



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Μοντέλα Περιγραφής Φυσικού Διαύλου Συστημάτων PLC στη Χαμηλή και τη Μέση Τάση

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΓΕΩΡΓΙΟΣ Δ. ΠΟΝΗΡΟΣ

Επιβλέπων : Παναγιώτης Γ. Κωττής
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2007



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

**Μοντέλα Περιγραφής Φυσικού Καναλιού Συστημάτων BPL
σε Χαμηλή και Μέση Τάση**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΓΕΩΡΓΙΟΣ Δ. ΠΟΝΗΡΟΣ

Επιβλέπων : Παναγιώτης Γ. Κωττής
Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 24^η Οκτωβρίου 2007

.....
Π. Κωττής
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Χ. Καγάλης
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Ι. Κανελλόπουλος
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2007

.....
Γεώργιος Δ. Πονηρός

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Γεώργιος Δ. Πονηρός, Αθήνα Οκτώβριος 2007

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.

Περίληψη

Οι επικοινωνίες μέσω γραμμών μεταφοράς ισχύος (PLC ή BPL) υφίστανται μια γρήγορη ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια εξαιτίας της δυνατότητας παροχής υπηρεσιών σε χαμηλό κόστος και της πολλαπλής χρησιμότητας τόσο στον έλεγχο εγκαταστάσεων όσο και σε γενικότερες εφαρμογές μετάδοσης δεδομένων. Πρέπει να σημειωθεί όμως ότι ένα κανάλι PLC πρέπει να υπερνικήσει κάποιες προκλήσεις, ώστε να αξιοποιηθεί όσο το δυνατόν καλύτερα. Χαρακτηριστικά του καναλιού PLC όπως η επιλεκτική εξασθένηση συχνοτήτων, τα μεταβαλλόμενα χαρακτηριστικά του καναλιού μετάδοσης, το περιβάλλον πολυδιαδεύσεων και ο θόρυβος (κυρίως κρουστικής μορφής), καθιστούν εξαιρετικά δύσκολη την επίτευξη υψηλών ρυθμών μετάδοσης. Προκειμένου να επιτευχθούν οι επιθυμητοί ρυθμοί μετάδοσης, απαιτούνται πολύπλοκες και καλά σχεδιασμένες μέθοδοι και τεχνικές.

Σκοπός της εργασίας αυτής αποτελεί η μελέτη και μοντελοποίηση των χαρακτηριστικών που εμφανίζει το δίκτυο γραμμών ηλεκτρικής ισχύος κατά τη χρήση του ως μέσο μετάδοσης ψηφιακών δεδομένων σε υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης, καθώς η πλήρης κατανόησή του είναι πολύ σημαντική για την περαιτέρω αξιοποίησή του σε τοπολογίες μέσης και χαμηλής τάσης..

Στο Κεφάλαιο 1 παρουσιάζονται γενικά στοιχεία σχετικά με το αντικείμενο των συστημάτων επικοινωνιών μέσω γραμμών μεταφοράς ισχύος. Γίνεται εισαγωγή με ένα σύνολο πληροφοριών που είναι απαραίτητες για την περαιτέρω μελέτη της αρχιτεκτονικής των συστημάτων πρόσβασης PLC και των επιμέρους τμημάτων τους.

Στο Κεφάλαιο 2 δίνεται με περισσότερη λεπτομέρεια η δομή καθώς και η λειτουργία των δικτύων PLC στην περιοχή πρόσβασης και διανομής. Τέλος παρουσιάζονται συγκεκριμένα προβλήματα απόδοσης που περιορίζουν την εφαρμογή της τεχνολογίας PLC.

Στο Κεφάλαιο 3 δίνεται περιγραφή του δικτύου μέσης και χαμηλής τάσης ενώ αναπτύσσονται και ζητήματα θορύβου που επηρεάζουν την επίδοση των συστημάτων PLC.

Στο Κεφάλαιο 4 αναλύονται τα μοντέλα περιγραφής των συστημάτων PLC με τη χρήση της σύνθετης συνάρτησης μεταφοράς $H(f)$. Στα πλαίσια αυτού του κεφαλαίου παρέχονται οι απαραίτητες διευκρινήσεις όσον αφορά τον υπολογισμό της σταθεράς διάδοσης $\gamma(f)$ και τον τρόπο με τον οποίο μπορούν να εκτιμηθούν σενάρια

πολυδιάδεσης (μοντέλα Dostert, Smith, Meng). Στο τέλος γίνεται μια αναφορά στα καλώδια που χρησιμοποιούνται από τα δίκτυα ηλεκτρικής ισχύος.

Στο Κεφάλαιο 5 δίνονται τα αριθμητικά αποτελέσματα που προέκυψαν από τα υλοποιημένα προγράμματα για διάφορες τοπολογίες δικτύων μέσης και χαμηλής τάσης, συχνότητες, μήκη, κατάσταση φορτίων τα οποία συνδέονται και αριθμό κλάδων.

Τέλος, στο Κεφάλαιο 6 αναφέρονται τεχνικές αντιμετώπισης ζητημάτων που επηρεάζουν αρνητικά την επίδοση ενός συστήματος PLC προκειμένου να επιτευχθούν οι επιθυμητοί ρυθμοί μετάδοσης (μέθοδος πολλαπλών φερόντων OFDM και μηχανισμοί χειρισμού λάθους).

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: Ευρυζωνικές Επικοινωνίες, Επικοινωνίες μέσω γραμμών μεταφοράς ισχύος, PLC, Μοντέλα Περιγραφής Καναλιού, Συνάρτηση Μεταφοράς, Μέση και Χαμηλή Τάση.

Abstract

The communications over power lines (PLC or BPL) suffer a fast growth the last years because of the possibility of benefits of services in low cost and the multiple usefulness in the control of installations and in more general applications in the transmission of data. It should be marked that a BPL channel has to overcome several challenges, so that is developed as much as possible better. Characteristics of a PLC channel such as large and frequency-depending attenuation, varying impedance, considerable noise (impulsive), high attenuation and other effects, act as an obstacle to achieve a high-speed rate of transmission with a conventional single-carrier approach. Thus that are achieved the desirable data rate of transmission, are required complicated and well design methods and techniques.

The scope of this thesis is the study and the modeling of characteristics that presents the power supply network when it is used for the transmission of digital data with high data rate of transmission, because their complete comprehension is very important for their further exploitation in topologies of medium and low voltage supply network.

In Chapter 1 are presented general elements with regard to the object of broadband over powerline system. This chapter is directed to give a set of information that is necessary to be considered for the design of the broadband PLC access systems and their network components.

In Chapter 2 is given with more detail the structure as well as the operation of networks PLC in the access and distribution area. Finally are presented concrete problems of output that limit the application of technology PLC.

In Chapter 3 is given description of medium and low voltage network while are developed also issues of noise that influence the record of systems PLC.

In Chapter 4 are analyzed the models of description of systems PLC with the use of complex transfer function $H(f)$. In the frames of this chapter are provided essential discriminations with regard to the calculation of propagation constant $\gamma(f)$ and the way with which they can be appreciated scripts of multipath signal propagation (models Dostert, Smith, Meng). In the end becomes a report in the cables which appear to be promising for broadband communication.

In Chapter 5 numerical results that arised from the materialised programs for various topologies of medium and low network, frequencies, lengths, situation of charges which is connected and number of sectors are presented.

Finally, in Chapter 6 are reported techniques of confrontation of problems that influence negatively the record of system PLC so that are achieved the desirable data rate of transmission (method Orthogonal Frequency Division Multiplexing OFDM and mechanisms for error handling).

KEY WORDS: Broadband Communications, Powerline Communications, PLC, Model for the Powerline Communication Channel, Transfer Function, Medium and Low Voltage.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΗΡΙΟ ΣΗΜΕΙΩΜΑ

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους βοήθησαν, με κάποιον άμεσο ή έμμεσο τρόπο, στην ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας.

Θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα της εργασίας μου Καθηγητή Ε.Μ.Π. κ. Παναγιώτη Γ. Κωττή για τη συνεισφορά του στις γνώσεις μου κατά τη διάρκεια των σπουδών μου στη Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου αλλά και για την εμπιστοσύνη που μου επέδειξε με την ανάθεση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Επίσης ευχαριστώ θερμά τον υποψήφιο Διδάκτορα Ε.Μ.Π. κ.Αθανάσιο Λαζαρόπουλο για την πολύ καλή συνεργασία που είχαμε και για τις πολύτιμες συμβουλές κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στην οικογένειά μου, για την υποστήριξη που μου παρείχαν όλα αυτά τα χρόνια, υλική και κυρίως ηθική.

Αφιερώνεται στην οικογένειά μου

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Κεφάλαιο 1.....	23
Ευρυζωνικά Δίκτυα PLC.....	23
1.1 Γενικά.....	23
1.1.1 Εισαγωγή.....	23
Κεφάλαιο 2.....	29
Συστήματα PLC στην Περιοχή Πρόσβασης.....	29
2.1 Τεχνολογίες πρόσβασης.....	29
2.1.1 Η σημασία των τηλεπικοινωνιών στην περιοχή πρόσβασης.....	29
2.2 Συστήματα Ευρυζωνικών Ηλεκτρονικών Επικοινωνιών μέσω Γραμμών	
Ηλεκτρικής Ισχύος.....	31
2.2.1 Ιστορική αναδρομή.....	31
2.2.2 Δίκτυα παροχής ηλεκτρικής ισχύος.....	32
2.2.3 Πρότυπα.....	33
2.2.4 Στενού εύρους ζώνης PLC.....	35
2.2.5 Ευρυζωνικά PLC.....	39
2.3 Δίκτυα πρόσβασης PLC.....	40
2.3.1 Δομή των δικτύων πρόσβασης PLC.....	40
2.3.2 Οικιακά δίκτυα PLC.....	42
2.3.3 Σύνδεση στο δίκτυο κορμού.....	44
2.3.3.1 Τεχνολογίες επικοινωνιών για τα δίκτυα διανομής PLC.....	44
2.3.3.2 Τοπολογία των δικτύων διανομής.....	45
2.3.3.3 Διαχείριση δικτύων πρόσβασης PLC.....	46
2.3.4 Δίκτυο M/T PLC.....	48
2.4 Προβλήματα επίδοσης συστημάτων PLC.....	49
2.4.1 Χαρακτηριστικά του καναλιού μετάδοσης PLC.....	50
Κεφάλαιο 3.....	51
Χαρακτηριστικά Δικτύου PLC.....	51
3.1 Τοπολογία δικτύου.....	51
3.1.1 Τοπολογία των δικτύων X/T.....	51
3.1.2 Οργάνωση των δικτύων πρόσβασης PLC.....	53

3.1.2.1 Τοποθεσία του σταθμού βάσης.....	54
3.1.2.2 Κατάτμηση του δικτύου.....	56
3.1.2.3 Σύστημα PLC μέσω πολλαπλών δικτύων X/T.....	59
3.1.2.4 Δίκτυα με την τεχνική των επαναληπτών και των πυλών.....	60
3.1.3 Υβριδικά δίκτυα πρόσβασης PLC.....	62
3.1.4 Λογικά μοντέλα δικτύου.....	65
3.2 Χαρακτηρισμός διαταραχών.....	68
3.2.1 Περιγραφή θορύβου.....	68
3.2.2 Γενικευμένος παρασιτικός θόρυβος.....	70
3.2.3 Κρουστικός Θόρυβος.....	72
Κεφάλαιο 4.....	75
Μοντέλα Περιγραφής Συστημάτων PLC.....	75
4.1 Εισαγωγή.....	75
4.2 Μοντέλα περιγραφής.....	76
4.2.1 1 ^ο Μοντέλο περιγραφής.....	76
4.2.1.1 Τοπολογία του βασικού δικτύου.....	77
4.2.1.2 Πολυδιαδρομική διάδοση σήματος.....	77
4.2.1.3 Απώλειες καλωδίου.....	79
4.2.1.4 Γενικευμένο μοντέλο πολυδιαδρομικής διάδοσης σήματος της συνάρτησης μεταφοράς.....	81
4.2.1.5 Απλοποιημένο μοντέλο.....	82
4.2.2 Μέθοδοι ανάλυσης μικροκυματικών δικτύων.....	83
4.2.2.1 Μοντελοποίηση της συνάρτησης μεταφοράς.....	87
4.3 Δίκτυα X/T και M/T.....	91
4.3.1 Δίκτυο X/T.....	91
4.3.1.1 Ανάλυση γραμμής μεταφοράς των καλωδίων ηλεκτρικής ισχύος.....	92
4.3.1.2 Καθορισμός των παραμέτρων του μοντέλου.....	94
4.3.1.3 Επαλήθευση των πρότυπων παραμέτρων.....	99
4.3.2 Δίκτυο M/T.....	101
4.3.2.1 Χαρακτηριστικά των καλωδίων M/T.....	101
Κεφάλαιο 5.....	105
Αριθμητικά Αποτελέσματα.....	105

5.1 Γενικά.....	105
5.1.1 Εισαγωγή.....	105
5.2 Τοπολογίες γραμμών X/T.....	106
5.2.1 1 ^η Τοπολογία	106
5.2.2 2 ^η Τοπολογία.....	108
5.2.2.1 2 ^η Τοπολογία (τρεις ανοιχτοκυκλωμένες διακλαδώσεις).....	108
5.2.2.2 2 ^η Τοπολογία (δύο ανοιχτοκυκλωμένες διακλαδώσεις, ένα προσαρμοσμένο ως προς τη γραμμή στέλεχος).....	110
5.2.2.3 2 ^η Τοπολογία (τρία προσαρμοσμένα ως προς τη γραμμή στελέχοι).....	111
5.3 Τοπολογίες γραμμών M/T.....	112
5.3.1 3 ^η Τοπολογία.....	112
5.3.2 4 ^η Τοπολογία.....	114
5.3.3 5 ^η Τοπολογία.....	115
5.3.4 6 ^η Τοπολογία.....	115
5.3.5 7 ^η Τοπολογία.....	117
5.3.6 8 ^η Τοπολογία.....	117
Κεφάλαιο 6.....	119
Υλοποίηση Συστημάτων Πρόσβασης PLC.....	119
6.1 Τεχνικές διαμόρφωσης σε συστήματα PLC.....	119
6.1.1 Ορθογώνια Μέθοδος Διαμόρφωσης OFDM.....	120
6.1.1.1 Αρχές διαμόρφωσης.....	120
6.1.1.2 Παραγωγή σημάτων OFDM.....	123
6.1.1.3 Υλοποίηση του συστήματος OFDM.....	125
6.1.2 Διαμόρφωση απλωμένου φάσματος	127
6.1.3 Επιλογή της κατάλληλης τεχνικής διαμόρφωσης για τα συστήματα PLC.....	128
6.2 Χειρισμός λάθους.....	129
6.2.1 Επισκόπηση.....	129
6.2.2 Κωδικοποίηση (Forward Error Correction).....	131
6.2.3 Ανάδευση ψηφίων.....	133
6.2.4 Μηχανισμοί ARQ	134
6.3 Υπηρεσίες PLC.....	135

6.3.1 Φορέας Υπηρεσίας PLC.....	135
6.3.2 Τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες στα δίκτυα πρόσβασης PLC.....	137
6.3.2.1 Τηλεφωνία.....	138
6.3.2.2 Διαδικτυακή πρόσβαση.....	139
6.3.2.3 Προηγμένες ευρυζωνικές υπηρεσίες	141
6.3.2.4 Υπηρεσίες στενού εύρους ζώνης.....	142
6.3.3 Κατηγοριοποίηση υπηρεσιών	143
6.3.3.1 Κλάσεις Κίνησης.....	144
6.3.3.2 Κατηγορίες υπηρεσιών	145
Παράρτημα Α.....	149
Γραμμές Μεταφοράς Δύο Αγωγών.....	149
A.1 Διάδοση κυμάτων σε γραμμές μεταφοράς.....	149
A.1.1 Ανάλυση κυμάτων σε γραμμές μεταφοράς που μεταβάλλονται ημιτονικά με το χρόνο.....	151
A.1.2 Μετασχηματισμός της σύνθετης αντίστασης σε γραμμές μεταφοράς. Χάρτης Smith.....	157
A.1.3 Στάσιμα κύματα σε γραμμές μεταφοράς χωρίς απώλειες.....	161
A.1.4 Ταχύτητες διάδοσης στις γραμμές μεταφοράς – Συνθήκη Heaviside.....	164
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	169

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1.1	Ιεραρχία τηλεπικοινωνιακών δικτύων.....	24
Σχήμα 1.2	Επικοινωνίες μέσω του δικτύου παροχής ηλεκτρικής ενέργειας.....	25
Σχήμα 1.3	Δίκτυο πρόσβασης PLC.....	27
Σχήμα 2.1	Γενική δομή τηλεπικοινωνιακών δικτύων.....	30
Σχήμα 2.2	Δομή ηλεκτρικού δικτύου.....	33
Σχήμα 2.3	Δομή ενός αυτοματοποιημένου στενού εύρους ζώνης συστήματος PLC.....	37
Σχήμα 2.4	Γενική δομή συστήματος PLC που χρησιμοποιείται για σχετικές με την ενέργεια υπηρεσίες.....	38
Σχήμα 2.5	Δομή δικτύου πρόσβασης PLC.....	41
Σχήμα 2.6	Δομή ενός οικιακού δικτύου PLC.....	43
Σχήμα 2.7	Σύνδεση στο δίκτυο κορμού.....	45
Σχήμα 2.8	Δίκτυο ελέγχου PLC.....	47
Σχήμα 2.9	Δομή ενός δικτύου επικοινωνιών, μιας πανεπιστημιούπολης, που χρησιμοποιεί δίκτυο PLC μέσης τάσης.....	49
Σχήμα 3.1	Πιθανή τοπολογία ενός δικτύου X/T.....	53
Σχήμα 3.2	Δίκτυο PLC με το σταθμό βάσης στη μονάδα του μετασχηματιστή.....	55
Σχήμα 3.3	Τοπολογία ενός δικτύου πρόσβασης PLC και του αντίστοιχου δικτύου X/T.....	55
Σχήμα 3.4	Παράλληλα συστήματα πρόσβασης PLC μέσα σε ένα δίκτυο X/T.....	56
Σχήμα 3.5	Ανεξάρτητα δίκτυα πρόσβασης PLC μέσα σε ένα δίκτυο τάσης.....	57
Σχήμα 3.6	Δίκτυο πρόσβασης PLC με δύο επίπεδα ιεραρχίας.....	58
Σχήμα 3.7	Διασύνδεση των δικτύων X/T.....	59
Σχήμα 3.8	Δίκτυο πρόσβασης με επαναλήπτες (πύλες).....	61
Σχήμα 3.9	Παράδειγμα ενός σύνθετου δικτύου πρόσβασης PLC.....	63
Σχήμα 3.10	Λογική δομή ενός δικτύου PLC τοπολογίας διαύλου (bus).....	66
Σχήμα 3.11	Τύποι προσθετικού θορύβου σε περιβάλλον PLC.....	69
Σχήμα 3.12	Πρότυπο χωρητικότητας φάσματος για το γενικευμένο παρασιτικό θόρυβο.....	71

Σχήμα 3.13 Παράδειγμα μετρήσεων κρουστικού παλμού ως προς το χρόνο σε ένα δίκτυο PLC.....	73
Σχήμα 3.14 Το μοντέλο που χρησιμοποιείται για την κατηγορία του κρουστικού θορύβου.....	74
Σχήμα 4.1 Πολυδιαδρομική διάδοση σήματος σε καλώδιο με ένα στέλεχος.....	78
Σχήμα 4.2 Σύνδεση σε διαδοχή διθύρων.....	84
Σχήμα 4.3 Ορισμός των κυματικών μητρών μεταφοράς.....	85
Σχήμα 4.4 Ένα απλουστευμένο κανάλι δικτύου μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος.....	88
Σχήμα 4.5 Λεπτομερές διάγραμμα για το δίκτυο ενός στελέχους.....	88
Σχήμα 4.6 Τομή ενός αγωγού ηλεκτρικής ισχύος.....	92
Σχήμα 4.7 (α) Ορισμοί τάσης-ρεύματος (β) Ισοδύναμο κύκλωμα γραμμής μεταφοράς δύο καλωδίων.....	93
Σχήμα 4.8 Ισοδύναμο διάγραμμα χωρητικότητας σε μια γραμμή ισχύος (L: αγωγός φάσης, N: ουδέτερος, E: γείωση).....	95
Σχήμα 4.9 Τμηματοποίηση του έκκεντρου ομοαξονικού κυλινδρικού αγωγού.....	97
Σχήμα 4.10 Συνολική χωρητικότητα μεταξύ του ζεύγους των καλωδίων.....	98
Σχήμα 4.11 Σύγκριση μετρήσεων και υπολογισμών.(α) Πλάτος και φάση της χαρακτηριστικής αντίστασης, (β) Σταθερά εξασθένησης και καθυστέρηση ομάδας.....	100
Σχήμα 4.12 Δίκτυο ανοικτού βρόχου.....	102
Σχήμα 4.13 Καλώδιο απλού πυρήνα.....	103
Σχήμα 5.1 Τοπολογία 1.....	106
Σχήμα 5.2 Συνάρτησης Μεταφοράς Γραμμής Ηλεκτρικής Ισχύος X/T με μια διακλάδωση.....	107
Σχήμα 5.3 Τοπολογία 2.....	109
Σχήμα 5.4 Συνάρτησης Μεταφοράς Γραμμής Ηλεκτρικής Ισχύος X/T με τρεις διακλαδώσεις.....	109
Σχήμα 5.5 Συνάρτησης Μεταφοράς Γραμμής Ηλεκτρικής Ισχύος X/T με τρεις διακλαδώσεις (δύο ανοιχτοκυκλωμένες διακλαδώσεις και μια προσαρμοσμένη.....	110
Σχήμα 5.6 Συνάρτησης Μεταφοράς Γραμμής Ηλεκτρικής Ισχύος X/T με τρεις διακλαδώσεις προσαρμοσμένες.....	111
Σχήμα 5.7 Τοπολογία 3.....	112
Σχήμα 5.8 Συνάρτηση Μεταφοράς Γραμμής Ηλεκτρικής Ισχύος M/T με τρεις διακλαδώσεις.....	113

Σχήμα 5.9	Συνάρτηση Μεταφοράς Γραμμής Ηλεκτρικής Ισχύος M/T.....	114
Σχήμα 5.10	Συνάρτηση Μεταφοράς Γραμμής Ηλεκτρικής Ισχύος M/T.....	115
Σχήμα 5.11	Τοπολογία 6.....	116
Σχήμα 5.12	Συνάρτηση Μεταφοράς Γραμμής Ηλεκτρικής Ισχύος M/T.....	116
Σχήμα 5.13	Συνάρτηση Μεταφοράς Γραμμής Ηλεκτρικής Ισχύος M/T.....	117
Σχήμα 5.14	Τοπολογία 7.....	118
Σχήμα 5.15	Συνάρτηση Μεταφοράς Γραμμής Ηλεκτρικής Ισχύος M/T.....	118
Σχήμα 6.1	Παρουσίαση συμβόλων OFDM ως προς τη συχνότητα.....	121
Σχήμα 6.2	Προσθέτοντας το κυκλικό πρόθεμα με το διπλασιασμό του πρώτου μέρους του αρχικού συμβόλου.....	122
Σχήμα 6.3	Παραγωγή σημάτων OFDM.....	124
Σχήμα 6.4	Υλοποίηση ενός OFDM συστήματος.....	126
Σχήμα 6.5	Αρχή της διαπλάτυνσης εύρους ζώνης σε DSSS.....	127
Σχήμα 6.6	Οι κύριες κατηγορίες FEC: κώδικες φραγμών και συνελκτικοί κώδικες.....	132
Σχήμα 6.7	Διαδικασία μιας απλής τεχνικής διασκορπισμού λαθών.....	134
Σχήμα 6.8	Ταξινόμηση των τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών.....	136
Σχήμα 6.9	Συμπεριφορά χρήστη Διαδικτύου σε διαφορετικά επίπεδα παρατήρησης.....	141
Σχήμα A.1	Γραμμή μεταφοράς χωρίς απώλειες με κατανομημένες παραμέτρους.....	150
Σχήμα A.2	Γραμμή μεταφοράς με απώλειες.....	150
Σχήμα A.3	Διέγερση γραμμής μεταφοράς.....	151
Σχήμα A.4	Μεταβολή τάσης $ V(z) $ κατά μήκος της γραμμής μεταφοράς χωρίς απώλειες για $Z_L = 0$ και $Z_L = \infty$	156
Σχήμα A.5	Μεταβολή της τάσης $ V(z) $ σε γραμμή μεταφορά με απώλειες για $Z_L = 0$ και $Z_L = \infty$	156
Σχήμα A.6	Μεταβολή της τάσης $ V(z) $ σε γραμμή με απώλειες για τυχαία τιμή της αντίστασης τερματισμού Z_L	157
Σχήμα A.7	Τερματισμένη γραμμή μεταφοράς.....	158
Σχήμα A.8	Κατασκευή του χάρτη Smith.....	161
Σχήμα A.9	Εύρεση της σύνθετης αγωγιμότητας.....	162
Σχήμα A.10	Στάσιμα κύματα σε γραμμές μεταφοράς.....	165

Σχήμα A.11 Μεταβολή της εξασθένησης $\alpha(\omega)$ και στροφής φάσης $\beta(\omega)$ ανά μονάδα μήκους.....166

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1	Ζώνες CENELEC για τα συστήματα PLC.....	34
Πίνακας 4.1	Παράμετροι που χαρακτηρίζουν τη γραμμή ενέργειας ως δίαυλο μετάδοσης σήματος.....	82
Πίνακας 6.1	Κλάσεις Κίνησης.....	145

ΚΕΦΑΛΑΙΟ

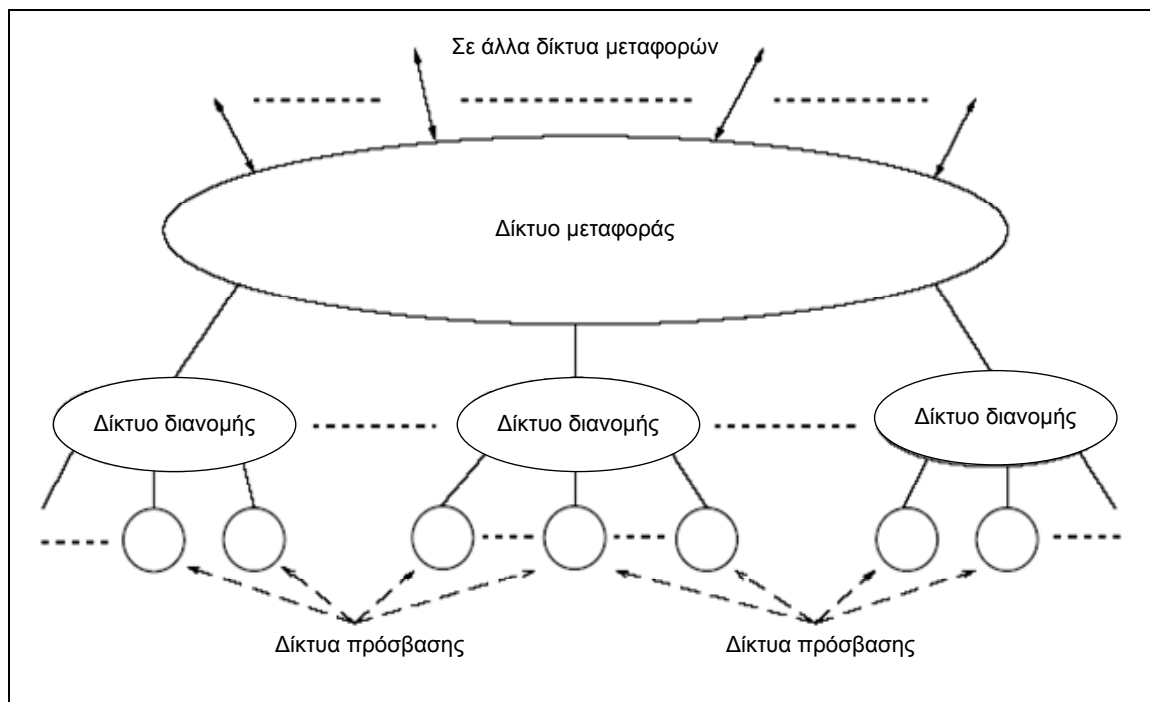
1

ΕΥΡΥΖΩΝΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ PLC

1.1 Γενικά

1.1.1 Εισαγωγή

Κατά την διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών, η χρήση των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων αυξήθηκε ραγδαία. Εξαιτίας της μόνιμης ανάγκης για νέες τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες και πρόσθετες ικανότητες μετάδοσης υπάρχει η ανάγκη για ανάπτυξη νέων τηλεπικοινωνιακών δικτύων και τεχνολογιών μετάδοσης. Από οικονομικής πλευράς, οι τηλεπικοινωνίες υπόσχονται μεγάλα έσοδα, παρακινώντας μεγάλες επενδύσεις σε αυτήν την περιοχή με αποτέλεσμα να υπάρχει μεγάλος αριθμός εταιριών που δραστηριοποιούνται σε μεγάλης ταχύτητας δίκτυα, εξασφαλίζοντας τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν παγκοσμίως. Οι κυριότερες επενδύσεις γίνονται κυρίως για τη δημιουργία δικτύων μεταφοράς που συνδέουν τους διάφορους κόμβους επικοινωνιών των διαφόρων παρόχων, αλλά δεν φτάνουν στους τελικούς χρήστες. Η επικοινωνία ενός τελικού πελάτη με ένα δίκτυο μεταφοράς, ως ένα κομμάτι του παγκόσμιου τηλεπικοινωνιακού δικτύου, πραγματοποιείται μέσω του δικτύου διανομής και πρόσβασης (Σχήμα 1.1). Τα δίκτυα διανομής καλύπτουν μεγάλες γεωγραφικές περιοχές και πραγματοποιούν συνδέσεις μεταξύ των δικτύων πρόσβασης και μεταφοράς, ενώ τα δίκτυα πρόσβασης καλύπτουν σχετικά μικρότερες περιοχές.



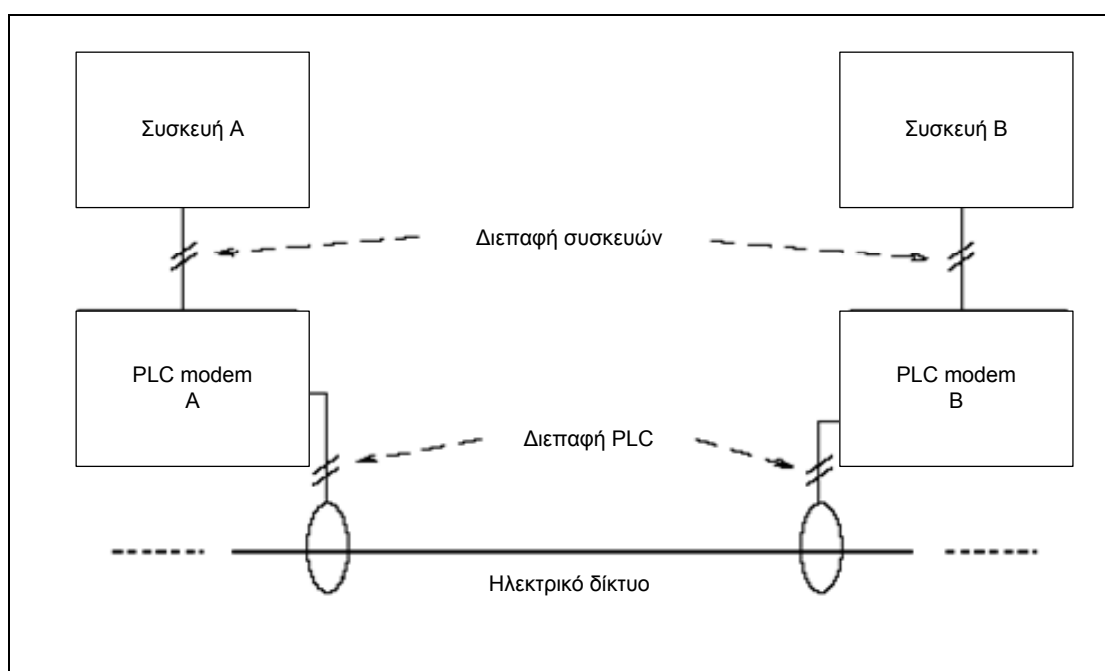
Σχήμα 1.1 Ιεραρχία τηλεπικοινωνιακών δικτύων

Η απευθείας σύνδεση με τους πελάτες/συνδρομητές πραγματοποιείται μέσω του δικτύου πρόσβασης, κάνοντας εφικτή την πρόσβαση διαφόρων συνδρομητών που τοποθετούνται μέσα σε μια ακτίνα μερικών εκατοντάδων μέτρων. Ωστόσο, οι δαπάνες για την πραγματοποίηση, την εγκατάσταση και την συντήρηση των δικτύων πρόσβασης είναι πολύ υψηλές. Υπολογίζεται ότι περίπου το 50% όλων των επενδύσεων σε δίκτυα αφορά την περιοχή πρόσβασης. Από την άλλη πλευρά, απαιτείται πολύς χρόνος για την αποπληρωμή του επενδυμένου κεφαλαίου εξαιτίας των σχετικά υψηλών δαπανών των δικτύων πρόσβασης, που υπολογίζονται για κάθε συνδεδεμένο συνδρομητή. Επομένως, οι πάροχοι του δικτύου προσπαθούν να υλοποιήσουν το δίκτυο πρόσβασης με το χαμηλότερο δυνατό κόστος.

Μετά την απελευθέρωση της αγοράς των τηλεπικοινωνιών σε ένα μεγάλο αριθμό χωρών, τα δίκτυα πρόσβασης είναι ακόμη ιδιοκτησία των επιβεβλημένων προμηθευτών δικτύου (προηγούμενες μονοπωλιακές τηλεφωνικές επιχειρήσεις). Εξαιτίας αυτού του γεγονότος, οι νέοι προμηθευτές δικτύου προσπαθούν να βρουν μια λύση για να κάνουν ελκυστικότερο το δικό τους δίκτυο πρόσβασης. Μια εναλλακτική λύση για την υλοποίηση δικτύου πρόσβασης παρέχεται μέσω της τεχνολογίας PLC (ευρυζωνικότητα μέσω γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας), που χρησιμοποιεί το πλέγμα παροχής ηλεκτρικού ρεύματος για επικοινωνίες. Κατά συνέπεια, για την πραγματοποίηση των δικτύων PLC, δεν υπάρχει καμία ανάγκη για

τοποθέτηση νέων καλωδίων επικοινωνιών. Επομένως, η εφαρμογή του PLC στα χαμηλής τάσης (X/T) δίκτυα παροχής ηλεκτρικής ενέργειας φαίνεται να είναι μια οικονομικώς αποδοτική λύση για τα αποκαλούμενα δίκτυα επικοινωνιών “τελευταίου μιλίου” που ανήκουν στην περιοχή πρόσβασης. Σήμερα, οι συνδρομητές δικτύου χρησιμοποιούν διάφορες τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες που χαρακτηρίζονται από υψηλούς ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων και ποιότητας υπηρεσιών QoS. Τα συστήματα PLC που εφαρμόζονται στην περιοχή πρόσβασης και εξασφαλίζουν τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες με υψηλή ποιότητα υπηρεσιών QoS καλούνται "ευρυζωνικά δίκτυα πρόσβασης PLC".

Για να καταστούν δυνατές οι επικοινωνίες μέσω του δικτύου παροχής ηλεκτρικού ρεύματος, είναι απαραίτητο να εγκατασταθούν PLC modems, τα οποία εξασφαλίζουν μετάδοση δεδομένων σήματος μέσω των γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας (Σχήμα 1.2).



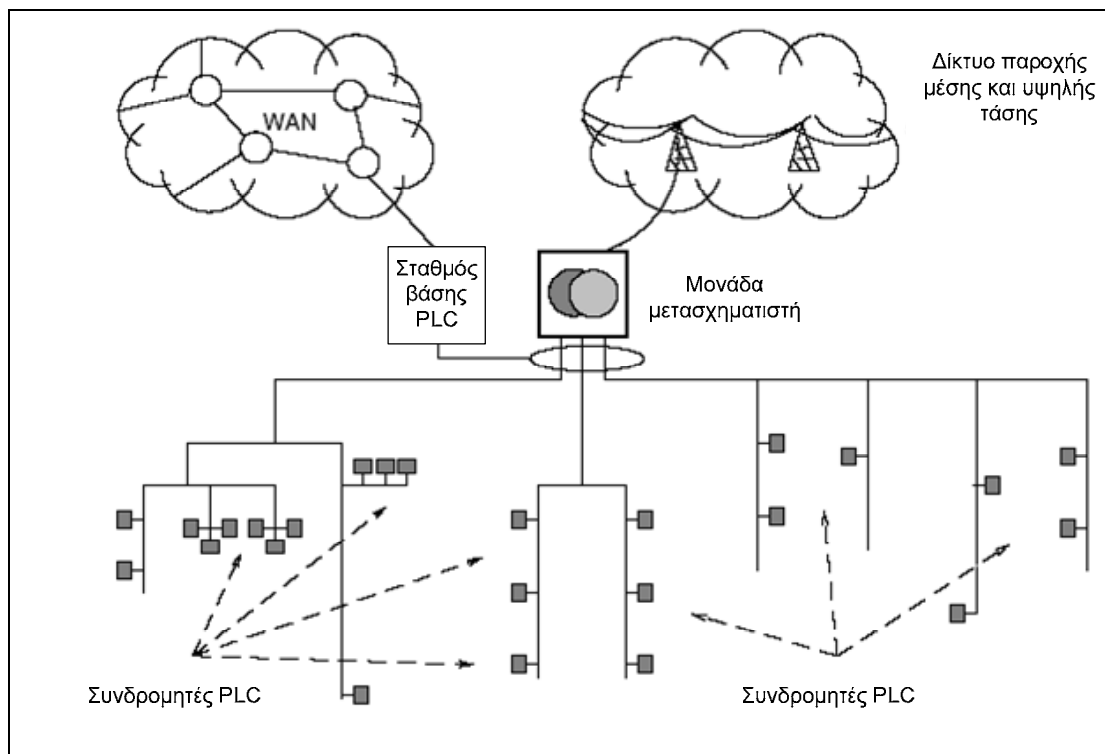
Σχήμα 1.2 Επικοινωνίες μέσω του δικτύου παροχής ηλεκτρικής ενέργειας

Συγκεκριμένα, ένα PLC modem μετατρέπει το σήμα δεδομένων που έχει λάβει από τις συμβατικές συσκευές επικοινωνιών (όπως υπολογιστές, τηλέφωνα κ.λ.π.) σε μορφή κατάλληλη για τη μετάδοση μέσω καλωδίων ηλεκτρικής ισχύος. Αντίστοιχα, όταν το modem λάβει ένα σήμα δεδομένων από το ηλεκτρικό δίκτυο, το μετατρέπει και το παραδίδει στις συσκευές επικοινωνιών. Κατά συνέπεια, τα PLC modem, που αντιπροσωπεύουν τον εξοπλισμό PLC επικοινωνιών, παρέχουν μια

απαραίτητη διεπαφή για τη διασύνδεση των διαφόρων συσκευών επικοινωνιών μέσω των δικτύων παροχής ηλεκτρικής ισχύος. Ο εξοπλισμός PLC (όπως είναι τα PLC modem) πρέπει να σχεδιαστεί κατάλληλα ώστε να εξασφαλίζει μια αποδοτική δικτυακή λειτουργία υπό τις συνθήκες μετάδοσης, ενδεικτικές για τα δίκτυα παροχής ηλεκτρικού ρεύματος και το περιβάλλον τους.

Εντούτοις, τα δίκτυα παροχής ηλεκτρικού ρεύματος δεν σχεδιάστηκαν για επικοινωνίες και δεν αποτελούν ένα ευνοϊκό μέσο μετάδοσης για επικοινωνία. Κατά συνέπεια, το κανάλι μετάδοσης PLC χαρακτηρίζεται από μεγάλη και εξαρτώμενη από τη συχνότητα εξασθένιση, από μεταβαλλόμενη σύνθετη αντίσταση και εξασθένιση λόγω θορύβου. Διάφορες πηγές θορύβου, ενεργούν από το δίκτυο παροχής ηλεκτρικής ισχύος, εξαιτίας του γεγονότος ότι διαφορετικές ηλεκτρικές συσκευές συνδέονται στο δίκτυο, με συνέπεια το δίκτυο να επηρεάζει αρνητικά το σύστημα PLC, προκαλώντας διαταραχές σε μια χωρίς λάθη μετάδοση δεδομένων. Αφ' ετέρου, για να παρέχονται υψηλοί ρυθμοί μετάδοσης, τα δίκτυα PLC πρέπει να λειτουργήσουν σε ένα ορισμένο φάσμα συχνοτήτων, το οποίο χρησιμοποιείται επίσης από άλλες ραδιοπηρεσίες. Αρνητικό στοιχείο επίσης αποτελεί το γεγονός ότι, ένα δίκτυο PLC ενεργεί ως κεραία εκπομπής ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στο περιβάλλον με αποτέλεσμα να επηρεάζονται άλλες υπηρεσίες που αναπτύσσουν δραστηριότητες στο ίδιο φάσμα συχνοτήτων. Επομένως, ρυθμιστικοί οργανισμοί καθορίζουν τα όρια σχετικά με την ηλεκτρομαγνητική εκπομπή από τα δίκτυα PLC, με συνέπεια τα δίκτυα PLC να πρέπει να λειτουργούν με περιορισμούς ως προς τη χρησιμοποιούμενη ενέργεια σήματος. Αυτό προκαλεί μείωση των αποστάσεων του δικτύου καθώς και του ρυθμού δεδομένων ενώ παράλληλα αυξάνει την ευαισθησία στις διαταραχές.

Η μείωση του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων αποτελεί μεγάλο μειονέκτημα και αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα δίκτυα πρόσβασης PLC λειτουργούν σε ένα κοινό μέσο μετάδοσης, στο οποίο διάφοροι συνδρομητές ανταγωνίζονται για να χρησιμοποιήσουν τους ίδιους πόρους μετάδοσης (Σχήμα 1.3).



Σχήμα 1.3 Δίκτυο πρόσβασης PLC

Στην περίπτωση του δικτύου πρόσβασης PLC, το μέσο μετάδοσης που παρέχεται από ένα δίκτυο X/T χρησιμοποιείται για την επικοινωνία μεταξύ των συδρομητών και ενός σταθμού βάσης PLC, ο οποίος συνδέει το δίκτυο πρόσβασης με το δίκτυο WAN υλοποιούμενο με τη συμβατική τεχνολογία επικοινωνιών.

Για να μειωθεί η αρνητική επίδραση του μέσου μετάδοσης (ηλεκτρικά καλώδια), τα συστήματα PLC πρέπει να εφαρμόσουν διαμόρφωση πολλαπλών φερουσών και ορθογώνια πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας (OFDM). Πρόσθετα για την αντιμετώπιση σφαλμάτων μετάδοσης, που προκαλούνται από τις διάφορες παρεμβολές στο δίκτυο, μπορούν να εφαρμοστούν διάφορες τεχνικές διόρθωσης λαθών (π.χ Forward Error Correction ή FEC, Automatic Repeat request ή ARQ). Εντούτοις, η εφαρμογή τους σπαταλάει ένα επιπλέον κομμάτι από την χωρητικότητα του δικτύου PLC. Από την άλλη πλευρά, ένα δίκτυο πρόσβασης PLC πρέπει να είναι οικονομικά αποδοτικό, εξυπηρετώντας ένα μεγάλο αριθμό συδρομητών. Αυτό μπορεί να εξασφαλιστεί μόνο με βέλτιστη αξιοποίηση των δυνατοτήτων του δικτύου. Ταυτόχρονα, τα συστήματα PLC πρέπει να ανταγωνιστούν με άλλες υπάρχουσες τεχνολογίες πρόσβασης (π.χ. Digital Subscriber Line, Cable Television) και να προσφέρουν διάφορες τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες με ικανοποιητική QoS. [Hras04]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ

2

ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ PLC ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ

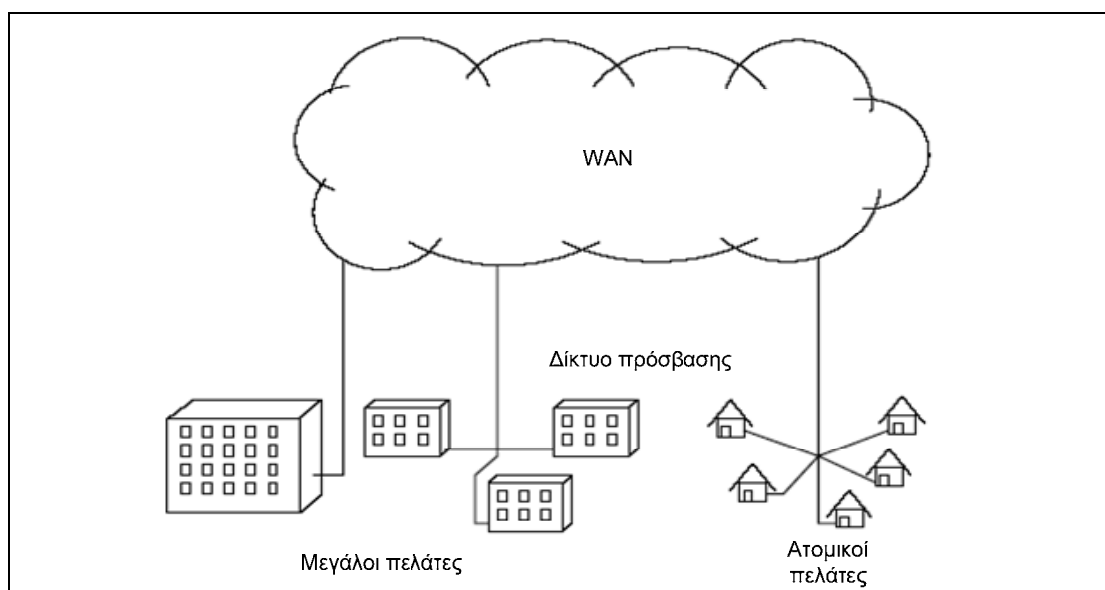
2.1 Τεχνολογίες πρόσβασης

2.1.1 Η σημασία των τηλεπικοινωνιών στην περιοχή πρόσβασης

Τα δίκτυα πρόσβασης είναι πολύ σημαντικά για τους πάροχους δικτύου λόγω του υψηλού κόστους τους και της δυνατότητας πραγματοποίησης άμεσης πρόσβασης με τους τελικούς χρήστες/συνδρομητές. Πρόσφατα, περίπου το 50% όλων των επενδύσεων στις τηλεπικοινωνιακές υποδομές, απαιτήθηκε για την υλοποίηση των τηλεπικοινωνιακών δικτύων πρόσβασης. Εντούτοις, ένα δίκτυο πρόσβασης συνδέει ένα περιορισμένο αριθμό μεμονωμένων συνδρομητών, σε αντιδιαστολή με ένα δίκτυο μεταφοράς (Σχήμα 2.1). Επομένως, τα οικονομικά οφέλη των δικτύων πρόσβασης είναι σημαντικά χαμηλότερα από ότι στα δίκτυα ευρείας ζώνης (WAN). Στην περίπτωση των μεγάλων πελατών (όπως π.χ. επιχειρήσεις, κυβερνητικοί ή βιομηχανικοί πελάτες), τα δίκτυα πρόσβασης συνδέουν ένα μεγαλύτερο αριθμό συνδρομητών που συγκεντρώνονται μέσα σε ένα κτίριο ή σε μια μικρή περιοχή (π.χ. πανεπιστημιούπολη). Οι μεγάλοι πελάτες χρησιμοποιούν συνήθως τις διάφορες τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες εντατικά και φέρνουν υψηλές πωλήσεις στους προμηθευτές δικτύου. Επομένως, η υλοποίηση αυτών των δικτύων πρόσβασης, για μεγάλους πελάτες έχει ιδιαίτερα οικονομικά οφέλη.

Σε αντίθεση με τους μεγάλους πελάτες, οι μεμονωμένοι συνδρομητές (π.χ. ιδιώτες, Σχήμα 2.1) κάνουν χρήση των τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών λιγότερο συχνά. Συνεπώς, η πραγματοποίηση των δικτύων πρόσβασης για τους μεμονωμένους συνδρομητές είναι οικονομικά λιγότερο αποδοτική. Από την άλλη πλευρά, μια άμεση πρόσβαση στους συνδρομητές αυξάνει τις ευκαιρίες για τους προμηθευτές δικτύου να προσφέρουν μεγαλύτερο πλήθος υπηρεσιών. Αυτό προσελκύει τους συνδρομητές ώστε να γίνουν πελάτες ενός πάροχου, ο οποίος αυξάνει τη χρήση του δικτύου μεταφοράς του. Επομένως, η πρόσβαση στους μεμονωμένους συνδρομητές φαίνεται να είναι επίσης σημαντική.

Ακόμα και μετά την απελευθέρωση της αγοράς τηλεπικοινωνιών σε ένα μεγάλο αριθμό χωρών, τα δίκτυα πρόσβασης παραμένουν στην ιδιοκτησία των προηγούμενων μονοπωλιακών επιχειρήσεων (επιβεβλημένοι προμηθευτές δικτύου). Οι νέοι προμηθευτές δικτύου ενισχύουν τα δίκτυα μεταφοράς τους (WAN), αλλά πρέπει ακόμα να χρησιμοποιήσουν την υποδομή πρόσβασης που αποτελεί ιδιοκτησία των επιβεβλημένων προμηθευτών.



Σχήμα 2.1 Γενική δομή τηλεπικοινωνιακών δικτύων

Εξαιτίας αυτού, οι νέοι προμηθευτές δικτύων προσπαθούν να βρουν μια λύση για να προσφέρουν δικό τους ιδιόκτητο δίκτυο πρόσβασης στους συνδρομητές. Επίσης, η ταχεία ανάπτυξη των νέων τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών αυξάνει τη ζήτηση για μεγαλύτερο ρυθμό μετάδοσης στα δίκτυα μεταφορών καθώς επίσης και στην περιοχή πρόσβασης. Επομένως, υπάρχει μια μόνιμη ανάγκη για επέκταση της

υποδομής πρόσβασης. Υπάρχουν δύο δυνατότητες για την επέκταση των δικτύων πρόσβασης

- Δημιουργία νέων δικτύων.
- Χρήση της υπάρχουσας υποδομής.

Η δημιουργία νέων δικτύων πρόσβασης είναι ο καλύτερος τρόπος να εφαρμοστεί η νεώτερη τεχνολογία επικοινωνιών, η οποία επιτρέπει την πραγματοποίηση πολύ ελκυστικών υπηρεσιών. Όμως, η κατασκευή νέων δικτύων πρόσβασης είναι αρκετά δαπανηρή. Επομένως, η εκμετάλλευση της υπάρχουσας υποδομής για την πραγματοποίηση των δικτύων πρόσβασης αποτελεί την ελκυστικότερη λύση για τους προμηθευτές δικτύου λόγω του χαμηλότερου κόστους, αν και η υπάρχουσα υποδομή πρέπει να ανανεωθεί και να εμπλουτιστεί για να είναι σε θέση να προσφέρει τις ελκυστικές τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες.

2.2 Συστήματα Ευρυζωνικών Ηλεκτρονικών Επικοινωνιών μέσω Γραμμών Ηλεκτρικής Ισχύος

2.2.1 Ιστορική αναδρομή

Ευρυζωνική μετάδοση δεδομένων μέσω γραμμών ηλεκτρικής ισχύος (PowerLine Communications ή PLC) είναι η τεχνολογία που χρησιμοποιεί ως φυσικό μέσο το δίκτυο ηλεκτρικής ισχύος για τη μετάδοση δεδομένων σε υψηλούς ρυθμούς. Σε αυτήν την περίπτωση, το πλέγμα μεταφοράς ή διανομής ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιείται ταυτόχρονα και ως μέσο μετάδοσης για τη μεταφορά των διάφορων τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών. Η κύρια ιδέα πίσω από τα συστήματα PLC είναι η μείωση της δαπάνης για την υλοποίηση των νέων δικτύων τηλεπικοινωνιών.

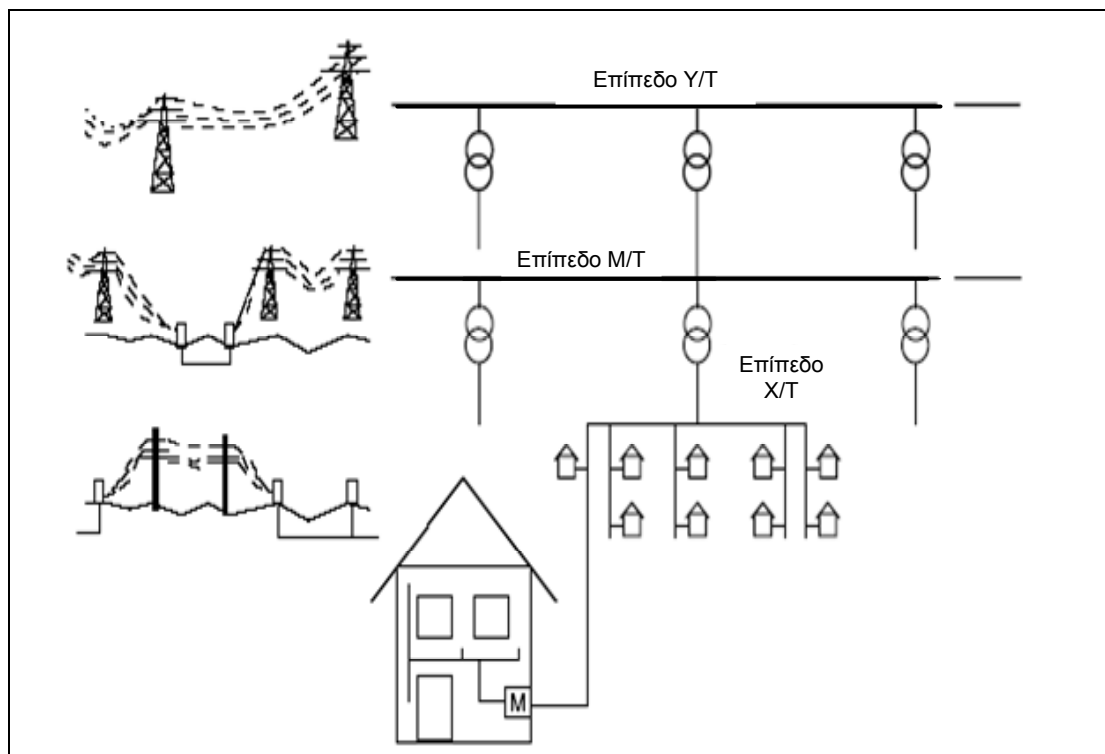
Τα Y/T ή M/T δίκτυα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να εξυπηρετήσουν μεγαλύτερες αποστάσεις αποφεύγοντας έτσι εγκατάσταση ενός πρόσθετου δικτύου επικοινωνιών. Τα δίκτυα X/T είναι διαθέσιμα παγκοσμίως και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την υλοποίηση δικτύων πρόσβασης PLC ώστε να καλύψουν τις αποκαλούμενες ως τηλεπικοινωνίες "τελευταίου μιλίου". Οι ευρυζωνικές ηλεκτρονικές επικοινωνίες μέσω γραμμών ηλεκτρικής ισχύος μπορούν επίσης να εφαρμοστούν μέσα σε κτίρια ή σε σπίτια, όπου μια εσωτερική ηλεκτρική εγκατάσταση χρησιμοποιείται για την πραγματοποίηση των οικιακών δικτύων PLC.

Τα εσωτερικά ηλεκτρικά δίκτυα έχουν χρησιμοποιηθεί για υλοποίηση διαφόρων υπηρεσιών αυτοματοποίησης. Η εφαρμογή οικιακών συστημάτων PLC καθιστά δυνατή τη διαχείριση πολυάριθμων ηλεκτρικών συσκευών μέσα σε ένα κτίριο ή σε ένα σπίτι από μια κεντρική μονάδα ελέγχου χωρίς την εγκατάσταση ενός πρόσθετου δικτύου επικοινωνιών. Τυπικά συστήματα ελέγχου εγκαταστάσεων PLC χρησιμοποιούνται κυρίως για ασφάλεια, επίβλεψη συσκευών θέρμανσης, έλεγχο φωτισμού κ.τ.λ.

2.2.2 Δίκτυα παροχής ηλεκτρικής ισχύος

Τα συστήματα παροχής ηλεκτρικής ισχύος, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μέσο μετάδοσης για την υλοποίηση δικτύων PLC, αποτελούνται από τρία επίπεδα δικτύου (Σχήμα 2.2)

- Την Υ/Τ (110-380 KV) που συνδέει τους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος με τις μεγάλες περιοχές κατανάλωσης ή τους μεγάλους πελάτες. Τα δίκτυα Υ/Τ εκτείνονται συνήθως σε πολύ μεγάλες αποστάσεις, επιτρέποντας τη μεταφορά ή ανταλλαγή ενέργειας ακόμα και μεταξύ ηπείρων. Τα δίκτυα Υ/Τ υλοποιούνται συνήθως με εναέρια καλώδια.
- Τη Μ/Τ (10-30 KV) που καλύπτει τις μεγαλύτερες περιοχές, πόλεις και μεγάλους βιομηχανικούς ή εμπορικούς πελάτες. Οι αποστάσεις που καλύπτουν τα δίκτυα Μ/Τ είναι σημαντικά μικρότερες από αυτές των δικτύων Υ/Τ. Τα δίκτυα μέσης τάσης υλοποιούνται και με εναέρια και με υπόγεια καλώδια.
- Τη Χ/Τ (το 230/400V και στις ΗΠΑ 110V) που τροφοδοτεί τους τελικούς χρήστες είτε ως μεμονωμένους πελάτες είτε ως ένα σύνολο χρηστών. Το μήκος των δικτύων Χ/Τ είναι συνήθως μέχρι μερικές εκατοντάδες μέτρα. Στις αστικές περιοχές, τα δίκτυα Χ/Τ υπογειοποιούνται, ενώ στις αγροτικές περιοχές είναι συνήθως εναέρια.



Σχήμα 2.2 Δομή ηλεκτρικού δικτύου

Οι οικιακές ηλεκτρικές εγκαταστάσεις ανήκουν στο δίκτυο Χ/Τ. Εντούτοις, οι εσωτερικές εγκαταστάσεις συνδέονται με το δίκτυο παροχής μέσω ενός μετρητή (meter unit ή Μ). Το υπόλοιπο του δικτύου Χ/Τ (υπαίθριου) χρησιμοποιείται από το δίκτυο παροχής.

Τα δίκτυα Χ/Τ συνδέουν άμεσα τους τελικούς χρήστες με ένα πολύ μεγάλο αριθμό νοικοκυριών παγκοσμίως. Επομένως, η εφαρμογή της τεχνολογίας PLC στα δίκτυα αυτά παρουσιάζει θετικές προοπτικές όσον αφορά τον αριθμό των συνδεδεμένων πελατών. Επίσης, τα δίκτυα Χ/Τ καλύπτουν τις τελευταίες εκατοντάδες μέτρων μεταξύ των πελατών και της μονάδας του μετασχηματιστή, προσφέροντας μια εναλλακτική λύση για την υλοποίηση της πρόσβασης τελευταίου μιλίου χρησιμοποιώντας την τεχνολογία PLC.

2.2.3 Πρότυπα

Οι επικοινωνίες μέσω των δικτύων παροχής ηλεκτρικής ισχύος καθορίζονται από την ευρωπαϊκή επιτροπή CENELEC (European Committee for Electrotechnical Standardization), σύμφωνα με το πρότυπο EN50065 που παρέχει ένα φάσμα

συχνοτήτων από 9 έως 140KHz (Πίνακας, 2.1). Το πρότυπο της CENELEC διαφέρει σημαντικά από τα αμερικανικά και ιαπωνικά πρότυπα, τα οποία για εφαρμογές υπηρεσιών εκχωρούν ένα φάσμα συχνοτήτων μέχρι 500KHz.

Ζώνη	Φάσμα συχνοτήτων	Μέγιστο πλάτος μετάδοσης(V)	Χρήστες
A	9 – 95	10	Επιχείρηση ηλεκτρισμού
B	95 – 125	1.2	Ιδιωτικά σπίτια
C	125 – 140	1.2	Ιδιωτικά σπίτια

Πίνακας 2.1 Ζώνες CENELEC για τα συστήματα PLC

Το πρότυπο CENELEC κάνει δυνατή την ανάπτυξη ρυθμών μετάδοσης δεδομένων μερικών Kbps, οι οποίοι είναι αρκετοί μόνο για μερικές λειτουργίες (διαχείριση φορτίων για ένα ηλεκτρικό δίκτυο, από απόσταση ανάγνωση μετρητών, κ.λ.π.), τη μετάδοση δεδομένων με πολύ χαμηλό ρυθμό και την υλοποίηση μικρού αριθμού καναλιών μετάδοσης για τις συνδέσεις φωνής. Ωστόσο, για την εφαρμογή στα σύγχρονα δίκτυα τηλεπικοινωνιών, τα συστήματα PLC πρέπει να παρέχουν υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων (άνω των 2Mbps). Μόνο σε αυτήν την περίπτωση, τα δίκτυα PLC θα είναι σε θέση να ανταγωνιστούν άλλες τεχνολογίες επικοινωνιών, ειδικά στην περιοχή πρόσβασης (Βλέπε §2.1).

Για την πραγματοποίηση υψηλότερων ρυθμών μετάδοσης, τα συστήματα μετάδοσης PLC πρέπει να λειτουργήσουν σε ένα ευρύτερο φάσμα συχνοτήτων. Εντούτοις, δεν υπάρχει κανένα πρότυπο PLC που να καθορίζει τη λειτουργία των συστημάτων PLC εκτός από τις ζώνες συχνοτήτων που καθορίζονται από το πρότυπο CENELEC. Αυτήν την περίοδο, υπάρχουν διάφοροι οργανισμοί που προσπαθούν να ανοίξουν το δρόμο για την τυποποίηση των ευρυζωνικών δικτύων PLC, όπως είναι:

- Ο οργανισμός PLCforum.
- Η HomePlug Powerline Alliance

Οι δραστηριότητες τυποποίησης για την ευρυζωνική τεχνολογία PLC συμπεριλαμβάνονται επίσης στο ευρωπαϊκό ίδρυμα προτύπων τηλεπικοινωνιών (European Telecommunications Standards Institute ή ETSI) και τη CENELEC.

2.2.4 Στενού εύρους ζώνης PLC

Τα στενού εύρους ζώνης δίκτυα PLC λειτουργούν μέσα στο φάσμα συχνοτήτων που καθορίζεται από το πρότυπο CENELEC (Πίνακας 2.1) και διαιρείται σε τρεις ζώνες: Την A, που χρησιμοποιείται από τις επιχειρήσεις ηλεκτρισμού, την B και την C, οι οποίες παρέχονται για ιδιωτική χρήση. Οι επιχειρήσεις ηλεκτρισμού χρησιμοποιούν το στενού εύρους ζώνης PLC για την υλοποίηση υπηρεσιών σχετικών με την ηλεκτρική ενέργεια. Συγκεκριμένα, η τεχνολογία PLC παρέχει τη δυνατότητα μέσω της συνεχούς και σε πραγματικό χρόνο μετάδοσης σημάτων να γίνεται η βέλτιστη δυνατή εποπτεία και διαχείριση του δικτύου. Έχει αποδειχθεί ότι πολλών τύπων βλάβες ή ασυνέχειες στο δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να κατηγοριοποιηθεί και να ανιχνευθεί με βάση τον υψίσυχο θόρυβο στενής ζώνης που παράγεται κατά περίπτωση και μεταδίδεται κατά μήκος της γραμμής. Οι ζώνες συχνοτήτων B και C χρησιμοποιούνται κυρίως για την αυτοματοποίηση κτιρίων και οικιών. Σήμερα, τα στενού εύρους ζώνης συστήματα PLC παρέχουν ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων μέχρι μερικά Kbps.

Τα στενού εύρους ζώνης συστήματα PLC εφαρμόζουν και στενής και ευρείας ζώνης διαμόρφωση. Τα πρώτα στενού εύρους ζώνης δίκτυα PLC έχουν πραγματοποιηθεί με χρήση της διαμόρφωσης μετατόπισης εύρους (Amplitude Shift Keying ή ASK) [Dost01]. Η ASK δεν είναι ικανοποιητική ενάντια στις διαταραχές και, επομένως, δεν είναι κατάλληλη για την εφαρμογή σε δίκτυα PLC. Από την άλλη, η δυαδική διαμόρφωση μετατόπισης φάσης (Binary Phase Shift Keying ή BPSK) είναι αρκετά ικανοποιητική και, επομένως, είναι καταλληλότερη για εφαρμογή στα συστήματα PLC. Εντούτοις, η ανίχνευση φάσης, που είναι απαραίτητη για την πραγματοποίηση της BPSK διαμόρφωσης, φαίνεται να είναι σύνθετη και έτσι τα συστήματα BPSK δεν χρησιμοποιούνται συχνά. Τα περισσότερα, πρόσφατα, στενού εύρους ζώνης συστήματα PLC χρησιμοποιούν διαμόρφωση μετατόπισης συχνότητας (Frequency Shift Keying ή FSK) και αναμένεται ότι η BPSK διαμόρφωση θα χρησιμοποιηθεί και στα μελλοντικά συστήματα επικοινωνιών [Dost01].

Τα ευρυζωνικά σχήματα διαμόρφωσης χρησιμοποιούνται επίσης στα στενής ζώνης συστήματα PLC. Τα πλεονεκτήματα της ευρυζωνικής διαμόρφωσης, όπως οι διάφορες παραλλαγές του φάσματος διάδοσης, είναι η ευρωστία του έναντι στον στενού εύρους ζώνης θόρυβο και η επιλεκτική επίδραση της εξασθένησης που εμφανίζεται στα δίκτυα PLC [Dost01]. Μια ακόμη μέθοδος μετάδοσης που

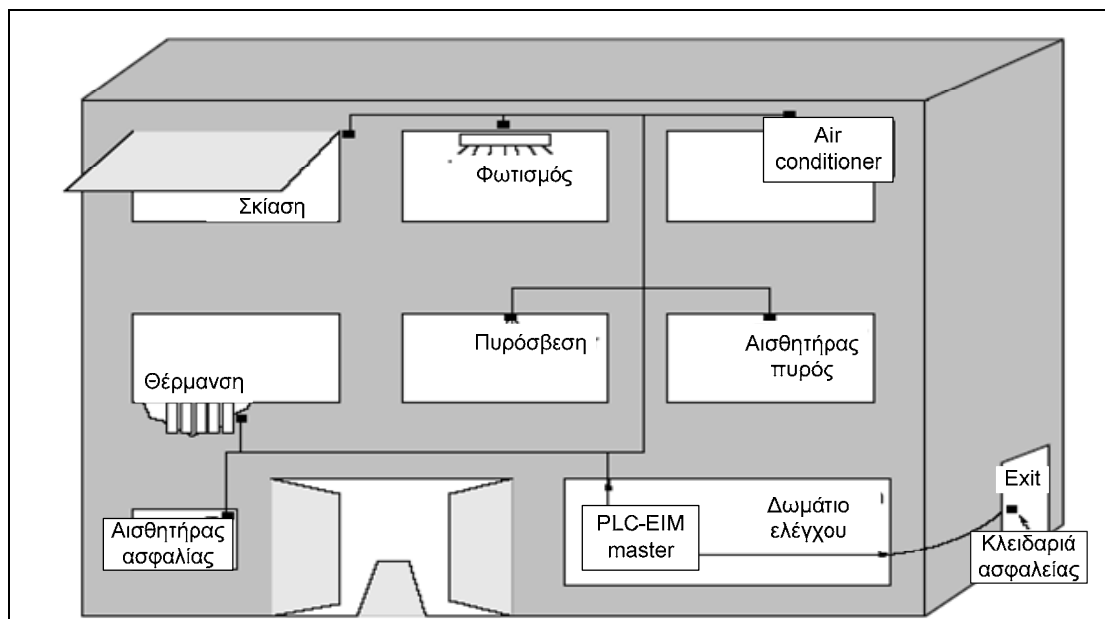
χρησιμοποιείται επίσης στα στενού εύρους ζώνης συστήματα PLC είναι η Ορθογώνια Πολύπλεξη Διαιρέσης Συχνοτήτων (Orthogonal Frequency Division Multiplexing ή OFDM) [Bumi03].

Ένας σημαντικός τομέας εφαρμογής της στενού εύρους ζώνης τεχνολογίας PLC είναι η δυνατότητα αυτοματοποίησης των κτιρίων και των σπιτιών. Τα βασικά συστήματα αυτοματοποίησης PLC πραγματοποιούνται χωρίς την ανάγκη εγκατάστασης πρόσθετων δικτύων επικοινωνιών (Σχήμα 2.3). Κατά συνέπεια, οι υψηλές δαπάνες που είναι απαραίτητες για την εγκατάσταση νέων δικτύων μέσα στα υπάρχοντα κτίρια μπορούν να μειωθούν σημαντικά από τη χρήση της τεχνολογίας PLC. Τα συστήματα αυτοματοποίησης που υλοποιούνται μέσω τεχνολογίας PLC μπορούν να εφαρμοστούν για διάφορους σκοπούς που λαμβάνουν χώρα μέσα στα κτήρια, όπως είναι

- Ο έλεγχος των διαφόρων συσκευών που συνδέονται με την εσωτερική ηλεκτρική εγκατάσταση, όπως είναι ο φωτισμός, η θέρμανση, ο κλιματισμός, οι ανελκυστήρες και τα λοιπά.
- Ο κεντρικός έλεγχος των διαφόρων συστημάτων οικοδόμησης, όπως ο έλεγχος παραθύρων και πορτών.
- Για σκοπούς ασφαλείας, παρατήρησης του σπιτιού και διασύνδεσης των αισθητήρων.

Τα βασικά συστήματα αυτοματοποίησης PLC χρησιμοποιούνται όχι μόνο σε μεγάλα κτίρια αλλά επίσης πολύ συχνά και στα ιδιωτικά νοικοκυριά για την πραγματοποίηση παρόμοιων σκοπών αυτοματοποίησης (home automation). Σε αυτήν την περίπτωση, γίνεται αναφορά για τα έξυπνα σπίτια.

Μια παραλλαγή PLC των προτύπων της EIB (European Installation BUS) ονομάζεται Powernet-EIB. Τα modems PLC που σχεδιάζονται σύμφωνα με την Powernet-ETE μπορούν να συνδεθούν εύκολα με οποιαδήποτε ηλεκτρική υποδοχή στον τοίχο ή να ενσωματωθούν σε οποιαδήποτε συσκευή που συνδέεται με την ηλεκτρική εγκατάσταση.

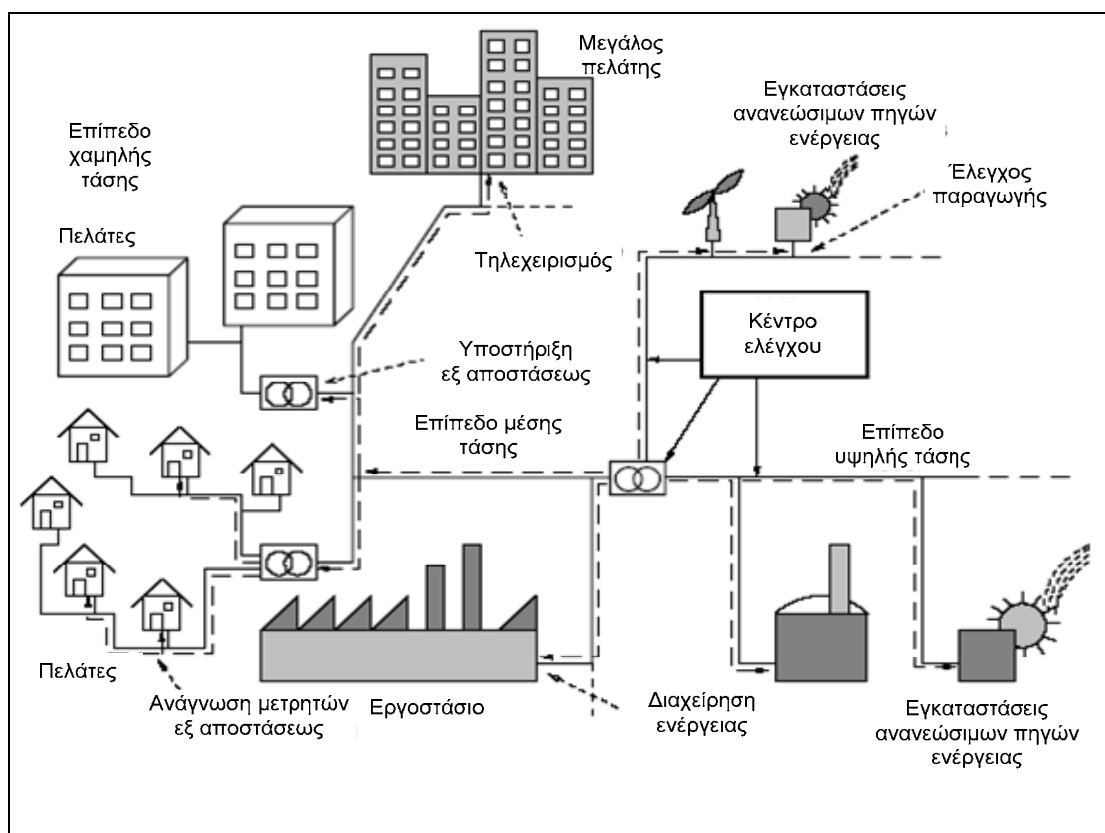


Σχήμα 2.3 Δομή ενός αυτοματοποιημένου στενού εύρους ζώνης συστήματος PLC

Αυτό εξασφαλίζει επικοινωνίες μεταξύ όλων των τμημάτων ενός εσωτερικού ηλεκτρικού δικτύου. Σήμερα, τα PLC modems που χρησιμοποιούν διαμόρφωση FSK επιτυγχάνουν ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων μέχρι 1200bps [Dost01].

Όπως διευκρινίζεται στα πρότυπα CENELEC, οι επιχειρήσεις ηλεκτρισμού μπορούν να χρησιμοποιήσουν την A μπάντα για την πραγματοποίηση των αποκαλούμενων σχετικών με την ενέργεια υπηρεσιών. Κατ' αυτό τον τρόπο, μια επιχείρηση ηλεκτρισμού μπορεί να χρησιμοποιήσει την τεχνολογία PLC για να πραγματοποιήσει εσωτερικές επικοινωνίες μεταξύ του κέντρου ελέγχου και διαφόρων συσκευών εξασφαλίζοντας λειτουργίες τηλεχειρισμού, χωρίς την ανάγκη ανάπτυξης πρόσθετου δικτύου τηλεπικοινωνιών ή αγοράς πόρων δικτύου από έναν προμηθευτή δικτύου (Σχήμα 2.4). Ταυτόχρονα, το PLC μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εξ αποστάσεως ανάγνωση των μετρητών κατανάλωσης ενέργειας ενός πελάτη, περιορίζοντας έτσι το πρόσθετο κόστος από το προσωπικό που θα απαιτείτο για τη χειρωνακτική ανάγνωση των μετρητών. Τέλος, η τεχνολογία PLC μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για τη δυναμική τιμολόγηση (π.χ. ανάλογα με το χρόνο κατά τη διάρκεια της ημέρας, τη συνολική ενεργειακή προσφορά, κ.λ.π.), καθώς επίσης και για την παρατήρηση και τον έλεγχο της κατανάλωσης και της παραγωγής ενέργειας. Ειδικά στην τελευταία περίπτωση, μέσα στις επιχειρήσεις ηλεκτρισμού έχουν προσπαθήσει να ενσωματώσουν έναν αυξανόμενο αριθμό μικρών εγκαταστάσεων παραγωγής ενέργειας (όπως μικρούς σταθμούς υδροηλεκτρικής παραγωγής

ηλεκτρικού ρεύματος, εγκαταστάσεις αιολικής ενέργειας). Εντούτοις, οι μικρές εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας δεν είναι απολύτως αξιόπιστες και η ισχύς παραγωγής τους ποικίλλει ανάλογα με τις τρέχουσες καιρικές συνθήκες. Επομένως, οι περιοχές που τροφοδοτούνται από μικρές εγκαταστάσεις πρέπει επίσης να τροφοδοτηθούν και από άλλες πηγές εάν αυτό είναι απαραίτητο. Για αυτόν το λόγο, οι επιχειρήσεις ηλεκτρισμού χρειάζονται μια μόνιμη επικοινωνία μεταξύ των συστημάτων τους. Στο [BumiPi03], βρίσκουμε ένα πολύ ενδιαφέρον παράδειγμα μιας εφαρμογής ενός συστήματος αυτοματοποίησης PLC σε υπαίθρια περιοχή.



Σχήμα 2.4 Γενική δομή συστήματος PLC που χρησιμοποιείται για σχετικές με την ενέργεια υπηρεσίες

Έτσι, τα στενού εύρους ζώνης συστήματα PLC μπορούν να εφαρμοστούν για να ελαχιστοποιηθούν οι δαπάνες για την ανάπτυξη ενός χωριστού δικτύου επικοινωνιών.

2.2.5 Ευρυζωνικά PLC

Τα ευρυζωνικά συστήματα PLC παρέχουν σημαντικά υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων (άνω των 2Mbps) σε αντίθεση με τα στενού εύρους ζώνης συστήματα PLC. Ενώ τα στενού εύρους ζώνης δίκτυα παρέχουν μόνο ένα μικρό αριθμό καναλιών φωνής και μετάδοσης δεδομένων με πολύ χαμηλούς ρυθμούς, τα ευρυζωνικά δίκτυα PLC παρέχουν δυνατότητες πολυπλοκότερων τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών, πολλαπλάσιες συνδέσεις φωνής, υψηλές ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων, μεταφορά τηλεοπτικών σημάτων και στενού εύρους ζώνης υπηρεσίες. Επομένως, τα ευρυζωνικά συστήματα PLC μπορούν να αποτελέσουν αξιόπιστη και ανταγωνιστική τεχνολογία τηλεπικοινωνιών. Η υλοποίηση των ευρυζωνικών επικοινωνιακών υπηρεσιών μέσω των ηλεκτρικών καλωδίων προσφέρει μια μεγάλη ευκαιρία για οικονομικώς αποδοτικά δίκτυα τηλεπικοινωνιών χωρίς την τοποθέτηση νέων καλωδίων. Ωστόσο, τα δίκτυα παροχής ηλεκτρικού ρεύματος δεν έχουν σχεδιαστεί για τη μεταφορά πληροφοριών και υπάρχουν περιοριστικοί παράγοντες στην εφαρμογή της ευρυζωνικής τεχνολογίας PLC. Επομένως, οι αποστάσεις που μπορούν να καλυφθούν, καθώς επίσης και οι ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων που μπορούν να πραγματοποιηθούν από συστήματα PLC, υπόκεινται σε περιορισμούς. Μια περαιτέρω πολύ σημαντική διάσταση του ευρυζωνικού PLC είναι η ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα (Electromagnetic Compatibility ή EMC). Όταν το σήμα μεταδίδεται μέσω μιας γραμμής ενέργειας, μέρος αυτού ακτινοβολείται και στον αέρα. Η γραμμή ενέργειας θα μπορούσε να θεωρηθεί σαν μία μεγάλη κεραία που λαμβάνει και εκπέμπει ηλεκτρομαγνητικά σήματα. Αυτά προκαλούν διαταραχές σε άλλα συστήματα επικοινωνιών, κυρίως ραδιοφωνικά, που χρησιμοποιούν το συγκεκριμένο εύρος ζώνης. Είναι λοιπόν εμφανής η ανάγκη του εκμηδενισμού της αλληλεπαραεμβολής με σήματα άλλων τηλεπικοινωνιακών συστημάτων.

Τα υπάρχοντα ευρυζωνικά συστήματα PLC παρέχουν ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων άνω των 2Mbps σε υπαίθριους χώρους, που περιλαμβάνουν τα δίκτυα παροχής ηλεκτρικής ισχύος M/T και X/T (Σχήμα 2.2) και μέχρι 12Mbps στην εσωτερική του κτιρίου περιοχή (in-home area). Μερικοί κατασκευαστές έχουν αναπτύξει ήδη πρωτότυπα προϊόντα που παρέχουν πολύ υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων. Η τεχνολογία PLC στη M/T χρησιμοποιείται συνήθως για την υλοποίηση των συνδέσεων σημείου προς σημείο γεφυρώνοντας τις αποστάσεις αρκετών εκατοντάδων μέτρων. Οι συνήθεις τομείς εφαρμογής τέτοιων συστημάτων

είναι η σύνδεση τοπικών δικτύων (LAN), δικτύων μεταξύ κτιρίων ή κτιρίων μέσα σε μια πανεπιστημιούπολη και η σύνδεση των κεραιών και των σταθμών βάσης των κυψελοειδών συστημάτων επικοινωνίας στα δίκτυα κορμού τους. Η τεχνολογία PLC X/T χρησιμοποιείται για την πραγματοποίηση πρόσβασης τελευταίου μιλίου. Λόγω της μεγάλης σημασίας των τηλεπικοινωνιών πρόσβασης, η τρέχουσα ανάπτυξη της ευρυζωνικής τεχνολογίας PLC οδηγείται σε εφαρμογές στα δίκτυα πρόσβασης συμπεριλαμβανομένης της οικιακής περιοχής. Σε αντίθεση με τα στενού εύρους ζώνης συστήματα PLC, δεν υπάρχουν συγκεκριμένα πρότυπα που να ισχύουν για τα ευρυζωνικά δίκτυα PLC (Βλέπε §2.2.3).

2.3 Δίκτυα πρόσβασης PLC

2.3.1 Δομή των δικτύων πρόσβασης PLC

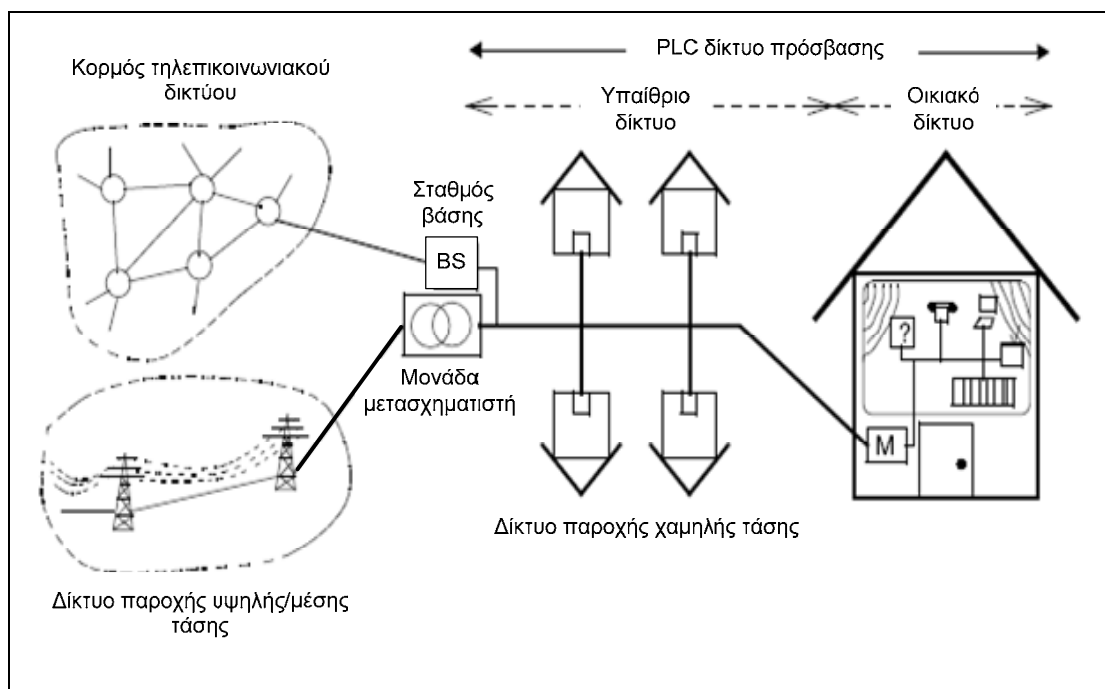
Όπως προαναφέραμε παραπάνω, το δίκτυο X/T χρησιμοποιείται ως μέσο για την υλοποίηση των δικτύων πρόσβασης PLC. Κατ' αυτό τον τρόπο, τα δίκτυα χαμηλής τάσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την πραγματοποίηση των αποκαλούμενων δικτύων "τελευταίου μιλίου".

Τα δίκτυα X/T συνδέονται με τα δίκτυα M/T και X/T μέσω μονάδας μετασχηματιστή (Σχήμα 2.5). Τα δίκτυα πρόσβασης PLC συνδέονται με τα δίκτυα επικοινωνιών κορμού μέσω ενός σταθμού βάσης που τοποθετείται συνήθως μέσα στη μονάδα μετασχηματιστή. Πολλές επιχειρήσεις ηλεκτρισμού έχουν το δικό τους τηλεπικοινωνιακό δίκτυο ελέγχου των μετασχηματιστών που μπορεί να λειτουργήσει και ως δίκτυο κορμού. Εάν αυτό δεν ισχύει, οι μετασχηματιστές μπορούν να συνδεθούν με ένα συμβατικό δίκτυο τηλεπικοινωνιών.

Η σύνδεση στο δίκτυο κορμού μπορεί επίσης να πραγματοποιηθεί μέσω ενός συνδρομητή ή μέσω ενός καφάο (power street cabinet), ειδικά εάν υπάρχει η δυνατότητα για την εγκατάστασή του. Σε κάθε περίπτωση, το σήμα από το δίκτυο κορμού πρέπει να μετατραπεί σε μια μορφή που καθιστά δυνατή τη μετάδοσή του μέσω του δικτύου X/T. Η μετατροπή πραγματοποιείται σε έναν κύριο σταθμό βάσης του συστήματος PLC.

Οι συνδρομητές PLC συνδέονται με το δίκτυο μέσω ενός modem PLC που τοποθετείται στη μονάδα μετρητή ηλεκτρικής ενέργειας M όπως φαίνεται στο Σχήμα

2.5 ή σε οποιαδήποτε υποδοχή στο εσωτερικό ηλεκτρικό δίκτυο. Στην πρώτη περίπτωση, οι συνδρομητές μέσα σε ένα σπίτι ή ένα κτίριο συνδέονται με το modem PLC χρησιμοποιώντας μια άλλη τεχνολογία επικοινωνιών (π.χ. DSL, WLAN). Στη δεύτερη περίπτωση, η εσωτερική ηλεκτρική εγκατάσταση χρησιμοποιείται ως μέσο μετάδοσης που οδηγεί στην λύση μέσω συστήματος PLC όπως παρουσιάζεται στην §2.3.2.



Σχήμα 2.5 Δομή δικτύου πρόσβασης PLC

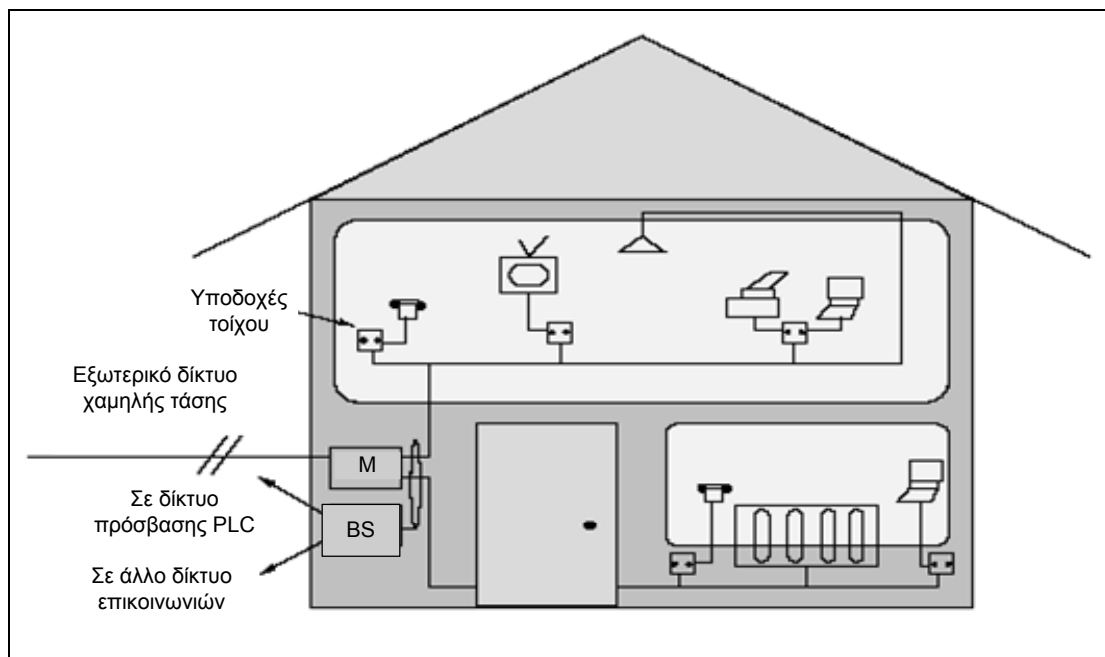
Το modem μετατρέπει το σήμα που παραλαμβάνεται από το δίκτυο PLC σε μια τυποποιημένη μορφή που μπορούν να επεξεργαστούν από τα συμβατικά συστήματα επικοινωνιών. Από την πλευρά των χρηστών, προσφέρονται συνήθως οι τυποποιημένες διεπαφές επικοινωνιών (όπως το Ethernet και το ISDN S0). Μέσα σε ένα σπίτι, η μετάδοση μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω ενός χωριστού δικτύου επικοινωνιών ή μέσω μιας εσωτερικής ηλεκτρικής εγκατάστασης. Με αυτό τον τρόπο, διάφορες συσκευές επικοινωνιών μέσα σε ένα σπίτι μπορούν επίσης να συνδεθούν με ένα δίκτυο πρόσβασης PLC.

2.3.2 Οικιακά δίκτυα PLC

Τα οικιακά συστήματα PLC μπορούν να χρησιμοποιούν την εσωτερική ενσύρματη ηλεκτρική υποδομή ή κάποια ασύρματη υποδομή ως μέσο μετάδοσης. Αυτό καθιστά δυνατή την υλοποίηση τοπικών δικτύων PLC μέσα στα σπίτια, μέσω του οποίου συνδέονται διάφορες συσκευές που υπάρχουν όπως τηλέφωνα, υπολογιστές, εκτυπωτές, τηλεοπτικές συσκευές και άλλα. Με τον ίδιο τρόπο, στα μικρά γραφεία μπορούν να παρασχεθούν τα συστήματα PLC τοπικού δικτύου (LAN). Και στις δύο περιπτώσεις, η τοποθέτηση νέων καλωδίων επικοινωνιών με υψηλό κόστος αποφεύγεται.

Σήμερα, οι υπηρεσίες αυτοματοποίησης γίνονται όλο και περισσότερο δημοφιλείς όχι μόνο λόγω της εφαρμογής τους στους βιομηχανικούς και επιχειρηματικούς τομείς και μέσα σε μεγάλα κτίρια, αλλά και λόγω της εφαρμογής τους στα ιδιωτικά νοικοκυριά. Τα συστήματα που παρέχουν υπηρεσίες αυτοματοποίησης, όπως έλεγχος ασφαλείας, έλεγχος θερμότητας, αυτόματη ρύθμιση των φώτων, πρέπει να συνδέουν ένα μεγάλο αριθμό τελικών συσκευών, όπως αισθητήρες, κάμερες, ηλεκτρομηχανές, φώτα κ.λ.π.. Επομένως, η οικιακή τεχνολογία PLC φαίνεται να είναι μια λογική λύση για την υλοποίηση δικτύων με μεγάλο αριθμό τελικών συσκευών, ειδικά μέσα σε παλαιότερα σπίτια και κτίρια όπου δεν υπάρχει κατάλληλη εσωτερική υποδομή επικοινωνίας (Βλέπε §2.2.4).

Βασικά, η δομή ενός οικιακού δικτύου PLC δεν είναι πολύ διαφορετική από τα συστήματα πρόσβασης PLC που χρησιμοποιούν τα δίκτυα παροχής ηλεκτρικής ενέργειας χαμηλής τάσης. Σε ένα οικιακό δίκτυο PLC υπάρχει σταθμός βάσης που ελέγχει και εξυπηρετεί την υπαίθρια του δικτύου περιοχή όπως αυτό παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.6. Ο σταθμός βάσης μπορεί να τοποθετηθεί μαζί με τη μονάδα μετρητών ενέργειας, ή σε οποιαδήποτε άλλη κατάλληλη θέση στο οικιακό δίκτυο PLC. Όλες οι συσκευές ενός οικιακού δικτύου PLC συνδέονται μέσω των modem PLC, όπως οι συνδρομητές ενός δικτύου πρόσβασης PLC. Τα modem συνδέονται απευθείας με τις υποδοχές παροχής ηλεκτρικής ισχύος (έξοδοι), οι οποίες είναι διαθέσιμες σε ολόκληρο το σπίτι/διαμέρισμα. Κατά συνέπεια, οι διαφορετικές συσκευές επικοινωνιών μπορούν να συνδεθούν με το οικιακό δίκτυο PLC οπουδήποτε οι υποδοχές αυτές είναι διαθέσιμες.



Σχήμα 2.6 Δομή ενός οικιακού δικτύου PLC

Ένα οικιακό δίκτυο PLC μπορεί να υπάρξει ως ανεξάρτητο δίκτυο που καλύπτει μόνο ένα σπίτι ή ένα κτίριο. Εντούτοις, αυτό αποκλείει τη χρήση και τον έλεγχο των οικιακών υπηρεσιών PLC από απόσταση. Ένα τηλεχειριζόμενο οικιακό σύστημα PLC είναι πολύ άνετο για την πραγματοποίηση διαφόρων λειτουργιών αυτοματοποίησης όπως η ασφάλεια, η διαχείριση της ενέργειας, όπως αυτά παρουσιάζονται στην §2.2.4. Επίσης, η σύνδεση ενός οικιακού δικτύου PLC σε ένα WAN σύστημα επικοινωνιών επιτρέπει τη χρήση πολυάριθμων τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών από κάθε ηλεκτρική υποδοχή μέσα σε ένα σπίτι.

Τα οικιακά δίκτυα PLC μπορούν να συνδεθούν όχι μόνο με ένα σύστημα πρόσβασης PLC αλλά και με ένα δίκτυο πρόσβασης που υλοποιείται από οποιαδήποτε άλλη τεχνολογία επικοινωνιών. Στην πρώτη περίπτωση, εάν το δίκτυο πρόσβασης χρησιμοποιείται από μια επιχείρηση ηλεκτρισμού, οι πρόσθετες υπηρεσίες μέτρησης μπορούν να πραγματοποιηθούν από απόσταση ελαχιστοποιώντας το κόστος διαχείρισης της ενέργειας, συνδυάζοντάς το με μια ελκυστική τιμολόγηση. Επίσης, ένα οικιακό δίκτυο PLC μπορεί να συνδεθεί με τα δίκτυα πρόσβασης που παρέχονται από τους διάφορους παρόχους δικτύου. Κατά συνέπεια, οι χρήστες του οικιακού δικτύου μπορούν να ωφεληθούν από την ελεύθερη αγορά τηλεπικοινωνιών.

2.3.3 Σύνδεση στο δίκτυο κορμού

Ένα δίκτυο πρόσβασης PLC καλύπτει το τελευταίο μίλι της περιοχής πρόσβασης τηλεπικοινωνιών. Αυτό σημαίνει ότι στις τελευταίες εκατοντάδες μέτρα των δικτύων πρόσβασης μπορεί να εφαρμοστεί η τεχνολογία PLC μέσω των δικτύων παροχής ρεύματος X/T. Τα δίκτυα πρόσβασης PLC συνδέονται με το δίκτυο κορμού μέσω των δικτύων διανομής, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.7. Γενικά, ένα δίκτυο διανομής συνδέει έναν σταθμό βάσης PLC με ένα τοπικό μεταγωγικό κόμβο (local exchange office) που χρησιμοποιείται από ένα πάροχο δικτύου.

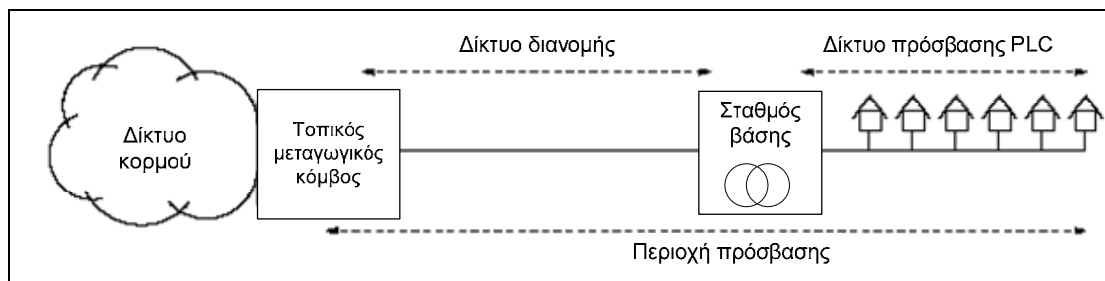
Όπως αναφέρεται στην §2.1, η εφαρμογή της τεχνολογίας PLC απαλλάσσει από δαπάνες εγκατάστασης νέων τηλεπικοινωνιακών δικτυακών υποδομών. Εντούτοις, το δίκτυο πρόσβασης PLC πρέπει να συνδεθεί με το WAN μέσω του δικτύου κορμού που επιφέρει επιπρόσθετες δαπάνες. Επομένως, ένα δίκτυο κορμού PLC πρέπει να πραγματοποιηθεί με τις χαμηλότερες δυνατές επενδύσεις για να εξασφαλίσει την ανταγωνιστικότητα των δικτύων PLC εν συγκρίση με άλλες τεχνολογίες πρόσβασης.

2.3.3.1 Τεχνολογίες επικοινωνιών για τα δίκτυα διανομής PLC

Η φθηνότερη λύση για την πραγματοποίηση σύνδεσης μεταξύ ενός δικτύου πρόσβασης PLC και του δικτύου κορμού είναι η χρήση συστημάτων επικοινωνιών που είναι διαθέσιμα στον τομέα εφαρμογής. Μερικές μονάδες μετασχηματιστών συνδέονται ήδη με ένα δίκτυο συντήρησης μέσω τυποποιημένων καλωδίων επικοινωνιών (γραμμών χαλκού). Αρχικά, αυτές οι συνδέσεις λειτούργησαν ως μέσο για την πραγματοποίηση λειτουργιών τηλεχειρισμού και εσωτερικών επικοινωνιών μεταξύ ενός κέντρου ελέγχου του δικτύου παροχής και του προσωπικού συντήρησης εξοπλισμού. Ωστόσο, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για τη σύνδεση των δικτύων PLC στο δίκτυο κορμού με την εφαρμογή μιας από τις τεχνολογίες DSL.

Κατά τη διάρκεια της τελευταίας δεκαετίας, πολλές επιχειρήσεις ηλεκτρισμού αντικατέστησαν τα παλαιά δίκτυα με δίκτυα οπτικών ινών, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη σύνδεση και με το δίκτυο κορμού. Σε αυτήν την περίπτωση, ένα δίκτυο πρόσβασης αποτελείται από το οπτικό τμήμα και το κομμάτι PLC του δικτύου (Σχήμα 2.7), το οποίο οδηγεί σε μια υβριδική λύση παρόμοια με τα δίκτυα HFC (Hybrid Fiber Coax), στα οποία ένα οπτικό δίκτυο διανομής συνδέει τα δίκτυα

πρόσβασης CATV στο WAN. Μια άλλη λύση για την πραγματοποίηση της σύνδεσης κορμού είναι η εφαρμογή της τεχνολογίας PLC στα ηλεκτρικά δίκτυα Μ/Τ (Βλέπε §2.3.5), που είναι συνδεδεμένα με τα δίκτυα Χ/Τ.



Σχήμα 2.7 Σύνδεση στο δίκτυο κορμού

Γενικά, υπάρχουν οι ακόλουθες δυνατότητες για την πραγματοποίηση της σύνδεσης στο δίκτυο κορμού:

- Χρήση του υπάρχοντος ή νέου καλωδίου ή των οπτικών δικτύων.
- Εκμετάλλευση των ασύρματων δικτύων διανομής π.χ. WLL, εφαρμογή της δορυφορικής τεχνολογίας και τα λοιπά.
- Εφαρμογή της τεχνολογίας PLC στα δίκτυα Μ/Τ.

Η τεχνολογία επικοινωνιών που εφαρμόζεται στα δίκτυα διανομής PLC πρέπει να εξασφαλίζει μετάδοση όλων των υπηρεσιών που προσφέρονται στα δίκτυα πρόσβασης PLC. Επίσης, τα δίκτυα κορμού PLC δεν πρέπει να προκαλούν συμφόρηση στην κοινή δομή επικοινωνιών μεταξύ των συνδρομητών PLC και του δικτύου κορμού. Επομένως, μια εφαρμοσμένη τεχνολογία κορμού πρέπει να παρέχει μια ικανοποιητική χωρητικότητα ζεύξης (ρυθμό μετάδοσης δεδομένων) και την πραγματοποίηση εγγυημένης ποιότητας υπηρεσιών (QoS).

2.3.3.2 Τοπολογία των δικτύων διανομής

Μια λογική λύση για τη σύνδεση πολλαπλών δικτύων πρόσβασης PLC, που τοποθετούνται μέσα σε μια μικρότερη περιοχή, είναι η πραγματοποίηση ενός δικτύου κοινής διανομής που συνδέει διάφορα δίκτυα PLC σε διάφορες τοπολογίες (bus, star, ring), ανεξάρτητες της εφαρμοσμένης τεχνολογίας επικοινωνιών. Μια επιλεγμένη τοπολογία δικτύων, για τα δίκτυα διανομής, πρέπει να αποτελεί οικονομική αλλά και

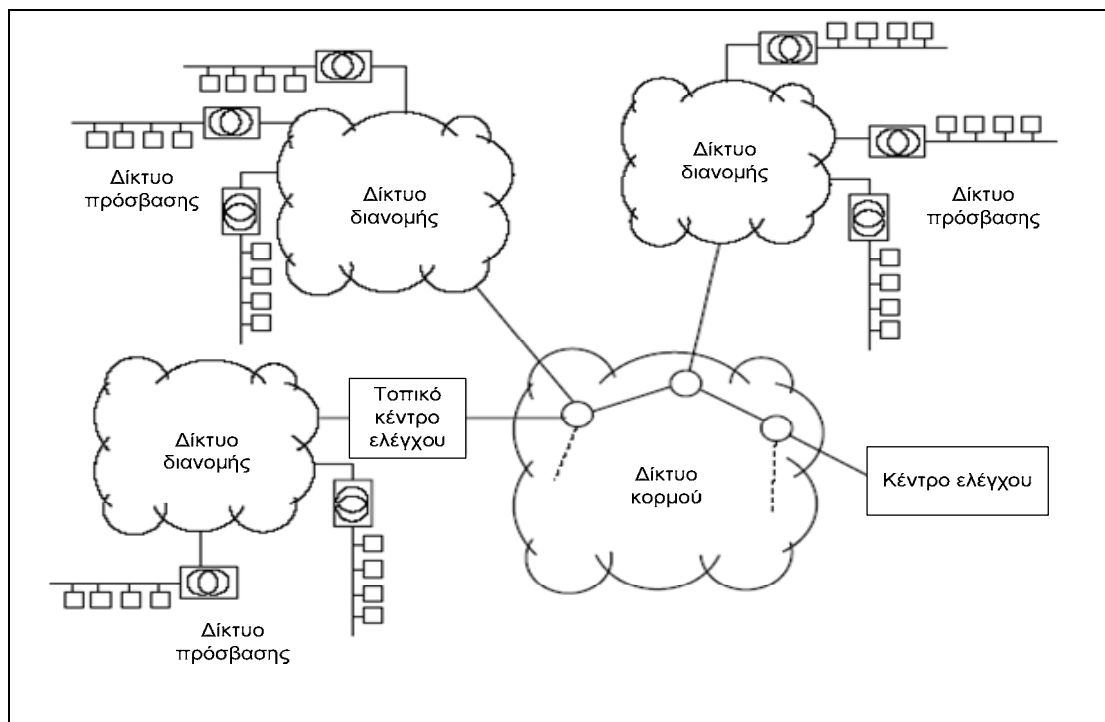
αξιόπιστη λύση και αυτό εξαρτάται κατά κύριο λόγο από τη θέση των δικτύων πρόσβασης PLC σε μια εξεταζόμενη περιοχή και από τη θέση του τοπικού μεταγωγικού κόμβου (Σχήμα 2.7).

Επίσης, η τοπολογία ενός δικτύου διανομής PLC μπορεί να είναι ένας συνδυασμός οποιονδήποτε από τις τρεις βασικές δομές δικτύων. Ωστόσο, η επιλογή της τοπολογίας του δικτύου εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως:

- Η ήδη χρησιμοποιούμενη τεχνολογία επικοινωνιών που επιβάλλει μια συγκεκριμένη τοπολογία δικτύων.
- Η διαθεσιμότητα ενός μέσου μετάδοσης μέσα στον τομέα εφαρμογής.
- Η δυνατότητα της πραγματοποίησης των αξιόπιστων δικτύων διανομής.
- Η γεωγραφική δομή και διανομή των δικτύων πρόσβασης PLC και τον τοπικό μεταγωγικό κόμβο.

2.3.3.3 Διαχείριση δικτύων πρόσβασης PLC

Ο έλεγχος των δικτύων πρόσβασης PLC πρέπει να γίνεται από ένα μόνο ή από ένα πολύ μικρό αριθμό διαχειριστικών κέντρων παρέχοντας μια οικονομικά λογική λύση. Εντούτοις, δίκτυα πρόσβασης PLC που ανήκουν σε ένα δίκτυο ή ένα φορέα παροχής υπηρεσιών μπορούν να κατανέμονται σε μια γεωγραφικά ευρύτερη περιοχή ή διάφορα δίκτυα PLC μπορούν να διανεμηθούν σε διάφορες γεωγραφικά χωρισμένες περιοχές. Επομένως, είναι σημαντικό να βελτιστοποιηθεί το σύστημα διαχείρισης που χρησιμοποιείται για τον έλεγχο των πολλαπλών δικτύων πρόσβασης PLC (Σχήμα 2.8).



Σχήμα 2.8 Δίκτυο ελέγχου PLC

Η διαχείριση ενός δικτύου πρόσβασης PLC περιλαμβάνει τη διαμόρφωση και την επαναδιαμόρφωση όλων των στοιχείων του (σταθμός βάσης, modems, επαναλήπτες και πύλες (gateways)) ανάλογα με την εκάστοτε κατάσταση του δικτύου. Οι διαχειριστικές λειτουργίες μπορούν να γίνουν τοπικά από το σταθμό βάσης ή τις πύλες ή από ένα διαχειριστικό κέντρο χρησιμοποιώντας λειτουργίες τηλεχειρισμού. Η τοπική διαχείριση γίνεται αυτόματα χωρίς οποιαδήποτε δράση τεχνικού προσωπικού. Από την άλλη πλευρά, η απομακρυσμένη διαχείριση (remote management) παρέχει τόσο την αυτόματη όσο και την επιτόπιο εκτέλεση των λειτουργιών ελέγχου. Η μετάδοση πληροφοριών διαχείρισης από και προς τα δίκτυα πρόσβασης πρέπει να εξασφαλίζεται μέσω των δικτύων διανομής PLC για την αποφυγή της συγκέντρωσης διαχειριστικών συστημάτων. Μια αποδοτική διαχειριστική λύση είναι η μεταφορά, ενδεχομένως, περισσότερων λειτουργιών υποστήριξης (maintenance functions) στους σταθμούς βάσης και στις πύλες που τοποθετούνται στα δίκτυα πρόσβασης. Ωστόσο, η διαχειριστική δυνατότητα των στοιχείων του δικτύου PLC αυξάνει τις δαπάνες εξοπλισμού.

Τελικά, η βασική λειτουργία του δικτύου πρέπει να εξασφαλιστεί από τα ίδια τα στοιχεία του δικτύου PLC, χωρίς οποιαδήποτε δράση ενός διαχειριστικού κέντρου. Μόλις εγκατασταθεί ο εξοπλισμός σε ένα δίκτυο X/T, πρέπει το δίκτυο PLC να είναι σε θέση να υποστηρίζει λειτουργίες αυτοελέγχου και αυτοδιαμόρφωσης

χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση. Τα δίκτυα πρόσβασης PLC μπορούν να λειτουργήσουν οικονομικά μόνο εάν η ανάγκη για επιτίπιο έλεγχο δικτύων και χειρισμούς είναι μειωμένη.

2.3.4 Δίκτυο M/T PLC

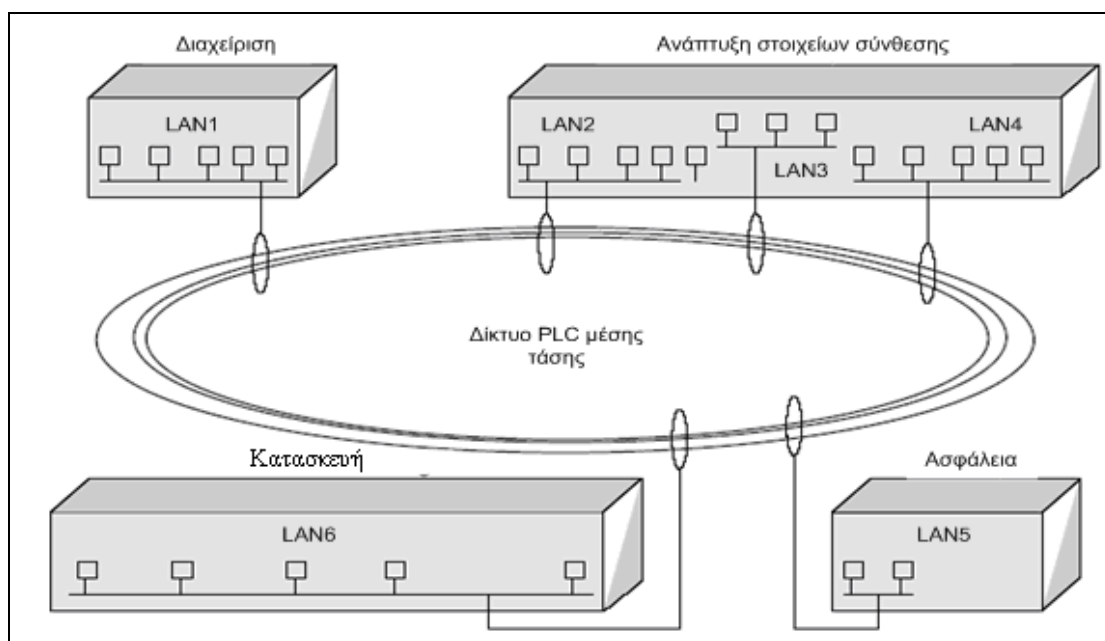
Τα δίκτυα M/T μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για την παροχή διαφόρων υπηρεσιών PLC κατά τρόπο παρόμοιο με τα συστήματα πρόσβασης PLC που χρησιμοποιούν τα δίκτυα X/T. Γενικά, η οργάνωση του δικτύου μέσης τάσης PLC (MV PLC) δεν είναι διαφορετική από τα δίκτυα X/T PLC και, συνεπώς, περιλαμβάνουν τα ίδια στοιχεία δικτύου: τα modems PLC που συνδέουν τους τελικούς χρήστες με τις γραμμές M/T, το σταθμό βάσης που συνδέει ένα δίκτυο M/T PLC με το δίκτυο κορμού, τους επαναλήπτες και τις πύλες.

Ένα ηλεκτρικό δίκτυο M/T τροφοδοτεί συνήθως διάφορα δίκτυα X/T, όπως αναφέρεται στην §2.2.2 και παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.2. Συνεπώς, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως δίκτυο διανομής που συνδέει διάφορα δίκτυα πρόσβασης PLC στον κορμό. Σε αυτήν την περίπτωση, διάφορα δίκτυα πρόσβασης PLC συνδέονται με το δίκτυο διανομής M/T PLC με μια τοπολογία δικτύων παρόμοια με το δίκτυο διανομής τοπολογίας δακτυλίου.

Ακόμη και οι συνθήκες μετάδοσης στα δίκτυα μέσης τάσης είναι καλύτερες από ότι στα δίκτυα χαμηλής τάσης που χρησιμοποιούνται για την πραγματοποίηση των δικτύων πρόσβασης PLC (μικρότερη εξασθένηση σήματος). Οι ρυθμοί μετάδοσης που πραγματοποιούνται μέσω του δικτύου M/T PLC αναμένεται να είναι όχι σημαντικά υψηλότεροι από ότι στα δίκτυα πρόσβασης PLC. Συνεπώς, εάν ένα δίκτυο μέσης τάσης PLC χρησιμοποιείται για να συνδέσει έναν μεγάλο αριθμό δικτύων πρόσβασης PLC με το κεντρικό δίκτυο, το κομμάτι της μετάδοσης μέσω του δικτύου M/T θα ήταν προβληματικό εξαιτίας προβλημάτων συμφόρησης (bottleneck). Επομένως, δεν αναμένεται ότι τα δίκτυα M/T PLC θα χρησιμοποιηθούν για τη διασύνδεση πολλαπλών δικτύων πρόσβασης PLC (π.χ. για να συνδέσουν περισσότερα από δύο δίκτυα πρόσβασης). Εντούτοις, στην φάση ανάπτυξης αναμένεται ότι τα δίκτυα πρόσβασης PLC θα συνδέουν μικρότερο αριθμό τελικών χρηστών και σε αυτήν την περίπτωση, τα δίκτυα μέσης τάσης PLC θα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως λύση για το δίκτυο διανομής.

Επίσης, το δίκτυο M/T PLC προσφέρει μια ευκαιρία για την πραγματοποίηση δικτύων επικοινωνιών χωρίς την ανάγκη για την τοποθέτηση νέων καλωδίων επικοινωνιών σε μια ευρύτερη περιοχή κάλυψης. Έτσι, ένα δίκτυο M/T μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη σύνδεση πολλών δικτύων LAN, όπως μέσα σε μια πανεπιστημιούπολη, σε ένα κοινό δίκτυο δεδομένων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.10.

Με τον ίδιο τρόπο, το δίκτυο μέσης τάσης PLC μπορεί να εφαρμοστεί για την πραγματοποίηση διαφόρων από σημείο σε σημείο (point-to-point) συνδέσεων, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη διασύνδεση μεταξύ των δικτύων LAN, παρόμοια με το δίκτυο της πανεπιστημιούπολης που παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.9. Σήμερα, το δίκτυο M/T PLC βρίσκει εφαρμογή κυρίως στην πραγματοποίηση point-to-point συνδέσεων. Μια εφαρμογή του δικτύου M/T PLC είναι η σύνδεση των κεραιών για τα διάφορα ασύρματα συστήματα.



Σχήμα 2.9 Δομή ενός δικτύου επικοινωνιών, μιας πανεπιστημιούπολης, που χρησιμοποιεί δίκτυο PLC μέσης τάσης

2.4 Προβλήματα επίδοσης συστημάτων PLC

Όπως γνωρίζουμε τα δίκτυα ηλεκτρικής ισχύος δεν είναι σχεδιασμένα για τις επικοινωνίες και επομένως, δεν αποτελούν ένα ευνοϊκό μέσο μετάδοσης.

2.4.1 Χαρακτηριστικά του καναλιού μετάδοσης PLC

Τα δίκτυα X/T δεν σχεδιάστηκαν για επικοινωνίες και επομένως παρουσιάζουν ιδιαίτερα χαρακτηριστικά γνωρίσματα όταν χρησιμοποιούνται για αυτό το σκοπό. Τα καλώδια δικτύων τάσης διαιρούνται με έναν ασύμμετρο τρόπο, που έχει πολλές ανώμαλες συνδέσεις μεταξύ των τμημάτων του δικτύου και των πελατών καθώς και μεταβάσεις μεταξύ των υπερυψωμένων και υπόγειων καλωδίων (Σχήμα 2.2). Τα καλώδια των γραμμών ισχύος και οι μεταξύ τους συνδέσεις δεν είναι σωστά εναρμονισμένες προκαλώντας ανακλάσεις και μεταβολή στη χαρακτηριστική αντίσταση. Επιπλέον, ένα δίκτυο PLC αλλάζει δυναμικά τη δομή του (π.χ. με την προσθήκη νέων πελατών), ειδικά σε ένα οικιακό δίκτυο PLC (Σχήμα 2.6) στο οποίο κάθε γεγονός μεταγωγής (switching event) μπορεί να αλλάξει την τοπολογία του δικτύου. Τα δίκτυα PLC χαρακτηρίζονται επίσης από πολυδιαδρομική διάδοση λόγω των πολυάριθμων αντανakλάσεων που προκαλούνται στα σημεία ένωσης, καλωδίων με διαφορετικές μεταξύ τους τιμές σύνθετης αντίστασης τερματισμού. Αυτό οδηγεί σε πολυδιαδρομική διάδοση των σημάτων, με επιλεκτικές ως προς τη συχνότητα διαλείψεις. Τα σημαντικότερα γεγονότα που επηρεάζουν τη μετάδοση του σήματος είναι οι απώλειες στα καλώδια, οι απώλειες λόγω των αντανakλάσεων στα σημεία διακλάδωσης, η έλλειψη προσαρμογής στους τερματισμούς των γραμμών καθώς επίσης και η επιλεκτική εξασθένηση. Η εξασθένηση στα δίκτυα PLC εξαρτάται από τον τύπο της γραμμής, το μήκος και τις μεταβολές της χαρακτηριστικής σύνθετης αντίστασης της γραμμής μετάδοσης.

Επίσης, ένα δίκτυο πρόσβασης PLC λειτουργεί ως κεραία εκπομπής ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, η οποία παρεμβάλλει σε άλλες υπηρεσίες επικοινωνιών που αναπτύσσονται στο ίδιο εύρος συχνοτήτων. Κατά συνέπεια, τα συστήματα PLC πρέπει να λειτουργήσουν με περιορισμένη ισχύ σήματος σε συγκεκριμένες φασματικές περιοχές, πράγμα που τα καθιστά ευαίσθητα στις παρεμβολές. Τα δίκτυα PLC επηρεάζονται από τις διαταραχές που συμβαίνουν στο περιβάλλον του δικτύου και επίσης από το ίδιο το δίκτυο X/T.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ

3

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΙΚΤΥΟΥ PLC

3.1 Τοπολογία δικτύου

Η τοπολογία ενός δικτύου πρόσβασης PLC δίνεται από την τοπολογία του δικτύου X/T που χρησιμοποιείται ως μέσο μετάδοσης. Ωστόσο, ένα δίκτυο πρόσβασης PLC μπορεί να οργανωθεί με διάφορους τρόπους (π.χ. διαφορετική θέση του σταθμού βάσης, κατάτμηση του δικτύου, κ.λ.π.), τρόποι οι οποίοι μπορούν να επηρεάσουν τη λειτουργία του δικτύου. Σε αυτή την ενότητα, συζητούνται οι τις διάφορες υλοποιήσεις των δικτύων πρόσβασης PLC, η επιρροή τους στην τοπολογία του δικτύου και την οργάνωση των επικοινωνιών στο δίκτυο. Αναλύονται, επίσης, οι επιπτώσεις που έχουν η εφαρμογή πρόσθετων στοιχείων (επαναλήπτες και πύλες) στη δομή του δικτύου.

3.1.1 Τοπολογία των δικτύων X/T

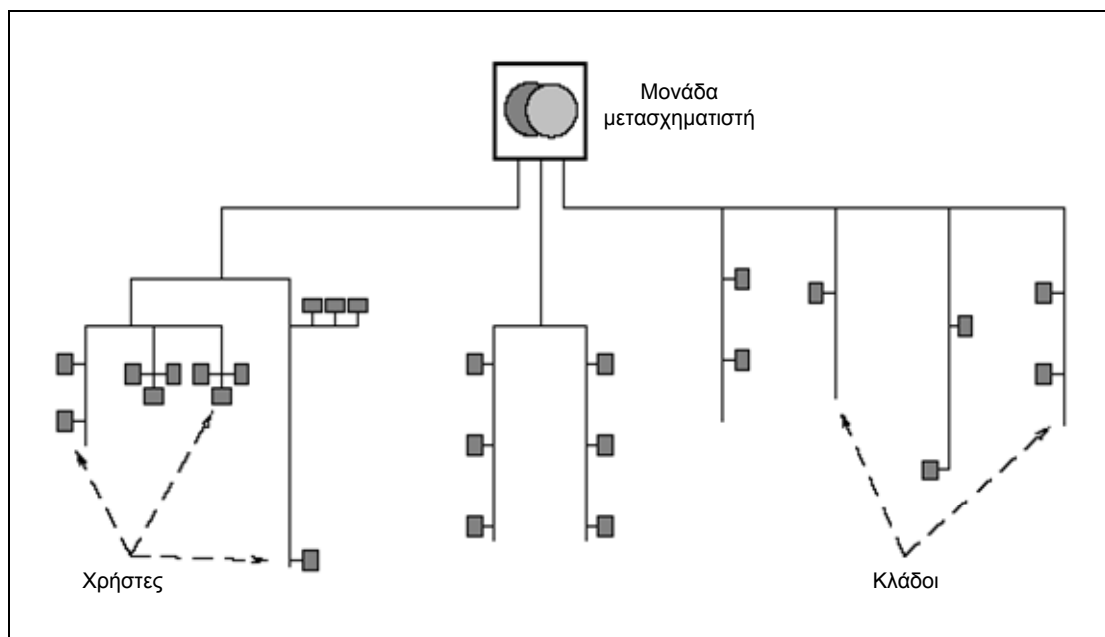
Τα δίκτυα X/T υλοποιούνται με χρήση διαφόρων τεχνολογιών και στοιχείων (διάφοροι τύποι καλωδίων, μονάδες μετασηματιστών, κ.λ.π.) και εγκαθίστανται σύμφωνα με τα πρότυπα, που διαφέρουν από χώρα σε χώρα. Επίσης, σε ένα δίκτυο X/T απαντώνται διάφοροι τρόποι καλωδίωσης. Έτσι, υπάρχουν δίκτυα που υλοποιούνται με τη χρήση εναέριων ή υπόγειων καλωδίων που εμφανίζουν διαφορετικά χαρακτηριστικά γνωρίσματα μετάδοσης, καθώς επίσης και συνδυαστικές

λύσεις καλωδίωσης. Η τοπολογία ενός δικτύου X/T διαφέρει από περιοχή σε περιοχή και εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως:

- Η τοποθεσία του δικτύου. Ένα δίκτυο PLC μπορεί να υπάρξει σε κατοικημένη, βιομηχανική ή επιχειρηματική περιοχή. Επιπλέον, υπάρχει σημαντική διαφορά μεταξύ των αγροτικών και αστικών κατοικημένων περιοχών. Οι βιομηχανικές και επιχειρηματικές περιοχές χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερο αριθμό πελατών που είναι δυνητικοί χρήστες των υπηρεσιών PLC. Αναμένεται επίσης ότι οι συνδρομητές στις επιχειρηματικές περιοχές θα έχουν διαφορετικές απαιτήσεις από συνδρομητές που βρίσκονται σε βιομηχανικές περιοχές και σημαντικά διαφορετικές από συνδρομητές σε αστικές περιοχές. Παρόμοιες διαφορές μπορούν να παρατηρηθούν και μεταξύ αστικών και αγροτικών περιοχών.
- Η πυκνότητα των συνδρομητών. Ο αριθμός των χρηστών/συνδρομητών σε ένα δίκτυο X/T καθώς επίσης και η συγκέντρωση των χρηστών, ποικίλλουν από δίκτυο σε δίκτυο. Οι συνδρομητές μπορεί να βρίσκονται σε μεμονωμένα σπίτια (χαμηλή πυκνότητα συνδρομητών), που είναι χαρακτηριστικό για τις αγροτικές περιοχές, μέσα σε μικρές τετραγωνικές περιοχές συμπεριλαμβανομένων μερικών μεμονωμένων πελατών (π.χ. αστική περιοχή), σε κτίρια με μεγαλύτερο αριθμό επιπέδων ή γραφείων, ή μέσα σε διαμερίσματα ή σε 'πύργους' επιχειρήσεων (πολύ υψηλή πυκνότητα συνδρομητών), όπως είναι τα μεγάλα εμπορικά κέντρα.
- Το μήκος του δικτύου. Η μεγαλύτερη απόσταση μεταξύ μιας μονάδας μετασχηματιστή και ενός πελάτη σε ένα δίκτυο X/T διαφέρει επίσης από περιοχή σε περιοχή. Συνήθως, υπάρχει σημαντική διαφορά του μήκους του δικτύου μεταξύ των αστικών και αγροτικών περιοχών εφαρμογής.
- Η σχεδίαση του δικτύου. Τα δίκτυα X/T αποτελούνται συνήθως από μερικά τμήματα δικτύου (κλάδοι), που επίσης διαφέρουν από δίκτυο σε δίκτυο.

Στο Σχήμα 3.1 παρουσιάζεται η συνήθης δομή ενός δικτύου PLC. Υπάρχουν γενικά διάφοροι κλάδοι (τμήματα δικτύου) που συνδέουν την μονάδα του μετασχηματιστή με τους τελικούς χρήστες. Κάθε κλάδος μπορεί να έχει διαφορετική τοπολογία και να συνδέει ένα μεταβλητό αριθμό χρηστών. Οι χρήστες μπορούν να συγκεντρωθούν και να κατανεμηθούν με συμμετρικό ή ασύμμετρο τρόπο κατά μήκος του δικτύου X/T ή κατά μήκος των κλάδων του. Υπάρχει επίσης διαφορά στα μήκη των διαφόρων

κλάδων. Τα δίκτυα X/T και οι κλάδοι των δικτύων έχουν μια φυσική τοπολογία δέντρου.



Σχήμα 3.1 Πιθανή τοπολογία ενός δικτύου X/T

Τα δίκτυα X/T διαφέρουν μεταξύ τους και δεν είναι δυνατό να καθοριστεί μια ενδεικτική δομή δικτύου για αυτά. Εντούτοις, είναι δυνατό να καθοριστούν μερικές χαρακτηριστικές τιμές και να περιγραφεί μια τυπική δομή ενός χαρακτηριστικού δικτύου PLC σύμφωνα με τις πληροφορίες από [Hooi98, HrasLe00, HrasHa01b] ως εξής

- Αριθμός χρηστών στο δίκτυο από 250 μέχρι 400
- Αριθμός τμημάτων δικτύου μέχρι 5
- Αριθμός χρηστών σε ένα τμήμα δικτύου από 50 μέχρι 80
- Μήκος δικτύου περίπου 500m

Σημειώνεται ότι οι χρήστες ενός δικτύου είναι απλά πιθανοί συνδρομητές PLC και δεν είναι απαραίτητο ότι θα χρησιμοποιήσουν τις υπηρεσίες PLC.

3.1.2 Οργάνωση των δικτύων πρόσβασης PLC

Τα δίκτυα X/T η τοπολογία των οποίων παρουσιάστηκε προηγούμενος, χρησιμοποιούνται ως μέσο μετάδοσης για τα δίκτυα πρόσβασης PLC. Υπάρχουν

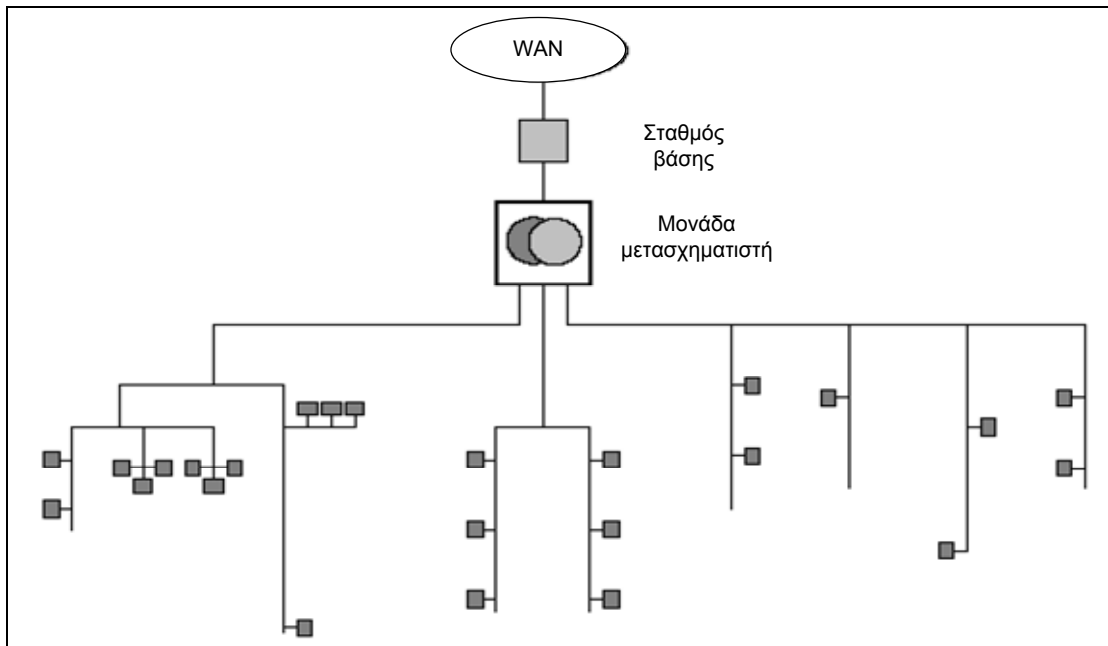
αρκετές δυνατότητες για την οργάνωση των συστημάτων πρόσβασης PLC είτε χρησιμοποιώντας το ίδιο το δίκτυο παροχής είτε χρησιμοποιώντας τα πολλαπλά δίκτυα X/T. Στα ακόλουθα κεφάλαια, εξετάζονται ορισμένες δυνατότητες για την τοποθέτηση ενός σταθμού βάσης PLC στο δίκτυο, την κατάτμηση του δικτύου που αποτελείται από πολλαπλά υποδίκτυα PLC, τη χρήση πολλαπλών δικτύων παροχής για την υλοποίηση ενός δικτύου πρόσβασης PLC και την υλοποίηση δικτύων PLC με τις τεχνικές εφαρμογής επαναληπτών και πυλών.

3.1.2.1 Τοποθεσία του σταθμού βάσης

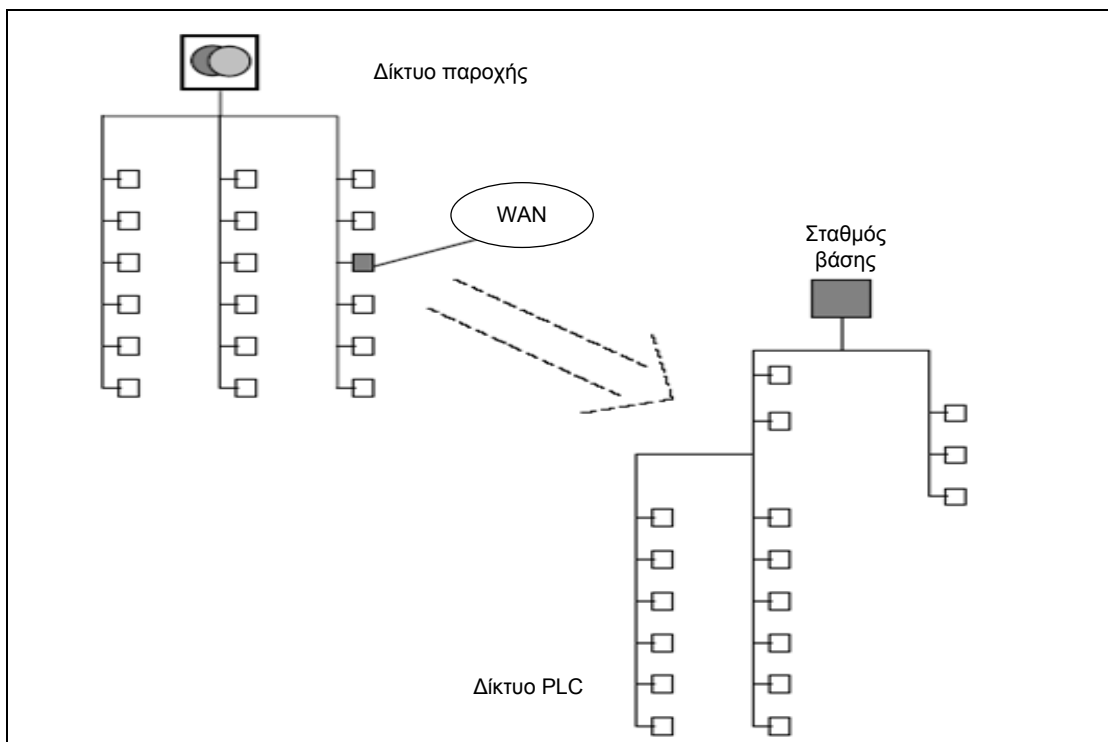
Όπως αναφέρεται στην §2.3, υπάρχει ένας κύριος σταθμός βάσης σε κάθε δίκτυο πρόσβασης PLC. Ο σταθμός βάσης συνδέει το σύστημα πρόσβασης PLC με το δίκτυο κορμού (δίκτυο ευρείας περιοχής WAN) και επομένως, κατέχει κεντρική θέση στη δομή του δικτύου PLC. Υπάρχουν οι ακόλουθες δύο δυνατότητες για την τοποθέτηση του σταθμού βάσης

- Τοποθέτηση του σταθμού βάσης στη μονάδα του μετασχηματιστή μαζί με σύνδεση στο WAN. Έτσι το δίκτυο πρόσβασης PLC διατηρεί την τοπολογία του δικτύου X/T (Σχήμα 3.2).
- Τοποθέτηση του σταθμού βάσης στο χώρο ενός συνδρομητή PLC ή σε οποιαδήποτε άλλη θέση στο δίκτυο (π.χ. καφάο ή power street cabinet). Η τοπολογία του δικτύου PLC αλλάζει και μπορεί να διαφέρει από την τοπολογία του δικτύου παροχής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.3.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ο σταθμός βάσης δεν είναι απαραίτητο να τοποθετηθεί μέσα στη μονάδα του μετασχηματιστή. Η θέση του σε ένα δίκτυο πρόσβασης PLC εξαρτάται πρωτίστως από τη δυνατότητα σύνδεσης του σταθμού βάσης με το δίκτυο κορμού. Συνεπώς, ο σταθμός βάσης μπορεί να τοποθετηθεί στο χώρο ενός συνδρομητή PLC (π.χ. εάν υπάρχει δυνατότητα για WAN σύνδεση) ή μέσα σε καφάο (street cabinet ή SC), τα οποία, γενικά, υπάρχουν σε διάφορα μέρη μέσα σε ένα X/T δίκτυο. Τα καφάο είναι συνήθως εξοπλισμένα με ένα καλώδιο επικοινωνίας, που παρέχεται αρχικά για την πραγματοποίηση της απόσταση συντήρησης και των εσωτερικών επικοινωνιών των επιχειρήσεων, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για σύνδεση με το δίκτυο κορμού.



Σχήμα 3.2 Δίκτυο PLC με το σταθμό βάσης στη μονάδα του μετασχηματιστή



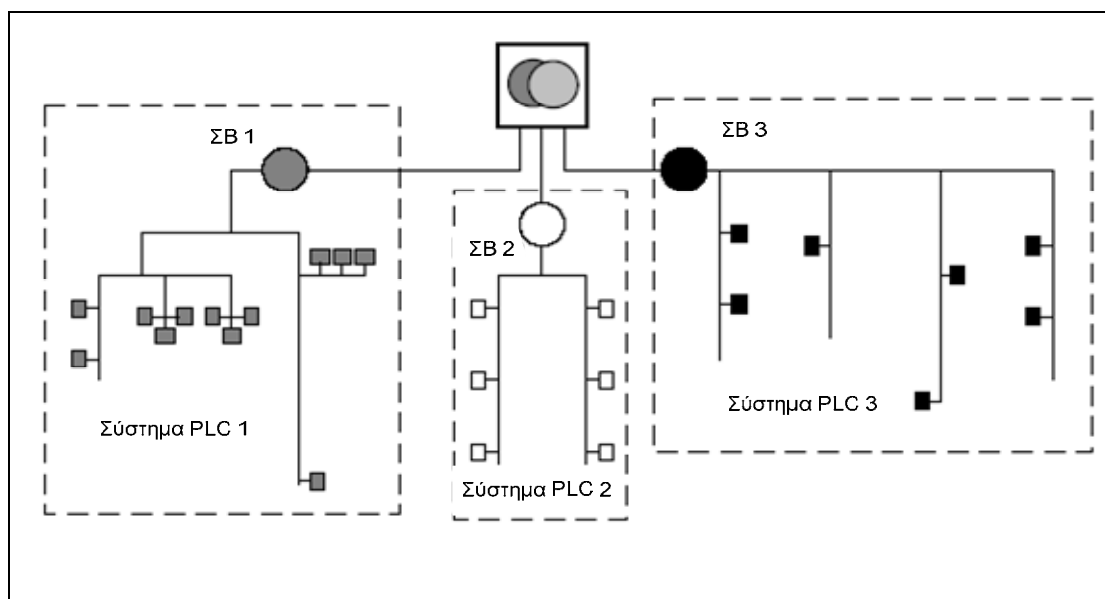
Σχήμα 3.3 Τοπολογία ενός δικτύου πρόσβασης PLC και του αντίστοιχου δικτύου X/T

Εάν ο σταθμός βάσης δεν τοποθετηθεί στη μονάδα του μετασχηματιστή, το κεντρικό σημείο (σημείο σύνδεσης στο δίκτυο κορμού) του δικτύου PLC μετακινείται σε μια άλλη θέση μέσα στο δίκτυο μόνο, όμως, κατά μήκος των ήδη

κατασκευασμένων πλεγμάτων παροχής ηλεκτρικής ισχύος (Σχήμα 3.3). Αυτό μπορεί να προκαλέσει μόνο ποικιλία αποστάσεων μεταξύ του σταθμού βάσης και των συνδρομητών κατά τις διάφορες υλοποιήσεις του δικτύου και όχι άλλες διαφοροποιήσεις. Κατά συνέπεια, η τοπολογία του δικτύου πρόσβασης PLC παραμένει πάντα η ίδια, κρατώντας την ίδια φυσική δομή δέντρου.

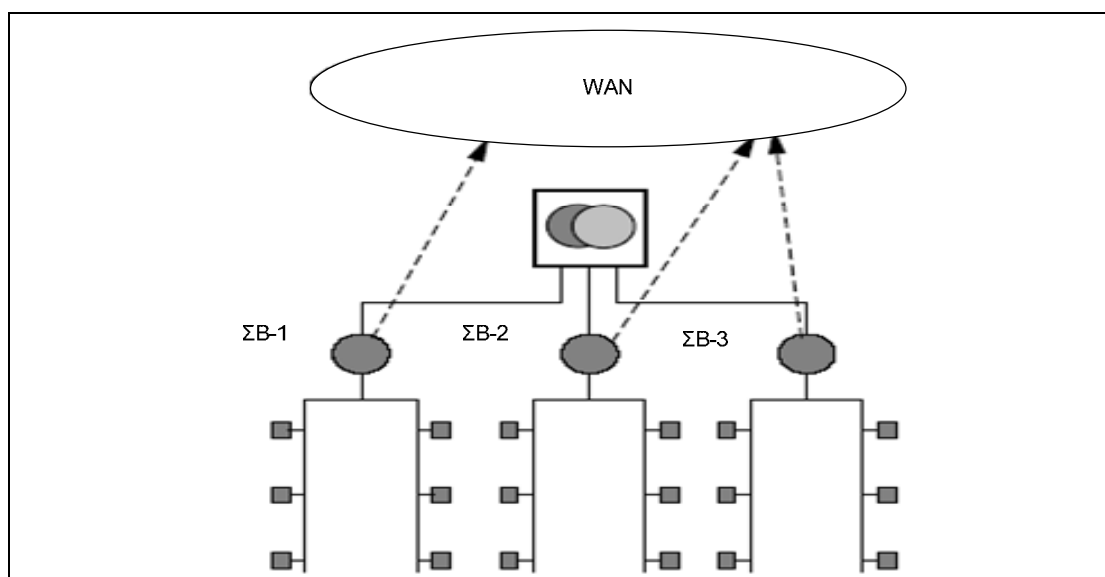
3.1.2.2 Κατάτμηση του δικτύου

Ένα δίκτυο πρόσβασης PLC μπορεί να περιλαμβάνει ολόκληρο το δίκτυο παροχής ηλεκτρικής ισχύος (X/T) ή μόνο ένα τμήμα του δικτύου. Για να μειωθεί ο αριθμός των χρηστών ανά σύστημα PLC και το μήκος του δικτύου, είναι δυνατό να διαιρεθεί το δίκτυο X/T σε τμήματα (π.χ. ένα σύστημα PLC ανά τμήμα δικτύου). Σε αυτήν την περίπτωση, αρκετά συστήματα PLC μπορούν να λειτουργήσουν ταυτόχρονα σε ένα δίκτυο X/T. Το Σχήμα 3.4 παρουσιάζει μια πιθανή κατάτμηση του δικτύου παροχής X/T, αποτελούμενο από τρία τμήματα. Κάθε τμήμα του δικτύου έχει ένα σταθμό βάσης που συνδέει μερικούς συνδρομητές ενός χωριζόμενου δικτύου πρόσβασης PLC. Έτσι, υπάρχουν τρία χωριστά συστήματα πρόσβασης PLC μέσα στο δίκτυο X/T. Κατ' αυτό τον τρόπο, ο αριθμός των συνδρομητών που μοιράζονται τη διαθέσιμη χωρητικότητα του δικτύου μειώνεται.

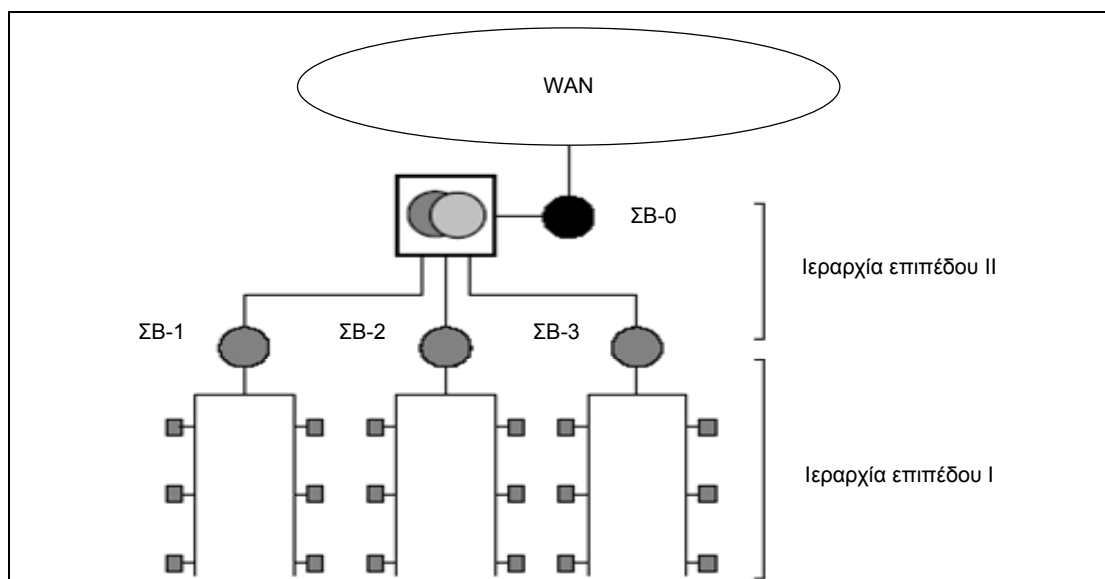


Σχήμα 3.4 Παράλληλα συστήματα πρόσβασης PLC μέσα σε ένα δίκτυο X/T

Ένα αποτέλεσμα της κατάτμησης του δικτύου στα πολλαπλά συστήματα πρόσβασης PLC είναι η μείωση του μήκους των δημιουργημένων δικτύων PLC που λειτουργούν στα μεμονωμένα τμήματα του δικτύου. Συνεπώς, η μετάδοση μπορεί να πραγματοποιηθεί με σήματα χαμηλότερης ισχύος, γεγονός που έχει μεγάλη σημασία λόγω του προβλήματος της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας (EMC, §2.4.2). Επίσης, κάθε σύστημα πρόσβασης, με αυτόν τον τρόπο αποτελείται από ένα μικρότερο αριθμό πιθανών συνδρομητών από ό,τι σε ολόκληρο το δίκτυο παροχής καθώς επίσης και η χωρητικότητα μετάδοσης μοιράζεται από ένα μικρότερο αριθμό συνδρομητών PLC. Η κατάτμηση του δικτύου δεν περιορίζεται μόνο στο διαχωρισμό του δικτύου σε τμήματα και κλάδους αλλά κάθε μέρος του δικτύου παροχής μπορεί, επίσης, να αποτελεσει ένα χωριστό σύστημα πρόσβασης PLC. Έτσι, προκαλείται μια περαιτέρω μείωση στο μήκος του δικτύου και στον αριθμό των συνδρομητών που συνδέονται με ένα δίκτυο πρόσβασης PLC. Μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι τα μεμονωμένα συστήματα PLC μέσα σε ένα δίκτυο X/T κρατούν τη φυσική τοπολογία δέντρου.



Σχήμα 3.5 Ανεξάρτητα δίκτυα πρόσβασης PLC μέσα σε ένα δίκτυο τάσης



Σχήμα 3.6 Δίκτυο πρόσβασης PLC με δύο επίπεδα ιεραρχίας

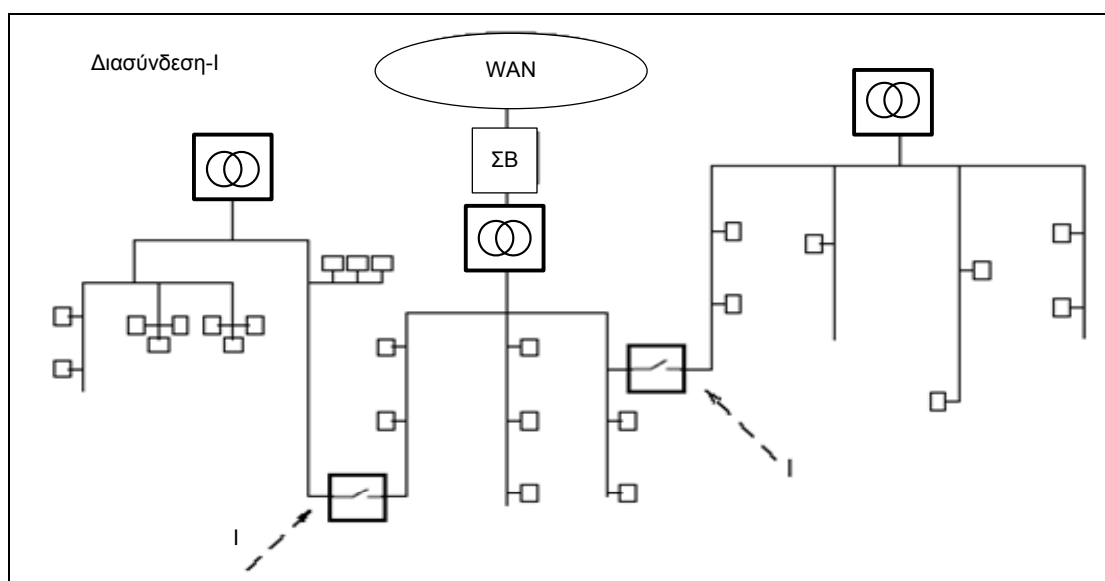
Κάθε ένα από τα μεμονωμένα συστήματα PLC μπορεί να συνδεθεί με το WAN χωριστά (Σχήμα 3.4) αντιπροσωπεύοντας ανεξάρτητα δίκτυα πρόσβασης PLC (Σχήμα 3.5).

Μια άλλη δυνατότητα για σύνδεση στο κεντρικό δίκτυο είναι αυτή όπου οι σταθμοί βάσης χρησιμοποιούν το δίκτυο παροχής ως μέσο μετάδοσης για τη σύνδεση σε ένα κεντρικό σταθμό βάσης (ΣΒ-0, Σχήμα 3.6), ο οποίος συνδέεται με το δίκτυο κορμού, χτίζοντας έτσι μια δεύτερη ιεραρχία δικτύου. Δίκτυα PLC με πολλαπλά επίπεδα ιεραρχίας μπορούν να υλοποιηθούν με τον ίδιο τρόπο. Οι σταθμοί βάσης μπορούν να μοιραστούν το μέσο PLC για επικοινωνία με ένα ανώτερο επίπεδο δικτύου ή μπορεί να διατηρηθεί ένα μοιρασμένο φάσμα συχνοτήτων για κάθε σταθμό βάσης για αυτήν την επικοινωνία. Και στις δύο περιπτώσεις, υπάρχει μείωση της διαθέσιμης χωρητικότητας του δικτύου. Επομένως, η πραγματοποίηση τέτοιων ιεραρχικών δικτύων πρόσβασης PLC δεν είναι συμφέρουσα και επομένως δεν αναμένεται να χρησιμοποιηθεί.

Εντούτοις, εάν η απόσταση μεταξύ των σταθμών βάσης και του κεντρικού σημείου ενός ανώτερου επιπέδου ιεραρχίας του δικτύου είναι μικρή, μεγαλύτεροι ρυθμοί μετάδοσης μπορούν να πραγματοποιηθούν στο ανώτερο επίπεδο δικτύου (π.χ. στο δεύτερο επίπεδο). Εάν ο ρυθμός μετάδοσης είναι ικανοποιητικός για να αντέξει το φορτίο κυκλοφορίας από όλους τους σταθμούς βάσης ταυτόχρονα, δεν προκαλείται δυσχέρεια στο ανώτερο επίπεδο δικτύου και, επομένως, η υλοποίηση των ιεραρχικών δικτύων PLC αποκτά νόημα.

3.1.2.3 Σύστημα PLC μέσω πολλαπλών δικτύων X/T

Τα δίκτυα X/T πολύ συχνά διασυνδέονται μεταξύ τους, εξασφαλίζοντας ένα πλεονασμό ενεργειακής παροχής στο σύστημα (Σχήμα 3.7). Έτσι, εάν μια μονάδα μετασχηματιστή δυσλειτουργεί ή είναι αποσυνδεδεμένη από το επίπεδο M/T, η παροχή μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω των γειτονικών δικτύων διανομής και των μετασχηματιστών τους. Υπό κανονικές συνθήκες, δεν υπάρχει ροή ρεύματος μεταξύ δύο γειτονικών δικτύων X/T. Τα σημεία διασύνδεσης μπορούν να εξοπλιστούν εύκολα για να εξασφαλίσουν μετάδοση σημάτων υψηλής συχνότητας που χρησιμοποιούνται για τις επικοινωνίες. Συνεπώς, ένα δίκτυο PLC μπορεί να υλοποιηθεί έτσι ώστε να περιλαμβάνει πολλαπλά δίκτυα X/T. Σε αυτήν την περίπτωση, ένας σταθμός βάσης συνδέει τους συνδρομητές PLC όλων των διασυνδεδεμένων δικτύων X/T με το WAN. Τέτοια δίκτυα που καλύπτουν πολλαπλά συστήματα X/T διατηρούν τη φυσική τοπολογία δένδρου.



Σχήμα 3.7 Διασύνδεση των δικτύων X/T

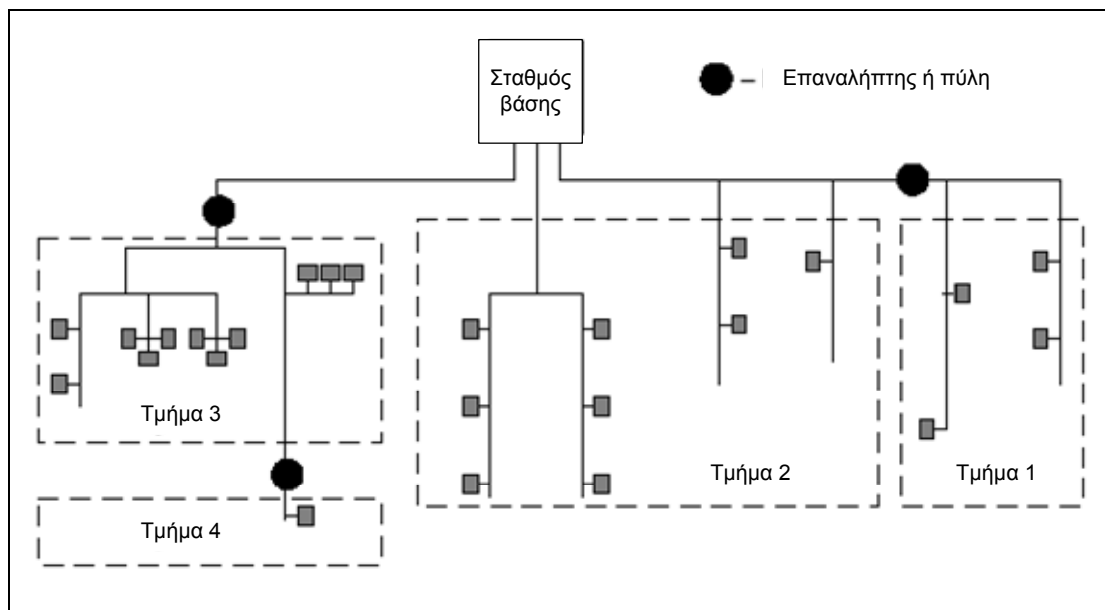
Κατ' αυτό τον τρόπο, ένα δίκτυο πρόσβασης PLC μπορεί να εξυπηρετήσει μια μεγαλύτερη περιοχή με συνδρομητές από διαφορετικά δίκτυα X/T. Ωστόσο, η χωρητικότητα του δικτύου παραμένει περιορισμένη, επιτρέποντας τη σύνδεση ορισμένων συνδρομητών PLC για να κρατήσει την απαραίτητη QoS στο δίκτυο. Πάντως, η υλοποίηση της τεχνολογίας PLC μέσω πολλαπλών δικτύων X/T είναι ιδανική για την πρώτη φάση οικοδόμησης ενός βασικού δικτύου πρόσβασης PLC.

Κατά συνέπεια σε πρώτη φάση, ενώ ο αριθμός των συνδρομητών PLC αναμένεται να είναι μικρός, μια περιοχή κάλυψης μπορεί να υλοποιηθεί με τις λιγότερες δαπάνες. Φυσικά, αυξανόμενου του αριθμού των συνδρομητών, το δίκτυο PLC μπορεί να αναπτυχθεί περαιτέρω ώστε να περιλαμβάνει ένα σύστημα PLC για κάθε δίκτυο X/T ή πολλαπλά συστήματα πρόσβασης PLC μέσα σε ένα δίκτυο X/T.

3.1.2.4 Δίκτυα με την τεχνική των επαναληπτών και των πυλών

Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 2, η απόσταση που μπορεί να καλυφθεί από τα δίκτυα πρόσβασης PLC εξασφαλίζοντας λογικούς ρυθμούς μετάδοσης εξαρτάται από την ισχύ του εγχεόμενου σήματος. Εντούτοις, μεγαλύτερη ισχύ σήματος προκαλεί σημαντική ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία στο περιβάλλον του δικτύου PLC. Επομένως, λόγω των περιορισμών ισχύος, τα δίκτυα PLC που καλύπτουν μεγαλύτερες αποστάσεις προσφέρουν πολύ χαμηλούς ρυθμούς μετάδοσης. Παρόλα αυτά, η υλοποίηση των δικτύων πρόσβασης PLC που εκτείνονται σε μεγαλύτερες αποστάσεις και εξασφαλίζουν ικανοποιητικούς ρυθμούς μετάδοσης είναι δυνατή με την εφαρμογή της τεχνικής των επαναληπτών.

Το Σχήμα 3.8 παρουσιάζει το παράδειγμα ενός δικτύου πρόσβασης PLC με επαναλήπτες. Τα απομακρυσμένα μέρη των δικτύων επικοινωνιών συνδέονται με το σταθμό βάσης μέσω επαναληπτών που λαμβάνουν το σήμα και διαβιβάζουν τα αναγεννημένα σήματα (refresh signal) σε ένα άλλο τμήμα του δικτύου. Εάν είναι απαραίτητο, οι συνδρομητές μπορούν να συνδεθούν με το σταθμό βάσης μέσω πολλαπλών επαναληπτών. Εξαιτίας του γεγονότος ότι ένας επαναλήπτης προωθεί τη ροή των πληροφοριών μεταξύ δύο κοντινών τμημάτων του δικτύου, μπορεί να συναχθεί το συμπέρασμα ότι ένα δίκτυο πρόσβασης PLC που χρησιμοποιεί την τεχνική των επαναληπτών διατηρεί τη φυσική τοπολογία δένδρου.



Σχήμα 3.8 Δίκτυο πρόσβασης με επαναλήπτες (πύλες)

Με τον ίδιο τρόπο, ένα δίκτυο πρόσβασης PLC μπορεί να διαιρεθεί σε υποδίκτυα με την εφαρμογή πυλών PLC. Σε αυτήν την περίπτωση, κάθε πύλη ελέγχει ένα δίκτυο PLC και πραγματοποιεί τη σύνδεση με ένα κεντρικό σταθμό βάσης. Κατά συνέπεια, σε αντίθεση με τους επαναλήπτες, οι πύλες όχι μόνο προωθούν τα δεδομένα μεταξύ των τμημάτων του δικτύου αλλά επίσης ελέγχουν και τα υποδίκτυα. Τα μεμονωμένα υποδίκτυα έχουν επίσης τη φυσική τοπολογία δέντρου, όπως στην υλοποίηση δικτύου με πολλαπλά συστήματα πρόσβασης PLC μέσα σε ένα δίκτυο X/T.

Γενικά, περιορισμένος αριθμός επαναληπτών και πυλών μπορεί να εφαρμοστεί σε ένα δίκτυο πρόσβασης PLC διαιρώντας το σε μικρά τμήματα δικτύων. Ωστόσο, ένας περιοριστικός παράγοντας για την υλοποίηση των πολυάριθμων μικρών τμημάτων δικτύου μέσα σε ένα δίκτυο πρόσβασης PLC είναι οι παρεμβολές μεταξύ των κοντινών τμημάτων. Επομένως, πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένα ευρύτερο φάσμα συχνοτήτων και να διαιρεθεί μεταξύ των τμημάτων του δικτύου, τρόπος ο οποίος οδηγεί στη μείωση της συνολικής χωρητικότητας του δικτύου, όπως συμβαίνει στα δίκτυα X/T με τα πολλαπλά συστήματα πρόσβασης PLC.

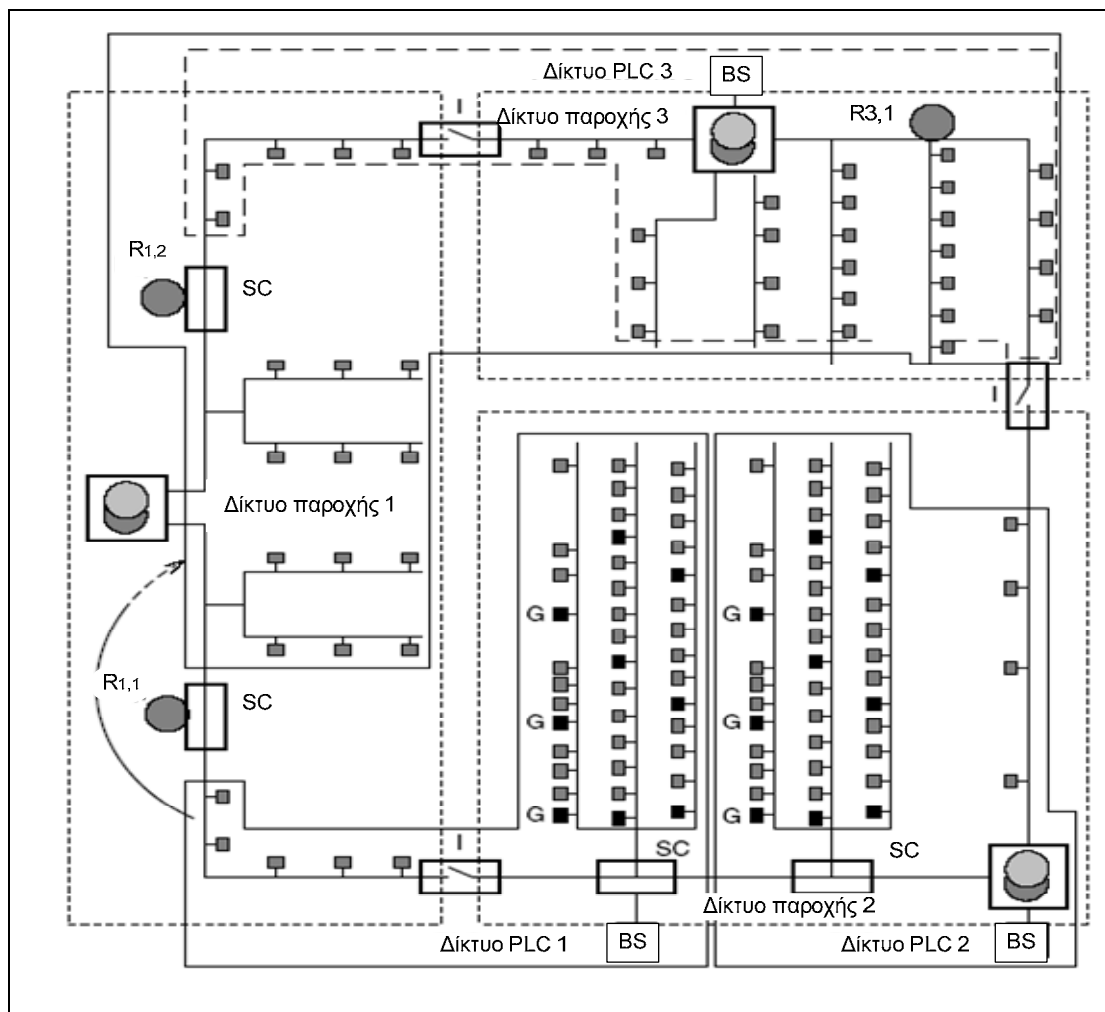
Στην ακραία περίπτωση, κάθε σταθμός του δικτύου μπορεί να λειτουργήσει ταυτόχρονα ως επαναλήπτης που διαιρεί ένα δίκτυο PLC σε πολύ μικρά τμήματα, με αποτέλεσμα να μειώνεται σημαντικά η απαραίτητη ισχύς του σήματος καθώς και η εκπεμπόμενη ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Εντούτοις, οι σταθμοί του δικτύου με λειτουργία επαναλήπτη είναι πιο σύνθετοι και η εφαρμογή τους απαιτεί ένα

περίπλοκο σύστημα διαχείρισης για να γίνει δυνατή η κατανομή συχνοτήτων ή χρονοσχισμών μέσα σε ένα δίκτυο PLC. Επιπλέον, οι συσκευές των επαναληπτών προκαλούν πρόσθετες καθυστερήσεις στη διάδοση λόγω του χρόνου επεξεργασίας που απαιτείται για τη μετατροπή των σημάτων. Επομένως, ο συνολικός αριθμός των επαναληπτών και των πυλών που εγκαθίστανται σε ένα δίκτυο πρόσβασης PLC πρέπει να είναι περιορισμένος.

3.1.3 Υβριδικά δίκτυα πρόσβασης PLC

Σε ένα πραγματικό περιβάλλον, ένα δίκτυο πρόσβασης PLC μπορεί να πραγματοποιηθεί ώστε να συμπεριλάβει κάποια από τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα των διαφόρων τύπων δικτύου που έχουμε προαναφέρει, δημιουργώντας τις αποκαλούμενες σύνθετες δομές δικτύου PLC ή τα υβριδικά δίκτυα.

Στο Σχήμα 3.9, παρουσιάζεται μια πιθανή διαμόρφωση δικτύου PLC καλύπτοντας πολλαπλά δίκτυα X/T και συμπεριλαμβάνοντας διαφορετικά στοιχεία δικτύου. Υπάρχουν τρία δίκτυα παροχής στο παράδειγμα, κάθε ένα από τα οποία διαθέτει μια μονάδα μετασχηματιστή παρέχοντας διάφορους κλάδους, μέσω των οποίων συνδέεται μεταβλητός αριθμός χρηστών (πιθανοί συνδρομητές PLC), με διαφορετική δηλαδή πυκνότητα χρηστών σε κάθε δίκτυο. Τα δίκτυα παροχής είναι διασυνδεδεμένα (I) για την περίπτωση όπου κάποια μονάδα μετασχηματιστή διακόψει τη λειτουργία της εξασφαλίζοντας μόνιμη παροχή σε όλους τους χρήστες. Στην κανονική περίπτωση, τα σημεία διασύνδεσης είναι ανοιχτά (switched on), έτσι δεν υπάρχει ροή ρεύματος μεταξύ των δικτύων παροχής. Τα σημεία διασύνδεσης μπορούν να εξοπλιστούν κατάλληλα ώστε να επιτρέψουν τη μετάδοση των υψηλής συχνότητας σημάτων επικοινωνίας.



Σχήμα 3.9 Παράδειγμα ενός σύνθετου δικτύου πρόσβασης PLC

Λόγω του ασύμμετρου διαχωρισμού των χρηστών του δικτύου, υπάρχει ένας σημαντικά υψηλός αριθμός συνδρομητών PLC στο δεύτερο δίκτυο παροχής (Σχήμα.3.9). Επομένως, το δίκτυο παροχής είναι χωρισμένο σε δύο συστήματα πρόσβασης PLC, διαιρώντας τους συνδρομητές PLC σε δύο ομάδες και ελεγχόμενο από δύο χωριστούς σταθμούς βάσης (BS). Ένας σταθμός βάσης τοποθετείται στη μονάδα του μετασχηματιστή και ένας δεύτερος σταθμός βάσης σε καφάο. Μέσα στο δεύτερο δίκτυο παροχής, η πυκνότητα των συνδρομητών είναι πολύ μεγάλη. Επομένως, τοποθετούνται διάφορες πύλες για να συνδέσουν τις διάφορες ομάδες των συνδρομητών με τους σταθμούς βάσης (π.χ. μια πύλη για κάθε διαμέρισμα ενός κτιρίου με μερικούς συνδρομητές PLC). Το τρίτο δίκτυο PLC καλύπτει το δίκτυο παροχής 3 και ο σταθμός βάσης τοποθετείται στη μονάδα του μετασχηματιστή. Μέσα σε αυτό το δίκτυο υπάρχει ανάγκη για την εφαρμογή επαναληπτών ώστε να εξασφαλιστεί η επικοινωνία με τους απόμακρους συνδρομητές του ($R_{3,1}$).

Υποτίθεται ότι ο αριθμός των συνδρομητών PLC στο πρώτο δίκτυο παροχής είναι μικρός ή σημαντικά μικρότερος από ότι στο δεύτερο και στο τρίτο δίκτυο παροχής. Επομένως, οι συνδρομητές αυτοί μπορούν να συνδεθούν με τα γειτονικά δίκτυα πρόσβασης PLC (δίκτυα 1 και 3) για να εξοικονομήσουν το κόστος εγκατάστασης ενός πρόσθετου σταθμού βάσης και της σύνδεσής του στο δίκτυο κορμού. Κατά συνέπεια, οι συνδρομητές PLC που τοποθετούνται στο δίκτυο παροχής 1 συνδέονται εν μέρει με το πρώτο και το τρίτο δίκτυο πρόσβασης PLC και με τους σταθμούς βάσης τους. Ο επαναλήπτης *R1,2* εξασφαλίζει κάλυψη των συνδρομητών, οι οποίοι είναι κάπως μακριά από το σταθμό βάσης του δικτύου PLC 3. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, ο επαναλήπτης *R1,1* δεν είναι ενεργός (τοποθετείται μεταξύ των τομέων του δικτύου παροχής 1 που καλύπτεται από τα συστήματα PLC 1 και 3).

Η κατάσταση κυκλοφορίας στα δίκτυα πρόσβασης, όπως το PLC, ποικίλλει κατά τη διάρκεια της ημέρας. Οι επιχειρηματικοί συνδρομητές είναι πλέον ενεργοί στις πρωινές ώρες, ενώ οι ιδιωτικοί συνδρομητές είναι πλέον ενεργοί το βράδυ. Εάν γίνει η υπόθεση ότι οι συνδρομητές στο δίκτυο παροχής 3 είναι κυρίως νοικοκυριά (Σχήμα 3.9) και ότι υπάρχουν διάφοροι επιχειρηματικοί πελάτες στο δίκτυο 2, τα δίκτυα πρόσβασης PLC 1 και 2 φορτώνονται περισσότερο κατά τη διάρκεια της ημέρας και το δίκτυο 3 PLC φορτώνεται περισσότερο το βράδυ. Επομένως, θα ήταν λογικό να βελτιστοποιήσουμε το φορτίο του δικτύου μεταξύ των συστημάτων πρόσβασης PLC, παρέχοντας επίσης καλύτερη ποιότητα QoS στο δίκτυο. Έτσι, για να ανακουφιστεί το δίκτυο PLC 3, ένα μέρος των συνδρομητών PLC του πρώτου δικτύου παροχής μπορεί να μεταφερθεί στο δίκτυο πρόσβασης PLC 1. Σε αυτήν την περίπτωση, ο επαναλήπτης *R1,1* γίνεται ενεργός, εξασφαλίζοντας επικοινωνίες μεταξύ του πρώτου σταθμού βάσης και της περιοχής κάλυψής του στο πρώτο δίκτυο παροχής και ο επαναλήπτης *R1,2* γίνεται ανενεργός.

Η αλλαγή των ρυθμίσεων ενός δικτύου PLC σε μια περιοχή όπου έχουν πρόσβαση διάφορα συστήματα PLC μπορεί να γίνει με μια διαφορετική δυναμική που βασίζεται σε δύο παράγοντες:

- το φορτίο κίνησης (όπως ήδη εξηγήθηκε)
- τις συνθήκες μετάδοσης στο δίκτυο

Ωστόσο, για να είναι σε θέση να αντιδράσει στις μεταβαλλόμενες καταστάσεις του δικτύου, ο επανασηματισμός πρέπει να πραγματοποιείται αυτόματα. Κατά συνέπεια,

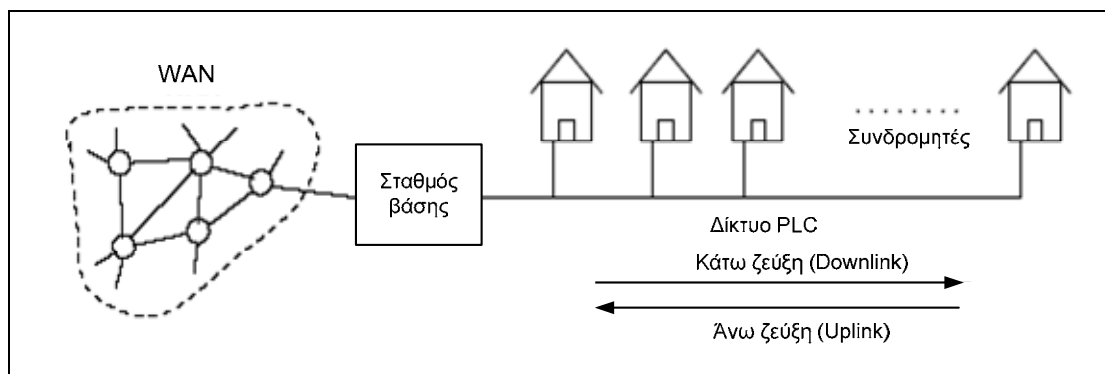
η μεταβολή της συμπεριφοράς του θορύβου στο περιβάλλον του δικτύου μπορεί να οδηγήσει σε δυσμενείς όρους μετάδοσης που καθιστούν τις επικοινωνίες με τους απόμακρους συνδρομητές PLC δύσκολες. Σε αυτήν την περίπτωση, η οργάνωση των επαναληπτών και η διασύνδεση του δικτύου μπορεί να αλλάζει για να λύσει αυτό το πρόβλημα. Ακόμη και οι πρόσθετοι επαναλήπτες μπορούν να παρεμβληθούν προσωρινά στο δίκτυο για να υπερνικήσουν το πρόβλημα. Ας σημειωθεί ότι οι σταθμοί δικτύου συνδρομητών (subscriber network stations) μπορούν επίσης να σχεδιαστούν ώστε να είναι σε θέση να αναλάβουν τη λειτουργία των επαναληπτών, εξασφαλίζοντας έτσι γρήγορη εισαγωγή πρόσθετων επαναληπτών.

3.1.4 Λογικά μοντέλα δικτύου

Όπως παρατηρήθηκε προηγουμένως παραπάνω, κατά τις διάφορες υλοποιήσεις δικτύων PLC της §3.1.2, ένα δίκτυο πρόσβασης PLC συνδέεται με το δίκτυο κορμού μέσω ενός σταθμού βάσης. Αυτή η σύνδεση υπάρχει σε όλες τις υλοποιήσεις συστημάτων πρόσβασης PLC ανεξάρτητα από τη θέση του σταθμού βάσης και τον αριθμό των υποσυστημάτων PLC μέσα σε ένα δίκτυο X/T. Η επικοινωνία μεταξύ των συνδρομητών και του WAN πραγματοποιείται μέσω ενός σταθμού βάσης. Επίσης, μπορεί να θεωρηθεί ότι και οι εσωτερικές επικοινωνίες μεταξύ των συνδρομητών ενός δικτύου PLC πραγματοποιούνται μέσω του σταθμού βάσης.

Για παράδειγμα, η μετάδοση δεδομένων μεταξύ των συνδρομητών μέσα σε ένα δίκτυο πρόσβασης PLC πραγματοποιείται μέσω ενός εξυπηρετητή Διαδικτύου (Internet server) που τοποθετείται συνήθως από ένα δίκτυο PLC. Αν εξεταστεί η υπηρεσία της τηλεφωνίας, θα διαπιστωθεί ότι οι συνδέσεις πραγματοποιούνται μέσω ενός συστήματος μεταγωγής που τοποθετείται επίσης κάπου στο WAN. Σύμφωνα με την εκτίμηση αυτήν, υπάρχουν δύο κατευθύνσεις μετάδοσης που μπορούν να προκύψουν σε ένα δίκτυο PLC (Σχήμα 3.10):

- Κάτω ζεύξη (Downlink/downstream): Είναι η μετάδοση από το σταθμό βάσης προς τους χρήστες του δικτύου
- Άνω ζεύξη (Uplink/upstream): Είναι η μετάδοση από τους χρήστες προς το σταθμό βάσης



Σχήμα 3.10 Λογική δομή ενός δικτύου PLC τοπολογίας διαύλου (bus)

Η πληροφορία που αποστέλλεται από το σταθμό βάσης στην κάτω ζεύξη διαβιβάζεται σε όλα τα υπομήματα του δικτύου και παραλαμβάνεται από όλους τους συνδρομητές στο δίκτυο. Στην άνω ζεύξη, η πληροφορία που αποστέλλει ένας συνδρομητής PLC παραλαμβάνεται όχι μόνο από το σταθμό βάσης αλλά και από όλους τους υπόλοιπους συνδρομητές που βρίσκονται στο δίκτυο.

Από την άποψη ενός υψηλότερου στρώματος δικτύου (π.χ. το στρώμα MAC), ένα σύστημα πρόσβασης PLC μπορεί να θεωρηθεί ως λογικό δίκτυο διαύλου (bus network) που συνδέει διάφορους σταθμούς δικτύου με ένα σταθμό βάσης, ο οποίος παρέχει επικοινωνία με το WAN. Συνεπώς, ο σταθμός βάσης λαμβάνει κεντρική θέση στη δομή επικοινωνιών ενός διαύλου. Ο λογικός δίαυλος δικτύου δεν περιλαμβάνει πληροφορίες για τις αποστάσεις μεταξύ του σταθμού βάσης και των συνδρομητών και για τις αποστάσεις μεταξύ των συνδρομητών. Αυτές οι πληροφορίες χρειάζονται για την εκτίμηση των καθυστερήσεων διάδοσης των σημάτων στο δίκτυο. Για το σκοπό αυτό, μπορεί να καθοριστεί μια μήτρα που περιλαμβάνει τις αποστάσεις μεταξύ όλων των σταθμών στο δίκτυο.

Όπως αναλύεται στην §3.1.2, η θέση του σταθμού βάσης στα δίκτυα πρόσβασης PLC δεν αλλάζει τη φυσική δομή δένδρου του δικτύου. Συνεπώς, η λογική δομή ενός διαύλου δικτύου μπορεί επίσης να εφαρμοστεί για την εξέταση των υψηλότερων στρωμάτων δικτύου. Το ίδιο συμπέρασμα μπορεί να εξαχθεί εάν ένα δίκτυο X/T είναι χωρισμένο σε διάφορα συστήματα PLC ή εάν τα πολλαπλά δίκτυα X/T διασυνδέονται για να ενισχύσουν ένα δίκτυο πρόσβασης PLC. Τα οικιακά δίκτυα PLC διατηρούν την ίδια φυσική τοπολογία δένδρου και επομένως, η λογική δομή ενός δικτύου τοπολογίας διαύλου μπορεί να εφαρμοστεί και σε αυτήν την περίπτωση.

Όπως προηγουμένως περιγράφηκε, τα δίκτυα πρόσβασης PLC μπορούν να υλοποιηθούν με επαναλήπτες. Σε αυτήν την περίπτωση, υπάρχουν διάφορα τμήματα δικτύου μέσα σε ένα σύστημα PLC που διαιρούνται με τους επαναλήπτες. Διαφορετικές φασματικές ζώνες ή διαφορετικές χρονοσχισμές χρησιμοποιούνται σε διαφορετικά τμήματα του δικτύου, επιτρέποντας τη συνύπαρξή τους μέσα σε ένα σύστημα πρόσβασης PLC. Οι επαναλήπτες μετατρέπουν τις συχνότητες ή τις χρονοσχισμές μεταξύ των τμημάτων του δικτύου χωρίς οποιοδήποτε αντίκτυπο στο περιεχόμενο των δεδομένων. Οι διαβιβασθείσες μονάδες δεδομένων διέρχονται απλά μεταξύ των τμημάτων του δικτύου εξασφαλίζοντας τη συνεχή ροή τους μέσα σε ολόκληρο το δίκτυο. Επομένως, η ίδια λογική δομή ενός δικτύου τοπολογίας διαύλου (Σχήμα 3.10) μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την εξέταση των υψηλότερων στρωμάτων δικτύου σε συστήματα PLC με επαναλήπτες, καθώς επίσης και στα δίκτυα με πύλες PLC. Εάν το δίκτυο διαιρείται στο πεδίο του χρόνου (time domain), οι καθυστερήσεις μετάδοσης που προκαλούνται από τη μετάθεση των χρονοσχισμών (time-slot transfer) μεταξύ των τμημάτων του δικτύου πρέπει να ληφθούν ιδιαίτερα υπόψη.

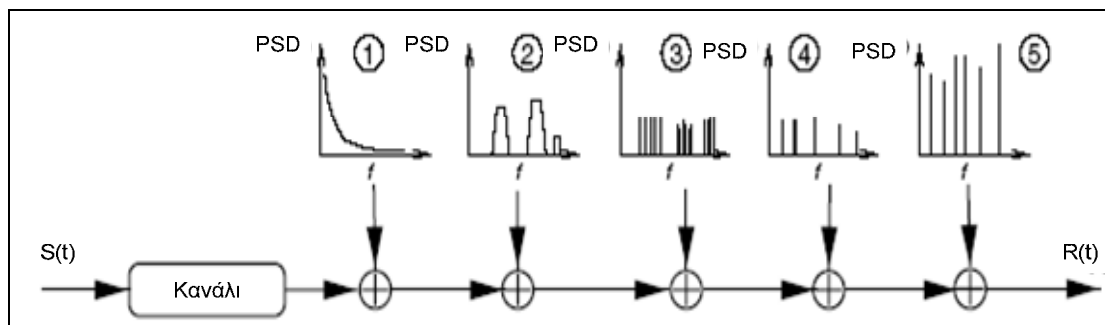
Στην §3.1.3, μελετήθηκε ένα παράδειγμα σύνθετου δικτύου πρόσβασης PLC που περιέχει διάφορα συστήματα πρόσβασης PLCˆ σταθμούς βάσης, επαναλήπτες και πύλες, ενώ επίσης καλύπτει και πολλαπλά δίκτυα χαμηλής τάσης. Προέκυψε, επίσης, το συμπέρασμα ότι η δομή των πολλαπλών δικτύων πρόσβασης PLC μπορεί να αλλάζει δυναμικά λόγω αλλαγής των συνθηκών στο δίκτυο. Εντούτοις, παρά τα διασυνδεδεμένα δίκτυα X/T, κάθε δίκτυο πρόσβασης PLC έχει τη φυσική δομή δένδρου (Σχήμα 3.9). Επομένως, η λογική δομή ενός δικτύου τοπολογίας διαύλου μπορεί να εφαρμοστεί για τη μελέτη υψηλότερων στρωμάτων δικτύου σε κάθε ένα από τα δίκτυα πρόσβασης PLC που ανήκει στη σύνθετη δομή. Η αλλαγή της δομής του δικτύου οδηγεί επίσης σε παρόμοια φυσική τοπολογία με διάφορα δίκτυα δέντρου. Κατά συνέπεια, η υιοθέτηση του λογικού μοντέλου διαύλου μπορεί να διατηρηθεί και σε κάθε ένα από τα δημιουργούμενα δίκτυα πρόσβασης PLC.

3.2 Χαρακτηρισμός διαταραχών

3.2.1 Περιγραφή θορύβου

Επειδή τα ηλεκτρικά καλώδια σχεδιάστηκαν μόνο για μεταφορά ενέργειας, καμμία πρόνοια δεν είχε ληφθεί για τις ιδιότητες αυτού του μέσου στο φάσμα των υψηλών συχνοτήτων. Επιπλέον, μια μεγάλη ποικιλία συσκευών με διάφορες ιδιότητες, συνδέεται προς το ηλεκτρικό δίκτυο. Επομένως, πριν χρησιμοποιηθεί αυτό το μέσο για τη μετάδοση πληροφοριών, πρέπει να γίνει πρώτα μια εντατική έρευνα για τα φαινόμενα που παρουσιάζονται στο περιβάλλον του. Εκτός από την παραμόρφωση του σήματος πληροφορίας, λόγω εξασθένησης κατά μήκος των καλωδίων και πολυδιαδρομικής διάδοσης, ο υπερτιθέμενος θόρυβος καθιστά τη σωστή λήψη των πληροφοριών δυσκολότερη. Αντίθετα από τους συμβατικούς τηλεπικοινωνιακούς διαύλους, το κανάλι των γραμμών ενέργειας δεν χαρακτηρίζεται από προσθετικό λευκό θόρυβο τύπου Gauss (Additive White Gaussian Noise ή AWGN), του οποίου η φασματική πυκνότητα ισχύος είναι σταθερή σε ολόκληρο το φάσμα μετάδοσης. Πολλές έρευνες και μετρήσεις επιτεύχθηκαν προκειμένου να δοθεί μια λεπτομερής περιγραφή των χαρακτηριστικών του θορύβου σε ένα περιβάλλον PLC. Μια ενδιαφέρουσα περιγραφή δίνεται στο [ZimmDo00a], η οποία ταξινομεί το θόρυβο ως επαλληλία πέντε τύπων θορύβου, που διακρίνονται από την προέλευση, τη χρονική διάρκεια, το εύρος κατειλημμένου φάσματος και την έντασή τους. Η προσεγγιστική αναπαράσταση του κατειλημμένου φάσματος παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.11.

- **Έγχρωμος θόρυβος περιβάλλοντος (Τύπος 1) (Colored background noise)**, του οποίου η φασματική πυκνότητα ισχύος (psd) είναι σχετικά χαμηλή και μειώνεται με τη συχνότητα. Αυτός ο τύπος θορύβου προκαλείται κυρίως από την επαλληλία πολυάριθμων πηγών θορύβου χαμηλότερης ισχύος. Σε αντίθεση με το λευκό θόρυβο, που είναι θόρυβος με συνεχή και ομοιόμορφη φασματική πυκνότητα ουσιαστικά ανεξάρτητη από τη συχνότητα μέσα στο καθορισμένο φάσμα συχνότητας, ο έγχρωμος θόρυβος υποβάθρου παρουσιάζει ισχυρή εξάρτηση από τη συχνότητα. Οι παράμετροι αυτού του θορύβου ποικίλλουν με το χρόνο.



Σχήμα 3.11 Τύποι προσθετικού θορύβου σε περιβάλλον PLC

- **Θόρυβος στενής ζώνης (Τύπος 2) (Narrowband noise)**, ο οποίος έχει φάσμα τις περισσότερες φορές ημιτονοειδούς μορφής, με διαμορφωμένα πλάτη. Αυτός ο τύπος θορύβου καταλαμβάνει διάφορες υποζώνες, οι οποίες είναι μεσαίες και συνεχείς μέσα στο φάσμα συχνοτήτων. Προκαλείται κυρίως από την εκπομπή των σταθμών ραδιοφωνικής μετάδοσης στις μέσες και χαμηλότερες ζώνες συχνοτήτων. Το πλάτος του ποικίλλει γενικά κατά τη διάρκεια της ημέρας, ενώ γίνεται μεγαλύτερο τη νύχτα όταν οι ανακλάσεις από την ατμόσφαιρα γίνονται ισχυρότερες.
- **Περιοδικός κρουστικός θόρυβος, ασύγχρονος στις κεντρικές συχνότητες (Τύπος 3) (Periodic impulsive noise, asynchronous to the main frequency)**, όπου οι παλμοί του εμφανίζουν στις περισσότερες περιπτώσεις μία επανάληψη με ρυθμό από 50KHz μέχρι 200KHz, δημιουργώντας ένα φάσμα με διακριτές γραμμές. Αυτός ο τύπος θορύβου προκαλείται συνήθως με την αλλαγή των παροχών ηλεκτρικού ρεύματος. Μια παροχή ηλεκτρικού ρεύματος είναι ένα κύκλωμα απομονωτών που τοποθετείται μεταξύ μιας ασύμβατης πηγής και ενός φορτίου προκειμένου αυτοί να καταστούν συμβατοί. Λόγω του υψηλού ρυθμού επανάληψης, αυτός ο θόρυβος καταλαμβάνει τις συχνότητες που είναι επίσης ή μια κοντά στην άλλη, και δημιουργεί επομένως δέσμες συχνοτήτων που προσεγγίζονται συνήθως από τις στενές ζώνες.
- **Περιοδικός κρουστικός θόρυβος, σύγχρονος προς τη συχνότητα του ηλεκτρικού δικτύου (Τύπος 4) (Periodic impulsive noise, synchronous to the main frequency)**, όπου οι παλμοί του εμφανίζουν ρυθμό επανάληψης ίσο με 50 ή 100Hz και είναι σύγχρονος με την κύρια συχνότητα του δικτύου. Είναι μικρής διάρκειας (μερικών msec) και έχουν φασματική πυκνότητα

ισχύος που μειώνεται με τη συχνότητα. Αυτός ο τύπος θορύβου προκαλείται γενικά από την παροχή ηλεκτρικού ρεύματος που λειτουργεί σύγχρονα με τη συχνότητα του ηλεκτρικού δικτύου, όπως οι μετατροπείς ισχύος που συνδέονται με το δίκτυο τροφοδοσίας.

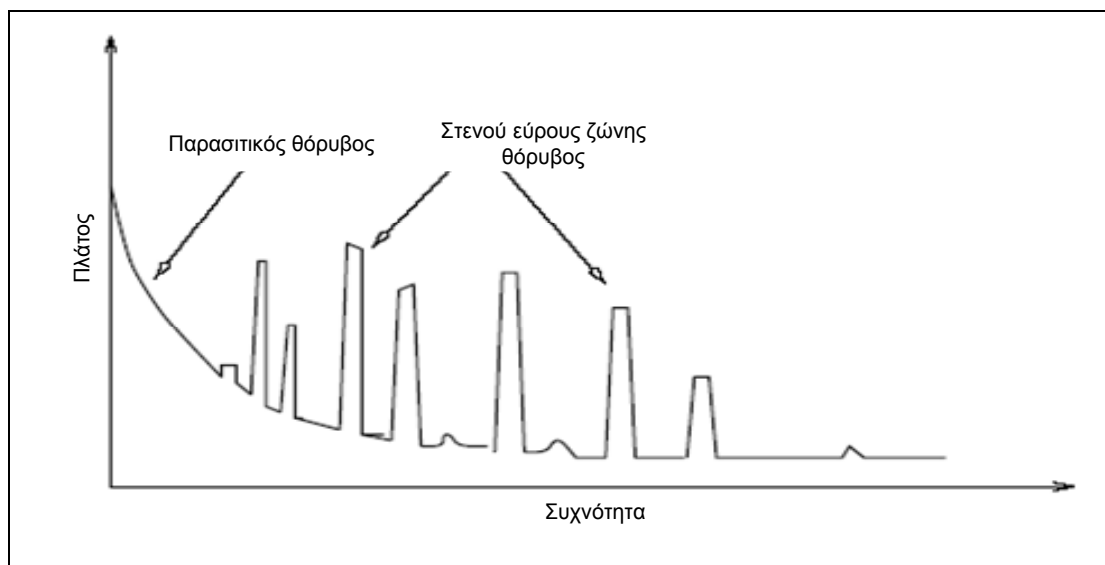
- **Ασύγχρονος κρουστικός θόρυβος (Τύπος 5) (Asynchronous impulsive noise)**, ο οποίος προκαλείται από την αιφνίδια μεταβολή της τάσης στο δίκτυο. Αυτοί οι παλμοί έχουν διάρκεια μερικών μsec μέχρι μερικών χιλιοστών του δευτερολέπτου με τυχαίους χρόνους εμφάνισης. Η φασματική πυκνότητα ισχύος του μπορεί να λάβει τιμές μεγαλύτερες των 50dB πάνω από το επίπεδο του παρασιτικού θορύβου, καθιστώντας τον την κύρια αιτία εμφάνισης λάθους στην ψηφιακή επικοινωνία μέσω των δικτύων PLC.

Γενικά, οι πειραματικές μετρήσεις γενικά έχουν δείξει ότι οι τύποι θορύβου 1, 2 και 3 παραμένουν συνήθως σταθεροί για περιόδους διάρκειας δευτερολέπτων, λεπτών ενώ μερικές φορές ακόμη και μερικών ωρών. Επομένως, αυτοί οι τρεις τύποι μπορούν να συνοψιστούν σε μια κατηγορία θορύβου, που καλείται γενικευμένος θόρυβος υποβάθρου ή περιβάλλοντος (Generalized background noise). Ο θόρυβος τύπου 4 και 5, αντίθετα, ποικίλλει σε διάστημα χιλιοστών του δευτερολέπτου και μsec, και μπορεί να περιληφθεί σε μια κατηγορία θορύβου ως Κρουστικός θόρυβος (Impulsive noise). Εξαιτίας των σχετικά υψηλών τιμών πλάτους, αυτή η μορφή θορύβου είναι η πλέον κρίσιμη για τη μετάδοση δεδομένων σε γραμμές ηλεκτρικής ισχύος αφού λειτουργεί σε παροξυσμικού τύπου σφάλματα και πρέπει να αντιμετωπίζεται προσεκτικά.

3.2.2 Γενικευμένος παρασιτικός θόρυβος

Η μοντελοποίηση του γενικευμένου θορύβου υποβάθρου ή περιβάλλοντος στο περιβάλλον PLC, που θεωρείται κυρίως ως επαλληλία του έγχρωμου θορύβου υποβάθρου ή περιβάλλοντος και του θορύβου στενής ζώνης παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.12. Σε αυτήν την περίπτωση, καμία διαφορά δεν επισημαίνεται μεταξύ των ραδιοφωνικών σημάτων στενής ζώνης και του στενής ζώνης θορύβου υπό μορφή φασματικών γραμμών, επειδή κανονικά οι φασματικές γραμμές βρίσκονται σε συσσωρευμένη μορφή. Για να μοντελοποιηθεί η συσσώρευση παρεμβολών γίνεται προσέγγιση βάσει της περιβάλλουσας. Επιπλέον, επειδή ο υψηλός ρυθμός επανάληψης του θορύβου τύπου 3 καταλαμβάνει τις συχνότητες που είναι επίσης η

μα κοντά στην άλλη, σχηματίζονται δέσμες συχνοτήτων που προσεγγίζονται συνήθως από ένα στενό κατειλημμένο εύρος ζώνης.



Σχήμα 3.12 Αναπαράσταση φάσματος για το γενικευμένο παρασιτικό θόρυβο

Επομένως, για τη μοντελοποίησή του, ο θόρυβος αυτός θα φανεί ως περιορισμένης ζώνης θόρυβος με πολύ χαμηλή psd. Η πυκνότητα ισχύος του έγχρωμου θορύβου υποβάθρου ή περιβάλλοντος υπολογίζεται χρονικά κατά μέσο όρο για τη μοντελοποίηση από $N_{CBN}(f)$. Η χρονική εξάρτηση, χαρακτηριστικό αυτού του θορύβου, μπορεί να μοντελοποιηθεί ανεξάρτητα γνωρίζοντας την σταθερή απόκλιση [Beny03]. Επομένως, η psd του γενικευμένου θορύβου υποβάθρου ή περιβάλλοντος μπορεί να γραφτεί υπό την ακόλουθη μορφή

$$N_{GBN}(f) = N_{CBN}(f) + N_{NN}(f) \quad (3.1)$$

$$N_{GBN}(f) = N_{CBN}(f) + \sum_{k=1}^B N_{NN}^{(k)}(f) \quad (3.2)$$

όπου $N_{GBN}(f)$ είναι η psd του έγχρωμου θορύβου υποβάθρου ή περιβάλλοντος, $N_{NN}(f)$ η psd του περιορισμένης ζώνης θορύβου και $N_{NN}^{(k)}(f)$ είναι η psd του κ-οστού υποστοιχείου ενεργοποιούμενο από τον κ-οστό παρεμβολέα του θορύβου στενής ζώνης.

Για το μοντέλο του έγχρωμου θορύβου υποβάθρου ή περιβάλλοντος psd, οι μετρήσεις έδειξαν ότι μια πρώτης τάξης εκθετική συνάρτηση είναι η πλέον κατάλληλη, όπως φαίνεται και από την εξίσωση [Beny03]

$$N_{CBN}(f) = N_0 + N_1 e^{-\frac{f}{f_1}} \quad (3.3)$$

όπου N_0 σταθερή πυκνότητα θορύβου, N_1 και f_1 είναι οι κατάλληλες παράμετροι για την εκθετική περιγραφή και η μονάδα της psd είναι το $dB\mu V / Hz^{1/2}$. Μέσω των διαφόρων ερευνών και μετρήσεων του θορύβου σε περιβάλλον κατοικημένων και βιομηχανικών περιοχών, κατέστη δυνατό να προσδιοριστούν οι προσεγγίσεις για τις παραμέτρους αυτού του προτύπου, ενώ η psd του έγχρωμου θορύβου υποβάθρου ή περιβάλλοντος μπορεί να περιγραφεί από τις εξισώσεις (3.4) και (3.5) για τα αντίστοιχα περιβάλλοντα [Phil00]

$$N_{BN}(f) = -35 + 35e^{-\frac{f[MHz]}{3.6}} \quad \text{Για κατοικημένες περιοχές (3.4)}$$

$$N_{BN}(f) = -33 + 40e^{-\frac{f[MHz]}{8.6}} \quad \text{Για βιομηχανικές περιοχές (3.5)}$$

Για τον προσδιορισμό του περιορισμένου εύρους ζώνης θορύβου που προέρχεται από παρεμβολές παρεμβαλλόμενου, χρησιμοποιείται η παραμετρική Gaussian συνάρτηση, της οποίας τα κύρια πλεονεκτήματα είναι ο μικρός αριθμός των παραμέτρων που απαιτούνται για τον καθορισμό του προτύπου. Επιπλέον, οι παράμετροι μπορούν ξεχωριστά να υπολογιστούν από τις μετρήσεις, οι οποίες παρουσιάζουν μόνο μικρές διαφορές [Beny03]

$$N_{NN}^{(k)}(f) = A_k e^{-\frac{(f-f_{0,k})^2}{2B_k^2}} \quad (3.6)$$

Οι παράμετροι της συνάρτησης είναι A_k για το ύψος, $f_{0,k}$ για την κεντρική συχνότητα και το B_k για το εύρος ζώνης της Gaussian συνάρτησης που μοντελοποιεί τη φασματική πυκνότητα ισχύος.

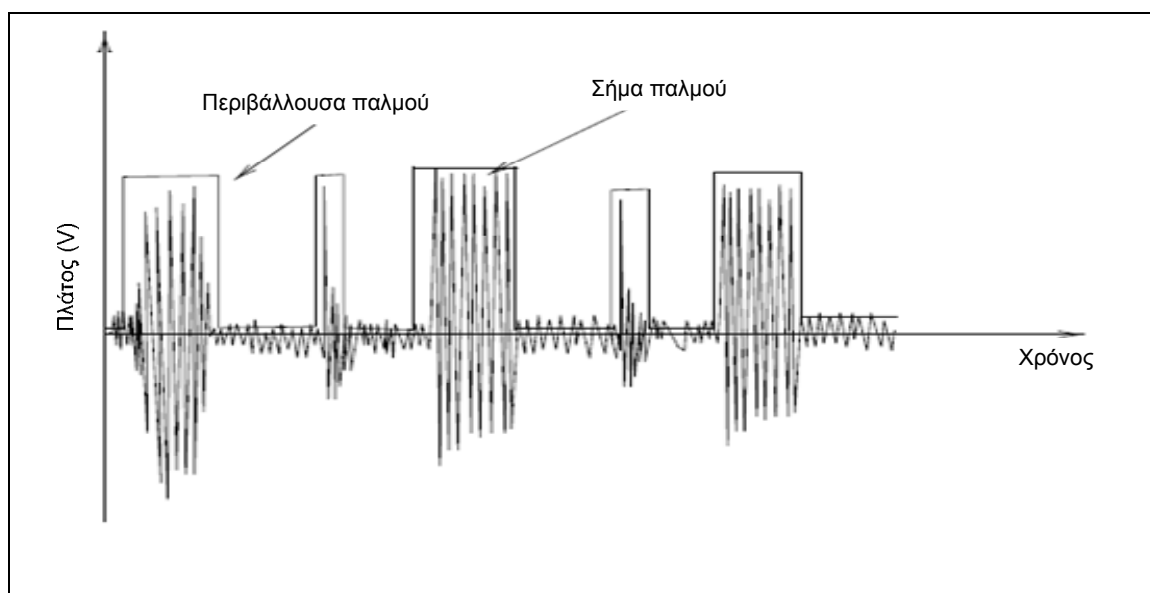
3.2.3 Κρουστικός Θόρυβος

Ο κρουστικός θόρυβος αποτελείται από περιοδικούς κρουστικούς παλμούς (periodic impulses) που είναι σύγχρονοι με την κύρια συχνότητα και τον ασύγχρονο κρουστικό θόρυβο. Οι μετρήσεις δείχνουν ότι η κατηγορία αυτή αποτελείται κατά ένα μεγάλο μέρος από τον τελευταίο τύπο θορύβου (τύπος 5). Για τον λόγο αυτό, η

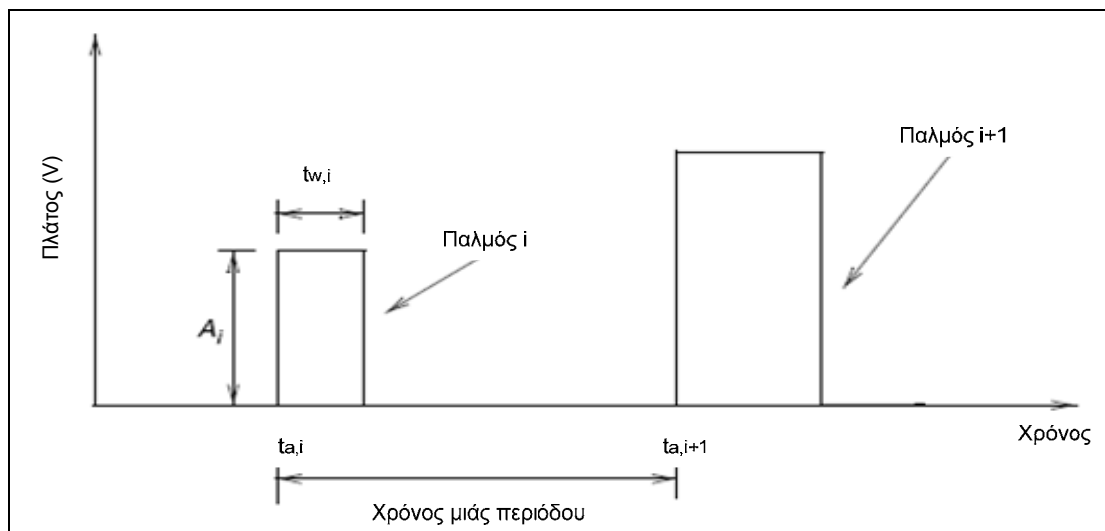
μοντελοποίηση αυτής της κατηγορίας βασίζεται σε έρευνες και μετρήσεις του τύπου (5), των οποίων ένα παράδειγμα παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.13.

Στόχος αυτών των ερευνών και μετρήσεων είναι να προσδιοριστούν τα στατιστικά χαρακτηριστικά των παραμέτρων του θορύβου, όπως η πιθανότητα διασποράς του εύρους των κρουστικών παλμών και η χρονική διασπορά, αντιπροσωπεύοντας το χρόνο μεταξύ δύο διαδοχικών κρουστικών παλμών (Σχήμα 3.14). Μια προσέγγιση προσομοίωσης αυτών των κρουστικών παλμών είναι μια σειρά παλμών με διάρκεια παλμού t_w , πλάτος παλμού A , περίοδο παλμών t_a και μια γενικευμένη παλμική συνάρτηση $p(t/t_w)$ με μονάδα πλάτους και διάρκεια κρουστικού παλμού t_w [ZimmDo00a]:

$$n_{imp}(t) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} A_i \cdot p\left(\frac{t-t_{a,i}}{t_{w,i}}\right) \quad (3.7)$$



Σχήμα 3.13 Παράδειγμα μετρήσεων κρουστικού παλμού ως προς το χρόνο σε ένα δίκτυο PLC



Σχήμα 3.14 Το μοντέλο που χρησιμοποιείται για την κατηγορία του κρουστικού θορύβου

Οι παράμετροι $t_{w,i}$, A_i και $t_{a,i}$ του κρουστικού παλμού i είναι τυχαίες μεταβλητές, των οποίων οι στατιστικές ιδιότητες μετριοούνται και ερευνώνται στο [ZimmDo00a]. Οι υπολογισμένοι κρουστικοί παλμοί έχουν δείξει ότι το 90% του εύρους τους είναι μεταξύ 100 και 200mV. Μόνο ένα ποσοστό μικρότερο από το 1% υπερβαίνει το πλάτος των 2V. Οι μετρήσεις του πλάτους του κρουστικού παλμού t_w έχουν δείξει ότι μόνο το 1% των μετρούμενων κρουστικών παλμών έχουν πλάτος που υπερβαίνει τα 500μs και μόνο το 0.2% αυτών υπερβαίνει το 1ms. Τέλος, η χρονική περίοδος που χωρίζει δύο διαδοχικούς κρουστικούς παλμούς είναι μικρότερη από 200ms για περισσότερο από το 90% των καταγραμμένων παλμών. Άλλες πιο λεπτομερείς μετρήσεις δείχνουν ότι περίπου το 30% των ανιχνευομένων παλμών είχε χρονική περίοδο ίση με 10 ή 20ms, που αντιπροσωπεύει τον κρουστικό θόρυβο που είναι σύγχρονος με τη συχνότητα του ηλεκτρικού δικτύου παροχής (τύπος θορύβου3). Οι χρονικοί περίοδοι, που είναι μεγαλύτερες των 200ms, έχουν εκθετική κατανομή. [Hras04]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ

4

ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ PLC

4.1 Εισαγωγή

Ως αποτέλεσμα των τελευταίων εξελίξεων, το δίκτυο παροχής ηλεκτρικής ενέργειας εξελίσσεται από ένα αμιγές δίκτυο παροχής ηλεκτρικής ενέργειας σε ένα μέσο πολλαπλών λειτουργιών μεταφέροντας ενέργεια και τηλεπικοινωνιακά σήματα. [LangDo00].

Από τηλεπικοινωνιακή άποψη το δίκτυο παροχής αυτό διαφέρει σημαντικά ως προς την τοπολογία, τη δομή και τις φυσικές του ιδιότητες από τα συμβατικά μέσα (όπως είναι τα ομοαξονικά καλώδια, τα συνεστραμένους ζεύγους καλώδια και οι οπτικές ίνες). Συνεπώς τα συστήματα PLC έχουν να αντιμετωπίσουν δυσμενείς συνθήκες [BussWa98]. Όσον αφορά την προσομοίωση μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή που προσανατολίζεται στην κατάλληλη σχεδίαση του συστήματος, σημαντικό ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα μοντέλα που αφορούν τα χαρακτηριστικά μεταφοράς του δικτύου.

Αν και στη βιβλιογραφία υπάρχουν κάποια προτεινόμενα μοντέλα, η πρακτική τους αξία γενικά είναι περιορισμένη, διότι τα περισσότερα από αυτά παρουσιάζουν προσεγγίσεις από κάτω προς τα άνω (bottom-up approaches) περιγράφοντας τη συμπεριφορά του δικτύου βασισμένα σε ένα μεγάλο αριθμό καταναμημένων εξαρτημάτων. Συνήθως, οι μήτρες περιέχουν τις ιδιότητες αυτών των εξαρτημάτων, που άλλοτε βασίζονται σε διασπορά παραμέτρων [Thre91] ή στην εμπέδηση τεσσάρων πόλων και στις τιμές αποδοχής της [Barn98, Dalb97, Karl97]. Προφανώς,

απαιτείται λεπτομερής γνώση όλων των στοιχείων ενός δικτύου (καλώδια, συνδέσεις, συνδεδεμένες στο δίκτυο συσκευές) για να δημιουργηθούν οι μήτρες. Στην πράξη, όμως, είναι αδύνατο να καθοριστούν οι απαραίτητες παράμετροι με μεγάλη ακρίβεια.

4.2 Μοντέλα περιγραφής

Όπως αναφέρθηκε λοιπόν, η ανάπτυξη των συστημάτων PLC για υπηρεσίες φωνής, δεδομένων και Internet απαιτεί τη δημιουργία μοντέλων περιγραφής των χαρακτηριστικών μεταφοράς του δικτύου, κατάλληλων για ανάλυση μέσω της προσομοίωσης. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τρία αναλυτικά μοντέλα περιγραφής της συνάρτησης μεταφοράς ενός καναλιού. Αυτή εξαρτάται από τα φυσικά χαρακτηριστικά του καναλιού, όπως το μήκος του, οι εξασθενήσεις και οι καθυστερήσεις που εισάγει, καθώς και από το πόσο έντονα εμφανίζεται σε αυτό το φαινόμενο της πολυδιάσπασης.

4.2.1 1^ο Μοντέλο περιγραφής

Στη μεθοδολογία που ακολουθεί υποτίθεται ότι το κανάλι επικοινωνίας (communication channel) δύο σημείων είναι ένα μαύρο κουτί (black box) και τα χαρακτηριστικά μεταφοράς του περιγράφονται από μια συνάρτηση απόκρισης συχνότητας $H(f)$ στο φάσμα συχνοτήτων από 500KHz έως 100MHz με χρήση ενός μικρού αριθμού κατάλληλων παραμέτρων. Η δομή του μοντέλου βασίζεται στις θεμελιώδεις αρχές του ηλεκτρομαγνητισμού που αναλύονται χρησιμοποιώντας ένα μεγάλο αριθμό πειραμάτων. Όμως, οι κατάλληλες παράμετροι δεν απορρέουν από τις ιδιότητες των εξαρτημάτων, αλλά από τις μετρήσεις στο κανάλι. Κάποιες βασικές ιδέες προς αυτήν την κατεύθυνση δημοσιεύτηκαν στο [ZimmDo99] ενώ στο [Phil99] παρουσιάζεται ένα απλούστερο αλλά λιγότερο ακριβές μοντέλο.

Μόνο στην περίπτωση των απλών τοπολογιών, όπως αυτή της μιας διακλάδωσης, μπορούν να αναγνωριστούν οι φυσικές αιτίες για τα παρατηρούμενα αποτελέσματα (απώλειες καλωδίου, ανάκλαση και παράγοντες μετάδοσης) σε αντίθεση με τις πραγματικές τοπολογίες δικτύου, που είναι πλέον περίπλοκες και

δυσκολότερη η αναγνώριση των φυσικών αιτιών. Το προτεινόμενο μοντέλο ωστόσο περιγράφει την απόκριση συχνότητας με ικανοποιητική ακρίβεια. Οι παράμετροι όμως δεν μπορούν να προκύψουν κατευθείαν από τις φυσικές ιδιότητες του δικτύου.

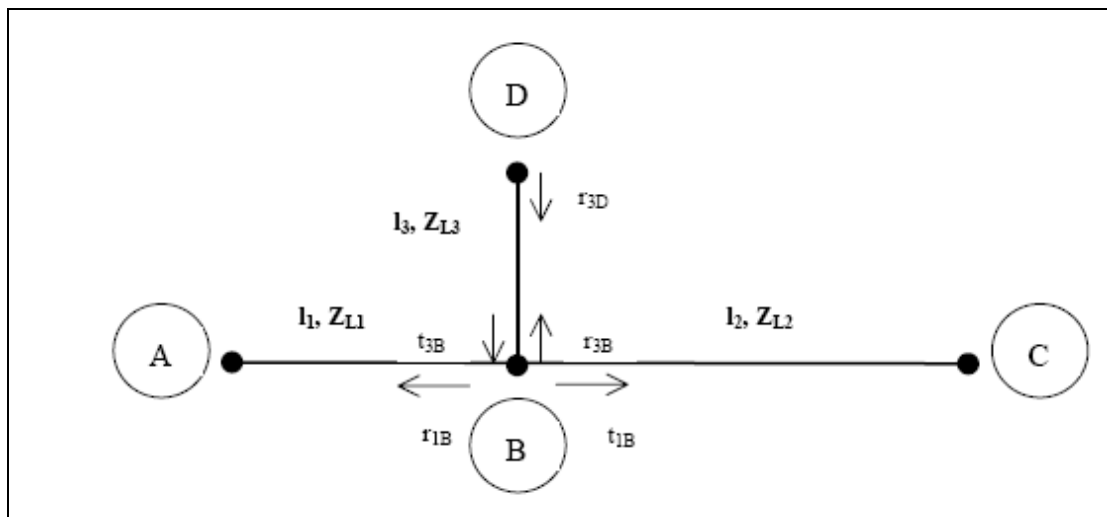
4.2.1.1 Τοπολογία του βασικού δικτύου

Αντίθετα από το τηλεφωνικό δίκτυο, το δίκτυο γραμμών ηλεκτρικής ισχύος δεν περιλαμβάνει συνδέσεις από σημείο σε σημείο μεταξύ υποσταθμών και χρηστών αλλά χρησιμοποιεί ένα κοινό μεριζόμενο μέσο σύνδεσης σε τοπολογία διαύλου. Μια τυπική ζεύξη πρόσβασης μεταξύ ενός υποσταθμού και ενός χρήστη αποτελείται από τη γραμμή διανομής, ή μια σειρά από γραμμές διανομής, και την εσωτερική του κτιρίου καλωδίωση ή καλωδίωση έως το μετασχηματιστή με χαρακτηριστικές αντιστάσεις Z_L . Για την περίπτωση του δικτύου X/T το καλώδιο που φθάνει στο σπίτι τερματίζει σε ένα κουτί σύνδεσης (connection box) και από εκεί ακολουθείται η εσωτερική διακλάδωση στο σπίτι που αντιπροσωπεύεται από μία σύνθετη αντίσταση τερματισμού $Z_H(f)$. Η εμπέδηση του σημείου σύνδεσης του σπιτιού είναι συνήθως χαμηλή λόγω των πολυάριθμων εσωτερικών διακλαδώσεων των καλωδίων. Επιπλέον, η $Z_H(f)$ εμφανίζεται σχεδόν σταθερή, καθώς το σημείο χαμηλής εμπέδησης κρύβει αποκλίσεις στην αντίσταση στο εσωτερικό δίκτυο. Πολυάριθμες ανακλάσεις προκαλούνται από τις συνδέσεις των οικιακών καλωδίων και των οικιακών κουτιών σύνδεσης και από τις συνδέσεις καλωδίων με διαφορετικές χαρακτηριστικές αντιστάσεις.

4.2.1.2 Πολυδιαδρομική διάδοση σήματος

Η διάδοση του σήματος δε πραγματοποιείται μόνο κατά μήκος μιας απευθείας διαδρομής μεταξύ πομπού και δέκτη (direct line-of-sight path), αλλά και με πρόσθετες διαδόσεις, αντηχήσεις (echoes), που συμβαίνουν προς τα γειτονικά μονοπάτια δημιουργώντας πολυδιαδρομική (πολύοδη) διάδοση του σήματος (multipath propagation), με αποτέλεσμα να προκύπτει ένα πολυδιαδρομικό σενάριο με διαλείψεις στα κανάλια επιλεκτικές ως προς τη συχνότητα.

Η πολυδιαδρομική διάδοση σήματος μελετάται σε ένα απλό παράδειγμα που εύκολα μπορεί να αναλυθεί (Σχήμα 4.1). Η ζεύξη έχει ένα μόνο στέλεχος (branch) και αποτελείται από τα τμήματα (1), (2) και (3) με μήκη l_1 , l_2 και l_3 και αντιστάσεις Z_{L1} , Z_{L2} και Z_{L3} αντίστοιχα.



Σχήμα 4.1 Πολυδιαδρομική διάδοση σήματος σε καλώδιο με ένα στέλεχος

Για την απλοποίηση του παραδείγματος και θεωρώντας ότι το σημείο A αποτελεί την πηγή και το σημείο C τον προορισμό, τα σημεία A και C προσαρμοσμένα (matched), δηλαδή $Z_A = Z_{L1}$ και $Z_C = Z_{L2}$. Τα εναπομείναντα σημεία για ανάκλαση είναι τα σημεία B και D, με παράγοντες ανάκλασης r_{1B} , r_{3D} και r_{3B} και με παράγοντες διάδοσης τους t_{1B} και t_{3B} . Υπό αυτές τις υποθέσεις, είναι δυνατός ένας άπειρος αριθμός διαδρομών διάδοσης λόγω των πολλαπλών ανακλάσεων (για παράδειγμα $A \rightarrow B \rightarrow C$, $A \rightarrow B \rightarrow D \rightarrow B \rightarrow C$, $A \rightarrow B \rightarrow D \rightarrow B \rightarrow D \rightarrow B \rightarrow C$). Κάθε μονοπάτι i έχει ένα συντελεστή βάρους g_i , που αντιπροσωπεύει τα αποτελέσματα της ανάκλασης και μετάδοσης κατά μήκος του. Όλοι οι συντελεστές ανάκλασης και μετάδοσης είναι μικρότεροι ή ίσοι της μονάδας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η μετάδοση εμφανίζεται μόνο στις συνδέσεις (joints), όπου το φορτίο της παράλληλης σύνδεσης από δυο ή περισσότερα καλώδια οδηγεί σε μια εμπέδηση που είναι μικρότερη από τη χαρακτηριστική εμπέδηση του καλωδίου τροφοδοσίας. Για το λόγο αυτό, ο συντελεστής βάρους g_i είναι επίσης μικρότερος ή ίσος της μονάδας, δηλαδή

$$|g_i| \leq 1 \quad (4.1)$$

Όσο περισσότερες διαδρομές και ανακλάσεις γίνονται κατά μήκος ενός μονοπατιού τόσο μικρότερος είναι ο συντελεστής g_i . Επίσης, μεγαλύτερα σε μήκος μονοπάτια παρουσιάζουν μεγαλύτερη εξασθένηση, γεγονός που συμβάλλει στη λήψη χαμηλότερου σήματος στο σημείο λήψης. Με βάση αυτές τις παρατηρήσεις, είναι λογικό να προσεγγιστεί ο άπειρος αριθμός μονοπατιών από τα N επικρατέστερα μονοπάτια. Η μέση καθυστέρηση τ_i ενός μονοπατιού είναι

$$\tau_i = \frac{d_i \cdot \sqrt{\varepsilon_r}}{c_o} = \frac{d_i}{u_p} \quad (4.2)$$

Η καθυστέρηση αυτή μπορεί να υπολογιστεί αν είναι γνωστή η διηλεκτρική σταθερά ε_r του μονωτικού υλικού, η ταχύτητα του φωτός c_o , και τα μήκη d_i των καλωδίων. Οι απώλειες των καλωδίων που οφείλονται στην εξασθένηση $A(f, d)$ αυξάνουν με το μήκος και τη συχνότητα. Το συνολικό σήμα προκύπτει από την υπέρθεση των μεμονωμένων σημάτων από τα διάφορα μονοπάτια. Συνεπώς, η απόκριση συχνότητας από το A στο C μπορεί να εκφραστεί από τη σχέση

$$\underline{H}(f) = \sum_{i=1}^N g_i \cdot A(f, d_i) \cdot e^{-j2\pi f \tau_i} \quad (4.3)$$

Η διάδοση σήματος σε πλέον σύνθετα δίκτυα με περισσότερα στελέχη μπορεί να χωριστεί σε κατάλληλα μονοπάτια με παρόμοιο τρόπο.

4.2.1.3 Απώλειες καλωδίου

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, τα διαδιδόμενα σήματα υφίστανται εξασθένηση που αυξάνεται με το μήκος του μονοπατιού και τη συχνότητα. Σε αυτήν την ενότητα, παρουσιάζεται ένα μαθηματικό μοντέλο με αναφορά στις απώλειες.

Η απόκριση συχνότητας $\underline{H}(f)$ μιας προσαρμοσμένης γραμμής μετάδοσης μήκους l μπορεί να εκφραστεί συναρτήση της μιγαδικής σταθεράς διάδοσης μέσω της σχέσης

$$H(f) = \frac{\underline{U}(x=l)}{\underline{U}(x=0)} = e^{-\underline{\gamma} \cdot l} = e^{-\alpha(f) \cdot t} \cdot e^{-j \cdot \beta(f) \cdot t} \quad (4.4)$$

όπου

$$\underline{\gamma} = \sqrt{(R' + j2\pi fL') \cdot (G' + j2\pi fC')} = \alpha(f) + j\beta(f) \quad (4.5)$$

και R', G', C', L' οι ειδικές παράμετροι του καλωδίου και $\underline{U}(x)$ το κύμα της τάσης σε απόσταση x από τον προορισμό.

Οι παράμετροι του καλωδίου C' και L' μπορούν προσεγγιστικά να υπολογιστούν από τις γεωμετρικές διαστάσεις και τις ιδιότητες του υλικού. Στο φάσμα συχνοτήτων μέχρι μερικά MHz, το επιδερμικό φαινόμενο (skin-effect) είναι το κυρίαρχο φαινόμενο στην αντίσταση ανά μονάδα μήκους R' με αποτέλεσμα η αντίσταση ανά μονάδα μήκους να είναι ανάλογη του \sqrt{f} . Η αγωγιμότητα ανά μονάδα μήκους G' εξαρτάται κυρίως από τον παράγοντα απωλειών του διηλεκτρικού υλικού και επομένως είναι ανάλογη της συχνότητας. Επιλέγοντας κατάλληλο υλικό κατασκευής για τη γραμμή ενέργειας μπορούμε να επιτύχουμε $R' \ll \omega \cdot L'$ και $G' \ll \omega \cdot C'$ στην επιθυμητή κλίμακα συχνοτήτων. Έτσι, τα καλώδια μπορούν να θεωρηθούν ότι εμφανίζουν ασθενείς απώλειες με πραγματική τιμή χαρακτηριστικής εμπέδησης Z_L . Έτσι ο σύνθετος συντελεστής διάδοσης γ μπορεί να προσεγγιστεί από την ακόλουθη απλοποιημένη σχέση

$$\underline{\gamma} = \underbrace{k_1 \cdot \sqrt{f} + k_2 \cdot f}_{\alpha(f)} + j \cdot \underbrace{k_3 \cdot f}_{\beta(f)} \quad (4.6)$$

όπου οι παράμετροι k_1, k_2, k_3 εξαρτώνται από το υλικό κατασκευής και τις γεωμετρικές παραμέτρους της γραμμής μεταφοράς. Το πραγματικό μέρος της μιγεδικής σταθεράς διάδοσης, ο παράγοντας εξασθένησης α αυξάνεται με τη συχνότητα. Ωστόσο για ένα συγκεκριμένο καλώδιο, η ακριβής εξάρτηση του α από τη συχνότητα f μπορεί να είναι ανάλογη του \sqrt{f} ή ανάλογη του f ή και συνδυασμός αυτών.

Κατόπιν εκτεταμένων μετρήσεων της απόκρισης συχνότητας, ένας καλός προσεγγιστικός τύπος για τον παράγοντα εξασθένησης περιέχεται από τη σχέση

$$\alpha = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot f^k \quad (4.7)$$

η οποία χαρακτηρίζει την εξασθένηση τυπικών ζεύξεων με καλώδια μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας με μόνο τρεις παραμέτρους και μπορεί εύκολα να προκύψει από τις μετρούμενες συναρτήσεις μεταφοράς. Από τις σχέσεις (4.5) και (4.6) η

εξασθένηση ενός καλωδίου μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας δίνεται από τη σχέση

$$A(f, d) = e^{-\alpha(f) \cdot d} = e^{-\left(\alpha_o + \alpha_1 \cdot f^k\right) \cdot d} \quad (4.8)$$

Αν και η προηγούμενη σχέση απορρέει από φυσικά φαινόμενα, οι παράμετροι α_o , α_1 και k δεν μπορούν εύκολα να βρεθούν από τις παραμέτρους του καλωδίου. Αυτό παρόλα αυτά δεν περιορίζει τη χρήση του μοντέλου στην πράξη, αν και είναι σχεδόν απίθανο να βρεθούν όλες οι απαραίτητες παράμετροι για το καλώδιο και για τα γεωμετρικά δεδομένα των πραγματικών δικτύων. Τυπικά, οι παράμετροι α_o , α_1 και k προκύπτουν από τις μετρούμενες συναρτήσεις μεταφοράς.

4.2.1.4 Γενικευμένο μοντέλο πολυδιαδρομικής διάδοσης σήματος της συνάρτησης μεταφοράς

Συνδυάζοντας το φαινόμενο της πολυδιαδρομικής μετάδοσης που περιγράφεται από την εξίσωση (4.3) και το φαινόμενο της εξασθένησης στο εσωτερικό των καλωδίων ανάλογα με το μήκος και τη συχνότητα της σχέσης (4.8), η συνάρτηση μεταφοράς γράφεται υπό τη μορφή

$$\underline{H}(f) = \sum_{i=1}^N \left\{ |g_i(f)| \cdot e^{\phi_{g_i}(f)} \right\} \cdot \left\{ e^{-\left(\alpha_o + \alpha_1 f^k\right) d_i} \right\} \cdot \left\{ e^{-j2\pi f \tau_i} \right\} \quad (4.9)$$

Η εξίσωση (4.9) περιγράφει τη διάδοση σήματος κατά μήκος ενός μονοπατιού λαμβάνοντας υπόψη την καθυστέρηση και τη βαθυπερατή συμπεριφορά (π.χ. η εξασθένηση αυξάνει είτε με το μήκος είτε με τη συχνότητα). Ως γνωστό, ο συντελεστής βάρους g_i (weighting factor) χαρακτηρίζει το πλήθος ανακλάσεων και μεταδόσεων κατά μήκος ενός δρόμου διάδοσης. Συνήθως, οι τιμές του συντελεστή g_i είναι μιγαδικές και επιλεκτικές ως προς τη συχνότητα. Όσο περισσότερες ανακλάσεις συμβαίνουν κατά μήκος ενός συγκεκριμένου δρόμου διάδοσης, τόσο μικρότερος συντελεστής βαρύτητας του αποδίδεται. Ο δεύτερος παράγοντας που εκφράζει την εξασθένηση (attenuation factor) χαρακτηρίζει το ποσοστό των απωλειών διαμέσου του καλωδίου και εξαρτάται από το μήκος του και από τη χρησιμοποιούμενη συχνότητα. Τέλος, ο τρίτος παράγοντας χαρακτηρίζει τις

καθυστερήσεις που εισάγονται από τη γραμμή κατά τη διάδοση. Τα μέρη του σήματος που έρχονται από N διαφορετικά μονοπάτια υπερτίθενται στο σημείο λήψης.

4.2.1.5 Απλοποιημένο μοντέλο

Πολυάριθμες μετρήσεις απέδειξαν ότι είναι δυνατή μια περαιτέρω απλοποίηση των συντελεστών βάρους g_i , θεωρώντας ότι είναι ανεξάρτητοι από τη συχνότητα. Σε πολλές περιπτώσεις πρακτικού ενδιαφέροντος, ο συντελεστής g_i μπορεί να εκφραστεί ως πραγματικός αριθμός. Από την πλευρά της πολυδιαδρομικής διάδοσης, οι συντελεστές g_i περιγράφουν τη βαρύτητα της διαδρομής i . Έτσι, μια απλουστευμένη έκφραση της συνάρτησης μεταφοράς μιας γραμμής ενέργειας είναι η ακόλουθη

$$\underline{H}(f) = \sum_{i=1}^N \{g_i\} \cdot \left\{ e^{-\left(\alpha_0 + \alpha_1 f^k\right) d_i} \right\} \cdot \left\{ e^{-j2\pi f \frac{d_i}{u_p}} \right\} \quad (4.10)$$

Η ακρίβεια της παραπάνω εξίσωσης έχει επιβεβαιωθεί και στην πράξη. Στον Πίνακα 4.1 παρουσιάζονται οι παράμετροι της 4.10

i :	αύξων αριθμός της διαδρομής (N το συνολικό πλήθος). Η διαδρομή με τη μικρότερη καθυστέρηση θεωρείται ως $i=1$
α_0, α_1 :	παράμετροι εξασθένησης
k :	εκθέτης του παράγοντα εξασθένησης (λαμβάνει τιμές μεταξύ 0.2 και 1)
g_i :	παράγοντας βάρους βάσει των ανακλάσεων ενός μονοπατιού
d_i :	μήκος της διαδρομής
τ_i :	καθυστερήση που εισάγει η διαδρομή
u_p :	ταχύτητα διάδοσης εντός της διαδρομής

Πίνακας 4.1 Παράμετροι που χαρακτηρίζουν τη γραμμή ενέργειας ως διάυλο μετάδοσης σήματος

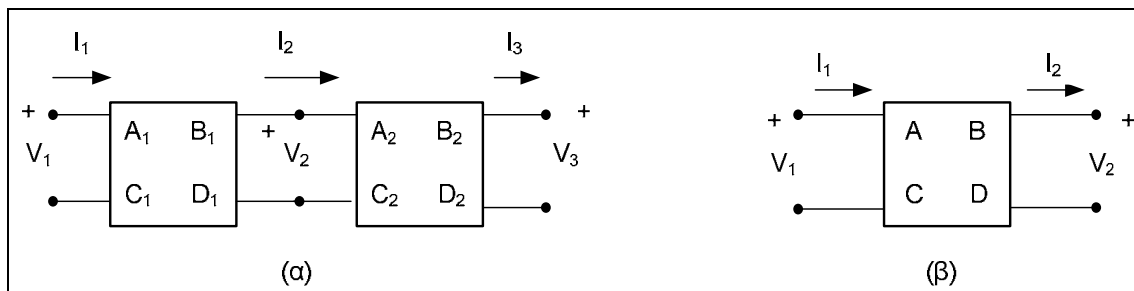
Η εξίσωση (4.10) αντιπροσωπεύει ένα παραμετρικό μοντέλο που περιγράφει τη σύνθετη απόκριση συχνότητας ενός τυπικού δίαυλου γραμμής μεταφοράς ρεύματος, καλύπτοντας όλα τα βασικά φαινόμενα μετάδοσης στο φάσμα συχνοτήτων από 500KHz έως 100MHz κάνοντας χρήση ενός μικρού πλήθους παραμέτρων. Το σύνολο αυτό των παραμέτρων μπορεί να προκύψει από τις μετρούμενες αποκρίσεις συχνοτήτων. Επιπλέον, ο αριθμός N των διαδρομών, επιτρέπει τον έλεγχο της ακρίβειας του μοντέλου, που είναι εξαιρετικά σημαντική για τον καθορισμό της ανάλυσης επίδοσης συστημάτων PLC. [ZimmDo02]

4.2.2 Μέθοδοι ανάλυσης μικροκυματικών δικτύων

Κατά τη σχεδίαση και ανάπτυξη μικροκυματικών κυκλωμάτων χρησιμοποιούνται διάφορα μικροκυματικά στοιχεία που συνδέονται κατάλληλα μεταξύ τους. Στα κλασσικά κυκλώματα των χαμηλών συχνοτήτων τα πλέον συνηθισμένα στοιχεία είναι η αντίσταση (R), η αυτεπαγωγή (L) και η χωρητικότητα (C). Λόγω του μεγάλου μήκους κύματος της ακτινοβολίας, τα στοιχεία αυτά συμπεριφέρονται ως συγκεντρωμένα στοιχεία. Άρα η κατανάλωση της ισχύος και η αποθήκευση της ενέργειας στο μαγνητικό και ηλεκτρικό πεδίο γίνεται σε συγκεντρωμένα στοιχεία. Στα μικροκυματικά κυκλώματα η αποθήκευση της ενέργειας αλλά και η κατανάλωση της ισχύος δεν μπορεί να θεωρηθεί ότι γίνεται σημειακά στο χώρο αλλά είναι απαραίτητο να ληφθούν υπόψη οι καθυστερήσεις που συμβαίνουν κατά τη διάδοση των κυμάτων. Για το λόγο αυτό η ανάλυση των μικροκυματικών κυκλωμάτων δεν μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας μόνο συγκεντρωμένα στοιχεία. Είναι όμως δυνατό τις περισσότερες φορές, τα μικροκυματικά κυκλώματα να αναλυθούν σε βασικά στοιχεία των οποίων η συμπεριφορά είναι γνωστή. Συνήθως, η ανάλυση των μικροκυματικών κυκλωμάτων ανάγεται σε ισοδύναμα κυκλώματα που αποτελούνται από γραμμές μεταφοράς και συγκεντρωμένα στοιχεία. Τα συγκεντρωμένα στοιχεία αντιπροσωπεύουν τις ασυνέχειες σε γραμμές μεταφοράς. Οι παραμετρικές τιμές αυτών των ισοδυνάμων συγκεντρωμένων στοιχείων υπολογίζονται είτε με αναλυτικές ή αριθμητικές μεθόδους είτε μετρώνται με πειραματικές διατάξεις. Εκτός από την περίπτωση ασυνεχειών σε γραμμές μεταφοράς, στην πράξη εμφανίζονται στοιχεία που

κατασκευάζονται από φερρίτες ή ενεργά στοιχεία όπως π.χ. τρανζίστορ, λυχνίες κ.λ.π. Η παράγραφος αυτή διαπραγματεύεται μόνο παθητικά στοιχεία.

Συχνά, μικροκυματικά δίθυρα ή μονόθυρα τοποθετούνται σε σύνδεση σε σειρά δηλαδή προκύπτει η σύνδεση του Σχήματος 4.2. Στην κλασική θεωρία των ηλεκτρικών δικτύων, η ανάλυση συνδέσεων του τύπου αυτού γίνεται χρησιμοποιώντας τις μήτρες μεταφοράς που ονομάζονται και μήτρες ABCD. Ο ορισμός των μητρών μεταφοράς δίνεται μέσω της σχέσης



Σχήμα 4.2 Σύνδεση σε διαδοχή διθύρων

$$\begin{pmatrix} V_1 \\ I_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} V_2 \\ I_2 \end{pmatrix} \quad (4.11)$$

όπου (V_1, V_2) και (I_1, I_2) είναι οι μη κανονικοποιημένες συνολικές τιμές των τάσεων και εντάσεων, αντίστοιχα, όπως ορίζονται στο Σχήμα 4.2β. Φαίνεται ότι η φορά του συνολικού ρεύματος I_2 είναι αντίθετη απ'αυτή που συνηθίζεται στη θεωρία δικτύων.

Για τη σύνδεση σε διαδοχή, όπως αυτή του Σχήματος 4.2α, ισχύουν οι εξισώσεις

$$\begin{pmatrix} V_1 \\ I_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} V_2 \\ I_2 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} V_2 \\ I_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} V_3 \\ I_3 \end{pmatrix}$$

και επομένως

$$\begin{pmatrix} V_1 \\ I_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} V_3 \\ I_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_1 \cdot A_2 + B_1 \cdot C_2 & A_1 \cdot B_2 + B_1 \cdot D_2 \\ C_1 \cdot A_2 + D_1 \cdot C_2 & C_1 \cdot B_2 + D_1 \cdot D_2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} V_3 \\ I_3 \end{pmatrix} \quad (4.12)$$

Η συνολική μήτρα μεταφοράς προκύπτει από το γινόμενο των δύο μητρών

Επίσης, ισχύει η σχέση

$$\begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{12} & Z_{22} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} I_1 \\ -I_2 \end{pmatrix} \quad (4.13)$$

για αμφίδρομα δίθυρα. Συνδυάζοντας τις εξισώσεις (4.11) και (4.13) προκύπτει

$$A = \frac{Z_{11}}{Z_{12}} \quad (\alpha)$$

$$B = \frac{Z_{11} \cdot Z_{12} - Z_{12}^2}{Z_{12}} \quad (\beta)$$

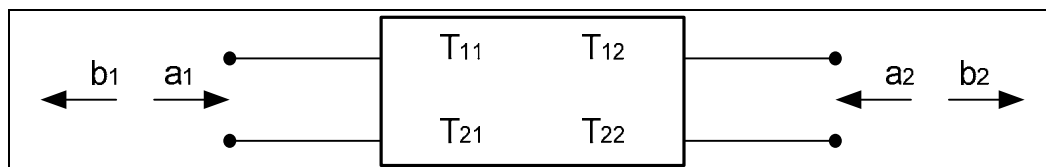
$$C = \frac{1}{Z_{12}} \quad (\gamma)$$

$$D = \frac{Z_{22}}{Z_{12}} \quad (\delta) \quad (4.14)$$

Από τις σχέσεις (α)-(δ) προκύπτει ότι για αμφίδρομα δίθυρα ισχύει η σχέση

$$A \cdot D - B \cdot C = 1 \quad (4.15)$$

Με ανάλογο τρόπο του ορισμού της μήτρας σκέδασης \bar{S} ορίζονται μήτρες μεταφοράς που συνδέουν τις κανονικοποιημένες κυματικές τάσεις. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται το παρακάτω Σχήμα



Σχήμα 4.3 Ορισμός των κυματικών μητρών μεταφοράς

Η κυματική μήτρα μεταφοράς T ορίζεται μέσω της σχέσης

$$\begin{pmatrix} a_1 \\ b_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} b_2 \\ a_2 \end{pmatrix} = \bar{T} \cdot \begin{pmatrix} b_2 \\ a_2 \end{pmatrix} \quad (4.16)$$

Αν υπάρχει σύνδεση σε διαδοχή δύο πολύθυρων, όπως αυτά του Σχήματος 4.2α, αποδεικνύεται εύκολα ότι ο κανόνας πολλαπλασιασμού των μητρών που δίνεται από την εξίσωση (4.64) ισχύει και για τις κυματικές μήτρες μεταφοράς \bar{T} .

Είναι γνωστό ότι οι κανονικοποιημένες κυματικές τάσεις a_1, a_2 και b_1, b_2 στο αριστερό και στο δεξί μέρος της εξίσωσης, αντίστοιχα, συνδέονται και μέσω της σχέσης

$$\begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix}$$

Επομένως, προκύπτουν οι παρακάτω σχέσεις που συνδέουν τα στοιχεία των μητρών σκέδασης \bar{S} και μεταφοράς \bar{T}

$$T_{11} = \frac{1}{S_{12}} \quad (\alpha)$$

$$T_{12} = -\frac{S_{22}}{S_{12}} \quad (\beta)$$

$$T_{21} = \frac{S_{11}}{S_{12}} \quad (\gamma)$$

$$T_{22} = \frac{S_{12}^2 - S_{11} \cdot S_{22}}{S_{12}} \quad (\delta) \quad (4.17)$$

Αποδεικνύεται εύκολα ότι ανάλογη σχέση με την εξίσωση (4.15) ισχύει και για την κυματική μήτρα μεταφοράς. Υπολογίζοντας την ορίζουσα της μήτρας \bar{T} για ένα αμφίδρομο δίθυρο προκύπτει το αποτέλεσμα

$$T_{11} \cdot T_{22} - T_{12} \cdot T_{21} = 1$$

Στην περίπτωση όπου είναι γνωστές οι παράμετροι A, B, C, D που συνδέουν τις μη κανονικοποιημένες συνολικές τάσεις και εντάσεις σε ένα δίθυρο (εξίσωση 4.63), μπορεί να προσδιοριστεί η μήτρα μεταφοράς \bar{T} που αφορά τις κυματικές κανονικοποιημένες τάσεις. Στην περίπτωση του διθύρου του Σχήματος 4.2 ισχύουν

$$V_1 = \sqrt{2} \cdot Z_0^{1/2} \cdot (a_1 + b_1)$$

$$V_2 = \sqrt{2} \cdot Z_0^{1/2} \cdot (a_2 + b_2)$$

$$I_1 = \sqrt{2} \cdot \frac{1}{Z_0^{1/2}} \cdot (a_1 - b_1)$$

$$I_2 = \sqrt{2} \cdot \frac{1}{Z_0^{1/2}} \cdot (-a_1 + b_2)$$

Αντικαθιστώντας τις παραπάνω εξισώσεις στην (4.11) προκύπτει

$$\bar{T} = \begin{pmatrix} (2 \cdot Z_0)^{1/2} & (2 \cdot Z_0)^{1/2} \\ \left(\frac{2}{Z_0}\right)^{1/2} & -(2 \cdot Z_0)^{1/2} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} (2 \cdot Z_0)^{1/2} & (2 \cdot Z_0)^{1/2} \\ \left(\frac{2}{Z_0}\right)^{1/2} & -\left(\frac{2}{Z_0}\right)^{1/2} \end{pmatrix}$$

ή

$$\bar{T} = \frac{1}{2} \cdot \begin{pmatrix} A + Z_0 \cdot C + \frac{B}{Z_0} + D & A + Z_0 \cdot C - \frac{B}{Z_0} - D \\ A - Z_0 \cdot C + \frac{B}{Z_0} - D & A - Z_0 \cdot C - \frac{B}{Z_0} + D \end{pmatrix} \quad (4.18)$$

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{T_{11} + T_{21} + T_{12} + T_{22}}{2} & Z_0 \cdot \frac{T_{11} + T_{21} - T_{12} - T_{22}}{2} \\ -\frac{T_{21} + T_{22} - T_{11} - T_{12}}{2} & -\frac{T_{21} + T_{12} - T_{11} - T_{22}}{2} \end{pmatrix} \quad (4.19)$$

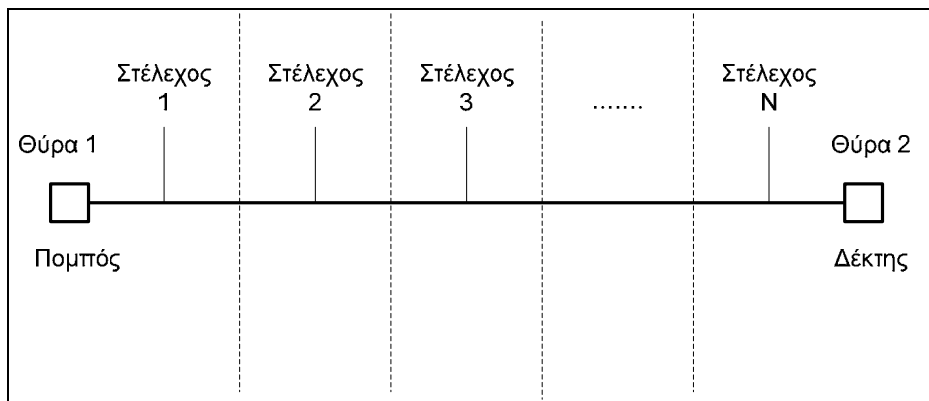
Στην ανάλυση μικροκυματικών κυκλωμάτων πολλές φορές χρησιμοποιούνται ισοδύναμα κυκλώματα που είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους. Για την ανάλυση των κυκλωμάτων αυτών χρειάζεται η γνώση των μητρών μεταφοράς και σκέδασης για τα βασικά στοιχεία που απαρτίζουν το κύκλωμα.

4.2.2.1 Μοντελοποίηση της συνάρτησης μεταφοράς

Η συνάρτηση μεταφοράς ενός PLC καναλιού μπορεί να προσδιοριστεί από τη σταθερά διάδοσης γ και τη χαρακτηριστική αντίσταση Z_0 . Πρέπει να κατανοηθούν οι διαφορετικοί μηχανισμοί λόγω των οποίων το σήμα PLC εξασθενεί. Υπάρχουν τρεις τύποι εξασθένησης κατά τη διάδοση ενός σήματος. Ο πρώτος είναι η εξασθένηση γραμμής που προκαλείται λόγω απωλειών θερμότητας και ακτινοβολίας κατά μήκος της γραμμής. Αυτή η εξασθένηση γραμμής εμφανίζεται πάντα και εξαρτάται από το μήκος της διαδρομής που ακολουθεί το κύμα και από τη συχνότητά του. Ο δεύτερος τύπος εξασθένησης προκαλείται από τις ανακλάσεις που προκύπτουν στα σημεία των ασυνεχειών της σύνθετης αντίστασης στο δίαυλο διάδοσης. Το ανακλώμενο κύμα που προκύπτει λόγω έλλειψης προσαρμογής παρεμβάλλει το αρχικό σήμα. Αυτού του είδους η παρεμβολή μπορεί να δρα θετικά ή αρνητικά, μεγαλώνοντας την παρεμβολή όταν επιδρά αρνητικά. Ο τελευταίος τύπος εξασθένησης δημιουργείται από τις καθυστερήσεις που εισάγονται από τη γραμμή κατά τη διάδοση του κύματος, προκαλώντας επιπλέον παρεμβολή και συμβάλλοντας αρνητικά στην συνολική εξασθένηση του σήματος.

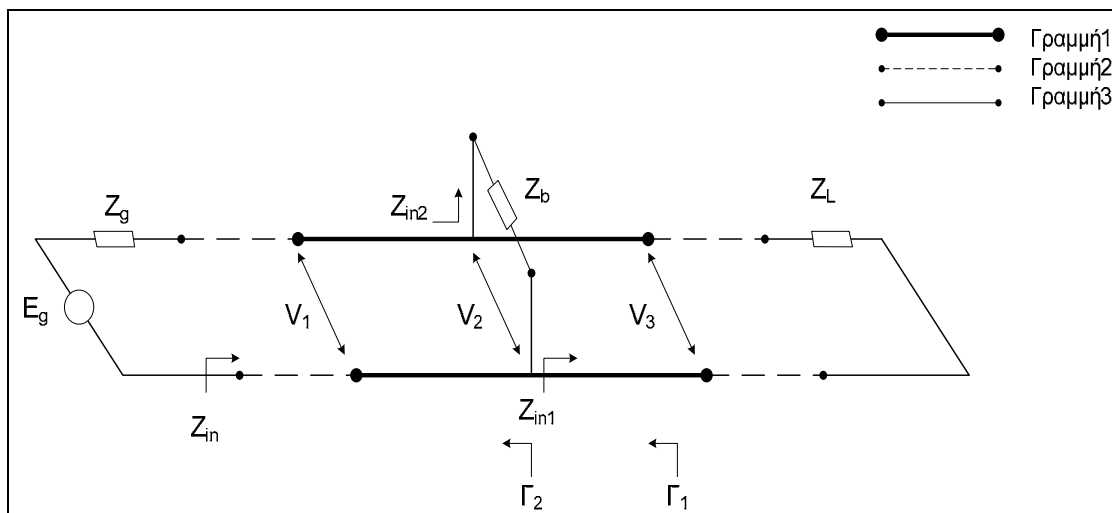
Επομένως, προτείνεται η προσέγγιση του μοντέλου σε επίπεδο συχνότητας επειδή είναι πολύ δύσκολο να χρησιμοποιηθεί προσέγγιση του μοντέλου στο πεδίο

του χρόνου για όλες τις ανακλάσεις και τις διαδρομές καθυστέρησης στο δίκτυο ηλεκτρικής ισχύος. Το δίκτυο PLC μπορεί να θεωρηθεί ως δίκτυο N-στελεχών, όπως φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 4.4. Λαμβάνοντας τη μήτρα μεταφοράς ενός τέτοιου δικτύου, το κανάλι είναι διαιρεμένο σε μια ομάδα από N διαδοχικά στελέχη δικτύων. Για κάθε στέλεχος δικτύου υπολογίζεται μια μήτρα μεταφοράς, ενώ η συνολική μήτρα μεταφοράς ολόκληρου του διαύλου μπορεί να καθοριστεί χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της αλυσιδωτής μήτρα μεταφοράς.



Σχήμα 4.4 Ένα απλουστευμένο κανάλι δικτύου μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος

Για να υπολογιστούν οι παράμετροι S μιας απλής διακλάδωσης δικτύου (single branch network), χρησιμοποιείται το παρακάτω μοντέλο γραμμής μεταφοράς.



Σχήμα 4.5 Λεπτομέρες διάγραμμα για το δίκτυο ενός στελέχους

Όπου l_1 είναι το μήκος της γραμμής από τέρμα αριστερά μέχρι το σημείο που συνδέεται το πρώτο στέλεχος, l_2 το μήκος του στελέχους και l_3 το μήκος της

γραμμής από το στέλεχος μέχρι το τέλος της γραμμής δεξιά. Επομένως, καθορίζονται οι αντιστάσεις εισόδου

$$Z_{in1} = Z_0 \cdot \frac{Z_L + Z_0 \cdot \tanh(\gamma \cdot l_3)}{Z_0 + Z_L \cdot \tanh(\gamma \cdot l_3)} \quad (\Omega) \quad (4.20)$$

$$Z_{in2} = Z_0 \cdot \frac{Z_b + Z_0 \cdot \tanh(\gamma \cdot l_2)}{Z_0 + Z_b \cdot \tanh(\gamma \cdot l_2)} \quad (\Omega) \quad (4.21)$$

$$Z_{in} = Z_0 \cdot \frac{(Z_{in1} // Z_{in2}) + Z_0 \cdot \tanh(\gamma \cdot l_1)}{Z_0 + (Z_{in1} // Z_{in2}) \cdot \tanh(\gamma \cdot l_1)} \quad (\Omega) \quad (4.22)$$

Z_g : Εσωτερική αντίσταση της πηγής (50Ω)

Z_L : Σύνθετη αντίσταση τερματισμού της γραμμής μεταφοράς (50Ω)

Z_b : Σύνθετη αντίσταση τερματισμού του στελέχους

Z_{in1} : Αντίσταση εισόδου στα δεξιά του στελέχους

Z_{in2} : Αντίσταση εισόδου του στελέχους

Z_{in} : Αντίσταση εισόδου στη Γραμμή2 της τοπολογίας του δικτύου

Γ_1 : Συντελεστής ανάκλασης από το τέλος του μονοπατιού

Γ_2 : Συντελεστής ανάκλασης από το σημείο διακλάδωσης

Γραμμή1: Η διαδρομή της γραμμής ηλεκτρικής ισχύος με παραμέτρους (Z_0, γ)

Γραμμή2: Η γραμμή μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος (στέλεχος) με παραμέτρους (Z'_0, γ')

Γραμμή3: Η γραμμή μεταφοράς με χαρακτηριστική αντίσταση 50Ω

$$\Gamma_1 = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (4.23)$$

$$\Gamma_2 = \frac{(Z_{in1} // Z_{in2}) - Z_0}{(Z_{in1} // Z_{in2}) + Z_0} \quad (4.24)$$

Σύμφωνα με [Gonz97], τα S_{11} και S_{21} της μήτρας διασποράς του δικτύου δίνονται από τις σχέσεις

$$S_{11} = \frac{Z_{in} - 50}{Z_{in} + 50} \quad (4.25)$$

$$S_{21} = 2 \cdot \frac{V_3}{E_g} \quad (4.26)$$

Επειδή δεν είναι εύκολος ο υπολογισμός της αναλογίας του E_g και V_3 στην σχέση (4.26) το S_{21} μπορεί να υπολογιστεί έμμεσα από τη σχέση

$$S_{21} = 2 \cdot \frac{V_3}{V_2} \cdot \frac{V_2}{V_1} \cdot \frac{V_1}{E_g} \quad (4.27)$$

όπου

$$\frac{V_3}{V_2} = \frac{(1 + \Gamma_1) \cdot e^{-\gamma \cdot l_3}}{1 + \Gamma_1 \cdot e^{-\gamma \cdot l_3}} \quad (4.28)$$

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{(1 + \Gamma_2) \cdot e^{-\gamma \cdot l_1}}{1 + \Gamma_2 \cdot e^{-\gamma \cdot l_1}} \quad (4.29)$$

$$\frac{V_1}{E_g} = \frac{Z_{in}}{Z_{in} + Z_g} \quad (4.30)$$

Παρόμοια μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να καθορίσει τα S_{12} και S_{22} , με απλή εναλλαγή της θέσης του φορτίου με την πηγή.

Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας την μικροκυματική θεωρία, υπάρχουν δύο μέθοδοι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να καθορίσουν τη μήτρα μεταφοράς που χαρακτηρίζει περισσότερες των δύο διαδοχικές διακλαδώσεις. Η πρώτη μέθοδος συνίσταται στη χρήση της αλυσιδωτής μήτρας μεταφοράς (ή μήτρας T) και η δεύτερη στη χρήση της γραφικής παράστασης ροής σήματος. Παρουσιάζεται η πρώτη μέθοδος, η οποία αποτελεί μια πρόσφορη και αξιόπιστη μέθοδο όσον αφορά ποσοτικούς υπολογισμούς

Η συνολική μήτρα T από την είσοδο στην έξοδο του δικτύου που εμφανίζει και διακλαδώσεις προκύπτει λαμβάνοντας υπόψη από τις επιμέρους μήτρες των διαδοχικών τμημάτων του δικτύου. Η σχέση μεταξύ της μήτρας-S και της μήτρας-T είναι [Gonz97]

$$[T] = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{S_{22}}{S_{21}} \\ \frac{S_{11}}{S_{21}} & S_{12} - \frac{S_{11} \cdot S_{22}}{S_{21}} \end{bmatrix} \quad (4.31)$$

Εξάλλου, η συνολική μήτρα T για N διακλαδώσεις του δικτύου σε διαδοχή είναι

$$[T] = \prod_{k=1}^N [T_k] \quad (4.32)$$

όπου T_k είναι η μήτρα T της κ διακλάδωσης του δικτύου. Τέλος, η συνολική μήτρα S από την είσοδο στην έξοδο του δικτύου μπορεί να προκύπτει από τη σχέση

$$[S] = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{T_{21}}{T_{11}} & T_{22} - \frac{T_{21} \cdot T_{12}}{T_{11}} \\ \frac{1}{T_{11}} & -\frac{T_{12}}{T_{11}} \end{bmatrix} \quad (4.33)$$

Το στοιχείο S_{21} της (4.85) αποτελεί την υπό προσδιορισμό συνάρτηση μεταφοράς ενός δικτύου με κ διακλαδώσεις. [Ouz94, MengCh04]

4.3 Δίκτυα X/T και M/T

Οδηγούμενη από την απελευθέρωση της αγοράς των τηλεπικοινωνιών και από τη διαθεσιμότητα ικανών και αξιόπιστων μεθόδων διαμόρφωσης, η επικοινωνία μέσω γραμμών ηλεκτρικής ισχύος γίνεται μια όλο και περισσότερο δημοφιλής εναλλακτική λύση. Μέχρι τώρα οι περισσότερες από τις μελέτες εστίασαν στο δίκτυο X/T ως λύση για πρόσβαση τελευταίου μιλίου.

Στη συνέχεια, εξετάζονται χαρακτηριστικά μετάδοσης των καλωδίων μέσης και χαμηλής τάσης που εμφανίζονται να είναι κατάλληλα για την ευρυζωνική επικοινωνία. Ο χαρακτηρισμός των γραμμών X/T και Y/T ως τηλεπικοινωνιακών διαύλων είναι ένας από τους σημαντικότερους στόχους. Πρέπει να ληφθούν υπόψη η τοπολογία του δικτύου, οι διαφορετικοί τύποι καλωδίων και τα βασικά χαρακτηριστικά τους. Αξίζει να σημειωθεί ότι, σε αντίθεση με το δίκτυο X/T στο δίκτυο M/T οι διάφοροι τύποι καλωδίων καθώς επίσης και οι τοπολογίες είναι καταγραμμένες από τις επιχειρήσεις ηλεκτρισμού, γεγονός που αποτελεί πλεονέκτημα για τη μελέτη.

4.3.1 Δίκτυο X/T

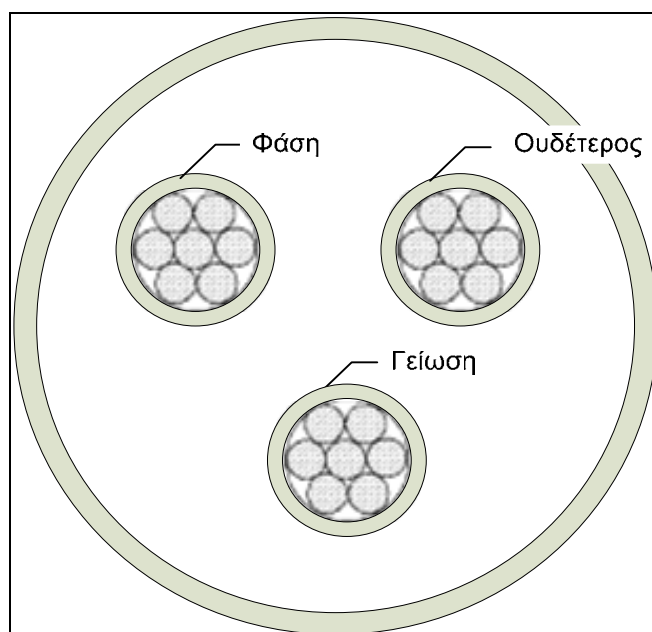
Αντίθετα από τα καλώδια που χρησιμοποιούνται ως μέσα επικοινωνίας όπως είναι τα καλώδια UTP και τα ομοαξονικά καλώδια, τα καλώδια ηλεκτρικής ισχύος του δικτύου X/T εμφανίζουν ένα εξαιρετικά δυσμενές περιβάλλον για τα υψηλής συχνότητας τηλεπικοινωνιακά σήματα. Τα τρία κρίσιμα χαρακτηριστικά του διαύλου

X/T είναι ο θόρυβος, η σύνθετη αντίσταση και η εξασθένηση που είναι απρόβλεπτες και μεταβαλλόμενες ως προς το χρόνο, τη συχνότητα και τη θέση. Προκειμένου να αντιμετωπιστούν αυτές οι δυσκολίες, έχουν γίνει πολλές προσπάθειες για το χαρακτηρισμό και την αξιοποίηση του διαύλου που αποτελούν τα καλώδια X/T.

4.3.1.1 Ανάλυση γραμμής μεταφοράς των καλωδίων ηλεκτρικής ισχύος

Σύμφωνα με την ηλεκτρομαγνητική θεωρία για να επιτευχθεί αξιόπιστη μετάδοση ισχύος και πληροφοριών, το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο της πηγής πρέπει να κυματοδηγηθεί. Όταν τα καλώδια ηλεκτρικής ισχύος χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση υψίσυχων τηλεπικοινωνιακών σημάτων μπορούν να θεωρηθούν ως γραμμές μετάδοσης που κυματοδηγούν τα εγκάρσια ηλεκτρομαγνητικά κύματα (TEM).

Κάθε καλώδιο θεωρείται ως απλό μονοφασικό καλώδιο για καλωδίωση στο σπίτι, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.6. Τα καλώδια αποτελούνται από συννεστραμένους αγωγούς χαλκού με μόνωση PVC. Τα τρία καλώδια (φάσης, ουδέτερος και γείωση) είναι συνήθως εγκιβωτισμένα στο εσωτερικό ενός μεταλλικού ή πλαστικού περιβλήματος που βρίσκεται μέσα σε τσιμεντένιο τοίχο.

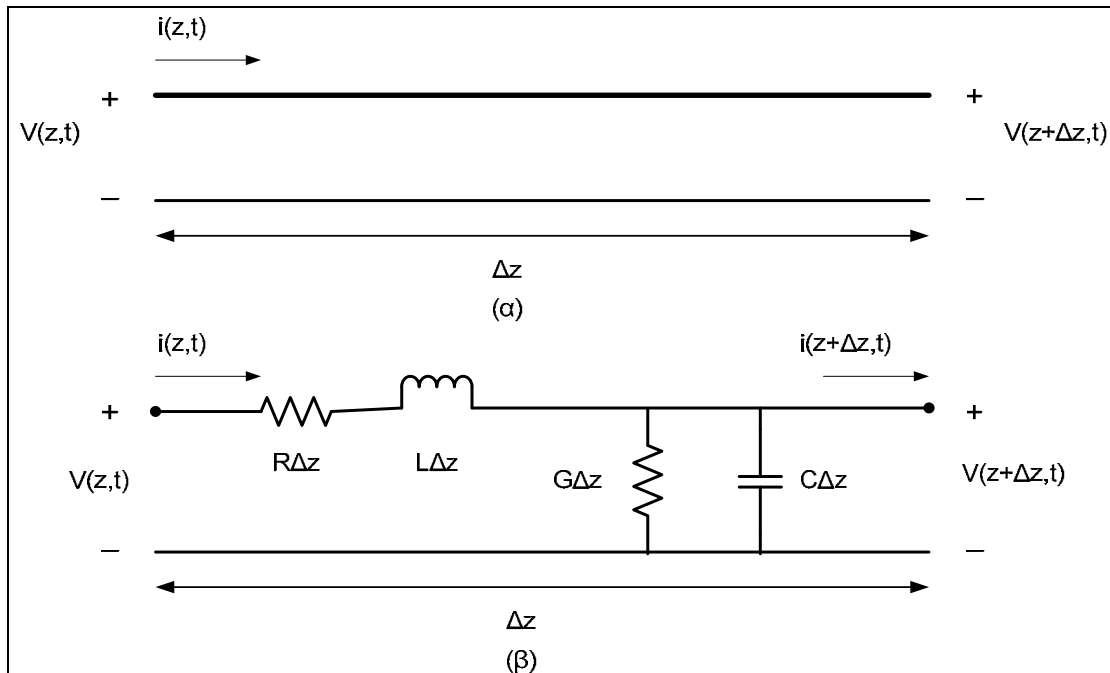


Σχήμα 4.6 Τομή ενός αγωγού ηλεκτρικής ισχύος

Κανονικά, ο ουδέτερος αγωγός και ο αγωγός φάσης χρησιμοποιούνται ως διάυλος μετάδοσης PLC, που μπορεί να χαρακτηριστεί ως γραμμή μεταφοράς δύο αγωγών, δηλαδή αποτελεί ζεύγος παραλλήλων αγωγών σε σταθερή απόσταση μεταξύ τους. Στην πραγματική εγκατάσταση, τα καλώδια ηλεκτρικής ισχύος τραβιούνται απλά μέσα στο περίβλημα και η απόσταση μεταξύ τους δεν είναι σταθερή. Όμως, το περίβλημα έχει μικρή διατομή και αυτό περιορίζει την μεταβολή του διαχωρισμού μεταξύ των καλωδίων. Ως εκ τούτου, η υπόθεση του σταθερού διαχωρισμού είναι αποδεκτή στην περίπτωση αυτή.

Βάσει των προηγούμενων, τα ανά ζεύγος καλώδια ισχύος θεωρούνται ως διανεμημένο δίκτυο παραμέτρου, όπου οι τάσεις και τα ρεύματα μπορούν να ποικίλουν στο μέγεθος και τη φάση πέρα από το μήκος της. Ως εκ τούτου, μπορεί να περιγραφεί από τις παραμέτρους κυκλώματος που κατανομούνται κατά μήκος.

Στο Σχήμα 4.7, τα μεγέθη $u(z,t)$ και $u(z + \Delta z,t)$ δηλώνουν την τάση στη θέση z και $z + \Delta z$, αντίστοιχα, ενώ τα μεγέθη $i(z,t)$ και $i(z + \Delta z,t)$ την ένταση του ρεύματος στα σημεία z και $z + \Delta z$, αντίστοιχα. Τα μεγέθη R , L , G και C δηλώνουν την αντίσταση ανά μονάδα μήκους και για τους δύο αγωγούς (σε Ω/m), την επαγωγή ανά μονάδα μήκους (σε H/m), την αγωγιμότητα ανά μονάδα μήκους (σε S/m) και τη χωρητικότητα ανά μονάδα μήκους (σε F/m), αντίστοιχα.



Σχήμα 4.7 (α) Ορισμοί τάσης-ρεύματος (β) Ισοδύναμο κύκλωμα γραμμής μεταφοράς δύο καλωδίων

Σύμφωνα με το κύκλωμα του Σχήματος 4.7β, η σταθερά διάδοσης γ και η χαρακτηριστική αντίσταση μπορούν να γραφούν σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις

$$\gamma(\omega) = \alpha(\omega) + j\beta(\omega) = \sqrt{(R + j\omega C) \cdot (G + j\omega L)} \quad (4.34)$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (4.35)$$

όπου ω είναι η γωνιακή συχνότητα. Το πραγματικό μέρος α και το φανταστικό μέρος β της μιγαδικής σταθεράς διάδοσης γ είναι ο συντελεστής εξασθένησης (σε Np/m) και η σταθερά διάδοσης της φάσης (σε rad/m) αντίστοιχα. Σημειώνεται ότι τόσο η γ όσο και η Z_0 αποτελούν χαρακτηριστικές παραμέτρους μιας γραμμής μεταφοράς ανεξάρτητα από το μήκος της, δηλαδή οι παράμετροι αυτές εξαρτώνται από τα μεγέθη R, L, C, G και ω αλλά όχι από το μήκος της γραμμής.

4.3.1.2 Καθορισμός των παραμέτρων του μοντέλου

Προκειμένου να καθοριστούν οι παράμετροι γ και Z_0 , πρέπει να καθοριστούν οι τέσσερις παράμετροι των γραμμών R, L, C και G .

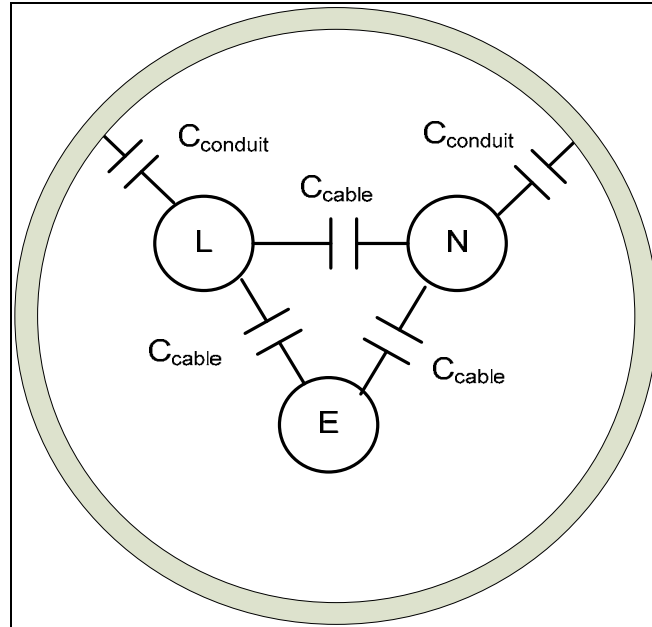
- Ειδική αντίσταση: Όταν υπάρχει ροή εναλλασσόμενου ρεύματος σε ένα αγωγό, η αυτεπαγωγή μέσα στον αγωγό προκαλεί μεγαλύτερη ροή φορτίου κοντά στην εξωτερική επιφάνεια του καλωδίου σε σχέση με το κέντρο του. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται επιδερμικό φαινόμενο. Το φαινόμενο αυτό προκαλεί μια αύξηση στην αντίσταση του καλωδίου και επιδεινώνεται καθώς η συχνότητα ρεύματος αυξάνεται. Αν και η ροή ρεύματος κατανέμεται σε ολόκληρη τη διατομή του καλωδίου, για τον υπολογισμό της αντίστασης, υποτίθεται ότι όλο το ρεύμα ρέει μέσα στο "επιδερμικό βάθος" του καλωδίου. Το επιδερμικό βάθος εξαρτάται από τη συχνότητα (f) σύμφωνα με τη σχέση

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi f \mu_c \sigma_c}} \quad (4.36)$$

όπου σ_c και μ_c είναι η αγωγιμότητα και η διαπερατότητα του αγωγού, αντίστοιχα. Άρα, για γραμμή μετάδοσης δύο αγωγών με στερεό πυρήνα αγωγού, η ειδική αντίσταση προκύπτει από τη σχέση

$$R_{solid} = \frac{1}{\pi \alpha \delta \sigma_c} \quad (\Omega / m) \quad (4.37)$$

όπου α είναι η ακτίνα του αγωγού.



Σχήμα 4.8 Ισοδύναμο διάγραμμα χωρητικότητας σε μια γραμμή ισχύος (L: αγωγός φάσης, N: ουδέτερος, E: γείωση)

Εντούτοις, εάν τα αγωγία καλώδια είναι πλεγμένα (όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.6), τότε η περιοχή που ρέει το ρεύμα μειώνεται πάλι λόγω των διαστημάτων που αφήνονται στην περιφέρεια των πλεγμένων καλωδίων. Σε αυτήν την περίπτωση, ένας παράγοντας διόρθωσης πρέπει να πολλαπλασιαστεί στην τιμή της αντίστασης του καλωδίου στερεού πυρήνα, το οποίο έχει την ίδια συνολικά ακτίνα. Αυτή η αναλογία δίνεται από [DickiNi]

$$X_R = [\cos^{-1}(\frac{r_{wire} - \delta}{r_{wire}}) \times r_{wire}^2 - (r_{wire} - \delta) \cdot \sqrt{r_{wire}^2 - (r_{wire} - \delta)^2}] / (2 \times r_{wire} \times \delta) \quad (4.38)$$

όπου r_{wire} είναι η ακτίνα ενός απλού καλωδίου στον συνεστραμένο αγωγό και δ είναι το επιδερμικό βάθος που δίνεται από την σχέση (4.88). Με αυτόν τον παράγοντα διόρθωσης, η τελική αντίσταση για το συνεστραμένο καλώδιο είναι

$$R = X_R \cdot R_{solid} \quad (\Omega / m) \quad (4.39)$$

- Ειδική αυτεπαγωγή: Η επαγωγή της γραμμής μεταφοράς δύο αγωγών περιλαμβάνει την αυτεπαγωγή για κάθε αγωγό και την αμοιβαία επαγωγή μεταξύ τους. Η αυτεπαγωγή για έναν αγωγό δίνεται από τη σχέση

$$L_s = \frac{\mu_c}{8 \cdot \pi} \quad (\text{H} / \text{m}) \quad (4.40)$$

ενώ η αμοιβαία επαγωγή ζεύγους παράλληλων αγωγών είναι

$$L_m = \frac{\mu_c}{\pi} \cdot \ln\left(\frac{D - \alpha}{\alpha}\right) \quad (\text{H} / \text{m}) \quad (4.41)$$

όπου D είναι η απόσταση μεταξύ των αγωγών. Η ειδική αυτεπαγωγή υπολογίζεται από τη σχέση

$$L = 2L_s + L_m = \frac{\mu_c}{\pi} \cdot \left[\frac{1}{4} + \ln\left(\frac{D - \alpha}{\alpha}\right) \right] \quad (\text{H} / \text{m}) \quad (4.42)$$

- Ειδική χωρητικότητα: Από το Σχήμα 4.6, φαίνεται ότι οι αγωγοί δεν βρίσκονται στο κενό αλλά τοποθετούνται μέσα σε ένα μεταλλικό περίβλημα. Επιπλέον, λόγω της παρουσίας του αγωγού γείωσης, τα χωρητικά αποτελέσματα σύζευξης τόσο με το περίβλημα όσο και με τον αγωγό γείωσης δεν μπορούν να αγνοηθούν. Τα αποτελέσματα της σύζευξης λαμβάνονται υπόψη ως ισοδύναμες χωρητικότητες, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.8, όπου C_{cable} είναι η χωρητικότητα ανά μονάδα μήκους που αναπτύσσεται μεταξύ των αγωγών που υπολογίζεται βάσει της σχέσης (4.43), ενώ $C_{conduit}$ είναι η χωρητικότητα ανά μονάδα μήκους που αναπτύσσεται μεταξύ των αγωγών και του περιβλήματος. Σημειώνεται ότι δεν αναπτύσσεται χωρητικότητα μεταξύ του ουδέτερου καλωδίου και του περιβλήματος επειδή και τα δύο είναι γειωμένα.

Η χωρητικότητα C_{cable} είναι η χωρητικότητα της γραμμής και προκύπτει από τη σχέση

$$C_{cable} = \frac{\pi \cdot \varepsilon}{\ln\left[\left(\frac{D}{2 \cdot \alpha}\right) + \sqrt{\left(\frac{D}{2 \cdot \alpha}\right)^2 - 1}\right]} \quad (\text{F} / \text{m}) \quad (4.43)$$

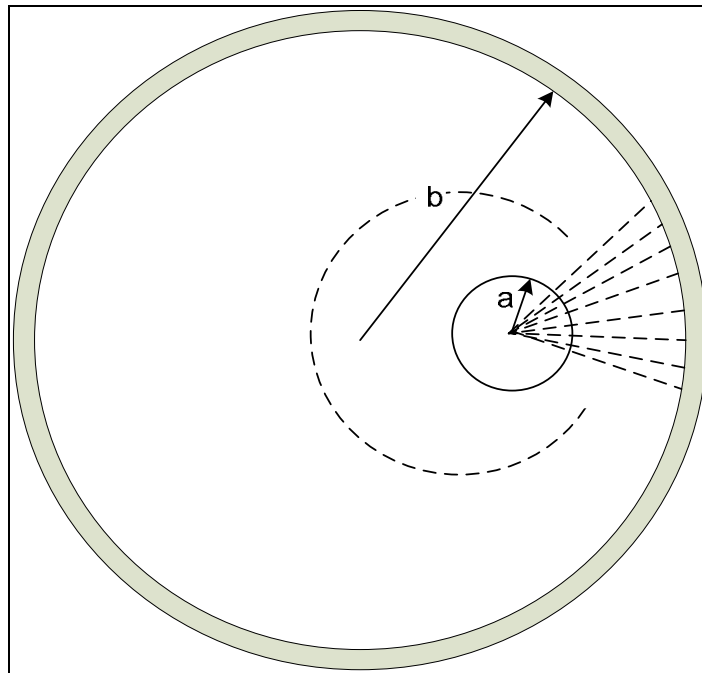
όπου ε είναι η διηλεκτρική σταθερά του διηλεκτρικού υλικού μεταξύ των αγωγών.

Ο υπολογισμός της χωρητικότητας $C_{conduit}$ είναι πιο περίπλοκος δεδομένου ότι οι αγωγοί και το περίβλημα είναι τοποθετημένοι έκκεντρα. Για τον

υπολογισμό της χρησιμοποιείται μια απλούστερη αναλυτική μέθοδος βασισμένη στην κατάτμηση. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.9, θεωρώντας το κέντρο του εσωτερικού αγωγού ως σημείο αναφοράς, οι ακτινικοί άξονες χρησιμοποιούνται για να τμηματοποιήσουν τους έκκεντρους ομοαξονικούς αγωγούς σε N τομείς. Όταν το $N \rightarrow \infty$, κάθε τομέας μπορεί να προσεγγιστεί ως ένα τμήμα από ομοαξονικούς κυλινδρικούς αγωγούς. Η χωρητικότητα για ομοαξονικό κυλινδρικό αγωγό προκύπτει από τη σχέση

$$C_{coaxial} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)} \quad (F/m) \quad (4.44)$$

όπου b είναι η εσωτερική ακτίνα του εξωτερικού αγωγού.



Σχήμα 4.9 Τμηματοποίηση του έκκεντρου ομοαξονικού κυλινδρικού αγωγού

Με βάση τη μέθοδο κατάτμησης, η χωρητικότητα μεταξύ του αγωγού φάσης και του μεταλλικού περιβλήματος όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.8, μπορεί να ληφθεί ως η μέση χωρητικότητα όλων των τμημάτων που προκύπτει από την κατάτμηση

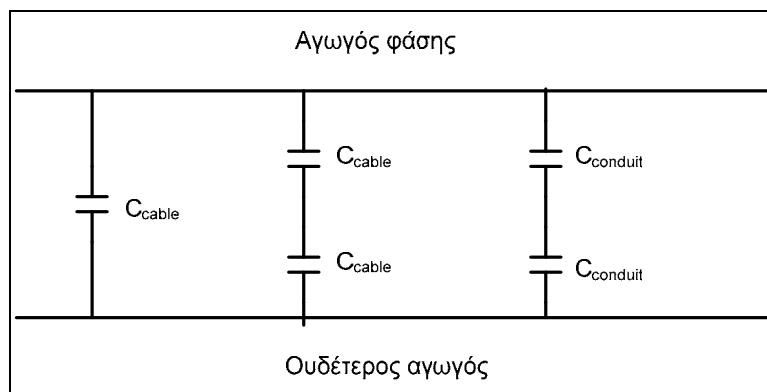
$$C_{conduit} = \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^N \frac{1}{N} \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon}{\ln\left(\frac{b_k}{a}\right)} \quad (F/m) \quad (4.45)$$

όπου ε_k και b_k είναι η διηλεκτρική σταθερά του διηλεκτρικού υλικού και η εσωτερική ακτίνα του μεταλλικού αγωγού για τον τομέα k .

Από το Σχήμα 4.9, φαίνεται ότι τα σήματα επικοινωνίας υψηλών συχνοτήτων δεν επάγονται αποκλειστικά μεταξύ συνεστραμμένων αγωγού, αλλά μπορούν να επάγονται μεταξύ του αγωγού φάσης (live cable) και του αγωγού της γείωσης ή μεταξύ του ουδέτερου (neutral cable) και του καλωδίου γείωσης (earth cable). Επίσης, το σήμα μπορεί να εγχυθεί μεταξύ του αγωγού φάσης και του περιβλήματος. Ως εκ τούτου, η συνολική χωρητικότητα μπορεί να συνοψιστεί στο Σχήμα 4.10.

Η σύνδεση σειράς των δύο χωρητικότητων C_{cable} αντιπροσωπεύει τη σύζευξη με τον αγωγό γείωσης, ενώ η σύνδεση σειράς των δύο χωρητικότητων $C_{conduit}$ αντιπροσωπεύει τη σύζευξη με το μεταλλικό περίβλημα. Η συνολική χωρητικότητα προκύπτει

$$C = C_{cable} + \frac{C_{cable}}{2} + \frac{C_{conduit}}{2} = \frac{1}{2}(3C_{cable} + C_{conduit}) \quad (4.46)$$



Σχήμα 4.10 Συνολική χωρητικότητα μεταξύ αγωγού φάσης και ουδέτερου

- Ειδική αγωγιμότητα: Εάν το μέσο έχει την ίδια διαστημική εξάρτηση ή εάν το μέσο είναι ομοιογενές, ισχύει

$$\frac{C}{G} = \frac{\varepsilon}{\sigma} \Rightarrow G = \frac{\sigma \cdot C}{\varepsilon} \quad (4.47)$$

όπου σ είναι η αγωγιμότητα του διηλεκτρικού υλικού και G είναι η αγωγιμότητα των αγωγών του καλωδίου.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.6, για τα καλώδια ισχύος στις οικιακές παροχές, το διηλεκτρικό υλικό, είτε μεταξύ των αγωγών είτε μεταξύ αγωγού και

περιβλήματος, είναι ετερογενές και στους δύο χώρους (λόγω της κυλινδρικής μορφής του καλωδίου) και στο περιεχόμενο (μίγμα μόνωσης και αέρα). Αλλά δεδομένου ότι τα καλώδια είναι πολύ κοντά το ένα με το άλλο, το πάχος της μόνωσης είναι συγκρίσιμο με την απόσταση μεταξύ των αγωγών.

4.3.1.3 Επαλήθευση των πρότυπων παραμέτρων

Οι σχέσεις (4.34) και (4.35) προσδιορίζουν τις μεταβλητές γ και Z_0 . Οι τιμές που προκύπτουν από τους υπολογισμούς μπορούν να ελεγχθούν με μέτρηση της σύνθετης αντίστασης εισόδου ενός τμήματος της γραμμής υπό συνθήκες ανοιχτοκυκλώματος και υπό συνθήκες βραχυκυκλώματος. Από τη θεωρία των γραμμών μεταφοράς, η σύνθετη αντίσταση εισόδου γραμμής μήκους l που τερματίζεται από σύνθετη αντίσταση τερματισμού Z_L είναι

$$Z_{in} = Z_0 \cdot \frac{Z_L + Z_0 \cdot \tanh(\gamma \cdot l)}{Z_0 + Z_L \cdot \tanh(\gamma \cdot l)} \quad (\Omega) \quad (4.48)$$

Εάν η σύνθετη αντίσταση τερματισμού είναι ίση με το μηδέν $Z_L = 0$ (περίπτωση βραχυκυκλώματος) η (4.48) γράφεται

$$Z_{is} = Z_0 \cdot \tanh(\gamma \cdot l) \quad (\Omega) \quad (4.49)$$

Αντίστοιχα, αν η αντίσταση τερματισμού γίνει πολύ μεγάλη ($Z_L \rightarrow \infty$), η (4.100) δίνει

$$Z_{io} = Z_0 \cdot \coth(\gamma \cdot l) \quad (\Omega) \quad (4.50)$$

Από (4.101) και (4.102) προκύπτουν

$$Z_0 = \sqrt{Z_{is} \cdot Z_{io}} \quad (4.51)$$

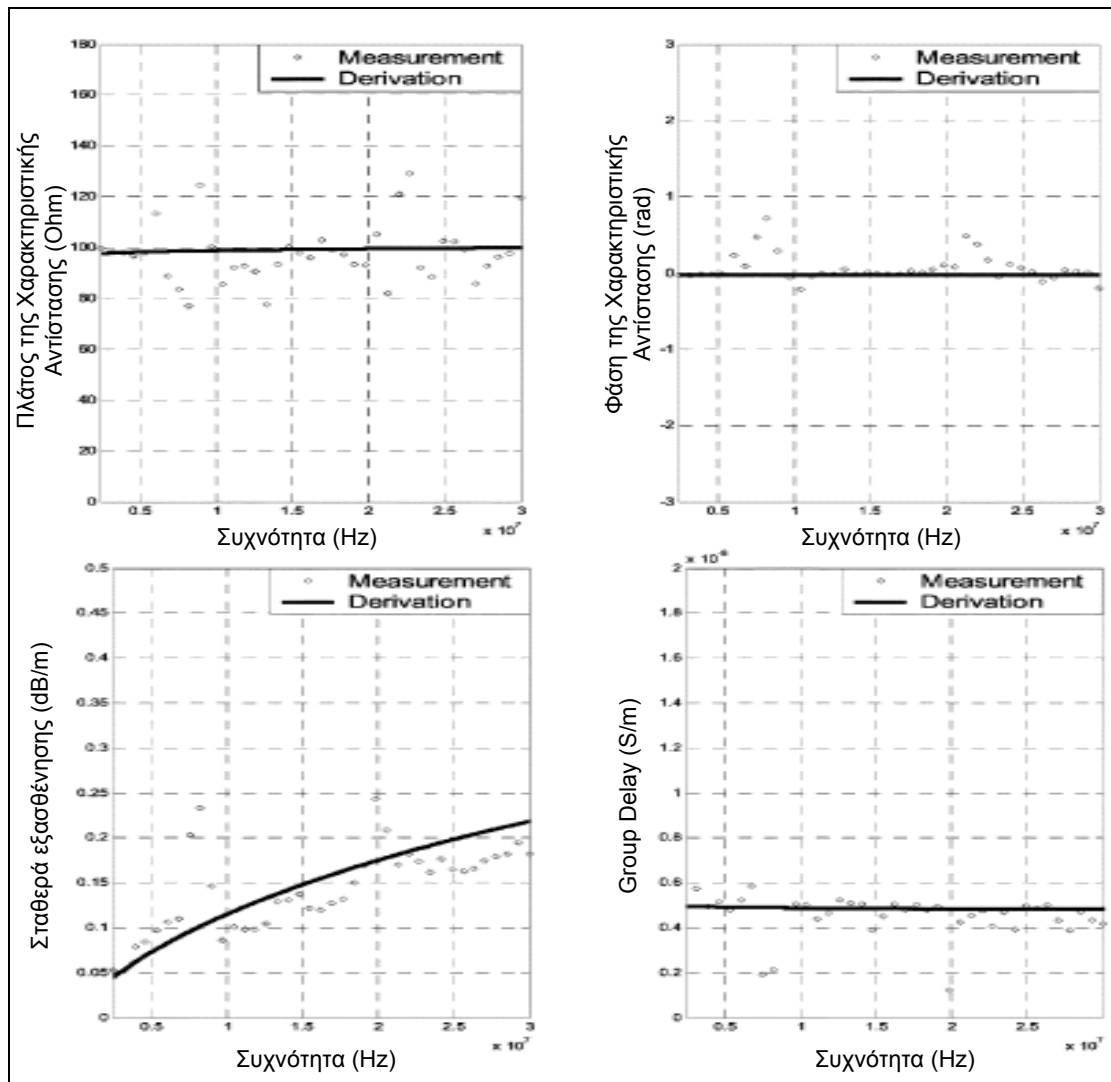
$$\gamma = \frac{1}{l} \cdot \tanh^{-1} \sqrt{\frac{Z_{is}}{Z_{io}}} \quad (4.52)$$

Πρέπει να σημειωθεί ότι όταν το μήκος του καλωδίου είναι ίσο με τα πολλαπλάσια του $\lambda/4$ του σήματος, τότε το Z_{is} και το Z_{io} θα ήταν είτε μηδέν είτε άπειρο. Στις περιπτώσεις αυτές, οι μετρήσεις είναι λανθασμένες, οπότε στις μετρήσεις επαλήθευσης, χρησιμοποιούνται διάφορα μήκη καλωδίων ηλεκτρικής ισχύος ώστε τα αποτελέσματα που επηρεάζονται από το φαινόμενο $\lambda/4$ να αγνοηθούν.

Το Σχήμα 4.11 συγκρίνει τη μετρημένη και την παραγόμενη χαρακτηριστική σύνθετη αντίσταση (Z_0), τη σταθερά εξασθένησης (α) και την καθυστέρηση ομάδας (τ), που ορίζεται από τη σχέση

$$\tau = \frac{d\beta}{d\omega} \quad (s/m) \quad (4.53)$$

Το καλώδιο που χρησιμοποιείται στη μέτρηση έχει διατομή 4mm^2 , με εσωτερική ακτίνα του μεταλλικού περιβλήματος 15mm^2 . Οι μετρήσεις έγιναν για συχνότητες $1\sim 30\text{MHz}$. Από τη σύγκριση, φαίνεται ότι οι υπολογιζόμενες παράμετροι της γραμμής βρίσκονται πολύ κοντά στις τιμές των μετρήσεων. Αυτό επιβεβαιώνει την αξιοπιστία αυτού του μοντέλου.



Σχήμα 4.11 Σύγκριση μετρήσεων και υπολογισμών.(α) Πλάτος και φάση της χαρακτηριστικής αντίστασης, (β) Σταθερά εξασθένησης και καθυστέρηση ομάδας

4.3.2 Δίκτυο M/T

Υπάρχει μεγάλη ποικιλία καλωδίων, διαφορετικών ως προς τη δομή, τον αριθμό των πυρήνων, το υλικό του αγωγού και τη χρησιμοποιούμενη μόνωση [BungMc90]. Τα θεμελιώδη μεγέθη όπως ο συντελεστής εξασθένησης, ο συντελεστής φάσης και η χαρακτηριστική σύνθετη αντίσταση έχουν υπολογιστεί. Με βάση τη γνώση αυτών μπορούν να υπολογιστούν η διαρρύθμιση της αντίστασης, της αυτεπαγωγής, της αγωγιμότητας και της χωρητικότητας κατά μήκος του καλωδίου. Τα εξεταζόμενα καλώδια έχουν ομοαξονική δομή. Επομένως, τα αποτελέσματα που έχουμε υπολογίσει θα μπορούσαν να συγκριθούν με εκείνα που υπολογίστηκαν με τους γνωστούς τύπους για τις ομοαξονικές γραμμές.

Οι μετρήσεις αποτελούν τη βάση για την ανάπτυξη ενός παθητικού μοντέλου ενός συγκεκριμένου τύπου καλωδίου. Το μοντέλο αποτελείται από μια αλυσίδα πανομοιότυπων ισοδύναμων κυκλωμάτων, κάθε ένα από τα οποία αντιπροσωπεύει ένα ορισμένου μήκους καλώδιο. Το μέγιστο μήκος που μπορεί να μοντελοποιηθεί με ένα ισοδύναμο κύκλωμα καθορίζεται από τη μέγιστη συχνότητα. Τα κυκλώματα σχεδιάστηκαν ως εκτεταμένα π-τμήματα που αποτελούνται από αντιστάτες, πυκνωτές και πηνία. Ειδική προσοχή λήφθηκε για την απεικόνιση του επιδερμικού φαινομένου, εγγενούς στα εξεταζόμενα καλώδια. Τα αποτελέσματα των υπολογισμών έδειξαν ότι το πρότυπο που αναπτύχθηκε απεικονίζει όλα τα σημαντικά χαρακτηριστικά του καλωδίου. Τελικά, μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι η εφαρμογή υλικού αυτού του παθητικού προτύπου θα απαιτούσε στοιχεία που είναι δύσκολα υλοποιήσιμα. Εντούτοις αυτός ο περιορισμός θα μπορούσε να ξεπεραστεί μειώνοντας τις απαιτήσεις.

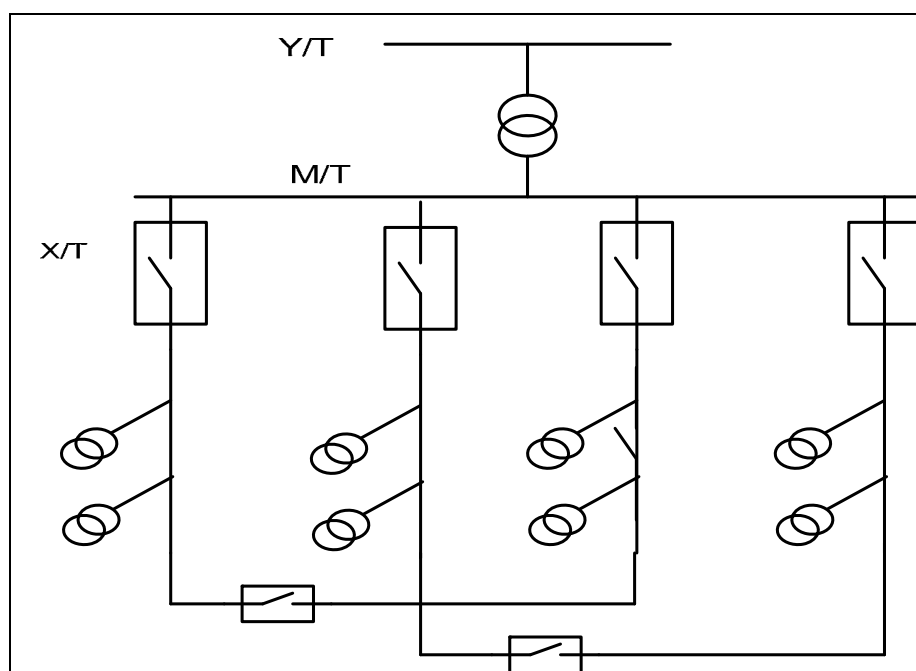
4.3.2.1 Χαρακτηριστικά των καλωδίων μέσης τάσης

Η μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας από το σταθμό παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος στον καταναλωτή πραγματοποιείται συνήθως σε τρία διαφορετικά επίπεδα τάσης.

Το δίκτυο M/T αντιπροσωπεύει τη σύνδεση μεταξύ του δικτύου Y/T και του δικτύου X/T. Το δίκτυο Y/T καλύπτει το εύρος τιμών τάσης από 110KV έως 380KV.

Χρησιμοποιείται για τη μετάδοση της ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις μεταξύ των σταθμών παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος και των υποσταθμών Υ/Τ που βρίσκονται κοντά σε αστικές περιοχές. Στη συνέχεια, το δίκτυο Μ/Τ χρησιμοποιείται για τη διανομή της ενέργειας μεταξύ των υποσταθμών Υ/Τ και των υποσταθμών Μ/Τ που τοποθετούνται κοντά στους καταναλωτές, όπου η τάση μειώνεται στα 0.4KV και διανέμεται στα νοικοκυριά. Πολλοί καταναλωτές, κυρίως βιομηχανίες, συνδέονται απευθείας με το δίκτυο Μ/Τ.

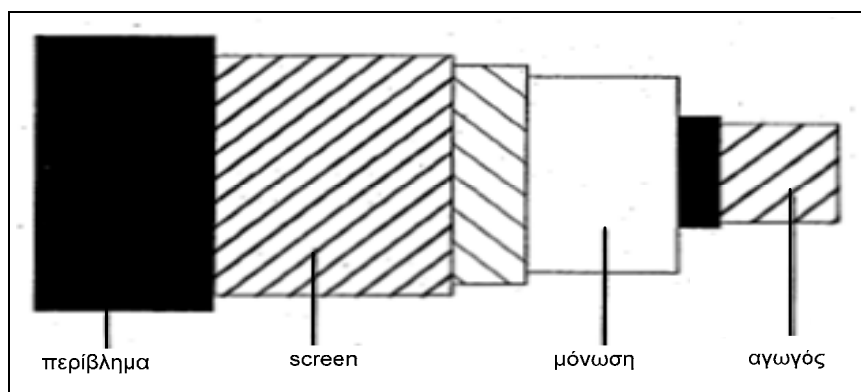
Στο δίκτυο αυτό χρησιμοποιούνται τόσο υπόγεια όσο και υπερυψωμένα καλώδια. Τα υπόγεια καλώδια διακρίνονται σε καλώδια απλού πυρήνα (single-core) και τριών πυρήνων (three-core) καλώδια. Η συνήθης τοπολογία δικτύου είναι ένα ακτινωτό δίκτυο (radial net) ή ένα δίκτυο ανοικτού βρόχου (open ring net) (Σχήμα 4.12). Η πρώτη έχει το πλεονέκτημα της ευκολότερης εγκατάστασης, ενώ η δεύτερη προσφέρει μεγαλύτερη αξιοπιστία. Στις αστικές περιοχές η τυπική απόσταση μεταξύ δύο υποσταθμών Μ/Τ κυμαίνεται στο εύρος μερικών μεταξύ εκατοντάδων μέτρων.



Σχήμα 4.12 Δίκτυο ανοικτού βρόχου

Παρακάτω μελετώνται μόνο τα καλώδια απλού πυρήνα (Σχήμα 4.13). Εδώ η μετάδοση μεταξύ του αγωγού (conductor) και της θωράκισης (screen) εξετάζεται σε αντιδιαστολή με άλλους τρόπους που χρησιμοποιούν αγωγούς ή θωρακίσεις δύο ή περισσότερων παράλληλων αγωγών. Τα καλώδια έχουν ομοαξονική δομή. Η γενική κατασκευή τους από το εσωτερικό προς το εξωτερικό τους είναι η ακόλουθη. Ο

πυρήνας του καλωδίου αποτελείται από ένα ή περισσότερους αγωγούς χαλκού ή αλουμινίου με διατομή από 35mm² έως 500mm². Ο πυρήνας περιβάλλεται από το περίβλημα αγωγού (conductor screen) από ημιαγώγιμο υλικό, το οποίο χρησιμοποιείται για να περιορίσει το ηλεκτρικό πεδίο, ενώ στη συνέχεια υπάρχει η μόνωση που χρησιμοποιείται για το διαχωρισμό του αγωγού από τη θωράκιση. Η θωράκιση αποτελείται από ημιαγώγιμα υλικά και ταινίες χαλκού. Συνδέεται με το έδαφος και μεταφέρει το ρεύμα φόρτισης (charging current), το ρεύμα διαρροής και το ρεύμα επιστροφής μέσω γής (ground fault current). Το τελευταίο εξωτερικά στρώμα αποτελεί το περίβλημα (sheath), για προστασία από μηχανικές πιέσεις και από τη διάβρωση.



Σχήμα 4.13 Καλώδιο απλού πυρήνα

Λόγω της ομοαξονικής δομής των καλωδίων απλού πυρήνα, οι γνωστές σχέσεις για τα ομοαξονικά καλώδια μπορούν να εφαρμοστούν για τον υπολογισμό των αρχικών παραμέτρων των γραμμών μεταφοράς. Η αντίσταση ανά μονάδα μήκους

$$R' = \frac{\rho_1}{\pi \cdot d \cdot t_1} + \frac{\rho_2}{\pi \cdot D \cdot t_2} \quad (4.54)$$

όπου D και d οι διάμετροι του εξωτερικού αγωγού και του εσωτερικού αγωγού και ρ_1, ρ_2 οι αντίστοιχες ειδικές αντιστάσεις ενώ όπου t_i $i = 1, 2$ είναι τα αντίστοιχα βάθη διείσδυσης (penetration depths) που υπολογίζονται μέσω της σχέσης

$$t_i = \sqrt{\frac{2 \cdot \rho_i}{\omega \cdot \mu_0}} \quad (4.55)$$

όπου ω η γωνιακή συχνότητα και μ_0 η μαγνητική διαπερατότητα. Η αγωγιμότητα ανά μονάδα μήκους είναι ίση με

$$G' = 2\pi \frac{\omega \varepsilon_0 \varepsilon_r}{\ln \frac{D}{d}} \tan \delta \quad (4.56)$$

όπου ε_0 η διηλεκτρική σταθερά του κενού, ε_r η σχετική διηλεκτρική σταθερά και $\tan \delta$ η γωνία διηλεκτρικής απώλειας.

Η αυτεπαγωγή ανά μονάδα μήκους είναι ίση με

$$L' = \frac{\mu_0}{2 \cdot \pi} \ln(D/d) \quad (4.57)$$

ενώ η χωρητικότητα ανά μονάδα μήκους είναι

$$C' = \frac{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r}{\ln(D/d)} \quad (4.58)$$

Η χαρακτηριστική σύνθετη αντίσταση Z_0 και η σταθερά διάδοσης γ υπολογίζονται χρησιμοποιώντας τις παραμέτρους ανά μονάδα μήκους της γραμμής μεταφοράς

$$\underline{Z}_0 = \sqrt{\frac{R' + j \cdot \omega \cdot L'}{G' + j \cdot \omega \cdot C'}} \quad (4.59)$$

και

$$\underline{\gamma} = \sqrt{(R' + j \cdot \omega \cdot L') \cdot (G' + j \cdot \omega \cdot C')} \quad (4.60)$$

Μια πρώτη εκτίμηση της απόλυτης τιμής της χαρακτηριστικής σύνθετης αντίστασης δίνεται από τη παρακάτω σχέση

$$|\underline{Z}_0| \approx \frac{60\Omega}{\sqrt{\varepsilon_r}} \quad (4.61)$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ**5****ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ****5.1 Γενικά**

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της συμπεριφοράς διαφόρων τοπολογιών γραμμών ηλεκτρικής ισχύος X/T και M/T, για συστήματα PLC, μέσω μοντέλων προσομοίωσης. Συγκεκριμένα, βάσει των θεωρητικών στοιχείων που αναπτύχθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια, υλοποιήθηκαν τρία διαφορετικά προγράμματα σε MATLAB στην έκδοση 6.0 για τις τρεις διαφορετικές μεθόδους που εξετάστηκαν (Dostert, Smith, Meng). Τα προγράμματα αυτά χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό των γραφικών παραστάσεων του μέτρου της συνάρτησης μεταφοράς του καναλιού συναρτήσει της συχνότητας. Το πρόγραμμα δέχεται ως είσοδο χαρακτηριστικά του καναλιού, όπως είναι το μήκος των καλωδίων, η χαρακτηριστική αντίσταση των καλωδίων, ο αριθμός των κρίσιμων διαδρομών, ενώ ως έξοδο λαμβάνεται το μέτρο της συνάρτησης μεταφοράς ως συνάρτηση της συχνότητας.

5.1.1 Εισαγωγή

Συνδυάζοντας το φαινόμενο της πολυδιαδρομικής μετάδοσης και την εξασθένηση λόγω καλωδιακής μετάδοσης, παρουσιάζεται και συγκρίνεται η γραμμική παραμόρφωση που προκαλούν οι γραμμές ισχύος X/T και M/T, για διάφορες τοπολογίες του ηλεκτρικού δικτύου με τη βοήθεια τριών διαφορετικών

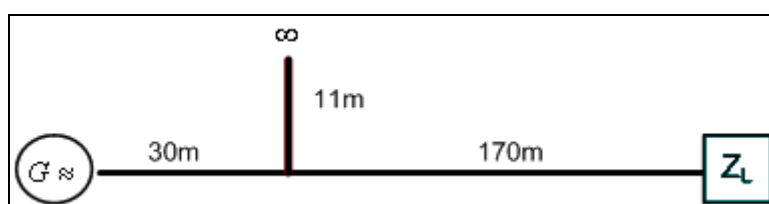
μεθόδων. Τα μήκη των τοπολογιών είναι μικρά (short distance link) με λίγα στελέχη (από 1 μέχρι 4). Οι τοπολογίες επιλέχθηκαν έτσι ώστε να αποτελούν μια αντιπροσωπευτική εικόνα πραγματικών τοπολογιών, αλλά ταυτόχρονα να παρέχουν και ουσιαστικά συμπεράσματα για τα χαρακτηριστικά των διαύλων σε διάφορες ειδικές περιπτώσεις.

Πρέπει να σημειωθεί ότι, όσον αφορά τη μέθοδο Dostert, ο αριθμός των κρίσιμων διαδρομών που χρησιμοποιούνται στην προσομοίωση προέκυψε κατόπιν ενδελεχούς έρευνας ώστε να μη ληφθούν υπόψη διαδρομές που συμβάλλουν κατά λιγότερο από 1% σε σχέση με την απευθείας μεταδιδόμενη ισχύ (straight path power).

5.2 Τοπολογίες γραμμών X/T

5.2.1 1^η Τοπολογία

Στην πρώτη αυτή περίπτωση εξετάζεται η διάταξη μιας γραμμής μεταφοράς X/T με μια ανοιχτοκυκλωμένη διακλάδωση ($|\rho|=1$). Όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενα κεφάλαια, πολλαπλές ανακλάσεις συμβαίνουν σε ένα δίκτυο από γραμμές ισχύος, όπως και στην παρούσα τοπολογία δοκιμής (Σχήμα 5.1)

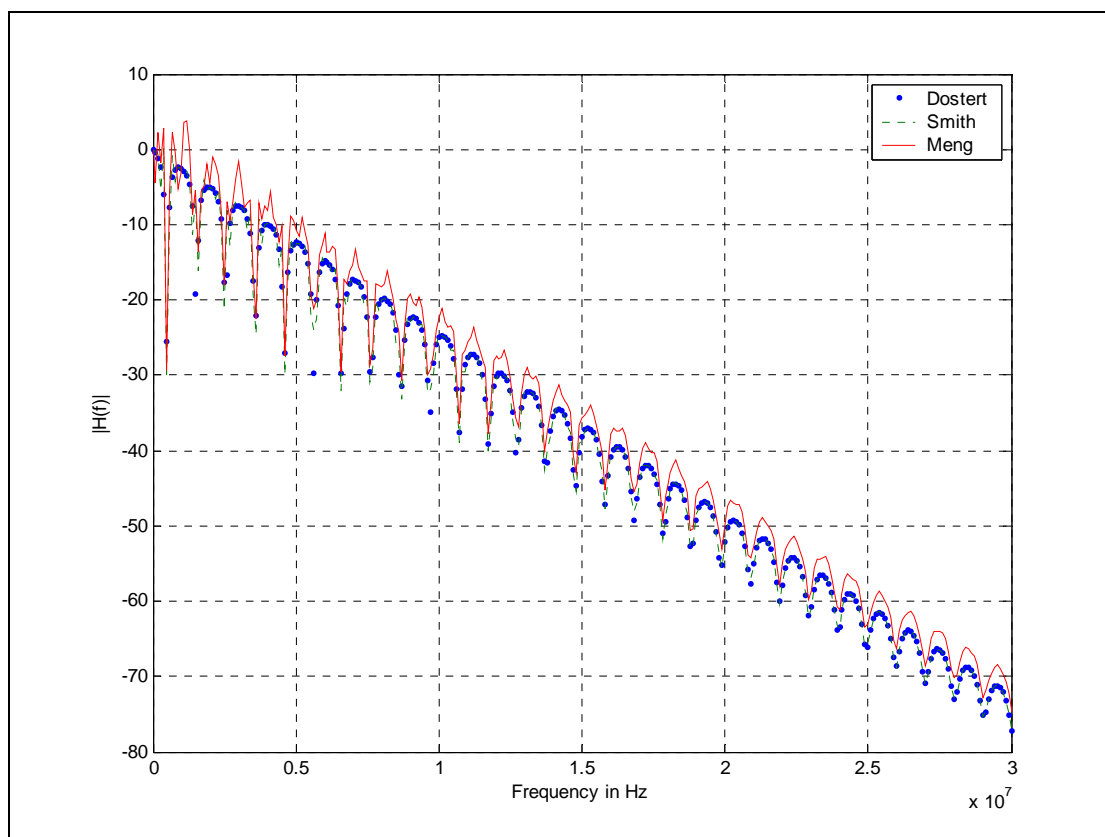


Σχήμα 5.1 Τοπολογία 1

Μια τοπολογία αυτής της μορφής θα μπορούσε να αποτελεί τοπολογία δικτύωσης στο εσωτερικό ενός σπιτιού. Οι ανακλάσεις προκαλούνται από τα καλώδια που συνιστούν την εσωτερική δικτύωση των σπιτιών, από τα κουτιά διασύνδεσης των καλωδίων που υπάρχουν σε κάθε κτίριο καθώς επίσης και από τις ενώσεις μεταξύ καλωδίων που διασυνδέονται για το σχηματισμό του δικτύου (πολλές φορές έχουν διαφορετικές χαρακτηριστικές αντιστάσεις μεταξύ τους). Όλες αυτές οι επιμέρους ανακλάσεις έχουν ως αποτέλεσμα να υπάρχει μετάδοση σημάτων όχι μόνο κατά την

απευθείας διαδρομή από τον πομπό στο δέκτη αλλά και κατά μήκος άλλων πολλαπλών διαδρομών. Η τοπολογία αυτή αποτελεί εφαρμογή του παραδείγματος της παραγράφου §4.2.1.1

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η γραφική παράσταση του μέτρου της συνάρτησης μεταφοράς $|H(f)|$ συναρτήσει της συχνότητας (frequency), με εφαρμογή τριών διαφορετικών μεθόδων (Dostert, Smith, Meng) (Σχήμα 5.2).



Σχήμα 5.2 Συνάρτηση Μεταφοράς Γραμμής Ηλεκτρικής Ισχύος X/T με μια διακλάδωση

Από την ανωτέρω γραφική παράσταση προκύπτει ότι στις υψηλότερες συχνότητες η επίδραση της γραμμικής παραμόρφωσης του διαύλου είναι εντονότερη από ό,τι στις χαμηλές συχνότητες (χαρακτηριστικά βαθυπερατού φίλτρου), επιτρέποντας τη διέλευση των χαμηλών συχνοτήτων και καταπιέζοντας τις υψηλές.

Προφανώς, οι συνδέσεις και οι διακλαδώσεις που παρεμβάλλονται του σημείου έκχυσης των σημάτων και του σημείου λήψης τους υποβιβάζουν την απόδοση συστημάτων σε σχέση με την ιδανική από σημείο σε σημείο ενσύρματη μετάδοση.

Η πριονωτή μορφή που παρατηρείται στο Σχήμα 5.2 είναι αποτέλεσμα της πολυδιαδρομικής μετάδοσης στο δίαυλο αφού στο δέκτη δεν φτάνει μόνο το απευθείας σήμα αλλά και εκδοχές του που οφείλονται σε διαδοχικές ανακλάσεις.

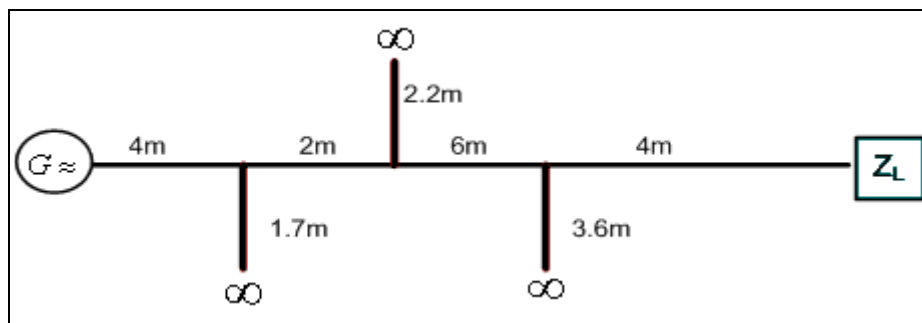
Για να αντιμετωπιστεί το φαινόμενο αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος της παράκαμψης (bypass method) των διακλαδώσεων της κύριας γραμμής, κάτι που πρέπει, όμως, να αποφεύγεται γιατί μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα σε μελλοντικές εφαρμογές επίβλεψης του δικτύου.

Ως γενική παρατήρηση εξάγουμε το συμπέρασμα ότι υπάρχει συμφωνία των αποτελεσμάτων από τα μοντέλα. Οι όποιες αποκλίσεις, που χαρακτηρίζονται ως αμελητέες, οφείλονται στους πολλαπλασιασμούς μεταξύ των πινάκων και την εμφάνιση μηδενισμών και απειρισμών κατά τους υπολογισμούς.

5.2.2 2^η Τοπολογία

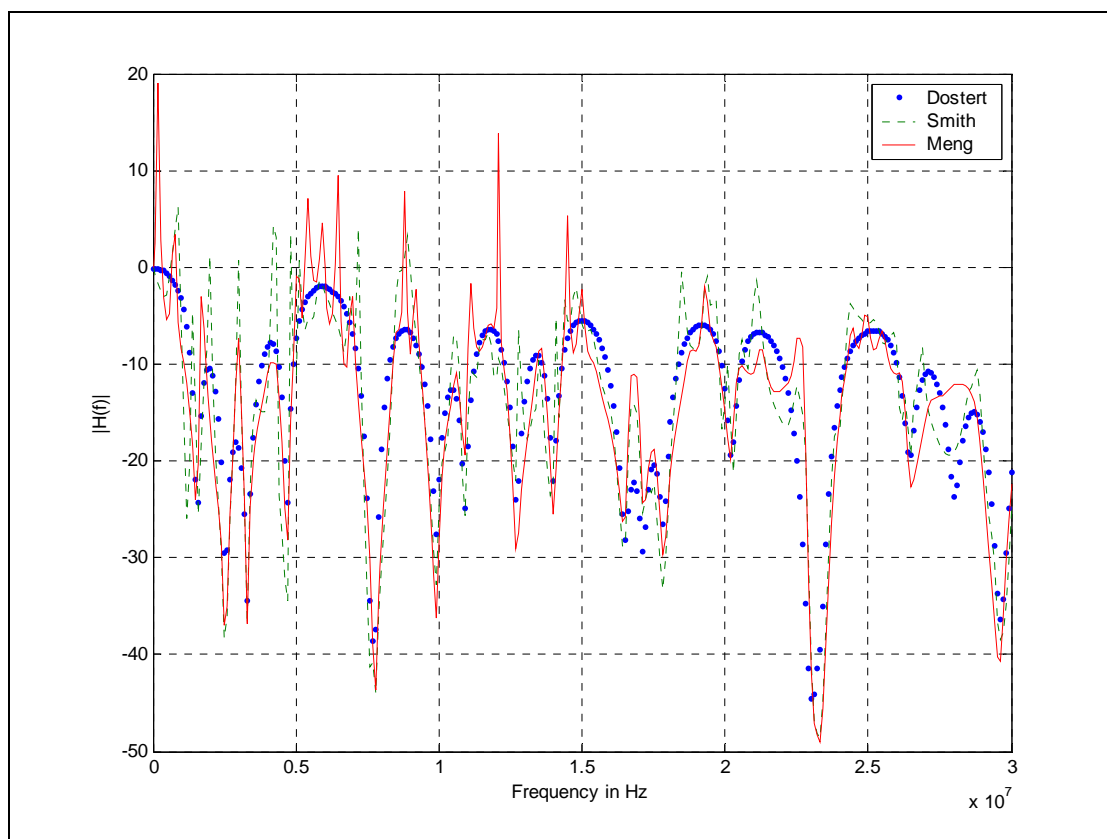
5.2.2.1 2^η Τοπολογία (τρεις ανοιχτοκυκλωμένες διακλαδώσεις)

Σε αυτήν την περίπτωση η τοπολογία μας είναι περισσότερο πολύπλοκη και αποτελείται από τρία ανοιχτοκυκλωμένα στελέχη. Αξίζει να σημειώσουμε ότι σε αυτήν την τοπολογία τόσο τα μήκη των ανοιχτοκυκλωμένων στελεχών όσο και τα μήκη της κύριας γραμμής μεταφοράς, από την προσαρμοσμένη πηγή μέχρι τον τελικό χρήστη (επίσης προσαρμοσμένος), είναι σχετικά μικρά, εν συγκρίσει με τα μήκη της προηγούμενης τοπολογίας. Η τοπολογία που εξετάζουμε είναι αυτή του Σχήματος 5.3 που απαντάται στο εσωτερικό οικιών και γραφείων (small office and home office ή SOHO environment), όπου τα φορτία στον τερματισμό κάθε διακλάδωσης μπορεί να είναι οποιαδήποτε ηλεκτρική συσκευή ενός σπιτιού (τηλεόραση, ψυγείο). Κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης θεωρείται ότι όλες οι συσκευές βρίσκονται σε κατάσταση μη λειτουργίας (ανοιχτοκύκλωμα)



Σχήμα 5.3 Τοπολογία 2

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η γραφική παράσταση του μέτρου της συνάρτησης μεταφοράς $|H(f)|$ συναρτήσει της συχνότητας (frequency).



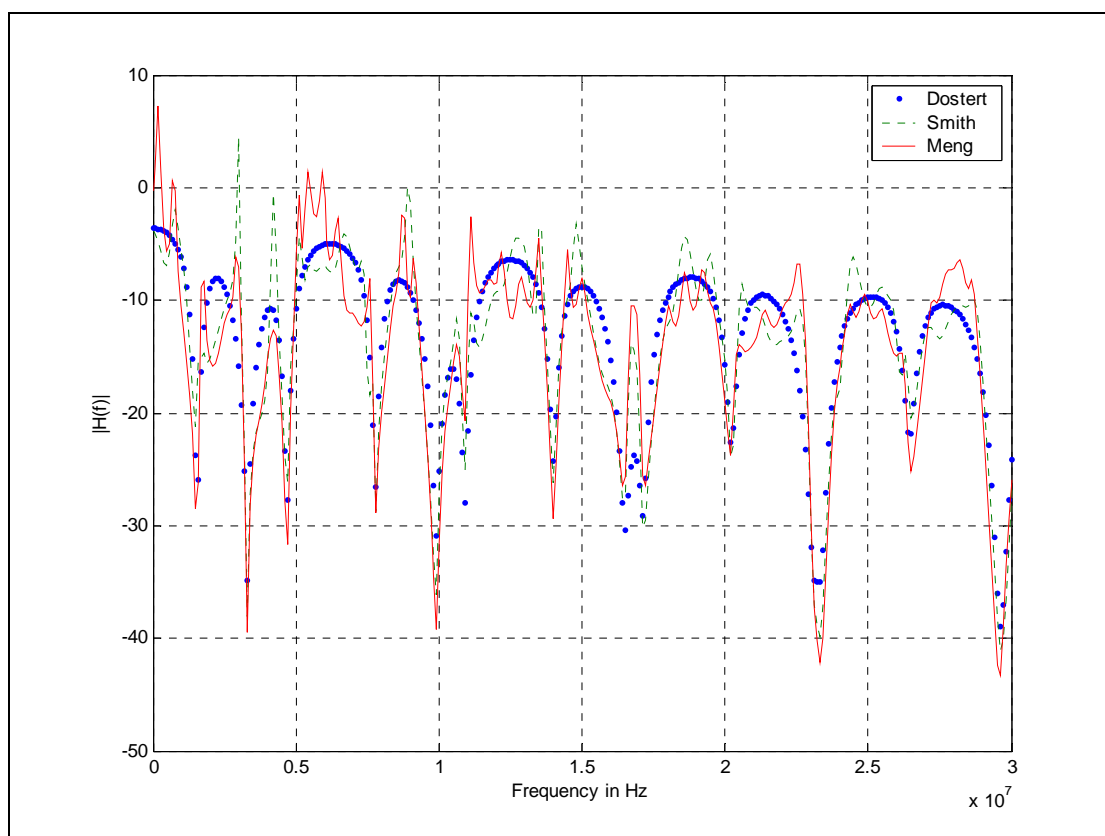
Σχήμα 5.4 Συνάρτηση Μεταφοράς Γραμμής Ηλεκτρικής Ισχύος X/T με τρεις διακλαδώσεις

Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, παρατηρείται σύμπτωση αποτελεσμάτων μεταξύ των μεθόδων. Από τη γραφική παρατηρούνται συχνοεπιλεκτικές εγκοπές.

5.2.2.2 2^η Τοπολογία (δύο ανοιχτοκυκλωμένες διακλαδώσεις, ένα προσαρμοσμένο ως προς τη γραμμή στέλεχος)

Σε αυτήν την περίπτωση χρησιμοποιείται η τοπολογία του Σχήματος 5.3, με τη διαφορά ότι στην περίπτωση αυτή το δεύτερο στέλεχος είναι προσαρμοσμένο (σύνδεση modem στην πρίζα), ενώ τα άλλα δυο στελέχη είναι και πάλι ανοιχτοκυκλωμένα.

Τα αποτελέσματα φαίνονται στο Σχήμα 5.5, από όπου διαπιστώνεται σύμπτωση αποτελεσμάτων με τη χρήση των τριών μεθόδων ενώ, και σε αυτήν την περίπτωση όπως και στην προηγούμενη, εμφανίζεται σε συγκεκριμένες συχνότητες ενίσχυση του σήματος (Ferranti Effect).

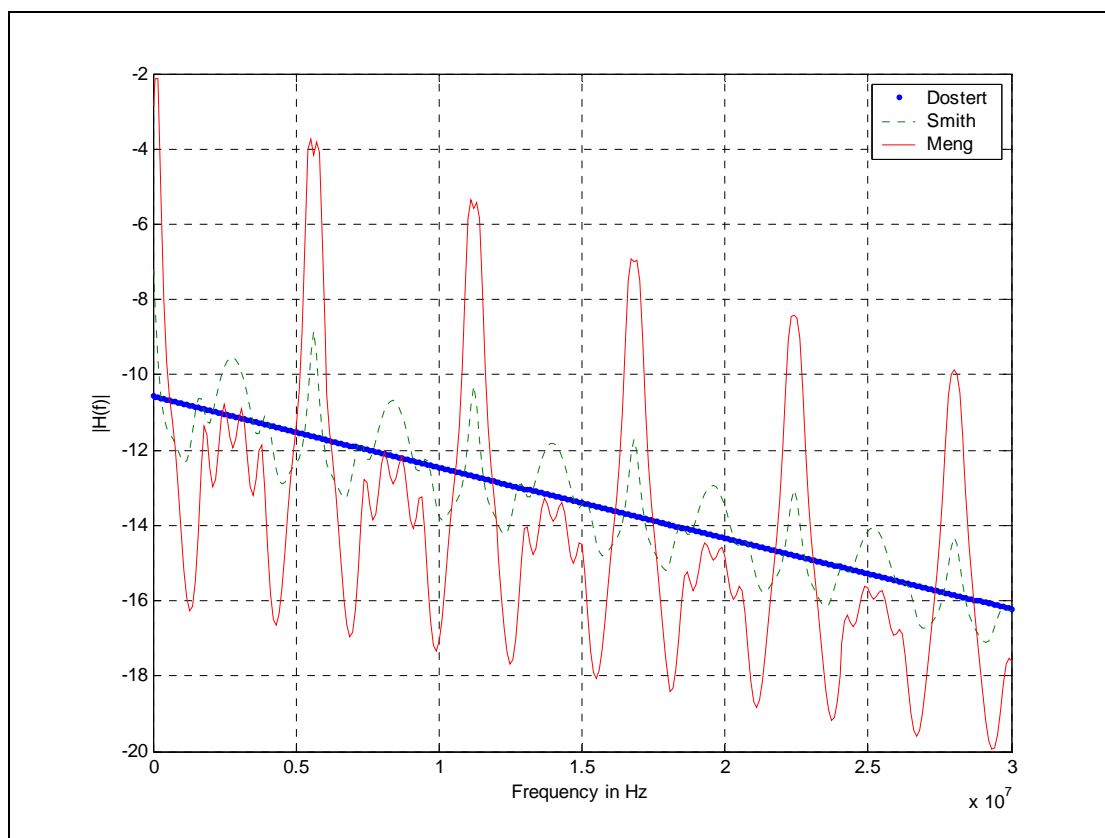


Σχήμα 5.5 Συνάρτηση Μεταφοράς Γραμμής Ηλεκτρικής Ισχύος X/T με τρεις διακλαδώσεις (δύο ανοιχτοκυκλωμένες διακλαδώσεις και μια προσαρμοσμένη)

5.2.2.3 2^η Τοπολογία (τρία προσαρμοσμένα ως προς τη γραμμή στελέχη)

Χρησιμοποιείται ξανά η τοπολογία του Σχήματος 5.3 μόνο που σε αυτήν την περίπτωση εξετάζεται η ακραία περίπτωση όπου και οι τρεις διακλαδώσεις είναι προσαρμοσμένες (σύνδεση modem στην πρίζα).

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης φαίνονται στο Σχήμα 5.6, όπου διαπιστώνεται σχετική απόκλιση μεταξύ των τριών μεθόδων εξαιτίας του διαφορετικού τρόπου με τον οποίο ο συντελεστής ανάκλασης υπολογίζεται και λαμβάνεται υπόψη στο μοντέλο. Παρόλα αυτά και σε αυτήν την ακραία περίπτωση, η μέση εξασθένιση των υπολοίπων δύο μοντέλων ακολουθεί τη μέση εξασθένιση που ορίζει το μοντέλο του Dostert το οποίο χρησιμοποιείται και ως προφίλ μέσης εξασθένισης (στην περίπτωση όπου όλες οι διακλαδώσεις είναι προσαρμοσμένες, σε αυτή δηλαδή την περίπτωση).



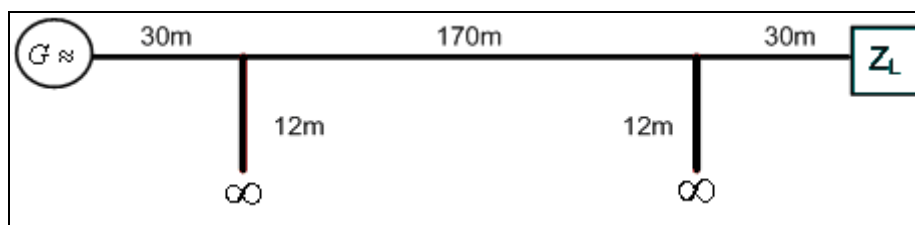
Σχήμα 5.6 Συνάρτηση Μεταφοράς Γραμμής Ηλεκτρικής Ισχύος X/T με τρεις διακλαδώσεις προσαρμοσμένες

Από τη σύγκριση των Σχημάτων 5.4, 5.5, 5.6 προκύπτει ότι όσο περισσότερα προσαρμοσμένα ως προς τη γραμμή στελέχη λειτουργούν τόσο μεγαλώνει η εξασθένιση που προκαλείται λόγω πολυδιαδρομικής μετάδοσης, γεγονός το οποίο είναι λογικό αφού περισσότερη ισχύς απορροφάται από τις προσαρμοσμένες στο δίκτυο συσκευές κάθε διακλάδωσης.

5.3 Τοπολογίες γραμμών M/T

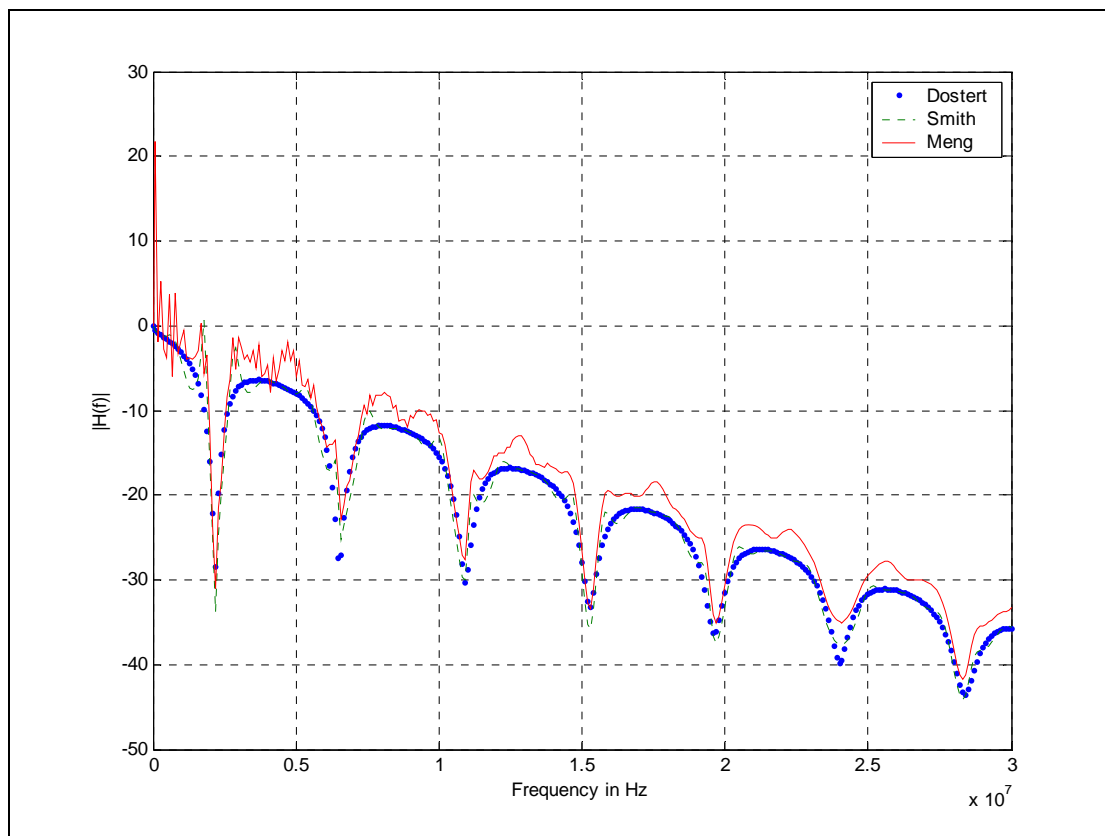
5.3.1 3^η Τοπολογία

Στην περίπτωση αυτή παρουσιάζεται τοπολογία γραμμών ηλεκτρικής ισχύος M/T με δύο ανοιχτοκυκλωμένες διακλαδώσεις ($|\rho|=1$). Σημείο έγχυσης σήματος στην υπόψη συνδεσμολογία θεωρείται και εδώ, όπως σε κάθε περίπτωση, προσαρμοσμένη πηγή ($G \approx$). Τα μήκη της γραμμής αποτελούν τυπικά μήκη σε γραμμές M/T. Η τοπολογία που εξετάζεται είναι αυτή του Σχήματος 5.7



Σχήμα 5.7 Τοπολογία 3

Στο Σχήμα 5.8 παρουσιάζεται η γραφική παράσταση του μέτρου της συνάρτησης μεταφοράς του διαύλου ως προς τη συχνότητα.



Σχήμα 5.8 Συνάρτηση Μεταφοράς Γραμμής Ηλεκτρικής Ισχύος M/T με τρεις διακλαδώσεις

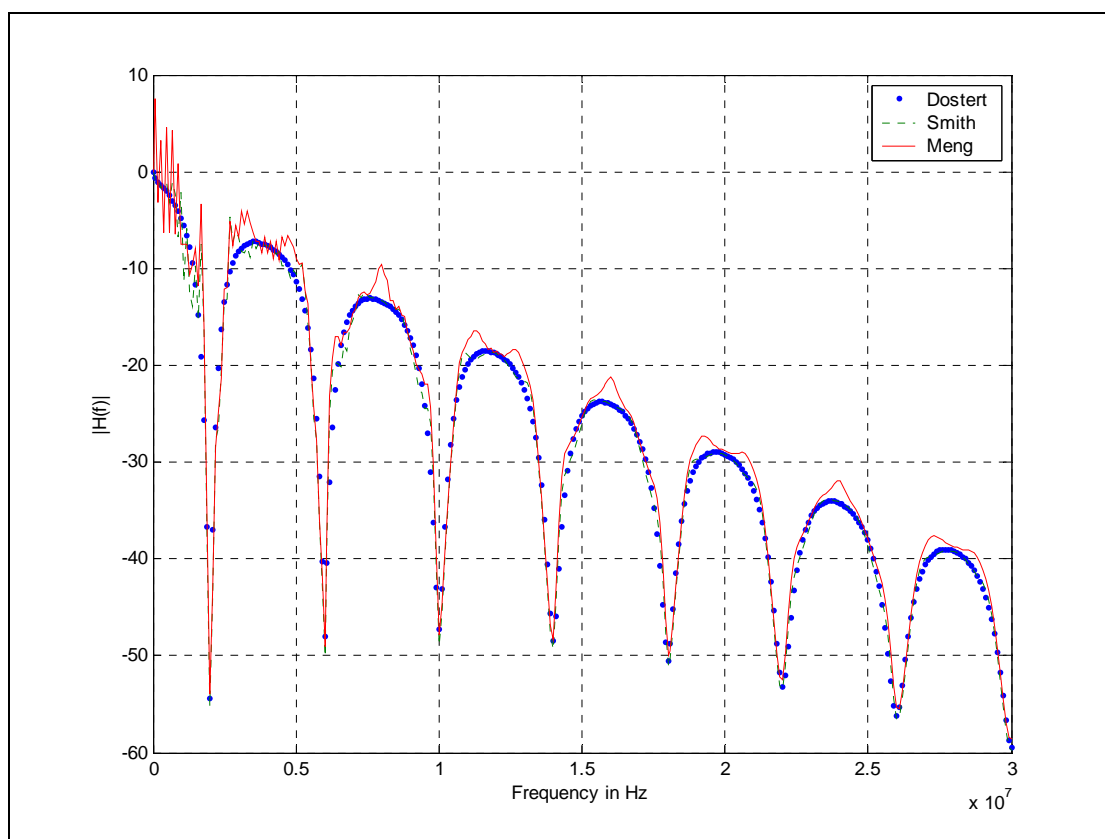
Και σε αυτή την περίπτωση, παρατηρείται σύμπτωση των αποτελεσμάτων από τις τρεις μεθόδους.

Η εξασθένηση του σήματος και στην περίπτωση γραμμών M/T είναι αρκετά μεγάλη λόγω των μεγάλων αποστάσεων μεταξύ των συνδρομητών PLC που συνδέονται στο δίκτυο M/T (είτε Wifi spots, είτε άμεση σύνδεση στο δίκτυο). Για να αντισταθμισθούν η απόσβεση και οι παραμορφώσεις του σήματος λόγω της μετάδοσής του μέσω των γραμμών M/T, παρεμβάλλονται επί των γραμμών επαναλήπτες που αναγεννούν το σήμα αυξάνοντας την ισχύ του και διατηρώντας την ποιότητά του. Επομένως είναι σημαντική η χρήση επαναληπτών αλλά και η θέση όπου αυτοί τοποθετούνται (κατώφλι εξασθένησης).

5.3.2 4^η Τοπολογία

Η τοπολογία αυτή αποτελείται από μια ανοιχτοκυκλωμένη διακλάδωση και είναι ίδια με την 1^η τοπολογία που εξετάστηκε για την X/T.

Στο Σχήμα 5.9 παρουσιάζεται η αντίστοιχη γραφική παράσταση.

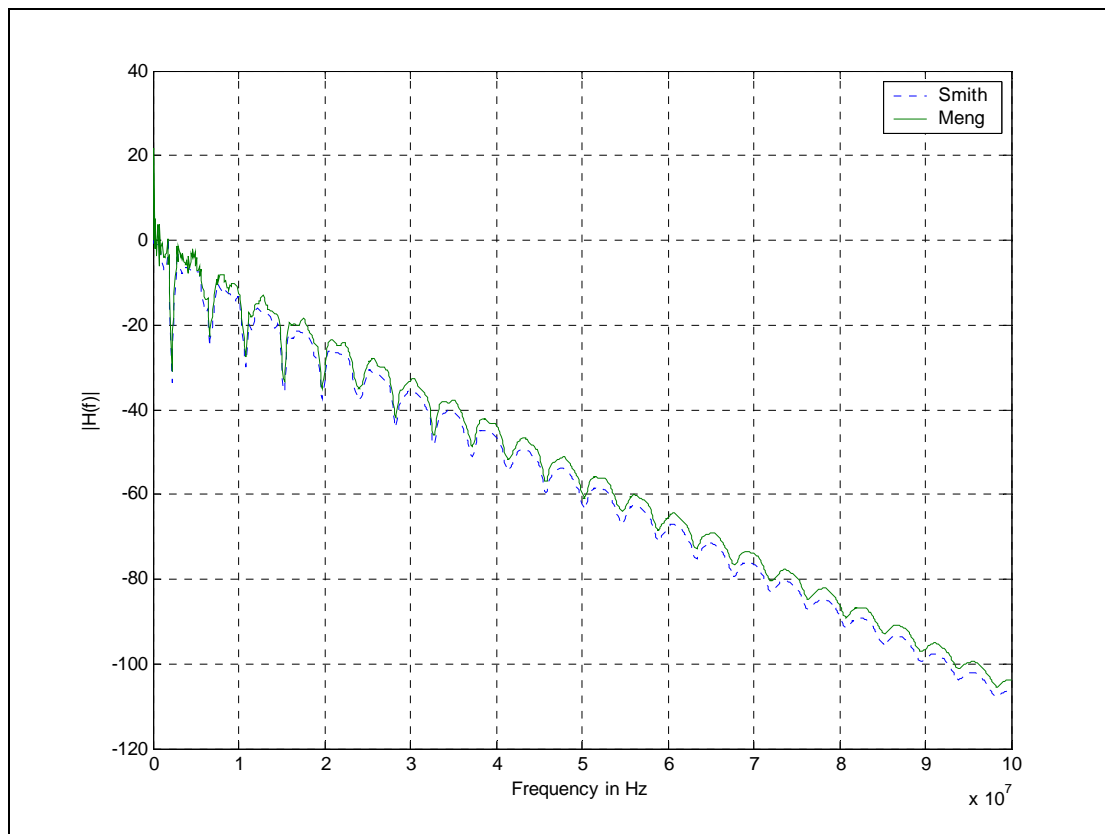


Σχήμα 5.9 Συνάρτηση Μεταφοράς Γραμμής Ηλεκτρικής Ισχύος M/T

Παρατηρείται μικρότερη εξασθένηση στη M/T σε σχέση με τη X/T ενώ οι συχνοεπιλεκτικές εγκοπές είναι βαθύτερες σε σύγκριση με τη γραφική της 1^η τοπολογίας για τη X/T.

5.3.3 5^η Τοπολογία

Στην περίπτωση αυτή εξετάζεται η 3^η τοπολογία αλλά για μεγαλύτερο εύρος συχνοτήτων (έως 100MHz).

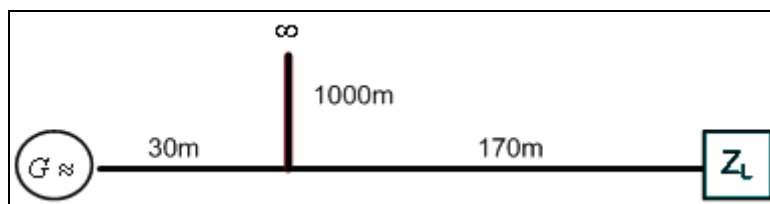


Σχήμα 5.10 Συνάρτηση Μεταφοράς Γραμμής Ηλεκτρικής Ισχύος M/T

Από το Σχήμα 5.10, φαίνεται η διατήρηση της εξάρτησης της εξασθένησης από τη συχνότητα (όσο η συχνότητα μεγαλώνει, μεγαλώνει και η εξασθένηση) και για μεγαλύτερες συχνότητες.

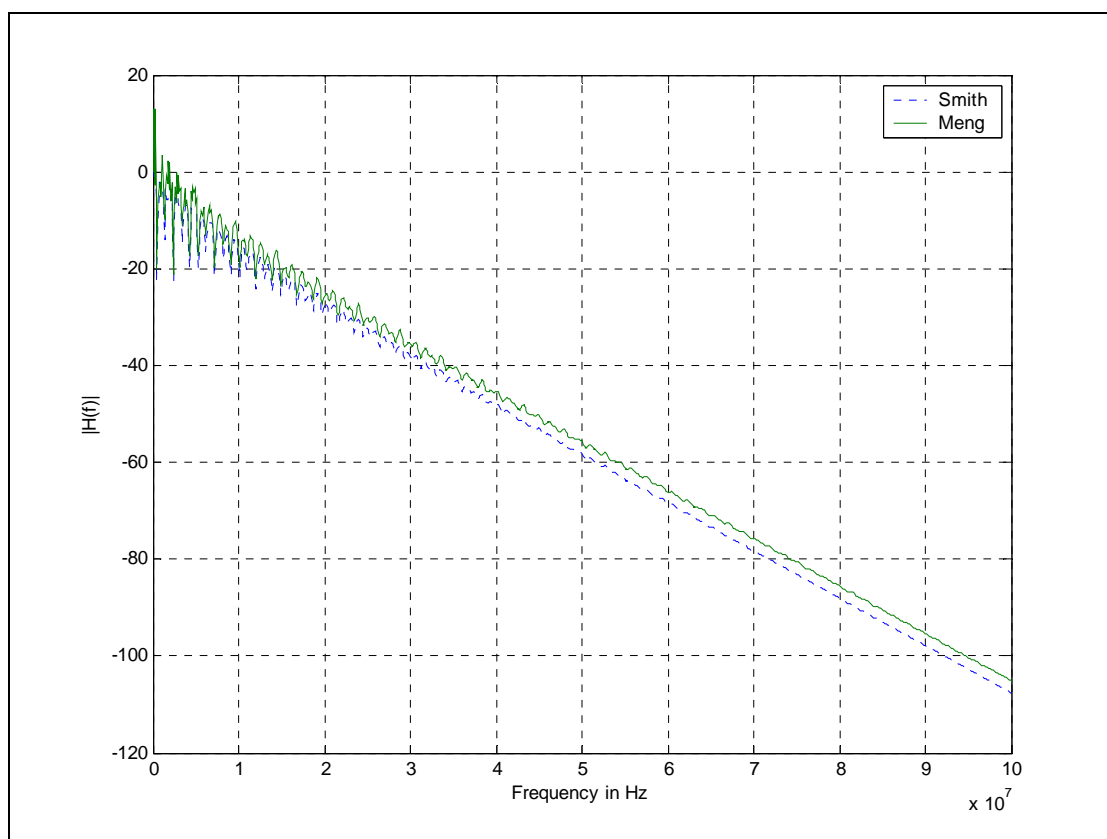
5.3.4 6^η Τοπολογία

Και σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιείται η 1^η τοπολογία με τη διαφορά, όπως φαίνεται και από το Σχήμα 5.11 στο μήκος της ανοιχτοκυκλωμένης παράκαμψης, το οποίο είναι σχεδόν δεκαπλάσιο συγκρινόμενο με αυτό της τοπολογίας 1.



Σχήμα 5.11 Τοπολογία 6

Στο Σχήμα 5.12 παρουσιάζεται η αντίστοιχη γραφική παράσταση για την παρούσα τοπολογία.

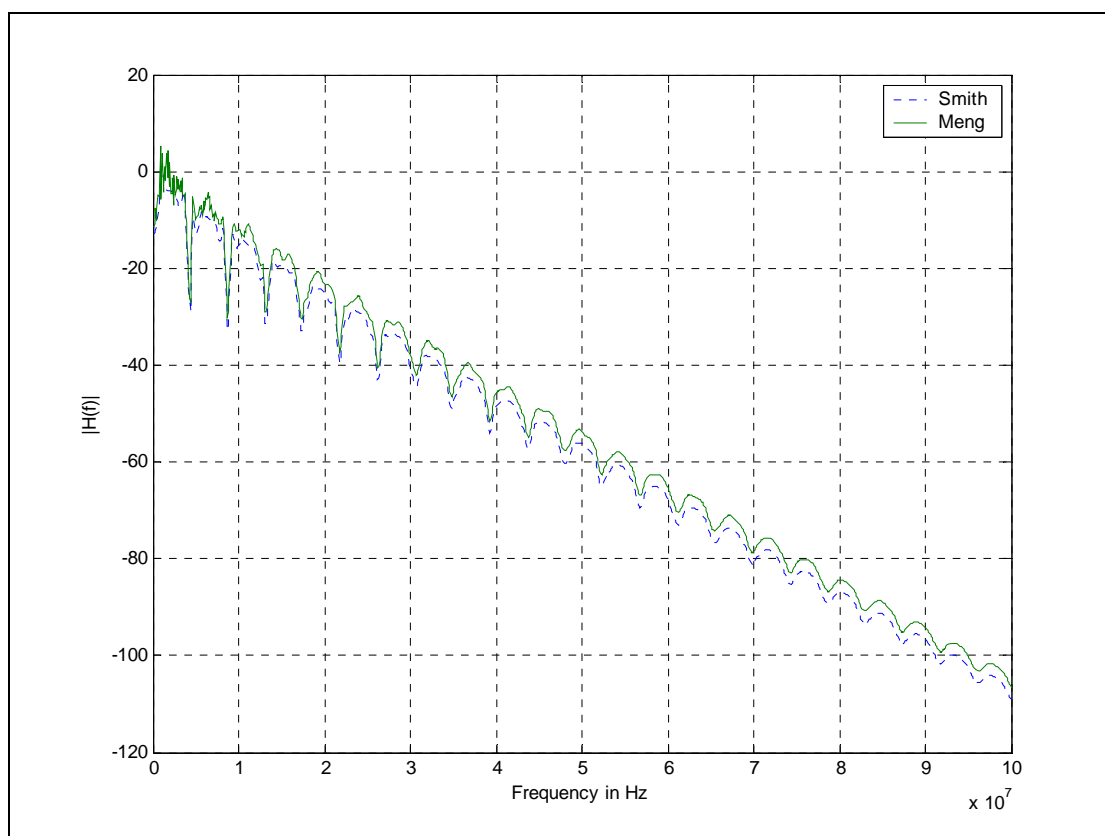


Σχήμα 5.12 Συνάρτηση Μεταφοράς Γραμμής Ηλεκτρικής Ισχύος M/T

Παρατηρείται μείωση των συχνοεπιλεκτικών εγκοπών. Η βελτίωση αυτή είναι εντονότερη στις υψηλότερες συχνότητες. Αυτή η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως αντίμετρο για την αντιμετώπιση βαθιών συχνοεπιλεκτικών εγκοπών (mitigation technique), λόγω περιορισμού των σημαντικών διαδρομών.

5.3.5 7^η Τοπολογία

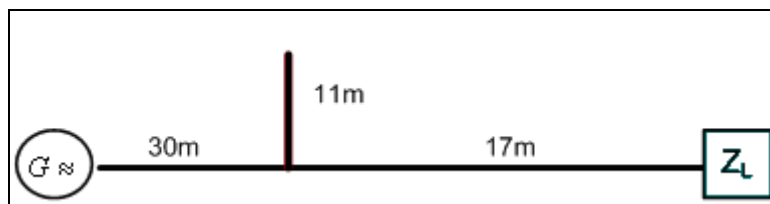
Στην περίπτωση αυτή παρουσιάζεται η ίδια τοπολογία (5^η τοπολογία) αλλά αντί για ανοιχτοκυκλωμένη διακλάδωση θεωρείται βραχυκυκλωμένη ($p = -1$). Συγκρίνοντας τις δύο γραφικές παραστάσεις παρατηρείται αλλαγή θέσης των βυθισμάτων σε σχέση με την 5^η τοπολογία χωρίς όμως να αλλάζει η μέση εξασθένηση του διαύλου με μετακίνηση των βυθισμάτων προς τα δεξιά.



Σχήμα 5.13 Συνάρτησης Μεταφοράς Γραμμής Ηλεκτρικής Ισχύος M/T

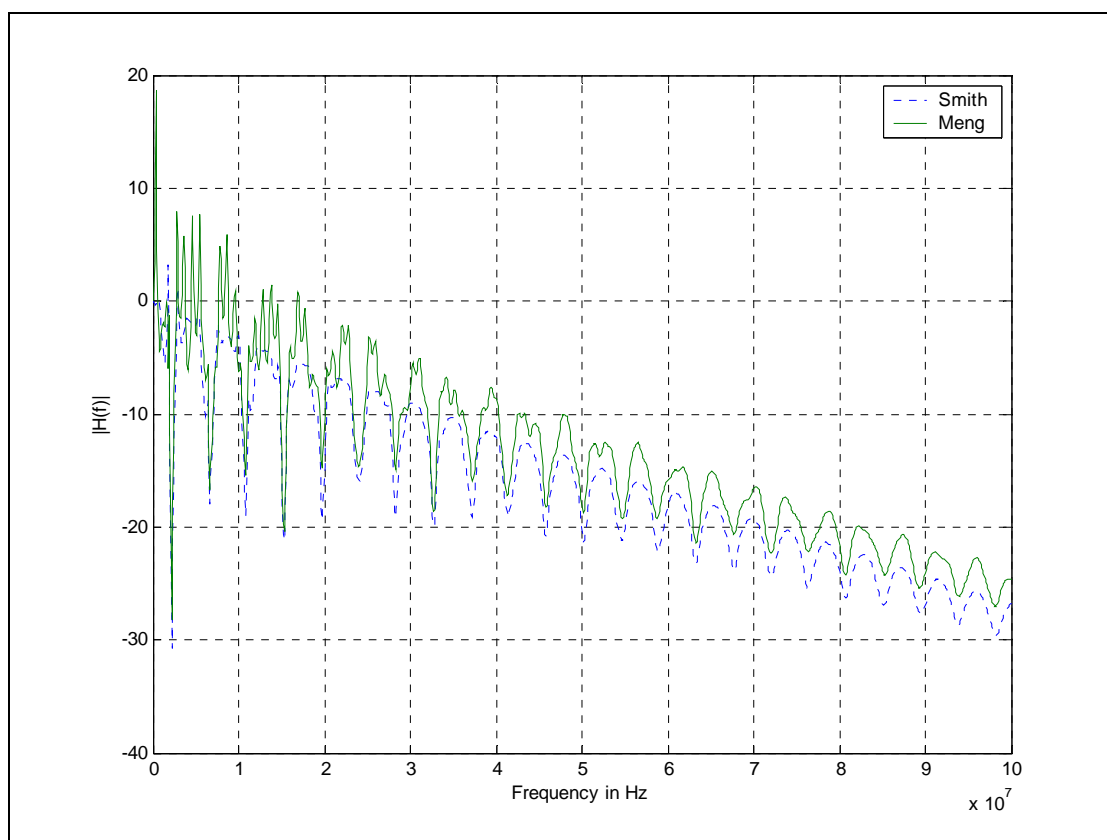
5.3.6 8^η Τοπολογία

Εξετάζεται και πάλι η 5^η τοπολογία με τη διαφορά ότι μειώνεται η συνολική απόσταση από τη διακλάδωση κατά 100m, από το στέλεχος μέχρι τον τερματισμό (Σχήμα 5.14).



Σχήμα 5.14 Τοπολογία 7

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η γραφική παράσταση για την ανωτέρω τοπολογία σε γραμμή M/T (Σχήμα 5.15).



Σχήμα 5.15 Συνάρτηση Μεταφοράς Γραμμής Ηλεκτρικής Ισχύος M/T

Από τη γραφική φαίνεται ότι, ο διάυλος χαρακτηρίζεται από μικρότερη εξασθένιση κάτι το οποίο είναι λογικό αν ληφθεί υπόψη η εξάρτηση της εξασθένισης από το μήκος της διαδρομής (ασθενέστερα χαρακτηριστικά βαθυπερατού φίλτρου).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ**6****ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ PLC****6.1 Τεχνικές διαμόρφωσης σε συστήματα PLC**

Η επιλογή του σχήματος διαμόρφωσης για ένα δεδομένο σύστημα επικοινωνιών εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη φύση και τα χαρακτηριστικά του μέσου στο οποίο πρέπει να λειτουργήσει. Ο διάυλος γραμμής ηλεκτρικής ισχύος παρουσιάζει δυσμενείς ιδιότητες για τη μετάδοση τηλεπικοινωνιακών σημάτων, όπως η ύπαρξη πολλών τύπων θορύβου και η πολυδιαδρομική μετάδοση. Εκτός από τα χαμηλά κόστη υλοποίησης, το σχήμα διαμόρφωσης που εφαρμόζεται σε ένα σύστημα PLC πρέπει επίσης να υπερκαλύπτει τις διάφορες εξασθενήσεις που εισάγει ο διάυλος. Παράδειγμα, για να είναι υποψήφιο κάποιο σχήμα διαμόρφωσης για εφαρμογή σε ένα σύστημα PLC, πρέπει να είναι σε θέση να αντιμετωπίσει τα μη γραμμικά χαρακτηριστικά του καναλιού. Αυτή η έλλειψη γραμμικότητας του διαύλου θα καθιστούσε τον αποδιαμορφωτή πολύ σύνθετο και ακριβό, εάν όχι μη υλοποιήσιμο, για ρυθμούς μετάδοσης υψηλότερους των 10Mbps με τη διαμόρφωση απλού φέροντος. Επομένως, η διαμόρφωση PLC πρέπει να υπερνικήσει αυτό το πρόβλημα χωρίς την ανάγκη για μια ιδιαίτερα περίπλοκη εξίσωση. Η κακή προσαρμογή της σύνθετης αντίστασης των τερματισμών προς τα ηλεκτρικά καλώδια δημιουργεί σήμα ηχούς προκαλώντας διάδοση καθυστέρησης (delay spread), που αποτελεί άλλη μια πρόκληση για το σχήμα διαμόρφωσης, η οποία πρέπει να υπερνικήσει τις ισχυρές διαλείψεις λόγω πολυδιαδρομικής μετάδοσης. Η επιλεγμένη διαμόρφωση πρέπει να προσφέρει ευελιξία όσον αφορά τη χρήση και τον αποκλεισμό

ζωνών συχνοτήτων όταν αυτές εμφανίζουν υψηλές εξασθενήσεις ή έχουν εκχωρηθεί σε άλλη υπηρεσία.

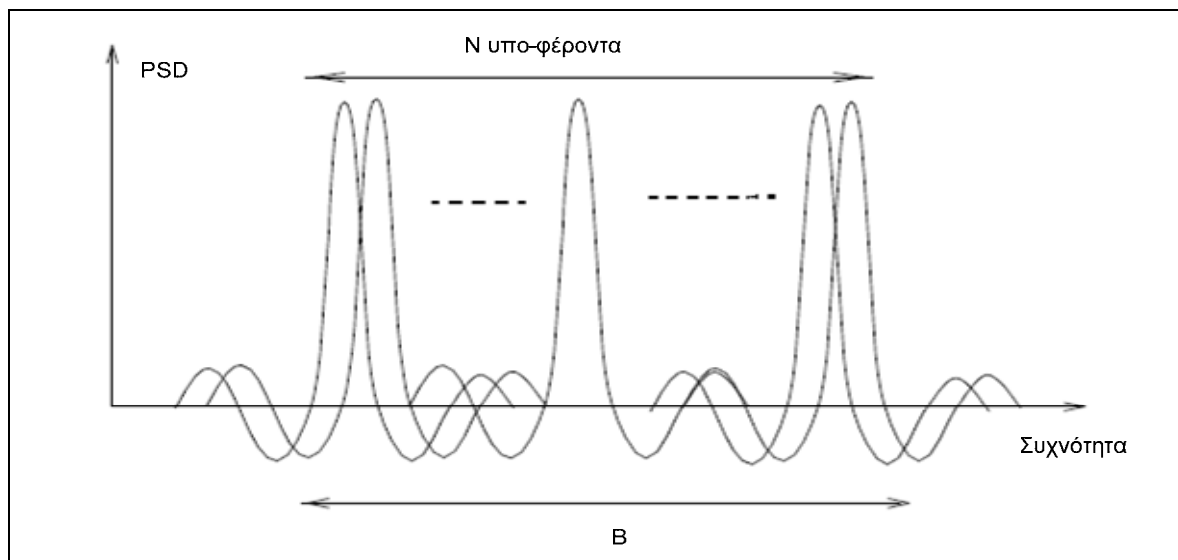
Πρόσφατες έρευνες έχουν εστιάσει σε δύο τεχνικές διαμόρφωσης που έχουν εμφανίσει καλές αποδόσεις σε δύσκολα περιβάλλοντα και επομένως υιοθετήθηκαν για διαφορετικά συστήματα. Η πρώτη τεχνική διαμόρφωσης είναι η ορθογώνια μέθοδος διαμόρφωσης OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) που έχει υιοθετηθεί για το European Digital Audio Broadcasting (DAB), την τεχνολογία DSL (Digital Subscriber Line) και η δεύτερη είναι η διαμόρφωση απλωμένου φάσματος (spread-spectrum modulation), η οποία χρησιμοποιείται ευρέως στις ασύρματες εφαρμογές, προσφέροντας μια επαρκή διαμόρφωση ως προς την πολλαπλή πρόσβαση.

6.1.1 Ορθογώνια Μέθοδος Διαμόρφωσης OFDM

6.1.1.1 Αρχές διαμόρφωσης

Η διαμόρφωση πολλαπλών φερόντων (MultiCarrier Modulation ή MCM) βασίζεται στη μετάδοση δεδομένων με διαίρεση της συνεχούς ροής σε παράλληλες ροές bit, κάθε μια από τις οποίες έχει ένα μικρότερο ρυθμό bit και αυτές οι υποροές διαμορφώνονται με χρήση μερικών φερόντων, αποκαλούμενων και ως υποφερόντων. Η βάση της διαμόρφωσης MCM παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.3. Τα πρώτα συστήματα που χρησιμοποίησαν το MCM ήταν στρατιωτικές HF ραδιοφωνικές συνδέσεις στη δεκαετία του '60. Η ορθογώνια διαμόρφωση διαίρεσης συχνότητας (Orthogonal Frequency Division Multiplexing ή OFDM) είναι μια ειδική μορφή της MCM με πυκνά διαστήματα υποφερόντων και επικαλυπτόμενα φάσματα, όπως παρουσιάζεται το σύμβολο OFDM ως προς τη συχνότητα στο Σχήμα 6.1. Για να επιτραπεί μια χωρίς λάθη λήψη OFDM σημάτων, οι κυματομορφές των υποφερόντων επιλέγονται ώστε να είναι ορθογώνιες μεταξύ τους. Σε σύγκριση με τις μεθόδους διαμόρφωσης όπως η BPSK (Binary Phase Shift Keying) ή QPSK (Quadrature Phase Shift Keying), η OFDM μεταδίδει σύμβολα που έχουν σχετικά μεγάλη διάρκεια, αλλά στενό εύρος ζώνης. Στην περίπτωση όπου η διάρκεια ενός συμβόλου είναι μικρότερη ή ίση προς τη μέγιστη καθυστέρηση μετάδοσης, όπως συμβαίνει και με τις άλλες διαμορφώσεις, το λαμβανόμενο σήμα αποτελείται από επικαλυπτόμενα αντίγραφα αυτών των

συμβόλων μετάδοσης ή του συμβόλου παρεμβολής (ISI Inter-Symbol Interference). Στα συστήματα OFDM, οι επιμέρους ζώνες συχνοτήτων θεωρούνται στενού εύρους έτσι ώστε να θεωρούνται ως ζώνες με επίπεδη εξασθένηση ως προς τη συχνότητα. Αυτό επιτρέπει τα επιμέρους φέροντα να παραμένουν ορθογώνια όταν διαβιβάζεται το σήμα μέσω μιας επιλεκτικής συχνότητας αλλά χρονικά αμετάβλητου καναλιού. Εάν ένα διαμορφωμένο σήμα OFDM διαβιβάζεται μέσα από ένα τέτοιο κανάλι, κάθε επιμέρους φέρον υποβάλλεται σε διαφορετική εξασθένηση. Κωδικοποιώντας τις επιμέρους ροές δεδομένων, τα λάθη που είναι πλέον πιθανά να εμφανιστούν στα εξασθενημένα υποφέροντα ανιχνεύονται και διορθώνονται στο δέκτη με χρήση κωδικοποίησης FEC (Forward Error Correcting codes).

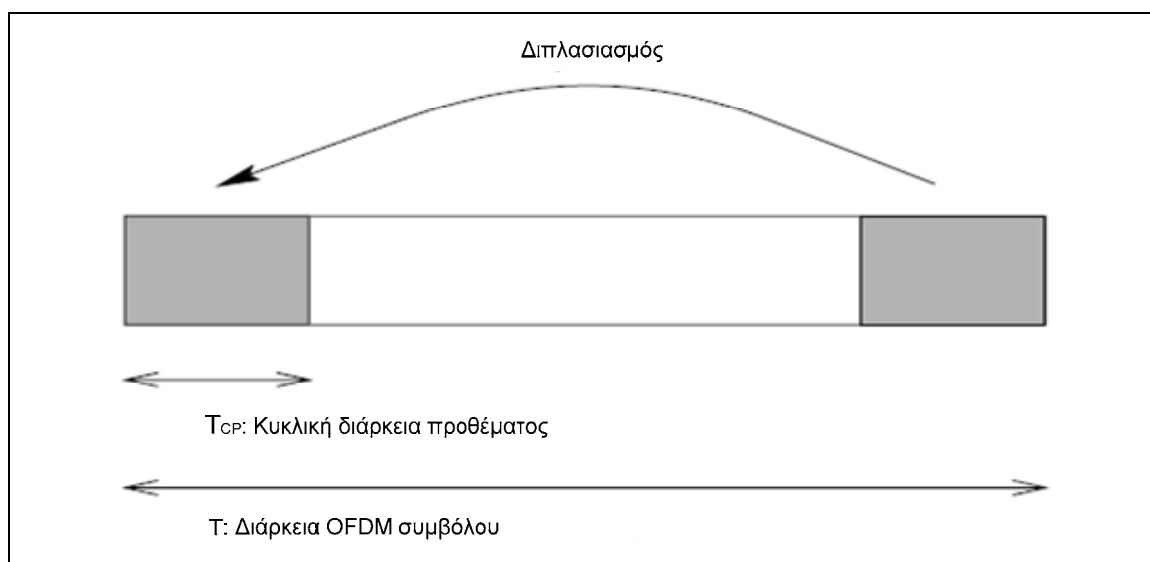


Σχήμα 6.1 Παρουσίαση συμβόλων OFDM ως προς τη συχνότητα

Αν και η διαμόρφωση OFDM κρίνεται ως εύρωστη απέναντι στην επιλεκτική φασματική εξασθένηση (πλεονέκτημα της διαμόρφωσης OFDM), ο μεταβλητός με το χρόνο χαρακτήρας του διαύλου δημιουργεί εμπόδια στην απόδοση του συστήματος. Οι χρονικές μεταβολές είναι γνωστό ότι επιδεινώνουν την ορθογωνιότητα των υποφερόντων [Cimi85]. Σε αυτήν την περίπτωση, προκύπτει περαμβολή μεταξύ φερόντων (Inter-Carrier Interference ή ICI) που εμφανίζεται επειδή τμήματα του σήματος ενός υποφέροντος παρεμβάλλονται από γειτονικά υποφέροντα.

Με τη διάσπαση και μετάδοση της πληροφορίας σε N επιμέρους υποφέροντα, η διάρκεια συμβόλου ενός σήματος OFDM καθίσταται N φορές μεγαλύτερη από τη διάρκεια συμβόλου ενός ισοδύναμου σήματος απλού φέροντος. Συνεπώς, η διασυμβολική παρεμβολή ISI που εισάγεται από τα γραμμικά χρονικά κανάλια

διασποράς ελαχιστοποιείται. Εντούτοις, για να εξαλειφθεί η διασυμβολική παρεμβολή πλήρως, ένα διάστημα ασφάλειας (guard time) παρεμβάλλεται με διάρκεια μεγαλύτερη από τη διάρκεια της κρουστικής απόκρισης του καναλιού. Επιπλέον, το διάστημα ασφάλειας παρατείνεται κυκλικά. Διαπιστώνεται ότι παρουσία γραμμικής χρονικής διασποράς καναλιού, ένα κατάλληλο διάστημα ασφάλειας αποφεύγει την διασυμβολική παρεμβολή αλλά όχι το ICI, εκτός και αν επεκτείνεται κυκλικά [Rodr02]. Για το λόγο αυτό, ένα διάστημα φύλαξης με διάρκεια T_{CP} προστίθεται στο σύμβολο OFDM και προκειμένου να δημιουργηθεί ένα είδος περιοδικότητας γύρω από αυτό το σύμβολο OFDM το περιεχόμενο αυτού του διαστήματος ασφάλειας λαμβάνεται από το πρώτο τμήμα του συμβόλου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.2. Σε αυτήν την περίπτωση, το διάστημα ασφάλειας γίνεται το κυκλικό πρόθεμα (CP cyclic prefix).



Σχήμα 6.2 Προσθέτοντας το κυκλικό πρόθεμα με το διπλασιασμό του πρώτου μέρους του αρχικού συμβόλου

Η εισαγωγή κατάλληλου κυκλικά παρατεταμένου διαστήματος ασφάλειας περιορίζει τα ISI και ICI σε ένα κανάλι γραμμικής διασποράς. Εντούτοις, η διαδικασία αυτή προκαλεί του σηματοθορυβικού λόγου (SNR) και μια αύξηση του αναγκαίου εύρους ζώνης [Rodr02]. Η μείωση του SNR δίνεται από τη σχέση

$$SNR_{loss} (dB) = 10 \log \frac{T}{T - T_{CP}} \quad (6.1)$$

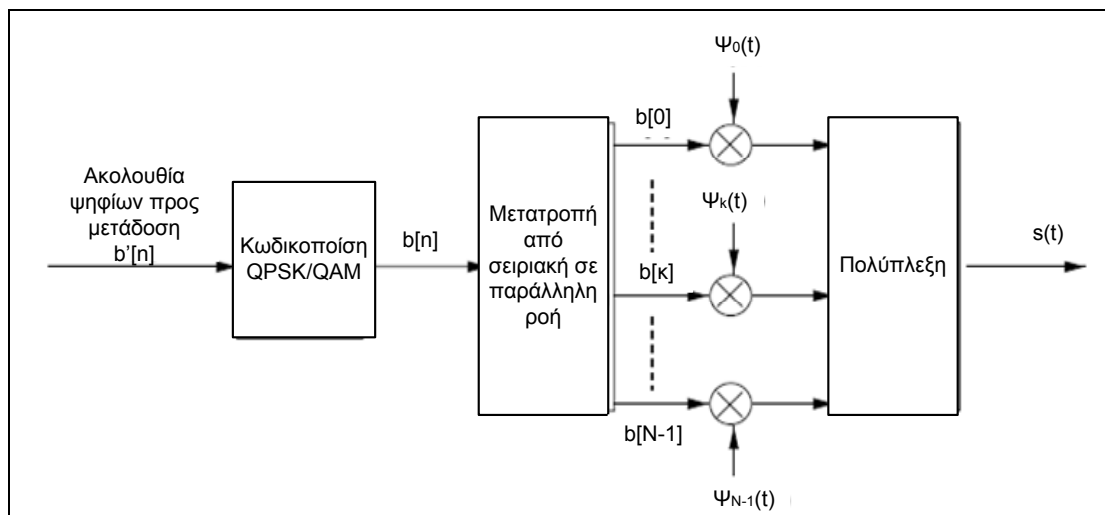
και ο παράγοντας επέκτασης (expansion factor) του εύρους ζώνης δίνεται από τη σχέση

$$\varepsilon_B = \frac{T}{T - T_{CP}} \quad (6.2)$$

6.1.1.2 Παραγωγή σημάτων OFDM

Η παραγωγή των συμβόλων OFDM βασίζεται σε δύο αρχές. Πρώτον, η ροή των δεδομένων υποδιαιρείται σε ένα δεδομένο πλήθος υποροών, κάθε μια από τις οποίες διαμορφώνεται σε συγκεκριμένο επιμέρους φέρον. Πριν μεταδοθούν τα προκύπτοντα διαμορφωμένα σήματα πρέπει να πολυπλεχθούν. Δεύτερον, είναι δυνατή η ανεξάρτητη χρήση των πολυπλεγμένων φασματικά επιμέρους φερόντων. Αυτό εξασφαλίζει ότι το φάσμα των μεμονωμένων επιμέρους φερόντων είναι μηδενικό στις άλλες συχνότητες επιμέρους φερόντων, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.1, που εμφανίζει τη θεμελιώδη αρχή της ορθογωνικότητας και της υλοποίησης της OFDM. Το Σχήμα 6.3 παρουσιάζει το βασικό λειτουργικό διάγραμμα υλοποίησης των OFDM [Cimi85]. Η ροή των δεδομένων διασπάται σε N παράλληλες ροές δεδομένων και χωρίζεται σε διαστήματα κάθε $\tau = \frac{1}{f_s}$, όπου f_s ο επιθυμητός ρυθμός συμβόλων. N παράλληλα στοιχεία διαμορφώνουν N επιμέρους φέροντα διαδικασία που αποτελεί πολύπλεξη με διαίρεση συχνότητας. Η διάρκεια συμβόλου έχει αυξηθεί τώρα σε $N \cdot \Delta t$ παρέχοντας ευρωστία στην καθυστέρηση διάδοσης που προκαλείται από το κανάλι. Κάθε μια από τις δύο γειτονικές συχνότητες των επιμέρους φερόντων χωρίζεται κατά διαστήματα έπειτα από το διάστημα που υπολογίζεται από την εξίσωση (6.3).

$$\Delta_f = \frac{1}{N \cdot \Delta t} \quad (6.3)$$



Σχήμα 6.3 Παραγωγή σημάτων OFDM

Αυτό εξασφαλίζει ότι οι συχνότητες των επιμέρους φερόντων χωρίζονται κατά πολλαπλάσια του $\frac{1}{T}$, έτσι ώστε τα επιμέρους φέροντα να είναι ορθογώνια μεταξύ τους κατά την διάρκεια εκπομπής συμβόλων αποφεύγοντας τη δημιουργία αλληλοπαρεμβολών. Πρέπει να αναφερθεί ότι η διάρκεια T σε αυτήν τη φάση είναι η διάρκεια του συμβόλου OFDM στην οποία η κυκλική περίοδος T_{CP} δεν έχει προστεθεί ακόμα.

Σύμφωνα με τη διαμόρφωση OFDM, το μεταδιδόμενο σήμα $s(\tau)$ εκφράζεται υπό τη μορφή

$$s(t) = \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=-\infty}^{\infty} b_l[k] \psi_k(t - lT) \quad (6.4)$$

Επιλέγοντας παλμούς της μορφής $p(t)$ και $f_k = \frac{k}{T}$, κάθε επιμέρους φέρον μπορεί να

εκφραστεί υπό τη μορφή

$$\psi_k(t) = p(t) \cdot e^{j2\pi f_k t} \quad (6.5)$$

Η βάση $\{\psi_0, \psi_1, \dots, \psi_{N-1}\}$ είναι ορθογώνια, οπότε ισχύει

$$\int_0^T \psi_k(t) \cdot \psi_i^*(t) dt = \begin{cases} 1 & \alpha \nu \ i = k \\ 0 & \alpha \nu \ i \neq k \end{cases} \quad (6.6)$$

Με βάση τα ανωτέρω, το σήμα μετάδοσης έρχεται στη μορφή

$$s(t) = \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=-\infty}^{\infty} b_l[k] \cdot p(t - lT) \cdot e^{j2\pi f_k t} \quad (6.7)$$

Δειγματοληπτώντας με ρυθμό $T_s = \frac{T}{N}$, προκύπτει

$$x[n] = \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=-\infty}^{\infty} b_l[k] \cdot \prod_N [n \cdot T_s - l \cdot NT_s] \cdot e^{j2\pi knT_s / (NT_s)} \quad (6.8)$$

$$x[n] = \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=-\infty}^{\infty} b_l[k] \cdot \prod_N [n - lN] \cdot e^{j2\pi kn / N} \quad (6.9)$$

όπου

$$\prod_N [n - lN] = \begin{cases} 1 & (l \cdot N < n \leq (l+1) \cdot N) \\ 0 & \text{σε άλλη περίπτωση} \end{cases} \quad (6.10)$$

Στη συνέχεια, το σήμα έρχεται στη μορφή

$$x[n] = \sum_{l=-\infty}^{\infty} \prod_N [n - lN] \cdot \sum_{k=0}^{N-1} b_l[k] \cdot e^{j2\pi kn / N} \quad (6.11)$$

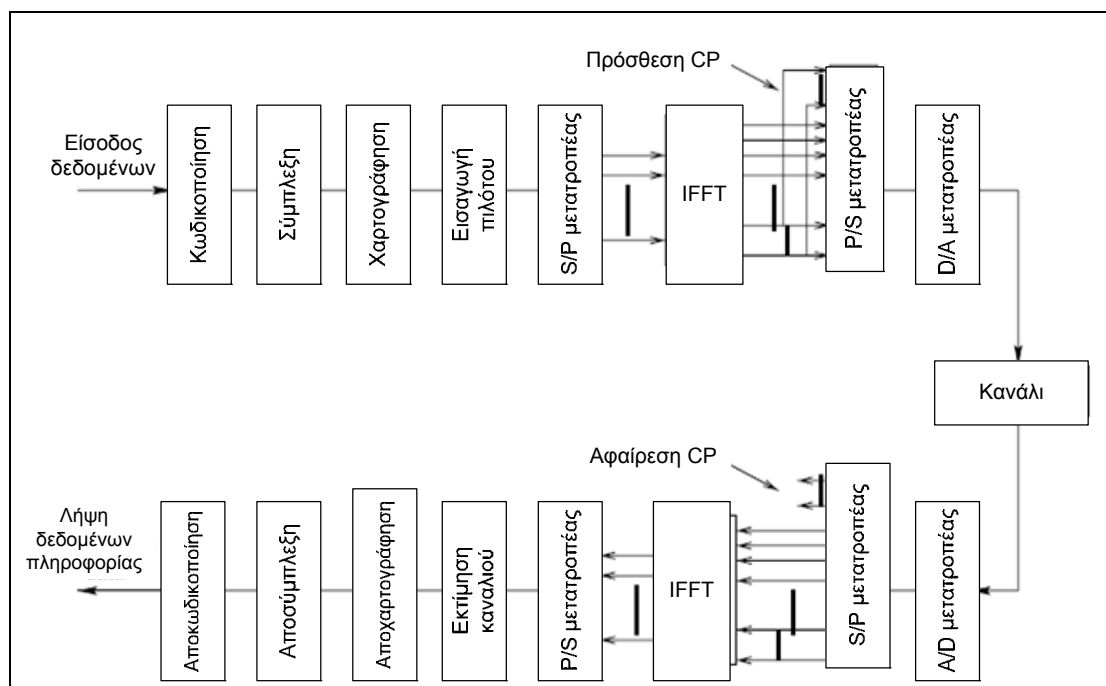
$$x[n] = \sum_{l=-\infty}^{\infty} \prod_N [n - lN] \cdot \text{IDFT}(b_l, n) \quad (6.12)$$

όπου IDFT είναι ο αντίστροφος διακριτός μετασχηματισμός Fourier (Inverse Discrete Fourier Transform ή IDFT).

Από την παρουσίαση αυτή της διαδικασίας OFDM, σήματος, εξάγεται το συμπέρασμα ότι για την παραγωγή των OFDM σημάτων $x[n]$ απαιτείται μια επεξεργασία φραγμών IDFT. Η παραγωγή σήματος OFDM μπορεί να βελτιωθεί περαιτέρω με τον υπολογισμό του IDFT των αρχικών σημάτων. Για την κυκλική επέκταση του συμβόλου OFDM, τα τελευταία δείγματα T_{CP} της εξόδου φραγμών IFFT παρεμβάλλονται στην έναρξη του συμβόλου OFDM. Στην πλευρά της λήψης, τα πρώτα δείγματα TCP του συμβόλου OFDM πρέπει να απορριφθούν, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.4.

6.1.1.3 Υλοποίηση του συστήματος OFDM

Στην προηγούμενη ενότητα αναλύθηκε η δημιουργία ενός συμβόλου OFDM με τη χρήση IFFT/IFF επεξεργασίας φραγμών. Ωστόσο, μερικές συμπληρωματικές λειτουργίες πρέπει πραγματοποιηθούν και να εφαρμοστούν στα ψηφία πληροφορίας πριν να υποβληθούν σε επεξεργασία IFFT, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.6.



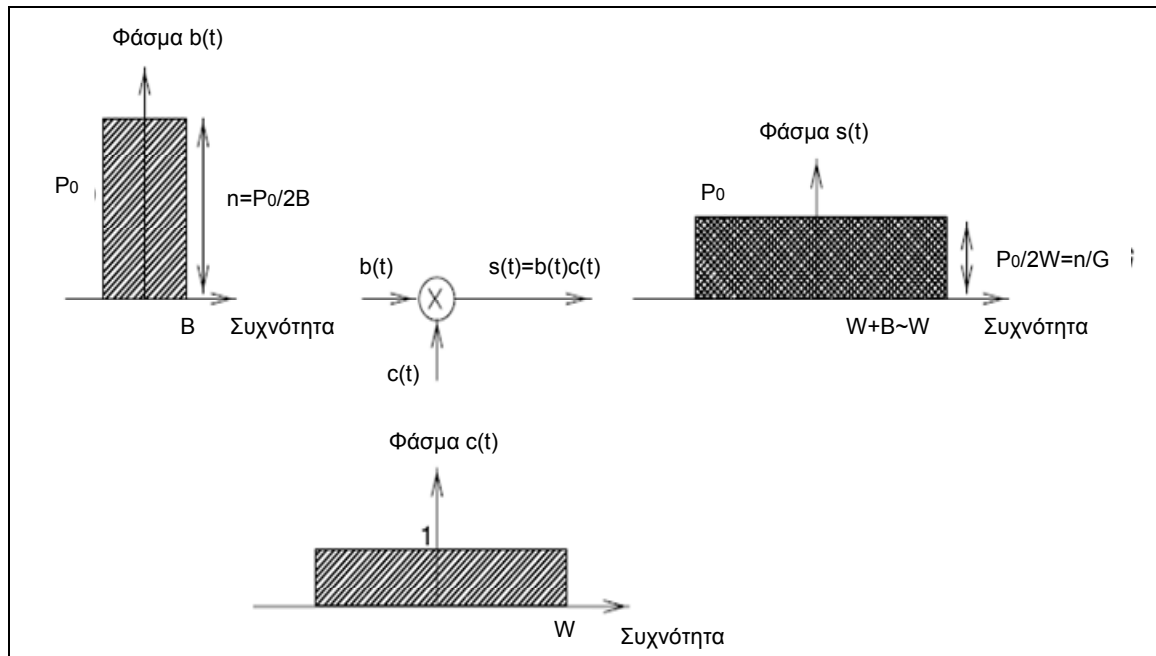
Σχήμα 6.4 Υλοποίηση ενός OFDM συστήματος

Όσον αφορά την υλοποίηση ενός OFDM συστήματος συνοπτικά αναφέρεται ότι η εισερχόμενη ροή ψηφίων πληροφορίας κωδικοποιείται και πακετάρεται σε blocks συμβόλων. Για τα φέροντα μπορούμε να θεωρήσουμε QPSK, DQPSK ή QAM διαμόρφωση. Τα φέροντα αυτά μεταδίδονται κατά παράλληλο τρόπο. Μέσω ενός αντίστροφου μετασχηματισμού Fourier (IFFT) δημιουργούν ανά N ένα OFDM σύμβολο. Ένα διάστημα ασφαλείας (guard interval) προστίθεται σε αυτό για μείωση της ISI. Κατόπιν τα διακριτά σύμβολα φιλτράρονται και μετατρέπονται σε αναλογικά για τη μετάδοσή τους μέσω των γραμμών ισχύος με κεντρική συχνότητα μετάδοσης f_0 .

Στο δέκτη ακολουθεί η αντίστροφη διαδικασία. Μετά τη λήψη τους από το δίαυλο μετάδοσης, τα σειριακά λαμβανόμενα OFDM σύμβολα μετατρέπονται σε παράλληλα blocks συμβόλων (serial to parallel μετατροπή). Κατόπιν, αφαιρείται η κυκλική επέκτασή τους (cyclic prefix removal) και απομένουν μόνο τα χρήσιμα bits πληροφορίας. Η παράλληλη ακολουθία συμβόλων υποβάλλεται σε μετασχηματισμό Fourier (FFT) και το αποτέλεσμα του μετατρέπεται ξανά σε σειριακή ακολουθία προκειμένου να γίνει η αποδιαμόρφωση των επιμέρους φερόντων με την ίδια μέθοδο που χρησιμοποιήθηκε στον πομπό για τη διαμόρφωσή τους (PSK, QAM κλπ.). Τα ψηφία που λαμβάνονται αποκωδικοποιούνται και λαμβάνονται αποφάσεις βάσει του διαγράμματος αστερισμού της μεθόδου διαμόρφωσης.

6.1.2 Διαμόρφωση απλωμένου φάσματος

Είναι ένας τύπος διαμόρφωσης που διαχέει τα δεδομένα που εκπέμπονται σε ολόκληρο το διαθέσιμο εύρος ζώνης συχνοτήτων, πέρα του ελαχίστου εύρους ζώνης που απαιτείται για να μεταδοθεί η πληροφορία. Τα πρώτα συστήματα απλωμένου φάσματος σχεδιάστηκαν για τις ασύρματες ψηφιακές επικοινωνίες, για να προσδώσουν ανθεκτικότητα σε εκούσιες παρεμβολές και χρησιμοποιήθηκαν στις στρατιωτικές επικοινωνίες. Οι περισσότερες εμπορικές εφαρμογές του είναι για αντιμετώπιση προβλημάτων σε εχθρικά περιβάλλοντα επικοινωνιών όπως το περιβάλλον PLC. Χαρακτηριστικές εμπορικές εφαρμογές αποτελούν τα ασύρματα τηλέφωνα, τα ασύρματα LANs, τα συστήματα PLC και τα συστήματα αντικατάστασης καλωδίων όπως είναι το Bluetooth. Σε ορισμένες περιπτώσεις, δεν υπάρχει κεντρικός έλεγχος των ραδιοπόρων και τα συστήματα πρέπει να λειτουργήσουν ακόμη και παρουσία ισχυρών παρεμβολών από άλλα συστήματα επικοινωνιών και ηλεκτρικών ή ηλεκτρονικών συσκευών. Στην περίπτωση αυτή, η παρεμβολή δεν είναι σκόπιμη, αλλά μπορεί να είναι αρκετά ισχυρή ώστε να επηρεάζει την επικοινωνία άλλων συστημάτων που λειτουργούν στο ίδιο φάσμα.



Σχήμα 6.5 Αρχή της διαπλάτυνσης του εύρους ζώνης σε DSSS

Η αρχή της διαπλάτυνσης του φάσματος παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.5, όπου το αρχικό σήμα πληροφορίας, με εύρος ζώνης B και διάρκεια T_s ,

πολλαπλασιαζόμενο με ένα σήμα ψευδοθορύβου μετατρέπεται σε ένα σήμα που καταλαμβάνει εύρος ζώνης W , όπου $W \gg B$. Η πολλαπλάσια επέκταση εύρους ζώνης μπορεί να μετρηθεί μέσω του παράγοντας διάχυσης (Spreading Factor ή SF). Για τις στρατιωτικές εφαρμογές, ο παράγοντας SF είναι μεταξύ 100 έως 1000 ενώ στο σύστημα UMTS/W-CDMA ο παράγοντας SF βρίσκεται μεταξύ του 4 και 256. Η παράμετρος αυτή είναι επίσης γνωστή και ως κέρδος διάπλάτυνσης ή κέρδος επεξεργασίας (spreading gain ή processing gain) και δίνεται από τη σχέση

$$G = \frac{W}{B} = W \cdot T_s \quad (6.13)$$

Οι τεχνικές διάχυσης φάσματος διακρίνονται σε Direct Sequence (DS), Frequency Hopping (FH), Time Hopping (TH) ή Multi-Carrier (MC). Είναι επίσης δυνατό να αναμιχθούν αυτές οι τεχνικές απλωμένου φάσματος ώστε προκύψουν υβριδικές τεχνικές που συνδυάζουν τα πλεονεκτήματα των διαφορετικών τεχνικών.

6.1.3 Επιλογή της κατάλληλης τεχνικής διαμόρφωσης για τα συστήματα PLC

Διάφορες έρευνες έχουν πραγματοποιηθεί για να προσδιοριστούν οι κατάλληλες εφαρμογές OFDM για δίκτυα PLC. Μια μέθοδος για τον έλεγχο της ισχύος των υποφερόντων, προκειμένου να αποφευχθεί η ραγδαία υποβάθμιση του σήματος OFDM μέσω του διαύλου μετάδοσης, που προκαλείται από την επιλεκτική ως προς τη συχνότητα εξασθένηση, προτείνεται στο [NomuSh01]. Αυτή η λύση αποτελείται από τον έλεγχο της ισχύος μετάδοσης κάθε επιμέρους φέροντος του σήματος OFDM προκειμένου να μεγιστοποιηθεί ο μέσος σηματοθορυβικός λόγος κάθε επιμέρους φέροντος του λαμβανόμενου σήματος. Αυτός ο έλεγχος είναι τόσο ευέλικτος όπου η συνολική μεταφερόμενη ισχύς δεν αυξάνεται. Περαιτέρω βελτίωση αυτού του ελέγχου είναι δυνατή μέσω της διάχυσης σε παράλληλες υποροές (substreams) στην έξοδο του μετατροπέα σειριακού σε παράλληλο (serial-to-parallel converter) [NishNo02, NishSh03]. Ένα σύστημα OFDM που υποδιαιρεί την αρχική ακολουθία πληροφορίας σε τρεις παράλληλες ομάδες δεδομένων, όπου κάθε ομάδα χαρτογραφείται είτε με τη διαμόρφωση BPSK είτε με QPSK και κωδικοποιείται είτε με κώδικα Reed–Solomon είτε με συνελκτικό κώδικα, έχει ερευνηθεί επίσης στο [KuriHa03]. Οι αποδόσεις του συστήματος OFDM ερευνήθηκαν, επίσης, υπό

διαφορετικά σενάρια θορύβου, ειδικά υπό κρουστικό θόρυβο, που θεωρείται ο κυρίαρχος θόρυβος σε περιβάλλον PLC, [ShirNo02, MatsUm03].

Οι τεχνικές διαμόρφωσης απλωμένου φάσματος με απευθείας διεύρυνση φάσματος ή αναπήδηση συχνότητας ερευνήθηκαν για να εφαρμοστούν στο φυσικό στρώμα PLC. Εντούτοις, το κύριο μειονέκτημα της τεχνικής απλωμένου φάσματος είναι ο σχετικά μικρότερος ρυθμός μετάδοσης σε σύγκριση με τα συστήματα OFDM. Ο σχεδιαστής συστημάτων πρέπει να γνωρίζει ποιες λειτουργίες έχουν την πιο υψηλή προτεραιότητα για αυτόν και ποιες έχουν τη μικρότερη σημασία. Εκτός από τους υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης, τα συστήματα OFDM παρουσιάζουν επίσης υψηλή ευρωστία έναντι της εξασθένησης του διαύλου, ευελιξία στην αποφυγή των έντονα εξασθενημένων καναλιών και μια βέλτιστη χρησιμοποίηση του εύρους ζώνης τα ελαφρώς εξασθενημένα κανάλια μέσω της διαδικασίας bit-loading. Το κύριο πλεονέκτημα του φάσματος διάδοσης είναι η ηλεκτρομαγνητική συμβατότητά του, από την ακτινοβολία των αδύνατων ηλεκτρομαγνητικών πεδίων στο περιβάλλον [Dost01a].

6.2 Χειρισμός Λάθους

6.2.1 Επισκόπηση

Τα δίκτυα PLC λειτουργούν με ισχύ σήματος η οποία πρέπει να είναι χαμηλότερη ενός ορίου, το οποίο καθορίζεται από τους ρυθμιστικούς οργανισμούς. Επίσης, το επίπεδο ισχύος του σήματος πρέπει να καθιστά δυνατή τη μετάδοση δεδομένων μέσα από το δίκτυο PLC. Αυτό σημαίνει ότι πρέπει να εξασφαλίζεται ένα ορισμένο επίπεδο σηματοθορυβικού λόγου SNR (Signal- to-Noise Ratio) στο δίκτυο PLC που να καθιστά δυνατή την επικοινωνία. Όσο υψηλότερος ο σηματοθορυβικός λόγος τόσο ευκολότερο είναι να αποφευχθούν οι διαταραχές στο δίκτυο. Έτσι, οι μηχανισμοί χειρισμού λάθους δεν είναι απαραίτητο να ενεργήσουν.

Οι περισσότερες δυσκολίες στα συστήματα μετάδοσης PLC προκαλούνται από τον κρουστικό θόρυβο, ο οποίος έχει πολύ υψηλότερη ισχύ από τον παρασιτικό θόρυβο. Σε αυτήν την περίπτωση, ο σηματοθορυβικός λόγος SNR δεν επαρκεί ώστε να υπερνικήσει τις διαταραχές και τα προκύπτοντα λάθη μετάδοσης. Εντούτοις, εάν η διάρκεια μιας διαταραχής είναι αρκετά σύντομη, το φυσικό στρώμα μπορεί να την

χειριστεί, όπως περιγράφεται στην §6.1. Από την άλλη, εάν η διάρκεια του κρουστικού θορύβου (noise impulses) είναι μεγάλη, πρέπει να εφαρμοστούν πρόσθετοι μηχανισμοί για το χειρισμό λαθών όπως μηχανισμοί για τη διόρθωση λαθών και μηχανισμοί αναμετάδοσης για τις μικρής διάρκειας διαταραχές και μηχανισμοί αναδιανομής χωρητικότητας για τις μεγάλης διάρκειας διαταραχές.

Σε πολλά συστήματα μετάδοσης, τεχνικές FEC και μηχανισμοί σύμπλεξης εφαρμόζονται για να αντιμετωπίσουν τις παρεμβολές [DaviBe96]. Σε αυτήν την περίπτωση, τα συστήματα μετάδοσης είναι σε θέση να διαχειριστούν την κατάσταση όταν καταστρέφεται ένας αριθμός ψηφίων. Η χρήση του μηχανισμού FEC προκαλεί αύξηση των αναγκών σε χωρητικότητα του δικτύου μετάδοσης. Για παράδειγμα, περίπου το 50% της χωρητικότητας χρησιμοποιείται για χρήση του μηχανισμού FEC στο σύστημα GSM, με στόχο να βελτιώσει τις τιμές του BER από 10^{-3} σε 10^{-6} [Walke99]. Παρακάτω παρουσιάζεται μια επισκόπηση των τεχνικών FEC και μηχανισμών αντιμετώπισης παρεμβολής για την τεχνολογία PLC.

Παρά τις τεχνικές FEC και τη δυνατότητα των συστημάτων επικοινωνιών να αποφεύγουν τα διάφορα είδη παρεμβολών, τα σήματα μπορεί να αλλοιωθούν. Όταν προκύπτουν λάθη, τα αλλοιωμένα δεδομένα πρέπει να αναμεταδοθούν από ένα μηχανισμό ARQ (Automatic Repeat reQuest). Η εφαρμογή του μηχανισμού ARQ μπορεί να μειώσει την πιθανότητα λάθους σε μια πολύ χαμηλή τιμή και περιορίζεται μόνο από την υπολειμματική πιθανότητα λάθους (remaining error probability) του κώδικα CRC (Cyclic Redundancy Check) που χρησιμοποιείται για την αναγνώριση λάθους, ή την ανοχή λάθους που καθορίζεται από μια ιδιαίτερη εφαρμογή. Για να χειριστούν τις διαταραχές, τα διάφορα συστήματα επικοινωνιών εφαρμόζουν μια αποκαλούμενη υβριδική ARQ/FEC λύση, ένα συνδυασμό μηχανισμών ARQ και FEC (π.χ. [KousEl99, Joe00]), η οποία αναμένεται επίσης να χρησιμοποιηθεί στα δίκτυα PLC. Η τεχνική ARQ είναι κατάλληλη για τη μετάδοση δεδομένων χωρίς περιορισμούς ως προς την καθυστέρηση. Εντούτοις, για τις υπηρεσίες που θεωρούνται χρονικά κρίσιμες (time-critical services), όπως είναι η τηλεφωνία, ο μηχανισμός ARQ προσθέτει πρόσθετες καθυστερήσεις που μπορεί να είναι μη αποδεκτές.

Οι μηχανισμοί ARQ χειρίζονται διαταραχές σχετικά σύντομης διάρκειας (μερικών χιλιοστών του δευτερολέπτου) που εμφανίζονται σε μια ή περισσότερες μονάδες δεδομένων (πλαίσια). Επίσης, οι μεγάλης διάρκειας παρεμβολές (π.χ. οι προκαλούμενες από τον στενού εύρους ζώνης θόρυβο που δημιουργείται από τις

εκπομπές των ραδιοφωνικών σταθμών στα βραχέα κύματα) καθιστούν ένα ή περισσότερα κανάλια μετάδοσης μη διαθέσιμα για περισσότερο χρόνο. Σε αυτήν την περίπτωση, ο μηχανισμός ARQ θα επαναλάμβανε συνεχώς τα δεδομένα, καθιστώντας τη μετάδοση αναποτελεσματική. Συνεπώς, τα μεγάλης χρονικής διάρκειας διαταραγμένα κανάλια μετάδοσης δεν πρέπει να χρησιμοποιηθούν για οποιαδήποτε μετάδοση μέχρι να σταματήσει η διαταραχή. Εάν ένα διαταραγμένο κανάλι χρησιμοποιείται κατ'αυτό το διάστημα για μετάδοση, πρέπει να γίνει αναδιανομή καναλιών για να επιτρέψει τη συνέχεια των επηρεασθέντων συνδέσεων χρησιμοποιώντας άλλα, χωρίς επιβάρυνση, κανάλια. Η δυνατότητα για την εφαρμογή των μηχανισμών αναδιανομής πρέπει επίσης να περιληφθεί στα χαρακτηριστικά γνωρίσματα του στρώματος MAC PLC.

6.2.2 Κωδικοποίηση (Forward Error Correction)

Η κωδικοποίηση (FEC) χρησιμοποιείται ευρέως για τη βελτίωση της ποιότητας σύνδεσης στα ψηφιακά συστήματα επικοινωνιών και αποθήκευσης. Η λέξη “forward” σε σύνδεση με τη διόρθωση λάθους σημαίνει τη διόρθωση των λαθών μετάδοσης στην πλευρά του δέκτη χωρίς την ανάγκη οποιωνδήποτε πρόσθετων πληροφοριών από τον πομπό. Η κύρια σημασία της μεθόδου FEC είναι να προσθέσει μια πλεονάζουσα ποσότητα πληροφορίας, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί από το δέκτη για να διορθώσει τα λάθη μετάδοσης που προκαλούνται από τις επιβαρύνσεις που προκαλεί ο δίαυλος. Επομένως, στη βιβλιογραφία, η κωδικοποίηση FEC περιγράφεται συνήθως ως κωδικοποίηση διαύλου. Η Shannon παρουσίασε στη μαθηματική θεωρία επικοινωνιών ότι κάθε κανάλι μετάδοσης έχει μια θεωρητικά μέγιστη χωρητικότητα, η οποία εξαρτάται από το εύρος ζώνης και το σηματοθορυβικό λόγο (SNR), όπως διατυπώνεται από την εξίσωση (6.14) [Shan49]. Η χωρητικότητα των πρακτικών συστημάτων είναι συνήθως πολύ μικρότερη από τη μέγιστη δυνατή τιμή που υπολογίζεται θεωρητικά. Για το λόγο αυτό, η χρήση των κατάλληλων κωδίκων πρέπει να επιτρέψει την περαιτέρω βελτίωση της αποδοτικότητας του εύρους ζώνης.

Το θεώρημα της Shannon δηλώνει ότι, για ένα κανάλι AWGN, ο περισσότερο αξιόπιστος, δηλαδή χωρίς λάθη, ρυθμός μετάδοσης δίνεται από τη σχέση

$$R \leq B \cdot \log_2 \left(1 + \frac{P}{N_0 \cdot B} \right) \quad (6.14)$$

όπου το B αντιπροσωπεύει το εύρος ζώνης του καναλιού, το N_0 τη φασματική πυκνότητα ισχύος του θορύβου, το P την ισχύ πομπού και R είναι ο ρυθμός bit επικοινωνίας σε bit το δευτερόλεπτο (bps).

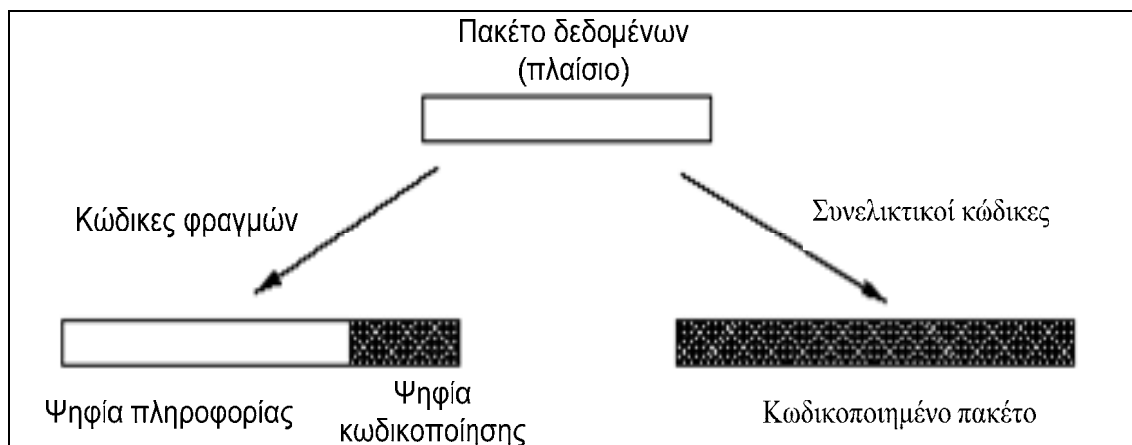
Αυτή η έκφραση μπορεί να τροποποιηθεί εκ νέου για να δώσει τον ελάχιστο λόγο E_b / N_0 που απαιτείται για αξιόπιστη επικοινωνία ως συνάρτηση με του R / B

$$E_b / N_0 \geq \frac{2^{R/B} - 1}{R/B} \quad (6.15)$$

Η ελάχιστη τιμή για το E_b / N_0 προκύπτει όταν ο λόγος R / B , γνωστός ως αποδοτικότητα του εύρους ζώνης (bandwidth efficiency), προσεγγίζει το μηδέν. Αυτή η τιμή δίνει το ελάχιστο όριο E_b / N_0 κάτω το οποίο δεν είναι εφικτή η επικοινωνία. Αυτό είναι το "όριο Shannon".

$$\frac{E_b}{N_0} \geq 10 \cdot \log_{10}(\log_e 2) \quad (6.16)$$

$$\frac{E_b}{N_0} \geq -1.6dB \quad (6.17)$$



Σχήμα 6.6 Οι κύριες κατηγορίες FEC: κώδικες φραγμών και συνελκτικοί κώδικες

Για αποδοτικότητα εύρους ζώνης ίση με $R / B = 1bps / Hz$, το θεωρητικό όριο για αξιόπιστη επικοινωνία είναι 0dB.

Οι κώδικες διόρθωσης λαθών μπορούν να διαιρεθούν σε δύο κύριες κατηγορίες, τους μπλοκ κώδικες και τους συνελκτικούς (ή συγκεραστικούς) κώδικες,

αποκαλούμενους επίσης και ως κώδικες trellis, όπως διευκρινίζεται στο Σχήμα 6.6. Οι μπλοκ κώδικες προσθέτουν ένα σταθερό αριθμό ψηφίων κωδικοποίησης σε κάθε μπλοκ ψηφίων πληροφορίας με σταθερό πλήθος ενώ οι συνελκτικοί κώδικες παράγουν μια τροποποιημένη ροή ψηφίων με μεγαλύτερο ρυθμό από τη ροή εισόδου. Οι κώδικες τούρμπο αποτελούν μια ειδική υποκατηγορία των συνελκτικών κωδικών που παρουσιάζει υψηλές αποδόσεις.

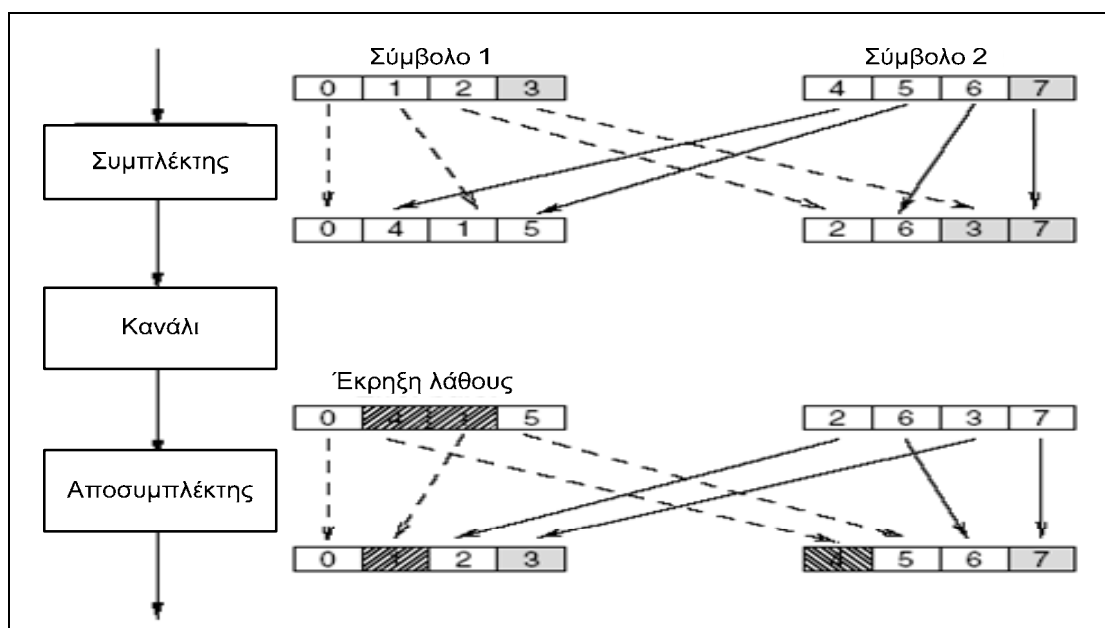
Οι διάφοροι κώδικες έχουν διαφορετικές ιδιότητες όσον αφορά τη δυνατότητα διόρθωσης λάθους και την πολυπλοκότητα αποκωδικοποίησης. Επιπλέον, για ένα πραγματικό σύστημα, οι παράγοντες για τη σχεδίαση όπως το μέγεθος των block και η κλιμάκωση (scalability) έχουν άλλους πρακτικούς περιορισμούς. Εντούτοις, οι κώδικες διαύλου πρέπει να καλύπτουν τις ακόλουθες απαιτήσεις, ή/και τουλάχιστον να είναι σε θέση να πραγματοποιούν ορισμένη ανταλλαγή μεταξύ τους. Οι κώδικες διαύλου:

- πρέπει να παρουσιάζουν υψηλό ρυθμό για να μεγιστοποιήσουν τη ρυθμαπόδοση δεδομένων
- πρέπει να έχουν χαμηλό ποσοστό λαθών bit στον επιθυμητό SNR για να ελαχιστοποιήσουν την ενέργεια που απαιτείται για τη μετάδοση
- πρέπει να έχουν χαμηλή πολυπλοκότητα κωδικοποίησης/αποκωδικοποίησης για να περιορίσουν το μέγεθος και το κόστος του πομποδέκτη και
- πρέπει να εισάγουν μόνο τις ελάχιστες καθυστερήσεις, ειδικά κατά τη μετάδοση φωνής, έτσι ώστε να μην υπάρχει ανιχνεύσιμη ή αντιληπτή υποβάθμιση στην ποιότητα σήματος να είναι ανιχνεύσιμη.

6.2.3 Ανάδευση ψηφίων

Μια κοινή μέθοδος για διόρθωση καταγισμού σφαλμάτων είναι η ανάδευση ψηφίων (interleaving), η οποία μπορεί να εφαρμοστεί κατά ψηφία ή κατά σύμβολα. Σύμπλεξη είναι η διαδικασία με την οποία επιτυγχάνεται η θέση των σφαλμάτων να παύση να είναι σειριακή και να ομοιάζει με τυχαία, δηλαδή ο καταγισμός να διασκορπίζεται σε πολλές κωδικές λέξεις αντί μιας ή λίγων διαδοχικών λέξεων. Στην πλευρά του δέκτη, όπου τα σύμβολα αποσυμπλέκονται, εάν μια έκρηξη λάθους έχει εμφανιστεί κατά τη διάρκεια της μετάδοσης, τα λανθασμένα σύμβολα προκύπτουν

διασκορπισμένα σε διάφορες κωδικές λέξεις. Η διαδικασία αυτή παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.7, όπου φαίνεται μια απλή διαδικασία διασκορπισμού που αφορά τα στοιχεία των αρχικών συμβόλων 1 και 2 ώστε να δημιουργήσουν δύο νέα σύμβολα που θα μεταδοθούν στο δίαυλο. Λόγω παροξυσμικής διαταραχής στο δίαυλο δύο παρακαείμενα στοιχεία του πρώτου μεταδιδόμενου συμβόλου καταστρέφονται, δημιουργώντας μια έκρηξη μήκους δύο στοιχείων. Στο δέκτη, τα λαμβανόμενα σύμβολα αποσυμπλέκονται με αποτέλεσμα η έκρηξη λάθους να αποσυντίθεται σε δύο απλά λάθη στοιχείων.



Σχήμα 6.7 Διαδικασία μιας απλής τεχνικής διασκορπισμού λαθών

6.2.4 Μηχανισμοί ARQ

Ο μηχανισμός ARQ παρέχει μια διαδικασία μεταξύ πομπού και δέκτη, κατά την οποία ο δέκτης αποστέλει θετική επιβεβαίωση (acknowledgement ή ACK), εφόσον ένα πλαίσιο παραλαμβάνεται χωρίς λάθη. Μια αίτηση για την αναμετάδοση ενός πλαισίου μπορεί να πραγματοποιηθεί από το δέκτη με αρνητική επαλήθευση (Negative Acknowledgement ή NAK), εφόσον το πλαίσιο δεν λαμβάνεται σωστά ή λείπει. Μια επαλήθευση διαβιβάζεται μέσα ως αντίστροφο κανάλι (reverse channel), το οποίο χρησιμοποιείται επίσης για τη μετάδοση δεδομένων στην αντίθετη κατεύθυνση. Συνήθως, μια επαλήθευση διαβιβάζεται μαζί με τα πλαίσια.

Υπάρχουν οι ακόλουθες τρεις βασικές παραλλαγές των μηχανισμών ARQ [Walke99]

- Send-and-Wait. Κάθε μονάδα δεδομένων πρέπει να επιβεβαιωθεί από μια ACK πριν να διαβιβαστεί το επόμενο πλαίσιο. Το πλαίσιο πρέπει να αναμεταδοθεί εάν ληφθεί NAK.
- Go-back-N. Αφού ο δέκτης έχει σηματοδοτήσει ότι ένα πλαίσιο είναι αλλοιωμένο, ο αποστολέας πρέπει να αναμεταδώσει όλα τα πλαίσια τα οποία δεν έχουν ακόμη επαληθευτεί.
- Selective-Reject. Όταν παραληφθεί μια NAK, ο αποστολέας αναμεταδίδει μόνο ένα αλλοιωμένο πλαίσιο. Όλα τα ορθά πλαίσια δεν είναι απαραίτητο να αναμεταδοθούν.

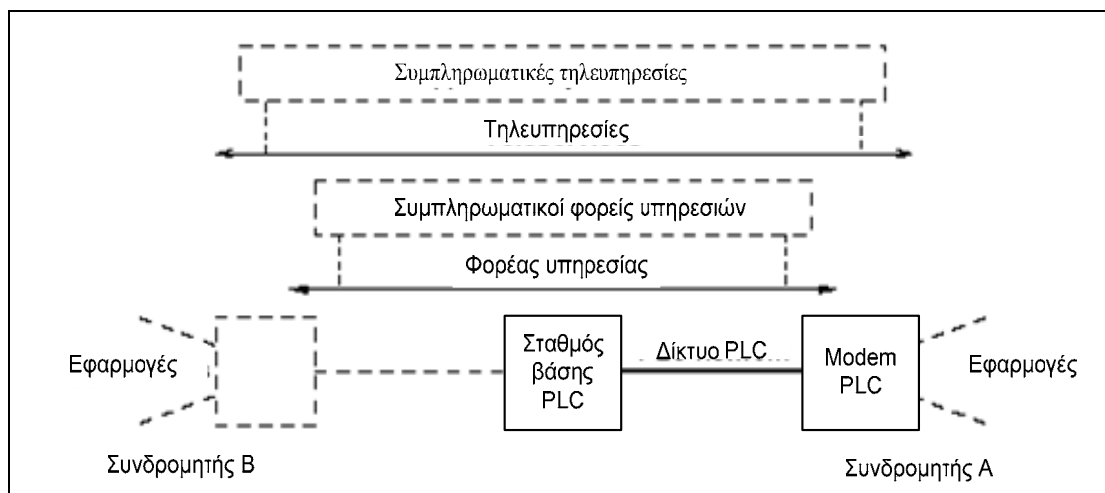
Η ορθότητα ενός πλαισίου επιβεβαιώνεται στην πλευρά του δέκτη με τη χρήση του CRC (Cyclic Redundancy Code) σε κάθε πλαίσιο. Για να εξασφαλιστεί η πραγματοποίηση των μηχανισμών ARQ, τα μεταδιδόμενα πλαίσια πρέπει να είναι αριθμημένα με τους αποκαλούμενους αριθμούς ακολουθίας. Κατά συνέπεια, η εντολή των πλαισίων μπορεί να ελεγχθεί πάντα από τους σταθμούς λήψης και εκπομπής του δικτύου.

6.3 Υπηρεσίες PLC

6.3.1 Φορέας Υπηρεσίας PLC

Ένα δίκτυο πρόσβασης παρέχει τη δυνατότητα του φορέα μεταφοράς για την παροχή τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών μεταξύ ενός κόμβου υπηρεσιών και των συνδρομητών του δικτύου πρόσβασης [MaedaFe01]. Συνεπώς, ένα δίκτυο πρόσβασης PLC μπορεί επίσης να θεωρηθεί ως φορέας υπηρεσίας, που παρέχει τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες στους συνδρομητές μέσα σε ένα ή πολλαπλά χαμηλής τάσης δίκτυα παροχής ηλεκτρικής ισχύος. Ένας φορέας υπηρεσίας (ή ένας φορέας/ένα δίκτυο μεταφορών), όπως το κλασσικό δίκτυο τηλεφωνίας, το δίκτυο πακέτων X.25, το δίκτυο ATM φέρουν τηλευπηρεσίες (teleservices), οι οποίες επιτρέπουν τη χρήση διάφορων εφαρμογών επικοινωνίας (Σχήμα 6.8). Σύμφωνα με τις λειτουργίες του φορέα υπηρεσιών, για να παρέχονται οι δυνατότητες μεταφοράς

διαφόρων τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες, καθορίζονται λεπτομερώς μέσα στα αποκαλούμενα ως στρώματα δικτύου του προτύπου αναφοράς ISO/OSI.



Σχήμα 6.8 Ταξινόμηση των τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών

Όπως αναφέρθηκε στην §2.3.3, τα δίκτυα πρόσβασης PLC καλύπτουν μόνο το τελευταίο κομμάτι ενός ολόκληρου μονοπατιού επικοινωνίας μεταξύ δύο συνδρομητών. Ολόκληρο το μονοπάτι αυτό αποτελείται από τα δίκτυα πρόσβασης και διανομής, καθώς επίσης και το δίκτυο κορμού και υλοποιείται πιθανώς από διαφορετικές τεχνολογίες επικοινωνιών. Κατά συνέπεια, ένα δίκτυο πρόσβασης PLC παρέχει τον φορέα υπηρεσίας μόνο για ένα ορισμένο κομμάτι της πορείας επικοινωνιών. Επομένως, τα δίκτυα PLC πρέπει να είναι σε θέση να ανταλλάξουν πληροφορίες με άλλα συστήματα επικοινωνιών που προσφέρονται επίσης ως φορείς υπηρεσιών (π.χ. τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στα δίκτυα διανομής για τη σύνδεση στο δίκτυο κορμού). Με άλλα λόγια, η τεχνολογία PLC πρέπει να είναι συμβατό με άλλες τεχνολογίες επικοινωνιών, εφ' όσον η διασύνδεση μεταξύ των διαφόρων συστημάτων είναι δυνατή, πράγμα το οποίο εξασφαλίζεται από τη συμβατότητα των διαφορετικών φορέων υπηρεσίας.

Οι τηλευπηρεσίες καλύπτουν ολόκληρες τις τηλεπικοινωνιακές λειτουργίες συμπεριλαμβανομένων όλων των στρωμάτων επικοινωνιών (1 έως 7) όπως καθορίζονται στο πρότυπο αναφοράς του ISO/OSI. Συνεπώς, οι λειτουργίες τηλευπηρεσιών εφαρμόζονται στις συσκευές επικοινωνιών του συνδρομητή και δεν συμπεριλαμβάνονται μέσα στην στοίβα πρωτοκόλων PLC. Εντούτοις, τα δίκτυα PLC πρέπει να παρέχουν δυνατότητες υλοποίησης διαφόρων τηλευπηρεσιών, όπως η τηλεφωνία, πρόσβαση διαδικτύου. Η βασική λειτουργία των φορέων υπηρεσιών και

τηλεүπηρεσιών (Σχήμα 6.8) μπορεί να επεκταθεί από τα διαφορετικά πρόσθετα χαρακτηριστικά γνωρίσματα, δημιουργώντας τις αποκαλούμενες συμπληρωματικές υπηρεσίες [ITU-t93]. Κατά συνέπεια, οι βασικές τηλεүπηρεσίες τηλεφωνίας μπορούν να επεκταθούν για να συμπεριλάβουν διάφορα χαρακτηριστικά γνωρίσματα, όπως είναι η υπηρεσία αφύπνισης, η υπηρεσία αναγνώρισης κλήσης, και πολλές άλλες υπηρεσίες που προσφέρονται στα σύγχρονα δίκτυα τηλεπικοινωνιών.

Από την πλευρά του συνδρομητή, οι τηλεүπηρεσίες χρησιμοποιούνται για την πραγματοποίηση διαφόρων εφαρμογών επικοινωνίας (Σχήμα 6.8). Έτσι, η τηλεφωνία χρησιμοποιείται για την ομιλία, ως επικοινωνιακή εφαρμογή, και η πρόσβαση στο Διαδίκτυο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πραγματοποίηση των πολυάριθμων εφαρμογών, όπως είναι ο WWW browsing, υπηρεσίες για γραπτά μηνύματα, παιχνίδια Διαδικτύου. Οι συνδρομητές (χρήστες των τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών) κρίνουν ένα δίκτυο, μια υπηρεσία, ή έναν προμηθευτή δικτύου σύμφωνα με την ποιότητα των εφαρμογών επικοινωνίας που χρησιμοποιούν. Αφ' ετέρου, τα δίκτυα PLC πρέπει να προσφέρουν μια μεγάλη ποικιλία τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών με ικανοποιητικό QoS, για να είναι σε θέση να ανταγωνιστούν άλλες τεχνολογίες επικοινωνιών που εφαρμόζονται στα δίκτυα πρόσβασης (Βλέπε §2.1). Επομένως, τα δίκτυα πρόσβασης PLC πρέπει να παρέχουν ένα φορέα υπηρεσίας που να μπορεί να φέρει διάφορες τηλεүπηρεσίες, εξασφαλίζοντας διάφορες εφαρμογές επικοινωνιών. Συνεπώς, ολόκληρη η στοίβα πρωτοκόλλων για να εφαρμοστεί στα δίκτυα PLC πρέπει να παρέχει χαρακτηριστικά που να επιτρέπουν τη μετάδοση διαφορετικών τύπων πληροφορίας επικοινωνιών που παράγεται από διάφορες τηλεүπηρεσίες και εφαρμογές. Συγχρόνως, είναι επίσης σημαντικό να εξασφαλιστεί ορισμένο QoS στο δίκτυο πρόσβασης PLC.

6.3.2 Τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες στα δίκτυα πρόσβασης PLC

Όπως συμπεράναμε παραπάνω, τα δίκτυα PLC πρέπει να προσφέρουν διάφορες τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες για να είναι σε θέση να ανταγωνιστούν με άλλες τεχνολογίες πρόσβασης, ώστε να προσελκύσουν ένα μεγαλύτερο αριθμό συνδρομητών PLC και να εξασφαλίσουν οικονομική αποδοτικότητα των δικτύων PLC. Επομένως, τα δίκτυα PLC πρέπει να υποστηρίξουν την κλασσική τηλεφωνική υπηρεσία λόγω της σημασίας της και της τεράστιας διείσδυσης στον κόσμο των

επικοινωνιών. Η τηλεφωνία είναι ακόμα η πιο αποδεκτή εφαρμογή επικοινωνιών, απαιτώντας σχετικά απλές συσκευές επικοινωνιών και ένα χαμηλό επίπεδο τεχνικών γνώσεων για τους πελάτες που χρησιμοποιούν αυτήν την υπηρεσία. Επιπλέον, παρά τη γρήγορη ανάπτυξη των διαφόρων υπηρεσιών τις τελευταίες δεκαετίες, οι χειριστές δικτύου επιτυγχάνουν ακόμα μεγάλα εισοδήματα με την προσφορά της τηλεφωνικής υπηρεσίας.

Σήμερα, μπορούμε να παρατηρήσουμε μια γρήγορη ανάπτυξη των διαφόρων εφαρμογών επικοινωνίας βασισμένη στην υπηρεσία του διαδικτύου στην επιχείρηση, καθώς επίσης και στο ιδιωτικό περιβάλλον. Σύμφωνα με την τρέχουσα αποδοχή των διαδικτυακών εφαρμογών, μπορούμε να περιμένουμε ότι στο εγγύς μέλλον η διαδικτυακή πρόσβαση θα είναι όλο και περισσότερο διαδεδομένη στον κόσμο των επικοινωνιών, παρόμοια με την περίπτωση της υπηρεσίας της τηλεφωνίας. Επομένως, και η τηλεφωνία και οι υπηρεσίες διαδικτύου θεωρούνται ως αρχικές τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες που πρέπει να πραγματοποιηθούν από τα ευρυζωνικά δίκτυα πρόσβασης PLC.

6.3.2.1 Τηλεφωνία

Η ομιλία ως εφαρμογή επικοινωνιών δεν είναι συνεχής και αποτελείται από τις περιόδους ομιλίας και τις σιωπηλές περιόδους (talkspurt and silent periods). Δεδομένου ότι για μια τηλεφωνική σύνδεση διατίθεται ορισμένη χωρητικότητα δικτύου, η διατιθέμενη χωρητικότητα δικτύου δεν χρησιμοποιείται κατά τη διάρκεια των σιωπηλών περιόδων, η οποία δεν είναι αποδοτική. Οι αποκαλούμενες υπηρεσίες τηλεφωνίας πακέτων (packet voice/telephony services) λαμβάνονται υπόψη αφού αποτελούν υπηρεσίες που ήδη προσφέρονται από ασύρματα συστήματα.

Εάν εφαρμόζεται η υπηρεσία πακέτων φωνής, οι λεκτικές πληροφορίες διαβιβάζονται μόνο κατά τη διάρκεια των περιόδων ομιλίας και οι σιωπηλές περίοδοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν από άλλες συνδέσεις και υπηρεσίες. Κατ' αυτό τον τρόπο, είτε τα δεδομένα είτε οι λεκτικές πληροφορίες από μια άλλη σύνδεση πακέτων φωνής μπορούν να διαβιβαστούν μέσω της ίδιας σύνδεσης. Οι συνδέσεις πακέτων φωνής χαρακτηρίζονται από δύο παραμέτρους, τη διάρκεια των περιόδων ομιλίας, που χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση διάφορων πακέτων φωνής και τη διάρκεια των περιόδων σιωπής. Εντούτοις, η χρονική περίοδος και ολόκληρη η διάρκεια των

συνδέσεων πακέτων φωνής μπορούν να διαμορφωθούν με τον ίδιο τρόπο, όπως στην περίπτωση της κλασσικής τηλεφωνικής υπηρεσίας, από τη χρήση των προτύπων κυκλοφορίας που καθορίστηκαν παραπάνω. Μπορεί διαισθητικά να αναγνωριστεί ότι η χρήση των σιωπηλών περιόδων στην υπηρεσία πακέτων φωνής βελτιώνει την αποδοτικότητα του δικτύου, έναντι της κλασσικής υπηρεσίας της τηλεφωνίας.

Σήμερα, τα δίκτυα τηλεπικοινωνιών είναι παγκοσμίως βασισμένα στο πρωτόκολλο IP (Internet Protocol), που αναπτύχθηκε αρχικά για την καθαρή μετάδοση δεδομένων και που δεν σχεδιάστηκε για τη μετάδοση φωνής. Εντούτοις, λόγω της γενικής κατεύθυνσης για ενοποίηση των υπηρεσιών φωνής και δεδομένων, μια λύση για την υλοποίηση φωνητικής υπηρεσίας στα δίκτυα IP, αποκαλούμενης ως VoIP (Voice over IP) ή τηλεφωνία μέσω ιντερνετ, εξετάζεται σοβαρά ως λύση για τα αποκαλούμενα ενσωματωμένα δίκτυα υπηρεσιών (integrated services networks). Επομένως, το VoIP εξετάζεται για εφαρμογές στα ευρυζωνικά δίκτυα πρόσβασης PLC.

6.3.2.2 Διαδικτυακή πρόσβαση

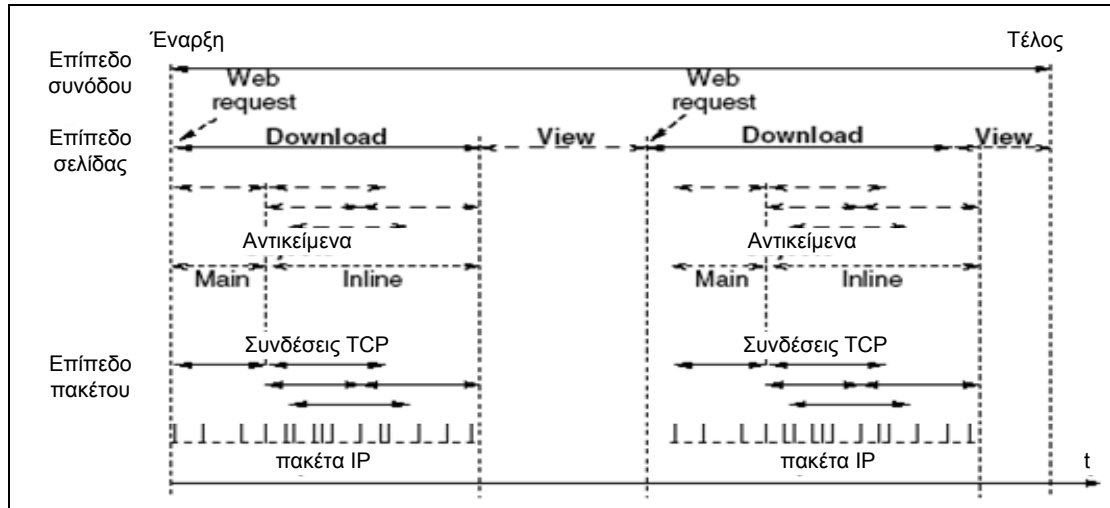
Η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη τηλεπικοινωνιακή υπηρεσία στο νέο δίκτυο πρόσβασης PLC είναι η μετάδοση δεδομένων βασισμένη στην διαδικτυακή πρόσβαση. Επομένως, είναι απαραίτητο να αναλυθεί η διαδικτυακή κίνηση των δεδομένων και να περιγραφούν τα κύρια χαρακτηριστικά τέτοιων σχεδίων κυκλοφορίας, που είναι ενδεικτικά για τα δίκτυα πρόσβασης, όπως τα ευρυζωνικά δίκτυα PLC. Τα χαρακτηριστικά κυκλοφορίας (Βλέπε π.χ. [FärBBo98]) δημιουργούνται με τη βοήθεια πολυάριθμων μετρήσεων στα διάφορα δίκτυα, ώστε να επιτύχουμε όσο το δυνατόν γενικότερα αποτελέσματα και να μπορέσουμε να σχεδιάσουμε κατάλληλα μοντέλα, που θα αντιπροσωπεύουν τα πιθανόν πραγματικά χαρακτηριστικά κυκλοφορίας. Εντούτοις, κατά τη διάρκεια της τελευταίας δεκαετίας, τα χαρακτηριστικά κίνησης αλλάζουν συχνά, λόγω της ταχείας εξέλιξης των νέων τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών, της γρήγορης ανάπτυξης των ενσύρματων και ασύρματων δικτύων καθώς και της αύξησης του αριθμού των συνδρομητών και των διαχειριστών. Συνεπώς, η μεταβαλλόμενη φύση των χαρακτηριστικών της κίνησης αναγνωρίζεται επίσης σε πολλές ερευνητικές μελέτες [SahiTe99, FeldGi]. Επομένως, τα πρότυπα κίνησης δεν μπορούν να αντιπροσωπεύσουν ένα ακριβές χαρακτηριστικό

κίνησης και τις μελλοντικές αλλαγές του, αλλά μπορούν να επιλεγτούν για να αντιπροσωπεύσουν μια γενικευμένη συμπεριφορά κίνησης, σύμφωνα με έναν συγκεκριμένο ερευνητικό σκοπό, σε αυτήν την περίπτωση, μια αξιολόγηση της απόδοσης των δικτύων πρόσβασης PLC και της συγκεκριμένης στοίβας πρωτοκόλλων PLC.

Η εφαρμογή που χρησιμοποιείται κυρίως στο Διαδίκτυο είναι ο World Wide Web (WWW). Συνεπώς, τα περισσότερα πρότυπα κίνησης που αντιπροσωπεύουν τη συμπεριφορά των χρηστών του Διαδικτύου αναπτύσσονται σύμφωνα με τα σχέδια κίνησης WWW. Ο χαρακτηρισμός και η διαμόρφωση της κίνησης WWW μπορεί να γίνει στα ακόλουθα επίπεδα, όπως προτείνεται στο [ReyesGo99]

- Επίπεδο συνόδου, που αντιπροσωπεύει μια σύνοδο εργασίας ενός χρήστη με έναν WWW browser από τη στιγμή έναρξης του browser έως το τέλος της περιήγησης.
- Επίπεδο σελίδων, συμπεριλαμβανομένων των επισκέψεων σε μια σελίδα WWW και θεωρώντας μια σελίδα ως σύνολο αρχείων (HTML, εικόνες, ήχοι) και
- Επίπεδο πακέτων, το χαμηλότερο επίπεδο που αντιπροσωπεύει τη μετάδοση των πακέτων IP.

Μια σύνοδος ορίζεται ως η εργασία ενός χρήστη Διαδικτύου με έναν WWW browser. Αυτό περιλαμβάνει το “κατέβασμα” (download) διαφόρων σελίδων WWW και της εξέτασης των σελίδων (Σχήμα 6.9). Γενικά, μια σελίδα WWW αποτελείται από διάφορα αντικείμενα (διάφορα αρχεία, εικόνες, κ.λ.π.) που διαβιβάζονται ταυτόχρονα κατά τη διάρκεια φόρτωσης μιας σελίδας. Η πρώτη αίτηση για μια σελίδα WWW, που πραγματοποιείται με το χέρι από έναν χρήστη Διαδικτύου, προκαλεί το “κατέβασμα” του κύριου μέρους της σελίδας. Αυτό το κύριο μέρος της σελίδας ακολουθείται από διάφορα αποκαλούμενα ως αντικείμενα εντός γραμμής (in-line objects), τα οποία ζητούνται αυτόματα από έναν browser ή απλά διαβιβάζονται από έναν κεντρικό υπολογιστή του Διαδικτύου ως λογική διαδοχή του κύριου μέρους.



Σχήμα 6.9 Συμπεριφορά χρήστη Διαδικτύου σε διαφορετικά επίπεδα παρατήρησης

Η μετάδοση κάθε αντικειμένου σελίδας προκαλεί την καθιέρωση μιας χωριστής σύνδεσης TCP. Κατά τη διάρκεια μιας σύνδεσης TCP [Stev94], υπάρχει μια ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ του πομπού (π.χ. κεντρικός υπολογιστής Διαδικτύου) και του δέκτη (π.χ. χρήστης Διαδικτύου), συμπεριλαμβανομένης της μετάδοσης δεδομένων χρήστη και διάφορων μηνυμάτων ελέγχου (TCP acknowledgements). Οι διαβιβάσιμες μονάδες δεδομένων στο επίπεδο TCP αντιστοιχούν στα πακέτα IP (ένα πακέτο TCP περιέχει ένα πακέτο IP με επικεφαλίδα TCP). Για να διαβιβαστούν μέσω ενός δικτύου, τα πακέτα IP παραδίδονται από τα ανώτερα στρώματα δικτύου στο στρώμα σύνδεσης δεδομένων. Από την πλευρά του στρώματος σύνδεσης δεδομένων, τα πακέτα IP μπορούν να θεωρηθούν ως μονάδες δεδομένων εισόδου. Συνεπώς, τα πρότυπα κυκλοφορίας IP είναι κατάλληλα να αντιπροσωπεύσουν την κίνηση δεδομένων, όπως το WWW, στην έρευνα της συγκεκριμένης στοίβας πρωτοκόλλων.

6.3.2.3 Προηγμένες ευρυζωνικές υπηρεσίες

Μια περαιτέρω ανάγκη στα ευρυζωνικά δίκτυα πρόσβασης PLC και στην ανάπτυξή τους είναι να προσφέρουν τις αποκαλούμενες προηγμένες ευρυζωνικές υπηρεσίες. Κατά συνέπεια, εκτός από τις αρχικές τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες που περιγράφονται παραπάνω, τα μελλοντικά συστήματα PLC πρέπει να προσφέρουν υπηρεσίες χρησιμοποιώντας υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων με

υψηλότερες προϋποθέσεις QoS (προτεραιότητες, καθυστερήσεις), όπως το βίντεο. Εντούτοις, τα νέα δίκτυα PLC επιτρέπουν ρυθμούς δεδομένων μέχρι μερικών Mbps μέσω ενός κοινού μέσου μετάδοσης, το οποίο δεν είναι ικανοποιητικό για την πραγματοποίηση υπηρεσιών που απαιτούν υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων, τουλάχιστον στην περίπτωση που ένας μεγαλύτερος αριθμός συνδρομητών που χρησιμοποιούν τέτοιες υπηρεσίες συνδέεται σε ένα PLC δίκτυο πρόσβασης.

Αφ' ετέρου, μια γρήγορη ανάπτυξη των διαφόρων τεχνολογιών επικοινωνίας, συμπεριλαμβανομένων των νέων μεθόδων μετάδοσης, των μεθόδων διαμόρφωσης, και άλλων, μπορεί επίσης να επιταχύνει την ανάπτυξη των συστημάτων PLC επιτυγχάνοντας υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης στο εγγύς μέλλον. Επομένως, η στοίβα πρωτοκόλλων PLC πρέπει να σχεδιαστεί ελαστικά για να επιτρέψει την πραγματοποίηση διαφορετικών παραλλαγών QoS εγγυήσεων που απαιτούνται από τις πρόσφατες καθώς επίσης και από τις μελλοντικές τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες και εφαρμογές. Εντούτοις, αρχικά, η χρήση της τηλεφωνίας και της διαδικτυακής πρόσβασης (αρχικές υπηρεσίες) πρέπει να πραγματοποιηθεί με το απαραίτητο QoS ώστε να υπάρξει αντίκτυπο των συστημάτων PLC στον ανταγωνισμό με άλλες τεχνολογίες πρόσβασης.

6.3.2.4 Υπηρεσίες στενού εύρους ζώνης

Στην §2.2.4, εξετάσαμε τα στενού εύρους ζώνης συστήματα PLC, που εξασφαλίζουν πραγματοποίηση διαφόρων υπηρεσιών PLC, όπως η κτιριακή αυτοματοποίηση, η διαχείριση της ενέργειας, οι διάφορες λειτουργίες ασφάλειας. Σε αυτήν την περίπτωση, οι διάφορες συσκευές που χρησιμοποιούν την ηλεκτρική ισχύ μπορούν να συνδεθούν εύκολα μέσω του ίδιου του ηλεκτρικού δικτύου με ένα σύστημα PLC, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον τηλεχειρισμό τέτοιων συσκευών. Τα στενού εύρους ζώνης συστήματα PLC τυποποιούνται ήδη και είναι επίσης ευρέως διαθέσιμα για χρήση τόσο από τις επιχειρήσεις όσο και από τους ιδιώτες-καταναλωτές. Εντούτοις, η ένταξη των στενού εύρους ζώνης υπηρεσιών PLC στα ευρυζωνικά δίκτυα PLC θα βελτίωνε την αρχική θέση των συστημάτων PLC στην αγορά έναντι άλλων τεχνολογιών επικοινωνίας. Επομένως, η ενσωμάτωση των

στενού εύρους ζώνης και των ευρυζωνικών συστημάτων PLC πρέπει να μελετηθεί σοβαρά κατά τη διάρκεια σχεδιασμού των ευρυζωνικών δικτύων PLC.

Οι συγκεκριμένες PLC υπηρεσίες υποτίθεται ότι θα χρησιμοποιούν σημαντικά χαμηλότερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων από την τηλεφωνία, το Διαδίκτυο και άλλες χαρακτηριστικές τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες και συνήθως δεν απαιτούν υψηλές εγγυήσεις QoS. Επομένως, η υλοποίηση υπηρεσιών στενού εύρους ζώνης και η ενσωμάτωσή τους μέσα στα ευρυζωνικά συστήματα PLC φαίνεται να είναι ακίνδυνη. Αφ' ετέρου, μερικές συγκεκριμένες στενού εύρους ζώνης υπηρεσίες μπορεί να απαιτούν πολύ μικρό χρόνο απόκρισης (καθυστερήσεις) στην περίπτωση που εξασφαλίζουν μετάδοση κάποιων σημαντικών πληροφοριών (π.χ. προειδοποιήσεις θερμοκρασίας, μηνύματα ασφάλειας, κ.λ.π.). Φυσικά, τα ολοκληρωμένα στενού εύρους ζώνης, ευρυζωνικά συστήματα PLC θα πρέπει να μπορούν να ικανοποιήσουν τέτοιες συγκεκριμένες απαιτήσεις σε ποιότητα QoS.

6.3.3 Κατηγοριοποίηση υπηρεσιών

Στην προηγούμενη ενότητα, εξετάσαμε διάφορες τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες, που αναμένεται να χρησιμοποιηθούν στα δίκτυα πρόσβασης, όπως το PLC. Εντούτοις, οι τηλεπικοινωνίες είναι μια από τις πιο αυξανόμενες τεχνολογικές περιοχές αυτήν την εποχή με μια γρήγορη ανάπτυξη νέων υπηρεσιών και εφαρμογών. Μπορεί επίσης να παρατηρηθεί ότι οι τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες αλλάζουν συνεχώς τη φύση τους σύμφωνα με την ανάπτυξη των νέων επικοινωνιακών τεχνολογιών και εφαρμογών.

Λόγω του αυξανόμενου αριθμού υπηρεσιών με διαφορετικά χαρακτηριστικά γνωρίσματα και απαιτήσεις, δεν είναι δυνατό να εξεταστούν όλες οι πιθανές υπηρεσίες κατά τη διάρκεια σχεδιασμού των διαφόρων δικτύων επικοινωνιών και των συστημάτων μετάδοσης. Επιπλέον, δεν είναι επίσης δυνατό να ληφθούν υπόψη οι τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες που δεν υπάρχουν αυτή τη στιγμή και θα αναπτυχθούν στο μέλλον. Επομένως, είναι απαραίτητο να ταξινομηθούν οι υπηρεσίες σύμφωνα με τα κύρια χαρακτηριστικά γνωρίσματά τους που αντιπροσωπεύονται από την ποιότητα υπηρεσίας QoS (QoS requirements) και τα χαρακτηριστικά κίνησης. Μια πρώτη ταξινόμηση των τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών συμπεριλαμβανομένων και των δύο

αρχικών υπηρεσιών μπορεί να γίνει σύμφωνα με τη φύση τους, όπως απαριθμείται παρακάτω:

- Circuit switched services (π.χ.τηλεφωνία) και
- Packet switched services (μεταφορά δεδομένων χωρίς εγγυήσεις ποιότητας υπηρεσίας QoS, π.χ. διαδικτυακή πρόσβαση)

Εντούτοις, η πρόσφατη ανάπτυξη των τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών απαιτεί μια λεπτότερη ταξινόμηση των υπηρεσιών. Παρακάτω, παρουσιάζεται η ταξινόμηση των υπηρεσιών που χρησιμοποιούνται σε διάφορα πρόσφατα εφαρμοσμένα δίκτυα τηλεπικοινωνιών, τα οποία μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν στις έρευνες για τα ευρυζωνικά δίκτυα πρόσβασης PLC.

6.3.3.1 Κλάσεις Κίνησης

Στις προδιαγραφές για τα δίκτυα UMTS, οι τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες διαιρούνται σε τέσσερις ομάδες conversational, streaming, interactive και background, όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 6.1, [QiuCh00]. Οι υπηρεσίες είναι ταξινομημένες σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά κίνησης που προκαλούνται από τις διάφορες εφαρμογές επικοινωνιών που αναμένονται στα σύγχρονα δίκτυα τηλεπικοινωνιών. Κάθε κατηγορία κίνησης έχει συγκεκριμένες απαιτήσεις QoS ανάλογα με τη φύση των χρησιμοποιούμενων εφαρμογών.

Κατά συνέπεια, για μια τυπική εφαρμογή που ανήκει στην conversational κατηγορία κίνησης, όπως η φωνή, είναι σημαντικό να εξασφαλιστούν πολύ χαμηλές καθυστερήσεις, όπως αναφέρθηκε επίσης στην Ενότητα 6.3.2. Στην περίπτωση της streaming κατηγορίας κίνησης (π.χ. βίντεο), μια ορισμένη χρονική σχέση μεταξύ των διαβιβασθέντων πακέτων/ πλαισίων ροής πρέπει να έχει εξασφαλιστεί. Η ίδια απαίτηση είναι απαραίτητη για τη conversational κατηγορία κίνησης εάν εφαρμόζεται η υπηρεσία φωνής πακέτων (ή VoIP).

Κλάσεις κίνησης	Conversational	Streaming	Interactive	Background
Χαρακτηριστικά	<ul style="list-style-type: none"> - Preserve time relation between information entities of the stream - Conversational pattern (stringent and low delay) 	<ul style="list-style-type: none"> - Preserve time relation between information entities of the stream 	<ul style="list-style-type: none"> - Request response pattern - Preserve payload content 	<ul style="list-style-type: none"> - Destination is not expecting the data within a certain time - Preserve payload content
Εφαρμογή	Φωνή	Streaming video	Web browsing	Ηλεκτρονικό ταχυδρομείο (E-mail)

Πίνακας 6.1 Κλάσεις Κίνησης

Η πιο χρησιμοποιημένη εφαρμογή που ανήκει στη conversational κατηγορία κίνησης είναι η εφαρμογή περιπλάνησης (web browsing) (§ 6.3.2). Σε αυτήν την περίπτωση, η χρονική σχέση μεταξύ των διαβιβασθέντων πακέτων δεν είναι σημαντική και οι καθυστερήσεις δεν είναι τόσο κρίσιμες. Εντούτοις, ένας αλληλεπιδρών χρήστης δικτύου αναμένει μια απάντηση από έναν μακρινό κεντρικό υπολογιστή μέσα σε ένα λογικό χρονικό διάστημα. Η background κατηγορία κίνησης έχει τις λιγότερες απαιτήσεις καθυστέρησης και περιλαμβάνει εφαρμογές που μπορούν να εξυπηρετηθούν από ένα δίκτυο με μικρότερη προτεραιότητα. Η μεταφορά μηνυμάτων ηλεκτρονικού ταχυδρομείου (e-mail) ή αρχείων χωρίς απαιτήσεις καθυστέρησης είναι χαρακτηριστικοί αντιπρόσωποι τέτοιων τηλεπικοινωνιακών εφαρμογών.

6.3.3.2 Κατηγορίες υπηρεσιών

Όπως αναφέρθηκε στην §6.3.1, ένα δίκτυο πρόσβασης PLC που θεωρείται ως φορέας υπηρεσίας πρέπει να εξασφαλίσει μετάδοση των διαφορετικών τηλευπηρεσιών παρέχοντας διαφορετικές εφαρμογές επικοινωνιών. Συνεπώς, η συγκεκριμένη στοιβα πρωτοκόλλων PLC πρέπει να παρέχει διάφορες κατηγορίες φορέων υπηρεσίας για να φέρει τις πληροφορίες που προκύπτουν από διαφορετικές κατηγορίες κίνησης, που περιγράφηκαν παραπάνω.

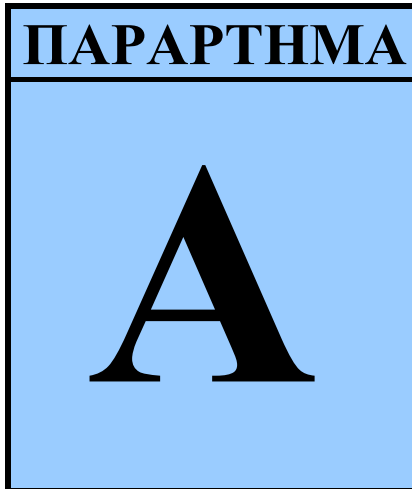
Για να παρέχονται διάφορες τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες με διαφορετικά χαρακτηριστικά κίνησης (π.χ. όπως κατηγοριοποιούνται από τάξεις κίνησης UMTS

traffic) και ολοκληρωμένες υπηρεσίες δικτύου πρέπει να εξασφαλιστεί η ταυτόχρονη μετάδοση των διαφόρων σχημάτων κίνησης με τις διαφορετικές απαιτήσεις σε QoS. Για αυτό το σκοπό, οι ολοκληρωμένες διαδικτυακές υπηρεσίες (integrated services networks) παρέχουν τις αποκαλούμενες ως κατηγορίες υπηρεσιών (service categories), οι οποίες καθορίζονται για να εξασφαλίσουν μετάδοση των διαφόρων τύπων υπηρεσιών με παρόμοια χαρακτηριστικά κυκλοφορίας και ποιότητα υπηρεσίας QoS. Μια κατηγοριοποίηση υπηρεσιών γίνεται για τις ενσωματωμένες υπηρεσίες στο διαδίκτυο, καθορίζοντας τις ακόλουθες τρεις κατηγορίες [ConnRyu99], την εγγυημένη υπηρεσία (GS ή guaranteed service), την κατηγορία ελεγχόμενο φορτίο (CL controlled load) και την κατηγορία καλύτερης προσπάθειας (Best Effort category).

- Η κατηγορία GS σχεδιάστηκε να καλύψει τις απαιτήσεις QoS των σε πραγματικό χρόνο υπηρεσιών, όπως είναι η φωνή και το βίντεο, με πολύ ισχυρά όρια καθυστέρησης και πολύ μικρή απώλεια πακέτων. Για να παρέχονται τέτοιου είδους υπηρεσίες, ορισμένη χωρητικότητα δικτύου μπορεί να διαθέσει μια πραγματικού χρόνου σύνδεση για ολόκληρη τη διάρκειά της ή πρέπει να εφαρμοστεί ένας μηχανισμός ελέγχου αποδοχής σύνδεσης (connection admission control ή CAC) για να εξασφαλίσει την απαραίτητη ποιότητα υπηρεσίας QoS χωρίς καθορισμένη κατανομή των πόρων μετάδοσης ή μπορεί να εφαρμοστεί ένας συνδυασμός και των δύο μεθόδων.
- Η κατηγορία CL παρέχεται για συνδέσεις και υπηρεσίες που μπορούν να ανεχτούν μεγαλύτερες απώλειες πακέτων και τις πιο μακρόχρονες καθυστερήσεις από ότι η κατηγορία GS. Μια σταθερή χωρική κατανομή δεν παρέχεται από την κατηγορία CL, και επομένως, οι πόροι του δικτύου μπορούν να χρησιμοποιηθούν αποτελεσματικά.
- Η καλύτερη κατηγορία προσπάθειας (Best Effort category) δεν παρέχει καμία εγγύηση QoS (π.χ. καθυστέρηση) και ο έλεγχος ροής τοποθετείται στο στρώμα μεταφοράς (δεν είναι μια δικτυακή λειτουργία).

Στα πλαίσια των δικτύων ATM, ως δεύτερο παράδειγμα των ενσωματωμένων δικτύων υπηρεσιών, οι ακόλουθες κατηγορίες υπηρεσιών καθορίζονται ως εξής [ConnRyu99]

- CBR. Είναι υπηρεσία σταθερού ρυθμού bit, που ολοκληρώνεται με τη διάθεση ενός σταθερού ποσού πόρων δικτύων για ολόκληρη τη διάρκεια της σύνδεσης,
- VBR. Είναι υπηρεσία μεταβλητού ρυθμού bit, που απαιτεί ακριβή όρια στην καθυστέρηση, μεταβλητότητα καθυστέρησης και χαμένα πακέτα και η οποία διαιρείται σε δύο υποκατηγορίες:
 - rtVBR. Είναι πραγματικού χρόνου VBR με τα ίδια χαρακτηριστικά με την GS κατηγορία διαδικτυακών υπηρεσιών GS (που περιγράφηκε παραπάνω) και
 - nrtVBR. Είναι μη πραγματικού χρόνου VBR χωρίς περιορισμούς καθυστέρησης, αλλά με την απαίτηση για μικρή απώλεια πακέτων
- ABR. Είναι υπηρεσία διαθέσιμου ρυθμού bit, η οποία δίνει εγγυήσεις ποιότητας QoS που μπορούν ενδεχομένως να αλλάξουν κατά τη διάρκεια της σύνδεσης και είναι παρόμοια με την κατηγορία διαδικτυακής υπηρεσίας CL και
- UBR. Είναι υπηρεσία απροσδιόριστου ρυθμού bit χωρίς οποιεσδήποτε εγγυήσεις ποιότητας QoS.



ΓΡΑΜΜΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΔΥΟ ΑΓΩΓΩΝ

A.1 Διάδοση κυμάτων σε γραμμές μεταφοράς

Εξαιτίας της μη ιδανικότητας των αγωγών και των μονωτικών υλικών, μέρος της εκπεμπόμενης ενέργειας δε φτάνει στο δέκτη. Σύμφωνα με τη θεωρία γραμμών μεταφοράς, αρχικά υποθέτουμε ότι η γραμμή μεταφοράς διαθέτει κατανομημένη αυτεπαγωγή και χωρητικότητα όπως παριστάνεται στο Σχήμα A.1. Αν υπάρχει αυτεπαγωγή ανά μονάδα μήκους $L(H/m)$, από τον ορισμό του πηνίου στη θεωρία κυκλωμάτων προκύπτει

$$V(z,t) - V(z + \Delta z, t) = L' \cdot \Delta z \cdot \frac{\partial}{\partial t} \cdot I(z,t)$$

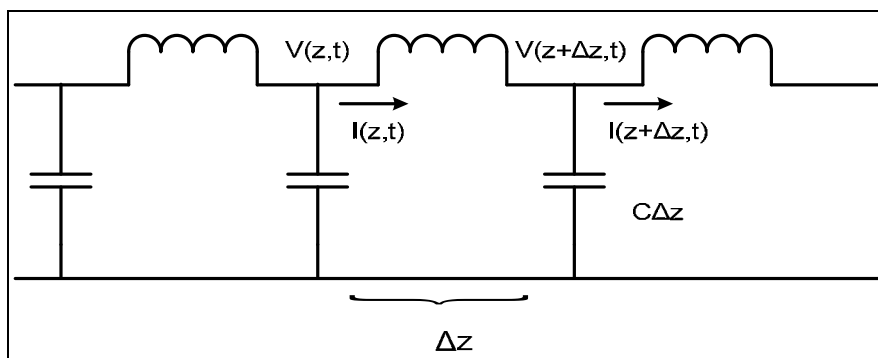
ή $\Delta z \rightarrow 0$

$$-\frac{\partial}{\partial z} \cdot V(z,t) = L' \cdot \frac{\partial}{\partial t} \cdot I(z,t) \quad (\text{A.1})$$

Με παρόμοιο τρόπο προκύπτει και η εξίσωση

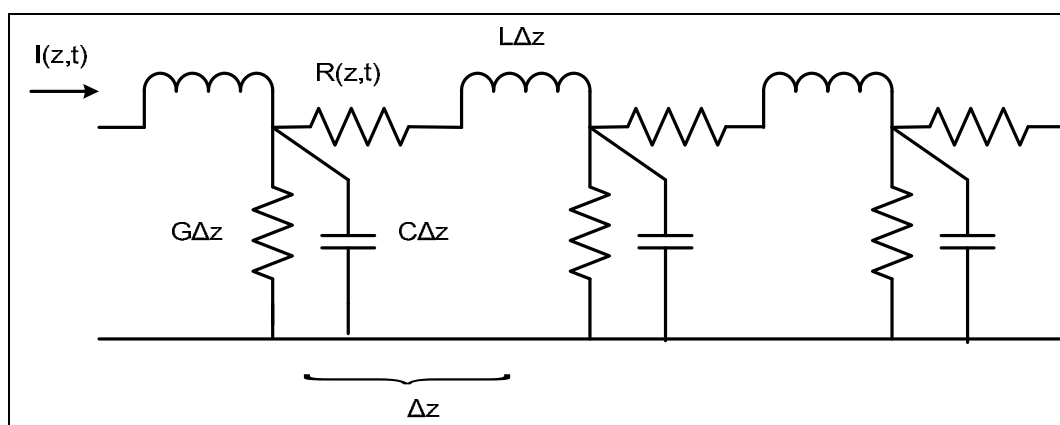
$$-\frac{\partial}{\partial z} \cdot I(z,t) = C' \cdot \frac{\partial}{\partial t} \cdot V(z,t) \quad (\text{A.2})$$

Στην παραπάνω ανάλυση παραδεχτήκαμε ότι οι αγωγοί έχουν άπειρη ειδική αγωγιμότητα ($\sigma \rightarrow \infty$) δηλαδή δεν έχουν απώλειες και ότι το μέσο μεταξύ των αγωγών έχει μηδενική ειδική αγωγιμότητα. Όμως στην πράξη πάντοτε έχουμε απώλειες στις γραμμές μεταφοράς που οφείλονται στο ότι δεν ικανοποιούνται οι ιδανικές συνθήκες που αναφέραμε παραπάνω.



Σχήμα A.1 Γραμμή μεταφοράς χωρίς απώλειες με κατανεμημένες παραμέτρους

Οι απώλειες αυτές μπορούν να ληφθούν υπόψη με προσεγγιστικό τρόπο, προσθέτοντας στις κατανεμημένες παραμέτρους L' και C' του Σχήματος A.1 την κατανεμημένη αντίσταση R (Ω/m) κατά μήκος των αγωγών και την κατανεμημένη αγωγιμότητα όπως φαίνεται στο Σχήμα A.2.



Σχήμα A.2 Γραμμή μεταφοράς με απώλειες

Γράφοντας τους νόμους του Kirchhoff για μια στοιχειώδη “κουπέλη” της γραμμής μεταφοράς και υπολογίζοντας τα όρια για $\Delta z \rightarrow 0$ έχουμε

$$-\frac{\partial}{\partial z} \cdot V(z,t) = R \cdot I(z,t) + L \cdot \frac{\partial}{\partial t} \cdot I(z,t) \quad (\text{A.3})$$

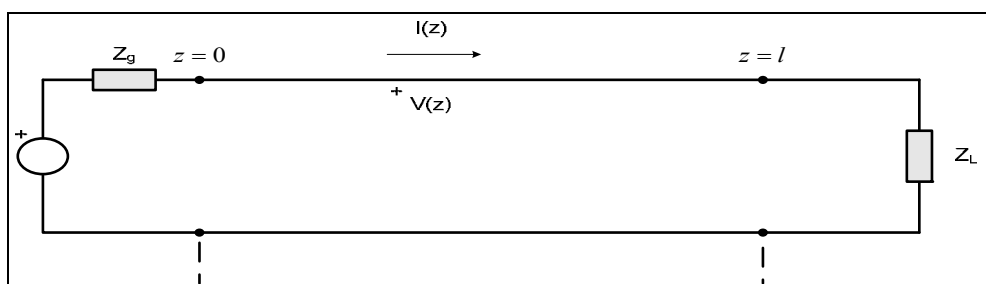
$$-\frac{\partial}{\partial z} \cdot I(z,t) = G \cdot V(z,t) + C \cdot \frac{\partial}{\partial t} \cdot V(z,t) \quad (\text{A.4})$$

Πρέπει να τονισθεί ότι η αγωγιμότητα G' (S/m) αντιστοιχεί στις ωμικές απώλειες ενώ όχι γενικά η R (Ω/m). Η τιμή της αντίστασης R (Ω/m) εξαρτάται από τις απώλειες ανά μονάδα μήκους που έχει η γραμμή μεταφοράς και μόνο για $\omega = 0$

είναι ίση με την ωμική αντίσταση των αγωγών. Στο υπόλοιπο τμήμα του κεφαλαίου αυτού θα χρησιμοποιηθούν οι εξισώσεις (A.3), (A.4) για την ανάλυση των γραμμών μεταφοράς.

A.1.1 Ανάλυση κυμάτων σε γραμμές μεταφοράς που μεταβάλλονται ημιτονικά με το χρόνο.

Παρακάτω εξετάζεται η διάδοση σημάτων (τάσης και ρεύματος) σε γραμμές μεταφοράς όταν η χρονική μεταβολή έχει ημιτονική εξάρτηση όπως $\cos(\omega \cdot t)$ ή $\sin(\omega \cdot t)$. Για να γίνει αυτό πρέπει η γραμμή να διεγείρεται από μια πηγή που έχει συχνότητα ταλάντωσης $f = \frac{\omega}{2 \cdot \pi}$, όπως φαίνεται στο Σχήμα A.3, όπου λαμβάνονται υπόψη και τα συγκεντρωμένα στοιχεία Z_g , Z_L τερματικών της γραμμής μεταφοράς.



Σχήμα A.3 Διέγερση γραμμής μεταφοράς

Θεωρούμε ότι η πηγή σημάτων έχει εφαρμοστεί στη γραμμή για αρκετό χρόνο και ότι τα μεταβατικά φαινόμενα έχουν εξαφανιστεί. Εισάγοντας τα μιγαδικά μεγέθη της τάσης $V(z)$ και του ρεύματος $I(z)$, που ονομάζονται και φασιθέτες (phasors), με τους ορισμούς

$$V(z,t) = \text{Re}(e^{j \cdot \omega \cdot t} \cdot V(z)) \quad (\text{A.5})$$

$$I(z,t) = \text{Re}(e^{j \cdot \omega \cdot t} \cdot I(z)) \quad (\text{A.6})$$

Οι εξισώσεις (4.13), (4.14) γράφονται εύκολα υπό τη μορφή

$$-\frac{\partial}{\partial z} \cdot V(z,t) = (R' + j \cdot \omega \cdot L') \cdot I(z) \quad (\text{A.7})$$

$$-\frac{\partial}{\partial z} \cdot I(z) = (G' + j \cdot \omega \cdot C') \cdot V(z) \quad (\text{A.8})$$

Εκτός από τις εξισώσεις της γραμμής μεταφοράς πρέπει να είναι γνωστές και οι οριακές συνθήκες στην αρχή και το τέλος της γραμμής. Γνωρίζοντας τις σύνθετες αντιστάσεις Z_L του τερματισμού και Z_g της πηγής σημάτων και την τάση V_g της πηγής ισχύει

$$V_g = Z_g \cdot I(0) + V(0) \quad (\text{για } z = 0) \quad (\text{A.9})$$

$$V(l) = Z_L \cdot I(l) \quad (\text{για } z = l) \quad (\text{A.10})$$

όπου l είναι το μήκος της γραμμής.

Έχοντας τις (A.7), (A.8) ένα ομογενές σύστημα διαφορικών εξισώσεων με σταθερούς συντελεστές μπορούμε να αναζητήσουμε λύσεις της μορφής

$$V(z) = A \cdot e^{q \cdot z} \quad \text{και} \quad I(z) = B \cdot e^{q \cdot z} \quad (\text{A.11})$$

Αντικαθιστώντας την εξίσωση (A.11) στις (A.7), (A.8) έχουμε το ομογενές γραμμικό

$$\text{σύστημα,} \quad \begin{bmatrix} q & (R + j \cdot \omega \cdot L) \\ (G + j \cdot \omega \cdot C) & q \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix} = 0 \quad (\text{A.12})$$

Για να προκύψουν μη μηδενικές λύσεις, δηλαδή $A \neq B \neq 0$, πρέπει η ορίζουσα του συστήματος να είναι ίση με το μηδέν, από τη συνθήκη αυτή βρίσκουμε,

$$q = \pm \gamma$$

$$\text{Όπου} \quad \gamma = [(R' + j \cdot \omega \cdot L') \cdot (G' + j \cdot \omega \cdot C')]^{1/2} \quad (\text{A.13})$$

είναι η σταθερά διάδοσης.

Άρα έχουμε δύο ανεξάρτητες λύσεις που αντιστοιχούν στα + και - πρόσημα της εξίσωσης (A.13). Αντικαθιστώντας τις δύο λύσεις της εξίσωσης (A.13) κατά σειρά στην εξίσωση (A.12) μπορούμε να υπολογίσουμε τους λόγους των συντελεστών A/B

$$\left(\frac{A}{B}\right)_+ = -Z_0 \quad \text{για } q = \gamma \quad (\text{A.14})$$

και

$$\left(\frac{A}{B}\right)_- = Z_0 \quad \text{για } q = -\gamma \quad (\text{A.15})$$

όπου

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j \cdot \omega \cdot L}{G + j \cdot \omega \cdot C}} \quad (\text{A.16})$$

όπου το μέγεθος Z_0 έχει μονάδες Ω ονομάζεται κυματική ή χαρακτηριστική αντίσταση της γραμμής για τους λόγους που θα αναφέρουμε παρακάτω. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της παραπάνω ανάλυσης οι γενικές λύσεις για την τάση $V(z)$ και το ρεύμα $I(z)$ γράφονται όπως παρακάτω

$$V(z) \cdot A_+ \cdot e^{\gamma \cdot z} + A_- \cdot e^{-\gamma \cdot z} \quad (\text{A.17})$$

$$I(z) = -\frac{A_+}{Z_0} \cdot e^{\gamma \cdot z} + \frac{A_-}{Z_0} \cdot e^{-\gamma \cdot z} \quad (\text{A.18})$$

Εφαρμόζοντας τις τερματικές συνθήκες των εξισώσεων (A.9), (A.10) στις λύσεις (A.17), (A.18) προκύπτουν οι εξισώσεις

$$V_g = Z_g \cdot \left(\frac{A_- - A_+}{Z_0} \right) + A_+ + A_- \quad (\text{A.19})$$

$$A_+ \cdot e^{\gamma \cdot l} + A_- \cdot e^{-\gamma \cdot l} = Z_L \cdot \left(-A_+ \cdot e^{\gamma \cdot l} + A_- \cdot e^{-\gamma \cdot l} \right) / Z_0$$

Λύνοντας το γραμμικό αυτό σύστημα για τους άγνωστους συντελεστές A_+ , A_- βρίσκουμε

$$A_+ = \frac{V_g}{Z_g + Z_0} \cdot \frac{\rho_L \cdot e^{-2\gamma \cdot l}}{1 - \rho_g \cdot \rho_L \cdot e^{-2\gamma \cdot l}} \cdot Z_0 \quad (\text{A.20})$$

$$A_- = \frac{V_g}{Z_g + Z_0} \cdot \frac{1}{1 - \rho_g \cdot \rho_L \cdot e^{-2\gamma \cdot l}} \cdot Z_0 \quad (\text{A.21})$$

όπου

$$\rho_g = \frac{Z_L - Z_0}{Z_g + Z_0} \quad , \quad \rho_L = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (\text{A.22})$$

Επιστρέφοντας στις εξισώσεις (A.17), (A.18) και αντικαθιστώντας τα αποτελέσματα των εξισώσεων (A.20), (A.21) γράφουμε τη λύση στην παρακάτω μορφή

$$V(z) = \frac{V_g}{Z_g + Z_0} \cdot \left(\frac{\rho_L \cdot e^{\gamma(z-2l)} + e^{-\gamma \cdot z}}{1 - \rho_g \cdot \rho_L \cdot e^{-2\gamma \cdot l}} \right) \cdot Z_0 \quad (\text{A.23})$$

$$I(z) = \frac{V_g}{Z_g + Z_0} \cdot \left(\frac{-\rho_L \cdot e^{\gamma(z-2l)} + e^{-\gamma \cdot z}}{1 - \rho_g \cdot \rho_L \cdot e^{-2\gamma \cdot l}} \right) \quad (\text{A.24})$$

Διαιρώντας την εξίσωση (A.23) με την (A.24) ορίζουμε την φαινόμενη σύνθετη αντίσταση της γραμμής στο σημείο z

$$Z(z) = \frac{V(z)}{I(z)} = Z_0 \cdot \frac{1 + \rho_L \cdot e^{2\gamma \cdot (z-l)}}{1 - \rho_L \cdot e^{2\gamma \cdot (z-l)}} \quad (\text{A.25})$$

που μπορεί να γραφεί σε απλούστερη μορφή ορίζοντας τις νέες μεταβλητές

$$\zeta(z) = \frac{Z(z)}{Z_0}, \quad \rho(z) = \rho_L \cdot e^{2\gamma \cdot (z-l)} \quad (\text{A.26})$$

όπως παρακάτω

$$\zeta(z) = \frac{1 + \rho(z)}{1 - \rho(z)} \quad (\text{A.27})$$

Λύνοντας την εξίσωση αυτή για $\rho(z)$ γράφουμε την αντίστροφη σχέση

$$\rho(z) = \frac{\zeta(z) - 1}{\zeta(z) + 1} \quad (\text{A.28})$$

Το αδιάστατο μέγεθος $\zeta(z) = \frac{Z(z)}{Z_0}$ ονομάζεται ανηγμένη σύνθετη αντίσταση

της γραμμής στη θέση z .

Έχοντας υπολογίσει την τάση και το ρεύμα πάνω στη γραμμή μεταφοράς θα εξετάσουμε τώρα την φυσική ερμηνεία και την χρησιμοποίηση των παραπάνω αποτελεσμάτων για την εξέταση πρακτικών προβλημάτων. Επιστρέφοντας στον ορισμό της εξίσωσης (A.13) για τη σταθερά διάδοσης γ , μπορούμε να ορίσουμε δύο νέους πραγματικούς αριθμούς α και β από τη σχέση

$$\gamma = \alpha + j \cdot \beta \quad (\text{A.29})$$

Ο αριθμός α αντιπροσωπεύει τις απώλειες της γραμμής ανά μονάδα μήκους σε Neger ενώ ο β την αντίστροφη φάση σε ακτίνια ανά μονάδα μήκους και ονομάζεται σταθερά φάσης ή διάδοσης.

Αντικαθιστώντας την εξίσωση (A.29) στην (A.23) παρατηρούμε ότι εμφανίζονται δύο όροι που περιγράφουν οδεύοντα κύματα σε αντίθετη κατεύθυνση μεταξύ τους σύμφωνα με την εξίσωση

$$V(z) = V_0 \cdot (\rho_L \cdot e^{-(2l-z)\alpha} \cdot e^{j\beta \cdot z - j\beta \cdot 2l} + e^{-\alpha \cdot z} \cdot e^{-j\beta \cdot z}) \quad (\text{A.30})$$

όπου

$$V_0 = \frac{V_g}{Z_g + Z_0} \cdot \frac{1}{1 - \rho_g \cdot \rho_L \cdot e^{-2(\alpha+j\beta)l}} \cdot Z_0$$

Παρατηρούμε ότι ο όρος με $\exp(+j \cdot \beta \cdot z)$ συμπεριφορά αντιπροσωπεύει κύμα που ανακλάται από το φορτίο Z_L προς την πηγή ενώ το κύμα που προσπίπτει από την πηγή προς το φορτίο περιγράφεται από τον όρο με $\exp(-j \cdot \beta \cdot z)$

συμπεριφορά. Ταυτόχρονα με τη διάδοση και τα δύο κύματα εξασθενούν κατά α Naper ανά μονάδα μήκους.

Υπολογίζοντας το λόγο του ανακλώμενου προς το προσπίπτον κύμα στην εξίσωση (A.30) έχουμε

$$\rho_L \cdot e^{2(z-l)(\alpha+j\beta)} = \rho(z) \quad (\text{A.31})$$

όπου χρησιμοποιούμε τον ορισμό της εξίσωσης (A.26). Άρα ο όρος $\rho(z)$ μπορεί να ερμηνευτεί σαν ο συντελεστής ανάκλασης της γραμμής στο σημείο z . Για $z = l$ δηλαδή στο τέλος της γραμμής έχουμε σαν συντελεστή ανάκλασης $\rho_L = \rho(l)$. Από την εξίσωση (A.22) βλέπουμε ότι για $Z_L = Z_0$ προκύπτει $\rho_L = 0$ που δείχνει ότι στη γραμμή υπάρχει μόνο το οδεύον κύμα από την πηγή σήματος προς το φορτίο. Στην περίπτωση που $\rho_L \neq 0$, επειδή στη γραμμή συνυπάρχουν δύο κύματα που οδεύουν σε αντίθετη κατεύθυνση, εμφανίζονται στάσιμα κύματα.

Εξετάζουμε πρώτα την περίπτωση βραχυκυκλώματος ($Z_L = 0$) ή ανοιχτού κυκλώματος ($Z_L \rightarrow \infty$) που δίνουν συντελεστή ανάκλασης $\rho_L = -1$ και $\rho_L = +1$ αντίστοιχα. Αντικαθιστώντας τις τιμές αυτές του ρ_L στην (A.30) έχουμε

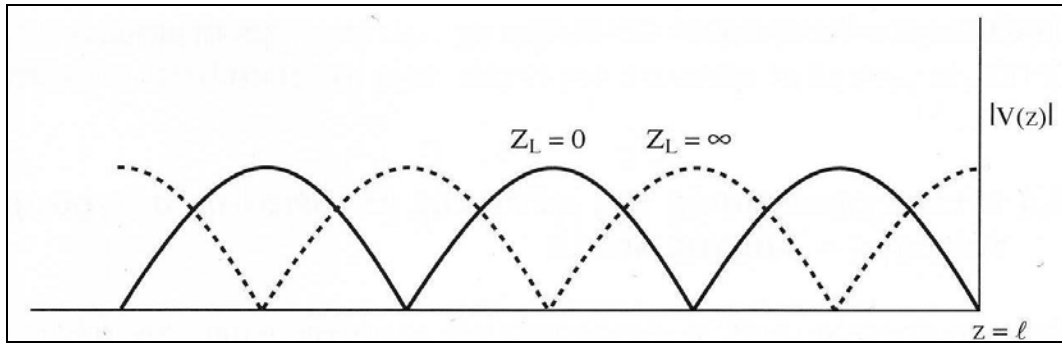
$$V(z) = 2 \cdot V_0 \cdot e^{-\alpha l - j \cdot \beta \cdot l} \begin{cases} \sinh(\alpha \cdot (l-z) + j \cdot \beta \cdot (l-z)) \\ \cosh(\alpha \cdot (l-z) + j \cdot \beta \cdot (l-z)) \end{cases} \quad \text{για } \begin{matrix} Z_L = 0 \\ Z_L = \infty \end{matrix} \quad (\text{A.32})$$

και από όπου μπορούμε να υπολογίσουμε το μέτρο και τη φάση της τάσης $V(z)$. Στις μικροκυματικές εφαρμογές προτιμάται πάντοτε η χρήση κυματοδηγών που οι απώλειές τους είναι πολύ μικρές, δηλαδή στην εξίσωση (A.29) πρέπει $\alpha \ll \beta$. Αν ισχύει η συνθήκη αυτή τότε η εξίσωση (A.32) παίρνει πιο απλή μορφή όπως

$$V(z) = 2 \cdot V_0 \cdot e^{-j \cdot \beta \cdot l} \begin{cases} j \cdot \sin(\beta(l-z)) \\ \cos(\beta(l-z)) \end{cases} \quad \text{για } \begin{matrix} Z_L = 0 \\ Z_L = \infty \end{matrix} \quad (\text{A.33})$$

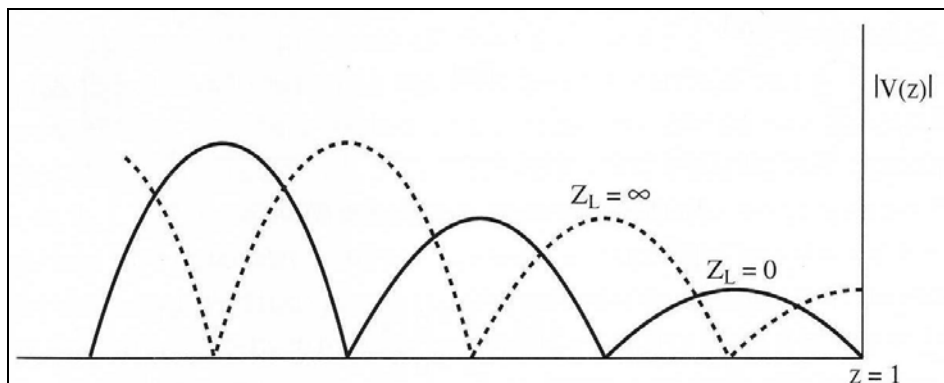
Στο Σχήμα A.4 δείχνουμε την μεταβολή της τάσης $|V(z)|$ κατά μήκος της βραχυκυκλωμένης ή ανοιχτοκυκλωμένης γραμμής μεταφοράς. Και στις δύο περιπτώσεις έχουμε περιοδικούς μηδενισμούς που η μεταξύ τους απόσταση Δz δίνεται από τη σχέση

$$\Delta z = \frac{n \cdot \pi}{\beta} \quad \text{με } n = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$$



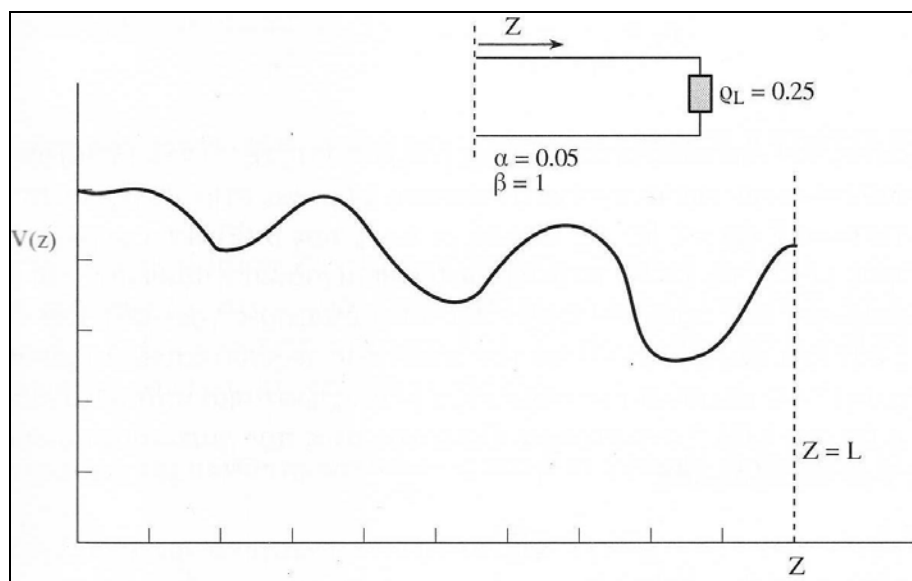
Σχήμα A.4 Μεταβολή τάσης $|V(z)|$ κατά μήκος της γραμμής μεταφοράς χωρίς απώλειες για $Z_L = 0$ και $Z_L = \infty$

Όταν η γραμμή έχει απώλειες για τον υπολογισμό της τάσης $|V(z)|$ μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την εξίσωση (A.32). Στο Σχήμα A.5 δείχνουμε τη μεταβολή της τάσης $|V(z)|$ κατά μήκος της γραμμής μεταφοράς.



Σχήμα A.5 Μεταβολή της τάσης $|V(z)|$ σε γραμμή μεταφορά με απώλειες για $Z_L = 0$ και $Z_L = \infty$

Για τη γενική περίπτωση που $|\rho_L| \neq 0$ και $|\rho_L| \neq 1$ η μεταβολή της τάσης πρέπει να υπολογιστεί από την εξίσωση (A.30).

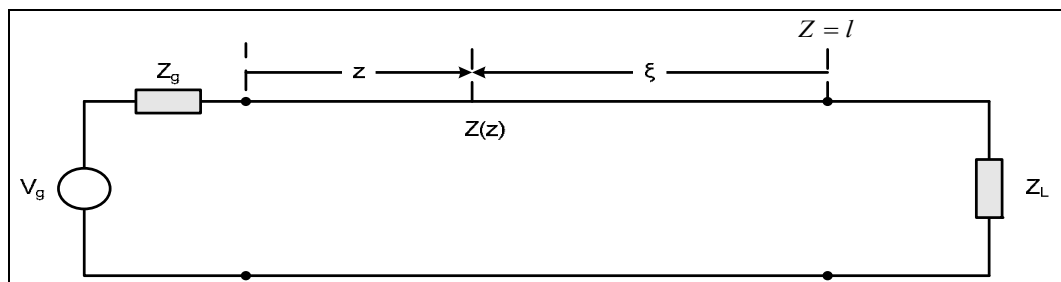


Σχήμα A.6 Μεταβολή της τάσης $|V(z)|$ σε γραμμή με απώλειες για τυχαία τιμή της αντίστασης τερματισμού Z_L

Στο Σχήμα A.6 δείχνουμε τη μεταβολή της τάσης $|V(z)|$ για γραμμή με απώλειες και τυχαία τιμή του συντελεστή ανάκλασης ρ_L .

A.1.2 Μετασχηματισμός της σύνθετης αντίστασης σε γραμμές μεταφοράς. Χάρτης Smith

Στην παράγραφο αυτή θα εξετάσουμε τον μετασχηματισμό της σύνθετης $Z(z)$ αντίστασης κατά μήκος μιας γραμμής μεταφοράς που έχει τερματιστεί με μια σύνθετη αντίσταση Z_L , όπως φαίνεται στο Σχήμα A.7. Ορίζοντας την απόσταση $\xi = l - z$ από το τέλος της γραμμής από τις εξισώσεις (A.26) και (A.27) γράφουμε την ανηγμένη τιμή της σύνθετης αντίστασης



Σχήμα Α.7 Τερματισμένη γραμμή μεταφοράς

$$\zeta(\xi) = \frac{1 + \rho(\xi)}{1 - \rho(\xi)} \quad (\text{A.34})$$

όπου

$$\rho(\xi) = \rho_L \cdot e^{-2\cdot\gamma\cdot\xi} \quad (\text{A.35})$$

$$\rho_L = \frac{\zeta_L - 1}{\zeta_L + 1}, \quad \zeta_L = \frac{Z_L}{Z_0} \quad (\text{A.36})$$

Γνωρίζοντας τον συντελεστή ανάκλασης $\rho(\xi)$ από τις εξισώσεις (A.35), (A.36) μπορούμε να υπολογίσουμε την ανηγμένη αντίσταση $\zeta(\xi)$ και στη συνέχεια την σύνθετη αντίσταση $Z(\xi) = \zeta(\xi) \cdot Z_0$. Επειδή οι τιμές των $\rho(\xi)$ είναι μιγαδικές ο υπολογισμός με την εξίσωση (A.34) απαιτεί διαίρεση μιγαδικών αριθμών. Με σκοπό την απλοποίηση των πράξεων έχουν προταθεί διάφορες γραφικές μέθοδοι. Η μέθοδος που έχει επικρατήσει είναι του Smith που περιγράφεται παρακάτω.

Η εξίσωση (A.34) αποτελεί ένα σύμμορφο μετασχηματισμό από το μιγαδικό επίπεδο $\rho(\xi)$ στο $\zeta(\xi)$ ή αντίστροφα. Ορίζουμε τους πραγματικούς αριθμούς r, x και u, v με τις εξισώσεις

$$\zeta(\xi) = r + j \cdot x$$

$$\rho(\xi) = u + j \cdot v$$

και αντικαθιστώντας στην (A.34) αφού χωρίσουμε τα πραγματικά και μιγαδικά μέρη έχουμε

$$r = \frac{1 - (u^2 + v^2)}{(1 - u)^2 + v^2}, \quad x = \frac{2 \cdot v}{(1 - u)^2 + v^2}$$

$$\left(u - \frac{r}{1+r}\right)^2 + v^2 = \frac{1}{(1+r)^2} \quad (\text{A.37})$$

ή

$$(u-1)^2 + \left(v - \frac{1}{x}\right)^2 = \frac{1}{x^2} \quad (\text{A.38})$$

Αν τώρα χαράξουμε στο μιγαδικό επίπεδο $\rho(\xi) = u + j \cdot v$ το γεωμετρικό τόπο των σημείων που ορίζονται από τη συνθήκη $r = \text{σταθερό}$ και $-\infty < x < +\infty$ προκύπτει κύκλος που έχει ακτίνα $\frac{1}{1+r}$ και το κέντρο του βρίσκεται

στη θέση $u = \frac{r}{1+r}$, $v=0$. Στο Σχήμα Α.8 δείχνουμε τους κύκλους που προκύπτουν για

$r = \infty, 2, 1, \frac{1}{2}$ και 0. Με παρόμοιο τρόπο χαράζουμε το γεωμετρικό τόπο των σημείων

που ορίζονται από τη εξίσωση $x = \text{σταθερό}$ και $0 < r < +\infty$ υποθέτοντας ότι το πραγματικό μέρος της ανηγμένης αντίστασης είναι πάντοτε θετικό, προκύπτουν κύκλοι που το κέντρο τους είναι στη θέση $u = 1$, $v = \frac{1}{x}$ και η ακτίνα τους είναι ίση με

$\frac{1}{x}$. Στο Σχήμα Α.8 δείχνουμε τους κύκλους που αντιστοιχούν στις τιμές

$x = 0, \pm \frac{1}{2}, \pm 1, \pm 2, \pm \infty$. Με τη βοήθεια του χάρτη Smith μπορούμε να υπολογίσουμε

εύκολα τον μετασχηματισμό των σύνθετων αντιστάσεων σε γραμμές μεταφοράς.

Εξετάζουμε παρακάτω τους διάφορους τρόπους χρήσης του χάρτη Smith.

Α) Εύρεση του συντελεστή ανάκλασης όταν είναι γνωστή η σύνθετη αντίσταση

Ξέροντας την αντίσταση Z_1 υπολογίζουμε το λόγο $\zeta = \frac{Z_1}{Z_0} = r_1 + j \cdot x_1$. Στη

συνέχεια βρίσκουμε στο μιγαδικό επίπεδο $\rho(\xi) = u + j \cdot v$ την τομή των κύκλων

$r = r_1$ και $x = x_1$ όπως φαίνεται στο Σχήμα Α.8. Υπολογίζουμε τον μιγαδικό αριθμό

ρ_1 μετρώντας το μέτρο $|\rho_1|$ και τη γωνία $|\rho_1|$.

Β) Μεταφορά της σύνθετης αντίστασης πάνω σε γραμμή μεταφοράς (Σχήμα 4.8)

Υπολογίζουμε την ανηγμένη αντίσταση $\zeta_L = \frac{Z_L}{Z_0} = r_L + j \cdot x_L$ και βρίσκουμε

την τομή των κύκλων $r = r_L$ και $x = x_L$. Το σημείο αυτό μας δίνει το συντελεστή

ανάκλασης στο τέλος της γραμμής όπως π.χ. το σημείο C στο Σχήμα Α.8.

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (Α.35) την (Α.29) έχουμε

$$\rho(\xi) = \rho_L \cdot e^{-2\alpha \cdot \xi} \cdot e^{-2j \cdot \beta \cdot \xi} \quad (\text{A.39})$$

που δείχνει ότι ο συντελεστής ανάκλασης σε απόσταση ξ από τον τερματισμό βρίσκεται στρέφοντας το συντελεστή ανάκλασης ρ_L αριστερόστροφα $2 \cdot \beta \cdot \xi$ ακτίνια και παίρνοντας σαν νέο μέτρο $e^{-2\alpha \cdot \xi} \cdot |\rho_L|$ όπως φαίνεται στο Σχήμα Α.8 για το σημείο D. Άρα ο γεωμετρικός τόπος του συντελεστή ανάκλασης $\rho(\xi)$ κατά μήκος της γραμμής είναι λογαριθμική ελικοειδής καμπύλη. Όταν η γραμμή είναι χωρίς απώλειες επειδή $\alpha=0$, ο συντελεστής ανάκλασης στρέφεται πάνω σε κύκλο με ακτίνα $|\rho(\xi)| = |\rho_L|$. Έχοντας βρει τον συντελεστή ανάκλασης βρίσκουμε εύκολα την ανηγμένη σύνθετη αντίσταση $Z(\xi)$ όπως δείχνουμε στο Σχήμα Α.8.

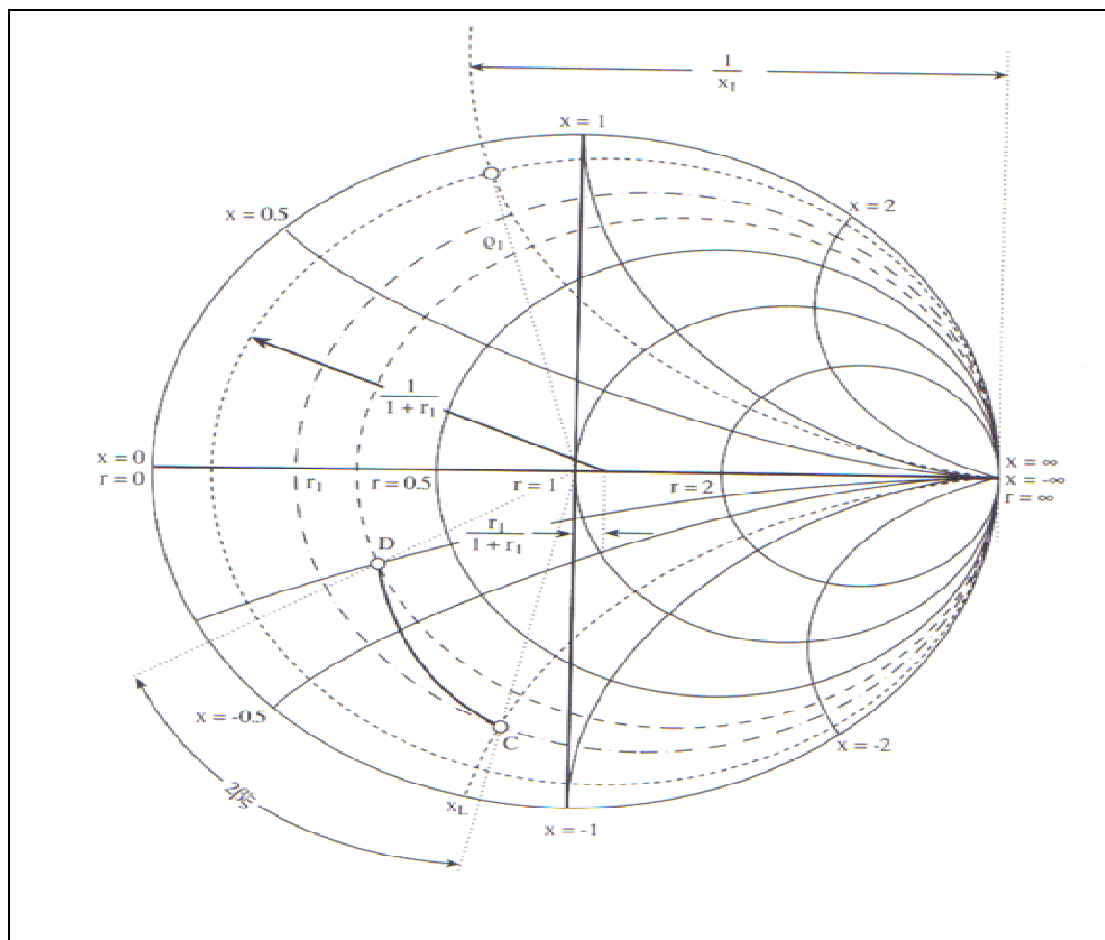
Γ) Εύρεση της σύνθετης αγωγιμότητας με τη βοήθεια του χάρτη Smith

Ορίζοντας την ανηγμένη σύνθετη αγωγιμότητα $\Psi(\xi) = \frac{1}{Z(\xi)}$ από την εξίσωση (Α.34) έχουμε

$$\psi(\xi) = \frac{1 + (-\rho(\xi))}{1 - (-\rho(\xi))} \quad (\text{A.40})$$

Παρατηρούμε ότι οι εξισώσεις $\psi(\xi) = f(-\rho(\xi))$ και $Z(\xi) = f(\rho(\xi))$ είναι ισοδύναμες. Άρα ο χάρτης Smith μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εύρεση της σύνθετης ανηγμένης αγωγιμότητας από το συντελεστή ανάκλασης. Συγκεκριμένα ακολουθούμε την παρακάτω διαδικασία.

- Αν γνωρίζουμε την σύνθετη αντίσταση $Z(\xi)$ υπολογίζουμε το λόγο $Z(\xi) = \frac{Z(\xi)}{Z_0} = r' + j \cdot x'$ απ'όπου καθορίζουμε το συντελεστή ανάκλασης βρίσκοντας την τομή των κύκλων $r = r'$ και $x = x'$ (σημείο A, Σχήμα Α.9)
- Ενώνουμε τα σημεία OA στο επίπεδο ρ και σημειώνουμε το συμμετρικό του A το A' (Σχήμα Α.9)
- Διαβάζουμε τις τιμές $r = r''$, $x = x''$ που μας δίνουν την τιμή της ανηγμένης αγωγιμότητας $\Psi(\xi) = r'' + j \cdot x''$.



Σχήμα Α.8 Κατασκευή του χάρτη Smith

A.1.3 Στάσιμα κύματα σε γραμμές μεταφοράς χωρίς απώλειες

Στις μικροκυματικές συχνότητες όπως έχουμε ήδη αναφέρει στην παραπάνω παράγραφο βασική απαίτηση από τις γραμμές μεταφοράς είναι να έχουν μικρή εξασθένηση δηλαδή $\alpha = 0$ στην εξίσωση (Α.29). Για την ακρίβεια πρέπει $a \cdot l \ll 1$ με l το μήκος της γραμμής μεταφοράς που χρησιμοποιείται. Επειδή στις πρακτικές μικροκυματικές γραμμές ισχύει η συνθήκη αυτή, σωστό είναι να γίνει αναλυτικότερη εξέταση των γραμμών μεταφοράς χωρίς απώλειες. Για να έχουμε $\alpha = 0$ πρέπει

$R = G = 0$ οπότε η χαρακτηριστική αντίσταση $Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}$ έχει πραγματική τιμή. Η

σταθερά διάδοσης είναι $\beta = \omega \cdot \sqrt{\frac{L}{C}}$.

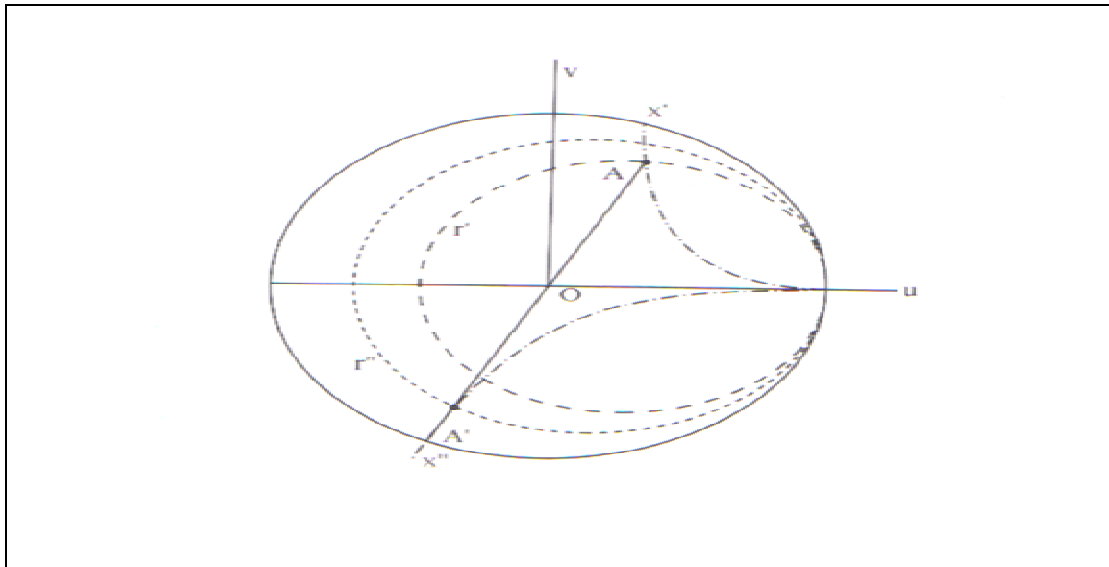
Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (Α.30) $\alpha = 0$

$$V(z) = V_0 \cdot (e^{-j\beta z} + \rho_L \cdot e^{j\beta(z-2l)}) \quad (\text{A.41})$$

όπου έχουμε το προσπίπτον και ανακλώμενο κύμα $V_0 \cdot \exp(-j \cdot \beta \cdot z)$ και $V_0 \cdot \rho_L \cdot \exp(j \cdot \beta \cdot (z - 2 \cdot l))$ αντίστοιχα. Η υπέρθεση των δύο αυτών κυμάτων δημιουργεί στάσιμα κύματα πάνω στη γραμμή.

Υπολογίζουμε το μέτρο της τάσης $|V(z)|$ εισάγοντας τον ορισμό $\rho_L = |\rho_L| \cdot \exp(j \cdot \phi_L)$,

$$|V(z)| = |V_0| \cdot \sqrt{1 + |\rho_L|^2 + 2 \cdot |\rho_L| \cdot \cos(2 \cdot \beta \cdot (z - l) + \phi_L)} \quad (\text{A.42})$$



Σχήμα Α.9 Εύρεση της σύνθετης αγωγιμότητας

Άρα σε μια τυχαία θέση z , η τάση μεταβάλλεται από $-|V(z)|$ μέχρι $|V(z)|$ με χρονική συχνότητα ταλάντωσης ω . Η μέγιστη τιμή της $|V(z)|$ λαμβάνεται όταν $\cos(2 \cdot \beta \cdot (z - l) + \phi_L) = 1$ ή $2 \cdot \beta \cdot (z - l) + \phi_L = 2 \cdot \kappa \cdot \pi$ ($\kappa = 0, 1, 2, \dots$) και $|V(z)|_M = |V_0| \cdot (1 + |\rho_L|)$. Με παρόμοιο τρόπο βρίσκουμε την ελάχιστη τιμή της τάσης $|V|_m = (1 - |\rho_L|)$ όταν $2 \cdot \beta \cdot (z - l) + \phi_L = (2 \cdot \kappa + 1) \cdot \frac{\pi}{2}$ ($\kappa = 0, 1, 2, \dots$).

Στις πρακτικές εφαρμογές έχει σημασία η επίτευξη όσο το δυνατό μικρότερης τιμής του συντελεστή ανάκλασης $|\rho_L|$. Αυτό γίνεται για να μεταφέρεται όσο το

δυνατόν μεγαλύτερη ισχύς στο φορτίο. Για να χαρακτηρίσουμε το βαθμό καλής προσαρμογής ορίζουμε το λόγο στάσιμων κυμάτων $S = \frac{|V(z)|_M}{|V(z)|_m}$ δηλαδή

$$S = \frac{1 + |\rho_L|}{1 - |\rho_L|} \quad (\text{A.43})$$

Για $0 \leq |\rho_L| \leq 1$, ο λόγος στασίμων κυμάτων παίρνει τιμές από $S=1$ μέχρι $S = \infty$. Έχει επικρατήσει η τιμή του λόγου να γράφεται με το συμβολισμό $S=S:1$. Αν γνωρίζουμε την τιμή $|\rho_L|$ μπορούμε να υπολογίσουμε το S απευθείας από το χάρτη Smith τοποθετώντας την τιμή $\rho = |\rho_L| \cdot \exp(j0)$ στον πραγματικό άξονα και διαβάζοντας την αντίστοιχη τιμή της ανηγμένης αντίστασης $r=S$ (εξίσωση A.34). Πρέπει να επισημάνουμε ότι ο λόγος στασίμων κυμάτων S είναι συνάρτηση της συχνότητας ω αφού τις περισσότερες φορές η σύνθετη αντίσταση τερματισμού μεταβάλλεται ισχυρά με τη συχνότητα ω όπως θα δούμε παρακάτω.

Για να γίνει πιο αντιληπτή η φυσική εικόνα στη διάδοση κυμάτων στις γραμμές μεταφοράς υπολογίζουμε την πραγματική τάση από την εξίσωση (A.41) με $\rho_L = |\rho_L| \cdot \exp(j \cdot \phi_L)$ και παίρνοντας το πραγματικό μέρος αυτής

$$V(z,t) = V_0 \cdot \cos(\omega \cdot t - \beta \cdot z) + |\rho_L| \cdot V_0 \cdot \cos(\omega \cdot t + \beta \cdot (\zeta + 2 \cdot l) + \phi_L)$$

όπου για απλούστευση θεωρούμε ότι ο V_0 είναι πραγματικός αριθμός. Στο Σχήμα A.10 απεικονίζουμε το προσπίπτον κύμα $V_{\pi\rho} = V_0 \cdot \cos(\omega \cdot t - \beta \cdot z)$. Για t =σταθερό παρατηρούμε περιοδικότητα της τάσης $V_{\pi\rho}(z,t)$ κατά μήκος της γραμμής. Η περίοδος αυτή ορίζεται σαν μήκος κύματος και βρίσκεται από τη συνθήκη $\beta \cdot \lambda = 2 \cdot \pi$ δηλαδή η απόσταση λ αντιστοιχεί στην απόσταση που η φάση στρέφεται κατά 2π ακτίνια για t =σταθερό. Άρα το μήκος κύματος υπολογίζεται από τη σχέση

$$\lambda = \frac{2 \cdot \pi}{\beta}$$

Το ανακλώμενο κύμα $V_{\alpha\nu} = |\rho_L| \cdot V_0 \cdot \cos(\omega \cdot t + \beta \cdot (\zeta - 2 \cdot l) + \phi_L)$ έχει παρόμοια συμπεριφορά με το προσπίπτον κύμα όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.11 όπου επίσης δίνεται το αποτέλεσμα της υπέρθεσης των δύο αντίστροφα οδευόντων κυμάτων.

A.1.4 Ταχύτητες διάδοσης στις γραμμές μεταφοράς – Συνθήκη Heaviside

Επειδή τα κύματα που εξετάσαμε στις γραμμές μεταφοράς έχουν παράγοντα διάδοσης $\exp(-j \cdot \beta \cdot z)$ παρόμοιο με τα επίπεδα κύματα και στην περίπτωση αυτή ισχύουν οι ορισμοί των ταχυτήτων φάσης u_p και ομάδας u_g .

Επιστρέφοντας στον ορισμό της σταθεράς διάδοσης στις εξισώσεις (A.13) και (A.29) έχουμε

$$\begin{aligned} \gamma &= \alpha + j \cdot \beta = ((R + j \cdot \omega \cdot L) \cdot (G + j \cdot \omega \cdot C))^{1/2} = \\ &= ((R \cdot G - \omega^2 \cdot L \cdot C) + j \cdot \omega \cdot (L \cdot G + R \cdot C))^{1/2} \end{aligned} \quad (\text{A.44})$$

Διαχωρίζοντας τα πραγματικά και φανταστικά μέρη στην εξίσωση (A.44) έχουμε

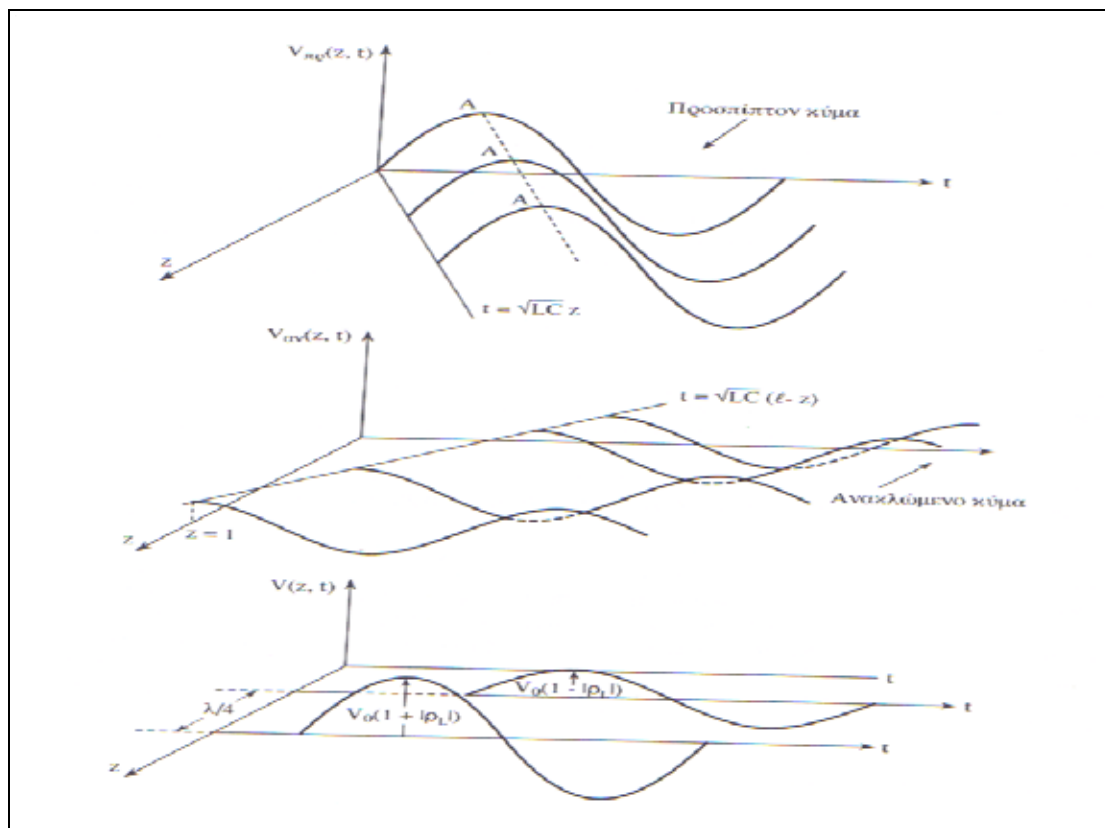
$$\alpha(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot (A(\omega) + (A^2(\omega) + B^2(\omega))^{1/2})^{1/2} \quad (\text{A.45})$$

$$\beta(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot (-A(\omega) + (A^2(\omega) + B^2(\omega))^{1/2})^{1/2} \quad (\text{A.46})$$

όπου

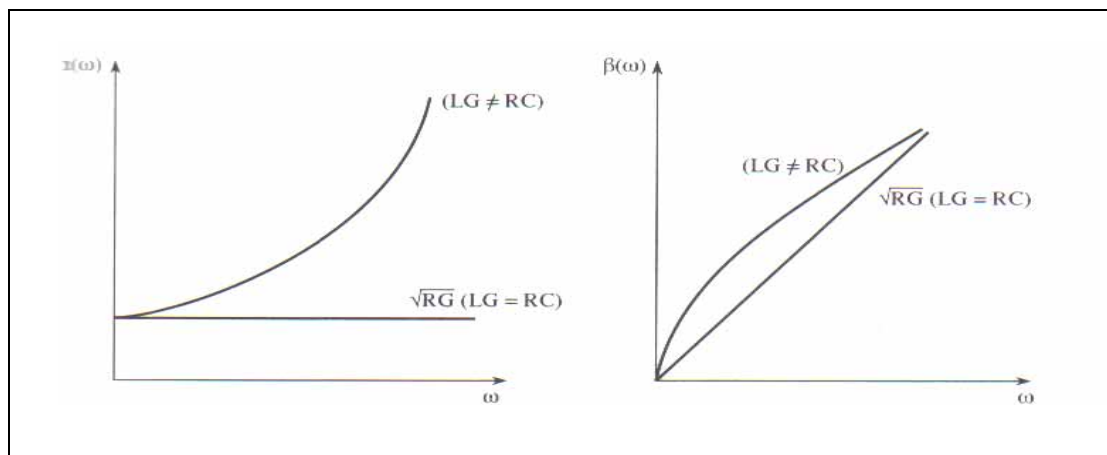
$$A(\omega) = R \cdot G - \omega^2 \cdot L \cdot C \quad (\text{A.47})$$

$$B(\omega) = \omega(LG + RC) \quad (\text{A.48})$$



Σχήμα Α.10 Στάσιμα κύματα σε γραμμές μεταφοράς

Γίνεται αμέσως αντιληπτό από την εξίσωση (Α.46) ότι αφού η σταθερά διάδοσης β είναι μη γραμμική συνάρτηση της συχνότητας γενικά οι ταχύτητες ομάδας και φάσης είναι διαφορετικές. Στο Σχήμα α.11 χαράζουμε τη μεταβολή της εξασθένησης $\alpha(\omega)$ και της σταθεράς φάσης $\beta(\omega)$ για διάφορες τιμές των RC, LG και LC. Παρατηρούμε από τις καμπύλες αυτές ότι σε μια γραμμή μήκους l η συνολική καθυστέρηση $t(\omega) = l \cdot \frac{\partial \beta(\omega)}{\partial \omega}$ και η εξασθένηση $\alpha(\omega) \cdot l$ (Neper) είναι συνάρτηση της συχνότητας ω .



Σχήμα Α.11 Μεταβολή της εξασθένησης $\alpha(\omega)$ και στροφής φάσης $\beta(\omega)$ ανά μονάδα μήκους

Άρα όταν η γραμμή διεγερθεί από μια πηγή που εκπέμπει διαμορφωμένο σήμα οι διάφορες συχνότητες που συγκροτούν το σήμα υφίστανται διαφορετικές καθυστερήσεις και εξασθενήσεις. Αποτέλεσμα είναι η παραμόρφωση του σήματος. Στην πράξη για να παρουσιαστεί η παραμόρφωση συνήθως πρέπει το μήκος της γραμμής l να είναι αρκετά μεγάλο (π.χ. 10Km για τα ομοαξονικά καλώδια και τις οπτικές ίνες). Το πρόβλημα της παραμόρφωσης παλμικών σημάτων σε γραμμές μεταφοράς μεγάλου μήκους παρατηρήθηκε σε τηλεγραφικές γραμμές για πρώτη φορά τον περασμένο αιώνα. Ο Heaviside ξεκινώντας από τις κυματικές εξισώσεις της γραμμής απέδειξε τη συνθήκη διάδοσης χωρίς παραμόρφωση. Για να μην υπάρξει παραμόρφωση πρέπει: (i) η εξασθένηση $\alpha(\omega)$ να είναι ανεξάρτητη από τη συχνότητα και (ii) η στροφή φάσης $\beta(\omega)$ να είναι γραμμική συνάρτηση της κυκλικής συχνότητας ω . Για να ισχύει η συνθήκη (i) πρέπει στην εξίσωση (4.55) να έχουμε

$$A(\omega) + (A^2(\omega) + B^2(\omega))^{1/2} = K = \text{σταθερό} \quad (\text{A.49})$$

Αντικαθιστώντας τις εξισώσεις (A.47), (A.48) στην (A.49), μεταφέροντας τον όρο $A(\omega)$ στο δεξί μέρος και υψώνοντας στο τετράγωνο προκύπτουν οι εξισώσεις

$$LG + RC = \sqrt{2KLC}$$

$$K = 2RC$$

ή απαλείφοντας την σταθερά K

$$\frac{LG}{CR} + \frac{RC}{GL} = 2$$

και

$$LG = RC \quad (\text{A.50})$$

Άρα όταν ισχύει η συνθήκη της εξίσωσης (4.60) τότε

$$\alpha(\omega) = \sqrt{RG} \quad (\text{A.51})$$

και η εξασθένιση ανά μονάδα μήκους είναι σταθερή. Για να αποδείξουμε ότι η σταθερά $\beta(\omega)$ επίσης ικανοποιεί την συνθήκη μη παραμόρφωσης των σημάτων αντικαθιστούμε την εξίσωση (A.49) στην (A.46)

$$\beta(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot (K - 2 \cdot A(\omega))^{1/2} = \omega \cdot \sqrt{LC} \quad (\text{A.52})$$

Το αποτέλεσμα αυτό δείχνει ότι όταν ισχύει η συνθήκη της εξίσωσης (4.60) έχοντας $\beta(\omega) = \omega \cdot \sqrt{LC}$, $\frac{\partial \beta(\omega)}{\partial \omega} = \sqrt{LC}$ η ταχύτητα ομάδας δηλαδή η καθυστέρηση είναι η ίδια για όλες τις συχνότητες. Συμπεραίνοντας μπορούμε να πούμε ότι όταν ισχύει η συνθήκη μη παραμόρφωσης (εξίσωση A.51) και όταν έχουμε προσαρμογή αν το σήμα που φθάσει είναι $V(l, t) = \exp(-l \cdot \sqrt{RG}) \cdot f \cdot (t - l \cdot \sqrt{LC})$. Τέλος πρέπει να τονίσουμε ότι στις γραμμές μεταφοράς χωρίς απώλειες η συνθήκη (A.51) αυτόματα ικανοποιείται και στο τέλος της γραμμής έχουμε την τάση $V(l, t) = f \cdot (t - l \cdot \sqrt{LC})$. [Ouz94]

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [Barn98] J. Barnes, “A physical multi-path model for power distribution network propagation,” in Proc. 1998 Int. Symp. Powerline Communications and its Applications, Tokyo, Japan, Mar. 1998, pp. 76–89.
- [Beny03] D. Benyoucef, A new statistical model of the noise power density spectrum for powerline communications, Proceedings of the 7th International Symposium on Power-Line Communications and its Applications (ISPLC), Kyoto, Japan, 136–141 March 26–28, 2003.
- [Bumi03] G. Bumiller, System architecture for power-line communication and consequences for modulation and multiple access, 7 th International Symposium on Power-Line Communications and its Applications (ISPLC2003), Kyoto, Japan, March 26–28, 2003.
- [BumiPi03] G. Bumiller, N. Pirschel, Airfield ground lighting automation system realised with power-line communication, 7 th International Symposium on Power Line Communications and its Applications (ISPLC2003), Kyoto, Japan, March 26–28, 2003.
- [BungMc90] E.W.G. Bungay, D. McAllister, Electric Cables Handbooku, BSP Professional Books, Oxford, 1990.
- [BussWa98] M. Busser, T. Waldeck, and K. Dostert, “Telecommunication applications over the low voltage power distribution grid,” in Proc. IEEE 5th Int. Symp. Spread Spectrum Techniques & Applications, vol. 1/3, Sun City, South Africa, 1998, pp. 73–77.
- [Cheng] D. K. Cheng, Fundamental of Engineering Electromagnetics. Reading, MA: Addison-Wesley.
- [Cimi85] L. Cimini, Analysis and simulation of a digital mobile channel using orthogonal frequency division multiplexing, IEEE Transaction Communications, COM-33(7), 665–675, July 1985.
- [ConnRyu99] D. P. Connors, B. Ryu, S. Dao, Modeling and simulation of broadband satellite networks; part I: medium access control for QoS Provisioning, IEEE Communications Magazine, 72–79 March 1999.
- [Dalb97] Dalby, “Signal transmission on powerlines—Analysis of powerline circuits,” in Proc. 1997 Int. Symp. Powerline Communications and its Applications, Essen, Germany, Apr. 1998, pp. 37–44.

- [DickiNi]** J. Dickinson and P. J. Nicholson, "Calculating the high frequency transmission line parameters of power cables," in Proc. 1st Int. Symp. Power-Line Communications and its Applications (ISPLC 97), Apr.1997, pp. 127–133.
- [Dost01]** K. Dostert, Powerline Communications, Prentice Hall, 2001.
- [Dost01a]** K. Dostert, Powerline-Kommunikation, NET Zeitschrift für Kommunikationsmanagement, 2002, in German.
- [Färbo98]** J. Färber, S. Bodamer, J. Charzinski, Measurement and Modelling of Internet Traffic at Access Networks, EUNICE Summer School, Munich, August 31–3 September, 1998.
- [Gonz97]** G. Gonzalez, Microwave Transistor Amplifiers. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1997.
- [Goed95]** J. Goedbloed, Electromagnetic Compatibility, Prentice Hall, New York, 1995.
- [HeinKa87]** L. Heinhold, Kabel und Leitungen für Starkstrom", Siemens AG Berlin, 1987.
- [HensSc]** C. Hensen, Dr. W. Schulz, S. Schwarze, Characterisation, Measurement and Modeling of Medium Voltage Power-Line Cables for High Data Rate Communication, University of Paderbon.
- [Hooi98]** O. G. Hooijen, On the channel capacity of the residential power circuit used as a digital communications medium, IEEE Communications Letters, **2**(10), October 1998.
- [Hras04]** H. Hrasnica, A. Haidine, R. Lehnert, Broadband Powerline Communications Network Design, John Wiley & Sons, Ltd, 2004.
- [HrasLe00]** H. Hrasnica, R. Lehnert, Powerline communications in telecommunication access area (Powerline Communications im TK-Zugangsbereich), VDE World Microtechnologies Congress (MICRO.tec2000), ETG-Fachtagung und Forum: Verteilungsnetze im liberalisierten Markt, Expo 2000, Hannover, Germany, September 25–27, 2000.
- [HrasHa01b]** H. Hrasnica, A. Haidine, R. Lehnert, Powerline Communications im Anschlussbereich, VDE Verlag, Germany, 48–53 NTZ 7-8/2001, in German.
- [IEC89]** IEC, Electromagnetic Compatibility, International Electrotechnical Vocabulary, Chapter 161, IEC Publication 50(161), Geneva, January 1989.

- [Joe00]** I. Joe, A novel adaptive hybrid ARQ scheme for wireless ATM networks, *Wireless Networks*, 6, 211–219 2000.
- [Karl97]** M. Karl, “Möglichkeiten der Nachrichtenübertragung über elektrische Energieverteilnetze auf der Grundlage Europäischer Normen, Fortschrittsberichte VDI, Reihe 10,” VDI-Verlag, Düsseldorf, 500, 1997.
- [KousEl99]** M. A. Kousa, A. K. Elhakeem, H. Yang, Performance of ATM networks under hybrid ARQ/FEC error control scheme, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 7(6), 917–925 December 1999.
- [KuriHa03]** K. Kuri, Y. Hase, S. Ohmori, F. Takahashi, R. Kohno, Power channel coding and modulation considering frequency domain error characteristics, *Proceedings of the 7th International Symposium on Power-Line Communications and its Applications (ISPLC)*, Kyoto, Japan, March 26–28, 2003.
- [LangDo00]** P. Langfeld and K. Dostert, “OFDM system synchronisation for powerline communications,” in *Proc. 4th Int. Symp. on Powerline Communications and its Applications*, Limerick, Ireland, 2000, pp. 15–22.
- [MaedaFe01]** Y. Maeda, R. Feigel, A standardization plan for broadband access network transport, *IEEE Communications Magazine*, 166–172 July 2001.
- [MatsUm03]** H. Matsuo, D. Umehara, M. Kawai, Y. Morihira, An iterative detection for OFDM over impulsive noise channel, *Proceedings of the 6th International Symposium on Power-Line Communications and its Applications (ISPLC)*, Athens, Greece, March 27–29, 2002.
- [MengCh04]** H. Meng, S.Chen, Modeling of Transfer Characteristics for the Broadband Power Line Communication Channel, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 19, No.3, July 2004.
- [NishNo02]** T. Nishiyama, S. Nomura, M. Itami, K. Itoh, H. Aghvami, A study on controlling transmission power of carriers of OFDM signal combined with data symbol spreading in frequency domain, *Proceedings of the 6th International Symposium on Power-Line Communications and its Applications (ISPLC)*, Athens, Greece, March 27–29, 2002.
- [NomuSh01]** S. Nomura, T. Shirai, M. Itami, K. Itoh, A study on controlling transmission power of carriers of OFDM signal, *Proceedings of the 5th International Symposium on Power-Line Communications and its Applications (ISPLC)*, Malmö, Sweden, April 4–6, 2001.

- [Ouz94]** Ουζούνογλου Ν., “Εισαγωγή στα Μικροκύματα”, 2^η έκδοση, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, 1994.
- [Phil99]** H. Philipps, “Modeling of powerline communication channels,” in Proc. 3rd Int. Symp. Powerline Communications and its Applications, Lancaster, U.K., 1999, pp. 14–21.
- [Phil00]** H. Philipps, Development of a statistical model for powerline communications channels, Proceedings of the 4th International Symposium on Power Line Communications and its Applications (ISPLC), Limerick, Ireland, April 5–7, 2000.
- [QiuCh00]** X. Qiu, K. Chawla, L. F. Chang, J. Chuang, N. Sollenberger, J. Whitehead, RLC/MAC design alternatives for supporting integrated services over EGPRS, IEEE Personal Communications, 20–33 April 2000.
- [ReyesGo99]** A. Reyes-Lecuona, E. Gonzalez-Parada, E. Casilari, J. C. Casasola, A. Diaz- Estrella, A pageoriented WWW traffic model for wireless system simulations, 16 th International Teletraffic Congress (ITC16), Edinburgh, UK, 1999.
- [Rodr02]** M. R. D. Rodrigues, Modelling and Performance Assessment of OFDM Communication Systems in the Presence of Non-linearities, PhD Thesis, Department of Electronic and Electrical Engineering, University College, London, October 2002.
- [SahiTe99]** Z. Sahinpglu, S. Tekinay, On multimedia networks: self-similar traffic and network performance, IEEE Communications Magazine, January 1999.
- [ShirNo02]** T. Shirai, S. Nomura, M. Itami, K. Itoh, Study on reduction of the affectation of impulse noise in OFDM transmission, Proceedings of the 6th International Symposium on Power-Line Communications and its Applications (ISPLC), Athens, Greece, March 27–29, 2002.
- [Stev94]** R. Stevens, TCP/IP Illustrated Vol. 1 – The Protocols, Addison-Wesley, 1994.
- [Thre91]** G. Threin, “Datenübertragung über Niederspannungsnetze mit Bandspreizverfahren, Fortschrittberichte VDI, Reihe 10,” VDI-Verlag, Düsseldorf, 156, 1991.
- [Walke99]** B. H. Walke, Mobile Radio Networks – Networking and Protocols, John Wiley & Sons Ltd, Chichester, UK, 1999, ISBN 0-471-97595-8.

- [ZimmDo99] M. Zimmermann and K. Dostert, "A multi-path signal propagation model for the powerline channel in the high frequency range," in Proc. 3rd Int. Symp. Powerline Communications and its Applications, Lancaster, U.K., 1999, pp. 45–51.
- [ZimmDo00a] M. Zimmermann, K. Dostert, The low voltage distribution network as last mile access network – signal propagation and noise scenario in the HF- range, AEU International Journal of Electronics and Communications, (1), 13–22 2000.
- [ZimmDo02] M. Zimmermann, K. Dostert, A Multipath Model for the Powerline Channel, IEEE Transactions on Communications, Vol. 50, No.4, April 2002.