

**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΟΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΕ**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ 1604

**ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ
ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΚΑΙ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΜΕ ΕΜΦΑΣΗ ΣΤΗΝ
ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ
ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ**

**ENERGY SAVING IN TRANSMISSION AND
DISTRIBUTION NETWORK WITH EMPHASIS
ON DESIGGN EVOLUTION OF TRANSFORMER**

**ΠΑΠΑΓΙΑΝΝΟΠΟΥΛΟΣ ΘΕΟΔΩΡΟΣ
ΣΟΥΛΙΝΤΖΗΣ ΑΝΤΡΕΑΣ**

ΕΠΟΠΤΕΥΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:

ΜΙΜΜΟΣ ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ

ΠΑΤΡΑ 2016

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας και η εμφάνιση ιδιωτικών εταιρειών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας έχει δημιουργήσει ένα νέο, ανταγωνιστικό περιβάλλον στην παγκόσμια αγορά ενέργειας και η εξοικονόμηση της, παίζει πολύ πιο σημαντικό ρόλο σε σχέση με παλιότερα. Σ' αυτό το νέο και ενδιαφέρον περιβάλλον εμφανίζεται στη βιομηχανία παραγωγής μετασχηματιστών, η ανάγκη βελτίωσης της απόδοσης και αξιοπιστίας των μετασχηματιστών και μείωσης του κόστους τους. Το συγκεκριμένο πρόβλημα σε συνδυασμό με το σχεδιασμό των δικτύων διανομής στη λογική της διεσπαρμένης κατανομής, που αποτελεί το βέλτιστο τρόπο εξοικονόμησης ηλεκτρικής ενέργειας στα δίκτυα, αποτελούν και το κύριο αντικείμενο έρευνας της συγκεκριμένης πτυχιακής εργασίας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία ασχολείται με την εξοικονόμηση ενέργειας στα δίκτυα μεταφοράς και διανομής με μεγαλύτερη έμφαση στην βελτίωση του βαθμού απόδοσης των μετασχηματιστών. Ποιο συγκεκριμένα:

Στο πρώτο κεφάλαιο πραγματοποιείται μια ιστορική αναδρομή της ηλεκτρικής ενέργειας, από αρχαιοτάτων χρόνων έως την ηλεκτρίση της Ελλάδας και μέχρι σήμερα.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζεται η διεσπαρμένη παραγωγή τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματά της, οι διάφοροι τύποι τεχνολογιών και οι λόγοι που την καθιστούν απαραίτητη στα σύγχρονα δίκτυα διανομής.

Στο τρίτο κεφάλαιο, πραγματοποιείται ανάλυση τεχνικών αντιστάθμισης άεργου ισχύος τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της και οι διάφορες τεχνολογίες για τη διόρθωση του συντελεστή ισχύος.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η αρχή λειτουργίας των μετασχηματιστών, αναλύονται τα επιμέρους μέρη του μετασχηματιστή και παρουσιάζονται οι διάφοροι τύποι του.

Στο πέμπτο κεφάλαιο περιγράφονται οι διάφοροι τρόποι αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας στις μέρες μας.

Στο έκτο κεφάλαιο αναλύονται οι διάφορες απώλειες των μετασχηματιστών, όπως είναι οι απώλειες σκέδασης, χαλκού, υστέρησης και δινορευμάτων.

Στο έβδομο κεφάλαιο περιγράφονται αναλυτικά οι συνδεσμολογίες και η χρήση των τριφασικών μετασχηματιστών που χρησιμοποιούνται στα ηλεκτρικά δίκτυα.

Στο όγδοο κεφάλαιο παρουσιάζονται διάφοροι μέθοδοι για την βελτίωση της απόδοσης (βαθμού απόδοσης) λειτουργίας των μετασχηματιστών

Στο ένατο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι τελευταίες τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στους εμπορικούς μετασχηματιστές υψηλής ενεργειακής απόδοσης

Τέλος στο δέκατο κεφάλαιο παρουσιάζονται η περίληψη και τα συμπεράσματα της παρούσας πτυχιακής εργασίας.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	I
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	II
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	III
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	2
ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	2
1.1 Αρχαιότητα	2
1.2 17 ^{ος} αιώνας.....	2
1.3 18 ^{ος} και 19 ^{ος} αιώνας	3
1.4 20 ^{ος} αιώνας.....	6
1.5 Ο ηλεκτρισμός στην Ελλάδα	6
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	9
ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ.....	9
2.1 Λόγοι Ανάπτυξης Διεσπαρμένης Παραγωγής	9
2.2 Δεδομένα Διεσπαρμένης Παραγωγής.....	10
2.3 Προσέγγιση και Απόφαση Εγκατάσταση.....	10
2.4 Τύποι τεχνολογιών διασπαρμένης παραγωγής (DER) - I.....	10
2.5 Τύποι τεχνολογιών διασπαρμένης παραγωγής (DER) -II	11
2.6 Τύποι τεχνολογιών διασπαρμένης παραγωγής (DER) -III	11
2.7 Τύποι τεχνολογιών διασπαρμένης παραγωγής (DER) - IV	12
2.8 Τύποι τεχνολογιών διασπαρμένης παραγωγής (DER) - V	12
2.9 Πλεονεκτήματα που προσφέρει η εγκατάσταση DER σε διάφορους τομείς.....	12
2.10 Επιδράσεις Διεσπαρμένης Παραγωγής.....	14
2.11 Μεταβολή Τάσης	14
2.12 Ποιότητα Ισχύος.....	15
2.13 Επιπτώσεις Διεσπαρμένης Παραγωγής.....	15
2.14 Μειονεκτήματα Διεσπαρμένης Παραγωγής	15
2.15 Η μετάβαση από το σήμερα στο αύριο	16
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	19
ΑΝΤΙΣΤΑΘΜΙΣΗ ΑΕΡΓΟΥ ΙΣΧΥΟΣ -ΔΙΟΡΘΩΣΗ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΙΣΧΥΟΣ	19
3.1 Πλεονεκτήματα από τη βελτίωση της αέργου ισχύος με τα συστήματα αντιστάθμισης	20
3.2 Μειονεκτήματα από τη βελτίωση της αέργου ισχύος με τα συστήματα αντιστάθμισης	21
3.3 Είδη αντιστάθμισης.....	21

3.3.1	Μεμονωμένη Αντιστάθμιση	21
3.3.2	Ομαδική Αντιστάθμιση	22
3.3.3	Κεντρική Αντιστάθμιση	22
3.3.4	Συνδυασμένη αντιστάθμιση.....	23
3.4	Τρόποι αντιστάθμισης	23
3.4.1	Αντιστάθμιση άεργου ισχύος με πυκνωτές (σταθερούς ή βηματικής μεταβολής)	23
3.4.2	Αντιστάθμιση με στρεφόμενους πυκνωτές.....	26
3.5	Σύγχρονες Μέθοδοι Αντιστάθμισης.....	29
3.5.1	STATCOM, SVC	30
3.5.2	Πυκνωτής Σειράς Ελεγχόμενος από Θυρίστορ (TCSC).....	32
3.5.3	Ρυθμιστής Φασικής Γωνίας Ελεγχόμενος από Θυρίστορ (TCPAR ή TCPST)....	33
3.6	Μέσα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας.....	34
3.7	Περικοπή ενεργού ισχύος της Διασπαρμένης Παραγωγής	37
3.8	Έλεγχος της αέργου ισχύος των αντιστροφών της Διασπαρμένης Παραγωγής	38
3.9	Κατηγορίες φορτίων που συμβάλλουν στην αυξημένη κατανάλωση αέργου ισχύος	38
3.9.1	Λειτουργία συμβατικών κλιματιστικών μονάδων	38
3.9.2	Μη γραμμικά φορτία: Εισαγωγή αρμονικών	39
3.9.3	Αρμονικές και αντιστάθμιση αέργου ισχύος.....	40
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	41
ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ.....		41
4.1	Γενικές αρχές λειτουργίας	41
4.2	Ο σιδηροπυρήνας του μετασχηματιστή - κατασκευαστικά χαρακτηριστικά	43
4.3	Ειδικές κατηγορίες Μετασχηματιστών.....	44
4.3.1	Μετασχηματιστές τροφοδοσίας.....	44
4.3.2	Μετασχηματιστές χαμηλών συχνοτήτων	46
4.3.3	Αυτομετασχηματιστές	47
4.3.4	Μετασχηματιστές ρεύματος.....	48
4.3.5	Μετασχηματιστές υψηλής τάσης.....	48
4.4	Ο ιδανικός Μετασχηματιστής	50
4.4.1	Ο ιδανικός μετασχηματιστής εν κενώ	51
4.4.2	Ο ιδανικός Μετασχηματιστής υπό φορτίο	55
4.5	Ισοδύναμο Πραγματικού Μονοφασικού Μετασχηματιστή για τη μόνιμη Κατάσταση.....	57
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	59

ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	59
5.1 Γενικές Αρχές Λειτουργίας	59
5.2 Αποθήκευση Ηλεκτρισμού με Δυναμική Ενέργεια (αντλησιοταμίευση)	59
5.3 Συμπιεσμένος Αέρας.....	61
5.4 Αποθήκευση Ηλεκτρισμού με Κινητική Ενέργεια	64
5.4.1 Σφόνδυλοι (flywheels)	64
5.5 Αποθήκευση Ηλεκτρισμού με Χημική Ενέργεια.....	66
5.5.1 Συσσωρευτές.....	66
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6	70
ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΤΟΥ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ.....	70
6.1 Ροή Σκέδασης.....	70
6.2 Απώλειες Χαλκού	70
6.3 Απώλειες υστέρησης.....	71
6.4 Απώλειες Δινορευμάτων	73
7 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7	76
ΤΡΙΦΑΣΙΚΟΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗΣ	76
7.1 Συνδεσμολογίες	76
7.2 Τριφασικοί μετασχηματιστές που περιλαμβάνουν μόνο δύο μετασχηματιστές	84
7.3 Αστέρας.....	85
7.4 Τρίγωνο	85
7.5 Τεθλασμένος αστέρας	85
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8.....	87
ΜΕΘΟΔΟΙ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ	87
8.1 Βελτίωση απόδοσης μέσω της σχεδίασης.....	87
8.2 Βελτίωση απόδοσης μέσω της κατασκευής.....	89
8.3 Βελτίωση απόδοσης μέσω του βοηθητικού εξοπλισμού.....	90
8.4 Βελτίωση απόδοσης μέσω του μεγέθους του.....	90
8.5 Βελτίωση απόδοσης μέσω της λειτουργίας του	92
8.6 Βελτίωση απόδοσης μέσω της συντήρησής του	92
8.7 Βελτίωση απόδοσης με εφαρμογή τεχνικών τεχνητής νοημοσύνης	92
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9.....	94
ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ ΥΨΗΛΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ.....	94
9.1 Σχεδιασμός Αγωγών.....	94
9.2 Η χρήση χάλυβα πυριτίου στον πυρήνα	95

9.3	Η χρήση άμορφου σιδήρου στον πυρήνα	96
9.4	Μετασχηματιστές με συντελεστή K (σταθερά επίδρασης των αρμονικών)	101
9.5	Μετασχηματιστές με υπεραγώγιμα τυλίγματα.....	105
9.6	Τοπολογία	106
ΠΕΡΙΛΗΨΗ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ		109
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....		110

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι ηλεκτρικές εταιρίες βελτιώνουν την αποδοτικότητα των δικτύων μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, μειώνοντας τις απώλειες. Οι βιομηχανικοί και οι εμπορικοί χρήστες της ηλεκτρικής ενέργειας, επίσης, βελτιώνουν την αποδοτικότητα των δικτύων διανομής τους, μειώνοντας τις απώλειες. Η μείωση των απωλειών μεταφοράς και διανομής γίνεται με τις παρακάτω έξι μεθόδους:

- Αντικατάσταση των αγωγών που είναι σε λειτουργία με μεγαλύτερης διατομής αγωγών,
- Αύξηση της τάσης του συστήματος, όπου αυτό είναι αποδεκτό,
- Βελτίωση του συντελεστή ισχύος του συστήματος με προσθήκη π.χ. πυκνωτών,
- Δημιουργία νέων γραμμών μεταφοράς ή αγωγών τροφοδοσίας, δηλαδή με την ορθή επαναδιαμόρφωση του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας,
- Εξισορρόπηση των φορτίων των φάσεων και
- Χρήση ενεργειακά αποδοτικών μετασχηματιστών (χαμηλών απωλειών)

Ενώ μερικές από τις παραπάνω παρεμβάσεις μπορούν να υλοποιηθούν ευκολότερα από κάποιες άλλες, η χρήση των ενεργειακά αποδοτικών Μ/Σ πραγματοποιείται πάντοτε εύκολα. Δεν χρειάζεται μεγάλη τεχνική εμπειρία, προκειμένου να χρησιμοποιηθούν σωστά οι Μ/Σ χαμηλών απωλειών. Η χρήση των ενεργειακά αποδοτικών μετασχηματιστών δεν απαιτεί τη γνώση του τρόπου με τον οποίο έχουν σχεδιαστεί, ούτε και των μεθόδων παραγωγής με τις οποίες έχουν κατασκευαστεί. Εκείνο που είναι απαραίτητο να γνωρίζει ο χρήστης είναι ο τρόπος με τον οποίο θα πρέπει να επιλέξει τον περισσότερο οικονομικό και ταυτόχρονα ενεργειακά αποδοτικό μετασχηματιστή.

Από τη δεκαετία του 1970, το αυξημένο κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας έχει οδηγήσει τις ηλεκτρικές εταιρίες να απαιτούν από τους κατασκευαστές μετασχηματιστών να παράγουν περισσότερο αποδοτικούς μετασχηματιστές, αν και μερικές μικρές ηλεκτρικές εταιρίες καθώς και βιομηχανικοί και εμπορικοί χρήστες μετασχηματιστών συνεχίζουν να χρησιμοποιούν φθηνότερους και μη αποδοτικούς μετασχηματιστές.

Οι σημερινοί μετασχηματιστές είναι περισσότερο αποδοτικοί παρά ποτέ. Νέες τεχνικές κατασκευής και νέοι τύποι μαγνητικών υλικών έχουν οδηγήσει στην κατασκευή οικονομικών και ενεργειακά αποδοτικών μετασχηματιστών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

1.1 Αρχαιότητα



Εικόνα 1.1:Θαλής ο Μιλήσιος.

Οι αρχαίοι πολιτισμοί γύρω από τη Μεσόγειο ήξεραν ότι κάποια αντικείμενα, όπως ράβδοι από κεχριμπάρι, όταν τριφτούν με κάποιο κατάλληλο υλικό όπως, για παράδειγμα, το τρίχωμα της γάτας, έλκουν ελαφρά αντικείμενα, όπως τα πούπουλα. Ο Θαλής ο Μιλήσιος έκανε μια σειρά από παρατηρήσεις πάνω στο στατικό ηλεκτρισμό, γύρω στο 600 π.Χ., από τις οποίες πίστευε ότι η τριβή μετατρέπει (προσωρινά) το κεχριμπάρι σε ένα είδος μαγνήτη, σε αντιδιαστολή με κάποια ορυκτά, όπως ο μαγνητίτης, που είναι μόνιμοι μαγνήτες, χωρίς να χρειάζονται τριβή. Ο Θαλής είχε άδικο όσον αφορά στο ότι η έλξη των πούπουλων από το κεχριμπάρι γινόταν χάρη σε ένα μαγνητικό φαινόμενο, αλλά αργότερα η επιστήμη απέδειξε ότι πράγματι υπάρχει σύνδεση μεταξύ του μαγνητισμού και του ηλεκτρισμού.

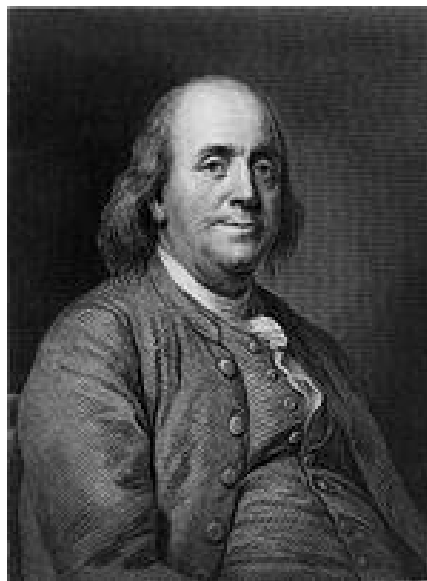
1.2 17^{ος} αιώνας

Ο ηλεκτρισμός θα παρέμενε σαν κάτι περισσότερο από μια διανοητική περιέργεια για πολλούς αιώνες, μέχρι το 1600, οπότε ο Άγγλος επιστήμονας *William Gilbert* έκανε μια προσεκτική μελέτη πάνω στον ηλεκτρισμό και στον μαγνητισμό, διακρίνοντας τον στατικό ηλεκτρισμό που παράγεται από το τρίψιμο κεχριμπαριού από τον μαγνητισμό. Αυτός

επινόησε τη νεολατινική λέξη «*electricus*», από την ελληνική λέξη «*Ηλεκτρον*», που ήταν η αρχαία ελληνική λέξη για το κεχριμπάρι, για να αναφερθεί στην ιδιότητα έλξης μικρών ελαφρών αντικειμένων από άλλα, μετά από τριβή. Ο συσχετισμός αυτός «γέννησε» τις αγγλικές λέξεις «*electric*» και «*electricity*» [που μεταφέρθηκαν αργότερα, ως αντιδάνειο, και στην ελληνική με τις λέξεις «ηλεκτρικός» (επίθετο) και «ηλεκτρισμός» (ουσιαστικό)].

1.3 18^{ος} και 19^{ος} αιώνας

Περαιτέρω εργασία διενεργήθηκε από τον Ότο φον Γκέρικε (*Otto von Guericke*), από τον Ρόμπερτ Μπόιλ (*Robert Boyle*), από τον Στήβεν Γκρέυ (*Stephen Gray*) και τον Σαρλ Φρανσουά ντε Σίστερνυ ντε Φε (*Charles François de Cisternay du Fay*). Τον 18ο αιώνα, ο Βενιαμίν Φραγκλίνος (*Benjamin Franklin*) έκανε εκτεταμένη έρευνα στον ηλεκτρισμό, πουλώντας τα υπάρχοντά του, για να χρηματοδοτήσει το έργο του.



Εικόνα 1.2: Βενιαμίν Φραγκλίνος.

Τον Ιούνιο του 1752 πραγματοποίησε ένα πολύ φημισμένο πείραμα, δένοντας ένα μεταλλικό κλειδί στην ουρά ενός χαρταετού, που πέταξε σε ένα θυελλώδη ουρανό.

Η δημιουργία μιας αλληλουχίας σπινθήρων από το κλειδί ως το χέρι του, που κρατούσε το σκοινί του χαρταετού, απέδειξε ότι η αστραπή

είναι όντως φυσικός (στατικός) ηλεκτρισμός. Επίσης εξήγησε τη φαινομενικά παράδοξη συμπεριφορά του δοχείου Λέιντεν (*Leyden jar*), μιας συσκευής που αποθήκευε, σχετικά, μεγάλες ποσότητες ηλεκτρικού φορτίου.

Το 1791, ο Λουίτζι Γκαλβάνι (*Galvani*) δημοσίευσε την ανακάλυψή του για τον βιοηλεκτρισμό, επιδεικνύοντας ότι διαμέσου των νευρώνων μεταδίδονται ηλεκτρικά σήματα προς τους μύες. Η μπαταρία ή ηλεκτρική στήλη (*voltaic pile*) του Αλεσάντρο Βόλτα (*Alessandro Volta*), το 1800, που κατασκευάστηκε από εναλλασσόμενα ελάσματα ψευδαργύρου και χαλκού, προμήθευσε στους επιστήμονες μια πιο αξιόπιστη πηγή ηλεκτρικής ενέργειας σε σχέση με τις ηλεκτροστατικές γεννήτριες (*electrostatic generator*) που χρησιμοποιούνταν προηγουμένως. Η αναγνώριση του ηλεκτρομαγνητισμού ως μιας ενότητας των ηλεκτρικών και μαγνητικών φαινομένων, άρχισε από τους Χανς Κρίστιαν Έρστεντ (*Hans Christian Ørsted*) και Αντρέ Μαρί Αμπέρ (*André-Marie Ampère*) το 1819-1820. Ο Μάικλ Φαραντέι (*Michael Faraday*) εφηύρε τον ηλεκτρικό κινητήρα, το 1821, και ο Γκέοργκ Ωμ (*Georg Ohm*) ανέλυσε μαθηματικά το ηλεκτρικό κύκλωμα το 1827. Ο ηλεκτρισμός, ο μαγνητισμός και το φως συνδέθηκαν (πλέον) ανεπιφύλακτα από τον Τζέιμς Κλερκ Μάξγουελ (*James Clerk Maxwell*), ιδίως με την εργασία του «Περί των φυσικών δυναμικών γραμμών» (*On Physical Lines of Force*) το 1862 και το 1862.



Εικόνα 1.3: André-Marie Ampère



Εικόνα 1.4: Georg Ohm

Ενώ στις αρχές του 19^{ου} αιώνα παρατηρήθηκε ταχεία πρόοδος στην ηλεκτρική επιστήμη, στα τέλη του 19^{ου} αιώνα παρατηρήθηκε η μεγαλύτερη πρόοδος στην ηλεκτρική μηχανική. Άνθρωποι όπως ο Αλεξάντερ Γκράχαμ Μπελ (*Alexander Graham Bell*), ο Οττό Μπλάθου (*Ottó Bláthy*), ο Τόμας Έντισον (*Thomas Edison*), ο Γαλιλέος Φερράρις (*Galileo Ferraris*), ο Όλιβερ Χέβισαϊντ (*Oliver Heaviside*), ο Άνυος Τζέντλαϊκ (*Ányos Jedlik*), ο Ουίλιαμ Τόμσον (*Lord Kelvin*), ο Τσαρλς Άλγκερον Πάρσονς (*Sir Charles Algernon Parsons*), ο Βέρνερ φον Ζίμενς (*Ernst Werner von Siemens*), ο Τζόζεφ Σουάν (*Joseph Swan*), ο Νίκολα Τέσλα (*Nikola Tesla*) και ο Τζωρτζ Γουέστινγκχαουζ (*George Westinghouse*), μετέτρεψαν τον ηλεκτρισμό από θέμα απλής επιστημονικής περιέργειας σε νευραλγικής σημασίας εργαλείο της σύγχρονης ζωής και την κινητήρια δύναμη της Δεύτερης Βιομηχανικής Επανάστασης.

Το 1887, ο Χάινριχ Χερτζ (*Heinrich Hertz*) ανακάλυψαν ότι τα ηλεκτρόδια που φωτίζονται με υπεριώδες φως παράγουν ευκολότερα ηλεκτρικούς σπινθήρες.

1.4 20^{ός} αιώνας

Το 1905, ο Άλμπερτ Αϊνστάιν δημοσίευσε ένα φυλλάδιο που εξηγούσε πειραματικά δεδομένα από το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο ως αποτέλεσμα της επίδρασης της ενέργειας του φωτός που μεταφέρεται σε διακριτά κβαντισμένα πακέτα, ενεργοποιώντας ηλεκτρόνια. Αυτή η ανακάλυψη οδήγησε την «κβαντική επανάσταση». Ο Αϊνστάιν βραβεύθηκε με το Βραβείο Νόμπελ Φυσικής του 1921 για αυτήν την ανακάλυψη. Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο επίσης εμπλέκεται στα φωτοκύτταρα και στα φωτοβολταϊκά και με αυτές τις μορφές χρησιμοποιήθηκε συχνά σε εμπορικά αξιοποιήσιμες εφαρμογές.

Η πρώτη ηλεκτρονική συσκευή στερεάς κατάστασης ήταν ο «ανιχνευτής σύρμα γάτας», που χρησιμοποιήθηκε τη δεκαετία του 1900 σε δέκτες ραδιοσημάτων. Ένα μυστακοειδές σύρμα τοποθετούνταν σε ελαφρά επαφή με ένα στερεό κρύσταλλο (όπως ένας κρύσταλλος γερμανίου) με σκοπό να ανιχνευθεί ένα σήμα ραδιοκυμάτων με το φαινόμενο διασταύρωσης. Σε συστατικά στερεής κατάστασης το φαινόμενο επιβεβαιώνεται τόσο στερεά χημικά στοιχεία και ενώσεις που διαμορφώνονται ειδικά στο να εφαρμόζουν και να διακόπτουν την παροχή του έτσι παραγόμενου ηλεκτρικού ρεύματος. Το ηλεκτρικό ρεύμα διαδίδεται με δυο κατανοητές μορφές: α) Με αρνητικά φορτισμένα ηλεκτρόνια και β) με θετικά φορτισμένα ηλεκτρονιακά κενά, που ονομάζονται «τρύπες». Αυτά τα φορτία και οι τρύπες είναι κατανοητά σε όρους κβαντικής φυσικής. Το δομικό υλικό αυτών είναι συχνά ένας κρυσταλλικός ημιαγωγός.

1.5 Ο ηλεκτρισμός στην Ελλάδα

Το 1889 φτάνει το "ηλεκτρικό" στην Ελλάδα. Η Γενική Εταιρεία Εργοληψιών, κατασκευάζει στην Αθήνα, στην οδό Αριστείδου, την πρώτη μονάδα παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος. Το πρώτο κτίριο που φωτίζεται είναι τα Ανάκτορα και πολύ σύντομα ο ηλεκτροφωτισμός επεκτείνεται στο ιστορικό κέντρο της Πρωτεύουσας. Τον ίδιο χρόνο η τουρκοκρατούμενη Θεσσαλονίκη θα δει κι αυτή το ηλεκτρικό φως καθώς Βελγική Εταιρία αναλαμβάνει απ' τις Τουρκικές αρχές το φωτισμό και την τροchioδρόμηση της Πόλης με την κατασκευή εργοστασίου παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Δέκα χρόνια αργότερα οι πολυεθνικές εταιρίες ηλεκτρισμού κάνουν την εμφάνισή τους στην Ελλάδα. Η αμερικανική εταιρία Thomson-Houston με τη συμμετοχή της Εθνικής Τράπεζας θα ιδρύσει την Ελληνική Ηλεκτρική Εταιρία που θα αναλάβει την ηλεκτροδότηση κι άλλων μεγάλων Ελληνικών πόλεων. Μέχρι το 1929 θα ηλεκτροδοτηθούν 250 πόλεις με πληθυσμό πάνω από 5.000 κατοίκους.

Στις πιο απόμακρες περιοχές, που ήταν ασύμφορο για τις μεγάλες εταιρίες να κατασκευάσουν μονάδες παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος, την ηλεκτροδότηση αναλαμβάνουν ιδιώτες ή δημοτικές και κοινοτικές αρχές κατασκευάζοντας μικρά εργοστάσια.

Το 1950 υπήρχαν στη Ελλάδα 400 περίπου εταιρείες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η πρώτη ύλη που χρησιμοποιούσαν ήταν το πετρέλαιο και ο γαιάνθρακας που φυσικά εισάγονταν από το εξωτερικό.

Η κατάτμηση αυτή της παραγωγής, σε συνδυασμό με τα εισαγόμενα καύσιμα, εξωθούσε την τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος στα ύψη (τριπλάσιες ή και πενταπλάσιες τιμές απ' αυτές που ίσχυαν στις Ευρωπαϊκές χώρες). Το ηλεκτρικό λοιπόν ήταν ένα αγαθό πολυτελείας, αν και τις περισσότερες φορές παρεχόταν με ωράριο και οι ξαφνικές διακοπές ήταν σύνηθες φαινόμενο.

Για να εξαπλωθεί η ηλεκτρική ενέργεια ομοιόμορφα σε όλη τη χώρα και για να αξιοποιηθεί αποτελεσματικά τόσο στη βιομηχανία όσο και στην ύπαιθρο, έπρεπε να υπάρξουν οι εξής προϋποθέσεις:

- Αξιοποίηση των εγχώριων πλουτοπαραγωγικών πόρων, που απαιτούσε όμως τεράστιες επενδύσεις, οι οποίες δεν μπορούσαν να πραγματοποιηθούν από τους μεμονωμένους βιομηχάνους παραγωγής ενέργειας.
- Ενοποίηση της παραγωγής σε ενιαίο διασυνδεδεμένο δίκτυο, ώστε τα φορτία να επιμερίζονται σε εθνική κλίμακα.
- Ύπαρξη ενιαίου φορέα που θα επέτρεπε τον επιμερισμό του κόστους ανάμεσα στις κερδοφόρες και ζημιογόνες περιοχές. Τις προϋποθέσεις αυτές κάλυψε η ΔΕΗ με τον πλέον επιτυχή τρόπο.

Έτσι τον Αύγουστο του 1950 ιδρύεται η Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού, για να λειτουργήσει "χάριν του δημοσίου συμφέροντος" με σκοπό τη χάραξη και εφαρμογή μιας εθνικής ενεργειακής πολιτικής, η οποία μέσα από την εντατική εκμετάλλευση των εγχώριων πόρων, να κάνει το ηλεκτρικό ρεύμα κτήμα και δικαίωμα του κάθε Έλληνα πολίτη, στη φθηνότερη δυνατή τιμή.

Αμέσως με την ίδρυσή της, η ΔΕΗ στρέφεται προς την αξιοποίηση των εγχώριων πηγών ενέργειας ενώ ξεκινά και η ενοποίηση των δικτύων σε ένα εθνικό διασυνδεδεμένο σύστημα. Τα πλούσια λιγνιτικά κοιτάσματα του ελληνικού υπεδάφους που είχαν νωρίτερα εντοπισθεί, άρχισαν να εξορύσσονται και να χρησιμοποιούνται ως καύσιμη ύλη στις λιγνιτικές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής που δημιουργούσε. Παράλληλα, η Επιχείρηση ξεκίνησε την αξιοποίηση της δύναμης των υδάτων με την κατασκευή υδροηλεκτρικών σταθμών στα μεγάλα ποτάμια της χώρας.

Αρκετά νωρίς, το 1956, αποφασίστηκε η εξαγορά όλων των ιδιωτικών και δημοτικών επιχειρήσεων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ώστε να υπάρχει ένας ενιαίος φορέας διαχείρισης. Σιγά-σιγά, η ΔΕΗ εξαγόρασε όλες αυτές τις επιχειρήσεις και ενέταξε το προσωπικό τους στις τάξεις της.

Σ' όλα αυτά τα χρόνια της παρουσίας της, αγωνίστηκε και πέτυχε την ενεργειακή αυτονομία της χώρας και έφερε σε πέρας το σπουδαίο έργο του εξηλεκτισμού της δημιουργώντας ταυτόχρονα το μεγαλύτερο μέρος της βαριάς ελληνικής βιομηχανίας.

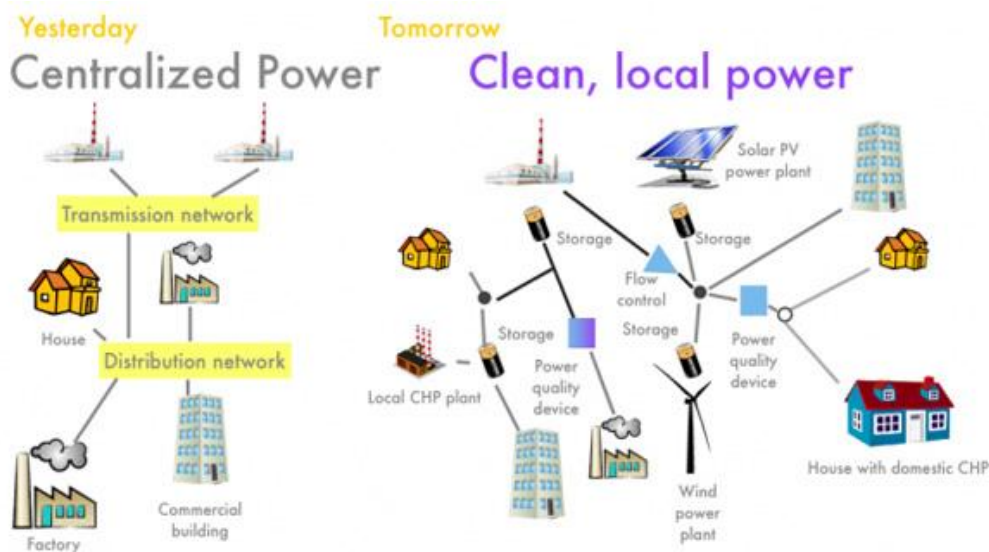
Το ηλεκτρικό ρεύμα έφτασε με επάρκεια σε κάθε άκρη της ελληνικής γης. Από τα μικρά ακριτικά νησιά μας ως τους πιο απόμακρους οικισμούς της ορεινής Ελλάδας.

Επί του παρόντος, **το 50%** της συνολικής παραγωγής προέρχεται από καύση λιγνίτη, **το 10%** από πετρέλαιο, **το 17%** από φυσικό αέριο, **το 10%** από υδροηλεκτρικούς σταθμούς, **το 6%** από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) και **το 7%** από διασυνδέσεις.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ

Η διεσπαρμένη παραγωγή ορίζεται ως η παραγωγή ενέργειας μικρής κλίμακας, με τιμές που κατά κανόνα κυμαίνονται από 1kW μέχρι 100MW και είναι μία σχετικά καινούρια τάση στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας. Πιο απλά όταν αναφερόμαστε στη διεσπαρμένη παραγωγή εννοούμε ότι μονάδες παραγωγής ενέργειας έχουν εγκατασταθεί κοντά στο σημείο κατανάλωσης (φορτίο).



Εικόνα 2.1: Η υπάρχουσα διάταξη της παραγωγής και η μελλοντική διάταξη της διεσπαρμένης παραγωγής

2.1 Λόγοι Ανάπτυξης Διεσπαρμένης Παραγωγής

Οι πέντε κυριότεροι λόγοι που οδήγησαν σε αυτήν την εξέλιξη είναι:

- § Η ανάπτυξη στις τεχνολογίες διεσπαρμένης παραγωγής,
- § Οι περιορισμοί στην κατασκευή νέων γραμμών μεταφοράς,
- § Οι αυξημένες απαιτήσεις των καταναλωτών για αξιόπιστη ενέργεια,
- § Η απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας και οι ανησυχίες για τις παγκόσμιες κλιματικές αλλαγές
- § Μέσω του πρωτόκολλου του Κιότο και προβλέπει μείωση των εκπομπών αερίων στο διάστημα 2008-2012 κατά 5.2% σε σχέση με τα επίπεδα του 1990.

2.2 Δεδομένα Διεσπαρμένης Παραγωγής

Η άρση του ελέγχου της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας δίνει την ευκαιρία να συνδεθούν όλο και περισσότερες διεσπαρμένες γεννήτριες στα δίκτυα διανομής. Η διεσπαρμένη παραγωγή ενέργειας έχει διάφορες επιπτώσεις στη λειτουργία των συστημάτων ισχύος. Τα ηλεκτρικά δίκτυα σχεδιάστηκαν για να μεταφέρουν την ενέργεια με μονοκατευθυντική ροή από τις συγκεντρωμένες εγκαταστάσεις παραγωγής στους πελάτες μέσω των δικτύων μεταφοράς και διανομής. Η παραγωγή ενέργειας από διεσπαρμένες πηγές μπορεί να αλλάξει την κατεύθυνση της ροής της ισχύος στα δίκτυα διανομής επηρεάζοντας ολόκληρη τη λειτουργία του συστήματος.

2.3 Προσέγγιση και Απόφαση Εγκατάστασης

Πριν αποφασίσει κάποιος να εγκαταστήσει τεχνολογίες διεσπαρμένης παραγωγής, είναι σημαντικό να:

- § Ξεκαθαρίσει τους λόγους για τους οποίους χρειάζεται τη διεσπαρμένη παραγωγή.
- § Προσδιορίσει τις τωρινές και μελλοντικές τεχνολογικές επιλογές.
- § Εκτιμήσει το κόστος και την εξοικονόμηση χρημάτων.
- § Κατανοήσει τους κανονισμούς και τη διαδικασία ανάπτυξης του έργου.
- § Κατανοήσει το ρίσκο και την αβεβαιότητα σε κάποιες τεχνολογίες.

2.4 Τύποι τεχνολογιών διεσπαρμένης παραγωγής (DER) - I

Οι τεχνολογίες DER αποτελούνται κυρίως από συστήματα παραγωγής ενέργειας και συστήματα αποθήκευσης που τοποθετούνται στον τελικό χρήστη ή κοντά σε αυτόν.

§ *Μικροτουρμπίνες*

Οι μικροτουρμπίνες είναι μικρές τουρμπίνες που παράγουν ισχύ μεταξύ 25 και 500 kW. Οι μικροτουρμπίνες προήλθαν από τεχνολογίες που υπήρχαν σε μεγάλα φορτηγά ή στις τουρμπίνες των αεροσκαφών.

§ *Τουρμπίνες εσωτερικής καύσης*

Οι παραδοσιακές τουρμπίνες παράγουν ισχύ μεταξύ 500 kW και 25 MW για DER, και μέχρι 250 MW για κεντρική παραγωγή ισχύος. Το καύσιμο που χρησιμοποιούν είναι φυσικό αέριο, πετρέλαιο ή ένας συνδυασμός καυσίμων. Οι σύγχρονες τουρμπίνες έχουν αποδόσεις που κυμαίνονται από 20 έως 45% στο πλήρες φορτίο.

2.5 Τύποι τεχνολογιών διασπαρμένης παραγωγής (DER) -II

§ *Μηχανές εσωτερικής καύσης*

Μια μηχανή εσωτερικής καύσης μετατρέπει την ενέργεια που περιέχεται σε κάποιο καύσιμο σε μηχανική ενέργεια. Αυτή η μηχανική ενέργεια χρησιμοποιείται για την περιστροφή ενός άξονα μέσα στη μηχανή. Μια γεννήτρια συνδέεται με τη μηχανή εσωτερικής καύσης για τη μετατροπή της περιστροφικής κίνησης σε ηλεκτρική ενέργεια. Είναι διαθέσιμες από μικρά μεγέθη (5kW για εφεδρική γεννήτρια σε κατοικίες) μέχρι μεγάλες γεννήτριες (7 MW). Οι μηχανές εσωτερικής καύσης χρησιμοποιούν διαθέσιμα καύσιμα όπως βενζίνη, φυσικό αέριο και diesel.

§ *Μηχανές Stirling*

Οι μηχανές Stirling έχουν κατηγοριοποιηθεί ως μηχανές εξωτερικής καύσης. Είναι σφραγισμένα συστήματα με ένα αδρανές αέριο που θέτει σε λειτουργία τη μηχανή, συνήθως ήλιο ή υδρογόνο. Συνήθως είναι διαθέσιμες σε μικρά μεγέθη (1-25 kW) και προς το παρόν παράγονται σε μικρές ποσότητες για εξειδικευμένες εφαρμογές στη διαστημική και τη θαλάσσια βιομηχανία.

2.6 Τύποι τεχνολογιών διασπαρμένης παραγωγής (DER) -III

§ *Κυψέλες καυσίμου*

Τα συστήματα ισχύος με κυψέλες καυσίμου είναι αθόρυβα, καθαρά και αποδοτικά τοπικά συστήματα παραγωγής που χρησιμοποιούν μια ηλεκτροχημική διεργασία – όχι καύση – για τη μετατροπή του καυσίμου σε ηλεκτρισμό. Επιπροσθέτως της παροχής ενέργειας, μπορούν να προσφέρουν μια πηγή θερμικής ενέργειας για τη θέρμανση του χώρου και του νερού ή για ψύξη απορρόφησης. Σε κάποιες έρευνες έχει αποδειχθεί ότι οι κυψέλες καυσίμου μειώνουν το κόστος για τις υπηρεσίες ηλεκτρισμού 20 με 40%.

§ *Αποθήκευση ενέργειας / Συστήματα UPS*

Οι τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας δεν παράγουν καθαρή ενέργεια αλλά μπορούν να προμηθεύουν ηλεκτρική ενέργεια για μικρά χρονικά διαστήματα. Χρησιμοποιούνται για τη διόρθωση πτώσεων τάσης, flicker και έντονης κυμάτωσης που συμβαίνουν όταν η εταιρία παροχής ή οι πελάτες αλλάζουν προμηθευτές ή φορτία. Μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν ως Συστήματα Αδιαλείπτου Τροφοδοσίας (UPS). Σαν τέτοια, οι τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας θεωρούνται τεχνολογίες διασπαρμένης παραγωγής.

2.7 Τύποι τεχνολογιών διασπαρμένης παραγωγής (DER) - IV

§ *Φωτοβολταϊκά Συστήματα*

Τα φωτοβολταϊκά κελιά (PV), ή αλλιώς ηλιακά κελιά, μετατρέπουν απευθείας το φως του ήλιου σε ηλεκτρική ενέργεια. Συγκεντρώνονται σε επίπεδα πάνελ τα οποία μπορούν να τοποθετηθούν σε ταράτσες ή άλλες ηλιόλουστες περιοχές. Παράγουν ηλεκτρισμό χωρίς να έχουν κινούμενα μέρη, λειτουργούν αθόρυβα και χωρίς εκπομπές.

§ *Αιολικά συστήματα*

Οι ανεμογεννήτριες χρησιμοποιούν τον άνεμο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Μια τουρμπίνα με πτερωτές τοποθετείται στην κορυφή ενός ψηλού πύργου. Ο πύργος είναι ψηλός ούτως ώστε να εκμεταλλευόμαστε τη μεγαλύτερη ταχύτητα του ανέμου, απαλλαγμένη από τις αναταράξεις που προέρχονται από τη μεσολάβηση εμποδίων όπως δέντρα, λόφοι και κτίρια. Όπως περιστρέφεται η τουρμπίνα με τον άνεμο, μια γεννήτρια παράγει ηλεκτρική ενέργεια. Μια ανεμογεννήτρια μπορεί να ποικίλλει σε μέγεθος από λίγα kW σε οικιακές εφαρμογές έως πάνω από 5 MW.

2.8 Τύποι τεχνολογιών διασπαρμένης παραγωγής (DER) - V

§ *Υβριδικά συστήματα*

Παραγωγοί και κατασκευαστές τεχνολογιών διασπαρμένης παραγωγής αναζητούν τρόπους να συνδυάσουν τεχνολογίες για να βελτιώσουν τις επιδόσεις και την απόδοση του εξοπλισμού διασπαρμένης παραγωγής. Κάποια παραδείγματα υβριδικών συστημάτων είναι:

- Μηχανή Stirling συνδυασμένη με ένα ηλιακό πιάτο.
- Κυψέλη καυσίμου στερεού οξειδίου συνδυασμένη με μια τουρμπίνα αερίου ή μικροτουρμπίνα.
- Ανεμογεννήτριες με μπαταρία αποθήκευσης και εφεδρικές γεννήτριες diesel.

2.9 Πλεονεκτήματα που προσφέρει η εγκατάσταση DER σε διάφορους τομείς.

Αισθητικά

- § Βελτιώνει την εικόνα συστημάτων ανεξάρτητων από το δίκτυο εξαλείφοντας την ανάγκη για υπέργεια καλώδια.

Οικονομικά:

- § Οδηγεί σε μείωση του κόστους μειώνοντας τη ζήτηση αιχμής σε μια εγκατάσταση και συνεπώς μειώνει τις χρεώσεις ζήτησης.
- § Προσφέρει πιο προβλέψιμο ενεργειακό κόστος (μικρότερο ρίσκο) εισάγοντας ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Λειτουργικά:

- § Προσφέρει μεγαλύτερη αξιοπιστία και ποιότητα ισχύος, ειδικά σε περιοχές όπου οι διακυμάνσεις τάσης είναι συχνές ή όπου η ενέργεια που παρέχεται από το δίκτυο δεν είναι αξιόπιστη.
- § Διευκολύνει βελτιώσεις στην απόδοση του εξοπλισμού DER όταν χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με εξοπλισμό συμπαραγωγής π.χ θέρμανσης.
- § Προσφέρει ενέργεια σε απομακρυσμένες περιοχές όπου η επιλογή των παραδοσιακών γραμμών διανομής δεν είναι δυνατή. Τέτοιες περιοχές όπως πύργοι κεραιών, μικρά απομακρυσμένα χωριά ή πλατφόρμες άντλησης πετρελαίου στον ωκεανό βρίσκονται εκτός του ηλεκτρικού δικτύου και επωφελούνται από τη διασπαρμένη παραγωγή ως βασική πηγή ενέργειας.

Λειτουργικά:

- § Μειώνει την υπερφόρτωση των γραμμών διανομής
- § Αυξάνει την αξιοπιστία του δικτύου
- § Η λήψη άδειας για τεχνολογίες DER είναι ταχύτερη συγκριτικά με την αναβάθμιση των γραμμών διανομής
- § Προσφέρει κάποια δευτερεύοντα οφέλη όπως σταθερότητα, διασφάλιση από απρόοπτα και δυνατότητα «black start» (η δυνατότητα μιας μονάδας παραγωγής κατά τη διάρκεια της αποκατάστασης του συστήματος να μεταβεί από απενεργοποιημένη κατάσταση σε κατάσταση λειτουργίας και να αρχίσει να παράγει ενέργεια χωρίς να υποβοηθηθεί από το ηλεκτρικό σύστημα.

Στην κατεύθυνση της παραγωγής:

- § Ανταποκρίνεται γρηγορότερα σε νέες απαιτήσεις ισχύος.
- § Ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά της διασπαρμένης παραγωγής είναι ότι οι αυξομειώσεις στην εγκατεστημένη ισχύ μπορούν να γίνουν με μικρές προσαυξήσεις, σε πλήρη συμφωνία με τη ζήτηση σε αντίθεση με την κατασκευή μεγάλων, κεντρικών εργοστασίων ενέργειας κατασκευασμένων για την κάλυψη μελλοντικής κυρίως και όχι τρέχουσας ζήτησης.

Ασφαλείας:

- § Ενδυναμώνει την ενεργειακή ασφάλεια – εφεδρική ενέργεια.

Στην κατεύθυνση της αειφόρου ανάπτυξης:

- § Προσφέρει καθαρότερη, πιο αθόρυβη λειτουργία και μειώνει τις εκπομπές για κάποιες τεχνολογίες (π.χ. τεχνολογίες που εκμεταλλεύονται την ηλιακή ενέργεια και τον άνεμο και κυψέλες καυσίμου).
- § Μειώνει ή αναβάλλει τις αναβαθμίσεις των έργων υποδομής (γραμμές και υποσταθμοί)
- § Επιτρέπει την πιο αποτελεσματική οικονομική διαχείριση ενέργειας και φορτίου.

2.10 Επιδράσεις Διεσπαρμένης Παραγωγής

Τα τελευταία χρόνια έχει δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στις επιδράσεις από την επικείμενη διασπαρμένη παραγωγή ενέργειας.

- § Αλλαγές στο επίπεδο της τάσης των δικτύων
- § Ποιότητα της παραγόμενης ισχύος
- § Μεταβολή των ρευμάτων από σφάλματα του δικτύου- αλλαγή του επιπέδου βραχυκύκλωσης.
- § Τροποποίηση των μηχανισμών προστασίας του δικτύου.
- § Αύξηση των παραγόμενων αρμονικών στο δίκτυο από τους ηλεκτρονικούς μετατροπείς ισχύος.
- § Επιπτώσεις στην ευστάθεια του συστήματος

2.11 Μεταβολή Τάσης

Έχουν αναπτυχθεί αρκετές τεχνικές για την διατήρηση της τάσεως στα επιθυμητά όρια.

- § Κυρίως ρυθμίζεται ο λόγος μέσης /χαμηλής τάσης του μετασχηματιστή του υποσταθμού ώστε να διατηρείται η τάση στα επιθυμητά όρια.
- § Η αντίστροφη ροή ισχύος και η προκαλούμενη ανύψωση της τάσης μπορεί να περιοριστεί είτε αναστρέφοντας την ροή αέργου ισχύος χρησιμοποιώντας ασύγχρονες γεννήτριες ή υποδιεγείροντας τις σύγχρονες γεννήτριες.
- § Σε πολλά δίκτυα χρησιμοποιούνται εξελιγμένες τεχνικές ελέγχου της τάσης μέσω ρύθμισης των λήψεων του αυτομετασχηματιστή σύμφωνα με την εκτίμηση της πτώσης τάσης από μετρήσεις του ρεύματος.

§ Ανάγκη να καθιερωθούν στοχαστικά όρια για την διακύμανση της τάσης, όπως π.χ. γίνεται στο πρότυπο *EN 50160*

2.12 Ποιότητα Ισχύος

Για τον χαρακτηρισμό της ποιότητας της ισχύος λαμβάνονται υπόψη κυρίως δυο παράγοντες :Οι μεταβατικές διακυμάνσεις της τάσης και η παρουσία αρμονικών στο δίκτυο.

Ένα σημαντικό ζήτημα για την ποιότητα ισχύος είναι οι βυθίσεις της τάσης που ορίζονται ως μειώσεις της τάσης (από *10% έως και το 90% της ονομαστικής τιμής*) σε χρονικά διαστήματα μεταξύ μισού κύκλου μέχρι και αρκετών λεπτών. Εάν κατά την ζεύξη/ απόζευξη των γεννητριών επιτρέπεται η ανταλλαγή μεγάλων ρευμάτων με το δίκτυο τότε μπορεί να εμφανιστούν μεταβατικές διαταραχές στην τάση του δικτύου. Τα προβλήματα αυτά μπορούν να περιοριστούν με την χρήση κατάλληλων ηλεκτρονικών διατάξεων και σωστό συγχρονισμό των σύγχρονων γεννητριών κατά την ζεύξη τους με το σύστημα.

2.13 Επιπτώσεις Διεσπαρμένης Παραγωγής

Μερικές από τις σχετικές επιπτώσεις στη λειτουργία του συστήματος λόγω της ύπαρξης διεσπαρμένων γεννητριών στο δίκτυο είναι:

- § Η συνεισφορά στο ρεύμα βραχυκύκλωσης από τις διεσπαρμένες γεννήτριες θα μπορούσε να προκαλέσει την αποσύνδεση υγιών γραμμών στις οποίες συνδέονται διεσπαρμένες γεννήτριες λόγω της γρήγορης αντίδρασης των υπέργειων γραμμών μέσης τάσης σε σφάλματα του δικτύου.
- § Σε μερικές περιπτώσεις όπου οι διεσπαρμένες γεννήτριες παραμένουν συνδεδεμένες σε μια ελαττωματική γραμμή, θα μπορούσαν να διατηρήσουν τη γραμμή διεγερμένη και να αποτρέψουν την αυτό-απόσβεση σφαλμάτων με την μορφή τόξου.
- § Μπορεί να γίνει αυτόματη επανάζευξη της γραμμής ενώ οι γεννήτριες έχουν χάσει το συγχρονισμό τους με το δίκτυο, με ενδεχόμενες καταστροφικές συνέπειες για τις γεννήτριες.

2.14 Μειονεκτήματα Διεσπαρμένης Παραγωγής

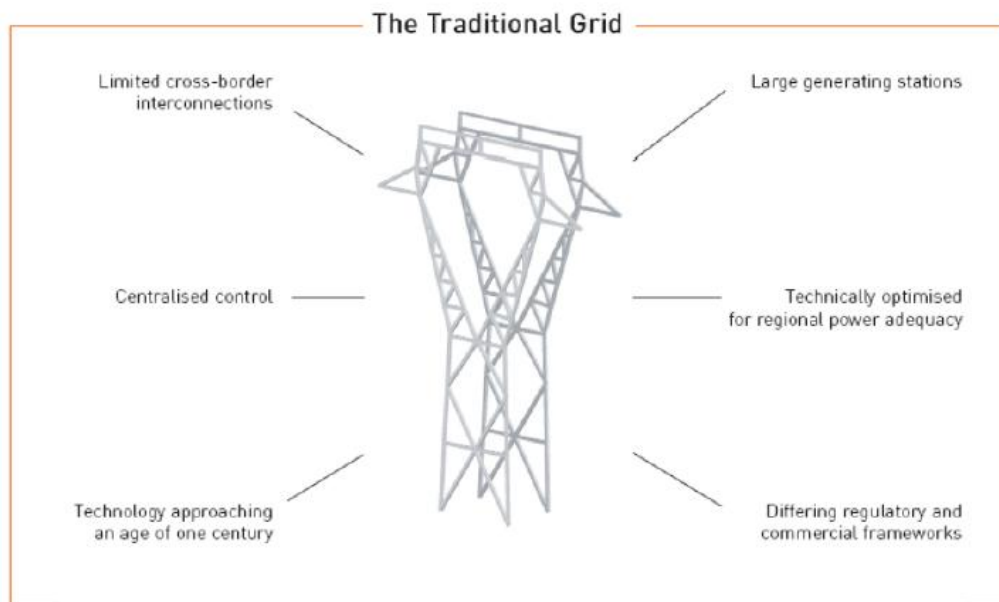
- § Ένα από τα βασικότερα ζητήματα που προκύπτει είναι το υψηλό κόστος. Συγκεκριμένα, αναφέρεται ότι το σημαντικότερο είναι το υψηλό κόστος κεφαλαίου ανά kW εγκατεστημένης ισχύος συγκριτικά με τα μεγάλα κεντρικά εργοστάσια παραγωγής.
- § Διαφορές όμως υπάρχουν και στα κόστη κεφαλαίου για διαφορετικές τεχνολογίες διεσπαρμένης παραγωγής και μπορούν

να ποικίλλουν από 1000 ευρώ/kW έως 20000 ευρώ/kW στις τουρμπίνες καύσης και τις κυσέλες καυσίμου αντίστοιχα.

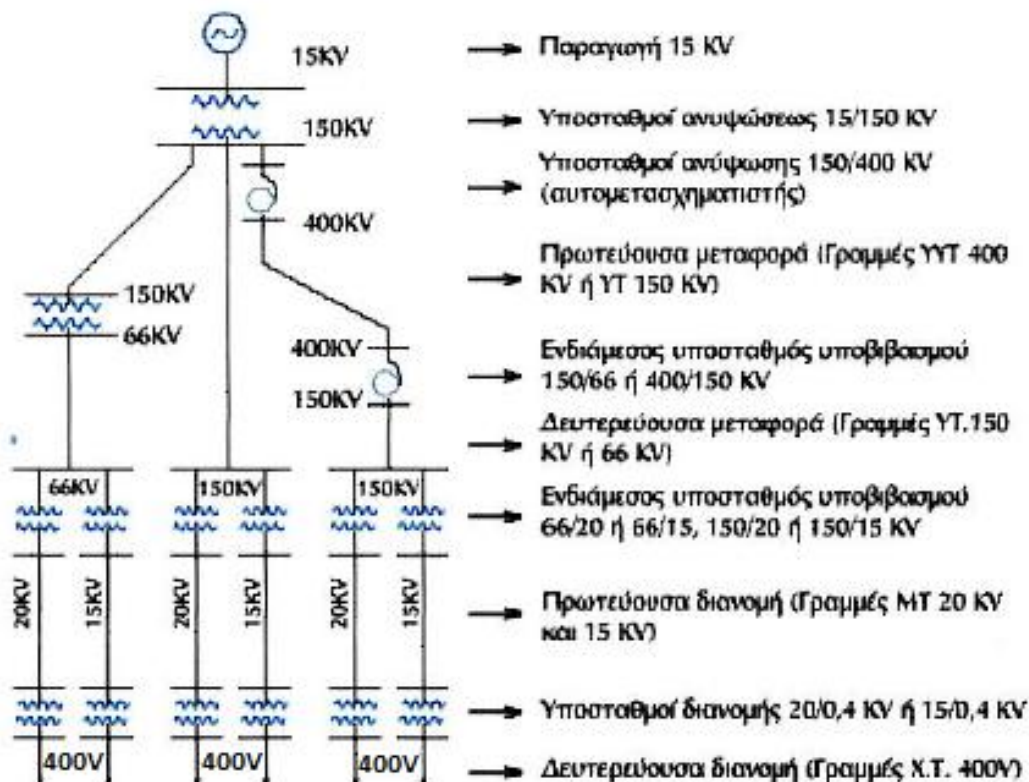
- § Το φαινόμενο της νησιδοποίησης, όπου σε περίπτωση σφάλματος οι καταναλωτές παραγωγές δεν αποσυνδέονται από το δίκτυο και συνεχίζουν να τροφοδοτούν, παρόλο που το μέσο προστασίας της γραμμής έχει επενεργήσει.

2.15 Η μετάβαση από το σήμερα στο αύριο

- § Τα υπάρχοντα δίκτυα βασίζονται κυρίως σε μεγάλους κεντρικούς σταθμούς παραγωγής που συνδέονται με συστήματα μεταφοράς υψηλής τάσης τα οποία με τη σειρά τους συνδέονται με συστήματα μέσης και χαμηλής δίκτυα.
- § Η διανομή και η μεταφορά της ενέργειας γίνεται κατά κύριο λόγο μονοπωλιακά από δημόσιους φορείς ενώ αντίθετα στον τομέα παραγωγής είναι δυνατόν να υπάρχει μεγάλος ανταγωνισμός.
- § Η παροχή ισχύος και ο έλεγχος του δικτύου γίνονται στα σημερινά δίκτυα από κεντρικές εγκαταστάσεις. Υπάρχει λίγο έως καθόλου συμμετοχή του καταναλωτή και απουσιάζει εντελώς η επικοινωνία.
- § Οι διασυνδέσεις αναπτύχθηκαν κυρίως για αμοιβαία υποστήριξη μεταξύ χωρών και περιφερειών σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης.

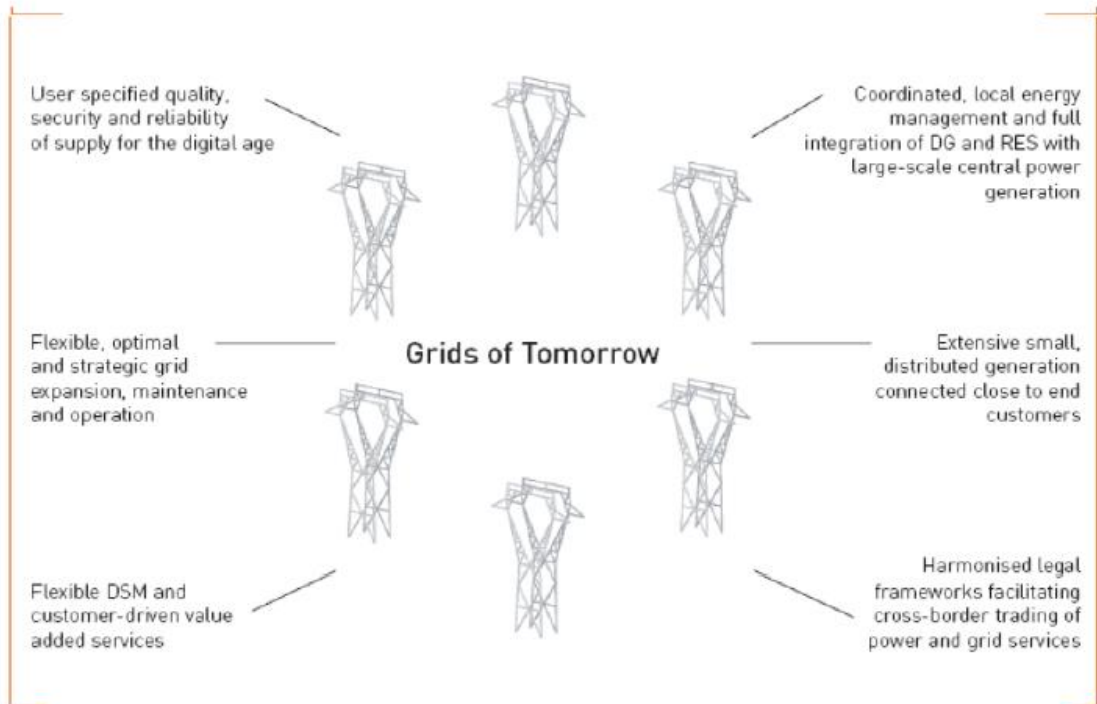


Εικόνα 2.2: Το παραδοσιακό δίκτυο και τα μειονεκτήματά του



Εικόνα 2.3: Η δομή του παραδοσιακού δικτύου

- § Τα μελλοντικά δίκτυα διανομής θα έχουν ενεργητικό ρόλο και πρέπει να εξασφαλίζουν αμφίδρομη ροή ισχύος. Τα Ευρωπαϊκά σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας λειτουργούν πλέον σε ένα πλαίσιο μοντέλου αγοράς στο οποίο οι μονάδες παραγωγής διανέμονται σύμφωνα με τις απαιτήσεις της κάθε αγοράς και το κέντρο ελέγχου του δικτύου αναλαμβάνει ένα γενικό ρόλο εποπτείας.
- § Μια μεγάλη ποσότητα ηλεκτρισμού που παράγεται από μεγάλους συμβατικούς σταθμούς παραγωγής θα προέρχεται από διεσπαρμένη παραγωγή και ΑΠΕ. Παράλληλα είναι δυνατό να χρειασθεί η ύπαρξη εφεδρείας σε περίπτωση ελλιπούς παραγωγής από ανανεώσιμες πηγές.
- § Αυτό προϋποθέτει πολλές αλλαγές στα υπάρχοντα δίκτυα διανομής και μεταφοράς αφού πολλές διασυνδέσεις και καλή επικοινωνία είναι απαραίτητη.



Εικόνα 2.4: Τα μελλοντικά δίκτυα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΑΝΤΙΣΤΑΘΜΙΣΗ ΑΕΡΓΟΥ ΙΣΧΥΟΣ -ΔΙΟΡΘΩΣΗ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΙΣΧΥΟΣ

Ο κύριος τρόπος αντιμετώπισης της άεργου είναι με την τοποθέτηση πυκνωτών παράλληλα με τα επαγωγικά φορτία, έτσι ώστε η ενέργεια να μην μεταφέρεται από τις εγκαταστάσεις της ΔΕΗ στις εγκαταστάσεις των καταναλωτών. Η μεταφορά άεργου ισχύος δημιουργεί ένα επιπρόσθετο ρεύμα στις γραμμές μεταφοράς και έτσι αυξάνονται και οι απώλειες του δικτύου. Σκοπός της τοπικής αντιστάθμισης, δηλαδή την εισαγωγή πυκνωτών στους καταναλωτές είναι όχι μόνο η μείωση της άεργου ισχύος που απορροφά μια ηλεκτρική εγκατάσταση από τη ΔΕΗ, αλλά και μείωση των προαναφερθέντων απωλειών.

Μια βιομηχανική ηλεκτρική εγκατάσταση περιλαμβάνει ένα σημαντικό αριθμό καταναλώσεων μεγάλης ισχύος όπως: ηλεκτρικοί κινητήρες, φωτιστικά σώματα φθορισμού, λαμπτήρες εκφορτίσεως υψηλής έντασης (λαμπτήρες υδραργύρου υψηλής πίεσης και λαμπτήρες νατρίου χαμηλής και υψηλής πίεσης), κυκλώματα τροφοδοτημένα από μετασχηματιστές ισχύος. Η συμπεριφορά όλων των παραπάνω φορτίων αποκλίνει σημαντικά από αυτή της ωμικής αντίστασης. Στη ουσία η φύση των καταναλώσεων αυτών είναι επαγωγική με άμεσο αποτέλεσμα την εμφάνιση σημαντικής ποσότητας άεργου ισχύος. Θεωρήσουμε ότι το ισοδύναμο κύκλωμα ανά φάση της συνολικής ηλεκτρικής εγκατάστασης ή ενός επιμέρους φορτίου περιγράφεται με την βοήθεια μιας ωμικής αντίστασης R και μιας αυτεπαγωγής L .

Η ισχύς η οποία είναι υπεύθυνη για την παραγωγή ωφέλιμου έργου σε μια ηλεκτρική εγκατάσταση ή σε ένα επιμέρους φορτίο είναι η πραγματική ή αλλιώς μέση ή ενεργός ισχύς P

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi$$

Είναι φανερό ότι η πραγματική ισχύς εξαρτάται ιδιαιτέρως από την τιμή του $\cos \varphi$, μέγεθος που υποδηλώνει την φύση του φορτίου (επαγωγικό) ή με άλλα λόγια το συνημίτονο της διαφοράς φάσης μεταξύ της τάσης και του ρεύματος που απορροφά μια κατανάλωση. Στην πραγματικότητα, δεδομένου ότι η τάση τροφοδοσίας και το $\cos \varphi$ (συντελεστής μετατόπισης ή συντελεστής ισχύος όταν δεν υπάρχουν αρμονικές συνιστώσες) είναι σταθερά, το φορτίο θα απορροφήσει το ρεύμα που χρειάζεται ώστε να αποδώσει το έργο για το οποίο προορίζεται.

Επομένως, εάν το $\cos\phi$ έχει μικρή τιμή (ισχυρά επαγωγικό φορτίο) το ρεύμα θα αυξηθεί αρκετά συγκρινόμενο με την περίπτωση που το φορτίο ήταν καθαρά ωμικό. Η αυξημένη τιμή ρεύματος λόγω της επαγωγικής φύσης των φορτίων έχει τα παρακάτω αποτελέσματα:

- § Αύξηση των απωλειών στις γραμμές μεταφοράς και των αγωγών τροφοδοσίας.
- § Υπέρ-διαστασιολόγηση των αγωγών μεταφοράς και τροφοδοσίας.
- § Μη ορθολογική χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας.
- § Προβλήματα ευστάθειας στο ηλεκτρικό δίκτυο.

Οι επιχειρήσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και οι διαχειριστές του ηλεκτρικού δικτύου επιβάλλουν στους βιομηχανικούς καταναλωτές την βελτίωση του συντελεστή ισχύος τους $\cos\phi$. Η διόρθωση αυτή μπορεί να γίνει με τη χρήση σύγχρονου πυκνωτή ο οποίος δεν είναι τίποτα άλλο από μια σύγχρονη μηχανή.

3.1 Πλεονεκτήματα από τη βελτίωση της αέργου ισχύος με τα συστήματα αντιστάθμισης

- § Άμεση μείωση του ρεύματος, με αποτέλεσμα οι ίδιοι αγωγοί να επαρκούν για μεγαλύτερα φορτία.
- § Ελάττωση των απωλειών ισχύος στα καλώδια, λόγω της μείωσης του ρεύματος, με αποτέλεσμα μικρότερους λογαριασμούς.
- § Δυνατότητα χρήσης μικρότερης ισχύος Μετασχηματιστών, διακοπών, καλωδίων κλπ..
- § Μερική προστασία συσκευών από πιθανές πτώσεις τάσης του δικτύου.
- § Μερική προστασία συσκευών από τις αναπτυσσόμενες υπερτάσεις, μετά τις διακοπές της ΔΕΗ.
- § Αύξηση της ζωής των συσκευών λόγω της ομαλότερης λειτουργίας τους
- § Αύξηση παραγωγικότητας - βελτίωση λειτουργίας συσκευών, λόγω βελτίωσης της ποιότητας του ρεύματος.
- § Μείωση της Χρεωστέας Μέγιστης Ζήτησης (ΧΜΖ), που εμφανίζεται σε κάποια τιμολόγια της ΔΕΗ, με αποτέλεσμα μικρότερους λογαριασμούς. Όταν αποσυνδέεται μια συσκευή ανκαι στιγμιαία, λόγω συχνότητας μας χρεώνει με 50% περίπου περισσότερη Κ.Μ.Ζ. (Καταγραφείσα Μέγιστη Ζήτηση). Με τα συστήματα της αντιστάθμισης θα μειωθεί σημαντικά

3.2 Μειονεκτήματα από τη βελτίωση της αέργου ισχύος με τα συστήματα αντιστάθμισης

Οι πυκνωτές που χρησιμοποιούνται για τη βελτίωση του συντελεστού ισχύος όμως, είναι δυνατόν να δημιουργήσουν και αρνητικές επιδράσεις που σχετίζονται με αυτό που ονομάζουμε «ποιότητα ισχύος» και τελικά μπορεί να οδηγήσουν σε αύξηση του κόστους χρήσης μιας εγκατάστασης αν δεν βρεθεί τρόπος να αντιμετωπιστούν αποτελεσματικά. Τέτοιες αρνητικές επιδράσεις είναι:

- Αύξηση του ποσοστού των αρμονικών στο δίκτυο με συνέπεια αύξηση των απωλειών γενικά.
- Αύξηση της ανισορροπίας των τάσεων στις τρεις φάσεις και δημιουργία συνιστώσας αρνητικής ακολουθίας τάσεων με αποτέλεσμα την αύξηση των απωλειών σε κινητήρες και τη μείωση της διάρκειας ζωής τους.
- Δημιουργία αιχμών υπερτάσεως στους χρόνους μεταγωγής των πυκνωτών στις αυτόματες συστοιχίες με πιθανότητα καταστροφής ή δυσλειτουργίας ευαίσθητου εξοπλισμού.
- Μείωση της ατρωσίας της εγκατάστασης από εξωτερικές κακές επιδράσεις λόγω της μείωσης της σύνθετης αντίστασης εισόδου της.
- Αύξηση της τάσεως της εγκατάστασης σε περίπτωση κακής εφαρμογής με πιθανότητα καταστροφής εξοπλισμού και μονώσεων.

3.3 Είδη αντιστάθμισης

3.3.1 Μεμονωμένη Αντιστάθμιση

Συνιστάται σε περιπτώσεις

- Μεγάλων φορτίων με σταθερούς συντελεστές ισχύος
- Φορτίων με απαίτηση μεγάλου χρόνου εκκίνησης

Πλεονεκτήματα: Η μεμονωμένη αντιστάθμιση έχει το πλεονέκτημα της αποφόρτισης των αγωγών προς τα φορτία. Συχνά υπάρχει δυνατότητα άμεσης σύνδεσης των πυκνωτών με τις κλέμμες σύνδεσης των φορτίων και συνεπώς ενεργοποίησης και απενεργοποίησης με έναν κοινό διακόπτη μεταγωγέα

Μειονεκτήματα: Απαιτείται προσοχή κατά την μεμονωμένη αντιστάθμιση κινητήρων. Σε περιπτώσεις κινητήρων που συνδέονται μέσω εκκινήτη αστέρα τριγώνου δεν επιτρέπεται στιγμιαία αποσύνδεση του πυκνωτή αντιστάθμισης από το δίκτυο. Αυτό ισχύει και για

κινητήρες που λειτουργούν περιοδικά. Στην περίπτωση αυτή ο πυκνωτής θα πρέπει πάντα να εκφορτίζεται αρκετά πριν από την εκκίνηση του κινητήρα (<10% (<10% της ονομαστικής τάσης του).).

Για προστασία από τυχόν επικίνδυνη αυτοδιέγερση πρέπει η ισχύς του πυκνωτή που είναι άμεσα συνδεδεμένος με τις κλέμμες του κινητήρα να είναι <90% της άεργης ισχύος του κινητήρα σε κατάσταση λειτουργίας χωρίς φορτίο. Αυτό επιτυγχάνεται με την σύνδεση του πυκνωτή μέσω ενός χωριστού ρελέ, ενσωματωμένου στον ελεγκτή του κινητήρα.

3.3.2 Ομαδική Αντιστάθμιση

Στην ομαδική αντιστάθμιση κάθε μονάδα αντιστάθμισης συνδέεται με αντίστοιχη ομάδα φορτίου. Και εδώ όπως στην μεμονωμένη αντιστάθμιση συχνά δεν απαιτούνται για την σύνδεση των πυκνωτών ξεχωριστοί διακόπτες

Πλεονεκτήματα: Μείωση του κόστους επένδυσης για τους πυκνωτές. Μειώνεται η πτώση τάσης και η απώλεια στη γραμμή τροφοδοσίας της ομάδας.

Μειονεκτήματα: Δεν μειώνεται το ρεύμα στις επιμέρους γραμμές διανομής προς τους καταναλωτές εντός μιας ομάδας.

3.3.3 Κεντρική Αντιστάθμιση

Χρησιμοποιούνται μονάδες ελέγχου άεργου ισχύος. Αυτές συνδέονται απευθείας με ένα κεντρικό δευτερεύοντα πίνακα. Συνιστάται σε περιπτώσεις πολλαπλών φορτίων

§ Με διαφορετικές απαιτήσεις Ισχύος

§ Για διάφορους χρόνους εκκίνησης

Πλεονεκτήματα: Η μονάδα αντιστάθμισης μπορεί να ελεγχθεί εύκολα λόγω της επικεντρωμένης διάταξης της εκ των υστέρων εγκατάσταση ή επέκταση είναι σχετικά απλή ισχύς του πυκνωτή προσαρμόζεται πάντα στην άεργη ισχύ του φορτίου. Λαμβάνοντας υπόψη το συντελεστή συγχρονισμού συχνά αρκεί μια χαμηλότερη ισχύς του πυκνωτή από ότι στην μεμονωμένη εγκατάσταση

Μειονεκτήματα: Δεν μειώνεται το ρεύμα στις επιμέρους γραμμές διανομής προς τους καταναλωτές εντός της εγκατάστασης.

3.3.4 Συνδυασμένη αντιστάθμιση

Πραγματοποιείται για τους καταναλωτές μεγάλης ισχύος για τους οποίους εφαρμόζεται ανεξάρτητη αντιστάθμιση ενώ για τους υπόλοιπους εφαρμόζεται ομαδική ή κεντρική αντιστάθμιση.

Με βάση τα όσα αναφέρθηκαν η επιλογή της απαιτούμενης αντιστάθμισης γίνεται με βάση τα ακόλουθα βήματα:

1. Υπολογισμός της απαιτούμενης άεργης ισχύος της μονάδας πυκνωτών
2. Επιλογή της μεθόδου αντιστάθμισης
3. Επιλογή μεταξύ αυτόματης ή σταθερής αντιστάθμισης
4. Επιλογή του είδους των πυκνωτών ανάλογα με το επίπεδο μόλυνσης του δικτύου με αρμονικές.

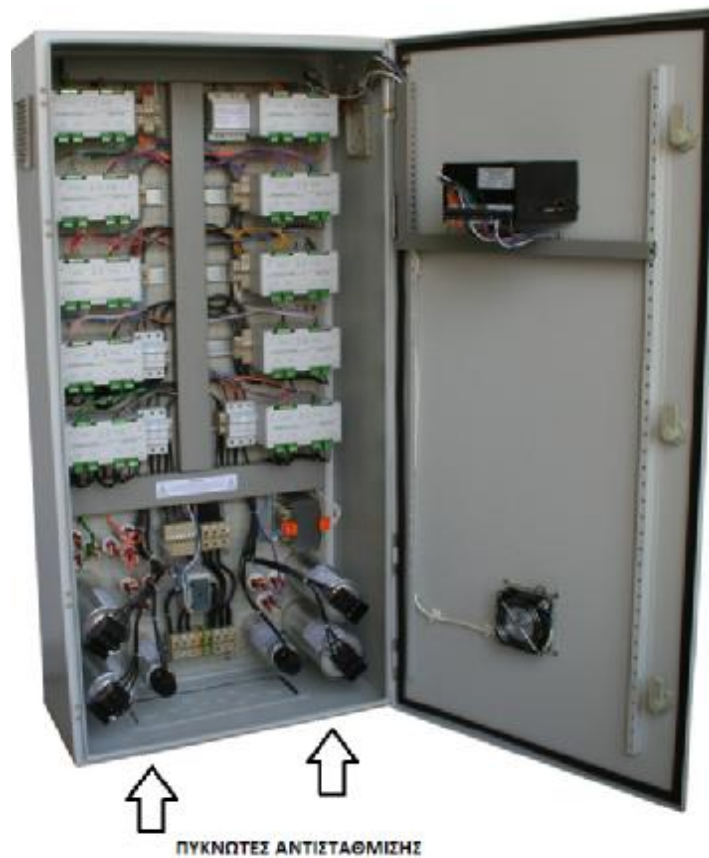
3.4 Τρόποι αντιστάθμισης

3.4.1 Αντιστάθμιση άεργου ισχύος με πυκνωτές (σταθερούς ή βηματικής μεταβολής)

Η αντιστάθμιση με πυκνωτές είναι η πιο ευρέως διαδεδομένη λύση. Οι πυκνωτές αντιστάθμισης άεργων φορτίων για μια τυπική κατοικία μπορούν να τοποθετηθούν:

1. Στον κεντρικό πίνακα της ηλεκτρικής εγκατάστασης της κατοικίας
2. Στην συσκευή που χρήζει διόρθωσης του συντελεστή ισχύος.

Στην πρώτη περίπτωση η τοποθέτηση είναι εύκολη αλλά έχει το σοβαρό μειονέκτημα της μόνιμης σύνδεσης του πυκνωτή και τις ώρες που δεν απαιτείται. Η ύπαρξη αυτοματισμού που να αποφασίζει για την σύνδεση και την αποσύνδεση του πυκνωτή πολλαπλασιάζει το κόστος. Η δεύτερη περίπτωση είναι αυτή που θα πρέπει να προτιμηθεί. Δεν έχει τα μειονεκτήματα της πρώτης αλλά, κατά περίπτωση, μπορεί να παρουσιάσει σχετικά αυξημένο κόστος τοποθέτησης.



Εικόνα 3.1 : Πυκνωτές αντιστάθμισης

Η τεχνολογία των στατών αντισταθμιστών βασίζεται σε ημιαγωγικούς διακόπτες υψηλής διακοπτικής συχνότητας. Οι στατοί αντισταθμιστές συνδυάζουν τους συμβατικούς πυκνωτές και αυτεπαγωγές με την διακοπτική ικανότητα. Ως διακόπτες χρησιμοποιούνται thyristors. Η μεγάλη διακοπτική συχνότητα διασφαλίζει πλεονεκτήματα όπως συνεχή, γρήγορο και ακριβό έλεγχο της τάσης καθώς και εξάλειψη των μεταβατικών φαινομένων (υπερτάσεις).

Οι εφαρμογές με στατούς αντισταθμιστές ισχύος απαιτούν την εγκατάσταση φίλτρων για τη μείωση της έγχυσης ανώτερων αρμονικών που παράγονται από τις διακοπές του ρεύματος, στο δίκτυο ισχύος. Η ικανότητα απόδοσης άεργου ισχύος περιορίζεται από την χωρητικότητα των πυκνωτών.



Εικόνα 3.2: Πίνακας αντιστάθμισης

Η αντιστάθμιση Άεργου Ισχύος με στατούς αντισταθμιστές ισχύος συνίσταται για μεγάλους καταναλωτές, στη μέση ή στη χαμηλή τάση. Τα συστήματα αυτά έχουν πολλά πλεονεκτήματα όπως:

- Καλύτερη δυναμική συμπεριφορά (πολύ γρήγορη απόκριση για μη σταθερές καταστάσεις φορτίων).
- Σχετικά χαμηλό κόστος επένδυσης.
- Χαμηλό κόστος λειτουργίας και συντήρησης.
- Ενσωματώνουν τον έλεγχο πυκνωτών αντιστάθμισης.

3.4.2 Αντιστάθμιση με στρεφόμενους πυκνωτές

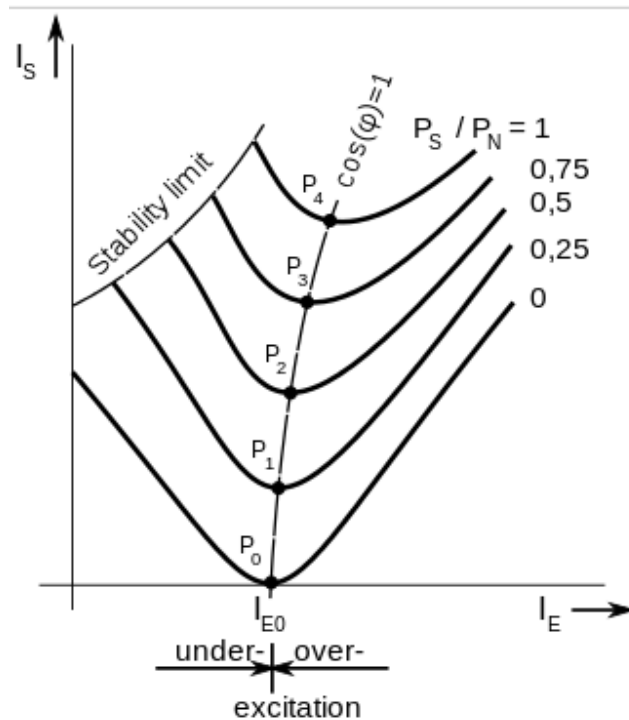
Οι στρεφόμενοι πυκνωτές είναι σύγχρονες γεννήτριες, ειδικά σχεδιασμένες για να παρέχουν άεργο ισχύ στα δίκτυα μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας. Έχουν όλους, τους απαιτούμενους για την καλή τους λειτουργία μηχανισμούς με τους οποίους είναι εξοπλισμένες οι γεννήτριες των σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Οι παραπάνω γεννήτριες εγκαθίστανται στο τέλος γραμμών μεταφοράς μεγάλων αποστάσεων, σε σημαντικούς υποσταθμούς μεταφοράς και σε σταθμούς μετατροπής υψηλής εναλλασσόμενης τάσης. Μικροί στρεφόμενοι πυκνωτές χρησιμοποιούνται σε υψηλής ισχύος βιομηχανικά δίκτυα για την αύξηση της ισχύος βραχυκύκλωσης.



Εικόνα 3.3 :Στρεφόμενος πυκνωτής

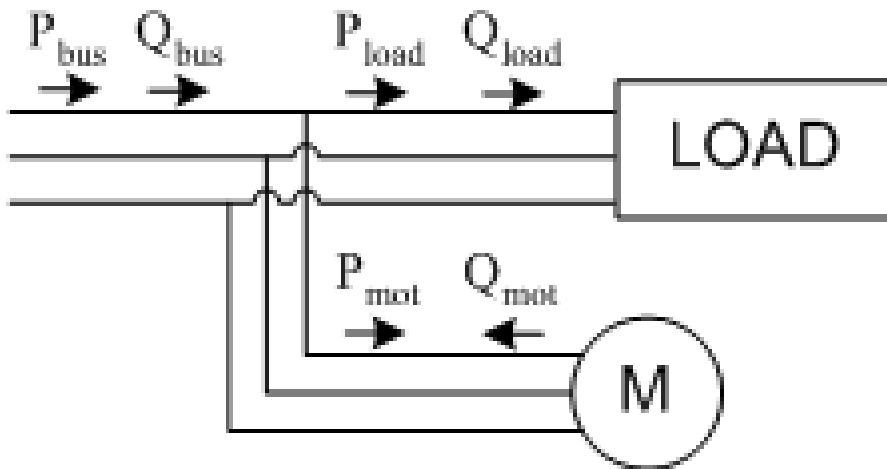
Η παρεχόμενη ισχύς από στρεφόμενους πυκνωτές υπόκειται σε συνεχή έλεγχο. Ο χρόνος απόκρισης είναι μερικά δευτερόλεπτα και εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Οι στρεφόμενοι πυκνωτές αποσύρονται σταδιακά τα τελευταία χρόνια και αντικαθίστανται από τους στατούς αντισταθμιστές ισχύος οι οποίοι είναι φθηνότεροι και έχουν παρόμοια χαρακτηριστικά.

Ο Σύγχρονος Αντισταθμιστής ή Σύγχρονος Πυκνωτής (ΣΠ) δεν είναι τίποτα περισσότερο από μία συμβατική σύγχρονη μηχανή, η οποία περιστρέφεται χωρίς μηχανικό φορτίο και έχει διέγερση ρυθμιζόμενη σε μία ευρεία περιοχή τιμών. Με αυτόν τον τρόπο τροφοδοτεί με άεργο ισχύ το σύστημα όταν υπερδιεγείρεται και απορροφά άεργο ισχύ από το σύστημα όταν υποδιεγείρεται. Η ρύθμιση της άεργου ισχύος που αποδίδει ο ΣΠ στο δίκτυο επιτυγχάνεται μέσω του ρυθμιστή τάσης του.



Εικόνα 3.4 : Καμπύλες V σύγχρονου κινητήρα

Επομένως, ρυθμίζοντας τη διέγερση του σύγχρονου αντισταθμιστή μπορούμε να ρυθμίζουμε κατά συνεχή τρόπο την άεργο ισχύ στην έξοδο του, που μπορεί να πάρει χωρητικές ή επαγωγικές τιμές, με σκοπό την υποστήριξη της τάσης του συστήματος ή την διατήρηση του συντελεστή ισχύος του συστήματος σε συγκεκριμένο επίπεδο. Ο ΣΠ λειτουργεί παράλληλα με ένα φορτίο που έχει χωρητικό χαρακτήρα, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.5.



Εικόνα 3.5 :Ένας κινητήρας σε ρόλο αντισταθμιστή

Ισχύει

$$P_{BUS} = P_{load} + P_{motor}$$

$$Q_{BUS} = Q_{load} + Q_{motor}$$

Αν ο κινητήρας λειτουργεί με μηδενική πραγματική ισχύ και με επαγωγικό συντελεστή ισχύος η Q_{motor} θα είναι αρνητική και θα κατευθύνεται προς το φορτίο, μειώνοντας με τον τρόπο αυτό την άεργο ισχύ που δίδεται από το δίκτυο.

Η ειδική αυτή περίπτωση που ένας σύγχρονος κινητήρας λειτουργεί με μηδενική P ($\Theta=90^\circ$) αλλά με $|E|>|V|$ είναι γνωστή ως λειτουργία σύγχρονου πυκνωτή και το διανυσματικό διάγραμμα παρουσιάζεται παρακάτω

Μερικά από τα πλεονεκτήματα του ΣΠ είναι

- Η άεργος ισχύς στην έξοδο τους αυξάνεται αμέσως μετά την πτώση τάσης
- Έχει την ικανότητα υπερφόρτισης για δεκάδες δευτερόλεπτα ενώ με πλήρες φορτίο μπορεί να διατηρεί ονομαστικό ρεύμα
- Αλλάζοντας την διέγερσή του είναι δυνατόν να αλλάξει το ρεύμα του σε οποιαδήποτε τιμή. Το γεγονός αυτό βοηθάει στην ομαλό έλεγχο του συντελεστή ισχύος
- Τα τυλίγματα του κινητήρα έχουν υψηλή θερμική σταθερότητα σε ρεύματα βραχυκύκλωσης
- Τα σφάλματα μπορούν να διορθωθούν εύκολα

- Ικανότητα παραγωγής έως και 150% αέργου ισχύος
- Δεν επηρεάζεται από τις αρμονικές του συστήματος (μάλιστα μερικές αρμόνικες μπορεί και να απορροφηθούν από αυτόν)

Στα μειονεκτήματα του συγκαταλέγεται

- Υψηλό λειτουργικό κόστος αλλά και ο κόστος συντήρησης,
- Πιθανότητα αποσυγχρονισμού του που προκαλεί μεγάλη βύθιση τάσης
- Λειτουργία με θόρυβο
- Μεγάλες απώλειες

Εκτός από κινητήρες ισχύος πάνω από 500KVA, το κόστος τους είναι μεγαλύτερο σε σχέση με αυτό των στατών πυκνωτών της ίδιας ισχύος

Από κατασκευαστικής άποψης δεν μπορούν να αναπτύξουν ροπή εκκίνησης και γι αυτό πρέπει να διαθέτουν έναν βοηθητικό εξοπλισμό για το σκοπό αυτό.

Η χρήση των σύγχρονων πυκνωτών είναι διαδεδομένη από τη δεκαετία του 1950 και πολλές φορές προτιμώνται έναντι των στατών πυκνωτών διότι οι τελευταίοι θερμαίνονται λόγω της ύπαρξης των αρμονικών. Οι σύγχρονοι πυκνωτές είναι επίσης χρήσιμοι στην διατήρηση σταθερής τάσης. Η άεργος ισχύς που παράγεται από τους στατους πυκνωτές είναι ανάλογη του τετραγώνου της τάσης τους και έτσι μια μείωση της τάσης προκαλεί μείωση της παραγόμενης αέργου ισχύος ακριβώς τη στιγμή που η ύπαρξή της είναι περισσότερο απαραίτητη ενώ αν η τάση αυξηθεί, αυξάνεται και η ισχύς προκαλώντας υπερτάσεις. Σε αντίθεση, ο σύγχρονος κινητήρας που διαθέτει ρυθμιζόμενο μαγνητικό πεδίο παράγει περισσότερη ισχύ σε χαμηλές τάσεις και απορροφά ισχύ σε υψηλές τάσεις. Έτσι βελτιώνεται η διακύμανση τάσης σε δίκτυα μεταφοράς

3.5 Σύγχρονες Μέθοδοι Αντιστάθμισης

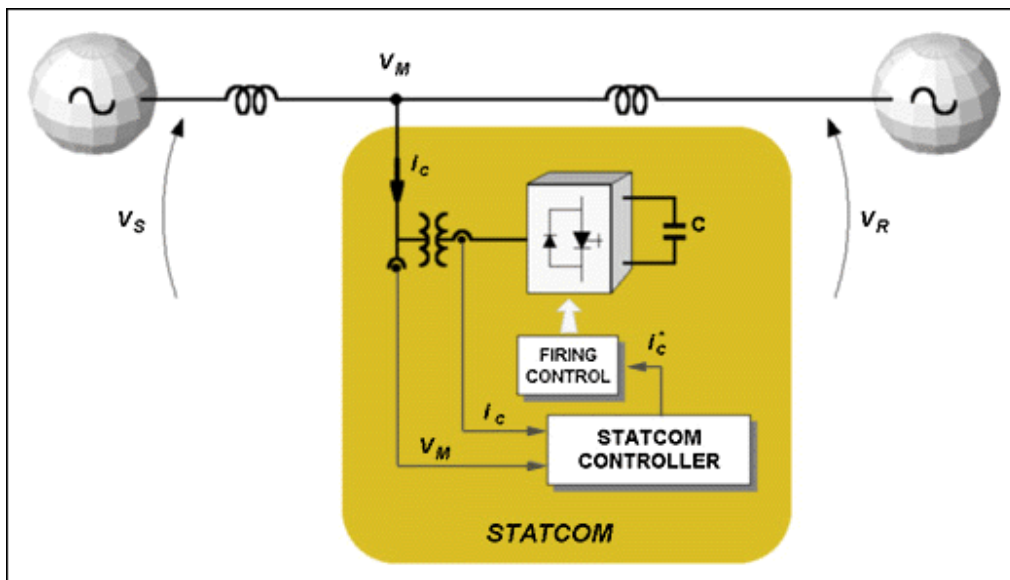
Με την έντονη διεύρυνση των μονάδων Διεσπαρμένης Παραγωγής (ΔΠ) χρειάστηκε να αναπτυχθούν νέες σύγχρονες μέθοδοι για την αντιμετώπιση των διακυμάνσεων της τάσης, χρησιμοποιώντας κατά

κύριο λόγο πολύπλοκα συστήματα ηλεκτρονικών ισχύος. Τα κυριότερα εξ' αυτών είναι:

- STATCOM, SVC
- Πυκνωτής Σειράς Ελεγχόμενος από Θυρίστορ (TCSC)
- Ρυθμιστής Φασικής Γωνίας Ελεγχόμενος από Θυρίστορ (TCPAR ή TCPST)
- Μέσα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας
- Περικοπή ενεργού ισχύος της ΔΠ
- Έλεγχος της αέργου ισχύος των αντιστροφών της ΔΠ

3.5.1 STATCOM, SVC

Το STATCOM (Static Compensator) είναι μια συσκευή ρύθμισης αποτελούμενη από ηλεκτρονικά ισχύος (κυριότερο είναι τα IGBTs) η οποία μπορεί να λειτουργήσει ως πηγή ή ως καταβόθρα αέργου ισχύος. Συνήθως το STATCOM χρησιμοποιείται σε δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας που παρουσιάζουν χαμηλό συντελεστή ισχύος ή «φτωχή» ρύθμιση τάσης. Ενδέχεται να χρησιμοποιηθεί επίσης και για βελτίωση της ευστάθειας της τάσης. Το STATCOM λειτουργεί με τη λογική μετατροπέα τάσης-πηγής (Voltage-Source Converter – VSC), με μια πηγή τάσης πίσω από μια επαγωγική αντίδραση.

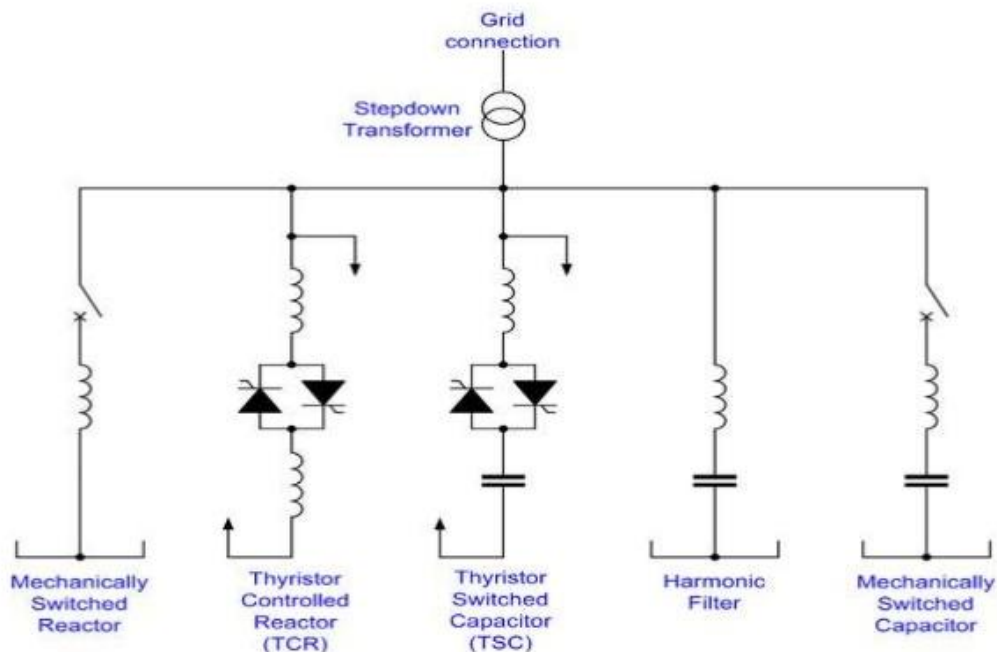


Εικόνα 3.6: Μέθοδος Ρύθμισης Τάσης με STATCOM

Η πηγή τάσης είναι ένας DC πυκνωτής, με συνέπεια το STATCOM να έχει πολύ μικρή δυνατότητα παραγωγής ενεργού ισχύος. Ωστόσο, αυτή μπορεί να αυξηθεί αν τοποθετηθεί παράλληλα στον πυκνωτή μια κατάλληλη συσκευή αποθήκευσης ενέργειας. Η άεργος ισχύς στους ακροδέκτες του STATCOM εξαρτάται από το πλάτος της τάσης της πηγής. Για παράδειγμα, αν η τάση των ακροδεκτών είναι μεγαλύτερη από την AC τάση στο σημείο διασύνδεσης, το STATCOM παράγει αέργο ισχύ, ενώ αντίθετα αν είναι μικρότερη τότε απορροφά άεργο ισχύ.

Μια παρόμοια, αλλά απλούστερη, διάταξη που χρησιμοποιείται είναι το Static Var Compensator (SVC). Αποτελείται κι αυτή από ηλεκτρονικά ισχύος, με τα συνηθέστερα να είναι τα θυρίστορ.

Static VAR compensator



Εικόνα 3.7: Static VAR Compensators (SVC) διάγραμμα

Τα STATCOM παρουσιάζουν καλύτερα χαρακτηριστικά από τα SVC. Ο χρόνος απόκρισης των STATCOM είναι μικρότερος από των SVC, όπως και η δημιουργία αρμονικών συνιστωσών, κυρίως λόγω της μεγαλύτερης

διακοπτικής συχνότητας των IGBT σε σχέση με τα θυρίστορ. Τα STATCOM επίσης προσφέρουν καλύτερη υποστήριξη αέργου ισχύος όταν η τάσεις είναι χαμηλές, καθώς η αέργος ισχύς τους μειώνεται γραμμικά με την τάση, αντίθετα με τα SVC όπου η αέργος ισχύς είναι ανάλογη με το τετράγωνο της τάσης. Ωστόσο, τα STATCOM παρουσιάζουν μεγαλύτερες απώλειες και είναι ακριβότερα από τα SVC, με αποτέλεσμα τα τελευταία να χρησιμοποιούνται ακόμη εκτενώς.

3.5.2 Πυκνωτής Σειράς Ελεγχόμενος από Θυρίστορ (TCSC)

Πρόκειται για σειριακή αντιστάθμιση. Ένα τυπικό TCSC μπορεί να παρέχει συνεχόμενο έλεγχο της ισχύος στη γραμμή μεταφοράς με μία μεταβλητή χωρητική αντιστάθμιση. Το TCSC επιτυγχάνει μια συνεχή μεταβολή της εν σειρά επαγωγικής αντίδρασης της γραμμής, με αποτέλεσμα τη μείωση ή αύξηση της φόρτισης κυματικής αντίστασης, και με αυτόν τον τρόπο, το TCSC μπορεί να τροφοδοτεί (κατά την υπερφόρτιση) ή να απορροφά (κατά την υποφόρτιση) αέργο ισχύ.

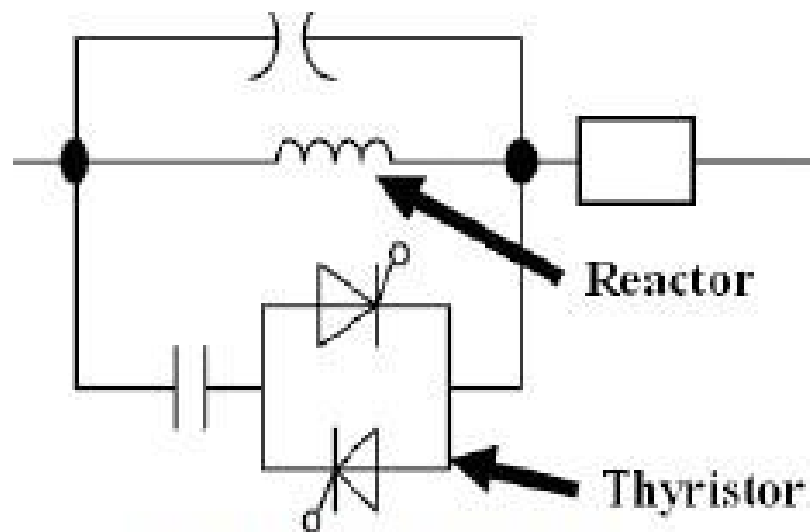


Fig. 1 Simple diagram of TCSC

Εικόνα 3.8: Μονογραμμικό διάγραμμα ενός TCSC

Το TCSC είναι παρόμοιο με το SVC. Η διαφορά τους είναι ότι το TCSC συνδέεται σε σειρά με τη γραμμή μεταφοράς, ενώ το SVC συνδέεται παράλληλα σε ένα τοπικό ζυγό. Σε αντίθεση, με το SVC, τα αρμονικά ρεύματα που παράγονται από το TCR δεν τείνουν να διαφύγουν από το δίκτυο. Στο TCSC, τα αρμονικά ρεύματα παγιδεύονται στο εσωτερικό του, λόγω χαμηλής αντίδρασης του πυκνωτή, σε σχέση με την

ισοδύναμη αντίδραση του δικτύου. Το TCSC παρέχει γρήγορο συνεχόμενο έλεγχο του σειριακού επιπέδου αντιστάθμισης της γραμμής μεταφοράς, αυξάνει τη μεταφερόμενη ισχύ της γραμμής, βελτιώνει το προφίλ της τάσης, ενώ με κατάλληλες προστατευτικές διατάξεις μπορεί να συμβάλει στη μείωση του ρεύματος βραχυκύκλωσης. Επίσης αποτελεί ένα αποδοτικό μέσο για τη βελτίωση της ευστάθειας του δικτύου και έχει αποδειχτεί πολύ αποτελεσματικός στην απόσβεση του φαινομένου του υπό- σύγχρονου συντονισμού (Sub-Synchronous Resonance, SSR), ένα ανεπιθύμητο φαινόμενο που είναι αποτέλεσμα της χρήσης πυκνωτών σειράς, και των ταλαντώσεων ισχύος. Ιστορικά, η αντιστάθμιση σειράς εφαρμοζόταν κυρίως για τη μεταφορά ισχύος σε μεγάλες αποστάσεις, ενώ με την πρόσφατη ανάπτυξη των ελεγχόμενων πυκνωτών σειράς, έχουν βελτιωθεί τα χαρακτηριστικά λειτουργίας και απόδοσης του σειριακού αντισταθμιστή και έχουν δημιουργηθεί νέες δυνατότητες εφαρμογών στον έλεγχο της ροής ισχύος σε διασυνδεδεμένα δίκτυα και στην απόσβεση ταλαντώσεων ισχύος σε διασυνδεδετικές γραμμές.

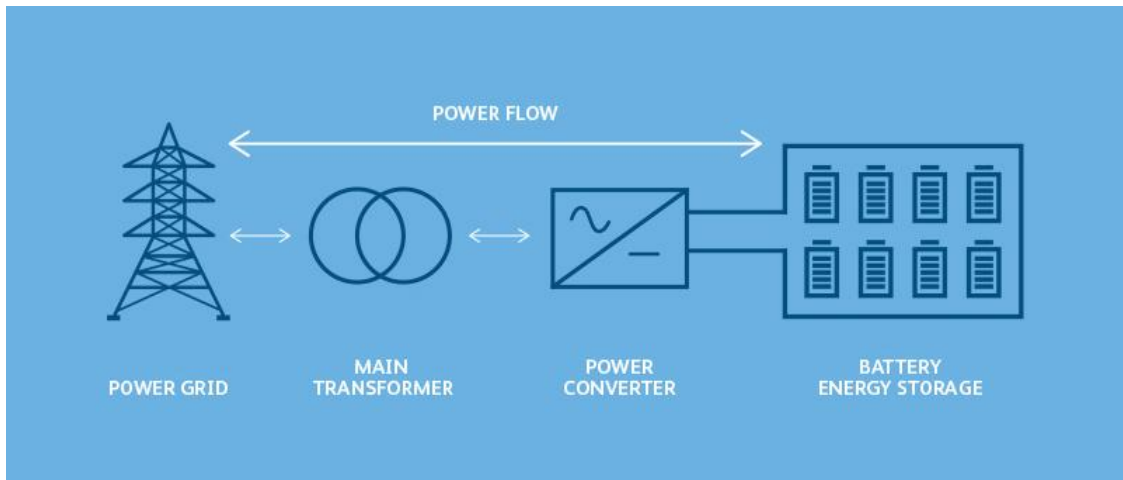
3.5.3 Ρυθμιστής Φασικής Γωνίας Ελεγχόμενος από Θυρίστορ (TCPAR ή TCPST)

Σε πολλές περιπτώσεις, η ικανότητα μεταφοράς ενός ΣΗΕ βελτιώνεται, μειώνοντας την κυκλοφορία ισχύος σε βρόχους, ή εκτρέποντας τη ροή ισχύος από γραμμές που βρίσκονται στα όρια στατικής ευστάθειας προς παράλληλες γραμμές με μεγαλύτερα περιθώρια. Για αυτό το λόγο ρυθμιστές φασικής γωνίας (Phase Shifting Transformer, PST ή Phase Angle Regulator, PAR) (της τάσης) χρησιμοποιούνται από το 1930 για τον έλεγχο της ροής ισχύος σε γραμμές μεταφοράς στην μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, χρησιμοποιώντας μετασχηματιστές με κατάλληλη συνδεσμολογία τυλιγμάτων. Το κύκλωμα ισχύος του ρυθμιστή αποτελείται από ένα μετασχηματιστή διέγερσης (Excitation Transformer, ET) από ένα μετασχηματιστή ανύψωσης (Boost Transformer, BT) και ένα μετατροπέα (converter). Οι δευτερεύουσες περιελίξεις (secondary windings) του μετασχηματιστή διέγερσης, συνδέονται παράλληλα, υποστηρίζοντας το μετασχηματιστή ανύψωσης που συνδέεται σε σειρά με τη γραμμή μεταφοράς. Ο μετασχηματιστής διέγερσης παρέχει την τάση εισόδου για το ρυθμιστή φασικής γωνίας, ενώ ο μετασχηματιστής ανύψωσης εγχέει μία ελεγχόμενη τάση, σε σειρά με τη γραμμή.

Το μέτρο και/ ή γωνία της ελεγχόμενης φάσης εξαρτάται από το μετατροπέα. Το τμήμα του μετατροπέα ενός συνηθισμένου ρυθμιστή φασικής γωνίας αποτελείται από μηχανικούς διακόπτες. Οι τυπικοί ρυθμιστές φασικής γωνίας δεν έχουν σαν σκοπό να βοηθήσουν στην αύξηση της μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας σε μία γραμμή μεταφοράς και ως εκ τούτου δεν προορίζονται να χρησιμοποιηθούν σε γραμμές μεγάλου μήκους. Τα κύρια τεχνικά μειονεκτήματα ενός τυπικού ρυθμιστή φασικής γωνίας είναι: η αργή απόκριση λόγω της υπάρχουσας αδράνειας των μηχανικών διακοπών, τα μειωμένα όρια ζώης και η απαίτηση για διατήρηση της συχνότητας σχετικά με τη μηχανική καταπόνηση και τη γήρανση του λαδιού. Το πρώτο μειονέκτημα αφορά τις εφαρμογές του ρυθμιστή φασικής γωνίας μόνο για τη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας και παράλληλα για τη ρύθμιση της τάσης. Το δεύτερο μειονέκτημα αντισταθμίζεται μερικώς, από το σύνολο των βοηθητικών ημιαγωγικών στοιχείων. Με την εφαρμογή των ελεγκτών ηλεκτρονικών ισχύος, η λειτουργία των αναβαθμισμένων ρυθμιστών φασικής γωνίας έχει γίνει πολύ πιο γρήγορη και επιτρέπει τη δυναμική ρύθμιση της ροής ισχύος, την απόσβεση των ταλαντώσεων και τη βελτίωση της μεταβατικής ευστάθειας του συστήματος αλλά και την ενίσχυση της ευστάθειας της τάσης. Αυτοί ονομάζονται ρυθμιστές φασικής γωνίας ελεγχόμενοι από θυρίστορ (Thyristor Controlled Phase Shifting Transformer, TCPST ή Thyristor Controlled Phase Angle Regulator, TCPAR).

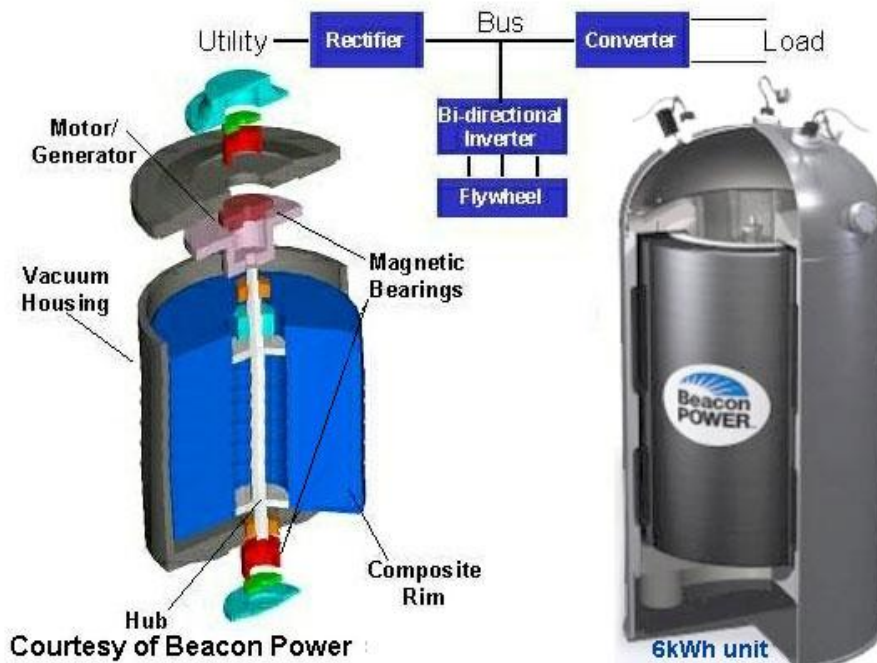
3.6 Μέσα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας

Μια έξυπνη λύση για την αντιμετώπιση των φαινομένων ανύψωσης και βύθισης τάσης που παρουσιάζονται στα σύγχρονα ενεργά δίκτυα διανομής είναι η εγκατάσταση μονάδων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας. Οι πιο δημοφιλείς μονάδες που χρησιμοποιούνται είναι οι συστοιχίες μπαταριών και τα flywheels (στρεφόμενες μηχανές που αποθηκεύουν την ηλεκτρική ενέργεια ως κινητική ενέργεια).

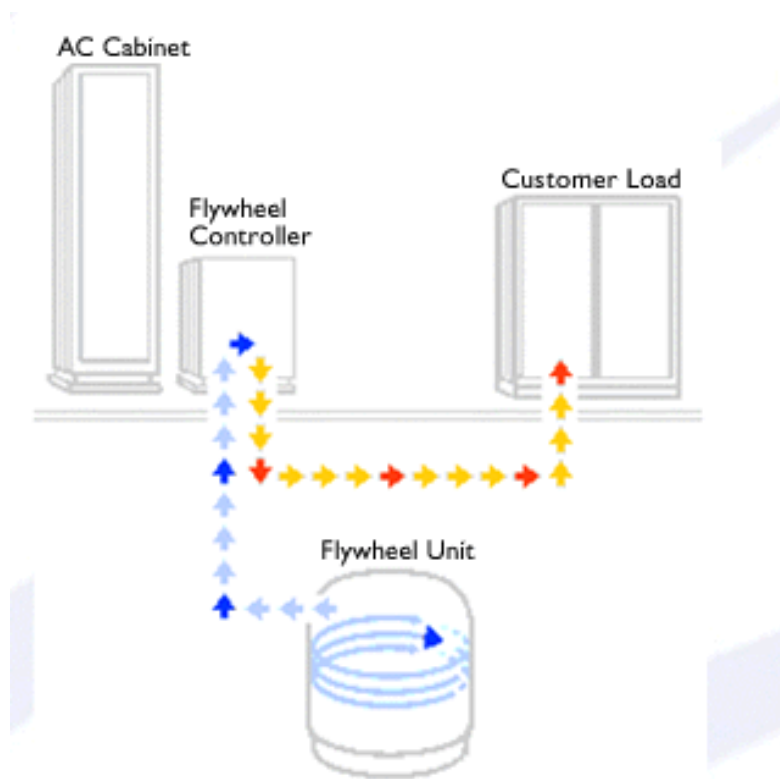


Εικόνα 3.9 : Δίκτυο με μονάδα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας

Χρησιμοποιώντας τέτοια μέσα έχουμε τη δυνατότητα να αποθηκεύουμε περίσσεια παραγόμενης ισχύος από τις μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής, έτσι ώστε να μην ρέει αντίστροφα μέσα στο δίκτυο προκαλώντας ανύψωση των τάσεων. Αντίστοιχα, αν κάποια περίοδο της ημέρας παρουσιαστεί έλλειψη ισχύος στο δίκτυο και οι τάσεις βυθιστούν, τα μέσα αποθήκευσης μπορούν να δράσουν ως πηγές ισχύος τροφοδοτώντας τα φορτία και βοηθώντας στη ρύθμιση της τάσης.



Εικόνα 3.10: Η μηχανή flywheel



Εικόνα 3.11:συνδεση της μηχανής flywheel



Εικόνα 3.12: Μια μηχανή flywheel (εξωτερική άποψη)

3.7 Περικοπή ενεργού ισχύος της Διασπαρμένης Παραγωγής

Στην τεχνική αυτή αξιοποιούνται οι δυνατότητες λειτουργίας των ηλεκτρονικών ισχύος (κυρίως των αντιστροφών), που βρίσκονται εγκατεστημένοι στην έξοδο των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής, για την αντιμετώπιση του φαινομένου ανύψωσης τάσης που προκαλείται από την έντονη διείσδυση της Διασπαρμένης Παραγωγής (ΔΠ) στα δίκτυα διανομής. Η λογική της Περικοπής Ενεργού Ισχύος (Active Power Curtailment – APC) βασίζεται στη μέτρηση και τον έλεγχο της τάσης στο σημείο κοινής σύνδεσης του αντιστροφέα με το δίκτυο. Όσο αυτή παραμένει εντός κάποιων επιλεγμένων επιθυμητών ορίων, τότε η παραγωγή ενεργού ισχύος της αντίστοιχης μονάδας ΔΠ αποδίδεται ολόκληρη στο δίκτυο. Σε περίπτωση όμως που η μετρούμενη τάση ξεπεράσει την επιτρεπτή τιμή, τότε ο αντιστροφέας αποφασίζει να

«κόψει» μια ποσότητα από την παραγόμενη ενεργό ισχύ της μονάδας. Σε ακραίες περιπτώσεις ανύψωσης τάσης, μπορεί να χρειαστεί να απομονώσει πλήρως τη μονάδα από το δίκτυο, εκμηδενίζοντας την αποδιδόμενη ενεργό ισχύ της.

3.8 Έλεγχος της αέργου ισχύος των αντιστροφών της Διασπαρμένης Παραγωγής

Και αυτή η μέθοδος αξιοποιεί τους αντιστροφείς των μονάδων Διασπαρμένης Παραγωγής (ΔΠ) αλλά για τον έλεγχο της αέργου ισχύος σε αυτήν την περίπτωση, αντίθετα με την τεχνική APC που ελέγχει την ενεργό ισχύ. Η λογική της βασίζεται σε αυτήν των σύγχρονων πυκνωτών, ότι δηλαδή μπορεί να επιτευχθεί ρύθμιση της τάσης μεταβάλλοντας την παραγωγή και την απορρόφηση αέργου ισχύος σε επιλεγμένα σημεία του δικτύου. Η διαφορά της μεθόδου αυτής είναι ότι τα σημεία είναι προκαθορισμένα, είναι οι κόμβοι κοινής σύνδεσης των μονάδων ΔΠ με το δίκτυο, και ότι δεν χρειάζεται πρόσθετος εξοπλισμός πέρα από αντιστροφείς που να έχουν τη δυνατότητα ελέγχου της ροής αέργου ισχύος τους. Ο έλεγχος της αέργου ισχύος γίνεται με τη μεταβολή του συντελεστή ισχύος λειτουργίας του αντιστροφέα, γι' αυτό και η μέθοδος αυτή ονομάζεται συχνά Έλεγχος Συντελεστή Ισχύος (Power Factor Control – PFC). Δουλεύοντας με επαγωγικό ΣΙ, ο αντιστροφέας έχει τη δυνατότητα να απορροφήσει άεργο ισχύ, ενώ δουλεύοντας με χωρητικό ΣΙ μπορεί να αποδώσει άεργο ισχύ στο δίκτυο. Με τον τρόπο αυτό συνεισφέρει στη ρύθμιση των τάσεων, απορροφώντας άεργο όταν παρατηρείται ανύψωση της τάσης και παράγοντας άεργο όταν παρατηρείται βύθιση της.

3.9 Κατηγορίες φορτίων που συμβάλλουν στην αυξημένη κατανάλωση αέργου ισχύος

3.9.1 Λειτουργία συμβατικών κλιματιστικών μονάδων

Τα κύρια προβλήματα της λειτουργίας των συμβατικών κλιματιστικών μονάδων είναι οι συχνές εκκινήσεις και η αδυναμία προσαρμογής του κινητήρα στην καμπύλη του φορτίου κατά τη λειτουργία του. Η παρούσα κατάσταση μπορεί να περιγραφεί ως εξής:

α) Τα σύγχρονα, πιστοποιημένα και υψηλού κόστους κτήσης, «επώνυμες» κλιματιστικές μονάδες ρυθμίζουν το ρεύμα εκκίνησης με inverter και συνήθως προσαρμόζουν τη λειτουργία του κινητήρα ανάλογα με τις απαιτήσεις του φορτίου. Το πρόβλημα των εν λόγω κλιματιστικών μονάδων δεν είναι κυρίως η χαμηλή τιμή του Συντελεστή

Ισχύος, αλλά η εισαγωγή αρμονικών στο δίκτυο με αντίστοιχη υποβάθμιση της ποιότητας τάσης.

β) Τα παλαιού τύπου κλιματιστικά μηχανήματα (χωρίς inverter) και γενικότερα «ανώνυμες» συσκευές, συνήθως χαμηλού κόστους κτήσης και χωρίς οποιαδήποτε τυποποίηση, συνήθως λειτουργούν με χαμηλή τιμή του Συντελεστή Ισχύος (από 0,55 έως 0,8).

Για παράδειγμα, μια τυπική επώνυμη μονάδα 18000 BTU έχει ισχύ $P=1850W$ με Συντελεστή Ισχύος ($\cos\phi$) περίπου ίσο με 0,9 για τάση λειτουργίας $U=230V$ μονοφασικό και ασφαρίζεται με μικροαυτόματο 16A. Εάν μία τέτοια μονάδα λειτουργεί 14 ώρες ημερησίως στη θερινή περίοδο σε ένα χώρο με μέτριες θερμικές απώλειες (όχι συχνά ανοιγοκλεισίματα παραθύρων και θυρών κλπ) αναμένονται 8-10 εκκινήσεις συνολικά, στην διάρκεια των οποίων το φορτίο δεν είναι σταθερό. Συνεπώς έχουμε:

α) Σημαντικό αριθμό εκκινήσεων στη διάρκεια των οποίων το ρεύμα εκκίνησης είναι πολλαπλάσιο του αντίστοιχου κανονικής λειτουργίας και προκαλεί τοπική πτώση τάσης στο δίκτυο.

β) Κατά την εκκίνηση (αρχικά στις χαμηλές στροφές περιστροφής κινητήρα) η τιμή του Συντελεστή Ισχύος ($\cos\phi$) είναι ιδιαίτερα χαμηλή.

γ) Κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του μηχανήματος, χωρίς δυνατότητα προσαρμογής των στροφών του κινητήρα στην καμπύλη του φορτίου, έχουμε χαμηλό συντελεστή ισχύος για φόρτιση μικρότερη του 100% (ιδανική συνθήκη). Ενδεικτικά για φόρτιση 100% έχουμε Συντελεστή Ισχύος ($\cos\phi$) =0,9, για φόρτιση 75% έχουμε Συντελεστή Ισχύος ($\cos\phi$) =0,87, για φόρτιση 50% Συντελεστή Ισχύος ($\cos\phi$) =0,78 και για φόρτιση 25% Συντελεστή Ισχύος ($\cos\phi$) =0,6.

Τα ίδια προβλήματα παρουσιάζουν μηχανήματα που λειτουργούν με ασύγχρονους (επαγωγικούς) κινητήρες π.χ. για οικιακής καταναλώσεως ψυγεία και αντίστοιχα ψυκτικές μονάδες μεγαλύτερης ισχύος ή κεντρικές κλιματιστικές μονάδες.

3.9.2 Μη γραμμικά φορτία: Εισαγωγή αρμονικών

Η ύπαρξη διατάξεων ηλεκτρονικών ισχύος (inverters, soft starters κλπ), ανορθωτικών διατάξεων AC-DC και γενικότερα η ύπαρξη μη γραμμικών φορτίων επηρεάζει και αλλοιώνει την ημιτονοειδή μορφή της τάσης. Αποτελέσματα της αλλοίωσης αυτής είναι η δημιουργία αρμονικών στο δίκτυο και η μη αποτελεσματική χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας. Οι αρμονικές που εγχέονται στο δίκτυο επηρεάζουν τον υπόλοιπο εξοπλισμό δημιουργώντας τα ακόλουθα προβλήματα:

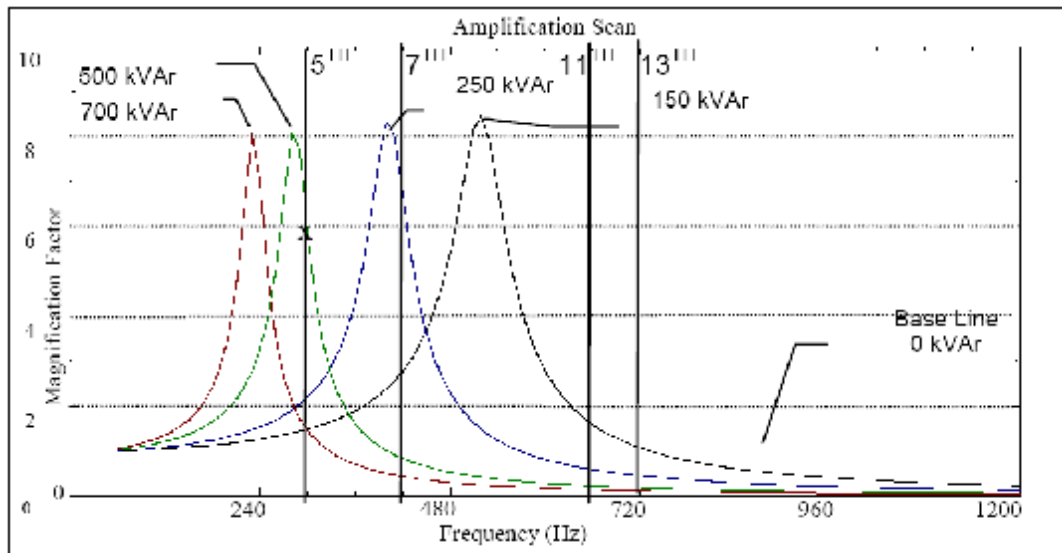
α) αυξημένες απώλειες

β) θέρμανση κινητήρων, καλωδίων και μετασχηματιστών

γ) παρεμβολές σε ηλεκτρονικό εξοπλισμό και ευαίσθητες ηλεκτρονικές διατάξεις. Είναι σκόπιμο το ζήτημα αυτό να μελετηθεί εκτενώς, με στόχο τη λήψη μέτρων αναφορικά με την πιστοποίηση του εξοπλισμού και την εφαρμογή των σχετικών προτύπων.

3.9.3 Αρμονικές και αντιστάθμιση αέργου ισχύος

Η αντιστάθμιση αέργου ισχύος στις βιομηχανικές εγκαταστάσεις γίνεται συνήθως με πυκνωτές. Οι αρμονικές θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη σε τέτοιες μελέτες λόγω του παράλληλου συντονισμού μεταξύ πυκνωτών και επαγωγής της πηγής του συστήματος.



Εικόνα 3.12: Μεταφορά της συχνότητας συντονισμού προς τη βασική αρμονική με την προσθήκη πυκνωτών

Όπως φαίνεται και από την παραπάνω εικόνα η προσθήκη όλο και περισσότερων πυκνωτών έχει ως αποτέλεσμα να μεταφέρει τη συχνότητα συντονισμού προς τη βασική αρμονική μεγεθύνοντας τα πλάτη συγκεκριμένων αρμονικών ρευμάτων. Προς αποφυγή των παραπάνω, η διόρθωση του συνημιτόνου θα πρέπει πάντα να πραγματοποιείται σε συνδυασμό με συντονισμένα πηνία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

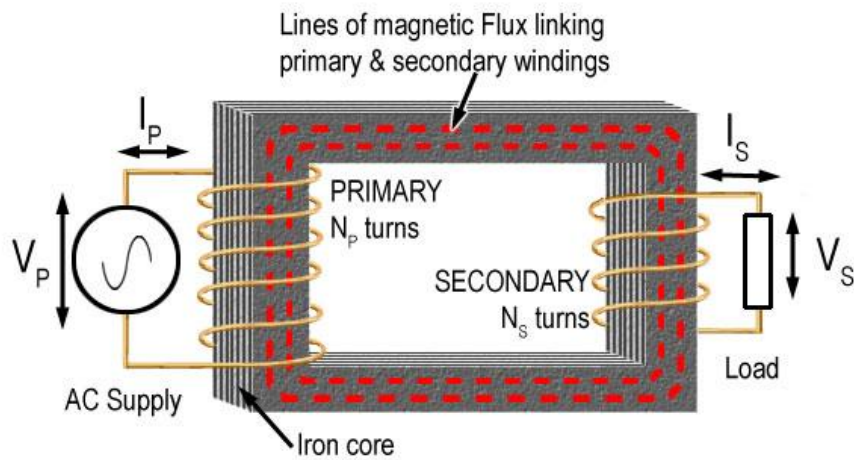
ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ

4.1 Γενικές αρχές λειτουργίας

Ο μετασχηματιστής είναι μια ηλεκτρική μηχανή η οποία μεταφέρει ηλεκτρική ενέργεια μέσω ηλεκτρικών αγωγών μεταξύ δύο επαγωγικά συζευγμένων μαγνητικά, ηλεκτρικών κυκλωμάτων. Οι μετασχηματιστές είναι μία από τις πιο αποδοτικές ηλεκτρικές μηχανές, με κάποιες μεγάλες μονάδες να αποδίδουν έως και το 99.75% της ισχύος εισόδου τους στην έξοδό τους. Οι μετασχηματιστές κατασκευάζονται σε ευρεία γκάμα μεγεθών, που κυμαίνονται από μέγεθος νυχιού (όπως αυτοί που βρίσκονται μέσα σε ένα μικρόφωνο) έως τεράστιες μονάδες με βάρος εκατοντάδων τόνων που χρησιμοποιούνται για τη διασύνδεση του εθνικού δικτύου ηλεκτροδότησης.

Η αρχή λειτουργίας τους είναι απλή: Ένα μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό ρεύμα στο πρώτο κύκλωμα (το "πρωτεύον") δημιουργεί ένα μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο. Αυτό το μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο επάγει μεταβαλλόμενη τάση στο δεύτερο κύκλωμα (το "δευτερεύον"). Αν ένας ηλεκτρικός καταναλωτής είναι συνδεδεμένος στο δευτερεύον κύκλωμα, τότε θα υπάρξει ροή ηλεκτρικού ρεύματος στο δευτερεύον τύλιγμα του μετασχηματιστή. Η επαγόμενη τάση V_S (s:secondary) στο δευτερεύον ενός ιδανικού μετασχηματιστή, είναι ανάλογη της τάσης V_P (p:primary) στο πρωτεύον κατά ένα συντελεστή ίσο με το λόγο του αριθμού N των περιελίξεων του σύρματος στα αντίστοιχα τυλίγματα:
$$\frac{V_S}{V_P} = \frac{N_S}{N_P}$$

Με κατάλληλη επιλογή του αριθμού των περιελίξεων (σπειρών), ένας μετασχηματιστής επιτρέπει την ανύψωση ή τον υποβιβασμό της τάσης του δευτερεύοντος τυλίγματος ως προς την τάση του πρωτεύοντος τυλίγματος, (ανύψωση αν $N_S > N_P$ και υποβιβασμός αν $N_S < N_P$).



$$\frac{\text{The number of primary turns } N_p}{\text{The number of secondary turns } N_s} = \frac{\text{The primary voltage } V_p}{\text{The secondary voltage } V_s}$$

$$\frac{\text{The number of secondary turns } N_s}{\text{The number of primary turns } N_p} = \frac{\text{The primary current } I_p}{\text{The secondary current } I_s}$$

Εικόνα 4.1: Ένας ιδανικός μετασχηματιστής υποβιβασμού τάσης με επισημασμένη την μαγνητική ροή στον πυρήνα του

Η λειτουργία του μετασχηματιστή βασίζεται σε δύο αρχές:

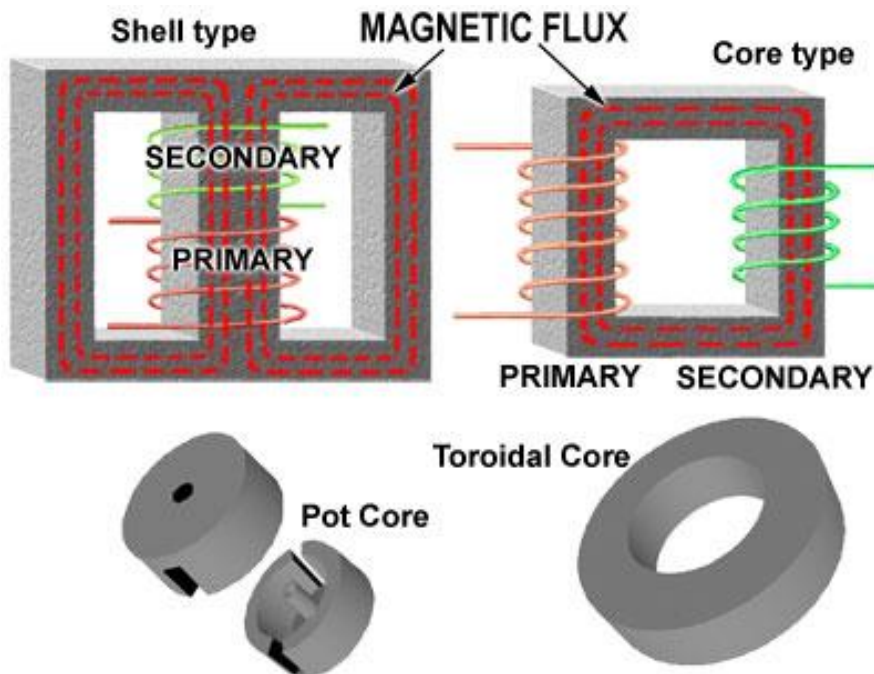
- § Ένα ηλεκτρικό ρεύμα διερχόμενο από έναν αγωγό, παράγει μαγνητικό πεδίο ανάλογο με την ένταση του ρεύματος και,
- § Ένα χρονικά μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο που διαρρέει ένα τύλιγμα, εμφανίζει στα άκρα του τυλίγματος τάση εξ επαγωγής.

Η μεταβολή της έντασης του ρεύματος στο πρωτεύον τύλιγμα ενός μετασχηματιστή, μεταβάλλει ανάλογα και την ένταση του μαγνητικού του πεδίου που δημιουργεί. Η μεταβολή του μαγνητικού πεδίου, του πρωτεύοντος τυλίγματος, που διαρρέει τις σπείρες του δευτερεύοντος τυλίγματος, δημιουργεί σε αυτό (δευτερεύον τυλιγμα) τάση εξ επαγωγής, η οποία είναι ανάλογη με τον λόγο των σπειρών των δύο τυλιγμάτων. Αυτή είναι και η βασική αρχή λειτουργίας ενός μετασχηματιστή.

4.2 Ο σιδηροπυρήνας του μετασχηματιστή - κατασκευαστικά χαρακτηριστικά

Οι απώλειες ενός σιδηροπυρήνα περιορίζονται με την επιλογή κατάλληλου υλικού το οποίο έχει κύκλο υστέρησης με μικρό εμβαδόν. Πρέπει επίσης να έχουν μεγάλη ειδική αντίσταση ρ για τον περιορισμό των δινορευμάτων. Οι απώλειες αυτές περιορίζονται κατασκευάζοντας τον πυρήνα από λεπτά πυριτιούχα ελάσματα, πάχους 0,3 - 0,5 cm ή από μίγμα σκόνης σιδήρου με μονωτικό υλικό που είναι μονωμένα από την μία όψη τους.

Ο πυρήνας του μετασχηματιστή μπορεί να είναι είτε τύπος μανδύα, είτε τύπος πυρήνα. Ο τύπος μανδύα συνηθίζεται σε μετασχηματιστές πολύ μεγάλης ισχύος. Τα πηνία πρωτεύοντος και δευτερεύοντος τυλίγονται στο κεντρικό στέλεχος αυτού, η δε όλη περιέλιξη προφυλάσσεται από δύο απέναντι στελέχη. Στους μετασχηματιστές με τύπο πυρήνα τα πηνία πρωτεύοντος και δευτερεύοντος κατανομούνται ομοιόμορφα στα δύο ακραία στελέχη και χρησιμοποιούνται συνήθως σαν μετασχηματιστές υψηλών συχνοτήτων. Οι περιελίξεις διαιρούνται εξίσου στα δύο σκέλη του πυρήνα και στον καθένα περιελίσσεται το μισό κάθε πηνίου. Η περιέλιξη χαμηλής τάσης μπαίνει κοντά στον πυρήνα και η περιέλιξη υψηλής τάσης εξωτερικά της περιέλιξης χαμηλής τάσης, για να μειωθούν οι απαιτήσεις μόνωσης.



Εικόνα 4.2: Μετασχηματιστής τύπου μανδύα (αριστερά) και τύπου πυρήνα (δεξιά)

Οι συνδέσεις ενός σιδηροπυρήνα γίνονται με συνδετήρες ή βίδες. Οι καλές συνδέσεις περιορίζουν τον μαγνητικό θόρυβο.

Η διάρκεια ζωής ενός μετασχηματιστή εξαρτάται περισσότερο από τις μονώσεις του και από τα μονωτικά υλικά που χρησιμοποιούνται. Τα μονωτικά υλικά που συνήθως χρησιμοποιούνται είναι το εμποτισμένο χαρτί, η μίκα και ειδικό λάδι.

Τα τυλίγματα του μετασχηματιστή γίνονται συνήθως με σύρμα κυκλικής διατομής, μονωμένο με ειδικό μονωτικό υλικό. Συνήθως στην περιέλιξη τα κενά που δημιουργούνται κατά το τύλιγμα γεμίζονται από ειδικό σκληρυντικό βερνίκι.

4.3 Ειδικές κατηγορίες Μετασχηματιστών

Οι μετασχηματιστές χωρίζονται στις εξής κατηγορίες:

- α) μετασχηματιστές τροφοδοσίας,
- β) μετασχηματιστές χαμηλών συχνοτήτων,
- γ) μετασχηματιστές ρεύματος,
- δ) αυτομετασχηματιστές, και
- ε) μετασχηματιστές υψηλής τάσης.

4.3.1 Μετασχηματιστές τροφοδοσίας

Οι μετασχηματιστές τροφοδοσίας είναι διατάξεις οι οποίες παίρνουν την ηλεκτρική ενέργεια από μια πηγή εναλλασσόμενου ρεύματος και την αποδίδουν στην έξοδό τους μεταβάλλοντας του βασικούς παράγοντες που είναι η τάση και το ρεύμα. Ένας απλός μετασχηματιστής τροφοδοσίας αποτελείται από δύο πηνία το πρωτεύον και το δευτερεύον τα οποία βρίσκονται σε μαγνητική ζεύξη μεταξύ τους, με την βοήθεια σιδηροπυρήνα. Επειδή ο σιδηροπυρήνας είναι καλός αγωγός του ηλεκτρισμού και διαρρέεται από μεταβαλλόμενη μαγνητική ροή, αναπτύσσονται σε αυτόν επαγωγικά ρεύματα (ρεύματα Φουκώ), τα οποία προκαλούν την θερμότητά του. Η θέρμανση αυτή σημαίνει απώλεια ενέργειας και θα πρέπει αυτή η ενέργεια που χάνεται να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη. Αν θεωρήσουμε έναν μετασχηματιστή χωρίς απώλειες (ιδανικός μετασχηματιστής), τότε το ρεύμα που κυκλοφορεί στο πρωτεύον αναπτύσσει στο δευτερεύον μια ηλεκτρεγερτική δύναμη E_2 . Αν E_1 είναι η τάση του πρωτεύοντος τότε οι μεταβολές της κοινής ροής θα είναι ανάλογες προς τον αριθμό στροφών n_1 και n_2 του πρωτεύοντος και δευτερεύοντος πηνίου.

Δηλαδή θα ισχύει η σχέση: $\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}$

Ο λόγος N_1/N_2 ονομάζεται λόγος μετασχηματισμού.

Αρα λοιπόν αν $N_1 > N_2$, τότε θα έχουμε $E_1 > E_2$. Με άλλα λόγια ο μετασχηματιστής θα είναι μετασχηματιστής υποβιβασμού τάσης. Αν η $E_2 > E_1$, τότε ο μετασχηματιστής ονομάζεται μετασχηματιστής ανύψωσης τάσης.

Το βάθος απόδοσης του μετασχηματιστή εκφράζει τις απώλειες ενέργειας ενός μετασχηματιστή τροφοδοσίας και δίνεται από την σχέση:

$$n = \frac{P_2}{P_1}$$

όπου P_1 είναι η ισχύς εισόδου του μετασχηματιστή και P_2 η ισχύς εξόδου του. Σε έναν ιδανικό μετασχηματιστή θα έχουμε $\eta=1$ που σημαίνει ότι η ισχύς εξόδου είναι ίση με την ισχύ εξόδου. Κάτι τέτοιο πρακτικά δεν συμβαίνει λόγω των απωλειών του μετασχηματιστή που θα αναφερθούμε παρακάτω.

Αν $P_1 = P_2$ τότε $E_1 I_1 = E_2 I_2$ οπότε $\frac{I_1}{I_2} = \frac{E_2}{E_1}$. Αυτό σημαίνει ότι το ρεύμα

στο δευτερεύον ανυψώνεται, όταν η τάση στο δευτερεύον υποβιβάζεται και αντίστροφα.

Ο λόγος E_1/I_1 εκφράζει την σύνθετη αντίσταση Z_1 του πρωτεύοντος οπότε θα έχουμε:

$$Z_1 = \frac{E_1}{I_1} = \frac{\frac{N_1}{N_2} E_2}{\frac{N_1}{N_2} I_2} = \frac{N_1^2}{N_2^2} \frac{E_2}{I_2} = \frac{N_1^2}{N_2^2} Z_2$$

Αυτό σημαίνει ότι η επαγωγική ή ωμική αντίσταση του δευτερεύοντος μπορεί να αναχθεί στο πρωτεύον με πολλαπλασιασμό επί το τετράγωνο του λόγου μετασχηματισμού.

Χρήση μετασχηματιστών τροφοδοσίας

Οι μετασχηματιστές τροφοδοσίας χρησιμοποιούνται σε κυκλώματα τροφοδοτικών σε ηλεκτρονικές συσκευές, οι οποίοι υποβιβάζουν την υψηλή τάση του δικτύου σε χαμηλές τάσεις για τα κυκλώματα των συσκευών. Παράλληλα παρέχουν γαλβανική απομόνωση των κυκλωμάτων των συσκευών για προστασία από κινδύνους ηλεκτροπληξίας.



Εικόνα 4.3: Μετασχηματιστής τροφοδοσίας

Πολλοί μετασχηματιστές χρησιμοποιούν περισσότερες από μία εξόδους για διάφορες τάσεις και ρεύματα σε ηλεκτρονικές συσκευές ενώ σε κυκλώματα παλμοτροφοδοτικών οι μετασχηματιστές είναι κατασκευασμένοι για υψηλότερες συχνότητες από τα 50Hz, με εντελώς διαφορετικά κατασκευαστικά χαρακτηριστικά από τους απλούς μετασχηματιστές των 50 - 60 Hz.

4.3.2 Μετασχηματιστές χαμηλών συχνοτήτων

Οι μετασχηματιστές χαμηλών συχνοτήτων χρησιμοποιούνται για να λειτουργούν σωστά σε όλο το ακουστικό φάσμα από 16Hz έως 16KHz. Χρησιμοποιούνται συνήθως ως μετασχηματιστές εξόδου σε ενισχυτές τάξης A μεγάλης ισχύος, ενώ σε πολύ μικρές ισχύς μπορούμε να συναντήσουμε μικρούς μετασχηματιστές σε ραδιόφωνα με ενισχυτή push pull για προσαρμογή της χαμηλής αντίστασης του μεγαφώνου. Η κατασκευή ενός μετασχηματιστή ήχου είναι ιδιαίτερα δύσκολη, καθώς λαμβάνονται πολλοί παράγοντες, όπως όρια συχνοτήτων, παρασιτικές χωρητικότητες, μαγνητικές διαφυγές, κτλ.

4.3.3 Αυτομετασχηματιστές

Οι αυτομετασχηματιστές αποτελούνται από ένα πηνίο με σιδηροπυρήνα, το οποίο διαθέτει μία ή περισσότερες λήψεις. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η τάση που λαμβάνεται ανάμεσα σε μία λήψη και ένα κοινό σημείο να είναι μικρότερη από την τάση εισόδου. Έτσι πετυχαίνουμε υποβιβασμό τάσης. Για ανύψωση τάσης κάνουμε την αντίστροφη διαδικασία, τροφοδοτούμε τον αυτομετασχηματιστή από το τύλιγμα λήψης και ένα κοινό σημείο και παίρνουμε μεγαλύτερη τάση στα δύο άκρα του.



Εικόνα 4.4: Αυτομετασχηματιστής

Αν η λήψη του αυτομετασχηματιστή είναι μεταβλητή, τότε θα παίρνουμε διάφορες τάσεις στην έξοδό του. Το πλεονέκτημα που έχει αυτός ο μετασχηματιστής είναι ότι είναι φτηνότερος σε κόστος διότι διαθέτει μόνο ένα τύλιγμα άρα λιγότερος χαλκός, καθώς επίσης και λιγότερο σιδηρομαγνητικό υλικό.

Επίσης ένα από τα μεγάλα πλεονεκτήματά του είναι ο υψηλός βαθμός απόδοσης που έχει. Η χρήση του όμως είναι πάρα πολύ περιορισμένη διότι δεν παρέχει γαλβανική απομόνωση και υπάρχει κίνδυνος εμφάνισης της φάσης στην έξοδό του. Το μεγάλο αυτό μειονέκτημα που έχει καθιστά την χρήση του σε πολύ ειδικές εφαρμογές.

4.3.4 Μετασχηματιστές ρεύματος

Οι μετασχηματιστές ρεύματος αποτελούνται από δύο πηνία, το πρωτεύον και το δευτερεύον και έναν σιδηροπυρήνα, όπως και οι μετασχηματιστές τάσης. Η διαφορά μεταξύ τους είναι ότι οι μετασχηματιστές ρεύματος έχουν λίγες σπείρες στο πρωτεύον τους και το χάλκινο σύρμα που χρησιμοποιείται είναι πολύ χοντρό. Το δευτερεύον πηνίο τους έχει περισσότερες σπείρες και το σύρμα που χρησιμοποιείται είναι ψιλότερης διατομής. Στο δευτερεύον πηνίο συνδέεται ένα αμπερόμετρο σαν φορτίο για την μέτρηση του ρεύματος.



Εικόνα 4.5: Διάφοροι μετασχηματιστές ρεύματος

Η χρήση των μετασχηματιστών ρεύματος είναι στα αμπερόμετρα καθώς με αυτόν των τρόπο αυξάνεται η ευαισθησία τους.

4.3.5 Μετασχηματιστές υψηλής τάσης

Οι μετασχηματιστές υψηλής τάσης είναι μικρής ισχύος και χρησιμοποιούνται στους δέκτες τηλεοράσεως για την τροφοδότηση των πηνίων απόκλισης του καθοδικού σωλήνα. Η κατασκευή αυτών των μετασχηματιστών έχει διαφορές καθώς απαιτούνται μονώσεις υψηλής ποιότητας και συμπαγής πυρήνας. Ο πυρήνας στους μετασχηματιστές υψηλής τάσης αποτελείται από δύο κομμάτια φερρίτη σχήματος Π.

Στο ένα σκέλος του πυρήνα περιελίσσονται το πρωτεύον και δύο άλλα δευτερεύοντα πηνία, ενώ στο άλλο σκέλος του περιελίσσεται το δευτερεύον, δηλαδή το τύλιγμα υψηλής τάσης.



Εικόνα 4.6: Μετασχηματιστής υψηλής τάσης

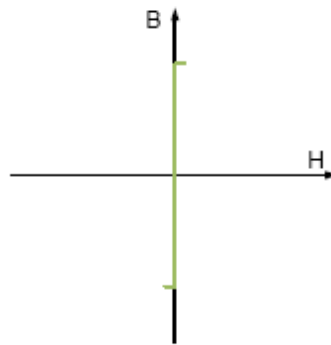
Κατά την περιέλιξη του δευτερεύοντος παρεμβάλλονται μεταξύ των στρωμάτων φύλλα από πλαστική ταινία μεγάλης μόνωσης και η όλη περιέλιξη γίνεται συμπαγής χωρίς να υπάρχουν κενά. Μετά τοποθετείται σε φούρνο με θερμοκρασία από 200 έως 300C° και ψήνεται. Τέλος εμποτίζεται σε πολυεστέρα και τοποθετείται μέσα σε θήκη από πολυκαρβονικό υλικό. Στην τελική μορφή του καλύπτεται ξανά με πολυεστέρα.

Η υπερυψηλή τάση που φτάνει τα 16KV επιτυγχάνεται με την βοήθεια διόδων (καταρράκτης), που στους σύγχρονους μετασχηματιστές υψηλής τάσης περιέχεται και το κύκλωμα του καταρράκτη.

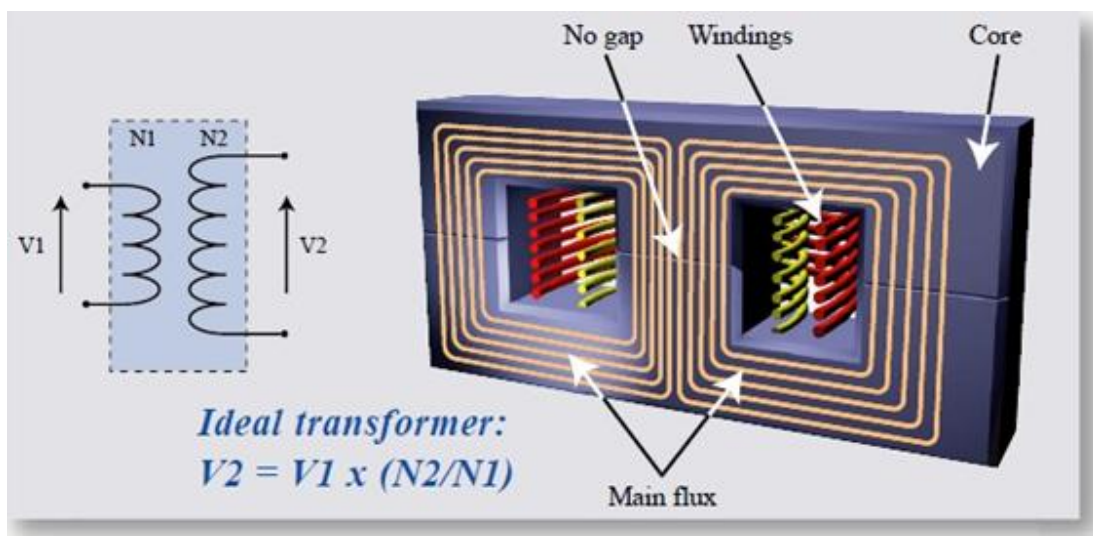
4.4 Ο ιδανικός Μετασχηματιστής

Ιδανικός ονομάζεται ο μετασχηματιστής ο οποίος δεν παρουσιάζει απώλειες κατά τη μεταφορά της ισχύος από το πρωτεύον τύλιγμα στο δευτερεύον. Αυτό σημαίνει ότι ο πυρήνας έχει άπειρη μαγνητική διαπερατότητα $\mu = \infty$, άρα όλη η ροή περνά μέσα απ' αυτόν. Δεν εμφανίζει απώλειες υστέρησης και δινορευμάτων, η άεργη ισχύς που απαιτείται για τη μαγνήτιση του πυρήνα είναι μηδέν. Οι ωμικές αντιστάσεις R_1 και R_2 καθώς και οι αντιστάσεις σκέδασης $X_{\sigma 1}$, $X_{\sigma 2}$ των τυλιγμάτων του είναι μηδέν. Η λειτουργία του στηρίζεται στο νόμο του Faraday:

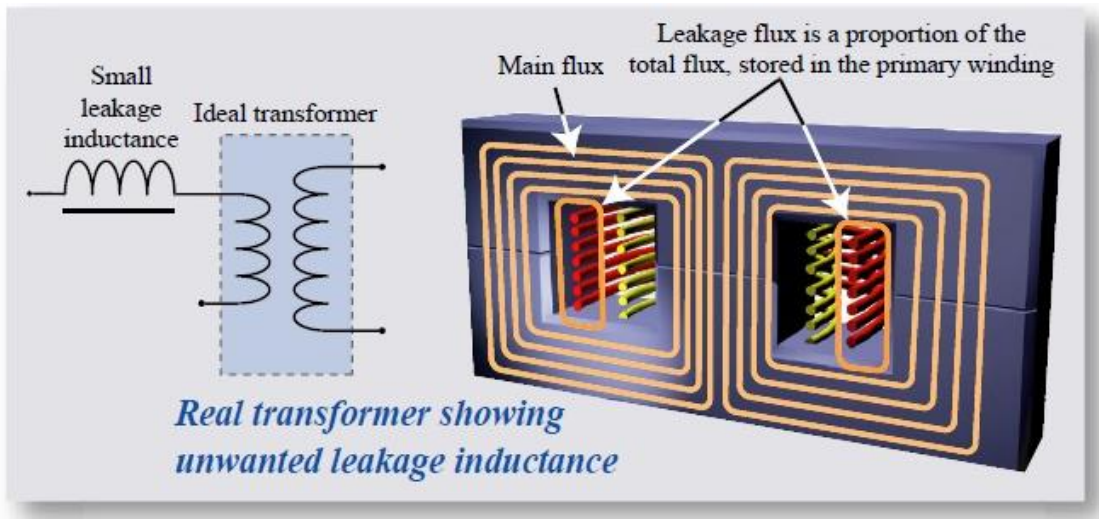
$$\oint \vec{E} \times dl = - \frac{d}{dt} \oint \vec{B} \times ds \quad \text{and} \quad e = - N \frac{dF}{dt} = \oint \vec{E} \times dl$$



Εικόνα4.7: Καμπύλη μαγνήτισης ιδανικού μετασχηματιστή



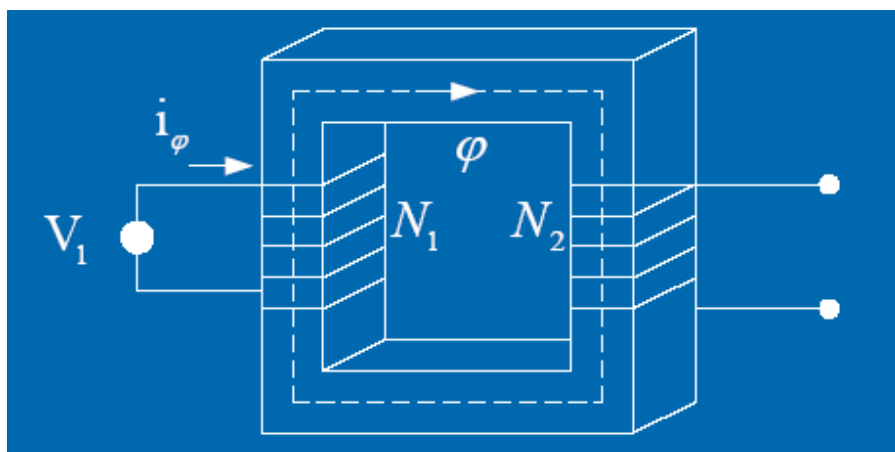
Εικόνα4.8: Ισοδύναμο κύκλωμα ιδανικού μετασχηματιστή



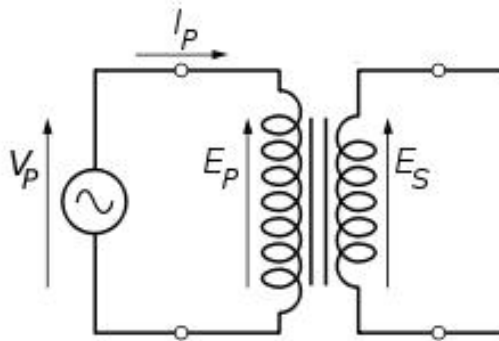
Εικόνα4.9: Ισοδύναμο κύκλωμα ιδανικού μετασχηματιστή

4.4.1 Ο ιδανικός μετασχηματιστής εν κενώ

Κατά την «εν κενώ λειτουργία» του μετασχηματιστή το πρωτεύον τύλιγμα του τροφοδοτείται με μια ημιτονοειδή πηγή τάσης και το δευτερεύον τύλιγμα του παραμένει ανοιχτό ($I_2=0$). Στην Εικόνα 4.10 φαίνεται το κυκλωματικό διάγραμμα της εν κενώ λειτουργίας του μονοφασικού μετασχηματιστή, ενώ στην Εικόνα 4.11 δείχνεται το αντίστοιχο ισοδύναμο κύκλωμα.



Εικόνα 4.10: :Κυκλωματικό διάγραμμα της εν κενώ λειτουργίας του μονοφασικού μετασχηματιστη



Εικόνα 4.11: :Ισοδύναμο κύκλωμα της εν κενώ λειτουργίας του μονοφασικού μετασχηματιστή

Η ημιτονοειδής τάση που εφαρμόζεται στα άκρα του πρωτεύοντος τυλίγματος $u_1 = V_{1,max} \times \sin \omega t$ προκαλεί την ροή ενός ημιτονοειδούς ρεύματος μέσα στο πρωτεύον τύλιγμα το οποίο, όπως συμβαίνει μέσα σε ένα καθαρά επαγωγικό κύκλωμα, καθυστερεί σε φάση της τάσεως που το προκαλεί κατά 90° . Η μαγνητεγερτική δύναμη (ΜΕΔ) του πρωτεύοντος τυλίγματος $F_1 = N_1 \times i_1$, προκαλεί την ροή μιας ημιτονοειδούς μαγνητικής ροής Φ μέσα στον πυρήνα, σύμφωνα με την σχέση: $N_1 \times i_1 = R_m \times \Phi$ όπου R_m η μαγνητική αντίσταση του πυρήνα του μετασχηματιστή.

Η χρονικά μεταβαλλόμενη μαγνητική ροή μέσα στον πυρήνα, όπως προκύπτει από τον νόμο της επαγωγής του Faraday, επάγει μια ηλεκτρεγερτική δύναμη (ΗΕΔ) e_1 , στο πρωτεύον τύλιγμα, που δίνεται

από τη σχέση:

$$e_1 = - \frac{d\lambda}{dt}$$

όπου λ είναι η συνολική πεπλεγμένη ροή που διαπερνά το πρωτεύον τύλιγμα και είναι ίση με το άθροισμα των ροών που διέρχονται από την καθεμιά σπείρα του εν λόγω τυλίγματος, δηλαδή: $\lambda = \sum_{i=1}^{N_1} \Phi_i$

Η συνολική πεπλεγμένη ροή του πρωτεύοντος τυλίγματος δεν είναι απλά ίση με $N_1 \Phi$, γιατί η ροή που διέρχεται από την κάθε μια σπείρα του τυλίγματος δεν είναι η ίδια για όλες τις σπείρες, αλλά διαφέρει ανάλογα με την θέση της καθεμιάς στον πυρήνα. Από αυτό το σημείο και έπειτα θα θεωρούμε στους υπολογισμούς μας ότι όλες οι σπείρες του τυλίγματος διαπερνώνται από το ίδιο ποσό μαγνητικής ροής, το οποίο αντιστοιχεί στην μέση τιμή της μαγνητικής ροής που δίνεται από την σχέση

$$F = \frac{I}{N_1}$$

Επομένως η επαγόμενη τάση e_1 στο πρωτεύον τύλιγμα όπως δίνεται από την σχέση γίνεται:

$$e_1 = N_1 \frac{dF}{dt}$$

Επειδή οι απώλειες ισχύος κατά την λειτουργία του ιδανικού μετασχηματιστή θεωρούνται μηδενικές, από τον νόμο των τάσεων του Kirchhoff προκύπτει ότι η επαγόμενη στο πρωτεύον τύλιγμα ΗΕΔ e_1 , σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα από την ώρα που θα κλείσει ο διακόπτης S, πρέπει να είναι ίση με την τάση της πηγής που εφαρμόζεται στο πρωτεύον τύλιγμα u_1 . Υποθέτοντας ότι η τάση της πηγής είναι $u_1 = V_{1,\max} \cos \omega t$, τότε ισχύει:

$$e_1 = u_1 \Rightarrow N_1 \frac{dF}{dt} = V_{1,\max} \cos \omega t$$

και λύνοντας ως προς την μαγνητική Φ προκύπτει:

$$j(t) = \frac{V_{1,\max}}{N_1} \int_0^t \cos(\omega t) dt + F(0) = \frac{V_{1,\max}}{\omega N_1} \sin(\omega t) + j(0)$$

όπου $\Phi(0)$ είναι μια σταθερά που προκύπτει από το ολοκλήρωμα και η οποία λαμβάνει υπ' όψιν τυχόν ποσό αρχικής μαγνητικής ροής μέσα στον πυρήνα, τη στιγμή που εφαρμόζεται η πηγή τάσης στην είσοδο του μετασχηματιστή. Για απλούστευση των υπολογισμών μας, θα θεωρήσουμε ότι την στιγμή που εφαρμόζεται η πηγή τάσης, η τιμή της μαγνητικής ροής μέσα στον πυρήνα είναι μηδέν, δηλαδή $\Phi(0) = 0$.

Επιπλέον, αντικαθιστώντας την μέγιστη τιμή της τάσεως V_1 με $V_{1,\max} = \sqrt{2} V_{1,rms}$ και την συχνότητα $\omega = 2\pi f$ στην σχέση προκύπτει:

$$F = \frac{\sqrt{2} V_{1,rms}}{2\pi f N_1} \sin(\omega t)$$

Επομένως η μέγιστη τιμή της μαγνητικής ροής που δημιουργείται μέσα στον πυρήνα είναι:

$$F_{\max} = \frac{V_{1,rms}}{4,44 N_1 f}$$

Από την σχέση είναι φανερό ότι η μέγιστη τιμή της μαγνητικής ροής μέσα στον πυρήνα, εξαρτάται από την ενεργό τιμή της τάσεως της πηγής, από τον αριθμό των σπειρών του πρωτεύοντος τυλίγματος, από την συχνότητα λειτουργίας του μετασχηματιστή και είναι ανεξάρτητη από την μαγνητική αντίσταση R_m του πυρήνα. Ωστόσο η μαγνητική αντίσταση του πυρήνα που αντιστοιχεί στη μέγιστη τιμή της μαγνητικής ροής, καθορίζει την μέγιστη τιμή του ρεύματος του πρωτεύοντος τυλίγματος που "απαιτείται" για την παραγωγή της συγκεκριμένης τιμής της μαγνητικής ροής, σύμφωνα με την σχέση:

$$R_m \times \mathcal{F}_{\max} = i_{1\max} \times N_1$$

Το ρεύμα $i_{1\max}$ είναι η μέγιστη τιμή του ρεύματος που ρέει μέσα στο πρωτεύον τύλιγμα κατά την εν κενώ λειτουργία και λέγεται ρεύμα μαγνήτισης. Η αποστολή του είναι η δημιουργία της μαγνητικής ροής μέσα στον πυρήνα με τιμή τέτοια ώστε η ΗΕΔ e_1 που επάγεται στο πρωτεύον τύλιγμα να είναι ίση με την τάση της πηγής v_1 . Εφ' όσον ισχύει $V_{1rms} = E_{1rms}$, τότε η E_{1rms} δίνεται από την σχέση

$$E_{1rms} = 4,44 \times N_1 \times f \times \mathcal{F}_{\max}$$

Η χρονικά μεταβαλλόμενη μαγνητική ροή Φ όμως διαρρέει και το δευτερεύον τύλιγμα του μετασχηματιστή και επάγει σ' αυτό μια ΗΕΔ e_2 . Εφ' όσον το δευτερεύον τύλιγμα είναι ανοιχτό, η ΗΕΔ e_2 ισούται με την τάση στους ακροδέκτες του δευτερεύοντος τυλίγματος v_2 . Επομένως η ενεργός τιμή της τάσεως v_2 δίνεται από την σχέση: $V_{2rms} = E_{2rms} = 4,44 \times N_2 \times f \times \mathcal{F}_{\max}$

Από τις σχέσεις και προκύπτει η σχέση :

$$\frac{V_{1rms}}{V_{2rms}} = \frac{E_{1rms}}{E_{2rms}} = \frac{N_1}{N_2} = a$$

σύμφωνα με την οποία ο λόγος των ΗΕΔ που επάγονται στα δύο τυλίγματα ισούται με τον λόγο του αριθμού των σπειρών των δύο τυλιγμάτων. Ο λόγος αυτός ισούται με τον λόγο μετασχηματισμού των τάσεων των δύο τυλιγμάτων.

Εφ' όσον οι απώλειες ισχύος στον ιδανικό Μ/Σ είναι μηδενικές, η φαινόμενη ισχύς εισόδου στην πλευρά του πρωτεύοντος ισούται με την φαινόμενη ισχύ εξόδου στην πλευρά του δευτερεύοντος, επομένως:

$$S = V_{1rms} \times I_{1rms} = V_{2rms} \times I_{2rms} \quad \text{P} \quad \frac{I_{1rms}}{I_{2rms}} = \frac{V_{2rms}}{V_{1rms}} = \frac{1}{a}$$

Σύμφωνα με την τελευταία σχέση, ο λόγος των ρευμάτων των δύο τυλιγμάτων ισούται με το αντίστροφο του λόγου μετασχηματισμού των τάσεων των δύο τυλιγμάτων.

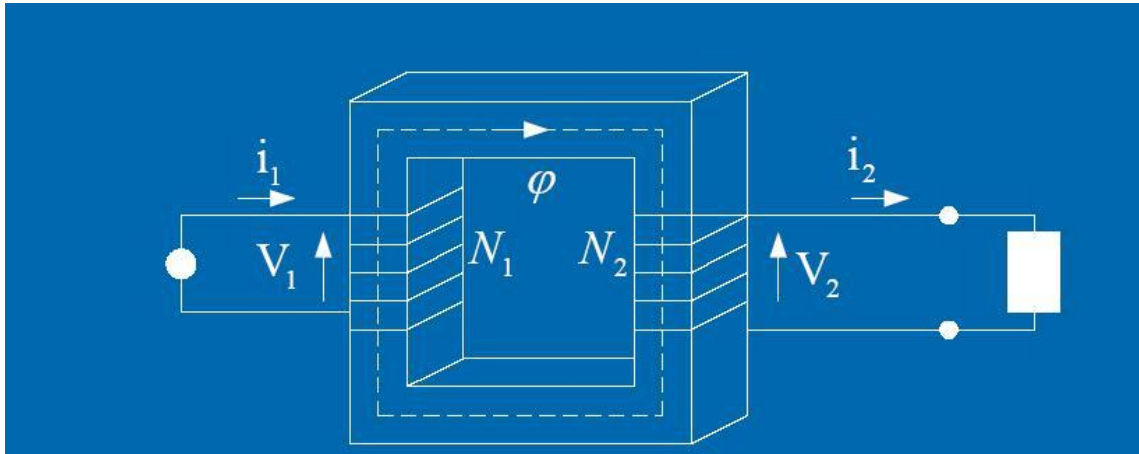
Οι τελείες που εφαρμόζονται στον ένα από τους δύο ακροδέκτες του καθενός τυλίγματος, υποδηλώνουν κάποιες πληροφορίες που αφορούν τις πολικότητες των τάσεων του μετασχηματιστή. Η σύμβαση που ισχύει σύμφωνα με την τοποθέτηση των τελειών πάνω στους ακροδέκτες είναι η εξής:

- § Οι πολικότητες των τάσεων στα δύο τυλίγματα του μετασχηματιστή, είναι οι ίδιες σε σχέση με τους σημειωμένους ακροδέκτες τους.
- § Αν το ρεύμα στο πρωτεύον τύλιγμα έχει φορά προς τον σημειωμένο ακροδέκτη του, τότε το ρεύμα στο δευτερεύον τύλιγμα θα έχει φορά προς τον μη σημειωμένο ακροδέκτη του.

Η φυσική σημασία της τοποθέτησης των τελειών είναι ότι ένα ρεύμα που έχει φορά προς τον σημειωμένο ακροδέκτη του τυλίγματος προκαλεί μια θετική μαγνητεγερτική δύναμη, ενώ ένα ρεύμα που έχει φορά προς τον μη σημειωμένο ακροδέκτη του τυλίγματος προκαλεί μια αρνητική μαγνητεγερτική δύναμη.

4.4.2 Ο ιδανικός Μετασχηματιστής υπό φορτίο

Στην Εικόνα 4.12 βλέπουμε έναν ιδανικό μετασχηματιστή που συνδέεται με ένα φορτίο σύνθετης αντίστασης. Το πρωτεύον τύλιγμα του συνδέεται με την πηγή εναλλασσόμενης τάσης V_1 , ενώ το δευτερεύον συνδέεται με φορτίο $Z_L = R_L + jX_L$ και σε αυτό κυκλοφορεί ρεύμα $I_2 = E_2 / Z_L$. Σύμφωνα με την συνδεσμολογία των τυλιγμάτων, η φορά των ρευμάτων μέσα στα τυλίγματα είναι τέτοια ώστε η μαγνητεγερτική δύναμη του δευτερεύοντος τυλίγματος να είναι αντίθετη από την αντίστοιχη του πρωτεύοντος.



Εικόνα 4.12 :Ιδανικός μετασχηματιστής υπό φορτίο

Έτσι η συνολική μαγνητεγερτική δύναμη που προκύπτει και η οποία προκαλεί την δημιουργία της μαγνητικής ροής μέσα στον πυρήνα, είναι η διαφορά των μαγνητεγερτικών δυνάμεων των δύο τυλιγμάτων.

Επομένως: $F_{\text{ολ}} = \mathbf{SF} = F_1 - F_2 = N_1 \mathcal{X}_1 - N_2 \mathcal{X}_2$ και η προκύπτουσα μαγνητική ροή μέσα στον πυρήνα υπολογίζεται από την σχέση:

Εάν η τάση της πηγής που εφαρμόζεται στην είσοδο παραμένει αμετάβλητη, τότε, για να διατηρηθεί η ισορροπία των τάσεων στην πλευρά του πρωτεύοντος πρέπει και η επαγόμενη ΗΕΔ e_1 να παραμείνει σταθερή. Με άλλα λόγια το αναγκαίο ποσό της μαγνητικής ροής μέσα στον πυρήνα, το οποίο επάγει την συγκεκριμένη τιμή της ΗΕΔ e_1 που ισορροπεί την τάση της πηγής, πρέπει να παραμείνει σταθερό. Επομένως το αναγκαίο ποσό του ρεύματος μαγνητίσεως I_m , για την δημιουργία της συγκεκριμένης τιμής της μαγνητικής ροής, είναι το ίδιο με αυτό κατά την εν κενώ λειτουργία του Μ/Σ. Άρα:

$$N_1 \mathcal{X}_m = R \mathcal{F}$$

Από τις σχέσεις 2.13 και 2.14 προκύπτει:

$$N_1 \mathcal{X}_1 - N_2 \mathcal{X}_2 = N_1 \mathcal{X}_m \quad \text{ᾤ} \quad N_1 \mathcal{X}_1 = N_1 \mathcal{X}_m + N_2 \mathcal{X}_2 \quad \text{ᾤ} \quad I_1 = I_m + \frac{N_2}{N_1} \mathcal{X}_2 = I_m + I_2'$$

Οπότε για να διατηρηθεί η ισορροπία των τάσεων στην πλευρά του πρωτεύοντος πρέπει τα μέτρα των τάσεων αυτών να παραμείνουν τα ίδια όπως ήταν κατά την εν κενώ λειτουργία. Για αυτόν το λόγο, το

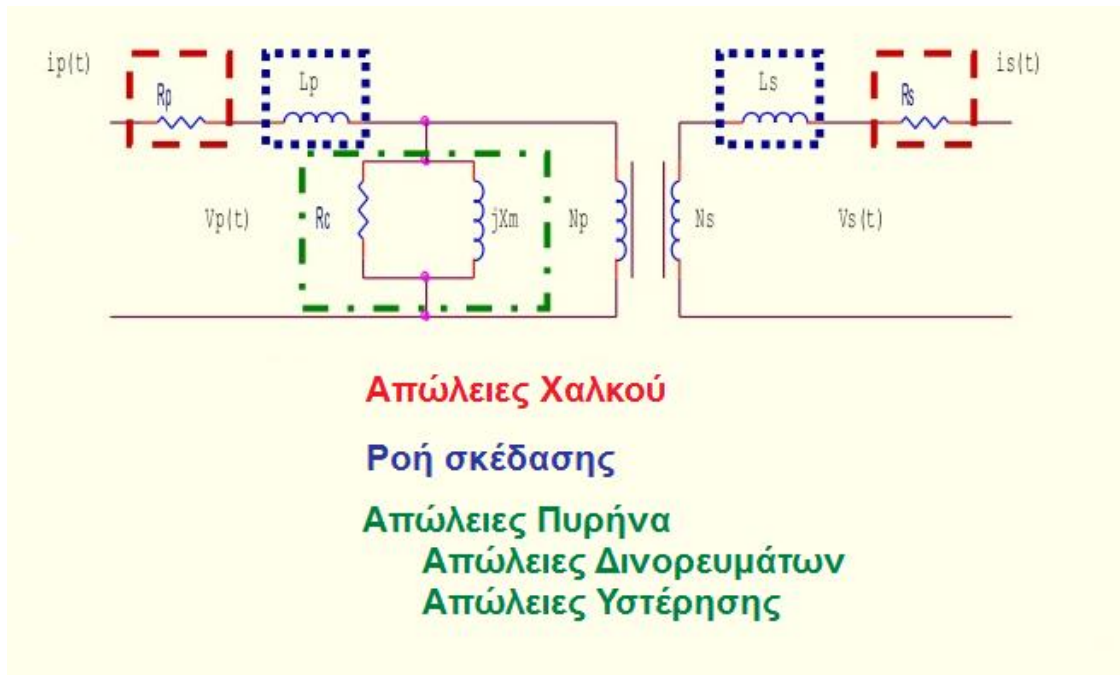
ρεύμα του πρωτεύοντος αυξάνεται κατά $I_2' = \frac{N_1}{N_2} \mathcal{X}_2$ ώστε να αντισταθμίζει την μαγνητεγερτική δύναμη του δευτερεύοντος

τυλίγματος. Το ποσό του ρεύματος αυτού, I'_2 , καλείται «ρεύμα αντιδράσεως». Καθώς μεταβάλλεται το μέγεθος του φορτίου Z_L , μεταβάλλεται το ρεύμα του δευτερεύοντος τυλίγματος I_2 και εφ' όσον το ρεύμα μαγνήτισης I_m παραμένει σταθερό, το ρεύμα αντιδράσεως I'_2 ακολουθεί αυτήν την μεταβολή ώστε να αντισταθμίζει την αντίστοιχη μαγνητεγερτική δύναμη του δευτερεύοντος τυλίγματος και να αποκαθίσταται η ισορροπία των τάσεων.

4.5 Ισοδύναμο Πραγματικού Μονοφασικού Μετασχηματιστή για τη μόνιμη Κατάσταση

Κατά την μελέτη του ιδανικού μονοφασικού μετασχηματιστή που προηγήθηκε, έχουν αμεληθεί εντελώς οι απώλειες που λαμβάνουν χώρα κατά την λειτουργία του πραγματικού μετασχηματιστή. Στην ενότητα αυτή εξετάζεται η λειτουργία του πραγματικού μετασχηματιστή και από τη μελέτη που θα ακολουθήσει θα εξαχθεί το βασικό ισοδύναμο κύκλωμα της λειτουργίας του. Ωστόσο επειδή η μελέτη που ακολουθεί έχει σαν στόχο την εξαγωγή των βασικών αρχών της λειτουργίας του μετασχηματιστή, η χωρητικότητα των τυλιγμάτων θεωρείται αμελητέα προς αποφυγή της πολυπλοκότητας των σχέσεων που θα εξαχθούν. Η υπόθεση αυτή είναι έγκυρη για όλες σχεδόν τις περιπτώσεις, εκτός των περιπτώσεων εκείνων κατά τις οποίες η συχνότητα λειτουργίας f , έχει αρκετά υψηλές τιμές. Στις περιπτώσεις αυτές η επίδραση της χωρητικότητας μπορεί να ληφθεί υπ' όψιν με διάφορους προσεγγιστικούς τρόπους.

Στην Εικόνα 4.13, φαίνεται το κυκλωματικό διάγραμμα ενός μονοφασικού μετασχηματιστή, στο οποίο δείχνονται οι ωμικές αντιστάσεις των τυλιγμάτων R_1 και R_2 , οι επαγωγικές αντιστάσεις $X_{\sigma 1}$ και $X_{\sigma 2}$ που εκφράζουν τη σκέδαση της μαγνητικής ροής, καθώς και την X_m η οποία εκφράζει την αμοιβαία μαγνητική ροή Φ_m .



Εικόνα 4.13: Ισοδύναμο κύκλωμα ενός πραγματικού μονοφασικού μετασχηματιστή.

Το ρεύμα μαγνήτισης είναι ανάλογο της τάσης που εφαρμόζεται στον πυρήνα του μετασχηματιστή ενώ η κυματομορφή του έπεται της κυματομορφής της τάσης κατά 90° . Έτσι το ρεύμα αυτό αντιστοιχίζεται σε μία αντίδραση X_m τοποθετημένη παράλληλα στην πηγή τάσης. Τέλος το ρεύμα απωλειών του πυρήνα I_{Fe} (απώλειες οφειλόμενες στο φαινόμενο της υστέρησης και στα δινορεύματα) είναι ανάλογο της τάσης που εφαρμόζεται στον πυρήνα του μετασχηματιστή και η κυματομορφή του είναι σε φάση με την κυματομορφή της τάσης. Έτσι αυτό το ρεύμα είναι δυνατό να παρουσιάζεται με μια αντίσταση R_{Fe} τοποθετημένη παράλληλα στην πηγή τάσης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

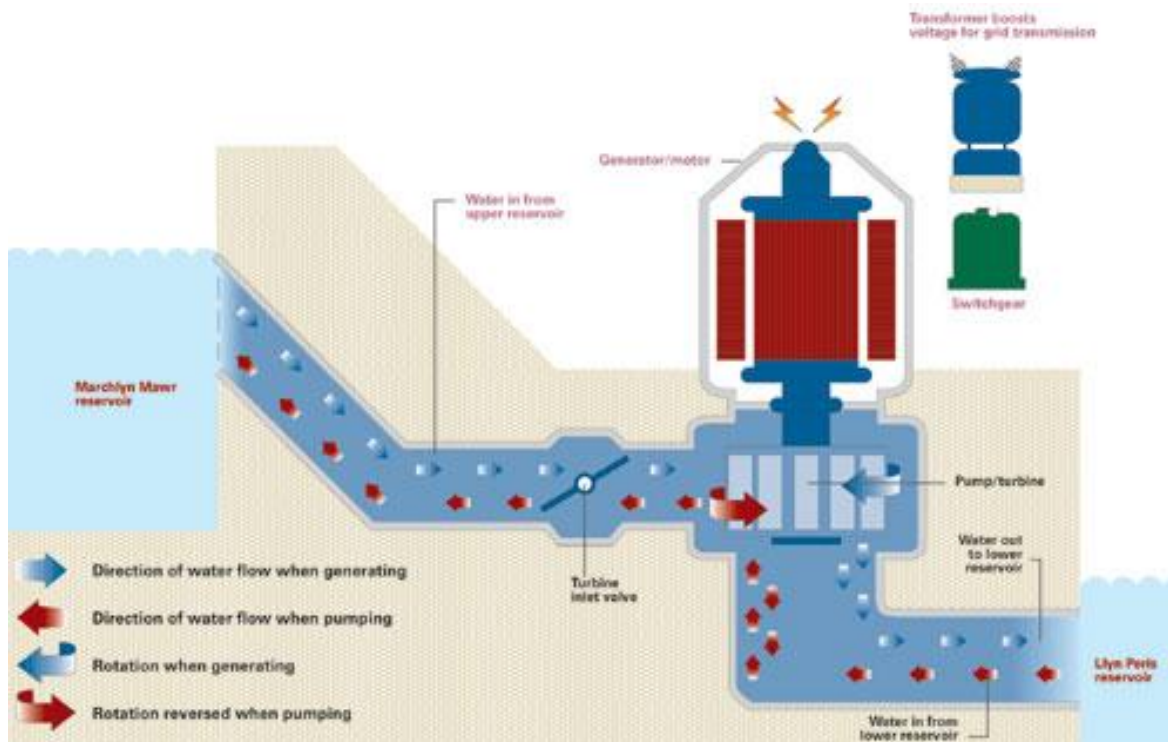
5.1 Γενικές Αρχές Λειτουργίας

Τα συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας μπορούν να ταξινομηθούν ως εξής:

1. Δυναμική Ενέργεια: Αντληση νερού, Συμπιεσμένος αέρας, Ελατήρια
2. Κινητική Ενέργεια: Σφόνδυλοι
3. Χημική Ενέργεια: Συνθετικά καύσιμα (από τον γαιάνθρακα, υγρά και αέρια, και από τη βιομάζα), Ηλεκτροχημικές ενεργειακές πηγές (Συσσωρευτές, Υδρογόνο - υγρό ή αέριο-, στοιχεία καυσίμων - fuel cells)

5.2 Αποθήκευση Ηλεκτρισμού με Δυναμική Ενέργεια (αντλησιοταμίευση)

Η αρχή της μεθόδου είναι απλή. Χρησιμοποιεί την περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας (κατά τη διάρκεια χαμηλής ζήτησης) για να μεταφέρει νερό από ένα χαμηλότερο σε έναν υψηλότερο υδάτινο ταμιευτήρα (τεχνητό ή φυσικό) κατά τη διάρκεια της νύχτας που υπάρχει περίσσεια ηλεκτρικής ισχύος. Η ανάκτηση της ενέργειας εξαρτάται από τον όγκο του νερού και από το ύψος πάνω από τον στρόβιλο. Για να είναι αποδοτική η αντλησιοταμίευση απαιτείται τουλάχιστον 100 m ύψος, ενώ συνήθως ο κατώτερος ταμιευτήρας είναι τεχνητός (με εκσκαφή). Η μονάδα δεν επηρεάζει τη φυσική ροή της λίμνης, ενώ περιορίζεται η συγκέντρωση ιζημάτων στον πυθμένα του ταμιευτήρα.



Εικόνα 5.1: Σχηματικό διάγραμμα αποθήκευσης υδροενέργειας με άντληση.

Επειδή η υδροϊσχύς έχει απόδοση περίπου 80-90%, η συνολική απόδοση της μεθόδου ανέρχεται σε 65-70% (και ίσως λίγο λιγότερο, γιατί η απόδοση για την ανύψωση του νερού είναι μικρότερη από 0,8). Η μέθοδος εφαρμόζεται από το 1929 στις Η.Π.Α. και σήμερα ακόμη παραμένει ουσιαστικά η κυριότερη, σχεδόν η μοναδική, μέθοδος αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας. Η μεγαλύτερη εγκατάσταση στον κόσμο βρίσκεται στη λίμνη Michigan ($1,5 \times 10^7$ kWh).



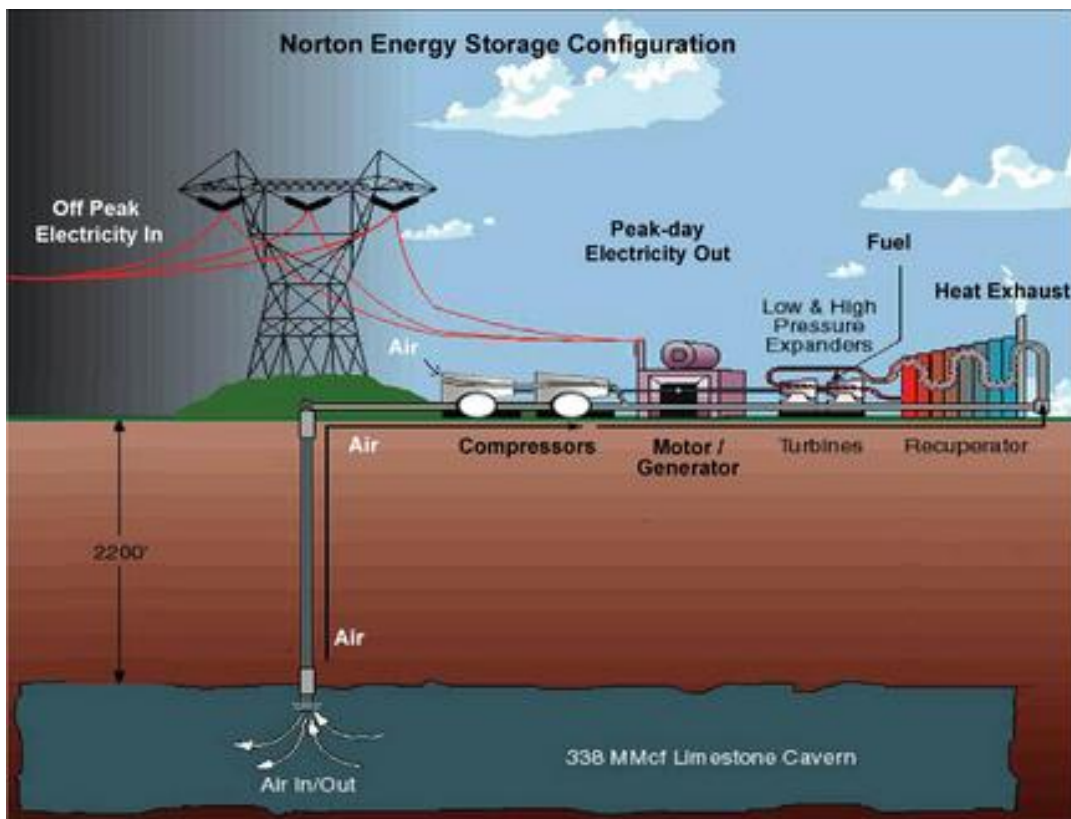
Εικόνα 5.2: Η μεγαλύτερη εγκατάσταση αντλησιοταμίευσης στον κόσμο Michigan

Πλεονέκτημα της μεθόδου είναι και η γρήγορη εκκίνηση και διακοπή λειτουργίας του συστήματος (μέσα σε 30 δευτερόλεπτα). Ο κυριότερος περιορισμός στην ανάπτυξη της μεθόδου είναι το υψηλό κόστος κατασκευής των τεχνητών ταμιευτήρων, αλλά υπάρχουν και γεωλογικοί, γεωγραφικοί και περιβαλλοντικοί περιορισμοί. Σήμερα διερευνάται η δυνατότητα χρήσης υπόγειων ταμιευτήρων.

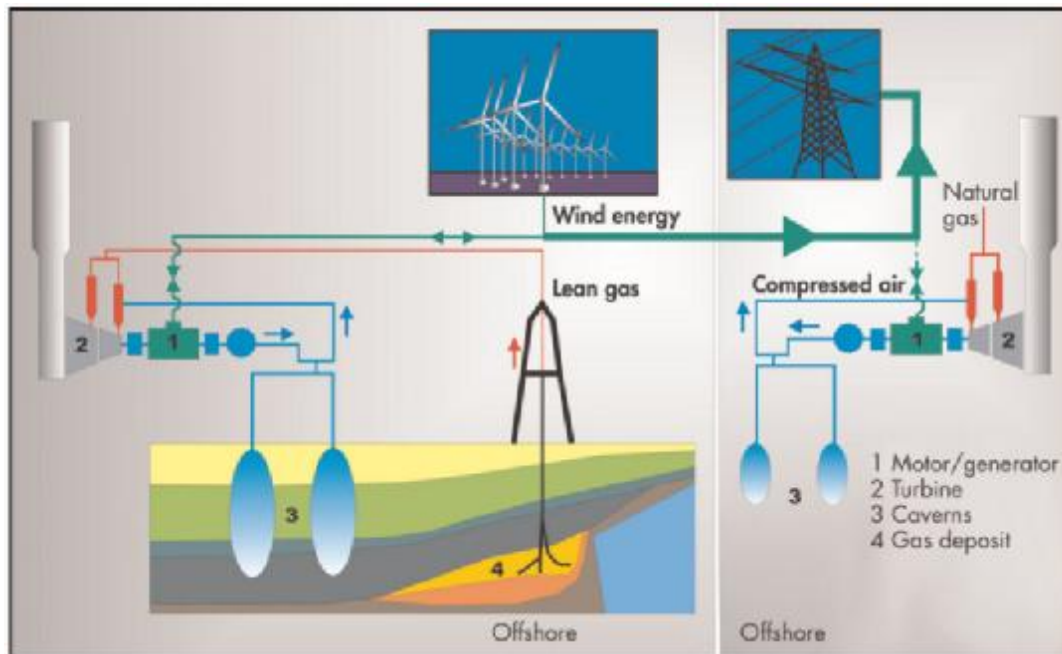
5.3 Συμπιεσμένος Αέρας

Η μέθοδος χρησιμοποιεί ηλεκτρική ενέργεια εκτός ωρών αιχμής για να συμπιέσει και να αποθηκεύσει αέρα σε αεροστεγή υπόγεια σπήλαιο. Όταν υπάρξει ανάγκη ο αποθηκευμένος αέρας απελευθερώνεται, θερμαίνεται και εκτονώνεται μέσω αεριοστροβίλου. Η τεχνική έχει υψηλή ικανότητα αποθήκευσης ενέργειας συγκρινόμενη με τις εναλλακτικές μεθόδους. Η αποθηκευμένη ενέργεια είναι περίπου 10 φορές υψηλότερη ανά m^3 από την άντληση νερού. Σήμερα μπορούν να κατασκευαστούν μονάδες από 5 μέχρι 350 MW. Στις Η.Π.Α. από το 1991 λειτουργεί επίσης μονάδα 110 MW στην Alabama. Παρακάτω περιγράφεται η μονάδα που βρίσκεται στο Huntorf της Γερμανίας.

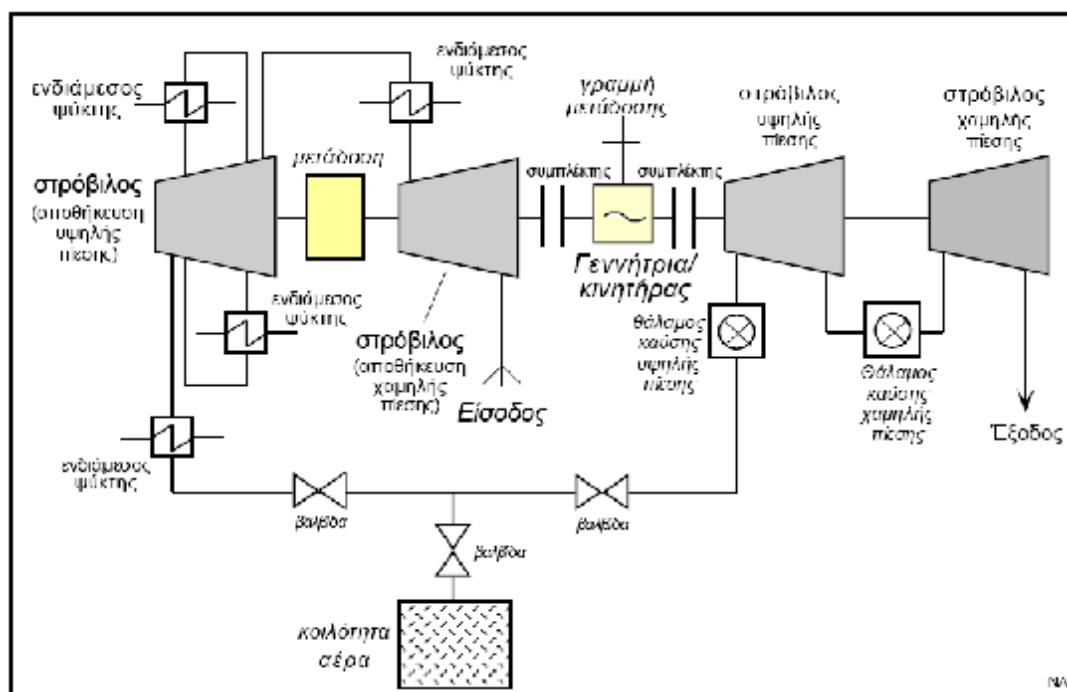
- Ο ταμιευτήρας αποθήκευσης είναι υπόγειο σπήλαιο (σε αποθέσεις φυσικού αλατιού)
- Ο όγκος αποθήκευσης είναι 300.000 m³.
- Ο αέρας συμπιέζεται στις 70 atm (Η συμπίεση γίνεται με ηλεκτρικούς συμπιεστές)
- Το σύστημα αποδίδει 300 MW για 2 ώρες χρησιμοποιώντας το συμπιεσμένο αέρα για να λειτουργήσει ένας στρόβιλος
- Δύσκολο να εκτιμηθεί η απόδοση του συστήματος, αν και δεν είναι υψηλή.
- Δυο παράγοντες είναι υπεύθυνοι για την όχι και τόσο καλή απόδοση του συστήματος:
 - ο Απαιτείται ενέργεια για να ψύξει τον αέρα καθώς αυτός συμπιέζεται. Κρίσιμη προϋπόθεση.
 - ο Απαιτείται ενέργεια (καύσιμο) για να διαστείλει τον αποθηκευμένο ψυχρό αέρα πριν μπει στο στρόβιλο
- Επιθυμητό χαρακτηριστικό του σχεδιασμού θα ήταν η ανακύκλωση της απορριπτόμενης ενέργειας από το στάδιο της συμπίεσης και της χρήσης της στο στάδιο της εκτόνωσης.



Εικόνα 5.3: Δομή μονάδας συμπιεσμένου αέρα



Εικόνα 5.4: Μονάδα συμπιεσμένου αέρα συνεργαζόμενη με ανεμογεννήτριες



Εικόνα 5.5: Σχηματικό διάγραμμα της μονάδας αποθήκευσης αέρα με συμπιεσμένο αέρα στο Hunterf της Γερμανίας.

5.4 Αποθήκευση Ηλεκτρισμού με Κινητική Ενέργεια

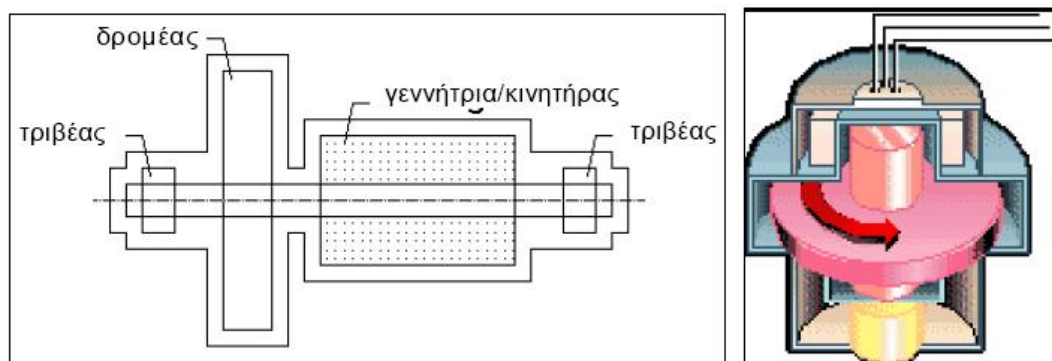
5.4.1 Σφόνδυλοι (flywheels)

Οι σφόνδυλοι αποθηκεύουν κινητική ενέργεια σε ένα δρομέα (rotor) και λειτουργούν ως μια μηχανική μπαταρία. Η διάμετρος του δρομέα ποικίλλει από μερικά εκατοστά μέχρι ορισμένα μέτρα, με ταχύτητες περιστροφής που ξεπερνούν της 200.000 rpm. Λειτουργούν άλλοτε ως γεννήτριες και άλλοτε ως κινητήρες. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν αποτελεσματικά και εκεί που υπάρχει απότομα διαθέσιμη ενέργεια (π.χ. φρενάρισμα). Έχουν προταθεί για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των ηλεκτρικών αυτοκινήτων. Μέχρι τώρα βρίσκονται σε πειραματικό στάδιο, είναι αντικοινομικοί και δεν υπάρχει εφαρμογή σε μονάδα ηλεκτροπαραγωγής.

Τα βασικά μέρη ενός σφονδύλου είναι:

- (1) ο δρομέας,
- (2) ο άξονας,
- (3) το δοχείο κενού που το περιβάλλει και
- (4) η γεννήτρια.

Ο δρομέας κατασκευάζεται από υλικό με μεγάλη αντοχή σε εφελκυσμό και χαμηλή πυκνότητα (π.χ. Kevlar - είδος carbon fiber-, πυρίτιο).



Εικόνα 5.6: Σχηματική παράσταση ενός μηχανικού σφονδύλου.

Η κινητική ενέργεια που αποθηκεύεται σε ένα σφόνδυλο δίνεται από

$$E_k = \frac{1}{2} I \omega^2$$

τον τύπο

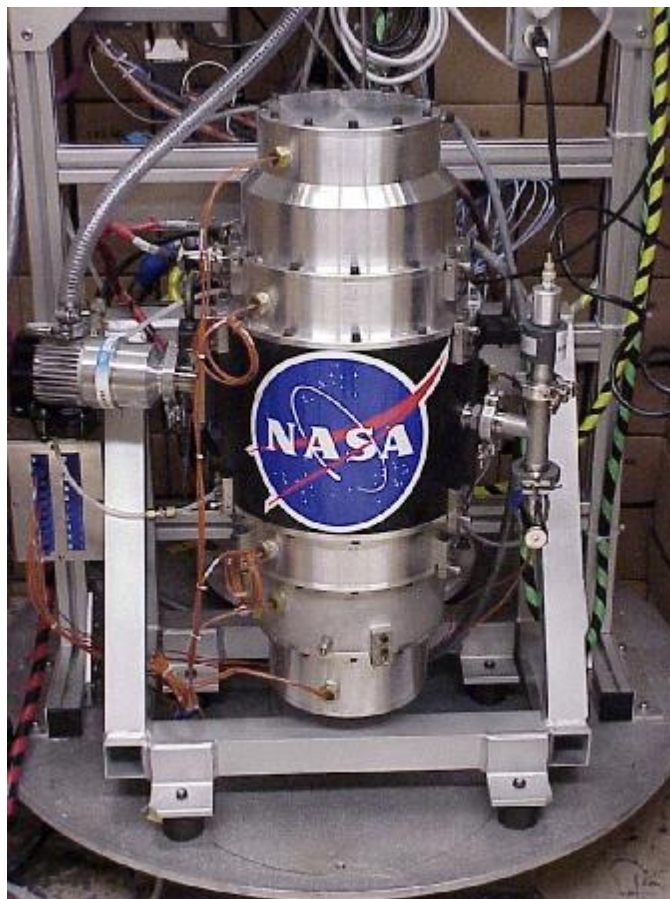
όπου I είναι η ροπή αδρανείας (kg m^2) και ω η ταχύτητα περιστροφής (rad/s). Οι σφόνδυλοι έχουν ικανότητα αποθήκευσης από 0,5-500 kWh.

Πλεονεκτήματα:

- Υψηλή απόδοση: ~80%
- Δεν επηρεάζεται από τη θερμοκρασία
- Μεγάλος χρόνος ζωής

Μειονεκτήματα

- Απώλειες με το χρόνο (κατάλληλο για σχετικά βραχυπρόθεσμη αποθήκευση, κατάλληλο για συστήματα UPS) *Προκλήσεις*
- Μείωση του βάρους του συστήματος
- Ανάπτυξη δοχείου κενού
- Μείωση του κόστους



Εικόνα 5.7: Μηχανικός σφόνδυλος της NASA

5.5 Αποθήκευση Ηλεκτρισμού με Χημική Ενέργεια

5.5.1 Συσσωρευτές

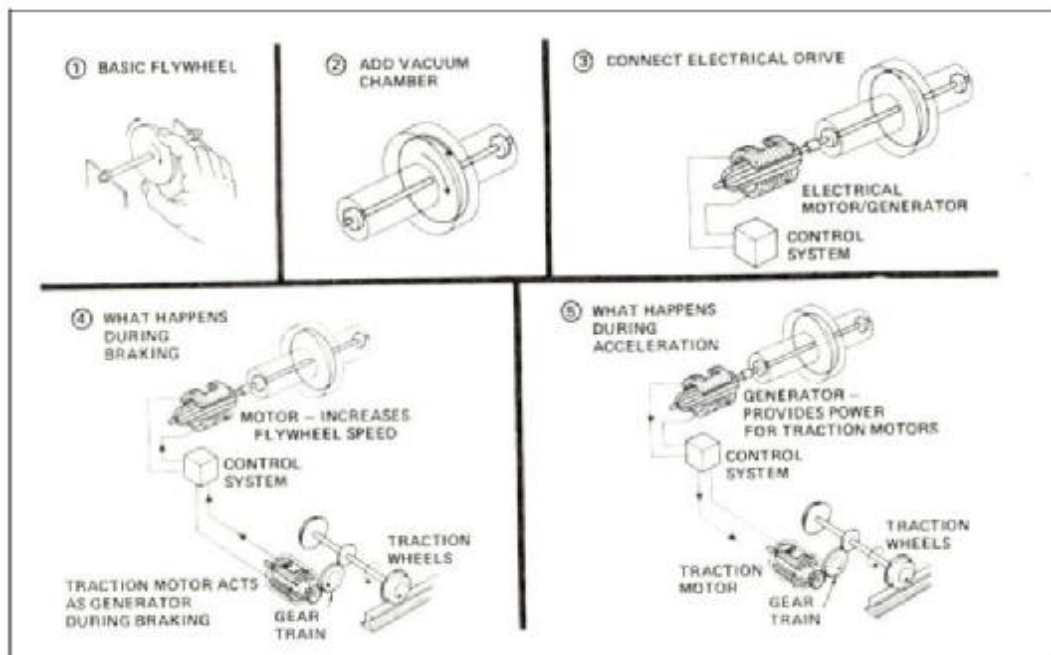
Υπάρχει ανάγκη για ανάπτυξη αξιόπιστων συσσωρευτών, ανώτερης ποιότητας από τα συμβατικά συστήματα των συσσωρευτών μολύβδου-οξέος, που θα διαρκούν για περισσότερους από 2000 κύκλους φόρτισης-αποφόρτισης. Οι συσσωρευτές μολύβδου-οξέος εφευρέθηκαν το 1859 από τον Gaston Planté και χρησιμοποιούνται ακόμη ευρύτατα στο μεταφορικό τομέα, για αποθήκευση ηλιακής ενέργειας κτλ. Οι περιορισμοί τους είναι:

(α) απαιτούν συχνή συντήρηση για αντικατάσταση του νερού που χάνεται,

(β) είναι σχετικά ακριβά για ευρεία χρήση στα ΦΒ συστήματα και

(γ) επειδή χρησιμοποιούν μόλυβδο είναι σχετικά βαριά.

Τα πλεονεκτήματά τους είναι ότι έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής και υπάρχουν διαθέσιμα στο εμπόριο σε μεγάλη ποικιλία.



Εικόνα 5.8: Τρόπος λειτουργίας του μηχανικού σφονδύλου.

Οι περιοχές ισχύος των συσσωρευτών κυμαίνονται ανάλογα με τη χρήση:

(1) 1-4 kW για οικιακή χρήση

(2) 30-100 kW για εμπορική, βιομηχανική ή οικιστική χρήση

(3) >1 MW για σύνδεση με το δίκτυο.

Υποψήφια εναλλακτικά συστήματα υπάρχουν πολλά και, σίγουρα, πολλά ακόμη βρίσκονται σε πειραματικό στάδιο (όπως το σύστημα ψευδάργυρος-βρώμιο): - νικέλιο-ψευδάργυρος και νικέλιο-σίδηρος, παρέχουν ορισμένες βελτιώσεις - ψευδάργυρος-χλώριο, νάτριο-θείο, λίθιο-θειούχος σίδηρος μπορούν να παρουσιάζουν σημαντικές βελτιώσεις. Μειονέκτημα το υψηλό κόστος και τα μέτρα ασφάλειας για μεγάλες μονάδες

2) Το υδρογόνο ως δευτερογενές καύσιμο

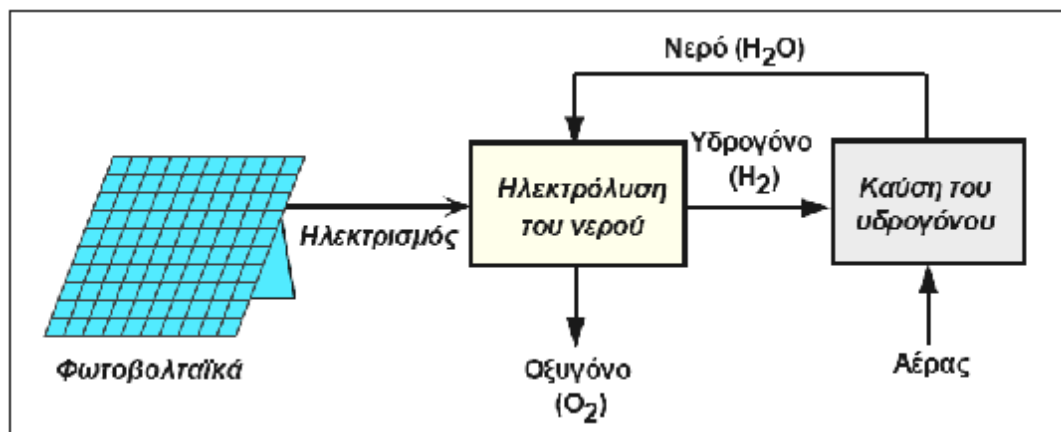
Θεωρείται από ορισμένους ως το «απόλυτο» καύσιμο και μέσο αποθήκευσης του μέλλοντος. Αυτό γιατί μπορεί να παραχθεί από το νερό, που ως καύσιμο μπορεί να διαρκέσει για τουλάχιστον 1000 χρόνια. Το υδρογόνο είναι το πιο άφθονο στοιχείο στον κόσμο και στη Γη συνήθως βρίσκεται ενωμένο με το οξυγόνο στο νερό. Με ηλεκτρόλυση διαχωρίζεται εύκολα από το O_2 , με μέση απόδοση της διεργασίας να φτάνει το 67%. Η καύση του με το O_2 παράγει νερό και κανένα άλλο προϊόν, εκτός από λίγα NO_x . Για να χρησιμοποιηθεί σε μεγάλη κλίμακα θα πρέπει να αποθηκευτεί σε θερμοκρασία 20 K (= -253°C). Η πυκνότητα του υγρού H_2 είναι 1000 μεγαλύτερη από την πυκνότητα του αερίου.. Η κρυογονική εγκατάσταση για την υγροποίηση του υδρογόνου είναι εν γένει λιγότερη δαπανηρή από την εγκατάσταση άντλησής του και μεταφοράς. Η απόδοση της διεργασίας κρυογονικής αποθήκευσης του υδρογόνου ανέρχεται στο 25%. Εκτός από την καύση, το υδρογόνο μπορεί να χρησιμοποιηθεί στα στοιχεία καυσίμων H_2 . Με τη χρήση καταλύτη ενώνεται το υδρογόνο με το οξυγόνο δίνοντας νερό και ηλεκτρισμό, με απόδοση 85%.

Παραγωγή υδρογόνου

Παράγεται σήμερα κυρίως καταλυτικά από CH_4 και ατμό σε σημαντικές ποσότητες για την παρασκευή της NH_3 και με μερική οξειδωση βαρέων κλασμάτων πετρελαίου. Υπάρχουν βέβαια πολυάριθμες άλλες μέθοδοι. Αν βεβαίως κάποτε η ηλεκτρική ενέργεια από το ήλιο γίνει προσιτή, τότε θα παράγεται το υδρογόνο με ηλεκτρόλυση

Προβλήματα με τη χρήση υδρογόνου

1. Για να ικανοποιηθεί το 10% της ενεργειακής κατανάλωσης των Η.Π.Α. απαιτούνται μονάδες με ισχύ ~400.000 MW (διπλάσιο από τη σημερινή ισχύ!) για την ηλεκτρόλυση του H₂.
2. Είναι εξαιρετικά εκρηκτικό, περισσότερο και από το φυσικό αέριο. Μπορεί να εκραγεί με αέρα σε συγκέντρωση 4-75%. Η ενέργεια ανάφλεξης του πολύ μικρή.



Εικόνα 5.9: Σχηματική παράσταση παραγωγής υδρογόνου από ηλιακή ενέργεια.

Τα γενικά χαρακτηριστικά του υδρογόνου είναι:

- **Αποθήκευση:** υγροποιημένο, συμπιεσμένο αέριο, και σε υπόγεια αεροστεγή σπήλαια.
- **Μεταφορά αέριου υδρογόνου:**
 - Χρήση υπαρχόντων αγωγών φυσικού αερίου. Για τις ίδιες ενεργειακές ανάγκες απαιτείται τριπλάσιος όγκος H₂, αλλά λόγω της μικρότερης πυκνότητας μεταφέρεται τριπλάσιος όγκος από τους αγωγούς.
 - Η μεταφορά με αγωγούς (σε μεγάλες αποστάσεις) οικονομικότερη από τη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας.
- **Κόστος:**
 - Λόγω της μικρής απόδοσης το υδρογόνο θα είναι πάντοτε ακριβότερο από τον ηλεκτρισμό που παράγει, εάν η σύγκριση γίνει για την ίδια περιοχή. Αν όμως είναι η ενέργεια (π.χ. ηλεκτρική) να μεταφερθεί σε απόσταση 2000 km, τότε αποβαίνει φθηνότερο !
 - Κατασκευή αιολικών πάρκων στην Αλάσκα και ηλιακών στη Σαχάρα.

- Η χρήση υγρού H_2 ως καυσίμου (π.χ. στα αεροπλάνα) έχει μέλλον, αλλά θα πρέπει να υπερπηδηθούν προβλήματα αποθήκευσης και διανομής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΤΟΥ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ

6.1 Ροή Σκέδασης

Κατά την εξέταση του ιδανικού μετασχηματιστή θεωρήσαμε ότι όλες οι δυναμικές γραμμές της μαγνητικής ροής βρίσκονταν περιορισμένες μέσα στον υψηλής μαγνητικής διαπερατότητας πυρήνα. Στην πραγματικότητα όμως μέρος αυτών των γραμμών διαγράφουν διαμέσου του αέρα κλειστούς βρόγχους, διασχίζοντας έτσι εν μέρει τον αέρα και εν μέρει τα αντίστοιχα τυλίγματα. Έτσι προκύπτουν οι «απώλειες σκεδάσεως».

Ορίζεται «μαγνητική ροή σκεδάσεως $\Phi_{1\sigma}$ » ως το ποσό της συνολικής μαγνητικής ροής του πρωτεύοντος, η οποία διαρρέει εν μέρει το τυλίγμα αυτό και εν μέρει τον αέρα. Εφ' όσον ο δρόμος ροής της μαγνητικής ροής σκεδάσεως δεν περιορίζεται μέσα στον πυρήνα αλλά επεκτείνεται και στον αέρα, συμβολίζουμε την μαγνητική αντίσταση του δρόμου αυτού ως $X_{1\sigma}$. Ωστόσο η κατεύθυνση ροής της μαγνητικής ροής σκεδάσεως $\Phi_{1\sigma}$, καθορίζεται από την φορά ροής του ρεύματος I_1 μέσα στο πρωτεύον τυλίγμα.

Όμοια ορίζεται και η «μαγνητική ροή σκεδάσεως $\Phi_{2\sigma}$ » ως το ποσό της συνολικής μαγνητικής ροής του δευτερεύοντος τυλίγματος, που διαρρέει εν μέρει το τυλίγμα αυτό και εν μέρει τον αέρα. Η μαγνητική ροή αυτή προκύπτει από την μαγνητεγερτική δύναμη του δευτερεύοντος τυλίγματος και η κατεύθυνση ροής της προκύπτει από την φορά του ρεύματος i_2 μέσα στο δευτερεύον τυλίγμα. Η μαγνητική αντίσταση του δρόμου ροής της μαγνητικής ροής σκεδάσεως $\Phi_{2\sigma}$ συμβολίζεται με $X_{2\sigma}$.

6.2 Απώλειες Χαλκού

Στους μετασχηματιστές υπάρχουν απώλειες ισχύος που οφείλονται στην αντίσταση των τυλιγμάτων. Οι απώλειες χαλκού εξαρτώνται από τα ρεύματα των τυλιγμάτων γι' αυτό και οι αντιστάσεις που τις δικαιολογούν τοποθετούνται σε σειρά στο ισοδύναμο κύκλωμα.

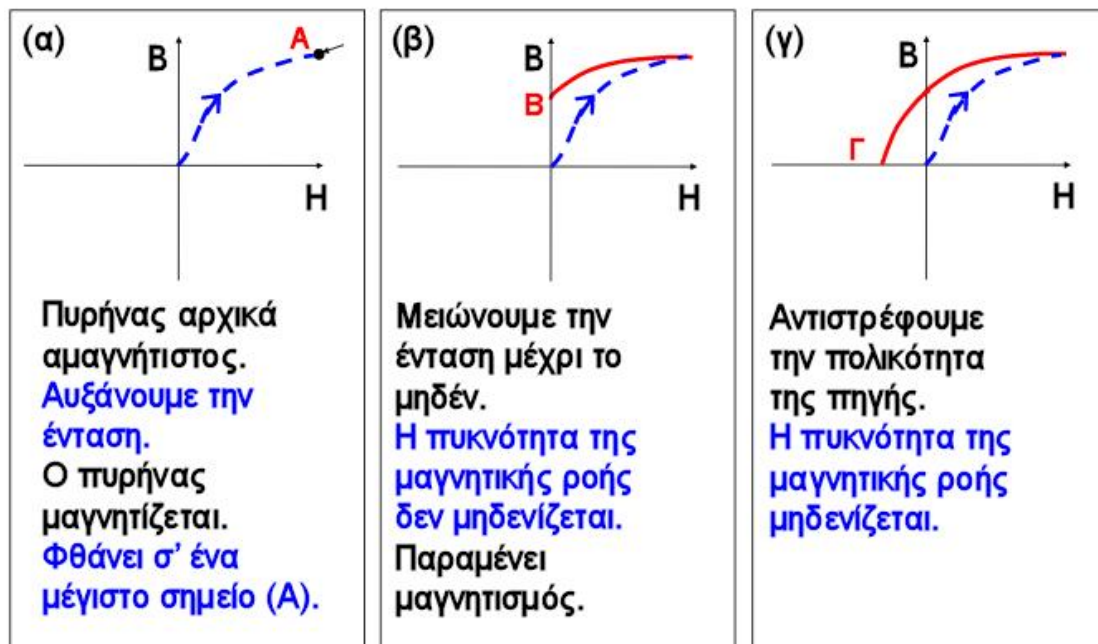
Οι ωμικές αντιστάσεις αφ' ενός προκαλούν πτώσεις τάσεως και αφ' ετέρου απώλειες ισχύος οι οποίες εκδηλώνεται υπό μορφή θερμότητας (φαινόμενο Joule) και είναι γνωστές ως «απώλειες Cu». Για τον περιορισμό αυτών των ωμικών αντιστάσεων, κατά συνέπεια και των απωλειών Cu, είναι αναγκαία η εκλογή της κατάλληλης διατομής των τυλιγμάτων. Επειδή οι μετασχηματιστές απαιτούν μεγάλα μήκη αγωγού, αυτές οι απώλειες μπορεί να είναι σημαντικός παράγοντας. Αυξάνοντας

τη διατομή των τυλιγμάτων, επιτυγχάνουμε μείωση των απωλειών, αλλά με ταυτόχρονη σημαντική αύξηση στο κόστος, το μέγεθος και το βάρος.

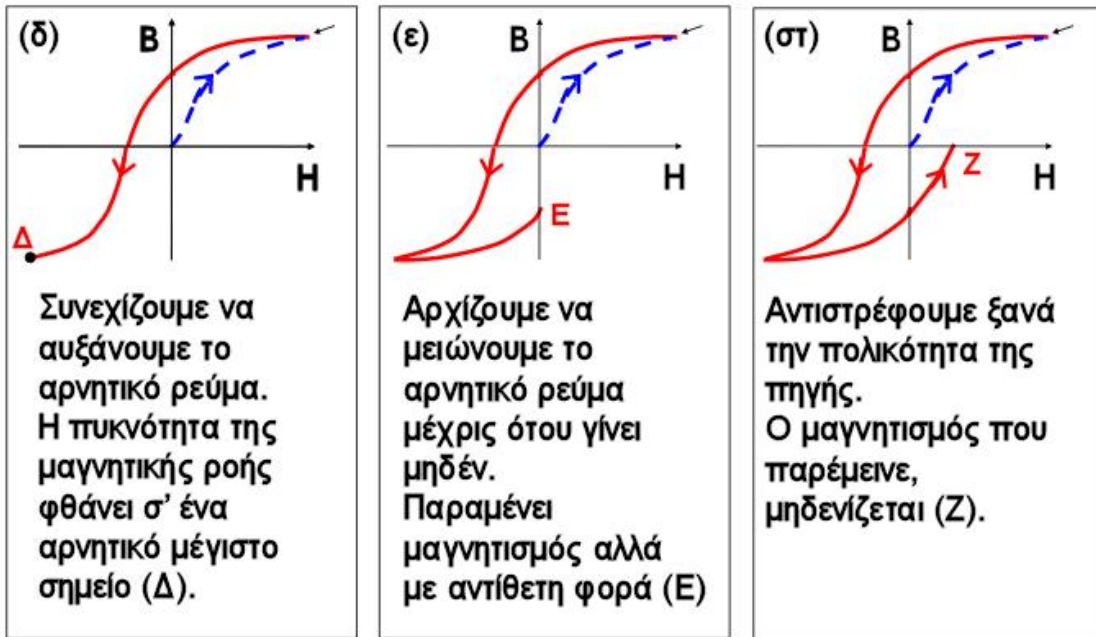
Το τύλιγμα υψηλής τάσης παρουσιάζει μεγαλύτερη ωμική αντίσταση από το τύλιγμα χαμηλής τάσης, γιατί αποτελείται από μεγαλύτερο αριθμό σπειρών. Στην πράξη, οι αντιστάσεις των δύο τυλιγμάτων εκλέγονται έτσι ώστε να ισχύει: $R_1 I_1^2 \gg R_2 I_2^2$, δηλαδή οι απώλειες Cu στα δύο τυλίγματα να είναι περίπου ίσες.

6.3 Απώλειες υστέρησης

Για τιμές της εντάσεως σταθερού - σε τιμή και κατεύθυνση - μαγνητικού πεδίου H καταγράφονται οι αντίστοιχες τιμές της μαγνητικής επαγωγής B του υλικού. Κάνοντας σάρωση των τιμών του H από μια ελάχιστη αρνητική τιμή $[-H]$ έως μια μέγιστη θετική τιμή $[+H]$ τα καταγεγραμμένα σημεία $[H, B]$ απεικονίζονται στο H - B επίπεδο. Όταν ενωθούν τα σημεία αυτά σχηματίζεται ένας βρόχος ο οποίος ονομάζεται στατικός βρόχος υστέρησης ή βρόχος υστέρησης ανεξάρτητος από την συχνότητα ή πιο απλά βρόχος υστέρησης,



Εικόνα 6.1: Αρχική μαγνήτιση και πρώτος μηδενισμός της μαγνητικής ροής



Εικόνα 6.2: Αρνητικός κορεσμός και μηδενισμός του μαγνητισμού



Παρατηρούμε ότι καθώς αυξομειώσαμε την ένταση που μαγνητικού πεδίου (H), αλλάζοντας δύο φορές την πολικότητα της τάσης της πηγής, διαγράψαμε μια καμπύλη. Η καμπύλη αυτή ονομάζεται **βρόγχος υστέρησης**

Εικόνα 6.3: Βρόγχος Υστέρησης

Για κάθε ένα κύκλο περιοδικής μεταβολής της έντασης του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου που επιβάλλεται στον πυρήνα, η ενέργεια που δεσμεύεται μέσα στον πυρήνα καθώς αυξάνεται η ένταση του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, είναι μεγαλύτερη από την ενέργεια που αποδεσμεύεται από τον πυρήνα προς το υπόλοιπο κύκλωμα όταν η ένταση του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου μειώνεται. Το ποσό αυτό της πυκνότητας ενέργειας που χάνεται καλείται «απώλειες υστέρησης».

Αυτό το είδος απωλειών μπορεί να μειωθεί μέσα από μια σωστή επιλογή υλικού για τον πυρήνα, διαλέγοντας π.χ. ένα κράμα με χαμηλή υστέρηση, με «λεπτή» δηλαδή καμπύλη υστέρησης B/H , καθώς επίσης και από μια σχεδίαση η οποία **θα** επιτρέπει ένα ελάχιστο όριο ανοχής του πυρήνα στην πυκνότητα της μαγνητικής ροής (μεγάλη περιοχή διατομής).

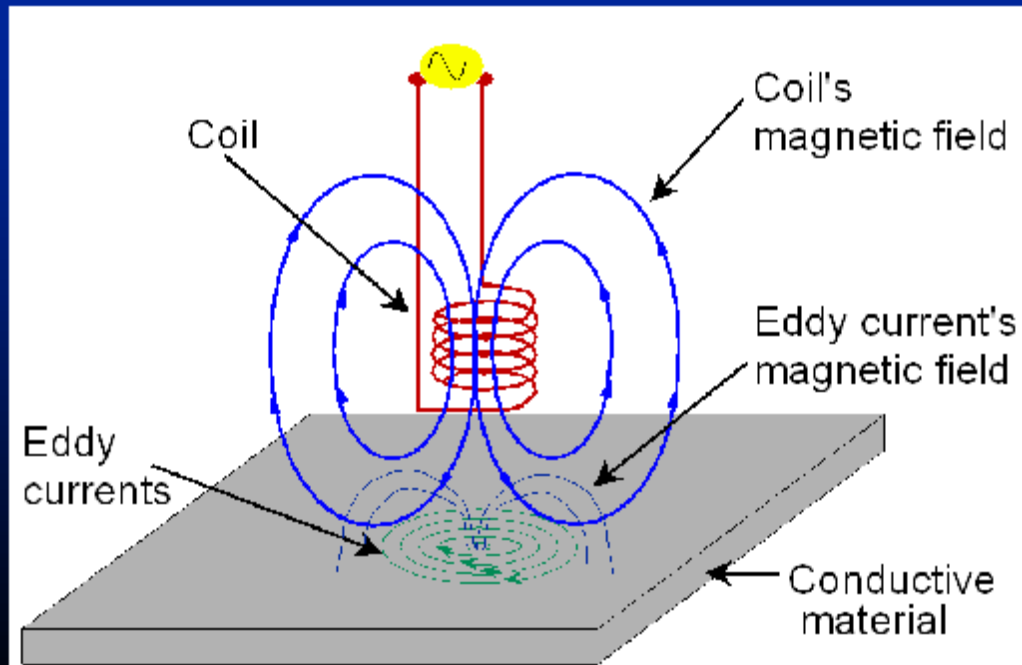
Η αύξηση της θερμοκρασίας του σιδηρομαγνητικού πυρήνα είναι ανεπιθύμητη, γιατί εξασθενεί τις μαγνητικές του ιδιότητες (μειώνεται η μαγνητική του διαπερατότητα). Ωστόσο όλα τα σιδηρομαγνητικά υλικά έχουν ένα όριο θερμοκρασίας, που καλείται θερμοκρασία Curie, πέραν του οποίου αποκτούν παραμαγνητική συμπεριφορά.

6.4 Απώλειες Δινορευμάτων

Ίσως οι πιο σημαντικές από τις «απώλειες πυρήνα» είναι οι απώλειες δινορευμάτων, οι οποίες είναι ωμικές και οφείλονται στη διαδρομή επαγόμενων ρευμάτων μέσα από τον πυρήνα σιδήρου. Όπως ήδη γνωρίζουμε από τον νόμο της επαγωγής του *Faraday*, όταν μια αγώγιμη μάζα βρεθεί μέσα σε ένα χρονικά μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο τότε, εξαιτίας της χρονικά μεταβαλλόμενης μαγνητικής ροής που την διαπερνά, επάγεται σ' αυτήν μια ΗΕΔ. Η επαγόμενη αυτή ΗΕΔ αναγκάζει τα ελεύθερα ηλεκτρόνια της αγώγιμης μάζας να κινηθούν σε τυρβώδεις τροχιές, σχηματίζοντας κλειστούς βρόγχους ή δίνες, γι' αυτό και τα ρεύματα αυτά ονομάζονται «δινορεύματα».

Η ροή των δινορευμάτων μέσα στον σιδηρομαγνητικό πυρήνα έχει ως αποτέλεσμα την κατανάλωση ενέργειας ανάλογη της ποσότητας I^2R , η οποία εκδηλώνεται υπό μορφή θερμότητας μέσα στον σιδηρομαγνητικό πυρήνα (απώλειες Joule) και καλούνται «απώλειες δινορευμάτων». Οι απώλειες δινορευμάτων είναι ανάλογες του γινομένου $I^2 R$ και εξαρτώνται από την ειδική αγωγιμότητα του υλικού πυρήνα και από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πυρήνα.

Eddy Current Testing



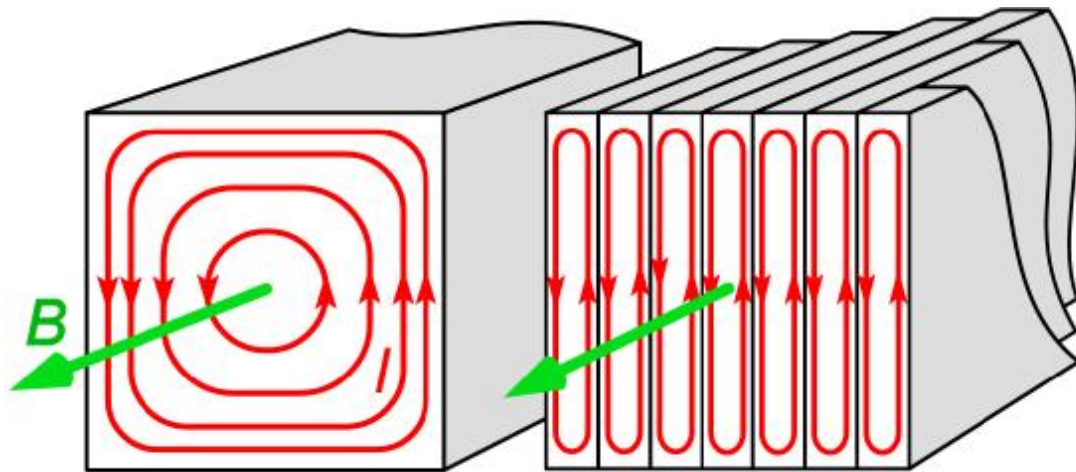
Εικόνα 6.4: Δινορεύματα στον πυρήνα ΜΣ

Η αύξηση της θερμοκρασίας του πυρήνα λόγω των απωλειών δινορευμάτων είναι ανεπιθύμητη γιατί προκαλεί αλλοίωση των μαγνητικών ιδιοτήτων του υλικού του πυρήνα (μείωση της μαγνητικής του διαπερατότητας) και κατά συνέπεια μείωση του βαθμού απόδοσης της ηλεκτρομαγνητικής συσκευής. Μια πολύ γνωστή κατηγορία υλικών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των πυρήνων των μετασχηματιστών ονομάζονται φερρίτες τα οποία είναι οξείδια σιδήρου σε κεραμική μορφή (μαγνητικά κεραμικά όπως τα πιάτα κουζίνας).

Συγκριτικά με τα μαγνητικά κράματα που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των μετασχηματιστών, οι φερρίτες παρουσιάζουν μικρότερη μαγνητική διαπερατότητα μ , μικρότερη μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής B_{max} και είναι ακριβότερα. Τα παραπάνω μειονεκτήματα όμως αντισταθμίζονται από το πλεονέκτημα της μειωμένης ειδικής αγωγιμότητας που παρουσιάζουν, η τιμή της οποίας ουσιαστικά τα καθιστά απαλλαγμένα από δινορεύματα.

Η πιο κοινή μέθοδος που χρησιμοποιείται για την μείωση των

δινορευμάτων είναι η μείωση της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας του πυρήνα. Αυτό επιτυγχάνεται συνήθως με την προσθήκη άλλων υλικών στο βασικό σιδηρομαγνητικό υλικό τον σίδηρο, όπως για παράδειγμα σιλικόνη. Η χρησιμοποίηση όμως ενός κράματος σιδήρου με χαμηλή ειδική αγωγιμότητα δεν μπορεί από μόνη της σαν μέθοδος να μειώσει τα δινορεύματα σε ένα επιθυμητό επίπεδο. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιείται μια επιπρόσθετη μέθοδος που συνίσταται στον τεμαχισμό του πυρήνα σε πολύ λεπτά φύλλα ή ελάσματα. Ο πυρήνας συναρμολογείται από ένα μεγάλο αριθμό τέτοιων ελασμάτων, τα οποία μονώνονται μεταξύ τους με ένα στρώμα μονωτικού υλικού (π.χ. βερνίκι ή κατάλληλο χαρτί), εμποδίζοντας έτσι την ροή ρεύματος μεταξύ τους. Στις παρακάτω εικόνες παρατηρούνται οι διαφορές των δινορευμάτων ανάμεσα σε έναν συμπαγή και σε έναν με ελάσματα πυρήνα σιδήρου.



Εικόνα 6.5: Ελάττωση Δινορευμάτων με χρήση πολλαπλών ελασμάτων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΤΡΙΦΑΣΙΚΟΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗΣ

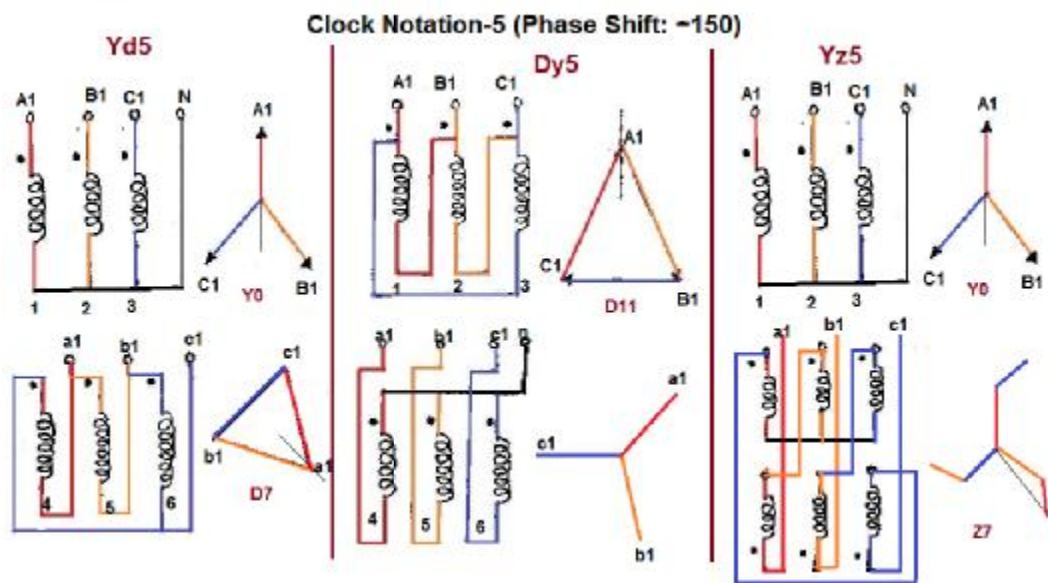
7.1 Συνδεσμολογίες

Τα τρία πρωτεύοντα και τα τρία δευτερεύοντα του μετασχηματιστή μπορούν να συνδεθούν κατά διάφορους τρόπους και έτσι να προκύψουν διάφορες ομάδες συνδεσμολογίας. Στην πράξη μόνο μερικές από αυτές χρησιμοποιούνται λόγω των πλεονεκτημάτων που παρουσιάζουν. Στον Πίνακα που ακολουθεί, αναγράφονται οι συμβολισμοί για τις διάφορες ομάδες συνδεσμολογίας που χρησιμοποιούνται διεθνώς.

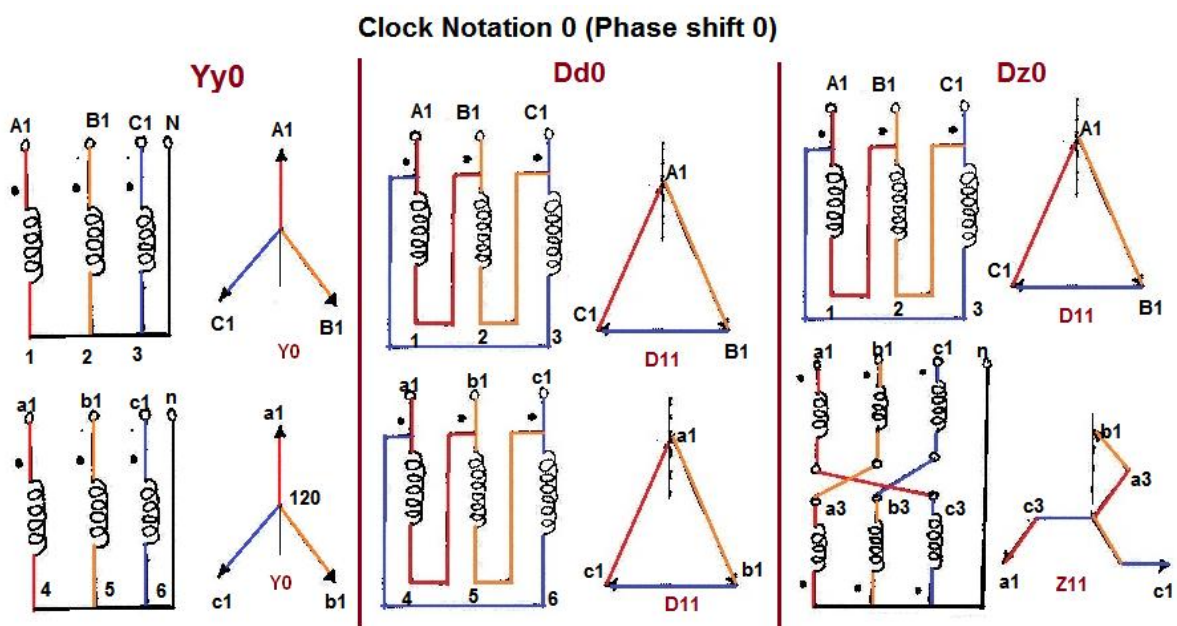
Πίνακας 7.1: Οι συνδεσμολογίες των Μ/Σ που χρησιμοποιούνται διεθνώς

Συνδεσμολογία Τυλίγματος	Υψηλή Τάση	Χαμηλή Τάση
Τρίγωνο	D	D
Αστέρας	Y	Y
Τεθλασμένος αστέρας	Z	Z

Τα κεφαλαία γράμματα αναφέρονται στην υψηλή τάση, ενώ τα μικρά στην χαμηλή. Για ένα πλήρη συμβολισμό γράφουμε πρώτα το κεφαλαίο γράμμα μετά το μικρό και έναν αριθμό, ο οποίος ονομάζεται χαρακτηριστικός αριθμός και είναι ένα πολλαπλάσιο της γωνίας των 30° . Αυτός ο αριθμός επί 30° μας δείχνει κατά πόσες μοίρες το διάνυσμα της χαμηλής τάσης επιπορεύεται του διανύσματος της υψηλής τάσης για την ίδια φάση του πρωτεύοντος και δευτερεύοντος. Παραδείγματα συνδεσμολογιών με χαρακτηριστικούς αριθμούς μαζί με τα διανυσματικά τους διαγράμματα φαίνονται στις Εικόνες 28 και 29



Εικόνα 7.1: Συνδεσμολογίες με χαρακτηριστικούς αριθμούς ^[15]

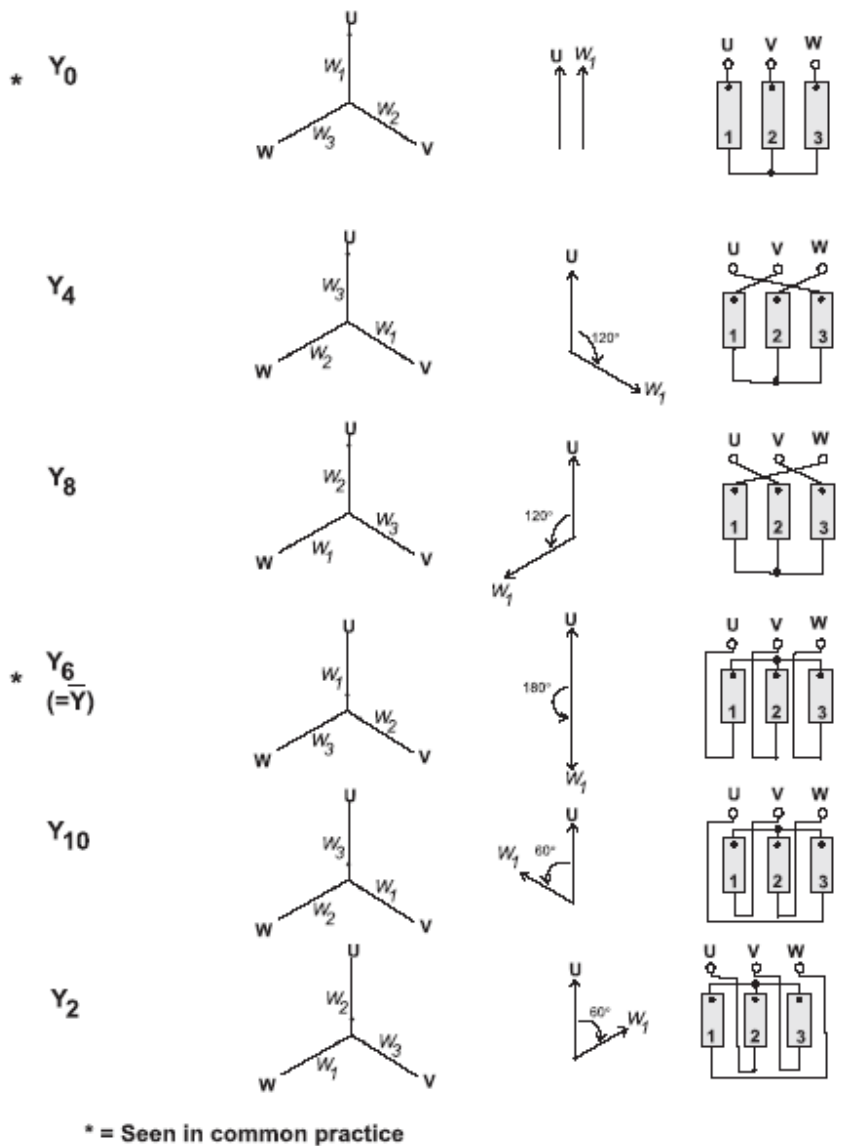


Εικόνα 7.2: Συνδεσμολογίες με χαρακτηριστικούς αριθμούς

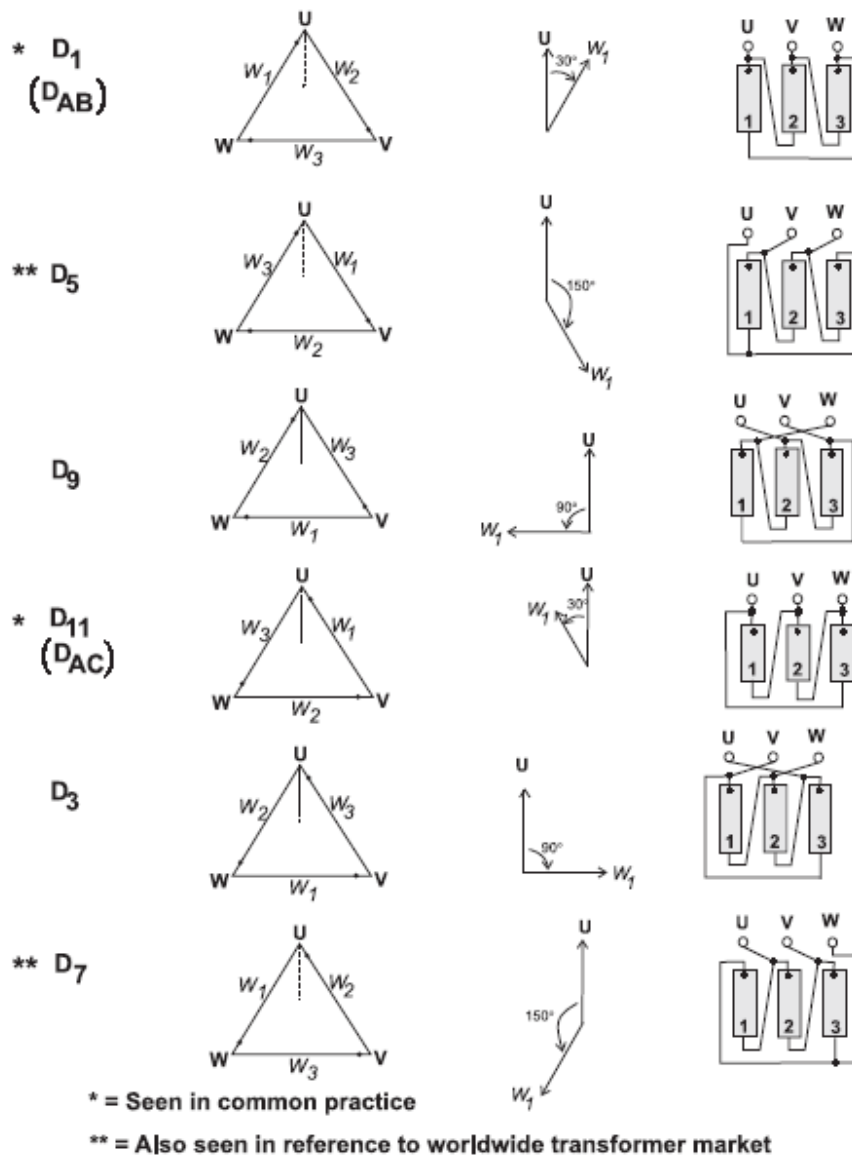
Εφαρμογή συνήθως βρίσκουν οι ομάδες Dy0, Dy5, Yd5, Yz5. Το πρωτεύον και το δευτερεύον τύλιγμα ενός μετασχηματιστή μπορούν να συνδεθούν κατ' αστέρα ή κατά τρίγωνο.

Στο τύλιγμα χαμηλής τάσης υπάρχει και ένα τρίτο είδος συνδεσμολογίας, αυτό του τεθλασμένου αστέρα (Zik-Zak). Στον τεθλασμένο αστέρα κάθε φάση του δευτερεύοντος είναι χωρισμένη σε δύο ίσα μέρη και το ένα μέρος συνδέεται σε σειρά με το μισό μιας άλλης φάσης. Το πλεονέκτημα αυτής της συνδεσμολογίας είναι ότι σε μια ασύμμετρη φόρτιση του δευτερεύοντος το ρεύμα κατανέμεται σε δύο φάσεις. Έτσι στην περίπτωση που ένας καταναλωτής συνδέεται μεταξύ ενός ακροδέκτη και του ουδέτερου σημείου το ρεύμα διέρχεται από δύο τυλίγματα (μισά) σε διαφορετικές φάσεις και η ασυμμετρία μειώνεται.

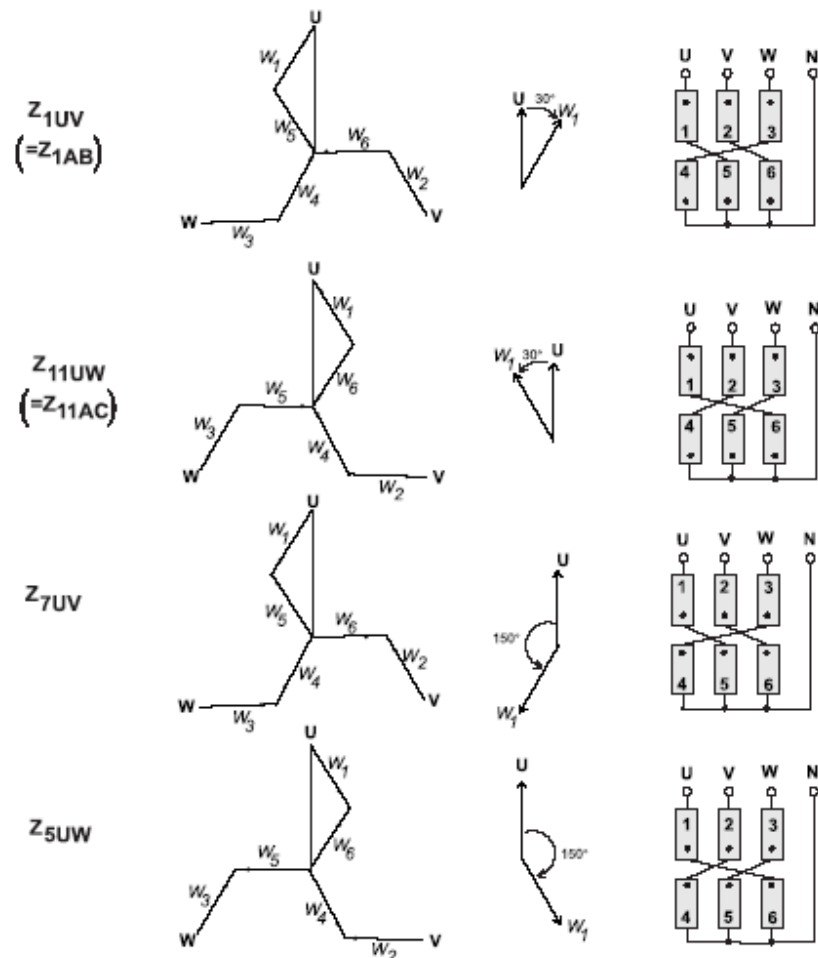
Στις εικόνες που ακολουθούν φαίνονται όλες οι δυνατές συνδεσμολογίες των τριφασικών μετασχηματιστών



Εικόνα 7.3: Συνδεσμολογίες τριφασικών μετασχηματιστών



Εικόνα 7.4: Συνδεσμολογίες τριφασικών μετασχηματιστών

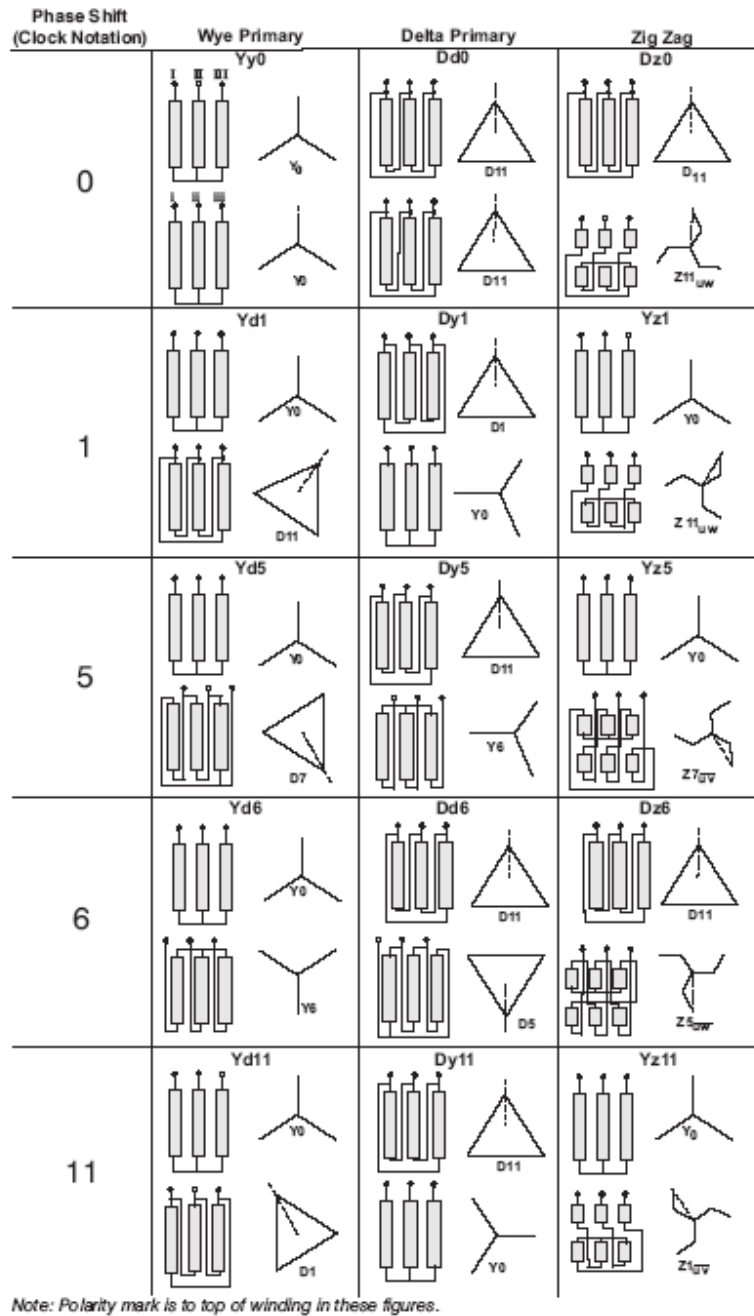


Partial listing of possible configurations:

- A 180° reversal of any of these is found by reversing common and HV terminals.
- Phase shifts via swaps of U, V, W not shown.

Εικόνα 7.5: Συνδεσμολογίες τριφασικών μετασχηματιστών

Στην Εικόνα 7.6 ένας αναλυτικός πίνακας όλων των δυνατών συνδεσμολογιών των τριφασικών μετασχηματιστών κατά IEC 60076-1



Εικόνα 7.6: Κοινές συνδεσμολογίες

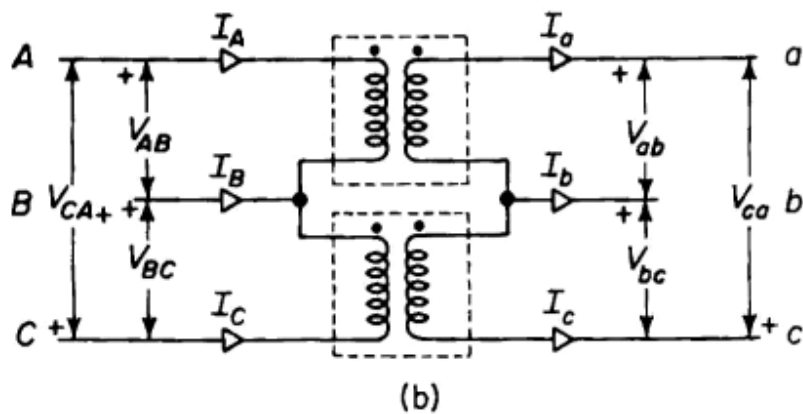
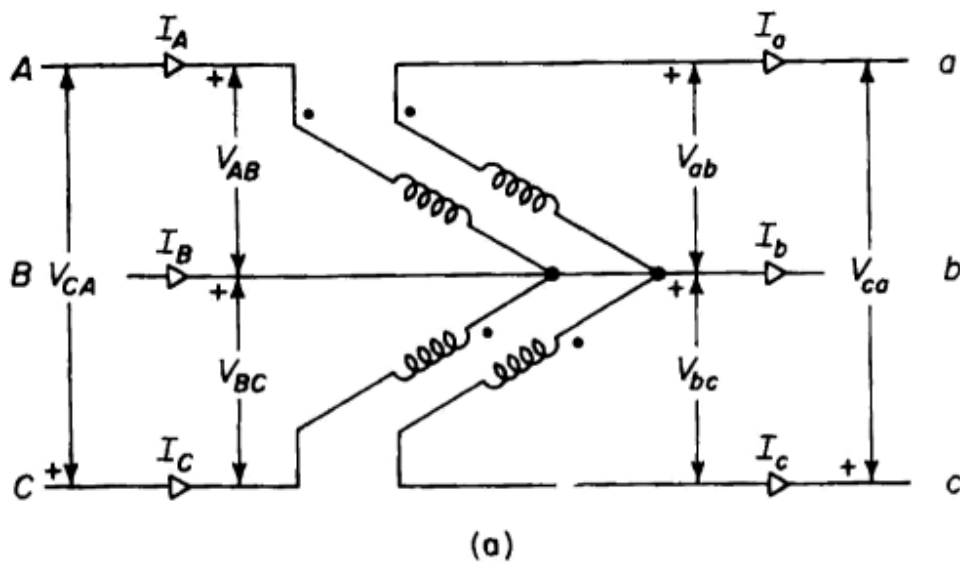
Phase Shift (Clock Notation)	Wye Primary	Delta Primary	Zig Zag
2		Dd2 	Dz2
4		Dd4 	Dz4
7	Yd7 	Dy7 	Yz7
8		Dd8 	Dz8
10		Dd10 	Dz10

Note: Polarity mark is to top of winding in these figures.

Εικόνα 7.7: Πρόσθετες Συνδεσμολογίες

7.2 Τριφασικοί μετασχηματιστές που περιλαμβάνουν μόνο δύο μετασχηματιστές

Η συνδεσμολογία ανοιχτό τρίγωνο (open-delta), επίσης γνωστή και ως σύνδεση V-V, είναι μια τριφασική συνδεσμολογία που χρησιμοποιεί μόνο δύο αντί για τρεις μετασχηματιστές. Η εν λόγω συνδεσμολογία χρησιμοποιείται σε μετασχηματιστές οργάνων μέτρησης για λόγους οικονομίας. Είναι πανομοιότυπη με τη συνδεσμολογία Dd μόνο που έχει δύο μετασχηματιστές



Εικόνα 7.8: Συνδεσμολογία Dd με δύο μετασχηματιστές

7.3 Αστέρας

Η σύνδεση των τριών φάσεων σε αστέρα έχει το πλεονέκτημα ότι η φασική τάση είναι μόνο το $1/\sqrt{3}$ της πολικής, με συνέπεια ο αριθμός των σπειρών ανά φάση να είναι μικρότερος σε σύγκριση με την σύνδεση κατά τρίγωνο, όταν και έχουμε δεδομένη πολική τάση. Αυτό σημαίνει ότι εξοικονομούμε αρκετό μονωτικό υλικό επειδή η τάση μιας φάσης είναι μικρότερη σε σχέση με εκείνης στο τρίγωνο. Συνεπώς, σε πολύ υψηλές τάσεις η συνδεσμολογία κατά αστέρα είναι η ενδεδειγμένη.

Εκτός αυτού, η εν λόγω συνδεσμολογία μας παρέχει το πλεονέκτημα να έχουμε ένα σημείο μηδενικού δυναμικού με το οποίο μπορούμε να συνδέσουμε τον ουδέτερο αγωγό. Το γεγονός αυτό μας επιτρέπει την μονοφασική φόρτιση.

Στα μειονεκτήματα της συνδεσμολογίας αυτής, συναντάμε την δυσκολία κατασκευής των πυρήνων καθώς επίσης και το κόστος των πηνίων.

7.4 Τρίγωνο

Το κύριο πλεονέκτημα της συνδεσμολογίας αυτής είναι η αποφυγή δημιουργίας ανώτερων αρμονικών σε τάσεις και ροές όταν έχουμε ασύμμετρο φορτίο, διότι λόγω του κανόνα των βρόχων πρέπει το άθροισμα των τριών φασικών τάσεων να είναι μηδέν.

Στα μειονεκτήματα συγκαταλέγεται το γεγονός ότι στο τύλιγμα μιας φάσης χρειάζονται περισσότερες σπείρες από ότι στην συνδεσμολογία κατά αστέρα.

7.5 Τεθλασμένος αστέρας

Το κύριο πλεονέκτημα της συνδεσμολογίας αυτής είναι ότι επιτρέπει την μονοφασική φόρτιση στο δευτερεύον. Το πλεονέκτημα αυτό αντισταθμίζεται από την ανάγκη για περισσότερο χαλκό, και κατ' επέκταση αυξημένη οικονομική δαπάνη

Κλείνοντας την παράγραφο αυτή, θα ήταν χρήσιμο να κάνουμε μια αναφορά στις συνδεσμολογίες που βρίσκουν συνήθως εφαρμογή:

- Ο μετασχηματιστής μεταξύ γεννήτριας και γραμμής υψηλής τάσεως

- είναι σε σύνδεση αστέρα-τρίγωνο.
- Ο μετασχηματιστής μεταξύ υψηλής τάσης και καταναλωτή μεγάλης ισχύος συνδέεται σε τρίγωνο-αστέρα. Όταν ο καταναλωτής είναι μικρός χρησιμοποιείται η σύνδεση αστέρας - τεθλασμένος αστέρας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

ΜΕΘΟΔΟΙ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ

Η απόδοση των μετασχηματιστών βελτιώνεται μέσω της μείωσης των απωλειών στον μετασχηματιστή. Οι απώλειες μπορούν να μειωθούν με μεταβολή της σχεδίασης, της κατασκευής, της λειτουργίας και της συντήρησης του μετασχηματιστή καθώς και με εφαρμογή μεθόδων τεχνητής νοημοσύνης. Η πλέον χρησιμοποιούμενη μέθοδος βελτίωσης της απόδοσης του μετασχηματιστή είναι μέσω της μεταβολής της σχεδίασής του.

8.1 Βελτίωση απόδοσης μέσω της σχεδίασης

Η ιδεατή σχεδίαση μετασχηματιστή στοχεύει να ελαχιστοποιήσει τις απώλειες κενού φορτίου και τις απώλειες φορτίου. Για τη μείωση των απωλειών κενού φορτίου συνήθως επιλέγεται η μείωση της μαγνητικής επαγωγής, που σημαίνει περισσότερες σπείρες, με συνέπεια να αυξάνονται οι απώλειες φορτίου. Παρόμοια, αν μειωθεί η πυκνότητα του ρεύματος, θα μειωθούν οι απώλειες φορτίου, όμως στην περίπτωση αυτή απαιτείται περισσότερο μαγνητικό υλικό, οπότε αυξάνονται οι απώλειες κενού φορτίου. Η σχεδίαση με μειωμένες απώλειες είναι ένας συμβιβασμός από τη μια μεριά με την κατανομή των απωλειών στον πυρήνα και στα πηνία και από την άλλη μεριά με το βάρος, το μέγεθος, τον όγκο, την τάση βραχυκύκλωσης, τη μόνωση και το κόστος του μετασχηματιστή.

Οι απώλειες στον πυρήνα και στο πηνίο, συνδέονται μεταξύ τους και μέσω της θερμότητας που παράγουν και μέσω του φυσικού χώρου που καταλαμβάνουν τα συστατικά τους. Οι μετασχηματιστές είναι σχεδιασμένοι για σταθερή θερμοκρασία ανύψωσης, ως αποτέλεσμα της θερμότητας που παράγεται από τις απώλειες του μετασχηματιστή κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του. Το όριο ανύψωσης της θερμοκρασίας είναι ένα σχεδιαστικό όριο και καθορίζεται μέσω σταθερών τιμών. Αν η τιμή της θερμοκρασίας υπερβεί αυτό το όριο, τότε λόγω αστοχίας του μονωτικού μέσου οδηγούμαστε σε μείωση της διάρκειας ζωής του μετασχηματιστή.

Εκτός όμως από τον πυρήνα και το πηνίο, ένας μετασχηματιστής διαθέτει κι άλλα στοιχεία τα οποία επιδρούν στη σχεδίασή του, όπως για παράδειγμα το μονωτικό μέσο ή το δοχείο. Η σχεδίαση του μετασχηματιστή είναι μια σύνθετη διαδικασία που περιλαμβάνει την επιλογή του κατάλληλου υλικού και την επιλογή της κατάλληλης γεωμετρίας.

Οι σύγχρονες τεχνικές σχεδίασης με τη βοήθεια Η/Υ επιτρέπουν πολλές μεταβολές στις μεταβλητές σχεδίασης με αποτέλεσμα την επιλογή της βέλτιστης τεχνικοοικονομικά λύσης. Στον πίνακα 8.1 φαίνεται πως η μεταβολή της σχεδίασης του πυρήνα και των τυλιγμάτων μπορεί να μειώσει τις απώλειες κενού φορτίου καθώς επίσης και πως αυτές οι μεταβολές επηρεάζουν το κόστος του μετασχηματιστή.

Πίνακας 8.1: Εναλλακτικές τεχνικές μείωσης απωλειών.

		Απώλειες Κενού	Απώλειες Φορτίου	Κόστος
Μείωση απωλειών κενού φορτίου				
A.	Χρήση υλικού πυρήνα χαμηλότερων απωλειών	Χαμηλότερες	Αμετάβλητες	Υψηλότερο
B1.	Μείωση μαγνητικής ροής με αύξησης της εγκάρσιας διατομής του πυρήνα	Χαμηλότερες	Υψηλότερες	Υψηλότερο
B2.	Μείωση μαγνητικής ροής με μείωση της τάσης ανά σπείρα	Χαμηλότερες	Υψηλότερες	Υψηλότερο
Γ.	Μείωση του μήκους διαδρομής της ροής με μείωση της εγκάρσιας διατομής του αγωγού	Χαμηλότερες	Υψηλότερες	Χαμηλότερο
Μείωση απωλειών φορτίου				
A.	Χρήση αγωγού χαμηλότερων απωλειών	Αμετάβλητες	Χαμηλότερες	Χαμηλότερο
B.	Μείωση πυκνότητας ρεύματος με αύξηση της εγκάρσιας διατομής του αγωγού	Υψηλότερες	Χαμηλότερες	Υψηλότερο
Γ1.	Μείωση του μήκους διαδρομής του ρεύματος με μείωση της εγκάρσιας διατομής του πυρήνα	Υψηλότερες	Χαμηλότερες	Χαμηλότερο
Γ2.	Μείωση του μήκους διαδρομής του ρεύματος με αύξηση της τάσης ανά σπείρα	Υψηλότερες	Χαμηλότερες	Χαμηλότερο

Στον πίνακα 8.1 εμφανίζονται συγκεντρωτικά οι εναλλακτικές λύσεις που έχει ο σχεδιαστής, έτσι ώστε να επιτύχει έναν μετασχηματιστή με μεγαλύτερη απόδοση. Για τις περισσότερες από αυτές τις εναλλακτικές προσεγγίσεις είναι εμφανής η ισορροπία μεταξύ των απωλειών κενού φορτίου, των απωλειών φορτίου και του κόστους.

8.2 Βελτίωση απόδοσης μέσω της κατασκευής

Οι τεχνικές κατασκευής των μετασχηματιστών μέσω εναλλακτικών μαγνητικών υλικών και διαμορφώσεων του πυρήνα μειώνουν τις απώλειες κενού φορτίου. Οι κατασκευαστές χρησιμοποιούν πυριτιούχο σίδηρο υψηλής μαγνητικής διαπερατότητας, ψυχρής εξέλασης, με προσανατολισμένους κόκκους. Για επιπλέον μειώσεις των απωλειών κενού φορτίου χρησιμοποιούν πυριτιούχο σίδηρο χαραγμένο με laser, στον οποίο οι κόκκοι είναι προσανατολισμένοι κατά την κατεύθυνση της μαγνητικής ροής. Αυτό μειώνει τις απώλειες υστέρησης μέσω της μείωσης της αντίστασης του σιδήρου κατά την διαδικασία της μαγνήτισης και της απομαγνήτισης του. Οποσδήποτε, αυτή η μέθοδος είναι ακριβή και επιλέγεται μόνο όταν ο χρήστης του μετασχηματιστή δίνει μεγάλη βαρύτητα στις απώλειες.

Χρησιμοποιώντας λεπτότερα ελάσματα σιδήρου, ο κατασκευαστής του μετασχηματιστή μειώνει σημαντικά τις απώλειες δινορευμάτων. Αυτή είναι μια διαδικασία αρκετά επίπονη και δαπανηρή, αφού κάποιοι μεγάλοι μετασχηματιστές απαιτούν για την συναρμολόγηση του πυρήνα τους περισσότερα από 50.000 φύλλα σιδήρου.

Η χρήση άμορφου σιδήρου ως υλικού κατασκευής του πυρήνα οδηγεί σε μείωση των απωλειών κενού φορτίου από 75% έως 80% σε σχέση με τον μετασχηματιστή με συμβατικό πυριτιούχο σίδηρο. Τα μόρια στον άμορφο σίδηρο έχουν τυχαίο προσανατολισμό σε σύγκριση με τα προσανατολισμένα μόρια στη δομή του πυριτιούχου σιδήρου. Όταν ένα εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο εφαρμόζεται σε έναν πυρήνα κατασκευασμένο από άμορφο σίδηρο, απορροφά λιγότερη ενέργεια στη μαγνήτιση και στην απομαγνήτιση του από ότι σε ένα πυρήνα από πυριτιούχο σίδηρο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μειώνει τις απώλειες υστέρησης σημαντικά. Τα λεπτότερα ελάσματα σε ένα πυρήνα από άμορφο σίδηρο μειώνουν τις απώλειες δινορευμάτων διότι μειώνεται η αντίσταση μεταξύ των ελασμάτων. Επίσης ο πυρήνας από άμορφο σίδηρο είναι μεγαλύτερος και βαρύτερος από ένα πυρήνα που είναι κατασκευασμένος από πυριτιούχο σίδηρο. Ο πυριτιούχος σίδηρος, που είναι χαραγμένος με laser, είναι ακριβότερος από το συμβατικό, ενώ πολύ πιο ακριβός είναι ο άμορφος σίδηρος. Για το λόγο αυτό οι δύο αυτές επιλογές μαγνητικού υλικού ακολουθούνται, όταν δίνεται μεγάλη βαρύτητα στο κόστος των απωλειών.

Το αλουμίνιο και ο χαλκός είναι τα δυο υλικά που χρησιμοποιούνται σήμερα στα τυλίγματα των μετασχηματιστών διανομής. Όταν τα δύο αυτά υλικά εφαρμόζονται με τον ίδιο ακριβώς τρόπο, ο χαλκός εμφανίζεται να έχει καλύτερη αγωγιμότητα και 40% μειωμένες ωμικές απώλειες από ότι το αλουμίνιο. Σε σύγκριση με το χαλκό, το αλουμίνιο μπορεί να μορφοποιηθεί ευκολότερα και είναι πιο φθηνό. Ο αγωγός από

αλουμίνιο εμφανίζεται να έχει τις ίδιες απώλειες φορτίου με εκείνες που έχει ο αγωγός από χαλκό. Ωστόσο το μειονέκτημα του αλουμινίου είναι ότι παρουσιάζει αυξημένες απώλειες πυρήνα σε σχέση με το χαλκό. Στους μετασχηματιστές διανομής, σε κάποιες σχεδιάσεις ακολουθείται η τακτική να χρησιμοποιείται χαλκός για το πηνίο υψηλής τάσης και αλουμίνιο για το πηνίο χαμηλής τάσης. Η χρήση αλουμινίου στο τύλιγμα χαμηλής τάσης μειώνει τις απώλειες από διανορεύματα. Και σε αυτή την περίπτωση παρατηρούμε ότι υπάρχει μια ισορροπία ανάμεσα στο κόστος του υλικού και στις απώλειες.

8.3 Βελτίωση απόδοσης μέσω του βοηθητικού εξοπλισμού

Οι απώλειες από το βοηθητικό εξοπλισμό μπορούν να μειωθούν μέσω της μείωσης του χρόνου λειτουργίας του βοηθητικού εξοπλισμού. Ο έλεγχος του χρόνου λειτουργίας γίνεται με τη χρήση θερμοστοιχείων. Τα θερμοστοιχεία τοποθετούνται κοντά στα τυλίγματα του μετασχηματιστή για να ανιχνεύουν τη θερμοκρασία τους. Όταν η τιμή της θερμοκρασίας υπερβαίνει τα προκαθορισμένα όρια, τα θερμοστοιχεία στέλνουν σήμα δια μέσου ενός πομπού και ενός δεκτή στους ανεμιστήρες και στις αντλίες για να λειτουργήσουν και να επέλθει η θερμοκρασία ξανά σε ανεκτά επίπεδα. Η εσωτερική αυτή θερμοκρασία συνήθως επιλέγεται να μην ξεπερνά τους 65°C πάνω από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος.

8.4 Βελτίωση απόδοσης μέσω του μεγέθους του

Το μέγεθος του μετασχηματιστή, δηλαδή η ονομαστική ικανότητά του, επηρεάζει την απόδοση του. Ένας μετασχηματιστής με το κατάλληλο μέγεθος διατηρεί τις απώλειες φορτίου στο ελάχιστο. Ένας μετασχηματιστής με μεγαλύτερη ονομαστική ικανότητα από την απαιτούμενη μπορεί να έχει υψηλές απώλειες κενού φορτίου, ενώ ένας μετασχηματιστής με μικρότερη ονομαστική ικανότητα μπορεί να έχει υψηλές απώλειες φορτίου. Το κατάλληλο μέγεθος ενός μετασχηματιστή εξαρτάται από την οικονομική αξία και το μέγεθος τόσο των απωλειών φορτίου όσο και των απωλειών κενού φορτίου.

Οι συνολικές απώλειες όμως δεν είναι σταθερές στη διάρκεια του χρόνου και εξαρτώνται από το φορτίο στο μετασχηματιστή. Η ονομαστική ικανότητα του μετασχηματιστή δεν θα πρέπει να επιλέγεται μόνο με κριτήρια που αφορούν το παρόν αλλά και το μέλλον. Θα πρέπει να εκτιμήσουμε το μελλοντικό φορτίο λειτουργίας του μετασχηματιστή στη διάρκεια του χρόνου ζωής του και επομένως τις μελλοντικές του απώλειες. Ο στόχος είναι να ελαχιστοποιήσουμε τις απώλειες μέσω της καταλληλότερης επιλογής αποδοτικού μετασχηματιστή με βάση τα κριτήρια που αναφέραμε.

8.5 Βελτίωση απόδοσης μέσω της λειτουργίας του

Η λειτουργία του μετασχηματιστή μπορεί να επηρεάσει την απόδοσή του. Ο μετασχηματιστής ισχύος με μεταγωγέα τάσεων μπορεί να λειτουργεί με τέτοιο τρόπο που να ελαχιστοποιεί τις απώλειες στο σύστημα διανομής και μεταφοράς. Λειτουργώντας με τον μεταγωγέα τάσεων στην μέγιστη τάση λειτουργίας, το σύστημα διανομής και μεταφοράς λειτουργεί με τη μέγιστη τάση και με τις χαμηλότερες απώλειες, παρόλο που ο μετασχηματιστής ισχύος με μεταγωγέα τάσεων έχει ελαφρώς υψηλότερες απώλειες φορτίου και κενού φορτίου από ότι ένας μετασχηματιστής χωρίς μεταγωγέα τάσεων.

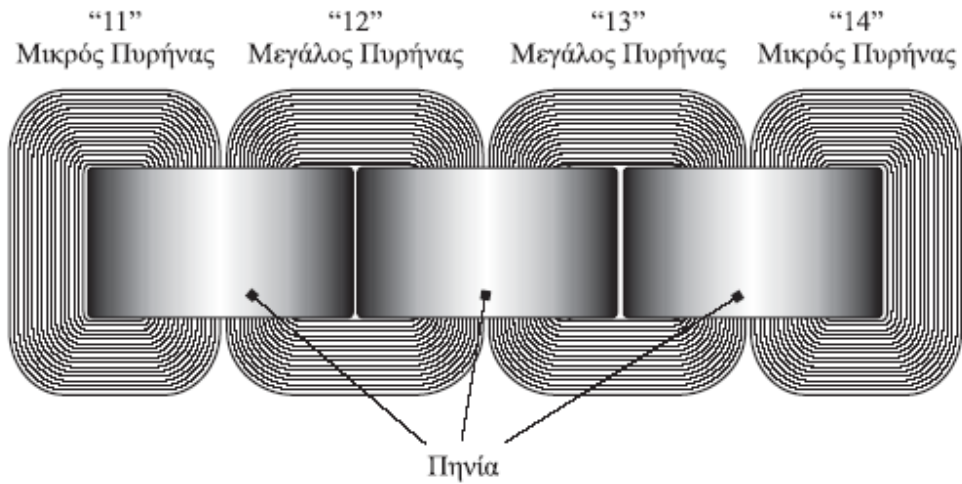
Ένας τρόπος μείωσης των απωλειών είναι μέσω της λειτουργίας των μετασχηματιστών με τρόπο ώστε να υπάρχει ισορροπία στη φόρτισή τους, διότι οι συνολικές απώλειες είναι χαμηλότερες, όταν το φορτίο μοιράζεται στους μετασχηματιστές σύμφωνα με την ονομαστική τους ικανότητα.

8.6 Βελτίωση απόδοσης μέσω της συντήρησής του

Η συντήρηση του μετασχηματιστή περιλαμβάνει επιθεώρηση και έλεγχο, ανακαίνιση και απόσυρση. Πολλοί λίγοι χρηστές συντηρούν τους μετασχηματιστές, προκείμενου να εξοικονομήσουν ενέργεια. Η συντήρηση συνήθως συνδέεται με την αξιοπιστία και την ασφάλεια. Αν ένας χρηστής μπορεί με τρόπο οικονομικό να αντικαταστήσει ένα λιγότερο αποδοτικό με έναν περισσότερο αποδοτικό μετασχηματιστή, τότε θα εξοικονομεί ένα σημαντικό ποσό ενέργειας

8.7 Βελτίωση απόδοσης με εφαρμογή τεχνικών τεχνητής νοημοσύνης

Οι τεχνικές τεχνητής νοημοσύνης έχουν πρόσφατα εφαρμοστεί για τη βελτίωση της απόδοσης των μετασχηματιστών μέσω της μείωσης των απωλειών κενού φορτίου, [3.9]. Με τη χρήση των δένδρων απόφασης προσδιορίζονται οι πιο σημαντικές παράμετροι, που επιδρούν στις απώλειες κενού φορτίου. Τα νευρωνικά δίκτυα εφαρμόζονται για την πρόβλεψη των απωλειών κενού φορτίου, χρησιμοποιώντας ως είσοδο τις τιμές των παραμέτρων που έχουν επιλεγεί από τα δέντρα απόφασης.



Εικόνα 8.1: Ενεργό μέρος μετασχηματιστή.

Ένας τριφασικός μετασχηματιστής τύπου τυλιχτού πυρήνα αποτελείται από τέσσερις διαφορετικούς ατομικούς πυρήνες όπως εμφανίζεται στην εικόνα 8.1. Όταν πρόκειται να κατασκευαστεί μια παρτίδα, έστω 50 μετασχηματιστών (ίδια μελέτη και ίδιος τύπος μετασχηματιστή), τότε πρέπει να επιλυθεί το πρόβλημα της ομαδοποίησης των πυρήνων, δηλαδή να συνδυαστούν οι 200 ατομικοί πυρήνες με τον καλύτερο δυνατό τρόπο, έτσι ώστε να προκύψουν 50 μετασχηματιστές με τις χαμηλότερες δυνατές απώλειες. Επειδή ο αριθμός των συνδυασμών αυτών είναι αρκετά μεγάλος για έναν τυπικό αριθμό πυρήνων, χρησιμοποιούνται οι γενετικοί αλγόριθμοι έτσι ώστε να υπολογιστεί μέσα σε μερικές ανακυκλώσεις η βέλτιστη διάταξη των ατομικών πυρήνων. Η μέθοδος αυτή μπορεί να προκαλέσει μείωση των απωλειών κενού φορτίου της τάξεως του 3% ή και πολλές φορές ακόμα μεγαλύτερη για μια τυπική παρτίδα 50 μετασχηματιστών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9

ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ ΥΨΗΛΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ

9.1 Σχεδιασμός Αγωγών

Η μείωση των απωλειών στους μετασχηματιστές είναι αποτέλεσμα τόσο της βελτίωσης των υλικών όσο και των μεθόδων κατασκευής των τυλιγμάτων και των πυρήνων στους μετασχηματιστές. Η χρήση αγωγών τύπου ταινίας στα τυλίγματα, αποτελεί την πιο πρόσφατη εξέλιξη στον τομέα του σχεδιασμού των αγωγών.

Αρχικά οι αγωγοί χαλκού αντικατέστησαν τους αγωγούς αλουμινίου, εξαιτίας της μικρότερης αντίστασης και ταυτόχρονα της υψηλότερης αντοχής σε ελατότητα που εμφανίζουν να έχουν. Στη συνέχεια η εξέλιξη του σχεδιασμού στους αγωγούς οδήγησε στην ανάπτυξη αγωγών τύπου ταινίας (ribbon conductors).



Εικόνα 9.1: Αγωγοί τύπου ταινίας (ribbon conductors)

Οι αγωγοί τύπου ταινίας μειώνουν τις απώλειες φορτίου μέσω της μείωσης των απωλειών δινορευμάτων και επίσης επιτρέπουν την τοποθέτηση περισσότερου χαλκού σε μικρότερο χώρο. Η μείωση των απωλειών δινορευμάτων επιτυγχάνεται από τη μείωση του εμβαδού της διατομής, που προκύπτει λόγω της χρήσης των αγωγών τύπου ταινίας. Μελέτες έχουν δείξει ότι για κάθε ποσοστιαία μείωση στις διαστάσεις της διατομής του αγωγού, υπάρχει μια αντίστοιχη μείωση των απωλειών λόγω δινορευμάτων ίση περίπου με 1,5% και επίσης μια βελτίωση του συντελεστή χώρου κατά 25%. Κατασκευάζεται από επτά επίπεδα τμήματα αγωγών κολλημένα το ένα δίπλα στο άλλο, ενώ η αξονική ψύξη των αγωγών κρίνεται απαραίτητη για τη διατήρηση της θερμοκρασίας τους μέσα στα επιτρεπτά όρια.

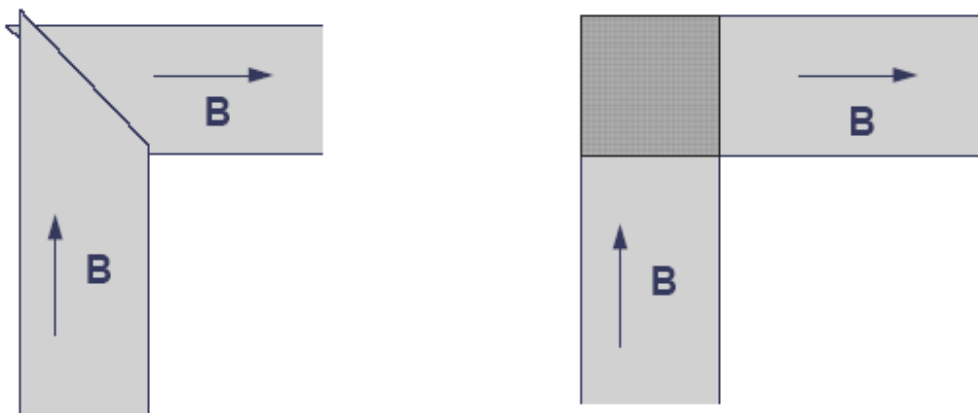
9.2 Η χρήση χάλυβα πυριτίου στον πυρήνα

Η μείωση των απωλειών κενού φορτίου επιτυγχάνεται με την επιλογή σιδήρου υψηλής απόδοσης. Ο χάλυβας που χρησιμοποιείται για αυτό το σκοπό καλείται χάλυβας πυριτίου χαμηλών απωλειών. Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί πολλές τεχνικές για τη μείωση των απωλειών κενού φορτίου. Αρχικά στις αρχές του 20^{ου} αιώνα χρησιμοποιήθηκε χάλυβα θερμής εξέλασης, στη συνέχεια χάλυβας ψυχρής εξέλασης, κατόπιν ψυχρής εξέλασης με μείωση της περιεκτικότητας σε πυρίτιο και αργότερα αναπτύχθηκαν νέες τεχνικές παρέμβασης στο κρυσταλλικό πλέγμα του σιδήρου κατά τη δεκαετία του 1980. Στις μέρες μας χρησιμοποιείται ο άμορφος σίδηρος. Το αποτέλεσμα από την εξέλιξη αυτή επέφερε μείωση 50% στις απώλειες κενού φορτίου. Στον πίνακα 9.1 φαίνεται η διαφορά των απωλειών που εμφανίζουν οι μετασχηματιστές με πυρήνα από απλό χάλυβα σε σχέση με τους μετασχηματιστές που έχουν κατασκευαστεί από χάλυβα πυριτίου χαμηλών απωλειών.

Πίνακας 9.1: Σύγκριση απωλειών κενού φορτίου ανάμεσα σε μετασχηματιστές με πυρήνα από τυπικό χάλυβα και με πυρήνα από χάλυβα χαμηλών απωλειών.

Ισχύς (kVA)	Απώλειες Κενού Φορτίου (W)	
	Χάλυβας Χαμηλών Απωλειών	Άμορφος Σίδηρος
Μονοφασικοί		
10	30	11
25	50	20
50	105	32
75	130	39
100	160	54
Τριφασικοί		
75	185	67
150	270	107
300	475	185
500	710	260
750	875	310
1000	1200	420
1500	1800	555
2000	2000	750
2500	2400	850

Η κατασκευή των ελασμάτων είναι ένας από τους παράγοντες που συνδέονται άμεσα με τις απώλειες κενού φορτίου. Η μείωση του πάχους τους έχει ως αποτέλεσμα να μειώνονται οι απώλειες δινορευμάτων. Η κοπή των ελασμάτων του πυρήνα μπορεί να γίνει είτε σε γωνία 90° είτε σε γωνία 45° , όπως φαίνεται στην εικόνα 7.2. Η κοπή των ελασμάτων σε γωνία 90° έχει μικρότερο κόστος κατασκευής και αυξημένες απώλειες οι οποίες πάντως είναι δυνατόν να μειωθούν με την αύξηση της διατομής του πυρήνα. Η επιλογή της κοπής των ελασμάτων σε γωνία 45° ευνοούν την ροή της μαγνητικής ροής, διότι το κρυσταλλικό πλέγμα του σιδήρου είναι προσανατολισμένο με την μαγνητική ροή.



Εικόνα 7.2: Κοπή ελασμάτων πυρήνα σε γωνία 45° και 90° .

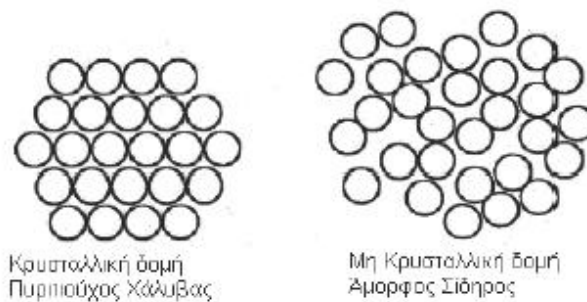
9.3 Η χρήση άμορφου σιδήρου στον πυρήνα

Ο άμορφος σίδηρος είναι ένα κράμα, που αποτελείται από 92% σίδηρο, 5% πυρίτιο και 3% βάριο. Η εφαρμογή του στους μετασχηματιστές έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση των απωλειών κενού φορτίου σε σχέση με τους μετασχηματιστές που χρησιμοποιούν πυριτιούχο χάλυβα χαμηλών απωλειών. Συνήθως οι μετασχηματιστές από άμορφο σίδηρο είναι κατά 25% με 30% πιο ακριβοί από τους συμβατικούς μετασχηματιστές, που είναι κατασκευασμένοι από χάλυβα πυριτίου χαμηλών απωλειών.

Το υψηλό αυτό κόστος προσπαθούν οι ειδικοί να το μειώσουν είτε με την παραγωγή όλο και περισσότερων μετασχηματιστών με πυρήνα από άμορφο σίδηρο είτε αναπτύσσοντας νέες τεχνικές για την παραγωγή άμορφου σιδήρου. Συχνά ο αγοραστής έρχεται αντιμέτωπος με το δίλημμα της αγοράς ενός νέου μετασχηματιστή από άμορφο σίδηρο ή ενός συμβατικού μετασχηματιστή, με κριτήριο το οικονομικό συμφέρον του. Η οικονομική αξιολόγηση μέσω του συνολικού κόστους επένδυσης ενός μετασχηματιστή είναι η προσέγγιση που αρκετές εταιρίες

ηλεκτρικής ενέργειας εφαρμόζουν για να εκτιμήσουν αν είναι δικαιολογημένη η υψηλή τιμή ενός μετασχηματιστή σε σχέση με τις απώλειές του ή αν είναι τελικά οικονομικά πιο αποδοτικό να αγοράσουν ένα συμβατικό μετασχηματιστή.

Η δομή του άμορφου σιδήρου δεν είναι κρυσταλλική, όπως στην περίπτωση του πυριτιούχου χάλυβα σύμφωνα με την εικόνα 7.3. Τα άτομα του πυριτιούχου χάλυβα είναι διευθετημένα σε μια καθορισμένη δομή, ενώ τα άτομα του άμορφου σιδήρου εμφανίζουν μια τυχαία κατανομή μη-κρυσταλλική. Λόγω αυτής της σύνθεσής τους παρουσιάζουν χαμηλές απώλειες υστέρησης και μοναδικές μαγνητικές ιδιότητες.



Εικόνα 7.3: Η δομή του πυριτιούχου χάλυβα και του άμορφου σιδήρου.

Η τυχαία μοριακή δομή που εμφανίζει να έχει ο άμορφος σίδηρος, δίνει τη δυνατότητα στα άτομά του να προσανατολίζονται σε οποιαδήποτε αλλαγή του μαγνητικού πεδίου. Επομένως κατά το μηδενισμό του πεδίου αυτού, τα άτομα επανέρχονται άμεσα στην αρχική τους κατάσταση. Ως αποτέλεσμα αυτής της ιδιότητάς τους, έχουν στενότερο βρόχο υστέρησης και επομένως μικρότερες απώλειες υστέρησης από ότι ο πυριτιούχος χάλυβας.

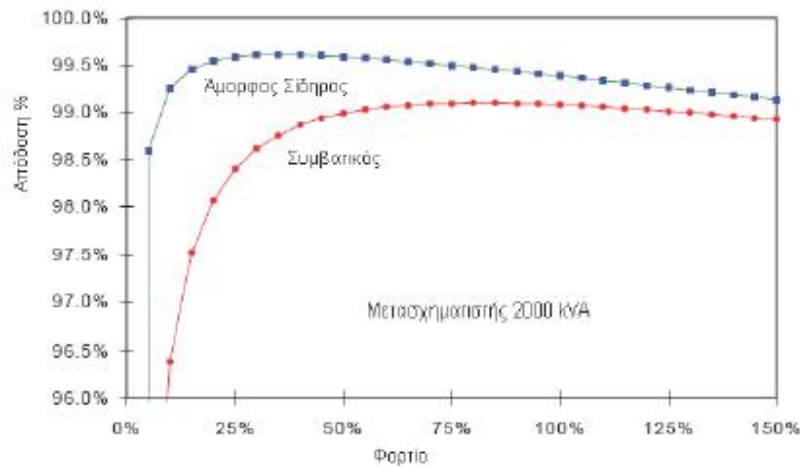
Επίσης ο μετασχηματιστής με πυρήνα από άμορφο σίδηρο μπορεί να κατασκευαστεί από πιο λεπτά ελάσματα από τον αντίστοιχο μετασχηματιστή που κατασκευάζεται από συμβατικό χάλυβα πυριτίου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να έχει λιγότερες απώλειες δινορευμάτων. Συνήθως το πάχος του ελάσματος από άμορφο σίδηρο είναι λιγότερο από 1 χιλιοστό. Πολύ λεπτά ελάσματα παρέχουν το πλεονέκτημα της μικρής αντίστασης μεταξύ των ελασμάτων, οπότε μικρές απώλειες δινορευμάτων.

Ο συνδυασμός των λιγότερων απωλειών δινορευμάτων και υστέρησης στον πυρήνα ενός μετασχηματιστή από τη χρήση άμορφου σιδήρου, επιφέρει μια συνολική μείωση των απωλειών στον πυρήνα πάνω από το 70% με 80%, σε σχέση με τους μετασχηματιστές από πυριτιούχο χάλυβα. Επίσης αν αναλογιστούμε ότι οι απώλειες αυτές αναφέρονται στις απώλειες κενού φορτίου που συμβαίνουν 24 ώρες την ημέρα και 365 ημέρες το χρόνο, τότε η εξοικονόμησή τους είναι συγκρίσιμη και εξισορροπούν την αύξηση του κόστους αγοράς που έχουν οι μετασχηματιστές από άμορφο σίδηρο. Για παράδειγμα, ένας μετασχηματιστής με ισχύ 25 kVA και με πυρήνα από πυριτιούχο χάλυβα έχει απώλειες πυρήνα 57 W, ενώ ο αντίστοιχος μετασχηματιστής με πυρήνα από άμορφο σίδηρο έχει απώλειες 15,5 W. Στον πίνακα 9.2 δείχνουμε τις απώλειες κενού φορτίου ανάμεσα στον άμορφο σίδηρο και στο χάλυβα πυριτίου χαμηλών απωλειών.

Πίνακας 9.2: Σύγκριση απωλειών κενού φορτίου ανάμεσα σε μετασχηματιστές με πυρήνα από χάλυβα χαμηλών απωλειών και με πυρήνα από άμορφο σίδηρο

Ισχύς (kVA)	Απώλειες Κενού Φορτίου (W)	
	Χάλυβας Χαμηλών Απωλειών	Άμορφος Σίδηρος
Μονοφασικοί		
10	30	11
25	50	20
50	105	32
75	130	39
100	160	54
Τριφασικοί		
75	185	67
150	270	107
300	475	185
500	710	260
750	875	310
1000	1200	420
1500	1800	555
2000	2000	750
2500	2400	850

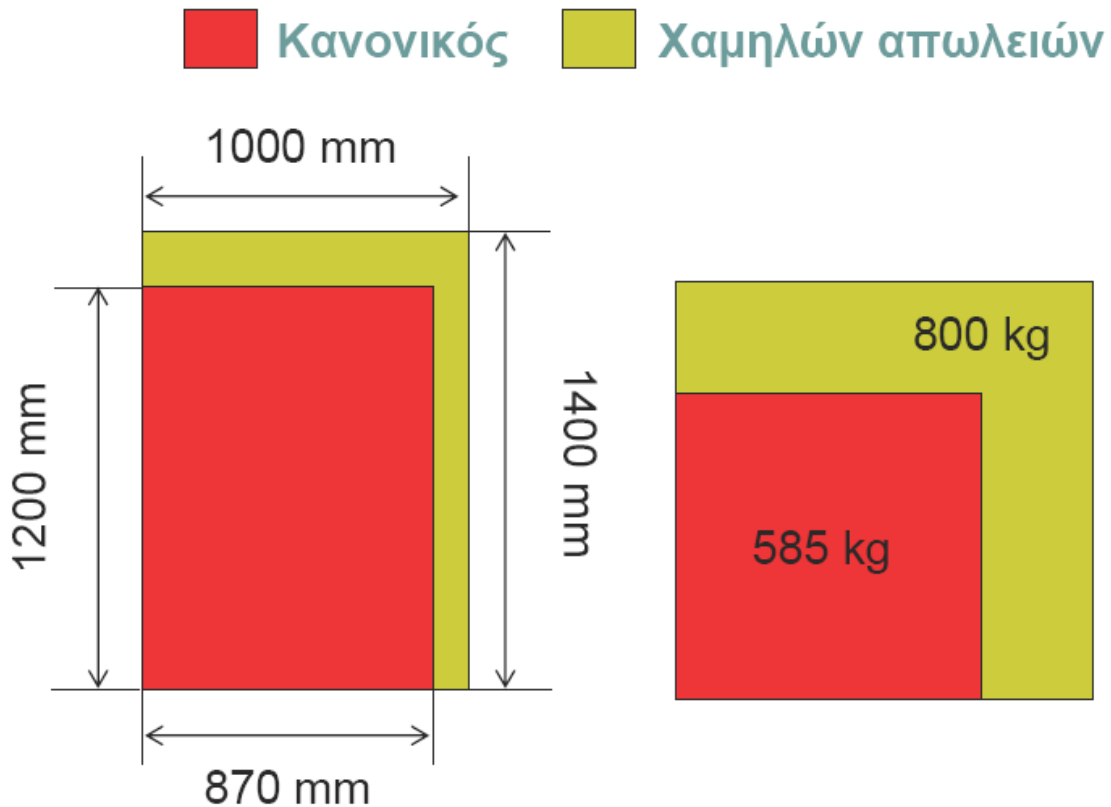
Εάν η χρήση άμορφου σιδήρου συνδυαστεί και με το βέλτιστο σχεδιασμό των πηνίων, τότε πρακτικά επιτυγχάνεται ελαχιστοποίηση των απωλειών στους μετασχηματιστές και συνεπώς αυτοί οι μετασχηματιστές είναι ενεργειακά πιο αποδοτικοί από τους συμβατικούς. Στην εικόνα 7.4 φαίνεται η διαφορά σε απόδοση που έχουν οι δυο μετασχηματιστές σε ποικίλες τιμές φορτίου.



Εικόνα 7.4: Σύγκριση απόδοσης μεταξύ μετασχηματιστών που οι πυρήνες τους είναι κατασκευασμένοι από πυριτιούχο χάλυβα και από άμορφο σίδηρο.

Το κύριο μειονέκτημα του άμορφου σιδήρου είναι ο μικρός συντελεστής χώρου που έχει, με αποτέλεσμα να απαιτείται περισσότερο υλικό για την κατασκευή του πυρήνα ενός μετασχηματιστή από ότι θα χρειαζόταν από πυριτιούχο χάλυβα. Αυτό συνεπάγεται με την σειρά του βαρύτερο και μεγαλύτερο μετασχηματιστή σε σχέση με έναν αντίστοιχο συμβατικό μετασχηματιστή από πυρήνα χάλυβα χαμηλών απωλειών. Η εξέλιξη αυτή αντιτίθεται με την προσδοκία των αγοραστών για ελαφρύτερους και μικρότερους μετασχηματιστές, διότι θα υπάρχει δυσκολία εγκατάστασής τους κατά της διαδικασία αντικατάστασης ενός παλιού από έναν νέο μετασχηματιστή.

ΜΣ 100 KVA



Εικόνα 7.5: Πυρήνας μετασχηματιστή από άμορφο σίδηρο (αριστερά) και μετασχηματιστή από πυρτιούχο χάλυβα (δεξιά)

Τέλος αναφέρουμε ότι υπάρχουν σημαντικά εμπόδια τόσο στην Ευρώπη, ειδικά, όσο και σε χώρες παγκοσμίως, όπου έχουν μια ήδη εδραιωμένη ή αναδυόμενη ικανότητα για παραγωγή συμβατικών μετασχηματιστών. Η κατασκευή του πυρήνα άμορφου σιδήρου θα απαιτούσε μια σημαντική επένδυση και μια αναδιάρθρωση της παρούσας βιομηχανίας. Πρέπει να ληφθεί υπόψιν ότι η κατασκευή και η επισκευή μετασχηματιστών διανομής γίνεται τοπικά σχεδόν σε όλα τα Ευρωπαϊκά κράτη και αντιπροσωπεύει ένα σημαντικό τμήμα του ηλεκτρολογικού τομέα της κάθε χώρας, καθώς και της τοπικής απασχόλησης.

9.4 Μετασχηματιστές με συντελεστή K (σταθερά επίδρασης των αρμονικών)

Αρμονικές καλούνται τα ημιτονοειδή ρεύματα ή τάσεις με συχνότητες πολλαπλάσιες της θεμελιώδους συχνότητας του δικτύου. Οι διαταραγμένες, λόγω αρμονικών, κυματομορφές αναλύονται σε άθροισμα της θεμελιώδους και των αρμονικών που δημιουργούνται από τις μη γραμμικές χαρακτηριστικές τάσης – ρεύματος των συσκευών που συνδέονται στο δίκτυο. Μέσω της τάσης και σε συνάρτηση με την ισχύ βραχυκυκλώσεως του δικτύου, οι αρμονικές που παράγονται σε ένα σημείο μεταδίδονται και μπορεί να δημιουργήσουν προβλήματα και σε άλλα φορτία. Σχεδόν όλες οι βιομηχανίες έχουν μη γραμμικές απώλειες. Τα τυπικά μη γραμμικά φορτία περιλαμβάνουν:

- Ηλεκτρονικούς υπολογιστές
- Συστήματα UPS, για την αδιάλειπτη παροχή ισχύος
- Κινητήρες πολύ υψηλών ταχυτήτων
- Αντιστροφείς.

Τα αρμονικά ρεύματα οδηγούν σε υψηλότερες απώλειες στους μετασχηματιστές και συνεπώς σε μια υψηλότερη θερμοκρασία, η οποία επηρεάζει τη διάρκεια ζωής του μετασχηματιστή. Οι επιπρόσθετες απώλειες εξαρτώνται από το φάσμα των αρμονικών του ρεύματος του φορτίου. Οι αρμονικές που είναι πολλαπλάσιες της 3^{ης} αρμονικής (3^η, 9^η, 15^η κλπ) είναι η σημαντικότερη αιτία θέρμανσης, αφού τα φασικά ρεύματα προστίθενται στον ουδέτερο αγωγό. Εκτός από τις πολλαπλάσιες της 3^{ης} αρμονικής, ένας μετασχηματιστής που τροφοδοτεί ένα μετατροπέα ή ένα αντιστροφέα μπορεί να έχει πρόβλημα και με τις άλλες αρμονικές. Το μέγεθος του ρεύματος που παράγουν οι αρμονικές μπορεί να οδηγήσει και στο διπλασιασμό του φασικού ρεύματος. Επομένως έχουμε άμεση επίδραση των αρμονικών στην αύξηση των απωλειών και της θερμότητας σε ένα μετασχηματιστή.

Η αύξηση των απωλειών φορτίου οφείλεται στην αύξηση των απωλειών δινορευμάτων, των απωλειών $I^2 R$ και των σποραδικών απωλειών. Επίσης οι αρμονικές ευθύνονται και για την αύξηση των απωλειών κενού φορτίου μέσω της αύξησης των απωλειών υστέρησης. Η νέα μέση τιμή του ρεύματος υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$I = \left[\sum_{h=1}^{h=h_{max}} (I_h)^2 \right]^{1/2}$$

όπου I είναι η νέα τιμή ρεύματος, h είναι η τιμή της αρμονικής και I_h είναι η τιμή του ρεύματος για δεδομένη τιμή αρμονικής h .

Αύξηση της τιμής του ρεύματος συνεπάγεται και αύξηση των απωλειών δινορευμάτων, των απωλειών $I^2 R$ και των σποραδικών απωλειών. Γενικά προκαλούνται τα παρακάτω προβλήματα

- Οι μετασχηματιστές και ο εξοπλισμός κίνησης υπερθερμαίνονται λόγω της επιπρόσθετης φόρτισης που υφίστανται. Επίσης, καταπονούνται μηχανικά με αποτέλεσμα να υπάρχουν σε αυξημένο βαθμό δονήσεις και θόρυβος κατά τη λειτουργία τους.
- Ο ουδέτερος αγωγός υπερφορτίζεται, καθώς το διανυσματικό άθροισμα των ρευμάτων που τον διαρρέουν δεν είναι πλέον ίσο με μηδέν (περίπτωση συμμετρικών φορτίων). Τα ρεύματα των διαφόρων συχνοτήτων προστίθενται και αποτελούν υπολογίσιμη ποσότητα, ενώ οι τιμές τάσης μεταξύ ουδέτερου – γης είναι μη αποδεκτές. Αποτέλεσμα αυτού είναι το ρεύμα του ουδέτερου να μην είναι εντός των αποδεκτών ορίων τις περισσότερες φορές.
- Υπάρχουσες διατάξεις πυκνωτών κινδυνεύουν να καταστραφούν, σε περιπτώσεις όπου ο κλάδος στον οποίο συνδέονται, εμφανίζει ίδια συχνότητα με κάποιες από τις αρμονικές που υπάρχουν στο δίκτυο. Στην περίπτωση αυτή, η σύνθετη αντίσταση του συγκεκριμένου κλάδου ελαχιστοποιείται με αποτέλεσμα να αυξάνει κατά πολύ το ρεύμα που τον διαρρέει. Έτσι το πλάτος των αρμονικών αυξάνεται (ηλεκτρική ταλάντωση), αυξάνεται η ενεργός τάση και ένταση, οι πυκνωτές υπερθερμαίνονται και ενδέχεται είτε να καταστραφεί το διηλεκτρικό τους υλικό είτε να λιώσουν οι ασφάλειες τους με αποτέλεσμα τη θέση τους εκτός λειτουργίας.
- Τα μέσα ζεύξης & προστασίας φθείρονται και είναι πιθανό να λειτουργήσουν ανεπιθύμητα, ιδιαίτερα αν η αρχή λειτουργίας τους στηρίζεται σε θερμικά μοντέλα ή για τον υπολογισμό της ενεργούς τιμής της έντασης χρησιμοποιείται το πλάτος της κυματομορφής της, το οποίο είναι στην περίπτωση αυτή παραμορφωμένο.
- Η λειτουργία του ηλεκτρονικού εξοπλισμού και των γεννητριών καθίσταται αναξιόπιστη.
- Σημειώνονται λανθασμένες καταγραφές ηλεκτρικών μεγεθών από τις μετρητικές διατάξεις.
- Γίνεται σπατάλη ενέργειας με αποτέλεσμα οι λογαριασμοί κατανάλωσης ενέργειας να είναι υψηλότεροι.
- Μειώνεται η εφεδρεία της ηλεκτρικής εγκατάστασης, καθώς τα ρεύματα που διαρρέουν τα καλώδια και τους ηλεκτρικούς πίνακες, είναι σημαντικά μεγαλύτερα λόγω των αρμονικών.

Όλα τα παραπάνω οδηγούν σε επιβάρυνση της ηλεκτρικής εγκατάστασης η οποία ισοδυναμεί με οικονομικό κόστος που προκύπτει από την:

- μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας άρα την πληρωμή υψηλότερων λογαριασμών
- αδικαιολόγητα σταματήματα στην παραγωγή – χαμένοι χρόνοι – πρόσθετο κόστος
- ταχύτερη φθορά του εξοπλισμού η οποία έχει ως αποτέλεσμα επιπρόσθετες επενδύσεις
- υψηλότερο κόστος συντήρησης και επισκευών
- μειωμένη ποιότητα του παραγόμενου προϊόντος ή της παρεχόμενης υπηρεσίας.

Για την αντιμετώπιση των προβλημάτων που προκαλούνται από αρμονικές υπάρχουν μέθοδοι τέτοιες ώστε να μειώσουν, να εξαλείψουν ή να μην επιτρέψουν τη διείσδυση των αρμονικών στο δίκτυο. Η τοποθέτηση φίλτρων αποτελεί μια λύση για την αντιμετώπιση των αρμονικών. Τα φίλτρα μπορεί να είναι ενεργά ή παθητικά. Τα ενεργά φίλτρα είναι διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος και μπορεί να συνδέονται παράλληλα ή σε σειρά με το φορτίο. Τα παθητικά φίλτρα είναι συνδυασμός πυκνωτών και πηνίων. Μια άλλη μέθοδος είναι η χρησιμοποίηση κατάλληλων τεχνικών παλμοδότησης των μετατροπέων, όπως είναι για παράδειγμα η τεχνική Ημιτονοειδούς Διαμόρφωσης Εύρους Παλμών.

Οι μετασχηματιστές με συντελεστή K είναι μια πρόσφατη εξέλιξη και η κατασκευή τους αποτελεί μια λύση στο πρόβλημα των αρμονικών. Οι μετασχηματιστές αυτοί δεν είναι αναγκαίο να είναι πιο αποδοτικοί από τους μετασχηματιστές χωρίς συντελεστή K . Ο συντελεστής αυτός είναι μια σταθερά και λαμβάνει υπόψιν την επίδραση των αρμονικών. Οι μετασχηματιστές με συντελεστή K το αναγράφουν στην πινακίδα τους και ο υπολογισμός του γίνεται σύμφωνα με την εξίσωση:

$$K = \frac{\sum(I_h \cdot h)^2}{\sum(h)^2}$$

όπου I_h είναι το ρεύμα υπό την επίδραση των αρμονικών και h είναι η τιμή της αρμονικής.

Ο μετασχηματιστής με συντελεστή K είναι ειδικά σχεδιασμένος με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, έτσι ώστε να αντεπεξέρχεται στην αύξηση της θερμοκρασίας εξαιτίας των αρμονικών. Επομένως ένας μετασχηματιστής μπορεί να έχει ιδιαίτερη μόνωση στους αγωγούς του, για να αντιμετωπίζει το επιδερμικό φαινόμενο ή να διαθέτει μεγαλύτερο ουδέτερο αγωγό στο δευτερεύον τύλιγμα για να αντεπεξέρχεται στη

αύξηση του ρεύματος λόγω της 3^{ης} αρμονικής. Μπορεί επίσης να διαθέτει αρκετά καλή μόνωση στα ελάσματα του πυρήνα του για να ελαττώσει τις απώλειες λόγω δινορευμάτων. Γενικά πολλές τεχνικές μπορούν να εφαρμοστούν για την αντιμετώπιση των απωλειών αυτών και έχουν αναφερθεί αναλυτικά για την κάθε περίπτωση ξεχωριστά στα προηγούμενα κεφαλαία. Τέλος μια τιμή του συντελεστή K κοντά στο 13 ή μικρότερη κρίνεται αρκετά ικανοποιητική

9.5 Μετασχηματιστές με υπεραγώγιμα τυλίγματα

Ένας τυπικός μετασχηματιστής χρησιμοποιεί συμβατικό αγωγό στα τυλίγματά του (χαλκό ή αλουμίνιο), δημιουργώντας έτσι απώλειες ηλεκτρικής ενέργειας υπό τη μορφή θερμότητας. Λαμβάνοντας υπόψη ότι το ποσοστό απόδοσης ενός μετασχηματιστή είναι περίπου 99%, είναι πιθανή η απώλεια ενός ποσοστού 5 με 10% της συνολικής ηλεκτρικής ενέργειας σε όλους τους μετασχηματιστές ενός δικτύου. Αντικαθιστώντας τους συμβατικούς αγωγούς των τυλιγμάτων με υπεραγωγούς, είναι δυνατή η μείωση των απωλειών κατά 60% ή και περισσότερο. Η αύξηση της διαθεσιμότητας των υπεραγωγών υψηλής κρίσιμης θερμοκρασίας και η σταδιακή μείωση του κόστους τους, καθιστούν την εφαρμογή τους εφικτή σε ευρεία κλίμακα. Ιδιαίτερα οι υπεραγωγοί δεύτερης γενιάς YBCO-123, έχουν επιτύχει την απαιτούμενη απόδοση για την εφαρμογή τους σε υπεραγώγιμους μετασχηματιστές. Τα κυριότερα πλεονεκτήματα των μετασχηματιστών με υπεραγώγιμα τυλίγματα, σε σχέση με τους συμβατικούς, είναι τα εξής:

- § Μικρότερο βάρος και μέγεθος. Εξαιτίας της μεγάλης πυκνότητας ισχύος των HTS καλωδίων, ένας μετασχηματιστής με HTS τυλίγματα είναι περίπου 40-60% μικρότερος και ελαφρύτερος από ένα συμβατικό ίδιας ισχύος. Η ιδιότητα αυτή συμβάλλει στη μείωση του κόστους κατασκευής, μεταφοράς και εγκατάστασης. Ακόμα παρέχει ευελιξία στην τοποθέτηση του μετασχηματιστή, καθώς γίνεται σημαντική οικονομία χώρου σε εφαρμογές όπως σε αστικούς υποσταθμούς, σε σιδηρόδρομους ή σε πλοία.
- § Μεγαλύτερη διάρκεια ζωής. Η θερμότητα που παράγεται από την ηλεκτρική αντίσταση και τις συνεχείς εναλλαγές της θερμοκρασίας, φθείρει την ηλεκτρική μόνωση του σύρματος χαλκού των συμβατικών τυλιγμάτων. Το φαινόμενο αυτό εξαλείφεται με τη χρησιμοποίηση των HTS τυλιγμάτων, τα οποία λειτουργούν σε κρυογονικές θερμοκρασίες.
- § Οι συμβατικοί μετασχηματιστές έχουν μειωμένη αντοχή σε υπερφορτώσεις (200% για 30 λεπτά, σύμφωνα με τα πρότυπα IEEE/ANSI). Αντίθετα, οι HTS μετασχηματιστές έχουν τη δυνατότητα υπερφόρτωσης ανά πάσα στιγμή, χωρίς μείωση της διάρκειας ζωής του εξοπλισμού.

- § Υψηλότερη αποδοτικότητα. Οι απώλειες ενέργειας μειώνονται με την εξάλειψη των απωλειών Joule στα τυλίγματα του μετασχηματιστή.
- § Περιβαλλοντικά οφέλη. Το υγρό άζωτο, το οποίο είναι οικονομικό και φιλικό προς το περιβάλλον, αντικαθιστά το συμβατικό έλαιο των μετασχηματιστών. Παρέχει την απαραίτητη ψύξη για τη λειτουργία στην υπεραγωγίμη κατάσταση, λειτουργώντας παράλληλα και ως διηλεκτρικό με την απαιτούμενη ηλεκτρική μόνωση. Το υγρό άζωτο είναι ασφαλές, μη εύφλεκτο και φιλικό προς το περιβάλλον. Χρησιμοποιώντας το ως ψυκτικό και διηλεκτρικό μέσο, εξαλείφεται ο κίνδυνος εκρήξεων και πιθανών μολύνσεων από διαρροή ελαίου. Οι HTS μετασχηματιστές μπορούν να σχεδιαστούν για την εγκατάστασή τους σε εσωτερικούς χώρους
- § Απόδοση του συστήματος. Οι HTS μετασχηματιστές χαρακτηρίζονται από χαμηλή σύγχρονη αντίδραση, γεγονός που τους καθιστά ικανούς να τροφοδοτούν φορτία με ελάχιστη πτώση τάσης. Η ιδιότητα αυτή μπορεί να μειώσει ή και να εξαλείψει την ανάγκη για μεταβλητούς λόγους ελιγμάτων, πρακτική με υψηλό κόστος και μειωμένη αξιοπιστία.
- § Ασφάλεια συστήματος. Οι HTS μετασχηματιστές παρέχουν τη δυνατότητα για βελτίωση της ασφάλειας του συστήματος. Μπορούν να συνδεθούν απευθείας με υπόγεια υπεραγωγίμα καλώδια. Χωρίς την παρουσία ελαίου για πιθανή διαρροή ή ανάφλεξη, οι μετασχηματιστές με υπεραγωγίμα τυλίγματα αποτελούν μία ασφαλή διάταξη ως προς τις πιθανές διαταραχές του ηλεκτρικού δικτύου.
- § Περιορισμός ρευμάτων μεταβατικών φαινομένων. Οι ιδιότητες των HTS καλωδίων παρέχουν δυνατότητες περιορισμού ρευμάτων που προέρχονται από σφάλματα. Είναι δυνατή η ενσωμάτωση της λειτουργίας αυτής σε μετασχηματιστές για συγκεκριμένες εφαρμογές.

9.6 Τοπολογία

Η φυσική βάση ενός μετασχηματιστή είναι η αμοιβαία επαγωγή μεταξύ δύο τυλιγμάτων, τα οποία συνδέονται μέσω μίας κοινής μαγνητικής ροής. Για αποτελεσματική μεταφορά ενέργειας ανάμεσα στα δύο τυλίγματα απαιτείται μία ισχυρή κοινή μαγνητική ροή. Ένας πυρήνας σιδήρου χρησιμοποιείται συνήθως ως αγωγός για τη μεταφορά της ροής μεταξύ των πηνίων. Τα βασικά πλεονεκτήματα ενός πυρήνα σιδήρου είναι τα ακόλουθα:

- § Αυξημένη κοινή ροή εξαιτίας της υψηλής μαγνητικής διαπερατότητας.
- § Μικρότερο ρεύμα μαγνήτισης, καθώς απαιτούνται λιγότερα αμπερελίγματα για τη δημιουργία της απαιτούμενης μαγνητικής ροής.
- § Μείωση της μαγνητικής ροής που δε συνδέει τα τυλίγματα (πεδίο ``διαρροής``), λόγω της μικρής διατομής των HTS τυλιγμάτων. Το μειονέκτημα του πυρήνα σιδήρου είναι οι σημαντικές απώλειες.

Ένας συμβατικός μετασχηματιστής χρησιμοποιεί τυλίγματα χαλκού, με πυκνότητες ρευμάτων που φτάνουν τα 4-5 A/mm². Οι χαμηλές πυκνότητες ρεύματος δημιουργούν την απαίτηση για μεγάλες διατομές τυλιγμάτων. Έτσι, αυξάνεται το συνολικό βάρος του μετασχηματιστή, λόγω της μεγάλης ποσότητας χαλκού. Οι μετασχηματιστές μεγάλης ισχύος τοποθετούνται σε μεγάλα μεταλλικά δοχεία, τα οποία είναι γεμάτα με έλαιο. Το έλαιο ψύχει τα τυλίγματα χαλκού και ενισχύει την ηλεκτρική τους μόνωση.

Οι συμβατικοί μετασχηματιστές διανομής είναι συνήθως κατασκευασμένοι με πλατιά αγωγίμα φύλλα στα τυλίγματά τους. Το σχήμα των αγωγών τους καθιστά ικανούς να μεταφέρουν πλήρες ονομαστικό ρεύμα. Εξαιτίας της υψηλής αντίστασης του χαλκού σε θερμοκρασία δωματίου, οι απώλειες δινορευμάτων που προκαλούνται από το πεδίο ``διαρροής`` είναι ελάχιστες. Τα υπεραγωγίμα καλώδια δεύτερης γενιάς έχουν πλάτη που φτάνουν τα 40mm και μπορούν να άγουν ρεύμα σημαντικής έντασης. Ωστόσο, εξαιτίας της σχεδόν μηδενικής αντίστασης των υπεραγωγών, δημιουργούνται μεγάλες απώλειες υστέρησης και δινορευμάτων από το πεδίο που δε συνδέει τα τυλίγματα.

Την τελευταία δεκαετία έχουν κατασκευαστεί αρκετά πρωτότυπα μετασχηματιστών με υπεραγωγίμο καλώδιο πρώτης γενιάς (BSCCO-2223). Οι προσπάθειες αυτές δεν είχαν την αναμενόμενη επιτυχία, εξαιτίας της μικρής πυκνότητας ρεύματος και των απωλειών AC του καλωδίου. Οι περισσότεροι κατασκευαστές κατέληξαν στο ότι ένα υπεραγωγίμο καλώδιο με μικρές απώλειες είναι απαραίτητο για οικονομικά και πρακτικά βιώσιμους μετασχηματιστές. Τα HTS καλώδια δεύτερης γενιάς έχουν μικρές απώλειες όταν τοποθετούνται παράλληλα στο τοπικό μαγνητικό πεδίο. Επίσης υπάρχει η δυνατότητα για μείωση των απωλειών που οφείλονται στο κάθετο μαγνητικό πεδίο. Το εμπορικά διαθέσιμο καλώδιο πλάτους 4mm άγει ρεύμα της τάξης των 100A και δεν είναι κατάλληλο για την κατασκευή μετασχηματιστών μεγάλης ισχύος. Καλώδια με μεγαλύτερο πλάτος έχουν μικρότερη πυκνότητα ρεύματος και χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερες απώλειες AC. Σε πολλές περιπτώσεις δεν πληρούν τα πρότυπα κατασκευής

μετασχηματιστών. Έτσι, προκύπτει η ανάγκη επανασχεδιασμού των καλωδίων δεύτερης γενιάς, για τη χρήση τους σε μετασχηματιστές.

Τα καλώδια τύπου CTC (Continuously Transposed Cable), τα οποία κατασκευάζονται από υπεραγωγό δεύτερης γενιάς, δίνουν τη δυνατότητα για την κατασκευή βιώσιμων μετασχηματιστών. Η δομή ενός CTC καλωδίου είναι όμοια με τη δομή ενός αγωγού Roebel, ο οποίος συναντάται σε γεννήτριες AC και σε μετασχηματιστές μεγάλης ισχύος. Ένας αγωγός Roebel αποτελείται από πλατιά νήματα χαλκού συνεστραμμένα με ορισμένη περιοδικότητα. Επειδή το υπεραγωγίμο καλώδιο δεύτερης γενιάς δεν έχει τη δυνατότητα της πλευρικής κάμψης, κόβεται κατάλληλα ώστε να σχηματίσει ένα νήμα τύπου Roebel. Ο αριθμός νημάτων του καλωδίου CTC καθορίζεται από τις ανάγκες αγωγιμότητας ρεύματος. Οι απώλειες AC σε ένα CTC καλώδιο είναι το άθροισμα των απωλειών κάθε νήματος χωριστά και ενός μικρού μέρους απωλειών εξαιτίας της μαγνητικής σύζευξης μεταξύ των νημάτων.

Τα τυλίγματα ενός HTS μετασχηματιστή τοποθετούνται σε μη μεταλλικά δοχεία και λειτουργούν σε κρυογονικές θερμοκρασίες, χρησιμοποιώντας συνήθως ως ψυκτικό μέσο το υγρό άζωτο. Ο πυρήνας σιδήρου λειτουργεί σε θερμοκρασία δωματίου, καθώς οι απώλειές του παραμένουν σταθερές, ανεξαρτήτως θερμοκρασίας. Τα εξωτερικά κάθετα τοιχώματα θερμοκρασίας δωματίου, που περικλείουν τα δοχεία των τυλιγμάτων, μπορεί να είναι είτε μεταλλικά είτε μη μεταλλικά. Τα άνω και κάτω οριζόντια τοιχώματα πρέπει να είναι μη μεταλλικά, για την αποφυγή βραχυκυκλωμάτων με τα αγωγίμα τυλίγματα. Τα τοιχώματα πρέπει να είναι σχεδιασμένα ώστε να αντέχουν στη διαφορά της εξωτερικής ατμοσφαιρικής πίεσης με το εσωτερικό κενό. Ένα επιπρόσθετο εξωτερικό μεταλλικό τοίχωμα, που θα περικλείει ολόκληρο το μετασχηματιστή, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την προστασία από το περιβάλλον.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία ασχολήθηκε με την εξοικονόμηση ενέργειας στα δίκτυα μεταφοράς και διανομής με μεγαλύτερη έμφαση στην βελτίωση του βαθμού απόδοσης των μετασχηματιστών. Αρχικά πραγματοποιήθηκε ιστορική αναδρομή της ηλεκτρικής ενέργειας, από αρχαιοτάτων χρόνων, έως και σήμερα. Στη συνέχεια μελετήθηκε η διεσπαρμένη παραγωγή με τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά της, οι διάφοροι τύποι τεχνολογιών και οι λόγοι που την καθιστούν απαραίτητη στα σύγχρονα δίκτυα διανομής. Η ανάλυση τεχνικών αντιστάθμισης άεργου ισχύος με τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα τους και οι διάφορες τεχνολογίες αυτών παρουσιάζονται στην συνέχεια. Επίσης παρουσιάζεται η αρχή λειτουργίας των μετασχηματιστών, αναλύονται τα επιμέρους μέρη ενός μετασχηματιστή και δίδονται οι τύποι που διέπουν τον μετασχηματιστή αυτό. Στη συνέχεια περιγράφονται οι διάφοροι τρόποι αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας στις μέρες μας, η οποία (αποθήκευση) είναι απαραίτητη μαζί με την διεσπαρμένη παραγωγή για την βέλτιστη εξοικονόμηση ηλεκτρικής ενέργειας σε ηλεκτρικά δίκτυα. Επίσης για την βελτιστοποίηση των μετασχηματιστών αρχικά αναλύονται οι απώλειες τους και δίδονται αναλυτικά οι συνδεσμολογίες και η χρήση των τριφασικών μετασχηματιστών που χρησιμοποιούνται στα ηλεκτρικά δίκτυα. Στη συνέχεια παρουσιάζονται διάφοροι μέθοδοι για την βελτίωση της απόδοσης της λειτουργίας των μετασχηματιστών (βαθμός απόδοσης). Τέλος περιγράφονται οι τελευταίες τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στους εμπορικούς μετασχηματιστές υψηλής ενεργειακής απόδοσης με σκοπό την ελαχιστοποίηση των απωλειών και την εξοικονόμηση ενέργειας στα δίκτυα μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Με βάση τα παραπάνω γίνεται σαφές ότι η παρούσα πτυχιακή εργασία ολοκληρώθηκε επιτυχώς.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- § Nasar Syed, “Handbook of electric machines”, Εκδότης McGraw-Hill
- § Flanagan, William M., “Handbook of transformer design and applications”, Εκδότης McGraw-Hill
- § Cregor D. Haberie, Heinz D. Haberie, “Μετασχηματιστές και ηλεκτρικές μηχανές”, απόδοση στην Ελληνική γλώσσα Φωτιάδης Νίκος, Εκδότης Ευρωπαϊκές Τεχνολογικές Εκδόσεις
- § Stephen J. Charman , “Ηλεκτρικές μηχανές DC-AC / Stephen J. Charman”; μετάφραση: Νίκος Χατζηιωάννου, επιμέλεια: Νίκος Ι. Μάργαρης, Εκδότης ΤΖΙΟΛΑΣ

- § <http://www.grameyer.com.br/obras/eletronorte-2>

- § http://eclass.uth.gr/eclass/modules/document/file.php/MHXB12/Enotita_5.pdf
- § http://www.fhc.co.uk/pumped_storage.htm
- § <http://www.powermag.com/ludington-pumped-storage-plant-increases-efficiency-to-provide-greater-grid-support/>
- § <http://energystoragesense.com/compressed-air-energy-storage/>
- § <http://www.bine.info/en/publications/publikation/druckluftspeicher-kraftwerke/>
- § <http://fresh-energy.org/2011/10/energy-101-what-in-the-world-is-distributed-generation/>
- § <http://www.coe.ufrj.br/bolsa98b.htm>
- § <http://scottses.com/work/new-projects/energy-storage-facility/>
- § <http://homework.uoregon.edu/pub/class/hc441/mstorage.html>
- § http://www.learnabout-electronics.org/ac_theory/transformers01.php
- § http://www.antoniadis.com/?page_id=15
- § <http://www.djshop.gr/pl/metaschimatistes-100v-6224.htm?lang=el&path=1224299717>
- § <http://www.stangen.es.com/current-transformers.html>
- § <http://www.electronicrepairguide.com/flyback-transformer.html>
- § http://www.voltech.com/Articles/104-105/1_What_is_Leakage_Inductance
- § <http://www.slideshare.net/KrasimirIvanov1/transformers-28593636>
- § https://en.wikipedia.org/wiki/Eddy_current
- § <https://www.haarlaender-gmbh.com/en/products/ribbons-tapes/fabric-tapes-kgb/>