

ΣΧΟΛΗ: ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

ΤΜΗΜΑ: ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ

ΣΠΥΡΗ ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ

ΤΖΑΝΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

“ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΗΝΙΟΥ TESLA”



ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Π. ΜΑΛΑΤΕΣΤΑΣ

ΑΘΗΝΑ 2012

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα θέλαμε εξ αρχής να εκφράσουμε τις ευχαριστίες σε όσους μας βοήθησαν προκειμένου να διεκπεραιωθεί η παρούσα διπλωματική εργασία. Η ολοκλήρωσή της δεν θα ήταν δυνατή χωρίς την επιστημονική βοήθεια ορισμένων αλλά και την ηθική συμπαράσταση άλλων. Ιδιαίτερες ευχαριστίες εκφράζονται:

Στον Ομότιμο Καθηγητή κ. Γ. ΚΑΠΟΓΙΑΝΝΗ, ο οποίος μας ανέθεσε το θέμα, ενώ σε κάθε στάδιο της εργασίας η καθοδήγησή του και οι επιστημονικές του γνώσεις ήταν καθοριστικές.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες στον κ. Π. ΜΑΛΑΤΕΣΤΑ, συνεργάτη του κ. Καπόγιαννη και προϊστάμενο του τμήματος ηλεκτρολογίας της Σχολής Τεχνολογικών Εφαρμογών για τη βοήθεια κατά την πραγματοποίηση των απαιτούμενων μετρήσεων, την απαραίτητη βιβλιογραφία που μας παρείχε καθώς και τις χρήσιμες υποδείξεις και συμβουλές του.

Τέλος, δε θα μπορούσαν να λείψουν από τη σελίδα αυτή, ευχαριστίες προς τους γονείς μας που όλα αυτά τα χρόνια υποστήριζαν με κάθε κόστος την προσπάθειά μας να αποκτήσουμε τα κατάλληλα εφόδια για ένα καλύτερο μέλλον.

EMMANOYHL ΣΠΥΡΗ & ΙΩΑΝΝΗΣ ΤΖΑΝΗΣ

Ιούνιος 2012

ΣΥΝΟΨΗ

Στόχος της παρούσας πτυχειακής εργασίας είναι η μελέτη και η κατασκευή ενός πηνίου Tesla, η συγκεκριμένη μελέτη έγινε με σκοπό την εκμάθηση και την διερεύνηση του επιτεύγματος ενός ανθρώπου χάρη στον οποίο σήμερα δισεκατομμύρια άνθρωποι έχουν φως και ρεύμα με το πάτημα ενός διακόπτη.

Ο απώτερος σκοπός αυτής της κατασκευής ήταν η ασύρματη μεταφορά ισχύος, κάτι που ακούγεται στα αυτιά πωλών εξωπραγματικό. Τα είχε καταφέρει όμως, σε ένα απόμακρο εργαστήριο στο Κολοράντο, ο Tesla κατασκεύασε ένα γιγάντιο πηνίο για να δημιουργήσει ισχυρά ηλεκτρομαγνητικά πεδία υψηλής συχνότητας και κατάφερε ασύρματη αποστολή 10,000 watts φωτίζοντας 200 λάμπες που βρίσκονταν περισσότερα από σαράντα χιλιόμετρα μακριά. Δυστυχώς όμως δεν κατάφερε να τελειοποιήσει την εφεύρεση λόγω του ότι οι επενδυτές της εποχής είχαν είδη στραφεί στην ενσύρματη διανομή του εναλλασσομένου ρεύματος, με αποτέλεσμα να μην υπάρχει τρόπος χρηματοδότησης της έρευνας του Tesla. Με την κατασκευή αυτή αποδεικνύουμε εμπράκτως τη λειτουργία ενός τέτοιου πηνίου, του οποίου κατά την ενεργοποίηση του μπορούμε εμφανώς να δούμε μια λάμπα φθορισμού να ανάβει χωρίς να είναι συνδεδεμένη ενσύρματα σε καμία πηγή ισχύος.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

1	Εισαγωγή.....	6
	1.1 Το πηνίο Tesla.....	6
	1.2 Εφαρμογές.....	6
2	Το μαγνητικό πεδίο και κυκλώματα	8
	2.1 Το μαγνητικό πεδίο	8
	2.2 Ο νόμος του Faraday - τάση εξ επαγωγής ενός χρονικά μεταβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου.....	20
3	Μετασχηματιστές.....	23
	3.1 Η σημασία των μετασχηματιστών στη σύγχρονη ζωή	23
	3.2 Είδη και κατασκευή των μετασχηματιστών	25
	3.3 Ιδανικός μετασχηματιστής	27
	3.4 Διακύμανση τάσης και απόδοση μετασχηματιστών	33
	3.5 Τριφασικοί μετασχηματιστές	37
	3.6 Ονομαστικά στοιχεία των μετασχηματιστών και προβλήματα που σχετίζονται μ' αυτά	40
4	Πυκνωτές	45
	4.1 Γενικά στοιχεία	45
	4.2 Συμπεριφορά του πυκνωτή στο εναλλασσόμενο ρεύμα.....	46
	4.3 Σύνδεση πυκνωτών σε σειρά	48
	4.4 Παράλληλη σύνδεση	49
5	Λειτουργία του πηνίου tesla – θεωρητική προσέγγιση.....	50
	5.1 Κυκλώματα RLC και συντονισμός.....	50
	5.1.1 Αυτεπαγωγή	50
	5.1.2 Ελικοειδής επαγωγή.....	51
	5.1.3 Σπειροειδής επαγωγή.....	51
	5.1.4 Επίπεδη επαγωγή	52
	5.1.5 Αμοιβαία επαγωγιμότητα	52
	5.1.6 Επιδερμικό φαινόμενο σε επαγωγές	53
	5.1.7 Σκέδαση	54
	5.1.8 Πυκνωτές και πηνία Tesla	54

5.1.9	Αύξηση της χωρητικότητας και της διηλεκτρικής ανοχής	54
5.1.10	Παρασιτικές χωρητικότητες	55
5.1.11	Επίδραση της τοροειδους χωρητικότητας στην συχνότητα συντονισμού	56
5.1.12	Μεγίστη χωρητικότητα χρησιμοποίησης στο πρωτεύον κύκλωμα με διάκενο διάσπασης	56
5.1.13	Τοροειδές	57
5.2	Συντονισμός κυκλωμάτων RLC	59
5.2.1	Επίδραση του συντονισμού στα εν σειρά RLC κυκλώματα	60
5.2.2	Επίδραση του συντονισμού στα εν παραλλήλω RLC κυκλώματα.....	60
5.2.3	Προσδιορισμός συχνότητας συντονισμού δυο συντονισμένων κυκλωμάτων με διάκενο διάσπασης	61
5.3	Θεωρητική ανάλυση ενός πηνίου TESLA	62
5.3.1	Πρωτεύον τυλίγμα.....	63
5.3.2	Υπολογισμός πρωτεύοντος τυλίγματος	64
5.3.3	Δευτερεύον τυλίγμα	65
5.3.4	Υπολογισμός δευτερεύοντος τυλίγματος	67
5.3.5	Υπολογισμός τοροειδούς	67
6	Σχεδιασμός και κατασκευή πηνίου TESLA	68
6.1	Γενικά στοιχεία	68
6.2	Υπολογισμός ισχύος και μήκος τόξου κατασκευής.....	69
6.3	Υπολογισμός πυκνωτή πρωτεύοντος κυκλώματος	69
6.4	Υπολογισμός πρωτεύοντος τυλίγματος	69
6.5	Υπολογισμός συχνότητας συντονισμού πρωτεύοντος κυκλώματος	70
6.6	Υπολογισμός δευτερεύοντος τυλίγματος	70
6.7	Υπολογισμός αυτό - χωρητικότητας δευτερεύοντος τυλίγματος	70
6.8	Υπολογισμός συχνότητας συντονισμού δευτερεύοντος τυλίγματος	71
6.9	Υπολογισμός τοροειδούς κατασκευής	71
6.10	Υπολογισμός συχνότητας συντονισμού δευτερεύοντος κυκλώματος	72
6.11	Διάκενο διάσπασης	72
6.11.1	Στατικό διάκενο διάσπασης	72
6.11.2	Διάκενα ασφαλείας	73
7	Βιβλιογραφία – Πηγές	74

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Απλός σιδηρομαγνητικός πυρήνας.....	9
Εικόνα 2: Προσδιορισμός της φοράς μιας πηγής μαγνητεγερτικής δύναμης σε μαγνητικό κύκλωμα.....	12
Εικόνα 3: Αντιστοιχία ηλεκτρικού / μαγνητικού κυκλώματος.....	13
Εικόνα 4: Η θυσάνωση στο διάκενο ενός πυρήνα. Εδώ φαίνεται καθαρά η αύξηση της διατομής του διακένου σε σχέση με τη διατομή του μετάλλου.....	16
Εικόνα 5: (α) Η καμπύλη μαγνήτισης ενός σιδηρομαγνητικού πυρήνα, (β) Η ίδια καμπύλη σαν γραφική παράσταση της μαγνητικής επαγωγής συναρτήσει της έντασης του μαγνητικού πεδίου στον πυρήνα, (γ) Λεπτομερής καμπύλη μαγνήτισης ενός μεταλλικού πυρήνα, (δ) Γραφική παράσταση της σχετικής μαγνητικής διαπερατότητας συναρτήσει της έντασης του μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό ενός μεταλλικού πυρήνα.	18
Εικόνα 6: Ένταση του μαγνητικού πεδίου H , A σπείρες/m (δ).....	19
Εικόνα 7: Συνδεσμολογία μετασχηματιστή τύπου πυρήνα.	26
Εικόνα 8: (α) Η καμπύλη μαγνήτισης για τον πυρήνα του μετασχηματιστή, (β) Το ρεύμα μαγνήτισης που προκαλεί η μαγνητική ροή στο εσωτερικό του πυρήνα ενός μετασχηματιστή.	31
Εικόνα 9: Το συνολικό ρεύμα διέγερσης σ' έναν μετασχηματιστή.	33
Εικόνα 10: Διανυσματικό διάγραμμα ενός μετασχηματιστή που λειτουργεί με επαγωγικό συντελεστή ισχύος.	35
Εικόνα 11: Διανυσματικό διάγραμμα ενός μετασχηματιστή που λειτουργεί με (α) μοναδιαίο (β) χωρητικό συντελεστή ισχύος.	35
Εικόνα 12: Εξαγωγή της προσεγγιστικής εξίσωσης για τον όρο V_p/a	36
Εικόνα 13: Συνδεσμολογία των Τυλιγμάτων στους Τριφασικούς Μετασχηματιστές (α) Συνδεσμολογία αστέρα-αστέρα $Y-Y$	39
Εικόνα 14: Οι επιπτώσεις της μέγιστης μαγνητικής ροής του πυρήνα ενός μετασχηματιστή πάνω στο απαιτούμενο ρεύμα μαγνήτισης.....	41
Εικόνα 15: Πηνίο.	50
Εικόνα 16: Τοροειδές.....	58

1 Εισαγωγή

1.1 Το πηνίο Tesla

Το πηνίο Τέσλα είναι ένα είδος συντονιζόμενου μετασχηματιστή που εφευρέθηκε από τον Νικόλα Τέσλα το 1891. Χρησιμοποιείται για την παραγωγή υψηλής τάσης, χαμηλού φορτίου (εναλλασσόμενο ρεύμα) ηλεκτρικής ενέργειας. Τα πηνία Τέσλα παράγουν υψηλότερη τάση ρεύματος από άλλες ηλεκτροστατικές μηχανές.

Ο Τέσλα πειραματίστηκε με μία σειρά από διαφορετικές διαμορφώσεις, οι οποίες μπορεί να αποτελούνται από δύο ή και από τρεις συζεύξεις ηλεκτρικών κυκλωμάτων. Ο Τέσλα χρησιμοποίησε αυτές τις σπείρες για τη διεξαγωγή πρωτοπόρων πειραμάτων στον φωτισμό με πηγή το ηλεκτρικό ρεύμα, στο φωσφορισμό, στις ακτινογραφίες με ακτίνες X, στην ηλεκτροθεραπεία με εναλλασσόμενο ρεύμα και τέλος στην μαζική μεταφορά μεγάλων ποσοτήτων ηλεκτρικής ενέργειας χωρίς καλώδια. Τα κυκλώματα του πηνίου Τέσλα χρησιμοποιήθηκαν επίσης στο εμπόριο σε ραδιοπομπούς sparkgap για την ασύρματη τηλεγραφία μέχρι τη δεκαετία του 1920. Σήμερα χρησιμοποιείται κυρίως για διασκέδαση και για εκπαιδευτικούς σκοπούς.

1.2 Εφαρμογές

Υπάρχει μια πληθώρα εφαρμογών όπου τα πηνία Tesla χρησιμοποιούνται τις τελευταίες δεκαετίες. Παραδείγματος χάριν, είναι σύνηθες να χρησιμοποιούνται για μελέτες και εξομοίωση κεραυνών. Οι καθοδικοί κεραυνοί (σύννεφο με γη) έχουν μελετηθεί διεξοδικά αλλά οι κεραυνοί που δημιουργούνται μεταξύ των σύννεφων (σύννεφο με σύννεφο) και μεταξύ σύννεφου και ατμόσφαιρας (σύννεφο με αέρα) είναι πιο δύσκολο να τους κατανοήσουμε και να τους καταγράψουμε.

Δύσκολα όμως μπορούμε μέσω μόνο των παρατηρήσεων να κατανοήσουμε το τι συμβαίνει πραγματικά με το φαινόμενο αυτό. Η αναπαραγωγή της διαδικασίας αυτής και

η ταχύτητα του φαινομένου μελετάτε πολύ καλύτερα με κλιμακωτή δημιουργία εργαστηριακών εκκενώσεων. Αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί με την χρήση πηνίου Tesla το οποίο μπορεί και παράγει ηλεκτρικές εκκενώσεις και ηλεκτρικά πεδία παρόμοια με το φαινόμενο των κεραυνών.

Μια άλλη ενδιαφέρουσα εφαρμογή αφορά στην δοκιμή μονωτικών υλικών, καθώς οι παραδοσιακοί τρόποι ελέγχου (παραδείγματος χάριν, με συνεχές ρεύμα υψηλής τάσης ή με τη βοήθεια μετασχηματιστών με σιδηρομαγνητικό πυρήνα) δεν προτιμούνται γιατί παρουσιάζουν σημαντικά προβλήματα, όπως για παράδειγμα μη γραμμικότητες. Αντίθετα, το πηνίο Tesla δεν δημιουργεί μη γραμμικά φαινόμενα διότι δεν έχει πυρήνα μεταξύ των δύο τυλιγμάτων του. Επίσης λόγω του μεγάλου του μεγέθους και της μεγάλης απόστασης μεταξύ των τυλιγμάτων του μειώνεται η χωρητικότητά του, ενώ παράλληλα μας δίνει τη δυνατότητα να ρυθμίζουμε την συχνότητα αλλάζοντας τα χαρακτηριστικά των πηνίων και την τάση εξόδου ρυθμίζοντας της τάση εισόδου. Έτσι, μπορεί να φανεί πολύ χρήσιμο για τέτοιες δοκιμές.

Ιδιαίτερα χρήσιμα είναι τα πηνία Tesla και για παραγωγή παλμών υψηλής τάσης, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, για την μέτρηση μεγεθών με υψηλή ακρίβεια ή για πολύ ισχυρούς παλμούς μικροκυμάτων. Έχουν δημοσιευθεί πολλές αναφορές στη χρήση πηνίων Tesla για την κατασκευή γεννητριών ακτινοβολίας ηλεκτρονίων.

Άλλες εφαρμογές των πηνίων αυτών αφορούν την δοκιμή μονωτήρων. Μάλιστα, κατασκευαστές κεραμικών μονωτήρων όπως είναι η Sun Electrics και η Electroceramics ακόμα χρησιμοποιούν πηνία Tesla ως μία από τις δοκιμές που τους καταβάλουν για την αντοχή του μονωτήρα στη διάτρηση από υψηλή τάση. Τέλος, πηνία Tesla χρησιμοποιούνται και για ασύρματη μεταφορά ενέργειας.

2 Το μαγνητικό πεδίο και κυκλώματα

2.1 Το μαγνητικό πεδίο

Όπως σημειώθηκε και στα προηγούμενα, η δράση των μαγνητικών πεδίων είναι ο βασικός μηχανισμός μετατροπής ενέργειας στους κινητήρες, στις γεννήτριες και στους μετασχηματιστές. Τέσσερις είναι οι βασικές αρχές σύμφωνα με τις οποίες δρουν τα μαγνητικά πεδία στις παραπάνω εφαρμογές:

- ⇒ Ένας ρευματοφόρος αγωγός παράγει γύρω του μαγνητικό πεδίο.
- ⇒ Ένα χρονικά μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο του οποίου οι δυναμικές γραμμές διέρχονται μέσα από κάποιο πηνίο (αγωγός σε σπείρες), επάγει τάση στα άκρα του πηνίου. (Σ' αυτή την αρχή βασίζεται η λειτουργία του μετασχηματιστή).
- ⇒ Σ' ένα ρευματοφόρο αγωγό που βρίσκεται μέσα σε μαγνητικό πεδίο εξασκείται μια δύναμη εξ επαγωγής. (Αυτή είναι η αρχή λειτουργίας του κινητήρα).
- ⇒ Στα άκρα ενός αγωγού που κινείται μέσα σε μαγνητικό πεδίο επάγεται κάποια τάση. (Αυτή είναι η αρχή λειτουργίας της γεννήτριας).

Η Δημιουργία ενός Μαγνητικού Πεδίου

Το μαγνητικό πεδίο που αναπτύσσεται γύρω από ένα ρευματοφόρο αγωγό διέπεται από το νόμο του *Ampere*:

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I_{\text{net}} \quad (1)$$

Όπου H είναι η ένταση (*intensity*) του μαγνητικού πεδίου η οποία παράγεται από το ρεύμα I_{net} . Σε μονάδες του SI το ρεύμα μετριέται σε Ampere (A) και η ένταση H σε αμπερελίγματα ανά μέτρο (At/m). Για την καλύτερη κατανόηση της παραπάνω εξίσωσης, αυτή θα εφαρμοστεί στο απλό παράδειγμα του Σχ. 1-3. Σ' αυτό το σχήμα φαίνεται ένας ορθογώνιος πυρήνας (core) στη μια πλευρά του οποίου είναι τυλιγμένος (N σπείρες) ένας αγωγός που τροφοδοτείται με ρεύμα. Αν ο πυρήνας είναι από σίδηρο ή από άλλα παρόμοια μέταλλα (*σιδηρομαγνητικά υλικά*), ουσιαστικά όλο το μαγνητικό πεδίο που παράγει το ρεύμα περιορίζεται μέσα στον πυρήνα. Έτσι η διαδρομή

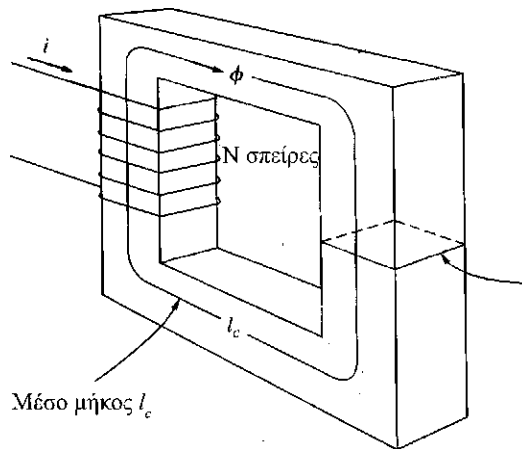
ολοκλήρωσης στο νόμο του Ampere είναι το μέσο μήκος του πυρήνα l_c . Το ρεύμα που εμπλέκεται με τη διαδρομή της ολοκλήρωσης, δηλαδή το I_{net} , είναι ίσο με Ni μια και το τύλιγμα συναντάει τη διαδρομή ολοκλήρωσης N φορές. Έτσι ο νόμος του Ampere γίνεται

$$H l_c = Ni \quad (2)$$

Στην προηγούμενη έκφραση το H είναι το μέτρο του διανύσματος της έντασης μαγνητικού πεδίου \mathbf{H} . Έτσι στο εσωτερικό του πυρήνα το μέτρο της έντασης του μαγνητικού πεδίου, που οφείλεται στη διέλευση του ρεύματος, έχει τιμή:

$$H = \frac{Ni}{l_c} \quad (3)$$

Η ένταση του μαγνητικού πεδίου H είναι κατά μια έννοια ένα μέτρο της "προσπάθειας" που καταβάλλει το ρεύμα για τη δημιουργία του πεδίου. Το μέγεθος της *μαγνητικής ροής* (*flux*) του πεδίου στον πυρήνα εξαρτάται από το υλικό που είναι κατασκευασμένος. Η σχέση που υπάρχει μεταξύ της έντασης του πεδίου \mathbf{H} και της *μαγνητικής επαγωγής* (*flux density*) στο εσωτερικό του υλικού δίνεται από την εξίσωση:



Εικόνα 1: Απλός σιδηρομαγνητικός πυρήνας.

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (4)$$

όπου \mathbf{H} = η ένταση του μαγνητικού πεδίου

μ = η μαγνητική διαπερατότητα (permeability) του υλικού

\mathbf{B} = η μαγνητική επαγωγή

Η μαγνητική επαγωγή που παράγεται σ' ένα τμήμα του υλικού δίνεται λοιπόν από το γινόμενο δυο όρων:

Της \mathbf{H} που εκφράζει την "προσπάθεια" του ρεύματος για τη δημιουργία πεδίου και της μ που εκφράζει τη σχετική ευκολία που παρουσιάζει η ανάπτυξη ενός μαγνητικού πεδίου στο συγκεκριμένο υλικό.

Οι μονάδες της έντασης του μαγνητικού πεδίου είναι τα At/m, της μαγνητικής διαπερατότητας τα H/m, ενώ τέλος, η μαγνητική επαγωγή μετριέται σε Wb/m² ή σε Tesla (T). (1 Wb/m² = 1T).

Η μαγνητική διαπερατότητα του κενού συμβολίζεται με μ_0 και η τιμή της είναι:

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m} \quad (5)$$

Η διαπερατότητα οποιουδήποτε άλλου υλικού συσχετίζεται με τη διαπερατότητα του κενού μέσω της *σχετικής μαγνητικής διαπερατότητας* (μ_r):

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (6)$$

Η σχετική διαπερατότητα μπορεί εύκολα να δώσει ένα μέτρο σύγκρισης της δυνατότητας μαγνήτισης διαφορετικών υλικών. Π.χ. οι χάλυβες από τους οποίους κατασκευάζονται οι σημερινές μηχανές έχουν μαγνητική διαπερατότητα από 2000 ως 6000 κι ακόμη μεγαλύτερη. Αυτό σημαίνει πως για δεδομένο ρεύμα η μαγνητική ροή μέσα από ένα τμήμα του μετάλλου είναι 2000 ως 6000 φορές μεγαλύτερη απ' αυτή σ' ένα αντίστοιχο τμήμα στον αέρα (η μαγνητική διαπερατότητα του αέρα είναι ουσιαστικά ίδια με αυτή του κενού). Προφανώς το είδος του μετάλλου του πυρήνα των μετασχηματιστών και των ηλεκτρικών μηχανών παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην αύξηση, αλλά και στη συγκέντρωση της μαγνητικής ροής κατά τη λειτουργία τους.

Επίσης, αφού η διαπερατότητα του σιδήρου είναι πολύ μεγαλύτερη απ' αυτή του αέρα, το μεγαλύτερο τμήμα της μαγνητικής ροής σ' ένα πυρήνα, παραμένει μέσα στο σίδηρο και δεν διασκορπίζεται στη γύρω απ' αυτόν περιοχή. Η μικρή ροή διαρροής (leakage flux) που ξεφεύγει από το μεταλικό πυρήνα είναι πολύ σημαντική για τον προσδιορισμό τόσο της πεπλεγμένης ροής μεταξύ των σπειρών, όσο και της αυτεπαγωγής των τυλιγμάτων στους μετασχηματιστές και στους κινητήρες.

Σ' έναν πυρήνα σαν αυτόν του σχήματος το μέτρο της μαγνητικής επαγωγής δίνεται από την:

$$B = \mu H = \frac{\mu N i}{l_c} \quad (7)$$

Η συνολική μαγνητική ροή σε μια συγκεκριμένη περιοχή δίνεται από την εξίσωση:

$$\Phi = \int_A \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} \quad (8)$$

Όπου dA είναι το διαφορικό μιας στοιχειώδους περιοχής της διατομής του πυρήνα. Αν το διάνυσμα της μαγνητικής επαγωγής είναι κάθετο στο επίπεδο της διατομής A και το μέτρο της είναι σταθερό σε όλη την περιοχή, η εξίσωση (8) απλουστεύεται και γίνεται:

$$\Phi = BA \quad (9)$$

Έτσι η συνολική μαγνητική ροή που προκαλεί το ρεύμα i στον πυρήνα είναι:

$$\Phi = BA = \frac{\mu N i A}{l_c} \quad (10)$$

όπου A είναι η διατομή του πυρήνα.

Μαγνητικά Κυκλώματα

Από την παραπάνω εξίσωση φαίνεται ότι το ρεύμα του πηνίου στη μια πλευρά του πυρήνα παράγει στο εσωτερικό του μετάλλου κάποια μαγνητική ροή. Υπάρχει δηλαδή κατά κάποιον τρόπο μια αναλογία με την πηγή τάσης που προκαλεί ροή ρεύματος σ' ένα ηλεκτρικό κύκλωμα. Έτσι είναι δυνατό να οριστεί κάποιο αντίστοιχο "μαγνητικό κύκλωμα" που να διέπεται από σχέσεις ανάλογες μ' αυτές ενός ηλεκτρικού κυκλώματος. Για την απλοποίηση της αρκετά περίπλοκης ανάλυσης και σχεδίασης των ηλεκτρικών μηχανών και των μετασχηματιστών χρησιμοποιείται συχνά το μοντέλο του μαγνητικού κυκλώματος.

Σ' ένα απλό ηλεκτρικό κύκλωμα η πηγή τάσης V "προκαλεί" το ρεύμα I που διαρρέει την αντίσταση R . Τη σχέση μεταξύ των παραπάνω ποσοτήτων τη δίνει ο νόμος του Ohm:

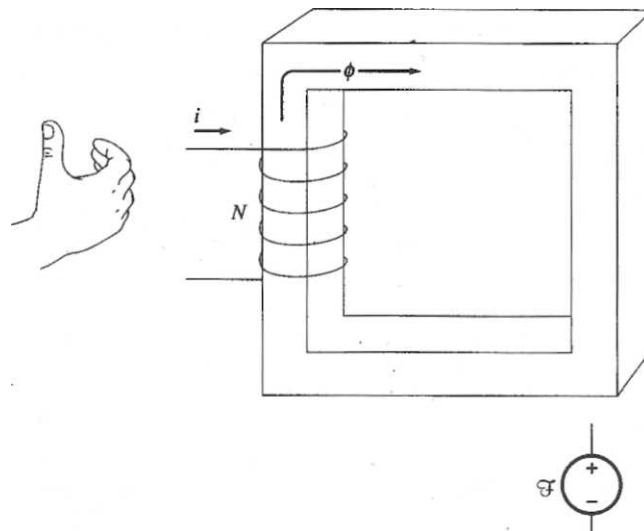
$$V=IR$$

Στο ηλεκτρικό κύκλωμα η αιτία που προκαλεί το ρεύμα είναι η τάση ή αλλιώς η ηλεκτρεγερτική δύναμη. Εντελώς ανάλογα η αντίστοιχη ποσότητα στο μαγνητικό κύκλωμα ονομάζεται *μαγνητεγερτική δύναμη (ΜΕΔ) (magnetomotive force – mmf)*. Η μαγνητεγερτική δύναμη στο μαγνητικό κύκλωμα είναι ίση με την "ισοδύναμη" ένταση του ρεύματος που εφαρμόζεται στον πυρήνα

$$\mathcal{F} = N I \quad (11)$$

όπου \mathcal{F} είναι το σύμβολο της μαγνητεγερτικής δύναμης η οποία μετρείται σε αμπερελίγματα A·t.

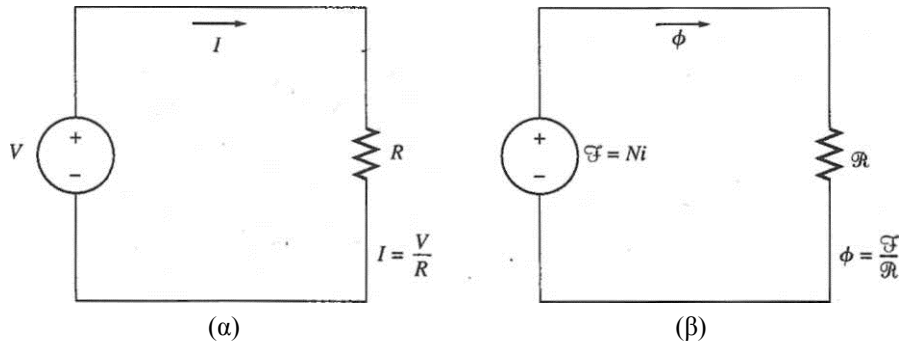
Όπως στην πηγή τάσης του ηλεκτρικού κυκλώματος, έτσι και στη μαγνητεγερτική δύναμη του μαγνητικού κυκλώματος αποδίδεται μια φορά αναφοράς. Το θετικό άκρο της ΜΕΔ είναι το άκρο από το οποίο εξέρχεται η ροή και το αρνητικό άκρο είναι το άκρο από το οποίο η ροή επανέρχεται. Η πολικότητα της ΜΕΔ ενός πηνίου μπορεί να προσδιοριστεί με τη βοήθεια μιας παραλλαγής του κανόνα του δεξιού χεριού: Αν τα δάκτυλα του δεξιού χεριού λυγίσουν κατά τη φορά της ροής του ρεύματος στο πηνίο, τότε ο αντίχειρας θα δείχνει τη θετική φορά της ΜΕΔ.



Εικόνα 2: Προσδιορισμός της φοράς μιας πηγής μαγνητεγερτικής δύναμης σε μαγνητικό κύκλωμα

Στα ηλεκτρικά κυκλώματα η ηλεκτρεγερτική δύναμη προκαλεί ένταση ρεύματος I . Αντίστοιχα στα μαγνητικά κυκλώματα η μαγνητεγερτική δύναμη προκαλεί μαγνητική ροή ϕ . Όπως αναφέρθηκε, ο νόμος του Ohm συνδέει την τάση (ηλεκτρεγερτική δύναμη)

με το ρεύμα. Η σχέση μεταξύ μαγνητεγερτικής δύναμης και μαγνητικής ροής είναι αντίστοιχα:



Εικόνα 3: Αντιστοιχία ηλεκτρικού / μαγνητικού κυκλώματος

$$\mathcal{F} = \phi \mathcal{R} \quad (12)$$

Όπου \mathcal{F} = η μαγνητεγερτική δύναμη του κυκλώματος

ϕ = η μαγνητική ροή στο κύκλωμα

\mathcal{R} = η μαγνητική αντίσταση (*reluctance*) του κυκλώματος

Η *μαγνητική αντίσταση* είναι το μαγνητικό ανάλογο της ηλεκτρικής αντίστασης και μετριέται σε At/Wb.

Επίσης ορίζεται το μαγνητικό ανάλογο της αγωγιμότητας. Όπως η αγωγιμότητα στο ηλεκτρικό κύκλωμα είναι το αντίστροφο της αντίστασης, έτσι και η μαγνητική *αγωγιμότητα* (*permeance*) \mathcal{P} είναι το αντίστροφο της μαγνητικής αντίστασης σ' ένα μαγνητικό κύκλωμα:

$$\mathcal{P} = \frac{1}{\mathcal{R}} \quad (13)$$

Η σχέση μεταξύ της μαγνητεγερτικής δύναμης και της μαγνητικής ροής μπορεί τώρα να γραφεί:

$$\phi = \mathcal{F} \mathcal{P} \quad (14)$$

Σε ορισμένες περιπτώσεις οι υπολογισμοί γίνονται ευκολότεροι με τη χρήση της μαγνητικής αγωγιμότητας παρά με τη χρήση της μαγνητικής αντίστασης.

Πώς υπολογίζεται όμως η μαγνητική αντίσταση στον πυρήνα του σχήματος. Η ροή στο εξωτερικό του δίνεται από την Εξ. (15):

$$\Phi = BA = \frac{\mu NiA}{l_c} \quad (15)$$

$$= Ni \left(\frac{\mu A}{l_c} \right)$$

$$= \mathcal{F} \left(\frac{\mu A}{l_c} \right) \quad (16)$$

Συγκρίνοντας την Εξ. (16) με την Εξ. (13) φαίνεται πως η μαγνητική αντίσταση του πυρήνα είναι:

$$R = \frac{l_c}{\mu A} \quad (17)$$

Οι μαγνητικές αντιστάσεις, όπως και οι ηλεκτρικές, διέπονται από ορισμένους νόμους. Η ισοδύναμη μαγνητική αντίσταση ενός αριθμού μαγνητικών αντιστάσεων συνδεδεμένων στη σειρά είναι το άθροισμα αυτών των αντιστάσεων:

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots \quad (18)$$

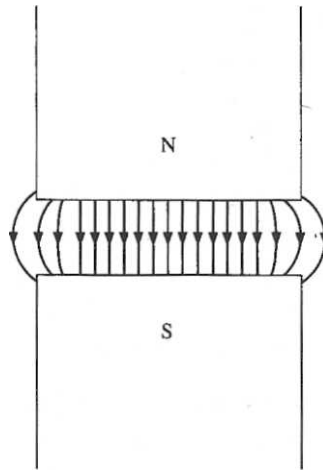
Αντίστοιχα η παράλληλη σύνδεση μαγνητικών αντιστάσεων γίνεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots \quad (19)$$

Όπως οι ηλεκτρικές αγωγιμότητες, έτσι και οι μαγνητικές υπακούουν σε αντίστοιχες σχέσεις όταν συνδέονται στη σειρά ή παράλληλα.

Ο υπολογισμός της μαγνητικής ροής με τη βοήθεια των μαγνητικών κυκλωμάτων είναι πάντα προσεγγιστικός (στην καλύτερη περίπτωση παρουσιάζει σφάλμα 5%). Υπάρχουν κάποιοι λόγοι που κάνουν αυτούς τους υπολογισμούς εξαρχής ανακριβείς. Οι σπουδαιότεροι από αυτούς είναι οι παρακάτω:

- ⇒ Στο μοντέλο του μαγνητικού κυκλώματος θεωρείται ότι η μαγνητική ροή είναι συγκεντρωμένη μέσα στον πυρήνα. Δυστυχώς αυτό δεν είναι απόλυτα ορθό. Αν και η μαγνητική διαπερατότητα του πυρήνα είναι 2000 ως 6000 φορές μεγαλύτερη από αυτή του αέρα, ωστόσο ένα μικρό κλάσμα της ροής ξεφεύγει από τον πυρήνα προς τον αέρα που τον περιβάλλει. Αυτή η ροή γύρω από τον πυρήνα ονομάζεται ροή διαρροής και παίζει σημαντικό ρόλο στη σχεδίαση των ηλεκτρικών μηχανών.
- ⇒ Κατά τον υπολογισμό της μαγνητικής αντίστασης θεωρούνται σταθερά το μέσο μήκος και η διατομή του πυρήνα. Κι αυτές οι προσεγγίσεις δεν είναι απόλυτα σωστές, ιδίως στις γωνίες του πυρήνα.
- ⇒ Ένας ακόμη λόγος που προκαλεί πρόσθετα σφάλματα στους υπολογισμούς είναι και ο εξής: Στα σιδηρομαγνητικά υλικά η μαγνητική διαπερατότητα εξαρτάται από την τιμή της μαγνητικής ροής που αναπτύσσεται στο υλικό. Αυτό το μη γραμμικό φαινόμενο θα περιγραφεί λεπτομερώς στα επόμενα.
- ⇒ Αν υπάρχει διάκενο αέρα στη διαδρομή της μαγνητικής ροής μέσα από τον πυρήνα, η διατομή του διακένου θα πρέπει στους υπολογισμούς να εμφανίζεται με μεγαλύτερη τιμή από τις διατομές του πυρήνα στις δυο πλευρές του διακένου. Η πρόσθετη αυτή περιοχή οφείλεται στη θυσάνωση (fringing effect) του μαγνητικού πεδίου που συμβαίνει στο διάκενο.



Εικόνα 4: Η θυσάνωση στο διάκενο ενός πυρήνα. Εδώ φαίνεται καθαρά η αύξηση της διατομής του διακένου σε σχέση με τη διατομή του μετάλλου.

Είναι δυνατή βέβαια η μερική μείωση των σφαλμάτων αυτών με τη χρήση "βελτιωμένων" ή "ενεργών" τιμών για το μέσο μήκος και τη διατομή του πυρήνα στη θέση των κανονικών.

Γίνεται, λοιπόν, φανερό πως το μοντέλο του μαγνητικού κυκλώματος έχει έμφυτα κάποια όρια στην εφαρμογή του. Ωστόσο, είναι ο ευκολότερος τρόπος υπολογισμού των μαγνητικών ροών κατά την πρακτική σχεδίαση ηλεκτρικών μηχανών. Οι ακριβείς υπολογισμοί με τη χρήση των νόμων του Maxwell απ' τη μια είναι περίπλοκοι κι από την άλλη δεν έχουν πρακτική αξία, αφού η προσεγγιστική μέθοδος του μαγνητικού κυκλώματος δίνει αρκετά ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Μαγνητική Συμπεριφορά των Σιδηρομαγνητικών Υλικών

Στα προηγούμενα δόθηκε ο ορισμός της μαγνητικής διαπερατότητας μέσω της σχέσης:

$$\mathbf{B}=\mu\mathbf{H} \quad (20)$$

Ακόμη σημειώθηκε ότι η διαπερατότητα των σιδηρομαγνητικών υλικών έχει πολύ μεγάλη τιμή (ακόμη και 6000 φορές μεγαλύτερη απ' τη διαπερατότητα του κενού). Στη θεωρητική ανάλυση, αλλά και στα παραδείγματα, θεωρήθηκε σταθερή για κάποιες σταθερές τιμές της μαγνητεγερτικής δύναμης που εφαρμόστηκαν στους πυρήνες. Αν και

είναι σωστό να θεωρηθεί σταθερή η μαγνητική διαπερατότητα του κενού, αυτό δεν μπορεί να γίνει για τις διαπερατότητες του σιδήρου και των άλλων σίδηρομαγνητικών υλικών.

Για να διευκρινιστεί η συμπεριφορά της διαπερατότητας ενός σίδηρομαγνητικού υλικού εφαρμόζεται συνεχές ρεύμα στον πυρήνα του σχήματος. Αυτό το ρεύμα έχει την αρχή μηδενική τιμή και στη συνέχεια μεταβάλλεται αργά μέχρι κάποιο επιθυμητό επίπεδο. Αν σχεδιαστεί σ' ένα διάγραμμα η μαγνητική ροή που παράγεται προς την εφαρμοζόμενη μαγνητεγερτική δύναμη, η καμπύλη που θα προκύψει μοιάζει μ' αυτή του σχήματος που ακολουθεί. Αυτού του είδους η καμπύλη ονομάζεται *καμπύλη κορεσμού* ή *καμπύλη μαγνήτισης* (*saturation – magnetization curve*). Στην αρχή, όπως φαίνεται, μια μικρή αύξηση της μαγνητεγερτικής δύναμης προκαλεί τεράστια αύξηση στη μαγνητική ροή. Μετά όμως από ένα συγκεκριμένο σημείο η επιπλέον αύξηση της μαγνητεγερτικής δύναμης προκαλεί σχετικά μικρότερη αύξηση στη μαγνητική ροή. Τελικά ακόμη μεγαλύτερη αύξηση της μαγνητεγερτικής δύναμης δε μεταβάλλει σχεδόν καθόλου τη μαγνητική ροή. Η περιοχή στην οποία η καμπύλη τείνει να γίνει οριζόντια ονομάζεται *περιοχή κορεσμού* (*saturation region*) και ο πυρήνας τότε λέγεται *κορεσμένος*. Αντίθετα η περιοχή όπου η μαγνητική ροή μεταβάλλεται πολύ γρήγορα ονομάζεται *ακόρεστη περιοχή* (*unsaturated region*). Σ' αυτή την περιοχή ο πυρήνας λέγεται *ακόρεστος*. Η περιοχή μετάβασης από την ακόρεστη στην κορεσμένη περιοχή ονομάζεται συνήθως "γόνατο" της καμπύλης.

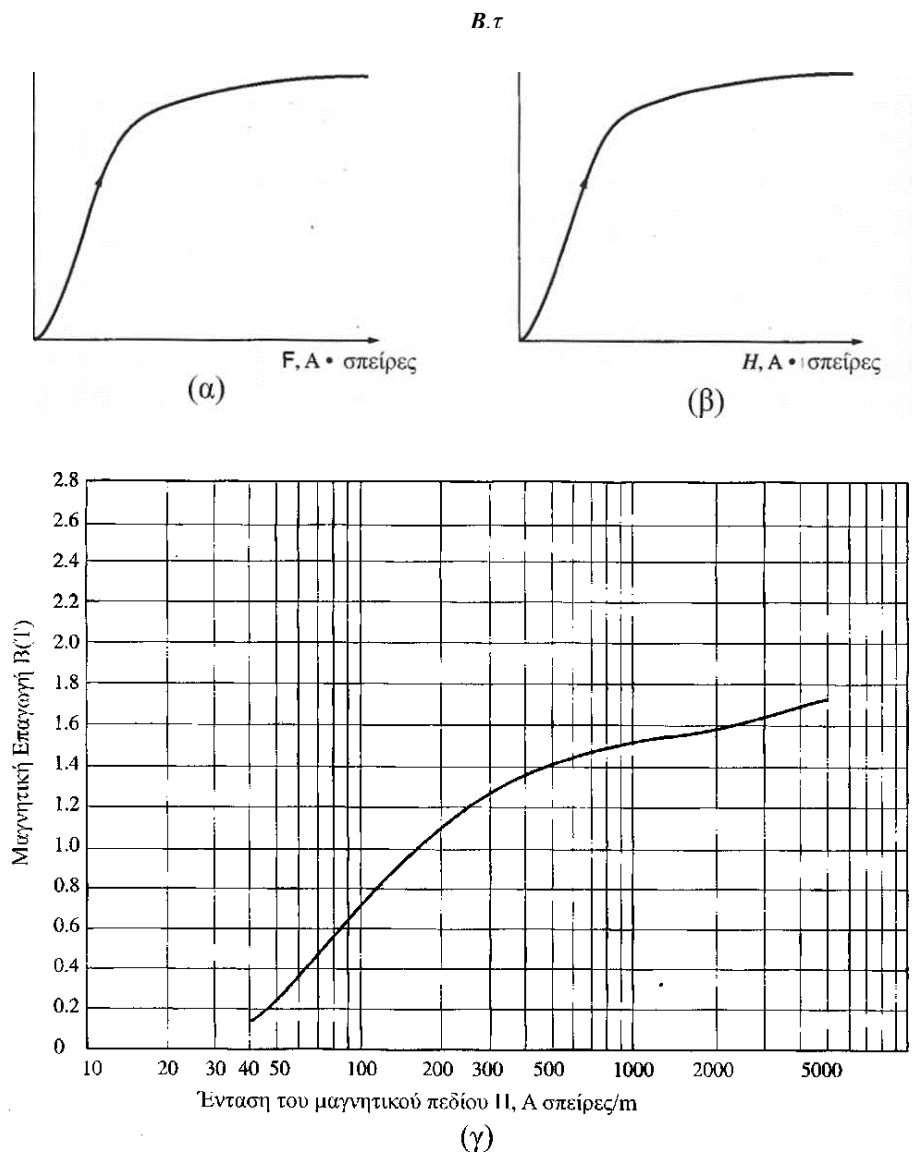
Μια δεύτερη καμπύλη σχετική με την προηγούμενη φαίνεται στο επόμενο σχήμα. Εδώ είναι σχεδιασμένη η μαγνητική επαγωγή B ως προς την ένταση του πεδίου H . Μπορούμε να γράψουμε ότι:

$$H = \frac{Ni}{l_c} = \frac{F}{l_c} \quad (21)$$

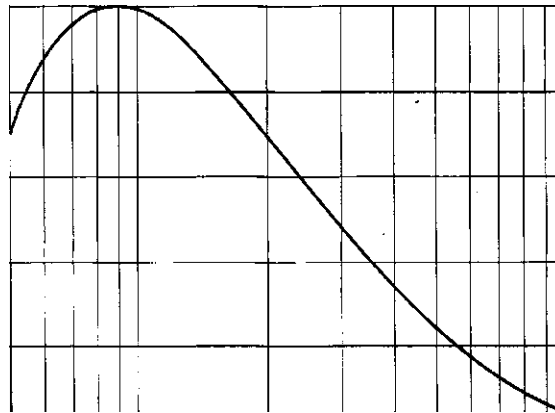
$$\Phi = BA \quad (22)$$

Απ' αυτές τις σχέσεις γίνεται φανερό ότι σε κάθε πυρήνα η ένταση του πεδίου είναι ανάλογη της μαγνητεγερτικής δύναμης, ενώ η μαγνητική επαγωγή είναι ανάλογη της

μαγνητικής ροής. Έτσι η καμπύλη μεταξύ των B και H είναι εντελώς όμοια μ' αυτή μεταξύ της ροής και της μαγνητεγερτικής δύναμης. Η κλίση της καμπύλης της εικόνας 5(α) είναι εξ ορισμού η διαπερατότητα του πυρήνα για τη συγκεκριμένη τιμή της έντασης του πεδίου. Έτσι απ' αυτή την καμπύλη φαίνεται πως η διαπερατότητα είναι μεγάλη και σχετικά σταθερή στην ακόρεστη περιοχή, ενώ μειώνεται βαθμιαία προς μια πολύ μικρή τιμή καθώς ο πυρήνας οδηγείται στον κορεσμό.



Εικόνα 5: (α) Η καμπύλη μαγνήτισης ενός σιδηρομαγνητικού πυρήνα, (β) Η ίδια καμπύλη σαν γραφική παράσταση της μαγνητικής επαγωγής συναρτήσει της έντασης του μαγνητικού πεδίου στον πυρήνα, (γ) Λεπτομερής καμπύλη μαγνήτισης ενός μεταλλικού πυρήνα, (δ) Γραφική παράσταση της σχετικής μαγνητικής διαπερατότητας συναρτήσει της έντασης του μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό ενός μεταλλικού πυρήνα.



Εικόνα 6: Ένταση του μαγνητικού πεδίου H , Α σπείρες/m (δ).

Στην εικόνα φαίνεται με μεγαλύτερη ακρίβεια η καμπύλη μαγνήτισης ενός τυπικού χάλυβα. Εδώ η ένταση του πεδίου εκφράζεται σε λογαριθμική κλίμακα. Μόνο έτσι είναι δυνατό να εμφανιστεί παραστατικά η αρκετά εκτεταμένη περιοχή κορεσμού.

Η χρήση σιδηρομαγνητικών πυρήνων στους μετασχηματιστές και στις ηλεκτρικές μηχανές παρουσιάζει το πλεονέκτημα ότι για συγκεκριμένη μαγνητεγερτική δύναμη στο εσωτερικό τους παράγεται πολλαπλάσια μαγνητική ροή απ' αυτή που θα παραγόταν στον αέρα. Αν όμως η μαγνητική ροή επιβάλλεται να είναι ανάλογη ή σχεδόν ανάλογη της μαγνητεγερτικής δύναμης, θα πρέπει ο πυρήνας να λειτουργεί στην ακόρεστη περιοχή της καμπύλης μαγνήτισης του.

Αφού οι ηλεκτρικές γεννήτριες και κινητήρες εξαρτώνται από τη μαγνητική ροή για να παράγουν τάση και ροπή, έχουν σχεδιαστεί έτσι ώστε να παράγουν όσο το δυνατό μεγαλύτερη μαγνητική ροή. Επομένως, οι περισσότερες ηλεκτρικές μηχανές λειτουργούν κοντά στο γόνατο της καμπύλης μαγνητισμού, και η μαγνητική ροή στους πυρήνες τους δεν σχετίζεται γραμμικά με την μαγνητεγερτική δύναμη που την παράγει. Σε αυτή τη μη-γραμμικότητα οφείλονται πολλές από τις περίεργες συμπεριφορές των μηχανών, τις οποίες θα εξηγήσουμε στα επόμενα κεφάλαια.

2.2 Ο νόμος του Faraday - τάση εξ επαγωγής ενός χρονικά μεταβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου

Η μέχρι τώρα ανάλυση εστιάστηκε στη δημιουργία του μαγνητικού πεδίου και στις ιδιότητες του. Από δω και πέρα θα εξεταστούν οι διάφοροι τρόποι με τους οποίους αυτό το πεδίο επιδρά στο περιβάλλον του.

Ο βασικότερος απ' αυτούς τους τρόπους είναι ο νόμος του Faraday στον οποίο στηρίζεται η λειτουργία των μετασχηματιστών. Σύμφωνα μ' αυτόν, αν μέσα από μια σπείρα ενός πηνίου διέρχεται μαγνητική ροή, τότε στα άκρα της επάγεται μια τάση e_{ind} που είναι ανάλογη προς το ρυθμό μεταβολής της μαγνητικής ροής ως προς το χρόνο.

$$e_{ind} = -\frac{d\phi}{dt} \quad (23)$$

όπου e_{ind} είναι η τάση που επάγεται στα άκρα της σπείρας και ϕ η μαγνητική ροή που διέρχεται μέσα απ' αυτή. Αν ένα πηνίο αποτελείται από σπείρες κι αν η ίδια μαγνητική ροή περνάει από την κάθε σπείρα του, η τάση που επάγεται στα άκρα του θα είναι:

$$e_{ind} = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (24)$$

Όπου e_{ind} = η τάση που επάγεται στα άκρα του πηνίου

N = ο αριθμός των σπειρών του πηνίου

ϕ = η μαγνητική ροή που διέρχεται απ' το πηνίο

Το αρνητικό πρόσημο στις παραπάνω σχέσεις οφείλεται στο νόμο του Lenz Σύμφωνα μ' αυτό το νόμο η πολικότητα της τάσης που αναπτύσσεται είναι τέτοια, ώστε, αν τα άκρα του πηνίου βραχυκυκλωθούν, το παραγόμενο ρεύμα να δημιουργεί μαγνητική ροή που *αντιτίθεται* στη μεταβολή της αρχικής ροής. Αν η τιμή της μαγνητικής ροής αυξάνεται, τότε η διαφορά δυναμικού που επάγεται στο τύλιγμα τείνει να δημιουργήσει ένα πεδίο με ροή που *αντιτίθεται* στην αύξηση της αρχικής ροής. Στην αντίθετη περίπτωση, η φορά του ρεύματος θα προκαλέσει μαγνητική ροή *αντίθετη* της αρχικής ή με άλλα λόγια η τάση εξ επαγωγής πρέπει να έχει πολικότητα η οποία να *επιβάλλει* ένα

τέτοιο ρεύμα στο εξωτερικό κύκλωμα του πηνίου. Το αρνητικό πρόσημο συχνά παραλείπεται αφού προκύπτει από κάποιες φυσικές παρατηρήσεις.

Κατά τη χρήση της Εξ. (24) σε πρακτικά προβλήματα εμφανίζεται μια σημαντική δυσκολία. Σ' αυτή την εξίσωση γίνεται η υπόθεση ότι η ροή είναι η ίδια για όλες τις σπείρες του τυλίγματος. Όμως, στην πραγματικότητα ένα μέρος της μαγνητικής ροής ξεφεύγει από τον πυρήνα προς τον αέρα που τον περιβάλλει. Όταν οι σπείρες είναι πολύ κοντά η μια στην άλλη, τότε πράγματι απ' όλες τους διέρχεται η ίδια μαγνητική ροή και η Εξ. (24) δίνει σωστά αποτελέσματα. Όμως, αν η ροή διαρροής είναι αρκετά μεγάλη ή αν στους υπολογισμούς απαιτείται μεγάλη ακρίβεια, πρέπει να χρησιμοποιηθεί μια άλλη εξίσωση στην οποία δε γίνεται η παραπάνω υπόθεση.

Πιο σωστά, λοιπόν, η τάση στα άκρα της i -οστής σπείρας του πηνίου θα είναι

$$e_{ind} = -N \frac{d(\phi_i)}{dt} \quad (25)$$

Αν το τύλιγμα αποτελείται από N σπείρες, η τάση στα άκρα του θα έχει τιμή

$$e_{ind} = \sum_{i=1}^N e_i \quad (26)$$

$$= \sum_{i=1}^N \frac{d(\phi_i)}{dt} \quad (27)$$

$$= \frac{d}{dt} \left(\sum_{i=1}^N \phi_i \right) \quad (28)$$

Ο όρος της Εξ. (28), που βρίσκεται σε παρένθεση ονομάζεται *πεπλεγμένη ροή (flux linkage)* του τυλίγματος. Τελικά, ο νόμος του Faraday γράφεται

$$e_{ind} = \frac{d\lambda}{dt} \quad (29)$$

Όπου
$$\lambda = \sum_{i=1}^N \phi_i \quad (30)$$

Οι μονάδες της πεπλεγμένης ροής είναι τα Weber επί σπείρες.

Ο νόμος του Faraday είναι η βασική αρχή των μαγνητικών πεδίων που εμπλέκονται στη λειτουργία του μετασχηματιστή, ενώ ο νόμος του Lenz προσδιορίζει την πολικότητα των επαγόμενων τάσεων στα τυλίγματα των μετασχηματιστών.

Επίσης, με το νόμο του Faraday εξηγούνται οι απώλειες εξαιτίας των δινορρευμάτων. Μια χρονικά μεταβαλλόμενη μαγνητική ροή επάγει τάση μέσα στον ίδιο τον πυρήνα, όπως ακριβώς και στο τυλίγμα του. Αυτή η τάση προκαλεί στο εσωτερικό του πυρήνα ρεύματα με μορφή στροβίλων. Τα ρεύματα αυτά μοιάζουν με τις δίνες που σχηματίζονται στις όχθες των ποταμών και γι' αυτό το λόγο ονομάζονται "δινορρεύματα". Καθώς τα δινορρεύματα διαρρέουν τον αγωγίμο πυρήνα καταναλώνεται ενέργεια. Η ενέργεια που χάνεται μετατρέπεται σε θερμότητα και θερμαίνει τον πυρήνα.

Αποδεικνύεται ότι το ποσό της ενέργειας που χάνεται εξαιτίας των δινορρευμάτων είναι ανάλογο του μήκους της διαδρομής που αυτά διαγράφουν μέσα στον πυρήνα. Γι' αυτό το λόγο οι σιδηρομαγνητικοί πυρήνες, στους οποίους είναι δυνατό να αναπτυχθούν τέτοια ανεπιθύμητα ρεύματα, χωρίζονται σε λεπτά φύλλα που ονομάζονται δυναμοελάσματα (*laminations*). Κατόπιν τα δυναμοελάσματα ενώνονται για να σχηματίσουν το νέο πυρήνα. Ανάμεσα στα δυναμοελάσματα παρεμβάλλονται μονωτικές ρητίνες που περιορίζουν τις διαδρομές των δινορρευμάτων. Η παρεμβολή ρητινών δεν επιδρά σχεδόν καθόλου στις μαγνητικές ικανότητες ενός πυρήνα μια και έχει πολύ μικρό πάχος. Αντίθετα παίζει πολύ σπουδαίο ρόλο στη μείωση των απωλειών εξαιτίας των δινορρευμάτων.

3 Μετασχηματιστές

Ο μετασχηματιστής είναι μια ηλεκτρική συσκευή που μετατρέπει εναλλασσόμενη ηλεκτρική ενέργεια ενός επιπέδου τάσης σε εναλλασσόμενη ηλεκτρική ενέργεια διαφορετικού επιπέδου τάσης μέσω της επίδρασης ενός μαγνητικού πεδίου. Αυτή η συσκευή αποτελείται από δυο ή περισσότερα πηνία που τυλίγονται γύρω από έναν κοινό σιδηρομαγνητικό πυρήνα. Τα πηνία αυτά συνήθως δεν είναι ηλεκτρικά συνδεδεμένα μεταξύ τους. Η μόνη σύζευξη που υπάρχει μεταξύ των σπειρών είναι το κοινό μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό του πυρήνα.

Το ένα από τα δύο πηνία του μετασχηματιστή συνδέεται με μια πηγή εναλλασσόμενης τάσης, ενώ το δεύτερο (ή το τρίτο, αν υπάρχει) συνδέεται με το φορτίο.

Το πρώτο τύλιγμα ονομάζεται *πρωτεύον τύλιγμα* (*primary winding*) ή *τύλιγμα εισόδου* του μετασχηματιστή και το δεύτερο ονομάζεται *δευτερεύον* (*secondary*) ή *τύλιγμα, εξόδου*. Αν υπάρχει και τρίτο τύλιγμα, αυτό ονομάζεται *τριτεύον τύλιγμα* του μετασχηματιστή.

3.1 Η σημασία των μετασχηματιστών στη σύγχρονη ζωή

Το πρώτο σύστημα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας στις ΗΠΑ αναπτύχθηκε από τον Τηομας Α. Edison και λειτουργούσε με συνεχές ρεύμα στα 120 V, για να τροφοδοτεί ένα δίκτυο φωτισμού με λαμπτήρες πυρακτώσεως. Πάνω σ' αυτό το δίκτυο του Edison στηρίχθηκε ο πρώτος σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που άρχισε να λειτουργεί στη Νέα Υόρκη το 1882. Δυστυχώς, αυτή η ενέργεια παράγονταν και διανέμονταν με τόσο χαμηλή τιμή τάσης, ώστε, για την τροφοδοσία ενός σημαντικού φορτίου, το ρεύμα στη γραμμή μεταφοράς ήταν αρκετά υψηλό. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα μεγάλες πτώσεις τάσης και απώλειες στις γραμμές μεταφοράς, γεγονός που μείωνε σημαντικά την περιοχή διανομής του σταθμού παραγωγής. Έτσι, ο κάθε σταθμός

παραγωγής εκείνη την εποχή τροφοδοτούσε λίγα μόνο οικοδομικά τετράγωνα της πόλης. Το γεγονός της αδυναμίας μεταφοράς συνεχούς τάσης με μεγάλο πλάτος είχε ως αποτέλεσμα οι σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας να είναι μικρής ισχύος, τοπικοί και συνεπώς μικρής σχετικά αποδόσεως.

Η εφεύρεση του μετασχηματιστή και η ταυτόχρονη ανάπτυξη των πηγών εναλλασσόμενης τάσης παραμέρισαν όλους τους προηγούμενους περιορισμούς στο επίπεδο ισχύος και το μέγεθος των συστημάτων ισχύος. Στην ιδανική περίπτωση ο μετασχηματιστής μετατρέπει το επίπεδο της εναλλασσόμενης τάσης που εφαρμόζεται στην είσοδο του σε τάση με διαφορετικό επίπεδο στην έξοδο του, χωρίς σημαντικές απώλειες. Έτσι, όταν η τάση εισόδου ανυψώνεται, το αντίστοιχο ρεύμα υποβιβάζεται, ώστε η ισχύς εξόδου να είναι ίση με την ισχύ εισόδου. Μ' αυτό τον τρόπο είναι δυνατή η παραγωγή εναλλασσόμενης τάσης σε κάποιο κεντρικό σημείο, η ανύψωση του επιπέδου της και η μεταφορά της σε μεγάλες αποστάσεις με πολύ μικρές απώλειες. Στο σημείο της κατανάλωσης φυσικά το επίπεδο της τάσης θα πρέπει και πάλι να υποβιβαστεί με τη βοήθεια ενός μετασχηματιστή υποβιβασμού. Όπως είναι γνωστό, οι απώλειες μιας γραμμής μεταφοράς είναι ανάλογες του τετραγώνου του ρεύματος της γραμμής. Δηλαδή, ο δεκαπλασιασμός του επιπέδου της παραγόμενης τάσης πριν από τη μεταφορά της και η αντίστοιχη μείωση του ρεύματος συνεπάγεται εκατό φορές μείωση των απωλειών μεταφοράς. Είναι, λοιπόν, φανερό πως, χωρίς την εισαγωγή των μετασχηματιστών, η ηλεκτρική ενέργεια θα ήταν αδύνατο να χρησιμοποιηθεί στις περισσότερες από τις σημερινές εφαρμογές.

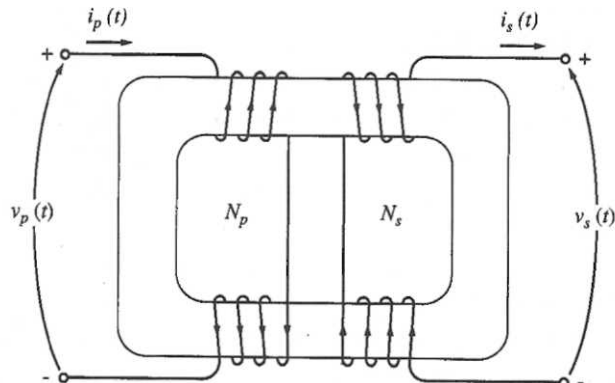
Στα σύγχρονα συστήματα ισχύος η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται με επίπεδο τάσης 12 έως 25 Kv. Οι μετασχηματιστές ανυψώνουν αυτά τα επίπεδα στα 110 Kv έως περίπου 1000 kV, ώστε οι απώλειες μεταφοράς να είναι πολύ μικρές. Ο πρώτος υποβιβασμός αυτής της τάσης γίνεται στους υποσταθμούς διανομής πάλι με τη βοήθεια των μετασχηματιστών σε επίπεδα τάσης από 12 έως 34,5 Kv. Τελικά, με συνεχείς υποβιβασμούς (μέχρι π.χ. τα 120 V) η ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί με ασφάλεια σε σπίτια, γραφεία και σε εργοστάσια.

3.2 Είδη και κατασκευή των μετασχηματιστών

Η βασική αποστολή των μετασχηματιστών είναι η μετατροπή της εναλλασσόμενης ηλεκτρικής ενέργειας ενός επιπέδου τάσης σε εναλλασσόμενη ηλεκτρική ενέργεια της ίδιας συχνότητας, αλλά διαφορετικού επιπέδου τάσης. Ακόμη, οι μετασχηματιστές χρησιμοποιούνται και για μια μεγάλη ποικιλία εφαρμογών, όπως η μέτρηση τάσης ή ρεύματος, ο μετασχηματισμός σύνθετων αντιστάσεων κλπ.

Δύο είναι οι τρόποι κατασκευής ενός μετασχηματιστή ισχύος. Στον πρώτο, τα τυλίγματα του μετασχηματιστή τοποθετούνται γύρω από τις δύο πλευρές ενός ορθογώνιου πυρήνα από φύλλα χάλυβος. Αυτός ο μετασχηματιστής ονομάζεται μετασχηματιστής τύπου πυρήνα (*core form*). Ο άλλος τρόπος κατασκευής του μετασχηματιστή πραγματοποιείται σ' έναν πυρήνα με τρία σκέλη. Τα τυλίγματα του μετασχηματιστή τοποθετούνται στο μεσαίο σκέλος. Αυτός ο μετασχηματιστής ονομάζεται μετασχηματιστής τύπου μανδύα (*shell form*). Και στις δύο περιπτώσεις, οι πυρήνες κατασκευάζονται από λεπτά δυναμοελάσματα. Τα δυναμοελάσματα είναι ηλεκτρικά μονωμένα μεταξύ τους, με σκοπό τη μείωση δινορρευμάτων. Στους πραγματικούς μετασχηματιστές τα δυο τυλίγματα τοποθετούνται ομόκεντρα, έτσι ώστε το τύλιγμα με το χαμηλότερο επίπεδο τάσης να βρίσκεται στο εσωτερικό του άλλου τυλίγματος. Αυτή η κατασκευή εξυπηρετεί τους δύο παρακάτω σκοπούς:

1. Λύνει το πρόβλημα της μόνωσης μεταξύ του πυρήνα και του τυλίγματος υψηλής τάσης.
2. Η μαγνητική ροή διαρροής μειώνεται σημαντικά σε σχέση με οποιονδήποτε άλλο τρόπο κατασκευής.



Εικόνα 7: Συνδεσμολογία μετασχηματιστή τύπου πυρήνα.

Ανάλογα με τη συγκεκριμένη λειτουργία τους στο σύστημα ισχύος οι μετασχηματιστές παίρνουν διάφορες ονομασίες. Ο μετασχηματιστής που συνδέεται στην έξοδο μιας γεννήτριας και ανυψώνει το επίπεδο της τάσης εξόδου της (π.χ. στα 110 kV) πριν οδηγηθεί στη γραμμή μεταφοράς, ονομάζεται μετασχηματιστής μονάδος (*unit transformer*). Ο μετασχηματιστής στο άλλο άκρο της γραμμής μεταφοράς που υποβιβάζει το επίπεδο τάσης της γραμμής στα επίπεδα διανομής (2,3 ως 34,5 kV) ονομάζεται μετασχηματιστής υποσταθμού (*substation transformer*). Τέλος, ο μετασχηματιστής που υποβιβάζει την τάση διανομής στα επίπεδα της χρησιμοποιήσιμης τάσης ονομάζεται μετασχηματιστής διανομής (*distribution transformer*). Όλοι οι παραπάνω μετασχηματιστές παρουσιάζουν μικρές διαφορές μεταξύ τους και η βασικότερη απ' αυτές βρίσκεται στον τρόπο με τον οποίο χρησιμοποιείται ο καθένας.

Εκτός από τους μετασχηματιστές ισχύος, πολύ σημαντικοί είναι και άλλοι δυο ιδιαίτεροι τύποι μετασχηματιστών. Ο πρώτος από αυτούς χρησιμοποιείται για τη μετατροπή υψηλής τάσης σε κάποια χαμηλή τιμή ανάλογη της πρώτης και ονομάζεται μετασχηματιστής τάσης (*potential transformer*). Τη λειτουργία αυτή του μετασχηματιστή μπορεί να την υλοποιήσει και ο μετασχηματιστής ισχύος, όμως η διαφορά τους βρίσκεται στο γεγονός ότι ο μετασχηματιστής τάσης λειτουργεί μόνο με ρεύματα πολύ χαμηλής τιμής. Ο δεύτερος ειδικός τύπος μετασχηματιστή μετατρέπει το υψηλό ρεύμα εισόδου σε χαμηλό ρεύμα δευτερεύοντος ανάλογο του ρεύματος εισόδου και ονομάζεται μετασχηματιστής ρεύματος (*current transformer*).

3.3 Ιδανικός μετασχηματιστής

Ιδανικός μετασχηματιστής (*ideal transformer*) είναι η διάταξη που δεν παρουσιάζει απώλειες και διαθέτει μια περιέλιξη εισόδου και μια περιέλιξη εξόδου. Οι σχέσεις μεταξύ των τάσεων εισόδου και εξόδου και μεταξύ των ρευμάτων εισόδου και εξόδου δίνονται από δυο απλές σχέσεις.

Το πρωτεύον τύλιγμα του μετασχηματιστή, διαθέτει N_p σπείρες και το δευτερεύον του σπείρες. Η εξίσωση που δίνει τη σχέση μεταξύ της εφαρμοζόμενης τάσης στο πρωτεύον τύλιγμα $v_p(t)$ και της τάσης στα άκρα του δευτερεύοντος $v_s(t)$ είναι η

$$\frac{v_p(t)}{v_s(t)} = \frac{N_p}{N_s} = \alpha \quad (31)$$

όπου α είναι ο λόγος μετασχηματισμού (*turns ratio*) του μετασχηματιστή:

$$\alpha = \frac{N_p}{N_s} \quad (32)$$

Η σχέση μεταξύ του ρεύματος στο πρωτεύον τύλιγμα του ιδανικού μετασχηματιστή $i_p(t)$ και του ρεύματος στο δευτερεύον τύλιγμα του $i_s(t)$ δίνεται από την εξίσωση

$$N_p i_p(t) = N_s i_s(t) \quad (33)$$

$$\frac{i_p(t)}{i_s(t)} = \frac{1}{\alpha} \quad (34)$$

και στο πεδίο της συχνότητας οι παραπάνω εξισώσεις γίνονται

$$\frac{\mathbf{V}_p}{\mathbf{V}_s} = \alpha \quad (35)$$

Και
$$\frac{\mathbf{I}_p}{\mathbf{I}_s} = \frac{1}{\alpha} \quad (36)$$

Από τις παραπάνω σχέσεις φαίνεται ότι τόσο οι \mathbf{V}_p και \mathbf{V}_s όσο και τα \mathbf{I}_p και \mathbf{I}_s παρουσιάζουν μεταξύ τους τις ίδιες φάσεις. Αυτό σημαίνει πως ο λόγος μετασχηματισμού επηρεάζει μόνο τα μέτρα των τάσεων και των ρευμάτων του μετασχηματιστή και όχι τις φάσεις τους.

Οι παραπάνω εξισώσεις αν και δίνουν τις ακριβείς σχέσεις μεταξύ των τάσεων και των ρευμάτων στα τυλίγματα ενός ιδανικού μετασχηματιστή, αφήνουν άλυτο το θέμα της πολικότητάς τους τόσο στο πρωτεύον όσο και στο δευτερεύον τύλιγμα. Ο μόνος τρόπος για να βρεθεί η πολικότητα στο δευτερεύον τύλιγμα ενός πραγματικού μετασχηματιστή είναι να ανοιχτεί το κέλυφος της συσκευής και να εξεταστεί το ίδιο το τύλιγμα. Για να αποφευχθεί όμως κάτι τέτοιο, στο κυκλωματικό διάγραμμα του μετασχηματιστή χρησιμοποιούνται τελείες που δείχνουν την πολικότητα της τάσης και του ρεύματος. Η σύμβαση που εφαρμόζεται στα αντίστοιχα κυκλωματικά διαγράμματα είναι η εξής:

1. Αν η τάση στο σημειωμένο με τελεία άκρο του πρωτεύοντος τυλίγματος είναι θετικότερη σε σχέση με το μη σημειωμένο άκρο του, τότε και η τάση στο σημειωμένο με τελεία άκρο του δευτερεύοντος τυλίγματος είναι θετικότερη σε σχέση με το άλλο άκρο του. Δηλαδή, οι πολικότητες των τάσεων στα δυο τυλίγματα του μετασχηματιστή είναι οι ίδιες σε σχέση με τα σημειωμένα άκρα τους.
2. Αν το ρεύμα στο πρωτεύον τύλιγμα του μετασχηματιστή έχει φορά προς το σημειωμένο άκρο του, τότε το ρεύμα στο δευτερεύον τύλιγμα θα έχει φορά προς το μη σημειωμένο άκρο του.

Ισχύς στους Ιδανικούς Μετασχηματιστές

Η ισχύς εισόδου στο πρωτεύον τύλιγμα ενός μετασχηματιστή έχει τιμή

$$P_{in} = V_p I_p \cos\theta_p \quad (37)$$

όπου θ_p η γωνία που σχηματίζουν μεταξύ τους τα διανύσματα της τάσης και του ρεύματος στο πρωτεύον τύλιγμα. Αντίστοιχα, η ισχύς που προσφέρει ο μετασχηματιστής στα φορτία του είναι ίση με

$$P_{out} = V_s I_s \cos\theta_s \quad (38)$$

όπου θ_s η γωνία που σχηματίζουν μεταξύ τους τα διανύσματα της τάσης και του ρεύματος στο δευτερεύον τύλιγμα. Επίσης, επειδή οι φάσεις των τάσεων και των ρευμάτων σε έναν ιδανικό μετασχηματιστή δεν επηρεάζονται, ισχύει $\theta_p - \theta_s = \theta$. Αυτό

σημαίνει ότι οι συντελεστές ισχύος του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος τυλίγματος ενός ιδανικού μετασχηματιστή είναι ίσοι, μεταξύ τους.

Η σχέση μεταξύ της ισχύος εισόδου στο πρωτεύον κύκλωμα του ιδανικού μετασχηματιστή και της ισχύος εξόδου στο δευτερεύον είναι δυνατό να υπολογιστεί από τις σχέσεις μεταξύ των τάσεων και των ρευμάτων στις δυο πλευρές του. Η ισχύς εξόδου του μετασχηματιστή είναι

$$P_{out} = V_S I_S \cos\theta_S \quad (39)$$

Εφαρμόζοντας στην Εξ. (39) τις εξισώσεις μετασχηματισμού $V_S = V_P / a$ και $I_S = A_P$ αυτή γίνεται

$$P_{out} = \frac{V_P}{a} (a I_P) \cos\theta_S$$
$$P_{out} = V_P I_P \cos\theta_S = P_{in} \quad (40)$$

Δηλαδή, η ισχύς εξόδου ενός ιδανικού μετασχηματιστή είναι ίση με την ισχύ εισόδου.

Το ίδιο ακριβώς ισχύει για την άεργο ισχύ Q , καθώς και για τη φαινόμενη ισχύ S ενός μετασχηματιστή

$$Q_{in} = V_P I_P \sin\theta = V_S I_S \sin\theta = Q_{out} \quad (41)$$

$$S_{in} = V_P I_P = V_S I_S = S_{out} \quad (42)$$

Ρεύμα Μαγνήτισης ενός Ιδανικού Μετασχηματιστή

Αν στο πρωτεύον τύλιγμα ενός μετασχηματιστή εφαρμοστεί εναλλασσόμενη τάση, τότε το τύλιγμα διαρρέεται από ρεύμα, ακόμη κι αν στο δευτερεύον του δε συνδέεται κανένα φορτίο. Αυτό το ρεύμα είναι απαραίτητο για την ανάπτυξη μαγνητικής ροής στο εσωτερικό του πυρήνα και αποτελείται από δύο συνιστώσες

1. Το ρεύμα μαγνήτισης (magnetization current) i_M που είναι η αιτία ανάπτυξης μαγνητικής ροής στον πυρήνα του μετασχηματιστή.

2. Το ρεύμα απωλειών πυρήνα (core-loss current) i_{h+e} , που αντιστοιχεί στο φαινόμενο υστέρησης (hysteresis) και στα δινορρέυματα (eddy currents) του πυρήνα.

Αν είναι γνωστή η ροή στο εσωτερικό του πυρήνα, τότε το ρεύμα μαγνήτισης υπολογίζεται από την καμπύλη του σχήματος

Έστω ότι στον παραπάνω πυρήνα η ροή διαρροής αγνοείται. Η μέση τιμή της ροής στον πυρήνα θα δίνεται από την

$$\bar{\Phi}_s = \frac{I}{N_p} \int v_p(t) dt \quad (43)$$

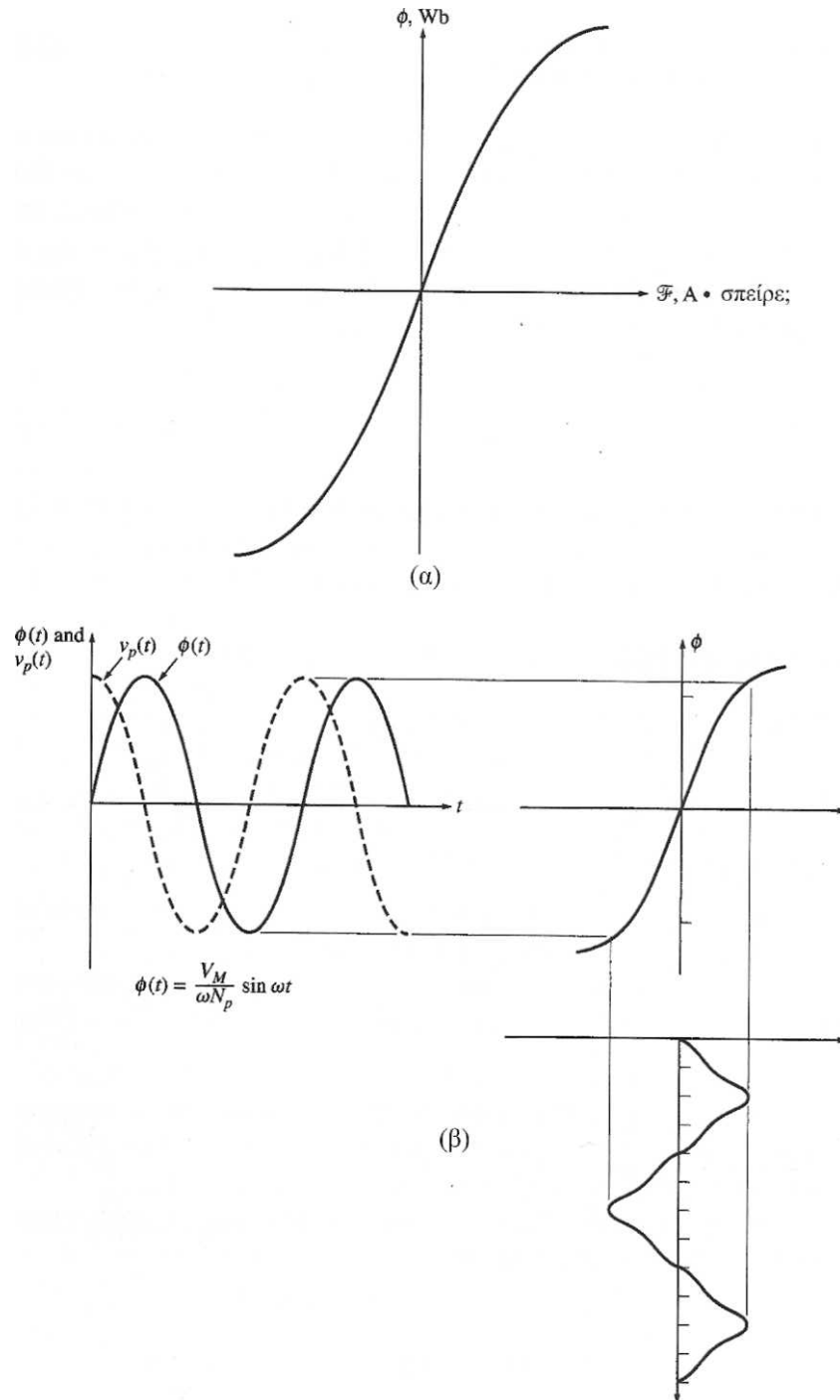
Αν η τάση που εφαρμόζεται στο πρωτεύον δίνεται από την $v_p(t) = V_M \cos \omega t$, η αντίστοιχη ροή θα είναι

$$\begin{aligned} \bar{\Phi}_s &= \frac{I}{N_p} \int v_M \cos \omega t dt \\ &= \frac{V_M}{\omega N_p} \sin \omega t \quad WB \end{aligned} \quad (44)$$

Οι τιμές του ρεύματος που απαιτούνται για την ανάπτυξη μιας συγκεκριμένης μαγνητικής ροής στον πυρήνα συγκρίνονται με τις τιμές της ροής σε διάφορες χρονικές στιγμές και δίνουν την κυματομορφή του ρεύματος μαγνήτισης του τυλίγματος. Αυτή η κυματομορφή φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί. Οι παρατηρήσεις που μπορούν να γίνουν σ' αυτή την κυματομορφή είναι οι ακόλουθες

1. Το ρεύμα μαγνήτισης του τυλίγματος ενός μετασχηματιστή δε μεταβάλλεται ημιτονοειδώς. Οι αρμονικές υψηλών συχνοτήτων που παρουσιάζει η κυματομορφή του οφείλονται στον κορεσμό του πυρήνα.
2. Κάθε φορά που η μέγιστη μαγνητική ροή φτάνει στο σημείο κορεσμού του πυρήνα, ακόμη και για μικρή αύξηση της ροής, απαιτείται μεγάλη αύξηση του ρεύματος μαγνήτισης.
3. Η κυματομορφή της βασικής συχνότητας του ρεύματος μαγνήτισης καθυστερεί σε σχέση με την κυματομορφή της τάσης κατά 90° .

4. Οι αρμονικές υψηλών συχνοτήτων που παρουσιάζει η κυματομορφή του ρεύματος μαγνήτισης, μπορεί να είναι πολύ μεγαλύτερες σε πλάτος από τη βασική συχνότητα. Γενικά, όσο βαθύτερα βρίσκεται ο πυρήνας στον κορεσμό, τόσο μεγαλύτερες είναι οι υψηλότερες αρμονικές του ρεύματος μαγνήτισης.



Εικόνα 8: (α) Η καμπύλη μαγνήτισης για τον πυρήνα του μετασχηματιστή, (β) Το ρεύμα μαγνήτισης που προκαλεί η μαγνητική ροή στο εσωτερικό του πυρήνα ενός μετασχηματιστή.

Η δεύτερη συνιστώσα του ρεύματος (ρεύμα απωλειών πυρήνα), που εμφανίζεται στην αφόρτιστη λειτουργία ενός πραγματικού μετασχηματιστή, είναι το ρεύμα που μεταφέρει την ισχύ η οποία καταναλώνεται στον πυρήνα με τη μορφή απωλειών υστέρησης και δινορρευμάτων. Έστω ότι η κυματομορφή της μαγνητικής ροής στο εσωτερικό του πυρήνα είναι ημιτονοειδής. Επειδή τα δινορρεύματα που αναπτύσσονται στο εσωτερικό του πυρήνα είναι ανάλογα της ποσότητας $d\phi/dt$, η τιμή τους είναι μέγιστη τη στιγμή που η ροή περνάει από το μηδέν. Οι απώλειες υστέρησης παρουσιάζουν μεγάλο βαθμό μη γραμμικότητας αλλά γίνονται κι αυτές μέγιστες τη στιγμή που η κυματομορφή της ροής περνάει από το μηδέν. Στην εικόνα φαίνεται η κυματομορφή του ρεύματος απωλειών του πυρήνα.

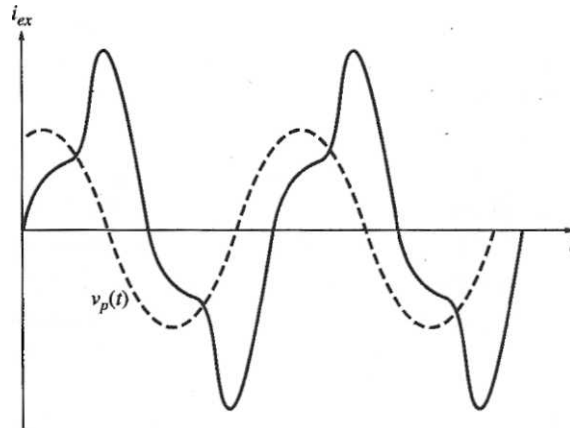
Σ' αυτό το τμήμα του ρεύματος του μετασχηματιστή γίνονται οι παρακάτω παρατηρήσεις:

1. Το ρεύμα απωλειών του πυρήνα είναι παραμορφωμένο εξαιτίας της μη γραμμικότητας των απωλειών υστέρησης.
2. Η κυματομορφή της βασικής συχνότητας του ρεύματος απωλειών του πυρήνα βρίσκεται σε φάση με την κυματομορφή της τάσης που εφαρμόζεται στην είσοδο του μετασχηματιστή

Το συνολικό ρεύμα στο τύλιγμα του μετασχηματιστή, που εξετάστηκε παραπάνω, ονομάζεται *ρεύμα διέγερσης (excitation current)* και είναι το άθροισμα του ρεύματος μαγνήτισης και του ρεύματος απωλειών πυρήνα:

$$i_{ex} = i_m + i_{h+e} \quad (45)$$

Η κυματομορφή του ρεύματος διέγερσης ενός συνηθισμένου μετασχηματιστή φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί.



Εικόνα 9: Το συνολικό ρεύμα διέγερσης σ' έναν μετασχηματιστή.

3.4 Διακύμανση τάσης και απόδοση μετασχηματιστών

Επειδή ο μετασχηματιστής στο κύκλωμα του διαθέτει κάποια σύνθετη αντίσταση σειράς, η τάση εξόδου μεταβάλλεται με τη μεταβολή του φορτίου, ακόμη και όταν η τάση τροφοδοσίας παραμένει σταθερή. Έτσι, για να είναι εύκολη η σύγκριση διαφορετικών μετασχηματιστών, ορίζεται μια νέα ποσότητα που ονομάζεται *διακύμανση τάσης (voltage regulation VR)*. Μ' αυτή την ποσότητα συγκρίνονται μεταξύ τους η τάση εξόδου του μετασχηματιστή στη λειτουργία χωρίς φορτίο (nl) με την τάση εξόδου του στην πλήρη φόρτιση του (fl). Η σχέση του ορισμού της είναι η

$$VR = \frac{V_{S,nl} - V_{S,fl}}{V_{S,fl}} \times 100\% \quad (46)$$

Επειδή στη λειτουργία χωρίς φορτίο ισχύει $Y_s = V_P/a$, η παραπάνω σχέση γράφεται

$$VR = \frac{V_P/a - V_{S,fl}}{V_{S,fl}} \times 100\% \quad (47)$$

Αν τώρα, το ισοδύναμο κύκλωμα του μετασχηματιστή έχει μετατραπεί στο ανά μονάδα σύστημα, η διακύμανση τάσης εκφράζεται ως εξής

$$VR = \frac{V_{P,pu} - V_{S,fl,pu}}{V_{S,fl,pu}} \times 100\% \quad (48)$$

Σχεδόν πάντα η τιμή της διακύμανσης τάσης θα πρέπει να είναι όσο το δυνατό μικρότερη. Σ' έναν ιδανικό μετασχηματιστή ισχύει $VR=0$. Όμως, πολύ συχνά

χρησιμοποιούνται σκόπιμα μετασχηματιστές με μεγάλη διακύμανση τάσης με σκοπό να μειώσουν κάποια ανεπιθύμητα ρεύματα που προέρχονται από σφάλματα στη λειτουργία κάποιων κυκλωμάτων.

Διανυσματικό Διάγραμμα ενός Μετασχηματιστή

Για τον προσδιορισμό της διακύμανσης τάσης ενός μετασχηματιστή είναι απαραίτητος ο υπολογισμός των πτώσεων τάσης στο εσωτερικό του. Εδώ μπορούν, επίσης, να αγνοηθούν τα φαινόμενα στον κλάδο διέγερσης και στους υπολογισμούς να συμπεριληφθούν μόνο οι σύνθετες αντιστάσεις σειράς. Η διακύμανση τάσης ενός μετασχηματιστή εξαρτάται τόσο από τις σύνθετες αντιστάσεις σειράς όσο και από τη φάση του ρεύματος. Αυτές οι ποσότητες είναι πολύ εύκολο να παρατηρηθούν με το σχεδιασμό του *διανυσματικού διαγράμματος (phasor diagram)* του μετασχηματιστή, δηλαδή, με τη σχεδίαση των διανυσμάτων των ρευμάτων και των τάσεων που αναπτύσσονται στο εσωτερικό του.

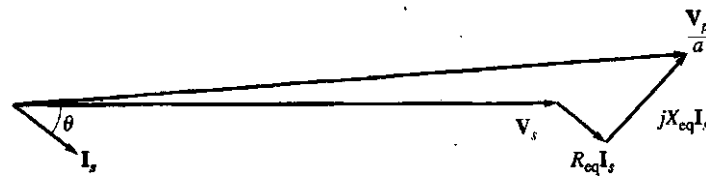
Σ' όλα τα διανυσματικά διαγράμματα που ακολουθούν το διάνυσμα της τάσης \mathbf{V}_S θεωρείται ότι έχει μηδενική φάση και λαμβάνεται ως αναφορά όλων των διανυσμάτων. Εφαρμόζοντας το νόμο των τάσεων του Kirchhoff ισοδύναμο κύκλωμα, η τάση του πρωτεύοντος δίνεται από την

$$\frac{V_P}{\alpha} = V_S + R_{eq} I_S + jX_{eq} I_S \quad (49)$$

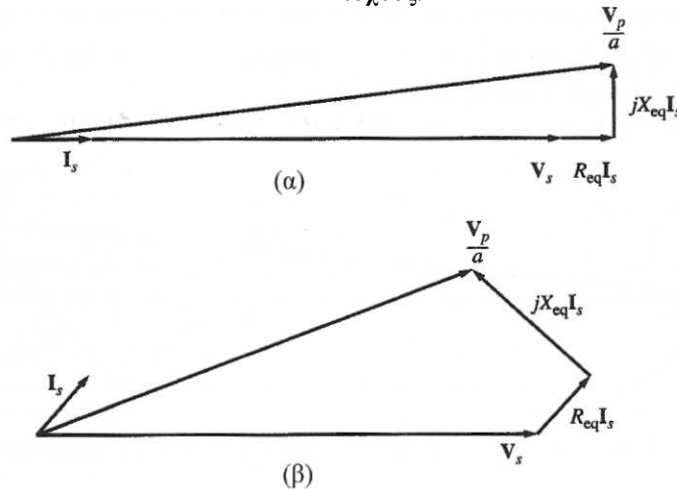
Το διανυσματικό διάγραμμα ενός μετασχηματιστή είναι απλώς η γραφική παρουσίαση της παραπάνω εξίσωσης.

Ένα τέτοιο διάγραμμα φαίνεται στο επόμενο σχήμα, όπου ο μετασχηματιστής λειτουργεί με επαγωγικό συντελεστή ισχύος. Εδώ ισχύει $V_P/\alpha > V_S$ επειδή το φορτίο είναι επαγωγικό, οπότε η αντίστοιχη διακύμανση τάσης θα είναι σ' αυτή την περίπτωση θετική.

Αντίστοιχα, στην δεύτερη εικόνα φαίνεται ένα διαφορετικό διανυσματικό διάγραμμα για κάποιο μετασχηματιστή με ωμικό φορτίο. Η τάση στο πρωτεύον είναι και πάλι μεγαλύτερη από την τάση του δευτερεύοντος και η διακύμανση τάσης είναι θετική. Σ' αυτή την περίπτωση όμως η διακύμανση τάσης έχει μικρότερη τιμή από αυτή της προηγούμενης περίπτωσης. Τέλος, όταν το φορτίο του μετασχηματιστή είναι χωρητικό, η τάση στο δευτερεύον μπορεί να είναι *μεγαλύτερη* από αυτή του πρωτεύοντος. Τότε η διακύμανση τάσης του μετασχηματιστή είναι *αρνητική*.



Εικόνα 10: Διανυσματικό διάγραμμα ενός μετασχηματιστή που λειτουργεί με επαγωγικό συντελεστή ισχύος.



Εικόνα 11: Διανυσματικό διάγραμμα ενός μετασχηματιστή που λειτουργεί με (α) μοναδιαίο (β) χωρητικό συντελεστή ισχύος.

Απλοποιημένη Μέθοδος Υπολογισμού της Διακύμανσης Τάσης

Στο διανυσματικό διάγραμμα του προηγούμενου σχήματος, γίνονται δυο σημαντικές παρατηρήσεις. Όταν το φορτίο του μετασχηματιστή είναι επαγωγικό (πράγμα που είναι το πιο συνηθισμένο στην πράξη), οι κατακόρυφες συνιστώσες των πτώσεων τάσης στην αντίσταση και στην αυτεπαγωγή αφαιρούνται μεταξύ τους. Ακόμη η φάση μεταξύ των V_p και V_s είναι πολύ μικρή (της τάξης των μερικών μοιρών) κάτω από κανονικές

συνθήκες λειτουργίας. Αυτές οι δυο παρατηρήσεις βοηθούν στην ανάπτυξη μιας αρκετά ικανοποιητικής προσεγγιστικής μεθόδου για τον υπολογισμό της διακύμανσης τάσης.

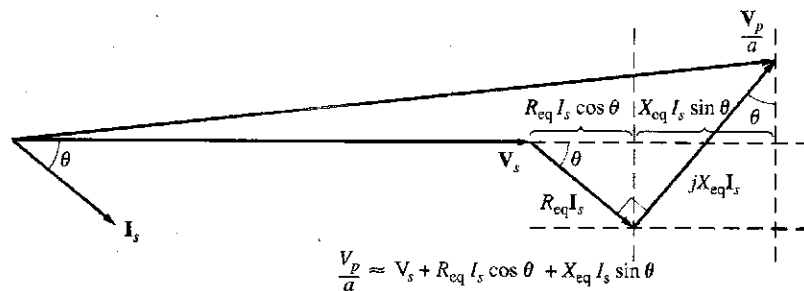
Στο τρίγωνο που σχηματίζει το διανυσματικό διάγραμμα, η οριζόντια πλευρά είναι σχεδόν ίση με την υποτεινούσα και οι κατακόρυφες συνιστώσες των πτώσεων τάσης στην αντίσταση και στην αυτεπαγωγή σειράς του μετασχηματιστή περιλαμβάνονται μόνο στους υπολογισμούς της κατακόρυφης πλευράς του διαγράμματος που είναι πολύ μικρή. Έτσι αυτές οι συνιστώσες είναι δυνατό να αγνοηθούν κατά τον υπολογισμό της τάσης εισόδου. Σ' αυτή την περίπτωση η προσεγγιστική τιμή της τάσης εισόδου θα είναι η εξής

$$\frac{V_P}{a} = V_S + R_{eq} I_S \cos \theta + X_{eq} I_S \sin \theta \quad (50)$$

Τελικά, ο υπολογισμός της διακύμανσης τάσης πραγματοποιείται με την αντικατάσταση της τάσης εισόδου από την εξίσωση 50.

Συντελεστής Απόδοσης (Απόδοση) του Μετασχηματιστή

Ένα ακόμη μέτρο σύγκρισης διαφορετικών μετασχηματιστών είναι και η απόδοση τους (efficiency). Αυτή ορίζεται από τη σχέση



Εικόνα 12: Εξαγωγή της προσεγγιστικής εξίσωσης για τον όρο V_P/a

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (51)$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{loss}} \times 100\% \quad (52)$$

Οι παραπάνω σχέσεις ισχύουν τόσο στους μετασχηματιστές, όσο και στις ηλεκτρικές μηχανές.

Οι διάφοροι τύποι απωλειών κατά τη λειτουργία του μετασχηματιστή είναι οι εξής:

1. *Απώλειες χαλκού (FR ή P_{Cu})*. Αυτές υπολογίζονται μέσω της αντίστασης σειράς του μετασχηματιστή.
2. *Απώλειες υστέρησης*. Πρόκειται για τις απώλειες που αναλύθηκαν στο Κεφάλαιο 1 και υπολογίζονται μέσω της αντίστασης R_C
3. *Απώλειες δινορρευμάτων*. Πρόκειται για τις απώλειες που αναλύθηκαν στο Κεφάλαιο 1 και υπολογίζονται κι αυτές μέσω της αντίστασης R_C

Ο υπολογισμός της απόδοσης του μετασχηματιστή πραγματοποιείται αφού πρώτα υπολογιστούν οι απώλειες και κατόπιν μεταφερθούν στην Εξ. (53). Όμως, η ισχύς εξόδου του μετασχηματιστή δίνεται από την

$$P_{out} = V_S I_S \cos\theta_S \quad (53)$$

η τελική εξίσωση της απόδοσης είναι

$$\eta = \frac{V_S I_S \cos\theta}{P_{Cu} + P_{core} + V_S I_S \cos\theta} \times 100\% \quad (54)$$

3.5 Τριφασικοί μετασχηματιστές

Σχεδόν όλα τα συστήματα παραγωγής και διανομής ηλεκτρικής ισχύος στις μέρες μας είναι τριφασικά συστήματα εναλλασσόμενης τάσης. Γι' αυτόν ακριβώς το λόγο είναι ανάγκη να γίνει κατανοητός ο τρόπος λειτουργίας των μετασχηματιστών σ' αυτά τα τόσο σημαντικά συστήματα.

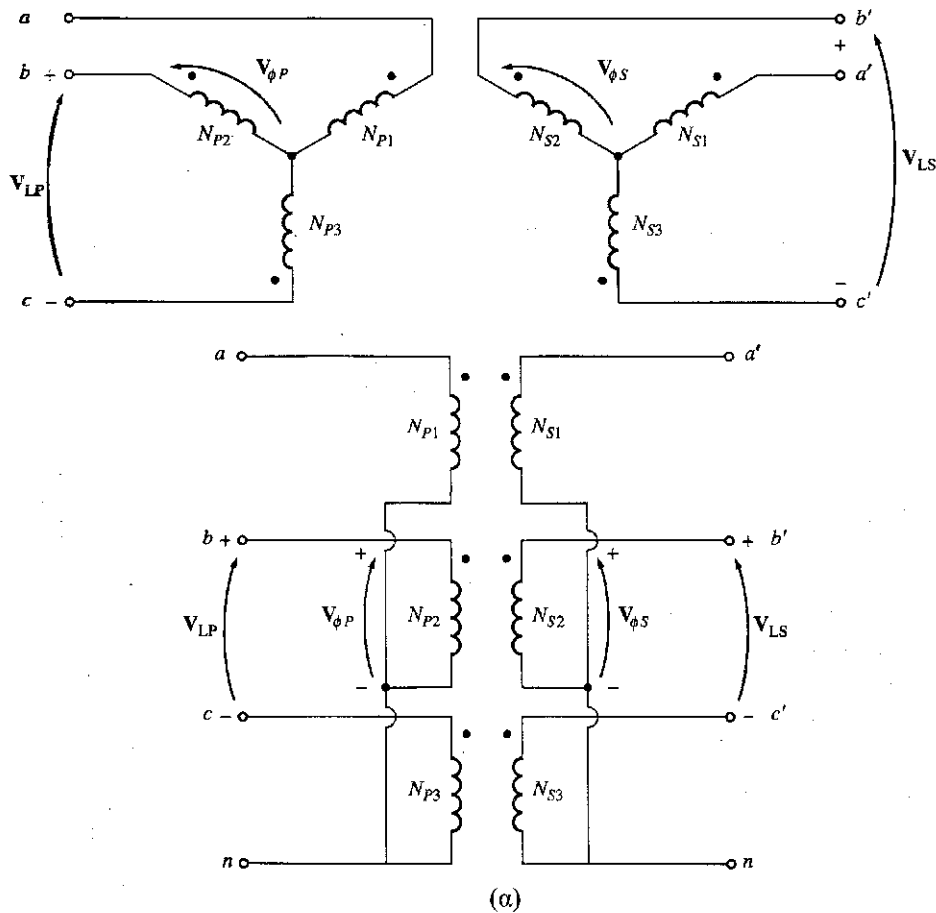
Οι τριφασικοί μετασχηματιστές κατασκευάζονται με δυο βασικούς τρόπους. Στον πρώτο απ' αυτούς, τρεις απλοί μονοφασικοί μετασχηματιστές συνδέονται μεταξύ τους πάνω σ'

ένα κοινό τριφασικό ζύγωμα (bank). Στη δεύτερη μέθοδο κατασκευής τριφασικών μετασχηματιστών τρία διπλά τυλίγματα τοποθετούνται γύρω από έναν κοινό πυρήνα. Οι δυο παραπάνω τεχνικές παρουσιάζονται στα επόμενα σχήματα. Η δεύτερη τεχνική είναι αυτή που χρησιμοποιείται πιο συχνά στις μέρες μας, επειδή παρουσιάζει μικρότερο βάρος και όγκο, είναι πιο φθηνή και λειτουργεί με κάπως μεγαλύτερη απόδοση. Ο παλαιότερος τρόπος κατασκευής παρουσίαζε το πλεονέκτημα εύκολης επισκευής για τον καθένα από τους ξεχωριστούς μετασχηματιστές, μια και η απομάκρυνση του από το κοινό ζύγωμα ήταν απλούστατη. Όμως τα πλεονεκτήματα του μετασχηματιστή που διαθέτει έναν μόνο πυρήνα είναι περισσότερο σημαντικά. Παρόλα αυτά, ακόμη και στις μέρες μας, σε πολλές εφαρμογές χρησιμοποιούνται μετασχηματιστές κατασκευασμένοι με την πρώτη από τις παραπάνω τεχνικές.

Συνδεσμολογία των Τυλιγμάτων στους Τριφασικούς Μετασχηματιστές

Όπως αναφέρθηκε στα προηγούμενα, ένας τριφασικός μετασχηματιστής αποτελείται από τρεις μετασχηματιστές που είτε λειτουργούν ο καθένας ξεχωριστά είτε συνδέονται όλοι μαζί σ' έναν κοινό πυρήνα. Τα πρωτεύοντα και τα δευτερεύοντα τυλίγματα των τριών μετασχηματιστών είναι δυνατό να συνδέονται τόσο σε αστέρα (Y) όσο και σε τρίγωνο (Δ). Έτσι οι τέσσερις πιθανές συνδεσμολογίες των τυλιγμάτων ενός τριφασικού μετασχηματιστή είναι οι εξής:

1. Αστέρας - Αστέρας (Y-Y)
2. Αστέρας - Τρίγωνο (Y-Δ)
3. Τρίγωνο - Αστέρας (Δ-Y)
4. Τρίγωνο - Τρίγωνο (Δ-Δ)



Εικόνα 13: Συνδεσμολογία των Τυλιγμάτων στους Τριφασικούς Μετασχηματιστές (α) Συνδεσμολογία αστέρα-αστέρα Y-Y.

Στην παραπάνω εικόνα φαίνονται αυτές οι συνδεσμολογίες.

Το κλειδί για την ανάλυση ενός τριφασικού μετασχηματιστή είναι η παρατήρηση του καθενός από τους τρεις μετασχηματιστές ξεχωριστά. Όμως, ο καθένας μετασχηματιστής συμπεριφέρεται όπως ακριβώς ο απλός μονοφασικός μετασχηματιστής, που περιγράφηκε στα προηγούμενα. Έτσι οι υπολογισμοί της σύνθετης αντίστασης, της διακύμανσης τάσης, της απόδοσης και των άλλων ποσοτήτων του τριφασικού μετασχηματιστή αναφέρονται σε κάποια συγκεκριμένη τιμή βάσης (pu) και χρησιμοποιούν τις μεθόδους του μονοφασικού μετασχηματιστή.

3.6 Ονομαστικά στοιχεία των μετασχηματιστών και προβλήματα που σχετίζονται μ' αυτά

Τα βασικά στοιχεία που συνθέτουν τις ονομαστικές ποσότητες ενός μετασχηματιστή είναι η φαινόμενη ισχύς, η τάση, το ρεύμα και η συχνότητα λειτουργίας του. Σ' αυτή την ενότητα εξετάζονται αυτά ακριβώς τα ονομαστικά στοιχεία των μετασχηματιστών και διευκρινίζεται ο τρόπος επιλογής τους. Ακόμη μελετάται το θέμα του κρουστικού ρεύματος (current inrush) που αναπτύσσεται κατά τη σύνδεση του μετασχηματιστή στη γραμμή μεταφοράς.

Ονομαστική Τάση και Συχνότητα του Μετασχηματιστή

Η ονομαστική τάση ενός μετασχηματιστή προσδιορίζεται από δυο παράγοντες. Ο πρώτος και λιγότερο σημαντικός λόγος περιορισμού της μέγιστης τάσης του είναι η προστασία της μόνωσης των αγωγών του από υψηλές τάσεις. Ο δεύτερος λόγος έχει σχέση με την καμπύλη μαγνήτισης και με το ρεύμα μαγνήτισης. Στο σχήμα που ακολουθεί, φαίνεται η καμπύλη μαγνήτισης ενός τυπικού μετασχηματιστή. Αν στο πρωτεύον εφαρμοστεί η τάση

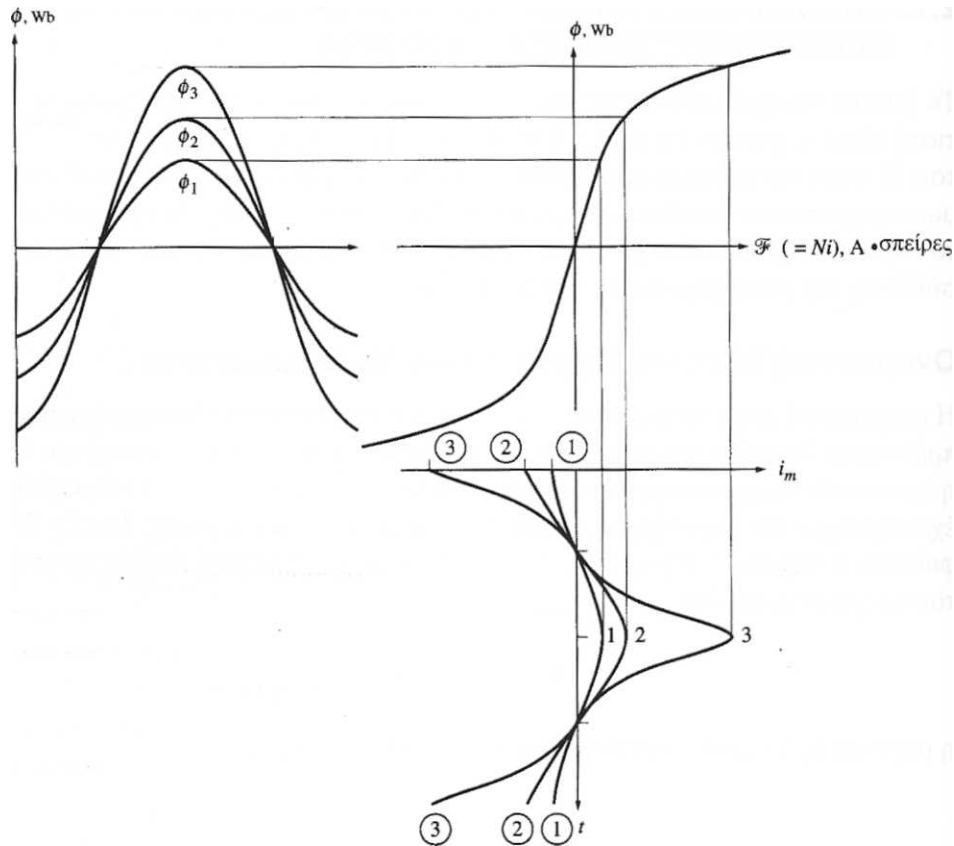
$$v(t) = V_M \sin \omega t$$

Η μαγνητική ροή που αναπτύσσεται στο εσωτερικό του έχει τιμή

$$\begin{aligned} \Phi(t) &= \frac{I}{N_p} \int v(t) dt \\ &= \frac{I}{N_p} \int V_M \sin \omega t dt \\ \Phi(t) &= -\frac{V_M}{\omega N_p} \cos \omega t \end{aligned} \tag{55}$$

Αν το πλάτος της εφαρμοζόμενης τάσης $v(t)$ αυξηθεί κατά 10%, η αντίστοιχη μέγιστη ροή θα αυξηθεί επίσης κατά 10%. Όμως, πέρα από ένα συγκεκριμένο σημείο της καμπύλης μαγνήτισης η αύξηση της μαγνητικής ροής κατά 10% προϋποθέτει αύξηση του ρεύματος μαγνήτισης πολύ μεγαλύτερη από 10%.

Με τη συνεχή αύξηση του πλάτους της τάσης εισόδου, το ρεύμα μαγνήτισης μπορεί να πάρει τιμές μη αποδεκτές. Έτσι η μέγιστη τιμή του πλάτους της τάσης (η ονομαστική τιμή της τάσης) περιορίζεται από το μέγιστο επιτρεπόμενο ρεύμα μαγνήτισης.



Εικόνα 14: Οι επιπτώσεις της μέγιστης μαγνητικής ροής του πυρήνα ενός μετασχηματιστή πάνω στο απαιτούμενο ρεύμα μαγνήτισης

Επίσης, παρατηρείται ότι, στην περίπτωση που η μέγιστη μαγνητική ροή διατηρείται σταθερή, το πλάτος της τάσης είναι αντιστρόφως ανάλογο της συχνότητας της.

$$\phi_{max} = -\frac{V_{max}}{\omega N_p} \quad (56)$$

Έτσι, αν κάποιος μετασχηματιστής με ονομαστική συχνότητα 60 Hz λειτουργεί στα 50 Hz, η τάση εισόδου θα πρέπει να είναι κι αυτή μειωμένη κατά το ένα έκτο της. Αν δε συμβαίνει αυτό, η μέγιστη μαγνητική ροή στον πυρήνα θα είναι απαράδεκτα υψηλή. Αυτή η

επιβαλλόμενη μείωση στην τάση εισόδου ονομάζεται *υποβιβασμός (derating)* της τάσης. Εντελώς ανάλογα, όταν ένας μετασχηματιστής των 50 Hz λειτουργεί στα 60 Hz, είναι δυνατή η αύξηση του πλάτους της τάσης εισόδου κατά 20%, αν φυσικά κάτι τέτοιο δεν υπερβαίνει τα όρια ασφαλείας της μόνωσης του.

Ονομαστική Φαινόμενη Ισχύς ενός Μετασχηματιστή

Ο βασικός λόγος που περιορίζει την ονομαστική φαινόμενη ισχύ ενός μετασχηματιστή είναι το γεγονός ότι, μαζί με την ονομαστική τάση του, επιβάλλουν το μέγιστο ρεύμα στα τυλίγματα του μετασχηματιστή. Αυτό ακριβώς το ρεύμα είναι που επηρεάζει τις απώλειες χαλκού στη συσκευή και στη συνέχεια τη θερμοκρασία του τυλίγματος του. Προφανώς, αν αυτή η θερμοκρασία ξεπεράσει κάποια συγκεκριμένη τιμή, το τύλιγμα θα υπερθερμανθεί και η διάρκεια ζωής του θα μειωθεί σημαντικά.

Όμως, η ονομαστική φαινόμενη ισχύς ενός μετασχηματιστή είναι δυνατό να εκφράζεται με περισσότερες από μια τιμές. Συνήθως η μια από αυτές τις τιμές εκφράζει την ονομαστική τιμή της φαινόμενης ισχύος, χωρίς τη χρήση κάποιας μεθόδου ψύξης των τυλιγμάτων, ενώ η άλλη τιμή υπολογίζεται για την περίπτωση εφαρμογής μιας τέτοιας μεθόδου. Το τελικό αποτέλεσμα, για τον προσδιορισμό της ονομαστικής ισχύος του μετασχηματιστή, είναι το ότι η θερμοκρασία των τυλιγμάτων του θα πρέπει να περιορίζεται με σκοπό την αύξηση της διάρκειας ζωής του.

Ακόμη, αν η τάση ενός μετασχηματιστή περιορίζεται για οποιονδήποτε λόγο (π.χ. λειτουργεί σε συχνότητα μικρότερη από την ονομαστική του), τότε και η ονομαστική του ισχύς θα πρέπει να μειώνεται με τον ίδιο συντελεστή. Σε περίπτωση που αυτό δεν τηρείται, το ρεύμα που αναπτύσσεται στα τυλίγματα του προκαλεί υπερθέρμανση.

Κρουστικά Ρεύματα κατά τη Λειτουργία του Μετασχηματιστή

Ένα ακόμη πρόβλημα που σχετίζεται με το επίπεδο τάσης ενός μετασχηματιστή είναι το κρουστικό ρεύμα που αναπτύσσεται κατά την έναρξη της λειτουργίας του. Ας υποθεθεί ότι η τάση

$$v(t) = V_M \sin(\omega t + \theta) V \quad (57)$$

εφαρμόζεται στα άκρα του μετασχηματιστή όταν αυτός συνδεθεί στη γραμμή μεταφοράς ισχύος. Η μέγιστη τιμή της μαγνητικής ροής που θα αναπτυχθεί στο εσωτερικό του μετασχηματιστή κατά την πρώτη ημιπερίοδο της τάσης εισόδου εξαρτάται από τη φάση αυτής της τάσης τη στιγμή που εφαρμόζεται στο πρωτεύον του. Αν η αρχική τάση έχει τιμή

$$v(t) = V_M \sin(\omega t + 90^\circ) V = V_M \cos \omega t V \quad (58)$$

και η αρχική τιμή της μαγνητικής ροής είναι μηδενική, τότε η μέγιστη τιμή της ροής στην πρώτη ημιπερίοδο αυτής της τάσης θα είναι ίση με τη μέγιστη τιμή της ροής

$$\Phi_{max} = \frac{V_{max}}{\omega N_p} \quad (59)$$

Αυτή η τιμή της ροής δεν προκαλεί προβλήματα στο μετασχηματιστή, επειδή είναι ακριβώς η μέγιστη επιτρεπόμενη. Όταν όμως η τάση εισόδου δίνεται από την

$$v(t) = V_M \sin \omega t V$$

η μέγιστη τιμή της μαγνητικής ροής κατά την πρώτη ημιπερίοδο λειτουργίας είναι η

$$\begin{aligned} \Phi(t) &= \frac{I}{N_p} \int_0^{\pi/\omega} V_M \sin \omega t dt \\ &= -\frac{V_M}{\omega N_p} \cos \omega t \Big|_0^{\pi/\omega} \\ &= \frac{V_M}{\omega N_p} [(-1) - (1)] \\ \Phi_{max} &= \frac{2V_{max}}{\omega N_p} \end{aligned} \quad (60)$$

Αυτή η μέγιστη ροή είναι διπλάσια από τη μαγνητική ροή του μετασχηματιστή στη μόνιμη κατάσταση ισορροπίας. Από την καμπύλη μαγνήτισης που είδαμε προηγουμένως,

γίνεται φανερό ότι ο διπλασιασμός της μέγιστης ροής στον πυρήνα του μετασχηματιστή προκαλεί ένα τεράστιο ρεύμα μαγνήτισης. Στην πραγματικότητα αυτή η κατάσταση αντιστοιχεί με βραχυκύκλωση του μετασχηματιστή για κάποιο μέρος του κύκλου, καθώς το ρεύμα μαγνήτισης είναι πολύ υψηλό.

Σε οποιαδήποτε άλλη κατάσταση όπου η φάση της τάσης εισόδου έχει τιμή ανάμεσα στις 90° - όπου δεν υπάρχει πρόβλημα και στις 0° - όπου το πρόβλημα γίνεται μέγιστο, πάντα αναπτύσσεται κάποιο μεγάλο ρεύμα μαγνήτισης. Η φάση της τάσης εισόδου στο μετασχηματιστή δεν μπορεί να ρυθμιστεί με κανένα τρόπο. Έτσι πάντα κατά τη σύνδεση του μετασχηματιστή στη γραμμή μεταφοράς υπάρχει ο κίνδυνος να αναπτυχθούν τεράστια κρουστικά ρεύματα τα οποία μηδενίζονται μόνο μετά από μερικές περιόδους της τάσης. Τόσο ο μετασχηματιστής όσο και το σύστημα στο οποίο πρόκειται να συνδεθεί αυτός θα πρέπει να αντέχουν στα παραπάνω ρεύματα.

4 Πυκνωτές

4.1 Γενικά στοιχεία

Ο πυκνωτής είναι ένα ηλεκτρικό στοιχείο δύο ακροδεκτών που κατασκευαστικά μπορεί να το φανταστεί κανείς ως δύο αντικριστές πλάκες από αγώγιμο υλικό σε κάθε μία από τις οποίες υπάρχει ένας ακροδέκτης. Η αρχή λειτουργίας του πυκνωτή είναι η αποθήκευση φορτίων στις πλάκες του και για αυτόν τον λόγο λέμε ότι ένας πυκνωτής διαθέτει χωρητικότητα. Συνήθως ανάμεσα στις δύο πλάκες τοποθετείται κάποιο μονωτικό υλικό, το οποίο έχει την ιδιότητα να προσαυξάνει την χωρητικότητα του πυκνωτή. Το υλικό αυτό ονομάζεται διηλεκτρικό. Στην πράξη οι πυκνωτές κατασκευάζονται με κάπως διαφορετικό τρόπο, προσπαθώντας να εξοικονομήσει κανείς όσο περισσότερο χώρο γίνεται μέσα στον οποίο να μπορέσει να χωρέσει όσο το δυνατόν μεγαλύτερη επιφάνεια, ώστε να αυξήσει τη χωρητικότητα του πυκνωτή.

Έτσι ένα συνηθισμένο σχήμα για πυκνωτή είναι ο κύλινδρος μέσα στον οποίο έχει τυλιχτεί σε μορφή σπείρας ένα διπλό μεταλλικό φιλμ με ένα διηλεκτρικό ανάμεσα στα δύο φύλλα.

Υπάρχουν διάφορα είδη πυκνωτών, ανάλογα με τα υλικά κατασκευής τους: κεραμικοί, πολυέστερ, ηλεκτρολυτικοί αλουμινίου (κοινοί), ηλεκτρολυτικοί τανταλίου (πιο σπάνιοι), από μίκα κ.α. Επίσης, οι πυκνωτές διαχωρίζονται και ανάλογα με τη χρήση τους σε πυκνωτές ισχύος, που χρησιμοποιούνται σε βιομηχανικές εφαρμογές και συνήθως είναι τριφασικοί και σε πυκνωτές ασθενών ρευμάτων με διάφορες εφαρμογές στην ηλεκτρονική. Ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται στη σύνδεση των ηλεκτρολυτικών πυκνωτών, οι οποίοι σε αντίθεση με τους υπόλοιπους πυκνωτές, παρουσιάζουν πολικότητα. Αν συνδεθούν ανάποδα παρουσιάζουν δυσλειτουργία και μπορεί μέχρι και να εκραγούν.

Διάφορες παράμετροι πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στην επιλογή ενός τύπου πυκνωτή σε μια εφαρμογή. Οι κυριότερες είναι η τάση λειτουργίας, η συχνότητα και η θερμοκρασία.

4.2 Συμπεριφορά του πυκνωτή στο εναλλασσόμενο ρεύμα

Όπως είναι γνωστό, στο συνεχές ρεύμα ο πυκνωτής παρουσιάζει άπειρη αντίσταση, δηλαδή δεν επιτρέπει τη διέλευση ρεύματος. Για το λόγο αυτό θεωρούμε ότι στο συνεχές ρεύμα ο πυκνωτής συμπεριφέρεται ως ανοικτός διακόπτης. Δε συμβαίνει όμως το ίδιο και στο εναλλασσόμενο ρεύμα. Λόγω της συνεχούς αλλαγής της πολικότητας του ρεύματος οι οπλισμοί του πυκνωτή φορτίζονται και αποφορτίζονται προσπαθώντας να ακολουθήσουν την αλλαγή της πολικότητας της τάσης που έχει εφαρμοστεί στους ακροδέκτες του. Έτσι λοιπόν φαίνεται σα να διαρρέεται ο πυκνωτής από ρεύμα. Στην πραγματικότητα δεν υπάρχει ροή ηλεκτρικού φορτίου διαμέσου του πυκνωτή, αλλά η συνεχής κίνηση των φορτίων των οπλισμών προς και από την πηγή ισοδυναμεί με ένα ρεύμα το οποίο τρέχει από τον πόλο της πηγής μέχρι τον οπλισμό με εναλλασσόμενη φορά. Διαμέσου του διηλεκτρικού του πυκνωτή δεν κινούνται φορτία. Μάλιστα, η κίνηση φορτίων δια μέσου του διηλεκτρικού είναι ανεπιθύμητη και οδηγεί σε διάσπαση του διηλεκτρικού και καταστροφή του πυκνωτή. Δια μέσου του διηλεκτρικού ρέει ένα ρεύμα που δεν οφείλεται σε ηλεκτρικά φορτία και ονομάζεται ρεύμα διηλεκτρικής μετατόπισης. Η φύση αυτού του ρεύματος είναι πεδιακή.

Λόγω του ρεύματος που τρέχει όταν εφαρμοστεί εναλλασσόμενη τάση στα άκρα ενός πυκνωτή, μπορούμε να αντιστοιχίσουμε μια αντίσταση στον πυκνωτή, έτσι ώστε αν διαιρέσουμε την τάση με την αντίσταση αυτή να προκύψει η τιμή της έντασης του ρεύματος που τρέχει (νόμος του Ohm). Αυτήν την αντίσταση θα την ονομάζουμε αντίδραση και θα τη συμβολίζουμε με X_C . Η τιμή της αντίδρασης X_C εξαρτάται από την χωρητικότητα του πυκνωτή, δηλαδή από τον τρόπο κατασκευής του, και από την κυκλική συχνότητα ω της τάσης που εφαρμόζεται. Όσο πιο χαμηλή είναι η συχνότητα και πλησιάζει προς το 0 (δηλαδή προς το συνεχές ρεύμα), τόσο η αντίδραση του

πυκνωτή θα πρέπει να αυξάνεται μέχρι οριακά να απειρίζεται στο συνεχές ρεύμα, όπου ο πυκνωτής λειτουργεί ως ανοικτός διακόπτης. Αντιθέτως, όταν η συχνότητα αυξάνεται θα πρέπει ο πυκνωτής να επιτρέπει τη διέλευση του ρεύματος ολοένα και πιο εύκολα. Η αντίδραση ενός πυκνωτή δίνεται από τον τύπο:

$$X_C = 1 / \omega C$$

Παρατηρούμε ότι όταν $\omega \rightarrow 0$, τότε $X_C \rightarrow \infty$, δηλαδή στο συνεχές ρεύμα (μηδενική συχνότητα), ο πυκνωτής παρουσιάζει άπειρη αντίδραση και δεν επιτρέπει τη διέλευση ρεύματος. Επίσης, βλέπουμε ότι για δεδομένη συχνότητα όσο πιο μεγάλη χωρητικότητα έχει ο πυκνωτής, τόσο πιο μικρή αντίδραση παρουσιάζει, δηλαδή επιτρέπει τη διέλευση μεγαλύτερου ρεύματος.

Το ηλεκτρικό ρεύμα που διαρρέει τον πυκνωτή και η τάση στα άκρα του δεν είναι συμφασικά μεγέθη. Η τάση καθυστερεί σε σχέση με το ρεύμα κατά 90° , ή αλλιώς το ρεύμα προηγείται της τάσης κατά 90° . Αυτό μπορεί να εξηγηθεί ποιοτικά με το εξής πείραμα:

Ο πυκνωτής C είναι αρχικά αφόρτιστος. Όταν κλείσουμε το διακόπτη S η μπαταρία V αρχίζει να φορτίζει τον πυκνωτή μέσω της αντίστασης R. Στο κύκλωμα τρέχει ένα ρεύμα σημαντικό προκειμένου να ισοσκελιστεί η διαφορά δυναμικού μεταξύ των πόλων της μπαταρίας και των πόλων του πυκνωτή. Η τάση στα άκρα του πυκνωτή είναι αρχικά μηδέν και αυξάνεται μέχρι να φτάσει στο ίδιο επίπεδο με την τάση της πηγής. Όταν συμβεί αυτό το ρεύμα πια μηδενίζεται. Αν στη συνέχεια αντιστρέψουμε την πολικότητα της μπαταρίας (για να εξομοιώσουμε το εναλλασσόμενο ρεύμα) θα δούμε το φαινόμενο να επαναλαμβάνεται με αντίστροφη φορά.

Παρατηρούμε ότι το ρεύμα και η τάση συμπεριφέρονται αντίστροφα όσον αφορά τη μέγιστη και την ελάχιστη τιμή τους. Όταν το ρεύμα είναι μέγιστο, η τάση είναι μηδέν και όταν πια το ρεύμα έχει μηδενιστεί η τάση στα άκρα του πυκνωτή έχει φτάσει στη μέγιστή τιμή της.

Έτσι λοιπόν το ρεύμα που τρέχει στον πυκνωτή, αν το εκφράσουμε με στρεφόμενο διάνυσμα θα είναι:

$$I_c = \frac{V_c}{X_c} \cdot 1 \angle 90^\circ = \frac{V_c}{X_c} \cdot j = j \cdot \frac{V_c}{j \cdot X_c} \cdot j = - \frac{V_c}{1 \cdot X_c} = \frac{V_c}{-1 \cdot X_c}$$

Εδώ, εφαρμόσαμε την ιδιότητα ότι πολλαπλασιασμός με j αντιστοιχεί σε στροφή του διανύσματος κατά 90° . Κατ' αυτόν τον τρόπο το ρεύμα προκύπτει να προηγείται της τάσης κατά 90° . Παρατηρείστε ότι στον παρανομαστή υπάρχει πλέον ο όρος $-jX_c$. Μπορούμε να αντιστοιχίσουμε λοιπόν στον παρανομαστή μια μιγαδική αντίσταση $Z_C = 1 / j\omega C$.

Επομένως μπορούμε να γράφουμε το νόμο Ohm για τον πυκνωτή στο εναλλασσόμενο ρεύμα ως εξής:

$$V_C = I_C \cdot Z_C$$

Παρατηρούμε ότι ο νόμος είναι σε πλήρη αντιστοιχία με τον νόμο του Ohm για τις αντιστάσεις στο συνεχές ρεύμα ($V=IR$) με τη διαφορά ότι το σύμβολο R έχει αντικατασταθεί από το σύμβολο Z_C και ότι και τα τρία μεγέθη είναι διανύσματα. Η μιγαδική αντίσταση αναφέρεται πιο συχνά ως σύνθετη αντίσταση.

4.3 Σύνδεση πυκνωτών σε σειρά

Ο τρόπος με τον οποίο αντιμετωπίζονται πυκνωτές που έχουν συνδεθεί σε σειρά όσον αφορά τον υπολογισμό της ολικής σύνθετης αντίστασης είναι ο ίδιος σα να είχαμε ωμικές αντιστάσεις στο συνεχές ρεύμα. Έτσι λοιπόν αν έχουμε n πυκνωτές συνδεδεμένους σε σειρά με σύνθετη αντίσταση Z_1, Z_2, \dots, Z_n , τότε η συνολική τους σύνθετη αντίσταση είναι το άθροισμα των επιμέρους συνθέτων αντιστάσεων, δηλαδή:

$$Z = Z_1 + Z_2 + \dots + Z_n$$

Ενώ οι σύνθετες αντιστάσεις προστίθενται, η συνολική χωρητικότητα που προκύπτει είναι μικρότερη από οποιαδήποτε από τις C_1, C_2, \dots, C_n . Αυτό

οφείλεται στο γεγονός ότι η αντίδραση του πυκνωτή X είναι αντιστρόφως ανάλογη της χωρητικότητας.

4.4 Παράλληλη σύνδεση

Για n πυκνωτές που είναι συνδεδεμένοι παράλληλα μεταξύ τους υπολογίζουμε για τον κάθε πυκνωτή τη σύνθετη αγωγιμότητά του και στη συνέχεια προσθέτουμε όλες τις επιμέρους σύνθετες αγωγιμότητες:

$$Y_{ολ} = Y_1 + Y_2 + \dots + Y_n$$

Η ζητούμενη ολική σύνθετη αντίσταση προκύπτει αντιστρέφοντας την ολική σύνθετη αγωγιμότητα.

Στην παράλληλη σύνδεση η ολική χωρητικότητα που προκύπτει είναι αυξημένη σε σχέση με τις επιμέρους από τις οποίες αποτελείται, μάλιστα είναι ίση με το άθροισμά τους. Η ολική αντίδραση όμως προκύπτει μειωμένη.

5 Λειτουργία του πηνίου tesla – θεωρητική προσέγγιση

5.1 Κυκλώματα RLC και συντονισμός

5.1.1 Αυτεπαγωγή

Με τον όρο αυτεπαγωγή, ουσιαστικά αναφερόμαστε στο πηνίο. Το πηνίο είναι ένα συρμάτινο τύλιγμα που έχει την ιδιότητα να αναπτύσσει μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό του όταν διαρρέεται από ρεύμα. Το μαγνητικό αυτό πεδίο περιγράφεται από την ένταση B , που είναι ανάλογη του ρεύματος και του αριθμού σπειρών του πηνίου, και αντιστρόφως ανάλογη του μήκους του.

Το πηνίο μπορεί να είναι κενό εσωτερικά ή να περιέχει κάποιον πυρήνα από σιδηρομαγνητικό υλικό. Χαρακτηριστικό μέγεθος του πηνίου είναι ο συντελεστής αυτεπαγωγής που συμβολίζεται με L και μετριέται σε Henry προς τιμήν του Αμερικανού φυσικού Joseph Henry που μελέτησε το φαινόμενο της αυτεπαγωγής και τα πηνία.



Εικόνα 15: Πηνίο.

Η βασική ιδιότητα του πηνίου, είναι να μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια σε μαγνητική και το αντίθετο. Έτσι λοιπόν χρησιμοποιείται στις ηλεκτρικές γεννήτριες, στους ηλεκτροκινητήρες, στους μετασχηματιστές, στα εξαρτήματα ρελέ, σε ηλεκτρομαγνήτες, και ακόμα σε χρονοκυκλώματα, σε φίλτρα και σε ταλαντωτές.

Μια ακόμα σημαντική του ιδιότητα είναι ότι αναπτύσσει εντονότερη μαγνητική ροή στο εσωτερικό του σε σχέση με έναν απλό βρόγχο. Η χρήση του πηνίου σε

χρονοκυκλώματα είναι αποτέλεσμα του κανόνα του Λεντς σύμφωνα με τον οποίο το πηνίο δεν αποκτά ακαριαία μέγιστο ρεύμα όταν συνδεθεί με μία πηγή. Αυτό συμβαίνει γιατί αναπτύσσεται αρχικά τάση από αυτεπαγωγή στα άκρα του, αντίθετη με την φορά της τάσης της πηγής. Αντίστοιχά κατά την εκφόρτιση αναπτύσσει τάση λόγω αυτεπαγωγής και εμποδίζει το ρεύμα του κυκλώματος να μηδενιστεί ακαριαία όταν το κύκλωμα αποσυνδέεται από την πηγή.

Επιπλέον, ιδιαίτερα χρήσιμο χαρακτηριστικό αποτελεί το γεγονός ότι το πηνίο επιτρέπει την διέλευση των συνεχών ρευμάτων και των ρευμάτων χαμηλών συχνοτήτων αλλά αποκόπτει τα ρεύματα πολύ υψηλών συχνοτήτων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να χρησιμοποιείται ως φίλτρο, καθώς είναι εντελώς αγωγίμο για το συνεχές ρεύμα, ενώ παρουσιάζει σύνθετη αντίσταση στο εναλλασσόμενο που αυξάνει όσο αυξάνεται η συχνότητα του εναλλασσόμενου ρεύματος.

5.1.2 Ελικοειδής επαγωγή

Όταν ένα πηνίο είναι τυλιγμένο με ελικοειδές φορά γύρω από ένα κυλινδρικό σχήμα ο υπολογισμός της αυτεπαγωγής δίνεται από τον τύπο:

$$L = \frac{(RN)^2}{9R + 10W}$$

Στην σχέση αυτή, L είναι η αυτεπαγωγή του πηνίου σε μH, R είναι η ακτίνα του πηνίου ίντσες, N είναι ο αριθμός των σπειρών του πηνίου και H είναι το ύψος του τυλίγματος του πηνίου σε ίντσες

5.1.3 Σπειροειδής επαγωγή

Όταν ένα πηνίο είναι τυλιγμένο σε σπειροειδές σχήμα ο υπολογισμός της αυτεπαγωγής δίνεται από τον τύπο :

$$L = \frac{(RN)^2}{8R + 11W}$$

Στην σχέση αυτή, L είναι η αυτεπαγωγή του πηνίου σε μH, R είναι η ακτίνα του πηνίου ίντσες, W είναι το πλάτος του τυλίγματος σε ίντσες, και N είναι ο αριθμός των σπειρών του πηνίου. Η γωνία κλίσης του πηνίου πρέπει να είναι πάντα α=45 μοίρες

5.1.4 Επίπεδη επαγωγή

Όταν ένα πηνίο είναι τυλιγμένο επίπεδα με την επιφάνεια ο υπολογισμός της αυτεπαγωγής δίνεται από τον τύπο :

$$L = \frac{(RN)^2}{8R + 11W}$$

Στην σχέση αυτή, L είναι η αυτεπαγωγή του πηνίου σε μH, R είναι η ακτίνα του πηνίου ίντσες, N είναι ο αριθμός των σπειρών του πηνίου και H είναι το ύψος του τυλίγματος του πηνίου σε ίντσες

5.1.5 Αμοιβαία επαγωγιμότητα

Όταν αναφερόμαστε στην αμοιβαία επαγωγιμότητα, ουσιαστικά μιλάμε για δύο τυλίγματα. Η επαγωγιμότητα αυτή επηρεάζεται από την εγγύτητα ζεύξης του πρωτεύοντος τυλίγματος στο δευτερεύον και από την γεωμετρία τους.

Παραδείγματος χάριν, ένα τύλιγμα πρωτεύοντος ελικοειδής μορφής θα έχει υψηλότερη κοινή επαγωγιμότητα από ένα τύλιγμα επίπεδης μορφής για τον ίδιο αριθμό στροφών και διαμέτρου καλωδίου.

Αυτό συμβαίνει ουσιαστικά διότι η μαγνητική ροή του πρωτεύοντος επάγει το μαγνητικό πεδίο, και η δύναμη του μαγνητικού πεδίου στο δευτερεύον θα έχει

υψηλότερη πυκνότητα όσο πλησιάζει το πρωτεύον και όσο πιο κάθετο είναι το πεδίο στο τύλιγμα.

Ας υποθέσουμε για παράδειγμα δύο τυλίγματα ελικοειδούς μορφής τα οποία βρίσκονται τυλιγμένα περιμετρικά σε ένα δευτερεύον διαμέτρου 3 ιντσών. Το ένα πρωτεύον έχει εξωτερική διάμετρο 12 ίντσες και το άλλο 6 ίντσες. Το 6 ιντσών πρωτεύον θα έχει θα έχει μεγαλύτερη αμοιβαία επαγωγιμότητα και μεγαλύτερο συντελεστή ζεύξης με το δευτερεύον. Καθώς το ύψος του πρωτεύοντος αυξάνεται, αυξάνονται και οι δύο αυτοί παράγοντες.

5.1.6 Επιδερμικό φαινόμενο σε επαγωγές

Το επιδερμικό φαινόμενο προκαλείται από τις παραγόμενες ηλεκτρεγερτικές δυνάμεις (emfs) με την δίοδο του εναλλασσομένου ρεύματος. Ουσιαστικά το φαινόμενο αυτό εξηγείται ως εξής. Στις υψηλές συχνότητες λόγω χωρητικότητας και επαγωγής προκαλούνται μεταβολές στη συμπεριφορά ενός αντιστάτη. Η αύξηση της συχνότητας του ρεύματος σε έναν αγωγό αυξάνει συγχρόνως την πυκνότητα του ρεύματος στις περιφερειακές στοιβάδες κοντά στην επιφάνεια του αγωγού. Οι τελευταίες είναι μεγαλύτερες στο κέντρο από την περιφέρεια και για αυτό τείνουν να αποκαταστήσουν ρεύματα στην περιφέρεια και να μειώσουν την ενεργό διατομή του αγωγού, οδηγώντας έτσι στο φαινόμενο αυτό.

Μάλιστα, λόγω αυτού του φαινομένου η ωμική αντίσταση στους αντιστάτες περιελίξεως σύρματος αυξάνει με την αύξηση της συχνότητας του ρεύματος, ενώ αντίθετα στους αντιστάτες άνθρακα ή μεταλλικής ταινίας η τιμή της αντιστάσεως μειώνεται, γιατί εκεί το φαινόμενο δεν εμφανίζεται.

Σε κάθε περίπτωση, η πραγματική αντίσταση ενός αγωγού είναι πάντα υψηλότερη στο εναλλασσόμενο ρεύμα απ' ότι στο συνεχές. Η εναλλασσόμενη μαγνητική ροή που δημιουργείται από το εναλλασσόμενο ρεύμα που διαρρέει έναν αγωγό, αλληλεπιδρά με τον ίδιο τον αγωγό, παράγοντας ένα αντίστροφο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, το οποίο αντιστέκεται στην διέλευση του ρεύματος. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το ρεύμα να μην

μπορεί να εκμεταλλευτεί όλη την ωφέλιμη διατομή του αγωγού για την διέλευσή του, αλλά ένα μικρό μόνο μέρος στην εξωτερική επιφάνεια.

Τέλος, η προκύπτουσα ανομοιόμορφη πυκνότητα ρεύματος έχει ως αποτέλεσμα την μεγάλη αύξηση της πραγματικής αντίστασης του αγωγού και κατά συνέπεια των απωλειών.

5.1.7 Σκέδαση

Σύμφωνα με το φαινόμενο της σκέδασης, η κοινή επαγωγιμότητα είναι ο βαθμός ζεύξης του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος πηνίου. Η διαρροή επαγωγιμότητας ενώνει την ενέργεια του πρωτεύοντος με το δευτερεύον πηνίο.

Εφόσον όλη η ενέργεια πρέπει να υπολογιστεί η ενέργεια που δεν μεταφέρεται στο δευτερεύον διαχέεται στη διαρροή επαγωγιμότητας.

5.1.8 Πυκνωτές και πηνία Tesla

Τα βασικά χαρακτηριστικά των πυκνωτών, αναφέρθηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο. Αναφορικά με αυτούς που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πηνία Tesla, αυτοί μπορεί να είναι ηλεκτρολυτικοί πυκνωτές, πλαστικοί πυκνωτές, κεραμικοί πυκνωτές πολλαπλών στρωμάτων, μεταβλητοί πυκνωτές, υπερπυκνωτές, Varactors και άλλοι.

5.1.9 Αύξηση της χωρητικότητας και της διηλεκτρικής ανοχής

Για την αύξηση της χωρητικότητας και της διηλεκτρικής ανοχής, μπορούμε να συνδέσουμε πολλούς πυκνωτές σε σειρά, παράλληλα ακόμα και σε σειρά παράλληλα.

Πιο συγκεκριμένα, σύνδεση παράλληλα αυξάνει την συνολική χωρητικότητα, ενώ σύνδεση σε σειρά αυξάνει την ανοχή σε τάση.

Σύνδεση σε σειρά και παράλληλα μπορεί να οδηγήσει ταυτόχρονα και στα δύο αυτά φαινόμενα.

5.1.10 Παρασιτικές χωρητικότητες

Πέρα από την καθορισμένη χωρητικότητα που παρουσιάζουν τα πηνία οι πυκνωτές και το τοροειδές της διάταξης, την οποία μπορούμε να την υπολογίσουμε από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των στοιχείων, υπάρχει και η παρασιτική χωρητικότητα την οποία είναι δύσκολο να την υπολογίσουμε.

Παρασιτική χωρητικότητα μπορεί να δημιουργηθεί μεταξύ του τοροειδούς και γης κάτω από το δευτερεύον πηνίο, μεταξύ του τοροειδούς και δευτερεύοντος πηνίου, πάνω στο δευτερεύον πηνίο, μεταξύ δευτερεύοντος πηνίου και γης, μεταξύ δευτερεύοντος πηνίου και αέρα αλλά και μεταξύ δευτερεύοντος πηνίου και κάποιου υλικού που βρίσκεται σε κοντινή ακτίνα με την διάταξη.

Σε κάθε περίπτωση, είναι γεγονός ότι η παρασιτική χωρητικότητα επηρεάζει αρνητικά την διάταξη αφού αλλάζει την συχνότητα συντονισμού που έχουμε υπολογίσει με αποτέλεσμα το σύστημά μας να χάνει την απόδοσή του.

Κάποιες λύσεις που μπορούμε να προτείνουμε για να μειώσουμε την παρασιτική χωρητικότητα είναι οι εξής:

- να μεγαλώσουμε την απόσταση του τοροειδούς από την γη και κατά συνέπεια από το δευτερεύον πηνίο
- αντί για τοροειδές μπορούμε να τοποθετήσουμε μια σφαίρα για τερματικό η οποία με το γεωμετρικό σχήμα που έχει μειώνει την παρασιτική χωρητικότητα και αυξάνει το μήκος τόξου διάσπασης.

5.1.11 Επίδραση της τοροειδούς χωρητικότητας στην συχνότητα συντονισμού

Έστω ότι υφίσταται μια τοροειδής χωρητικότητα στο πάνω μέρος ενός RLC κυκλώματος συντονισμού σε σειρά όπως είναι το δευτερεύον τύλιγμα ενός πηνίου Tesla. Σε μια τέτοια περίπτωση, παρατηρείται αλλαγή στη συχνότητα συντονισμού.

Ο λόγος για τον οποίο συμβαίνει αυτό είναι το γεγονός ότι η χωρητικότητα που παρουσιάζει το τοροειδές μαζί με την εσωτερική χωρητικότητα του δευτερεύοντος τυλίγματος δημιουργούν δύο παράλληλες χωρητικότητες.

Η συνολική λοιπόν χωρητικότητα του δευτερεύοντος τυλίγματος προκύπτει από το άθροισμα αυτών των δύο επιμέρους χωρητικοτήτων, και έτσι η συχνότητα συντονισμού μειώνεται.

Όσο πιο μεγάλη είναι η τιμή της χωρητικότητας του τοροειδούς τόσο πιο μικρή γίνεται η συχνότητα συντονισμού και για να το διορθώσουμε αυτό θα πρέπει να προσθαφαιρέσουμε σπείρες από το πηνίο του πρωτεύοντος τυλίγματος μέχρι η συχνότητα συντονισμού να πάρει την τιμή που έχουμε υπολογίσει.

5.1.12 Μεγίστη χωρητικότητα χρησιμοποίησης στο πρωτεύον κύκλωμα με διάκενο διάσπασης

Ο λόγος μετασχηματισμού των M/Σ ανύψωσης, τον πρωτεύον τύλιγμα και τα χαρακτηριστικά του διακένου είναι αυτά που καθορίζουν την μέγιστη τιμή του πυκνωτή που μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά. Ο υπολογισμός της μέγιστης χωρητικότητας χρησιμοποίησης είναι στην ουσία μια βελτιστοποίηση στον σχεδιασμό. Όταν χρησιμοποιείται ένας M/Σ περιορισμένου ρεύματος, η rms τιμή του ρεύματος στο πρωτεύον μειώνεται στην ονομαστική τιμή εξόδου M/Σ .

Χρησιμοποιώντας έναν πυκνωτή ο οποίος είναι πολύ μικρός δεν θα αξιοποιήσει την μέγιστη ονομαστική έξοδο του ρεύματος και ελαχιστοποιεί την μέγιστη τιμή του ρεύματος στο πρωτεύον.

Αυτό σημαίνει επίσης μικρότερες max τιμές ρεύματος και τάσης στο δευτερεύον. Αν χρησιμοποιηθεί ένας πυκνωτής μεγαλύτερης τιμής από την μέγιστη

χρησιμοποιούμενη τιμή με ένα M/Σ ο οποίος δεν είναι περιορισμένου ρεύματος δεν θα αυξήσει ούτε την τάση στο δευτερεύον ούτε θα ενισχύσει την απόδοση του πηνίου αλλά μπορεί να ρυθμίσει την συχνότητα συντονισμού.

Για τον υπολογισμό για την μέγιστη χωρητικότητα χρησιμοποίησης λαμβάνουμε υπόψη ότι αυτή είναι ανάλογη του ρεύματος του πρωτεύοντος και αντιστρόφως ανάλογη της τάσης εξόδου M/Σ ανύψωσης σε kV (rms) αλλά και του αριθμού διασπάσεων ανά δευτερόλεπτο από το περιστροφικό διάκενο.

5.1.13 Τοροειδές

Το τοροειδές λειτουργεί ως ένας πυκνωτής στο κύκλωμα του δευτερεύοντος κυκλώματος και η μορφή του είναι η προτιμότερη που μπορεί να έχει. Κατά την λειτουργία του πηνίου το τοροειδές φορτίζεται με αποτέλεσμα να δημιουργείται ένα ηλεκτρικό πεδίο γύρω από την επιφάνειά του.

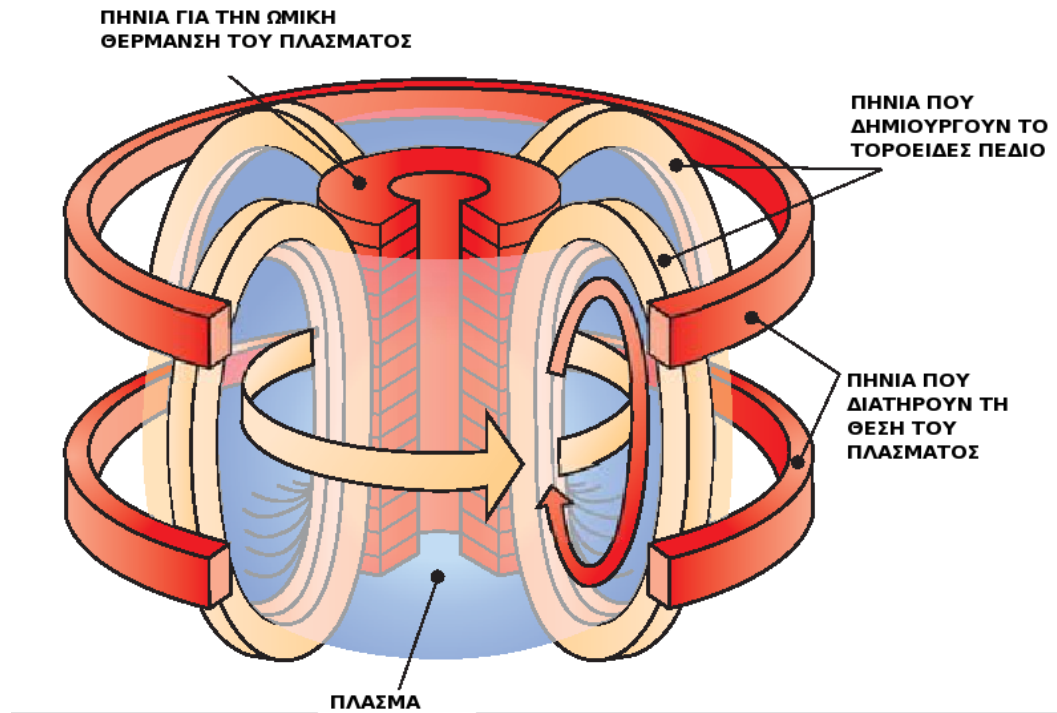
Μία σφαίρα αποκτά καλύτερο ομοιογενές πεδίο γύρω από την επιφάνειά της αλλά αν συμπίεσουμε μια σφαίρα και δημιουργήσουμε ένα τοροειδές η ένταση του πεδίου θα αυξηθεί γύρω από τις ακτίνες του τοροειδούς. Όταν η ένταση του πεδίου φτάσει στην μέγιστη τιμή της τότε θα έχουμε την δημιουργία και το ξέσπασμα των τόξων προς τον αέρα. Το όφελος που προκύπτει από την συγκέντρωση των πεδίων γύρω από τις ακτίνες του τοροειδούς είναι ότι βοηθά άμεσα στο ξέσπασμα των τόξων.

Η πιο συνηθισμένη μέθοδος κατασκευής τοροειδούς είναι να τυλίξουμε μια εύκαμπτη αλουμινένια σωλήνα γύρω από ένα κυκλικό κομμάτι αλουμινίου. Στην ουσία ένα τοροειδές μπορεί να κατασκευαστεί από οτιδήποτε έχει ομαλό κυκλικό σχήμα καλυμμένο με αλουμίνιο. Να σημειώσουμε ότι αποφεύγουμε τον ψεκασμό με μεταλλικό χρώμα για το λόγο ότι το χρώμα αυτό δεν περιέχει αρκετό μέταλλο με αποτέλεσμα όταν θέσουμε σε λειτουργία το πηνίο Tesla το τοροειδές να καεί.

Είναι πολύ σημαντικό να τοποθετήσουμε το τοροειδές στο σωστό ύψος πάνω από το δευτερεύον τύλιγμα του πηνίου Tesla. Αν το τοροειδές είναι πολύ ψηλά θα παρατηρήσουμε να δημιουργείτε ένα μπλε φώς (φαινομενο corona) στην άκρη του δευτερεύοντος τυλίγματος ενώ μπορεί να ξεσπούν και μερικά τόξα από το ίδιο σημείο.

Αν το τοροειδές είναι πολύ χαμηλά τότε υπάρχει ο κίνδυνος τα τόξα να χτυπήσουν το πρωτεύον τύλιγμα και να δημιουργηθεί βραχυκύκλωμα στη διάταξη.

Η επόμενη εικόνα παρουσιάζει ένα τοροειδές.



Εικόνα 16: Τοροειδές.

5.2 Συντονισμός κυκλωμάτων RLC

Όταν αναφερόμαστε στην έννοια του συντονισμού, ουσιαστικά μιλάμε για μια ειδική κατάσταση λειτουργίας των παθητικών, αμφίδρομων, γραμμικών κυκλωμάτων που διαρρέονται από εναλλασσόμενο ρεύμα.

Η λογική του φαινομένου του συντονισμού είναι η εξής. Η επαγωγική αντίδραση ενός πηνίου, εξαρτάται από τη συχνότητα λειτουργίας, ενώ το ίδιο ισχύει και για την χωρητική αντίδραση ενός πυκνωτή. Οι δύο αυτές αντιδράσεις έχουν πρόσημα αντίθετα, και μαζί δημιουργούν το φανταστικό μέρος της συνολικής αντίστασης ενός φορτίου ή κυκλώματος.

Κατά συνέπεια, μπορούμε να πούμε πως για μια τιμή της συχνότητας λειτουργίας, οι αντιδράσεις αυτές έχουν ίδια απόλυτη τιμή, και κατά συνέπεια μηδενίζεται το φανταστικό μέρος της αντίστασης. Η κατάσταση αυτή ονομάζεται συντονισμός, και η συχνότητα για την οποία επιτυγχάνεται λέγεται συχνότητα συντονισμού.

Ένα συντονισμένο κύκλωμα έχει διάφορες ιδιότητες. Καταρχήν, τα διανύσματα της τάσης και του ρεύματος το κυκλώματος είναι συμφασικά, και αυτό γιατί η αντίστασή του είναι καθαρά ωμική. Επίσης, και ανάλογα με την μορφή του κυκλώματος, η αντίσταση ή η αγωγιμότητα είναι μέγιστη όταν η συχνότητα γίνεται ίση με τη συχνότητα συντονισμού. Αντίστοιχα, ως άμεση συνέπεια αυτού, και το ρεύμα I είναι αντίστοιχα μέγιστο ή ελάχιστο. Όταν δε η συχνότητα αποκλίνει από την συχνότητα συντονισμού, τότε η αντίσταση (ή η αγωγιμότητα) αυξάνει με πολύ γρήγορο ρυθμό.

Τέλος η μέση ισχύς του κυκλώματος είναι μέγιστη ή ελάχιστη στο συντονισμό. Είναι αυτονόητο ότι επειδή η αντίσταση στην κατάσταση συντονισμού είναι ωμική, η άεργη ισχύς ότι κυκλώματος στο συντονισμό είναι μηδενική.

Τα απλά ηλεκτρικά κυκλώματα συντονίζονται σε μία μόνο συχνότητα. Τέτοια κυκλώματα είναι το κύκλωμα RLC σε σειρά και το κύκλωμα RLC εν παραλλήλω. Τα κυκλώματα αυτά παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον επειδή αποτελούν τη βάση της θεωρίας των φίλτρων. Ειδικότερα, το κύκλωμα RLC εν σειρά είναι ένα απλό φίλτρο διέλευσης, το δε RLC εν παραλλήλω ένα φίλτρο αποκοπής. Στη συνέχεια, θα μελετήσουμε εν συντομία τις συνδεσμολογίες αυτές.

5.2.1 Επίδραση του συντονισμού στα εν σειρά RLC κυκλώματα

Όταν έχουμε ένα κύκλωμα RLC με σύνδεση σε σειρά, τότε το ρεύμα στο πηνίο και στον πυκνωτή είναι το ίδιο. Επιπλέον, η τάση στα άκρα του πηνίου προηγείται του ρεύματος πάντοτε κατά 90 μοίρες, και η τάση στα άκρα του πυκνωτή υστερεί του ρεύματος πάντοτε κατά 90 μοίρες.

Άμεση συνέπεια των παραπάνω, είναι το γεγονός ότι οι στιγμιαίες τιμές της τάσης στα άκρα του L και του C έχουν πάντοτε διαφορά φάσης 180 μοιρών. Στη συχνότητα συντονισμού, όπως έχει ήδη αναφερθεί, τα πλάτη αυτών των δύο τάσεων είναι ίσα τότε αθροίζονται στο μηδέν σε κάθε χρονική στιγμή και η ολική τάση στα άκρα του συνδυασμού L-C είναι ακριβώς μηδέν. Για συχνότητες κοντά στον συντονισμό η τάση της πηγής μπορεί να είναι πολύ μικρότερη από τις επιμέρους τάσεις στα άκρα του L και του C.

Όταν η συχνότητα είναι μικρότερη από την συχνότητα συντονισμού, η χωρητική αντίδραση είναι μεγαλύτερη από την επαγωγική αντίδραση του πηνίου. Σε κάθε περίπτωση, η τάση υστερεί του ρεύματος και η γωνία φάσης φ είναι αρνητική και μεγαλύτερη από -90 μοίρες.

Αντίστοιχα, όταν η συχνότητα είναι μεγαλύτερη από την συχνότητα συντονισμού υπερσχύει η επαγωγική άεργη αντίσταση, η τάση προηγείται ρεύματος και η γωνία φάσης είναι θετική και μικρότερη από 90 μοίρες.

Αν είμαστε σε θέση να μεταβάλουμε την επαγωγή L ή τη χωρητικότητα C ενός κυκλώματος, μπορούμε να μεταβάλουμε και την συχνότητα συντονισμού.

5.2.2 Επίδραση του συντονισμού στα εν παραλλήλω RLC κυκλώματα

Αντίστοιχα, όταν το πηνίο, ο πυκνωτής και ο αντιστάτης είναι συνδεδεμένοι παράλληλα, παρουσιάζεται ένα διαφορετικό είδος συντονισμού. Αυτό το κύκλωμα παρουσιάζει συμπεριφορά συντονισμού παρόμοια με αυτή του κυκλώματος RLC εν σειρά που αναλύσαμε παραπάνω, με τους ρόλους όμως της τάσης και του ρεύματος αναστραμμένους.

Ουσιαστικά, η βασική διαφορά σε αυτήν την περίπτωση είναι ότι η τάση είναι ίδια για τα τρία στοιχεία του κυκλώματος και ισούται με την τάση της πηγής, αλλά το ρεύμα στο κάθε στοιχείο του κυκλώματος είναι διαφορετικό.

Πιο συγκεκριμένα, το ρεύμα στο πηνίο υστερεί της τάσης κατά 90 μοίρες, το ρεύμα στον πυκνωτή προηγείται της τάσης κατά 90 μοίρες και άρα υπάρχει μια διαφορά συνολικά 180 μοιρών μεταξύ των δύο ρευμάτων.

5.2.3 Προσδιορισμός συχνότητας συντονισμού δυο συντονισμένων κυκλωμάτων με διάκενο διάσπασης

Σε αυτήν την ενότητα θα δούμε πως προσδιορίζεται η συχνότητα συντονισμού δύο συντονισμένων κυκλωμάτων με διάκενο διάσπασης, που ουσιαστικά λειτουργούν σαν μετασχηματιστής. Ένας συντονισμένος μετασχηματιστής αποτελείται από δύο συντονισμένα RLC κυκλώματα γνωστά ως πρωτεύον και δευτερεύον. Το δευτερεύον κύκλωμα καθορίζει την συχνότητα συντονισμού του πηνίου Tesla. Η μορφή του δευτερεύοντος κυκλώματος είναι ένα RLC κύκλωμα σειράς που διαθέτει αυτεπαγωγή, χωρητικότητα και αντίσταση. Η αντίσταση γενικά αυξάνεται όταν αυξάνεται η συχνότητα συντονισμού.

Το εν σειρά RLC κύκλωμα καθορίζει την εμπέδηση του δευτερεύοντος η οποία ποικίλει σε ένα επιλεγμένο φάσμα συχνοτήτων. Το δευτερεύον έχει υψηλό Q με αντίστοιχο στενό εύρος ζώνης απόκρισης συχνοτήτων. Η εμπέδηση του δευτερεύοντος έχει χαμηλή τιμή κατά την συχνότητα συντονισμού και αυξάνεται απότομα πάνω και κάτω από το συντονισμό όταν υπάρχει υψηλό Q στο κύκλωμα. Τα αποτελέσματα του υψηλού Q σε μια χαμηλή μείωση και οι ταλαντώσεις που παράγονται στο δευτερεύον διαρκούν περισσότερο σε σχέση με αυτές στο πρωτεύον. Το πρωτεύον κύκλωμα είναι η πηγή της ενέργειας του συντονισμένου μετασχηματιστή. Συμπεριφέρεται σαν ένα ξεχωριστό συντονισμένο κύκλωμα συνδεδεμένο στο δευτερεύον μέσω μιας αμοιβαίας επαγωγής του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος τυλίγματος.

Από την άλλη μεριά, πρέπει να σημειωθεί ότι και το πρωτεύον τύλιγμα έχει αυτεπαγωγή, αυτό-χωρητικότητα και αντίσταση. Στις περισσότερες των περιπτώσεων

όμως τα μεγέθη αυτά του πρωτεύοντος τυλίγματος είναι αμελητέα. Το πρωτεύον κύκλωμα επίσης αποτελεί ένα RLC κύκλωμα το οποίο χρησιμοποιεί την αυτεπαγωγή του πρωτεύοντος, τον πυκνωτή και την αντίσταση του διακένου. Η εμπέδηση του πρωτεύοντος RLC κυκλώματος υπερσχύει της αντίστασης του διακένου κατά την διάρκεια του ιονισμού. Η αντίσταση επηρεάζεται από την διακύμανση της τάσης διαμέσου του διακένου, από το υλικό των ηλεκτροδίων, από την απόσταση των ηλεκτροδίων και από την κορυφή του ταλαντευόμενου ρεύματος. Το πρωτεύον έχει χαμηλό φορτίο με ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων. Ουσιαστικά, το πρωτεύον λειτουργεί σαν μια αποτελεσματική γεννήτρια ρεύματος με σημαντικό εύρος.

Με την όλη διάταξη, σημαντικές τιμές ρεύματος είναι δυνατόν να παραχθούν μέσα σε ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων για να παραχθεί υψηλή τάση στο δευτερεύον παρόλο που οι ταλαντώσεις δεν χρειάζεται να ρυθμιστούν ακριβώς στην συχνότητα συντονισμού του δευτερεύοντος.

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι η αύξηση της τάσης στο δευτερεύον είναι υψηλότερη όταν πρωτεύον και δευτερεύον είναι συντονισμένα στην ίδια συχνότητα. Η σχέση ανάμεσα στο Q και το εύρος είναι αντιστρόφως ανάλογη ($Q = 1/BW$)

5.3 Θεωρητική ανάλυση ενός πηνίου TESLA

Αυτή η ενότητα παρουσιάζει τα σημαντικότερα βήματα της θεωρητικής ανάλυσης ενός πηνίου Tesla. Στη βασική του μορφή, αποτελείται από δύο πηνία, ένα πρωτεύον και ένα δευτερεύον. Το πρωτεύον πηνίο είναι κατασκευασμένο από λίγες σπείρες αγωγού μεγάλης διατομής και το δευτερεύον από πολλές σπείρες αγωγού μικρής διατομής. Αντίθετα με άλλους μετασχηματιστές, δεν υπάρχει σιδηρομαγνητικός πυρήνας και έτσι η αμοιβαία επαγωγή μεταξύ των δύο πηνίων είναι μικρή.

Στο πρωτεύον πηνίο εφαρμόζονται ηλεκτρικοί παλμοί μεγάλης έντασης, μέσω της εκφόρτισης ενός πυκνωτή, που έχει προηγουμένως φορτιστεί σε τάση μερικών kV AC. Η διαδικασία πραγματοποιείται με τη χρήση ενός σπινθηριστή ο οποίος λειτουργεί ως

διακόπτης, όπως φαίνεται στο σχεδιάγραμμα, που ρυθμίζεται ώστε το διάκενό του να διασπάται μόλις η τάση στα άκρα του πυκνωτή φτάσει σε συγκεκριμένη τιμή.

Όταν ο σπινθηριστής άγει, ο πυκνωτής και το πρωτεύον πηνίο δημιουργούν ένα κύκλωμα LC, στο οποίο παράγονται ηλεκτρικές ταλαντώσεις σε συγκεκριμένη συχνότητα. Στο δευτερεύον πηνίο, που αποτελεί ένα άλλο κύκλωμα LC, παράγονται επίσης ηλεκτρικές ταλαντώσεις από επαγωγή. Οι συχνότητες ταλάντωσης των δύο πηνίων καθορίζονται από τις κατασκευαστικές παραμέτρους τους. Στα επόμενα κεφάλαια θα αναφερθούμε αναλυτικότερα στη λειτουργία του κυκλώματος.

Για τη σωστή λειτουργία του μετασχηματιστή τα δύο κυκλώματα (πρωτεύοντος και δευτερεύοντος) πρέπει να βρίσκονται από μόνα τους και μεταξύ τους σε συντονισμό, δηλαδή οι συχνότητες ταλάντωσης τους να συμπίπτουν. Όταν αυτό συμβεί, τότε το πλάτος της ηλεκτρικής ταλάντωσης στο δευτερεύον πολλαπλασιάζεται και ο μετασχηματιστής παράγει υψηλή τάση στην έξοδό του. Η τάση εξόδου του μετασχηματιστή Tesla μπορεί να φτάσει σε επίπεδα MVolts, ικανή να προκαλέσει εντυπωσιακές ηλεκτρικές εκκενώσεις πολλών μέτρων στο αέρα.

Ο μετασχηματιστής χρησιμοποιήθηκε από τον Tesla για τη παραγωγή και τη μετάδοση ηλεκτρικών ταλαντώσεων με σκοπό τον ασύρματο χειρισμό συσκευών από απόσταση, την ασύρματη επικοινωνία (ραδιοφωνία), καθώς και την ασύρματη μετάδοση ηλεκτρικής ενέργειας, στόχους που πραγματοποίησε. Στις αρχές του αιώνα μας, το πηνίο Tesla βρήκε επίσης δημοφιλή χρήση και στην ιατρική. Ο ασθενής υποβαλλόταν σε ρεύματα υψηλής τάσης και υψηλής συχνότητας, που μπορούν να διαπεράσουν ακίνδυνα το ανθρώπινο σώμα και πιστευόταν ότι είχαν ανακουφιστική και τονωτική επίδραση. Παρόμοιες τεχνικές βρίσκουν εφαρμογή ακόμα και σήμερα όπως είναι η ηλεκτροθεραπεία.

5.3.1 Πρωτεύον τύλιγμα

Το πρωτεύον τύλιγμα μαζί με τον πυκνωτή και την αντίσταση γραμμής δημιουργούν ένα RLC κύκλωμα σε σειρά. Το πρωτεύον κύκλωμα είναι υπεύθυνο για την ζεύξη με το δευτερεύον τύλιγμα αλλά και για την μεταφορά ενέργειας.

Η κατασκευή του πρωτεύοντος τυλίγματος κατά κανόνα απαιτεί την χρήση αγωγού χαλκού διαμέτρου ίσης με το 25% της ίντσας. Για να αποφύγουμε την δημιουργία τόξων μεταξύ των σπειρών του τυλίγματος η ελάχιστη απόσταση των σπειρών θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από το 1/4 της ίντσας, ενώ μπορούμε να το τοποθετήσουμε σε βάση κατασκευασμένη από οποιοδήποτε μη αγώγιμο υλικό.

Αναφορικά με τη μορφή του πρωτεύοντος τυλίγματος, είναι συνήθως επίπεδη. Σε περίπτωση που έχουμε ελικοειδή και σπειροειδή μορφή αυξάνονται οι πιθανότητες το τόξο που παράγει το τοροειδές να χτυπήσει το πρωτεύον τύλιγμα, καθώς μειώνεται η μεταξύ τους απόσταση.

Όταν το πηνίο Tesla λειτουργεί στην μέγιστη ισχύ του τα τόξα που ξεσπούν από το τοροειδές έχουν ανεξέλεγκτη κατεύθυνση και κυρίως στα πιο αγώγιμα υλικά. Έτσι υπάρχουν μεγάλες πιθανότητες τα τόξα, ιδίως αν έχουν μεγάλο μήκος, να πέσουν πάνω στον πρωτεύον τύλιγμα με αποτέλεσμα να δημιουργηθεί βραχυκύκλωμα. Απαραίτητη λοιπόν, σε μια κατασκευή πηνίου Tesla, για τους λόγους που αναφέρθηκαν παραπάνω, είναι η τοποθέτηση προστατευτικού δακτυλίου πάνω από το πρωτεύον τύλιγμα γειωμένο σε διαφορετική γείωση από το δευτερεύον τύλιγμα έτσι ώστε το τόξο να πέφτει πρώτα στο δακτύλιο της γείωσης.

Πριν την κατασκευή του πρωτεύοντος τυλίγματος θα πρέπει να γνωρίζουμε τον αριθμό των σπειρών που θα χρειαστούμε για να τελειοποιηθεί το πηνίο, το μήκος των σωληνώσεων ή τα καλώδια που θα χρειαστεί και το μέγεθος της βάσης του τυλίγματος.

5.3.2 Υπολογισμός πρωτεύοντος τυλίγματος

Για ένα επίπεδο σπειροειδές πηνίο, η οποία είναι η προτιμώμενη επιλογή, πρέπει να γνωρίζουμε το πλάτος και την απόσταση μεταξύ των αγωγών, τη διάμετρο της εσωτερικής σειράς και τον αριθμό των στροφών για να μπορέσουμε να βρούμε την τιμή της επαγωγής του.

Όταν ένα πηνίο είναι τυλιγμένο επίπεδα με την επιφάνεια , ο υπολογισμός της αυτεπαγωγής δίνεται από τον τύπο :

$$L = \frac{(RN)^2}{8R + 11W}$$

Στην σχέση αυτή, L είναι η αυτεπαγωγή του πηνίου σε μH, R είναι η ακτίνα του πηνίου ίντσες, N είναι ο αριθμός των σπειρών του πηνίου και W είναι το πλάτος του τυλίγματος του πηνίου σε ίντσες.

5.3.3 Δευτερεύον τύλιγμα

Το δευτερεύον πηνίο βρίσκεται στο κέντρο κάθε πηνίου Tesla. Είναι το ψηλό λεπτό πηνίο ανάμεσα στο πρωτεύον τύλιγμα και το τοροειδές, που αναπτύσσεται πάνω του τάση της τάξης των χιλιάδων ακόμα και εκατομμυρίων βολτ που φυσικά είναι και ο στόχος του πηνίου Tesla. Λόγω ότι αναπτύσσεται υψηλή τάση και λειτουργεί σε πολύ υψηλές συχνότητες (RF ραδιοσυχνότητες) πρέπει να είναι του σωστού μεγέθους και πολύ καλά μονωμένο.

Η διαρροή υψηλής τάσης μέσα από τη μόνωση μαζί με την διάχυση των ραδιοσυχνοτήτων ονομάζεται Q του δευτερεύοντος κυκλώματος. Το Q μετράει το πόσες φορές μια ταλάντωση θα περάσει μέσα από το πηνίο πριν αυτή μειωθεί στο 1/10 της αρχικής της τιμής. Βεβαίως, όσο μεγαλύτερο είναι το Q τόσο λιγότερη ενέργεια θα διαχυθεί από το πηνίο και κατά συνέπεια θα έχουμε την μέγιστη ενέργεια για την παραγωγή των τόξων. Με την επιλογή καλύτερου διηλεκτρικού αυξάνουμε και την τιμή του Q.

Όσον αφορά στη μορφή του πηνίου, αυτή ουσιαστικά είναι ένας σωλήνας που περιμετρικά του τυλίγεται ο χαλκός. Για να έχουμε την μικρότερη δυνατή διαρροή αντίστασης το, υλικό του σωλήνα πρέπει να είναι πολύ καλό διηλεκτρικό. Τα περισσότερα πλαστικά υλικά που χρησιμοποιούνται για το δευτερεύον πηνίο δεν περιέχουν καθόλου άνθρακα και δεν απορροφούν υγρασία από το περιβάλλον. Η τιμή του συντελεστή διάχυσης των RF μας υποδηλώνει πιο υλικό είναι το προτιμότερο.

Το χαμηλότερο συντελεστή διάχυσης RF των πλαστικών έχει το πολυαιθυλένιο (PE) το οποίο αποτελεί μια πολύ καλή επιλογή για την κατασκευή ενός δευτερεύοντος πηνίου. Άριστη επιλογή αποτελεί το πολυαιθυλένιο μεγάλου μοριακού βάρους (PE-UHMW) το οποίο βέβαια είναι δυσεύρετο στο εμπόριο.

Το πολυπροπυλένιο έχει και αυτό χαμηλό συντελεστή διάχυσης RF και είναι δομικά ισχυρό ώστε να περιελιχθεί γερά ο χαλκός περιμετρικά του.

Δεύτερη καλύτερη λύση αποτελούν τα ακρυλικά υλικά τα οποία έχουν χαμηλό συντελεστή διάχυσης RF αλλά με μειονέκτημα ότι πρέπει να επιστρωθούν με μονωτικό βερνίκι για να μειωθεί περισσότερο στα επιθυμητά επίπεδα ο συντελεστής διάχυσης. Πλεονέκτημα είναι ότι δεν απορροφούν υγρασία και καθιστούν περιττή οποιαδήποτε διαδικασία ξήρανσης.

Τέλος υπάρχει και το PVC. Είναι τι υλικό που χρησιμοποιείται πιο συχνά όπως οι σωλήνες PVC που χρησιμοποιούνται εκτεταμένα σε αγωγούς ύδρευσης και αποχετευτικών συστημάτων. Παρόλο που το PVC είναι μια καλή επιλογή κατασκευής δευτερεύοντος πηνίου έχει και αυτό τα μειονεκτήματά του. Οι σωλήνες από PVC περιέχουν συχνά άνθρακα που τους κάνουν λιγότερο ευαίσθητους στο υπεριώδες φως κατά την έκθεσή του στον ήλιο. Επομένως οι μαύροι PVC σωλήνες είναι άχρηστοι για τον σκοπό μας, κατά κύριο λόγο χρησιμοποιούνται λευκοί ή γκρι σωλήνες.

Μόλις επιλεγεί το υλικό του πηνίου και το κατασκευάσουμε στις διαστάσει που απαιτούνται είναι απαραίτητο να σφραγίσουμε τα δύο άκρα ώστε να αποφευχθούν οι σπινθηρισμοί στο εσωτερικό του πηνίου.

Όσον αφορά στις διαστάσεις του πηνίου, τα τοιχώματα του σωλήνα πρέπει να είναι όσο το δυνατό πιο λεπτά. Αυτό καθιστά την μείωση του συντελεστή διάχυσης των RF αφού όσο το περισσότερο υλικό υπάρχει στα τοιχώματα του σωλήνα τόσες περισσότερες απώλειες υπάρχουν.

Το πηνίο πρέπει να κατασκευαστεί με βάση το λόγο ύψους διαμέτρου με αναλογία μεταξύ τους 1:3 και 1:6. Με μικρό λόγο το πηνίο δίνει την υψηλότερη επαγωγή για το ίδιο μήκος καλωδίου χαλκού, καθώς η μεγαλύτερη επαγωγή είναι αυτή που μας δίνει την υψηλή τάση στην έξοδο όπου και είναι το επιθυμητό αποτέλεσμα. Ωστόσο υπάρχουν περιπτώσεις που επιθυμούμε ψηλότερο πηνίο παρά μεγαλύτερη επαγωγή.

Το πηνίο θα πρέπει να είναι μεταξύ 800 και 1200 σπειρών. Αυξάνοντας ή μειώνοντας τις τιμές αυτές παρατηρούμε την μείωση της ενέργειας εξόδου είτε λόγω της αύξησης της αντίστασης είτε λόγω της μείωσης της επαγωγής. Η διατομή των καλωδίων επιλέγεται ανάλογα με τον αριθμό των σπειρών και το μήκος του πηνίου.

5.3.4 Υπολογισμός δευτερεύοντος τυλίγματος

Για την κατασκευή ενός δευτερεύοντος πηνίου θα πρέπει να γνωρίζουμε τη διάμετρο και το ύψος του πηνίου, την διάμετρο του χάλκινου καλωδίου και τον αριθμό των στροφών για να μπορέσουμε να βρούμε την τιμή της επαγωγής του.

Ο υπολογισμός της αυτεπαγωγής δίνεται από τον τύπο :

$$L = \frac{(RN)^2}{9R + 10H}$$

Στην σχέση αυτή, L είναι η αυτεπαγωγή του πηνίου σε μh, R είναι η ακτίνα του πηνίου ίντσες, N είναι ο αριθμός των σπειρών του πηνίου και H είναι το ύψος του τυλίγματος του πηνίου σε ίντσες.

5.3.5 Υπολογισμός τοροειδούς

Η χωρητικότητα ενός τοροειδούς μπορεί να καθοριστεί από την εισαγωγή των διαστάσεών του στον παρακάτω τύπο:

$$C = \left(1,28 - \frac{d}{D}\right) \sqrt{2\pi(D-d)}$$

Όπου d είναι η εσωτερική διάμετρος του τοροειδούς σε ίντσες και D η εξωτερική διάμετρος του τοροειδούς σε ίντσες.

6 Σχεδιασμός και κατασκευή πηνίου TESLA

6.1 Γενικά στοιχεία

Το πηνίο Τέσλα που κατασκευάστηκε αποτελείται από ένα τυπικό μετασχηματιστή, ένα ανοδικό μετασχηματιστή υψηλής τάσης, έναν πυκνωτή χωρητικότητας $0.005\mu\text{F}$ (MFD), ένα σπινθηριστή, το πρωτεύον τύλιγμα το δευτερεύων τύλιγμα και τον τελικό ακροδέκτη (πίατο) σε τοροειδής σχήμα.

Για την λειτουργία της διάταξης, αυτή τροφοδοτείται με τάση 115V στον μετασχηματιστή ανόδου υψηλής τάσης ο οποίος είναι συνδεδεμένος παράλληλα με τον πυκνωτή. Σε σειρά έχουμε συνδέσει τον σπινθηριστή.

Το διάκενο του σπινθηριστή είναι ρυθμισμένο ώστε να άγει σε συγκεκριμένο μέγεθος τάσης με αποτέλεσμα όταν φτάσει σε αυτό να εκφορτιστεί ο πυκνωτής και να έχουμε πολύ μεγάλα επίπεδα τάσης. Η τάση αυτή εφαρμόζει στα άκρα του πρωτεύοντος τυλίγματος το οποίο συνδέεται επαγωγικά με το δευτερεύων πηνίο. Η διάταξη πρωτεύοντος και δευτερεύοντος πηνίου δημιουργεί πολύ υψηλή συχνότητα με τελικό αποτέλεσμα στην έξοδο του πηνίου (τοροειδής ακροδέκτης) να έχουμε πολύ υψηλή τάση πολύ υψηλή συχνότητα ενώ πολύ μικρό μέγεθος έντασης ρεύματος.

Ο μετασχηματιστής που έχει χρησιμοποιηθεί είναι ανοδικός υψηλής τάσης, στην είσοδό του έχει τάση $V_{in} = 120\text{V}$ (έχουμε προμηθευτεί τα μηχανήματα εξολοκλήρου από τις Η.Π.Α.) η οποία προέρχεται από ένα τυπικό μετασχηματιστή 220V/115V. Οι τιμές εξόδου του μετασχηματιστή μας είναι : τάση $V_{out} = 6.5\text{KV}$ ένταση : $I_{out} = 20\text{mA}$

Ο σπινθηριστής που έχει χρησιμοποιηθεί είναι ένας τυπικός σπινθηριστής ο οποίος έχει ρυθμιζόμενα άκρα για να μπορούμε να ελέγχουμε το σημείο που θα άγει. Τα διάκενα μεταξύ των ακροδεκτών ξεκινάει από 00mm και φτάνει έως και 00mm. Οι ακροδέκτες του σπινθηριστή είναι φτιαγμένοι από καθαρό βολφράμιο (χάλυβας) , για την κατάλληλη αγωγιμότητα.

6.2 Υπολογισμός ισχύος και μήκος τόξου κατασκευής

Ο υπολογισμός ισχύος γίνεται πολλαπλασιάζοντας την τάση εισόδου με το αντίστοιχο ρεύμα. Εν συνεχεία, το μήκος τόξου προκύπτει από τη σχέση $L = 1.7 * P^{1/2}$

Στην συγκεκριμένη διάταξη, έχουμε συνολική ισχύ $P = 250$ Watt και μήκος τόξου 26,8 ίντσες.

6.3 Υπολογισμός πυκνωτή πρωτεύοντος κυκλώματος

Ο πυκνωτής που χρησιμοποιήθηκε είναι της τάξης των 36nF, συνδεδεμένος παράλληλα με το μετασχηματιστή είναι φορτισμένος μέχρι τη στιγμή που θα άγει ο σπινθηριστής και την κρίσιμη στιγμή εκτοξεύει την ισχύ του στα τυλίγματα (εκφόρτιση).

6.4 Υπολογισμός πρωτεύοντος τυλίγματος

Το πρωτεύον τύλιγμα είναι το επαγωγικό μέρος του πρωτεύοντος κυκλώματος, μαζί με το πυκνωτή σχηματίζουν ένα συντονισμένο κύκλωμα. Δεδομένου ότι το πρωτεύον τύλιγμα χειρίζεται όλη την ισχύ εκφόρτισης του πυκνωτή, πρέπει να είναι ικανό να αντέχει σε μεγάλα μεγέθη ρεύματος, τέτοια που θα συναντούσαμε σε περίπτωση βραχυκυκλώματος. Για το λόγο αυτό είναι κατασκευασμένο από σωλήνες χαλκού ή από χάλκινα καλώδια ισχύος μεγάλης διατομής.

Η αυτεπαγωγή του πρωτεύοντος πηνίου υπολογίζεται από την σχέση

$$L = \frac{(RN)^2}{8R + 11W}$$

Στο πηνίο που χρησιμοποιήσαμε, έχουμε $N = 13$, $R = 3.7$ ίντσες, $W = 7.3$ ίντσες και άρα η αυτεπαγωγή είναι ίση με 65.6 μ H.

6.5 Υπολογισμός συχνότητας συντονισμού πρωτεύοντος κυκλώματος

Ο υπολογισμός της συχνότητας συντονισμού γίνεται με βάση την σχέση:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Για τα ερευνητικά δεδομένα της παρούσης κατασκευής, προκύπτει ότι η συχνότητα συντονισμού είναι ίση με περίπου 220 KHz.

6.6 Υπολογισμός δευτερεύοντος τυλίγματος

Το δευτερεύον τυλίγμα είναι το σημείο του πηνίου όπου επιτυγχάνεται η μέγιστη άνοδος της συχνότητας (περίπου 500KHZ). Είναι τυλιγμένο πάνω σε σωλήνα 13'' PVC, ο πυρήνας του είναι καινός, και τα τυλίγματα του είναι 500 στροφών.

6.7 Υπολογισμός αυτό - χωρητικότητας δευτερεύοντος τυλίγματος

Για τον υπολογισμό της αυτό - χωρητικότητας, χρησιμοποιείται η σχέση $k = 0.585 - 0.25442(H/D) + 0.15563(H/D)^2 - 0.02777(H/D)^3 + 0.00172(H/D)^4$.

Για την παρούσα διάταξη, προκύπτει ότι ο συντελεστής k είναι ίσος με 0,855. Επομένως, η αυτό - χωρητικότητα είναι ίση με $0,855 * D = 7,6 \text{ pF}$.

6.8 Υπολογισμός συχνότητας συντονισμού δευτερεύοντος τυλίγματος

Για τη συχνότητα συντονισμού του δευτερεύοντος τυλίγματος χρησιμοποιούμε και πάλι τη σχέση

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Αυτή τη φορά όμως χρησιμοποιείται η αυτό – χωρητικότητα και η αυτεπαγωγή του δευτερεύοντος, και άρα έχουμε συχνότητα συντονισμού ίση με 531 KHz.

6.9 Υπολογισμός τοροειδούς κατασκευής

Για τον υπολογισμό της τοροειδούς κατασκευής έχουμε ότι η διάμετρος είναι 18,9 ίντσες και η εσωτερική διάμετρος 4 ίντσες. Η χωρητικότητά της βρίσκεται από την σχέση:

$$C = \left(1,28 - \frac{d}{D}\right)\sqrt{2\pi(D-d)}$$

Υπολογίζεται ότι είναι ίση με 20,66 pF.

6.10 Υπολογισμός συχνότητας συντονισμού δευτερεύοντος κυκλώματος

Για τον υπολογισμό της συνολικής χωρητικότητας, προσθέτουμε τις δύο επιμέρους χωρητικότητες (αυτό – χωρητικότητα και χωρητικότητα τοροειδούς), και έχουμε $C = 28,66 \text{ pF}$.

Με βάση αυτήν, προκύπτει η συχνότητα συντονισμού από τον γνωστό τύπο, και είναι ίση με $273,8 \text{ KHz}$.

6.11 Διάκενο διάσπασης

6.11.1 Στατικό διάκενο διάσπασης

Τα διάκενα διάσπασης είναι διακόπτες υψηλής τάσης οι οποίοι επιτρέπουν την φόρτιση και εκφόρτιση του πυκνωτή. Βελτιώνοντας την απόδοση του διακένου, οι αιχμές ισχύος του πυκνωτή αυξάνονται χωρίς να χρειάζεται περισσότερη τροφοδοσία.

Εφαρμόζοντας υψηλή τάση δημιουργείτε μια ένταση και δυναμικές γραμμές παίρνουν μορφή. Η γεωμετρική μορφή των ηλεκτροδίων καθορίζει σε μεγάλο βαθμό τη μορφή του πεδίου και τη συνισταμένη τάση διάσπασης του διακένου σε κάθε απόσταση.

Καθώς η τάση διασπά τον αέρα η αντίσταση του διακένου πέφτει. Η διάσπαση ιονίζει τον αέρα ανάμεσα στα ηλεκτρόδια και το τόξο που ξεκινάει ιονίζει ακόμα και τα ηλεκτρόδια. Το μίγμα αυτών των ιόντων σχηματίζει ένα υψηλής αγωγιμότητας πλάσμα ανάμεσα στα ηλεκτρόδια. Χωρίς αυτό το υπεραγώγιμο κανάλι ανάμεσα στα ηλεκτρόδια η ταλάντωση του πυκνωτή θα ήταν ανύπαρκτη. Το πλάσμα επίσης μειώνει την απόσταση του διακένου. Ένα διάκενο το οποίο έχει εγκλωβίσει ζεστά ιόντα δεν κάνει διάσπαση και αφήνει τον πυκνωτή να επαναφορτίσει μέχρι τον επόμενο παλμό.

6.11.2 Διάκενα ασφαλείας

Τα διάκενα ασφαλείας είναι στην ουσία ένα στατικό διάκενο διάσπασης με την διαφορά ότι διασπάτε μόνο όταν δημιουργηθεί μία υπέρταση πάνω στον πυκνωτή από μια παροδική τάση. Η λανθασμένη λειτουργία ενός πηνίου Tesla ή η απορύθμιση του μπορεί να προκαλέσει παροδικές υπερτάσεις οι οποίες μπορούν να καταστρέψουν το μετασχηματιστή ανύψωσης, τον πυκνωτή ή και ακόμα να μεταφέρουν στο πρωτεύον του μετασχηματιστή ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές (EMI).

7 Βιβλιογραφία – Πηγές

Ελληνική Βιβλιογραφία

1. Ηλεκτρονική (Malvino)
2. Ηλεκτρονικά Ισχύος (Μοσαν/Undeland/Robbins)
3. Ηλεκτρικές Μηχανές (Stephen Charman)
4. Ηλεκτρικές Εγκαταστάσεις Καταναλωτών Μέσης και Χαμηλής Τάσης (Πέτρος Ντοκόπουλος)
5. Ηλεκτροτεχνία 2 (Νίκος Κολιόπουλος)
6. Τεχνολογία Υψηλών Τάσεων (Σιδεράκης Κυριάκος)
7. The Ultimate Tesla Coil Design and Construction Guide (Mitch Tilbury)

Διαδικτυακοί Τόποι

8. www.teslasociety.com/teslacoil.htm
9. www.teslacoil.com
10. www.pbs.org/tesla/
11. en.wikipedia.org/wiki/Tesla_coil

8 Παράρτημα Φωτογραφιών



