



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Διπλωματική Εργασία

Μετατροπή ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους σε κατάσταση λειτουργίας
συστήματος επαύξησης ισχύος

Αλεξανδρής Νικόλαος

A.M. 222017018

Επιβλέπων Καθηγητής

ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ ΠΑΠΑΚΙΤΣΟΣ

ΑΙΓΑΛΕΩ 2023



UNIVERSITY OF WEST ATTICA

SCHOOL OF ENGINEERING

**DEPARTMENT OF INDUSTRIAL DESIGN AND
PRODUCTION ENGINEERING**

Diploma Thesis

**Conversion of a power generating pair to an augmented
operation system**

Alexandris Nikolaos

Registration Number: 222017018

Supervisor:

Papakitsos Evangelos

Egaleo, Athens, 2023



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ
ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Τίτλος εργασίας

**Μετατροπή ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους σε κατάσταση λειτουργίας συστήματος
επαύξεσης ισχύος**

Μέλη Εξεταστικής Επιτροπής συμπεριλαμβανομένου και του Εισηγητή

Η μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία εξετάστηκε επιτυχώς από την κάτωθι Εξεταστική Επιτροπή:

Α/α	ΟΝΟΜΑ ΕΠΩΝΥΜΟ	ΒΑΘΜΙΑΔΑ/ΙΔΙΟΤΗΤΑ	ΨΗΦΙΑΚΗ ΥΠΟΓΡΑΦΗ
1	Ε.Χ. ΠΑΠΑΚΙΤΣΟΣ	ΕΔΙΠ Α΄	
2	Ν. ΛΑΣΚΑΡΗΣ	ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ	
3	Ε.-Ο. ΣΚΛΑΒΟΥΝΟΥ	ΛΕΚΤΟΡΑΣ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ	

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Αλεξάνδρης Νικόλαος του Δημητρίου, με αριθμό μητρώου 222017018 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Μηχανικών Βιομηχανικής Σχεδίασης και Παραγωγής, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της πτυχιακής/διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Ο Δηλών



Περίληψη

Στην παρούσα εργασία παρουσιάστηκε η δημιουργία ενός μοντέλου προσομοίωσης μιας πρότασης για την δημιουργία ενός συστήματος ενίσχυσης RotoVerte στο περιβάλλον του MATLAB. Το μοντέλο επιτρέπει στον χρήστη να μελετήσει την συμπεριφορά του προτεινόμενου συστήματος υπό διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας. Εν γένει το σύστημα όντως οδηγεί σε ενίσχυση, ωστόσο αυτή οφείλεται στην αποθηκευμένη ισχύ των πυκνωτών

Summary

In this paper, the creation of a simulation model of a proposal for the creation of a RotoVerter amplification system in the MATLAB environment was presented. The model allows the user to study the behavior of the proposed system under different operating conditions. In general, the system does lead to amplification, however this is due to the stored power of the capacitors that are utilized during its operation.

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα.....	3
Κατάλογος Εικόνων – Σχημάτων	4
Εισαγωγή	6
1. Επαγωγικές (Ασύγχρονες) Ηλεκτρογεννήτριες: Βασικές διαμορφώσεις.....	7
2. Επαγωγικές γεννήτριες τυλίγματος ρότορα.....	15
2.1 Κατασκευή.....	19
3. Το σύστημα ενίσχυσης ισχύος «RotoVertter».....	27
4. Προσομοίωση συστήματος ενίσχυσης ισχύος.....	41
4.1 Περιγραφή μοντέλου.....	41
4.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης.....	44
4.2.1 Λειτουργία μοντέλου χωρίς τις αλλαγές στα κυκλώματα των μηχανών...	44
4.2.2 Δοκιμή προτεινόμενης συνδεσμολογίας.....	45
Συμπεράσματα	46
Βιβλιογραφία	47

Κατάλογος Εικόνων – Σχημάτων

Εικόνα 1 Επαγωγική Γεννήτρια ρότορα κλωβού	7
Εικόνα 2 Χρήση μετατροπέα	9
Εικόνα 3 Διπλό σύστημα IG	10
Εικόνα 4 Γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδοσίας <i>Wound-Rotor</i>	12
Εικόνα 5 Μοντέλα λειτουργίας.....	13
Εικόνα 6 Βασικά μοντέλα λειτουργίας.....	16
Εικόνα 7 Διαμορφώσεις στάτορα και ρότορα	19
Εικόνα 8 Δομές στάτορα και ρότορα.....	20
Εικόνα 9 Βασικό τριφασικό τύλιγμα	23
Εικόνα 10 Διπολικό τύλιγμα 24 σχισμών	24
Εικόνα 11 Γενική διάταξη του συστήματος RotoVerter	27
Εικόνα 12 Ηλεκτρικό μοντέλο κινητήρα	28
Εικόνα 13 Αφαίρεση του ρότορα.....	29
Εικόνα 14 Αφαίρεση της έτερης πλάκας του κινητήρα.....	30
Εικόνα 15 Κύκλωμα κινητήρα μετά την αλλαγή.....	31
Εικόνα 16 Συνδεσμολογία γεννήτριας.....	32
Εικόνα 17 Ολοκληρωμένο φυσικό σύστημα	32
Εικόνα 18 Σύνδεση του κινητήρα με Muller Motor	34
Εικόνα 19 Εναλλακτικό κύκλωμα	35
Εικόνα 20 Αποτελέσματα μετατροπής	36
Εικόνα 21 Γράφημα του πηνίου στο πρώτο μισό του κύκλου.....	36
Εικόνα 22 Ταχεία εναλλαγή βραχυκυκλώματος.....	37
Εικόνα 23 Αποτελέσματα της μεθόδου	38
Εικόνα 24 Κύκλωμα συλλογής ισχύος που χρησιμοποιείται για το βραχυκυκλωμένο πηνίο.....	39
Εικόνα 25 Κύκλωμα συλλογής ισχύος που χρησιμοποιείται για το μη βραχυκυκλωμένο πηνίο.....	39
Εικόνα 26 Πλήρες κύκλωμα	40
Εικόνα 27 Μοντέλο συστήματος RotoVerter	41
Εικόνα 28 Βασική διαμόρφωση κινητήρα.....	42
Εικόνα 29 Παράμετροι κινητήρα.....	42

Εικόνα 30 Βασική διαμόρφωση γεννήτριας	43
Εικόνα 31 Παράμετροι γεννήτριας	43
Εικόνα 32 Αποτελέσματα προσομοίωσης χωρίς αλλαγές στα κυκλώματα των μηχανών	44
Εικόνα 33 Αποτελέσματα προσομοίωσης του προτεινόμενου συστήματος	45

Εισαγωγή

Τα «συστήματα ελεύθερης ενέργειας» αναφέρονται συχνά σε υποθετικές ή μη συμβατικές τεχνολογίες ενέργειας που ισχυρίζονται ότι παράγουν περισσότερη ενέργεια από όση καταναλώνουν, παραβιάζοντας φαινομενικά τους νόμους της θερμοδυναμικής. Αυτά τα συστήματα συχνά συνδέονται με μηχανές ή συσκευές αέναης κίνησης που υπόσχονται απεριόριστη και δωρεάν ενέργεια χωρίς την ανάγκη καυσίμου ή εξωτερικών υλικών εισροών.

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η έννοια της «ελεύθερης ενέργειας» σε αυτό το πλαίσιο θεωρείται ευρέως ψευδοεπιστημονική και δεν υποστηρίζεται από καθιερωμένες επιστημονικές αρχές. Οι νόμοι της θερμοδυναμικής, συγκεκριμένα ο πρώτος και ο δεύτερος νόμος, διέπουν τη διατήρηση της ενέργειας και τη συμπεριφορά της ενέργειας σε κλειστά συστήματα. Αυτοί οι νόμοι υποδηλώνουν ότι είναι αδύνατο να δημιουργηθεί μια μηχανή αέναης κίνησης ή ένα σύστημα που παράγει συνεχώς περισσότερη ενέργεια από αυτή που καταναλώνει χωρίς να παραβιάζονται οι νόμοι της Φυσικής.

Παρόλα αυτά, υπήρξαν πολλοί ισχυρισμοί και εφευρέτες που ισχυρίστηκαν ότι ανέπτυξαν συσκευές ελεύθερης ενέργειας. Αυτοί οι ισχυρισμοί αντιμετωπίζονται συχνά με σκεπτικισμό και υπόκεινται σε έλεγχο από την επιστημονική κοινότητα. Στις περισσότερες περιπτώσεις, τέτοιοι ισχυρισμοί έχουν καταρριφθεί ή έχει βρεθεί ότι είναι αποτέλεσμα σφαλμάτων, παρερμηνειών ή ακόμη και απάτης.

Εν ολίγοις, ενώ η ιδέα των συστημάτων ελεύθερης ενέργειας είναι ενδιαφέρουσα, δεν υποστηρίζονται από καθιερωμένες επιστημονικές αρχές και τυχόν ισχυρισμοί τέτοιων συστημάτων θα πρέπει να αντιμετωπίζονται με προσοχή και σκεπτικισμό έως ότου ελεγχθούν αυστηρά και επαληθευτούν μέσω της επιστημονικής μεθόδου. Μέχρι σήμερα, κανένα σύστημα ελεύθερης ενέργειας δεν έχει αποδειχθεί ότι λειτουργεί όπως ισχυρίζεται εντός των ορίων της αποδεκτής Φυσικής.

Με βάση τα παραπάνω, στην παρούσα εργασία παρουσιάστηκε η δημιουργία ενός μοντέλου προσομοίωσης μιας πρότασης για τη δημιουργία και προσομοίωση ενός προτεινόμενου συστήματος ενίσχυσης στο περιβάλλον του Matlab.

1. Επαγωγικές (Ασύγχρονες) Ηλεκτρογεννήτριες: Βασικές διαμορφώσεις

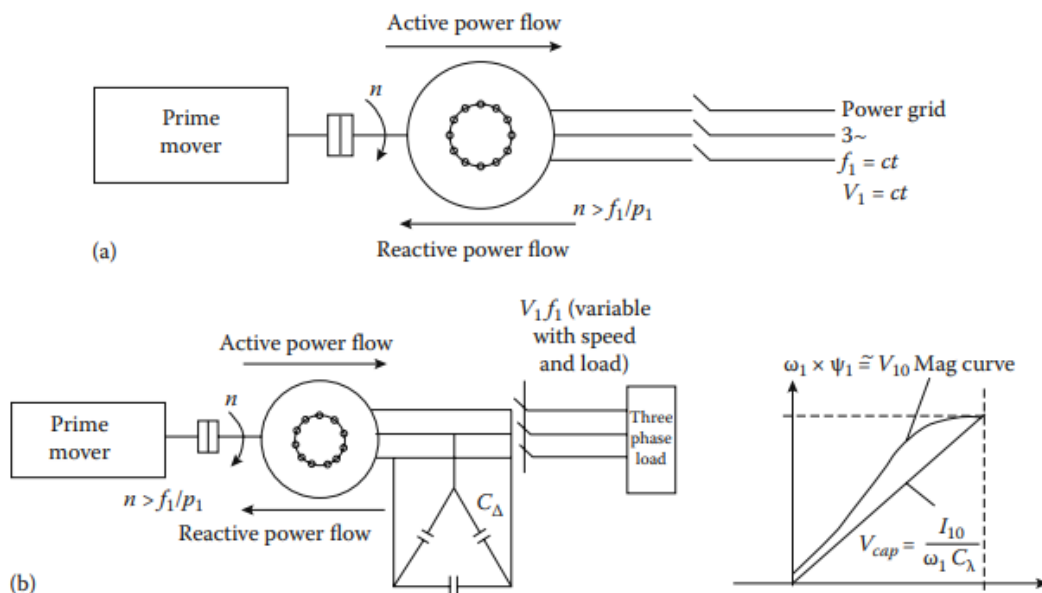
Η επαγωγική γεννήτρια ρότορα κλωβού είναι γνωστό ότι λειτουργεί ως γεννήτρια, με την προϋπόθεση

- Η συχνότητα f_1 να είναι μικρότερη από $n \times p_1$ (ταχύτητα \times ζεύγη πόλων): $S < 0$ (Εικόνα 1a).
- Να υπάρχει μια πηγή για να μαγνητίζει τη μηχανή.

Μια επαγωγική μηχανή που λειτουργεί ως κινητήρας και που τροφοδοτείται σε σταθερή συχνότητα και τάση f_1, V_1 ηλεκτρικό δίκτυο, γίνεται γεννήτρια εάν κινείται από έναν κύριο κινητήρα πάνω από την ιδανική ταχύτητα χωρίς φορτίο f_1/p_1 :

$$n > f_1/p_1$$

Εναλλακτικά, το μηχάνημα επαγωγής με ρότορα κλωβού μπορεί να αυτοδιεγερθεί σε έναν πυκνωτή στους ακροδέκτες του (Εικόνα 1b).



Εικόνα 1 Επαγωγική Γεννήτρια ρότορα κλωβού [1]

Για μια γεννήτρια επαγωγής συνδεδεμένη σε ένα ισχυρό (σταθερής συχνότητας και τάσης) ηλεκτρικό δίκτυο, όταν αυξάνεται η ταχύτητα n (πάνω από f_1/p_1), αυξάνεται

η ενεργή ισχύς που παρέχεται στο ηλεκτρικό δίκτυο, αλλά και η άεργη ισχύς που αντλείται από το ηλεκτρικό δίκτυο.

Πολλές υπάρχουσες γεννήτριες χρησιμοποιούν τέτοιους GRID συνδεδεμένους στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Ο έλεγχος είναι μόνο μηχανικός. Η γωνία κλίσης της λεπίδας προσαρμόζεται σύμφωνα με την ταχύτητα του ανέμου και τις απαιτήσεις παροχής ισχύος. Ωστόσο, τέτοια IG τείνουν να είναι άκαμπτα καθώς είναι σταθερά μόνο έως ότου το n φτάσει την τιμή:

$$n_{\max} = \frac{f_1}{p_1} (1 + |S_K|)$$

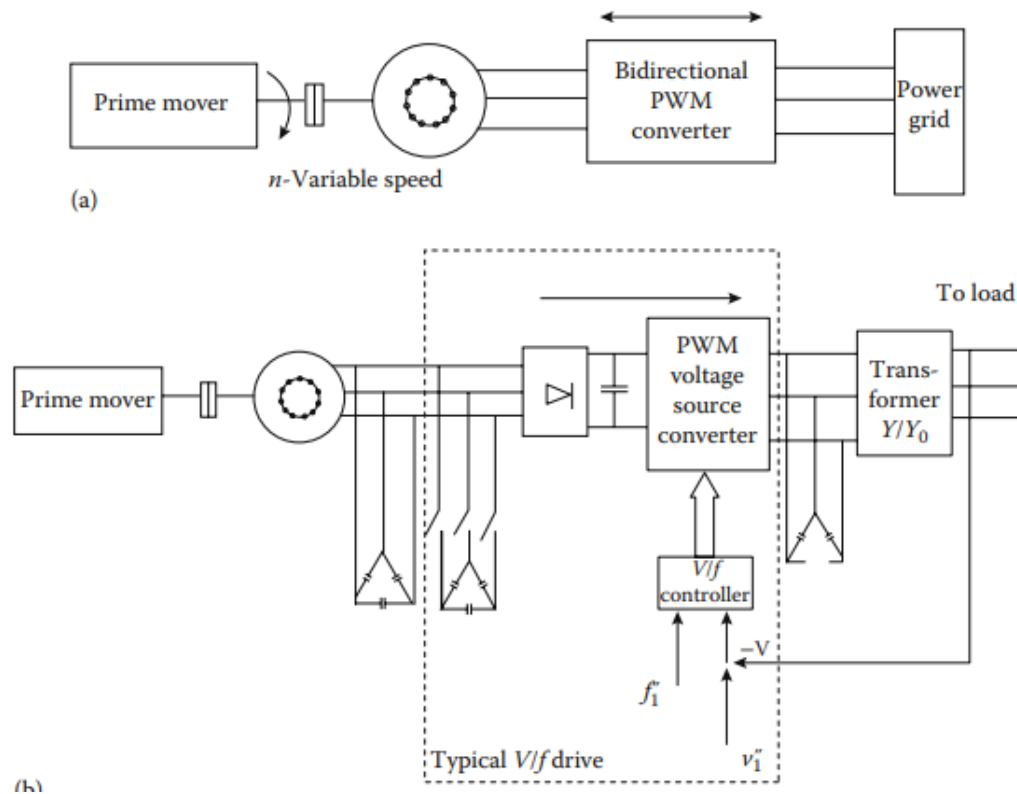
όπου το S_K είναι ο κρίσιμος ύπνος, ο οποίος μειώνεται με την ονομαστική ισχύ και είναι, ούτως ή άλλως, κάτω από 0,08 για IG σε εκατοντάδες κιλοβάτ. Απαιτούνται πρόσθετοι παράλληλοι πυκνωτές στο ηλεκτρικό δίκτυο για να αντισταθμίσουν την άεργη ισχύ που εκκενώνεται από το IG.

Εναλλακτικά, η άεργος ισχύς μπορεί να παρέχεται από παράλληλους πυκνωτές (σε σειρά) (Εικόνα 1b). Σε αυτή την περίπτωση, έχουμε μια διαδικασία αυτοδιέγερσης που απαιτεί κάποια παραμένουσα ροή στον ρότορα (από προηγούμενη λειτουργία) και την παρουσία μαγνητικού κορεσμού (Εικόνα 1b). Η συχνότητα f_1 της τάσης αυτοδιέγερσης (χωρίς φορτίο) εξαρτάται από την τιμή του πυκνωτή και από την καμπύλη μαγνήτισης της επαγωγικής μηχανής $\Psi_1 (I_{10})$

$$V_{10} \approx \psi_1(I_{10}) \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_1 \approx V_{C_V} = I_{10} \frac{3}{C_{\Delta} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_1}$$

Το πρόβλημα είναι ότι σε φορτίο, ακόμα κι αν η ταχύτητα είναι σταθερή μέσω του ελέγχου ταχύτητας του κύριου μηχανισμού κίνησης, η τάση και η συχνότητα εξόδου ποικίλλουν ανάλογα με το φορτίο. Για σταθερή ταχύτητα, εάν είναι αποδεκτή η μείωση της συχνότητας υπό φορτίο 1 Hz, αρκεί ο έλεγχος τάσης. Ένας τριφασικός κόφτης εναλλασσόμενου ρεύματος (variac) που τροφοδοτεί τους πυκνωτές θα το έκανε, αλλά οι αρμονικές που εισάγονται από αυτόν πρέπει να φιλτραριστούν. Σε απλές εφαρμογές, ένας συνδυασμός παράλληλων και σειριακών πυκνωτών θα παρείχε μάλλον σταθερή (με ρύθμιση 3%-5%) τάση μέχρι το ονομαστικό φορτίο.

Τώρα, εάν πρόκειται να χρησιμοποιηθεί μεταβλητή ταχύτητα, τότε, για σταθερή τάση και συχνότητα, χρειάζονται μετατροπείς PWM. Τέτοιες διαμορφώσεις απεικονίζονται στην Εικόνα 2.



Εικόνα 2 Χρήση μετατροπέα [1]

Ένας μετατροπέας PWM αμφίδρομης ροής ισχύος (Εικόνα 2a) παρέχει λειτουργίες παραγωγής και κίνησης με μεταβλητή ταχύτητα. Ο πυκνωτής στη γραμμή συνεχούς ρεύματος του μετατροπέα μπορεί να οδηγήσει όχι μόνο σε παροχή ενεργού αλλά και άεργου ισχύος. Η σύνδεση στο ηλεκτρικό δίκτυο χωρίς μεγάλα μεταβατικά είναι σιωπηρή και επομένως είναι γρήγορος, αποσυνδεδεμένος, ενεργός και άεργος έλεγχος ισχύος.

Η αυτόνομη διαμόρφωση στην Εικόνα 2b είναι λιγότερο δαπανηρή, αλλά παρέχει μόνο μονοκατευθυντική ροή ισχύος. Χρησιμοποιείται ένας τυπικός μετατροπέας V_1/f_1 για μονάδες δίσκου. Είναι δυνατή η αντιστροφή των συνδέσεων, δηλαδή η σύνδεση του ανορθωτή διόδου και των πυκνωτών στο δίκτυο και του μετατροπέα στο μηχανήμα. Με αυτόν τον τρόπο, το σύστημα λειτουργεί ως κίνηση μεταβλητής ταχύτητας για άντληση κ.λπ., εάν υπάρχει διαθέσιμο τοπικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτή η μετάλλαξη μπορεί να γίνει αυτόματα αν και θα χρειαζόταν 1–2 λεπτά. Για μεταβλητή

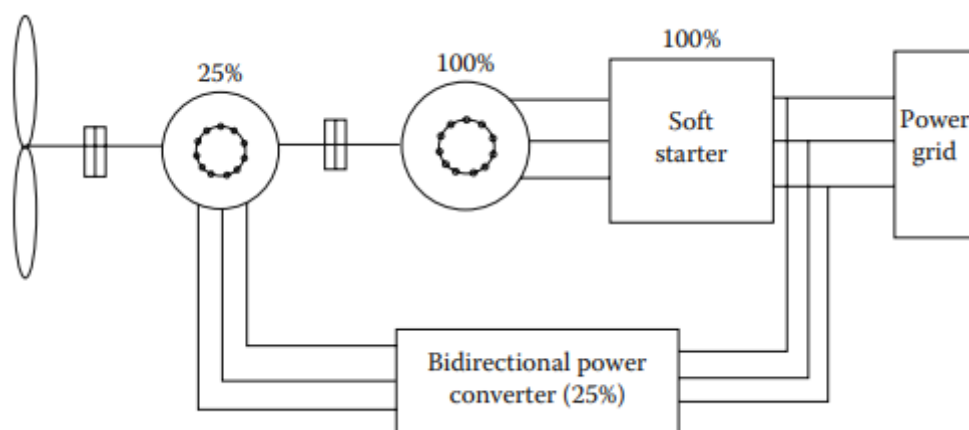
ταχύτητα - σε περιορισμένο εύρος - ένας πυκνωτής διέγερσης σε δύο στάδια θα παρείχε στον ανορθωτή διόδου μόνο ελαφρώς μεταβλητή τάση σύνδεσης DC.

Εφόσον πληρούνται τα ελάχιστα και μέγιστα όρια τάσης μετατροπέα, ο πρώτος θα λειτουργεί σε όλο το εύρος στροφών. Τώρα ο μετατροπέας ελέγχεται V_1/f_1 για σταθερή τάση και συχνότητα.

Μπορεί να χρειαστεί ένας μετασχηματιστής (Y, Y_0) για την υποδοχή μη ισορροπημένων (ή μονοφασικών) φορτίων.

Η τάση εξόδου μπορεί να ελέγχεται κλειστού βρόχου μέσω του μετατροπέα PWM. Από την άλλη πλευρά, η διαμόρφωση του αμφίδρομου μετατροπέα PWM μπορεί να παρέχεται με ένα επαναδιαμορφώσιμο σύστημα ελέγχου έτσι ώστε να λειτουργεί όχι μόνο στο ηλεκτρικό δίκτυο αλλά να διαχωρίζεται ομαλά για να λειτουργεί ως αυτόνομο ή να περιμένει σε αναμονή και στη συνέχεια να επανασυνδεθεί ομαλά στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Έτσι, παράγεται πολυλειτουργική παραγωγή ενέργειας με μεταβλητή ταχύτητα. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.b, απαιτούνται ηλεκτρονικά πλήρους ισχύος. Για περιορισμένο εύρος στροφών, ας πούμε έως και 25%, είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν δύο IG με ρότορα κλωβού και διαφορετικούς αριθμούς πόλων ($2p_2/2p_1 = 8/6, 5/4, 4/3 \dots$). Αυτός με περισσότερους πόλους, ($2p_2 > 2p_1$) βαθμολογείται στο 25% της ονομαστικής ισχύος και τροφοδοτείται από έναν αμφίδρομο μετατροπέα ισχύος που έχει επίσης μέγεθος περίπου 25%.

Το σχέδιο λειτουργεί στο ηλεκτρικό δίκτυο (Εικόνα 3).

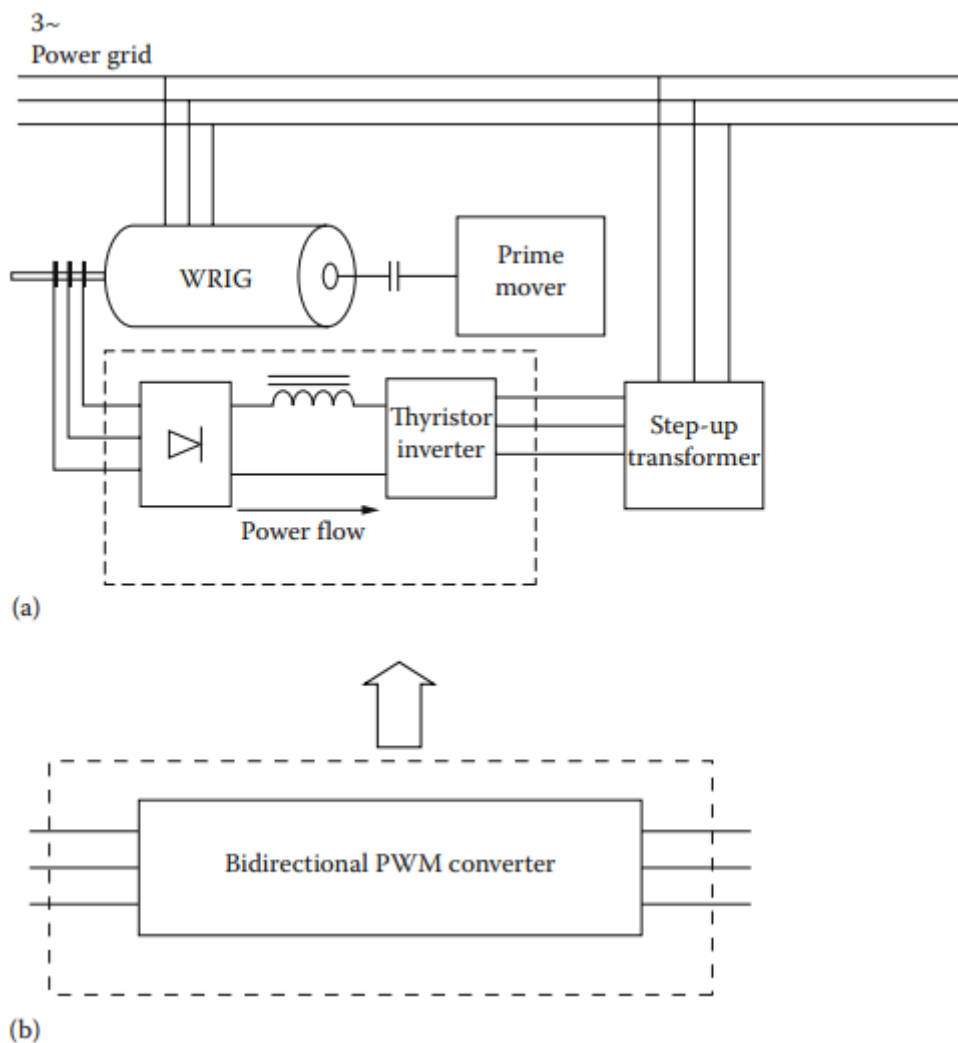


Εικόνα 3 Διπλό σύστημα IG [1]

Ο μαλακός εκκινητής μειώνει τα μεταβατικά στοιχεία συγχρονισμού και αποσυνδέει το 100% IG όταν η απαιτούμενη ισχύς είναι κάτω από 25%. Στη συνέχεια, το 25% IG παραμένει μόνο του στη δουλειά, σε μεταβλητή ταχύτητα ($n > f_1/p_1$), για να αξιοποιήσει την ενέργεια που είναι διαθέσιμη από, για παράδειγμα, άνεμο χαμηλής ταχύτητας ή από μικροϋδροστρόβιλο χαμηλής κεφαλής. Επιπλέον, πάνω από 25% φορτίο, όταν λειτουργεί το κύριο (100%) IG, το 25% IG μπορεί να προσθέσει ισχύ ως γεννήτρια ή να λειτουργήσει στην οδήγηση για καλύτερη δυναμική και σταθερότητα. Τώρα μπορούμε να φανταστούμε έναν μοναδικό IG ρότορα-στάτορα με δύο περιελίξεις στάτορα χωριστού ρυθμού ($2p_2 > 2p_1$) να εκτελεί την ίδια εργασία. Αξιοσημείωτη είναι η μείωση της βαθμολογίας, από 100% σε 25%, του αμφίδρομου μετατροπέα PWM. Το κύριο πλεονέκτημα του διπλού IG ή της περιέλιξης διπλού στάτη IG είναι το χαμηλότερο κόστος, αν και για χαμηλότερη απόδοση (εύρος χαμηλής ταχύτητας πάνω από f_1/p_1).

Γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδοσίας Wound-Rotor

Όλα ξεκίνησαν μεταξύ 1907 και 1913, με τις διαμορφώσεις Scherbius και Kraemer, οι οποίες είναι και οι δύο σχήματα ανάκτησης ισχύος ολίσθησης των μηχανών επαγωγής στροφείου τυλιγμένου. Ο Leonhard το ανέλυσε κατάλληλα το 1928, αλλά τότε δεν ήταν διαθέσιμα επαρκή ηλεκτρονικά στοιχεία ισχύος για αυτό. Ένα σχήμα ανάκτησης ολίσθησης με ηλεκτρονικά ισχύς thyristor φαίνεται στην Εικόνα 4a.



Εικόνα 4 Γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδοσίας Wound-Rotor [1]

Η μονοκατευθυντική ροή ισχύος, από τον δρομέα IG στον μετατροπέα, είναι εφικτή μόνο λόγω του ανορθωτή της διόδου. Ένας μετασχηματιστής ανόδου είναι απαραίτητος για την προσαρμογή της τάσης, ενώ ο μετατροπέας θυρίστορ παράγει σταθερή τάση και συχνότητα εξόδου. Η αρχή της λειτουργίας βασίζεται στο θεώρημα συχνότητας των διακινούμενων πεδίων

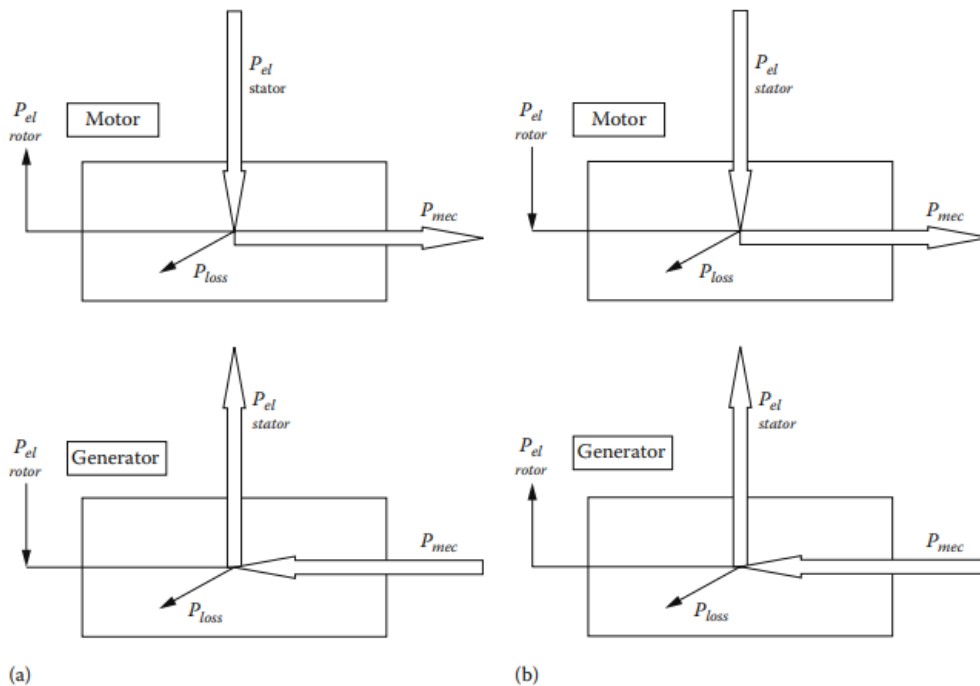
$$f_1 = np_1 + f_2; f_2 \diamond 0, \text{ and variable } f_1 = ct$$

Αρνητική συχνότητα σημαίνει ότι η ακολουθία των φάσεων του ρότορα είναι διαφορετική από την ακολουθία των φάσεων του στάτορα.

Τώρα, εάν η f_2 είναι μεταβλητή, το n μπορεί επίσης να είναι μεταβλητό εφόσον πληρούται η Εξίσωση. Δηλαδή, παρέχεται σταθερή συχνότητα f_1 στον στάτορα για

ρυθμιζόμενη ταχύτητα. Το σύστημα μπορεί να λειτουργεί στο ηλεκτρικό δίκτυο ή ακόμη και ως αυτόνομο, αν και με δυνατότητα επαναδιαμόρφωσης ελέγχου.

Όταν $f_2 > 0$, $n < f_1/p_1$, έχουμε υποσύγχρονη λειτουργία. Η περίπτωση για $f_2 < 0$, $n > f_1/p_1$ αντιστοιχεί σε υπερσύγχρονη λειτουργία. Η σύγχρονη λειτουργία λαμβάνει χώρα στο $f_2 = 0$, κάτι που δεν είναι εφικτό με τον μετατροπέα ρεύματος του ανορθωτή διόδου, αλλά είναι με τον αμφίδρομο μετατροπέα PWM



Εικόνα 5 Μοντέλα λειτουργίας [1]

Το σύστημα ανάκτησης ολίσθησης μπορεί να λειτουργήσει ως υποσύγχρονος ($n < f_1/p$) κινητήρας ή ως υπερσύγχρονη ($n > f_1/p$) γεννήτρια. Το WRIG με αμφίδρομο μετατροπέα PWM μπορεί να λειτουργήσει ως κινητήρας και γεννήτρια τόσο για υποσύγχρονη όσο και για υπερσύγχρονη ταχύτητα.

Οι κατευθύνσεις ροής ισχύος για ένα τέτοιο σύστημα φαίνονται στην (Εικόνα 5). Η βαθμολογία του μετατροπέα είναι ανάλογη με το εύρος ταχύτητας, δηλαδή με τη μέγιστη ολίσθηση S_{max} :

$$KVA_{rating} = K \frac{f_{2max}}{f_1} \times 100[\%]$$

όπου $K = 1-1,4$ ανάλογα με τις απαιτήσεις αέργου ισχύος από τον μετατροπέα.

Σημειώστε ότι όταν τοποθετείται στο κύκλωμα του ρότορα, μέσω δακτυλίων ολίσθησης και βουρτσών, η βαθμολογία του μετατροπέα είναι περίπου $|S_{max}|$ σε %. Όσο μεγαλύτερο είναι το εύρος στροφών, τόσο μεγαλύτερη είναι η βαθμολογία και το κόστος του μετατροπέα. Επίσης, ο πλήρως αμφίδρομος μετατροπέας PWM—ως σύστημα μετατροπέα πολλαπλών επιπέδων PWM πηγής τάσης back-to-back—μπορεί να παρέχει γρήγορη και συνεχή λειτουργία ελέγχου ενεργού και άεργου ισχύος αποσυνδεδεμένου ακόμη και σε συγχρονισμό ($f_2 = 0$, διέγερση ρότορα DC). Και μπορεί να εκτελέσει και την αυτοεκκίνηση. Η αυτοεκκίνηση πραγματοποιείται βραχυκυκλώνοντας πρώτα τον στάτορα, ο οποίος είχε προηγουμένως αποσυνδεθεί από το ηλεκτρικό δίκτυο, και τροφοδοτώντας τον ρότορα μέσω του μετατροπέα PWM στη λειτουργία υποσύγχρονης κίνησης. Ο ρότορας επιταχύνει μέχρι μια προδιαγεγραμμένη ταχύτητα που αντιστοιχεί σε $f_2 > f_1 (1 - S_{max})$. Στη συνέχεια ανοίγει η περιέλιξη του στάτορα και, με τον ρότορα να περιστρέφεται ελεύθερα, η τάση χωρίς φορτίο του στάτη, η σειρά και η συχνότητα ρυθμίζονται ώστε να συμπίπτουν με αυτές του δικτύου ισχύος, με επαρκή έλεγχο του μετατροπέα PWM. Τέλος, η περιέλιξη του στάτορα συνδέεται στο ηλεκτρικό δίκτυο χωρίς αξιοσημείωτες μεταβατικές αλλαγές.

Αυτό το είδος εκκίνησης με ρότορα απαιτεί $f_2 > (0.8-1) f_1$, πράγμα που σημαίνει ότι ο τυπικός κυκλομετατροπέας είναι εκτός θέματος. Επομένως, μόνο ο μετατροπέας πολλαπλών επιπέδων PWM τάσης back-to-back ή ο μετατροπέας μήτρας είναι κατάλληλοι για πλήρη εκμετάλλευση της οδήγησης/παραγωγής σε ταχύτητες δευτερεύουσας και υπερσύγχρονης ταχύτητας, τόσο τυπικό στις εφαρμογές αποθήκευσης αντλιών.

2. Επαγωγικές γεννήτριες τυλίγματος ρότορα

Οι γεννήτριες επαγωγής τυλίγματος ρότορα (WRIGs) παρέχονται με τριφασικές περιελίξεις στον ρότορα και στον στάτορα. Μπορούν να τροφοδοτούνται με ενέργεια και στους ακροδέκτες του ρότορα και του στάτη. Για τον λόγο αυτό, τέτοιες γεννήτριες ονομάζονται «γεννήτριες επαγωγής διπλής τροφοδοσίας» (DFIG) ή γεννήτριες επαγωγής διπλής εξόδου (DOIG).

Τα WRIG μπορούν να λειτουργήσουν και σε λειτουργίες παρακολούθησης και παραγωγής, υπό την προϋπόθεση ότι ο μετατροπέας ηλεκτρονικών ισχύος που τροφοδοτεί τα κυκλώματα του ρότορα, γενικά μέσω δακτυλίων ολίσθησης και βούρτσες, είναι ικανός να χειρίζεται την ισχύ και προς τις δύο κατευθύνσεις. Τα WRIG παρέχουν σταθερή ή ελεγχόμενη τάση V_s και συχνότητα f_1 ισχύ μέσω του στάτορα, ενώ ο ρότορας τροφοδοτείται μέσω ενός μετατροπέα στατικής ισχύος σε μεταβλητή τάση V_r και συχνότητα f_2 , το κύκλωμα του ρότορα μπορεί να απορροφά ή να παρέχει ηλεκτρική ισχύ. Καθώς ο αριθμός των πόλων και των περιελίξεων του στάτορα και του ρότορα είναι ο ίδιος σε σταθερή κατάσταση. Επομένως, σύμφωνα με το θεώρημα της συχνότητας, η ταχύτητα ω_m είναι η εξής:

$$\omega_m = \omega_1 \pm \omega_2; \quad \omega_m = \Omega_R \cdot p_1$$

όπου p_1 είναι ο αριθμός των ζευγών πόλων Ω_R είναι η μηχανική ταχύτητα ρότορα.

Το θετικό (+) πρόσημο στην Εξίσωση δείχνει ότι η ακολουθία φάσεων στον ρότορα είναι ίδια με αυτή του στάτορα και $\omega_m < \omega_1$, δηλαδή υποσύγχρονη λειτουργία.

Το αρνητικό πρόσημο (-) στην εξίσωση αντιστοιχεί σε μια ακολουθία αντίστροφης φάσης στον ρότορα όταν $\omega_m > \omega_1$, δηλαδή υπερσύγχρονη λειτουργία.

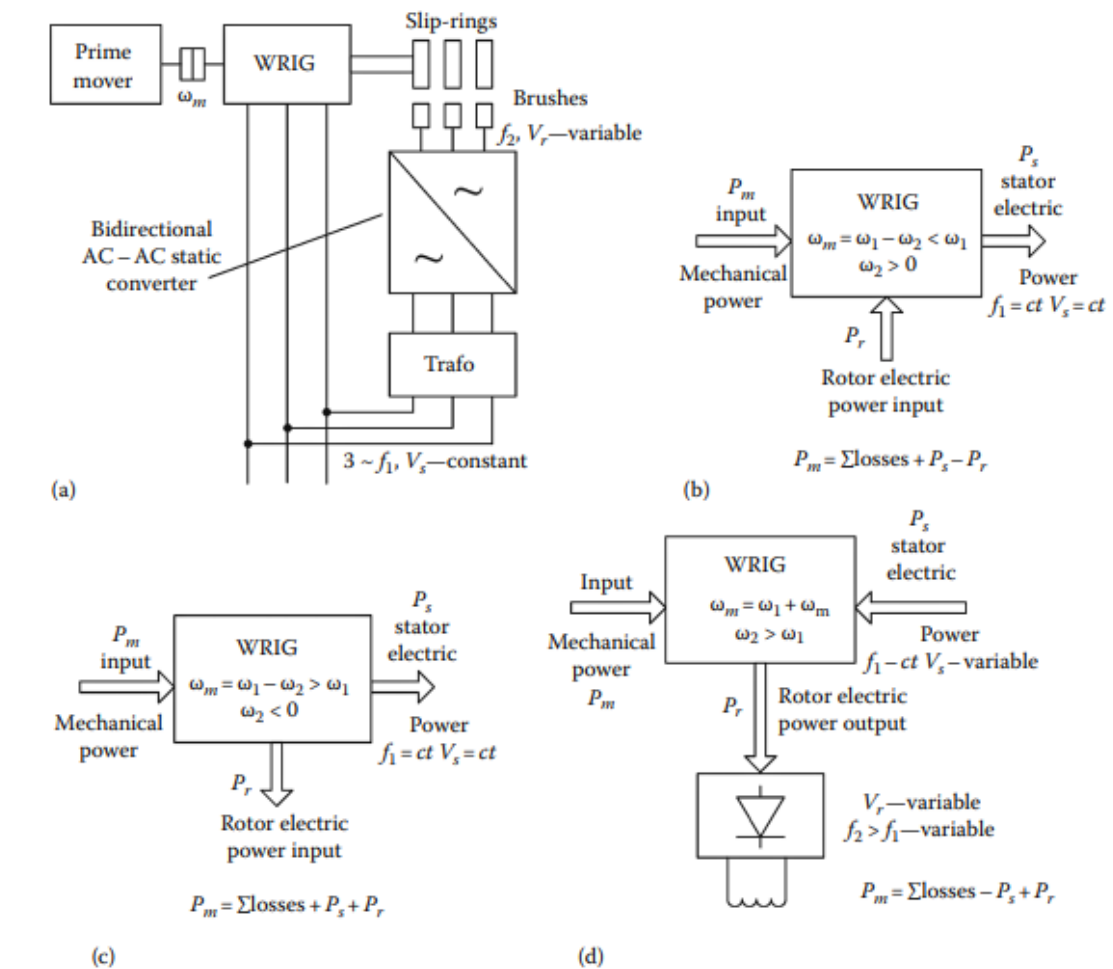
Για έξοδο σταθερής συχνότητας, η συχνότητα του ρότορα ω_2 πρέπει να τροποποιηθεί "σταδιακά" με τη διακύμανση της ταχύτητας. Με αυτόν τον τρόπο, η μεταβλητή ταχύτητα σε σταθερή συχνότητα (και τάση) μπορεί να διατηρηθεί ελέγχοντας την τάση, τη συχνότητα και τη σειρά φάσεων στο κύκλωμα του δρομέα.

Μπορεί να υποστηριχθεί ότι οι WRIG λειτουργούν ως σύγχρονες γεννήτριες (SGs) με τριφασική διέγερση εναλλασσόμενου ρεύματος (AC) στη συχνότητα ολίσθησης

(ρότορα) $\omega_2 = \omega_1 - \omega_m$. Ωστόσο, καθώς $\omega_1 \neq \omega_m$, ο στάτορας επάγει τάσεις στα κυκλώματα του δρομέα ακόμη και σε σταθερή κατάσταση, κάτι που δεν συμβαίνει στα συμβατικά SG. Ως αποτέλεσμα, προκύπτουν πρόσθετα εξαρτήματα ισχύος. Οι κύριοι τρόποι λειτουργίας του WRIG απεικονίζονται στην Εικόνα 6 (α έως δ) (βλ. Εικόνα 6α για βασική διαμόρφωση). Οι δύο πρώτοι τρόποι λειτουργίας (Εικόνα 6β και γ) αναφέρονται σε υποσύγχρονες και υπερσύγχρονες γεννήτριες που ορίστηκαν προηγουμένως. Για την οδήγηση με κινητήρα, το αντίστροφο ισχύει για το κύκλωμα του ρότορα. Επιπλέον, ο στάτορας απορροφά ενεργό ισχύ για την οδήγηση. Η ολίσθηση S ορίζεται ως εξής:

$$S = \frac{\omega_2}{\omega_1} > 0; \text{ subsynchronous operation}$$

$$\omega_1 < 0; \text{ supersynchronous operation}$$



Εικόνα 6 Βασικά μοντέλα λειτουργίας [1]

Καθώς τα WRIG λειτουργούν, γενικά, για $\omega_2 \neq 0$ ($S \neq 0$), διατηρούν τα χαρακτηριστικά μιας επαγωγικής μηχανής. Η κύρια ενεργή ισχύς εξόδου παρέχεται μέσω του στάτορα. Ωστόσο, σε υπερσύγχρονη λειτουργία, ένα μεγάλο μέρος, σχετικά με τις δυνάμεις του στάτορα ολίσθησης (SPs), παρέχεται μέσω του κυκλώματος του δρομέα. Με περιορισμένο εύρος διακύμανσης ταχύτητας, δηλαδή από S_{\max} σε $-S_{\max}$, η βαθμολογία στατικού μετατροπέα από την πλευρά του ρότορα—για ικανότητα μηδενικής άεργου ισχύος στην πλευρά του ρότορα—θα είναι $P_{\text{conv}} \approx |S_{\max}|P_s$. Με το S_{\max} συνήθως ίσο με $\pm 0,2$ έως $0,25$, οι ονομασίες και το κόστος του μετατροπέα στατικής ισχύος αντιστοιχούν στο 20%-25% της ισχύος εξόδου που παρέχεται από τον στάτορα.

Στη μέγιστη ταχύτητα, το WRIG θα προσφέρει αυξημένη ηλεκτρική ισχύ, P_{\max} :

$$P_{\max} = P_s + P_{\text{max}} = P_s + |S_{\max}|P_s$$

με το WRIG σχεδιασμένο στο P_s για ταχύτητα $\omega_m = \omega_1$. Η αυξημένη ισχύς παρέχεται σε υψηλότερη από την ονομαστική ταχύτητα:

$$\omega_{\text{mmax}} = \omega_1 (1 + |S_{\max}|)$$

Κατά συνέπεια, το WRIG έχει σχεδιαστεί ηλεκτρικά για P_s σε $\omega_m = \omega_1$, αλλά μηχανικά σε ω_{mmax} και P_{\max} .

Η ικανότητα των WRIG να παρέχουν ισχύ με μεταβλητή ταχύτητα αλλά με σταθερή τάση και συχνότητα αντιπροσωπεύει ένα πλεονέκτημα στην παροχή μεγαλύτερης ευελιξίας στη μετατροπή ισχύος και επίσης καλύτερη σταθερότητα στον έλεγχο συχνότητας και τάσης στα συστήματα ισχύος στα οποία είναι συνδεδεμένες τέτοιες γεννήτριες.

Η παροχή άεργου ισχύος από τα WRIG εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ικανότητα του μετατροπέα από την πλευρά του ρότορα να την παρέχει. Όταν ο μετατροπέας λειτουργεί με συντελεστή ισχύος μονάδας που παρέχεται από την πλευρά της πηγής, η άεργος ισχύς στο μηχάνημα πρέπει να προέρχεται από τον μετατροπέα από την πλευρά του ρότορα. Ωστόσο, μια τέτοια ικανότητα πληρώνεται από τις αυξημένες τιμές του μετατροπέα από την πλευρά του ρότορα. Καθώς αυτό σημαίνει αυξημένο κόστος μετατροπέα, γενικά, τα WRIG είναι επαρκή για να λειτουργούν με συντελεστή ισχύος μονάδας σε πλήρες φορτίο στην πλευρά του στάτορα.

Μεγάλες εκλύσεις άεργου ισχύος στο σύστημα ισχύος πρέπει ακόμη να παρέχονται από υπάρχοντα SG ή από WRIG που λειτουργούν σε συγχρονισμό ($S = 0$, $\omega_2 = 0$) με τους μετατροπείς τάσης διαμορφωμένου πλάτους παλμού back-to-back (PWM) που είναι συνδεδεμένοι και ο ρότορας ελέγχεται επαρκώς για το πεδίο εφαρμογής. Οι μετατροπές αιολικής ενέργειας και μικρές μονάδες υδροενέργειας σε 1 μεγαβάτ (MW) και άνω ανά μονάδα απαιτούν μεταβλητή ταχύτητα για την αξιοποίηση του μέγιστου των αποθεμάτων ενέργειας και τη βελτίωση των ορίων απόδοσης και σταθερότητας.

Οι μονάδες υψηλής ισχύος σε υδροηλεκτρικούς σταθμούς αποθήκευσης αντλιών (400 MW [11]) και θερμοηλεκτρικούς σταθμούς με WRIG παρέχουν επιπλέον ευελιξία για τα ολοένα και πιο καταπονημένα συστήματα κατανεμημένης ισχύος του εγγύς μέλλοντος. Ακόμη και τα υπάρχοντα (παλιά) SG μπορούν να τοποθετηθούν εκ των υστέρων σε WRIG αλλάζοντας τον ρότορα και τον έλεγχο του μετατροπέα στατικής ισχύος. Το WRIG μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ενέργειας αποκλειστικά στην πλευρά του ρότορα για φορτία ανορθωτή (Εικόνα 6d). Για τον έλεγχο της συνεχούς τάσης (ή του συνεχούς ρεύματος [DC]) στο φορτίο, η τάση του στάτη ελέγχεται, στη σταθερή συχνότητα ω_1 , από έναν τριφασικό εναλλάκτη AC χαμηλού κόστους. Καθώς η ταχύτητα αυξάνεται, η ηλικία της τάσης του στάτη πρέπει να μειωθεί έτσι ώστε το ρεύμα στο φορτίο συνεχούς ρεύματος που είναι συνδεδεμένο στον ρότορα ($\omega_2 = \omega_1 + \omega_m$) να διατηρείται σταθερό.

Εάν το μηχάνημα έχει μεγάλο αριθμό πόλων ($2p_1 = 6, 8, 12$), τότε η ισχύς εισόδου διέγερσης εναλλασσόμενου ρεύματος του στάτη γίνεται μάλλον χαμηλή, καθώς το μεγαλύτερο μέρος της ηλεκτρικής ισχύος εξόδου προέρχεται από τον άξονα (μέσω κίνησης). Μια τέτοια διαμόρφωση είναι επαρκής για διεγέρτες χωρίς ψήκτρες που απαιτούνται για SM ή για SG, όπου απαιτείται ρεύμα πεδίου από μηδενική ταχύτητα, δηλαδή όταν χρησιμοποιούνται μετατροπείς πλήρους ισχύος στον στάτορα των αντίστοιχων SM ή SG. Με $2p_1 = 8$, $n = 1500$ rpm και $f_1 = 50$ Hz, η συχνότητα της εξόδου του ρότορα $f_2 = f_1 + np_1 = 50 + (1500/60) \times 4 = 150$ Hz.

Μια τέτοια συχνότητα είναι πρακτική με τυπικές ελασματοποιήσεις πυρήνων σιδήρου και μειώνει το περιεχόμενο σε αρμονικές του ρεύματος φορτίου που διορθώνεται με έξοδο.

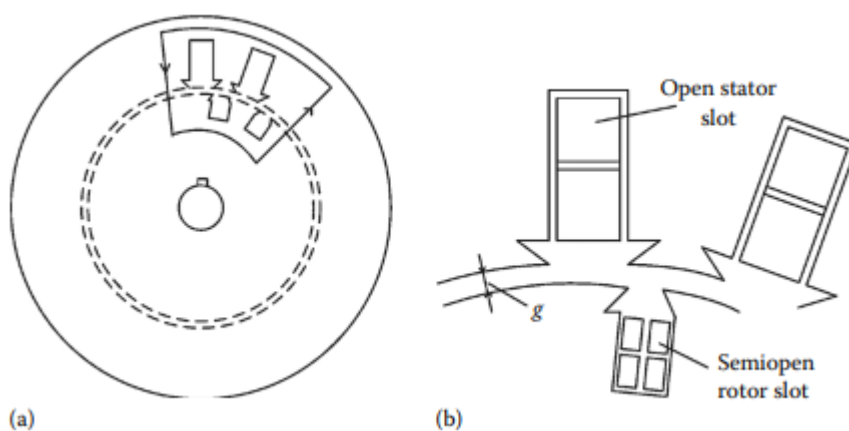
2.1 Κατασκευή

Η τοπολογία WRIG περιέχει τα ακόλουθα κύρια μέρη:

- Πυρήνας ελασματοποιημένος με στάτορα με ομοιόμορφα κατανεμημένες υποδοχές N_s .
- Πλαστικοποιημένος πυρήνας ρότορα με N_r ομοιόμορφα κατανεμημένες υποδοχές.
- Τριφασική περιέλιξη στάτη τοποθετημένη σε μονωμένες εγκοπές.
- Άξονας ρότορα.
- Πλαίσιο στάτορα με ρουλεμάν.
- Χάλκινοι δακτύλιοι ολίσθησης ρότορα και (τοποθετημένες) βούρτσες στάτορα για τη μεταφορά ισχύος σε (από) περιελίξεις ρότορα.
- Τριφασική περιέλιξη ρότορα AC σε μονωμένες υποδοχές ρότορα.
- Σύστημα ψύξης.

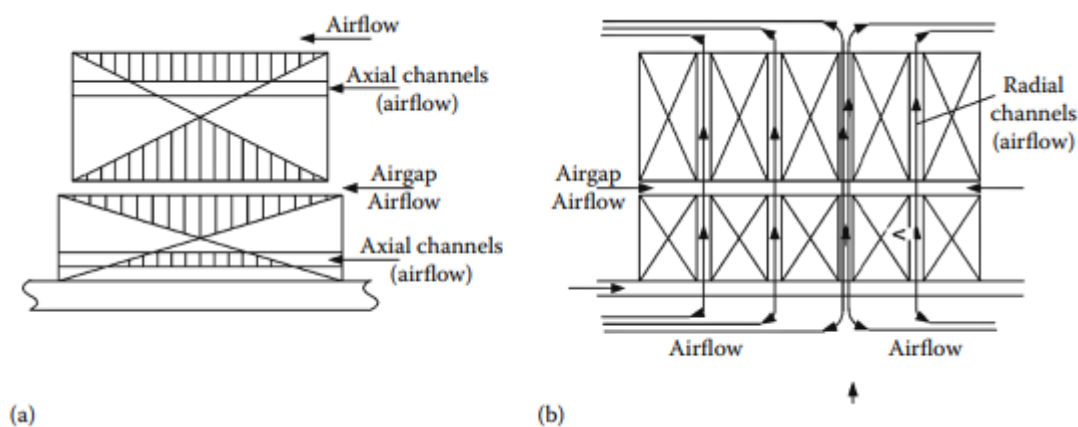
Μαγνητικοί Πυρήνες

Οι πυρήνες του στάτορα και του ρότορα είναι κατασκευασμένοι από λεπτό στρώμα (συνήθως 0,5 mm) μη προσανατολισμένου κόκκου από χάλυβα πυριτίου εφοδιασμένο με ομοιόμορφες σχισμές μέσω σφράγισης (Εικόνα 7a). Για να διατηρείται το διάκενο εύλογα μικρό, χωρίς να υπάρχουν μεγάλες απώλειες δινορευμάτων από τις αρμονικές της επιφάνειας του πυρήνα, μόνο οι υποδοχές στη μία πλευρά θα πρέπει να είναι ανοιχτές. Στην άλλη πλευρά του διακένου αέρα, θα πρέπει να είναι μισοκλειστά ή μισά ανοιχτά (Εικόνα 7b).



Εικόνα 7 Διαμορφώσεις στάτορα και ρότορα [1]

Αν και, γενικά, η χρήση συστημάτων ακτινικού-αξονικού αερισμού οδηγεί στην παρουσία στοιχειωδών στοιβών ακτινικών καναλιών μήκους μεταξύ 60 και 100 mm, τουλάχιστον για ισχύ έως 2–3 MW, είναι εφικτός ο αξονικός αερισμός με στοίβες απλής πλαστικοποίησης. (Εικόνα 8a και b).



Εικόνα 8 Δομές στάτορα και ρότορα [1]

Καθώς το διάκενο είναι ελαφρώς αυξημένο σε σύγκριση με τους τυπικούς επαγωγικούς κινητήρες, η αξονική ροή αέρα μέσω του διάκενου διευκολύνεται περαιτέρω. Τα αξονικά κανάλια (Εικόνα 8a) στους ζυγούς του στάτορα και του ρότορα (πίσω από την περιοχή της σχισμής) παίζουν βασικό ρόλο στην ψύξη του στάτη και του ρότορα, όπως και τα ακτινικά κανάλια (Εικόνα 8b) για τον ακτινωτό-αξονικό αερισμό. Τα ακτινικά κανάλια, ωστόσο, είναι λιγότερο αποδοτικά, καθώς «ταξιδεύονται» από τις περιελίξεις. Έτσι, πρόσθετη αντίσταση φάσης και επαγωγή διαρροής προστίθενται από τις ζώνες περιελίξης στις συνεισφορές ακτινωτού καναλιού. Σε πολύ μεγάλες ή μεγάλες μηχανές στοίβας, η ακτινική-αξονική ψύξη μπορεί να είναι αναπόφευκτη. αλλά όπως εξηγήθηκε προηγουμένως, κάτω από τα 3 MW, η αξονική ψύξη σε πυρήνες unistack, που ήδη χρησιμοποιούνται για βιομηχανική χρήση για επαγωγικούς κινητήρες, φαίνεται να είναι ο τρόπος του μέλλοντος.

Περιελίξεις και οι μαγνητοκινητικές τους δυνάμεις

Οι τριφασικές περιελίξεις του στάτορα και του ρότορα είναι κατ' αρχήν παρόμοιες. Οι τριφασικές περιελίξεις είναι κατασκευασμένες για να παρέχουν κινούμενες μαγνητοκινητικές δυνάμεις (mmfs) ικανές να παράγουν ένα κινούμενο μαγνητικό πεδίο στο ομοιόμορφο διάκενο (τα ανοίγματα σχισμής παραμελούνται ή λαμβάνονται υπόψη μέσω του συντελεστή Carter $K_C = 1,02-1,5$:

$$B_z(x,t) = \frac{\mu_0 F_{s,r}(x,t)}{gK_C(1+K_s)}$$

όπου

- $F_{s,r}(x,t)$ είναι ίσο με τα mmfs ανά πόλο που παράγονται είτε από περιελίξεις στάτορα ή ρότορα
- g είναι το διάκενο
- K_C είναι ο συντελεστής Carter για να ληφθεί υπόψη η αύξηση του διακένου λόγω των ανοιγμάτων σχισμής
- K_s είναι η συμβολή του πυρήνα σιδήρου στο ισοδύναμο μαγνητικό απροθυμίας της κύριας διαδρομής ροής (βλ. Εικόνα 8a).

Για να δημιουργηθεί ένα πεδίο κινούμενου διακένου, τα mmf του στάτορα και του ρότορα, που φαίνονται από τον στάτορα και τον ρότορα, αντίστοιχα, πρέπει να είναι ως εξής:

$$F_s(\theta_s, t) = F_{1s} \cos(p_1 \theta_s - \omega_1 t)$$

$$F_r(\theta_r, t) = F_{1r} \cos(p_1 \theta_r \pm \omega_2 t)$$

όπου p_1 είναι ο αριθμός των ηλεκτρικών περιόδων του κύματος μαγνητικού πεδίου στο διάκενο ή των ζευγών πόλων. Ο ρότορας mmf παράγεται από ρεύματα συχνότητας ω_2 .

Σε σταθερή ταχύτητα, οι γεωμετρικές γωνίες του δρομέα και του στάτορα σχετίζονται με

$$p_1 \theta_r = p_1 \theta_s - \omega_r t + \gamma; \quad \omega_r = \Omega_r \cdot p_1; \quad p_1 \theta_s = \omega_1 t$$

όπου ω_r είναι η ταχύτητα του δρομέα σε ακτίνια ανά δευτερόλεπτο (rad/s). Κατά συνέπεια, προκύπτει η $F_r(\theta_s, t)$.

$$F_r(\theta_s, t) = F_{1r} \cos[p_1 \theta_s - (\omega_r \pm \omega_2)t + \gamma]$$

Η μέση ηλεκτρομαγνητική ροπή και ισχύς ανά ηλεκτρική περίοδο είναι μη μηδενική μόνο εάν τα δύο mmfs είναι ακίνητα μεταξύ τους. Αυτό είναι,

$$\omega_1 = \omega_r \pm \omega_2; \quad S = \frac{\omega_2}{\omega_1}$$

Το θετικό πρόσημο (+) χρησιμοποιείται όταν $\omega_r < \omega_1$, και έτσι τα κύματα mmf του ρότορα και του στάτη περιστρέφονται προς τη θετική κατεύθυνση. Το αρνητικό πρόσημο (-), που χρησιμοποιείται όταν $\omega_r > \omega_1$, αναφέρεται στην περίπτωση που το κύμα mmf του ρότορα κινείται προς την αντίθετη κατεύθυνση από αυτή του στάτορα. Επιπλέον, η ροπή είναι μη μηδενική όταν η γωνία $\gamma \neq 0$, δηλαδή όταν τα δύο mmfs μετατοπίζονται κατά φάση.

Για να παραχθεί ένα διακινούμενο mmf, τρεις φάσεις με υστέρηση χώρου κατά 120° (ηλεκτρικό), πρέπει να τροφοδοτούνται από ρεύματα εναλλασσόμενου ρεύματος με 120° (ηλεκτρικές) γωνίες χρονικής υστέρησης μεταξύ τους.

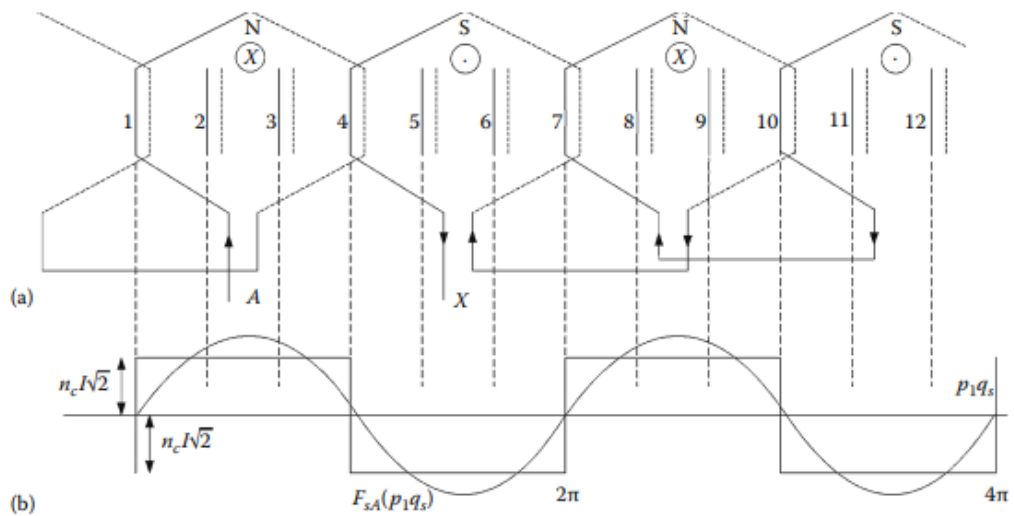
Έτσι, όλες οι τριφασικές περιελίξεις για, π.χ., τη μέγιστη τιμή του ρεύματος, θα πρέπει ανεξάρτητα να παράγουν ένα ημιτονοειδές χωρικό mmf

$$(F_{A,B,C}(\theta_s, t))_{t=0} = \frac{2}{3} F_1 \cos\left(p_1 \theta_s - (i-1) \frac{2\pi}{3}\right)$$

Κάθε φάση mmf πρέπει να παράγει $2p_1$ ημιπεριόδους κατά μήκος μιας μηχανικής περιόδου. Με ένα μόνο πηνίο ανά πόλο ανά φάση, θα υπήρχαν $2p_1$ πηνία ανά φάση και $2p_1$ σχισμές ανά φάση εάν κάθε πηνίο καταλαμβάνει το μισό της σχισμής (Εικόνα 9a). Από την ορθογώνια κατανομή της φάσης mmf (Εικόνες 9a και b και 8b), εξάγεται ένα θεμελιώδες στοιχείο

$$F_{\alpha A}(p_1, \theta_s) = \frac{4}{\pi} n_c I \sqrt{2} \cos p_1 \theta_s; \quad n_c \text{—turns/coil}$$

Το περιεχόμενο αρμονικών της φάσης mmf στην Εικόνα 9b είναι ελάχιστα αποδεκτό, αλλά περισσότερα βήματα στην κατανομή του (περισσότερες αυλακώσεις) και το πηνίο χορδής θα μείωναν δραστικά αυτές τις αρμονικές του χώρου (Εικόνα 10).



Εικόνα 9 Βασικό τριφασικό τύλιγμα [2]

Για το τύλιγμα 2 πόλων 24 σχισμών με πηνία χορδής (ανάπτυξη πηνίου/ βήμα πόλου = 10/12), ο αριθμός των βημάτων στη φάση mmf είναι μεγαλύτερος και έτσι οι αρμονικές μειώνονται (Εικόνα 10). Για το θεμελιώδες στοιχείο (με βάση την Εικόνα 9b), λαμβάνεται η έκφραση του mmf ανά πόλο και φάση:

$$F_{sA1} = \frac{2W_1 k_{w1} K_{y1} \cdot I \sqrt{2}}{\pi p_1}; \quad W_1 \text{—turns/phase}$$

Για το διαστημικό αρμονικό ν , με παρόμοιο τρόπο

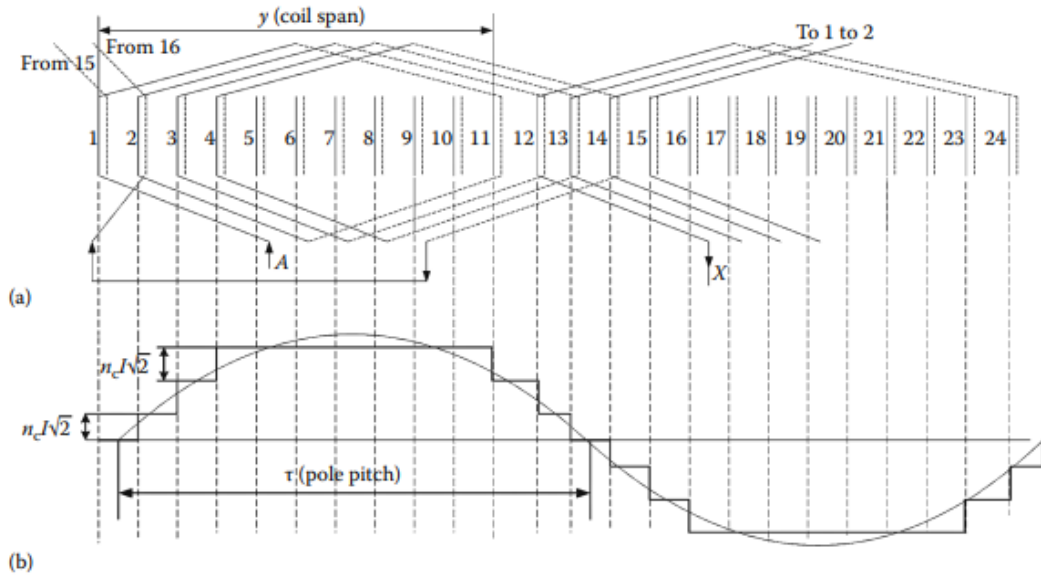
$$F_{sA\nu} = \frac{2W_1 K_{d\nu} K_{y\nu} \cdot I \sqrt{2}}{\nu p_1}$$

με $K_{d\nu}$ και $K_{y\nu}$ γνωστά ως παράγοντες κατανομής και συγχορδίας

$$K_{d\nu} = \frac{\sin \nu \pi / 6}{q \sin(\nu \pi / 6q)} \quad K_{y\nu} = \sin \frac{\nu y \pi}{\tau 2}$$

όπου q είναι ο αριθμός των θυρίδων ανά πόλο ανά φάση

$$q_{s,r} = \frac{N_{s,r}}{2p_1 m_1} = \frac{N_{s,r}}{6p_1}$$



Εικόνα 10 Διπολικό τύλιγμα 24 σχισμών [2]

Μόνο οι περιττές αρμονικές υπάρχουν, γενικά, καθώς ο θετικός και ο αρνητικός πόλος mmf είναι πανομοιότυποι, ενώ τα πολλαπλάσια των τριών αρμονικών είναι μηδέν για συμμετρικά ρεύματα (ίσο πλάτος, μετατόπιση φάσης 120°): $\nu = 1, 5, 7, 11, 13, 17, 19, \dots$

Έχει αποδειχθεί ότι οι αρμονικές 7, 13 και 19 είναι θετικές και οι 5, 11, 17, ... είναι αρνητικές ως προς την ακολουθία. Προσθέτοντας τις συνεισφορές των τριών φάσεων, λαμβάνουμε το πλάτος mmf ανά πόλο F_{sv} :

$$F_{sv} = \frac{3}{2} F_{sAv} = \frac{3W_l K_{dv} K_{pv} I \sqrt{2}}{\nu p_l}$$

Παρόμοιες εκφράσεις μπορούν να προκύψουν για τον ρότορα. Για να αποφευχθούν οι παρασιτικές σύγχρονες ροπές, ο αριθμός των σχισμών του στάτορα και του ρότορα πρέπει να διαφέρει:

$$N_s - N_r; \quad q_s - q_r$$

Οι αρμονικές πρέπει να αντιμετωπίζονται προσεκτικά, καθώς η ακτινική μαγνητική έλξη λόγω της εκκεντρότητας του δρομέα τείνει να είναι μεγαλύτερη στο WRIG από ότι στις γεννήτριες επαγωγής ρότορα κλωβού (IGs) [12].

Γενικά, τα WRIG τείνουν να κατασκευάζονται με ακέραιο q τόσο στον στάτορα όσο και στον ρότορα. Επιπλέον, οι διαδρομές ρεύματος παράλληλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μείωση των διατομών του στοιχειώδους αγωγού. Τα φαινόμενα συχνότητας (δέρμα) πρέπει να μειωθούν, ειδικά σε μεγάλα WRIG, με περιελίξεις κατασκευασμένες με ράβδο όπου μπορεί να είναι απαραίτητη η μεταφορά (μπάρα Roebel).

Τέλος, οι ακραίες συνδέσεις της περιέλιξης του ρότορα πρέπει να προστατεύονται από φυγόκεντρες δυνάμεις μέσω επαρκών επιδέσμων, όπως για τα κυλινδρικά SG του ρότορα.

Όποτε είναι δυνατόν, η ονομαστική τάση (σχεδιαστική) της περιέλιξης του ρότορα πρέπει να είναι ίση με αυτή του στάτορα, όπως απαιτείται στον έλεγχο του μετατροπέα στατικής ισχύος από την πλευρά του ρότορα στη μέγιστη ολίσθηση. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να αποφευχθεί ένας μετασχηματιστής προσαρμογής τάσης στην πλευρά τροφοδοσίας του στατικού μετατροπέα. Συνεπώς, ο λόγος στροφών ρότορα προς στάτορα έχει ως εξής:

$$a_{rs} \cong \frac{W_r K_{q1}^r K_{d1}^r}{W_s K_{q1}^s K_{d1}^s} \cong \frac{1}{|S_{\max}|}$$

Πρέπει να δίνεται προσοχή σε τέτοιους σχεδιασμούς ώστε να αποφεύγεται η σύνδεση του στάτορα στο ηλεκτρικό δίκτυο πλήρους τάσης με μηδενική ταχύτητα ($S = 1$), καθώς η τάση που προκαλείται στις περιελίξεις του ρότορα θα είναι πολλές φορές μεγαλύτερη από την ονομαστική, θέτοντας σε κίνδυνο την περιέλιξη μόνωσης του ρότορα και τον μετατροπέα στατικής ισχύος από την πλευρά του ρότορα.

Εάν απαιτείται εκκίνηση ως κινητήρας (για αποθήκευση αντλίας κ.λ.π.), γίνεται από τον ρότορα, με τον στάτορα βραχυκυκλωμένο, χρησιμοποιώντας τις δυνατότητες αμφίδρομης ροής ισχύος από την πλευρά του ρότορα. Στη συνέχεια, σε συγκεκριμένη ταχύτητα $\omega_{\min} > \omega_m(1 - |S_{\max}|)$, ανοίγει το κύκλωμα του στάτη.

Το μηχάνημα μετακινείται ενώ το χειριστήριο προετοιμάζει τις συνθήκες συγχρονισμού χρησιμοποιώντας τον μετατροπέα στον ρότορα για την παραγωγή επαρκών τάσεων στον στάτορα. Μετά τον συγχρονισμό, η οδήγηση (για αποθήκευση αντλίας) μπορεί να πραγματοποιηθεί με ασφάλεια.

Στα WRIG, μια σημαντική ποσότητα ισχύος (έως $|S_{max}| \cdot P_{sN}$) μεταφέρεται μέσα και έξω από τον ρότορα ηλεκτρικά μέσω δακτυλίων ολίσθησης και βουρτσών. Με $|S_{max}| = 0,20$, είναι περίπου το 20% της ονομαστικής ισχύος του μηχανήματος. Θυμηθείτε ότι στα SG, η μεταφορά ισχύος διέγερσης στον ρότορα με δακτυλίου ολίσθησης και βούρτσες είναι περίπου 5-10 φορές μικρότερη.

Το ερώτημα είναι εάν αυτά τα πολυμεγαβάτ θα μπορούσαν να μεταφερθούν μέσω δακτυλίων ολίσθησης και βουρτσών στον ρότορα σε WRIG μεγάλης ισχύος. Η απάντηση φαίνεται να είναι «ναι», καθώς οι μονάδες 200 και 400 MW λειτουργούν για περισσότερα από 5 χρόνια με μεταφορά ισχύος έως και 30 MW στον ρότορα.

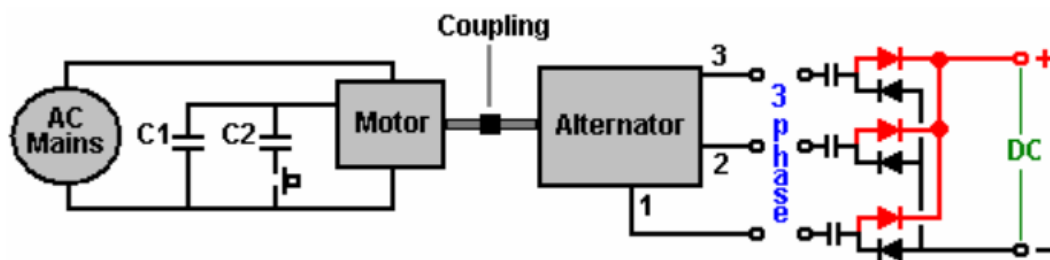
Σε αντίθεση με τις γεννήτριες συνεχούς, τα WRIG πρέπει να χρησιμοποιούν υψηλότερη τάση για τη μεταφορά ισχύος στον ρότορα για να μειώσουν το ρεύμα δακτυλίου ολίσθησης. Οι μετατροπείς θυρίστορ (MCT) με ελεγχόμενο με θυρίστορ PWM MOSFET πολλαπλών επιπέδων πηγής τάσης είναι επαρκείς για το αντικείμενο της συζήτησής μας εδώ. Εάν η τάση του ρότορα αυξηθεί στο εύρος των κιλοβολτ (και άνω), οι διατάξεις μόνωσης για τους δακτυλίου ολίσθησης του ρότορα και στην πλευρά του πλαισίου της βούρτσας είναι πολύ πιο απαιτητικές. Σημειώστε ότι οι διεγέρτες χωρίς ψήκτρες SG που βασίζονται στην αρχή WRIG με ανορθωμένη έξοδο ρότορα δεν χρειάζονται δακτυλίου ολίσθησης και βούρτσες.

Σε WRIG με μεγάλη τάση στάτη ($V_n = 18 \text{ kV}$, 400 MW), ίσως είναι πιο πρακτικό να χρησιμοποιηθεί χαμηλότερη ονομαστική (μέγιστη) τάση στον ρότορα, δηλαδή έως 4,5 kV, και στη συνέχεια να χρησιμοποιηθεί μια τάση ανύψωσης προσαρμογής μετασχηματιστή για να ταιριάζει με την τάση του μετατροπέα στατικής ισχύος (4,5 kV) που συνδέεται με τον ρότορα με την τοπική τάση (στάτορα) (δηλαδή, 18 kV). Μια τέτοια μείωση της τάσης μπορεί να μειώσει το ενδεχόμενο κόστος του μετατροπέα στατικής ισχύος τόσο πολύ ώστε να υπεραντισταθμίσει το κόστος του προστιθέμενου μετασχηματιστή.

3. Το σύστημα ενίσχυσης ισχύος «RotoVerter».

Υπάρχουν τρεις κατηγορίες συστημάτων παλμικής ενίσχυσης σύμφωνα με την βιβλιογραφία [15]. Αυτά είναι συστήματα παλμικής μετάδοσης κίνησης, παλμικά συστήματα με άντληση ενέργειας και παλμικά συστήματα ελεύθερης βαρύτητας.

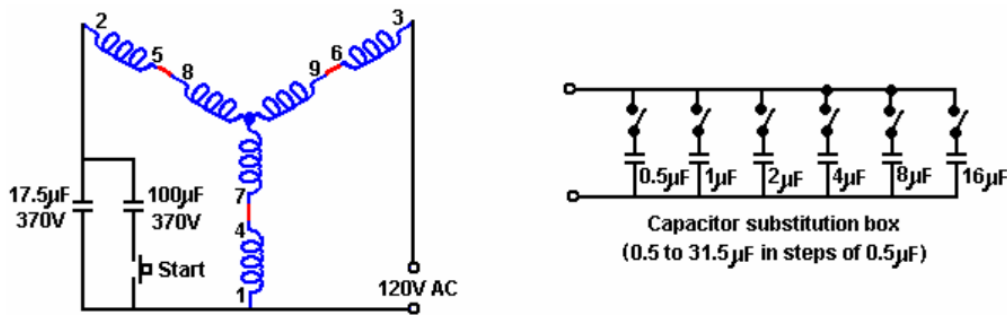
Το σύστημα RotoVerter, που σχεδιάστηκε από τον Hector D. Peres Torres από το Πουέρτο Ρίκο, και το οποίο έχει αναπαραχθεί από αρκετούς ανεξάρτητους ερευνητές, παράγοντας τουλάχιστον 10 φορές περισσότερη ισχύ εξόδου από την ισχύ εισόδου, χρησιμοποιεί τυπικούς τριφασικούς ηλεκτρικούς κινητήρες αντί για μαγνήτες. Αυτό το σύστημα έχει αναπαραχθεί από αρκετούς ανεξάρτητους ερευνητές και παράγει σημαντικό κέρδος ισχύος κατά την οδήγηση συσκευών που χρειάζονται ηλεκτρικό κινητήρα για να λειτουργήσουν.



Εικόνα 11 Γενική διάταξη του συστήματος RotoVerter [15]

Η συσκευή εξόδου είναι μια γεννήτρια εναλλασσόμενου που κινείται από έναν τριφασικό κινητήρα 3 HP έως 7,5 HP που τροφοδοτείται από το δίκτυο (και οι δύο αυτές συσκευές μπορούν να είναι τυπικοί ασύγχρονοι κινητήρες «σκιουροκλωβού»).

Ο κινητήρας που δίνει την κίνηση λειτουργεί με εξαιρετικά μη τυπικό τρόπο. Είναι ένας κινητήρας 240V με έξι περιελίξεις όπως φαίνεται παρακάτω (Εικόνα 12). Αυτές οι περιελίξεις συνδέονται σε σειρά για να δημιουργήσουν μια διάταξη η οποία θα απαιτούσε 480 V για να κινηθεί, αλλά αντ' αυτού, τροφοδοτείται με 120 V μονοφασικού AC. Η τάση εισόδου για τον κινητήρα πρέπει πάντα να είναι το ένα τέταρτο της ονομαστικής τάσης λειτουργίας του. Μια εικονική τρίτη φάση δημιουργείται χρησιμοποιώντας έναν πυκνωτή που δημιουργεί μια μετατόπιση φάσης 90° μοιρών μεταξύ της εφαρμοζόμενης τάσης και του ρεύματος.



Εικόνα 12 Ηλεκτρικό μοντέλο κινητήρα [15]

Ο στόχος είναι να συντονιστούν οι περιελίξεις του κινητήρα για να παρέχουν λειτουργία συντονισμού. Ένας πυκνωτής εκκίνησης συνδέεται στο κύκλωμα χρησιμοποιώντας τον διακόπτη του κουμπιού που φαίνεται (Εικόνα 12 αριστερά), για να ανεβάσει την ταχύτητα του κινητήρα, οπότε ο διακόπτης απελευθερώνεται, επιτρέποντας στον κινητήρα να λειτουργεί με έναν πολύ μικρότερο πυκνωτή στη θέση του. Αν και ο πυκνωτής λειτουργίας εμφανίζεται στην Εικόνα 12 ως σταθερή τιμή, στην πράξη, αυτός ο πυκνωτής πρέπει να ρυθμίζεται ενώ ο κινητήρας λειτουργεί, για να παρέχει λειτουργία συντονισμού.

Για αυτό κατασκευάζεται συνήθως μια συστοιχία πυκνωτών, όπου κάθε πυκνωτής έχει το δικό του διακόπτη ON/OFF, έτσι ώστε διαφορετικοί συνδυασμοί κλεισίματος διακόπτη να αποδίδουν ένα ευρύ φάσμα διαφορετικών συνολικών τιμών χωρητικότητας. Με τους έξι πυκνωτές που φαίνονται παραπάνω (Εικόνα 12 δεξιά), οποιαδήποτε τιμή από 0,5 microfarad έως 31,5µF μπορεί να επιτευχθεί γρήγορα ώστε να βρεθεί η σωστή τιμή συντονισμού. Αυτές οι τιμές επιτρέπουν με συνδυασμό τους τιμές 0,5, 1,0, 1,5, 2,0, 2,5, 3,0, 3,5, µF επιλέγοντας τους κατάλληλους διακόπτες να είναι ON ή OFF. Στην περίπτωση που απαιτείται μια τιμή μεγαλύτερη από αυτή, τότε συνδέεται ένας πυκνωτής 32 µF στη θέση του συνδυασμού και συνδέεται το κουτί αντικατάστασης κατά μήκος του για να επιτευχθούν υψηλότερες τιμές χωρητικότητας, βήμα προς βήμα ώστε να βρεθεί η βέλτιστη τιμή του πυκνωτή που θα χρησιμοποιηθεί.

Οι πυκνωτές πρέπει να είναι ισχυρές, γεμάτες λάδι μονάδες με υψηλή ονομαστική τάση - με άλλα λόγια, μεγάλου μεγέθους και βάρους και μεγάλου κόστους. Η ισχύς που χρησιμοποιείται σε ένα από αυτά τα συστήματα είναι μεγάλη και η εγκατάσταση ενός εμπεριέχει κατά συνέπεια κάποιο βαθμό φυσικού κινδύνου. Αυτά τα συστήματα έχουν ρυθμιστεί να είναι αυτοτροφοδοτούμενα, αλλά αυτό δεν συνιστάται, πιθανώς λόγω της

πιθανότητας διαφυγής, με την ισχύ εξόδου να αυξάνεται γρήγορα και να αυξάνεται η ισχύς εισόδου μέχρι να καεί ο κινητήρας.

Περαιτέρω, μπορούν να αναφερθούν κάποιες πιο πρακτικές κατασκευαστικές λεπτομέρειες για αυτό το σύστημα που αναφέρονται στην βιβλιογραφία [9-15]. Ο κινητήρας (και η γεννήτρια εναλλασσόμενου) που θεωρείται ο καλύτερος για αυτήν την εφαρμογή είναι η μονάδα 7,5 ίππων "Baldor EM3770T". Ο αριθμός προδιαγραφών είναι 07H002X790 και πρόκειται για συσκευή 230/460 volts 60Hz 3-φασική, 19/9,5 amp, 1770 rpm, συντελεστής ισχύος 0.81.

Η ακραία πλάκα του κινητήρα μετάδοσης κίνησης πρέπει να αφαιρεθεί και να ανασηκωθεί ο ρότορας. Χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή καθώς πραγματοποιείται η εργασία, καθώς ο ρότορας είναι βαρύς και δεν πρέπει να σύρεται κατά μήκος των περιελίξεων του στάτορα, καθώς κάτι τέτοιο θα τους βλάψει (Εικόνα 13).



Εικόνα 13 Αφαίρεση του ρότορα [15]

Στη συνέχεια αφαιρείται η δεύτερη ακραία πλάκα και τοποθετείται στο αντίθετο άκρο του περιβλήματος του στάτη:



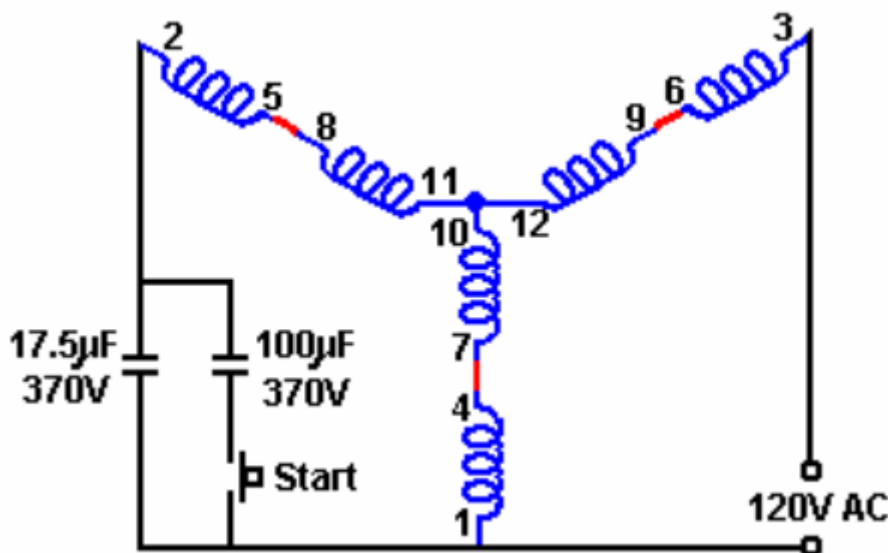
Εικόνα 14 Αφαίρεση της έτερης πλάκας του κινητήρα [15]

Ο ανεμιστήρας αφαιρείται καθώς δεν χρειάζεται και προκαλεί απλώς περιττή έλξη, και ο ρότορας εισάγεται αντίθετα από τον τρόπο που αφαιρέθηκε. Δηλαδή, το περίβλημα είναι πλέον αντίστροφο σε σχέση με τον ρότορα, αφού ο ρότορας έχει περιστραφεί κατά 180° μοίρες πριν αντικατασταθεί. Το ίδιο τμήμα του άξονα του ρότορα διέρχεται από την ίδια ακραία πλάκα όπως πριν, καθώς οι ακραίες πλάκες έχουν επίσης αντικατασταθεί. Οι ακραίες πλάκες βιδώνονται στη θέση τους και ο άξονας του ρότορα περιστρέφεται για να επιβεβαιωθεί ότι εξακολουθεί να περιστρέφεται ελεύθερα όπως πριν.

Για να μειωθεί η τριβή στο απόλυτο ελάχιστο, τα ρουλεμάν του κινητήρα πρέπει να καθαριστούν σε εξαιρετικό βαθμό. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι για να γίνει αυτό. Μια από τις καλύτερες μεθόδους είναι η χρήση ενός σπρέι καθαρισμού καρμπυρατέρ. Πραγματοποιείται ψεκασμός μέσα στα ρουλεμάν για να ξεπλυθεί όλο το συσκευασμένο γράσο. Το σπρέι εξατμίζεται αν αφηθεί για λίγα λεπτά. Γίνεται επανάληψη της διαδικασίας έως ότου ο άξονας περιστρέφεται τέλεια και, στη συνέχεια, τοποθετείται μία σταγόνα ελαφρού λαδιού σε κάθε ρουλεμάν. Δεν πρέπει να

χρησιμοποιείται το WD40 καθώς αφήνει υπολειμματικό φιλμ. Το αποτέλεσμα θα πρέπει να είναι ένας άξονας που περιστρέφεται απολύτως τέλεια.

Το επόμενο βήμα είναι η σύνδεση των περιελίξεων των δύο μονάδων. Ο κινητήρας (ο "Prime Mover") είναι καλωδιωμένος για λειτουργία 480 volt. Αυτό γίνεται συνδέοντας τους ακροδέκτες περιέλιξης 4 έως 7, 5 έως 8 και 6 έως 9 όπως φαίνεται παρακάτω (Εικόνα 13). Το διάγραμμα δείχνει 120 βολτ AC ως τάση τροφοδοσίας. Αυτό οφείλεται στο ότι ο σχεδιασμός RotoVerter κάνει τον κινητήρα να λειτουργεί με πολύ χαμηλότερη είσοδο από ό,τι είχε προβλεφθεί στον σχεδιασμό του κινητήρα. Εάν αυτός ο κινητήρας λειτουργούσε με τον τυπικό τρόπο, μια τριφασική τροφοδοσία 480 volt θα συνδεόταν στους ακροδέκτες 1, 2 και 3 και δεν θα υπήρχαν πυκνωτές στο κύκλωμα.

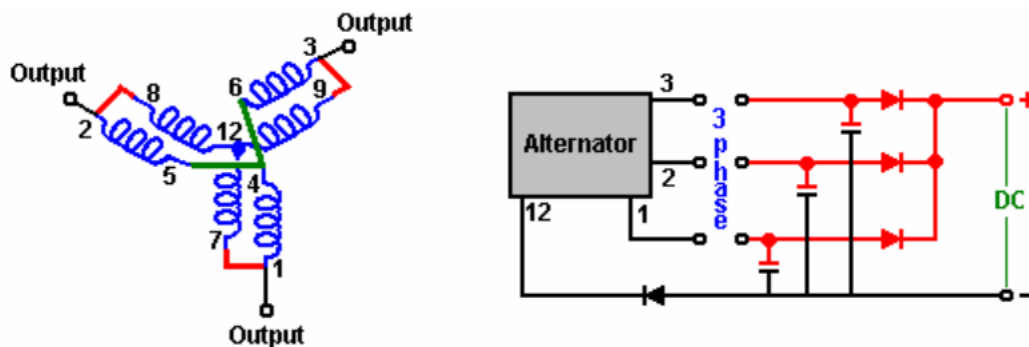


Εικόνα 15 Κύκλωμα κινητήρα μετά την αλλαγή [15]

Προτείνεται η σύνδεση των περιελίξεων του κινητήρα να γίνεται πιο προσεκτικά, αφαιρώντας το κάλυμμα του κιβωτίου διακλάδωσης και τρυπώντας μέσα από αυτό για να μεταφερθούν οι συνδέσεις έξω σε εξωτερικούς συνδέσμους, συνδεόμενες τακτοποιημένα ώστε να φαίνεται καθαρά πώς έχουν γίνει οι συνδέσεις για κάθε μονάδα και να επιτρέπονται εύκολες αλλαγές σε περίπτωση που αποφασιστεί η αλλαγή του jumpering για οποιονδήποτε λόγο.

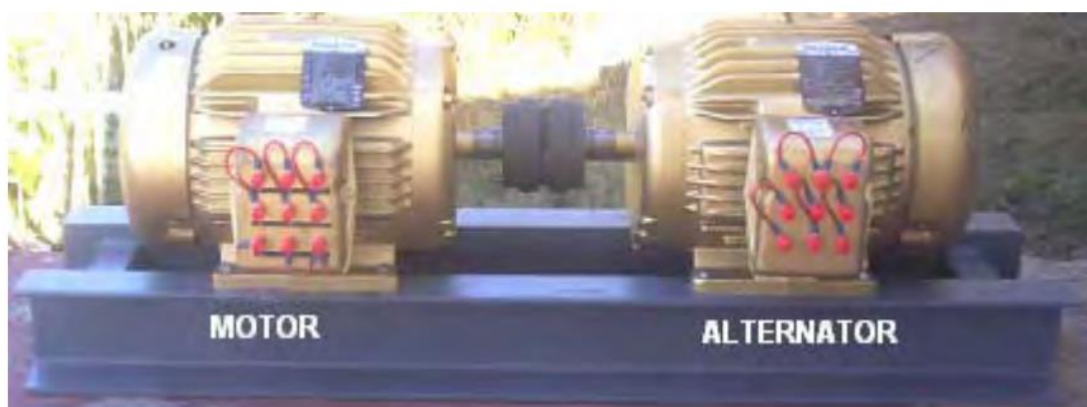
Η ίδια διαδικασία ακολουθείται και για τη μονάδα που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί ως γεννήτρια εναλλασσόμενου. Για να αυξηθεί η επιτρεπόμενη λήψη ρεύματος, οι περιελίξεις της μονάδας συνδέονται για να δώσουν τη χαμηλότερη τάση με τις

περιελίξεις συνδεδεμένες παράλληλα όπως φαίνεται παρακάτω με τους ακροδέκτες 4, 5 και 6 συνδεδεμένους μεταξύ τους, ο 1 συνδεδεμένος στον 7, ο 2 συνδεδεμένος στον 8 και ο 3 συνδεδεμένος στον 9. Αυτό οδηγεί στην παροχή μιας τριφασικής εξόδου στους ακροδέκτες 1, 2 και 3. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως έξοδος AC 3 φάσεων ή ως τρεις μονοφασικές εξοδοί AC ή ως έξοδος DC με κατάλληλη καλωδίωση, όπως φαίνεται στην Εικόνα 16.



Εικόνα 16 Συνδεσμολογία γεννήτριας [15]

Στη συνέχεια, ο κινητήρας και η γεννήτρια εναλλασσόμενου τοποθετούνται με ασφάλεια σε ακριβή ευθυγράμμιση και συνδέονται μεταξύ τους. Η εναλλαγή της κατεύθυνσης του περιβλήματος στον κινητήρα μετάδοσης κίνησης επιτρέπει σε όλα τα jumpering να βρίσκονται στην ίδια πλευρά των δύο μονάδων όταν συνδέονται μεταξύ τους, η μία απέναντι από την άλλη:



Εικόνα 17 Ολοκληρωμένο φυσικό σύστημα [15]

Η μονάδα εισόδου μπορεί να προέρχεται από έναν μετατροπέα που κινείται από μπαταρία που φορτίζεται μέσω ηλιακού πάνελ. Το σύστημα στη συνέχεια πρέπει να «συντονιστεί» και να δοκιμαστεί. Αυτό περιλαμβάνει την εύρεση του καλύτερου

πυκνωτή «εκκίνησης» που θα μπει στο κύκλωμα για λίγα δευτερόλεπτα κατά την εκκίνηση και του καλύτερου πυκνωτή «λειτουργίας».

Συνοψίζοντας: Αυτή η συσκευή λαμβάνει μια είσοδο AC χαμηλής ισχύος 120 Volt και παράγει μια ηλεκτρική έξοδο πολύ υψηλότερης ισχύος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την τροφοδοσία πολύ μεγαλύτερων φορτίων από ό,τι θα μπορούσε να τροφοδοτήσει η είσοδος. Η ισχύς εξόδου είναι πολύ μεγαλύτερη από την ισχύ εισόδου.

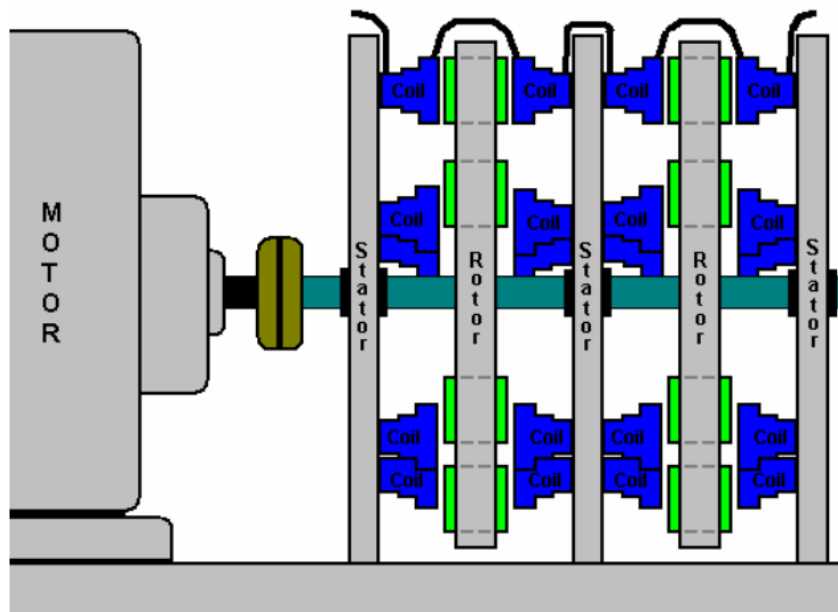
Ένα πλεονέκτημα που πρέπει να τονιστεί, είναι ότι χρειάζονται πολύ λίγα στον τρόπο κατασκευής και ότι χρησιμοποιούνται κινητήρες της αγοράς. Επίσης, δεν απαιτείται γνώση ηλεκτρονικών, γεγονός που καθιστά αυτήν τη συσκευή μία από τις ευκολότερες στην κατασκευή, όσον αφορά στις συσκευές ελεύθερης ενέργειας που είναι διαθέσιμες αυτήν τη στιγμή.

Ένα μικρό μειονέκτημα είναι ότι ο συντονισμός του κινητήρα "Prime Mover" εξαρτάται από τη φόρτισή του και τα περισσότερα φορτία έχουν διαφορετικά επίπεδα απαίτησης ισχύος από καιρό σε καιρό.

Ένας κινητήρας AC 220 Volt μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί εάν αυτή είναι η τοπική τάση τροφοδοσίας. Εάν μια γεννήτρια εναλλασσόμενου κινείται από τον κινητήρα RotoVerter (το "Prime Mover"), αλλά παρόλο που ο άξονας περιστρέφεται γρήγορα, δεν υπάρχει τάση εξόδου, τότε είναι πιθανό ο εναλλάκτης να έχει παραμείνει αχρησιμοποίητος για μεγάλο χρονικό διάστημα και να έχει χάσει τις μαγνητικές ιδιότητες που χρειάζεται κατά την εκκίνηση.

Η διόρθωση αυτού επιτυγχάνεται με τη σύνδεση κάθε μιας από τις τρεις περιελίξεις εξόδου, μία κάθε φορά, σε μια μπαταρία αυτοκινήτου για περίπου πέντε δευτερόλεπτα για να αναπτυχθεί μαγνητισμός και στη συνέχεια η γεννήτρια εναλλασσόμενου θα λειτουργήσει. Αυτό είναι ένα εφάπαξ πράγμα που χρειάζεται μόνο μετά από μια μακρά περίοδο αδράνειας. Δεν είναι απαραίτητο να κατασκευαστεί το RotoVerter ακριβώς όπως φαίνεται παραπάνω, αν και αυτή είναι η πιο κοινή μορφή κατασκευής.

Ο κινητήρας Muller, μπορεί να έχει ισχύ 35 κιλοβάτ όταν κατασκευάζεται με ακρίβεια όπως έκανε ο Bill Muller. Επομένως, μια επιλογή είναι να χρησιμοποιηθεί ένας κινητήρας Baldor με βραχυκυκλωτήρα ως κινητήρα μετάδοσης κίνησης "Prime Mover" και να τοποθετηθεί ώστε να κινεί έναν ή περισσότερους ρότορες τύπου Muller Motor για να παράγει την ισχύ εξόδου:



Εικόνα 18 Σύνδεση του κινητήρα με Muller Motor [15]

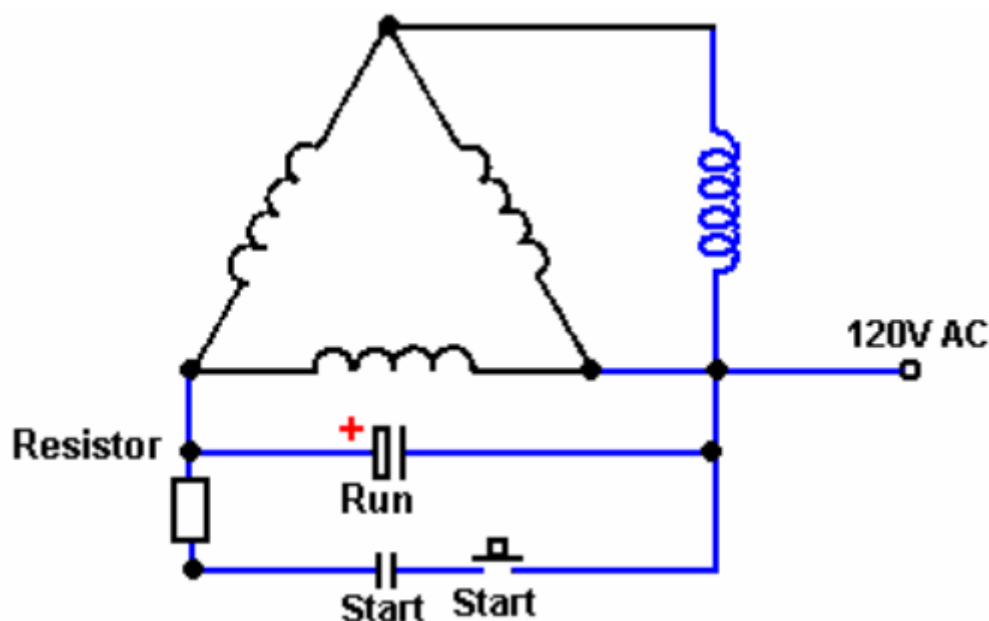
Ο T. J. Chorister στην Αμερική χρησιμοποιεί εδώ και αρκετό καιρό ένα κύκλωμα τύπου RotoVerter. Χρησιμοποιεί έναν τριφασικό ηλεκτροκινητήρα 200V που κινείται από μονοφασικό δίκτυο 120V 60 Hz. Αναφέρει ότι το καλώδιο της φάσης συνδέεται κατευθείαν στη μία φάση, και επίσης περνάει μέσω ενός πυκνωτή «τρεξίματος» στη δεύτερη φάση, και μέσω ενός επαγωγέα στην 3η φάση.

Εν γένει απαιτούνται δοκιμές με τις τιμές του πυκνωτή και του επαγωγέα ώστε να επιτευχθεί πιο ομαλή λειτουργία του κινητήρα. Συχνά δεν απαιτείται καν ένας εναλλασσόμενος πυκνωτής εκκίνησης. Γενικά, ένας κινητήρας ενός ίππου θα αποδίδει περίπου τα τρία τέταρτα του ίππου. Ωστόσο, η διάταξη θα είναι πολύ πιο αποτελεσματική από έναν μονοφασικό κινητήρα.

Ο ουδέτερος δεν χρειάζεται, πρέπει να χρησιμοποιείται γείωση συνδεδεμένη στο πλαίσιο του κινητήρα. Οι πυκνωτές λειτουργίας περνούν περίπου 1-amp για κάθε 22 microfarads της χωρητικότητάς τους και έτσι λειτουργούν ως περιοριστές ρεύματος όταν βρίσκονται σε σειρά σε ένα κύκλωμα AC.

Τα πηνία πρέπει να έχουν σύρμα αρκετά παχύ ώστε να μεταφέρει το ρεύμα που χρειάζεται ο κινητήρας. Η τιμή του επαγωγέα ρυθμίζεται με την μέθοδο δοκιμής και σφάλματος μέχρι να βρεθεί η τιμή όπου ο κινητήρας λειτουργεί πιο ομαλά. Εάν απαιτείται πυκνωτής εκκίνησης, τότε απλώς τοποθετείται παράλληλα ένας πυκνωτής

εκκίνησης και συνδέεται μια αντίσταση φορτίου στον πυκνωτή λειτουργίας. Το κύκλωμα έχει ως εξής (Εικόνα 19):



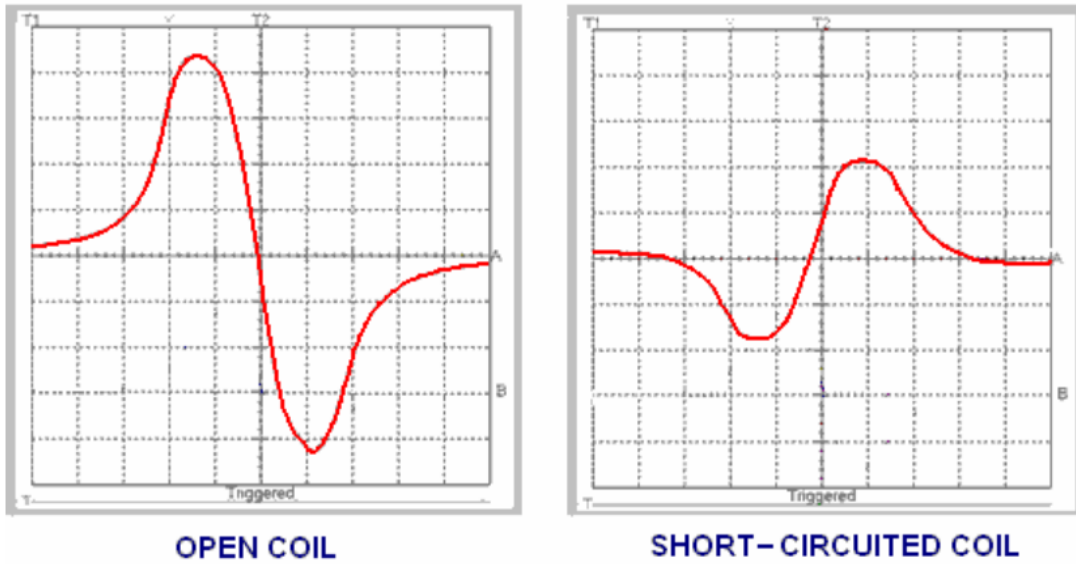
Εικόνα 19 Εναλλακτικό κύκλωμα [15]

Η έξοδος RotoVertter και η έξοδος κινητήρα/γεννήτριας Muller (και πιθανώς η έξοδος κινητήρα Adams) μπορούν να αυξηθούν σημαντικά με μια τεχνική. Αυτή αφορά στην τοποθέτηση ενός νεκρού βραχυκυκλώματος σε κάθε πηνίο εξόδου, ακριβώς τη στιγμή που το μαγνητικό πεδίο αυτού του πηνίου φτάνει στο μέγιστο. Αυτό γίνεται πέντε φορές διαδοχικά και μπορεί να αυξήσει την ισχύ εξόδου κατά έναν εκτιμώμενο παράγοντα 100 φορές.

Επιφανειακά, φαίνεται σύμφωνα με τους συγγραφείς μη λογικό να τοποθετείται βραχυκύκλωμα στην ίδια την έξοδο που δημιουργείται ως όλο το σημείο της μετατροπής και κατασκευής. Στο σημείο αιχμής, το ίδιο το πηνίο περιέχει μεγάλη ποσότητα ενέργειας και όταν τοποθετείται ένα βραχυκύκλωμα κατά μήκος του, το αποτέλεσμα είναι αρκετά ασυνήθιστο. Η επίδραση του βραχυκυκλώματος ενός πηνίου με πυρήνα σιδήρου έχει αποδειχθεί από τον Ron Pugh από τον Καναδά.

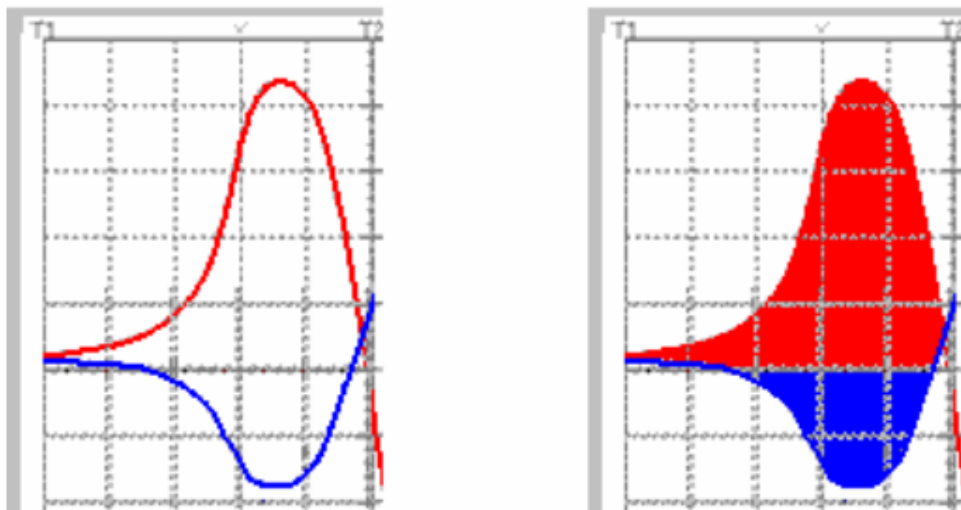
Εδώ, μια συσκευή για τη μέτρηση των μαγνητικών πεδίων ανιχνεύει το μαγνητικό πεδίο του πηνίου καθώς οι μαγνήτες του ρότορα κινούνται πέρα από το πηνίο. Η μέτρηση γίνεται με το πηνίο να λειτουργεί κανονικά και μετά ξανά, με το πηνίο

βραχυκυκλωμένο. Τα αποτελέσματα φαίνονται σε αυτούς τους παλμογράφους (Εικόνα 20):



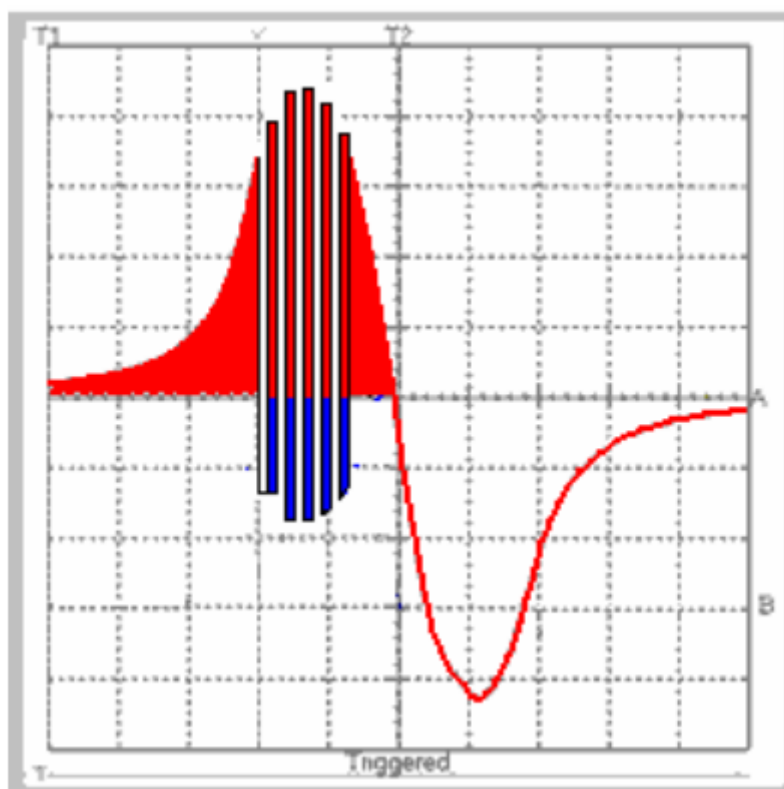
Εικόνα 20 Αποτελέσματα μετατροπής [15]

Παραδόξως, το μαγνητικό πεδίο αντιστρέφεται από το βραχυκύκλωμα. Αν ληφθεί υπόψη μόνο το πρώτο μισό του κύκλου:



Εικόνα 21 Γράφημα του πηνίου στο πρώτο μισό του κύκλου [15]

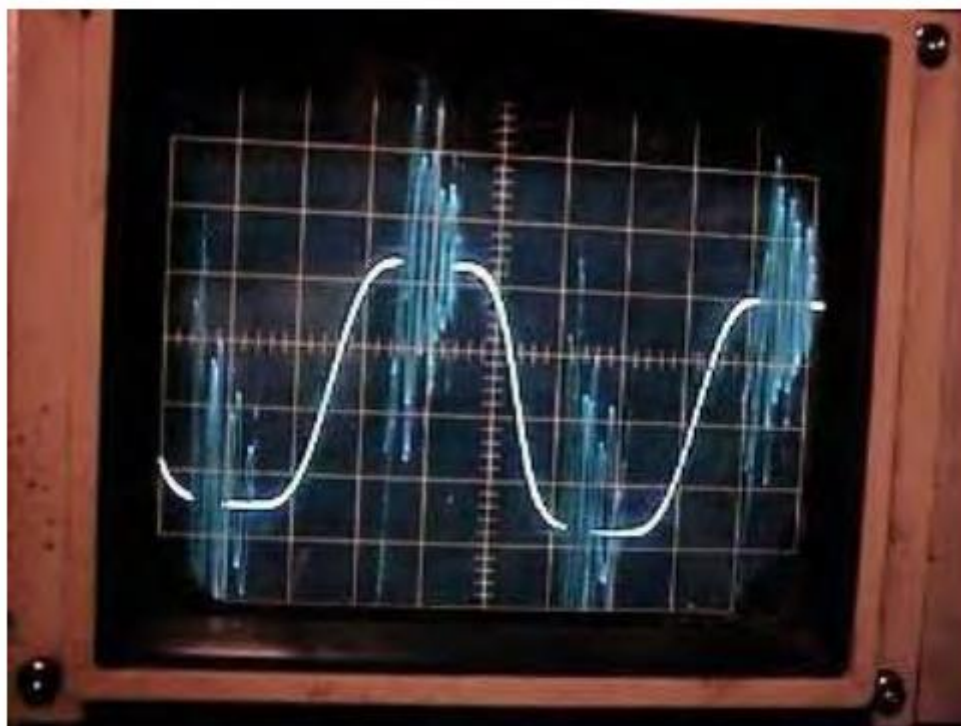
Παρατηρείται ότι όταν το ανοιχτό πηνίο έχει μια πολύ ισχυρή θετική θέση (σε σχέση με έναν βόρειο μαγνητικό πόλο), το βραχυκυκλωμένο πηνίο έχει μια ισχυρή ένδειξη της αντίθετης πολικότητας. Επομένως, σε οποιαδήποτε δεδομένη περίπτωση κοντά στην κορυφή, υπάρχει η πιθανότητα για μια σημαντική μαγνητική αναστροφή εάν το πηνίο μεταβαλλόταν από την κόκκινη περιοχή στην μπλε περιοχή και ξανά πίσω. Στην περίπτωση που το βραχυκύκλωμα του πηνίου εκτελούνταν πολύ γρήγορα, θα υπήρχε ένα αποτέλεσμα όπως αυτό στην Εικόνα 22:



Εικόνα 22 Ταχεία εναλλαγή βραχυκυκλώματος [15]

Ωστόσο, αυτό δεν είναι πραγματικά δυνατό με ένα πηνίο με πυρήνα σιδήρου, καθώς δεν είναι σε θέση να αντιστρέψει τη μαγνήτισή του αρκετά γρήγορα για να δημιουργήσει αυτό το αποτέλεσμα. Τα πηνία με πυρήνες σιδήρου μπορεί να έχουν έως και 3.000 αναστροφές ανά δευτερόλεπτο, αν και οι 1.000 θα ήταν πιθανώς πιο ρεαλιστικός αριθμός. Για υψηλότερες συχνότητες, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ένας πυρήνας φερριτή και για ακόμη υψηλότερες συχνότητες χρειάζεται ένας πυρήνας ενθυλακωμένος με εποξειδική σκόνη σιδήρου. Για απεριόριστες συχνότητες, αξιοποιείται πηνίο με πυρήνα αέρα. Στο παράδειγμα RotoVerter / Muller Motor όπου

ο Κοπε έχει επιδείξει σημαντικά ενεργειακά κέρδη, η διάταξη είναι διαφορετική από το παράδειγμα δοκιμής πάγκου του Ron Pugh. Πρώτον, οι μαγνήτες στον ρότορα παρουσιάζουν δύο πόλους στο πηνίο καθώς περνούν, δίνοντας μια πλήρη, ομοιόμορφη έξοδο ημιτονοειδούς κύματος. Δεύτερον, ο Κοπε χρησιμοποιεί ένα πηνίο με πυρήνα αέρα και έχει εφαρμόσει τη γρήγορη εναλλαγή για να εκμεταλλευτεί αυτόν τον τύπο πηνίου (Εικόνα 23):

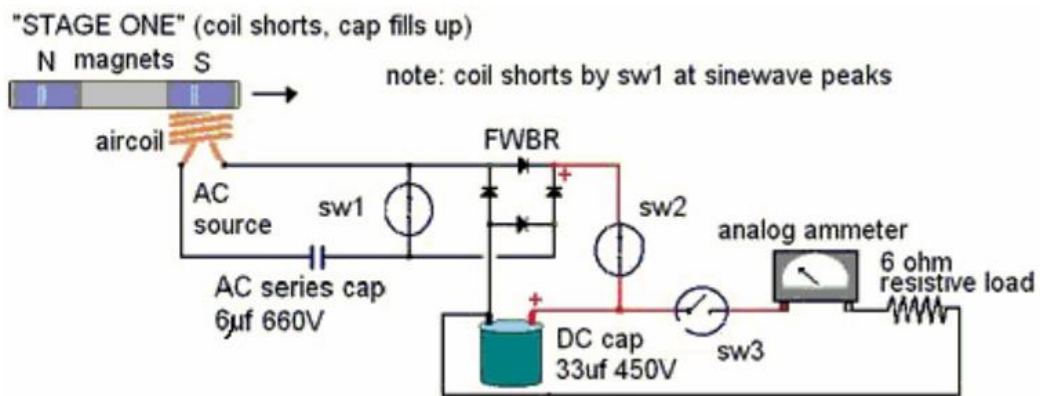


Εικόνα 23 Αποτελέσματα της μεθόδου [15]

Αυτό το στιγμιότυπο οθόνης δείχνει ακριβώς το ίδιο αποτέλεσμα με τους ταλαντούμενους παλμούς να πέφτουν ακριβώς στο σημείο που θα ήταν το αρνητικό ίχνος εκείνη τη στιγμή κατά τη διάρκεια κάθε περιόδου βραχυκυκλώματος. Η οθόνη δείχνει μια κυματομορφή κορυφής σε κορυφή είκοσι βολτ με κάθε πλήρη κύκλο ημιτονοειδούς κύματος να διαρκεί 2 χιλιοστά του δευτερολέπτου. Αντί για την αρχική σταδιακή μαγνητική άνοδο σε μία μόνο κορυφή, υπάρχουν τώρα πέντε πολύ έντονες μαγνητικές ανατροπές, καθεμία από τις οποίες είναι σημαντικά μεγαλύτερη από την αρχική κορυφή. Είναι η αλλαγή της μαγνητικής ροής στο πηνίο συλλογής που παράγει την ισχύ εξόδου, επομένως μπορεί να φανεί ότι με αυτήν την πρόσθετη μεταγωγή, έχει παραχθεί μια τεράστια αύξηση στην αλλαγή ροής στο πηνίο εξόδου. Αυτή η αύξηση είναι τόσο μεγαλύτερη μαγνητική αιώρηση όσο και πολύ μεγαλύτερος ρυθμός

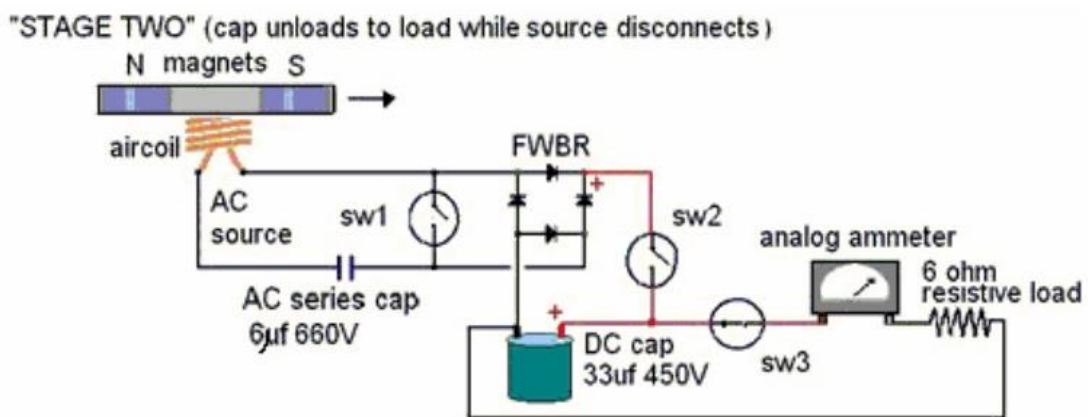
μεταβολής της ροής, και καθώς ο ρότορας περιστρέφεται με περίπου 1.800 rpm και έχει πολλούς μαγνήτες μέσα του, η συνολική μαγνητική ισχύς αυξάνεται κατά έναν σημαντικό παράγοντα.

Πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι στα ακόλουθα διαγράμματα που παράγονται από τον Kone, ο μαγνήτης του ρότορα έχει έναν Νότιο πόλο που φτάνει πρώτος στο πηνίο συλλογής, ακολουθούμενος από έναν Βόρειο πόλο που περνάει από το πηνίο. Αυτό παράγει μια εξαιρετική έξοδο ημιτονοειδούς κύματος στο πηνίο. Η πρόσθετη εναλλαγή πραγματοποιείται με μηχανική βούρτσα και σύστημα επαφής και το κύκλωμα συλλογής ισχύος που χρησιμοποιείται για το βραχυκυκλωμένο πηνίο είναι (Εικόνα 24):

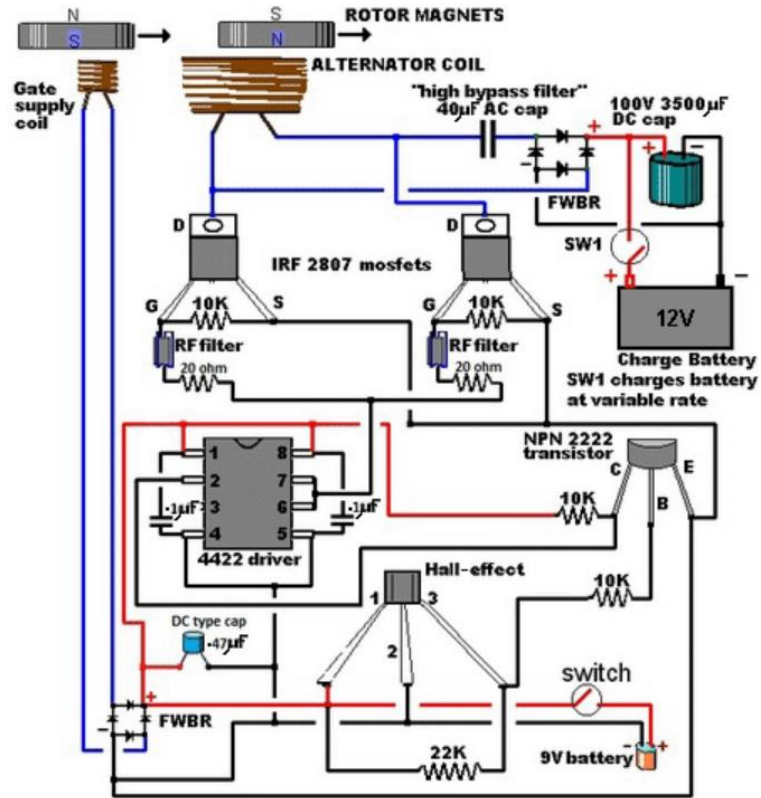


Εικόνα 24 Κύκλωμα συλλογής ισχύος που χρησιμοποιείται για το βραχυκυκλωμένο πηνίο [15]

και όταν το πηνίο δεν είναι βραχυκυκλωμένο, το κύκλωμα είναι (Εικόνα 25):



Εικόνα 25 Κύκλωμα συλλογής ισχύος που χρησιμοποιείται για το μη βραχυκυκλωμένο πηνίο [15]



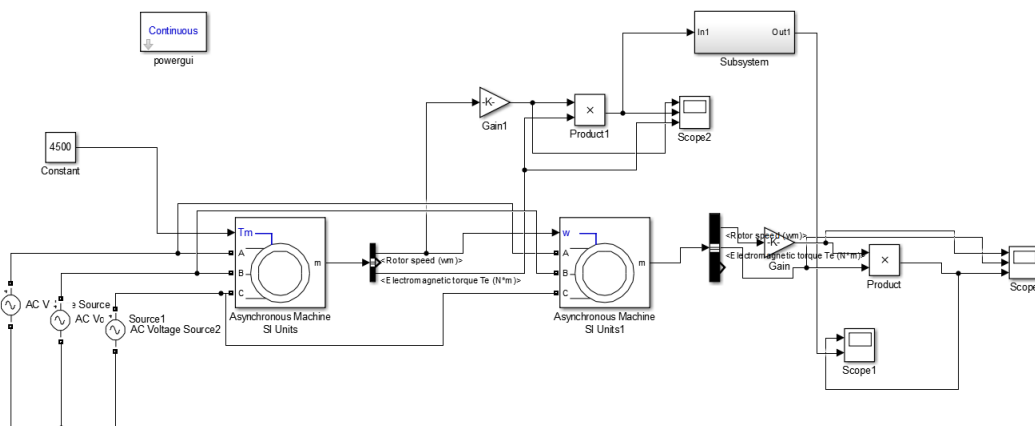
Εικόνα 26 Πλήρες κύκλωμα [15]

4. Προσομοίωση συστήματος ενίσχυσης ισχύος

Ο βασικός στόχος της εργασίας είναι η δημιουργία κατάλληλου μοντέλου προσομοίωσης του συστήματος RotoVerter στο περιβάλλον του Matlab και η συνεπακόλουθη αξιοποίηση του μοντέλου σε σειρά προσομοιώσεων. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται το μοντέλο που δημιουργήθηκε και τα σχετικά αποτελέσματα της προσομοίωσης της λειτουργίας από την χρήση του.

4.1 Περιγραφή μοντέλου

Το συνολικό μοντέλο του RotoVerter που δημιουργήθηκε στο περιβάλλον Simulink είναι το ακόλουθο (Εικόνα 27).



Εικόνα 27 Μοντέλο συστήματος RotoVerter

Το μοντέλο, ακολουθώντας την περιγραφή του συστήματος, περιλαμβάνει δύο ασύγχρονες μηχανές, όπου η πρώτη λειτουργεί ως κινητήρας και η δεύτερη ως γεννήτρια εναλλασσόμενου. Τα μοντέλα των μηχανών, επιλέχθηκαν να είναι όσο πιο κοντά σε αυτά που αναφέρονται στην περιγραφή του συστήματος, ώστε να υπάρχει η κατάλληλη σύνδεση.

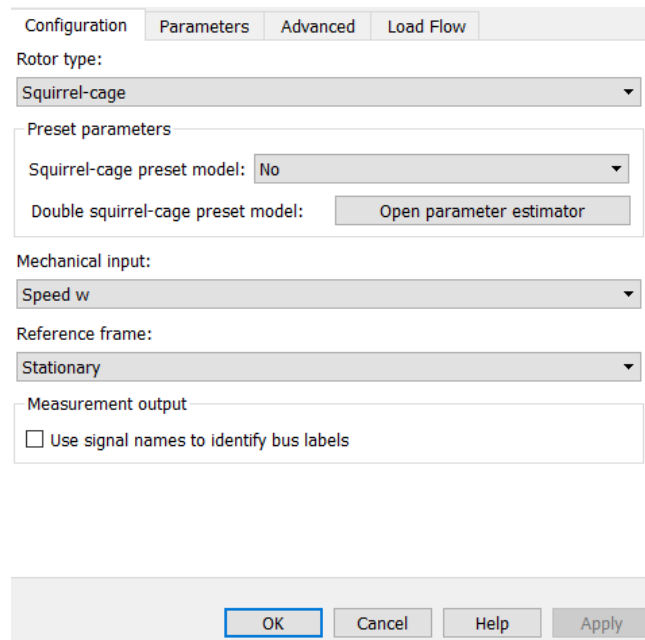
Το μοντέλο του κινητήρα παρουσιάζεται στις εικόνες που ακολουθούν.

Εικόνα 28 Βασική διαμόρφωση κινητήρα

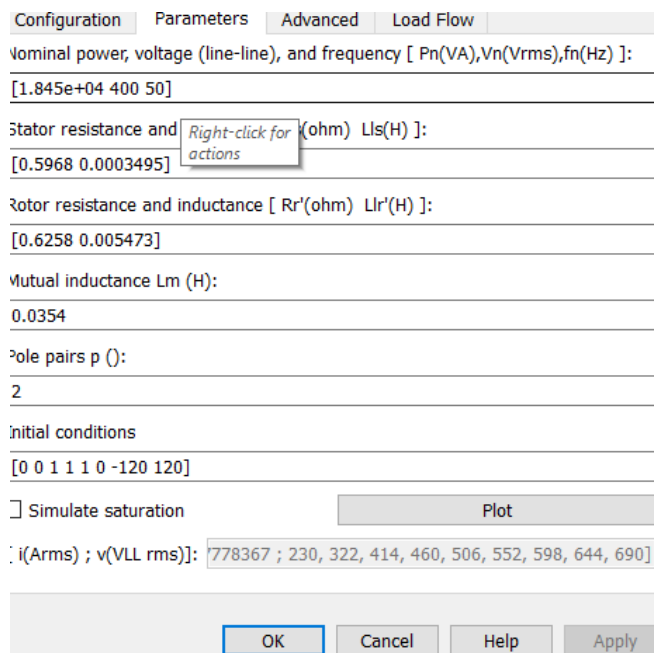
Εικόνα 29 Παράμετροι κινητήρα

Η ιδιαίτερη συνδεσμολογία του κινητήρα επιτυγχάνεται με τον καθορισμό των παραμέτρων ώστε να προσομοιώνεται η σύνδεση των τυλιγμάτων, η οποία καθορίζεται μέσω μιας εξωτερικής τιμής που αφορά στην ταχύτητα συντονισμού τους (Εικόνα 27).

Αντίστοιχα, το μοντέλο της γεννήτριας παρουσιάζεται στις εικόνες 30, 31.



Εικόνα 30 Βασική διαμόρφωση γεννήτριας



Εικόνα 31 Παράμετροι γεννήτριας

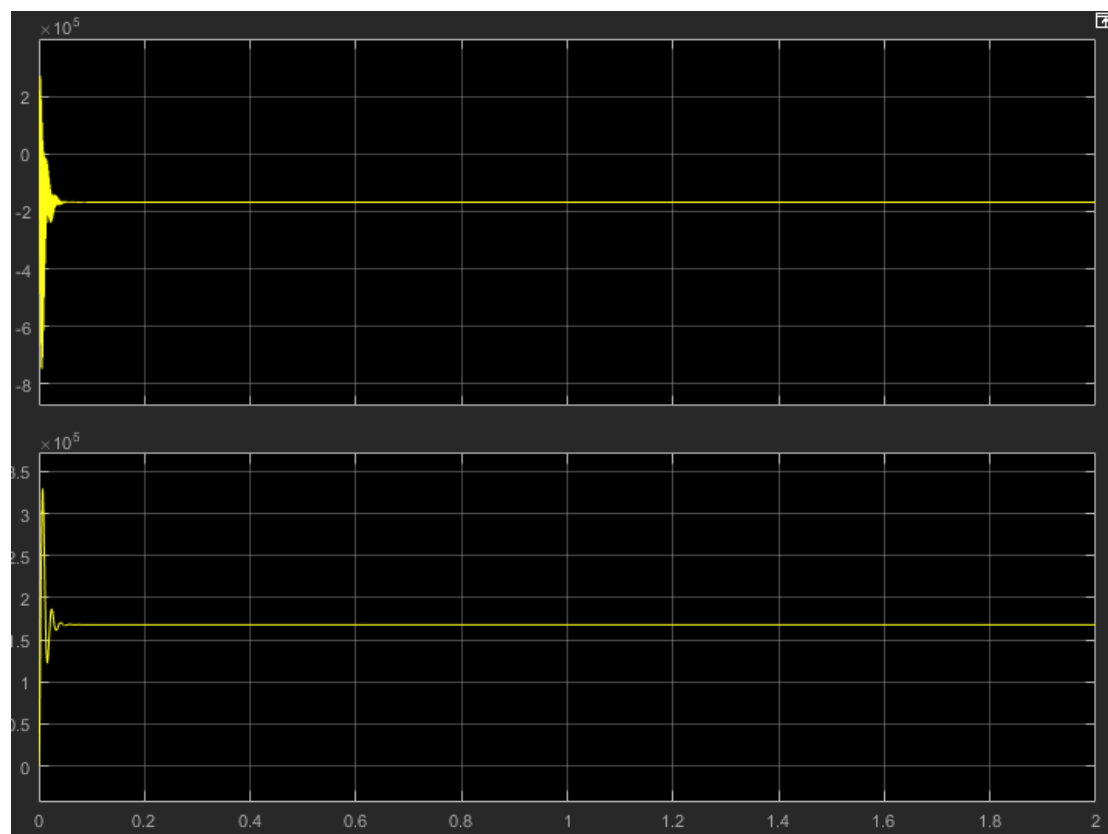
Όπως και στην περίπτωση του κινητήρα, η ιδιαίτερη συνδεσμολογία με τη σύνδεση των επιμέρους τυλιγμάτων όπως αναφέρεται στη περιγραφή του συστήματος έλαβε χώρα με την κατάλληλη ρύθμιση των παραμέτρων (Εικόνα 31).

Η πηγή τάσης στο κύκλωμα είναι τριφασική με ενεργό τιμή 120V, όπως αναφέρεται στην περιγραφή του συστήματος. Το υποσύστημα στο πάνω μέρος της Εικόνας 26 αναφέρεται στη μηχανική σύνδεση κινητήρα και γεννήτριας.

4.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης

4.2.1 Λειτουργία μοντέλου χωρίς τις αλλαγές στα κυκλώματα των μηχανών

Στην περίπτωση αυτή, το μοντέλο εξετάζεται με τον κινητήρα και τη γεννήτρια ως έχουν. Δεδομένου ότι στην προσομοίωση θεωρείται ότι όλα τα επιμέρους συστήματα είναι ιδανικά (μηδενικές ηλεκτρικές και μηχανικές απώλειες), αυτό που είναι αναμενόμενο είναι ότι η γεννήτρια θα παράγει την ίδια ισχύ που απορροφά ο κινητήρας. Δεδομένου επίσης του ότι οι μηχανές είναι όμοιες, αυτό συνεπώς μπορεί να φανεί με βάση την απορροφούμενη ισχύ από τον κινητήρα και την αποδιδόμενη ισχύ από τη γεννήτρια. Τα αντίστοιχα αποτελέσματα παρουσιάζονται στην Εικόνα 32.

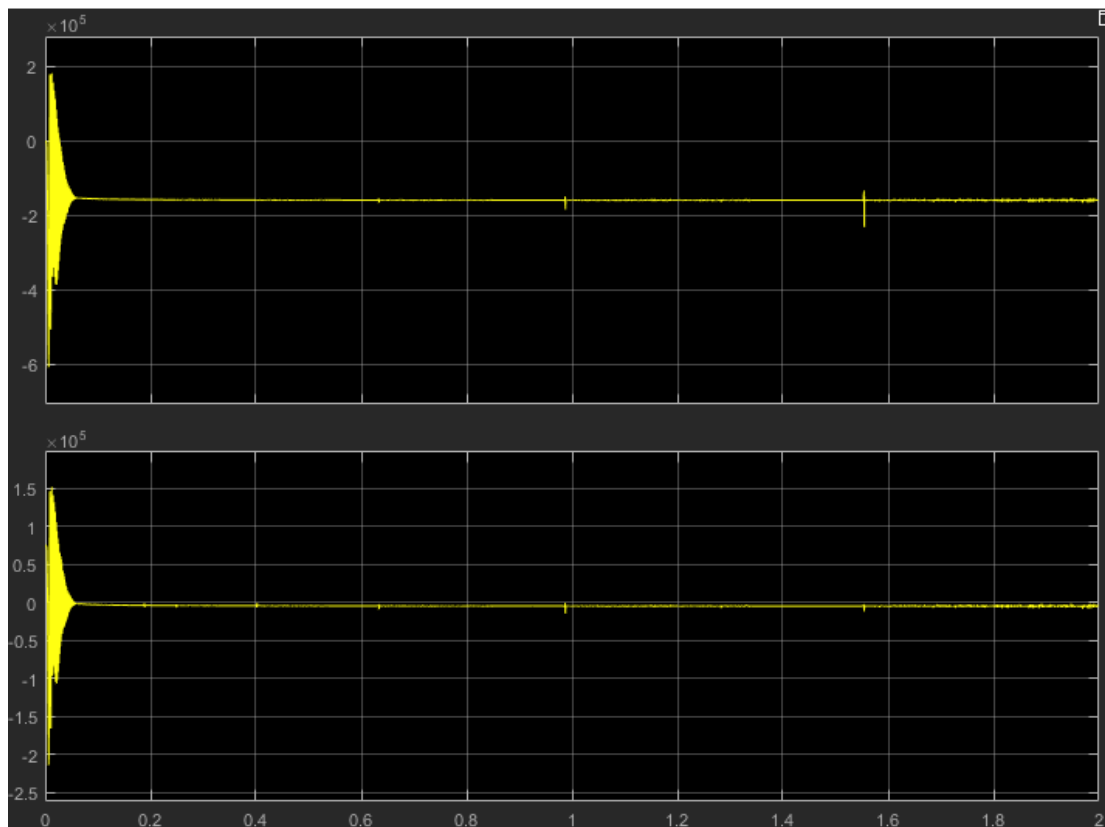


Εικόνα 32 Αποτελέσματα προσομοίωσης χωρίς αλλαγές στα κυκλώματα των μηχανών

Είναι εμφανές από το διάγραμμα της Εικόνας 32 ότι προκύπτει το αναμενόμενο αποτέλεσμα, καθώς η ισχύς που αποδίδει η γεννήτρια (άνω Εικόνα, το αρνητικό πρόσημο υποδηλώνει απόδοση ισχύος) είναι ίδια με την αντίστοιχη που απορροφά ο κινητήρας (κάτω διάγραμμα). Είναι προφανές ότι δεν υφίσταται κάποια ενίσχυση.

4.2.2 Δοκιμή προτεινόμενης συνδεσμολογίας

Εν συνεχεία, το μοντέλο συμπεριέλαβε τις αλλαγές που παρουσιάστηκαν. Τα αντίστοιχα αποτελέσματα παρουσιάζονται στην Εικόνα 33.



Εικόνα 33 Αποτελέσματα προσομοίωσης του προτεινόμενου συστήματος

Στην περίπτωση αυτή, παρατηρείται ότι από ένα σημείο και μετά ο κινητήρας σχεδόν δεν απορροφά ισχύ, αλλά αντίθετα η γεννήτρια παράγει όπως και πριν. Κατά συνέπεια θα μπορούσε όντως να θεωρηθεί ότι επιτυγχάνεται ενίσχυση στην περίπτωση αυτή. Ωστόσο, η ενίσχυση προέρχεται κυρίως από την φόρτιση και αποφόρτιση των πυκνωτών λειτουργείας που αποδίδουν στα τυλίγματα του κινητήρα την ηλεκτρική ισχύ που αποθηκεύουν κατά τη λειτουργία του συστήματος.

Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία παρουσιάστηκε η δημιουργία ενός μοντέλου προσομοίωσης μιας πρότασης για τη δημιουργία ενός συστήματος ενίσχυσης στο περιβάλλον του Matlab.

Το μοντέλο επιτρέπει στον χρήστη να μελετήσει τη συμπεριφορά του προτεινόμενου συστήματος υπό διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας. Εν γένει το σύστημα όντως οδηγεί σε ενίσχυση, ωστόσο αυτή οφείλεται στην αποθηκευμένη ισχύ των πυκνωτών που αξιοποιούνται κατά την λειτουργία του.

Βιβλιογραφία

- [1] Boldea, I., & Nasar, S.A. (2001). *Induction Machine Handbook*. Boca Raton, FL: CRC Press, p. 327.
- [2] Trzynadlowski, A. M. (2000). *Control of induction motors*. Elsevier.
- [3] Benbouzid, M. E. H. (2000). A review of induction motors signature analysis as a medium for faults detection. *IEEE transactions on industrial electronics*, 47(5), 984-993.
- [4] Trzynadlowski, A. M. (2013). *The field orientation principle in control of induction motors*. Springer Science & Business Media.
- [5] Benbouzid, M. (1999). Bibliography on induction motors faults detection and diagnosis. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 14(4), 1065-1074.
- [6] Asanbayev, V. (2022). *Asynchronous Machines: Basic Calculation Elements from Field Equations*. Springer.
- [7] Lamchich, M. T. (Ed.). (2011). *Torque control*. BoD–Books on Demand.
- [8] Gao, J., Zhang, L., & Wang, X. (2009). AC machine systems. *Mathematical Model and Parameters, Analysis, and System Performance*.
- [9] ROTOVERTER® Type D: <https://ronkelectrical.com/products/rotoverter-type-d>
- [10] RotoVerter: <https://www.instructables.com/RotoVerter/>
- [11] Rotoverter: <http://www.rexresearch.com/rotoverter/rotoverter.htm>
- [12] Rotoverter: <http://panacea-bocaf.org/rotoverter.htm>
- [13] Rotoverter:
<http://www.scribd.com/doc/2965018/HighEfficiencyForElectricMotors>
- [14] Rotoverter: <http://www.scribd.com/doc/26347817/RV-Energy-Saving-X>
- [15] Kelly, P.J. (2013). Moving Pulsed Systems. In “A Practical Guide to Free-Energy Devices” (Chapter 2). eBook: Version 22.9.