

Πανεπιστήμιο Πατρών

Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών

Τομέας Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας

Εργαστήριο Παραγωγής, Μεταφοράς, Διανομής και Χρησιμοποίησης Ηλεκτρικής Ενέργειας

Διπλωματική Εργασία

του φοιτητή του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών της
Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Πατρών

Πάλλη Κ. Ιωάννη

Αριθμός Μητρώου: 5722

Θέμα:

“Μελέτη διείσδυσης υψηλών αρμονικών σε δίκτυο μέσης τάσης”

Επιβλέπων:

Μήλιας-Αργεΐτης Ιωάννης

Αν. Καθηγητής

Αριθμός Διπλωματικής Εργασίας:

Πάτρα, 15 Οκτωβρίου 2009

ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ

Πιστοποιείται ότι η Διπλωματική Εργασία με θέμα :

“Μελέτη διείσδυσης υψηλών αρμονικών σε δίκτυο μέσης τάσης”

Του φοιτητή του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας
Υπολογιστών

Πάλλη Κ. Ιωάννη

Αριθμός Μητρώου : 5722

Παρουσιάστηκε δημόσια και εξετάστηκε στο Τμήμα Ηλεκτρολόγων
Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών στις
... /... /...

Ο Επιβλέπων
Μήλιας Αργείτης Ιωάννης
Αν. Καθηγητής

Ο Διευθυντής του Τομέα
Αντώνιος Αλεξανδρίδης
Καθηγητής

Αριθμός Διπλωματικής Εργασίας:

Θέμα: "Μελέτη διείσδυσης υψηλών αρμονικών σε δίκτυο μέσης τάσης"

Ο Φοιτητής
Πάλλης Κ. Ιωάννης

Ο Επιβλέπων
Μήλιας Αργείτης Ιωάννης
Αν. Καθηγητής

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκαν οι αιτίες, οι επιπτώσεις και η αντιμετώπιση σε προβλήματα που αφορούν διείσδυση ανώτερων αρμονικών σε δίκτυο μέσης τάσης. Μοντελοποιήθηκε και εισήχθει ένα κομμάτι πραγματικού δικτύου μέσης τάσης στο υπολογιστικό πακέτο MATLAB. Οι εξαχθήσες προσομοιώσεις, τόσο της εμπίδησης-συχνότητας όσο και της τάσης παρουσία αρμονικών, έδωσαν συμπεράσματα για την συμπεριφορά του δικτύου. Τέλος εξετάσθηκε η συμπεριφορά του παρουσία παθητικών φίλτρων.

Abstract

In the present <<Diploma Thesis>> the causes, the effects and the treatment of high harmonics penetration in middle voltage electric distribution systems were studied. A real middle voltage electric distribution system was modeled with the use of Matlab. The simulations (impedance vs. frequency and voltage with presence of high harmonics) resulted conclusions over the behavior of such system. At last, the behavior of the electric distribution system in presence of passive filters was studied.

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία ολοκληρώθηκε με επιτυχία χάρη στην πολύτιμη συμβολή του καθηγητή μου κ.Μήλια-Αργεΐτη Ιωάννη.Η καθοδήγησή του στη μελέτη και οι ατελείωτες ώρες κουβέντας,γύρω από επιστημονικά θέματα με βοήθησαν να κατανοήσω τις τρέχουσες και μελλοντικές επιστημονικές εξελίξεις.

Επιπλέον,θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ.Ζαχαρία Θωμά για τους προβληματισμούς και τα πρακτικά προβλήματα που μου έθετε γύρω από λεπτές επιστημονικές έννοιες.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή κ.Τσανάκα Δημήτριο για τις πολύτιμες γνώσεις που μας μετέδιδε στις διαλέξεις των μαθημάτων του φέρνοντάς μας όλο και πιο κοντά στην πραγματικότητα ενός μηχανικού.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τη συμφοιτήριά μου Χαρούλα Ζωγόγιαννη για την προσπάθεια που κατέβαλε για τη διόρθωση της διπλωματικής.Οι παρατηρήσεις της και οι διορθώσεις της έκαναν αυτό το κείμενο πιο κατανοητό και ευανάγνωστο.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την στήριξη που μου παρείχε σε κάθε τομέα και για τόσα χρόνια ώστε να ολοκληρώσω τις σπουδές μου.

Η παρούσα διπλωματική γράφτηκε σε L^AT_EX₂_εμε την γραμματοσειρά kerkis,που αναπτύχθηκε από τμήμα Μαθηματικών του Πανεπιστημίου Αιγαίου.

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή	13
2	Αρμονικές: Θεωρία,Πηγές και Επιπτώσεις	15
2.1	Ορισμοί,βασικές έννοιες	15
2.1.1	Μη γραμμικά φορτία,παραμόρφωση κυματομορφών	15
2.1.2	Η ανάλυση Fourier σαν εργαλείο ορισμού και ανάλυσης ανώτερων αρμονικών	16
2.1.3	Ενδιάμεσες Αρμονικές	18
2.2	Ηλεκτρική ισχύς παρουσία ανώτερων αρμονικών	18
2.2.1	Ενεργός,άεργος και φαινόμενη ισχύς	19
2.3	Ηλεκτρικά μεγέθη για την περιγραφή αρμονικών παραμορφώσεων	21
2.3.1	Ολική αρμονική παραμόρφωση	21
2.3.2	Συντελεστής μερικής αρμονικής παραμόρφωσης	21
2.4	Ακολουθία φάσεων αρμονικών	22
2.4.1	Τριπλές αρμονικές	22
2.5	Πηγές αρμονικών τάσεων και ρευμάτων	26
2.5.1	Τροφοδοτικά	28
2.5.2	Τριφασικοί μετατροπείς	30
2.5.3	Αντιστροφείς	35
2.5.4	Πηγές αρμονικών από ηλεκτρικές εκκενώσεις	36
2.6	Επιπτώσεις	39
2.6.1	Παράλληλος Συντονισμός	39
2.6.2	Επιπτώσεις στις ηλεκτρικές μηχανές	40
2.6.3	Επιπτώσεις στους μετασχηματιστές	41
2.6.4	Επιπτώσεις στους πυκνωτές	41
2.6.5	Δυσλειτουργία διατάξεων προστασίας	41
2.6.6	Απώλειες δικτύου	42
2.6.7	Επιπτώσεις τηλεπικοινωνιών	42
2.6.8	Παρεμβολές στα συστήματα τηλεχειρισμών	42
2.6.9	Επιπτώσεις στους μετατροπείς	42
3	Αντιμετώπιση αρμονικών	43
3.1	Αντιμετώπιση αρμονικών στους μετατροπείς	43
3.1.1	Χρήση μετατροπένων πολλών παλμών	43
3.1.2	Αλλαγή του τρόπου παλμοδότησης	44
3.2	Φίλτρα	45
3.2.1	Παθητικά φίλτρα	45
3.2.2	Ενεργά φίλτρα	51

4 Μοντελοποίηση του Δικτύου	53
4.1 Μοντελοποίηση φορτίων	53
4.2 Μοντελοποίηση Μετασχηματιστών	55
4.2.1 Μετασχηματιστής υψηλής/μέσης	55
4.2.2 Μετασχηματιστές διανομής	56
4.3 Μοντελοποίηση γραμμών μεταφοράς	61
4.3.1 Ευθύ σύστημα	61
4.3.2 Ομοπολικό σύστημα	64
4.3.3 Τιμές αντιδράσεων και αντιστάσεων εναέριων γραμμών	65
5 Αποτελέσματα εξομοιώσεων	67
5.1 Τρόπος εξομοίωσης	67
5.1.1 Αριθμητική μέθοδος επίλυσης των διαφορικών εξισώσεων	67
5.2 Διαγράμματα εμπέδησης-συχνότητας,εμπέδησης-φάσης χωρίς πυκνωτή αν- τιστάθμισης	68
5.3 Διαγράμματα εμπέδησης-συχνότητας,εμπέδησης-φάσης με πυκνωτή αντι- στάθμισης	86
5.4 Εισαγωγή αρμονικών ρευμάτων	104
5.5 Αλληλεπίδραση φίλτρου δικτύου	104
6 Συμπεράσματα	109

Κατάλογος Σχημάτων

2.1 Παραμόρφωση και μη γραμμικά φορτία	17
2.2 (α') Ροή ισχύος στην θεμελιώδη αρμονική (β') Ροή ισχύος ανώτερων αρμονικών	17
2.3 Τριπλές αρμονικές στον ουδέτρο	23
2.4 Τριπλές αρμονικές σε μετασχηματιστές με σύνδεση αστέρα-τρίγωνο και τρίγωνο-τρίγωνο	25
2.5 Σχεδιάγραμμα ενός παλμοτροφοδοτικού	28
2.6 Κυματομορφή ρεύματος ενός παλμοτροφοδοτικού	29
2.7 Φάσμα πλάτους ρεύματος ενός παλμοτροφοδοτικού	29
2.8 p-φάσεων μετατροπείας μιας κατεύθυνσης	30
2.9 Συρμός τετραγωνικών παλμών	30
2.10 p-φάσεων μετατροπείας δύο κατευθύνσεων	31
2.11 Σύνθεση ενός τετραγωνικού παλμού ρεύματος από συνιστώσες μέχρι και 5ης αρμονικής	31
2.12 Εξαπαλμική γέφυρα	32
2.13 Γραφικές παραστάσεις βασικών ηλεκτρικών μεγεθών μιας εξαπαλμικής γέφυρας	33
2.14 (α') Διακύμανση της 5ης αρμονικής σε σχέση με τη γωνία έναυσης και γωνία μετάβασης (β') Διακύμανση της 7ης αρμονικής σε σχέση με τη γωνία έναυσης και γωνία μετάβασης	34
2.15 (α') Διακύμανση της 11ης αρμονικής σε σχέση με τη γωνία έναυσης και γωνία μετάβασης (β') Διακύμανση της 13ης αρμονικής σε σχέση με τη γωνία έναυσης και γωνία μετάβασης	34
2.16 Φάσμα πλάτους για (α') την διάρκεια τήξης του μετάλλου και (β') κατά την απομάκρυνση προσμίξεων	36
2.17 Κυματομορφή (α') ρεύματος και (β') φάσμα πλάτους	37
2.18 Σύνδεση λαμπτήρων φθορισμού. FL: λαμπτήρας φθορισμού· B: ballast· S: διακόπτης· L: μεταβλητή επαγωγή· C: πυκνωτής διόρθωσης συντελεστή ισχύος	37
2.19 Παλμογράφημα του ρεύματος ουδετέρου, τριών ομάδων των τριών λαμπτήρων ο κάθε ένας συνδεδεμένος σε αστέρα	38
2.20 Κύκλωμα παράλληλου συντονισμού	39
3.1 Διαμόρφωση παλμών PWM	44
3.2 Φίλτρα: πρώτης, δεύτερης, τρίτης τάξης και C type	46
3.3 Φίλτρο δεύτερης τάξης με απόσβεση	46
3.4 Φίλτρο μεγάλου συντελεστή ποιότητας	47
3.5 Αλληλεπίδραση φίλτρου δικτύου	47
3.6 Διάγραμμα συντονισμένων φίλτρων	50
3.7 Λειτουργία ενεργού φίλτρου	52

4.1 (α') Ωμικό-επαγωγικό φορτίο και (β') Ωμικό-χωρητικό φορτίο	54
4.2 Μετασχηματιστής υψηλής-μέσης	56
4.3 Μοντέλο μετασχηματιστή διανομής	57
4.4 Δοκιμή ανοιχτοκυκλώσεως	58
4.5 Δοκιμή βραχυκυκλώσεως	59
4.6 Δοκιμή βραχυκυκλώσεως με βάση τις αναλογίες πρωτεύοντος-δευτερεύοντος	59
4.7 Τυπική διάταξη γραμμής μέσης τάσης	62
4.8 Ισοδύναμο κύκλωμα ευθέως συστήματος για εναέρια γραμμή μεταφοράς . .	63
4.9 Ισοδύναμο κύκλωμα ομοπολικού συστήματος για εναέρια γραμμή μεταφοράς	64
5.1 Κόμβος 1	69
5.2 Κόμβος 2	70
5.3 Κόμβος 3	71
5.4 Κόμβος 4	72
5.5 Κόμβος 5	73
5.6 Κόμβος 6	74
5.7 Κόμβος 7	75
5.8 Κόμβος 8	76
5.9 Κόμβος 9	77
5.10 Κόμβος 10	78
5.11 Κόμβος 11	79
5.12 Κόμβος 12	80
5.13 Κόμβος 13	81
5.14 Κόμβος 14	82
5.15 Κόμβος 15	83
5.16 Όλα τα διαγράμματα εμπέδησης συχνότητας για όλους τους κόμβους	84
5.17 Όλα τα διαγράμματα φάσης συχνότητας για όλους τους κόμβους	85
5.18 Κόμβος 1	87
5.19 Κόμβος 2	88
5.20 Κόμβος 3	89
5.21 Κόμβος 4	90
5.22 Κόμβος 5	91
5.23 Κόμβος 6	92
5.24 Κόμβος 7	93
5.25 Κόμβος 8	94
5.26 Κόμβος 9	95
5.27 Κόμβος 10	96
5.28 Κόμβος 11	97
5.29 Κόμβος 12	98
5.30 Κόμβος 13	99
5.31 Κόμβος 14	100
5.32 Κόμβος 15	101
5.33 Όλα τα διαγράμματα εμπέδησης συχνότητας για όλους τους κόμβους	102
5.34 Όλα τα διαγράμματα φάσης συχνότητας για όλους τους κόμβους	103
5.35 Διαγράμμα εμπέδησης-συχνότητας, φάσης-συχνότητας παρουσία φίλτρου .	106
5.36 Διαγράμμα εμπέδησης-συχνότητας, φάσης-συχνότητας παρουσία φίλτρου και παρουσία πυκνωτή αντιστάθμισης	107

Κατάλογος Πινάκων

2.1	Ακολουθία αρμονικών	24
3.1	Οι περιπτώσεις οξύτητας συντονισμού του διαγράμματος 3.6	51
4.1	Τιμές για τα φορτία,για φόρτιση μετασχηματιστών στο 80% και ΣΙ:0,8 επαγωγικό.	55
4.2	Τυποποιημένες τιμές μετασχηματιστών για το ελληνικό δίκτυο διανομής. . .	60
4.3	Ωμική αντίσταση R'_1 και επαγωγική αντίδραση X'_1 ανά μονάδα μήκους του ευθέος συστήματος των εναέριων γραμμών μέσης και χαμηλής τάσεως της ΔΕΗ.	65
4.4	Λόγοι R_0/R_1 και X_0/X_1 εναέριων γραμμών	66
5.1	Στοιχεία εξομοίωσης	68
5.2	Στοιχεία εξομοίωσης	86
5.3	Πηγή αρμονικών ρευμάτων	104
5.4	Αρμονικό περιεχόμενο για αρμονικές πηγές ρεύματος σε κάθε κόμβο	104
5.5	Αρμονικό περιεχόμενο για αρμονικές πηγές ρεύματος σε οκτώ κόμβους . . .	105

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Από τις αρχές του αιώνα ο ηλεκτρισμός, ως κομμάτι των παραγωγικών δυνάμεων, έδωσε τεράστια ώθηση στην ανάπτυξη των παραγωγικών δυνάμεων. Η αλματώδης ανάπτυξη του 20ού αιώνα απαίτησε και αύξηση της ενεργειακής ζήτησης. Αυτό όμως οδηγεί με μαθηματική ακρίβεια σε μια κρίσιμη οικολογική κατάσταση. Ολοένα και περισσότεροι συμφωνούν ότι αν επιτευχθεί σε ορισμένες περιπτώσεις ή διατηρηθεί απεριορίστα σε άλλες ένας δείκτης οικονομικής μεγέθυνσης παρόμοιος με αυτόν του δευτέρου μισού του 20ου αιώνα στις ανεπτυγμένες χώρες, αυτό θα έχει καταστροφικές και ανεπανόρθωτες συνέπειες για το φυσικό περιβάλλον του πλανήτη, συμπεριλαμβανομένου και του ανθρώπινου είδους που αποτελεί μέρος του.

Μια έκθεση του World Resources Institute επισημαίνει ότι οι επτά περισσότερο ανεπτυγμένες χώρες του ΟΟΣΑ κατανάλωσαν το 1995 το 43% της παγκόσμιας εξαγωγής καυσίμων και ένα πολύ μεγάλο μέρος των δασικών προϊόντων. Στοιχεία του 1997 δείχνουν ότι οι ΗΠΑ μόνο κατανάλωσαν το ένα τέταρτο της παγκόσμιας παραγωγής πρωταρχικής ενέργειας (πετρέλαιο, φυσικό αέριο, άνθρακας, πυρηνική και υδροηλεκτρική ενέργεια).

Φυσικά δε θα αυξάνει μόνο σε τεράστιο βαθμό η ρύπανση, αλλά απλώς δε θα φτάνουν όλοι οι πόροι του πλανήτη για να καλυφθούν όλες οι καταναλωτικές ανάγκες.

Για το λόγο αυτό αμφισβητείται όλο και περισσότερο το παραγωγικό παράδειγμα που υποσχόταν ότι η οικονομική μεγέθυνση θα έφερνε την κοινωνική πρόοδο και την ανθρώπινη ευτυχία, παράδειγμα στο οποίο βασίστηκε τόσο η δυτική κουλτούρα όσο και ο υπαρκτός σοσιαλισμός. Σήμερα ολοένα και περισσότερο γίνεται συζήτηση για την αναγκαιότητα να τεθούν όρια σε αυτό τον τύπο της ανάπτυξης.

Μπροστά τις τόσες οικολογικές καταστροφές αλλά και στα φαινόμενα που οδηγούν σε ακραίες καταστάσεις τον πλανήτη (π.χ φαινόμενο θερμοκηπίου λόγω αύξησης των ρύπων) προτείνονται νέα μοντέλα ανάπτυξης. Τα οποία με τη σειρά τους δεν κάνουν τίποτε άλλο παρά να προτείνουν νέες πολιτικές που θα αυξήσουν τελικά τη ρύπανση.

Σε μια κοινωνία που σαν στόχο της έχει την μεγιστοποίηση του κέρδους, ποτέ δε θα μπορέσει να υιοθετήσει τις αρχές μιας ισόροπης και πραγματικά οικολογικής ανάπτυξης. Η επεκτατική της κουλτούρας - το περισσότερο είναι το καλύτερο - αντιπαράτίθεται μετωπικά με τη κουλτούρα της επάρκειας - το επαρκές είναι το καλύτερο -, του μέτρου, της εγκράτειας, της αυτοκυριαρχίας που χαρακτηρίζουν την οικολογική κοινωνία.

Στην παρούσα διπλωματική μελετήθηκε ένα από τα φαινόμενα που το επόμενο διάστημα θα ενταθούν, λόγω της ανάπτυξης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, αυτό της διείδυσης ανώτερων αρμονικών στα δίκτυα διανομής.

Κεφάλαιο 2

Αρμονικές: Θεωρία, Πηγές και Επιπτώσεις

Σε αυτό το κεφάλαιο θα διατυπωθούν οι βασικοί ορισμοί και τα ηλεκτρικά μεγέθη που απαιτούνται για την κατανόηση του φαινομένου της έγχυσης αρμονικών στο δίκτυο λόγω μη γραμμικών φορτίων. Θα αναφερθούν και θα αναλυθούν οι αιτίες που προκαλούν το φαινόμενο καθώς και η αύξηση του αρμονικού περιεχομένου στα δίκτυα μέσης τάσης λόγω της κατανεμημένης παραγωγής (Distributed Generation - D.G) που έχει ήδη ξεκινήσει να εφαρμόζεται και στη χώρα μας. Τέλος θα εξεταστούν οι επιπτώσεις των αρμονικών στο δίκτυο διανομής και στον εξοπλισμό.

2.1 Ορισμοί, βασικές έννοιες

2.1.1 Μη γραμμικά φορτία, παραμόρφωση κυματομορφών

Μια γεννήτρια ηλεκτρικού ρεύματος παράγει τάση η οποία μπορεί να περιγραφεί από μια ημιτονοειδή συνάρτηση του χρόνου $U(t) = A \cos(\omega t + \varphi)$, όπου:

A : η μέγιστη τιμή της τάσης ή πλάτος

ω : η κυκλική συχνότητα, $\omega = \frac{2\pi}{T}$

φ : είναι η φάση και t είναι ο χρόνος

Εάν αυτή η τάση εφαρμοστεί σε ένα γραμμικό φορτίο (R-L-C) τότε το ρεύμα που θα προκύψει θα είναι και πάλι ημιτονοειδές αλλά διαφορετικού πλάτους και φάσης. Στην περίπτωση όμως που η γεννήτρια τροφοδοτεί ένα μη γραμμικό φορτίο τότε το ρεύμα θα είναι και πάλι περιοδική συνάρτηση του χρόνου αλλά όχι ημιτονοειδής.

Η αρμονική παραμόρφωση λοιπόν προκαλείται από τα μη γραμμικά φορτία. Ως μη γραμμικό φορτίο νοείται εκείνο το φορτίο του οποίου το ρεύμα που το διαπερνά δεν είναι ανάλογο της εφαρμοζόμενης τάσης στα άκρα του. Η χαρακτηριστική I-V αυτού του φορτίου δεν είναι μια γραμμική συνάρτηση όπως π.χ η χαρακτηριστική ενός ωμικού φορτίου. Στο 2.1 βλέπουμε ότι το ρεύμα που διαπερνά τη μη-γραμμική αντίσταση δεν είναι ανάλογο της τάσης αλλά ακολουθεί τη χαρακτηριστική της μη-γραμμικής αντίστασης. Ενώ η τάση είναι ημιτονοειδής το ρεύμα είναι παραμορφωμένο (αν και συνεχίζει να είναι περιοδική συνάρτηση). Αυξάνοντας κατά ένα ποσοστό την τάση έχει σαν αποτέλεσμα μια μη αναλογική αύξηση του ρεύματος διαφοροποιημένου επίσης ως προς τη μορφή της συνάρτησης.

Ας υποθέσουμε τώρα ότι σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας μια γεννήτρια G τροφοδοτεί ένα γραμμικό ωμικό φορτίο, αντίστασης R_l , μέσω μια γραμμής μεταφοράς και ενός μετατροπέα ισχύος, όπως φαίνονται στο σχήμα 2.2. Η γεννήτρια τροφοδοτεί με ισχύ (P_{g1}) στη θεμελιώδη συχνότητα, η γραμμή μεταφοράς καταναλώνει ισχύ (P_{s1}) (ένα μικρό μέρος σε σχέση με αυτό που αποδίδει η γεννήτρια) και το μεγαλύτερο μέρος αποδίδεται τελικά στο φορτίο (P_{l1}). Παρόλα αυτά ένα μέρος της συνολικής ισχύος μετατρέπεται σε ισχύ άλλης συχνότητας στον μετατροπέα. Αν υποθέσουμε ότι η γεννήτρια παράγει μόνο τέλεια ημιτονοειδή τάση τότε όπως φαίνεται στο σχήμα 2.28' θα έχουμε το μετατροπέα να γίνεται αυτός πηγή ρευμάτων ανώτερων αρμονικών. Κάθε στοιχείο θα καταναλώνει ενέργεια από τα ρεύματα ανώτερων αρμονικών που θα το τροφοδοτεί ο μετατροπέας. Έτσι θα έχουμε κατανάλωση τόσο στη βασική αρμονική όσο και στις ανώτερες.

2.1.2 Η ανάλυση Fourier σαν εργαλείο ορισμού και ανάλυσης ανώτερων αρμονικών

Από τη θεωρία της ανάλυσης Fourier είναι γνωστό ότι κάθε περιοδική συνάρτηση μπορεί να εκφραστεί σαν ένα άθροισμα από ημιτονικές συναρτήσεις. Μια περιοδική αλλά παραμορφωμένη συνάρτηση, όπως αυτή του ρεύματος που περιγράφηκε πιο πάνω με κυκλική συχνότητα ω_0 , μπορεί να γραφεί σαν ένα άθροισμα ενός σταθερού όρου που καλείται **μέση τιμή** και μιας σειράς ημιτονικών όρων με συχνότητες ακέραια πολλαπλάσια της ω_0 . Κάθε ένας από αυτούς τους ημιτονικούς όρους, που χωριστά αποτελεί μια ημιτονική συνάρτηση πολλαπλάσιας συχνότητας από την ω_0 , ονομάζεται **αρμονική**. Κάθε ακέραιο πολλαπλάσιο της θεμελιώδους συχνότητας $f_0 = 2\pi\omega_0$ καλείται **αρμονική συχνότητα**.

Από μαθηματικής άποψης για μια συνάρτηση $f(t)$ που ισχύει ότι $f(t) = f(t + T)$ (δηλαδή είναι περιοδική), μπορούμε να γράψουμε:

$$f(t) = \frac{1}{2}\alpha_0 + \alpha_1 \cos(\omega_0 t) + \alpha_2 \cos(2\omega_0 t) + \dots + b_1 \sin(\omega_0 t) + b_2 \sin(2\omega_0 t) + \dots \Rightarrow$$

$$f(t) = \frac{1}{2}\alpha_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [\alpha_n \cos(n\omega_0 t) + b_n \sin(n\omega_0 t)] \quad (2.1)$$

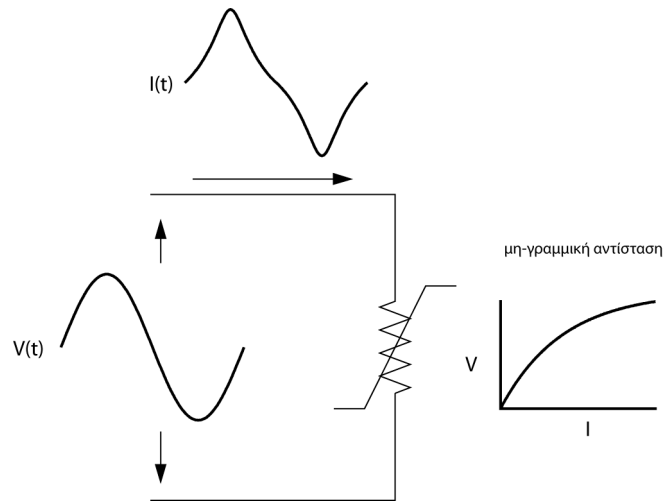
Ο όρος $\frac{1}{2}\alpha_0$ ονομάζεται μέση τιμή της σειράς και ο α_0 δίνεται από τη σχέση:

$$\alpha_0 = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) dt \quad (2.2)$$

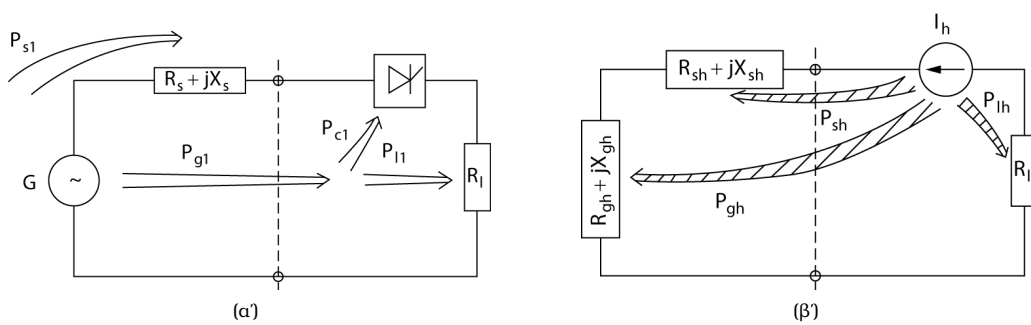
Οι όροι $\alpha_1 \cos(\omega_0 t)$ και $b_1 \sin(\omega_0 t)$ ονομάζονται θεμελιώδεις συνιστώσες της συνάρτησης και η συχνότητα ω_0 θεμελιώδης συχνότητα (που για το ελληνικό ηλεκτρικό δίκτυο ισοδυναμεί με $\omega_0 = 2\pi f = 2\pi 50 = 314 \text{ rad/sec}$, όπου $f = 50 \text{ Hz}$). Οι όροι $\alpha_n \cos(n\omega_0 t)$ και $b_n \sin(n\omega_0 t)$ για $n \geq 2$ ονομάζονται n -οστές αρμονικές συνιστώσες και δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$\alpha_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(n\omega_0 t) dt \quad n = 1, 2, \dots \quad (2.3)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin(n\omega_0 t) dt \quad n = 1, 2, \dots \quad (2.4)$$



Σχήμα 2.1: Παραμόρφωση και μη γραμμικά φορτία



Σχήμα 2.2: (α) Ροή ισχύος στην θεμελιώδη αρμονική (β) Ροή ισχύος ανώτερων αρμονικών

Επειδή ισχύει ότι $\alpha_n \cos(n\omega_0 t) + b_n \sin(n\omega_0 t) = C_n \cos(n\omega_0 t + \varphi_n)$ με $C_n = \sqrt{(\alpha_n^2) + (b_n^2)}$ να συμβολίζει το πλάτος και $\varphi_n = \arctan(\frac{\alpha_n}{b_n})$ τη φάση της n-οστής αρμονικής, η σειρά Fourier μπορεί να πάρει την ακόλουθη μορφή:

$$f(t) = \frac{1}{2}\alpha_0 + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cos(n\omega_0 t + \varphi_n) \quad (2.5)$$

Σύμφωνα με αυτήν την αναπαράσταση, η θεμελιώδης συνιστώσα εκφράζεται από τον όρο $C_1 \cos(\omega_0 t + \varphi_1)$, ενώ οι ανώτερες αρμονικές από τους όρους $C_n \cos(n\omega_0 t + \varphi_n)$. Αν παραστήσουμε το πλάτος C_n για κάθε συχνότητα θα έχουμε το φάσμα πλάτους της σειράς, ενώ αν παραστήσουμε το $|C_n^2|$ το φάσμα της ενέργειας.

Ακριβώς λόγω των παραπάνω ιδιοτήτων η ανάλυση Fourier χρησιμοποιείται ευρέως για προβλήματα αρμονικών. Πλέον ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας (όπως και οποιοδήποτε άλλο ηλεκτρικό κύκλωμα) μπορεί να αναλυθεί για κάθε μια αρμονική συνιστώσα χωριστά. Επιπλέον, η εύρεση της απόκρισης του συστήματος είναι πιο εύκολη εάν γίνει για κάθε συνιστώσα χωριστά από ότι για όλη την παραμορφωμένη κυματομορφή. Οι αποκρίσεις για κάθε μια συνιστώσα μπορούν να συνδυαστούν ώστε να αποτελέσουν μια νέα σειρά Fourier από την οποία μπορεί να υπολογιστεί η συνολική απόκριση. Συχνά, μονάχα το φάσμα πλάτους και τα πλάτη των ανώτερων αρμονικών μας απασχολούν και όχι η φάση.

Σε συνέχεια της μαθηματικής ανάλυσης, όταν μια συνάρτηση είναι άρτια (η κυματομορφή της είναι όμοια και κατά το θετικό και κατά τον αρνητικό κάθετο ημιάξονα του συστήματος αναφοράς, δηλ. έχει σαν άξονα συμμετρίας τον άξονα $y'y$) τότε η σειρά Fourier έχει μόνο **μονές** αρμονικές συνιστώσες¹.

2.1.3 Ενδιάμεσες Αρμονικές

Ενδιάμεσες ή αλλιώς **μη-χαρακτηριστικές** αρμονικές ονομάζονται εκείνες οι αρμονικές των οποίων η συχνότητα δεν είναι ακέραιο πολλαπλάσιο της θεμελιώδους. Όταν δύο ή περισσότερες ημιτονικές κυματομορφές με διαφορετικά πλάτη και σε συχνότητες που δεν είναι ακέραια πολλαπλάσια της θεμελιώδους συχνότητας συνδυαστούν δε σημαίνει ότι η νέα κυματομορφή είναι περιοδική συνάρτηση. Η συχνότητα μιας μη χαρακτηριστικής αρμονικής ονομάζεται **ενδιάμεση αρμονική συχνότητα**, $f_i = h_i f_0$ με $h_i \notin C$. Σε πρακτικό επίπεδο οι ενδιάμεσες αρμονικές βρίσκονται μεταξύ δύο χαρακτηριστικών αρμονικών.

Η βασική πηγή ενδιάμεσων αρμονικών είναι εκείνα τα μη γραμμικά φορτία που δύνανται να παράγουν παραμορφώσεις στην κυματομορφή του ρεύματος ή της τάσης σε ένα μεγάλο φάσμα συχνοτήτων. Παραδείγματα τέτοιων μη γραμμικών φορτίων είναι οι ηλεκτρικοί κλίβανοι, οι μετατροπείς PWM που χρησιμοποιούνται στα UPS, τα ενεργά φίλτρα κ.α.

2.2 Ηλεκτρική ισχύς παρουσία ανώτερων αρμονικών

Κατά τη μελέτη ηλεκτρικών μεγεθών υπό μη ημιτονοειδείς συνθήκες ιδιαίτερο αντικείμενο μελέτης αποτελούν τα φαινόμενα που σχετίζονται με την ισχύ. Οι γνωστές προσεγγίσεις για την ισχύ σε μόνιμη ημιτονοειδή κατάσταση δεν επαρκούν και είναι εσφαλμένες. Η παρουσία ανώτερων αρμονικών τάσεων και ρευμάτων μας αναγκάζει σε μια διαφορετική προσέγγιση της ηλεκτρικής ισχύος.

¹Υπάρχουν μη-γραμμικά φορτία τα οποία εγχύουν αρμονικές τόσο μονές όσο και διπλές, των οποίων οι κυματομορφές δεν είναι άρτιες συναρτήσεις. Τέτοια φορτία είναι οι μετατροπείς μισού κύματος καθώς και οι ηλεκτρικοί κλίβανοι, των οποίων το ηλεκτρικό τόξο έχει συνεχές φάσμα αρμονικών.

Η προσπάθεια διαμόρφωσης της θεωρίας ισχύος για κυκλώματα με μη ημιτονοειδείς κυματομορφές έχει ξεκινήσει εδώ και πολλές δεκαετίες. Η ύπαρξη του προβλήματος διαπιστώθηκε από πολύ νωρίς. Το 1892 ο Steinmetz κατέληξε στο συμπέρασμα ότι οι ανορθωτές με λυχνίες υδραργύρου παρουσιάζουν μεγαλύτερη φαινόμενη ισχύ σε σχέση με την ενεργό, χωρίς όμως να υπάρχει διαφορά φάσης μεταξύ τάσης και ρεύματος. Η παραμόρφωση της κυματομορφής του ρεύματος φαινόταν να ήταν η αιτία αυτής της διαφοράς. Ήταν επομένως προφανές ότι συσκευές που προκαλούν παραμόρφωση των κυματομορφών δεν μπορούσαν να περιγραφούν με όρους ισχύος που ορίστηκαν για συστήματα με ημιτονοειδείς κυματομορφές. Αρχικά, το θέμα του ορισμού των συνιστωσών της ισχύος παρουσία αρμονικών είχε τη μορφή ακαδημαϊκής κουβέντας μιας και στα τότε ηλεκτρικά συστήματα οι τάσεις και τα ρεύματα ήταν ημιτονοειδή. Πολλές αναλύσεις για το θέμα υιοθετήθηκαν εκείνη την εποχή χωρίς ιδιαίτερη αμφισβήτηση. Με την εμφάνιση όμως των ηλεκτρικών μετατροπέων ισχύος το φαινόμενο της έγχυσης ανώτερων αρμονικών έγινε και πάλι επίκαιρο.

2.2.1 Ενεργός, άεργος και φαινόμενη ισχύς

Η φαινόμενη ισχύς S ορίζεται ως το γινόμενο της ενεργού τιμής του ρεύματος και της τάσης. Αυτός ο ορισμός ισχύει τόσο για τη ΜΗΚ όσο και για τη μη-ΜΗΚ κατάσταση.

$$S = V_{rms} I_{rms} \quad (2.6)$$

Όμως στη ΜΗΚ κατάσταση η ενεργός τιμή της τάσης και του ρεύματος είναι:

$$V_{rms} = \frac{1}{\sqrt{2}} V_1 \quad I_{rms} = \frac{1}{\sqrt{2}} I_1 \quad (2.7)$$

με V_1 και I_1 να αποτελούν τα πλάτη της τάσης και του ρεύματος για συχνότητα ίση με τη θεμελιώδη. Με την παρουσία ανώτερων αρμονικών θα πρέπει να ξαναορίσουμε τις παραπάνω τιμές. Τώρα θα πρέπει να συμπεριλάβουμε τα πλάτη τάσεως ή ρεύματος για κάθε μια αρμονική. Έτσι θα έχουμε:

$$V_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{h_{max}} \left(\frac{1}{\sqrt{2}} V_h\right)^2} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{V_1^2 + V_2^2 + V_3^2 + \dots + V_n^2} \quad (2.8)$$

$$I_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{h_{max}} \left(\frac{1}{\sqrt{2}} I_h\right)^2} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2} \quad (2.9)$$

Όπως είναι φανερό κατά τη ΜΗΚ οι τιμές V_h και I_h είναι μηδέν εκτός από τις V_1 και I_1 που είναι τα πλάτη στη θεμελιώδη συχνότητα.

Η ενεργός ισχύς P αντιπροσωπεύει εκείνη την ισχύ που το φορτίο εκμεταλλεύεται ώστε να παραχθεί πραγματικό έργο, δηλ. τη μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε άλλη μορφή ενέργειας (θερμική, κινητική κ.ά). Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι πραγματικό έργο έχουμε όταν η τάση και το ρεύμα είναι συμφασικά μεγέθη. Πάντως επειδή η ενεργός ισχύς είναι ο ρυθμός με τον οποίο ένα φορτίο καταναλίσκει ενέργεια αυτή μπορεί να υπολογιστεί (και αυτό ισχύει πάντα ανεξαρτήτως αν βρισκόμαστε σε ΜΗΚ ή όχι), ως:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) i(t) dt \quad (2.10)$$

Για τη θεμελιώδη συχνότητα ισχύει προφανώς η παρακάτω σχέση:

$$P = \frac{V_1 I_1}{2} \cos(\phi_1) \quad (2.11)$$

Επειδή και πρακτικά η παραμόρφωση της τάσης σε ένα ΣΗΕ είναι μικρή, συνήθως κάτω του 5%, η σχέση (1.11) είναι μια καλή προσέγγιση ανεξάρτητα του πόσο παραμορφωμένο μπορεί να είναι το ρεύμα. *Αν θέλουμε παρόλα αυτά να είμαστε ακριβείς πρέπει να υπολογίσουμε την ενεργό ισχύ για κάθε μια αρμονική χωριστά, το άθροισμα των οποίων θα μας δώσει τη συνολική ενεργό ισχύ.*

Η άεργος ισχύς Q αντιπροσωπεύει το ρυθμό της ενέργειας που απαιτείται για να φορτιστούν χωρητικές και επαγωγικές αντιδράσεις σε ένα ΣΗΕ και έχει άμεση σχέση με τη συνολική αντίδραση ενός συστήματος. Είναι το πλάτος της αμφίδρομης συνιστώσας της στιγμιαίας ισχύος που ταλαντεύεται με συχνότητα $2n\omega$. Όπως και στον ορισμό της ενεργού ισχύος θα έχουμε:

$$Q = \sum_{h=1}^{h_{max}} V_h I_h \sin(\theta_h) \quad (2.12)$$

Κατά την παρουσία ανώτερων αρμονικών, εκτός από το συντελεστή ισχύος χρησιμοποιείται και ο συντελεστής ισχύος στην θεμελιώδη αρμονική (Displacement Power Factor, DPF), ο οποίος προκύπτει από την σχέση:

$$DPF = \frac{P_1}{S_1} = \cos \phi_1 \quad (2.13)$$

Θα ήταν τελείως λάθος αν θεωρούσαμε ότι η φαινόμενη ισχύς μπορεί να περιγραφεί πλήρως από τη σχέση:

$$S^2 = P^2 + Q^2 \quad (2.14)$$

όταν υπάρχουν παρούσες ανώτερες αρμονικές. Πριν ορίσαμε την άεργο ισχύ που προέρχεται από τις βασικές αρμονικές της τάσεως και της εντάσεως Q , αυτή είναι διαφορετική από την $Q_{\alpha\rho}$, και θα ισχύει:

$$Q_{\alpha\rho} = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (2.15)$$

Για το λόγο αυτό ορίζεται η ισχύς παραμορφώσεως D :

$$D = \sqrt{Q_{\alpha\rho}^2 - Q^2} \quad (2.16)$$

Έχουν υπάρξει κατά καιρούς πολλές θεωρητικές μελέτες που επεξηγούν με διαφορετικούς τρόπους την ισχύ σε τέτοιου είδους κυκλώματα. Η κάθε μια από τις αναλύσεις που διατυπώθηκαν τις τελευταίες δεκαετίες εφάρμοσε και ένα διαφορετικό τρόπο ομαδοποίησης των συνιστωσών της ισχύος ορίζοντας έτσι νέες ομαδοποιήσεις. Παρόλα αυτά οι διαφορετικές ως προς τον ορισμό των συνιστωσών ισχύος προσεγγίσεις μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν αυτές οι μέθοδοι που εκφράζουν σε συναρτήσεις στο πεδίο του χρόνου τις συνιστώσες ισχύος και στη δεύτερη αυτές που εκφράζουν τις συνιστώσες στο πεδίο της συχνότητας. Αυτές που ανήκουν στην πρώτη κατηγορία χωρίζουν το ρεύμα σε διαφορετικές συνιστώσες όπου κάθε μια είναι υπεύθυνη για διαφορετικό ενεργειακό φαινόμενο. Αυτού του τύπου οι προσεγγίσεις χρησιμεύουν για μετρήσεις και για τη σχεδίαση ενεργών φίλτρων. Αυτές που ανήκουν στη δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνουν αναλύσεις στο πεδίο της συχνότητας, προσφέρουν καλύτερη κατανόηση των ιδιοτήτων της ισχύος και χρησιμεύουν περισσότερο σε μεθόδους αντιστάθμισης με επαγωγούς ή πυκνωτές και για τη σχεδίαση παθητικών φίλτρων.

2.3 Ηλεκτρικά μεγέθη για την περιγραφή αρμονικών παραμορφώσεων

2.3.1 Ολική αρμονική παραμόρφωση

Η ολική αρμονική παραμόρφωση THD^2 είναι ένα μέτρο της αρμονικής παραμόρφωσης ενός σήματος και ορίζεται ως το πηλίκο όλων των αρμονικών συνιστωσών (π.χ rms τιμή ρεύματος ή τάσης) προς την τιμή της θεμελιώδους αρμονικής του σήματος.

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h>1}^{h_{max}} M_h^2}}{M_1} \quad (2.17)$$

όπου M_h είναι η rms τιμή της αρμονικής συνιστώσας h του σήματος M . Μπορούμε λοιπόν να πούμε ότι η ολική αρμονική παραμόρφωση μας δίνει το ποσοστό της αύξησης της ενεργού τιμής μιας ποσότητας σε σχέση με την θεμελιώδη. Αυτό στην πράξη μας δείχνει π.χ το ποσοστό της αύξησης των απωλειών (σε θερμότητα) όταν εφαρμόζουμε μια παραμορφωμένη τάση στα άκρα μιας αντίστασης. Θα έχουμε λοιπόν τις παρακάτω σχέσεις για το ποσοστό της ολικής παραμόρφωσης της τάσης και του ρεύματος αντίστοιχα:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} V_h^2}}{V_1} 100\% \quad (2.18)$$

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} I_h^2}}{I_1} 100\% \quad (2.19)$$

Συχνά για λόγους απλούστευσης (αν και θεωρητικά δεν είναι ορθό) χρησιμοποιείται η ονομαστική τιμή της τάσης ή του ρεύματος αντί της θεμελιώδους συνιστώσας. Η ανώτερη τάξη αρμονικών, h_{max} , η οποία λαμβάνεται υπόψη στον υπολογισμό του THD είναι η 40η κατά IEC ($f_{max} = 2kHz$) και η 50η κατά IEEE ($f_{max} = 2kHz$)³.

2.3.2 Συντελεστής μερικής αρμονικής παραμόρφωσης

Αποτελεί το μέτρο της αρμονικής παραμόρφωσης υψηλής τάξης $PWHD^4$ του ρεύματος και ορίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$PWHD = \sqrt{\sum_{h=14}^{h_{max}} h \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2} 100\% \quad (2.20)$$

όπου I_1 είναι η rms τιμή της θεμελιώδους συνιστώσας του ρεύματος (συχνότητας $f_1 = 50Hz$) και I_h η rms τιμή της αρμονικής συνιστώσας h (συχνότητας hf_1). Στον υπολογισμό του $PWHD$ λαμβάνονται υπόψη αρμονικές ανώτερης της 14ης. Ο συντελεστής αυτός χρησιμοποιείται στην αξιολόγηση της δυνατότητας σύνδεσης συσκευών ΧΤ και εξασφαλίζει το αρμονικό περιεχόμενο υψηλών συχνοτήτων της κυματομορφής του ρεύματος να είναι επαρκώς χαμηλό, ώστε να μην απαιτείται η εξέταση των επιμέρους αρμονικών.

²Total harmonic distortion

³Αρμονικές ανώτερης συχνότητας υπάρχουν στα δίκτυα αλλά δεν έχουν ακόμη καθιερωθεί μεθοδολογικές εξετάσεις και όρια.

⁴Partial Weighted Harmonic Distortion

2.4 Ακολουθία φάσεων αρμονικών

Κάθε τριφασικό μη-συμμετρικό σύστημα μπορεί να αναλυθεί σε 3 συμμετρικές συνιστώσες: θετικής ακολουθίας ($0^\circ, -120^\circ, 120^\circ$), αρνητικής ακολουθίας ($0^\circ, 120^\circ, -120^\circ$) και μηδενικής ακολουθίας ($0^\circ, 0^\circ, 0^\circ$). Η θετική ακολουθία (A-B-C) από μόνη της περιγράφει ένα σύνηθες συμμετρικό τριφασικό σύστημα (ένα σύστημα δηλαδή που οι κυματομορφές των τάσεων κάθε μιας φάσης είναι μετατοπισμένες κατά 120° μεταξύ τους). Οι ανώτερες αρμονικές δεν έχουν όμως την ίδια ακολουθία φάσεων με τη θεμελιώδη και αυτό μπορεί να προκαλέσει πολλά προβλήματα τόσο στο δίκτυο διανομής όσο και στον εξοπλισμό (αρμονικά ρεύματα στον ουδέτερο, ανάστροφες ροπές σε ηλεκτρικές μηχανές κτλ)

Σε ένα συμμετρικό τριφασικό σύστημα, η φασική ακολουθία της h -ιοστής αρμονικής μπορεί να βρεθεί πολλαπλασιάζοντας την τάξη της αρμονικής με τη θετική φασική ακολουθία $h \times (0^\circ, -120^\circ, 120^\circ)$. Για παράδειγμα για τη δεύτερη αρμονική θα έχουμε: $h = 2, h \times (0^\circ, -120^\circ, 120^\circ) = (0^\circ, 120^\circ, -120^\circ)$, δηλαδή είναι αρνητικής ακολουθίας. Όλες οι φασικές ακολουθίες των αρμονικών μπορούν να βρεθούν με αυτόν τον τρόπο.

Αυτό εξηγείται ως εξής: έστω ότι έχουμε δύο σήματα A και B ίδιας συχνότητας αλλά μετατοπισμένα κατά 120° . Η τρίτη αρμονική αυτών των σημάτων θα έχει την τριπλάσια συχνότητα, δηλαδή οι δύο κυματομορφές εναλλάσσονται 3 φορές πιο γρήγορα από ότι οι A και B. Αυτό δε σημαίνει ότι η φασική μετατόπιση έχει παραμείνει στις 120° , γιατί για την ίδια περίοδο του χρόνου θα έχουν 'συμπέσει' και οι δύο κυματομορφές (δηλ. μετατόπιση ίση με 0°).

Συμπερασματικά μπορούμε να πούμε ότι:

- Αρμονικές τάξης $h = 1, 4, 7, 10, 13 \dots, 3k + 1$ είναι γενικά θετικής ακολουθίας.
- Αρμονικές τάξης $h = 2, 5, 8, 11, 17 \dots, 3k - 1$ είναι αρνητικής ακολουθίας.
- Τριπλές αρμονικές ⁵ $h = 3, 6, 9 \dots$ είναι μηδενικής ακολουθίας.

Στον πίνακα 2.1 δίνονται ενδεικτικά οι ακολουθίες μέχρι την 20η αρμονική.

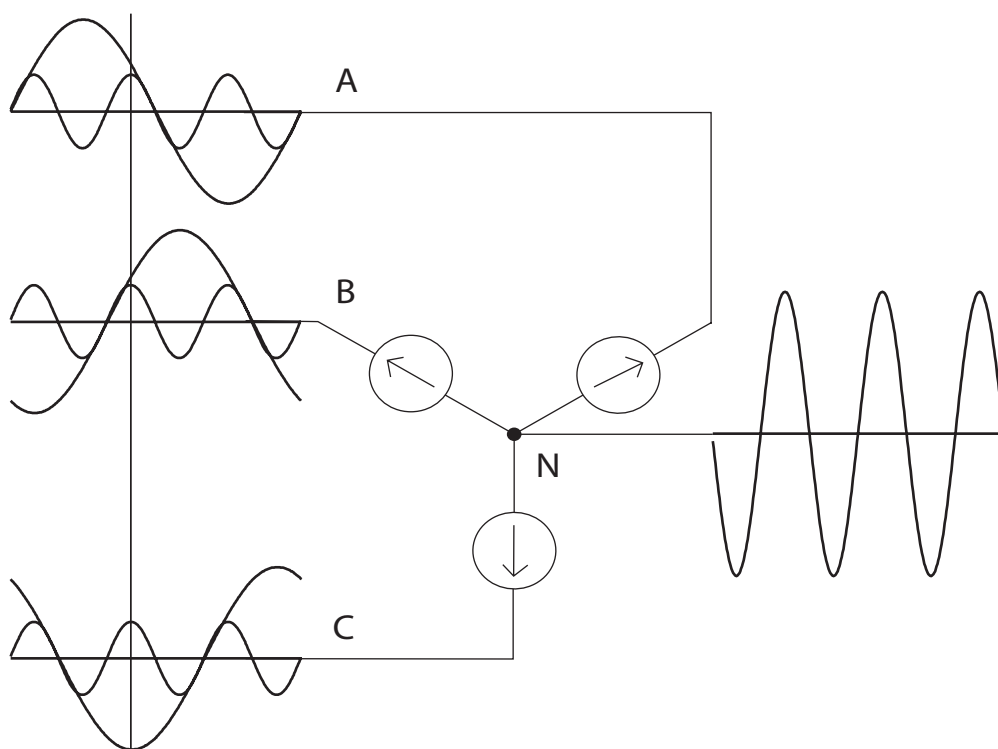
2.4.1 Τριπλές αρμονικές

Για αυτής της τάξης τις αρμονικές θα πρέπει να γίνει ιδιαίτερη αναφορά διότι η συμπεριφορά ενός ΣΗΕ σε αυτές είναι διαφορετική από τις υπόλοιπες. Οι τριπλές αρμονικές αποκτούν ενδιαφέρον σε γειωμένους ουδέτερους κόμβους σύνδεσης αστέρα όταν έχουμε ρεύμα στον ουδέτερο. Δύο τυπικά προβλήματα αυτής της κατάστασης είναι η υπερφόρτιση του ουδετέρου και οι τηλεπικοινωνιακές παρεμβολές. Έχει αναφερθεί δε δυσλειτουργία κάποιων συσκευών όταν η τάση του ουδετέρου είναι παραμορφωμένη από πτώσεις τάσης τριπλών αρμονικών.

Βλέποντας το σχήμα 2.3 και υποθέτοντας ότι έχουμε παρουσία τόσο τριπλών αρμονικών όσο και στη θεμελιώδη (σε συμμετρικό φορτίο και στις 3 φάσεις) παρατηρούμε ότι:

- προσθέτοντας το ρεύμα της θεμελιώδους στο κόμβο N το αποτέλεσμα όπως αναμενόταν είναι μηδέν.
- προσθέτοντας το ρεύμα μιας τριπλής αρμονικής το αποτέλεσμα είναι τρεις φορές μεγαλύτερη ροή ρεύματος στον ουδέτερο. Αυτό συμβαίνει γιατί το ρεύμα κάθε μιας τριπλής αρμονικής στο N συμπίπτει σε φάση και σε χρόνο με τις άλλες δύο.

⁵για τις επιπτώσεις των οποίων θα αναφερθούμε παρακάτω.

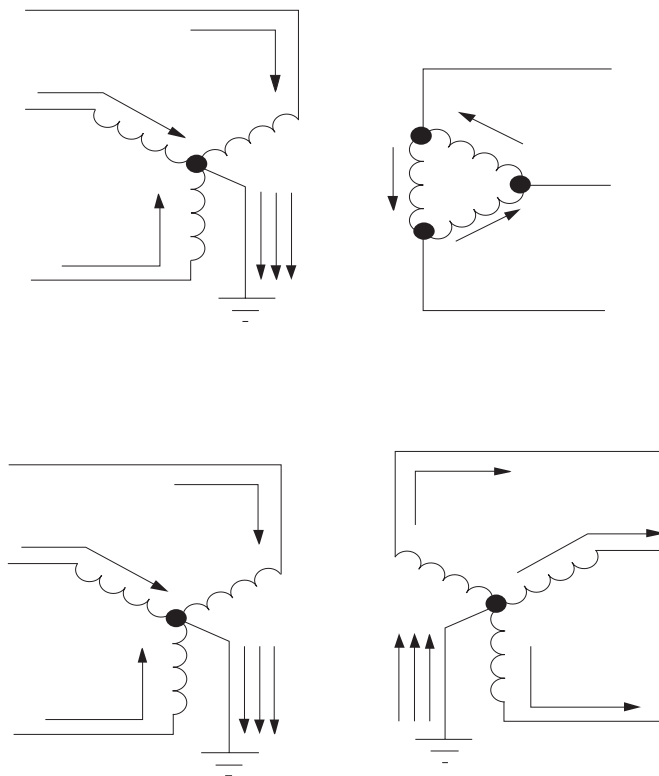


Σχήμα 2.3: Τριπλές αρμονικές στον ουδέτρο

Αρμονική τάξη	Συχνότητα (Hz)	Ακολουθία
1	50	+
2	100	-
3	150	0
4	200	+
5	250	-
6	300	0
7	350	+
8	400	-
9	450	0
10	500	+
11	550	-
12	600	0
13	650	+
14	700	-
15	750	0
16	800	+
17	850	-
18	900	0
19	950	+
20	1000	-

Πίνακας 2.1: Ακολουθία αρμονικών

Η σύνδεση λοιπόν των τυλιγμάτων των μετασχηματιστών παίζει σπουδαίο ρόλο κατά την παρουσία μη γραμμικών φορτίων. Κατά τη σύνδεση του μετασχηματιστή σε Dy οι τριπλές αρμονικές εισέρχονται και διαφεύγουν στον ουδέτερο, όμως στην πλευρά, όπου ο μετασχηματιστής είναι συνδεδεμένος κατά τρίγωνο, παραμένουν παγιδευμένες εντός των τυλιγμάτων και έτσι δεν εμφανίζονται πάνω στις γραμμές των φάσεων. Αντίθετα αν είχαμε σύνδεση Yy , θα παρατηρούσαμε ότι οι τριπλές αρμονικές εμφανίζονται στις γραμμές των φάσεων, σχήμα 2.4.



Σχήμα 2.4: Τριπλές αρμονικές σε μετασχηματιστές με σύνδεση αστέρα-τρίγωνο και τρίγωνο-τρίγωνο

2.5 Πηγές αρμονικών τάσεων και ρευμάτων

Οι πηγές των αρμονικών είναι τα μη γραμμικά φορτία. Σε αυτό το κεφάλαιο θα μελετήσουμε τα βασικότερα μη γραμμικά φορτία που εγχύουν ανώτερες αρμονικές στα δίκτυα διανομής. Μπορούμε να χωρίσουμε τα φορτία αυτά σε δύο μεγάλες κατηγορίες: στα τριφασικά μη γραμμικά φορτία και στα μονοφασικά μη γραμμικά φορτία. Τα πρώτα εμφανίζονται κατά κόρον στους βιομηχανικούς καταναλωτές ενώ τα δεύτερα στους οικιακούς. Τα περισσότερα μη γραμμικά φορτία είναι αυτά που περιλαμβάνουν ηλεκτρονικά στοιχεία ισχύος (διόδους, τρανζίστορ, θυρίστορ κτλ.), μαγνητικά κυκλώματα αλλά και φορτία που προκαλούν ηλεκτρικές εκκενώσεις (ηλεκτρικοί κλίβανοι, λάμπες φθορισμού). Τα τελευταία χρόνια, τα ηλεκτρονικά στοιχεία ισχύος είναι πολύ διαδεδομένα, βρίσκονται σχεδόν σε κάθε οικιακή ηλεκτρονική συσκευή (π.χ Η/Υ, τηλεοράσεις κτλ) αλλά και σε βιομηχανικά μηχανήματα (π.χ ρυθμιστές στροφών μηχανών) αυξάνοντας έτσι με διαφορετικό βάρος φυσικά το αρμονικό περιεχόμενο.

Το ζήτημα γίνεται αρκετά πολύπλοκο λόγω της απελευθέρωσης της αγοράς ενέργειας και της χρήσης κατανεμημένης παραγωγής μέσω φωτοβολταϊκών, αιολικών και άλλων συστημάτων. Οι ηλεκτρονικοί μετατροπείς, οι οποίοι αποτελούνται από ηλεκτρονικά ισχύος, βρίσκονται σε όλα αυτά τα συστήματα. Αποτελούν το κομμάτι εκείνο που είναι υπεύθυνο για τη διασύνδεση της ανανεώσιμης πηγής με το υπόλοιπο δίκτυο διανομής [8].

Ειδικά για τα φωτοβολταϊκά, που είναι πολύ διαδεδομένα στις μέρες μας, πρέπει να γίνει ιδιαίτερη μνεία για τις επιπτώσεις τους σε θέματα αρμονικών. Τα φωτοβολταϊκά διαφέρουν από τα άλλα συστήματα γιατί κυρίως μας ενδιαφέρει πλέον η ενσωμάτωσή τους σε κτίρια και όχι μόνο σε μικρά αυτόνομα συστήματα. Η τάξη μεγέθους εγκατεστημένη ισχύς για αυτά τα συστήματα είναι περίπου 200 Wp με 5 kWp εν αντιθέσει με τις άλλες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όπως αιολικά πάρκα, βιομάζα, υδροηλεκτρικοί σταθμοί κτλ όπου η εγκατεστημένη ισχύς είναι της τάξης των MW. Πιο συγκεκριμένα, μια πολύ διαδεδομένη εφαρμογή αυτών των συστημάτων είναι η χρήση τους σε μονοφασικά, οικιακά με μετατροπείς PWM, ψηφιακά ελεγχόμενο αντιστροφέα πηγής τάσης, χωρίς χρήση αποθήκευσης (μπαταρία) της παραγόμενης ισχύος που συνδέονται σε δίκτυο διανομής χαμηλής τάσης. Τέτοια συστήματα μπορεί να χρησιμοποιηθούν τις ώρες εκείνες της ημέρας όπου η ζήτηση, και αναλόγως και η χρέωση της ηλεκτρικής ενέργειας είναι σε υψηλά επίπεδα. Με την ενσωμάτωση τέτοιων συστημάτων στη δομή του κτιρίου δεν απαιτείται δαπάνη για την εξασφάλιση γης. Μπορούν μάλιστα να αντικατασταθούν κατασκευαστικά υλικά μετριάζοντας έτσι το κόστος εγκατάστασής τους.

Από τα παραπάνω είναι φανερό ότι η γνώση και η συμπεριφορά τέτοιων συστημάτων είναι πολύ σημαντική τόσο από άποψη οικονομοτεχνική όσο και από άποψη **εκτίμησης των συγκεντρωτικών επιπτώσεων από τη μεγάλης έκτασης ενσωμάτωση τέτοιων συστημάτων στα δίκτυα διανομής**. Η συμπεριφορά μιας μεγάλης έκτασης τέτοιων συστημάτων συνδεδεμένων στο δίκτυο διανομής είναι μια πολύπλοκη διαδικασία. Η χρήση υπολογιστικών πακέτων για την προσομοίωση της συμπεριφοράς τους είναι απαραίτητη με ταυτόχρονες μετρήσεις στο δίκτυο διανομής.

Παρακάτω φαίνονται συνοπτικά οι πιο βασικές πηγές ανώτερων αρμονικών:

- Ανορθωτικές διατάξεις
- Αντιστροφείς
- Ρυθμιστές ταχύτητας μηχανών (ASD)
- Παλμοτροφοδοτικά

- Τροφοδοτικά αδιαλείπτου παροχής (UPS)
- Στατικοί αντισταθμιστές
- Ηλεκτρικοί κλίβανοι και μηχανήματα ηλεκτροσυγκολλήσεων
- Λαμπτήρες φθορισμού
- Μαγνητικά κυκλώματα (π.χ μεταβατική λειτουργία μετασχηματιστών ισχύος)

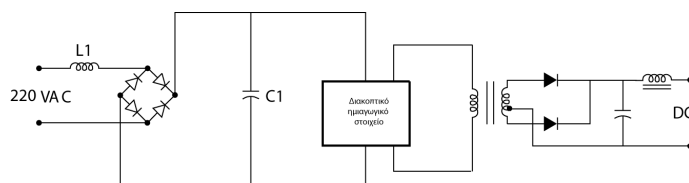
Παρακάτω θα μελετήσουμε τα βασικότερα από αυτά τα φορτία ως προς το επίπεδο των αρμονικών που παράγουν.

2.5.1 Τροφοδοτικά

Με την εξέλιξη των ηλεκτρονικών συσκευών που σήμερα βρίσκονται σε σχεδόν κάθε καταναλωτή, έχει αυξηθεί η χρήση ηλεκτρονικών ισχύος για την τροφοδοσία τους. Τα ηλεκτρονικά αυτά χρειάζονται συνεχή τάση η οποία προέρχεται από τα κατάλληλα τροφοδοτικά που χρησιμοποιούν συνήθως μια γέφυρα πλήρους ανόρθωσης. Το ποσοστό αυτών των φορτίων έχει σήμερα αυξηθεί δραματικά με τη χρήση των ηλεκτρονικών υπολογιστών.

Μπορούμε να χωρίσουμε σε δύο κατηγορίες αυτά τα τροφοδοτικά: στα γραμμικά τροφοδοτικά και στα παλμοτροφοδοτικά (SMPS). Τα πρώτα χρησιμοποιούν στο πρώτο στάδιο ένα μετασχηματιστή για να ρίξει την τάση στα επίπεδα που χρειάζεται, μετά ακολουθεί μια γέφυρα πλήρους ανόρθωσης (μετατρέπεται δηλαδή το εναλλασσόμενο ρεύμα σε συνεχές) και μετά εξομαλύνεται συνήθως από έναν πυκνωτή. Σε μια τέτοια διάταξη το επίπεδο των αρμονικών είναι πολύ χαμηλό διότι η επαγωγή των τυλιγμάτων του μετασχηματιστή εξομαλύνει το ρεύμα εισόδου στη γέφυρα. Τα τελευταία χρόνια όμως εγκαταλείπονται αυτού του τύπου τα τροφοδοτικά διότι έχουν χαμηλή απόδοση, μεγάλο βάρος και μέγεθος και απαιτούν μετασχηματιστή.

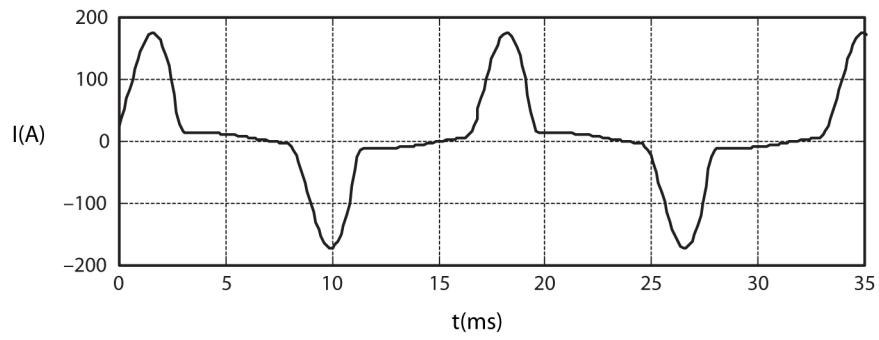
Τα παλμοτροφοδοτικά έχουν διαφορετική διάταξη και λειτουργία. Η ανορθωτική διάταξη εισόδου, συνήθως μια γέφυρα, ανορθώνει και εξομαλύνει (με χρήση ενός φίλτρου, έναν πυκνωτή) την τάση εισόδου η οποία οδηγείται σε ένα ημιαγωγικό διακοπτικό στοιχείο. Σε αυτό το σημείο, η συνεχής τάση κατατέμενεται και μετατρέπεται σε εναλλασσόμενη υψηλής διακοπτικής συχνότητας (μερικές δεκάδες ή εκατοντάδες kHz). Από τη στιγμή που η συνεχής τάση μετατρέπεται σε εναλλασσόμενη είναι πλέον εύκολος ο υποβιβασμός της, με τη βοήθεια μετασχηματιστών υψηλής συχνότητας και επομένως μικρού όγκου και βάρους. Έτσι η έξοδος της βαθμίδας αυτής είτε οδηγείται απευθείας στη μονάδα εξόδου, είτε τροφοδοτεί το πρωτεύον ενός μετασχηματιστή με εναλλασσόμενη τάση υψηλής συχνότητας και από το δευτερεύον του μετασχηματιστή οδηγείται στη μονάδα εξόδου. Στη βαθμίδα εξόδου η εναλλασσόμενη υψηλής συχνότητας τάση ανορθώνεται και φιλτράρεται, ώστε να προκύψει η επιθυμητή συνεχής τάση στην έξοδο του τροφοδοτικού [1]. Τα παλμοτροφοδοτικά αυτά μπορεί να βρεθούν σε κάθε υπολογιστή ή άλλη οικιακή συσκευή.⁶



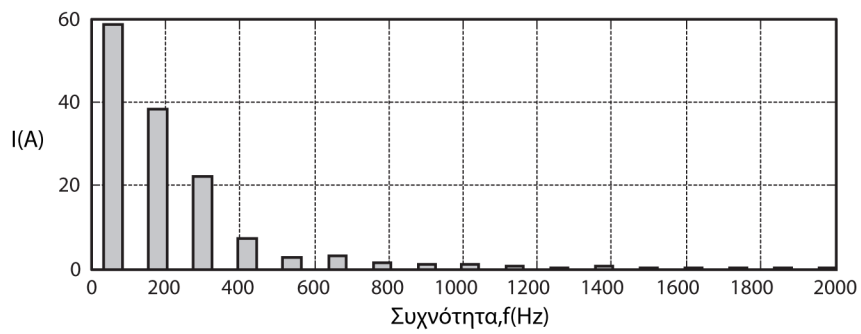
Σχήμα 2.5: Σχεδιάγραμμα ενός παλμοτροφοδοτικού

Επειδή δεν υπάρχει μια μεγάλη επαγωγή στην είσοδο ενός παλμοτροφοδοτικού, το ρεύμα εισόδου εισέρχεται σε μικρούς παλμούς και άρα εισάγει ανώτερες αρμονικές στο δίκτυο. Βέβαια τα ρεύματα αυτά είναι μικρά αλλά λόγω της μεγάλης χρήσης αυτών των τροφοδοτικών, σε μια περιοχή το αρμονικό περιεχόμενο αυξάνει σημαντικά. Ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό είναι το μεγάλο περιεχόμενο σε αρμονικές ρεύματος τρίτης τάξης. Από τη στιγμή που αυτού του τύπου αρμονικές προστίθενται στον ουδέτερο μπορεί να προκύψουν πολλά προβλήματα, ειδικά σε παλαιότερες ηλεκτρικές εγκαταστάσεις όπου ο ουδέτερος κόμβος είναι υπολογισμένος για μικρότερα μεγέθη ρευμάτων.

⁶τηλεοράσεις μέχρι και στα ηλεκτρονικά ballast λαμπτήρων φθορισμού,δες 2.5.4



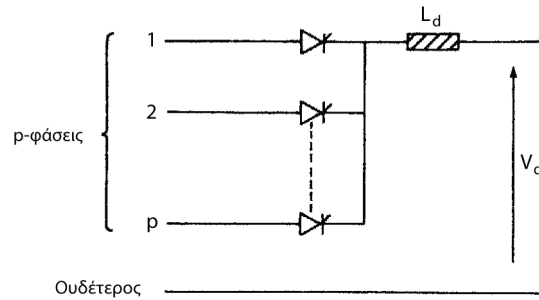
Σχήμα 2.6: Κυματομορφή ρεύματος ενός παλμοτροφοδοτικού



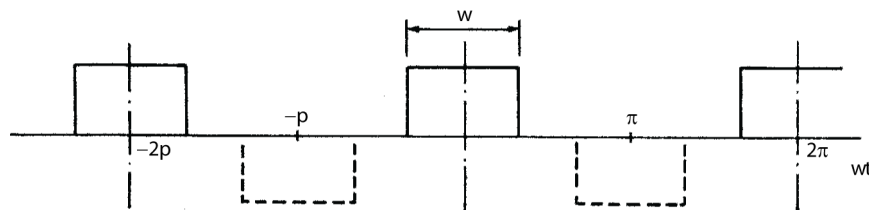
Σχήμα 2.7: Φάσμα πλάτους ρεύματος ενός παλμοτροφοδοτικού

2.5.2 Τριφασικοί μετατροπείς

Ένας μετατροπέας έχει συνήθως στην πλευρά συνεχούς ρεύματος μια μεγάλη επαγωγή έτσι ώστε το ρεύμα να είναι συνεχές και χωρίς κυμάτωση, άρα προς αυτήν την πλευρά ένας μετατροπέας συμπεριφέρεται σαν πηγή αρμονικών τάσεων. Στην εναλλασσόμενη πλευρά του μετατροπέα, όπου συνήθως έχουμε φίλτρα, η τάση δεν εμφανίζει κάποια κυμάτωση και έτσι ο ανορθωτής συμπεριφέρεται σαν πηγή αρμονικών ρευμάτων. Επιπλέον η πλευρά συνεχούς ρεύματος εμφανίζεται να έχει μεγαλύτερη εμπέδηση σε σχέση με την εναλλασσόμενη πλευρά. Σε κανονικές πλήρως συμμετρικές συνθήκες θα πρέπει τα ρεύματα να είναι απολύτως συμμετρικά και ίσα σε όλες τις φάσεις.



Σχήμα 2.8: p-φάσεων μετατροπέας μιας κατεύθυνσης



Σχήμα 2.9: Συρμός τετραγωνικών παλμών

Σε έναν ιδανικό p-φάσεων ανορθωτή μιας κατεύθυνσης θα έχουμε κατά την αγωγή της κάθε βαλβίδας, ροή ρεύματος σε μορφή παλμού για χρόνο $w = \frac{2\pi}{p}$ που θα επαναλαμβάνεται με τη συχνότητα της τριφασικής πηγής. Αν αναλύσουμε κατά Fourier αυτόν το συρμό των θετικών παλμών θα πάρουμε:

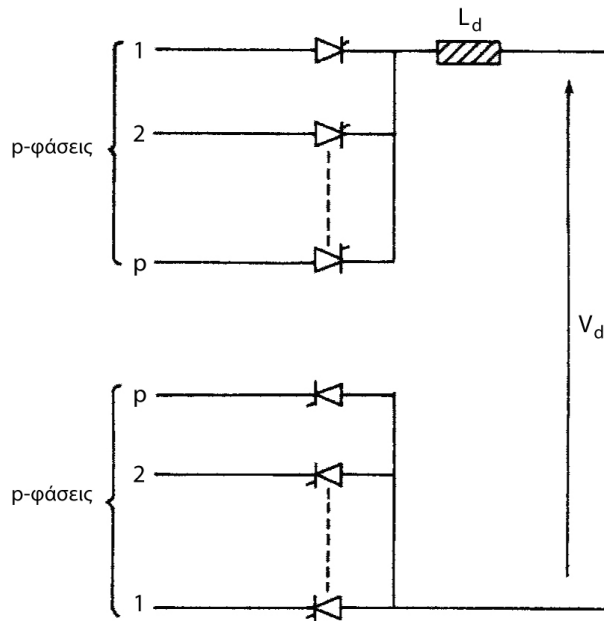
$$F_p = \frac{2}{\pi} \left(\frac{w}{4} + \sin\left(\frac{w}{2}\right) \cos(\omega t) + \frac{1}{2} \sin\left(\frac{2w}{2}\right) \cos(2\omega t) + \frac{1}{3} \sin\left(\frac{3w}{2}\right) \cos(3\omega t) + \dots \right) \quad (2.21)$$

Εάν προσθέσουμε και άλλη μια p-άδα βαλβίδων τότε θα πάρουμε και τους αρνητικούς παλμούς του ρεύματος (θα έχουμε δύο κατευθύνσεων μετατροπέα), για τους οποίους θα ισχύει ότι και πριν, άρα θα έχουμε:

$$F_n = \frac{2}{\pi} \left(-\frac{w}{4} + \sin\left(\frac{w}{2}\right) \cos(\omega t) - \frac{1}{2} \sin\left(\frac{2w}{2}\right) \cos(2\omega t) + \frac{1}{3} \sin\left(\frac{3w}{2}\right) \cos(3\omega t) - \dots \right) \quad (2.22)$$

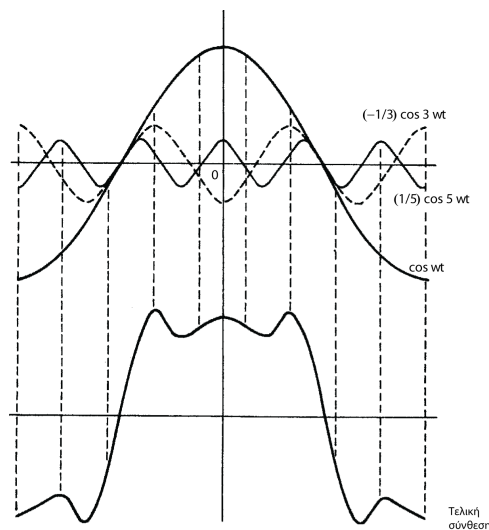
Τελικά αν συνδυάσουμε τις πιο πάνω εξισώσεις θα πάρουμε το γενικό τύπο:

$$F = F_p + F_n = \frac{4}{\pi} \left(\sin\left(\frac{w}{2}\right) \cos(\omega t) + \frac{1}{3} \sin\left(\frac{3w}{2}\right) \cos(3\omega t) + \frac{1}{5} \sin\left(\frac{5w}{2}\right) \cos(5\omega t) + \dots \right) \quad (2.23)$$



Σχήμα 2.10: p-φάσεων μετατροπές δύο κατευθύνσεων

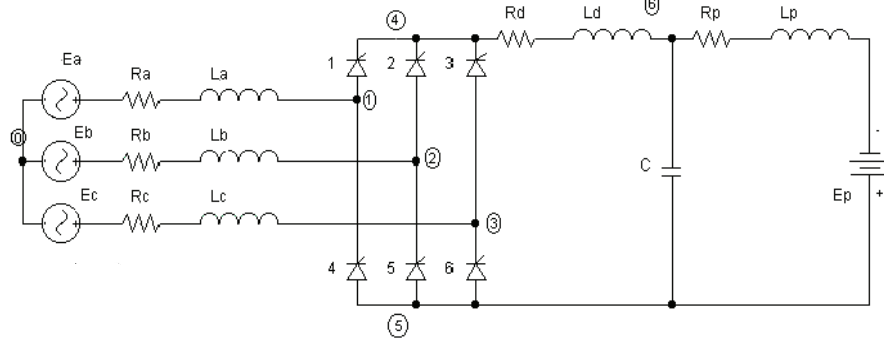
Έχουμε εξάγει πλέον τις βασικές γενικές εξισώσεις των μετατροπών p-παλμών. Στο σχήμα 2.11 φαίνεται ο τετραγωνικός παλμός σαν συνδυασμός των υπολοίπων αρμονικών, στο σχήμα για λόγους καθαρότητας έχει αναπαρασταθεί μέχρι και η 5η αρμονική συνιστώσα. [13]



Σχήμα 2.11: Σύνθεση ενός τετραγωνικού παλμού ρεύματος από συνιστώσες μέχρι και 5ης αρμονικής

Η εξαπαλμική γέφυρα

Η εξαπαλμική γέφυρα είναι η πιο ευρέως διαδεδομένη διάταξη στους τριφασικούς μετατροπείς, σχήμα 2.12. Γενικά είναι η βασικότερη διάταξη για τη σύνδεση ενός d.c φορτίου με το δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Η χρήση της είναι διαδεδομένη στις βιομηχανικές εφαρμογές για τον έλεγχο κινητήριων συστημάτων και θεωρείται ένας από τους



Σχήμα 2.12: Εξαπαλμική γέφυρα

βασικούς 'παραγωγούς' υψηλών αρμονικών από βιομηχανικά δίκτυα. Είναι λοιπόν πολύ σημαντικό να γίνει μια ενδελεχής ανάλυσή της ως προς το επίπεδο των αρμονικών που παράγει, ας μην ξεχνάμε ότι τα βασικά της στοιχεία, δηλαδή οι βαλβίδες (π.χ. θυρίστορ, IGBT) είναι μη-γραμμικά στοιχεία.

Αν αντικαταστήσουμε στην (2.23) $w = \frac{2\pi}{3}$ και εισάγοντας το συνεχές ρεύμα I_d της d.c. πλευράς θα έχουμε για το ρεύμα της φάσης a:

$$i_a = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d (\cos(\omega t) - \frac{1}{5} \cos(5\omega t) + \frac{1}{7} \cos(7\omega t) - \frac{1}{11} \cos(11\omega t) + \dots) \quad (2.24)$$

Από την (2.24) και από το σχήμα 2.13 μπορούμε να εξάγουμε τα παρακάτω συμπεράσματα:

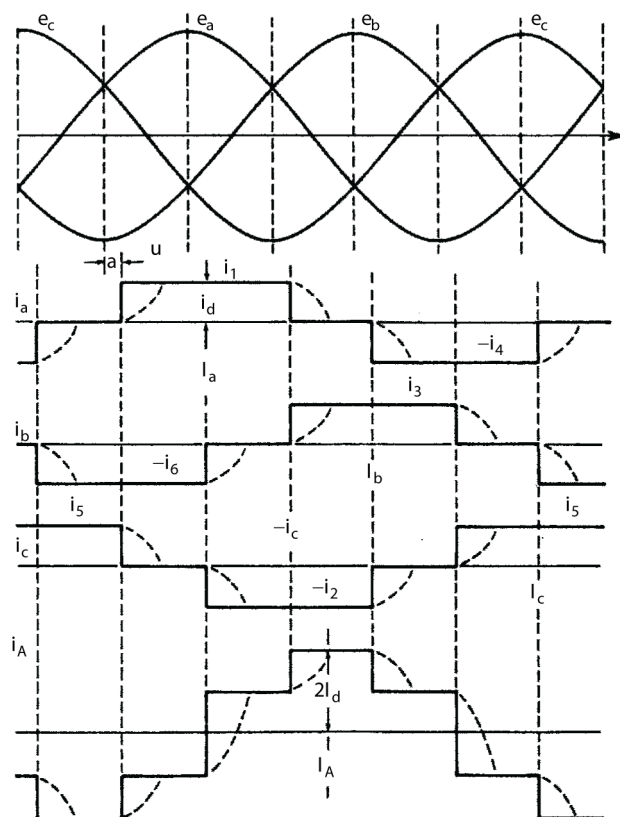
1. Απουσία τριπλών αρμονικών⁷
2. Οι αρμονικές έχουν τάξη $6k \pm 1$, με k να ανήκει στους ακεραίους.
3. Οι αρμονικές τάξης $6k + 1$ είναι θετικής ακολουθίας ενώ αυτές με τάξη $6k - 1$ είναι αρνητικής ακολουθίας.
4. Η r.m.s τιμή του ρεύματος στη θεμελιώδη συχνότητα είναι:

$$I_1 = (1/\sqrt{2})(2\sqrt{3}/\pi) I_d = (\sqrt{6}/\pi) I_d \quad (2.25)$$

5. Κάθε άλλη αρμονική n-τάξης έχει r.m.s τιμή ρεύματος:

$$I_n = \frac{I_1}{n} \quad (2.26)$$

⁷Σε επόμενο κεφάλαιο θα γίνει πιο λεπτομερής προσέγγιση αυτών των αρμονικών τάξεων.



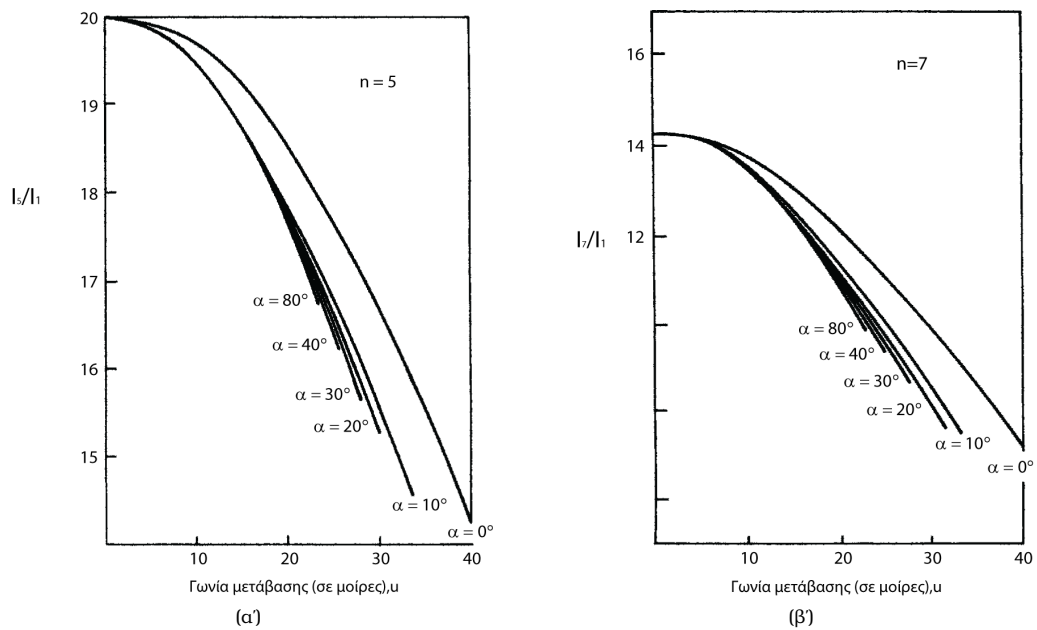
Σχήμα 2.13: Γραφικές παραστάσεις βασικών ηλεκτρικών μεγεθών μιας εξαπαλμικής γέφυρας

Εάν τώρα στον τριφασικό μετασχηματιστή αλλάξουμε τη διασύνδεση είτε του πρωτεύοντος είτε του δευτερεύοντος τυλίγματος π.χ σε αστέρα-τρίγωνο αντί αστέρα-αστέρα θα έχουμε διαφορετική συνάρτηση ρεύματος η οποία διαφέρει μόνο στο πρόσημο για αρμονικές τάξης $6k \pm 1$ με k περιττό αριθμό.

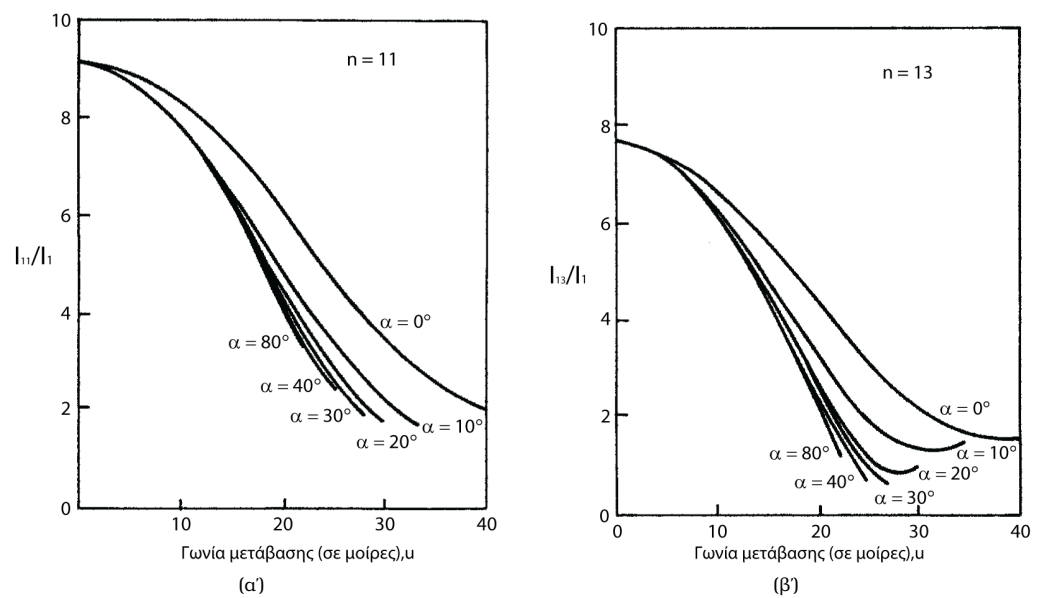
$$i_a = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d (\cos(\omega t) + \frac{1}{5} \cos(5\omega t) - \frac{1}{7} \cos(7\omega t) - \frac{1}{11} \cos(11\omega t) + \frac{1}{13} \cos(13\omega t) + \frac{1}{17} \cos(17\omega t) - \frac{1}{19} \cos(19\omega t) \dots) \quad (2.27)$$

Σε όλη την παραπάνω ανάλυση δεν έχουμε λάβει υπόψιν το φαινόμενο της μετάβασης από βαλβίδα σε βαλβίδα. Θεωρήσαμε ότι η μεταγωγή του ρεύματος είναι ακαριαία από κάθε κλάδο, πράγμα το οποίο δεν ισχύει. Οι κυματομορφές των ρευμάτων δεν είναι πλήρως τετραγωνικές και άρα έχουμε και αλλαγή στις ανώτερες τάξεις αρμονικών που εγχέονται. Στην προηγούμενη θεώρηση είχαμε παραλείψει τις ωμικές και επαγωγικές αντιδράσεις της πηγής, δηλ. του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή. Για την ακρίβεια, η ύπαρξη επαγωγικής αντίδρασης στην είσοδο της γέφυρας προκαλεί μια καθυστέρηση στη σβέση της κάθε βαλβίδας, δηλαδή ένα χρόνο όπου και δύο κλάδοι από την ίδια ομάδα άγουν ταυτόχρονα. Αυτός ο χρόνος σε μονάδες ηλεκτρικών γωνιών καλείται **γωνία μετάβασης u**. Παρακάτω φαίνονται τα διαγράμματα που συνδέουν τις γωνίες έναυσης των βαλβίδων και τις γωνίες μετάβασης με το ποσοστό έγχυσης ανώτερων αρμονικών.

Όπως μπορούμε να δούμε από τα διαγράμματα 2.14 - 2.15, η επαγωγική αντίδραση της πηγής φαίνεται να μειώνει το αρμονικό περιεχόμενο του ρεύματος, αυτό δε είναι



Σχήμα 2.14: (α') Διακύμανση της 5ης αρμονικής σε σχέση με τη γωνία έναυσης και γωνία μετάβασης (β') Διακύμανση της 7ης αρμονικής σε σχέση με τη γωνία έναυσης και γωνία μετάβασης



Σχήμα 2.15: (α') Διακύμανση της 11ης αρμονικής σε σχέση με τη γωνία έναυσης και γωνία μετάβασης (β') Διακύμανση της 13ης αρμονικής σε σχέση με τη γωνία έναυσης και γωνία μετάβασης

πιο ξεκάθαρο στην περίπτωση μιας μη-ελεγχόμενης γέφυρας. Με την αύξηση της γωνίας έναυσης οι παλμοί του ρεύματος επηρεάζονται όλο και λιγότερο από την επαγωγή της πηγής.

2.5.3 Αντιστροφείς

Οι αντιστροφείς είναι εκείνες οι συσκευές που μετατρέπουν το συνεχές ρεύμα σε εναλλασσόμενο. Χρησιμοποιούνται για τη σύνδεση φορτίων που παράγουν συνεχή τάση στην έξοδό τους. Τέτοια φορτία είναι τα φωτοβολταϊκά, οι κυψέλες υδρογόνου κ.ά. Με την εξάπλωση των ήπιων μορφών ενέργειας η χρήση τους είναι ευρεία. Επειδή και αυτές οι διατάξεις περιέχουν πολλά μη γραμμικά στοιχεία έχουν αυξήσει και την έγχυση αρμονικών στο δίκτυο.

Υπάρχουν πολλές διατάξεις αντιστροφέων, η εξαπαλμική γέφυρα που μελετήσαμε πριν αν λειτουργήσει με γωνίες έναυσης από 90° μέχρι 180° ουσιαστικά είναι ένας αντιστροφέας. Παρόλα αυτά λόγω των ειδικών απαιτήσεων των φωτοβολταϊκών υπάρχουν και άλλες διατάξεις.

2.5.4 Πηγές αρμονικών από ηλεκτρικές εκκενώσεις

Οι χαρακτηριστικές τάσεως ρεύματος ενός ηλεκτρικού τόξου είναι μη γραμμικές. Σε ένα ηλεκτρικό τόξο παρατηρούμε την τάση στα άκρα του τόξου να πέφτει, η τιμή της οποίας περιορίζεται μόνο από την εμπέδηση του συστήματος εκκένωσης. Οι βασικές πηγές αρμονικών που προέρχονται από ηλεκτρικές εκκενώσεις είναι οι ηλεκτρικοί κλίβανοι, οι λάμπες φθορισμού με μαγνητικά ballasts και οι ηλεκτροσυγκολλήσεις.

Ηλεκτρικοί κλίβανοι

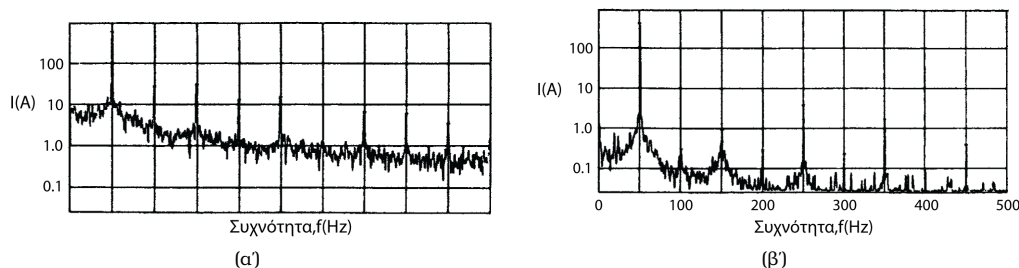
Στη βιομηχανία σιδήρου χρησιμοποιούνται μεγάλοι ηλεκτρικοί κλίβανοι για την τήξη των μετάλλων. Η λειτουργία τους στηρίζεται στη δημιουργία ενός ηλεκτρικού τόξου που λιώνει τα μέταλλα.

Η χαρακτηριστική τάσεως ρεύματος ενός ηλεκτρικού κλίβανου είναι εν μέρει τραπεζοειδής και το μέτρο της εξαρτάται από τη συνάρτηση μήκους του τόξου. Το επίπεδο των ρευμάτων, που κατά βάση εξαρτάται μόνο από τα καλώδια και το μετασχηματιστή που τον τροφοδοτούν, μπορεί να φτάσει μέχρι και πάνω από τα 60kA [11]. Κατά τη διάρκεια της δημιουργίας του τόξου αυτό φαίνεται σα σταθερή πηγή αρμονικών ρευμάτων. Η τάση στα άκρα των ηλεκτροδίων είναι ένα πιθανοτικό φαινόμενο που εξαρτάται από τις απότομες εναλλαγές του τόξου πάνω στο μέταλλο. Αυτό ακριβώς το φαινόμενο προκαλεί και μια διασπορά του φάσματος των αρμονικών. Για κάθε μια αρμονική που είναι παρούσα υπάρχει ένα φάσμα ενδιάμεσων αρμονικών γύρω της σε ένα εύρος 0.1 ως 30 Hz. Το φαινόμενο αυτό είναι πιο έντονο κατά την τήξη του μετάλλου όπου έχουμε συνεχή κίνηση του τόξου. Κατά τη διάρκεια της απομάκρυνσης άλλων προσμίξεων από το μέταλλο το τόξο έχει καλύτερη συμπεριφορά και δεν προκαλεί τόσες ενδιάμεσες αρμονικές. Όσο η διαδικασία προχωρά τόσο σταθεροποιείται το τόξο σχήμα 2.16. Για αυτούς τους λόγους είναι πολύ δύσκολο να προβλεφθούν αυτές οι αρμονικές, αν και μετρήσεις έχουν δείξει ότι στις χαμηλές συχνότητες επικρατούν οι ακέραιες τάξεις αρμονικών.

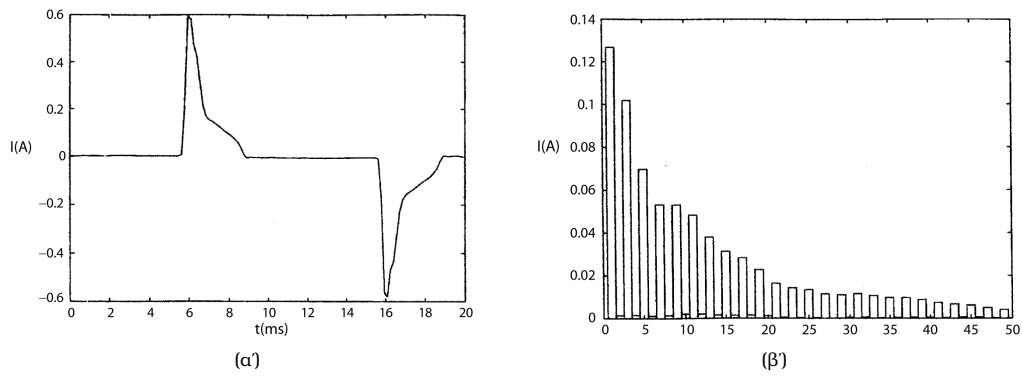
Λαμπτήρες φθορισμού

Ο φωτισμός μιας μη-βιομηχανικής εγκατάστασης (π.χ ένα εμπορικό κτίριο) αντιπροσωπεύει το 40 με 60 τοις εκατό της κατανάλωσής του. Σύμφωνα με το [11] ο φωτισμός με λάμπες φθορισμού αντιπροσωπεύει το 77% ενός κτιρίου ενώ μόνο το 14% ο φωτισμός επιτυγχάνεται με κοινές λάμπες πυρακτώσεως. Ας μην ξεχνάμε ότι η χρήση τους γίνεται και για οικονομικούς λόγους, λόγω μειωμένης κατανάλωσης.

Μια φωτοβόλα εκκένωση είναι μη γραμμική και προκαλεί αυξημένες μονές ανώτερες αρμονικές. Στο σχήμα 2.17 φαίνεται η κυματομορφή του ρεύματος και το φάσμα μιας

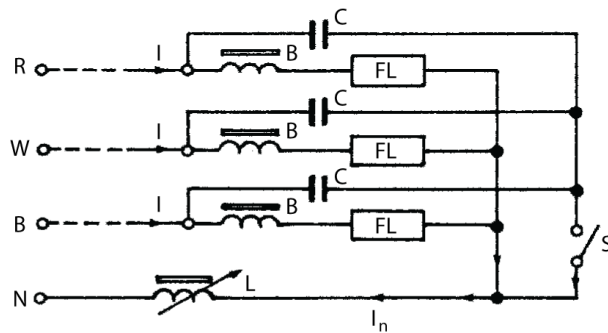


Σχήμα 2.16: Φάσμα πλάτους για (α') την διάρκεια τήξης του μετάλλου και (β') κατά την απομάκρυνση προσμίξεων



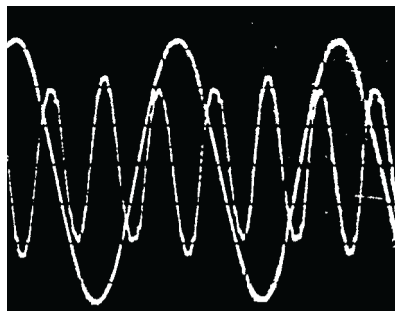
Σχήμα 2.17: Κυματομορφή (α') ρεύματος και (β')φάσμα πλάτους

υψηλής απόδοσης λάμπας.Οι λαμπτήρες φθορισμού για να λειτουργήσουν χρειάζονται ένα πηνίο να δημιουργήσει και να σταθεροποιήσει την απαιτούμενη εκκένωση.Αυτό είναι το λεγόμενο ballast,που μπορεί να είναι είτε μαγνητικό είτε ηλεκτρονικού τύπου.Ένα μαγνητικό ballast είναι φτιαγμένο από ένα μετασχηματιστή με σιδερένιο πυρήνα και έναν πυκνωτή.Ένα τέτοιο ballast μπορεί να οδηγήσει έναν με δύο λαμπτήρες.Λόγω των πρόσθετων απωλειών χρησιμοποιείται το ηλεκτρονικό τα τελευταία χρόνια.Τα μαγνητικά ballast δεν προσθέτουν στο αρμονικό περιεχόμενο αντίθετα με τα ηλεκτρονικά που συνδυάζονται με παλμοτροφοδοτικά.



Σχήμα 2.18: Σύνδεση λαμπτήρων φθορισμού. FL: λαμπτήρας φθορισμού·B:ballast· S:διακόπτης ·L:μεταβλητή επαγωγή·C:πυκνωτής διόρθωσης συντελεστή ισχύος

Στο σχήμα 2.18 φαίνεται μια σύνδεση σε τριφασικό δίκτυο ενός φορτίου που αποτελείται από λαμπτήρες φθορισμού.Έχει ενδιαφέρον να δούμε ότι το αρμονικό περιεχόμενο των λαμπτήρων είναι πλούσιο σε αρμονικές τρίτης τάξης,σχήμα 2.19.Κατά την παραπάνω σύνδεση τα αρμονικά ρεύματα τρίτης τάξης που περνούν μέσα από τον ουδέτερο μπορούν να ξεπεράσουν τα επιτρεπτά όρια.Για αυτό το λόγο είναι αναγκαίο να προσπαθούμε να ισοκατανέμουμε αυτά τα φορτία και στις 3 φάσεις σε σύνδεση τριγώνου και όχι αστέρα (αν και κατά τη σύνδεση σε τρίγωνο,επειδή δεν περνούν τα αρμονικά ρεύματα και στο δεύτερο τύλιγμα του μετασχηματιστή,δεν είναι αναγκαίο να ισοκατανείμουμε αυτά τα φορτία),ώστε να μειώσουμε τα αυξημένα αρμονικά ρεύματα 3ης τάξης διαμέσου του ουδέτερου.Όπου δεν είναι δυνατό θα πρέπει,για να μην προκύψουν συντονισμοί,να αποφεύγουμε την αντιστάθμιση μόνο σε ένα λαμπτήρα αλλά αντίθετα να κάνουμε συνολική αντιστάθμιση στο σύνολο μιας εγκατάστασης φωτισμού.



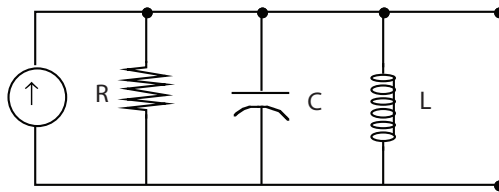
Σχήμα 2.19: Παλμογράφημα του ρεύματος ουδετέρου,τριών ομάδων των τριών λαμπτήρων ο κάθε ένας συνδεδεμένος σε αστέρα

2.6 Επιπτώσεις

Η ύπαρξη αρμονικών τάσεων και ρευμάτων μπορεί να προκαλέσει πολύ σοβαρά προβλήματα τόσο στον εξοπλισμό του ίδιου του δικτύου αλλά και των καταναλωτών όσο και στο ίδιο το δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Προβλήματα που φυσικά αντιμετωπίζονται, όπως θα δούμε παρακάτω είτε με την καλύτερη σχεδίαση του δικτύου και του εξοπλισμού είτε με την αντιμετώπισή τους αφού αυτά εμφανιστούν. Οι βασικές επιπτώσεις μπορούν να ομαδοποιηθούν στις παρακάτω:

- Πιθανότητα αύξησης των επιπέδων τάσης και ρεύματος πέραν του επιτρεπτού λόγω παράλληλων και εν σειρά συντονισμών στο δίκτυο.
- Μείωση της απόδοσης κατά την παραγωγή, διανομή και κατανάλωση της ηλεκτρικής ενέργειας.
- Γήρανση των μονώσεων του εξοπλισμού που επιφέρει δραστική μείωση του χρόνου ζωής του.
- Δυσλειτουργία του εξοπλισμού.

2.6.1 Παράλληλος Συντονισμός



Σχήμα 2.20: Κύκλωμα παράλληλου συντονισμού

Θεωρούμε το παράλληλο κύκλωμα του σχήματος 2.20 [10]. Η σύνθετη αγωγιμότητα εισόδου του κυκλώματος είναι:

$$Y(j\omega) = G(\omega) + j\left(C\omega - \frac{1}{L\omega}\right) \quad (2.28)$$

Η επιδεκτικότητα αυτή μηδενίζεται για γωνιακή συχνότητα:

$$\omega_n = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2.29)$$

Και άρα για αυτήν τη συχνότητα η σύνθετη αγωγιμότητα γίνεται ελάχιστη:

$$Y(j\omega_n) = G \quad (2.30)$$

Κατά αντιστοιχία η σύνθετη εμπίδηση του κυκλώματος για αυτήν τη συχνότητα θα γίνεται μέγιστη. Το ρεύμα που θα περνά από τον πυκνωτή και την επαγωγή θα είναι ίδιο αλλά με

αντίθετες γωνίες άρα θα αλληλοαναιρείται.Σαν είσοδο του κυκλώματος η πηγή θα βλέπει μια μικρή αντίσταση και έτσι το ρεύμα θα πάρει μεγάλες τιμές που με τη σειρά του θα έχει σαν αποτέλεσμα την εμφάνιση μιας υπέρτασης στα άκρα του παράλληλου συνδυασμού.

Σε ένα δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας το πιθανότερο σενάριο για να συμβεί συντονισμός είναι κατά τη σύνδεση ενός πυκνωτή αντιστάθμισης σε κάποιο κόμβο του δικτύου.Σε μια τέτοια περίπτωση έχουμε αλληλεπίδραση της επαγωγικής αντίδρασης του δικτύου με αυτήν του πυκνωτή και εμφάνιση τελικά υπέρτασης λόγω των αρμονικών ρευμάτων σε αυτό το σημείο.Ο συντονισμός αυτός συμβαίνει σε μια συχνότητα $f_r = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}}$ η οποία μπορεί να επιβάλλεται από μια αρμονική πηγή ρεύματος (π.χ κάποιον αντιστροφέα).

Εδώ θα πρέπει να αναφέρουμε το εξής:οι συντονισμοί που προκύπτουν μεταξύ του συστήματος και συστοιχιών πυκνωτών οφείλονται στην εξάρτηση της εμπέδησης του δικτύου από τη συχνότητα.Ως γνωστόν το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας,εκτός από τις συσκευές παραγωγής και κατανάλωσης,αποτελείται και από αντισταθμιστές,στοιχεία μεταφοράς και μετασχηματιστές.Για να μελετήσουμε τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα κατά τη λειτουργία όλων αυτών των στοιχείων,τα μοντελοποιούμε σε βασικά κυκλώματα R-L-C.Επομένως,τα μιγαδικά μέρη αυτών των στοιχείων εξαρτώνται από τη συχνότητα των τάσεων και των ρευμάτων που υπάρχουν στο δίκτυο,άρα η κυκλωματική τους συμπεριφορά αλλάζει με τη συχνότητα.

Αν είχαμε μοντελοποιήσει ένα δίκτυο θα βλέπαμε ότι η συμπεριφορά του είναι διαφορετική σε ένα φάσμα συχνοτήτων.Για κάθε κόμβο του δικτύου η ισοδύναμη εμπέδησή του θα είναι διαφορετική για κάθε συχνότητα.**Ως ισοδύναμη εμπέδηση σε ένα σημείο ορίζουμε την κατά Thevenin εμπέδηση που προκύπτει εάν απλοποιήσουμε όλες τις μιγαδικές αντιστάσεις των διατάξεων του δικτύου και καταλήξουμε σε μία.**

Κάθε μελέτη διείσδυσης αρμονικών τάσεων και ρευμάτων προϋποθέτει να γνωρίζουμε τη συμπεριφορά του δικτύου συναρτήσει της συχνότητας.Με αυτόν τον τρόπο μπορούμε να προβλέψουμε τυχόν συντονισμούς μεταξύ του δικτύου(για το οποίο γνωρίζουμε την κατά Thevenin σύνθετη εμπέδηση) και των φίλτρων ή πυκνωτών αντιστάθμισης.

2.6.2 Επιπτώσεις στις ηλεκτρικές μηχανές

Τα αρμονικά ρεύματα στις μηχανές,επαγωγικές και σύγχρονες,προκαλούν επιπρόσθετες απώλειες και θέρμανση.Αυτές οι επιδράσεις οφείλονται κατά κύριο λόγο σε αρμονικές κατώτερων τάξεων,οι οποίες μπορεί να έχουν και μεγάλα μεγέθη.Η χρήση των κινητήρων σε υψηλές τιμές θερμοκρασίας επιβαρύνει τη μόνωσή τους και μειώνει το χρόνο ζωής τους.

Είναι δε πιθανόν,ειδικά για κάποιες μηχανές που τροφοδοτούνται από drives,να έχουμε και ακουστικούς θορύβους κατά τη λειτουργία τους.Για την αποφυγή θέρμανσης των κινητήρων χρησιμοποιούνται τυλίγματα αποσβέσεως χαμηλής αντίστασης τα οποία προστατεύουν το δρομέα από υπερθέρμανση.

Οι αρμονικές σε επαγωγικούς κινητήρες μειώνουν την ονομαστική τους ροπή και ταχύτητα.Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ανάλογα με την ακολουθία μιας ανώτερης αρμονικής μπορεί να εμφανιστούν και ροπές αντίθετης φοράς από την επιθυμητή.Παρουσία ανώτερων αρμονικών οι κινητήρες απαιτούν περισσότερο χρόνο για να φτάσουν στην ονομαστική τους τιμή.

Τέλος,αν συμβεί πτώση τάσης λόγω αρμονικών,τότε πολλά φορτία σταθερής ισχύος,όπως οι ηλεκτρικές μηχανές,θα λειτουργούν με αυξημένο ρεύμα.Κάτι τέτοιο θα επιφέρει πολλά προβλήματα π.χ στις μονώσεις,αύξηση απωλειών σάτη και δρομέα κ.α.

2.6.3 Επιπτώσεις στους μετασχηματιστές

Η παρουσία αρμονικών επιβαρύνει τη λειτουργία των μετασχηματιστών. Η ύπαρξη αρμονικών σε ένα μετασχηματιστή γίνεται αντιληπτή από την αύξηση του θορύβου στις ακουστικές συχνότητες που παράγεται κατά τη λειτουργία του. Ο θόρυβος δεν μπορεί να θεωρηθεί ως σοβαρό πρόβλημα εν αντιθέσει η υπερθέρμανσή του είναι πιο σημαντική.

Για τις απώλειες των τυλιγμάτων ισχύει η προφανής σχέση $I^2 R$, πρόκειται για τις απώλειες χαλκού. Προφανώς μια αύξηση του αρμονικού περιεχομένου θα επιφέρει και αύξηση αυτών των απωλειών. Ειδικότερα στις ουδέτερες συνδέσεις όταν ο μετασχηματιστής είναι συνδεδεμένος με μονοφασικά φορτία αυξημένων τριπλών αρμονικών. Αύξηση της θερμοκρασίας όμως θα συμβεί και εξαιτίας των αυξημένων απωλειών του πυρήνα λόγω διαφορετικής “συμπεριφοράς” των δινορρευμάτων παρουσία ανώτερων αρμονικών.

Τα ρεύματα τριπλών αρμονικών, επειδή είναι μηδενικής ακολουθίας, εγκλωβίζονται στην πλευρά του τριγώνου. Δεν περνούν στους αγωγούς των φάσεων και ως εκ τούτου δε μπορούν να μετρηθούν, δίνοντάς μας μια λάθος εικόνα της τυχόν υπερθέρμανσης, αλλά και δε γίνονται αντιληπτές από τις διατάξεις προστασίας.

2.6.4 Επιπτώσεις στους πυκνωτές

Η ύπαρξη αρμονικών τάσεων θα προκαλέσει μια αύξηση απωλειών σε ένα πυκνωτή κατά την ποσότητα:

$$\sum_{h=2}^{\infty} C \tan \delta \omega_h V_h^2 \quad (2.31)$$

όπου:

- C : η χωρητικότητα του πυκνωτή
- $\tan \delta$: ο συντελεστής απωλειών
- ω_h : η αρμονική συχνότητα
- V_h : η ενεργός τιμή της συχνότητας τάξεως h

Η διηλεκτρική καταπόνηση είναι ανάλογη προς τη μέγιστη τάση που μπορεί είτε να αυξηθεί είτε να μειωθεί από τις αρμονικές τάσεις. Επίσης η συνολική άεργος ισχύς που περιλαμβάνει τη θεμελιώδη και τις αρμονικές, δεν μπορεί να ξεπεράσει την ονομαστική άεργο ισχύ του πυκνωτή:

$$\sum_{h=1}^{\infty} \omega_h C V_h^2 \leq Q_c \quad (2.32)$$

2.6.5 Δυσλειτουργία διατάξεων προστασίας

Υπάρχουν διατάξεις προστασίας που στηρίζουν τη λειτουργία τους στη μέτρηση του ρεύματος μιας φάσης. Αυτά τα όργανα συνήθως δε μετράνε την πραγματική τιμή του ρεύματος αλλά την ενεργό τιμή της θεμελιώδους (μέσω έμμεσης μέτρησης). Συγκεκριμένα μετράνε τη μέγιστη τιμή του ρεύματος (ή της τάσης) και ύστερα γίνεται η διαίρεση με $\sqrt{2}$. Αυτή η μέθοδος δε δίνει σωστά αποτελέσματα όταν υπάρχει αυξημένο αρμονικό περιεχόμενο [5].

2.6.6 Απώλειες δικτύου

Τα αρμονικά ρεύματα οδεύουν, μέσω των δικτύων διανομής και μεταφοράς, από τις γεννήτριες προς τις πηγές αυτών. Σε όλη αυτή τη διαδρομή θα προκαλέσουν αυξημένες απώλειες μεταφοράς στα δίκτυα. Μάλιστα τα υψίσυχνα ρεύματα βλέπουν, λόγω επιδερμικού φαινομένου, αυξημένη την ωμική αντίσταση των αγωγών οπότε η κατάσταση επιδεινώνεται.

Όταν αναφερόμαστε σε αύξηση των απωλειών ισχύος μεταφοράς, θα πρέπει να έχουμε υπόψιν ότι τα μεγέθη ισχύος είναι τεράστια (κάτι αντίστοιχο με τις απώλειες Corona). Μια μεταβολή των απωλειών κατά μια ποσοστιαία μονάδα, μεταφράζεται σε αρκετά MW ισχύος. Το κόστος αυτών των απωλειών είναι πολύ μεγάλο. Αυτή η αύξηση επιφέρει τόσο δυσμενέστερες επιπτώσεις στα οικονομικά μεγέθη όσο και αύξηση της επιβάρυνσης του περιβάλλοντος.

2.6.7 Επιπτώσεις τηλεπικοινωνιών

Μια από τις πιο σημαντικές επιδράσεις των ανώτερων αρμονικών είναι στον τομέα των ενσύρματων επικοινωνιών. Οι τηλεφωνικές παρεμβολές στα κανάλια μετάδοσης δεδομένων είναι πολύ συχνό φαινόμενο και προκαλούν θόρυβο στις ακουστικές συχνότητες [3].

2.6.8 Παρεμβολές στα συστήματα τηλεχειρισμών

Μερικές ηλεκτρικές εταιρίες πουλάνε ηλεκτρική ενέργεια σε χαμηλές τιμές για φορτία μακριά από την αιχμή και ελέγχουν τις ώρες κατά τη διάρκεια των οποίων τέτοια φορτία μπορούν να συνδεθούν (π.χ νυχτερινό τιμολόγιο). Αυτή η μεταφορά γίνεται με σήματα ακουστικής συχνότητας στην περιοχή $290 - 1650\text{ Hz}$ από υποσταθμούς μέσω κυκλωμάτων διανομής που ελέγχουν τις επαφές των καταναλωτών.

Οι συσκευές λήψεως για τα σήματα ελέγχου συντονίζονται σε μια πλατιά περιοχή ισχύος και μπορούν να δεχτούν αρμονικές από μετατροπείς μεγάλης ισχύος, που μπορούν να προκαλέσουν ανεπιθύμητη λειτουργία των επαφών ή και να εμποδίσουν τις επιθυμητές συνδέσεις [6].

2.6.9 Επιπτώσεις στους μετατροπείς

Παρόλο που όπως είδαμε ένας ηλεκτρονικός μετατροπέας παράγει ανώτερες αρμονικές, και είναι μια από τις βασικότερες πηγές αρμονικών, επηρεάζεται και από αυτές. Οι κοινοί ανορθωτές που χρησιμοποιούνται για τη σύνδεση ηλεκτρονικών συσκευών ισχύος με το δίκτυο μπορεί να υπερβούν τις μέγιστες τιμές THD και μεμονωμένων αρμονικών για τις οποίες είναι κατασκευασμένοι. Οι μετατροπείς επηρεάζονται με τους παρακάτω τρόπους:

- το φίλτρο πυκνωτή στην a.c πλευρά καταπονείται έντονα λόγω αρμονικών.
- οι απώλειες στις διόδους της ανορθωτικής γέφυρας είναι μεγαλύτερες, λόγω της μεγαλύτερης πτώσης τάσης στα άκρα των διόδων.
- τα EMI-ElectroMagnetic Interference στοιχεία πρέπει να σχεδιάζονται για μεγαλύτερους παλμούς ρεύματος
- αν στην είσοδο χρησιμοποιείται μετασχηματιστής των 50 Hz θα πρέπει να είναι υπερπροδιαγεγραμμένος.

Κεφάλαιο 3

Αντιμετώπιση αρμονικών

Υπάρχουν δύο τρόποι για την αντιμετώπιση των αρμονικών. Ο πρώτος προλαμβάνει την εμφάνισή τους, ενώ ο δεύτερος δρα κατασταλτικά. Στον πρώτο τρόπο αλλάζουμε ουσιαστικά τον τρόπο λειτουργίας ή τις διατάξεις των συσκευών που παράγουν αρμονικές. Αντίθετα, όταν σε ένα σύστημα υπάρχουν αρμονικές μπορούν να τοποθετηθούν παθητικά ή ενεργητικά φίλτρα, καταστέλλοντάς τις.

3.1 Αντιμετώπιση αρμονικών στους μετατροπείς

Μπορούμε να πούμε ότι σε ένα μετατροπέα εξαλείφουμε τις αρμονικές τόσο με φίλτρα στην έξοδό του όσο και με αλλαγή του τρόπου λειτουργίας. Όσο πιο μικρές είναι οι συχνότητες που πρέπει να εξαλείψουμε τόσο πιο μεγάλα γίνονται τα κυκλωματικά στοιχεία του φίλτρου, που συνήθως βρίσκεται στην έξοδο του μετατροπέα. Επομένως, αν οι αρμονικές μικρής τάξης της τάσης εξόδου μπορούν να μειωθούν ή να εξαλειφθούν με άλλα μέσα, το μέγεθος και το κόστος του φίλτρου μπορεί να μειωθεί [4].

Γενικότερα, η μέθοδος της εξάλειψης των αρμονικών στον τελικό καταναλωτή με διάφορα φίλτρα ή με άλλους τρόπους χρησιμοποιείται αρκετά συχνά.

3.1.1 Χρήση μετατροπένων πολλών παλμών

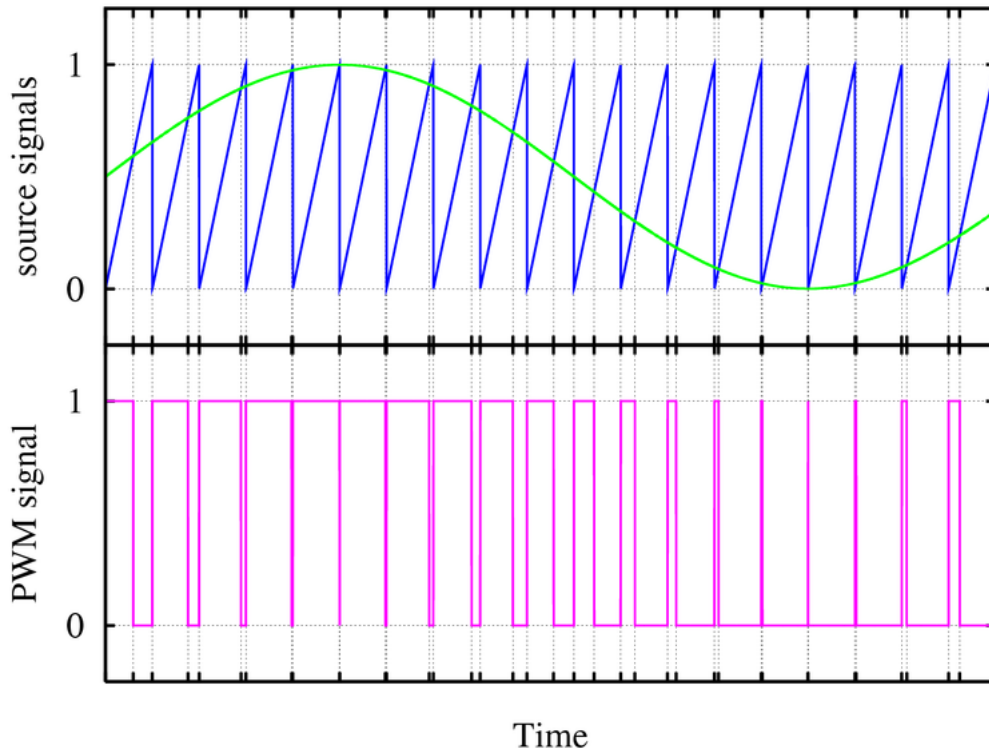
Όπως αναφέρθηκε, ένα μεγάλο ποσοστό της δημιουργίας αρμονικών ανήκει στους μετατροπείς ηλεκτρικής ενέργειας (π.χ σε αυτούς που χρησιμοποιούνται στα φωτοβολταϊκά συστήματα κτλ). Στο κεφάλαιο 2.5.2 η τάξη των αρμονικών που παράγονται έχει άμεση σχέση με τον αριθμό των ομάδων των βαλβίδων που χρησιμοποιεί ή αλλιώς με το πόσων παλμών γέφυρα έχουμε. Έτσι μια εξαπαλμική γέφυρα παράγει ρεύματα με αρμονικές 5ης, 7ης, 11ης κτλ τάξης. Αντίθετα αν χρησιμοποιήσουμε μια δωδεκαπαλμική γέφυρα θα έχουμε αρμονικά ρεύματα 11ης, 13ης κτλ τάξης. Με αυτόν τον τρόπο θα έχουμε εξαλείψει την 5η και την 7η συνιστώσα, αρμονικές που έχουν σημαντικό πλάτος¹.

Το μειονέκτημα της χρήσης μετατροπένων πολλών παλμών είναι ότι για τη λειτουργία τους απαιτούνται πολύπλοκες συνδέσεις, περισσότερα ηλεκτρονικά ισχύος και ακριβότεροι μετασχηματιστές. Κάτι τέτοιο καθιστά τη χρήση μετατροπένων άνω των δώδεκα παλμών ασύμφορη και δαπανηρή.

¹ Τα παραπάνω ισχύουν για την περίπτωση που λειτουργούν όλες οι ομάδες βαλβίδων. Σε κάθε άλλη περίπτωση το όφελος από τη χρήση πολλών παλμών εξακολουθεί μεν να υπάρχει αλλά είναι μικρότερο

3.1.2 Αλλαγή του τρόπου παλμοδότησης

Ένας άλλος τρόπος περιορισμού, υπό προϋποθέσεις, του αρμονικού περιεχομένου είναι η διαμόρφωση των παλμών τροφοδότησης των βαλβίδων. Στους περισσότερους σύγχρονους



Σχήμα 3.1: Διαμόρφωση παλμών PWM

μετατροπείς χρησιμοποιούνται παραλλαγές της μεθόδου PWM (Pulse Width Modulation) τόσο για τη βελτίωση των μετατροπέων και για τον έλεγχο τους όσο και για τον περιορισμό των αρμονικών. Η γενική λειτουργία της παλμοδότησης με τη μέθοδο PWM συνίσταται στη σύγκριση δύο κυματομορφών σχήμα 3.1:

- μιας τριγωνικής κυματομορφής, συχνότητας f_s (φέρουσα συχνότητα) η οποία καθορίζει την αλλαγή κατάστασης των βαλβίδων.
- ένα ημιτονοειδές σήμα ελέγχου, το σήμα αυτό χρησιμοποιείται για τη διαμόρφωση της σχετικής διάρκειας αγωγής και έχει συχνότητα f_1 (συχνότητα διαμόρφωσης-modulation frequency) που είναι η επιθυμητή θεμελιώδης συχνότητα της τάσης εξόδου του μετατροπέα.

Η τάση εξόδου δε θα είναι προφανώς τέλεια ημιτονοειδής κυματομορφή αλλά θα περιέχει αρμονικές της f_1 . Ο συντελεστής διαμόρφωσης συχνότητας m_f^2 ορίζεται ως:

$$m_f = \frac{f_s}{f_1} \quad (3.1)$$

Ο συντελεστής αυτός καθορίζει το σε ποιες συχνότητες εμφανίζονται οι αρμονικές. Κατά γενικό κανόνα αυτό συμβαίνει για συχνότητες:

$$f_h = (jm_f \pm k)f_1 \quad (3.2)$$

²Επιλέγουμε αυτό το συντελεστή να είναι περιττός αριθμός.

όπου ο αριθμός j είναι ακέραιος και καθορίζει την κεντρική αρμονική και ο k είναι και αυτός ακέραιος και δείχνει τις πλευρικές συχνότητες γύρω από τις ανώτερες αρμονικές. Είναι φανερό ότι η επιλογή της f_s είναι σημαντική για το ποιες συχνότητες θέλουμε να αποκόψουμε. Οι αρμονικές με υψηλή συχνότητα φιλτράρονται σχετικά εύκολα, όπως θα δούμε παρακάτω, σε σχέση με της χαμηλής συχνότητας αρμονικές. Άρα είναι επιθυμητή η χρήση όσο το δυνατόν υψηλότερων συχνοτήτων μετάβασης f_s . Στις περισσότερες εφαρμογές, η συχνότητα επιλέγεται είτε κάτω των 6KHz είτε υψηλότερη των 20KHz [12] ώστε να είναι πάνω από την περιοχή ακουστικών συχνοτήτων.

Με αυτόν τον τρόπο λειτουργούν και άλλες μέθοδοι παλμοδότησης PWM για την αποκοπή συχνοτήτων. Πρέπει να τονιστεί όμως ότι οι διαφορετικές διαμορφώσεις μπορεί και να επιβαρύνουν ένα σύστημα διανομής όταν βρίσκονται σε υψηλή συγκέντρωση.

3.2 Φίλτρα

Η τοποθέτηση φίλτρων μας εξασφαλίζει:

- Μείωση των αρμονικών τάσεων και ρευμάτων του δικτύου σε αποδεκτά επίπεδα, τα οποία καθορίζονται από διεθνή πρότυπα και σχετίζονται με το επίπεδα των αρμονικών, ένα από αυτά είναι το *IEEE519 – 1192*.
- Παραγωγή όλου ή ενός μέρους του ποσού της απαιτούμενης αέργου ισχύος. Όταν έχουμε ημιτονοειδή ρεύματα και τάσεις, μπορούμε με μια απλή συστοιχία παράλληλων πυκνωτών να βελτιώσουμε το συντελεστή ισχύος στη θεμελιώδη συχνότητα.

Τα φίλτρα μπορούν να χωριστούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

- τα παθητικά, αυτά που αποτελούνται από παθητικά στοιχεία και μόνο.
- τα ενεργητικά που χρησιμοποιούν διακοπτικά στοιχεία σε συνδυασμό με παθητικά.

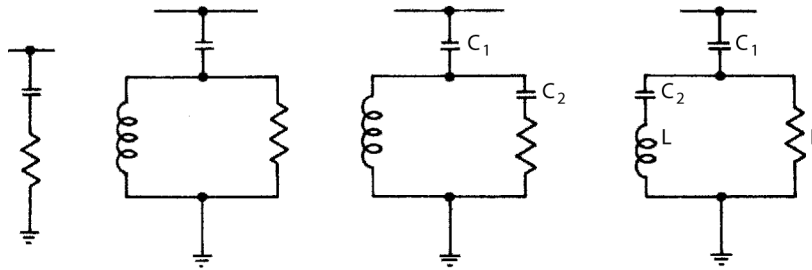
3.2.1 Παθητικά φίλτρα

Οι αρμονικές μπορούν να εξαλειφθούν με δύο τρόπους:

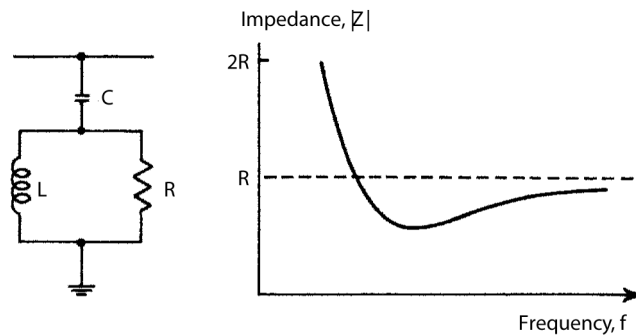
1. με μια μεγάλη σύνθετη αντίσταση σε σειρά (φίλτρα σειράς).
2. με μια μικρή εγκάρσια σύνθετη αντίσταση (εγκάρσια φίλτρα).

Τα φίλτρα σειράς πρέπει να φέρουν το ονομαστικό ρεύμα του κυρίου κυκλώματος και να μονωθούν παντού για την ονομαστική τάση. Το εγκάρσιο φίλτρο μπορεί να γειωθεί στο ένα άκρο και φέρει μόνο το αρμονικό ρεύμα για το οποίο έχει συντονιστεί και ένα θεμελιώδους συχνότητας ρεύμα πολύ μικρότερο από εκείνο του κυρίου κυκλώματος.

Έτσι ένα εγκάρσιο φίλτρο είναι πολύ πιο φθηνό από ένα φίλτρο σειράς ίδιας αποτελεσματικότητας. Επίσης, τα εγκάρσια φίλτρα έχουν το πλεονέκτημα ότι στη θεμελιώδη συχνότητα τροφοδοτούν το σύστημα με άεργο ισχύ, εν αντιθέσει με τα φίλτρα σειράς που καταναλώνουν άεργο ισχύ. Για αυτούς τους λόγους τα εγκάρσια φίλτρα έχουν επικρατήσει έναντι των φίλτρων σειράς και με αυτά θα ασχοληθούμε στη συνέχεια. Ένα παθητικό φίλτρο που αποτελείται από παράλληλους, συντονιζόμενους κλάδους L-C συχνά επαρκεί για τον έλεγχο των αρμονικών. Κάθε κλάδος παρουσιάζει χαμηλή αντίσταση σε μια συγκεκριμένη αρμονική ρεύματος και συνδέεται παράλληλα με το φορτίο, εκτρέποντας έτσι την αρμονική αυτή από την κανονική ροή της προς το δίκτυο. Όμως, δημιουργεί ένα σημείο



Σχήμα 3.2: Φίλτρα :πρώτης,δεύτερης,τρίτης τάξης και C type



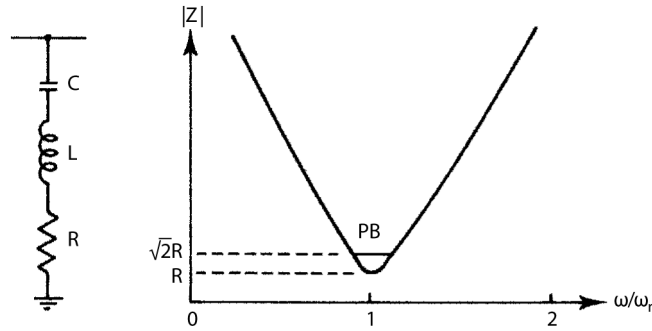
Σχήμα 3.3: Φίλτρο δεύτερης τάξης με απόσβεση

ισχυρού παράλληλου συντονισμού σε μια συχνότητα μικρότερη αυτής για την οποία σχεδιάστηκε. Το σημείο αυτό είναι φανερό ότι πρέπει να βρίσκεται μακριά από τις σημαντικές αρμονικές του συστήματος.

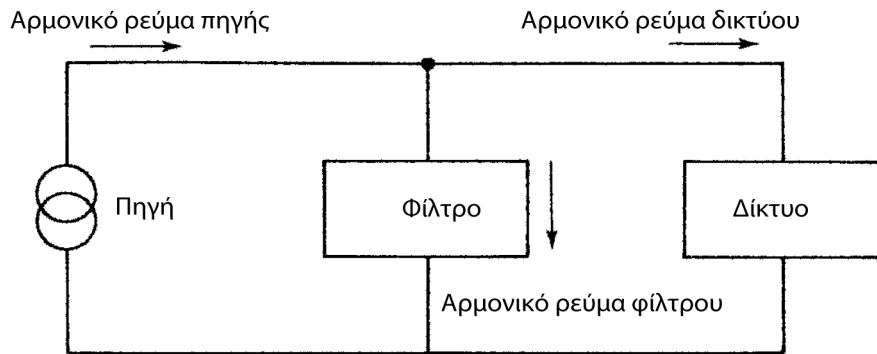
Υπάρχουν και απρόβλεπτες καταστάσεις που μπορεί να μειώσουν την απόδοση ενός φίλτρου. Μεταβολές των παραμέτρων των φίλτρων (π.χ γήρανση διηλεκτρικών κτλ) μπορεί να αυξήσουν την αρμονική παραμόρφωση. Ένας ακόμη παράγοντας μείωσης της απόδοσης είναι η τυχόν παραμορφωμένη τάση τροφοδοσίας του. Επίσης αλλαγές της τοπολογίας του δικτύου (π.χ προσθήκη πυκνωτών ή φίλτρων σε γειτονικές εγκαταστάσεις) μπορούν να προκαλέσουν απρόβλεπτους συντονισμούς.

Η οξύτητα του συντονισμού παίζει σπουδαίο ρόλο για τα χαρακτηριστικά ενός φίλτρου. Μπορούμε να χωρίσουμε τα φίλτρα ανάλογα με την οξύτητα τους και τον τρόπο αποκοπής στις παρακάτω κατηγορίες:

- το συντονιζόμενο φίλτρο μεγάλου συντελεστή ποιότητας Q το οποίο συντονίζεται σε μια από τις κατώτερες αρμονικές και παρέχει μια διαδρομή μικρής αντίστασης για τη συγκεκριμένη αρμονική.
- το φίλτρο με απόσβεση με χαμηλό συντελεστή ποιότητας Q το οποίο παρουσιάζει μια μικρή σύνθετη αντίσταση σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων.
- το διπλό ζωνοδιαβατό φίλτρο
- τα σύνθετα φίλτρα (composite filters) εγκαθίστανται συνήθως σε ηλεκτρικούς κλιβάνους. Οι δύο κλάδοι τους είναι φίλτρα υψηλού συντελεστή ποιότητας ενώ ο τρίτος είναι ζωνοδιαβατό φίλτρο για το φιλτράρισμα υψηλότερων συχνοτήτων.
- υπάρχουν και άλλα είδη φίλτρων όπως τα τρίτης τάξης και τα επονομαζόμενα C filters που χρησιμοποιούνται στα συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.



Σχήμα 3.4: Φίλτρο μεγάλου συντελεστή ποιότητας



Σχήμα 3.5: Αλληλεπίδραση φίλτρου δικτύου

Αλληλεπίδραση φίλτρου-δικτύου

Η τοποθέτηση ενός φίλτρου αρμονικών μπορεί όχι μόνο να μην επιλύσει το πρόβλημα αλλά να το επιτείνει, και αυτό γιατί μπορεί να υπάρξουν προϋποθέσεις συντονισμού μεταξύ φίλτρου και δικτύου. Έτσι, μια ανάλυση θα μας βοηθήσει να εξάγουμε κάποια συμπεράσματα. Στο σχήμα 3.5 βλέπουμε ένα τυπικό κύκλωμα για την ανάλυση των φαινομένων. Ως πηγή αρμονικών θεωρούμε μια πηγή γνωστού ρεύματος I_h . Το αρμονικό ρεύμα χωρίζεται στο ρεύμα I_{hf} που απορροφά το φίλτρο και το ρεύμα I_{hn} που περνά στο δίκτυο. Το αρμονικό ρεύμα I_h θα δημιουργήσει μια αρμονική τάση V_h πάνω στον παράλληλο συνδυασμό της σύνθετης αντίστασης του φίλτρου και της σύνθετης αντίστασης του δικτύου.

Θα έχουμε για το κύκλωμα :

- Z_{hf} : η σύνθετη αντίσταση του φίλτρου για την αρμονική τάξης h .
- Z_{hn} : η σύνθετη αντίσταση του δικτύου για την αρμονική τάξης h .

Οι αντίστοιχες σύνθετες αγωγιμότητες θα είναι :

- $Y_{hf} = \frac{1}{Z_{hf}}$
- $Y_{hn} = \frac{1}{Z_{hn}}$

Ο παράλληλος συνδυασμός της Z_{hf} και της Z_{hn} μας δίνει τη σύνθετη αντίσταση που βλέπει η πηγή :

$$Z_h = \frac{Z_{hn} Z_{hf}}{Z_{hn} + Z_{hf}} \quad (3.3)$$

Οπότε η αρμονική πτώση τάσης θα είναι :

$$V_h = I_h Z_h = \left(\frac{Z_{hn} Z_{hf}}{Z_{hn} + Z_{hf}} \right) I_h \quad (3.4)$$

Ή αλλιώς εκφρασμένη σε αγωγιμότητες :

$$V_h = \left(\frac{1}{Y_{hf} + Y_{hn}} \right) I_h \quad (3.5)$$

Το αρμονικό ρεύμα³ που διέρχεται μέσα από το φίλτρο θα είναι :

$$\begin{aligned} I_{hf} &= \frac{V_h}{Z_{hf}} \\ &= \frac{Z_{hn}}{Z_{hf} + Z_{hn}} I_h = \\ &= \frac{Y_{hf}}{Y_{hf} + Y_{hn}} I_h \end{aligned} \quad (3.6)$$

Το αρμονικό ρεύμα⁴ που θα διεισδύει στο δίκτυο θα είναι :

$$\begin{aligned} I_{hn} &= \frac{V_h}{Z_{hn}} = \\ &= \frac{Z_{hf}}{Z_{hf} + Z_{hn}} I_h = \\ &= \frac{Y_{hn}}{Y_{hf} + Y_{hn}} I_h \end{aligned} \quad (3.7)$$

Χρησιμοποιώντας τις παραπάνω σχέσεις θα διερευνήσουμε την επίδραση που έχει η σύνθετη αντίσταση του δικτύου.

- Αν το δίκτυο είχε μηδενική σύνθετη αντίσταση σε όλες τις αρμονικές (άπειρη ισχύς βραχυκύκλωσης), η αρμονική τάση θα ήταν μηδενική, $V_h = 0$. Τότε θα είχαμε τέλειο φιλτράρισμα της τάσης και όλο το αρμονικό ρεύμα θα εισέρρεε στο δίκτυο, $I_{hn} = I_h$. Βέβαια μια τέτοια παραδοχή δεν συμβαίνει ποτέ στην πράξη. Αν ίσχυε θα έπρεπε να χρησιμοποιήσουμε φίλτρα σειράς.
- Αν το δίκτυο είχε άπειρη αντίσταση $Z_h = \infty$, τότε όλο το αρμονικό ρεύμα θα έβρισκε δίοδο μέσω του φίλτρου. Θα είχαμε δηλαδή :

$$\begin{aligned} I_{hn} &= 0 \\ I_{hf} &= I_h \\ V_h &= Z_{hf} I_h \end{aligned} \quad (3.8)$$

Η αρμονική τάση θα μπορούσε να παραμείνει σε λογικά επίπεδα, αφού θα αρκούσε να τοποθετήσουμε ένα φίλτρο με μικρή σύνθετη αντίσταση στη συχνότητα των αρμονικών.

³Η σύνθετη αντίσταση που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του ρεύματος παίρνει συνήθως τιμές, για ένα καλά σχεδιασμένο φίλτρο, μέτρου 0.995Ω και φάσης -81°

⁴Αντίστοιχα η σύνθετη αντίσταση που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του ρεύματος παίρνει συνήθως τιμές, για ένα καλά σχεδιασμένο φίλτρο, μέτρου 0.005Ω και φάσης -2.6° .

- Το χειρότερο σενάριο όμως είναι αυτό κατά το οποίο το εγκάρσιο φίλτρο και το δίκτυο διανομής βρίσκονται σε παράλληλο συντονισμό. Η σύνθετη αντίσταση Z_h που θα προέκυπτε θα είχε μόνο πραγματικό μέρος. Σε αυτήν την περίπτωση, η αρμονική τάση V_h και τα αρμονικά ρεύματα τόσο στο φίλτρο I_{hf} όσο και στο δίκτυο I_{hn} θα έπαιρναν μεγάλες τιμές. Σε μια τέτοια περίπτωση θα είχαμε υπέρταση στο κοινό σημείο φίλτρου-δικτύου. Το φιλτράρισμα θα ήταν ανεπαρκές, το δε φίλτρο θα μπορούσε να καταστραφεί επειδή θα λειτουργούσε σε μεγάλα ρεύματα και υπό αυξημένη τάση.

Για τα συντονιζόμενα φίλτρα ισχύει ότι εμφανίζουν μια μικρή σύνθετη αντίσταση για την αρμονική που τα έχουμε σχεδιάσει. Σε αυτήν τη συχνότητα θα ήταν δύσκολο να εμφανιστεί συντονισμός αφού ο παράλληλος συνδυασμός Z_{hn} και Z_{hf} θα μας έδινε μια αντίσταση με μη μηδενικό φανταστικό μέρος. Υπάρχουν όμως και απρόβλεπτοι παράγοντες, όπως:

- μια διαταραχή της συχνότητας του δικτύου
- μια αλλαγή στα στοιχεία του φίλτρου

που μπορεί να προκαλέσουν αποσυντονισμό του φίλτρου ή ακόμη και παράλληλο συντονισμό.

Το ίδιο ισχύει και για τα ανωδιαβατά φίλτρα. Είναι πιθανότερο να συμβεί συντονισμός σε μιας χαμηλής τάξης μη χαρακτηριστική αρμονική, ενώ σπάνια θα συμβεί σε περισσότερες από μια αρμονικές ταυτόχρονα.

Σε κάθε περίπτωση, η οξύτητα του συντονισμού θα εξαρτηθεί από την απόσβεση που θα έχει το συντονιζόμενο κύκλωμα. Η απόσβεση αυτή εξαρτάται από το πραγματικό μέρος της σύνθετης αντίστασης Z_h και καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από τα ωμικά στοιχεία φίλτρου-δικτύου. Είναι σημαντικό λοιπόν, να ξέρουμε τη συμπεριφορά του δικτύου για ένα φάσμα συχνοτήτων.

Συντονιζόμενα φίλτρα μεγάλου συντελεστή ποιότητας

Θα εξετάσουμε τώρα κάποια γενικά χαρακτηριστικά αυτών των φίλτρων. Για ένα τέτοιο φίλτρο θα πρέπει η χωρητική και η επαγωγική του αντίδραση να είναι ίσες για τη συντονιζόμενη συχνότητα.

$$Z = R + j\omega_n L + \frac{1}{j\omega_n C} = R \quad (3.9)$$

Η δε συχνότητα συντονισμού θα είναι:

$$\omega_n = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (3.10)$$

Η αντίδραση ενός φίλτρου στη συντονιζόμενη συχνότητα θα είναι:

$$X_0 = \omega_n L = \frac{\omega_n C}{= \sqrt{\frac{L}{C}}} \quad (3.11)$$

Άρα ο συντελεστής ποιότητας του φίλτρου θα είναι:

$$Q = \frac{X_0}{R} = \frac{\sqrt{\frac{L}{C}}}{R} \quad (3.12)$$

που ουσιαστικά μας δείχνει την οξύτητα του συντονισμού. Η περιοχή μέσα στην οποία δεν κόβονται οι συχνότητες ορίζεται ως :

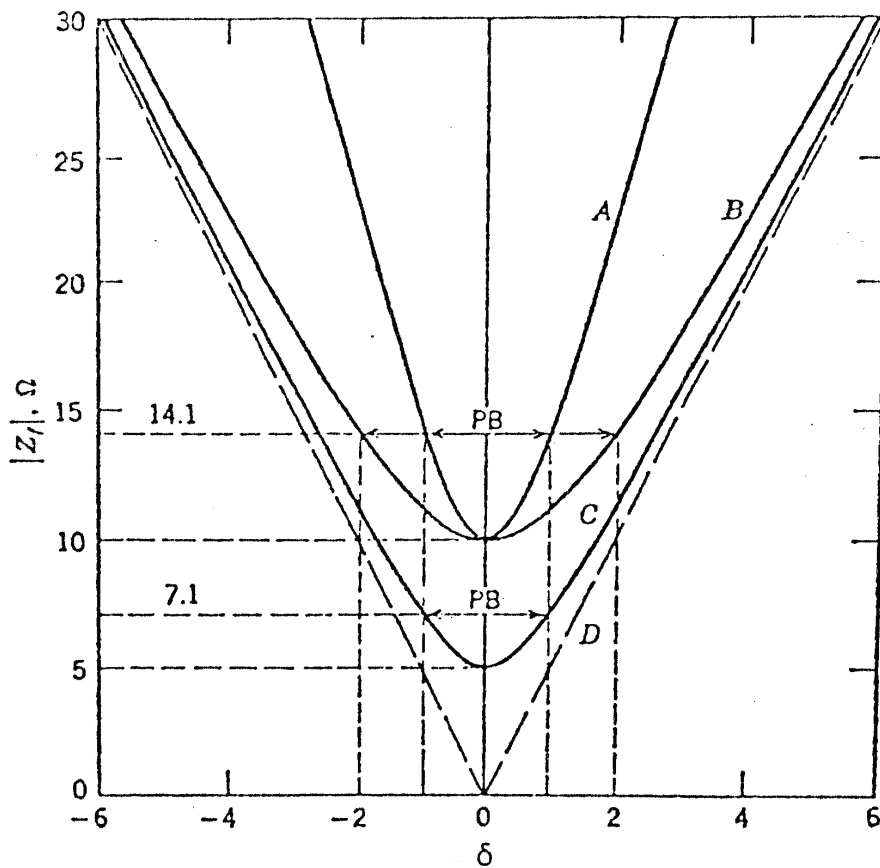
$$|Z_f| = \sqrt{2}R \quad (3.13)$$

$$\delta = \frac{\omega - \omega_n}{\omega_n} \quad (3.14)$$

Προφανώς η οξύτητα του συντονισμού εξαρτάται από την επιλογή των R και X_0 . Μειώνοντας και τις δύο παραμέτρους μειώνουμε τη σύνθετη αντίσταση για τη συχνότητα συντονισμού που το έχουμε σχεδιάσει. Οι δύο ασύμπτωτες (διακεκομμένες στο σχήμα 3.6) δίνονται από τη σχέση :

$$|X_f| = \pm 2Q_0 |\delta| \quad (3.15)$$

Τα άκρα μέσα στα οποία ενεργεί το φίλτρο είναι στα σημεία $\pm \frac{1}{2}Q$ και έχει εύρος $\frac{1}{Q}$. Στο σχήμα 3.6 βλέπουμε κάποιες καμπύλες για διαφορετικά φίλτρα, κάθε ένα από τα οποία έχει διαφορετική οξύτητα συντονισμού.



Σχήμα 3.6: Διάγραμμα συντονισμένων φίλτρων

Από το σχήμα 3.6 είναι φανερό ότι η σύνθετη αντίσταση του φίλτρου στη συχνότητα συντονισμού μπορεί να μειωθεί με τη μείωση της R . Για να διατηρηθεί η σύνθετη αντίσταση χαμηλή σε μια ζώνη συχνοτήτων που ορίζεται από τα σημεία της μέγιστης απόκλισης συχνότητας όμως, μπορεί να είναι απαραίτητο να μειωθεί X_0 και επομένως να μειωθεί το Q .

Καμπύλη	$R(\Omega)$	$X_0(\Omega)$	Q	PB
A	10	500	50	2%
B	10	250	25	4%
C	5	250	50	2%

Πίνακας 3.1: Οι περιπτώσεις οξύτητας συντονισμού του διαγράμματος 3.6

Παραγωγή αέργου ισχύος Για έναν απλό πυκνωτή γνωρίζουμε ότι η παρεχόμενη αέργος ισχύς υπολογίζεται από τον τύπο:

$$Q = \frac{V_0^2}{X_c} \quad (3.16)$$

Κατά το συντονισμό θα ισχύει:

$$\begin{aligned} \omega_n L &= \frac{1}{\omega_n C} \Rightarrow \\ \omega_n^2 L &= \frac{1}{C} \Rightarrow \\ \omega_n^2 L \frac{\omega}{\omega} &= \frac{1}{C} \frac{\omega}{\omega} \Rightarrow \\ \frac{\omega_n^2}{\omega} X_L &= \omega X_C \Rightarrow \\ X_L &= \frac{\omega^2}{\omega_n^2} X_C \end{aligned} \quad (3.17)$$

Θέτω $\frac{\omega}{\omega_n} = \frac{f_n}{f} = n$, όπου:

- f : η θεμελιώδης συχνότητα
- f_n : η συχνότητα συντονισμού

Σε ένα φίλτρο όμως σαν αυτό που εξετάζουμε θα ισχύει:

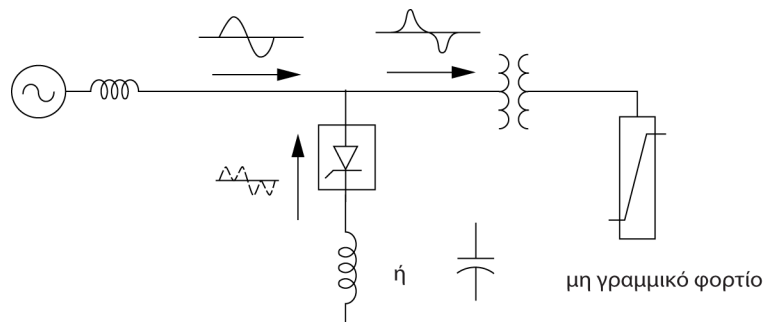
$$\begin{aligned} Q_f &= \frac{V_0^2}{X_L - X_C} = \\ &= \frac{V^2}{\frac{X_C}{n^2} - X_C} = \\ &= \frac{1}{\frac{1}{n^2} - 1} \frac{V^2}{X_C} = \\ &= \frac{n^2}{n^2 - 1} Q \end{aligned} \quad (3.18)$$

Όπως γίνεται φανερό για ένα φίλτρο αυξάνεται η παροχή αέργου ισχύος κατά ένα παράγοντα $\frac{n^2}{n^2-1}$.

3.2.2 Ενεργά φίλτρα

Τα ενεργά φίλτρα περιλαμβάνουν διακοπτικούς αντισταθμιστές που αποτελούνται από ημιαγωγούς διακόπτες και παθητικά στοιχεία (πηνία ή πυκνωτές) για αποθήκευση ενέργειας. Η βασική αρχή λειτουργίας τους έγκειται στη δημιουργία ενός ρεύματος αντίθετου από αυτό κάποιας υψηλής αρμονικής και ροής του προς την πηγή αρμονικών. Με αυτόν

τον τρόπο την εξαφανίζει. Το ρεύμα αυτό που δημιουργεί το φίλτρο είναι αντίγραφο των ρευμάτων ανώτερων αρμονικών της πηγής, σχήμα 3.7. Μμε αυτόν τον τρόπο η πηγή εξαναγκάζεται να τροφοδοτεί μόνο το ρεύμα της θεμελιώδους αρμονικής. Τα ενεργά φίλτρα έχουν



Σχήμα 3.7: Λειτουργία ενεργού φίλτρου

το πλεονέκτημα ότι δεν εμφανίζουν συντονισμό με το δίκτυο. Αντίθετα με τα παθητικά φίλτρα, λειτουργούν ανεξάρτητα από τις αλλαγές στη τοπολογία του δικτύου. Επίσης, μπορούν να αντιμετωπίσουν παραπάνω από μια αρμονικές. Είναι ιδιαίτερα χρήσιμα όταν υπάρχουν φορτία που εισάγουν υψηλό αρμονικό περιεχόμενο σε ασθενή σημεία του δικτύου. Όπως και τα παθητικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για αντιστάθμιση ισχύος, αν και αυξάνεται η καταπόνηση του μετατροπέα λόγω αύξησης του ρεύματος.

Τα ενεργά φίλτρα όμως παρουσιάζουν και μειονεκτήματα, όπως υψηλό κόστος εγκατάστασης και συντήρησης. Τα ηλεκτρονικά στοιχεία ισχύος, που αποτελούν το διακοπτικό κομμάτι, περιορίζουν τη χρήση αυτών των φίλτρων σε χαμηλότερη ισχύ και ευθύνονται για τις αυξημένες διακοπτικές απώλειες.

Για όλα αυτά τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα ενδιαφέρον παρουσιάζει η υβριδική λύση, δηλαδή η χρήση παθητικών φίλτρων για τις κυρίαρχες αρμονικές, ώστε να απαιτείται μικρότερης ονομαστικής ισχύος μετατροπέας για το ενεργό φίλτρο.

Κεφάλαιο 4

Μοντελοποίηση του Δικτύου

Ένα δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας είναι ένα πολύπλοκο σύστημα που αποτελείται από τις γεννήτριες, τις γραμμές μεταφοράς, τους μετασχηματιστές, τις διατάξεις αντιστάθμισης και τα κάθε λογής φορτία. Για να μπορούμε να κάνουμε μια ενδελεχή ανάλυση αλλά και κυρίως προσομοίωση της συμπεριφοράς του κάτω από διάφορες συνθήκες είναι αναγκαίο να εξάγουμε το συνολικό μοντέλο του δικτύου. Θα πρέπει λοιπόν να διαμορφώσουμε το μοντέλο που παριστάνει ακριβώς τη λειτουργία κάθε μιας συνιστώσας του δικτύου που προαναφέραμε. Ο συνδυασμός αυτών των μοντέλων θα μας δώσει το συνολικό μοντέλο του δικτύου μας.

Τα τελευταία χρόνια η ανάπτυξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών έχει δώσει νέα ώθηση στη μοντελοποίηση των διαφόρων φαινομένων και όχι μόνο αυτών που σχετίζονται με την ηλεκτρολογία και την ηλεκτρονική. Η αύξηση της υπολογιστικής ισχύος μας δίνει τη δυνατότητα να προσομοιώσουμε μοντέλα με μεγάλη ακρίβεια και ταχύτητα. Σε αυτήν τη διπλωματική χρησιμοποιήθηκε το MATLAB για την προσομοίωση του ηλεκτρικού δικτύου. Παρόλα αυτά, για την εισαγωγή του μοντέλου στο H/Y έγινε μελέτη του δικτύου και εξαγωγή του μοντέλου του αναλυτικά στο 'χέρι'.

Στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής μελετήθηκε μια γραμμή μέσης τάσης 20KV . Μια τέτοια γραμμή ξεκινά από έναν υποσταθμό υψηλής/μέσης τάσης και μέσω εναέριων γραμμών μεταφοράς καταλήγει σε υποσταθμούς διανομής μέσης/χαμηλής τάσης. Από εκεί τροφοδοτούνται τα διάφορα φορτία ή ακόμη και μικροί παραγωγοί.

Για τη διευκόλυνση των υπολογισμών ή γιατί το MATLAB δέχεται το μοντέλο σε τέτοια μορφή, θα θεωρήσουμε ότι το μοντέλο είναι συμμετρικό, ώστε να μπορέσουμε να δουλέψουμε με το μονοφασικό ισοδύναμο του δικτύου. Αυτή η υπόθεση δεν ισχύει σχεδόν ποτέ, αλλά μας δίνει τη δυνατότητα να εξάγουμε συμπεράσματα που δεν απέχουν πολύ από την πραγματικότητα.

4.1 Μοντελοποίηση φορτίων

Τα φορτία σε ένα ΣΗΕ μπορεί να είναι ωμικά, επαγωγικά, χωρητικά και συνδυασμός αυτών (ωμικά-επαγωγικά ή ωμικά-χωρητικά). Στην ανάλυση που θα κάνουμε θα θεωρήσουμε όλα τα φορτία ως φορτία σταθερής σύνθετης μιγαδικής αντίστασης. Έτσι, κάθε φορτίο μοντελοποιείται με έναν από τους εξής τρόπους:

- εν σειρά συνδυασμός αντίστασης και πηνίου όταν πρόκειται για φορτίο επαγωγικής συμπεριφοράς (π.χ ασύγχρονη μηχανή).

- εν σειρά συνδυασμός αντίστασης και πυκνωτή όταν πρόκειται για φορτίο χωρητικής συμπεριφοράς (πρόκειται για φορτία που τα συναντάμε σπανιότερα σε ηλεκτρικές εγκαταστάσεις χαμηλής τάσης).

Αν έχουμε ως δεδομένα τη φαινόμενη ισχύ S και το συντελεστή ισχύος του τριφασικού φορτίου στη θεμελιώδη αρμονική, τότε ο υπολογισμός των στοιχείων του μονοφασικού ισοδυνάμου γίνεται ως εξής:

Αρχικά υπολογίζουμε το ρεύμα του φορτίου. Εδώ θα πρέπει να γίνει η παρατήρηση ότι: επειδή δεν έχουμε πάντοτε την ακριβή τιμή της φαινόμενης ισχύος που καταναλώνει το φορτίο θεωρούμε ότι αυτή είναι ένα ποσοστό της ονομαστικής φαινόμενης ισχύος του μετασχηματιστή μέσης/χαμηλής τάσης ή και αλλιώς ένα ποσοστό του ονομαστικού ρεύματος του μετασχηματιστή.

$$S = \sqrt{3}V_{\pi}I_{\pi} \Rightarrow I_{\pi} = \frac{S}{\sqrt{3}V_{\pi}} \quad (4.1)$$

όπου V_{π} η πολική τάση του δικτύου $20KV$ και I_{π} το ζητούμενο ρεύμα.

Η ενεργός ισχύς P του φορτίου δίνεται από τη σχέση:

$$P = S \cos \phi \quad (4.2)$$

Η κάθε φάση του δικτύου καταναλώνει το ένα τρίτο της ενεργού ισχύος, $\frac{P}{3}$. Αυτή η ισχύς καταναλώνεται πάνω στο ωμικό κομμάτι του φορτίου σύμφωνα με τη σχέση:

$$P = I^2 R \quad (4.3)$$

Άρα η ωμική αντίσταση του φορτίου θα είναι σύμφωνα με τις εξισώσεις (4.1) και (4.3):

$$I^2 R = \frac{P}{3} \Rightarrow I_{\pi}^2 R = \frac{S \cos \phi}{3} \Rightarrow R = \frac{S \cos \phi}{3I_{\pi}^2} \quad (4.4)$$

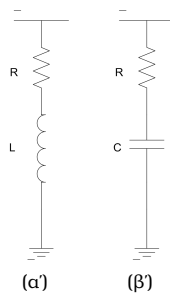
Το μέτρο της σύνθετης αντίστασης του φορτίου δίνεται από τη σχέση:

$$Z = \frac{V_{\pi}}{\sqrt{3}I_{\pi}} \quad (4.5)$$

Θα πρέπει τώρα να προσδιορίσουμε το φανταστικό μέρος της σύνθετης αντίστασης του φορτίου, το οποίο είναι ίσο με:

$$X = \sqrt{Z^2 - R^2} \quad (4.6)$$

Εδώ θα πρέπει να διακρίνουμε δύο περιπτώσεις:



Σχήμα 4.1: (α) Ωμικό-επαγωγικό φορτίο και (β) Ωμικό-χωρητικό φορτίο

1. Αν το φορτίο είναι ωμικό-επαγωγικό, τότε :

$$X = j\omega L \Rightarrow L = \frac{X}{j\omega} \quad (4.7)$$

και τελικά η ισοδύναμη αντίσταση θα είναι:

$$Z = R + j\omega L \quad (4.8)$$

2. Αν τώρα το φορτίο είναι ωμικό-χωρητικό, τότε :

$$Q = \frac{1}{j\omega C} \Rightarrow C = \frac{1}{j\omega X} \quad (4.9)$$

Η ισοδύναμη αντίσταση θα είναι:

$$Z = R - j\frac{1}{\omega C} \quad (4.10)$$

Με βάση τους παραπάνω υπολογισμούς και με δεδομένο τυποποιημένες τιμές ισχύος για τους μετασχηματιστές, στους παρακάτω πίνακες φαίνονται οι τιμές για τα φορτία.¹

$S (KVA)$	$80\%S KVA$	$I_\phi (A)$	$R_\phi (W)$	$Z_\phi (\Omega)$	$R_\phi (\Omega)$	$L_\phi (H)$
100	80	115.47	21333.3	1.999999161	1.6	0.003821652
160	128	184.752	34133.3	1.249999475	1	0.002388532
250	200	288.6751	53333.33	0.799999664	0.64	0.001528661
400	320	461.8802	85333.33	0.49999979	0.4	0.000955413

Πίνακας 4.1: Τιμές για τα φορτία, για φόρτιση μετασχηματιστών στο 80% και ΣΙ:0,8 επαγωγικό.

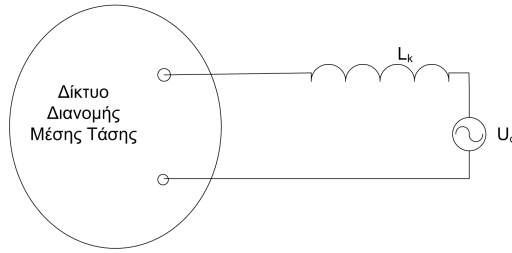
4.2 Μοντελοποίηση Μετασχηματιστών

Μια γραμμή μέσης τάσης τροφοδοτείται από ένα μετασχηματιστή υψηλής τάσης, ο οποίος μετατρέπει την υψηλή τάση (150KV ή 400KV) στην οποία γίνεται η μεταφορά, στο επίπεδο της τάσης διανομής (20KV). Η τροφοδότηση των οικιακών καταναλωτών γίνεται από μετασχηματιστές μέσης τάσης, οι οποίοι υποβιβάζουν την τάση στα 400V, δηλ. χαμηλή τάση. Από τα παραπάνω είναι εμφανής ο σημαντικός ρόλος που κατέχουν οι μετασχηματιστές για την τροφοδότηση των καταναλωτών. Παρακάτω περιγράφεται το μοντέλο των μετασχηματιστών. Ουσιαστικά πρόκειται για το κλασικό π-ισοδύναμο μοντέλο και πως αυτό εξήχθη με βάση πραγματικά στοιχεία μετασχηματιστών που χρησιμοποιούνται από τη ΔΕΗ.

4.2.1 Μετασχηματιστής υψηλής/μέσης

Από το σημείο έναρξης της γραμμής διανομής και πίσω λειτουργούν ο μετασχηματιστής υψηλής/μέσης τάσης, το δίκτυο μεταφοράς και οι γεννήτριες. Άρα θα πρέπει όλο αυτό το ισοδύναμο που βρίσκεται προ της έναρξης της γραμμής διανομής να το εισάγουμε σαν ένα νέο μοντέλο. Ο υπολογισμός αυτού είναι πολύπλοκος. Αντί αυτού θα απλοποιήσουμε

¹ Έχουμε υποθέσει ότι τα φορτία είναι ωμικά-επαγωγικά, κάτι που ισχύει γενικά για τους οικιακούς καταναλωτές



Σχήμα 4.2: Μετασχηματιστής υψηλής-μέσης

το μοντέλο, αντικαθιστώντας ότι βλέπει η γραμμή προς τα πίσω με μια πηγή τάσης σε σειρά με μια επαγωγή.

Η τιμή της πηγής τάσης θα είναι ίση με $20KV$, δηλ. η πολική τάση του δικτύου. Η τιμή της επαγωγής σχετίζεται άμεσα με την ισχύ βραχυκύκλωσης στο επίπεδο της μέσης τάσης (μια τυπική ισχύς βραχυκύκλωσης είναι αυτή των $S_k = 200MVA$). Παρακάτω ακολουθεί ο υπολογισμός αυτής της επαγωγής.

Η ισχύς βραχυκύκλωσης ανά φάση θα είναι: $S_{k,\phi} = \frac{S_k}{3}$. Ακόμη θα ισχύει ότι:

$$S_{k,\phi} = \frac{U_\phi^2}{X_k} = \frac{U_\phi^2}{\omega L_k} \Rightarrow L_k = \frac{U_\phi^2}{\omega S_{k,\phi}} \quad (4.11)$$

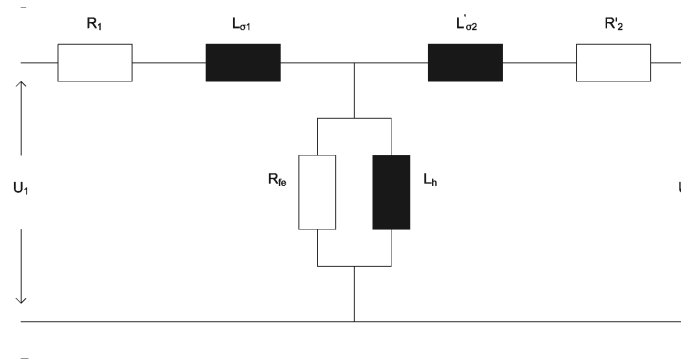
Με δεδομένο ότι $U_\phi = \frac{20}{\sqrt{3}}KV$ και $\omega = 2\pi 50$ σε συνδυασμό με τη (4.11) παίρνουμε τη ζητούμενη τιμή επαγωγής ίση με $L_k = 6,3mH$.

4.2.2 Μετασχηματιστές διανομής

Για την τροφοδότηση των καταναλωτών είναι απαραίτητο να υποβιβαστεί η μέση τάση του δικτύου διανομής σε χαμηλή. Η διαδικασία αυτή γίνεται με τους μετασχηματιστές διανομής που βρίσκονται ή πάνω σε στύλους ή σε κλειστούς εσωτερικούς χώρους. Κάθε τερματικό σημείο μιας γραμμής διανομής μέσης τάσης τερματίζεται από έναν τέτοιο μετασχηματιστή.

Είναι σημαντικό για τη συνολική μοντελοποίηση του δικτύου να δούμε ενδελεχώς το μοντέλο ενός τέτοιου μετασχηματιστή. Παρακάτω φαίνεται το T-ισοδύναμο μοντέλο ενός τέτοιου μετασχηματιστή (στη διεθνή βιβλιογραφία υπάρχουν πολλές παραλλαγές αυτού του μοντέλου). Εδώ θα σταθούμε στον υπολογισμό όλων των παραμέτρων και κάποιων από αυτές που σχετίζονται με τις αρμονικές. Τα διάφορα πακέτα προσομοίωσης χρησιμοποιούν διαφορετικές παραλλαγές σε αυτά τα μοντέλα. Πολλά ακόμη μοντέλα που έχουν προταθεί δεν έχουν ακόμη υλοποιηθεί μέσα στα υπάρχοντα που χρησιμοποιούνται στα προγράμματα προσομοίωσης [7].

- R_1 είναι η ωμική αντίσταση του πρωτεύοντος τυλίγματος.
- R'_2 είναι η ωμική αντίσταση του δευτερεύοντος τυλίγματος, ανηγμένη στο πρωτεύον.
- $L_{\sigma 1}$ είναι η επαγωγή λόγω σκέδασης του πρωτεύοντος.
- $L'_{\sigma 2}$ είναι η επαγωγή λόγω σκέδασης του δευτερεύοντος, ανηγμένη στο πρωτεύον.
- L_h είναι η κύρια αυτεπαγωγή μαγνήτισης του μετασχηματιστή.
- R_{fe} είναι η αντίσταση που αναφέρεται στις απώλειες υστέρησης και δινορρευμάτων του πυρήνα του μετασχηματιστή.



Σχήμα 4.3: Μοντέλο μετασχηματιστή διανομής

- U_1 είναι η φασική τάση του πρωτεύοντος τυλίγματος.
- U'_2 είναι η φασική τάση του δευτερεύοντος τυλίγματος, ανηγμένη στο πρωτεύον.

Για τα προηγούμενα μεγέθη του δευτερεύοντος που είναι ανηγμένα στο πρωτεύον ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις, όπου $\alpha = \frac{w_1}{w_2}$ ο λόγος μετασχηματισμού (αριθμός σπειρών πρωτεύοντος προς αριθμό σπειρών δευτερεύοντος)².

$$U'_2 = U_2 \alpha \quad (4.13)$$

$$R'_2 = R_2 \alpha^2 \quad (4.14)$$

$$L'_{\sigma 2} = L_{\sigma 2} \alpha^2 \quad (4.15)$$

Για ένα μετασχηματιστή φαινομένης ισχύος S_f , το ονομαστικό ρεύμα γραμμής δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$I_N = \frac{S_f}{\sqrt{3}U_\pi} \quad (4.16)$$

όπου U_π η πολική φάση της γραμμής. Επειδή έχουμε συνδεσμολογία Dy , το φασικό ρεύμα στην πλευρά του τριγώνου θα είναι:

$$I_{\phi, N} = \frac{I_N}{\sqrt{3}} \quad (4.17)$$

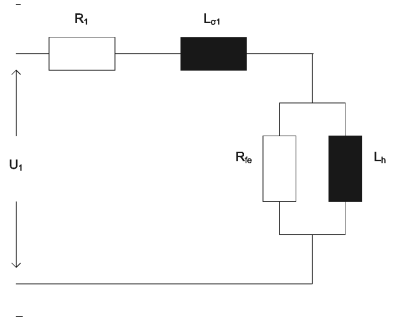
και η φασική τάση θα ισούται με την πολική, $U_{1, \phi} = U_\pi$.

Υπολογισμός παραμέτρων για M/Σ διανομής

Ο υπολογισμός των παραμέτρων του μονοφασικού ισοδύναμου ενός μετασχηματιστή μπορεί να υπολογιστεί με βάση κάποια στοιχεία που μας δίνει ο κατασκευαστής του. Το σύνηθες είναι να δίνονται τα εξής:

²Αυτός ο λόγος μπορεί να εκφραστεί και ως συνάρτηση του λόγου των πολικών τάσεων. Αυτή η σχέση είναι διαφορετική ανάλογα με τη συνδεσμολογία των τυλιγμάτων του μετασχηματιστή. Στην πράξη όμως, η πλειονότητα των μετασχηματιστών που χρησιμοποιεί η ΔΕΗ είναι συνδεσμολογίας τριγώνου-αστέρα (Dy). Για αυτό και στη μοντελοποίηση που ακολουθεί έχουμε θεωρήσει ότι όλοι οι μετασχηματιστές είναι αυτής της συνδεσμολογίας. Σε αυτή την περίπτωση ο λόγος σπειρών συνδέεται με το λόγο των πολικών τάσεων με την παρακάτω σχέση:

$$\frac{w_1}{w_2} = \frac{\sqrt{3}U_{1, \pi}}{U_{2, \pi}} \quad (4.12)$$



Σχήμα 4.4: Δοκιμή ανοιχτοκυκλώσεως

- Οι απώλειες χαλκού P_k , δηλαδή οι απώλειες εκείνες που καταναλώνονται στις αντιστάσεις και των δύο τυλιγμάτων κατά τη δοκιμή βραχυκύκλωσης του δευτερεύοντος.
- Οι απώλειες κενής λειτουργίας P_0 , δηλαδή οι απώλειες εκείνες που καταναλώνονται κατά τη δοκιμή ανοιχτοκυκλώσεως του δευτερεύοντος κατά βάση όπως θα δούμε παρακάτω στον πυρήνα του μετασχηματιστή.
- Η σχετική τάση βραχυκύκλωσης u_k (εκφράζεται σαν ποσοστό της ονομαστικής τάσης του πρωτεύοντος), που εκφράζει το ποσοστό της τάσης σε σχέση με την ονομαστική στο πρωτεύον κατά τη δοκιμή βραχυκυκλώσεως.

Από αυτά για τον υπολογισμό των στοιχείων του μετασχηματιστή θα πρέπει να εκτελέσουμε δύο δοκιμές:

1. Την ανοιχτοκύκλωση του δευτερεύοντος για τον υπολογισμό των στοιχείων του πυρήνα. Θα θεωρήσουμε προσεγγιστικά ότι ισχύει η παρακάτω αναλογία:

$$\frac{\omega L_h}{R_{fe}} = \frac{1}{10} \quad (4.18)$$

2. Τη βραχυκύκλωση του δευτερεύοντος για τον υπολογισμό των στοιχείων των τυλιγμάτων. Και εδώ θα θεωρήσουμε ότι ισχύουν προσεγγιστικά οι παρακάτω αναλογίες:

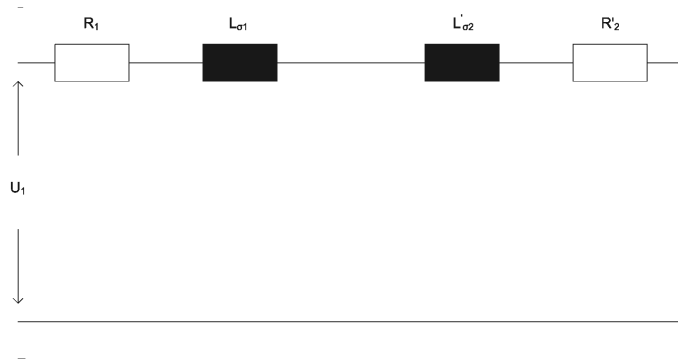
$$\frac{R_1}{R'_2} = \frac{L_{\sigma 1}}{L'_{\sigma 2}} = \frac{1}{1} \quad (4.19)$$

Δοκιμή Μ/Σ με το δευτερεύον εν κενώ. Κατά τη λειτουργία του μετασχηματιστή εν κενώ, το μονοφασικό ισοδύναμο απλοποιείται και γίνεται όπως στο σχήμα 4.4. Οι απώλειες κενής λειτουργίας P_0 είναι η ισχύς που καταναλώνεται πάνω στην αντίσταση R_{fe} που για κάθε φάση θα ισούται με $\frac{P_0}{3}$. Άρα για τον υπολογισμό της R_{fe} θα έχουμε ότι:

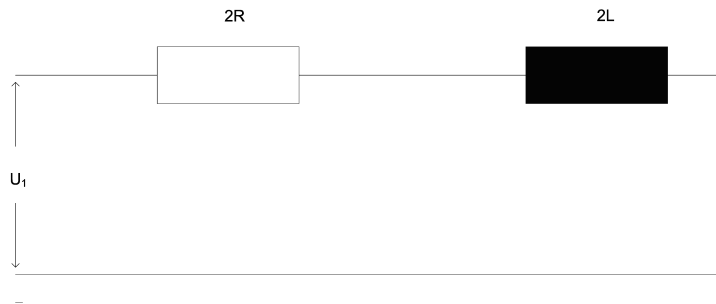
$$\frac{P_0}{3} = \frac{U_{1,\phi}^2}{R_{fe}} = \frac{U_\pi^2}{R_{fe}} \Rightarrow R_{fe} = \frac{3U_\pi^2}{P_0} \quad (4.20)$$

Και λόγω της (4.18), η επαγωγή μαγνήτισης θα είναι ίση με:

$$L_h = \frac{R_{fe}}{10\omega} \quad (4.21)$$



Σχήμα 4.5: Δοκιμή βραχυκυκλώσεως



Σχήμα 4.6: Δοκιμή βραχυκυκλώσεως με βάση τις αναλογίες πρωτεύοντος-δευτερεύοντος

Δοκιμή Μ/Σ με βραχυκυκλωμένο το δευτερεύον. Κατά τη δοκιμή βραχυκυκλώσεως, το ρεύμα έχει την ονομαστική του τιμή και άρα θα καταναλώνει την ισχύ των απωλειών χαλκού P_k . Σε αυτήν την περίπτωση μπορούμε να παραλείψουμε τον εγκάρσιο κλάδο διότι η αντίστασή του είναι πολύ μεγαλύτερη σε σχέση με τις αντιστάσεις των δύο τυλιγμάτων και άρα ένα αμελητέο ρεύμα θα τον διαπερνά και θα καταναλώνει κάποια ενέργεια σε αυτό. Πλέον το Τ-ισοδύναμο μοντέλο μπορεί να παρασταθεί όπως στο σχήμα 4.5. Λόγω όμως της (4.19) θα ισχύει ότι:

$$R_1 + R_2 = 2R_1 = 2R \quad (4.22)$$

$$L_{\sigma 1} + L_{\sigma 2} = 2L_{\sigma 1} = 2L \quad (4.23)$$

Το μοντέλο θα έχει τη μορφή όπως το σχήμα 4.6. Γνωρίζουμε τώρα ότι σε κάθε φάση καταναλώνεται ισχύς ίση με: $\frac{P_k}{3}$ πάνω στην αντίσταση $2R$, οπότε μπορούμε να γράψουμε:

$$\frac{P_k}{3} = 2R I_{\phi, N}^2 \xrightarrow{I_{\phi, N} = \frac{I_N}{\sqrt{3}}} \quad (4.24)$$

$$\frac{P_k}{3} = 2R \left(\frac{I_N}{\sqrt{3}} \right)^2 \Rightarrow$$

$$\frac{P_k}{3} = 2R \frac{I_N^2}{3} \Rightarrow$$

$$P_k = 2R I_N^2 \Rightarrow$$

$$R = R_1 = R_2' = \frac{P_k}{2I_N^2}$$

Η τάση πρωτεύοντος $U_{1,k}$ δίνεται από τη σχέση :

$$U_{1,k} = u_k U_{1,N} \quad (4.25)$$

Η εμπέδηση του κυκλώματος με βάση το ρεύμα και την τάση λειτουργίας θα είναι ίση με :

$$Z = \frac{U_{1,k}}{I_{\phi,N}} = \frac{\sqrt{3}u_k U_{1,N}}{I_N} \quad (4.26)$$

Επίσης, θα ισχύει η σχέση :

$$Z = 2R + j\omega 2L = 2R + j2X \quad (4.27)$$

Το μέτρο αυτής της εμπέδησης θα είναι ίσο με :

$$Z = \sqrt{4R^2 + 4X^2} \Rightarrow X = \frac{\sqrt{Z^2 - 4R^2}}{2} \Rightarrow \quad (4.28)$$

$$\omega L_{\sigma 1} = \omega L'_{\sigma 2} = \frac{\sqrt{Z^2 - 4R^2}}{2} \Rightarrow L_{\sigma 1} = L'_{\sigma 2} = \frac{\sqrt{Z^2 - 4R^2}}{2\omega}$$

όπου Z και R είναι υπολογισμένα από τις εξισώσεις (::) και (4.26) αντίστοιχα. Οι μετασχηματιστές διανομής που χρησιμοποιεί η ΔΕΗ για το ελληνικό ηλεκτρικό δίκτυο έχουν τυποποιημένες τιμές ισχύος. Με βάση αυτές τις τιμές έχουμε υπολογίσει τα στοιχεία για τη μοντελοποίηση των μετασχηματιστών.

Ονομαστική ισχύς KVA	Απώλειες χαλκού $P_k W$	Απώλειες εν κενώ $P_o W$	Τάση βραχυκύκλωσης $u_k \%$
50	875	125	4%
100	1475	210	
160	2000	300	
250	2750	425	
400	3850	610	
630	5400	860	
1000	9500	1100	6%
1600	14000	1700	
2500	22000	2500	

Πίνακας 4.2: Τυποποιημένες τιμές μετασχηματιστών για το ελληνικό δίκτυο διανομής.

4.3 Μοντελοποίηση γραμμών μεταφοράς

Μια γραμμή μεταφοράς δεν είναι τίποτε άλλο παρά ένα μέσο για τη διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας από το σημείο παραγωγής στα σημεία κατανάλωσης. Ειδικότερα, οι γραμμές διανομής μέσης τάσης για τις οποίες ενδιαφερόμαστε είναι συνήθως εναέριες και στηρίζονται πάνω σε ξύλινους στύλους. Συχνά μέσα στην πόλη, οι γραμμές διανομής είναι υπόγειες υπό τη μορφή καλωδίων. Στην παρούσα διπλωματική θα ασχοληθούμε μόνο με τις εναέριες γραμμές.

Υπάρχουν αρκετοί τύποι γραμμών μεταφοράς μέσης τάσης, που διαφοροποιούνται ως προς την κατασκευή του στύλου αλλά και την διάταξη των αγωγών των φάσεων. Ο πιο συνηθισμένος τύπος φαίνεται στο σχήμα 4.7. Οι αγωγοί των φάσεων βρίσκονται σε οριζόντιο επίπεδο, το οποίο απέχει από το έδαφος περίπου 6m. Για να εξαχθεί το κυκλωματικό ισοδύναμο θα πρέπει να λάβουμε υπόψιν τρία διαφορετικά φαινόμενα που συμβαίνουν κατά τη λειτουργία της:

- Οι τάσεις σειράς που επάγονται στους αγωγούς και που προκαλούνται από τα μαγνητικά πεδία που τους περιβάλλουν. Αυτές μπορούν να εκφραστούν από την εν σειρά επαγωγή L της γραμμής.
- Τα εγκάρσια ρεύματα διαρροής μεταξύ των αγωγών που προκαλούνται από τα ηλεκτρικά πεδία που υπάρχουν στο χώρο μεταξύ των αγωγών. Αυτά μπορούν να εκφραστούν από την εγκάρσια χωρητικότητα C της γραμμής.
- Η ωμική αντίσταση του υλικού των αγωγών, την οποία εκφράζουμε με την εν σειρά αντίσταση R της γραμμής.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία η μοντελοποίηση της γραμμής μεταφοράς έγινε αναλύοντας την σε συμμετρικές συνιστώσες τόσο για να έχουμε μεγαλύτερη ακρίβεια στα αποτελέσματα κατά τις ασυμμετρίες που θέλουμε να εισάγουμε τόσο και για την περαιτέρω ακρίβεια του υπολογιστικού πακέτου που χρησιμοποιήσαμε. Περισσότερες θεωρητικές αναλύσεις και μια εισαγωγή στην θεωρία των συμμετρικών συνιστωσών μπορεί να γίνει στο [2].

4.3.1 Ευθύ σύστημα

Το σχήμα 4.8 δείχνει το ισοδύναμο κύκλωμα εναέριας γραμμής για το ευθύ σύστημα, το οποίο ισχύει και για το αντίστροφο σύστημα.

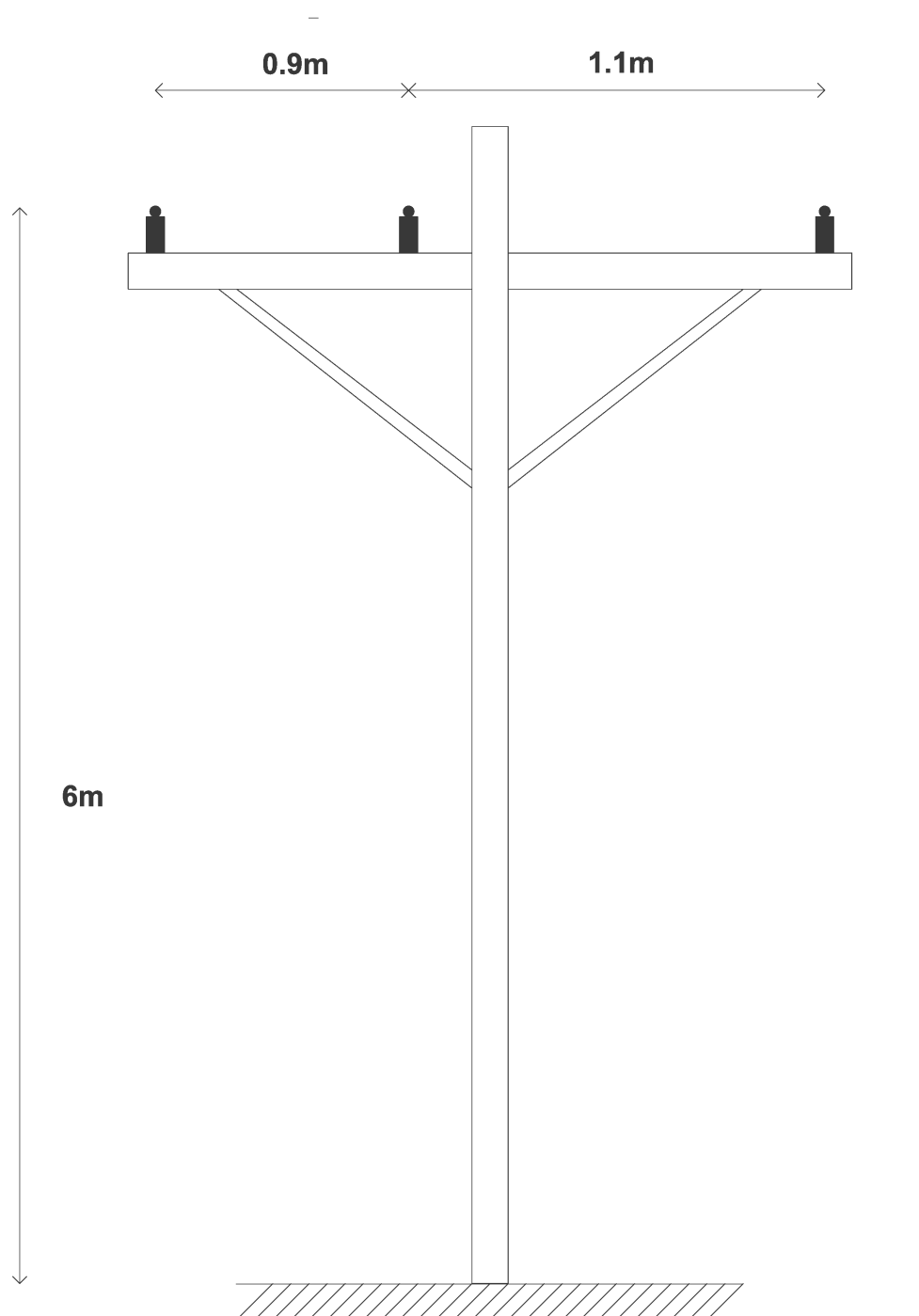
$$R_1 = \frac{1}{n} \frac{1}{\kappa q} \quad (4.29)$$

όπου n ο αριθμός των αγωγών που απαρτίζουν τον πολλαπλό αγωγό και κ η ειδική αγωγιμότητα:

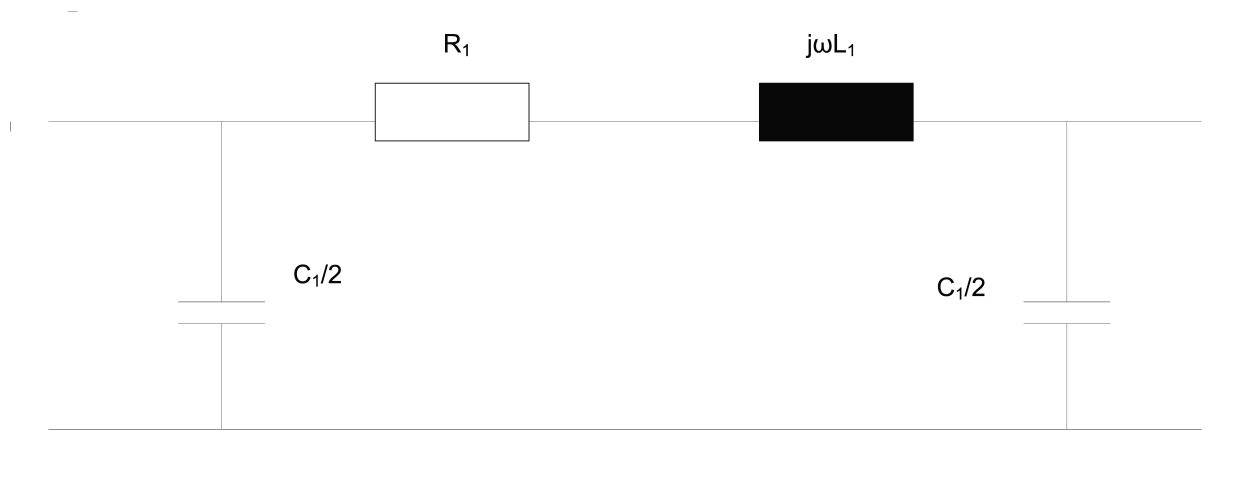
$$\kappa_{20^\circ C} = 56 \frac{m}{\Omega mm^2} \quad (4.30)$$

$$\kappa_{20^\circ C} = 34.8 \frac{m}{\Omega mm^2} \quad (4.31)$$

για αγωγούς χαλκού και αλουμινίου, στους $20^\circ C$, αντίστοιχα. Και q η διατομή του αγωγού (διατομή χαλκού ή αλουμινίου). Η διατομή του χάλυβα αγωγών με χαλύβδινη ψυχή δε λαμβάνεται υπόψιν.



Σχήμα 4.7: Τυπική διάταξη γραμμής μέσης τάσης



Σχήμα 4.8: Ισοδύναμο κύκλωμα ευθέως συστήματος για εναέρια γραμμή μεταφοράς

Η ωμική αντίσταση εξαρτάται από τη θερμοκρασία.

$$R_{1,\theta} = R_{1,20^\circ C}(1 + \alpha_{20^\circ C}(\theta - 20^\circ C)) \quad (4.32)$$

Η τιμή του συντελεστή α_{20° είναι:

$$\alpha_{20^\circ} = 3.9 \cdot 10^{-3} C^{-1} \quad (4.33)$$

$$\alpha_{20^\circ} = 4.0 \cdot 10^{-3} C^{-1} \quad (4.34)$$

Συνήθως λαμβάνεται τόσο για τους αγωγούς χαλκού, όσο και για αγωγούς αλουμινίου η (4.34).

Είναι γνωστό από τον ηλεκτρομαγνητισμό ότι όταν ένας αγωγός διαρρέεται από εναλλασσόμενο ρεύμα, τότε παράγεται, τόσο εντός αυτού όσο και στο περιβάλλον χώρο, μαγνητικό πεδίο, οι δυναμικές γραμμές του οποίου είναι ομόκεντροι κύκλοι που έχουν τα κέντρα τους στο κέντρο του αγωγού και βρίσκονται σε επίπεδα κάθετα σε προς τον άξονα του αγωγού. Όταν υπάρχουν περισσότεροι από ένας αγωγοί στον ίδιο χώρο, ο καθένας από αυτούς δημιουργεί το δικό του μαγνητικό πεδίο. Ευρισκόμενοι οι αγωγοί μέσα σε αυτό το μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο, αναπτύσσονται πάνω τους τάσεις εξ επαγωγής. Τα μέτρα αυτών των τάσεων εξαρτώνται από τα επαγωγικά χαρακτηριστικά τους αλλά και από τις αμοιβαίες επαγωγές μεταξύ των τριών αγωγών.

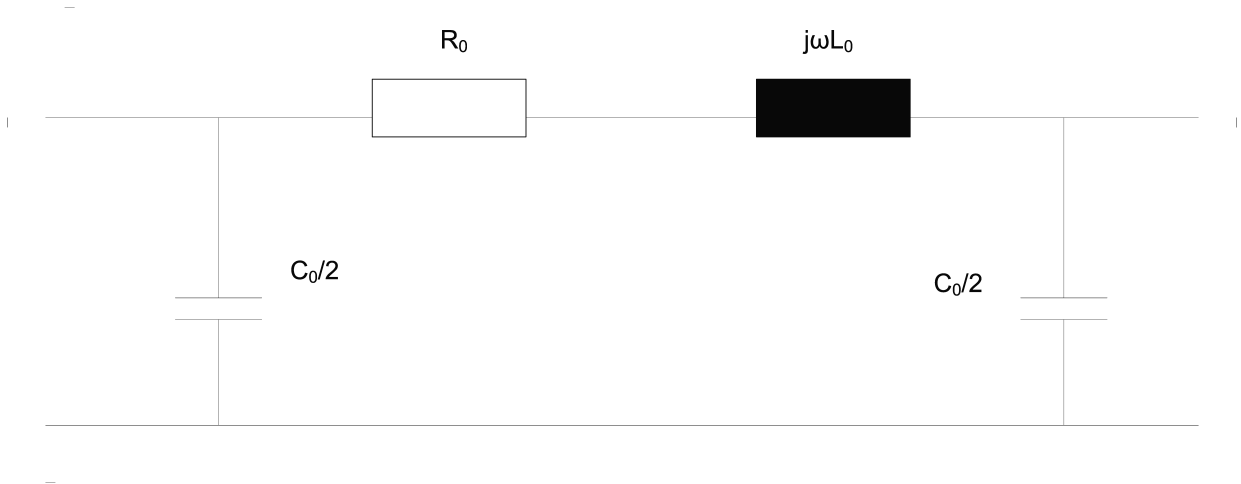
Για μια απλή γραμμή (όπως στην περίπτωση μας), η επαγωγική αντίδραση Q_1 είναι: $Q_1 = \omega L_1$.

$$L_1 = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left(\ln \frac{D_i}{r_B} + \frac{1}{4n} \right) \quad (4.35)$$

- όπου $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} H/m$, η μαγνητική διαπερατότητα του αέρα
- l το μήκος της γραμμής
- r_B η τροποποιημένη ακτίνα του αγωγού³

³η τροποποιημένη ακτίνα του αγωγού δίνεται από την εξίσωση

$$r_B = \sqrt[n]{nr_T^{n-1}} \quad (4.36)$$



Σχήμα 4.9: Ισοδύναμο κύκλωμα ομοπολικού συστήματος για εναέρια γραμμή μεταφοράς

- n ο αριθμός των αγωγών που απαρτίζουν τον πολλαπλό αγωγό

$$D_i = \sqrt[3]{d_{ab}d_{bc}d_{ca}} \quad (4.37)$$

D_i είναι η ισοδύναμη απόσταση για την περίπτωση άνισων αποστάσεων μεταξύ των αγωγών των φάσεων.

Οι αγωγοί μιας γραμμής ηλεκτρικής ενέργειας, ανάμεσα στους οποίους παρεμβάλλεται ως διηλεκτρικό αέρας, συμπεριφέρονται ουσιαστικά σαν οπλισμοί πυκνωτή. Η διαφορά δυναμικού μεταξύ των αγωγών των φάσεων προκαλεί φόρτιση αυτών κατά τον ίδιο τρόπο που φορτίζονται οι οπλισμοί ενός πυκνωτή όταν μεταξύ τους υπάρχει μια διαφορά δυναμικού. Η χωρητικότητα μιας γραμμής είναι το αποτέλεσμα της διαφοράς δυναμικού μεταξύ των αγωγών και των αγωγών και της γης.

$$C_1 = C_\Gamma + 3C \quad (4.38)$$

όπου C_Γ η χωρητικότητα μιας φάσεως προς τη γη και C η χωρητικότητα των αγωγών των φάσεων.

$$C_1 = \frac{2\pi\epsilon_0 l}{\ln \frac{D_i}{r_B}} \quad (4.39)$$

4.3.2 Ομοπολικό σύστημα

Το σχήμα 4.9 δείχνει το ισοδύναμο κύκλωμα για το ομοπολικό σύστημα.

Η αντίσταση $R_0 = R_1 + 3R_n$, όπου η R_1 είναι η ωμική αντίσταση του αγωγού φάσεως (αντίσταση ευθέως συστήματος) και R_n , η ωμική αντίσταση του γειωμένου αγωγού n ή η αντίσταση γης R_Γ (όπου το κύκλωμα κλείνει με ιδεατό αγωγό).

Η αντίσταση R_Γ είναι ανεξάρτητη από την ωμική αντίσταση του εδάφους, εξαρτάται όμως από την συχνότητα f .

$$R_\Gamma = \frac{\omega\mu_0 l}{8} \quad (4.40)$$

Για $\omega = 2\pi f = 100\pi s^{-1}$ και $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} Vs/Am$ προκύπτει τελικά:

$$R'_\Gamma = 0.0493 \frac{\Omega}{km} \cong 0.05 \frac{\Omega}{km} \quad (4.41)$$

Η απόσταση δ είναι το βάθος διεισδύσεως (απόσταση ιδεατού αγωγού από την επιφάνεια της γης, ώστε η επαγωγική αντίδραση αγωγού φάσεως-γης να είναι ίση με την αντίδραση του βρόχου αγωγός φάσεως-ιδεατός αγωγός στο βάθος δ). Το βάθος διεισδύσεως εξαρτάται από την συχνότητα του ρεύματος και την ειδική αντίσταση του εδάφους ρ_{Γ} . Για $\omega = 2\pi f = 100\pi s^{-1}$ και $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} Vs/Am$:

$$\delta = \frac{1.85}{\sqrt{\frac{\omega\mu_0}{\rho_{\Gamma}}}} = 93.1\sqrt{\rho_{\Gamma}}m \quad (4.42)$$

με ρ_{Γ} σε $\Omega \cdot m$. Για απλές γραμμές, με πολλαπλούς αγωγούς να απαρτίζουν τον κάθε αγωγό

$$Z_0 = R_0 + j\omega L_0 = (R_1 + 3\frac{\omega\mu l}{8}) + j\omega\frac{\mu_0 l}{2\pi} (3\ln\frac{\delta}{\sqrt[3]{r_B D_i^2} + \frac{1}{4}}) \quad (4.43)$$

$$C_0 = \frac{2\pi\epsilon_0 l}{3\ln\frac{2h}{\sqrt[3]{r_B D_i^2}}} \quad (4.44)$$

4.3.3 Τιμές αντιδράσεων και αντιστάσεων εναέριων γραμμών

Επειδή είναι αρκετά δύσκολο να υπολογιστούν οι παραπάνω τιμές για κάθε τύπο και κάθε περίπτωση υπάρχουν στην βιβλιογραφία συγκεκριμένες τιμές βάση των οποίων γίνονται οι υπολογισμοί. Βάση αυτών των τιμών έγιναν και οι υπολογισμοί και εισαγωγή αυτών των στοιχείων στο μοντέλο.

Ισοδύναμη διατομή χαλκού mm^2	$R'_{1,20^\circ}$ Ω/km	ακτίνα αγωγών $r(mm)$			$X_1 \Omega/km$			
					γραμμές MT		γραμμές XT	
		ACSR	Al	Cu	ACSR	Cu	Al	Cu
16	1.098	3.48	3.31	2.55	0.393	0.413	0.313	0.330
35	0.520	5.16	4.84	3.80	0.369	0.388	0.289	0.305
50	0.353	6.16	5.85	4.60	0.358	0.376	0.277	0.293
70	0.265	7.37	7.00	5.35	0.346	0.366	0.266	0.283
95	0.192	8.62	-	6.20	0.337	0.357	-	0.274

Πίνακας 4.3: Ωμική αντίσταση R'_1 και επαγωγική αντίδραση X'_1 ανά μονάδα μήκους του ευθέος συστήματος των εναέριων γραμμών μέσης και χαμηλής τάσεως της ΔΕΗ.

Οι τιμές της ομοπολικής σύνθετης αντίστασης $Z_0 = R_{0+jX_0}$ είναι μεγαλύτερες από τις τιμές του ευθέος συστήματος $R_1 + jX_1$. Στον πίνακα 4.4 δίνονται οι λόγοι R_0/R_1 και X_0/X_1 για την εκτίμηση των τιμών R_0 και X_0 από τις γνωστές τιμές R_1 και X_1 .

Η τιμή C_0 είναι περίπου:

- $5.5nF/km$ για γραμμές χαμηλής τάσης
- $4.5nF/km$ για γραμμές μέσης τάσης
- $4nF/km$ για γραμμές υψηλής τάσης με απλούς αγωγούς
- $6.5nF/km$ για γραμμές υψηλής και υπέρυψηλής τάσης με διπλούς αγωγούς
- $7nF/km$ για γραμμές υψηλής και υπερυψηλής τάσης με τετραπλούς αγωγούς

$$C_0 \cong (0.45 \dots 0.60)C_1 \quad (4.45)$$

	απλές γραμμές		διπλές γραμμές	
	R_0/R_1	X_0/X_1	R_0/R_1	X_0/X_1
Γραμμές μέσης και υψηλής τάσεως χωρίς αγωγό γης		3.3		5.8
με ένα αγωγό γης από St		3.1		5.5
με ένα αγωγό γης από Al/St	2...8	2.7	4...9	4.6
με δύο αγωγό γης από Al/St		2.1		3.7
Γραμμές χαμηλής τάσης με γειωμένο ουδέτερο αγωγό	1.9	3	-	-

Πίνακας 4.4: Λόγοι R_0/R_1 και X_0/X_1 εναέριων γραμμών

Κεφάλαιο 5

Αποτελέσματα εξομοιώσεων

Σε αυτό το κεφάλαιο, θα παραθέσουμε τα αποτελέσματα των εξομοιώσεων για το δίκτυο μέσης τάσης που μελετήθηκε. Ακόμη και κάποια στοιχεία που αφορούν τον τρόπο εξομοίωσης του μοντέλου από το συγκεκριμένο υπολογιστικό πακέτο.

5.1 Τρόπος εξομοίωσης

Το MATLAB για τον υπολογισμό των στοιχείων που μας ενδιαφέρουν εκτελεί μια συγκεκριμένη λειτουργία. Από το γραφικό τρόπο αναπαράστασης ενός κυκλώματος (αν πρόκειται για πολυπλοκότερα στοιχεία, π.χ γραμμή μεταφοράς, ουσιαστικά αντικαθίστανται από R-L-C στοιχεία), δημιουργεί τις καταστατικές εξισώσεις του κυκλώματος. Ύστερα, ανάλογα με τη μέθοδο επίλυσης που έχουμε επιλέξει τις επιλύει. Με την εντολή `power_analyze`, εισάγονται οι καταστάσεις (ρεύματα πηνίων και τάσεις πυκνωτών), οι είσοδοι και οι έξοδοι και επιστρέφει τους πίνακες A, B, C, D .

[A,B,C,D,electrical_states,input,output]=power_analyze('tixaio_kikloma')

5.1.1 Αριθμητική μέθοδος επίλυσης των διαφορικών εξισώσεων

Η επίλυση των διαφορικών εξισώσεων που εξάγονται από την εισαγωγή και εκτέλεση του μοντέλου από το Simulink γίνονται με βάση τη μέθοδο Bogacki-Shampine (ή όπως αλλιώς αναφέρεται από το Matlab σαν μέθοδος `ode23`).

Η μέθοδος αυτή προτάθηκε για πρώτη φορά το 1989 από τους Przenyslaw Bogacki και Lawrence Shampine. Η μέθοδος Bogacki-Shampine είναι μια τροποποιημένη μέθοδος Runge-Kutta τρίτης τάξης και χρησιμοποιεί τρεις εξισώσεις για κάθε βήμα προσέγγισης.

Θέλοντας να επιλύσουμε μια συνήθη διαφορική εξίσωση της μορφής $y' = f(t, y)$, όπου y_n αναφέρεται στην προσέγγιση της y για την τιμή της ανεξάρτητης μεταβλητής t_n και h_n το βήμα της προσέγγισης, δηλ. $h_n = t_{n+1} - t_n$. Κάθε βήμα της μεθόδου θα δίνεται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$k_1 = f(t_n, y_n) \quad (5.1)$$

$$k_2 = f\left(t_n + \frac{1}{2}h_n, y_n + \frac{1}{2}h_n k_1\right) \quad (5.2)$$

$$k_3 = f\left(t_n + \frac{3}{4}h_n, y_n + \frac{3}{4}h_n k_1\right) \quad (5.3)$$

$$y_{n+1} = y_n + \frac{2}{9}h_n k_1 + \frac{1}{3}h_n k_2 + \frac{4}{9}h_n k_3 \quad (5.4)$$

$$k_4 = f(t_n + h_n, y_{n+1}) \quad (5.5)$$

$$z_{n+1} = y_n + \frac{7}{24}h_n k_1 + \frac{1}{4}h_n k_2 + \frac{1}{3}h_n k_3 + \frac{1}{8}h_n k_4 \quad (5.6)$$

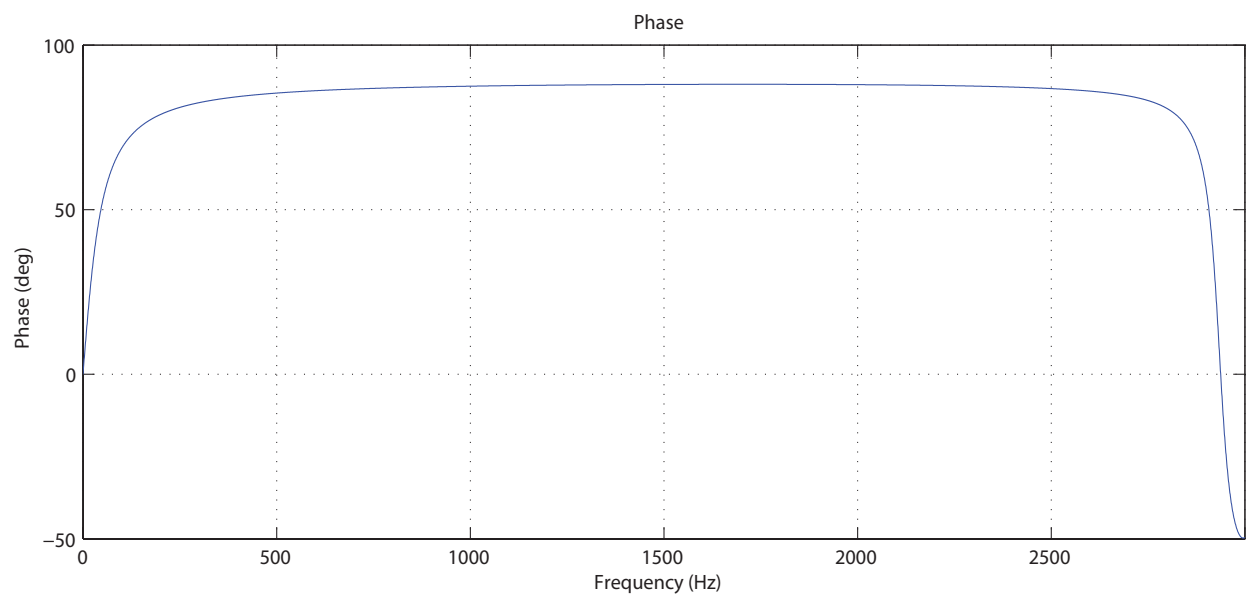
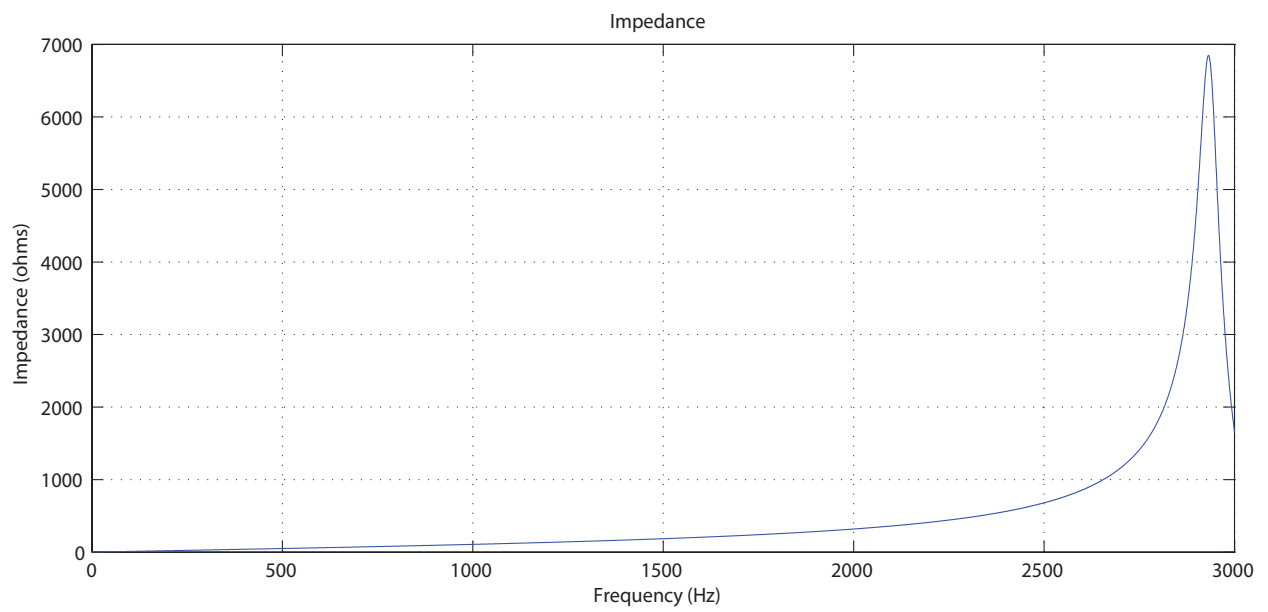
Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε η y_{n+1} είναι τρίτης τάξης προσέγγιση της ακριβούς λύσης. Η z_{n+1} είναι προσέγγιση δεύτερης τάξης της λύσης και χρησιμοποιείται για να μας δώσει την δυνατότητα αλλαγής του βήματος, έτσι ώστε να έχουμε μεταβλητό βήμα, μειώνοντας έτσι της επαναλήψεις κρατώντας όμως την ακρίβεια που θέλουμε (με αυτό το χρόνο κερδίζουμε σημαντικό χρόνο κατά της εκτέλεση ενός τέτοιου προγράμματος). Όπως γίνεται φανερό από τις (5.1) και (5.5) η τιμή k_1 και k_4 είναι η ίδια. Λόγω αυτού ικανοποιεί την ιδιότητα FSAL (First Same As Last) για αυτό τη μέθοδος αυτή θεωρείται σαν να ενσωματώνει μιας τέταρτης τάξης μέθοδο ενώ είναι τρίτης.

5.2 Διαγράμματα εμπέδησης-συχνότητας, εμπέδησης-φάσης χωρίς πυκνωτή αντιστάθμισης

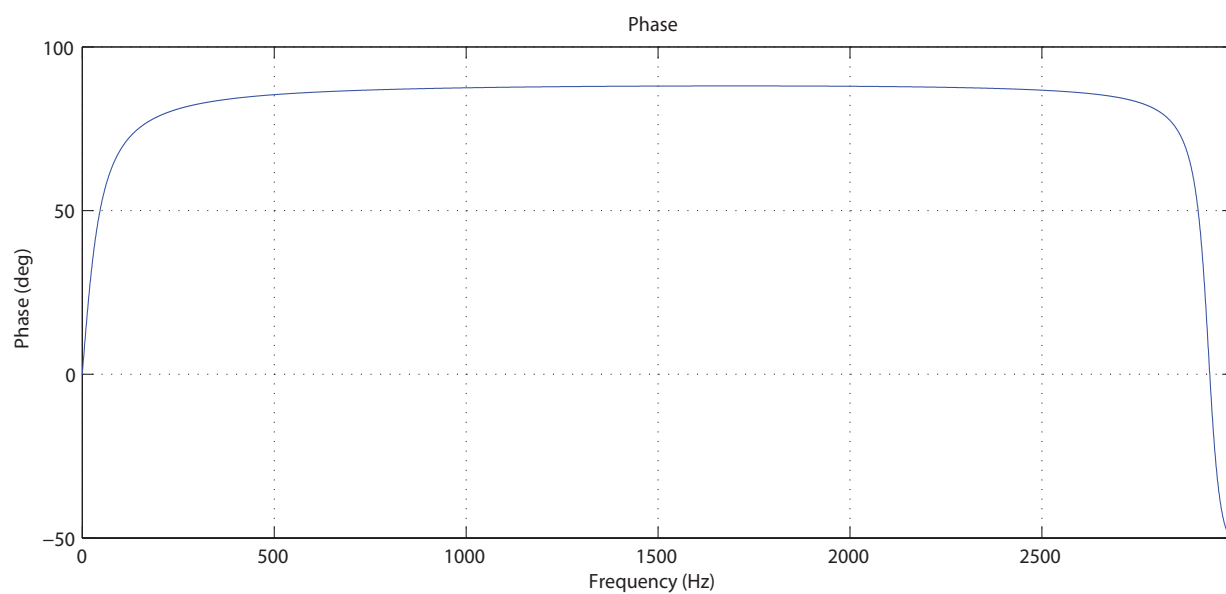
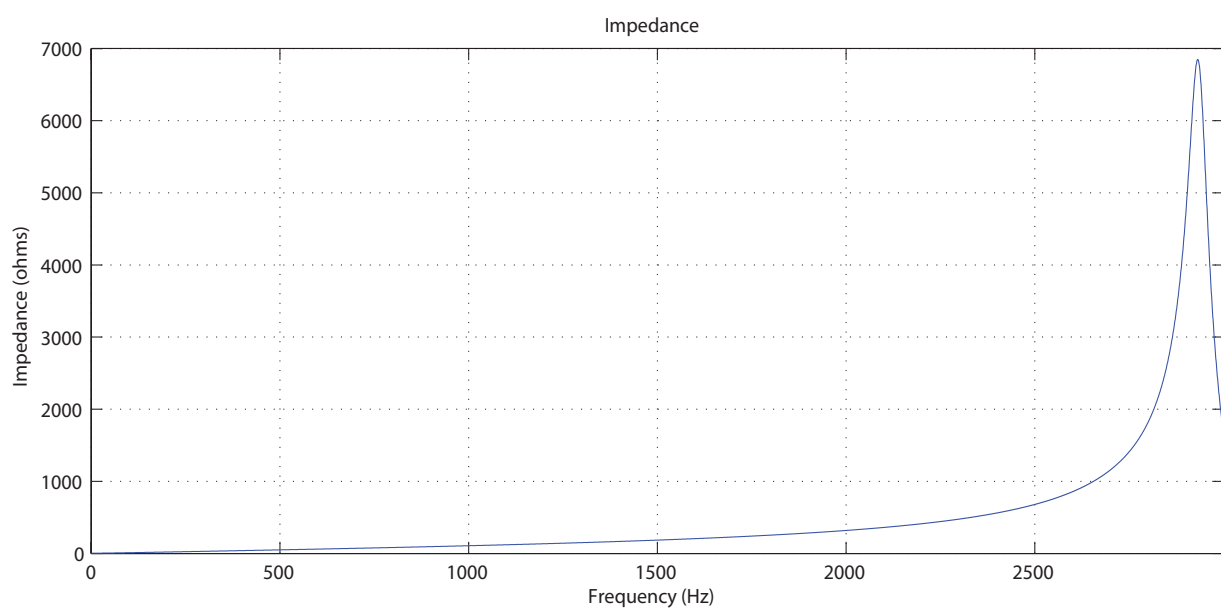
Παρακάτω φαίνονται τα διαγράμματα εμπέδησης-συχνότητας, εμπέδησης-φάσης χωρίς πυκνωτή αντιστάθμισης για το δίκτυο μέσης τάσης. Η φόρτιση των μετασχηματιστών όπως περιγράφηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο είναι 80% και ΣΙ : 0.8 επαγωγικό.

Βήμα διακριτοποίησης	Μέθοδος επίλυσης	Χρόνος εξομοίωσης (προσεγγιστικά)
κανένα	ode23 (Bogacki-Shamphine)	12 min

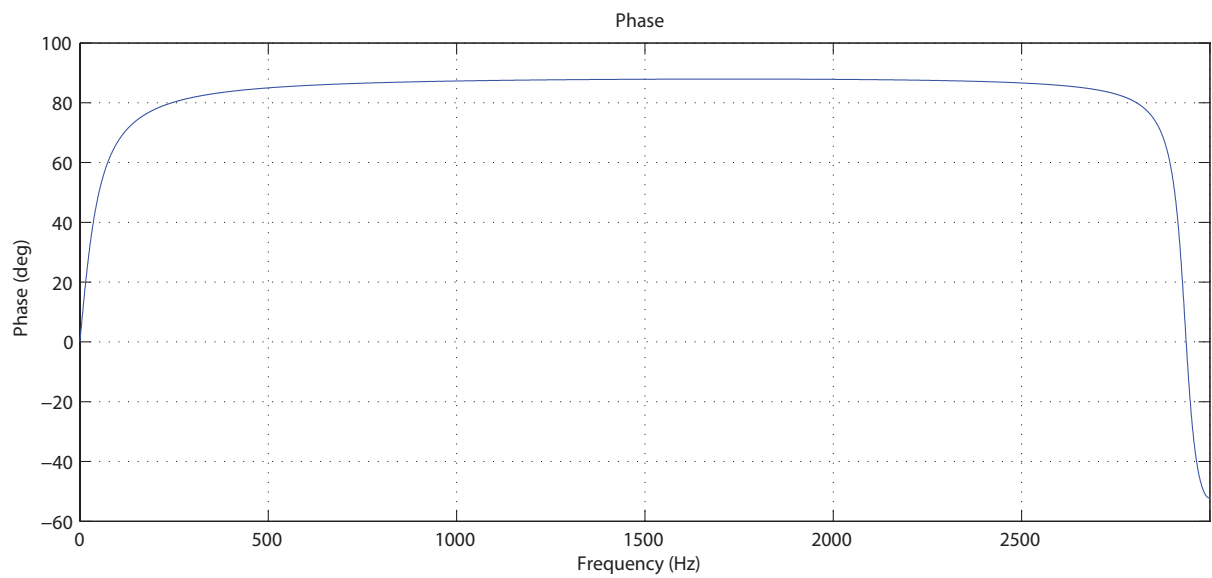
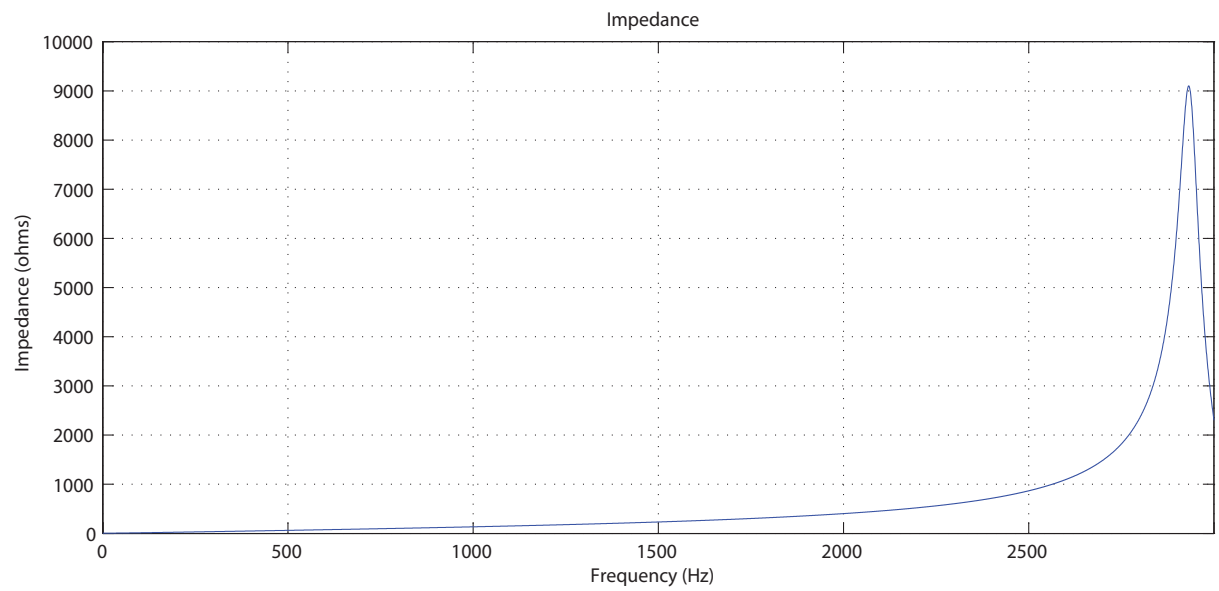
Πίνακας 5.1: Στοιχεία εξομοίωσης



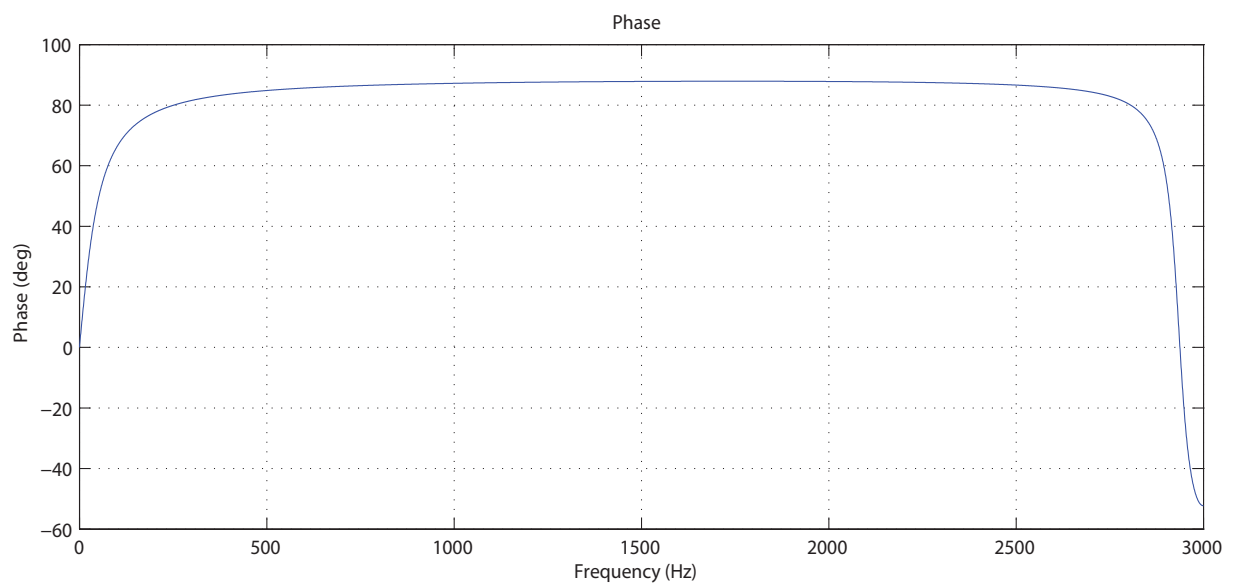
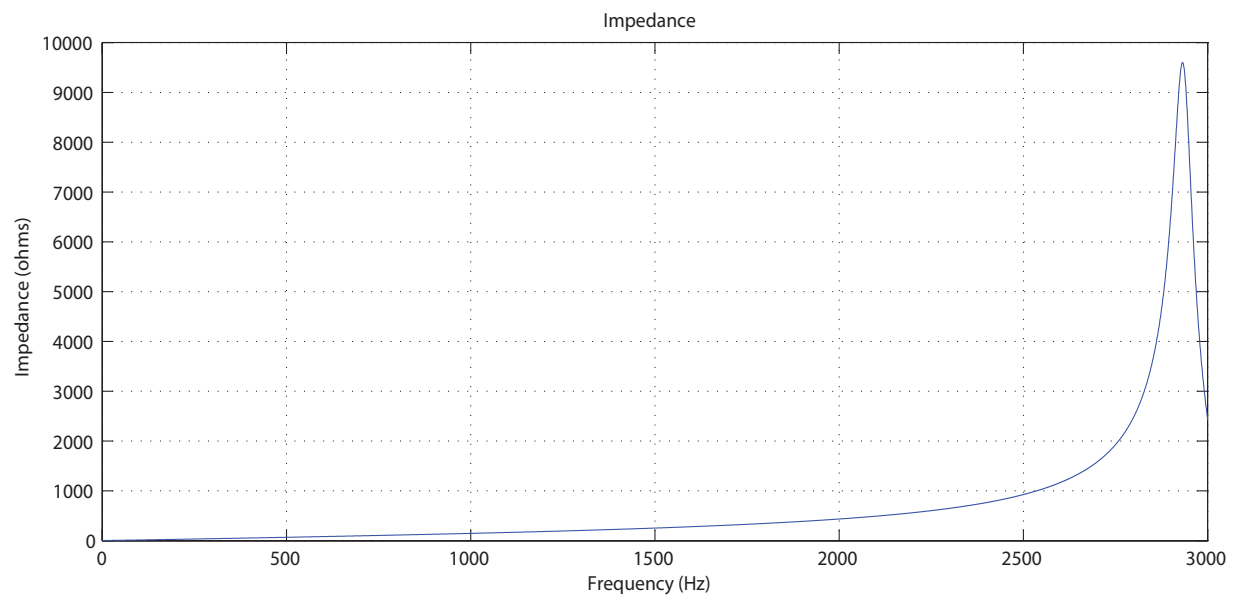
Σχήμα 5.1: Κόμβος 1



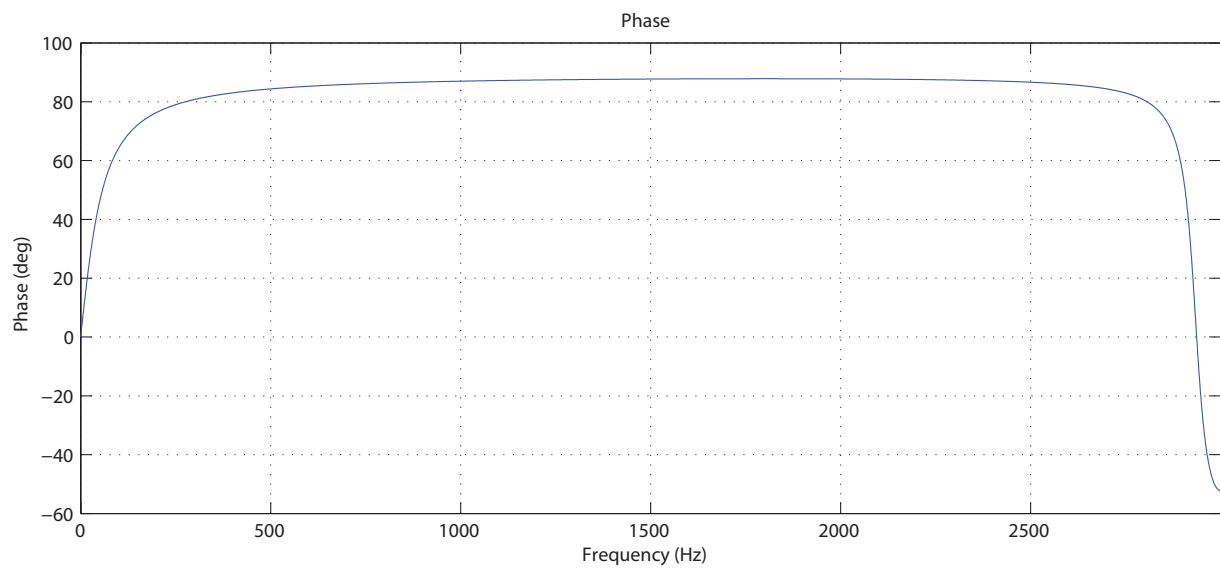
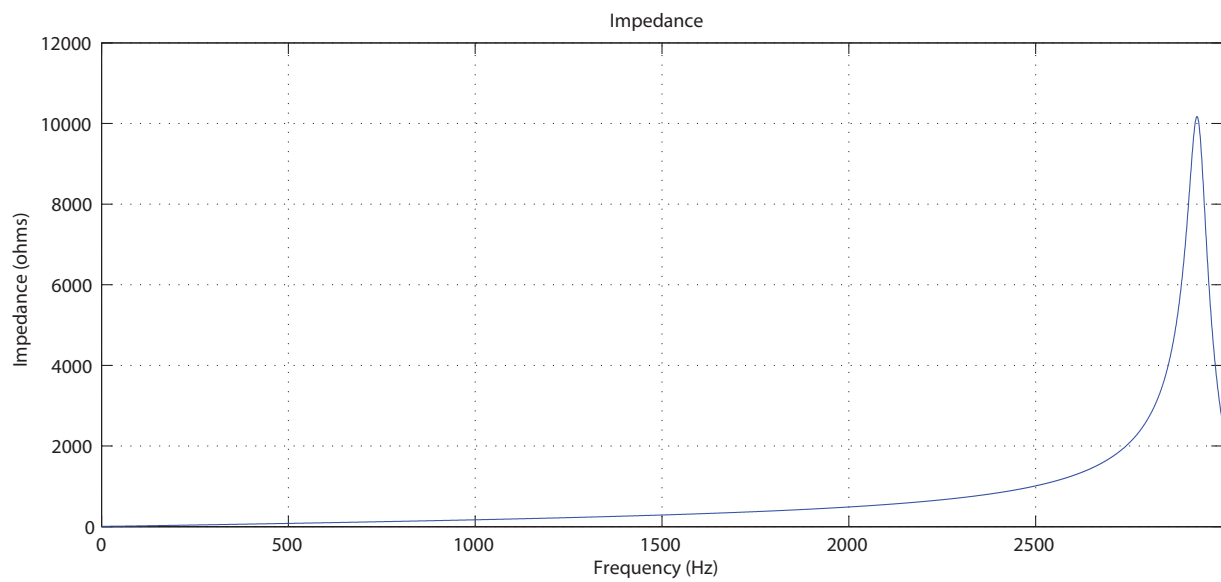
Σχήμα 5.2: Κόμβος 2



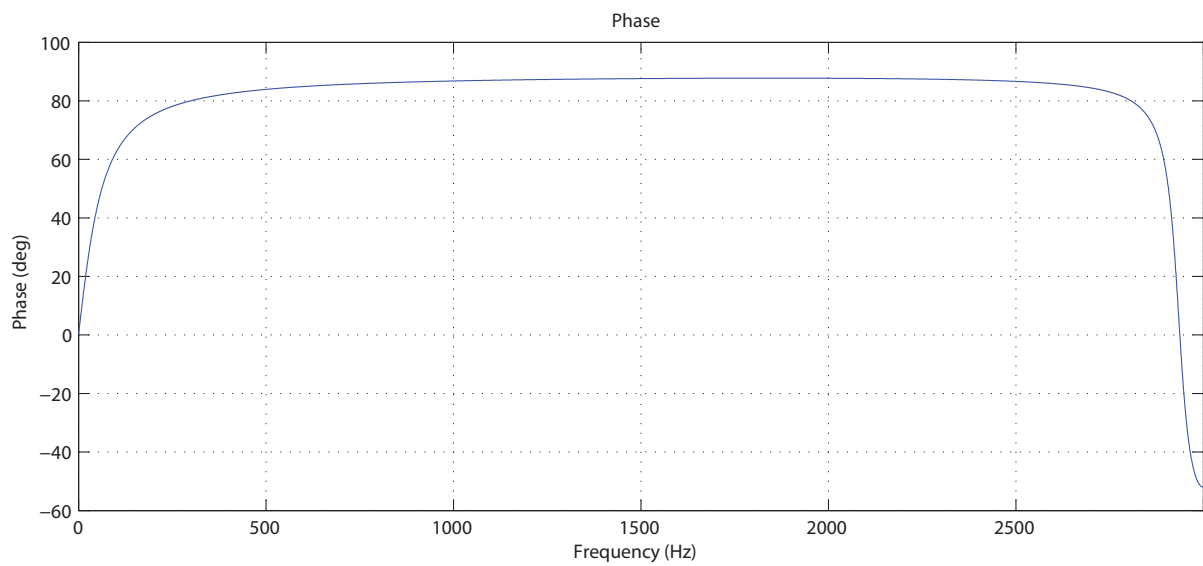
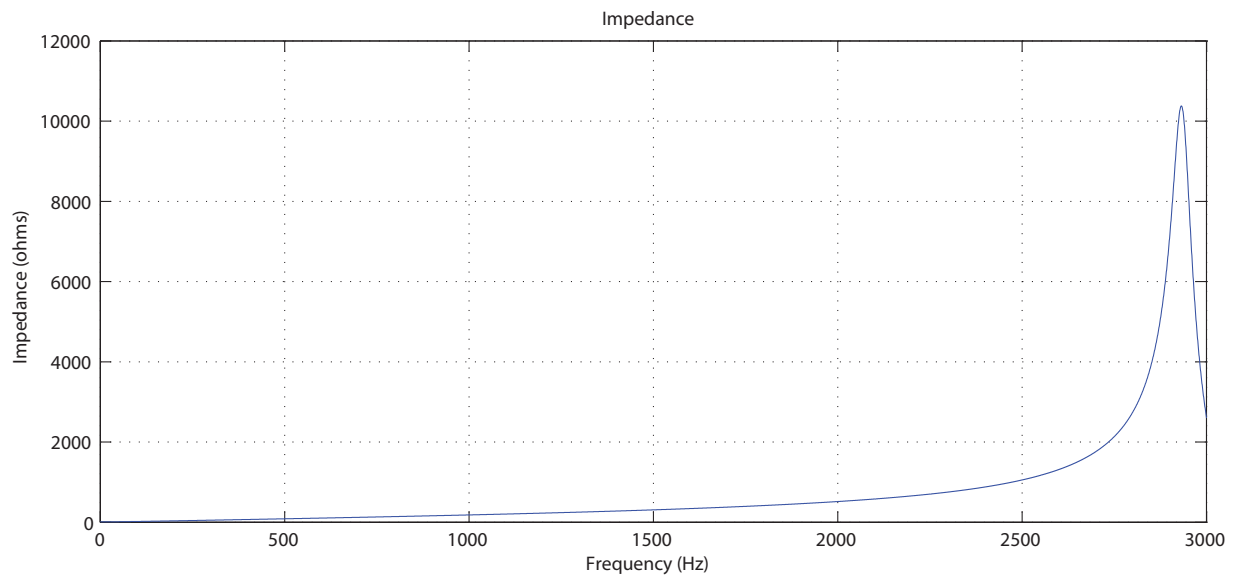
Σχήμα 5.3: Κόμβος 3



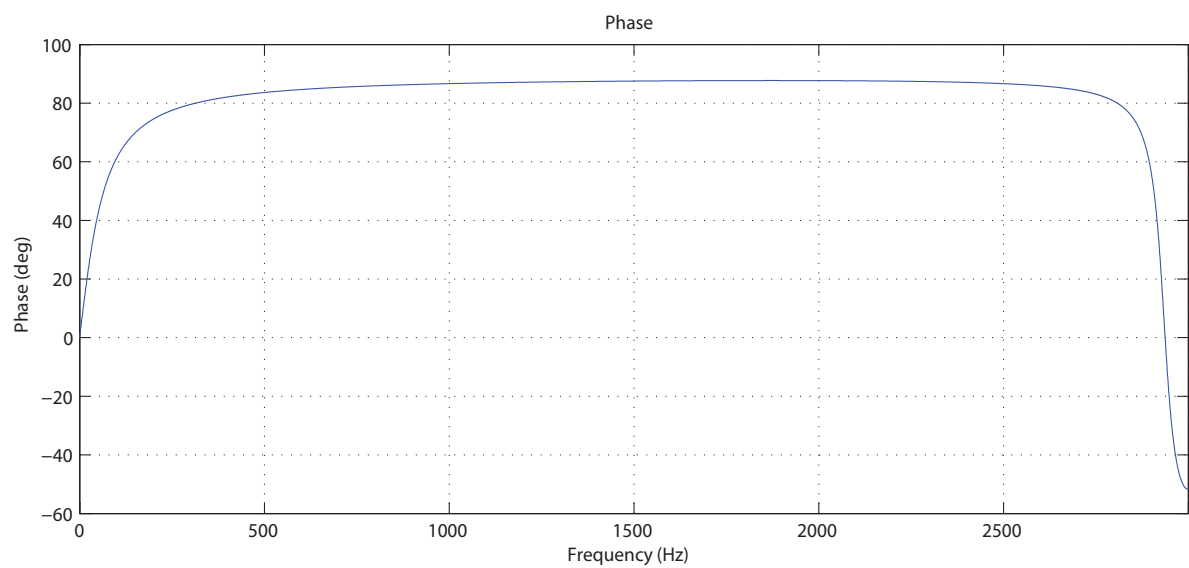
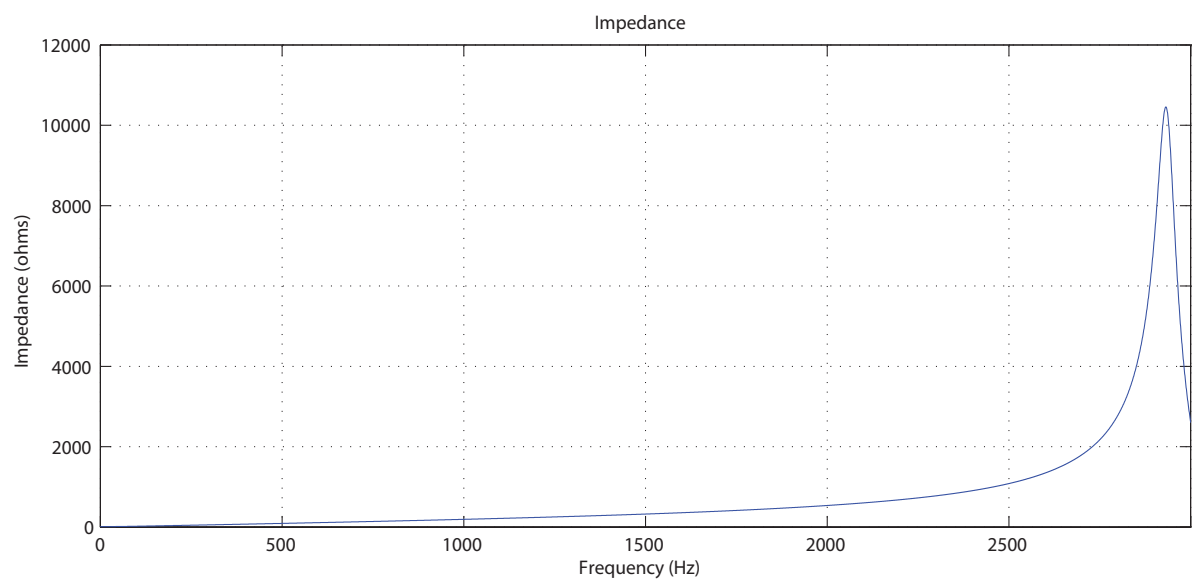
Σχήμα 5.4: Κόμβος 4



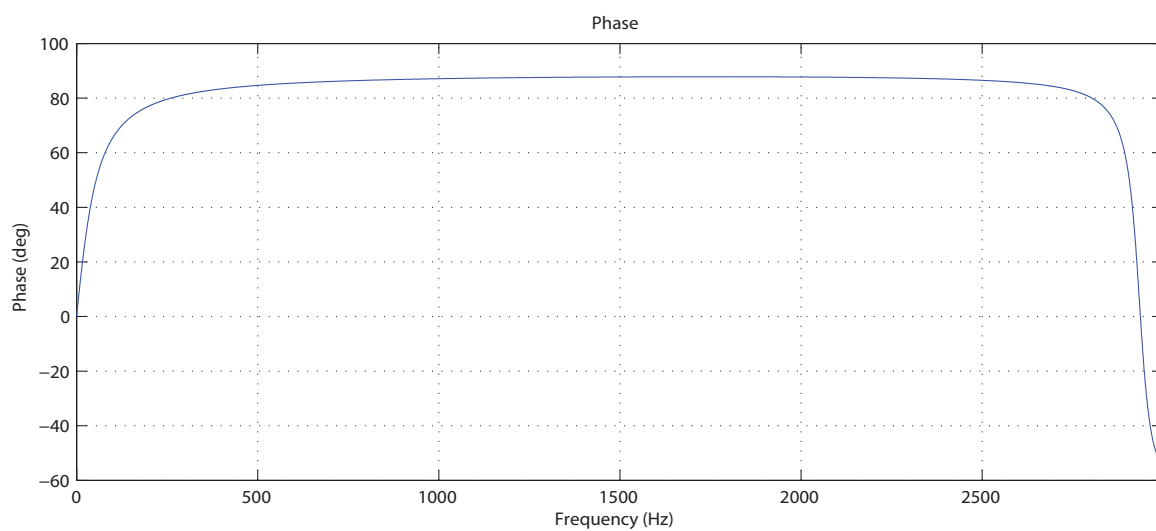
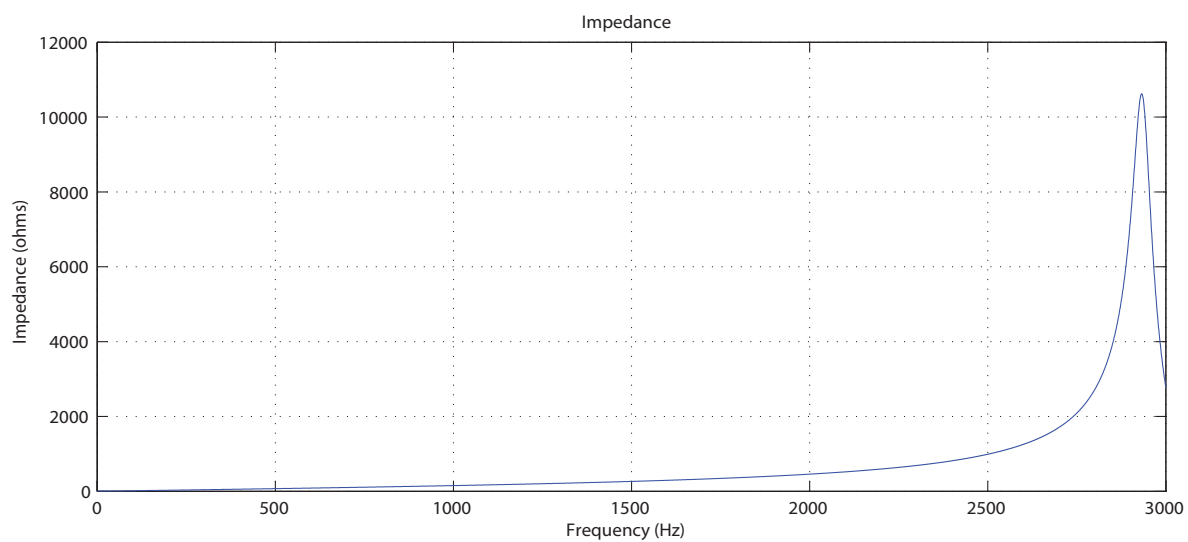
Σχήμα 5.5: Κόμβος 5



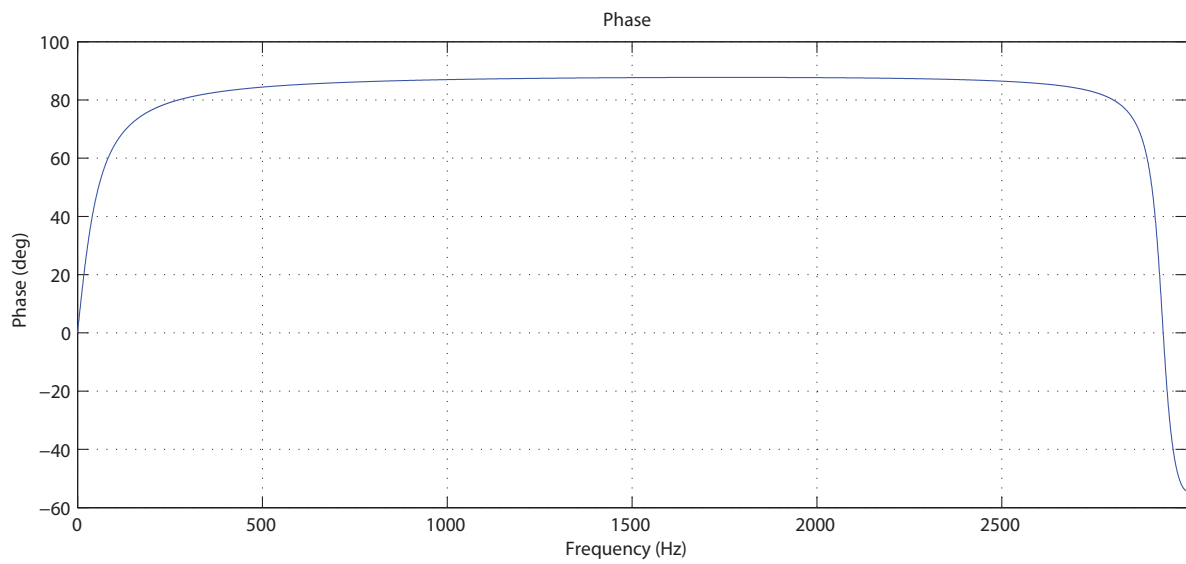
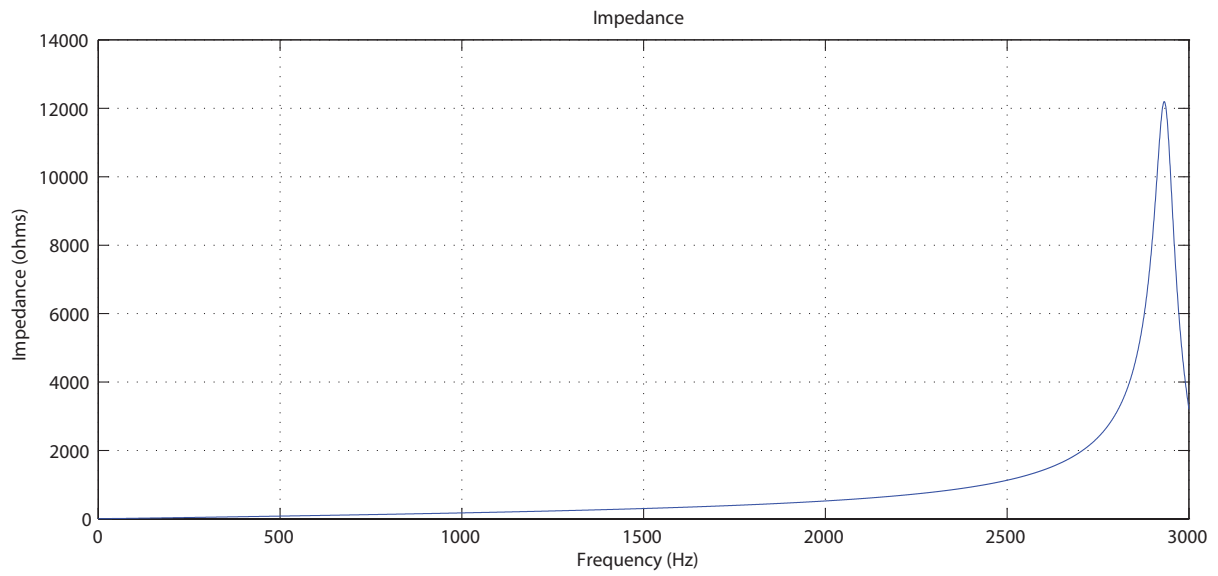
Σχήμα 5.6: Κόμβος 6



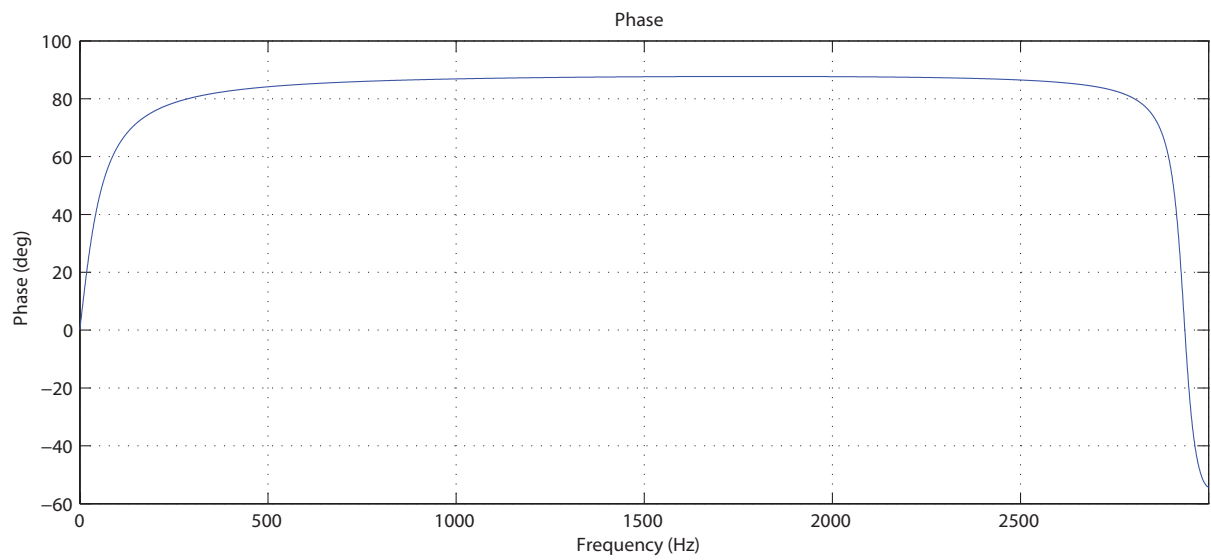
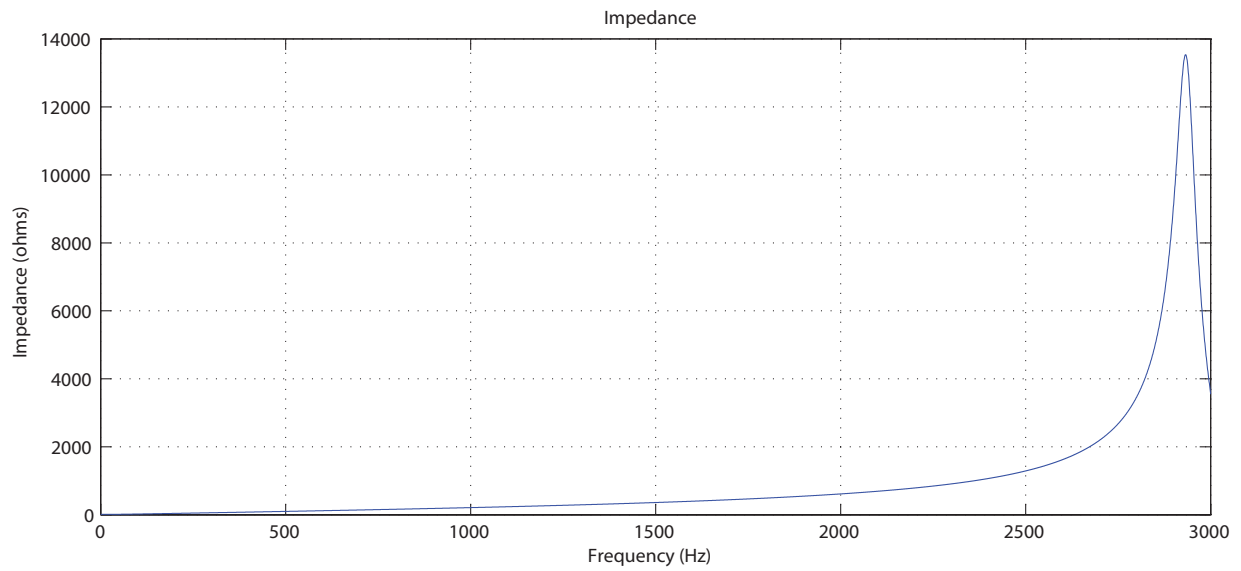
Σχήμα 5.7: Κόμβος 7



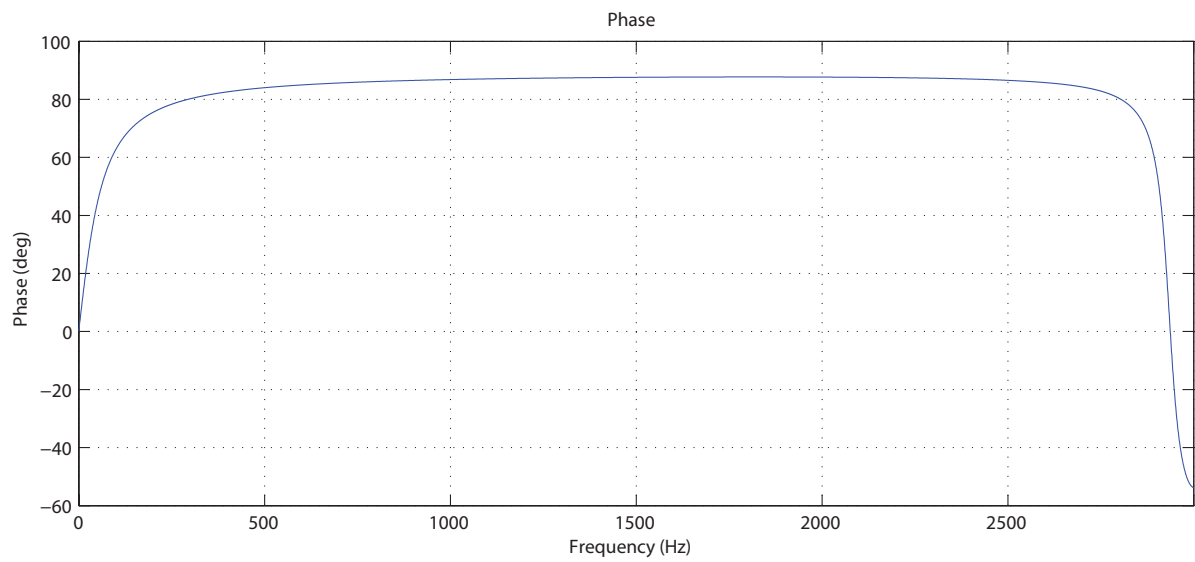
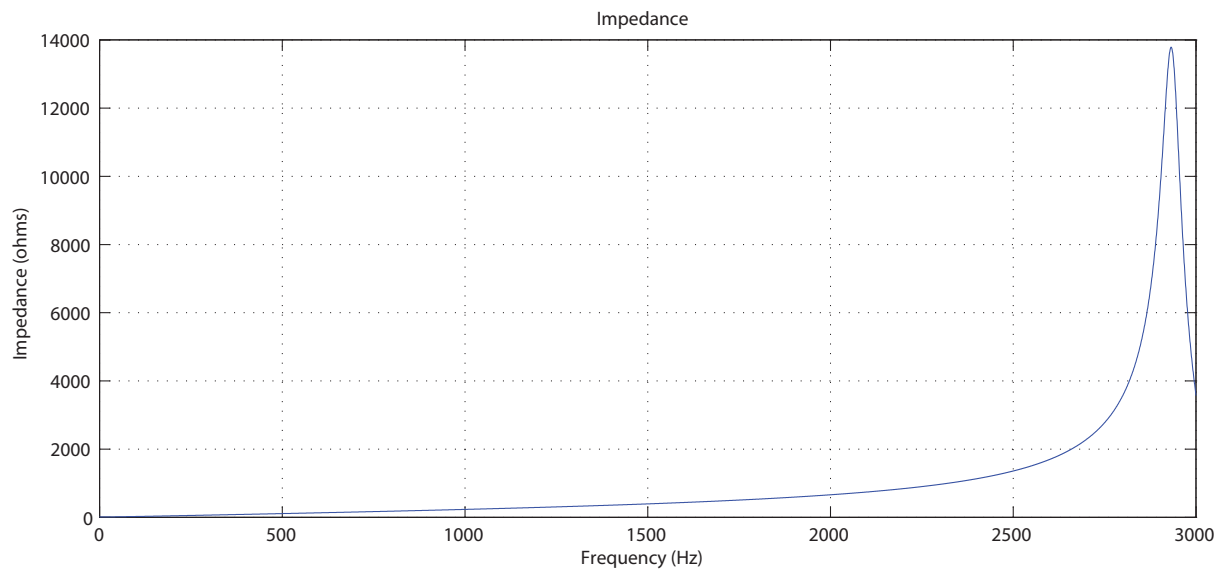
Σχήμα 5.8: Κόμβος 8



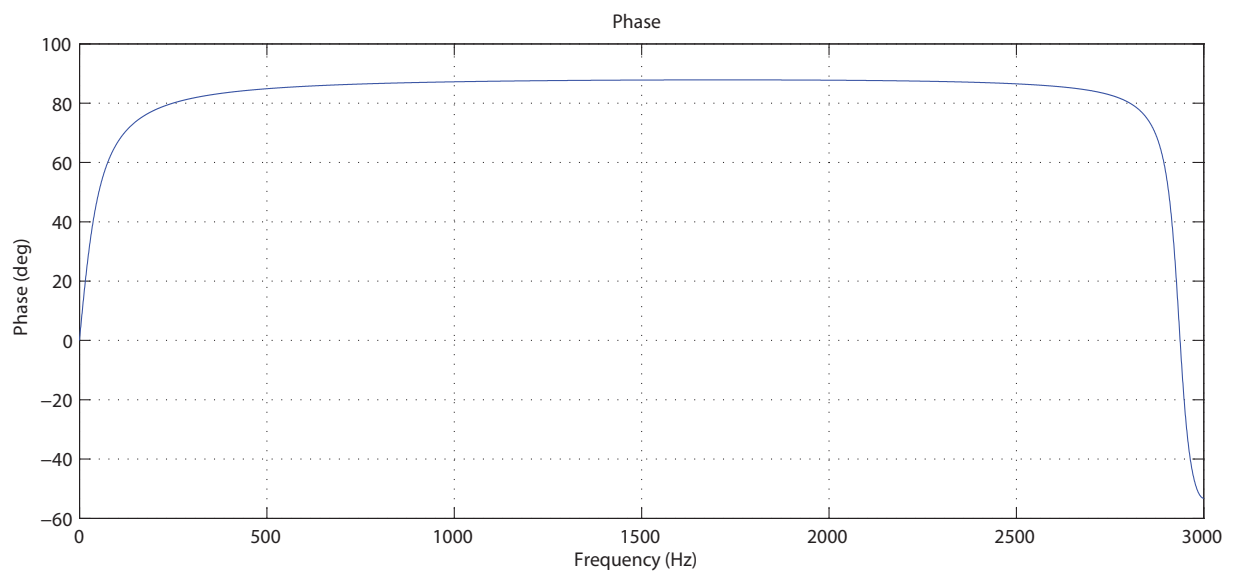
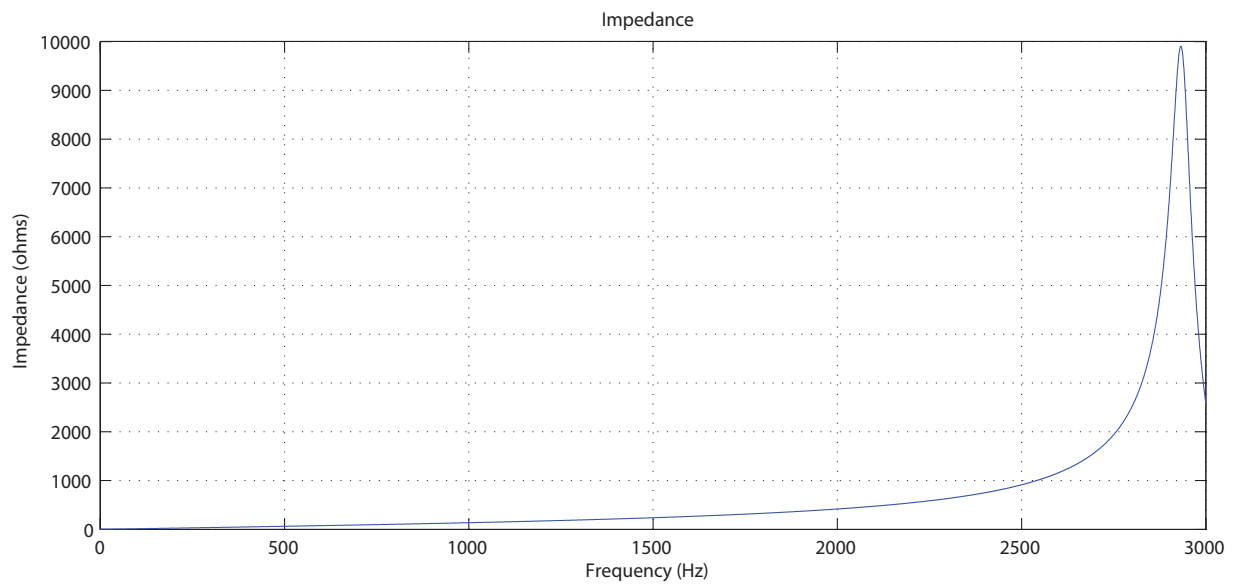
Σχήμα 5.9: Κόμβος 9



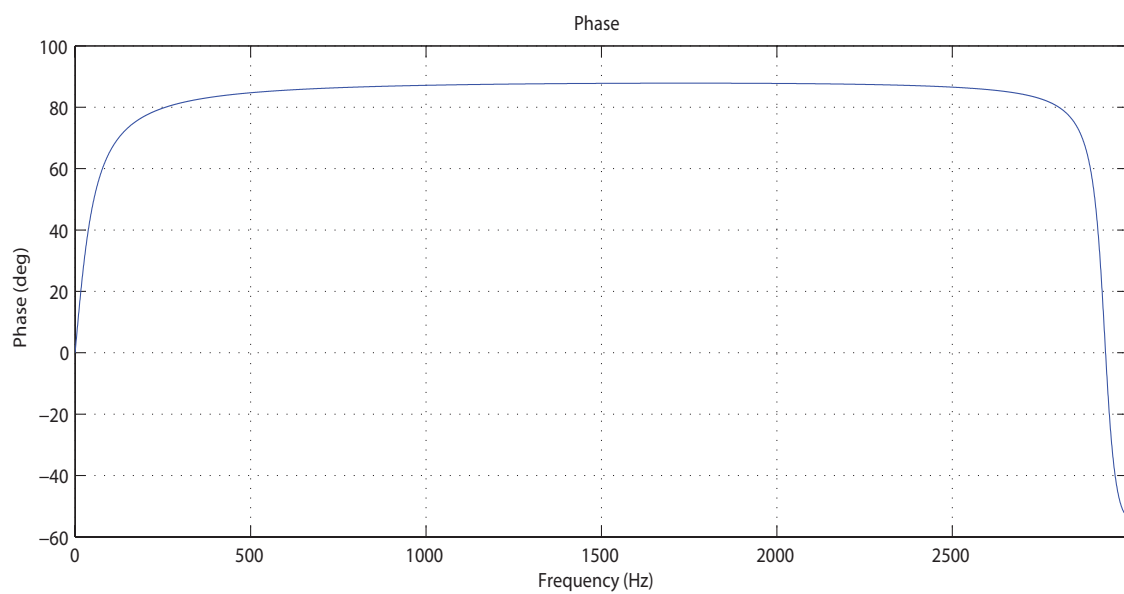
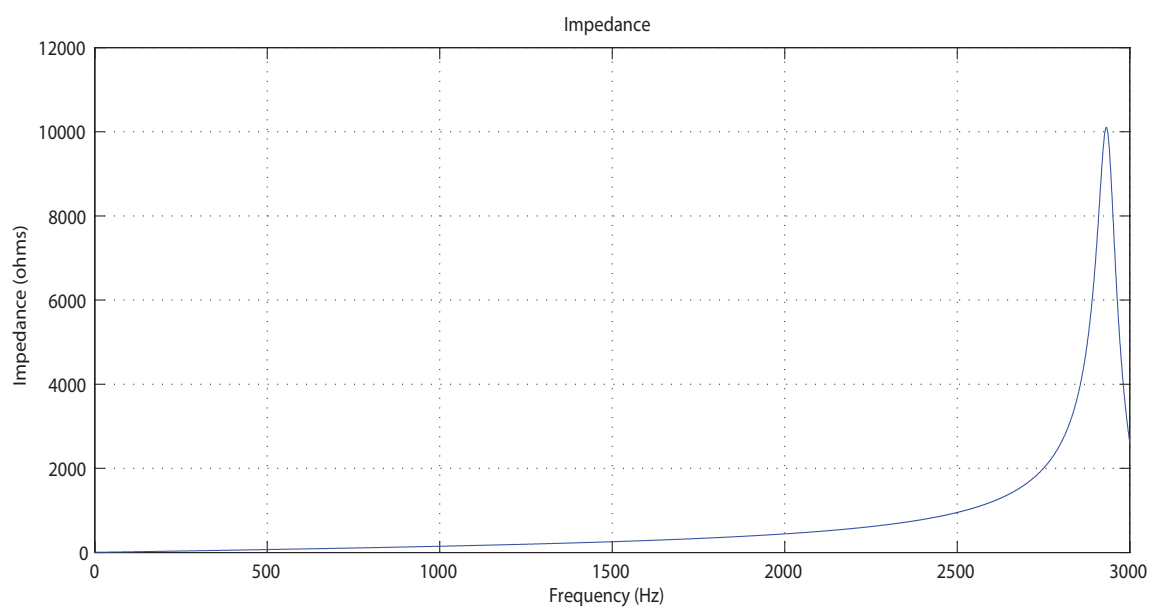
Σχήμα 5.10: Κόμβος 10



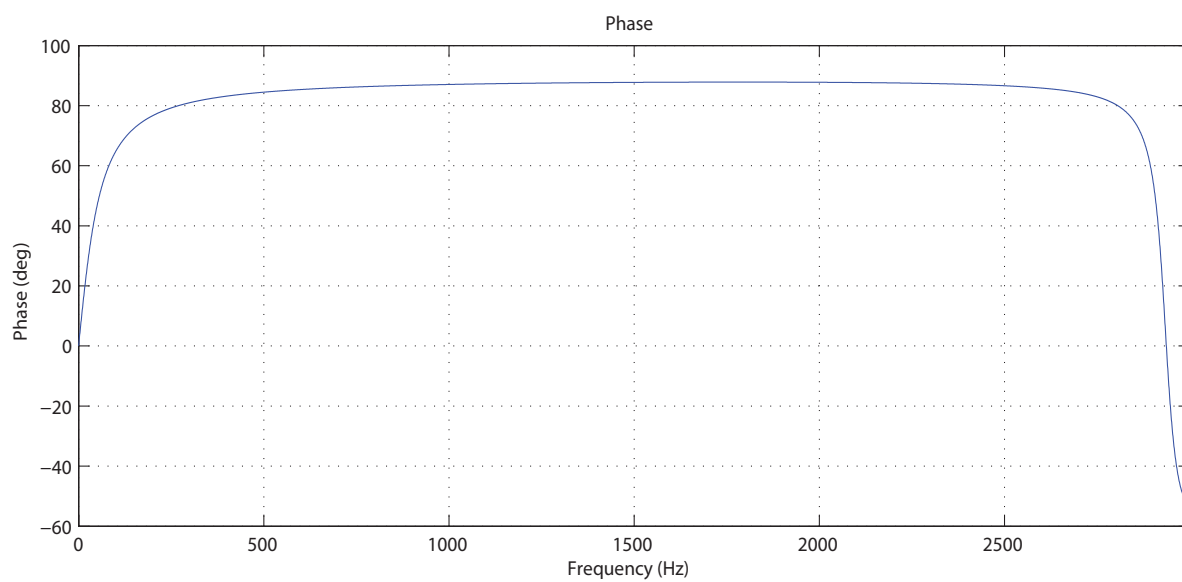
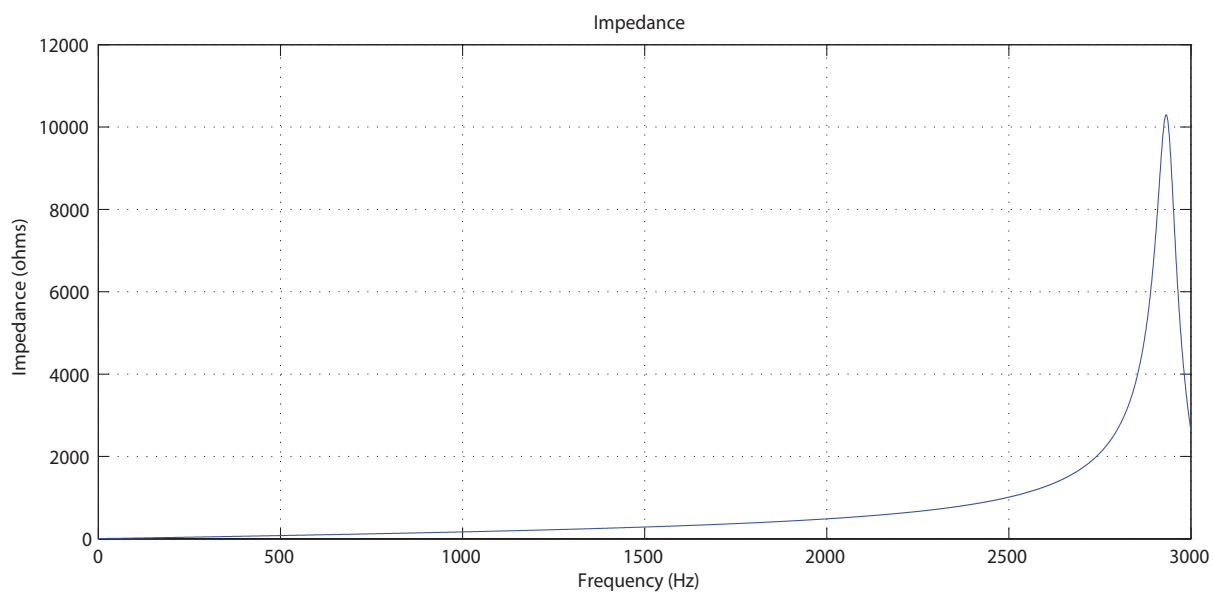
Σχήμα 5.11: Κόμβος 11



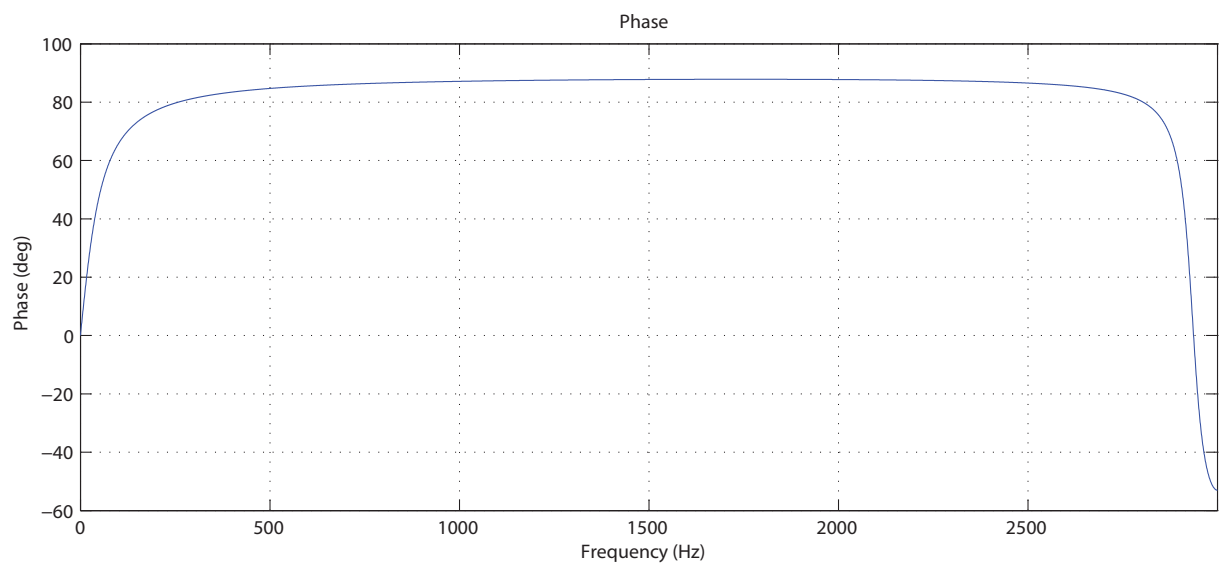
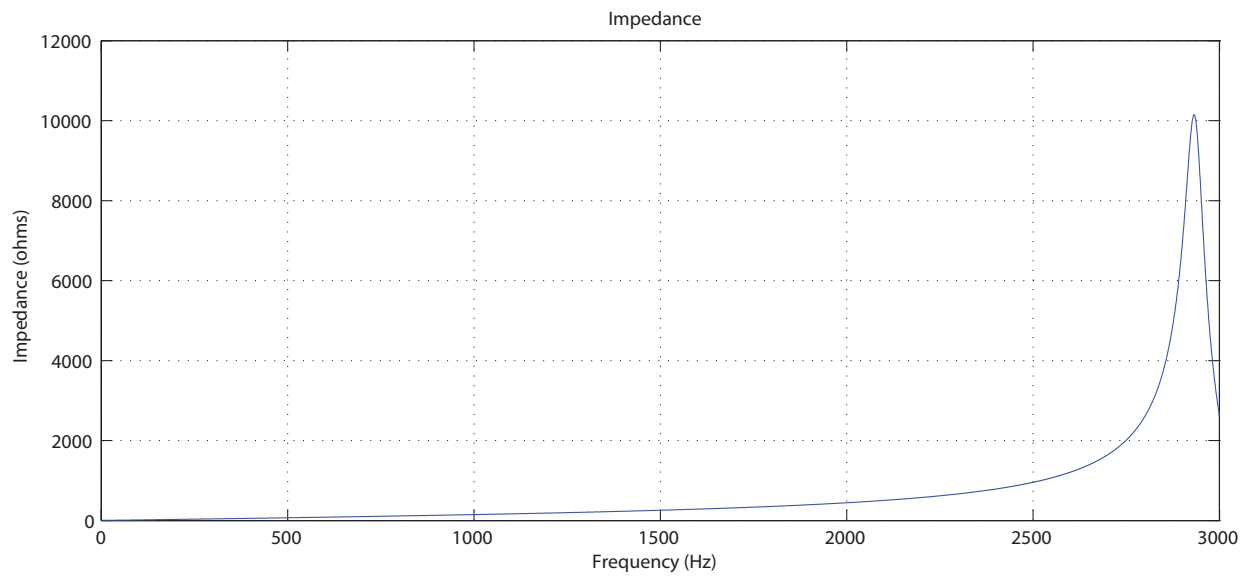
Σχήμα 5.12: Κόμβος 12



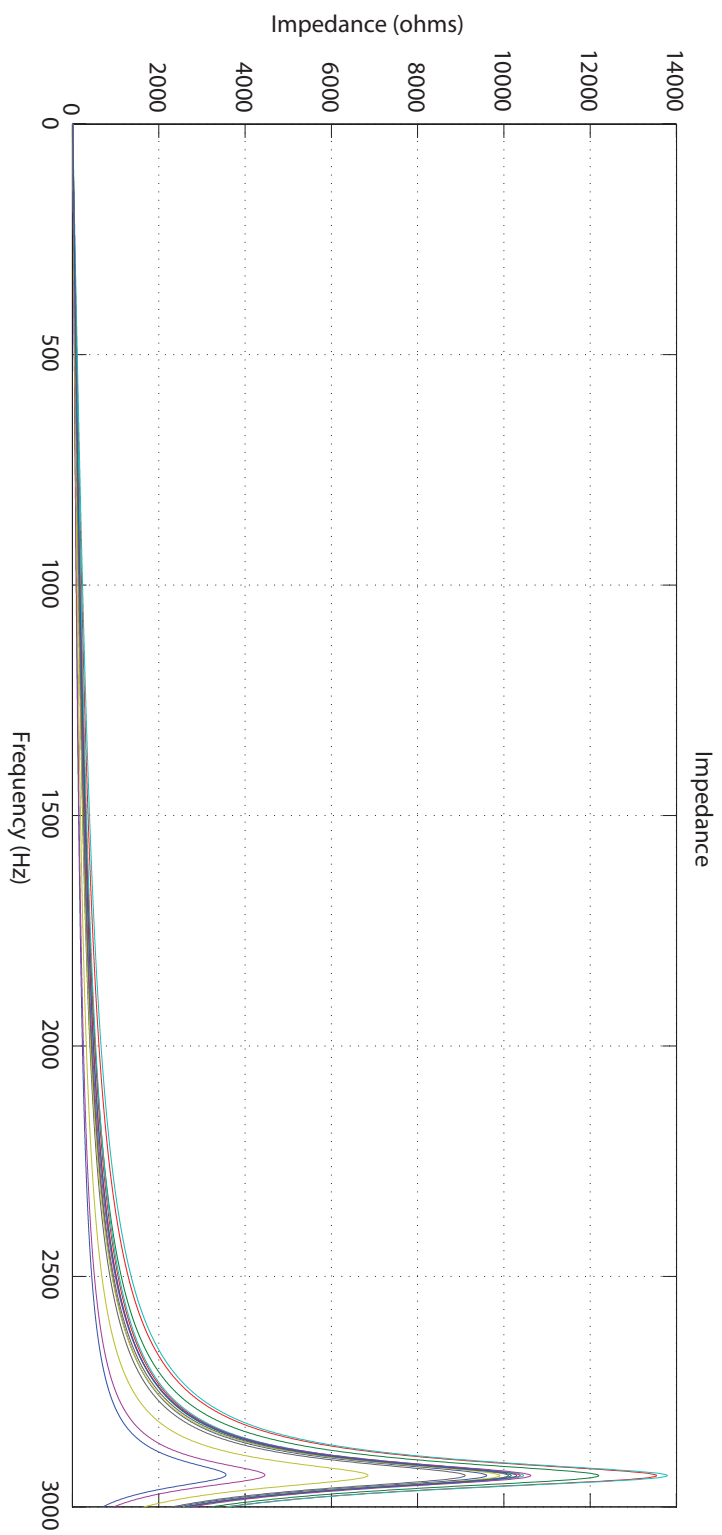
Σχήμα 5.13: Κόμβος 13



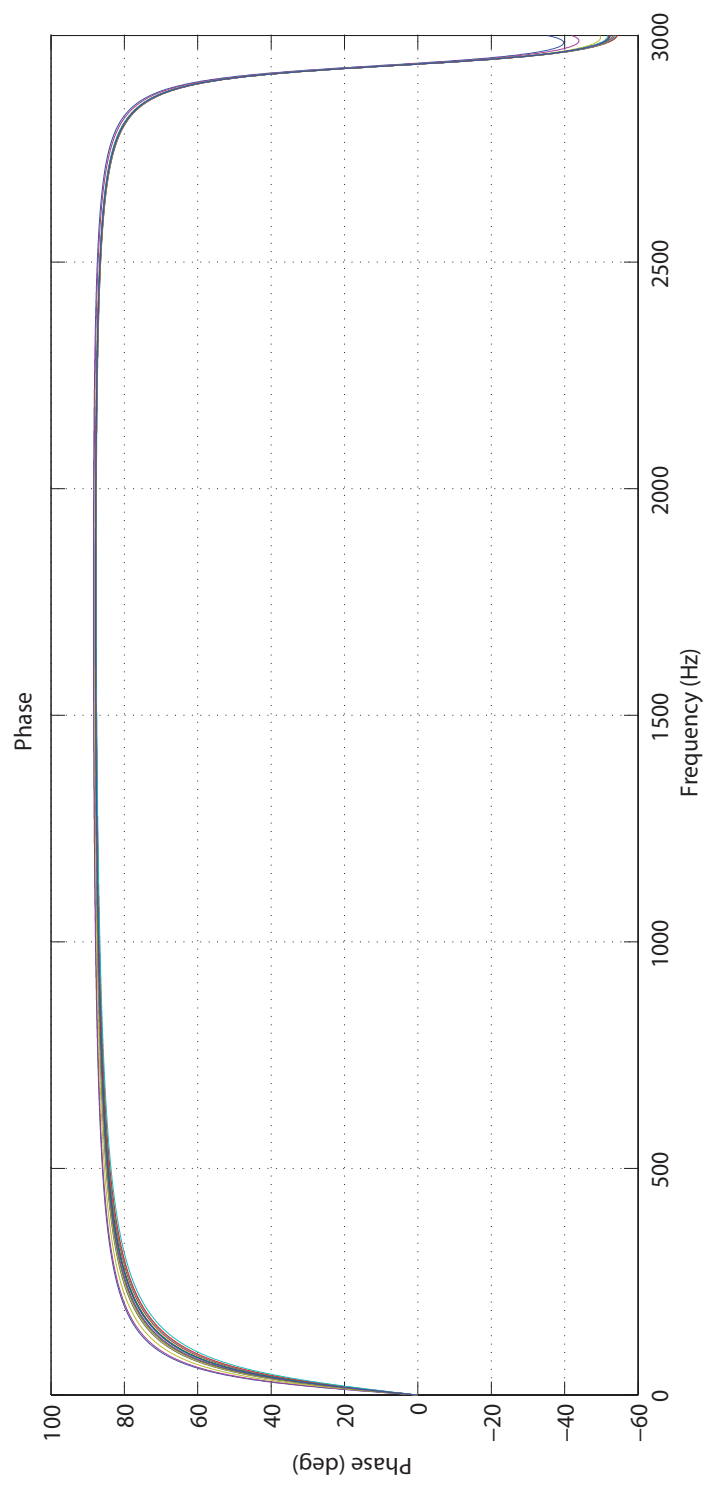
Σχήμα 5.14: Κόμβος 14



Σχήμα 5.15: Κόμβος 15



Σχήμα 5. 16: Όλα τα διαγράμματα επιμέτρησης συχνότητας για όλους τους κόμβους



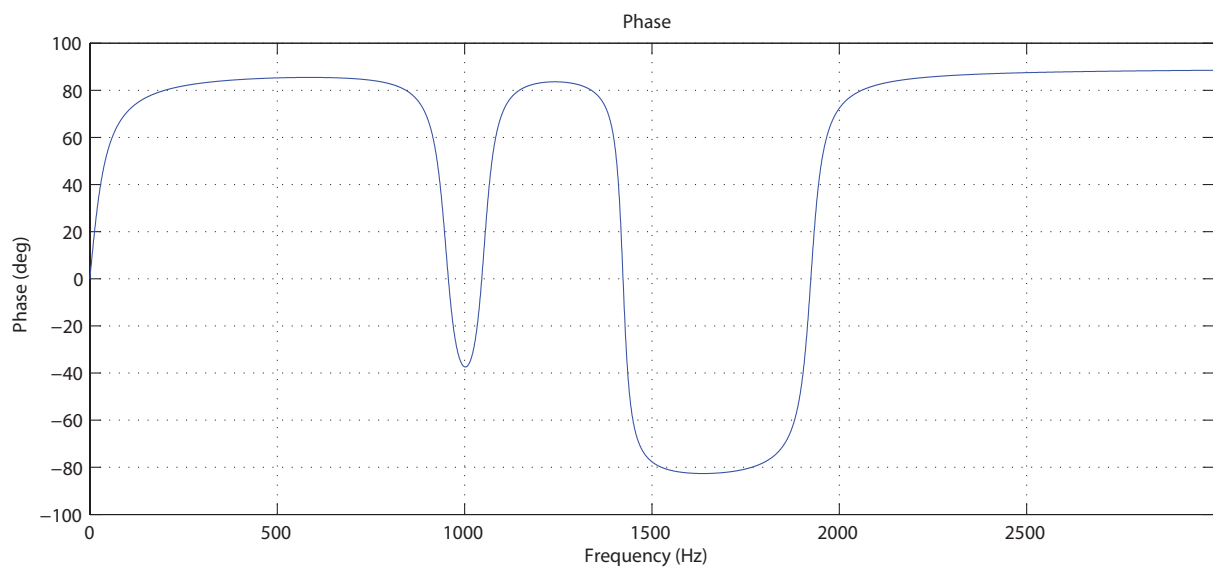
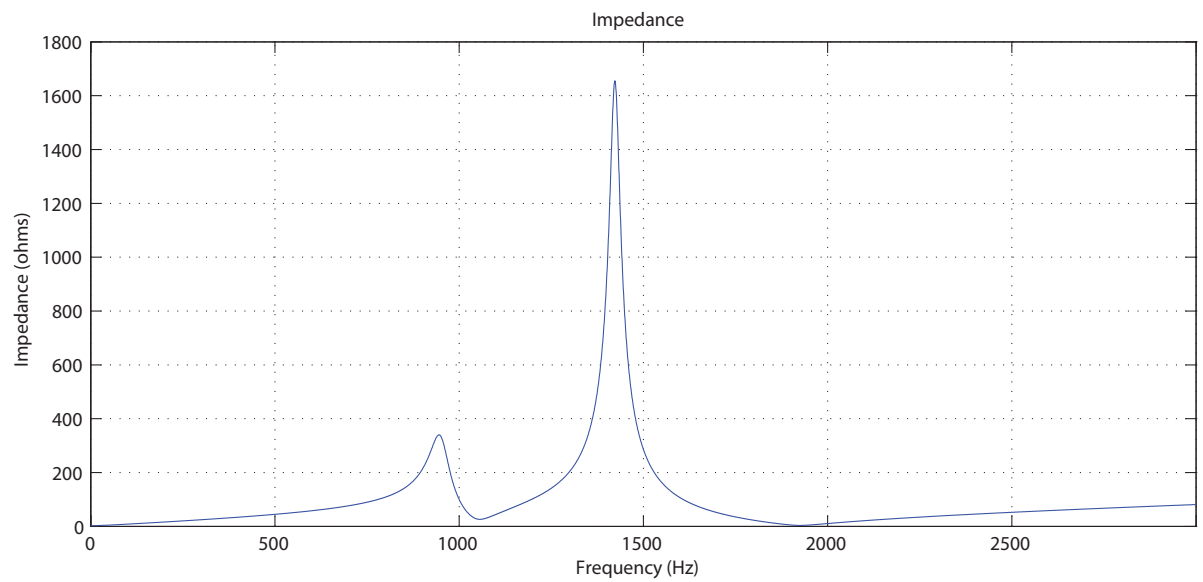
Σχήμα 5.17: Όλα τα διαγράμματα φάσης συχνότητας για όλους τους κόμβους

5.3 Διαγράμματα εμπέδησης-συχνότητας,εμπέδησης-φάσης με πυκνωτή αντιστάθμισης

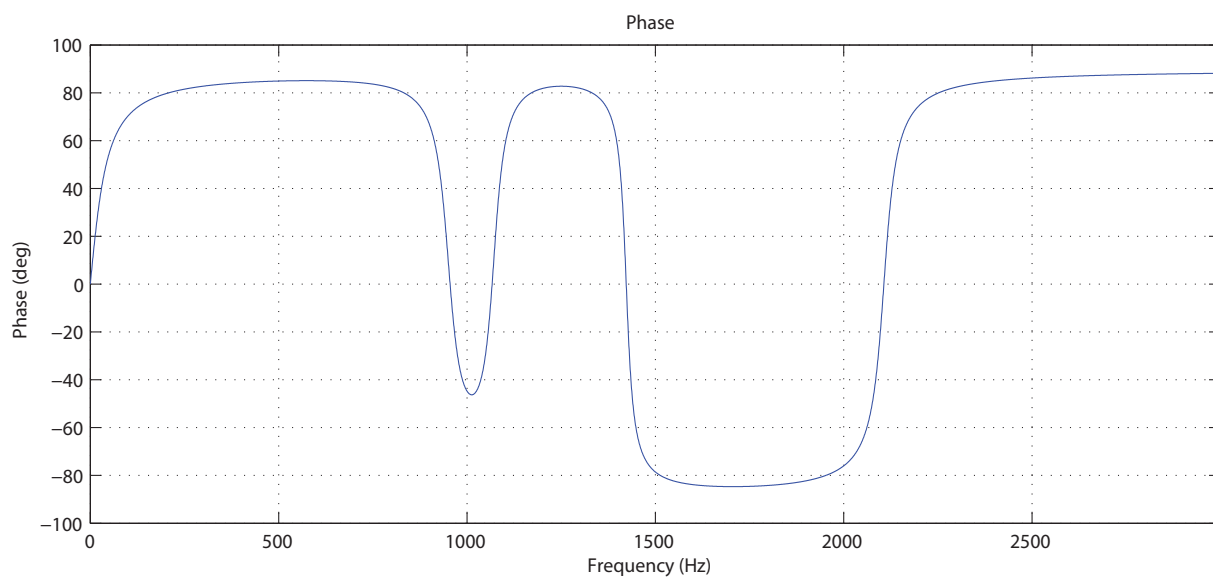
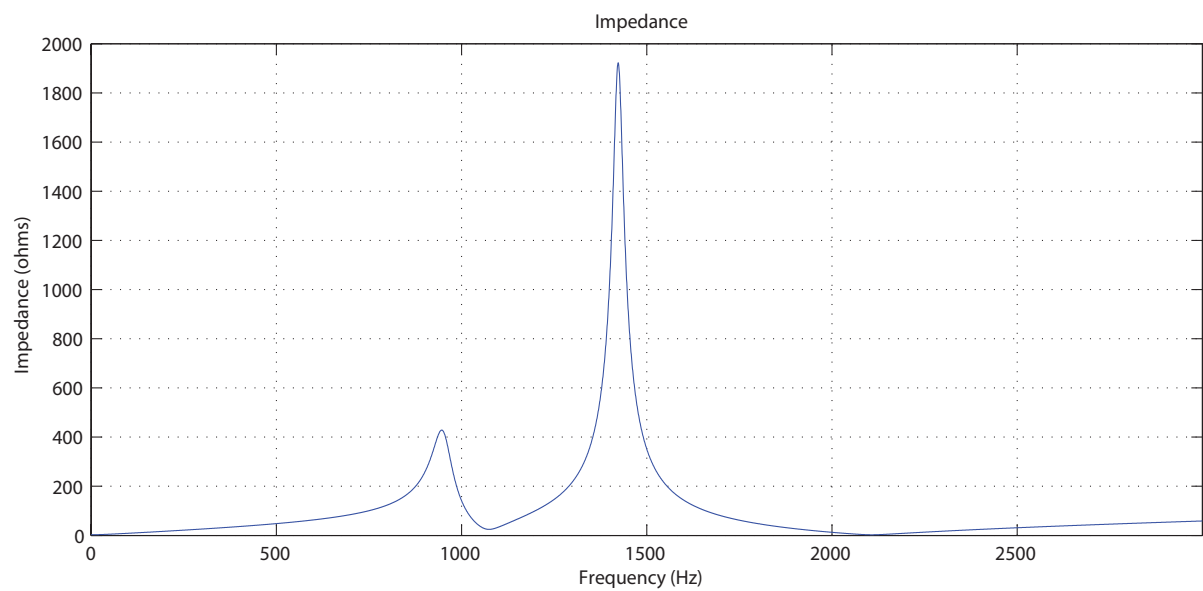
Παρακάτω φαίνονται τα διαγράμματα εμπέδησης-συχνότητας,εμπέδησης-φάσης με πυκνωτή αντιστάθμισης για το δίκτυο μέσης τάσης.Η φόρτιση των μετασχηματιστών όπως περιγράφηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο είναι 80% και ΣΙ:0.8 επαγωγικό.

Βήμα διακριτοποίησης	Μέθοδος επίλυσης	Χρόνος εξομοίωσης (προσεγγιστικά)
κανένα	ode23 (Bogacki-Shamphine)	15 min

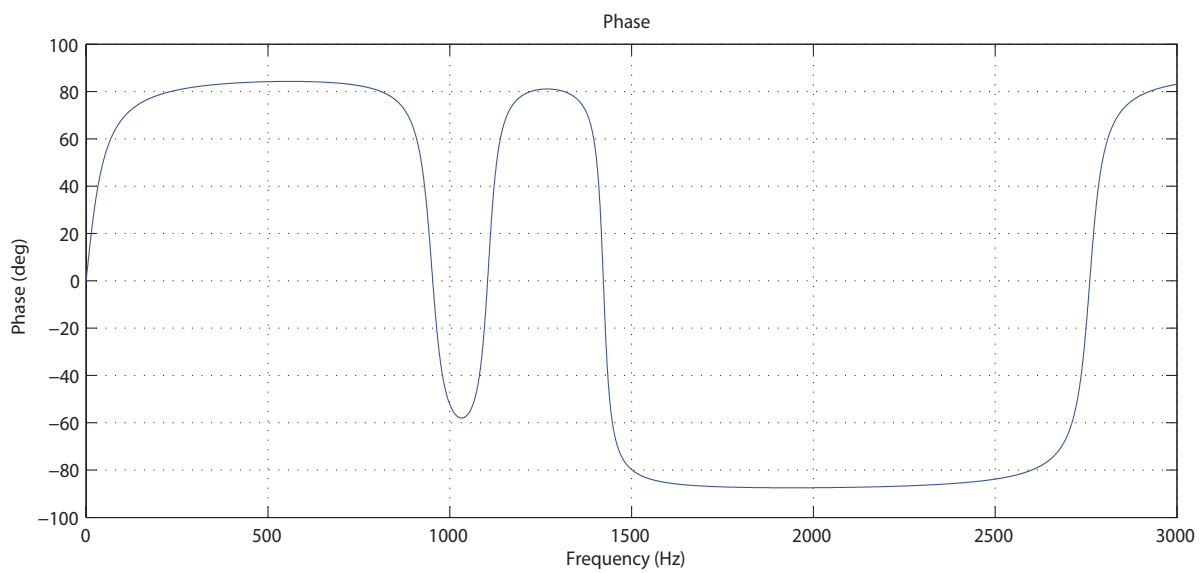
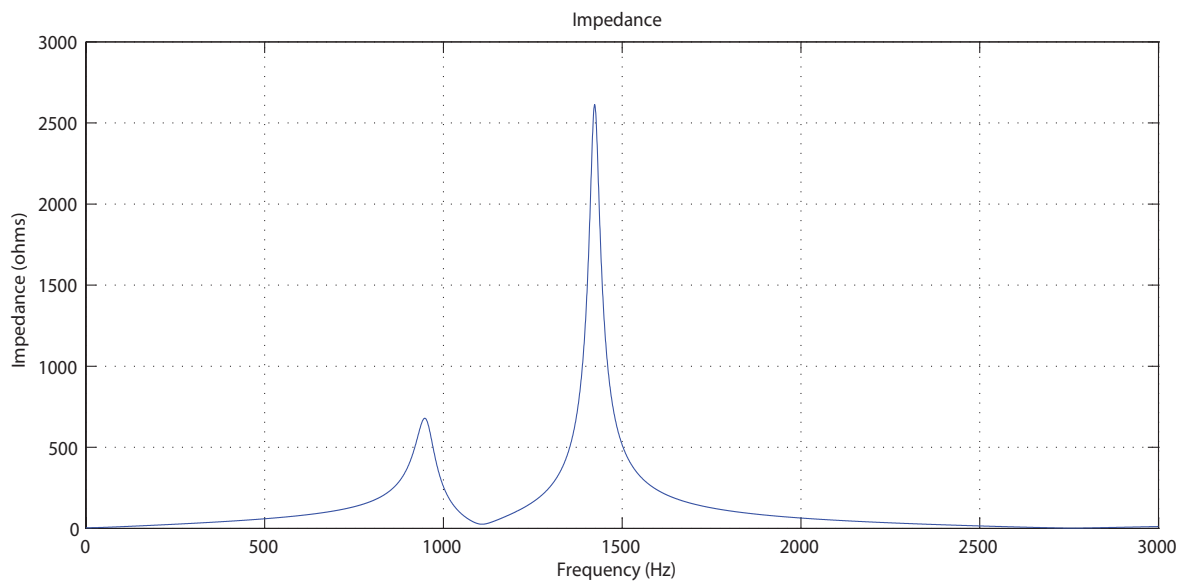
Πίνακας 5.2: Στοιχεία εξομοίωσης



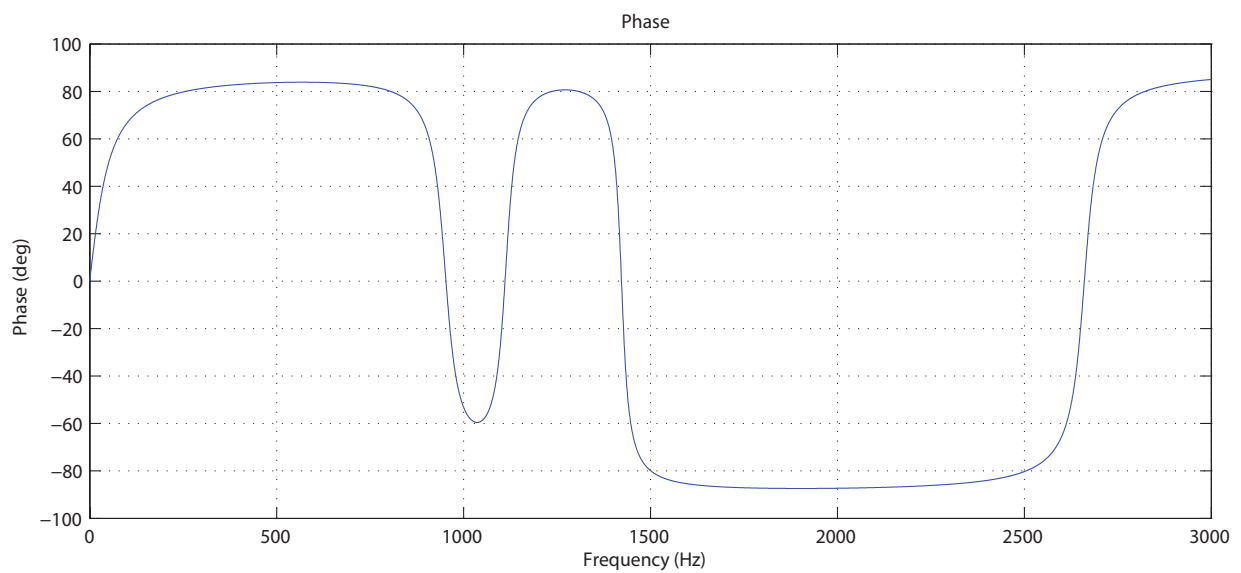
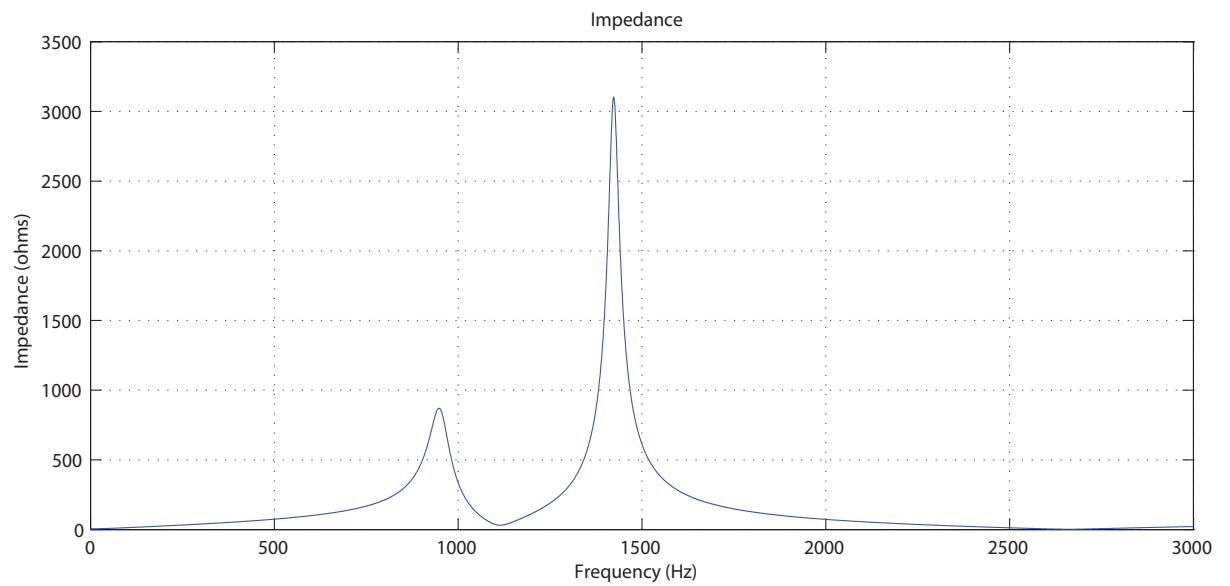
Σχήμα 5.18: Κόμβος 1



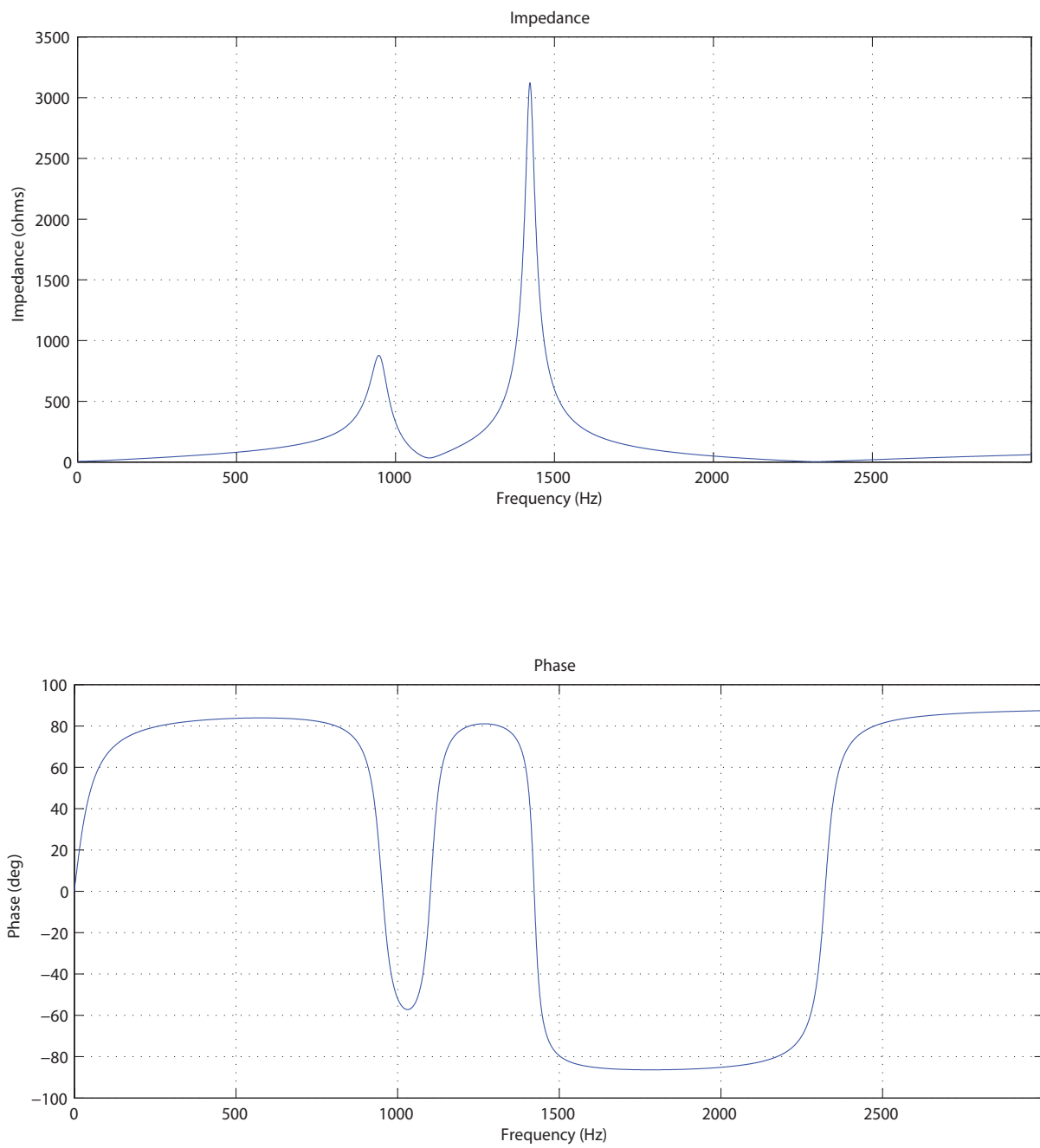
Σχήμα 5.19: Κόμβος 2



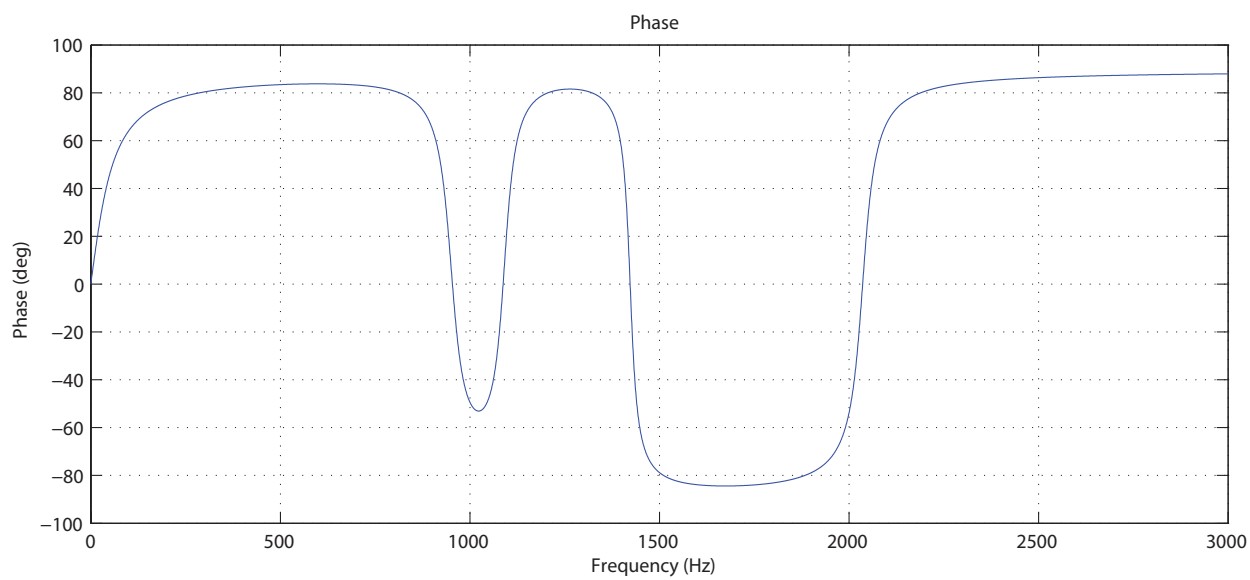
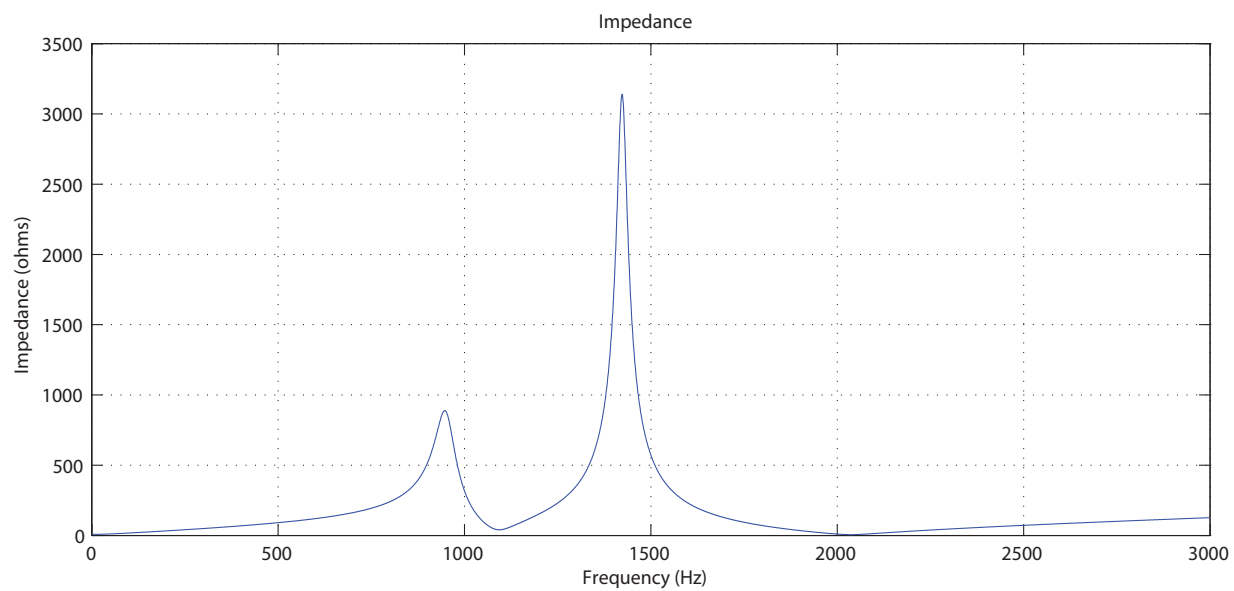
Σχήμα 5.20: Κόμβος 3



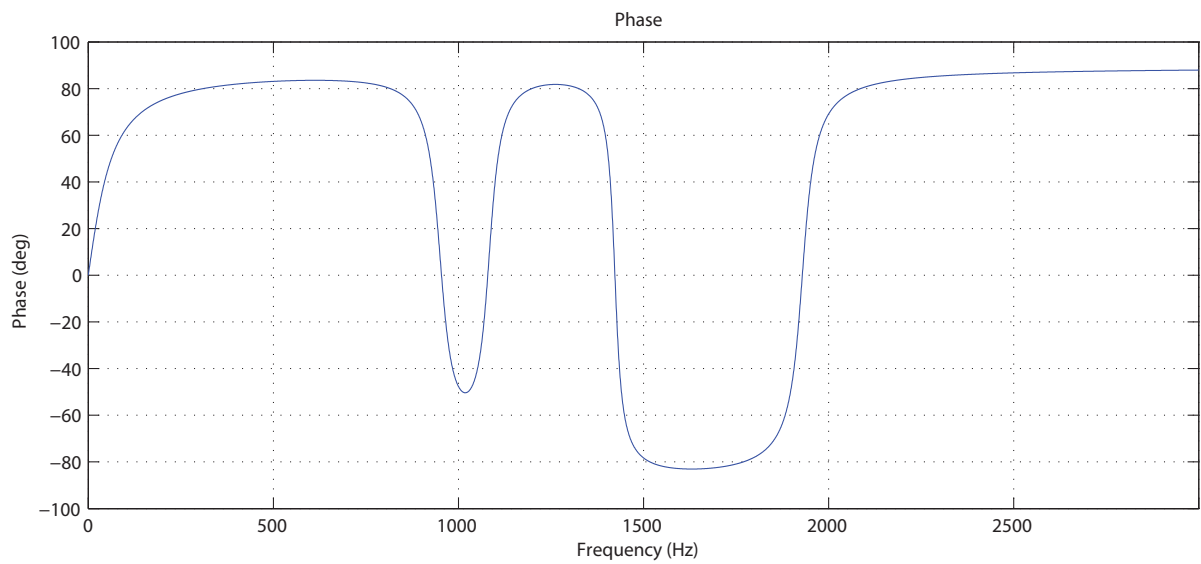
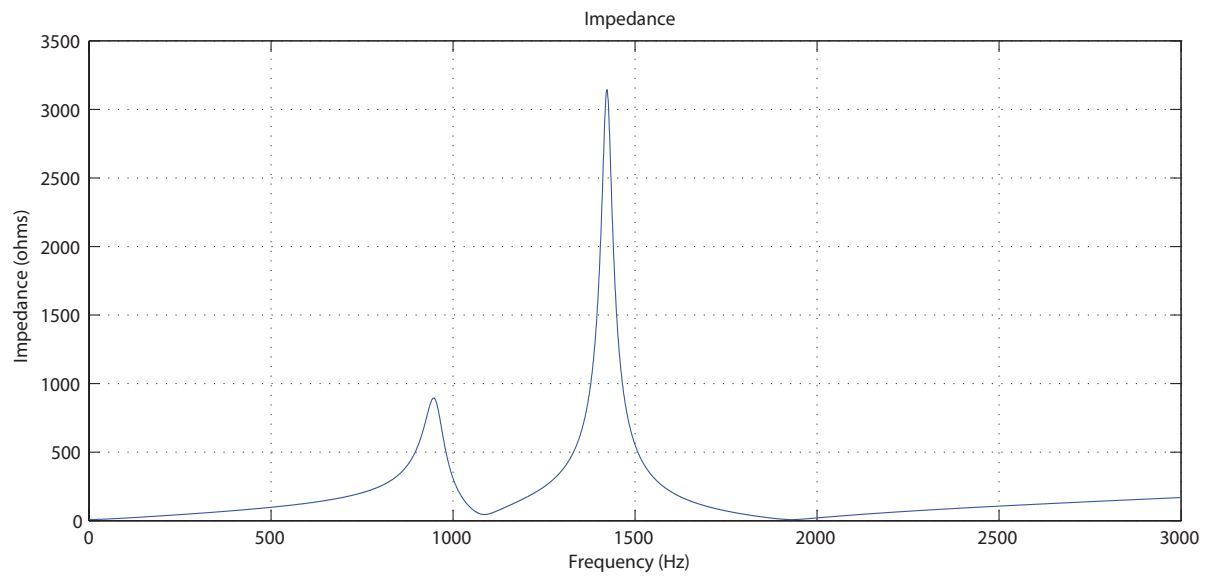
Σχήμα 5.21: Κόμβος 4



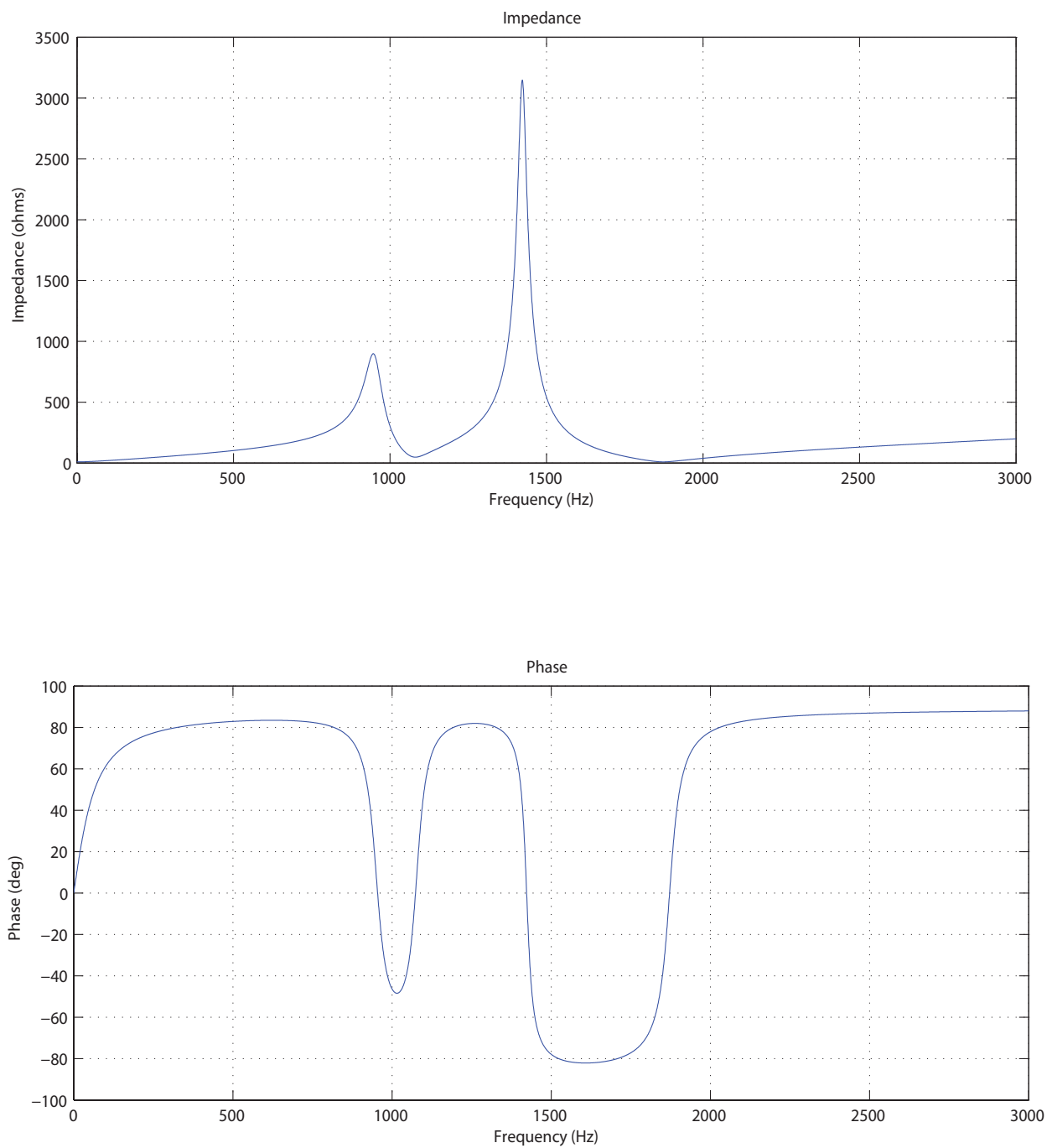
Σχήμα 5.22: Κόμβος 5



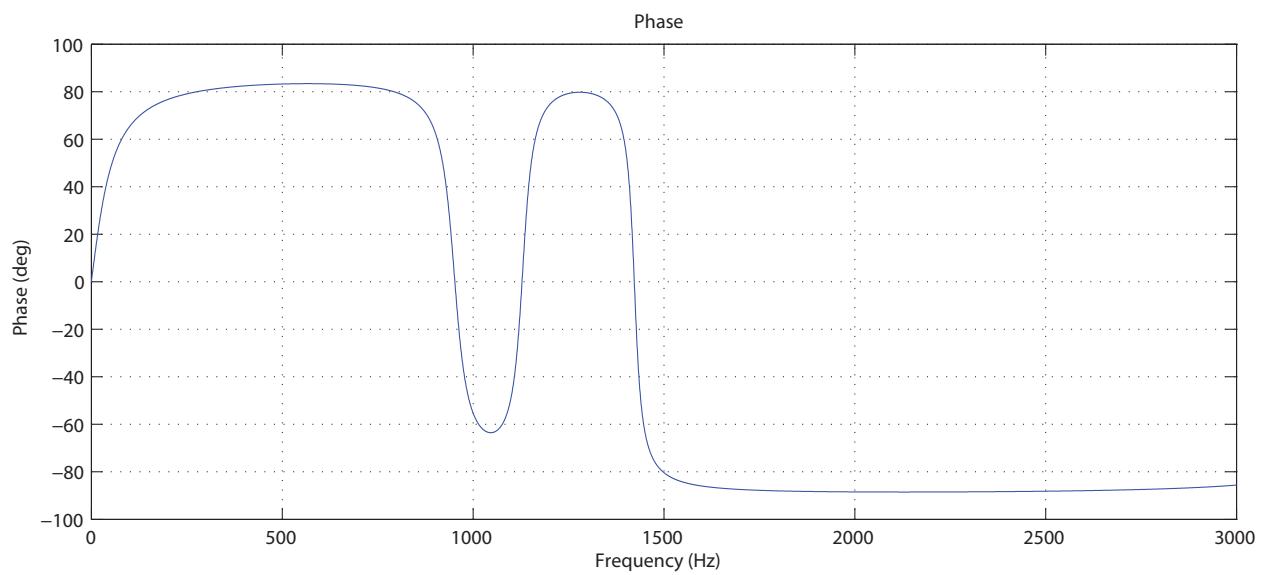
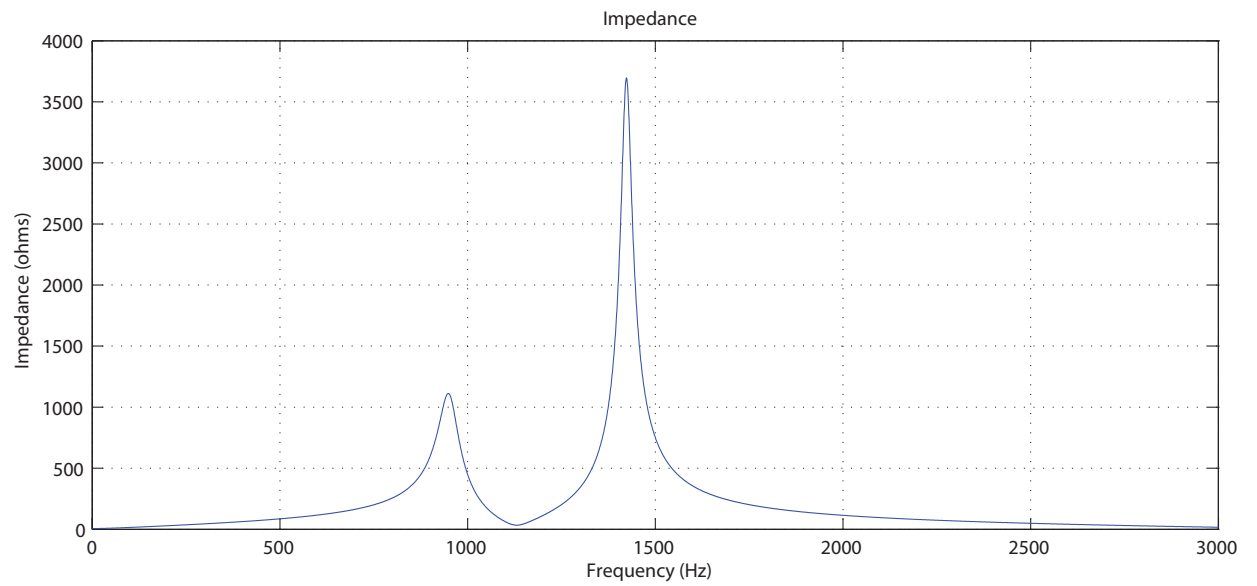
Σχήμα 5.23: Κόμβος 6



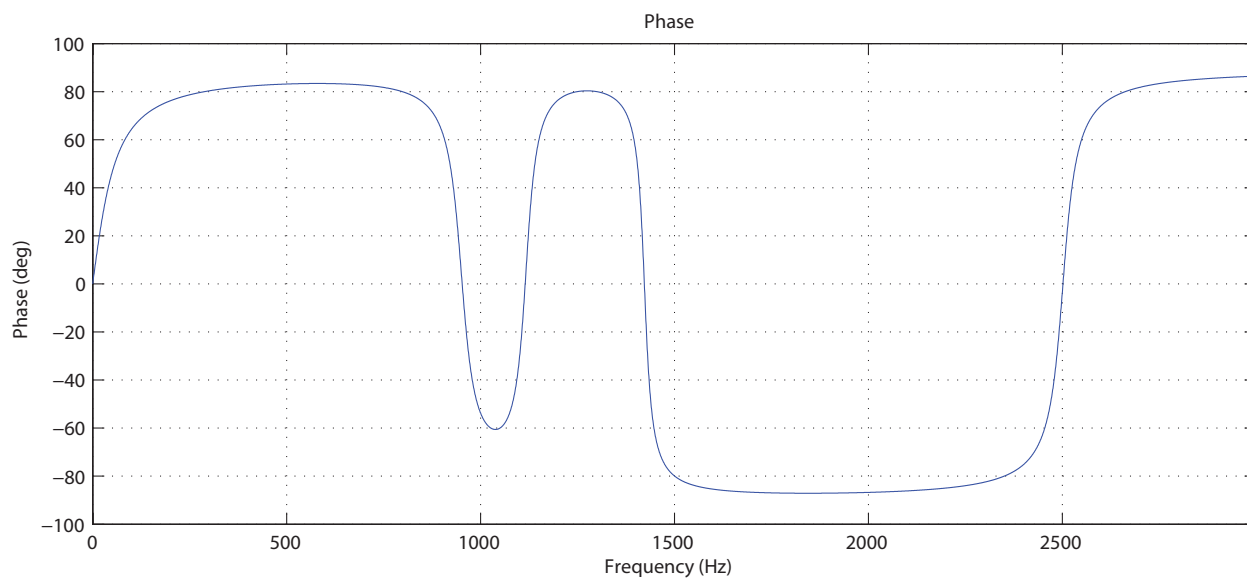
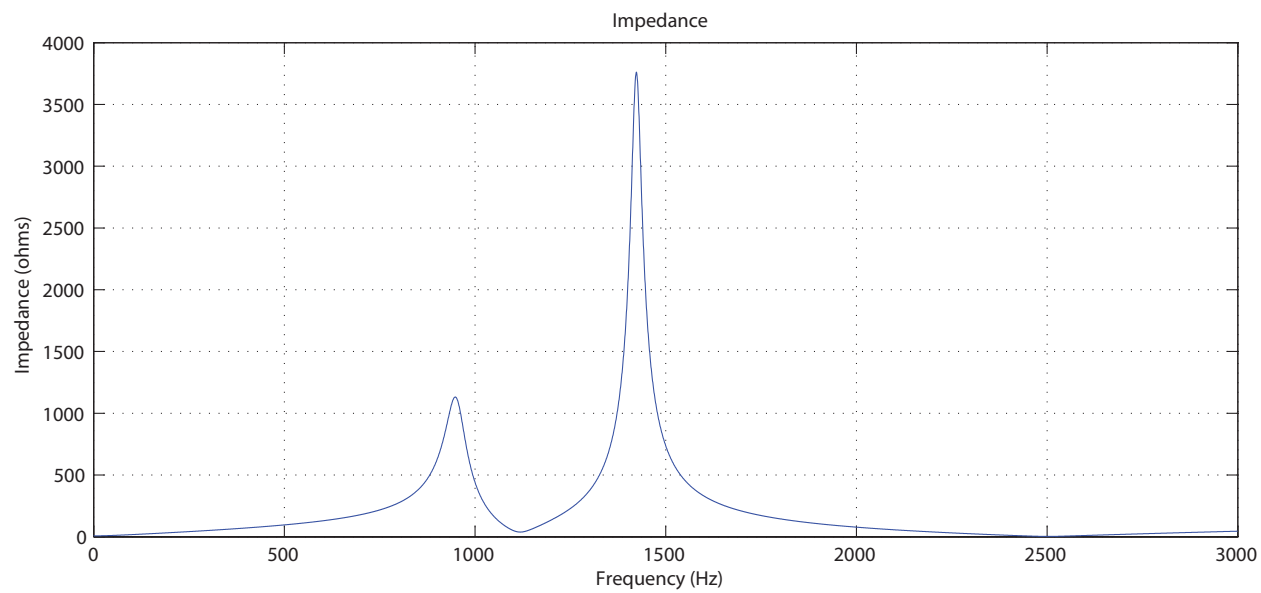
Σχήμα 5.24: Κόμβος 7



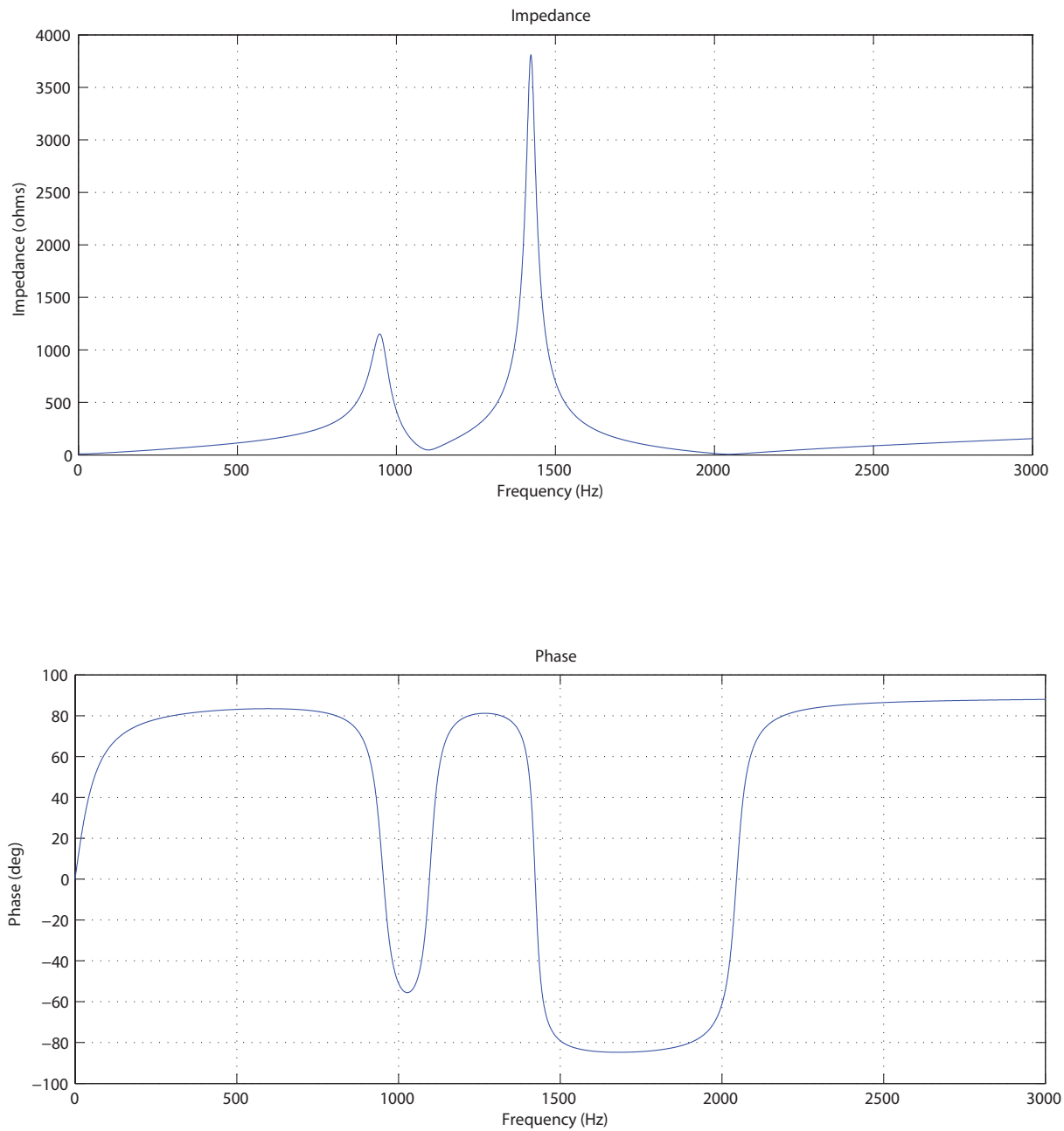
Σχήμα 5.25: Κόμβος 8



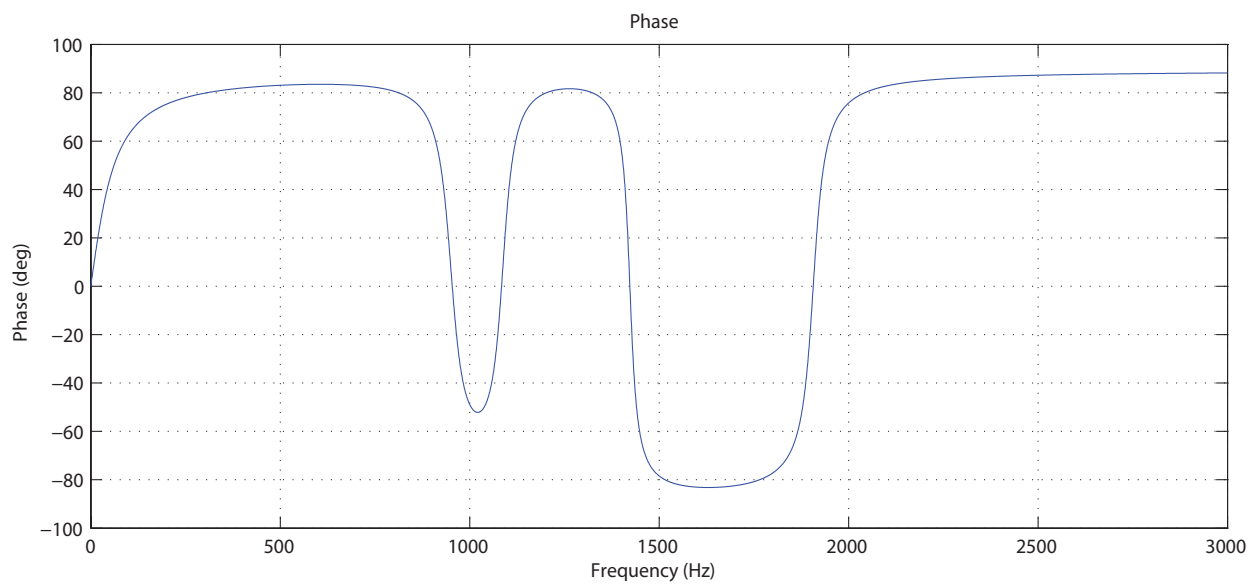
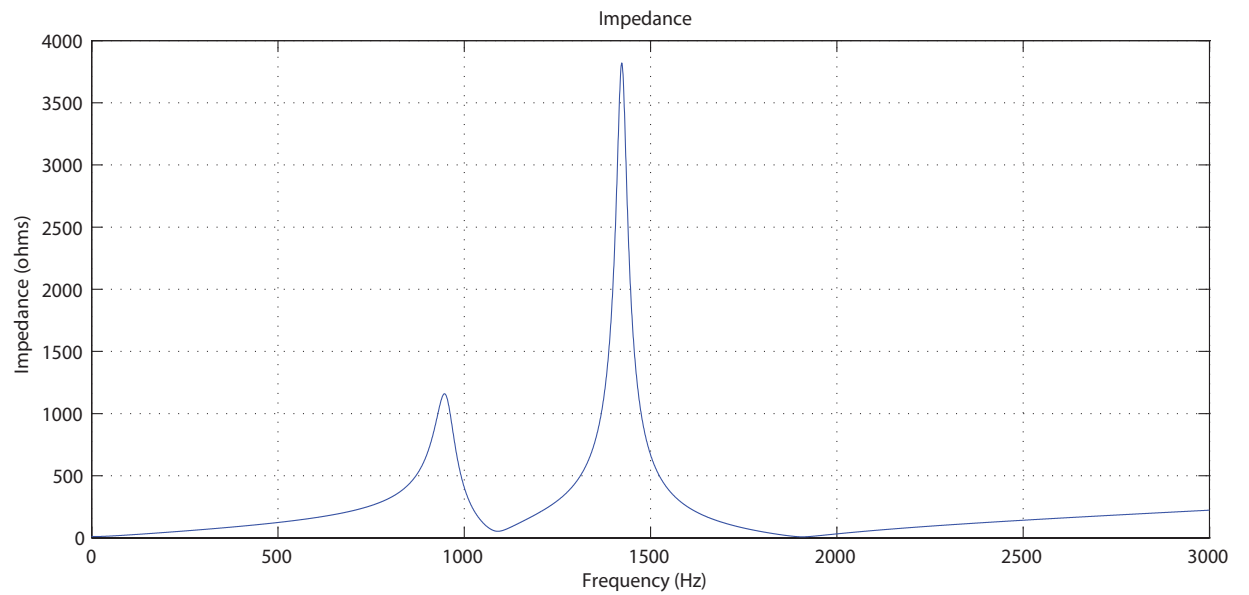
Σχήμα 5.26: Κόμβος 9



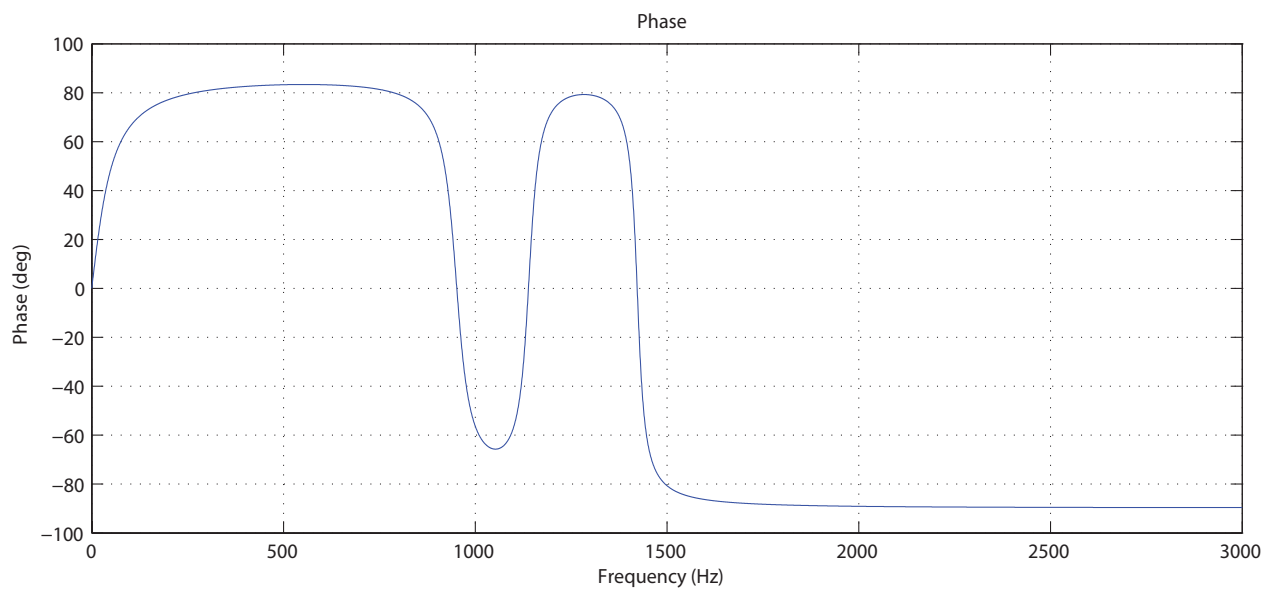
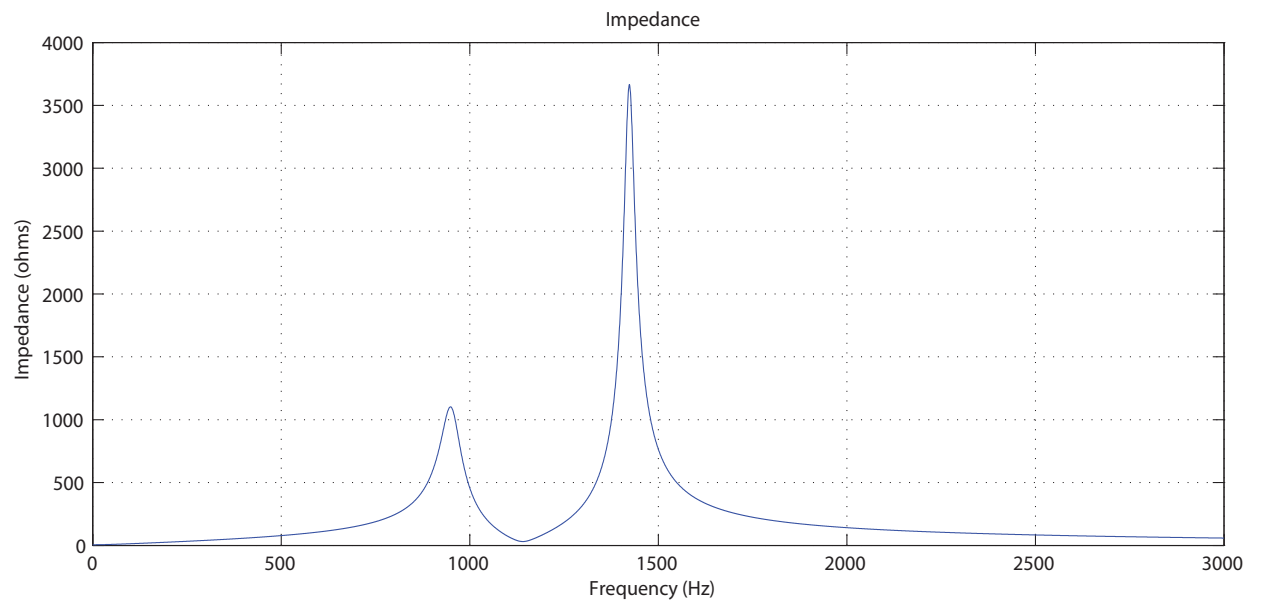
Σχήμα 5.27: Κόμβος 10



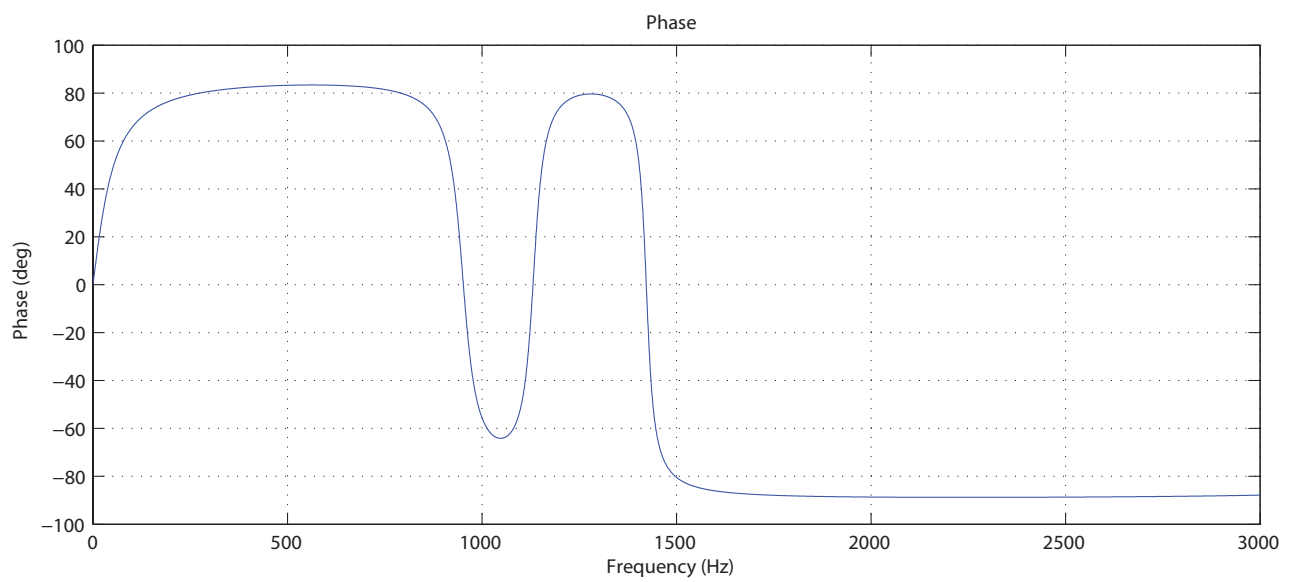
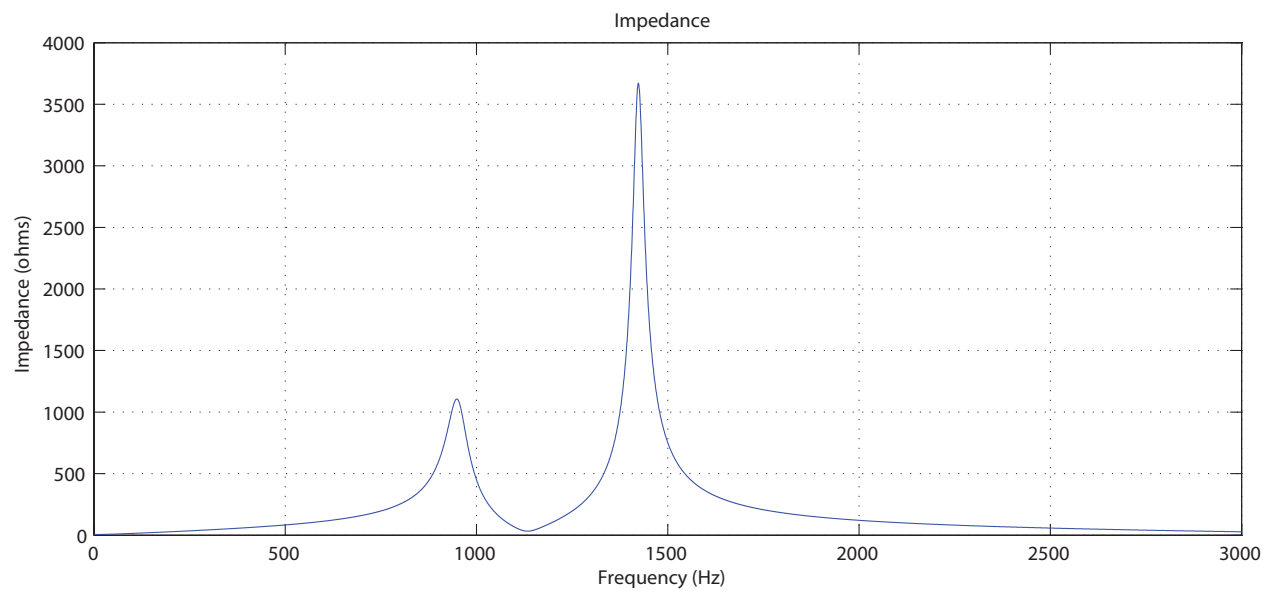
Σχήμα 5.28: Κόμβος 11



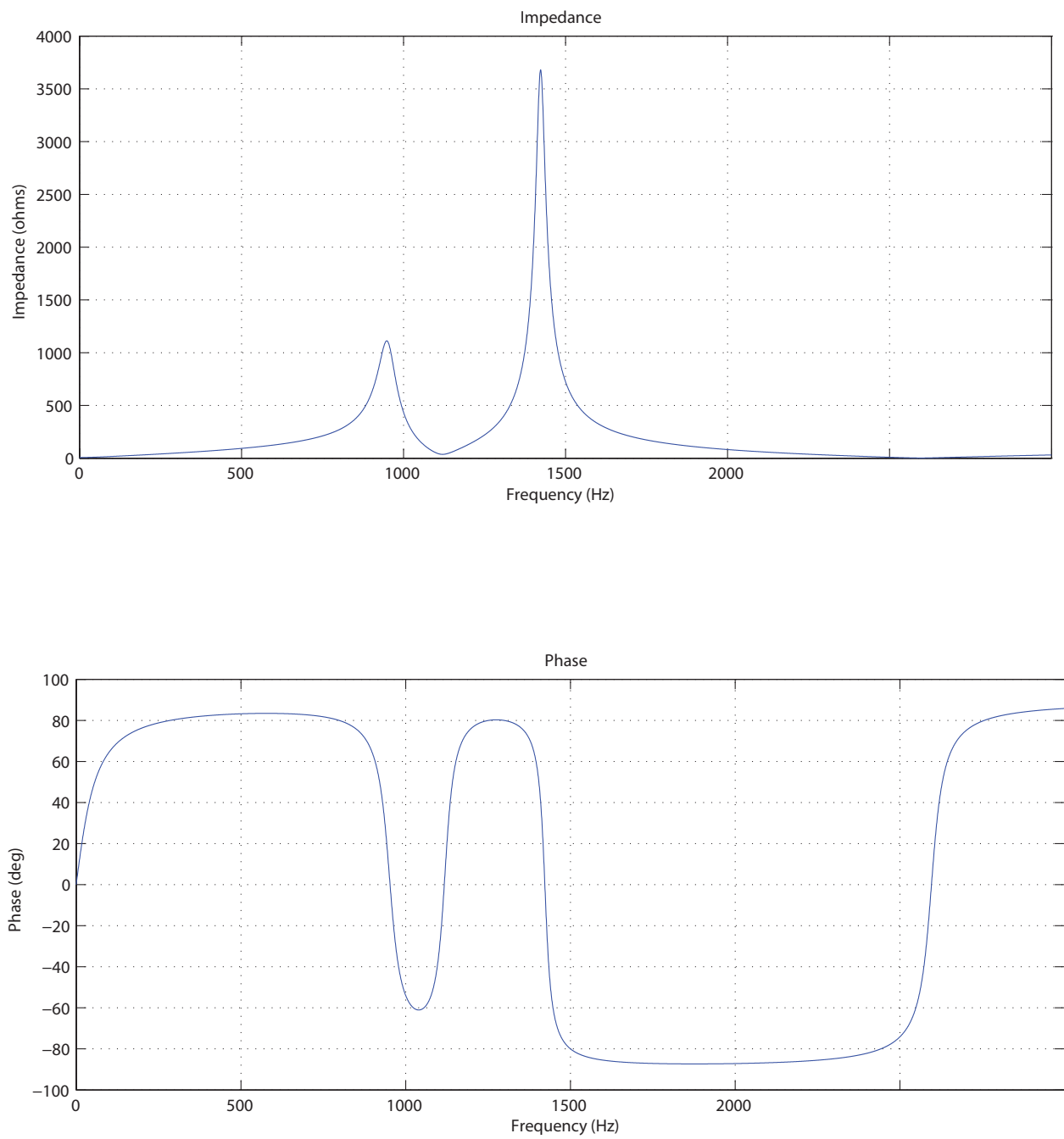
Σχήμα 5.29: Κόμβος 12



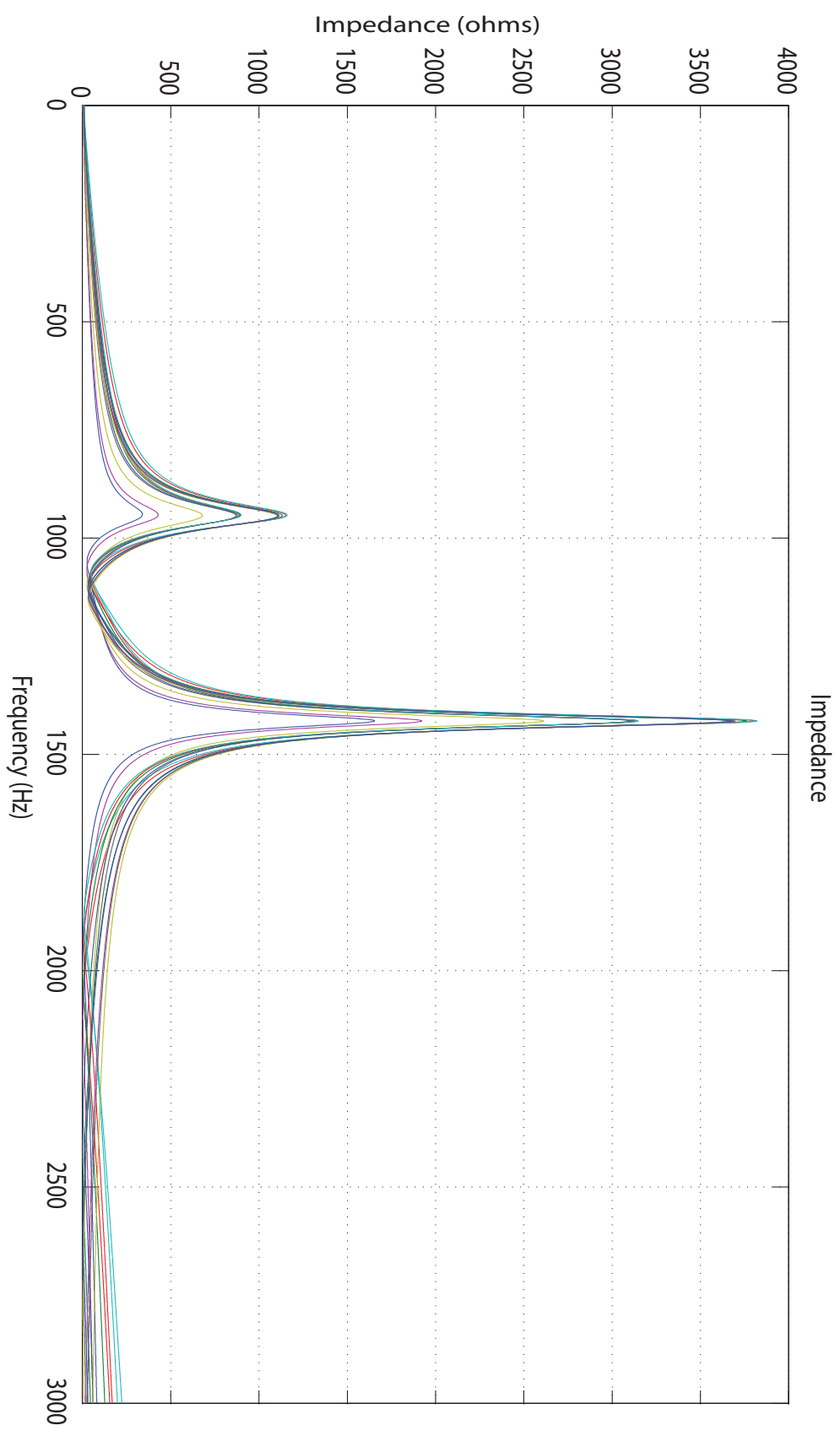
Σχήμα 5.30: Κόμβος 13



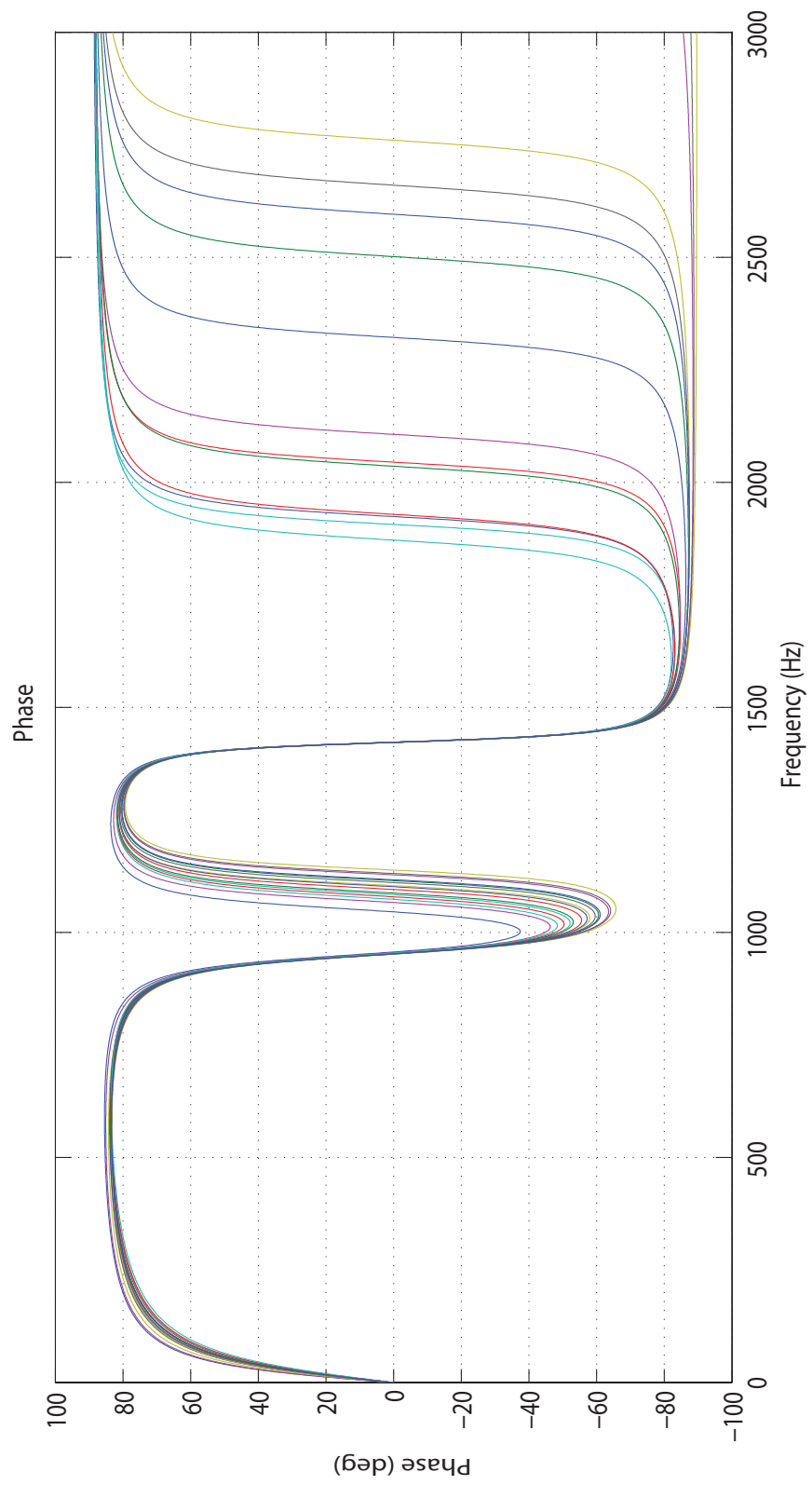
Σχήμα 5.31: Κόμβος 14



Σχήμα 5.32: Κόμβος 15



Σχήμα 5.33: Όλα τα διαγράμματα εμπέδησης συχνότητας για όλους τους κόμβους



Σχήμα 5.34: Όλα τα διαγράμματα φάσης συχνότητας για όλους τους κόμβους

$I_1(A)$	$I_5(A)$	$I_7(A)$	$I_{11}(A)$	$I_{13}(A)$
$100\%I_1$	$18\%I_1$	$13\%I_1$	$6.5\%I_1$	$4.8\%I_1$
8.695	1.5651	1.13035	0.5651	0.41736

Πίνακας 5.3: Πηγή αρμονικών ρευμάτων

Κόμβος	THD%	$I_5\%$	$I_7\%$	$I_{11}\%$	$I_{13}\%$
1	1.99	1.13	1.00	0.94	0.88
2	1.97	1.12	1.00	0.94	0.87
3	5.10	2.91	2.58	2.42	2.24
4	1.38	0.79	0.7	0.65	0.61
5	3.13	1.78	1.58	1.48	1.38
6	5.12	2.92	2.59	2.43	2.26
7	1.19	0.68	0.60	0.57	0.53
8	3.13	1.78	1.58	1.48	1.38
9	3.12	1.78	1.58	1.48	1.37
10	3.12	1.78	1.58	1.48	1.37
11	1.95	1.12	0.99	0.93	0.86
12	5.10	2.91	2.58	2.42	2.24
13	1.96	1.12	0.99	0.93	0.86
14	1.19	0.68	0.60	0.57	0.53
15	5.10	2.91	2.58	2.42	2.24

Πίνακας 5.4: Αρμονικό περιεχόμενο για αρμονικές πηγές ρεύματος σε κάθε κόμβο

5.4 Εισαγωγή αρμονικών ρευμάτων

Σε αυτή την εξομοίωση του δικτύου θα εξεταστεί τη διεύθυνση αρμονικών υπό κάποιες τυχαίες περιπτώσεις.

Θεωρούμε πηγές ρεύματος, ως πηγές αρμονικού περιεχομένου, με βάση την αναφορά [9].

Στον πίνακα 5.4 βλέπουμε το αρμονικό περιεχόμενο που θα έχουμε αν σε κάθε κόμβο του δικτύου εισάγουμε τις παραπάνω πηγές αρμονικών.

Η παραπάνω εξομοίωση επαναληφθεί αλλά αυτή τη φορά εισήχθησαν μόνο στους μισούς κόμβους οι παραπάνω αρμονικές.

Συγκεκριμένα στους κόμβους: 1, 2, 4, 5, 7, 8, 12 και 13. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον πίνακα 5.5.

5.5 Αλληλεπίδραση φίλτρου δικτύου

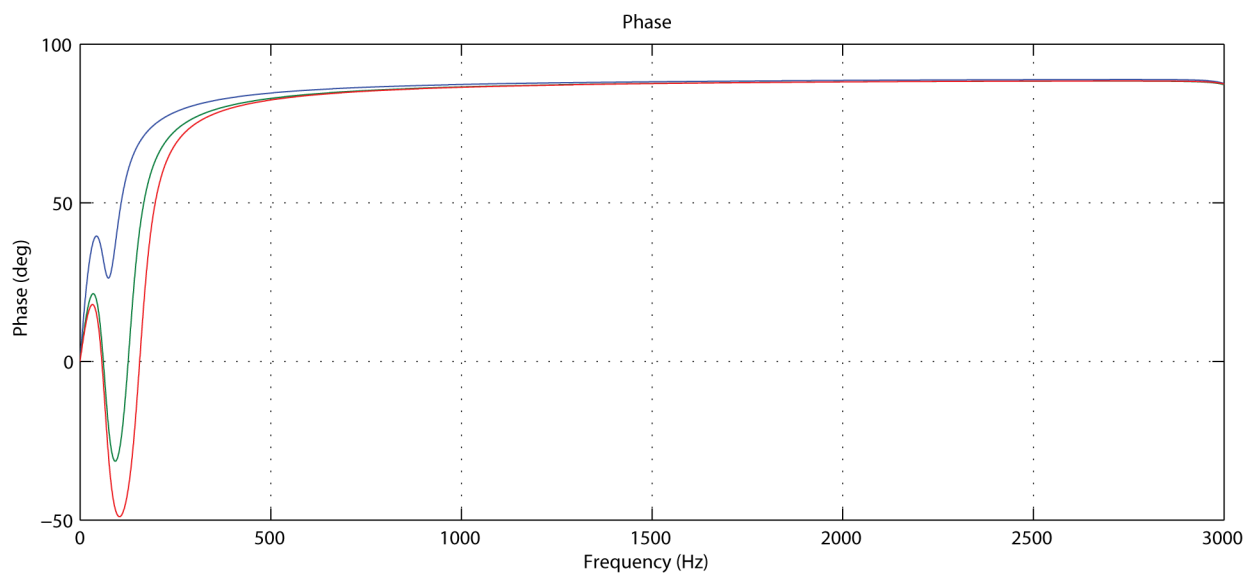
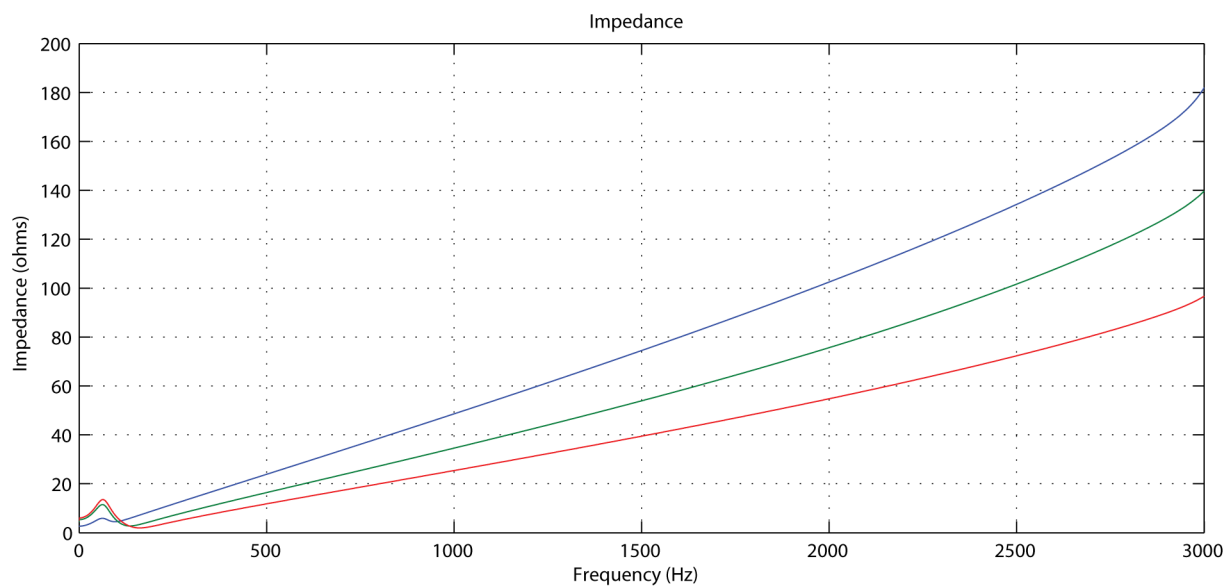
Σε αυτή την εξομοίωση εισήχθει στον κόμβο 15 ένα τυχαίο εγκάρσιο φίλτρο, υψηλού συντελεστή ποιότητας με στοιχεία:

- αντίσταση $R = 2\Omega$
- χωρητικότητα πυκνωτή $C = 0.2mF$
- επαγωγή πηνίου $L = 5mH$
- συντελεστή ποιότητας $Q = 2.5$
- συχνότητας συντονισμού $1kHz$

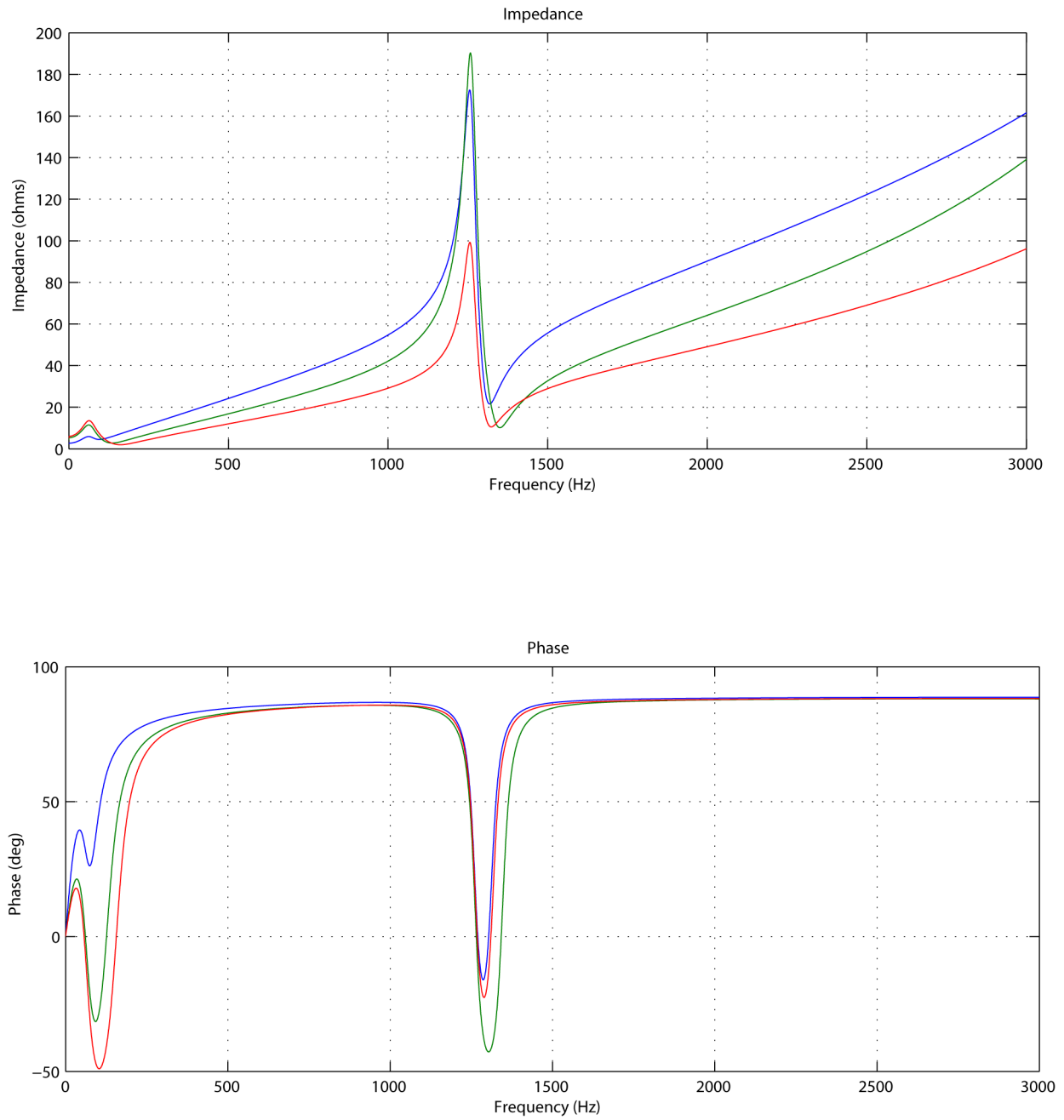
Κόμβος	THD%	$I_5\%$	$I_7\%$	$I_{11}\%$	$I_{13}\%$
1	2.01	1.14	1.02	0.95	0.89
2	2.01	1.14	1.01	0.95	0.88
3	0.04	0.02	0.02	0.02	0.01
4	1.43	0.82	0.72	0.68	0.63
5	3.17	1.81	1.61	1.51	1.40
6	0.04	0.03	0.02	0.02	0.01
7	1.24	0.70	0.62	0.59	0.54
8	3.17	1.81	1.61	1.50	1.40
9	0.04	0.03	0.02	0.02	0.01
10	0.04	0.03	0.02	0.02	0.01
11	0.05	0.03	0.02	0.02	0.02
12	5.15	2.94	2.61	2.44	2.27
13	2.01	1.14	1.02	0.95	0.89
14	0.04	0.02	0.02	0.02	0.01
15	0.04	0.02	0.02	0.02	0.01

Πίνακας 5.5: Αρμονικό περιεχόμενο για αρμονικές πηγές ρεύματος σε οκτώ κόμβους

Στο σχήμα 5.35 βλέπουμε τα διαγράμματα εμπέδησης-συχνότητας και φάσης-συχνότητας των κόμβων υπάριθμόν:1(μπλε χρώμα),13(πράσινο χρώμα) και 15(κόκκινο χρώμα) και στο σχήμα 5.36 βλέπουμε τα διαγράμματα εμπέδησης-συχνότητας και φάσης-συχνότητας των κόμβων υπάριθμόν:1(μπλε χρώμα),13(πράσινο χρώμα) και 15(κόκκινο χρώμα) παρουσία του πυκνωτή αντιστάθμισης.



Σχήμα 5.35: Διαγράμμα εμπέδησης-συχνότητας,φάσης-συχνότητας παρουσία φίλτρου



Σχήμα 5.36: Διαγράμμα εμπέδησης-συχνότητας,φάσης-συχνότητας παρουσία φίλτρου και παρουσία πυκνωτή αντιστάθμισης

Κεφάλαιο 6

Συμπεράσματα

Το πρόβλημα της διείσδυσης υψηλών αρμονικών στα δίκτυα διανομής μέσης και χαμηλής τάσης γίνεται ολοένα και μεγαλύτερο. Η εξέλιξη των τροφοδοτικών των ηλεκτρονικών συσκευών επιβαρύνουν όλο και περισσότερο. Τα επόμενα χρόνια λόγω και της αύξησης της χρήσης ήπιων μορφών ενέργειας, το πρόβλημα μπορεί να γιγαντωθεί. Μπορεί οι σύγχρονες τάσεις για την προστασία του περιβάλλοντος και τη λεγόμενη πράσινη ανάπτυξη να μειώσουν τη μόλυνση του περιβάλλοντος (αν και κάτι τέτοιο βρίσκεται σε αμφισβήτηση) όμως από τεχνικής άποψης μπορεί να αποβεί καταστροφικό για τα δίκτυα διανομής.

Η χρήση των ηλεκτρονικών υπολογιστών έχουν φανεί χρήσιμα εργαλεία για τη μοντελοποίηση και προσομοίωση των δικτύων και όχι μόνο. Η ανάπτυξη της υπολογιστικής ισχύος έχει κάνει ακόμη πιο γρήγορες τις προσομοιώσεις και με πιο ακριβή αποτελέσματα. Η ανάπτυξη των αλγορίθμων, σαν επιστημονικό αντικείμενο, μας έχει δώσει ταχύτερους αλγορίθμους, μειώνοντας το χρόνο προσομοιώσεων. Φυσικά αυτός ο χρόνος δε μπορεί να γίνει μηδαμινός, η θερμοδυναμική του υπολογισμού το απαγορεύει.

Στα πλαίσια της παρούσης διπλωματικής μοντελοποιήθηκε ένα δίκτυο μέσης τάσης και διερευνήθηκε η συμπεριφορά του με τη χρήση του υπολογιστικού πακέτου MATLAB. Στα πλεονεκτήματα της χρήσης ενός υπολογιστικού πακέτου συγκαταλέγεται η δυνατότητα χρήσης έτοιμων μοντέλων (και σε μεγάλη ποικιλία, ανάλογα με τη χρήση που απαιτείται), της δυνατότητας υπολογισμού ενός μοντέλου με διαφορετικούς τρόπους και για πολλούς διαφορετικούς υπολογισμούς και τη δυνατότητα οπτικής σχεδίασης ενός μοντέλου και παρακολούθησης του. Αντίθετα, η ανάπτυξη αλγορίθμων εκ του μηδενός στερείται αυτών των χαρακτηριστικών. Όμως σε ένα υπολογιστικό πακέτο πολλές φορές δεν έχουμε ούτε τη δυνατότητα γνώσης ενός μοντέλου ούτε και τροποποίησής του. Επίσης ο χρόνος προσομοίωσης αυξάνει σημαντικά γιατί ένα τέτοιο πρόγραμμα έχει υψηλότερες υπολογιστικές απαιτήσεις και ο kernel του μπορεί να μην είναι παραμετροποιημένος έτσι ώστε να εκμεταλλεύεται την υπολογιστική ισχύ (π.χ χρήση fortran compiler για συγκεκριμένους επεξεργαστές). Συχνά, στα υπολογιστικά πακέτα γίνονται λάθη τα οποία δεν είναι δυνατόν να εντοπιστούν παρόλο που μπορεί να υπάρχει σχετικό μήνυμα από το πρόγραμμα.

Από τις προσομοιώσεις που έγιναν μπορούν να εξαχθούν σημαντικά συμπεράσματα για τη συμπεριφορά του δικτύου. Η εικόνα που έχουμε για το σύστημα αλλάζει με την εισαγωγή ανώτερων αρμονικών. Το ίδιο το σύστημα γίνεται πιο δυναμικό στις ιδιότητές του, εμφανίζονται συντονισμοί και υπερτάσεις. Όπως έγινε φανερό από τα προηγούμενα διαγράμματα, η κυματομορφή της εμπέδησης για κάθε κόμβο του δικτύου εμφανίζει μέγιστα και ελάχιστα, όσον αφορά το μέτρο της. Είναι φανερό ότι η συμπεριφορά του δικτύου αλλάζει δραματικά με την παρουσία πυκνωτών αντιστάθμισης. Το επαγωγικό δίκτυο αλληλεπιδρά με τους πυκνωτές αντιστάθμισης και δημιουργεί φαινόμενα συντονισμού. Αυτό

φαίνεται όταν το φανταστικό μέρος της εμπέδησης του δικτύου γίνεται μηδέν (ή αλλιώς όταν μηδενίζεται η φάση). Τότε η εμπέδηση του δικτύου είναι καθαρά ωμική και άλλοτε έχει μικρή τιμή (συντονισμός) και άλλοτε μεγάλη (αντισυντονισμός). Τα προαναφερόμενα γίνονται φανερά αν συγκρίνουμε τα διαγράμματα 5.3 και 5.20. Βλέπουμε αρχικά ότι στον κόμβο πριν την εισαγωγή του πυκνωτή αντιστάθμισης δεν έχουμε φαινόμενα συντονισμού για μικρές συχνότητες ύστερα όμως εμφανίζονται συντονισμοί στις συχνότητες 950Hz , $\approx 1100\text{Hz}$ και $\approx 2450\text{Hz}$. Με τα παραπάνω διαγράμματα έχουμε χρήσιμες πληροφορίες για τη μελέτη καινούργιων εγκαταστάσεων και για την πρόβλεψη εμφάνισης ανεπιθύμητων και ζημιωγώνων υπερτάσεων, στοιχεία για τον υπολογισμό φίλτρων ανώτερων αρμονικών και ενός μέτρου των ιδιοτήτων του δικτύου.

Με την εισαγωγή ανώτερων αρμονικών ρευμάτων σε όλους τους κόμβους βλέπουμε την αύξηση του αρμονικού περιεχομένου και την παραμόρφωση των ρευμάτων γραμμής. Με την εισαγωγή ανώτερων αρμονικών ρευμάτων στους μισούς κόμβους, το αρμονικό περιεχόμενο σε γειτονικούς κόμβους (που δεν έχουμε εισάγει αρμονικές) μειώθηκε (αν και δεν εξαλήφθει) ενώ είχαμε μια αύξηση του αρμονικού περιεχομένου στους κόμβους με αρμονικά ρεύματα της τάξης του 0.02%, πίνακες 5.4 και 5.5.

Στα διαγράμματα 5.35 και 5.36 βλέπουμε, για τρεις κόμβους, την αλλαγή στη συμπεριφορά του δικτύου παρουσία τυχαίου εγκάρσιου φίλτρου. Βλέπουμε για τους γειτονικούς κόμβους 13 και 15 ότι υπάρχουν συχνότητες και μάλιστα κοντά στη θεμελιώδη αρμονική των 50Hz , όπου μπορεί να εμφανιστεί παράλληλος συντονισμός. Αντίθετα, για τον πιο απομακρυσμένο κόμβο 1 δεν υπάρχουν τέτοια προβλήματα. Αν από την άλλη έχουμε και πυκνωτή αντιστάθμισης, τότε το φαινόμενο γίνεται πιο έντονο. Είναι φανερό ότι η εισαγωγή ενός φίλτρου μπορεί να γίνει προβληματική αν δεν έχει γίνει προσεκτική προσέγγιση ως προς τη συμπεριφορά του δικτύου.

Προς αυτή την κατεύθυνση κινήθηκε η παρούσα διπλωματική εργασία. _

Βιβλιογραφία

- [1] Δρ-Μηχ Εμμανουήλ Κ. Τατάκης. *Ηλεκτρονικά Στοιχεία Ισχύος και Βιομηχανικές εφαρμογές*. Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, Πάτρα, 2003.
- [2] Δημήτριος Κ. Τσανάκας. *Ειδικά Κεφάλαια Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας*. Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, Πάτρα, 2004.
- [3] Μήλιος-Αργεΐτης Ιωάννης. *Συστήματα Μεταφοράς με Συνεχές Ρεύμα*. Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, Πάτρα, 2007.
- [4] Ζαχαρίας Θωμάς. *Ήπιες Μορφές Ενέργειας II*. Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, Πάτρα, 2005.
- [5] Χρήστος Ξεκάρφωτος. *Υπολογισμός Διείσδυσης Αρμονικών στο Δίκτυο Χαμηλής Τάσης*. 2007.
- [6] Βαρελάς Γεώργιος. *Υπολογισμός Διείσδυσης Αρμονικών στο Δίκτυο Μέσης Τάσης*. 2007.
- [7] Θεοχάρης Ανδρέας. *Μοντελοποίηση και Εξομοίωση Μετασχηματιστών Διανομής για την Διασύνδεση Συστημάτων Ήπιων Μορφών Ενέργειας*. 2009.
- [8] Ανθούλα Μεντή. *Αρμονικές Φωτοβολταϊκού Συστήματος Συνδεδεμένου στο δίκτυο-Μια Νέα Μέθοδος Ανάλυσης της Ισχύος Παρουσία Αρμονικών*. 2009.
- [9] Das, J.C. Passive filters-potentialities and limitations. In *Pulp and Paper Industry Technical Conference, 2003. Conference Record of the 2003 Annual*, παγες 187–197, June 2003.
- [10] G.Zeveke,P.Tonkin,A.Netushil,S.Strakhov. *Analysis of Electric Circuits*. Mir Publishers, Moscow,, 1973.
- [11] J.Arrillaga,N.R Watson. *Power System Harmonics*. John Wiley & Sons,Ltd, 2003.
- [12] Mohan,Underland,Robbins. *Ηλεκτρονικά Ισχύος*. Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη, 1996.
- [13] Roger C. Dugan,Mark F. McGranaghan,Surya Santoso,H.Wayne Beaty. *Electrical Power System Quality*. McGraw-Hill, ΝΘ, ΥΣΑ, 2002.