



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

**Η ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΖΩΝΗΣ NB-PLC ΓΙΑ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ ΕΥΦΥΟΥΣ ΔΙΚΤΥΟΥ ΜΕΣΩ ΓΡΑΜΜΩΝ  
ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΧΑΜΗΛΗΣ ΤΑΣΗΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Νίκη Βαρβάρα Κ. Κυλιντηρέα**

**Επιβλέπων:** Παναγιώτης Κωττής  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2017





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

**Η ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΖΩΝΗΣ NB-PLC ΓΙΑ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ ΕΥΦΟΥΣ ΔΙΚΤΥΟΥ ΜΕΣΩ ΓΡΑΜΜΩΝ  
ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΧΑΜΗΛΗΣ ΤΑΣΗΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Νίκη Βαρβάρα Κ. Κυλιντηρέα**

**Επιβλέπων:** Παναγιώτης Κωττής  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 18η Ιουλίου 2017.

.....  
Κωττής Παναγιώτης  
Καθηγητής ΕΜΠ

.....  
Καψάλης Χρήστος  
Καθηγητής ΕΜΠ

.....  
Φικιώρης Γεώργιος  
Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2017

.....  
**Νίκη Βαρβάρα Κυλιντηρέα**

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

Copyright © Νίκη Βαρβάρα Κυλιντηρέα, 2017

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

Η παρούσα εργασία ασχολείται με την μετάδοση πληροφορίας χαμηλού ρυθμού μετάδοσης μέσω του δικτύου πρόσβασης ΧΤ. Η ζώνη συχνοτήτων που μελετάται είναι η ζώνη NB-PLC (Narrowband Power Line Communications), αποδίδει μικρούς ρυθμούς μετάδοσης και προσφέρεται για επικοινωνίες στο ευφυές ηλεκτρικό δίκτυο. Με τη χρήση της τεχνολογίας αυτής στο δίκτυο ΧΤ μπορεί να υλοποιηθεί η εξελιγμένη υποδομή μέτρησης (Advanced Metering Infrastructure) καθώς και να παρακολουθούνται και να ελέγχονται διάφορα μεγέθη ενδιαφέροντος του δικτύου σε πραγματικό χρόνο.

Στη συγκεκριμένη εργασία μελετάται το δίκτυο πρόσβασης ΧΤ ως περιβάλλον διάδοσης για τηλεπικοινωνιακά σήματα στη ζώνη NB-PLC. Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται εισαγωγή στο ευφυές δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας (Smart Grid) και στις τηλεπικοινωνίες μέσω αυτού. Στο δεύτερο κεφάλαιο μελετώνται τα κατασκευαστικά και τα τηλεπικοινωνιακά χαρακτηριστικά των καλωδίων που χρησιμοποιούνται στο δίκτυο πρόσβασης ΧΤ. Στο τρίτο παρουσιάζεται ο θόρυβος που εμφανίζεται στο δίκτυο ΧΤ και αναλύονται τα διάφορα μαθηματικά μοντέλα που μπορούν να τον περιγράψουν. Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι διάφορες τοπολογίες δικτύου που απαντώνται στο δίκτυο ΧΤ. Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των ευφυών συστημάτων μέτρησης. Στο κεφάλαιο 6 εξετάζεται μέσω προσομοιώσεων η επίδραση της απόστασης συγκεντρωτή-SM κόμβου και της ύπαρξης διακλαδώσεων μεταξύ τους στη συνάρτηση μεταφοράς του διαύλου. Τέλος, στο Κεφάλαιο 7 παρουσιάζονται οι συναρτήσεις μεταφοράς για τις διάφορες τοπολογίες του δικτύου ΧΤ, όπως αυτές υπολογίστηκαν μέσω προσομοιώσεων.

## Λέξεις κλειδιά

Ευφυές δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, narrowband power line communications, γραμμή μεταφοράς, συνάρτηση μεταφοράς, ΧΤ



## **Abstract**

This thesis deals with the transmission of low data rate information through the LV access network. The frequency band being studied is the NB-PLC (Narrowband Power Line Communications) band, delivers low transmission rates and is used for smart grid communications. By using this technology in the LV network, Advanced Metering Infrastructure as well as monitoring and controlling various network sizes of interest in real time can be implemented.

In this this thesis, the LV access network is being studied as a transmission environment for telecommunication signals in the NB-PLC band. In the first chapter the reader is introduced to the concepts of Smart Grid and communications over it. In the second chapter the construction and telecommunication characteristics of the cables used in the LV access network are studied. The third chapter presents the noise that appears over the LV network and analyzes the various mathematical models that can describe it. The fourth chapter presents the various network topologies found on the LV network. In the fifth chapter the characteristics of intelligent measurement systems are presented. In Chapter 6, the influence of the distance and branching between the data aggregator and the SM node on the channel transfer function is examined through simulations. Finally, Chapter 7 presents the transfer functions for the various topologies of the LV network, as these were calculated via simulations.

## **Key words**

Smart Grid, Narrowband Power Line Communications, transmission line, Transfer function, LV





## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΥΦΥΕΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ - POWER LINE COMMUNICATIONS .....	14
1.1 Ορισμός και στόχοι του ευφυούς ηλεκτρικού δικτύου .....	14
1.2 Προτεραιότητες και κριτήρια επίδοσης του ευφυούς ηλεκτρικού δικτύου .....	14
1.3 Εφαρμογές των ευφύων δικτύων .....	15
1.4 Τεχνολογίες επικοινωνίας στο ευφύς ηλεκτρικό δίκτυο .....	15
1.5 Η τεχνολογία PLC.....	16
1.5.1 Κατηγορίες τεχνολογιών PLC.....	17
1.5.2 Διαδεδομένες τεχνολογίες PLC στην Ευρώπη.....	17
1.6 Περιγραφή των δικτύων επικοινωνίας έξυπνων μετρητών.....	18
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΚΑΛΩΔΙΩΝ ΧΤ ΣΤΗ ΖΩΝΗ NB-PLC20	
2.1 Κατασκευαστική διαμόρφωση αγωγών και καλωδίων (ελληνικό δίκτυο διανομής ΧΤ) .....	20
2.1.1 Εναέρια διανομή [7].....	20
2.1.2 Υπόγεια μεταφορά [8].....	21
2.2 Τηλεπικοινωνιακά χαρακτηριστικά των καλωδίων ΧΤ στη ζώνη NB-PLC.....	22
2.2.1 Ισοδύναμο κύκλωμα γραμμής μεταφοράς.....	22
2.2.2 Ανακλάσεις και προσαρμογή στις γραμμές μεταφοράς.....	24
2.2.3 Η μιγαδική σταθερά διάδοσης μιας γραμμής μεταφοράς .....	25
2.2.4 Χαρακτηριστικά των γραμμών μεταφοράς του δικτύου ΧΤ .....	26
2.2.5 Περιγραφή στοιχειώδους τοπολογίας ΗΔ υπό μορφή διθύρου δικτύου.....	26
2.2.6 Αναλυτικός υπολογισμός συνάρτησης μεταφοράς στοιχειώδους τοπολογίας ΗΔ .....	27
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΘΟΡΥΒΟΣ ΕΠΙ ΤΩΝ ΚΑΛΩΔΙΩΝ ΧΤ ΣΤΗ ΖΩΝΗ NB-PLC .....	31
3.1 Είδη θορύβου που εμφανίζονται στις γραμμές μεταφοράς ΧΤ.....	31
3.2 Ο θόρυβος στη ζώνη NB-PLC.....	32
3.3 Πλήρη μαθηματικά μοντέλα του θορύβου που εμφανίζεται στη ΧΤ στη ζώνη NB-PLC .....	33
3.3.1 Τμηματικά κυκλοστατικό γκαουσιανό μοντέλο (piece-wise spectral cyclostationary Gaussian model).....	33
3.3.2 Εναλλακτική περιγραφή του θορύβου στη ΧΤ στη ζώνη NB-PLC .....	35
3.4 Απλοποιημένα μαθηματικά μοντέλα του του θορύβου που εμφανίζεται στη ΧΤ στη ζώνη NB-PLC.....	36
3.4.1 Το μοντέλο θορύβου Middleton .....	37
3.4.2 Κυκλοστατικό μοντέλο θορύβου.....	38

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΤΟΠΟΛΟΓΙΕΣ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΧΤ .....	40
4.1 Δομή του SM δικτύου.....	40
4.2 Τοπολογίες του δικτύου ΧΤ.....	41
4.3 Κατοικημένες περιοχές χαμηλής πληθυσμιακής πυκνότητας.....	41
4.3.1 Τοπολογία Δένδρου .....	41
4.4 Κατοικημένες περιοχές υψηλής πληθυσμιακής πυκνότητας.....	42
4.4.1 Τοπολογία Αστέρα.....	42
4.4.2 Τοπολογία Δένδρου .....	43
4.4.3 Τοπολογία αστέρα με τους SM μετρητές τοποθετημένους σε διαφορετικά επίπεδα.....	44
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΕΥΦΥΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ .....	46
5.1 Σκοπός των ευφύων συστημάτων μέτρησης ηλεκτρικής ενέργειας .....	46
5.2 Οφέλη της έξυπνης μέτρησης.....	46
5.3 Εφαρμογή των ευφύων συστημάτων μέτρησης στην Ευρώπη .....	46
5.4 Μετρητικές διατάξεις.....	47
5.4.1 Περιγραφή τυπικής μετρητικής διάταξης.....	47
5.4.2 Έξυπνοι μετρητές.....	47
5.4.3 Κυκλωματικό μοντέλο έξυπνου μετρητή .....	48
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. Η συνάρτηση μεταφοράς μιας γραμμής αναχώρησης.....	50
6.1 Η επίδραση της απόστασης συγκεντρωτή-καταναλωτή .....	51
6.2 Επίδραση του πλήθους των διακλαδώσεων.....	52
6.3 Συμπεράσματα .....	54
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7. Η συνάρτηση μεταφοράς διαφορετικών τοπολογιών του δικτύου ΧΤ .....	55
7.1 Προσδιορισμός μέσης και χειρότερης περίπτωσης τοπολογίας .....	55
7.2 Μεθοδολογία .....	55
7.3 Κατοικημένες περιοχές χαμηλής πληθυσμιακής πυκνότητας.....	55
7.3.1 Τοπολογία Δένδρου .....	55
7.4 Κατοικημένες περιοχές υψηλής πυκνότητας κατοίκησης .....	56
7.4.1 Τοπολογία Αστέρα.....	56
7.4.2 Τοπολογία Δένδρου .....	57
7.4.3 Τοπολογία αστέρα με τους SM μετρητές τοποθετημένους σε διαφορετικά επίπεδα.....	58
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	62



## Κατάλογος Σχημάτων

1.1: Μετάβαση στο ευφυές ΗΔ.....	14
1.2 Η δομή του δικτύου PLC στην Ευρώπη [4].....	17
1.3 Δίκτυο επικοινωνίας έξυπνων μετρητών .....	18
1.4 Τακτική και έκτακτη επικοινωνία SM-MDMS .....	19
2.1: Τομή τριπολικού καλωδίου.....	21
2.2: Κυκλωματικό μοντέλο στοιχειώδους τμήματος γραμμής μεταφοράς με καταναμεημένα στοιχεία .....	23
2.3 Ισοδύναμο κύκλωμα γραμμής μεταφοράς με καταναμεημένα στοιχεία [9] .....	23
2.4 Υπολογισμός της χαρακτηριστικής σύνθετης αντίστασης γραμμής μεταφοράς .....	24
2.5: Στοιχειώδες τμήμα του δικτύου ΧΤ υπό μορφή δίθυρου δικτύου .....	26
2.6: Στοιχειώδης τοπολογία τμήματος δικτύου ΧΤ.....	28
2.7: Το κύκλωμα που αντιστοιχεί στην τοπολογία του Σχήματος 2.6 .....	28
2.8: Το κύκλωμα που αντιστοιχεί στην τοπολογία του Σχήματος 2.6 μετά την απλοποίηση	29
3.1: Κυματομορφή θορύβου σε γραμμή μεταφοράς ΧΤ που λειτουργεί στα 50Hz [17].....	32
3.2 Φασματογράφημα του θορύβου που δίνεται στο Σχήμα 3.1 [20].....	33
3.3 Τμηματοποίηση του θορύβου που δίνεται στο Σχήμα 3.1 [20] Η αυτοσυσχέτιση του θορύβου είναι περιοδική συνάρτηση του χρόνου, με περίοδο $T_{AC}/2$ .....	34
3.4 Μαθηματική περιγραφή του θορύβου στις γραμμές μεταφοράς ΧΤ [20] .....	34
3.5 Τετραγωνική παλμοσειρά-Γραφική αναπαράσταση της σχέσης ( 3.3 ) .....	36
4.1 Παράδειγμα διαμόρφωσης του δικτύου ΧΤ με τον υποσταθμό ΜΤ/ΧΤ στην Ευρώπη....	40
4.2 Τεχνολογία PLC σε περιοχές διαφορετικής πληθυσμιακής πυκνότητας κατοίκησης [4].	41
4.3 Παράδειγμα τοπολογίας δέντρου τμήματος δικτύου ΧΤ σε αραιοκατοικημένες περιοχές .....	42
4.4 Παράδειγμα τοπολογίας αστέρα τμήματος δικτύου ΧΤ σε πυκνοκατοικημένες περιοχές .....	43
4.5 Παράδειγμα τοπολογίας δένδρου τμήματος δικτύου ΧΤ σε πυκνοκατοικημένες περιοχές .....	44
4.6 Παράδειγμα τοπολογίας αστέρα με τους μετρητές τοποθετημένους σε διαφορετικά επίπεδα τμήματος δικτύου ΧΤ σε πυκνοκατοικημένες περιοχές .....	45
5.1: Χάρτης των προγραμμάτων εγκατάστασης ευφύων μετρητών στην Ευρώπη .....	46
5.2 Τυπική μετρητική διάταξη.....	47
5.3: Έξυπνος μετρητής.....	48
5.4: Το ισοδύναμο κύκλωμα μιας συσκευής σύζευξης χωρητικού τύπου .....	48
6.1 Δικτύωμα για την εξέταση της επίδρασης της απόστασης στη συνάρτηση μεταφοράς .	51
6.2 Συνάρτηση μεταφοράς του δικτυώματος του Σχήματος 6.1 για διάφορες αποστάσεις στη ζώνη NB-PLC .....	52
6.3 Δικτύωμα για την εξέταση της επίδρασης του πλήθους των διακλαδώσεων στη συνάρτηση μεταφοράς .....	53
6.4 Συνάρτηση μεταφοράς του δικτυώματος του Σχήματος 6.4 για διάφορα πλήθη διακλαδώσεων στη ζώνη NB-PLC.....	53
7.1 Μέση και χειρότερη περίπτωση συνάρτησης μεταφοράς για τοπολογία δένδρου σε αραιοκατοικημένη περιοχή.....	56

7.2 Μέση και χειρότερη περίπτωση συνάρτησης μεταφοράς τοπολογίας αστέρα σε πυκνοκατοικημένη περιοχή .....	57
7.3 Μέση και χειρότερη περίπτωση συνάρτησης μεταφοράς τοπολογίας δένδρου σε πυκνοκατοικημένη περιοχή .....	58
7.4 Μέση περίπτωση συνάρτησης μεταφοράς τοπολογίας αστέρα με τους μετρητές σε πολλά επίπεδα, πυκνοκατοικημένη περιοχή.....	59

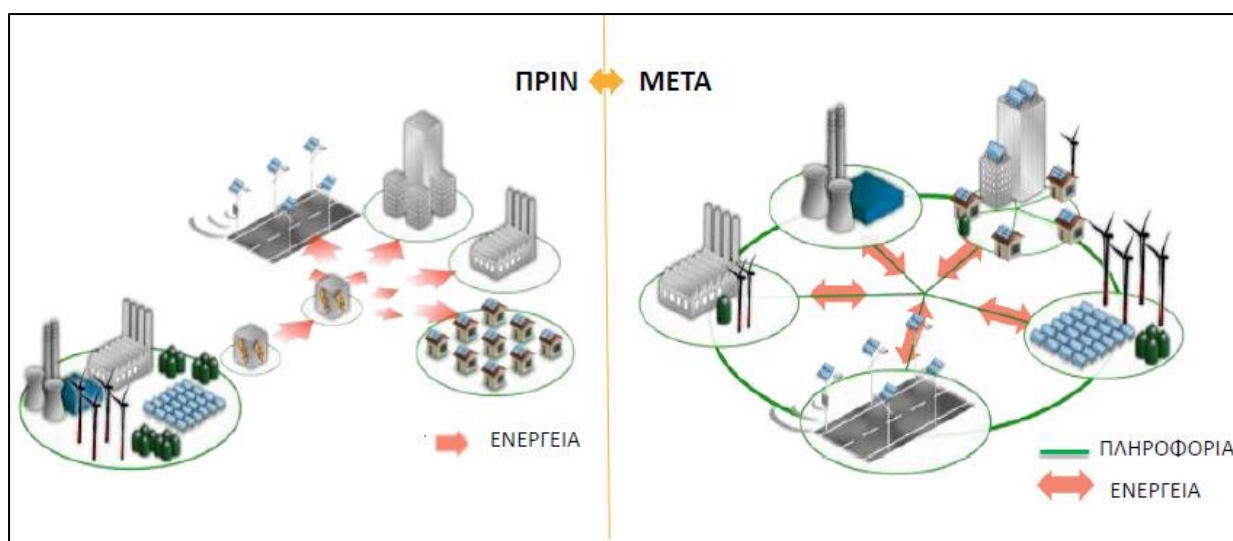
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΥΦΥΕΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ - POWER LINE COMMUNICATIONS

### 1.1 Ορισμός και στόχοι του ευφυούς ηλεκτρικού δικτύου

Το ευφύες δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας (Smart Grid ή SG), ορίζεται ως το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας που συνδυάζει με ευφυή τρόπο τις ενέργειες όλων των χρηστών που είναι συνδεδεμένοι σε αυτό (παραγωγών, καταναλωτών ή εκείνων που επιτελούν και τους δύο ρόλους) ώστε να παρέχει με αποδοτικό, αξιόπιστο και ασφαλές τρόπο ηλεκτρική ισχύ ή σχετική πληροφορία. [1]

Ενδεικτικά, μερικοί στόχοι που επιτυγχάνονται μέσω της ανάπτυξης του ευφυούς ηλεκτρικού δικτύου είναι [1]:

- Η βελτίωση της διασύνδεσης και λειτουργίας των παραγωγών (διαφορετικών μεγεθών και τεχνολογιών)
- Η δυνατότητα των καταναλωτών να συμμετέχουν στη βελτιστοποίηση της λειτουργίας του δικτύου, μειώνοντας την κατανάλωσή τους και αξιοποιώντας τον ανταγωνισμό
- Η καλύτερη πληροφόρηση των καταναλωτών, η δυνατότητα απομακρυσμένου ελέγχου και η δυνατότητα επιλογής παρόχου
- Η σημαντική μείωση της επίπτωσης του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας στο περιβάλλον
- Τα υψηλά επίπεδα αξιοπιστίας και ασφάλειας



Σχήμα 1.1: Μετάβαση στο ευφύες ΗΔ

### 1.2 Προτεραιότητες και κριτήρια επίδοσης του ευφυούς ηλεκτρικού δικτύου

Κατά την υλοποίηση του ευφυούς ηλεκτρικού δικτύου αναγνωρίζονται οι ακόλουθες προτεραιότητες [1]:

- i. Εξελιγμένη υποδομή μέτρησης (Advanced Metering Infrastructure)
- ii. Απόκριση στη ζήτηση (Demand Response)
- iii. Εξυπηρέτηση ηλεκτρικών οχημάτων
- iv. Παρακολούθηση και έλεγχος των συνθηκών που επικρατούν σε ευρείες περιοχές

- v. Διαχείριση διασπαρμένων ενεργειακών πόρων και συστημάτων αποθήκευσης
- vi. Διαχείριση του δικτύου διανομής

Τα κριτήρια επίδοσης που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση των επικοινωνιακών λύσεων για το SG είναι τα ακόλουθα: αυξημένη απόδοση (throughput), μικρή καθυστέρηση μετάδοσης, ασφάλεια, αξιοπιστία, δυνατότητα αυτοδιόρθωσης, ευκολία συντήρησης, διαλειτουργικότητα (τήρηση των standards), δυνατότητα επέκτασης, μικρός διαχειριστικός πλεονασμός (redundancy), κ.ά. [1]

### 1.3 Εφαρμογές των ευφυών δικτύων

Η αποτελεσματικότητα των λειτουργιών παρακολούθησης και διαχείρισης του ενεργειακού δικτύου αποτελεί το βασικότερο κίνητρο ανάπτυξης ευφυών δικτύων. Οι σημαντικότερες εφαρμογές του ευφυούς ηλεκτρικού δικτύου είναι [2]:

- i. Η δημιουργία ενός αποτελεσματικού συστήματος παρακολούθησης του ηλεκτρικού δικτύου, το οποίο μπορεί να προλαμβάνει μία επικείμενη διακοπή και, εφόσον η διακοπή συμβεί, να την ανιχνεύει και να αναγνωρίζει την αιτία της.
- ii. Η δυνατότητα απομακρυσμένης παρακολούθησης και διαχείρισης των κρίσιμων διατάξεων σε υποσταθμούς διανομής.
- iii. Η διασύνδεση κατανεμημένων πηγών ενέργειας (Distributed Energy Resources – DERs): Επεκτείνεται έτσι η διεξόδυση μικροδικτύων (microgrids) στο ηλεκτρικό δίκτυο (ΗΔ), συμβάλλοντας ουσιαστικά στην ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας
- iv. Η αυτόματη ανάγνωση μετρητών (Automatic Meter Reading – AMR) και ταυτόχρονα, η δημιουργία μετρητικής υποδομής (Advanced Metering Infrastructure – AMI) που προσφέρει αμφίδρομη επικοινωνία με τα συστήματα και τις συσκευές των τελικών χρηστών. Η τεχνολογία PLC μπορεί να υποστηρίξει τη συγκεκριμένη εφαρμογή προφέροντας ασφάλεια στη συλλογή των AMR δεδομένων αφού η συλλογή τους γίνεται μέσω των ίδιων των καλωδίων ισχύος αποφεύγοντας τη μεσολάβηση άλλων παρόχων.
- v. Η αμφίδρομη επικοινωνία με τους κόμβους του ΗΔ που επιτυγχάνεται μέσω της AMI υποδομής κινητροδοτεί τη δημιουργία εφαρμογών διαχείρισης της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας (Demand Side Management – DSM). Δεδομένου ότι η ζήτηση για κατανάλωση δεν είναι ομοιόμορφα κατανεμημένη κατά τη διάρκεια μιας ημέρας, η διαχείριση της ζήτησης μέσω δυναμικής τιμολόγησης μπορεί να περιορίσει τη ζήτηση σε περιόδους αιχμής, εξοικονομώντας σημαντικό ποσοστό ενέργειας.

### 1.4 Τεχνολογίες επικοινωνίας στο ευφυές ηλεκτρικό δίκτυο

Υπάρχουν πολλές τεχνολογίες τηλεπικοινωνιών, ενσύρματες και ασύρματες, που εξυπηρετούν το ευφυές ηλεκτρικό δίκτυο. Στον Πίνακα 1.1 συγκρίνονται συνοπτικά οι διάφορες τεχνολογίες πρόσβασης. [1] [3]. Σημειώνεται ότι οι τεχνολογίες DSL και Satellite αφορούν ελάχιστες πρακτικές περιπτώσεις.

ΤΕΧΝΙΚΗ	ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ	ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ
Κυψελωτές επικοινωνίες 3G (GSM) 4G (LTE)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ευκολία στη χρήση</li> <li>• Χαμηλό κόστος υλοποίησης</li> <li>• Ώριμη τεχνική</li> <li>• Επαρκείς ταχύτητες μετάδοσης</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Εξάρτηση από τηλεπικοινωνιακό πάροχο</li> <li>• Περιορισμοί στην τοποθέτηση των πομποδεκτών</li> <li>• Περιορισμένο εύρος ζώνης</li> <li>• Αδυναμία επέμβασης στην περίπτωση προβλήματος</li> <li>• Προβληματική διαθεσιμότητα κατά τόπους</li> </ul>
Narrowband PLC (NB-PLC)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Εκμετάλλευση προϋπάρχουσας υποδομής</li> <li>• Καθολική παρουσία του μέσου μετάδοσης της πληροφορίας</li> <li>• Χαμηλό κόστος</li> <li>• Ανεξαρτησία από τρίτους</li> <li>• Αξιοπιστία επικοινωνιών ίδια με την αξιοπιστία της ηλεκτρικής ισχύος</li> <li>• Πρόσφατα επικαιροποιημένο πρότυπο</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Επίδοση εξαρτώμενη από τη στιγμιαία κατάσταση του ενσύρματου διαύλου</li> <li>• Ταχείες μεταβολές στη συνάρτηση μεταφοράς του διαύλου</li> <li>• Μεριζόμενος δίαυλος λόγω ταυτόχρονης μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος και πληροφορίας</li> </ul>
Wideband PLC (WB-PLC)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Υψηλή απόδοση</li> <li>• Υπάρχουσα υποδομή</li> <li>• Ανεξαρτησία από τρίτους</li> <li>• Πρόσφατο πρότυπο</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ηλεκτρομαγνητικές διαταραχές από άλλες υπηρεσίες</li> <li>• Δυνατότητα κάλυψης μικρών αποστάσεων</li> <li>• Μεριζόμενος δίαυλος λόγω ταυτόχρονης μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος και πληροφορίας</li> </ul>
DSL	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Υψηλός ρυθμός μετάδοσης</li> <li>• Μέσο χρησιμοποιούμενο αποκλειστικά για τη μετάδοση πληροφορίας</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ελλιπής κάλυψη αγροτικών περιοχών</li> <li>• Εξάρτηση από τηλεπικοινωνιακό πάροχο</li> </ul>
Satellite	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Άμεση υλοποίηση</li> <li>• 100% κάλυψη, ακόμα και σε δυσπρόσιτες περιοχές</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Υψηλή καθυστέρηση μετάδοσης</li> <li>• Εξάρτηση από τρίτους</li> <li>• Υψηλό κόστος</li> </ul>

Πίνακας 1.1: Σύγκριση εναλλακτικών τεχνολογιών για τις επικοινωνίες στο ευφυές ηλεκτρικό δίκτυο

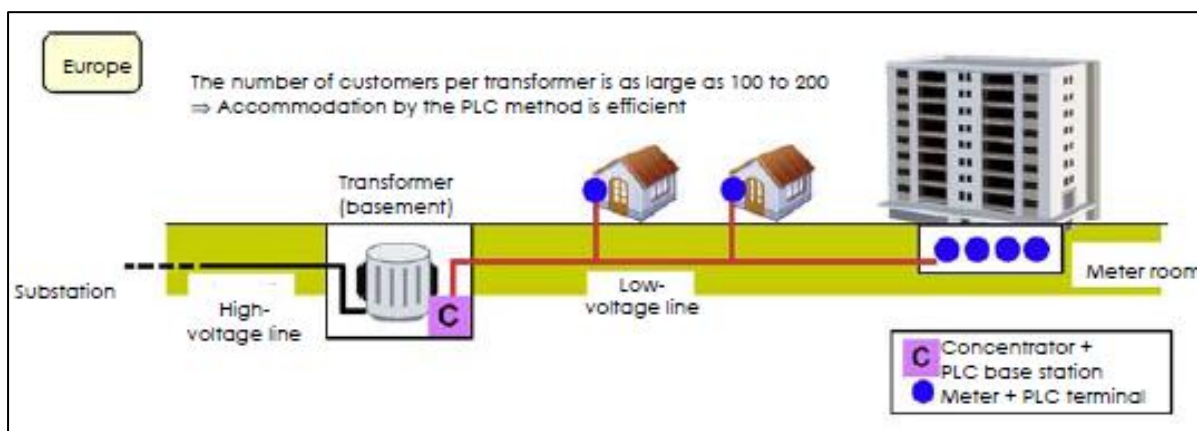
### 1.5 Η τεχνολογία PLC

Η τεχνολογία Power Line Communications (PLC) χρησιμοποιεί τις γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας ως δίαυλο για τις επικοινωνίες. Συχνά, αποτελεί τη λύση που προτιμούν οι εταιρείες ηλεκτρισμού για την υλοποίηση του ευφυούς ηλεκτρικού δικτύου, διότι η αναγκαία υποδομή (δηλαδή το ηλεκτρικό δίκτυο) ανήκει στις ίδιες τις εταιρείες, με αποτέλεσμα αυτές να έχουν άμεση πρόσβαση και πλήρη έλεγχο επί του τηλεπικοινωνιακού μέσου.

Η τεχνολογία PLC παρέχει ένα φθηνό και αξιόπιστο τρόπο παροχής νέων, ευφυών εφαρμογών από και προς το τελευταίο τμήμα (last mile) του δικτύου διανομής. Μπορούν



να λειτουργήσουν τόσο στη χαμηλή τάση (ΧΤ), επιτρέποντας την πρόσβαση σε οικιακούς ή μικρούς καταναλωτές, όσο και στη μέση τάση (ΜΤ), που απευθύνεται σε μεγαλύτερους καταναλωτές/παραγωγούς που πιθανώς να βρίσκονται και σε μεγαλύτερες αποστάσεις από τις εγκαταστάσεις της εταιρείας ηλεκτρικής ενέργειας. [1]



Σχήμα 1.2 Η δομή του δικτύου PLC στην Ευρώπη [4]

### 1.5.1 Κατηγορίες τεχνολογιών PLC

Στη βιβλιογραφία συναντώνται τρεις βασικές κατηγορίες τεχνολογιών PLC, οι οποίες διαφοροποιούνται σημαντικά ως προς τη λειτουργία τους. Η πρώτη κατηγορία αφορά τις επικοινωνίες εξαιρετικά στενής ζώνης (Ultra Narrow Band-UNB), η δεύτερη τις επικοινωνίες στενής ζώνης (Narrowband-NB) και η τρίτη τις επικοινωνίες ευρείας ζώνης (Broadband-BB). [2] [5]

- i. *Ultra Narrowband PLC (UNB-PLC)*: Επικοινωνίες που λειτουργούν στη ζώνη συχνοτήτων 0.3-3kHz και επιτυγχάνουν ρυθμούς μετάδοσης μικρότερους των 100bps. Έχουν πολύ μεγάλη εμβέλεια (150km και περισσότερο) και χρησιμοποιούνται στην πράξη την τελευταία εικοσαετία από εκατοντάδες παρόχους παγκοσμίως.
- ii. *Narrowband PLC (NB-PLC)*: Τεχνολογίες που λειτουργούν στην ζώνη συχνοτήτων 3-500kHz. Διακρίνονται σε τεχνολογίες χαμηλού ρυθμού μετάδοσης (Low Data Rate-LDR), οι οποίες εμφανίζουν ρυθμούς μετάδοσης μερικών kbps και σε τεχνολογίες υψηλού ρυθμού μετάδοσης (High Data Rate-HDR), όπου με τη χρήση πολυδιαυλικών τεχνικών μετάδοσης επιτυγχάνονται ρυθμοί από μερικές δεκάδες έως και 500kbps.
- iii. *Broadband PLC (BB-PLC)*: Τεχνολογίες που λειτουργούν στη ζώνη συχνοτήτων 1.8-250MHz και επιτυγχάνουν ρυθμούς μετάδοσης από μερικές δεκάδες έως μερικές εκατοντάδες Mbps.

### 1.5.2 Διαδεδομένες τεχνολογίες PLC στην Ευρώπη

Οι πλέον διαδεδομένες PLC τεχνολογίες στην Ευρώπη είναι οι ακόλουθες: [3]

- i. *PRIME (Power Line Intelligent Metering Evolution)*: πρόκειται για μια ανοικτή, μη ιδιωτική τεχνολογία επικοινωνιών, η οποία υποστηρίζει τις παρούσες και μελλοντικές λειτουργίες διαχείρισης μετρητικών δεδομένων.

- ii. *G3-PLC*: Στόχος του G3-PLC είναι η ανάπτυξη ενός προτύπου για PLC modems βάσει των προδιαγραφών που θέτει η ERDF (Electricité Reseau Distribution France).
- iii. *PLC-OSGP (Open Smart Grid Protocol)*: Το πρότυπο αυτό χρησιμοποιείται σε πολλές χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης
- iv. *Meters and More*: Πρόκειται για ένα πρωτόκολλο PLC που διατίθεται στη βιομηχανία από το 2010 μέσω του “Meters and More” association.

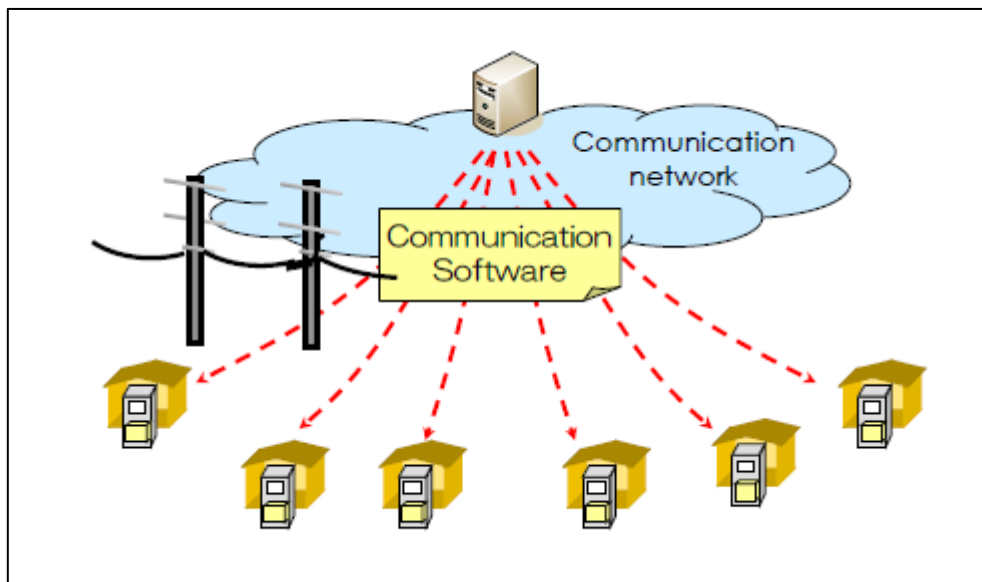
Στον Πίνακα 1.2 συγκρίνονται τα βασικά χαρακτηριστικά των τεχνολογιών που αναφέρθηκαν ανωτέρω.

Τεχνολογία	Μέγιστη ταχύτητα	Διαμόρφωση
PRIME	128 kbps	OFDM
G3-PLC:	33.4 kbps	OFDM
PLC-OSGP	5 kbps	BPSK
Meters and More	9.6 kbps	BPSK

Πίνακας 1.2: Σύγκριση των διάφορων PLC προτύπων

### 1.6 Περιγραφή των δικτύων επικοινωνίας έξυπνων μετρητών

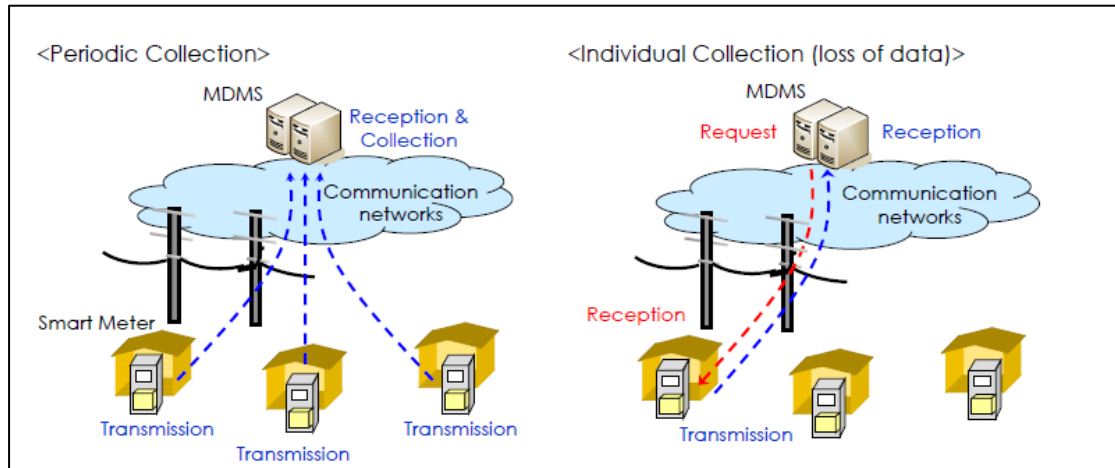
Το δίκτυο επικοινωνίας του ευφυούς ηλεκτρικού δικτύου υλοποιεί την αμφίδρομη επικοινωνία μεταξύ των έξυπνων μετρητών των καταναλωτών και του συστήματος συγκέντρωσης και διαχείρισης δεδομένων (MDMS – Meter Data Management System). Για το δίκτυο ΧΤ, το σύστημα MDMS είναι συνήθως εγκαταστημένο στον τοπικό υποσταθμό ΜΤ/ΧΤ.



Σχήμα 1.3 Δίκτυο επικοινωνίας έξυπνων μετρητών

Για την σωστή υλοποίηση του τηλεπικοινωνιακού δικτύου λαμβάνονται υπόψη πολλοί παράγοντες, όπως η πληθυσμιακή πυκνότητα κατοίκησης της κάθε περιοχής, η τοπολογία του ΗΔ καθώς και ο τύπος (πολυκατοικίες, μεμονωμένες κατοικίες, παραγωγικές μονάδες κ.α.) και η χρήση των κτιρίων της περιοχής.

Οι έξυπνοι μετρητές λαμβάνουν μετρήσεις κάθε 30 λεπτά και τις μεταδίδουν στο σύστημα συγκέντρωσης δεδομένων. Όταν υπάρξει δυσλειτουργία στη μετάδοση κάποιας μέτρησης, τότε το σύστημα MDMS διαπιστώνει το σφάλμα. Μόλις η επικοινωνία μεταξύ MDMS και έξυπνου μετρητή αποκατασταθεί, το MDMS ζητά εκ νέου την μέτρηση και η αποστολή της μέτρησης από τον έξυπνο μετρητή επαναλαμβάνεται [4].



Σχήμα 1.4 Τακτική και έκτακτη επικοινωνία SM-MDMS

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΚΑΛΩΔΙΩΝ ΧΤ ΣΤΗ ΖΩΝΗ NB-PLC

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται, αρχικά, η κατασκευαστική διαμόρφωση των καλωδίων ΧΤ και, στην συνέχεια, αναλύονται τα τηλεπικοινωνιακά τους χαρακτηριστικά.

### 2.1 Κατασκευαστική διαμόρφωση αγωγών και καλωδίων (ελληνικό δίκτυο διανομής ΧΤ)

Το ελληνικό δίκτυο ΧΤ διαθέτει κλάδους μήκους μερικών εκατοντάδων μέτρων (όχι περισσότερο από 800-1000m). Στις αστικές περιοχές, η διανομή γίνεται συνήθως υπόγεια ενώ στις αγροτικές εναέρια (δηλαδή με υπερυψωμένα καλώδια στηριζόμενα σε στύλους). [6]. Η χρήση καλωδίων έναντι γυμνών αγωγών επιλέγεται όταν [6]:

- i. οι αποστάσεις είναι μεγάλες και δεν υπάρχει δυνατότητα στήριξης πυλώνων για την εναέρια διανομή
- ii. το περιβάλλον είναι δυσμενές για εναέρια διανομή

#### 2.1.1 Εναέρια διανομή [7]

Το εναέριο δίκτυο ΧΤ αποτελείται από γυμνούς αγωγούς, δηλαδή αγωγούς χωρίς μόνωση. Συνήθως, για το επίπεδο ΧΤ (400V πολική τάση και 230V μεταξύ φάσης και ουδέτερου) χρησιμοποιούνται 4 αγωγοί (3 φάσεις και ουδέτερος) οι οποίοι διατάσσονται κατακόρυφα. Τα κύρια υλικά κατασκευής των εναέριων αγωγών ΧΤ είναι:

- i. *Χαλκός εφελκυσμένος εν ψυχρώ*  
Ο χαλκός έχει καλή μηχανική αντοχή και μεγάλη ηλεκτρική αγωγιμότητα. Επιπλέον, επειδή δεν διαβρώνεται εύκολα, η χρήση του ενδείκνυται για δίκτυα σε παραθαλάσσιες περιοχές.
- ii. *Αλουμίνιο ηλεκτροτεχνίας (δηλαδή 99.9% καθαρό αλουμίνιο, E-Al)*  
Το αλουμίνιο είναι ελαφρότερο από το χαλκό, χαρακτηριστικό που αποτελεί πλεονέκτημα για εναέρια καλώδια αλλά χαρακτηρίζεται από το 60% της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του χαλκού και το 50% της μηχανικής του αντοχής. Επιπλέον, επειδή το αλουμίνιο είναι επιρρεπές στη διάβρωση, δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε δίκτυα ΧΤ παραθαλάσσιων περιοχών.
- iii. *Κράμα αλουμινίου Aldrey*  
Πρόκειται για κράμα αλουμινίου με εκατοστιαία σύνθεση περίπου 0,3-0,5 Mg, 0,4-0,7 Si, 0,3 Fe και το υπόλοιπο αλουμίνιο.

Οι εναέριοι αγωγοί ΧΤ πρέπει να αντέχουν σε μηχανική και θερμική καταπόνηση. Για λόγους μηχανικής αντοχής, οι εναέριοι αγωγοί είναι πολύκλωνοι, κατασκευάζονται δηλαδή υπό τη μορφή συρματόσχοινων.

Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των διαφόρων τύπων αγωγών που χρησιμοποιούνται στο ελληνικό δίκτυο ΧΤ. Οι διατομές των αγωγών

χαλκού και AAC είναι πραγματικές ενώ οι διατομές των αγωγών Al είναι ισοδύναμες χαλκού.

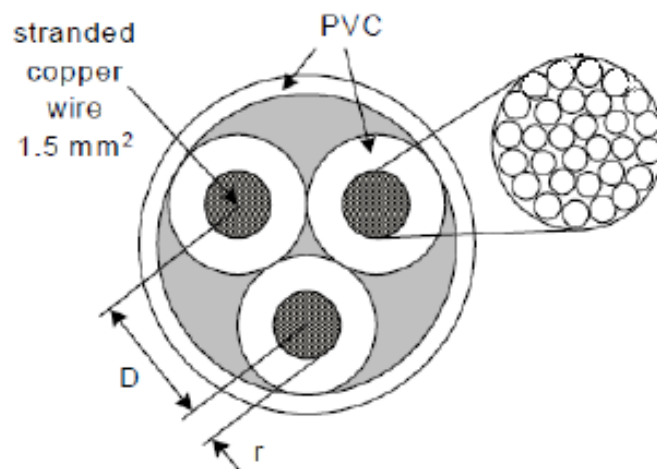
Διατομή αγωγών (mm <sup>2</sup> )	Βάρος kg/m	διάμετρος mm	κλώνοι mm
<b>Αγωγοί Αλουμινίου</b>			
16	0.074	6.63	7/2.21
35	0.158	9.66	7/3.22
50	0.229	11.75	19/2.35
70	0.320	13.90	19/2.78
<b>Αγωγοί χαλκού</b>			
16	0.144	5.13	7/1.71
35	0.315	7.59	7/2.53
50	0.453	9.20	19/1.83
70	0.634	10.70	19/2.17
<b>Αγωγοί κράματος αλουμινίου (AAC)</b>			
35	0.098	7.50	7/2.50
70	0.189	10.50	19/2.10
95	0.269	12.50	19/2.50
185	0.525	17.50	37/2.50

Πίνακας 2.1 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά των αγωγών ΧΤ στο ελληνικό δίκτυο ΧΤ

### 2.1.2 Υπόγεια μεταφορά [8]

Για την υπόγεια μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας μέσω του δικτύου ΧΤ, χρησιμοποιούνται καλώδια, δηλαδή προστατευμένοι και μονωμένοι αγωγοί.

Τα καλώδια μπορεί να είναι μονοπολικά (L1), τριπολικά (L1, L2, L3), τετραπολικά (L1, L2, L3, ουδέτερος) ή και πενταπολικά (L1, L2, L3, ουδέτερος, αγωγός γείωσης).



Σχήμα 2.1: Τομή τριπολικού καλωδίου

Στα καλώδια χρησιμοποιούνται διάφορα είδη αγωγών με βάση το χαλκό ή το αλουμίνιο. Καίτοι ο χαλκός έχει μεγαλύτερη αγωγιμότητα και μηχανική αντοχή, το μέταλλο που συνήθως χρησιμοποιείται είναι το αλουμίνιο, λόγω των οικονομικών και εμπορικών πλεονεκτημάτων που εμφανίζει. Οι αγωγοί των καλωδίων είναι συνήθως πολύκλωνοι για μεγαλύτερη ευκαμψία και έχουν είτε κυκλική διατομή είτε διατομή κυκλικού τομέα.

Οι αγωγοί των καλωδίων είναι πάντοτε μονωμένοι μεταξύ τους. Τα μονωτικά υλικά που χρησιμοποιούνται είναι το μονωτικό χαρτί εμποτισμένο με μονωτικό λάδι, ελαστικό, ύφασμα εμποτισμένο με βερνίκι ή κάποιο συνθετικό υλικό, συνήθως PVC, απλό πολυαιθυλένιο (PE) ή πολυαιθυλένιο διασταυρωμένης δομής (XLPE). Στην Ελλάδα, τα καλώδια του δικτύου διανομής ΧΤ έχουν συνήθως μόνωση χάρτου. Οι μονωμένοι αγωγοί προστατεύονται από ένα εξωτερικό στρώμα μόνωσης που ονομάζεται μανδύας. Στα καλώδια ΧΤ, ο μανδύας είναι συνήθως κατασκευασμένος από αλουμίνιο ή μόλυβδο και περιβάλλεται από εξωτερικό πλαστικό περίβλημα. Το εξωτερικό περίβλημα τοποθετείται για λόγους στεγανότητας και για προστασία του αλουμινίου από τη διάβρωση.

Στα ελληνικά υπόγεια δίκτυα ΧΤ, οι κυριότερες από τις χρησιμοποιούμενες διατομές καλωδίων είναι [8]:

- i. 3x150+70mm<sup>2</sup> αλουμινίου
- ii. 3x95+50mm<sup>2</sup> αλουμινίου
- iii. 4x50mm<sup>2</sup> αλουμινίου

Η τέταρτη διατομή αναφέρεται στον ουδέτερο αγωγό του καλωδίου.

Τα υπόγεια καλώδια ΧΤ εγκαθίστανται σε βάθος περίπου 70 cm. [8]

## **2.2 Τηλεπικοινωνιακά χαρακτηριστικά των καλωδίων ΧΤ στη ζώνη NB-PLC**

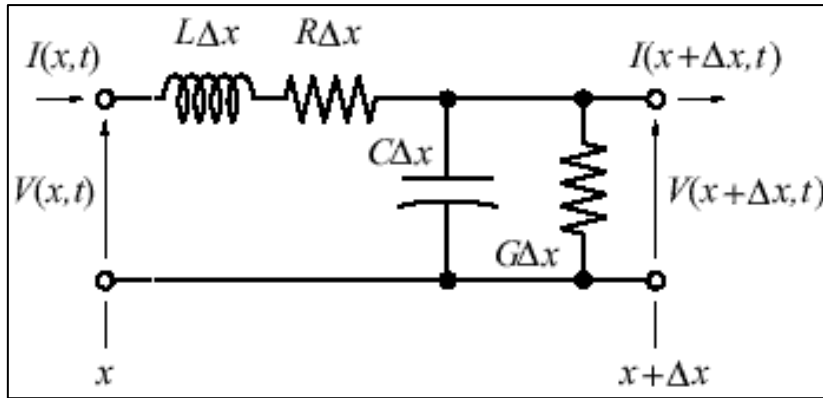
### **2.2.1 Ισοδύναμο κύκλωμα γραμμής μεταφοράς**

Μια γραμμή μεταφοράς λέγεται ότι είναι γραμμή μεγάλου ηλεκτρικού μήκους, όταν ισχύει η σχέση:

$$\text{Φυσικό μήκος γραμμής} > \lambda/4 \quad (2.1)$$

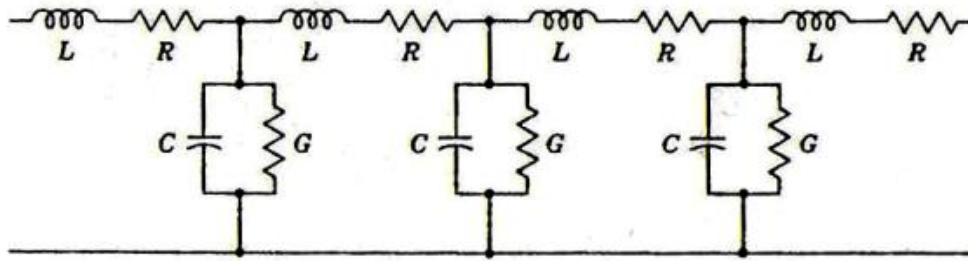
όπου  $\lambda$  είναι το μήκος κύματος του διερχόμενου κύματος. Μια γραμμή μεταφοράς μεγάλου ηλεκτρικού μήκους χαρακτηρίζεται από σύνθετη αντίσταση και περιγράφεται με κατανεμημένα στοιχεία [9].

Η γραμμή μεταφοράς μεγάλου ηλεκτρικού μήκους χαρακτηρίζεται από τέσσερις παραμέτρους ανά μονάδα μήκους: την αντίσταση σειράς που μετράται σε Ωm/m, την εγκάρσια αγωγιμότητα (Siemens/m), την αυτεπαγωγή (H/m) και την εγκάρσια χωρητικότητα (F/m). [9] Έτσι, ένα στοιχειώδες τμήμα της γραμμής μεταφοράς με μήκος  $\Delta x$  περιγράφεται λειτουργικά από το κύκλωμα που παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.2.



Σχήμα 2.2: Κυκλωματικό μοντέλο στοιχειώδους τμήματος γραμμής μεταφοράς με καταναμημένα στοιχεία

Κατά συνέπεια, μια γραμμή μεταφοράς μήκους  $L=n \cdot \Delta x$  περιγράφεται με παράθεση  $n$  στοιχειωδών τμημάτων μήκους  $\Delta x$ , όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.3.



Σχήμα 2.3 Ισοδύναμο κύκλωμα γραμμής μεταφοράς με καταναμημένα στοιχεία [9]

Εφόσον η γραμμή μεταφοράς περιλαμβάνει ωμικές αντιστάσεις, αυτεπαγωγές και χωρητικότητες, προκύπτει ότι η γραμμή μεταφοράς εμφανίζει μια σύνθετη αντίσταση εισόδου. Η σύνθετη αντίσταση της γραμμής εξαρτάται από:

- i. Τον τύπο της γραμμής (γεωμετρία, υλικό, κλπ.), ο οποίος καθορίζει την τιμή των μεγεθών  $R$ ,  $L$ ,  $C$ ,  $G$
- ii. Το μήκος της γραμμής
- iii. Τον τρόπο τερματισμού, δηλαδή το φορτίο που είναι συνδεδεμένο στη γραμμή

Προκειμένου να απαλλαγούμε από την εξάρτηση της σύνθετης αντίστασης της γραμμής μεταφοράς από την αντίσταση τερματισμού και να αποκτήσουμε ένα σημείο αναφοράς που να χαρακτηρίζει τη γραμμή, ορίζουμε την χαρακτηριστική αντίσταση της γραμμής. Ως χαρακτηριστική αντίσταση γραμμής μεταφοράς  $Z_0$  ορίζεται η σύνθετη αντίσταση στην είσοδο της γραμμής, αν θεωρήσουμε ότι αυτή έχει άπειρο μήκος (βλ. Σχήμα 2.4).

Συναρτήσκει των παραμέτρων  $R$ ,  $L$ ,  $C$ ,  $G$  της γραμμής μεταφοράς, η χαρακτηριστική σύνθετη αντίσταση της γραμμής υπολογίζεται από τη σχέση:

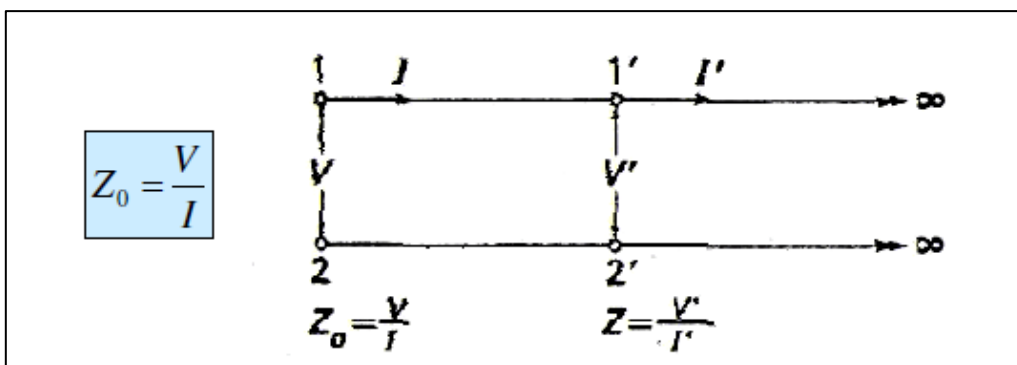
$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (2.2)$$

Παρατηρούμε ότι η χαρακτηριστική σύνθετη αντίσταση της γραμμής μεταφοράς εξαρτάται από τη συχνότητα  $\omega=2\pi f$ .

Στην περίπτωση γραμμής μεταφοράς χωρίς απώλειες ( $R=G=0$ ), η σχέση γίνεται:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2.3)$$

Στην περίπτωση αυτή, η χαρακτηριστική σύνθετη αντίσταση της γραμμής δεν εξαρτάται από τη συχνότητα.



Σχήμα 2.4 Υπολογισμός της χαρακτηριστικής σύνθετης αντίστασης γραμμής μεταφοράς

## 2.2.2 Ανακλάσεις και προσαρμογή στις γραμμές μεταφοράς

Μια γραμμή μεταφοράς μπορεί να αναλυθεί όχι μόνο ως κύκλωμα αλλά και ως μέσο διάδοσης ηλεκτρομαγνητικών πεδίων. Στα σημεία κυκλωματικής σύνδεσης (μεταξύ γραμμών μεταφοράς ή μεταξύ γραμμής και φορτίου) το ΗΜ κύμα που διατρέχει τη γραμμή μεταφοράς περνά από ένα μέσο σε ένα άλλο, με αποτέλεσμα την εμφάνιση ανακλάσεων.

Το ποσοστό του κύματος που θα ανακλαστεί και του ποσοστό εκείνου που θα διαδοθεί στο άλλο μέσο εξαρτάται από:

- i. Τη χαρακτηριστική αντίσταση της γραμμής  $Z_0$
- ii. Την αντίσταση φορτίου  $Z_L$

Στην περίπτωση που στα άκρα μιας γραμμής μεταφοράς εφαρμοστεί εναλλασσόμενη τάση, η τάση θα μεταβάλλεται ημιτονοειδώς με το χρόνο σε κάθε σημείο της γραμμής. Στα άκρα της γραμμής συμβαίνουν ανακλάσεις, οι οποίες οδηγούν στην συνύπαρξη προσπίπτοντος και ανακλώμενου κύματος πάνω στην γραμμή. Έτσι, η τελική τάση στη γραμμή θα δίνεται από την υπέρθεση των συνυπαρχόντων κυμάτων σε κάθε σημείο.



Ορίζουμε ως συντελεστή ανάκλασης τάσεων το λόγο:

$$\rho = \frac{V_r}{V_i} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (2.4)$$

Όπου  $V_r$  είναι η ανακλώμενη τάση και  $V_i$  η μεταδιδόμενη τάση. Για τον συντελεστή ανάκλασης ισχύουν:

- i. Είναι γενικά μιγαδικός αριθμός
- ii.  $0 \leq |\rho| \leq 1$
- iii. Αν  $\rho=0$  δεν υπάρχει ανάκλαση ενώ αν  $\rho=1$  συμβαίνει πλήρης ανάκλαση
- iv. Αν  $\rho < 0$  υπάρχει αλλαγή φάσης

Όταν ισχύει η σχέση:

$$Z_0 = Z_L \quad (2.5)$$

όπου  $Z_0$  είναι η χαρακτηριστική σύνθετη αντίσταση της γραμμής και  $Z_L$  η σύνθετη αντίσταση του φορτίου που συνδέεται στη γραμμή, τότε δεν συμβαίνει καθόλου ανάκλαση. Στην περίπτωση αυτή λέμε ότι έχουμε προσαρμογή.

### 2.2.3 Η μιγαδική σταθερά διάδοσης μιας γραμμής μεταφοράς

Η μιγαδική σταθερά διάδοσης  $\gamma$  μιας γραμμής μεταφοράς είναι ένας μιγαδικός αριθμός ο οποίος ορίζεται μέσω της σχέσης:

$$e^{\gamma x} = \frac{A_0}{A_x} \quad (2.6)$$

Όπου  $A_0$  το μιγαδικό πλάτος του κύματος που διατρέχει τη γραμμή στο σημείο της πηγής και  $A_x$  το μιγαδικό πλάτος του κύματος που διατρέχει τη γραμμή σε απόσταση  $x$  από την πηγή [10].

Η μιγαδική σταθερά διάδοσης μπορεί να γραφεί στην μορφή:

$$\gamma = \alpha(f) + i\beta(f) \quad (2.7)$$

Το πραγματικό μέρος  $\alpha(f)$  της μιγαδικής σταθεράς διάδοσης ονομάζεται ειδική απόσβεση και σχετίζεται με τη μείωση της ισχύος του σήματος κατά τη διάδοσή του μέσω της γραμμής. Το φανταστικό μέρος  $\beta(f)$  ονομάζεται σταθερά φάσης και σχετίζεται με τη στροφή φάσης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος κατά τη διάδοσή του. Η συνάρτηση μεταφοράς της γραμμής προσδιορίζεται άμεσα όταν είναι γνωστή η μιγαδική σταθερά διάδοσης [1].

Η μιγαδική σταθερά διάδοσης μπορεί να υπολογιστεί με βάση τις παραμέτρους  $R$ ,  $L$ ,  $C$ ,  $G$  μιας γραμμής μεταφοράς από τη σχέση:

$$\gamma = \alpha(f) + i\beta(f) = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} \quad (2.8)$$

## 2.2.4 Χαρακτηριστικά των γραμμών μεταφοράς του δικτύου ΧΤ

Σύμφωνα με το [11] , τυπικές τιμές των χαρακτηριστικών μεγεθών των καλωδίων στο δίκτυο ΧΤ δίνονται από τις σχέσεις

$$R = R_{dc} 10^{-5} \sqrt{f} \text{ (}\Omega/\text{m)} \quad (2.9)$$

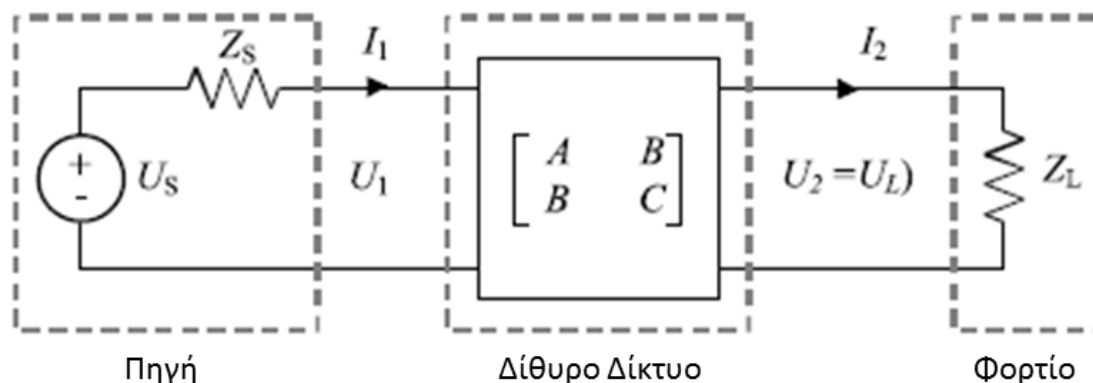
$$G = G_0 10^{-14} 2\pi f \text{ (S/m)} \quad (2.10)$$

όπου η συχνότητα δίνεται σε Hz και η  $R_{dc}$  σε  $\Omega/\text{km}$ .

Η τιμή  $R_{dc}$  αντιπροσωπεύει την ωμική αντίσταση του καλωδίου ανά μονάδα μήκους στους  $20^\circ \text{C}$  και περιλαμβάνεται στα φύλλα δεδομένων του κατασκευαστή. Η τιμή της εν σειρά αυτεπαγωγής και της εγκάρσιας χωρητικότητας εξαρτώνται έντονα από τον τύπο καλωδίου αλλά δεν μεταβάλλονται με τη μεταβολή της συχνότητας.

## 2.2.5 Περιγραφή στοιχειώδους τοπολογίας ΗΔ υπό μορφή διθύρου δικτύου

Κάθε στοιχειώδες τμήμα δικτύου μπορεί να περιγραφεί μαθηματικά ως δίθυρο δίκτυο συνδεδεμένο με πηγή σήματος και φορτίο (Σχήμα 2.5).



Σχήμα 2.5: Στοιχειώδες τμήμα του δικτύου ΧΤ υπό μορφή διθύρου δικτύου

Η σχέση μεταξύ των διανυσμάτων τάσης και ρεύματος εισόδου και των διανυσμάτων τάσης και ρεύματος εξόδου δίνεται από τη σχέση [12]:

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_2 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

και η συνάρτηση μεταφοράς του διθύρου (συμπεριλαμβανομένης και της εσωτερικής αντίστασης της πηγής είναι:

$$H = \frac{U_L}{U_S} = \frac{Z_L}{AZ_L + B + CZ_L Z_S + DZ_S} \quad (2.12)$$

Επιπλέον, η σύνθετη αντίσταση εισόδου του δίθυρου δικτύου προσδιορίζεται με από τα στοιχεία της μήτρας μεταφοράς και την αντίσταση φορτίου μέσω της σχέσης: [13]

$$Z_{IN} = \frac{AZ_L + B}{CZ_L + D} \quad (2.13)$$

Για γραμμή μεταφοράς χωρίς διακλαδώσεις, με συντελεστή διάδοσης  $\gamma$ , μήκος  $L$  και χαρακτηριστική αντίσταση  $Z_c$ , η μήτρα μεταφοράς ABCD προσδιορίζεται από τη σχέση [8]:

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma L) & Z_c \sinh(\gamma L) \\ \frac{1}{Z_c} \sinh(\gamma L) & \cosh(\gamma L) \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

Από τις ( 2.13 ) και ( 2.14 ), η σύνθετη αντίσταση εισόδου δικτύου που αποτελείται από γραμμή μεταφοράς με συντελεστή διάδοσης  $\gamma$ , μήκος  $d$  και χαρακτηριστική αντίσταση  $Z_c$ , συνδεδεμένης με φορτίο  $Z_L$  προκύπτει:

$$Z_{IN} = \frac{Z_L \cosh(\gamma d) + Z_0 \sinh(\gamma d)}{(Z_L/Z_0) \sinh(\gamma d) + \cosh(\gamma d)} \quad (2.15)$$

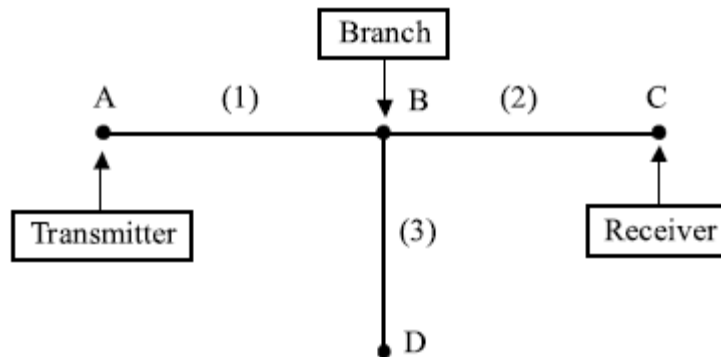
### 2.2.6 Αναλυτικός υπολογισμός συνάρτησης μεταφοράς στοιχειώδους τοπολογίας ΗΔ

Η συνάρτηση μεταφοράς των καλωδίων ΧΤ στη ζώνη NB-PLC (3 - 148.5kHz) προσδιορίζεται αναλυτικά με χρήση της θεωρίας γραμμών μεταφοράς. Αντίθετα από τις γραμμές μεταφοράς ΜΤ, όπου η συνάρτηση μεταφοράς της γραμμής μπορεί να υπολογιστεί χωρίς να λαμβάνονται υπόψη φορτία και διακλαδώσεις [14] , στο δίκτυο ΧΤ μια τέτοια υπόθεση δεν οδηγεί σε ρεαλιστικά αποτελέσματα. Αυτό ισχύει επειδή οι κλάδοι του δικτύου ΧΤ από τον υποσταθμό ΜΤ/ΧΤ προς τους καταναλωτές έχουν μικρό μήκος (το πολύ 800-1000m) και παρουσιάζουν πολλές διακλαδώσεις που καταλήγουν στους πίνακες των καταναλωτών ΧΤ.

Η προσέγγιση που ακολουθείται στη βιβλιογραφία χωρίζει το δίκτυο σε μικρά τμήματα που περιλαμβάνουν, κατά περίπτωση, γραμμές μεταφοράς, φορτία, μη τερματισμένες συνδέσεις κ.τ.λ. για τα οποία προσδιορίζεται η συνάρτηση μεταφοράς. Στη συνέχεια, η συνολική συνάρτηση μεταφοράς του τμήματος του δικτύου που μελετάται προκύπτει ως κατάλληλος συνδυασμός των επιμέρους συναρτήσεων μεταφοράς. [15]

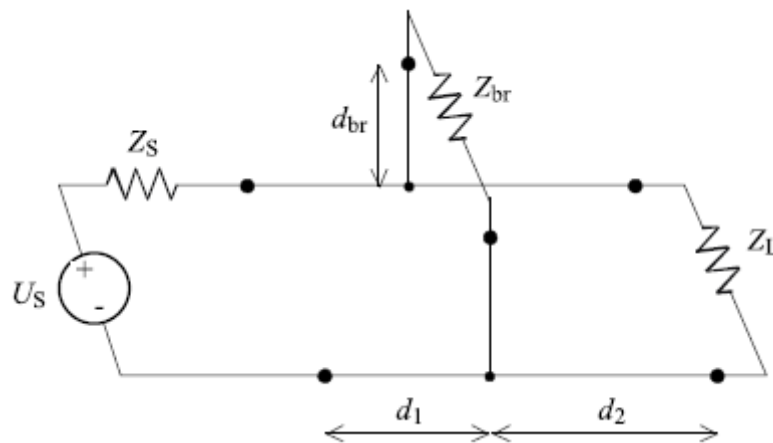
Ως παράδειγμα χρήσης των διθύρων δικτύων για τον προσδιορισμό της συνάρτησης μεταφοράς τμήματος του δικτύου ΧΤ θα χρησιμοποιηθεί η στοιχειώδης τοπολογία του Σχήματος 2.6. Η τοπολογία περιλαμβάνει τον πομπό του σήματος (Α), το δέκτη (C), τη

γραμμή μεταφοράς που τους συνδέει (AC), μια διακλάδωση στο σημείο B και τη γραμμή μεταφοράς από το σημείο B προς κάποιο σημείο D (BD).



Σχήμα 2.6: Στοιχειώδης τοπολογία τμήματος δικτύου ΧΤ

Η στοιχειώδης τοπολογία μπορεί να περιγραφεί ως ηλεκτρικό κύκλωμα με κατάλληλη αντικατάσταση των στοιχείων που την αποτελούν. Ο πομπός περιγράφεται από μια ανεξάρτητη πηγή τάσης ( $U_s$ ) σε σειρά με σύνθετη αντίσταση ( $Z_s$ ), ο δέκτης με την σύνθετη αντίσταση  $Z_L$ , και οι γραμμές μεταφοράς AC, BC και BD από τα καλώδια με μήκη  $d_1, d_2$  και  $d_{br}$  αντίστοιχα. Θεωρείται επίσης ότι ο κλάδος BD τερματίζεται σε μια σύνθετη αντίσταση  $Z_{br}$  και ότι το επίπεδο γης είναι κοινό για όλο το κύκλωμα. Το ηλεκτρικό κύκλωμα που προκύπτει παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.7.



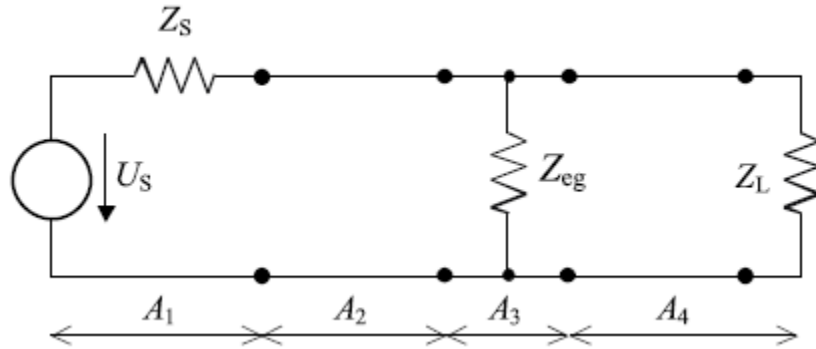
Σχήμα 2.7: Το κύκλωμα που αντιστοιχεί στην τοπολογία του Σχήμα 2.6

Στη συνέχεια, στο κύκλωμα του Σχήματος 2.7 μπορεί να γίνει απλοποίηση προκειμένου να είναι δυνατός ο χωρισμός του σε τμήματα με εύκολα υπολογίσιμες συναρτήσεις μεταφοράς. Ο κλάδος BD και η αντίσταση  $Z_{br}$  μπορούν να αντικατασταθούν από την σύνθετη αντίσταση εισόδου του κλάδου BD:

$$Z_{eq} = Z_c \frac{Z_{br} + Z_c \tanh(\gamma_{br} d_{br})}{Z_c + Z_{br} \tanh(\gamma_{br} d_{br})} \quad (2.16)$$

όπου  $Z_c$  και  $\gamma_{br}$  είναι η χαρακτηριστική αντίσταση και ο συντελεστής διάδοσης του καλωδίου του κλάδου BD.

Με βάση την προηγηθείσα ανάλυση, το στοιχειώδες τμήμα του δικτύου που περιλαμβάνει διακλάδωση απεικονίζεται στο Σχήμα 2.8.



Σχήμα 2.8: Το κύκλωμα που αντιστοιχεί στην τοπολογία του Σχήματος 2.6 μετά την απλοποίηση

Το στοιχειώδες τμήμα του δικτύου χωρίζεται σε τέσσερα τμήματα, ένα από τα οποία μπορεί να θεωρηθεί δίθυρο δίκτυο με συνάρτηση μεταφοράς  $A_i$ . Τα τέσσερα αυτά τμήματα του δικτύου χαρακτηρίζονται από τους ακόλουθους πίνακες μεταφοράς: [16]

$$A_1 = \begin{bmatrix} 1 & Z_s \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma_2 L_2) & Z_c \sinh(\gamma_2 L_2) \\ (1/Z_2) \sinh(\gamma_2 L_2) & \cosh(\gamma_2 L_2) \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1/Z_{eq} & 1 \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

$$A_4 = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma_4 L_4) & Z_c \sinh(\gamma_4 L_4) \\ (1/Z_{eq}) \sinh(\gamma_4 L_4) & \cosh(\gamma_4 L_4) \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

Ο πίνακας μεταφοράς του στοιχειώδους τμήματος δικτύου XT προκύπτει ως το γινόμενο των επιμέρους πινάκων μεταφοράς:

$$A = \prod_{i=1}^4 A_i \quad (2.21)$$

Σημειώνεται ότι η περιγραφείσα μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί με κατάλληλες προσαρμογές για οποιοδήποτε δίκτυο γνωστής τοπολογίας.

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΘΟΡΥΒΟΣ ΕΠΙ ΤΩΝ ΚΑΛΩΔΙΩΝ ΧΤ ΣΤΗ ΖΩΝΗ NB-PLC

Αρχικά, στο κεφάλαιο αυτό, περιγράφονται τα είδη θορύβου που εμφανίζονται στις γραμμές μεταφοράς ΧΤ και επηρεάζουν την NB-PLC μετάδοση. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται εναλλακτικοί τρόποι μαθηματικής περιγραφής του θορύβου στη ζώνη NB-PLC.

#### 3.1 Είδη θορύβου που εμφανίζονται στις γραμμές μεταφοράς ΧΤ

Τα είδη θορύβου που εμφανίζονται κατά τη μετάδοση PLC σημάτων μέσω των γραμμών μεταφοράς ΧΤ είναι [17] [18]:

- i. Έγχρωμος θόρυβος υποβάθρου (Coloured background noise):*  
Έχει χαμηλή φασματική πυκνότητα ισχύος (Power Spectral Density - PSD) που μεταβάλλεται με τη συχνότητα σε μεγάλη χρονική βάση (λεπτά, ώρες). Προκαλείται κυρίως από οικιακές συσκευές όπως Η/Υ και στεγνωτήρες και μπορεί να προκαλέσει οχλήσεις στο εύρος συχνοτήτων έως και 30MHz.
- ii. Θόρυβος στενής ζώνης (Narrowband noise):*  
Πρόκειται κυρίως για διαμορφωμένα σήματα που προέρχονται από ραδιοφωνικές εκπομπές, τυπικά στο εύρος 1-22MHz. Τα επίπεδα παρεμβολής μεταβάλλονται σε ωριαία βάση.
- iii. Περιοδικός κρουστικός θόρυβος, ασύγχρονος προς τη συχνότητα του ΗΔ:*  
Καταλαμβάνει ζώνες συχνοτήτων 50-200kHz και εμφανίζει γραμμικό φάσμα που εξαρτάται από τη συχνότητα εμφάνισης που κρουστικού παλμού. Προκαλείται κυρίως από τροφοδοτικά ισχύος με διακοπτική λειτουργία (Switched Mode Power Supply - SMPS).
- iv. Περιοδικός κρουστικός θόρυβος, σύγχρονος προς τη συχνότητα του ΗΔ:*  
Η συχνότητα εμφάνισης αυτού του είδους κρουστικού θορύβου είναι η συχνότητα του δικτύου (στην Ελλάδα 50Hz) ή πολλαπλάσιό της (συνήθως 100Hz). Η διάρκεια των εξάρσεων του κρουστικού θορύβου είναι πολύ μικρή και η φασματική πυκνότητα ισχύος του μειώνεται με τη συχνότητα. Αυτό το είδος θορύβου προκαλείται από τα τροφοδοτικά, κυρίως από ανορθωτικές διατάξεις με διόδους.
- v. Μη περιοδικός κρουστικός θόρυβος, ασύγχρονος προς τη συχνότητα του ΗΔ:*  
Οι εξάρσεις εμφανίζονται με τυχαίο τρόπο και διαρκούν από μερικά μs έως μερικά ms. Αυτός ο τύπος θορύβου είναι ισχυρός και η φασματική πυκνότητα ισχύος μπορεί να φθάσει έως και 50dB υψηλότερα από το θόρυβο υποβάθρου. Συνεπώς μπορεί να επηρεάσει πολύ ή και να καλύψει εντελώς το σήμα πληροφορίας. Αιτία της εμφάνισης του μη περιοδικού, ασύγχρονου κρουστικού θορύβου είναι τα διακοπτικά φαινόμενα στο ΗΔ.

Τα πρώτα τρία είδη θορύβου είναι στατικά για μεγάλες χρονικές περιόδους (λεπτά, ώρες). Τα δύο τελευταία είδη έχουν στοχαστική συμπεριφορά ως προς το χρόνο.

### 3.2 Ο θόρυβος στη ζώνη NB-PLC

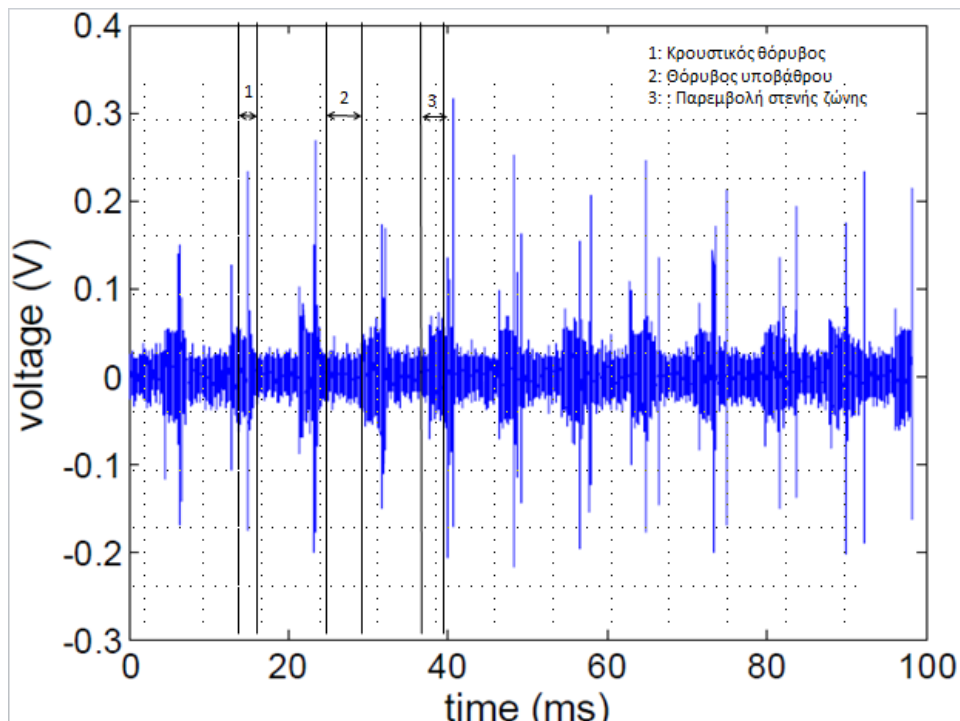
Στη ζώνη συχνοτήτων NB-PLC [3-500kHz] το είδος θορύβου που κυριαρχεί είναι ο περιοδικός κρουστικός θόρυβος σύγχρονος προς τη συχνότητα του ΗΔ. [19]

Σύμφωνα με τις μετρήσεις που αναφέρονται στο [20], ο περιοδικός κρουστικός θόρυβος στις γραμμές μεταφοράς ΧΤ έχει περίοδο  $T_{AC}/2$ , δηλαδή περίοδο μισή της περιόδου της τάσης του δικτύου (η οποία είναι 20 ms για συχνότητα λειτουργίας 50Hz). Επιπλέον του περιοδικού θορύβου, εμφανίζονται και παρεμβολές στενής ζώνης συχνότητας μερικών kHz, ο κύκλος λειτουργίας (duty cycle) των οποίων ποικίλλει σε όλο το δυνατό εύρος, δηλαδή από 0% έως και 100%. Η παρεμβολές αυτές έχουν υψηλότερη φασματική πυκνότητα ισχύος στις χαμηλές συχνότητες (συνήθως μέχρι τα 100kHz).

Από τις μετρήσεις που παρουσιάζονται στο [20], παρατηρείται ότι ο θόρυβος στη ζώνη NB-PLC στο δίκτυο ΧΤ έχει τα ακόλουθα γενικά χαρακτηριστικά:

- i. Περιοδικής μορφής περιβάλλουσα με τυχαία μεταβαλλόμενο πλάτος
- ii. Εμφανίζονται παρεμβολές στενής ζώνης, κατά κύριο λόγο στις χαμηλές συχνότητες
- iii. Μια περίοδος του θορύβου μπορεί συνήθως να χωριστεί σε τρεις περιοχές: μικρής διάρκειας εξάρσεις ευρυζωνικών παρεμβολών, θόρυβος υποβάθρου και (όχι πάντα παρούσες) παρεμβολές στις χαμηλές και τις μεσαίες συχνότητες.

Ένα παράδειγμα κυματομορφής θορύβου στο δίκτυο ΧΤ απεικονίζεται στο Σχήμα 3.1.



Σχήμα 3.1: Κυματομορφή θορύβου σε γραμμή μεταφοράς ΧΤ που λειτουργεί στα 50Hz [17]



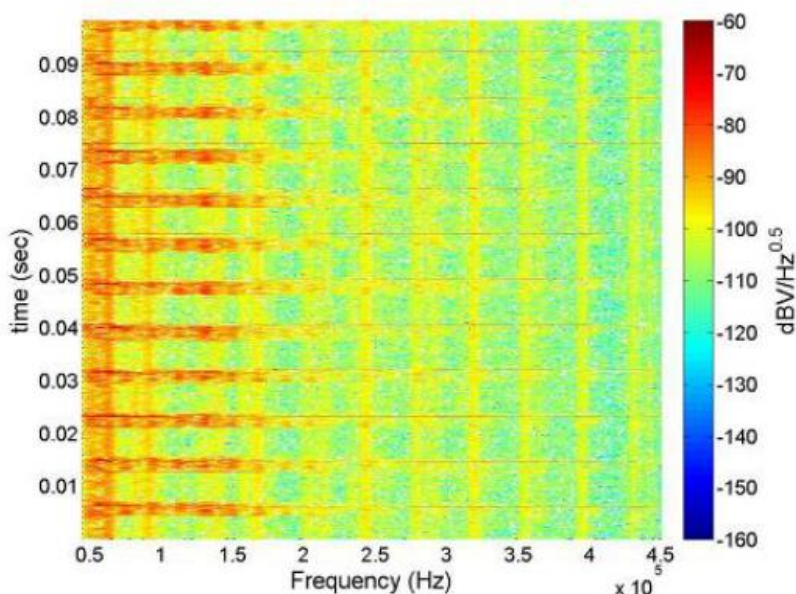
### 3.3 Πλήρη μαθηματικά μοντέλα του θορύβου που εμφανίζεται στη ΧΤ στη ζώνη NB-PLC

Στο πρότυπο IEEE Standard 1901.2-2013, προτείνονται δύο μέθοδοι για τη μαθηματική περιγραφή του θορύβου στο δίκτυο ΧΤ στη ζώνη NB-PLC. Και οι δύο μέθοδοι εκκινούν από μετρήσεις στις οποίες γίνεται στατιστική επεξεργασία προκειμένου να εξαχθούν τα χαρακτηριστικά του θορύβου. Με βάση τα χαρακτηριστικά αυτά παρουσιάζεται μέθοδος προσομοίωσης θορύβου, ο οποίος ομοιάζει με αυτόν που εμφανίζεται στη ΧΤ πραγματικών ΗΔ.

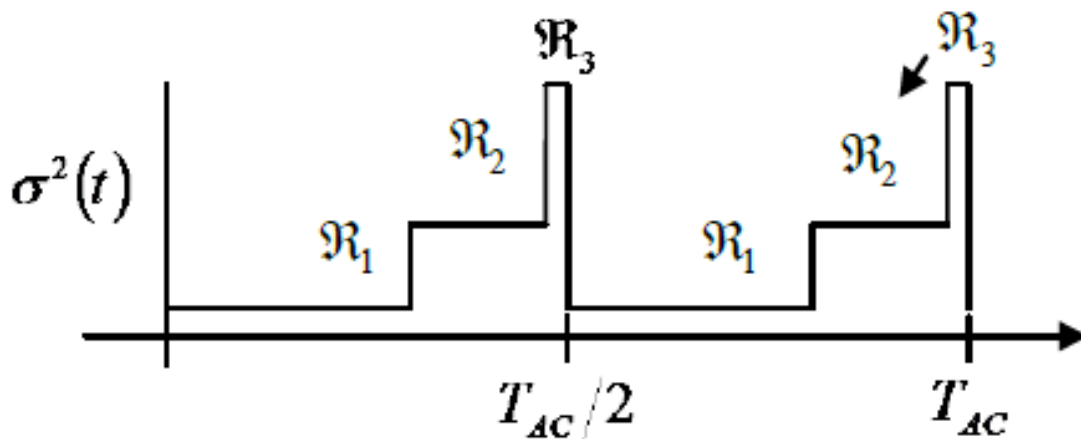
#### 3.3.1 Τμηματικά κυκλοστατικό γκαουσιανό μοντέλο (piece-wise spectral cyclostationary Gaussian model)

Η μέθοδος αυτή μπορεί να συμπεριλάβει στη μαθηματική περιγραφή του θορύβου τον περιοδικό κρουστικό θόρυβο, το θόρυβο υποβάθρου και ορισμένες από τις παρεμβολές στενής ζώνης που εμφανίζονται. Με κατάλληλες προσαρμογές μπορούν ακόμη να συμπεριληφθούν και χρονικές μεταβολές που παρατηρούνται στο φάσμα του θορύβου [21].

Επειδή ο θόρυβος έχει περιοδικά χαρακτηριστικά, είναι δυνατό να απομονωθεί μια περίοδος και να προσδιοριστεί το φασματογράφημά της. Στη συνέχεια η περίοδος χωρίζεται σε τμήματα με διαφορετικά χρονικά και φασματικά χαρακτηριστικά και σαφώς καθορισμένα χρονικά όρια. Επίσης, υπολογίζεται η PSD κάθε τμήματος. Έτσι, ο συνολικός θόρυβος είναι δυνατόν να εκφραστεί ως μια πολυκλαδική συνάρτηση με τόσους κλάδους όσα και τα τμήματα στα οποία χωρίστηκε η περίοδος του θορύβου. Στο Σχήμα 3.2 φαίνεται το φασματογράφημά του θορύβου του Σχήματος 3.1 και στο Σχήμα 3.3 η τμηματοποίηση του.



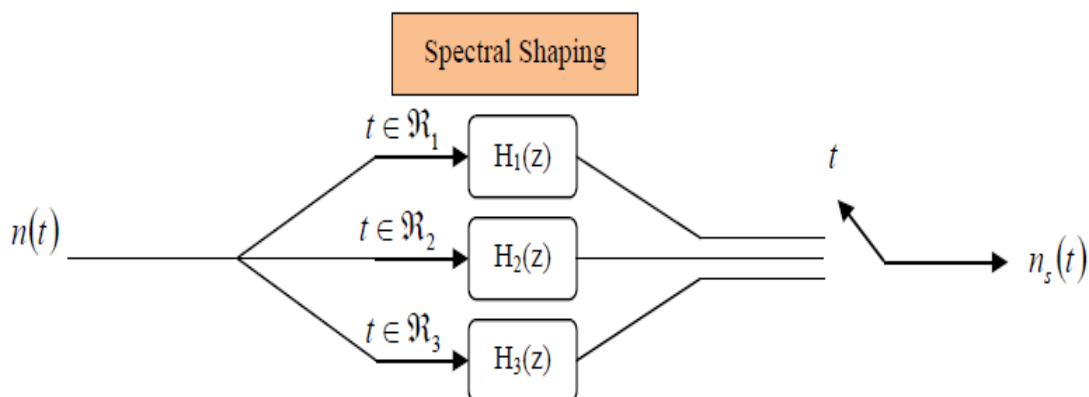
Σχήμα 3.2 Φασματογράφημα του θορύβου που δίνεται στο Σχήμα 3.1 [20]



**Σχήμα 3.3** Τμηματοποίηση του θορύβου που δίνεται στο Σχήμα 3.1 [20] Η αυτοσυσχέτιση του θορύβου είναι περιοδική συνάρτηση του χρόνου, με περίοδο  $T_{AC}/2$

Κατ'αυτόν τον τρόπο, κάθε τμήμα της κυματομορφής του θορύβου μπορεί να περιγραφεί μαθηματικά ως λευκός θόρυβος ο οποίος διέρχεται από ένα γραμμικό χρονικά ανεξάρτητο φίλτρο ώστε να προσεγγίσει την πραγματική συμπεριφορά στο πεδίο της συχνότητας. Τελικά, το αποτέλεσμα κανονικοποιείται ως προς την τετραγωνική ρίζα της ισχύος του συνολικού θορύβου.

Έτσι, για τη δημιουργία θορύβου που προσεγγίζει τον περιοδικό κρουστικό θόρυβο απαιτείται μια συστοιχία γραμμικών χρονικά ανεξάρτητων φίλτρων, ισάριθμων προς τα τμήματα στα οποία χωρίστηκε ο θόρυβος. Εναλλακτικά, είναι δυνατό να κανονικοποιηθεί το κάθε φίλτρο της συστοιχίας με την τετραγωνική ρίζα της ισχύος του θορύβου στο χρονικό διάστημα στο οποίο αντιστοιχεί το φίλτρο. Η ανωτέρω διαδικασία απεικονίζεται παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.4.



**Σχήμα 3.4** Μαθηματική περιγραφή του θορύβου στις γραμμές μεταφοράς ΧΤ [20]

Η διαδικασία που περιγράφηκε αναφέρεται σε μια περίοδο του θορύβου και άρα θα πρέπει να επαναληφθεί όσες φορές απαιτείται προκειμένου να κατασκευαστεί θόρυβος για όλο το χρονικό διάστημα που ενδιαφέρει.

### 3.3.2 Εναλλακτική περιγραφή του θορύβου στη ΧΤ στη ζώνη NB-PLC

Η περιγραφή αυτή μπορεί να συμπεριλάβει τον περιοδικό κρουστικό θόρυβο, τις παρεμβολές στενής ζώνης, το θόρυβο υποβάθρου και τον τυχαίο κρουστικό θόρυβο. Τα είδη θορύβου αυτά έχουν ανεξάρτητη μαθηματική περιγραφή και υπερτίθενται για να προκύψει το τελικό μοντέλο [21].

#### α) Κρουστικός θόρυβος

Η μαθηματική περιγραφή ενός κρουστικού παλμού μικρής διάρκειας ακολουθεί τα ακόλουθα βήματα:

1. Λευκός θόρυβος πολλαπλασιάζεται στο πεδίο του χρόνου με εκθετική συνάρτηση, διότι το πλάτος του κρουστικού παλμού έχει εκθετικά φθίνουσα μορφή, δηλαδή

$$A_i = Ae^{-Bt} \quad (3.1)$$

όπου A η μέγιστη τιμή που εμφανίζει ο κρουστικός παλμός θορύβου. Συνήθως, η παράμετρος B επιλέγεται B=500 ώστε το πλάτος να μειώνεται από το 1 στο 0.35 σε 2ms. Η τιμή αυτή έχει προκύψει από μετρήσεις και μπορεί να προσαρμοστεί αντίστοιχα με την τοπολογία και τις συνθήκες του ΗΔ που ενδιαφέρουν.

2. Το αποτέλεσμα που έχει προκύψει από το βήμα 1 πολλαπλασιάζεται στο πεδίο της συχνότητας με την εκθετικά φθίνουσα συνάρτηση:

$$\eta_c(f) = 10^{k-\beta f} \quad (3.2)$$

όπου η μεταβλητή k ακολουθεί κανονική κατανομή με μέση τιμή  $\mu=5,64$  και διασπορά  $\sigma=0,5$

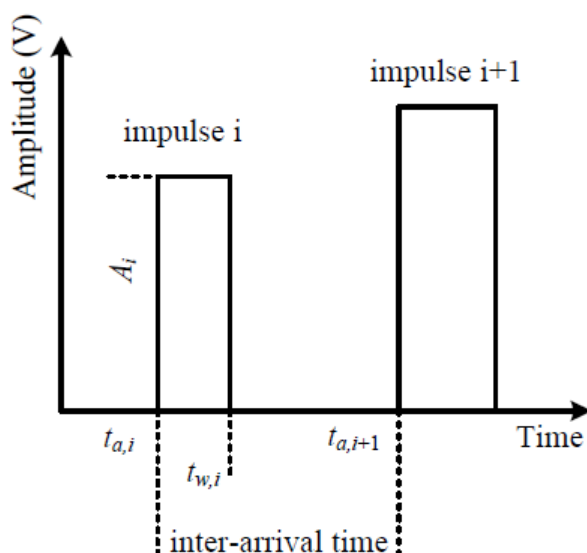
Το δεύτερο πραγματοποιείται ώστε ο κρουστικός παλμός θορύβου μικρής διάρκειας που προκύπτει να έχει PSD παρόμοια με αυτή που εμφανίζεται στη ΧΤ πραγματικών ΗΔ.

Οι κρουστικοί παλμού θορύβου μικρής διάρκειας δεν εμφανίζονται αποκλειστικά με περιοδικό τρόπο, καθώς άλλοι είναι σύγχρονοι και άλλοι ασύγχρονοι προς τη συχνότητα του ΗΔ. Η εμφάνιση των κρουστικών παλμών στο χρόνο μπορεί να περιγραφεί από τη σχέση:

$$\eta_{imp}(t) = \sum_{i=1}^N A_i imp\left(\frac{t - t_{a,i}}{t_{w,i}}\right) \quad (3.3)$$

όπου  $imp(x)$  κρουστικός παλμός μεταβλητής διάρκειας, N το πλήθος των κρουστικών παλμών στο παράθυρο παρατήρησης,  $t_{a,i}$  ο μέσος χρόνος μεταξύ δύο κρουστικών παλμών,  $t_{w,i}$  η μέση διάρκεια του κρουστικού παλμού και  $A_i$  το πλάτος του i-οστού κρουστικού παλμού. Γραφική απεικόνιση της Σχέσης ( 3.3 ) παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.5 (αντί κρουστικών παλμών έχουν χρησιμοποιηθεί τετραγωνικοί παλμοί).

Το διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ δύο κρουστικών παλμών  $t_{a,i}$  είναι τυχαία μεταβλητή που ακολουθεί την κατανομή Poisson ενώ η διάρκεια κάθε κρουστικού παλμού  $t_{w,i}$  είναι τυχαία μεταβλητή που ακολουθεί την εκθετική κατανομή. Οι μέσες τιμές των τυχαίων μεταβλητών αυτών προσδιορίζονται μέσω μετρήσεων.



Σχήμα 3.5 Τετραγωνική παλμοσειρά-Γραφική αναπαράσταση της σχέσης ( 3.3 )

### β) Θόρυβος που οφείλεται σε παρεμβολές στενής ζώνης

Η διαδικασία προσομοίωσης θορύβου που οφείλεται σε παρεμβολές στενής ζώνης είναι ίδια με αυτήν της προσομοίωσης του κρουστικού θορύβου, με διαφορετικές τιμές παραμετρων A και B στην εκθετική συνάρτηση του βήματος 1, ώστε το σήμα να μην έχει τόσο μεγάλο πλάτος και να μη φθίνει τόσο ταχέως στο πεδίο του χρόνου. Σε περιπτώσεις όπου οι παρεμβολές στενής ζώνης δεν φθίνουν με την πάροδο του χρόνου αλλά το πλάτος τους παραμένει σταθερό για κάποιο χρονικό διάστημα, παραλείπεται το βήμα 1 και πραγματοποιείται μόνο το βήμα 2.

### γ) Θόρυβος υποβάθρου

Ο έγχρωμος θόρυβος υποβάθρου προκύπτει από προσθετικό λευκό θόρυβο (Additive White Gaussian Noise – AWGN) πολλαπλασιασμένο στο πεδίο της συχνότητας με τη συνάρτηση  $\eta_c(f) = 10^{k-\beta f}$ .

Τα τρία είδη θορύβου (α,β,γ) που περιγράφηκαν υπερτίθενται προκειμένου να προσομοιωθεί ο συνολικός θόρυβος που εμφανίζεται στις γραμμές μεταφοράς ΧΤ.

## 3.4 Απλοποιημένα μαθηματικά μοντέλα του του θορύβου που εμφανίζεται στη ΧΤ στη ζώνη NB-PLC

Τα μοντέλα που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα είναι δυνατόν να προσαρμοστούν με μεγάλη ακρίβεια ούτως ώστε να προσομοιώνουν πάρα πολύ καλά

πραγματικές κυματομορφές θορύβου. Όμως, έχουν μεγάλη πολυπλοκότητα, απαιτούν καθορισμό των παραμέτρων τους με βάση πειραματικά δεδομένα και δεν εκφράζουν τη συμπεριφορά του θορύβου σε κλειστή μορφή. Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται απλοποιημένα μαθηματικά μοντέλα που εκφράζουν τη συμπεριφορά του θορύβου σε κλειστή μορφή. [1]

### 3.4.1 Το μοντέλο θορύβου Middleton

Ένα από τα πλέον διαδεδομένα και σημαντικά μοντέλα μη κανονικής κατανομής θορύβου εκφράζεται από τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας που προτάθηκε από το Middleton [26]. Το μοντέλο αυτό κατηγοριοποιεί τα περιβάλλοντα θορύβου σε τρεις μεγάλες κλάσεις, τις A, B και C. Από τις τρεις κλάσεις αυτές, η A χρησιμοποιείται συχνά ως μαθηματικό υπόδειγμα για το περιβάλλον θορύβου των PLC. Για θόρυβο κλάσης A, η κατανομή πυκνότητας πιθανότητας της κρουστικής τάσης  $n$  δίδεται από τη σχέση

$$p(n) = \sum_{m=0}^{\infty} p_m \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_m^2}} \exp\left(-\frac{n^2}{2\sigma_m^2}\right) \quad (3.4)$$

Όπου

$$p_m = \frac{e^{-A} A^m}{m!} \quad (3.5)$$

$$\sigma_m^2 = \sigma^2 \frac{\frac{m}{A} + \Gamma}{1 + \Gamma} = \sigma_i^2 \frac{m}{A} + \sigma_g^2 \quad (3.6)$$

Και

$$\Gamma = \frac{\sigma_g^2}{\sigma_i^2} \quad (3.7)$$

Η παράμετρος  $A$  ονομάζεται κρουστικός δείκτης (impulsive index). Ο θόρυβος γίνεται περισσότερο κρουστικός όταν το  $A$  είναι μικρό, ενώ η  $p(n)$  προσεγγίζει την κανονική κατανομή όταν το  $A$  τείνει στο άπειρο. Η παράμετρος  $\Gamma$  είναι ο μέσος λόγος ισχύων μεταξύ Gaussian και κρουστικών συνιστωσών θορύβου και το άθροισμά τους είναι η συνολική ισχύς του θορύβου. Μέσω του μοντέλου αυτού, ο θόρυβος μπορεί να θεωρηθεί ως υπέρθεση άπειρου πλήθους παράλληλων Gaussian θορύβων με διαφορετική ισχύ θορύβου και με συντελεστές βαρύτητας που ακολουθούν την κατανομή Poisson  $p_m$ . Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι το μοντέλο του Middleton παρέχει στατιστική πρώτης τάξης, χωρίς να περιγράφει το φάσμα ισχύος ή την αυτοσυσχέτιση του θορύβου. Τέλος, δεν προσδιορίζει αν η μορφή του θορύβου εμφανίζει κορυφές (είναι δηλαδή κρουστική) ή αν είναι λεία στο πεδίο του χρόνου. [1]

### 3.4.2 Κυκλοστατικό μοντέλο θορύβου

Στα συστήματα NB-PLC οι συνιστώσες θορύβου που επικρατούν είναι ο χρονικά μεταβαλλόμενος συνεχής θόρυβος και ο κυκλικός κρουστικός θόρυβος, που είναι και οι δύο σύγχρονοι προς την τάση του ΗΔ. Η συχνότητα των περιοδικών χαρακτηριστικών του θορύβου στις PLC διπλάσια της συχνότητας της τάσης του ΗΔ. Η συχνότητα αυτή (50 ή 60 Hz) είναι σχετικά αργή συγκρινόμενη με το ρυθμό δεδομένων/πακέτων των BB-PLC συστημάτων υψηλής ταχύτητας. Συνεπώς, σε συστήματα WB-PLC τα μεγέθη pdf και psd (φασματική πυκνότητα ισχύος – power spectrum density) είναι περισσότερο παραστατικά στην περιγραφή του θορύβου σε σύγκριση με τα κυκλοστατικά χαρακτηριστικά του θορύβου, δηλαδή τη μέση τιμή και τη διασπορά του.

Στην περίπτωση των narrowband συστημάτων, όμως, η διάρκεια συμβόλου κι ως εκ τούτου και το μήκος του πακέτου είναι συνήθως μεγάλα. Έτσι, τα περιοδικά χαρακτηριστικά του θορύβου δεν μπορούν να αγνοηθούν. Για αυτόν τον τύπο θορύβου στις NB-PLC έχει αναπτυχθεί ένα μοντέλο στο οποίο ο θόρυβος θεωρείται ότι είναι κυκλοστατικός (cyclostationary), δηλαδή περιοδικά στατικός, προσθετικός κανονικής κατανομής με μηδενική μέση τιμή και διασπορά σύγχρονη στην τάση AC. Η στιγμιαία διασπορά ισχύος του θορύβου στο μοντέλο αυτό προσεγγίζεται με την ακόλουθη περιοδική συνάρτηση:

$$\hat{\sigma}^2(t) = \sum_{l=1}^{L-1} A_l \left| \sin\left(\frac{2\pi t}{T_{AC}} + \theta_l\right) \right|^{n_l} \quad (3.8)$$

Για την οποία ισχύει:

$$\frac{2}{T_{AC}} = \int_{-\frac{T_{AC}}{4}}^{\frac{T_{AC}}{4}} \hat{\sigma}^2(t) dt = 1 \quad (3.9)$$

ώστε να διατηρείται η χρονική μέση τιμή της  $\sigma(t)$  μοναδιαία.

Στο μοντέλο αυτό ένα σύνολο  $3L$  παραμέτρων  $A_l$ ,  $\theta_l$  και  $n_l$ ,  $l=0, 1, 2, \dots, L-1$ , περιγράφει τα χαρακτηριστικά του θορύβου. Το  $L$  δεν συμβολίζει το πλήθος των πηγών θορύβου αλλά το πλήθος των κλάσεων θορύβου, όπως αυτές περιγράφηκαν προηγουμένως. Για παράδειγμα, στις NB-PLC ο θόρυβος διαχωρίζεται σε συνιστώσες συνεχούς χρονικά μεταβλητού και χρονικά αμετάβλητου θορύβου καθώς και κρουστικού θορύβου σύγχρονου προς την τάση AC. Έτσι, το  $L$  στην περίπτωση αυτή είναι ίσο με 3, για να περιγράψει τις τρεις κλάσεις θορύβου που συναπαρτίζουν το συνολικό θόρυβο. [1]

Το μοντέλο βασίζεται στην υπόθεση ότι το φάσμα ισχύος του θορύβου δεν εξαρτάται από το χρόνο για να περιγράψει τον έγχρωμο χαρακτήρα του θορύβου στις NB-PLC. Στην περίπτωση αυτή, η διασπορά του θορύβου τη χρονική στιγμή  $t$  για τη συχνότητα  $f$  θα είναι:

$$\sigma^2(t, f) = \hat{\sigma}^2(t) \cdot a(f) \quad (3.10)$$

όπου

$$\alpha(f) = \frac{\alpha}{2} \exp(-a|f|) \quad (3.11)$$

η φασματική πυκνότητα ισχύος.

Χρησιμοποιώντας αυτό το μαθηματικό μοντέλο είναι δυνατή η παραγωγή κυματομορφών θορύβου γραμμών ηλεκτρικής ενέργειας ακολουθώντας την εξής διαδικασία [1]:

1. Καθορισμός των παραμέτρων για τη  $\sigma^2(t, f)$ .
2. Παραγωγή Gaussian θορύβου με στιγμιαία διασπορά  $\sigma^2(t, f)$ .
3. Διέλευση του θορύβου από φίλτρο με απόκριση συχνότητας που περιγράφεται από την εξίσωση:

$$\sqrt{\alpha(f)} = \sqrt{a \cdot \exp(-a|f|/2)}$$

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΤΟΠΟΛΟΓΙΕΣ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΧΤ

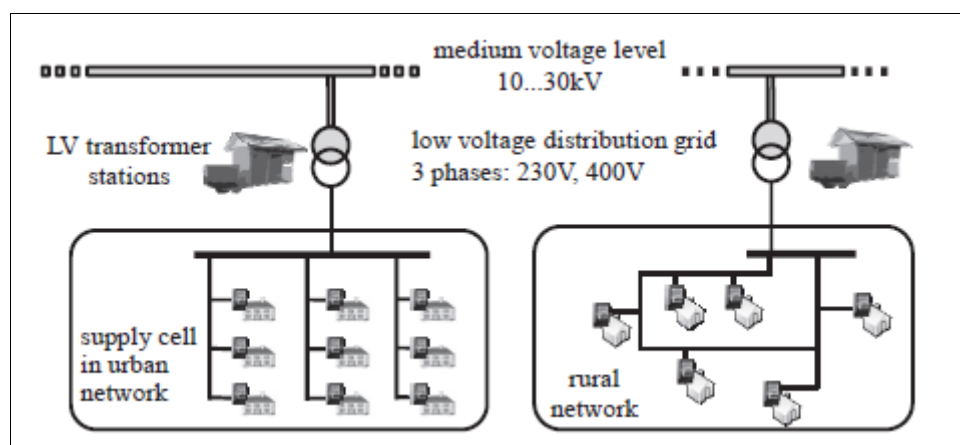
Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι συνηθέστερες τοπολογίες του δικτύου ΧΤ. Η διάκριση γίνεται με κριτήριο την μορφή του δικτύου (αστέρας ή δένδρο) και την πληθυσμιακή πυκνότητα.

### 4.1 Δομή του SM δικτύου

Στις PLC επικοινωνίες, οι γραμμές μεταφοράς του ΗΔ αποτελούν τον τηλεπικοινωνιακό δίαυλο μέσω του οποίου διακινούνται τα δεδομένα μεταξύ των έξυπνων μετρητών και του κόμβου σταθμού συγκέντρωσης των δεδομένων, ο οποίος βρίσκεται στον υποσταθμό ΜΤ/ΧΤ. Έτσι, το τηλεπικοινωνιακό δίκτυο των μετρητών συμπίπτει με το δίκτυο ΧΤ. Οι βασικές λειτουργίες που υλοποιούνται από το δίκτυο των SM μετρητών είναι: [22]

- i. Η μέτρηση της ενέργειας που καταναλώνουν (ή παράγουν αν έχουμε διασπαρμένη παραγωγή) οι χρήστες του ΗΔ
- ii. Η συλλογή των SM δεδομένων από τους SM μετρητές σε συγκεκριμένο σημείο συλλογής, με ταχύ και αξιόπιστο τρόπο
- iii. Η πρόσβαση του διαχειριστή του ΗΔ - στην Ελλάδα του ΔΕΔΗΕ- στους SM μετρητές για την ομαλή λειτουργία του δικτύου (σύνδεση/αποσύνδεση χρηστών, εντοπισμός ρευματοκλοπών κλπ.) και για διάγνωση σφαλμάτων.

Στο τμήμα «τελευταίου μιλίου» (“last mile”) του ΗΔ, οι χρήστες, κατά κύριο λόγο οικιακοί, τροφοδοτούνται από κάποιο υποσταθμό ΜΤ/ΧΤ. Ανάλογα με το εξυπηρετούμενο φορτίο, ο υποσταθμός αυτός περιλαμβάνει ένα ή περισσότερους μετασχηματιστές υποβιβασμού ΜΤ/ΧΤ. Στις αστικές περιοχές, οι καταναλωτές ομαδοποιούνται σε «κύτταρα τροφοδοσίας» έκαστο εκ των οποίων περιλαμβάνει το πολύ 350 καταναλωτές. Κάθε κύτταρο μπορεί να εμφανίζει το πολύ 10 κλάδους. Ενδεικτικό παράδειγμα τοπολογίας του ΗΔ ΧΤ με τον υποσταθμό ΜΤ/ΧΤ στην Ευρώπη παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.1. [23]



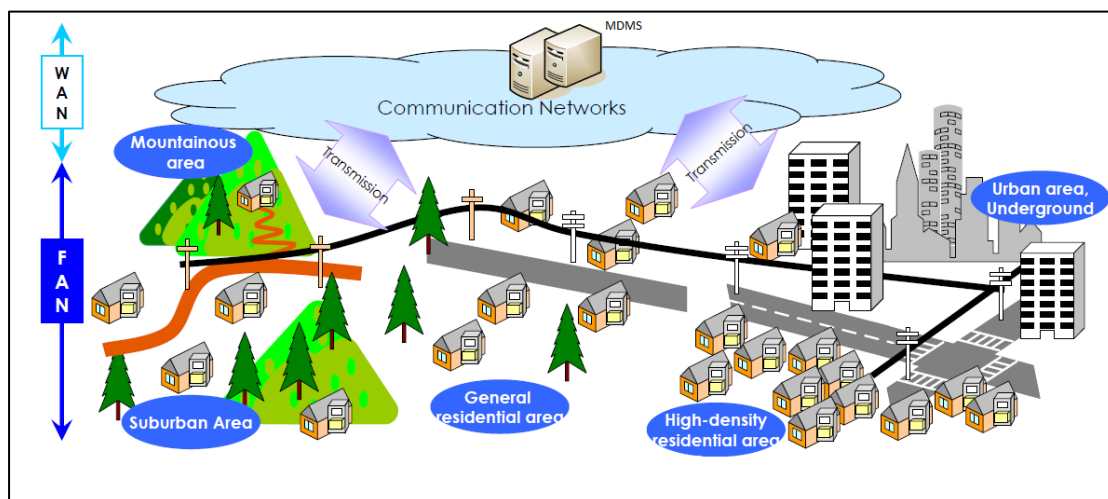
Σχήμα 4.1 Παράδειγμα διαμόρφωσης του δικτύου ΧΤ με τον υποσταθμό ΜΤ/ΧΤ στην Ευρώπη



## 4.2 Τοπολογίες του δικτύου ΧΤ

Η γενίκευση της τοπολογίας και των χαρακτηριστικών του ηλεκτρικού δικτύου ΧΤ στο “last-mile”<sup>1</sup> τμήμα του είναι ιδιαίτερα δύσκολη, επειδή:

- i. Τόσο η τοπολογία όσο και τα χαρακτηριστικά του στο “last-mile” τμήματος του δικτύου ΧΤ μεταβάλλονται συνεχώς
- ii. δεν υπάρχει αναλυτική καταγραφή του δικτύου ΧΤ από τους παρόχους ηλεκτρικής ενέργειας [24].



Σχήμα 4.2 Τεχνολογία PLC σε περιοχές διαφορετικής πληθυσμιακής πυκνότητας κατοίκησης [4]

Η τοπολογία εξαρτάται έντονα από τα γεωγραφικά χαρακτηριστικά κάθε περιοχής και την πληθυσμιακή πυκνότητα [25] [26], ενώ τα στοιχεία που απαρτίζουν το δίκτυο (τύπος καλωδίων, μετασχηματιστές, κουτιά κλπ.) διαφέρουν από χώρα σε χώρα και εξαρτώνται από τις περιβαλλοντικές συνθήκες και την παλαιότητα του ΗΔ [27]. Στη γενική περίπτωση διακρίνονται τρεις τηλεπικοινωνιακές τοπολογίες που είναι αντίστοιχες της τοπολογίας των γραμμών μεταφοράς του δικτύου ΧΤ:

- i. Τοπολογία δένδρου
- ii. Τοπολογία αστέρα
- iii. Τοπολογία αστέρα με τους SM μετρητές τοποθετημένους σε διαφορετικά επίπεδα των κτιρίων

## 4.3 Κατοικημένες περιοχές χαμηλής πληθυσμιακής πυκνότητας

### 4.3.1 Τοπολογία Δένδρου

Η τοπολογία δικτύου ΧΤ που συναντάται σε αραιοκατοικημένες περιοχές είναι η τοπολογία δένδρου. Τα κυριότερα χαρακτηριστικά αυτού του είδους δικτύου ΧΤ και τυπικές τιμές τους παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1.

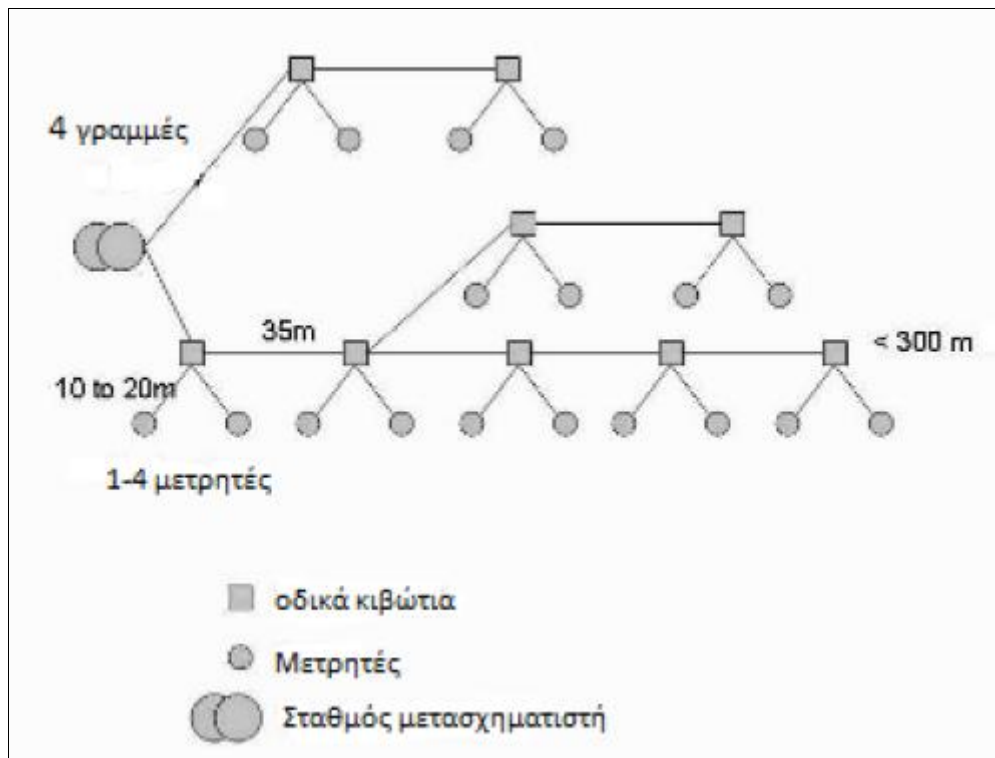
<sup>1</sup> Last mile τμήμα του ΗΔ : Το τμήμα του δικτύου ΧΤ μεταξύ του υποσταθμού ΜΤ/ΧΤ και των τελικών χρηστών

Χαρακτηριστικό του ΗΔ	Μέση τιμή
Αριθμός μετασχηματιστών ΜΤ/ΧΤ ανά Υ/Σ	1
Αριθμός κατοικιών ανά μετασχηματιστή ΜΤ/ΧΤ	40-160
Αριθμός γραμμών ανά μετασχηματιστή ΜΤ/ΧΤ	4
Συνολικό μήκος γραμμής ΧΤ	<300m
Αριθμός οδικών κιβωτίων σύνδεσης/ασφαλειών ανά γραμμή	<9

Πίνακας 4.1: Χαρακτηριστικά δικτύου τοπολογίας δέντρου-αραιοκατοικημένες περιοχές

Ενδεικτικό παράδειγμα αυτής της τοπολογίας είναι το δίκτυο που απεικονίζεται στο Σχήμα 4.3.

Η τοπολογία δέντρου είναι η χειρότερη από πλευράς καθυστέρησης μετάδοσης διότι ο αριθμός των βημάτων (hops) του δικτύου αυξάνει αναλογικά με την τάξη μεγέθους του δικτύου. [26]



Σχήμα 4.3: Παράδειγμα τοπολογίας δέντρου τμήματος δικτύου ΧΤ σε αραιοκατοικημένες περιοχές

#### 4.4 Κατοικημένες περιοχές υψηλής πληθυσμιακής πυκνότητας

##### 4.4.1 Τοπολογία Αστέρα

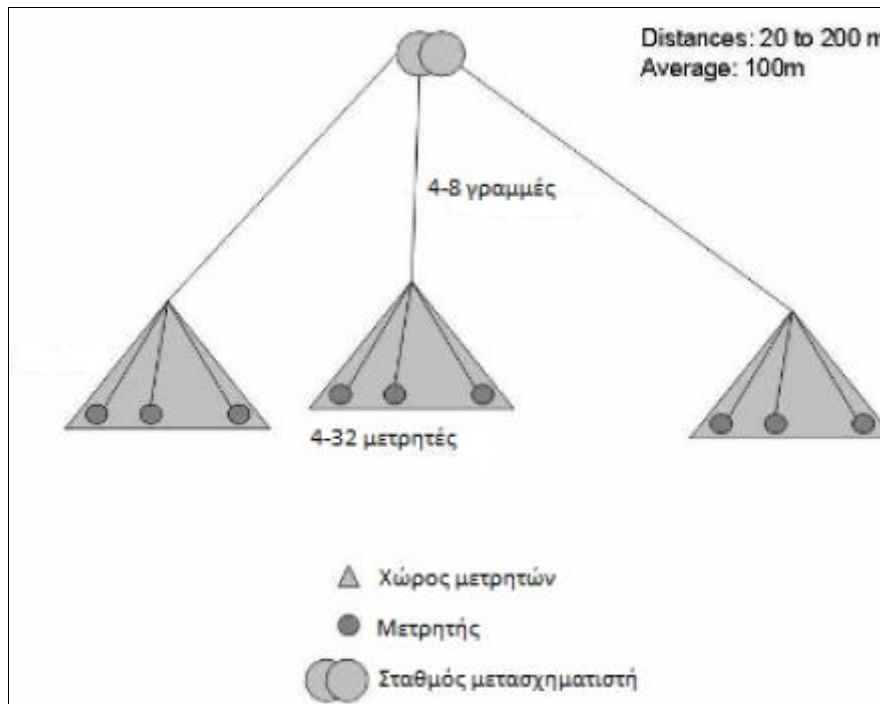
Σε περιοχές υψηλής πληθυσμιακής πυκνότητας, κάθε κτίριο εξυπηρετεί συνήθως πολλούς χρήστες και οι μετρητές τοποθετούνται σε ειδικό χώρο. Τα κυριότερα χαρακτηριστικά αυτού του είδους δικτύου ΧΤ και τυπικές τιμές τους παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.2.

Χαρακτηριστικό του ΗΔ	Μέση τιμή
Αριθμός μετασχηματιστών ΜΤ/ΧΤ ανά Υ/Σ	1-2
Αριθμός κατοικιών ανά μετασχηματιστή ΜΤ/ΧΤ	200

Αριθμός γραμμών ανά μετασηματιστή ΜΤ/ΧΤ	4-8
Συνολικό μήκος γραμμής	100m (20m-200m)
Αριθμός οδικών κιβωτίων σύνδεσης/ασφαλειών ανά γραμμή	1
Αριθμός μετρητών ανά μετασηματιστή ΜΤ/ΧΤ	4-16
Αριθμός κατοικιών ανά μετρητή	32

**Πίνακας 4.2 Χαρακτηριστικά δικτύου τοπολογίας αστέρα σε πυκνοκατοικημένες περιοχές**

Ενδεικτικό παράδειγμα αυτής της τοπολογίας είναι το δίκτυο που παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.4.



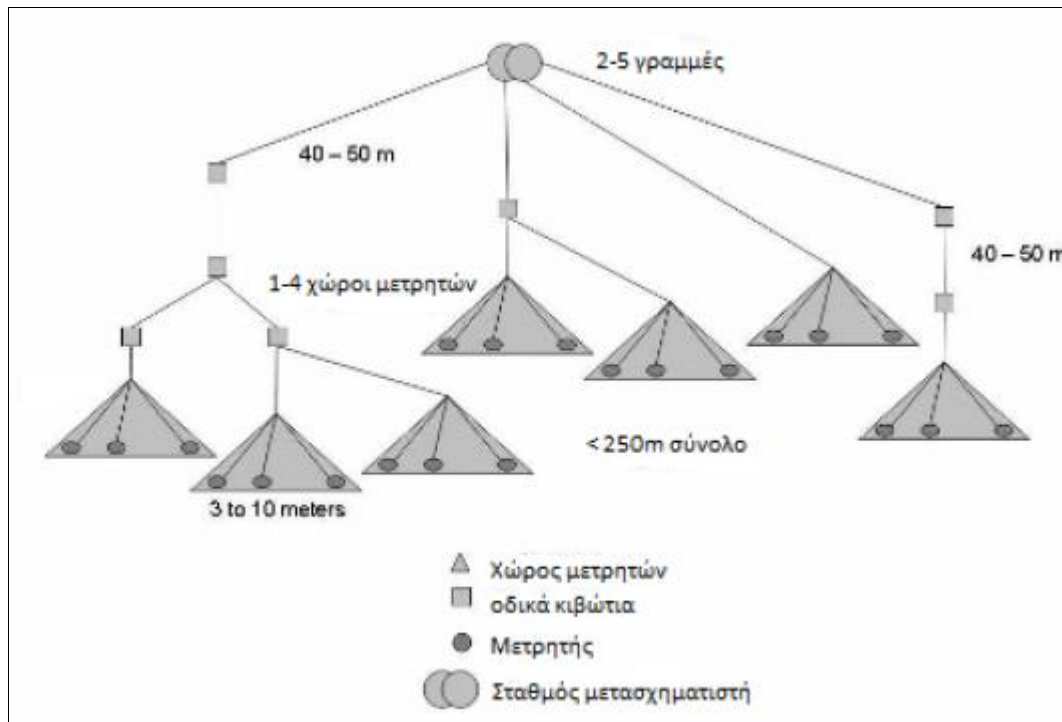
**Σχήμα 4.4 Παράδειγμα τοπολογίας αστέρα τμήματος δικτύου ΧΤ σε πυκνοκατοικημένες περιοχές**

#### 4.4.2 Τοπολογία Δένδρου

Εκτός από την τοπολογία αστέρα, στο δίκτυο ΧΤ πυκνοκατοικημένων περιοχών εμφανίζεται και η τοπολογία δένδρου. Στον Πίνακα 4.3 παρουσιάζονται τυπικές τιμές των χαρακτηριστικών του ΗΔ για τοπολογία δένδρου. Στο Σχήμα 4.4 απεικονίζεται ένα ενδεικτικό παράδειγμα της τοπολογίας αυτής.

Χαρακτηριστικό του ΗΔ	Μέση τιμή
Αριθμός μετασηματιστών ΜΤ/ΧΤ ανά Υ/Σ	1-2
Αριθμός κατοικιών ανά μετασηματιστή ΜΤ/ΧΤ	150
Αριθμός γραμμών ανά μετασηματιστή ΜΤ/ΧΤ	2-5
Συνολικό μήκος γραμμής	40m - 250m
Αριθμός οδικών κιβωτίων σύνδεσης/ασφαλειών ανά γραμμή	2-8
Αριθμός μετρητών ανά μετασηματιστή ΜΤ/ΧΤ	16-32
Αριθμός κατοικιών ανά μετρητή	12

**Πίνακας 4.3 Χαρακτηριστικά δικτύου τοπολογίας δένδρου σε πυκνοκατοικημένες περιοχές**



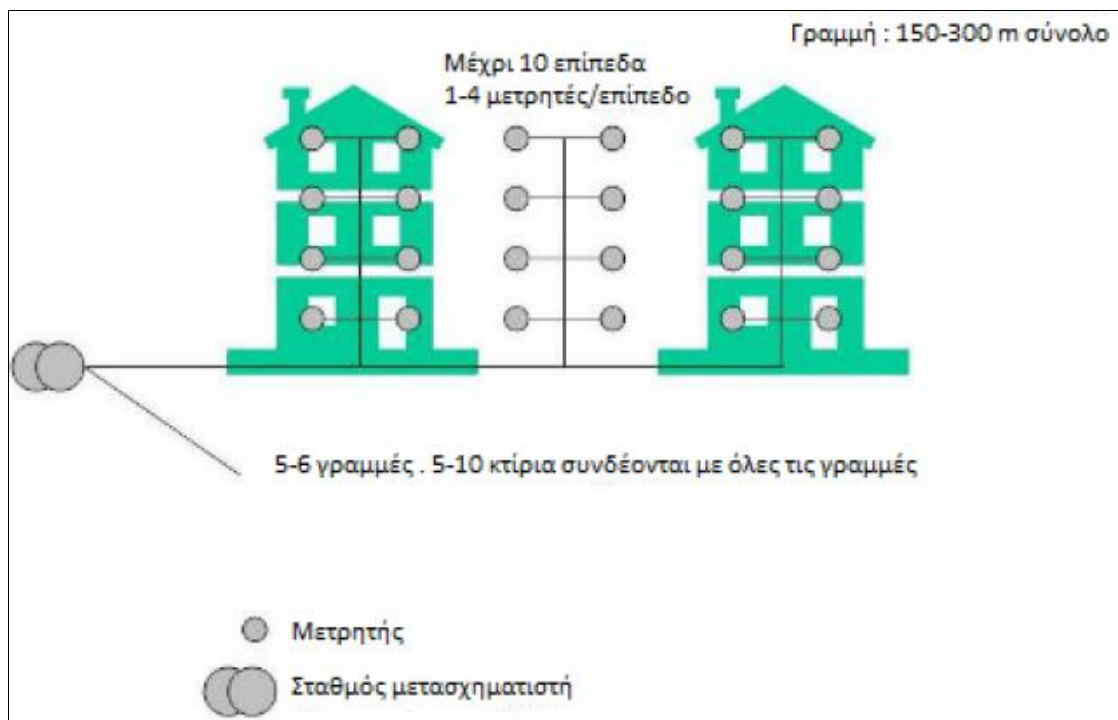
Σχήμα 4.5 Παράδειγμα τοπολογίας δένδρου τμήματος δικτύου ΧΤ σε πυκνοκατοικημένες περιοχές

#### 4.4.3 Τοπολογία αστέρα με τους SM μετρητές τοποθετημένους σε διαφορετικά επίπεδα

Στην περίπτωση αυτή προκύπτει και πάλι τοπολογία αστέρα αλλά οι SM μετρητές δεν είναι τοποθετημένοι σε συγκεκριμένο χώρο κάθε κτιρίου αλλά σε διαφορετικά σημεία ή ορόφους του κτιρίου. Έτσι, η τοπολογία του ΗΔ διαφοροποιείται σε όλα της τα χαρακτηριστικά σε σχέση με την τοπολογία αστέρα που παρουσιάστηκε στην Ενότητα 4.4.1. Στον Πίνακα 4.4 παρουσιάζονται τυπικές τιμές των χαρακτηριστικών του ΗΔ για την τοπολογία αστέρα με τους μετρητές τοποθετημένους σε διαφορετικά επίπεδα ενώ στο Σχήμα 4.6 απεικονίζεται ένα τυπικό παράδειγμα της τοπολογίας αυτής.

Χαρακτηριστικό του ΗΔ	Μέση τιμή
Αριθμός μετασχηματιστών ΜΤ/ΧΤ ανά Υ/Σ	1-2
Αριθμός κατοικιών ανά μετασχηματιστή ΜΤ/ΧΤ	200
Αριθμός γραμμών ανά μετασχηματιστή ΜΤ/ΧΤ	5-6
Συνολικό μήκος γραμμής	150-300m
Αριθμός οδικών κιβωτίων σύνδεσης/ασφαλειών ανά γραμμή	1-2
Αριθμός μετρητών ανά μετασχηματιστή ΜΤ/ΧΤ	<100
Αριθμός κατοικιών ανά μετρητή	1-4

Πίνακας 4.4 Χαρακτηριστικά δικτύου τοπολογίας αστέρα με τους μετρητές τοποθετημένους σε επίπεδα σε πυκνοκατοικημένες περιοχές



Σχήμα 4.6 Παράδειγμα τοπολογίας αστέρα με τους μετρητές τοποθετημένους σε διαφορετικά επίπεδα τμήματος δικτύου ΧΤ σε πυκνοκατοικημένες περιοχές

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΕΥΦΥΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

### 5.1 Σκοπός των ευφύων συστημάτων μέτρησης ηλεκτρικής ενέργειας

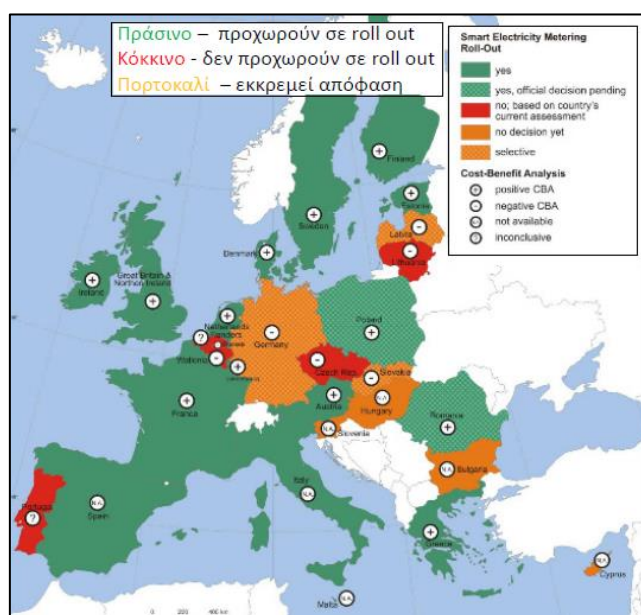
Η εγκατάσταση ευφύων συστημάτων μέτρησης ηλεκτρικής ενέργειας στο ηλεκτρικό δίκτυο επιτρέπει την αντικατάσταση της επιτόπιας ανάγνωσης των μετρητών με τη λήψη μετρήσεων από απόσταση και επιτρέπει την αμφίδρομη επικοινωνία μεταξύ παρόχου και καταναλωτή. Επιπλέον καθίσταται δυνατός ο εντοπισμός και η πρόληψη της ρευματοκλοπής και η υποστήριξη προηγμένων συστημάτων τιμολόγησης. [3]

### 5.2 Οφέλη της έξυπνης μέτρησης

Η έξυπνη μέτρηση έχει πολλαπλά οφέλη για τους καταναλωτές, τους διαχειριστές του ΗΔ και τους προμηθευτές ηλεκτρικής ενέργειας. Οι καταναλωτές απολαμβάνουν καλύτερη ποιότητα υπηρεσιών, μεγαλύτερη ευελιξία και ποικιλία τιμολογίων και ακριβείς μετρήσεις και τιμολογήσεις. Ο προμηθευτές μπορούν να βελτιστοποιήσουν το κόστος παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας με μετατόπιση των αιχμών ζήτησης και να μειώσουν το ισοζύγιο ενέργειας χάρη στις καλύτερες προβλέψεις που είναι σε θέση να κάνουν. Επιπλέον, έχουν τη δυνατότητα να παρέχουν νέες υπηρεσίες για ειδικές απαιτήσεις (π.χ. προπληρωμή). Οι διαχειριστές αποκτούν μεγαλύτερες δυνατότητες για καλύτερο έλεγχο και εποπτεία του δικτύου καθώς και δυνατότητα μείωσης του κόστους χάρη στην αυτοματοποίηση των υπηρεσιών. Τέλος, γίνεται ευκολότερος ο εντοπισμός σφαλμάτων δικτύου και ρευματοκλοπών και η ενσωμάτωση της διασπαρμένης παραγωγής. [3]

### 5.3 Εφαρμογή των ευφύων συστημάτων μέτρησης στην Ευρώπη

Στις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης έχουν επενδυθεί πάνω από €4 δισ. σε εγκαταστάσεις έξυπνων μετρητών και εκτιμάται ότι έως το 2020 θα έχουν διατεθεί τουλάχιστον €30 δισ. Στην Ελλάδα, έχουν εφαρμοστεί μικρά πιλοτικά προγράμματα τηλεμέτρησης στην Λάρισα και στο Λαύριο. Κύριες τεχνολογίες επικοινωνίας είναι οι PLC και το GPRS.



Σχήμα 5.1: Χάρτης των προγραμμάτων εγκατάστασης ευφύων μετρητών στην Ευρώπη

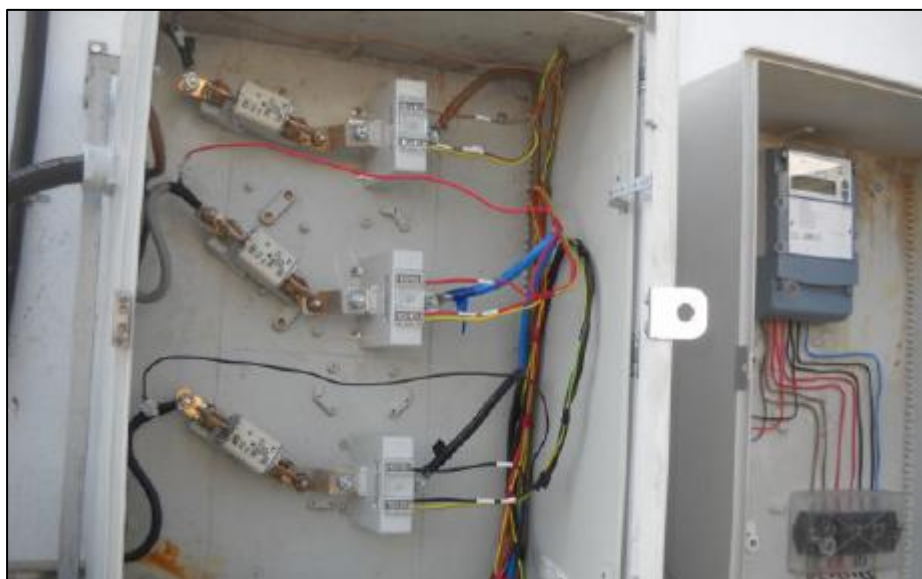
## 5.4 Μετρητικές διατάξεις

### 5.4.1 Περιγραφή τυπικής μετρητικής διάταξης

Ως μετρητική διάταξη ορίζεται το σύνολο του ηλεκτρομηχανολογικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού που απαιτείται για την ακριβή και αξιόπιστη μέτρηση της ηλεκτρικής ενέργειας.

Ο εξοπλισμός αποτελείται από: [3]

- i. Μετρητή κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας
- ii. Μετασχηματιστές των οργάνων μέτρησης
- iii. Εξοπλισμό επικοινωνίας
- iv. Λοιπό εξοπλισμό (Κιβώτιο δοκιμών, πίνακας ή ερμάριο, καλώδια κλπ.)



Σχήμα 5.2 Τυπική μετρητική διάταξη

### 5.4.2 Έξυπνοι μετρητές

Ο έξυπνος μετρητής είναι ένας μετρητής αμφίδρομης επικοινωνίας, ο οποίος καταγράφει σε πραγματικό χρόνο την κατανάλωση ενέργειας και έχει δυνατότητα αποστολής δεδομένων και λήψης εντολών. Ο έξυπνος μετρητής: [3]

- i. Επικοινωνεί με το διαχειριστή του ΗΔ για τη λήψη μετρητικών δεδομένων, τη βελτιστοποίηση του ελέγχου του δικτύου διανομής και για τη διαχείριση σφαλμάτων
- ii. Επιτρέπει την εφαρμογή πολυζωνικών τιμολογίων από τον προμηθευτή ηλεκτρικής ενέργειας
- iii. Ενημερώνει τον καταναλωτή για την κατανάλωσή του, την ορθολογική χρήση και την εξοικονόμηση ενέργειας (μέσω π.χ. In Home Display)

Οι έξυπνοι μετρητές συνδέονται στο ηλεκτρικό δίκτυο είτε απευθείας είτε μέσω μετασχηματιστή έντασης. Διαθέτουν θύρα οπτικής και ηλεκτρικής επικοινωνίας για τοπική

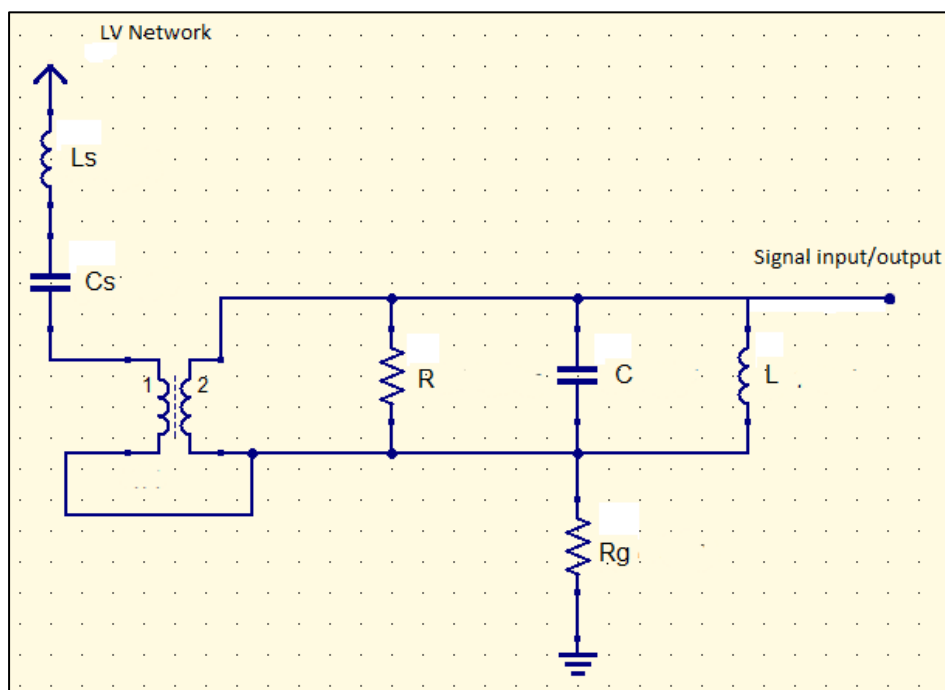
και απομακρυσμένη μετάδοση δεδομένων και ελέγχονται από εσωτερικό ρολόι πραγματικού χρόνου.



Σχήμα 5.3: Έξυπνος μετρητής

### 5.4.3 Κυκλωματικό μοντέλο έξυπνου μετρητή

Η έγχυση του σήματος πληροφορίας στη γραμμή μεταφοράς γίνεται μέσω μιας συσκευής σύζευξης. Το ισοδύναμο κύκλωμα μιας συσκευής σύζευξης χωρητικού τύπου, μεταξύ μιας φάσης και γης παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.4. [28] Το κύκλωμα αποτελείται από ένα δίκτυο RLC, ένα μετασχηματιστή απομόνωσης και ένα υψιπερατό φίλτρο.



Σχήμα 5.4: Το ισοδύναμο κύκλωμα μιας συσκευής σύζευξης χωρητικού τύπου

Το σήμα πληροφορίας εγχέεται στο σημείο Signal input/output και περνά από το δίκτυο RLC όπως αυτό φαίνεται στο Σχήμα 5.4. Το κύκλωμα RLC ακολουθείται από έναν μετασχηματιστή απομόνωσης, ο οποίος λειτουργεί στη ζώνη συχνοτήτων 3-500kHz. Μεταξύ



του μετασχηματιστή απομόνωσης και του δικτύου ΧΤ παρεμβάλεται ένα υψιπερατό φίλτρο (Ls, Cs), το οποίο απορρίπτει το σήμα ισχύος 50Hz του δικτύου και επιτρέπει τη διέλευση μόνο του σήματος πληροφορίας. Τυπικές τιμές των στοιχείων του ισοδυναμού κυκλώματος παρέχονται στον Πίνακα 5.1 [11].

Στοιχείο	Τιμή	
Ls	68 $\mu$ H	
Cs	82 nF	
R	30 k $\Omega$	
L	165 $\mu$ H	
C	14 nF	
Μετασχηματιστής	Λόγος μετασχηματισμού	1:1
	Αντίσταση Μαγνήτισης	75 $\Omega$
	Αυτεπαγωγή	450 $\mu$ H

Πίνακας 5.1: Τιμές των στοιχείων του κυκλώματος του Σχήμα 5.4

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. Η ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΜΙΑΣ ΓΡΑΜΜΗΣ ΑΝΑΧΩΡΗΣΗΣ

Στο κεφάλαιο αυτό, αρχικά εξετάζεται η συμπεριφορά δικτύματος ενός κλάδου, δηλαδή μοναδικής γραμμής αναχώρησης από τον υποσταθμό ΜΤ/ΧΤ, ως συνάρτηση της απόστασης μεταξύ συγκεντρωτή και SM κόμβου. Στη συνέχεια, εξετάζεται η επίδραση του πλήθους των διακλαδώσεων που εμφανίζονται μεταξύ συγκεντρωτή και SM κόμβου στη συνάρτηση μεταφοράς.

### 6.1 Μεθοδος εργασίας

#### 6.1.1 Μορφή των δικτυωμάτων που χρησιμοποιήθηκαν

Για την εκτίμηση της επίδρασης της απόστασης και του πλήθους διακλαδώσεων στη συνάρτηση μεταφοράς χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα προσομοίωσης κυκλωμάτων QUCS (Quite Universal Circuit Simulator). Κατασκευάστηκαν δικτυώματα αποτελούμενα από γραμμές μεταφοράς, μια πηγή τάσης η οποία ορίζει το σημείο έγχυσης του σήματος και τα μοντέλα της διάταξης σύζευξης του έξυπνου μετρητή. Για τις συσκευές σύζευξης χρησιμοποιήθηκε το ίδιο μοντέλο τόσο στην πλευρά του SM κόμβου όσο και στην πλευρά του συγκεντρωτή, ακολουθώντας τη μεθοδολογία του [28].

Για την εκτίμηση της επίδρασης της απόστασης στη συνάρτηση μεταφοράς της γραμμής μεταφοράς χρησιμοποιήθηκαν δικτυώματα όπως αυτό του Σχήματος 6.1. Οι προσομοιώσεις επαναλήφθηκαν για τιμές απόστασης από 20m έως 200m.

Για την εκτίμηση της επίδρασης του πλήθους διακλαδώσεων, προσομοιώθηκε η λειτουργία τοπολογιών, όπως αυτή που απεικονίζεται στο Σχήμα 6.3, διατηρώντας την συνολική απόσταση μεταξύ συγκεντρωτή και SM κόμβου σταθερή. Εξετάστηκαν οι περιπτώσεις όπου μεταξύ συγκεντρωτή και SM κόμβου παρεμβάλλονται από 1 έως και 20 συνδέσεις καταναλωτών. Η διαδικασία επαναλήφθηκε για διαφορετικές συνολικές αποστάσεις συγκεντρωτή-καταναλωτή.

#### 6.1.2 Παράμετροι των γραμμών μεταφοράς που χρησιμοποιήθηκαν

Οι γραμμές μεταφοράς που προσομοιώθηκαν δεν είναι ιδανικές. Για την προσομοίωσή του χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο γραμμής RLCG που παρέχεται από το λογισμικό QUCS. Πρόκειται για μοντέλο γραμμής μεταφοράς κατανεμημένων στοιχείων όπως αυτό που έχει περιγραφεί στην ενότητα 2.2.1. Οι τιμές για την ειδική διαμήκη αντίσταση (R), την ειδική διαμήκη αυτεπαγωγή (L), την ειδική εγκάρσια χωρητικότητα (C) και την ειδική εγκάρσια αγωγιμότητα (G) δίνονται στον Πίνακα 6.1 και προέρχονται από το [11].

	Κύριος κλάδος	Διακλαδώσεις προς καταναλωτές
R [Ohm/m]	0.014	0.0065
L [μH/m]	0.86	0.59
C [pF/m]	13.6	38
G [S/m]	0	0

Πίνακας 6.1 Παράμετροι γραμμών μεταφοράς για τις προσομοιώσεις [11]

Οι τιμές των R και G προκύπτουν από τις εξισώσεις ( 2.9 ) και ( 2.10 ) για f=250kHz. Λόγω περιορισμού του λογισμικού QUCS δεν ήταν δυνατή η μεταβολή των παραμέτρων αυτών συναρτήσει της συχνότητας. Όμως για τη ζώνη NB-PLC [3kHz-500kHz] η παραδοχή αυτή δεν συνιστά σημαντικό συμβιβασμό, καθώς η μεταβολή των παραμέτρων στη ζώνη αυτή είναι αμελητέα.

Η ειδική απόσβεση α υπολογίζεται σε 0.007dB/m για τα καλώδια του κύριου κλάδου και σε 0.001dB/m για τα καλώδια διακλαδώσεων προς τους καταναλωτές. Η σταθερά φάσης β υπολογίζεται επίσης από την σε 1rad/m και σε 0.5rad/m για τον κύριο κλάδο και τις διακλαδώσεις αντίστοιχα.

### 6.1.3 Εκτίμηση της συνάρτησης μεταφοράς

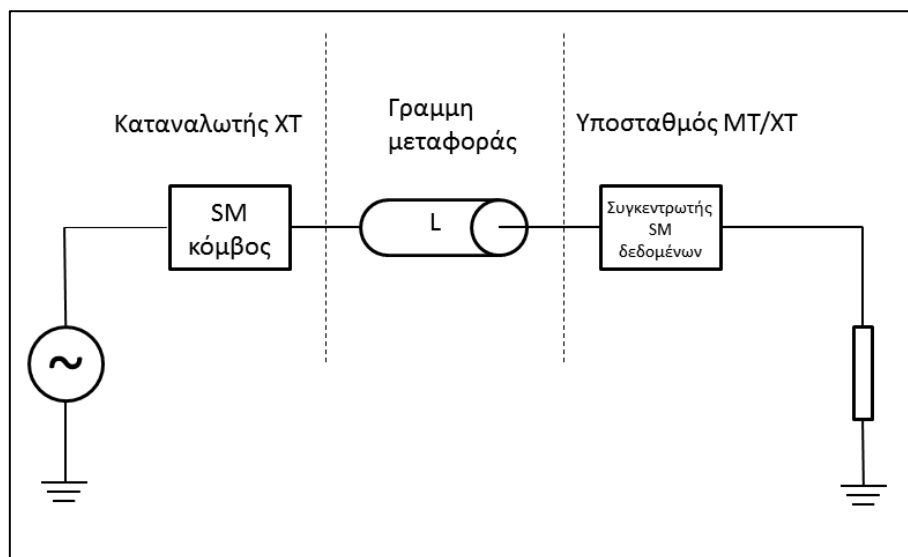
Η λειτουργία των δικτυωμάτων συναρτήσει της συχνότητας προσομοιώθηκε με χρήση του ελεύθερου λογισμικού QUCS. Πραγματοποιήθηκαν «σαρώσεις συχνότητας» (frequency sweeps) 1900 σημείων στη ζώνη NB-PLC (3kHz-500kHz). Κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης λαμβάνονταν από το πρόγραμμα μετρήσεις τάσης στο σημείο έγχυσης και στο σημείο λήψης του σήματος. Η συνάρτηση μεταφοράς ισχύος υπολογίζεται αριθμητικά, για κάθε συχνότητα από τη σχέση:

$$|H(f)| = \left| \frac{V_{\text{σημείο λήψης}}(f)}{V_{\text{σημείο έγχυσης}}(f)} \right|^2 \quad (6.1)$$

Η επεξεργασία των αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκε με χρήση του πακέτου MATLAB.

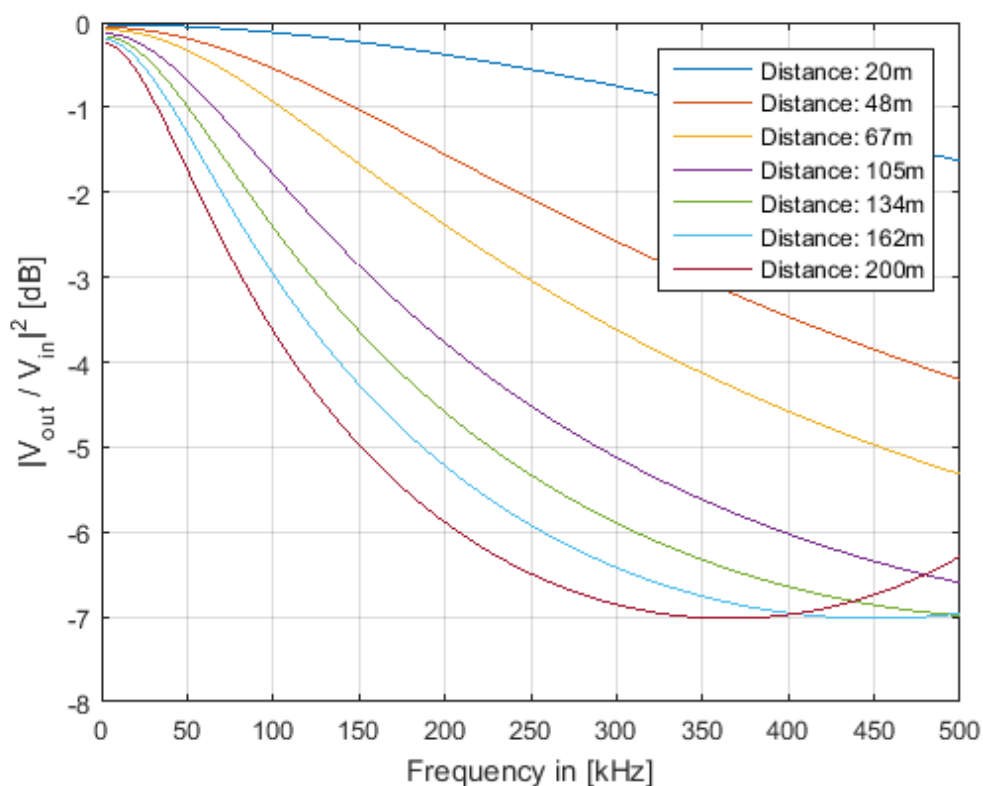
### 6.2 Η επίδραση της απόστασης συγκεντρωτή-καταναλωτή

Αρχικά, εξετάστηκε η επίδραση της απόστασης συγκεντρωτή-SM κόμβου στη συνάρτηση μεταφοράς του διαύλου. Για το σκοπό αυτό προσομοιώθηκαν δικτυώματα της μορφής που παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.1. και υπολογίστηκε η συνάρτηση μεταφοράς.



Σχήμα 6.1 Δικτύωμα για την εξέταση της επίδρασης της απόστασης στη συνάρτηση μεταφοράς

Η συνάρτηση μεταφοράς του δικτυώματος του Σχήματος 6.1, για διάφορα μήκη της γραμμής μεταφοράς για τη ζώνη NB-PLC [3-500kHz] απεικονίζεται στο Σχήμα 6.2.



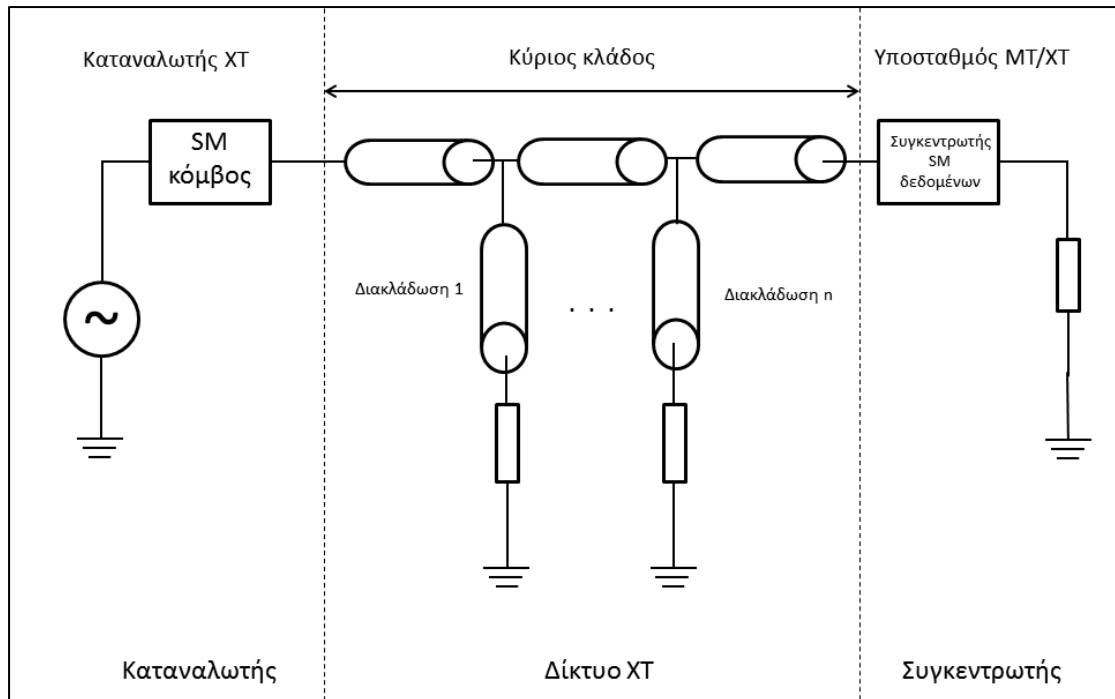
Σχήμα 6.2 Συνάρτηση μεταφοράς του δικτυώματος του Σχήματος 6.1 για διάφορες αποστάσεις στη ζώνη NB-PLC

Είναι φανερό ότι η αύξηση της απόστασης συγκεντρωτή-SM κόμβου, προκαλεί μείωση του πλάτους της συνάρτησης μεταφοράς.

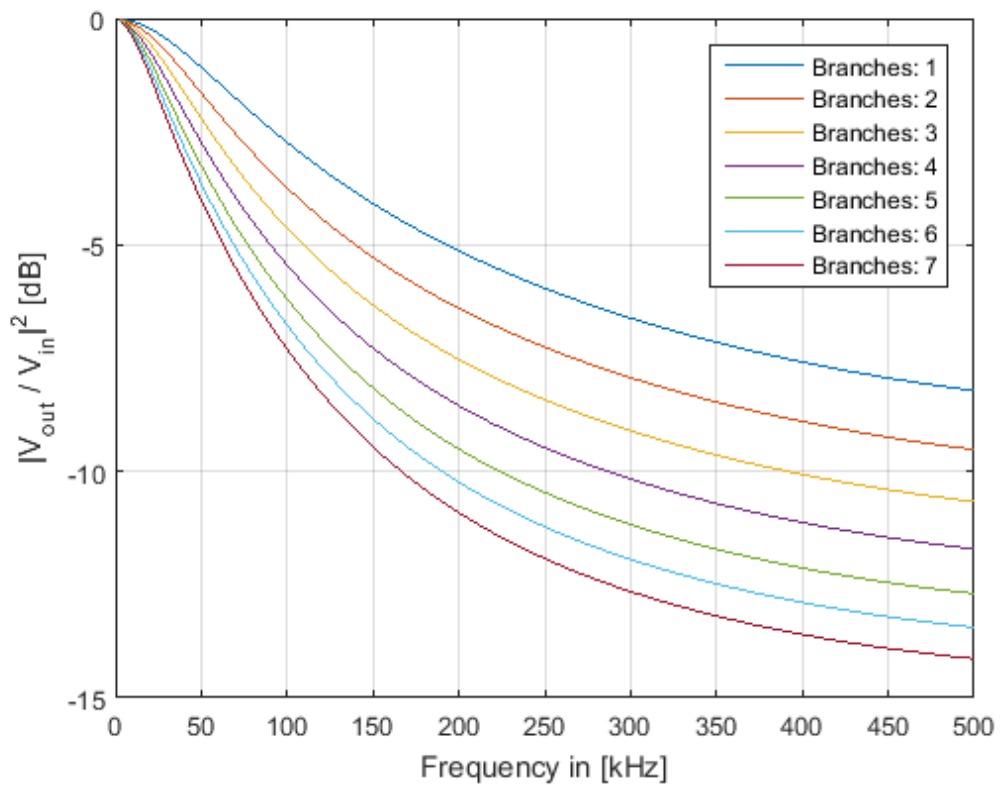
### 6.3 Επίδραση του πλήθους των διακλαδώσεων

Για την εξέταση της επίδρασης του πλήθους διακλαδώσεων που παρεμβάλλονται μεταξύ συγκεντρωτή και SM κόμβου στη συνάρτηση μεταφοράς του διαύλου, προσομοιώθηκαν δικτυώματα της μορφής που απεικονίζεται στο Σχήμα 6.3. Στη συνέχεια, υπολογίστηκε η συνάρτηση μεταφοράς ισχύος με βάση την εξίσωση ( 6.1 ).

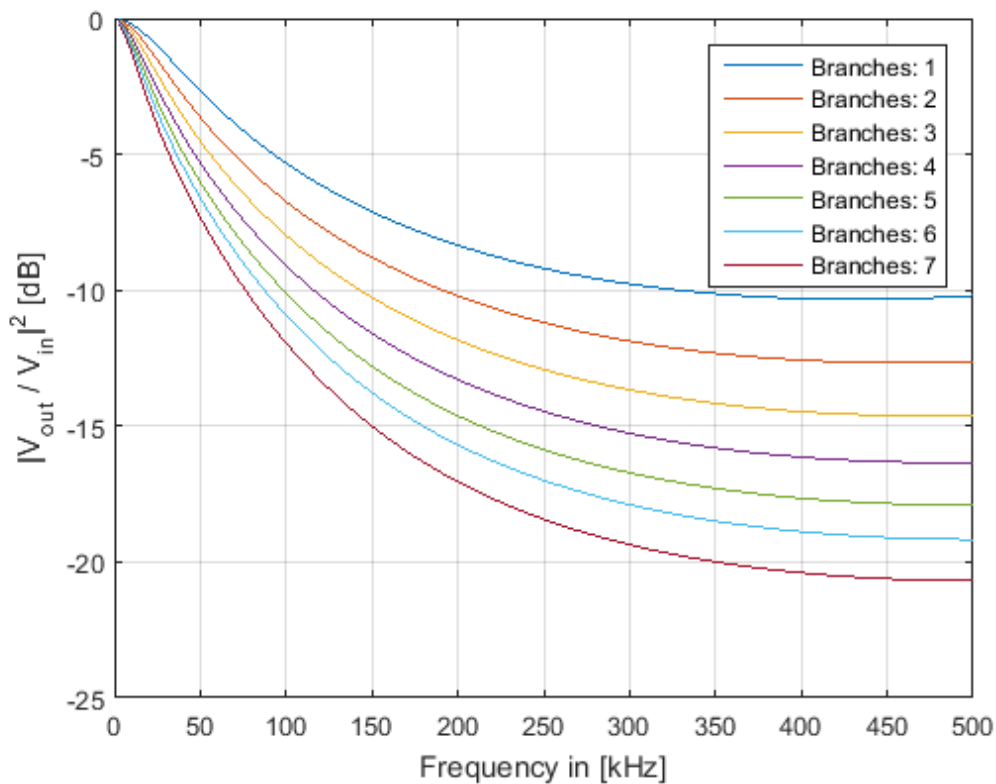
Ενδεικτικά, για σταθερή συνολική απόσταση 100m μεταξύ συγκεντρωτή και SM κόμβου, η συνάρτηση μεταφοράς στη ζώνη NB-PLC απεικονίζεται στο Σχήμα 6.4. Είναι φανερό ότι η αύξηση του πλήθους διακλαδώσεων προκαλεί σημαντική μείωση στο πλάτος της συνάρτησης μεταφοράς ισχύος.



Σχήμα 6.3 Δικτύωμα για την εξέταση της επίδρασης του πλήθους των διακλαδώσεων στη συνάρτηση μεταφοράς



Σχήμα 6.4 Συνάρτηση μεταφοράς του δικτύωματος του Σχήματος 6.3 για διάφορα πλήθη διακλαδώσεων στη ζώνη NB-PLC για απόσταση 100m



Σχήμα 6.5 Συνάρτηση μεταφοράς του δικτύματος του Σχήματος 6.3 για διάφορα πλήθη διακλαδώσεων στη ζώνη NB-PLC για απόσταση 200m

#### 6.4 Συμπεράσματα

Με βάση τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που αφορούν μια γραμμή αναχώρησης, προκύπτει ότι η εξασθένηση του SM σήματος αυξάνεται σημαντικά καθώς αυξάνεται η συχνότητα λειτουργίας, η απόσταση SM κόμβου από το συγκεντρωτή SM δεδομένων και το πλήθος των διακλαδώσεων που παρεμβάλλονται και που εμφανίζουν απώλειες ισχύος.

Η αύξηση της εξασθένησης των SM σημάτων καθώς αυξάνονται είτε η συχνότητα λειτουργίας είτε η απόσταση SM κόμβου και SM συγκεντρωτή οφείλονται στην εκθετική συνάρτηση της εξασθένησης από τα μεγέθη αυτά. Όταν υπάρχουν διακλαδώσεις μεταξύ SM κόμβου και συγκεντρωτή, το SM σήμα δεν μεταδίδεται μόνο κατά την επιθυμητή διαδρομή αλλά ακολουθεί και όλες τις δυνατές διαδρομές που οφείλονται στις διακλαδώσεις που παρεμβάλλονται μεταξύ SM κόμβου και SM συγκεντρωτή. Αποτέλεσμα αυτών είναι η εμφάνιση σημαντικής πρόσθετης εξασθένησης σε σχέση με την περίπτωση απουσίας διακλαδώσεων.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7. Η ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΤΟΠΟΛΟΓΙΩΝ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΧΤ

Στο κεφάλαιο αυτό, αρχικά εξετάζεται η συμπεριφορά των διάφορων δυνατών τοπολογιών του ηλεκτρικού δικτύου ΧΤ ως προς τη συχνότητα, όπως αυτές παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 4. Για κάθε τοπολογία προσομοιώνεται η μέση και η χειρότερη τηλεπικοινωνιακά περίπτωση και υπολογίζεται η συνάρτηση μεταφοράς στη ζώνη NB-PLC. Στη συνέχεια, για κάθε τοπολογία πραγματοποιείται σειρά προσομοιώσεων για διαφορετικές τιμές των παραμέτρων και με στατιστικό τρόπο εξάγεται η μέση συνάρτηση μεταφοράς κάθε τοπολογίας.

### 7.1 Προσδιορισμός μέσης και χειρότερης περίπτωσης τοπολογίας

Για να προσδιοριστούν τα χαρακτηριστικά της μέσης περίπτωσης τοπολογίας έγινε αναδρομή στη βιβλιογραφία, όπως αυτή παρατίθεται για το Κεφάλαιο 4. Με βάση τα αποτελέσματα του Κεφάλαιο 4, ως χειρότερη περίπτωση θεωρείται η τοπολογία εκείνη στην οποία εμφανίζονται οι μεγαλύτερες δυνατές αποστάσεις SM συγκεντρωτή- SM κόμβου και ταυτόχρονα το μεγαλύτερο δυνατό πλήθος διακλαδώσεων.

### 7.2 Μεθοδολογία

Όπως αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 4, το ηλεκτρικό δίκτυο ΧΤ εμφανίζει διάφορες τοπολογίες με βάση την πληθυσμιακή πυκνότητα κάθε περιοχής. Διακρίνονται, έτσι, οι ακόλουθες περιπτώσεις τοπολογίας του ηλεκτρικού δικτύου ΧΤ:

1. Χαμηλή πληθυσμιακή πυκνότητα: τοπολογία δένδρου
2. Υψηλή πληθυσμιακή πυκνότητα:
  - i. Τοπολογία δένδρου
  - ii. Τοπολογία αστέρα
  - iii. Τοπολογία αστέρα με τους μετρητές τοποθετημένους σε διαφορετικά επίπεδα

Για κάθε είδος τοπολογίας πραγματοποιήθηκε προσομοίωση με χρήση του λογισμικού Qucs για τη μέση και τη χειρότερη περίπτωση.

### 7.3 Περιοχές χαμηλής πληθυσμιακής πυκνότητας

#### 7.3.1 Τοπολογία Δένδρου

Στην τοπολογία δένδρου, οι παράμετροι οι οποίες μεταβλήθηκαν είναι:

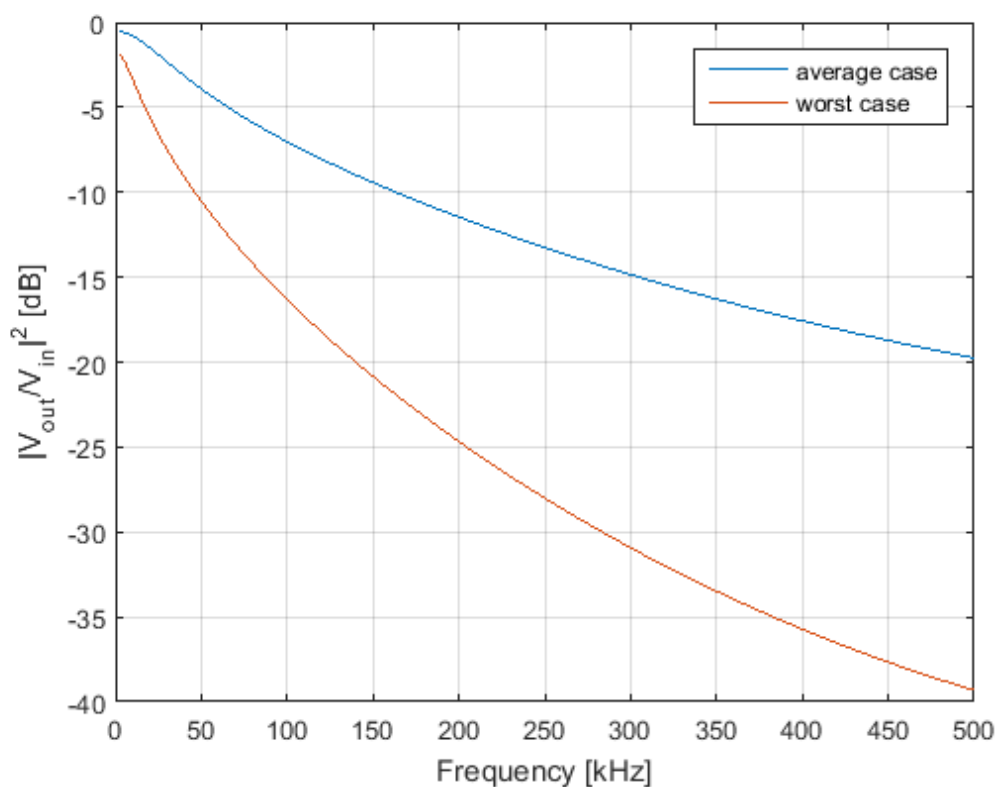
- i. Η συνολική απόσταση SM συγκεντρωτή- SM κόμβου
- ii. Το πλήθος των διακλαδώσεων που παρεμβάλλονται μεταξύ SM συγκεντρωτή και SM κόμβου
- iii. Το μήκος των διακλαδώσεων

Στον Πίνακα 7.1 παρατίθενται οι τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν για την τοπολογία δένδρου αραιοκατοικημένης περιοχής, για τη μέση και τη χειρότερη

τηλεπικοινωνιακά περίπτωση. Οι συναρτήσεις μεταφοράς που προκύπτουν για τη ζώνη NB-PLC σχεδιάστηκαν Σχήμα 7.1.

	Μέση περίπτωση	Χειρότερη περίπτωση
Αναχωρήσεις	4	4
Συνολικό μήκος αναχώρησης	150m	300m
Πλήθος διακλαδώσεων σε κάθε αναχώρηση	4	9
Μέσο μήκος διακλάδωσης	15m	20m

Πίνακας 7.1 Τιμές των παραμέτρων για την τοπολογία δένδρου σε αραιοκατοικημένη περιοχή, για τη μέση και τη χειρότερη περίπτωση



Σχήμα 7.1 Μέση και χειρότερη περίπτωση συνάρτησης μεταφοράς για τοπολογία δένδρου σε αραιοκατοικημένη περιοχή

## 7.4 Κατοικημένες περιοχές υψηλής πυκνότητας κατοίκησης

### 7.4.1 Τοπολογία Αστέρα

Στην τοπολογία αστέρα, οι παράμετροι οι οποίες μεταβλήθηκαν είναι:

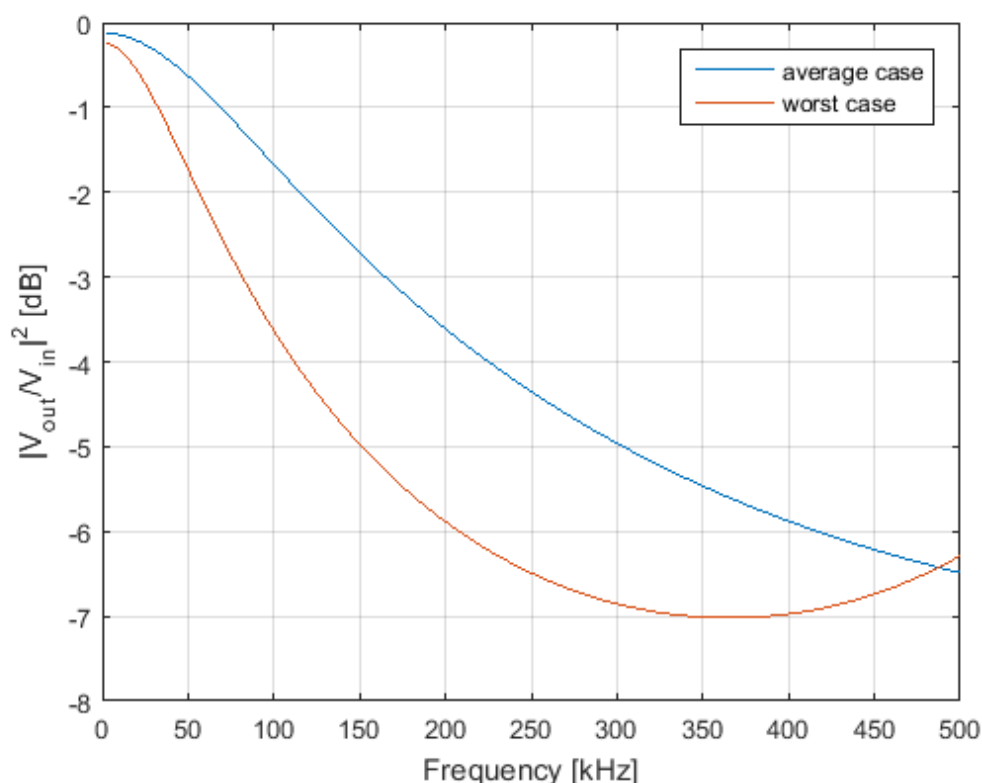
- i. Το πλήθος των αναχωρήσεων από τον υποσταθμό ΜΤ/ΧΤ
- ii. το συνολικό μήκος κάθε γραμμής ΧΤ, δηλαδή κάθε αναχώρησης



Οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση της μέσης και της χειρότερης περίπτωσης παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.2 Γραφικές απεικονίσεις των συναρτήσεων μεταφοράς για τη μέση και τη χειρότερη περίπτωση συνάρτησης μεταφοράς τοπολογίας αστέρα σε πυκνοκατοικημένη περιοχή παρουσιάζονται στο Σχήμα 7.2..

	Μέση περίπτωση	Χειρότερη περίπτωση
Αναχωρήσεις	6	8
Μήκος γραμμής	100m	200m

Πίνακας 7.2 Τιμές των παραμέτρων για την τοπολογία αστέρα σε πυκνοκατοικημένη περιοχή, για τη μέση και τη χειρότερη περίπτωση



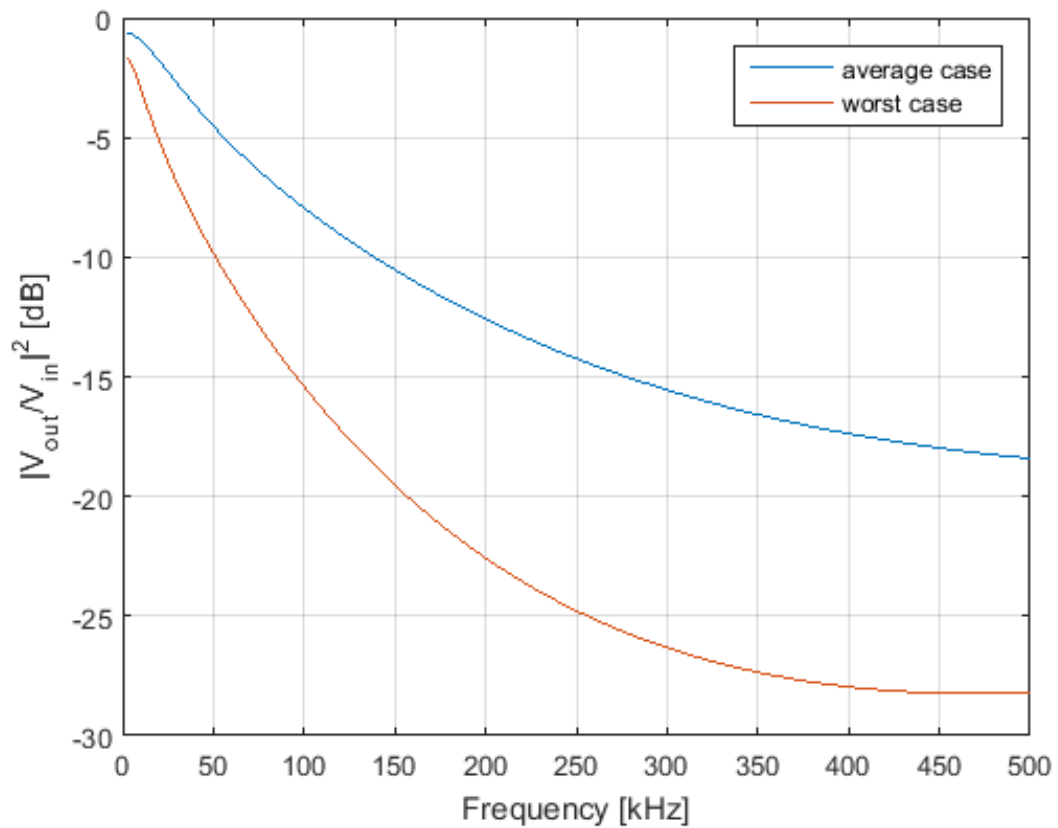
Σχήμα 7.2 Μέση και χειρότερη περίπτωση συνάρτησης μεταφοράς τοπολογίας αστέρα σε πυκνοκατοικημένη περιοχή

#### 7.4.2 Τοπολογία Δένδρου

Για την περίπτωση της τοπολογίας δένδρου σε πυκνοκατοικημένη περιοχή, οι παράμετροι που εξετάστηκαν παρατίθενται στον Πίνακα 7.3

	Μέση περίπτωση	Χειρότερη περίπτωση
Αναχωρήσεις	3	5
Συνολικό μήκος αναχώρησης	150m	250m
Πλήθος διακλαδώσεων σε κάθε αναχώρηση	5	8
Μέσο μήκος διακλάδωσης	40m	50m

Πίνακας 7.3 Τιμές των παραμέτρων για την τοπολογία δένδρου σε πυκνοκατοικημένη περιοχή, στην μέση και στην χειρότερη περίπτωση



Σχήμα 7.3 Μέση και χειρότερη περίπτωση συνάρτησης μεταφοράς τοπολογίας δένδρου σε πυκνοκατοικημένη περιοχή

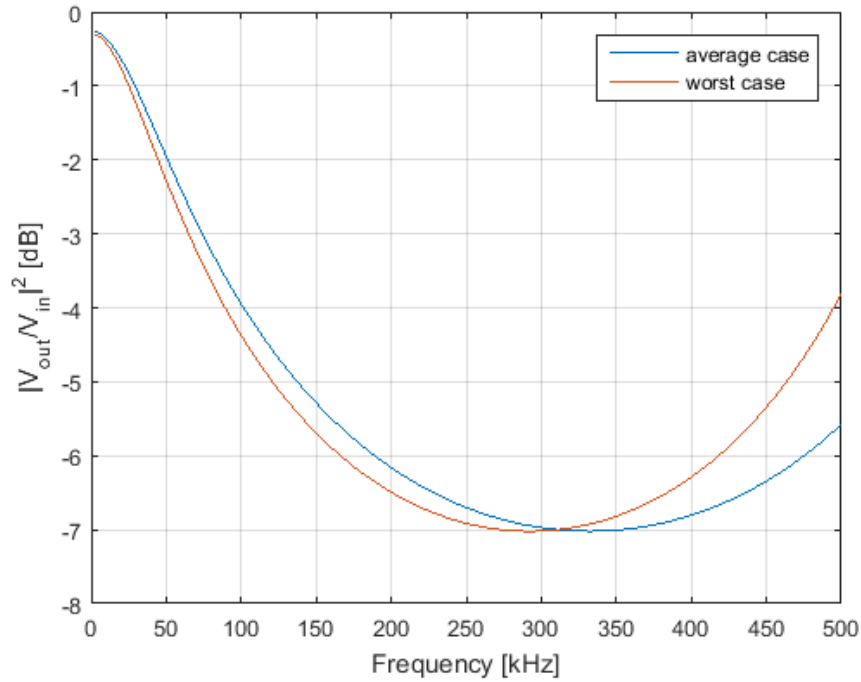
#### 7.4.3 Τοπολογία αστέρα με τους SM μετρητές τοποθετημένους σε διαφορετικά επίπεδα

Στην περίπτωση αυτή προκύπτει και πάλι τοπολογία αστέρα, όπως στην ενότητα 7.4.1, αλλά με διαφορετικές παραμέτρους, οι τιμές των οποίων παρέχονται στον Πίνακα 7.4.

	Μέση περίπτωση	Χειρότερη περίπτωση
Αναχωρήσεις	5	6
Μήκος γραμμής	220m	300m

Πίνακας 7.4 Τιμές των παραμέτρων για την τοπολογία αστέρα με τους SM μετρητές τοποθετημένους σε διαφορετικά επίπεδα σε πυκνοκατοικημένη περιοχή, για τη μέση και τη χειρότερη περίπτωση

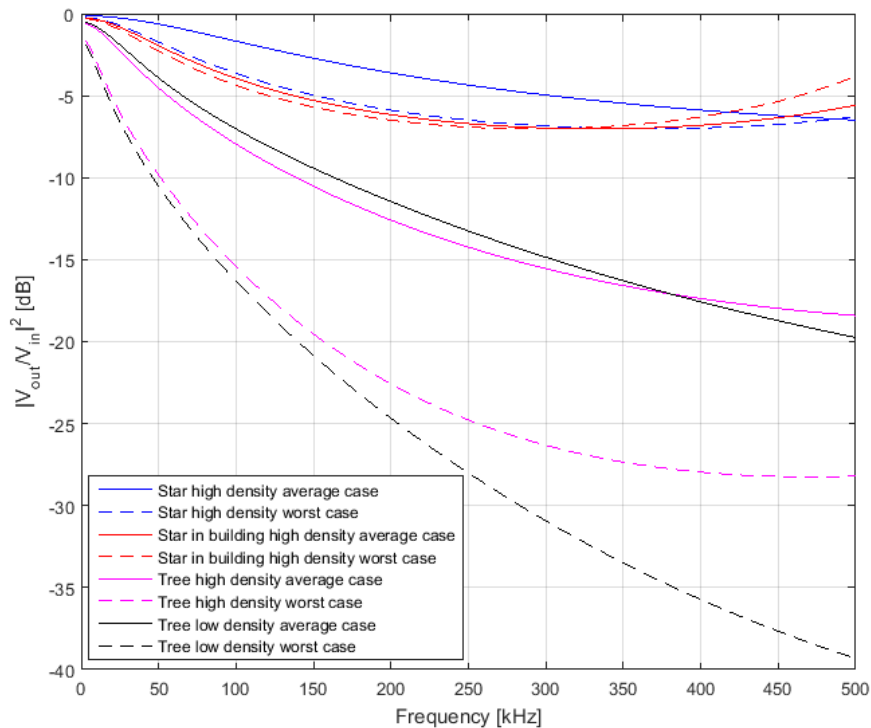
Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τη μέση και τη χειρότερη περίπτωση στο Σχήμα 7.4.



Σχήμα 7.4 Μέση περίπτωση συνάρτησης μεταφοράς τοπολογίας αστέρα με τους μετρητές σε πολλά επίπεδα, πυκνοκατοικημένη περιοχή

### 7.5 Σύγκριση των αποτελεσμάτων

Συγκριτικά, οι μέσες και οι χειρότερες περιπτώσεις των τεσσάρων δυνατών τοπολογιών SM δικτύων επί του ηλεκτρικού δικτύου ΧΤ απεικονίζονται στο Σχήμα 7.5. Η μέση περίπτωση κάθε τοπολογίας σχεδιάζεται με συνεχή γραμμή και η χειρότερη περίπτωση με διακεκομμένη γραμμή.



Σχήμα 7.5 Ενιαία παρουσίαση των συναρτήσεων μεταφοράς όλων των τοπολογιών ΗΔ ΧΤ

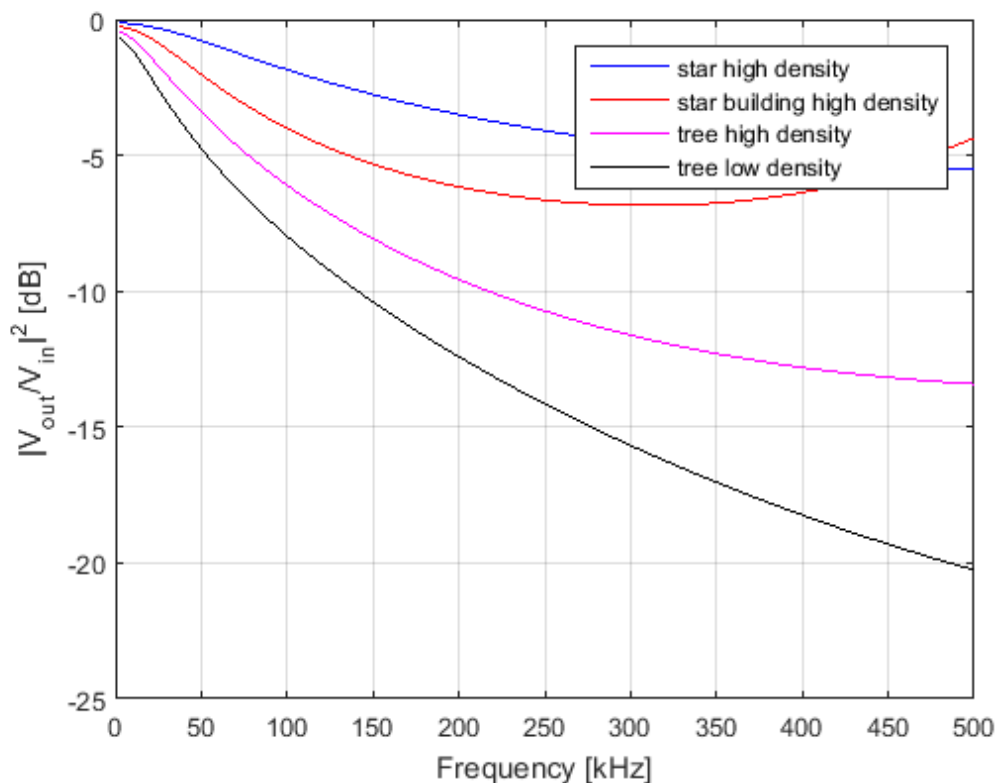
## 7.6 Εξαγωγή της μέσης συνάρτησης μεταφοράς με στατιστικό τρόπο

Υποθέτοντας ομοιόμορφη κατανομή πυκνότητας πιθανότητας των παραμέτρων κάθε τοπολογίας, με βάση τις ακραίες και τις μέσες τιμές που αναφέρονται στο Κεφάλαιο 4, πραγματοποιήθηκε σειρά προσομοιώσεων και υπολογίστηκε η μέση τιμή των αντίστοιχων αποτελεσμάτων. Οι συναρτήσεις μεταφοράς που προέκυψαν για τις τέσσερις τοπολογίες απεικονίζονται γραφικά στο Σχήμα 7.6.

Οι ακραίες τιμές των παραμέτρων για κάθε τοπολογία παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 7.5.

Πυκνότητα κατοίκησης	Τοπολογία	Αναχωρήσεις από μετασηματιστή	Απόσταση SM συγκεντρωτή-SM κόμβου	Πλήθος διακλαδώσεων ανά αναχώρηση	Μέσο μήκος διακλάδωσης
Χαμηλή	Δένδρο	4	έως 300m	έως 9	10m-20m
Υψηλή	Αστέρα	4-8	20m-200m	-	-
	Δένδρο	2-5	40m-250m	1-4	40m-50m
	Αστέρα (κτίριο)	5-6	150m-300m	-	-

Πίνακας 7.5 Οι ακραίες τιμές των παραμέτρων για την κάθε τοπολογία



Σχήμα 7.6. Οι συναρτήσεις μεταφοράς που προέκυψαν με στατιστικό τρόπο για τις τέσσερις τοπολογίες

## 7.7 Σχολιασμός των αποτελεσμάτων

Από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τις διάφορες τοπολογίες του δικτύου ΧΤ προκύπτουν οι ακόλουθες παρατηρήσεις:

- i. Η συνάρτηση μεταφοράς παρουσιάζει συστηματική συμπεριφορά ως προς τη συχνότητα. Συγκεκριμένα, ανεξαρτήτως τοπολογίας παρατηρείται εξασθένηση του σήματος η οποία αυξάνεται συναρτήσει της συχνότητας.
- ii. Η τοπολογία του δικτύου ΧΤ επηρεάζει σημαντικά το ρυθμό αύξησης της εξασθένησης συναρτήσει της συχνότητας.
- iii. Για το ίδιο είδος τοπολογίας, η θεωρηθείσα ως χειρότερη περίπτωση έχει σε όλα τα είδη τοπολογίας μεγαλύτερη εξασθένηση από τη μέση περίπτωση. Η παρατήρηση αυτή επιβεβαιώνει την ορθότητα της παραδοχής ότι χειρότερη περίπτωση είναι η περίπτωση στην οποία εμφανίζονται οι μεγαλύτερες πιθανές αποστάσεις και το μεγαλύτερο πιθανό πλήθος διακλαδώσεων για κάθε τοπολογία.
- iv. Οι μέσες τιμές των συναρτήσεων μεταφοράς της ενότητας 7.6 προσεγγίζουν αρκετά τις συναρτήσεις μεταφοράς της μέσης περίπτωσης.

Ως προς την εξασθένηση που εμφανίζουν τα διάφορα είδη τοπολογιών δικτύου ΧΤ στη ζώνη NB-PLC, η τοπολογία αστέρα εμφανίζει αρκετά μικρότερη εξασθένηση σε σχέση με την τοπολογία δένδρου. Αυτό συμβαίνει διότι στην τοπολογία αστέρα, ο μόνος παράγοντας που προκαλεί εξασθένηση είναι η απόσταση μεταξύ συγκεντρωτή και SM κόμβου. Αντίθετα, στην τοπολογία δένδρου η εξασθένηση οφείλεται τόσο στην απόσταση μεταξύ SM κόμβου και SM συγκεντρωτή όσο και από τις διακλαδώσεις που παρεμβάλλονται μεταξύ τους. Έτσι, για δεδομένη απόσταση συγκεντρωτή-SM κόμβου, η τοπολογία δένδρου είναι λογικό να εμφανίζει μεγαλύτερη εξασθένηση σε σχέση με αυτή της τοπολογίας αστέρα.

Ως προς την επίδραση της πυκνότητας κατοίκησης, είναι φανερό ότι οι τοπολογίες που αντιστοιχούν σε πυκνοκατοικημένες περιοχές εμφανίζουν μικρότερη εξασθένηση από την τοπολογία δένδρου σε αραιοκατοικημένη περιοχή. Αυτό είναι αναμενόμενο διότι:

- i. Η τοπολογία δένδρου εμφανίζει μεγαλύτερη εξασθένηση από την τοπολογία αστέρα λόγω της ύπαρξης διακλαδώσεων
- ii. Σε αραιοκατοικημένες περιοχές η απόσταση SM συγκεντρωτή-SM κόμβου είναι κατά κανόνα αισθητά μεγαλύτερη, όπως φαίνεται στον Πίνακα 7.5.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Χιωτέλλης, "Η χρήση της ζώνης NB-PLC για επικοινωνίες ευφυούς δικτύου μέσω γραμμών μεταφοράς Μέσης Τάσης," Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Διπλωματική Εργασία 2012.
- [2] Σαράφη, "Βέλτιστος Χρονοπρογραμματισμός σε PLC Ευφυή Ενεργειακά Δίκτυα," Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Διδακτορική διατριβή 2014.
- [3] Ανδρεάδης, Ευφυή συστήματα μέτρησης και διαχείρισης ηλεκτρικής ενέργειας, 2014, ΔΕΔΗΕ.
- [4] The Tokyo Electric Power Company, Incorporated , Basic specifications for smart meter communications, 2012.
- [5] Scaglione, Wang Galli, "For the Grid and Through the Grid: The Role of Power Line Communications in the Smart Grid," *Proceedings of the IEEE*, vol. 99, no. 6, pp. 998-1027, June 2011.
- [6] Κακούτσης Ζ., "Το επιδερμικό φαινόμενο σε υπόγεια καλώδια για BPL μεταφορά," Τμήμα ηλεκτρολόγων μηχανικών και τεχνολογίας υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα, Διπλωματική εργασία 2014.
- [7] Γεωργάκη Ο., "Αποκοπή αγωγού Αλουμινίου ισοδύναμης διατομής 16mm<sup>2</sup> γραμμής διανομής χαμηλής τάσης 400V ηλεκτροδοτούμενης από υπαίθριο υποσταθμό μέσης τάσης 150kVA ή 160kVA ή 200kVA," Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών ΕΜΠ, Αθήνα, Διπλωματική Εργασία 2009.
- [8] Παπαδιάς Β., *Γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας*. Αθήνα: Εκδόσεις Συμμετρία, 1999.
- [9] <http://xanthippi.ceid.upatras.gr/courses/its/Presentations/transmission-lines.pdf>.
- [10] Wikipedia. [Online]. [https://en.wikipedia.org/wiki/Propagation\\_constant](https://en.wikipedia.org/wiki/Propagation_constant)
- [11] Haider, Baig Masood, "Modeling and Characterization of Low Voltage Access Network for Narrowband Powerline Communications," *Journal of Electrical Engineering & Technology*, vol. 11, no. 4, pp. 1921-1928, 2016.
- [12] Κουσιουρής Τ.Γ., *Θεωρία Ανάλυσης Συστημάτων και Κυκλωμάτων*. Αθήνα: Έκδοση Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.
- [13] Werner, "The HDSL environment," *IEEE Journal on Selected Areas in Communication*, vol. 9, no. 6, pp. 785-800, August 1991.
- [14] Panagiotis G. Kottis Nikolaos Chiotellis, "Simulation of a Narrowband Powerline Communications System over Medium Voltage," *Appl. Sci.* , pp. 1-12, March 2016.

- [15] Misurec J., Koutny M., Orgon M. Mlynek P., "Powerline cable transfer function for modelling of Powerline Communication Systems," *Journal of Electrical Engineering*, vol. 62, no. 2, pp. 104-108, 2011.
- [16] Kschischang F., Gulak P. Esmailian T., "In-building power lines as high-speed communication channels:channel characterization and a test channel ensemble," *INTERNATIONAL JOURNAL OF COMMUNICATION SYSTEMS*, vol. 16, pp. 381-400, 2003.
- [17] Dostert J Zimmermann, "Analysis and Modelling of impulsive noise in BB-PLC".
- [18] Rapp, Dostert Goetz, "Power Line Communications systems and their effect on communication system design".
- [19] Katayama, "A mathematical model of noise in Narrowband Power Line Communications".
- [20] IEEE, Standard 1901.2.
- [21] IEEE Standards Association, "IEEE Standard for Low-Frequency (less than 500 kHz) Narrowband Power Line Communications for Smart Grid Applications," IEEE Communications Society, IEEE Std 1901.2 2013.
- [22] "White paper, A proposal for Smart Metering Networking Solution," Albentia Systems, ALB-W012-00en, May-2012.
- [23] Wenqing Liu, "Emulation of Narrowband Powerline Data Transmission Channels and Evaluation of PLC Systems," Karlsruhe Institut fur Technologie, Karlsruhe, Διαδατορικη διατριβη 2013.
- [24] Misurec, Koutny, Silhavy Mlynek, "Two port network transfer function for Power Line Topology Modelling," *Radioengineering*, vol. 21, no. 1, pp. 356-363, April 2012.
- [25] Κατσαμπας, "Σχεδιαση BPL πρόσβασης σε ημιαστικές περιοχές," Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα, Διπλωματική εργασία Απρίλιος 2013.
- [26] Scaglione, Wang Galli, "From the Grid and through the Grid: The role of Powerline Communications in the Smart Grid," *IEEE Proceedings*, June 2011.
- [27] Pena, Agueira Sendin, "Strategies for Powerline Communication Smart Metering Network Deployment," *energies*, vol. 7, pp. 2377-2420, 2014.
- [28] Haider, Baig Masood, "Modeling and Characterization of Low Voltage Access Network for Narrowband Powerline Communications," *Journal of Electrical Engineering Technology*, pp. 1921-1928, 2016.