

**ΑΛΕΞΑΝΔΡΕΙΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ
ΙΔΡΥΜΑ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ**

**ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΙΣΧΥΟΣ**

Διεύθυνση: Τ.Θ.171, 57400 Θεσσαλονίκη

Τηλ.: 2310-791623, Fax: 2310-791622, E-mail: ikiosker@el.teithe.gr

ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΙΟΡΔΑΝΗΣ ΚΙΟΣΚΕΡΙΔΗΣ

ΤΙΤΛΟΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ

**“Βελτιστοποίηση της λειτουργίας κινητήρων μαγνητικής
αντίστασης διακοπτικής τάσης διέγερσης και κατασκευή
πρότυπης βέλτιστης διάταξης ελέγχου”**

**Ιορδάνης Κιοσκερίδης
Χρήστος Μαδεμλής**

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ, 2006

**ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟΥ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΠΟΥ ΧΡΗΜΑΤΟΔΟΤΗΘΗΚΕ
ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΕΡΕΥΝΩΝ**

Τίτλος Ερευνητικού προγράμματος: Βελτιστοποίηση της λειτουργίας κινητήρων μαγνητικής αντίστασης διακοπτικής τάσης διέγερσης και κατασκευή πρότυπης βέλτιστης διάταξης ελέγχου.

Συνεργαζόμενα Τμήματα: Ηλεκτρονικής

Επιστημονικά Υπεύθυνος: Ιορδάνης Κιοσκερίδης

Επιστημονικοί συνεργάτες: -

Εξωτερικοί επιστημονικοί συνεργάτες:

Όνομα: Χρήστος Μαδεμλής, Θέση: Λέκτορας ΑΠΘ,

Ειδικότητα: Ηλεκτρολόγος Μηχανικός

Απασχοληθέντες φοιτητές: -

Διάρκεια Ερευνητικού Προγράμματος: 1/12/2004–28/2/2006 (15 μήνες).

Ποσό χρηματοδότησης Επιτροπής Ερευνών: 5000€.

Δημοσιεύσεις/παρουσιάσεις εργασιών (έως τη στιγμή σύνταξης της έκθεσης): **I. Kioskeridis, C. Mademlis, "Maximum Efficiency in Single-Pulse Controlled Switched Reluctance Motor Drives", IEEE Trans. on Energy Conversion.**

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	7
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	12
2. ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ.....	13
3. ΣΤΙΓΜΙΑΙΑ ΡΟΠΗ	18
4. ΕΞΙΣΩΣΗ ΤΗΣ ΤΑΣΗΣ.....	20
5. ΜΕΣΗ ΡΟΠΗ	21
6. ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ.....	24
7. ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑΣ ΙΣΧΥΟΣ.....	25
8. ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ <i>SWITCHED RELUCTANCE</i>	26
9. ΔΙΑΤΑΞΗ ΟΔΗΓΗΣΗΣ ΤΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΜΕ ΕΛΕΓΧΟ ΤΟΥ ΡΕΥ- ΜΑΤΟΣ ΣΕ ΜΙΚΡΕΣ ΤΑΧΥΤΗΤΕΣ	30
9.1. Βέλτιστες Γωνίες Έναυσης και Μεταγωγής.....	31
9.2. Πειραματικά Αποτελέσματα	36
10. ΔΙΑΤΑΞΗ ΟΔΗΓΗΣΗΣ ΤΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΜΕ ΑΠΛΟ ΠΑΛΜΟ ΣΕ ΥΨΗΛΕΣ ΤΑΧΥΤΗΤΕΣ.....	40
10.1. Βέλτιστες Γωνίες Έναυσης και Μεταγωγής.....	41
10.2. Πειραματικά Αποτελέσματα	42
ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	47

ΤΙΤΛΟΣ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ

Βελτιστοποίηση της λειτουργίας κινητήρων μαγνητικής αντίστασης διακοπτικής τάσης διέγερσης και κατασκευή πρότυπης βέλτιστης διάταξης ελέγχου

(Ιορδάνης Κιοσκερίδης)

Το αντικείμενο του ερευνητικού προγράμματος είναι η μελέτη και η διερεύνηση του προβλήματος της ελαχιστοποίησης των απωλειών και της μείωσης των διακυμάνσεων της ροπής στους κινητήρες μαγνητικής αντίστασης διακοπτικής τάσης διέγερσης (*switched reluctance motors*), σ' όλη την περιοχή ταχυτήτων. Ως αποτέλεσμα του προγράμματος αναπτύχθηκαν δύο μέθοδοι, για τις υψηλές και τις χαμηλές ταχύτητες αντίστοιχα, οι οποίες προσδιορίζουν on-line της γωνίες έναυσης και σβέσης των παλμών της τάσης τροφοδοσίας, καθώς και το μέγεθος του ρεύματος κάθε φάσης, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η βέλτιστη λειτουργία του κινητήρα. Τα θεωρητικά αποτελέσματα επιβεβαιώθηκαν με την κατασκευή ενός βέλτιστου κινητήριου συστήματος με μηχανή ισχύος 1hp, 4-φάσεων, 8/6 πόλων, χρησιμοποιώντας τη μεθοδολογία ελέγχου της μέσης ροπής.

Απαραίτητη προϋπόθεση στη μελέτη ενός κινητήρα *switched reluctance* είναι η γνώση των καμπύλων μαγνήτισης. Οι καμπύλες μαγνήτισης του διαθέσιμου κινητήρα *switched reluctance* 1hp μετρήθηκαν σε μια από τις τέσσερις φάσεις του, καθώς ο κινητήρας είναι συμμετρικός, σε διάφορες θέσεις των πόλων του δρομέα μεταξύ της γωνίας ευθυγράμμισης και της γωνίας μη ευθυγράμμισης, ως προς τους αντίστοιχους πόλους του στάτη. Στη μέτρηση των καμπύλων μαγνήτισης κατασκευάστηκε ένας στοιχειώδης μετατροπέας ισχύος, ο οποίος παρέχει τους παλμούς τάσης στη μια φάση του κινητήρα. Ακόμη, υλοποιήθηκε η διάταξη μέτρησης των παλμών τάσης και του αντίστοιχου φασικού ρεύματος με γαλβανική απομόνωση και το πρόγραμμα επεξεργασίας των δεδομένων, με τη χρήση του λογισμικού Labview, για τη λήψη των καμπύλων μαγνήτισης.

Χρησιμοποιώντας το εξειδικευμένο λογισμικό επίλυσης διαφορικών εξισώσεων για εφαρμογές ελέγχου Simnon, έγινε η προσομοίωση του πλήρους κινητήριου συστήματος με τη μηχανή *switched reluctance*. Στην προσομοίωση χρησιμοποιήθηκε μια αναλυτική αριθμητική μέθοδος, η οποία προσεγγίζει τις καμπύλες μαγνήτισης του κινητήρα με μια περιοδική συνάρτηση, ως προς τη γωνία περιστροφής του δρομέα. Με την αναλυτική μέθοδο ο χρόνος της κάθε προσομοίωσης ήταν μόλις μερικές 10δες δευτερόλεπτα, σε αντίθεση με άλλες μεθόδους προσομοίωσης οι οποίες απαιτούν εξαιρετικά μεγαλύτερο χρόνο. Η προσομοίωση του κινητήριου συστήματος έγινε με ανοικτό και με κλειστό βρόχο ταχύτητας. Έτσι, μελετήθηκε η δυ-

ναμική συμπεριφορά του κινητήρα, η διακύμανση της ροπής και οι απώλειες ισχύος σε διάφορες τιμές των μεταβλητών ελέγχου, δηλαδή των γωνιών έναυσης και σβέσης και του πλάτους του φασικού ρεύματος.

Με αναφορά τα δεδομένα από την προσομοίωση του κινητήριου συστήματος, σχεδιάστηκαν οι δύο βέλτιστοι ελεγκτές. Οι ελεγκτές εξασφαλίζουν τη λειτουργία του κινητήρα με τον ιδανικό συνδυασμό απωλειών ισχύος και ταλαντώσεων στη ροπή. Οι ελεγκτές βασίζονται σε αναλυτικές μαθηματικές σχέσεις, για τον υπολογισμό των γωνιών έναυσης και σβέσης στις υψηλές ταχύτητες και επιπλέον του πλάτους του φασικού ρεύματος στις χαμηλές ταχύτητες. Με τη χρήση των αναλυτικών σχέσεων στην υλοποίηση των βέλτιστων ελεγκτών, δεν απαιτείται η γνώση των καμπύλων μαγνήτισης του κινητήρα, οι οποίες είναι δύσκολο και δαπανηρό να μετρηθούν σε πολλές εφαρμογές. Επιπλέον, οι ελεγκτές υλοποιούνται εύκολα σε γλώσσα μηχανής στο μικροεπεξεργαστή και παρέχουν ταχεία απόκριση στο κινητήριο σύστημα. Οι ελεγκτές που αναπτύχθηκαν ικανοποιούν τον κύριο στόχο του ερευνητικού προγράμματος, ο οποίος είναι η εύκολη υλοποίησή τους, έτσι ώστε να μην αυξάνεται η πολυπλοκότητα και το κόστος της μονάδας οδήγησης. Επομένως, το πλήρες σύστημα κινητήρας-μονάδα οδήγησης είναι χαμηλού κόστους, προκειμένου να είναι ανταγωνιστικό των κινητήριων συστημάτων μεταβλητής ταχύτητας με επαγωγικούς κινητήρες και κινητήρες μόνιμου μαγνήτη.

Η αποτελεσματικότητα των βέλτιστων ελεγκτών στις χαμηλές και τις υψηλές ταχύτητες λειτουργίας του κινητήρα, επιβεβαιώθηκε με την κατασκευή ενός πειραματικού κινητήριου συστήματος με μηχανή switched reluctance ισχύος 1hp, 4-φάσεων, με 8 πόλους στο στάτη και 6 πόλους στο δρομέα. Η διάταξη ισχύος του μετατροπέα τύπου 4m, αποτελείται από δύο διακόπτες τύπου IGBT και δύο διόδους σε κάθε μια από τις τέσσερις φάσεις. Τα σήματα έναυσης των οκτώ συνολικά διακοπών ισχύος παρέχονται από ένα κύκλωμα οδήγησης, το οποίο έχει υλοποιηθεί με διακριτά αναλογικά και ψηφιακά στοιχεία. Οι δύο βέλτιστοι ελεγκτές υλοποιήθηκαν μέσω ενός ειδικού ισχυρού μικροεπεξεργαστή των 32bits. Στον ίδιο μικροεπεξεργαστή ενσωματώθηκαν οι λειτουργίες ομαλής εκκίνησης και στάσης του κινητήρα, πρόσθετες διαδικασίες ασφαλούς λειτουργίας του κινητήρα και αλγόριθμοι για τη μέτρηση με ακρίβεια των κρίσιμων λειτουργικών παραμέτρων, όπως η ταχύτητα, η ροπή, η ισχύς απωλειών, τα φασικά ρεύματα.

Ένα μεγάλο πλήθος μετρήσεων έχει ληφθεί από το κινητήριο σύστημα σε διάφορες καταστάσεις λειτουργίας. Στις στατικές συνθήκες λειτουργίας, όπου η ταχύτητα και η ροπή του κινητήρα είναι σταθερές, η λήψη και η επεξεργασία των μετρήσεων γίνεται μέσω του μικροεπεξεργαστή. Στις μεταβατικές καταστάσεις λειτουργίας, όπου η

ταχύτητα είτε η ροπή μεταβάλλονται βηματικά, η καταγραφή της συμπεριφοράς του κινητήριου συστήματος γίνεται με τη χρήση ενός ψηφιακού παλμογράφου. Σ' όλες τις περιπτώσεις λειτουργίας, οι απώλειες του κινητήριου συστήματος και η διακύμανση της ροπής ήταν σημαντικά μειωμένες με τη χρήση των βέλτιστων ελεγκτών, σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους ελέγχου του κινητήρα, χωρίς αρνητική επίπτωση στη μεταβατική συμπεριφορά του συστήματος.

ΤΙΤΛΟΣ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ

Βελτιστοποίηση της λειτουργίας κινητήρων μαγνητικής αντίστασης διακοπτικής τάσης διέγερσης και κατασκευή πρότυπης βέλτιστης διάταξης ελέγχου

ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗ ΟΜΑΔΑ

Ιορδάνης Κιοσκερίδης, Χρήστος Μαδεμλής

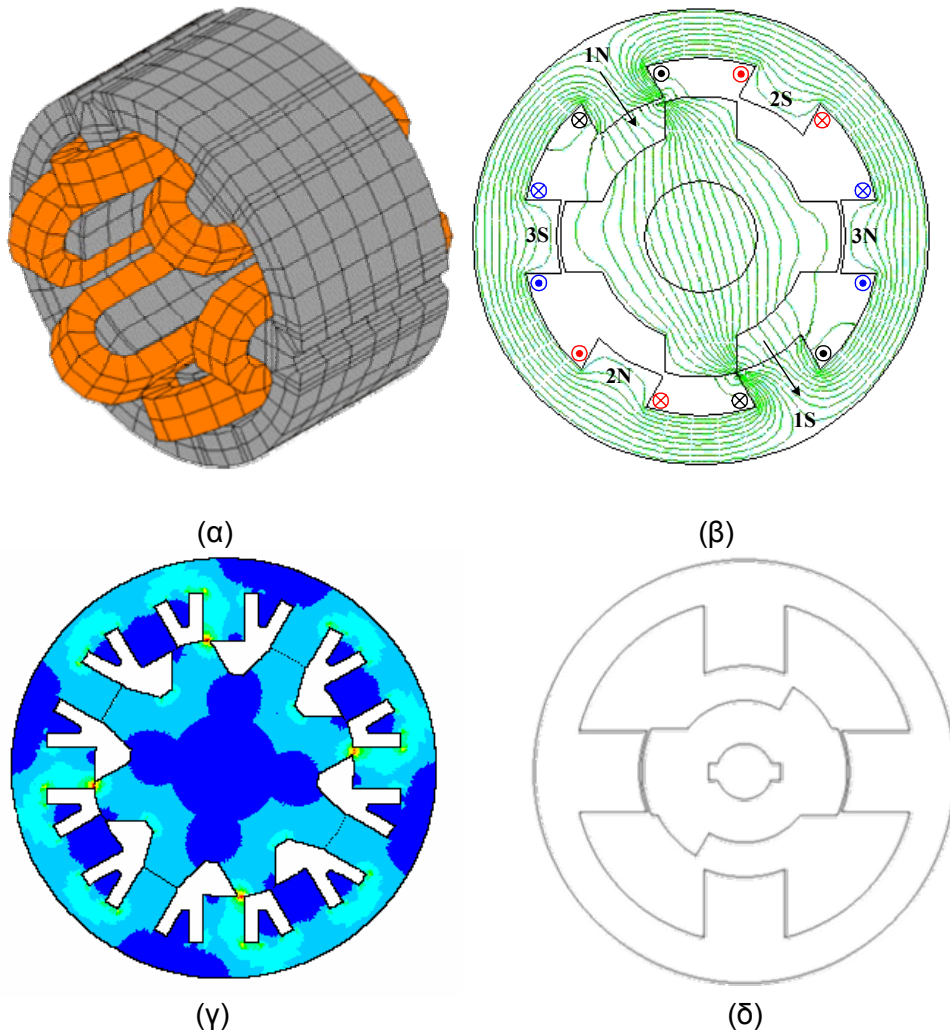
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μηχανή *switched reluctance* είναι γνωστή από το 1838. Η μηχανή *switched reluctance* έχει έκτυπους πόλους στο στάτη και το δρομέα (*doubly-salient machinery*), οι οποίοι κατασκευάζονται από ελάσματα σιδήρου μονωμένα μεταξύ τους. Το μεγάλο πλεονέκτημα της μηχανής είναι ότι στο δρομέα δεν υπάρχουν μαγνήτες ούτε τύλιγμα, επομένως ο δρομέας δεν φέρει ρεύμα. Ως αποτέλεσμα, το κόστος κατασκευής είναι μικρό, ενώ η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα μπορεί να είναι εξαιρετικά υψηλή (10δες χιλιάδες rpm). Οι μηχανές *switched reluctance* χρησιμοποιούνται τόσο ως γεννήτριες όσο και ως κινητήρες, κυρίως σε εφαρμογές όπου απαιτείται υψηλή ταχύτητα και αξιοπιστία. Σε αντίθεση με τους τριφασικούς κινητήρες όλων των τύπων, οι κινητήρες *switched reluctance* εξακολουθούν να λειτουργούν σε περίπτωση διακοπής σε μια ή και περισσότερες φάσεις.

Η μηχανή κατασκευάζεται ως *συμμετρική (regular)*, όταν οι πόλοι του στάτη και του δρομέα είναι συμμετρικά τοποθετημένοι ως προς το ζύγωμα. Σε διαφορετική περίπτωση η μηχανή χαρακτηρίζεται *ασύμμετρη (irregular)*. Ο αριθμός των πόλων του στάτη N_s και του δρομέα N_r λαμβάνει διάφορες τιμές. Στις συμμετρικές μηχανές ο αριθμός των πόλων του δρομέα διαφέρει συνήθως κατά δύο από τους πόλους του στάτη ($N_r = N_s \pm 2$). Καθένα από τα τυλίγματα του στάτη αποτελείται από δύο πηνία, τα οποία τυλίγονται σε αντίθετα τοποθετημένους πόλους. Τα δύο πηνία συνδέονται παράλληλα ή συνηθέστερα σε σειρά. Έτσι, ο αριθμός των φάσεων m της μηχανής είναι ίσος με το ήμισυ του αριθμού των πόλων του στάτη. Το τύλιγμα της κάθε φάσης είναι ανεξάρτητο από τα τυλίγματα των άλλων φάσεων.

Στο Σχ. 1α εικονίζεται η κατασκευαστική δομή μιας συμμετρικής μηχανής *switched reluctance* τριών φάσεων, με 6 πόλους στο στάτη και 4 πόλους στο δρομέα, η οποία συμβολίζεται ως 6/4. Στο Σχ. 1β παρουσιάζεται η τομή της ίδιας μηχανής και η κατανομή του μαγνητικού πεδίου που προκαλείται από το τύλιγμα της φάσης 1. Το Σχ. 1γ παριστά την κατανομή του μαγνητικού πεδίου σε μια μηχανή 12/8 τριών φάσεων, η οποία προκύπτει από τη μηχανή 6/4 με διπλασιασμό του αριθμού των πόλων. Στη μηχανή αυτή κάθε τύλιγμα του στάτη τυλίγεται σε 4 πόλους. Μια ασύμμετρη μηχανή *switched reluctance* 4/2 δύο φάσεων με βηματικό διάκενο (*stepped airgap*), εικονίζεται στο Σχ. 1δ.

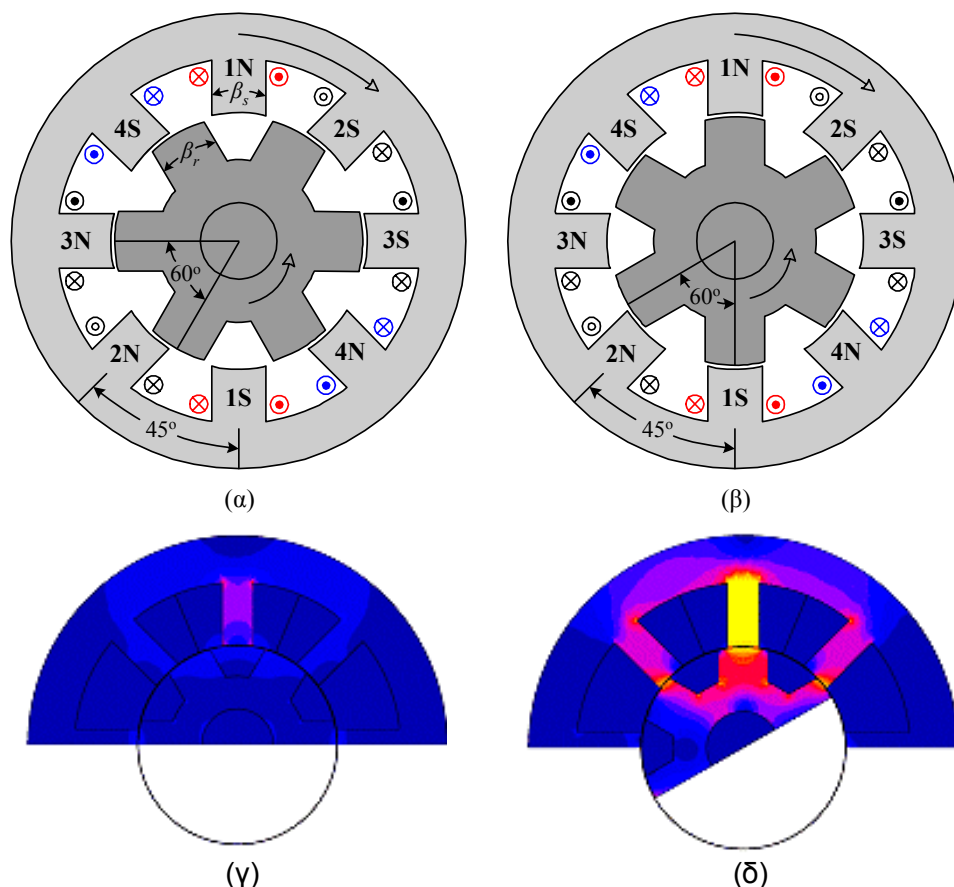
Μια συμμετρική μηχανή *switched reluctance* πρέπει να έχει τουλάχιστον τρεις φάσεις, όταν απαιτείται η δυνατότητα φοράς περιστροφής και προς τις δύο κατευθύνσεις και η ανάπτυξη ροπής εκκίνησης από κάθε θέση του δρομέα.



Σχ. 1 Κατασκευαστική δομή μιας συμμετρικής μηχανής *switched reluctance* τριών φάσεων με 6 πόλους στο στάτη και 4 πόλους στο δρομέα 6/4 (α), δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου στην ίδια μηχανή (β). Κατανομή του μαγνητικού πεδίου σε μια συμμετρική μηχανή 12/8 3-φάσεων (γ) και τομή μιας ασύμμετρης μηχανής 2-φάσεων 4/2 (δ)

2. ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Η λειτουργία των κινητήρων *switched reluctance* στηρίζεται στην τάση του δρομέα να κινείται προς τη θέση όπου η αυτεπαγωγή του διεγερόμενου τυλίγματος του στάτη είναι μέγιστη. Στην εξήγηση της λειτουργίας θεωρούμε ένα κινητήρα 4 φάσεων 8/6, ο οποίος είναι από τους πλέον χρησιμοποιούμενους (Σχ. 2). Θεωρούμε ότι ο δρομέας του κινητήρα βρίσκεται στη θέση του Σχ. 2α και διεγείρεται η φάση 1 του στάτη με ρεύμα i_1 . Η θέση αυτή, όπου κάποιο ζεύγος



Σχ. 2 Συμμετρικός κινητήρας *switched reluctance* 4-φάσεων 8/6 στη θέση μη ευθυγράμμισης (α) και ευθυγράμμισης (β) ως προς τη φάση 1. Κατανομή του μαγνητικού πεδίου στον κινητήρα στη θέση μη ευθυγράμμισης, ακόρεστη λειτουργία (γ) και ευθυγράμμισης (δ) όπου ο κορεσμός είναι ισχυρός

από τους πόλους του δρομέα είναι ακριβώς στο μέσο των πόλων της διεγερόμενης φάσης του στάτη (της φάσης 1 στη συγκεκριμένη περίπτωση), ονομάζεται *θέση μη ευθυγράμμισης (unaligned position)* της διεγερόμενης φάσης θ_u .

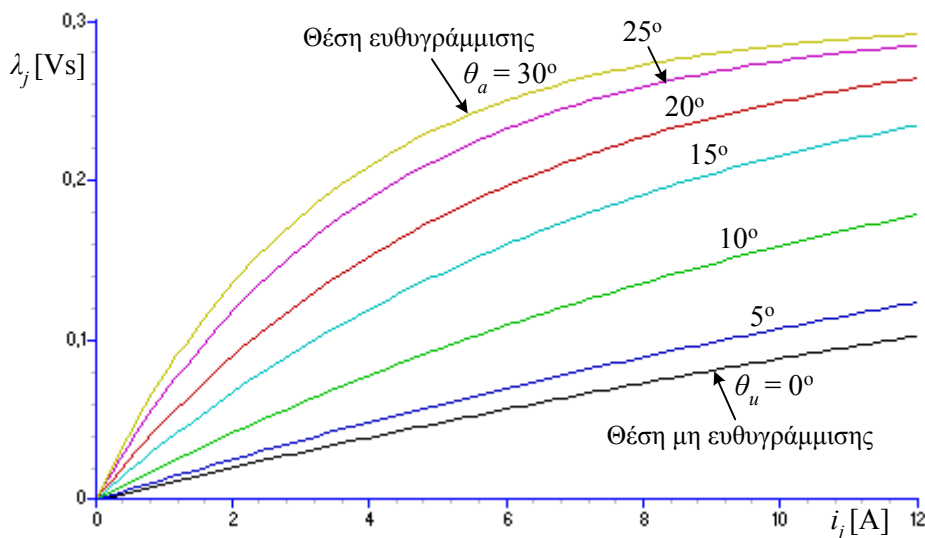
Στη θέση μη ευθυγράμμισης το διάκενο αέρα μεταξύ των πόλων του δρομέα και των πόλων της φάσης 1 είναι το μέγιστο δυνατό. Ως αποτέλεσμα, η μαγνητική αντίσταση (*reluctance*) στη διαδρομή της πεπλεγμένης μαγνητικής ροής (*linkage flux*) λ_1 , που παράγει η φάση 1 είναι υψηλή και η αυτεπαγωγή της φάσης L_1 ελάχιστη ($\lambda_1 = L_1 \cdot i_1$). Η τιμή της αυτεπαγωγής L_1 στη θέση μη ευθυγράμμισης ονομάζεται *αυτεπαγωγή μη ευθυγράμμισης (unaligned inductance)* και συμβολίζεται με L_u . Εξαιτίας της μεγάλης μαγνητικής αντίστασης στη θέση μη ευθυγράμμισης, ο κινητήρας λειτουργεί χωρίς κορεσμό (Σχ. 2γ). Στη θέση μη ευθυγράμμισης δεν αναπτύσσεται ροπή στο δρομέα. Αν ο

δρομέας μετακινηθεί σε οποιαδήποτε κατεύθυνση, τότε αναπτύσσεται ροπή η οποία τείνει να απομακρύνει το δρομέα από τη θέση μη ευθυγράμμισης. Επομένως, η θέση μη ευθυγράμμισης είναι ασταθές σημείο ισοροπίας.

Όταν κάποιο ζεύγος πόλων του δρομέα είναι σε ευθυγράμμιση με τους πόλους της φάσης 1, τότε ο κινητήρας βρίσκεται στη *θέση ευθυγράμμισης* (*aligned position*) ως προς τη φάση 1 (Σχ. 2β). Η μαγνητική αντίσταση είναι τώρα ελάχιστη, καθώς το διάκενο αέρα είναι το μικρότερο δυνατό. Επομένως, η αυτεπαγωγή της φάσης 1 είναι μέγιστη στη θέση ευθυγράμμισης θ_a και ο κινητήρας λειτουργεί σε κατάσταση κορεσμού (Σχ. 2δ). Το επίπεδο του κορεσμού εξαρτάται από το μέγεθος του ρεύματος στη φάση i_1 . Στη θέση ευθυγράμμισης, όπως και στη θέση μη ευθυγράμμισης, δεν αναπτύσσεται ροπή. Όμως, μια απόκλιση του δρομέα από τη θέση ευθυγράμμισης σε οποιαδήποτε κατεύθυνση, προκαλεί την ανάπτυξη μιας ροπής επαναφοράς. Έτσι, η θέση ευθυγράμμισης αποτελεί ευσταθές σημείο ισοροπίας.

Αν οι φάσεις του κινητήρα στο Σχ. 2 διεγείρονται με τη σειρά 1–2–3–4, τότε ο δρομέας στρέφεται με φορά αντίθετη των δεικτών του ρολογιού. Διεγείροντας τις φάσεις του στάτη με τη σειρά 1–4–3–2 αντιστρέφεται η φορά περιστροφής.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι η μηχανή *switched reluctance* έχει ένα πλήθος από καμπύλες μαγνήτισης, όπως εικονίζεται στο Σχ. 3. Κάθε καμπύλη παριστά τη μεταβολή της μαγνητικής ροής λ_j ως



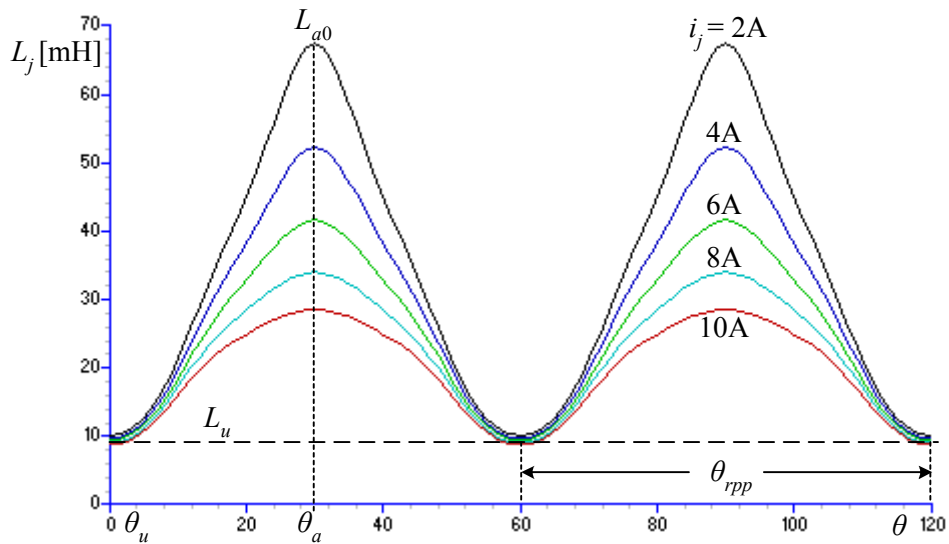
Σχ. 3 Καμπύλες μαγνήτισης μιας φάσης j ενός κινητήρα *switched reluctance* 1hp–4000rpm–8/6, σε 7 θέσεις του δρομέα ανά 5° , μεταξύ της θέσης μη ευθυγράμμισης 0° και της θέσης ευθυγράμμισης 30°

προς το ρεύμα i_j μιας φάσης j , με το δρομέα σε διάφορες θέσεις μεταξύ της θέσης μη ευθυγράμμισης θ_u και ευθυγράμμισης θ_a . Από το Σχ. 3 παρατηρούμε ότι όταν ο δρομέας είναι στη θέση μη ευθυγράμμισης ή κοντά σ' αυτή, οι καμπύλες είναι σχεδόν ευθείες και η μηχανή λειτουργεί χωρίς κορεσμό. Καθώς ο δρομέας προσεγγίζει τη θέση ευθυγράμμισης, ο κορεσμός γίνεται εντονότερος. Όταν οι πόλοι του στάτη και του δρομέα αρχίσουν να επικαλύπτονται, τότε εκδηλώνεται τοπικός κορεσμός στις γωνίες των πόλων, όπως εικονίζεται στο Σχ. 1γ.

Στη λήψη των καμπυλών μαγνήτισης διεγείρεται μια μόνο φάση της μηχανής, ενώ οι υπόλοιπες είναι ανοικτοκυκλωμένες. Στην κανονική λειτουργία της μηχανής δύο ή και περισσότερες φάσεις μπορεί να φέρουν ταυτόχρονα ρεύμα. Έτσι, οι καμπύλες μαγνήτισης από τη μια φάση μπορεί να διαταραχθούν. Το φαινόμενο ονομάζεται *αμοιβαία σύζευξη* μεταξύ των φάσεων και είναι ανεπιθύμητο στις μηχανές *switched reluctance*. Προκειμένου να εξασφαλισθεί η ανεξαρτησία μεταξύ των φάσεων, το ζύγωμα κυρίως στάτη αλλά και του δρομέα κατασκευάζεται με μεγάλο πάχος. Έτσι, αποφεύγεται ο κορεσμός στο ζύγωμα, το οποίο μοιράζονται οι μαγνητικές ροές από τις ταυτόχρονα διεγειρόμενες φάσεις. Προκειμένου τα μαγνητικά πεδία από δύο διαδοχικές φάσεις να αφαιρούνται στο μεγαλύτερο τμήμα του ζυγώματος, αντί να αθροίζονται, τα τυλίγματα των φάσεων συνδέονται με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε οι μαγνητικοί πόλοι που δημιουργούν να είναι αντίθετοι (Σχ. 2α).

Από τις καμπύλες μαγνήτισης και τη σχέση $\lambda_j(i, \theta) = L_j(i, \theta) \cdot i_j$, η οποία συνδέει τη μαγνητική ροή μιας φάσης j με το ρεύμα που τη διαρρέει και την αυτεπαγωγή, προκύπτουν οι καμπύλες του Σχ. 4. Το Σχ. 4 παριστά τη μεταβολή της αυτεπαγωγής μιας φάσης L_j , ως προς τη θέση του δρομέα θ , για διάφορες τιμές του ρεύματος i_j . Παρατηρούμε ότι η αυτεπαγωγή έχει την ελάχιστη τιμή της L_u στη θέση μη ευθυγράμμισης θ_u και τη μέγιστη τιμή της στη θέση ευθυγράμμισης θ_a . Η τιμή της αυτεπαγωγής στη θέση ευθυγράμμισης με πολύ μικρό ρεύμα ονομάζεται *ακόρεστη αυτεπαγωγή ευθυγράμμισης* (*unsaturated aligned inductance*) και συμβολίζεται ως L_{a0} .

Επειδή η μεταβολή της αυτεπαγωγής των φάσεων L_j με τη θέση του δρομέα έχει πολύ μεγάλη σημασία στη λειτουργία της μηχανής, σχεδιάζεται για ευκολία η μεταβολή μιας ιδανικής αυτεπαγωγής με τη γωνία, όπως στο Σχ. 5. Στο Σχ. 5 θ_1 είναι η γωνία όπου αρχίζει η επικάλυψη των πόλων του στάτη και του δρομέα, β_s είναι γωνία των πόλων του στάτη (*stator pole arc*), β_r είναι η γωνία των πόλων του δρομέα (*rotor pole arc*) και θ_{rpp} είναι το *πολικό βήμα του δρομέα*



Σχ. 4 Μεταβολή της αυτεπαγωγής μιας φάσης j ως προς τη θέση του δρομέα στη μηχανή 1hp–4000rpm–8/6, με παράμετρο το ρεύμα διέγερσης της φάσης j . Παρατηρούμε τη μείωση της αυτεπαγωγής, ιδιαίτερα σε γωνίες κοντά στη θέση ευθυγράμμισης (30° και 90°), εξαιτίας του κορεσμού με την αύξηση του ρεύματος από τα 2A στα 10A

(*rotor pole pitch*), το οποίο ορίζεται από τη σχέση

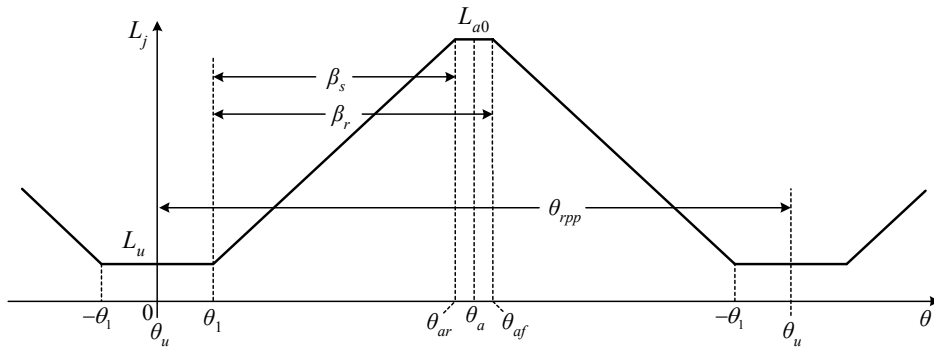
$$\theta_{rpp} = \frac{2\pi}{N_r} \quad (1)$$

Παρατηρούμε ότι η αυτεπαγωγή αυξάνεται περίπου γραμμικά στην περιοχή από τη γωνία έναρξης της επικάλυψης θ_1 μέχρι τη γωνία ευθυγράμμισης θ_a . Η αυτεπαγωγή παραμένει σταθερή σε μια μικρή περιοχή γύρω από τη γωνία θ_a , η οποία είναι ίση με τη διαφορά των γωνιών $|\beta_r - \beta_s|$ και στη συνέχεια μειώνεται γραμμικά μέχρι τη γωνία $-\theta_1$.

Οι καμπύλες της ιδανικής αυτεπαγωγής των υπόλοιπων φάσεων έχουν ακριβώς την ίδια μορφή, αλλά είναι μετατοπισμένες μεταξύ τους κατά τη γωνία *stroke* θ_{sk} , η οποία είναι ίση με

$$\theta_{sk} = \frac{2\pi}{mN_r} \quad (2)$$

Η γωνία *stroke* είναι ίση με 15° στη μηχανή 8/6 πόλων.



Σχ. 5 Ιδανική μεταβολή της αυτεπαγωγής μιας φάσης, ως προς τη θέση του δρομέα

3. ΣΤΙΓΜΙΑΙΑ ΡΟΠΗ

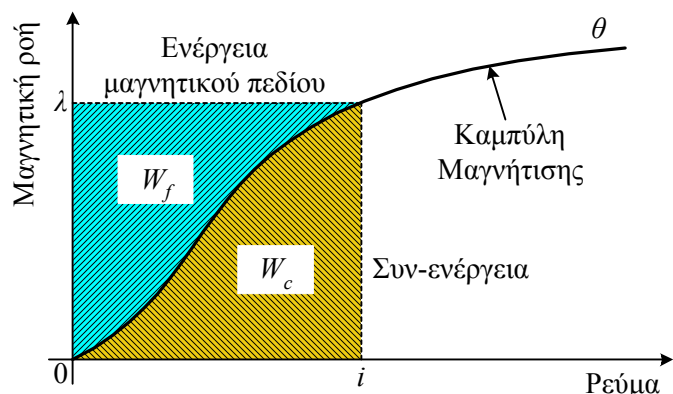
Όταν μια φάση του κινητήρα *switched reluctance* διαρρέεται από ρεύμα, τότε ανεξάρτητα από τη φορά του ρεύματος αναπτύσσεται στο δρομέα μια ροπή, η οποία τείνει να στρέψει το δρομέα στην κατεύθυνση αύξησης της αυτεπαγωγής της φάσης, έως τη θέση ευθυγράμμισης, η οποία αποτελεί το σημείο ισορροπίας. Δηλαδή, η κατεύθυνση της ροπής είναι προς την πλησιέστερη θέση ευθυγράμμισης. Η ηλεκτρομαγνητική ροπή που παράγεται από τη φάση j του κινητήρα ορίζεται ισοδύναμα από τις σχέσεις

$$T_{ej}(\lambda, \theta) = - \left. \frac{\partial W_f(\lambda, \theta)}{\partial \theta} \right|_{\lambda = \text{const.}} \quad (3)$$

$$T_{ej}(i, \theta) = \left. \frac{\partial W_c(i, \theta)}{\partial \theta} \right|_{i = \text{const.}} \quad (4)$$

όπου, W_f είναι η αποθηκευμένη ενέργεια με τη μορφή μαγνητικού πεδίου στη μηχανή. Η W_f για δεδομένη γωνία θ και ρεύμα i είναι ίση με το εμβαδόν μεταξύ της αντίστοιχης καμπύλης μαγνήτισης και του άξονα της μαγνητικής ροής (Σχ. 6).

$$W_f(\lambda, \theta) = \int_0^\lambda i(\xi, \theta) d\xi \Big|_{\theta = \text{const.}} \quad (5)$$



Σχ. 6 Ορισμός της αποθηκευμένης ενέργειας στο μαγνητικό πεδίο W_f και της συν-ενέργειας W_c

Ακόμη, W_c είναι η *συν-ενέργεια (co-energy)*, η οποία ορίζεται ως το εμβαδόν μεταξύ της καμπύλης μαγνήτισης και του άξονα του ρεύματος

$$W_c(i, \theta) = \int_0^i \lambda(\xi, \theta) d\xi \Big|_{\theta = \text{const.}} \quad (6)$$

Αν αγνοήσουμε τον κορεσμό στη μηχανή, τότε ισχύει

$$\lambda(i, \theta) = L(i, \theta) \cdot i = L(\theta) \cdot i \quad (7)$$

Αντικαθιστώντας την Εξ. (7) στην Εξ. (6) προκύπτει η συν-ενέργεια στην ακόρεστη μηχανή,

$$W_c(i, \theta) = \int_0^i L(\theta) \cdot \xi d\xi = \frac{1}{2} L(\theta) \cdot i^2 \quad (8)$$

την οποία θέτοντας στην Εξ. (4) ορίζουμε τη ροπή που παράγει μια φάση της μηχανής

$$T_{ej}(i, \theta) = \frac{1}{2} \frac{dL(\theta)}{d\theta} i^2 \quad (9)$$

Από την Εξ. (9) προκύπτει ότι η ροπή είναι ανεξάρτητη από τη φορά του ρεύματος στη φάση και εξαρτάται από τη μεταβολή της αυτεπαγωγής ως προς τη γωνία του δρομέα. Ειδικότερα στην περιο-

χή γωνιών θ_1 έως θ_{ar} (Σχ. 5), όπου η αυτεπαγωγή αυξάνεται, η ροπή είναι θετική. Επομένως, η μηχανή λειτουργεί ως κινητήρας. Όταν η φάση φέρει ρεύμα στην περιοχή γωνιών θ_{af} έως $-\theta_1$, η ροπή είναι αρνητική και έτσι η μηχανή λειτουργεί ως γεννήτρια. Με την προσέγγιση της γραμμικής μεταβολής της αυτεπαγωγής με τη γωνία θ , η αναπτυσσόμενη ροπή είναι σταθερή στην αντίστοιχη περιοχή γωνιών, όταν το ρεύμα της φάσης είναι σταθερό.

Θεωρώντας ότι οι m φάσεις της μηχανής είναι μαγνητικά ανεξάρτητες μεταξύ τους, η ολική ηλεκτρομαγνητική ροπή είναι ίση με

$$T_e = \sum_{j=1}^m T_{ej}(i, \theta) \quad (10)$$

Σε αντίθεση με τις μηχανές συνεχούς ρεύματος και τους τριφασικούς επαγωγικούς κινητήρες, η ολική ροπή στους κινητήρες *switched reluctance* δεν είναι σταθερή. Η ολική ροπή παρουσιάζει διακυμάνσεις (*ripple*) με συχνότητα $m \cdot N_r \cdot \omega_r$, όπου ω_r είναι η ταχύτητα περιστροφής. Στους κινητήρες τριών φάσεων οι διακυμάνσεις της ροπής είναι πολύ υψηλές. Έτσι, προτιμώνται οι κινητήρες τεσσάρων φάσεων, οι οποίοι παρουσιάζουν μικρότερη διακύμανση της ροπής. Αν και η αύξηση του αριθμού των φάσεων (πόλων) συντελεί στην παραγωγή περισσότερο ομαλής ροπής, προκαλεί ταυτόχρονα τη μείωση του λόγου L_{a0} / L_u , με αποτέλεσμα τη μείωση του βαθμού απόδοσης.

4. ΕΞΙΣΩΣΗ ΤΗΣ ΤΑΣΗΣ

Η εξίσωση της τάσης που ισχύει σε κάθε φάση της μηχανής *switched reluctance* είναι η

$$u_j = Ri_j + \frac{d\lambda_j(i, \theta)}{dt} \quad (11)$$

όπου R είναι η ωμική αντίσταση του τυλίγματος κάθε φάσης. Όταν η ταχύτητα περιστροφής ω_r είναι σταθερή, ισχύει $d\theta/dt = \omega_r$ και η ταχύτητα μεταβολής της πεπλεγμένης μαγνητικής ροής γράφεται στη μορφή

$$\frac{d\lambda_j(i, \theta)}{dt} = \frac{\partial \lambda_j(i, \theta)}{\partial i} \frac{di_j}{dt} + \frac{\partial \lambda_j(i, \theta)}{\partial \theta} \omega_r \quad (12)$$

Στην Εξ. (12) ο όρος $\partial_j(i, \theta)/\partial i$ παριστά την κλίση της καμπύλης μαγνήτισης στη γωνία θ , συμβολίζεται με $l_j(i, \theta)$ και ονομάζεται *μεταβλητή αυτεπαγωγή (incremental inductance)*. Ο δεύτερος όρος $\partial \lambda_j(i, \theta)/\partial \theta \cdot \omega_r$ αποτελεί την αντιηλεκτρεγερτική δύναμη του κινητήρα $e_j(i, \theta, \omega_r)$. Επομένως, η εξίσωση της τάσης λαμβάνει τη μορφή

$$u_j = Ri_j + l_j(i, \theta) \frac{di_j}{dt} + e_j(i, \theta, \omega_r) \quad (13)$$

Στην ειδική περίπτωση του γραμμικού κινητήρα, χωρίς κορεσμό, η εξίσωση της τάσης απλοποιείται ως

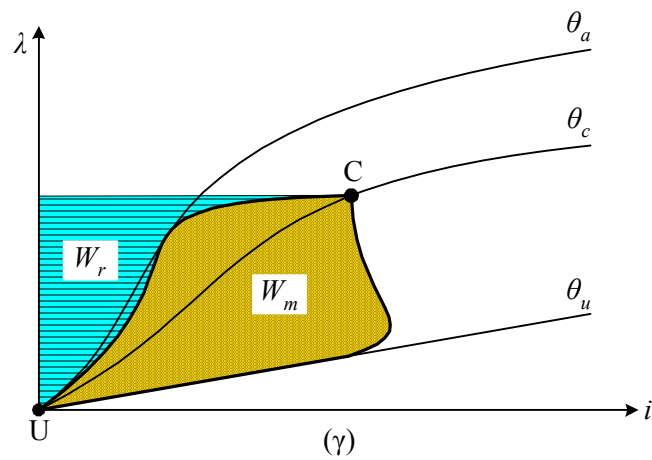
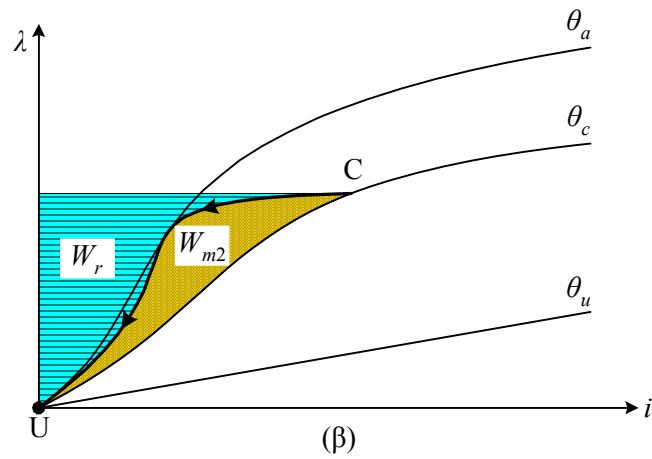
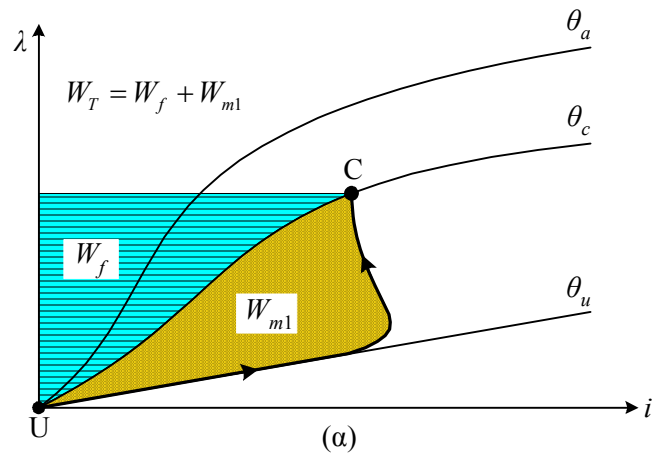
$$u_j = R \cdot i_j + L_j(\theta) \frac{di_j}{dt} + i_j \cdot \omega_r \frac{dL_j(\theta)}{d\theta} \quad (14)$$

5. ΜΕΣΗ ΡΟΠΗ

Το κυριότερο μειονέκτημα της μηχανής *switched reluctance* είναι οι διακυμάνσεις της ολικής ηλεκτρομαγνητικής ροπής, οι οποίες έχουν ως άμεσο επακόλουθο την παραγωγή θορύβου με υψηλή στάθμη. Αν και στα κινητήρια συστήματα υψηλών επιδόσεων η μορφή της στιγμιαίας ροπής είναι σημαντική, σε πολλές εφαρμογές το ενδιαφέρον εστιάζεται μόνο στη μέση ροπή. Η μέση τιμή της ροπής T_{av} υπολογίζεται μαθηματικά από την ολοκλήρωση της ολικής στιγμιαίας ροπής, σύμφωνα με τη σχέση

$$T_{av} = \frac{1}{\theta_{sk}} \int_0^{\theta_{sk}} T_e d\theta \quad (15)$$

Προκειμένου να εξηγήσουμε τη διαδικασία μετατροπής της ενέργειας από τον κινητήρα, θα υπολογίσουμε τη μέση ροπή γραφικά, από το διάγραμμα με τις καμπύλες μαγνήτισης. Θεωρούμε ότι ο κινητήρας στρέφεται με σταθερή υψηλή ταχύτητα ω_r και ότι εφαρμόζεται τάση u σε μια φάση της μηχανής, σε μια γωνία κοντά στη θέση μη ευθυγράμμισης θ_u . Στην περίπτωση αυτή και αμελώντας την αντίσταση του τυλίγματος R , το ρεύμα αυξάνεται αρχικά γραμμικά μέχρι τη γωνία θ_1 (Σχ. 5), όπου η αυτεπαγωγή διατηρείται σταθερή στην τιμή L_u . Στη συνέχεια αναπτύσσεται η αντιηλεκτρεγερτική δύναμη από τον κινητήρα, καθώς η αυτεπαγωγή της φάσης αυξάνεται και το ρεύμα διατηρείται περίπου σταθερό.



Σχ. 7 Υπολογισμός της μέσης ροπής του κινητήρα *switched reluctance*.
 Εικονίζονται οι καμπύλες μαγνήτισης στη θέση μη ευθυγράμμισης θ_u , ευθυγράμμισης θ_a και μεταγωγής θ_c : Περίοδος μαγνήτισης (α), περίοδος απομαγνήτισης (β), ολικό διάγραμμα ενέργειας σε κάθε *stroke* (γ)

Η μαγνητική ροή αυξάνεται συνεχώς γραμμικά, καθώς ισχύει $d\lambda/d\theta \cong u/\omega_r$. Έτσι, το διάγραμμα $\lambda(i)$ έχει τη μορφή της καμπύλης UC στο Σχ. 7α. Το διάστημα U έως C, στο οποίο επιβάλλεται θετική τάση u στη φάση του κινητήρα, ονομάζεται *περίοδος μαγνήτισης (fluxing period)*, επειδή αυξάνεται το μαγνητικό πεδίο στη μηχανή. Στο σημείο C, το οποίο αντιστοιχεί στη γωνία θ_c , η τάση που εφαρμόζεται στη φάση του κινητήρα αντιστρέφεται $-u$ και το ρεύμα μειώνεται μέχρι το μηδέν, καμπύλη CU στο Σχ. 7β.

Στο διάστημα CU η μαγνητική ροή μειώνεται γραμμικά, από τη μέγιστη τιμή της στη *γωνία μεταγωγής ή σβέσης (commutation angle, turn-off angle)* θ_c στο μηδέν και ονομάζεται *περίοδος απομαγνήτισης (de-fluxing period)*.

Στο διάστημα μαγνήτισης, U έως C, η πηγή τροφοδοσίας αποδίδει στον κινητήρα ηλεκτρική ενέργεια ίση με W_T

$$W_T = W_f + W_{m1} \quad (16)$$

όπου, W_f είναι η ενέργεια που έχει αποθηκευθεί στο μαγνητικό πεδίο και W_{m1} είναι η ενέργεια που έχει μετατραπεί σε μηχανική. Σύμφωνα με το Σχ. 7α, περίπου το μισό της ηλεκτρικής ενέργειας που παρέχει η πηγή μετατρέπεται σε μηχανική, ενώ η υπόλοιπη αποθηκεύεται με τη μορφή μαγνητικού πεδίου στη μηχανή.

Κατά την περίοδο απομαγνήτισης, σημεία από το C έως το U στο οποίο το ρεύμα και η μαγνητική ροή μηδενίζονται, το τμήμα W_{m2} της αποθηκευμένης μαγνητικής ενέργειας W_f μετατρέπεται σε μηχανικό έργο, ενώ το τμήμα W_r επιστρέφει στην πηγή τροφοδοσίας. Επομένως, σύμφωνα με το Σχ. 7γ, η συνολική ενέργεια που μετατρέπεται σε μηχανική είναι ίση με

$$W_m = W_{m1} + W_{m2} \quad (17)$$

ενώ W_r είναι το τμήμα της ολικής προσφερόμενης ενέργειας W_T που επιστρέφει στην πηγή και δεν συνεισφέρει στην παραγωγή μηχανικής ισχύος. Έτσι, ο λόγος W_m/W_T στις μηχανές *switched reluctance* αντιστοιχεί στο συντελεστή ισχύος των μηχανών εναλλασσόμενου ρεύματος. Ο λόγος W_m/W_T έχει την ελάχιστη τιμή του 0.5 στην περίπτωση της γραμμικής μηχανής και αυξάνεται καθώς η μηχανή λειτουργεί με ισχυρότερο κορεσμό.

Το διάγραμμα του Σχ. 7γ επαναλαμβάνεται $m \cdot N_r$ φορές σε κάθε περιστροφή της μηχανής (*stroke*). Έτσι, η μέση τιμή της ροπής ανά περιστροφή ορίζεται από τη σχέση

$$T_{av} = \frac{mN_r}{2\pi} W_m \quad (18)$$

6. ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ

Στις μηχανές *switched reluctance*, αντίθετα από τις μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος, δεν ισχύει η ημιτονοειδής μεταβολή της αυτεπαγωγής με τη θέση του δρομέα. Η πραγματική μεταβολή της αυτεπαγωγής με τη γωνία εικονίζεται στο Σχ. 4 και η ιδανική στο Σχ. 5. Έτσι, δεν μπορεί να εφαρμοστεί ο μετασχηματισμός $d-q$ στις μηχανές *switched reluctance*, για τη μετατροπή των μεταβλητών αυτεπαγωγών σε σταθερές και στη λήψη ενός δυναμικού ισοδύναμου κυκλώματος.

Στην απόκτηση ενός μοντέλου για την περιγραφή της δυναμικής συμπεριφοράς της μηχανής *switched reluctance* έχουν προταθεί διάφορες μέθοδοι, οι οποίες απαιτούν τη γνώση των καμπυλών μαγνήτισης. Πολλές από τις μεθόδους είναι μη αναλυτικές, ενώ η αμοιβαία σύζευξη μεταξύ των φάσεων δεν λαμβάνεται συνήθως υπόψη.

Στη συνέχεια περιγράφεται μια πολύ βολική αναλυτική μέθοδος, για την προσομοίωση της δυναμικής συμπεριφοράς της μηχανής *switched reluctance*. Η μέθοδος στηρίζεται στην προσέγγιση της μαγνητικής ροής κάθε φάσης, η οποία είναι μια περιοδική συνάρτηση της γωνίας θ , με τη σχέση

$$\lambda_j(i_j, \theta) = \lambda_s (1 - e^{-i_j f_j(\theta)}), \quad i_j > 0 \quad (19)$$

όπου

$$f_j(\theta) = a + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin n\theta + c_n \cos n\theta \quad (20)$$

και λ_s είναι η μαγνητική ροή κορεσμού. Η γωνία θ ολισθαίνει κατά $(j-1)2\pi/(mN_r)$ σε κάθε φάση. Η συν-ενέργεια υπολογίζεται από την Εξ. (6) ως

$$W_{ej}(i_j, \theta) = \int_0^{i_j} \lambda_j(\xi, \theta) d\xi \Big|_{\theta = const.} = \lambda_s \left[i_j + \frac{e^{-i_j f_j(\theta)} - 1}{f_j(\theta)} \right] \quad (21)$$

και η στιγμιαία ροπή κάθε φάσης από την Εξ. (4) ως

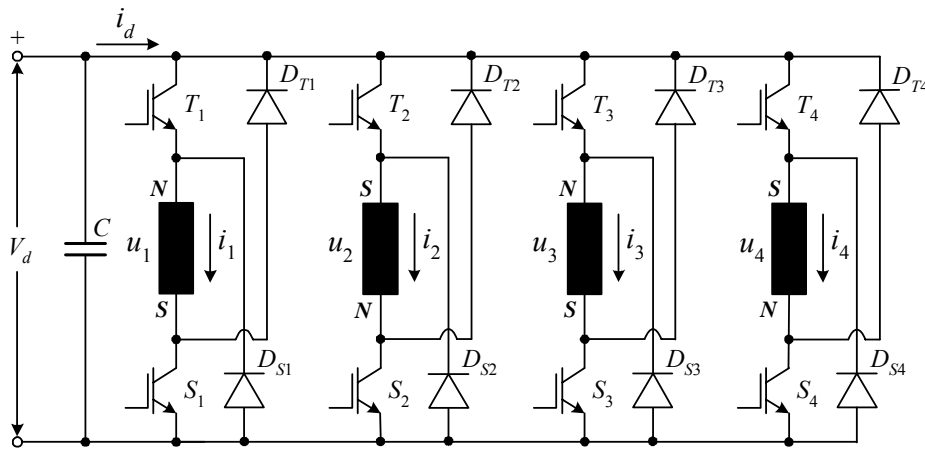
$$T_{ej}(i_j, \theta) = \left. \frac{\partial W_{ej}(i_j, \theta)}{\partial \theta} \right|_{i_j = \text{const.}} = \frac{\lambda_s}{f_j^2(\theta)} \frac{df_j(\theta)}{d\theta} \left[1 - (1 + i_j f_j(\theta)) e^{-i_j f_j(\theta)} \right] \quad (22)$$

Η ολική στιγμιαία ηλεκτρομαγνητική ροπή ορίζεται από την Εξ. (10), η μέση τιμή της από την Εξ. (15) και η τάση από την Εξ. (11).

7. ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑΣ ΙΣΧΥΟΣ

Για τη λειτουργία των κινητήρων *switched reluctance* είναι αναγκαία η χρήση ενός μετατροπέα ισχύος, ο οποίος έχει συνήθως τη δομή του Σχ. 8 για την περίπτωση της μηχανής με 4 φάσεις. Κάθε φάση του κινητήρα ελέγχεται ανεξάρτητα από ένα κλάδο του μετατροπέα, ο οποίος αποτελείται από δύο transistors και δύο διόδους. Ως transistor χρησιμοποιείται συνήθως το *IGBT*. Ο μετατροπέας τροφοδοτείται από μια πηγή συνεχούς τάσης V_d , η οποία συνήθως προέρχεται από την ανόρθωση της τάσης του δικτύου και ένα πυκνωτή C εξομάλυνσης της τάσης και αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας.

Η τάση u_j σε κάθε φάση του κινητήρα εξαρτάται από την κατάσταση των transistors. Όταν άγουν και τα δύο transistors του κλάδου, τότε στο τύλιγμα της αντίστοιχης φάσης εφαρμόζεται τάση ίση με $+V_d$. Η εφαρμογή της θετικής τάσης προκαλεί τη ροή ενός αυξανόμενου ρεύματος i_j στο τύλιγμα με την εικονιζόμενη φορά, ενώ $i_d = i_j$.



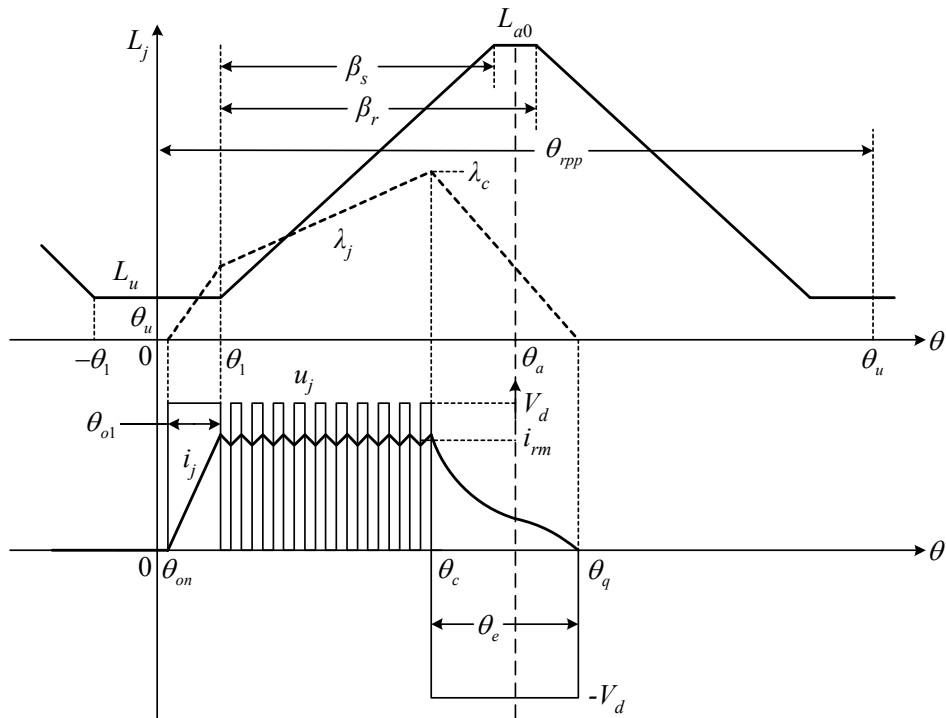
Σχ. 8 Δομή του μετατροπέα ισχύος για την οδήγηση του κινητήρα *switched reluctance* 4-φάσεων

Όταν δεν άγουν τα transistors το ρεύμα i_j μειώνεται, καθώς ρέει μέσω των δύο διόδων προς την πηγή τροφοδοσίας. Η φορά του ρεύματος εντός του τυλίγματος δεν μεταβάλλεται, ενώ η τάση στο τύλιγμα είναι ίση με $u_j = -V_d$ και η φορά του ρεύματος i_d είναι αντεστραμμένη ($i_d = -i_j$). Όταν άγει το ένα από τα δύο transistor, έστω το T_j , το ρεύμα i_j ρέει μέσω του T_j και της διόδου D_{Tj} με την ίδια φορά, ενώ η τάση στο τύλιγμα και το ρεύμα i_d είναι μηδενικά. Αντίστοιχα, όταν άγει μόνο το transistor S_j το ρεύμα ρέει μέσω αυτού και της διόδου D_{Sj} .

8. ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ SWITCHED RELUCTANCE

Στη λειτουργία των μηχανών *switched reluctance* απαιτείται η τροφοδότηση του τυλίγματος κάθε φάσης με παλμούς ρεύματος, μέσω του μετατροπέα ισχύος. Οι παλμοί ρεύματος σε κάθε φάση, στην περίπτωση του κινητήρα, πρέπει να εφαρμόζονται κυρίως στην περιοχή γωνιών όπου η αυτεπαγωγή της αντίστοιχης φάσης αυξάνεται, καθώς τότε αναπτύσσεται θετική ροπή. Αντίστοιχα, για τη λειτουργία της μηχανής ως γεννήτριας, οι παλμοί του ρεύματος πρέπει να επιβάλλονται κυρίως στην περιοχή γωνιών όπου η αυτεπαγωγή της κάθε φάσης μειώνεται. Επομένως, στη λειτουργία της μηχανής *switched reluctance* είναι αναγκαίο ένα κύκλωμα ελέγχου, το οποίο να ορίζει το μέγεθος του ρεύματος σε κάθε φάση i_{rm} , τη γωνία έναυσης (έναρξης) του ρεύματος (*turn-on angle*) θ_{on} και τη γωνία μεταγωγής θ_c , όπως εικονίζεται στο Σχ. 9 για την περίπτωση του κινητήρα. Στο διάστημα θ_{on} έως θ_c η μαγνητική ροή αυξάνεται (περίοδος μαγνήτισης), ενώ στην περιοχή γωνιών θ_c έως θ_q η μαγνητική ροή μειώνεται (περίοδος απομαγνήτισης). Στη γωνία θ_q (*extinction angle*), το ρεύμα και η μαγνητική ροή μηδενίζονται.

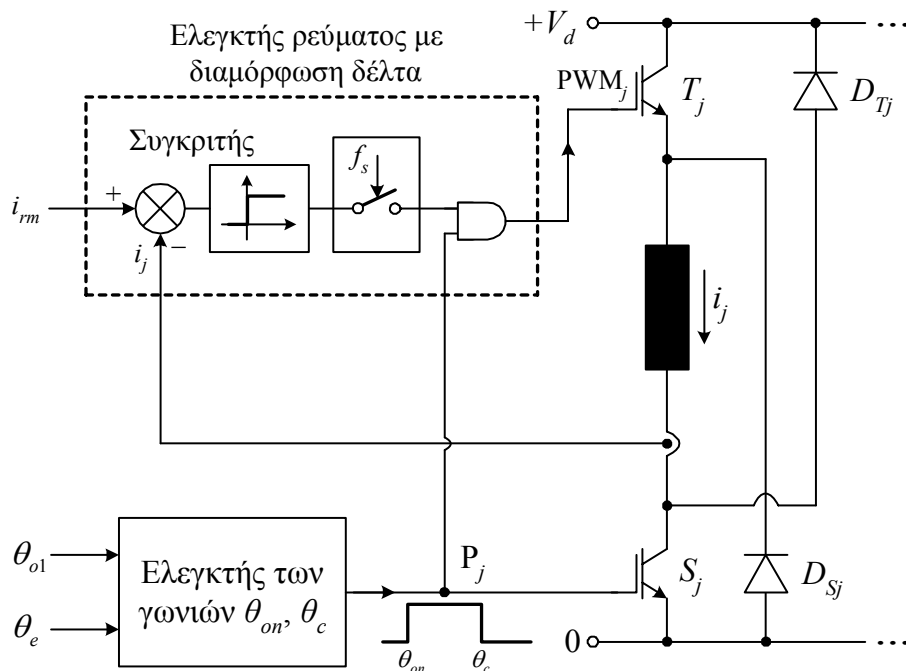
Η επιλογή του ρεύματος και των γωνιών θ_{on} , θ_c εξαρτάται από τη ροπή του φορτίου, την ταχύτητα ω_r , τη συνεχή τάση τροφοδοσίας V_d και πρέπει να γίνεται με κριτήριο τη βέλτιστη λειτουργία του κινητήρα. Η βέλτιστη λειτουργία αναφέρεται στην επίτευξη ελάχιστων απωλειών ισχύος από τον κινητήρα και στιγμιαίας ροπής με την ελάχιστη διακύμανση. Η γωνία θ_{on} επιλέγεται έτσι ώστε το ρεύμα της φάσης να λαμβάνει την τιμή i_{rm} στη γωνία θ_1 , όπου αρχίζει η επικάλυψη των πόλων. Στο διάστημα θ_{on} έως θ_1 η αυτεπαγωγή είναι περίπου σταθερή στην τιμή L_u , επομένως η αντιηλεκτρεγερτική δύναμη που αναπτύσσει ο κινητήρας είναι μηδέν. Οδηγώντας στη γωνία θ_{on} τα δύο transistors του μετατροπέα ισχύος στην αγωγιμότητα, το ρεύμα της φάσης i_j αυξάνεται γρήγορα στην επιθυμητή τιμή i_{rm} , κάτω από την επίδραση της τάσης τροφοδοσίας $+V_d$.



Σχ. 9 Λειτουργία του κινητήρα *switched reluctance* με έλεγχο του ρεύματος, μέσω της μεθόδου *soft chopping*. Εικονίζονται η ιδανική αυτεπαγωγή της φάσης j (L_j), η μαγνητική ροή (λ_j), η τάση (u_j) και το ρεύμα (i_j) της φάσης

Στη γωνία θ_1 το ρεύμα στη φάση j του κινητήρα λαμβάνει την επιθυμητή τιμή. Προκειμένου να διατηρηθεί το ρεύμα σταθερό στην τιμή i_{rm} το ένα από τα δύο transistor, συνήθως το S_j παραμένει στην αγωγιμότητα, ενώ το T_j οδηγείται από τους PWM_j παλμούς που παράγει ένας ελεγκτής ρεύματος (Σχ. 10). Ο ελεγκτής ρεύματος με διαμόρφωση δέλτα (*delta modulation current controller*) που χρησιμοποιείται στο Σχ. 10 αποτελείται από ένα συγκριτή του ρεύματος αναφοράς i_{rm} με το μετρούμενο ρεύμα της φάσης i_j . Οι παλμοί που προκύπτουν από τη σύγκριση υφίστανται δειγματοληψία με τη μέγιστη επιθυμητή διακοπτική συχνότητα f_s , παράγοντας το σήμα PWM_j , το οποίο ελέγχει την αγωγιμότητα του transistor T_j . Το πλεονέκτημα του ελεγκτή ρεύματος με διαμόρφωση δέλτα, σε σχέση με τον ελεγκτή ρεύματος υστέρησης, είναι ότι η μέγιστη διακοπτική συχνότητα του transistor περιορίζεται στην τιμή f_s .

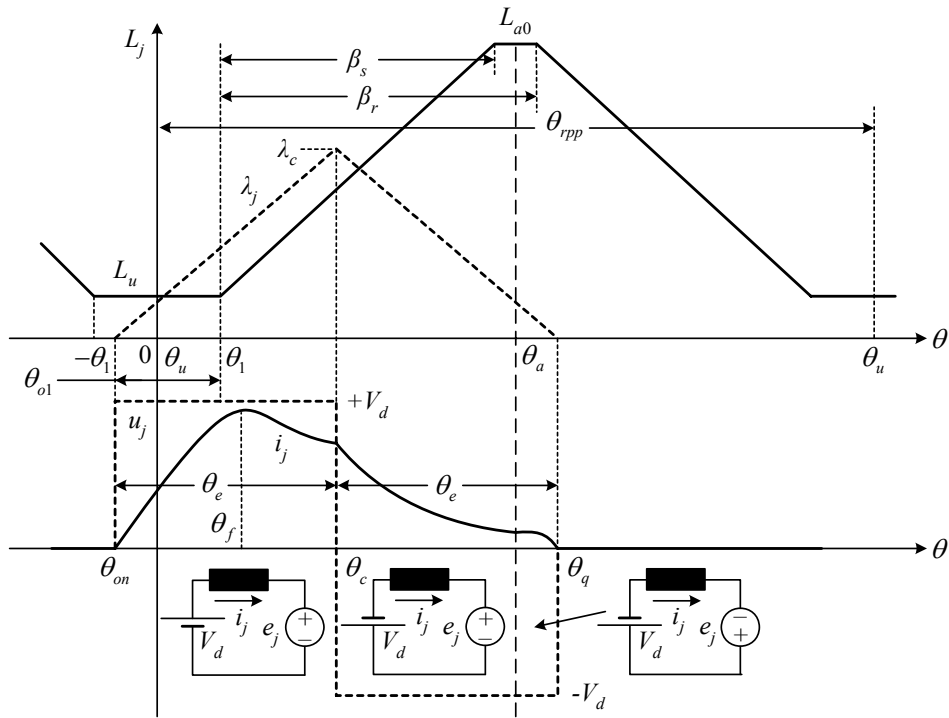
Στο διάστημα θ_1 έως θ_c , το ρεύμα στη φάση j διατηρείται σταθερό στην τιμή i_{rm} , μέσω των παλμών PWM_j που παράγει ο ελεγκτής ρεύματος και του σήματος P_j που παράγει ο ελεγκτής των γωνιών έναυσης θ_{on} και μεταγωγής θ_c .



Σχ. 10 Κύκλωμα οδήγησης των transistors σ' ένα κλάδο του μετατροπέα ισχύος, για τον έλεγχο του ρεύματος στη φάση j με τη μέθοδο *soft chopping*

Όταν το σήμα PWM_j είναι σε κατάσταση “1” άγουν και τα δύο transistors, η τάση u_j είναι ίση με $+V_d$ και το ρεύμα i_j αυξάνεται. Όταν το σήμα PWM_j είναι σε κατάσταση “0” άγει μόνο το transistor S_j , η τάση στη φάση είναι μηδενική ($u_j = 0$) και το ρεύμα i_j μειώνεται καθώς ρέει στο βρόχο που σχηματίζουν το transistor S_j και η διόδος D_{Sj} . Αυτός ο τρόπος ελέγχου του ρεύματος, όπου η τάση u_j λαμβάνει τις τιμές $+V_d$ και 0 ονομάζεται *soft chopping*. Αγνοώντας τη σύνθετη αντίσταση του τυλίγματος, η μαγνητική ροή μεταβάλλεται γραμμικά. Ειδικότερα, στο διάστημα $\theta_1 - \theta_{on}$ ισχύει $d\lambda_j/d\theta = V_d/\omega_r$, ενώ στο διάστημα $\theta_c - \theta_1$ ισχύει $d\lambda_j/d\theta = PWM_j \cdot V_d/\omega_r$, επομένως η μαγνητική ροή αυξάνεται με μικρότερο ρυθμό. Στο διάστημα $\theta_c - \theta_c$ η μαγνητική ροή μειώνεται γραμμικά καθώς $d\lambda_j/d\theta = -V_d/\omega_r$. Η μαγνητική ροή λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της λ_c στη γωνία μεταγωγής θ_c .

Ο έλεγχος του ρεύματος επιτυγχάνεται ακόμη με την οδήγηση και των δύο transistors από το σήμα PWM_j . Στην περίπτωση αυτή η τάση της φάσης είναι ίση με $+V_d$, όταν άγουν τα δύο transistors, οπότε $PWM_j = “1”$. Η τάση u_j είναι ίση με $-V_d$ όταν τα δύο transistors είναι στην αποκοπή ($PWM_j = “0”$). Το σήμα P_j ορίζει την έναρξη με τη γωνία θ_{on} και τη λήξη με τη γωνία θ_c , της δράσης του ελεγκτή ρεύματος. Η μέθοδος αυτή ονομάζεται *hard chopping* και συνήθως δεν χρησιμοποιείται, καθώς με δεδομένη συχνότητα του σήματος PWM_j η



Σχ. 11 Λειτουργία του κινητήρα *switched reluctance* με απλό παλμό. Εικονίζονται η ιδανική αυτεπαγωγή της φάσης j (L_j), η μαγνητική ροή (λ_j), η τάση (u_j) και το ρεύμα (i_j) της φάσης

κυμάτωση του ρεύματος i_j είναι πολύ μεγαλύτερη από εκείνη με τη μέθοδο *soft chopping*.

Οι κυματομορφές του Σχ. 9 και η παραπάνω ανάλυση ισχύουν όταν η ταχύτητα του κινητήρα είναι σχετικά μικρή ως προς την ονομαστική (*base*), οπότε η αντιηλεκτρεγερτική δύναμη είναι αρκετά μικρότερη από την τάση τροφοδοσίας V_d . Η ονομαστική ταχύτητα στις μηχανές *switched reluctance* ορίζεται ως η μέγιστη ταχύτητα στην οποία αναπτύσσεται η ονομαστική ροπή, χωρίς υπέρβαση στην ονομαστική τάση V_d και το ρεύμα. Καθώς η ταχύτητα αυξάνεται σε τιμές κοντά ή και μεγαλύτερες της ονομαστικής, η αντιηλεκτρεγερτική δύναμη e_j υπερβαίνει την τάση τροφοδοσίας σε κάποια διαστήματα λειτουργίας. Έτσι, η τάση τροφοδοσίας καθίσταται ανεπαρκής για τον έλεγχο του ρεύματος στην επιθυμητή τιμή i_{rm} , ο αριθμός των παλμών στο σήμα PWM_j περιορίζεται και τελικά η διαδικασία εκφυλίζεται στη λειτουργία απλού παλμού (*single pulse operation*).

Στη λειτουργία απλού παλμού, όπως εικονίζεται στο Σχ. 11, το ρεύμα i_j δεν μπορεί να λάβει την τιμή αναφοράς i_{rm} στο διάστημα $\theta_c - \theta_{on}$, καθώς η e_j υπερβαίνει την τάση τροφοδοσίας μετά τη γωνία θ_f ($e_j \cong i_j \omega_r dL_j / d\theta$), οπότε το ρεύμα μειώνεται. Έτσι, η έξοδος του ελεγκτή ρεύματος είναι μόνιμα "1" και στο διάστημα $\theta_c - \theta_{on}$ άγουν

μόνιμα και τα δύο transistors. Μετά τη γωνία μεταγωγής θ_c , οπότε τα transistors οδηγούνται στην αποκοπή και μέχρι τη γωνία ευθυγράμμισης θ_a , η αρνητική τάση τροφοδοσίας και η e_j προστίθενται, προκαλώντας την απότομη μείωση του ρεύματος. Μετά τη γωνία θ_a η πολικότητα της e_j αντιστρέφεται, εξαιτίας της μείωσης της αυτεπαγωγής, με αποτέλεσμα τη μείωση του ρεύματος με μικρότερο ρυθμό εφόσον $e_j < V_d$. Αν η τιμή της e_j είναι μεγαλύτερη της τάσης τροφοδοσίας μετά τη γωνία θ_a , τότε το ρεύμα θα αρχίσει να αυξάνεται. Για να αποφευχθεί αυτή η κατάσταση, πρέπει η γωνία θ_c να είναι πολύ πριν τη θ_a . Σημειώνουμε ότι στη λειτουργία απλού παλμού τα διαστήματα $\theta_c - \theta_{on}$ και $\theta_q - \theta_c$ είναι περίπου ίσα μεταξύ τους και ίσα με $\theta_e = \lambda_c \omega_r / V_d$, όπου λ_c είναι η μέγιστη τιμή της μαγνητικής ροής.

9. ΔΙΑΤΑΞΗ ΟΔΗΓΗΣΗΣ ΤΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΜΕ ΕΛΕΓΧΟ ΤΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΣΕ ΜΙΚΡΕΣ ΤΑΧΥΤΗΤΕΣ

Η λειτουργία του κινητήρα *switched reluctance* επιτυγχάνεται μέσω ενός μετατροπέα ισχύος με τη δομή του Σχ. 8. Τα transistors σε κάθε κλάδο του μετατροπέα οδηγούνται από τα σήματα PWM_j και P_j , τα οποία παράγουν οι ελεγκτές ρεύματος και οι ελεγκτές των γωνιών θ_{on} , θ_c αντίστοιχα για την κάθε φάση. Οι ελεγκτές ρεύματος συγκρίνουν το μετρούμενο ρεύμα από κάθε φάση i_j με το ρεύμα αναφοράς i_{rm} . Οι τρεις μεταβλητές ελέγχου του κινητήρα, δηλαδή το ρεύμα αναφοράς και οι γωνίες έναυσης και μεταγωγής ορίζονται από ένα σύστημα κλειστού βρόχου με PI ελεγκτή ταχύτητας, όπως εικονίζεται στο Σχ. 12. Ο ελεγκτής ταχύτητας συγκρίνει την επιθυμητή ταχύτητα αναφοράς ω^* με τη μετρούμενη ταχύτητα ω_r και παράγει την αναφορά του ρεύματος στις φάσεις του κινητήρα i_{rm} . Το ρεύμα i_{rm} εξαρτάται κυρίως από τη ροπή του φορτίου. Στις υψηλές ταχύτητες ο κινητήρας λειτουργεί με τη μέθοδο απλού παλμού, όπως εξηγείται στην παρ. 10. Στη λειτουργία απλού παλμού οι μεταβλητές ελέγχου εκφυλίζονται σε δύο, τις γωνίες έναυσης και μεταγωγής, καθώς η αναφορά του ρεύματος δεν μπορεί να ικανοποιηθεί.

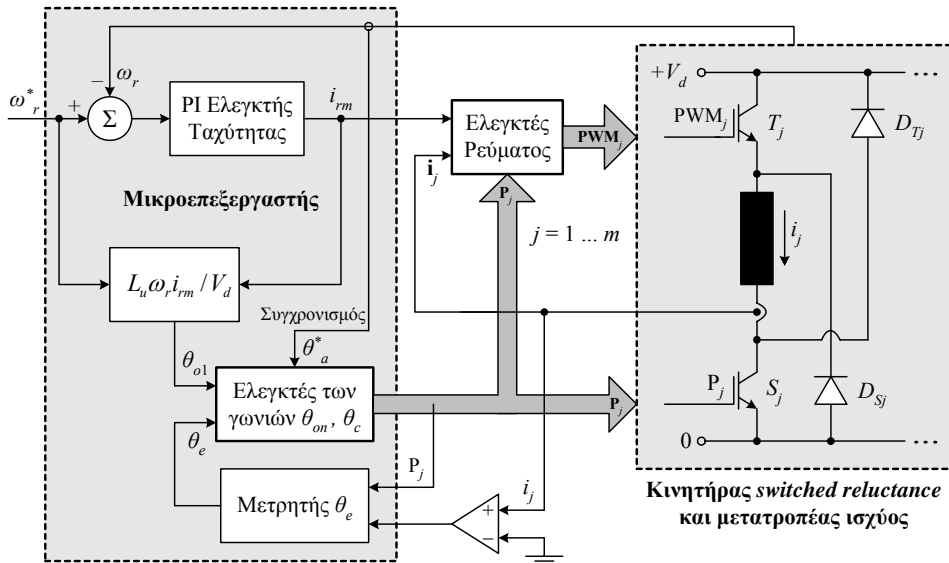
Στη μέτρηση της ταχύτητας του κινητήρα χρησιμοποιείται μια παλμοταχογεννήτρια (*incremental encoder*). Η παλμοταχογεννήτρια παρέχει επιπλέον ένα παλμό ανά περιστροφή, ο οποίος ορίζει τη θέση της γωνίας ευθυγράμμισης θ_a σε μια φάση. Αυτή η αναφορά γωνίας θ_a^* είναι αναγκαία, για την παραγωγή των παλμών P_j σε συγχρονισμό με τη θέση των πόλων του δρομέα ως προς τους πόλους του στάτη, δηλαδή παρέχει την πληροφορία για τη μεταβολή της L_j στο Σχ. 9 και το Σχ. 11. Τα σήματα P_j της κάθε φάσης έχουν μια μετατόπιση μεταξύ τους, ίση με τη γωνία *stroke*.

9.1. Βέλτιστες Γωνίες Έναυσης και Μεταγωγής

Για τη βέλτιστη λειτουργία του κινητήρα, δηλαδή για τη λειτουργία του με τις ελάχιστες απώλειες ισχύος, με ταυτόχρονη μικρή διακύμανση στην αναπτυσσόμενη ηλεκτρομαγνητική ροπή, πρέπει οι γωνίες έναυσης θ_{on} και μεταγωγής θ_c να επιλεγούν κατάλληλα.

Στη λειτουργία του κινητήρα με έλεγχο του ρεύματος, η γωνία θ_{on} επιλέγεται όπως έχει αναφερθεί στην παρ. 8, έτσι ώστε το ρεύμα της κάθε φάσης i_j να αποκτά την τιμή αναφοράς i_{rm} που επιβάλλει ο ελεγκτής ταχύτητας στη γωνία θ_1 . Στη γωνία θ_1 αρχίζει η επικάλυψη των πόλων και η παραγωγή θετικής ροπής από τη μηχανή. Για το σκοπό αυτό η γωνία έναυσης πρέπει να προπορεύεται της γωνίας θ_1 κατά τη γωνία θ_{o1} (Σχ. 9). Η γωνία θ_{o1} υπολογίζεται προσεγγιστικά από την εξίσωση της τάσης, αγνοώντας την ωμική αντίσταση του τυλίγματος R και θεωρώντας σταθερή την αυτεπαγωγή στην τιμή L_u . Επιπλέον, η αντιηλεκτρεγερτική δύναμη είναι μηδενική, έτσι η Εξ. (13) γράφεται

$$u_j = L_u \frac{di_j}{dt} \Rightarrow V_d = L_u \omega_r \frac{i_{rm}}{\theta_{o1}} \quad (23)$$



Σχ. 12 Σύστημα κλειστού βρόχου για τη λειτουργία του κινητήρα *switched reluctance* με έλεγχο του ρεύματος

και η βέλτιστη γωνία έναυσης ορίζεται από τη σχέση

$$\theta_{on}^{opt} = \theta_1 - \theta_{o1} = \theta_1 - \frac{L_u \cdot \omega_r \cdot i_{rm}}{V_d} \quad (24)$$

Η επιλογή της γωνίας μεταγωγής θ_c είναι ιδιαίτερα κρίσιμη για τη βέλτιστη λειτουργία του κινητήρα. Διάφορες μέθοδοι ορισμού της γωνίας θ_c έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία, ορισμένες από τις οποίες στηρίζονται στη χρήση *look-up tables*, ενώ άλλες σε αναλυτικές σχέσεις. Μια ιδιαίτερα αποτελεσματική αναλυτική μέθοδος υπολογισμού της γωνίας μεταγωγής περιγράφεται στη συνέχεια. Η μέθοδος βασίζεται στο γεγονός ότι η διακύμανση της ολικής στιγμιαίας ροπής που παράγει η μηχανή, εξαρτάται από τη συσχέτιση μεταξύ των ροπών που παράγει μόνη της η κάθε φάση. Σημειώνουμε ότι στις μηχανές *switched reluctance*, εξαιτίας της ανεξαρτησίας μεταξύ των φάσεων, η ολική ροπή μπορεί να κατανέμεται αυθαίρετα μεταξύ των φάσεων.

Προκειμένου η διακύμανση της ολικής ροπής να είναι περιορισμένη, αρκεί οι μαγνητικές ροές που παράγουν δύο διαδοχικές φάσεις του κινητήρα, η φάση 1 και η φάση 2 στο Σχ. 13, να είναι ίσες μεταξύ τους στη γωνία τομής θ_i . Στο διάστημα του *chopping* $\theta_c - \theta_1$, η μαγνητική ροή που παράγει η φάση 1 αυξάνεται με μικρότερο ρυθμό σχετικά με το διάστημα $\theta_1 - \theta_{on}$, όπου εφαρμόζεται στη φάση 1 η πλήρης τάση V_d . Από το Σχ. 13 προκύπτει ότι η μαγνητική ροή της φάσης 1 στο διάστημα $\theta_c - \theta_1$ (λ_1^r) είναι ίση με,

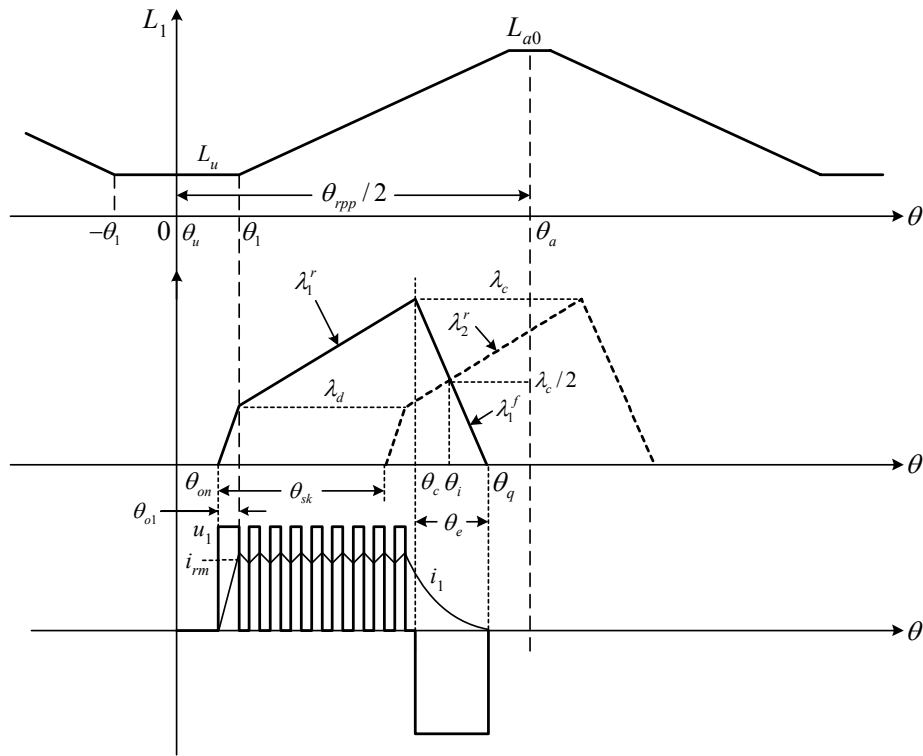
$$\lambda_1^r = \frac{\lambda_c - \lambda_d}{\theta_c - \theta_1} (\theta - \theta_1) + \lambda_d \quad (25)$$

ενώ στο διάστημα $\theta_q - \theta_c$ ισχύει

$$\lambda_1^f = \lambda_c \left(1 - \frac{\theta - \theta_c}{\theta_e} \right) \quad (26)$$

όπου $\theta_e = \theta_q - \theta_c$. Η μαγνητική ροή της φάσης 2 καθυστερεί κατά τη γωνία *stroke* σε σχέση με τη φάση 1, έτσι

$$\lambda_2^r = \frac{\lambda_c - \lambda_d}{\theta_c - \theta_1} [(\theta - \theta_1) - \theta_{sk}] + \lambda_d \quad (27)$$



Σχ. 13 Κυματομορφές σε δύο διαδοχικές φάσεις του κινητήρα *switched reluctance* για τον ορισμό της βέλτιστης γωνίας μεταγωγής θ_c

Ακόμη, όταν η γωνία έναυσης είναι σύμφωνη με την Εξ. (24), η μαγνητική ροή στη γωνία θ_1 είναι ίση με

$$\lambda_d = L_u i_{rm} \quad (28)$$

και η μέγιστη τιμή της μαγνητικής ροής στη γωνία μεταγωγής θ_c είναι

$$\lambda_c = \frac{V_d \theta_e}{\omega_r} \quad (29)$$

Από τις Εξ. (24), (28) και (29) προκύπτει

$$\frac{\lambda_d}{\lambda_c} = \frac{\theta_{o1}}{\theta_e} \quad (30)$$

Στη γωνία θ_i οι μαγνητικές ροές από τις φάσεις 1 και 2 είναι ίσες, επομένως

$$\lambda_1^f = \lambda_2^r = \frac{\lambda_c}{2} \quad (31)$$

Αντικαθιστώντας την Εξ. (31) στην (26) προκύπτει

$$\theta_i = \theta_c + \frac{\theta_e}{2} \quad (32)$$

Η βέλτιστη τιμή της γωνίας μεταγωγής ορίζεται εισάγοντας τις Εξ. (31), (32) στην Εξ. (27)

$$\theta_c^{opt} = \theta_1 + (2\theta_{sk} - \theta_e)(1 - \theta_{o1} / \theta_e) \quad (33)$$

Στην Εξ. (33) οι γωνίες θ_{sk} και θ_1 έχουν μια σταθερή τιμή, η οποία εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της κάθε μηχανής. Η γωνία θ_{o1} υπολογίζεται από την αυτεπαγωγή L_u , την ταχύτητα ω_r , το ρεύμα αναφοράς i_{rm} και τη σταθερή τάση τροφοδοσίας V_d , σύμφωνα με τη σχέση

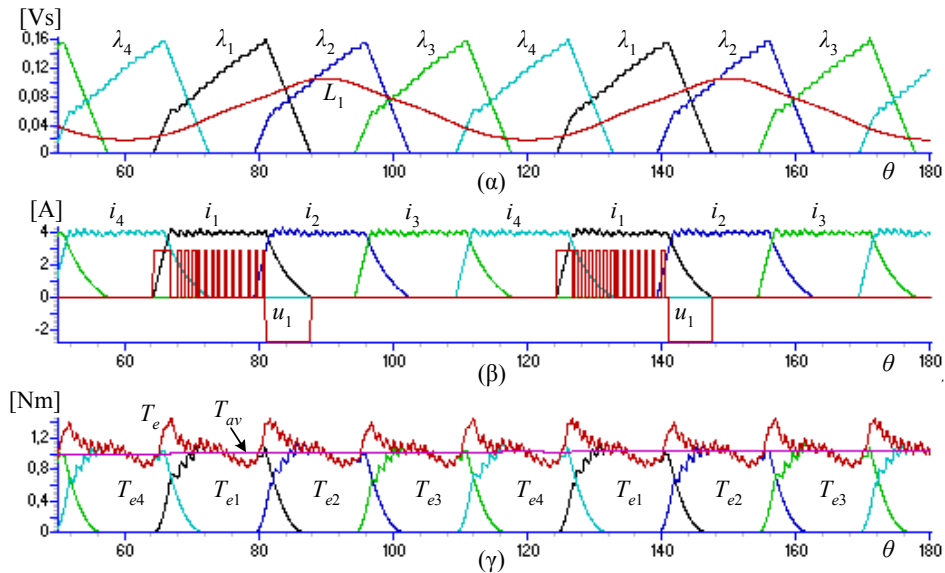
$$\theta_{o1} = \frac{L_u \cdot \omega_r \cdot i_{rm}}{V_d} \quad (34)$$

Η γωνία θ_e , κατά την οποία το ρεύμα της φάσης μειώνεται από την τιμή αναφοράς στο μηδέν, μετράται *on-line* από μια ειδική διάταξη του μικροεπεξεργαστή (Σχ. 12).

Πρέπει να σημειωθεί ότι η επιλογή της γωνίας μεταγωγής από την Εξ. (33), εξασφαλίζει τη βέλτιστη λειτουργία του κινητήρα μόνο στις χαμηλές ταχύτητες, όπου λειτουργεί αποτελεσματικά ο έλεγχος του ρεύματος.

Χρησιμοποιώντας το δυναμικό μοντέλο του κινητήρα από την παρ. 6, το οποίο προσεγγίζει με αναλυτικό τρόπο τις καμπύλες μαγνήτισης της μηχανής *switched reluctance*, προκύπτουν οι λειτουργικές κυματομορφές του Σχ. 14. Οι κυματομορφές αναφέρονται σ' ένα κινητήρα τεσσάρων φάσεων 8/6 με ονομαστική ισχύ 1hp στις 4000rpm. Ο κινητήρας στρέφεται με ταχύτητα 1200rpm σε ροπή φορτίου 1Nm, ενώ οι γωνίες έναυσης και μεταγωγής έχουν τις βέλτιστες τιμές.

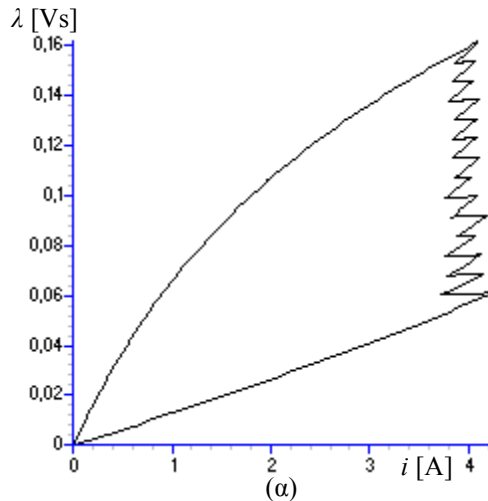
Το διάγραμμα μαγνητικής ροής–ρεύματος, το οποίο παριστά το βρόχο μετατροπής ενέργειας του κινητήρα, δίνεται στο Σχ. 15. Από τις κυματομορφές της ολικής ροπής στο Σχ. 14 προκύπτει ότι η διακύμανση δεν έχει εξουδετερωθεί πλήρως.



Σχ. 14 Κυματομορφές από την προσομοίωση ενός κινητήρα *switched reluctance* 4–φάσεων 8/6, στην ταχύτητα 1200rpm με ροπή φορτίου 1Nm. Ο κινητήρας λειτουργεί με έλεγχο του ρεύματος και τις βέλτιστες γωνίες έναυσης–μεταγωγής: Πεπλεγμένη μαγνητική ροή των φάσεων και αυτεπαγωγή της φάσης 1 (α), Φασικά ρεύματα και τάση της φάσης 1 (β), Ηλεκτρομαγνητική ροπή των φάσεων, ολική ροπή και η μέση τιμή της (γ)

Η διακύμανση της ροπής μπορεί να μειωθεί παραπέρα, με την κατάλληλη μεταβολή της γωνίας μεταγωγής. Όμως, στην περίπτωση αυτή οι απώλειες ισχύος αυξάνονται. Αντίστοιχα, σε κάποια τιμή της γωνίας θ_c οι απώλειες ισχύος μειώνονται παραπέρα, αλλά οι διακυμάνσεις της ροπής είναι αυξημένες. Έτσι, ο ορισμός της γωνίας μεταγωγής από την Εξ. (33) παρέχει ένα ικανοποιητικό συμβιβασμό μεταξύ των απωλειών ισχύος και της διακύμανσης στη ροπή.

Σε εφαρμογές όπου η διακύμανση της ροπής πρέπει να είναι η ελάχιστη δυνατή, εκτός από την κατάλληλη επιλογή των γωνιών έναυσης και μεταγωγής, απαιτείται ο στιγμιαίος έλεγχος της κυματομορφής του ρεύματος κάθε φάσης. Αυτή η τεχνική ελέγχου ονομάζεται *μέθοδος με στιγμιαίο έλεγχο της ροπής (instantaneous torque control method)* και απαιτεί την αποθήκευση των κυματομορφών του ρεύματος των φάσεων σε διάφορες συνθήκες ροπής–ταχύτητας. Όπως είναι φανερό η μέθοδος με στιγμιαίο έλεγχο της ροπής είναι εξαιρετικά πολύπλοκη. Αντίθετα, η *μέθοδος με έλεγχο της μέσης ροπής (average torque control method)* που περιγράφηκε, δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα με απλό τρόπο, με αποτέλεσμα να χρησιμοποιείται ευρέως.



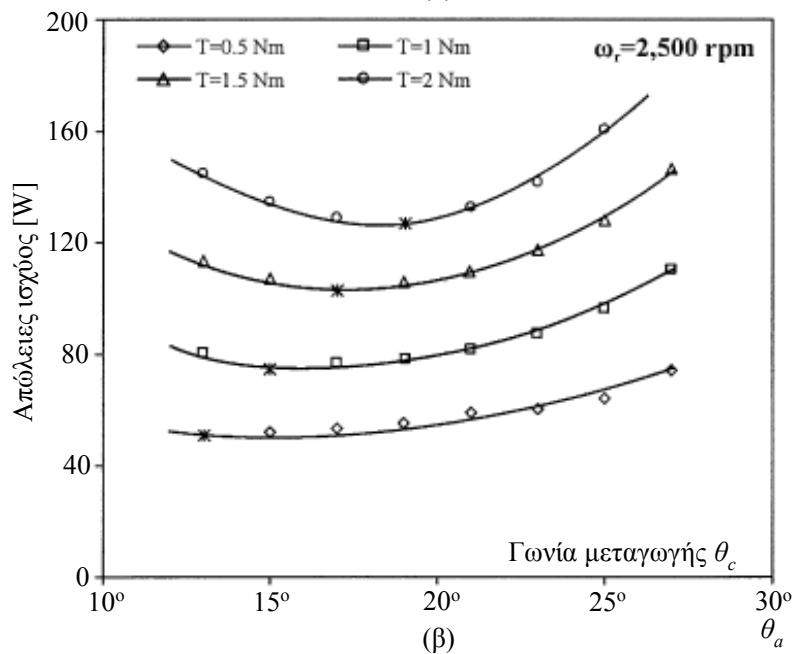
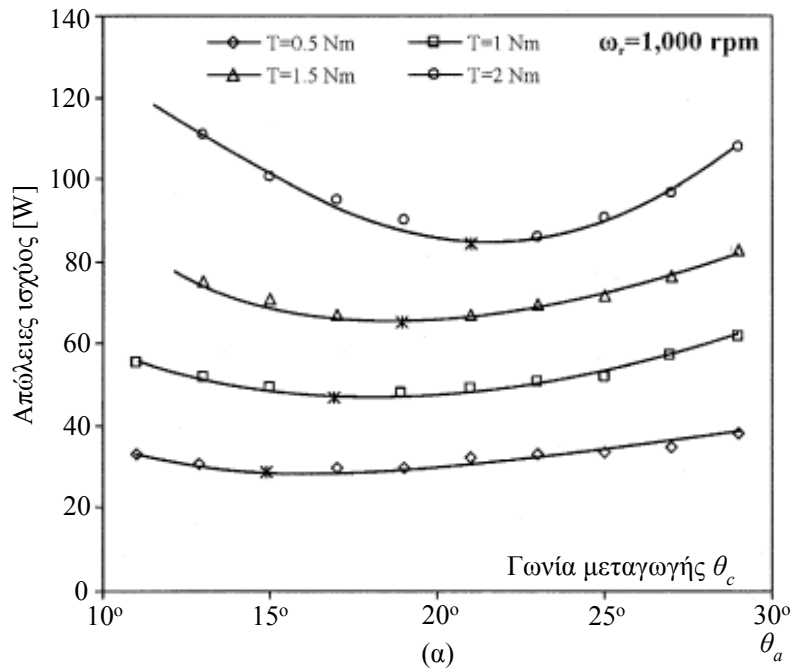
Σχ. 15 Διάγραμμα μαγνητικής ροής–ρεύματος, το οποίο ορίζει το βρόχο μετατροπής ενέργειας του κινητήρα, σε ταχύτητα 1200rpm με ροπή φορτίου 1Nm

Σημειώνουμε ότι σε εφαρμογές με κινητήρες μικρής ισχύος, όπου απαιτείται το ελάχιστο κόστος, ο έλεγχος της μέσης ροπής γίνεται χωρίς τη χρήση ελεγκτών ρεύματος, με αποτέλεσμα να αποφεύγεται η μέτρηση των ρευμάτων σε κάθε φάση του κινητήρα. Στην περίπτωση αυτή ο κινητήρας λειτουργεί με *έλεγχο της τάσης* σε κάθε φάση και ο ελεγκτής ταχύτητας παράγει απευθείας το επιθυμητό *duty cycle* των παλμών PWM_j. Όμως, η μέτρηση της ταχύτητας είναι αναγκαία σ' όλες τις μεθόδους ελέγχου.

9.2. Πειραματικά Αποτελέσματα

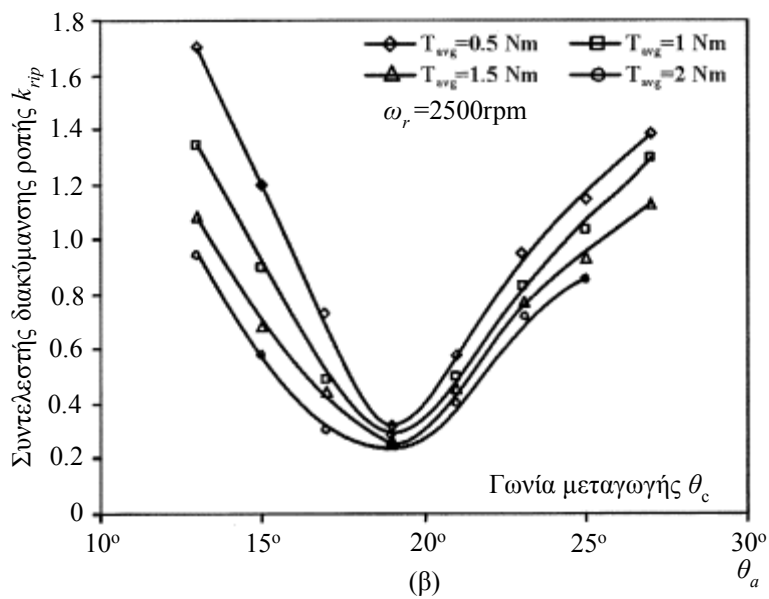
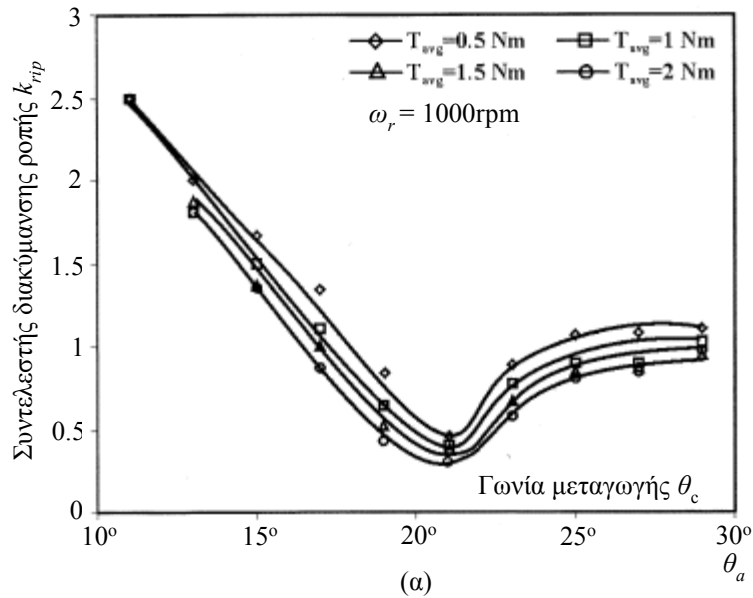
Η κρίσιμη επίδραση της γωνίας μεταγωγής θ_c στις απώλειες και τη διακύμανση της ροπής, στον πειραματικό κινητήρα *switched reluctance* ισχύος 1hp τεσσάρων φάσεων 8/6 πόλων, προκύπτει από τις καμπύλες στο Σχ. 16 και το Σχ. 17 αντίστοιχα. Στο Σχ. 16 εικονίζεται η μεταβολή των απωλειών ισχύος ως προς τη γωνία μεταγωγής σε τέσσερις τιμές της ροπής φορτίου T και σε ταχύτητα περιστροφής 1000rpm (α) και 2500rpm (β). Τα σημεία με αστερίσκο αντιστοιχούν στη λειτουργία του κινητήρα με τις ελάχιστες απώλειες. Η διακύμανση της ροπής μέσω του συντελεστή $k_{rip} = (T_{max} - T_{min}) / T_{avg}$, στις ίδιες συνθήκες λειτουργίας, παρουσιάζεται στο Σχ. 17.

Τα ρεύματα στις τέσσερις φάσεις του κινητήρα και η ολική παραγόμενη ροπή εικονίζονται στο Σχ. 18, όταν η γωνία μεταγωγής έχει τη βέλτιστη τιμή (α) που ορίζεται από την Εξ. (33) και τιμές οι οποίες αντιστοιχούν σε ελάχιστες απώλειες (β) και στην ελάχιστη διακύμανση της ροπής (γ).



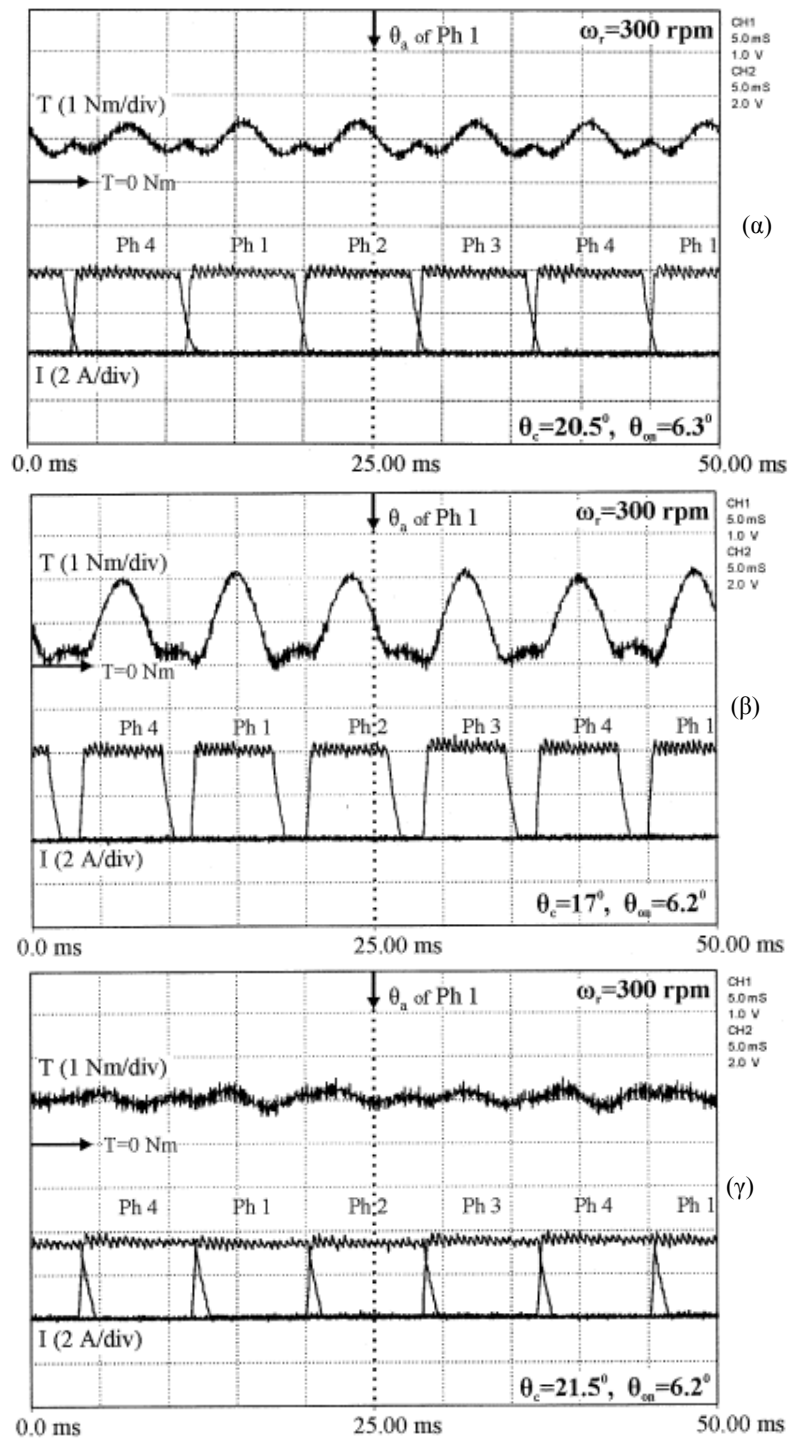
Σχ. 16 Μεταβολή των απωλειών ισχύος στον πειραματικό κινητήρα, ως προς τη γωνία μεταγωγής θ_c , σε τέσσερις τιμές της ροπής φορτίου, όταν η ταχύτητα περιστροφής είναι $\omega_r = 1000\text{rpm}$ (α) και $\omega_r = 2500\text{rpm}$ (β)

Παρατηρούμε ότι η βέλτιστη τιμή της γωνίας θ_c αποτελεί ένα ιδανικό συνδυασμό μεταξύ των ελάχιστων απωλειών ισχύος και της ελάχιστης διακύμανσης στη ροπή.

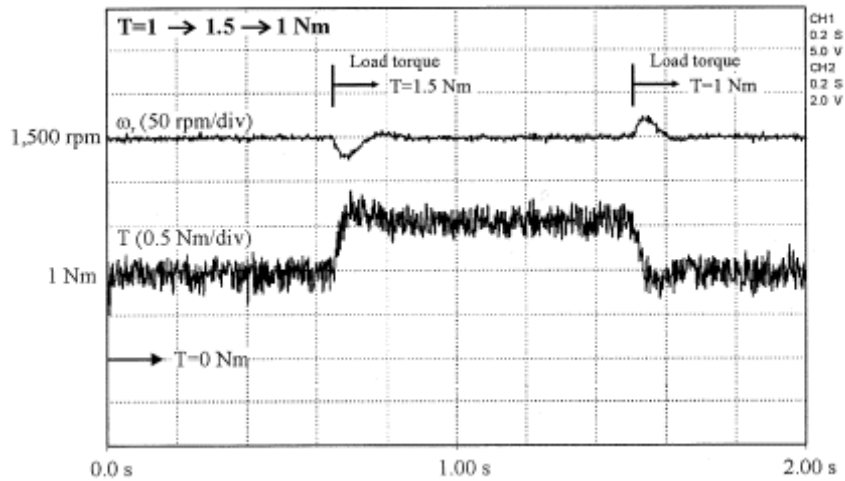


Σχ. 17 Διακύμανση της ροπής στον πειραματικό κινητήρα, μέσω του συντελεστή k_{rip} , σε τέσσερις τιμές της ροπής φορτίου, όταν η ταχύτητα περιστροφής είναι $\omega_r = 1000\text{rpm}$ (α) και $\omega_r = 2500\text{rpm}$ (β)

Τέλος, στο Σχ. 19 εικονίζεται η μεταβατική απόκριση του κινητήριου συστήματος, σε μια βηματική μεταβολή της ροπής φορτίου. Οι βέλτιστοι ελεγκτές αντιδρούν πολύ γρήγορα και προσδιορίζουν τις νέες βέλτιστες τιμές των γωνιών έναυσης και μεταγωγής στην αυξημένη τιμή της ροπής φορτίου 1.5Nm. Μόλις η απαίτηση ροπής αποσύρεται, οι ελεγκτές αποκαθιστούν τις προηγούμενες βέλτιστες τιμές.



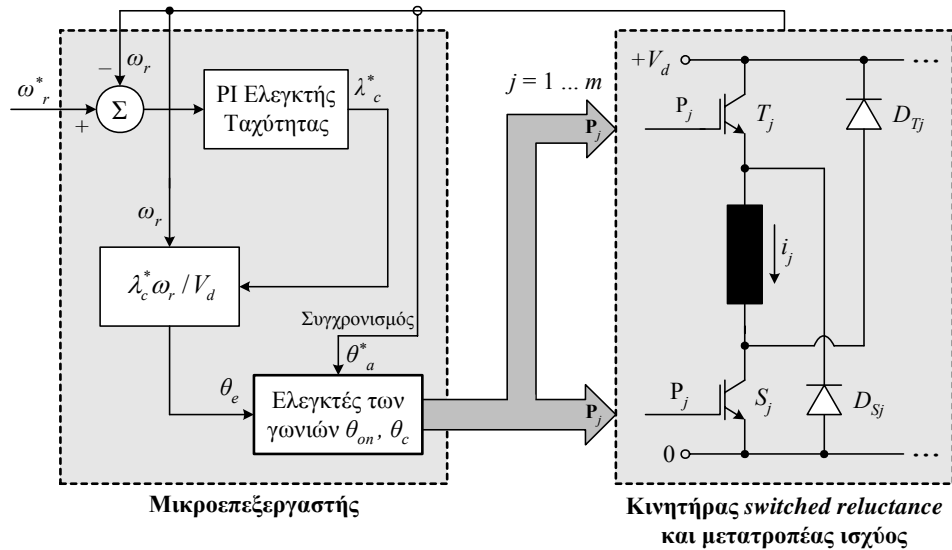
Σχ. 18 Μεταβολή της ροπής και των ρευμάτων στις τέσσερις φάσεις του πειραματικού κινητήρα σε ταχύτητα $\omega_r = 300\text{rpm}$, όταν η γωνία μεταγωγής αντιστοιχεί στη βέλτιστη τιμή (α), στις ελάχιστες απώλειες (β) και στην ελάχιστη διακύμανση της ροπής (γ)



Σχ. 19 Μεταβατική απόκριση του κινητήριου συστήματος σε μια βηματική μεταβολή της ροπής φορτίου μεταξύ των τιμών 1Nm και 1.5Nm

10. ΔΙΑΤΑΞΗ ΟΔΗΓΗΣΗΣ ΤΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΜΕ ΑΠΛΟ ΠΑΛΜΟ ΣΕ ΥΨΗΛΕΣ ΤΑΧΥΤΗΤΕΣ

Στις υψηλές ταχύτητες ο κινητήρας *switched reluctance* ελέγχεται με τη μέθοδο απλού παλμού, καθώς η υψηλή αντιηλεκτρεγερτική δύναμη δεν επιτρέπει τον έλεγχο του ρεύματος σε κάθε φάση. Επομένως, η λειτουργία του κινητήρα ρυθμίζεται μέσω των γωνιών έναυσης θ_{on} και μεταγωγής θ_c , οι οποίες ορίζονται από ένα σύστημα κλειστού βρόχου με PI ελεγκτή ταχύτητας, όπως εικονίζεται στο Σχ. 20.



Σχ. 20 Σύστημα κλειστού βρόχου για τη λειτουργία του κινητήρα *switched reluctance* με απλό παλμό

Ο ελεγκτής ταχύτητας επιβάλλει τη μέγιστη τιμή της μαγνητικής ροής λ_c^* , από την οποία υπολογίζεται η γωνία θ_e αγωγής και αποκοπής των δύο transistors του μετατροπέα ισχύος (Σχ. 11), τα οποία οδηγούνται ταυτόχρονα.

10.1 Βέλτιστες Γωνίες Έναυσης και Μεταγωγής

Αντίστοιχα με τη λειτουργία του κινητήρα *switched reluctance* με έλεγχο του ρεύματος, οι γωνίες έναυσης θ_{on} και μεταγωγής θ_c πρέπει να εξασφαλίζουν ελάχιστες απώλειες ισχύος και ταυτόχρονα μικρή διακύμανση στην αναπτυσσόμενη ηλεκτρομαγνητική ροπή του κινητήρα. Οι παραπάνω απαιτήσεις ικανοποιούνται επιλέγοντας τον κατάλληλο λόγο k_θ μεταξύ των γωνιών θ_{o1} και θ_e , σύμφωνα με τα μεγέθη λειτουργίας του κινητήρα στο Σχ. 11

$$\frac{\theta_{o1}}{\theta_e} = k_\theta \quad (35)$$

Χρησιμοποιώντας την Εξ. (35) ως βέλτιστη συνθήκη λειτουργίας του κινητήρα με απλό παλμό, η γωνία έναυσης ορίζεται από τη σχέση,

$$\theta_{on}^{opt} = \theta_1 - \theta_{o1} = \theta_1 - k_\theta \theta_e \quad (36)$$

ενώ η βέλτιστη γωνία μεταγωγής είναι ίση με

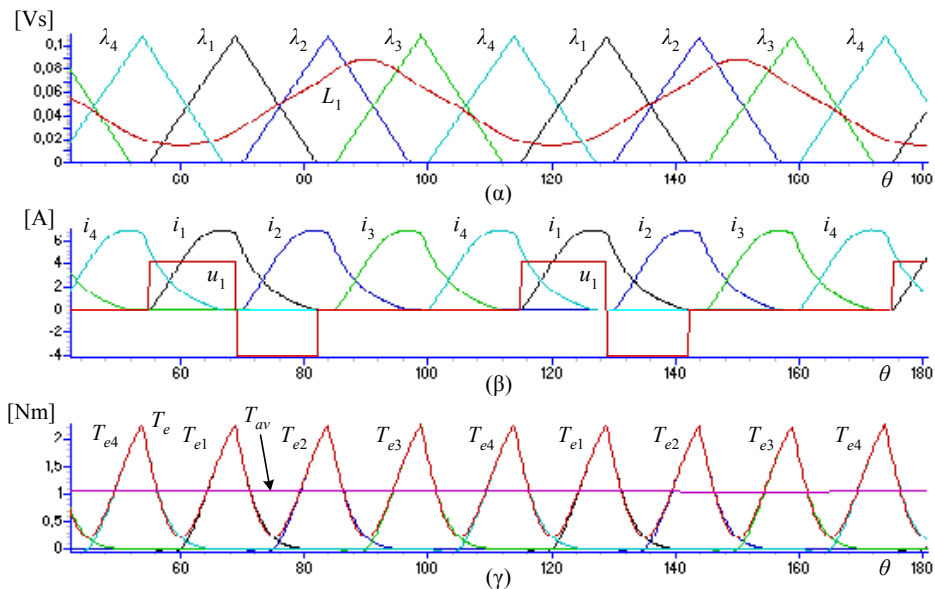
$$\theta_c^{opt} = \theta_{on}^{opt} + \theta_e = \theta_1 + (1 - k_\theta) \theta_e \quad (37)$$

Η γωνία θ_e υπολογίζεται από τη σχέση

$$\theta_e = \frac{\lambda_c \omega_r}{V_d} \quad (38)$$

όπου, η μέγιστη τιμή της ροής λ_c επιβάλλεται από τον PI ελεγκτή ταχύτητας.

Υπολογίζοντας τις γωνίες έναυσης και μεταγωγής με τον παραπάνω τρόπο, οι κυματομορφές του Σχ. 21 περιγράφουν τη λειτουργία του ίδιου κινητήρα τεσσάρων φάσεων 8/6, ισχύος 1hp, στη λειτουργία απλού παλμού, όταν στρέφεται με ταχύτητα 3500rpm σε ροπή φορτίου 1Nm.

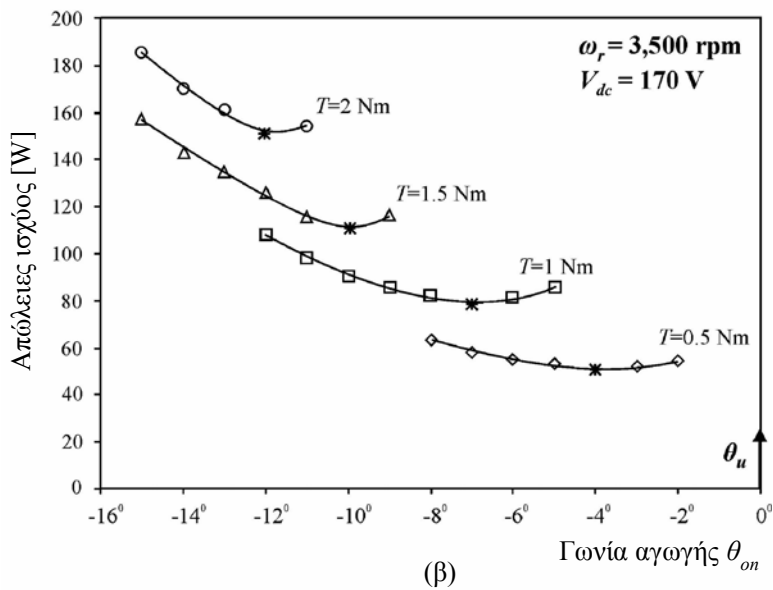
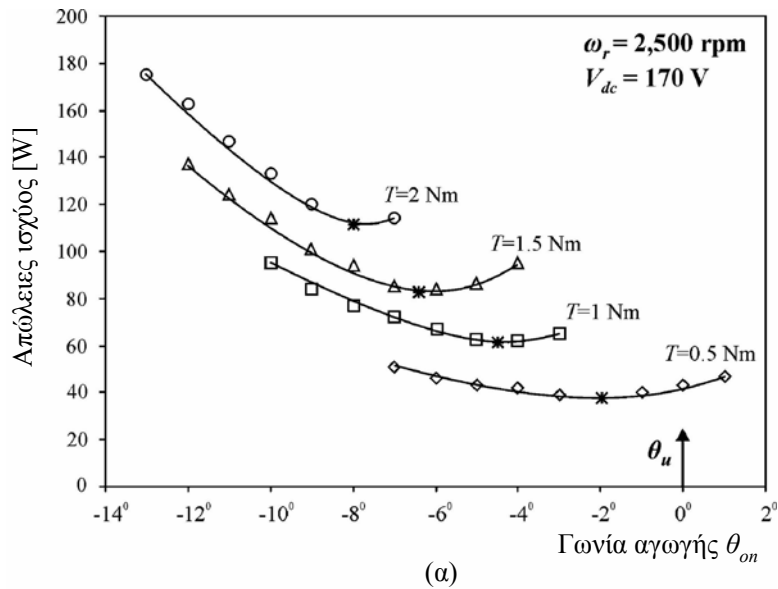


Σχ. 21 Κυματομορφές από την προσομοίωση του κινητήρα *switched reluctance* 1hp, 4-φάσεων 8/6, σε ταχύτητα 3500rpm με ροπή φορτίου 1Nm. Ο κινητήρας λειτουργεί με τη μέθοδο απλού παλμού: Πεπλεγμένη μαγνητική ροή των φάσεων και αυτεπαγωγή της φάσης 1 (α), Φασικά ρεύματα και τάση της φάσης 1 (β), Ηλεκτρομαγνητική ροπή των φάσεων, ολική ροπή και η μέση τιμή της (γ)

10.2. Πειραματικά Αποτελέσματα

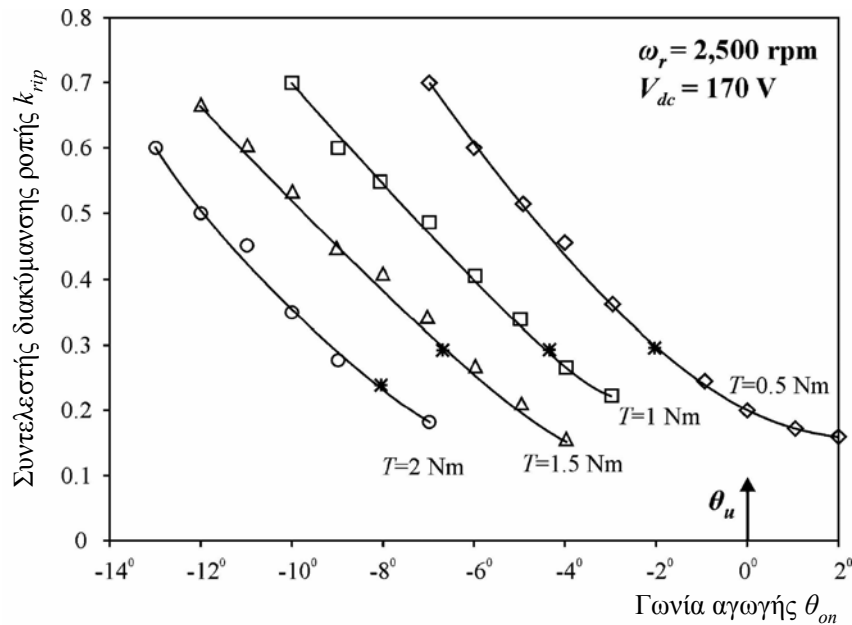
Η ικανότητα για τη λειτουργία του κινητήρα *switched reluctance* σε υψηλές ταχύτητες με απλό παλμό, μέσω της προτεινόμενης μεθόδου, επιβεβαιώθηκε πειραματικά με τη διενέργεια πολλών μετρήσεων. Μερικές από τις μετρήσεις παρουσιάζονται ενοποιημένες στα επόμενα σχήματα.

Η μεταβολή των απωλειών ισχύος στον κινητήρα ως προς τη γωνία έναυσης, σε διάφορες τιμές της ροπής φορτίου και σε δύο τιμές της ταχύτητας, εικονίζεται στο Σχ. 22. Τα σημεία με αστερίσκο αντιστοιχούν στη λειτουργία του κινητήρα με τις ελάχιστες απώλειες. Παρατηρούμε ότι η τιμή της γωνίας έναυσης επηρεάζει σημαντικά τις απώλειες ισχύος του κινητήρα. Η μέγιστη απόδοση επιτυγχάνεται όταν υπάρχει η βέλτιστη κατανομή μεταξύ των απωλειών σιδήρου και των ωμικών απωλειών.



Σχ. 22 Μεταβολή των απωλειών ισχύος στον πειραματικό κινητήρα, ως προς τη γωνία έναυσης θ_{on} , σε τέσσερις τιμές της ροπής φορτίου, όταν η ταχύτητα περιστροφής είναι $\omega_r = 2500$ rpm (α) και $\omega_r = 3500$ rpm (β)

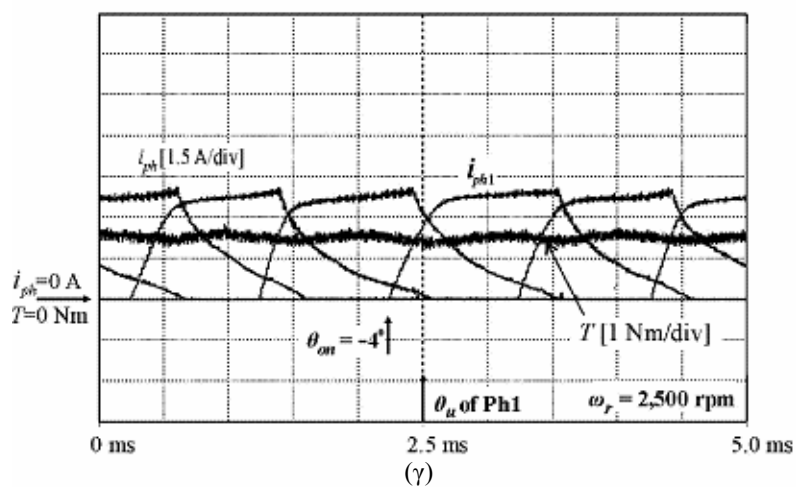
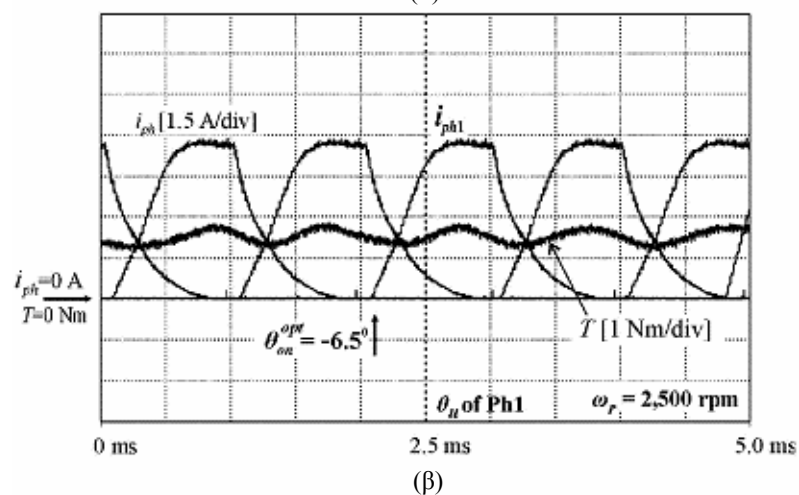
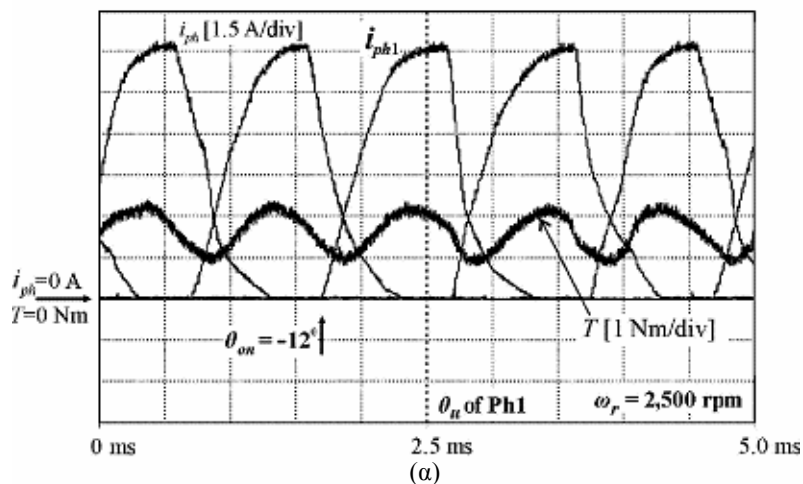
Στο Σχ. 23 εικονίζεται η μεταβολή του συντελεστή διακύμανσης ροπής $k_{rip} = (T_{max} - T_{min}) / T_{avg}$, σε τέσσερις ροπές φορτίου και ταχύτητα 2500rpm. Τα σημεία με αστερίσκο παριστούν θέσεις μέγιστου βαθμού απόδοσης. Παρατηρούμε ότι η διακύμανση της ροπής μειώνεται συνεχώς καθώς η γωνία έναυσης αυξάνει, όμως πέρα από τη βέλτιστη γωνία θ_{on} ο βαθμός απόδοσης μειώνεται.



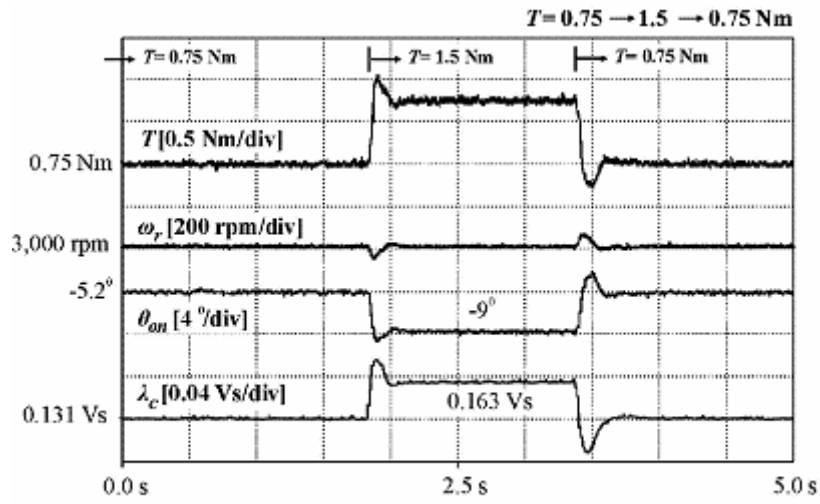
Σχ. 23 Διακύμανση της ροπής στον πειραματικό κινητήρα, μέσω του συντελεστή k_{rip} , σε τέσσερις τιμές της ροπής φορτίου και με ταχύτητα περιστροφής 2500rpm

Οι μεταβολές της παραγόμενης ροπής και των ρευμάτων στις τέσσερις φάσεις του πειραματικού κινητήρα εικονίζονται στο Σχ. 24, όταν η γωνία έναυσης είναι μικρότερη της βέλτιστης (α), ίση με τη βέλτιστη (β) και μεγαλύτερη της βέλτιστης (γ).

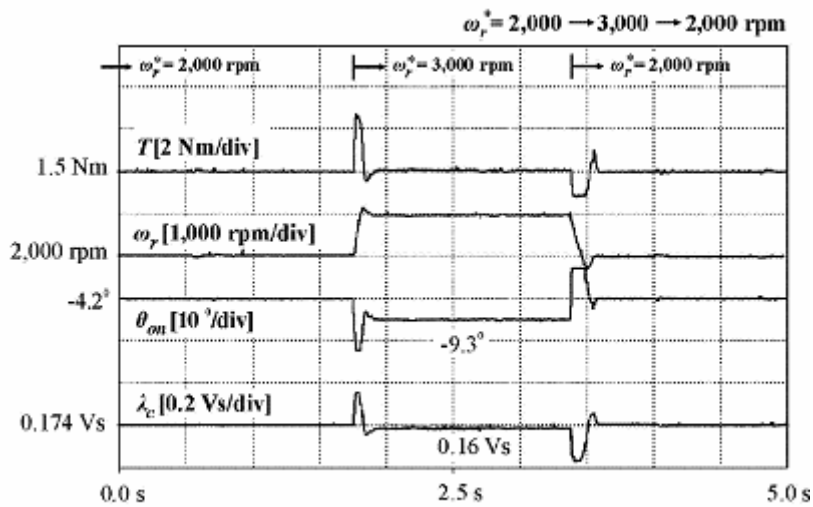
Τέλος, η μεταβατική απόκριση του βέλτιστου κινητήριου συστήματος, σε βηματικές μεταβολές της ροπής φορτίου και της αναφοράς ταχύτητας, εικονίζεται στο Σχ. 25α και το Σχ. 25β αντίστοιχα. Οι βέλτιστοι ελεγκτές αντιδρούν πολύ γρήγορα και προσδιορίζουν τις νέες τιμές των γωνιών έναυσης και μεταγωγής με την αλλαγή στη ροπή και την ταχύτητα. Μόλις η ροπή είτε η ταχύτητα επανέλθουν στην αρχική τιμή τους, οι ελεγκτές επιβάλλουν τις προηγούμενες βέλτιστες τιμές των γωνιών.



Σχ. 24 Μεταβολή της ροπής και των ρευμάτων στις τέσσερις φάσεις του πειραματικού κινητήρα σε ταχύτητα 2500rpm και ροπή φορτίου 1.5Nm, όταν η γωνία έναυσης είναι μικρότερη της βέλτιστης (α), ίση με τη βέλτιστη τιμή (β) και μεγαλύτερη της βέλτιστης (γ)



(α)



(β)

Σχ. 25 Μεταβατική απόκριση του βέλτιστου κινητήριου συστήματος σε μια βηματική μεταβολή της ροπής φορτίου (α) και σε μια βηματική μεταβολή της αναφοράς ταχύτητας (β)

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- 1 MILLER, T.J.E.: 'Electronic control of switched reluctance machines', (Newnes, Oxford, 2001)
- 2 RAY, W.F., LAWRENSON, P.J., DAVIS, R.M., STEPHENSON, M., FULTON, N.N., and BLAKE, R.J.: 'High-performance switched reluctance brushless drives', *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 1986, **IA-22**, (4), pp. 722-730
- 3 REINERT, J., INDERKA, R., MENNE, M., and DE DONCKER, R.W.: 'Optimizing performance in switched reluctance drives', *IEEE Ind. Appl. Magazine*, 2000, (4), pp. 63-70
- 4 RADUN, A.V.: 'High power density switched reluctance motor drive for aerospace applications', *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 1992, **28**, (1), pp. 113-119
- 5 JACK, A.G., MECROW, B.C., and HAYLOCK, J.A.: 'A comparative study of permanent magnet and switched reluctance motors for high-performance fault-tolerant applications', *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 1996, **32**, (4), pp. 889-895
- 6 RAHMAN, K.M., FAHIMI, B., SURESH, G., RAJARATHNAM, A.V., and EHSANI, M.: 'Advantages of switched reluctance motor applications to EV and HEV: Design and control issues', *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 2000, **36**, (1), pp. 111-121
- 7 INDERKA, R.B., MENNE, M., and DE DONCKER R.W.: 'Control of switched reluctance drives for electric vehicles applications', *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 2002, **49**, (1), pp. 48-52
- 8 BOSE, B.K., MILLER, T.J.E., SZCZESNY, P.M., and BICKNELL, W.H.: 'Microcomputer control of switched reluctance motor', *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 1986, **IA-22**, (4), pp. 708-715

- 9 ORTHMANN, R., and SCHÖNER, H.P.: 'Turn-off angle control of switched reluctance motors for optimum torque output', *Proc. Conf. Eur. Power Electron. Appl.*, 1993, pp. 20-25
- 10 GRIBBLE, J.J., KJAER, P.C., and MILLER, T.J.E.: 'Optimal commutation in averaged torque control of switched reluctance motors', *IEE Proc.- Electr. Power Appl.*, 1999, **146**, (1), pp. 2-10
- 11 KJAER, P.C., NIELSEN, P., ANDERSEN, L., and BLAABJERG F.: 'A new energy optimizing control strategy for switched reluctance motors', *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 1995, **31**, (5), pp. 1088-1095
- 12 ILIĆ-SPONG, M., MILLER, T.J.E., MACMINN, S.R., and THORP, J.S.: 'Instantaneous torque control of electric motor drives', *IEEE Trans. Power Electron.*, 1987, **PE-2**, (1), pp. 55-61
- 13 SAHOO, N.C., XU, J.X., and PANDA, S.K.: 'Determination of current waveforms for torque ripple minimization in switched reluctance motors using iterative learning: an investigation', *IEE Proc.- Electr. Power Appl.*, 1999, **146**, (4), pp. 369-377
- 14 STEPHENSON, J.M., HUGHES, A., and MANN, R.: 'Torque ripple minimization in switched reluctance motor by optimum harmonic current injection', *IEE Proc.- Electr. Power Appl.*, 2001, **148**, (4), pp. 322-328
- 15 HUSAIN, I.: 'Minimization of torque ripple in SRM drives', *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 2002, **49**, (1), pp. 28-39
- 16 MILLER, T.J.E.: 'Optimal design of switched reluctance motors', *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 2002, **49**, (1), pp. 15-27
- 17 REINERT, J., and SCHRÖDER, S.: 'Power-factor correction for switched reluctance drives', *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 2002, **49**, (1), pp. 54-57

- 18 MADEMLIS, C., and KIOSKERIDIS, I.: 'Performance optimization in switched reluctance motor drives with online commutation angle control', *IEEE Trans. Energy Conversion*, 2003, **18**, (3), pp. 448-457
- 19 MATERU, P.N., and KRISHNAN, R.: 'Estimation of switched reluctance motor losses', *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 1992, **28**, (3), pp. 668-679
- 20 HAYASHI, Y., and MILLER, T.J.E.: 'A new approach to calculate core losses in the SRM', *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 1995, **31**, (5), pp. 1039-1046