιάστηκαν σε προηγούμενες μελέτες. Ως εκ τούτου, ο λόγος ταχύτητας σε κάθε στάδιο μετάδοσης της μετάδοσης μαγνητικού διανομέα μπορεί εύκολα να υπολογιστεί.

Στο [68], παρουσιάζεται μια μετάδοση πίσω διανομέα με μηχανισμό μαγνητικού οδοντωτού τροχού για ποδήλατα. Ένα τέτοιο μαγνητικό κέντρο μετάδοσης παρέχει τρεις ταχύτητες προς τα εμπρός: μια ταχύτητα χαμηλής ταχύτητας, ένα κιβώτιο άμεσης κίνησης και μια ταχύτητα, που επιτρέπουν στον αναβάτη να επιλέγει διαφορετικές σχέσεις για να ρυθμίσει τη δύναμη του πεντάλ. Η κινηματική εξίσωση ενός συστήματος για τον ομοαξονικό μαγνητικό μηχανισμό μετάδοσης προκύπτει, η οποία είναι ισοδύναμη με την κινηματική μιας αμαξοστοιχίας πλανητικών οδοντωτών τροχών και χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του SR σε κάθε στάδιο μετάδοσης. Ένας μηχανισμός ελέγχου ταχύτητας έχει κατασκευαστεί για να ρυθμίζει την εμπλοκή τεσσάρων συμπλέκων με πiónι και καστάνια. Η διαδρομή ροής ισχύος σε κάθε στάδιο μετάδοσης ελέγχεται και χρησιμοποιείται για την επαλήθευση της σκοπιμότητας του προτεινόμενου μηχανισμού ελέγχου ταχύτητας. Το SR επιβεβαιώνεται επίσης από FEA και πειραματικές δοκιμές. Παρόλο που η παρουσιαζόμενη μετάδοση μαγνητικού διανομέα ξεπερνά αρκετά μειονεκτήματα των συμβατικών κιβωτίων διανομής πολλαπλών ταχυτήτων, ο κυματισμός της εκπεμπόμενης ροπής θα πρέπει να μετριαστεί έτσι ώστε να βελτιωθεί η άνεση οδήγησης. Οι μελλοντικές εργασίες που σχετίζονται με αυτήν τη μελέτη θα στοχεύουν στην ελαχιστοποίηση του κυματισμού της ροπής με διάφορες πιθανές προσεγγίσεις, όπως: αύξηση του αριθμού ζευγών πόλων μαγνήτη στους εσωτερικούς και εξωτερικούς ρότορες, στρέβλωση μόνιμων μαγνητών στους εσωτερικούς και εξωτερικούς ρότορες ή τροποποίηση τόξο μόνιμου μαγνήτη.

Ο Fukuoaka et al. στο [69] δείχνουν ότι οι μαγνητικοί οδοντωτοί τροχοί προσφέρουν αρκετά πλεονεκτήματα έναντι των συμβατικών μηχανικών οδοντωτών τροχών, όπως η εύκολη συντήρηση, οι χαμηλοί κραδασμοί και ο ακουστικός θόρυβος και η υψηλή αξιοπιστία. Για την πρακτική εφαρμογή των μαγνητικών οδοντωτών τροχών, θα πρέπει να διεξαχθούν πειραματικές μελέτες σχετικά με τα χαρακτηριστικά των οδοντωτών τροχών που λαμβάνουν υπόψη τους πραγματικούς κατασκευαστικούς περιορισμούς. Αυτό το έγγραφο παρουσιάζει την ανάλυση ζημιών, πειραματικές δοκιμές και βελτίωση της απόδοσης ενός μαγνητικού οδοντωτού τροχού επιφανειακού μόνιμου μαγνήτη (SPM). Το χαρακτηριστικό ροπής και η απόδοση της μαγνητικής ταχύτητας SPM υπολογίστηκαν χρησιμοποιώντας ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων (FEA). Πειράματα έγιναν σε δοκιμαστικό μαγνητικό οδοντωτό τροχό. Ο FEA και τα πειραματικά αποτελέσματα κατέδειξαν τη βελτιωμένη απόδοση του δοκιμαστικού εξοπλισμού. Η μέγιστη απόδοση της βελτιωμένης ταχύτητας ήταν πάνω από 96%.

Οι Fukuoaka et al περιέγραψαν την ανάλυση απόδοσης του δοκιμαστικού μαγνητικού οδοντωτού τροχού και τη βελτίωση της απόδοσης. Ταν σαφές ότι η μέγιστη ροπή του μαγνητικού οδοντωτού τροχού εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το μήκος στοίβας των πόλων και το βέλτιστο μήκος των τεμαχίων πόλων είναι ίσο με το μήκος στοίβας των εσωτερικών και εξωτερικών ρότορων. Η μέγιστη απόδοση της αρχικής μαγνητικής ταχύτητας ήταν περίπου 85% στα 200 r/min. Αναφέρθηκε ότι η απώλεια ρεύματος στο αλουμίνιο είναι κυρίαρχη σε σύγκριση με τις άλλες απώλειες. Αντικαθιστώντας τα περιβλήματα αλουμινίου με αυτά του Βακελίτη, η απόδοση του βελτιωμένου μαγνητικού οδοντωτού τροχού δοκιμής επιτεύχθηκε έως και πάνω από 96%.

Jaiaraman, et al. στο [5] περιλαμβάνει το σχεδιασμό, το υλικό, την τεχνολογία, την εφαρμογή και τις μελλοντικές χρήσεις των «τρένων μαγνητικής μετακίνησης». Το σύστημα μεταφοράς maglev είναι πιο σταθερό, γρηγορότερο, οικονομικό, αποτελεσματικό. Τα συστήματα Maglev χρησιμοποιούνται επί του παρόντος για εφαρμογές όπως ρουλεμάν, τρένα υψηλής ταχύτητας και βιομηχανικές κατασκευές. Το σύστημα Maglev είναι μια μέθοδος πρόωσης που χρησιμοποιεί μαγνητική διέγερση για να ωθήσει οχήματα με μαγνήτες και όχι με τροχούς, άξονες και ρουλεμάν. Με το σύστημα maglev, ένα όχημα κινείται σε μικρή απόσταση από τον οδηγό χρησιμοποιώντας μαγνήτες για να δημιουργήσει τόσο ανύψωση όσο και ώθηση (η διέγερση δεν θα υπερβαίνει τα 10 εκατοστά). Στο μέλλον, αυτά τα τρένα maglev υψηλής ταχύτητας θα έδιναν τεράστιο ανταγωνισμό στην αεροπορική βιομηχανία.



Εικόνα 27: Αμαξοστοιχίες μαγνητικής αιώρησης.

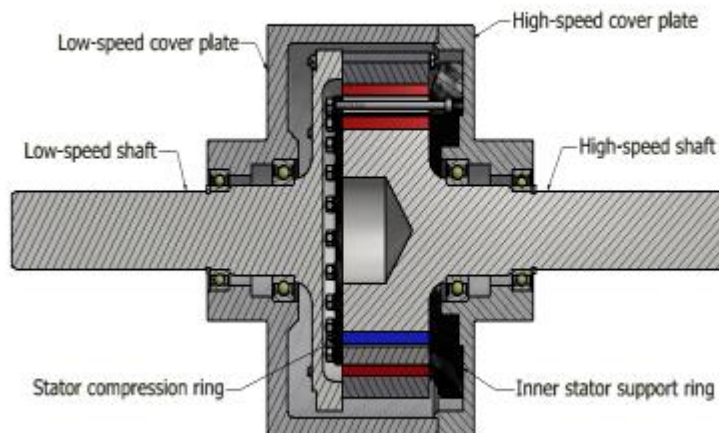
Τα τρένα μαγνητικής μετακίνησης έχουν πολλές εφαρμογές και πλεονεκτήματα, όπως υπερβαίνουν την ταχύτητα των 300 μιλίων/ώρα. Δεν έχει κατανάλωση καυσίμου, το κόστος είναι φθηνότερο από τις πτήσεις, πιο γρήγορο, αποτελεσματικό, λιγότερη συντήρηση. που χρησιμοποιούνται στις μεταφορές επιβατών και εμπορευμάτων, δεν χρησιμοποιούνται ορυκτά καύσιμα, λιγότερος θόρυβος, παίρνει λιγότερο χώρο από τα συμβατικά τρένα [5].

Αυτά τα τρένα καταναλώνουν πολύ λιγότερη ενέργεια σε σύγκριση με τα συμβατικά τρένα. Δεν απαιτούν μεγάλα είδη κινητήρα, καθώς λειτουργούν με γραμμικούς κινητήρες. Μετακινούνται πολύ γρηγορότερα από τα συνηθισμένα τρένα επειδή δεν επηρεάζονται από τριβή εδάφους. Θα είχαν μόνο αντίσταση αέρα ή αντίσταση αντίστασης. Είναι ασυμβίβαστα με τις υπάρχουσες σιδηροδρομικές γραμμές επειδή χρειάζονται απρόσκοπτη πίστα για να κινούνται, σε αντίθεση με τα παραδοσιακά τρένα υψηλής ταχύτητας. Αρχικά το κόστος είναι πολύ υψηλό, αλλά μπορεί να μειωθεί στο εγγύς μέλλον.

Ο A. Matthee et al. στο άρθρο [70] ασχολείται με τη βελτίωση του σχεδιασμού ενός προηγουμένως σχεδιασμένου μαγνητικού οδοντωτού τροχού με έμφαση στη βελτιστοποίηση της απόδοσης και τον μετριασμό των τελικών επιδράσεων. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης απόδοσης δείχνουν περίπου 70% μείωση των απωλειών σε πλήρες φορτίο και 40% αύξηση της μέγιστης ικανότητας ροπής. Συζητούνται νέες τεχνικές κατασκευής διαμορφωτών ροής, οι οποίες απέδωσαν εξαιρετικά αποτελέσματα.

Ο A. Matthee et al. στο άρθρο [70] περιγράφει τις βελτιώσεις σχεδιασμού σε ένα προηγουμένως σχεδιασμένο ομόκεντρο μαγνητικό εργαλείο. Βελτιστοποιώντας τον διαμορφωτή ροής και εξετάζοντας προσεκτικά τις πτυχές του σχεδιασμού που επηρεάζουν τα 3-D τελικά αποτελέσματα, η συνολική απόδοση (απόδοση και ικανότητα ροπής) της μαγνητικής ταχύτητας έχει βελτιωθεί σημαντικά. Το βελτιωμένο πρωτότυπο έχει κατασκευαστεί και αξιολογηθεί πειραματικά. Τα μετρημένα αποτελέσματα συγκρίνονται ευνοϊκά με τα προβλεπόμενα. Τα ξεχωριστά χαρακτηριστικά και η υψηλή απόδοση των μαγνητικών οδοντωτών τροχών τα

καθιστούν ελκυστική εναλλακτική λύση στα συμβατικά μηχανικά γρανάζια. Παρόλο που το βελτιωμένο πρωτότυπο δείχνει σημαντική μείωση της απώλειας χωρίς φορτίο, ενώ εξακολουθούν να υπάρχουν μαγνητικά πεδία διαρροής στην περιοχή του περιβλήματος υψηλής ταχύτητας που υποστηρίζει τον διαμορφωτή. Η μείωση αυτού του τελικού πεδίου διαρροής θα βελτιώσει περαιτέρω τη συνολική απόδοση της μαγνητικής ταχύτητας, ειδικά σε υψηλότερες ταχύτητες λειτουργίας. Οι πιθανές λύσεις περιλαμβάνουν την αύξηση της απόστασης μεταξύ των τμημάτων διαμορφωτή και του περιβλήματος υψηλής ταχύτητας ή την κατασκευή ολόκληρου του περιβλήματος υψηλής ταχύτητας από ένα μη μαγνητικό υλικό όπως το Vesconite. Τόσο οι 2-D όσο και οι 3-D προσομοιώσεις FEM δείχνουν ότι μπορεί να επιτευχθεί ελαφρώς υψηλότερη ροπή εξόδου για τα γεφυρωμένα διαμορφωτικά τμήματα χωρίς τις καμπύλες γωνίες. Αυτές οι καμπύλες γωνίες προστέθηκαν στο σχέδιο για να ενισχύσουν τη δομική αντοχή της πλαστικοποίησης, η οποία στο τέλος φαίνεται να είναι περιττή. Για το μαγνητικό εργαλείο που κατασκευάστηκε προηγουμένως, χρησιμοποιήθηκαν οι μαγνήτες N35H NdFeB. Η χρήση ισχυρότερων μαγνητών στο σχεδιασμό θα βελτιώσει εύκολα την πυκνότητα ροπής του μαγνητικού οδοντωτού τροχού κατά ένα σημαντικό περιθώριο.

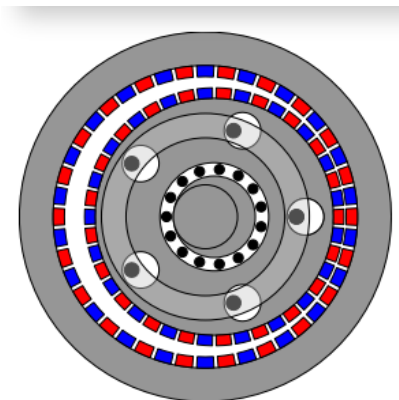


Εικόνα 28: Τομή του τελικού μαγνητικού οδοντωτού τροχού

Σε μελέτη της Fujita et al. [71] φάνηκε πως στα μηχανικά συστήματα οδοντωτών τροχών η σκόνη, ο θόρυβος, οι κραδασμοί και η φθορά των δοντιών δημιουργούνται από τριβές μεταξύ των οδοντωτών τροχών και η πίεση της τριβής απαιτεί λίπανση. Οι μαγνητικοί τροχοί μεταδίδουν ροπή με μαγνητικές δυνάμεις χωρίς επαφή και έτσι δεν υποκύπτουν σε προβλήματα που σχετίζονται με την επαφή. Η παρούσα εργασία συζητά τις διατάξεις μαγνήτη και το σχήμα των στατικών οδοντωτών οδοντωτών τροχών για τη βελτίωση της ροπής μετάδοσης στους μηχανισμούς μετάδοσης μαγνητικών οδοντωτών τροχών τύπου μαγνήτη επιφανείας.

Η Fujita et al. στη μελέτη τους[71], αναπτύξανε ένα μαγνητικό οδοντωτό υψηλής ταχύτητας που αναστέλλει τα στροφικά ρεύματα στον στάτορά του. Συγκεκριμένα, ο οδοντωτός τροχός έχει μια βέλτιστη σταθερή μορφή τεμαχίου πόλου και μαγνητική διάταξη Halbach. Τα αποτελέσματα που ελήφθησαν είναι τα εξής: Ερευνήθηκε ένα σχήμα ακίνητου στύλου με μικρή διαρροή μαγνητικής ροής. Ως αποτέλεσμα, εάν το σχήμα που χρησιμοποιήθηκε στον προηγούμενο στάτορα έχει διαδρομή ροής που συνδέει τα κομμάτια πόλων, η μέγιστη ροπή μετάδοσης είναι μικρή σε σύγκριση με τον στάτη χωρίς διαδρομή ροής. Έτσι, προτάθηκε ένα νέο σχήμα πόλου. Χρησιμοποιώντας τα προτεινόμενα τεμάχια πόλων, η ροπή μετάδοσης θα μπορούσε να αυξηθεί κατά 15% ή περισσότερο, σε σύγκριση με τα συμβατικά τεμάχια πόλων. Η διάταξη magneto Halbach προτάθηκε για τον ρότορα υψηλής ταχύτητας και η βέλτιστη κατάσταση διευκρινίστηκε με αριθμητική ανάλυση. Όταν το μέγεθος του μαγνήτη (γωνία του τεμαχίου μαγνήτη) ήταν το βέλτιστο, η μέγιστη ροπή μετάδοσης θα μπορούσε να αυξηθεί κατά περίπου 7%, σε σύγκριση με την κανονική κατάσταση.

Στο άρθρο [72] ο Jorgensen et al. παρουσιάζουν ένα νέο οδοντωτό τροχό μόνιμου μαγνήτη βασισμένο στην αρχή του κυκλοειδούς οδοντωτού τροχού, το οποίο συνήθως χαρακτηρίζεται από μια εξαιρετική πυκνότητα ροπής και μια πολύ υψηλή σχέση μετάδοσης. Ένας αρχικός σχεδιασμός της προτεινόμενης μαγνητικής ταχύτητας σχεδιάστηκε, αναλύθηκε και βελτιστοποιήθηκε με ένα αναλυτικό μοντέλο που αφορά την πυκνότητα ροπής. Τα αποτελέσματα ήταν ελπιδοφόρα σε σύγκριση με άλλα σχέδια μαγνητικών εργαλείων υψηλής απόδοσης. Κατασκευάστηκε ένα μοντέλο δοκιμής για την επαλήθευση του αναλυτικού μοντέλου.



Εικόνα 29: .Κυκλοειδής μαγνητικός οδοντωτός τροχός

Στο άρθρο [72] παρουσιάστηκε μια νέα διάταξη κυκλοειδούς μαγνητικού οδοντωτού τροχού από τους Jorgensen et al. Αυτός ο μαγνητικός οδοντωτός τροχός χαρακτηρίζεται από υψηλή πυκνότητα ροπής και υψηλό λόγο μετάδοσης. Η μέγιστη δυνατή ροπή της προτεινόμενης ταχύτητας υπολογίστηκε με αναλυτικές εκφράσεις που προέκυψαν από το [2]. Ένας αρχικός

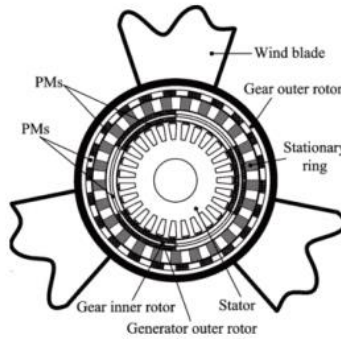
σχεδιασμός του εργαλείου κυκλοειδούς ήταν σε θέση να φτάσει τα $141,9 \text{ N} \cdot \text{m/L}$, δηλαδή περίπου 40% περισσότερο από τα «πλανητικά» μαγνητικά γρανάζια που αναπτύχθηκαν το [4]. Κατασκευάστηκε και δοκιμάστηκε ένα πειραματικό μοντέλο δοκιμής του αρχικού σχεδιασμού. Το πειραματικό μοντέλο δοκιμής έφτασε τα $33 \text{ N} \cdot \text{m}$. Οι βελτιστοποιήσεις για κυκλοειδείς οδοντωτούς τροχούς έδειξαν ότι ήταν δυνατή η επίτευξη πυκνότητας ροπής έως $183 \text{ N} \cdot \text{m/L}$, η οποία είναι σχεδόν διπλάσια από την πυκνότητα σε σύγκριση με τους «πλανητικούς» τύπους μαγνητικών ταχυτήτων [4]. Ένα μαγνητικό εργαλείο κυκλοειδούς θα μπορούσε επομένως να είναι μια πιθανή επιλογή για μελλοντικές εφαρμογές όπου, για παράδειγμα, ένας κινητήρας ή μια γεννήτρια είναι ενσωματωμένη μαζί με τον σχεδιασμό του κυκλοειδούς οδοντωτού τροχού. Οι προτεινόμενες διαμορφώσεις μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθούν ως συσκευές διανομής ισχύος για υβριδικά αυτοκίνητα ή ανεμογεννήτριες με σύγχρονη γεννήτρια σταθερής ταχύτητας [22].

Μελλοντικές εφαρμογές

Η θαλάσσια ενέργεια γίνεται τη δεκαετία όλο και πιο ελκυστική για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Όσο κι αν φαίνεται παράξενο, η τεχνολογία μαγνητικών οδοντωτών τροχών (μηχανές) είναι σε θέση να είναι πιο αποτελεσματική και να έχει πολύ διαφορετικά συστήματα απογείωσης ισχύος (PTO) και αρχές λειτουργίας για να καταδείξει την ευρεία εφαρμογή των MG's σε αυτόν τον τομέα [13].

Παλιρροιακή τουρμπίνα

Η συσκευή παλιρροιακής ανεμογεννήτριας με οριζόντιο άξονα [14] είναι ίσως η πιο ευθεία σύγκριση με τις ανεμογεννήτριες λόγω των ομοιοτήτων στον προσανατολισμό της μηχανής και την απογείωση ισχύος. Για αυτόν τον τύπο MEC, προτείνεται ένα σύστημα παρόμοιο με αυτό που προτείνεται [15]. Αυτός ο σχεδιασμός χρησιμοποιεί ένα CMG ομοαξονικά συζευγμένο με μια γεννήτρια μόνιμου μαγνήτη (PMG) που αποδεικνύεται από το επόμενο σχήμα. Ο εξωτερικός ρότορας του CMG είναι συνδεδεμένος με τις λεπίδες που συλλαμβάνουν την εισερχόμενη ενέργεια του ρευστού απευθείας. Ο προτεινόμενος λόγος μετάδοσης ήταν 7,33 λαμβάνοντας υπόψη τη μέση ταχύτητα ανέμου 7 m/s . Αυτό μπορεί να χρειαστεί να αυξηθεί για έναν παλιρροιακό ρότορα καθώς σημειώνονται ταχύτητες παλιρροιακού ρεύματος.

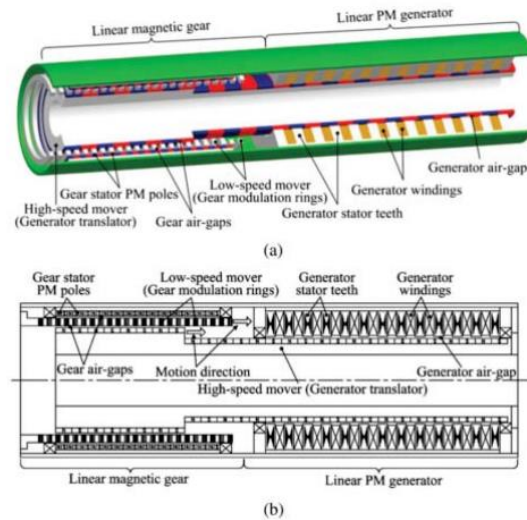


**Εικόνα 30: Προτεινόμενη παλιρροιακή τουρμπίνα
με οδοντωτό τροχό[13]**

Σημαδούρα-μετατροπέας ενέργειας κύματος (Heaving Buoy Wave Energy Converter)

Η σημαδούρα-μετατροπέας ενέργειας κύματος έχουν απλή λειτουργία με τη χρήση μιας πλωτής κατασκευής που ταλαντεύεται με τα εισερχόμενα κύματα. Το σύστημα (PTO-power power off) αυτών των συσκευών μπορεί να είναι αρκετά περίπλοκος, ωστόσο λόγω της γραμμικής φύσης των πρωτογενών κινήσεων των συσκευών. Υπήρξαν κάποια προτεινόμενα μοντέλα που χρησιμοποιούν γραμμική γεννήτρια [16], αλλά λόγω της χαμηλής συχνότητας απαιτείται μεγάλος αριθμός πόλων και υπάρχει κακή χρήση μαγνητικών υλικών. Αυτό θα επέτρεπε την άμεση μετατροπή της κίνησης ενός συστήματος τύπου σημαδούρας χωρίς εναλλαγή από γραμμικούς σε περιστροφικούς μηχανισμούς, όπως συστήματα σχάρας και πινιόν ή συστήματα βιδωτής σφαίρας [17].

Στο άρθρο [18] ένα προτεινόμενο ολοκληρωμένο σύστημα είδε τη χρήση ενός γραμμικού μαγνητικού οδοντωτού τροχού με μια γραμμική γεννήτρια μόνιμων μαγνητών. Αυτό επέτρεψε στον κινητήρα υψηλής ταχύτητας του οδοντωτού τροχού της γεννήτριας να μοιράζονται τον ίδιο άξονα. Με τον προτεινόμενο σχεδιασμό, ο κινητήρας χαμηλής ταχύτητας του μαγνητικού οδοντωτού τροχού συνδυάζεται με τη δομή του πλωτήρα πηνίου, όπως φαίνεται στο σχήμα 31. Καθώς ο σημαδούρας ανεβαίνει και κατεβαίνει με τη διάδοση του κύματος, ο κινητήρας υψηλής ταχύτητας που συνδέεται με την ταχύτητα της γραμμικής γεννήτριας ενισχύεται κατά ένα συντελεστή η σχέση μετάδοσης. Ένα παρόμοιο ονομαστικό μηχανήμα χωρίς σύστημα MG υπολογίστηκε ότι είχε όγκο 4 φορές μεγαλύτερο από το προτεινόμενο σύστημα και με μεγαλύτερους όγκους PM, πυρήνες σιδήρου και περιελίξεις χαλκού (167% 214% και 271% αντίστοιχα) θα είχαν σημαντικά υψηλότερο κόστος. Επιπλέον, το μηχανήμα χωρίς γρανάζι υπολογίστηκε ότι είχε μεγαλύτερες απώλειες χαλκού. Έτσι, ενώ μειώνει σημαντικά το κόστος και τον όγκο, το προτεινόμενο μηχανήμα έχει μεγαλύτερη απόδοση και πυκνότητα ισχύος.



Εικόνα 31. Προτεινόμενο σύστημα σηματοδότης-μετατροπέας ενέργειας κύματος (α) Πραγματικό μοντέλο

(β) Σχηματικό μοντέλο [18]

Μετατροπέας ταλάντωσης κύματος κύματος

Στην αναφορά τους [19], ο Ozan Keysan et al. εξέτασαν τον μετατροπέα κύματος ταλάντωσης κύματος Aquamarine Oyster με στόχο να προτείνει μια βέλτιστη τοπολογία γεννήτριας σε αντίθεση με το υδραυλικό σύστημα που χρησιμοποιήθηκε τότε. Από τους τρεις τύπους κίνησης (γραμμική, πλήρης περιστροφική και μερική περιστροφή) η πλήρης περιστροφή βρέθηκε να είναι η πλέον συμφέρουσα.

Δεύτερον, αναλύθηκαν τα χαρακτηριστικά ροπής ταχύτητας. Με μέση ταχύτητα 0.45rpm και μέση ισχύ 164kW, οι απαιτήσεις υψηλής ροπής και η πολύ χαμηλή ταχύτητα σήμαιναν ότι μια άμεση λύση οδήγησης είχε ως αποτέλεσμα μια βαριά γεννήτρια χαμηλής απόδοσης.

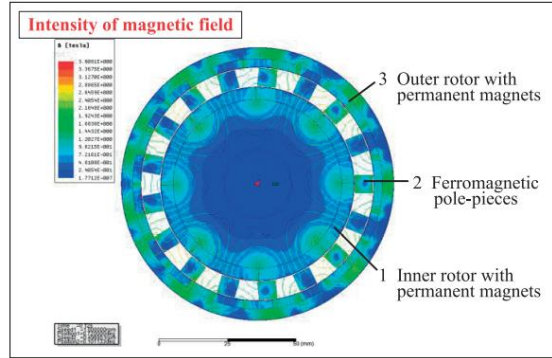
Χρησιμοποιώντας κιβώτιο ταχυτήτων μονής βαθμίδας με σχέση μετάδοσης είτε 10-15: 1, η απόδοση της γεννήτριας αυξήθηκε στο 90% και μείωσε σημαντικά τη συνολική μάζα. Στην προτεινόμενη σχεδίαση, δύο γεννήτριες C-GEN [20] με δύο κιβώτια ταχυτήτων θα συνδέονταν σε κάθε πλευρά του περυγίου Oyster. Τα κιβώτια ταχυτήτων συνδέονται με τον άξονα περυγίων των συσκευών με τον άξονα εξόδου του κιβωτίου ταχυτήτων να συνδέεται με τον βραχίονα ροπής της γεννήτριας. Προτείνεται η αντικατάσταση των μηχανικών κιβωτίων ταχυτήτων που προτείνονται στην έκθεση με αξονικά προσανατολισμένα MG [21]. Έτσι, ο ίδιος συνολικός σχεδιασμός μπορεί να διατηρηθεί και παρόλο που το MG θα ήταν δυνητικά χαμηλότερης αναλογίας και ακριβότερο από ένα παραδοσιακό μηχανικό εργαλείο, με την ένταξη του στο σύστημα να αναμένονται παρόμοιες αποδόσεις και μειώσεις μάζας.

Πιθανές εφαρμογές

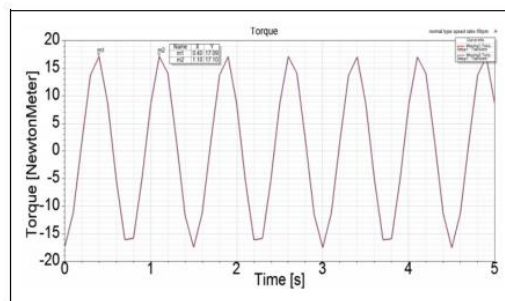
Το κόστος των μόνιμων μαγνητών θα είναι πιθανότατα ένας σημαντικός παράγοντας για τον καθορισμό του εάν οι μαγνητικοί οδοντωτοί τροχοί και τα μηχανήματα μαγνητικών οδοντωτών τροχών υιοθετούνται ευρέως στη βιομηχανία. Είναι ενδιαφέρον ότι τα MGM μπορούν να είναι ανταγωνιστικά όσον αφορά τη ροπή ανά όγκο μαγνήτη. Δύο πολύ ελκυστικές πτυχές των μαγνητικών οδοντωτών τροχών είναι οι χαμηλές απαιτήσεις συντήρησης και η εγγενής προστασία υπερφόρτωσης που προσφέρουν. Αυτά τα πλεονεκτήματα μπορεί να είναι πολύ σημαντικά στη βιομηχανία αιολικής ενέργειας, όπου η συντήρηση του πύργου είναι δύσκολο να εκτελεστεί, ειδικά σε υπεράκτιες εφαρμογές. Εάν ένα μαγνητικό γρανάζι χρησιμοποιείται ως το πρώτο στάδιο του ανεμογεννητήρα μετάδοσης κίνησης [83], ολόκληρο το σύστημα κίνησης μπορεί να προστατευθεί από επικίνδυνους παλμούς ροπής που προκαλούνται από δυνατούς ανέμους. Η βιομηχανία αιολικής ενέργειας, ωστόσο, δεν είναι σε καμία περίπτωση η μόνη βιομηχανία που μπορεί να επωφεληθεί από αυτήν την τεχνολογία. Έχει προβλεφθεί ότι η εξοικονόμηση κόστους συντήρησης μπορεί να καταστήσει τους μαγνητικούς οδοντωτούς τροχούς μια βιώσιμη εναλλακτική λύση σε πολλές εφαρμογές, ακόμη και αν το αρχικό κόστος κεφαλαίου είναι υψηλότερο. Με βάση τα δεδομένα προσομοίωσης, τα πειραματικά δεδομένα που συλλέχθηκαν σε αυτή τη μελέτη και άλλες πηγές, μπορεί να συναχθεί το συμπέρασμα ότι τα μηχανήματα με μαγνητικό εξοπλισμό αξίζει να εξεταστούν για εφαρμογές χαμηλής ταχύτητας παρά τα μειονεκτήματα όσον αφορά τη μηχανική πολυπλοκότητα. Η πυκνότητα ροπής τους υπερβαίνει κατά πολύ εκείνη των συμβατικών μηχανών PM και μπορούν να επιτύχουν υψηλές αποδόσεις. Τα μηχανήματα Vernier μπορεί να είναι μια πολύ ελκυστική επιλογή για εφαρμογές έλξης. Τα μηχανήματα έχουν υψηλή ικανότητα ροπής σε χαμηλές ταχύτητες και μεγάλο εύρος ταχύτητας λειτουργίας.

Ανάλυση μαγνητοστατικού πεδίου μηχανισμού ομοαξονικού μαγνητικού οδοντωτού τροχού
Η διδιάστατη ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων (FEA) εφαρμόζεται για τη διερεύνηση του μαγνητοστατικού πεδίου της συνθετικής ενσωματωμένης συσκευής. Το σχήμα 32 δείχνει τις κατανομές μαγνητικού πεδίου ενός ομοαξονικού μηχανισμού μαγνητικού οδοντωτού τροχού. Οι αριθμοί των ζευγών πόλων μαγνήτη για τον εσωτερικό ρότορα, σιδηρομαγνητικών κομματιών πόλων στον φορέα και ζευγών πόλων μαγνήτη για τον εξωτερικό ρότορα είναι 4, 17 και 13, αντίστοιχα. Από το Σχήμα 33 φαίνεται ότι η μέγιστη μεταφερόμενη ροπή του μηχανισμού ομοαξονικού μαγνητικού οδοντωτού τροχού είναι 17,1 N m. Σε αυτόν τον μηχανισμό δεν εμφανίζεται μαγνητικός κορεσμός. Η μεταδιδόμενη ροπή και ο λόγος ταχύτητας μπορούν να σχεδιαστούν με βάση τις γεωμετρικές του διαστάσεις, τον αριθμό των πόλων μόνιμου μαγνήτη, τον αριθμό σιδηρομαγνητικών στύλων και τις ιδιότητες υλικών των μόνιμων μαγνητών και του σιδηρομαγνητικού χάλυβα για σκοπούς ζυγού. Λόγω του χαρακτηριστικού μη επαφής, παρέχει

μια μοναδική λειτουργία προστασίας από υπερφόρτωση όταν η φόρτωση είναι μεγαλύτερη από τη μέγιστη μεταδιδόμενη ροπή του μηχανισμού ομοαξονικού μαγνητικού οδοντωτού τροχού..



Εικόνα 32. Η κατανομή μαγνητικού πεδίου ενός ομοαξονικού μηχανισμού μαγνητικού οδοντωτού τροχού



Εικόνα 33. Η καμπύλη μεταδιδόμενης ροπής έναντι χρόνου ενός ομοαξονικού μαγνητικού μηχανισμού μετάδοσης

Για τη μελλοντική εργασιακή μελέτη, το πιο σημαντικό βήμα είναι η επικύρωση των αλγορίθμων μέσω της σύγκρισης με μετρήσεις σε πρωτότυπο μαγνητικού οδοντωτού τροχού. Όπως έχει ήδη εξηγηθεί στην Περίληψη, αυτή η δραστηριότητα σχεδιάστηκε αρχικά, αλλά λόγω εξωτερικών παραγόντων το πρωτότυπο δεν έχει κατασκευαστεί, αν και αρκετές εταιρείες δήλωσαν το ενδιαφέρον τους και πραγματοποιήθηκαν προκαταρκτικές συζητήσεις και τεχνικές συναντήσεις.

Επιπλέον, μια έρευνα που θα ήταν σημαντική αφορά την ανάλυση απομαγνήτισης λόγω κακής ευθυγράμμισης των ρότορων και υπερβολικής θερμοκρασίας μόνιμων μαγνητών. Ο αλγόριθμος που εισήχθη για την ανάλυση μαγνήτισης, απομαγνήτισης και ανάκρουσης που αναπτύχθηκε σε αυτή τη διατριβή μπορεί να υιοθετηθεί για το σκοπό αυτό.

Τέλος, ο αλγόριθμος 2D FEM/BEM που αναπτύχθηκε σε αυτήν την εργασία μπορεί να επεκταθεί και στην τρισδιάστατη περίπτωση, καθώς οι μαγνητικές ταχύτητες δισδιάστατες

προσομοιώσεις είναι γνωστό ότι υπερεκτιμούν τη ροπή της στάσης λόγω πιθανών μη αμελητέων περιθωριακών και τελικών επιδράσεων.

2.3. Μέθοδοι παραγωγής

Μαγνητικοί οδοντωτοί τροχοί μη σπάνιας γης και σπάνιας γης

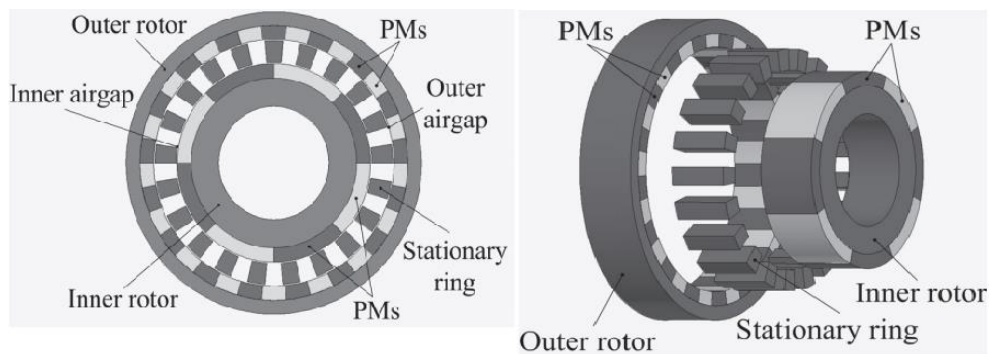
Το πρώτο υλικό μόνιμων μαγνητών που εφαρμόζεται στη μαγνητική ταχύτητα είναι ο σπάνιος φερρίτης που μπορεί να μεταδώσει μόνο χαμηλή ροπή [28]. Ο φερρίτης έχει τα πλεονεκτήματα της χαμηλής τιμής, της εύκολης κατασκευής και της υψηλής καταναγκαστικότητας, ενώ η χαμηλή υπολειμματική πυκνότητα ροής είναι το προφανές μειονέκτημά του. Πριν από την εφεύρεση των μόνιμων μαγνητών των σπάνιων γαιών, το αλουμίνιο-νικέλιο-κοβάλτιο (Alnico) που λαμβάνει τα καθορισμένα πλεονεκτήματα της υψηλής πυκνότητας ροής και των άφθονων στοιχείων, χρησιμοποιήθηκε επίσης για την ανάπτυξη μαγνητικών οδοντωτών τροχών. Μετά την έλευση των υψηλής ενέργειας υλικών μόνιμων μαγνητών σπάνιων γαιών όπως το PM νεοδυμίου-σιδήρου-βορίου (NdFeB) PM, ο οποίος είναι πιο ισχυρός τύπος μαγνήτη εμπορικά [31] και το σαμάριο-κοβάλτιο (SmCo) PM προσφέρουν εφαρμογές υψηλής θερμοκρασίας [32], γίνονται τα υλικά PM που υιοθετούνται ευρέως για μαγνητικά γρανάζια [29]. Πρόσφατα υπάρχει μια αυξανόμενη ανησυχία για την τιμή και την προσφορά στοιχείων σπάνιας γης. Αν και τα σπάνια γήινα μαγνητικά γρανάζια έχουν καλύτερα η απόδοση, η κυμαινόμενη και ακριβή τιμή τους και τα πεπερασμένα αποθέματα θα αυξήσουν το κόστος κατασκευής ηλεκτρικών οχημάτων, εμποδίζοντας την περαιτέρω εφαρμογή σε ηλεκτρικά οχήματα [30].

Σύγκριση απόδοσης

Παρόλο που η αρχή λειτουργίας, η αναλυτική μοντελοποίηση και η αριθμητική ανάλυση πεδίου των μαγνητικών οδοντωτών τροχών έχουν παρουσιαστεί καλά, η σύγκριση των επιδόσεων των μαγνητικών εργαλείων με τη χρήση διαφορετικών τύπων PMs απουσιάζει στη βιβλιογραφία. Για μια δίκαιη σύγκριση, τα τρία μαγνητικά γρανάζια, τα οποία είναι εγκατεστημένα με τα Alnico, NdFeB και SmCo, υιοθετούν την ίδια τοπολογία με βάση τα ακόλουθα κριτήρια:

- ίδια εξωτερική διάμετρος, διάμετρος άξονα και αξονικό μήκος
- ίδιο ακίνητο δακτύλιο
- ίδια σχέση μετάδοσης
- τα ίδια σιδηρομαγνητικά υλικά που χρησιμοποιούνται
- χρησιμοποιείται ο ίδιος όγκος PM

Στο σχήμα 34 απεικονίζονται οι 2-D και 3-D διαμορφώσεις του ομοαξονικού μαγνητικού οδοντωτού τροχού για σύγκριση:



Εικόνα 34: Δισδιάστατη(2-D) και τρισδιάστατη(3-D) δομή μαγνητικού οδοντωτού τροχού

Σύγκριση υλικών των μαγνητών

Η διαφορά πυκνότητας ροής του διακένου αέρα μεταξύ των μη σπάνιων και σπάνιων γαιών αποδίδει κυρίως την ποιότητα των υλικών PM που υιοθετήθηκαν. Τα PM της σπάνιας γης, τα οποία αποτελούνται από κράματα στοιχείων σπάνιας γης, παράγουν σημαντικά ισχυρότερο μαγνητικό πεδίο από άλλους τύπους PM [30]. Τα NdFeB και SmCo είναι δύο συνηθισμένοι τύποι PM σπάνιας γης που υιοθετούνται εκτενώς σε βιομηχανικές εφαρμογές. Το SmCo, το οποίο είναι το πρώτο μέλος των PM της σπάνιας γης, αποτελείται από Sm, Co και άλλα στοιχεία όπως Fe και Cu. Παρόλο που έχει το πλεονέκτημα της καλής σταθερότητας της θερμοκρασίας και της υψηλής αντοχής στον απομαγνητισμό, χρησιμοποιείται λιγότερο από το NdFeB λόγω της εξαιρετικά υψηλής τιμής και της σχετικά ασθενέστερης έντασης του μαγνητικού πεδίου. Το NdFeB, το οποίο είναι η πιο επιτυχημένη εφεύρεση στα PM της σπάνιας γης, είναι το ισχυρότερο και πιο προσιτό PM σπάνιας γης. Είναι κράμα Nd, Fe, B και άλλων στοιχείων όπως Re, Al και Cu. Αν και τα PM των σπάνιων γαιών έχουν πολύ εντυπωσιακή απόδοση σε πολλές εφαρμογές, η υψηλή τιμή και τα χαμηλά αποθέματά τους στη γη καθορίζουν ότι τα PM των σπάνιων γαιών θα εξαντληθούν στο μέλλον. Το μη σπάνιο γήινο Alnico PM, το οποίο αποτελείται από Al, Ni, Co και άλλα στοιχεία όπως Cu, Ti και Fe, είναι ένας πιθανός υποψήφιος για να ανταγωνιστεί τα PM της σπάνιας γης. Το σημαντικό πλεονέκτημα του Alnico είναι ο πολύ χαμηλός συντελεστής θερμοκρασίας και η πολύ υψηλή πυκνότητα ροής Br. Αν και ο χαμηλός καταναγκαστικός Hc του Alnico το καθιστά ευάλωτο στην απομαγνήτιση, αυτό το μειονέκτημα μπορεί να λυθεί ή ακόμη και να χρησιμοποιηθεί θετικά [33]. Ο Πίνακας 2 δίνει μια ποσοτική σύγκριση των μαγνητικών ιδιοτήτων μεταξύ αυτών των τριών PM.

Πίνακας 2 Σύγκριση υλικών μαγνήτη

	Alnico	NdFeB	SmCo
Br [T]	1.4	1.4	1.1
Hc [kA/m]	275	2000	2000
BH(max) [kJ/m ³]	88	440	200

Σύγκριση κόστους-αποτελεσματικότητας

Για να γίνει μια δίκαιη σύγκριση κόστους, λαμβάνονται υπόψη οι τιμές των πρώτων υλών αυτών των τριών υλικών PM, παραμελώντας παράλληλα τις τιμές των προϊόντων που διέπονται από πολλούς παράγοντες όπως η προσφορά και η ζήτηση, η στρατηγική μάρκετινγκ και η εμπορική πολιτική. Είναι προφανές ότι οι τιμές των πρώτων υλών αυτών των τριών PM μπορούν να υπολογιστούν σύμφωνα με τις συνθέσεις τους. Δεδομένου ότι η Κίνα είναι ένας από τους σημαντικότερους παραγωγούς PM, οι τιμές αυτών των στοιχείων βασίζονται στην κινεζική αγορά υλικών τον Απρίλιο του 2012 όπως παρατίθεται στον Πίνακα 3. Κατά συνέπεια, το κόστος τριών μαγνητικών εργαλείων με διαφορετικούς τύπους PM μπορεί να υπολογιστεί εύκολα. Η ροπή του εσωτερικού ρότορα λαμβάνεται ως ο βασικός δείκτης που αντικατοπτρίζει την αποδοτικότητα κόστους. Ο Πίνακας 5 συνοψίζει τις πυκνότητες, τους όγκους, τις συνθέσεις και τις ροπές τους, υπολογίζοντας ως εκ τούτου την αποδοτικότητα κόστους ως προς το κόστος ανά ροπή.

Πίνακας 5 Τιμή βασικών στοιχείων

Element	Price (USD/kg)	Element	Price (USD/kg)
Al	2.363	Sm	236.265
Fe	0.126	Nd	252.016
Cu	8.506	B	3.938
Re	2362.651	Ni	18.901
Co	35.125		

Αν και ο τύπος PM AlNiCo έχει τη χαμηλότερη απόδοση ροπής, ο τύπος PM AlNiCo έχει τη χαμηλότερη τιμή για τη δημιουργία της μονάδας ροπής, η οποία είναι μόνο 0,3779 USD/Nm. Αυτό σημαίνει ότι είναι μόνο το 84,826 % του τύπου NdFeB PM (0,4455 USD/Nm) και 81,234 % του τύπου SmCo PM (0,4652 USD/Nm). Επιπλέον, τα μαγνητικά γρανάζια δεν περιλαμβάνουν κανένα ρεύμα οπλισμού, εξαλείφοντας την πιθανότητα τυχαίας απομαγνήτισης. Έτσι, ο τύπος AlNiCo είναι η καλύτερη επιλογή αντικατάστασης των μαγνητών σπάνιας γης.

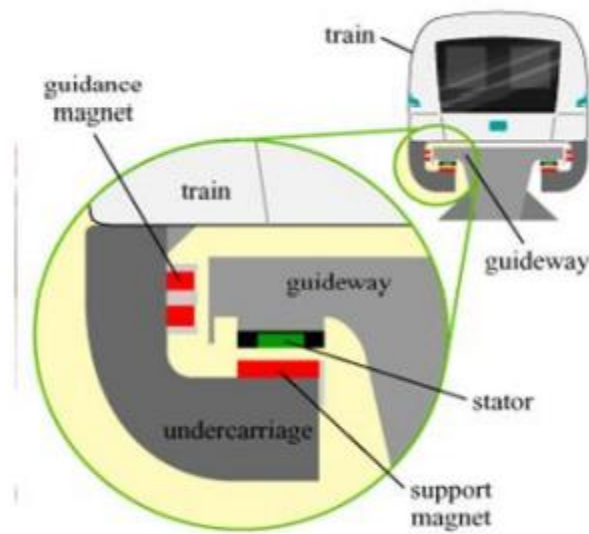
3. Ηλεκτρομαγνητική μετάδοση ταχυτήτων

3.1. Εφαρμογές

Ηλεκτρομαγνητική ανάρτηση

Σε αυτό το σύστημα οι ηλεκτρομαγνήτες είναι προσαρτημένοι στο τρένο και επίσης προσαρτημένοι στη σιδηρογραμμική γραμμή. Έχουν σιδηρομαγνητικούς στάτορες στην πίστα και τους βοηθούν να ανεβάσουν το τρένο [7]. Έχουν μαγνήτες καθοδήγησης στις πλευρές της πίστας που είναι τοποθετημένοι πλήρως κατά μήκος της πίστας. Ένας υπολογιστής

χρησιμοποιείται για τον έλεγχο του ύψους της μετεωρίσεως των τρένων. Μας κάνουν να πετάμε περίπου (1 - 15 εκατοστά). Η μέγιστη ταχύτητα που θα μπορούσαν να φτάσουν αυτά τα τρένα είναι περίπου 438 χιλιόμετρα/ώρα. Είναι γρήγοροι και δίνουν καλό ανταγωνισμό στην αεροπορική βιομηχανία. Έχουν ενσωματωμένο τροφοδοτικό μπαταρίας το οποίο δίνει πλεόνασμα ενέργειας που απαιτείται για τη λειτουργία μιας καμπίνας. Σύμφωνα με το σχήμα 38. H. Yaghoubi και H. Ziari (Τα μαγνητικά πεδία μέσα και έξω από το όχημα είναι μικρότερα από την ηλεκτρονική δυναμική ανάρτηση · είναι εμπορικά αποδεδειγμένο ότι η διαθέσιμη τεχνολογία μπορεί να επιτύχει πολύ υψηλές ταχύτητες · δεν απαιτούνται τροχοί, δευτερεύον σύστημα πρόωσης. Λόγω της αστάθειας του συστήματος και των απαιτούμενων σταθερών διορθώσεων από εξωτερικά συστήματα, ενδέχεται να προκύψουν προβλήματα κραδασμών.



Εικόνα 38: Ηλεκτρομαγνητική ανάρτηση

Στο άρθρο [24] σύμφωνα με αυτό το σύστημα Supercooled, υπεραγώγιμοι μαγνήτες τοποθετούνται κάτω από το τρένο. Με αυτό το σύστημα το τρένο θα μπορούσε να ανυψωθεί περίπου 10 cm. Το μαγνητικό πεδίο που βοηθά το τρένο να κινείται οφείλεται στη χρήση υπεραγώγιμων μαγνητών. Εάν αυτοί οι μόνιμοι μαγνήτες τοποθετηθούν σε μια συστοιχία, θα χρησιμοποιηθούν επίσης ως σύστημα Inductrack. Η δύναμη στην πίστα δημιουργείται από επαγόμενο μαγνητικό πεδίο σε καλώδια ή αγωγίμες ταινίες στην πίστα. Στην ηλεκτροδυναμική ανάρτηση (EDS), τόσο ο οδηγός όσο και το τρένο ασκούν μαγνητικό πεδίο και το τρένο κινείται από την απωθητική και ελκυστική δύναμη μεταξύ αυτά τα μαγνητικά πεδία. Τα συστήματα EDS έχουν επίσης ένα σημαντικό μειονέκτημα. Σε αργές ταχύτητες, το ρεύμα που προκαλείται σε αυτά τα πηνία και η μαγνητική ροή που προκύπτει δεν είναι αρκετά μεγάλη για να αντέξει το βάρος της αμαξοστοιχίας. Για το λόγο αυτό, το τρένο πρέπει να έχει τροχούς ή κάποια άλλη

μορφή εργαλείων προσγείωσης για να στηρίζει το τρένο μέχρι να φτάσει σε μια ταχύτητα που μπορεί να διατηρήσει τη διέγερση. Δεδομένου ότι ένα τρένο μπορεί να σταματήσει σε οποιοδήποτε σημείο, λόγω προβλημάτων εξοπλισμού, για παράδειγμα, ολόκληρη η πίστα πρέπει να είναι σε θέση να υποστηρίξει λειτουργία χαμηλής ταχύτητας και υψηλής ταχύτητας. Ένα άλλο μειονέκτημα είναι ότι το σύστημα EDS δημιουργεί φυσικά ένα πεδίο στην πίστα μπροστά και πίσω από τους μαγνήτες ανύψωσης, το οποίο δρα ενάντια στους μαγνήτες και δημιουργεί μια μορφή οπισθέλκουσας.

Στο άρθρο [25] η Behbahani et al. εξήγησε ότι το όνομα maglev προέρχεται από το MAGneticLEVitation. Η μαγνητική διέγερση είναι μια εξαιρετικά προηγμένη τεχνολογία. Έχει διάφορες χρήσεις, συμπεριλαμβανομένης της καθαρής ενέργειας (μικρές και τεράστιες ανεμογεννήτριες: στο σπίτι, στο γραφείο, στη βιομηχανία κ.λπ.), κτιριακές εγκαταστάσεις (ανεμιστήρας), συστήματα μεταφοράς (τρένο με μαγνητική διέλευση, Personal Rapid Transit (PRT), κ.λπ.), όπλο (πυροβόλο όπλο, πυραύλους), πυρηνική μηχανική (φυγοκέντρωση πυρηνικού αντιδραστήρα), πολιτικός μηχανικός (ασανσέρ), διαφήμιση (μπορεί να επιλεγεί ό, τι θεωρείται εντός ή πάνω από διάφορα πλαίσια), παιχνίδια (τρένο, εκτοξεύοντας αποστάτες πάνω από το διαστημόπλοιο κ.λπ.) και χαρτικά (στυλό). Το κοινό σημείο σε όλες αυτές τις εφαρμογές είναι η έλλειψη επαφής και συνεπώς η φθορά και η τριβή. Αυτό αυξάνει την αποδοτικότητα, μειώνει το κόστος συντήρησης και αυξάνει τη διάρκεια ζωής του συστήματος [7]. Η τεχνολογία μαγνητικής διέγερσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως αποτελεσματική τεχνολογία σε διάφορους κλάδους. Υπάρχουν ήδη πολλές χώρες που έλκονται από τα συστήματα maglev. Πολλά συστήματα έχουν προταθεί σε διαφορετικά μέρη του κόσμου. Αυτό το έγγραφο προσπάθησε να μελετήσει τις σημαντικότερες χρήσεις της τεχνολογίας μαγνητικής μετακίνησης. Τα αποτελέσματα έδειξαν ξεκάθαρα ότι το maglev μπορεί βολικά να θεωρηθεί ως λύση για τις μελλοντικές μηχανικές ανάγκες του κόσμου. Οι μαγνήτες επί του σκάφους έχουν μεγάλο περιθώριο μεταξύ σιδηροδρόμου και τρένου επιτρέπουν τις υψηλότερες καταγεγραμμένες ταχύτητες τρένων 581 χλμ./Ωρα (361 μίλια/ώρα) [5] και μεγάλη χωρητικότητα φορτίου. έχει επιδείξει επιτυχημένες λειτουργίες χρησιμοποιώντας υπεραγωγούς υψηλής θερμοκρασίας στους μαγνήτες του, που ψύχονται με φθινό υγρό άζωτο. Τα ισχυρά μαγνητικά πεδία στο τρένο θα καθιστούσαν το τρένο απρόσιτο για τους επιβάτες με βηματοδότες ή μαγνητικά μέσα αποθήκευσης δεδομένων, όπως σκληρούς δίσκους και πιστωτικές κάρτες. χρήση μαγνητικής θωράκισης · Περιορισμοί στην επαγωγικότητα του οδηγού περιορίζουν τη μέγιστη ταχύτητα του οχήματος. το όχημα πρέπει να είναι τροχοφόρο για να ταξιδεύει σε χαμηλές ταχύτητες.

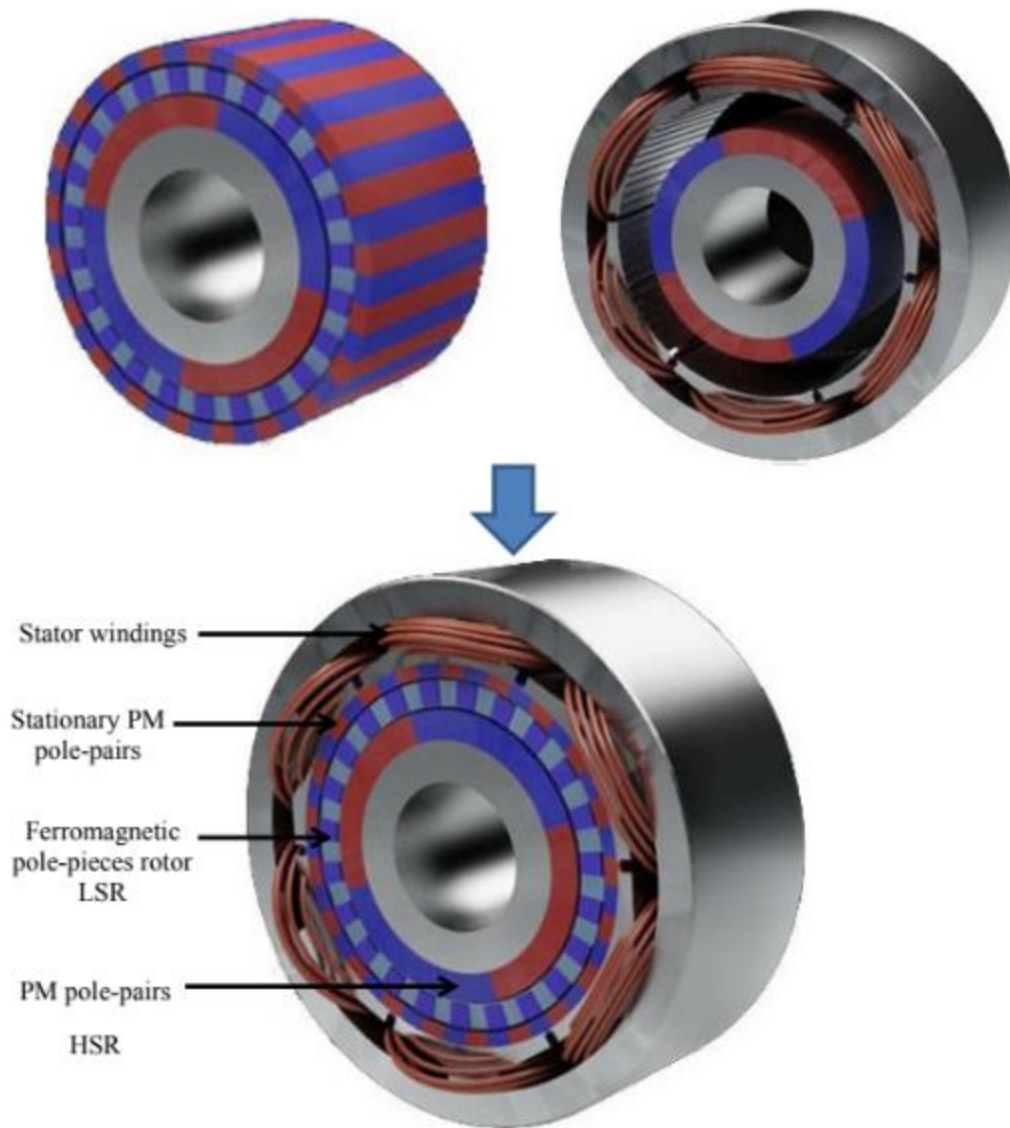
Pseudo Direct Drive (PDD)

Στο άρθρο [35] μαθαίνουμε ένα συνδυασμό μαγνητικών οδοντωτών τροχών με περιελίξεις στάτορα, αποκτώντας έτσι Pseudo Direct Drive (PDD). Το PDD αντιπροσωπεύει την

αντικατάσταση του κινητήρα και του μειωτήρα και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε όλες τις περιπτώσεις όπου χρησιμοποιούνται συμβατικοί κινητήρες και μειωτήρες. Ένα σύστημα PDD φαίνεται στο σχήμα 39.

Το PDD επιτυγχάνεται συνδυάζοντας ένα μηχανήμα PM με μαγνητικό εργαλείο μηχανικά και μαγνητικά. αυτό αναπτύχθηκε από την Atallah και δημοσιεύθηκε το 2008 [100]. Η μηχανική ολοκλήρωση συνίσταται στο να περικλείει τον στροφέα μόνιμου μαγνήτη χαμηλού πόλου μέσα σε έναν σιδηρομαγνητικό στροφέα όπου ο εσωτερικός ρότορας υποστηρίζεται από ρουλεμάν, μια διάταξη μόνιμου μαγνήτη υψηλού ζεύγους πόλων προσαρτάται στη διάτρηση του στάτη για διαμόρφωση πεδίου. Αυτά είναι τα κύρια συστατικά που σχηματίζουν μια ψευδοαπευθείας κίνηση όπως φαίνεται στο σχήμα 39 και με περισσότερες λεπτομέρειες στο σχήμα 3.1 και το σχήμα 3.2. Αυτή η δομή προσφέρει ένα συμπαγές μηχανήμα σε ένα πακέτο, ικανό για μετάδοση υψηλής ροπής, εύκολο στη συντήρηση και τη μεταφορά.

Το PDD μπορεί να επιτύχει πυκνότητα ροπής άνω των 60kNm/m^3 για μεσαίο έως μικρό μέγεθος. Μεγαλύτερη πυκνότητα ροπής με PDD (110kNm/m^3) μπορεί εύκολα να επιτευχθεί, όπως έχει αναφερθεί στο [101], με χαμηλή ροπή απόφραξης, φυσική ψύξη με αέρα και συντελεστή ισχύος πάνω από 0,9.



Εικόνα 39. Νέος σχεδιασμός κίνησης με χρήση PDD.

Επιπλέον, η προστασία από υπερφόρτωση είναι ένα σημαντικό πλεονέκτημα των PDD. Όταν υποβάλλεται σε ροπή φορτίου μεγαλύτερη από τη ροπή απομάκρυνσης, γλιστράει χωρίς να προκαλεί ζημιά στο μηχανήμα ή στην αμαξοστοιχία. Αυτό το συγκεκριμένο χαρακτηριστικό λειτουργεί σαν ασφάλεια υπερβολικής ροπής που αποτρέπει τη ζημιά στο σύστημα κίνησης υπό συνθήκες υπερφόρτωσης.

Επιπλέον, το PDD θα μπορούσε να ελεγχθεί χρησιμοποιώντας υπάρχουσες τεχνικές ελέγχου που χρησιμοποιούνται για μηχανές BLAC, επομένως είναι απαραίτητο να προσδιοριστεί το καλύτερο σύστημα ελέγχου που υπάρχει στη βιβλιογραφία για την επίτευξη καλής απόδοσης, απλότητας και ευκολίας εφαρμογής.

Θαλάσσια πρόωση

Η τεχνολογία Pseudo-Direct Drive (PDD) της Magnomatics για θαλάσσια πρόωση προσφέρει εξαιρετικές μειώσεις στο μέγεθος και το βάρος της μηχανής σε σύγκριση με τις συμβατικές ηλεκτρικές μηχανές μόνιμου μαγνήτη και πηνίων. Είτε η εφαρμογή αφορά εμπορική θαλάσσια, ναυτική ή υποθαλάσσια, ισχύ από kW έως πολυμεγαβάτ, η Magnomatics έχει την αποτελεσματική, πράσινη λύση για το ηλεκτρικό σας σύστημα πρόωσης. Για μικρότερα σκάφη, το PDD Thrusters προσφέρει μια εξαιρετική λύση για ένα ηλεκτρικό θαλάσσιο σύστημα πρόωσης. Οι προηγούμενες εργασίες περιλαμβάνουν τα προωθητικά συστήματα 15kW και 25kW για Soil Machine Dynamics Quantum και Atom Remotely Operated Vehicles (ROV) που πρωτοπορούν σε αυτόν τον τομέα.

MAGSPLIT υβριδικό σύστημα μετάδοσης (DHT)

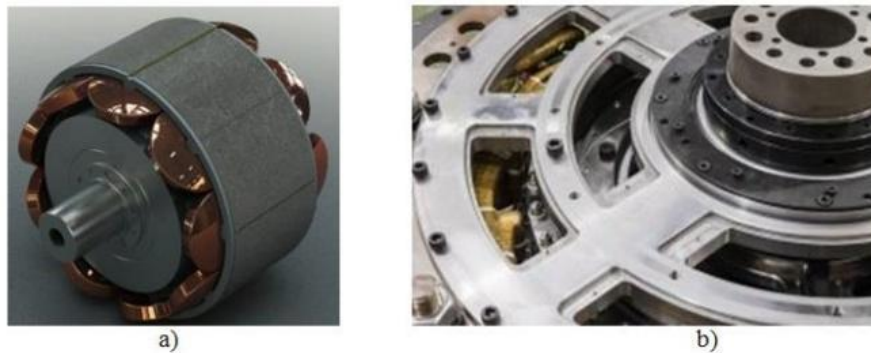
Το MAGSPLIT DHT παρέχει την καλύτερη οικονομία καυσίμου στην κατηγορία, ενώ είναι ακόμα ικανό να παρέχει υψηλή απόδοση. Το κιβώτιο προσφέρει ενεργειακά αποδοτικές λύσεις για υβριδικά και ηλεκτρικά οχήματα, οι οποίες παρέχουν χαμηλό λειτουργικό κόστος. Το MAGSPLIT DHT της Magnomatics είναι ένας νέος τύπος εξαιρετικά εύκαμπτου υβριδικού κιβωτίου ταχυτήτων που αντικαθιστά το υπάρχον κιβώτιο ταχυτήτων και μίζας. Σε αυτό το προϊόν, συνδυάζοντας τα συστήματα μαγνητικών οδοντωτών τροχών με τη νέα τεχνολογία κινητήρα και γεννήτριας, δημιουργείται ένα υβριδικό σύστημα που παρέχει συνεχώς μεταβαλλόμενη κίνηση στους τροχούς και όπου η ηλεκτρική ισχύς μπορεί να εγχυθεί απρόσκοπτα στο σύστημα μετάδοσης κίνησης για αύξηση της απόδοσης. Η ηλεκτρική ισχύς σε αυτή τη μετάδοση IMPACT παράγεται από τον ελκυστήρα Magnomatics TM91.

Πλεονεκτήματα:

- Απλός ρότορας δύο
- Αφιερωμένο υβριδικό κιβώτιο ταχυτήτων
- Καλύτερη στην κατηγορία οικονομία καυσίμου: 30% άμεση μείωση για οχήματα κατηγορίας C
- Πιο συμπαγές? υποστηρίζει εύκολη εναλλαγή υπάρχοντος κιβωτίου ταχυτήτων
- Κόστος 19% χαμηλότερο από το αντίστοιχο υβριδικό DCT

- Φιλτράρει τη στρεπτική δόνηση του κινητήρα. δεν χρειάζεται επιπλέον αποσβεστήρας στρέψης
- Κατάλληλο για κινητήρες ντίζελ

Το PDD μπορεί να εφαρμοστεί σε βιομηχανίες πετρελαίου και αερίου, αεροναυπηγική [35] όπως φαίνεται στο σχήμα 40



Εικόνα 40: (α)PDD στην Αεροδιαστημική

(b) PDD στη θαλάσσια πρόωση

3.2. Έρευνα και μελλοντικές εφαρμογές

Έρευνα

Οι Goryca et al. στο άρθρο [47] επικεντρώνονται στο θέμα της μείωσης της ροπής απόφραξης, συνδυάζοντας διάφορες μεθόδους ελαχιστοποίησης της ροπής. Λόγω του υψηλού κόστους κατασκευής του πρωτοτύπου, η ροπή απόφραξης ελαχιστοποιείται κατά τη φάση του σχεδιασμού χρησιμοποιώντας αριθμητικές μεθόδους, ενώ οι προσομοιώσεις υπολογιστών χρησιμοποιούνται για να βρουν μια διάταξη μαγνητικού κυκλώματος για την οποία η ροπή απόφραξης έχει τη μικρότερη δυνατή τιμή. Η ροπή απόφραξης εμφανίζεται ως αποτέλεσμα της συνδυασμένης πρόσκρουσης του μαγνητικού πεδίου ενός μόνιμου μαγνήτη που βρίσκεται στον ρότορα και τον στάτορα με μεταβλητή μαγνητική αγωγιμότητα ανάλογα με τη γωνία περιστροφής. Είναι μια παλλόμενη ροπή και εμφανίζεται μόνιμα κατά τη λειτουργία του μηχανήματος, επηρεάζοντας τη λειτουργία ολόκληρης της συσκευής που συνεργάζεται με το ηλεκτρικό μηχάνημα και προκαλώντας κραδασμούς, τάση και θόρυβο. Έχει ως αποτέλεσμα τη ροπή πέδησης και τις επακόλουθες απώλειες ισχύος και οδηγεί σε ταχύτερη φθορά των δομικών στοιχείων της μηχανής. Οι υψηλές τιμές ροπής απόφραξης προκαλούν προβλήματα με τη

ρύθμιση της ταχύτητας περιστροφής. Στην περίπτωση των ηλεκτρικών γεννητριών που χρησιμοποιούνται σε αιολικούς σταθμούς, εμποδίζει την εκκίνηση των σταθμών ηλεκτροπαραγωγής σε υψηλές ταχύτητες ανέμου. Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, η μείωση της ροπής απόφραξης σε μηχανές μόνιμου μαγνήτη είναι εξαιρετικά σημαντική. Με βάση τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν, εξήχθησαν τα ακόλουθα συμπεράσματα. Οι υπολογισμοί 2D δίνουν αποτελέσματα που μοιάζουν πολύ με τα πραγματικά. Η τροποποίηση του μαγνητικού κυκλώματος του μηχανήματος μπορεί να οδηγήσει στην εμφάνιση πρόσθετων αρμονικών στη ροπή απόφραξης, και αυτό είναι ιδιαίτερα ανιχνεύσιμο κατά τη μετατροπή από τη συμμετρική δομή στην ασύμμετρη δομή. Η ακρίβεια των υπολογισμών ροπής απόσβεσης εξαρτάται κυρίως από την πυκνότητα του πλέγματος διακένου (όσο μεγαλύτερη, τόσο το καλύτερο). Σε άλλα μέρη του μαγνητικού κυκλώματος, το πλέγμα μπορεί να έχει προεπιλεγμένες τιμές. Δεδομένου ότι η ροπή απόφραξης δεν είναι το μόνο κριτήριο που αξιολογείται κατά τη σχεδίαση μαγνητικών κυκλωμάτων ηλεκτρικής μηχανής, ο σχεδιασμός μηχανών με βέλτιστες παραμέτρους θα πρέπει να εκτελείται χρησιμοποιώντας γενετικούς αλγόριθμους λαμβάνοντας υπόψη πολλαπλές παραμέτρους και την αμοιβαία επίδρασή τους. Λόγω της δομής του μαγνητικού κυκλώματος, δεν είναι όλες οι μέθοδοι μείωσης ροπής απόφραξης κατάλληλες για εφαρμογή σε ένα δεδομένο μοτέρ, κατάλληλες για χρήση σε έναν άλλο. Η χρήση μίας μόνο μεθόδου προκαλεί σημαντική μείωση της ροπής απόφραξης. Τα καλύτερα αποτελέσματα ελαχιστοποίησης της ροπής απόφραξης λαμβάνονται για τις ακόλουθες διαμορφώσεις: συμμετρικός στάτορας με ασύμμετρο ρότορα ή ασύμμετρο στάτορας και συμμετρικός ρότορας. Άλλες διαμορφώσεις παράγουν χειρότερα αποτελέσματα. Η εφαρμογή μιας άλλης μεθόδου για το μοντέλο με μια ήδη μειωμένη μικρότερη τιμή της ροπής απόφραξης οδηγεί σε πρόσθετη μείωση, αν και όχι στον ίδιο βαθμό με την κύρια μέθοδο. Σε περίπτωση εφαρμογής δύο μεθόδων μείωσης της ροπής απόφραξης με διαφορετική σειρά, μπορούμε να αποκτήσουμε το μηχανήμα με τη μικρότερη τιμή ροπής απόφραξης.

Ο Bharathi et al. στο άρθρο [54] ανέλυσαν τη μηχανή μόνιμου μαγνήτη αντιστροφής ροής (FRPMM) που είναι μια νέα μηχανή μόνιμου μαγνήτη χωρίς ψήκτρες μόνιμου μαγνήτη με μικρότερο ρότορα, στην οποία οι πολικότητες ροής φάσης αντιστρέφονται στα συμπτυκνωμένα πηνία του στάτη για κάθε ηλεκτρικό κύκλο μετατόπιση ρότορα. Σε αυτήν την ιδέα, οι ποιοτικές συγκρίσεις γίνονται μεταξύ του FRM με διαφορετικές ποικιλίες μηχανών χωρίς ψήκτρες, ειδικά μια μηχανή απροθυμίας μεταγωγής που βασίζεται στην τεχνική διαγράμματος Flux-MMF. Αυτή η περιγραφή δίνει την ολοκληρωμένη ανασκόπηση των βελτιώσεων αρκετών ηλεκτρικών μηχανών για υιοθέτηση στη συλλογή ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, αποκαλύπτοντας όλους τους ισοδύναμους περιορισμούς μαζί με ευνοϊκές συνθήκες έρευνας. Διάφορες στρατηγικές σχεδιασμού, συμπεριλαμβανομένης της διάταξης του μαγνήτη και των τεχνικών τυλίγματος,

υιοθετούνται για να αυξήσουν την απόδοση του FRPM. Σε αυτή τη μελέτη συζητούνται και αναλύονται τα αποτελέσματα των πρόσφατων συνεισφορών.

Οι πρόσφατες εξελίξεις στη ροή σχεδιασμού μηχανών FRPM έχουν συζητηθεί με σαφήνεια. Επικεντρώνεται κυρίως σε μεθόδους βελτιστοποίησης απόδοσης, όπως η περιέλιξη στάτη και οι μαγνητικές διατάξεις που υιοθετούνται για να ξεπεραστούν τα μειονεκτήματα μιας συμβατικής μηχανής FRPM. Γίνεται μια ποιοτική σύγκριση μεταξύ της μηχανής FRPM και άλλες μηχανές χωρίς ψήκτρες αναλύονται με την τεχνική διαγράμματος Flux-MMF. Οι μέθοδοι που εξηγούνται από τους μεγάλους ερευνητές με πειραματικά αποτελέσματα εξηγούνται σε όλη την εργασία. Αν και επιτυγχάνεται, μια βασική δομή όπως ένα παραδοσιακό μηχανήμα FRPM είναι ένα σημαντικό έργο μπροστά στους ερευνητές. Το έργο έχει πραγματοποιηθεί από συγγραφείς προς μηχανές FRPM για συστήματα συλλογής ανανεώσιμων πηγών [54].

Ο Homin Chin et al. στο [61] δείχνουν το διπλά τροφοδοτούμενο μαγνητικό γριναζωτό μοτέρ, το οποίο έχει διπλές περιελίξεις AC, μπορεί να λειτουργήσει με διαφορετικές συχνότητες στο εσωτερικό και στο εξωτερικό τύλιγμα. Ωστόσο, οι εσωτερικές και εξωτερικές περιελίξεις έχουν διαφορετικό αριθμό ζευγών πόλων για να συναντήσουν τον συνδυασμό πόλων που προκύπτει από το φαινόμενο μαγνητικού οδοντωτού τροχού, και ως εκ τούτου ανεπιθύμητα διαστημικά αρμονικά συστατικά της μαγνητικής ροής παράγονται στα κενά αέρα. Αυτές οι αρμονικές χώρου επηρεάζουν τις απώλειες σιδήρου σε κάθε πυρήνα και η προκύπτουσα απώλεια και απόδοση σιδήρου ποικίλλουν ανάλογα με τις συχνότητες των εσωτερικών και εξωτερικών περιελίξεων. Έτσι, σε αυτό το έγγραφο, πρώτα, διερευνάται ξεχωριστά η επίδραση των διαστημικών αρμονικών συστατικών της πυκνότητας μαγνητικής ροής του διακένου αέρα στον εσωτερικό στάτορα, τον εξωτερικό στάτορα και τα διαμορφωτικά κομμάτια. Επιπλέον, τα χαρακτηριστικά απώλειας σιδήρου κάθε σιδηρομαγνητικού υλικού παρουσιάζονται σύμφωνα με τους συνδυασμούς συχνοτήτων στην εσωτερική και εξωτερική περιέλιξη. Δεύτερον, σχεδιάζονται οι χάρτες απώλειας σιδήρου και οι χάρτες απόδοσης σύμφωνα με τις συνθήκες συχνότητας των εσωτερικών και εξωτερικών περιελίξεων και αναλύονται οι αιτίες των χαρακτηριστικών διαφορών σε κάθε χάρτη. Τρίτον, η ακολουθία ελέγχου συχνότητας και οι ρόλοι των εσωτερικών και εξωτερικών περιελίξεων καθώς ο οπλισμός και τα τμήματα πεδίου αλλάζουν, και η ανάλυση του χάρτη απώλειας σιδήρου και του χάρτη απόδοσης επαναλαμβάνεται. Τέλος, τα αποτελέσματα στην θήκη του εσωτερικού οπλισμού και της εξωτερικής θήκης συγκρίνονται μεταξύ τους, και αποδεικνύεται η δυνατότητα βελτίωσης της συνολικής απόδοσης λειτουργίας στα πολλαπλά σημεία λειτουργίας με τη χρήση του ατομικού ελέγχου συχνότητας και συνδυασμού συχνότητας.

Ο António Pedro Dias στο άρθρο [99] περιλαμβάνει το σχεδιασμό, την κατασκευή και τον πειραματισμό ενός νέου γραμμικού σωληνοειδούς τριφασικού ενεργοποιητή με τον στάτορα που αποτελείται από ένα μονόπλευρο τυπωμένο εύκαμπτο κύκλωμα για μαλακές ρομποτικές

εφαρμογές σε εξωσκελετούς και ενεργή όρθωση. Πρώτα εισήγαγε τα χαρακτηριστικά του ενεργοποιητή και τις πιθανές διαμορφώσεις, τις τοπολογίες καθώς και τους περιορισμούς τους μετά τον καθορισμό των στόχων βελτιστοποίησης. Αναπτύσσεται ένα ηλεκτρομαγνητικό θεωρητικό μοντέλο, το οποίο είναι η προβλεπόμενη δύναμη που αποσύρεται από τη διαμόρφωση που φέρνει περισσότερα πλεονεκτήματα. Χρησιμοποιείται μια παροδική θερμική μελέτη του με χρήση της ηλεκτρικής αναλογικής μεθόδου. Τα διάφορα στάδια της κατασκευής του πρωτοτύπου είναι παρόντα, περνώντας από κάθε βήμα λεπτομερώς έως την ολοκλήρωση. Τα ηλεκτρομαγνητικά και θερμικά θεωρητικά μοντέλα επικυρώνονται εις βάρος αρκετών πειραμάτων. Εξετάζονται τα σχετικά χαρακτηριστικά του ενεργοποιητή ως η ακρίβεια και η μέγιστη ταχύτητα.

Στο [99], συζητήθηκε ο σχεδιασμός, η κατασκευή, η δοκιμή και η θεωρητική επικύρωση μοντέλου ενός νέου σωληνοειδούς τριφασικού γραμμικού κινητήρα απευθείας κίνησης. Παρουσιάστηκε ένα θεωρητικό μέρος όπου εισήχθησαν οι πιθανές τοπολογίες του σωληνοειδούς ενεργοποιητή, αφού πραγματοποιήθηκε η παραμετροποίηση του μοντέλου και τέθηκε ένας στόχος βελτιστοποίησης. Η θεωρητική δύναμη αποσύρθηκε. Μια θερμική παροδική συμπεριφορά εισήχθη προβλέποντας την αύξηση της θερμοκρασίας λόγω των απωλειών joule στα ίχνη του χαλκού από πολυστρωματικό υλικό. Μετά εξηγήθηκε η διαδικασία κατασκευής που αναπτύχθηκε. Δοκιμάστηκαν διάφορα σχέδια για το τυπωμένο κύκλωμα καθώς και αρκετές μέθοδοι για τη σύνδεση των ιχνών, καθώς το σχέδιο που υπάρχει εδώ είναι αποτέλεσμα αρκετών δοκιμών. Τέλος, ελήφθησαν πειραματικά αποτελέσματα από διάφορες δοκιμές και αναλύθηκαν τα επικυρωμένα τόσο ηλεκτρομαγνητικά όσο και θερμικά μοντέλα. Και τα δύο γίνονται αποδεκτά ως έγκυρα θεωρητικά μοντέλα που παρουσιάζουν μικρά λάθη. Επιπλέον, πραγματοποιήθηκαν μερικές δοκιμές για τη διερεύνηση των χαρακτηριστικών του ενεργοποιητή. Ο K. Atallah et al. στο [100] έδειξε το Pseudo Direct Drive PDD, το οποίο είναι ένα μόνιμο μαγνητικό μηχάνημα που διαθέτει ενσωματωμένο μαγνητικό κιβώτιο ταχυτήτων. Αυτός ο συνδυασμός μπορεί να επιτύχει υψηλή πυκνότητα ροπής και να ανακουφίσει προβλήματα που σχετίζονται με μηχανικά κιβώτια ταχυτήτων. Ωστόσο, η ροπή που μεταδίδεται στο φορτίο μέσω ενός μαγνητικού οδοντωτού τροχού χαμηλής ακαμψίας, μπορεί να προκαλέσει ταλαντώσεις ταχύτητας και θέσης στην έξοδο που δεν είναι επιθυμητές για τις περισσότερες εφαρμογές. Επιπλέον, θέτουν σε κίνδυνο την ποιότητα ελέγχου ταχύτητας και θέσης του PDD και του ωφέλιμου φορτίου και μπορεί επίσης να διεγείρουν ανεπιθύμητες λειτουργίες συντονισμού στο σύστημα που οδηγούν σε κακές αποκρίσεις. Η έρευνα του Attallah αντιμετωπίζει τα ζητήματα που σχετίζονται με τον έλεγχο και τη λειτουργία του PDD αναπτύσσοντας προηγμένες τεχνικές ελέγχου για την απόσβεση των ταλαντώσεων, τη μεγιστοποίηση της απόδοσης και την πρόληψη της ανεξέλεγκτης ολίσθησης μεταξύ των δύο ρότορων ενός PDD. Σε αντίθεση με μια συμβατική μηχανή χωρίς ψήκτρες PM, η οποία είναι συνήθως εξοπλισμένη με έναν αισθητήρα

τοποθετημένο στον άξονα τόσο για ηλεκτρονική μετακίνηση όσο και για έλεγχο ταχύτητας ή θέσης, ένα PDD έχει δύο άξονες που συνδέονται μεταξύ τους με μαγνητική δύναμη μετάδοσης. Τα χαρακτηριστικά μη γραμμικής σύζευξης του μαγνητικού οδοντωτού τροχού προσθέτουν περισσότερη πολυπλοκότητα στη δυναμική του PDD εάν πρόκειται να λειτουργήσει με έναν αισθητήρα. Μια προτεινόμενη τεχνική για τη λειτουργία του PDD με συνδυασμό ενός μόνο αισθητήρα και ενός παρατηρητή πραγματοποιείται σε πραγματικό χρόνο. Επιπλέον, το PDD έχει ένα μοναδικό χαρακτηριστικό ότι, όταν υποβάλλεται σε ροπή φορτίου μεγαλύτερη από τη ροπή έλξης, οι δύο ρότορες του γλιστρούν ακίνδυνα. Ωστόσο, η απόδοση ελέγχου μπορεί να επηρεαστεί εάν δεν εντοπιστεί η ολίσθηση και ληφθούν τα κατάλληλα μέτρα ελέγχου. Έχει αναπτυχθεί μια νέα τεχνική που επιτρέπει στο PDD να λειτουργεί υπό αυτές τις συνθήκες ενώ διατηρείται ο πλήρης έλεγχος. Αυτή η διατριβή πραγματοποιεί μια ολοκληρωμένη μελέτη σχετικά με τα ζητήματα ελέγχου που περιβάλλουν το PDD και προτείνει λύσεις επικυρωμένες από πειραματικά αποτελέσματα που προέκυψαν από ένα πρωτότυπο εξοπλισμό δοκιμής PDD. Αυτή είναι η πρώτη φορά που διεξήχθη μια ολοκληρωμένη μελέτη σχετικά με τον έλεγχο PDD τόσο σε προσομοίωση όσο και σε μια πραγματική μηχανή PDD. Οι ιδιότητες του PDD λόγω μαγνητικού οδοντωτού τροχού παρουσιάζουν υψηλή συμμόρφωση και χαρακτηριστικά μη γραμμικής μετάδοσης ροπής, γεγονός που οδηγεί σε ζητήματα ελέγχου που δεν έχουν παρατηρηθεί ποτέ στις παραδοσιακές μηχανές PM. Έτσι απαιτείται μια νέα μελέτη για τον εντοπισμό των προβλημάτων και την πρόταση λύσεων.

Η διαδικασία ανάπτυξης στρατηγικής ελέγχου πρέπει να βασίζεται στην πλήρη κατανόηση των προβλημάτων και των αιτιών τους, επομένως, έχει δημιουργηθεί ένα ολοκληρωμένο μοντέλο του δυναμικού συστήματος PDD, για να διευκολύνει τη διατύπωση λύσεων στα προβλήματα. Το μοντέλο παρέχει επίσης κατανόηση των μηχανικών συστημάτων και των χαρακτηριστικών μετάδοσης ροπής, των επιπτώσεων των εξωτερικών και εσωτερικών παραμέτρων, όπως τα MOI, οι ροπές και τα μαγνητικοί οδοντωτοί τροχοί και οι επιπτώσεις τους στη δυναμική απόδοση. Επιπλέον, έχει ληφθεί επίσης υπόψη η επίδραση άλλων ελεγκτών στο σύστημα κλειστού βρόχου, όπως ο σχεδιασμός του τρέχοντος ελεγκτή, η μεταγωγή PWM, ο κορεσμός του ελεγκτή και τα όρια τάσης και ρεύματος [100].

Μελλοντική ανάπτυξη

Το μηχάνημα PM ελέγχεται τυπικά με εμπορική κίνηση, όπου συνήθως χρησιμοποιείται ένας ελεγκτής PI για τη ρύθμιση της ταχύτητας χρησιμοποιώντας μια συσκευή ανάδρασης, όπως έναν ανιχνευτή. Αυτός ο τύπος ελεγκτή όταν χρησιμοποιείται με PDD μπορεί να προκαλέσει ανεπιθύμητες ταλαντώσεις ταχύτητας/θέσης που εμφανίζονται στην έξοδο.

Η προτεινόμενη δομή ελέγχου SFBK και μέθοδοι σχεδιασμού έχουν αναπτυχθεί και εφαρμοστεί με επιτυχία, όπου οι μη μετρημένες καταστάσεις συστήματος που απαιτούνται για την

ανατροφοδότηση έχουν ανακατασκευαστεί με τη χρήση ενός χαμηλού κόστους παρατηρητή παραγγελιών. Οι στρεπτικές ταλαντώσεις που παρατηρούνται στο PDD με τον συμβατικό ελεγκτή PI και IP έχουν εξαλειφθεί με την προτεινόμενη τεχνική ελέγχου SFBK και τη μέθοδο συντονισμού GA. Έχει αποδειχθεί ότι η προτεινόμενη στρατηγική ελέγχου και η μέθοδος ρύθμισης είναι αποτελεσματικά στην καταστολή της στρεπτικής ταλάντωσης και στη βελτίωση της απόδοσης και της απόδοσης του σερβο PDD.

Για να προσδιοριστεί η αιτία των ταλαντώσεων με το PI και το IP, υιοθετήθηκε μια σύνθετη ανάλυση πεδίου συχνοτήτων για την κατανόηση σε βάθος της δυναμικής απόκρισης του PDD με τρεις υποψήφιους ελεγκτές. Έχει δημιουργηθεί ένα μοντέλο κλειστού βρόχου του PDD κάτω από τρεις δομές ελεγκτή PI, IP, SFBK και η επίδραση των δομών και των παραμέτρων ελέγχου, όπως η ροπή φορτίου, το MOI φορτίου και το εύρος ζώνης του ελεγκτή, στην απόσβεση και τη σταθερότητα του συστήματος διερευνήθηκε. Έχει αποδειχθεί ότι ο ελεγκτής SFBK που είναι συντονισμένος με GA παρέχει την καλύτερη απόσβεση και στιβαρότητα στις αλλαγές παραμέτρων και αβεβαιότητες σε σύγκριση με το PI και IP.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η GA έχει προσφέρει μια αποτελεσματική πλατφόρμα για τη ρύθμιση των ελεγκτών για συστήματα με πολύπλοκα και μη γραμμικά χαρακτηριστικά με έναν καθορισμένο δείκτη απόδοσης. Η προτεινόμενη μέθοδος συντονισμού καθιστά δυνατή την επίτευξη βέλτιστων επιδόσεων για τη λειτουργία PDD εντός των ορίων ροπής, ρεύματος και τάσης.

Όλες οι εργασίες που έχουν γίνει μέχρι τώρα στον έλεγχο PDD έχουν επιτευχθεί με το PDD να λειτουργεί με έναν αισθητήρα προσαρτημένο στο HSR. Έχει προταθεί μια νέα προσέγγιση για τη λειτουργία ενός PDD με έναν μόνο αισθητήρα στο LSR. Παραδοσιακά το PDD απαιτεί δύο αισθητήρες θέσης/ταχύτητας: ο ένας στο HSR για ηλεκτρονική μεταφορά και ο άλλος στο LSR για έλεγχο ταχύτητας/θέσης του ωφέλιμου φορτίου. Αυτό όχι μόνο αυξάνει το κόστος του συστήματος κίνησης, αλλά η ανάγκη τοποθέτησης αισθητήρα θέσης/ταχύτητας στο HSR επιβάλλει μεγάλους περιορισμούς στο μηχανικό σχεδιασμό PDD. Έχει αποδειχθεί ότι με αυτήν την τεχνική ελέγχου το μηχάνημα PDD μπορεί να λειτουργήσει και να επιτύχει απόδοση ίση με αυτήν που είναι εξοπλισμένη με δύο αισθητήρες και υπόκειται σε υψηλές διακυμάνσεις ροπής φορτίου από μηδέν έως την ονομαστική ροπή. Έχει επίσης αποδειχθεί ότι η άμεση ολοκλήρωση της εκτιμώμενης ταχύτητας για την απόκτηση ηλεκτρικής γωνιακής θέσης θα προκαλέσει μεγάλο σφάλμα που μπορεί να προκαλέσει αστάθεια. Αντ' αυτού, η ηλεκτρική γωνιακή θέση πρέπει να προέρχεται από τη μετρούμενη θέση του LSR και την εκτιμώμενη αναφερόμενη γωνία.

Η ολίσθηση στα PDD έχει διερευνηθεί, όταν ένα PDD υποβάλλεται σε ροπή φορτίου υψηλότερη από την ολίσθηση ροπής ροής μεταξύ των δύο ρότορων. Αν και, αυτό μπορεί να μην προκαλέσει ζημιά στο PDD ή το φορτίο, θα μπορούσε, αν αφεθεί ανεξέλεγκτο, να οδηγήσει σε ανεπιθύμητες

συνέπειες όπως απώλεια μεταφοράς ισχύος, υπερβολική ταχύτητα στο HSR, λανθασμένο σήμα μεταγωγής ή/και απώλεια ταχύτητας φορτίου/ έλεγχος θέσης.

Μελλοντική δραστηριότητα

Η προτεινόμενη δομή ελέγχου όπου το LSR χρησιμοποιείται για έλεγχο ωφέλιμου φορτίου και παρέχει ηλεκτρονική μεταφορά για τη μονάδα δίσκου, θα μπορούσε να αξιοποιηθεί περαιτέρω για να φιλοξενήσει διαφορετικούς τύπους αισθητήρων όπως ο ψηφιακός κωδικοποιητής (απόλυτος και σταδιακός).

Ενώ οι αναπτυγμένες τεχνικές ελέγχου έχουν αποδειχθεί επιτυχώς, η οικονομικά αποδοτική εφαρμογή τους σε μια εμπορική κίνηση δεν έχει ακόμη υλοποιηθεί. Αυτό απαιτεί την ενσωμάτωση των ανεπτυγμένων αλγορίθμων ελέγχου και παρατηρητή στον βρόχο ελέγχου ρεύματος προσανατολισμένου στο πεδίο με την κατάλληλη ευελιξία στις διαμορφώσεις αισθητήρων.

Επιπλέον, χρησιμοποιώντας αυτόνομο υλικό, όπως έναν πίνακα που βασίζεται σε FPGA, όπου ο αλγόριθμος θα μπορούσε να αναπτυχθεί και να εφαρμοστεί σε πραγματικό χρόνο για τη μετατροπή της θέσης του LSR σε HSR. Το υλικό θα μπορούσε να έχει το μέγεθος ενός μικρού τσιπ και να βρίσκεται μεταξύ της μονάδας δίσκου και του αισθητήρα με επαρκή θωράκιση. Αυτή η εφαρμογή θα μπορούσε να βιομηχανοποιηθεί και επιτρέπει στο PDD να λειτουργεί ως οποιοδήποτε άλλο μηχάνημα PM με οικονομικά αποδοτικό και αξιόπιστο τρόπο.

Μπορούν να πραγματοποιηθούν μαγνητικά μηχανήματα με διάφορες άλλες τοπολογίες από αυτές που αναλύθηκαν στο [64]. Συνιστάται ιδιαίτερα η διερεύνηση του διαμορφωτή τραύματος MGM και του μερικώς συζευγμένου διαχωρισμένου MGM σε μελλοντικές εργασίες. Σε αυτή τη μελέτη, οι απώλειες πυρήνα και μαγνήτη δεν ελήφθησαν υπόψη κατά τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού. Αυτό έγινε προκειμένου να περιοριστεί το υπολογιστικό κόστος βελτιστοποίησης. Θεωρήθηκε επίσης ότι η απώλεια χαλκού θα ήταν το κυρίαρχο στοιχείο απώλειας λόγω των σχετικά χαμηλών συχνοτήτων λειτουργίας και του μικρού μεγέθους των μηχανημάτων που εξετάστηκαν. Αυτή η υπόθεση αποδείχθηκε ακριβής. Ωστόσο, αυτό μπορεί να μην συμβαίνει πάντα, ειδικά όταν λαμβάνονται υπόψη μεγαλύτερα μηχανήματα ή μηχανές με υψηλότερες συχνότητες λειτουργίας. Οι ακριβείς υπολογισμοί ζημιών μπορούν να ενσωματωθούν στη διαδικασία βελτιστοποίησης υπό αυτές τις συνθήκες ή όταν πρέπει να πληρούνται αυστηροί περιορισμοί απόδοσης. Αρκετές βελτιστοποιήσεις μαγνητικών οδοντωτών τροχών που πραγματοποιήθηκαν σε αυτή τη μελέτη αποκάλυψαν ότι τα σχέδια με την υψηλότερη ροπή στάθμης μπορεί να είναι επιρρεπή σε απομαγνητισμό. Αυτό υποστηρίζει τα ευρήματα [47] ότι για σχέδια με υψηλό όγκο PM, πρέπει να επιβληθεί περιορισμός στην κατανομή υλικού PM μεταξύ του ηλιακού εργαλείου και του δακτυλίου, προκειμένου να αποφευχθεί η απομαγνήτιση. Εναλλακτικά, μια ανάλυση απομαγνήτισης μπορεί να συμπεριληφθεί ως μέρος της ανάλυσης

που χρησιμοποιείται για βελτιστοποίηση. Από αυτή την άποψη, συνάγεται επίσης το συμπέρασμα ότι οι θερμικές αναλύσεις μπορεί να έχουν μεγάλη σημασία προκειμένου να προσδιοριστεί πότε ακριβώς θα συμβεί απομαγνήτιση και να επιτραπεί ο καθορισμός των περιορισμών σχεδιασμού ανάλογα.

Προκειμένου να αυξηθεί η απόδοση των ηλεκτρικών μηχανών μόνιμου μαγνήτη και/ή να μειωθεί το κόστος, συνεχώς αναζητούνται βελτιωμένες τεχνικές κατασκευής από τους σχεδιαστές μηχανών [103]. Ο κατακερματισμός του πυρήνα του στάτορα προσφέρει τη δυνατότητα απλοποίησης της διαδικασίας περιέλιξης, αύξησης του συντελεστή πλήρωσης σχισμών ή ελαχιστοποίησης της σπατάλης ηλεκτρικού χάλυβα. Αυτό το έγγραφο διερευνά μερικά από τα οφέλη που μπορούν να αποκτηθούν από την κατάτμηση του στάτορα και τονίζει την επίδραση της μαγνητικής αποδόμησης λόγω της αυξημένης απαίτησης για διάτρηση, μέσω μιας σειράς μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων.

Μέσα από μια σειρά βελτιώσεων μοντελοποίησης σε μια μηχανή αναφοράς, ο Justin J. Scheidler διερεύνησε την επίδραση της κατασκευής και της κατάτμησης του στάτη [103]. Πρώτον, χρησιμοποιώντας τη σειρά ηλεκτρικών χάλυβων iCARE® της ArcelorMittal για εφαρμογές αυτοκινήτων, αποδείχθηκε ότι η χρήση διαφορετικών ηλεκτρικών χάλυβων στον ρότορα και τον στάτορα ενός κινητήρα IPM φέρνει σαφή οφέλη για την πυκνότητα ροπής και την απόδοση του μηχανήματος. Ειδικότερα, η υψηλότερη τάση απόδοσης της ταχύτητας 35-510 για το υλικό του ρότορα έχει ως αποτέλεσμα ένα πιο κοντό μηχανήμα, χάρη στην αυξημένη πυκνότητα ροής του διακένου αέρα, ενώ η χρήση της ροπής 30Nm στον στάτορα φέρνει βελτιώσεις τόσο στο αξονικό μήκος όσο και στην απόδοση. Σε μια περαιτέρω βελτίωση προσομοίωσης, ποσοτικοποιήθηκε η επίδραση της διάσπασης του χάλυβα από τη διάτρηση στη συνολική απόδοση του μηχανήματος. Όσον αφορά την κατάτμηση, φάνηκε ότι η συμπερίληψη παρασιτικών αεραγωγών μεταξύ των τμημάτων του ζυγού του στάτη έχει σημαντική επιρροή, περισσότερο από την πρόσθετη ζημιά στον ηλεκτρικό χάλυβα από το αυξημένο μήκος των διάτρητων άκρων. Αν μπορούσε να εξαλειφθεί αυτός ο αεροθάλαμος, η απόδοση του μηχανήματος θα βελτιωνόταν πραγματικά, χάρη στην εκμετάλλευση των καλύτερων μαγνητικών ιδιοτήτων του ηλεκτρικού χάλυβα στην κατεύθυνση κύλισης. Η έρευνα δεν περιελάμβανε υποβάθμιση υλικού λόγω μηχανικών καταπονήσεων που εφαρμόζονται κατά τη συναρμολόγηση του τμηματοποιημένου στάτορα, ούτε τα αποτελέσματα οποιασδήποτε μεθόδου που χρησιμοποιείται για τη συναρμολόγηση των υποσυσκευών, όπως η αλληλοσύνδεση. Ο Chunhua Liu et al. στο [65] προτείνουν ένα νέο ηλεκτρικά ελεγχόμενο μαγνητικό μηχανισμό μετάδοσης μεταβλητής ταχύτητας (EC-MVSG), το οποίο είναι ικανό να παρέχει ελεγχόμενες σχέσεις σχέσεων για εφαρμογές υβριδικών ηλεκτρικών οχημάτων (HEV). Το βασικό χαρακτηριστικό σχεδιασμού περιλαμβάνει την υιοθέτηση μιας δομής μαγνητικού οδοντωτού τροχού και την αποδοχή της έννοιας της ροής-μνημονικής μηχανής μνήμης. Συνεπώς, το

προτεινόμενο μηχανήμα μπορεί όχι μόνο να προσφέρει μηχανισμό αλλαγής ταχυτήτων για ροπή και μετάδοση ταχύτητας, αλλά και να παρέχει μεταβλητές σχέσεις μετάδοσης για ροπή και διακύμανση ταχύτητας. Ο ηλεκτρομαγνητικός σχεδιασμός μελετάται και συζητείται. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων αναπτύσσεται με το μοντέλο υστέρησης για την επαλήθευση της εγκυρότητας του σχεδιασμού της μηχανής.

Ο Chunhua liu et al. παρουσιάζουν ένα νέο τύπο μηχανήματος EC-MVSG, το οποίο διαθέτει ηλεκτρικά ελεγχόμενες σχέσεις ταχυτήτων για οδήγηση αυτοκινήτου. Αρχικά, η δομή της μηχανής, η αρχή του σχεδιασμού και η αρχή λειτουργίας συζητούνται και αναλύονται λεπτομερώς. Η ιδέα είναι να αλλάξει η μαγνήτιση του AlNiCo PM για να επιτευχθούν διαφορετικοί αριθμοί ζεύγους πόλων ρότορα του μηχανήματος. Εν τω μεταξύ, ο σχεδιασμός της μηχανής υιοθετεί το φαινόμενο μαγνητικού οδοντωτού τροχού. Έτσι, το προτεινόμενο μηχανήμα δεν προσφέρει μόνο έναν μηχανισμό μετάδοσης για τη μετάδοση ροπής και ταχύτητας, αλλά παρέχει επίσης μεταβλητές σχέσεις μετάδοσης για παραλλαγές ροπής και ταχύτητας. Δηλαδή, ο λόγος της ταχύτητας του εξωτερικού στροφέα προς την ταχύτητα του εσωτερικού ρότορα έχει τρεις τιμές:

$Gr1 = 1$, $Gr2 = -2$ και $Gr3 = -1/2$, που σημαίνει ότι το μηχανήμα έχει τρεις θήκες λειτουργίας. Με αυτόν τον τρόπο, το μηχανήμα είναι πολλά υποσχόμενο για εφαρμογές αυτοκινήτων. Τα αποτελέσματα καταδεικνύουν την αποτελεσματικότητα του προτεινόμενου σχεδιασμού μηχανής.

Στο [66] υπάρχει μια περιγραφή μιας προσέγγισης σχεδιασμού που αναπτύχθηκε σύμφωνα με την οποία βελτιστοποιήθηκε μια γεννήτρια μόνιμου μαγνήτη με μαγνητικό προσανατολισμό, υπό την επιφύλαξη περιορισμών απόδοσης. Με τον βελτιστοποιημένο σχεδιασμό κατασκευάστηκε ένα πρωτότυπο μηχανήμα και αξιολογήθηκε πειραματικά. Τα βασικά συμπεράσματα και πορίσματα μπορούν να συνοψιστούν ως εξής:

- Η τοπολογία αξονικής ροής που επιλέχθηκε για το πρωτότυπο μηχανήμα ήταν η πρώτη μηχανή αξονικής ροής με μαγνητική ταχύτητα που αξιολογήθηκε πειραματικά. Το μειονέκτημα αυτής της τοπολογίας είναι ότι οι δυνάμεις είναι κυρίως προς μία κατεύθυνση, δεν αντιδρούν μεταξύ τους όπως στις ακτινικές μηχανές. Ωστόσο, η αξονική τοπολογία επέτρεψε την εύκολη παρατήρηση του πρωτοτύπου μηχανής.
- Το πρωτότυπο μηχανήμα σχεδιάστηκε για εφαρμογές μετατροπής αιολικής ενέργειας, για τις οποίες οι MG μπορούν να λύσουν τα ακόλουθα προβλήματα: - Ένα MG μεταφέρει ισχύ χωρίς επαφή μεταξύ των κινούμενων μερών, γεγονός που επιτρέπει τη λειτουργία χωρίς λιπαντικά και ελάχιστη ή καθόλου συντήρηση. Ωστόσο, πριν από την εφαρμογή ενός MG σε ανεμογεννήτριες, ο σχεδιασμός θα πρέπει να απλοποιηθεί περαιτέρω για να είναι εύκολη η συναρμολόγηση και η συντήρηση. - Τα MG προσφέρουν υψηλή πυκνότητα ροπής, η οποία μπορεί να μειώσει το συνολικό βάρος και το μέγεθος των συστημάτων μετατροπής της αιολικής ενέργειας. - Τα MG

επιτρέπουν την εγγενή προστασία από υπερφόρτωση, η οποία μπορεί να προσφέρει πρόσθετη προστασία στις ανεμογεννήτριες, ωστόσο, εάν η μέγιστη ροπή υπερβεί, η ταχύτητα εισόδου πρέπει να μειωθεί σε σχεδόν μηδενική ταχύτητα προτού η ταχύτητα αρχίσει να ξαναμπλέκεται.

- Η γεννήτρια με μαγνητικό ρυθμιστή μπορεί να σχεδιαστεί σε συνδυασμένες ή αποσυνδεδεμένες διαμορφώσεις. Μια προσέγγιση σχεδιασμού διατυπώθηκε για την αποσυνδεδεμένη προσέγγιση. Η αποσυνδεδεμένη προσέγγιση σχεδιασμού επιτρέπει στο MG και το PMG να βελτιστοποιηθούν χωριστά, γεγονός που μειώνει σημαντικά τον απαιτούμενο χρόνο βελτιστοποίησης, σε σύγκριση με την προσέγγιση του συνδυασμένου σχεδιασμού.

- Κατά τη βελτιστοποίηση έγινε αντιληπτό ότι το γρανάζι χρειαζόταν μεγαλύτερη εξωτερική διάμετρο για να παρέχει επαρκή ροπή στη γεννήτρια. Ωστόσο, η αύξηση της διαμέτρου δεν αύξησε σημαντικά τον όγκο του μηχανήματος, καθώς οι περιελίξεις του στάτορα έχουν την ίδια διάμετρο με τη βελτιστοποιημένη εξωτερική διάμετρο του οδοντωτού τροχού. Από τα αποτελέσματα βελτιστοποίησης διαπιστώνεται ότι υπάρχει πυκνότητα ροπής άνω των 100 kNm/m³ στο 50% της μέγιστης ροπής στο γρανάζι του μηχανήματος.

- Ο μηχανικός σχεδιασμός αναλύθηκε προκειμένου να διασφαλιστεί ότι το πρωτότυπο μηχάνημα είναι μηχανικά υγιές.

Υπάρχουν ανεπιθύμητες απώλειες σε ορισμένα μηχανικά εξαρτήματα που είναι αποκλειστικά για μηχανική αντοχή, όπως οι ράβδοι από ανοξείδωτο χάλυβα στον διαμορφωτή ροής και η πλάκα από συμπαγές χάλυβα του ρότορα χαμηλής ταχύτητας. Για απλοποίηση του σχεδιασμού επιλέχθηκαν μόνο δύο γωνιακά ρουλεμάν επαφής για το σχέδιο, ένα για κάθε ρότορα. Ο περιορισμένος χώρος μεταξύ του στάτη και του ρυθμιστή ροής αφήνει λίγο χώρο για ρουλεμάν. Ωστόσο, ένα ρουλεμάν είναι αρκετό για τον ρότορα υψηλής ταχύτητας, αφού η προκύπτουσα δύναμη στον ρότορα υψηλής ταχύτητας αντισταθμίζεται και από τις δύο πλευρές του ρότορα. Ωστόσο, η αξονική δύναμη στον ρότορα χαμηλής ταχύτητας είναι κυρίως προς μία κατεύθυνση, επομένως θα πρέπει να δοθεί προσοχή στην επιλογή του ρουλεμάν για τον δρομέα χαμηλής ταχύτητας. Ο ρότορας χαμηλής ταχύτητας βρίσκεται στο τέλος του μηχανήματος, επομένως υπάρχει περισσότερος χώρος για ρουλεμάν.

- Ένα πρωτότυπο μηχάνημα MGAFG κατασκευάστηκε και κατασκευάστηκε σε αυτό το έργο. Το μηχάνημα έχει διαμορφωθεί ώστε να επιτρέπει τις αποσυνδεδεμένες και τις συζευγμένες διαμορφώσεις. Η πιο χρονοβόρα πτυχή της διαδικασίας συναρμολόγησης του πρωτοτύπου μηχανήματος ήταν η τοποθέτηση των εξαρτημάτων για να διασφαλιστεί ότι τα PM στα ρότορα δεν θα κολλήσουν σε άλλα εξαρτήματα. Το υλικό υψηλής ποιότητας PM που χρησιμοποιήθηκε περιπλέκει σημαντικά τη διαδικασία συναρμολόγησης. Λόγω των μεγάλων αξονικών δυνάμεων, ως συντηρητικό μέτρο, τα κενά αέρος του πρωτοτύπου αυξήθηκαν στα 4 mm, που είναι διπλάσια από την προβλεπόμενη τιμή.

• Για την πειραματική αξιολόγηση το πρωτότυπο μηχάνημα αξιολογήθηκε δοκιμάζοντας το μηχάνημα χωρίς φορτίο και φορτίο. Από τις δοκιμές χωρίς φορτίο παρατηρήθηκε ότι για την ονομαστική ταχύτητα εισόδου (150rpm) οι απώλειες του μηχανήματος ήταν σχεδόν 2,7 kW. Υψηλές απώλειες παρατηρήθηκαν στην πίσω πλάκα του ρότορα χαμηλής ταχύτητας μετρώντας τη διαφορά θερμοκρασίας σε διαφορετικά μέρη του μηχανήματος. Οι ωμικές απώλειες του ρότορα χαμηλής ταχύτητας προσομοιώθηκαν σε 2D και 3D. Και για τις δύο προσομοιώσεις, οι απώλειες στην πλάτη παρατηρήθηκαν ότι ήταν περίπου 530 W. Εκτός από τις απώλειες ανεμοστρόβιλου και ρουλεμάν, οι υποτιμημένες απώλειες μπορούν να αποδοθούν στις ακόλουθες πτυχές:

- Ο πλαστικοποιημένος πυρήνας χαμηλής ταχύτητας κατασκευάστηκε για να γίνει ο ρότορας παράλληλος και ομόκεντρος, κάτι που έθεσε σε κίνδυνο την ηλεκτρική μόνωση του πλαστικοποιημένου πυρήνα.

- Οι παράλληλοι δίσκοι μπορεί να προκάλεσαν επιπλέον υψηλές αρμονικές στον ρότορα χαμηλής ταχύτητας.

- Οι απώλειες μπορεί να προκλήθηκαν λόγω κραδασμών στο δρομέα χαμηλής ταχύτητας. Δεδομένου ότι το μηχάνημα παρουσίασε τόσο μεγάλες απώλειες, οι δοκιμές φορτίου μετρήθηκαν σε χαμηλές ταχύτητες, οι οποίες μείωσαν τις απώλειες στο ελάχιστο. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν μεταξύ 25rpm και 50rpm, με τριφασικό φορτίο 30Ω. Με τα αποτελέσματα υπολογίστηκε η απόδοση σε διαφορετικές ταχύτητες εισόδου. Η απόδοση για την αποσυνδεδεμένη διαμόρφωση μετρήθηκε ότι είναι 35,5 %. Ωστόσο, οι απώλειες που υπολογίστηκαν στα προσομοιωμένα αποτελέσματα ήταν πολύ χαμηλότερες από τις απώλειες που μετρήθηκαν στο πρωτότυπο, επομένως η απόδοση των προσομοιωμένων μοντέλων ήταν υψηλότερη. Η ροπή απομάκρυνσης του μηχανήματος μετρήθηκε ότι είναι λίγο μικρότερη από 200 Nm. Για τον προσδιορισμό των παραγόντων που μείωσαν τη ροπή απομάκρυνσης πραγματοποιήθηκε μια σειρά προσομοιώσεων.

• Το πρωτότυπο αξιολογήθηκε πειραματικά για τις αποσυνδεδεμένες και τις συζευγμένες διαμορφώσεις. Από τα αποτελέσματα της πειραματικής αξιολόγησης παρατηρήθηκε ότι οι απώλειες τόσο στις αποσυνδεδεμένες όσο και στις συζευγμένες διαμορφώσεις είναι παρόμοιες, ωστόσο η συζευγμένη μηχανή παράγει περισσότερη ισχύ εξόδου για την ίδια ποσότητα ισχύος εισόδου. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί από το πρόσθετο συστατικό σύνδεσης ροής χαμηλής ταχύτητας στον στάτορα για τη συζευγμένη διαμόρφωση. Συνεπώς, η συζευγμένη διαμόρφωση εμφανίζει υψηλότερη απόδοση σε σύγκριση με την αποσυνδεδεμένη διαμόρφωση.

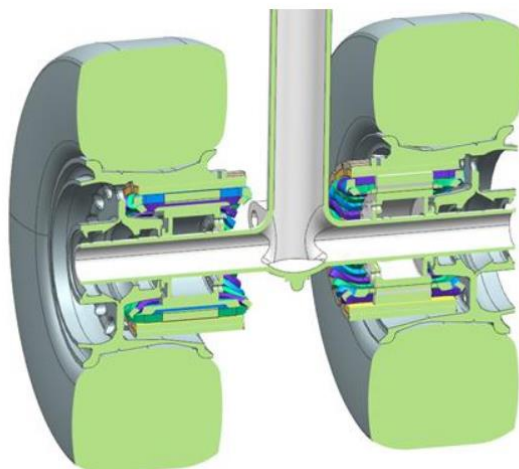
Δεν μπορούν όλες οι απώλειες να εξηγηθούν με ηλεκτρομαγνητικές προσομοιώσεις. Για τον ακριβή προσδιορισμό των απωλειών είναι απαραίτητο να διορθώσουμε πρώτα τα μηχανικά προβλήματα που δημιουργούνται στο πρωτότυπο, όπως π.χ. η δόνηση στον ρότορα χαμηλής ταχύτητας και για να γίνει σωστή η απόσταση του διακένου αέρα, ακόμη και σε όλο το

μηχάνημα. Εάν επιλυθούν τα μεγάλα μηχανικά προβλήματα, τα πειραματικά αποτελέσματα θα πρέπει να συγκρίνονται πιο στενά με τα προσομοιωμένα αποτελέσματα.

Παρόλο που η απόδοση του πρωτότυπου μηχανήματος ήταν χαμηλότερη από την αναμενόμενη, τα πλεονεκτήματα που προσφέρουν τα μηχανήματα με μαγνητική σχέση με τα παραδοσιακά μηχανικά μηχανήματα είναι σημαντικά. Εάν επιλυθούν οι μηχανικές πολυπλοκότητες του πρωτότυπου μηχανήματος, η απόδοση του σχεδιασμού και η πυκνότητα της ροπής του σχεδιασμού μπορούν ακόμη να επιτευχθούν.

Πιθανές εφαρμογές

Το κόστος των μόνιμων μαγνητών θα είναι πιθανότατα ένας σημαντικός παράγοντας για τον καθορισμό του εάν τα μαγνητικά γρανάζια και τα μηχανήματα μαγνητικών εργαλείων υιοθετούνται ευρέως στη βιομηχανία. Είναι ενδιαφέρον ότι τα MGM μπορούν να είναι ανταγωνιστικά όσον αφορά τη ροπή ανά όγκο μαγνήτη. Δύο πολύ ελκυστικές πτυχές των μαγνητικών οδοντωτών τροχών είναι οι χαμηλές απαιτήσεις συντήρησης και η εγγενής προστασία υπερφόρτωσης που προσφέρουν. Αυτά τα πλεονεκτήματα μπορεί να είναι πολύ σημαντικά στη βιομηχανία αιολικής ενέργειας όπου η συντήρηση του πύργου είναι δύσκολο να εκτελεστεί, ειδικά σε off-shore εφαρμογές. Εάν ένα μαγνητικό γρανάζι χρησιμοποιείται ως το πρώτο στάδιο της ανεμογεννήτριας, ολόκληρο το σύστημα κίνησης μπορεί να προστατευθεί από επικίνδυνους παλμούς ροπής που προκαλούνται από ισχυρούς ανέμους. Η βιομηχανία αιολικής ενέργειας, ωστόσο, δεν είναι σε καμία περίπτωση η μόνη βιομηχανία που μπορεί να επωφεληθεί από αυτήν την τεχνολογία. Προβλέπεται ότι η εξοικονόμηση κόστους συντήρησης μπορεί να καταστήσει τα μαγνητικά γρανάζια μια βιώσιμη εναλλακτική λύση σε πολλές εφαρμογές, ακόμη και αν το αρχικό κόστος κεφαλαίου είναι υψηλότερο. Με βάση τα δεδομένα προσομοίωσης, τα πειραματικά δεδομένα που συλλέχθηκαν σε αυτή τη μελέτη και άλλες πηγές, μπορεί να συναχθεί το συμπέρασμα ότι τα μηχανήματα με μαγνητικό εξοπλισμό αξίζει να εξεταστούν για εφαρμογές χαμηλής ταχύτητας παρά τα μειονεκτήματα όσον αφορά τη μηχανική πολυπλοκότητα. Η πυκνότητα ροπής τους υπερβαίνει κατά πολύ εκείνη των συμβατικών μηχανών PM και μπορούν να επιτύχουν υψηλές αποδόσεις. Τα μηχανήματα Vernier μπορεί να είναι μια πολύ ελκυστική επιλογή για εφαρμογές έλξης. Τα μηχανήματα έχουν υψηλή ικανότητα ροπής σε χαμηλές ταχύτητες και μεγάλο εύρος ταχύτητας λειτουργίας.



Εικόνα 41: Μαγνητικό φρένο για αεροσκάφη

Η AMT, σε συνεργασία με τη θυγατρική εταιρεία Inductive Ventures, βρίσκεται επί του παρόντος σε ανάπτυξη ενός νέου μαγνητικού φρένου ως άμεσης αντικατάστασης των σημερινών τελευταίας τεχνολογίας φρένων άνθρακα. Το μαγνητικό φρένο που δοκιμάζουμε σήμερα έχει σχεδιαστεί για το αεροσκάφος Airbus A320.

Το μαγνητικό φρένο μπορεί να χωρέσει σε υπάρχοντες χώρους που διατίθενται στο αεροσκάφος και είναι σε θέση να παρέχει ροπή πέδησης άνω των 6.000 ποδιών.

Το μαγνητικό φρένο μπορεί να ανακτήσει ένα σημαντικό μέρος της κινητικής ενέργειας του αεροσκάφους κατά τη διάρκεια της εκδήλωσης προσγείωσης και να μεταφέρει αυτή την ενέργεια από τους τροχούς προσγείωσης μέσω της γεννήτριας κινητήρα σε μια συσκευή αποθήκευσης ενέργειας που βρίσκεται στο αεροσκάφος. Μπορεί επίσης να λειτουργήσει ως ηλεκτρικός κινητήρας για τη μετακίνηση του αεροσκάφους, συμπεριλαμβανομένων των δυνατοτήτων pushback, ταξί και εδάφους. Χρησιμοποιώντας έναν ηλεκτρικό κινητήρα αντί για καύσιμο καυσίμου που θα χρησιμοποιούσε διαφορετικά όταν λειτουργούσαν οι κινητήρες του αεροσκάφους ενώ το αεροσκάφος βρίσκεται στο έδαφος, στο υπόστεγο ή στο κατάστρωμα του αεροπλανοφόρου, ο κινητήρας μπορεί επίσης να παρέχει δυνατότητες υποβοήθησης απογείωσης, κάτι που μπορεί να οδηγήσει σε γρηγορότερες επιταχύνσεις αεροσκαφών και και μικρότερη απαίτηση διαδρόμου.

Αυτό το σύστημα συμβάλλει στη σημαντική μείωση του αριθμού των ωρών που δαπανώνται για συντήρηση. Δεν υπάρχει τριβή μεταξύ των μερών του, επομένως δεν υπάρχει τίποτα που να φθείρεται ή να αντικαθίσταται. Αυτή η προσπάθεια αποτελεί μέρος του βραβείου Phase 2 Small Business Innovation Research (Μάρτιος 2019).

3.3. Μέθοδοι παραγωγής

Τα ηλεκτρικά μηχανήματα για εφαρμογές έλξης αυτοκινήτων σχεδιάζονται συνήθως με υψηλή ικανότητα ροπής εκκίνησης και εκτεταμένο εύρος σταθερής ισχύος έως αυξημένες ταχύτητες. Για το μηχάνημα αναφοράς IPM, αυτές οι προδιαγραφές οδηγούν σε αντικρουόμενες απαιτήσεις για τις πλαστικοποιήσεις ρότορα και στάτορα: ενώ το υλικό του ρότορα πρέπει να επιλέγεται για να έχει υψηλή αντοχή σε απόδοση για να φτάνει σε υψηλές ταχύτητες, ο στάτης θα πρέπει κατά προτίμηση να είναι κατασκευασμένος από χάλυβα με υψηλή διαπερατότητα, έτσι ώστε να μπορεί να δημιουργηθεί υψηλή πυκνότητα ροής και συνεπώς ροπή. Μέσα στη γκάμα ηλεκτρικών χάλυβων iCARE® για εφαρμογές αυτοκινήτων, η ArcelorMittal έχει αναπτύξει μια σειρά από χάλυβες που είναι ειδικά βελτιστοποιημένες για να ικανοποιούν συγκεκριμένες απαιτήσεις αυξημένης ισχύος απόδοσης, αυξημένης διαπερατότητας ή χαμηλών απωλειών έως υψηλών συχνοτήτων [98].

Υλικά που ερευνήθηκαν Η απόδοση της μηχανής αναφοράς διαμορφώνεται χρησιμοποιώντας τους ακόλουθους τρεις διαφορετικούς ηλεκτρικούς χάλυβες από τη σειρά iCARE® της ArcelorMittal:

- Εξοικονομήστε 30-15: ένας ηλεκτρικός χάλυβας με πάχος 0,3 mm, ειδικά σχεδιασμένος για να επιτυγχάνει υψηλές αποδόσεις έως αυξημένες συχνότητες,
- Ροπή 30: ηλεκτρικός χάλυβας πάχους 0,3 mm, ειδικά σχεδιασμένος για να επιτυγχάνει υψηλή διαπερατότητα και πόλωση, και έτσι να επιτρέπει την παραγωγή υψηλών ροπών
- Ταχύτητα 35-510 που έχει σχεδιαστεί για υψηλή μηχανική τάση απόδοσης (YS) και είναι κατάλληλη για ρότορες υψηλής ταχύτητας.

Καθώς το μηχάνημα αναφοράς σχεδιάστηκε αρχικά χρησιμοποιώντας Save 30-15 τόσο στον στάτορα όσο και στον ρότορα, γίνεται πρώτα μια σύγκριση με τη χρήση της ταχύτητας 35-510 στον ρότορα, για να επωφεληθεί από την αυξημένη τάση απόδοσης. Στη συνέχεια, διερευνάται η αντικατάσταση του υλικού του στάτη από τη ροπή 30.

Σύγκριση αποτελεσμάτων

Το μοντέλο κινητήρα αναφοράς προσομοιώθηκε με τρεις συνδυασμούς ηλεκτρικών χαλύβων. Για κάθε συνδυασμό, το μοντέλο διαμορφώθηκε με πανομοιότυπη γεωμετρία στάτορα και πανομοιότυπο ρεύμα εισόδου, ενώ η γεωμετρία του ρότορα προσαρμόστηκε ελαφρώς ώστε να λαμβάνει υπόψη το YS του υλικού, όπως συζητήθηκε προηγουμένως. Το αξονικό μήκος προσαρμόστηκε για κάθε μοντέλο προκειμένου να δημιουργηθεί πανομοιότυπη ροπή 100 Nm. Ως εκ τούτου, οι απώλειες χαλκού δεν είναι ίσες μεταξύ των σχεδίων. Καθώς το αρχικό μηχάνημα σχεδιάστηκε με τη χρήση Save 30-15 τόσο στον ρότορα όσο και στον στάτορα, τα αποτελέσματα δίνονται ως σχετικές αλλαγές από την αναφορά.

Πρώτον, χρησιμοποιώντας τη σειρά ηλεκτρικών χάλυβων iCARE® της ArcelorMittal για εφαρμογές αυτοκινήτων, αποδείχθηκε ότι η χρήση διαφορετικών ηλεκτρικών χάλυβων στον ρότορα και τον στάτορα ενός κινητήρα IPM φέρνει σαφή οφέλη για την πυκνότητα ροπής και την απόδοση του μηχανήματος. Συγκεκριμένα, η υψηλότερη τάση απόδοσης του Speed 35-510 για το υλικό του ρότορα οδηγεί σε μικρότερη μηχανή, χάρη στην αυξημένη πυκνότητα ροής του διακένου αέρα, ενώ η χρήση της ροπής 30 στον στάτορα φέρνει βελτιώσεις τόσο στο αξονικό μήκος όσο και στην απόδοση. Σε μια περαιτέρω βελτίωση προσομοίωσης, ποσοτικοποιήθηκε η επίδραση της διάσπασης του χάλυβα από τη διάτρηση στη συνολική απόδοση του μηχανήματος. Όσον αφορά την κατάτμηση, φάνηκε ότι η συμπερίληψη παρασιτικών κενών αέρα μεταξύ των τμημάτων του ζυγού του στάτη έχει σημαντική επιρροή, περισσότερο από την πρόσθετη ζημιά στον ηλεκτρικό χάλυβα από το αυξημένο μήκος των διάτρητων άκρων. Εάν αυτό το κενό αέρα μπορούσε να εξαλειφθεί, η απόδοση του μηχανήματος θα βελτιωνόταν πραγματικά, χάρη στην εκμετάλλευση των καλύτερων μαγνητικών ιδιοτήτων του ηλεκτρικού χάλυβα στην κατεύθυνση κύλισης.

4. Συγκριτική αξιολόγηση των μεταδόσεων ισχύος και συμπέρασμα

Συνολικά, τα μαγνητικά και ηλεκτρομαγνητικά εργαλεία είναι μια πολύ ισχυρή τεχνολογία στη μετάδοση ισχύος. Οι εφαρμογές και οι δυνατότητες φαίνεται να είναι πολύ ανταγωνιστικές με τα παραδοσιακά εργαλεία που χρησιμοποιούνται. Αναλύσαμε μερικές από αυτές τις εφαρμογές, δηλαδή μαγνητικά τρένα, ηλεκτρικά οχήματα (μαγνητικός συμπλέκτης), ρομποτική, αεροδιαστημική. Τα ευρήματα δείχνουν ότι υπάρχει μεγάλο δυναμικό για την προώθηση της παρούσας γνώσης και στοχεύουν στη βελτιστοποίηση.

Έχουν προταθεί αρκετές τοπολογίες και απαιτείται περαιτέρω έρευνα για να διαπιστωθούν τα πλεονεκτήματά τους. Καθώς πολλά μηχανικά κιβώτια ταχυτήτων μπορούν να λειτουργήσουν σε πυκνότητα ροπής άνω των 300 Nm/L, απαιτείται ακόμη περισσότερη έρευνα για την περαιτέρω βελτίωση της απόδοσης πυκνότητας ροπής MG.

Τα μαγνητικά τρένα (εκτοξεύοντας) χρησιμοποιούν τις τεχνολογίες μαγνητικών και ηλεκτρομαγνητικών εργαλείων με εξαιρετικά αποτελέσματα, παραμένοντας φιλικά προς το περιβάλλον και μεταφέροντας με ασφάλεια. Τα τρένα μαγνητικής μετακίνησης έχουν πολλές εφαρμογές και πλεονεκτήματα, όπως υπερβαίνουν γρήγορα την ταχύτητα των 300 mph. Δεν έχει κατανάλωση καυσίμου, το κόστος είναι φθηνότερο από τις πτήσεις, πιο γρήγορο, αποτελεσματικό και απαιτεί λιγότερη συντήρηση. που χρησιμοποιούνται στις μεταφορές επιβατών και εμπορευμάτων, δεν χρησιμοποιούνται ορυκτά καύσιμα, λιγότερος θόρυβος, παίρνει λιγότερο χώρο από τα συμβατικά τρένα.

Επίσης, συζήτησα για το κιβώτιο ταχυτήτων cvt που συνθέτει εφικτά μαγνητικά γρανάζια με ενσωματωμένα CVT που χρησιμοποιούνται για συστήματα μετάδοσης. Σύμφωνα με μια μεθοδολογία σχεδιασμού δημιουργικού μηχανισμού, λαμβάνονται 17 νέα μαγνητικά γρανάζια 7 συνδέσεων με ενσωματωμένα CVT. Το κύριο κινηματικό χαρακτηριστικό αυτών των ενσωματωμένων συσκευών είναι το ευρύ φάσμα της συνολικής σχέσης ταχύτητας, επειδή τα δύο μηχανικά σύνολα CVT και ο ομοαξονικός μηχανισμός μαγνητικού οδοντωτού τροχού διαθέτουν τη λειτουργία συνεχώς μεταβλητής μετάδοσης ταυτόχρονα. Η μελλοντική εργασία σε αυτήν τη μελέτη θα περιλαμβάνει τον υπολογισμό του συνολικού λόγου ταχύτητας, της ισχύος που μεταδίδεται και της μηχανικής απόδοσης αυτών των ενσωματωμένων συσκευών για περαιτέρω αξιολόγηση της απόδοσης Το Pseudo-Direct Drive είναι μια υπέροχη τεχνολογία που μπορεί να είναι πολύ ικανή. Οι ιδιότητες του PDD λόγω μαγνητικού οδοντωτού τροχού παρουσιάζουν υψηλή συμμόρφωση και χαρακτηριστικά μη γραμμικής μετάδοσης ροπής, γεγονός που οδηγεί σε ζητήματα ελέγχου που δεν έχουν παρατηρηθεί ποτέ στις παραδοσιακές μηχανές PM. Έτσι απαιτείται μια νέα μελέτη για τον εντοπισμό των προβλημάτων και την πρόταση λύσεων.

Σε γενικές γραμμές, η διεξαγόμενη έρευνα σχετικά με τα συστήματα μετάδοσης ισχύος μαγνητικών οδοντωτών τροχών είναι πολύ περισσότερα από τα ηλεκτρομαγνητικά συστήματα

μετάδοσης ισχύος. Αυτό μπορεί να οφείλεται στην υψηλή πολυπλοκότητα ενός ηλεκτρομαγνητικού εργαλείου και στο υψηλό κόστος τέτοιων εφαρμογών. Ωστόσο, ο οικονομικά αποδοτικός και στιβαρός μηχανικός σχεδιασμός των ηλεκτρομαγνητικών εργαλείων είναι ένας τομέας στον οποίο μπορούν να γίνουν σημαντικές βελτιώσεις. Συγκεκριμένα, οι μέθοδοι κατασκευής διαμορφωτών και ηλιακής μηχανής σε διαχωρισμένα MGM δεν είναι καλά εδραιωμένες. Η ικανότητα ροπής των MG και MGM μπορεί να αυξηθεί δραματικά με τη μείωση των αποστάσεων του διακένου αέρα. Τα μηχανικά σχέδια που επιτρέπουν τη χρήση λεπτότερων περιοχών με διάκενο αέρα μπορούν να είναι ιδιαίτερα πλεονεκτικά.

Οι μελλοντικές εργασίες που σχετίζονται με αυτήν τη μελέτη θα στοχεύσουν στη διερεύνηση της πυκνότητας ροής, των απωλειών σιδήρου, του κυματισμού ροπής και της αποτελεσματικότητας των ομοαξονικών μαγνητικών εργαλείων και στην επίλυση του προβλήματος στην κατασκευή μαγνητισμένου τύπου Halbach.

5.Βιβλιογραφία

- [1]Li, Kang, and Jonathan Z. Bird. 2018. “A Review of the Volumetric Torque Density of Rotary Magnetic Gear Designs.” Pp. 2016–22 in *2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*. Alexandroupoli: IEEE.
- [2] Wu, Yi-Chang, Mi-Ching Tsai, and Chin-Tsung Chan. 2018. “Creative Mechanism Design of Magnetic Gears Integrated with Continuously Variable Transmissions.” *Advances in Mechanical Engineering* 10(5):168781401877268.
- [3] Wang, Yawei, Mattia Filippini, Nicola Bianchi, and Piergiorgio Alotto. 2019. “A Review on Magnetic Gears: Topologies, Computational Models, and Design Aspects.”
- [4]H.-S. Yan, “Creative Design of Mechanical Devices.”
- [5] Jaiaraman, Sujay. 2015. “A RESEARCH REVIEW ON MAGNETIC LEVITATION TRAINS.” 10:8.
- [6] Moritz, Walter. n.d. “WHAT ARE MAGNETIC GEARS GOOD FOR?”
- [7]Maglev Transportation — AMT, Inc.
- [8] Reversible Magnetic Transmission for Electric Vehicles

[9] Space Tribology Handbook, 5th edition (v2), pp.41 ff. and pp.132 ff., ESR Technology Ltd., 2013

[10] Puchhammer, Gregor. n.d. "Magnetic Gearing versus Conventional Gearing in Actuators for Aerospace Applications." 8.

[11] General Catalogue, www.harmonicdrive.de

[12] Maxon Motor Catalog, Program 2013/2014

[13] McGilton, Ben, Markus Mueller, and Dr Alasdair McDonald. n.d. "Review of Magnetic Gear Technologies and Their Applications in Marine Energy." 6.

[14]. G. Marsh, "Tidal turbines harness the power of the sea," Reinforced Plastics, vol. 48, no. 6, pp. 44–47, 2004

[15]. L. Jian, K. T. Chau, and J. Z. Jiang, "A magnetic-gear outer-rotor permanent-magnet brushless machine for wind power generation," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 45, no. 3, pp. 954–962, 2009.

[16] A. J. Vining and A. Muetze, "Linear Generators for Direct-Drive Ocean Wave Energy Conversion," p. 2007, 2007.

[17] E. B. Agamloh, A. K. Wallace, and A. von Jouanne, "A novel direct-drive ocean wave energy extraction concept with contact-less force transmission system," Renewable Energy, vol. 33, no. 3, pp. 520–529, 2008.

[18] W. Li, K. T. Chau, and J. Z. Jiang, "Application of linear magnetic gears for pseudodirect-drive oceanic wave energy harvesting," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 47, no. 10, pp. 2624–2627, 2011.

[19] O. Keysan, A. McDonald, and M. Mueller, "Aquamarine power oyster - C-GEN rotary machine design," Design, no. June, 2009.

[20] O. Keysan, M. Mueller, R. Doherty, M. Hamilton, and A. McDonald, "C-GEN, a lightweight direct drive generator for marine energy converters," 5th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2010), pp. 244–244, 2010

[21] S. Mezani, K. Atallah, and D. Howe, "A high-performance axial-field magnetic gear," Journal of Applied Physics, vol. 99, no. 8, pp. 97–100, 2006.

- [22] Polinder, H., F. F. A. Van Der Pijl, G. J. De Vilder, and P. J. Tavner. 2006. "Comparison of Direct-Drive and a novel Geared Generator Concepts for Wind Turbines." *IEEE Transactions on Energy Conversion* 21(3):725–33.
- [23] McMillan, David, and Graham W. Ault. 2010. "Techno-Economic Comparison of Operational Aspects for Direct Drive and Gearbox-Driven Wind Turbines." *IEEE Transactions on Energy Conversion* 25(1):191–98.
- [24] H. Behbahani, H. Yaghoubi, and M. A. Rezvani, "Development of technical and economical models for widespread application of magnetic levitation system in public transport," *International Journal of Civil Engineering*, vol. 10, no. 1, pp. 13–24, 2012
- [25] Behbahani, H., H. Yaghoubi, and M. A. Rezvani. 2012. "Development of Technical and Economical Models for Widespread Application of Magnetic Levitation System in Public Transport." *International Journal of Civil Engineering* 10(1):12.
- [26] Komiyama H, Uchimura Y. Speed control and sensorless force control with magnetic gear. IEEE International Workshop on Advanced Motion Control, p 325–330, 2010
- [27] Tsai MC, Huang CC. Development of a variable-inertia device with a magnetic planetary gearbox. IEEE/ASME Trans Mechatron 2011;16:1120–1128.
- [28] Huang C. C., M. C. Tsai, D. G. Dorrell, and B. J. Li, Development of a magnetic planetary gearbox, IEEE Transaction on Magnetics, Vol. 44, No. 3, 403-412, 2008.
- [29] Atallah, K., and D. Howe, A novel high-performance magnetic gear, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 37, No. 4, 2844-2846, 2001.
- [30] Chen, Mu, Kwok Tong Chau, Wenlong Li, and Chunhua Liu. 2012. "Development of Non-Rare-Earth Magnetic Gears for Electric Vehicles." *Journal of Asian Electric Vehicles* 10(2):1607–13. doi: [10.4130/jaev.10.1607](https://doi.org/10.4130/jaev.10.1607).
- [31] [Neodymium magnet](#)
- [32] [Samarium Cobalt Magnets | SmCo Magnets](#)
- [33] Yu, C., K. T. Chau, X. H. Liu, and J. Z. Jiang, A flux mnemonic permanent magnet brushless motor for electric vehicles, *Journal of Applied Physics*, Vol. 103, 07F103:1-3, 2008.
- [34] H. Yaghoubi and H. Ziari, "Assessment of structural analysis and design principles for maglev guideway: a case-study for implementing low-speed maglev systems in Iran," in *Proceedings of the 1st International Conference on Railway Engineering, High-speed Railway*,

Heavy Haul Railway and Urban Rail Transit, pp. 15– 23, China Railway Publishing House, Beijing Jiaotong University, Beijing, China, 2010.

[35] <https://www.magnomatics.com/>

[36] McGilton, Ben, Markus Mueller, and Dr Alasdair McDonald. n.d. “Review of Magnetic Gear Technologies and Their Applications in Marine Energy.” 6.

[37] H. Faus, “Magnet gearing.” Aug. 21 1941, uS Patent 353,472. [Online]. Available: <https://patents.google.com/patent/US2243555A>

[38] C. Armstrong, “Power-transmitting device,” Nov. 26 1901, uS Patent 687,292. [Online]. Available: [US687292A - Power-transmitting device.](#)

[39] S. Kikuchi and K. Tsurumoto, “Design and characteristics of a new magnetic worm gear using permanent magnet,” IEEE Transactions on Magnetics, vol. 29, no. 6, pp. 2923– 2925, 1993.

[40] Kikuchi, Shinki and Tsurumoto, Katsuo, “Trial construction of a new magnetic skew gear using permanent magnet,” IEEE Transactions on Magnetics, vol. 30, no. 6, pp. 4767–4769, 1994.

[41] R. C. Holehouse, K. Atallah, and J. Wang, “Design and Realization of a Linear Magnetic Gear,” Magnetics, IEEE Transactions on, vol. 47, no. 10, pp. 4171–4174, 2011.

[42] S. Mezani, K. Atallah, and D. Howe, “A high-performance axial-field magnetic gear,” Journal of Applied Physics, vol. 99, no. 8, pp. 97–100, 2006.

[43] S. Tlali, P.M. and Wang, R.-J. and Gerber, “Magnetic gear technologies: A review,” Electrical Machines (ICEM), 2014 International Conference on, pp. 544–550, 2014.

[44] J. Rens, K. Atallah, S. D. Calverley and D. Howe, ‘A Novel Magnetic Harmonic Gear,’ in IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 46, No. 1, Pp. 206-212, Jan.-Feb. 2010, Doi: 10.1109/TIA.2009.2036507

[45] Jing, Libing, Jun Gong, Zhangxian Huang, Tong Ben, and Yuehua Huang. 2019. “A New Structure for the Magnetic Gear.” *IEEE Access* 7:75550–55. doi: [10.1109/ACCESS.2019.2919679](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2919679).

[46] Magnetic gears numerical modelling and optimization

[47] Goryca et al., “Impact of Selected Methods of Cogging Torque Reduction in Multipolar Permanent-Magnet Machines.”

Fodorean, Daniel. “State of the Art of Magnetic Gears, Their Design, and Characteristics with Respect to EV Application.” In *Modeling and Simulation for Electric Vehicle*

[48] *Applications*, edited by Mohamed Amine Fakhfakh. InTech, 2016. <https://doi.org/10.5772/64174>.

[49] Perez-Diaz, Jose Luis, Efren Diez-Jimenez, Marco Antonio Alvarez-Valenzuela, Juan Sanchez-García-Casarrubios, Christian Cristache, and Ignacio Valiente-Blanco. "Magnetic Gearboxes for Aerospace Applications," n.d., 10.

[50] Esnoz-Larraya, Judit, Ignacio Valiente-Blanco, Cristian Cristache, Juan Sanchez-Garcia-Casarrubios, Fernando Rodriguez-Celis, Efrén Diez-Jimenez, and Jose Luis Perez-Diaz. "OPTIMAGDRIVE: HIGH-PERFORMANCE MAGNETIC GEARS DEVELOPMENT FOR SPACE APPLICATIONS," n.d., 5.

[51] Rahideh, Akbar, Amir Abbas Vahaj, Mohammad Mardaneh, and Thierry Lubin. "Two-dimensional Analytical Investigation of the Parameters and the Effects of Magnetisation Patterns on the Performance of Coaxial Magnetic Gears." *IET Electrical Systems in Transportation* 7, no. 3 (September 2017): 230–45. <https://doi.org/10.1049/iet-est.2016.0070>.

[52] Galmadi, Gheorghe, and Oana Dodun. "Functional Analysis Diagram of a Flux Modulated Magnetic Gear." Edited by G. Mansour, D. Tzetzis, and P. Kyratsis. *MATEC Web of Conferences* 318 (2020): 01013. <https://doi.org/10.1051/matecconf/202031801013>.

[53] Jian, Linni, and K. T. Chau. "A Coaxial Magnetic Gear With Halbach Permanent-Magnet Arrays." *IEEE Transactions on Energy Conversion* 25, no. 2 (June 2010): 319–28. <https://doi.org/10.1109/TEC.2010.2046997>.

[54] Bharathi, Manne, M Kiran Kumar, and O Chandra Sekhar. "A Review of Recent Advancements in Flux Reversal Permanent Magnet Machine (FRPMM)" 8, no. 1 (2019): 13.

[55] Linni Jian, K.T. Chau, Yu. Gong, J.Z. Jiang, Chuang Yu, and Wenlong Li. "Comparison of Coaxial Magnetic Gears With Different Topologies." *IEEE Transactions on Magnetics* 45, no. 10 (October 2009): 4526–29. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2009.2021662>.

[56] Mr. Akash Patel, Mr. Ravi Gondaliya "MAGNETIC CONTINUOUSLY VARIABLE TRANSMISSION"

[57] Nur Fajri, Saian, Ibnu Siswanto, and Ahmad Mustamil Khoiron. "Design and Analysis of Coaxial Magnetic Gear Mechanism with Halbach Permanent-Magnet Array." *Journal of Physics: Conference Series* 1273 (November 2019): 012062. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1273/1/012062>.

[58] Li, Kang, and Jonathan Z. Bird. "A Review of the Volumetric Torque Density of Rotary Magnetic Gear Designs." In *2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, 2016–22. Alexandroupoli: IEEE, 2018. <https://doi.org/10.1109/ICELMACH.2018.8507059>.

- [59]Komiyama, Hiroki, and Yutaka Uchimura. "Contactless Magnetic Gear for Robot Control Application." *Electrical Engineering in Japan* 184, no. 4 (September 2013): 32–41. <https://doi.org/10.1002/eej.22414>.
- [60]Faysal, Abdullah Al, and Sallehuddin Mohamed Haris. "Development of Magnetic Gears: A Review," n.d., 8.
- [61]Shin, Homin, and Junghwan Chang. "Efficiency Improvement Strategy for Multiple Operating Points in Doubly Fed Magnetic Geared Motor." *Applied Sciences* 10, no. 7 (April 3, 2020): 2456. <https://doi.org/10.3390/app10072456>.
- [62]Li, Xianglin, Kwok-Tong Chau, Ming Cheng, and Wei Hua. "COMPARISON OF MAGNETIC-GEARED PERMANENT-MAGNET MACHINES." *Progress In Electromagnetics Research* 133 (2013): 177–98. <https://doi.org/10.2528/PIER12080808>.
- [63]Desvaux, Melaine, Roman Le Goff Latimier, Bernard Multon, Hamid Ben Ahmed, and Stephane Sire. "Design and Optimization of Magnetic Gears with Arrangement and Mechanical Constraints for Wind Turbine Applications." In *2016 Eleventh International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*, 1–8. Monte Carlo: IEEE, 2016. <https://doi.org/10.1109/EVER.2016.7476341>.
- [64]Gerber, Stiaan. "Evaluation and Design Aspects of Magnetic Gears and Magnetically Geared Electrical Machines," n.d., 196.
- [65]Liu, Chunhua, and K. Chau. "Electromagnetic Design of a New Electrically Controlled Magnetic Variable-Speed Gearing Machine." *Energies* 7, no. 3 (March 13, 2014): 1539–54. <https://doi.org/10.3390/en7031539>.
- [67]Brönn, Lodewyk. "Design and Performance Evaluation of a Magnetically Geared Axial-Flux Permanent Magnet Generator," n.d., 129.
- [68]Wu, Yi-Chang, and Chin-Tsung Chan. "A Novel Bicycle Rear Hub Transmission with a Magnetic Gear Mechanism." *Advances in Mechanical Engineering* 10, no. 7 (July 2018): 168781401878482. <https://doi.org/10.1177/1687814018784825>.
- [69]Fukuoka, Michinari, Kenji Nakamura, and Osamu Ichinokura. "Experimental Tests and Efficiency Improvement of Surface Permanent Magnet Magnetic Gear." *IEEJ Journal of Industry Applications* 3, no. 1 (2014): 62–67. <https://doi.org/10.1541/ieejia.3.62>.
- [70]A Matthee, S Gerber, and R-J Wang. "A High Performance Concentric Magnetic Gear," 2015. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1493.6167>.

[71]Fujita, Tomoyuki, Yoshinori Ando, Kosuke Nagaya, Masaru Oka, Takashi Todaka, Masato Enokizono, and Kazunobu Sugiura. "Surface Magnet Gears with a New Magnet Arrangement and Optimal Shape of Stationary Pole Pieces." *Journal of Electromagnetic Analysis and Applications* 05, no. 06 (2013): 243–49. <https://doi.org/10.4236/jemaa.2013.56039>.

[72]Jorgensen, Frank T., Torben Ole Andersen, and Peter Omand Rasmussen. "The Cycloid Permanent Magnetic Gear." *IEEE Transactions on Industry Applications* 44, no. 6 (2008): 1659–65. <https://doi.org/10.1109/TIA.2008.2006295>.

[73]G. Yang, W. Liu, Y. Zhou and M. Lin, "Variable Magnetic Characteristic Analysis of Series Hybrid Permanent Magnet Magnetic Circuit Using Low Coercive Force Permanent Magnet," in *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 31, no. 8, pp. 1-4, Nov. 2021, Art no. 4901504, doi: 10.1109/TASC.2021.3091123.

[74] Komiyama, Hiroki, and Yutaka Uchimura. "Contactless Magnetic Gear for Robot Control Application." *Electrical Engineering in Japan* 184, no. 4 (September 2013): 32–41. <https://doi.org/10.1002/eej.22414>.

[75] M. R. Harris, G. H. Pajooman, and S. M. Abu Sharkh, "Performance and design optimization of electric motors with heteropolar surface magnets and homopolar windings," *IEE Proceedings*, pt. B, vol. 143, no. 6, pp. 429–436, 1996

[76] H. Weh, "Transverse flux (TF) machines in drive and generator applications," in *Proceedings of IEEE/KTH Stockholm Power Technology Conference*, Stockholm, Sweden, 1995, pp. 75–80.[8]M. R. Harris, G. H. Pajooman, and S. M. Abu Sharkh, "Performance and design optimization of electric motors with heteropolar surface magnets and homopolar windings," *IEE Proceedings*, pt. B, vol. 143, no. 6, pp. 429–436, 1996

[77]Tsurumoto, K., 1992, "Basic Analysis on Transmitted Force of Magnetic Gear Using Permanent Magnet", *IEEE Translation Journal on Magnetics in Japan*, Vol 7, No. 6, June 1992, p. 447-52

[78]Bassani, R., 2007, "Dynamic Stability of Passive Magnetic Bearings", *Nonlinear Dynamics*, V. 50, p. 161-68

[79]Furlani, E. P., 1996, "Analysis and optimization of synchronous magnetic couplings", *J. Appl. Phys.*, Vol. 79, No. 8, p. 4692

- [80]K. T. Chau, Dong Zhang, J. Z. Jiang, Linni Jian, 2008, "Transient Analysis of Coaxial Magnetic Gears Using Finite Element Comodeling", Journal of Applied Physics, Vol. 103
- [81] Correlated Magnetics Research, 2010, Company Website, <http://www.correlatedmagnetics.com>
- [82]Jae Seok Choi, Jeonghoon Yoo, Shinji Nishiwaki, and Kazuhiro Izui, 2010, "Optimization of Magnetization Directions in a 3-D Magnetic Structure", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 46, No. 6, June 2010, p. 1603–06
- [83]General Electric DP 2.7 Wind Turbine Gearbox, <http://www.gedrivetrain.com/insideDP27.cfm>, referenced June 2010
- [84]Neugart PLE-160, One-Stage Planetary Gearbox, http://www.neugartusa.com/ple—160_gb.pdf, referenced June 2010
- [85]Boston Gear 221S-4, One-stage Helical Gearbox, http://www.bostongear.com/pdf/product_sections/200_series_helical.pdf, referenced June 2010
- [86]Krasilnikov, A. Ya. Krasil'nikov, A. A., 2009, "Torque Determination for a Cylindrical Magnetic Clutch", Russian Engineering Research, Vol. 29, No. 6, pp. 544–47
- [87]Kyung-Ho Ha, Young-Jin Oh, Jung-Pyo Hong, 2002, "Design and Characteristic Analysis of Non-Contact Magnet Gear for Conveyor by Using Permanent Magnet", Conf. Record of the 2002 IEEE Industry Applications Conference, p. 1922–27
- [88] Yao, Y., Lee, C., Wang, S., Huang, D., 2000, "Method of designing optimal bi-axial magnetic gears and system of the same", U.S. Pat. No. 6,047,456
- [89] Furlani, E. P., 2000, "Analytical analysis of magnetically coupled multipole cylinders", J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 33, No. 1, p. 28-33.
- [90] Jorgensen, F. T., Andersen, T. O., Rasmussen P. O., 2005, "Two dimensional model of a permanent magnet spur gear", Conf. Record of the 2005 IEEE Industry Applications Conference, p. 261-5
- [91] Storaasli, A.G., 2016, "Eccentric Magnetic Gear System Based On Repulsion", U.S. Pat. No 9,337,712
- [92] Ackermann, B., Honds, L., 1997, "Magnetic drive arrangement comprising a plurality of magnetically cooperating parts which are movable relative to one another", U.S. Pat. No. 5,633,555

- [93] P. O. Rasmussen, et al, "Development of a High Performance Magnetic Gear," IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 41, No. 3, 2005, pp. 764-770.
- [94] C. P. Cho and R. A. Bedingfield, "Permanent Magnet Torque/Force Transfer Apparatus," Patent No. 5,569,111, 1996.
- [95] G. Valmor da Cunha, "Orbital Magnetic Speed Change," US Patent No. 8,210,980 B2, 2012.
- [96] L. A. Vazquez-Perez, "Cycloidal Magnetic Gear Speed Reducer" Master's Degree Thesis, Universidad Nacional Autonoma de Mexico, 2013.
- [97] I. Petrov, P. Immonen and J. Pyrhönen, "Design and Analysis of a Self-Holding Three-Position Electric Tubular Actuator," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 68, no. 9, pp. 8487-8497, Sept. 2021, doi: 10.1109/TIE.2020.3013773.
- [98] Rens, Jan, Sigrid Jacobs, Lode Vandenbossche, and Emmanuel Attrazic. 2016. "Effect of Stator Segmentation and Manufacturing Degradation on the Performance of IPM Machines, Using ICARe® Electrical Steels." *World Electric Vehicle Journal* 8(2):450–60.
- [99] António Pedro Dias Alves de Campos , "Design of a Linear Actuator for Soft Robotics Applications", 2016
- [100] K. Atallah, J. Rens, S. Mezani, and D. Howe, "A Novel 'Pseudo' Direct-Drive Brushless Permanent Magnet Machine," *Magnetics, IEEE Transactions on*, vol. 44, pp. 4349-4352, 2008.
- [101] D. J. Powell, S. D. Calverley, F. de Wildt, and K. Daffey, "Design and analysis of a Pseudo Direct-Drive propulsion motor," in *Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2010)*, 5th IET International Conference on, 2010, pp. 1-2.
- [102] Rens, Jan, Sigrid Jacobs, Lode Vandenbossche, and Emmanuel Attrazic. "Effect of Stator Segmentation and Manufacturing Degradation on the Performance of IPM Machines, Using ICARe® Electrical Steels." *World Electric Vehicle Journal* 8, no. 2 (June 24, 2016): 450–60.
- [103] Scheidler, Justin J. 2018. "NASA's Magnetic Gearing Research for Electrified Aircraft Propulsion." in *2018 AIAA/IEEE Electric Aircraft Technologies Symposium*. Cincinnati, Ohio: American Institute of Aeronautics and Astronautics.