



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΕΜΦΑΝΙΣΗ ΑΡΜΟΝΙΚΩΝ ΣΤΗΝ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΙΣΧΥ
ΑΠΟ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ

ΣΙΑΤΕΡΛΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ, ΑΜ: 7011

ΦΡΑΓΚΑΚΟΣ ΙΩΑΝΝΗΣ, ΑΜ:7063

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΣΧΟΙΝΑΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

ΠΑΤΡΑ 2021

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ζήτηση ενέργειας αυξάνεται καθημερινά σε όλο τον κόσμο και οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας έχουν αποδειχθεί ανταγωνιστικές έναντι των συμβατικών πηγών ενέργειας, οι οποίες παράγουν περιβαλλοντική ρύπανση και συμβάλλουν στην αλλαγή του κλίματος και στην υπερθέρμανση του πλανήτη. Ένας αποτελεσματικός και αποδεδειγμένος τύπος ανανεώσιμης ενέργειας είναι η αιολική ενέργεια, η οποία έχει χρησιμοποιηθεί από τον ανθρώπινο πολιτισμό εδώ και χιλιετίες για πλοήγηση και άντληση νερού για γεωργικές δραστηριότητες. Σήμερα, η αιολική ενέργεια χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτή η ενέργεια χρησιμοποιείται για την ώθηση, μηχανικά, των γεννητριών που παράγουν ηλεκτρική ενέργεια. Η συσκευή που επιτρέπει αυτήν τη μετατροπή ονομάζεται ανεμογεννήτρια. Η γεννήτρια συνδέεται απευθείας με το ηλεκτρικό δίκτυο αλλά έχει το μειονέκτημα ότι λειτουργεί με χαμηλή απόδοση παράγοντας κακή ποιότητα ισχύος. Λόγω της απρόβλεπτης φύσης του ανέμου, η αιολική ενέργεια παρουσιάζει πολλά προβλήματα, όπως διακυμάνσεις στην τάση που δημιουργείται και επιπλοκές για την επίτευξη αποτελεσματικών συνδέσεων με το ηλεκτρικό δίκτυο.

Οι διακυμάνσεις της τάσης μπορεί να οδηγήσουν σε δυσλειτουργία ευαίσθητων εξαρτημάτων του συστήματος, μείωση της απόδοσης της γεννήτριας και γενικά, υποβάθμιση της ποιότητας ισχύος, ενώ αρμονικές, οι οποίες είναι σήματα ρεύματος ή / και τάσης που εμφανίζονται σε ηλεκτρικά συστήματα με πολλαπλές συχνότητες του θεμελιώδους, προκαλούν σοβαρά προβλήματα, όπως αλλοίωση των επαγωγών της γεννήτριας και ταλαντώσεις ροπής, μειώνοντας τη διάρκεια ζωής της γεννήτριας ενώ ταυτόχρονα υποβαθμίζουν την ποιότητα της παραγόμενης ισχύος.

Οι αρμονικές και η αντιμετώπισή τους είναι το αντικείμενο της παρούσας πτυχιακής εργασίας. Στο πρώτο κεφάλαιο πραγματοποιείται μια πρώτη εισαγωγή όσον αφορά τις αρμονικές. Ακολούθως στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι πηγές δημιουργίας των αρμονικών και στο τρίτο κεφάλαιο αναλύονται τα προβλήματα που προκύπτουν στα δίκτυα και στους καταναλωτές από την ύπαρξη αρμονικών και παρουσιάζονται και τα πρότυπα

που χρησιμοποιούνται για την κατηγοριοποίηση των αρμονικών. Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται μέθοδοι μέτρησης των αρμονικών και στο επόμενο κεφάλαιο αναλύεται η δομή και η λειτουργία των ανεμογεννητριών όπου και παρατίθενται οι λόγοι για τους οποίους εμφανίζονται αρμονικές λόγω της λειτουργίας τους. Στο έκτο κεφάλαιο αναλύονται διεξοδικά οι διατάξεις που είναι υπεύθυνες για τη δημιουργία των αρμονικών από τις ανεμογεννήτριες και τέλος στο έβδομο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι διατάξεις που χρησιμοποιούνται προκειμένου να περιοριστούν οι αρμονικές.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	I
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ	III
ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	VI
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	VI
ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	VI
ΠΙΝΑΚΑΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ	VIII
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - ΠΗΓΕΣ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΑΡΜΟΝΙΚΩΝ	3
2.1 Βιομηχανία	4
2.2 Ναυτιλία.....	5
2.3 Νοσοκομεία	5
2.4 Κτιριακές εγκαταστάσεις.....	6
2.5 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας.....	7
2.6 Μετασχηματιστές	7
2.7 Περιστρεφόμενες μηχανές.....	8
2.8 Λαμπτήρες φθορισμού.....	9
2.9 Συσκευές παραγωγής ηλεκτρικού τόξου	9
2.10 Ειδικά φαινόμενα.....	10
2.10.1 Flickering	10
2.10.2 Συντονισμός	10
2.11 Μελλοντικές Πηγές Αρμονικών	11
2.12 Συνέπειες από τη δημιουργία των αρμονικών	13
2.13 Αντιμετώπιση των προβλημάτων που δημιουργούν οι αρμονικές.....	17
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - ΠΡΟΤΥΠΑ ΑΡΜΟΝΙΚΩΝ - ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΠΟΥ ΔΗΜΙΟΥΡΓΟΥΝΤΑΙ ΑΠΟ ΤΗΝ ΥΠΑΡΞΗ ΑΡΜΟΝΙΚΩΝ	19
3.1 Αρμονική παραμόρφωση - Πρότυπα αρμονικών	19
3.2 Προβλήματα που δημιουργούνται από τις αρμονικές	21
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΑΡΜΟΝΙΚΩΝ.....	29
4.1 Κατάλληλος εξοπλισμός μέτρησης	29

4.2	Απαραίτητος χρόνος εκτέλεσης των μετρήσεων.....	30
4.3	Κατάλληλο σημείο μέτρησης	31
4.4	Αξιολόγηση μεγεθών.....	32
4.4.1	Η τάση και οι διακυμάνσεις της.....	33
4.4.2	Η άεργος ισχύς και η τιμή του συνημιτόνου.....	33
4.5	Χρήση σωστών ορίων των αρμονικών τάσης	34
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 - ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ.....		36
5.1	Σύντομη ιστορική αναδρομή	36
5.2	Γενικά περί ανέμου.....	38
5.3	Στατιστική περιγραφή του ανέμου	38
5.4	Η κυκλοφορία του ανέμου.....	40
5.5	Βασικές αρχές αιολικής ενέργειας.....	41
5.6	Αιολικό δυναμικό	42
5.7	Ανεμογεννήτριες – Ανεμοκινητήρες – Αιολικές Μηχανές	42
5.7.1	Α/Γ οριζόντιου άξονα	44
5.7.2	Τέσσερις περιπτώσεις ελέγχου της ταχύτητας περιστροφής του ρότορα.....	47
5.8	Επίδραση διαλείπουσας παραγωγής από ΑΠΕ στην ευστάθεια του συστήματος.....	48
5.8.1	Το παράδειγμα της Δανίας.....	49
5.8.2	Ενέργειες για τη διατήρηση ισορροπίας και ενέργειας.....	49
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 - ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΠΟΥ ΔΗΜΙΟΥΡΓΟΥΝ ΑΡΜΟΝΙΚΕΣ ΚΑΤΑ ΤΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ		51
6.1	Φίλτρα.....	51
6.1.1	Παθητικά φίλτρα γραμμής AC (AC Passive Filters) ή αποσυντονισμένα φίλτρα	51
6.1.2	Ενεργά φίλτρα (Active Filters) ή συντονισμένα φίλτρα.....	53
6.1.3	Μ/Σ Zig-Zag (HMT Harmonic Mitigating Transformers).....	58
6.1.4	Φίλτρα ραδιοσυχνοτήτων (RFI).....	58
6.2	Μικρότερος πυκνωτής (C-less)	58
6.3	Πηγία	59
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 - ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΥ ΑΡΜΟΝΙΚΩΝ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ.....		60
7.1	Βασικές τοπολογίες μετατροπών DC-AC.....	60

7.1.1	Εισαγωγή και βασικές έννοιες	60
7.1.2	Παράμετροι απόδοσης	62
7.1.3	Αντιστροφέας ημιγέφυρας (half bridge inverter).....	62
7.1.4	Αντιστροφέας πλήρους γέφυρας (full bridge inverter).....	63
7.1.5	Πολυεπίπεδοι αντιστροφείς	64
7.1.6	Τριφασικοί αντιστροφείς	64
7.1.7	Διαμόρφωση παλμών	65
7.1.8	Προηγμένες τεχνικές διαμόρφωσης.....	69
7.2	Βασικές Τοπολογίες Μετατροπέων DC-DC	69
7.2.1	Βασικές έννοιες, κυκλωματική παράσταση και βασικές στρατηγικές.....	70
7.2.2	DC-DC μετατροπέας υποβιβασμού (buck converter).....	72
7.2.3	DC-DC μετατροπέας ανύψωσης (boost converter)	73
7.2.4	DC-DC μετατροπέας υποβιβασμού-ανύψωσης (buck-boost converter)	75
7.2.5	Μετατροπέας Cuk	76
7.3	Παλμοτροφοδοτικά.....	76
7.3.1	Flyback μετατροπέας	76
7.3.2	Forward μετατροπέας.....	77
7.3.3	Μετατροπέας ημιγέφυρας (half bridge converter).....	78
7.3.4	Μετατροπέας πλήρους γέφυρας (full bridge converter)	79
7.3.5	Μετατροπέας Push-Pull	79
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	81
	ΠΗΓΕΣ ΑΠΟ ΤΟ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ.....	81

ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 4-1	Τριφασικός αναλυτής ισχύος (αριστερά) και αμπεροσιμπίδα (δεξιά).....	30
Εικόνα 5-1	Ολλανδικός ανεμόμυλος.....	37
Εικόνα 5-2	Μεταβολή ανέμου σε διάφορα σημεία της γης.....	38
Εικόνα 5-3	Ένα μέρος της κινητικής ενέργειας του ανέμου δεν εισέρχεται στο δρομέα της Α/Γ.....	40
Εικόνα 5-4	Τοποθέτηση Α/Γ ανάμεσα σε δύο λόφους με σκοπό την εκμετάλλευσή της αύξησης της ενέργειας του ανέμου.....	40
Εικόνα 5-5	Αρχή κίνησης των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας.....	41
Εικόνα 5-6	Τύποι Α/Γ με βάση τον αριθμό των πτερυγίων.....	44
Εικόνα 5-7	Τύποι Α/Γ με βάση τη θέση της πτερωτής ως προς τον πύργο στήριξης.....	44

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2-1	Αρμονική παραμόρφωση για διάφορα είδη φορτίων.....	12
-------------	--	----

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1-1	Αναπαράσταση αρμονικών στο πεδίο του χρόνου.....	1
Σχήμα 1-2	Αρμονικές περιττής τάξης.....	2
Σχήμα 2-1	Τυπική κυματομορφή παρεχόμενης τάσης σε κτίριο και φάσμα αρμονικών με THDV= 2,6%......	7
Σχήμα 2-2	Παραμορφωμένο ρεύμα σε συνθήκες κορεσμού.....	8
Σχήμα 2-3	Παραμορφωμένες κυματομορφές τάσης και ρεύματος ενός λαμπτήρα φθορισμού 15W.....	9
Σχήμα 3-1	Τροφοδοσία δικτύου ηλεκτρικών φορτίων.....	22
Σχήμα 3-2	Ροή του ρεύματος τρίτης αρμονικής σε ένα τριφασικό σύστημα.....	24
Σχήμα 4-1	Σωστό (σημείο Α) και λανθασμένο (σημείο Β) σημείο μέτρησης αρμονικών του συστήματος.....	32
Σχήμα 5-1	Περσικός ανεμόμυλος.....	36
Σχήμα 5-2	Α/Γ οριζόντιου και κατακόρυφου άξονα.....	43

Σχήμα 5-3	Η Α/Γ με τα απαραίτητα συστήματα ηλεκτρονικών ισχύος.....	45
Σχήμα 5-4	Σύστημα μετάδοσης της περιστροφικής κίνησης της πλήμνης στον ηλεκτροκινητήρα, με τη μεσολάβηση άξονα και κιβωτίου ταχυτήτων	48
Σχήμα 6-1	Φιλτράρισμα αρμονικών σε γραμμή AC.....	52
Σχήμα 6-2	Σχηματική απεικόνιση ενός αποσυντονισμένου φίλτρου και της αρχής λειτουργίας του	53
Σχήμα 6-3	Ο ρόλος ενός ενεργού φίλτρου (α) Σύνδεση στο κύκλωμα (β) Κυματομορφές ρεύματος.....	54
Σχήμα 6-4	Σχηματική απεικόνιση ενός συντονισμένου φίλτρου και της αρχής λειτουργίας του	55
Σχήμα 6-5	Σχηματική απεικόνιση της αρχής λειτουργίας ενός ενεργού φίλτρου	56
Σχήμα 6-6	Παράδειγμα μείωσης της Ολικής Αρμονικής Παραμόρφωσης που προκαλείται από την εγκατάσταση ενός ενεργού φίλτρου σε έναν κινητήρα ο οποίος είναι συνδεδεμένος με inverter	57
Σχήμα 6-7	Πυκνωτής εξομάλυνσης ανόρθωσης (DC link capacitor).....	59
Σχήμα 6-8	Πηνία εξομάλυνσης στο σύνδεσμο DC και στη γραμμή AC.....	59
Σχήμα 7-1	Βασικά διαγράμματα λειτουργίας για αντιστροφείς ελεγχόμενους από τάση και αντιστροφείς ελεγχόμενους από ρεύμα.	60
Σχήμα 7-2	Προοδευτική προσέγγιση της τετραγωνικής μορφής με αύξηση του αρμονικού περιεχομένου.....	61
Σχήμα 7-3	Το βασικό κύκλωμα του αντιστροφέα ημιγέφυρας, η 10.τάση εξόδου και η συνηθισμένη προσέγγιση με σύνδεση διόδων για την προστασία των διακοπών.	63
Σχήμα 7-4	Αντιστροφέας πλήρους γέφυρας και επεξήγηση λειτουργίας.....	64
Σχήμα 7-5	Ένας αντιστροφέας τριών επιπέδων, οι σχετικές κυματομορφές και μια παραλλαγή στον σχεδιασμό (και στις δύο περιπτώσεις ισχύει $A1=A2=A3$).....	64
Σχήμα 7-6	Τριφασικός αντιστροφέας σε συνδεσμολογία γέφυρας.....	65
Σχήμα 7-7	Μονοπαλμική PWM διαμόρφωση.....	66
Σχήμα 7-8	Πολυπαλμική PWM διαμόρφωση	66
Σχήμα 7-9	Δύο παραδείγματα SPWM διαμόρφωσης	68
Σχήμα 7-10	Παράδειγμα τάσης και ρεύματος εξόδου με SPWM τεχνική και φίλτρο εξόδου	68
Σχήμα 7-11	Παράδειγμα MSPWM	69

Σχήμα 7-12	Η απλουστευμένη γενική αρχή λειτουργίας των κατατμητών	70
Σχήμα 7-13	Σταθερή και μη σταθερή κατάσταση για DC-DC μετατροπείς.....	71
Σχήμα 7-14	Βασικό κύκλωμα του buck μετατροπέα και κυματομορφές	73
Σχήμα 7-15	Buck μετατροπέας με φίλτρο εξόδου και κυματομορφές	73
Σχήμα 7-16	Βασικό κύκλωμα του boost μετατροπέα	74
Σχήμα 7-17	Boost μετατροπέας φίλτρο εξόδου και κυματομορφές	74
Σχήμα 7-18	Βασικό κύκλωμα buck-boost μετατροπέα και κύκλωμα με φίλτρο εξόδου	75
Σχήμα 7-19	Βασική τοπολογία μετατροπέα Cuk	76
Σχήμα 7-20	Ο buck-boost μετατροπέας και ο flyback μετατροπέας (με διακεκομμένες υπογραμμίζεται η αντικατάσταση του πηνίου από έναν μετασχηματιστή)	77
Σχήμα 7-21	Ο forward μετατροπέας	78
Σχήμα 7-22	Ο μετατροπέας ημιγέφυρας	78
Σχήμα 7-23	Ο μετατροπέας πλήρους γέφυρας.....	79
Σχήμα 7-24	Ο push-pull μετατροπέας.....	80

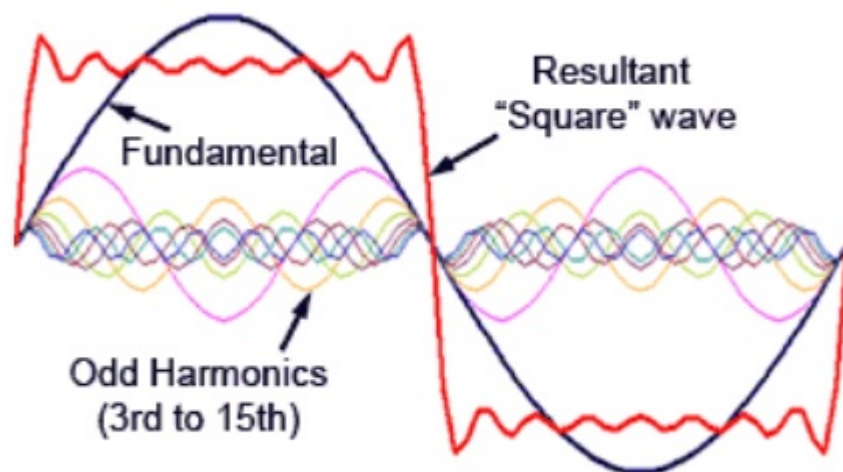
ΠΙΝΑΚΑΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 3-1	Οι αρμονικές μειώνουν το συντελεστή ισχύος.....	28
Διάγραμμα 5-1	Η κατανομή των ανέμων σε μια περιοχή μοντελοποιείται συνήθως με μια κατανομή Weibull	39

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας εναλλασσόμενης τάσης λειτουργούν σε συχνότητα 50 Hz (στις ΗΠΑ 60 Hz). Αυτή η συχνότητα ονομάζεται βασική ή θεμελιώδης. Τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας τροφοδοτούν φορτία τα οποία δεν απορροφούν ημιτονοειδές ρεύμα ή/και το ρεύμα τους έχει διαφορά φάσης με την εφαρμοζόμενη τάση. Έτσι δημιουργούνται τάσεις και ρεύματα διαφορετικών (υψηλότερων) συχνοτήτων π.χ. 100 Hz, 150 Hz, 250 Hz, κλπ λόγω των διαφορετικών φορτίων. Οι συχνότητες αυτές που αποτελούν ακέραια πολλαπλάσια της θεμελιώδους λέγονται αρμονικές.

Άρα οι αρμονικές είναι ημιτονοειδής συνιστώσες του εναλλασσομένου ρεύματος διαφορετικής συχνότητας οι οποίες παραμορφώνουν την καθαρή ημιτονοειδή κυματομορφή του.



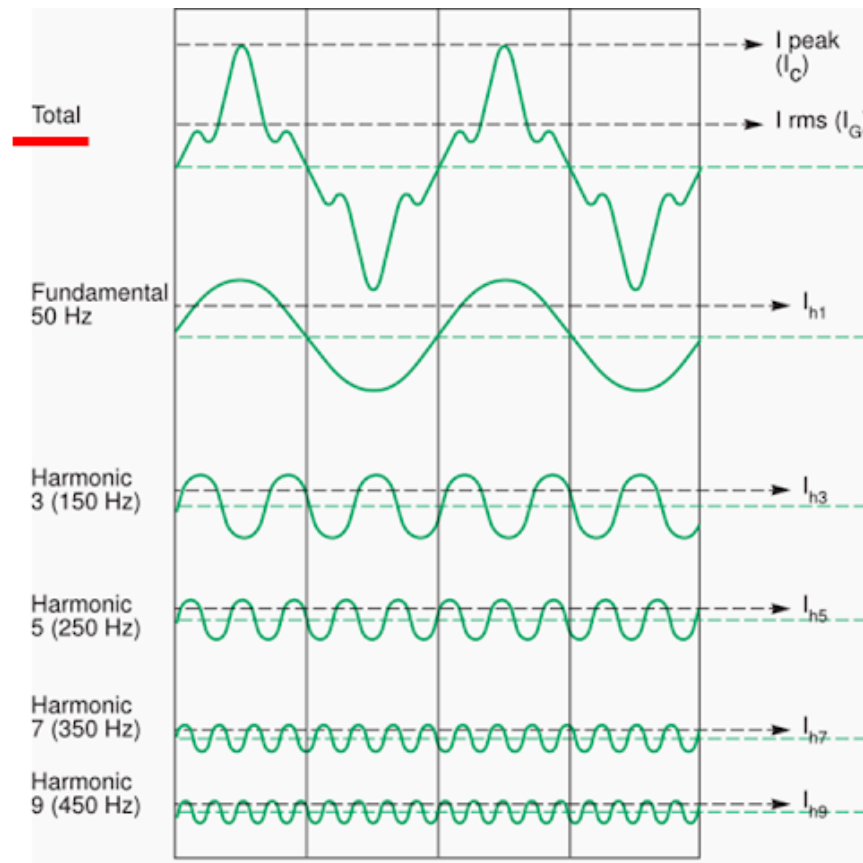
Σχήμα 1-1 Αναπαράσταση αρμονικών στο πεδίο του χρόνου

Το τμήμα του εξοπλισμού που μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια απ'ευθείας σε θερμότητα αξιοποιεί την ενέργεια των αρμονικών και έτσι δεν υπάρχει πρόβλημα. Το πιο ευαίσθητο τμήμα του εξοπλισμού είναι αυτό που σχεδιάστηκε έτσι ώστε να δέχεται μια τέλεια ημιτονοειδή είσοδο (εφαρμογές τηλεπικοινωνιών και επεξεργασίας δεδομένων).

Οι κινητήρες βρίσκονται σε μια κατηγορία που βρίσκεται σε ένα ενδιάμεσο επίπεδο καθώς επηρεάζονται αρκετά από το αρμονικό περιεχόμενο. Ακόμα όμως και στις περιπτώσεις φορτίων που επηρεάζονται λιγότερο από τις

ανώτερες αρμονικές, αυτές μπορούν να αποβούν επιβλαβείς. Για παράδειγμα σε ένα ωμικό φορτίο μπορούν να προκαλέσουν θέρμανση του διηλεκτρικού ή αύξηση της τιμής της τάσης με αποτέλεσμα να επέλθει γήρανση στη μόνωση.

Έτσι, για παράδειγμα, η συχνότητα των 150 Hz ονομάζεται 3^η αρμονική, η συχνότητα 250 Hz 5^η αρμονική, κοκ. Κατ' επέκταση, οι συνιστώσες τάσης ή ρεύματος αυτών των υψηλοτέρων συχνοτήτων λέγονται αρμονικές τάσης ή αρμονικές ρεύματος αντίστοιχα.



Σχήμα 1-2 Αρμονικές περιττής τάξης

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΠΗΓΕΣ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΑΡΜΟΝΙΚΩΝ

Η συνηθέστερη αιτία δημιουργίας αρμονικών στα ηλεκτρικά δίκτυα είναι η ύπαρξη μη γραμμικών φορτίων και οι διατάξεις των ημιαγωγικών στοιχείων.

- Στρεφόμενες ηλεκτρικές μηχανές: Οι αρμονικές οφείλονται στις οδοντώσεις του πυρήνα και στις ατέλειες των μαγνητικών κυκλωμάτων τους.
- Ρεύματα μαγνήτισης των Μ/Σ: Οι αρμονικές οφείλονται στο μαγνητικό κορεσμό των πυρήνων και στη μαγνητική υστέρηση.
- Σιδηροσυντονισμός: Οι αρμονικές οφείλονται σε ισχυρό μη γραμμικό φαινόμενο προκαλούμενο από την αλληλεπίδραση μη γραμμικής επαγωγικής αντίδρασης (για παράδειγμα ένας μετασχηματιστής) με τη χωρητικότητα του συστήματος. Συχνά υπερισχύουν οι συχνότητες του 1/3 ή 1/5 της βασικής και εμφανίζεται σαν υποαρμονικό φαινόμενο με υπερτάσεις, μεγάλα ρεύματα, παραμόρφωση κυματομορφών, κλπ.
- Μη γραμμικότητες δικτύου: Προκύπτουν από φορτία όπως ανορθωτές, μετατροπείς, κλίβανοι ηλεκτρικού τόξου, μηχανήματα ηλεκτροσυγκόλλησης τόξου, λαμπτήρες αερίου, ελεγκτές τάσης, μετατροπείς συχνότητας, κ.ά.
- Τριφασικά φορτία: εισάγουν κυρίως αρμονικές περιττής τάξεως (5η, 7η, 11η, 13η, 17η αρμονική).
- Συσκευές που συνδυάζουν ημιαγωγούς και συστήματα διακοπής (για εξοικονόμηση ενέργειας).
- Συσκευές ελέγχου των κινητήρων σε εφαρμογές ελέγχου ταχύτητας έλξης (π.χ. ηλεκτρικοί σιδηρόδρομοι).
- Συσκευές μετατροπής και μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος με συνεχές ρεύμα υψηλής τάσεως.
- Ηλιακά και αιολικά συστήματα μικρής ισχύος με τους αντίστοιχους μετατροπείς ισχύος από εναλλασσόμενο σε συνεχές ρεύμα για τη σύνδεση των πηγών με τα συστήματα διανομής.
- Συστήματα διόρθωσης συντελεστή ισχύος. Η χρήση συστοιχιών πυκνωτών προκαλεί παραγωγή αρμονικών λόγω συντονισμού, όπως επίσης και η χρήση πηνίων αντιστάθμισης που χρησιμοποιούνται για

την εξουδετέρωση χωρητικών φορτίσεων (π.χ. μεγάλων γραμμών μεταφοράς). Άλλος λόγος δημιουργίας αρμονικών στα ανωτέρω συστήματα είναι τα θυρίστορ, που περιλαμβάνονται στις νέες μεθόδους διόρθωσης του συντελεστή ισχύος.

- Συσκευές φόρτισης συσσωρευτών. Απαιτούν χρήση ανορθωτών και χρησιμοποιούνται για παράδειγμα σε ηλεκτρικά οχήματα που λειτουργούν με συσσωρευτές.
- Συσκευές άμεσης μετατροπής ενέργειας που απαιτούν μετατροπείς από εναλλασσόμενο σε συνεχές ρεύμα.
- Κυκλομετατροπείς (cycloconverters) που χρησιμοποιούνται σε κινητήρες χαμηλών ταχυτήτων και μεγάλων ροπών, κυρίως σε βιομηχανικές εφαρμογές.
- Στοιχεία θέρμανσης PBM (Pulse Burst-Modulated), που χρησιμοποιούνται σε μεγάλους κλιβάνους.

2.1 Βιομηχανία

Η βιομηχανία είναι ο πρώτος τομέας που απασχόλησαν οι αρμονικές. Με τη σταδιακά αυξανόμενη χρήση των ηλεκτρονικών ισχύος (θυρίστορς κλπ), οι αρμονικές εξαπλώθηκαν ραγδαία τα τελευταία έτη. Η πολυπλοκότητα του εξοπλισμού, αλλά και η αλληλεπίδρασή του με διάφορα συστήματα, δημιουργούν μεγάλα και ποικίλα φαινόμενα αρμονικών. Οι κυριότερες πηγές παραγωγής αρμονικών στη βιομηχανία είναι οι ακόλουθες:

- Διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος (inverters, ανορθωτές, μετατροπείς κλπ)
- Εργαλειομηχανές CNC
- Διατάξεις ηλεκτρικού τόξου (ηλεκτροσυγκολήσεις)
- Ηλεκτρικοί φούρνοι
- Αντλίες

Για την αντιμετώπιση του φαινομένου των αρμονικών στη βιομηχανία, η βέλτιστη επιλογή είναι η χρήση ενεργών φίλτρων διότι τα φίλτρα που καλούνται να αντιμετωπίσουν τις αρμονικές στη βιομηχανία πρέπει να

χαρακτηρίζονται τόσο από υψηλή απόδοση όσο και από μεγάλη αντοχή στις δύσκολες συνθήκες του βιομηχανικού περιβάλλοντος.

Για παράδειγμα, σε βιομηχανίες που αντιμετωπίζουν μεγάλο πρόβλημα με τη σκόνη (όπως βιομηχανίες τσιμέντου, μύλοι άλεσης, λατομεία, κλπ), τα συνήθη αερόψυκτα φίλτρα δεν αποδίδουν ικανοποιητικά, καθώς το σύστημα ψύξης επιβαρύνεται (ή «μπουκώνει» από τη σκόνη) με κίνδυνο να υπερθερμανθεί το φίλτρο και να καταστραφεί.

2.2 Ναυτιλία

Ένας άλλος πολύ σημαντικός κλάδος με αρκετά διαδεδομένο το φαινόμενο των αρμονικών είναι η ναυτιλία. Οι αρμονικές έχουν κάνει την εμφάνισή τους σε διάφορες κατηγορίες πλοίων, εξαιτίας ποικίλων παραγόντων ανά περίπτωση.

Για παράδειγμα, στα επιβατηγά πλοία οι αρμονικές εμφανίζονται κυρίως λόγω των μεγάλων μονάδων κλιματισμού. Σε πλοία που αναπτύσσουν μεγάλες ταχύτητες (πολεμικά, θαλαμηγοί) έχουν παρατηρηθεί προβλήματα στα συστήματα πρόωσης και πηδαλίων. Τέλος, πλοία ειδικών χρήσεων (αλιευτικά, υποβρύχιων σκυροδετήσεων, κλπ.) διαθέτουν πιο ιδιαίτερο εξοπλισμό, όπως ανυψωτικά, inverters, κλπ. και αντιμετωπίζουν άλλες μορφές αρμονικών.

Όπως και στην περίπτωση των βιομηχανικών εφαρμογών, έτσι και στις ναυτιλιακές η αντιμετώπιση των αρμονικών γίνεται με τη χρήση των ενεργών φίλτρων. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι και στους δύο κλάδους εμφανίζονται αρμονικές ίδιας τάξης (5^η, 7^η, κλπ), ενώ και οι τιμές των δεικτών αρμονικής παραμόρφωσης THD δε διαφέρουν σημαντικά.

2.3 Νοσοκομεία

Τα νοσοκομεία είναι ένας ακόμη χώρος που εντοπίζονται υψηλά επίπεδα αρμονικών. Οι πηγές δημιουργίας αρμονικών στις νοσοκομειακές εγκαταστάσεις είναι κυρίως η συνεχώς αυξανόμενη χρήση αξονικών και μαγνητικών τομογράφων καθώς και συσκευών παραγωγής ακτίνων.

Επιπλέον, λόγω των αυξημένων απαιτήσεων ασφαλείας, τα διεθνή πρότυπα προβλέπουν για τα νοσοκομεία αυστηρότερα όρια για το ύψος των αρμονικών σε σύγκριση με άλλους κλάδους. Πιο συγκεκριμένα, το πρότυπο IEEE 519 προβλέπει για τα νοσοκομεία μέγιστη τιμή αρμονικής παραμόρφωσης τάσης (THDv) μόλις 3%, ενώ για τη βιομηχανία η αντίστοιχη μέγιστη τιμή παραμόρφωσης είναι 8%.

Η βέλτιστη αντιμετώπιση των αρμονικών σε νοσοκομειακές εγκαταστάσεις απαιτεί τη χρήση ενεργών φίλτρων, καθώς τα ενεργά είναι το μοναδικό είδος φίλτρων με ικανότητα πλήρους απόσβεσης αρμονικών. Συνεπώς, τα ενεργά φίλτρα είναι το μοναδικό είδος φίλτρων που μπορεί να επιτύχει τα προαναφερόμενα ποσοστιαία επίπεδα αρμονικής παραμόρφωσης.

2.4 Κτιριακές εγκαταστάσεις

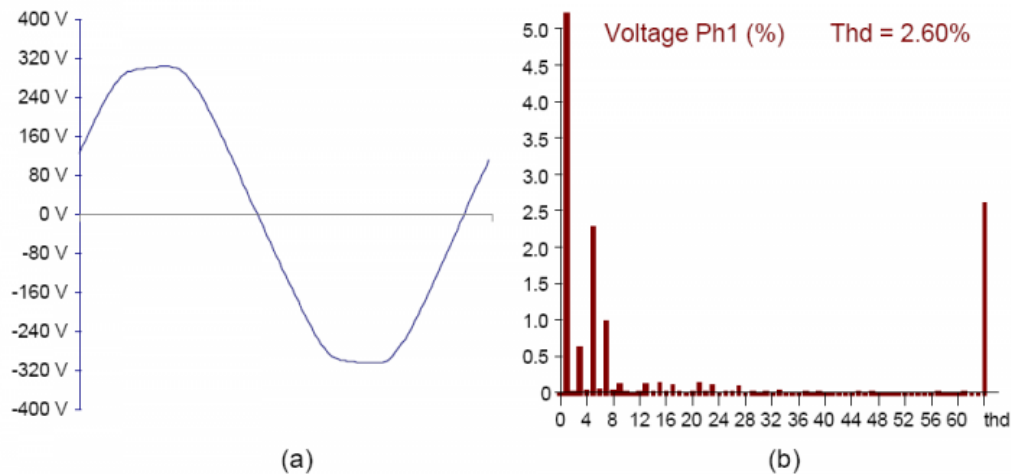
Σε ό,τι αφορά τις κτιριακές εγκαταστάσεις, οι αρμονικές εμφανίζονται κυρίως σε μεγάλα κτιριακά συγκροτήματα που περιλαμβάνουν μεγάλο αριθμό ηλεκτρονικού εξοπλισμού, μεγάλο αριθμό φωτιστικών σωμάτων και πλήθος UPS, που είναι εξίσου μεγάλες πηγές παραγωγής αρμονικών.

Ενδεικτικά, οι πιο κοινές περιπτώσεις εμφάνισης αρμονικών είναι οι εξής:

- Κτίρια γραφείων εταιριών και οργανισμών
- Ξενοδοχεία
- Τράπεζες
- Data Centers

Οι παραπάνω κτιριακές εγκαταστάσεις διαθέτουν μεγάλο αριθμό μονοφασικών φορτίων με αποτέλεσμα να παρουσιάζουν μεγάλες τιμές αρμονικών στον ουδέτερο αγωγό. Το γεγονός ότι σε αυτές τις περιπτώσεις το σύνολο των αρμονικών διέρχεται μέσα από τον ουδέτερο αγωγό, μπορεί να οδηγήσει στην καταστροφή του, καθώς η διαστασιολόγηση της διατομής του σπανίως γίνεται έχοντας λάβει υπόψιν την πιθανότητα εμφάνισης αρμονικών.

Για τέτοιες εγκαταστάσεις, έχουν αναπτυχθεί ειδικές εκδόσεις ενεργών φίλτρων με σύνδεση τεσσάρων (4) αγωγών (αντί των συνηθισμένων τριών (3) αγωγών) ώστε να αντισταθμίζονται και οι αρμονικές του ουδέτερου αγωγού.



Σχήμα 2-1 Τυπική κυματομορφή παρεχόμενης τάσης σε κτίριο και φάσμα αρμονικών με $THDV = 2,6\%$

2.5 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Οι ιδιώτες παραγωγοί ηλεκτρικής ενέργειας από μεγάλα αιολικά και φωτοβολταϊκά πάρκα αντιμετωπίζουν συχνά προβλήματα με τους διαχειριστές των εθνικών δικτύων, λόγω των υψηλών τιμών αρμονικών που περιέχει το παραγόμενο ρεύμα που εισάγεται στο δίκτυο.

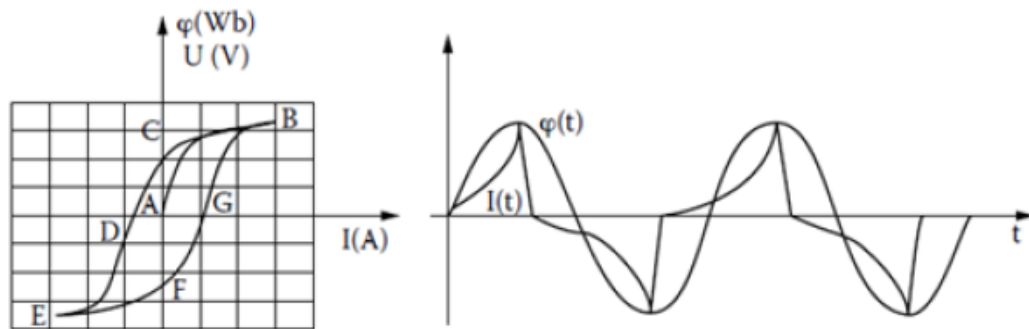
Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο εξοπλισμός παλαιάς τεχνολογίας (ανεμογεννήτριες, panels) παράγει περισσότερες αρμονικές, τις οποίες διοχετεύει στο δίκτυο μεταφοράς μέσω των μετασχηματιστών, οι οποίοι δεν έχουν τη δυνατότητα απόσβεσης αρμονικών. Επίσης, λόγω της ευαισθησίας και του περιορισμένου χρόνου ζωής που παρουσιάζουν οι συστοιχίες πυκνωτών, η άεργος ισχύς αυξάνεται σταδιακά, γεγονός που επιφέρει πρόσθετες χρεώσεις.

Για την αντιμετώπιση των αρμονικών σε μεγάλα έργα ΑΠΕ, απαιτούνται συνδυαστικές εφαρμογές αντιστάθμισης αρμονικών και άεργου ισχύος.

2.6 Μετασχηματιστές

Ένας μετασχηματιστής μπορεί να υποστεί συνθήκες κορεσμού πυρήνα σε οποιαδήποτε από τις ακόλουθες περιπτώσεις: Όταν λειτουργεί άνω της ονομαστικής ισχύος ή όταν λειτουργεί πάνω από την ονομαστική τάση. Η πρώτη κατάσταση μπορεί να προκύψει κατά τη διάρκεια των περιόδων αιχμής ζήτησης, και η δεύτερη περίπτωση μπορεί να συμβεί κατά τις συνθήκες

μεγάλης φόρτισης, ειδικά εάν οι συστοιχίες πυκνωτών δεν έχουν αποσυνδεθεί ανάλογα και η τάση του τροφοδοτικού αυξάνεται πάνω από τις ονομαστικές τιμές. Παραμορφωμένο ρεύμα στο μετασχηματιστή σε συνθήκες κορεσμού φαίνεται στο **Σχήμα 2-2**. Από το σχήμα είναι προφανές ότι ένας μετασχηματιστής που λειτουργεί στην περιοχή κορεσμού θα παρουσιάσει ένα μη γραμμικό ρεύμα μαγνητισμού, το οποίο περιέχει ένα σύνολο από αρμονικές, με κυρίαρχη την τρίτη αρμονική. Το αποτέλεσμα θα γίνει πιο εμφανές με την αύξηση της φόρτισης. Η παραμόρφωση οφείλεται τυπικά σε τριπλές αρμονικές (περιττά πολλαπλάσια του τρία, δηλαδή, 3ος, 9ος, 15ος, κλπ.), αλλά κυρίως λόγω της τρίτης αρμονικής.



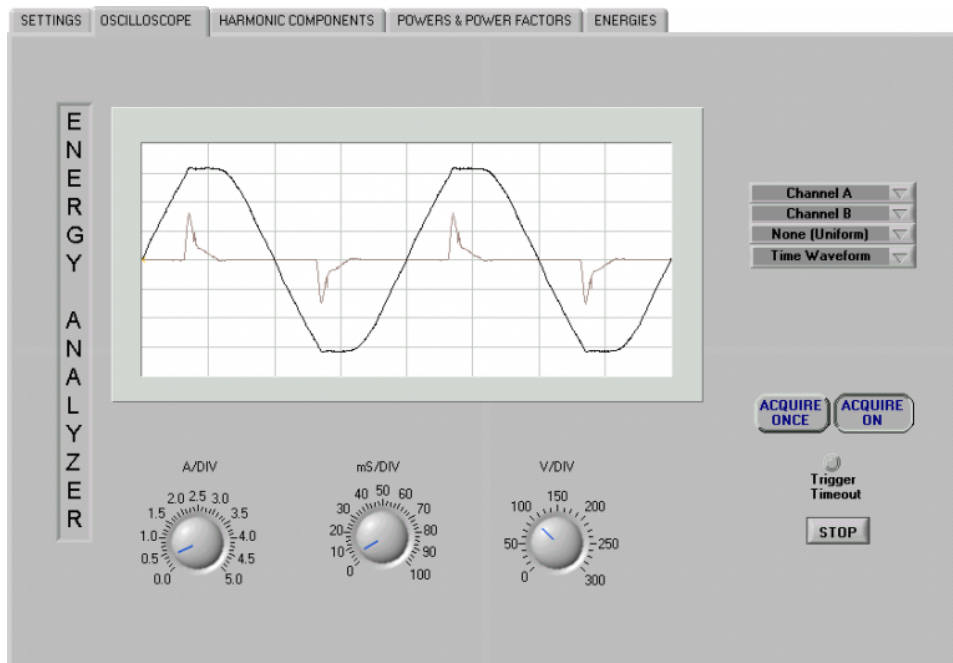
Σχήμα 2-2 Παραμορφωμένο ρεύμα σε συνθήκες κορεσμού

2.7 Περιστρεφόμενες μηχανές

Λόγω των αυλακιών του δρομέα ή των ελαφρών ανωμαλιών στους τρόπους τυλίγματος της περιέλιξης μιας περιστρεφόμενης μηχανής ή λόγω μικρών ασυμμετριών στο μηχάνημα, μπορούν να αναπτυχθούν αρμονικά ρεύματα. Αυτές οι αρμονικές επάγουν ηλεκτροκινητική δύναμη (electromotive force, emf) στις περιελίξεις του στάτορα με συχνότητα ίση με το λόγο ταχύτητας / μήκους κύματος. Η προκύπτουσα κατανομή των μαγνητικών δυνάμεων (magneto motive forces, mmf) στο μηχάνημα παράγει αρμονικές. Επιπρόσθετα αρμονικά ρεύματα μπορούν να δημιουργηθούν με τον κορεσμό του μαγνητικού πυρήνα. Αυτά τα αρμονικά ρεύματα είναι συνήθως μικρότερα από αυτά που αναπτύσσονται όταν τα μηχανήματα τροφοδοτούνται μέσω μηχανισμών οδήγησης μεταβλητής συχνότητας (variable frequency drives VFD).

2.8 Λαμπτήρες φθορισμού

Οι αρμονικές παραμορφώσεις επηρεάζουν τον ευαίσθητο εξοπλισμό που συνδέεται με τα δίκτυα ρεύματος και είναι ιδιαίτερα εμφανείς για τους συμπαγείς λαμπτήρες φθορισμού. Οι λαμπτήρες αυτοί είναι εξαιρετικά μη γραμμικοί στη λειτουργία τους και δημιουργούν περιττές συνιστώσες αρμονικών σημαντικού μεγέθους. Τα ηλεκτρονικά στραγγαλιστικά πηνία λειτουργούν σε υψηλότερη συχνότητα, πράγμα που επιτρέπει τη χρήση μικρότερων πηνίων και πυκνωτών. Η χρήση υψηλότερων συχνοτήτων τους επιτρέπει να δημιουργούν περισσότερο φως για την ίδια είσοδο ισχύος. Αυτό χρησιμοποιείται για να μειώσει την ισχύ εισόδου αλλά με το τίμημα της εμφάνισης ανώτερων αρμονικών.



Σχήμα 2-3 Παραμορφωμένες κυματομορφές τάσης και ρεύματος ενός λαμπτήρα φθορισμού 15W

2.9 Συσκευές παραγωγής ηλεκτρικού τόξου

Τα χαρακτηριστικά τάσης-ρεύματος των ηλεκτρικών τόξων είναι εξαιρετικά μη γραμμικά. Μετά την ανάφλεξη του τόξου, η τάση μειώνεται λόγω του ρεύματος βραχυκυκλώματος, η τιμή του οποίου περιορίζεται μόνο από την αντίσταση του συστήματος ισχύος. Λόγω του φυσικού φαινομένου της τήξης του υλικού με το κινούμενο ηλεκτρόδιο, το ρεύμα που τροφοδοτεί το

ηλεκτρόδιο δίνει τη χειρότερη παραμόρφωση. Επίσης το ρεύμα αυτό διαφέρει σε κάθε κύκλο εργασίας.

2.10 Ειδικά φαινόμενα

Πέρα από τις προαναφερόμενες εφαρμογές, παρατηρούνται ιδιαίτερα φαινόμενα, τα οποία οφείλονται στις αρμονικές, ωστόσο δεν μπορούν να αντιμετωπιστούν από τα συνηθισμένα ενεργά φίλτρα της αγοράς. Τέτοια ειδικά φαινόμενα είναι το flickering και ο συντονισμός, όπως αναλύονται παρακάτω.

2.10.1 Flickering

Έχει να κάνει με τη διαμόρφωση πλάτους (AM) της τάσης των 50 Hz σε μικρότερες συχνότητες (0.5–20 Hz). Η συνηθέστερη συνέπειά του, από την οποία έχει πάρει και το όνομά του είναι οι αναλαμπές του φωτισμού των εγκαταστάσεων (flicker). Αντίθετα με την επικρατούσα εντύπωση ότι οφείλεται στα φωτιστικά παλαιάς τεχνολογίας, παρατηρούμε ότι εξακολουθεί να εμφανίζεται ακόμη και στις πιο σύγχρονες εγκαταστάσεις με φωτισμό LED κλπ.

Λόγω των πολύ μικρών συχνοτήτων που προαναφέρθηκαν, η αντιστάθμιση του flickering δεν είναι δυνατό να πραγματοποιηθεί ταυτόχρονα με την αντιστάθμιση των κοινών αρμονικών των 150, 250 Hz κλπ. Συνεπώς, ο μόνος τρόπος αντιμετώπισης του φαινομένου του flickering είναι η χρήση ενεργών φίλτρων, τα οποία όμως θα πρέπει να είναι εφοδιασμένα με κατάλληλα σχεδιασμένο λογισμικό.

2.10.2 Συντονισμός

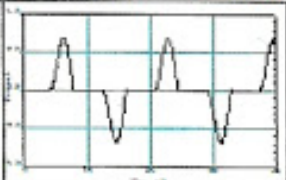
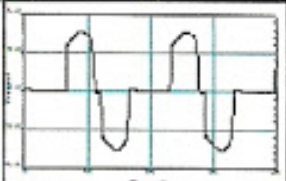
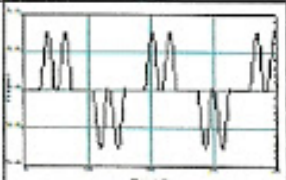
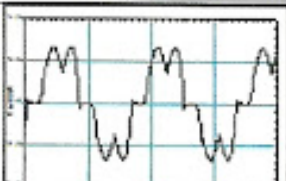
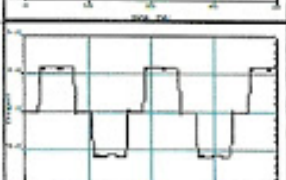
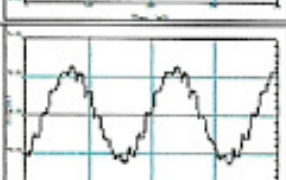
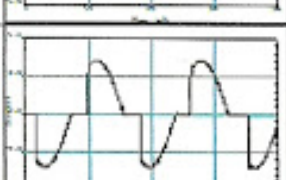
Στο φαινόμενο του συντονισμού, η χωρητική και η επαγωγική αντίδραση εξισώνονται και αλληλοεξουδετερώνονται με αποτέλεσμα να προκαλούνται υπερεντάσεις, οι οποίες είναι καταστροφικές για τον εξοπλισμό. Ο συντονισμός παρατηρείται σε πολλές περιπτώσεις ανεμογεννητριών παλαιάς τεχνολογίας, αλλά και βιομηχανιών με μεγάλο αριθμό επαγωγικών και χωρητικών φορτίων (παθητικά φίλτρα, συστοιχίες πυκνωτών κλπ.) που αλληλοεπηρεάζονται.

2.11 Μελλοντικές Πηγές Αρμονικών

Οι πηγές των αρμονικών στο ηλεκτρικό σύστημα του μέλλοντος θα είναι πολλές και ποικίλες. Λόγω της αυξανόμενης χρήσης ευαίσθητων ηλεκτρονικών συσκευών σε προσωπικούς υπολογιστές, πολυμέσα, ψηφιακές επικοινωνίες και βιομηχανικές αυτοματοποιημένες διαδικασίες, το πρόβλημα αυξάνεται. Γενικά, ακόμα και συσκευές που δεν θεωρούνται μεγάλες πηγές αρμονικών, μπορεί να φτάσουν να θεωρούνται. Τα φωτοβολταϊκά, τα αιολικά, το φυσικό αέριο, οι κυψέλες καυσίμου και ακόμη και το υδρογόνο αναμένεται να διαδραματίσουν ολοένα και σημαντικότερους ρόλους στη διαχείριση των αναγκών του μέλλοντος.

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζεται η κυματομορφή και η αρμονική παραμόρφωση για διάφορα είδη φορτίων.

Πίνακας 2-1 Αρμονική παραμόρφωση για διάφορα είδη φορτίων

Τύπος φορτίου	Τυπική κυματομορφή	Παραμόρφωση ρεύματος, THD _i
Μονοφασικό τροφοδοτικό		80% (υψηλή 3 ^η αρμονική)
Ημιανορθωτής		Υψηλή 2 ^η , 3 ^η , 4 ^η σε μερικό φορτίο
Ανορθωτής 6 παλμών, με χωρητική εξομάλυνση, χωρίς πηνίο σειράς		80%
Ανορθωτής 6 παλμών, με χωρητική εξομάλυνση, με πηνίο σειράς > 3%, ή τροφοδοσία dc κινητήρα		40%
Ανορθωτής 6 παλμών, με μεγάλο πηνίο για εξομάλυνση ρεύματος		28%
Ανορθωτής 12 παλμών		15%
Ρυθμιστής ac τάσης		Ανάλογα με την γωνία έναυσης
Λαμπτήρες φθορισμού		17%

2.12 Συνέπειες από τη δημιουργία των αρμονικών

- Ο εξοπλισμός αποκρίνεται διαφορετικά κατά την εφαρμογή σε αυτόν αρμονικής τάσης και εξαρτάται σημαντικά από την μέθοδο λειτουργίας. Για παράδειγμα, οι λαμπτήρες πυρακτώσεως και οι περισσότεροι τύποι οικιακών θερμοσιφώνων και θερμοστρών δεν επηρεάζονται σχεδόν καθόλου.
- Από την άλλη, τα τυλίγματα των επαγωγικών κινητήρων υπερθερμαίνονται από τις αρμονικές, προκαλώντας με αυξημένο ρυθμό μείωση της αποδοτικότητας των μονώσεων, όπως και μείωση του χρόνου ζωής τους.
- Οι αρμονικές τάσεις μπορούν να δώσουν αντιστοίχως μεγαλύτερα ρεύματα από αυτά της θεμελιώδους συνιστώσας και για αυτό μπορεί εύκολα να υποτιμηθεί ο βαθμός αύξησης της θερμότητας στον κινητήρα (στην αρχική μελέτη θεωρήθηκε ότι θα φτάσει μέχρι ένα συγκεκριμένο σημείο με αποτέλεσμα καταστροφικές συνέπειες για τον κινητήρα).
- Η λειτουργία κάποιων συσκευών βασίζεται σε μία ακριβή κυματομορφή τάσης με ελάχιστες αποκλίσεις, με αποτέλεσμα αυτές οι συσκευές να δυσλειτουργούν παρουσία αρμονικών. Παραδείγματα τέτοιων συσκευών αποτελούν ηλεκτρονικοί εξοπλισμοί που περιλαμβάνουν switching τροφοδοτικά, θυρίστορ, προγραμματιζόμενες μονάδες ελέγχου, ηλεκτρονικές κάρτες, κλπ.
- Πολλές από τις αρμονικές που διαρρέουν το δίκτυο οφείλονται στην παραμόρφωση που εισάγουν μονοφασικά φορτία, όπως παρατηρείται σε κτίρια που στεγάζουν γραφεία, και μπορεί να προκαλέσουν διαρροή ρευμάτων στον ουδέτερο αγωγό που ξεπερνούν την ονομαστική ενεργό τιμή του ρεύματος.
- Σε συνθήκες χωρίς αρμονικές, ο ουδέτερος μεταφέρει πολύ μικρά ρεύματα, και κατά συνέπεια έχει γίνει πλέον πρακτική να τοποθετούνται αγωγοί στον ουδέτερο που να μπορούν να μεταφέρουν ολόκληρο ή πιθανά το μισό από την ονομαστική ενεργό τιμή του ρεύματος. Με αυξημένα επίπεδα αρμονικών ελλοχεύει ο κίνδυνος υπερφόρτισης του ουδετέρου με δύο πιθανές επιπτώσεις:

- Υπερθέρμανση του αγωγού στον ουδέτερο με μείωση του χρόνου ζωής και ενδεχόμενο εκδήλωσης πυρκαγιάς.
- Υπάρχουν ενδείξεις ότι εμφάνιση μεγάλων τάσεων στον ουδέτερο επηρεάζουν τον ψηφιακό εξοπλισμό και τα τοπικά δίκτυα υπολογιστών αν δεν υφίσταται καλό σύστημα γείωσης.
- Στο σύστημα τροφοδοσίας ηλεκτρικής ενέργειας, οι μετασχηματιστές των υποσταθμών και οι πυκνωτές αντιστάθμισης είναι αυτοί που επηρεάζονται περισσότερο. Οι μετασχηματιστές επηρεάζονται από παραμορφωμένη κυματομορφή ρεύματος που μπορεί να προκαλέσει επιπλέον θέρμανση και να οδηγήσει σε μείωση του χρόνου ζωής τους. Οι πυκνωτές επηρεάζονται από την επιβαλλόμενη κυματομορφή της τάσης, που αν είναι σημαντικά παραμορφωμένη μπορεί να προκαλέσει υπερθέρμανση του διηλεκτρικού μέσου στον πυκνωτή, με κίνδυνο να οδηγήσει σε έκρηξη.
- Οι περισσότεροι μηχανικοί στις εργοστασιακές εγκαταστάσεις ενδιαφέρονται μόνο για προβλήματα στην παρεχόμενη ισχύ τα οποία γίνονται άμεσα αντιληπτά, αφού οδηγούν σε άμεση δυσλειτουργία ή αστοχία του εξοπλισμού.
- Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία έχει παρατηρηθεί ότι η επίδραση των αρμονικών στον εξοπλισμό μπορεί να οδηγήσει σε υπερθέρμανση και μείωση της διάρκειας ζωής (ή τη διάρκεια ασφαλούς λειτουργίας, δηλαδή μετά απαιτείται συντήρηση ή επισκευή) σε μέγεθος μέχρι και το μισό της αναμενόμενης, με προφανείς οικονομικές επιπτώσεις.
- Σε αντίθεση με τα υπόλοιπα προβλήματα στο σύστημα, οι αρμονικές μπορούν να περνούν απαρατήρητες για αρκετά χρόνια εκτός αν τύχει να γίνει κάποια προκαθορισμένη μέτρηση στην θερμοκρασία της συσκευής ή στην κυματομορφή τάσης που τροφοδοτείται.

Στο συγκεκριμένο σημείο πρέπει να τονιστεί ότι στις πηγές αρμονικών ανήκει και το ίδιο το σύστημα παροχής ηλεκτρικής ενέργειας, όμως η επίδραση αυτή δεν είναι τόσο σημαντική στην δημιουργία όσο στην διάδοση ή στην διατήρηση των ήδη υπαρχόντων αρμονικών στο δίκτυο. Σε αυτό συνεισφέρει το γεγονός ότι για τους παραγωγούς ηλεκτρικής ενέργειας, ακόμα και για τους

μικρούς, υπάρχουν συγκεκριμένα όρια που πρέπει να τηρούνται και έτσι έχουν αναπτύξει μεθόδους εξάλειψης των αρμονικών στην τάση.

Το ίδιο συμβαίνει και με μερικούς από τους μεγάλους καταναλωτές υψηλής τάσης, αλλά όχι συστηματικά και μετά από παρατήρηση δημιουργίας σημαντικών προβλημάτων στους γειτονικούς καταναλωτές. Έτσι δεν είναι τυχαίο ότι πριν την δεκαετία του '60 η αρμονική παραμόρφωση ήταν ελάχιστη (έκτοτε το δίκτυο αναπτύχθηκε πολύ, αλλά πολλές φορές άναρχα).

Στις μέρες μας, ένας διαφορετικός τύπος φορτίου καταναλωτών, με χρήση των ηλεκτρονικών ισχύος, έχει γίνει αρκετά δημοφιλής. Αυτά τα καλούμενα και ως «φορτία εισαγωγής διαταραχών» απορροφούν ρεύματα που δεν είναι ημιτονοειδούς μορφής. Ο πρώτος τύπος ρεύματος απορροφάται από ηλεκτρονικό εξοπλισμό γραφείου, όπως κομπιούτερ, φαξ και άλλες οικιακές συσκευές με ηλεκτρονικό έλεγχο, όπως οι πιο πολύπλοκοι τύποι πλυντηρίων. Ο δεύτερος τύπος ρεύματος απορροφάται από συστήματα οδήγησης κινητήρων μεταβλητής ταχύτητας, όπως αυτά που χρησιμοποιούνται στην γραμμή παραγωγής μιας βιομηχανίας ή στους ανελκυστήρες.

Αυτές οι μορφές ρεύματος μπορούν να αναλυθούν σε ένα συνδυασμό άλλων ημίτονων, ένα για την θεμελιώδη συχνότητα και τα άλλα για συχνότητες ακέραια πολλαπλάσια της θεμελιώδους.

Έτσι η κυματομορφή (α) αποτελείται από συνημίτονα συχνότητας 50, 150, 250 Hz, κ.ο.κ. ($2n-1$, όπου n είναι η τάξη της αρμονικής, άρα περιττές αρμονικές), ενώ η κυματομορφή (β) μπορεί να αναλυθεί σε συνημίτονα συχνότητας 50, 250, 350 Hz, κ.ο.κ. (άρα αρμονικές τάξης που δεν είναι πολλαπλάσια του 3).

Το πλάτος και η συχνότητα των υψίσυχνων συνιστωσών είναι χαρακτηριστική του τύπου του φορτίου που προκαλεί την διαταραχή και επομένως μπορεί να αναγνωριστεί με αυτόν τον τρόπο. Η συνιστώσα της παραμόρφωσης μπορεί και κινείται μέσα στο δίκτυο και προσθέτει υψίσυχνες πτώσεις τάσης που επηρεάζουν και τον γειτονικό εξοπλισμό.

Έτσι μπορεί κανείς να δει το φαινόμενο της αρμονικής διαταραχής σαν ένα φαινόμενο, όπου οι καταναλωτές επηρεάζουν ο ένας τον άλλο μέσω της κοινής τους σύνδεσης με το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως η παρουσία σύνθετης αντίστασης από την πλευρά του συστήματος είναι αναπόφευκτη (δηλαδή δεν γίνεται κάθε φορτίο να βλέπει ότι είναι συνδεδεμένο με ένα άπειρο σύστημα χωρίς να παρεμβάλλεται κάποια σύνθετη αντίδραση μεταξύ των δύο, ώστε οποιαδήποτε διαταραχή στο ρεύμα να μην έχει επίπτωση στην τάση). Επομένως η αύξηση των καταναλωτών με ηλεκτρονικά ισχύος στον εξοπλισμό τους, έχει σαν αποτέλεσμα την αναπόφευκτη αύξηση της αρμονικής διαταραχής του συστήματος.

Επειδή υπερβολική αρμονική παραμόρφωση έχει σαν αποτέλεσμα να μειώνει την απόδοση κάποιων τύπων συσκευών, είναι σημαντικό να είναι δυνατός ο υπολογισμός του επιπέδου της αρμονικής παραμόρφωσης και η προσπάθεια μείωσης τους.

Στην συνέχεια παρατίθενται συγκεντρωτικά οι σημαντικότερες επιπτώσεις των αρμονικών διαταραχών στα φορτία:

- 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 ουδετέρου – γης είναι μη αποδεκτές. Αποτέλεσμα αυτού είναι το ρεύμα του ουδετέρου 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 και 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.

2.13 Αντιμετώπιση των προβλημάτων που δημιουργούν οι αρμονικές

Βελτίωση του προβλήματος που προκαλείται από την αρμονική παραμόρφωση συχνά συναντάτε ως συνώνυμο της μείωσης της παραμόρφωσης των αρμονικών τάσης και ρεύματος. Παρόλα αυτά το πρόβλημα μπορεί επίσης να λυθεί με βελτίωση της ατρωσίας του εξοπλισμού.

Ένας πιο συνήθης τρόπος αποκοπής των αρμονικών προβλημάτων είναι η εγκατάσταση φίλτρων, συνήθως σε σειρά, που στρέφουν τα ανεπιθύμητα αρμονικά ρεύματα πίσω στο φορτίο. Τα αρμονικά ρεύματα παραμένουν υψηλά, αλλά δεν διαδίδονται μέσω του φορτίου και δεν προκαλούν αρμονική παραμόρφωση στην τάση.

Άλλες τεχνικές μετριασμού συμπεριλαμβάνουν βελτιώσεις στο δίκτυο (διαχωρισμός ευαίσθητων και «μολυσματικών» φορτίων) και βελτιώσεις στα φορτία. Τα τελευταία εμπεριέχουν μία περισσότερο ημιτονοειδή

κυματομορφή ρεύματος (μειωμένη εκπομπή), αλλά επίσης αυξημένη ατρωσία σε παραμορφώσεις της τάσης.

Μειωμένη εκπομπή θεωρείται από πολλούς σαν η ενδεδειγμένη μακροπρόθεσμη λύση. Καθώς το πλήθος των προβλημάτων που οφείλονται στις αρμονικές παραμένει σε σχετικά χαμηλά επίπεδα, η προσπάθεια διατήρησης της παραμόρφωσης σε αυτά τα επίπεδα ή η επίτρεψη μικρής αύξησης αυτής μπορεί να αποτελέσει την φτηνότερη λύση.

Ένας σημαντικός παράγοντας στην ταξινόμηση των αρμονικών προβλημάτων είναι ο ορισμός των ορίων της αρμονικής παραμόρφωσης τάσης και ρεύματος. Τα όρια της παραμόρφωσης από αρμονική τάση αναφέρονται σε πολλά εθνικά και διεθνή πρότυπα, τα οποία κυρίως αποτελούν μία καταγραφή σε κανόνες της ήδη υπάρχουσας παραμόρφωσης. Τα IEC πρότυπα θέτουν όρια βάσει του μεγέθους της εκπομπής κάθε εξοπλισμού, την ώρα που τα IEEE θέτουν όρια για την εκπομπή κάθε καταναλωτή.

Σύμφωνα με τα πρότυπα της IEEE η ευθύνη είναι στον καταναλωτή, ο οποίος και ενδέχεται να αγοράσει φίλτρα αντί να αγοράσει καλύτερο εξοπλισμό. Αντίθετα, σύμφωνα με τα IEC πρότυπα η ευθύνη είναι στον καταναλωτή των ‘μολυσματικών’ συσκευών (μπορούμε να πούμε πως μολυσματικό είναι το φορτίο που μολύνει το δίκτυο με αρμονικές). Η διαφοροποίηση πηγάζει από τον στόχο των κειμένων: τα πρότυπα της IEEE στοχεύουν στην κανονικοποίηση της σύνδεσης μεγάλων εργοστασιακών καταναλωτών, ενώ τα πρότυπα της IEC αναφέρονται κυρίως σε μικρούς καταναλωτές που δεν έχουν δυνατότητα επιλογής μεθόδων αντιμετώπισης των προβλημάτων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - ΠΡΟΤΥΠΑ ΑΡΜΟΝΙΚΩΝ - ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΠΟΥ ΔΗΜΙΟΥΡΓΟΥΝΤΑΙ ΑΠΟ ΤΗΝ ΥΠΑΡΞΗ ΑΡΜΟΝΙΚΩΝ

3.1 Αρμονική παραμόρφωση - Πρότυπα αρμονικών

Όσον αφορά τις προδιαγραφές των αρμονικών, υπάρχει πληθώρα προτύπων ανά τον κόσμο, γεγονός που δημιουργεί σύγχυση για το ποια είναι τελικά τα όρια που πρέπει κανείς να επιδιώκει προκειμένου η εγκατάστασή του να λειτουργεί με ασφάλεια. Τα πιο γνωστά διεθνή πρότυπα αρμονικών είναι τα IEEE 519, IEC 61000 και EN50160.

Επί σειρά ετών, υπήρχε σημαντική διαφοροποίηση ανάμεσα στα όρια των προαναφερόμενων προτύπων, καθώς το αμερικανικής έμπνευσης IEEE 519 ανέφερε ως όριο αρμονικής παραμόρφωσης τάσης THD_v το 5%, ενώ τα ευρωπαϊκά πρότυπα IEC 61004 και EN50160 το 8%.

Μετά την τελευταία όμως αναθεώρησή του το 2014, το πρότυπο IEEE 519 υιοθέτησε επίσης το 8% ως όριο αρμονικής παραμόρφωσης τάσης, με αποτέλεσμα να υπάρχει πλέον πλήρης τυποποίηση μεταξύ των προτύπων.

Παρόλ' αυτά, η εμπειρική καθιέρωση του 5% ως στόχου ακόμη και σήμερα, οδηγεί πολλούς τεχνικούς λανθασμένα σε αυξημένες απαιτήσεις αντιστάθμισης και ως εκ τούτου, σε ζήτηση υπερδιαστασιοποιημένων φίλτρων (σε σχέση πάντα με τις πραγματικές τους ανάγκες), γεγονός που αυξάνει άσκοπα το συνολικό κόστος αγοράς τους.

Αντίθετα με τις αρμονικές τάσης, οι αρμονικές ρεύματος πολλές φορές συνηθίζεται να αγνοούνται. Αυτό οφείλεται κυρίως στους εξής τρεις λόγους:

- Συνήθως οι βλάβες του εξοπλισμού και οι διακοπές των γραμμών παραγωγής οφείλονται περισσότερο στις αρμονικές τάσης και λιγότερο σε αυτές της έντασης.
- Το ευρωπαϊκό πρότυπο IEC 61000 δεν αναφέρει όρια αρμονικής παραμόρφωσης έντασης παρά μόνο για επίπεδα έντασης μέχρι 16 A.
- Πολλά όργανα μέτρησης δεν μετρούν το δείκτη ολικής αρμονικής παραμόρφωσης TDD, που είναι και ο δείκτης βάσει του οποίου το

πρότυπο IEEE 519 κατατάσσει τις εγκαταστάσεις σε κατηγορίες ανάλογα με το ύψος των αρμονικών τους.

Στο σημείο αυτό, επειδή πολλοί δεν γνωρίζουν τι σημαίνει ο δείκτης TDD και πώς επηρεάζει τις μετρήσεις κλπ, θα αφιερώσουμε λίγο χρόνο για να παρουσιάσουμε το συγκεκριμένο δείκτη.

Για τη μέτρηση της αρμονικής παραμόρφωσης τάσης χρησιμοποιείται ο δείκτης THD_v σύμφωνα με τον ακόλουθο τύπο:

$$THD_v = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + \dots + V_n^2}}{V_1}$$

Για τη μέτρηση της αρμονικής παραμόρφωσης ρεύματος χρησιμοποιείται ο αντίστοιχος δείκτης THD_i:

$$THD_i = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2}}{I_1}$$

Οι δύο δείκτες THD_v και THD_i έχουν μια πολύ σημαντική διαφορά. Στον πρώτο δείκτη ο παρονομαστής είναι πάντα σταθερός στα 380 ή στα 400V μιας και οι εγκαταστάσεις λειτουργούν υπό σταθερή τάση. Στο δεύτερο δείκτη όμως ο παρονομαστής μεταβάλλεται συνεχώς. Η ζήτηση για ρεύμα ποικίλει σε σχέση με το χρόνο καθώς μια εγκατάσταση μπορεί:

- να λειτουργεί την ημέρα αλλά όχι τη νύχτα,
- να λειτουργεί μόνο εργάσιμες ημέρες και ώρες,
- να παράγει διαφορετικά προϊόντα ανά ημέρα, ανά ώρα ή γενικά ανά χρονική περίοδο,
- να υπερλειτουργεί ή να υπολειτουργεί ανάλογα με τις ανάγκες παραγωγής των προϊόντων,
- να έχει διαφορετικές ανάγκες θέρμανσης, κλιματισμού ή φωτισμού ανάλογα με την εποχή.

Αυτή η ιδιομορφία οδήγησε στη χρήση του δείκτη TDD (Total Demand Distortion).

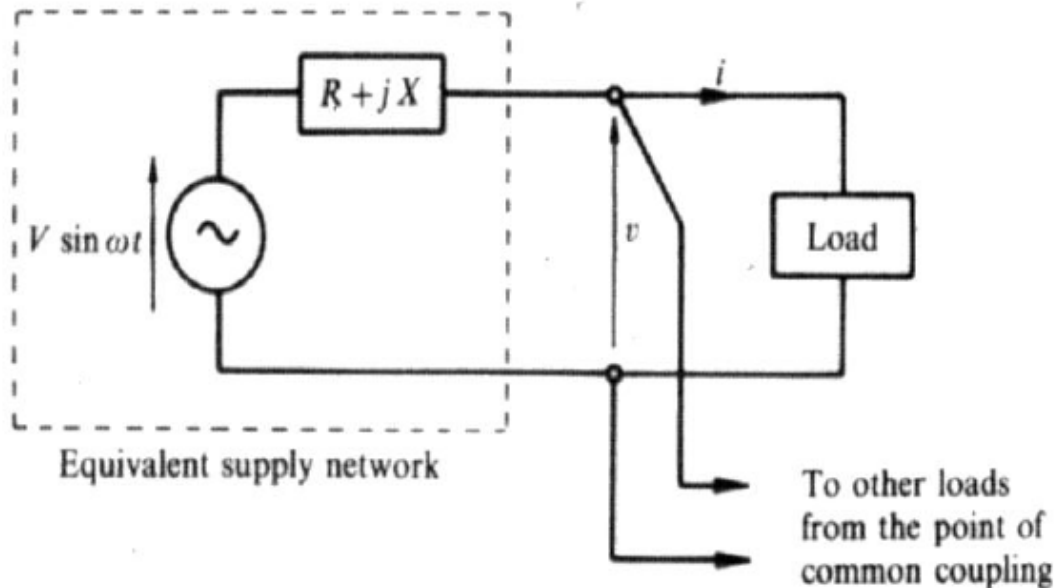
$$TDD = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2}}{I_L}$$

Η διαφορά των δεικτών TDD και THDi είναι στην τιμή του παρονομαστή. Ο δείκτης TDD έχει στον παρονομαστή τη μέγιστη τιμή έντασης της εγκατάστασης, αντί της εκάστοτε τιμής έντασης. Με άλλα λόγια, ο δείκτης TDD υπολογίζει την αρμονική παραμόρφωση πάντοτε ως προς το μέγιστο ρεύμα λειτουργίας της εγκατάστασης (σταθερό μέγεθος) και όχι ως προς το στιγμιαίο ρεύμα λειτουργίας (διαρκώς μεταβαλλόμενο μέγεθος) όπως ο δείκτης THDi. Κατά τη μέτρηση των αρμονικών, στόχος είναι ο εντοπισμός των μέγιστων τιμών των αρμονικών κατά τη λογική της ανίχνευσης του “worst case scenario” και αυτός είναι ο λόγος που το πρότυπο IEEE 519 αναφέρεται σε όρια του δείκτη TDD (και όχι του δείκτη THDi).

3.2 Προβλήματα που δημιουργούνται από τις αρμονικές

Η εμφάνιση αρμονικών – με άλλα λόγια, η εμφάνιση υψηλότερων συχνοτήτων σε ακέραια πολλαπλάσια της θεμελιώδους – δημιουργεί διάφορα προβλήματα. Τα μη γραμμικά φορτία απορροφώντας μη ημιτονοειδή ρεύματα προκαλούν πολλά και σημαντικά προβλήματα στις εταιρείες που διαχειρίζονται την παραγωγή, μεταφορά και διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας, όπως:

- Παραμόρφωση της εναλλασσόμενης ημιτονοειδούς τάσης, την οποία παράγουν οι εναλλακτήρες. Αναφορικά με το Σχήμα 3-1, το δίκτυο τροφοδοσίας της ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να εξομοιωθεί με το ισοδύναμο κατά Thevenin. Ένα φορτίο τραβώντας ένα ρεύμα i θα προκαλέσει μία πτώση τάσης στη σύνθετη αντίσταση της πηγής $R+jX$, με αποτέλεσμα η τάση v να διαφέρει από την τάση τροφοδοσίας $V\sin(\omega t)$.



Σχήμα 3-1 Τροφοδοσία δικτύου ηλεκτρικών φορτίων

Η τιμή της σύνθετης αντίστασης δικτύου θα διαφέρει για κάθε αρμονική συχνότητα, συνεπώς η τάση v θα περιέχει αρμονικές συνιστώσες τάσης (Voltage Distortion). Αν άλλα ηλεκτρικά φορτία μέσα στην ίδια ηλεκτρική εγκατάσταση ή άλλες ηλεκτρικές εγκαταστάσεις τροφοδοτηθούν από αυτό το σημείο κοινής σύνδεσης PCC (Point Common Coupling) θα δεχθούν μία μη ημιτονοειδή τάση.

- Σημαντικά αυξημένες απώλειες θερμότητας στους μετασχηματιστές. Για παράδειγμα, μετασχηματιστές που τροφοδοτούν εγκαταστάσεις με συσκευές γραφείου (υπολογιστές, εκτυπωτές κτλ) με 80% THDI εμφανίζουν περίπου 250% αυξημένες απώλειες από να τροφοδοτούσαν γραμμικά φορτία με το ίδιο ενεργό ρεύμα. Οι απώλειες θερμότητας ενισχύονται από την εμφάνιση του επιδερμικού φαινομένου (skin effect), ιδιαίτερα αν η συχνότητα των αρμονικών ξεπερνά τα 300 Hz.
- Η υπερθέρμανση των μετασχηματιστών μειώνει το χρόνο ζωής τους λόγω γρηγορότερης γήρανσης των μονώσεων.
- Αυξημένες απώλειες θερμότητας στις γραμμές μεταφοράς, λόγω του φαινομένου Joule, αλλά και του επιδερμικού φαινομένου.
- Αυξημένες απώλειες θερμότητας στους εναλλακτήρες των σταθμών παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας.

- Σημαντική υπερφόρτιση του ουδέτερου σε τριφασικό σύστημα 4 αγωγών. Δεδομένου ότι ασφαλίζονται μόνο οι 3 γραμμές των φάσεων, αυτό μπορεί να οδηγήσει ακόμα και σε ανάφλεξη του ουδέτερου αγωγού. Αναφορικά με ένα τριφασικό συμμετρικό σύστημα τάσεων μπορεί να γίνουν μερικές γενικές παρατηρήσεις. Οι άρτιες αρμονικές είναι απύσες στο τριφασικό δίκτυο. Συνεπώς τη ρύπανση (pollution) των δικτύων προξενούν οι περιττές αρμονικές, οπότε ασχολούμαστε με τον περιορισμό αυτών των αρμονικών. Οι τριπλές αρμονικές τάξης $3m$, όπου $m=1,3,5\dots$, δηλαδή οι περιττές και πολλαπλάσια του 3, είναι όλες σε φάση μεταξύ τους, όπως προκύπτει από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$i_a(3m) = I \sin 3m\omega t$$

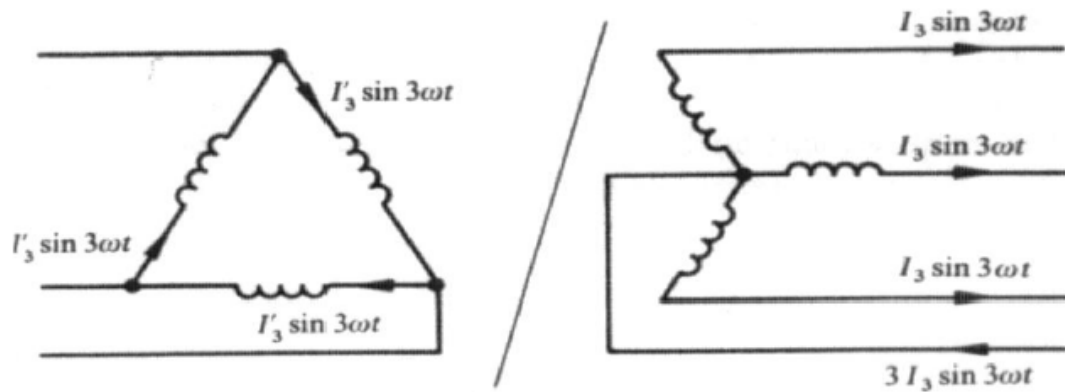
$$i_b(3m) = I \sin[3m(\omega t - 2\pi/3)] = I \sin 3m\omega t$$

$$i_c(3m) = I \sin[3m(\omega t + 2\pi/3)] = I \sin 3m\omega t$$

συνεπώς:

$$i_a(3m) = i_b(3m) = i_c(3m)$$

Όπως είναι προφανές από το Σχήμα 3-2, αν $i_a(3m) = i_b(3m) = i_c(3m)$ τότε αυτό το ρεύμα τριπλής αρμονικής μπορεί να κυκλοφορήσει μόνο σε σύστημα 4 αγωγών, δηλαδή αστέρας με ουδέτερο. Στην περίπτωση αυτή το ρεύμα του ουδέτερου αγωγού είναι τριπλάσιο από τα ρεύματα σε κάθε γραμμή. Οι μετασχηματιστές διανομής είναι συνήθως Δ/Υ τεσσάρων αγωγών για να τροφοδοτούν εκτός των τριφασικών και μονοφασικά φορτία. Τα ρεύματα της τρίτης αρμονικής, που φαίνονται στα τυλίγματα τριγώνου μέσης τάσης του μετασχηματιστή του Σχήμα 3-2 κυκλοφορούν κυκλικά μόνο στα τυλίγματα χωρίς να εμφανίζονται στις γραμμές. Αν ο ουδέτερος δεν συνδεθεί στο φορτίο, αυτό σημαίνει ότι στη τριφασική γραμμή δεν εμφανίζονται συνιστώσες των τριπλών αρμονικών. Τα δίκτυα χαμηλής τάσης τεσσάρων αγωγών (3Φ+N), εν τούτοις, φορτίζονται ασύμμετρα λόγω των μονοφασικών φορτίων, συνεπώς τα μη γραμμικά φορτία, που γεννούν τριπλές αρμονικές πρέπει να τύχουν ιδιαίτερης προσοχής. Το φαινόμενο της υπερθέρμανσης του ουδέτερου αγωγού είναι πολύ συχνό σε μεγάλα κτίρια γραφείων, νοσοκομείων, κτλ, που λειτουργούν 1Φ μη γραμμικά φορτία.



Σχήμα 3-2 Ροή του ρεύματος τρίτης αρμονικής σε ένα τριφασικό σύστημα

- Η διείσδυση αρμονικών στην τροφοδοσία από το φορτίο θα εξαρτάται από το βαθμό αντίδρασης των διαφόρων εξαρτημάτων του συστήματος σε κάθε αρμονική συχνότητα. Για παράδειγμα οι πυκνωτές, που χρησιμοποιούνται για τη διόρθωση του συντελεστή ισχύος, θα απορροφήσουν αρμονικά ρεύματα, λόγω της χωρητικής τους αντίδρασης, η οποία ελαττώνεται με την αύξηση της συχνότητας. Σε αρκετές περιπτώσεις, αν δεν προστατευτούν οι πυκνωτές μπορεί να καταστραφούν από υπερφόρτιση.
- Συνθήκες δημιουργίας χαμηλού συντελεστή ισχύος, λόγω της άεργης ισχύος των αρμονικών συνιστωσών του ρεύματος.
- Άλλα προβλήματα που εμφανίζονται από τη ύπαρξη των αρμονικών είναι η δημιουργία φαινομένων συντονισμού σε συγκεκριμένες συχνότητες αρμονικών. Τέτοια προβλήματα μπορεί να εμφανιστούν στο συγχρονισμό των παλμών για την έναυση των θυρίστορ στους ελεγχόμενους ανορθωτές (φαινόμενο Zitter), καθώς και στο φωτισμό με την αυξομείωση της φωτεινής έντασης (φαινόμενο Flicker).
- Σφάλματα στα όργανα μετρήσεων.
- Στιγμιαίες υπερτάσεις.

Τέλος, τα προβλήματα που δημιουργούνται από τις αρμονικές στις ηλεκτρικές εγκαταστάσεις είναι:

- η μείωση του συνφ
- οι αυξημένες απώλειες στα καλώδια
- ο συντονισμός

- η καταστροφή πυκνωτών και μετασχηματιστών
- φρενάρισμα των κινητήρων και αύξηση απωλειών σε κινητήρες
- οι παρεμβολές σε κυκλώματα ελέγχου και τηλεπικοινωνιών
- Καταπόνηση του ουδέτερου αγωγού.

Αναλυτικότερα:

1. Οι μετασχηματιστές υπερθερμαίνονται λόγω της αύξησης των απωλειών χαλκού και σιδήρου. Επίσης, καταπονούνται μηχανικά με αποτέλεσμα να υπάρχουν σε αυξημένο βαθμό δονήσεις και θόρυβος κατά τη λειτουργία τους.
2. Ο ουδέτερος αγωγός υπερφορτίζεται, καθώς το διανυσματικό άθροισμα των ρευμάτων που τον διαρρέουν δεν είναι πλέον ίσο με μηδέν (περίπτωση συμμετρικών φορτίων) με αποτέλεσμα ο ουδέτερος να διαρρέεται από ρεύμα. Έτσι ενώ σε παλαιές εγκαταστάσεις είχαμε τη δυνατότητα να μειώσουμε τη διατομή του ουδετέρου, στις νέες αυτό δεν συμβαίνει. Στο εξωτερικό αντί των πενταπολικών καλωδίων υπάρχουν τα εξαπολικά καλώδια με 2 αγωγούς ουδετέρου γιατί η διατομή του θα πρέπει να είναι τουλάχιστον διπλάσια των αγωγών των φάσεων. Στην Ελβετία είναι τριπλάσια και έχουν επταπολικά καλώδια με 3 αγωγούς ουδετέρου. Αυτό επειδή από τη στιγμή που ο αγωγός του ουδετέρου διαρρέεται από ρεύμα σημαντικά μεγαλύτερο από αυτό που έχουμε εκτιμήσει, ζεσταίνεται και η μόνωσή του καταπονείται και φθείρεται γρηγορότερα. Σε τριφασικά κυκλώματα με ουδέτερο, οι εντάσεις των ρευμάτων της τρίτης αρμονικής καθώς και των μεγαλύτερων, περιττών, πολλαπλάσιων της τρίτης, συνιστωσών της φέρουσας των 50 Hz, που είναι γνωστές και σαν ομοπολικές ή τριπλές αρμονικές (3ης, 9ης, 15ης τάξης κ.ο.κ) αθροίζονται αριθμητικά, ως επιστροφές στον ουδέτερο αγωγό. Σε περίπτωση τριφασικών συμμετρικών μη γραμμικών φορτίων, το ρεύμα επιστροφής του ουδετέρου δίνεται από τον τύπο:

$$I_N = 3 \cdot \sqrt{I_3^2 + I_9^2 + I_{15}^2 + \dots}$$

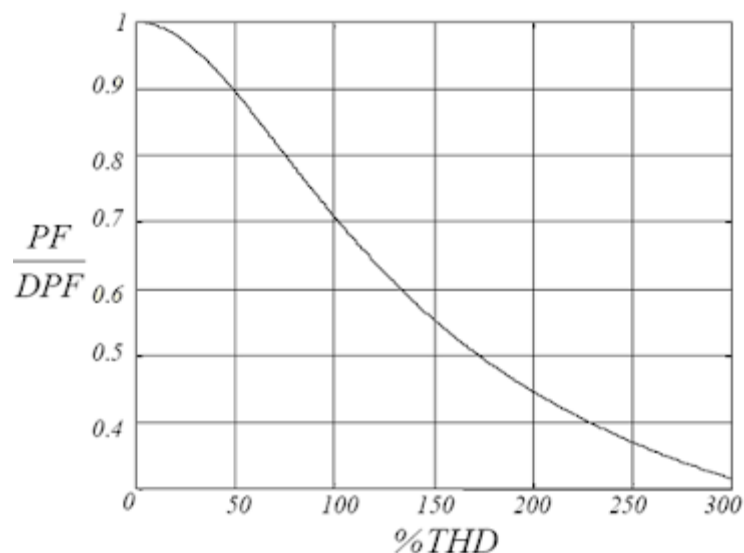
3. Υπάρχουσες διατάξεις πυκνωτών που κινδυνεύουν να καταστραφούν, σε περιπτώσεις όπου ο κλάδος στον οποίο συνδέονται, εμφανίζει ίδια συχνότητα με κάποιες από τις αρμονικές που υπάρχουν στο δίκτυο.

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. Το παρακάτω διάγραμμα δείχνει την κατά προσέγγιση συχνότητα συντονισμού (σαν πολλαπλάσιο των 50 Hz) για διάφορες τιμές της συνολικής χωρητικής αντιστάθμισης (σε βήματα των 50 kVAr) και για μετασχηματιστή 2000 kVA.

4. 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.
5. Κινητήρες και γεννήτριες: Οι αρμονικές στις επαγωγικές και σύγχρονες μηχανές αυξάνουν τη θερμοκρασία τους. Αυτό είναι αποτέλεσμα των απωλειών που οφείλεται στις απώλειες σιδήρου και χαλκού που εμφανίζονται στις αρμονικές συχνότητες. Η αύξηση της θερμοκρασίας λόγω των απωλειών μειώνει την απόδοσή τους καθώς και τη δυνατότητα ανάπτυξης ροπής. Πιο συγκεκριμένα: Οι αρμονικές ρεύματος σε μια μηχανή αυξάνουν την εκπομπή θορύβου στις ακουστικές συχνότητες έναντι της λειτουργίας με ημιτονοειδή διέγερση. Επιπροσθέτως οι αρμονικές δημιουργούν προβλήματα στην εκκίνηση των μηχανών γιατί παράγουν μια μαγνητική ροή η οποία κατανέμεται στο διάκενο αυτών. Η 5η και 7η αρμονική έχουν τη τάση να δημιουργούν μηχανικές ταλαντώσεις σε συστήματα όπως στο σύστημα στρόβιλος-γεννήτρια και κινητήρας-φορτίο. Οι μηχανικές αυτές ταλαντώσεις οφείλονται στις αρμονικές ροπής που προκύπτουν από την αλληλεπίδραση των αρμονικών ρεύματος και του μαγνητικού πεδίου της θεμελιώδους συχνότητας (βασική αρμονική). Αν η συχνότητα του μηχανικού συντονισμού βρίσκεται κοντά στη συχνότητα της ηλεκτρικής διέγερσης, τότε αναπτύσσονται πολύ ισχυρές δυνάμεις. Εκτός από τις προηγούμενες επιπτώσεις οι ανώτερες αρμονικές έχουν

σαν αποτέλεσμα τη ροή αρμονικών ρευμάτων στο δρομέα της μηχανής. Η ροή ρεύματος στο στάτη δημιουργεί ένα μαγνητικό πεδίο στο διάκενο που με τη σειρά του θα προκαλέσει ροή ρεύματος στο δρομέα. Ανάλογα με το αν η αρμονική εμφανίζεται με θετική ή αρνητική ακολουθία θα προκαλέσει περιστροφή του δρομέα κατά την αντίστοιχη φορά, με αποτέλεσμα να αντιτίθεται στη φορά περιστροφής των κινητήρων και να τους φρενάρει. Το φρενάρισμα του κινητήρα έχει σαν αποτέλεσμα την καταπόνηση των ρουλεμάν και το σκάψιμο της φωλιάς του ρουλεμάν στο καπάκι. Έτσι μετά σύντομο χρονικό διάστημα χάνεται η ευθυγράμμιση του κινητήρα με το φορτίο.

6. Η λειτουργία του ηλεκτρονικού εξοπλισμού καθίσταται αναξιόπιστη. Οι αρμονικές μεγάλης συχνότητας δημιουργούν προβλήματα ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών σε δίκτυα τηλεπικοινωνιών και ειδικά σε βιομηχανικούς χώρους στην λειτουργία των διαφόρων ηλεκτρονικών συστημάτων ελέγχου (προβλήματα στα PLC, λανθασμένες εντολές ελέγχου, κλπ). Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση των νεκρών χρόνων από δυσλειτουργία των ηλεκτρονικών συστημάτων και επομένως αύξηση του κόστους συντήρησης. Οι υπολογιστές και τα PLC απαιτούν τροφοδοσία με αρμονικό περιεχόμενο τάσεων μικρότερο από 5%, με τη βασική αρμονική μικρότερη του 3% της ονομαστικής τάσης λειτουργίας.
7. Σημειώνονται λανθασμένες καταγραφές ηλεκτρικών μεγεθών από τις μετρητικές διατάξεις.
8. Γίνεται σπατάλη ενέργειας με αποτέλεσμα οι λογαριασμοί κατανάλωσης ενέργειας να είναι υψηλότεροι.



Διάγραμμα 3-1 Οι αρμονικές μειώνουν το συντελεστή ισχύος

9. Μειώνεται η εφεδρεία της ηλεκτρικής εγκατάστασης, καθώς τα ρεύματα που διαρρέουν τα καλώδια και τους ηλεκτρικούς πίνακες, είναι σημαντικά μεγαλύτερα λόγω των αρμονικών.
10. Ηλεκτρονόμοι: Έχει παρατηρηθεί ότι ένα ποσοστό αρμονικών της τάξεως του 10% με 20% μπορεί να προκαλέσει καθυστερημένη ή πρόωρη ενεργοποίηση των ρελέ.
11. Inverters: Τα Inverters από τη φύση τους εισάγουν ανώτερες αρμονικές στο δίκτυο που ανήκουν. Τα Inverters επηρεάζονται από τις αρμονικές που παράγουν οι ίδιοι αλλά και από τις αρμονικές που παράγουν άλλες συνιστώσες του δικτύου. Οι ανώτερες αρμονικές προκαλούν θερμική καταπόνηση σε κάποια στοιχεία του μετατροπέα αλλά είναι πιθανό να περάσουν και στη πλευρά του φορτίου. Στη περίπτωση που η είσοδος του μετατροπέα έχει αρμονικό περιεχόμενο, υπάρχει το ενδεχόμενο να έχουμε ετεροχρονισμένες εναύσεις ημιαγωγών στοιχείων, λανθασμένες μεταβάσεις ρεύματος, ή απλώς μια παραμόρφωση σε σχέση με την αναμενόμενη έξοδο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΑΡΜΟΝΙΚΩΝ

Η ορθή και ολοκληρωμένη διαχείριση του προβλήματος των αρμονικών προϋποθέτει την εκτέλεση σωστών και επαρκών μετρήσεων.

Στην πράξη όμως, παρατηρούνται πολύ σοβαρά λάθη και παραλείψεις, τα οποία οδηγούν στη συλλογή λανθασμένων ή ανεπαρκών δεδομένων και συνεπώς, στην ελλιπή αντιμετώπιση του προβλήματος των αρμονικών.

Στη χειρότερη εκδοχή, γίνονται σκόπιμα επιλεκτικές μετρήσεις, ώστε με πρόχειρους υπολογισμούς να προκύπτουν στοχευμένα αποτελέσματα (π.χ. υψηλά ποσοστά εξοικονόμησης, μεγάλες ανάγκες για διόρθωση συνημιτόνου, κλπ) που αποσκοπούν στη δημιουργία παραπλανητικής εικόνας για τις πραγματικές ανάγκες της ηλεκτρικής εγκατάστασης και τον απαιτούμενο εξοπλισμό.

4.1 Κατάλληλος εξοπλισμός μέτρησης

Πρώτη και βασικότερη προϋπόθεση για τη σωστή διενέργεια μετρήσεων αρμονικών είναι η χρήση του κατάλληλου εξοπλισμού. Παρατηρείται συχνά (είτε από άγνοια είτε και από πρόθεση) το φαινόμενο να γίνονται απόπειρες μέτρησης με μονοφασικές αμπεροτσιμπίδες, βολτόμετρα, συνημιτόμετρα ή χαμηλής ακρίβειας αναλυτές ενέργειας.

Καμία από τις παραπάνω μεθόδους δε συνιστά σωστή μέτρηση αρμονικών. Για τη μέτρηση των αρμονικών πρέπει απαραίτητως να χρησιμοποιούνται **τριφασικοί αναλυτές ενέργειας** με υψηλό βαθμό ακρίβειας μέτρησης.



ΣΩΣΤΟ



ΛΑΘΟΣ

Εικόνα 4-1 Τριφασικός αναλυτής ισχύος (αριστερά) και αμπεροτσιμπίδα (δεξιά)

Οι τριφασικοί αναλυτές ενέργειας είναι ο απαραίτητος εξοπλισμός για τις ηλεκτρολογικές μετρήσεις:

1. Πρώτον, διότι οι τριφασικοί αναλυτές ενέργειας είναι οι μοναδικές συσκευές που μπορούν και μετρούν όλα τα σχετικά μεγέθη (τάσεις, εντάσεις, ισχύς, αρμονικές, κλπ).
2. Δεύτερον, διότι οι τριφασικοί αναλυτές ενέργειας έχουν τη δυνατότητα καταγραφής δεδομένων για μεγάλο χρονικό διάστημα, απαραίτητη προϋπόθεση για τη λήψη επαρκών δεδομένων.

Παρ' όλα αυτά, οι τριφασικοί αναλυτές ενέργειας που χρησιμοποιούνται για τις μετρήσεις αρμονικών θα πρέπει να καλύπτουν τις απαιτήσεις του διεθνούς προτύπου ποιότητας ισχύος EN 50160.

4.2 Απαραίτητος χρόνος εκτέλεσης των μετρήσεων

Ο αναγκαίος χρόνος εκτέλεσης των μετρήσεων αρμονικών ποικίλει ανάλογα με τα χαρακτηριστικά λειτουργίας της εκάστοτε εγκατάστασης. Υπάρχει τεράστια διαφορά ανάμεσα σε εκείνες τις εγκαταστάσεις που έχουν σχετικά

σταθερή λειτουργία και σε εκείνες που η λειτουργία τους μεταβάλλεται συνεχώς.

Για παράδειγμα, εγκαταστάσεις εκτυπώσεων εφημερίδων ή συντήρησης τροφίμων έχουν παραπλήσια λειτουργία καθημερινά, ενώ αντίθετα οι βιομηχανικές εγκαταστάσεις παραγωγής προϊόντων έχουν διαρκώς μεταβαλλόμενη λειτουργία, καθώς εξαρτώνται από πλήθος παραγόντων όπως η ζήτηση παραγωγής προϊόντων, η εποχή του χρόνου, οι καιρικές συνθήκες κ.α. Δεν έχει νόημα λ.χ. να γίνεται μέτρηση σε μια βαριά βιομηχανία σε μια εποχή που λειτουργεί μόνο στο 20% της συνολικής παραγωγικής της ικανότητας (λόγω μειωμένης ζήτησης), ή σε ένα κρουαζιερόπλοιο τους ανοιξιάτικους μήνες που δεν χρησιμοποιείται το σύστημα κλιματισμού. Η συνήθης πρακτική για μεσαίου μεγέθους βιομηχανίες είναι οι μετρήσεις να διαρκούν περί τις 4 ημέρες, ενώ για τις μεγαλύτερες ο αντίστοιχος χρόνος μπορεί να ανέλθει σε εβδομάδες.

Σε κάθε περίπτωση πάντως οι μετρήσεις δεν νοείται να γίνονται για χρονικό διάστημα μικρότερο των 24 ωρών, δειγματοληπτικά ή σε χρόνους που δεν καταγράφονται κρίσιμα μεταβατικά φαινόμενα όπως εκκινήσεις, παύσεις λειτουργίας, προγραμματισμένες χρήσεις εφεδρικών γεννητριών κλπ. Πρέπει να αφιερώνεται επαρκής αριθμός ημερών, ώστε να γίνεται πλήρης καταγραφή και αποτύπωση του κύκλου λειτουργίας της εγκατάστασης.

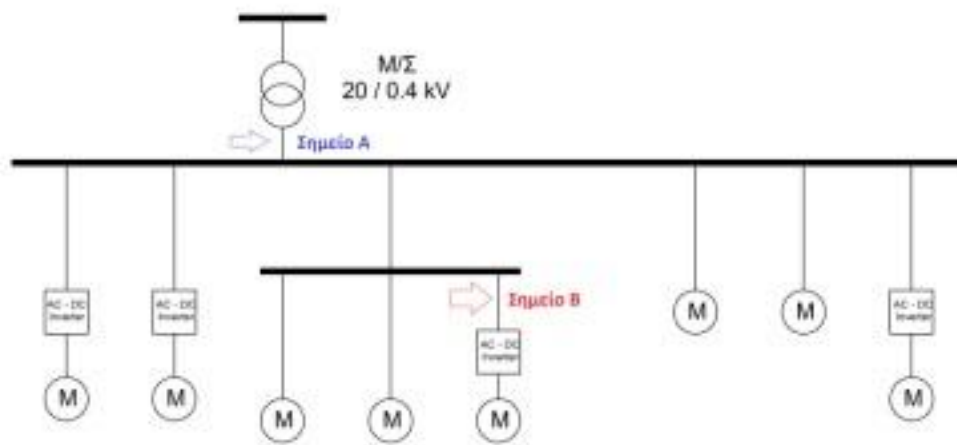
4.3 Κατάλληλο σημείο μέτρησης

Ένα ακόμη σημαντικό σφάλμα που παρατηρείται κατά την πραγματοποίηση των μετρήσεων αρμονικών είναι η επιλογή του σημείου σύνδεσης του οργάνου. Αρκετοί τεχνικοί παίρνουν μετρήσεις δειγματοληπτικά από διάφορα σημεία του δικτύου, θεωρώντας ότι με αυτόν τον τρόπο θα αποκτήσουν πληρέστερη εικόνα της εγκατάστασης.

Όμως, οι δειγματοληπτικές μετρήσεις σε διάφορα σημεία του δικτύου είναι μία ελλιπής και εσφαλμένη μέθοδος διότι είναι πρακτικά αδύνατο με δειγματοληπτικούς ελέγχους να καλυφθεί το σύνολο της εγκατάστασης, ιδιαίτερα αν η εγκατάσταση περιλαμβάνει πολλά διαφορετικά φορτία.

Παράλληλα υπάρχει κίνδυνος να γίνουν σοβαρά λάθη στις μετρήσεις των αρμονικών έντασης. Αντίθετα με την τάση που είναι σταθερή (400V σε όλα τα σημεία του δικτύου), η τιμή της έντασης δεν είναι σταθερή, καθώς γι αυτές ισχύει ο 1^{ος} κανόνας του Kirchhoff.

Όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα, αν η μέτρηση γίνει στο (λάθος) σημείο B, το όργανο θα καταγράψει μόνο τις αρμονικές έντασης του συγκεκριμένου κλάδου και όχι τις συνολικές, τις οποίες θα κατέγραφε αν η μέτρηση γινόταν στο (σωστό) σημείο A.



Σχήμα 4-1 Σωστό (σημείο A) και λανθασμένο (σημείο B) σημείο μέτρησης αρμονικών του συστήματος

Πλέον η διεθνής πρακτική είναι η μέτρηση να γίνεται στο λεγόμενο «Σημείο Κοινής Ζεύξης» ή αλλιώς PCC (Point of Common Coupling) όπως ονομάζεται στο πρότυπο IEEE 519. Το Σημείο Κοινής Ζεύξης πρέπει να βρίσκεται κοντά στο Μετασχηματιστή Ισχύος και συνήθως στους ζυγούς του Πίνακα ΧΤ, όπως υποδεικνύεται και στο παραπάνω σχήμα. Με τον τρόπο αυτό ο αναλυτής ενέργειας καταγράφει το σύνολο των μετρούμενων μεγεθών και όχι ένα μέρος αυτών.

4.4 Αξιολόγηση μεγεθών

Μια μέτρηση προκειμένου να θεωρείται άρτια και επαρκής θα πρέπει καταρχήν να γίνεται βάσει των προδιαγραφών του διεθνούς προτύπου EN 50160, το οποίο αναφέρει μεταξύ άλλων, όλα τα απαραίτητα ηλεκτρικά μεγέθη που πρέπει να ληφθούν υπόψη.

Στην πράξη όμως, αντίθετα με ό,τι ορίζει το πρότυπο, κατά την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων μετρήσεων αρμονικών, συνηθίζεται η προσοχή να επικεντρώνεται μόνο στους δείκτες αρμονικής παραμόρφωσης THD_v και THD_i.

Ωστόσο για τη σωστή αξιολόγηση των αποτελεσμάτων θα πρέπει να ληφθούν υπόψιν και τα ακόλουθα μεγέθη που σχετίζονται με την ποιότητα ισχύος:

4.4.1 Η τάση και οι διακυμάνσεις της

Πολλές φορές οι βλάβες στον εξοπλισμό ή οι ανωμαλίες στη λειτουργία των γραμμών παραγωγής αποδίδονται λανθασμένα στην ύπαρξη αρμονικών, ενώ πραγματική αιτία είναι οι μεγάλες διακυμάνσεις της τάσης. Αυτό συμβαίνει διότι λαμβάνονται υπόψη μόνο οι δείκτες αρμονικής παραμόρφωσης THD_v και THD_i και δεν γίνονται ολοκληρωμένες μετρήσεις.

Για παράδειγμα, υπάρχει το φαινόμενο της υπέρτασης (όπου ο εξοπλισμός κινδυνεύει να καταστραφεί) και το φαινόμενο της βύθισης (όπου ο εξοπλισμός υπολειτουργεί και δεν αποδίδει ικανοποιητικά. Αν όμως μετρηθούν μόνο οι δείκτες αρμονικής παραμόρφωσης THD_v και THD_i και δεν γίνει συνολική εκτίμηση της κατάστασης και ολοκληρωμένες μετρήσεις, υπάρχει ο κίνδυνος να διαγνωσθεί το πρόβλημα ως πρόβλημα αρμονικών, ενώ στην πραγματικότητα υπάρχει πρόβλημα τάσης. Στην περίπτωση αυτή, θα προταθεί – λανθασμένα – η αγορά φίλτρων αρμονικών ενώ ο κατάλληλος εξοπλισμός είναι ο σταθεροποιητής τάσης. Είναι προφανές πόσο πολύ μπορεί να κοστίσει στην επιχείρηση η αγορά και εγκατάσταση λανθασμένου εξοπλισμού, λόγω ελλιπούς αξιολόγησης της κατάστασης και ελλιπών μετρήσεων.

4.4.2 Η άεργος ισχύς και η τιμή του συνημιτόνου

Οι αρμονικές και η διόρθωση συνημιτόνου είναι δυο αλληλένδετες έννοιες αλλά δεν είναι ταυτόσημες έννοιες. Στην πράξη όμως, συμβαίνει να χρησιμοποιούνται ως ταυτόσημες έννοιες, οδηγώντας σε άσκοπες δαπάνες.

Ειδικότερα, η χαμηλή τιμή του συνημιτόνου δεν σημαίνει απαραίτητα και ύπαρξη αρμονικών. Αν όμως ερμηνευθεί λανθασμένα ως ύπαρξη αρμονικών,

τότε μπορεί να οδηγήσει στην αγορά εξοπλισμού για την εξάλειψη αρμονικών, χωρίς να υπάρχουν αρμονικές.

Σημειώνουμε όμως ότι υπάρχουν και περιπτώσεις εγκαταστάσεων, όπου υπάρχει ανάγκη τόσο για διόρθωση συνημιτόνου όσο και για αντιστάθμιση αρμονικών. Στις περιπτώσεις που υπάρχει ανάγκη μόνο για διόρθωση του συνημιτόνου, αυτό επιτυγχάνεται συνήθως με χρήση συστοιχιών πυκνωτών. Στις περιπτώσεις όμως που υπάρχει επιπλέον ανάγκη και για αντιστάθμιση αρμονικών, οι συστοιχίες πυκνωτών δεν διορθώνουν το πρόβλημα και πρέπει να χρησιμοποιηθούν άλλες λύσεις όπως είναι τα ενεργά φίλτρα αρμονικών. Σε κάθε περίπτωση πάντως κατά τη διενέργεια μετρήσεων ποιότητας ισχύος θα πρέπει να μετρώνται τόσο οι τιμές της άεργης ισχύος όσο και του συνημιτόνου, υπό την προϋπόθεση όμως μην συγχέονται με αυτές των αρμονικών και να αξιολογούνται ξεχωριστά.

4.5 Χρήση σωστών ορίων των αρμονικών τάσης

Όσον αφορά τις προδιαγραφές των αρμονικών, υπάρχει πληθώρα προτύπων ανά τον κόσμο, γεγονός που δημιουργεί σύγχυση για το ποια είναι τελικά τα όρια που πρέπει κανείς να επιδιώκει προκειμένου η εγκατάστασή του να λειτουργεί με ασφάλεια. Τα πιο γνωστά διεθνή πρότυπα αρμονικών είναι τα IEEE 519, IEC 61000 και EN50160.

Επί σειρά ετών, υπήρχε σημαντική διαφοροποίηση ανάμεσα στα όρια των προαναφερόμενων προτύπων, καθώς το αμερικανικής έμπνευσης IEEE 519 ανέφερε ως όριο αρμονικής παραμόρφωσης τάσης THD_v το 5%, ενώ τα ευρωπαϊκά πρότυπα IEC 61004 και EN50160 το 8%. Μετά την τελευταία όμως αναθεώρησή του το 2014, το πρότυπο IEEE 519 υιοθέτησε επίσης το 8% ως όριο αρμονικής παραμόρφωσης τάσης, με αποτέλεσμα να υπάρχει πλέον πλήρης τυποποίηση μεταξύ των προτύπων.

Παρόλ' αυτά, η εμπειρική καθιέρωση του 5% ως στόχου ακόμη και σήμερα, οδηγεί πολλούς τεχνικούς λανθασμένα σε αυξημένες απαιτήσεις αντιστάθμισης και ως εκ τούτου, σε ζήτηση υπερδιαστασιοποιημένων φίλτρων (σε σχέση πάντα με τις πραγματικές τους ανάγκες), γεγονός που αυξάνει άσκοπα το συνολικό κόστος αγοράς τους.

Ποιο είναι το τελικό συμπέρασμα;

Χωρίς αξιόπιστες ολοκληρωμένες μετρήσεις και ακριβή αποτελέσματα δεν μπορεί να γίνει σωστή εξαγωγή συμπερασμάτων, ενώ η λανθασμένη αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, ακόμη και αν οι μετρήσεις έχουν εκτελεσθεί με το σωστό τρόπο, ενέχει σημαντικούς κινδύνους, όπως:

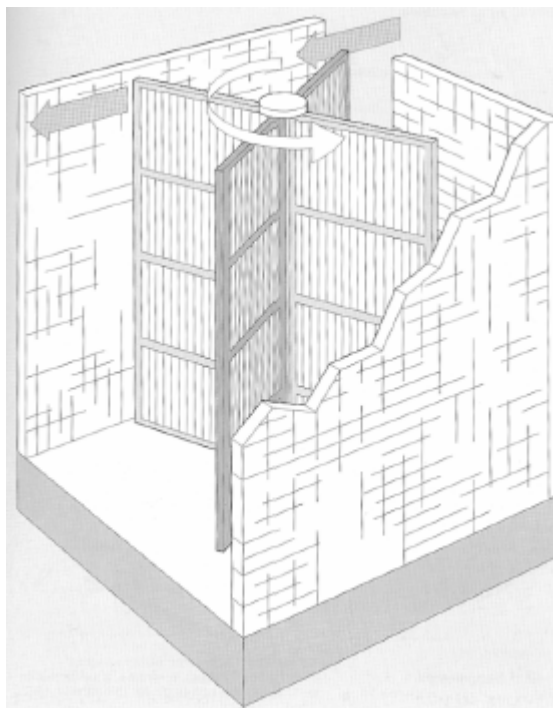
- να μη γίνει ολοκληρωμένη καταγραφή των μεγεθών της εγκατάστασης συνολικά, αλλά μόνο ενός μέρους αυτής κι έτσι να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα μερικώς,
- να προταθεί υπερδιαστασιολογημένος και ως εκ τούτου ακριβότερος ή αντίστοιχα υποδιαστασιολογημένος εξοπλισμός σε σχέση με τις πραγματικές ανάγκες,
- να μη γίνει σωστή διάγνωση της φύσης του προβλήματος και να προταθεί ακατάλληλος εξοπλισμός (π.χ. πυκνωτές αντί φίλτρων, ή φίλτρα αντί σταθεροποιητών),
- να δοθεί ψευδής εικόνα της εγκατάστασης με αποτέλεσμα την άσκοπη σπατάλη χρημάτων για μη απαραίτητο εξοπλισμό.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 - ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ

5.1 Σύντομη ιστορική αναδρομή

Αιολική ενέργεια είναι η ενέργεια που εμπεριέχεται στις αέριες δυνάμεις που φυσούν στην επιφάνεια της γης. Ο άνεμος δημιουργείται όταν ο αέρας που θερμαίνεται πάνω από τη γη ανεβαίνει, αφήνοντας κενό από κάτω του. Ακολούθως, ο κρύος αέρας αντικαθιστά τον ζεστό αέρα για να γεμίσει το κενό. Αυτή η μετακίνηση του αέρα είναι ο άνεμος. Η αιολική ενέργεια μετατρέπει την κινητική ενέργεια του ανέμου σε μηχανική ή ακολούθως σε ηλεκτρική.

Θεωρείται ότι οι ανεμόμυλοι είχαν χρησιμοποιηθεί ακόμη και πριν 4000 χρόνια. Οι αρχαίοι Πέρσες χρησιμοποιούσαν την αιολική ενέργεια για άντληση νερού. Ο κόσμος έχει εξερευνηθεί με πλοία κινούμενα με αιολική ενέργεια (πανιά).



Σχήμα 5-1 Περσικός ανεμόμυλος

Οι ολλανδικοί ανεμόμυλοι χρησιμοποιήθηκαν ως αλεστήρες και για άντληση νερού για να μεταφερθεί πίσω στη θάλασσα και να ανακτηθεί περισσότερη γη.



Εικόνα 5-1 Ολλανδικός ανεμόμυλος

Τη δεκαετία του 1970, οι ξαφνικές αυξήσεις στην τιμή του πετρελαίου και η αύξηση της ευαισθησίας για τον περιβαλλοντικό αντίκτυπο των ορυκτών καυσίμων, οδήγησαν στην αύξηση του ενδιαφέροντος για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τον άνεμο.

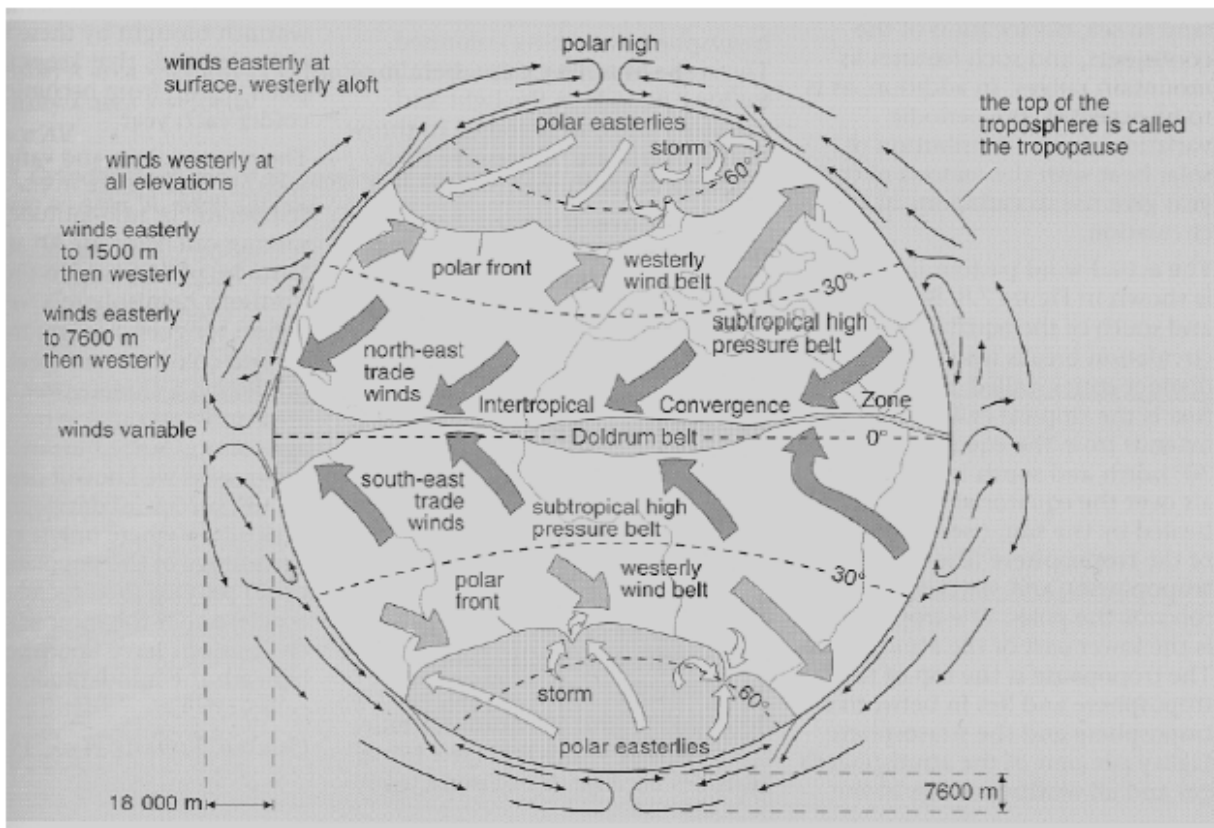
Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα να αυξηθεί ερευνητική δραστηριότητα γύρω από τις ανεμογεννήτριες με αποτέλεσμα τη δημιουργία ανεμογεννητριών πολύ μεγαλύτερων και πολύ πιο αποδοτικών από τους ανεμόμυλους. Αυτό επιτεύχθηκε με τη χρήση της αεροδυναμικής και της μηχανικής για βελτιστοποίηση του σχεδιασμού τους.

5.2 Γενικά περί ανέμου

Θεωρητικά, 1-2% της ακτινοβολίας του ήλιου που φτάνει στη γη μετατρέπεται σε αιολική ενέργεια. Αυτή η ποσότητα ενέργειας είναι 100 φορές περισσότερη από όλη την ενέργεια που καταναλώνεται στον πλανήτη.

Ο ήλιος θερμαίνει το έδαφος το οποίο ακολούθως θερμαίνει τον αέρα από πάνω του. Ο θερμός αέρας ανεβαίνει, δημιουργώντας χαμηλή πίεση. Κρύος αέρας μετακινείται στη θέση του δημιουργώντας κίνηση αέριων μαζών. Αυτή η κίνηση είναι ο άνεμος.

Εκτός από την παγκόσμια κυκλοφορία, σε κάθε περιοχή επικρατούν και τοπικά φαινόμενα που έχουν να κάνουν με τη μορφολογία, το κλίμα της, κλπ.



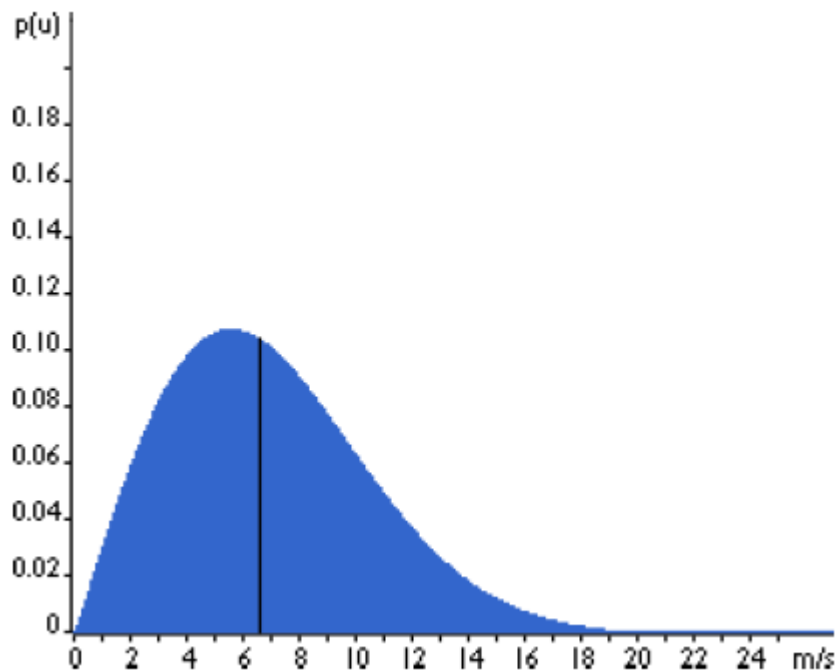
Εικόνα 5-2 Μεταβολή ανέμου σε διάφορα σημεία της γης

5.3 Στατιστική περιγραφή του ανέμου

Πρώτα υπολογίζονται οι μέσοι όροι ταχυτήτων για ένα μικρό χρονικό διάστημα (πχ λεπτό ή δεκάλεπτο). Στη συνέχεια, ανάλογα με τον αριθμό των μετρήσεων και την επιθυμητή ακρίβεια, επιλέγεται κατάλληλο διάστημα ΔV το οποίο χρησιμοποιείται για την ομαδοποίηση των μετρήσεων. Η κλίμακα

ταχυτήτων χωρίζεται σε επιμέρους τμήματα (V_i , $V_i + \Delta V$) και αθροίζεται ο αριθμός των φορών n (λέγεται και συχνότητα εμφάνισης) που η ταχύτητα του ανέμου εμφάνισε τιμές μέσα στο κάθε τμήμα. Έτσι κατασκευάζεται διάγραμμα $n/N=f(V)$, όπου N είναι ο συνολικός αριθμός των παρατηρήσεων.

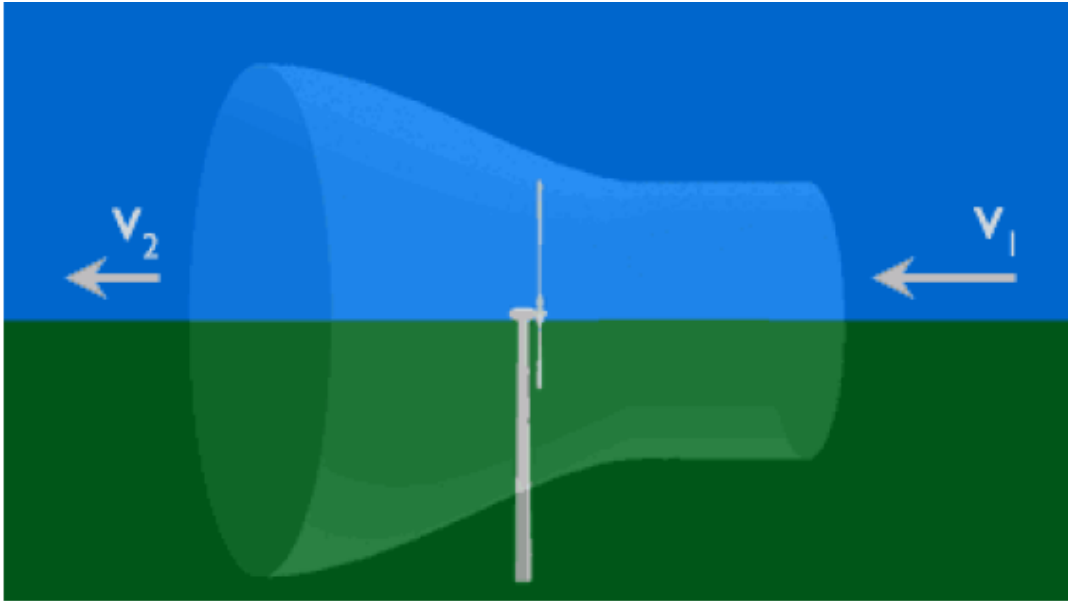
Η κατανομή των ανέμων σε μια περιοχή μοντελοποιείται συνήθως με μια κατανομή Weibull. Αν γίνουν μετρήσεις κατά τη διάρκεια ενός χρόνου, θα παρατηρηθεί ότι συνήθως οι πολύ δυνατοί άνεμοι είναι σπάνιοι, ενώ οι μέτριοι άνεμοι είναι αρκετά συχνοί.



Διάγραμμα 5-1 Η κατανομή των ανέμων σε μια περιοχή μοντελοποιείται συνήθως με μια κατανομή Weibull

5.4 Η κυκλοφορία του ανέμου

Είναι αδύνατο να συλλεχθεί όλη η κινητική ενέργεια του ανέμου. Ένα μέρος του ανέμου θα αποκλίνει πριν ακόμη φτάσει στο δρομέα.



Εικόνα 5-3 Ένα μέρος της κινητικής ενέργειας του ανέμου δεν εισέρχεται στο δρομέα της Α/Γ

Μεταξύ ψηλών κτηρίων ή μέσω μιας στενής διάβασης μεταξύ βουνών, η ταχύτητα του ανέμου αυξάνεται. Επομένως, ένας έξυπνος τρόπος για επίτευξη ψηλών ταχυτήτων ανέμου, είναι οι ανεμογεννήτριες να τοποθετούνται στα περάσματα μεταξύ λόφων. Ο αέρας συμπιέζεται στην πλευρά που φυσά ο άνεμος και η ταχύτητα του αυξάνεται αρκετά.



Εικόνα 5-4 Τοποθέτηση Α/Γ ανάμεσα σε δύο λόφους με σκοπό την εκμετάλλευση της αύξησης της ενέργειας του ανέμου

Όμως, για να είναι επιτυχημένη αυτή η εγκατάσταση πρέπει το πέρασμα να είναι ομαλό, χωρίς οι γύρω λόφοι να είναι απότομοι ή με αρκετές εναλλαγές.

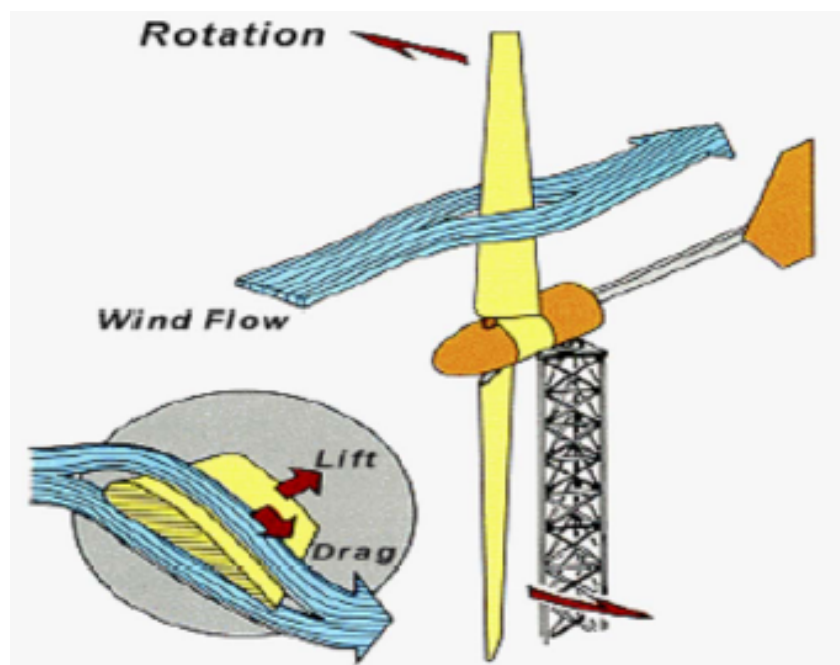
Αλλιώς, θα δημιουργηθούν αναταραχές λόγω των απότομων μεταβολών κατεύθυνσης του αέρα μέσα στο πέρασμα. Αν υπάρχουν τέτοιες μεταβολές, τότε μπορεί να ακυρώσουν το πλεονέκτημα της ύπαρξης μεγαλύτερων ταχυτήτων και ακόμη να δημιουργήσουν φθορά στην ανεμογεννήτρια.

Το φαινόμενο της αύξησης ταχύτητας μπορεί να παρατηρηθεί και σε λόφους. Ο λόγος είναι ότι ο αέρας συμπιέζεται στην πλευρά που φυσά ο άνεμος και όταν φτάσει στην κορυφή αποσυμπιέζεται στο χώρο πέρα από την κορυφή όπου η πίεση είναι χαμηλότερη.

5.5 Βασικές αρχές αιολικής ενέργειας

Το πτερύγιο μιας ανεμογεννήτριας είναι μια αεροτομή, όπως το πτερύγιο ενός αεροσκάφους. Δημιουργείται δυναμική άνωση και οπισθέλκουσα δύναμη (lift and drag forces).

Η δυναμική άνωση δημιουργεί μια ροπή και περιστρέφει το δρομέα ο οποίος είναι συνδεδεμένος με το στρόβιλο (πετερύγια ανεμογεννήτριας).



Εικόνα 5-5 Αρχή κίνησης των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας

5.6 Αιολικό δυναμικό

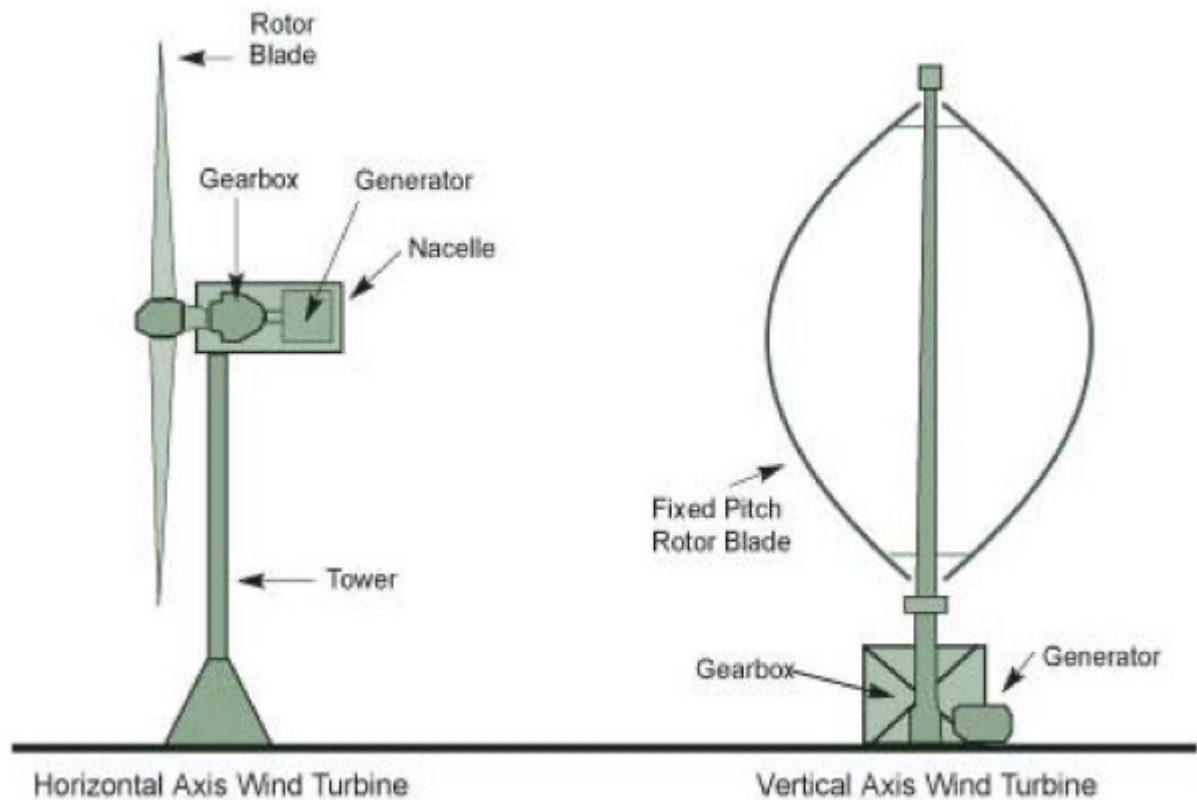
- Διαθέσιμο αιολικό δυναμικό. Για την εκτίμηση του διαθέσιμου αιολικού δυναμικού σε μία περιοχή, χρησιμοποιούνται επιτόπιες μετρήσεις, μετεωρολογικά στοιχεία και προγράμματα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (computational fluid dynamics, CFD), που προβλέπουν τις μεταβολές της μέσης ταχύτητας του ανέμου, ανάλογα με τη διαμόρφωση του εδάφους της περιοχής ενδιαφέροντος. Με τον τρόπο αυτό κατασκευάζονται χάρτες όπως αυτοί που παρουσιάζονται στα επόμενα σχήματα.
- Τεχνικά εκμεταλλεύσιμο δυναμικό. Είναι προφανές, ότι δεν είναι δυνατόν να εκμεταλλευτούμε ολόκληρο το διαθέσιμο δυναμικό για παραγωγή ενέργειας. Και αυτό γιατί υπάρχουν διάφοροι περιορισμοί στη χρήση του, όπως απαγορευτικές χρήσεις γης (κατοικημένες περιοχές, δάση ή εθνικοί δρυμοί, αρχαιολογικοί χώροι, κλπ), ασθενή ή ανύπαρκτα ηλεκτρικά δίκτυα, δύσκολη ή αδύνατη πρόσβαση.
- Οικονομικά εκμεταλλεύσιμο δυναμικό. Σε περιοχές με τεχνικά εκμεταλλεύσιμο δυναμικό αλλά με χαμηλές ταχύτητες ανέμου, δεν είναι οικονομικά συμφέρουσα η παραγωγή αιολικής ενέργειας. Το οικονομικά εκμεταλλεύσιμο δυναμικό εξαρτάται από παράγοντες όπως η τιμή της kWh, οι επιδοτήσεις που προσφέρονται για την εγκατάσταση των αιολικών, κλπ.

5.7 Ανεμογεννήτριες – Ανεμοκινητήρες – Αιολικές Μηχανές

Είναι όλες ανθρώπινες επινοήσεις με σκοπό την αξιοποίηση του μέγιστου ποσοστού της κινητικής ενέργειας του ανέμου. Σκοπός τους είναι η μετατροπή της κινητικής ενέργειας του ανέμου σε εύχρηστη για τον άνθρωπο μορφή (μηχανική, ηλεκτρική).

Η κατάταξη των ανεμογεννητριών πραγματοποιείται με βάση τα παρακάτω κριτήρια:

- Προσανατολισμός αξόνων σε σχέση με τη ροή του ανέμου
 - Κατακόρυφου άξονα
 - Οριζόντιου άξονα



Σχήμα 5-2 Α/Γ οριζόντιου και κατακόρυφου άξονα

Οι Α/Γ κατακόρυφου άξονα έχουν το πλεονέκτημα να μην χρειάζονται σύστημα διεύθυνσης που να τις στρέφει απέναντι στην κατεύθυνση του ανέμου, όμως έχουν συνήθως χαμηλότερο βαθμό απόδοσης και παρουσιάζουν προβλήματα όσον αφορά στην κλιμάκωση του μεγέθους τους και την προστασία τους σε πολύ ισχυρούς ανέμους. Έτσι, οι Α/Γ οριζόντιου άξονα έχουν κυριαρχήσει στις σχετικές εφαρμογές.

- Αριθμός πτερυγίων της πτερωτής:
 - Μονοπτέρυγες
 - Διπτέρυγες
 - Τριπτέρυγες
 - Πολυπτέρυγες



Μονοπτέρυγες



Διπτέρυγες



Τριπτέρυγες



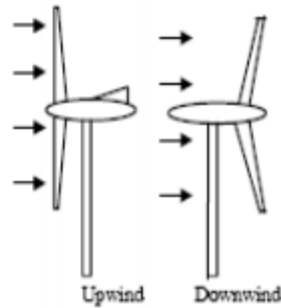
Πολυπτέρυγες

Εικόνα 5-6 Τύποι Α/Γ με βάση τον αριθμό των πτερυγίων

- Θέση της πτερωτής ως προς τον πύργο στήριξης:
 - Ανάντη
 - Κατάντη



Ανάντη



Κατάντη

Εικόνα 5-7 Τύποι Α/Γ με βάση τη θέση της πτερωτής ως προς τον πύργο στήριξης

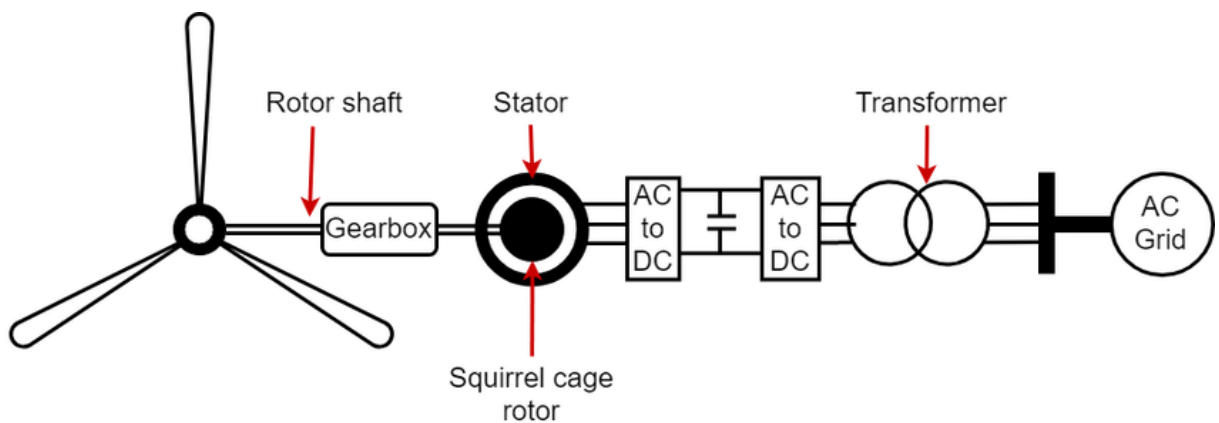
5.7.1 Α/Γ οριζόντιου άξονα

Οι Α/Γ οριζόντιου άξονα αποτελούνται από τα παρακάτω τμήματα:

- τον πύργο,
- τον ρότορα που αποτελείται από την πλήμνη και συνήθως 2 ή 3 πτερύγια, που στηρίζονται σε αυτή,

- το θάλαμο που περιέχει το κιβώτιο ταχυτήτων, το σύστημα ελέγχου της ταχύτητας περιστροφής, το φρένο και την ηλεκτρογεννήτρια και,
- το σύστημα προσανατολισμού του θαλάμου και του ρότορα κάθετα στη διεύθυνση του ανέμου.

Για τη διάθεση της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος στον τελικό καταναλωτή (το ηλεκτρικό δίκτυο της χώρας, στα διασυνδεδεμένα αιολικά πάρκα ή τον αυτόνομο χρήστη), η Α/Γ συνοδεύεται από συστήματα ηλεκτρονικών ισχύος, που δίνουν στο παραγόμενο ηλεκτρικό ρεύμα τα χαρακτηριστικά (τάση και συχνότητα) που το καθιστούν κατάλληλο για την τελική χρήση.



Σχήμα 5-3 Η Α/Γ με τα απαραίτητα συστήματα ηλεκτρονικών ισχύος

Οι Α/Γ για κεντρική παραγωγή ισχύος (συνήθως διασυνδεδεμένες με το ηλεκτρικό δίκτυο) έχουν ονομαστική ισχύ στην περιοχή των 100 kW έως λίγα MW, ενώ μικρότερες Α/Γ (400 W έως 100 kW) χρησιμοποιούνται για τη μερική κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών απομονωμένων (μη διασυνδεδεμένων με το δίκτυο) καταναλώσεων (κεραίες τηλεπικοινωνίας, στρατιωτικές ή ερευνητικές εγκαταστάσεις ή ακόμη και οικιών ή οικισμών σε απομακρυσμένες περιοχές). Η μεγαλύτερη Α/Γ που βρίσκεται σήμερα σε λειτουργία έχει διάμετρο πτερυγίων 126 m, σε πύργο ύψους 135 m (συνολικό ύψος 198 m) και ονομαστική ισχύ 7 MW, μετρημένη σε ταχύτητα ανέμου 14 m/s.

5.7.1.1 Ανάλυση τμημάτων

Ο πύργος στηρίζει το θάλαμο και την πλήμνη της Α/Γ και το ύψος του εξυπηρετεί την αποκομιδή αιολικής ενέργειας σε κατά το δυνατόν μεγαλύτερη απόσταση από το έδαφος, όπου η ταχύτητα του ανέμου είναι μεγαλύτερη. Στις Α/Γ μικρής ονομαστικής ισχύος το ύψος του πύργου μπορεί να είναι αρκετές φορές μεγαλύτερο από το μήκος των πτερυγίων, ενώ για Α/Γ πάνω από 500 kW, το ύψος του πύργου τείνει να είναι οριακά μεγαλύτερο από μήκος των πτερυγίων. Το κυριότερο πρόβλημα όσον αφορά στη διαστασιολόγηση του πύργου είναι η αντοχή του στη ροπή που του ασκεί ο άνεμος καθώς και στις δονήσεις που υφίσταται από την περιστροφή των πτερυγίων. Κρίσιμο σημείο ως προς το σχεδιασμό του είναι η όλη διάταξη να αποφεύγει τα φαινόμενα συντονισμού, σε όλο το εύρος πιθανών ανέμων της περιοχής.

Τα πτερύγια, στις σύγχρονες Α/Γ, κατασκευάζονται από εποξιδικά συνθετικά υλικά μεγάλης αντοχής και μικρού ειδικού βάρους, ώστε να αντέχουν στις ροπές που αναπτύσσονται και να τις ελαχιστοποιούν. Ειδικά η σύνδεση των πτερυγίων με την πλήμνη δέχεται τις υψηλότερες μηχανικές τάσεις και αποτελεί το πιο ευαίσθητο σημείο της όλης κατασκευής. Προκείμενου οι τάσεις αυτές να συγκρατηθούν κάτω από ένα όριο και να αποφευχθεί η αποκόλληση των πτερυγίων, η ταχύτητα περιστροφής της ελέγχεται από μηχανικό φρένο, που βρίσκεται στο εσωτερικό του θαλάμου. Σε περιπτώσεις πολύ ισχυρών ανέμων, η περιστροφή του ρότορα σταματά και η το επίπεδο περιστροφής των πτερυγίων στρέφεται, μαζί με όλο τον θάλαμο, παράλληλα στην κατεύθυνση του ανέμου. Όπως αναφέρθηκε, η ταχύτητα περιστροφής του ρότορα, σε υψηλές ταχύτητες ανέμου, περιορίζεται από μηχανικό φρένο. Ο περιορισμός της ταχύτητας περιστροφής του ρότορα αποσκοπεί στο να περιοριστούν οι φυγόκεντρες δυνάμεις στις συνδέσεις των πτερυγίων με την πλήμνη και να αποφευχθεί η θραύση των συνδέσεων αυτών και η αποκόλληση των πτερυγίων. Σε πολύ μεγάλες, μάλιστα, ταχύτητες ανέμου (συνήθως πάνω από 30-35 m/s – 100-120 χλμ/ώρα) εκτός από το μηχανικό φρένο, την πράξη εμφανίζονται τέσσερις περιπτώσεις ελέγχου της ταχύτητας περιστροφής του ρότορα.

5.7.2 Τέσσερις περιπτώσεις ελέγχου της ταχύτητας περιστροφής του ρότορα

Στην πρώτη περίπτωση, η ταχύτητα περιστροφής του ρότορα δεν υφίσταται κανέναν έλεγχο και αυξάνει με την αύξηση της ταχύτητας του ανέμου – η περίπτωση αυτή αφορά μικρές Α/Γ σχεδιασμένες έτσι ώστε να αντέχουν σε οποιαδήποτε ταχύτητα ανέμου.

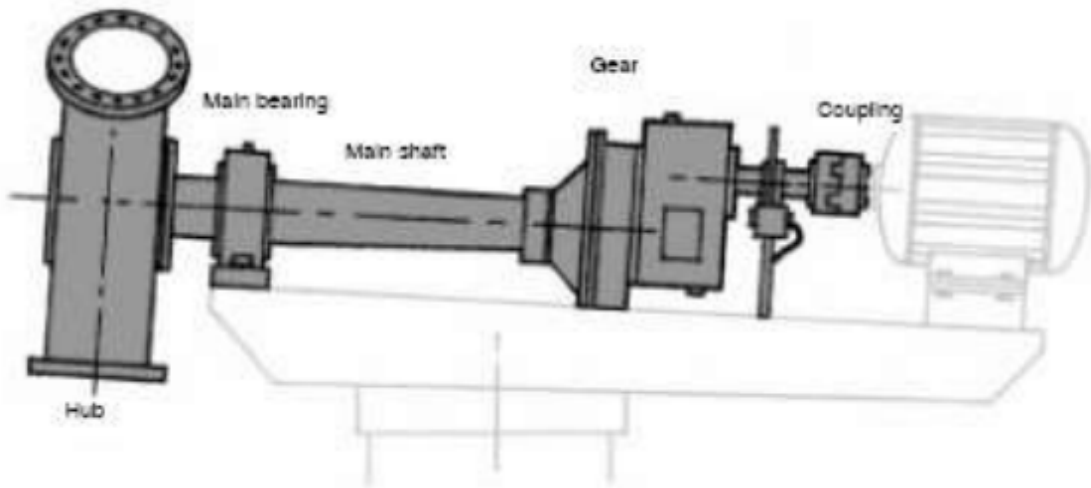
Στη δεύτερη περίπτωση, το επίπεδο περιστροφής του ρότορα εκτρέπεται (ο θάλαμος της Α/Γ γυρίζει κάθετα στην κατεύθυνση του ανέμου) από τη διεύθυνση την κάθετη στην κατεύθυνση του ανέμου, όταν η ταχύτητα του ανέμου ξεπεράσει μία ορισμένη τιμή, προκειμένου ο ρότορας να προστατευτεί από τις ισχυρές ροπές που αναπτύσσονται.

Στην τρίτη περίπτωση, με την αύξηση της ταχύτητας του ανέμου, μόνο τα πτερύγια (και όχι ο θάλαμος) περιστρέφονται, ώστε ο άνεμος να μην προσπίπτει στην εμπρόσθια επιφάνεια τους αλλά στην ακμή τους και με τον τρόπο αυτό η ταχύτητα περιστροφής του ρότορα ελέγχεται και παραμένει σταθερή και ανεξάρτητη της ταχύτητας του ανέμου, σε μεγάλο εύρος ταχυτήτων του ανέμου.

Στην τέταρτη περίπτωση, με την αύξηση της ταχύτητας του ανέμου περιστρέφονται τόσο ο θάλαμος, ώστε να εκτρέψει το επίπεδο περιστροφής των πτερυγίων από τη διεύθυνση της κάθετη στην ταχύτητα του ανέμου, όσο και τα πτερύγια, ώστε να εκθέτουν την ακμή τους στη διεύθυνση του ανέμου.

Επίσης, οι σύγχρονες Α/Γ διαθέτουν και κιβώτιο ταχυτήτων, στον άξονα που συνδέει την πλήμνη με τον ηλεκτροκινητήρα. Με την αύξηση της ταχύτητας του 21 ανέμου, το κιβώτιο “ανεβάζει ταχύτητα” με αποτέλεσμα να αυξάνεται η αντίσταση του ηλεκτροκινητήρα στην περιστροφή της πλήμνης, και η ταχύτητα περιστροφής της τελευταίας να περιορίζεται. Ο τυπικός ηλεκτροκινητήρας των Α/Γ παράγει ηλεκτρική ισχύ εκμεταλλευόμενος το επαγωγικό ρεύμα που αναπτύσσεται κατά την περιστροφή ενός πηνίου σε σταθερό μαγνητικό πεδίο. Η απόδοση του ηλεκτροκινητήρα (το πηλίκο της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας προς τη ροπή περιστροφής του ρότορα) κυμαίνεται στο διάστημα 75–85%, εξαρτάται από το μέγεθος και την τεχνολογία του και λαμβάνει τις τιμές αυτές σε συγκεκριμένο εύρος

ταχυτήτων περιστροφής του πηνίου (το οποίο είναι συνδεδεμένο, μέσω του άξονα και του κιβωτίου ταχυτήτων, με την πλήμνη του ρότορα.



Σχήμα 5-4 Σύστημα μετάδοσης της περιστροφικής κίνησης της πλήμνης στον ηλεκτροκινητήρα, με τη μεσολάβηση άξονα και κιβωτίου ταχυτήτων

5.8 Επίδραση διαλείπουσας παραγωγής από ΑΠΕ στην ευστάθεια του συστήματος

Η αιολική ενέργεια έχει την πρωτοκαθεδρία ανάμεσα στις διαλείπουσες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Η λέξη διαλείπουσα (intermittent) στην ουσία σημαίνει μεταβλητή παραγωγή ενέργειας διότι εξαρτάται (η παραγωγή) από τον άνεμο. Ως εκ τούτου, όσο πιο διασκορπισμένα είναι τα αιολικά πάρκα, τόσο το καλύτερο, διότι αν σταματήσει να φυσά σε μια περιοχή, θα ξεκινήσει να φυσά σε άλλη. Βέβαια, όσο η αιολική ισχύς φτάνει σε σημαντικά ποσοστά εισχώρησης στο δίκτυο, τόσο οι επιπτώσεις στην ευστάθεια του συστήματος αυξάνονται.

Πιο συγκεκριμένα, αν η εισχώρηση μεγαλύτερη του 20%, δημιουργούνται τα παρακάτω ζητήματα που πρέπει να αντιμετωπισθούν:

- Πιθανότητα για υπερφόρτωση γραμμών,
- Ζητήματα ευστάθειας τάσης και γωνιακής ευστάθειας κατά τη διάρκεια διαταραχών στο σύστημα,
- Η αιολική ισχύς πρέπει να εξισορροπηθεί με άλλες γρήγορες, ελεγχόμενες μονάδες παραγωγής (μεταβαλλόμενη ισχύς από

ανεμογεννήτριες) (ψηλότερα κόσθη αγοράς, λειτουργίας και συντήρησης τέτοιων μονάδων),

- Ζητήματα ποιότητας ηλεκτρικής ισχύος,
- Τα αιολικά πάρκα μπορεί να μην μπορούν να συνεισφέρουν στις επικουρικές υπηρεσίες (auxiliary services) που χρειάζονται για τον έλεγχο και ευστάθεια του συστήματος.

5.8.1 Το παράδειγμα της Δανίας

Η Δανία έχει την υψηλότερη εισχώρηση αιολικής ενέργειας στον κόσμο με εγκατεστημένη ισχύ στο 62% του μέγιστου φορτίου και ικανοποιεί το 40% της ζήτησης. Παρακάτω είναι κάποιου από τους λόγους για τους οποίους είναι επιτυχημένη η εισχώρηση:

- Η Δανία είναι ενωμένη στο υδροηλεκτρικό σύστημα των Σκανδιναβικών χωρών και στο θερμικό σύστημα της Γερμανίας, οπότε μια διακοπόμενη λειτουργία δεν επηρεάζει τόσο πολύ το δίκτυο που τροφοδοτείται από πολλές και διαφορετικές πηγές ενέργειας.
- Τόσο το αιολικό δυναμικό όσο και τα αιολικά της πάρκα είναι ομοιόμορφα διανεμημένα σε όλη την επικράτεια της χώρας.
- Η μεταβολή της ζήτησης φορτίου στη Δανία είναι μεγαλύτερη από ότι στις γειτονικές χώρες.

5.8.2 Ενέργειες για τη διατήρηση ισορροπίας και ενέργειας

- Ρυθμίζοντας τη λειτουργική φιλοσοφία των παράκτιων αιολικών πάρκων.
- Ελέγχοντας τη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας.
- Αναπτύσσοντας συστήματα ενεργειακής αποθήκευσης σε μεγάλη κλίμακα.
- Ρυθμίζοντας τη λειτουργική φιλοσοφία των συμβατικών μονάδων παραγωγής (αύξηση των κύκλων δέσμευσης-αποδέσμευσης => αύξηση στα κόσθη λειτουργίας και συντήρησης).
- Ενδυνάμωση και επέκταση των δικτύων μεταφοράς.
- Διαχείριση άεργου ισχύος για ευστάθεια του δικτύου (υποστήριξη τάσης, voltage support).

- Βελτίωση στην πρόβλεψη ανέμου και παραγωγής.
- Καλύτερος έλεγχος των ανεμογεννητριών (περικοπή (curtailment) των αιολικών πάρκων).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 – ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΠΟΥ ΔΗΜΙΟΥΡΓΟΥΝ ΑΡΜΟΝΙΚΕΣ ΚΑΤΑ ΤΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

6.1 Φίλτρα

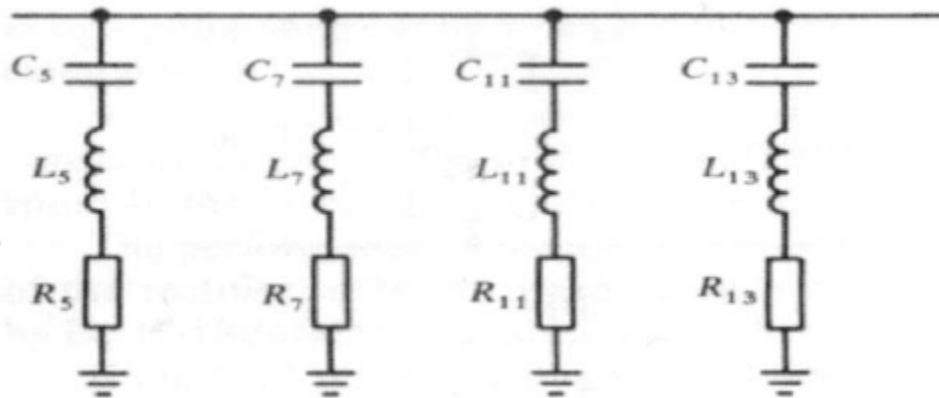
Ο σκοπός των φίλτρων είναι ο περιορισμός του αρμονικού περιεχόμενου μιας κυματομορφής καθώς αυτή περνά από την είσοδο στην έξοδο. Με άλλα λόγια τα φίλτρα εξομαλύνουν της κυματομορφές τάσης, ρεύματος με στόχο την καλύτερη και αποδοτικότερη λειτουργία των ηλεκτρικών φορτίων, την αποτροπή διάχυσης στο δίκτυο ανεπιθύμητων αρμονικών συνιστωσών και τέλος τον περιορισμό των παρεμβολών στις ραδιοσυχνότητες, RFI (Radio-Frequency Interference). Ως απόλυτο φιλτράρισμα για τις κυματομορφές συνεχούς (DC) νοείται η σταθερή συνάρτηση, ενώ για τις εναλλασσόμενες (AC) νοείται η ημιτονοειδής συνάρτηση.

Αποτελούνται από συνδυασμό πηνίων και ειδικών πυκνωτών κατάλληλα διαστασιολογημένων, ώστε να συντονίζονται (να ελαχιστοποιούν τη σύνθετη αντίδρασή τους) σε επιλεγμένες συχνότητες και διαχωρίζονται σε βαθμίδες.

Έχουν τη δυνατότητα ελέγχου από ρυθμιστή ο οποίος ανάλογα με τη ζήτηση του φορτίου είτε βάζει εντός, είτε θέτει εκτός βαθμίδες πηνίων – πυκνωτών, ούτως ώστε να αποφεύγεται το φαινόμενο της υπεραντιστάθμισης.

6.1.1 Παθητικά φίλτρα γραμμής AC (AC Passive Filters) ή αποσυντονισμένα φίλτρα

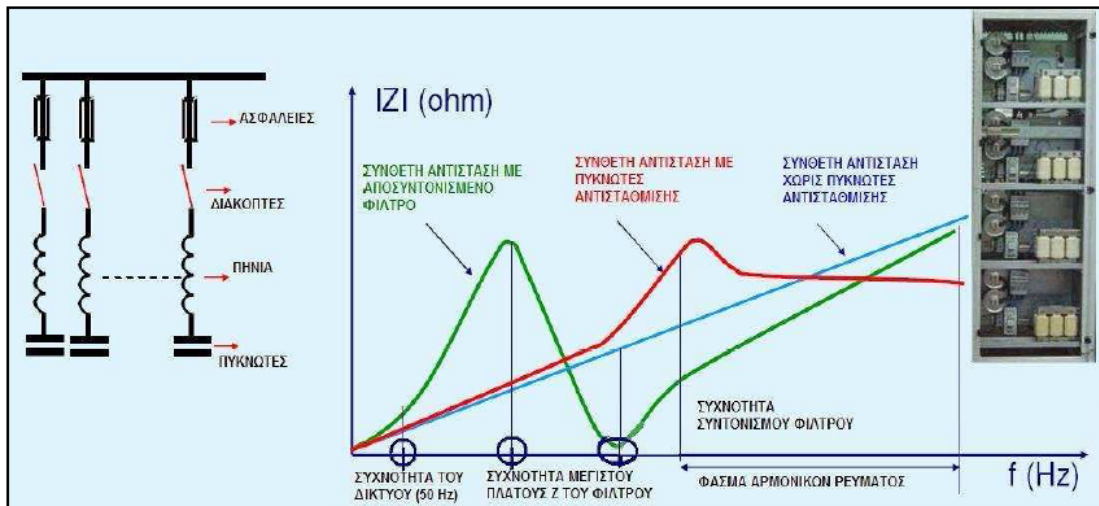
Για να περιορίσουμε την διείσδυση αρμονικών στο δίκτυο AC από ένα φορτίο ανορθωτή ή από μία συνολική ηλεκτρική εγκατάσταση, φίλτρα αρμονικών μπορεί να συνδεθούν μεταξύ κάθε γραμμής και του ουδετέρου, όπως φαίνονται στο Σχήμα 6-1. Σε μια τριφασική γραμμή τα φίλτρα είναι τριφασικά και συνδέονται κατά αστέρα ή τρίγωνο. Αυτά είναι παθητικά φίλτρα RLC υπολογισμένα κατάλληλα έτσι ώστε να απορροφούν ανά κλάδο το ρεύμα συγκεκριμένης αρμονικής και να το οδηγούν στη γη, αποτρέποντας την κυκλοφορία του σε όλο το δίκτυο.



Σχήμα 6-1 Φιλτράρισμα αρμονικών σε γραμμή AC

Τα αποσυντονισμένα φίλτρα είναι σχεδιασμένα να αποκόπτουν ρεύματα σε συχνότητες κοντινές σε αυτές των ρευμάτων αρμονικών που εμφανίζονται στο δίκτυο. Ο λόγος που σχεδιάζονται κατ'αυτόν τον τρόπο είναι για να μπορούν να αποκόπτουν ένα εύρος ρευμάτων αρμονικών (στην περιοχή των συχνοτήτων που ενδιαφέρει), περιορίζοντας ταυτόχρονα περισσότερες από μία αρμονικές και μειώνοντας συγχρόνως την ολική αρμονική παραμόρφωση (THD-I %). Είναι φίλτρα που απαιτούν ιδιαίτερη τεχνογνωσία κατά το σχεδιασμό τους, καθώς δεν συντονίζονται απόλυτα στις αρμονικές που εμφανίζονται στο εκάστοτε δίκτυο κι έτσι δεν παρουσιάζεται κίνδυνος εμφάνισης πολύ υψηλών ρευμάτων στους βρόχους που συνδέονται.

Ο τρόπος με τον οποίο τα αποσυντονισμένα φίλτρα αποκόπτουν τις αρμονικές του δικτύου φαίνεται καλύτερα και στο παρακάτω διάγραμμα συσχετισμού της Σύνθετης Αντίστασης ενός κλάδου και της Συχνότητας του ρεύματος το οποίο τον διαρρέει.



Σχήμα 6-2 Σχηματική απεικόνιση ενός αποσυντονισμένου φίλτρου και της αρχής λειτουργίας του

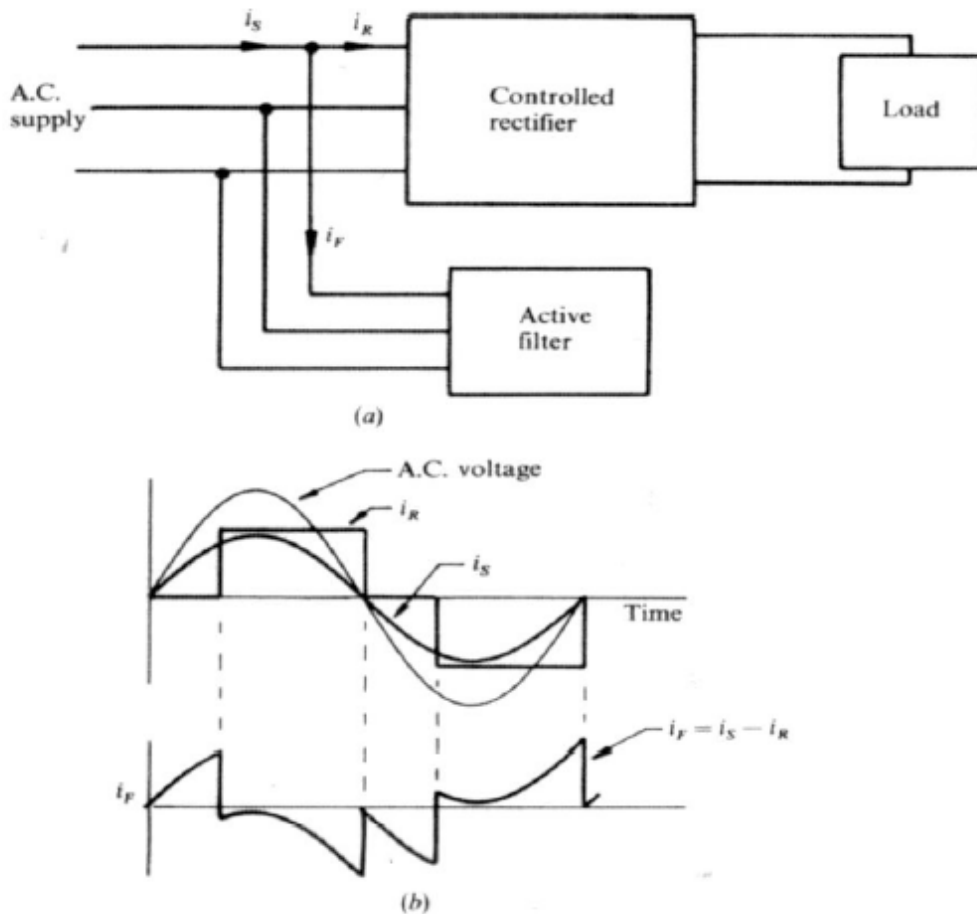
Στο πιο πάνω διάγραμμα φαίνεται καθαρά η διαφοροποίηση της σύνθετης αντίστασης του κλάδου ενός αποσυντονισμένου φίλτρου σε σχέση με αυτήν που θα είχε ο κλάδος αυτός αν δεν υπήρχε το φίλτρο. Στην περίπτωση λοιπόν που τοποθετείται αποσυντονισμένο φίλτρο σε κάποιο σημείο του δικτύου, αυτό εμφανίζει μία πολύ μικρή σύνθετη αντίσταση στη συχνότητα συντονισμού του, με αποτέλεσμα τα ρεύματα τόσο σε αυτήν όσο και σε κοντινές συχνότητες στη συχνότητα συντονισμού του φίλτρου να διέρχονται όλα από τον εν λόγω κλάδο (αποκοπή). Έτσι τα αποσυντονισμένα φίλτρα αποκόπτουν ένα εύρος αρμονικών ρευμάτων και όχι μία συγκεκριμένη αρμονική ρεύματος. Μειονέκτημά τους όμως είναι ότι έτσι δεν μπορούν να φιλτράρουν το 100% της αρμονικής παραμόρφωσης, με αποτέλεσμα να παραμένουν έπειτα και κάποιες αρμονικές στο δίκτυο.

6.1.2 Ενεργά φίλτρα (Active Filters) ή συντονισμένα φίλτρα

Ως γνωστό, τα μη γραμμικά φορτία λειτουργούν με μη ημιτονοειδή ρεύματα, τα οποία προκαλούν πληθώρα προβλημάτων. Μια μέθοδος μετατροπής των μη ημιτονοειδών ρευμάτων σε ημιτονοειδή και μάλιστα σε φάση συνεχώς με την τάση είναι να χρησιμοποιήσουμε ένα PWM μετατροπέα παράλληλα με το φορτίο, Σχήμα 6-3. Ο μετατροπέας αυτός καλείται ενεργό φίλτρο.

Ο ρόλος του ενεργού φίλτρου φαίνεται στο Σχήμα 6-3, όπου ένας ελεγχόμενος ανορθωτής απορροφά από το δίκτυο AC ένα ρεύμα, i_R , σχεδόν τετραγωνικό. Σ' αυτή την περίπτωση ο ελεγχόμενος ανορθωτής είναι τριφασική πλήρως

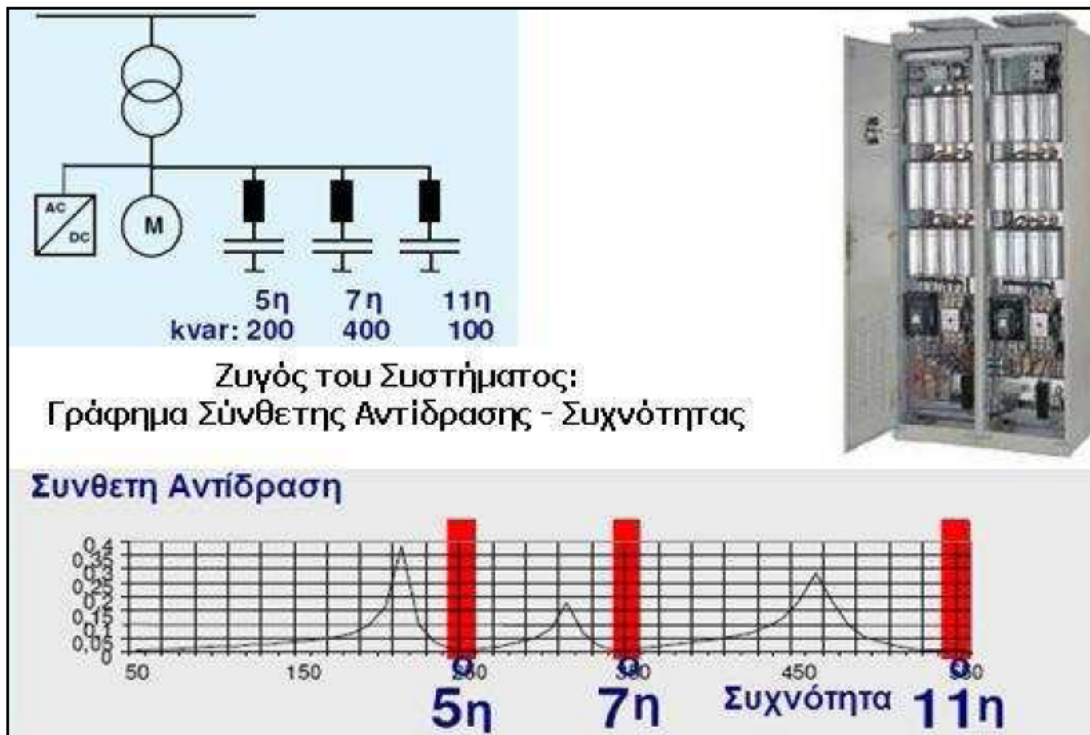
ελεγχόμενη γέφυρα, που λειτουργεί με γωνία έναυσης 300 και τροφοδοτεί ένα φορτίο με μεγάλη αυτεπαγωγή. Για να μετατραπεί το σχεδόν τετραγωνικό ρεύμα σε ημιτονοειδές, το φίλτρο πρέπει να απορροφήσει το ρεύμα i_F , που φαίνεται στο Σχήμα 6-3(b). Το φίλτρο δεν καταναλώνει ισχύ, ενώ η ισχύς φορτίου προσφέρεται από το σε φάση με την τάση ρεύμα τροφοδοσίας, και το φίλτρο εξουδετερώνει όλη την άεργη ισχύ και τις αρμονικές συνιστώσες ρεύματος, που απορροφώνται από τον ανορθωτή.



Σχήμα 6-3 Ο ρόλος ενός ενεργού φίλτρου
(a) Σύνδεση στο κύκλωμα (b) Κυματομορφές ρεύματος

Τα συντονισμένα φίλτρα είναι σχεδιασμένα να αποκόπτουν ρεύματα σε συχνότητες ίδιες με αυτές των αρμονικών ρευμάτων που εμφανίζονται στο δίκτυο. Αποτελούνται από βαθμίδες πυκνωτών και πηνίων συνδεδεμένων εν σειρά. Η κάθε βαθμίδα έχει τη δική της συχνότητα συντονισμού και μάλιστα τέτοια που να αποκόπτει μία συγκεκριμένη αρμονική ρεύματος.

Αυτό φαίνεται αναλυτικά και στο παρακάτω σχήμα.

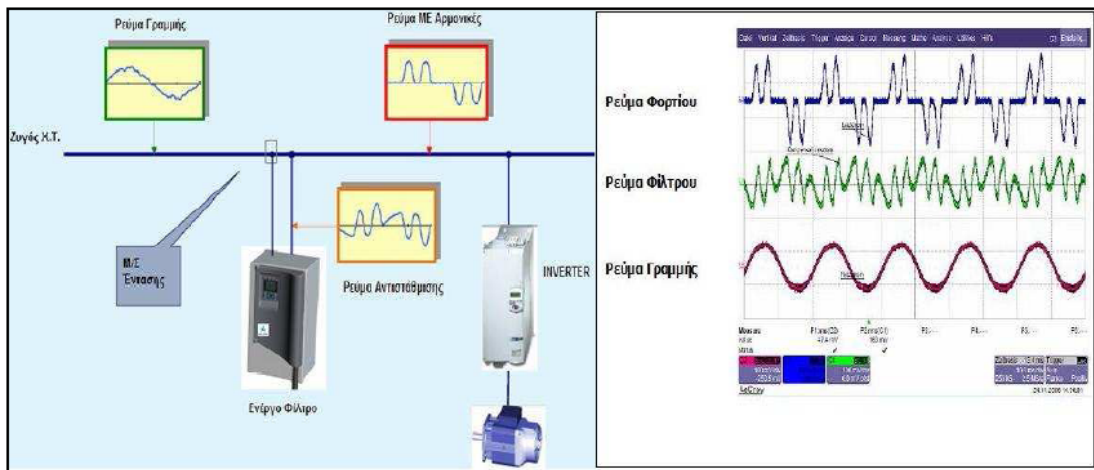


Σχήμα 6-4 Σχηματική απεικόνιση ενός συντονισμένου φίλτρου και της αρχής λειτουργίας του

Με τα συντονισμένα φίλτρα αποκοπής αρμονικών επιτυγχάνεται άριστη μείωση της ολικής αρμονικής παραμόρφωσης στο δίκτυο καθώς αποκόπτουν ακριβώς τις αρμονικές (5η, 7η, 11η...) που υπάρχουν στο τελευταίο. Οι συχνότητες συντονισμού των συντονισμένων φίλτρων βρίσκονται πάρα πολύ κοντά (σχεδόν ακριβώς) στις αντίστοιχες συχνότητες των αρμονικών ρευμάτων που αποκόπτουν. Αποτέλεσμα αυτού είναι οι σύνθετες αντιστάσεις των φίλτρων να είναι υπερβολικά μικρές και έτσι να δημιουργούνται υψηλά ρεύματα αρμονικών που οδηγούν τις πυκνωτικές διατάξεις του φίλτρου σε μεγάλη καταπόνηση. Το παραπάνω, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι δεν αντισταθμίζουν εύκολα την άεργο ισχύ σε δυναμικά φορτία και ενέχουν τον κίνδυνο απορρόφησης αρμονικών ρευμάτων από τη μεριά της Υψηλής Τάσης του Μετασχηματιστή Ισχύος, τα καθιστά ιδιαίτερα απαιτητικά στο σχεδιασμό, την υλοποίηση και τελικά την εγκατάστασή τους στη βιομηχανία.

Παράλληλα, βασικά τους πλεονεκτήματα αποτελούν η άριστη αποκοπή των αρμονικών του δικτύου - σε ποσοστό μεγαλύτερο από αυτό που πετυχαίνεται με τα αποσυντονισμένα φίλτρα - καθώς και το γεγονός ότι παράλληλα με τον καθαρισμό των αρμονικών αντισταθμίζουν και την άεργο ισχύ του δικτύου.

Τα ενεργά φίλτρα είναι διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος που παράγουν και διοχετεύουν στο δίκτυο το αντίθετο ρεύμα αρμονικών από αυτό που δημιουργούν οι πηγές αρμονικών του δικτύου. Σχηματικά αυτό φαίνεται στο Σχήμα 6-5 που ακολουθεί.



Σχήμα 6-5 Σχηματική απεικόνιση της αρχής λειτουργίας ενός ενεργού φίλτρου

Χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις όπου ο ΜΗ αντισταθμισμένος συντελεστής ισχύος είναι κοντά στη μονάδα και επομένως δεν απαιτείται τόσο αντιστάθμιση αέργου όσο μείωση της Ολικής Αρμονικής Παραμόρφωσης (THD%). Είναι ιδιαίτερα ακριβές λύσεις και γι' αυτόν τον λόγο χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις όπου ισχύουν αρκετές ή όλες από τις παρακάτω συνθήκες σε μια εγκατάσταση:

- Υπάρχει μεγάλο περιεχόμενο σε ΜΗ γραμμικά φορτία
- Οι απαιτήσεις για καλή ποιότητα τάσης και ρεύματος είναι ιδιαίτερα αυξημένες (THD V% < 3)
- Υπάρχει Δυναμική Μεταβολή της Ολικής Αρμονικής Παραμόρφωσης
- Υπάρχουν ταχέως μεταβαλλόμενα ΜΗ γραμμικά φορτία (π.χ. Νοσοκομεία, ακτίνες X, κλπ.)
- Υπάρχει ευαίσθητος ηλεκτρονικός Εξοπλισμός

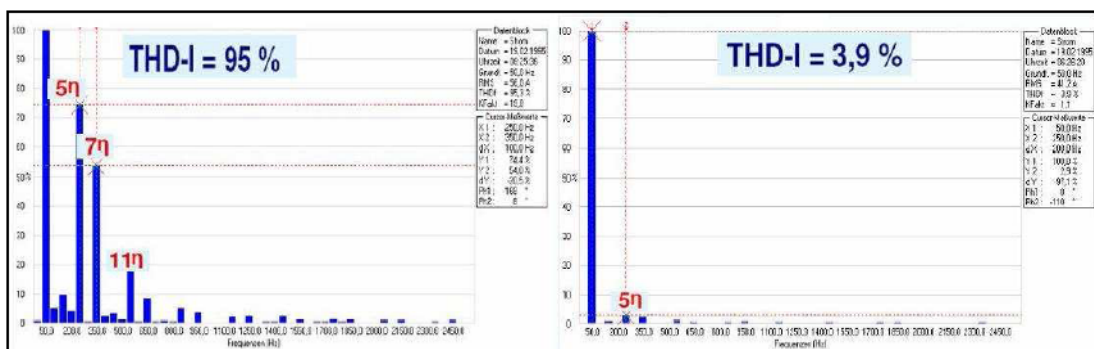
Το βασικότερο πλεονέκτημα των ενεργών φίλτρων είναι ότι πετυχαίνουν ολοκληρωτική αποκοπή των αρμονικών που εμφανίζονται στο δίκτυο μειώνοντας σχεδόν 100% την Ολική Αρμονική Παραμόρφωση. Επιπλέον, είναι εύκολα στην εγκατάσταση αφού δεν πιάνουν ιδιαίτερο χώρο. Ακόμη δεν υπερφορτίζονται, ενώ η δυναμική αλλαγή στην Ολική Αρμονική

Παραμόρφωση του δικτύου δεν επηρεάζει τη λειτουργία τους, αφού παράγουν και διοχετεύουν στο δίκτυο το αντίθετο ρεύμα από αυτό των αρμονικών την κάθε χρονική στιγμή.

Το μεγαλύτερό τους μειονέκτημα αποτελεί η τιμή τους, η οποία δεδομένου του γεγονότος ότι UEN αντισταθμίζουν την άεργο ισχύ, είναι κατά πολύ αυξημένη σε σχέση με τη λύση ενός παθητικού φίλτρου, το οποίο πετυχαίνει και βελτίωση του συντελεστή ισχύος στο δίκτυο που τοποθετείται.

Το Σχήμα 6-6 που ακολουθεί είναι αρκετά διαφωτιστική όσον αφορά τον τρόπο λειτουργίας όσο και την αποτελεσματικότητα ενός ενεργού φίλτρου.

Στο Σχήμα 6-6, αριστερά, δίνεται η Ολική Αρμονική Παραμόρφωση που προκαλείται στο ρεύμα γραμμής από έναν Inverter συνδεδεμένο με έναν Ασύγχρονο Τριφασικό Κινητήρα. Ο κινητήρας είναι ονομαστικής ισχύος 45kW και είναι φορτισμένος στα 30kW. Στα δεξιά του Σχήμα 6-6 δίνεται η νέα Ολική Αρμονική Παραμόρφωση που προκύπτει έπειτα από την εγκατάσταση ενός ενεργού φίλτρου και η οποία είναι εμφανώς μικρότερη και εντός των ορίων που θέτουν οι κανονισμοί.



Σχήμα 6-6 Παράδειγμα μείωσης της Ολικής Αρμονικής Παραμόρφωσης που προκαλείται από την εγκατάσταση ενός ενεργού φίλτρου σε έναν κινητήρα ο οποίος είναι συνδεδεμένος με inverter

6.1.3 M/Σ Zig-Zag (HMT Harmonic Mitigating Transformers)

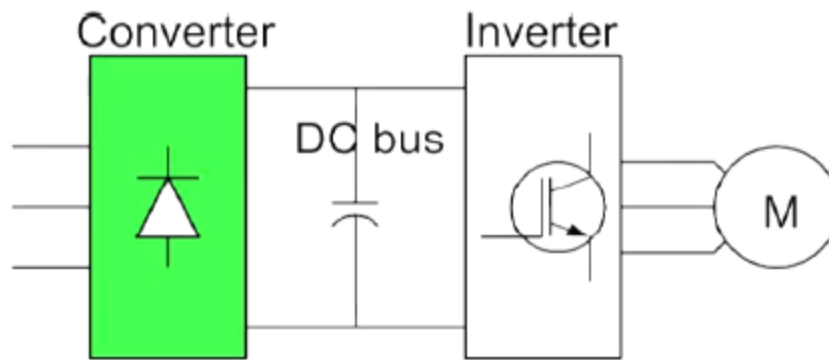
Οι μετασχηματιστές περιορισμού των αρμονικών (HMTs) περιορίζουν την κυκλοφορία των αρμονικών ρευμάτων στα τυλίγματα, άρα λιγότερες θερμικές απώλειες και μικρότερη παραμόρφωση τάσης. Τα τυλίγματα zig-zag στο δευτερεύον ακυρώνουν την επαγωγή στο πρωτεύον τύλιγμα των τριπλών αρμονικών ρευμάτων (3η, 9η, 15η). Επί πλέον με πολλαπλά (2 ή 3) δευτερεύοντα τυλίγματα μετατόπισης φάσης μπορούν να ακυρώσουν στα δευτερεύοντα τυλίγματα τις αρμονικές μαγνητικές ροές των 5ης, 7ης, 11ης, 13ης, 17ης, 19ης αρμονικών. Τα μονοφασικά φορτία στους HMT με πολλαπλά δευτερεύοντα τυλίγματα ισοκατανέμονται στα τυλίγματα αυτά. Πιο συγκεκριμένα, HMT με δύο δευτερεύοντα εξαλείφει από το πρωτεύον τύλιγμα την κυκλοφορία των αρμονικών ρευμάτων 5ης, 7ης, 17ης, 19ης τάξης, ενώ HMT με τρία δευτερεύοντα εξαλείφει από το πρωτεύον τύλιγμα την κυκλοφορία των αρμονικών ρευμάτων 5ης, 7ης, 11ης, 13ης τάξης.

6.1.4 Φίλτρα ραδιοσυχνότητας (RFI)

Η γρήγορη διακοπτική λειτουργία των τρανζίστορ IGBTs (από 3 έως 18 kHz περίπου) σε ρυθμιστές στροφών (VFDs), παλμοτροφοδοτικά (SMPS), τροφοδοτικά αδιάλειπτης παροχής (UPS) προκαλεί ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία (EMI Electromagnetic Interference) στο φάσμα συχνοτήτων των ραδιοκυμάτων. Τα ηλεκτρομαγνητικά αυτά κύματα μεταφέρονται μέσα από τα καλώδια και αν φτάσουν στις γραμμές μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας, τότε μπορεί να διαδοθούν ασύρματα. Για να αποφευχθεί η διάχυσή τους στα δίκτυα, κατάλληλα φίλτρα συνδέονται στην είσοδο των ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος, τα λεγόμενα φίλτρα RFI.

6.2 Μικρότερος πυκνωτής (C-less)

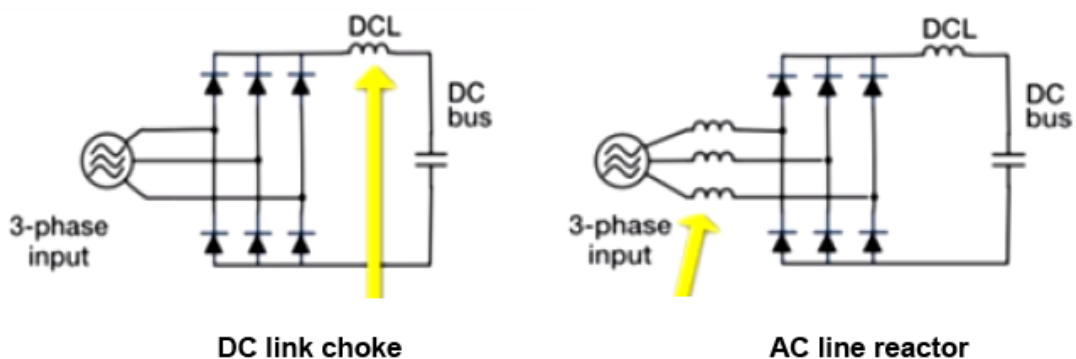
Η ενδιάμεση μετατροπή ισχύος σε όλους τους μετατροπείς συχνότητας περιέχει παράλληλα συνδεδεμένη χωρητικότητα για την εξομάλυνση της ανορθωμένης τάσης, βλέπε Σχήμα 6-7. Στην πράξη η χωρητικότητα δημιουργείται από δύο ηλεκτρολυτικούς πυκνωτές σε σειρά, για να μειωθεί στο μισό η ονομαστική τους τάση.



Σχήμα 6-7 Πυκνωτής εξομάλυνσης ανόρθωσης (DC link capacitor)

Όσο μεγαλώνει η χωρητικότητα των πυκνωτών, τόσο μικραίνει η κυμάτωση της τάσης και τόσο αυξάνεται η VDC. Η μέγιστη χωρητικότητα εξασφαλίζει $VDC = V_{peak AC}$. Η μείωση της χωρητικότητας περίπου 10% προκαλεί μια πολύ σημαντική πτώση (50%) της 5ης αρμονικής που προξενεί τη μεγαλύτερη ποσοστιαία παραμόρφωση στα ρεύματα των VFDs.

6.3 Πηνία



Σχήμα 6-8 Πηνία εξομάλυνσης στο σύνδεσμο DC και στη γραμμή AC

Το μέγεθος των πηνίων καθορίζεται από το ποσοστό πτώσης τάσης που εκφράζεται επί τοις % της ονομαστικής τάσης, π.χ. 3% πηνίο σε γραμμή 400V θα προκαλέσει 12V πτώση τάσης. Στο Σχήμα 6-8 φαίνεται ο περιορισμός του THDI σε συνάρτηση με το μέγεθος των πηνίων AC, DC. Ένα μειονέκτημα της μεθόδου είναι η πτώση τάσης, γι αυτό το συνολικό μέγεθός τους δηλαδή DC ή AC ή AC+DC κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 1% και 5%.

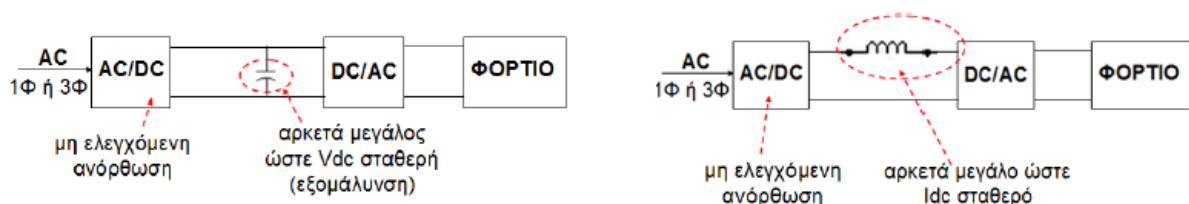
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 - ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΥ ΑΡΜΟΝΙΚΩΝ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ

7.1 Βασικές τοπολογίες μετατροπών DC-AC

7.1.1 Εισαγωγή και βασικές έννοιες

Για τους DC-DC μετατροπείς χρησιμοποιείται συνήθως ο όρος «αντιστροφείς» ή *inverters*. Ένας τέτοιος μετατροπέας μπορεί να τροφοδοτείται είτε από τάση (Voltage Source Inverter ή VSI) είτε από ρεύμα (Current Source Inverter ή CSI). Οι πρώτοι δέχονται μια DC τάση στην είσοδο ενώ οι δεύτεροι ένα DC ρεύμα. Αν υποθεθεί ότι η αφετηρία είναι μια μονοφασική ή τριφασική AC τάση η οποία ανορθώνεται μέσω της χρήσης μιας μη ελεγχόμενης διάταξης, τότε αν στην έξοδο της ανόρθωσης συνδεθεί (παράλληλα) πυκνωτής κατάλληλης χωρητικότητας μπορεί να προκύψει μια DC σταθερή τάση. Αντίθετα, αν στην έξοδο της ανόρθωσης συνδεθεί πηνίο κατάλληλης αυτεπαγωγής τότε μπορεί να προκύψει ένα DC σταθερό ρεύμα. Στη συνέχεια η DC σταθερή τάση ή το DC σταθερό ρεύμα μπορούν να τροφοδοτήσουν έναν αντιστροφέα ελεγχόμενο από τάση ή έναν αντιστροφέα ελεγχόμενο από ρεύμα αντίστοιχα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 7-1, ώστε αυτός με τη σειρά του να μεταφέρει την ισχύ στο φορτίο.

Οι αντιστροφείς ελεγχόμενοι από ρεύμα έχουν ακόμα περιορισμένη εφαρμογή (αν και κερδίζουν έδαφος έναντι των VSI) και για αυτό η ανάλυση στη συνέχεια θα επικεντρωθεί στους αντιστροφείς που ελέγχονται από τάση. Για λόγους συντομίας στη συνέχεια θα χρησιμοποιείται απλά ο όρος «αντιστροφέας» και θα εννοείται ο αντιστροφέας ελεγχόμενος από τάση (VSI).

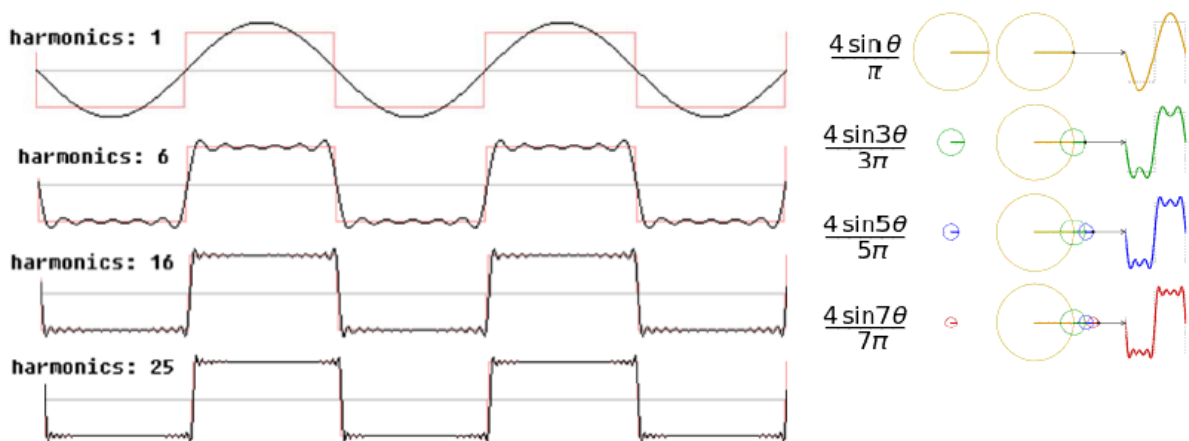


Σχήμα 7-1 Βασικά διαγράμματα λειτουργίας για αντιστροφείς ελεγχόμενους από τάση και αντιστροφείς ελεγχόμενους από ρεύμα

Τα τρία βασικά είδη αντιστροφέων είναι οι αντιστροφείς ημιγέφυρας, πλήρους γέφυρας και οι push-pull αντιστροφείς, σε αντιστοιχία με τις τοπολογίες για τους DC-DC μετατροπείς. Επιπλέον κατηγοριοποίηση μπορεί να προκύψει σε σχέση με τα επιμέρους στοιχεία τους (κυρίως αριθμό επιπέδων, αριθμό φάσεων και το αν η έξοδος είναι μονοπολική (εναλλασσόμενη) ή διπολική).

Η ιδανική λειτουργία για έναν αντιστροφέα είναι η μετατροπή μιας σταθερής DC τάσης σε AC τάση αμιγώς ημιτονοειδούς μορφής. Πρακτικά, το ζητούμενο είναι η προσέγγιση της ημιτονοειδούς μορφής (καλύτερη προσέγγιση απαιτεί αύξηση κόστους και γενικά είναι περισσότερο αναγκαία όσο η ισχύς ανεβαίνει). Για χαμηλές ισχύς μπορεί να γίνει δεκτή ακόμα και τετραγωνική AC τάση εξόδου.

Ένα «καθαρό» ημίτονο δεν περιέχει ανώτερες αρμονικές παρά μόνο την θεμελιώδη. Αντίθετα, μια τετραγωνική μορφή έχει μεγάλο αρμονικό περιεχόμενο. Μια σχηματική αναπαράσταση της αναγκαίας αύξησης του αρμονικού περιεχομένου μπορεί να βρεθεί στα σχήματα του Σχήμα 7-1. Προφανώς το επιθυμητό είναι η ελάττωση της παρουσίας των αρμονικών η οποία επιτυγχάνεται με καλύτερη προσέγγιση της αμιγώς ημιτονοειδούς μορφής. Προς αυτόν το σκοπό, πέρα από τη χρήση φίλτρων, ελέγχεται η διαμόρφωση του εύρους των παλμών ώστε αυτοί να προσομοιάζουν στην ημιτονοειδή μορφή (δηλαδή, σε μια απλουστευμένη εξήγηση, να είναι μικρότερης διάρκειας προς τα άκρα των ημιπεριόδων και μεγαλύτερη διάρκειας προς το μέσο των ημιπεριόδων).



Σχήμα 7-2 Προοδευτική προσέγγιση της τετραγωνικής μορφής με αύξηση του αρμονικού περιεχομένου

7.1.2 Παράμετροι απόδοσης

Οι συνηθέστεροι παράμετροι απόδοσης/αξιολόγησης ενός αντιστροφέα είναι:

$$HF_n = \frac{V_n}{V_1}$$

(1) ο αρμονικός συντελεστής ν-οστής αρμονικής:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1}$$

(2) ο λόγος συνολικής αρμονικής παραμόρφωσης:

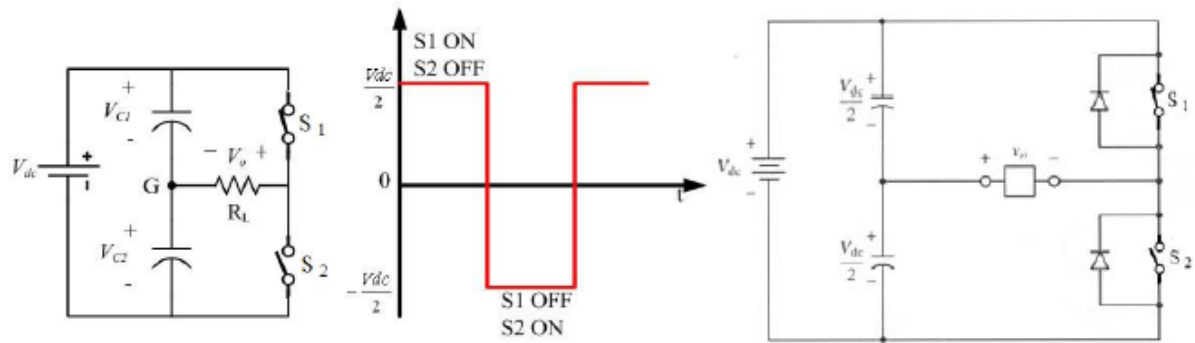
$$DF = \frac{1}{V_1} \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}{n}}$$

(3) ο συντελεστής παραμόρφωσης:

(4) η αρμονική μικρότερης τάξης (LOH): η αρμονική που είναι πιο κοντά στη θεμελιώδη με πλάτος μεγαλύτερο ή ίσο του 3% της θεμελιώδους.

7.1.3 Αντιστροφέας ημιγέφυρας (half bridge inverter)

Η βασική τοπολογία του αντιστροφέα ημιγέφυρας φαίνεται στο Σχήμα 7-3. Οι δύο πυκνωτές χρησιμοποιούνται ώστε να επιτευχθεί ισομοιρασμός της τάσης εισόδου. Συνεπώς η τάση εξόδου μπορεί να είναι ίση με το μισό της τάσης εισόδου (με πολικότητα που αλλάζει ανάλογα με το ποιος διακόπτης είναι ON) και με έλεγχο της σειράς και του χρόνου ενεργοποίησης των διακοπών η τάση εξόδου θα είναι ένας τετραγωνικός παλμός με συγκεκριμένη RMS τιμή (Σχήμα 7-3). Κατά τα γνωστά από τα προηγούμενα, αν το φορτίο είναι επαγωγικό τότε θα πρέπει να προστεθούν δίοδοι προστασίας παράλληλα στους διακόπτες (Σχήμα 7-3). Αυτή είναι και η γενική λογική σχεδιασμού των αντιστροφέων.



Σχήμα 7-3 Το βασικό κύκλωμα του αντιστροφέα ημιγέφυρας, η 10. τάση εξόδου και η συνηθισμένη προσέγγιση με σύνδεση διόδων για την προστασία των διακοπών

7.1.4 Αντιστροφέας πλήρους γέφυρας (full bridge inverter)

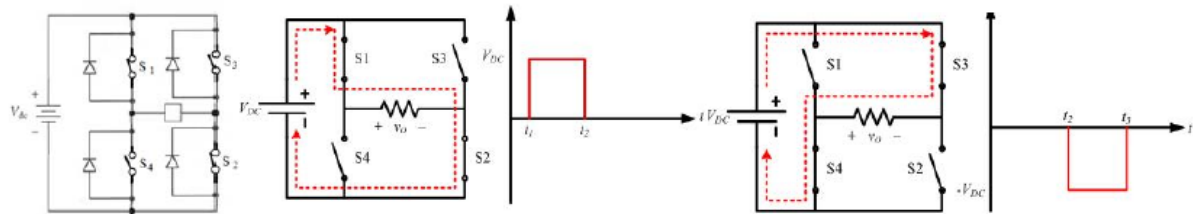
Η βασική τοπολογία για έναν αντιστροφέα πλήρους γέφυρας φαίνεται στο Σχήμα 7-4. Ο αντιστροφέας πλήρους γέφυρας αποδίδει διπλάσια ισχύ σε σχέση με τον αντιστροφέα ημιγέφυρας για την ίδια τάση εισόδου. Αντίστροφα, στην περίπτωση που ένας αντιστροφέας πλήρους γέφυρας αποδίδει ίδια ισχύ με έναν αντιστροφέα ημιγέφυρας, τότε το ρεύμα εξόδου και το ρεύμα που διαρρέει τους διακόπτες θα είναι το μισό σε σχέση με τα αντίστοιχα στην περίπτωση του αντιστροφέα ημιγέφυρας.

Η βασική λειτουργία του αντιστροφέα γέφυρας έχει ως εξής:

- (1) S1-S2 ON: $V_{out}=V_{dc}$
- (2) S3-S4 ON: $V_{out}=-V_{dc}$
- (3) S1-S3 ή S2-S4 ON: $V_{out}=0$

και δεν επιτρέπεται να είναι όλοι οι διακόπτες ON ταυτόχρονα.

Μια σχηματική επεξήγηση για τις φάσεις 1 και 2 δίνεται στο Σχήμα 7-4. Για την φάση 3, όταν το άνω ή το κάτω ζεύγος διακοπών είναι ON, το φορτίο είναι παράλληλα συνδεδεμένο σε βραχυκύκλωμα οπότε $V_{out}=0$. Το ίδιο αποτέλεσμα θα προκύψει αν S1-S2-S3-S4 OFF. Συνεπώς ελέγχοντας την σειρά και τον χρόνο ενεργοποίησης των διακοπών, είναι δυνατό να παραχθεί μια AC τάση στην έξοδο με συγκεκριμένη RMS τιμή.

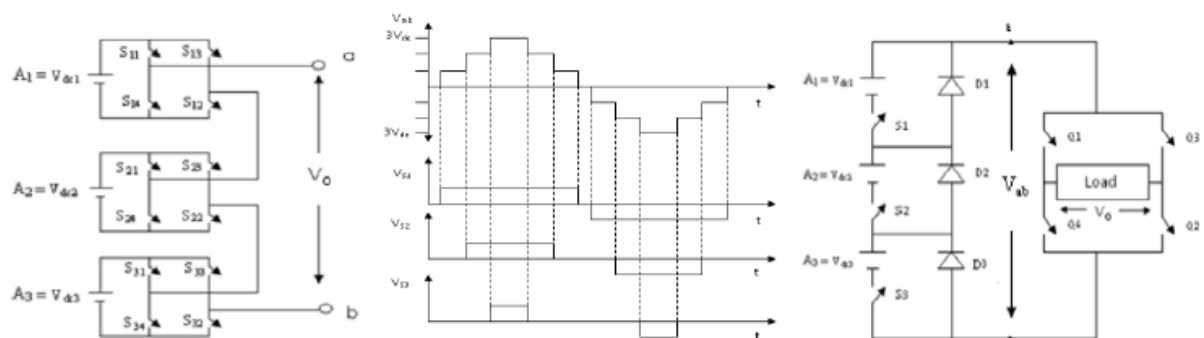


Σχήμα 7-4 Αντιστροφείας πλήρους γέφυρας και επεξήγηση λειτουργίας

7.1.5 Πολυεπίπεδοι αντιστροφείς

Οι πολυεπίπεδοι αντιστροφείς είναι ουσιαστικά περισσότεροι του ενός αντιστροφείς κατάλληλα συνδεδεμένοι ώστε να προσφέρουν περισσότερα επίπεδα στην τάση εξόδου. Έτσι αν π.χ. χρησιμοποιηθούν τρεις αντιστροφείς τότε θα μπορούν να προσφέρουν τέσσερα επίπεδα στην τάση εξόδου (δηλαδή 3 θετικές και 3 αρνητικές στάθμες τάσης καθώς και την μηδενική) όπως φαίνεται στο Σχήμα 7-5. Όσον αφορά τις πηγές εισόδου αυτές μπορεί να είναι διαφορετικές ή να χρησιμοποιηθούν πυκνωτές (όπως στο Σχήμα 7-3) για να ισομοιραστεί η τάση από μία πηγή.

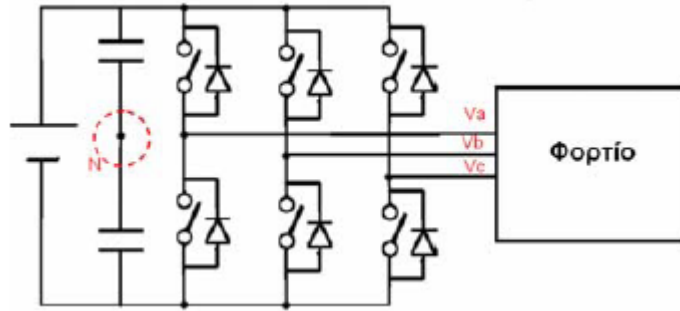
Διαφορετικές παραλλαγές στον σχεδιασμό επίσης μπορεί να εφαρμοσθούν (Σχήμα 7-5). Η προσθήκη περισσότερων σταθμών στην τάση εξόδου σημαίνει ότι μπορεί να επιτευχθεί (με κατάλληλο έλεγχο των διακοπών) μια κυματομορφή εξόδου που να προσεγγίζει καλύτερα την ημιτονοειδή μορφή.



Σχήμα 7-5 Ένας αντιστροφείας τριών επιπέδων, οι σχετικές κυματομορφές και μια παραλλαγή στον σχεδιασμό (και στις δύο περιπτώσεις ισχύει $A1=A2=A3$)

7.1.6 Τριφασικοί αντιστροφείς

Όσον αφορά τους τριφασικούς αντιστροφείς, η προφανής προσέγγιση είναι τρεις μονοφασικοί αντιστροφείς (ημιγέφυρας ή γέφυρας) που συνδέονται στην ίδια είσοδο για να δώσουν τις 3 διαφορετικές φάσεις. Η συνηθέστερη σύνδεση είναι σε συνδεσμολογία γέφυρας (Σχήμα 7-6).



Σχήμα 7-6 Τριφασικός αντιστροφέας σε συνδεσμολογία γέφυρας

7.1.7 Διαμόρφωση παλμών

Η διαμόρφωση παλμών γίνεται για να επιτευχθεί αφενός έλεγχος της τάσης και αφετέρου καλύτερη προσέγγιση της αμιγώς ημιτονοειδούς μορφής και άρα μείωση των αρμονικών.

Οι βασικές κατηγορίες τεχνικών διαμόρφωσης παλμών είναι:

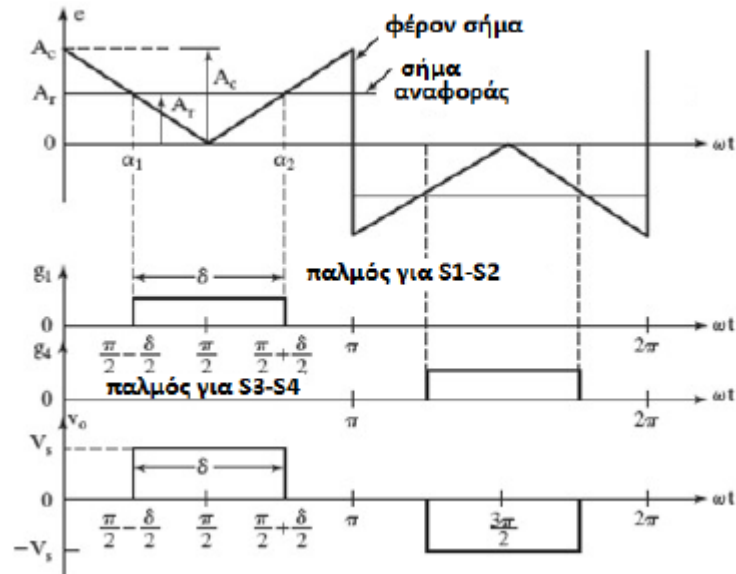
- (1) μονοπαλμική διαμόρφωση εύρους παλμού (single PWM)
- (2) πολυπαλμική διαμόρφωση εύρους παλμού (multiple PWM)
- (3) ημιτονοειδής διαμόρφωση εύρους παλμού (SPWM)
- (4) τροποποιημένη ημιτονοειδής διαμόρφωση εύρους παλμού (modified SPWM ή MSPWM)
- (5) προηγμένες τεχνικές διαμόρφωσης

Η βασική λογική είναι η εξής: χρησιμοποιείται ένα σήμα αναφοράς A_r (reference) (ορθογώνιο ή ημιτονοειδές) και ένα φέρον σήμα A_c (carrier) (τριγωνικό). Ορίζεται προφανώς η συχνότητα f_r του σήματος αναφοράς και η συχνότητα f_c του φέροντος σήματος. Τα δύο σήματα συγκρίνονται και ανάλογα με το αποτέλεσμα παράγεται ή δεν παράγεται παλμός. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι είναι δυνατόν να υπάρχουν διαφορετικές λογικές παραγωγής παλμού ακόμα και για τον ίδιο τύπο διαμόρφωσης.

7.1.7.1 Μονοπαλμική PWM

Με τον όρο μονοπαλμική PWM περιγράφεται η τεχνική με την οποία παράγεται μόνο ένας παλμός ανά περίοδο για κάθε διακόπτη και ένα παράδειγμα παρατίθεται στο Σχήμα 7-7. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα παλμός για τα S1-S2 (συνδεσμολογία πλήρους γέφυρας) παράγεται όταν (και

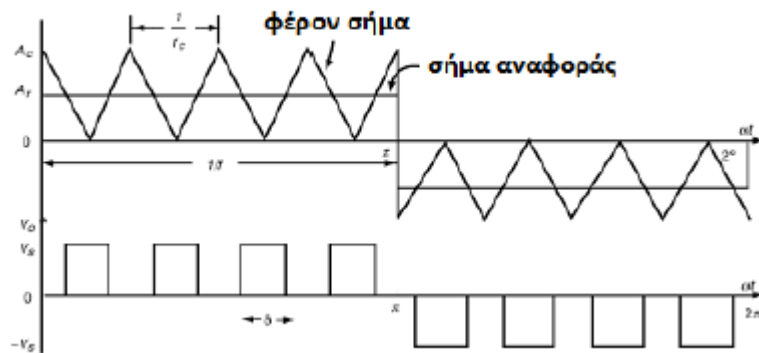
για όσο) το σήμα αναφοράς είναι μεγαλύτερο από το θετικό φέρον σήμα, ενώ παλμός για τα S3-S4 παράγεται όταν (και για όσο) το σήμα αναφοράς είναι μικρότερο από το αρνητικό φέρον σήμα.



Σχήμα 7-7 Μονοπαλμική PWM διαμόρφωση

7.1.7.2 Πολυπαλμική PWM

Στην πολυπαλμική PWM παράγονται περισσότεροι από ένας παλμοί ανά περίοδο για κάθε διακόπτη και ένα παράδειγμα φαίνεται στο Σχήμα 7-8. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα παλμός για τα S1-S2 (συνδεσμολογία πλήρους γέφυρας) παράγεται όταν (και για όσο) το σήμα αναφοράς είναι μεγαλύτερο από το θετικό φέρον σήμα, ενώ παλμός για τα S3-S4 παράγεται όταν (και για όσο) το σήμα αναφοράς είναι μικρότερο από το αρνητικό φέρον σήμα, με αποτέλεσμα την κυματομορφή AC τάσεως εξόδου που φαίνεται στο Σχήμα 7-8.

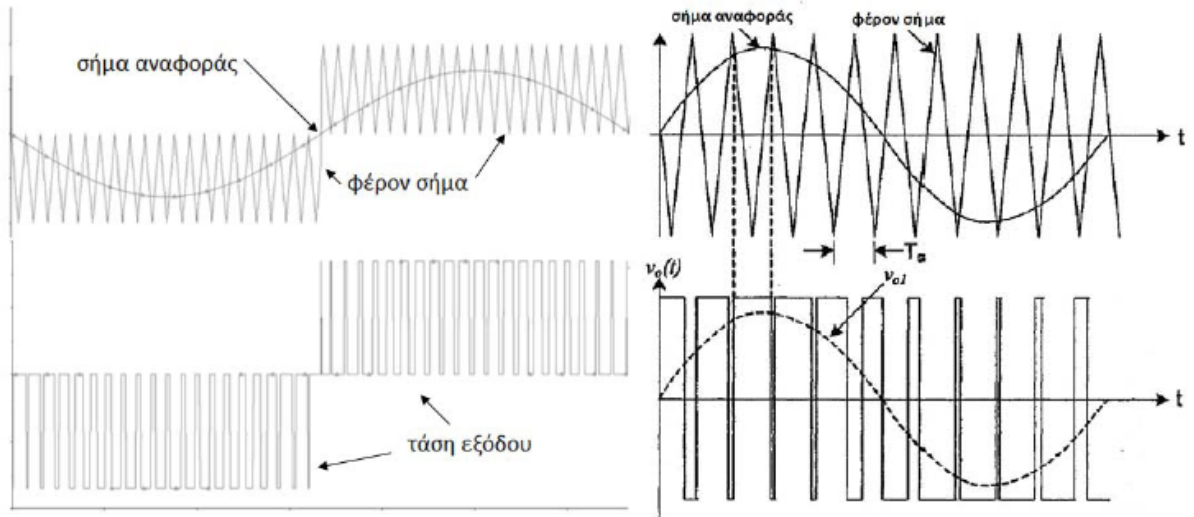


Σχήμα 7-8 Πολυπαλμική PWM διαμόρφωση

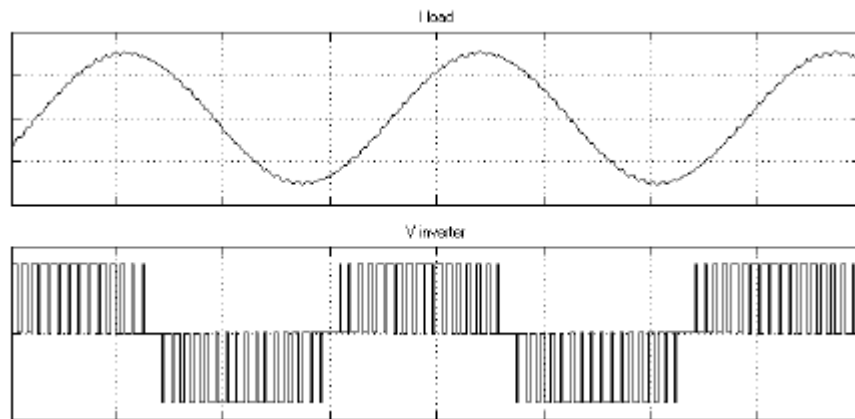
7.1.7.3 Ημιτονοειδής PWM (SPWM)

Στην ημιτονοειδή PWM αντί να έχουν όλοι οι παλμοί το ίδιο εύρος (όπως στην μονοπαλμική και στην πολυπαλμική), το εύρος κάθε παλμού μεταβάλλεται ανάλογα με το πλάτος ενός ημιτονοειδούς σήματος. Το σήμα αναφοράς είναι ένα ημίτονο της ίδιας συχνότητας με την επιθυμητή συχνότητα εξόδου. Η συχνότητα f_r του σήματος αναφοράς καθορίζει την συχνότητα εξόδου και το πλάτος του καθορίζει την RMS τιμή της τάσης εξόδου. Οι αρμονικές ωθούνται προς υψηλές συχνότητες (γύρω από την συχνότητα του φέροντος).

Δύο παραδείγματα SPWM τεχνικής φαίνονται στο Σχήμα 7-9. Στο πρώτο η λογική ομοιάζει με αυτές που αναλύθηκαν στο προηγούμενο: παλμός για τα S1-S2 (συνδεσμολογία πλήρους γέφυρας) παράγεται όταν (και για όσο) το σήμα αναφοράς είναι μεγαλύτερο από το θετικό φέρον σήμα, ενώ παλμός για τα S3-S4 παράγεται όταν (και για όσο) το σήμα αναφοράς είναι μικρότερο από το αρνητικό φέρον σήμα. Στο δεύτερο παράδειγμα παλμός για τα S1-S2 παράγεται όταν (και για όσο) το σήμα αναφοράς είναι μεγαλύτερο από το φέρον σήμα, ενώ παλμός για τα S3-S4 παράγεται όταν (και για όσο) το σήμα αναφοράς είναι μικρότερο από το φέρον σήμα. Η προσέγγιση με την ημιτονοειδή μορφή θα γίνει πιο προφανής αν προστεθεί ένα κατάλληλο φίλτρο εξομάλυνσης (π.χ. L-C). Το ρεύμα στο φορτίο τότε θα προσεγγίσει αρκετά την ημιτονοειδή μορφή όπως φαίνεται στο Σχήμα 7-10. Να σημειωθεί ότι μπορούν να ακολουθηθούν και άλλες λογικές στην SPWM τεχνική π.χ. μπορεί να χρησιμοποιηθεί σήμα αναφοράς διπλής κατεύθυνσης.



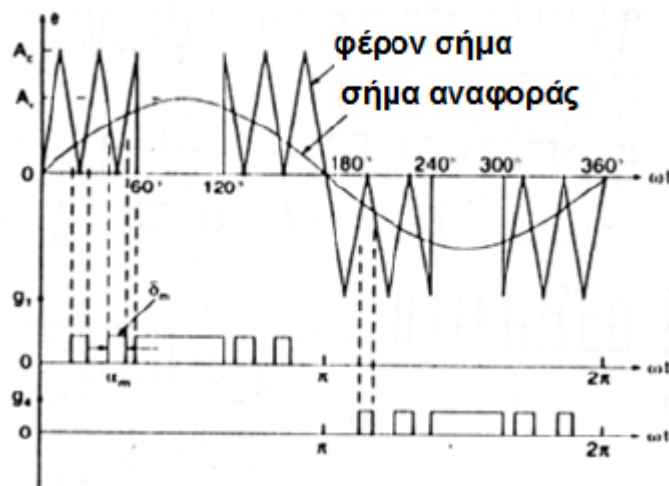
Σχήμα 7-9 Δύο παραδείγματα SPWM διαμόρφωσης



Σχήμα 7-10 Παράδειγμα τάσης και ρεύματος εξόδου με SPWM τεχνική και φίλτρο εξόδου

7.1.7.4 Τροποποιημένη SPWM (MSPWM)

Με τον όρο «τροποποιημένη SPWM» εννοείται μια ημιτονοειδής διαμόρφωση η οποία όμως εφαρμόζεται μόνο στις πρώτες και στις τελευταίες 60° κάθε ημιπεριόδου όπως φαίνεται στο Σχήμα 7-11.



Σχήμα 7-11 Παράδειγμα MSPWM

7.1.8 Προηγμένες τεχνικές διαμόρφωσης

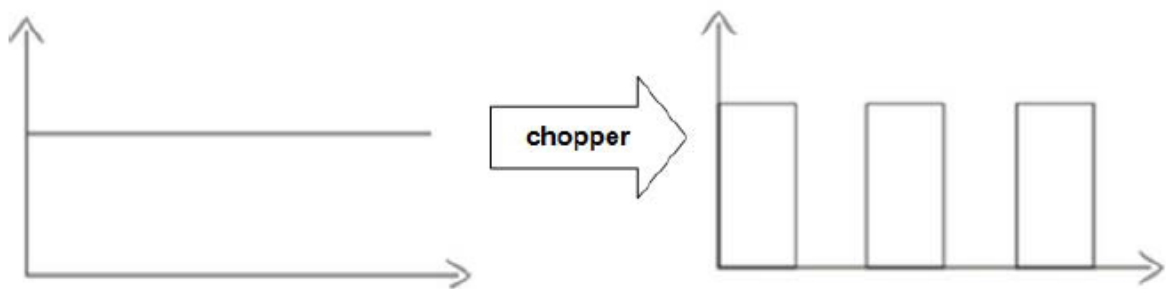
Στην κατηγορία αυτή ανήκουν τεχνικές όπως η τραπεζοειδής όπου το σήμα αναφοράς είναι τραπέζιο, η κλιμακωτή όπου το σήμα αναφοράς είναι ένα κλιμακωτό κύμα, η βηματική όπου το σήμα αναφοράς αποτελείται από βηματικά μέρη, η έγχυση αρμονικών όπου το σήμα αναφοράς παράγεται με έγχυση συγκεκριμένων αρμονικών και η διαμόρφωση δέλτα όπου ένα τριγωνικό σήμα ταλαντώνεται εντός ορισμένου παραθύρου, γύρω από το ημιτονοειδές σήμα αναφοράς.

7.2 Βασικές Τοπολογίες Μετατροπέων DC-DC

Οι DC-DC μετατροπείς ονομάζονται και κατατμητές (ή ψαλιδιστές) («choppers»). Πρόκειται κατά βάση για κυκλώματα που χρησιμοποιούν ηλεκτρονικούς διακόπτες μεγάλης διακοπτικής συχνότητας ώστε να αποκόπτουν ή όχι μια DC τάση εισόδου από το φορτίο, παράγοντας έτσι μια DC τάση εξόδου με διαφορετική μέση τιμή. Η απλουστευμένη γενική αρχή λειτουργίας απεικονίζεται στο Σχήμα 7-12. Με χρήση κατάλληλων στοιχείων και κυκλωματικών διατάξεων (αξιοποιώντας τις δυνατότητες αποθήκευσης ενέργειας παθητικών στοιχείων) είναι δυνατόν να παραχθούν και τάσεις εξόδου με μεγαλύτερη μέση τιμή από αυτήν της εισόδου. Συνεπώς οι DC-DC μετατροπείς μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υποβιβασμό και την ανύψωση μιας DC τάσης.

Έτσι ανάλογα με τη λειτουργία του μετατροπέα αυτός μπορεί να είναι υποβιβασμού (buck), ανύψωσης (boost) ή υποβιβασμού-ανύψωσης (buck-boost). Άλλες ονομασίες χρησιμοποιούνται για να δηλώσουν συγκεκριμένες τοπολογίες/ιδιότητες (Flyback, Forward, Push-pull, Half bridge, Full bridge, Cuk, SEPIC, κλπ).

Οι DC-DC μετατροπείς έχουν ευρύ πεδίο εφαρμογών που περιλαμβάνει τα παλμοτροφοδοτικά, τα συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, τα συστήματα αντιστάθμισης, τα συστήματα ελέγχου ταχύτητας DC μηχανών, κ.α.



Σχήμα 7-12 Η απλουστευμένη γενική αρχή λειτουργίας των κατατμητών

7.2.1 Βασικές έννοιες, κυκλωματική παράσταση και βασικές στρατηγικές

Για κάθε DC-DC μετατροπέα (ή διακόπτη) ορίζεται ο χρόνος αγωγής (t_{on}) και ο χρόνος μη αγωγής (t_{off}). Το άθροισμά τους αποτελεί την περίοδο κατάτμησης ή διακοπτική περίοδο η οποία συμβολίζεται συνήθως με T ή με T_{sw} (το «sw» από το «switch» (διακόπτης) συχνά προστίθεται στα μεγέθη που αφορούν τον διακόπτη). Αντίστοιχα ορίζεται η συχνότητα κατάτμησης ή διακοπτική συχνότητα f (ή f_{sw}) και ισχύει $f=1/T$. Το πηλίκο $D=t_{on}/T$ ονομάζεται κύκλος λειτουργίας ή βαθμός χρησιμοποίησης («duty cycle») και αποτελεί ένα μέγεθος με ιδιαίτερη σημασία. Σημειώνεται ότι η διακοπτική συχνότητα επιλέγεται αρκετά υψηλή ώστε να μην διαταράσσει την λειτουργία του φορτίου.

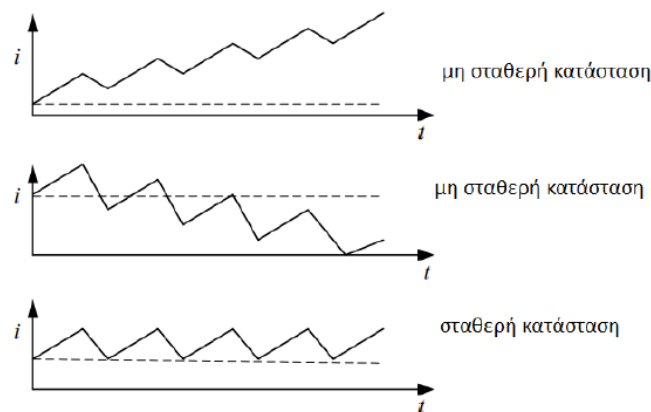
Κατάλληλα φίλτρα (π.χ. L-C διατάξεις) χρησιμοποιούνται ώστε το ρεύμα στο φορτίο να διατηρείται σταθερό (στην πραγματικότητα συνήθως παρατηρείται κάποια κυμάτωση). Για τη λειτουργία των κυκλωμάτων τέτοιων μετατροπέων συχνά απαιτούνται παθητικά στοιχεία (πηνία) για την αποθήκευση ενέργειας.

Σε αυτή την περίπτωση ενδιαφέρει και η μορφή του ρεύματος σε αυτά (στο πηνίο).

Οι παράγοντες αξιολόγησης των DC-DC μετατροπέων είναι:

- (1) η κυμάτωση του ρεύματος στο πηνίο
- (2) η μέγιστη διακοπτική συχνότητα
- (3) η συνθήκη για συνεχές ρεύμα στο πηνίο
- (4) η κυμάτωση/παραμόρφωση της τάσεως και του ρεύματος εξόδου (THD)
- (5) η κυμάτωση/παραμόρφωση του ρεύματος εισόδου (THD).

Σημειώνεται ότι κατά το σχεδιασμό και την ανάλυση τέτοιων κυκλωμάτων θεωρείται ότι το τέλος κάθε περιόδου βρίσκεται το κύκλωμα (από πλευράς ρεύματος) στην ίδια κατάσταση με την αρχή της περιόδου (λειτουργίας σταθερής κατάστασης) (Σχήμα 7-13).



Σχήμα 7-13 Σταθερή και μη σταθερή κατάσταση για DC-DC μετατροπείς

Όσον αφορά την κυκλωματική τους παράσταση, ανάλογα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής, μπορούν να χρησιμοποιηθούν διαφορετικά στοιχεία για την υλοποίηση των διακοπών ενός DC-DC μετατροπέα. Έτσι συνηθίζεται για την θεωρητική ανάλυση τέτοιων κυκλωμάτων να χρησιμοποιείται απλά το γενικό σύμβολο του διακόπτη αντί για τα επιμέρους σύμβολα (IGBT, MOSFET, κλπ).

Όσον αφορά τη λειτουργία τους υπάρχουν δύο βασικές στρατηγικές:

- (1) η λειτουργία σταθερής συχνότητας κατά την οποία η διακοπτική συχνότητα παραμένει σταθερή αλλά μεταβάλλονται τα t_{on} και t_{off} .

Ουσιαστικά έτσι μεταβάλλεται το εύρος του παλμού (δηλαδή η διάρκειά του) και για αυτό η συγκεκριμένη στρατηγική ονομάζεται Διαμόρφωση Εύρους Παλμών (Pulse Width Modulation ή PWM)

- (2) η λειτουργία μεταβλητής συχνότητας όπου η διακοπτική συχνότητα είναι μεταβαλλόμενη αλλά διατηρείται σταθερός είτε ο t_{on} είτε ο t_{off} . Η στρατηγική αυτή ονομάζεται Διαμόρφωση Συχνότητας (Frequency Modulation).

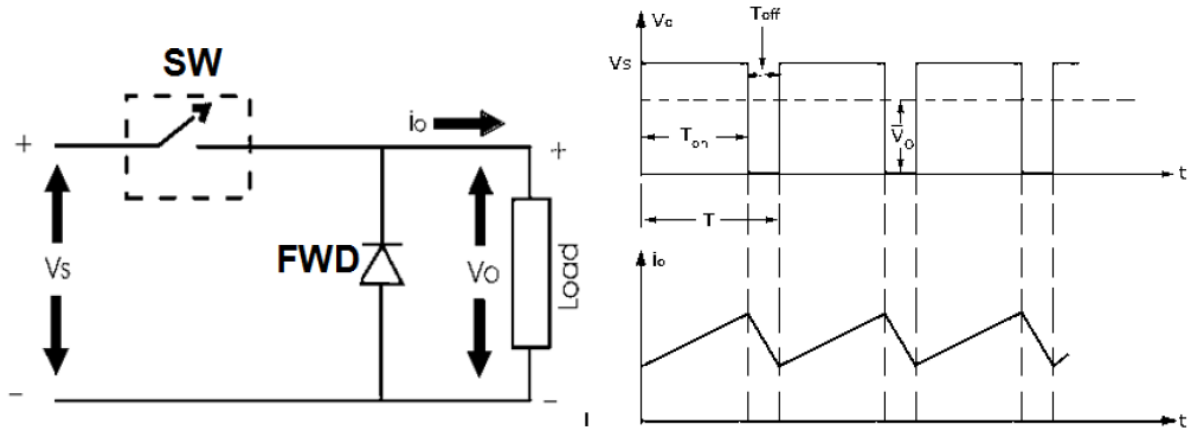
Στην πλειονότητα των εφαρμογών χρησιμοποιείται η PWM τεχνική και διάφορες παραλλαγές της.

7.2.2 DC-DC μετατροπέας υποβιβασμού (buck converter)

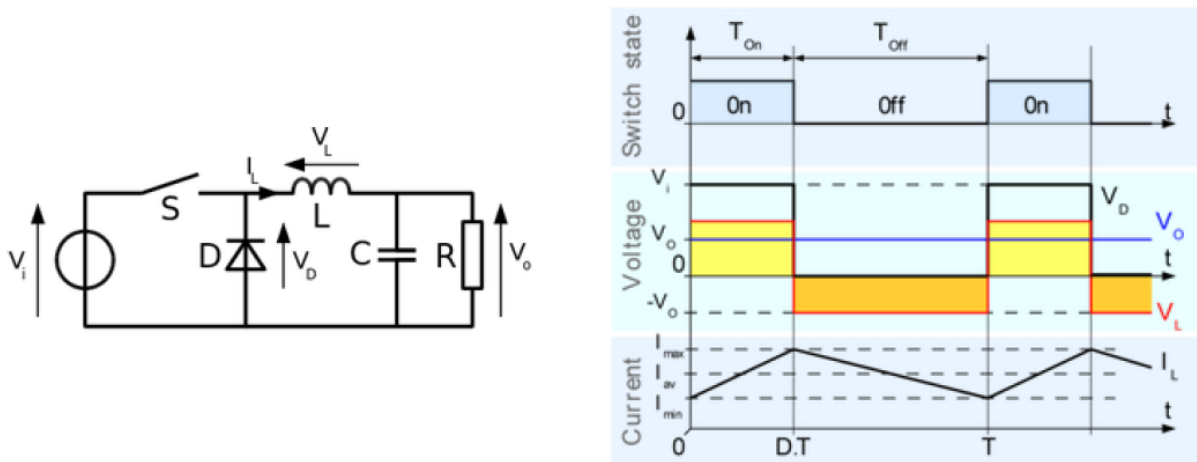
Αν θεωρήσουμε ότι έχουμε το απλό κύκλωμα ενός διακόπτη που αποκόπτει ή όχι μια πηγή τάσης από ένα ωμικό φορτίο, τότε η λειτουργία θα είναι αυτή που απεικονίζεται στο Σχήμα 7-12. Στην περίπτωση όμως που το φορτίο έχει επαγωγικό χαρακτήρα, τότε το πηνίο θα αποθηκεύσει ενέργεια και όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, ο διακόπτης θα δεχτεί υπέρταση κατά το άνοιγμά του. Για να αποφευχθεί η καταπόνηση ή και η καταστροφή του διακόπτη, προστίθεται μία δίοδος ελεύθερης διέλευσης όπως φαίνεται στο Σχήμα 7-14. Αντί να συνδέεται παράλληλα στο φορτίο, σε άλλα κυκλώματα είναι δυνατόν να σχεδιασθεί συνδεδεμένη παράλληλα σε κάθε διακόπτη. Αν τώρα υποθέσουμε ότι έχουμε σταθερή λειτουργία τότε οι κυματομορφές της τάσεως και του ρεύματος εξόδου θα είναι αυτές που φαίνονται στο Σχήμα 7-14.

Αν συνδεθεί κατάλληλο φίλτρο για την εξομάλυνση της εξόδου τότε είναι δυνατόν να προκύψει σταθερό ρεύμα στο φορτίο. Το Σχήμα 7-15 δείχνει ένα τέτοιο παράδειγμα. Σε μια τέτοια περίπτωση η ανάλυση επικεντρώνεται στο ρεύμα στο πηνίο όπως φαίνεται στο Σχήμα 7-15. Το ρεύμα στο πηνίο μπορεί να είναι συνεχές ή όχι. Στην περίπτωση ασυνεχούς ρεύματος, η ανάλυση είναι γενικά πιο σύνθετη. Δεδομένου ότι συνήθως αυτή είναι μια μη επιθυμητή κατάσταση, η ανάλυση των κυκλωμάτων που θα ακολουθήσει θα επικεντρωθεί στην περίπτωση που το ρεύμα στο πηνίο είναι συνεχές. Επίσης δεν θα γίνει αναφορά στις προϋποθέσεις που πρέπει να ισχύουν κάθε φορά ώστε το ρεύμα στο πηνίο να είναι συνεχές. Στην περίπτωση που το ρεύμα στο

πηνίο είναι συνεχές, τότε αποδεικνύεται ότι ισχύει: $V_o = D \cdot V_i$, με $D < 1$, και συνεπώς ο έλεγχος του χρόνου που ο διακόπτης άγει σε κάθε περίοδο (με άλλα λόγια, ο έλεγχος του εύρος του παλμού), προσφέρει και έλεγχο της τάσης εξόδου.



Σχήμα 7-14 Βασικό κύκλωμα του buck μετατροπέα και κυματομορφές



Σχήμα 7-15 Buck μετατροπέας με φίλτρο εξόδου και κυματομορφές

7.2.3 DC-DC μετατροπέας ανύψωσης (boost converter)

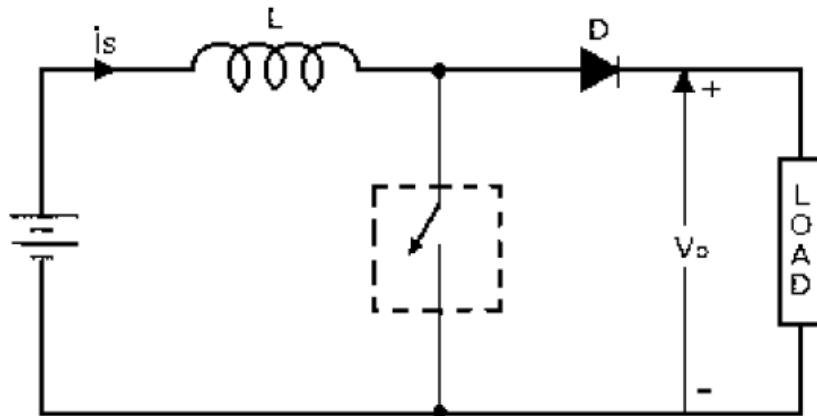
Για να γίνει πιο κατανοητή η λειτουργία του boost μετατροπέα θα εξεταστεί αρχικά το βασικό κύκλωμα που φαίνεται στο Σχήμα 7-16. Όταν ο διακόπτης είναι κλειστός, το ρεύμα τρέχει στον αριστερό βρόγχο και το πηνίο αποθηκεύει ενέργεια. Όταν ο διακόπτης ανοίξει, η ενέργεια που έχει αποθηκεύσει το πηνίο προστίθεται σε αυτήν της πηγής και διοχετεύεται μέσω της διόδου D στο φορτίο. Συνεπώς, όταν ανοίξει ο διακόπτης το πηνίο

γίνεται πηγή τάσης ίδιας πολικότητας με την πηγή εισόδου, οπότε η συνολική τάση εξόδου (στο φορτίο) προκύπτει μεγαλύτερη από αυτήν της εισόδου (πηγής). Αντίστοιχη λειτουργία με την προσθήκη φίλτρου προκύπτει και για την περίπτωση του μετατροπέα ανύψωσης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 7-18.

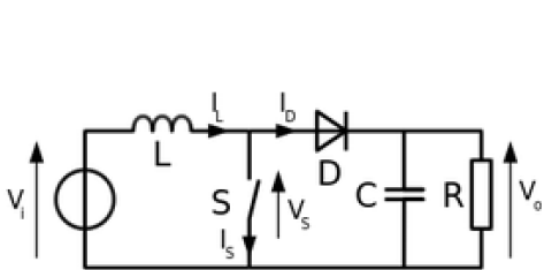
Για την περίπτωση που το ρεύμα στο πηνίο είναι συνεχές προκύπτει:

$$V_o = \frac{1}{1-D} V_i$$

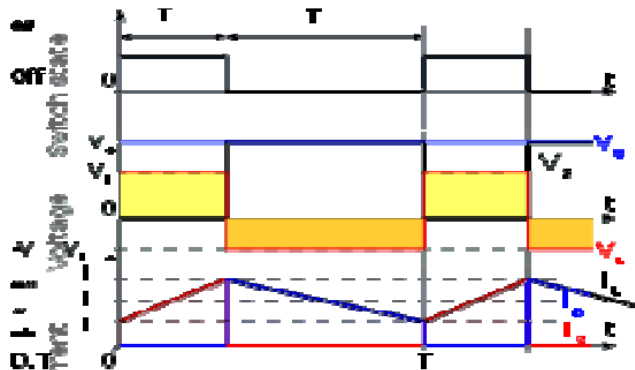
και συνεπώς και σε αυτή την περίπτωση ελέγχοντας το εύρος του παλμού, είναι δυνατός ο έλεγχος της τάσης εξόδου η οποία θα προκύψει μεγαλύτερη από την εισόδου (εφόσον εξ' ορισμού $D < 1$).



Σχήμα 7-16 Βασικό κύκλωμα του boost μετατροπέα



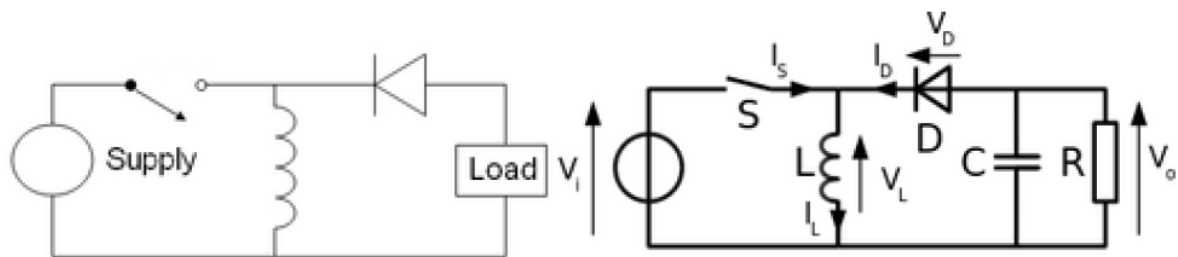
Σχήμα 7-17 Boost μετατροπέας φίλτρο εξόδου και κυματομορφές



7.2.4 DC-DC μετατροπέας υποβιβασμού-ανύψωσης (buck-boost converter)

Ο buck-boost μετατροπέας αποτελεί έναν συνδυασμό των προηγούμενων δύο (buck και boost). Το βασικό κύκλωμα και το κύκλωμα με προσθήκη φίλτρου εξόδου φαίνονται στο Σχήμα 7-18. Κατά το διάστημα που ο διακόπτης είναι κλειστός, φορτίζεται το πηνίο και αν υπάρχει πυκνωτής (που θα έχει φορτιστεί από την προηγούμενη φάση λειτουργίας) τότε αυτός εκφορτίζεται στην αντίσταση.

Κατά το διάστημα που ο διακόπτης είναι ανοικτός, το πηνίο εκφορτίζεται μέσα από τη δίοδο φορτίζοντας τον πυκνωτή (αν υπάρχει) στέλνοντας ρεύμα και στην αντίσταση.



Σχήμα 7-18 Βασικό κύκλωμα buck-boost μετατροπέα και κύκλωμα με φίλτρο εξόδου

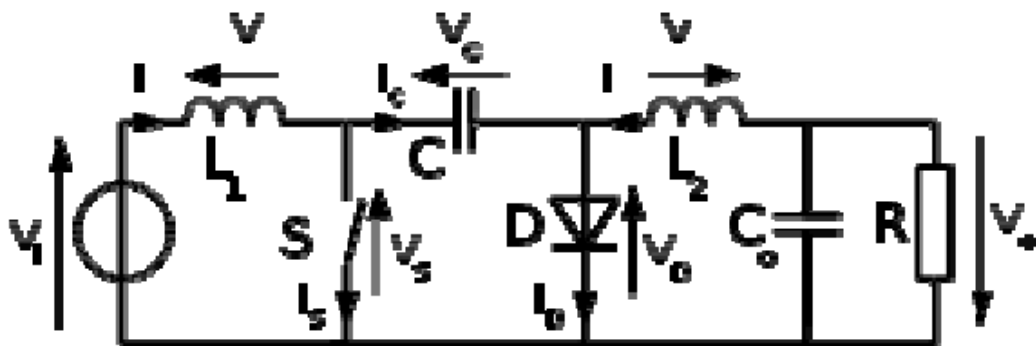
Για την περίπτωση που το ρεύμα στο πηνίο είναι συνεχές προκύπτει:

$$V_o = -\frac{D}{1-D} V_i$$

και ουσιαστικά η συνάρτηση μεταφοράς του buck-boost μετατροπέα προκύπτει ως το γινόμενο των συναρτήσεων μεταφοράς των buck και boost μετατροπέων. Πάντως και σε αυτή την περίπτωση ελέγχοντας το εύρος του παλμού, είναι δυνατός ο έλεγχος της τάσης εξόδου και μάλιστα ελέγχοντας την τιμή του D μπορεί να επιτευχθεί ανύψωση (για $1 > D > 0.5$) ή υποβιβασμός (για $D < 0.5$). Σε κάθε περίπτωση θα υπάρχει όμως αναστροφή της πολικότητας της τάσης από την είσοδο στην έξοδο (για αυτό και το μείον στον παραπάνω τύπο).

7.2.5 Μετατροπέας Cuk

Μια διαφορετική τοπολογία για έναν DC-DC μετατροπέα υποβιβασμού ανύψωσης προτάθηκε από τον Slobodan Cuk και πήρε το όνομά του. Η προτεινόμενη τοπολογία έχει διάφορα πλεονεκτήματα σε σχέση με έναν buck-boost μετατροπέα με βασικότερο ότι επιτρέπει συνεχές ρεύμα στην είσοδο και στην έξοδό του με βέλτιστη χρήση στοιχείων (μέγιστη απόδοση για ελάχιστο αριθμό στοιχείων). Η βασική τοπολογία του μετατροπέα Cuk φαίνεται στο Σχήμα 7-19. Η συνάρτηση μεταφοράς του μετατροπέα του είναι ίδια με αυτή ενός buck-boost μετατροπέα.



Σχήμα 7-19 Βασική τοπολογία μετατροπέα Cuk

7.3 Παλμοτροφοδοτικά

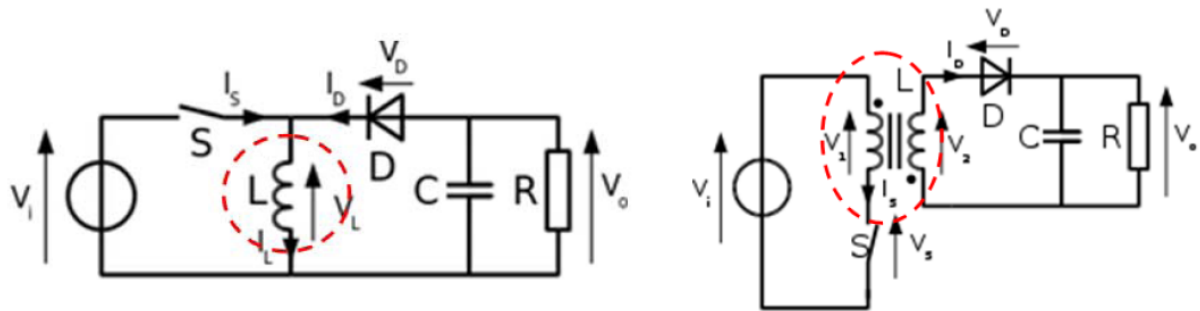
Με τον όρο «παλμοτροφοδοτικά» ή «διακοπτικά τροφοδοτικά» περιγράφονται διατάξεις που περιλαμβάνουν μια διάταξη ανόρθωσης (AC-DC) και στην συνέχεια μια διάταξη DC-DC μετατροπής ώστε να παράγουν την επιθυμητή DC τάση για την τροφοδοσία συσκευών. Οι DC-DC μετατροπείς που χρησιμοποιούνται σε τέτοια τροφοδοτικά είναι παραλλαγές των προηγούμενων με διάφορες ονομασίες (Flyback, Forward, Half bridge, Full bridge, Push-pull, κ.α.), επιλέγονται ανάλογα με την επιθυμητή ισχύ εξόδου και θα εξεταστούν συνοπτικά στην συνέχεια.

7.3.1 Flyback μετατροπέας

Ο Flyback μετατροπέας είναι ο απλούστερος όλων, έχει χαμηλή απόδοση και απαιτεί μεγάλο πυκνωτή εξόδου. Ουσιαστικά είναι ένας buck-boost μετατροπέας που το πηνίο του έχει αντικατασταθεί από έναν μετασχηματιστή. Η φορά περιέλιξης στα τυλίγματα αυτού του μετασχηματιστή είναι τέτοια

ώστε να προκύπτει τάση εξόδου ίδιας πολικότητας με την τάση εισόδου. Η συνάρτηση μεταφοράς που προκύπτει είναι:

$$V_o = \frac{D}{1-D} \cdot \frac{N_2}{N_1} V_i$$



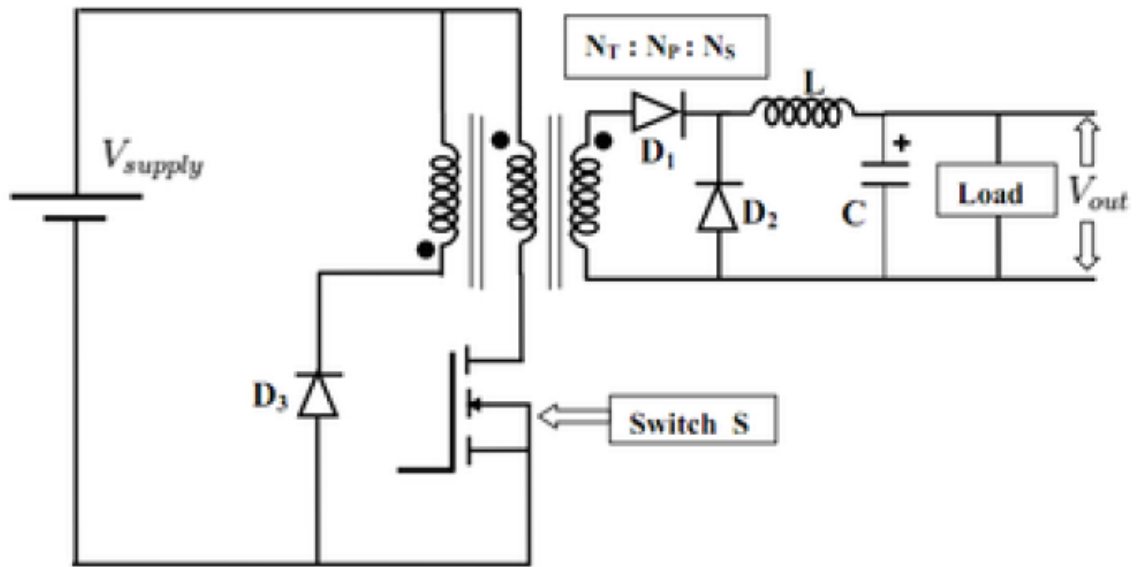
Σχήμα 7-20 Ο buck-boost μετατροπέας και ο flyback μετατροπέας (με διακεκομμένες υπογραμμίζεται η αντικατάσταση του πηνίου από έναν μετασχηματιστή)

7.3.2 Forward μετατροπέας

Το βασικό κύκλωμα για τον forward μετατροπέα φαίνεται στο Σχήμα 7-21. Όταν ο διακόπτης είναι ON η D1 είναι ορθά πολωμένη, ρεύμα διαρρέει το φορτίο και καταλήγει και στα L, C. Όταν ο διακόπτης είναι OFF, η πολικότητα αντιστρέφεται, η D1 είναι OFF, οι D2 και D3 είναι ON και ρεύμα μαγνήτισης επιστρέφει στην πηγή μέσω D3.

Η συνάρτηση μεταφοράς που προκύπτει για τον μετατροπέα αυτόν είναι:

$$V_o = D \cdot \frac{N_2}{N_1} V_i$$

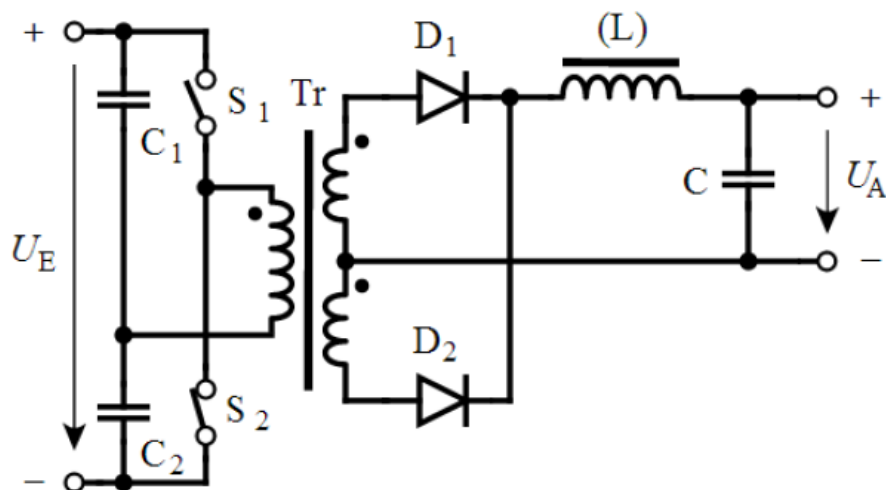


Σχήμα 7-21 Ο forward μετατροπέας

7.3.3 Μετατροπέας ημιγέφυρας (half bridge converter)

Το βασικό κύκλωμα για τον μετατροπέα ημιγέφυρας φαίνεται στο Σχήμα 7-22. Ο μετατροπέας ημιγέφυρας έχει τέσσερις φάσεις λειτουργίας (S1 ON-S2 OFF, S1-S2 OFF, S1 OFF-S2 ON, S1-S2 OFF).

Μια τετραγωνική AC στο πρωτεύον, υποβιβάζεται/ανυψώνεται από τον Μ/Σ, ανορθώνεται και φιλτράρεται. Ο μετατροπέας ημιγέφυρας έχει την ίδια συνάρτηση μεταφοράς με τον forward μετατροπέα αλλά μπορεί να αποδώσει διπλάσια ισχύ σε σχέση με τον forward για τα ίδια στοιχεία και μετασχηματιστή.



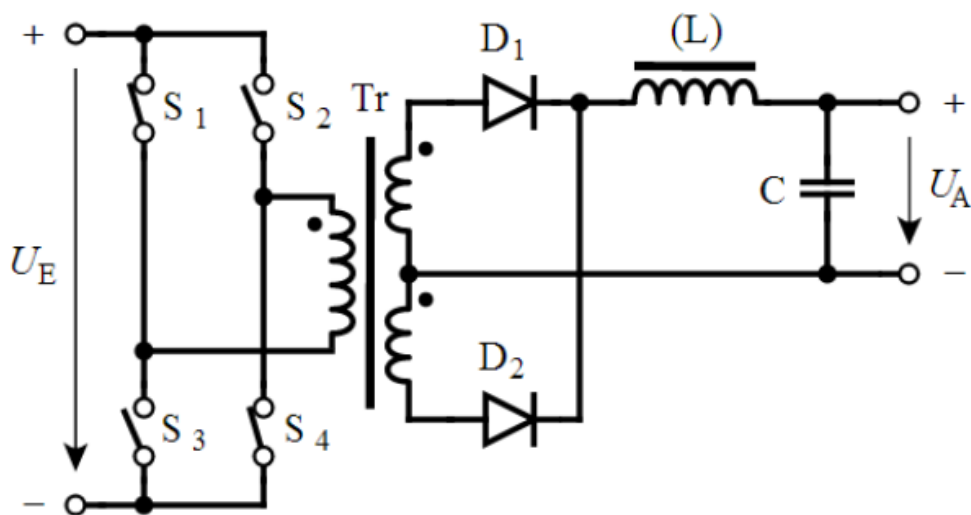
Σχήμα 7-22 Ο μετατροπέας ημιγέφυρας

7.3.4 Μετατροπέας πλήρους γέφυρας (full bridge converter)

Το βασικό κύκλωμα για τον μετατροπέα πλήρους γέφυρας φαίνεται στο Σχήμα 7-23. Ο μετατροπέας πλήρους γέφυρας αντιμετωπίζει τους διακόπτες σαν ζευγάρια παρόμοια με τις γνωστές συνδεσμολογίες γέφυρας (ζευγάρι 1: S1 και S4, ζευγάρι 2: S2 και S3). Για τον μετατροπέα πλήρους γέφυρας υπάρχουν 4 φάσεις λειτουργίας (ON το 1ο ζευγάρι-OFF το 2ο, όλοι OFF, ON το 2ο ζευγάρι και OFF το 1ο, όλοι OFF). Έτσι παράγεται τετραγωνικό AC στο πρωτεύον. Η τάση ανυψώνεται ή υποβιβάζεται, ανορθώνεται, και φιλτράρεται ώστε να προκύψει DC τάση εξόδου. Ο μετατροπέας πλήρους γέφυρας αποδίδει διπλάσια ισχύ από τον μετατροπέα ημιγέφυρας και η συνάρτηση

$$V_o = 2 \cdot D \cdot \frac{N_2}{N_1} V_i$$

μεταφοράς του είναι:

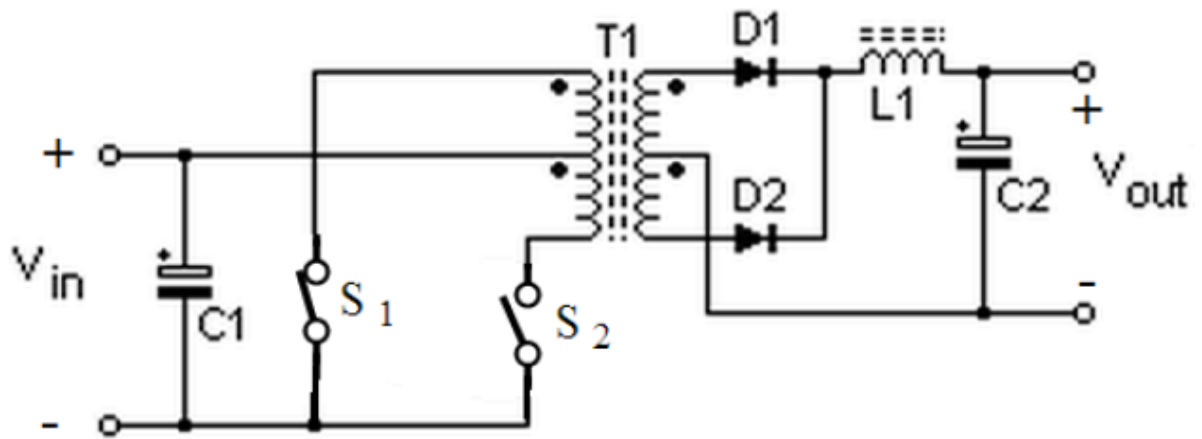


Σχήμα 7-23 Ο μετατροπέας πλήρους γέφυρας

7.3.5 Μετατροπέας Push-Pull

Το βασικό κύκλωμα για τον μετατροπέα push-pull φαίνεται στο Σχήμα 7-24. Ο push-pull μετατροπέας έχει επίσης τέσσερις φάσεις λειτουργίας (S1 ON-S2 OFF, S1-S2 OFF, S1 OFF-S2 ON, S1-S2 OFF). Όταν S1 ή S2 ON, ενεργοποιείται το ένα μισό του πρωτεύοντος και άγει η μία από τις 2 διόδους. Οι S1 και S2 δεν μπορεί να είναι ταυτόχρονα ON καθώς τότε θα υπάρξει

βραχυκύκλωμα. Η συνάρτηση μεταφοράς του push-pull μετατροπέα είναι ίδια με αυτήν του μετατροπέα πλήρους γέφυρας.



Σχήμα 7-24 Ο push-pull μετατροπέας

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Σημειώσεις μαθήματος «Ηλεκτρικά Κινητήρια Συστήματα», Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών

ΠΗΓΕΣ ΑΠΟ ΤΟ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ

- <https://www.pro-fi.gr/el/technologies/17-armonikes>
- https://talos-ts.com/files/PEGA_PYLARINOS.pdf
- [http://www.eng.ucy.ac.cy/elias/Courses/ECE445/presentations/Lectures 2010/ECE%20445_Lecture_Wind%20Energy.pdf](http://www.eng.ucy.ac.cy/elias/Courses/ECE445/presentations/Lectures%202010/ECE%20445_Lecture_Wind%20Energy.pdf)
- https://eclass.upatras.gr/modules/document/file.php/PHY1953/Ενότητα_5_%28Αιολική_Ενέργεια%29.pdf
- <http://eclass.teipir.gr/openeclass/modules/document/file.php/MECH105/I.%20Διαφάνειες%20Μαθήματος/II.%20Αιολική%20Ενέργεια%20-%20Αιολικές%20Μηχανές.pdf>
- https://eclass.uowm.gr/modules/document/file.php/MECH101/ΑΣΚΗΣΕ_ΙΣ/2_Αιολική%20Ενέργεια_oc.pdf
- https://www.researchgate.net/figure/Schematic-of-the-horizontal-and-vertical-axis-wind-turbine-Source-23_fig2_6174926
- https://www.researchgate.net/figure/Type-4-wind-turbine-generator_fig19_337243740