

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ Σχολή Ηλεκτρολογών Μηχανικών Και Μηχανικών Υπολογιστών Τομέας Συστημάτων Μεταδοσής Πληροφορίας Και Τεχνολογίας Υλικών

Ευρυζωνική Μετάδοση Σημάτων μέσω Γραμμών Μέσης Τάσης: Μοντέλα Διάδοσης – Χωρητικότητα

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

του

ΑΘΑΝΑΣΙΟΥ Γ. ΛΑΖΑΡΟΠΟΥΛΟΥ

Διπλωματούχου Ηλεκτρολόγου Μηχανικού και Μηχανικού Υπολογιστών Ε.Μ.Π. (2005)

Αθήνα, Φεβρουάριος 2010



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ Σχολή Ηλεκτρολογών Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών Τομέας Συστηματών Μεταδοσής Πληροφορίας και Τεχνολογίας Υλικών

Ευρυζωνική Μετάδοση Σημάτων μέσω Γραμμών Μέσης Τάσης: Μοντέλα Διάδοσης – Χωρητικότητα

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

του

ΑΘΑΝΑΣΙΟΥ Γ. ΛΑΖΑΡΟΠΟΥΛΟΥ

Διπλωματούχου Ηλεκτρολόγου Μηχανικού και Μηχανικού Υπολογιστών Ε.Μ.Π. (2005)

Συμβουλευτική Επιτροπή : Παναγιώτης Κωττής (επιβλέπων), Καθηγητής ΕΜΠ Ιωάννης Κανελλόπουλος, Καθηγητής ΕΜΠ Χρήστος Καψάλης, Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την 8^η Φεβρουαρίου 2010.

Π. Κωττής Καθηγητής Ε.Μ.Π. Ι. Κανελλόπουλος Καθηγητής Ε.Μ.Π. Χ. Καψάλης Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Σ. Παπαβασιλείου Επίκ. Καθηγητής Ε.Μ.Π. Α. Παναγόπουλος Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Α. Κανάτας Αναπλ. Καθηγητής Παν. Πειραιώς

..... Γ. Ευθύμογλου Επίκ. Καθηγητής Παν. Πειραιώς

Αθήνα, Φεβρουάριος 2010

.....

Αθανάσιος Γ. Λαζαρόπουλος Διδάκτωρ Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Αθανάσιος Γ. Λαζαρόπουλος, 2010. Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Κεφάλαιο 1° Επισκόπηση του Δικτύου Ηλεκτρικής Ενέργειας 1.1 Εισαγωγή......1-1

1.2 Σύστημα Παραγωγής	1-2
1.3 Σύστημα Μεταφοράς	1-4
1.4 Σύστημα Υπομεταφοράς	1-5
1.5 Σύστημα Διανομής ΜΤ	1-5
1.6 Γραμμές MT	1-7
1.7 Τοπολογίες Δικτύων Ηλεκτρικής Ενέργειας	1-8
1.7.1 Τοπολογίες ΜΤ	1-9

Κεφάλαιο 2[°] Επισκόπηση των Συστημάτων BPL (Αρχιτεκτονικές Δικτύων– Συχνότητες Λειτουργίας-Όρια Εκπομπών-Εφαρμογές)

2.1 Εφαρμογές της Τεχνολογίας BPL	2-1
2.2 Αρχιτεκτονικές Δικτύων BPL	2-3
2.2.1 Η Τεχνολογία των Συστημάτων BPL	2-5
2.2.2 Αρχιτεκτονική Δομή Δικτύων BPL	2-6
2.2.2.1 Αρχιτεκτονική Τύπου Α	2-7
2.2.2.2 Αρχιτεκτονική Τύπου Β	2-8
2.2.2.3 Αρχιτεκτονική Τύπου Γ	2-11
2.2.2.4 Πιθανά Μελλοντικά Σχήματα Αρχιτεκτονικών	2-12
2.3 Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα του BPL	2-14
2.4 Πρότυπα Συστημάτων BPL	2-18
2.4.1 Κατηγοριοποίηση Εγκαταστάσεων/Εξοπλισμού BPL ως προς την	
EMI	2-19
2.5 Κανονισμοί και Μελέτες για τα Όρια Ακτινοβολίας λόγω Μετάδοσης BPL	2-20
2.5.1 Διεθνείς Κανονισμοί που Αφορούν την Ακτινοβολία	
Διατάξεων/Συστημάτων ΒΡL	2-20
2.5.1.1 Το FCC/P.15 των Κανόνων της Επιτροπής FCC	2-20
2.5.1.2 Διεθνείς Κανονισμοί	2-24

2.5.1.2.1 Διοικητικές Αποφάσεις που Αφορούν το BPL.	2-25
2.5.1.2.2 Προτεινόμενοι Κανονισμοί	2-25
2.5.2 Μελέτες Παρεμβολών από Συστήματα BPL	2-28
2.5.2.1 Ταξινόμηση Παρεμβολών που οφείκονται στο BPL από	την
FCC NOI. Προτεινόμενοι Κανονισμοί	2-28
2.5.2.1.1 Γραμμές Ισχύος ως Ακούσιοι Ακτινοβολητές	
Σημάτων ΒΡL	2-28
2.5.2.1.2 Οι Κανόνες που Προτείνει το FCC/P.15 σχετικ	ά με το
BPL	2-31
2.5.2.1.3 Οι Επιπτώσεις από την Εφαρμογή της Τεχνολο	γίας
BPL στις Αδειοδοτημένες Υπηρεσίες Επικοινω	νιών
HF	2-34
2.5.2.2 Δραστηριότητες της ITU	2-35
2.5.2.2.1 ΙΤU-Τ Ομάδα Μελέτης 5	2-35
2.5.2.2.2 ΙΤU-R Ομάδα Μελέτης 1	2-35
2.5.2.2.3 ITU-R Ομάδα Μελέτης 3	2-36
2.5.2.2.4 ITU-R Ομάδα Μελέτης 6	2-37
2.6 Τεχνικές Άμβλυνσης των Επιδράσεων των Παρεμβολών από τα	
Δίκτυα BPL	2-38
2.6.1 Ελαχιστοποίηση του Επιπέδου Ισχύος	2-38
2.6.2 Αποφυγή των Τοπικά Χρησιμοποιούμενων Συχνοτήτων	2-38
2.6.3 Διαφορική Μέθοδος Έγχυσης Σημάτων	2-39
2.6.4 Φίλτρα και Τερματισμοί Σημάτων	2-39
2.6.5 Ο Κανόνας ''Μια Ενεργή Συσκευή ανά Συχνότητα και Περιοχή''.	2-40
2.6.6 Συνετή Επιλογή Φερουσών Σήματος	2-40
2.6.7 Διατήρηση Ενιαίου Σημείου Ελέγχου	2-41
2.6.8 Πρόσβαση στις Πληροφορίες Ραδιοϋπηρεσιών Βασισμένη στο	
Διαδίκτυο	2-41
2.6.9 Καταγραφή Εγκατάστασης και Εξοπλισμού BPL	2-41
2.6.10 Γνωστικά Συστήματα Ραδιοεπικοινωνιών	2-42
2.7 Περίληψη	2-42

Κεφάλαιο 3° Ανάλυση Γραμμών Μεταφοράς Πολλών Αγωγών	
3.1 Εισαγωγή στην Ανάλυση MTL	3-1
3.2 Εξισώσεις Γραμμών Μεταφοράς στην Ημιτονοειδή Μόνιμη Κατάσταση	3-1
3.3 Η Γραμμή Μεταφοράς <i>n+1</i> Αγωγών	3-6
3.3.1 Αποσύζευξη των Συζευγμένων Εξισώσεων Γραμμών MTL με Χρή	ση
Μετασχηματισμού Ομοιότητας	3-6
3.3.2 Η Γραμμή Μεταφοράς <i>n</i> +1 Αγωγών ως Πολύθυρο 2 <i>n</i> Εισόδων 2 <i>n</i>	
Εξόδων	3-10
3.3.3 Ενσωμάτωση των Συνθηκών Τερματισμού	3-11
3.3.3.1 Το Ισοδύναμο κατά Thévenin	3-11
3.3.4 Μη Ομοιόμορφες Γραμμές Μεταφοράς	3-13
3.4 Διαγωνιοποίηση για Γραμμές Μεταφοράς MTL	3-15
3.4.1 Γραμμή MTL με Απώλειες που Περιβάλλεται από μη Ομογενές	
Μέσο	3-16
3.4.2 Κυκλικώς Συμμετρικές Δομές	3-17
3.5 Μήτρες Ισχύος και Παράγοντες Ανάκλασης	3-21

Κεφάλαιο 4° Πολυδιαδρομική Διάδοση σε Γραμμές Μεταφοράς

4.1 Εισαγωγή	4-1
4.2 Ανάλυση Διαύλων Μετάδοσης ΜΤ/BPL με Χρήση Πολυδιάστατων Μητρών	
Σκέδασης	4-1
4.2.1 Πολυδιάστατη Μήτρα Σκέδασης	4-3
4.2.2 Βάση Αναφοράς και Αλλαγή Μήτρας Βάσης	4-4
4.2.3 Τμήματα Γραμμών Μεταφοράς	4-7
4.2.4 Περιγραφή Σημείων Διακλαδώσεων Γραμμών MTL	4-7
4.2.5 Τερματισμοί Γραμμής4	-10
4.2.6 Γενικό Πολυδιάστατο Εργαλείο Ανάλυσης Δικτύων Γενικής	
Χρήσης4	-11
4.3 Ανάλυση Δικτύων MT/BPL	-11
4.4 Η Πολυδιαδρομική Μέθοδος Ηχούς (Μέθοδος MEB)4	-13
4.5 Ανάλυση Δικτύων Επικοινωνιών ΜΤ/BPL με τη Χρήση Μητρικών	
Μεθόδων4-	-17
4.6 Προσδιορισμός της Συνάρτησης Μεταφοράς με Χρήση της Μήτρας ABCD4-	-18

Συνάρτηση Μεταφοράς Γραμμής Μεταφοράς με μια Διακλάδωση	4-20
4.7 Προσδιορισμός της Συνάρτησης Μεταφοράς με Χρήση της Μήτρας Τ	4-22
Μετάδοση μέσω Δομικών Στοιχείων του Δικτύου	4-22
4.8 Η Μέθοδος του Υβριδικού Χάρτη Smith	4-24

Κεφάλαιο 5° Ευρυζωνική Μετάδοση Σημάτων μέσω Εναέριων Γραμμών ΜΤ

5-1
5-1
.5-8
5-12
5-14
5-14
5-20
5-20
5-20
5-22
5-22

Κεφάλαιο 6° Ευρυζωνική Μετάδοση Σημάτων μέσω Υπόγειων Γραμμών ΜΤ

6.1 Εισαγωγή
6.2 Μελέτη Υπόγειων Γραμμών Μεταφοράς Πολλών Αγωγών6-2
Υποθέσεις για τη Γενική Ανάλυση Υπόγειων Γραμμών Μεταφοράς
Ισχύος ΜΤ6-4
Ανάλυση Υπόγειων Γραμμών Μεταφοράς Πολλών Αγωγών6-7
6.3 Ευρυζωνική Μετάδοση μέσω Τριφασικών Υπόγειων Γραμμών Μεταφοράς ΜΤ
με Κοινή Θωράκιση και Οπλισμό6-10
6.4 Προσεγγιστική Λύση για Συμμετρικές Υπόγειες Γραμμές Μεταφοράς ΜΤ
Πολλών Αγωγών
6.4.1 Προσεγγιστική Λύση για Συμμετρικές Γραμμές Μεταφοράς με
Υψηλών Απωλειών Μονώσεις6-15
6.5 Χαρακτηριστικά Μετάδοσης Υπόγειων Γραμμών Μεταφοράς MT/BPL6-18

6.6 Αριθμητικά Αποτελέσματα	6-20
6.7 Θόρυβος στις Υπόγειες Γραμμές MT/BPL	6-26

Κεφάλαιο 7° Αριθμητικά Αποτελέσματα

7.1 Εισαγωγή	1
7.2 Μετάδοση σε Εναέριες Γραμμές ΜΤ7-2	2
7.3 Χωρητικότητα των Εναέριων Διαύλων MT/BPL	6
Θόρυβος στις Εναέριες Γραμμές Ισχύος ΜΤ	6
Χωρητικότητα Διαύλου ΜΤ/BPL υπό Σταθερή και υπό Ρυθμιζόμενη Έγχυση	
Ισχύος	6
7.3.1 Χωρητικότητα Εναέριων Διαύλων ΜΤ/BPL υπό Περιορισμούς	
EMI7-17	7
7.3.2 Έγχυση Σημάτων BPL και Περιορισμοί Ισχύος	9
Μέθοδοι Σύζευξης7-1	9
Συμβατότητα με άλλες Υπηρεσίες και Περιορισμοί Ισχύος λόγω	
EMI7-20	0
7.3.3 Έγχυση Σημάτων BPL και Περιορισμοί Ισχύος	1
7.3.3.1 Χωρητικότητα Εναέριων Δικτύων MT/BPL7-23	3
7.3.3.2 Επίδραση των Κανονισμών ΕΜΙ στην Επίδοση ΜΤ/BPL7-28	8
7.3.3.3 Επίδραση της Λειτουργίας Πρωτευουσών Υπηρεσιών στη	
Μετάδοση MT/BPL7-32	2
7.3.3.4 Προστασία ΕΜΙ μέσω Μασκών Ισχύος Προσαρμοζομένων	
στις Τοπικές Πρωτεύουσες Ραδιοεκπομπές7-3	5
7.4 Χωρητικότητα των Υπόγειων Διαύλων MT/BPL	8
7.4.1 Υπολογισμός της από-Άκρο-σε-Άκρο Συνάρτησης Μεταφοράς7-38	8
Θόρυβος στις Υπόγειες Γραμμές Ισχύος ΜΤ	9
Περιορισμοί Ισχύος για Υπόγεια Συστήματα MT/BPL7-39	9
7.4.2 Αριθμητικά Αποτελέσματα7-40	0
ΕΜΙ λόγω Υπόγειας Μετάδοσης ΜΤ/BPL7-4	9
Σύγκριση μεταξύ Υπόγειας και Εναέριας Μετάδοσης MT/BPL7-5	1
Εσωτερική Λειτουργικότητα μεταξύ Υπόγειας και Εναέριας	
Μετάδοσης ΜΤ/ΒΡL7-52	2
7.5 Συμπεράσματα	3

6 Μελλοντική Έρευνα7-53

Παραρτήματα Π

Π.1.1 Περιγραφή των Στοιχείων Ηλεκτρικού Δικτύου ΜΤ	П-1
Υποσταθμοί	П-1
Υποσταθμοί Μετασχηματιστών	П-8
Μετασχηματιστής ΜΤ/ΧΤ	П-17
Π.2.1 Αγόμενες και Ακτινοβολούμενες Διαταραχές από Εξοπλισμό BPL	П-22
Π.2.2 Αρμονικές Ρεύματος Εξοπλισμού BPL	П-23
Π.2.3 Ατρωσία Εξοπλισμού BPL	П-23
Π.3.1 Ιδιότητες της Μήτρας Αλυσιδωτής Σύνδεσης	П-25
Π.3.2 Εξισώσεις ΜΤL για Ημιτονοειδή Σταθερής Κατάστασης Διέγερση	П-27
Π.3.3 Το Ισοδύναμο κατά Thévenin	П-27
Π.3.4 Το Ισοδύναμο κατά Norton	П-29
Π.3.5 Μικτές Αναπαραστάσεις	П-31
Π.5.1 Εναέριες Γραμμές	П-32
Π.5.2 Απλός Αγωγός υπεράνω Εδάφους	П-36
Π.5.3 Προσδιορισμός Μήτρας Διάδοσης για Γραμμές Μεταφοράς Πολλών	
Αγωγών	П-37
Π.6.1 Υπόγειες Γραμμές	П-37
Π.6.2 Θωρακισμένες Γραμμές Μεταφοράς	П-47
Π.6.3 Στοιχεία των ανά Μονάδα Μήκους Μητρών Σύνθετης Αντίστασης και	
Σύνθετης Αγωγιμότητας Γραμμών Μεταφοράς Πολλών Αγωγών Θαμμ	ένων στο
Έδαφος	П-47
Εσωτερική Αντίσταση Αγωγών	П-48
Σύνθετες Αντιστάσεις Επιφάνειας Κοίλων Στερεών Κυλινδρικών	
Αγωγών	П-48
Σύνθετη Αντίσταση και Σύνθετη Αγωγιμότητα λόγω Μόνωσης	П-50
Σύνθετη Αντίσταση Εδάφους	П-50
Ανά Μονάδα Μήκους Μήτρες Αυτεπαγωγής και Χωρητικότητας	П-53
Π.6.3 Προσέγγιση Θωράκισης/Οπλισμού Γραμμών Μεταφοράς Πολλών Αγά	ογών
MT	П-56

Βιβλιογραφία

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

1.1 Στάδια μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας1-1
1.2 Μονογραμμικό διάγραμμα δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας1-3
1.3 Επισκόπηση του ηλεκτρικού ενεργειακού συστήματος1-9
1.4 Δομή διπλού κυκλώματος1-10
1.5 Δομή ενιαίου κυκλώματος1-10
1.6 Ακτινωτή τοπολογία. Αποκλειστικές γραμμές ΜΤ1-12
1.7 Ακτινωτή τοπολογία. Απλή γραμμή ΜΤ1-12
1.8 Ακτινωτή τοπολογία. Δενδρική γραμμή ΜΤ1-12
1.9 Τοπολογία δακτυλίου1-13
1.10 Τοπολογία πλέγματος1-13
2.1 Παράδειγμα ευρυζωνικών επικοινωνιών μέσω των γραμμών μεταφοράς MT2-2
2.2 Βασική διάταξη εναέριου συστήματος BPL2-6
2.3 Η αρχιτεκτονική τύπου Α των συστημάτων BPL2-8
2.4 Η αρχιτεκτονική τύπου Β των συστημάτων BPL2-11
2.5 Η αρχιτεκτονική τύπου Γ των συστημάτων BPL2-12
2.6 Δισδιάστατη αρχιτεκτονική δικτύου με χρήση μονάδων Gen22-14
2.7 Πιθανή μελλοντική αρχιτεκτονική των συστημάτων BPL2-15
2.8 Πιθανές ζώνες συχνοτήτων για λειτουργία BPL συστημάτων [65]2-16
2.9 Διάταξη γραμμών ηλεκτρικής ενέργειας σε στύλο2-22
2.10 Σύγκριση των προτάσεων που αφορούν τα όρια έντασης ηλεκτρικού πεδίου που
δημιουργείται ακούσια από εκπομπές BPL2-29
3.1 (α) Γεωμετρία και μεγέθη γραμμής μεταφοράς δύο αγωγών και (β) η γραμμή
μεταφοράς δύο αγωγών μήκους L ως δίθυρο δίκτυο
3.2 Γραμμή MTL $n+1$ αγωγών ως πολύθυρο δίκτυο $2n$ εισόδων $2n$ εξόδων3-11
3.3 Το ισοδύναμο κατά Thévenin όταν ο τερματισμός δεν περιλαμβάνει σύζευξη.3-12
3.4 Γραμμή μεταφοράς MTL ως διαδοχή τμημάτων ομοιόμορφων γραμμών
MTL
3.5 Απεικόνιση θωρακισμένης γραμμής με ίνες έναρξης και λήξης ως σύνδεση τριών
διαφορετικών ομοιόμορφων τμημάτων3-15

3.6 Διατάξεις κυκλικώς συμμετρικές που διαθέτουν μήτρα ΥΖ που μπορεί να
διαγωνιοποιηθεί μέσω μετασχηματισμού ανεξάρτητου της συχνότητας [119]3-18
4.1 Δίκτυο πολλαπλής πρόσβασης ΜΤ/ΒΡL4-3
4.2 Ανάλυση δικτύου MT/BPL με χρήση πολυδιάστατων μητρών σκέδασης
[134]4-4
4.3 Σειριακή σύνδεση μητρών σκέδασης: (α) Μήτρες σκέδασης σε σειρά.
(β) Μεταφορά μήτρας ανάκλασης μέσω μήτρας σκέδασης4-5
4.4 Παράδειγμα σύνδεσης αγωγών και αντίστοιχη μήτρα σύνδεσης4-9
4.5 Μήτρα σκέδασης που αφορά διακλάδωση προς γνωστό τερματισμό (η μετάδοση
MT/BPL γίνεται κατά μήκος της κυρίας γραμμής μεταφοράς)4-9
4.6 Μήτρα σκέδασης που αφορά τη μετάδοση σημάτων MT/BPL από την κύρια
γραμμή μεταφοράς προς τη γραμμή μεταφοράς διακλάδωσης4-9
4.7 Τηλεπικοινωνιακός δίαυλος MT/BPL
4.8 Πολυδιαδρομική διάδοση σημάτων ΜΤ/BPL σε δίαυλο με ανοικτοκυκλωμένη
διακλάδωση4-15
4.9 Δίθυρο δίκτυο που συνδέει πηγή τάσης με φορτίο4-19
4.10 Κύκλωμα αποτελούμενο από δύο δίθυρα σε αλυσιδωτή σύνδεση4-19
4.11 Σύνδεση MT/BPL με ενδιάμεση διακλάδωση4-21
4.12 Ισοδύναμο κύκλωμα του Σχήματος 4.11
4.13 Ορισμός των κυματικών μητρών μεταφοράς4-22
4.14 Ζεύξη MT/BPL με N διακλαδώσεις που θεωρούνται ως διακριτά δομικά
στοιχεία
4.15 Σύνδεση ενός δομικού στοιχείου δικτύου4-26
4.16 Ισοδύναμο κύκλωμα υποθετικής ζεύξης MT/BPL με N διακλαδώσεις4-27
5.1 Λεπτός αγωγός υπεράνω επίπεδης ατελούς εδάφους με επιτρεπτότητα ε_{g} ,
διαπερατότητα $\mu_g = \mu_0$ και αγωγιμότητα σ_g
5.2 Ρυθμοί διάδοσης σε γραμμή μεταφοράς τριών αγωγών
5.3 Έγχυση σήματος BPL σε γραμμές MT: (α) καλώδιο με καλώδιο και
(β) καλώδιο με έδαφος5-10
5.4 Γραμμή μεταφοράς πολλών αγωγών

5.5 Εξάρτηση από τη συχνότητα των συντελεστών εξασθένησης και της φάσης των
τριών ρυθμών που υποστηρίζει μια γραμμή μεταφοράς τριών αγωγών
MT/BPL
5.6 Φασματική πυκνότητα ισχύος θορύβου κορώνα υπό κακές καιρικές
συνθήκες
5.7 Συνολικός θόρυβος σε γραμμή MT που λειτουργεί υπό κακές καιρικές
συνθήκες
6.1 Δομή υπόγειας τριφασικής γραμμής μεταφοράς ΜΤ με οπλισμό και
θωράκιση
6.2 Μηχανισμοί εξασθένησης για τις περιπτώσεις: (α) απωλειών δινορρευμάτων και
(β) απωλειών λόγω χωρητικού ρεύματος6-17
6.3 Συντελεστής εξασθένησης υπόγειων γραμμών μεταφοράς ΜΤ με χρήση τριών
διαφορετικών μεθόδων (η κλίμακα του άξονα y είναι γραμμική)6-21
6.4 Συντελεστής εξασθένησης υπόγειων και εναέριων τριφασικών γραμμών
μεταφοράς ΜΤ συναρτήσει της συχνότητας (η κλίμακα του άξονα y είναι
λογαριθμική)
7.1 Τυπική εναέρια γραμμή μεταφοράς ΜΤ πολλών αγωγών και πολυδιαδρομική
διάδοση σήματος σε μια σύνδεση MT/BPL έχοντας N διακλαδώσεις και σύνδεση
δομικού στοιχείου δικτύου
7.2 Φασματική συμπεριφορά του κοινού ρυθμού CM και του διαφορικού ρυθμού
DM1 όπως προσδιορίζεται με εφαρμογή της μεθόδου TM (—), MEB (- • -) και
HSC ()
7.3 Φασματική συμπεριφορά των ρυθμών (α) CM και (β) DM $_1$ για:
αγροτικά δίκτυα MT/BPL (—) και μετάδοση LOS ()
7.4 Εξασθένηση των ρυθμών CM και DM_1 συναρτήσει της απόστασης από το σημείο
έγχυσης για τις συχνότητες για τις περιπτώσεις:
ρυθμού CM/Τοπολογία 1 (), ρυθμού CM/Τοπολογία 2 (),
ρυθμού CM/περίπτωση LOS (), ρυθμού DM1/Τοπολογία 1 (—),
ρυθμού DM1/Τοπολογία 2 () και ρυθμού DM1/περίπτωση LOS (·····)7-8
7.5 Ασυνέχεια της εξασθένησης συναρτήσει της συχνότητας για την Τοπολογία 1
(α) στην πρώτη διακλάδωση (A_1) (β) στη δεύτερη διακλάδωση (A_2)
και (γ) στην τρίτη διακλάδωση (Α3) για τις περιπτώσεις:
СМ (—) кал DM ₁ ()

7.6 Επίδραση μήκους διακλαδώσεων στη φασματική συμπεριφορά των ρυθμών
(α) CM και (β) DM1 για τις Τοπολογίες 1 (—), 5 (—) και 6 ()
7.7 Επίδραση του μήκους διακλαδώσεων στην ασυνέχεια της εξασθένησης
(α) στην πρώτη διακλάδωση (A1), (β) στη δεύτερη διακλάδωση (A2)
(γ) στην τρίτη διακλάδωση (Α3) για τις Τοπολογίες 1 (—), 5 ()
και 6 ()
7.8 (α) Εξασθένηση διαύλου συναρτήσει της συχνότητας και
(β) <i>PWB</i> συναρτήσει της από-άκρο-σε-άκρο εξασθένησης για τις περιπτώσεις:
Τοπολογίας 1 (—) και Τοπολογίας 3 ()
7.9 (α) Εξασθένηση διαύλου συναρτήσει της συχνότητας και
(β) <i>PWB</i> συναρτήσει της από-άκρο-σε-άκρο εξασθένησης για τις περιπτώσεις:
Τοπολογίας 1 (—) και Τοπολογίας 3 ()
7.10 Από-άκρο-σε-άκρο εξασθένηση, πιθανότητα υπέρβασης SE και σωρευτική
χωρητικότητα του DM $_1$ υπό σταθερό IPSD7-25
7.11 Πιθανότητα υπέρβασης SE και σωρευτική χωρητικότητα κατά τη μετάδοση των
ρυθμών CM (—) και DM ₁ () υπό σταθερό IPSD7-27
7.12 Σωρευτική χωρητικότητα για την περίπτωση εναέριων συστημάτων MT/BPL
υπό σταθερό IPSD (—) και ρυθμιζόμενο IPSD μέσω W-F ()7-28
7.13 Σωρευτική χωρητικότητα όταν η συνολική εγχυόμενη ισχύς P κατανέμεται στο
ρυθμό DM1 με ρυθμιζόμενο IPSD μέσω W-F (α) Αποτελέσματα της
διατριβής (—) (β) Αποτελέσματα της εργασίας [162] ()7-29
7.14 Σωρευτική χωρητικότητα για καλούς και κακούς διαύλους BPL για τέσσερα
όρια IPSD υποθέτοντας (α) θόρυβο τύπου Α και (β) θόρυβο τύπου Β7-30
7.15 Σωρευτική χωρητικότητα για καλούς και κακούς διαύλους BPL όταν η έγχυση
γίνεται με τα όρια FCC, τα όρια FCC +5%, και τα όρια FCC -5% (υποτίθεται
θόρυβος τύπου Α)7-31
7.16 Όρια FCC και χρησιμοποιούμενες μάσκες (S2 και C2)7-33
7.17 Η σωρευτική χωρητικότητα των καλών και κακών διαύλων MT/BPL όταν
επιβάλλονται οι φασματικές μάσκες του Πίνακα 7.1 επιπλέον των ορίων
της FCC
7.18 Η σωρευτική χωρητικότητα καλών και κακών διαύλων MT/BPL όταν
επιβάλλονται οι φασματικές μάσκες του Πίνακα 7.1 με έγχυση στα όρια της
FCC και με έγχυση σε χαλαρότερα όρια (FCC+5%)

7.19 (α) Από-άκρο-σε-άκρο εξασθένηση και (β) πιθανότητα υπέρβασης της	
εξασθένησης για το ρυθμό DM_1 υπό σταθερό IPSD	7-43
7.20 Πιθανότητα υπέρβασης SE του ρυθμού DM ₁ υπό σταθερό IPSD	.7-45
7.21 Σωρευτική χωρητικότητα του ρυθμού DM_1 υπό σταθερό IPSD	7-47
7.22 Σωρευτική χωρητικότητα υπόγειων διαύλων MT/BPL υπό σταθερό IPSD κ	αι
ρυθμιζόμενο IPSD μέσω του αλγορίθμου W-F	
7.23 Η σωρευτική χωρητικότητα εναέριων και υπόγειων διαύλων MT/BPL με έγ	νχυση
ισχύος στα όρια της FCC	.7-49
7.24 Η διδακτορική διατριβή σε μορφή δομικών στοιχείων και μελλοντική	
έρευνα	.7-54
Π.1.1 Υποσταθμός	П-2
Π.1.2 Παράδειγμα μετασχηματιστών από ΥΤ σε ΜΤ	П-2
Π.1.3 Υποσταθμός [2]	П-5
Π.1.4 Υποσταθμός ανύψωσης τάσης	П-6
Π.1.5 Υποσταθμός ανύψωσης τάσης και σύνδεσης με τις γραμμές μεταφοράς	…П - 6
Π.1.6 Υποσταθμός υποβιβασμού τάσης	П-8
Π.1.7 Υποσταθμός διανομής	П-8
Π.1.8 Διάγραμμα υποσταθμών μετασχηματιστών	П-9
Π.1.9 Εναέριες γραμμές ΜΤ	П-10
Π.1.10 Υπόγειες γραμμές ΜΤ	.П-10
Π.1.11 Εσωτερικές υπόγειες γραμμές ΜΤ και υποσταθμοί μετασχηματιστών	
κουβουκλίου	.П - 11
Π.1.12 Υπόγειος υποσταθμός μετασχηματιστή	.П-11
Π.1.13 Υπόγειος μετασχηματιστής στο έδαφος	.П-13
Π.1.14 Σταθμός μετασχηματιστών φωλεάς	П-13
Π.1.15 Υποσταθμός μετασχηματιστή σε στύλο	.П-15
Π.1.16 Δομή υποσταθμού μετασχηματιστή σε στύλο	П-15
Π.1.17 Συσκευασμένος υποσταθμός μετασχηματιστών	П-16
Π.1.18 Μετασχηματιστής βυθισμένος σε υγρό	.П-18
Π.1.19 Μετασχηματιστής ξηρού τύπου	П-18
Π.1.20 Μετασχηματιστής μιας φάσης	П-18
Π.1.21 Μετασχηματιστής τριών φάσεων	.П-19
Π.1.22 Υπερυψωμένος μετασχηματιστής	.П-19
Π.1.23 Επιφανειακός μετασχηματιστής	.П-20

Π.1.24 Υπόγειος μετασχηματιστής	П-20
Π.3.1 Συνθήκες τερματισμού στα άκρα z=0 και z=L σε μια γραμμή μεταφοράς	
MTL <i>n</i> +1 αγωγών	П-28
Π.3.2 Η απεικόνιση του ισοδυνάμου κατά Norton όταν ο τερματισμός δεν	
περιλαμβάνει σύζευξη	П-30
Π.5.1 Εναέρια γραμμή με αγωγό ΑΑC	П-34
Π.5.2 Εναέρια γραμμή με αγωγό ACSR	П-34
Π.5.3 Εναέριες γραμμές με αγωγούς ACSR διαφορετικών διατομών	П-34
Π.5.4 Εναέρια γραμμή με αγωγό ΑΑΑC	П-35
Π.5.5 Εναέριες γραμμές με αγωγούς ΑΑC και ΑΑΑC	П-35
Π.5.6 Εναέρια γραμμή με αγωγούς ACAR	П-35
Π.5.7 Εναέρια γραμμή με αγωγό ACSR και μονωμένη με XLPE	П-36
Π.6.1 Απευθείας θαμμένες υπόγειες γραμμές	П-38
Π.6.2 Υπόγειες γραμμές τοποθετημένες σε σωλήνες	П-38
Π.6.3 Υπόγειες γραμμές τοποθετημένες σε αύλακα	П-38
Π.6.4 Εκσκαφή	П-39
Π.6.5 Όργωμα	П-40
Π.6.6 Διάτρηση	П-40
Π.6.7 Γενική δομή ενός υπόγειου καλωδίου	П-41
Π.6.8 Γραμμές μεταφοράς PILC [157], [282]	П-43
Π.6.9 Γραμμή μεταφοράς XLPE	П-43
Π.6.10 Ομόκεντρη ουδέτερη γραμμή μεταφοράς	П-45
Π.6.11 Γραμμή μεταφοράς ισχύος	П-45
Π.6.12 Γραμμή μεταφοράς ενιαίου αγωγού	П-46
Π.6.13 Γραμμή μεταφοράς τριών αγωγών	П-46
Π.6.14: Προσδιορισμός των ανά μονάδα μήκους μητρών αυτεπαγωγής και	
χωρητικότητας για <i>n</i> αγωγούς σε κυλινδρική θωράκιση: (α) διατομή,	
(β) η απεικόνιση με χρήση ειδώλων [119], [284]	П-54

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

1.1 Συνολικό μήκος γραμμών ηλεκτρικής ενέργειας	1-2
2.1 Υπηρεσίες BPL προς χρήστες με χρέωση	2-4
2.2 Υπηρεσίες BPL προς την επιχείρηση ηλεκτρικής ενέργειας	2-4
2.3 Κλάση, θέση εγκατάστασης του εξοπλισμού BPL και μέσο μετάδοσης σ	ημάτων
BPL	2-23
2.4 Πιθανές παρεμβολές εναέριου στύλου σε άλλο εξοπλισμό	2-23
2.5 Όρια εκπομπής σχετικά BPL του FCC/P.15	2-25
2.6 Χώρες και οι αποφάσεις τους σχετικά με εφαρμογές BPL	2-26
2.7 Γερμανικά όρια NB30	2-27
2.8 Νορβηγική πρόταση.	2-27
2.9 Πρόταση από το BBC και το NATO	2-27
2.10 Πρόταση από τους κατασκευαστές εξοπλισμού BPL	2-28
2.11 Όρια ισχύος ηλεκτρικών πεδίων ΙΤU-Τ Rec. K.60	2-36
4.1 Διαδρομές διάδοσης για την από-άκρο-σε-άκρο σύνδεση Α→Β του	
Σχήματος 4.8	4-16
6.1 Βασικές παράμετροι απλών διατάξεων (Rs η επιφανειακή αντίσταση	
αγωγού)	6-22
7.1 Φασματικές μάσκες αποκλεισμού ισχύος	7-33
7.2 Πίνακας που ποσοτικοποιεί τον εμπειρικό κανόνα	7-35
7.3 Συχνότητες κορεσμού χωρητικότητας για διάφορες κατηγορίες υπόγειων	, MT/BPL
διαύλων που έχουν σχεδιαστεί στο Σχήμα 7.21	7-47
Π.1.1 Κύρια χαρακτηριστικά των δικτύων ΧΤ της Δυτικής Ευρώπης	П-16
Π.1.2 Οι βασικές παράμετροι των μετασχηματιστών ΜΤ/ΧΤ	П-22

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διδακτορική διατριβή εκπονήθηκε στα πλαίσια του Εργαστηρίου Ασυρμάτου και Επικοινωνίας Μεγάλων Αποστάσεων που ανήκει στον Τομέα Συστημάτων Μετάδοσης Πληροφορίας και Τεχνολογίας Υλικών στα πλαίσια των υποχρεώσεων που απορρέουν από το Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Αντικείμενο της διατριβής αποτελεί η μελέτη της ευρυζωνικής μετάδοσης σημάτων μέσω γραμμών ΜΤ (Μέσης Τάσης). Στόχος της διατριβής είναι η παρουσίαση κατάλληλων μοντέλων διάδοσης όσον αφορά την ευρυζωνική μετάδοση σημάτων σε εναέρια και υπόγεια συστήματα MT/BPL (Broadband over Power Lines) και η εξαγωγή αναλυτικών αποτελεσμάτων για παραμέτρους που άπτονται των συστημάτων.

Ειδικότερα, τα Κεφάλαια 1 και 2 παρέχουν μια γενική επισκόπηση του ηλεκτρικού δικτύου αλλά και μια εξειδικευμένη παρουσίαση των χαρακτηριστικών της τεχνολογίας BPL όπως είναι οι συχνότητες λειτουργίας, τα πρότυπα από διεθνείς οργανισμούς και τα όρια εκπομπών.

Στα Κεφάλαια 3 και 4 της Διατριβής πραγματοποιείται μια εκτενής επισκόπηση των συστημάτων γραμμών μεταφοράς πολλών αγωγών (γραμμές MTL ή Multiconductor Transmission Lines) τόσο ως προς την ανάλυση των ρυθμών (modal analysis) όσο και ως προς τη συμπεριφορά της από-άκρο-σε-άκρο συνάρτησης μεταφοράς (end-to-end transfer function ή end-to-end channel attenuation). Στο Κεφάλαιο 3 γίνεται η παρουσίαση της γενικής λύσης για την περίπτωση γραμμής MTL *n*+1 αγωγών με τη χρήση ισοδύναμης περιγραφής όπως αυτή προκύπτει από τη λύση του ιδιοπροβλήματος (eigenproblem). Στο Κεφάλαιο 4 με τη βοήθεια της γενικευμένης ανάλυσης με χρήση πολυδιάστατων μητρών σκέδασης SM (multidimensional Scattering Matrices) γίνεται η περιγραφή της από-άκρο-σε-άκρο συνάρτησης μεταφοράς των ρυθμών (mode) που υποστηρίζει μια γραμμή MTL ενώ δίνεται έμφαση στην περιγραφή του φαινομένου της πολυδιαδρομικότητας (multipath) που εμφανίζει ο δίαυλος τόσο επί εναέριων όσο και επί υπόγειων γραμμών MTL στα συστήματα MT/BPL.

Τα Κεφάλαια 5 και 6 της Διατριβής εμβαθύνουν στα προβλήματα διάδοσης καθώς και τις αντίστοιχες τεχνικές αντιμετώπισής τους που αφορούν το φυσικό δίαυλο των εναέριων και των υπόγειων συστημάτων MT/BPL. Αφού αρχικά γίνεται μια επισκόπηση των σχετικών ερευνητικών προσπαθειών προηγούμενων ετών, στη συνέχεια περιγράφονται οι εξελίξεις και οι σχετικές μέθοδοι που έχουν εμφανισθεί κατά τα τελευταία έτη. Με την ολοκληρωμένη πλέον διατύπωση του ιδιοπροβλήματος γραμμών MTL παρουσιάζεται η επίλυσή του για εναέρια και υπόγεια συστήματα MT/BPL.

Στο Κεφάλαιο 7 της Διατριβής αφού γίνει η παρουσίαση καταλλήλων μέτρων αποτίμησης (metrics) για την αξιολόγηση των διαύλων στη συνέχεια γίνεται η παρουσία των αριθμητικών αποτελεσμάτων και η συζήτηση που αφορά τη συμπεριφορά εναέριων και υπόγειων συστημάτων MT/BPL τόσο σε σχέση με την από-άκρο-σε-άκρο εξασθένηση όσο και με τη σωρευτική χωρητικότητα. Μεταξύ των ενδιαφερόντων συμπερασμάτων όσον αφορά την ευρυζωνική ικανότητα των δικτύων MT/BPL θίγονται θέματα όπως η ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα EMC και παρεμβολή EMI (ElectroMagnetic Compatibility and Interference), η διαλειτουργικότητα μεταξύ συστημάτων MT/BPL και άλλων τεχνολογιών (intraoperability and interoperability) και οι συμβιβασμοί (trade-offs) μεταξύ των μέτρων αποτίμησης.

Επί τη λήξει της διδακτορικής μου πορείας θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου σε μια σειρά ανθρώπων, καθένας εκ των οποίων είχε σημαντικό ρόλο σε αυτά τα χρόνια της ερευνητικής μου προσπάθειας.

Καταρχήν θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινέστατες ευχαριστίες μου και τη βαθιά μου ευγνωμοσύνη στον επιβλέποντα Καθηγητή τόσο της παρούσας διδακτορικής μου διατριβής όσο και της διπλωματικής μου εργασίας κ. Παναγιώτη Κωττή. Θα ήθελα να τον ευχαριστήσω θερμά για τη μεγάλη εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου όλα αυτά τα χρόνια. Ο ορθολογισμός του, η αγάπη του για το τέλειο, η υπομονή και επιμονή του, οι επαγγελματικές και προσωπικές αξίες του με βοήθησαν στην ανάπτυξη της επαγγελματικής δεοντολογίας που πρέπει να χαρακτηρίζει έναν ολοκληρωμένο σύγχρονο μηχανικό και αποτελούν την παρακαταθήκη για τη μελλοντική σταδιοδρομία μου. Επιπρόσθετα, η αγάπη του για την ορθή και λακωνική χρήση της γλώσσας στοιχείο που σπάνια χαρακτηρίζει θετικούς επιστήμονες συνέβαλλε στην ευρύτερη εκπαίδευσή μου κατά τη διάρκεια της συνεργασίας μας. Επίσης, σε επιστημονικό επίπεδο, η τεράστια γνώση του, προϊόν βαθειάς ερευνητικής εμπειρίας, έδωσε πολύτιμες λύσεις και συνεισέφερε καθοριστικά στην περάτωση της διατριβής. Τέλος, σε πιο προσωπικό επίπεδο, τον ευχαριστώ για τις συμβουλές, τις συζητήσεις και τη διαρκή ενθάρρυνση.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να εκφράσω προς τους αξιότιμους κ. Ιωάννη Κανελλόπουλο, κ. Χρήστο Καψάλη και κ. Αθανάσιο Παναγόπουλο για την καθοριστική συμβολή τους στην ανάπτυξη μου ως μηχανικό τηλεπικοινωνιών. Η άρτια επιστημονική τους κατάρτιση και η αγάπη για τα αντικείμενα διδασκαλίας τους στη ΣΗΜΜΥ/ΕΜΠ μου ενέπνευσαν την αγάπη για μάθηση και έρευνα.

Τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες για τη συνεργασία τους θα ήθελα επίσης να εκφράσω προς τους κ. Συμεών Παπαβασιλείου, κ. Αθανάσιο Κανάτα και κ. Γεώργιο Ευθύμογλου.

Στα πλαίσια της εργασίας μου ως Συμβούλου στο Υπουργείο Μεταφορών και Επικοινωνιών θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου προς τους συναδέλφους μου και μέλη του εργαστηρίου εκεί Μάρκο Αναστασόπουλο, Παντελή Αράπογλου, Θανάση Δρούγκα, Διονυσία Πετράκη και Γιώργο Τσιρόπουλο για την εξαιρετική συνεργασία που είχαμε και το υψηλό επίπεδο εργασίας που παράχθηκε.

Επίσης, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου και προς τα υπόλοιπα μέλη του εργαστηρίου Άννα Βαζιντάρη, Αρτέμη Βουλκίδη, Αγγελική Κορδαλή, Αγγελική Σαράφη, Σωτήρη Κανελλόπουλο, Βασίλη Σακαρέλλο, Δημήτρη Σκραπαρλή και Δημήτρη Στρατογιάννη για την εκτίμησή τους.

Ολοκληρώνοντας, θα ήθελα από τα βάθη της καρδιάς μου να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στην οικογένειά μου, τον πατέρα μου Γεώργιο Λαζαρόπουλο, τη μητέρα μου Αικατερίνη Λαζαροπούλου και τον αδερφό μου Παναγιώτη Λαζαρόπουλο, για την αγάπη τους, την αμέριστη στήριξή τους, τη συμπαράσταση αλλά και για τα εχέγγυα που μου προσέφεραν όλα αυτά τα χρόνια.

Αθανάσιος Γ. Λαζαρόπουλος Αθήνα, Φεβρουάριος 2010

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της διατριβής αποτελεί η μελέτη της ευρυζωνικής μετάδοσης σημάτων μέσω τριφασικών εναέριων γραμμών MT (Μέση Τάση) και μέσω τριφασικών υπόγειων γραμμών MT τριών αγωγών με κοινή θωράκιση και οπλισμό. Ο δίαυλος μετάδοσης MT/BPL (Broadband over Power Lines) διερευνήθηκε διεξοδικά ως προς τη γενική φασματική συμπεριφορά του, το αξιοποιήσιμο εύρος ζώνης, την από-άκρο-σε-άκρο εξασθένηση και τη χωρητικότητα. Διαπιστώθηκε ότι τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά εξαρτώνται δραστικά από τον τύπο των γραμμών μεταφοράς MT, την τοπολογία του δικτύου MT και συγκεκριμένα το πλήθος και το ηλεκτρικό μήκος των διακλαδώσεων που υπάρχουν κατά μήκος μιας από-άκρο-σεάκρο σύνδεσης MT/BPL, το επίπεδο της ισχύος έγχυσης, τα επίπεδα θορύβου και το μοντέλο ρύθμισης των ακούσιων εκπομπών.

Το Κεφάλαιο 1 της διατριβής παρέχει σύντομη εισαγωγή στη δομή των δικτύων μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ισχύος εξετάζοντας κυρίως δύο πτυχές του: την αρχιτεκτονική των δικτύων και τις εγκαταστάσεις. Η ανάλυση επικεντρώνεται στην παρουσίαση των χαρακτηριστικών που απαντώνται στην Ευρώπη. Το Κεφάλαιο 2 αξιολογεί το ευρύτερο περιβάλλον που σχετίζεται με την ενσωμάτωση της τεχνολογίας MT/BPL στην αγορά τηλεπικοινωνιών. Στο Κεφάλαιο αυτό η ανάλυση εστιάζεται στις νέες δυνατότητες ευρυζωνικής πρόσβασης που μπορούν να προσφέρουν τα συστήματα MT/BPL. Επίσης, αναλύονται οι παράγοντες που επηρεάζουν τη διείσδυση της τεχνολογίας MT/BPL δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση σε προδιαγραφές τεχνικών προτύπων, στους κανονισμούς που εφαρμόζονται στα συστήματα MT/BPL και στις μελέτες που πραγματοποιήθηκαν από τα διάφορα ενδιαφερόμενα μέρη για τη διερεύνηση των χαρακτηριστικών εκπομπών των συστημάτων MT/BPL. Οι κανονισμοί περιλαμβάνουν τα καθιερωμένα και προτεινόμενα όρια ακτινοβολίας που σχετίζονται με τα συστήματα MT/BPL.

Στο Κεφάλαιο 3 της διατριβής εξετάστηκε η λύση των εξισώσεων MTL (γραμμών μεταφοράς πολλών αγωγών/Multiconductor Transmission Lines) για γραμμές μεταφοράς n+1 αγωγών. Με χρήση μητρών, οι λύσεις των εξισώσεων MTL είναι της ίδιας μορφής με τις λύσεις των γραμμών μεταφοράς δύο αγωγών. Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για να λυθούν οι εξισώσεις MTL είναι η αποσύζευξή τους (decouple) μέσω μετασχηματισμού ομοιότητας (similarity transformation). Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται πλήρης μεθοδολογία για τον ακριβή προσδιορισμό της από-άκρο-σε-άκρο συνάρτησης μεταφοράς δικτύων MT/BPL, βασισμένη στη θεωρία MTL. Με βάση τα γενικά χαρακτηριστικά των γραμμών μεταφοράς πολλών αγωγών και έχοντας προσδιορίσει τα θεμελιώδη χαρακτηριστικά διάδοσης (ρυθμούς διάδοσης, μιγαδικές σταθερές διάδοσης και χαρακτηριστικές αντιστάσεις των θεωρία των πολυδιάστατων ρυθμών) αξιοποιείται η μητρών σκέδασης (multidimensional scattering matrix formalism) που επιτρέπει την ακριβή ανάλυση των δικτύων MT/BPL λαμβάνοντας υπόψη όλα τα στοιχεία των γραμμών μεταφοράς πολλών αγωγών, των διακλαδώσεων και των τερματισμών. Υπό τρεις βασικές υποθέσεις που συνήθως ισχύουν στα υπάρχοντα δίκτυα ΜΤ, η ανωτέρω ανάλυση καταλήγει στην ύπαρξη ανεξάρτητων διαύλων που αντιστοιχούν σε κάθε ρυθμό διάδοσης (independent modal scalar-waves networks). Η παράλληλη ανάλυση των ανεξάρτητων διαύλων αυτών γίνεται μέσω κατάλληλων μεθόδων περιγραφής της πολυδιαδρομικής διάδοσης (multipath propagation) όπως η μέθοδος MEB (Multipath Echo Based model), η μέθοδος ABCD, η μέθοδος TM (T-Matrix method) ή η μέθοδος HSC (υβριδική μέθοδος διαγραμμάτων Smith ή Hybrid Smith Chart method).

Το Κεφάλαιο 5 της διατριβής εξετάζει ως προς τη δυνατότητα BPL την εναέρια γραμμή μεταφοράς ΜΤ τριών αγωγών με απώλειες πάνω από ατελή γη (dissipative line above a lossy ground) με βάση την ακριβή διατύπωση των εξισώσεων Maxwell για συχνότητες από 1-100MHz. Η διαδικασία που ακολουθείται αποτελεί επέκταση σε γραμμές μεταφορές πολλών αγωγών των αποτελεσμάτων της ανάλυσης της απλής περίπτωσης ενός αγωγού πάνω από έδαφος. Τέτοιου τύπου γραμμές υποστηρίζουν τόσους ρυθμούς διάδοσης όσοι είναι και οι αγωγοί που τις αποτελούν. Επιπλέον, εξάγονται οι εκφράσεις της ανά μονάδα μήκους σύνθετης αντίστασης και σύνθετης αγωγιμότητας. Το Κεφάλαιο 6 εξετάζει τις υπόγειες γραμμές μεταφοράς MT ως προς τη μετάδοση BPL. Εξετάζονται γραμμές μεταφοράς τριών αγωγών με θωράκιση και οπλισμό. Γίνεται ανάλυση για συχνότητες 1-100MHz για την περίπτωση γυμνών και μονωμένων αγωγών. Επιπλέον, εξετάζονται τα φαινόμενα σύζευξης των αγωγών μέσω της θωράκισης και του οπλισμού και αναλύεται η έννοια των ανά μονάδα μήκους σύνθετων αντιστάσεων και σύνθετων αγωγιμοτήτων κυλινδρικών αγωγών (tube impedances) για τη θωράκιση και τον οπλισμό των γραμμών μεταφοράς ΜΤ. Προτείνεται μέθοδος για την περιγραφή της διάδοσης σε συχνότητες 1-100MHz για διάφορες υπόγειες γραμμές μεταφοράς πολλών αγωγών -είτε τύπου τομέα (sector-type) είτε τύπου πυρήνα (coretype)- και για διάφορους τύπους μονώσεων. Τα θεωρητικά αποτελέσματα επιβεβαιώνονται από άλλες καθιερωμένες θεωρητικές μεθόδους αλλά και πειραματικές μετρήσεις.

Το Κεφάλαιο 7 που ολοκληρώνει τη διατριβή εξετάζει την ευρυζωνική μετάδοση σημάτων μέσω τριφασικών εναέριων γραμμών μεταφοράς MT/BPL υπεράνω εδάφους με απώλειες και μέσω τριφασικών υπόγειων γραμμών μεταφοράς MT/BPL με κοινή θωράκιση και οπλισμό. Με τη χρήση των μεθόδων που αναλύθηκαν στα κεφάλαια που προηγήθηκαν εξετάζεται η διάδοση ευρυζωνικών σημάτων με βάση την από-άκρο-σε-άκρο συνάρτηση μεταφοράς για διάφορες τοπολογίες εναέριων και υπόγειων δικτύων MT/BPL. Διαπιστώνεται ότι η φασματική συμπεριφορά των δικτύων MT/BPL εξαρτάται δραστικά από τον τύπο του δικτύου ΜΤ και το πλήθος, τον τύπο και το ηλεκτρικό μήκος των διακλαδώσεων που απαντώνται κατά μήκος μιας από-άκρο-σε-άκρο σύνδεσης. Επιπλέον, μελετώνται οι διάφορες τοπολογίες διαύλων μετάδοσης MT/BPL ως προς τη χωρητικότητα και τη ρυθμαπόδοσή τους. Η ανάλυση και οι σχετικές προσομοιώσεις αποκαλύπτουν ότι η ευρυζωνική μετάδοση μέσω των γραμμών μεταφοράς MT/BPL εξαρτάται τόσο από τον τύπο του δικτύου ΜΤ όσο, και κυρίως, από τους περιορισμούς ισχύος που επιβάλλονται για να καταστείλουν την ακούσια ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή σε άλλες ασύρματες αδειοδοτημένες υπηρεσίες. Τα χαλαρά όρια έγχυσης ισχύος και τα χαμηλότερα επίπεδα θορύβου που χαρακτηρίζουν την υπόγεια μετάδοση MT/BPL εξισορροπούν την αντίστοιχη εξαιρετικά υψηλή εξασθένηση καθιστώντας τη χωρητικότητα των υπόγειων δικτύων MT/BPL συγκρίσιμη με αυτή των εναέριων δικτύων MT/BPL επιτρέποντας τη διαλειτουργικότητά τους. Τέλος, για τη ρύθμιση των εκπομπών λόγω μετάδοσης MT/BPL μέσω εναέριων δικτύων προτείνεται τροποποίηση του σταθερού προτύπου κατανομής/ολικής προστασίας του φάσματος (fixed spectrum allocation/all-protection model) με χρήση μασκών ισχύος (power

masks) προσαρμοσμένων στις τοπικές συνθήκες λειτουργίας άλλων ασυρμάτων υπηρεσιών.

ABSTRACT

The main objective of this thesis is broadband signal transmission via threephase overhead Medium-Voltage (MV) lines above the lossy plane ground and threephase underground MV lines with common shield and armor. The MV/BPL (Broadband over Power Lines) transmission channel is investigated with regard to spectral behavior, usable bandwidth, end-to-end signal attenuation and capacity. It is found that these features depend drastically on the MV cables used, the MV grid topology, mainly on the number and electrical length of the branches existing along an end-to-end BPL connection, the level of power injection, the noise power levels and the spectrum allocation rules used to regulate BPL emissions.

Chapter 1 provides an introduction of the power distribution network structure in its both aspects: architecture and installation devices. Typical configurations in Europe are considered. Chapter 2 assesses the environment of MV/BPL technology in the telecommunications market, based on the state-of-the-art of the technology and the commercial and operational experiences that MV/BPL has already built up. This Chapter focuses on the potential role MV/BPL may play in broadband access. Chapter 2 also analyses the factors that could affect the development of MV/BPL technology, with special emphasis on the specifications of the technical standards, the regulations suggested for MV/BPL systems and the studies conducted by various parties to investigate the characteristics of MV/BPL emissions. The regulations include both the established and proposed radiation limits for MV/BPL systems.

Chapter 3 considers the frequency-domain solution of the MTL (Multiconductor Transmission Lines) equations for an n+1 conductor line. Using matrix notation, the solutions to these phasor MTL equations are similar to the solutions for two-conductor lines. The method used to solve these phasor MTL equations is to decouple them via a similarity transformation. Chapter 4 proposes a complete methodology for the deterministic modeling of the end-to-end transfer function associated with MV/BPL networks, in the light of the MTL theory. Based on general multiconductor power line cables and their fundamental propagation characteristics (definition of eigenmodes, propagation constant and modal characteristic impedance), a multidimensional scattering matrix formalism is introduced to perform an accurate analysis of global MV/BPL networks including multiconductor cable segments, derivation points and termination loads. Under three basic assumptions, multiconductor network analysis can be reduced to the parallel analysis of independent modal scalar-waves networks via suitable multipath methods like MEB method (Multipath Echo Based method), ABCD method, TM method (T-Matrix method) or HSC method (Hybrid Smith Chart method).

Chapter 5 ends up with the simulation model of a three-conductor overhead MV/BPL dissipative line above a lossy ground, after providing an exact expression of the matrix modal equation of the line, assuming that there are as many discrete modes of propagation as there are conductors. Furthermore, the expressions of the distributed series-impedance and shunt-admittance matrices are presented, with reference to the definition of the wire-to-ground voltage. Chapter 6 analyzes underground MV/BPL transmission taking into account coupling phenomena through cable shields. The concept of tube impedances for cable shields is discussed. A wide range of transmission line models for multi-sector and multi-core cables with various types of

insulations including shield and armor is presented and compared with experiments. The analysis is assorted and completed by other established models reproduced from the literature.

Chapter 7 concludes the thesis by considering broadband signal transmission via three-phase overhead MV/BPL lines above the lossy plane ground and via threephase underground MV/BPL lines with common shield and armor. The established methods dealing with transmission along MV power lines are examined in terms of the end-to-end transfer function under various network configurations. The MV/BPL transmission channel is investigated with regard to its spectral behavior, the usable bandwidth and the end-to-end channel attenuation. It is found that the aforementioned features depend drastically on the number and type of branches existing along the end-to-end MV/BPL signal propagation. Moreover, various topologies of MV/BPL transmission channels have been studied with regard to their capacity. The analysis and relevant simulations reveal that broadband transmission via MV power lines depends drastically on the MV grid topology and the power constraints imposed to suppress EMI (ElectroMagnetic Interference) to other services. The relaxed power injection limits and the lower noise power levels characterizing underground MV/BPL transmission counteracts the extremely high inherent attenuation making the capacity achieved compatible to that achieved in overhead MV/BPL transmission. Especially for overhead MV/BPL networks, a modification to the fixed spectrum allocation/all-protection model to regulate BPL emission is proposed employing power masks adaptive to locally existing wireless services.

KATALOGOS Syntmhseqn

AAAC	All Aluminium Alloy Conductor					
AAC	All Aluminium Conductor					
ACA	Australian Communications and media Authority					
ACAR	Aluminium Conductor Aluminium-Alloy Reinforced					
ACSR	Aluminium Conductor Steel Reinforced					
AM	Amplitude Modulation					
Ameren	Ameren Energy Communications, Incorporated					
AR	Auto-Regressive					
ARRL	American Radio Relay League					
BBC	British Broadcasting Corporation					
BER	Bit Error Rate					
BPL	Broadband over Power Lines					
CCI	Co-Channel Interference					
CENELEC	Comité Européen de Normalisation ÉLECtrotechnique					
CEPT	Conférence Européenne des administrations des Postes et					
	Télécommunications					
CISPR	Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques					
СМ	Common Mode					
CoS	Service Classes					
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance					
DARC	Deutsche Amateur-Radio-Club					
DM	Differential Mode					
DSL	Digital Subscriber Line					
DSL	Digital Subscriber Line					
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum					
EBU	European Broadcasting Union					
ECC	European Communications Commission					
EFT	Electric Fast Transients					
EMC	ElectroMagnetic Compatibility					
EMI	ElectroMagnetic Interference					

EN	EuropeaN standards						
ENDESA	Empresa Nacional de Electricidad						
EPR	Ethylene-PRopylene						
ESD	ElectroStatic Discharges						
FCC	Federal Communications Commission						
FD	Full Duplex						
FDD	Frequency Division Duplexing						
FICORA	FInnish COmmunications Regulatory Authority						
GtP	Ground-to-Phase						
HBES	Home and Building Electronic Systems						
HF	High Frequency						
HSC	Hybrid Smith Chart						
HV	High Voltage						
IACS	International Annealed Copper Standard						
IEC	International Electrotechnical Commission						
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers						
IP	Internet Protocol						
IPSD	Injected Power Spectral Density						
ITU	International Telecommunication Union						
KEPCO	Korea Electric Power COrporation						
KTH	Kungliga Tekniska Högskolan						
LAN	Local Area Network						
LF	Low Frequency						
LLDPE	Linear Low-Density PolyEthylene						
LOS	Line-of-Sight						
LT	Line Termination						
LV	Low Voltage						
MAN	Metropolitan Area Network						
MEB	Multipath Echo Based method						
MF	Medium Frequency						
MIMO	Multiple Input Multiple Output						
MPHPT	Ministry of Public management, Home affairs, Posts and						
	Telecommunications						

MTL	Multiconductor Transmission Lines				
MV	Medium Voltage				
NEC	Numerical Electromagnetics Code				
NLS	Noise-Like Signals				
NOI	Notice Of Inquiry				
NT	Network Terminations				
NTIA	National Telecommunications and Information Administration				
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing				
OPERA	Open PLC European Research Alliance				
PE	PolyEthylene				
PILC	Paper Insulated Lead Covered				
PLC	Power Line Communications				
PLT	Power Line Telecommunications/Technologies				
PM	Phantom Mode				
PSD	Power Spectral Density				
PtMP	Point to Multi Points				
PtP	Phase-to-Phase				
PVC	PolyVinyl Chloride				
PWB	Percentage Wasted Bandwidth				
QoS	Quality of Service				
RA	Radiocommunications Agency				
RegTP	REGulierungsbehörde für Telekommunikation und Post				
RF	Radio Frequency				
SC	Shunt Coupler				
SE	Spectral Efficiency				
SM	Scattering Matrix				
SNMP	Simple Network Management Protocol				
SP	Shortest Path routing				
TCP/IP	Transmission Control Protoco/Internet Protocol				
TDD	Time Division Duplexing				
TEM	Transverse ElectroMagnetic Wave				
TM	T-Matrix method				
TR-XLPE	Tree-Retardant Cross-Linked PolyEthylene				

TUE	Technische Universiteit Eindhoven				
VoIP	Voice over Internet Protocol				
W-F	Water-Filling				
WiFi	Wireless Fidelity				
WiMAX	Worldwide interoperability for Microwave Access				
WPA	Wi-Fi Protected Access				
WtG	Wire-to-Ground				
WtW	Wire-to-Wire				
XLPE	Cross-Linked PolyEthylene				
ΑΠΕ	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας				
ГМ	Γραμμές Μεταφοράς				
ΔEH	Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού				
ΕΚΚΖΣ	Εθνικός Κανονισμός Κατανομής Ζωνών Συχνοτήτων				
HM	Ηλεκτρομαγνητικό Πεδίο				
MT	Μέση Τάση				
Y/Σ	Υποσταθμός				
YT	Υψηλή Τάση				
YYT	ΥπερΥψηλή Τάση				
XT	Χαμηλή Τάση				

1.1 Εισαγωγή

Σκοπός των δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας είναι η μεταφορά και διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας από τις μονάδες παραγωγής στους τελικούς καταναλωτές. Βασική επιδίωξη είναι η παροχή ηλεκτρικής ενέργειας υψηλής αξιοπιστίας και υψηλής ποιότητας εξασφαλίζοντας σταθερή συχνότητα και διακύμανση της τάσης μέσα σε προδιαγραφόμενα όρια [1]. Τα στάδια μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας από τον σταθμό παραγωγής στον τελικό χρήστη φαίνονται στο Σχήμα 1.1.

Σε ένα δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας διακρίνονται τρία επίπεδα τάσης:

- Υψηλή Τάση ή ΥΤ (High Voltage ή HV) με επίπεδα τάσης άνω των 35kV (τάση άνω των 275kV ονομάζεται ΥπερΥψηλή Τάση ή ΥΥΤ),
- Μέση Τάση ή MT (Medium Voltage ή MV) με επίπεδα τάσης από 1kV έως 35kV και

• $X \alpha \mu \eta \lambda \eta T d\sigma \eta \eta XT$ (Low Voltage η LV) $\mu \epsilon \epsilon \pi i \pi \epsilon \delta \alpha \tau d\sigma \eta \varsigma \alpha \pi \delta 100V \epsilon \omega \varsigma 1 kV.$

Τα ανωτέρω όρια αναφέρονται σε ενεργό (rms) τιμή πολικής τάσης τριφασικού συστήματος.



Σχήμα 1.1: Στάδια μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

Το συνολικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας απαρτίζεται από τα εξής επιμέρους συστήματα:

- Σύστημα Παραγωγής,
- Σύστημα Διασύνδεσης και Μεταφοράς,
- Σύστημα Υπομεταφοράς και
- Σύστημα Διανομής.

Τα σύγχρονα συστήματα μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας είναι τριφασικά και, επί πλέον, συμμετρικά. Η ομοιόμορφη φόρτιση των τριών φάσεων επιτυγχάνεται με ισοκατανομή στο δίκτυο των ενεργών ή αναμενομένων φορτίων. Επομένως, ένα συμμετρικό τριφασικό δίκτυο παριστάνεται μέσω μόνο μιας φάσης του και υπονοείται ότι η συμπεριφορά των τριών φάσεων είναι κοινή, με μόνη διαφορά τη φασική απόκλιση. Στο Σχήμα 1.2 παρουσιάζεται η μονογραμμική περιγραφή των ηλεκτρικών δικτύων, όπου φαίνονται τα σημαντικότερα τμήματα ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.

Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από τις γεννήτριες μεταφέρεται στις περίπου 7000000 καταναλώσεις στην Ελλάδα μέσω γραμμών μεταφοράς ΥΤ, γραμμών ΜΤ και γραμμών ΧΤ. Τα αντίστοιχα συνολικά μήκη αναφέρονται στον Πίνακα 1.1.

1.2 Σύστημα Παραγωγής

Το Σύστημα Παραγωγής περιλαμβάνει τους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος και τους μετασχηματιστές ανύψωσης της τάσης για τη μεταφορά του από το δίκτυο ΥΤ. Η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται από μετατροπή άλλης μορφής ενέργειας σε ηλεκτρική. Το σύνολο της ηλεκτρικής ενέργειας που παρέχεται στην κατανάλωση σήμερα από συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας προέρχεται από την καύση ορυκτών καυσίμων (άνθρακες, πετρέλαιο), από τη ροή ή την πτώση των υδάτων και από την κινητική ενέργεια του ανέμου. Μια γεννήτρια ισχύος παράγει 3 διαφορετικές φάσεις

Συνολικό μήκος (km)	Έτος	1999	Έτος	2004	Έτος	2006
Γραμμές ΥΤ		9811		10985		11424
Γραμμές ΜΤ		76544		88025		93307
Γραμμές ΧΤ		87935		105522		113963

Πίνακας	1.1: Συνολικό	μήκος γοσμ	μών ηλεκτοικι	ής ενέονειας.
IIIIVURU	, 1.1. 2000//iku	milkoz shah	μων ηλεκτρικι	ly even jeiny.


Σχήμα 1.2: Μονογραμμικό διάγραμμα δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας.

ισχύος ταυτόχρονα, έκαστη των οποίων διαφέρει φασικά 120° από την άλλη.

Το πλεονέκτημα της τριφασικής ισχύος είναι ότι σε κάθε χρονική στιγμή μια από τις τρεις φάσεις είναι κοντά σε ένα μέγιστο της, χαρακτηριστικό θετικό όσον αφορά τη λειτουργία διατάξεων και μηχανών σε βιομηχανικό περιβάλλον.

Οι διάφοροι τύποι σταθμών παραγωγής κατατάσσονται σε θερμοηλεκτρικούς (ατμοηλεκτρικούς, ντιζελοηλεκτρικούς, πυρηνικούς), σε υδροηλεκτρικούς (υδατοπτώσεων, υδατίνων ρευμάτων, αντλητικούς) και σε ηπίων και ανανεώσιμων μορφών/πηγών ενέργειας (ΑΠΕ).

1.3 Σύστημα Μεταφοράς

Τα δίκτυα Μεταφοράς κομίζουν την ηλεκτρική ενέργεια από τις μονάδες παραγωγής στις ευρύτερες ζώνες κατανάλωσης. Λειτουργούν κατά διασυνδεδεμένο τρόπο, έχουν δηλαδή τη δυνατότητα αμφίδρομης ροής ενέργειας, σε αντιστοιχία με τα χαρακτηριστικά παραγωγής/ζήτησης δεδομένης χρονικής στιγμής. Μέσω των δικτύων Μεταφοράς πραγματοποιούνται οι διεθνείς διασυνδέσεις, είτε για λόγους εφεδρείας είτε για ανταλλαγές ηλεκτρικής ενέργειας μεταξύ χωρών, βάσει συμφωνιών. Οι τάσεις λειτουργίας τους κυμαίνονται συνήθως από 150kV (σπανιότερα από 66kV) έως 400kV (YT), ενώ σε ορισμένες χώρες φθάνουν μέχρι τα 800kV με 900kV (YYT). Η χρήση της YT γίνεται για οικονομικούς λόγους, επειδή για δεδομένη μεταφερόμενη ισχύ οι απώλειες ισχύος γραμμής αυξάνονται με τη μείωση της τάσης.

Η επιλογή του επιπέδου τάσης υπό το οποίο πραγματοποιείται η μεταφορά γίνεται με τεχνικά και οικονομικά κριτήρια και εξαρτάται από την καμπύλη του μεταφερόμενου φορτίου και από την απόσταση μεταφοράς. Για τεχνικούς και οικονομικούς λόγους τα δίκτυα μεταφοράς είναι συνήθως εναέρια. Τα όρια των δικτύων Μεταφοράς είναι:

- Οι Υ/Σ ανύψωσης στους Σταθμούς Παραγωγής μέσω των οποίων εισρέει ενέργεια στο δίκτυο Μεταφοράς.
- Οι Υ/Σ υποβιβασμού της τάσης, στη στάθμη τάσης των δικτύων Υπομεταφοράς
 ή των δικτύων Διανομής ΜΤ, από τους οποίους εκρέει ενέργεια από τα δίκτυα
 Μεταφοράς.
- Οι Υ/Σ ηλεκτροδότησης μεγάλων καταναλωτών, από τους οποίους επίσης εκρέει ενέργεια.
- Τα σημεία όπου πραγματοποιούνται διεθνείς διασυνδέσεις.

Το σύστημα προστασίας των δικτύων Μεταφοράς πρέπει να είναι πολύ υψηλών προδιαγραφών/επιδόσεων, δεδομένου ότι σφάλματα στα δίκτυα αυτά μπορούν να προκαλέσουν πολύωρες διακοπές ηλεκτροδότησης σε εκατοντάδες χιλιάδες ή και εκατομμύρια καταναλωτές. Επειδή λειτουργούν συνήθως σε εθνικό επίπεδο (διασυνδεδεμένο δίκτυο Μεταφοράς), η παρακολούθηση και ο έλεγχος της λειτουργίας τους καθώς και η προστασία τους αναλαμβάνεται από το Κέντρο Ελέγχου. Το διασυνδεδεμένο δίκτυο Μεταφοράς της ΔΕΗ περιλαμβάνει περίπου 8000km γραμμών 150kV και 2500km γραμμών 400kV. Οι καταναλωτές ΥΤ είναι περίπου 20.

1.4 Σύστημα Υπομεταφοράς

Τα αντίστοιχα δίκτυα μεταφέρουν ενέργεια από το δίκτυο Μεταφοράς στα κύρια κέντρα κατανάλωσης. Η στάθμη τάσης λειτουργίας τους κυμαίνεται από 25kV έως 250kV. Κατά κανόνα λειτουργούν κατά διασυνδεδεμένο τρόπο. Συνήθως, οι γραμμές Υπομεταφοράς είναι εναέριες. Τροφοδοτούν με ηλεκτρική ενέργεια είτε Υ/Σ υποβιβασμού σε MT είτε μεγάλους καταναλωτές (με ζήτηση ισχύος της τάξης π.χ. των 10MVA). Η προστασία τους είναι παρόμοια με εκείνη των δικτύων Μεταφοράς, ενώ τα Κέντρα Ελέγχου κατανέμονται σε περιφερειακό (και όχι σε εθνικό) επίπεδο. Σε ορισμένες χώρες δεν υπάρχουν δίκτυα Υπομεταφοράς αλλά το δίκτυο Μεταφοράς τροφοδοτεί απευθείας τα δίκτυα MT. Στην Ελλάδα, τα δίκτυα 22kV στην Αττική, που τροφοδοτούν δίκτυα 6.6kV μπορούν να θεωρηθούν ως δίκτυα Υπομεταφοράς (τα δίκτυα των 22kV και 6.6kV είναι παλαιά δίκτυα, κατασκευασμένα έως τις αρχές της δεκαετίας του 1960). Σε πολλές περιπτώσεις είναι δύσκολο να γίνει διάκριση μεταξύ δικτύων Υπομεταφοράς και δικτύων Διανομής MT.

1.5 Σύστημα Διανομής ΜΤ

Από τους δημόσιους Υ/Σ υποβιβασμού της τάσης των δικτύων Μεταφοράς ή Υπομεταφοράς σε Μέση Τάση τροφοδοτούνται οι αναχωρήσεις ΜΤ που μεταφέρουν την ηλεκτρική ενέργεια στα τοπικά κέντρα κατανάλωσης. Δημόσιοι Υ/Σ είναι όλοι οι Υ/Σ πλην εκείνων που εξυπηρετούν αποκλειστικά μεγάλους καταναλωτές. Τα δίκτυα ΜΤ τροφοδοτούν με ηλεκτρική ενέργεια τους Υ/Σ Διανομής ΜΤ/ΧΤ καθώς και τους Υ/Σ ΜΤ μεγάλων καταναλωτών που αποτελούν μικρό ποσοστό του συνόλου των καταναλωτών ενός παρόχου ηλεκτρικής ενέργειας. Η τάση λειτουργίας τους κυμαίνεται συνήθως από 5kV έως 40kV (συνηθέστερες είναι οι στάθμες τάσης μεταξύ 12kV και 24kV). Οι αναχωρήσεις ΜΤ αποτελούνται από τον κορμό και τις διακλαδώσεις, αν και σε κάποιες περιπτώσεις η διάκριση μεταξύ τους δεν είναι σαφής. Το μέσο πλήθος των αναχωρήσεων ΜΤ από Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ καθώς και το μέσο μήκος των αναχωρήσεων παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές μεταξύ χωρών ή ηλεκτρικών επιχειρήσεων. Το πλήθος των αναχωρήσεων κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 4 και 25. Το μέσο μήκος των αναχωρήσεων είναι γενικά μικρότερο σε αστικές περιοχές (από 3km έως 10km σε αστικές και από 5km έως 35km σε μη αστικές). Παρά το μικρότερο μήκος τους, σε πολλές χώρες οι αναχωρήσεις σε αστικές περιοχές μεταφέρουν κατά μέσο όρο περισσότερο φορτίο. Σε πολλές περιπτώσεις, μεταξύ των αναχωρήσεων MT υπάρχει δυνατότητα διασύνδεσης. Αυτό σημαίνει ότι με κατάλληλους χειρισμούς των στοιχείων ζεύξης των αναχωρήσεων είναι δυνατό τα φορτία μιας αναχώρησης ή μέρους αυτής να τροφοδοτηθούν από άλλη ή άλλες αναχωρήσεις του ίδιου ή, συνήθως, διαφορετικών υποσταθμών ΥΤ/ΜΤ.

Η δυνατότητα διασύνδεσης αυξάνει την αξιοπιστία των δικτύων μειώνοντας το χρόνο διακοπής σε περίπτωση σφάλματος. Γενικότερα, οι υπόγειες γραμμές MT κατασκευάζονται σχεδόν πάντοτε με δυνατότητα διασύνδεσης. Επιπλέον, οι εναέριες γραμμές που εξυπηρετούν περιοχές με σχετικά πυκνά φορτία (π.χ. αστικές, ημιαστικές) διαθέτουν συνήθως δυνατότητα διασύνδεσης. Οι γραμμές με δυνατότητα διασύνδεσης λειτουργούν κατά κανόνα ακτινικά, δηλαδή σε κάθε χρονική στιγμή οποιοδήποτε φορτίο κατανάλωσης ηλεκτροδοτείται από μια μόνο αναχώρηση MT Y/Σ YT/MT (δομή ανοικτού βρόχου). Είναι πολύ σπάνιες οι περιπτώσεις κατά τις οποίες σε δίκτυα MT υπάρχουν ταυτόχρονα περισσότεροι από ένας αγώγιμοι δρόμοι μεταξύ φορτίου κατανάλωσης και Y/Σ YT/MT, γιατί, γενικά, τέτοια πρακτική δεν ενδείκνυται για τεχνοοικονομικούς λόγους (λόγω της τεχνικής πολυπλοκότητας, κυρίως του συστήματος προστασίας που απαιτείται).

Στην Ελλάδα οι στάθμες MT είναι 20kV (συνηθέστερη), 22kV, 15kV και 6.6kV. Τα δίκτυα MT έχουν συνολικό μήκος περίπου 95000km, από τα οποία τα 85000km έχουν τάση λειτουργίας 20kV. Το 92% του συνολικού μήκους των δικτύων είναι εναέρια. Οι Υ/Σ Διανομής (MT/XT) είναι περίπου 135000 και οι Υ/Σ καταναλωτών MT είναι 8000.

Τα εναέρια δίκτυα έχουν συνήθως δενδροειδή μορφή. Αποτελούνται, δηλαδή, από τον κορμό –δηλαδή την κύρια γραμμή που κατασκευάζεται με αγωγούς μεγάλης διατομής– και τις διακλαδώσεις που κατασκευάζονται με αγωγούς μικρότερης διατομής επί των οποίων συνδέονται οι Υ/Σ ΜΤ/ΧΤ. Η δενδροειδής μορφή επιτυγχάνεται σχετικά εύκολα στις αγροτικές περιοχές ενώ παρουσιάζει δυσκολίες στις ημιαστικές και αστικές περιοχές όπου οι περιορισμοί στην όδευση των γραμμών δεν το επιτρέπουν. Γενικά, τα εναέρια δίκτυα λειτουργούν ακτινικά, δηλαδή όλες οι γραμμές τροφοδοτούνται από το ένα άκρο τους. Στην Ελλάδα καθώς και στις Ευρωπαϊκές χώρες, οι γραμμές των εναέριων δικτύων διανομής περιλαμβάνουν μόνο τους τρεις αγωγούς των φάσεων και όχι τον ουδέτερο. Όσον αφορά τις βλάβες που παρουσιάζονται, ο εντοπισμός τους και η αποκατάσταση της κανονικής λειτουργίας είναι σχετικά εύκολες διαδικασίες για τις οποίες απαιτείται χρόνος μερικών ωρών.

Τα υπόγεια δίκτυα επειδή τροφοδοτούν περιοχές με μεγάλη πυκνότητα φορτίου αλλά και με αυξημένες απαιτήσεις συνεχούς τροφοδότησης δεν καλύπτονται επαρκώς από το ακτινικό μοντέλο. Αυτό συμβαίνει επειδή ο εντοπισμός και η αποκατάσταση μιας βλάβης υπόγειας γραμμής είναι ιδιαίτερα σύνθετες εργασίες και απαιτούν χρονικά διαστήματα της τάξης των 24 ωρών. Έτσι, στα υπόγεια δίκτυα ακολουθείται ο κανόνας να υπάρχει μετά από βλάβη η δυνατότητα για τροφοδότηση (αυτόματα ή χειροκίνητα) από άλλη οδό χωρίς να απαιτείται η επισκευή της βλάβης. Συνήθως αυτή η άλλη οδός σε μη αστικές περιοχές είναι εναέρια, ενώ σε αστικές περιοχές είναι υπόγεια. Συχνές είναι και οι περιπτώσεις κατά τις οποίες στην ίδια αναχώρηση από υποσταθμό περιλαμβάνονται και εναέρια και υπόγεια τμήματα. Υπάρχουν τριών ειδών τοπολογίες για τις γραμμές ΜΤ: η ακτινωτή (radial topology), η τοπολογία δακτυλίου (ring topology) και η τοπολογία πλέγματος (networked topology) [2]. Οι τοπολογίες αυτές παρουσιάζονται στην §1.7.1.

Στο Παράρτημα 1.1 περιγράφονται διάφορα στοιχεία που απαντώνται σε ηλεκτρικά δίκτυα MT και σχετίζονται με την ευρυζωνική μετάδοση BPL (Broadband over Power Lines) όπως είναι οι υποσταθμοί, οι υποσταθμοί μετασχηματιστών και οι μετασχηματιστές MT/XT [2]-[16].

1.6 Γραμμές ΜΤ

Οι γραμμές MT είναι οι διατάξεις που μεταφέρουν την ηλεκτρική ισχύ στη διανομή MT. Η γραμμή μεταφοράς πρέπει να επιλεγεί ώστε να παρέχεται ακίνδυνα και συνεχώς επαρκής ηλεκτρική ισχύς, χωρίς προβλήματα λειτουργίας ώστε το σύστημα να είναι σε θέση να ανταποκριθεί σε ενδεχόμενες απροσδόκητες απαιτήσεις και σε καταστάσεις υπερφόρτωσης [17]-[21], [22]-[24].

Υπάρχει μεγάλη ποικιλία γραμμών μεταφοράς που μπορεί να ταξινομηθεί κατά διαφόρους τρόπους. Ενδεικτικά, μπορούν να ταξινομηθούν με βάση το υλικό του αγωγού. Ευρύτατα χρησιμοποιούμενα υλικά είναι το αλουμίνιο και ο χαλκός. Με κριτήριο την αγωγιμότητα, το καλύτερο υλικό για αγωγούς μετά από τον άργυρο είναι ο χαλκός και μετά το αλουμίνιο που είναι αισθητά φθηνότερο. Μια άλλη ταξινόμηση μπορεί να γίνει με βάση τη διατομή του αγωγού. Η διατομή του αγωγού

ποικίλλει και εξαρτάται από τη μεταφερόμενη ισχύ, με χαρακτηριστικό ότι υψηλότερη ισχύς απαιτεί υψηλότερες διατομές. Η δημιουργία δέσμης αγωγών είναι επίσης σημαντική. Υπάρχουν δύο δυνατότητες: γραμμές μεταφοράς ενιαίου αγωγού και γραμμές μεταφοράς τριών αγωγών. Οι γραμμές μεταφοράς ενιαίου αγωγού έχουν έναν αγωγό φάσης για κάθε γραμμή μεταφοράς, με αποτέλεσμα να είναι απαραίτητοι τρεις γραμμές μεταφοράς MT. Οι γραμμές μεταφοράς τριών αγωγών έχουν τρεις αγωγούς στην ίδια γραμμή μεταφοράς, με ένα αγωγό για κάθε φάση. Τέλος, η συνηθέστερη ταξινόμηση γίνεται με βάση τη θέση όπου οι γραμμές μεταφοράς τοποθετούνται: εναέρια ή υπόγεια [17]-[21].

Ειδικά για την περίπτωση της Ελλάδας, η ΔΕΗ χρησιμοποιεί στις γραμμές ΜΤ τους εξής αγωγούς και διατομές:

- Για τα υπόγεια δίκτυα MT: $3 \times 240 \text{mm}^2 \text{Al}$ (αλουμίνιο).
- Στα εναέρια δίκτυα MT: 3×95mm² ACSR, 3×70mm² ACSR, 3×35mm² ACSR. Το υλικό των αγωγών είναι το αλουμίνιο ή ο χαλκός με χαλύβδινη ψίχα για μηχανική αντοχή.

1.7 Τοπολογίες Δικτύων Ηλεκτρικής Ενέργειας

Τα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας χαρακτηρίζονται από τρία επίπεδα με κριτήριο το επίπεδο τάσης που μεταφέρουν Τα επίπεδα αυτά είναι το επίπεδο μαζικής μεταφοράς/μετάδοσης (bulk transmission), το επίπεδο μεταφοράς (subtransmission) και το επίπεδο διανομής (distribution) [25]-[29]. Τα δίκτυα διανομής διαιρούνται σε δύο μέρη: δίκτυα διανομής MT και XT, γνωστά επίσης και ως πρωτεύουσα και δευτερεύουσα διανομή, αντίστοιχα. Παρουσίαση της δομής του ηλεκτρικού ενεργειακού συστήματος που δόθηκε έως τώρα δίνεται στο Σχήμα 1.3 [2], [30]. Οι τάσεις που παρουσιάζονται είναι μόνο για λόγους επισκόπησης. Μπορούν να μεταβάλλονται ανάλογα με τους εθνικούς κανονισμούς και τις εσωτερικές διαδικασίες κάθε εταιρίας ηλεκτρισμού. Τα τυποποιημένα IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) πρότυπα 141 καθορίζουν ένα ονομαστικό σύστημα τάσεων. Οι ακόλουθες υποενότητες περιγράφουν τις κοινές τοπολογίες που απαντώνται στα δίκτυα διανομής. Η γνώση αυτών των τοπολογιών επιτρέπει την καλύτερη εφαρμογή των δικτύων BPL στη MT.



Σχήμα 1.3: Επισκόπηση του ηλεκτρικού ενεργειακού συστήματος.

1.7.1 Τοπολογίες ΜΤ

Τα δίκτυα ΜΤ μπορούν να μεταφέρουν ισχύ σε μια διπλού ή ενιαίου κυκλώματος:

Διπλό κύκλωμα ή διπλή παραγωγή. Διατίθενται δύο γραμμές ανά φάση, μια εκ των οποίων λειτουργεί ως γραμμή υπηρεσίας ενώ η άλλη λειτουργεί ως εφεδρική γραμμή. Με αυτόν τον τρόπο αποφεύγεται η υπερφόρτωση των γραμμών και επιτυγχάνονται καλύτερες αποκρίσεις σε πιθανές αποτυχίες. Η τοπολογία αυτή υπάρχει μόνο σε περιοχές υψηλής πυκνότητας ή σε περιοχές ειδικών απαιτήσεων. Ο μέσος αριθμός μετασχηματιστών MT/XT στη γραμμή μεταφοράς MT είναι 20, αλλά μπορεί να κυμανθεί μεταξύ 4 και 30. Η απόσταση μεταξύ δύο μετασχηματιστών MT/XT στη γραμμή μεταφοράς MT κυμαίνεται από 150 έως 400m. Παράδειγμα διπλού κυκλώματος παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.4.



Σχήμα 1.4: Δομή διπλού κυκλώματος.

Ενιαίο κύκλωμα. Διατίθεται μια γραμμή ανά φάση. Ο μέσος αριθμός μετασχηματιστών MT/XT στη γραμμή μεταφοράς MT είναι 20, αλλά μπορεί να κυμανθεί μεταξύ 4 και 30. Η απόσταση μεταξύ δύο μετασχηματιστών MT/XT στη γραμμή μεταφοράς MT είναι από 150 έως 400m. Σε αραιοκατοικημένες περιοχές η απόσταση μεταξύ των υποσταθμών είναι μεγαλύτερη και μπορεί να είναι μέχρι 1000m. Παράδειγμα ενιαίου κυκλώματος παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.5.



Σχήμα 1.5: Δομή ενιαίου κυκλώματος.

Υπάρχουν τρεις τοπολογίες για τη μεταφορά της ηλεκτρικής ισχύος: η ακτινωτή, η τοπολογία δακτυλίου και η δικτυωμένη τοπολογία [31], [32].

 Ακτινωτή τοπολογία. Στην τοπολογία αυτή οι ηλεκτρικοί υποσταθμοί (YT/MT) συνδέονται με τους υποσταθμούς μετασχηματιστών (MT/XT) μέσω ακτινωτών συνδέσεων. Αυτές οι γραμμές (ή τροφοδότες) μπορούν να είναι αποκλειστικές για ένα υποσταθμό μετασχηματιστών ή να διέλθουν από διάφορους υποσταθμούς μετασχηματιστών. Ένα πλεονέκτημα του ακτινωτού συστήματος με τη βοήθεια των αποκλειστικών γραμμών MT είναι ο συγκεντρωτικός έλεγχος όλων των υποσταθμών μετασχηματιστών. Παράδειγμα ακτινωτού συστήματος με αποκλειστικές γραμμές MT παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.6.

Συχνά, μια γραμμή ΜΤ που τροφοδοτεί διάφορους υποσταθμούς μετασχηματιστών διέρχεται διαδοχικά από καθένα εξ αυτών. Αυτό το σύστημα απαιτεί τη σωστή κατανομή των συσκευών ελέγχου (π.χ. μηχανισμοί διανομής), μια για κάθε υποσταθμό μετασχηματιστών. Παράδειγμα ακτινωτής τοπολογίας με χρήση απλών γραμμών ΜΤ παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.7.

Και τα δύο συστήματα ακτινωτής τοπολογίας, δηλαδή τόσο οι αποκλειστικές γραμμές MT όσο και οι απλές γραμμές MT, υπονοούν ένα απλό τρόπο σχεδίασης ενός ηλεκτρικού δικτύου. Πέραν αυτών των τοπολογιών υπάρχει και η μικτή τοπολογία. Η γραμμή προέρχεται από τον ηλεκτρικό υποσταθμό και διαιρείται σε κλάδους μέχρι να επιτύχει κάλυψη όλων των υποσταθμών μετασχηματιστών. Παράδειγμα μικτής τοπολογίας παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.8.

 Τοπολογία δακτυλίου. Οι τοπολογίες δακτυλίων αντιμετωπίζουν ορισμένες αδυναμίες των ακτινωτών τοπολογιών. Ως απώλεια μιας γραμμής MT ορίζεται η απώλεια της ισχύος από τη γραμμή και όχι λόγω τροφοδότησης των αντίστοιχων υποσταθμών μετασχηματιστών της. Επομένως, η τοπολογία δακτυλίου μπορεί να θεωρηθεί ως βελτιωμένη ακτινωτή τοπολογία όπου ο ανοικτός δεσμός (open tie point) επιτρέπει την ύπαρξη εφεδρείας για τις άλλες γραμμές MT. Οι γραμμές αυτές χρησιμοποιούνται ακτινωτά, αλλά όταν ένα ελάττωμα εμφανίζεται σε μια από τις γραμμές, οι διακόπτες δεσμών επιτρέπουν την ταχεία αποκατάσταση της γραμμής. Συνήθως, οι διακόπτες



Σχήμα 1.6: Ακτινωτή τοπολογία. Αποκλειστικές γραμμές ΜΤ.



Σχήμα 1.7: Ακτινωτή τοπολογία. Απλή γραμμή ΜΤ.



Σχήμα 1.8: Ακτινωτή τοπολογία. Δενδρική γραμμή ΜΤ.

αυτοί είναι χειροκίνητοι αν και προχωρεί η αυτοματοποίηση της διακοπτικής λειτουργίας. Παράδειγμα τοπολογίας δακτυλίου παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.9.

 Τοπολογία πλέγματος. Μια τοπολογία πλέγματος χαρακτηρίζει ένα δίκτυο όπου οι ηλεκτρικοί υποσταθμοί και οι υποσταθμοί μετασχηματιστών διασυνδέονται μέσω πολλών γραμμών ΜΤ σε ένα πλέγμα. Επομένως, η ισχύς μπορεί να μεταφερθεί από διάφορες διαδρομές. Όταν μια γραμμή αφαιρείται από την υπηρεσία, η ισχύς μπορεί να αναδρομολογηθεί. Παράδειγμα τοπολογίας πλέγματος δίνεται στο Σχήμα 1.10. Τα δίκτυα που δημιουργούνται από τις τοπολογίες πλέγματος είναι τα πλέον σύνθετα. Το σχέδιό τους απαιτεί



Σχήμα 1.9: Τοπολογία δακτυλίου.



Σχήμα 1.10: Τοπολογία πλέγματος.

τον υπολογισμό της λειτουργίας του δικτύου υπό οιαδήποτε πιθανή συνθήκη και διαμόρφωση.

Γενικά, τα δίκτυα MT (αρχικά δίκτυα διανομής) ακολουθούν τη δικτυωμένη τοπολογία. Εντούτοις, λειτουργούν σε ακτινωτές τοπολογίες. Σε περίπτωση αποτυχίας κάποιας γραμμής MT, οι υπόλοιπες γραμμές που ήταν αποσυνδεμένες συνδέονται με το δίκτυο εξασφαλίζοντας την παράδοση των υπηρεσιών σε όλους τους πελάτες.

Οι ακτινωτές τοπολογίες παρουσιάζουν πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις δικτυωμένες τοπολογίες:

- ο Ευκολότερη προστασία από ρεύματα σφαλμάτων.
- ο Χαμηλότερα ρεύματα σφαλμάτων στο μεγαλύτερο μέρος του κυκλώματος.
- ο Ευκολότερος έλεγχος τάσης.
- ο Ευκολότερη πρόβλεψη και έλεγχος των ροών ισχύος.
- ο Χαμηλότερο κόστος.



2.1 Εφαρμογές της Τεχνολογίας BPL

Οι επικοινωνίες μέσω γραμμών μεταφοράς ισχύος (Power Line Communications, PLC) χρησιμοποιούν το υπάρχον δίκτυο διανομής ενέργειας για μετάδοση δεδομένων και μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε δύο κατηγορίες με κριτήριο τον τρόπο εκμετάλλευσης του τμηματοποιημένου εύρους ζώνης τους [33]

- Χαμηλής ταχύτητας επικοινωνίες, με ρυθμό μετάδοσης δεδομένων της τάξης των λίγων kbps. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη διασύνδεση οικιακού εξοπλισμού σε μια οικία, για σηματοδοσία, για αντιμετώπιση προβλημάτων, κτλ. Είναι μια πλήρως αναπτυγμένη και προτυποποιημένη τεχνολογία. Στην Ευρώπη προτυποποιήθηκε από το CENELEC (Comité Européen de Normalisation ÉLECtrotechnique) EN 50065. Στην εφαρμογή αυτή παραχωρήθηκε η ζώνη συχνοτήτων από 3kHz έως 148.5kHz [34].
- Υψηλής ταχύτητας επικοινωνία με ρυθμούς δεδομένων από 1Mbps και άνω με διατάξεις παρόμοιες με αυτή του Σχήματος 2.1. Οι επικοινωνίες αυτές παρέχουν τη δυνατότητα σύνδεσης είτε στο Διαδίκτυο είτε σε LAN (Local Area Network) δίκτυα υπολογιστών και πολυμεσικού εξοπλισμού μεταξύ των οποίων συμπεριλαμβάνονται το DSL (Digital Subscriber Line ή ψηφιακή συνδρομητική γραμμή), διαποδιαμορφωτές καλωδίων (cable modems), δρομολογητές (routers), συσκευές ήχου, κάμερες ασφαλείας, τηλέφωνα IP (Internet Protocol), ηλεκτρονικοί προβολείς εικόνων (electronic picture frames) και κονσόλες παιχνιδιών (gaming consoles).

Ενώ η ευρυζωνική πρόσβαση στο Διαδίκτυο μπορεί να αποτελέσει κύρια εφαρμογή των συστημάτων BPL, το πλήθος των πιθανών εφαρμογών που μπορούν να εξυπηρετηθούν είναι μεγάλο και αποτελεί μια επιχειρησιακή και επιχειρηματική



Σχήμα 2.1: Παράδειγμα ευρυζωνικών επικοινωνιών μέσω των γραμμών μεταφοράς ΜΤ.

δραστηριότητα που τώρα αρχίζει να αναπτύσσεται. Τα οφέλη από την αναμενόμενη εγκατάσταση των συστημάτων BPL επί του δικτύου MT είναι άμεσα και έμμεσα. Το ίδιο το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας αποκτά τη δυνατότητα αυτοδιαχείρισης [35] ενώ παράλληλα οι εταιρίες ηλεκτρικής ενέργειας μπορούν να λειτουργήσουν ως πάροχοι ευρυζωνικής πρόσβασης στο Διαδίκτυο σε κάθε είδους χρήστες με ό,τι αυτό συνεπάγεται.

Παραδείγματα υπηρεσιών που μπορούν να προσφερθούν μέσω των δικτύων BPL είναι οι υπηρεσίες προστιθεμένης αξίας που περιλαμβάνουν από ψυχαγωγία και τηλεφωνία VoIP (Voice over Internet Protocol) –εφαρμογές που ήδη έχουν υλοποιηθεί σε διάφορα συστήματα BPL– μέχρι λειτουργίες οικιακής διαχείρισης (home management functions), όπως η διαχείριση ασφάλειας (security management) και η διαχείριση ενέργειας (energy management). Τα συστήματα BPL μπορούν να χρησιμεύσουν ως ο ενδιάμεσος μεταξύ των πελατών και των εταιριών ηλεκτρικής ενέργειας αλλά και ως υπόβαθρο για την εκτέλεση διαφόρων λειτουργιών για λογαριασμό των πελατών. Με χρήση της τεχνολογίας BPL μπορούν να μεταδοθούν χρήσιμες πληροφορίες στον τελικό καταναλωτή/χρήστη, όπως τιμές ενέργειας σε πραγματικό χρόνο (energy prices), λογαριασμοί κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας και στοιχεία ενεργειακής χρήσης (billing and energy use data), καιρικές προβλέψεις (weather forecasts) κλπ ενώ ταυτόχρονα μπορούν να ληφθούν αυτόματες ή προγραμματισμένες αποφάσεις που αφορούν ή προέρχονται από τους πελάτες, όπως σκόπιμη διακοπή φορτίων (load shedding), ρυθμίσεις θερμοστατών (thermostat settings) κλπ.. Οι πελάτες αποκτούν τη δυνατότητα να τροποποιήσουν και να αλληλεπιδράσουν με το δίκτυο της ηλεκτρικής ενέργειας στο βαθμό που επιθυμούν.

Η χρήση συστημάτων BPL μπορεί να βελτιστοποιήσει τις υπάρχουσες λειτουργίες του ηλεκτρικού δικτύου (utility-based functions), γεγονός το οποίο με τη σειρά του μπορεί να βελτιώσει την επιχειρησιακή εφαρμογή των συστημάτων BPL για τους καταναλωτές ενθαρρύνοντας έτσι την επέκταση για ευρυζωνική χρήση. Τα εμπορικά συστήματα BPL περιλαμβάνουν ήδη εφαρμογές ηλεκτρικού δικτύου (utility applications) [36]-[38].

Οι εφαρμογές της τεχνολογίας BPL στη MT παρουσιάζονται στους Πίνακες 2.1 και 2.2 [39].

2.2 Αρχιτεκτονικές Δικτύων BPL

Για πολλά χρόνια, οι εταιρίες παροχής ηλεκτρικής ενέργειας έκαναν προσπάθειες για μετάδοση τηλεπικοινωνιακών σημάτων με στόχο την καλύτερη λειτουργία του δικτύου ηλεκτρικής ισχύος. Η ιδέα της χρησιμοποίησης της ΥΤ ως τμήματος της διαδρομής του σήματος από τον πάροχο μέχρι τον καταναλωτή απορρίφθηκε αφού ο θόρυβος των γραμμών ΥΤ είναι αυξημένος, επιβαρύνοντας απαγορευτικά τη μετάδοση σημάτων. Εξίσου απαγορευτική είναι αυτού του είδους η μετάδοση λόγω της απόστασης που χωρίζει την ΥΤ από τις αστικές περιοχές. Ως πλέον λογική προσέγγιση θεωρείται η έγχυση του σήματος στη γραμμή ΜΤ που βρίσκεται κοντά στους κόμβους του τηλεπικοινωνιακού δικτύου κορμού και, στη συνέχεια, είτε μέσω της ΧΤ είτε μέσω ασύρματης μετάδοσης να φθάσει το σήμα στον τελικό χρήστη.

Τα ευρυζωνικά συστήματα BPL επί του δικτύου MT αποτελούν εναλλακτική ευέλικτη και οικονομική λύση ως δίκτυα πρόσβασης 'τελευταίου μιλίου' (Last Mile

Εφαρμογές BPL και υπηρεσίες

Υπηρεσίες πελατών με χρέωση

Τηλεφωνία μέσω Διαδικτύου (VoIP)

Αυτόματη απεικόνιση (automated monitoring) και έλεγχος εξοπλισμού (control of end-

use equipment), συμπεριλαμβανομένης και της αποστολής εντολών

Λογαριασμοί και δεδομένα κατανάλωσης (Billing and energy consumption data)

Παρακολούθηση ασφαλείας σε υποδομές και κτίρια και αναφορά κινήσεων (Real-time security monitoring/reporting)

Αυτόματη ανίχνευση αποθεματικών διαφόρων αγαθών όπως αποθέματα καυσίμων

(Automated tracking of various goods such as fuel stocks)

Δυναμική πληροφόρηση για τιμολόγια (Dynamic price information)

Βίντεο κατόπιν ζήτησης (Video on demand)

Παιχνίδια σε πραγματικό χρόνο (Real-time internet-based games)

Παροχή πενταπλής δυνατότητας με μια σύνδεση δηλαδή σταθερή και κινητή τηλεφωνία, ευρυζωνική πρόσβαση στο Διαδίκτυο, τηλεόραση και Έξυπνο Δίκτυο (Quintuple game through the power grid)

Πίνακας 2.1: Υπηρεσίες BPL προς χρήστες με χρέωση.

Εφαρμογές BPL και υπηρεσίες

Διαχείριση δικτύου

Αυτόματη ανάγνωση μετρητών (Automated meter reading)

Αυτόματη σύνδεση/αποσύνδεση φορτίων (Automated load connection/disconnection)

Απεικόνιση ποιότητας ενέργειας (Power quality monitoring)

Απεικόνιση δεδομένων του δικτύου διανομής (Distribution system data monitoring)

Έλεγχος φορτίου/ζήτησης (Load control/demand-side management)

Έλεγχος φωτισμού (Lighting detection and notification)

Εντοπισμός σφαλμάτων (Fault location)

Έλεγχος τάσης (Voltage control)

Δυναμικός καθορισμός τιμών (Dynamic pricing)

Κατανεμημένος έλεγχος διανομής (Distributed resource control and dispatch)

Διαχείριση προσωπικού αποκατάστασης βλαβών και συντήρησης (Crew management)

Παρακολούθηση για ασφάλεια του δικτύου (Security monitoring)

Πίνακας 2.2: Υπηρεσίες BPL προς την επιχείρηση ηλεκτρικής ενέργειας.

Communication Networks) [19], [40]-[45]. Αυτό οφείλεται στο ότι η τεχνολογία BPL αξιοποιεί το παντού εγκατεστημένο δίκτυο ηλεκτρικής ισχύος και δεν απαιτεί πρόσθετη καλωδίωση για τηλεπικοινωνιακούς λόγους. Αρκετές δραστηριότητες σχετίζονται με την ανάπτυξη και εφαρμογή της τεχνολογίας BPL για πρόσβαση στον τελικό χρήστη. Με το αντικείμενο αυτό αναμένεται να δραστηριοποιηθεί ικανός αριθμός κατασκευαστών που διαθέτουν προϊόντα BPL που εξασφαλίζουν μεγάλες ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων. Επίσης, πολυάριθμες σχετικές δοκιμές έχουν πραγματοποιηθεί παγκοσμίως αν και η προτυποποίηση των συστημάτων BPL δεν έχει ολοκληρωθεί ακόμη [46], [47].

Αρχικά, ο εξοπλισμός πρόσβασης στα συστήματα BPL περιλάμβανε εισαγωγείς (injectors), επαναλήπτες (repeaters) και εξαγωγείς (extractors) σήματος. Με την καθιέρωση της νέας γενιάς μονάδων BPL (Gen2) [48], ο διαχωρισμός των μονάδων δεν υφίσταται και, πλέον, η μονάδα BPL είναι μια και μοναδική παρέχοντας τη δυνατότητα ευκολότερης σχεδίασης του δικτύου. Κατά συνέπεια, στο υπόλοιπο του εδαφίου και της διατριβής οι διαφοροποιήσεις κατά τις αναφορές στη λειτουργία των ενιαίων πλέον μονάδων BPL γίνονται με βάση τη συγκεκριμένη σκοπιμότητά τους. Παράδειγμα εναέριας διάταξης συστήματος BPL απεικονίζεται στο Σχήμα 2.2 [31].

2.2.1 Η Τεχνολογία των Συστημάτων BPL

Οι μονάδες BPL που έχουν ήδη διατίθενται εμπορικά διαθέτουν δυνατότητα μετάδοσης μέχρι 200Mbps στο φυσικό επίπεδο τα οποία προσφέρουν τουλάχιστον 70Mbps στο στρώμα εφαρμογής. Χρησιμοποιούν διαμόρφωση OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) και αμφίδρομη μέθοδο πρόσβασης στο δίαυλο είτε TDD (Time Division Duplexing) είτε FDD (Frequency Division Duplexing). Η υπηρεσία BPL προβλέπεται να λειτουργήσει στη ζώνη μεταξύ 1.7 και 88MHz, να διαθέτει δυναμική περιοχή λειτουργίας μέχρι 90dB και να προσφέρει δυνατότητες αναμετάδοσης με πολυπλεξία συχνότητας και χρόνου. Τα χαρακτηριστικά μετάδοσης αυτά επιτρέπουν την υλοποίηση εφαρμογών βασισμένων στην ποιότητα της υπηρεσίας (Quality of Service ή QoS) και την κατηγοριοποίηση σε κλάσεις υπηρεσίας (Service Classes ή CoS).



Σχήμα 2.2: Βασική διάταξη εναέριου συστήματος BPL.

Η OFDM, που χρησιμοποιείται επίσης και σε προσφάτως εισαχθέντα πρότυπα ευρυζωνικής ασύρματης μετάδοσης όπως το WiMAX (Worldwide interoperability for Microwave Access), είναι η επικρατούσα μέθοδος διαμόρφωσης για τα δίκτυα BPL. Χρησιμοποιεί υποκανάλια (subcarriers) με φασματική απόδοση (subchannel efficiency) που κυμαίνεται από 2 μέχρι 10bps/Hz και είναι ανεξάρτητη σε κάθε υποκανάλι. Μέσω του μεγάλου πλήθους υποκαναλιών επιτυγχάνονται:

- Μεγάλη ακρίβεια στην εκτίμηση της σχέσης σήματος προς θόρυβο σε κάθε υποκανάλι και αντιστοίχως καλύτερη προσαρμογή των παραμέτρων της διαμόρφωσης.
- Δυνατότητα για στενής ζώνης επιλεκτικές φασματικές φραγές (spectral notching) με μικρή επίδραση στα γειτονικά υποκανάλια.

2.2.2 Αρχιτεκτονική Δομή Δικτύων BPL

Η Εθνική Υπηρεσία Τηλεπικοινωνιών των ΗΠΑ (National Telecommunications and Information Administration, NTIA) έχει σε πρώτη φάση κατηγοριοποιήσει τις πιθανές αρχιτεκτονικές των δικτύων BPL στις τρεις βασικές κατηγορίες [49], [50] που παρουσιάζονται στη συνέχεια [19], [40].

2.2.2.1 Αρχιτεκτονική Τύπου Α

Η αρχιτεκτονική τύπου Α απεικονίζεται στο Σχήμα 2.3 και χρησιμοποιεί διαμόρφωση OFDM χρησιμοποιώντας πολλαπλά φέροντα στενού εύρους ζώνης.

Οι εισαγωγείς BPL μετατρέπουν δεδομένα που προέρχονται από το δίκτυο κορμού (Internet backbone) σε σήματα OFDM και κατόπιν εγχύουν τα σήματα αυτά μέσω του συζεύκτη υψηλών συχνοτήτων (coupler) σε μία από τις τρεις φάσεις των γραμμών MT που εξυπηρετούν το δίκτυο BPL. Λόγω της αμφίδρομης λειτουργίας τους, οι εισαγωγείς μετατρέπουν επίσης τα διαμορφωμένα σήματα OFDM που μεταδίδονται μέσω της γραμμής ΜΤ στον τύπο δεδομένων που χρησιμοποιείται στο δίκτυο κορμού. Η αμφίδρομη αυτή διακίνηση δεδομένων προς και από κάθε ομάδα τελικών χρηστών γίνεται μέσω των γραμμών ΧΤ χρησιμοποιώντας εξαγωγείς BPL για να παρακαμφθούν οι μετασχηματιστές MT/XT. Οι εξαγωγείς υλοποιούν διαδικασίες δρομολόγησης και ταυτόχρονα μετατρέπουν τα σήματα από τη μορφή που χρησιμοποιείται για τη μετάδοσή τους στη ΜΤ σε μορφή κατάλληλη για τους τελικούς χρήστες ευρυζωνικών υπηρεσιών. Η πρόσβαση των καταναλωτών στο δίκτυο BPL γίνεται μέσω ειδικών μονάδων διαποδιαμορφωτών BPL (BPL modems). Προκειμένου να καταστεί δυνατή και αξιόπιστη η σύνδεση μεταξύ των ακραίων, και όχι μόνο, εισαγωγέων και εξαγωγέων, χρησιμοποιούνται επαναλήπτες σε όλο το εύρος του δικτύου BPL. Όπως φαίνεται από το Σχήμα 2.3, οι εισαγωγείς και οι εξαγωγείς στην πρώτη αυτή αρχιτεκτονική, μοιράζονται ένα κοινό εύρος συχνοτήτων F1 σε όλη την έκταση των γραμμών MT που είναι διαφορετικό από το εύρος συχνοτήτων F2 που χρησιμοποιείται στο δίκτυο XT μετά τους μετασχηματιστές MT/XT, από τις οικιακές συσκευές BPL των συνδρομητών. Προκειμένου να μειωθούν οι παρεμβολές χρησιμοποιούνται πρωτόκολλα CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance).

Πλεονέκτημα της αρχιτεκτονικής τύπου Α είναι η εξασφάλιση χαμηλής ομοδιαυλικής παρεμβολής (Co-Channel Interference, CCI) εντός των κυψελών BPL χωρίς χρήση ειδικών φίλτρων. Αυτό οφείλεται στο ότι όλες οι συσκευές του δικτύου MT λειτουργούν στο ίδιο εύρος συχνοτήτων, οπότε η χαμηλή ομοδιαυλική παρεμβολή επιτρέπει την ταυτόχρονη λειτουργία δύο ή τριών δικτύων BPL επί χωρικά γειτονικών γραμμών MT χωρίς να υπάρχει κίνδυνος απώλειας πληροφορίας ή αποσυγχρονισμού. Η δυνατότητα αυτή είναι καθοριστική σε περιοχές όπως μεγάλα



Σχήμα 2.3: Η αρχιτεκτονική τύπου Α των συστημάτων BPL.

αστικά κέντρα όπου το δίκτυο MT είναι πυκνό και είναι πιθανή η ύπαρξη δύο ή τριών γειτονικών δικτύων MT/BPL.

Η έγχυση των σημάτων γίνεται σε μια φάση του δικτύου με αποτέλεσμα να μην είναι απαραίτητη η χρήση ειδικού τριφασικού εξοπλισμού από τους συνδρομητές XT. Επίσης, υιοθετείται η έγχυση του σήματος σε διαφορετικές φάσεις του τριφασικού δικτύου MT (εναλλαγή φάσεων). Η αλλαγή στην αλληλουχία των φάσεων γίνεται για να υπάρχει πλήρης έλεγχος των τριών φάσεων του δικτύου όσον αφορά στοιχεία ζήτησης/προσφοράς ηλεκτρικής ενέργειας αλλά, κυρίως, για να μειωθούν οι παρεμβολές που θα δημιουργούσε το σήμα μετάδοσης αν παρέμενε στην ίδια φάση λόγω συνεχούς άθροισης ενισχυμένου σήματος και οδεύοντος σήματος στη γραμμή MT.

2.2.2.2 Αρχιτεκτονική Τύπου Β

Η αρχιτεκτονική τύπου Β αποτελεί ένα είδος υβριδικού δικτύου BPL που χρησιμοποιεί και την ασύρματη τεχνολογία:

- για πρόσβαση στον τελικό χρήστη παρακάμπτοντας τη XT
- για σύνδεση του δικτύου κορμού του τηλεπικοινωνιακού δικτύου απευθείας
 με το δίκτυο BPL στη XT παρακάμπτοντας τη MT.

Στην πρώτη περίπτωση η ασύρματη δικτύωση για πρόσβαση στον τελικό χρήστη γίνεται μέσω της τεχνολογίας 802.11 b/g γνωστής ως WiFi (Wireless Fidelity) που

χρησιμοποιεί τις ελεύθερες ζώνες στα 2.4 και 5GHz. Η εναλλακτική αυτή προσέγγιση πρέπει να συμμορφώνεται με τις απαιτήσεις της σύστασης ERC/EC/70-03 [51] για συσκευές μικρής εμβέλειας που ορίζει:

- στη ζώνη 2400-2483.5MHz μέγιστη ισχύ εκπομπής τα 100mW EIRP και πρότυπο συμμόρφωσης το EN 300 328,
- στη ζώνη 5150-5350MHz μέγιστη ισχύ εκπομπής τα 200mW και πρότυπο συμμόρφωσης το EN 300 893 (χρήση μόνο σε εσωτερικούς χώρους),
- στη ζώνη 5470-5725MHz μέγιστη ισχύ εκπομπής το 1W και πρότυπο συμμόρφωσης το EN 300 893.

Ο εξοπλισμός της ασύρματης δικτύωσης WiFi που διατίθεται στην ευρωπαϊκή αγορά πρέπει να φέρει τη σήμανση CE και να συμμορφώνεται με τις απαιτήσεις της κοινοτικής οδηγίας RTTE 1999/5/EC [52] για ραδιοεξοπλισμό και τηλεπικοινωνιακό εξοπλισμό, η οποία μεταφέρθηκε στην ελληνική νομοθεσία με το προεδρικό διάταγμα ΠΔ 44/2002 [53]. Το υβριδικό αυτό δίκτυο προσφέρει σαφώς καλύτερη συμπεριφορά όσον αφορά τις παρεμβολές προς την υπηρεσία ραδιοερασιτεχνών σε σχέση με ένα αμιγώς ενσύρματο δίκτυο BPL. Η λειτουργία όμως στη ελεύθερη ζώνη δεν παρέχει προστασία από παρεμβολές άλλων χρηστών κάτι που είναι ιδιαίτερα αισθητό στις αστικές περιοχές και μπορεί να επηρεάσει δραστικά την ικανότητα παροχής υπηρεσιών στον τελικό χρήστη.

Στη δεύτερη περίπτωση η πρόσβαση στον τελικό χρήστη γίνεται μέσω του ενσύρματου δικτύου XT/BPL. Η ασύρματη δικτύωση πραγματοποιείται μεταξύ του τηλεπικοινωνιακού δικτύου κορμού και του δικτύου XT/BPL χρησιμοποιώντας:

- είτε τεχνολογία 802.11 b/g (WiFi) στις ελεύθερες ζώνες στα 2.4 και 5GHz
- είτε σταθερές ασύρματες, PtMP (σημείου προς πολλαπλά σημεία) μικροκυματικές ζεύξεις σε αδειοδοτημένες συχνότητες. Η επιλογή αυτή έχει το πλεονέκτημα ότι το ασύρματο τμήμα της μετάδοσης BPL προστατεύεται από τις παρεμβολές που προκαλούνται από άλλες ασύρματες εφαρμογές.

Στη συνέχεια, το ενδιαφέρον εστιάζεται στην πρώτη περίπτωση. Μέσω των εξαγωγέων, το σήμα BPL εξάγεται από τις γραμμές MT και μετατρέπεται σε IEEE 802.11 WiFi σήμα. Παράλληλα, μελετώνται και άλλες εναλλακτικές πλατφόρμες ασύρματης μετάδοσης όπως το πρωτόκολλο WiMAX. Οι συνδρομητές πρέπει να διαθέτουν εξοπλισμό συμβατό με το χρησιμοποιούμενο ασύρματο πρωτόκολλο. Αν και διαφέρει ως προς τον τρόπο με τον οποίο γίνεται η μετάδοση των σημάτων από και προς τους συνδρομητές, η δεύτερη αρχιτεκτονική των συστημάτων BPL έχει ως κοινό χαρακτηριστικό με την πρώτη αρχιτεκτονική τη χρησιμοποίηση της διαμόρφωσης OFDM. Η καθοριστική διαφορά της δεύτερης αυτής αρχιτεκτονικής σε σχέση με την πρώτη είναι το γεγονός ότι δεν χρησιμοποιείται BPL στις γραμμές XT προς τους τελικούς αποδέκτες. Το σήμα μεταδίδεται κατά ασύρματο τρόπο, παρακάμπτοντας έτσι τους μετασχηματιστές τάσης και εξασφαλίζοντας μεγαλύτερο βαθμό φορητότητας και ελευθερίας στους χρήστες που έχουν πρόσβαση στην υπηρεσία.

Σημαντικό χαρακτηριστικό της δεύτερης αρχιτεκτονικής είναι ότι το σύστημα χρησιμοποιεί διαφορετικές συχνότητες για τη ζεύξη επιστροφής (upstream) των σημάτων BPL που πραγματοποιείται στις ζώνες συχνοτήτων F2 και F4 στο Σχήμα 2.4 σε σχέση με τη ζεύξη διαβίβασης (downstream) που πραγματοποιείται στις ζώνες συχνοτήτων F1 και F3 (βλέπε Σχήμα 2.4). Δηλαδή, οι ζώνες συχνοτήτων είναι διαφορετικές τόσο από τα αντίστοιχα εύρη των γειτονικών επαναληπτών (τεχνική αναχρησιμοποίησης συχνότητας) όσο και από τα εύρη εκπομπής και λήψης των εισαγωγέων. Έτσι, περιορίζεται η ομοδιαυλική παρεμβολή μεταξύ δικτύων BPL που λειτουργούν σε γειτονικούς κλάδους του δικτύου MT επιτρέποντας την ανάπτυξη πυκνότερων δικτύων.

Σημαντικό ζήτημα αποτελεί η ενεργειακή αυτονομία αυτής της αρχιτεκτονικής. Στην περίπτωση εξωτερικής τροφοδοσίας των λειτουργικών στοιχείων του συστήματος –για παράδειγμα μέσω ηλιακών συσσωρευτών–, όταν υπάρχει φυσική διακοπή της γραμμής ισχύος η μετάδοση του σήματος BPL είναι δυνατόν να γίνει και με ασύρματο τρόπο εξασφαλίζοντας αδιάλειπτη τηλεπικοινωνιακή λειτουργία για ορισμένο χρονικό διάστημα. Όπως παρουσιάζεται και στο Σχήμα 2.4, η εναλλαγή φάσεων χρησιμοποιείται και στην αρχιτεκτονική τύπου B.

Τέλος, όπως και στην πρώτη αρχιτεκτονική, τα σήματα BPL μεταδίδονται αρχικά μέσω μιας φάσης των γραμμών μεταφοράς ισχύος MT και υιοθετείται έγχυση του σήματος σε διαφορετικές φάσεις του τριφασικού δικτύου MT (εναλλαγή φάσεων) για να μειωθούν οι παρεμβολές.



Σχήμα 2.4: Η αρχιτεκτονική τύπου Β των συστημάτων BPL.

2.2.2.3 Αρχιτεκτονική Τύπου Γ

Για την τρίτη αρχιτεκτονική, η ΝΤΙΑ έχει προτείνει τη χρήση της τεχνικής DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum), βάσει της οποίας όλοι οι χρήστες σε μία κυψέλη BPL χρησιμοποιούν όλο το εύρος συχνοτήτων, σε αντίθεση με τις δύο προηγούμενες αρχιτεκτονικές όπου χρησιμοποιείται OFDM διαμόρφωση. Προκειμένου να μειωθεί η ομοδιαυλική παρεμβολή, χρησιμοποιούνται τεχνικές CSMA. Η τοπολογία της τρίτης αρχιτεκτονικής δίδεται στο Σχήμα 2.5.

Κάθε κυψέλη BPL αποτελείται από:

- ένα εισαγωγέα που προσφέρει μέσω T1 ή οπτικής ίνας μια διεπαφή του δικτύου BPL με το Διαδίκτυο,
- ένα πλήθος επαναληπτών που λειτουργούν και ως εξαγωγείς οι οποίοι χρησιμοποιούνται για την αναγέννηση των σημάτων BPL επί των γραμμών MT και
- κατάλληλο εξοπλισμό διαποδιαμορφωτών στην πλευρά των συνδρομητών κατάλληλων για τη λήψη σημάτων BPL.



Σχήμα 2.5: Η αρχιτεκτονική τύπου Γ των συστημάτων BPL.

Στην αρχιτεκτονική αυτή παρουσιάζεται συχνά επικάλυψη γειτονικών κυψελών BPL. Για να εξασφαλιστεί ότι κάθε τελικός χρήστης συνδέεται σε μία μόνο κυψέλη, οι επαναλήπτες BPL έχουν τη δυνατότητα να συνδέονται με το συγκεντρωτή που εμφανίζει τις λιγότερες απώλειες μετάδοσης προς αυτόν.

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι στην τρίτη αρχιτεκτονική γίνεται χρήση του ουδέτερου αγωγού και μιας εκ των τριών φάσεων των γραμμών MT. Για αυτό το λόγο η αναμενόμενη εφαρμογή της τρίτης αρχιτεκτονικής σε ορισμένες χώρες όπως η Ελλάδα όπου στο δίκτυο MT χρησιμοποιείται σπάνια ουδέτερος αγωγός αναμένεται να είναι περιορισμένη.

2.2.2.4 Πιθανά Μελλοντικά Σχήματα Αρχιτεκτονικών

Τα μελλοντικά σχήματα αρχιτεκτονικών περιλαμβάνουν ως βασικό δομικό τους στοιχείο τη δεύτερη γενιά μονάδων BPL/Gen2 που κινείται σε διαφορετική λογική αφού ο διαχωρισμός των μονάδων (σε injectors, repeaters και extractors) δεν υφίσταται πλέον. Η μονάδα BPL είναι μια και μοναδική παρέχοντας έτσι τη δυνατότητα ευκολότερης και πολύπλευρης σχεδίασης του δικτύου. Η αλλαγή αυτή οφείλεται στο νέο chip PLC των μονάδων BPL (DS2 Gen2) και δίδει τη δυνατότητα επικοινωνίας με το φυσικό επίπεδο του δικτύου κορμού (backhaul network). Ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά της μονάδας BPL/Gen2 είναι η αυξημένη

ταχύτητα κυκλώματος που φθάνει τα 200Mbps στο φυσικό επίπεδο [48], [54]-[57]. Η δικτύωση προς τον καταναλωτή γίνεται ασύρματα με κεραίες τύπου MIMO (Multiple Input Multiple Output) και με χρήση των πρωτοκόλλων IEEE 802.11a, b, g και n. Μέσω του νέου πρωτοκόλλου WPA (Wi-Fi Protected Access) μπορεί να εξασφαλιστεί αυξημένη κάλυψη, ταχύτητα και ασφάλεια.

Άλλη μία σημαντική βελτίωση που υπάρχει στις μονάδες BPL/Gen2 είναι η ευκολία εγκατάστασης και συντήρησης. Το μειωμένο μέγεθος καθιστά εύκολη την εγκατάστασή τους, ενώ η παθητική ψύξη χωρίς να είναι αναγκαία η χρήση ανεμιστήρων τις καθιστά οικονομικές ως προς την κατανάλωση, πλήρως αδιάβροχες και λιγότερο ευάλωτες σε αστοχίες υλικού. Η ανάπτυξη του δικτύου με χρήση μονάδων BPL/Gen2 είναι επίσης αρκετά διαφορετική από αυτή με τη χρήση μονάδων BPL/Gen1. Κάθε μονάδα BPL/Gen2 έχει τη δυνατότητα πολυεκπομπής (multicast) ώστε να μπορεί να επικοινωνεί συγχρόνως με περισσότερες από δύο μονάδες. Κατ'αυτόν τον τρόπο, παρέχεται η δυνατότητα δισδιάστατης σχεδίασης της αρχιτεκτονικής του δικτύου ώστε το δίκτυο να μπορεί να αναπτυχθεί προς όλες τις επιθυμητές κατευθύνσεις κατά τρόπο που σχηματικά απεικονίζεται στο Σχήμα 2.6. Επιπλέον, οι μονάδες διαθέτουν τη δυνατότητα να αναγνωρίζουν αυτόματα τις νέες προσθήκες στο δίκτυο και να τις παραμετροποιούν ανάλογα, μειώνοντας σημαντικά το χρόνο παραμετροποίησης και σχεδίασης του δικτύου. Τέλος, κάθε μονάδα BPL/Gen2 έχει τη δυνατότητα ταυτόχρονης παροχής υπηρεσίας σε ογδόντα πελάτες και να τους δρομολογεί μέσω του δικτύου χρησιμοποιώντας τη δρομολόγηση SP (Shortest Path routing) [31], [58], [59], παρέχοντας έτσι στον τελικό χρήστη πολλαπλές εναλλακτικές διαδρομές μετάδοσης της πληροφορίας. Το δίκτυο που δημιουργείται είναι αμφίδρομο (Full Duplex, FD).

Η διαχείριση των συσκευών μπορεί να γίνει από κατάλληλη πλατφόρμα λογισμικού που χρησιμοποιεί SNMP (Simple Network Management Protocol) προσφέροντας έτσι διασυνδεσιμότητα με πολλές διαθέσιμες πλατφόρμες [31], [60].

Οι μονάδες της δεύτερης γενιάς χρησιμοποιούν και νέου τύπου συζεύκτες υψηλών συχνοτήτων. Οι νέοι αυτοί συζεύκτες υψηλών συχνοτήτων ονομάζονται συζεύκτες SC (Shunt Coupler) και είναι ευκολότεροι στην εγκατάσταση σε δίκτυο που βρίσκεται σε λειτουργία, παρέχουν υψηλότερες ταχύτητες μετάδοσης και είναι ασφαλέστεροι για το δίκτυο.



Σχήμα 2.6: Δισδιάστατη αρχιτεκτονική δικτύου με χρήση μονάδων Gen2.

Η τεχνολογία BPL πρέπει να είναι σε θέση να παρέχει ένα σύνολο υπηρεσιών όπως υψηλής ποιότητας video, VoIP, πρόσβαση στο Διαδίκτυο και άλλες εφαρμογές πραγματικού χρόνου. Για να υποστηριχθούν ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων της τάξης των 2, 4 και 8Mbps σε επίπεδο τελικού χρήστη, τα συστήματα BPL πρέπει να λειτουργούν με ταχύτητες τουλάχιστον της τάξης των 200Mbps. Η δομή του μελλοντικού δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας απεικονίζεται στο Σχήμα 2.7, σύμφωνα με το οποίο το τηλεπικοινωνιακό δίκτυο κορμού (Metropolitan Area Network, MAN), που έχει υλοποιηθεί ως οπτικό δίκτυο (Gigabit Ethernet), συνδέεται προς το BPL δίκτυο επί της MT μέσω οπτικών πυλών (optical gateways). Έπειτα το δίκτυο MT/BPL μέσω των μονάδων BPL/Gen2 φθάνει στον τελικό χρήστη.

2.3 Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα του BPL

Ένα από τα σημαντικότερα θέματα που σχετίζονται με την τεχνολογία BPL και ταυτόχρονα ένα από τα δυσκολότερα βήματα για την ευρεία αποδοχή και εφαρμογή της είναι αυτό της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας (ElectroMagnetic Compatibility, EMC) των δικτύων BPL με τα υπόλοιπα ασύρματα αδειοδοτημένα συστήματα [61]-[64]. Πολλές έρευνες έχουν πραγματοποιηθεί και συνεχίζουν να πραγματοποιούνται παγκοσμίως σχετικά με τα επιτρεπόμενα όρια λειτουργίας ενός



Σχήμα 2.7: Πιθανή μελλοντική αρχιτεκτονική των συστημάτων BPL.

BPL συστήματος, αφού, όταν το σήμα BPL μεταδίδεται μέσω μιας γραμμής μεταφοράς ισχύος, την καθιστά ακούσιο ακτινοβολητή που προκαλεί παρεμβολές σε άλλες ασύρματες υπηρεσίες, που λειτουργούν στην ίδια ζώνη συχνοτήτων. Είναι λοιπόν αναγκαίος ο περιορισμός της αλληλοπαρεμβολής της μετάδοσης BPL με άλλες τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες [65].

Η σύνδεση πολυάριθμων ηλεκτρικών συσκευών στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας οδηγεί σε σωρευτική αύξηση του ηλεκτρικού πεδίου που προκαλεί παρεμβολές (cumulative high frequency radiated interference) σε άλλες υπηρεσίες, παρεμβολές που πρέπει να διατηρούνται υπό έλεγχο [49], [50], [66], [67]. Οι αρχές που καθορίζουν τα πρότυπα λειτουργίας των συστημάτων BPL έχουν ως στόχο τη θέσπιση ανεκτών επιπέδων όσον αφορά τις μεταβολές της τάσης και του HM πεδίου ακτινοβολίας (harmonics emission) με στόχο να προστατεύονται οι αδειοδοτημένες υπηρεσίες. Είναι πολύ σημαντικό, επομένως, να βρεθούν τρόποι περιορισμού του μεγίστου επιπέδου εκπομπής. Στην περίπτωση όπου οι γραμμές BPL είναι υπόγειες, η ακτινοβολία τους είναι μηδαμινή. Στο Σχήμα 2.8 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα της σημερινής κατάστασης όσον αφορά την εκχώρηση του υπό μελέτη φάσματος



Σχήμα 2.8: Πιθανές ζώνες συχνοτήτων για λειτουργία BPL συστημάτων [65].

1-100MHz σε άλλες αδειοδοτημένες υπηρεσίες και τις πιθανές ζώνες συχνοτήτων όπου μπορεί να λειτουργεί ένα δίκτυο BPL χωρίς να παρεμβάλλει άλλες υπηρεσίες.

Η κατάληψη του ραδιοφάσματος στην Ελλάδα διέπεται από τον Εθνικό Κανονισμό Κατανομή Ζωνών Συχνοτήτων (ΕΚΚΖΣ) που καθορίζει την κατανομή συγκεκριμένων ζωνών συχνοτήτων του φάσματος από 9kHz μέχρι 400GHz σε μία ή περισσότερες υπηρεσίες ραδιοεπικοινωνίας –επίγειες ή δορυφορικές– ή στην υπηρεσία ραδιοαστρονομίας. Ο ΕΚΚΖΣ έχει σκοπό την ορθή χρήση του φάσματος ραδιοσυχνοτήτων και πρέπει να χρησιμοποιείται από κάθε ενδιαφερόμενο ως βασικό βοήθημα [68].

Όπως θα αναπτυχθεί λεπτομερώς σε επόμενα εδάφια, η έρευνα που αφορά την ΗΜ παρεμβολή λόγω μετάδοσης BPL έχει οδηγήσει στα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Όπως προκύπτει από τον ΕΚΚΖΣ, η ζώνη συχνοτήτων 1-100MHz χαρακτηρίζεται από υψηλό βαθμό κατακερματισμού και επομένως είναι δύσκολη η αξιοποίησή της. Επιπλέον, εξαιτίας του υψηλού ποσοστού χρησιμοποίησης της ζώνης συχνοτήτων 1-100MHz από άλλες αδειοδοτημένες υπηρεσίες, το ελεύθερο εύρος για την τεχνολογία BPL είναι περιορισμένο [69]-[73].
- Με την έναρξη της πειραματικής και εμπορικής λειτουργίας τους, τα συστήματα επικοινωνιών BPL μέσω γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος

δημιούργησαν διεθνώς ανησυχία για παρεμβολές σε άλλες αδειοδοτημένες ραδιοϋπηρεσίες.

- Οι ανησυχίες αυτές λαμβάνονται υπόψη και αντιμετωπίζονται σε επίπεδο Ευρωπαϊκής Ένωσης (ECC ή European Communications Commission) και ΗΠΑ (FCC ή Federal Communications Commission) με συστάσεις και διατάξεις που προβλέπουν τεχνικές αποτροπής ή άμβλυνσης των παρεμβολών, όπως είναι η φασματική φραγή (spectral notching ή spectral masking) [35], [50], [74].
- Η διαμόρφωση OFDM παρέχει τη δυνατότητα της επιλεκτικής και προγραμματιζόμενης φασματικής φραγής και έχει εξεταστεί σε δοκιμές τόσο στο πλαίσιο των ευρωπαϊκών προγραμμάτων OPERA1 και OPERA2 (Open PLC European Research Alliance) όσο και σε λοιπές μετρήσεις σε ευρωπαϊκό και διεθνές επίπεδο [10], [15], [49], [50], [57], [75]-[77].
- Η τυποποίηση της τεχνολογίας BPL δεν έχει ακόμη ολοκληρωθεί. Με την προτυποποίηση των δικτύων BPL ως προς την HM συμβατότητά τους, τα συστήματα αυτά θα αντιμετωπίζονται ως ενσύρματα δίκτυα επικοινωνιών και οφείλουν να τηρούν τα ίδια όρια με άλλα ενσύρματα δίκτυα, όπως τα xDSL [49], [50], [74].
- Καίτοι δεν έχει ολοκληρωθεί η τυποποίηση, υπάρχει πληθώρα προδιαγραφών και αναφορών τοπικών μετρήσεων που μπορεί να αποτελέσει τη βάση για μετρήσεις/ελέγχους σε ήδη εγκατεστημένα συστήματα BPL.
- Δεν υπάρχουν νομικοί ή ρυθμιστικοί περιορισμοί για την εγκατάσταση των συστημάτων BPL. Μάλιστα, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή με τη σύσταση 6/4/2005 προτρέπει τα κράτη μέλη να άρουν κάθε αδικαιολόγητο εμπόδιο κανονιστικού χαρακτήρα, ιδίως σε βάρος εταιρειών κοινής ωφέλειας, ώστε να ευνοηθεί η εγκατάσταση και λειτουργία συστημάτων ηλεκτρονικών επικοινωνιών μέσω γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος και η παροχή υπηρεσιών ηλεκτρονικών επικοινωνιών μέσω των συστημάτων αυτών.
- Για την άμβλυνση των πιθανών παρεμβολών από συστήματα BPL, έχουν προταθεί διάφοροι τρόποι για τη μείωση των παρεμβολών. Μεταξύ των προτάσεων αυτών είναι η ελάττωση της εγχυόμενης ισχύος, η αποφυγή των τοπικά χρησιμοποιούμενων ζωνών συχνοτήτων, η διαφορική μέθοδος έγχυσης σημάτων και η χρησιμοποίηση φίλτρων [49], [50], [66], [67], [75], [78]-[80].

2.4 Πρότυπα Συστημάτων BPL

Με στόχο τη συμμόρφωσή τους με τις σχετικές απαιτήσεις EMC, οι μονάδες BPL αντιμετωπίζονται ως συσκευές που πρέπει να συμμορφώνονται με τις απαιτήσεις EMC, να φέρουν τη σήμανση CE και να συνοδεύονται από τη δήλωση συμμόρφωσης του κατασκευαστή ή του εξουσιοδοτημένου εκπροσώπου του. Η συμμόρφωση μπορεί να διαπιστωθεί μέσω της διαδικασίας συμμόρφωσης με τα εναρμονισμένα πρότυπα ή μέσω της διαδικασίας αξιολόγησης του τεχνικού κατασκευαστικού φακέλου από ένα πιστοποιημένο οργανισμό. Οι απαιτήσεις που προδιαγράφονται στα πρότυπα αφορούν, αφενός, τις ηλεκτρομαγνητικές διαταραχές που ενδεχομένως προκαλεί ο εξοπλισμός και, αφετέρου, την ατρωσία που πρέπει να έχει η συσκευή όταν βρίσκεται σε περιβάλλον εξωτερικών επιδράσεων.

Ο αρμόδιος φορέας για την έκδοση των σχετικών διεθνών προτύπων είναι η IEC (International Electrotechnical Commission ή Διεθνής Ηλεκτροτεχνική Επιτροπή). Συγκεκριμένα, το έργο τυποποίησης συστημάτων BPL έχει αναλάβει η ομάδα PLT (Power Line Telecommunications/Technologies) της υποεπιτροπής Ι της CISPR (Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques ή Διεθνής Ειδική Επιτροπή για Ραδιοπαρεμβολές) το έργο της οποίας έχει οργανωθεί στις ακόλουθες δραστηριότητες:

- Να περιγραφούν οι τυπικές ηλεκτρικές εγκαταστάσεις όπου πρόκειται να συνδεθεί εξοπλισμός BPL [81].
- Να προσδιοριστούν οι υπηρεσίες/εξοπλισμός κάθε τμήματος των ηλεκτρικών εγκαταστάσεων που περιγράφονται στο 1 που ενδεχομένως επηρεάζονται από ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές [82].
- Για τον εξοπλισμό/υπηρεσίες που αναφέρονται στο 2 να αξιολογηθεί το επίπεδο προστασίας που προσφέρει το υπάρχον πρότυπο CISPR 22.
- Να τεθούν όρια για αγόμενες και ακτινοβολούμενες διαταραχές για κάθε τμήμα του εξοπλισμού BPL.
- Να αναπτυχθούν μέθοδοι μέτρησης για τον εργαστηριακό έλεγχο του εξοπλισμού BPL ώστε να μπορούν να προβλεφθούν οι διαταραχές που προκαλούνται από κάθε τμήμα μιας εγκατάστασης BPL.
- Για κάθε τμήμα μιας εγκατάστασης BPL να τεθούν όρια εκπομπών που θα χρησιμοποιηθούν για τον εργαστηριακό έλεγχο του εξοπλισμού BPL.

 Να ομαδοποιηθούν τα τμήματα μιας εγκατάστασης BPL σε συγκεκριμένο αριθμό κατηγοριών.

Αρμόδια επιτροπή για τη σύνταξη ευρωπαϊκών προτύπων ή για τη μεταφορά στην Ευρώπη ή σε ευρωπαϊκή έκδοση των διεθνών προτύπων της IEC είναι η CENELEC, δύο τεχνικές επιτροπές της οποίας είναι επιφορτισμένες με την τυποποίηση του εξοπλισμού BPL ως εξής:

- Η επιτροπή TC 210 είναι υπεύθυνη για τα θέματα EMC και για τη μεταφορά σε ευρωπαϊκή έκδοση των προτύπων CISPR/I της IEC. Το βασικότερο εναρμονισμένο ευρωπαϊκό πρότυπο που αφορά τη μέτρηση των ηλεκτρομαγνητικών διαταραχών που προκαλεί ο εξοπλισμός πληροφορικής και τηλεπικοινωνιών (ITE) είναι το EN 55022 [83] που βασίζεται στο διεθνές πρότυπο CISPR 22 της IEC. Το CISPR 22 πρέπει να επικαιροποιηθεί κατάλληλα για να περιλάβει και τις απαιτήσεις που αφορούν τις συσκευές BPL. Το πλέον επίκαιρο προσχέδιο για αλλαγή στο CISPR 22, είναι το CISPR 22/1/89/CD [84].
- Η υποεπιτροπή SC205A "Mains Communicating Systems" της TC 205 "Home and Building Electronic Systems (HBES)" είναι υπεύθυνη για την προετοιμασία των ευρωπαϊκών εναρμονισμένων προτύπων για τα προϊόντα BPL υψηλών συχνοτήτων.

Για την ατρωσία εκδόθηκε από την επιτροπή SC205A το πρότυπο της CENELEC: EN 50412-2-1:2005 [85].

2.4.1 Κατηγοριοποίηση Εγκαταστάσεων/Εξοπλισμού BPL ως προς την ΕΜΙ

Η πλέον αναλυτική κατηγοριοποίηση του εξοπλισμού BPL ως προς την πιθανότητα παρεμβολών παρέχεται στο έγγραφο CISPR/I/186/DC [81]. Στον Πίνακα 2.3 παρουσιάζεται η κατηγοριοποίηση του εξοπλισμού BPL σε κλάσεις με κριτήριο, τη θέση εγκατάστασης του εξοπλισμού BPL και το μέσο μετάδοσης του σήματος.

Ενδεικτικά για την κλάση 10, όπου ο μετασχηματιστής MT/XT βρίσκεται σε εναέριο στύλο και εκεί εγκαθίσταται ο εξοπλισμός BPL, οι πιθανές παρεμβολές σε άλλο εξοπλισμό περιλαμβάνονται στον Πίνακα 2.4.

Στην πραγματικότητα βέβαια η διάταξη των γραμμών ηλεκτρικής ισχύος σε ένα στύλο μπορεί να είναι περισσότερο πολύπλοκη όπως φαίνεται και από το Σχήμα 2.9, σύμφωνα με το οποίο σε μία διάταξη δύο στύλων είναι δυνατό να συνυπάρχουν εναέρια γραμμή MT (γυμνοί αγωγοί), εναέριες γραμμές XT (γυμνοί αγωγοί), εναέριες γραμμές XT (συνεστραμμένοι αγωγοί), υπόγειες γραμμές MT, υπόγειες γραμμές XT και μετασχηματιστής MT/XT. Όσον αφορά στις αγόμενες και ακτινοβολούμενες διαταραχές, τις αρμονικές ρεύματος και την ατρωσία από εξοπλισμό BPL χρήσιμες λεπτομέρειες παρουσιάζονται στα Παραρτήματα 2.1, 2.2 και 2.3, αντίστοιχα.

2.5 Κανονισμοί και Μελέτες για τα Όρια Ακτινοβολίας λόγω Μετάδοσης BPL

Στην παράγραφο αυτή εντοπίζονται και διερευνώνται τα προβλήματα EMC σε ευρυζωνικά συστήματα BPL επί γραμμών MT. Συγκεκριμένα, παρουσιάζονται μελέτες και κανονισμοί που αφορούν τα όρια ακτινοβολίας από συστήματα BPL στο φάσμα συχνοτήτων από 1.7-88MHz με στόχο την προστασία άλλων συστημάτων που λειτουργούν στην περιοχή λειτουργίας των συστημάτων BPL [49], [50], [66], [67], [74], [78]-[80], [86], [87].

2.5.1 Διεθνείς Κανονισμοί που Αφορούν την Ακτινοβολία Διατάξεων/Συστημάτων BPL

2.5.1.1 Το FCC/P.15 των Κανόνων της Επιτροπής FCC

Τα όρια έντασης πεδίου του FCC/P.15 (FCC Part 15) παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.5. Τα συστήματα BPL εμπίπτουν στον ορισμό των συστημάτων φορέων ρεύματος του FCC/P.15. Ως σύστημα φορέα ρεύματος (current carrier system) ορίζεται το σύστημα ή το μέρος του συστήματος που μεταδίδει σήματα ραδιοσυχνότητας μέσω των ηλεκτρικών γραμμών ισχύος. Τα συστήματα φορείς ρεύματος που είναι εγκατεστημένα σε γραμμές MT –όπως είναι τα συστήματα BPL που μελετώνται στην παρούσα διατριβή– προκαλούν ακούσιες παρεμβολές σε άλλα συστήματα που βρίσκονται στην περιοχή που τα περιβάλλει και για το λόγο αυτό ονομάζονται ακούσιοι ακτινοβολητές (unintentional radiators). Η λειτουργία των συστημάτων αυτών σε καθορισμένες φασματικές ζώνες [88] γίνεται υπό τα αντίστοιχα όρια που επιβάλλονται στα συστήματα φορέων ρευμάτων.

Αν και τα όρια εκπομπής του FCC/P.15 προορίζονται να περιορίσουν τον κίνδυνο επιβλαβούς παρεμβολής σε αδειοδοτημένες υπηρεσίες, οι διαδικασίες



Σχήμα 2.9: Διάταξη γραμμών ηλεκτρικής ενέργειας σε στύλο.

Κλάση εξοπλισμού	Θέση εγκατάστασης εξοπλισμού BPL	Μέσο μετάδοσης
1		Γυμνές εναέριες ΓΜ/ΜΤ (Γραμμές Μεταφοράς ΜΤ)
2	Υποσταθμός μετασχηματιστή	Υπόγειες ΓΜ/ΜΤ
3	επιφανειας (transformer substation house-type surface)	Εναέριες γυμνές ΓΜ/ΧΤ
4		Εναέριες συνεστραμμένες ΓΜ/ΧΤ
5		Υπόγειες ΓΜ/ΧΤ
6	Υποσταθμός μετασχηματιστή	Υπόγειες ΓΜ/ΜΤ
7	υπόγειο κτιρίου	Υπόγειες ΓΜ/ΧΤ
8	Υπόγειος υποσταθμός	Υπόγειες ΓΜ/ΜΤ
9	μετασχηματιστή	Υπόγειες ΓΜ/ΧΤ
10	Υποσταθμός μετασχηματιστή σε	Εναέριες γυμνές ΓΜ/ΜΤ
11	στύλο	Εναέριες συνεστραμμένες ΓΜ/ΧΤ
12	Ερμάριο οδού (street cabinet)	Υπόγειες ΓΜ/ΧΤ
13	Φωτισμός οδού	Υπόγειες ΓΜ/ΧΤ
14		Εναέριες συνεστραμμένες ΓΜ/ΧΤ
15	Κατακόρυφος κλάδος κτιρίου	Δέσμη θωρακισμένων ΓΜ/XT
16		Υπόγειες ΓΜ/ΧΤ
17		Δέσμη μεταλλικών θωρακισμένων ΓΜ/ΧΤ
18	Μη οικιακός εξοπλισμός πελάτη	Δέσμη μη μεταλλικών θωρακισμένων ΓΜ/ΧΤ
19		Μεμονωμένες ΓΜ/ΧΤ

20		Δέσμη μη μεταλλικών
	Οικιακός εξοπλισμός πελάτη	θωρακισμένων ΓΜ/ΧΤ
21		Μεμονωμένες ΓΜ/ΧΤ

Πίνακας 2.3: Κλάση, θέση εγκατάστασης του εξοπλισμού BPL και μέσο μετάδοσης σημάτων BPL.

Κατηγορία παρεμβάλλοντος εξοπλισμού	Παρεμβάλλων Εξοπλισμός	Θύρα εισόδου παρεμβολής	Απόσταση παρεμβολής
Εξωτερικές ραδιοσυσκευές		Κεραία	30m στον αέρα
Εσωτερικές ραδιοσυσκευές		Κεραία	30m στον αέρα + 1 τοίχος
Εσωτερικές ραδιοσυσκευές		Θύρα ΑC τροφοδοσίας	Συνακρόαση μεταξύ γραμμών ΜΤ και ΧΤ (1m) + μετρητής ηλ. ενέργειας + πίνακας ΧΤ
Εσωτερικές ενσύρματες τηλεπικοινωνιακές συσκευές	modem DSL	Τηλεπικοινωνιακή θύρα	Συνακρόαση μεταξύ τηλεπικοινωνιακών γραμμών και γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος (1m μεταξύ γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος, 30-500m από εξοπλισμό BPL)
Εσωτερικές ενσύρματες τηλεπικοινωνιακές συσκευές	Δέκτες καλωδιακής ΤV	Τηλεπικοινωνιακή θύρα	Συνακρόαση μεταξύ ομοαξονικών γραμμών και γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος (3m μεταξύ γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος, 10-100m από εξοπλισμό BPL)

Πίνακας 2.4: Πιθανές παρεμβολές εναέριου στύλου σε άλλο εξοπλισμό.

μέτρησης της συμμόρφωσης είναι εξίσου σημαντικές όσον αφορά τον κίνδυνο παρεμβολής επειδή η αβεβαιότητα μέτρησης μπορεί τελικά να οδηγήσει τη λειτουργία BPL σε επίπεδα έντασης πεδίου που είναι σημαντικά υψηλότερα ή χαμηλότερα από τα όρια [49], [50], [74]. Πρακτικά, γίνεται χρήση των κανονικοποιημένων ορίων της FCC (normalized FCC limits) [57], [87], [89], [90]. Ανάλογα με τη ζώνη συχνοτήτων και την κλάση, η εφαρμογή των ορίων απαιτεί και διαφορετική απόσταση μέτρησης όπως φαίνεται από τον Πίνακα 2.5. Εντούτοις, η μέτρηση πρακτικά γίνεται σε μια απόσταση και στη συνέχεια κανονικοποιούνται τα όρια της FCC για να γίνει ο έλεγχος. Ας θεωρηθεί μέτρηση σε απόσταση 10m σε 9kHz εύρος ζώνης μέτρησης. Τότε, η κανονικοποίηση στα 30MHz μπορεί να πραγματοποιηθεί όπως κατωτέρω:

Το όριο στη ζώνη από 1.705 έως 30MHz είναι 30μV/m και μετριέται στα 30m σε εύρος ζώνης 9kHz. Για μέτρηση στα 10m χρησιμοποιείται ο παράγοντας διόρθωσης 40dB/δεκάδα [49], [50], [57], [87], [90]. Τότε, το όριο στα 10m γίνεται:

 $20 \log 30 + 40 \log (30/10) = 48.62 dB \mu V/m$ (A)

Το όριο στη ζώνη από 30 έως 88MHz μετρημένο στα 3m σε εύρος ζώνης 120kHz είναι 100µV/m. Για μέτρηση στα 10m χρησιμοποιείται ο παράγοντας διόρθωσης λόγω απόστασης των 20dB/δεκάδα [49], [50], [57], [87], [90]. Για σήματα NLS (Noise-Like Signals), δηλαδή για παρεμβολές που προσομοιάζουν ή δρουν ως επιπλέον θόρυβος, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας παράγοντας διόρθωσης ανάλογος του 10log του εύρους ζώνης. Τότε, το όριο στα 10m σε εύρος ζώνης 9kHz γίνεται

 $20 \log 100 - 20 \log (10/3) - 10 \log (120/9) = 18.29 dB\mu V/m$ (B)

Προκύπτει λοιπόν ότι για σήματα NLS με εύρος ζώνης που υπερβαίνει τα 120kHz, το όριο της FCC πάνω από τα 30MHz είναι 30.33dB (**A-B**), δηλαδή είναι αυστηρότερο σε σχέση με το αντίστοιχο όριο κάτω από τα 30MHz.

2.5.1.2 Διεθνείς Κανονισμοί

Κυβερνήσεις και διάφοροι οργανισμοί έχουν θεσπίσει κανόνες ή κανονισμούς που διέπουν την εφαρμογή της τεχνολογίας BPL. Το πλήθος των κανονισμών και η έλλειψη κοινώς αποδεκτών ορίων έχουν καθυστερήσει την ανάπτυξη της τεχνολογίας
Χρήση	Συχνότητα (MHz)	Ένταση Πεδίου (μV/m)	Απόσταση μέτρησης (m)	Εύρος ζώνης μέτρησης (kHz)	Είδος ανίχνευσης	Πηγή (FCC/P.15)
Συστήματα Φορέων Ρεύματος	1.705-30.0	30	30	9	quasi-peak	§15.209
Κλάση Α Εμπορικές, επιχειρηματικές, βιομηχανικές περιοχές	30-88	90	10	120	quasi-peak	§15.109
Κλάση Β Κατοικημένες περιοχές	30-88	100	3	120	quasi-peak	§15.109

Πίνακας 2.5: Όρια εκπομπής σχετικά BPL του FCC/P.15.

BPL σε ευρεία βάση γιατί πολλές χώρες έχουν αναβάλει την ανάπτυξη συστημάτων BPL μέχρι την ολοκλήρωση των μελετών παρεμβολής. Σε επίπεδο κρατών, έχουν προταθεί διάφοροι κανονισμοί εκπομπής για αξιολόγηση. Μερικοί από αυτούς παρουσιάζονται στη συνέχεια. Στις σχετικές συνοψίσεις που παρουσιάζονται, πέραν της σύντμησης BPL (ευρυζωνικές επικοινωνίες μέσω ηλεκτροφόρων γραμμών) χρησιμοποιούνται και οι συντμήσεις PLC (επικοινωνίες μέσω ηλεκτροφόρων γραμμών) και PLT (τηλεπικοινωνίες/τεχνολογίες ηλεκτροφόρων γραμμών).

2.5.1.2.1 Διοικητικές Αποφάσεις που Αφορούν το BPL

Στον Πίνακα 2.6, παρουσιάζονται κανόνες που έχουν θεσπίσει διάφορες χώρες για τις διάφορες υλοποιήσεις συστημάτων BPL.

2.5.1.2.2 Προτεινόμενοι Κανονισμοί

Στη συνέχεια παρουσιάζεται ένα σύνολο μελετών/προτάσεων που αποσκοπούν στο να ρυθμίσουν τις εκπομπές από εξοπλισμό BPL που λειτουργεί στη ζώνη συχνοτήτων από 1.7–88MHz [49], [50].

Η πρώτη πρόταση είναι αυτή της Γερμανίας που έχει ληφθεί από το NB30 και παρουσιάζεται στον Πίνακα 2.7.

Η δεύτερη πρόταση είναι αυτή της Νορβηγίας (Νορβηγική Πρόταση) που παρουσιάζεται στον Πίνακα 2.8.

Η τρίτη πρόταση είναι αυτή του BBC του Ηνωμένου Βασιλείου και του ΝΑΤΟ και παρουσιάζεται στον Πίνακα 2.9.

Χώρα	Απόφαση ή σκεπτικό απόφασης				
Αυστραλία	Το ACA δεν έχει κανένα υποχρεωτικό πρότυπο για εξοπλισμό BPL για τις συχνότητες πάνω από 525kHz.				
Αυστρία	Το Υπουργείο Εμπορίου έχει ολοκληρώσει τα πιλοτικά προγράμματα για το PLC. Κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η παρεμβολή που προκλήθηκε από το PLC στις επικοινωνίες στο εύρος συχνότητας 2-30MHz δεν μπορούσε να μειωθεί στα αποδεκτά επίπεδα.				
Φινλανδία	FICORA ετήσια έκθεση 2001: Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των μετρήσεων, αποφάσισε ότι η τεχνολογία PLC μπορεί να προσαρμοστεί μόνο αφού έχουν λυθεί τα προβλήματα παρεμβολής και ασφάλειας και όταν συμμορφώνεται η τεχνολογία με τις επίσημες απαιτήσεις. Οι έννοιες συμμορφώνονται με το NB30 μέχρι να καθοριστεί ένας πανευρωπαϊκός κανόνας.				
Γερμανία	ΝΒ30 (Πίνακας 2.7).				
Ιαπωνία	Το MPHPT της Ιαπωνίας έχει αποφασίσει ότι σε αυτή τη φάση, η αύξηση του διατιθέμενου εύρους ζώνης για επικοινωνίες μέσω γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος είναι δύσκολη. Η λύση που εξετάζεται είναι η προώθηση της έρευνας και της ανάπτυξης κατάλληλων modem.				
Ηνωμένο Βασίλειο	Καμία επίσημη τοποθέτηση μέχρι στιγμής για το εύρος από 1.6MHz έως 30MHz.				
 Βασίλειο από 1.6MHz έως 30MHz. ACA (Australian Communications and media Authority): Αυστραλιανή Αρχή Επικοινωνιών. BBC (British Broadcasting Corporation): Βρετανική Εταιρία Ευρυεκπομπών. DARC (Deutsche Amateur-Radio-Club): Γερμανική Ερασιτεχνική Ραδιολέσχη. EN (EuropeaN standards): Ευρωπαϊκά Πρότυπα NF. FICORA (Finnish Communications Regulatory Authority): Φινλανδική Ρυθμιστική Αρχή Επικοινωνιών. MPHPT (Ministry of Public management, Home affairs, Posts and Telecommunications): Υπουργείο Δημόσιας Διαχείρισης Οικογενειακών Υποθέσεων, Πληροφοριών και Τηλεπικοινωνιών της Ιαπωνίας. NB30: Άρθρο Χρήσης 30, προερχόμενο από το γερμανικό RegTP τον Ιανουάριο του 1999. Περιέχει μια καμπύλη περιορισμού για την ακτινοβολία των τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών μέσα και παράλληλα με τις γραμμές μεταφοράς (συμπεριλαμβανομένης της καλωδιακής τηλεόρασης, του xDSL και του PLC) για το εύρος συχνότητας από 9kHz έως 3GHz. RA (Radiocommunications Agency): Υπηρεσία Ραδιοεπικοινωνιών του Ηνωμένου Βασιλείου. 					
RegTP (REGulierungsbehörde für Telekommunikation und Post): Διοίκηση Τηλεπικοινωνιών και Πληροφοριών της Γερμανίας.					

Πίνακας 2.6: Χώρες και οι αποφάσεις τους σχετικά με εφαρμογές BPL.

Εύρος συχνότητας (MHz)	Όριο της μέγιστης έντασης πεδίου στα 3m (dBμV/m)	Εύρος ζώνης μέτρησης	Είδος ανίχνευσης	
>1 έως 30	$40 - 8.8 \log_{10} (f_{MHz})$	9kHz	Peak	
>30 έως1000	27 (ισοδύναμο της ακτινοβολούμενης ισχύος	Μη	Peak	
	των 20dBpW)	καθορισμένο		
Το όριο δίνεται από την πλευρά της έντασης των ηλεκτρικών πεδίων. Κάτω από τα 30MHz το όριο				
ισχύει για την ένταση μαγνητικών πεδίων, υποθέτοντας εσωτερική σύνθετη αντίσταση 377Ω (intrinsic				
impedance). Αυτή η πρόταση υποστηρίζεται από την Αυστρία, τη Φινλανδία, τη Γαλλία, τη Γερμανία,				
τη Ρουμανία και την Ελβετία.				

Πίνακας 2.7: Γερμανικά όρια Ν	B30.
-------------------------------	------

Εύρος συχνότητας (MHz)	Όριο της μέγιστης έντασης πεδίου στα 3m (dBμV/m)	Εύρος ζώνης μέτρησης	Είδος ανίχνευσης	
>1 έως 30	$20 - 7.7 \log_{10} (f_{MHz})$	9kHz	peak	
Τα δεδομένα του μαγνητικού πεδίου, σε dBµA/m, μετρούνται με βροχοκεραία (loop antenna). Τα ισοδύναμα δεδομένα του ηλεκτρικού πεδίου μετατρέπονται από τα δεδομένα του μαγνητικού				
πεοιού μεσω παραγοντά των 51.5dB που αντιστοιχεί στην συνθετη αντιστάση του κενού (free space impedance) των $120\pi\Omega$. Αυτή η πρόταση υποστηρίζεται από την Ιρλανδία.				

Πίνακας 2.8: Νορβηγική πρόταση.

Εύρος συχνότητας (MHz)	Όριο της μέγιστης έντασης πεδίου στο 1m	Εύρος ζώνης μέτρησης	Ανιχνευτής
3 - 30	$H_{peak} = -29.7 - 8.15 \log_{10} (f_{MHz}),$ (dBμA/m, μετρημένο)	9kHz	peak
3 - 30	$E_{peak} = 21.8 - 8.15 \log_{10} (f_{MHz}),$ (dBµV/m, υπολογισμένο από το H_{peak})	9kHz	peak

Τα δεδομένα του μαγνητικού πεδίου μετρούνται με βροχοκεραία και τα δεδομένα του ηλεκτρικού πεδίου προκύπτουν από τα δεδομένα του μαγνητικού πεδίου μέσω του παράγοντα των 51.5dB. Αυτό το όριο απορρέει μαζί με το επίπεδο θορύβου αναφοράς από το ITU-R REC (International Telecommunication Union ή Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών). Ρ 372-7 και την απόσταση προστασίας των 10m όπου η ευαισθησία ενός δέκτη "θύματος" υποβιβάζεται λιγότερο από 0.5dB. Υποστηρίζεται από τους ράδιο χρήστες (στρατός, ράδιο μετάδοση, πολιτική αεροπορία, ερασιτέχνες, κ.λπ) σε όλο τον κόσμο στις LF (Low Frequency), MF (Medium Frequency) και HF (High Frequency) ζώνες.

Πίνακας 2.9: Πρόταση από το BBC και το NATO.

Η τέταρτη πρόταση που υποστηρίζεται από τους κατασκευαστές BPL παρουσιάζεται στον Πίνακα 2.10. Η πρόταση αυτή είναι στην ουσία το FCC/P.15.

Εύρος συχνότητας (MHz)	Ένταση πεδίου στα 30m (μV/m)	Εύρος ζώνης μέτρησης	Ανιχνευτής
1.705 - 30.0	30	9kHz	quasi-peak

Πίνακας 2.10: Πρόταση από τους κατασκευαστές εξοπλισμού BPL.

Μια σύγκριση αυτών των τεσσάρων προτάσεων παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.10, όπου τα δεδομένα παρουσιάζονται κανονικοποιημένα σε απόσταση μέτρησης 10m σύμφωνα με τις [49], [50], [87]. Τα όρια συγκρίνονται για συχνότητες κάτω των 30MHz. Παρατηρώντας το Σχήμα 2.10 προκύπτει ότι τα όρια των τεσσάρων προτάσεων εμφανίζουν μεγάλες διαφορές και αυτό οφείλεται στους διαφορετικούς σκοπούς που κάθε πρόταση καλείται να υπερασπιστεί σε σχέση με την τεχνολογία BPL.

2.5.2 Μελέτες Παρεμβολών από Συστήματα BPL

2.5.2.1 Ταξινόμηση Παρεμβολών που Οφείλονται στο BPL από την FCC NOI. Προτεινόμενοι Κανονισμοί

Οι υπέρμαχοι και οι αντίπαλοι της Επιτροπής NOI (Notice Of Inquiry) ως προς τις ευρυζωνικές υπηρεσίες μέσω ηλεκτροφόρων γραμμών υπέβαλαν τις σχετικές τεχνικές αναλύσεις για τις επιπτώσεις που αναμένεται να έχει η εφαρμογή του BPL στις αδειοδοτημένες υπηρεσίες στο εύρος 1.7-88MHz. Ορισμένα βασικά σημεία των αναλύσεων συνοψίζονται στις παραγράφους που ακολουθούν [49], [50], [74].

2.5.2.1.1 Γραμμές Ισχύος ως Ακούσιοι Ακτινοβολητές Σημάτων BPL

Τα συστήματα BPL που είναι εγκατεστημένα επί γραμμών MT δημιουργούν ακούσια ακτινοβολία που παρεμβάλλει ασύρματες αδειοδοτημένες υπηρεσίες που λειτουργούν στην περιοχή που περιβάλλει το σύστημα, δηλαδή τα δίκτυα BPL λειτουργούν ως ακούσιοι ακτινοβολητές. Όπως είναι ευρέως γνωστό, ένα τμήμα γραμμής MT δύο ή περισσοτέρων γυμνών αγωγών στο οποίο εγχύεται σήμα BPL υποστηρίζει ρυθμούς διάδοσης τύπου TEM (quasi-TEM). Οι γραμμές μεταφοράς ακτινοβολούν κυρίως στα σημεία ασυνέχειάς τους, δηλαδή στα άκρα, στις συνδέσεις με άλλες γραμμές, σε γωνίες που σχηματίζονται λόγω κάμψης των γραμμών αλλά και στα σημεία όπου εγκαθίσταται εξοπλισμός ισχύος όπως μετασχηματιστές MT/XT και



Σχήμα 2.10: Σύγκριση των προτάσεων που αφορούν τα όρια έντασης ηλεκτρικού πεδίου που δημιουργείται ακούσια από εκπομπές BPL.

οι πυκνωτές. Επίσης, οι ανακλάσεις στα άκρα των τμημάτων των γραμμών ισχύος δημιουργούν επί των τμημάτων αυτών στάσιμα κύματα που προκαλούν ακτινοβολία.

Η εταιρία ενέργειας Ameren (Ameren Energy Communications, Incorporated) ανέλυσε τις γραμμές ισχύος MT ιδιαίτερα ως προς την ακούσια λειτουργία τους ως κεραιών. Η Ameren σημείωσε ότι κατά τον υπολογισμό του βαθμού απόδοσης (radiation efficiency) και του κατευθυντικού κέρδους (directional gain) μιας γραμμής ισχύος όταν λειτουργεί ακούσια ως ακτινοβολητής, η σύνθετη αντίσταση της πηγής του σήματος BPL πρέπει να θεωρείται σταθερή ενώ η σύνθετη αντίσταση φορτίου πρέπει να θεωρείται μεταβλητή. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με την κλασική έννοια γραμμών μεταφοράς που λειτουργούν ως κεραίες οδεύοντος κύματος (traveling wave antennas) δεδομένου ότι σε αυτές η σύνθετη αντίσταση τερματισμού πρέπει να είναι προσαρμοσμένη προς τη χαρακτηριστική αντίσταση της γραμμής η οποία σε συχνότητες μεταξύ 1 και 100MHz λαμβάνει τιμές μεταξύ 350 και 420Ω. Οι υπολογισμοί της Ameren δείχνουν ότι καθώς η σύνθετη αντίσταση τερματισμού της γραμμής διαφοροποιείται σε σχέση με τη χαρακτηριστική αντίσταση της γραμμής

δεν αλλάζει μόνο ο βαθμός απόδοσης ακτινοβολίας και το κατευθυντικό κέρδος της γραμμής μεταφοράς όταν θεωρηθεί ως ακούσια κεραία, αλλά μειώνεται και η δυνατότητα της σταθερής πηγής να εγχύει ισχύ στη γραμμή ισχύος λόγω κακής προσαρμογής του φορτίου. Περαιτέρω, η Ameren υπολόγισε τον παράγοντα διάταξης (array factor) για γραμμή δύο αγωγών στην περίπτωση διαφορικής έγχυσης με στόχο να προσδιορίσει ποσοτικά τη μεταβολή της ακτινοβολίας σε σχέση με την περίπτωση έγχυσης σε ένα μόνο αγωγό. Η Ameren θεωρεί ότι οι γραμμές μεταφοράς που μεταφέρουν κύματα TEM δεν πρέπει να συγχέονται με γραμμικές στοιχειοκεραίες (linear array elements) δεδομένου ότι οι μηχανισμοί ακτινοβολίας τους είναι διαφορετικοί και περισσότερο σύνθετοι.

Επίσης, η Ameren εξέτασε την περίπτωση των διασυνδεμένων τμημάτων γραμμών μεταφοράς MT και επισήμανε ότι το διάγραμμα ακτινοβολίας επηρεάζεται από την κατανομή του ρεύματος σε γραμμές που λειτουργούν προς διαφορετικές κατευθύνσεις, οπότε η ακτινοβολία ενδεχομένως πλησιάζει περισσότερο την ισοτροπική. Αυτό αναμένεται να οδηγήσει σε χαμηλότερα κατευθυντικά κέρδη των γραμμών μεταφοράς όταν δρουν ως ακούσιοι ακτινοβολητές –χαρακτηριστικό θετικό καθώς μειώνει την EMI (ElectroMagnetic Interference)– αλλά και σε αυξανόμενη εξασθένηση των σημάτων BPL καθώς διαιρούνται μεταξύ των διασυνδεδεμένων τμημάτων και ανακλώνται από τις ασυνέχειες –χαρακτηριστικό που είναι αρνητικό–. Η Ameren καταλήγει στο συμπέρασμα ότι η ισχυρότερη ακούσια ακτινοβολία προέρχεται από τα σημεία έγχυσης, οπότε αυτά είναι τα κρίσιμα σημεία του συστήματος που καθορίζουν την ακτινοβολία των συστημάτων BPL.

Μελέτη της ARRL (American Radio Relay League) υπολογίζει τα κατευθυντικά κέρδη και τα διαγράμματα ακτινοβολίας γραμμών μεταφοράς κατά την ακούσια λειτουργία τους ως ακτινοβολητών συναρτήσει της συχνότητας θεωρώντας ένα απλό μοντέλο ακτινοβολίας που περιγράφει γραμμές ισχύος. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι, καθώς αυξάνεται η συχνότητα, μια γραμμή μεταφοράς ακτινοβολεί περισσότερο εμφανίζοντας ένα σύνθετο και ιδιαίτερα κατευθυντικό διάγραμμα

Σε άλλη μελέτη της η ARRL περιέγραψε το μοντέλο μιας γραμμής μεταφοράς ΜΤ και συνέκρινε τις ακόλουθες τρεις μεθόδους έγχυσης του BPL σήματος με βάση το μοντέλο αυτό [92]:

- Διαφορική τροφοδότηση μεταξύ δύο φάσεων με την τροφοδότηση στο ένα άκρο της γραμμής ισχύος.
- Τροφοδότηση σε μια φάση, με την τροφοδότηση στο μέσο ενός ενιαίου τμήματος γραμμής.
- Διαφορική τροφοδότηση μεταξύ δύο φάσεων με τον ένα αγωγό γειωμένο σε έδαφος με απώλειες (relatively poor RF (Radio Frequency) ground) και το σημείο τροφοδότησης της μη γειωμένης φάσης μετατοπισμένο από το κέντρο (offset from center).

Με βάση το μοντέλο αυτό, η ARRL παρουσίασε αποτελέσματα για το κατευθυντικό κέρδος μιας γραμμής ισχύος όταν ακτινοβολεί ακούσια ως κεραία με την τρίτη περίπτωση που αναφέρθηκε –διαφορική τροφοδότηση μεταξύ δύο φάσεων με τον ένα αγωγό γειωμένο- να αποτελεί τη χειρότερη περίπτωση με κριτήριο την ΕΜΙ από τη γραμμή μεταφοράς. Η περίπτωση αυτή οδήγησε σε υψηλότερο κατευθυντικό κέρδος της κεραίας που δημιουργείται ενώ, ταυτόχρονα, το διάγραμμα ακτινοβολίας που προέκυψε από την εφαρμογή του μοντέλου της ARRL υπήρξε τέτοιο ώστε προκάλεσε καλύτερη σύζευξη (coupling) σε προσομοιωμένες ερασιτεχνικές κεραίες ασύρματης λήψης που ενσωματώθηκαν στο μοντέλο προκαλώντας έτσι ισχυρότερες παρεμβολές. Η ARRL υπολόγισε ότι το κατευθυντικό κέρδος αυτής της γραμμής ισχύος στα 14MHz είναι μεγέθους παραπλήσιου με αυτό πολλών ερασιτεχνικών κεραιών HF με αποτέλεσμα η διάταξη αυτή να καθίσταται ισχυρός ακτινοβολητής ΕΜΙ σε υπάρχοντα αδειοδοτημένα συστήματα. Μια τελική παρατήρηση είναι ότι τα διαγράμματα ακτινοβολίας που προκύπτουν θεωρώντας αυτό το μοντέλο ήταν σύνθετα και ότι η μέγιστη ακτινοβολία στα 3.5MHz κατευθύνεται προς τον ουρανό, χαρακτηριστικό ιδιαίτερα σημαντικό για τις αεροναυτικές επικοινωνίες.

2.5.2.1.2 Οι Κανόνες που Προτείνει το FCC/P.15 σχετικά με το BPL

Η Ameren εξέτασε την αξιοπιστία της χρήσης βροχοκεραίας για τη μέτρηση της έντασης του μαγνητικού πεδίου [93] και επισήμανε ότι οι γραμμές ισχύος λειτουργούν ως μεγάλοι ακτινοβολητές (large radiators), οπότε οι μετρήσεις κοντά στις γραμμές (π.χ. στα 30m) αναφέρονται στο κοντινό πεδίο, όπου η τιμή της κυματικής αντίστασης του κενού 377Ω που χρησιμοποιείται σε υπολογισμούς που αναφέρονται στο μακρινό πεδίο δεν ισχύει. Αυτό το συμπέρασμα προέκυψε από μετρήσεις που έκανε η Ameren με τη χρήση βροχοκεραίας και τις γραφικές παραστάσεις ηλεκτρικών (E) και των μαγνητικών (H) πεδίων που προκύπτουν.

Η Ameren δήλωσε ότι το εκτιμώμενο λάθος λόγω χρήσης βροχοκεραίας για τις μετρήσεις είναι ενδεχομένως πολύ υψηλό, μέχρι 10dBµV/m για μετρήσεις που πραγματοποιούνται κατά μήκος της γραμμής ισχύος και μέχρι 20dBµV/m όταν πραγματοποιούνται μακριά από τη γραμμή ισχύος, ακόμα και τόσο μακριά όσο τα 700m. Με βάση το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε στην ανάλυση αυτή προέκυψε ότι η μέγιστη ισχύς του πεδίου ακτινοβολείται υπό γωνία ανύψωσης 12°. Η Ameren κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η χρήση βροχοκεραίας εισάγει σημαντικά λάθη μέτρησης κοντά στις γραμμές ισχύος και πρότεινε τη χρήση μονοπολικής κεραίας για τις μετρήσεις BPL.

Σε άλλη της μελέτη, η ARRL υπολόγισε τα επίπεδα ισχύος εκπομπών (conducted emissions power levels) με βάση τις προτάσεις που υπέβαλαν οι κατασκευαστές BPL στην Επιτροπή FCC σε απάντηση στο NOI της Επιτροπής [94]. Η ARRL δήλωσε, ότι σύμφωνα με τους υπολογισμούς της, οι προτάσεις των κατασκευαστών BPL εμφανίζουν εκπομπές που υπερβαίνουν τα όρια της FCC [74] και δήλωσε ότι οι διαρροές εκπομπής από τη λειτουργία των συζευκτών BPL υψηλών συχνοτήτων προκαλούν επίσης σημαντικές παρεμβολές.

Επίσης, η ARRL εξέτασε την πιθανότητα ύπαρξης ανακριβειών κατά τη διαδικασία μετρήσεων όπως αυτή περιγράφεται από τους κανόνες του FCC/P.15 [93]. Η ARRL δήλωσε ότι, με βάση το μοντέλο των γραμμών ισχύος που χρησιμοποίησε, τα διαγράμματα ακτινοβολίας BPL είναι σύνθετα και καθιστούν δύσκολη την πρόβλεψη της θέσης όπου μπορούν να πραγματοποιηθούν οι μετρήσεις της μέγιστης τιμής του ακτινοβολούμενου πεδίου. Μια άλλη αιτία λαθών είναι ότι, προκειμένου να υπολογιστεί ένας παράγοντας διόρθωσης (extrapolation factor), οι μετρήσεις κατέδειξαν ότι το ακτινοβολούμενο ηλεκτρικό πεδίο δεν μειώνεται κατά 40dB/δεκάδα σε αποστάσεις μικρότερες των 30m από τη γραμμή. Χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα από το μοντέλο γραμμής ισχύος που έχει υιοθετήσει, η ARRL επισήμανε ότι η ένταση του ακτινοβολούμενου πεδίου από τη γραμμή ισχύος είναι μεγαλύτερη υπεράνω των γραμμών ισχύος, οπότε οι μετρήσεις που γίνονται σε απόσταση 1m από την επιφάνεια του εδάφους υποτιμούν τη μέγιστη ένταση του πεδίου. Στα αποτελέσματα από τη χρήση του μοντέλο γραμμής ισχύος που έχει υιοθετήσει, η ARRL διαπίστωσε ότι υπάρχουν στάσιμα κύματα στη γραμμή ισχύος. Για να μεγιστοποιήσει την πιθανότητα ότι τα αποτελέσματα των μετρήσεων χαρακτηρίζουν ακριβώς την ένταση του ακούσια ακτινοβολούμενου πεδίου λόγω μετάδοσης BPL, η ARRL πρότεινε επιτόπιες δοκιμές σε πολύ κοντινά διαστήματα πάνω, κάτω και πλευρικά των εγκαταστάσεων των συστημάτων BPL.

Με βάση το μοντέλο γραμμής ισχύος που υιοθέτησε, η ARRL υπολόγισε το επίπεδο παρεμβολής που λαμβάνεται κοντά σε κεραίες ραδιοερασιτεχνών λόγω ακούσιων εκπομπών που οφείλονται στη λειτουργία BPL και την αναμενόμενη αύξηση στο κατώτερο επίπεδο του θορύβου (expected increase in noise floor). Με βάση τη φασματική πυκνότητα ισχύος, η ARRL υπολόγισε ότι η ένταση του πεδίου ακτινοβολίας θα υπερβεί το όρια του FCC/P.15. Η ARRL υιοθέτησε το δυσμενέστερο για την εφαρμογή BPL σενάριο, δηλαδή υπέθεσε ιδανική (υψηλή) σύζευξη (ideal coupling) μεταξύ της γραμμής ισχύος και της ερασιτεχνικής κεραίας που θεωρήθηκε ότι βρίσκεται στην κατεύθυνση μεγίστου του διαγράμματος ακτινοβολίας. Επιπλέον, η ARRL υπολόγισε το κατευθυντικό κέρδος της γραμμής ισχύος κατά την ακούσια λειτουργία της ως κεραίας. Η ARRL περιέγραψε περαιτέρω τα πιθανά λάθη μέτρησης που μπορούν εσφαλμένα να οδηγήσουν τους κατασκευαστές μονάδων BPL να θεωρήσουν ότι ικανοποιούν τα όρια του FCC/P.15.

Σε μελέτη του BBC, εξετάστηκαν διάφορες προτάσεις ως προς τα όρια εκπομπών που είναι υπό αναθεώρηση στο CEPT SE35 (Conférence Européenne des administrations des Postes et Télécommunications) και αξιολογήθηκε ο βαθμός προστασίας που αυτά τα όρια παρέχουν σε δέκτες που βρίσκονται κοντά σε γραμμές μεταφοράς που μεταδίδουν xDSL και BPL σήματα [89]. Η μελέτη κατέληξε στο συμπέρασμα ότι κανένα από τα προτεινόμενα όρια δεν προστατεύει επαρκώς στο βαθμό που καθορίζει το BBC και ότι χρειάζεται μια αξιόπιστη πρόταση που θα επιτύχει στο να περιορίσει την αύξηση του επίπεδου θορύβου ή παρεμβολών που μοιάζουν ή δρουν ως επιπλέον θόρυβος που προκύπτει από τη λειτουργία μονάδων BPL ώστε να προσφερθεί μεγαλύτερη ασφάλεια από τις παρεμβολές σε άλλες αδειοδοτημένες υπηρεσίες.

2.5.2.1.3 Οι Επιπτώσεις από την Εφαρμογή της Τεχνολογίας BPL στις Αδειοδοτημένες Υπηρεσίες Επικοινωνιών HF

Η ARRL κατέστρωσε μοντέλα σχετικά με την προστασία των επικοινωνιών ΗF από BPL και άλλες ενσύρματες μεταδόσεις για διάφορα επίπεδα θορύβου [95] θεωρώντας συγκεκριμένα επίπεδα θορύβου:

- i) για ήρεμο κατοικημένο περιβάλλον,
- ii) για κατοικημένο περιβάλλον όπως καθορίζεται από την ITU-R [96],
- iii) για επίπεδο θορύβου αυξημένο κατά 10dB σε σχέση με αυτόν της ITU-R [96] και
- iv) για επίπεδο θορύβου προσαυξημένο κατά το επίπεδο του ακουσίως ακτινοβολούμενου σήματος BPL όπως υπολογίστηκε θεωρώντας ευρείας κλίμακας εφαρμογή BPL, όπου οι συσκευές BPL λειτουργούν με τη μέγιστη ένταση πεδίου που επιτρέπεται από το FCC/P.15. Η ARRL κατέστρωσε μοντέλα για τις συνθήκες λειτουργίας στα 5MHz και 14MHz χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα αντίστροφης κάλυψης περιοχής VOACAP (VOACAP inverse-area coverage program).

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της ARRL [95] έδειξαν ότι η αξιοπιστία των επικοινωνιών HF υποβιβάζεται ήδη λόγω λειτουργίας ενός δέκτη παρουσία του μεσαίου επιπέδου θορύβου της ITU-R. Συνεπώς, εφόσον η χρήση του BPL αυξάνει το κατώτατο επίπεδο θορύβου κατά 10dB, ή στο επίπεδο το οποίο η ARRL ισχυρίζεται ότι θα προκύψει εφόσον υλοποιηθεί το σενάριο που υποθέτει ευρεία λειτουργία της τεχνολογίας BPL υπό τα όρια που υπαγορεύονται από FCC/P.15, η ARRL καταλήγει στο συμπέρασμα ότι οι παγκόσμιες επικοινωνίες HF θα υποβαθμιστούν σημαντικά λόγω της αύξησης του επιπέδου θορύβου από τα σωρευτικά φαινόμενα παρεμβολής (cumulative high frequency radiated interference) από την εφαρμογή ή τη λειτουργία BPL [66], [67].

Σε άλλη μελέτη, το BBC ανέλυσε τα αθροιστικά αποτελέσματα του σεναρίου της ευρείας διάδοσης της τεχνολογίας BPL και xDSL και εξέτασε τις επιπτώσεις από την ακούσια λόγω λειτουργίας συστημάτων BPL διάδοση ουράνιων κυμάτων σε δέκτες αεροσκαφών και σε σχετικά απομακρυσμένους επίγειους δέκτες [97]. Από τη σχετική ανάλυση προκύπτει ότι η έκταση της παρεμβολής των ουράνιων κυμάτων που προκαλεί το BPL σε αεροσκάφη και επίγειους δέκτες λόγω εκτεταμένης λειτουργίας των BPL και xDSL συστημάτων μπορεί να μην είναι αμελητέα και προτείνεται η περαιτέρω διερεύνηση των ενδεχόμενων παρεμβολών από τις σχετικές αρμόδιες αρχές.

2.5.2.2 Δραστηριότητες της ΙΤU

Δύο τομείς της ITU έχουν εξετάσει την τεχνολογία BPL:

- i) ο τομέας Τηλεπικοινωνιακών Προτύπων (ITU-T)
- ii) ο τομέας Ραδιοεπικοινωνιών (ITU-R).

Οι περιγραφές της τρέχουσας τεκμηρίωσης και οι σχετικές δραστηριότητες που παρουσιάζονται στη συνέχεια δεν καλύπτουν μεγάλο εύρος παραπομπών.

2.5.2.2.1 ΙΤU-Τ Ομάδα Μελέτης 5

Στα μέσα του 2003, η Ομάδα Μελέτης 5 της ΙΤU-Τ ενέκρινε τη Σύσταση Κ.60 που αφορά τα όρια εκπομπής και τις μεθόδους δοκιμής για τα δίκτυα τηλεπικοινωνιών [98]. Συγκεκριμένα, η εφαρμογή της προορίζεται για τη διερεύνηση καταγγελιών για παρεμβολές, ενώ το πεδίο δράσης της περιλαμβάνει όλα τα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα που χρησιμοποιούν γραμμές ηλεκτρικής ισχύος XT και συχνότητες μεταξύ 9kHz και 400GHz. Τα όρια έντασης πεδίου που συστήνονται (recommended "target" field strength limits) στο φασματικό εύρος 1.7-88MHz παρατίθενται στον Πίνακα 2.11. Οι σχετικές μετρήσεις και οι διαδικασίες διαχείρισης της Ομάδας Μελέτης διευκρινίζονται στη Σύσταση [98]. Οι διαδικασίες προτείνουν διάφορα μέτρα που πρέπει να ληφθούν από τις άμεσα ενδιαφερόμενες ομάδες για το μετριασμό της παρεμβολής.

2.5.2.2.2 ITU-R Ομάδα Μελέτης 1

Οι Ομάδες Εργασίας 1Α για τη διαχείριση του φάσματος και 1C για τον έλεγχο του φάσματος συναντήθηκαν το Νοέμβριο του 2003 και εξέτασαν τις έως τότε υπάρχουσες μελέτες BPL. Ως επικεφαλής της ομάδας ITU-R που ασχολούνται με τη διατύπωση συστάσεων σχετικών με ενδεχόμενες παρεμβολές από τα συστήματα BPL, η Ομάδα Εργασίας 1Α ζήτησε πληροφορίες από όλες τις άλλες Ομάδες Εργασίας αρμόδιες για τα πρότυπα διάδοσης ραδιοκυμάτων και την ανάλυσή τους για τα ζητήματα που ενδεχομένως έχουν επιπτώσεις σε συγκεκριμένες ραδιοϋπηρεσίες.

Εύρος συχνότητας (MHz)	Ένταση πεδίου (dBμV/m)		Απόσταση μέτρησης (m)	Εύρος ζώνης μέτρησης (kHz)
	Peak	Quasi-peak		
από 1 έως 30	52 - 40 log (f)	40 - 20 log (f)	3m	9kHz
Από 30 έως 230	52 - 8.8 log (f)	40 - 8.8 log (f)	3m	120kHz

Σημειώσεις: f είναι η συχνότητα (MHz). Σε συχνότητες χαμηλότερες των 30MHz, η κυματική αντίσταση του αέρα θεωρείται ίση με 377Ω και λαμβάνεται υπόψη για τον υπολογισμό της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου όταν έχει μετρηθεί η ένταση του μαγνητικού πεδίου. Όταν ο θόρυβος υποβάθρου (background noise) είναι πολύ υψηλός, για να μπορεί να γίνει αξιόπιστη μέτρηση κορυφής (peak) προσδιορίζεται το όριο quasi-peak (quasi-peak limit).

Πίνακας 2.11: Όρια ισχύος ηλεκτρικών πεδίων ITU-T Rec. K.60.

2.5.2.3 ΙΤU-R Ομάδα Μελέτης 3

Στις συνεδριάσεις της Ομάδας Μελέτης 3 το Νοέμβριο του 2003, οι Ομάδες Εργασίας 3J, 3K, 3L και 3M, συζήτησαν εκτενώς τις διάφορες πτυχές του προβλήματος που ανακύπτει από την ανάπτυξη της τεχνολογίας τηλεπικοινωνιών μέσω ηλεκτροφόρων γραμμών (PLT). Οι ανησυχίες που εκφράστηκαν αφορούσαν: την ασύμμετρη φύση και τα διαφορετικά χαρακτηριστικά των ηλεκτροφόρων γραμμών, την πιθανότητα ακτινοβολίας είτε από μεμονωμένα σημεία μιας γραμμής είτε κατά κατανεμημένο τρόπο από μια γραμμή, τη συσσώρευση ΕΜΙ λόγω εκπομπών από πολλαπλές πηγές και την ακούσια ακτινοβολία και επίγειων και ουράνιων κυμάτων. Επιβεβαιώθηκε ότι για τη διατύπωση κριτηρίων για τη μη επιβλαβή συνύπαρξη του BPL με αδειοδοτημένες υπηρεσίες, πρέπει να εξετάζονται οι μετρήσεις και του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου λόγω της απροσδιόριστης μεταξύ τους σχέσης στο κοντινό πεδίο. Προτάθηκε:

- ένα πρότυπο όπως το NEC (Numerical Electromagnetics Code) να χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της ακτινοβολίας,
- η οδηγία ITU-R REC. P. 368 [99] ή το λογισμικό GRWAVE να χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της διάδοσης επίγειων κυμάτων που δημιουργούνται λόγω PLT,
- η οδηγία ITU-R REC. Ρ. 533 [100] να χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της διάδοσης ουράνιων κυμάτων που δημιουργούνται λόγω PLT,

 η οδηγία ITU-R REC. P. 372 [96] να χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των επιπέδων θορύβου που αναφέρονται στο εδάφιο §2.5.2.1.3.

Η Ομάδα Εργασίας 3L διατύπωσε ένα νέο ερώτημα και διαμόρφωσε μια νέα Ομάδα για να εργαστεί στο αντικείμενο των επικοινωνιών PLT. Το νέο ερώτημα εστίασε στις μεθόδους και τα πρότυπα πρόβλεψης που εφαρμόζονται για τα συστήματα PLT. Οι μελέτες εξετάζουν τους μηχανισμούς ακτινοβολίας των συστημάτων PLT, τα χρησιμοποιούμενα μοντέλα, την επίδραση του εδάφους και των χαρακτηριστικών των γραμμών μεταφοράς, τις μεθόδους συσσώρευσης του ακτινοβολούμενου πεδίου (methods of aggregation), μοντέλα για τον υπολογισμό της παρεμβολής και τη μέτρηση των ακτινοβολούμενων πεδίων στο κοντινό πεδίο.

2.5.2.2.4 ΙΤU-R Ομάδα Μελέτης 6

Στην ITU WP 6E, η Ευρωπαϊκή Ένωση Ευρυεκπομπών (European Broadcasting Union ή EBU) πρότεινε την αναθεώρηση των ορίων έντασης ακτινοβολούμενου πεδίου και της απόστασης μέτρησης που προσδιορίστηκαν σε προγενέστερη σχετική μελέτη της ITU-R. Η συγκεκριμένη πρόταση υπέδειξε τις ακόλουθες ατέλειες της προγενέστερης μελέτης:

- i) Για να εξετασθεί η επιτρεπόμενη ισχύς έγχυσης σημάτων PLT, πρέπει να χρησιμοποιηθεί ψηφιακή διαμόρφωση και απλή AM (Amplitude Modulation) διαμόρφωση.
- ii) Με βάση το σηματοθορυβικό λογο πρέπει να υπάρχει κατάλληλη κατανομή ισχύος μεταξύ των υποκαναλιών ώστε το σύστημα PLT να μη δημιουργεί παρεμβολές χωρίς να περιορίζει αισθητά τη χωρητικότητα του συστήματος PLT.
- iii) Η απόσταση μέτρησης των 3m που διευκρινίζεται στα Γερμανικά όρια NB30 (Πίνακας 2.7) είναι μεγάλη για αξιόπιστες μετρήσεις σε οικιακό περιβάλλον.

Επομένως, η EBU κατέληξε στο συμπέρασμα ότι τα Γερμανικά όρια NB30 είναι απαράδεκτα χαλαρά αφήνοντας μεγάλο περιθώριο για δημιουργία παρεμβολών και πρότειναν:

- η μέγιστη επιτρεπόμενη παρεμβολή PLT να είναι τουλάχιστον 10-20dB χαμηλότερη από αυτήν που προβλέπουν τα Γερμανικά όρια NB30 και
- η λήψη να γίνεται στο 1m αλλά και σε μεγαλύτερες αποστάσεις από την πηγή ακούσιας εκπομπής λόγω PLT.

2.6 Τεχνικές Άμβλυνσης των Επιδράσεων των Παρεμβολών από τα Δίκτυα BPL

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται ο τρόπος προσέγγισης του προβλήματος των παρεμβολών από δίκτυα BPL. Συγκεκριμένα, παρουσιάζονται ανάλυση, τρόποι επίλυσης και διάφορες τεχνικές μείωσης της παρεμβολής ή μετριασμού των προβλημάτων παρεμβολής [49], [50], [67].

2.6.1 Ελαχιστοποίηση του Επιπέδου Ισχύος

Η αποτελεσματικότερη μέθοδος για τη μείωση της παρεμβολής είναι η μείωση της εγχυόμενης ισχύος BPL στη γραμμή MT. Σύμφωνα με την FCC/P.15 [74], οι χειριστές συστημάτων BPL ενθαρρύνονται να χρησιμοποιούν την ελάχιστη ισχύ έγχυσης σήματος που απαιτείται για να πραγματοποιηθεί μετάδοση σήματος μέσω των γραμμών ηλεκτρικής ισχύος. Η χρήση του προσαρμοστικού ελέγχου της ισχύος έγχυσης στα διάφορα σημεία ενός δικτύου BPL έχει στόχο την εξασφάλιση στον πλέον απομακρυσμένο συνδρομητή ενός ελάχιστου αποδεκτού επιπέδου QoS και παράλληλα το μέγιστο επιτρεπτό επίπεδο EMI σε αδειοδοτημένες ραδιοϋπηρεσίες.

Ο περιορισμός της ισχύος έγχυσης είναι μία βασική δυνατότητα για τον περιορισμό των ακούσιων παρεμβολών λόγω μετάδοσης BPL αλλά απαιτεί τη χρήση επαναληπτών ανά μικρότερες αποστάσεις.

2.6.2 Αποφυγή των Τοπικά Χρησιμοποιούμενων Συχνοτήτων

Η μετατόπιση των συχνοτήτων των σημάτων BPL για να αποφευχθεί σε τοπικό επίπεδο η παρεμβολή σε πρωτεύουσες υπηρεσίες είναι επίσης αποτελεσματική τεχνική πρόληψης ή μετριασμού της παρεμβολής σύμφωνα και με το Σχήμα 2.8. Οι πλέον προηγμένες μέθοδοι περιλαμβάνουν το προσαρμοστικό φιλτράρισμα σε πραγματικό χρόνο (σύμφωνα με τις αρχές του cognitive radio) [101]-[104] που μπορεί να αποδειχθεί πολύ αποτελεσματικό για τη μείωση της παρεμβολής σε τοπικό επίπεδο. Προτείνεται η περαιτέρω μελέτη του αποκλεισμού της χρήσης BPL σε συγκεκριμένες στενές ζώνες συχνότητας, αλλά απαιτείται περαιτέρω έρευνα για να καθοριστεί αν αυτοί οι φασματικοί αποκλεισμοί μπορούν να καθορίζονται σε γεωγραφική βάση. Πάντως, τα συστήματα BPL δεν πρέπει να λειτουργούν σε ορισμένες ζώνες συχνότητας προκειμένου να προστατευθούν οι επικοινωνίες που σχετίζονται με καταστάσεις κινδύνου, συναγερμού, επείγουσας ανάγκης ή ασφάλειας σύμφωνα με τους αντίστοιχους κανονισμούς της ITU [105]. Τα ευρυζωνικά ενσύρματα δίκτυα μέσω γραμμών ηλεκτρικής ισχύος χρησιμοποιούν συχνότητες που σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να έχουν απονεμηθεί σε διάφορες ραδιοϋπηρεσίες όπως οι ζεύξεις ραδιοερασιτεχνών. Με την υπάρχουσα ρύθμιση και νομοθεσία καθορίζονται οι ζώνες συχνοτήτων που πρέπει να αποφεύγονται και αναφέρονται ως ζώνες αποκλεισμού (exclusion bands) [53].

Όπως θα φανεί από το Κεφάλαιο 7, σημαντική είναι η συμβολή της διατριβής αυτής στην κατεύθυνση της μείωσης των παρεμβολών με την αποφυγή τοπικά χρησιμοποιούμενων συχνοτήτων.

2.6.3 Διαφορική Μέθοδος Έγχυσης Σημάτων

Η χρήση της μεθόδου διαφορικής έγχυσης του σήματος RF σε δύο παράλληλες ηλεκτροφόρες γραμμές θα μπορούσε ενδεχομένως να μειώσει τις ακτινοβολούμενες εκπομπές BPL κατά τρόπο παρόμοιο με τις μη θωρακισμένες γραμμές μετάδοσης που αποτελούνται από ένα ζεύγος όμοιων αγωγών. Πρακτικά, όμως, η μη ισορροπημένη φύση των ζευγών ηλεκτροφόρων γραμμών περιορίζει την αποτελεσματικότητα αυτής της τεχνικής [106], [107].

2.6.4 Φίλτρα και Τερματισμοί Σημάτων

Η χρήση φίλτρων στις ηλεκτροφόρες γραμμές που απορροφούν αντί να ανακλούν τα σήματα RF σε θέσεις ασυνέχειας της σύνθετης αντίστασης ή σε σημεία τερματισμού μιας γραμμής μπορεί να μειώσει την περιττή ακτινοβολία από ηλεκτροφόρες γραμμές που μεταδίδουν σήματα BPL. Επί πλέον, όσον αφορά τις αρχιτεκτονικές τύπου A και Γ, η χρήση απορροφητικών φίλτρων στις γραμμές XT που εμποδίζει τα σήματα BPL να φθάσουν στις εγκαταστάσεις μη συνδρομητών μπορεί να μετριάσει ορισμένα προβλήματα παρεμβολής.

Η τεχνική της φασματικής φραγής χρησιμοποιείται για την αποφυγή μετάδοσης στις ζώνες αποκλεισμού. Οι φασματικές φραγές πραγματοποιούν διακοπή των υποκαναλιών OFDM που περιλαμβάνονται στις ζώνες αποκλεισμού και μπορεί να έχουν βάθος μέχρι και 100dB και, εφόσον είναι δυνατό, να είναι προγραμματιζόμενες. Έτσι, παρέχεται η δυνατότητα επιλεκτικών φραγών ανάλογα με τη ραδιοϋπηρεσία, τη νομοθεσία της χώρας και την περιοχή εγκατάστασης ενός συστήματος MT/BPL.

Όπως θα φανεί από το Κεφάλαιο 7, σημαντική είναι η συμβολή της διατριβής αυτής στην κατεύθυνση της μείωσης των παρεμβολών με τη χρήση τόσο φίλτρων που επιτυγχάνουν φασματικές φραγές όσο και κατάλληλων τερματισμών στις γραμμές.

2.6.5 Ο Κανόνας "Μια Ενεργή Συσκευή ανά Συχνότητα και Περιοχή"

Διάφορες υλοποιήσεις συστημάτων BPL βασίζονται στην τεχνική σύμφωνα με την οποία σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή μόνο μια συσκευή είναι ενεργή σε συγκεκριμένη συχνότητα σε συγκεκριμένη περιοχή. Τέτοιες τεχνικές αποσκοπούν στην ελάττωση ή και το μηδενισμό της πιθανότητας παρεμβολής BPL σε τοπικό επίπεδο. Εντούτοις, προκειμένου να αυξηθεί η συνολική χωρητικότητα των δικτύων BPL, είναι δυνατή η χρήση ανεξάρτητων συσκευών BPL στην ίδια συχνότητα σε διαφορετικές φάσεις της ίδιας διαδρομής τριφασικών ηλεκτροφόρων γραμμών. Με αυτόν τον τρόπο είναι δυνατή η πλήρης αξιοποίηση της υποδομής του ηλεκτρικού δικτύου, δηλαδή και των τριών φάσεων, σε σχέση με τη μερική αξιοποίηση της υποδομής όπως γίνεται σήμερα. Σε κάθε περίπτωση, οι μετρήσεις συμμόρφωσης πρέπει να γίνονται με βάση τη συνολική ακτινοβολία που προκαλείται από όλες τις συσκευές BPL που λειτουργούν στο ίδιο εύρος συχνοτήτων επί του δικτύου BPL σύμφωνα με την FCC/P.15 [74]. Αυτό επιβάλλει την ορθή αξιοποίηση της εγχυόμενης ισχύος στις τρεις φάσεις.

2.6.6 Συνετή Επιλογή Φερουσών Σήματος

Λόγω της επιλεκτικής συμπεριφοράς ως προς τη συχνότητα που οφείλεται στα τοπολογικά και ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των διαφόρων τμημάτων των γραμμών MT, είναι δυνατό να προσδιοριστούν οι φασματικές ζώνες συχνότητας μέσα στο εύρος 1.7-88MHz που επιτρέπουν υψηλότερα επίπεδα ισχύος έγχυσης χωρίς να προκαλούν επιβλαβή EMI σε άλλες υπηρεσίες. Συγκεκριμένα, σε κάθε περίπτωση, είτε κατά τη διάρκεια της εγκατάστασης είτε κατά τη διάρκεια της λειτουργίας ενός συστήματος BPL, είναι δυνατός ο αποκλεισμός ζωνών συχνοτήτων όπου εμφανίζονται υψηλά επίπεδα ακτινοβολίας. Οι μελέτες της NTIA με στόχο τον προσδιορισμό τέτοιων ζωνών [49], [50] έχουν εξετάσει μόνο μερικώς τη συνετή επιλογή φερουσών σήματος (judicious signal carrier choice). Λιγότερο από το 50% των φασματικών ζωνών στο εύρος 1.7-88MHz παρουσιάζουν χαρακτηριστικά χαμηλών επιπέδων ακτινοβολίας. Για την εφαρμογή αυτής της μεθόδου απαιτούνται λεπτομερείς μετρήσεις σε κάθε περιοχή εγκαταστάσεων BPL. Πάντως, τα αποτελέσματα αυτών των μετρήσεων αναμένεται να επιτρέψουν τη λειτουργία των συσκευών BPL υπό υψηλότερα όρια εγχυόμενης ισχύος.

2.6.7 Διατήρηση Ενιαίου Σημείου Ελέγχου

Για να διευκολυνθεί η ταχεία συλλογή δεδομένων όσον αφορά τις πραγματικές περιπτώσεις παρεμβολής, πρέπει να χρησιμοποιείται ένα σημείο ελέγχου σε κάθε περιοχή όπου βρίσκονται σε λειτουργία συσκευές BPL. Το σημείο ελέγχου αυτό θα αποτελεί επίσης και σημείο επαφής για τον έλεγχο των παρεμβολών από δίκτυα BPL σε αδειοδοτημένα ραδιοσυστήματα της περιοχής.

2.6.8 Πρόσβαση στις Πληροφορίες Ραδιοϋπηρεσιών Βασισμένη στο Διαδίκτυο

Η γνώση ποιά αδειοδοτημένα ραδιοσυστήματα ενδεχομένως λειτουργούν στο τοπικό περιβάλλον ενός συστήματος BPL μπορεί να βοηθήσει στην επιλογή των υποκαναλιών, των αντιστοίχων επιπέδων ισχύος έγχυσης και άλλων τεχνικών παραμέτρων που ελαχιστοποιούν την παρεμβολή λόγω μετάδοσης σημάτων BPL. Πρέπει να διερευνηθεί περαιτέρω ποιά στοιχεία της βάσης δεδομένων εκχώρησης συχνοτήτων πρέπει να είναι διαθέσιμα μέσω ενός διαδραστικού μηχανισμού βασισμένου στο Διαδίκτυο. Προσπάθεια προς αυτήν την κατεύθυνση έχει κάνει ήδη η FCC, που έχει καταστήσει διαθέσιμη στο Διαδίκτυο βάση δεδομένων που περιλαμβάνει τις εκχωρήσεις σε συστήματα BPL που βρίσκονται σε λειτουργία [49], [50], [74].

2.6.9 Καταγραφή Εγκατάστασης και Εξοπλισμού BPL

Μέσω της καταγραφής των προγραμματισμένων ενεργειών ανάπτυξης του BPL σε μια κεντρική, δημόσια προσιτή βάση δεδομένων, οι χειριστές των συστημάτων BPL παρέχουν στους τοπικούς ραδιοχρήστες τις πληροφορίες που χρειάζονται ώστε να ειδοποιούν για ενδεχόμενα προβλήματα παρεμβολής. Η βάση δεδομένων θα μπορούσε επίσης να βοηθήσει στη διάγνωση των περιπτώσεων ύποπτης παρεμβολής.

2.6.10 Γνωστικά Συστήματα Ραδιοεπικοινωνιών

Οι γνωστικές ραδιοεπικοινωνίες (cognitive radio) έχουν προταθεί ως μέσο αποδοτικότερης και αποτελεσματικότερης χρησιμοποίησης του φάσματος με την αξιοποίηση των αχρησιμοποίητων συχνοτήτων σε δυναμικά μεταβαλλόμενο περιβάλλον. Δηλαδή, προσφέρουν τη δυνατότητα ευκαιριακής κατάληψης ζωνών ραδιοσυχνοτήτων από δευτερεύοντες χρήστες όπως είναι τα συστήματα BPL στους οποίους δεν έχει εκχωρηθεί σταθερή ζώνη συχνοτήτων. Συνεπώς, οι γνωστικές ραδιοεπικοινωνίες αποτελούν μια καινούργια φιλοσοφία σχεδίασης που περιλαμβάνει έξυπνη ανίχνευση φασματικών κενών και, στη συνέχεια, καθορισμό και προσαρμογή των παραμέτρων μετάδοσης μιας ομάδας δευτερογενών χρηστών. Προς αυτήν την κατεύθυνση, εξετάζονται λύσεις για την τεχνολογία BPL βασισμένες στις αρχές των γνωστικών συστημάτων ραδιοεπικοινωνιών (cognitive radio systems) [101]-[118].

2.7 Περίληψη

Η τεχνολογία BPL έχει αρχίσει να εφαρμόζεται πειραματικά σε ορισμένες χώρες, ενώ άλλες χώρες έχουν αναβάλει την ευρεία εφαρμογή της μέχρι να ολοκληρωθούν περαιτέρω μελέτες παρεμβολής. Άλλες χώρες έχουν αναβάλει την έγκριση λειτουργίας των συστημάτων BPL μετά από την εμπειρία τους λόγω προβλημάτων παρεμβολής. Διάφορα όρια εκπομπής έχουν υιοθετηθεί ή έχουν προταθεί για την αξιολόγηση σε διεθνή, εθνική και τοπική βάση. Οι περισσότερες μελέτες έχουν προσανατολιστεί στο να καθορίζουν αν θα εμφανιστεί παρεμβολή με κριτήριο τα ποικιλοτρόπως προτεινόμενα όρια. Ως προς το ζητούμενο αυτό, η παρούσα διδακτορική διατριβή έχει προσανατολιστεί στο να διατυπώσει λύση που θα εξυπηρετεί την τεχνολογία BPL και ταυτόχρονα θα διαχειρίζεται κατάλληλα την παρεμβολή σε/από αδειοδοτημένες ραδιοϋπηρεσίες.

Οι τεχνικές πληροφορίες και οι αναλύσεις που υποβλήθηκαν στην FCC NOI περιλαμβάνουν διάφορες παρατηρήσεις. Πράγματι, τα σήματα BPL ακτινοβολούν ακούσια από τις ηλεκτροφόρες γραμμές, αν και υπάρχει ουσιαστική διαφωνία ως προς το μέγεθος των εκπομπών και τη δυνατότητά τους για πρόκληση παρεμβολών σε αδειοδοτημένες ραδιοϋπηρεσίες. Οι αναλύσεις δείχνουν ότι η μέγιστη ένταση πεδίου λόγω της ακούσιας BPL ακτινοβολίας εμφανίζεται υπεράνω και καθέτως προς τον ορίζοντα των ηλεκτροφόρων γραμμών. Το πλαίσιο που θέτει το FCC/P.15 για τις τεχνικές μέτρησης μπορεί να υποτιμήσει σημαντικά τη μέγιστη ένταση πεδίου που

δημιουργείται από τα συστήματα BPL. Αυτό οφείλεται στη χρησιμοποίηση βροχοκεραίας για μετρήσεις στο κοντινό πεδίο, την εκτέλεση των μετρήσεων κοντά στο επίπεδο του εδάφους (π.χ. 1m) και τη μέτρηση των εκπομπών στην εγγύς περιοχή των πηγών ακούσιας BPL ακτινοβολίας.

κεφαλαίο *ΑΝΑΛΥΣΗ ΓΡΑΜΜΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΠΟΛΛΩΝ ΑΓΩΓΩΝ*

3.1 Εισαγωγή στην Ανάλυση ΜΤL

Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται η λύση των διαφορικών εξισώσεων για γραμμές μεταφοράς *n*+1 αγωγών ή γραμμές MTL (Multiconductor Transmission Lines). Χρησιμοποιώντας τη θεωρία μητρών, η διάδοση σε γραμμές MTL εξετάζεται κατά τρόπο παρόμοιο με αυτόν της διάδοσης σε γραμμές μεταφοράς δύο αγωγών. Η μέθοδος που χρησιμοποιείται για να λυθούν οι εξισώσεις MTL είναι η αποσύζευξή τους με τη χρήση μετασχηματισμών ομοιότητας.

3.2 Εξισώσεις Γραμμών Μεταφοράς στην Ημιτονοειδή Μόνιμη Κατάσταση

Υποθέτοντας ότι η χρονική μεταβολή των πηγών είναι ημιτονοειδής οι τάσεις και τα ρεύματα γραμμής κατά μήκος των αγωγών μιας γραμμής μεταφοράς πολλών αγωγών γράφονται υπό τη μορφή

$$V_{i}(z,t) = |V_{i}(z)|\cos(2\pi f t + \theta_{i}(z))$$
(3.1.1)

$$I_{i}(z,t) = |I_{i}(z)|\cos(2\pi f t + \phi_{i}(z))$$
(3.1.2)

όπου

$$V_{i}(z) = |V_{i}(z)|e^{j\theta_{i}(z)}$$
(3.2.1)

$$I_{i}(z) = |I_{i}(z)|e^{j\phi_{i}(z)}$$
(3.2.2)

οι φασιθέτες των αντίστοιχων μεγεθών και i = 1, ..., n όπου n το πλήθος των αγωγών.

Λόγω της αρμονικής χρονικής μεταβολής $e^{j2\pi t}$, η παραγώγιση ως προς το χρόνο t ισοδυναμεί με πολλαπλασιασμό με $j2\pi f$ οπότε οι γνωστές κυματικές εξισώσεις που συνδέουν τα κύματα της τάσης και του ρεύματος σε μια γραμμή MTL γράφονται [119]-[122]

$$\frac{d}{dz}\mathbf{V}(z) = -\mathbf{Z}\mathbf{I}(z) \tag{3.3.1}$$

$$\frac{d}{dz}\mathbf{I}(z) = -\mathbf{Y}\mathbf{V}(z) \tag{3.3.2}$$

όπου

$$\mathbf{V}(z) = \begin{bmatrix} V_1(z) & \cdots & V_i(z) & \cdots & V_n(z) \end{bmatrix}^T$$
(3.4.1)

$$\mathbf{I}(z) = \begin{bmatrix} I_1(z) & \cdots & I_n(z) \end{bmatrix}^T$$
(3.4.2)

$$\mathbf{Z} = \mathbf{R} + j2\pi f \mathbf{L} \tag{3.5.1}$$

$$\mathbf{Y} = \mathbf{G} + j2\pi f \mathbf{C} \tag{3.5.2}$$

και με $[\cdot]^T$ συμβολίζεται η ανάστροφη μιας μήτρας. Σε γραμμή μεταφοράς που αποτελείται από *n* αγωγούς και ένα αγωγό αναφοράς, $\mathbf{V}(z)$ και $\mathbf{I}(z)$ είναι οι $n \times 1$ μήτρες τάσης και ρεύματος γραμμής αντίστοιχα. **Z**, **Y**, **R**, **L**, **G** και **C** είναι οι $n \times n$ μήτρες σύνθετης αντίστασης, σύνθετης αγωγιμότητας, αντίστασης, αυτεπαγωγής, αγωγιμότητας και χωρητικότητας ανά μονάδα μήκους, αντίστοιχα. Οι παράμετροι **R**, **L**, **G** και **C** θεωρείται ότι δεν μεταβάλλονται χρονικά. Οι (3.3.1) και (3.3.2) είναι οι συζευγμένες διαφορικές εξισώσεις πρώτης τάξης μιας γραμμής μεταφοράς MTL και μπορούν να γραφούν υπό την ακόλουθη συμπαγή μορφή

$$\frac{d}{dz}\mathbf{X}(z) = \mathbf{A}\mathbf{X}(z)$$
(3.6)

όπου

$$\mathbf{X}(z) = \begin{bmatrix} \mathbf{V}(z) \\ \mathbf{I}(z) \end{bmatrix}$$
(3.7.1)

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & -\mathbf{Z} \\ -\mathbf{Y} & \mathbf{0} \end{bmatrix}$$
(3.7.2)

μήτρες διαστάσεων $2n \times 1$ και διαστάσεων $2n \times 2n$, αντίστοιχα. Οι εξισώσεις (3.6) είναι παρόμοιες σε μορφή με τις εξισώσεις κατάστασης (state-variable equations) που απαντώνται στη θεωρία δικτύων που περιλαμβάνουν συγκεντρωμένα στοιχεία [120]. Η διαφορά είναι ότι, ενώ στις εξισώσεις κατάστασης ανεξάρτητη μεταβλητή είναι ο χρόνος t, στην (3.6) ανεξάρτητη μεταβλητή είναι η θέση παρατήρησης των κυμάτων της τάσης και του ρεύματος επί της γραμμής z. Λόγω της άμεσης αυτής αντιστοιχίας, για τη λύση των εξισώσεων MTL θα γίνει προσαρμογή των γνωστών λύσεων των εξισώσεων κατάστασης αντικαθιστώντας τη χρονική μεταβλητή t των εξισώσεων κατάστασης με τη θέση παρατήρησης των ΗΜ κυμάτων επί της γραμμής z.

Διαφορίζοντας τις (3.3.1) και (3.3.2) ως προς z και αντικαθιστώντας κατάλληλα, η περιγραφή των κυμάτων τάσης και ρεύματος σε μια γραμμή MTL καταλήγει στη γνωστή εναλλακτική περιγραφή μέσω δεύτερης τάξης διαφορικών εξισώσεων γραμμών MTL

$$\frac{d^2}{dz^2}\mathbf{V}(z) = \mathbf{Z}\mathbf{Y}\mathbf{V}(z)$$
(3.8)

$$\frac{d^2}{dz^2}\mathbf{I}(z) = \mathbf{Y}\mathbf{Z}\mathbf{I}(z)$$
(3.9)

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι γνωστές λύσεις για την περίπτωση γραμμής μεταφοράς δύο αγωγών που απεικονίζεται στο Σχήμα 3.1α. Η διεύθυνση διάδοσης σε γραμμές μεταφοράς κάθε είδους ταυτίζεται με τον άξονα z. Οι λύσεις αυτές θα επεκταθούν για τη λύση του προβλήματος διάδοσης σε γραμμές MTL με περισσότερους των δύο αγωγών [61], [121].

Σε γραμμή μεταφοράς δύο αγωγών οι ανά μονάδα μήκους μήτρες παραμέτρων εκφυλλίζονται σε βαθμωτά μεγέθη, *R*, *L*, *G* και *C* και οι αποσυζευγμένες δεύτερης τάξης διαφορικές εξισώσεις (3.8) και (3.9) γράφονται

$$\frac{d^2}{dz^2}V(z) = \gamma^2 V(z) \tag{3.10}$$

$$\frac{d^2}{dz^2}I(z) = \gamma^2 I(z)$$
(3.11)

με

$$\gamma = [ZY]^{1/2} = [(R + j2\pi fL)(G + j2\pi fC)]^{1/2} = \alpha(f) + j\beta(f)$$
(3.12)

τη μιγαδική σταθερά διάδοσης, ο α είναι ο συντελεστής εξασθένησης και β η σταθερά φάσης. Οι γενικές λύσεις των (3.10) και (3.11) είναι

$$V(z) = V_{\pi}e^{-\varkappa} + V_{\alpha}e^{+\varkappa}$$
(3.13)

$$I(z) = I_{\pi} e^{-\gamma z} + I_{\alpha} e^{+\gamma z} = Z_{C}^{-1} \left(V_{\pi} e^{-\gamma z} - V_{\alpha} e^{+\gamma z} \right)$$
(3.14)

όπου

$$Z_{C} = (Z/Y)^{1/2} = [(R + j2\pi fL)/(G + j2\pi fC)]^{1/2}$$
(3.15)

η χαρακτηριστική αντίσταση της γραμμής. Οι σταθερές V_{π} , V_{α} , I_{π} και I_{α} είναι προσδιοριστέες μιγαδικές ποσότητες που προσδιορίζονται με βάση τις συνθήκες στα δύο άκρα της γραμμής.

Οι γενικές λύσεις που περιγράφονται από τις (3.13), (3.14) μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να συνδέσουν τα κύματα της τάσης και του ρεύματος στο άκρο (είσοδο) z = 0 και σε κάποιο σημείο z της γραμμής μέσω της ακόλουθης μητρικής σχέσης

$$\begin{bmatrix} V(z) \\ I(z) \end{bmatrix} = \mathbf{\Phi}^{-1}(z) \begin{bmatrix} V(0) \\ I(0) \end{bmatrix} = \mathbf{\Phi}^{inv}(z) \begin{bmatrix} V(0) \\ I(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_{11}^{inv}(z) & \phi_{12}^{inv}(z) \\ \phi_{21}^{inv}(z) & \phi_{22}^{inv}(z) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V(0) \\ I(0) \end{bmatrix}$$
(3.16)

όπου $\Phi(z)$ είναι η μήτρα ABCD και $\Phi^{inv}(z)$ η μήτρα αλυσιδωτής σύνδεσης (chain parameter matrix) [123]-[132]. Θέτοντας z = L στην (3.16), η μήτρα αλυσιδωτής σύνδεσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να συνδέσει την τάση και το ρεύμα στο άκρο (είσοδο) z = 0 και στο άκρο (έξοδο) z = L

$$\begin{bmatrix} V(L) \\ I(L) \end{bmatrix} = \mathbf{\Phi}^{inv} \left(L \right) \begin{bmatrix} V(0) \\ I(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_{11}^{inv} \left(L \right) & \phi_{12}^{inv} \left(L \right) \\ \phi_{21}^{inv} \left(L \right) & \phi_{22}^{inv} \left(L \right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V(0) \\ I(0) \end{bmatrix}$$
(3.17)

Η μήτρα αλυσιδωτής σύνδεσης είναι κατάλληλη για την περιγραφή της γραμμής ως διθύρου δικτύου με αναφορά τα άκρα της γραμμής όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1β.

Εφαρμόζοντας τις γενικές λύσεις (3.13), (3.14) για τυχόν σημείο z επί της γραμμής και για το άκρο z = 0 προκύπτουν οι σχέσεις

$$\begin{bmatrix} V(z) \\ I(z) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{-\varkappa} & e^{\varkappa} \\ Z_C^{-1}e^{-\varkappa} & -Z_C^{-1}e^{\varkappa} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{\pi} \\ V_{\alpha} \end{bmatrix}$$
(3.18)

$$\begin{bmatrix} V(0) \\ I(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ Z_C^{-1} & -Z_C^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{\pi} \\ V_{\alpha} \end{bmatrix}$$
(3.19)

Απαλείφοντας το διάνυσμα των προσδιοριστέων σταθερών $\begin{bmatrix} V_{\pi} & V_{\alpha} \end{bmatrix}^{T}$ ύστερα από τη διαδικασία αντικατάστασης της (3.19) στην (3.18), η μήτρα $\mathbf{\Phi}^{inv}(z)$ προκύπτει

$$\Phi^{inv}(z) = \begin{bmatrix} \phi_{11}^{inv}(z) & \phi_{12}^{inv}(z) \\ \phi_{21}^{inv}(z) & \phi_{22}^{inv}(z) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma z) & -Z_c \sinh(\gamma z) \\ -Z_c^{-1} \sinh(\gamma z) & \cosh(\gamma z) \end{bmatrix}$$
(3.20)

Στη γενική περίπτωση που απεικονίζεται στο Σχήμα 3.1α, η γραμμή μεταφοράς στο άκρο z = L τερματίζεται σε σύνθετη αντίσταση Z_L ενώ το άκρο z = 0 διεγείρεται



Σχήμα 3.1: (α) Γεωμετρία και μεγέθη γραμμής μεταφοράς δύο αγωγών και (β) η γραμμή μεταφοράς δύο αγωγών μήκους *L* ως δίθυρο δίκτυο.

από ανεξάρτητη ημιτονοειδή πηγή τάσης με φασιθέτη E_g και σύνθετη εσωτερική αντίσταση Z_g . Οι σχέσεις που προκύπτουν λαμβάνοντας υπόψη τις συνθήκες τερματισμού στα άκρα της γραμμής είναι

$$V(0) = E_g - Z_g I(0)$$
(3.21)

$$V(L) = Z_L I(L) \tag{3.22}$$

Αντικαθιστώντας τις (3.20), (3.21), (3.22) στην (3.16), προκύπτουν οι εκφράσεις της τάσης, του ρεύματος, της αντίστασης εισόδου και της μέσης ισχύος στη θέση z της γραμμής

$$V(z) = E_g \frac{Z_C}{Z_C + Z_g} \frac{e^{-\gamma z} + \Gamma_L e^{\gamma(z-2L)}}{1 - \Gamma_g \Gamma_L e^{-2\gamma L}}$$
(3.23)

$$I(z) = E_g \frac{1}{Z_C + Z_g} \frac{e^{-\gamma z} - \Gamma_L e^{\gamma(z-2L)}}{1 - \Gamma_g \Gamma_L e^{-2\gamma L}}$$
(3.24)

$$Z_{in}(z) = Z_C \frac{1 + \Gamma_L e^{-2\gamma L} e^{2\gamma z}}{1 - \Gamma_L e^{-2\gamma L} e^{2\gamma z}} = Z_C \frac{Z_L + Z_C \tanh\{\gamma(L-z)\}}{Z_L + Z_C \tanh\{\gamma(L-z)\}}$$
(3.25)

$$P_{av}(z) = \frac{1}{2} \operatorname{Re}\{V(z)I^{*}(z)\} = \frac{1}{2} \frac{|V_{\pi}|^{2}}{Z_{C}} \left(1 - |\Gamma_{L}|^{2}\right)$$
(3.26)

όπου

$$\Gamma_g = \frac{Z_g - Z_C}{Z_g + Z_C} \tag{3.27}$$

$$\Gamma_L = \frac{Z_L - Z_C}{Z_L + Z_C} \tag{3.28}$$

οι συντελεστές ανάκλασης στην είσοδο και τον τερματισμό της γραμμής και με [·]^{*} απεικονίζεται η συζυγής μιας μήτρα.

3.3 Η Γραμμή Μεταφοράς *n*+1 Αγωγών

Στο παρόν εδάφιο παρουσιάζεται η λύση της γενικής περίπτωσης γραμμής MTL, δηλαδή γραμμής μεταφοράς *n*+1 αγωγών, ως γενίκευση της λύσης της γραμμής μεταφοράς δύο αγωγών με χρήση μητρών κατάλληλης μορφής.

3.3.1 Αποσύζευξη των Συζευγμένων Εξισώσεων Γραμμών MTL με Χρήση Μετασχηματισμού Ομοιότητας

Η μέθοδος του μετασχηματισμού ομοιότητας (similarity transformation) είναι η συχνότερα χρησιμοποιούμενη μέθοδος για την αποσύζευξη και επίλυση των συζευγμένων εξισώσεων γραμμών [119], [133]-[136].

Κατ'αναλογία προς τη γραμμή δύο αγωγών που υποστηρίζει τη διάδοση ενός ζεύγους κυμάτων που οδεύουν επί της γραμμής με αντίθετες φορές, η γραμμή MTL n+1 αγωγών υποστηρίζει τη διάδοση n προσπιπτόντων και n ανακλώμενων κυμάτων με αντίστοιχες μιγαδικές σταθερές διάδοσης. Τα κύματα αυτά μπορούν να περιγραφούν μέσω 2n συζευγμένων μερικών διαφορικών εξισώσεων που συνδέουν τα κύματα της τάσης $V_i(z,t)$ και τα κύματα του ρεύματος $I_i(z,t)$, i = 1,2,...,n. Κάθε ζεύγος κυμάτων οδευόντων κατά αντίθετες κατευθύνσεις με την ίδια μιγαδική σταθερά διάδοσης αναφέρεται ως ρυθμός διάδοσης (propagation mode). Για παράδειγμα, στην περίπτωση της εναέριας τοπολογίας MT/BPL –που αναλύεται λεπτομερώς στο Κεφάλαιο 5– όπου υπάρχουν τρεις αγωγοί και το έδαφος υποστηρίζονται τρεις ρυθμοί, ενώ στην περίπτωση της υπόγειας τοπολογίας MT/BPL όπου υπάρχουν πέντε αγωγοί και το έδαφος υποστηρίζονται πέντε ρυθμοί [119], [134]-[136].

Η εφαρμογή του μετασχηματισμού ομοιότητας βασίζεται στον ορισμό των μητρών τάσεων και ρευμάτων ρυθμών μέσω των σχέσεων

$$\mathbf{V}(z) = \mathbf{T}_V \mathbf{V}^m(z) \tag{3.29}$$

$$\mathbf{I}(z) = \mathbf{T}_{I} \mathbf{I}^{m}(z) \tag{3.30}$$

Oi $n \times n$ μιγαδικές μήτρες \mathbf{T}_{v} και \mathbf{T}_{I} χρησιμοποιούνται για το μετασχηματισμό ομοιότητας μεταξύ των τάσεων και ρευμάτων γραμμής (line voltages/currents), $\mathbf{V}(z)$ και $\mathbf{I}(z)$, και των τάσεων και ρευμάτων ρυθμών (modal voltages/currents), $\mathbf{V}^{m}(z)$ και $\mathbf{I}^{m}(z)$, αντίστοιχα. Για να έχει νόημα ο μετασχηματισμός ομοιότητας πρέπει οι μήτρες μετασχηματισμού να μπορούν να αντιστραφούν, δηλαδή να υπάρχουν οι μήτρες \mathbf{T}_{v}^{-1} και \mathbf{T}_{I}^{-1} . Αντικαθιστώντας τις (3.29) και (3.30) στις συζευγμένες εξισώσεις γραμμών MTL (3.6) προκύπτουν οι συζευγμένες εξισώσεις ρυθμών MTL υπό την ακόλουθη μητρική μορφή

$$\frac{d}{dz} \begin{bmatrix} \mathbf{V}^m \\ \mathbf{I}^m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & -\mathbf{T}_V^{-1} \mathbf{Z} \mathbf{T}_I \\ -\mathbf{T}_I^{-1} \mathbf{Y} \mathbf{T}_V & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}^m \\ \mathbf{I}^m \end{bmatrix}$$
(3.31)

Μέσω της (3.31) συνδέονται οι τάσεις και τα ρεύματα των ρυθμών σε οποιοδήποτε σημείο της γραμμής.

Στόχος του μετασχηματισμού ομοιότητας είναι με κατάλληλη επιλογή των μητρών μετασχηματισμού \mathbf{T}_{V} και \mathbf{T}_{I} να καταστήσει διαγώνιες τις μήτρες $\mathbf{T}_{V}^{-1}\mathbf{Z}\mathbf{T}_{I}$ και $\mathbf{T}_{I}^{-1}\mathbf{Y}\mathbf{T}_{V}$ [119], [135], [136], δηλαδή

$$\mathbf{T}_{V}^{-1}\mathbf{Z}\mathbf{T}_{I} = \mathbf{z} = diag\{z_{i}\}, \ i = 1, \dots, n$$

$$(3.32)$$

$$\mathbf{T}_{I}^{-1}\mathbf{Y}\mathbf{T}_{V} = \mathbf{y} = diag\{y_{i}\}, \ i = 1, \dots, n$$
(3.33)

όπου $diag\{\cdot\}$ συμβολίζει μια $n \times n$ διαγώνια μήτρα. Τότε, οι εξισώσεις ρυθμών MTL αποσυζευγνύονται και έρχονται στη μορφή

$$\frac{d}{dz}V_{i}^{m}(z) = -z_{i}I_{i}^{m}(z), \ i = 1,...,n$$
(3.34)

$$\frac{d}{dz}I_{i}^{m}(z) = -y_{i}V_{i}^{m}(z), \ i = 1,...,n$$
(3.35)

Εφόσον είναι δυνατός ο προσδιορισμός δύο $n \times n$ μητρών \mathbf{T}_v και \mathbf{T}_l έκαστη των οποίων διαγωνιοποιεί τις ανά μονάδα μήκους μήτρες \mathbf{Z} και \mathbf{Y} , αντίστοιχα, οι τάσεις και τα ρεύματα ρυθμών προκύπτουν ως λύσεις n ζευγών αποσυζευγμένων, πρώτης τάξης διαφορικών εξισώσεων όπως και στην περίπτωση των γραμμών μεταφοράς δύο αγωγών. Επομένως, προσδιορίζοντας καταλλήλως το μετασχηματισμό ομοιότητας που διαγωνιοποιεί τις ανά μονάδα μήκους μήτρες \mathbf{Z} και \mathbf{Y} επιτυγχάνεται η αποσύζευξη και λύση των n αποσυζευγμένων εξισώσεων ρυθμών ΜΤL.

Η εφαρμογή του μετασχηματισμού ομοιότητας των (3.29) και (3.30) επί των αποσυζευγμένων δεύτερης τάξης εξισώσεων γραμμών MTL οδηγεί στις αποσυζευγμένες δεύτερης τάξης εξισώσεις που περιγράφουν την τάση και το ρεύμα των ρυθμών που μπορεί να υποστηρίξει μια γραμμή μεταφοράς *n*+1 αγωγών δηλαδή

$$\frac{d^2}{dz^2} \mathbf{V}^m(z) = \mathbf{T}_V^{-1} \mathbf{Z} \mathbf{Y} \mathbf{T}_V \mathbf{V}^m(z) = \mathbf{T}_V^{-1} \mathbf{Z} \mathbf{T}_I \mathbf{T}_I^{-1} \mathbf{Y} \mathbf{T}_V \mathbf{V}^m(z) = \mathbf{z} \mathbf{y} \mathbf{V}^m(z)$$
(3.36)

$$\frac{d^2}{dz^2} \mathbf{I}^m(z) = \mathbf{T}_I^{-1} \mathbf{Y} \mathbf{Z} \mathbf{T}_I \mathbf{I}^m(z) = \mathbf{T}_I^{-1} \mathbf{Y} \mathbf{T}_V \mathbf{T}_V^{-1} \mathbf{Z} \mathbf{T}_I \mathbf{I}^m(z) = \mathbf{y} \mathbf{z} \mathbf{I}^m(z)$$
(3.37)

όπου έχει τεθεί $\mathbf{z} = \mathbf{T}_V^{-1} \mathbf{Z} \mathbf{T}_I$, $\mathbf{y} = \mathbf{T}_I^{-1} \mathbf{Y} \mathbf{T}_V$.

Επειδή οι μήτρες Ζ και Υ είναι συμμετρικές ισχύει

$$\left(\mathbf{T}_{V}^{-1}\mathbf{Z}\mathbf{Y}\mathbf{T}_{V}\right)^{T} = \left(\mathbf{T}_{V}\right)^{T}\left(\mathbf{Y}\right)^{T}\left(\mathbf{Z}\right)^{T}\left(\mathbf{T}_{V}^{-1}\right)^{T} = \left(\mathbf{T}_{V}\right)^{T}\mathbf{Y}\mathbf{Z}\left(\mathbf{T}_{V}^{-1}\right)^{T}$$
(3.38)

Για να είναι δυνατή η αποσύζευξη των (3.36) και (3.37) πρέπει, με κατάλληλη επιλογή των μητρών μετασχηματισμού \mathbf{T}_{v} και \mathbf{T}_{I} , οι μήτρες $\mathbf{z}\mathbf{y}$ και $\mathbf{y}\mathbf{z}$ να καταστούν διαγώνιες. Με την υπόθεση ότι οι μήτρες \mathbf{z} και \mathbf{y} είναι διαγώνιες το γινόμενό τους να μπορεί να αντιστραφεί. Συγκρίνοντας την (3.38) με την (3.37) λαμβάνοντας υπόψη ότι οι συμμετρικές μήτρες $\mathbf{Z}\mathbf{Y}$ και $\mathbf{Y}\mathbf{Z}$ έχουν τις ίδιες ιδιοτιμές, δηλαδή $\mathbf{z}\mathbf{y} = \mathbf{y}\mathbf{z}$, προκύπτει

$$\mathbf{T}_{I}^{T} = \mathbf{T}_{V}^{-1} \tag{3.39}$$

Για να διαγωνιοποιηθεί η μήτρα zy (αντίστοιχα η yz) και να αποσυζευχθούν έτσι οι (3.36) (αντίστοιχα οι (3.37)) πρέπει να διαγωνιοποιηθεί το γινόμενο ZY (αντίστοιχα το γινόμενο YZ). Σε συμφωνία με την [119] επιλέγεται η αποσύζευξη της (3.37) Θέτοντας

$$\mathbf{T} = \mathbf{T}_{I} \tag{3.40}$$

όπου Τ ο πίνακας που διαγωνιοποιεί τη μήτρα ΥΖ προκύπτουν

$$\frac{d^2}{dz^2} \mathbf{I}^m(z) = \mathbf{T}^{-1} \mathbf{Y} \mathbf{Z} \mathbf{T} \mathbf{I}^m(z) = \mathbf{\gamma}^2 \mathbf{I}^m(z)$$
(3.41)

$$\boldsymbol{\gamma}^2 = \mathbf{T}^{-1} \mathbf{Y} \mathbf{Z} \mathbf{T} = diag \left\{ \boldsymbol{\gamma}_i^2 \right\}, \ i = 1, \dots, n$$
(3.42)

Η γενική λύση των αποσυζευγμένων εξισώσεων (3.41) είναι

$$\mathbf{I}^{m}(z) = e^{-\gamma z} \mathbf{I}_{\pi}^{m} - e^{\gamma z} \mathbf{I}_{\alpha}^{m}$$
(3.43)

όπου

$$e^{\pm\gamma z} = diag \{ e^{\pm\gamma_i z} \}, \ i = 1, ..., n$$
 (3.44)

$$\mathbf{I}_{\alpha}^{m} = \begin{bmatrix} I_{1,\alpha}^{m} & \cdots & I_{i,\alpha}^{m} & \cdots & I_{n,\alpha}^{m} \end{bmatrix}^{\mathbf{r}}$$
(3.45)

Τα ρεύματα γραμμής προκύπτουν πολλαπλασιάζοντας τη μήτρα ρευμάτων ρυθμών με τη μήτρα μετασχηματισμού Τ, δηλαδή

$$\mathbf{I}(z) = \mathbf{T}\mathbf{I}^{m}(z) = \mathbf{T}\left(e^{-\gamma z}\mathbf{I}_{\pi}^{m} - e^{\gamma z}\mathbf{I}_{\alpha}^{m}\right)$$
(3.46)

Λαμβάνοντας υπόψη την (3.39), οι αποσυζευγμένες δεύτερης τάξης διαφορικές εξισώσεις των τάσεων ρυθμών γράφονται

$$\frac{d^2}{dz^2} \mathbf{V}^m(z) = \mathbf{T}_V^{-1} \mathbf{Z} \mathbf{Y} \mathbf{T}_V^{-1} \mathbf{V}^m(z) = \mathbf{T}^T \mathbf{Z} \mathbf{Y} \left(\mathbf{T}^T \right)^{-1} \mathbf{V}^m(z) = \gamma^2 \mathbf{V}^m(z)$$
(3.47)

με γενική λύση της μορφής

$$\mathbf{V}^{m}(z) = e^{-\gamma z} \mathbf{V}^{m\pi} + e^{\gamma z} \mathbf{V}^{m\alpha}$$
(3.48)

Οι τάσεις γραμμής προκύπτουν πολλαπλασιάζοντας τη μήτρα των τάσεων ρυθμών της (3.48) με τη μήτρα $\mathbf{T}_{V} = \left(\mathbf{T}_{I}^{-1}\right)^{T} = \left(\mathbf{T}^{-1}\right)^{T}$ δηλαδή

$$\mathbf{V}(z) = \left(\mathbf{T}^{-1}\right)^{T} \left(e^{-\gamma z} \mathbf{V}_{\pi}^{m} + e^{\gamma z} \mathbf{V}_{\alpha}^{m}\right)$$
(3.49)

Για να προκύψει η σχέση μεταξύ τάσεων και ρευμάτων γραμμής αντικαθίστανται οι (3.46) και (3.49) στην (3.3.2) με αποτέλεσμα

$$\mathbf{V}(z) = -\mathbf{Y}^{-1} \frac{d}{dz} \mathbf{I}(z) = \mathbf{Y}^{-1} \mathbf{T} \gamma \left(e^{-\gamma z} \mathbf{I}_{\pi}^{m} + e^{\gamma z} \mathbf{I}_{\alpha}^{m} \right) = \mathbf{Z}_{C} \mathbf{T} \left(e^{-\gamma z} \mathbf{I}_{\pi}^{m} + e^{\gamma z} \mathbf{I}_{\alpha}^{m} \right)$$
(3.50)

όπου

$$\mathbf{Z}_{C} = \mathbf{Y}^{-1} \mathbf{T} \boldsymbol{\gamma} \mathbf{T}^{-1} \tag{3.51}$$

η μήτρα χαρακτηριστικών αντιστάσεων μιας γραμμής MTL. Με τη χρήση της (3.42), η μητρα χαρ ικτηρισ ης ης γραφε τη μορφη

$$\mathbf{Z}_{C} = \mathbf{Z}\mathbf{T}\boldsymbol{\gamma}^{-1}\mathbf{T}^{-1} \tag{3.52}$$

3.3.2 Η Γραμμή Μεταφοράς n+1 Αγωγών ως Πολύθυρο 2n Εισόδων 2n Εξόδων

Οι τάσεις και τα ρεύματα στα δύο άκρα μιας γραμμής MTL *n*+1 αγωγών μπορούν να συνδεθούν μέσω μήτρας αλυσιδωτής σύνδεσης κατ'αντιστοιχία της (3.17) που περιγράφει τη σύνδεση των αντιστοίχων μεγεθών σε γραμμές μεταφοράς δύο αγωγών, δηλαδή

$$\begin{bmatrix} \mathbf{V}(L) \\ \mathbf{I}(L) \end{bmatrix} = \mathbf{\Phi}^{inv} \left(L \right) \begin{bmatrix} \mathbf{V}(0) \\ \mathbf{I}(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{\Phi}_{11}^{inv}(L) & \mathbf{\Phi}_{12}^{inv}(L) \\ \mathbf{\Phi}_{21}^{inv}(L) & \mathbf{\Phi}_{22}^{inv}(L) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}(0) \\ \mathbf{I}(0) \end{bmatrix}$$
(3.53)

Η ανωτέρω σχέση περιγράφει μια γραμμή MTL *n*+1 αγωγών ως πολύθυρο όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 3.2.

Προς την κατεύθυνση αυτή, για να προσδιοριστούν οι $n \times n$ υπομήτρες $\Phi_{ij}^{inv}(L)$ θεωρείται η γενική λύση των εξισώσεων γραμμών MTL αξιοποιώντας τους μετασχηματισμούς ομοιότητας. Δηλαδή χρησιμοποιούνται οι σχέσεις

$$\mathbf{V}(z) = \mathbf{Y}^{-1} \mathbf{T} \boldsymbol{\gamma} \left(e^{-\gamma z} \mathbf{I}_{\pi}^{m} + e^{\gamma z} \mathbf{I}_{\alpha}^{m} \right)$$
(3.54)

$$\mathbf{I}(z) = \mathbf{T}\left(e^{-\gamma z}\mathbf{I}_{\pi}^{m} - e^{\gamma z}\mathbf{I}_{\alpha}^{m}\right)$$
(3.55)

Θέτοντας στις ανωτέρω εξισώσεις z = 0, z = L και απαλείφοντας τις μεταβλητές \mathbf{I}_{a}^{m} προκύπτουν οι υπομήτρες της μήτρας αλυσιδωτής σύνδεσης

$$\boldsymbol{\Phi}_{11}^{inv}(L) = \frac{1}{2} \mathbf{Y}^{-1} \mathbf{T} \left(e^{\gamma L} + e^{-\gamma L} \right) \mathbf{\Gamma}^{-1} \mathbf{Y}$$
(3.56)

$$\boldsymbol{\Phi}_{12}^{inv}(L) = -\frac{1}{2} \mathbf{Y}^{-1} \mathbf{T} \boldsymbol{\gamma} \left(e^{\boldsymbol{\gamma} L} - e^{-\boldsymbol{\gamma} L} \right) \mathbf{\Gamma}^{-1} = -\frac{1}{2} \mathbf{Y}^{-1} \mathbf{T} \boldsymbol{\gamma} \mathbf{T}^{-1} \left[\mathbf{T} \left(e^{\boldsymbol{\gamma} L} - e^{-\boldsymbol{\gamma} L} \right) \mathbf{\Gamma}^{-1} \right] = -\frac{1}{2} \mathbf{Z}_{C} \left[\mathbf{T} \left(e^{\boldsymbol{\gamma} L} - e^{-\boldsymbol{\gamma} L} \right) \mathbf{\Gamma}^{-1} \right]$$
(3.57)

$$\boldsymbol{\Phi}_{21}^{inv}(L) = -\frac{1}{2}\mathbf{T}\left(e^{\gamma L} - e^{-\gamma L}\right)\boldsymbol{\gamma}^{-1}\mathbf{T}^{-1}\mathbf{Y} = -\frac{1}{2}\left[\mathbf{T}\left(e^{\gamma L} - e^{-\gamma L}\right)\mathbf{\Gamma}^{-1}\right]\mathbf{\Gamma}\boldsymbol{\gamma}^{-1}\mathbf{T}^{-1}\mathbf{Y} = -\frac{1}{2}\left[\mathbf{T}\left(e^{\gamma L} - e^{-\gamma L}\right)\mathbf{\Gamma}^{-1}\right]\mathbf{Y}_{C}$$
(3.58)

$$\boldsymbol{\Phi}_{22}^{inv}(L) = \frac{1}{2} \mathbf{T} \left(e^{\gamma L} + e^{-\gamma L} \right) \mathbf{T}^{-1}$$
(3.59)

όπου

$$\mathbf{Y}_C = \mathbf{Z}_C^{-1} \tag{3.60}$$

η μήτρα χαρακτηριστικών αγωγιμοτήτων της γραμμής MTL.



Σχήμα 3.2: Γραμμή MTL n+1 αγωγών ως πολύθυρο δίκτυο 2n εισόδων 2n εξόδων.

3.3.3 Ενσωμάτωση των Συνθηκών Τερματισμού

Η γενική λύση των εξισώσεων MTL που προκύπτει μέσω των (3.54) και (3.55) εμπλέκει 2n προσδιοριστέες σταθερές που δηλώνονται μέσω των $n \times 1$ διανυσμάτων I_{π}^{m} και I_{α}^{m} , για τον προσδιορισμό των οποίων απαιτούνται 2n εξισώσεις που θα προκύψουν από την ικανοποίηση των συνθηκών τερματισμού στα άκρα z = 0, z = L της γραμμής MTL. Οι συνθήκες τερματισμού στο άκρο z = 0οδηγούν σε n εξισώσεις που σχετίζονται με τις n τάσεις και τα n ρεύματα πηγής V(0) και I(0), αντίστοιχα. Οι συνθήκες τερματισμού στο άκρο z = L οδηγούν σε n εξισώσεις που σχετίζονται με τις n τάσεις και τα n ρεύματα V(L) και I(L), αντίστοιχα, που εμφανίζονται επί των συνθέτων αντιστάσεων τερματισμού [136]-[140].

3.3.3.1 Το Ισοδύναμο κατά Thévenin

Θεωρώντας το ισοδύναμο κατά Thévenin μιας γραμμής MTL για την περιγραφή των συνθηκών τερματισμού στα άκρα της προκύπτουν οι μητρικές σχέσεις [119], [120], [136], [138]

$$\mathbf{V}(0) = \mathbf{E}_{g} - \mathbf{Z}_{g}\mathbf{I}(0) \tag{3.61}$$

$$\mathbf{V}(L) = \mathbf{V}_L + \mathbf{Z}_L \mathbf{I}(L) \tag{3.62}$$

Ta $n \times 1$ διανύσματα στήλης \mathbf{E}_{g} και \mathbf{V}_{L} περιγράφουν τις ανεξάρτητες πηγές τάσης και ρεύματος στο άκρα z = 0 και z = L, αντίστοιχα. Οι $n \times n$ μήτρες \mathbf{Z}_{g} και \mathbf{Z}_{L} περιγράφουν τις σύνθετες αντιστάσεις στα άκρα z = 0 και z = L, αντίστοιχα.

Στη γενική περίπτωση, οι μήτρες \mathbf{Z}_{g} και \mathbf{Z}_{L} είναι πλήρεις μήτρες, δηλαδή υπάρχει σύζευξη μεταξύ όλων των θυρών του δικτύου. Εντούτοις, μπορεί να υπάρξει κατάλληλος τερματισμός της γραμμής μεταφοράς MTL ώστε οι μήτρες \mathbf{Z}_{g} και \mathbf{Z}_{L} να είναι διαγώνιες. Το Σχήμα 3.3 παρουσιάζει αυτήν την περίπτωση όπου κάθε γραμμή στο άκρο z = 0 σε σχέση με τον επιλεγμένο αγωγό αναφοράς διεγείρεται από ανεξάρτητη πηγή με αντίστοιχη σύνθετη εσωτερική αντίσταση.

Στην περίπτωση αυτή ισχύει

$$\mathbf{E}_{g} = \begin{bmatrix} E_{g1} & \cdots & E_{gi} & \cdots & E_{gn} \end{bmatrix}^{T}$$
(3.63)

$$\mathbf{Z}_{g} = diag\{\mathbf{Z}_{gi}\}, \ i = 1, \dots, n$$
 (3.64)

Τα ρεύματα και οι τάσεις γραμμής προκύπτουν από τις (3.46) και (3.50), αντίστοιχα. Για να προσδιοριστούν οι 2*n* προσδιοριστέες σταθερές I_{π}^{m} και I_{α}^{m} , εφαρμόζονται οι (3.46) και (3.50) για z = 0 και z = L και στη συνέχεια γίνεται αντικατάσταση στο ισοδύναμο κατά Thévenin

$$\begin{bmatrix} (\mathbf{Z}_{C} + \mathbf{Z}_{g})\mathbf{\Gamma} & (\mathbf{Z}_{C} - \mathbf{Z}_{g})\mathbf{\Gamma} \\ (\mathbf{Z}_{C} - \mathbf{Z}_{L})\mathbf{\Gamma}e^{-\gamma L} & (\mathbf{Z}_{C} + \mathbf{Z}_{L})\mathbf{\Gamma}e^{\gamma L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{\pi}^{m} \\ \mathbf{I}_{\alpha}^{m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{E}_{g} \\ \mathbf{V}_{L} \end{bmatrix}$$
(3.65)





Επιλύοντας στο σύστημα των ανωτέρω 2n εξισώσεων ως προς I_{π}^{m} και I_{α}^{m} , μέσω των (3.46) και (3.50) καθίσταται δυνατός ο υπολογισμός των κυματικών μεγεθών σε οποιοδήποτε σημείο z επί της γραμμής μεταφοράς MTL. Στα Παραρτήματα 3.2 έως 3.5 παρουσιάζεται η εναλλακτική αναπαράσταση με το γενικό ισοδύναμο κατά Norton (Generalized Norton Equivalent) και η γενική περίπτωση μικτών αναπαραστάσεων.

3.3.4 Μη Ομοιόμορφες Γραμμές Μεταφοράς

 $M\eta$ ομοιόμορφες γραμμές μεταφοράς (nonuniform transmission lines) είναι οι γραμμές των οποίων η διατομή των αγωγών και το μέσο που περιβάλλει τους αγωγούς διαφοροποιούνται κατά μήκος της διεύθυνσης μετάδοσης, συνήθως κατά τα διάφορα τμήματα των γραμμών [133], [141], [142]. Για τα είδη γραμμών αυτά, οι ανά μονάδα μήκους μήτρες παραμέτρων μεταβάλλονται με το z, δηλαδή αποτελούν συναρτήσεις της μορφής $\mathbf{R}(z)$, $\mathbf{L}(z)$, $\mathbf{G}(z)$ και $\mathbf{C}(z)$. Στην περίπτωση αυτή οι διαφορικές εξισώσεις MTL μετατρέπονται σε διαφορικές εξισώσεις με μη σταθερούς συντελεστές. Αν και είναι γραμμικές όταν το μέσο που περιβάλλει τους αγωγούς είναι γραμμικό, δεν είναι εύκολο να επιλυθούν. Ένας απλός προσεγγιστικός τρόπος επίλυσης των εξισώσεων MTL σε μη ομοιόμορφες γραμμές MTL πραγματοποιείται με χρήση τμηματικά ομοιόμορφων MTL (discretely uniform MTL). Προς τούτο και όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 3.4 μια μη ομοιόμορφη γραμμή MTL χωρίζεται σε διαδοχικά τμήματα μήκους Δz, έκαστο των οποίων μπορεί να περιγραφεί προσεγγιστικά ως ομοιόμορφη γραμμή με μήτρα αλυσιδωτής σύνδεσης $\mathbf{\Phi}_{k}^{inv}(\Delta z_{k})$. Η συνολική μήτρα αλυσιδωτής σύνδεσης προκύπτει ως το γινόμενο των μητρών αλυσιδωτής σύνδεσης των επιμέρους ομοιόμορφων τμημάτων MTL στα οποία μπορεί να χωριστεί, δηλαδή

$$\boldsymbol{\Phi}^{inv}(L) = \boldsymbol{\Phi}_{N}^{inv}(\Delta z_{N}) \times \dots \times \boldsymbol{\Phi}_{k}^{inv}(\Delta z_{k}) \times \dots \times \boldsymbol{\Phi}_{1}^{inv}(\Delta z_{1}) = \prod_{k=1}^{N} \boldsymbol{\Phi}_{N-k+1}^{inv}(\Delta z_{k})$$
(3.66)

Πολλές μη ομοιόμορφες διατάξεις MTL, όπως για παράδειγμα ορισμένα εναέρια/υπόγεια συστήματα BPL, μπορούν να περιγραφούν προσεγγιστικά με αυτόν τον τρόπο [143]-[146]. Από τη στιγμή όπου μέσω της (3.66) προκύψει η συνολική μήτρα αλυσιδωτής σύνδεσης μιας μη ομοιόμορφης γραμμής MTL, οι συνθήκες



Σχήμα 3.4: Γραμμή μεταφοράς MTL ως διαδοχή τμημάτων ομοιόμορφων γραμμών MTL.

τερματισμού στα άκρα της λαμβάνονται υπόψη όπως και στην περίπτωση ομοιόμορφων γραμμών MTL. Οι τάσεις και τα ρεύματα στα ενδιάμεσα σημεία z $(0 \le z \le L)$ μπορούν επίσης να προσδιοριστούν χρησιμοποιώντας τις επιμέρους μήτρες αλυσιδωτής σύνδεσης των ομοιόμορφων τμημάτων. Για παράδειγμα, η τάση $V(z_2)$ στη δεξιά θύρα του δεύτερου δομικού στοιχείου του Σχήματος 3.4 μπορεί να προκύψει από τη σχέση

$$\begin{bmatrix} \mathbf{V}(z_2) \\ \mathbf{I}(z_2) \end{bmatrix} = \mathbf{\Phi}_2^{inv} (\Delta z_2) \times \mathbf{\Phi}_1^{inv} (\Delta z_1) \begin{bmatrix} \mathbf{V}(0) \\ \mathbf{I}(0) \end{bmatrix}$$
(3.67)

Με εφαρμογή της (3.67) μπορεί να περιγραφεί η συμπεριφορά συνεστραμμένων ζευγών καλωδίων με χρήση ανάλυσης MTL. Η διάταξη συνεστραμμένων ζευγών καλωδίων μπορεί να προσεγγιστεί ως αλυσιδωτή σύνδεση βρόχων σε διαδοχή [119], [123]-[132].

Μια άλλη περίπτωση σύνδεσης διαφορετικών τμημάτων που απαντάται σε υπόγειες γραμμές MTL παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.5. Τα θωρακισμένα καλώδια έχουν εκτεθειμένα τμήματα στα άκρα τους για να διευκολύνεται η σύνδεση της θωράκισης με τα δίκτυα τερματισμού. Η θωράκιση συνδέεται με τα δίκτυα τερματισμών μέσω ινών έναρξης και λήξης (pigtail) στα εκτεθειμένα τμήματα [140], [147]-[153]. Η συνολική μήτρα αλυσιδωτής σύνδεσης προκύπτει ως γινόμενο των μητρών αλυσιδωτής σύνδεσης των ινών έναρξης και λήξης με μήκη L_{pL} και L_{pR} , αντίστοιχα, και της μήτρας αλυσιδωτής σύνδεσης του θωρακισμένου τμήματος μήκους L_s , δηλαδή

$$\boldsymbol{\Phi}^{inv}(L) = \boldsymbol{\Phi}_{pR}^{inv}(L_{pR}) \times \boldsymbol{\Phi}_{S}^{inv}(L_{S}) \times \boldsymbol{\Phi}_{pL}^{inv}(L_{pL})$$
(3.68)



Σχήμα 3.5: Απεικόνιση θωρακισμένης γραμμής με ίνες έναρξης και λήξης ως σύνδεση τριών διαφορετικών ομοιόμορφων τμημάτων.

Ενσωματώνοντας τις συνθήκες τερματισμού στα άκρα καθίσταται δυνατός ο υπολογισμός των κυματικών μεγεθών.

Συμπερασματικά, η ονομασία μήτρα αλυσιδωτής σύνδεσης οφείλεται στο γεγονός ότι η συνολική μήτρα αλυσιδωτής σύνδεσης διαφορετικών τμημάτων γραμμών συνδεδεμένων σε διαδοχή είναι το γινόμενο (με κατάλληλη σειρά) των μητρών αλυσιδωτής σύνδεσης κάθε τμήματος της αλυσίδας. Η παρατήρηση αυτή παρέχει μια προσεγγιστική μέθοδο θεώρησης των ανομοιόμορφων γραμμών –όπως για παράδειγμα τα συνεστραμμένα ζεύγη καλωδίων– ως σύνδεσης ομοιόμορφων γραμμών [123]-[132]. Η μήτρα αλυσιδωτής σύνδεσης περιγράφει μια γραμμή MTL στα σημεία των τερματισμών μέσω μήτρας δύο θυρών.

Από την (3.53), η διαδικασία προσδιορισμού των υπομητρών προϋποθέτει ότι υπάρχει και μπορεί να υπολογιστεί μια $n \times n$ αντιστρέψιμη μήτρα μετασχηματισμού **T** που διαγωνιοποιεί το γινόμενο των ανά μονάδα μήκους μητρών **YZ** της (3.41). Οι n τιμές γ_i^2 είναι οι ιδιοτιμές (eigenvalues) της μήτρας **YZ**. Από την (3.41) προκύπτει

$$\mathbf{YZT} - \mathbf{T}\boldsymbol{\gamma}^2 = \mathbf{0} \tag{3.69}$$

Στη συνέχεια συμβολίζονται τα $n \times 1$ διανύσματα στηλών του **T** ως **T**_i, δηλαδή

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \mathbf{T}_1 & \cdots & \mathbf{T}_n \end{bmatrix}$$
(3.70)

Αντικαθιστώντας την (3.70) και την (3.41) στην (3.69) και επεκτείνοντας το αποτέλεσμα προκύπτει ένα σύνολο από *n* εξισώσεις της μορφής

$$\left(\mathbf{Y}\mathbf{Z} - \boldsymbol{\gamma}_{i}^{2}\mathbf{I}_{n}\right)\mathbf{\Gamma}_{i} = \mathbf{0}, \ i = 1, \dots, n$$

$$(3.71)$$

Οι στήλες της **T**, **T**_i, είναι τα ιδιοδιανύσματα (eigenvectors) της μήτρας **YZ** [154]. Το ερώτημα λοιπόν που τίθεται είναι αν μπορούν να υπολογιστούν n γραμμικά ανεξάρτητα ιδιοδιανύσματα της μήτρας **YZ** που θα τη διαγωνιοποιούν. Η (3.71) περιγράφει ένα ομογενές σύνολο γραμμικών αλγεβρικών εξισώσεων. Ως τέτοιες χαρακτηρίζονται από

- 1. Μοναδική μηδενική λύση δηλαδή $\mathbf{T}_i = \mathbf{0}$.
- 2. Ένα άπειρο αριθμό λύσεων για την **T**_i.

Μη μηδενική λύση υπάρχει εφόσον η ορίζουσα της μήτρας παραμέτρων της (3.71) είναι μηδέν δηλαδή

$$\left|\mathbf{Y}\mathbf{Z}-\boldsymbol{\gamma}_{i}^{2}\mathbf{I}_{n}\right|=0$$
(3.72)

Στη συνέχεια γίνεται διερεύνηση πότε υπάρχει μη μηδενική λύση και πώς μπορεί να προσδιοριστεί.

Η διαγωνιοποίηση μιας $n \times n$ μήτρας **M** είναι εξασφαλισμένη όταν:

- 1. Όλες οι ιδιοτιμές του \mathbf{M} είναι διακριτές (distinct).
- 2. Η **M** είναι πραγματική και συμμετρική μήτρα (real and symmetric).
- 3. Η **M** είναι μιγαδική μήτρα αλλά κανονική (complex but normal), δηλαδή $\mathbf{M}(\mathbf{M}^{T})^{*} = (\mathbf{M}^{T})^{*} \mathbf{M}.$
- 4. Η **M** είναι μιγαδική και ερμιτιανή (complex and hermitian), δηλαδή $\mathbf{M} = \left(\mathbf{M}^{T}\right)^{*}.$

Για μήτρα **M** κανονική ή ερμιτιανή, η μήτρα μετασχηματισμού μπορεί να υπολογιστεί έτσι ώστε $\mathbf{T}^{-1} = (\mathbf{T}^T)^*$. Για πραγματική και συμμετρική μήτρα **M**, η μήτρα μετασχηματισμού μπορεί να βρεθεί τέτοια που να ισχύει $\mathbf{T}^{-1} = \mathbf{T}^T$. Για άλλους τύπους μητρών, δεν είναι εξασφαλισμένο ότι μπορεί να βρεθεί μια μήτρα που να τους διαγωνιοποιεί.

3.4.1 Γραμμή MTL με Απώλειες που Περιβάλλεται από μη Ομογενές Μέσο

Στην περίπτωση όπου η γραμμή εμφανίζει απώλειες $-\mathbf{R} \neq \mathbf{0}$ και $\mathbf{G} \neq \mathbf{0}$ - και το μέσο που περιβάλλει τους αγωγούς είναι ανομοιογενές $-\mathbf{LC} \neq 1/\upsilon^2 \mathbf{I}_n$, μια μήτρα
μετασχηματισμού ομοιότητας εξαρτώμενη από τη συχνότητα $\mathbf{T}(f)$ προκύπτει από τη σχέση

$$\mathbf{T}^{-1}(f)\underbrace{(\mathbf{G}+j2\pi f\mathbf{C})}_{\mathbf{Y}(f)}\underbrace{(\mathbf{R}+j2\pi f\mathbf{L})}_{\mathbf{Z}(f)}\mathbf{T}(f) = \gamma^{2}(f)$$
(3.73)

Εκτός του ότι η αριθμητική ευστάθεια της διαγωνιοποίησης δεν είναι εξασφαλισμένη, η μήτρα μετασχηματισμού $\mathbf{T}(f)$ εξαρτάται από τη συχνότητα και πρέπει να υπολογίζεται για κάθε συχνότητα.

3.4.2 Κυκλικώς Συμμετρικές Δομές

Μέχρι το σημείο αυτό θεωρήθηκαν γραμμές MTL που διαθέτουν συνολική μήτρα YZ που μπορεί να διαγωνιοποιηθεί αριθμητικά. Όπως φαίνεται από την (3.73) η μήτρα μετασχηματισμού T(f) εξαρτάται στη γενική περίπτωση από τη συχνότητα. Στο παρόν εδάφιο εξετάζονται γραμμές MTL που διαθέτουν κατασκευαστική συμμετρία (structural symmetry). Για τις γραμμές αυτές μπορεί να προσδιοριστεί μια αριθμητικά ευσταθής μήτρα μετασχηματισμού T που διαγωνιοποιεί τη μήτρα YZ. Επιπλέον, ο μετασχηματισμός αυτός μπορεί να είναι ανεξάρτητος της συχνότητας καίτοι η γραμμή εμφανίζει απώλειες ή το μέσο που περιβάλλει τους αγωγούς είναι ανομοιογενές, όπως συμβαίνει στη γενική περίπτωση.

Ας θεωρηθεί γραμμή MTL αποτελούμενη από ένα αγωγό αναφοράς και *n* όμοιους αγωγούς που παρουσιάζουν κατασκευαστική συμμετρία σε σχέση με τον αγωγό αναφοράς. Τότε, οι ανά μονάδα μήκους μήτρες σύνθετης αντίστασης και σύνθετης αγωγιμότητας έχουν συμμετρική μορφή, δηλαδή

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} Z_{1} & Z_{2} & Z_{3} & \cdots & Z_{3} & Z_{2} \\ Z_{2} & Z_{1} & Z_{2} & Z_{3} & \ddots & Z_{3} \\ Z_{3} & Z_{2} & Z_{1} & Z_{2} & \ddots & \vdots \\ \vdots & Z_{3} & Z_{2} & \ddots & \ddots & Z_{3} \\ Z_{3} & \ddots & \ddots & \ddots & Z_{1} & Z_{2} \\ Z_{2} & Z_{3} & \cdots & Z_{3} & Z_{2} & Z_{1} \end{bmatrix}$$
(3.74)
$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} Y_{1} & Y_{2} & Y_{3} & \cdots & Y_{3} & Y_{2} \\ Y_{2} & Y_{1} & Y_{2} & Y_{3} & \ddots & Y_{3} \\ Y_{3} & Y_{2} & Y_{1} & Y_{2} & \ddots & \vdots \\ \vdots & Y_{3} & Y_{2} & \ddots & \ddots & Y_{3} \\ Y_{3} & \ddots & \ddots & \ddots & Y_{1} & Y_{2} \\ Y_{2} & Y_{3} & \cdots & Y_{3} & Y_{2} & Y_{1} \end{bmatrix}$$
(3.75)



Σχήμα 3.6: Διατάξεις κυκλικώς συμμετρικές που διαθέτουν μήτρα YZ που μπορεί να διαγωνιοποιηθεί μέσω μετασχηματισμού ανεξάρτητου της συχνότητας [119].

Παραδείγματα διατάξεων MTL που οδηγούν σε συμμετρικές ανά μονάδα μήκους μήτρες παραμέτρων παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.6. Για να είναι οι όροι της κυρίας διαγωνίου ίσοι, οι αγωγοί και το περιβάλλον μέσο (που μπορεί να είναι ανομοιογενές) πρέπει επίσης να παρουσιάζουν συμμετρία. Για παράδειγμα, αν οι *n* αγωγοί είναι καλώδια διηλεκτρικά μονωμένα, οι διηλεκτρικές μονώσεις των *n* καλωδίων πρέπει να έχουν το ίδιο πάχος. Ο αγωγός αναφοράς δεν χρειάζεται να έχει και αυτός την ίδια ιδιότητα. Μια γενική κυκλική συμμετρική μήτρα **M** έχει στοιχεία που ικανοποιούν τη σχέση

$$\left[\mathbf{M}\right]_{ij} = \mathbf{M}_{|i-j|+1} \tag{3.76}$$

όπου

$$\mathbf{M}_{j\pm n} = \mathbf{M}_{j} \tag{3.77}$$

$$\mathbf{M}_{n+2-j} = \mathbf{M}_j \tag{3.78}$$

[·]_j παριστάνει το στοιχείο της μήτρας στη γραμμή *i* της στήλης *j* και δείκτες μεγαλύτερους από *n* ή μικρότερους από 1 προκύπτουν από την n + j = j και n + i = i [119], [133], [155]-[157]. Λόγω της ειδικής δομής τους οι ανά μονάδα μήκους μήτρες **Z** και **Y** που είναι κανονικές μήτρες –δηλαδή π.χ. $\mathbf{Z}(\mathbf{Z}^T)^* = (\mathbf{Z}^T)^* \mathbf{Z} -$, οπότε υπάρχει μήτρα **T** που τις διαγωνιοποιεί δηλαδή

$$\mathbf{T}^{-1}\mathbf{Z}\mathbf{T} = \mathbf{\gamma}_Z^2 \tag{3.79}$$

$$\mathbf{T}^{-1}\mathbf{Y}\mathbf{T} = \boldsymbol{\gamma}_Y^2 \tag{3.80}$$

όπου οι $n \times n$ μήτρες γ_Z^2 και γ_Y^2 είναι διαγώνιες μήτρες. Ο μετασχηματισμός μπορεί να προκύψει από [155]-[157]

$$\left[\mathbf{T}\right]_{ij} = \frac{1}{\sqrt{n}} \angle \left[\frac{2\pi}{n} (i-1)(j-1)\right]$$
(3.81)

και

$$\mathbf{T}^{-1} = \left(\mathbf{T}^{T}\right)^{*} \tag{3.82}$$

όπου

$$\angle [x] = e^{jx} \tag{3.83}$$

Οι ιδιοτιμές της ΥΖ προσδιορίζονται από τις σχέσεις [155]-[157]

$$\gamma_{i}^{2} = \left\{ \sum_{p=1}^{n} [\mathbf{Z}]_{1p} \angle \left[\frac{2\pi}{n} (p-1)(i-1) \right] \right\} \left\{ \sum_{q=1}^{n} [\mathbf{Y}]_{1q} \angle \left[\frac{2\pi}{n} (q-1)(i-1) \right] \right\}$$
(3.84)

Ενδεικτικά, ας θεωρηθεί γραμμή τεσσάρων αγωγών (n=3) με κυκλικώς συμμετρική δομή. Τότε

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} Z_1 & Z_2 & Z_2 \\ Z_2 & Z_1 & Z_2 \\ Z_2 & Z_2 & Z_1 \end{bmatrix}$$
(3.85)

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} Y_1 & Y_2 & Y_2 \\ Y_2 & Y_1 & Y_2 \\ Y_2 & Y_2 & Y_1 \end{bmatrix}$$
(3.86)

Η μήτρα μετασχηματισμού με εφαρμογή της (3.81) είναι [155]-[157]

$$\mathbf{T} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & e^{j2\pi/3} & e^{j4\pi/3} \\ 1 & e^{j4\pi/3} & e^{j2\pi/3} \end{bmatrix}$$
(3.87)

με

$$\mathbf{T}^{-1} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & e^{-j2\pi/3} & e^{-j4\pi/3} \\ 1 & e^{-j4\pi/3} & e^{-j2\pi/3} \end{bmatrix}$$
(3.88)

και οι μιγαδικές σταθερές διάδοσης από τις σχέσεις

$$\gamma_1^2 = (Z_1 + Z_2 + Z_2)(Y_1 + Y_2 + Y_2) = (Z_1 + 2Z_2)(Y_1 + 2Y_2)$$
(3.89)

$$\gamma_{2}^{2} = (Z_{1} \angle 0 + Z_{2} \angle 2\pi/3 + Z_{2} \angle 4\pi/3)(Y_{1} \angle 0 + Y_{2} \angle 2\pi/3 + Y_{2} \angle 4\pi/3) = (Z_{1} - Z_{2})(Y_{1} - Y_{2})$$
(3.90)

$$\gamma_{3}^{2} = (Z_{1} \angle 0 + Z_{2} \angle 4\pi/3 + Z_{2} \angle 2\pi/3)(Y_{1} \angle 0 + Y_{2} \angle 4\pi/3 + Y_{2} \angle 2\pi/3) = (Z_{1} - Z_{2})(Y_{1} - Y_{2})$$
(3.91)

Υπάρχουν πολλές περιπτώσεις γραμμών MTL που μπορεί να θεωρηθούν ως κυκλικώς συμμετρικές διατάξεις, όπως οι υπόγειες τριφασικές γραμμές MT αλλά και προσεγγιστικά οι εναέριες γραμμές MT που αποτελούνται από τρεις αγωγούς [158]-[160].

Οι μιγαδικές σταθερές διάδοσης κυκλικών συμμετρικών διατάξεων γ_2 και γ_3 είναι ίσες και σχετίζονται με τους διαφορικούς ή ρυθμούς διάδοσης μέσω του αέρα (differential or aerial propagation modes). Η σταθερά διάδοσης γ_1 σχετίζεται με τον κοινό ή μέσω του εδάφους ρυθμό διάδοσης (common or ground propagation mode). Ο μετασχηματισμός ομοιότητας αυτός αναφέρεται στη βιβλιογραφία ως μέθοδος των συμμετρικών συνιστωσών ενώ γραμμές μεταφοράς αυτού του τύπου ονομάζονται ισορροπημένες γραμμές.

Γραμμές MTL που αποτελούν προσεγγίσεις κυκλικώς συμμετρικών διατάξεων είναι οι γραμμές MTL μονωμένων αγωγών που παρουσιάζουν κυκλική συμμετρική δομή των *n*×*n* ανά μονάδα μήκους μητρών σύνθετης αντίστασης και σύνθετης αγωγιμότητας.

3.5 Μήτρες Ισχύος και Παράγοντες Ανάκλασης

Αντίστοιχα προς την περίπτωση της γραμμής μεταφοράς δύο αγωγών, η ροή ισχύος κατά μήκος μιας γραμμής MTL εξετάζεται μέσω της μήτρας συντελεστών ανάκλασης $\Gamma(z)$. Οι τάσεις και ρεύματα γράφονται ως υπέρθεση προσπιπτόντων κυμάτων, $\mathbf{V}_{\pi}(z)$ και $\mathbf{I}_{\pi}(z)$, και ανακλώμενων κυμάτων, $\mathbf{V}_{\alpha}(z)$ και $\mathbf{I}_{\alpha}(z)$ υπό τη μορφή

$$\mathbf{V}(z) = \mathbf{V}_{\pi}(z) + \mathbf{V}_{\alpha}(z) \tag{3.92}$$

$$\mathbf{I}(z) = \mathbf{I}_{\pi}(z) - \mathbf{I}_{\alpha}(z) \tag{3.93}$$

όπου

$$\mathbf{V}_{\pi}(z) = \mathbf{Z}_{C} \mathbf{T} e^{-\gamma z} \mathbf{I}_{\pi}^{m}$$
(3.94)

$$\mathbf{V}_{\alpha}(z) = \mathbf{Z}_{C} \mathbf{T} e^{\gamma z} \mathbf{I}_{\alpha}^{m}$$
(3.95)

$$\mathbf{I}_{\pi}(z) = \mathbf{T}e^{-\gamma z}\mathbf{I}_{\pi}^{m}$$
(3.96)

$$\mathbf{I}_{\alpha}(z) = \mathbf{T}e^{\gamma z} \mathbf{I}_{\alpha}^{m} \tag{3.97}$$

Στη συνέχεια ορίζεται η μήτρα συντελεστών ανάκλασης που συνδέει τα ανακλώμενα με τα προσπίπτοντα κύματα τάσης σε κάθε σημείο μιας γραμμής MTL μέσω της σχέσης

$$\mathbf{V}_{\alpha}(z) = \mathbf{\Gamma}(z)\mathbf{V}_{\pi}(z) \tag{3.98}$$

Αντικαθιστώντας τις (3.94), (3.95) στην (3.98) λύνοντας ως προς \mathbf{I}_{α}^{m} προκύπτει [161]

$$\mathbf{I}_{\alpha}^{m} = e^{-\gamma z} \mathbf{T}^{-1} \mathbf{Z}_{C}^{-1} \mathbf{\Gamma}(z) \mathbf{Z}_{C} \mathbf{T} e^{-\gamma z} \mathbf{I}_{\pi}^{m} = e^{-\gamma L} \mathbf{T}^{-1} \mathbf{Z}_{C}^{-1} \mathbf{\Gamma}_{L} \mathbf{Z}_{C} \mathbf{T} e^{-\gamma L} \mathbf{I}_{\pi}^{m}$$
(3.99)

όπου η μήτρα ανάκλασης στη θέση τερματισμού $\Gamma(L)$ έχει συμβολιστεί ως Γ_L . Μέσω της (3.99), η μήτρα ανάκλασης σε κάθε σημείο της γραμμής συνδέεται με τη μήτρα ανάκλασης στη θέση τερματισμού z = L. Τα διανύσματα τάσεων και ρευμάτων μπορούν να γραφούν υπό τη μορφή

$$\mathbf{V}(z) = (\mathbf{I}_n + \boldsymbol{\Gamma}(z))\mathbf{Z}_C \mathbf{T} e^{-\gamma z} \mathbf{I}_{\pi}^m$$
(3.100)

$$\mathbf{I}(z) = \left(\mathbf{I}_n - \mathbf{Z}_C^{-1} \mathbf{\Gamma}(z) \mathbf{Z}_C\right) \mathbf{\Gamma} e^{-\gamma z} \mathbf{I}_{\pi}^m$$
(3.101)

Η μήτρα της σύνθετης αντίστασης εισόδου σε κάποιο σημείο μιας γραμμής MTL συσχετίζει τις τάσεις και τα ρεύματα στο σημείο αυτό μέσω της σχέσης

$$\mathbf{V}(z) = \mathbf{Z}_{in}(z)\mathbf{I}(z) \tag{3.102}$$

Αντικαθιστώντας τις (3.100), (3.101) στην (3.102) προκύπτει

$$\mathbf{Z}_{in}(z) = (\mathbf{I}_n + \mathbf{\Gamma}(z))(\mathbf{I}_n - \mathbf{\Gamma}(z))^{-1}\mathbf{Z}_C$$
(3.103)

Ομοίως, μέσω της (3.103), η μήτρα ανάκλασης μπορεί να γραφεί συναρτήσει της μήτρας των συνθέτων αντιστάσεων εισόδου σε κάποιο σημείο της γραμμής, δηλαδή

$$\Gamma(z) = \mathbf{Z}_{C} (\mathbf{Z}_{in}(z) + \mathbf{Z}_{C})^{-1} (\mathbf{Z}_{in}(z) - \mathbf{Z}_{C}) \mathbf{Z}_{C}^{-1} = (\mathbf{Z}_{in}(z) - \mathbf{Z}_{C}) (\mathbf{Z}_{in}(z) + \mathbf{Z}_{C})^{-1}$$
(3.104)

Στο άκρο τερματισμού z = Lισχύουν

$$\mathbf{V}(L) = \mathbf{Z}_{L}(z)\mathbf{I}(L) \tag{3.105}$$

και

$$\boldsymbol{\Gamma}_{L} = \mathbf{Z}_{C} (\mathbf{Z}_{L} + \mathbf{Z}_{C})^{-1} (\mathbf{Z}_{L} - \mathbf{Z}_{C}) \mathbf{Z}_{C}^{-1} = (\mathbf{Z}_{L} - \mathbf{Z}_{C}) (\mathbf{Z}_{L} + \mathbf{Z}_{C})^{-1}$$
(3.106)

Από την (3.106) προκύπτει ότι για να μηδενιστούν όλοι οι συντελεστές ανάκλασης στο άκρο τερματισμού z = L, η γραμμή πρέπει να τερματίζεται σε μήτρα αντιστάσεων τερματισμού ίση με τη μήτρα χαρακτηριστικών αντιστάσεων, δηλαδή $\mathbf{Z}_L = \mathbf{Z}_C$. Αυτό είναι το νόημα της προσαρμογής φορτίων στην περίπτωση γραμμών MTL.

Η μέση ισχύς στη θέση z μιας γραμμής ΜΤL προκύπτει από τη σχέση

$$P_{av}(z) = \frac{1}{2} \operatorname{Re}\left\{\mathbf{V}^{T}(z)\mathbf{I}^{*}(z)\right\} = \frac{1}{2} \operatorname{Re}\left\{V_{1}(z)I_{1}^{*}(z) + V_{2}(z)I_{2}^{*}(z) + \dots + V_{n}(z)I_{n}^{*}(z)\right\}$$
(3.107)

Επίσης λαμβάνοντας υπόψη τις (3.92) και (3.93) προκύπτει

$$P_{av}(z) = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left\{ V_{\pi}^{T}(z) I_{\pi}^{*}(z) + V_{\alpha}^{T}(z) I_{\pi}^{*}(z) - V_{\pi}^{T}(z) I_{\alpha}^{*}(z) + V_{\alpha}^{T}(z) I_{\alpha}^{*}(z) \right\}$$
(3.108)

Ο πρώτος όρος $V_{\pi}^{T}(z)I_{\pi}^{*}(z)$ αντιστοιχεί στη μέση ισχύ στο σημείο που οφείλεται στα προσπίπτοντα κύματα και ο τελευταίος όρος $V_{\alpha}^{T}(z)I_{\alpha}^{*}(z)$ αντιστοιχεί στη μέση ισχύ που οφείλεται στα ανακλώμενα κύματα. Οι δύο μεσαίοι όροι, $V_{\alpha}^{T}(z)I_{\pi}^{*}(z)$ και $V_{\pi}^{T}(z)I_{\alpha}^{*}(z)$, είναι διασταυρωτικοί όροι (cross-coupling terms) μεταξύ των δύο ειδών κυμάτων. Αν υποτεθεί ότι υπάρχει προσαρμοσμένος τερματισμός σε μια γραμμή MTL, η μήτρα Γ_{L} είναι μηδενική, οπότε από την (3.104) προκύπτει ότι η μήτρα ανάκλασης είναι μηδενική σε όλα τα σημεία της γραμμής, δηλαδή $\Gamma(z)=0$. Στην περίπτωση αυτή, επί της γραμμής MTL υπάρχουν μόνο προσπίπτοντα κύματα και δεν υπάρχει ισχύς που οδεύει κατά την κατεύθυνση – z. Αυτές οι ιδιότητες είναι ακριβώς αντίστοιχες με αυτές που ισχύουν στην περίπτωση γραμμών μεταφοράς δύο αγωγών. Η χρήση μητρών επιτρέπει την απευθείας επέκταση των γνωστών αποτελεσμάτων των γραμμών μεταφοράς δύο αγωγών στην περίπτωση γραμμών MTL [119], [144]-[146], [161].

κεφαλαίοΠΟΛΥΛΙΑΔΡΟΜΙΚΗμΔΙΑΔΟΣΗ ΣΕΓΡΑΜΜΕΣμΜΕΤΑΦΟΡΑΣ

4.1 Εισαγωγή

Στο Κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι διάφορες μέθοδοι για την περιγραφή του φαινομένου της πολυδιαδρομικής διάδοσης που εμφανίζεται σε διαύλους MT/BPL τόσο επί εναέριων όσο και επί υπόγειων γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος.

Αρχικά περιγράφεται το γενικό πρόβλημα της διάδοσης ρυθμών σε γραμμές MTL [106], [119], [161], [162] και η γενικευμένη ανάλυση με χρήση πολυδιάστατων μητρών σκέδασης SM (multidimensional Scattering Matrices) [134], [135], [163]. Στη συνέχεια, με βάση τρεις θεμελιώδεις υποθέσεις η γενικευμένη ανάλυση της διάδοσης πολλών ρυθμών μέσω γραμμών MTL μπορεί να απλοποιηθεί σε ανάλυση ανεξάρτητων ρυθμών.

Στη συνέχεια, η πολυδιαδρομική συμπεριφορά των ανεξάρτητων αυτών διαύλων MT/BPL αντιμετωπίζεται με χρήση: της πολυδιαδρομικής μεθόδου ηχούς MEB (Multipath Echo Based method), της μεθόδου μητρών ABCD (ABCD method), της μεθόδου μητρών μεταφοράς TM (*T*-Matrix method) και της υβριδικής μεθόδου χάρτη Smith HSC (Hybrid Smith Chart method).

4.2 Ανάλυση Διαύλων Μετάδοσης ΜΤ/BPL με Χρήση Πολυδιάστατων Μητρών Σκέδασης

Μέσω της μητρικής προσέγγισης που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 3, η κλασική ανάλυση δισυρμάτων γραμμών μεταφοράς μπορεί να επεκταθεί για να καλύψει περιπτώσεις διατάξεων MTL με περισσότερους από δύο αγωγούς. Σε σχέση με μια γραμμή δύο αγωγών που υποστηρίζει δύο κύματα οδεύοντα κατά αντίθετες κατευθύνσεις επί της γραμμής, μια διάταξη MTL με *n* παράλληλους αγωγούς και το έδαφος που λειτουργεί ως επιστροφή μπορεί να υποστηρίζει *n* ζεύγη κυμάτων που

οδεύουν με την ίδια μιγαδική σταθερά διάδοσης κατά αντίθετες κατευθύνσεις. Ένα δίκτυο μεταφοράς MT αποτελείται από μια κύρια γραμμή μεταφοράς διανομής που εκκινεί από μετασχηματιστές YT/MT, διακλαδώνεται με γραμμές μεταφοράς διακλαδώσεων και φθάνει μέχρι την τελική σύνδεση. Λαμβάνοντας υπόψη τους ρυθμούς που μπορεί να υποστηρίξει κάθε γραμμή MTL, οι *n* τάσεις και τα *n* ρεύματα γραμμής μπορούν να αναλυθούν σε γραμμικούς συνδυασμούς *n* τάσεων ρυθμών και *n* ρευμάτων ρυθμών, αντίστοιχα [106], [134], [135], [162]-[167]. Σύμφωνα με τη θεωρία MTL, μέσω των μητρών διάδοσης, κάθε τμήμα της γραμμής MTL περιγράφεται ισοδυνάμως ως δίθυρο τύπου Π έχοντας ίδια συνάρτηση μεταφοράς (transfer function). Μέσω της διαδικασίας αυτής, το συνολικό δίκτυο περιγράφεται ως αλυσιδωτή σύνδεση διθύρων τύπου Π.

Με χρήση της τεχνολογίας BPL, στο ενεργειακό δίκτυο κορμού δημιουργείται μια νέα πλατφόρμα IP για παροχή κάθε είδους υπηρεσιών και κάθε είδους πρόσβασης. Η ύπαρξη γραμμών μεταφοράς διαφορετικών τύπων, διαφορετικού πλήθους αγωγών, οι κάθε είδους διασυνδέσεις στα σημεία διακλαδώσεων και φορτία τερματισμού διαμορφώνουν την τοπολογία ενός νέου ενσύρματου υποβάθρου ευρυζωνικής μετάδοσης σημάτων BPL. Έτσι, επί του ίδιου φυσικού μέσου συνυπάρχουν δύο "οντότητες"/λειτουργίες: η ενεργειακή μεταφορά ισχύος στα 50 ή 60Hz και η ευρυζωνική μετάδοση στο εύρος 1-100MHz. Οι ευρυζωνικοί διαποδιαμορφωτές (BPL modems) ή τερματισμοί δικτύων (Network Terminations, NT) μπορούν να συνδεθούν σε τερματικά σημεία και να επικοινωνούν με το δίκτυο τηλεπικοινωνιακού κορμού που συνδέεται σε κάποιο κεντρικό υποσταθμό ή επαναλήπτη ή τερματισμό γραμμής (Line Termination, LT). Έτσι, μετά τη σύνδεση των μονάδων BPL το δίκτυο μεταφοράς ισχύος MT καθίσταται και δίκτυο ευρυζωνικής πρόσβασης MT/BPL.

Η αξιολόγηση της εκάστοτε δημιουργούμενης τηλεπικοινωνιακής ζεύξης απαιτεί τη γνώση της από-άκρο-σε-άκρο συνάρτησης μεταφοράς. Ο συνολικός απόάκρο-σε-άκρο τηλεπικοινωνιακός δίαυλος μπορεί να θεωρηθεί ως αλληλουχία επιμέρους τμημάτων λαμβάνοντας υπόψη την ύπαρξη διακλαδώσεων και τους αντίστοιχους τερματισμούς. Στο Σχήμα 4.1 παρουσιάζεται μια ισοδύναμη συνολική τοπολογία ενός δικτύου πρόσβασης MT/BPL [134], [135], [163]. Υπάρχουν πολλές παραλλαγές της γενικής μορφής που απεικονίζεται στο Σχήμα 4.1 που κατηγοριοποιούνται σε διάφορες κλάσεις διαύλων MT/BPL. Για τη δημιουργία των αντίστοιχων μοντέλων πρέπει να λαμβάνονται υπόψη τα ακόλουθα χαρακτηριστικά των δικτύων MT:

- 1. Ο συνολικός αριθμός των διακλαδώσεων \hat{K} .
- Η θέση των K ≤ K κυκλωματικών στοιχείων που σχετίζονται με τη μετάδοση BPL όπως διαποδιαμορφωτές κλπ επί της γραμμής μεταφοράς MT. Οι K – K διακλαδώσεις που απομένουν αντιστοιχούν σε απλά σημεία διανομής ισχύος (π.χ μετασχηματιστές MT/XT) χωρίς να παρέχουν ενσύρματη πρόσβαση BPL.
- 3. Τα μήκη των διαφόρων τμημάτων γραμμών μεταφοράς.
- Το είδος των αντιστοίχων γραμμών μεταφοράς: αριθμός αγωγών, πλήθος ρυθμών, μιγαδική σταθερά διάδοσης και χαρακτηριστική αντίσταση κάθε ρυθμού.
- 5. Το είδος των διακλαδώσεων (π.χ διασυνδέσεις αγωγών).
- Το είδος των διαφόρων τερματισμών (προσαρμοσμένοι, ανοικτοκυκλωμένοι, άλλοι).

4.2.1 Πολυδιάστατη Μήτρα Σκέδασης

Όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 4.2, τα διάφορα τμήματα και στοιχεία (πηγές, τμήματα γραμμών, σημεία διακλαδώσεων και τερματισμοί) που απαρτίζουν ένα δίκτυο πρόσβασης MT/BPL μπορούν να περιγραφούν μέσω των αντίστοιχων μητρών σκέδασης **S** που συνδέουν τα εξερχόμενα κύματα με τα εισερχόμενα κύματα.

Η ομαδοποίηση διαδοχικών στοιχείων του δικτύου πραγματοποιείται θεωρώντας τη σειριακή σύνδεση των αντίστοιχων μητρών σκέδασης. Για τη μαθηματική διαχείριση των θεμάτων αυτών, επιλέγονται κατάλληλες μήτρες σκέδασης, που λαμβάνουν υπόψη την ύπαρξη γραμμών μεταφοράς με διαφορετικό



Σχήμα 4.1: Δίκτυο πολλαπλής πρόσβασης ΜΤ/BPL.



[134].

αριθμό αγωγών και, γενικά, με διαφορετικά χαρακτηριστικά [134], [135], [163], [164], [169]-[172].

Υποθέτοντας ότι δίκτυο με μήτρα σκέδασης \mathbf{S}_x N_1 εισόδων και N_2 εξόδων συνδέεται σειριακά προς δίκτυο με μήτρα σκέδασης \mathbf{S}_y N_2 εισόδων και N_3 εξόδων όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.3α, τα στοιχεία της μήτρας σκέδασης \mathbf{S} που περιγράφει το συνδυασμό τους προκύπτουν από τις σχέσεις

$$\mathbf{S}_{11} = \mathbf{S}_{11}^{T} = \mathbf{S}_{x,11} + \mathbf{S}_{x,12} \left(\mathbf{I}_{N_2} - \mathbf{S}_{y,11} \mathbf{S}_{x,22} \right)^{-1} \mathbf{S}_{y,11} \mathbf{S}_{x,21}$$
(4.1)

$$\mathbf{S}_{12} = \mathbf{S}_{21}^{T} = \mathbf{S}_{x,12} \left(\mathbf{I}_{N_2} - \mathbf{S}_{y,11} \mathbf{S}_{x,22} \right)^{-1} \mathbf{S}_{y,12}$$
(4.2)

$$\mathbf{S}_{22} = \mathbf{S}_{22}^{T} = \mathbf{S}_{y,22} + \mathbf{S}_{y,21} \left(\mathbf{I}_{N_{2}} - \mathbf{S}_{x,22} \mathbf{S}_{y,11} \right)^{-1} \mathbf{S}_{x,22} \mathbf{S}_{y,12}$$
(4.3)

όπου \mathbf{I}_n είναι η $n \times n$ μοναδιαία μήτρα.

Επίσης, η κυκλωματική μεταφορά μιας μήτρας ανάκλασης \mathbf{K}_{out} N_2 εισόδων μέσω μιας μήτρας σκέδασης \mathbf{S} N_1 εισόδων και N_2 εξόδων όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.3β, οδηγεί σε μήτρα ανάκλασης \mathbf{K}_{in} N_1 εισόδων που δίδεται από τη σχέση

$$\mathbf{K}_{in} = \mathbf{S}_{11} + \mathbf{S}_{12} (\mathbf{I}_{N_2} - \mathbf{K}_{out} \mathbf{S}_{22})^{-1} \mathbf{K}_{out} \mathbf{S}_{21}$$
(4.4)

4.2.2 Βάση Αναφοράς και Αλλαγή Μήτρας Βάσης

Ας θεωρηθεί τμήμα γραμμής μεταφοράς n+1 αγωγών με ανά μονάδα μήκους $n \times n$ μήτρες **Z** και **Y**. Ο ορισμός μιας μήτρας σκέδασης **S** σχετίζεται με τον



Σχήμα 4.3: Σειριακή σύνδεση μητρών σκέδασης: (α) Μήτρες σκέδασης σε σειρά. (β) Μεταφορά μήτρας ανάκλασης μέσω μήτρας σκέδασης.

ορισμό των κυμάτων **A** και **B**. Σε εφαρμογές γραμμών μεταφοράς τα κύματα αυτά μπορούν να εκφραστούν συναρτήσει των τάσεων γραμμής **V** και ρευμάτων γραμμής **I**. Η αλλαγή από το ζεύγος (**V**, **I**) στο ζεύγος (**A**,**B**) πραγματοποιείται μέσω των σχέσεων

$$\mathbf{A}(z) = 0.5\mathbf{U}^{-1}\mathbf{V}(z) + 0.5\mathbf{J}^{-1}\mathbf{I}(z)$$
(4.5)

$$\mathbf{B}(z) = 0.5\mathbf{U}^{-1}\mathbf{V}(z) - 0.5\mathbf{J}^{-1}\mathbf{I}(z)$$
(4.6)

όπου **U**, **J** οι μήτρες ρυθμών (modal matrices). Το ζεύγος των μητρών των ρυθμών (\mathbf{U}, \mathbf{J}) αποτελεί μια ιδιοβάση (eigenbase) ή βάση αναφοράς (reference basis) και μαζί με τη μήτρα γ αποτελούν τη λύση του προβλήματος διάδοσης ρυθμών

(eigenproblem) μιας διάταξης MTL. Οι μήτρες U, J και γ συνδέονται μέσω των σχέσεων [119], [136], [163]

$$\mathbf{U}^{-1}(\mathbf{Z}\mathbf{Y})\mathbf{U} = \boldsymbol{\gamma}^2 \tag{4.7}$$

$$\mathbf{U}^T \mathbf{J} = \mathbf{I}_n \tag{4.8}$$

Οι μήτρες **U**, **J** έχουν διαστάσεις τετραγωνικής ρίζας σύνθετης αντίστασης και ικανοποιούν τη συνθήκη κανονικοποίησης (4.8). Τότε, τα κύματα **A** και **B** που εμφανίζονται στις (4.5) και (4.6) έχουν διαστάσεις τετραγωνικής ρίζας ισχύος. Ο ορισμός των ρυθμών που κάθε διάταξη MTL μπορεί να υποστηρίξει οδηγεί στην επιλογή των μητρών των ρυθμών. Η υποστήριξη από μια γραμμή μεταφοράς n+1 αγωγών n ρυθμών διάδοσης με μιγαδικές σταθερές διάδοσης γ_i , i = 1,...,n οδηγεί στον ορισμό n από-άκρο-σε-άκρο συναρτήσεων μεταφοράς των ρυθμών ή n υπομητρών σκέδασης για την περιγραφή της συμπεριφοράς των αντίστοιχων διθύρων ως προς τον αντίστοιχο ρυθμό. Οι στήλες των μητρών των ρυθμών **U**, **J** είναι τα n ιδιοδιανύσματα (eigenvectors) τάσης και ρεύματος, αντίστοιχα.

Κατά τη σειριακή σύνδεση τμημάτων γραμμών που έχουν διαφορετικό αριθμό αγωγών χρειάζεται να οριστούν διαφορετικές βάσεις αναφοράς για τα διάφορα τμήματα του δικτύου και μια κοινή βάση αναφοράς $(\mathbf{U}_R, \mathbf{J}_R)$ και να χρησιμοποιηθεί σε όλο το δίκτυο. Αυτό είναι απαραίτητο, διότι αφού κάθε τμήμα υποστηρίζει τους δικούς του ρυθμούς είναι αναγκαία μια κοινή βάση αναφοράς $(\mathbf{U}_R, \mathbf{J}_R)$ να επιτρέπει την περιγραφή με ενιαίο τρόπο τις από-άκρο-σε-άκρο συναρτήσεις μεταφοράς των ρυθμών.

Επίσης, η αλλαγή βάσης αναφοράς κάθε τμήματος σε μια κοινή βάση αναφοράς σε όλο το δίκτυο είναι απαραίτητη δεδομένου ότι κατά τη σειριακή σύνδεση τμημάτων οι τάσεις και τα ρεύματα που περιγράφονται μέσω των (4.7) και (4.8) στα σημεία συνδέσεων είναι ίσα. Επομένως, για να καταστεί εφικτή η άμεση σειριακή σύνδεση διαφορετικών τμημάτων γραμμών MTL χρησιμοποιείται η σχέση αλλαγής βάσης

$$\begin{bmatrix} \mathbf{B}_{x} \\ \mathbf{A}_{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (\boldsymbol{\Sigma}_{xy})_{11} & (\boldsymbol{\Sigma}_{xy})_{12} \\ (\boldsymbol{\Sigma}_{xy})_{12}^{T} & (\boldsymbol{\Sigma}_{xy})_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{x} \\ \mathbf{B}_{y} \end{bmatrix}$$
(4.9)

μέσω της οποίας κύματα $(\mathbf{A}_x, \mathbf{B}_x)$ που ορίζονται ως προς τη βάση $(\mathbf{U}_x, \mathbf{J}_x)$ συνδέονται με κύματα $(\mathbf{A}_y, \mathbf{B}_y)$ που ορίζονται ως προς τη βάση $(\mathbf{U}_y, \mathbf{J}_y)$. Οι υπομήτρες που εμφανίζονται στην (4.9) δίδονται από τις σχέσεις

$$\left(\boldsymbol{\Sigma}_{xy}\right)_{11} = \left(\mathbf{z}_{yx} + \mathbf{I}\right)^{-1} \left(\mathbf{z}_{yx} - \mathbf{I}\right) = \left(\boldsymbol{\Sigma}_{yx}\right)_{22}$$
(4.10)

$$\left(\boldsymbol{\Sigma}_{xy}\right)_{22} = \left(\boldsymbol{z}_{yx} + \boldsymbol{I}\right)^{-1} \left(\boldsymbol{z}_{xy} - \boldsymbol{I}\right) = \left(\boldsymbol{\Sigma}_{yx}\right)_{11}$$
(4.11)

$$\left(\boldsymbol{\Sigma}_{xy}\right)_{12} = 2\left(\mathbf{z}_{yx} + \mathbf{I}\right)^{-1} \mathbf{J}_{x}^{T} \mathbf{U}_{y} = \left(\boldsymbol{\Sigma}_{yx}\right)_{21}$$
(4.12)

όπου

$$\mathbf{z}_{yx} = \mathbf{J}_{x}^{T} \mathbf{U}_{y} \mathbf{U}_{y}^{T} \mathbf{J}_{x} = \mathbf{z}_{yx}^{T}$$
(4.13)

$$\mathbf{z}_{xy} = \mathbf{J}_{y}^{T} \mathbf{U}_{x} \mathbf{U}_{x}^{T} \mathbf{J}_{y} = \mathbf{z}_{xy}^{T}$$
(4.14)

4.2.3 Τμήματα Γραμμών Μεταφοράς

Η μήτρα σκέδασης που περιγράφει τη συμπεριφορά σε τμήμα γραμμής MTL μήκους *L* κατά τη διάδοση των ρυθμών που αυτή μπορεί να υποστηρίξει δίδεται από τη σχέση

$$\mathbf{S}_0 = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{T} \\ \mathbf{T} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \tag{4.15}$$

όπου $\mathbf{T} = diag[\exp(-\gamma L)]$ και γ η μήτρα μιγαδικών σταθερών διάδοσης των ρυθμών.

Ας θεωρηθεί ότι το ανωτέρω τμήμα της γραμμής MTL περιγράφεται με βάση αναφοράς $(\mathbf{U}_0, \mathbf{J}_0)$ ενώ η κοινή βάση αναφοράς για όλο το δίκτυο είναι $(\mathbf{U}_R, \mathbf{J}_R)$. Είναι χρήσιμο λοιπόν να εκφραστεί η μήτρα σκέδασης \mathbf{S}_0 ενός τμήματος γραμμής μεταφοράς ως προς την επιλεγμένη βάση αναφοράς $(\mathbf{U}_R, \mathbf{J}_R)$. Αυτό μπορεί να προκύψει από την αριστερή και τη δεξιά σε σειρά σύνδεση της αρχικής μήτρας \mathbf{S}_0 με τις μήτρες αλλαγής βάσης $\boldsymbol{\Sigma}_{R0}$ και $\boldsymbol{\Sigma}_{0R}$ αντίστοιχα. Το αποτέλεσμα είναι

$$(\mathbf{S}_{R})_{11} = (\mathbf{S}_{R})_{22} = (\mathbf{\Sigma}_{R0})_{11} + (\mathbf{\Sigma}_{R0})_{12} \mathbf{T} [\mathbf{I}_{N} - (\mathbf{\Sigma}_{R0})_{22} \mathbf{T} (\mathbf{\Sigma}_{R0})_{22} \mathbf{T}]^{-1} (\mathbf{\Sigma}_{R0})_{22} \mathbf{T} (\mathbf{\Sigma}_{R0})_{21} \quad (4.16)$$

$$(\mathbf{S}_{R})_{12} = (\mathbf{S}_{R})_{21}^{T} = (\mathbf{\Sigma}_{R0})_{12} \mathbf{T} [\mathbf{I}_{N} - (\mathbf{\Sigma}_{R0})_{22} \mathbf{T} (\mathbf{\Sigma}_{R0})_{22} \mathbf{T}]^{-1} (\mathbf{\Sigma}_{R0})_{21}$$
(4.17)

4.2.4 Περιγραφή Σημείων Διακλαδώσεων Γραμμών MTL

Ας θεωρηθεί κύρια γραμμή μεταφοράς MT/BPL με N αγωγούς, βάση αναφοράς $(\mathbf{U}_c, \mathbf{J}_c)$ και τάσεις γραμμών που δηλώνονται με το δείκτη $[\cdot]_c$. Σε κάποιο

σημείο της κυρίας γραμμής μεταφοράς συνδέεται γραμμή μεταφοράς διακλάδωσης με n αγωγούς, βάση αναφοράς $(\mathbf{U}_d, \mathbf{J}_d)$ και τάσεις γραμμών που δηλώνονται με το δείκτη $[\cdot]_d$. Επίσης, ας θεωρηθεί η $n \times N$ μήτρα σύνδεσης **C** μέσω της οποίας περιγράφονται οι συνδέσεις των αγωγών της κυρίας γραμμής μεταφοράς με τους αγωγούς της γραμμής μεταφοράς διακλάδωσης, δηλαδή

$$\mathbf{V}_d = \mathbf{C}\mathbf{V}_c \tag{4.18}$$

όπου τα στοιχεία της μήτρας **C** είναι 1 και 0, αντίστοιχα με το αν υπάρχει ή όχι η σύνδεση. Στο Σχήμα 4.4 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα μήτρας σύνδεσης που αφορά κύρια γραμμή μεταφοράς με N = 4 και διακλάδωση με n = 2 αγωγούς. Εξ ορισμού, η μήτρα σύνδεσης ικανοποιεί τη σχέση $\mathbf{CC}^T = \mathbf{I}_n$. Μέσω της σχέσης

$$\mathbf{D} = \mathbf{J}_d^T \mathbf{N}_d^{-1} \mathbf{C} \mathbf{N}_c \mathbf{U}_c \tag{4.19}$$

ορίζεται η τροποποιημένη μήτρα σύνδεσης **D** ώστε να διευκολυνθεί ο υπολογισμός της μήτρας σκέδασης στα σημεία διακλαδώσεων όταν κύρια γραμμή MTL και η γραμμή διακλάδωσης MTL έχουν διαφορετικό πλήθος αγωγών [134], [135], [163]. Στην (4.19), οι \mathbf{N}_c , \mathbf{N}_d είναι μήτρες με διαστάσεις $N \times N$ και $n \times n$, αντίστοιχα, με στήλες τα ιδιοδιανύσματα της κυρίας γραμμής MTL και της γραμμής διακλάδωσης MTL, αντίστοιχα. Σε κάθε σημείο διακλάδωσης, που αντιστοιχεί συνήθως σε ένα δίκτυο τριών θυρών, προκύπτει ανάγκη υπολογισμού της μήτρας σκέδασης όταν μια από τις θύρες αυτές τερματίζεται με γνωστό φορτίο, όπως ενδεικτικά συμβαίνει στο Σχήμα 4.5. Η μετάδοση σημάτων MT/BPL κατά μήκος της κυρίας γραμμής μεταφοράς περιγράφεται από τις σχέσεις [134], [135], [163]

$$\mathbf{S}_{11} = \mathbf{S}_{22} = \mathbf{T} \tag{4.20}$$

$$\mathbf{S}_{12} = \mathbf{S}_{21} = \mathbf{I}_N + \mathbf{T} \tag{4.21}$$

$$\mathbf{T} = \mathbf{D}^{T} (\mathbf{K}_{d} - \mathbf{I}_{n}) [\mathbf{D}\mathbf{D}^{T} (\mathbf{I}_{n} - \mathbf{K}_{d}) + 2(\mathbf{I}_{n} + \mathbf{K}_{d})]^{-1} \mathbf{D}$$
(4.22)

Στο Σχήμα 4.6, θεωρείται ότι υπάρχει σύνδεση φορτίου στην πλευρά της κυρίας γραμμής μεταφοράς. Η μετάδοση σήματος MT/BPL από την κύρια γραμμή μεταφοράς στη γραμμή μεταφοράς διακλάδωσης περιγράφεται από μήτρα σκέδασης **S** με στοιχεία [134], [135], [163]

$$\mathbf{S}_{11} = \mathbf{S}_{11}^{T} = \mathbf{K}_{c} - (\mathbf{I}_{N} + \mathbf{K}_{c})\mathbf{D}^{T} [\mathbf{D}(\mathbf{I}_{N} + \mathbf{K}_{c})\mathbf{D}^{T} + 2\mathbf{I}_{n}]^{-1}\mathbf{D}(\mathbf{I}_{N} + \mathbf{K}_{c})$$
(4.23)

$$\mathbf{S}_{12} = \mathbf{S}_{21}^{T} = 2(\mathbf{I}_{N} + \mathbf{K}_{c})\mathbf{D}^{T} [\mathbf{D}(\mathbf{I}_{N} + \mathbf{K}_{c})\mathbf{D}^{T} + 2\mathbf{I}_{n}]^{-1}$$
(4.24)



Σχήμα 4.4: Παράδειγμα σύνδεσης αγωγών και αντίστοιχη μήτρα σύνδεσης.



Σχήμα 4.5: Μήτρα σκέδασης που αφορά διακλάδωση προς γνωστό τερματισμό (η μετάδοση MT/BPL γίνεται κατά μήκος της κυρίας γραμμής μεταφοράς).



Σχήμα 4.6: Μήτρα σκέδασης που αφορά τη μετάδοση σημάτων MT/BPL από την κύρια γραμμή μεταφοράς προς τη γραμμή μεταφοράς διακλάδωσης.

$$\mathbf{S}_{22} = \mathbf{S}_{22}^{T} = \left[\mathbf{D} (\mathbf{I}_{N} + \mathbf{K}_{c}) \mathbf{D}^{T} + 2\mathbf{I}_{n} \right]^{-1} \left[\mathbf{D} (\mathbf{I}_{N} + \mathbf{K}_{c}) \mathbf{D}^{T} - 2\mathbf{I}_{n} \right]$$
(4.25)

4.2.5 Τερματισμοί Γραμμής

Οι ενεργοί και οι παθητικοί τερματισμοί των γραμμών χαρακτηρίζονται από πολυδιάστατη πηγή τάσης και σύνθετη αντίσταση. Οι ενεργοί τερματισμοί (πηγές) – δηλαδή οι μονάδες BPL σε λειτουργία έγχυσης– περιγράφονται κυκλωματικά μέσω του ισοδυνάμου κατά Thévenin κυκλώματος

$$\mathbf{V} = \mathbf{E}_g - \mathbf{Z}_g \mathbf{I} \tag{4.26}$$

όπου \mathbf{Z}_{g} είναι η διαγώνια μήτρα της σύνθετης αντίστασης πηγής και η (4.26) είναι ένα διάνυσμα στήλης που περιγράφει την τάση των πηγών. Τα κύματα **A** και **B** ως προς τη βάση αναφοράς $(\mathbf{U}_{R}, \mathbf{J}_{R})$ προκύπτουν από τη σχέση

$$\mathbf{A} = \mathbf{g} - \mathbf{K}_{g} \mathbf{B} \tag{4.27}$$

όπου

$$\mathbf{g} = \left(\mathbf{z}_g + \mathbf{I}_N\right)^{-1} \mathbf{U}_R \mathbf{E}_g = \frac{1}{2} \left(\mathbf{I}_N - \mathbf{K}_g\right) \mathbf{U}_R \mathbf{E}_g$$
(4.28)

$$\mathbf{K}_{g} = \left(\mathbf{z}_{g} + \mathbf{I}_{N}\right)^{-1} \left(\mathbf{z}_{g} - \mathbf{I}_{N}\right)$$
(4.29)

και

$$\mathbf{z}_g = \mathbf{J}_R^T \mathbf{Z}_g \mathbf{J}_R \tag{4.30}$$

είναι η περιορισμένη μήτρα σύνθετης αντίστασης πηγής ή ανά μονάδα μήκους μήτρα σύνθετης αντίστασης πηγής των ρυθμών [134], [135], [163].

Ομοίως, ένας παθητικός τερματισμός σε κάποιο άκρο της γραμμής –δηλαδή οι μονάδες BPL σε λειτουργία λήψης– περιγράφεται κυκλωματικά μέσω της σχέσης

$$\mathbf{V} = \mathbf{Z}_L \mathbf{I} \tag{4.31}$$

Η σχέση μεταξύ των κυμάτων A και B δίδεται μέσω της μήτρας ανάκλασης $\mathbf{K}_{\scriptscriptstyle L}$

$$\mathbf{B} = \mathbf{K}_L \mathbf{A} \tag{4.32}$$

όπου

$$\mathbf{K}_{L} = (\mathbf{z}_{L} + \mathbf{I}_{N})^{-1} (\mathbf{z}_{L} - \mathbf{I}_{N}) = (\mathbf{z}_{L} - \mathbf{I}_{N}) (\mathbf{z}_{L} + \mathbf{I}_{N})^{-1}$$
(4.33)

και

$$\mathbf{z}_{L} = \mathbf{J}_{R}^{T} \mathbf{Z}_{L} \mathbf{J}_{R}$$

$$(4.34)$$

είναι η περιορισμένη μήτρα σύνθετης αντίστασης φορτίου ή ανά μονάδα μήκους μήτρα σύνθετης αντίστασης φορτίου των ρυθμών [134], [135], [163].

4.2.6 Γενικό Πολυδιάστατο Εργαλείο Ανάλυσης Δικτύων Γενικής Χρήσης

Ένα γενικό πολυδιάστατο εργαλείο ανάλυσης δικτύων γενικής χρήσης με βάση την προηγηθείσα ανάλυση είναι εφαρμόσιμο σε αυθαίρετη τοπολογία δικτύων, με οποιοδήποτε τύπο γραμμής μεταφοράς στα διαφορετικά τμήματα δικτύων. Αρχικά, προσδιορίζονται οι ρυθμοί διάδοσης που υποστηρίζονται από κάθε τύπο γραμμής μεταφοράς που υπάρχει στο δίκτυο. Αυτό είναι εφικτό όταν έχουν υπολογιστεί οι θεμελιώδεις παράμετροι κάθε τμήματος, δηλαδή η βάση αναφοράς και οι μιγαδικές σταθερές διάδοσης. Αφού καθοριστούν για κάθε τμήμα οι βάσεις αναφοράς, υπολογίζονται οι πολυδιάστατες μήτρες σκέδασης και εκφράζονται ως προς την κατάλληλη βάση αναφοράς. Χρησιμοποιώντας την άλγεβρα μητρών σκέδασης που προηγήθηκε και περιγράφοντας με ακριβή τρόπο τις διάφορες διακλαδώσεις και τους τερματισμούς, προκύπτει η μήτρα μεταφοράς **T** που συνδέει το διάνυσμα κυμάτων εισόδου στον *k*-οστό NT, *k* = 1,..., \hat{K} ή σε LT με την πηγή **g** δηλαδή

 $\mathbf{A} = \mathbf{T}\mathbf{g}$

(4.35)

Οι διαστάσεις κάθε μήτρας μεταφοράς εξαρτώνται από το πλήθος των αγωγών, το πλήθος των LT και από το πλήθος των διακλαδώσεων [134], [135], [163], [164], [169]-[172].

4.3 Ανάλυση Δικτύων MT/BPL

Η γενικευμένη ανάλυση με χρήση πολυδιάστατων μητρών σκέδασης που μόλις παρουσιάστηκε είναι μια εξαιρετικά ισχυρή μέθοδος δεδομένου ότι είναι σε θέση να προβλέψει τη συμπεριφορά δικτύων που περιλαμβάνουν γραμμές μεταφοράς διαφορετικών τύπων, διαφορετικού πλήθους αγωγών, οποιουδήποτε τύπου διασυνδέσεις στα σημεία διακλαδώσεων και οποιουδήποτε τύπου φορτία τερματισμού. Επίσης, μπορεί να αναλυθεί και το πρόβλημα της ανάμιξης ρυθμών (mode mixing), δηλαδή του φαινομένου κατά το οποίο σε κάποια σημεία του δικτύου όπου υπάρχουν μη ισορροπημένες διακλαδώσεις ή τερματισμοί (unbalanced derivations or terminations) η διάδοση ενός ρυθμού προκαλεί τη διέγερση και άλλων ρυθμών.

Οι ρυθμοί διάδοσης που υποστηρίζονται από μια διάταξη MT/BPL, έκαστος με τα δικά του χαρακτηριστικά διάδοσης, μπορούν να εξεταστούν ανεξάρτητα σε ένα δίκτυο MT/BPL εφόσον ισχύουν οι ακόλουθες τρεις παραδοχές [134], [135], [146], [162]-[165]:

- Α1. Κατά μήκος του δικτύου χρησιμοποιούνται γραμμές μεταφοράς που υποστηρίζουν ταυτόσημους ρυθμούς. Οι διακλαδώσεις και οι τερματισμοί θεωρούνται τελείως ισορροπημένοι (perfectly balanced) επιτρέποντας έτσι τη θεώρηση ότι δεν υπάρχει ανάμιξη ρυθμών σε κανένα σημείο του δικτύου. Επομένως, η προηγηθείσα γενικευμένη ανάλυση με χρήση πολυδιάστατων μητρών σκέδασης απλοποιείται σε ανάλυση των ανεξάρτητων διαύλων που αντιστοιχούν στους διακριτούς ρυθμούς που υποστηρίζονται από συγκεκριμένη διάταξη MTL.
- A2. Οι γραμμές μεταφοράς διακλαδώσεων είναι πανομοιότυπες με τις γραμμές μεταφοράς διανομής οπότε όλοι οι ρυθμοί οι οποίοι διαδίδονται κατά μήκος των διαφόρων τμημάτων γραμμών μεταφοράς είναι κοινοί.
- A3. Οι τερματισμοί συμπεριφέρονται ανεξάρτητα από τη συχνότητα αφού είναι είτε ανοικτοκυκλώματα είτε προσαρμοσμένοι προς τις γραμμές MTL μέσω διατάξεων σύζευξης προσαρμοσμένων προς τους ρυθμούς διάδοσης (adaptive modal impedance matching) [173]-[176].

Λόγω των ανωτέρω παραδοχών, οι ρυθμοί που διαδίδονται στις γραμμές MT είναι διακριτοί οδηγώντας στη μελέτη ανεξάρτητων διαύλων μετάδοσης αντίστοιχων προς τους ρυθμούς που υποστηρίζονται από τη γραμμή. Οι διακριτοί αυτοί ρυθμοί μεταφέρουν σήματα BPL συγχρόνως.

Για την ανάλυση της διάδοσης των ανεξάρτητων ρυθμών που υποστηρίζονται από μια γραμμή MT/BPL θεωρείται ότι τα άκρα εκπομπής και λήψης (σημεία Α και B, αντίστοιχα, στο Σχήμα 4.7) τερματίζονται με τη χαρακτηριστική αντίσταση του εκάστοτε εξεταζόμενου ρυθμού. Επίσης, θεωρείται απευθείας έγχυση ισχύος στον εκάστοτε εξεταζόμενο ρυθμό [65], [106], [134], [135], [162], [164], [165], [177].





Με βάση το Σχήμα 4.7, η από-άκρο-σε-άκρο συνάρτηση μεταφοράς ενός διαύλου MT/BPL δίδεται από τη σχέση

$$H(f) = \frac{V_{out}(f)}{V_{in}(f)}$$
(4.36)

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τέσσερις μέθοδοι για τον υπολογισμό της H(f).

4.4 Η Πολυδιαδρομική Μέθοδος Ηχούς (Μέθοδος ΜΕΒ)

Η μέθοδος ΜΕΒ βασίζεται σε μεθόδους που ακολουθούνται στους ασύρματους διαύλους και χρησιμοποιείται ευρέως λόγω της απλότητας και της επαναληπτικής φύσης των υπολογισμών [65], [177]-[179].

Στην περίπτωση προσαρμοσμένης γραμμής μεταφοράς δύο αγωγών, η συνάρτηση μεταφοράς H(f) μπορεί να εκφραστεί συναρτήσει της μιγαδικής σταθεράς διάδοσης γ . Η τάση V(f,L) σε απόσταση L από την πηγή δίδεται από τη σχέση

$$V(f,L) = H(f,L)V(f,0)$$
(4.37)

όπου

$$H(f,L) = e^{-\gamma(f)L} = e^{-\alpha(f)L} e^{-j\beta(f)L}$$
(4.38)

και V(f,0) είναι η τάση στην είσοδο της υπό εξέταση γραμμής μεταφοράς. Όταν είναι γνωστή η μιγαδική σταθερά διάδοσης $\gamma(f)$ εύκολα προσδιορίζεται η συνάρτηση μεταφοράς της γραμμής μεταφοράς ως προς οποιοδήποτε σημείο της γραμμής.

Δεδομένου ότι οι γραμμές MTL υποστηρίζουν περισσότερους του ενός ρυθμούς έκαστος των οποίων εμφανίζει διαφορετική σταθερά διάδοσης, η διάδοση κάθε ρυθμού χαρακτηρίζεται από διαφορετική συνάρτηση μεταφοράς.

Από πλευράς μετάδοσης τηλεπικοινωνιακών σημάτων μια γραμμή MT πρέπει να αντιμετωπιστεί ως πολυδιαδρομικός δίαυλος, αφού η μετάδοση σημάτων BPL δεν πραγματοποιείται μόνο απευθείας από το σημείο εκπομπής προς το σημείο λήψης – κατ'αναλογία της απευθείας λήψης στις ασύρματες επικοινωνίες (Line-of-Sight ή LOS περίπτωση)– αλλά στη μετάδοση εμπλέκονται και τα ανακλώμενα/μεταδιδόμενα σήματα ηχούς (echo signals) που προκαλούνται λόγω ασυνεχειών στις διακλαδώσεις και τους τερματισμούς. Η μέθοδος MEB αναπτύχθηκε για να περιγράψει μια γραμμή μεταφοράς ως ευρυζωνικό δίαυλο όπου πραγματοποιείται πολυδιαδρομική διάδοση σημάτων MT/BPL [65], [177], [180], [181].

Εκτός από την εξασθένηση που προκαλείται κατά την απευθείας σύνδεση πομπού και δέκτη –που, όπως αναφέρθηκε, είναι αντίστοιχη της LOS εξασθένησης των ασύρματων επικοινωνιών με εκθετική, όμως, εξάρτηση από την απόσταση– δημιουργούνται πολλαπλές εκδοχές του σήματος BPL λόγω των ανακλάσεων στα σημεία διακλαδώσεων και τερματισμών [182]. Ως συντελεστής ανάκλασης σε κάθε κόμβο ορίζεται ο λόγος της ανακλώμενης ισχύος προς την ισχύ που φθάνει στη διακλάδωση.

Οι διάφορες ανακλάσεις δημιουργούν εκδοχές του σήματος MT/BPL που ακολουθούν διαδρομές διαφορετικές της απευθείας διαδρομής από το άκρο-πομπό στο άκρο-δέκτη, δηλαδή της LOS διαδρομής. Κατ' αυτόν τον τρόπο δημιουργείται ένας δίαυλος πολλαπλών διαδρομών –πολυδιαδρομικός δίαυλος (multipath channel)– που εμφανίζει επιλεκτική συμπεριφορά ως προς τη συχνότητα. Το φαινόμενο της πολυδιαδρομικότητας κατά τη μετάδοση MT/BPL σημάτων είναι αντίστοιχο με αυτό που εμφανίζεται κατά την ασύρματη μετάδοση σημάτων σε περιβάλλον πολλαπλών ανακλάσεων [65], [177].

Όταν το σήμα MT/BPL διέρχεται μέσω μιας σύνδεσης διακλάδωσης για να οδεύσει προς το άκρο λήψης, πολλαπλασιάζεται με τον αντίστοιχο συντελεστή μετάδοσης. Αντιστοίχως, όταν ανακλασθεί από μια σύνδεση διακλάδωσης πολλαπλασιάζεται με τον αντίστοιχο συντελεστή ανάκλασης. Επομένως, κάθε διαδρομή χαρακτηρίζεται από ένα συντελεστή στάθμισης (weighting coefficient) *g* που προσδιορίζεται ως το γινόμενο των συντελεστών ανάκλασης και μετάδοσης στις συνδέσεις διακλάδωσης που συναντώνται κατά μήκος της από-άκρο-σε-άκρο διαδρομής του σήματος MT/BPL. Δεδομένου ότι οι συντελεστές ανάκλασης και μετάδοσης είναι κατά μέτρο ίσοι ή μικρότεροι της μονάδας, οι παράγοντες στάθμισης [180], [181].

Σε γραμμές MTL, η πολυδιαδρομική μετάδοση των ρυθμών διάδοσης MT/BPL (multipath modal transmission) μπορεί να μελετηθεί με τη βοήθεια του απλού παραδείγματος που απεικονίζεται στο Σχήμα 4.8, όπου κατά μήκος της



Σχήμα 4.8: Πολυδιαδρομική διάδοση σημάτων MT/BPL σε δίαυλο με ανοικτοκυκλωμένη διακλάδωση.

απευθείας διαδρομής A \rightarrow B υπάρχει μόνο μια διακλάδωση στο σημείο C. Το συγκεκριμένο απλό δίκτυο MT/BPL αποτελείται από τρία τμήματα (segments) με μήκη L_1 , L_2 και L_b . Για κάθε εξεταζόμενο ρυθμό τα τρία αυτά τμήματα εμφανίζουν κοινή χαρακτηριστική αντίσταση Z_{mc} .

Θεωρώντας ότι τα σημεία Α και Β του Σχήματος 4.8 τερματίζονται σε σύνθετες αντιστάσεις ίσες προς τη χαρακτηριστική αντίσταση του εξεταζόμενου ρυθμού, δηλαδή $Z_A = Z_{mc}$ και $Z_B = Z_{mc}$, τα μοναδικά σημεία όπου μπορούν να συμβούν ανακλάσεις είναι το C και το D. Με αναφορά στο Σχήμα 4.8 και λαμβάνοντας υπόψη τις μικροκυματικές παραδοχές σχετικά με τα τμήματα του δικτύου [65], [177], [183] στα σημεία αυτά προκύπτουν οι συντελεστές ανάκλασης r_{1c} , r_{3c} , r_{3D} και συντελεστές μετάδοσης t_{1c} , t_{3c} , t_{3D} με τιμές

$$r_{1C} = \frac{\left(Z_{mc} / / Z_{mc}\right) - Z_{mc}}{\left(Z_{mc} / / Z_{mc}\right) + Z_{mc}} = -\frac{1}{3}$$
(4.39)

$$r_{3D} = \frac{Z_D - Z_{mc}}{Z_D + Z_{mc}}$$
 ίσο με το 0 για προσαρμοσμένο φορτίο ($Z_D = Z_{mc}$) και ίσο με 1 όταν

υπάρχει ανοικτοκύκλωμα ($Z_D
ightarrow \infty$)

(4.40)

$$r_{3C} = \frac{\left(Z_{mc} / / Z_{mc}\right) - Z_{mc}}{\left(Z_{mc} / / Z_{mc}\right) + Z_{mc}} = -\frac{1}{3}$$
(4.41)

$$t_{1C} = 1 - \left| r_{1C} \right| = \frac{2}{3} \tag{4.42}$$

$$t_{3C} = 1 - \left| r_{3C} \right| = \frac{2}{3} \tag{4.43}$$

Οι εξισώσεις αυτές μπορούν να γραφούν υπό μορφή μητρών σε ένα σενάριο όπου εμπλέκονται γραμμές MTL (multiwire scenario), σύμφωνα με το οποίο υποστηρίζονται πολλοί ρυθμοί έκαστος των οποίων εμφανίζει διαφορετική μιγαδική σταθερά διάδοσης και, συνεπώς, διαφορετική συνάρτηση μεταφοράς. Υπό αυτές τις υποθέσεις και λόγω των πολλαπλών ανακλάσεων το πλήθος των διαδρομών διάδοσης θεωρητικά είναι άπειρο, δηλαδή υπάρχουν οι διαδρομές $A \rightarrow C \rightarrow B$, $A \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow C \rightarrow B$, $A \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow C \rightarrow D$, κτλ όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1.

Κάθε διαδρομή (path) *i* χαρακτηρίζεται από ένα συντελεστή στάθμισης g_i. Όσο περισσότερες διελεύσεις και ανακλάσεις λαμβάνονται υπόψη σε κάποια διαδρομή τόσο μικρότερος κατά μέτρο είναι ο συντελεστής στάθμισης, επειδή όπως προαναφέρθηκε, οι συντελεστές μετάδοσης και ανάκλασης είναι κατά μέτρο μικρότεροι από τη μονάδα. Επιπλέον, διαδρομές μεγαλύτερου μήκους εμφανίζουν υψηλότερη εξασθένηση, με αποτέλεσμα να συμβάλλουν λιγότερο στο συνολικό σήμα λήψης. Με βάση τις ανωτέρω παρατηρήσεις, είναι λογικό ο άπειρος αριθμός διαδρομών να προσεγγίζεται από ένα πεπερασμένο πλήθος κυρίαρχων διαδρομών (dominant paths) [180], [181].

Αύξων	Διαδρομή	Συντελεστής	Μήκος διαδρομής
αριθμός		στάθμισης (g_i)	(d_i)
διαδρομής			
1	A→C→B	t_{IC}	$L_{1} + L_{2}$
2	$A \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow C \rightarrow B$	$t_{1C}r_{3D}t_{3C}$	$L_1 + 2L_b + L_2$
N	$A \rightarrow C \rightarrow (D \rightarrow C)^{N-1} \rightarrow B$	$t_{1C}r_{3D}(r_{3C}r_{3D})^{(N-2)}t_{3C}$	$L_1 + 2(N-1)L_b + L_2$

Πίνακας 4.1: Διαδρομές διάδοσης για την από-άκρο-σε-άκρο σύνδεση Α→Β του Σχήματος 4.8. Με βάση τα προηγούμενα, η από-άκρο-σε-άκρο συνάρτηση μεταφοράς μπορεί να εκφραστεί ως άθροισμα πολυδιαδρομικών συνιστωσών που αντιστοιχούν σε διαφορετικά μήκη και συντελεστές στάθμισης. Λαμβάνοντας υπόψη την (4.36) κατά την κατεύθυνση πρόσπτωσης, η από-άκρο-σε-άκρο συνάρτηση μεταφοράς δίδεται από τη σχέση [65], [177]-[179], [183]

$$H(f) = \sum_{i=1}^{N} g_i e^{-\alpha(f)d_i} e^{-j\beta(f)d_i}$$
(4.44)

όπου N είναι το πλήθος των κυρίαρχων διαδρομών από τον πομπό (σημείο A) στο δέκτη (σημείο B), d_i το μήκος και g_i ο συντελεστής στάθμισης της διαδρομής i. Για την περιγραφή του από-άκρο-σε-άκρο διαύλου με χρήση της (4.44) απαιτείται η γνώση της μιγαδικής σταθεράς διάδοσης κάθε ρυθμού¹.

Η ανωτέρω έκφραση στο πεδίο της συχνότητας περιγράφει τη φασματική συμπεριφορά ενός τυπικού διαύλου MT/BPL χρησιμοποιώντας ένα σχετικά μικρό σύνολο παραμέτρων. Τα κυριότερα πλεονεκτήματα της μεθόδου MEB είναι:

- Η απλή εφαρμογή της σε συνήθεις τοπολογίες δικτύων γραμμών μεταφοράς MT.
- Η δυνατότητα της μεθόδου να εξάγει μέσω προσομοιώσεων γενικά συμπεράσματα που αφορούν τα δίκτυα MT/BPL.
- Η ομοιότητα της μεθόδου με μεθόδους ευρέως χρησιμοποιούμενες στις ασύρματες επικοινωνίες.

Το μειονέκτημα της μεθόδου MEB είναι η περικοπή του θεωρητικά άπειρου αριθμού διαδρομών σε πεπερασμένο πλήθος κυρίαρχων διαδρομών.

4.5 Ανάλυση Δικτύων Επικοινωνιών ΜΤ/ΒΡL με τη Χρήση Μητρικών Μεθόδων

Διάφορες μέθοδοι που βασίζονται στη χρήση κλασικών μητρών περιγραφής πολυθύρων δικτύων έχουν χρησιμοποιηθεί με συγκλίνοντα αποτελέσματα [164], [167] για τον προσδιορισμό της συνάρτησης μεταφοράς των ρυθμών μετάδοσης

¹ Στη γενική περίπτωση όπου ένα δίκτυο MT/BPL δεν είναι τερματισμένο με τη χαρακτηριστική αντίσταση του υπό εξέταση ρυθμού κατά τον υπολογισμό του συντελεστή στάθμισης κάθε διαδρομής *i* πρέπει να ληφθεί υπόψη ο συντελεστής μετάδοσης t_B στο φορτίο στο σημείο B (ομοίως για τον υπολογισμό της νέας συνάρτησης μεταφοράς S'_{21} με την εφαρμογή μεθόδων πρόσπτωσης ορθής φοράς μέσω της $S'_{21} = S_{21}/(1-S_{22}r_B)$ όταν r_B είναι ο συντελεστής ανάκλασης στο φορτίο στο σημείο B). Συνήθως όμως θεωρείται και επιδιώκεται προσαρμογή στον τερματισμό. Άρα δεν υπάρχει ανακλώμενο κύμα. διαύλων MT/BPL. Στη συνέχεια, θα εξεταστούν τα ισοδύναμα κυκλώματα των ρυθμών μετάδοσης δικτύων MT/BPL [33], [122], [184]. Τα βασικά πλεονεκτήματα της διατύπωσης του προβλήματος διάδοσης MT/BPL με χρήση καταλλήλων μητρών είναι:

- 1. Ο ακριβής υπολογισμός της από-άκρο-σε-άκρο συνάρτησης μεταφοράς.
- Η ακριβής απεικόνιση των ασυνεχειών της εξασθένησης στα σημεία διακλαδώσεων.
- 3. Η προσαρμοστικότητα στις διάφορες τοπολογίες δικτύων ΜΤ που οφείλονται στα διάφορα είδη διακλαδώσεων ή στη σύνδεση μετασχηματιστών ΜΤ/ΧΤ. Αυτή η προσαρμοστικότητα επιτυγχάνεται άμεσα λόγω της αρθρωτής θεώρησης ενός από-άκρο-σε-άκρο δικτύου MT/BPL μέσω των μητρών.

4.6 Προσδιορισμός της Συνάρτησης Μεταφοράς με Χρήση της Μήτρας ABCD

Για τον υπολογισμό της συνάρτησης μεταφοράς των διαύλων MT/BPL έχει χρησιμοποιηθεί η θεωρία των μητρών ABCD [184]-[186] βάσει της οποίας η απόάκρο-σε-άκρο συνάρτηση μεταφοράς υπολογίζεται θεωρώντας την αλυσιδωτή σύνδεση επιμέρους τμημάτων μιας γραμμής μεταφοράς των οποίων είναι γνωστή η μήτρα ABCD [119], [120], [138], [143]-[146],[185]-[191].

Στη γενική του μορφή ένας από-άκρο-σε-άκρο δίαυλος MT/BPL περιγράφεται από το συγκεντρωμένο κύκλωμα του Σχήματος 4.9

Η περιγραφή μιας από-άκρο-σε-άκρο σύνδεσης MT/BPL ως διθύρου δικτύου μέσω της μήτρας ABCD προσφέρει ευχερή υπολογισμό της αντίστοιχης συνάρτησης μεταφοράς [143], [185], [186], [190]. Η σχέση μεταξύ των μεγεθών V_{in} , I_{in} , V_{out} και I_{out} του Σχήματος 4.9 είναι

$$\begin{bmatrix} V_{in} \\ I_{in} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{out} \\ I_{out} \end{bmatrix} = \mathbf{\Phi} \begin{bmatrix} V_{out} \\ I_{out} \end{bmatrix}$$
(4.45)

όπου A, B, C, D κατάλληλα προσδιοριζόμενες παράμετροι που εξαρτώνται από τη συχνότητα, το είδος και το μήκος της ζεύξης MT/BPL και τον εξεταζόμενο ρυθμό διάδοσης.

Η μήτρα ABCD της διαδοχικής σύνδεσης δύο διθύρων (βλέπε Σχήμα 4.10) προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό των μητρών ABCD των δύο διθύρων, δηλαδή

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{bmatrix}$$
(4.46)



Σχήμα 4.9: Δίθυρο δίκτυο που συνδέει πηγή τάσης με φορτίο.



Σχήμα 4.10: Κύκλωμα αποτελούμενο από δύο δίθυρα σε αλυσιδωτή σύνδεση.

Ο άμεσος προσδιορισμός της μήτρας ABCD της αλυσιδωτής σύνδεσης (concatenation) δύο διθύρων με γνωστές μήτρες ABCD προσφέρει ένα εύχρηστο εργαλείο για την ανάλυση δικτύων MT/BPL.

Με αναφορά στο Σχήμα 4.9 και χρησιμοποιώντας το ισοδύναμο Thévenin απαιτούνται οι δύο σχέσεις που θα προκύψουν από τις τερματικές συνθήκες (terminal conditions) [119], [120], [138], [144]-[146], [185]

$$V_{in} = E_g - Z_g I_{in} \tag{4.47}$$

$$V_{out} = Z_L I_{out} \tag{4.48}$$

όπου E_g είναι η τάση πηγής που λειτουργεί ως πομπός και Z_g , Z_L οι σύνθετες αντιστάσεις της πηγής τάσης και του τερματισμού, αντίστοιχα. Η πηγή και το φορτίο του Σχήματος 4.10 είναι οι μονάδες BPL σε λειτουργία έγχυσης και λήψης, αντίστοιχα.

Η συνάρτηση μεταφοράς της από-άκρο-σε-άκρο σύνδεσης στην περίπτωση της άμεσης έγχυσης σήματος που έχει υποτεθεί στην είσοδο δίδεται από τη σχέση

$$H(f) = \frac{V_{out}(f)}{V_{in}(f)} = \frac{Z_L}{AZ_L + B}$$
(4.49)

Επίσης

$$\frac{V_{out}(f)}{E_g(f)} = \frac{Z_L}{AZ_L + B + CZ_L Z_g + DZ_g}$$
(4.50)

και

$$Z_{in} = \frac{V_{in}}{I_{in}} = \frac{AZ_{L} + B}{CZ_{L} + D}$$
(4.51)

Συνάρτηση Μεταφοράς Γραμμής Μεταφοράς με μια Διακλάδωση

Η συνάρτηση μεταφοράς μιας γραμμής μεταφοράς που περιγράφεται μέσω διθύρου δικτύου όπως αυτό του Σχήματος 4.9 δίδεται από την (4.49). Κατ' αντιστοιχία προς τη μέθοδο MEB, στο Σχήμα 4.11 απεικονίζεται η διακλάδωση μιας γραμμής μεταφοράς ως δομικό στοιχείο (module) που αποτελείται από τμήμα γραμμής μεταφοράς μήκους L_1 , διακλάδωση μήκους L_b και τμήμα γραμμής μεταφοράς μήκους L_2 .

Στο Σχήμα 4.12 η διακλάδωση έχει αντικατασταθεί από την αντίσταση εισόδου που εμφανίζει στο σημείο σύνδεσής της προς την κύρια γραμμή

$$Z_{k} = Z_{mc} \frac{Z_{bk} + Z_{mc} \tanh(\gamma_{m}L_{b})}{Z_{mc} + Z_{bk} \tanh(\gamma_{m}L_{b})}$$

$$(4.52)$$

Στόχος της αντικατάστασης είναι η ανάλυση μιας από-άκρο-σε-άκρο σύνδεσης MT/BPL σε επιμέρους δομικά στοιχεία ώστε να διευκολυνθούν οι υπολογισμοί. Η αλληλουχία των τριών διθύρων που προκύπτουν φαίνεται στο Σχήμα 4.12. Η συνολική μήτρα *ABCD* που περιγράφει υπό μορφή διθύρου την απλή σύνδεση MT/BPL με ενδιάμεση διακλάδωση είναι

$$\mathbf{\Phi} = \prod_{i=1}^{3} \mathbf{\Phi}_{i} \tag{4.53}$$

όπου Φ_i , i = 1,2,3 οι μήτρες των τριών διθύρων που αποτελούν τα δομικά στοιχεία στα οποία αναλύεται η από-άκρο-σε-άκρο σύνδεση. Συγκεκριμένα

$$\boldsymbol{\Phi}_{1} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma_{m}L_{1}) & Z_{mc}\sinh(\gamma_{m}L_{1}) \\ Z_{mc}^{-1}\sinh(\gamma_{m}L_{1}) & \cosh(\gamma_{m}L_{1}) \end{bmatrix}$$
(4.54)

$$\boldsymbol{\Phi}_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0\\ Z_k^{-1} & 1 \end{bmatrix} \tag{4.55}$$

$$\boldsymbol{\Phi}_{3} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma_{m}L_{2}) & Z_{mc}\sinh(\gamma_{m}L_{2}) \\ Z_{mc}^{-1}\sinh(\gamma_{m}L_{2}) & \cosh(\gamma_{m}L_{2}) \end{bmatrix}$$
(4.56)



Σχήμα 4.11: Σύνδεση MT/BPL με ενδιάμεση διακλάδωση.



Σχήμα 4.12: Ισοδύναμο κύκλωμα του Σχήματος 4.11.

Στη συνέχεια, μέσω των εξισώσεων (4.49) ή (4.50) υπολογίζεται η συνάρτηση μεταφοράς της από-άκρο-σε-άκρο σύνδεσης MT/BPL. Για τον υπολογισμό της συνάρτησης μεταφοράς όταν μεσολαβούν περισσότερες διακλαδώσεις ακολουθείται παρόμοια διαδικασία.

Η εφαρμογή των μητρών ABCD για τον προσδιορισμό της συνάρτησης μεταφοράς μιας από-άκρο-σε-άκρο σύνδεσης MT/BPL εμφανίζει ένα σημαντικό μειονέκτημα σε σχέση με τις υπόλοιπες μεθόδους που άμεσα ή έμμεσα βασίζονται στις μήτρες σκέδασης (Σχήμα 4.13). Ενώ η μήτρα ABCD συνδέει τις τάσεις και τα ρεύματα στα δύο άκρα ενός διθύρου, η μήτρα σκέδασης συσχετίζει τα αντίστοιχα προσπίπτοντα (α) και ανακλώμενα (b) κύματα. Η συνάρτηση μεταφοράς που προκύπτει με χρήση της μήτρας ABCD παρέχει το λόγο V_{out}/V_{in} λαμβάνοντας υπόψη



Σχήμα 4.13: Ορισμός των κυματικών μητρών μεταφοράς.

τόσο το προσπίπτον όσο και το ανακλώμενο σε κάθε θύρα. Εντούτοις, σε εφαρμογές MT/BPL ενδιαφέρει μόνο η συνάρτηση μεταφοράς κατά την ορθή φορά που είναι ίση με το λόγο της προσπίπτουσας ισχύος στο δέκτη προς την ισχύ που εγχύεται στη γραμμή MT από τον πομπό. Αυτό εκφράζεται άμεσα από το λόγο b_2/α_1 ή το στοιχείο S_{21} της μήτρας σκέδασης που περιγράφει την από-άκρο-σε-άκρο σύνδεση MT/BPL.

4.7 Προσδιορισμός της Συνάρτησης Μεταφοράς με Χρήση της Μήτρας Τ

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η μέθοδος της μήτρας μεταφοράς (chain scattering matrix or T-matrix) ή TM μέθοδος [164], [167], [192]-[197], για την εφαρμογή της οποίας μια από-άκρο-σε-άκρο σύνδεση MT/BPL χωρίζεται σε επιμέρους τμήματα –δομικά στοιχεία– έκαστο των οποίων χαρακτηρίζει τις διαδοχικές διακλαδώσεις αλλά και τα ενδιάμεσα τμήματα γραμμών μεταφοράς (βλέπε Σχήμα 4.14α).

Μετάδοση μέσω Δομικών Στοιχείων του Δικτύου

Η μετάδοση μέσω δομικών στοιχείων του δικτύου λαμβάνεται υπόψη με χρήση των αντίστοιχων μητρών μεταφοράς. Μια τυπική από-άκρο-σε-άκρο σύνδεση MT/BPL περιλαμβάνει δομικά στοιχεία δικτύου όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.14β. Τα άκρα Α και Β θεωρούνται προσαρμοσμένα [65], [162], [177]. Τα δομικά στοιχεία που



Σχήμα 4.14: Ζεύξη MT/BPL με N διακλαδώσεις που θεωρούνται ως διακριτά δομικά στοιχεία.

αντιπροσωπεύουν διακλαδώσεις μπορούν να θεωρηθούν ως αλυσιδωτή σύνδεση δύο δομικών στοιχείων δικτύου, συγκεκριμένα:

Ενός δομικού στοιχείου "μεταφοράς" που αντιπροσωπεύει μια γραμμή μετάδοσης μήκους L_k με μήτρα μεταφοράς

$$\mathbf{T}_{T}(\boldsymbol{\gamma}_{m}, \boldsymbol{L}_{k}) = \begin{bmatrix} \boldsymbol{e}^{\boldsymbol{\gamma}_{m}\boldsymbol{L}_{k}} & \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{e}^{-\boldsymbol{\gamma}_{m}\boldsymbol{L}_{k}} \end{bmatrix}$$
(4.57)

ii. Ενός δομικού στοιχείου "σύνθετης αγωγιμότητας" που αντιπροσωπεύει μια σύνθετη αγωγιμότητα Z_k^{-1} με μήτρα μεταφοράς

$$\mathbf{T}_{S}(\boldsymbol{\gamma}_{m}, \boldsymbol{Z}_{mc}, \boldsymbol{L}_{bk}, \boldsymbol{Z}_{bk}) = \begin{bmatrix} 1 + \boldsymbol{\zeta}_{mk} & \boldsymbol{\zeta}_{mk} \\ -\boldsymbol{\zeta}_{mk} & 1 - \boldsymbol{\zeta}_{mk} \end{bmatrix}$$
(4.58)

όπου

$$\zeta_{mk} = \frac{1}{2} \left(Z_{mc} / Z_k \right) \tag{4.59}$$

$$Z_{k} = Z_{mc} \frac{Z_{bk} + Z_{mc} \tanh(\gamma_{m}L_{bk})}{Z_{mc} + Z_{bk} \tanh(\gamma_{m}L_{bk})}$$
(4.60)

Οι ποσότητες $\gamma_m = \lambda_m^{1/2} = \alpha_m + j\beta_m$ and Z_{mc} που εμφανίζονται στις (4.57) έως (4.60) είναι η μιγαδική σταθερά διάδοσης και η χαρακτηριστική αντίσταση του εξεταζόμενου ρυθμού, αντίστοιχα [119], [161], [164]. Λαμβάνοντας υπόψη τις (4.57) και (4.58), η μήτρα μεταφοράς ενός δομικού στοιχείου διακλάδωσης **T**_k, είναι ίση προς [119], [144], [146], [189]

$$\mathbf{T}_{k} = \mathbf{T}_{k} \left(\boldsymbol{\gamma}_{m}, \boldsymbol{Z}_{mc}, \boldsymbol{L}_{k}, \boldsymbol{L}_{bk}, \boldsymbol{Z}_{bk} \right) = \begin{bmatrix} (1 + \boldsymbol{\zeta}_{mk}) e^{\boldsymbol{\gamma}_{m} \boldsymbol{L}_{k}} & \boldsymbol{\zeta}_{mk} e^{\boldsymbol{\gamma}_{m} \boldsymbol{L}_{k}} \\ -\boldsymbol{\zeta}_{mk} e^{-\boldsymbol{\gamma}_{m} \boldsymbol{L}_{k}} & (1 - \boldsymbol{\zeta}_{mk}) e^{-\boldsymbol{\gamma}_{m} \boldsymbol{L}_{k}} \end{bmatrix}$$
(4.61)

Το τελευταίο δομικό στοιχείο μιας ζεύξης MT/BPL είναι το δομικό στοιχείο του "φορτίου" με μήτρα μεταφοράς

$$\mathbf{T}_{N+1} = \mathbf{T}_{N+1} (\gamma_m, L_{N+1}) = \begin{bmatrix} e^{\gamma_m L_{N+1}} & 0\\ 0 & e^{-\gamma_m L_{N+1}} \end{bmatrix}$$
(4.62)

Έχοντας προσδιορίσει τις μήτρες μεταφοράς των διαφόρων δομικών στοιχείων του δικτύου που απαντώνται σε μια από-άκρο-σε-άκρο σύνδεση, η συνολική από-άκρο-σε-άκρο μήτρα μεταφοράς υπολογίζεται μέσω της σχέσης [119], [144], [146], [189]

$$\mathbf{T} = \prod_{k=1}^{N+1} \mathbf{T}_k \tag{4.63}$$

Η συνολική από-άκρο-σε-άκρο μήτρα σκέδασης προκύπτει από τη σχέση

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} T_{21}/T_{11} & T_{22} - (T_{21}T_{12}/T_{11}) \\ 1/T_{11} & -T_{12}/T_{11} \end{bmatrix}$$
(4.64)

όπου T_{11} , T_{12} , T_{21} , T_{22} τα στοιχεία της συνολικής μήτρας **T** που υπολογίζεται μέσω της (4.63). Για την περίπτωση μη προσαρμοσμένου τερματισμού χρησιμοποιείται η υποσημείωση της §4.4.

Η από-άκρο-σε-άκρο συνάρτηση μεταφοράς της σύνδεσης MT/BPL δίδεται από το στοιχείο S_{21} της συνολικής μήτρας ${\bf S}$, δηλαδή

$$H(f) = S_{21} = 1/T_{11} \tag{4.65}$$

4.8 Η Μέθοδος του Υβριδικού Χάρτη Smith

Στη συνέχεια, περιγράφεται μια απλοποιημένη και πειραματικά επιβεβαιωμένη μέθοδος για τον υπολογισμό της από-άκρο-σε-άκρο συνάρτησης μεταφοράς μιας σύνδεσης MT/BPL [164], [192], [193]. Μια ζεύξη MT/BPL μπορεί να θεωρηθεί ως αλυσιδωτή σύνδεση N δομικών στοιχείων. Η μέθοδος HSC (Hybrid

Smith Chart Method [199]-[201]) βασίζεται στο μοντέλο της μήτρας S στην αρχή του Κεφαλαίου [164], [192], [193], [198]. Το βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου HSC είναι η εύκολη υλοποίηση λόγω του επαναληπτικού τρόπου εφαρμογής της.

Κάθε δομικό στοιχείο περιγράφεται από μια μήτρα μεταφοράς ενώ η συνολική μήτρα μεταφοράς μιας από-άκρο-σε-άκρο σύνδεσης MT/BPL προσδιορίζεται χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της αλυσιδωτής μήτρας μεταφοράς που παρουσιάστηκε στην §4.7. Χρησιμοποιώντας τη θεωρία γραμμών μεταφοράς υπολογίζονται οι παράμετροι της μήτρας σκέδασης **S** ενός απλού δομικού στοιχείου που περιγράφει μια διακλάδωση της ζεύξης MT/BPL. Στη συνέχεια και με τη βοήθεια του Σχήματος 4.15 όπου απεικονίζεται ένα δομικό στοιχείο μιας από-άκρο-σε-άκρο σύνδεσης, παρουσιάζεται ο τρόπος μέσω του οποίου η μέθοδος HSC προσδιορίζει τη συνάρτηση μεταφοράς της αντίστοιχης MT/BPL σύνδεσης.

Η διακλάδωση αντικαθίσταται από την ισοδύναμή της σύνθετη αντίσταση εισόδου

$$Z_{in2} = Z_{mc} \frac{Z_b + Z_{mc} \tanh(\gamma_m L_b)}{Z_{mc} + Z_b \tanh(\gamma_m L_b)}$$
(4.66)

Τότε, η Z_{in} του Σχήματος 4.15 προκύπτει

$$Z_{in} = Z_{mc} \frac{(Z_{in1} // Z_{in2}) + Z_{mc} \tanh(\gamma_m L_1)}{Z_{mc} + (Z_{in1} // Z_{in2}) \tanh(\gamma_m L_1)}$$
(4.67)

όπου

$$Z_{in1} = Z_{mc} \frac{Z_{in,r} + Z_{mc} \tanh(\gamma_m L_2)}{Z_{mc} + Z_{in,r} \tanh(\gamma_m L_2)}$$
(4.68)

και $Z_{\mathit{in,r}}$ είναι η σύνθετη αντίσταση εισόδου του υπολοίπου δικτύου.

Ορίζοντας στη συνέχεια τους συντελεστές ανάκλασης

$$p_L^{(1)} = \frac{\left(Z_{in1} / / Z_{in2}\right) - Z_{mc}}{\left(Z_{in1} / / Z_{in2}\right) + Z_{mc}}$$
(4.69)

$$p_L^{(2)} = \frac{Z_{in,r} - Z_{mc}}{Z_{in,r} + Z_{mc}}$$
(4.70)

η συνάρτηση μεταφοράς ενός δομικού στοιχείου προκύπτει από τη σχέση [164], [192], [193]

$$H(f) = S_{21} \cong \underbrace{\frac{(1+p_L^{(1)})e^{-\gamma_m L_1}}{1+p_L^{(1)}e^{-2\gamma_m L_1}}}_{1}\underbrace{\frac{(1+p_L^{(2)})e^{-\gamma_m L_2}}{1+p_L^{(2)}e^{-2\gamma_m L_2}}}_{2}$$
(4.71)



Σχήμα 4.15: Σύνδεση ενός δομικού στοιχείου δικτύου.

Η διαδικασία HSC που οδηγεί στον υπολογισμό της από-άκρο-σε-άκρο συνάρτησης μεταφοράς μπορεί να γενικευτεί για σύνθετες τοπολογίες δικτύων. Ένα ενδιαφέρον παράδειγμα της γενίκευσης αυτής είναι η ζεύξη MT/BPL N διακλαδώσεων που απεικονίζεται στο Σχήμα 4.16. Η από-άκρο-σε-άκρο συνάρτηση μεταφοράς μπορεί να περιγραφεί θέτοντας $L_2 = 0$ επεκτείνοντας τη διαδικασία δύο διακλαδώσεων.

Το αποτέλεσμα είναι

$$H(f) = \frac{V_{N+2}(f)}{V_{1}(f)} = \frac{\left(1 + p_{L}^{(1)}\right)e^{-\gamma_{m}L_{1}}}{1 + p_{L}^{(1)}e^{-2\gamma_{m}L_{1}}} \cdots \frac{\left(1 + p_{L}^{(N)}\right)e^{-\gamma_{m}L_{N}}}{1 + p_{L}^{(N)}e^{-2\gamma_{m}L_{N}}} \underbrace{\left(1 + p_{L}^{(N+1)}\right)e^{-\gamma_{m}L_{N+1}}}_{N+1}}_{N+1} = \prod_{k=1}^{N+1} \frac{\left(1 + p_{L}^{(k)}\right)e^{-\gamma_{m}L_{k}}}{1 + p_{L}^{(k)}e^{-2\gamma_{m}L_{k}}}$$

$$(4.72)$$

όπου

$$p_L^{(i)} = \frac{Z_k^{(i)} / / Z_{ki} - Z_{mc}}{Z_k^{(i)} / / Z_{ki} + Z_{mc}}, \ i = 1, 2, \dots, N$$
(4.73)

οι ενδιάμεσοι παράγοντες ανάκλασης και

$$p_L^{(N+1)} = \frac{Z_L - Z_{mc}}{Z_L + Z_{mc}}$$
(4.74)

o parágontas anáklashs $p_L^{(N+1)}$ ston termatismó.

Οι σύνθετες αντιστάσεις Z_{ki} και $Z_k^{(i)}$ που εμφανίζονται στις (4.72) έως (4.74) υπολογίζονται από τις σχέσεις



Σχήμα 4.16: Ισοδύναμο κύκλωμα υποθετικής ζεύξης MT/BPL με Nδιακλαδώσεις.

$$Z_{k}^{(i)} = Z_{mc} \frac{\left(Z_{k}^{(i+1)} / / Z_{ki+1}\right) + Z_{mc} \tanh(\gamma_{m} L_{i+1})}{Z_{mc} + \left(Z_{k}^{(i+1)} / / Z_{ki+1}\right) \tanh(\gamma_{m} L_{i+1})}$$
(4.75)

$$Z_{k}^{(N)} = Z_{mc} \frac{Z_{in,r} + Z_{mc} \tanh(\gamma_{m} L_{N+1})}{Z_{mc} + Z_{in,r} \tanh(\gamma_{m} L_{N+1})}$$
(4.76)

όπου

$$Z_{ki} = Z_{mc} \frac{Z_{bi} + Z_{mc} \tanh(\gamma_m L_{bi})}{Z_{mc} + Z_{bi} \tanh(\gamma_m L_{bi})}$$

$$(4.77)$$

η σύνθετη αντίσταση στην είσοδο της διακλάδωσης i.


5.1 Εισαγωγή

Το εναέριο δίκτυο MT είναι ένα σχεδόν πανταχού παρόν δίκτυο με ευρέως διακλαδωμένη δομή. Επομένως, είναι κατάλληλο για την παροχή τελικής πρόσβασης και εφαρμογών έξυπνου δικτύου (smart grid applications) [36], [106], [164], [165]. Οι κυριότερες εναέριες γραμμές μεταφοράς που χρησιμοποιούνται παρουσιάζονται στο Παράρτημα 5.1.

Η απόκριση συχνότητας H(f) μιας προσαρμοσμένης στα δύο άκρα της γραμμής μεταφοράς δύο αγωγών προσδιορίζεται μέσω της μιγαδικής σταθεράς διάδοσης γ. Η τάση V(L) σε απόσταση L από την πηγή συνδέεται με την τάση της πηγής V(0) μέσω της σχέσης

$$V(L) = H(f)V(0) \tag{5.1}$$

όπου

$$H(f) = e^{-\gamma(f)L} = e^{-\alpha(f)L} e^{-j\beta(f)L}$$
(5.2)

η συνάρτηση μεταφοράς και $\gamma(f) = \alpha(f) + j\beta(f)$ η μιγαδική σταθερά διάδοσης. Επομένως, όταν είναι γνωστή η μιγαδική σταθερά διάδοσης, εύκολα προσδιορίζεται η συνάρτηση μεταφοράς μέχρι οποιοδήποτε σημείο μιας γραμμής, οπότε ο προσδιορισμός της H(f) είναι υψίστης σημασίας για την ορθή περιγραφή της συμπεριφοράς μιας γραμμής μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος όταν χρησιμοποιείται ως δίαυλος μετάδοσης τηλεπικοινωνιακών σημάτων [106], [162], [184], [202]-[205].

5.2 Αγωγός υπεράνω Ατελούς Εδάφους

Ιστορικά, η εύρεση της μιγαδικής σταθεράς διάδοσης μέσω "λεπτού αγωγού πάνω από έδαφος" (thin wire over earth) απασχόλησε τους ερευνητές από τις αρχές του 20ου αιώνα λόγω της χρήσης υπέργειων αγωγών για τη μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος και την τηλεφωνία [119], [158]-[160], [206]-[257]. Αμφότερες οι εφαρμογές λειτουργούν σε χαμηλές συχνότητες για τις οποίες το ύψος εγκατάστασης των αγωγών αποτελεί μικρό κλάσμα του μήκους κύματος. Το χαρακτηριστικό ότι οι αγωγοί που εξετάζονται στην παρούσα διατριβή δεν είναι τελείως αγώγιμοι έχει ως συνέπεια την εμφάνιση συνιστώσας ηλεκτρικού πεδίου κατά τη διεύθυνση διάδοσης. Αυτό οφείλεται στην εμφάνιση πτώσης τάσης κατά μήκος των αγωγών και το HM πεδίο προσεγγίζεται ως quasi-TEM [119], [250]. Η αρχική ερευνητική δραστηριότητα επικεντρώθηκε στον προσδιορισμό των κατανεμημένων παραμέτρων των γραμμών μεταφοράς, –δηλαδή τον προσδιορισμό της ισοδύναμης ανά μονάδα μήκους διαμήκους σύνθετης αντίστασης γραμμής Z(f) (equivalent series line impedance) και της ισοδύναμης ανά μονάδα μήκους εγκάρσιας σύνθετης αγωγιμότητας Y(f) (equivalent shunt line admittance)– που περιγράφουν τη γραμμή μεταφοράς.

Το πρόβλημα λοιπόν που ανακύπτει είναι ο προσδιορισμός των κατανεμημένων παραμέτρων και, στη συνέχεια, ο υπολογισμός της μιγαδικής σταθεράς διάδοσης. Ο Carson δημοσίευσε την πρώτη λύση του προβλήματος αυτού το 1926 [206], [220] όπου υπολόγισε τις κατανεμημένες παραμέτρους του ρυθμού *quasi*-TEM βασιζόμενος στις ακόλουθες τρεις υποθέσεις:

- Η μιγαδική σταθερά διάδοσης στον αέρα δεν είναι σημαντικά διαφορετική εκείνης στον αγωγό, γεγονός που επιτρέπει την αντικατάσταση της εξίσωσης Laplace από τη δισδιάστατη κυματική εξίσωση στον αέρα.
- Τα ρεύματα μετατόπισης στην επιφάνεια του εδάφους θεωρούνται αμελητέα.
- Η επίδραση της αγωγιμότητας του εδάφους στην ανά μονάδα μήκους εγκάρσια αγωγιμότητα (που περιγράφει τις απώλειες διάδοσης κατά την εγκάρσια διεύθυνση) είναι αμελητέα.

Αυτές οι υποθέσεις περιορίζουν την ισχύ της λύσης σε πολύ χαμηλές συχνότητες.

Για να προσδιοριστεί η ακριβής λύση του ανωτέρου προβλήματος σε υψηλές συχνότητες πάνω από ατελές έδαφος, πρέπει να γίνει χρήση των εξισώσεων που διέπουν τους ρυθμούς διάδοσης. Ο Kikuchi το 1956 προσέγγισε το πρόβλημα για πολύ λεπτούς αγωγούς πάνω από ατελές έδαφος [207], [208], [246]. Κατά την ημιστατική (quasi-static) αυτή προσέγγιση χρησιμοποίησε ασυμπτωτική ανάπτυξη της ακριβούς λύσης των ρυθμών διάδοσης για να διερευνήσει τη μετατροπή της διάδοσης του ρυθμού *quasi*-TEM σε διάδοση επιφανειακών ρυθμών. Ενώ η μέθοδος του Carson επιλύει το πρόβλημα για χαμηλές συχνότητες, τα αποτελέσματα του Kikuchi αφορούν όλο το φάσμα συχνοτήτων. Ο Kikuchi απέδειξε πειραματικά και θεωρητικά ότι, καθώς αυξάνει η συχνότητα, ο ρυθμός quasi-TEM της γραμμής μεταφοράς μετατρέπεται σε ρυθμό TM. Σύμφωνα με τον Kikuchi, υπάρχει σημαντική συγκέντρωση του HM πεδίου στην περιφέρεια του αγωγού και μεγάλο διάμηκες ρεύμα μετατόπισης που λειτουργεί ως επιστροφή μέσω του αέρα, ελαχιστοποιώντας έτσι το ρόλο του εδάφους ως οδό επιστροφής του ρεύματος. Επομένως, μετά από συγκεκριμένη συχνότητα όπου ο συντελεστής εξασθένησης $\alpha(f)$ λαμβάνει μέγιστη τιμή, ο συντελεστής εξασθένησης μειώνεται καθώς η συχνότητα αυξάνει. Το 1972, ο Wait επεξέτεινε την εργασία του Kikuchi και παρήγαγε μια ακριβέστερη εξίσωση που διέπει τους ρυθμούς διάδοσης για λεπτό αγωγό πάνω από ατελές έδαφος [209], [210].

Στο Σχήμα 5.1 απεικονίζεται η γεωμετρία του προβλήματος όπου τέλειος αγωγός ακτίνας a σε περιβάλλον ελευθέρου χώρου υπεράνω ατελούς εδάφους, που χαρακτηρίζεται από επιτρεπτότητα ε_g , διαπερατότητα $\mu_g = \mu_0$ και αγωγιμότητα σ_g , έχει τοποθετηθεί σε ύψος h παράλληλα προς την επίπεδη αγώγιμη γήινη επιφάνεια. Με ε_0 , μ_0 συμβολίζονται η επιτρεπτότητα και η διαπερατότητα του ελευθέρου χώρου αντίστοιχα. Ως άξονας της μετάδοσης θεωρείται σε όλη τη διατριβή ο z, δηλαδή όλοι οι αγωγοί των γραμμών μεταφοράς που θα μελετηθούν θεωρούνται παράλληλοι προς τον άξονα z.

Ο Wait απέδειξε [209], [210] ότι η μιγαδική σταθερά διάδοσης γ μπορεί να εκφραστεί μέσω εξίσωσης αντίστοιχης προς αυτήν μιας γραμμής μεταφοράς δύο αγωγών, δηλαδή

$$\gamma(f) = [Z(f)Y(f)]^{1/2} = \alpha(f) + j\beta(f)$$
(5.3)

όπου τα μεγέθη Z(f) και Y(f) είναι ισοδύναμα προς τα αντίστοιχα μεγέθη μιας δισύρματης γραμμής μεταφοράς που συμπεριφέρεται όμοια προς τη διάταξη αγωγού υπεράνω εδάφους.

Ισχύουν οι σχέσεις:

$$Z = jf\mu_0 [\Lambda + 2(Q - jP)]$$
(5.4)

$$Y = \frac{4\pi^2 j f \varepsilon_0}{\Lambda + 2(N - jM)}$$
(5.5)

$$\Lambda = \mathbf{K}_{0} \left\{ j \alpha \left(k_{0}^{2} - \gamma^{2} \right)^{1/2} \right\} - \mathbf{K}_{0} \left\{ 2 j h \left(k_{0}^{2} - \gamma^{2} \right)^{1/2} \right\}$$
(5.6)



Σχήμα 5.1: Λεπτός αγωγός υπεράνω επίπεδης ατελούς εδάφους με επιτρεπτότητα $\varepsilon_g,$

diaperatótyta $\,\mu_{\rm g}=\mu_{\rm 0}\,$ kai agwyimótyta $\,\sigma_{\rm g}$.

$$Q - jP = \int_{0}^{\infty} \frac{e^{-2u_0 h}}{u_0 + u_g} \cos(\lambda \alpha) d\lambda$$
(5.7)

$$N - jM = \int_{0}^{\infty} \frac{e^{-2u_0 h}}{k_g^2 u_0 + k_0^2 u_g} \cos(\lambda \alpha) d\lambda$$
(5.8)

$$u_0 = \left(\lambda^2 + \gamma^2 - k_0^2\right)^{1/2} \, \mathrm{kat} \, u_g = \left(\lambda^2 + \gamma^2 - k_g^2\right)^{1/2} \tag{5.9}$$

$$k_0 = 2\pi f \left(\mu_0 \varepsilon_0\right)^{1/2} \text{ kat } k_g = 2\pi f \left[\mu_g \left(\varepsilon_g - \frac{j\sigma_g}{2\pi f}\right)\right]^{1/2}$$
(5.10)

όπου $K_0\{\cdot\}$ είναι η τροποποιημένη συνάρτηση Bessel δευτέρου είδους μηδενικής τάξης.

Όπως έδειξε ο Wait, η προηγούμενη εργασία του Carson [203], [206], [223] αποτελεί ειδική περίπτωση λύσης της (5.3). Εφόσον ισχύουν οι σχέσεις:

$$\left| \alpha \left(k_0^2 - \gamma^2 \right)^{1/2} \right| <<1$$
(5.11.1)

$$\left|2h(k_0^2 - \gamma^2)^{1/2}\right| <<1$$
(5.11.2)

$$2h \gg \alpha \tag{5.11.3}$$

$$|k_0 h| << 1$$
 (5.11.4)

$$|k_0/k_g| << 1$$
 (5.11.5)

είναι δυνατή η προσέγγιση μικρού ορίσματος για τη συνάρτηση Bessel, το Q - jPμπορεί να υπολογιστεί προσεγγιστικά με απλό τρόπο [203], [206], [223] ενώ το N – *j*M μπορεί να αγνοηθεί. Με αυτές τις τρεις προσεγγίσεις το τελικό αποτέλεσμα της (5.3) είναι ταυτόσημο με τη μιγαδική σταθερά διάδοσης που προσδιόρισε ο Carson [203], [206], [223] δηλαδή

$$\gamma = k_0 [1 - J_c / \ln(2h/a)]^{1/2}$$
(5.12.1)

όπου

$$J_{c} = \frac{2}{k_{g}^{2}} \int_{0}^{\infty} \left[\left(\lambda^{2} - k_{g}^{2} \right)^{1/2} - \lambda \right] e^{-2\lambda h} d\lambda$$
(5.12.2)

η προσέγγιση του όρου 2(Q - JP) εφόσον ισχύουν οι (5.11.1) έως (5.11.5). Το ολοκλήρωμα της (5.12.2) μπορεί να υπολογιστεί υπό μορφή σειράς [206], [220]. Δυστυχώς, ακόμη και υπό τις παραδοχές (5.11.1) έως (5.11.5) και την προσέγγιση της (5.12.2) με σειρά, η λύση είναι ιδιαιτέρως περίπλοκη. Ωστόσο, σε πολλές πρακτικές περιπτώσεις, ο Carson επισήμανε ότι οι επικρατούντες όροι της σειράς είναι πεπερασμένου πλήθους, διαπίστωση που οδηγεί σε σχετικά απλές κλειστές λύσεις [206], [220].

Τα αποτελέσματα του Kikuchi [207], [208], [246] περιέχονται επίσης στην πλήρη κυματική λύση του Wait. Εφόσον η ακτίνα του αγωγού α είναι σημαντικά μικρότερη του μήκους κύματος λ , είναι δυνατή η προσέγγιση μικρού ορίσματος για τη συνάρτηση Bessel, ενώ ο όρος $\cos(\alpha\lambda)$ που εμφανίζεται στο Q - jP και το N – jM μπορεί να τεθεί ίσος με τη μονάδα. Υπό αυτές τις παραδοχές, τα αποτελέσματα που αφορούν τη μιγαδική σταθερά διάδοσης του Kikuchi και του Wait προκύπτουν ταυτόσημα.

Όλες οι προαναφερθείσες λύσεις προέκυψαν με την υπόθεση ότι ο αγωγός υπεράνω της γήινης επιφάνειας είναι τελείως αγώγιμος. Στα πραγματικά συστήματα μεταφοράς ισχύος, οι γραμμές μεταφοράς των αγωγών αποτελούνται από όχι τελείως αγώγιμα υλικά. Για την εύρεση της λύσης του γενικού προβλήματος, δηλαδή όταν οι γραμμές μεταφοράς των αγωγών δεν είναι τελείως αγώγιμες, έχουν γίνει αρκετές έρευνες όπως αυτές των Wise [235]-[237], Wait [209], [210], Olsen [211]-[213], [220], Nakagawa [238]-[240], Wedepohl [217], [241]-[243] και άλλων [215]-[257].

Οι κυριότερες έρευνες στις οποίες βασίζεται η παρούσα διατριβή είναι αυτές των Pettersson [247], [248] και D'Amore [158]-[160], [247], [248]. Ο κοινός βασικός στόχος όλων αυτών των ερευνητικών προσπαθειών είναι ο προσδιορισμός της μιγαδικής σταθεράς διάδοσης. Η διαφορά τους έγκειται στις διαφορετικές προσεγγίσεις και τις παραδοχές που σε κάθε ερευνητική προσπάθεια θεωρούνται αποδεκτές με στόχο την απλοποίηση της πολύπλοκης λύσης.

Προχωρώντας στην περαιτέρω ανάλυση του προβλήματος, το ΗΜ πεδίο που υποστηρίζεται από την ΗΜ διάταξη του Σχήματος 5.1 πρέπει να ικανοποιεί την οριακή συνθήκη στη διεπαφή μεταξύ της επιφάνειας του αγωγού και του αέρα η οποία γράφεται

$$E_{z}(z,h,\alpha)|_{\alpha\gamma\omega\gamma\delta\varsigma} = E_{z}(z,h,\alpha)|_{\alpha\acute{z}\rho\alpha\varsigma}$$
(5.13)

Η z συνιστώσα του ηλεκτρικού πεδίου στον αγωγό δίδεται από

$$E_{z}(z,h,\alpha)|_{\alpha\gamma\omega\gamma\delta\varsigma} = z_{i}(\gamma)I(z)$$
(5.14)

όπου I(z) το ρεύμα που ρέει κατά μήκους του αγωγού (βλέπε Σχήμα 5.1) και

$$z_{i}(\gamma) = (f\mu_{w}u_{w}I_{0}\{ju_{w}\alpha\})/(\alpha k_{w}^{2}I_{1}\{ju_{w}\alpha\})$$

$$(5.15)$$

η εσωτερική αντίσταση αγωγού (wire inner impedance) [211]. Επίσης

$$k_{w} = k_{0} \left(\frac{\varepsilon_{w}}{\varepsilon_{0}} - \frac{j\sigma_{w}}{2\pi f \varepsilon_{0}} \right)^{1/2}$$
(5.16)

$$u_{w} = \left(k_{w}^{2} - \gamma^{2}\right)^{1/2}$$
(5.17)

όπου σ_w , ε_w και $\mu_w = \mu_0$ η αγωγιμότητα, η επιτρεπτότητα και η διαπερατότητα του αγωγού, αντίστοιχα, I_0 {·} και I_1 {·} οι τροποποιημένες συναρτήσεις Bessel πρώτου είδους μηδενικής τάξης και πρώτης τάξης, αντίστοιχα.

Ακολουθώντας τη διαδικασία που προτείνεται στις [158], [159], η z συνιστώσα του ηλεκτρικού πεδίου στον αέρα προκύπτει από τη σχέση

$$E_{z}(z,h,\alpha)|_{\alpha \in \rho \alpha \varsigma} = -j2f\mu_{0}M\{\gamma,h,\alpha\}I(z)$$
(5.18)

όπου η συνάρτηση $M\{\cdot\}$ δίδεται στο Παράρτημα 5.2.

Αντικαθιστώντας τις (5.14) και (5.18) στην οριακή συνθήκη (5.13) προκύπτει $z_i(\gamma) = -j2f\mu_0 M\{\gamma, h, \alpha\}$ (5.19)

η οποία λαμβάνοντας υπόψη τις (5.15) έως (5.17) αποτελεί την εξίσωση κυματοδήγησης που μπορεί να επιλυθεί ως προς τη ζητούμενη μιγαδική σταθερά

διάδοσης γ. Στην (5.19) εμπλέκονται συναρτήσεις Bessel και ολοκληρώματα Sommerfeld που είναι συναρτήσεις του γ. Επομένως, η επίλυση της (5.19) ως προς γ μπορεί να γίνει μόνο με αριθμητικές μεθόδους. Και η αριθμητική επίλυση, όμως, δεν είναι απλή διότι δεν είναι προσδιορίσιμο με βεβαιότητα το σημείο εκκίνησης μιας επαναληπτικής διαδικασίας για τον προσδιορισμό του γ. Επισημαίνεται ότι λανθασμένη εκκίνηση μπορεί να προκαλέσει σημαντικές αποκλίσεις στα αποτελέσματα. Ο D'Amore στην εργασία [158] υπέθεσε ότι $k_w >> k_0$, $k_0^2 - \gamma^2 \cong 0$, προσεγγίσεις που ισχύουν για τις εναέριες γραμμές μεταφοράς MT που συνήθως ενδιαφέρουν στην πράξη [106], [162], [164], [165]. Υπό αυτές τις παραδοχές η μιγαδική σταθερά διάδοσης προσδιορίζεται μέσω της σχέσης

$$\gamma^{2} = k_{0}^{2} \left[\frac{2\pi \widehat{z}_{i} (j 2\pi f \mu_{0})^{-1} + \ln(2h/\alpha) + 2\widehat{S}_{1g}(h)}{\ln(2h/\alpha) + \widehat{S}_{2g}(h)} \right]$$
(5.20)

όπου \hat{z}_i , $\hat{S}_{1g}\{\cdot\}$ και $\hat{S}_{2g}\{\cdot\}$ δίδονται στο Παράρτημα 5.2.

Στις εργασίες [106], [158]-[160], [162], [203], [207], [208], [220], [223], [246], παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν με χρήση των μεθόδων Kikuchi, Carson και D'Amore. Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων αυτών για διάφορες τοπολογίες προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Για την περίπτωση αγωγού τοποθετημένου σε συνηθισμένο ύψος πάνω από το έδαφος (>7m), τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την εφαρμογή των ανωτέρω τριών μεθόδων για το συντελεστή εξασθένησης συμπίπτουν στις χαμηλές συχνότητες και αυξάνουν με αύξηση της συχνότητας. Όμως, μετά από συγκεκριμένη συχνότητα, ο συντελεστής εξασθένησης της λύσης του D'Amore μειώνεται, αυτός του Kikuchi τείνει προς σταθερή τιμή και αυτός του Carson αυξάνει μονότονα καθώς αυξάνεται η συχνότητα. Από την άλλη πλευρά, οι σταθερές φάσης και των τριών μεθόδων συμπίπτουν σχεδόν σε όλο το φάσμα συχνοτήτων.
- Για την περίπτωση αγωγού τοποθετημένου σε μικρό ύψος πάνω από το έδαφος (<0.5m) οι υποθέσεις του D'Amore δεν είναι πλέον εφαρμόσιμες. Αντίθετα, για μικρά ύψη και για το εύρος συχνοτήτων από 1-100MHz, η εξίσωση (5.12.1) του Carson θεωρείται η πλέον ενδεδειγμένη προς χρήση. Επιπλέον, η υπόθεση του Kikuchi (λ/h>>1) ισχύει σε ολόκληρο σχεδόν το εύρος συχνοτήτων από 1-100MHz [207] και τα ολοκληρώματα που

υπεισέρχονται στις (5.4) και (5.5) μπορούν να προσεγγιστούν μέσω σειρών. Οι μέθοδοι του Kikuchi και του Carson συμφωνούν, ενώ του D'Amore οδηγεί σε τελείως διαφορετικές τιμές του συντελεστή εξασθένησης στο συγκεκριμένο εύρος συχνοτήτων.

Τα δύο προηγούμενα παραδείγματα τοπολογιών αγωγού υπεράνω εδάφους σχετίζονται με την εφαρμοσιμότητα των μεθόδων υπό συγκεκριμένες συνθήκες. Ανάλογα με τις συνθήκες, τα σχετικά αποτελέσματα υποδεικνύουν ποιά μέθοδος είναι πλέον αξιόπιστη για την κατάστρωση του μοντέλου διάδοσης όταν μια γραμμή μεταφοράς ισχύος πολλών αγωγών θεωρηθεί ως δίαυλος μετάδοσης τηλεπικοινωνιακών σημάτων.

Συμπερασματικά, για εναέρια δίκτυα MT, όπου οι γραμμές μεταφοράς πολλών αγωγών τοποθετούνται σε ύψος από 8-10m πάνω από το έδαφος, η μέθοδος του D'Amore είναι η πλέον ακριβής, ενώ σε οικιακές γραμμές XT, προτιμώνται οι προσεγγίσεις του Carson ή του Kikuchi αφού, τότε, τα καλώδια εγκαθίστανται πλησίον της διαδρομής επιστροφής μέσω του εδάφους.

5.3 Ανάλυση Εναέριων Γραμμών Μεταφοράς Πολλών Αγωγών

Η καθιερωμένη ανάλυση δισυρμάτων γραμμών μεταφοράς επεκτάθηκε στο Κεφάλαιο 3 και σε γραμμές μεταφοράς που αποτελούνται από πολλούς αγωγούς. Στις γραμμές μεταφοράς δύο αγωγών υποστηρίζονται δύο κύματα, το προσπίπτον και το ανακλώμενο, που οδεύουν με την ίδια μιγαδική σταθερά διάδοσης κατά αντίθετες κατευθύνσεις. Σε γραμμές μεταφορές πολλών αγωγών αποτελούμενες από n+1 αγωγούς παράλληλους προς τον άζονα z, υποστηρίζονται n προσπίπτοντα και n ανακλώμενα κύματα που οδεύουν με αντίστοιχες μιγαδικές σταθερές διάδοσης κατά αντίθετες κατευθύνσεις. Τα κύματα αυτά ικανοποιούν 2n συζευγμένες μερικές διαφορικές εξισώσεις που συνδέουν τις τάσεις $V_i(z,t)$ και τα ρεύματα της γραμμής $I_i(z,t)$, i = 1,2,...,n. Κάθε ζεύγος κυμάτων που οδεύουν με την ίδια μιγαδική σταθερά διάδοσης κατά αντίθετες κατευθύνσεις είναι γνωστό ως ρυθμός διάδοσης (propagation mode). Για παράδειγμα, στην περίπτωση όπου η γραμμή μεταφοράς αποτελείται από τρεις αγωγούς με επιστροφή μέσω εδάφους υποστηρίζονται τρεις ρυθμοί διάδοσης όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.2 [106], [162], [203], [258].

Τα ρεύματα γραμμής I1, I2 και I3 εκφράζονται ως γραμμικός συνδυασμός των τριών ρευμάτων ρυθμών (modal currents). Ο γραμμικός συνδυασμός προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό της μήτρας ιδιοδιανυσμάτων ρευμάτων T₁ με τη μήτρα στήλη των ρευμάτων ρυθμών (βλέπε Σχήμα 5.2 και (3.30)). Ο κοινός ρυθμός ή ρυθμός διάδοσης μέσω του εδάφους χαρακτηρίζεται κυρίως από υψηλότερη εξασθένηση και σχετίζεται με τη διάδοση μέσω των αγωγών και επιστροφή μέσω του εδάφους (βλέπε Σχήμα 5.5 και αντίστοιχο σχολιασμό). Θεωρώντας διάδοση και επιστροφή του ρεύματος μόνο μέσω των αγωγών, προκύπτουν οι διαφορικοί ή ρυθμοί διάδοσης μέσω του αέρα 1 και 2 που γενικά εμφανίζουν μικρότερη εξασθένηση σε σχέση με τον κοινό ρυθμό. Αν και τα ρεύματα που οφείλονται στον κοινό ρυθμό έχουν περίπου το ίδιο μέγεθος και ρέουν προς την ίδια κατεύθυνση κατά μήκος και των τριών αγωγών, τα ρεύματα που οφείλονται στους διαφορικούς ρυθμούς εμφανίζουν τη συμπεριφορά που απεικονίζεται στο Σχήμα 5.2. Αν και εμφανίζουν μικρότερο πλάτος από τα ρεύματα που οφείλονται στη διάδοση των διαφορικών ρυθμών, τα ρεύματα των αγωγών που οφείλονται στη διάδοση του κοινού ρυθμού δημιουργούν πεδία ακτινοβολίας που προστίθενται λόγω της ίδιας φοράς των ρευμάτων. Αντιθέτως, τα πεδία ακτινοβολίας λόγω των ρευμάτων που οφείλονται στη διάδοση των διαφορικών ρυθμών αλληλοαναιρούνται λόγω της αντίθετης φοράς των ρευμάτων επί των αγωγών [106], [119], [203]. Αυτό είναι σημαντικό θέμα που σχετίζεται με την EMC των δικτύων MT/BPL που συνυπάρχουν με αδειοδοτημένες ασύρματες υπηρεσίες (βλέπε Κεφάλαιο 2 και κυρίως Κεφάλαιο 7).

Με κριτήριο τον τρόπο έγχυσης των σημάτων BPL στις γραμμές MT, διακρίνονται δύο περιπτώσεις:

- έγχυση καλώδιο με καλώδιο (Wire-to-Wire ή WtW) και
- έγχυση καλώδιο με έδαφος (Wire-to-Ground ή WtG).



Σχήμα 5.2: Ρυθμοί διάδοσης σε γραμμή μεταφοράς τριών αγωγών.

Οι δύο αυτοί δυνατοί τρόποι έγχυσης σήματος σε γραμμές μεταφοράς MT απεικονίζονται στο Σχήμα 5.3.

Κατά την έγχυση WtW διεγείρονται κυρίως οι διαφορικοί ρυθμοί. Συγκεκριμένα, έχοντας υπολογίσει τη μήτρα ιδιοδιανυσμάτων ρευμάτων Τ, και τη μήτρα ιδιοδιανυσμάτων τάσεων \mathbf{T}_{ν} , μέσω της (3.39), προκύπτει $\mathbf{V}^{m}(0) = \mathbf{T}_{\nu}^{-1} \mathbf{V}(0)$. Θεωρώντας έγχυση WtW μεταξύ αγωγού А Γ -δηλαδή και $V(0) = \begin{bmatrix} 0.5E & 0 & -0.5E \end{bmatrix}^T - προκύπτει ότι οι τάσεις του διαφορικού ρυθμού 1$ λαμβάνει μη μηδενικές τιμές σε αντίθεση με τη τάση του κοινού ρυθμού και διαφορικού ρυθμού 2 που μηδενίζονται. Θεωρώντας έγχυση WtG μεταξύ αγωγού B και εδάφους -δηλαδή $\mathbf{V}(0) = \begin{bmatrix} 0 & E & 0 \end{bmatrix}^T - \pi \rho$ οκύπτει ότι οι τάσεις του κοινού ρυθμού και του διαφορικού ρυθμού 2 λαμβάνουν μη μηδενικές τιμές σε αντίθεση με τη τάση του διαφορικού ρυθμού 1 που μηδενίζεται. Κατά την έγχυση WtG, όπως ενδεικτικά συμβαίνει στην περίπτωση σύνδεσης στον αγωγό Β του Σχήματος 5.3β, διεγείρονται ο κοινός και ο διαφορικός ρυθμός 2.

Στο Σχήμα 5.4 απεικονίζεται μια γραμμή μεταφοράς πολλών αγωγών υπεράνω εδάφους. Όπως στην περίπτωση αγωγού υπεράνω ατελούς εδάφους, έτσι και στην περίπτωση του προβλήματος διάδοσης μέσω γραμμών μεταφοράς πολλών αγωγών υπεράνω ατελούς εδάφους εφαρμόζονται οι εξισώσεις Maxwell με ταυτόχρονη ικανοποίηση των οριακών συνθηκών για κάθε αγωγό [212], [213]. Οι μιγαδικές σταθερές διάδοσης των ρυθμών που μπορεί να υποστηρίξουν οι



Σχήμα 5.3: Έγχυση σήματος BPL σε γραμμές MT: (α) καλώδιο με καλώδιο και (β) καλώδιο με έδαφος.



Σχήμα 5.4: Γραμμή μεταφοράς πολλών αγωγών.

συγκεκριμένες διατάξεις θα προκύψουν από την επίλυση εξισώσεων που περιλαμβάνουν συναρτήσεις Bessel και ολοκληρώματα Sommerfeld. Η διαφορά σε σχέση με το απλό πρόβλημα αγωγού υπεράνω ατελούς εδάφους είναι ότι στην περίπτωση γραμμών μεταφοράς πολλών αγωγών η λύση του προβλήματος απαιτεί την εισαγωγή μητρών [158], [159].

Οπως αναλύθηκε και στο Κεφάλαιο 3, το πρώτο βήμα για να λυθούν οι εξισώσεις γραμμών MTL είναι να υπολογιστούν οι αντίστοιχες ανά μονάδα μήκους παράμετροι. Ο Carson πρότεινε να συμπεριληφθεί η σύνθετη αντίσταση του εδάφους στην ισοδύναμη ανά μονάδα μήκους διαμήκη σύνθετη αντίσταση γραμμής [206], [220]. Ωστόσο, η υπόθεση αυτή, δίχως τη θεώρηση της σύνθετης αγωγιμότητας (admittance) του εδάφους στην ισοδύναμη ανά μονάδα μήκους εγκάρσια σύνθετη αγωγιμότητα, είναι κατάλληλη για χαμηλές συχνότητες και/ή για καλές συνθήκες αγωγιμότητας του εδάφους (τέλειο έδαφος). Επομένως, για να προσδιοριστεί η λύση του προβλήματος για υψηλές συχνότητες και για διάφορες τιμές της αγωγιμότητας του εδάφους προτάθηκε η μεθοδολογία του D'Amore [158]-[160], [247], [248]. Η

μεθοδολογία αυτή περιλαμβάνει τον προσδιορισμό μέσω των εξισώσεων Maxwell της ανά μονάδα μήκους μήτρας διαμήκους σύνθετης αντίστασης Z και της ανά μονάδα μήκους μήτρας εγκάρσιας σύνθετης αγωγιμότητας Y που προσδιορίζονται χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις του Maxwell.

5.3.1 Ανάλυση του Προβλήματος Πολλών Αγωγών Χρησιμοποιώντας τη Μέθοδο D'Amore και Sarto

Κατ'αντιστοιχία με την περίπτωση γραμμής μεταφοράς δύο αγωγών, οι ευρέως γνωστές διαφορικές εξισώσεις δεύτερης τάξης, που περιγράφουν τη διάδοση μέσω γραμμών μεταφοράς πολλών αγωγών γράφονται σε μητρική μορφή ως

$$\frac{d^2 \mathbf{V}}{dz^2} = \mathbf{P} \mathbf{V} \tag{5.21.1}$$

$$\frac{d^2 \mathbf{I}}{dz^2} = \mathbf{P}^T \mathbf{I}$$
(5.21.2)

όπου

$$\mathbf{P} = \mathbf{Z}\mathbf{Y} \tag{5.22}$$

είναι η $n \times n$ μήτρα διάδοσης και V, I είναι οι $n \times 1$ μήτρες τάσεων και ρευμάτων γραμμών αντίστοιχα. Για την ανάλυση γραμμών πολλών αγωγών (βλέπε Κεφάλαιο 3), υιοθετείται συνήθως ο μετασχηματισμός ομοιότητας, μέσω του οποίου πραγματοποιείται αντικατάσταση των μεγεθών γραμμής V, I με τα αντίστοιχα μεγέθη των ρυθμών V^m, I^m που υποστηρίζονται από τη γραμμή MTL, δηλαδή [119], [162], [164], [212]

$$\mathbf{V} = \mathbf{T}_{V} \mathbf{V}^{m} \tag{5.23}$$

$$\mathbf{I} = \mathbf{T}_I \mathbf{I}^m \tag{5.24}$$

με αποτέλεσμα

$$\frac{d}{dz}\mathbf{V} = -\mathbf{Z}\mathbf{I} \tag{5.25.1}$$

$$\frac{d}{dz}\mathbf{I} = -\mathbf{Y}\mathbf{V} \tag{5.25.2}$$

$$\frac{d}{dz} \begin{bmatrix} \mathbf{V}^m \\ \mathbf{I}^m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & -\mathbf{T}_V^{-1} \mathbf{Z} \mathbf{T}_I \\ -\mathbf{T}_I^{-1} \mathbf{Y} \mathbf{T}_V & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}^m \\ \mathbf{I}^m \end{bmatrix}$$
(5.26)

Με κατάλληλη επιλογή των μητρών μετασχηματισμού \mathbf{T}_{v} και \mathbf{T}_{I} οι μήτρες $\mathbf{T}_{v}^{-1}\mathbf{Z}\mathbf{T}_{I}$ και $\mathbf{T}_{I}^{-1}\mathbf{Y}\mathbf{T}_{v}$ μπορούν να καταστούν διαγώνιες, δηλαδή

$$\mathbf{T}_{V}^{-1}\mathbf{Z}\mathbf{T}_{I} = \mathbf{z} = diag\{z_{i}\}, \ i = 1,...,n$$
(5.27.1)

και

$$\mathbf{T}_{I}^{-1}\mathbf{Z}\mathbf{T}_{V} = \mathbf{y} = diag\{y_{i}\}, \ i = 1,...,n$$
 (5.27.2)

Με την επιλογή αυτή και αντικαθιστώντας τις (5.23), (5.24) στις εξισώσεις MTL (5.25.1) και (5.25.2), οι τελευταίες αποσυζευγνύονται οδηγώντας στις ακόλουθες εξισώσεις ρυθμών τάσης και ρεύματος

$$\frac{d}{dz}V_i^m(z) = -z_i I_i^m(z), \ i = 1,...,n$$
(5.28.1)

$$\frac{d}{dz}I_{i}^{m}(z) = -y_{i}V_{i}^{m}(z), \ i = 1,...,n$$
(5.28.2)

Εφόσον είναι δυνατή η επιλογή των δύο $n \times n$ μητρών \mathbf{T}_{ν} και \mathbf{T}_{I} που ταυτόχρονα διαγωνιοποιούν τις ανά μονάδα μήκους μήτρες \mathbf{Z} και \mathbf{Y} , η λύση του ιδιοπροβλήματος διάδοσης σε γραμμή μεταφοράς n+1 αγωγών προκύπτει ως λύση n ζευγών αποσυζευγμένων, πρώτης τάξης, διαφορικών εξισώσεων για τις τάσεις και τα ρεύματα των ρυθμών, όπως ακριβώς συμβαίνει και στην απλή περίπτωση των γραμμών μεταφοράς δύο αγωγών. Κατ'αυτό τον τρόπο, προσδιορίζοντας καταλλήλως το μετασχηματισμό ομοιότητας που διαγωνιοποιεί τις ανά μονάδα μήκους μήτρες \mathbf{Z} και \mathbf{Y} επιτυγχάνεται η αποσύζευξη και λύση των n εξισώσεων ρυθμών MTL (5.28.1) και (5.28.2).

Επίσης συνδυάζοντας τις (5.28.1) και (5.28.2) προκύπτουν οι σχέσεις

$$\mathbf{T}_{V}^{-1}\mathbf{Z}\mathbf{T}_{I}\mathbf{T}_{I}^{-1}\mathbf{Y}\mathbf{T}_{V} = \mathbf{T}_{V}^{-1}\mathbf{Z}\mathbf{Y}\mathbf{T}_{V} = \mathbf{T}_{V}^{-1}\mathbf{P}\mathbf{T}_{V} = \mathbf{z}\mathbf{y}$$
(5.29)

$$\mathbf{T}_{I}^{-1}\mathbf{Y}\mathbf{T}_{V}\mathbf{T}_{V}^{-1}\mathbf{Z}\mathbf{T}_{I} = \mathbf{T}_{I}^{-1}\mathbf{Y}\mathbf{Z}\mathbf{T}_{I} = \mathbf{T}_{I}^{-1}\mathbf{P}^{T}\mathbf{T}_{I} = \mathbf{y}\mathbf{z}$$
(5.30)

$$\boldsymbol{\gamma}^2 = \mathbf{y}\mathbf{z} = \mathbf{z}\mathbf{y} = diag\{\boldsymbol{\lambda}_i\}, \ i = 1, \dots, n$$
(5.31)

όπου \mathbf{T}_{V_i} και \mathbf{T}_{I_i} είναι η στήλη *i* των μητρών \mathbf{T}_V και \mathbf{T}_I , αντίστοιχα, ενώ λ_i είναι η ιδιοτιμή που συνδέεται με τα ιδιοδιανύσματα \mathbf{T}_{V_i} και \mathbf{T}_{I_i} . Το σύνολο των ιδιοτιμών του πίνακα **P** είναι { λ_i }, *i* = 1,...,*n*. Επίσης

$$\gamma_i(f) = (\lambda_i)^{1/2} = \alpha_i(f) + j\beta_i(f), \ i = 1, 2, ..., n$$
(5.32)

είναι η μιγαδική σταθερά διάδοσης του ρυθμού i.

Η γενική λύση των αποσυζευγμένων εξισώσεων είναι

$$\begin{bmatrix} I_1^m \\ \vdots \\ I_n^m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{-\gamma_1 z} & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & e^{-\gamma_n z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{1,\pi}^m \\ \vdots \\ I_{n,\pi}^m \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} e^{\gamma_1 z} & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & e^{\gamma_n z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{1,\alpha}^m \\ \vdots \\ I_{n,\alpha}^m \end{bmatrix}$$
(5.33)

Τέλος, οι μήτρες της χαρακτηριστικής αντίστασης και της χαρακτηριστικής αγωγιμότητας της γραμμής μεταφοράς MTL δίδονται από τη σχέση

$$\mathbf{Z}_{C} = \mathbf{Y}_{C}^{-1} = \mathbf{Y}^{-1}\mathbf{T}_{I}\boldsymbol{\gamma}\mathbf{T}_{I}^{-1} = \mathbf{Z}\mathbf{T}_{I}\boldsymbol{\gamma}^{-1}\mathbf{T}_{I}^{-1}$$
(5.34)

Προσδιορισμός της Μήτρας Διάδοσης

Με βάση τα προηγούμενα αποτελέσματα είναι δυνατός ο αναλυτικός προσδιορισμός της μήτρας **P** που επιτυγχάνεται επιβάλλοντας τη συνέχεια της z συνιστώσας του ηλεκτρικού πεδίου στην εξωτερική επιφάνεια κάθε εναέριου αγωγού. Ακολουθώντας τη μεθοδολογία των [106], [107], [158]-[160], [162], [247], [248], η **P** μπορεί να υπολογιστεί συναρτήσει των $n \times n$ ανά μονάδα μήκους μητρών μέσω της σχέσης

$$\mathbf{P} = (\mathbf{Z}_{i} + \mathbf{Z}_{e} + \mathbf{Z}_{g})(\mathbf{Y}_{e}^{-1} + \mathbf{Y}_{g}^{-1})^{-1}$$
(5.35)

όπου τα μεγέθη \mathbf{Z}_i (εσωτερική σύνθετη αντίσταση), \mathbf{Z}_e (εξωτερική σύνθετη αντίσταση), \mathbf{Z}_g (σύνθετη αντίσταση του εδάφους), \mathbf{Y}_e (εξωτερική σύνθετη αγωγιμότητα) και \mathbf{Y}_g (σύνθετη αγωγιμότητα του εδάφους) δίδονται στο Παράρτημα 5.3.

Ακριβής Υπολογισμός των Ζ και Υ

Οι σχέσεις του Παραρτήματος 5.3 μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εύρεση της μήτρας διάδοσης (5.35). Πάντως, είτε χρησιμοποιηθούν οι αρχικές σχέσεις για τον υπολογισμό των **Z** και **Y** είτε οι ακριβείς που προτείνονται στο παρόν εδάφιο, το αποτέλεσμα όσον αφορά τα χαρακτηριστικά των ρυθμών διάδοσης παραμένει το ίδιο [158]-[160].

Οι ανά μονάδα μήκους μήτρες Z και Y μπορούν να υπολογιστούν με ακρίβεια [158]-[160] μέσω των σχέσεων

$$\mathbf{Z}_{g} = j2f\mu_{0}\mathbf{F}_{1g} - \frac{1}{j2\pi^{2}f\varepsilon_{0}}\mathbf{F}_{3g}\mathbf{P}^{T}$$
(5.36)

$$F_{3gij} = \xi_2 \ln \left\{ (h_i + j\Delta_{ij} + \xi_3) / (h_i + j\Delta_{ij}) \right\}$$
(5.37)

$$\mathbf{Y}_{g} = j2\pi^{2} f \varepsilon_{0} (\mathbf{F}_{2g} - \mathbf{F}_{3g})^{-1}$$
(5.38)

$$\mathbf{Z} = \mathbf{Z}_{i} + \mathbf{Z}_{e} + \mathbf{Z}_{g} \tag{5.39}$$

$$\mathbf{Y} = j2\pi^2 f\varepsilon_0 (\frac{1}{2}\mathbf{A} + \mathbf{F}_{2g} - \mathbf{F}_{3g})^{-1}$$
(5.40)

$$F_{1gij} = 0.5 \ln \left\{ \left(h_i + h_j + j\Delta_{ij} + \xi_1 \right) / \left(h_i + h_j + j\Delta_{ij} \right) \right\}$$
(5.41)

$$F_{2gij} = \xi_2 \ln \left\{ \left(h_i + h_j + j \Delta_{ij} + \xi_3 \right) / \left(h_i + h_j + j \Delta_{ij} \right) \right\}$$
(5.42)

$$F_{3gij} = \xi_2 \ln\{(h_i + j\Delta_{ij} + \xi_3)/(h_i + j\Delta_{ij})\}$$
(5.43)

Ο κοινός ρυθμός (CM) και οι δύο διαφορικοί ρυθμοί (DM_i, i = 1, 2) –έκαστος με τη δική του μιγαδική σταθερά διάδοσης και χαρακτηριστική αντίσταση– μπορούν να εξεταστούν χωριστά σε όλη την έκταση του εναέριου δικτύου MT, εφόσον ισχύουν οι τρεις υποθέσεις A_i , i = 1,2,3 που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 4. Τότε, οι τρεις ρυθμοί που διαδίδονται μέσω των εναέριων γραμμών μεταφοράς είναι πλήρως διακριτοί και αντιστοιχούν σε τρεις ανεξάρτητους διαύλους μετάδοσης που μπορούν ταυτόχρονα να μεταδίδουν σήματα BPL σε όλη την έκταση του εναέριου δικτύου MT. Η σχέση μεταξύ $V_i^m(z)$ και $V_i^m(0)$ καθορίζεται προσδιορίζοντας κατάλληλους τελεστές H_i^m (·) ώστε να ισχύει η σχέση

$$\mathbf{V}^{m}(z) = \mathbf{H}^{m} \left\{ \mathbf{V}^{m}(0) \right\}$$
(5.44)

όπου

$$\mathbf{H}^{m}\left\{\cdot\right\} = diag\left\{H_{1}^{m}\left\{\cdot\right\} \quad H_{2}^{m}\left\{\cdot\right\} \quad H_{3}^{m}\left\{\cdot\right\}\right\}$$

$$(5.45)$$

η διαγώνια τελεστική μήτρα που λειτουργεί ως μητρική συνάρτηση μεταφοράς [164] με στοιχεία H_i^m {·} τις συναρτήσεις μεταφοράς που χαρακτηρίζουν τους αντίστοιχους ρυθμούς μετάδοσης. Συνδυάζοντας τις (5.23) και (5.45), η 3×3 μήτρα συναρτήσεων μεταφοράς **H** που συνδέει τις τάσεις **V**(z) με **V**(0) μέσω της σχέσης

$$\mathbf{V}(z) = \mathbf{H}\mathbf{V}(0) \tag{5.46}$$

προκύπτει από τη σχέση

$$\mathbf{H} = \mathbf{T}_{V} \mathbf{H}^{m} \left\{ \mathbf{T}_{V}^{-1} \right\}$$
(5.47)

Χρησιμοποιώντας τις προηγούμενες σχέσεις, υπολογίστηκαν και σχεδιάστηκαν στο Σχήμα 5.5α συναρτήσει της συχνότητας οι συντελεστές εξασθένησης $\alpha_{CM} = \operatorname{Re}\{\gamma_{CM}\}, \alpha_{DM_1} = \operatorname{Re}\{\gamma_{DM_1}\}$ και $\alpha_{DM_2} = \operatorname{Re}\{\gamma_{DM_2}\}$ του κοινού και των δύο διαφορικών ρυθμών, αντίστοιχα. Η διάταξη που εξετάστηκε είναι εναέρια γραμμή μεταφοράς τριών αγωγών ACSR από 50 έως 150mm² που τοποθετείται σε

ύψος *h* από 8m έως 10m όταν οι αγωγοί βρίσκονται σε απόσταση μεταξύ τους Δ που κυμαίνεται από 0.3m έως 1m. Το έδαφος με απώλειες χαρακτηρίζεται από $\varepsilon_{rg} = 13$ και $\sigma_g = 5 mS/m$ [164], [165], [184]. Στο Σχήμα 5.5β έχουν σχεδιαστεί συναρτήσει της συχνότητας οι συντελεστές φάσης $\beta_{CM} = \text{Im}\{\gamma_{CM}\}, \beta_{DM1} = \text{Im}\{\gamma_{DM1}\}$ και $\beta_{DM2} = \text{Im}\{\gamma_{DM2}\}$ του κοινού και των δύο διαφορικών ρυθμών, αντίστοιχα. Από τη σχεδίαση αυτή επιβεβαιώνεται ότι οι συντελεστές φάσης των τριών ρυθμών είναι γραμμικές συναρτήσεις της συχνότητας και ταυτίζονται σε όλο το εύρος συχνοτήτων που μελετήθηκε.

Με βάση τα Σχήματα 5.5α και β προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Οι δύο διαφορικοί ρυθμοί παρουσιάζουν σχεδόν πανομοιότυπη φασματική συμπεριφορά.
- Σε σχετικά χαμηλές συχνότητες του υπό εξέταση φάσματος (μέχρι τα 15MHz), η εξασθένηση του κοινού ρυθμού α_{CM} είναι σημαντικά υψηλότερη συγκρινόμενη με αυτήν των δύο διαφορικών ρυθμών α_{DM1} και α_{DM2}, αντίστοιχα. Σε συνδυασμό και με το προηγούμενο συμπέρασμα, αυτό έχει ως συνέπεια τη διάδοση στο εύρος 1-15MHz μόνο των δύο διαφορικών ρυθμών με σχεδόν πανομοιότυπα χαρακτηριστικά μετάδοσης. Σε συχνότητες υψηλότερες των 15MHz ο κοινός ρυθμός συνυπάρχει με τους δύο διαφορικούς ρυθμούς οδηγώντας πρακτικά σε πολυρρυθμική μετάδοση των σημάτων MT/BPL.
- Η συμπεριφορά του συντελεστή εξασθένησης του κοινού ρυθμού διάδοσης *α_{CM}* μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός ότι στις υψηλές συχνότητες το βάθος διείσδυσης της ΗΜ ισχύος σε έδαφος με απώλειες γίνεται αμελητέο σε σχέση με το μήκος κύματος, με αποτέλεσμα η διάδοση να πραγματοποιείται αποκλειστικά πάνω από το έδαφος όπως στην περίπτωση της διάδοσης χωρίς απώλειες. Αυτή η συμπεριφορά του μιγαδικού συντελεστή εξασθένησης δεν μπορεί να προκύψει με τη χρήση της μεθόδου Carson γιατί για τη μέθοδο αυτή η επίδραση της αγωγιμότητας του εδάφους στην ανά μονάδα μήκους εγκάρσια αγωγιμότητα είναι ούτως ή άλλως αμελητέα. Το μέγιστο που εμφανίζει ο συντελεστής εξασθένησης *α_{CM}* οφείλεται στο συντονισμό που λαμβάνει χώρα στο έδαφος. Ο συντελεστής εξασθένησης του κοινού ρυθμού



Σχήμα 5.5: Εξάρτηση από τη συχνότητα των συντελεστών εξασθένησης και της φάσης των τριών ρυθμών που υποστηρίζει μια γραμμή μεταφοράς τριών αγωγών MT/BPL.

αυξάνει μέχρι μια συχνότητα κατωφλίου και στη συνέχεια ελαττώνεται. Αυτό οφείλεται στο φαινόμενο του συντονισμού στο υπόστρωμα του εδάφους που αρχικά εμφανίζει χωρητική συμπεριφορά η οποία με την αύξηση της συχνότητας γίνεται επαγωγική. Το φαινόμενο αυτό εμφανίζει, επίσης, και η χαρακτηριστική αντίσταση της γραμμής μεταξύ αγωγών και εδάφους [106], [158], [159], [162]. Το πραγματικό μέρος της χαρακτηριστικής αντίστασης είναι θετικό αφού μια γραμμή μεταφοράς είναι παθητικό δίκτυο, αλλά το φανταστικό μέρος είναι αρνητικό μέχρι ορισμένη συχνότητα και ακολούθως γίνεται θετικό. Αυτή η μετάβαση της χαρακτηριστικής αντίστασης δικαιολογείται από το ότι στις χαμηλές συχνότητες τα ρεύματα μετατόπισης είναι ασήμαντα και το έδαφος λειτουργεί ως καλός αγωγός του ρεύματος. Επομένως, οι αντίστοιχοι όροι της μήτρας χαρακτηριστικής αντίστασης της γραμμής μεταξύ αγωγών και εδάφους αποκτούν αρνητική τιμή. Αντιθέτως, στις υψηλότερες συχνότητες το έδαφος συμπεριφέρεται ως καλό διηλεκτρικό υλικό και οι όροι της μήτρας χαρακτηριστικής αντίστασης της γραμμής μεταξύ αγωγών και εδάφους γίνονται επαγωγικοί, καθιστώντας το φανταστικό μέρος της χαρακτηριστικής αντίστασης θετικό. Η μηδενική τιμή του φανταστικού μέρους εμφανίζεται στη συχνότητα συντονισμού f_t όπου το πραγματικό μέρος λαμβάνει τη μικρότερη τιμή του.

Ως προς τους συντελεστές εξασθένησης των διαφορικών ρυθμών, επειδή η επίδραση του εδάφους με απώλειες στη διάδοσή τους είναι ασήμαντη, οι συντελεστές εξασθένησης α_{DM1} και α_{DM2} είναι σχεδόν ταυτόσημοι και οι αντίστοιχες καμπύλες πρακτικά ταυτίζονται για συχνότητες μεγαλύτερες των 10MHz. Η εξασθένηση των διαφορικών ρυθμών οφείλεται κυρίως στις απώλειες και το επιδερμικό φαινόμενο επί των αγωγών [160]. Λόγω της πανομοιότυπης φασματικής συμπεριφοράς που εμφανίζουν οι δύο διαφορικοί ρυθμοί, στη συνέχεια της διατριβής θα εξετάζεται μόνο ο DM₁.

Η αλλαγή της συμπεριφοράς του συντελεστή εξασθένησης μπορεί να ερμηνευθεί μέσω του επιδερμικού βάθους (skin depth) σε ένα αγωγό που δίδεται από τη σχέση [214]

$$\delta_w = \left(\pi f \mu_0 \sigma_w\right)^{-1/2} \tag{5.48}$$

Από την (5.48) είναι φανερό ότι το επιδερμικό βάθος δ_w εξαρτάται από τη συχνότητα ως $f^{-1/2}$. Επομένως, όσο η συχνότητα αυξάνει τόσο η ροή ρεύματος περιορίζεται κοντά στην επιφάνεια του αγωγού καθιστώντας την αντίσταση του αγωγού μεγαλύτερη και προκαλώντας έτσι μεγαλύτερη εξασθένηση. Κατά τη διάδοσή τους οι διαφορικοί ρυθμοί εμπλέκουν αποκλειστικά τους αγωγούς χωρίς να εμπλέκεται το έδαφος με αποτέλεσμα οι απώλειες των διαφορικών ρυθμών να ακολουθούν την (5.48). Αυτό ερμηνεύει την εξάρτηση των συντελεστών εξασθένησης των διαφορικών ρυθμών από τη συχνότητα που απεικονίζεται στο Σχήμα 5.5.

Στην περίπτωση όμως του κοινού ρυθμού, η διάδοση πραγματοποιείται εξίσου και μέσω του εδάφους, με αποτέλεσμα ο συντελεστής εξασθένησης να εξαρτάται κυρίως από το έδαφος που εμφανίζει απώλειες και διηλεκτρική συμπεριφορά που οδηγούν στη σχέση [214]

$$\delta_{g} = \frac{1}{2\pi f \left\{ \frac{\mu_{0}\varepsilon_{g}}{2} \left[\left(1 + \left[\sigma_{g}/2\pi f \varepsilon_{g} \right]^{2} \right)^{1/2} - 1 \right] \right\}^{1/2}}$$
(5.49)

για το επιδερμικό βάθος. Καθώς η συχνότητα αυξάνει, ισχύει η προσέγγιση

$$\delta_g \cong 0.5\sigma_g \left(\mu_0 / \varepsilon_g\right)^{1/2} \tag{5.50}$$

από την οποία προκύπτει ότι στις υψηλές συχνότητες το βάθος διείσδυσης στο έδαφος καθίσταται ανεξάρτητο της συχνότητας. Έτσι, οι απώλειες διάδοσης που οφείλονται στην ροή ρεύματος επί της επιφανείας του εδάφους δεν αυξάνονται πέραν μιας συχνότητας κατωφλίου $f_t = \sigma_g / 2\pi\varepsilon_g$ [106], [214].

Ένα άλλο φαινόμενο που ευθύνεται για τη μείωση του συντελεστή εξασθένησης του κοινού ρυθμού μετά τη συχνότητα κατωφλίου f_t παρουσιάζεται αναλυτικά στις εργασίες [106], [212]. Το ηλεκτρικό πεδίο σε απόσταση r από τον άξονα της γραμμής εξαρτάται ως $H_0^{(2)}{\{\xi r\}}$, όπου $H_0^{(2)}{\{\cdot\}}$ η συνάρτηση Hankel δεύτερης τάξης και ξ μεταβλητή που αυξάνει με την συχνότητα. Σε χαμηλές συχνότητες, το $|\xi r|$ είναι μικρό και η φθίνουσα συμπεριφορά της συνάρτησης Hankel είναι αργή. Όμως, σε υψηλές συχνότητες το όρισμα της συνάρτησης Hankel γίνεται μεγαλύτερο και προκαλεί ραγδαία μείωση στην τιμή της. Αυτό στις υψηλές συχνότητες έχει ως αποτέλεσμα το ηλεκτρικό πεδίο να συγκεντρώνεται κυρίως περί τον αγωγό και μικρότερη ισχύς να φθάνει στο έδαφος. Έτσι οι απώλειες του εδάφους (earth losses) μειώνονται. Επομένως, η καμπύλη του συντελεστή εξασθένησης του

κοινού ρυθμού αυξάνει μονότονα μέχρι κάποια μέγιστη τιμή λόγω της παρουσίας του εδάφους που είναι η συχνότητα κατωφλίου f_t . Στη συνέχεια μειώνεται καθώς αυξάνει η συχνότητα, όπως, άλλωστε, επιβεβαιώνεται και από το Σχήμα 5.5.

5.4 Θόρυβος και Παρεμβολή στη ΜΤ

Εκτός από την παραμόρφωση που εισάγεται λόγω της μεταβλητής ως προς τη συχνότητα εξασθένησης και καθυστέρησης, ένας άλλος κρίσιμος παράγοντας που επηρεάζει την ευρυζωνική μετάδοση δεδομένων μέσω γραμμών μεταφοράς ισχύος είναι ο θόρυβος. Για να γίνει επιτυχής επιλογή σχημάτων ψηφιακής διαμόρφωσης είναι απαραίτητη η προσεκτική εξέταση των διαφόρων ειδών θορύβου που υφίστανται σε γραμμές μεταφοράς για να υπάρξει ορθή εκτίμηση της φασματικής πυκνότητας ισχύος (Power Spectral Density, PSD) του θορύβου. Τα δύο κύρια είδη θορύβου που εμφανίζονται σε διαύλους MT/BPL παρουσιάζονται στη συνέχεια [106], [164], [165], [259]-[262].

5.4.1 Έγχρωμος Θόρυβος Υποβάθρου

Ο έγχρωμος θόρυβος υποβάθρου (colored background noise) αποτελεί τον κυρίαρχο τύπο θορύβου που εμφανίζεται στους διαύλους MT/BPL. Εξαρτάται από τις περιβαλλοντικές συνθήκες, την υγρασία, τη γεωγραφική θέση, το ύψος τοποθέτησης των γραμμών μεταφοράς πάνω από το έδαφος κλπ. Μια από τις κύριες αιτίες δημιουργίας έγχρωμου θορύβου υποβάθρου είναι το φαινόμενο κορώνα [106], [262]-[269]. Στην εργασία [259] αναφέρεται ένα σύνολο μετρήσεων σχετικών με το επίπεδο θορύβου σε ένα πεδίο δοκιμής που περιλαμβάνει γραμμές MT. Το επίπεδο θορύβου αυτό συγκρίνεται με άλλα επίπεδα θορύβου που μετρώνται σε διαμερίσματα και μονοκατοικίες στη XT. Από τη σύγκριση αυτή προκύπτει το συμπέρασμα ότι το επίπεδο θορύβου στις γραμμές MT είναι υψηλότερο από αυτό της XT κατά 20 έως 30dBm/Hz. Ο έγχρωμος θόρυβος υποβάθρου υπάρχει μονίμως στο δίαυλο MT/BPL και διαφοροποιείται στις διαφορετικές ζώνες συχνότητας.

Θόρυβος Κορώνα

Η εκκένωση κορώνα ή στεμματοειδής εκκένωση (corona discharge) αποτελεί σημαντικό αίτιο δημιουργίας θορύβου υποβάθρου, ειδικά υπό υγρές και βαριές καιρικές συνθήκες. Το ύψος της PSD του θορύβου εξαρτάται από το επίπεδο της MT (supply voltage), τη γεωμετρική διάταξη, την τοπολογία των αγωγών στη γραμμή μεταφοράς και τις καιρικές συνθήκες. Κοντά σε γραμμές ΜΤ που βρίσκονται σε λειτουργία αναπτύσσεται ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο που προκαλεί απελευθέρωση ελεύθερων ηλεκτρονίων στον αέρα που περιβάλλει τους αγωγούς. Τα ηλεκτρόνια αυτά αλληλεπιδρούν με τα μόρια του αέρα και παράγουν και άλλα ελεύθερα ηλεκτρόνια καθώς και θετικά ιόντα. Αυτή η διαδικασία αποκτά χαρακτήρα χιονοστιβάδας (avalanche) και προκαλεί κρουστικής μορφής ρεύματα (current pulses) επί των γραμμών. Οι κρουστικοί παλμοί ρεύματος προκύπτουν σε τυχαίες χρονικές στιγμές και χαρακτηρίζονται ως τυχαία διαδικασία. Τα επαγόμενα ρεύματα περιγράφονται κυκλωματικά ως πηγές ρεύματος συνδεδεμένες παράλληλα προς τις γραμμές μεταφοράς. Η PSD του θορύβου κορώνα εμφανίζει αργή ελάττωση καθώς αυξάνεται η συχνότητα [270], [271]. Για στενού εύρους ζώνες συχνότητας, μπορεί να θεωρηθεί σταθερή, δηλαδή ισοδυναμεί με λευκό θόρυβο.

Με βάση τις διαδικασίες που περιγράφηκαν στα [106], [262], [263], [265], [267]-[269], για τις τοπολογίες γραμμών μεταφοράς αγωγών MT ως PSD θορύβου κορώνα θεωρείται αυτή που προκύπτει υπό βαριές καιρικές συνθήκες και υγρασία 80% και απεικονίζεται στο Σχήμα 5.6.



Σχήμα 5.6: Φασματική πυκνότητα ισχύος θορύβου κορώνα υπό κακές καιρικές συνθήκες.

5.4.2 Θόρυβος Στενής Ζώνης

Ο θόρυβος στενής ζώνης θόρυβος είναι το αθροιστικό αποτέλεσμα παρεμβολών από άλλες ασύρματες υπηρεσίες, όπως οι μεταδόσεις ευρυεκπομπών, οι ραδιοερασιτεχνικές εκπομπές ή οι ζεύξεις βραχέων κυμάτων που λειτουργούν στο ίδιο εύρος συχνοτήτων με τα υπέργεια συστήματα MT/BPL. Αυτό το είδος θορύβου εμφανίζει τοπικές διακυμάνσεις λόγω του ότι το εύρος συχνοτήτων από 1-100MHz δεν έχει αποδοθεί κατά ομοιόμορφο τρόπο σε ασύρματες υπηρεσίες. Επίσης, η PSD του θορύβου μεταβάλλεται χρονικά και τοπικά από περιοχή σε περιοχή [106], [260], [261]. Παρά τις διάφορες ερευνητικές προσπάθειες να ποσοτικοποιηθεί αυτό το είδος θορύβου, δεν έχει προκύψει μοντέλο για να περιγράψει ικανοποιητικά αυτές τις τυχαίες διακυμάνσεις. Μια απλή φασματική περιγραφή του θορύβου στενής ζώνης [106], [259], [260] γίνεται μέσω της σχέσης

$$S_{NBN}(f) = \sum_{i} A_{i}B(f - f_{i})$$
(5.51)

όπου

$$B(x) = \sin c \{x/6\} \gamma \iota \alpha - 0.2MHz < x < 0.2MHz$$
(5.52.1)
$$\sin c \{x\} = \sin(\pi x)/\pi x$$
(5.52.2)

 f_i είναι η κεντρική συχνότητα της ζώνης συχνοτήτων i και A_i το αντίστοιχο ύψος της PSD στη ζώνη αυτή. Οι παράμετροι f_i και A_i μεταβάλλονται χρονικά και τοπικά από περιοχή σε περιοχή.

5.4.3 Συνολικός Θόρυβος

Μια ακόμη συχνά χρησιμοποιούμενη μέθοδος για τον προσδιορισμό της PSD του συνολικού θορύβου βασίζεται στη χρήση παραμετρικού φασματικού εκτιμητή βασισμένου σε διαδικασία AR (parametric spectral estimator based on an Auto-Regressive process) [65], [79], [180], [181], [183], [260], [272]-[277].

Ο συνολικός θόρυβος σε ένα σύστημα γραμμής MT στο εύρος ζώνης από 1 έως 100MHz προκύπτει ως υπέρθεση του θορύβου υποβάθρου και του θορύβου στενής ζώνης. Στο Σχήμα 5.7 παρουσιάζεται η συνολική PSD για τυχαία περίπτωση γραμμής MT που λειτουργεί υπό κακές καιρικές συνθήκες και υπό περιορισμένη παρουσία θορύβου στενού εύρους ζώνης.

Όπως προκύπτει από το Σχήμα 5.7, η PSD του θορύβου στενής ζώνης



Σχήμα 5.7: Συνολικός θόρυβος σε γραμμή ΜΤ που λειτουργεί υπό κακές καιρικές συνθήκες.

υπερβαίνει σχεδόν σε κάθε περίπτωση εμφάνισής του την PSD του θορύβου υποβάθρου κατά τουλάχιστον 10-15dB με αποτέλεσμα την εμφάνιση σημαντικών και ιδιαίτερα δυσμενών φασματικών αιχμών. Υπάρχουν και περιπτώσεις όπου η PSD του θορύβου στενής ζώνης υπερβαίνει το θόρυβο υποβάθρου ακόμη και κατά 30-50dB [260].

Μια γενική παρατήρηση είναι ότι οι καμπύλες PSD του συνολικού θορύβου παρουσιάζουν σημαντικά υψηλότερες τιμές στις χαμηλές ζώνες συχνοτήτων. Τέλος, η ευρυζωνική δυνατότητα επηρεάζεται από την εμφάνιση των φασματικών αιχμών της PSD που προκαλούν υψηλό ποσοστό λαθών ακόμη και καταιγισμικού τύπου. Αυτό σημαίνει ότι απαιτείται λεπτομερής περιγραφή της φασματικής συμπεριφοράς – καμπυλότητα, συχνότητα έναρξης γραμμικού τμήματος, επίπεδο PSD του γραμμικού τμήματος του θορύβου (βλέπε Σχήμα 5.7)– που θα διευκολύνει σημαντικά την αξιολόγηση της επίπτωσης του συνολικού θορύβου στην ευρυζωνική μετάδοση σημάτων μέσω εναέριων γραμμών MT.



6.1 Εισαγωγή

Στο παρόν Κεφάλαιο, η bottom-up προσέγγιση, που χρησιμοποιήθηκε στο Κεφάλαιο 5 για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών μετάδοσης εναέριων διαύλων MT/BPL, τροποποιείται με στόχο τη θεωρητική αντιμετώπιση της υπόγειων διαύλων MT/BPL. Η μετάδοσης μέσω προτεινόμενη τροποποίηση/επέκταση του μετασχηματισμού ομοιότητας ενοποιεί την ανάλυση της μετάδοσης MT/BPL μέσω εναέριων και μέσω υπόγειων διαύλων. Σε αντίθεση με την περίπτωση των εναέριων τριφασικών γραμμών μεταφοράς MT που υποστηρίζουν τρεις ρυθμούς διάδοσης, μέσω των τριφασικών υπόγειων γραμμών ΜΤ με κοινή θωράκιση και οπλισμό διαδίδονται πέντε ρυθμοί. Στην περίπτωση όπου η θωράκιση και ο οπλισμός είναι γειωμένοι, οι πέντε αυτοί ρυθμοί διάδοσης μειώνονται σε τρεις που συμπεριφέρονται σχεδόν πανομοιότυπα σε γραμμές μεταφοράς όπου οι μονώσεις εμφανίζουν υψηλές απώλειες χωρίς να επηρεάζονται από την παρουσία του εδάφους. Επίσης, διαπιστώθηκε ότι η εξασθένηση που εμφανίζουν οι υπόγειοι δίαυλοι μετάδοσης MT/BPL είναι σημαντικά υψηλότερη αυτής των εναέριων διαύλων MT/BPL.

Στη συνέχεια προτείνεται μια νέα μέθοδος για την αναλυτική περιγραφή της διάδοσης στον υπόγειο δίαυλο MT/BPL κατάλληλη για υψηλές συχνότητες (από 1–100 MHz) ανεξαρτήτως του τύπου μόνωσης. Τα αριθμητικά αποτελέσματα που αφορούν την εξασθένηση που εμφανίζουν οι υπόγειοι δίαυλοι MT/BPL επιβεβαιώνονται από τις σχετικές μετρήσεις και συγκρίνονται με τα αντίστοιχα αποτελέσματα που αφορούν εναέριους διαύλους MT/BPL.

6.2 Μελέτη Υπόγειων Γραμμών Μεταφοράς Πολλών Αγωγών

Οι υπόγειες γραμμές ΜΤ μπορούν να είναι είτε άμεσα θαμμένες στο έδαφος είτε τοποθετημένες στο εσωτερικό θαμμένων προστατευτικών κυλίνδρων. Η ευρεία ποικιλία των υπόγειων γραμμών μεταφοράς ΜΤ ταξινομείται σε κατηγορίες με βάση [2]:

- Το υλικό των αγωγών. Τα υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται περισσότερο είναι το αλουμίνιο και ο χαλκός. Ο χαλκός είναι καλύτερος αγωγός ενώ το αλουμίνιο είναι αρκετά φθηνότερο ως υλικό.
- Τη μορφή των αγωγών. Αυτή ποικίλλει αντίστοιχα προς τον αριθμό και τον τύπο των αγωγών –είτε τύπου τομέα (sector type) είτε τύπου πυρήνα (core type)–, τη διατομή, την ύπαρξη στρωμάτων ημιαγωγών, το είδος της μόνωσης, την ύπαρξη ουδέτερων αγωγών και το είδος της θωράκισης/οπλισμού που χρησιμοποιείται. Μεταφορά υψηλότερης ισχύος πραγματοποιείται με χρήση αγωγών μεγαλύτερης διατομής.
- Τη δεσμοποίηση των αγωγών (bundling). Υπάρχουν δύο είδη γραμμών: οι μονοφασικές και οι τριφασικές γραμμές. Οι μονοφασικές γραμμές μεταφοράς έχουν ένα αγωγό φάσης ανά γραμμή μεταφοράς, οπότε χρησιμοποιούν τρεις γραμμές μεταφοράς ΜΤ. Οι τριφασικές γραμμές έχουν τρεις αγωγούς μέσα στην ίδια γραμμή μεταφοράς, ένα αγωγό ανά φάση. Οι μονοφασικές γραμμές προτιμώνται όταν αναμένονται έντονες μηχανικές καταπονήσεις ενώ οι τριφασικές γραμμές χρησιμοποιούνται σε ηλεκτρικά επιβαρυμένα περιβάλλοντα.

Οι κυριότερες υπόγειες γραμμές μεταφοράς παρουσιάζονται στο Παράρτημα 6.1.

Στη συνέχεια διερευνάται πώς τα κύματα του ρεύματος και της τάσης διαδίδονται στους εσωτερικούς αγωγούς υπόγειων θωρακισμένων τριφασικών γραμμών MT. Για το λόγο αυτό είναι απαραίτητη η γνώση των χαρακτηριστικών της θωράκισης που μπορούν να επηρεάσουν τη διάδοση καθώς και των μηχανισμών σύζευξης της θωράκισης και των αγωγών των υπόγειων γραμμών μεταφοράς MT. Ο εξωτερικός μεταλλικός σωληνοειδής/κυλινδρικός αγωγός καλείται οπλισμός (armor) ενώ ο εσωτερικός μεταλλικός σωληνοειδής/κυλινδρικός αγωγός καλείται θωράκιση (shield). Εξετάζεται μια τυπική τριφασική γραμμή μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος με κοινή θωράκιση και οπλισμό για τους τρεις εσωτερικούς αγωγούς όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 6.1.



Σχήμα 6.1: Δομή υπόγειας τριφασικής γραμμής μεταφοράς ΜΤ με οπλισμό και θωράκιση.

Οι γραμμές μεταφοράς PILC (Paper Insulated Lead Covered) ή γραμμές μεταφοράς μονωμένες με χαρτί και επικαλυμμένες με μόλυβδο αποτελούν ένα από τους παλαιότερους τύπους αγωγών ισχύος που χρησιμοποιούνται εδώ και σχεδόν εκατό έτη. Για μεγάλο χρονικό διάστημα δεν υπήρξε καμία εναλλακτική λύση που να ανταγωνίζεται την αποδεδειγμένη αξιοπιστία αυτού του τύπου γραμμής μεταφοράς. Σε πολλές χώρες οι γραμμές μεταφοράς PILC είναι ακόμα κυρίαρχες σε αστικές εφαρμογές. Οι θωρακισμένες γραμμές μεταφοράς PILC χρησιμοποιούνται ευρέως για τη μεταφορά ισχύος στη MT αλλά και τη διανομή ισχύος στη XT [157], [278]-[281].

Οι υπόγειες γραμμές μεταφοράς ΜΤ που θα εξεταστούν στη συνέγεια αποτελούνται από τριφασικές γραμμές μεταφοράς PILC τύπου τομέα (8/10kV, 3×95mm² Cu, PILC) θαμμένες στο έδαφος σε βάθος 1m [157], [280], [282]. Στις αριθμητικές εφαρμογές που θα ακολουθήσουν η αγωγιμότητα του εδάφους λαμβάνεται ίση με σ_g = 5mS/m και η σχετική επιτρεπτότητά του ίση με ε_{rg} = 13, τιμές που αποτελούν ρεαλιστικό σενάριο και έχουν θεωρηθεί και κατά τη μελέτη των εναέριων διαύλων MT/BPL. Θεωρείται, επίσης, κοινή θωράκιση και οπλισμός για τις τρεις φάσεις των γραμμών μεταφοράς. Όπως προαναφέρθηκε, η μορφή των γραμμών μεταφοράς αυτού του τύπου [283], [284] απεικονίζεται στο Σχήμα 6.1. Στην παρούσα διατριβή, έχει επιλεγεί η ανάλυση της διάδοσης μέσω των τριφασικών γραμμών μεταφοράς PILC -και όχι μέσω γραμμών μεταφοράς διασυνδεδεμένου πολυαιθυλενίου XLPE (Cross-Linked PolyEthylene) που παρουσιάζουν χαμηλότερη εξασθένηση-, επειδή οι γραμμές μεταφοράς τύπου PILC εμφανίζουν συμπεριφορά LOS παραπλήσια με την πλειοψηφία των υπόγειων δικτύων MT που λειτουργούν στην πράξη και, επομένως, παρέχουν πλέον αντιπροσωπευτική εικόνα της πραγματικής κατάστασης. Ενδεικτική της βασιμότητας της επιλογής αυτής είναι η συμφωνία των θεωρητικών αποτελεσμάτων που αφορούν την εξασθένηση των ρυθμών διάδοσης με πειραματικά αποτελέσματα που λαμβάνονται από τις διάφορες δοκιμές μετρήσεων [157].

Υποθέσεις για τη Γενική Ανάλυση Υπόγειων Γραμμών Μεταφοράς Ισχύος ΜΤ

Η μετάδοση σημάτων μέσω τριφασικών υπόγειων γραμμών μεταφοράς MT έχει αρχικά αναλυθεί στις εργασίες [231], [253], [254], [256], [257], [284]-[287] για χαμηλές συχνότητες και για μονώσεις που εμφανίζουν χαμηλές απώλειες. Στην παρούσα διατριβή εξετάζεται η μετάδοση MT/BPL στη γενική περίπτωση υπόγειων γραμμών μεταφοράς ισχύος MT που αποτελούνται από τρεις αγωγούς φάσεων –είτε τύπου τομέα είτε τύπου πυρήνα– με κοινή θωράκιση και οπλισμό υπό τις ακόλουθες υποθέσεις [221], [231], [284], [286]:

1. Θεωρείται διάταξη τριών μη συνεστραμμένων συμπαγών παράλληλων αγωγών φάσεων με κοινή θωράκιση και οπλισμό (βλέπε Σχήμα 6.1) [61], [119], [135], [284]. Οι αγωγοί φάσεων τοποθετούνται εντός ομογενούς μονωτικού μέσου με επιτρεπτότητα $\varepsilon_{ins}(f)$ [157], [282], διαπερατότητα μ_o , αγωγιμότητα σ_{ins} και παράγοντα απωλειών tan $\delta(f)$ [119] όπου

$$\varepsilon_{ins}(f) = \varepsilon_0 \{ \varepsilon_r'(f) - j \varepsilon_r''(f) \}$$
(6.1.1)

και

$$\tan \delta(f) = \frac{\varepsilon_r''(f)}{\varepsilon_r'(f)} + \frac{\sigma_{ins}}{2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon_r'(f)} \cong \frac{\varepsilon_r''(f)}{\varepsilon_r'(f)}$$
(6.1.2)

Στις (6.1.1) και (6.1.2), ε_0 είναι η επιτρεπτότητα του κενού, $\varepsilon'_r(f)$ η σχετική επιτρεπτότητα της μόνωσης και $\varepsilon''_r(f)$ είναι το φανταστικό μέρος της σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς. Η επιτρεπτότητα $\varepsilon_{ins}(f)$ και ο παράγοντας απώλειας tan $\delta(f)$ εξαρτώνται από τη συχνότητα αλλά και από τον τύπο και την ηλικία της γραμμής μεταφοράς, το μονωτικό μέσο, την εμποτισμένη μάζα της μόνωσης (impregnating mass), τη μηχανική τάση, το ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργείται, τη θερμοκρασία, τη χημική διάβρωση, την είσοδο υγρασίας, ενδεχόμενες κατασκευαστικές ατέλειες κλπ [65], [135], [157], [177], [288], [289].

- Η επιτρεπτότητα και ο παράγοντας απωλειών ποικίλλουν από γραμμή σε γραμμή με αποτέλεσμα να μην υπάρχει γενική θεωρητική ή πειραματική μέθοδος προσδιορισμού τους. Για την απλότητα της ανάλυσης που ακολουθεί, γίνεται η ευρέως αποδεκτή θεώρηση [134], [135], [157], [282], [290]-[292] ότι οι τιμές των tan δ, ε'_r και ε''_r λαμβάνουν σταθερές τιμές μέχρι τα 100MHz. Οι σταθερές αυτές τιμές προκύπτουν από μετρήσεις επί του συγκεκριμένου τύπου γραμμής μεταφοράς που εξετάζεται στη διατριβή [157], [282]. Ούτως ή άλλως, οι τιμές της μιγαδικής σταθεράς διάδοσης που προκύπτουν με σταθερές τιμές των tan δ, ε'_r και ε''_r είναι παρεμφερείς με αυτές που προκύπτουν μέσω προσαρμογής καμπυλών μέχρι 100MHz με χρήση κατάλληλου μοντέλου Debye [65], [157], [177], [282], [291], [293], [294] για το συγκεκριμένο τύπο γραμμής μεταφοράς.
- 3. Λόγω διάδοσης ρυθμών τύπου quasi-TEM, η παραδοσιακή θεωρία γραμμών μεταφοράς αποδεικνύεται κατάλληλη και για τη μελέτη της μετάδοσης σημάτων MT/BPL (είτε μέσω εναέριων είτε μέσω υπόγειων γραμμών μεταφοράς) [287], [295]-[298]. Η συμφωνία που έχει επιβεβαιωθεί για συχνότητες μέχρι 100MHz μεταξύ μεθόδων BPL βασισμένων στη θεωρία γραμμών μεταφοράς και μιας σειράς πειραμάτων [297], [298], ενθαρρύνει την

εφαρμογή μοντέλων BPL βασισμένων στην παραδοσιακή θεωρία γραμμών μεταφοράς.

- 4. Η θωράκιση και ο οπλισμός θεωρούνται χωρίς ατέλειες (flawless conductors). Οι διαρροές (leakage effects) μέσω των ανοιγμάτων και των ατελειών θεωρούνται αμελητέες. Δεδομένου ότι είναι λογικό να θεωρηθούν η θωράκιση και ο οπλισμός των τριφασικών γραμμών μεταφοράς MT ως συμπαγείς αγωγοί με δακτυλιοειδή διατομή [284], [285], η ανάλυση βασίζεται στις σύνθετες αντιστάσεις κυλινδρικών αγωγών (tube impedance) που αρχικά εισήχθησαν στις [299], [300] και που αργότερα επεκτάθηκαν σε γραμμές μεταφοράς πολλών αγωγών [231], [253], [284], [285], [301], όπως αυτές που εξετάζονται στην παρούσα εργασία.
- 5. Η επίδραση της επιστροφής μέσω του εδάφους θεωρείται αμελητέα λόγω της ΗΜ θωράκισης που παρέχεται από τον οπλισμό [217], [231], [283]. Συνεπώς, τα όρια προσέγγισης γραμμών μεταφοράς με επίγεια επιστροφή δεν έχουν επιπτώσεις στην ανάλυση των γραμμών μεταφοράς τριών αγωγών και θωράκισης όπου θα εστιαστεί η συνέχεια της διατριβής [231], [284].
- 6. Η επέκταση του μοντέλου διάδοσης που έχει προταθεί στις εργασίες [302]-[305] ώστε να γίνει εφικτή η εξέταση της συμπεριφοράς σε υψηλές συχνότητες και ο συνυπολογισμός των διηλεκτρικών απωλειών –που στις υψηλές συχνότητες ποικίλλουν από πολύ χαμηλές (όπως στην περίπτωση αγωγών με μόνωση XLPE) μέχρι υψηλές (όπως στην περίπτωση αγωγών PILC και μονώσεων EPR)– είναι εφικτή λαμβάνοντας υπόψη τη συμπεριφορά των γραμμών μεταφοράς σε υψηλές συχνότητες. Αυτό επιτυγχάνεται αν σε κάθε στοιχείο της ανά μονάδα μήκους μήτρας χωρητικότητας $j2\pi fC_{ij}$ του αντίστοιχου στοιχείου της μήτρας σύνθετης αγωγιμότητας Y_{ij} που αναφέρεται στα [119], [284]-[286], προστεθεί το αντίστοιχο ανά μονάδα μήκους στοιχείο της μήτρας αγωγιμότητας $G_{ij} = 2\pi fC_{ij}(\tan \delta)_{ij}$ όπου C_{ij} και $(\tan \delta)_{ij}$ είναι το ανά μονάδα μήκους στοιχείο χωρητικότητας της γραμμής μεταφοράς πολλών αγωγών [119], [231], [284] και ο παράγοντας απωλειών για την αντίστοιχη μόνωση μεταξύ των αγωγών *i* και *j*, αντίστοιχα. Δηλαδή

$$Y_{ij} \to Y_{ij} + G_{ij} \tag{6.2}$$

Ανάλυση Υπόγειων Γραμμών Μεταφοράς Πολλών Αγωγών

Όπως ήδη αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 3, με εισαγωγή κατάλληλων μητρών η τυποποιημένη κλασική ανάλυση γραμμών μεταφοράς δύο αγωγών μπορεί να επεκταθεί σε γραμμές μεταφοράς που αποτελούνται από περισσότερους από δύο αγωγούς. Οι γραμμές μεταφοράς του υπόγειου δικτύου ΜΤ αποτελούνται από τους τρεις αγωγούς φάσεων (τύπου τομέα ή τύπου πυρήνων), τη θωράκιση και τον οπλισμό. Το έδαφος λειτουργεί ως κοινή τάση αναφοράς. Οι αγωγοί φέρουν ρεύματα γραμμής $I_1(z)$, $I_2(z)$ και $I_3(z)$ ενώ οι αντίστοιχες τάσεις ως προς έδαφος είναι $V_1(z)$, $V_2(z)$ και $V_3(z)$. Τα ρεύματα της θωράκισης και του οπλισμού συμβολίζονται με $I_4(z)$ και $I_5(z)$ και οι αντίστοιχες τάσεις με $V_4(z)$ και $V_5(z)$. Οι διαφορές δυναμικού μεταξύ των εσωτερικών αγωγών (φάσεων) και της θωράκισης ονομάζονται τάσεις βρόχων (loop voltages) και συμβολίζονται με $V_1^L(z)$, $V_2^L(z)$ και $V_3^L(z)$. Τέλος, $V_4^L(z)$ είναι η διαφορά δυναμικού μεταξύ του οπλισμού και του εδάφους [285], [300], [306]. Μεταξύ των τάσεων γραμμής και βρόχων ισχύουν οι σχέσεις

$$V_i^L = V_i - V_4 \quad i = 1, 2, 3, \quad V_4^L = V_4 - V_5, \quad V_5^L = V_5$$
(6.3)

Με βάση τον ανωτέρω ορισμό των τάσεων βρόχων, το αντίστοιχο διάνυσμα τάσεων βρόχων $\mathbf{V}^{L}(z) = \begin{bmatrix} V_{1}^{L}(z) & V_{2}^{L}(z) & V_{3}^{L}(z) & V_{4}^{L}(z) & V_{5}^{L}(z) \end{bmatrix}^{T}$ συνδέεται με το διάνυσμα τάσεων γραμμής $\mathbf{V}(z) = \begin{bmatrix} V_{1}(z) & V_{2}(z) & V_{3}(z) & V_{4}(z) & V_{5}(z) \end{bmatrix}^{T}$ μέσω της σχέσης $\mathbf{V}^{L}(z) = \mathbf{D}_{\nu}^{L} \mathbf{V}(z)$ (6.4.1)

όπου

$$\mathbf{D}_{V}^{L} = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ -1 & 0 \\ -1 & 0 \\ 0_{2\times 3} & 1 & -1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$
(6.4.2)

είναι η μήτρα μετασχηματισμού τάσεων γραμμής σε τάσεις βρόχων, \mathbf{I}_n μοναδιαία μήτρα $n \times n$ και $\mathbf{0}_{m \times n}$ μήτρα $m \times n$ με μηδενικά στοιχεία. Κατ'αντίστοιχο τρόπο, τα

ρεύματα βρόχων $\mathbf{I}^{L}(z) = \begin{bmatrix} I_{1}^{L}(z) & I_{2}^{L}(z) & I_{3}^{L}(z) & I_{4}^{L}(z) & I_{5}^{L}(z) \end{bmatrix}^{T}$ συνδέονται με τα ρεύματα γραμμής $\mathbf{I}(z) = \begin{bmatrix} I_{1}(z) & I_{2}(z) & I_{3}(z) & I_{4}(z) & I_{5}(z) \end{bmatrix}^{T}$ μέσω των σχέσεων

$$I_i^L = I_i, \ i = 1,2,3 \tag{6.5.1}$$

$$I_4^L = I_1 + I_2 + I_3 + I_4 \tag{6.5.2}$$

$$I_5^L = I_1 + I_2 + I_3 + I_4 + I_5$$
(6.5.3)

και της αντίστοιχης σχέσης μητρών

$$\mathbf{I}^{L}(z) = \mathbf{D}_{I}^{L}\mathbf{I}(z) \tag{6.6.1}$$

όπου

$$\mathbf{D}_{I}^{L} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{3} & \mathbf{0}_{3\times 2} \\ \hline \mathbf{1}_{2\times 3} & 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$$
(6.6.2)

είναι η μήτρα μετασχηματισμού ρευμάτων γραμμής σε ρεύματα βρόχων και $\mathbf{1}_{m\times n}$ μήτρα $m \times n$ με όλα τα στοιχεία της ίσα με 1.

Οι τάσεις και τα ρεύματα βρόχων συνδέονται μέσω των γνωστών διαφορικών εξισώσεων

$$-\frac{d}{dz}\mathbf{V}^{L}(z) = \mathbf{Z}\mathbf{I}^{L}(z) \tag{6.7.1}$$

$$-\frac{d}{dz}\mathbf{I}^{L}(z) = \mathbf{Y}\mathbf{V}^{L}(z)$$
(6.7.2)

όπου

$$\mathbf{Z} = \mathbf{Z}(f) = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_{inner}(f) & -\mathbf{Z}_{shield-mutual}(f) & \mathbf{0}_{3\times 1} \\ -\mathbf{Z}_{shield-mutual}^{T}(f) & Z_{44}(f) & -Z_{armor-mutual}(f) \\ \mathbf{0}_{1\times 3} & -Z_{armor-mutual}(f) & Z_{55}(f) \end{bmatrix}$$
(6.8)

η ανά μονάδα μήκους μήτρα σύνθετης αντίστασης βρόχων Z [253], [286], [307]. Z_{inner} είναι η ανά μονάδα μήκους κυκλική (circulant) 3×3 μήτρα σύνθετης αντίστασης της γραμμής μεταφοράς τεσσάρων αγωγών που εμφανίζει συμμετρία εκ περιστροφής και ανάκλασης [119], [134], [135], [157], Z_{shield-mutual} είναι η 3×1 μήτρα σύνθετης αντίστασης αμοιβαίας θωράκισης (shield mutual matrix impedance), Z_{44} είναι το άθροισμα της εξωτερικής σύνθετης αντίστασης θωράκισης (shield-out impedance) της σύνθετης αντίστασης μόνωσης μεταξύ θωράκισης και οπλισμού (insulation between shield-armor impedance) και της εσωτερικής σύνθετης αντίστασης οπλισμού (armor-in impedance), $Z_{armor-mutual}$ είναι η αμοιβαία σύνθετη αντίσταση οπλισμού (armor mutual impedance) και Z_{55} είναι το άθροισμα της εξωτερικής σύνθετης αντίστασης οπλισμού (armor-out impedance) της σύνθετης αντίστασης μόνωσης μεταξύ θωράκισης και εδάφους (insulation between armor-earth impedance) και της σύνθετης αντίστασης εδάφους (ground impedance) [62], [227], [284], [285], [300], [308]-[316]. Αναλυτικά η ανά μονάδα μήκους μήτρα σύνθετης αντίστασης δίδεται στα Παραρτήματα 6.2 και 6.3.

Επίσης, η ανά μονάδα μήκους μήτρα σύνθετης αγωγιμότητας Υ έχει τη μορφή [119], [231], [317]

$$\mathbf{Y} = \mathbf{Y}(f) = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{inner}(f) & \mathbf{0}_{3\times 1} & \mathbf{0}_{3\times 1} \\ \mathbf{0}_{1\times 3} & Y_{44}(f) & \mathbf{0} \\ \mathbf{0}_{1\times 3} & \mathbf{0} & Y_{55}(f) \end{bmatrix}$$
(6.9)

όπου $\mathbf{Y}_{inner}(f)$ είναι η ανά μονάδα μήκους κυκλική 3×3 μήτρα σύνθετης αγωγιμότητας της γραμμής μεταφοράς τεσσάρων αγωγών που εμφανίζει συμμετρία εκ περιστροφής και ανάκλασης [119], [134], [135], [157], $Y_{44}(f)$ είναι η σύνθετη αγωγιμότητα της μόνωσης μεταξύ θωράκισης και οπλισμού και $Y_{55}(f)$ είναι το άθροισμα της σύνθετης αγωγιμότητας της μόνωσης μεταξύ οπλισμού και εδάφους και της σύνθετης αγωγιμότητας εδάφους [227], [284], [285], [300], [308]-[311], [317]. Αναλυτικά η ανά μονάδα μήκους μήτρα σύνθετης αγωγιμότητας δίδεται στα Παραρτήματα 6.2 και 6.3.

Στις υπόγειες τριφασικές γραμμές μεταφοράς MT, οι μήτρες Z και Y συνδέουν τις τάσεις βρόχων με τα ρεύματα βρόχων, ενώ στις εναέριες γραμμές μεταφοράς τριών αγωγών MT συνδέουν τις τάσεις γραμμής με τα ρεύματα γραμμής.

Οι (6.7.1) και (6.7.2) αποσυζευγνύονται για να προκύψουν τελικά οι διαφορικές εξισώσεις για τα κύματα της τάσης και του ρεύματος

$$\frac{d^2}{dz^2} \mathbf{V}^L(z) = \mathbf{Z} \mathbf{Y} \mathbf{V}^L(z)$$
(6.10)

$$\frac{d^2}{dz^2}\mathbf{I}^L(z) = \mathbf{Y}\mathbf{Z}\mathbf{I}^L(z)$$
(6.11)

6.3 Ευρυζωνική Μετάδοση μέσω Τριφασικών Υπόγειων Γραμμών Μεταφοράς ΜΤ με Κοινή Θωράκιση και Οπλισμό

Όπως και κατά την εναέρια μετάδοση MT/BPL, οι τάσεις των ρυθμών $\mathbf{V}^{m}(z) = \begin{bmatrix} V_{1}^{m}(z) & V_{2}^{m}(z) & V_{3}^{m}(z) & V_{4}^{m}(z) & V_{5}^{m}(z) \end{bmatrix}^{T}$ και ρεύματα των ρυθμών $\mathbf{I}^{m}(z) = \begin{bmatrix} I_{1}^{m}(z) & I_{2}^{m}(z) & I_{3}^{m}(z) & I_{4}^{m}(z) & I_{5}^{m}(z) \end{bmatrix}^{T}$ που υποστηρίζει μια γραμμή μεταφοράς πολλών αγωγών είναι δυνατό να συνδεθούν με τα αντίστοιχα μεγέθη γραμμής $\mathbf{V}(z)$ και $\mathbf{I}(z)$ μέσω μετασχηματισμών ομοιότητας της μορφής [119], [145] $\mathbf{V}(z) = \mathbf{T}_{V} \mathbf{V}^{m}(z)$ (6.12)

$$\mathbf{I}(z) = \mathbf{T}_{I} \mathbf{I}^{m}(z) \tag{6.13}$$

όπου \mathbf{T}_{ν} και \mathbf{T}_{I} είναι 5×5 μήτρες που εξαρτώνται από τη συχνότητα, τις φυσικές ιδιότητες των αγωγών και τη γεωμετρία της γραμμής μεταφοράς πολλών αγωγών [119], [135], [318]. Στη συνέχεια, οι μήτρες αυτές θα προσδιοριστούν με στόχο την εξαγωγή διακριτών αποσυζευγμένων εξισώσεων ως προς τα κυματικά μεγέθη των ρυθμών.

Οι διαφορικές εξισώσεις που εμπλέκουν τις τάσεις και τα ρεύματα των ρυθμών προκύπτουν αντικαθιστώντας τις (6.4.1), (6.6.1), (6.8), (6.9), (6.12) και (6.13) στις (6.10) και (6.11). Τότε

$$\frac{d^2}{dz^2} \mathbf{V}_m(z) = \mathbf{z} \mathbf{y} \mathbf{V}_m(z)$$
(6.14)

$$\frac{d^2}{dz^2} \mathbf{I}_m(z) = \mathbf{y} \mathbf{z} \mathbf{I}_m(z)$$
(6.15)

όπου

$$\mathbf{z}\mathbf{y} = \left(\mathbf{D}_{V}^{L}\mathbf{T}_{V}\right)^{-1}\mathbf{Z}\mathbf{Y}\left(\mathbf{D}_{V}^{L}\mathbf{T}_{V}\right)$$
(6.16.1)

και

$$\mathbf{y}\mathbf{z} = \left(\mathbf{D}_{I}^{L}\mathbf{T}_{I}\right)^{-1}\mathbf{Y}\mathbf{Z}\left(\mathbf{D}_{I}^{L}\mathbf{T}_{I}\right)$$
(6.16.2)

Για να προσδιοριστούν τα χαρακτηριστικά των ρυθμών που μπορούν να υποστηριχθούν από μια γραμμή μεταφοράς πολλών αγωγών, οι διαφορικές εξισώσεις (6.14) και (6.15) που διέπουν τους ρυθμούς πρέπει να αποσυζευχθούν ώστε να προκύψουν διακριτές διαφορικές εξισώσεις για κάθε ρυθμό. Αυτό επιτυγχάνεται προσδιορίζοντας τις μήτρες \mathbf{T}_{V} και \mathbf{T}_{I} ώστε οι μήτρες **zy** και **yz** να είναι διαγώνιες [119]. Στην περίπτωση μετάδοσης BPL μέσω εναέριων γραμμών μεταφοράς MT πολλών αγωγών, όπου οι \mathbf{D}_{V}^{L} και \mathbf{D}_{I}^{L} –που εμπλέκονται στις αντίστοιχες των (6.4.1) και (6.6.1) σχέσεις που συνδέουν τα μεγέθη βρόχων και γραμμής– είναι μοναδιαίες μήτρες, οι αντίστοιχες 3×3 μήτρες \mathbf{T}_{V} και \mathbf{T}_{I} προκύπτουν απευθείας από τις (6.16.1) και (6.16.2). Πράγματι, στην περίπτωση αυτή, οι προσδιοριστέες μήτρες είναι αυτές που διαγωνιοποιούν τις μήτρες \mathbf{Z} και \mathbf{Y} που συνδέουν τις τάσεις και τα ρεύματα γραμμής, αντίστοιχα. Στην περίπτωση μετάδοσης BPL μέσω υπόγειων γραμμών μεταφοράς MT πολλών αγωγών, οι μήτρες \mathbf{Z} και \mathbf{Y} συνδέουν τις τάσεις και τα ρεύματα ρεύματα βρόχων. Συνεπώς, οι μήτρες \mathbf{T}_{V} και \mathbf{T}_{I} μπορούν να προσδιοριστούν μόνο κατά έμμεσο τρόπο. Θέτοντας

$$\mathbf{T} = \mathbf{D}_V^L \mathbf{T}_V \tag{6.17}$$

και λαμβάνοντας υπόψη τις (6.16.1) και (6.16.2), προκύπτει ότι, για να καταστεί διαγώνια η μήτρα zy, η μήτρα T πρέπει να διαγωνιοποιεί το γινόμενο ZY, αφού τότε

$$\mathbf{T}^{-1}\mathbf{Z}\mathbf{Y}\mathbf{T} = \mathbf{z}\mathbf{y} \tag{6.18}$$

Επομένως, η μήτρα **T** έχει ως στήλες της τα ιδιοδιανύσματα της μήτρας **ZY**. Στη συνέχεια, η μήτρα \mathbf{T}_{ν} –που χρησιμοποιείται στο μετασχηματισμό ομοιότητας (6.12)– προσδιορίζεται από τη σχέση

$$\mathbf{T}_{V} = \left(\mathbf{D}_{V}^{L}\right)^{-1} \mathbf{T}$$
(6.19)

Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία, η μήτρα **T**₁ –που χρησιμοποιείται στο μετασχηματισμό ομοιότητας (6.13)– προσδιορίζεται από τη σχέση

$$\mathbf{T}_{I} = \left(\mathbf{D}_{I}^{L}\right)^{-1} \mathbf{T}^{\prime} \tag{6.20}$$

όπου **T**' η μήτρα που έχει ως στήλες τα ιδιοδιανύσματα της **YZ**. Οι **Z** και **Y** είναι συμμετρικές μήτρες με αποτέλεσμα οι ιδιοτιμές των **ZY** και **YZ** να είναι ίδιες. Αφού αμφότερες οι **zy** και **yz** είναι διαγώνιες, οι **z** και **y** είναι επίσης διαγώνιες [119], [135], [157], [319] –όπως παρουσιάζεται αναλυτικά στη συνέχεια– και οι **Z** και **Y** είναι συμμετρικές μήτρες, λόγω των (6.8), (6.9), (6.16.1) και (6.16.2) προκύπτει η περαιτέρω συσχέτιση των **T**_V και **T**_I και **T** και **T**'. Οι **T**_V και **T**_I μπορούν περαιτέρω να προσδιοριστούν μέσω της [119]

$$(\mathbf{z}\mathbf{y})^T = \mathbf{y}\mathbf{z} \Leftrightarrow (\mathbf{D}_I^L \mathbf{T}_I)^T = (\mathbf{D}_V^L \mathbf{T}_V)^{-1}$$
(6.21)

Λαμβάνοντας υπόψη την (6.19) και (6.20), η (6.21) οδηγεί στη σχέση $(\mathbf{T}')^{T} = \mathbf{T}^{-1}$ (6.22)

Στην περίπτωση της μετάδοσης BPL μέσω εναέριων γραμμών μεταφοράς MT, όπου \mathbf{D}_{V}^{L} και \mathbf{D}_{I}^{L} είναι ίσες με τη μοναδιαία μήτρα, οι αντίστοιχες μήτρες συνδέονται μέσω της [119], [161], [164]

$$\left[\mathbf{T}_{V}^{(o)}\right]^{-1} = \left[\mathbf{T}_{I}^{(o)}\right]^{T}$$
(6.23)

όπου $\mathbf{X}^{(o)}$ συμβολίζει την αντίστοιχη μήτρα \mathbf{X} στην περίπτωση εναέριας μετάδοσης MT/BPL. Λαμβάνοντας υπόψη ότι όταν έχει επιλεγεί κατάλληλα η μήτρα \mathbf{T} ισχύει η (6.18), οι εξισώσεις (6.14) που περιγράφουν τις τάσεις των ρυθμών αποσυζευγνύονται και έρχονται στη μορφή

$$\frac{d^2}{dz^2} \mathbf{V}_m(z) = \lambda \mathbf{V}_m(z) \tag{6.24}$$

όπου

 $\boldsymbol{\lambda} = \mathbf{T}^{-1} \mathbf{Z} \mathbf{Y} \mathbf{T} = diag \{ \lambda_1 \quad \lambda_2 \quad \lambda_3 \quad \lambda_4 \quad \lambda_5 \}$ (6.25)

Στην (6.25), λ_i , i = 1,2,3,4,5 είναι οι ιδιοτιμές της **ΖΥ**. Οι μιγαδικές σταθερές διάδοσης των πέντε ρυθμών που υποστηρίζονται από υπόγεια γραμμή MTL της μορφής του Σχήματος 6.1 είναι $\gamma_i = \lambda_i^{1/2} = \alpha_i + j\beta_i$, i = 1,2,3,4,5.

Οι χαρακτηριστικές αντιστάσεις των ρυθμών δίδονται από τη σχέση [161] $\mathbf{Z}_{mc} = \mathbf{T}^{-1} \mathbf{Y}^{-1} (\mathbf{T}^{-1})^T diag \{ \gamma_1 \quad \gamma_2 \quad \gamma_3 \quad \gamma_4 \quad \gamma_5 \}$ (6.26)

Κατά την περίπτωση μετάδοσης μέσω εναέριων γραμμών μεταφοράς MT/BPL, όπου οι \mathbf{T}_{V} και \mathbf{T}_{I} συνδέονται μέσω της (6.23), η (6.26) απλοποιείται στην

$$\mathbf{Z}_{mc} = \left[\mathbf{T}_{V}^{(o)}\right]^{-1} \mathbf{Y}^{-1} \mathbf{T}_{I}^{(o)} diag\left\{\gamma_{1} \quad \gamma_{2} \quad \gamma_{3}\right\}$$
(6.27)

που είναι η γνωστή χαρακτηριστική αντίσταση των ρυθμών για την περίπτωση μετάδοσης μέσω εναέριων γραμμών μεταφοράς MT/BPL [161], [164].

Οι πέντε ρυθμοί που υποστηρίζονται από την υπόγεια διάταξη MT/BPL που μελετάται έχουν τις δικές τους μιγαδικές σταθερές διάδοσης, έχοντας έτσι διαφορετική εξάρτηση από τη συχνότητα. Εφόσον ισχύουν οι προϋποθέσεις που έχουν αναφερθεί ως A_i , i = 1,2,3 στο Κεφάλαιο 4, οι πέντε αυτοί ρυθμοί είναι διακριτοί σε όλο το υπόγειο δίκτυο MT. Η σχέση μεταξύ $V_i^m(z)$ και $V_i^m(0)$ καθορίζεται προσδιορίζοντας κατάλληλους τελεστές $H_i^m \{\cdot\}$ ώστε να ισχύει η σχέση
$$\mathbf{V}^{m}(z) = \mathbf{H}^{m} \left\{ \mathbf{V}^{m}(0) \right\}$$
(6.28)

όπου

 $\mathbf{H}^{m}\left\{\cdot\right\} = diag\left\{H_{1}^{m}\left\{\cdot\right\} \quad H_{2}^{m}\left\{\cdot\right\} \quad H_{3}^{m}\left\{\cdot\right\} \quad H_{4}^{m}\left\{\cdot\right\} \quad H_{5}^{m}\left\{\cdot\right\}\right\}$ (6.29)

η διαγώνια τελεστική μήτρα που λειτουργεί ως μητρική συνάρτηση μεταφοράς [164] με στοιχεία H_i^m {·} τις συναρτήσεις μεταφοράς που χαρακτηρίζουν τους αντίστοιχους ρυθμούς μετάδοσης. Συνδυάζοντας τις (6.12) και (6.29), η 5×5 μήτρα συναρτήσεων μεταφοράς **H** που συνδέει τις τάσεις **V**(z) με **V**(0) μέσω της σχέσης

$$\mathbf{V}(z) = \mathbf{H}\mathbf{V}(0) \tag{6.30}$$

προκύπτει από τη σχέση

$$\mathbf{H} = \mathbf{T}_{V} \mathbf{H}^{m} \left\{ \mathbf{T}_{V}^{-1} \right\}$$
(6.31)

Μέσω των (6.19) και (6.29), προσδιορίζεται η μήτρα συναρτήσεων μεταφοράς Η υπόγειων τριφασικών γραμμών μεταφοράς MT με κοινή θωράκιση και οπλισμό. Παρεμφερείς εκφράσεις προκύπτουν για την εναέρια MT/BPL περίπτωση του Κεφαλαίου 5. Οι αντίστοιχες εκφράσεις για τη μετάδοση BPL μέσω υπόγειων γραμμών μεταφοράς MT/BPL διαφοροποιούνται λόγω της εισαγωγής της μήτρας \mathbf{D}_{V}^{L} . Ας σημειωθεί ότι η ανωτέρω αναλυτική διαδικασία αποτελεί άμεση λύση του προβλήματος όταν οι ανά μονάδα μήκους μήτρες **Z** και **Y** είναι γνωστές, όπως συμβαίνει στην περίπτωση των αγωγών τύπου πυρήνα [253], [254], [284]-[286].

6.4 Προσεγγιστική Λύση για Συμμετρικές Υπόγειες Γραμμές Μεταφοράς ΜΤ Πολλών Αγωγών

Η προσέγγιση θωράκισης/οπλισμού γραμμών μεταφοράς MT πολλών αγωγών που εισάγεται στην παράγραφο αυτή αποτελεί γενική προσέγγιση που αφορά υπόγειες τριφασικές γραμμές μεταφοράς MT με κοινή θωράκιση και οπλισμό ανεξάρτητα από τον τύπο των αγωγών φάσεων (είτε τύπου τομέα είτε τύπου πυρήνα) και από τη μόνωση. Η προσέγγιση αυτή αποσκοπεί: α) σε μια ημιαναλυτική μελέτη των ρυθμών που υποστηρίζονται από την υπόγεια διάταξη που εξετάζεται και β) στην εφαρμογή αυτής της ανάλυσης ρυθμών σε πραγματικά υπόγεια δίκτυα MT/BPL.

Η προτεινόμενη προσέγγιση –που ισχύει για τη μεγάλη πλειοψηφία των γραμμών μεταφοράς πολλών αγωγών που χρησιμοποιούνται στα υπάρχοντα δίκτυα MT– βασίζεται στην πραγματική δομή της θωράκισης και του οπλισμού σε υπόγειες τριφασικές γραμμές μεταφοράς MT και αξιοποιεί την ύπαρξη συμμετρίας των γραμμών μεταφοράς πολλών αγωγών. Ειδικότερα, για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών διάδοσης των πέντε ρυθμών που υποστηρίζονται από υπόγειες γραμμές πολλών αγωγών, η προσέγγιση θωράκισης/οπλισμού γραμμών μεταφοράς πολλών αγωγών λαμβάνει υπόψη ότι στην πλειοψηφία των υπαρχόντων δικτύων ΜΤ το πάγος της θωράκισης και το πάγος του οπλισμού των υπόγειων γραμμών μεταφοράς ΜΤ είναι μεγαλύτερο από 100μm και 200μm, αντίστοιχα [320], [321]. Στο εύρος συχνοτήτων 1-100MHz, το γεγονός αυτό έχει ως συνέπεια οι τιμές των $\mathbf{Z}_{shield-mutual}$ και $Z_{armor-mutual}$ που υπεισέρχονται στην (6.8) να είναι αμελητέες σε σχέση με τις υπόλοιπες τιμές των στοιχείων της μήτρας \mathbf{Z} ανεξάρτητα από το υλικό της συμπαγούς θωράκισης/οπλισμού και τον τύπο της μόνωσης. Το φαινόμενο είναι εμφανέστερο όταν είτε η συχνότητα είτε το πάχος αυξάνουν ή όταν τα υλικά της θωράκισης/οπλισμού παρουσιάζουν μεγάλη αγωγιμότητα [62], [284], [285], [300], [308], [312]-[316]. Με βάση την προσέγγιση αυτή, η μήτρα Ζ όπως προκύπτει από την (6.8) λαμβάνει μορφή παρόμοια με αυτήν της Υ που δίδεται μέσω της (6.9). Η μορφή αυτή επιτρέπει τη χωριστή διαγωνιοποίηση των μητρών \mathbf{Z}_{inner} και \mathbf{Y}_{inner} , αφού τα 2×2 κάτω δεξιά τμήματα των πινάκων Z και Y είναι διαγώνιες μήτρες όπως φαίνεται στο Παράρτημα 6.4.

Συμπερασματικά, οι μιγαδικές σταθερές διάδοσης, οι χαρακτηριστικές αντιστάσεις, οι ιδιοτιμές και τα ιδιοδιανύσματα που χαρακτηρίζουν μια γραμμή μεταφοράς με τρεις αγωγούς φάσεων –είτε τύπου τομέα είτε τύπου πυρήνα– και κοινή θωράκιση προσδιορίζονται χωριστά [157], [282], [322]-[324]. Επίσης, με χρήση της κυκλικής συμμετρίας των υπόγειων γραμμών μεταφοράς πολλών αγωγών που εξετάζονται στην παρούσα διατριβή και παρουσιάζονται στο Παράρτημα 6.4, προκύπτει ότι οι ισοδύναμες ανά μονάδα μήκους μήτρες σύνθετης αντίστασης **z** και σύνθετης αγωγιμότητας **y** που χαρακτηρίζουν τη διάδοση των διακριτών ρυθμών μέσω γραμμών τέτοιου τύπου είναι διαγώνιες μήτρες. Επίσης, προκύπτει ότι $\gamma_2 = \gamma_3$, $Z_{mc,2} = Z_{mc,3}$ [119], [134], [135], [157], [161], [172]. Επομένως, αφού οι ρυθμοί DM₁ και DM₂ εμφανίζουν την ίδια μιγαδική σταθερά διάδοσης και την ίδια χαρακτηριστική αντίσταση αρκεί να μελετηθεί μόνο ένας ρυθμός από τους δύο, έστω ο DM₁ [119], [134], [135], [157], [161], [172].

6.4.1 Προσεγγιστική Λύση για Συμμετρικές Γραμμές Μεταφοράς με Υψηλών Απωλειών Μονώσεις

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η προσέγγιση TUE (Technische Universiteit Eindhoven) [65], [157], [177], [282], [325] που αποσκοπεί στην προσεγγιστική επίλυση του ιδιοπροβλήματος των γραμμών μεταφοράς τεσσάρων αγωγών, όπως είναι οι τριφασικές υπόγειες γραμμές μεταφοράς MT (είτε τύπου τομέα είτε τύπου πυρήνα) με κοινή θωράκιση και οπλισμό και υψηλών απωλειών μονώσεις και χωρίς ημιαγώγιμα στρώματα [157], [280], [282]. Σε συσχετισμό και με το σχόλιο στο τέλος του προηγούμενου εδαφίου επισημαίνεται ότι η προσέγγιση αυτή είναι πολύ χρήσιμη όταν οι ανά μονάδα μήκους μήτρες \mathbf{Z}_{inner} και \mathbf{Y}_{inner} δεν είναι δυνατό να προσδιοριστούν αναλυτικά αλλά προσδιορίζονται μόνο προσεγγιστικά ή μέσω μετρήσεων, όπως στην περίπτωση αγωγών φάσεων τύπου τομέα.

Ειδικά στην περίπτωση γραμμών μεταφοράς με σχετικά υψηλές απώλειες διηλεκτρικού (PILC και μερικά EPR διηλεκτρικά) χωρίς ημιαγώγιμα στρώματα και για υψηλές συχνότητες, η ευρέως γνωστή προσέγγιση $\text{Re}(z_i) << \text{Im}(z_i)$ και $\text{Re}(y_i) << \text{Im}(y_i)$, i = 1,2,3 για τα z_i και y_i όπως προκύπτουν από τις (Π.6.28) και (Π.6.30), αντίστοιχα, του Παραρτήματος 6.4 σε γραμμές μεταφοράς με μικρές απώλειες [65], [157], [177], [282], [325], οδηγεί στο συμπέρασμα ότι σε υψηλές συχνότητες η εξασθένηση καθορίζεται κατά κύριο λόγο από τις διηλεκτρικές απώλειες. Συγκεκριμένα, για υψηλές συχνότητες ισχύουν οι σχέσεις (i = 1,2,3)

$$\gamma_{i}(f) \cong \underbrace{\frac{1}{2}R_{i}(f)[C_{i}(f)/L_{i}(f)]^{1/2}}_{\alpha_{i}(f)} + \underbrace{\frac{1}{2}G_{i}(f)[L_{i}(f)/C_{i}(f)]^{1/2}}_{\alpha_{i}(f)} + j\underbrace{(2\pi f)[L_{i}(f)C_{i}(f)]^{1/2}}_{\beta_{i}(f)}$$

$$Z_{mc,i}(f) \cong [L_i(f)/C_i(f)]^{1/2}$$
(6.33)

Επίσης, ισχύει [119], [157]

$$L_i(f)C_i(f) \cong \mu_0 \varepsilon_0 \varepsilon'_r \tag{6.34}$$

$$L_i(f)G_i(f) \cong (2\pi f)\mu_0 \varepsilon_0 \varepsilon_r'' \tag{6.35.1}$$

$$\acute{\eta} G_i(f) \cong (2\pi f) \tan \delta C_i(f)$$
(6.35.2)

Από την (6.32) εξάγονται τα ακόλουθα ενδιαφέροντα συμπεράσματα σχετικά με τους μηχανισμούς εξασθένησης [290]:

(6.32)

- Σε σχετικά χαμηλές συχνότητες τη διάδοση μέσω των αγωγών επηρεάζει το επιδερμικό φαινόμενο που ποσοτικοποιείται μέσω του συντελεστή $\alpha_{sk,i}(f)$ [231], [284], [285]. Όταν το επιδερμικό φαινόμενο είναι κυρίαρχο, ισχύει $\alpha_{sk,i}(f) \propto f^{1/2}$ [65], [157], [177], [302], [325].
- Διηλεκτρικές απώλειες στη μόνωση, που ποσοτικοποιούνται μέσω του συντελεστή α_{d,i}(f), αυξάνουν ανάλογα προς τη συχνότητα –δηλαδή α_{d,i}(f)∝ f [157], [282], [302]- και, συνεπώς, καθίστανται σημαντικές σε υψηλές συχνότητες. Για ορισμένους τύπους γραμμών μεταφοράς που εμφανίζουν σχετικά μεγάλη διηλεκτρική εξασθένηση σε υψηλές συχνότητες (PILC και μερικά EPR διηλεκτρικά), ο μηχανισμός απωλειών αυτός κυριαρχεί στο εύρος συχνοτήτων 1-100MHz [157], [279], [280].
- Απώλειες δινορρευμάτων (eddy current losses) στους τρεις αγωγούς που προκαλούνται λόγω σπειροειδούς ροής ρεύματος επί των ομόκεντρων ουδέτερων αγωγών (concentric neutral wires) ή επί των ταινιών χαλκού που αποτελούν τη θωράκιση (copper tape shield). Στην περίπτωση των τελευταίων, η απώλεια αυτή είναι ενδεχομένως σημαντική, ιδιαίτερα σε γερασμένες γραμμές μεταφοράς όπου η αντίσταση μεταξύ των περιτυλιγμένων ταινιών είναι αυξημένη λόγω διάβρωσης. Στην περίπτωση ομόκεντρων ουδέτερων αγωγών, η επίδραση των απωλειών αυτών είναι αμελητέα (βλέπε Σχήμα 6.2α) [290].
- Απώλειες που προκαλούνται από το χωρητικό ρεύμα που διαπερνά εγκαρσίως τους αγωγούς και τα ημιαγώγιμα στρώματα της γειωμένης θωράκισης. Για διηλεκτρικά που εμφανίζουν σχετικά χαμηλές απώλειες σε υψηλές συχνότητες, όπως οι γραμμές μεταφοράς XLPE, οι απώλειες αυτές είναι κυρίαρχες [290], [302]-[305]. Συνολικά, οι απώλειες λόγω των ημιαγώγιμων στρωμάτων εκφράζονται μέσω του συντελεστή α_{sc}(f)∝ f² της (6.32) [157], [302].
- Απώλειες που οφείλονται στο χωρητικό ρεύμα που ρέει περιφερειακά επί των ημιαγώγιμων στρωμάτων της γειωμένης θωράκισης για να φθάσει στον ουδέτερο αγωγό. Η επίδραση των απωλειών αυτών είναι δευτερεύουσα (βλέπε Σχήμα 6.2β) [302].



Σχήμα 6.2: Μηχανισμοί εξασθένησης για τις περιπτώσεις: (α) απωλειών δινορρευμάτων και (β) απωλειών λόγω χωρητικού ρεύματος.

Κατά την εξέταση γραμμών μεταφοράς PILC χωρίς ημιαγώγιμα στρώματα στο εύρος συχνοτήτων 1-100MHz [157], [282], [302], οι διηλεκτρικές απώλειες στη μόνωση που ποσοτικοποιούνται μέσω του συντελεστή $\alpha_{d,i}(f)$ κυριαρχούν έναντι των άλλων απωλειών και μάλιστα τόσο περισσότερο όσο αυξάνει η συχνότητα [157], [282]. Κατά συνέπεια, η συνολική εξασθένηση μπορεί να προσεγγιστεί μέσω του $\alpha_{d,i}(f)$ με αποτέλεσμα οι μιγαδικές σταθερές διάδοσης των ρυθμών CM, DM₁ και DM₂ να λαμβάνουν παραπλήσιες τιμές [157]. Αυτό οφείλεται στο ότι, λόγω των (6.34) και (6.35), για τη μιγαδική σταθερά διάδοσης της (6.32) $\gamma_i(f) = \alpha_i(f) + j\beta_i(f)$ ισχύουν

$$\alpha_i(f) \cong \alpha_{d,i}(f) \cong \frac{(2\pi f)\varepsilon_r''}{2} \left(\frac{\varepsilon_0 \mu_0}{\varepsilon_r'}\right)^{1/2}, \ i = 1,2,3$$
(6.36)

$$\beta_i(\omega) \cong (2\pi f) (\mu_0 \varepsilon_0 \varepsilon'_r)^{1/2}, \ i = 1, 2, 3$$
(6.37)

Από (6.36) και (6.37) είναι φανερό ότι στην περίπτωση των ανωτέρω γραμμών μεταφοράς ο συντελεστής εξασθένησης και η καθυστέρηση φάσης εμφανίζουν γραμμική συμπεριφορά ως προς τη συχνότητα. Τα χαρακτηριστικά μετάδοσης αυτά είναι ανεξάρτητα από τη γεωμετρία του συστήματος των τεσσάρων αγωγών όταν αυτό είναι συμμετρικό και εξαρτώνται μόνο από τις παραμέτρους του μονωτικού μέσου. Εντούτοις, σε διαφορετικούς τύπους γραμμών μεταφοράς, οι μιγαδικές σταθερές διάδοσης των CM, DM₁ και DM₂ ενδεχομένως είναι διαφορετικές. Μπορούν επίσης να είναι διαφορετικές όταν η διάταξη των γραμμών μεταφοράς δεν είναι συμμετρική ή όταν υπάρχουν: (i) ανοίγματα και ατέλειες στους αγωγών, της

θωράκισης και του οπλισμού, (iii) ανομοιογένειες στο μέσο μόνωσης, (iv) ημιαγώγιμα στρώματα [157], [280], [282].

6.5 Χαρακτηριστικά Μετάδοσης Υπόγειων Γραμμών Μεταφοράς ΜΤ/BPL

Από την προηγούμενη ανάλυση προέκυψε ότι, μέσω τριφασικών υπόγειων γραμμών μεταφοράς που έχουν κοινή θωράκιση και οπλισμό, υποστηρίζεται η διάδοση πέντε ρυθμών. Συγκεκριμένα υποστηρίζονται:

- Ο κοινός (common) ρυθμός που διαδίδεται μέσω των τριών φάσεων και επιστρέφει μέσω της θωράκισης.
- Δύο διαφορικοί ρυθμοί (differential modes) που διαδίδονται και επιστρέφουν μέσω των τριών φάσεων.
- Δύο ρυθμοί-φάντασμα (phantom modes), ένας που διαδίδεται μέσω της θωράκισης και επιστρέφει μέσω του οπλισμού και ένας που διαδίδεται μέσω του οπλισμού και επιστρέφει μέσω του εδάφους [285], [300], [306].

Ο κοινός ρυθμός (CM), οι δύο διαφορικοί ρυθμοί (DM_i, i = 1,2) και οι δύο ρυθμοίφάντασμα (PM_i, i = 1,2) –έκαστος με τη δική του μιγαδική σταθερά διάδοσης και χαρακτηριστική αντίσταση– μπορούν να εξεταστούν χωριστά σε όλη την έκταση του υπόγειου δικτύου MT, εφόσον ικανοποιούνται οι τρεις υποθέσεις A_i , i = 1,2,3, που έγιναν στο Κεφάλαιο 4 [135], [146], [162], [326]. Λόγω των υποθέσεων αυτών, οι πέντε ρυθμοί που διαδίδονται μέσω των υπόγειων τριφασικών γραμμών μεταφοράς MT με κοινή θωράκιση και οπλισμό είναι πλήρως διακριτοί και αντιστοιχούν σε πέντε ανεξάρτητους διαύλους μετάδοσης που μπορούν ταυτόχρονα να μεταδίδουν σήματα BPL σε όλη την έκταση του υπόγειου δικτύου MT. Ο πλήρης διαχωρισμός των ρυθμών είναι χαρακτηριστικό και της μετάδοσης BPL μέσω τριφασικών εναέριων γραμμών μεταφοράς MT οπότε υποστηρίζονται τρεις διακριτοί ρυθμοί μετάδοσης.

Με κριτήριο τον τρόπο έγχυσης των σημάτων BPL στις υπόγειες γραμμές μεταφοράς MT/BPL, διακρίνονται δύο περιπτώσεις [4], [283], [327]:

- Έγχυση φάσης-φάσης (Phase-to-Phase ή PtP) όταν το σήμα εγχύεται σε δύο φάσεις.
- Έγχυση θωράκισης-φάσης (Shield-to-Phase ή StP) όταν το σήμα εγχύεται μεταξύ μιας φάσης και της θωράκισης.

Όταν πραγματοποιείται έγχυση PtP διεγείρονται μόνο οι δύο διαφορικοί ρυθμοί ενώ ενδεχόμενη η δευτερογενής διέγερση του κοινού ρυθμού προκαλείται από αντίστοιχες ασυνέχειες και ατέλειες των γραμμών μεταφοράς. Ως εκ τούτου, η μετάδοση BPL πραγματοποιείται κυρίως μέσω των δύο διαφορικών ρυθμών.

Όταν πραγματοποιείται έγχυση StP διεγείρονται τόσο ο κοινός ρυθμός όσο και οι δύο διαφορικοί ρυθμοί [283], [327]. Το φαινόμενο αυτό παρατηρήθηκε και κατά την έγχυση WtG στις εναέριες γραμμές μεταφοράς MT/BPL [162], [164], [165]. Δεδομένου ότι η απόσταση των αγωγών στις υπόγειες γραμμές μεταφοράς είναι ένα μικρό κλάσμα του μήκους κύματος που αντιστοιχεί σε συχνότητες μέχρι 100MHz, οι ρυθμοί που υποστηρίζονται από τις υπόγειες γραμμές μεταφοράς είναι σχεδόν ορθογώνιοι [65].

Τόσο κατά την έγχυση PtP όσο και κατά την έγχυση StP δεν διεγείρονται οι ρυθμοί-φάντασμα. Εντούτοις, οι ρυθμοί-φάντασμα εμφανίζονται τόσο κατά την έγχυση εδάφους-φάσης (Ground-to-Phase ή GtP) όσο και κατά τις εγχύσεις PtP και StP όταν οι τιμές των $\mathbf{Z}_{shield-mutual}$ και $Z_{armor-mutual}$ που υπεισέρχονται στην (6.8) δεν είναι αμελητέες σε σχέση με τις υπόλοιπες τιμές των στοιχείων της μήτρας \mathbf{Z} [62], [284], [285], [300], [308], [312]-[316].

Γενικά, τόσο η θωράκιση όσο και ο οπλισμός στα τριφασικά συστήματα είναι γειωμένα στη μια ή στις δύο άκρες ή με βραχείες συνδέσεις σε πολλαπλές θέσεις [328]-[330]. Δηλαδή $V_4(z) = V_5(z) = 0$ εξισώνοντας έτσι την ηλεκτρική καταπόνηση (electrical stress), παρέχοντας πορεία επίγειας επιστροφής για τα ρεύματα, εμποδίζοντας τη ροή χωρητικού ρεύματος στα αντικείμενα (ή τα πρόσωπα) που έρχονται σε επαφή με το εξωτερικό του αγωγού και παρέχοντας προστασία από τις τάσεις ή παλμούς ρευμάτων θορύβου [329]-[331]. Όταν το πάχος της θωράκισης και του οπλισμού υπερβαίνει τα 100μm και 200μm, αντίστοιχα –όπως ισχύει για τις περισσότερες γραμμές μεταφοράς MT–, η μήτρα \mathbf{T}_V έχει τη μορφή της (Π.6.34) που δίδεται στο Παράρτημα 6.3. Λόγω της μορφής του κάτω δεξιά 2×5 τμήματος της μήτρας \mathbf{T}_V , προκύπτει ότι όταν $V_4(z) = V_5(z) = 0$ και οι αντίστοιχες τάσεις ρυθμών είναι μηδενικές, δηλαδή $V_4^m(z) = V_5^m(z) = 0$. Επομένως, όταν και η θωράκιση και ο οπλισμός είναι γειωμένοι, οι τάσεις των ρυθμών-φάντασμα $V_4^m(z)$ και $V_5^m(z)$ είναι μηδενικές σε όλη την από-άκρο-σε-άκρο-σύνδεση. Στην περίπτωση αυτή η θωράκιση λειτουργεί ως αγωγός επίγειας επιστροφής (ground return path) και ως αγωγός

αναφοράς (reference conductor), ενώ η διάδοση ρυθμών μεταπίπτει σε διάδοση μέσω γραμμής μεταφοράς τεσσάρων αγωγών. Ο μετασχηματισμός αυτός των υπόγειων γραμμών μεταφοράς τριών αγωγών με κοινή θωράκιση και οπλισμό σε γραμμές μεταφοράς τεσσάρων αγωγών αποτελεί κοινή πρακτική είτε σε επίπεδο θεωρητικής ανάλυσης είτε σε επίπεδο πειραματικών μετρήσεων [65], [135], [157], [282], [284], [285], [317], [323], [324].

Επομένως, οι ρυθμοί-φάντασμα δεν συμμετέχουν ενεργά στη μετάδοση σημάτων BPL. Συνεπώς, η φασματική συμπεριφορά τους δεν θα εξεταστεί περαιτέρω.

6.6 Αριθμητικά Αποτελέσματα

Αν και η θεωρητική ανάλυση που παρουσιάστηκε είναι γενική και αφορά τις τριφασικές υπόγειες γραμμές μεταφοράς ΜΤ με κοινή θωράκιση και οπλισμό ανεξάρτητα από τον τύπο των αγωγών φάσης (είτε τύπου πυρήνα είτε τύπου τομέα) και της μόνωσης, οι δίαυλοι MT/BPL που θα εξεταστούν στις προσομοιώσεις είναι τριφασικές γραμμές μεταφοράς MT τύπου τομέα (8/10kV, 3×95mm², PILC) θαμμένες 1m στο έδαφος [157], [280], [282].

Στο Σχήμα 6.3, σχεδιάζονται συναρτήσει της συχνότητας οι συντελεστές εξασθένησης $\alpha_{CM} = \operatorname{Re}\{\gamma_{CM}\}, \ \alpha_{DM_1} = \operatorname{Re}\{\gamma_{DM_1}\}\$ και $\alpha_{DM_2} = \operatorname{Re}\{\gamma_{DM_2}\}\$ του κοινού ρυθμού και των δύο διαφορικών ρυθμών που υποστηρίζονται από υπόγειες τριφασικές γραμμές μεταφοράς MT τύπου τομέα (βλέπε Σχήμα 6.1).

Από το Σχήμα 6.3, η θεωρητική ανάλυση που έχει προηγηθεί για υψηλές συχνότητες και για μονώσεις που εμφανίζουν απώλειες επιβεβαιώνεται με τη χρήση άλλων δύο θεωρητικών μεθόδων. Συγκεκριμένα χρησιμοποιούνται:

- Η μέθοδος που περιγράφεται στις εργασίες [106], [158]-[160], [162], [164], [284]-[286], [231] και επεκτάθηκε στην υπάρχουσα διατριβή για υψηλές συχνότητες και για μονώσεις διαφόρων τύπων για την περίπτωση υψηλών απωλειών μόνωσης PILC αντί XLPE και γραμμή μεταφοράς τριών πυρήνων χωρίς ημιαγώγιμα στρώματα –όπως το 2XSYBY 3×95mm² [320]– (Μέθοδος UPP).
- Η προσέγγιση TUE για τριφασική γραμμή μεταφοράς αγωγών τύπου τομέα PILC (8/10kV, 3×95mm² Cu, PILC) [157], [282] (Μέθοδος TUE).



Σχήμα 6.3: Συντελεστής εξασθένησης υπόγειων γραμμών μεταφοράς MT με χρήση τριών διαφορετικών μεθόδων (η κλίμακα του άξονα *y* είναι γραμμική).

Η μέθοδος ΚΑR που περιλαμβάνει την υπομέθοδο ομοαξονικής γραμμής (για την περιγραφή του διαύλου CM) [65], [134], [135], [157], [282] και την υπομέθοδο πυκνωτή (για την περιγραφή των διαύλων DM) [65], [281], [325]. Η μέθοδος ΚΑR αποτελεί μια απλουστευμένη προσέγγιση και εφαρμόζεται για τριφασική γραμμή μεταφοράς αγωγών τύπου τομέα PILC (8/10kV, 3×95mm² Cu, PILC) [157], [282] με θωράκιση και οπλισμό από χαλκό (Μέθοδος KAR). Οι ανά μονάδα μήκους παράμετροι σύνθετης αντίστασης και σύνθετης αγωγιμότητας των δύο υπομεθόδων παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.1.

Σημείωση: Λόγω του αντίστοιχου τρόπου κατανομής των ρευμάτων στους αγωγούς – διαδίδονται μέσω των τριών φάσεων και επιστρέφουν μέσω της θωράκισης–, ο δίαυλος CM μπορεί να προσεγγιστεί από μια ισοδύναμη ομοαξονική γραμμή μεταφοράς ενιαίου πυρήνα (single-core coaxial model) όπου οι τρεις αγωγοί τύπου τομέα αντικαθίστανται από ένα ενιαίο αγωγό τύπου πυρήνα που έχει την ίδια ακτίνα [65], [134], [135], [157], [282]. Κατά τον ίδιο τρόπο, λόγω του τρόπου κατανομής των ρευμάτων στους αγωγούς, οι δίαυλοι DM μπορούν να προσεγγιστούν από έναν ισοδύναμο πυκνωτή (two strip-lines model approximation) [65], [281], [325]. Για τον προσδιορισμό των ανά μονάδα μήκους μητρών σύνθετης αντίστασης z και σύνθετης αγωγιμότητας y των ρυθμών CM και DM₁, DM₂ χρησιμοποιούνται οι ανά μονάδα μήκους αντίσταση r, αυτεπαγωγή l, αγωγιμότητα g και χωρητικότητα c όπως ορίζονται για κάθε περίπτωση στον Πίνακα 6.1.

Εφόσον οι συντελεστές εξασθένησης όπως απεικονίζονται στο Σχήμα 6.3 είναι σχεδόν ταυτόσημοι, στη συνέχεια των προσομοιώσεων και για τα αριθμητικά αποτελέσματα του Κεφαλαίου αυτού αλλά και του Κεφαλαίου 7 θα προτιμηθεί η προσέγγιση TUE λόγω της απλότητας εφαρμογής της [167].

	Ομοαξονική	Δύο αγωγοί	Πυκνωτής (DM)
	γραμμή (CM)		
			⊢r θ ⊥
r	$\frac{R_s}{2\pi} \left(\frac{1}{r_c} + \frac{1}{r_s} \right)$	$\frac{R_s}{\pi r}$	$\frac{2R_s}{r}$
l	$\frac{\mu_0}{2\pi} \ln \left(\frac{r_s}{r_c}\right)$	$\frac{\mu_0}{\pi} \cosh^{-1}\left(\frac{D}{2r}\right)$	$\frac{\mu_0 \theta}{r}$
g	$\frac{2\pi(2\pi f)\varepsilon_r'\varepsilon_0}{\ln(r_s/r_c)}$	$rac{\pi(2\pi\!f)arepsilon_r'\!arepsilon_0}{\cosh^{-1}(D/2r)}$	$\frac{(2\pi f)\varepsilon_r''\varepsilon_0r}{\theta}$
С	$\frac{2\pi\varepsilon_r'\varepsilon_0}{\ln(r_s/r_c)}$	$rac{\pi arepsilon_r' arepsilon_0}{\cosh^{-1}(D/2r)}$	$\frac{\varepsilon_r'\varepsilon_0r}{\theta}$

Πίνακας 6.1: Βασικές παράμετροι απλών διατάξεων (R_s η επιφανειακή αντίσταση
αγωγού).

Διάφορα αιτιοκρατικά και στατιστικά πρότυπα έχουν προταθεί για την αξιολόγηση της εξασθένησης υπόγειων διαύλων MT/BPL [3], [157], [282], [322], [323]. Τελευταία, έχει πραγματοποιηθεί ένα μεγάλο πλήθος πειραματικών μετρήσεων του υπόγειου δικτύου MT για διάφορες τοπολογίες και τύπους αγωγών κυρίως στο φάσμα συχνότητας 1-30MHz αλλά και το φάσμα 1-100MHz. Οι μετρήσεις αυτές μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως ακολούθως:

- Μετρήσεις σε υπόγεια δίκτυα MT/BPL που είναι σε λειτουργία. Σε αυτές συμπεριλαμβάνονται οι μετρήσεις των ENDESA (Empresa Nacional de Electricidad) [322], [323], OPERA [2], [3] και ΚΕΡCΟ (Korea Electric Power COrporation) [332], [333].
- Μετρήσεις σε γραμμές μεταφοράς MT στις οποίες συμπεριλαμβάνονται οι μετρήσεις KTH1 (AXCE-F, 14/24kV, 1×150mm²/25LT, XLPE) και KTH2 (Kungliga Tekniska Högskolan ή Swedish Royal Institute of Technology) (AXCE, 7/12kV, 1×95mm²/25LT, XLPE) [302]-[305], URL (μονοπολικό, 18/30kV με τριπλό εξωθημένο πυρήνα αλουμινίου, XLPE) [322], [323], [334] και TUE (8/10kV, 3×95mm² Cu, PILC) [157], [282], [335].

Στο Σχήμα 6.4, σχεδιάζονται συναρτήσει της συχνότητας οι συντελεστές εξασθένησης $\alpha_{CM} = \operatorname{Re}\{\gamma_{CM}\}, \ \alpha_{DM1} = \operatorname{Re}\{\gamma_{DM1}\}$ και $\alpha_{DM2} = \operatorname{Re}\{\gamma_{DM2}\}$ του κοινού και των δύο διαφορικών ρυθμών, αντίστοιχα, για την περίπτωση υπόγειας τριφασικής γραμμής μεταφοράς αγωγών τύπου τομέα PILC (8/10kV, 3×95mm² Cu, PILC) [157], [282] (βλέπε Σχήμα 6.1). Στο Σχήμα 6.4 έχουν επίσης σχεδιαστεί για λόγους σύγκρισης οι συντελεστές εξασθένησης που σχετίζονται με τη μετάδοση BPL μέσω εναέριων γραμμών μεταφοράς MT. Οι καθυστερήσεις φάσης $\beta_{CM} = \text{Im}\{\gamma_{CM}\}$, $\beta_{DM1} = \text{Im}\{\gamma_{DM1}\}$ και $\beta_{DM2} = \text{Im}\{\gamma_{DM2}\}$ εμφανίζουν γραμμική συμπεριφορά ως προς τη συχνότητα και δεν έχουν σχεδιαστεί. Όπως εύκολα επιβεβαιώνεται από το Σχήμα 6.4, τα αποτελέσματα της μεθόδου TUE είναι συγκρίσιμα με αυτά που αφορούν τη συμπεριφορά LOS της πλειοψηφίας των υπόγειων δικτύων MT. Επίσης, οι γραμμές μεταφοράς PILC (που απεικονίζεται από τη γραφική της TUEexp) εμφανίζουν θεωρητική εξασθένηση παραπλήσια της πραγματικής εξασθένησης των δικτύων MT (που απεικονίζεται από τις γραφικές των OPERA, ENDESA και KEPCO) σε σχέση με τις γραμμές μεταφοράς που έχουν μόνωση XLPE (που απεικονίζεται από τις γραφικές των KTH1, KTH2 και URL).

Από τη φασματική συμπεριφορά των διαύλων BPL που έχουν εγκατασταθεί επί υπόγειων τριφασικών γραμμών μεταφοράς MT με κοινή θωράκιση και οπλισμό συνάγονται τα ακόλουθα γενικά συμπεράσματα:

- Συγκρινόμενη με την εναέρια μετάδοση MT/BPL, η υπόγεια μετάδοση MT/BPL υποφέρει από εξαιρετικά υψηλότερη εξασθένηση.
- Οι συντελεστές εξασθένησης των υπόγειων διαύλων MT/BPL είναι αύξουσες συναρτήσεις της συχνότητας, με συνέπεια η εξασθένηση των υπόγειων διαύλων MT/BPL να εμφανίζει βαθυπερατή συμπεριφορά [65], [177].

Από τη φασματική συμπεριφορά των τριών ρυθμών που υποστηρίζονται από συμμετρικές γραμμές μεταφοράς με υψηλές απώλειες μόνωσης –που χρησιμοποιούνται σε πολλές χώρες του κόσμου–, συνάγονται τα ακόλουθα πρόσθετα συμπεράσματα:

- Σε αντιδιαστολή με την εναέρια μετάδοση MT/BPL –όπου οι δύο διαφορικοί ρυθμοί εμφανίζουν σχεδόν ταυτόσημη συμπεριφορά ενώ η συμπεριφορά του κοινού ρυθμού είναι αρκετά διαφορετική– κατά την υπόγεια μετάδοση MT/BPL και οι τρεις ενεργοί ρυθμοί, δηλαδή οι CM, DM₁ και DM₂, εμφανίζουν σχεδόν ταυτόσημη φασματική συμπεριφορά [134], [135], [157], [282], [283]. Αυτό οφείλεται κατά κύριο λόγο στη μεγάλη διηλεκτρική απώλεια των γραμμών μεταφοράς PILC. Με βάση το χαρακτηριστικό αυτό μπορεί επίσης να εξηγηθεί η αμελητέα διαφοροποίηση που διαπιστώνεται μεταξύ των τρόπων έγχυσης StP και PtP [157], [217], [282], [283]. Δεδομένης της σχεδόν ταυτόσημης αυτής συμπεριφοράς, αρκεί να εξεταστεί μόνο ένας από τους ρυθμούς αυτούς, έστω ο DM₁.
- Όταν η μόνωση των υπόγειων γραμμών μεταφοράς εμφανίζει υψηλές απώλειες και οι παράμετροι ε', ε", και tan δ μπορούν να θεωρηθούν σταθερές ως προς τη συχνότητα (όπως συμβαίνει με τις γραμμές μεταφοράς PILC που εξετάζονται στις προσομοιώσεις της διατριβής αυτής), οι συντελεστές εξασθένησης και οι καθυστερήσεις φάσης του κοινού και των δύο διαφορικών ρυθμών είναι γραμμικές συναρτήσεις της συχνότητας ανεξάρτητα από τον τρόπο διάταξης των αγωγών φάσεων (είτε τύπου πυρήνα είτε τύπου τομέα). Ο κρίσιμος παράγοντας που κατά κύριο λόγο καθορίζει την εξασθένηση των υπόγειων γραμμών μεταφοράς MT είναι αυτές ακριβώς οι ιδιαίτερα υψηλές απώλειες της μόνωσης.





6.7 Θόρυβος στις Υπόγειες Γραμμές MT/BPL

Δύο τύποι θορύβου απαντώνται στις υπόγειες τριφασικές γραμμές μεταφοράς MT:

- Θόρυβος Υποβάθρου. Αποτελεί τον κυρίαρχο τύπο θορύβου που εμφανίζεται στους υπόγειους διαύλους MT/BPL και οφείλεται σε συνδυασμό διαφόρων αιτίων όπως τα φαινόμενα διαρροών ή εκκενώσεων, η λειτουργία των μετατροπέων ισχύος, οι μη ιδανικοί μετασχηματιστές, η σύνθεση του εδάφους και η υγρασία [3], [323], [333], [334]. Ο θόρυβος υποβάθρου εκφράζεται ως υπέρθεση διαφόρων πηγών θορύβου χαμηλής ισχύος και θεωρείται συνήθως στατικός σε διάρκεια ωρών ακόμη και ημερών.
- Κρουστικός θόρυβος. Αυτός ο τύπος θορύβου οφείλεται κυρίως σε μεταβατικά φαινόμενα που οφείλονται σε μεταγωγή ή αποσύζευξη φορτίων ή στη λειτουργία διακοπτών ή σε άλλους λόγους [3], [322], [323], [260], [261]. Αυτός ο τύπος θορύβου μεταβάλλεται με το χρόνο σε βάση με ή ms και παρουσιάζει σημαντική τοπική εξάρτηση [3], [65], [106], [260], [261]. Όταν και σε όποια σημεία του δικτύου MT υπάρχει κρουστικός θόρυβος, η PSD του θορύβου αυξάνεται σημαντικά και μπορεί να προκαλέσει καταιγισμούς σφαλμάτων (burst-type transmission errors).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

7.1 Εισαγωγή

Οι πρωτογενείς παράμετροι ενός διαύλου MT/BPL είναι οι ανά μονάδα μήκους μήτρες σύνθετης αντίστασης και σύνθετης αγωγιμότητας ενώ οι δευτερογενείς παράμετροι είναι οι μήτρες των μιγαδικών σταθερών διάδοσης και των χαρακτηριστικών αντιστάσεων. Μέσω των παραμέτρων αυτών προσδιορίζεται η συνάρτηση μεταφοράς και η από-άκρο-σε-άκρο εξασθένηση μιας σύνδεσης MT/BPL. Αυτή η προσέγγιση, που βασίζεται στη γνώση της ακριβούς τοπολογίας του δικτύου, των γαρακτηριστικών των γραμμών μεταφοράς ΜΤ και της κατάστασης όλων των τερματισμών στους διάφορους κλάδους είναι ευέλικτη και ακριβής εφόσον έχουν προσδιοριστεί με ακρίβεια όλες οι εμπλεκόμενες παράμετροι. Έτσι, αφού έχει σαφώς οριστεί η σχέση που συνδέει τη συμπεριφορά του δικτύου με τις παραμέτρους του, μπορεί να προβλεφθεί κάθε αλλαγή στα χαρακτηριστικά μετάδοσης από ενδεχόμενες αλλαγές του συστήματος (εισαγωγή/απομάκρυνση μετασχηματιστών MT/XT, εισαγωγή/απομάκρυνση έξυπνων τερματικών, εισαγωγή/απομάκρυνση εξοπλισμού MT/BPL κτλ) [106], [160], [162], [205]. Επίσης, μπορούν να προσδιοριστούν οι ασυνέχειες της από άκρο-σε-άκρο συνάρτησης μεταφοράς στον ευρυζωνικό δίαυλο παρέχοντας έτσι ακριβείς πληροφορίες ως προς την αναγκαιότητα της ύπαρξης επαναληπτών σήματος και την κατάλληλη θέση εγκατάστασής τους. Στο Κεφάλαιο 7, οι διάφοροι ρυθμοί διάδοσης σε διαύλους MT/BPL, η επίδραση των φασματικών αιχμών κατά τη μετάδοση σημάτων BPL και η επίδραση των διακλαδώσεων στη συνολική εξασθένηση διερευνώνται προσομοιώνοντας διάφορες τοπολογίες δικτύων MT [36], [47], [79], [202], [203], [336]-[341]. Επίσης, παρέχονται αριθμητικά αποτελέσματα που εξετάζουν πώς τα διάφορα χαρακτηριστικά του δικτύου ΜΤ επηρεάζουν τη μετάδοση BPL μέσω του εναερίου και υπογείου δικτύου MT. Εξετάζεται η επίδραση διαφόρων παραγόντων όπως η τοπολογία του δικτύου ΜΤ, ο τρόπος σύζευξης του σήματος BPL στη γραμμή μεταφοράς, οι κανονισμοί που διέπουν την HM συμβατότητα μεταξύ των συστημάτων BPL και των υπόλοιπων αδειοδοτημένων ασύρματων συστημάτων και η επίδραση των κανονισμών αυτών στη χωρητικότητα του δικτύου. Εξετάζεται, επίσης, ο πιθανός συμβιβασμός μεταξύ της προστασίας EMI και της χωρητικότητας ενός δικτύου MT/BPL. Στο πλαίσιο αυτό προτείνεται τροποποίηση στο μοντέλο σταθερής κατανομής πλήρους προστασίας του φάσματος (fixed spectrum allocation/all-protection model) ώστε οι εκπομπές BPL να ρυθμίζονται λαμβάνοντας υπόψη τις τοπικές συνθήκες ασύρματης κίνησης.

Οι διαφορές της ευρυζωνικής μετάδοσης σημάτων μέσω εναέριων και υπόγειων δικτύων MT/BPL εξετάζονται διερευνώντας είτε τους εγγενείς παράγοντες (inherent factors) που επηρεάζουν τη μετάδοση BPL, όπως η εξασθένηση και η προς τη συχνότητα συμπεριφοράς, είτε τους εξωτερικά επιλεκτική ως επιβαλλόμενους παράγοντες (imposed factors) που σχετίζονται με τη συμβατότητα των εφαρμογών BPL με άλλες υπηρεσίες που παρέχονται στις ίδιες συχνότητες και έχουν προτεραιότητα έναντι του BPL. Η διαφορετική φύση των εναέριων και μετάδοσης MT/BPL μεγέθη υπόγειων γραμμών απεικονίζεται στα που ποσοτικοποιούν την από-άκρο-σε-άκρο εξασθένηση και την πληροφοριακή παρέχονται υποδείξεις χωρητικότητα. Τέλος, με στόχο εσωτερική την λειτουργικότητα (intraoperability) μεταξύ υπόγειων και εναέριων συστημάτων MT/BPL που αποτελεί το απαραίτητο πρώτο βήμα πριν από τη διερεύνηση της διαλειτουργικότητας (interoperability) μεταξύ των συστημάτων MT/BPL και άλλων τεχνολογιών.

7.2 Μετάδοση σε Εναέριες Γραμμές ΜΤ

Η ανάπτυξη κατάλληλων μεθόδων περιγραφής της μετάδοσης σήματος σε υψηλές συχνότητες μέσω του δικτύου MT είναι ένα ενδιαφέρον ζήτημα αφού το δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος είναι σχεδιασμένο για μεταφορά ενέργειας. Όπως παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 5, η μετάδοση μέσω εναέριων γραμμών MT διαφέρει σημαντικά από τη μετάδοση μέσω των κλασικών ενσυρμάτων μέσων μετάδοσης τηλεπικοινωνιακών σημάτων λόγω των σημαντικών διαφορών της δομής του δικτύου και των φυσικών ιδιοτήτων των γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος. Τυπικά, στο εναέριο δίκτυο MT χρησιμοποιούνται αγωγοί οι οποίοι απέχουν μεταξύ τους Δ από 0.3m έως 1m πάνω από έδαφος με απώλειες (lossy ground) σε ύψος από 8m έως 10m όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 5.4. Η αγωγιμότητα του εδάφους θεωρείται ίση με $\sigma_g = 5 \,\mathrm{mS/m}$ και η σχετική επιτρεπτότητα ίση με $\varepsilon_g = 13$, τιμές που αποτελούν ρεαλιστικό σενάριο.

Οι τρεις μέθοδοι που αναλύθηκαν στο Κεφάλαιο 4 –συγκεκριμένα οι μέθοδοι TM, MEB και HSC– εφαρμόστηκαν για τον προσδιορισμό της από-άκρο-σε-άκρο συνάρτησης μεταφοράς για διάφορες χαρακτηριστικές τοπολογίες MT/BPL. Για τους αριθμητικούς υπολογισμούς, έχει θεωρηθεί η τριών φάσεων εναέρια συνδεσμολογία MT που απεικονίζεται στο Σχήμα 5.4. Τόσο ο κοινός ρυθμός όσο και οι δύο διαφορικοί ρυθμοί μπορούν να διεγερθούν έκαστος με διαφορετική απόκριση συχνότητας. Όπως ήδη αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 5, οι τρεις αυτοί ρυθμοί μπορούν να μελετηθούν ανεξάρτητα. Επίσης, λόγω της πανομοιότυπης φασματικής συμπεριφοράς που εμφανίζουν οι δύο διαφορικοί ρυθμοί, στα αριθμητικά αποτελέσματα θα εξεταστεί μόνο ο DM₁. Έτσι, η ανάλυση που ακολουθεί αφορά τη μελέτη του κοινού και ενός διαφορικού ρυθμού. Για την ευκρίνεια των σχημάτων, το φάσμα συχνότητας που εκάστοτε εξετάζεται διαιρείται σε υποκανάλια εύρους 1MHz.

Στο Σχήμα 7.1, μια τυπική περίπτωση τοπολογίας MT απεικονίζεται στο Σχήμα 7.1 όπου μια γραμμή μεταφοράς MT έχει τρεις MT διακλαδώσεις (L₁=500m, L₂=200m, L₃=100m, L₄=200m, L_{b1}=6m, L_{b2}=1m, L_{b3}=6m). Τα άκρα της γραμμής που αποτελούν και τα άκρα της σύνδεσης MT/BPL που εξετάζεται θεωρούνται προσαρμοσμένα στη χαρακτηριστική αντίσταση της τριφασικής γραμμής MT, ενώ τα σημεία A'₁, A'₃ θεωρούνται ανοικτοκυκλωμένα. Στη συνέχεια εξετάζονται δύο περιπτώσεις: της Τοπολογίας 1 όπου το A'₂ είναι ανοικτοκυκλωμένο και της Τοπολογίας 2 όπου το A'₂ είναι προσαρμοσμένο.

Στα Σχήματα 7.2α και 7.2β σχεδιάζεται η από-άκρο-σε-άκρο συνάρτηση μεταφοράς από το Α στο Β ως συνάρτηση της συχνότητας για την περίπτωση του κοινού ρυθμού CM και διαφορικού ρυθμού DM₁.

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την εφαρμογή των τριών μεθόδων είναι παραπλήσια για όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν. Η μέθοδος TM και η HSC δίνουν πρακτικά ταυτόσημα αποτελέσματα [164], [167], [198]. Η μικρή απόκλιση των αποτελεσμάτων της μεθόδου MEB οφείλεται στην περικοπή του θεωρητικά άπειρου αριθμού διαδρομών διάδοσης σε N κυρίαρχες διαδρομές και από



Σχήμα 7.1: Τυπική εναέρια γραμμή μεταφοράς ΜΤ πολλών αγωγών και πολυδιαδρομική διάδοση σήματος σε μια σύνδεση MT/BPL έχοντας N διακλαδώσεις και σύνδεση δομικού στοιχείου δικτύου.

την απλοποιημένη δομή του μοντέλου. Στη συνέχεια της διατριβής υιοθετείται η μέθοδος TM λόγω της ακριβούς περιγραφής των ασυνεχειών της εξασθένησης που παρέχει και της προσαρμοστικότητάς της στις διάφορες τοπολογίες που οφείλονται στην ύπαρξη διακλαδώσεων ή μετασχηματιστών MT/XT. Αυτή η προσαρμοστικότητα είναι εύκολα υλοποιήσιμη λόγω της δυνατότητας αρθρωτής θεώρησης μιας σύνδεσης MT/BPL που προσφέρει η μέθοδος TM.

Στα Σχήματα 7.3α και 7.3β, η από-άκρο-σε-άκρο εξασθένηση των ρυθμών CM και DM₁ από το A στο B σχεδιάζεται συναρτήσει της συχνότητας για δύο τοπολογίες:

- 1. Τοπολογία 3 που αντιστοιχεί σε αγροτικό δίκτυο MT/BPL και είναι η ίδια με αυτήν του Σχήματος 8 της [162]. (L₁=500m, L₂=200m, L₃=100m, L₄=200m, L_{b1}=300m, L_{b2}=150m, L_{b3}=200m) με ανοικτοκυκλώματα στα σημεία A'_1 , A'_2 και A'_3 .
- Η περίπτωση LOS, όπου τα σημεία Α και Β συνδέονται άμεσα χωρίς να υπάρχουν ενδιάμεσες διακλαδώσεις.



Σχήμα 7.2: Φασματική συμπεριφορά (α) του κοινού ρυθμού CM και (β) του διαφορικού ρυθμού DM₁ όπως προσδιορίζεται με εφαρμογή της μεθόδου TM (—), MEB (- • --) και HSC (----).



Σχήμα 7.3: Φασματική συμπεριφορά των ρυθμών (α) CM και (β) DM₁ για: αγροτικά δίκτυα MT/BPL (—) και μετάδοση LOS (----).

Από τα προηγούμενα σχήματα προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- (i) Σε ένα ρεαλιστικό δίκτυο MT/BPL, λόγω των ανακλάσεων και της πολυδιαδρομικής διάδοσης που προκαλείται από τις διακλαδώσεις και τις διάφορες συνδέσεις, δημιουργούνται φασματικές αιχμές (spectral notches) στην από από-άκρο-σε-άκρο εξασθένηση. Η αιχμηρή αυτή φασματική συμπεριφορά υπερτίθεται στην εκθετική LOS εξασθένηση με συνέπεια σημαντική μείωση του αξιοποιήσιμου εύρους ζώνης.
- (ii) Το πλήθος των φασματικών αιχμών, το μέγεθος και το φασματικό εύρος τους εξαρτάται από το πλήθος και το ηλεκτρικό μήκος των διακλαδώσεων και των συνδέσεων κατά μήκος μιας από από-άκρο-σε-άκρο σύνδεσης.

Στο Σχήμα 7.4α, η εξασθένηση των ρυθμών CM και DM₁ για τη συχνότητα των 6MHz σχεδιάζεται συναρτήσει της απόστασης από την πηγή (σημείο A) για τις Τοπολογίες 1 και 2 και για την περίπτωση LOS –όπου δεν υπάρχουν διακλαδώσεις–. Στο Σχήμα 7.4β, οι ίδιες περιπτώσεις σχεδιάζονται για τη συχνότητα των 90MHz.

Στο Σχήμα 7.5α, η ασυνέχεια της εξασθένησης (attenuation discontinuity) που εμφανίζουν οι ρυθμοί CM και DM₁ στην πρώτη διακλάδωση (σημείο A₁, Τοπολογία 1) σχεδιάζονται συναρτήσει της συχνότητας. Στα Σχήματα 7.5β και 7.5γ, απεικονίζονται οι αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις στα σημεία της δεύτερης και της τρίτης διακλάδωσης (σημεία A₂ και A₃, Τοπολογία 1), αντίστοιχα. Είναι φανερό ότι ο CM και οι διαφορικοί ρυθμοί εμφανίζουν σχεδόν ταυτόσημη συμπεριφορά σε όλο το εύρος συχνοτήτων που ενδιαφέρει τη μετάδοση MT/BPL. Αυτό οφείλεται στο ότι η ασυνέχεια της εξασθένησης σε κάθε διακλάδωση εξαρτάται κυρίως από το ηλεκτρικό μήκος της διακλάδωσης και όχι από τον εκάστοτε θεωρούμενο ρυθμό.

Για να παρουσιαστεί σαφέστερα η επίδραση του μήκους της διακλάδωσης στη συνολική εξασθένηση, στα Σχήματα 7.6α και β, η από-άκρο-σε-άκρο εξασθένηση από το A στο B των ρυθμών CM και DM₁ σχεδιάζεται συναρτήσει της συχνότητας για την Τοπολογία 1, την Τοπολογία 5 –που είναι ίδια με την Τοπολογία 1 αλλά με 10πλάσιο μήκος διακλαδώσεων (L_{b1} =60m, L_{b2} =10m, L_{b3} =60m)– και την Τοπολογία 6 –που είναι ίδια με την Τοπολογία 1 αλλά με 50πλάσιο μήκος διακλαδώσεων (L_{b1} =300m, L_{b2} =50m, L_{b3} =300m)–.

Η επίδραση του μήκους των διακλαδώσεων στην ασυνέχεια της εξασθένησης στα σημεία διακλαδώσεων εξετάζεται στα Σχήματα 7.7α, β και γ όπου σχεδιάζεται η





ρυθμού CM/περίπτωση LOS (.....), ρυθμού DM1/Τοπολογία 1 (.....),

ρυθμού $DM_1/Toπoλογία 2$ (----) και ρυθμού DM_1/π ερίπτωση LOS (·····).



Σχήμα 7.5: Ασυνέχεια της εξασθένησης συναρτήσει της συχνότητας για την Τοπολογία 1 (α) στην πρώτη διακλάδωση (A₁) (β) στη δεύτερη διακλάδωση (A₂) και (γ) στην τρίτη διακλάδωση (A₃) για τις περιπτώσεις: CM (—) και DM₁ (----).



(α) CM και (β) DM1 για τις Τοπολογίες 1 (----), 5 (----) και 6 (-----).

ασυνέχεια της εξασθένησης του ρυθμού CM στις τρεις διακλαδώσεις A₁, A₂ και A₃ της Τοπολογίας 1 συναρτήσει της συχνότητας. Παρόμοια εικόνα προκύπτει όταν θεωρηθεί η διάδοση του ρυθμού DM₁.

Από τα προηγούμενα σχήματα προκύπτουν τα ακόλουθα ενδιαφέροντα συμπεράσματα:

- Εκτός από φασματικές αιχμές, οι διάφορες διακλαδώσεις και συνδέσεις προκαλούν ασυνέχειες στην από-άκρο-σε-άκρο εξασθένηση. Έτσι, εκτός από τη μείωση του εύρους του αξιοποιήσιμου φάσματος, η ύπαρξη διακλαδώσεων οδηγεί σε υποβάθμιση του BER του διαύλου.
- Εκτός από την αναμενόμενη εκθετική LOS εξασθένηση, η συνολική απόάκρο-σε-άκρο εξασθένηση εξαρτάται δραστικά από τη συχνότητα, το πλήθος και το ηλεκτρικό μήκος των ενδιαμέσων διακλαδώσεων.
- 3. Όπως παρατηρείται από τα Σχήματα 7.5α και β σε κάποια διακλάδωση μπορεί να παρατηρηθεί ενίσχυση της ισχύος του σήματος (αρνητικές τιμές σε dB της ασυνέχειας της εξασθένησης). Αυτό εξαρτάται από την αντίσταση εισόδου του τμήματος του δικτύου που ακολουθεί.
- 4. Οι ασυνέχειες της ισχύος του σήματος λόγω των διαφόρων διακλαδώσεων που απαντώνται κατά μήκος μιας από-άκρο-σε-άκρο σύνδεσης MT/BPL εξαρτώνται σημαντικά από το μήκος των διακλαδώσεων και την αντίσταση τερματισμού τους και έχουν ενδεχομένως σημαντικό μέγεθος, όπως φαίνεται από τα Σχήματα 7.5, 7.6 και 7.7. Αν η ακριβής τοπολογία του δικτύου MT είναι γνωστή, αυτές οι ασυνέχειες μπορούν να υπολογιστούν με ακρίβεια παρέχοντας πληροφορία ως προς την αναγκαιότητα τοποθέτησης επαναληπτών καθώς επίσης και ως προς την ακριβή θέση όπου πρέπει να τοποθετηθούν.
- 5. Από τα Σχήματα 7.6 και 7.7, προκύπτει ότι, όταν αυξάνεται το μήκος των διακλαδώσεων, οι φασματικές αιχμές μειώνονται τόσο σε βάθος όσο και σε φασματική έκταση, με αποτέλεσμα η φασματική συμπεριφορά του δικτύου MT/BPL να τείνει να συγκλίνει με τη φασματική συμπεριφορά της LOS περίπτωσης (Σχήματα 7.3α και 7.3β).

Συμπερασματικά, σε ένα πραγματικό MT/BPL δίκτυο, εκτός από την αναμενόμενη εκθετική εξασθένηση LOS κατά μήκος μιας πολυφασικής γραμμής μεταφοράς MT,





προκύπτει πρόσθετη εξασθένηση σε συγκεκριμένα φασματικά διαστήματα λόγω κακής προσαρμογής και της επακόλουθης πολυδιαδρομικότητας. Η πρόσθετη αυτή εξασθένηση μπορεί να καταστήσει αυτά τα φασματικά διαστήματα ακατάλληλα για παροχή υπηρεσιών που απαιτούν χαμηλό BER. Σε διάφορες περιπτώσεις, ανάλογα με το πλήθος και το ηλεκτρικό μήκος των διακλαδώσεων, ορισμένα φασματικά διαστήματα μπορεί να καταστούν εντελώς ακατάλληλα. Αυτά τα διαστήματα καθώς και οι ζώνες συχνοτήτων που διατίθενται σε άλλες υπηρεσίες, όπως, για παράδειγμα, οι ερασιτεχνικές ραδιοεκπομπές, πρέπει να αποκλείονται από τη μετάδοση σημάτων BPL. Για να εξεταστεί το φαινόμενο αυτό, εισάγεται η έννοια του ποσοστού αποκλειόμενου εύρους ζώνης PWB(A) (Percentage Wasted Bandwidth) που ποσοτικοποιεί το τμήμα του εύρους ζώνης όπου η εξασθένηση του διαύλου MT/BPL υπερβαίνει ένα επίπεδο εξασθένησης Α που καθορίζεται από τις απαιτήσεις της παρεγόμενης υπηρεσίας. Το PWB(A) αποτελεί ένα κατάλληλο μακροσκοπικό δείκτη για να αποτιμηθεί η φασματική απόδοση των διαύλων MT/BPL. Στο Σχήμα 7.8α σχεδιάζεται συναρτήσει της συχνότητας η εξασθένηση του κοινού ρυθμού για τις Τοπολογίες 1 και 3, ενώ στο Σχήμα 7.8β σχεδιάζεται η αντίστοιχη κατανομή PWB(A).

Όπως προκύπτει από το Σχήμα 7.8β, η κατανομή *PWB* που χαρακτηρίζει την Τοπολογία 1, όπου οι διακλαδώσεις είναι μικρότερου μήκους, είναι σημαντικά αυξημένη σε σχέση με την κατανομή που χαρακτηρίζει την Τοπολογία 3, όπου οι διακλαδώσεις είναι μεγαλύτερου μήκους. Η ίδια εικόνα για την κατανομή του *PWB* προκύπτει και στην περίπτωση του ρυθμού DM₁ (βλέπε Σχήμα 7.9). Αυξημένες τιμές του μεγέθους *PWB* σημαίνουν χειρότερη επίδοση όσον αφορά τη χωρητικότητα και τη ρυθμαπόδοση των συστημάτων MT/BPL. Δηλαδή η σωρευτική χωρητικότητα σε Mbps στο φάσμα 1-100MHz για την Τοπολογία 3 είναι υψηλότερη σε σχέση με αυτήν της Τοπολογίας 1 για σταθερή έγχυση IPSD και με ίδιο PSD θορύβου. Αντίστοιχα συμπεράσματα ισχύουν για τη ρυθμαπόδοση.

Από τα Σχήματα 7.8 και 7.9 προκύπτει η σημαντική εξάρτηση της ευρυζωνικής μετάδοσης μέσω εναέριων γραμμών MT από το πλήθος και το ηλεκτρικό μήκος των διακλαδώσεων που απαντώνται κατά μήκος μιας από-άκρο-σεάκρο σύνδεσης. Η κατανομή του σημαντικού για τη μετάδοση MT/BPL μεγέθους *PWB* καθορίζεται από την τοπολογία του δικτύου MT/BPL. Εφαρμόζοντας τις



Σχήμα 7.8: (α) Εξασθένηση διαύλου συναρτήσει της συχνότητας και (β) *PWB* συναρτήσει της από-άκρο-σε-άκρο εξασθένησης για τις περιπτώσεις:

Τοπολογίας 1 (----) και Τοπολογίας 3 (----).



Σχήμα 7.9: (α) Εξασθένηση διαύλου συναρτήσει της συχνότητας και (β) *PWB* συναρτήσει της από-άκρο-σε-άκρο εξασθένησης για τις περιπτώσεις:

Τοπολογίας 1 (----) και Τοπολογίας 3 (----).

διαδικασίες που ήδη παρουσιάστηκαν η κατανομή του μεγέθους *PWB* παρέχει, όπως παρουσιάστηκε, εκτίμηση της χωρητικότητας ενός δικτύου MT/BPL και του πόσο ικανοποιητικά το δίκτυο χρησιμοποιείται για την παροχή υπηρεσιών διαφόρων κλάσεων. Έτσι, εφόσον η κατανομή PWB(A) είναι γνωστή, τόσο η χρήση της διαμόρφωσης OFDM όσο και η κατανομή των πόρων μπορούν να βελτιστοποιηθούν με γνώμονα τη μεγιστοποίηση αντικειμενικών συναρτήσεων περιγραφής της ποιότητας ενός διαύλου όπως για παράδειγμα τη μεγιστοποίηση του ρυθμού διέλευσης πληροφορίας.

7.3 Χωρητικότητα των Εναέριων Διαύλων MT/BPL

Θόρυβος στις Εναέριες Γραμμές Ισχύος ΜΤ

Η χωρητικότητα είναι ο μέγιστος εφικτός ρυθμός μετάδοσης μέσω ενός τηλεπικοινωνιακού διαύλου και εξαρτάται από την ισχύ του σήματος και του θορύβου και από τα χαρακτηριστικά του διαύλου. Για να υπολογιστεί η χωρητικότητα των διαύλων MT/BPL, θεωρούνται δύο τύποι θορύβου με ομοιόμορφη PSD: ο θόρυβος τύπου A με PSD ίση με -105 dBm/Hz που περιγράφει τη μέση κατάσταση ενός διαύλου MT/BPL από πλευράς θορύβου [106], [162], [259] και ο θόρυβος τύπου B με PSD ίση με -135 dBm/Hz που περιγράφει την καλύτερη δυνατή περίπτωση θορύβου [332], [333]. Στο Κεφάλαιο 5 έχει ήδη παρουσιαστεί ο θόρυβος που εμφανίζεται στις εναέριες γραμμές ισχύος MT.

Χωρητικότητα Διαύλου ΜΤ/BPL υπό Σταθερή και υπό Ρυθμιζόμενη Έγχυση Ισχύος

Αν η εγχυόμενη φασματική πυκνότητα ισχύος (Injected PSD, IPSD) σε τριφασική γραμμή μεταφοράς MT είναι σταθερή και ίση με *p_{con}* η χωρητικότητα του διαύλου MT/BPL είναι ίση προς [342]

$$C = \int_{0}^{\infty} \log_2 \left\{ 1 + \left[p_{con} |H(f)|^2 / N(f) \right] \right\} df$$
(7.1)

όπου H(f), N(f) η συνάρτηση μεταφοράς του διαύλου MT/BPL και η PSD του θορύβου του διαύλου, αντίστοιχα.

Η συνολική χωρητικότητα του διαύλου MT/BPL υπολογίζεται ως το άθροισμα των χωρητικοτήτων των υποκαναλιών που προκύπτουν από το χωρισμό του συνολικού εύρους ζώνης BPL σε υποκανάλια επιπέδων διαλείψεων (flat fading subchannels) [343], [344]. Όταν η συνολική εγχυόμενη ισχύς είναι σταθερή, η μεγιστοποίηση της χωρητικότητας του διαύλου MT/BPL επιτυγχάνεται με εφαρμογή κλασικών μεθόδων Lagrange που λαμβάνουν υπόψη την ακριβή μορφή της συνάρτησης μεταφοράς H(f). Η βέλτιστη κατανομή ισχύος στα υποκανάλια προκύπτει με εφαρμογή του αλγορίθμου υδροπλήρωσης (Water-Filling algorithm). Ο αλγόριθμος W-F έχει ως εισόδους τα επίπεδα εξασθένησης σε κάθε υποκανάλι και τη συνολική εγχυόμενη ισχύ P και καθορίζει τη φασματική κατανομή $p_{wf}(f)$ της IPSD που οδηγεί σε μεγιστοποίηση της χωρητικότητας. Με την εφαρμογή του αλγορίθμου W-F προκύπτει ότι το $p_w(f)$ πρέπει να ικανοποιεί τη σχέση [167], [277], [342]-[346]

$$P = \int_{0}^{\infty} \left(p_{w}(f) - N(f) / |H(f)|^{2} \right)^{+} df$$
(7.2)

όπου $p_w(f)$ το επίπεδο υδροπλήρωσης (water level) και $(x)^+ = \max\{x, 0\}$.

Η χωρητικότητα του διαύλου MT/BPL προσδιορίζεται αντικαθιστώντας στην (7.1) την ομοιόμορφη IPSD p_{con} με την $p_{wf}(f) = \left(p_w(f) - N(f)/|H(f)|^2\right)^+$ που ικανοποιεί την (7.2).

7.3.1 Χωρητικότητα Εναέριων Διαύλων ΜΤ/ΒΡL υπό Περιορισμούς ΕΜΙ

Αν και η εφαρμογή της τεχνολογίας BPL δεν απαιτεί πρόσθετη καλωδίωση, το σημαντικότερο εμπόδιο για την ευρεία εφαρμογή της ως εναλλακτικής ευρυζωνικής λύσης είναι η ΗΜ παρεμβολή (EMI) σε χρήστες πρωτευουσών ασυρμάτων υπηρεσιών που χρησιμοποιούν το φάσμα συχνοτήτων 1–100 MHz. Οι εναέριες γραμμές μεταφοράς MT έχουν σχεδιαστεί για να μεταφέρουν ηλεκτρική ισχύ και συνεπώς δεν θωρακίζονται ηλεκτρομαγνητικά από ειδικό περίβλημα. Επομένως, όταν χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση σημάτων BPL, οι εναέριες γραμμές μεταφοράς MT λειτουργούν ως ακούσιοι ακτινοβολητές και προκαλούν παρεμβολές σε ασύρματες υπηρεσίες που λειτουργούν στις ίδιες συχνότητες. Οι εναέριες γραμμές μεταφοράς ακτινοβολούν κυρίως στα σημεία ασυνέχειάς τους, δηλαδή στα άκρα, στις συνδέσεις με άλλες γραμμές, σε γωνίες που σχηματίζονται λόγω κάμψης των γραμμών αλλά και στα σημεία όπου εγκαθίσταται εξοπλισμός ισχύος όπως μετασχηματιστές MT/XT και οι πυκνωτές. Επίσης, οι ανακλάσεις στα άκρα των τμημάτων των γραμμών ισχύος δημιουργούν επί των τμημάτων αυτών στάσιμα κύματα που προκαλούν ακτινοβολία. Δεδομένου ότι το φάσμα 1-100MHz χρησιμοποιείται για ραδιοφωνικές εκπομπές, στρατιωτικές επικοινωνίες, υπηρεσίες αεροναυτικής/ναυτιλιακής ασφάλειας, εκπομπές ραδιοερασιτεχνών και άλλες υπηρεσίες (βλέπε ενδεικτικά ΕΚΚΖΣ [68]), πιθανή ΕΜΙ που ενδεχομένως προκαλείται από την ευρυζωνική μετάδοση MT/BPL αποτελεί σημαντικό ζήτημα για πολλούς εθνικούς και διεθνείς ρυθμιστικούς οργανισμούς. Όσο τα ζητήματα ΕΜΙ δεν επιλύονται, θα υπάρχει σημαντική αντίδραση για την επέκταση της τεχνολογίας BPL σε έργα μεγάλης κλίμακας.

Θεωρητικά, τα προβλήματα ΕΜΙ προκαλούνται και από τη διάδοση του κοινού ρυθμού και από τη διάδοση των διαφορικών ρυθμών. Στην πράξη, όμως, η ΕΜΙ που οφείλεται στη διάδοση των διαφορικών ρυθμών δεν θεωρείται σημαντική επειδή, όπως αναλύθηκε στα Κεφάλαια 3 και 5, τα πεδία ακτινοβολίας των διαφορικών ρυθμών συθμών αλληλοαναιρούνται εξαιτίας της κατανομής των ρευμάτων των διαφορικών ρυθμών στις γραμμές μεταφοράς ΜΤ. Όμως, η ροή ρεύματος μέσω των γραμμών μεταφοράς ΜΤ λόγω διάδοσης του κοινού ρυθμού μπορεί να προκαλέσει σημαντικά επίπεδα ΕΜΙ. Δεδομένου ότι η μετάδοση BPL πραγματοποιείται κυρίως μέσω των ρυθμών DM₁ και DM₂ [188], η ακούσια διάδοση του ρυθμού CM –που συνήθως οφείλεται σε έλλειψη ισορροπίας (unbalances) των γραμμών μεταφοράς του δικτύου ΜΤ που μετατρέπουν μέρος των εγχυόμενων σημάτων DM σε σήματα CM–πρέπει να αποφεύγεται, δεδομένου ότι η ροή ρεύματος λόγω διάδοσης του ρυθμού CM είναι το κύριο αίτιο ΕΜΙ από τα δίκτυα BPL [347].

Δύο είναι οι παράγοντες που επιδρούν δυσμενώς κατά πολλαπλασιαστικό τρόπο και επηρεάζουν τη μορφή της κατανομής της IPSD, δηλαδή το πώς πρέπει να εγχύεται στις εναέριες γραμμές μεταφοράς MT η ισχύς του σήματος BPL:

- i. Ο εγγενής παράγοντας (inherent factor) σχετίζεται με την εξασθένηση και τις επιλεκτικές ως προς τη συχνότητα διαλείψεις που εμφανίζει ο δίαυλος MT/BPL. Λαμβάνεται υπόψη μέσω της από-άκρο-σε-άκρο συνάρτησης μεταφοράς $|H(f)|^2$.
- ii. Ο επιβαλλόμενος παράγοντας (imposed factor) που σχετίζεται με τη συμβατότητα των συστημάτων MT/BPL με αδειοδοτημένες υπηρεσίες που λειτουργούν στο φάσμα 1-100MHz έχοντας προτεραιότητα έναντι του BPL. Οι σχετικοί κανονισμοί που διέπουν την κοινή λειτουργία διατυπώνονται από τις διάφορες εθνικές ή διεθνείς αρχές και λαμβάνονται υπόψη με διαφόρους τρόπους. Στην παρούσα διατριβή για την ανάλυση των επιπτώσεων του

επιβαλλόμενου παράγοντα υιοθετείται η χρήση κατάλληλων φασματικών μασκών ισχύος (power spectral masks) M(f) που πολλαπλασιάζουν την $|H(f)|^2$.

Στη γενική περίπτωση, η ανάγκη χρήσης μασκών ισχύος αποδίδεται σε διάφορους λόγους. Η χρήση μασκών ισχύος επιβάλλει αυστηρή μείωση της ισχύος στις συχνότητες όπου πρέπει να εξασφαλιστεί προστασία ΕΜΙ, δηλαδή στις συχνότητες που πρέπει να αποκλειστούν από τη λειτουργία BPL. Στην παρούσα διατριβή θεωρείται μείωση 100dB, αν και πρακτικά, στις δοκιμές BPL εφαρμόζεται μείωση της τάξης των 20dB. Για να ληφθούν υπόψη οι περιορισμοί ισχύος προς αποφυγή ΕΜΙ, ο εγγενής παράγοντας $|H(f)|^2$ πρέπει να αντικατασταθεί στην (7.1) από το γινόμενό του με τον επιβαλλόμενο πολλαπλασιαστικό παράγοντα M(f) οδηγώντας στο αποτέλεσμα

$$C = \int_{0}^{\infty} \log_2 \left\{ 1 + \left[p_{con} |H(f)|^2 M(f) / N(f) \right] \right\} df$$
(7.3)

Αντίστοιχα προς την (7.3), προκύπτει παρόμοια έκφραση για τη χωρητικότητα διαύλων MT/BPL όταν για τον καθορισμό της φασματικής μορφής της IPSD εφαρμόζεται ο αλγόριθμος W-F.

7.3.2 Έγχυση Σημάτων BPL και Περιορισμοί Ισχύος

Μέθοδοι Σύζευζης

Η ισορροπία (trade-off) μεταξύ της χωρητικότητας που προσφέρεται από τα δίκτυα BPL και των ορίων EMI που πρέπει να επιβληθούν για να αποφεύγονται παρεμβολές σε άλλες υπηρεσίες εξαρτάται σημαντικά από τον τρόπο με τον οποίο το σήμα BPL εγχύεται στις γραμμές ισχύος και από το επίπεδο της IPSD. Η έγχυση WtG διεγείρει τον κοινό και τους διαφορικούς ρυθμούς ενώ η έγχυση WtW αποσκοπεί στο να διεγείρει κυρίως τους διαφορικούς ρυθμούς. Στη δεύτερη περίπτωση, ενδεχόμενη ακούσια διέγερση του κοινού ρυθμού αποδίδεται σε:

 ασυμμετρίες που οφείλονται στους αγωγούς των γραμμών μεταφοράς αλλά και στον ίδιο τον τρόπο σύζευξης, όπως οι διαφορές, αν και μικρές, στις χωρητικότητες διασποράς (stray capacitance) των, σε άλλη περίπτωση συμμετρικών, κυκλωμάτων μεταξύ των κλάδων με αποτέλεσμα την εμφάνιση ρευμάτων διαρροής (leakage currents).

- 2. διάφορες άλλες ασυμμετρίες που μπορούν να ταξινομηθούν ως [348]:
 - τοπικές ασυμμετρίες της διάταξης ΜΤ λόγω διακοπτών, αιχμηρών γωνιών και ασύμμετρων τερματισμών
 - ασυμμετρίες των παραμέτρων των γραμμών, όπως οι διαφορετικές ακτίνες ή οι διαφορετικές διηλεκτρικές σταθερές των αγωγών, οι διαφορετικές αποστάσεις από τον αγωγό αναφοράς.
- σύζευξη εξωτερικών ΗΜ πεδίων που οφείλονται σε τοπικές ασύρματες δραστηριότητες.

Συμβατότητα με άλλες Υπηρεσίες και Περιορισμοί Ισχύος λόγω ΕΜΙ

Από τα προηγούμενα προκύπτει ότι είναι επιτακτικό να βελτιστοποιηθεί η χρησιμοποίηση του φάσματος από τα εναέρια δίκτυα MT/BPL υπό περιορισμούς που επιβάλλονται τόσο στη συνολική εγχυόμενη ισχύ (total injected power constraints) όσο και στην ισχύ που εγχύεται σε μεμονωμένα επιμέρους κανάλια (individual channel power constraints).

Οι διαδικασίες συμμόρφωσης της ακούσιας ακτινοβολίας που οφείλεται στη μετάδοση MT/BPL, που έχουν υιοθετηθεί από την FCC και εκτίθενται λεπτομερώς στο FCC/P.15, απαιτούν μετρήσεις στις μονάδες BPL που αποτελούν μέρος ενός δικτύου MT/BPL. Μια απλούστερη ρυθμιστική προσέγγιση θα ήταν να αποφεύγονται οι τυπικές δοκιμές συμμόρφωσης περιορίζοντας την IPSD σε επίπεδα που, στις περισσότερες περιπτώσεις, δεν παράγουν EMI. Για τα εναέρια δίκτυα MT/BPL που λειτουργούν στο εύρος συχνοτήτων 1.705-30MHz, οι σχετικές μελέτες και μετρήσεις έχουν δείξει ότι ένα μέγιστο επίπεδο IPSD -60dBm/Hz ή 10·10⁻¹⁰W/Hz –θεωρούμενο ως υψηλό ή χαλαρό όριο– αποτελεί κατάλληλο όριο που επιτυγχάνει συμμόρφωση με τα όρια που καθορίζονται στο FCC/P.15. Για τα εναέρια δίκτυα MT/BPL που λειτουργούν στο εύρος συχνοτήτων 30-88MHz, το FCC/P.15 είναι αυστηρότερο και απαιτεί ένα μέγιστο επίπεδο IPSD ίσο με -74dBm/Hz ή 0.398·10⁻¹⁰ W/Hz –θεωρούμενο ως χαμηλό ή αυστηρό όριο ή όριο που επιβάλλεται από τη συσκευή σύζευξης– ώστε να ικανοποιούνται οι προϋποθέσεις συμμόρφωσης [66], [67], [74], [87].

Αρκετοί διεθνείς ή εθνικοί ρυθμιστικοί οργανισμοί έχουν καθιερώσει κανονισμούς σχετικά με τη λειτουργία BPL και έχουν υποβάλει διάφορες προτάσεις για να ρυθμίσουν τις εκπομπές από τον εξοπλισμό BPL. Μεταξύ των προτάσεων για τα πρότυπα εκπομπής, οι κυριότερες είναι η FCC/P.15, η German RegTP NB30, η

Νορβηγική πρόταση και η πρόταση από το BBC και το NATO. Δεδομένου ότι τα πρότυπα εκπομπής ποικίλλουν αρκετά, πρέπει να επιτευχθεί συμβιβασμός ως προς τα τελικά όρια εκπομπής [78]. Τα όρια στις εκπομπές ηλεκτρικού πεδίου που προτείνονται από τους προαναφερθέντες οργανισμούς παρουσιάζονται στις [49], [79], [80] και στο Κεφάλαιο 2. Μέσω των ορίων αυτών μπορούν να καθοριστούν τα αντίστοιχα όρια IPSD [80] χρησιμοποιώντας τη σχέση

 $IPSD_{A}(f) = IPSD_{FCC}(f) + [E_{A}(f) - E_{FCC}(f)] \sigma \varepsilon dB$ (7.4)

όπου $IPSD_{FCC}(f)$ το μέγιστο επίπεδο IPSD που συμμορφώνεται με τα όρια που καθορίζονται στο FCC/P.15, $E_{FCC}(f)$ και $E_A(f)$ τα όρια έντασης του ηλεκτρικού πεδίου για την περίπτωση FCC/P.15 και του ορίου για το οποίο γίνεται ο καθορισμός του ορίου $IPSD_A(f)$.

Εκτός από τον καθορισμό των ορίων IPSD, ο φασματικός περιορισμός της ισχύος (spectral masking) με χρήση φασματικών μασκών ισχύος μπορεί να αποδειχθεί εξαιρετικά αποτελεσματικός για την εξασφάλιση της ΗΜυμβατότητας της τεχνολογίας BPL με πρωτεύουσες ασύρματες υπηρεσίες σε τοπική βάση. Δεδομένου ότι οι πρωτεύουσες ασύρματες υπηρεσίες ποικίλλουν ανάλογα με τη θέση ή/και το γενικότερο περιβάλλον (αστικός, προαστιακός ή αγροτικός), ο προσαρμοστικός φασματικός περιορισμός που λαμβάνει υπόψη τις τοπικές συνθήκες ραδιοεκπομπών μπορεί να εμποδίσει τη λειτουργία του BPL στις συχνότητες όπου πρωτεύουσες υπηρεσίες είναι σε λειτουργία σε τοπικό επίπεδο. Τα απαραίτητα επίπεδα περιορισμού της ισχύος που διαμορφώνουν τις επιβλητέες φασματικές μάσκες εξαρτώνται από τον τύπο της πρωτεύουσας υπηρεσίας (υπηρεσίες ασφάλειας, ραδιοερασιτέχνες κλπ) που απαιτεί προστασία.

Ο κατάλληλος καθορισμός των ορίων IPSD σε συνδυασμό με τη χρήση προσαρμοστικών φασματικών μασκών που εμποδίζουν τη λειτουργία δικτύων MT/BPL σε συγκεκριμένες ζώνες συχνοτήτων ανάλογα με τις τοπικές συνθήκες πρωτευουσών ραδιοεκπομπών προσφέρουν ευελιξία στην προστασία άλλων υπηρεσιών και αποφυγή της υποβάθμισης της χωρητικότητας BPL.

7.3.3 Έγχυση Σημάτων BPL και Περιορισμοί Ισχύος

Οι προσομοιώσεις των διάφορων τύπων διαύλων MT/BPL αποσκοπούν στη διερεύνηση της αποδοτικότητας των δικτύων MT/BPL κατά την ευρυζωνική μετάδοση σημάτων και της σχετικής επίδρασης ορισμένων παραγόντων, όπως τα

τοπολογικά χαρακτηριστικά του ενεργειακού δικτύου, η σύζευξη του BPL σήματος στη γραμμή μεταφοράς MT, η λειτουργία πρωτευουσών υπηρεσιών σε τοπικό επίπεδο και, κυρίως, των κανονισμών EMI που διέπουν την εκπομπή BPL. Για απλοποίηση της ανάλυσης υποτίθεται ότι το σήμα BPL εγχύεται άμεσα στους τρεις ρυθμούς που μπορεί να υποστηρίζει το εναέριο δίκτυο MT. Κατά συνέπεια, η περίπλοκη μικροκυματική ανάλυση για κάθε ρυθμό διάδοσης με ενσωμάτωση των τερματικών συνθηκών μέσω των ισοδυνάμων Thévenin ή Norton (βλέπε Κεφάλαιο 3 και Παράρτημα Π.3, αντίστοιχα) [164], αποφεύγεται. Αυτή η προσέγγιση δεν έχει επιπτώσεις στην αξιοπιστία των αποτελεσμάτων δεδομένου ότι οι δείκτες αποτίμησης της αποδοτικότητας της μετάδοσης BPL μέσω του κοινού ρυθμού και των δύο διαφορικών ρυθμών είναι παραπλήσιοι. Επομένως και όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι τρεις ρυθμοί μπορούν να εξεταστούν χωριστά. Δεδομένου ότι τα χαρακτηριστικά μετάδοσης των δύο διαφορικών ρυθμών παρουσιάζουν σχεδόν ταυτόσημη συμπεριφορά [164], θα εξεταστούν τα χαρακτηριστικά μετάδοσης του κοινού ρυθμού και ενός μόνο από τους δύο διαφορικούς ρυθμούς, έστω του DM₁.

Ας θεωρηθεί η απλή τοπολογία MT με N διακλαδώσεις που απεικονίζεται στο Σχήμα 7.1 και ας υποτεθεί άμεση έγχυση ισχύος στους ρυθμούς μετάδοσης στο σημείο Α. Ο πομπός και ο δέκτης υποτίθενται προσαρμοσμένοι προς τη χαρακτηριστική αντίσταση της γραμμής μεταφοράς, ενώ οι τερματισμοί Α'₁, Α'₂ και Α'₃ θεωρούνται ανοικτοκυκλώματα. Εξετάζονται πέντε ενδεικτικές τοπολογίες απόάκρο-σε-άκρο σύνδεσης μήκους 1000m:

- (i) Μια χαρακτηριστική αστική MT/BPL τοπολογία –Αστική περίπτωση Α- με 3 διακλαδώσεις (L₁=500m, L₂=200m, L₃=100m, L₄=200m, L_{b1}=6m, L_{b2}=1m, L_{b3}=6m).
- (ii) Μια επιβαρυμένη αστική MT/BPL τοπολογία –*Αστική περίπτωση B* με 5 διακλαδώσεις (L₁=200m, L₂=50m, L₃=100m, L₄=200m, L₅=300m, L₆=150m, L_{b1}=2m, L_{b2}=5m, L_{b3}=8m, L_{b4}=2m, L_{b5}=8m).
- (iii) Μια τυπική προαστιακή MT/BPL τοπολογία -Προαστιακή περίπτωση- με 3 διακλαδώσεις (L₁=500m, L₂=200m, L₃=100m, L₄=200m, L_{b1}=60m, L_{b2}=10m, L_{b3}=60m).
- (iv) Μια τυπική αγροτική MT/BPL τοπολογία –*Αγροτική περίπτωση* με 3 διακλαδώσεις (L₁=500m, L₂=200m, L₃=100m, L₄=200m, L_{b1}=300m, L_{b2}=150m, L_{b3}=200m) όπως αυτή του Σχήματος 8 της [162].
(v) Η περίπτωση μετάδοσης LOS –LOS περίπτωση– με ίδια συνολική από-άκροσε-άκρο απόσταση L=L₁+...+L_{n+1}=1000m αλλά χωρίς διακλαδώσεις.

Πριν παρουσιαστούν τα αριθμητικά αποτελέσματα, δίνονται οι ορισμοί των μέτρων αποτίμησης της φασματικής απόδοσης της μετάδοσης MT/BPL:

- Η φασματική απόδοση υποκαναλιού (subchannel efficiency) που δηλώνει πόσα bps μεταδίδονται ανά κάθε Hz που καταλαμβάνεται και αξιολογείται χωριστά για κάθε εξεταζόμενο υποκανάλι. Για λόγους απλότητας, το φάσμα συχνότητας που εξετάζεται στη συνέχεια της διατριβής διαιρείται σε υποκανάλια εύρους 100kHz στα οποία η εξασθένηση θεωρείται σταθερή. Σε κάθε πρακτική περίπτωση και με στόχο να μεγιστοποιηθεί η ρυθμαπόδοση της διαμόρφωσης OFDM, το φάσμα συχνοτήτων BPL πρέπει να διαιρεθεί κατάλληλα σε στενού εύρους ζώνης επίπεδα ως προς τη συχνότητα υποκανάλια (βαθμωτό OFDM ή SOFDM, Scalable OFDM). Ο τρόπος τεμαχισμού του φάσματος καθορίζεται λαμβάνοντας υπόψη παράγοντες όπως τα χαρακτηριστικά πολυδιαδρομικότητας του διαύλου MT/BPL και η συμμόρφωση με τους κανονισμούς χρήσης ραδιοσυχνοτήτων [349].
- η πιθανότητα υπέρβασης μιας στάθμης φασματικής απόδοσης (Spectral Efficiency (SE) exceedance probability). Είναι η πιθανότητα η SE μιας απόάκρο-σε-άκρο BPL σύνδεσης να υπερβαίνει ένα ορισμένο επίπεδο [277].
 Αποτελεί ένα κατάλληλο μακροσκοπικό μέτρο για να αξιολογηθεί η φασματική απόδοση των διαύλων MT/BPL. Με εφαρμογή της ανάλυσης που προηγήθηκε [164], [165], [167] μπορεί να προσδιοριστεί η κατανομή της πιθανότητας υπέρβασης της SE για οποιαδήποτε διάταξη BPL υπό ορισμένο τρόπο έγχυσης ισχύος. Το μέγεθος αυτό παρέχει μια ποιοτική εκτίμηση του πόσο αποτελεσματικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα δίκτυα MT/BPL για παροχή ευρυζωνικών υπηρεσιών.
- Η σωρευτική χωρητικότητα (cumulative capacity). Είναι το σωρευτικό ανώτερο όριο πληροφορίας σε Mbps που μπορεί να μεταδοθεί αξιόπιστα μέσω ενός διαύλου BPL.

7.3.3.1 Χωρητικότητα Εναέριων Δικτύων ΜΤ/ΒΡL

Στο Σχήμα 7.10α, η από-άκρο-σε-άκρο εξασθένηση του ρυθμού DM_1 έχει σχεδιαστεί ως συνάρτηση της συχνότητας για τις πέντε ενδεικτικές τοπολογίες υπό σταθερό IPSD. Σε όλες τις περιπτώσεις σχεδίασης χαρακτηριστικών μετάδοσης μέσω

εναέριων διαύλων MT/BPL έχει υποτεθεί συνολική ισχύς έγχυσης 10dBm. Από το Σχήμα 7.10α προκύπτει ότι αυτή εξαρτάται δραστικά από το πλήθος και το ηλεκτρικό μήκος των διακλαδώσεων που συναντώνται κατά μήκος της από-άκρο-σε-άκρο σύνδεσης. Σύμφωνα με την εικόνα που εμφανίζει η φασματική συμπεριφορά τους, οι τοπολογίες MT/BPL μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε τρεις βασικές κατηγορίες διαύλων μετάδοσης:

- Διαύλους LOS, όταν δεν υπάρχουν διακλαδώσεις και, συνεπώς, δεν παρατηρούνται φασματικές αιχμές. Αυτή η περίπτωση αντιπροσωπεύει το καλύτερο δυνατό σενάριο μετάδοσης MT/BPL [339].
- ii. Ευνοϊκούς ή καλούς διαύλους, όταν το πλήθος των διακλαδώσεων είναι μικρό και το ηλεκτρικό μήκος τους μεγάλο. Η φασματική συμπεριφορά εμφανίζει ρηχές φασματικές αιχμές. Οι Τοπολογίες της Αστικής περίπτωσης Α, Προαστιακής περίπτωσης και Αγροτικής περίπτωσης αντιστοιχούν στην περίπτωση των καλών διαύλων. Στη συνέχεια, η κατηγορία των καλών διαύλων τόσο στην εναέρια περίπτωση ΜΤ/BPL όσο και παρακάτω στην υπόγεια περίπτωση ΜΤ/BPL θα εκπροσωπείται από την Προαστιακή περίπτωση.
- iii. Δυσμενείς ή κακούς διαύλους, όταν το πλήθος των διακλαδώσεων είναι μεγάλο και το ηλεκτρικό τους μήκος μικρό. Η φασματική συμπεριφορά εμφανίζει βαθιές φασματικές αιχμές. Η Τοπολογία της Αστικής περίπτωσης *Β* αντιστοιχεί στην περίπτωση των κακών διαύλων.

Η φασματική συμπεριφορά των ανωτέρω κατηγοριών διαύλων MT/BPL έχει επιπτώσεις στα αντίστοιχα μέτρα αποτίμησης της φασματικής απόδοσης που απεικονίζεται στο Σχήμα 7.10β, όπου σχεδιάζεται η πιθανότητα υπέρβασης SE, και στο Σχήμα 7.10γ, όπου σχεδιάζεται η σωρευτική χωρητικότητα, των τριών κατηγοριών διαύλων MT/BPL. Πράγματι, μια σωρευτική διαφορά χωρητικότητας της τάξης των 50-150Mbps παρατηρείται στη συμπεριφορά των καλών και των κακών διαύλων. Από το Σχήμα 7.10β και γ καταδεικνύεται σαφώς ότι η χωρητικότητα που προσφέρεται από τα δίκτυα MT/BPL σε αστικές περιοχές είναι σαφώς χαμηλότερη αυτής που προσφέρεται σε προαστιακές ή αγροτικές περιοχές λόγω της σημαντικής εξάρτησής της από-άκρο-σε-άκρο εξασθένησης από το πλήθος και το ηλεκτρικό μήκος των διακλαδώσεων που συναντώνται κατά μήκος μιας σύνδεσης BPL.



Σχήμα 7.10: Από-άκρο-σε-άκρο εξασθένηση, πιθανότητα υπέρβασης SE και σωρευτική χωρητικότητα του DM₁ υπό σταθερό IPSD.

Τα ίδια συμπεράσματα συνάγονται και από την αντίστοιχη εξέταση του κοινού ρυθμού.

Στα Σχήματα 7.11α και 7.11β η πιθανότητα υπέρβασης SE και η σωρευτική χωρητικότητα έχουν σχεδιαστεί για μετάδοση MT/BPL μέσω του κοινού ρυθμού και ενός από τους διαφορικούς ρυθμούς υπό σταθερό IPSD. Μπορεί εύκολα να παρατηρηθεί ότι τα μέτρα αποτίμησης της φασματικής απόδοσης των δύο ρυθμών είναι παραπλήσια, γεγονός που καταδεικνύει ότι οι αντίστοιχες χωρητικότητες μετάδοσης είναι σχεδόν ίδιες. Δεδομένου ότι οι δύο διαφορικοί ρυθμοί παρουσιάζουν σχεδόν πανομοιότυπη φασματική συμπεριφορά και ότι είναι πιθανό να διεγερθούν και οι τρεις ρυθμοί για να μεταφέρουν ευρυζωνική πληροφορία συμπεραίνεται ότι η συνολική χωρητικότητα ενός διαύλου MT/BPL δεν εξαρτάται από το πώς γίνεται η σύζευξη του σήματος BPL, δηλαδή από το πώς κατανέμεται η ισχύς μεταξύ των ρυθμών που διεγείρονται [162]. Καθώς οι τρεις ρυθμοί παρουσιάζουν πρακτικά την ίδια ικανότητα ευρυζωνικής μετάδοσης, η σωρευτική χωρητικότητα MT/BPL μπορεί να υπολογιστεί υποθέτοντας ότι μόνο ένας ρυθμός έχει διεγερθεί, έστω ο DM₁, που είναι και ο ρυθμός ο οποίος θα εξετάζεται στο υπόλοιπο μέρος της διατριβής. Αυτό θα γίνει και στα υπόγεια δίκτυα MT/BPL που ακολουθούν.

Με στόχο να αντιμετωπίσουν τους περιορισμούς ΕΜΙ και να μετριάσουν την εξασθένηση BPL του σήματος λόγω πολυδιαδρομικότητας, έχουν προταθεί διάφορες εκδοχές του αλγορίθμου W-F [277], [345], [346]. Στο Σχήμα 7.12, έχει σχεδιαστεί η σωρευτική χωρητικότητα των τριών τύπων δίαυλων MT/BPL υπό σταθερό IPSD και υπό μεταβλητό IPSD ρυθμισμένο με εφαρμογή του αλγορίθμου W-F, και στις δύο περιπτώσεις υπό την ίδια συνολική εγχυόμενη ισχύ. Είναι φανερό ότι μόνο στην περίπτωση κακών διαύλων ο αλγόριθμος W-F παρέχει ένα ελάχιστο πλεονέκτημα χωρητικότητας. Στη LOS περίπτωση και στην περίπτωση καλών διαύλων, η χρήση του αλγορίθμου W-F δεν προσφέρει καμία βελτίωση σε σχέση με την έγχυση σταθερού IPSD.

Τα αποτελέσματα της διατριβής συγκρίθηκαν με αντίστοιχα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στην εργασία [162]. Συγκεκριμένα, συγκρίθηκαν οι σωρευτικές χωρητικότητες που απεικονίζονται στα Σχήματα 7b και 9c του [162] για LOS και αγροτικά δίκτυα MT/BPL υπό έγχυση WtG και ρυθμιζόμενο IPSD με εφαρμογή του αλγορίθμου W-F με τα αντίστοιχα αποτελέσματα της διατριβής. Η σύγκριση





υπό σταθερό IPSD.



Σχήμα 7.12: Σωρευτική χωρητικότητα για την περίπτωση εναέριων συστημάτων MT/BPL υπό σταθερό IPSD (—) και ρυθμιζόμενο IPSD μέσω W-F (----).

απεικονίζεται στο Σχήμα 7.13, από όπου είναι φανερή η εξαιρετική σύγκλιση των αποτελεσμάτων των δύο μεθόδων. Η ελάχιστη απόκλιση που υπάρχει μεταξύ των δύο αποτελεσμάτων αποδίδεται στις διαφορές μεταξύ του αμερικανικού δικτύου ΜΤ που εξετάζεται στην εργασία [162] και του ελληνικού δικτύου ΜΤ που εξετάζεται στη διατριβή.

7.3.3.2 Επίδραση των Κανονισμών ΕΜΙ στην Επίδοση ΜΤ/ΒΡL

Όπως ήδη έχει γίνει φανερό, ένα κρίσιμο ζήτημα που αφορά την τεχνολογία BPL έχει σχέση με τους περιορισμούς ισχύος έγχυσης που πρέπει να επιβληθούν για να επιτρέψουν τη λειτουργία δικτύων MT/BPL και οφείλει να απαντήσει στο κρίσιμο ερώτημα "ποιές συχνότητες είναι διαθέσιμες υπό συγκεκριμένα επίπεδα ισχύος;" Για να διερευνήσουν το επίπεδο παρεμβολών που προκαλείται σε αδειοδοτημένες ασύρματες υπηρεσίες από τη λειτουργία BPL και να προτείνουν κατάλληλα όρια ισχύος έγχυσης, έχουν συσταθεί από διάφορους ρυθμιστικούς οργανισμούς ειδικές επιτροπές. Μεταξύ των προτάσεων που αφορούν την ΕΜΙ που προκαλείται από τη



Σχήμα 7.13: Σωρευτική χωρητικότητα όταν η συνολική εγχυόμενη ισχύς *P* κατανέμεται στο ρυθμό DM₁ με ρυθμιζόμενο IPSD μέσω W-F (α) Αποτελέσματα της διατριβής (—) (β) Αποτελέσματα της εργασίας [162] (---).

λειτουργία συστημάτων BPL, τα ακόλουθα τέσσερα όρια IPSD είναι τα σημαντικότερα:

- i. τα όρια της FCC που προτείνονται από το FCC/P.15,
- τα γερμανικά όρια που προτείνονται από το Γερμανικό Κανονισμό ΤΡ NB30,
- iii. τα νορβηγικά όρια που προτείνονται από τη Νορβηγία,
- iv. τα όρια BBC και NATO που προτείνονται από το BBC και το NATO.

Στο Κεφάλαιο 2 στο Σχήμα 2.10 πραγματοποιείται σύγκριση των προτάσεων που μόλις αναφέρθηκαν και αφορούν τα όρια έντασης ηλεκτρικού πεδίου που δημιουργείται ακούσια από εκπομπές BPL. Η σωρευτική χωρητικότητα καλών και κακών διαύλων MT/BPL έχει σχεδιαστεί στο Σχήμα 7.14 για να εξεταστεί η σχετική επίδραση των ανωτέρω τεσσάρων ορίων IPSD που προτείνονται για τη ζώνη συχνότητας 3-30MHz. Τα Σχήματα 7.14α και β αποκαλύπτουν το πόσο κρίσιμη για



Σχήμα 7.14: Σωρευτική χωρητικότητα για καλούς και κακούς διαύλους BPL για τέσσερα όρια IPSD υποθέτοντας (α) θόρυβο τύπου Α και (β) θόρυβο τύπου Β.

την εφαρμογή της τεχνολογίας BPL είναι η επιλογή των ορίων EMI μέσω των οποίων καθορίζονται τα επίπεδα IPSD.

Διαφορές χωρητικότητας της τάξης των εκατοντάδων Mbps παρατηρούνται μεταξύ των χωρητικοτήτων μετάδοσης που προκύπτουν εφαρμόζοντας τις τέσσερις διαφορετικές IPSD που επιβάλλουν τα αντίστοιχα προτεινόμενα όρια ΕΜΙ. Επισημαίνεται ότι η τεχνολογία BPL δεν έχει νόημα όταν η έγχυση ισχύος περιορίζεται από τα τρία χαμηλότερα όρια IPSD. Επιπλέον, όπως καταδεικνύεται από τις σωρευτικές καμπύλες χωρητικότητας που σχεδιάζονται στο Σχήμα 7.15 θεωρώντας θόρυβο διαύλου τύπου Α, η μεταβλητότητα της σωρευτικής χωρητικότητας ως προς τα όρια IPSD είναι πολύ μεγάλη. Εύκολα παρατηρείται ότι μια μεταβολή 5% στην IPSD (dB/Hz) οδηγεί σε σημαντική μεταβολή της σωρευτικής χωρητικότητας.



Σχήμα 7.15: Σωρευτική χωρητικότητα για καλούς και κακούς διαύλους BPL όταν η έγχυση γίνεται με τα όρια FCC, τα όρια FCC +5% και τα όρια FCC -5% (υποτίθεται θόρυβος τύπου A).

7.3.3.3 Επίδραση της Λειτουργίας Πρωτευουσών Υπηρεσιών στη Μετάδοση MT/BPL

Ένα ζήτημα σχετικό με την ΕΜΙ λόγω λειτουργίας MT/BPL είναι ποιές φασματικές μάσκες πρέπει να επιβληθούν και ποιά χαρακτηριστικά λειτουργίας πρέπει να υιοθετηθούν, ώστε οι αδειοδοτημένες ασύρματες υπηρεσίες να προστατεύονται σε τοπικό επίπεδο χωρίς να επηρεάζεται σημαντικά η χωρητικότητα BPL.

Η ανεπάρκεια φάσματος προκύπτει κυρίως από την ανεπαρκή διαχείριση ή την αναποτελεσματική χρήση του. Οι ανεξάρτητες μελέτες επιβεβαιώνουν την ανωτέρω παρατήρηση και έχουν οδηγήσει στο συμπέρασμα ότι η διαθεσιμότητα φάσματος εξαρτάται σημαντικά από το χώρο και το χρόνο [112], [113]. Πρέπει επίσης να αναφερθεί ότι ένα σημαντικό τμήμα του διατιθέμενου φάσματος είναι ανενεργό για μεγάλες χρονικές περιόδους. Κατά συνέπεια, η σταθερή κατανομή του φάσματος και η ολική προστασία του αποτρέπουν τη χρησιμοποίησή του από άλλους χρήστες των συχνοτήτων που είναι συνήθως ανενεργές. Επομένως, η αξιολόγηση των κατάλληλων ορίων IPSD και η χρήση συνεχών ή τμηματικών φασματικών μασκών ισχύος μπορούν να παράσχουν στις ρυθμιστικές αρχές τα κατάλληλα εργαλεία για να προσδώσουν ευελιξία στους ρυθμιστικούς κανόνες και να βελτιώσουν την αποδοτικότητα του χρησιμοποιούμενου φάσματος.

Για τη διερεύνηση της δυνατότητας αυτής, στις συχνότητες για τις οποίες απαιτείται σε τοπικό επίπεδο η προστασία πρωτευουσών ασύρματων υπηρεσιών χρησιμοποιούνται μάσκες ισχύος για να εμποδίσουν την αντίστοιχη εκπομπή από ένα BPL δίκτυο. Για το σκοπό αυτό μάσκες ισχύος –είτε συνεχείς είτε τμηματικές– όπως αυτές που ενδεικτικά αναφέρονται στον Πίνακα 7.1, υπερτίθενται στα όρια της FCC που απεικονίζονται στο Σχήμα 7.16α. Με αυτόν τον τρόπο θα εξεταστούν οι επιπτώσεις στη χωρητικότητα BPL από τη χρήση φασματικών μασκών που προσαρμόζονται σε τοπικές συνθήκες εκπομπής στο εύρος 3-88MHz.

Στο Σχήμα 7.17 έχει σχεδιαστεί η σωρευτική χωρητικότητα. Αμέσως προκύπτει ότι η θέση των αποκλεισμένων ζωνών συχνότητας στο εξεταζόμενο φάσμα έχει πολύ μικρή επίπτωση στη σωρευτική χωρητικότητα BPL.

Αντιθέτως, η σωρευτική χωρητικότητα BPL επηρεάζεται σημαντικά από το συνολικό αποκλεισμένο φάσμα. Προκύπτει, μάλιστα, ότι η ποσοστιαία μείωση σε

	Τύπος μάσκας	Συνολικά αποκλεισμένο φάσμα (MHz)	Αποκλεισμένες ζώνες συχνοτήτων (MHz)
S1	Τμηματική	5	10-11, 15-16, 16-17, 22-23, 27-28
S2	Τμηματική	10	S1 και 31-32, 45-46, 57-58, 61-62, 65-66
S3	Τμηματική	20	S2 και 68-69, 71-72, 72-73, 75-76, 77-78, 79-80, 81-82, 84-85, 86-87, 87-88
C1	Συνεχής	5	20-25
C2	Συνεχής	10	C1 και 70-75
C3	Συνεχής	20	C2 και 78-88

Πίνακας 7.1: Φασματικές μάσκες αποκλεισμού ισχύος.



Σχήμα 7.16: Όρια FCC και χρησιμοποιούμενες μάσκες (S2 και C2).



Σχήμα 7.17: Η σωρευτική χωρητικότητα των καλών και κακών διαύλων MT/BPL όταν επιβάλλονται οι φασματικές μάσκες του Πίνακα 7.1 επιπλέον των ορίων της FCC.

σχέση με τη χωρητικότητα που αντιστοιχεί όταν η έγχυση γίνεται στα όρια της FCC σε όλο το εύρος συχνοτήτων BPL είναι σχεδόν ίση με το ποσοστό του συνολικά αποκλειομένου φάσματος σε σχέση με το συνολικό φάσμα BPL (βλέπε Πίνακα 7.2). Πρέπει να σημειωθεί ότι έχει υποτεθεί θόρυβος τύπου Α.

	Συνολικό	Μείωση χωρητικότητας σε σχέση με τη χωρητικότητα	
	αποκλεισμένο φάσμα	που προκύπτει με εφαρμογή των ορίων FCC σε όλο το	
	(%)	εύρος συχνοτήτων (%)	
		Καλοί δίαυλοι	Κακοί δίαυλοι
S1	5.88	7.59	6.18
S2	11.76	12.51	9.56
S3	23.53	21.72	19.32
C1	5.88	5.97	9.56
C2	11.76	10.97	14.60
C3	23.53	19.03	23.48

Πίνακας 7.2: Πίνακας που ποσοτικοποιεί τον εμπειρικό κανόνα.

7.3.3.4 Προστασία ΕΜΙ μέσω Μασκών Ισχύος Προσαρμοζομένων στις Τοπικές Πρωτεύουσες Ραδιοεκπομπές

Από τα προηγούμενα αποτελέσματα διαπιστώνεται ότι η επίδραση των περιορισμών EMI στη χωρητικότητα BPL είναι κρίσιμη. Επίσης, είναι γνωστό ότι το BPL φάσμα δεν καταλαμβάνεται συνεχώς και εξολοκλήρου από πρωτεύουσες ραδιοεκπομπές. Η κατάληψη του είναι κυρίως περιστασιακή και εξαρτάται από τοπικές συνθήκες. Είναι φανερό ότι τα πρότυπα που ρυθμίζουν την EMI που προκαλείται από τη λειτουργία συστημάτων BPL πρέπει να τροποποιηθούν ώστε να λαμβάνουν υπόψη τις αδειοδοτημένες υπηρεσίες σε τοπική βάση και όχι μονίμως και παντού κατά τον ίδιο τρόπο. Διαφορετικά, ένα σημαντικό τμήμα του φάσματος BPL δεν θα αξιοποιείται δεδομένου ότι θα διατίθεται σε πρωτεύουσες ασύρματες υπηρεσίες που είναι όμως ανενεργές σε τοπική βάση. Επίσης, είναι φανερό ότι η δυνατότητα επιλεκτικής φραγής της λειτουργίας συστημάτων BPL σε ζώνες συχνοτήτων όπου πρωτεύουσες ασύρματες υπηρεσίες είναι σε λειτουργία μέσω κατάλληλα σχεδιασμένων μασκών ισχύος μπορεί να οδηγήσει σε χαλάρωση των ορίων IPSD στο φάσμα που απομένει ελεύθερο προς χρήση από εφαρμογές BPL. Δεδομένου ότι, όπως ήδη έχει δειχθεί, η χωρητικότητα BPL είναι πολύ ευαίσθητη σε μεταβολές των ορίων IPSD, μια μικρή χαλάρωση αυτών των ορίων μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική αύξηση της χωρητικότητας σε σχέση με αυτήν που προκύπτει με εφαρμογή του προτύπου σταθερής κατανομής/συνεχούς προστασίας του φάσματος. Στο Σχήμα 7.18 σχεδιάζεται η σωρευτική χωρητικότητα των διαύλων MT/BPL όταν η IPSD περιορίζεται από:

 Μόνο τα όρια της FCC (πρότυπο σταθερής κατανομής/συνεχούς προστασίας του φάσματος).



Σχήμα 7.18: Η σωρευτική χωρητικότητα καλών και κακών διαύλων MT/BPL όταν επιβάλλονται οι φασματικές μάσκες του Πίνακα 7.1 με έγχυση στα όρια της FCC και με έγχυση σε χαλαρότερα όρια (FCC+5%).

- Τα όρια της FCC, όταν επιβάλλεται η S2 (ή S3) μάσκα για να προστατεύσει 10MHz (ή 20MHz) αδειοδοτημένων ασύρματων υπηρεσιών.
- 3. Τα όρια της FCC αυξημένα κατά 5% όταν επιβάλλεται η S2 (ή S3) μάσκα.

Είναι φανερό ότι ο επιλεκτικός αποκλεισμός συγκεκριμένων ζωνών του φάσματος BPL για να προστατευτούν συγκεκριμένες τοπικές πρωτεύουσες ασύρματες υπηρεσίες –αποκλεισμός που σε άλλη περίπτωση θα οδηγούσε σε ανάλογη μείωση της συνολικής χωρητικότητας– αντισταθμίζεται από μια μικρή μόνο αύξηση των ορίων IPSD στο φάσμα BPL που απομένει ελεύθερο προς χρήση.

Από τα προηγούμενα αποτελέσματα, συνάγονται τα ακόλουθα σημαντικά συμπεράσματα σχετικά με τη χωρητικότητα MT/BPL:

- Με κριτήριο το πλήθος και το ηλεκτρικό μήκος των διακλαδώσεων που απαντώνται κατά μήκος μιας από-άκρο-σε-άκρο σύνδεσης, οι δίαυλοι MT/BPL ταξινομούνται σε:
 - καλούς διαύλους, που χαρακτηρίζονται από ρηχές φασματικές αιχμές
 και απαντώνται σε αγροτικές, προαστιακές και ορισμένες αστικές
 περιοχές.
 - Κακούς διαύλους, που χαρακτηρίζονται από βαθιές φασματικές αιχμές και απαντώνται σπάνια και μόνο σε αστικές περιοχές.

Η σωρευτική χωρητικότητα στο φάσμα 1-100MHz μπορεί να υπερβεί τα 700Mbps (καλοί δίαυλοι) ή τα 550Mbps (κακοί δίαυλοι) υπό θόρυβο με PSD ίση προς -105dBm/Hz.

- ii. Η χωρητικότητα MT/BPL εξαρτάται δραστικά από το επίπεδο IPSD, δηλαδή από την ισχύ έγχυσης.
- iii. Υπάρχει αντιστάθμιση μεταξύ της προστασίας ΕΜΙ και της χωρητικότητας BPL. Αυστηροί κανονισμοί ΕΜΙ για προστασία από τη λειτουργία συστημάτων BPL οδηγούν σε δραματική μείωση της χωρητικότητας BPL. Εντούτοις, αν και για εφαρμογές έξυπνου δικτύου τα υπάρχοντα όρια δεν είναι απαγορευτικά –δεδομένου ότι 15-20Mbps μπορεί να είναι ικανοποιητικές ταχύτητες για τέτοιου είδους εφαρμογές–, οι κανονισμοί αυτοί δημιουργούν εξαιρετικά υψηλά εμπόδια για την προαγωγή της τεχνολογίας MT/BPL ως εναλλακτικής λύσης προς άλλες ευρυζωνικές τεχνολογίες. Η προστασία των πρωτευουσών ασυρμάτων υπηρεσιών από τη λειτουργία συστημάτων BPL πρέπει να επανεξεταστεί με κριτήριο τις

δυνατότητες που η τεχνολογία BPL μπορεί να προσφέρει για παροχή είτε των εφαρμογών έξυπνου δικτύου είτε ευρυζωνικών υπηρεσιών σε περιοχές όπου αυτό είναι πάρα πολύ ακριβό ή αδύνατο για άλλες τεχνολογίες.

iv. Για να ρυθμιστεί αποτελεσματικά η λειτουργία των συστημάτων BPL, εναλλακτική προσέγγιση του προτύπου σταθερής κατανομής/συνεχούς προστασίας του φάσματος είναι η προσαρμοστική σε τοπική βάση φραγή λειτουργίας MT/BPL μόνο σε ζώνες συχνοτήτων όπου λειτουργούν πρωτεύουσες ασύρματες υπηρεσίες. Μικρή χαλάρωση των ορίων IPSD στο φάσμα BPL που απομένει ελεύθερο προς χρήση, αντισταθμίζει τη χωρητικότητα που χάνεται λόγω προσαρμοστικής σε τοπική βάση φραγής συχνοτήτων και προσφέρει σημαντικά σωρευτικά επίπεδα χωρητικότητας που δεν είναι μακριά από τα μέγιστα δυνατά.

7.4 Χωρητικότητα των Υπόγειων Διαύλων MT/BPL

7.4.1 Υπολογισμός της από-Άκρο-σε-Άκρο Συνάρτησης Μεταφοράς

Από τη γενική ανάλυση της μετάδοσης σημάτων μέσω τριφασικών υπόγειων καλωδίων ισχύος με κοινή θωράκιση και οπλισμό, διαπιστώθηκε ότι είναι δυνατό να υποστηριχθούν πέντε ρυθμοί: ο κοινός ρυθμός (CM), οι δύο διαφορικοί ρυθμοί (DM_i, i = 1,2) και οι δύο ρυθμοί-φάντασμα (PM_i, i = 1,2). Εφόσον ισχύουν οι προϋποθέσεις A_i , i = 1,2,3 του Κεφαλαίου 4 οι πέντε αυτοί ρυθμοί είναι απολύτως διαχωρίσιμοι, με συνέπεια πέντε ανεξάρτητοι δίαυλοι μετάδοσης να μπορούν ταυτόχρονα να μεταφέρουν σήματα BPL σε όλη την έκταση του υπόγειου δικτύου MT/BPL.

Επίσης διαπιστώθηκε ότι εφόσον η θωράκιση και ο οπλισμός είναι γειωμένοι, οι τάσεις των ρυθμών-φάντασμα $V_i^m(z)$, i = 4,5, είναι μηδενικές και δεν συμμετέχουν στη μετάδοση BPL. Επομένως, η φασματική συμπεριφορά τους δεν θα εξεταστεί στο Κεφάλαιο 7.

Μεταξύ των διαφόρων συναφών μεθόδων που έχουν προταθεί για τον προσδιορισμό της συνάρτησης μεταφοράς των διαφόρων ρυθμών έγινε επιλογή της μεθόδου μητρών μεταφοράς (TM method) που αποτελεί μια ακριβή έκδοση της μεθόδου μητρών σκέδασης (SM) [164]. Η μέθοδος TM, επίσης, χρησιμοποιήθηκε και για την περίπτωση των εναέριων διαύλων MT/BPL που προηγήθηκε. Προς τούτο μια υπόγεια από-άκρο-σε-άκρο σύνδεση MT/BPL διαχωρίζεται σε επιμέρους τμήματα – δομικά στοιχεία- έκαστο των οποίων αντιστοιχεί στις διαδοχικές διακλαδώσεις που απαντώνται κατά μήκος της σύνδεσης (βλέπε Κεφάλαιο 4 και Σχήμα 7.1).

Θόρυβος στις Υπόγειες Γραμμές Ισχύος ΜΤ

Για να υπολογιστεί η χωρητικότητα των υπόγειων διαύλων μετάδοσης MT/BPL θεωρείται ένα ομοιόμορφο μέσο επίπεδο θορύβου με PSD ίση με -135dBm/Hz (θόρυβος τύπου B) [322], [323], [332], [333]. Το επίπεδο αυτό είναι πολύ χαμηλό έναντι του, σε αρκετές περιπτώσεις, σημαντικά υψηλότερου θορύβου (θορύβου τύπου A) που εμφανίζεται κατά την εναέρια μετάδοση MT/BPL με PSD που λαμβάνεται ίση με -105dBm/Hz [106], [162], [165].

Περιορισμοί Ισχύος για Υπόγεια Συστήματα MT/BPL

Αν και όπως αναλύθηκε διεξοδικά στο Κεφάλαιο 6, τα χαρακτηριστικά μετάδοσης των υπόγειων γραμμών μεταφοράς MT/BPL είναι πολύ χειρότερα από αυτά των αντίστοιχων των εναέριων γραμμών μεταφοράς, το γεγονός ότι το υπόγειο δίκτυο MT/BPL είναι HM θωρακισμένο επιτρέπει έγχυση του σήματος BPL υπό σημαντικά υψηλότερα επίπεδα IPSD έναντι της εναέριας μετάδοσης MT/BPL όπου λόγω ανάγκης αποτροπής EMI προς άλλες υπηρεσίες η ισχύς έγχυσης περιορίζεται σημαντικά [66], [67], [165].

Δεδομένου ότι οι υπόγειες γραμμές μεταφοράς είναι θαμμένες και ΗΜ θωρακισμένες από τη θωράκιση ή/και τον οπλισμό, η ΕΜΙ που προκαλείται από την υπόγεια μετάδοση MT/BPL οφείλεται κυρίως στην ΗΜ διαρροή από τις μονάδες BPL στα σημεία έγχυσης (υποσταθμοί, διανομείς MT). Για τον τύπο αυτό διαρροής είναι υπεύθυνος κυρίως ο κοινός ρυθμός [61], [119], [167], [203], [329].

Σε συχνότητες κάτω από τα 30MHz τα μέγιστα επίπεδα ακούσιων εκπομπών λόγω HM διαρροής (leakage emissions) από εναέριες τριφασικές γραμμές MT/BPL μετρήθηκαν 20dB υψηλότερα των αντίστοιχων εκπομπών από υπόγεια τριφασικά δίκτυα MT/BPL στην ίδια απόσταση υπό την ίδια ισχύ έγχυσης [57], [87], [90], [350], [351]. Με βάση την παρατήρηση αυτή, στο εύρος συχνοτήτων 1.705-30MHz ένα μέγιστο επίπεδο IPSD ίσο με -40dBm/Hz σύμφωνα με την Ofcom, αποτελεί ένα κατάλληλο όριο που ικανοποιεί τα όρια συμμόρφωσης που θέτει το FCC/P.15.

Για τη μελέτη χωρητικότητας στο εύρος 30-88MHz, θα υποτεθεί η ίδια διαφορά των 20dB μεταξύ των ορίων MT/BPL IPSD για υπόγεια και εναέρια δίκτυα MT/BPL. Επομένως, ένα μέγιστο επίπεδο IPSD ίσο με -57dBm/Hz θεωρείται ότι

παρέχει συμμόρφωση στη ζώνη συχνοτήτων αυτή (όριο που υπαγορεύεται από ΕΜΙ λόγω ηλεκτρικού πεδίου).

7.4.2 Αριθμητικά Αποτελέσματα

Οι προσομοιώσεις των διάφορων τύπων υπόγειων γραμμών μεταφοράς MT/BPL αποσκοπούν στον υπολογισμό της φασματικής τους απόδοσης κατά τη μετάδοση BPL σημάτων και τη διερεύνηση των παραγόντων που την επηρεάζουν, όπως ο τύπος των γραμμών μεταφοράς, η τοπολογία του υπόγειου δικτύου MT, ο τρόπος σύζευξης του σήματος BPL στις υπόγειες γραμμές MT κλπ. Οι κανονισμοί που αναφέρονται στην υπόγεια μετάδοση MT/BPL εξετάζονται επίσης ως προς τη εσωτερική λειτουργικότητα μεταξύ των εναέριων και των υπόγειων δικτύων MT/BPL. Δεδομένου ότι οι τρεις ρυθμοί που υποστηρίζονται από τριφασικές υπόγειες γραμμές μεταφοράς ΜΤ με γειωμένη θωράκιση και οπλισμό είναι διαχωρίσιμοι μπορούν να εξεταστούν χωριστά. Όπως και κατά την εναέρια μετάδοση ΜΤ/ΒΡΙ -όπου οι τρεις ρυθμοί εμφανίζουν την ίδια συμπεριφορά ως προς τη χωρητικότητα– έτσι και κατά την υπόγεια μετάδοση MT/BPL, εφόσον γρησιμοποιούνται γραμμές μεταφοράς με υψηλές διηλεκτρικές απώλειες, οι τρεις ενεργοί ρυθμοί συμπεριφέρονται σχεδόν πανομοιότυπα. Για απλοποίηση της ανάλυσης υποτίθεται ότι το σήμα BPL εγχύεται άμεσα στους τρεις αυτούς ρυθμούς και, συνεπώς, αρκεί να εξεταστούν τα χαρακτηριστικά μετάδοσης μόνο ενός ρυθμού, έστω του DM₁ για τα υπόγεια συστήματα MT/BPL [167].

Για τα αριθμητικά αποτελέσματα θεωρήθηκε η γενική μορφή τοπολογίας MT του Σχήματος 7.1. Ο πομπός και ο δέκτης θεωρούνται προσαρμοσμένοι στη χαρακτηριστική αντίσταση του εκάστοτε χρησιμοποιούμενου ρυθμού διάδοσης ενώ οι τερματισμοί των διακλαδώσεων θεωρούνται ανοικτοκυκλώματα [106], [162]. Σε αστικές περιοχές περίπου το 50-75% των υπόγειων δικτύων MT έχουν κλάδους μήκους μικρότερου των 200m, ενώ μόνο το 1-5% έχει κλάδους μήκους μεγαλύτερου των 500m. Η τελευταία περίπτωση αποτελεί το χειρότερο σενάριο όσον αφορά την υπόγεια μετάδοση MT/BPL [2], [3]. Ως εκ τούτου, για τη μελέτη της υπόγειας μετάδοσης MT/BPL θα θεωρηθούν αποστάσεις της τάξης των 200m που είναι αρκετά μικρότερες των αποστάσεων που απαντώνται κατά την εναέρια μετάδοση MT/BPL που μπορούν να φθάσουν τα 1000m [162], [165]. Όπως θα δειχθεί στη συνέχεια, η σημαντικά βραχύτερη απόσταση μετάδοσης που εμφανίζεται στις υπόγειες τοπολογίες MT/BPL σε συνδυασμό με τα αντίστοιχα σημαντικά υψηλότερα επιτρεπόμενα επίπεδα IPSD αντισταθμίζουν την εξαιρετικά υψηλή εξασθένηση που εμφανίζουν οι υπόγειοι δίαυλοι MT/BPL, καθιστώντας τους τελευταίους συμβατούς προς τους εναέριους διαύλους MT/BPL [4], [10], [167].

Για την εξαγωγή ποσοτικών συμπερασμάτων θα εξεταστούν πέντε ενδεικτικές τοπολογίες υπόγειων γραμμών μεταφοράς MT, που αφορούν από-άκρο-σε-άκρο συνδέσεις μέσων αποστάσεων ίσων με 200m, δηλαδή:

- Μια τυπική τοπολογία MT/BPL -Αστική περίπτωση Α- με 3 διακλαδώσεις (L₁=70m, L₂=55m, L₃=45m, L₄=30m, L_{b1}=12m, L_{b2}=7m, L_{b3}=21m).
- Μια επιδεινωμένη αστική τοπολογία MT/BPL -Αστική περίπτωση B- με 5 διακλαδώσεις (L₁=40m, L₂=10m, L₃=20m, L₄=40m, L₅=60m, L₆=30m, L_{b1}=2m, L_{b2}=5m, L_{b3}=8m, L_{b4}=2m, L_{b5}=8m).
- Μια τυπική προαστιακή τοπολογία MT/BPL –Προαστιακή περίπτωση– με 2 διακλαδώσεις (L₁=50m, L₂=100m, L₃=50m, L_{b1}=60m, L_{b2}=30m).
- Μια τυπική αγροτική τοπολογία MT/BPL –Αγροτική περίπτωση– με 1 διακλάδωση (L₁=50m, L₂=150m, L_{b1}=100m).
- Η LOS μετάδοση, δηλαδή η μετάδοση σε μια από-άκρο-σε-άκρο σύνδεση όταν δεν μεσολαβούν διακλαδώσεις. Η τοπολογία αυτή αντιστοιχεί στην Line of Sight μετάδοση στις ασύρματες ζεύξεις.

Οι αντίστοιχες ενδεικτικές τοπολογίες εναέριων γραμμών μεταφοράς MT που εξετάστηκαν συγκριτικά αφορούν από-άκρο-σε-άκρο συνδέσεις μέσων αποστάσεων ίσων με 500m. Αυτές οι τοπολογίες είναι:

- Η τυπική τοπολογία MT/BPL -Αστική περίπτωση Α- με 3 διακλαδώσεις (L₁=250m, L₂=100m, L₃=50m, L₄=100m, L_{b1}=6m, L_{b2}=1m, L_{b3}=6m).
- Η επιδεινωμένη αστική τοπολογία MT /BPL -Αστική περίπτωση B- με 5 διακλαδώσεις (L₁=100m, L₂=25m, L₃=50m, L₄=100m, L₅=150m, L₆=75m, L_{b1}=2m, L_{b2}=5m, L_{b3}=8m, L_{b4}=2m, L_{b5}=8m).
- Η τυπική προαστιακή τοπολογία MT/ BPL –Προαστιακή περίπτωση– με 2 διακλαδώσεις (L₁=250m, L₂=200m, L₃=50m, L_{b1}=60m, L_{b2}=10m).
- Η τυπική αγροτική τοπολογία MT/BPL –Αγροτική περίπτωση– με 1 διακλάδωση (L₁=250m, L₂=250m, L_{b1}=300m).
- η μετάδοση LOS για την ίδια από-άκρο-σε-άκρο απόσταση $L=L_1+\ldots+L_{n+1}=500m$ όταν δεν υπάρχει διακλάδωση.

Πριν παρουσιαστούν και σχολιαστούν τα αριθμητικά αποτελέσματα, πρέπει να δοθούν οι ορισμοί δύο χαρακτηριστικών μεγεθών και συγκεκριμένα

- Η πιθανότητα υπέρβασης ενός επιπέδου εζασθένησης (attenuation exceedance probability ή percentage wasted bandwidth). Είναι η πιθανότητα η από-άκρο-σε-άκρο εξασθένηση να υπερβαίνει ένα ορισμένο επίπεδο και αποτελεί ένα κατάλληλο μακροσκοπικό μέτρο για να αξιολογηθεί η αποδοτικότητα των υπόγειων διαύλων MT/BPL. Η κατανομή της πιθανότητας υπέρβασης της εξασθένησης μπορεί να υπολογιστεί για οποιαδήποτε εναέρια [164] ή υπόγεια διάταξη γραμμών μεταφοράς MT/BPL. Παρέχει μια μακροσκοπική εκτίμηση για το πόσο αποτελεσματικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα δίκτυα MT/BPL για να παρέχουν ευρυζωνικές υπηρεσίες.
- Η συχνότητα κορεσμού χωρητικότητας (saturation frequency). Είναι η οριακή συχνότητα μετά της οποίας η σωρευτική χωρητικότητα δεν αλλάζει, δηλαδή η φασματική απόδοση των υποκαναλιών παραμένει κάτω από ένα κατώφλιο. Ο κορεσμός της χωρητικότητας οφείλεται στη βαθυπερατή φασματική συμπεριφορά της εξασθένησης των υπόγειων διαύλων MT/BPL. Η συχνότητα κορεσμού χωρητικότητας εξαρτάται από το είδος των υπόγειων γραμμών μεταφοράς MT, την IPSD, την PSD του θορύβου και την ύπαρξη και τη θέση επαναληπτών. Υπό χαλαρό ορισμό, η συχνότητα κορεσμού ορίζεται ως η συχνότητα f_{sat,95%} για την οποία η σωρευτική χωρητικότητα γίνεται ίση με το 95% του επιπέδου κορεσμού της.

Επίδραση της Τοπολογίας του Δικτύου στην Υπόγεια Μετάδοση ΜΤ/ΒΡL

Στα Σχήματα 7.19α και β σχεδιάζεται η από-άκρο-σε-άκρο εξασθένηση υπόγειων διαύλων συναρτήσει της συχνότητας καθώς και η πιθανότητα υπέρβασης για τις πέντε ενδεικτικές υπόγειες τοπολογίες MT/BPL. Σε όλες τις περιπτώσεις σχεδίασης χαρακτηριστικών μετάδοσης μέσω υπόγειων διαύλων MT/BPL –όπως και στις περιπτώσεις των εναέριων διαύλων MT/BPL που προηγήθηκαν– έχει υποτεθεί συνολική ισχύς έγχυσης 10dBm. Για σύγκριση, στο Σχήμα 7.19β σχεδιάζονται και οι αντίστοιχες καμπύλες για τις πέντε ενδεικτικές εναέριες τοπολογίες που αναφέρθηκαν αμέσως πριν.



Σχήμα 7.19: (α) Από-άκρο-σε-άκρο εξασθένηση και (β) πιθανότητα υπέρβασης της εξασθένησης για το ρυθμό DM_1 υπό σταθερό IPSD.

Όπως παρατηρήθηκε και κατά την εναέρια μετάδοση MT/BPL, η φασματική συμπεριφορά της από-άκρο-σε-άκρο εξασθένησης των υπόγειων διαύλων MT/BPL εξαρτάται δραστικά από το πλήθος των διακλαδώσεων που απαντώνται κατά μήκος της σύνδεσης καθώς επίσης και από το ηλεκτρικό μήκος τους. Με βάση την εικόνα της φασματικής συμπεριφοράς που εμφανίζεται στο Σχήμα 7.19α και οι υπόγειοι δίαυλοι MT/BPL μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις κατηγορίες. Αυτές είναι:

- Δίαυλοι LOS, που αντιπροσωπεύουν μια από-άκρο-σε-άκρο σύνδεση MT/BPL όταν δεν υπάρχει καμία ενδιάμεση διακλάδωση. Δεν παρατηρούνται φασματικές αιχμές. Η περίπτωση αυτή αντιστοιχεί στη μετάδοση LOS των ασυρμάτων ζεύξεων και αντιπροσωπεύει την καλύτερη δυνατή περίπτωση μετάδοσης σε υπόγειους διαύλους MT/BPL. Παρουσιάζεται σε αγροτικές, λιγότερο συχνά σε προαστιακές και σπάνια σε αστικές περιοχές.
- 2. Καλοί δίαυλοι, όταν κατά μήκος της από-άκρο-σε-άκρο σύνδεσης υπάρχει ένα μικρό πλήθος διακλαδώσεων σχετικά μεγάλου μήκους. Η φασματική συμπεριφορά εμφανίζει ρηχές φασματικές αιχμές. Σε αυτήν την κατηγορία διαύλων ανήκει η υπόγεια μετάδοση MT/BPL στις περισσότερες περιπτώσεις υπόγειων δικτύων MT/BPL.
- 3. Κακοί δίαυλοι, όταν κατά μήκος της από-άκρο-σε-άκρο σύνδεσης υπάρχει μεγάλο πλήθος διακλαδώσεων σχετικά μικρού μήκους. Η φασματική συμπεριφορά εμφανίζει βαθιές φασματικές αιχμές. Σε αυτήν την κατηγορία διαύλων ανήκει η υπόγεια μετάδοση MT/BPL σε ολιγάριθμες περιπτώσεις αστικών περιοχών.

Η ανωτέρω ταξινόμηση είναι παρόμοια με την ταξινόμηση των εναέριων διαύλων μετάδοσης MT/BPL, όπου επίσης παρατηρούνται τρεις κατηγορίες διαύλων με αντίστοιχα χαρακτηριστικά [165]. Στο Σχήμα 7.19β καταδεικνύεται ότι η συμπεριφορά των υπόγειων διαύλων MT/BPL είναι εντυπωσιακά χειρότερη από τη συμπεριφορά των εναέριων όπως εύκολα προκύπτει από τη σημαντικά χαμηλότερη κατανομή της εξασθένησης για τις αντίστοιχες τοπολογίες. Συγκρίνοντας τα Σχήματα 7.10α και 7.19α ως προς την επίπτωση της πολυδιαδρομικότητας στην εναέριαν 100dB ενώ στην υπόγεια περίπτωση MT/BPL της τάξης των 50dB. Έτσι εξηγείται γιατί στους περισσότερους υπόγειους διαύλους MT/BPL η απόσταση και όχι η πολυδιαδρομικότητα αποτελεί τον κύριο παράγοντα που επηρεάζει τη μετάδοση

BPL. Επομένως, για να μειωθούν οι αποστάσεις των από-άκρο-σε-άκρο συνδέσεων σε αστικά και προαστιακά περιβάλλοντα πρέπει να προβλέπονται πυκνότερα υπόγεια δίκτυα MT/BPL [2], [3]. Στην περίπτωση αυτή, οι αντίστοιχες βραχύτερες από-άκρο-σε-άκρο συνδέσεις επηρεάζονται κυρίως από την πολυδιαδρομικότητα [13].

Στο Σχήμα 7.20, η πιθανότητα υπέρβασης SE έχει σχεδιαστεί ως συνάρτηση της φασματικής απόδοσης για υπόγειες συνδέσεις MT/BPL μήκους 200m. Οι αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις για εναέριες συνδέσεις MT/BPL μήκους 500m έχουν επίσης σχεδιαστεί για λόγους σύγκρισης.



Σχήμα 7.20: Πιθανότητα υπέρβασης SE του ρυθμού DM₁ υπό σταθερό IPSD.

Όπως αναμενόταν, η φασματική συμπεριφορά των υπόγειων και των εναέριων διαύλων MT/BPL που απεικονίζεται στα Σχήματα 7.19α και β, αντίστοιχα, εξαντικρύζεται και στην αντίστοιχη φασματική απόδοση. Αν και έχει προσδιορισθεί για συνδέσεις μήκους 500m –σε σχέση με συνδέσεις μήκους 200m για τη μετάδοση μέσω υπόγειων διαύλων–, η φασματική απόδοση της εναέριας μετάδοσης MT/BPL είναι σημαντικά καλύτερη από την υπόγεια υπό την ίδια IPSD.

Στο Σχήμα 7.20, η μέγιστη φασματική απόδοση των εναέριων διαύλων MT/BPL για θόρυβο τύπου Α δίδεται το σημείο (1) ενώ η μέγιστη φασματική απόδοση των υπόγειων και εναέριων διαύλων MT/BPL για θόρυβο τύπου B δίδεται από τα σημεία (2) και (3), αντίστοιχα. Όπως μπορεί να εύκολα να παρατηρηθεί η μέγιστη φασματική απόδοση των υπόγειων και εναέριων διαύλων MT/BPL για θόρυβο τύπου B είναι σχεδόν ίσες. Η διαφορά μεταξύ της μέγιστης φασματικής απόδοσης μεταξύ υπόγειων και εναέριων διαύλων MT/BPL αποδίδεται στην αντίστοιχη σημαντική διαφορά μεταξύ του μέσου επιπέδου της PSD του θορύβου στους υπόγειους και εναέριους διαύλους MT/BPL (περιθώριο θορύβου), όπως άλλωστε προκύπτει από τη διαφορά των σημείων (1) και (2) στο Σχήμα 7.20 [106], [162], [165], [323], [332], [333].

Επιπλέον, η ασυνέχεια της φασματικής απόδοσης των εναέριων LOS διαύλων οφείλεται στη σχεδόν σταθερή συμπεριφορά της εξασθένησης των εναέριων LOS διαύλων όπως φαίνεται από το Σχήμα 7.19β. Επισημαίνεται ότι οι καμπύλες που απεικονίζουν τη φασματική απόδοση των εναέριων διαύλων MT/BPL είναι κυρτές ενώ εκείνες των υπόγειων διαύλων είναι κοίλες. Αυτή η συμπεριφορά αποδίδεται στην αντίστοιχη συμπεριφορά της από-άκρο-σε-άκρο εξασθένησης. Δηλαδή η κυρτή συμπεριφορά της φασματικής απόδοσης –που παρατηρείται στους εναέριους διαύλους MT/BPL– οφείλεται στην αντίστοιχη κοίλη μορφή της από-άκρο-σε-άκρο εξασθένησης, ενώ η κοίλη φασματική συμπεριφορά –που παρατηρείται στους υπόγειους διαύλους MT/BPL– οφείλεται στην κυρτή μορφή της αντίστοιχης από-άκρο-σε-άκρο εξασθένησης.

Η εικόνα αυτή επιβεβαιώνει τη βαθυπερατή φασματική συμπεριφορά των υπόγειων διαύλων MT/BPL, που πιστοποιείται επίσης από το Σχήμα 7.21, όπου έχει σχεδιαστεί συναρτήσει της συχνότητας η σωρευτική χωρητικότητα των υπόγειων διαύλων MT/BPL. Το μεγαλύτερο μέρος της σωρευτικής χωρητικότητας κατά την υπόγεια μετάδοση MT/BPL επιτυγχάνεται στο χαμηλό τμήμα του φάσματος

συχνοτήτων BPL. Οι συχνότητες κορεσμού χωρητικότητας $f_{sat,95\%}$ που σημειώνονται στο Σχήμα 7.21 για τις διάφορες τοπολογίες υπόγειων διαύλων MT/BPL που εξετάζονται παρατίθενται στον Πίνακα 7.3.



Σχήμα 7.21: Σωρευτική χωρητικότητα του ρυθμού DM1 υπό σταθερό IPSD.

Τοπολογία	Συχνότητα κορεσμού χωρητικότητας
	(MHz)
Αστική περίπτωση Α	43.7
Αστική περίπτωση Β	44.5
Προαστιακή περίπτωση	45.4
Αγροτική περίπτωση	47.8
LOS περίπτωση	50.3

Πίνακας 7.3: Συχνότητες κορεσμού χωρητικότητας για διάφορες κατηγορίες υπόγειων MT/BPL διαύλων που έχουν σχεδιαστεί στο Σχήμα 7.21.

Από τα Σχήματα 7.19, 7.20 και 7.21 εξάγονται τα ακόλουθα σημαντικά συμπεράσματα:

- Όπως και κατά την εναέρια μετάδοση MT/BPL, οι υπόγειοι δίαυλοι MT/BPL ταξινομούνται σε τρεις κατηγορίες: LOS, καλών και κακών διαύλων.
- Αφού πέραν της συχνότητας κορεσμού χωρητικότητας δεν παρατηρείται αύξηση χωρητικότητας, είναι επιθυμητό να ωθηθεί αυτή η συχνότητα προς το ανώτερο όριο του φάσματος BPL. Αυτό θα οδηγήσει σε καλύτερη αξιοποίηση του διαθέσιμου φάσματος και μπορεί να επιτευχθεί είτε με αύξηση του πλήθους επαναληπτών –που καθιστούν έτσι το υπόγειο δίκτυο MT/BPL πυκνότερο– είτε με υιοθέτηση υψηλότερων ορίων IPSD.

Για να μετριαστεί η από-άκρο-σε-άκρο εξασθένηση και να συμμορφωθούν τα εναέρια και υπόγεια δίκτυα MT/BPL με τους περιορισμούς EMI, έχουν προταθεί διάφορες εκδοχές του αλγορίθμου W-F. Στο Σχήμα 7.22, έχει σχεδιαστεί η σωρευτική χωρητικότητα των τριών υπόγειων τύπων διαύλων MT/BPL υπό σταθερό IPSD και υπό μεταβλητό IPSD ρυθμιζόμενο εφαρμόζοντας τον αλγόριθμο W-F και στις δύο περιπτώσεις υποθέτοντας συνολική εγχυόμενη ισχύ 10dBm.



Σχήμα 7.22: Σωρευτική χωρητικότητα υπόγειων διαύλων MT/BPL υπό σταθερό IPSD και ρυθμιζόμενο IPSD μέσω του αλγορίθμου W-F.

Από το Σχήμα 7.22 φαίνεται ότι, αντίθετα προς την ασήμαντη βελτίωση χωρητικότητας που παρατηρήθηκε κατά την αντίστοιχη σύγκριση των εναέριων διαύλων MT/BPL (βλέπε Σχήμα 7.12), κατά την υπόγεια μετάδοση MT/BPL ο αλγόριθμος W-F παρέχει μικρή βελτίωση χωρητικότητας, ειδικά σε κακούς υπόγειους διαύλους MT/BPL όπου η πολυδιαδρομικότητα –που προκαλεί βαθιές φασματικές αιχμές και υψηλή διακύμανση της εξασθένησης– συνδυάζεται με υψηλή εξασθένηση LOS. Αν και η βασισμένη στον αλγόριθμο W-F έγχυση σημάτων προσφέρει μια μικρή βελτίωση της σωρευτικής χωρητικότητας (όσο υψηλότερη η εξασθένηση LOS τόσο υψηλότερη η βελτίωση), αυτό γίνεται με δυσανάλογο κόστος λόγω της πολυπλοκότητας που εισάγει η εφαρμογή του αλγορίθμου W-F. Ως εκ τούτου, η σταθερή έγχυση IPSD κρίνεται προτιμητέα στην πράξη και υιοθετείται για τις προσομοιώσεις.

ΕΜΙ λόγω Υπόγειας Μετάδοσης ΜΤ/ΒΡL

Η σωρευτική χωρητικότητα των πέντε υπόγειων τοπολογιών MT/BPL που θεωρήθηκαν προηγουμένως έχει σχεδιαστεί στο Σχήμα 7.23 θεωρώντας ότι η IPSD



Σχήμα 7.23: Η σωρευτική χωρητικότητα εναέριων και υπόγειων διαύλων MT/BPL με έγχυση ισχύος στα όρια της FCC.

έγχυσης είναι ίση προς τα όρια που καθορίζει η οδηγία FCC/P.15 για τη λειτουργία MT/BPL στο φάσμα συχνότητας 3-88MHz [49], [165]. Εξετάστηκαν εναέριες και υπόγειες από-άκρο-σε-άκρο συνδέσεις μέσου αντίστοιχου μήκους, δηλαδή 200m για την υπόγεια και 500m για την εναέρια περίπτωση.

Από το Σχήμα 7.23 προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- Η εξαιρετικά ισχυρή εξασθένηση από την οποία υποφέρουν οι υπόγειοι δίαυλοι MT/BPL αντισταθμίζεται από τα σημαντικά χαλαρότερα (υψηλότερα) όρια IPSD που επιβάλλονται στην υπόγεια μετάδοση MT/BPL. Επιπλέον, η μέση από-άκρο-σε-άκρο απόσταση μετάδοσης σε υπόγειους διαύλους MT/BPL (200m) είναι σημαντικά μικρότερη από την αντίστοιχη μέση απόσταση μετάδοσης των εναέριων συνδέσεων MT/BPL (500m). Τα σημαντικά υψηλότερα όρια IPSD σε συνδυασμό με τις βραχύτερες μέσες απόάκρο-σε-άκρο αποστάσεις μετάδοσης καθιστούν τη σωρευτική χωρητικότητα μετάδοσης των υπόγειων διαύλων MT/BPL συγκρίσιμη με αυτήν των εναέριων διαύλων MT/BPL, όπου η σημαντικά χαμηλότερη εξασθένηση αντισταθμίζεται από τα σημαντικά αυστηρότερα (χαμηλότερα) όρια IPSD. Αυτό είναι ένα σημαντικό συμπέρασμα καθώς αναμένεται ότι η μετάδοση ΜΤ/ΒΡL σε αστικές περιοχές θα υλοποιηθεί κυρίως μέσω του υπόγειου δικτύου ΜΤ. Επομένως, η διαφαινόμενη συμβατότητα της τηλεπικοινωνιακής χωρητικότητας του υπόγειου MT/BPL δικτύου με αυτήν του εναέριου MT/BPL δικτύου είναι ιδιαιτέρως ενθαρρυντικό εύρημα.
- Ευέλικτη συνεργασία μεταξύ των εναέριων και υπόγειων δικτύων MT/BPL μπορεί να επιτευχθεί με εγκατάσταση επαναληπτών σε κατάλληλες θέσεις κυρίως του υπογείου δικτύου MT και με κατάλληλη εναλλαγή της μετάδοσης MT/BPL μεταξύ των εναέριων και υπόγειων συστημάτων MT/BPL.

Ολοκληρώνοντας την ανάλυση της υπόγειας μετάδοσης MT/BPL πρέπει να επισημανθούν τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

 Οι τριφασικές υπόγειες γραμμές μεταφοράς ΜΤ με κοινή θωράκιση και οπλισμό υποστηρίζουν πέντε ρυθμούς, δηλαδή τον κοινό ρυθμό, δύο διαφορικούς ρυθμούς και δύο ρυθμούς-φάντασμα. Εφόσον η θωράκιση και ο οπλισμός είναι γειωμένοι –που είναι η συνήθης περίπτωση στο υπόγειο δίκτυο MT [328], [329]–, οι δύο ρυθμοί-φάντασμα δεν υπάρχουν. Στην περίπτωση γραμμών με υψηλές διηλεκτρικές απώλειες (όπως οι γραμμές μεταφοράς PILC και μερικά EPR διηλεκτρικά), οι συντελεστές εξασθένησης των υπόλοιπων τριών ρυθμών εμφανίζουν την ίδια φασματική συμπεριφορά. Επομένως, η συνολική χωρητικότητα των υπόγειων διαύλων MT/BPL είναι ανεξάρτητη του τρόπου έγχυσης του σήματος BPL στις υπόγειες γραμμές μεταφοράς MT, δηλαδή του πώς κατανέμεται η εγχυόμενη ισχύς στους τρεις ρυθμούς διάδοσης.

- Η μετάδοση BPL μέσω του υπόγειου δικτύου MT εμφανίζει βαθυπερατή φασματική συμπεριφορά που περιορίζει το εκμεταλλεύσιμο εύρος ζώνης BPL μέχρι μια ορισμένη συχνότητα κορεσμού της χωρητικότητας.
- Δεδομένου ότι οι υπόγειες γραμμές μεταφοράς είναι θαμμένες και θωρακισμένες, η μετάδοση MT/BPL δεν παρεμβάλλει τοπικά αδειοδοτημένες ασύρματες υπηρεσίες. Για το λόγο αυτό, οι κανονισμοί προστασίας από EMI προβλέπουν προστασία κυρίως από HM διαρροή στα σημεία έγχυσης. Κατά συνέπεια, τα όρια IPSD για τα υπόγεια δίκτυα MT/BPL είναι σημαντικά υψηλότερα από εκείνα που προβλέπονται για την εναέρια μετάδοση MT/BPL.

Σύγκριση μεταξύ Υπόγειας και Εναέριας Μετάδοσης MT/BPL

Με βάση τα αποτελέσματα που αφορούν τη μετάδοση MT/BPL τόσο μέσω εναέριων όσο και μέσω υπόγειων δικτύων προέκυψαν τα εξής:

- Τόσο οι υπόγειοι όσο και οι εναέριοι δίαυλοι MT/BPL ταξινομούνται σε τρεις κατηγορίες: κακοί δίαυλοι που παρουσιάζουν βαθιές φασματικές αιχμές, καλοί δίαυλοι που εμφανίζουν ρηχές φασματικές αιχμές και δίαυλοι LOS που δεν εμφανίζουν φασματικές αιχμές. Η εναέρια και η υπόγεια μετάδοση MT/BPL σε αστικές περιοχές σε αρκετές περιπτώσεις ανήκει στην κατηγορία των κακών διαύλων ενώ η μετάδοση των MT/BPL σε προαστιακές, αγροτικές και σε αρκετές περιπτώσεις αστικών περιοχών ανήκει στην κατηγορία των καλών διαύλων.
- Αφού η εξασθένηση είναι ο κυρίαρχος επιβαρυντικός μηχανισμός της υπόγειας μετάδοσης MT/BPL, η πολυδιαδρομικότητα επηρεάζει λιγότερο την υπόγεια μετάδοση σε σχέση με την εναέρια μετάδοση.
- Η PSD του θορύβου που εμφανίζεται στις υπόγειες γραμμές μεταφοράς MT/BPL είναι σημαντικά χαμηλότερη αυτής των εναέριων γραμμών μεταφοράς.

- Τα όρια IPSD που προβλέπονται για την υπόγεια μετάδοση MT/BPL είναι σημαντικά χαλαρότερα (υψηλότερα) από εκείνα που προβλέπονται για την εναέρια μετάδοση MT/BPL.
- Τα χαλαρότερα όρια IPSD και η χαμηλότερη PSD του θορύβου που χαρακτηρίζουν τους υπόγειους διαύλους MT/BPL αντισταθμίζουν την εξαιρετικά υψηλή εξασθένησή τους καθιστώντας τη χωρητικότητα των υπόγειων διαύλων MT/BPL μέσου μήκους συγκρίσιμη με τη χωρητικότητα που επιτυγχάνεται από εναέριους διαύλους MT/BPL μέσου μήκους.

Εσωτερική Λειτουργικότητα μεταξύ Υπόγειας και Εναέριας Μετάδοσης ΜΤ/ΒΡL

Εκτός από τη διαλειτουργικότητά της (interoperability) με άλλες ευρυζωνικές τεχνολογίες –ενσύρματες όπως είναι οι οπτικές ίνες και η τεχνολογία DSL αλλά και ασύρματες όπως το WiFi και WiMax– [10], [11], [39], [76], η τεχνολογία MT/BPL πρέπει να εξεταστεί και ως προς την εσωτερική λειτουργικότητα (intraoperability) σε πρώτη φάση μεταξύ των υπόγειων και εναέριων εναλλακτικών εκδοχών της αλλά και σε δεύτερη φάση με τις άλλες εκδοχές BPL για την αξιοποίηση των δικτύων XT και YT [36]-[38], [46], [65], [134], [144], [145], [177], [180], [203], [260], [336], [337], [343], [352]-[362].

Η εσωτερική λειτουργικότητα MT/BPL αφορά τη δυνατότητα συνεργασίας των υπόγειων και εναέριων συστημάτων MT/BPL (intraoperate). Με βάση τα αποτελέσματα της διατριβής, η εσωτερική λειτουργικότητα μεταξύ συστημάτων MT/BPL φαίνεται εφικτή εξαιτίας των συγκρίσιμων χωρητικοτήτων που επιτυγχάνονται από εναέριους και υπόγειους διαύλους MT/BPL μέσου μήκους. Η εσωτερική λειτουργικότητα κρίνεται εξαιρετικά χρήσιμη αφού θα επιτρέψει ευελιξία όσον αφορά στην ενσωμάτωση διαφορετικών τεχνολογιών πρόσβασης BPL. Για να είναι εφικτή η ενσωμάτωση αυτή πρέπει να βεβαιωθούν οι συμβατές συχνότητες, ο εξοπλισμός και η σηματοδοσία, τα επαρκή επίπεδα IPSD, η περιοχή κάλυψης και η ικανότητα εξέλιξης/επέκτασης του συστήματος. Η μελέτη της εσωτερικής λειτουργικότητας των συστημάτων MT/BPL πρέπει να βασιστεί στους διάφορους παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση των συστημάτων [363]-[365]. Η χωρητικότητα των εναέριων συστημάτων MT/BPL επηρεάζεται κυρίως από τα χαμηλά όρια IPSD [165] ενώ η χωρητικότητα των υπόγειων συστημάτων MT/BPL επηρεάζεται κυρίως από την εξαιρετικά υψηλή εξασθένηση [183], [366].

7.5 Συμπεράσματα

Αρχικά, μελετήθηκαν τα χαρακτηριστικά μετάδοσης εναέριων τριφασικών γραμμών μεταφοράς MT/BPL. Η ικανότητα ευρυζωνικής μετάδοσης των δικτύων αυτών εξαρτάται από τις φυσικές ιδιότητες των χρησιμοποιούμενων καλωδίων, την από-άκρο-σε-άκρο απόσταση, το πλήθος και το ηλεκτρικό μήκος των διακλαδώσεων που συναντώνται. Οι παράγοντες αυτοί καθορίζουν το αξιοποιήσιμο εύρος ζώνης, τη θέση των επαναληπτών και τα κατώφλια που σχετίζονται με την εφαρμογή της τεχνικής OFDM και άλλων σχημάτων κατανομής πόρων. Διαπιστώθηκε ότι η χωρητικότητα των εναέριων δικτύων MT/BPL εξαρτάται δραστικά από τα τοπολογικά χαρακτηριστικά του ενεργειακού δικτύου, τη σύζευξη του σήματος BPL στις γραμμές μεταφοράς και, κυρίως, τους κανονισμούς EMI που διέπουν τις εκπομπές BPL. Προτάθηκε η χρήση προσαρμοστικών μασκών ισχύος για να προστατευθούν σε τοπική βάση οι πρωτεύουσες υπηρεσίες. Η χρήση μασκών ισχύος συνδυαζόμενη με μικρή χαλάρωση των ορίων EMI μπορεί να συμβάλει στην επίτευξη υψηλής χωρητικότητας από τα εναέρια δίκτυα MT/BPL.

Στη συνέχεια, μελετήθηκαν τα χαρακτηριστικά μετάδοσης τριφασικών υπόγειων δικτύων MT/BPL, η χωρητικότητα των οποίων συγκρίθηκε με εκείνη των εναέριων. Με βάση τη φασματική συμπεριφορά τους, τόσο οι εναέριοι όσο και οι υπόγειοι δίαυλοι MT/BPL μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις κατηγορίες: LOS χωρίς φασματικές αιχμές, καλούς διαύλους με ρηχές φασματικές αιχμές και κακούς διαύλους που εμφανίζουν έντονες φασματικές αιχμές. Λόγω της εξαιρετικά υψηλής εξασθένησης των υπόγειων γραμμών μεταφοράς MT, η απόσταση είναι ο κύριος καθοριστικός παράγοντας της ποιότητας μετάδοσης των υπόγειων διαύλων MT/BPL και όχι η πολυδιαδρομικότητα. Πάντως, η ισχυρή εξασθένηση των υπόγειων γραμμών μεταφοράς αντισταθμίζεται από τη χαμηλότερη PSD του θορύβου και τους χαλαρότερους περιορισμούς ΕΜΙ, με αποτέλεσμα τα υπόγεια δίκτυα MT/BPL να μπορούν να συνεργάζονται ικανοποιητικά με τα αντίστοιχα εναέρια.

7.6 Μελλοντική Έρευνα

Η διδακτορική αυτή διατριβή μπορεί να περιγραφεί υπό μορφή δομικών στοιχείων όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 7.24.

Με βάση το Σχήμα 7.24, ανακύπτουν τα ζητήματα που σχετίζονται με τη μελλοντική έρευνα. Αυτά περιλαμβάνουν:



Σχήμα 7.24: Η διδακτορική διατριβή σε μορφή δομικών στοιχείων και μελλοντική έρευνα.

- Προσδιορισμός των ορίων με νέα αντίληψη μακράν του προστατευτικού μοντέλου σταθερής κατανομής/συνεχούς προστασίας-Διοικητικές αποφάσειςνέες προσαρμοστικές τεχνικές σε τοπικό και real time (με χρήση διαδικτύου) επίπεδο.
- 2. Ακριβέστερα μοντέλα θορύβου.
- 3. Μεγιστοποίηση της φασματικής απόδοσης και της σωρευτικής χωρητικότητας που θα επιτυγχάνουν τα πραγματικά συστήματα MT/BPL με στόχο να προσεγγιστούν τα θεωρητικά όρια που προβλέπει η θεωρία του Shannon και υπολογίστηκαν στη διατριβή (Χρήση κατάλληλων σχημάτων διαμόρφωσης και κωδικοποίησης, κατανομή υποκαναλιών από την OFDM, προσαρμοστική διαμόρφωση και κωδικοποίηση κλπ).

- Επίπτωση των χαρακτηριστικών του διαύλου MT/BPL στη λειτουργία του πρωτοκόλλου TCP/IP (Transmission Control Protocol/Internet Protocol).
- 5. Βελτιστοποίηση των χαρακτηριστικών μετάδοσης MT/BPL, ακριβέστερα μοντέλα διάδοσης και πολυδιαδρομικότητας.
- 6. Η τεχνολογία ΜΙΜΟ μπορεί επίσης να εφαρμοστεί στις γραμμές ΜΤ/ΒΡL επιτρέποντας την ξεχωριστή εκμετάλλευση των αγωγών είτε της εναέριας είτε της υπόγειας διάταξης [363], [364], [367]. Ωστόσο, η μέθοδος ΜΙΜΟ/ΜΤ/ΒΡL δεν θα έχει νόημα αν η έγχυση ισχύος περιορίζεται από τα χαμηλότερα όρια IPSD που αποτρέπουν την πλήρη εκμετάλλευση των ρυθμών δεδομένων της τάξης των Gbps.



ПАРАРТНМАТА

Π.1.1 Περιγραφή των Στοιχείων Ηλεκτρικού Δικτύου ΜΤ

Στο Παράρτημα 1.1 περιγράφονται τα διάφορα στοιχεία που απαντώνται σε ηλεκτρικά δίκτυα MT και σχετίζονται με την ευρυζωνική μετάδοση BPL [2]-[16].

Υποσταθμοί

Υποσταθμός είναι το τμήμα ενός δικτύου μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας όπου η τάση μετασχηματίζεται από χαμηλές σε υψηλές τιμές (εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας) και αντίστροφα χρησιμοποιώντας τους μετασχηματιστές. Ένας υποσταθμός είναι μια σύνθετη διάταξη μεταγωγής (switching), ελέγχου, ανύψωσης και υποβιβασμού της τάσης. Ένας υποσταθμός μετατρέπει την ΥΥΤ (132-400kV) ή την ΥΤ (30-66kV) σε MT (11-20kV) και αντίστροφα [368], [369]. Στα Σχήματα Π.1.1 και Π.1.2 παρουσιάζονται παραδείγματα υποσταθμών.

Ο μετασχηματισμός μπορεί να πραγματοποιηθεί διαδοχικά σε διάφορα στάδια και σε διαφορετικά επίπεδα τάσης, που αρχίζουν από τον υποσταθμό παραγωγής όπου η τάση αυξάνεται για λόγους μεταφοράς και επιτυγχάνουν σταδιακό υποβιβασμό στο επίπεδο της τάσης που κατά περίπτωση απαιτείται από τους πελάτες (κατοικίες, εργοστάσια, βιοτεχνίες κτλ).

Όλοι οι υποσταθμοί περιλαμβάνουν κατά κύριο λόγο μετασχηματιστές. Στη συνέχεια γίνεται αναλυτική παρουσίαση των μετασχηματιστών MT/XT (MV/LV transformers).

Ένας υποσταθμός που έχει μετασχηματιστή ανύψωσης (step-up transformer) αυξάνει την τάση μειώνοντας παράλληλα το ρεύμα. Ένας μετασχηματιστής υποβιβασμού (step-down transformer) μειώνει την τάση ενώ αυξάνει παράλληλα το ρεύμα.



Σχήμα Π.1.1: Υποσταθμός.



Σχήμα Π.1.2: Παράδειγμα μετασχηματιστών από ΥΤ σε ΜΤ.

Από λειτουργική άποψη, οι υποσταθμοί μπορούν να ταξινομηθούν στις εξής κατηγορίες:

- Ο υποσταθμός παραγωγής ενσωματώνει στο δίκτυο την ηλεκτρική ενέργεια που συλλέγει από τις εγκαταστάσεις παραγωγής μέσω των αντίστοιχων μετασχηματιστών.
- Ο υποσταθμός μεταφοράς λειτουργεί ως κόμβος διασύνδεσης ενός μεταβλητού αριθμού γραμμών μεταφοράς.
- Ο υποσταθμός διανομής υποβιβάζει την τάση από το επίπεδο μεταφοράς σε επίπεδα κατάλληλα για τοπική διανομή.
Οι υποσταθμοί σχεδιάζονται για να υλοποιήσουν με ολοκληρωμένο τρόπο ένα συνδυασμό των ακόλουθων λειτουργιών:

- Αλλαγή τάσης από ένα επίπεδο σε ένα άλλο.
- Ρύθμιση της τάσης για την αντιστάθμιση των μεταβολών της στο σύστημα.
- Κυκλώματα μεταφοράς και μεταγωγής σε και από το δίκτυο. Έχουν επίσης διακόπτες για έκτακτες ανάγκες οι οποίες απαιτούν τη διακοπή ή τον αναπροσανατολισμό της ισχύος.
- Εφαρμογές μέτρησης ηλεκτρικής ενέργειας και δυνατότητα παροχής υπηρεσιών δικτύου.
- Έγχυση σημάτων επικοινωνίας στο δίκτυο.
- Παροχή προστασίας από αστραπές και άλλες ηλεκτρικές εκκενώσεις.
- Σύνδεση των ηλεκτρικών εγκαταστάσεων παραγωγής με το σύστημα.
- Δυνατότητα διασύνδεσης μεταξύ των ηλεκτρικών συστημάτων περισσότερων από μιας εγκαταστάσεων παραγωγής και του δικτύου.
- Παροχή αυτόματης αποσύνδεσης των κυκλωμάτων.

Συμπερασματικά, οι λειτουργίες ενός ηλεκτρικού υποσταθμού μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις ευρύτερες κατηγορίες:

- Ασφάλεια: χωρισμός από το γενικό σύστημα εκείνων των τμημάτων όπου έχει εμφανιστεί ηλεκτρικό ελάττωμα.
- Λειτουργία:
 - βελτιστοποίηση λειτουργίας του ηλεκτρικού δικτύου διανομής με κριτήριο την ασφάλεια και την ελαχιστοποίηση των ενεργειακών απωλειών.
 - Απομόνωση τμημάτων του δικτύου ώστε να εκτελούνται οι απαραίτητες λειτουργίες συντήρησης του υπάρχοντος εξοπλισμού ή εγκατάστασης νέου εξοπλισμού.
- Διασύνδεση: διασύνδεση δύο ηλεκτρικών δικτύων με διαφορετικές τάσεις μέσω μετασχηματιστών ισχύος, σύνδεση των γεννητριών με το δίκτυο διανομής και διασύνδεση των διαφόρων γραμμών με το ίδιο επίπεδο τάσης.

Οι υποσταθμοί (συνήθως) δεν έχουν γεννήτριες, αν και εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας διαθέτουν, ενδεχομένως, υποσταθμό σε κοντινή απόσταση. Ένας τυπικός υποσταθμός περιέχει δομές τερματισμού γραμμών, μηχανισμό διανομής ΥΤ, ένα ή περισσότερους μετασχηματιστές ισχύος, μηχανισμό διανομής ΧΤ, προστασία από

υπερτάσεις, διακόπτες, συστήματα ελέγχου και συστήματα μέτρησης της ποιότητας. Σε ένα υποσταθμό υπάρχουν και άλλες συσκευές όπως πυκνωτές και ρυθμιστές τάσης. Αυτά τα στοιχεία εξοπλισμού συνδέονται συνήθως το ένα με το άλλο μέσω αγωγών. Στο Σχήμα Π.1.3 παρουσιάζεται η κοινή εμφάνιση αυτών των στοιχείων εξοπλισμού.

Οι ηλεκτρικοί υποσταθμοί μπορούν να βρεθούν σε διαφορετικές τοποθεσίες σε αντιστοιχία με την τοπολογία του δικτύου και τις ανάγκες που εμφανίζονται κατά περίπτωση. Μπορούν να εγκατασταθούν στην επιφάνεια της γης σε περιφραγμένα κουβούκλια, σε ειδικής χρήσης κτίρια, σε υπόγειες θέσεις, σε πυλώνες (εναέριοι υποσταθμοί) ή σε περιοχές κοντά σε κτίρια όπου γίνονται συντηρήσεις.

Τα σύγχρονα συστήματα ηλεκτρικής ισχύος χρησιμοποιούν τους μετασχηματιστές για την μετατροπή της ηλεκτρικής τάσης στα διαφορετικά επίπεδα που εκάστοτε απαιτούνται. Κάθε στάδιο του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας λειτουργεί σε διαφορετικά επίπεδα τάσης. Σε ένα τυπικό σύστημα, οι γεννήτριες του σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος τροφοδοτούν το σύστημα με τάση που κυμαίνεται από 1000V έως 26000V. Οι μετασχηματιστές ανεβάζουν την τάση αυτή σε τιμές που κυμαίνονται από 138kV έως 765kV προκειμένου για γραμμές μεταφοράς μεγάλων αποστάσεων επειδή οι υψηλότερες τάσεις μπορούν να μεταδοθούν σε μεγάλες αποστάσεων επειδή οι υψηλότερες τάσεις μπορούν να μεταδοθούν σε μεγάλες μετασχηματιστεί σε επίπεδα τάσης από 69kV έως 138kV για την περαιτέρω μετασχηματιστεί συν την τάση σε ένα επίπεδο διανομής. Στη συνέχεια, διαδοχικοί μετασχηματιστές μετασχηματιστές μετασχηματιστές μετασχηματιστές μετασχηματιστές μετασχηματιστές μετασχηματιστές μετασχηματιστές μετασχηματιστές συ σύστημα διανομής. Στη συνέχεια, διαδοχικοί μετασχηματιστές μετασχηματιστές μετασχηματιστές τάσεις μετασχηματιστές του την τάση σε ένα επίπεδο διανομής της τάζης των 2.4kV, 4.16kV, 15kV, 27kV ή 33kV. Τέλος, η τάση μετασχηματίζεται εκ νέου στους υποσταθμούς μετασχηματιστών στο επίπεδο τάσης από 120V-480V.

Οι υποσταθμοί ταξινομούνται σε τρεις κύριες ομάδες, αν και υπάρχουν υποσταθμοί που αποτελούν συνδυασμό δύο ή περισσότερων τύπων.

 Υποσταθμός ανύψωσης τάσης. Οι γεννήτριες παράγουν συνήθως την ηλεκτρική ενέργεια υπό ΧΤ. Για να μεταφερθεί η ηλεκτρική ενέργεια με μικρότερες απώλειες ισχύος σε μεγάλες αποστάσεις μέσω των γραμμών μεταφοράς, η ΧΤ της γεννήτριας αυξάνεται στην υψηλότερη τάση μεταφοράς μέσω ενός μετασχηματιστή ανύψωσης τάσης. Ένας υποσταθμός ανύψωσης τάσης λαμβάνει την ηλεκτρική ενέργεια από το σημείο παραγωγής και με

Παραρτήματα



Σχήμα Π.1.3: Υποσταθμός [2].

χρήση ενός μεγάλου μετασχηματιστή ισχύος ανυψώνει το επίπεδο τάσης για τη μεταφορά της σε απομακρυσμένες περιοχές. Σε ένα υποσταθμό ανύψωσης τάσης, μια γραμμή μεταφοράς (transmission bus) χρησιμοποιείται για τη διανομή ισχύος σε μια ή περισσότερες γραμμές μεταφοράς. Όπως ήδη αναφέρθηκε, σε ένα υποσταθμό υπάρχουν διακόπτες ασφαλείας (circuit breaker) που χρησιμοποιούνται όταν έκτακτες ανάγκες απαιτούν τη διακοπή ή τον αναπροσανατολισμό της ισχύος. Η προστασία αυτή είναι σε θέση να διατηρεί τα ρεύματα που δημιουργούνται στο δίκτυο στις κανονικές τους τιμές όταν το σύστημα βρίσκεται είτε σε κανονική κατάσταση είτε σε κατάσταση έκτακτης ανάγκης. Όταν εμφανίζεται πρόβλημα, ο διακόπτης συνδέεται με τον προστατευτικό εξοπλισμό (protective equipment) που έχει ως αποστολή να λειτουργήσει πέραν του διακόπτη με την κατάλληλη ταχύτητα και ασφάλεια. Επιπλέον, ο προστατευτικός εξοπλισμός ελέγχει το σύστημα ισχύος μέσω μετρήσεων στους μετασχηματιστές. Προαιρετικά, διακόπτης μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως στοιχείο επιλογέων ράβδων (selector element of bars) ή ως στοιχείο παράκαμψης (bypass element) για να επιτραπεί με αυτόν τον τρόπο η συνοχή του κυκλώματος όταν οποιοδήποτε στοιχείο, συνήθως διακόπτης, τίθεται εκτός λειτουργίας. Συνήθως, υπάρχει ένα σύστημα ελέγχου και μια συσκευή αλληλοσύνδεσης (μανταλωτής) για την εξασφάλιση της ασφάλειας των διαδικασιών. Επιπλέον, ένα σύστημα επικοινωνιών επιτρέπει τη διαχείριση (centralized management) συγκεντρωτική και επίβλεψη.

Παραδείγματα υποσταθμών υποβιβασμού παρουσιάζονται στο Σχήμα Π.1.4 και στο Σχήμα Π.1.5.

Υποσταθμοί υποβιβασμού τάσης. Οι υποσταθμοί αυτοί απαντώνται στα σημεία μετατροπής τάσης ενός ηλεκτρικού δικτύου. Συνδέουν τα διαφορετικά τμήματα ενός πλέγματος και λειτουργούν στην ουσία ως πηγή ισχύος για τις γραμμές χαμηλότερης τάσης ή τις γραμμές διανομής. Ο υποσταθμός υποβιβασμού τάσης υποβιβάζει την τάση μεταφοράς σε τάση χαμηλότερου επιπέδου. Οι γραμμές χαμηλότερης τάσης τάσης μπορούν έπειτα να χρησιμεύσουν ως πηγή για τους υποσταθμούς διανομής. Σε ορισμένες περιπτώσεις, η μεταφερόμενη ισχύς δεν τροφοδοτείται στις γραμμές χαμηλότερης τάσης αλλά προωθείται σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις. Διαφορετικά, η ισχύς οδεύει



Σχήμα Π.1.4: Υποσταθμός ανύψωσης τάσης.



Σχήμα Π.1.5: Υποσταθμός ανύψωσης τάσης και σύνδεσης με τις γραμμές μεταφοράς.

σε ένα υποσταθμό διανομής. Παράδειγμα υποσταθμού υποβιβασμού τάσης παρουσιάζεται στο Σχήμα Π.1.6.

Υποσταθμοί διανομής. Οι εγκαταστάσεις αυτές βρίσκονται πλησίον των τελικών χρηστών. Λόγω του υψηλού επιπέδου τάσης, η ισχύς δεν μπορεί να διανεμηθεί άμεσα σε γειτονιές και επιχειρήσεις αλλά απαιτούνται μετασχηματιστές υποσταθμών διανομής που μειώνουν την τάση σε χαμηλότερα επίπεδα ώστε να μπορεί να διανεμηθεί σε κατοικίες, μικρούς και μέσους βιομηχανικούς πελάτες. Οι τυπικές τάσεις διανομής ποικίλλουν από 4kV έως 35kV. Παραδείγματα υποσταθμών διανομής παρουσιάζονται στο Σχήμα Π.1.7.

Οι ηλεκτρικοί υποσταθμοί είναι οι σημαντικότερες εγκαταστάσεις σε ένα ηλεκτρικό δίκτυο διανομής. Ένας υποσταθμός μπορεί να τροφοδοτήσει διάφορους υποσταθμούς μετασχηματιστών στη ΜΤ έκαστος των οποίων μπορεί στη συνέχεια να τροφοδοτήσει εκατοντάδες τελικούς χρήστες. Συνήθως οι εγκαταστάσεις αυτές ελέγγονται από απόσταση εφόσον διατίθενται αξιόπιστοι τρόποι μετάδοσης σήματος για τέτοιου είδους τηλεχειρισμούς όπως οπτική ίνα, ασύρματη ζεύξη ή άλλες παραδοσιακές τεχνολογίες. Επομένως, οι θέσεις αυτές είναι κατάλληλες να αποτελέσουν σημεία πρόσβασης BPL στο δίκτυο κορμού. Με αυτόν, λοιπόν, τον τρόπο μπορεί να δημιουργηθεί ένα δίκτυο μετάδοσης BPL επί του ηλεκτρικού δικτύου ΜΤ. Κατά συνέπεια, οι διατάξεις έγχυσης σήματος πρέπει να τοποθετηθούν στα κουβούκλια MT εφόσον πρόκειται για επίγεια ή υπόγεια συστήματα ή στους στύλους όταν πρόκειται για εναέριους υποσταθμούς. Η πρόσφατη ανάπτυξη της τεχνολογίας παρέχει τη δυνατότητα μετατροπής του συστήματος παροχής ηλεκτρικής ενέργειας από ένα δίκτυο μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας σε ένα εύχρηστο, πολλαπλών χρήσεων μέσο μετάδοσης ηλεκτρικής ενέργειας και τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών. Συγκεκριμένα, μέσω του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας μπορούν να πραγματοποιηθούν:

- Πρόσβαση στο Διαδίκτυο.
- Εφαρμογές αυτόματης μέτρησης και τιμολόγησης (ηλεκτρικής ενέργειας, φυσικού αερίου, ύδρευσης κ.α).
- Δυνατότητα ασύρματης σύνδεσης μέσω ασύρματων πρωτοκόλλων επικοινωνιών.
- Διαχείριση φορτίου, αυτοματισμοί διανομής, έλεγχος του δικτύου.



Σχήμα Π.1.6: Υποσταθμός υποβιβασμού τάσης.



Σχήμα Π.1.7: Υποσταθμός διανομής.

- Προστασία, βελτιστοποίηση της λειτουργίας του συστήματος μεταφοράς και διανομής.
- Δυνατότητα παροχής υπηρεσιών έξυπνου δικτύου (smart grid application).

Υποσταθμοί Μετασχηματιστών

Οι υποσταθμοί μετασχηματιστών είναι οι εγκαταστάσεις του δικτύου MT όπου το ηλεκτρικό σήμα υποβιβάζεται στη XT (<1kV) μέσω των μετασχηματιστών. Από τον υποσταθμό μετασχηματιστών εκκινούν τα ηλεκτρικά πλέγματα της XT που καταλήγουν στους τελικούς χρήστες [370]-[372].

Η μελέτη και η κατανόηση των υποσταθμών μετασχηματιστών και των στοιχείων τους είναι βασική προϋπόθεση για την εγκατάσταση δικτύων BPL στη MT και τη XT. Στο Σχήμα Π.1.8 παρουσιάζεται το γενικό ηλεκτρικό σχέδιο ενός υποσταθμού μετασχηματιστών. Τα κύρια μέρη ενός υποσταθμού μετασχηματιστών όπως παρουσιάζονται στο Σχήμα Π.1.8 είναι:



Σχήμα Π.1.8: Διάγραμμα υποσταθμών μετασχηματιστών.

- Γραμμές ΜΤ. Είναι ηλεκτρικές γραμμές που υποστηρίζουν τις συγκεκριμένες τάσεις και ρεύματα που ξεκινούν από ένα υποσταθμό και παραδίδουν την ηλεκτρική ενέργεια στους υποσταθμούς μετασχηματιστών.
- Εξοπλισμός μεταγωγής ή μηχανισμοί διανομής ή πλαίσια MT (switchgear ή MV panel). Είναι συσκευές που απομονώνουν ή διασυνδέουν τα διαφορετικά στοιχεία διανομής όπως μετασχηματιστές και γραμμές MT.
- Μετασχηματιστής ΜΤ/ΧΤ. Είναι η συσκευή που υποβιβάζει την τάση μιας γραμμής διανομής ηλεκτρικής ισχύος (2.4–35kV) σε χαμηλότερες τάσεις (120-480V).
- Πίνακας χειρισμού XT ή κέντρο XT (LV switchboard). Πλαίσιο που μπορεί να διανείμει την ηλεκτρική ισχύ από το δευτερεύον πηνίο/μετασχηματιστή/τύλιγμα (secondary transformer) στους διαφορετικούς τροφοδότες της XT. Το κέντρο XT μπορεί να έχει διακόπτες και άλλες προστατευτικές συσκευές.
- Σύνδεση τροφοδότησης ΧΤ ή τροφοδότες ΧΤ (LV feeders). Ηλεκτρικές γραμμές που υποστηρίζουν συγκεκριμένες τάσεις και ρεύματα τα οποία παραδίδουν την ηλεκτρική ισχύ στους πελάτες.

Οι υποσταθμοί μετασχηματιστών μπορούν να βρεθούν σε διάφορες θέσεις ανάλογα με την τοπολογία του δικτύου και τις εμφανιζόμενες ανάγκες σε κάθε περίπτωση. Οι υποσταθμοί μετασχηματιστών μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο κύριες ομάδες ανάλογα με τη θέση του μετασχηματιστή MT/XT:

- Εσωτερικοί και
- Υπαίθριοι.

Οι συνήθεις εσωτερικές θέσεις όπου μπορεί να τοποθετηθεί ένας υποσταθμός μετασχηματιστών είναι:

 Στο κουβούκλιο (επιφανειακού τύπου). Στην περίπτωση αυτή, οι γραμμές ΜΤ μπορούν να φθάσουν στους υποσταθμούς μετασχηματιστών είτε μέσω εναέριων είτε μέσω υπόγειων γραμμών. Οι δύο πιθανοί τρόποι παρουσιάζονται στο Σχήμα Π.1.9 και στο Σχήμα Π.1.10 αντίστοιχα.



Σχήμα Π.1.9: Εναέριες γραμμές ΜΤ.



Σχήμα Π.1.10: Υπόγειες γραμμές ΜΤ.

Και στις δύο περιπτώσεις, οι εσωτερικές δομές είναι παρόμοιες (οι μόνες διαφορές είναι στο σημείο εισόδων των γραμμών της ΜΤ και των ενισχυτικών στοιχείων των) όπως απεικονίζεται στο Σχήμα Π.1.11.

 Θαμμένος (υπόγειος). Ο υποσταθμός μετασχηματιστών αυτού του τύπου τροφοδοτείται από υπόγειες γραμμές ΜΤ. Στο Σχήμα Π.1.12 παρουσιάζεται η συνηθέστερη μορφή τέτοιου υποσταθμού μετασχηματιστή.



Σχήμα Π.1.11: Εσωτερικές υπόγειες γραμμές ΜΤ και υποσταθμοί μετασχηματιστών κουβουκλίου.



Σχήμα Π.1.12: Υπόγειος υποσταθμός μετασχηματιστή.

Στο έδαφος ή στους χαμηλότερους ορόφους ενός κτιρίου. Οι υποσταθμοί μετασχηματιστών αυτοί είναι τοποθετημένοι στο ισόγειο ή στο υπόγειο ενός κτιρίου. Η δομή και η λειτουργία είναι οι ίδιες με αυτών των προηγούμενων περιπτώσεων. Υποσταθμός μετασχηματιστή αυτής της κατηγορίας παρουσιάζεται στο Σχήμα Π.1.13.

Είναι απαραίτητο να αναφερθεί η ύπαρξη ενός ειδικού είδους υποσταθμού μετασχηματιστών γνωστού ως σταθμός μετασχηματιστών φωλεάς (pad-mounted transformer station). Το κύριο χαρακτηριστικό γνώρισμά του είναι το γεγονός ότι συγκεντρώνονται διαφορετικές λειτουργικές ενότητες μέσα σε μια δομή. Επομένως, οι υποσταθμοί μετασχηματιστών αυτοί διαιρούνται σε τρεις περιοχές: Λειτουργία ΜΤ, λειτουργία ΧΤ και εσωτερικής περιοχής. Στο Σχήμα Π.1.14 παρουσιάζεται ένας σταθμός μετασχηματιστών φωλεάς.

Γενικά, οι εσωτερικοί υποσταθμοί μετασχηματιστών αποτελούνται από τα εξής στοιχεία:

- Κτίριο ή περίβολος όπου βρίσκεται ο υποσταθμός. Είναι το μέρος όπου βρίσκονται όλα τα στοιχεία που περιλαμβάνονται σε κάθε υποσταθμό μετασχηματιστών. Μπορεί να είναι είτε ένα κτίριο είτε μια προκατασκευασμένη κατασκευή.
- Μηχανισμοί διανομής ή πλαίσια ΜΤ. Οι διατάξεις αυτές αποτελούν τη διεπαφή μεταξύ των γραμμών ΜΤ και του μετασχηματιστή. Εκπληρώνουν δύο κύριες λειτουργίες: την προστασία και τη διασύνδεση γραμμών. Οι λειτουργίες της προστασίας συνδέουν, αποσυνδέουν και προστατεύουν το μετασχηματιστή, ενώ οι λειτουργίες της διασύνδεσης γραμμών χρησιμοποιούνται για να ενεργοποιήσουν τις γραμμές παραγωγής ή εισαγωγής ΜΤ στο κύκλωμα τροφοδοσίας του μετασχηματιστή. Το συνηθέστερο σύστημα μόνωσης που χρησιμοποιείται για την παραγωγή των πλαισίων ΜΤ είναι βασισμένο στο αέριο SF₆.
- Μετασχηματιστής MT/XT. Μετασχηματίζει τη MT στη XT.
- Κέντρο ΧΤ. Το κέντρο της ΧΤ είναι το στοιχείο που εγκαθίσταται μετά από το μετασχηματιστή και παρέχει τη ΧΤ, δηλαδή στην ουσία είναι ο τροφοδότης της ΧΤ στο σύστημα. Αποτελείται από μια σειρά οριζόντιων και κάθετων ράβδων (3 για τις φάσεις και 1 για ουδέτερο σε κάθε κατεύθυνση) έτσι ώστε η κάθετη λειτουργία των ράβδων να μπορεί να λάβει την ηλεκτρική ισχύ από το



Σχήμα Π.1.13: Υπόγειος μετασχηματιστής στο έδαφος.



Σχήμα Π.1.14: Σταθμός μετασχηματιστών φωλεάς.

μετασχηματιστή της MT και να τη διανείμει μέσω των οριζόντιων ράβδων στη XT.

Πλαίσια ΜΤ-διασύνδεση μετασχηματιστή. Σύνολο τριών αγωγών (ένα για κάθε φάση) 50mm² και τύπου HEPRZ1 (η απομόνωση είναι από ξηρό

αιθυλοπροπυλένιο και η κάλυψη είναι από πολυολεφίν) που συνδέουν τα πλαίσια MT με την εισαγωγή των μετασχηματιστών.

- Μετασχηματιστής-διασύνδεσης κέντρου ΧΤ. Σύνολο τεσσάρων ενιαίων αγωγών πόλων (τρεις φάσεις και ένας ουδέτερος) 240mm², με τον αγωγό τύπου αλουμινίου RV (η απομόνωση είναι από πολυαιθυλένιο και το περίβλημα είναι από PVC (PolyVinyl Chloride)) για τάσεις 0.6/1kV.
- Εγκαταστάσεις γειώσεων. Υπάρχουν δύο είδη τέτοιων εγκαταστάσεων:
 - Εγκατάσταση προστασίας (Protection Installation ή PS): Στην εγκατάσταση αυτή διασυνδέονται τα μεταλλικά μέρη κάθε στοιχείου στην εγκατάσταση προστασίας, όπως π.χ. η δεξαμενή μετασχηματιστών (transformer tank), το περίβλημα των κέντρων XT (LV switchboard cover), τα πλαίσια MT (MV panel), πλαίσια MT-αγωγός διασύνδεσης μετασχηματιστών HEPRZ1 (MV panel-transformer interconnection cable).
 - Εγκατάσταση υπηρεσιών: Η ουδέτερη έξοδος πρέπει να συνδεθεί με τη γείωση υπηρεσιών.

Πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι οι διάφορες γραμμές ΧΤ που προέρχονται από τους υποσταθμούς μετασχηματιστών είναι αυτές που τελικά μεταφέρουν την ηλεκτρική ενέργεια στα κτίρια περί το μετασχηματιστή.

Από την άλλη πλευρά, οι συνηθέστερες υπαίθριες θέσεις είναι:

- Σε στύλο. Στο Σχήμα Π.1.15 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα αυτού του είδους υποσταθμού μετασχηματιστών. Στο Σχήμα Π.1.16 παρουσιάζεται η τυπική δομή αυτού του είδους υποσταθμού μετασχηματιστών.
- Συσκευασμένος υποσταθμός μετασχηματιστών (packaged transformer substation). Η υπαίθρια συσκευασία υποσταθμού μετασχηματιστών μπορεί να θεωρηθεί ως ειδική περίπτωση επειδή μερικά στοιχεία είναι εσωτερικά ενώ άλλα είναι υπαίθρια, κυρίως ο μετασχηματιστής και ο πίνακας χειρισμού. Στο Σχήμα Π.1.17 παρουσιάζεται το γενικό σχέδιο ενός συσκευασμένου υποσταθμού μετασχηματιστή.



Σχήμα Π.1.15: Υποσταθμός μετασχηματιστή σε στύλο.



Σχήμα Π.1.16: Δομή υποσταθμού μετασχηματιστή σε στύλο.



Σχήμα Π.1.17: Συσκευασμένος υποσταθμός μετασχηματιστών.

Οι τοπολογίες MT και XT ρυθμίζουν την κύρια απόδοση και τα χαρακτηριστικά των υποσταθμών μετασχηματιστών που πρέπει να χρησιμοποιηθούν. Ο Πίνακας Π.1.1 συνοψίζει τα χαρακτηριστικά των δικτύων XT της Δυτικής Ευρώπης.

Χαρακτηριστικά	Πυκνοκατοικημένη περιοχή	Αραιοκατοικημένη περιοχή
	X	
Τύπος υποσταθμού	Υπόγεια ή στο ισόγειο ενός	Σε κουβούκλιο ή σε στύλο
μετασχηματιστή	κτιρίου	
Μετασχηματιστές ανά	2	1
υποσταθμό μετασχηματιστή		
Μέσος αριθμός καταναλωτών	250-320	100 (10-200)
ανά υποσταθμό		
μετασχηματιστή		
Τροφοδότες ΧΤ ανά	6-8	6-8
μετασχηματιστή		
Μέσο μήκος των γραμμών ΧΤ	150m	300m (100m-800m)
Τύπος γραμμής ΧΤ	Υπόγεια	Εναέρια
Καταναλωτές ανά μετρητή	10-25	1-4

Πίνακας Π.1.1: Κύρια χαρακτηριστικά των δικτύων XT της Δυτικής Ευρώπης.

Μετασχηματιστής ΜΤ/ΧΤ

Οι μετασχηματιστές MT/XT ή μετασχηματιστές διανομής υποβιβάζουν την τάση μιας γραμμής διανομής ισχύος που κυμαίνεται από 2.4 έως 35kV σε χαμηλότερες τάσεις που κυμαίνονται από 120V έως 480V και είναι κατάλληλες για την τροφοδοσία του εξοπλισμού πελατών. Το πρωτεύον πηνίο/τύλιγμα/μετασχηματιστής είναι το τύλιγμα που δέχεται την ισχύ και το δευτερεύον πηνίο/τύλιγμα/μετασχηματιστής είναι το τύλιγμα που παραδίδει την ισχύ [370]-[372].

Ένας μετασχηματιστής αποτελείται από δύο μέρη: ένα πυρήνα κατασκευασμένο από μαγνητικά διαπερατό υλικό και ένα αγωγό κατασκευασμένο από υλικό χαμηλής αντίστασης όπως ο χαλκός ή το αλουμίνιο. Ο αγωγός περιτυλίσσεται γύρω από τον πυρήνα με διαφορετικό λόγο σπειρών ανά πηνίο μετασχηματίζοντας το ρεύμα από τη μια πλευρά του μετασχηματιστή στην άλλη. Αυτή η διαδικασία απαιτεί ένα υγρό υλικό μόνωσης (ή τον αέρα για μικρότερους μετασχηματιστές) για να ψύχει και ταυτόχρονα να μονώνει τη διάταξη από το περιβάλλον.

Γενικά, οι μετασχηματιστές MT/XT μπορούν να ταξινομηθούν με τρία διαφορετικά κριτήρια:

- Τεχνολογία ψύξης,
- Σύνδεση και
- Θέση.

Η τεχνολογία ψύξης αναφέρεται στην τεχνολογία που χρησιμοποιείται για να ψύχει το μετασχηματιστή. Με κριτήριο το μέσο ψύξης, οι μετασχηματιστές μπορούν να ταξινομηθούν στους βυθισμένους σε υγρό (βλέπε Σχήμα Π.1.18) ή τους μετασχηματιστές ξηρού τύπου (βλέπε Σχήμα Π.1.19). Ένας μετασχηματιστής βυθισμένος σε υγρό διαθέτει σπείρες και πυρήνα βυθισμένους σε μονωτικό υγρό που συχνά είναι ένα ιδιαιτέρως καθαρό ορυκτέλαιο. Ένας μετασχηματιστής ξηρού τύπου διαθέτει πυρήνα και σπείρες τοποθετημένους στο εσωτερικό αέριου ή ξηρού μίγματος προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν η περιβαλλοντική μόλυνση και ο κίνδυνος πυρκαγιάς.

Η σύνδεση αναφέρεται στο πλήθος των φάσεων που παραδίδει ο μετασχηματιστής. Υπάρχουν μετασχηματιστές μιας (βλέπε Σχήμα Π.1.20) ή τριών φάσεων (βλέπε Σχήμα Π.1.21).



Σχήμα Π.1.18: Μετασχηματιστής βυθισμένος σε υγρό.



Σχήμα Π.1.19: Μετασχηματιστής ξηρού τύπου.



Σχήμα Π.1.20: Μετασχηματιστής μιας φάσης.



Σχήμα Π.1.21: Μετασχηματιστής τριών φάσεων.

Η θέση αναφέρεται στη θέση εγκατάστασης του μετασχηματιστή: υπερυψωμένος (βλέπε Σχήμα Π.1.22), επιφανειακός (βλέπε Σχήμα Π.1.23) ή υπόγειος (βλέπε Σχήμα Π.1.24).

Οι κυριότερες παράμετροι των μετασχηματιστών MT/XT είναι τα χαρακτηριστικά όρια σε kVA, τα χαρακτηριστικά όρια/προδιαγραφές σε τάση (voltage rating), το ποσοστό σύνθετης αντίστασης (percentage impedance), οι απώλειες, η πολικότητα, η συχνότητα, ο αριθμός φάσεων, οι διαστάσεις, το βάρος, το διάγραμμα σύνδεσης (connection diagram), η κατηγορία ψύξης (cooling class) και οι συνθήκες εργασίας (working conditions). Αναλυτικά οι παράμετροι ενός μετασχηματιστή MT/XT παρουσιάζονται στον Πίνακα Π.1.2.



Σχήμα Π.1.22: Υπερυψωμένος μετασχηματιστής.



Σχήμα Π.1.23: Επιφανειακός μετασχηματιστής.





Σχήμα Π.1.24: Υπόγειος μετασχηματιστής.

Παράμετροι	Σχόλια	
Χαρακτηριστικά όρια σε	kiloVolt-Ampere (kVA): μέτρο της φαινόμενης ισχύος παραγωγής του	
kVA	μετασχηματιστή. Οι τυποποιημένες προδιαγραφές μετασχηματιστών	
	διανομής σε kVA είναι: 5, 10, 15, 30, 37.5, 45, 50, 75, 100, 112.5, 150,	
	167, 225, 250, 300, 333, 500, 750, 1000, 1500, 2000 каl 2500.	
Χαρακτηριστικά όρια σε	Τάση πρωτεύοντος: η τάση στο πρωτεύον τύλιγμα του μετασχηματιστή	
τάση	διανομής. Προδιαγραφές τάσης πρωτεύοντος: 2.4-35kV	
	Τάση δευτερεύοντος: η τάση στο δευτερεύον τύλιγμα του	
	μετασχηματιστή διανομής. Προδιαγραφές τάσης δευτερεύοντος: 120-	
	480V	

Ποσοστό σύνθετης	Η σύνθετη αντίσταση μετασγηματιστή είναι ένα μέτρο της		
αντίστασης	αποδοτικότητας του μετασγηματιστή για να παρασγεθεί ένα		
19	$n\lambda$ εκτρονικό φορτίο (electronic load) με τη βέλτιστη ποιότητα ισχύος		
	(optimum power quality)		
Δπάλαιος			
Απωλειες	Οι απωλειες του μετασχηματιστη. Υπαρχουν συο τυποι: απωλειες		
	φορτιου (load losses) και απώλειες όχι φορτίου (no load losses).		
	Οι απώλειες φορτίου καλούνται επίσης απώλειες τυλίγματος. Οι		
	απώλειες φορτίου οφείλονται στη ροή ρεύματος μέσω των τυλιγμάτων		
	του μετασχηματιστή που παράγει θερμότητα μέσω της αντίστασης		
	τυλίγματος ίση με $I^2 R$.		
	Οι απώλειες όχι φορτίου/πυρήνα αντιστοιχούν στην ισχύ που απαιτείται		
	για να κρατηθεί ο πυρήνας ενεργοποιημένος και περιγράφουν μια		
	λειτουργία των υλικών πυρήνων. Τα δύο κύρια συστατικά των απωλειών		
	όχι φορτίου/πυρήνα είναι τα ρεύματα στροβίλου και η υστέρηση. Η		
	υστέρηση σχετίζεται με τη μνήμη ενός μαγνητικού υλικού. Οι απώλειες		
	ρευμάτων τύπου Eddy είναι μικρά ρεύματα που ρέουν στο υλικό του		
	πυρήνα.		
Πολικότητα	Προσθετική (additive) ή αφαιρετική (subtractive).		
Συχνότητα	50 ή 60Hz.		
Σύνδεση	Μονοφασικές συνδέσεις στο πρωτεύον: Γειωμένη Wye σύνδεση.		
	Μονοφασικές συνδέσεις στο δευτερεύον: δύο, τρεις ή τέσσερις		
	δευτεροβάθμιοι δακτύλιοι.		
	Τριφασικές: Αγείωτο Wye-Γειωμένο Wye, Γειωμένο Wye-Δέλτα,		
	Γειωμένο Wye-Γειωμένο Wye, τριφασικές συνδέσεις στο δευτερεύον-		
	Δέλτα, Τριφασικές συνδέσεις στο δευτερεύον-Wve.		
Διαστάσεις	Οι διαστάσεις του μετασχηματιστή (ΠxYxM).		
Βάρος	Το βάρος του μετασχηματιστή.		
Τάξη ψύξης	Το μονωτικό μέσο σε ένα μετασχηματιστή ενεονεί κατά ποώτο λόνο ως		
	μονωτής και κατά δεύτερο λόνο ως καλός ανωνός της θερμότητας		
	Η τυποποίηση ΙΕΕΕ C57.12.00-2000 καθορίζει κάθε σύστημα με ένα κώδικα τεσσάρων γραμμών για να χαρακτηριστεί η ψύξη:		
	Πρωτο γραμμα. Εσωτερικο μεσο ψυζης σε επαφη με τα τυλιγματα:		
	Ο ορυκτέλαιο ή συνθετικό μονωτικό υγρό με σημείο ανάφλεξης =		
	300°C.		
	Κ: μονωτικό υγρό με σημείο ανάφλεξης > 300°C.		

	L: μονωτικό υγρό χωρίς μετρήσιμο σημείο ανάφλεξης.	
	Δεύτερο γράμμα. Μηχανισμός κυκλοφορίας για το εσωτερικό μέσο	
	ψύξης:	
	Ν: φυσική ροή μεταγωγής θερμότητας (natural convection flow)	
	μέσω της ψύξης του εξοπλισμού και των τυλιγμάτων.	
	F: εξαναγκασμένη κυκλοφορία (forced circulation) μέσω εξοπλισμού	
	ψύξης, φυσική ροή των τυλιγμάτων.	
	D: εξαναγκασμένη κυκλοφορία μέσω εξοπλισμού ψύξης, που	
	κατευθύνεται από τον εξοπλισμό ψύξης προς τα τυλίγματα.	
	Τρίτο γράμμα. Εξωτερικό μέσο ψύξης:	
	Α: αέρας.	
	W: νερό.	
	Τέταρτο γράμμα. Μηχανισμός κυκλοφορίας για το εξωτερικό μέσο	
	ψύξης:	
	Ν: φυσική μεταφορά.	
	F: εξαναγκασμένη κυκλοφορία.	
Επίπεδο θορύβου	Ο ακουστικός θόρυβος που παράγεται από το μετασχηματιστή όταν	
	αυτός λειτουργεί υπό κανονικές συνθήκες.	
Θερμοκρα σ ιακά όρια	Η μέγιστη άνοδος της θερμοκρασίας των τυλιγμάτων υπό συγκεκριμένες	
	συνθήκες θερμοκρασίας περιβάλλοντος και όρια kVA έτσι ώστε να	
	λειτουργεί ο μετασχηματιστής.	

Πίνακας Π.1.2: Οι βασικές παράμετροι των μετασχηματιστών ΜΤ/ΧΤ.

Π.2.1 Αγόμενες και Ακτινοβολούμενες Διαταραχές από Εξοπλισμό BPL

Σύμφωνα με το πρότυπο EN 55022 (CISPR 22) [83], οι αγόμενες διαταραχές από εξοπλισμό ITE μετρούνται στην είσοδο τροφοδοσίας της συσκευής και επίσης στις τηλεπικοινωνιακές εισόδους της συσκευής. Οι συσκευές BPL όμως έχουν κοινή είσοδο (θύρα) για τη τροφοδοσία και τις επικοινωνίες. Αυτό οδηγεί στην ανάγκη ορισμού της θύρας πολλαπλών χρήσεων (Multi Purpose Port) σύμφωνα με το CISPR 22/1/89/CD [84] σύμφωνα με το οποίο οι αγόμενες διαταραχές θα μετρούνται στη θύρα πολλαπλών χρήσεων. Η μέτρηση της διαταραχής στη θύρα πολλαπλών χρήσεων του εξοπλισμού BPL θα γίνεται δύο φορές:

- Όσον αφορά τη λειτουργία ως προς την κατανάλωση ισχύος (με τη λειτουργία των επικοινωνιών ανενεργή) χρησιμοποιώντας δικτύωμα τύπου V και με όρια σύμφωνα με τους πίνακες 1 ή 2 του προτύπου EN 55022 [83].
- Όσον αφορά τη λειτουργία επικοινωνιών χρησιμοποιώντας δικτύωμα τύπου Τ και με όρια σύμφωνα με τους πίνακες 3 ή 4 του προτύπου EN 55022 [83].

Οι ακτινοβολούμενες διαταραχές από εξοπλισμό BPL μετρούνται όπως ο λοιπός εξοπλισμός ITE με όρια σύμφωνα με τους πίνακες 5 ή 6 του προτύπου EN 55022 [83].

Τα όρια που αναφέρονται στους πίνακες 1, 3, 5 αφορούν εξοπλισμό κλάσης Α ενώ τα όρια που αναφέρονται στους πίνακες 2, 4, 6 αφορούν εξοπλισμό κλάσης Β και είναι αυστηρότερα κατά 10dB από αυτά της κλάσης Α. Ο εξοπλισμός κλάσης Β αφορά εξοπλισμό που προορίζεται κυρίως για οικιακό περιβάλλον, γραφεία και ελαφρά βιομηχανικό περιβάλλον. Σε γενικές γραμμές και χωρίς αυτό να αποτελεί τον κανόνα, ο εξοπλισμός BPL που πρόκειται να εγκατασταθεί σε χώρο του τελικού χρήστη ανήκει στην κλάση Β, ενώ ο εξοπλισμός που εγκαθίσταται σε κοινόχρηστους χώρους (π.χ. υπόγεια πολυκατοικιών, χώρος ηλεκτρικών μετρητών) και σε χώρους όπως οι υποσταθμοί των εταιρειών ηλεκτρικής ενέργειας ανήκει στη κλάση Α. Περισσότερες πληροφορίες δίδονται στο Κεφάλαιο 2 όπου καθορίζονται τα όρια εκπομπών και ορίζονται οι κλάσεις.

Π.2.2 Αρμονικές Ρεύματος Εξοπλισμού BPL

Εφόσον τροφοδοτείται από το δίκτυο XT 220V, ο εξοπλισμός BPL πρέπει να συμμορφώνεται επίσης με τα ακόλουθα πρότυπα:

- ➤ EN 61000-3-2 [373] каι
- ► EN 61000-3-3 [374].

Π.2.3 Ατρωσία Εξοπλισμού BPL

Η ατρωσία ως όρος περιγράφει την ικανότητα του εξοπλισμού BPL να λειτουργεί ικανοποιητικά μέσα στο ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον του. Οι απαιτήσεις της ατρωσίας επιλέγονται αντίστοιχα προς το εκάστοτε περιβάλλον λειτουργίας με στόχο να εξασφαλίσουν επαρκή ατρωσία για συσκευές BPL που λειτουργούν:

σε οικιακούς, εμπορικούς και ελαφρά βιομηχανικούς χώρους (περιβάλλον κατηγορίας 1) και

σε συσκευές που τροφοδοτούνται αποκλειστικά από μετασχηματιστές ΥΤ/ΜΤ ή MT/XT (περιβάλλον κατηγορίας 2) με αυστηρότερες απαιτήσεις για ατρωσία.

Για εξοπλισμό BPL που λειτουργεί στη περιοχή συχνοτήτων 1.6 ως 30MHz και μεταδίδει πληροφορία μέσω XT –είτε μέσω του δημόσιου ενεργειακού δικτύου είτε στις εγκαταστάσεις του καταναλωτή– εφαρμόζεται το πρότυπο EN 50412-2-1:2005 [85].

Οι επιμέρους δοκιμές που προδιαγράφονται είναι:

- Οι ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις ESD (ElectroStatic Discharges) σύμφωνα με το πρότυπο EN 61000-4-2 [375]. Οι ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις εφαρμόζονται στην υπό δοκιμή συσκευή σε σημεία που μπορεί να προσεγγίσει ο χειριστής και σε οριζόντιο και κατακόρυφο επίπεδο σύζευξης. Η μέθοδος που χρησιμοποιείται είναι η άμεση επαφή με όλες τις μεταλλικές επιφάνειες. Όπου δεν υπάρχουν μεταλλικές επιφάνειες η εκφόρτιση γίνεται στον αέρα πλησίον της επιφάνειας. Τα επίπεδα δοκιμής για την εκφόρτιση άμεσης επαφής είναι ±4kV και για την εκφόρτιση στον αέρα είναι ±8kV. Οι εκφορτίσεις γίνονται με ελάχιστο ρυθμό μία ανά δευτερόλεπτο κατά τη θετική και την αρνητική πολικότητα.
- Η δοκιμή με ακτινοβολούμενα ηλεκτρομαγνητικά πεδία σύμφωνα με το πρότυπο ΕΝ 61000-4-3 [376]. Η συσκευή υποβάλλεται σε πεδία 3V/m σε συχνότητες από 80MHz ως 1GHz με διαμόρφωση ημιτονικού σήματος 1kHz με βάθος διαμόρφωσης 80%. Η απόσταση μεταξύ κεραίας εκπομπής και συσκευής είναι 3m και η δοκιμή γίνεται με τη κεραία σε οριζόντια και σε κατακόρυφη πόλωση και με τη συσκευή τοποθετημένη κάθε φορά με διαφορετική όψη προς τη κεραία έτσι ώστε να ελέγχονται και οι τέσσερις όψεις. Η λειτουργία της συσκευής δεν πρέπει να επηρεάζεται κατά τη διάρκεια της δοκιμής.
- Η δοκιμή σε ταχείες ηλεκτρικές διαταραχές EFT (Electric Fast Transients) σύμφωνα με το πρότυπο EN 61000-4-4 [377]. Οι διαταραχές είναι επαναλαμβανόμενες μικρής ενέργειας με μικρό χρόνο ανόδου της τάσης δοκιμής. Συγκεκριμένα, επί ένα λεπτό η συσκευή υποβάλλεται μέσω της γραμμής τροφοδοσίας σε παλμούς τάσης 1kV με θετική και αρνητική πολικότητα με ρυθμό επανάληψης 5kHz. Οι υπόλοιπες γραμμές μεταφοράς,

εκτός από αυτή της τροφοδοσίας, ελέγχονται με χωρητική σύζευξη σε παλμούς 0.5kV. Η λειτουργία της συσκευής επιτρέπεται να επηρεαστεί κατά τη διάρκεια της δοκιμής αλλά η συσκευή πρέπει να συνεχίζει να λειτουργεί έστω και με μειωμένη απόδοση κατά τη δοκιμή.

- Η δοκιμή σε κρουστικές υπερτάσεις, π.χ. από κεραυνοπτώσεις, σύμφωνα με το πρότυπο EN 61000-4-5 [378]. Η συσκευή υποβάλλεται μέσω της γραμμής τροφοδοσίας σε παλμούς μορφής 1.2µs/50µs τάσης 1kV μεταξύ των φάσεων και μεταξύ φάσης και γης με θετική και αρνητική πολικότητα. Η λειτουργία της συσκευής επιτρέπεται να σταματήσει κατά τη διάρκεια της δοκιμής αλλά πρέπει να μπορεί να λειτουργεί μετά τη δοκιμή.
- Η δοκιμή με αγόμενα ηλεκτρομαγνητικά πεδία σύμφωνα με το πρότυπο EN 61000-4-6 [379]. Η συσκευή υποβάλλεται σε δοκιμή με χωρητική (capacitive clamp) ή επαγωγική σύζευξη (current clamp) στις γραμμές μεταφοράς της σε τάση 3V σε συχνότητες από 150kHz ως 80MHz με διαμόρφωση ημιτονικού σήματος 1kHz με βάθος διαμόρφωσης 80%. Η λειτουργία της συσκευής δεν επιτρέπεται να επηρεάζεται κατά τη διάρκεια της δοκιμής.

Η δοκιμή σε βυθίσεις και βραχείες διακοπές της τάσης τροφοδοσίας σύμφωνα με το πρότυπο ΕΝ 61000-4-11 [380]. Η συσκευή υποβάλλεται σε δοκιμή με βυθίσεις >95% για 0.5 της περιόδου και 30% για 25 περιόδους. Η λειτουργία της συσκευής δεν επιτρέπεται να επηρεαστεί κατά τη διάρκεια της δοκιμής. Επίσης, η συσκευή υποβάλλεται σε δοκιμή με βραχείες διακοπές >95% για 250 περιόδους. Η συσκευή πρέπει να λειτουργεί μετά τη δοκιμή.

Π.3.1 Ιδιότητες της Μήτρας Αλυσιδωτής Σύνδεσης

Στην παρούσα υποενότητα παρουσιάζονται ορισμένες αντιστοιχίες ιδιοτήτων μεταξύ της γραμμής μεταφοράς δύο αγωγών και των γραμμών MTL [133], [137].

 Αρχικά ορίζεται η τετραγωνική ρίζα μιας μήτρας (square root of a matrix)

 $M^{1/2}$ μέσω της σχέσης

 $M^{1/2}M^{1/2} = M$ (Π.3.1)

 Από την (3.42) και την (Π.3.1) προκύπτουν οι σχέσεις
 (Π.3.2)

 και
 (Π.3.2)

$$(\mathbf{Z}\mathbf{Y})^{1/2} = \mathbf{Y}^{-1} (\mathbf{Y}\mathbf{Z})^{1/2} \mathbf{Y}$$
 (II.3.3)

Με βάση την (Π.3.2) η μήτρα χαρακτηριστικών αντιστάσεων προκύπτει

$$\mathbf{Z}_{C} = \mathbf{Y}^{-1} (\mathbf{Y} \mathbf{Z})^{1/2} = \mathbf{Z} (\mathbf{Y} \mathbf{Z})^{-1/2}$$
(II.3.4)

Επιπλέον σχέσεις μπορούν να προκύψουν από την απευθείας αντιστοίχηση της γραμμής μεταφοράς δύο αγωγών και της γραμμής MTL όσον αφορά τις υπερβολικές συναρτήσεις. Αρχικά ορίζονται οι εκθετικές μήτρες μέσω των σχέσεων

$$e^{(\mathbf{Y}\mathbf{Z})^{1/2}L} = \mathbf{I}_n + \frac{L}{1!} (\mathbf{Y}\mathbf{Z})^{1/2} + \frac{L^2}{2!} ((\mathbf{Y}\mathbf{Z})^{1/2})^2 + \cdots$$
(II.3.5)

$$e^{\gamma L} = \mathbf{I}_n + \frac{L}{1!}\gamma + \frac{L^2}{2!}\gamma^2 + \cdots$$
 (II.3.6)

όπου I_n είναι η $n \times n$ μοναδιαία μήτρα. Με τη χρήση των εκθετικών μητρών και της (3.41), μπορούν να υπολογιστούν οι μήτρες υπερβολικών συναρτήσεων ως

$$\cosh((\mathbf{Y}\mathbf{Z})^{1/2}L) = \frac{1}{2} \left(e^{(\mathbf{Y}\mathbf{Z})^{1/2}L} + e^{-(\mathbf{Y}\mathbf{Z})^{1/2}L} \right) = \mathbf{I}_{n} + \frac{L^{2}}{2!} \left((\mathbf{Y}\mathbf{Z})^{1/2} \right)^{2} + \frac{L^{4}}{4!} \left((\mathbf{Y}\mathbf{Z})^{1/2} \right)^{4} + \dots =$$

$$= \mathbf{T} \left(\mathbf{I}_{n} + \frac{L^{2}}{2!} \left(\mathbf{T}\gamma\mathbf{T}^{-1} \right)^{2} + \frac{L^{4}}{4!} \left(\mathbf{T}\gamma\mathbf{T}^{-1} \right)^{4} + \dots \right) \mathbf{T}^{-1} = \mathbf{T} \left(\mathbf{I}_{n} + \frac{L^{2}}{2!} \gamma^{2} + \frac{L^{4}}{4!} \gamma^{4} + \dots \right) \mathbf{T}^{-1} =$$

$$= \frac{1}{2} \mathbf{T} \left(e^{\gamma L} + e^{-\gamma L} \right) \mathbf{T}^{-1}$$
(II.3.7)

$$\sinh((\mathbf{Y}\mathbf{Z})^{1/2}L) = \frac{1}{2} \left(e^{(\mathbf{Y}\mathbf{Z})^{1/2}L} - e^{-(\mathbf{Y}\mathbf{Z})^{1/2}L} \right) = \frac{L^1}{1!} \left((\mathbf{Y}\mathbf{Z})^{1/2} \right)^2 + \frac{L^3}{3!} \left((\mathbf{Y}\mathbf{Z})^{1/2} \right)^3 + \dots =$$
$$= \frac{1}{2} \mathbf{T} \left(e^{\gamma L} - e^{-\gamma L} \right) \mathbf{\Gamma}^{-1}$$
(II.3.8)

Οι υπομήτρες των μητρών αλυσιδωτής σύνδεσης γράφονται

$$\boldsymbol{\Phi}_{11}^{inv}(L) = \cosh\left((\mathbf{Z}\mathbf{Y})^{1/2}L\right) = \mathbf{Y}^{-1}\cosh\left((\mathbf{Y}\mathbf{Z})^{1/2}L\right)\mathbf{Y}$$
(II.3.9)

$$\boldsymbol{\Phi}_{12}^{inv}(L) = -\mathbf{Z}_{C} \sinh\left((\mathbf{Y}\mathbf{Z})^{1/2}L\right) = -\sinh\left((\mathbf{Z}\mathbf{Y})^{1/2}L\right)\mathbf{Z}_{C} \tag{\Pi.3.10}$$

$$\Phi_{21}^{inv}(L) = -\mathbf{Z}_{C}^{-1}\sinh((\mathbf{Z}\mathbf{Y})^{1/2}L) = -\sinh((\mathbf{Y}\mathbf{Z})^{1/2}L)\mathbf{Z}_{C}^{-1}$$
(II.3.11)

$$\boldsymbol{\Phi}_{22}^{inv}(L) = \cosh\left((\mathbf{Y}\mathbf{Z})^{1/2}L\right) = \mathbf{Y}\cosh\left((\mathbf{Z}\mathbf{Y})^{1/2}L\right)\mathbf{Y}^{-1}$$
(II.3.12)

Η σημαντική ιδιότητα των μητρών αλυσιδωτής σύνδεσης σχετίζεται με την αντιστροφή τους για την οποία ισχύει η σχέση

$$\boldsymbol{\Phi}^{inv}(L)\boldsymbol{\Phi}^{inv^{-1}}(L) = \mathbf{I}_{2n} \tag{\Pi.3.13}$$

$$\boldsymbol{\Phi}^{inv}(L)\boldsymbol{\Phi}^{inv}(-L) = \mathbf{I}_{2n} \tag{\Pi.3.14}$$

Αντικαθιστώντας την (3.53) στην (Π.3.14) προκύπτει

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{\Phi}_{11}^{inv}(L) & \boldsymbol{\Phi}_{12}^{inv}(L) \\ \boldsymbol{\Phi}_{21}^{inv}(L) & \boldsymbol{\Phi}_{22}^{inv}(L) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\Phi}_{11}^{inv}(-L) & \boldsymbol{\Phi}_{12}^{inv}(-L) \\ \boldsymbol{\Phi}_{21}^{inv}(-L) & \boldsymbol{\Phi}_{22}^{inv}(-L) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_n & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I}_n \end{bmatrix}$$
(II.3.15)

Η (Π.3.15) παρέχει ένα σύνολο σχέσεων που βοηθούν στον περιορισμό των εκφράσεων των σχετικών με τις μήτρες που σχετίζονται με την επίλυση διατάξεων MTL [119].

Π.3.2 Εξισώσεις ΜΤL για Ημιτονοειδή Σταθερής Κατάστασης Διέγερση

Η γενική λύση των εξισώσεων MTL εμπλέκει 2*n* προσδιοριστέες σταθερές. Για τον προσδιορισμό τους απαιτούνται 2*n* εξισώσεις που θα προκύψουν από την ικανοποίηση των συνθηκών τερματισμού στα άκρα της γραμμής μεταφοράς MTL z = 0, z = L όπως αυτές απεικονίζονται στα Σχήματα Π.3.1α και Π.3.1β [136], [138], [381].

Oi $\pi\eta\gamma\dot{\epsilon}\varsigma$ (driving source) και οι σύνθετες αντιστάσεις τερματισμών που εμφανίζονται στα Σχήματα Π.3.1α και Π.3.1β αναφέρονται στα δύο άκρα της γραμμής, αντίστοιχα. Οι συνθήκες τερματισμού στο άκρο z = 0 οδηγούν σε nεξισώσεις που σχετίζονται με τις n τάσεις και τα n ρεύματα πηγής V(0) και I(0), αντίστοιχα. Οι συνθήκες τερματισμού στο άκρο z = L οδηγούν σε n εξισώσεις που σχετίζονται με τις n τάσεις και τα n ρεύματα V(L) και I(L), αντίστοιχα που εμφανίζονται επί των συνθέτων αντιστάσεων τερματισμού.

Π.3.3 Το Ισοδύναμο κατά Thévenin

Το ισοδύναμο κατά Thévenin (Generalized Thévenin Equivalent) περιγράφτηκε αναλυτικά στο Κεφάλαιο 4 [120], [136], [138], [381]. Μια εναλλακτική μέθοδος για την συμπερίληψη των περιορισμών τερματισμών είναι η αντικατάσταση του ισοδυνάμου κατά Thévenin από

$$\mathbf{V}(L) = \mathbf{\Phi}_{11}^{inv}(L)\mathbf{V}(0) + \mathbf{\Phi}_{12}^{inv}(L)\mathbf{I}(0)$$
(II.3.16)

$$\mathbf{I}(L) = \mathbf{\Phi}_{21}^{inv}(L)\mathbf{V}(0) + \mathbf{\Phi}_{22}^{inv}(L)\mathbf{I}(0)$$
(II.3.17)

$$\left(\boldsymbol{\Phi}_{12}^{inv} - \boldsymbol{\Phi}_{11}^{inv} \mathbf{Z}_g - \mathbf{Z}_L \boldsymbol{\Phi}_{22}^{inv} + \mathbf{Z}_L \boldsymbol{\Phi}_{21}^{inv} \mathbf{Z}_g\right) \mathbf{I}(0) = \mathbf{V}_L - \left(\boldsymbol{\Phi}_{11}^{inv} - \mathbf{Z}_L \boldsymbol{\Phi}_{21}^{inv}\right) \mathbf{E}_g \qquad (\Pi.3.18)$$

$$\mathbf{I}(L) = \mathbf{\Phi}_{21}^{inv} \mathbf{E}_g + \left(\mathbf{\Phi}_{22}^{inv} - \mathbf{\Phi}_{21}^{inv} \mathbf{Z}_g\right) \mathbf{I}(0) \tag{\Pi.3.19}$$

Η (Π.3.18) αποτελεί ένα σύνολο n εξισώσεων οι οποίες μπορούν να



Σχήμα Π.3.1: Συνθήκες τερματισμού στα άκρα z=0 και z=L σε μια γραμμή μεταφοράς MTL *n+1* αγωγών.

λυθούν για τα *n* ρεύματα στο άκρο z = 0, I(0). Αυτές οι εξισώσεις μπορούν να λυθούν με τη χρήση αριθμητικών μεθόδων εξάλειψης Gauss [120], [139]. Από τη στιγμή που αυτές οι εξισώσεις επιλυθούν, μπορούν να υπολογιστούν τα *n* ρεύματα στο άκρο z = L, I(L) από τη σχέση (Π.3.19). Οι 2*n* τάσεις, V(0) και V(L) μπορούν να υπολογιστούν από τις συνθήκες τερματισμού στα άκρα γραμμής μεταφοράς δύο αγωγών όπως προκύπτουν από το ισοδύναμο κατά Thévenin [120], [136], [138], [381]

$$\mathbf{V}(0) = \mathbf{E}_g - \mathbf{Z}_g \mathbf{I}(0) \tag{\Pi.3.20}$$

$$\mathbf{V}(L) = \mathbf{V}_L + \mathbf{Z}_L \mathbf{I}(L)$$

Π.3.4 Το Ισοδύναμο κατά Norton

Όπως παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 3, το ισοδύναμο κατά Thévenin είναι ένας τρόπος συσχετισμού των τάσεων και των ρευμάτων στα άκρα ενός πολυθύρου. Μια εναλλακτική αναπαράσταση είναι το γενικό ισοδύναμο κατά Norton (Generalized Norton Equivalent) όπου οι τάσεις και τα ρεύματα συνδέονται μέσω των σχέσεων [136], [138], [381]

$$\mathbf{I}(0) = \mathbf{I}_{g} - \mathbf{Y}_{g} \mathbf{V}(0) \tag{\Pi.3.22}$$

$$\mathbf{I}(L) = -\mathbf{I}_L + \mathbf{Y}_L \mathbf{V}(L) \tag{\Pi.3.23}$$

Τα $n \times 1$ διανύσματα στήλες \mathbf{I}_g και \mathbf{I}_L απεικονίζουν τα αποτελέσματα των ανεξάρτητων πηγών τάσης και ρευμάτων στα άκρα z = 0 και z = L, αντίστοιχα. Οι $n \times n$ μήτρες \mathbf{Y}_g και \mathbf{Y}_L περιγράφουν τις σύνθετες αγωγιμότητες καθώς και ενδεχόμενες ελεγχόμενες πηγές στα άκρα z = 0 και z = L, αντίστοιχα. Στη γενική περίπτωση, οι μήτρες σύνθετης αγωγιμότητας \mathbf{Y}_g και \mathbf{Y}_L είναι πλήρεις μήτρες (full matrices) δηλαδή υπάρχει σύζευξη (cross coupling) μεταξύ όλων των θυρών του δικτύου. Παρόλα αυτά μπορεί να υπάρξει κατάλληλη συνδεσμολογία τερματισμού του δικτύου όπου οι μήτρες σύνθετης αγωγιμότητας να είναι διαγώνιες μήτρες. Το Σχήμα Π.3.2 παρουσιάζει αυτήν την περίπτωση όπου κάθε γραμμή στο σημείο z = 0τερματίζεται απευθείας στον επιλεγμένο αγωγό αναφοράς (reference conductor) με παράλληλη σύνθετη αγωγιμότητα και πηγή ρεύματος.

Σε αυτήν την περίπτωση οι μήτρες της (Π.3.22) γίνονται

$$\mathbf{I}_{g} = \begin{bmatrix} I_{g1} & \cdots & I_{gi} & \cdots & I_{gn} \end{bmatrix}^{T}$$
(II.3.24)

$$\mathbf{Y}_{g} = diag\{Y_{gi}\}, \ i = 1, \dots, n$$
(П.3.25)

Όπως στην περίπτωση του ισοδυνάμου κατά Thévenin, στα άκρα z = 0 και z = L το ισοδύναμο κατά Norton δίνει

$$\mathbf{T}\left(\mathbf{I}_{\pi}^{m}+\mathbf{I}_{\alpha}^{m}\right)=\mathbf{I}_{g}-\mathbf{Y}_{g}\mathbf{Z}_{C}\mathbf{T}\left(\mathbf{I}_{\pi}^{m}+\mathbf{I}_{\alpha}^{m}\right)$$
(II.3.26)

$$\mathbf{T}\left(e^{-\gamma L}\mathbf{I}_{\pi}^{m}-e^{\gamma L}\mathbf{I}_{\alpha}^{m}\right)=-\mathbf{I}_{L}+\mathbf{Y}_{L}\mathbf{Z}_{C}\mathbf{T}\left(e^{-\gamma L}\mathbf{I}_{\pi}^{m}+e^{\gamma L}\mathbf{I}_{\alpha}^{m}\right)$$
(II.3.27)

Δίνοντας τις παραπάνω σχέσεις σε μορφή μήτρας προκύπτει η σχέση

$$\begin{bmatrix} (\mathbf{Y}_{g}\mathbf{Z}_{C} + \mathbf{I}_{n})\mathbf{\Gamma} & (\mathbf{Y}_{g}\mathbf{Z}_{C} - \mathbf{I}_{n})\mathbf{\Gamma} \\ (\mathbf{Y}_{L}\mathbf{Z}_{C} - \mathbf{I}_{n})\mathbf{T}e^{-\gamma L} & (\mathbf{Y}_{L}\mathbf{Z}_{C} + \mathbf{I}_{n})\mathbf{T}e^{\gamma L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{\pi} \\ \mathbf{I}_{\alpha}^{m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{g} \\ \mathbf{I}_{L} \end{bmatrix}$$
(II.3.28)



Σχήμα Π.3.2: Η απεικόνιση του ισοδυνάμου κατά Norton όταν ο τερματισμός δεν περιλαμβάνει σύζευξη.

Αφού το σύνολο από τις 2*n* ταυτόχρονες εξισώσεις λύνεται ως προς \mathbf{I}_{π}^{m} και \mathbf{I}_{α}^{m} , οι τάσεις και τα ρεύματα γραμμής μπορούν να υπολογιστούν σε οποιοδήποτε σημείο *z* της γραμμής αντικαθιστώντας στην (3.55).

Μια εναλλακτική μέθοδος για την συμπερίληψη των περιορισμών τερματισμών είναι η αντικατάσταση του γενικού ισοδυνάμου κατά Norton από τις (Π.3.20) και (Π.3.21) στην (3.53) όπου χαρακτηρίζεται η μήτρα αλυσιδωτών παραμέτρων δίνοντας τελικά

$$\left(\boldsymbol{\Phi}_{21}^{inv} - \boldsymbol{\Phi}_{22}^{inv} \mathbf{Y}_g - \mathbf{Y}_L \boldsymbol{\Phi}_{11}^{inv} + \mathbf{Y}_L \boldsymbol{\Phi}_{12}^{inv} \mathbf{Y}_g\right) \mathbf{V}(0) = \mathbf{V}_L - \left(\boldsymbol{\Phi}_{22}^{inv} - \mathbf{Y}_L \boldsymbol{\Phi}_{12}^{inv}\right) \mathbf{I}_g \qquad (\Pi.3.29)$$

$$\mathbf{V}(L) = \mathbf{\Phi}_{12}^{inv} \mathbf{I}_g + \left(\mathbf{\Phi}_{11}^{inv} - \mathbf{\Phi}_{12}^{inv} \mathbf{Y}_g\right) \mathbf{V}(0) \tag{\Pi.3.30}$$

Η εξίσωση (Π.3.29) είναι ένα σύνολο n ταυτόχρονων εξισώσεων οι οποίες μπορούν να λυθούν για τα n τερματικά ρεύματα στο σημείο z = 0, V(0). Αυτές οι εξισώσεις μπορούν να λυθούν με τη χρήση αριθμητικών μεθόδων εξάλειψης Gauss [120], [139].

Апо́ тη στιγμή που αυτές οι εξισώσεις επιλυθούν, μπορούν να υπολογιστούν οι *n* τερματικές τάσεις στο σημείο z = L, V(L) από την (Π.3.30). Οι 2*n* τερματικές τάσεις, I(0) και I(L) μπορούν να υπολογιστούν από τις τερματικές συνθήκες των (Π.3.22) και (Π.3.23).

Π.3.5 Μικτές Αναπαραστάσεις

Υπάρχουν αρκετές περιπτώσεις στις οποίες οι τερματισμοί δεν μπορούν να αναπαρασταθούν ως ισοδύναμο είτε κατά Thévenin είτε κατά Norton [126], [140]. Παράδειγμα είναι η περίπτωση τερματισμών στο άκρο z = 0 μεταξύ μερικών αγωγών σε σχέση με τον αγωγό αναφοράς με βραχυκύκλωμα. Στην περίπτωση αυτή, το ισοδύναμο κατά Norton της (Π.3.22) δεν υπάρχει για αυτόν τον τερματισμό αφού η σύνθετη αντίσταση τερματισμού είναι άπειρη. Παρόλα αυτά το ισοδύναμο κατά Thévenin υπάρχει αφού το βραχυκύκλωμα είναι ισοδύναμο με σύνθετη αντίσταση fortiou ist me mudén, timú η opoia eínai égkurt gia thn períptios \mathbf{T}_g . Ta θωρακισμένα καλώδια όπου η θωράκιση (ένας από τους αγωγούς MTL) είναι γειωμένη στον αγωγό αναφοράς τότε ισχύει η περίπτωση του βραχυκυκλώματος. Αντίθετα, υπάρχει η περίπτωση όπου ένας από τους αγωγούς είναι μη τερματισμένος, υπάρχει δηλαδή ένα ανοικτοκύκλωμα μεταξύ του αγωγού και του αγωγού αναφοράς. Σε αυτήν την περίπτωση πρέπει να χρησιμοποιηθεί το γενικό ισοδύναμο κατά Norton (ο τερματισμός έχει μηδενική σύνθετη αγωγιμότητα) αφού το γενικό ισοδύναμο κατά Thévenin δεν υπάρχει (ο τερματισμός έχει άπειρη σύνθετη αντίσταση). Παράδειγμα αυτής της περίπτωσης είναι τα ισορροπημένα καλώδια (balanced wire) όπως στην περίπτωση των συνεστραμμένων ζευγών όπου κανένα καλώδια δεν είναι προσαρμοσμένο με τον αγωγό αναφοράς. Αυτή η περίπτωση απαιτεί μια μικτή απεικόνιση των τερματισμών του δικτύου όπου ο ένας τερματισμός απεικονίζεται με γενικό ισοδύναμο κατά Thévenin ενώ ο άλλος τερματισμός απεικονίζεται με γενικό ισοδύναμο κατά Norton.

Στη συνέχεια παρατίθενται οι εξισώσεις που πρέπει να λυθούν για να απεικονιστούν οι μικτές αναπαραστάσεις. Χρησιμοποιώντας την (Π.3.20), (Π.3.21), (Π.3.22) και (Π.3.23) προκύπτει

$$\begin{bmatrix} (\mathbf{Z}_{C} + \mathbf{Z}_{g})\mathbf{\Gamma} & (\mathbf{Z}_{C} - \mathbf{Z}_{g})\mathbf{\Gamma} \\ (\mathbf{Y}_{L}\mathbf{Z}_{C} - \mathbf{I}_{n})\mathbf{T}e^{-\gamma L} & (\mathbf{Y}_{L}\mathbf{Z}_{C} + \mathbf{I}_{n})\mathbf{T}e^{\gamma L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{\pi}^{m} \\ \mathbf{I}_{\alpha}^{m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{V}_{g} \\ \mathbf{I}_{L} \end{bmatrix}$$
(II.3.31)

ή μέσω της μήτρας αλυσιδωτής σύνδεσης

$$\left(\boldsymbol{\Phi}_{11}^{inv} - \boldsymbol{\Phi}_{12}^{inv} \mathbf{Y}_g - \mathbf{Z}_L \boldsymbol{\Phi}_{22}^{inv} \mathbf{Y}_g\right) \mathbf{V}(0) = \mathbf{V}_L - \left(\boldsymbol{\Phi}_{12}^{inv} - \mathbf{Z}_L \boldsymbol{\Phi}_{22}^{inv}\right) \mathbf{I}_g \qquad (\Pi.3.32)$$

$$\mathbf{I}(L) = \mathbf{\Phi}_{22}^{inv} \mathbf{I}_g + \left(\mathbf{\Phi}_{21}^{inv} - \mathbf{\Phi}_{22}^{inv} \mathbf{Y}_g\right) \mathbf{V}(0) \tag{\Pi.3.33}$$

Οι παραπάνω μικτές απεικονίσεις μπορούν να χαρακτηρίσουν τους τερματισμούς κυκλωμάτων όταν εμφανίζεται βραχυκύκλωμα στο ένα δίκτυο τερματισμού και ανοικτοκύκλωμα στο άλλα δίκτυο τερματισμού. Τερματισμοί δικτύων όπου εμφανίζονται τόσο βραχυκυκλώματα όσο και ανοιχτοκυκλώματα μπορούν να είναι διαχειρίσιμοι με τη γενικότερη διατύπωση

$$\mathbf{Y}_{g}\mathbf{V}(0) + \mathbf{Z}_{g}\mathbf{I}(0) = \mathbf{P}_{g} \tag{\Pi.3.34}$$

$$\mathbf{Y}_{L}\mathbf{V}(L) + \mathbf{Z}_{L}\mathbf{I}(L) = \mathbf{P}_{L} \tag{\Pi.3.35}$$

Για παράδειγμα, η (Π.3.34) μπορεί να γραφτεί σε χωρισμένη μορφή

$$\begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{11} & \mathbf{Y}_{12} \\ \mathbf{Y}_{21} & \mathbf{Y}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_{1}(0) \\ \mathbf{V}_{2}(0) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_{11} & \mathbf{Z}_{12} \\ \mathbf{Z}_{21} & \mathbf{Z}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{1}(0) \\ \mathbf{I}_{2}(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{g1} \\ \mathbf{I}_{g2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{V}_{g1} \\ \mathbf{V}_{g2} \end{bmatrix}$$
(II.3.36)

Γίνεται η θεώρηση ότι δεν υπάρχει σύζευξη μεταξύ του πρώτου συνόλου τερματισμών όπως αυτό περιγράφεται από το ισοδύναμο κατά Norton του Σχήματος Π.3.2 και τελευταίου συνόλου τερματισμών όπως αυτό περιγράφεται από το ισοδύναμο κατά Thévenin του Σχήματος Π.3.1. Η χωρισμένη μορφή τότε μπορεί να γραφτεί ως

$$\begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{11} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I}_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_1(0) \\ \mathbf{V}_2(0) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{I}_n & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{Z}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_1(0) \\ \mathbf{I}_2(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{g1} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{V}_{g2} \end{bmatrix}$$
(II.3.37)

όπου οι μήτρες \mathbf{Y}_{11} και \mathbf{Z}_{22} είναι διαγώνιες μήτρες. Αν οποιαδήποτε από τις σύνθετες αγωγιμότητες είναι μηδενική η ισοδύναμη είσοδος \mathbf{Y}_{11} ορίζεται ίση με μηδέν. Ομοίως αν οποιαδήποτε από τις εμπεδήσεις είναι μηδενική τότε ορίζεται ίση με μηδέν η αντίστοιχη είσοδος του \mathbf{Z}_{22} .

Π.5.1 Εναέριες Γραμμές

Οι γραμμές αυτές είναι εναέριοι αγωγοί που τοποθετούνται πάνω σε στύλους που κατασκευάζονται από ξύλο, χάλυβα, σκυρόδεμα ή φάιμπεργκλας. Απαντώνται υπό διάφορες υλοποιήσεις: ένα κύκλωμα ανά στύλο ή περισσότερα από ένα κυκλώματα.

Οι περισσότεροι αγωγοί των εναερίων γραμμών αποτελούνται από αλουμίνιο ή χαλκό. Σήμερα, οι επιχειρήσεις ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιούν το αλουμίνιο για σχεδόν όλες τις νέες υπερυψωμένες εγκαταστάσεις δεδομένου ότι το αλουμίνιο είναι ελαφρότερο και φθηνότερο. Εντούτοις, ο χαλκός ήταν το πρώτο μέταλλο που χρησιμοποιήθηκε για να μεταφέρει την ηλεκτρική ισχύ με αποτέλεσμα σήμερα πολλές εναέριες γραμμές να είναι κατασκευασμένες από χαλκό. Τέσσερις είναι οι σημαντικότεροι τύποι εναέριων αγωγών:

- Αγωγοί AAC (All Aluminium Conductor ή αγωγοί εξ ολοκλήρου από αλουμίνιο): Αποτελούνται από ένα ή περισσότερα νήματα αλουμινίου κράματος 1350 (1350 Alloy Aluminium), καθαρότητας 99.5% και εμφανίζουν ελάχιστη αγωγιμότητα 61.0% IACS (International Annealed Copper Standard). Λόγω της σχετικά χαμηλής αναλογίας ισχύς προς βάρος, το AAC έχουν περιορισμένη χρήση στην αγροτική διανομή λόγω των μακροχρόνιων εκτάσεων. Εντούτοις, οι αγωγοί AAC χαρακτηρίζονται από εκτεταμένη χρήση σε αστικές περιοχές όπου οι εκτάσεις είναι συνήθως μικρές αλλά απαιτείται υψηλή αγωγιμότητα. Οι αγωγοί αυτοί χρησιμοποιούνται επίσης ευρέως στις παραλιακές περιοχές επειδή παρουσιάζουν υψηλό βαθμό αντοχής σε διάβρωση (Σχήμα Π.5.1).
- Αγωγοί ACSR (Aluminium Conductor Steel Reinforced ή αγωγοί από αλουμίνιο ενισχυμένοι με χάλυβα). Αποτελούνται από ένα ενιαίο (solid) ή πλεγμένο (stranded) πυρήνα χάλυβα που περιβάλλεται από ένα ή περισσότερα στρώματα νημάτων αλουμινίου 1350. Το ποσοστό του χάλυβα ποικίλλει από 6% έως 40%. Το κύριο πλεονέκτημα αυτών των αγωγών είναι η υψηλή αναλογία ισχύος προς βάρος. Αυτό σημαίνει ότι ο αγωγός επιτρέπει μεγαλύτερη έκταση, έχει μικρότερες απαιτήσεις στήριξης της εναέριας διάταξης και εμφανίζει μεγαλύτερη αντοχή στον πάγο και τον αέρα. Παραδείγματα αγωγών ACSR παρουσιάζονται στα Σχήματα Π.5.2 και Π.5.3.
- Αγωγοί AAAC (All Aluminium Alloy Conductor ή αγωγοί εξ ολοκλήρου από κράμα αλουμινίου). Είναι κατασκευασμένοι από κράμα αλουμινίου-μαγνησίου-πυριτίου υψηλής ηλεκτρικής αγωγιμότητας και περιέχουν μαγνήσιο (0.6-0.9%) και πυρίτιο (0.5-0.9%) που αποδίδουν καλύτερες μηχανικές ιδιότητες μετά από την επεξεργασία. Οι αγωγοί AAAC κατασκευάζονται από κράμα αλουμινίου 6201 με ελάχιστη αγωγιμότητα 54% και εμφανίζουν καλύτερη αντοχή σε διάβρωση και καλύτερη αναλογία ισχύος προς βάρος. Παράλληλα, παρουσιάζουν βελτιωμένη ηλεκτρική αγωγιμότητα σε σχέση με αγωγούς ACSR της ίδιας διαμέτρου. Οι αγωγοί AAAC



Σχήμα Π.5.1: Εναέρια γραμμή με αγωγό ΑΑC.



Σχήμα Π.5.2: Εναέρια γραμμή με αγωγό ACSR.



Σχήμα Π.5.3: Εναέριες γραμμές με αγωγούς ACSR διαφορετικών διατομών.

χρησιμοποιούνται ευρέως σε παράκτιες περιοχές όπου η χρήση αγωγών ACSR είναι απαγορευτική λόγω υπερβολικής διάβρωσης. Παραδείγματα αγωγών AAAC εμφανίζονται στα Σχήματα Π.5.4 και Π.5.5.

Αγωγοί ACAR (Aluminium Conductor Aluminium-Alloy Reinforced ή αγωγοί από αλουμίνιο ενισχυμένοι με κράμα αλουμινίου). Συνδυάζουν αγωγούς AAC και AAAC έτσι ώστε να προκύψει ένας αγωγός μεταφοράς με άριστη ισορροπία ηλεκτρικών και μηχανικών ιδιοτήτων. Παράδειγμα αγωγών ACAR παρουσιάζεται στο Σχήμα Π.5.6.

Σε αστικές και προαστιακές εφαρμογές οι αγωγοί AAC εμφανίζουν υψηλό βαθμό αντοχής και καλά θερμικά χαρακτηριστικά υπό δεδομένο βάρος του αγωγού. Στις αγροτικές περιοχές, οι εγκαταστάσεις μπορούν να χρησιμοποιήσουν μικρότερους



Σχήμα Π.5.4: Εναέρια γραμμή με αγωγό ΑΑΑC.



Σχήμα Π.5.5: Εναέριες γραμμές με αγωγούς ΑΑC και ΑΑΑC.

αγωγούς σε μεγαλύτερες αποστάσεις μεταξύ των πυλώνων, οπότε κρίνονται καταλληλότεροι οι αγωγοί με υψηλότερο βαθμό αντοχής όπως οι αγωγοί ACSR.

Ένας αγωγός ισχύος μπορεί να μονωθεί ή όχι. Ο γυμνός (un-insulated) αγωγός είναι ο συνηθέστερος τύπος γραμμής που χρησιμοποιείται στους εναέριους ηλεκτροφόρους αγωγούς. Ο μονωμένος αγωγός είναι αγωγός AAC, AAAC ή ACSR που καλύπτονται με πολυαιθυλένιο (PE, PolyEthylene) ή με διασυνδεμένο πολυαιθυλένιο (XLPE). Επειδή οι γραμμές είναι μονωμένες, η πιθανότητα εμφάνισης ζημιών που οφείλονται είτε στη φύση (βλάστηση, ζώα) είτε σε ανθρώπινη δραστηριότητα είναι μικρή με αποτέλεσμα οι γραμμές αυτές να παρουσιάζουν βελτιωμένη αξιοπιστία. Παράδειγμα εναέριας μονωμένης γραμμής παρουσιάζεται στο Σχήμα Π.5.7.



Σχήμα Π.5.6: Εναέρια γραμμή με αγωγούς ACAR.



Σχήμα Π.5.7: Εναέρια γραμμή με αγωγό ACSR και μονωμένη με XLPE.

Π.5.2 Απλός Αγωγός υπεράνω Εδάφους	
$M\{\gamma, h, \alpha\} = \frac{k_0^2 - \gamma^2}{2k_0^2} \Lambda\{\gamma, h, \alpha\} + S_{1g}\{\gamma, h, \alpha\} - \frac{\gamma^2}{k_0^2} S_{2g}\{\gamma, h, \alpha\}$	(П.5.1)

$$\Lambda\{\gamma, h, \alpha\} = K_0 \left\{ j \alpha \left(k_0^2 - \gamma^2 \right)^{1/2} \right\} - K_0 \left\{ j \left(4h^2 + \alpha^2 \right)^{1/2} \left(k_0^2 + \gamma^2 \right)^{1/2} \right\}$$
(II.5.2)

$$S_{1g}\{\gamma,h,\alpha\} = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\exp(-u_0 2h)}{u_0 + u_g} \exp(-jz\lambda) d\lambda$$
(II.5.3)

$$S_{2g}\{\gamma, h, \alpha\} = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\exp(-u_0 2h)}{k_g^2 k_0^{-2} u_0 + u_g} \exp(-jz\lambda) d\lambda$$
(II.5.4)

$$u_0 = \left(\lambda^2 + \gamma^2 - k_0^2\right)^{1/2} \tag{\Pi.5.5}$$

$$u_g = \left(\lambda^2 + \gamma^2 - k_g^2\right)^{1/2}$$
(II.5.6)

όπου S_{1g} και S_{2g} είναι ολοκληρώματα Sommerfeld.

Για την περίπτωση υπολογισμού της μιγαδικής σταθεράς διάδοσης υπό παραδοχές ισχύει

$$\widehat{z}_{i} = \frac{f\mu_{w}I_{0}\{jk_{w}\alpha\}}{\alpha k_{w}I_{1}\{jk_{w}\alpha\}}$$
(II.5.7)

$$\widehat{S}_{1g}\{h\} = 0.5 \ln(1 + \alpha' r^{-1}) \tag{\Pi.5.8}$$

$$\widehat{S}_{2g}\{h\} = \frac{k_0^2}{k_g^2 + k_0^2} \ln(1 + \beta' r^{-1})$$
(II.5.9)

$$\alpha' = 2/(k_0^2 - k_g^2)^{1/2} \quad \text{kat} \quad \beta' = (k_0^2 + k_g^2)/[k_0^2(k_0^2 - k_g^2)^{1/2}] \tag{\Pi.5.10}$$

$$r = (4h^2 + \alpha^2)^{1/2} \tag{\Pi.5.11}$$

Π.5.3 Προσδιορισμός Μήτρας Διάδοσης για Γραμμές Μεταφοράς Πολλών Αγωγών

$\mathbf{Z}_{i} = diag\{Z_{ii}\}, \ i = 1, \dots, n$	(П.5.12.1)
$\mathbf{L}_{i} = diag\{\mathbf{Z}_{ii}\}, \ i = 1, \dots, n$	(11.5.12.1

$$Z_{ii} = (\mu_w f I_0 \{ j k_w \alpha_i \}) / (\alpha_i k_w I_1 \{ j k_w \alpha_i \})$$
(II.5.12.2)

$$k_{w} = k_{0} \left[\left(\varepsilon_{w} / \varepsilon_{0} \right) - j \left(\sigma_{w} / 2\pi f \varepsilon_{0} \right) \right]^{1/2} \tag{\Pi.5.13}$$

$$\mathbf{Z}_e = jf\mu_0\mathbf{A} \tag{\Pi.5.14}$$

$$A_{ii} = \ln(2h_i/\alpha_i), \ A_{ij} = \ln(D_{ij}/d_{ij}), \ D_{ij} = \left[(h_i + h_j)^2 + \Delta^2_{ij}\right]^{1/2}$$
(II.5.15)

$$\mathbf{Y}_e = j2\pi f \varepsilon_0 2\pi \mathbf{A}^{-1} \tag{\Pi.5.16}$$

$$\mathbf{Z}_g = j2f\mu_0\mathbf{F}_{1g} \tag{\Pi.5.17}$$

$$\mathbf{Y}_g = j2\pi f \varepsilon_0 \pi \mathbf{F}_{2g}^{-1} \tag{\Pi.5.18}$$

$$F_{1gij} = 0.5 \ln \left\{ \left(h_i + h_j + j\Delta_{ij} + \xi_1 \right) / \left(h_i + h_j + j\Delta_{ij} \right) \right\}$$
(II.5.19)

$$F_{2gij} = \xi_2 \ln \left\{ \left(h_i + h_j + j\Delta_{ij} + \xi_3 \right) / \left(h_i + h_j + j\Delta_{ij} \right) \right\}$$
(II.5.20)

$$\xi_{1} = 2/(k_{0}^{2} - k_{g}^{2})^{1/2}, \ \xi_{2} = k_{0}^{2}/(k_{0}^{2} + k_{g}^{2}), \ \xi_{3} = (k_{0}^{2} + k_{g}^{2})/[k_{0}^{2}(k_{0}^{2} - k_{g}^{2})^{1/2}]$$
(II.5.21)

$$k_g = k_0 \left[\left(\varepsilon_g / \varepsilon_0 \right) - j \left(\sigma_g / 2\pi f \varepsilon_0 \right) \right]^{1/2} \tag{\Pi.5.22}$$

Π.6.1 Υπόγειες Γραμμές

Οι υπόγειες γραμμές αποτελούνται από αγωγούς που είναι θαμμένες υπό την επιφάνεια της γης. Οι υπόγειες γραμμές είναι κρυμμένες από τα μάτια των ανθρώπων με αποτέλεσμα να μην ενοχλούν την περιβαλλοντική καλαισθησία, είναι ασφαλέστερες λόγω αποφυγής οποιουδήποτε είδους επαφής, πλέον αξιόπιστες δεδομένου ότι συμβαίνουν λιγότερες σύντομες ή μακροχρόνιες διακοπές και χαρακτηρίζονται από χαμηλότερο κόστος συντήρησης. Εντούτοις, το συνολικό κόστος των υπόγειων γραμμών είναι μεγαλύτερο από αυτό των εναέριων γραμμών.

Οι υπόγειες γραμμές εμφανίζονται συνήθως με κάποια από τις ακόλουθες μορφές:

- Απευθείας θαμμένες (βλέπε Σχήμα Π.6.1).
- Τοποθετημένες σε σωλήνες (βλέπε Σχήμα Π.6.2).
- Τοποθετημένες σε αύλακα (βλέπε Σχήμα Π.6.3).
- Τοποθετημένες σε εσωτερικές στοές.



Σχήμα Π.6.1: Απευθείας θαμμένες υπόγειες γραμμές.



Σχήμα Π.6.2: Υπόγειες γραμμές τοποθετημένες σε σωλήνες.



Σχήμα Π.6.3: Υπόγειες γραμμές τοποθετημένες σε αύλακα.
Οι εταιρίες ηλεκτρικής ενέργειας διαθέτουν διαφόρους τρόπους για να εγκαθιστούν υπόγειες γραμμές. Συνήθεις μέθοδοι εγκατάστασης είναι:

- Εκσκαφή περιφερειακής τάφρου. Είναι ο κοινός τρόπος εγκατάστασης υπόγειων γραμμών μεταφοράς. Αρχικά, σκάβεται μια τάφρος, κατόπιν η γραμμή μεταφοράς εγκαθίσταται άμεσα ή σε σωλήνες ή σε αύλακες. Στη συνέχεια, καλύπτεται η τάφρος και αποκαθίσταται η επιφάνεια (βλέπε Σχήμα Π.6.4).
- Όργωμα. Μια λεπίδα αρότρου γραμμών μεταφοράς χωρίζει και ανυψώνει τη γη τοποθετώντας σε αυλάκι τη γραμμή μεταφοράς. Με το όργωμα αντιμετωπίζεται το πρόβλημα της επιχωμάτωσης και η επιφάνεια ενοχλείται λιγότερο από ότι με την εκσκαφή. Εντούτοις, με αυτή τη μέθοδο είναι δυνατή η τοποθέτηση συγκεκριμένου μόνο τύπου γραμμής μεταφοράς (βλέπε Σχήμα Π.6.5).
- Διάτρηση. Με τα σύγχρονα μέσα είναι διαθέσιμη μια σειρά τεχνολογιών για τη διάτρηση του εδάφους και την κατασκευή στοών για την τοποθέτηση των γραμμών μεταφοράς. Η διάτρηση αυτή μπορεί να γίνει με τηλεκατευθυνόμενα τρυπάνια προκειμένου να κατασκευαστούν οι στοές (βλέπε Σχήμα Π.6.6).



Σχήμα Π.6.4: Εκσκαφή.



Σχήμα Π.6.5: Όργωμα.





Σχήμα Π.6.6: Διάτρηση.

Όπως απεικονίζεται στο Σχήμα Π.6.7, η δομή μιας υπόγειας γραμμής μεταφοράς χαρακτηρίζεται από τα ακόλουθα μέρη από εσωτερικά σε εξωτερικά στρώματα: αγωγός, ημιαγώγιμο στρώμα αγωγού, μόνωση, ημιαγώγιμο στρώμα μόνωσης, θωράκιση/ουδέτερος και περίβλημα.

Αγωγός. Ο αγωγός είναι ο φορέας του ρεύματος στη γραμμή μεταφοράς. Οι



Σχήμα Π.6.7: Γενική δομή ενός υπόγειου καλωδίου.

αγωγοί που χρησιμοποιούνται στις υπόγειες γραμμές είναι κατασκευασμένοι από αλουμίνιο και χαλκό. Οι αγωγοί μπορούν να είναι συμπαγείς (solid) ή συνεστραμμένοι (stranded). Οι συμπαγείς αγωγοί είναι φθηνότεροι και εμφανίζουν καλύτερη αγωγιμότητα. Εντούτοις, οι συνεστραμμένοι αγωγοί έχουν μεγαλύτερη ευελιξία και διάρκεια ζωής.

- Ημιαγώγιμο στρώμα αγωγού. Το ημιαγώγιμο στρώμα αγωγού είναι το περίβλημα που περιβάλλει τον αγωγό ώστε να επιτρέπει την ύπαρξη ενός ομαλού, ακτινωτού ηλεκτρικού πεδίου στο εσωτερικό της μόνωσης. Χωρίς αυτό το περίβλημα, η κλίση του ηλεκτρικού πεδίου θα συγκεντρωνόταν στις στενότερες διεπαφές μεταξύ του αγωγού και της μόνωσης, με αποτέλεσμα η αυξανόμενη εντοπισμένη πίεση να τείνει να διαλύσει τη μόνωση. Τα ημιαγώγιμα στρώματα αγωγών κατασκευάζονται με προσθήκη άνθρακα σε ένα κανονικά μονωμένο πολυμερές υλικό όπως το EPR (Ethylene-PRopylene ή λάστιχοαιθυλένιο-προπυλενίου), το PE ή XLPE.
- Μόνωση. Η μόνωση συγκρατεί τα ηλεκτρόνια ώστε να επιτρέπει στους αγωγούς με μικρή σχετικά διάμετρο να μπορούν να υποστηρίξουν σημαντικές τάσεις. Οι βασικές παράμετροι της μόνωσης γραμμών μεταφοράς είναι: η διηλεκτρική σταθερά (dielectric constant), η ειδική αντίσταση όγκου (volume resistivity), οι διηλεκτρικές απώλειες και ο παράγοντας απωλειών (dissipation factor ή loss factor). Με κριτήριο τη μόνωση, οι γραμμές μεταφοράς μπορούν να ταξινομηθούν στις εξής κατηγορίες:

Γραμμές μεταφοράς PILC (Paper Insulated Lead Covered ή γραμμές μεταφοράς μονωμένες με χαρτί και επικαλυμμένες με μόλυβδο). Οι μονωμένες με χαρτί γραμμές μεταφοράς παρέχουν αξιόπιστη υπόγεια διανομή ισχύος για δεκαετίες. Στις γραμμές μεταφοράς (καλώδια) PILC γύρω από τον αγωγό τυλίγονται ταινίες χαρτιού Κραφτ που είναι ξηρές και εμποτισμένες σε πετρέλαιο. Μια κάλυψη μολύβδου επικαλύπτει τον πυρήνα ενώ πάνω από το περίβλημα μολύβδου τοποθετείται ένα προστατευτικό περίβλημα. Παραδείγματα γραμμών μεταφοράς PILC απεικονίζονται στα Σχήματα Π.6.8α και Π.6.8β.

Όσον αφορά το Σχήμα Π.6.8β, απεικονίζεται μια ευρέως χρησιμοποιούμενη γραμμή μεταφοράς PILC: μια θωράκιση (3) γύρω από τους τρεις αγωγούς (1+2). Οι αγωγοί (1) κατασκευάζονται από χαλκό ή αλουμίνιο. Η μόνωση αποτελείται όπως αναφέρθηκε από τυλίγματα ταινιών χαρτιού, εμποτισμένα σε ένα μίγμα πετρελαίου, κεριού και ρητίνης (2+3). Το πάχος των αγωγών και της θωράκισης εξαρτάται από το επίπεδο της μεταφερόμενης ισχύος. Η θωράκιση από μόλυβδο (4) λειτουργεί ως ουδέτερος και εξασφαλίζει τη στεγανότητα της γραμμής μεταφοράς. Τα υπόλοιπα μέρη της γραμμής μεταφοράς είναι χαρτί βουτηγμένο σε άσφαλτο (5), μόνωση (6), οπλισμός από ατσάλι (7), μόνωση βουτηγμένη σε άσφαλτο (8) και περίβλημα (9).

- Μονωμένη γραμμή μεταφοράς με συνθετικό. Ως μονωτές γραμμής μεταφοράς μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορα υλικά όπως το PVC, το PE, το XLPE, το TR-XLPE (Tree-Retardant Cross-Linked PolyEthylene ή διασυνδεμένο δεντροκαθυστερών πολυαιθυλένιο) και το EPR. Αυτές οι συνθετικές μονώσεις είναι σκληρές, φθηνές και έχουν καλές ηλεκτρικές ιδιότητες. Παράδειγμα γραμμής μεταφοράς XLPE απεικονίζεται στο Σχήμα Π.6.9.
- Ημιαγώγιμο στρώμα θωράκισης. Το ημιαγώγιμο στρώμα θωράκισης περιβάλλει τη μόνωση και επιτρέπει την ύπαρξη ενός ομαλού ηλεκτρικού πεδίου στη διεπαφή μεταξύ της μόνωσης και της θωράκισης/ουδετέρου. Χωρίς αυτό το ημιαγώγιμο στρώμα, η ηλεκτρική κλίση του πεδίου θα συγκεντρωνόταν στις πιο στενές διεπαφές μεταξύ της μόνωσης και της





Σχήμα Π.6.9: Γραμμή μεταφοράς XLPE.

θωράκισης με αποτέλεσμα η αυξανόμενη εντοπισμένη πίεση να τείνει να διασπάσει τη μόνωση. Μια σημαντική πτυχή του ημιαγώγιμου στρώματος της θωράκισης είναι η "δυνατότητα ταινίας" (strip-ability). Το ημιαγώγιμο στρώμα της θωράκισης πρέπει να μπορεί εύκολα να απογυμνωθεί προκειμένου να μπορεί να τερματίζεται και να συνδέεται. Αυτά τα περιβλήματα κατασκευάζονται με προσθήκη άνθρακα σε ένα πολυμερές υλικό μόνωσης όπως το EPR, το PE ή το XLPE.

- Θωράκιση ή ουδέτερος (shield or neutral). Η θωράκιση είναι το μεταλλικό περίβλημα που περιβάλλει τη μόνωση των γραμμών μεταφοράς. Η θωράκιση διατηρεί το εξωτερικό της γραμμής μεταφοράς σε τάση γης ενώ ταυτόχρονα παρέχει διαδρομή για το ρεύμα επιστροφής (return current) και το ρεύμα σφάλματος (fault current). Η θωράκιση προστατεύει επίσης τη γραμμή μεταφοράς από την κεραυνοπληξία (lightning strikes) και από το ρεύμα άλλων πηγών σφάλματος. Η θωράκιση πέραν από ενιαία δομή μπορεί επίσης να αποτελείται από αγωγούς (βλέπε Σχήμα Π.6.10), από ταινίες (βλέπε Σχήμα Π.6.11) ή συνδυασμό αυτών. Ο πρώτος τύπος, που χρησιμοποιείται στις γραμμές μεταφοράς γνωστές και ως ομόκεντρες ουδέτερες γραμμές μεταφοράς, είναι σε θέση να φέρει διαφορικά ρεύματα (unbalanced currents). Ο δεύτερος τύπος, που χρησιμοποιείται στις γραμμές μεταφοράς γνωστές και ως γραμμές μεταφοράς ισχύος, παρουσιάζει υψηλότερη αντίσταση. Ο αγωγός είναι κατασκευασμένος από χαλκό αφού το αλουμίνιο διαβρώνεται πάρα πολύ ταχέως για να μπορεί να αποδώσει καλά σε αυτήν την λειτουργία.
- Περίβλημα (jacket). Το περίβλημα γραμμών μεταφοράς είναι η εξωτερική κάλυψη που περιβάλλει τον πυρήνα, τις θωρακίσεις και τη μόνωση της γραμμής μεταφοράς. Ο σκοπός του είναι να προστατεύσει τα εξωτερικά μέρη της γραμμής μεταφοράς από μηχανικές ζημιές, χημικές ουσίες, υγρασία και έκθεση σε επιβλαβείς περιβαλλοντικές συνθήκες. Τα περισσότερα περιβλήματα είναι πλαστικά. Το PVC είναι ένα πλαστικό υλικό από τα ευρέως χρησιμοποιούμενα υλικά για περίβλημα. Πάντως, το συνηθέστερο υλικό περιβλήματος στις σύγχρονες εφαρμογές είναι το LLDPE (Linear Low-Density PolyEthylene ή γραμμικής χαμηλής πυκνότητας πολυαιθυλένιο).

Οι υπόγειες γραμμές μεταφοράς μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο κατηγορίες: τις



Σχήμα Π.6.10: Ομόκεντρη ουδέτερη γραμμή μεταφοράς.



Σχήμα Π.6.11: Γραμμή μεταφοράς ισχύος.

υπόγειες γραμμές μεταφοράς ενιαίου αγωγού (βλέπε Σχήμα Π.6.12) και τις υπόγειες γραμμές μεταφοράς τριών αγωγών (κάθε αγωγός με τη μόνωση και το περίβλημά του) (βλέπε Σχήμα Π.6.13). Επίσης, όλες οι γραμμές μεταφοράς μπορούν να διαθέτουν οπλισμό (θωρακισμένο στρώμα) πέρα από τη μόνωση για να παρέχουν στη γραμμή μεταφοράς μηχανική προστασία.



Σχήμα Π.6.12: Γραμμή μεταφοράς ενιαίου αγωγού.



Σχήμα Π.6.13: Γραμμή μεταφοράς τριών αγωγών.

Π.6.2 Θωρακισμένες Γραμμές Μεταφοράς

Η ανά μονάδα μήκους μήτρας σύνθετης αντίστασης **Ζ** που εμφανίζεται στην (6.6.1) αναπτύσσεται υπό τη μορφή της

$$-\frac{dV_i^L}{dz} = Z_{i1}I_1^L + Z_{i2}I_2^L + Z_{i3}I_3^L + Z_{i4}I_4^L + Z_{i5}I_5^L, \ i = 1, 2, 3, 4, 5$$
(II.6.1)

όπου κάθε στοιχείο είναι μια σε σειρά σύνδεση όρων εσωτερικών συνθέτων αντιστάσεων και εξωτερικών συνθέτων αντιστάσεων [134], [135], [157], [227], [231], [284], [285], [300], [306], [308]-[311]

Ομοίως, η ανά μονάδα μήκους μήτρας σύνθετη αγωγιμότητα Υ που εμφανίζεται στην (6.6.2) αναπτύσσεται υπό τη μορφή της

$$-\frac{dI_i^L}{dz} = Y_{i1}V_1^L + Y_{i2}V_2^L + Y_{i3}V_3^L + Y_{i4}V_4^L + Y_{i5}V_5^L, \ i = 1, 2, 3, 4, 5$$
(II.6.2)

όπου κάθε στοιχείο είναι ένας συνδυασμός εξωτερικών και αμοιβαίων όρων σύνθετης αγωγιμότητας [134], [135], [157], [227], [231], [284], [285], [300], [306], [308]-[311].

Π.6.3 Στοιχεία των ανά Μονάδα Μήκους Μητρών Σύνθετης Αντίστασης και Σύνθετης Αγωγιμότητας Γραμμών Μεταφοράς Πολλών Αγωγών Θαμμένων στο Έδαφος

Στόχος είναι να προσδιοριστούν τα στοιχεία των ανά μονάδα μήκους μητρών σύνθετης αντίστασης **Z** και σύνθετης αγωγιμότητας **Y** που υπεισέρχονται στις (6.6.1) και (6.6.2). Ο υπολογισμός αυτός θα γίνει για την περίπτωση γραμμών μεταφοράς πολλών αγωγών τύπου πυρήνα.

Τα στοιχεία της ανά μονάδα μήκους μήτρας σύνθετης αντίστασης της (Π.6.1) προσδιορίζονται αναλυτικά στη συνέχεια. Στην (Π.6.1) υπάρχουν όροι σύνθετης αντίστασης οι οποίοι προστίθενται με όρους εξωτερικής αυτεπαγωγής των εσωτερικών αγωγών. Αν από τους όρους των συνθέτων αντιστάσεων εξαιρεθούν οι εσωτερικές αντιστάσεις αγωγών Z_i (internal impedances) οι υπόλοιποι όροι είναι αυτοί που συμβάλλουν στη σύζευξη μεταξύ των αγωγών και της θωράκισης, αφενός, και της θωράκισης και του οπλισμού, αφετέρου.

Εσωτερική Αντίσταση Αγωγών

Ως προς την εσωτερική αντίσταση των αγωγών Z_i, αυτή οφείλεται στο επιδερμικό φαινόμενο και για την περίπτωση αγωγών τύπου πυρήνα προκύπτει από τη σχέση [299], [308]

$$Z_{i}(f) = \frac{\left[j(2\pi f)\mu_{0}\sigma_{w}\right]^{1/2}}{2\pi\sigma_{w}r} \frac{I_{0}\left\{\left[j(2\pi f)\mu_{0}\sigma_{w}\right]^{1/2}r\right\}}{I_{1}\left\{\left[j(2\pi f)\mu_{0}\sigma_{w}\right]^{1/2}r\right\}}$$
(II.6.3)

Στην παρούσα διατριβή χρησιμοποιείται η προσεγγιστική σχέση

$$Z_{i}(f) = \frac{[j(2\pi f)\mu_{0}\sigma_{w}]^{1/2}}{2\pi\sigma_{w}r} \coth\{0.777r[j(2\pi f)\mu_{0}\sigma_{w}]^{1/2}\} + \frac{0.356}{\pi\sigma r^{2}}$$
(II.6.4)

των Wedepohl και Wilcox [300] που συγκλίνει εξαιρετικά προς την (Π.6.3) ως προς τη συχνότητα.

Σύνθετες Αντιστάσεις Επιφάνειας Κοίλων Στερεών Κυλινδρικών Αγωγών

Όσον αφορά τους όρους που συμβάλλουν στη σύζευξη μεταξύ αγωγών και θωράκισης και μεταξύ θωράκισης και οπλισμού, στην παρούσα διατριβή χρησιμοποιούνται οι προσεγγίσεις που αρχικά εισήχθησαν από τον Schelkunoff [231], [284], [285], [299], [308] για τις επιφανειακές σύνθετες αντιστάσεις κοίλων στερεών κυλινδρικών ατελών αγωγών με εσωτερική και εξωτερική ακτίνα α και b, αντίστοιχα. Η επιστροφή της ομοαξονικής πορείας θεωρείται ότι γίνεται μερικώς εντός και μερικώς εκτός του αγωγού. Έστω Z_{aa} η επιφανειακή σύνθετη αντίσταση λόγω εξωτερικής επιστροφής και Z_{bb} η επιφανειακή σύνθετη αντίσταση λόγω εξωτερικής επιστροφής. Στην ουσία, δηλαδή, πρόκειται για δύο γραμμές μεταφοράς με κατανεμημένη αμοιβαία σύνθετη αντίσταση Z_{ab} μεταξύ των δύο επιστροφών. Στην ανάλυση κατά Schelkunoff, το Z_{ab} οφείλεται στη μίξη δύο ρευμάτων στον κοίλο αγωγό κοινό και για τις δύο γραμμές και καλείται σύνθετη αντίσταση μεταφοράς από μια επιφάνεια αγωγού στην άλλη. Χρησιμοποιώντας τις μαγνητεγερτικές εντάσεις που συνδέονται με τα δύο ρεύματα, προκύπτουν οι σύνθετες αντιστάσεις επιφάνειας από τις σχέσεις

$$Z_{aa} = \frac{[j(2\pi f)\mu_{0}\sigma_{w}]^{1/2}}{2\pi\sigma_{w}\alpha\Lambda} \Big[\Big(I_{0} \Big\{ \alpha [j(2\pi f)\mu_{0}\sigma_{w}]^{1/2} \Big\} K_{1} \Big\{ b [j(2\pi f)\mu_{0}\sigma_{w}]^{1/2} \Big\} \Big] + \Big(I_{1} \Big\{ b [j(2\pi f)\mu_{0}\sigma_{w}]^{1/2} \Big\} K_{0} \Big\{ \alpha [j(2\pi f)\mu_{0}\sigma_{w}]^{1/2} \Big\} \Big] \Big]$$
(II.6.5.1)

$$Z_{bb} = \frac{[j(2\pi f)\mu_0\sigma_w]^{1/2}}{2\pi\sigma_w b\Lambda} \Big[\Big(I_0 \Big\{ b[j(2\pi f)\mu_0\sigma_w]^{1/2} \Big\} K_1 \Big\{ \alpha[j(2\pi f)\mu_0\sigma_w]^{1/2} \Big\} + \Big(I_1 \Big\{ \alpha[j(2\pi f)\mu_0\sigma_w]^{1/2} \Big\} K_0 \Big\{ b[j(2\pi f)\mu_0\sigma_w]^{1/2} \Big\} \Big] \Big]$$
(II.6.5.2)

$$Z_{ab} = \frac{1}{2\pi\sigma_w \alpha b\Lambda} \tag{\Pi.6.5.3}$$

όπου

 $\Lambda = \left[\left(I_1 \left\{ b [j(2\pi f) \mu_0 \sigma_w]^{1/2} \right\} K_1 \left\{ \alpha [j(2\pi f) \mu_0 \sigma_w]^{1/2} \right\} \right) - \left(I_1 \left\{ \alpha [j(2\pi f) \mu_0 \sigma_w]^{1/2} \right\} K_1 \left\{ b [j(2\pi f) \mu_0 \sigma_w]^{1/2} \right\} \right) \right] \quad (\Pi.6.5.4)$

Στη παρούσα διατριβή χρησιμοποιούνται οι απλές προσεγγίσεις που προτάθηκαν από τους Wedepohl και Wilcox [300] στις (Π.6.6) για τις σύνθετες αντιστάσεις αγωγών και ισχύουν εάν $\frac{b-a}{b+a} < \frac{1}{8}$. Οι σχέσεις αυτές έχουν επιβεβαιωθεί για διάφορες πρακτικές σωληνοειδείς θωρακίσεις αγωγών [284], [285] προσεγγίζοντας με ακρίβεια τις σχέσεις (Π.6.5)

$$Z_{aa} \cong \frac{[j(2\pi f)\mu_0 \sigma_w]^{1/2}}{2\pi \sigma_w \alpha} \coth\{(b-a)[j(2\pi f)\mu_0 \sigma_w]^{1/2}\} - \frac{1}{2\pi \sigma_w a(a+b)}$$
(II.6.6.1)

$$Z_{bb} \simeq \frac{[j(2\pi f)\mu_0\sigma_w]^{1/2}}{2\pi\sigma b} \coth\{(b-a)[j(2\pi f)\mu_0\sigma_w]^{1/2}\} - \frac{1}{2\pi\sigma b(a+b)}$$
(II.6.6.2)

$$Z_{ab} \cong \frac{[j(2\pi f)\mu_0\sigma_w]^{1/2}}{\pi\sigma(a+b)} \frac{1}{\sinh\{(b-a)[j(2\pi f)\mu_0\sigma_w]^{1/2}\}}$$
(II.6.6.3)

Οι σύνθετες αντιστάσεις Z_{aa} , Z_{bb} και Z_{ab} μπορούν στη συνέχεια να χρησιμοποιηθούν για τη θωράκιση και τον οπλισμό. Για τη συνέχεια της ανάλυσης χρησιμοποιούνται δύο θεωρήματα που αφορούν τις σύνθετες αντιστάσεις σωληνοειδών αγωγών [284], [299], [308]

- 1. Αν η διαδρομή επιστροφής είναι αποκλειστικά εξωτερική $(I_a = 0)$ ή αποκλειστικά εσωτερική $(I_b = 0)$, η διαμήκης ηλεκτρεργετική δύναμη στην επιφάνεια που είναι πλησιέστερη στη διαδρομή επιστροφής ισούται με την αντίστοιχη ίδια επιφανειακή σύνθετη αντίσταση πολλαπλασιασμένη με το συνολικό ρεύμα που ρέει στον αγωγό και η διαμήκης ηλεκτρεργετική δύναμη στην άλλη επιφάνεια ισούται με την σύνθετη αμοιβαία αντίσταση μεταφοράς πολλαπλασιασμένη με το συνολικό ρεύμα.
- Αν η διαδρομή επιστροφής είναι τμηματικά εξωτερική και τμηματικά εσωτερική, η συνολική διαμήκης ηλεκτρεργετική δύναμη σε κάθε πλευρά της επιφάνειας μπορεί να προκύψει εφαρμόζοντας το Θεώρημα 1 σύμφωνα με την αρχή της υπέρθεσης.

Σύνθετη Αντίσταση και Σύνθετη Αγωγιμότητα λόγω Μόνωσης

Ας θεωρηθεί μόνωση μεταξύ δύο αγώγιμων στρωμάτων με ακτίνες r_{inner} και r_{outer} , αντίστοιχα. Τότε, η σύνθετη αντίσταση και η σύνθετη αγωγιμότητα λόγω μόνωσης μπορεί να υπολογιστεί μέσω των σχέσεων

$$Z_{ins} = j2\pi f L_{ins} \tag{\Pi.6.7}$$

$$Y_{ins} = j2\pi f C_{ins} \tag{\Pi.6.8}$$

όπου

$$L_{ins} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\{r_{outer}/r_{inner}\}$$
(II.6.9)

$$C_{ins} = \frac{2\pi\varepsilon_r'\varepsilon_0}{\ln\{r_{outer}/r_{inner}\}}$$
(II.6.10)

 L_{ins} και C_{ins} είναι η ανά μονάδα μήκους αυτεπαγωγή και χωρητικότητα της μόνωσης. Η σύνθετη αντίσταση και σύνθετη αγωγιμότητα της μόνωσης εξαρτάται από τη συχνότητα, το πάχος της και τις ιδιότητες του μονωτικού μέσου.

Σύνθετη Αντίσταση Εδάφους

Στη συνέχεια θεωρείται ότι η εξωτερική ακτίνα του καλωδίου είναι R_{ab} ενώ το βάθος ταφής του καλωδίου είναι d. Η έκφραση σύνθετης αντίστασης του εδάφους (ground impedance) αναπτύχθηκε πρώτα από τον Pollaczek [309], [310]

$$Z_{g}^{Pollaczek} = \frac{j(2\pi f)\mu_{0}}{2\pi} \left[K_{0} \left\{ R_{ab} \left[j(2\pi f)\mu_{0}\sigma_{g} \right]^{1/2} \right\} - K_{0} \left\{ j(2\pi f)\mu_{0}\sigma_{g} \left(R_{ab}^{2} + 4d^{2} \right)^{1/2} \right\} + \cdots \right] \\ \left[\cdots + \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{e^{-2d \left[u^{2} + j(2\pi f)\mu_{0}\sigma_{g} \right]^{1/2}}}{|u| + \left[u^{2} + j(2\pi f)\mu_{0}\sigma_{g} \right]^{1/2}} e^{juR_{ab}} du \right]$$
(II.6.11)

Η έκφραση αυτή αποτελεί μια προσέγγιση χαμηλών συχνοτήτων, δηλαδή ισχύει για συχνότητες που ικανοποιούν τη συνθήκη $2\pi f \ll \sigma_g/\varepsilon_g$. Λόγω της προσέγγισης χαμηλών συχνοτήτων, στη (Π.6.11) δεν περιλαμβάνεται η επιτρεπτότητα του εδάφους. Όλες οι περιπλοκές που συνδέονται με τη σύνθετη αντίσταση εδάφους κατά Carson για τις εναέριες γραμμές μεταφοράς, ισχύουν επίσης στην έκφραση της σύνθετης αντίστασης εδάφους κατά Pollaczek για τις υπόγειες γραμμές μεταφοράς. Ο Saad [311] αναλυτικά έχει αποδείξει ότι μια άριστη προσέγγιση της (Π.6.11) δίδεται από την

$$Z_{g}^{Saad} = \frac{j(2\pi f)\mu_{0}}{2\pi} \left(K_{0} \left\{ R_{ab} \left[j(2\pi f)\mu_{0}\sigma_{g} \right]^{1/2} \right\} + \frac{2e^{-2d\left[j(2\pi f)\mu_{0}\sigma_{g} \right]^{1/2}}}{4 + R_{ab}^{2} \left[j(2\pi f)\mu_{0}\sigma_{g} \right]} \right)$$
(II.6.12)

Ο Wedephol και Wilcox [300], ο Ametani [216] και ο Semlyen [221] έχουν προτείνει κλειστές εκφράσεις για τη σύνθετη αντίσταση εδάφους.

Για ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων εφόσον ισχύει η προσέγγιση γραμμών μεταφοράς, ο Sunde [227] παραθέτει την έκφραση σύνθετης αντίστασης εδάφους της σχέσης

$$Z_{g}^{Sunde} = \frac{j(2\pi f)\mu_{0}}{2\pi} \left(K_{0} \left\{ R_{ab} \gamma_{g} \right\} - K_{0} \left\{ \gamma_{g} \left[R_{ab}^{2} + 4d^{2} \right]^{1/2} \right\} + 2 \int_{0}^{+\infty} \frac{e^{-2d\left(u^{2} + \gamma_{g}^{2}\right)^{1/2}}}{u + \left(u^{2} + \gamma_{g}^{2}\right)^{1/2}} \cos(uR_{ab}) du \right)$$
(II.6.13)

όπου

$$\gamma_g = \left[j(2\pi f) \mu_0 \left(\sigma_g + j 2\pi f \varepsilon_g \right) \right]^{1/2} \tag{\Pi.6.14}$$

είναι η μιγαδική σταθερά διάδοση του εδάφους. Η (Π.6.13) είναι παρόμοια με την (Π.6.11) με μόνη διαφορά ότι στην (Π.6.13) χρησιμοποιήθηκαν οι πλήρεις εκφράσεις της μιγαδικής σταθεράς διάδοσης του εδάφους αντί της αντίστοιχης προσέγγισης χαμηλών συχνοτήτων της (Π.6.11) ή (Π.6.12). Το ολοκλήρωμα της (Π.6.13) συγκλίνει αργά απαιτώντας υψηλούς χρόνους υπολογισμού με πιθανά λάθη λόγω αποκοπής καθώς η συχνότητα αυξάνεται. Περαιτέρω, διαπιστώθηκε ότι οι πρώτοι δύο όροι Bessel της (Π.6.13) παρουσιάζουν ταλάντωση όταν η συχνότητα είναι υψηλή. Εντούτοις, η έκφραση κατά Sunde για την επίγεια σύνθετη αντίσταση ισχύει υπό την έννοια ότι χρησιμοποιεί τις πλήρεις εκφράσεις για τη μιγαδική σταθερά διάδοσης. Ο Bridges [382], ο Chen [383] και ο Wait [384] έχουν ανεξάρτητα προτείνει πλέον πολύπλοκες εκφράσεις για τη σύνθετη αντίσταση εδάφους. Εντούτοις, όλες οι εκφράσεις που παρουσιάστηκαν παρουσιάζουν ταλάντωση στις υψηλές συχνότητες κάτι το οποίο απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή κατά τον υπολογισμό των εμπλεκομένων εκφράσεων.

Ο Vance [317] πρότεινε μια από τις απλούστερες μορφές κλειστής προσέγγισης για την (Π.6.13)

$$Z_{g}^{vance} = \frac{(2\pi f)\mu_{0}}{2\pi R_{ab}\gamma_{g}} \frac{H_{0}^{(1)}\{jR_{ab}\gamma_{g}\}}{H_{1}^{(1)}\{jR_{ab}\gamma_{g}\}}$$
(II.6.15)

όπου χρησιμοποιούνται συναρτήσεις Hankel αντί των συναρτήσεων Bessel. Ο Petrache [385] πρότεινε τη λογαριθμική προσέγγιση της σύνθετης αντίστασης εδάφους της σχέσης

$$Z_g^{Log} = \frac{j(2\pi f)\mu_0}{2\pi} \ln\left\{\frac{1+R_{ab}\gamma_g}{R_{ab}\gamma_g}\right\}$$
(II.6.16)

Στις (Π.6.15) και (Π.6.16) δεν λαμβάνεται υπόψη το βάθος ταφής του καλωδίου. Μοντέλα τα οποία αμελούν τη διεπαφή αέρα-εδάφους (air-earth interface) [317] είναι γνωστά ως μοντέλα άπειρου εδάφους (infinite earth model). Ο Wait [384] έχει δείξει ότι αυτό ισχύει εφόσον $2jd \left[\varepsilon_g \mu_0 (2\pi f)^2 - j(2\pi f) \mu_0 \sigma_g \right]^{/2} >> 1$. Επιπλέον, μπορεί να αποδειχθεί αριθμητικά ότι για οποιοδήποτε συνδυασμό σύστασης του εδάφους, η λογαριθμική προσέγγιση και οι προσεγγίσεις Vance για τη σύνθετη αντίσταση εδάφους είναι ταυτόσημες.

Η έκφραση της σύνθετης αντίστασης εδάφους που χρησιμοποιείται στην παρούσα διατριβή είναι αυτή του λογαριθμικοεκθετικού τύπου (logarithmicexponential formula) που προτείνεται στις [231], [284], [285], [386]-[388]. Το πλεονέκτημα της σχέσης αυτής είναι ότι περιλαμβάνει τις πληροφορίες που σχετίζονται με το βάθος ταφής του καλωδίου. Από το συνδυασμό των (Π.6.16) και του όρου του βάθους από την (Π.6.12) και μετά από ανάλυση ευαισθησίας [231], [284], [285], [386]-[388], η λογαριθμικοεκθετική έκφραση καταλήγει

$$Z_{g} = Z_{g}^{Log-Exp} = \frac{j(2\pi f)\mu_{0}}{2\pi} \ln\left\{\frac{1+R_{ab}\gamma_{g}}{R_{ab}\gamma_{g}}\right\} + \frac{j(2\pi f)\mu_{0}}{2\pi}\frac{2e^{-2d\cdot|\gamma_{g}|}}{4+R_{ab}^{2}\gamma_{g}^{2}}$$
(II.6.17)

Μπορεί να φανεί ότι η λογαριθμικοεκθετική προσέγγιση βρίσκεται σε συμφωνία με τις εκφράσεις κατά Sunde και κατά Wait. Επίσης, μπορεί να δειχθεί ότι καθώς $f \rightarrow \infty \ Z_g^{Log-Exp} \rightarrow \frac{1}{2\pi R_{ab}} [\mu_0/\varepsilon_g]^{1/2}$, το οποίο είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για μελέτη στο

πεδίο χρόνου.

Σύμφωνα με τον Vance, το γινόμενο της σύνθετης αντίστασης εδάφους και της σύνθετης αγωγιμότητας εδάφους είναι ίσο με τη σταθερά διάδοσης εδάφους $Z_g Y_g = \gamma_g^2$ (Π.6.18)

Η σύνθετη αγωγιμότητα εδάφους συνήθως δεν λαμβάνεται υπόψη στις προσομοιώσεις μεταβατικών καταστάσεων όπως στο πακέτο προγραμμάτων ΕΜΤΡ [221], [383]. Στη διατριβή αυτή η σύνθετη αγωγιμότητα εδάφους έχει ληφθεί υπόψη.

Ανά Μονάδα Μήκους Μήτρες Αυτεπαγωγής και Χωρητικότητας

Στη συνέχεια υπολογίζονται οι υπόλοιποι όροι της ανά μονάδα μήκους αγωγιμότητας και χωρητικότητας.

Τα στοιχεία των ανά μονάδα μήκους μητρών αυτεπαγωγής και χωρητικότητας μιας γραμμής μεταφοράς πολλών αγωγών όταν οι αγωγοί τοποθετούνται εντός ομογενούς μονωτικού μέσου όπως απεικονίζεται στο Σχήμα Π.6.14 αναλύονται στις [61], [119].

Στην περίπτωση μη συνεστραμμένων υπόγειων γραμμών μεταφοράς MT *n* αγωγών τύπου πυρήνα, η ανά μονάδα μήκους *n*×*n* μήτρα αυτεπαγωγής L έχει στοιχεία [119], [231], [284]:

$$\left[\mathbf{L}\right]_{i\times i} = \frac{\psi_i}{I_i}\Big|_{I_1 = \cdots = I_{i+1} = \cdots = I_n = 0} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left\{\frac{r_s - d_i}{r_i}\right\} + \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left\{\frac{r_s^2/d_i - d_i}{r_s^2/d_i - r_s}\right\} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left\{\frac{r_s^2 - d_i^2}{r_s r_i}\right\}$$
(II.6.19)

$$\left[\mathbf{L}\right]_{i\times j} = \left[\mathbf{L}\right]_{j\times i} = \frac{\psi_{j}}{I_{i}}\bigg|_{I_{1}=\cdots I_{i+1}=I_{i+1}=\cdots=I_{n}=0} = \frac{\mu_{0}}{2\pi} \ln\left\{\frac{d_{j}}{r_{s}}\bigg[\frac{(d_{i}d_{j})^{2} + r_{s}^{4} - 2d_{i}d_{j}r_{s}^{2}\cos\{\theta_{ij}\}}{(d_{i}d_{j})^{2} + d_{j}^{4} - 2d_{i}d_{j}^{3}\cos\{\theta_{ij}\}}\bigg]^{1/2}\right\}$$
(II.6.20)

όπου $[\cdot]_{i \times j}$ συμβολίζει το στοιχείο μιας μήτρας που βρίσκεται στη θέση i της στήλης j.

Η ανά μονάδα μήκους $n \times n$ μήτρα χωρητικότητας C προκύπτει από την ανά μονάδα μήκους μήτρα αυτεπαγωγής από τη σχέση

$$\mathbf{C} = \mu_0 \varepsilon_0 \varepsilon_r' \mathbf{L}^{-1} \tag{\Pi.6.21}$$

Αναλυτικός Υπολογισμός των Μητρών Σύνθετης Αντίστασης και Σύνθετης

Αγωγιμότητας

Για την περίπτωση υπόγειων τριφασικών γραμμών μεταφοράς MT, η ανά μονάδα μήκους σύνθετη αντίσταση **Z** των (6.6.1), (Π.6.1) προκύπτει από τις σχέσεις: $Z = Z + i2\pi f [\mathbf{L}] + Z$ (Π.6.22.1)

$$Z_{11} = Z_{1} + \int 2\pi j \left[\mathbf{L} \right]_{1\times 1} + Z_{shield-in}$$
(11.0.22.1)

$$Z_{22} = Z_{i} + j2\pi f [\mathbf{L}]_{2\times 2} + Z_{shield-in}$$
(II.6.22.2)

$$Z_{33} = Z_{i} + j2\pi f [\mathbf{L}]_{3\times 3} + Z_{shield-in}$$
(II.6.22.3)

$$Z_{12} = Z_{21} = j2\pi f[\mathbf{L}]_{1\times 2} + Z_{shield-in}$$
(II.6.22.4)

$$Z_{13} = Z_{31} = j2\pi f[\mathbf{L}]_{3\times 1} + Z_{shield-in}$$
(II.6.22.5)



Σχήμα Π.6.14: Προσδιορισμός των ανά μονάδα μήκους μητρών αυτεπαγωγής και χωρητικότητας για *n* αγωγούς σε κυλινδρική θωράκιση: (α) διατομή, (β) η απεικόνιση με χρήση ειδώλων [119], [284].

$$Z_{14} = Z_{24} = Z_{34} = Z_{41} = Z_{42} = Z_{43} = -Z_{shield-mutual}$$
(II.6.22.6)

$$Z_{15} = Z_{25} = Z_{35} = Z_{51} = Z_{52} = Z_{53} = 0 \tag{\Pi.6.22.7}$$

$$Z_{23} = Z_{32} = j2\pi f [\mathbf{L}]_{2\times 3} + Z_{shield-in}$$
(II.6.22.8)

$$Z_{44} = Z_{shield-out} + Z_{shield-armor-insulation} + Z_{armor-in}$$
(II.6.22.9)

$$Z_{45} = Z_{54} = -Z_{armor-mutual} \tag{\Pi.6.22.10}$$

 $Z_{55} = Z_{armor-out} + Z_{armor-earth-insulation} + Z_g$ (II.6.22.11)

όπου

 $Z_{\rm i}$ στις (Π.6.22.1)-(Π.6.22.3) είναι η εσωτερική αντίσταση αγωγού και δίδεται από την (Π.6.4),

 $Z_{shield-in}$ και $Z_{armor-in}$ στις (Π.6.22.1)-(Π.6.22.5) και (Π.6.22.9), αντίστοιχα, είναι η εσωτερική σύνθετη αντίσταση αγωγού της θωράκισης και του οπλισμού, αντίστοιχα και δίδεται από την (Π.6.6.1),

 $Z_{shield-out}$ και $Z_{armor-out}$ στις (Π.6.22.9) και (Π.6.22.11), αντίστοιχα, είναι η εξωτερική σύνθετη αντίσταση αγωγού (tube-out impedance) της θωράκισης και του οπλισμού, αντίστοιχα και δίδεται από την (Π.6.6.2),

 $Z_{shield-mutual}$ και $Z_{armor-mutual}$ στις (Π.6.22.6) και (Π.6.22.10), αντίστοιχα είναι η αμοιβαία σύνθετη αντίσταση αγωγού της θωράκισης και του οπλισμού, αντίστοιχα και δίδεται από την (Π.6.6.3),

 $Z_{shield-armor-insulation}$ και $Z_{armor-earth-insulation}$ στις (Π.6.22.9) και (Π.6.22.11), αντίστοιχα είναι η σύνθετη αντίσταση λόγω μόνωσης μεταξύ θωράκισης και οπλισμού και μεταξύ οπλισμού και εδάφους, αντίστοιχα και δίδεται από την (Π.6.7)

και τέλος Z_g στην (Π.6.22.11) είναι η σύνθετη αντίσταση εδάφους και δίδεται από την (Π.6.17).

Για την περίπτωση της ανά μονάδα μήκους σύνθετης αγωγιμότητας Y των (Π.6.6), (Π.6.2), ισχύουν οι σχέσεις:

$$\mathbf{Y}_{3\times 3} = j2\pi f \mathbf{C}_{3\times 3} \tag{\Pi.6.23.1}$$

$$\hat{\eta} \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} \end{bmatrix} = j2\pi f \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{bmatrix}$$
(II.6.23.2)

$$Y_{14} = Y_{15} = Y_{24} = Y_{25} = Y_{34} = Y_{35} = 0 \tag{(II.6.23.3)}$$

$$Y_{41} = Y_{51} = Y_{42} = Y_{52} = Y_{43} = Y_{53} = 0 \tag{\Pi.6.23.4}$$

$$Y_{45} = Y_{54} = 0 \tag{\Pi.6.23.5}$$

$$Y_{44} = Y_{shield-armor-insulation} \tag{\Pi.6.23.6}$$

$$Y_{55} = Y_{armor-earth-insulation} // Y_g \tag{\Pi.6.23.7}$$

όπου

 $Y_{shield-armor-insulation}$ και $Y_{armor-earth-insulation}$ της (Π.6.23.6) και (Π.6.23.7), αντίστοιχα είναι η σύνθετη αγωγιμότητα λόγω μόνωσης μεταξύ θωράκισης/οπλισμού και οπλισμού/εδάφους, αντίστοιχα και δίδεται από τη σχέση (Π.6.8)

ενώ Y_{g} η σύνθετη αγωγιμότητα εδάφους της (Π.6.23.7) και δίδεται από την (Π.6.18).

Π.6.4 Προσέγγιση Θωράκισης/Οπλισμού Γραμμών Μεταφοράς Πολλών Αγωγών ΜΤ

Λόγω του μεγάλου πάχους της θωράκισης και του οπλισμού, οι μήτρες \mathbf{Z}_{inner} και \mathbf{Y}_{inner} μπορούν να διαγωνιοποιηθούν χωριστά ακολουθώντας τη διαδικασία του μετασχηματισμού Fourier που συνήθως χρησιμοποιείται για τη διαγωνιοποίηση κυκλικών μητρών [155], [156], [389]-[392] λόγω της κυκλικής συμμετρίας της διάταξης MTL. Το αποτέλεσμα της διαδικασίας διαγωνιοποίησης είναι

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \mathbf{T}_{V}^{inner} & \mathbf{0}_{3\times 2} \\ \mathbf{0}_{2\times 3} & \mathbf{T}_{V}^{outer} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{T}_{V}^{inner} & \mathbf{0}_{3\times 2} \\ \mathbf{0}_{2\times 3} & \mathbf{I}_{2} \end{bmatrix}$$
(II.6.24)

$$\mathbf{T}_{V}^{inner} = \mathbf{F}^{-1} = \left(\mathbf{F}^{-1}\right)^{T} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & e^{j2\pi/3} & e^{j4\pi/3} \\ 1 & e^{j4\pi/3} & e^{j2\pi/3} \end{bmatrix}$$
(II.6.25)

$$\mathbf{T}_{V}^{outer} = \mathbf{I}_{2} \tag{\Pi.6.26}$$

$$\mathbf{F} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1\\ 1 & e^{-j2\pi/3} & e^{-j4\pi/3}\\ 1 & e^{-j4\pi/3} & e^{-j2\pi/3} \end{bmatrix}$$
(II.6.27)

$$\mathbf{z} = \mathbf{T}^{-1} \mathbf{Z} \left(\mathbf{T}^T \right)^{-1} = diag \{ z_1 \quad z_2 \quad z_3 \quad z_4 \quad z_5 \}$$
(II.6.28)

$$z_{i} = \sum_{p=1}^{3} \left[\mathbf{Z}_{inner} \right]_{1 \times p} e^{j2\pi (p-1)(i-1)/3} \quad i = 1, 2, 3, \ z_{4} = Z_{44}, \ z_{5} = Z_{55}$$
(II.6.29)

$$\mathbf{y} = \mathbf{T}^T \mathbf{Y} \mathbf{T} = diag\{y_1 \quad y_2 \quad y_3 \quad y_4 \quad y_5\}$$
(II.6.30)

$$y_{i} = \sum_{q=1}^{3} \left[\mathbf{Y}_{inner} \right]_{1 \times q} e^{j2\pi (q-1)(i-1)/3} \quad i = 1, 2, 3, \ y_{4} = Y_{44}, \ y_{5} = Y_{55}$$
(II.6.31)

$$\gamma_{i} = (z_{i}y_{i})^{1/2}, \ i = 1,2,3,4,5$$

$$Z_{mc,i} = [\mathbf{Z}_{mc}(f)]_{i\times i} = [\mathbf{T}^{-1}\mathbf{Y}^{-1}(\mathbf{T}^{-1})^{T} diag\{\gamma_{1} \quad \gamma_{2} \quad \gamma_{3} \quad \gamma_{4} \quad \gamma_{5}\}]_{i\times i} =$$
(II.6.32)

$$=(z_i/y_i)^{1/2}, i = 1,2,3,4,5$$
 (II.6.33)

όπου \mathbf{T}_{v}^{inner} και \mathbf{T}_{v}^{outer} είναι οι 3×3 και 2×2 μήτρες ιδιοδιανυσμάτων, αντίστοιχα που συσχετίζουν τις τάσεις γραμμής με τις τάσεις των ρυθμών [134], [162] και [·] _{i×j} συμβολίζει το στοιχείο μιας μήτρας που βρίσκεται στη θέση *i* της στήλης *j*. Από το Κεφάλαιο 6, η μήτρα \mathbf{T}_{v} προσδιορίζεται από την (6.19) και η μήτρα \mathbf{T}_{I} από την (6.20). Οι \mathbf{T}_{v} και \mathbf{T}_{I} μπορούν περαιτέρω να προσδιοριστούν μέσω των (6.21) και (6.22).

Αντικαθιστώντας την (Π.6.24) στην (6.19) προκύπτει
η $\mathbf{T}_{\!\scriptscriptstyle V}$, δηλαδή

$$\mathbf{T}_{V} = \left(\mathbf{D}_{V}^{L}\right)^{-1}\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{3} & \mathbf{1}_{3\times 2} \\ \hline \mathbf{0}_{2\times 3} & 1 & 1 \\ \mathbf{0}_{2\times 3} & \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{T}_{V}^{inner} & \mathbf{0}_{3\times 2} \\ \mathbf{0}_{2\times 3} & \mathbf{I}_{2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{T}_{V}^{inner} & \mathbf{1}_{3\times 2} \\ \hline \mathbf{0}_{2\times 3} & 1 & 1 \\ \mathbf{0}_{2\times 3} & \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix}$$
(II.6.34)

Ομοίως προσδιορίζοντας τη μήτρα \mathbf{T}' με αντικατάσταση της (Π.6.24) στην (6.22) και, αντικαθιστώντας στην (6.20), η \mathbf{T}_I δίνεται από την

$$\mathbf{T}_{I} = \left(\mathbf{D}_{I}^{L}\right)^{-1} \mathbf{T}' = \begin{bmatrix} \mathbf{F} & \mathbf{0}_{3\times 2} \\ \frac{-3/\sqrt{3} & 0 & 0}{0 & 0} & \frac{1 & 0}{-1 & 1} \end{bmatrix}$$
(II.6.38)

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Χ. Παπαθεοδώρου, "Η Τεχνολογία BPL στη Μέση Τάση: Το Έξυπνο Δίκτυο,"
 Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Οκτ. 2007.
- [2] OPERA1, "D44: Report Presenting the Architecture of PLC System, the Electricity Network Topologies, the Operating Modes and the Equipment over which PLC Access System will be Installed," IST Integrated Project No 507667, Dec. 2005, [Online]. Available: http://www.istopera.org/opera1/downloads/D44_Architecture_PLC.zip
- [3] OPERA1, "D5: Pathloss as a Function of Frequency, Distance and Network Topology for Various LV and MV European Powerline Networks," IST Integrated Project No 507667, Apr. 2005, [Online]. Available: http://www.istopera.org/opera1/downloads/D5/D5_Pathloss.pdf
- [4] OPERA1, "D45: Specification of PLC System Requirements," IST Integrated Project No 507667, Jun. 2004, [Online]. Available: http://www.istopera.org/opera1/downloads/D45_Specs_PLC.zip
- [5] OPERA1, "D14: Report on MV Backbone System," IST Integrated Project No 507667, Jan. 2005, [Online]. Available: http://www.istopera.org/opera1/downloads/D14_report_backbone_system.zip
- [6] OPERA1, "D57: Specification of Interfaces between Home Automation and PLC and between AMR and PLC," IST Integrated Project No 507667, Nov. 2004, [Online]. Available: http://www.istopera.org/opera1/downloads/D57/OP_WP5_DeliverableD57_v10.pdf
- [7] OPERA1, "D4: Theoritical Postulation of PLC Channel Model," IST Integrated Project No 507667, Mar. 2005, [Online]. Available: http://www.istopera.org/opera1/downloads/D4/D4 Theoretical Post.pdf
- [8] OPERA1, "D10: Reference Guide on Optimization of PLC Access Network and their Connection to the Backbone Network," IST Integrated Project No

507667, Nov. 2004, [Online]. Available: http://www.istopera.org/opera1/downloads/D10/D10_Reference_Guide_Optimization.pdf

- [9] OPERA2, "D24: Document of Conclusions about the Different Services Tested over the New Generation PLC Network," IST Integrated Project No 026920, Oct. 2008, [Online]. Available: http://www.istopera.org/drupal2/files/OP2_WP4_D24_1_0_M22.pdf
- [10] OPERA2, "D13: Reference Guide on the Design of an Integrated PLC Network, Including the Adaptations to Allow the Carriers' Carrier Model," IST Integrated Project No 026920, Jun. 2008, [Online]. Available: http://www.ist-opera.org/drupal2/files/OP2 WP2 D13 v1.1.pdf
- [11] OPERA2, "D51: White Paper: OPERA Technology," IST Integrated Project No 026920, Jul. 2007, [Online]. Available: http://www.istopera.org/drupal2/files/OP2_D51_White_Paper_Opera_Technology_v1.pdf
- [12] OPERA2, "D30: First Report on the Status of PLC Standardisation Activities in CISPR," IST Integrated Project No 026920, Feb. 2008, [Online]. Available: http://www.ist-opera.org/drupal2/files/OP2_D30_v1%206.pdf
- [13] OPERA2, "D12: Preliminary Results of the Performed Tests," IST Integrated Project No 026920, Jun. 2007, [Online]. Available: http://www.istopera.org/drupal2/files/OP2_WP2_D12_2.2.doc
- [14] OPERA2, "D15: Results of the Performed Tests," IST Integrated Project No 026920, Apr. 2008, [Online]. Available: http://www.istopera.org/drupal2/files/OP2_WP2_D15_1.pdf
- [15] OPERA1, "D13: Report on the Requirements and Specifications for the Integrated Communication Systems: PLC MV-LAN and PLC MV-PLC LV," IST Integrated Project No 507667, Feb. 2005, [Online]. Available: http://www.ist-

opera.org/opera1/downloads/D13/OP_WP2_D13_FinalDeliverable_v1.0.pdf

- [16] OPERA2, "D33: New Business Models and Technical Feasibility with Wi-Fi, WiMAX, UWB, ZigBee and Bluetooth," IST Integrated Project No 026920, Dec. 2007, [Online]. Available: http://www.istopera.org/drupal2/files/OP2_WP6_D33_v1.0.pdf
- [17] U. A. Bakshi and M. V. Bakshi, *Generation, Transmission and Distribution*, Pune, India: Technical Publications Pune, 2009.

- [18] F. Kiessling, P. Nefzger, J. F. Nolasco, and U. Kaintzyk, Overhead Power Lines: Planning, Design, Construction, Berlin, Germany: Springer, 2003.
- [19] G. Held, Understanding Broadband over Power Line, Boca Raton, FL, USA: Auerbach Publications, 2006.
- [20] U. A. Bakshi and M. V. Bakshi, *Elements of Power Systems*, Pune, India: Technical Publications Pune, 2008.
- [21] T. Wildi, *Electrical Machines, Drives, and Power Systems*, Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall, 1997.
- [22] B. J. McPartland, J. F. McPartland, and F. Hartwell, *McGraw-Hill's National Electrical Code 2008 Handbook*, New York, NY, USA: McGraw-Hill Professional, 2008.
- [23] D. F. Warne, *Electrical Power Engineer's Handbook*, Oxford, UK: Elsevier, 2005.
- [24] T. Croft, W. I. Summers, and F. P. Hartwell, *American Electricians' Handbook*, New York, NY, USA: McGraw-Hill Professional, 2008.
- [25] A. Midttun, European Electricity Systems in Transition: a Comparative Analysis of Policy and Regulation in Western Europe, Oxford, UK: Elsevier, 1997.
- [26] D. F. Giannetto and A. Zecca, The Performance Power Grid: the Proven Method to Create and Sustain Superior Organizational Performance, New York, NY, USA: Wiley, 2006.
- [27] L. L. Grigsby, *Electric Power Generation, Transmission, and Distribution*, Boston, MA, USA: CRC Press, 2007.
- [28] T. A. Short, *Electric Power Distribution Handbook*, Boston, MA, USA: CRC Press, 2004.
- [29] C. R. Bayliss, *Transmission and Distribution Electrical Engineering*, Oxford, UK: Elsevier, 2004.
- [30] J. Schlabbach and K. H. Rofalski, Power System Engineering: Planning, Design, and Operation of Power Systems and Equipment, Weinheim, Germany: Wiley-VCH, 2008.
- [31] Α. Βουλκίδης, "Σχεδίαση και Ανάπτυξη Ασφαλούς Πρωτοκόλλου Διαχείρισης και Ελέγχου Συσκευών για Μεγάλης Κλίμακας BPL Δίκτυα," Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Νοε. 2007.

- [32] C. Strauss, *Practical Electrical Network Automation and Communication Systems*, Oxford, UK: Elsevier, 2003.
- [33] Γ. Πονηρός, "Μοντέλα Περιγραφής Φυσικού Διαύλου Συστημάτων PLC στη Χαμηλή και τη Μέση Τάση," Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Οκτ. 2007.
- [34] CENELEC, "Signalling on Low Voltage Electrical Installations in the Frequency Range 3 kHz to 148.5 kHz," Tech. Rep. EN 50065, 1991-2002.
- [35] G. Jee, D. Sciano, R. Rao, Y. Cern, and B. Nugent, "Field Trials of Utility Applications Employing Ambient Corporation Power Line Communications at Consolidated Edison," in *Proc. 2005 IEEE International Symposium on Power Line Communications and its Applications, ISPLC'05*, pp. 381-384, Vancouver, Canada, Apr. 2005.
- [36] A. G. Lazaropoulos, A. M. Sarafi, and P. G. Cottis, "The Emerging Smart Grid–A Pilot MV/BPL Network Installed at Lavrion, Greece," in 2008 Workshop on Applications for Powerline Communications, WSPLC'08, Thessaloniki, Greece, Oct. 2008.
- [37] J. Newbury, "Development for the Electric Utilities Networks towards the National Information Infrastructure," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 11, no. 3, pp. 1209-1213, Jul. 1996.
- [38] A. Patrick, J. Newbury, and S. Gargan, "Two-way Communications Systems in the Electricity Supply Industry," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 13, no. 1, pp. 53-58, Jan. 1998.
- [39] C. W. Gellings and K. George, "Broadband Over Powerline 2004: Technology and Prospects," EPRI White Paper, 2004, [Online]. Available: http://mydocs.epri.com/docs/public/0000000001011264.pdf
- [40] H. Hrasnica, A. Haidine, and R. Lehnert, Broadband Powerline Communications Networks: Network Design, Chichester, West Sussex, UK: Wiley, 2004.
- [41] D. Hurley and J. H. Keller, *The First 100 Feet: Options for Internet and Broadband Access*, Boston, MA, USA: MIT Press, 1999.
- [42] N. Jayant, Broadband Last Mile: Access Technologies for Multimedia Communications, Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2005.

- [43] E. S. Cohen, *Broadband Internet: Access, Regulation and Policy*, Hauppauge, NY, USA: Nova Publishers, 2008.
- [44] E. Oz, *Management Information Systems*, Boston, MA, USA: Cengage Learning, 2008.
- [45] R. Munson, From Edison to Enron: the Business of Power and What it Means for the Future of Electricity, Westport, CT, USA: Northeast-Midwest Institute, 2005.
- [46] S. Galli, A. Scaglione, and K. Dostert, "Broadband is Power: Internet Access through the Power Line Network," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 41, no. 5, pp. 82-83, May 2003.
- [47] S. Galli and O. Logvinov, "Recent Developments in the Standardization of Power Line Communications within the IEEE," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 46, no. 7, pp. 64-71, Jul. 2008.
- [48] Amperion, [Online]. Available: http://www.amperion.com/ ή http://www.amperionse.gr/
- [49] NTIA, "Potential Interference from Broadband over Power Line (BPL) Systems to Federal Government Radio Communications at 1.7-80 MHz Phase
 1 Study Vol. I," NTIA Rep. 04-413, Apr. 2004, [Online]. Available: http://www.ntia.doc.gov/ntiahome/fccfilings/2004/bpl/FinalReportAdobe/NTI A_BPL_Report_04-413_Volume_I.pdf
- [50] NTIA, "Potential Interference from Broadband over Power Line (BPL) Systems to Federal Government Radio Communications at 1.7-80 MHz Phase
 1 Study Vol. II," NTIA Rep. 04-413, Apr. 2004, [Online]. Available: http://www.ntia.doc.gov/ntiahome/fccfilings/2004/bpl/FinalReportAdobe/NTI A_BPL_Report_04-413_Volume_II.pdf
- [51] ERC, "Relating to the Use of Short Range Devices (SRD)," ERC Recommendation 70-03, May 2008, [Online]. Available: http://www.atcb.com/publicdocs/EU-70-03-Implementation-Chart.pdf
- [52] Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο, "Οδηγία 1999/5/ΕС του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 9ης Μαρτίου 1999 σχετικά με τον Ραδιοεξοπλισμό και τον Τηλεπικοινωνιακό Τερματικό Εξοπλισμό και την Αμοιβαία Αναγνώριση της Πιστότητας των Εξοπλισμών Αυτών," Οδηγία 1999/5/ΕΚ, Μαρ. 1999.

- [53] Ελληνικό Κοινοβούλιο, "Ραδιοεξοπλισμός και Τηλεπικοινωνιακός Τερματικός Εξοπλισμός και Αμοιβαία Αναγνώριση των Εξοπλισμών Αυτών. Προσαρμογή της Ελληνικής Νομοθεσίας στην Οδηγία 1999/5/EC του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 9ης Μαρτίου 1999," Προεδρικό διάταγμα 44, ΦΕΚ 44, Μαρ. 2002.
- [54] A. Sarafi, G. Tsiropoulos, and P. G. Cottis, "Hybrid Wireless-Broadband over Power Lines: A Promising Broadband Solution in Rural Areas," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 47, no. 11, pp. 140-147, Nov. 2009.
- [55] E. S. Kapareliotis, K. E. Drakakis, H. P. K. Dimitriadis, and C. N. Capsalis, "Fault Recognition on Power Networks via SNR Analysis," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 24, no. 4, pp. 2428-2433, Oct. 2009.
- [56] OPERA2, "D52: White Paper: Comparison of Access Technologies," IST Integrated Project No 026920, Oct. 2007, [Online]. Available: http://www.istopera.org/drupal2/files/OP2_D52_WP7_Comparison_Access_Tech.pdf
- [57] Ofcom, "DS2 PLT Measurements in Crieff," Ofcom, Tech. Rep. 793 (part 2), May 2005, [Online]. Available: http://www.ofcom.org.uk/research/technology/research/archive/cet/powerline/ ds2.pdf
- [58] Α. Βαζιντάρη, "Δρομολόγηση σε Ευρυζωνικά Δίκτυα Επικοινωνιών μέσω Δικτύων Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας," Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Νοε. 2007.
- [59] Γ. Κονδή, "Επίδοση Υβριδικών Δικτύων BPL-WiMAX," Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Μαρ. 2009.
- [60] M. P. Anastasopoulos, A. C. Voulkidis, A. V. Vasilakos, and P. G. Cottis, "A Secure Network Management Protocol for SmartGrid BPL Networks: Design, Implementation and Experimental Results," *Elsevier Computer Communications*, vol. 31, no. 18, pp. 4333-4342, Dec. 2008.
- [61] C. R. Paul, *Introduction to Electromagnetic Compatibility*, 2nd ed., New York, NY, USA: Wiley, 2006.
- [62] A. Tsaliovich, Cable Shielding for Electromagnetic Compatibility, New York, NY, USA: Springer, 1995.
- [63] M. Mardiguian, Controlling Radiated Emissions by Design, 2nd ed., New York, NY, USA: Springer, 2001.

- [64] C. Christopoulos, *Principles and Techniques of Electromagnetic Compatibility*, Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 1995.
- [65] K. Dostert, *Powerline Communications*, Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall, 2001.
- [66] D. Fenton and P. Brown, "Some Aspects of Benchmarking High Frequency Radiated Emissions from Wireline Communications Systems in the Near and Far Fields," in *Proc. 2001 IEEE International Symposium on Power Line Communications and its Applications, ISPLC'01*, pp. 161-167, Malmö, Sweden, Apr. 2001.
- [67] D. Fenton and P. Brown, "Modelling Cumulative High Frequency Radiated Interference from Power Line Communication Systems," in *Proc. 2002 IEEE International Conference on Power Line Communications and its Applications, ISPLC'02*, pp. 83-88, Athens, Greece, Mar. 2002.
- [68] Ελληνικό Κοινοβούλιο, "Εγκριση Εθνικού Κανονισμού Κατανομής Ζωνών
 Συχνοτήτων (ΕΚΚΖΣ)," ΦΕΚ 399, τεύχος Β, αριθμ. οικ. 17225/655, Απρ. 2006.
- [69] FCC, "FCC Report of the Spectrum Efficiency Working Group," FCC Spectrum Policy Task Force, Nov. 2002, [Online]. Available: http://www.fcc.gov/sptf/files/SEWGFinalReport1.pdf
- [70] R. Coase, "The Federal Communications Commission," J. Law and Economics, pp. 1-40, 1959.
- [71] D. Hatfield and P. Weiser, "Property Rights in Spectrum: Taking the Next Step," in Proc. 1st IEEE Symp. New Frontiers Dynamic Spectrum Access Networks, pp. 43-55, Baltimore, MA, USA, Nov. 2005.
- [72] Y. Benkler, "Overcoming Agoraphobia: Building the Commons of the Digitally Networked Environment," *Harv. J. Law Tech*, vol. 11, no. 2, pp. 287-400, 1998.
- [73] Q. Zhao and B. M. Sadler, "A Survey of Dynamic Spectrum Access–Signal Processing, Networking, and Regulatory Policy," *IEEE Signal Process Mag.*, vol. 24, no. 3, pp. 79-89, May 2007.
- [74] FCC, "In the Matter of Amendment of Part 15 Regarding New Requirements and Measurement Guidelines for Access Broadband over Power Line

Systems," FCC 04-245 Report and Order, Jul. 2008, [Online]. Available: http://www.fcc.gov/oet/info/rules/part15/PART15 07-10-08.pdf

- [75] Y. Lin, V. Le, and Z. Feng, "A Microeconomics based Radio Resource Allocation Scheme for B3G Heterogeneous Networks," in *Proc. 2008 4th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, WiCOM'08*, pp. 1-4, Dalian, China, Oct. 2008.
- [76] OPERA2, "D24: Document of Conclusions about the Different Services Tested over the New Generation PLC Network (M24 Definitive Version)," IST Integrated Project No 026920, Dec. 2008, [Online]. Available: http://www.istopera.org/drupal2/files/OP2_WP4_D24_1_1_M24.pdf
- [77] OPERA2, "D11: Reference Guide on the Description of Field Trials and Test Procedures," IST Integrated Project No 026920, Jun. 2007, [Online]. Available: http://www.ist-opera.org/drupal2/documents/OP_WP2_D11_1.6_M2_version.pdf
- [78] J. Newbury, "Broadband Power Line Communications for the Electricity Supply Industry," in Proc. 2008 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, T&D'08, pp. 1-8, Chicago, USA, Apr. 2008.
- [79] M. Gebhardt, F. Weinmann, and K. Dostert, "Physical and Regulatory Constraints for Communication over the Power Supply Grid," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 41, no. 5, pp. 84-90, May 2003.
- [80] NATO, "HF Interference, Procedures and Tools (Interférences HF, procédures et outils) Final Report of NATO RTO Information Systems Technology," RTO-TR-ISTR-050, Jun. 2007, [Online]. Available: http://ftp.rta.nato.int/public/PubFullText/RTO/TR/RTO-TR-IST-050/\$\$TR-IST-050-ALL.pdf
- [81] IEC, "PT PLT: Limits and Method of Measurement of Broadband Telecommunication Equipment over Power Lines," Tech. Rep. CISPR/I/186/DC, Mar. 2006.
- [82] IEC, "PT PLT: Limits and Method of Measurement of Broadband Telecommunication Equipment over Power Lines," Tech. Rep. CISPR/I/211/DC, Sep. 2006.
- [83] IEC, "Information Technology Equipment–Radio Disturbance Characteristics– Limits and Methods of Measurement," Tech. Rep. CISPR 22, 2006.
- [84] IEC, "Committee Draft, Amendment to CISPR 22, Clarification of Its Application to Telecommunication System on the Method of Disturbance

Measurement at Ports Used for PLC (Power Line Communication)," Tech. Rep. CIS/I/89/CD, 2002.

- [85] CENELEC, "Power Line Communication Apparatus and Systems Used in Low-Voltage Installations in the Frequency Range 1.6 MHz to 30 MHz–Part 2-1: Residential, Commercial and Industrial Environment - Immunity Requirements," Tech. Rep. EN 50412-2-1:2005, 2005.
- [86] Ν. Λειβαδάς και Π. Τοπάλογλου, "Προβλήματα Ηλεκτρομαγνητικής Συμβατότητας σε Συστήματα Μετάδοσης Σημάτων Πάνω από Γραμμές Μέσης Τάσης," Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Ιουλ. 2006.
- [87] Ofcom, "Amperion PLT Measurements in Crieff," Ofcom, Tech. Rep., Sept.
 2005, [Online]. Available: http://www.ofcom.org.uk/research/technology/research/archive/cet/powerline/
- [88] US CFR, "Issuing Solicitations," CFR 15.205, [Online]. Available: http://frwebgate.access.gpo.gov/cgi-bin/getcfr.cgi?YEAR=current&TITLE=47&PART=15&SECTION=205&SUBPART =&TYPE=TEXT
- [89] Ofcom, "AM Broadcasting and Emissions from xDSL/PLT/etc.," Ofcom, Tech. Rep., Nov. 2001, [Online]. Available: http://www.ofcom.org.uk/static/archive/ra/topics/interference/documents/uktw g/26november/twg_06_08.pdf
- [90] Ofcom, "Ascom PLT Measurements in Winchester," Ofcom, Tech. Rep. 793 (part 1), May 2005, [Online]. Available: http://www.ofcom.org.uk/research/technology/research/archive/cet/powerline/a scom.pdf
- [91] ARRL, "Power Lines as Antennas from 100 kHz to 50 MHz," ARRL, Tech. Rep., Jul. 2003, [Online]. Available: http://www.arrl.org/announce/regulatory/et03-104/Power lines as antennas.pdf
- [92] ARRL, "Methods of Feeding Overhead Electrical Power-Line Distribution Lines With BPL Signals and the Relationship of These Methods to the Radiated Emissions of the Conductors," ARRL, Tech. Rep., Jul. 2003,

[Online]. Available: http://www.arrl.org/announce/regulatory/et03-104/bpl_feed_methods_analysis.pdf

- [93] ARRL, "Electric and Magnetic Fields near Physically Large Radiators," ARRL, Tech. Rep., Jul. 2003, [Online]. Available: http://www.arrl.org/announce/regulatory/et03-104/Fields near large radiators.pdf
- [94] ARRL, "Exhibit B: Broadband Over Power Line Devices and Conducted Emission," ARRL, Tech. Rep., Aug. 2003, [Online]. Available: http://www.arrl.org/announce/regulatory/et03-104/rep-comments-exhibitb.html
- [95] ARRL, "Exhibit C: Impact of Man-Made Noise From Broadband Over Power Line Systems Operating at the FCC Part-15 Radiated Emissions Limits on Worldwide HF Communications," ARRL, Tech. Rep., Dec. 2003, [Online]. Available: http://gullfoss2.fcc.gov/prod/ecfs/retrieve.cgi?native_or_pdf=pdf&id_documen

t=6514683434

- [96] ITU, "Radio Noise," Recom. P.372.8 ITU-R Recommendation, 2003.
- [97] Ofcom, "Cumulative Effects of Distributed Interferers," Ofcom, Tech. Rep., Aug. 2001, [Online]. Available: http://www.ofcom.org.uk/static/archive/ra/topics/interference/documents/uktw g/8october/twg_05_03.pdf
- [98] ITU, "Emission Limits and Test Methods for Telecommunication Networks," Recom. K.60 ITU-T, Document1A/20, E Document 1C/20-E 28, Oct. 2003
- [99] ITU, "Ground-Wave Propagation Curves for Frequencies between 10 kHz and 30 MHz," Recom. P.368-9 ITU-R, Jan. 2007.
- [100] P.533-9 ITU-R Recommendation, "Method for the Prediction of the Performance of HF Circuits," Tech. Rep. P.533-9, ITU, Jan. 2007.
- [101] J. Mitola III, "Cognitive Radio: An Integrated Agent Architecture for Software Defined Radio," Ph.D. dissertation, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, May 2000, [Online]. Available: http://kth.divaportal.org/smash/get/diva2:8730/FULLTEXT01
- [102] J. Mitola III and G. Q. Maguire Jr., "Cognitive radio: Making Software Radios more Personal," *IEEE Pers. Commun.*, vol. 6, no. 4, pp. 13-18, Aug. 1999.

- [103] S. Haykin, "Cognitive radio: Brain-Empowered Wireless Communications," IEEE J. Sel. Areas Commun., vol. 23, no. 2, pp. 201-220, Feb. 2005.
- [104] Y. Lin, V. Le, and Z. Feng, "A Microeconomics based Radio Resource Allocation Scheme for B3G Heterogeneous Networks," in Proc. 2008 4th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, WiCOM'08, pp. 1-4, Dalian, China, Oct. 2008.
- [105] ITU, "ITU Radio Regulations," Recom. RR No. 4.22 ITU-R, 2003.
- [106] P. Amirshahi, "Broadband Access and Home Networking through Powerline Networks," Ph.D. dissertation, The Pennsylvania-State University, Pennsylvania, USA, May 2006, [Online]. Available: http://etda.libraries.psu.edu/theses/approved/WorldWideIndex/ETD-1205/index.html
- [107] P. Amirshahi and M. Kavehrad, "On the Channel Characterization of Overhead Medium-Voltage Power Lines for Broadband Communications," *IEC Annual Review of Communications*, vol. 58, pp. 123-132, Jan. 2006.
- [108] DARPA XG WG, "The XG Architectural Framework V1.0," BBN Technologies, Tech. Rep., Cambridge, MA, USA, Jul. 2003, [Online]. Available: http://www.ir.bbn.com/projects/xmac/rfc/rfc-af.pdf
- [109] DARPA XG WG, "The XG Vision RFC V2.0," BBN Technologies, Tech. Rep., Cambridge, MA, USA, Jan. 2004, [Online]. Available: http://www.ir.bbn.com/projects/xmac/rfc/rfc-vision.pdf
- [110] I. F. Akyildiz, W. Y. Lee, M. C. Vuran, and S. Mohanty, "Next Generation/Dynamic Spectrum Access/Cognitive Radio Wireless Networks: A Survey," *Elsevier Computer Networks Journal*, vol. 50, no. 13, pp. 2127-2159, Sep. 2006.
- [111] I. F. Akyildiz and Y. Li, "OCRA: OFDM-Based Cognitive Radio Networks, Broadband and Wireless Networking Laboratory," Georgia Institute of Technology, Tech. Report, Mar. 2006.
- [112] D. Čabrić, S. M. Mishra, and R. W. Brodersen, "Implementation Issues in Spectrum Sensing for Cognitive Radios," in *Proc. 2004 Thirty-Eighth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, pp. 772-776, Pacific Grove, California, USA, Nov. 2004.

- [113] T. A. Weiss and F. K. Jondral, "Spectrum Pooling: An Innovative Strategy for the Enhancement of Spectrum Efficiency," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 42, no. 3, pp. S8-S14, Mar. 2004.
- [114] S. Achard, R. Salvador, B. Whitcher, J. Suckling, and E. Bullmore, "A Resilient, Low-Frequency, Small-World Human Brain Functional Network with Highly Connected Association Cortical Hubs," *J. Neurosci.*, vol. 26, no. 1, pp. 63-72, 2006.
- [115] X. F. Wang and G. Chen, "Complex Networks: Small-World, Scale-Free and Beyond," *IEEE Circuits Syst. Mag.*, vol. 3, no. 1, pp. 6-20, 2003.
- [116] D. J. Watts, Small Worlds. The Dynamics of Networks between Order and Randomness, Princeton, NJ, USA: Princeton University Press, 1999.
- [117] A. Reznik, S. R. Kulkarni, and S. Verdú, "A Small World Approach to Heterogeneous Networks," *Commun. Inf. Syst.*, vol. 3, no. 4, pp. 325-348, Sep. 2004.
- [118] Ε. Σ. Ανυφαντής και Α. Ζ. Τσαρακλημάνης, "Γνωστικές Επικοινωνίες σε Φυσικό Στρώμα και Επίπεδο MAC," Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Ιουλ. 2009.
- [119] C. R. Paul, Analysis of Multiconductor Transmission Lines, New York, NY, USA: Wiley, 1994.
- [120] C. R. Paul, Analysis of Linear Circuits, McGraw-Hill, New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1994.
- [121] C. R. Paul, K. Whites, and S. Nasar, *Introduction to Electromagnetic Fields*, New York, NY, USA: 3rd ed. McGraw-Hill, 1998.
- [122] Ν. Κ. Ουζούνογλου, Εισαγωγή στα Μικροκύματα, Αθήνα, Ελλάδα: Παπασωτηρίου, 1994.
- [123] C. R. Paul, "Applications of Multiconductor Transmission Line Theory to the Prediction of Cable Coupling-Vol. V-Prediction of Crosstalk Involving Twisted Wire Pairs," Tech. Rep. A053559, Rome Air Development Center, Griffiss AFB, NY, RADC-TR-76.101, Feb. 1978.
- [124] C. R. Paul and M. B. Jolly, "Crosstalk in Twisted-Wire Circuits," Tech. Rep., Rome Air Development Center, Griffiss AFB, NY, RADC-TR-82-286, Vol. IV C, Nov. 1982.

- [125] C. R. Paul and D. Koopman, "Prediction of Crosstalk in Balanced, Twisted Pair Circuits," Tech. Rep., Rome Air Development Center, Griffiss AFB, NY, RADC-TR-82-286, Vol. IV D, Aug. 1984.
- [126] C. R. Paul and J. W. McKnight, "Prediction of Crosstalk Involving Twisted Pairs of Wires–Part I: A Transmission Line Model for Twisted Wire Pairs," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. EMC-21, no. 2, pp. 92-105, May 1979.
- [127] C. R. Paul and J. W. Mcknight, "Prediction of Crosstalk Involving Twisted Pairs of Wires–Part II, A Simplified, Low-Frequency Prediction Model," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. EMC-21, no. 2, pp. 105-114, May 1979.
- [128] C. R. Paul and M. B. Jolly, "Sensitivity of Crosstalk in Twisted-Pair Circuits to Line Twist," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. EMC-24, no. 3, pp. 359-364, Aug. 1982.
- [129] C. R. Paul and D. Koopman, "Sensitivity of Coupling to Balanced, Twisted Pair Lines to Line Twist," in Proc. 1983 International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility, EMC-Zurich'83, Zurich, Switzerland, Mar. 1983.
- [130] C. R. Paul, "Prediction of Crosstalk in Twisted Pairs, A Simplified, Low-Frequency Model," in Proc. 1978 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Atlanta, GA, USA, Jun. 1978.
- [131] C. R. Paul and D. Koopman, "Coupling to Twisted-Pair Transmission Lines," in Proc. 1981 International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility, EMC-Zurich'81, Zurich, Switzerland, Mar. 1981.
- [132] C. R. Paul and M. B. Jolly, "Crosstalk in Balanced, Twisted-Pair Circuits," in *Proc. 1981 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Boulder, CO, USA, Jun. 1981.
- [133] C. R. Paul, "Application of Multiconductor Transmission Line Theory to the Prediction of Cable Coupling-Vol. I-Multiconductor Transmission Line Theory," Tech. Rep. A0258028, Rome Air Development Center, Griffiss AFB, NY, RADC-TR-76.101, Apr. 1976.
- [134] T. Sartenaer and P. Delogne, "Deterministic Modelling of the (Shielded) Outdoor Powerline Channel based on the Multiconductor Transmission Line

Equations," IEEE J. Sel. Areas Commun., vol. 24, no. 7, pp. 1277-1291, Jul. 2006.

- [135] T. Sartenaer, "Multiuser Communications over Frequency Selective Wired Channels and Applications to the Powerline Access Network," Ph.D. dissertation, Université Catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve, Belgium, Sep. 2004, [Online]. Available: http://www.tele.ucl.ac.be/~ts/PhD.php
- [136] J. A. B. Faria, Multiconductor Transmission-Line Structures: Modal Analysis Techniques, New York, NY, USA: Wiley, 1993.
- [137] C. R. Paul, "Useful Matrix Chain Parameter Identities for the Analysis of Multiconductor Transmission Lines," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 23, no. 9, pp. 756-760, Sep. 1975.
- [138] G. Miano and A. Maffucci, *Transmission Lines and Lumped Circuits*, San Diego, CA, USA: Academic Press, 2001.
- [139] C. R. Paul, "Applications of Multiconductor Transmission Line Theory to the Prediction of Cable Coupling-Vol. VII-Digital Computer Programs for the Analysis of Multiconductor Transmission Lines," Tech. Rep. A046662, Rome Air Development Center, Griffiss AFB, NY, RADC-TR-76.101, Jul. 1977.
- [140] C. R. Paul and B. A. Bowles, "Symbolic Solution of the Multiconductor Transmission-Line Equations for Lines Containing Shielded Wires," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 33, no. 3, pp. 149-162, Aug. 1991.
- [141] C. R. Paul and L. Monroe, "Lumped Circuit Modeling of Transmission Lines," in Proc. 1985 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Wakefield, MA, USA, Jun. 1978.
- [142] C. R. Paul, "Derivation of Common Impedance Coupling from the Transmission-Line Equations," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 34, no. 3, pp. 315-319, Aug. 1992.
- [143] G. M. Kuma, "Mitigating EMI of Powerline Communications Using Carrierless UWB Pulses," Ph.D. dissertation, Universität Duisburg-Essen, Duisburg, Germany, Sep. 2008, [Online]. Available: http://www.ets.uni-duisburgessen.de/download/public/Mekuria Kuma Diss.pdf
- [144] S. Galli and T. Banwell, "A Deterministic Frequency-Domain Model for the Indoor Power Line Transfer Function," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 24, no. 7, pp. 1304-1316, Jul. 2006.

- [145] T. Banwell and S. Galli, "A Novel Approach to Accurate Modeling of the Indoor Power Line Channel—Part I: Circuit Analysis and Companion Model," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 20, no. 2, pp. 655-663, Apr. 2005.
- [146] S. Galli and T. Banwell, "A Novel Approach to Accurate Modeling of the Indoor Power Line Channel—Part II: Transfer Function and Channel Properties," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 20, no. 3, pp. 1869-1878, Jul. 2005.
- [147] C. R. Paul, "Applications of Multiconductor Transmission Line Theory to the Prediction of Cable Coupling-Vol. VIII-Prediction of Crosstalk Involving Braided- Shield Cables," Tech. Rep., Rome Air Development Center, Griffiss AFB, NY, RADC-TR-76.101, Aug. 1980.
- [148] C. R. Paul and W. E. Beech, "Prediction of Crosstalk in Flatpack, Coaxial Cables," Tech. Rep., Rome Air Development Center, Griffiss AFB, NY, RADC-TR-82.286, Vol. IV B, Nov. 1982.
- [149] C. R. Paul, "Effect of Pigtails on Crosstalk to Braided-Shield Cables," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 22, no. 3, pp. 161-172, Aug. 1980.
- [150] C. R. Paul, "Transmission-Line Modeling of Shielded Wires for Crosstalk Prediction," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 23, no. 4, pp. 352-358, Nov. 1981.
- [151] C. R. Paul, "Effect of Pigtails on Coupling to Shielded Wires," in *Proc. 1979 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, San Diego, CA, USA, Jun. 1979.
- [152] C. R. Paul and W. E. Beech, "Prediction of Crosstalk in Flatpack, Coaxial Cables," in Proc. 1984 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, San Antonio, TE, USA, Apr. 1984.
- [153] C. R. Paul and B. A. Bowles, "Literal Solution of the Transmission-Line Equations for Shielded Wires," in *Proc. 1990 IEEE International Symposium* on *Electromagnetic Compatibility*, pp. 591-599, Washington, DC, USA, Aug. 1990.
- [154] S. A. Nasar and C. R. Paul, *Essential Engineering Equations*, CRC Press. Boston, MA, USA, 1991.
- [155] S. Barnett, *Matrices: Methods and Applications*, Oxford, NY, USA: Oxford University Press, 1990.
- [156] P. J. Davis, Circulant Matrices, New York, NY, USA: Wiley, 1979.

- [157] P. C. J. M. van der Wielen, "On-line Detection and Location of Partial Discharges in Medium-Voltage Power Cables," Ph.D. dissertation, Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven, the Netherlands, Apr. 2005, [Online]. Available: http://alexandria.tue.nl/extra2/200511097.pdf
- [158] M. D'Amore and M. S. Sarto, "Simulation Models of a Dissipative Transmission Line above a Lossy Ground for a Wide-Frequency Range—Part I: Single Conductor Configuration," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 38, no. 2, pp. 127-138, May 1996.
- [159] M. D'Amore and M. S. Sarto, "Simulation Models of a Dissipative Transmission Line above a Lossy Ground for a Wide-Frequency Range—Part II: Multi-Conductor Configuration," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 38, no. 2, pp. 139-149, May 1996.
- [160] M. D'Amore and M. S. Sarto, "A New Formulation of Lossy Ground Return Parameters for Transient Analysis of Multiconductor Dissipative Lines," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 12, no. 1, pp. 303-314, Jan. 1997.
- [161] T. Calliacoudas and F. Issa, ""Multiconductor Transmission Lines and Cables Solver", an Efficient Simulation Tool for PLC Channel Networks Development," in Proc. 2002 IEEE International Conference on Power Line Communications and Its Applications, ISPLC'02, Athens, Greece, Mar. 2002.
- [162] P. Amirshahi and M. Kavehrad, "High-Frequency Characteristics of Overhead Multiconductor Power Lines for Broadband Communications," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 24, no. 7, pp. 1292-1303, Jul. 2006.
- [163] F. Issa, T. Sartenaer, E. Marthe, F. Rachidi, N. Korovkin, S. Duteau, and A. Pacaud, "Analysis of Power Line Communication Networks Using a New Approach Based on Scattering Parameters Matrix", in *Proc. International Symposium on Electromagnetic Compatibility, ISEMC'02*, pp. 1043-1047, Minneapolis, MN, USA, Aug. 2002.
- [164] A. G. Lazaropoulos and P. G. Cottis, "Transmission Characteristics of Overhead Medium Voltage Power Line Communication Channels," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 24, no. 3, pp. 1164-1173, Jul. 2009.
- [165] A. G. Lazaropoulos and P. G. Cottis, "Capacity of Overhead Medium Voltage Power Line Communication Channels," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 25, no. 2, pp. 723-733, Apr. 2010.
- [166] A. G. Lazaropoulos and P. G. Cottis, "Broadband Transmission via Underground Medium Voltage Power Lines—Part I: Transmission Characteristics," *IEEE Trans. Power Del.*, to be published.
- [167] A. G. Lazaropoulos and P. G. Cottis, "Broadband Transmission via Underground Medium Voltage Power Lines—Part II: Capacity," *IEEE Trans. Power Del.*, under review.
- [168] K. Ogata, State Space Analysis of Control Systems, Englewood Cliffs, NJ, USA: Prentice-Hall, 1967.
- [169] T. Sartenaer, J. Louveaux, and L. Vandendorpe, "Balanced Capacity of Downlink and Uplink Wireline Multiuser Channels", *IEEE Trans. Commun.*, vol. 53, no. 12, pp. 2029-2042, Dec. 2005.
- [170] T. Sartenaer, F. Horlin, and L. Vandendorpe, "DMT-FDMA as a Multiple Access Technique for Wideband Upstream Powerline Communications," in Proc. 2000 IEEE International Symposium on Power Line Communications and its Applications, ISPLC'00, pp. 89-96, Limerick, Ireland, Apr. 2000.
- [171] T. Sartenaer and L. Vandendorpe, "Resource Allocation for Frequency-Selective Multiple Access Channels with Adaptive QAM Modulation", in *Proc. URSI Forum 2000*, Brussels, Belgium, Dec. 2000.
- [172] T. Sartenaer and P. Delogne, "Powerline Cables Modelling for Broadband Communications," in Proc. 2001 IEEE International Conference on Power Line Communications and its Applications, ISPLC'01, pp. 331-337, Malmö, Sweden, Apr. 2001.
- [173] P. C. Romero, "ADAPT: An Automatic Impedance Adapter for Medium Voltage Communications Equipment," in *Proc. 2000 IEEE International Symposium on Power Line Communications and its Applications, ISPLC'00*, pp. 218-224, Limerick, Ireland, Apr. 2000.
- [174] F. Issa, M. Goldberg, H. Li, and S. Rowland, "Wideband Impedance Matching using Tchebycheff Gain Functions," in *Proc. 2005 IEEE International Symposium on Power Line Communications and its Applications, ISPLC'05*, pp. 278-280, Vancouver, BC, Canada, Apr. 2005.
- [175] J. Pandel and A. Fettweiss, "Broadband Matching Using Parametric Representations," in *Proc. 1985 IEEE International Symposium on Circuits* and Systems, vol. 41, pp. 143-149, Kyoto, Japan, Jun. 1985.

- [176] B. S. Yarman and A. Fettweiss, "Computer Aided Double Matching via Parametric Representation of Brune Functions," *IEEE Trans. Circuits Syst.*, vol. 37, no. 2, pp. 212-222, Feb. 1990.
- [177] M. Zimmermann and K. Dostert, "A Multipath Model for the Powerline Channel," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 50, no. 4, pp. 553-559, Apr. 2002.
- [178] H. Philipps, "Modelling of Powerline Communication Channels," in Proc. 1999 IEEE International Symposium on Power Line Communications and its Applications, ISPLC'99, pp. 14-21, Lancaster, UK, Mar. 1999.
- [179] H. Philipps, "Development of a Statistical Model for Power-Line Communication Channels," in Proc. 2000 IEEE International Symposium on Power Line Communications and its Applications, ISPLC'00, pp. 153-160, Limerick, Ireland, Apr. 2000.
- [180] M. Götz, M. Rapp, and K. Dostert, "Power Line Channel Characteristics and Their Effect on Communication System Design," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 42, no. 4, pp. 78-86, Apr. 2004.
- [181] M. Götz and K. Dostert, "A Universal High Speed Powerline Channel Emulation System," in *Proc. 2002 Int. Zurich Sem. on Broadband Commun.*, pp. 24/1-24/6, Zürich, Switzerland, 2002.
- [182] D. C. Chang and R. G. Olsen, "Excitation of an Infinite Wire above Dissipative Earth," *Radio Science*, vol. 10, no. 8-9, pp. 823-831, Aug.-Sep. 1975.
- [183] M. Zimmermann, Energieverteilnetze als Zugangsmedium für Telekommunikations-Dienste (Energy Distribution Networks as an Access Medium for Telecommunication Services), Aachen, Germany: Shaker, 2000.
- [184] Μ. Μανουσάκης, "Επίδραση του Εδάφους στα Δίκτυα BPL Μέσης Τάσης," Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Οκτ. 2008.
- [185] T. Esmailian, F. R. Kschischang, and P. G. Gulak, "An in-Building Power Line Channel Simulator," in Proc. 2002 IEEE International Conference on Power Line Communications and Its Applications, ISPLC'02, Athens, Greece, Mar. 2002.
- [186] T. Esmailian, F. R. Kschischang, and P. G. Gulak, "In-Building Power Lines as High-Speed Communication Channels: Channel Characterization and a Test-Channel Ensemble," *Int. J. Commun. Syst.*, vol. 16, pp. 381-400, 2003.

- [187] G. C. Temes and J. W. Lapatra, *Introduction to Circuit Synthesis and Design*, New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1967.
- [188] T. Banwell and S. Galli, "A New Approach to the Modeling of the Transfer Function of the Power Line Channel," in *Proc. 2001 IEEE International Conference on Power Line Communications and Its Applications, ISPLC'01*, Malmö, Sweden, Apr. 2001.
- [189] T. Banwell and S. Galli, "On the Symmetry of the Power Line Channel," in Proc. 2001 IEEE International Conference on Power Line Communications and Its Applications, ISPLC'01, Malmö, Sweden, Apr. 2001.
- [190] J. D. Irwin, Basic Engineering Circuit Analysis., New York, NY, USA: Macmillan, 1984.
- [191] S. Galli and D. Waring, "Loop Make-up Identification Via Single Ended Testing: Beyond Mere Loop Qualification," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 20, no. 5, Jun. 2002.
- [192] H. Meng, S. Chen, Y. L. Guan, C. L. Law, P. L. So, E. Gunawan, and T. T. Lie, "Modeling of Transfer Characteristics for the Broadband Power Line Communication Channel," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 19, no. 3, pp. 1057-1064, Jul. 2004.
- [193] H. Meng, S. Chen, Y. L. Guan, C. L. Law, P. L. So, E. Gunawan, and T. T. Lie, "A Transmission Line Model for High-Frequency Power Line Communication Channel," in *Proc. 5th Int. Conf. Power System Technology*, Oct. 2002.
- [194] S. Barmada, A. Musolino, M. Raugi, and M. Tucci, "Analysis of Power Lines Uncertain Parameter Influence on Power Line Communications," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 22, no. 4, pp. 2163-2171, Oct. 2007.
- [195] S. Barmada, A. Musolino, and M. Raugi, "Innovative Model for Time-Varying Power Line Communication Channel Response Evaluation," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 24, no. 7, pp. 1317-1326, Jul. 2006.
- [196] G. Gonzalez, *Microwave Transistor Amplifiers: Analysis and Design*, 2nd ed., Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice-Hall, 1996.
- [197] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, Reading, MA, USA: Addison-Wesley Publishing Company, 1990.

- [198] A. G. Lazaropoulos and P. G. Cottis, "Transmission Characteristics of Overhead MV/PLC Channels," in Proc. 2008 Workshop on Applications for Powerline Communications, WSPLC'08, Thessaloniki, Greece, Oct. 2008.
- [199] L. Besser and R. Gilmore, Practical RF Circuit Design for Modern Wireless Systems: Passive Circuits and Systems, Norwood, MA, USA: Artech House, 2003.
- [200] T. H. Lee, The Design of CMOS Radio-Frequency Integrated Circuits, Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2004.
- [201] J. J. Carr, *Practical Antenna Handbook*, New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2001.
- [202] P. Amirshahi and M. Kavehrad, "Broadband Access over Medium and Low Voltage Power-lines and use of White Light Emitting Diodes for Indoor Communications," in Proc. 2006 IEEE Consumer Communications and Networking Conference, CCNC'06, pp. 897-901, Las Vegas, NV, USA, Jan. 2006.
- [203] P. Amirshahi and M. Kavehrad, "Medium Voltage Overhead Power-line Broadband Communications; Transmission Capacity and Electromagnetic Interference," in *Proc. 2005 IEEE International Symposium on Power Line Communications and its Applications, ISPLC'05*, pp. 2-6, Vancouver, Canada, Apr. 2005.
- [204] P. Amirshahi, S. M. Navidpour, and M. Kavehrad, "Performance Analysis of Uncoded and Coded OFDM Broadband Transmission over Low Voltage Power-Line Channels with Impulsive Noise," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 21, no. 4, pp. 1927-1934, Oct. 2006.
- [205] P. Amirshahi and M. Kavehrad, "Transmission Channel Model and Capacity of Overhead Multi-Conductor Medium-Voltage Power-Lines for Broadband Communications," in *Proc. 2005 IEEE Consumer Communications and Networking Conference*, *CCNC'05*, pp. 354-358, Las Vegas, NV, USA, Jan. 2005.
- [206] R. Carson, "Wave Propagation in Overhead Wires with Ground Return," Bell System Tech. Jour., vol. 5, pp. 539-554, 1926.
- [207] H. Kikuchi, "Wave Propagation along an Infinite Wire above Ground at High Frequencies," *Electrotech. J.*, vol. 2, pp. 73-78, Dec. 1956.

- [208] H. Kikuchi, "On the Transition Form a Ground Return Circuit to a Surface Waveguide," in Proc. International Congress of Ultrahigh Frequency Circuits Antennas, pp. 39-45, Paris, France, Oct. 1957.
- [209] J. R. Wait, "Theory of Wave Propagation along a Thin Wire Parallel to an Interface," *Radio Science*, vol. 7, pp. 675-679, Jun. 1972.
- [210] J. R. Wait and D. A. Hill, "Propagation along a Braided Coaxial Cable in a Circular Tunnel," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 23, pp. 345-354, May 1975.
- [211] R. G. Olsen, E. F. Kuester, and D. C. Chang, "Modal Theory of Long Horizontal Wire Structures above the Earth—Part II: Modes," *Radio Science*, vol. 13, pp. 615-623, Jul.-Aug. 1978.
- [212] R. G. Olsen and M. D. Wu, "High Frequency Propagation Losses on an Open Wire Transmission Line above Dissipative Earth," *IEEE Trans. Broadcast.*, vol. 34, no. 2, pp. 292-300, Jun. 1988.
- [213] D. C. Chang and R. G. Olsen, "Excitation of an Infinite Wire above Dissipative Earth," *Radio Science*, vol. 10, no. 8-9, pp. 823-831, Aug.-Sep. 1975.
- [214] S. Ramo, J. R. Whinnery, and T. Van Duzer, *Fields and Waves in Communication Electronics*, 2nd ed., Willey: New York, 1984.
- [215] Θ. Α. Παπαδόπουλος, "Επίδραση της Γης στα Κυματικά Χαρακτηριστικά Γραμμών Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας," Διδακτορική Διατριβή, Αριστοτέλειο Πανέπιστημιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη, Οκτ. 2008.
- [216] H. W. Dommel, "Overhead Line Parameters from Handbook Formulas and Computer Programs," *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems*, vol. 104, no. 2, pp. 366-372, Feb. 1985.
- [217] L. M. Wedepohl, "Application of the Solution of Traveling-Wave Phenomena in Polyphase System," *Proc. IEE*, vol. 110, no. 12, pp. 2200-2212, Dec. 1963.
- [218] M. C. Perz and M. R. Raghuveer, "Generalized Derivation of Fields, and Impedance Correction Factors of Lossy Transmission Lines–Part I: Lossy Conductors above Lossless Ground," *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems*, vol. 93, no. 6, pp. 1827-1831, Nov. 1974.
- [219] M. C. Perz and M. R. Raghuveer, "Generalized Derivation of Fields, and Impedance Correction Factors of Lossy Transmission Lines-Part II: Lossy

Conductors above Lossy Ground," *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems*, vol. 93, no. 6, pp. 1832-1841, Nov. 1974.

- [220] R. G. Olsen and T. A. Pankaskie, "On the Exact, Carson, and Image Theories for Wires at or Above the Earth's Interface," *IEEE Trans. Power Apparatus* and Systems, vol. 102, no. 4, pp. 769-778, Apr. 1983.
- [221] H. W. Dommel, *EMTP Theory Book*, 2nd ed., Vancouver, BC, Canada: Microtran Power Syst. Anal. Corporation, 1996.
- [222] A. Deri, G. Tevan, A. Semlyen, and A. Castanheira, "The Complex Ground Return Plane. A Simplified Model for Homogenous and Multilayer Earth Return," *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems*, vol. 100, no. 8, pp. 3686-3693, Aug. 1981.
- [223] T. Noda, "A Double Logarithmic Approximation of Carson's Ground-Return Impedance," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 21, no. 1, pp. 472-479, Jan. 2006.
- [224] L. Hofmann, "Series Expansions for Line Series Impedances Considering Different Specific Resistances, Magnetic Permeabilities, and Dielectric Permittivities of Conductors, Air, and Ground," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 18, no. 2, pp. 564-570, Apr. 2003.
- [225] A. Mariscotti, "Discussion of "Series Expansions for Line Series Impedances Considering Different Specific Resistances, Magnetic Permeabilities, and Dielectric Permittivities of Conductors, Air, and Ground"," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 18, no. 4, pp. 1592, Oct. 2003.
- [226] A. Semlyen, "Ground Return Parameters of Transmission Lines an Asymptotic Analysis for Very High Frequencies," *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems*, vol. 100, no. 3, pp. 1031-1038, Mar. 1981.
- [227] E. D. Sunde, *Earth Conduction Effects in the Transmission Systems*, New York, NY, USA: Van Nostrand, 1949.
- [228] F. L. Alvarado and R. Betancourt, "An Accurate Closed-Form Approximation for Ground Return Impedance Calculations," *Proc. IEEE*, vol. 71, no. 2, pp. 279-280, Feb. 1983.
- [229] K. C. Chen and K. M. Damrau, "Accuracy of Approximate Transmission Line Formulas for Overhead Wires," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 31, no. 4, pp. 396-397, Nov. 1989.

- [230] M. T. Abuelma'atti, "An Improved Approximation of the Transmission Line Parameters of Overhead Wires," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 32, no. 4, pp. 303-304, Nov. 1990.
- [231] F. Rachidi and S. V. Tkachenko, Electromagnetic Field Interaction with Transmission Lines: from Classical Theory to HF Radiation Effects, Southampton, SO, UK: WIT press, 2008.
- [232] F. Rachidi, C. A. Nucci and M. Ianoz, "Transient Analysis of Multiconductor Lines above a Lossy Ground," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 14, no. 1, pp. 294-302, Jan. 1999.
- [233] N. Theethayi, R. Thottappillil, Y. Liu, and R. Montano, "Parameters that Influence the Crosstalk in Multiconductor Transmission Line," in *Proc. 2003 IEEE Power Tech Conference, PowerTech*'03, Bologna, Italy, Jun. 2003.
- [234] Vu Phan Tu and J. Tlusty, "The Calculated Methods of a Frequency-Dependent Series Impedance Matrix of Overhead Transmission Lines with a Lossy Ground for Transient Analysis Problem," in *Proc. 2003 Large Engineering Systems Conference on Power Engineering*, pp. 159-163, Quebec, Canada, May 2003.
- [235] W. H. Wise, "Effect of Ground Permeability on Ground Return Circuits," Bell System Tech. Jour., vol. 10, pp. 472-484, 1931.
- [236] W. H. Wise, "Propagation of High Frequency Currents in Ground Return Circuits," Proc. Inst. Radio Engrs., vol. 22, pp. 522-527, 1934.
- [237] W. H. Wise, "Potential Coefficients for Ground Return Circuits," Bell System Tech. Jour., vol. 27, pp. 365-371, 1948.
- [238] M. Nakagawa, "Admittance Correction Effects of a Single Overhead Line," *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems*, vol. 100, no. 3, pp. 1154-1161, Mar. 1981.
- [239] M. Nakagawa, "Further Studies on Wave Propagation along Overhead Transmission Lines: Effects of Admittance Correction," *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems*, vol. 100, no. 7, pp. 3626-3633, Jul. 1981.
- [240] M. Nakagawa and K. Iwamoto, "Earth-Return Impedance for the Multi-Layer Case," *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems*, vol. 95, no. 2, pp. 671-676, Mar. 1976.

- [241] L. M. Wedepohl and R. G. Wasley, "Wave Propagation in Multiconductor Overhead Lines–Calculation of Series Impedance for Multilayer Earth," *Proc. IEE*, vol. 113, no. 4, pp. 627-632, Apr. 1996.
- [242] L. M. Wedepohl and A. E. Efthymiadis, "Wave Propagation in Transmission Lines over Lossy Ground: a New, Complete Field Solution," *Proc. IEE*, vol. 125, no. 6, pp. 505-510, 1978.
- [243] A. E. Efthymiadis and L. M. Wedepohl, "Propagation Characteristics of Infinitely-Long Single-Conductor Lines by the Complete Field Solution Method," *Proc. IEE*, vol. 125, no. 6, pp. 511-517, 1978.
- [244] I. S. Moghram, "Effects of Earth Stratification on Impedances of Power Transmission Lines," *European Trans. on Electric Power*, vol. 8, no. 6, pp. 445-449, 1998.
- [245] A. Ametani, N. Nagaoka, and R. Koide, "Wave Propagation Characteristics on an Overhead Conductor Above Snow," *Trans. of the Institute of Electrical Engineers of Japan*, vol. 134, no. 3, pp. 26-33, 2001.
- [246] H. Kikuchi, "Power Transmission and Radiation," *Space Science Reviews*, vol. 35, no. 1, 1983.
- [247] P. Pettersson, "Image Representation of Wave Propagation on Wires above, on and under Ground," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 9, no. 2, pp. 1049-1055, Apr. 1994.
- [248] P. Pettersson, "Propagation of Waves on a Wire above a Lossy Ground– Different Formulations with Approximations," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 14, no. 3, pp. 1173-1180, Jul. 1999.
- [249] G. E. J. Bridges and L. Shafai, "Plane Wave Coupling to Multiple Conductor Transision Lines Above a Lossy Earth," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 31, no. 1, pp. 21-33, Feb. 1989.
- [250] P. Degauque, G. Courbet, and M. Heddebaut, "Propagation along a Line Parallel to the Ground Surface: Comparison between the Exact Solution and the Quasi-TEM Approximation," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 25, no. 4, pp. 422-427, Nov. 1983.
- [251] F. M. Tesche, "Comparison of the Transmission Line and Scattering Models for Computing the HEMP Response of Overhead Cables," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 34, no. 2, pp. 93-99, May 1992.

- [252] Δ. Α. Τσιαμήτρος, "Επίδραση της Ανομοιογενούς Γης στη Μεταβατική Συμπεριφορά Εναέριων Γραμμών και Καλωδίων Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας," Διδακτορική Διατριβή, Αριστοτέλειο Πανέπιστημιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη, 2005.
- [253] D. A. Tsiamitros, G. K. Papagiannis, and P. S. Dokopoulos, "Earth Return Impedances of Conductor Arrangements in Multilayer Soils—Part I: Theoretical Model," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 23, no. 4, pp. 2392-2400, Oct. 2008.
- [254] D. A. Tsiamitros, G. K. Papagiannis, and P. S. Dokopoulos, "Earth Return Impedances of Conductor Arrangements in Multilayer Soils—Part II: Numerical Results," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 23, no. 4, pp. 2401-2408, Oct. 2008.
- [255] D. A. Tsiamitros, G. K. Papagiannis, and P. S. Dokopoulos, "Equivalent Resistivity Approximation of Two-Layer Earth Structures for Earth Return Impedance Calculations," in *Proc. 2005 IEEE Power Tech Conference*, *PowerTech*'05, pp. 1-7, St. Petersburg, Russia, Jun. 2005.
- [256] D. A. Tsiamitros, G. K. Papagiannis, and P. S. Dokopoulos, "Homogenous Earth Approximation of Two-Layer Earth Structures: An Equivalent Resistivity Approach," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 22, no. 1, pp. 658-666, Jan. 2007.
- [257] D. A. Tsiamitros, G. K. Papagiannis, D. P. Labridis, and P. S. Dokopoulos, "Earth Return Path Impedances of Underground Cables for the Two-Layer Earth Case," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 20, no. 3, pp. 2174-2181, Jul. 2005.
- [258] N. Suljanović, A. Mujcic, M. Zajc, J. F. Tasic, "Power-Line High Frequency Characteristics: Analytical Formulation," in Proc. 2003 Workshop on Mobile Future and Symposium on Trends in Communications, SympoTIC'03, Bratislava, Slovakia, pp. 106-109, Oct. 2003.
- [259] J. J. Lee, S. J. Choi, H. M. Oh, W. T. Lee, K. H. Kim, and D. Y. Lee, "Measurements of the Communications Environment in the Medium Voltage Power Distribution Lines for Wide-Band Power Line Communications," in Proc. 2004 IEEE International Symposium on Power Line Communications and its Applications, ISPLC'04, pp. 69-74, Zaragoza, Spain, Mar. 2004.

- [260] M. Zimmermann and K. Dostert, "Analysis and Modeling of Impulsive Noise in Broad-band Powerline Communications," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 44, no. 1, pp. 249-258, Feb. 2002.
- [261] M. Katayama, T. Yamazato, and H. Okada, "A Mathematical Model of Noise in Narrowband Power Line Communication Systems," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 24, no. 7, pp. 1267-1276, Jul. 2006.
- [262] Z. Tao, Y. Xiaoxian, Z. Baohui, N. H. Xu, F. Xiaoqun, and L. Changxin, "Statistical Analysis and Modeling of Noise on 10-kV Medium-Voltage Power Lines," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 22, no. 3, pp. 1433-1439, Jul. 2007.
- [263] CIGRE SC35 WG35.09, "Report on Digital Power Line Carrier," TB 164, Tech. Rep., Sep. 2000.
- [264] N. Suljanović, A. Mujcic, M. Zajc, and J. F. Tasic, "Corona Noise Characteristics in High Voltage PLC Channel," in *Proc. 2003 IEEE International Conference on Industrial Technology*, *ICIT'03*, vol. 2, pp. 1036-1039, Maribor, Slovenia, Dec. 2003.
- [265] A. Mujčić, N. Suljanović, M. Zajc, and J. F. Tasič, "Corona Noise on the 400 kV Overhead Power Line–Measurements and Computer Modeling," *Springer Electrical Engineering*, vol. 86, no.2, pp. 61-67, Jan. 2004.
- [266] N. Suljanović, A. Mujcić, M. Zajc, and J. Tasič, "Computation of High-Frequency and Time Characteristics of Corona Noise on HV Power Line," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 20, no. 1, pp. 71-79, Jan. 2005.
- [267] N. Suljanović, A. Mujcić, M. Zajc, and J. Tasič, "Frequency Characteristics Measurement of Overhead High-Voltage Power-Line in Low Radio-Frequency Range," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 22, no. 4, pp. 2142-2149, Oct. 2007.
- [268] V. H. Ishkin and Y. P. Shkarin, "Computation of Parameters of High Frequency Channels via Overhead Power Lines," in *Elect. Power Inst.* (in Russian). Moscow, Russia: Elect. Power Inst., 1999.
- [269] G. V. Mikutski, "Computation of Attenuation in High-Frequency Channels," (in Russian) *Electrichestvo*, no. 9, pp. 51-53, 1964.
- [270] R. Cortina, S. Cristina, M. D'Amore, and F. Rosa, "A General Method for the Analysis of Radio-Interference Measurements on Short Multi-Conductor Lines," *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems*, vol. 102, no. 1, pp. 1-9, Jan. 1983.

- [271] S. Cristina and M. D'Amore, "Prediction of Long-Line Radio-Interference Field from Measurements on Multi-Conductor Short-Line," *IEE Proc. C Generation, Transmission and Distribution*, vol.130, no. 2, pp. 83-90, Mar. 1983.
- [272] S. L. Marple, *Digital Spectral Analysis with Applications*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1987.
- [273] Y. H. Ma, P. L. So, and E. Gunawan, "Performance Analysis of OFDM Systems for Broadband Power Line Communications under Impulsive Noise and Multipath Effects," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 20, no. 2, pp. 674-682, Apr. 2005.
- [274] J. J. Lee, Y. S. Kim, W. T. Lee, Y. C. Rhee, and S. Shon, "Characteristic Parameter Analysis on Medium Voltage Power Distribution Line for BPLC," in Proc. 2007 IEEE International Symposium on Power Line Communications and its Applications, ISPLC'07, pp. 240-245, Pisa, Italy, Mar. 2007.
- [275] Y. Xiaoxian, Z. Tao, Z. Baohui, Y. Fengchun, D. Jiandong, and S. Minghui, "Research of Impedance Characteristics for Medium-Voltage Power Networks," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 22, no. 2, pp. 870-878, Apr. 2007.
- [276] Y. Xiaoxian, Z. Tao, Z. Baohui, N. H. Xum, L. Changxin, and T. Lixi, "Investigation of Transmission Properties on 10-kV Medium-Voltage Power Lines—Part II: Path Loss," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 23, no. 4, pp. 1886-1895, Oct. 2008.
- [277] E. Liu, Y. Gao, G. Samdani, O. Mukhtar, and T. Korhonen, "Broadband Characterization of Indoor Powerline Channel and its Capacity Consideration," in *Proc. 2005 IEEE International Conference on Communications*, *ICC'05*, vol. 2, pp. 901-905, Seoul, Korea, May 2005.
- [278] R. Bartnikas and K. Srivastava, Power and Communication Cables: Theory and Applications, Piscataway, NJ, USA: Wiley-IEEE Press, 2000.
- [279] J. Veen, P. C. J. M. van der Wielen, and E. F. Steennis, "Propagation Characteristics of Three-Phase Belted Paper Cable for on-Line PD Detection," in *Proc. 2002 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, *ELINSL*'02, pp. 96-99, Boston, MA, USA, Apr. 2002.
- [280] P. C. J. M. van der Wielen, E. F. Steennis, and P. A. A. F. Wouters, "Fundamental Aspects of Excitation and Propagation of on-Line Partial

Discharge Signals in Three-Phase Medium Voltage Cable Systems," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 10, no. 4, pp. 678-688, Aug. 2003.

- [281] Ofcom, "Compatibility of VDSL & PLT with Radio Services in the Range 1.6 MHz to 30 MHz," Ofcom, Tech. Rep., Oct. 2002, [Online]. Available: http://www.ofcom.org.uk/static/archive/ra/topics/interference/documents/twgfinalreport.pdf
- [282] J. Veen, "On-line Signal Analysis of Partial Discharges in Medium-Voltage Power Cables," Ph.D. dissertation, Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven, the Netherlands, Apr. 2005, [Online]. Available: http://alexandria.tue.nl/extra2/200511099.pdf
- [283] T. A. Papadopoulos, B. D. Batalas, A. Radis, and G. K. Papagiannis, "Medium Voltage Network PLC Modeling and Signal Propagation Analysis," in *Proc.* 2007 IEEE International Symposium on Power Line Communications and its Applications, ISPLC'07, pp. 284-289, Pisa, Italy, Mar. 2007.
- [284] N. Theethayi, "Electromagnetic Interference in Distributed Outdoor Electrical Systems, with an Emphasis on Lightning Interaction with Electrified Railway Network," Ph.D. dissertation, Uppsala Univ., Uppsala, Sweden, Sep. 2005,
 [Online]. Available: http://uu.divaportal.org/smash/get/diva2:166746/FULLTEXT01
- [285] N. Theethayi, Z. Mazloom, and R. Thottappillil, "Technique for Reducing Transient Voltages in Multiconductor-Shielded Cables," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 49, no. 2, pp. 434-440, May 2007.
- [286] N. Theethayi, R. Thottappillil, M. Paolone, C. A. Nucci, and F. Rachidi, "External Impedance and Admittance of Buried Horizontal Wires for Transient Studies Using Transmission Line Analysis," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 14, no. 3, pp. 751-761, Jun. 2007.
- [287] J. Anatory, N. Theethayi, R. Thottappillil, M. M. Kissaka, and N. H. Mvungi, "The Influence of Load Impedance, Line Length, and Branches on Underground Cable Power-Line Communications (PLC) Systems," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 23, no. 1, pp. 180-187, Jan. 2008.
- [288] High Voltage Inc., "Tanδ (DELTA) Cable Testing: Overview and Answers to Frequently Asked Questions," High Voltage Inc., Tech. Rep., [Online]. Available: http://www.hvinc.com/downloads/Tan_Delta_FAQ.pdf

- [289] F. M. Clark, Insulating Materials for Design and Engineering Practice, NewYork, NY, USA: Wiley, 1962.
- [290] C. Xu, L. Zhou, J. Y. Zhou, and S. Boggs, "High Frequency Properties of Shielded Power Cable—Part 1: Overview of Mechanism," *IEEE Electr. Insul. Mag.*, vol. 21, no. 6, pp. 24-28, Nov-Dec. 2005.
- [291] B. Gustavsen, J. A. Martinez, and D. Durbak, "Parameter Determination for Modeling System Transients—Part II: Insulated Cables," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 20, no. 3, pp. 2045-2050, Jul. 2005.
- [292] N. Srivallipuranandan, "Series impedance and shunt admittance matrices of an underground cable system," Master dissertation, University of British Columbia, Vancouver, BC, Canada, 1986.
- [293] J. B. Faria, "Evaluation of Indoor Cable Capacitances Taking Into Account Conductor Proximity and Dielectric Heterogeneity Effects," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 21, no. 4, pp. 1919-1926, Oct. 2006.
- [294] O. Breien and I. Johansen, "Attenuation of Traveling Waves in Single- Phase High-Voltage Cables," in *Proc. Inst. Elect. Eng.*, vol. 118, pp. 787-793, Jun. 1971.
- [295] J. Anatory and N. Theethayi, "On the Efficacy of Using Ground Return in the Broadband Power-Line Communications—A Transmission-Line Analysis," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 23, no. 1, pp. 132-139, Jan. 2008.
- [296] J. Anatory, N. Theethayi, M. M. Kissaka, and N. H. Mvungi, "Broadband Power Line Communications: The Factors Influencing Wave Propagations in the Medium Voltage Lines," in *Proc. 2007 IEEE International Symposium on Power Line Communications and its Applications, ISPLC'07*, pp. 127-132, Pisa, Italy, Mar. 2007.
- [297] J. Anatory, N. Theethayi, R. Thottappillil, M. M. Kissaka, and N. H. Mvungi,
 "An Experimental Validation for Broadband Power-Line Communication (BPLC) Model," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 23, no. 3, pp. 1380-1383, Jul. 2008.
- [298] J. Anatory, N. Theethayi, R. Thottappillil, M. M. Kissaka, and N. H. Mvungi, "Broadband Power-Line Communication Channel Model: Comparison between Theory and Experiments," in *Proc. 2008 IEEE International*

Symposium on Power Line Communications and its Applications, ISPLC'08, pp. 322-324, Jeju Island, Korea, Apr. 2008.

- [299] S. A. Schelkunoff, *Electromagnetic Waves*, Princeton, NJ, USA: Van Nostrand Company Incorporation, 1943.
- [300] L. M. Wedepohl and D. J. Wilcox, "Transient Analysis of Underground Power Transmission Systems. System-Model and Wave Propagation Characteristics," in *Proc. Inst. Electr. Eng.*, vol. 120, no. 2, pp. 253-260, Feb. 1973.
- [301] G. K. Papagiannis, D. A. Tsiamitros, G. T. Andreou, D. P. Labridis, and P. S. Dokopoulos, "Earth Return Path Impedances of Underground Cables for the Multi-Layer case: A Finite Element Approach," in *Proc. 2003 IEEE Power Tech Conference, PowerTech'03*, Bologna, Italy, Jun. 2003.
- [302] G. Mugala, "High Frequency Characteristics of Medium Voltage XLPE Power Cables," Ph.D. dissertation, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, Nov. 2005, [Online]. Available: http://kth.divaportal.org/smash/get/diva2:14437/FULLTEXT01
- [303] G. Mugala, R. Eriksson, U. Gafvert, and P. Pettersson, "Measurement Technique for High Frequency Characterization of Semiconducting Materials in Extruded Cables," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 11, no. 3, pp. 471-480, Jun. 2004.
- [304] G. Mugala, R. Eriksson, and P. Pettersson, "Dependence of XLPE Insulated Power Cable Wave Propagation Characteristics on Design Parameters," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 14, no. 2, pp. 393-399, Apr. 2007.
- [305] G. Mugala, R. Eriksson, and P. Pettersson, "Comparing Two Measurement Techniques for High Frequency Characterization of Power Cable Semiconducting and Insulating Materials," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 13, no. 4, pp. 712-716, Aug. 2006.
- [306] H. W. Dommel, "Digital Computer Solution of Electromagnetic Transients in Single and Multiphase Networks," *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems*, vol. 88, no. 4, pp. 388-399, Apr. 1969.
- [307] N. Theethayi, Y. Baba, F. Rachidi, and R. Thottappillil, "On the Choice between Transmission Line Equations and Full-Wave Maxwell's Equations for Transient Analysis of Buried Wires," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 50, no. 2, pp. 347-357, May 2008.

- [308] S. A. Schelkunoff, "The Electromagnetic Theory of Coaxial Transmission Lines and Cylindrical Shields," J. Bell Syst. Tech., vol. 13, pp. 532-579, Oct. 1934.
- [309] F. Pollaczek, "Über das Feld Einer Unendlich Langen Wechsel Stromdurchflossenen Einfachleitung," *Elek. Nachr. Tech.*, vol. 3, no. 9, pp. 339-360, 1926.
- [310] F. Pollaczek, "Sur le Champ Produit par un Conducteur Simple Infiniment Long Parcouru par un Courant Alternative," *Rev. Gén. Elect.*, vol. 29, pp. 851-867, 1931.
- [311] O. Saad, G. Gaba, and M. Giroux, "A Closed-Form Approximation for Ground Return Impedance of Underground Cables," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 11, no. 3, pp. 1536-1545, Jul. 1996.
- [312] S. Celozzi, R. Araneo, and G. Lovat, *Electromagnetic Shielding*, New York, NY, USA: Wiley-Interscience, 2008.
- [313] X. C. Tong, *Advanced Materials and Design for Electromagnetic Interference Shielding*, Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2008.
- [314] F. M. Tesche, M. Ianoz, and T. Karlsson, *EMC Analysis Methods and Computational Models*, New York, NY, USA: Wiley-IEEE, 1997.
- [315] R. Morrison, Grounding and Shielding: Circuits and Interference, New York, NY, USA: Wiley-IEEE, 2007.
- [316] K. L. Kaiser, *Electromagnetic Compatibility Handbook*, Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2004.
- [317] E. F. Vance, Coupling to Cable Shields, New York, NY, USA: Wiley, 1978.
- [318] J. Anatory, N. Theethayi, and R. Thottappillil, "Power-Line Communication Channel Model for Interconnected Networks—Part II: Multiconductor System," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 24, no. 1, pp. 124-128, Jan. 2009.
- [319] Y. O. Shlepnev, "Broadband Transmission Line Models for Analysis of Serial Data Channel Interconnects," in *Proc. 2007 PCB Design Conference East*, Durham, NC, USA, Oct. 2007, [Online]. Available: http://www.simberian.com/Presentations/Shlepnev_TLines_PCBEast_F4.pdf
- [320] Nexans Deutschland Industries GmbH & Co. KG Energy Networks,
 "Starkstromkabel 1-30 kV Power Cables 1-30 kV," Mar. 2004, [Online].
 Available:

http://www.nexans.de/Germany/group/doc/en/Power%20Cables%201%20-%2030%20kV%20-%20Nov%2006.pdf

- [321] Tele-Fonika Kable GmbH, "Starkstromkabel 1-30 kV Power Cables 1-30 kV," 2007, [Online]. Available: http://www.tfkable.pl/data/katalogi/tf_export_starkstromkabel_30kv_de_2007. pdf
- [322] R. Aquilué, M. Ribó, J. R. Regué, J. L. Pijoan, and G. Sánchez, "Scattering Parameters Based Underground Medium-Voltage Power-Line Communications Channel Measurements, Characterization and Modeling," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 24, no. 3, pp. 1122-1131, Jul. 2009.
- [323] R. Aquilué, "Power Line Communications for the Electrical Utility: Physical Layer Design and Channel Modeling," Ph.D. dissertation, Universitat Ramon Llull, Enginyeria I Arquitectura La Salle, Barcelona, Spain, Jul. 2008, [Online]. Available: http://www.tesisenxarxa.net/TDX-0721108-150034/
- [324] A. Cataliotti, A. Daidone, and G. Tinè, "Power Line Communication in Medium Voltage Systems: Characterization of MV Cables," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 23, no. 4, pp. 1896-1902, Oct. 2008.
- [325] M. Zimmermann and K. Dostert, "A Multi-Path Signal Propagation Model for the Power Line Channel in the High Frequency Range," in *Proc. 1999 IEEE International Symposium on Power Line Communications and its Applications, ISPLC'99*, pp. 45-51, Lancaster, UK, Mar. 1999.
- [326] A. Pérez, A. M. Sánchez, J. R. Regué, M. Ribó, R. Aquilué, P. Rodríguez-Cepeda, and F. J. Pajares, "Circuital and Modal Characterization of the Power-Line Network in the PLC Band," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 24, no. 3, pp. 1182-1189, Jul. 2009.
- [327] T. A. Papadopoulos, Ch. G. Kaloudas, and G. K. Papagiannis, "A Multipath Channel Model for PLC Systems based on Nodal Method and Modal Analysis," in *Proc. 2007 IEEE International Symposium on Power Line Communications and its Applications, ISPLC'07*, pp. 278-283, Pisa, Italy, Mar. 2007.
- [328] G. J. Anders, *Rating of Electric Power Cables*, New York, NY, USA: IEEE Press, 1997.

- [329] US Department of Defence, "Military Handbook. Grounding, Bonding, and Shielding for Electronic Equipments and Facilities. Volume 1: Basic Theory," Tech. Rep., ADA239565, Washington, DC, USA, Dec. 1987, [Online]. Available: http://www.wbdg.org/ccb/FEDMIL/hdbk419a_vol1.pdf
- [330] J. G. Stallcup, Stallcup's R Electrical Grounding and Bonding Simplified, 2005 Edition, Boston, MA, USA: Jones & Bartlett Publishers, 2005.
- [331] R. J. Mohr, "Coupling Between Wire Lines and Application to Transfer Impedance Analysis," in *Proc. 2004 IEEE/EMC Symposium Workshop*, Santa Clara, CA, USA, Aug. 2004, [Online]. Available: http://www.spiraemi.com/references/pdf/tf2_coupling_mohr.pdf
- [332] H. Liu, J. Song, B. Zhao, and X. Li, "Channel Study for Medium-Voltage Power Network," in Proc. 2006 IEEE International Symposium on Power Line Communications and its Applications, ISPLC'06, pp. 245-250, Orlando, FL, USA Mar. 2006.
- [333] J. Song, C. Pan, Q. Wu, Z. Yang, H. Liu, B. Zhao, and X. Li, "Field Trial of Digital Video Transmission over Medium-Voltage Powerline with Time-Domain Synchronous Orthogonal Frequency Division Multiplexing Technology," in *Proc. 2007 IEEE International Symposium on Power Line Communications and its Applications, ISPLC'07*, pp. 559-564, Pisa, Italy, Mar. 2007.
- [334] R. Aquilué, M. Ribó, J. R. Regué, J. L. Pijoan, and G. Sánchez, "Urban Underground Medium Voltage Channel Measurements and Characterization," in Proc. 2008 IEEE International Symposium on Power Line Communications and its Applications, ISPLC'08, pp. 70-75, Jeju Island, Korea, Apr. 2008.
- [335] P. A. A. F. Wouters, P. C. J. M. van der Wielen, J. Veen, P. Wagenaars, and E. F. Steennis, "Effect of Cable Load Impedance on Coupling Schemes for MV Power Line Communication," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 20, no. 2, pp.638-645, Apr. 2005.
- [336] J. Anatory, N. Theethayi, M. M. Kissaka, N. H. Mvungi, and R. Thottappillil, "The Effects of Load Impedance, Line Length and Branches in the BPLC— Transmission Lines Analysis for Medium Voltage Channel," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 22, no. 4, pp. 2156-2162, Oct. 2007.

- [337] G. Jee, C. Edison, R. Das Rao, and Y. Cern, "Demonstration of the Technical Viability of PLC Systems on Medium- and Low-Voltage Lines in the United States," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 41, no. 5, pp. 108-112, May 2003.
- [338] J. J. Lee, Y. J. Park, S. W. Kwon, H. M. Oh, H. S. Park, K. H. Kim, D. Y. Lee, and Y. H. Jeong, "High Data Rate Internet Service over Medium Voltage Power Lines," in *Proc. 2005 IEEE International Symposium on Power Line Communications and its Applications, ISPLC'05*, pp. 405-408, Vancouver, BC, Canada, Apr. 2005.
- [339] S. Liu and L. J. Greenstein, "Modeling and Interference Evaluation of Overhead Medium-Voltage Broadband Power Line (BPL) Systems," in *Proc.* 2007 IEEE Global Telecommunications Conference, GLOBECOM'07, pp. 134-139, Washington, DC, USA, Nov. 2007.
- [340] L. Weilin, H. Widmer, and P. Raffin, "Broadband PLC Access Systems and Field Deployment in European Power Line Networks," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 41, no. 5, pp. 114-118, May 2003.
- [341] P. S. Henry, "Interference Characteristics of Broadband Power Line Communication Systems Using Aerial Medium Voltage Wires," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 43, no. 4, pp. 92-98, Apr. 2005.
- [342] R. G. Gallager, Information Theory and Reliable Communication, New York, NY, USA: Wiley, 1968.
- [343] M. Kuhn, S. Berger, I. Hammerström, and A. Wittneben, "Power Line Enhanced Cooperative Wireless Communications," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 24, no. 7, pp. 1401-1410, Jul. 2006.
- [344] M. Crussière, J. Y. Baudais, and J. F. Hélard, "Adaptive Spread-Spectrum Multicarrier Multiple-Access over Wirelines," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 24, no. 7, pp. 1377-1388, Jul. 2006.
- [345] M. A. Aceña, "Power and Bit Allocation for Multicarrier Modulation in Multi-User Environments," Master dissertation, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, 2005.
- [346] D. Jiang, "Optimal Bit Loading Algorithm for Power-Line Communication Systems Subject to Individual Channel Power Constraints," in *Proc. 2006 International Conference on Communication Technology*, *ICCT'06*, pp. 1-4, Guilin, China, Nov. 2006.

- [347] T. S. Pang, P. L. So, K. Y. See, and A. Kamarul, "Modeling and Analysis of Common-Mode Current Propagation in Broadband Power-Line Communication Networks," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 23, no. 1, pp. 171-179, Jan. 2008.
- [348] A. Vukicevic, M. Rubinstein, F. Rachidi, and J. L. Bermudez, "On the Mechanisms of Differential-Mode to Common-Mode Conversion in the Broadband over Power Line (BPL) Frequency Band," in Proc. 2006 International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility, EMC-Zurich'06, pp. 658-661, Zurich, Switzerland, Feb. 2006.
- [349] Telecommunication Engineering Centre (TEC), "Study Paper on Scalable OFDM Access (SOFDMA)," Department of Telecommunications (DoT), Ministry of Communications and Information Technology, Government of India, Tech. Rep., Jun. 2007, [Online]. Available: http://www.tec.gov.in/technology%20updates/study%20paper%20on%20sofdma-N%20divn.pdf
- [350] C. Wooff, "Leakage Emissions from ADSL and PLT Networks," Ofcom, Tech. Presentation, Nov. 2003. [Online]. Available: www.ofcom.org.uk/static/archive/ra/topics/research/rrac/1-colinwooff.ppt
- [351] F. Issa, D. Chaffanjon, and A. Pacaud, "Outdoor Radiated Emission Associated with Power Line Communications Systems," in *Proc. 2001 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, ISEMC'01*, vol. 1, pp. 521-526, Montreal, QC, Canada, Aug. 2001.
- [352] N. Pavlidou, A. J. Han Vinck, J. Yazdani, and B. Honary, "Power Line Communications: State of the Art and Future Trends," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 41, no. 4, pp. 34-40, Apr. 2003.
- [353] S. Baig and M. J. Mughal, "Multirate Signal Processing Techniques for High-Speed Communication over Power Lines," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 47, no. 1, pp. 70-76, Jan. 2009.
- [354] A. Chubukjian, J. Benger, R. Otnes, and B. Kasper, "Potential Effects of Broadband Wireline Telecommunications on the HF Spectrum," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 46, no. 11, pp. 49-54, Nov. 2008.
- [355] C. Douligeris, "Intelligent Home Systems," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 31, no. 10, pp. 52-61, Oct. 1993.

- [356] D. Huaiyu and H. V. Poor, "Advanced Signal Processing for Power Line Communications," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 41, no. 5, pp. 100-107, May 2003.
- [357] S. Baig and N. D. Gohar, "A Discrete Multitone Transceiver at the Heart of the PHY Layer of an in-Home Power Line Communication Local-Area Network," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 41, no. 4, pp. 48-53, Apr. 2003.
- [358] H. A. Latchman and L. W. Yonge, "A Power Line Local Area Networking," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 41, no. 4, pp. 32-33, Apr. 2003.
- [359] Y. J. Lin, H. A. Latchman, R. E. Newman, and S. H. Katar, "A Comparative Performance Study of Wireless and Power Line Networks," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 41, no. 4, pp. 54-63, Apr. 2003.
- [360] F. J. Cañete, J. A. Cortés, L. Diez, and J. T. Entrambasaguas, "Modeling and Evaluation of the Indoor Power Line Transmission Medium," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 41, no. 4, pp. 41-47, Apr. 2003.
- [361] J. Abad, A. Badenes, J. Blasco, J. Carreras, V. Dominguez, C. Gomez, S. Iranzo, J. C. Riveiro, D. Ruiz, L. M. Torres, and J. Comabella, "Extending the Power Line LAN up to the Neighborhood Transformer," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 41, no. 4, pp. 64-70, Apr. 2003.
- [362] N. K. Cheung, "Guest Editorial–Broadband over Power Line Interferences and Intervehicle Safety Communications," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 43, no. 4, pp. 90-91, Apr. 2005.
- [363] B. Lee, J. M. Cioffi, S. Jagannathan, and M. Mohseni, "Gigabit DSL," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 55, no. 9, pp. 1689-1692, Sep. 2007.
- [364] G. N. S. Prasanna, "Aerial MV lines at VHF/UHF: Quasi-TEM Analysis and Experimental Results," in Proc. 2006 IEEE International Symposium on Power Line Communications and its Applications, ISPLC'06, pp. 302-308, Orlando, FL, USA Mar. 2006.
- [365] S. Orda, R. Rom, and S. Shimkin, "Competitive Routing in Multiuser Communication Networks," *IEEE/ACM Trans. Networking*, vol. 1, no. 5, pp. 510-521, Oct. 1993.
- [366] J. Anatory and N. Theethayi, Broadband Power Line Communications Systems: Theory and Applications, Southampton, SO, UK: WIT press, Mar. 2010.

- [367] F. Pérez-Cruz, M. Rodrigues, and S. Verdú, "Optimal Precoding for Digital Subscriber Lines," in Proc. 2008 IEEE International Conference on Communications, ICC'08, pp. 1200-1204, Beijing, China, May 2008.
- [368] T. C. Elliott, K. Chen, and R. C. Swanekamp, Standard Handbook of Powerplant Engineering, New York, NY, USA: McGraw-Hill Professional, 1998.
- [369] J. H. Matthews, Introduction to the Design and Analysis of Building Electrical Systems, New York, NY, USA: Springer, 1993.
- [370] R. C. Dugan, M. F. McGranaghan, S. Santoso, and H. W. Beaty, *Electrical Power Systems Quality*, New York, NY, USA: McGraw-Hill Professional, 2003.
- [371] J. H. Harlow, *Electric Power Transformer Engineering*, Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2004.
- [372] Bharat Heavy Electricals Limited, *Transformers*, New Delhi, India: Tata McGraw-Hill, 2003.
- [373] IEC, "Electromagnetic compatibility (EMC) Part 3: Limits Section 2: Limits for Harmonic Current Emissions (Equipment Input Current ≤ 16A per Phase)," Tech. Rep. IEC 61000-3-2:2000, 2000.
- [374] IEC, "Electromagnetic Compatibility (EMC) –Part 3-3: Limits- Limitation of Voltage Changes, Voltage Fluctuations and Flicker in Public Low-Voltage Supply Systems, for Equipment with Rated Current<=16A per Phase and not Subject to Conditional Connection," Tech. Rep. IEC 61000-3-11:2000, 2000.
- [375] IEC, "Electrostatic Discharge Immunity Test," Tech. Rep. IEC 61000-4-2, Ed.
 1.2 (2001) + A1, A2, 2001.
- [376] IEC, "Radiated Radio-Frequency Electromagnetic Field Immunity Test," Tech.Rep. IEC 61000-4-3, Ed. 2.0 (2002-03); EN 61000-4-3 (2002), 2002.
- [377] IEC, "Electromagnetic compatibility (EMC) Part 4-4: Testing and Measurement Techniques – Electrical Fast Transient/Burst Immunity Test," Tech. Rep. IEC 61000-4-4(1995), A1(2000), A2(2001); EN 61000-4-4, 2001.
- [378] IEC, "Electromagnetic compatibility (EMC) Part 4-5: Testing and Measurement Techniques – Surge Immunity Test," Tech. Rep. IEC 61000-4-5, Ed. 1.1 (2001-04); EN 61000-4-5, 2001.

- [379] IEC, "Electromagnetic compatibility (EMC) Part 4-6: Testing and Measurement Techniques – Immunity to Conducted Disturbances, Induced by Radio-Frequency Fields," Tech. Rep. IEC 61000-4-6, Ed.2.0 (2003-05); EN 61000-4-6, 2003.
- [380] IEC, "Voltage Dips, Short Interruptions and Voltage Variations Immunity Tests," Tech. Rep. IEC 61000-4-11, Ed.1.1 (2001-03); EN 61000-4-11, 2001.
- [381] S. Frankel, *Multiconductor Transmission Line Analysis*, Michigan, MI, USA: Artech House, 1977.
- [382] G. E. Bridges, "Fields Generated by the Bare and Insulated Cables Buried in a Lossy Half-sSpace," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 30, no. 1, pp. 140-146, 1992.
- [383] K. C. Chen, "Transient Response of an Infinite Wire in a Dissipative Medium," *Interaction notes on EMP and related subjects*, Dr. C. E. Baum, Editor, IN453, 2001.
- [384] J. R. Wait, "Electromagnetic Wave Propagation along a Buried Insulated Wire," *Canadian Jour. Physics*, vol. 50, pp. 2402-2409, 1972.
- [385] E. Petrache, "Lightning Electromagnetic Field Coupling to Overhead Transmission Line Networks and to Buried Cables," Ph.D. dissertation, Swiss Federal Institute of Technology, Lausanne, Switzerland, 2004.
- [386] N. Theethayi and R. Thottappillil, "Lightning Current Pulse Propagation in Underground Wires–A Transmission Line Analysis: Part I–Simple Expressions for External Wire Impedances and Admittance," in review at IEEE Trans. Power Del..
- [387] N. Theethayi and R. Thottappillil, "Lightning Current Pulse Propagation in Underground Wires–A Transmission Line Analysis: Part II–Time Domain Simulations for Sensitivity Analysis," in review at *IEEE Trans. Power Del.*.
- [388] N. Theethayi and R. Thottappillil, "Pulse Propagation in Underground Wires-A Transmission Line Analysis," in Proc. 2005 RK Conference, Linköping, Sweden, 2005.
- [389] R. Bronson, Schaum's Outline of Theory and Problems of Matrix Operations, New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1989.
- [390] R. M. Gray, *Toeplitz and Circulant Matrices: a Review*, Delft, the Netherlands: Now Publishers Inc, 2006.

- [391] S. G. Tzafestas, Multidimensional Systems: Techniques and Applications, Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 1986.
- [392] A. Böttcher and S. M. Grudsky, *Toeplitz Matrices, Asymptotic Linear Algebra, and Functional Analysis*, Berlin, Germany: Birkhäuser, 2000.