



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

Βέλτιστος Χρονοπρογραμματισμός σε PLC Ευφυή Ενεργειακά Δίκτυα

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

της

Αγγελικής Μ. Σαράφη

Διπλωματούχου Ηλεκτρολόγου Μηχανικού και
Μηχανικού Υπολογιστών Ε.Μ.Π. (2006)

Αθήνα, Φεβρουάριος 2014



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

Βέλτιστος Χρονοπρογραμματισμός σε PLC Ευφυή Ενεργειακά Δίκτυα

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

της

Αγγελικής Μ. Σαράφη

Διπλωματούχου Ηλεκτρολόγου Μηχανικού και
Μηχανικού Υπολογιστών Ε.Μ.Π. (2006)

Συμβουλευτική Επιτροπή : Παναγιώτης Γ. Κωττής (επιβλέπων), Καθηγητής ΕΜΠ

Ιωάννης Δ. Κανελλόπουλος, Καθηγητής ΕΜΠ

Χρήστος Ν. Καψάλης, Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την 24^η Φεβρουαρίου 2014.

.....

Π. Κωττής
Καθηγητής ΕΜΠ

.....

Σ. Παπαβασιλείου
Καθηγητής ΕΜΠ

.....

Ι. Κανελλόπουλος
Καθηγητής ΕΜΠ

.....

Μ. Θεολόγου
Καθηγητής ΕΜΠ

.....

Γ. Ευθύμογλου
Αναπλ. Καθηγητής Παν. Πειραιώς

.....

Χ. Καψάλης
Καθηγητής ΕΜΠ

.....

Σ. Λιβιεράτος
Επικ. Καθηγητής ΣΕΛΕΤΕ

Αθήνα, Φεβρουάριος 2014

.....
Αγγελική Μ. Σαράφη

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

Copyright © Αγγελική Μ. Σαράφη, 2014.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1:	1
ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΕΠΙ ΤΟΥ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ.....	1
1.1 Εισαγωγή.....	1
1.2 Κρίσιμα ζητήματα κατά τη μετάδοση σημάτων μέσω του ενεργειακού δικτύου.6	
1.2.1 Τοπολογία.....	7
1.2.2 Θόρυβος.....	7
1.2.3 Ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα (<i>Electromagnetic compatibility - EMC</i>).....	8
1.3 Βασικές αρχιτεκτονικές PLC δικτύων	10
1.3.1 Οικιακά Δίκτυα (<i>In-home - IH networks</i>).....	10
1.3.2 Δίκτυα Πρόσβασης (<i>Access networks - ANs</i>)	13
1.4 Εφαρμογές PLC δικτύων.....	14
1.4.1 Εφαρμογές ευφών δικτύων	15
1.4.2 Εφαρμογές ευρυζωνικής πρόσβασης.....	17
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2:	19
ΠΡΟΤΥΠΟΠΟΙΗΣΗ ΔΙΚΤΥΩΝ BB-PLC	19
2.1. Εισαγωγή.....	19
2.2. Αρχιτεκτονική δικτύων πρόσβασης βασισμένων στο πρότυπο IEEE 1901	20
2.2.1. Επισκόπηση φυσικού στρώματος BB-PLC	20
2.2.2. Δίκτυα BB-PLC ευρείας κάλυψης.....	26
2.3. Μηχανισμοί πρόσβασης.....	28
2.3.1. Τυχαία πρόσβαση στο δίκτυο: CSMA/CA.....	29
2.3.2. Εγγυημένη πρόσβαση στο δίκτυο: TDMA.....	31
2.3.2.1. Σταθερή εκχώρηση εύρους ζώνης κατά την CFP περίοδο.....	31
2.3.2.2. Δυναμική εκχώρηση εύρους ζώνης κατά την CFP περίοδο	33
2.3.3. Μηχανισμός πρόσβασης DVTP	35
2.4. Ποιότητα υπηρεσίας σε δίκτυα BB-PLC	36
2.4.1. CSMA/CA βασισμένο στην ανάλυση προτεραιοτήτων	36

2.4.2.	<i>Έλεγχος προτεραιοτήτων στο CSMA/CA βάσει του χρονικού διαστήματος μεταξύ των πλαισίων.....</i>	39
2.4.3.	<i>Έλεγχος αποδοχής κλήσεων σε δίκτυα TDMA.....</i>	42
2.5.	Πρωτόκολλο Συνύπαρξης ISP	44
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3:	47
ΕΥΦΥΗ ΔΙΚΤΥΑ	47
3.1	Εισαγωγή.....	47
3.2	Δομικά στοιχεία ευφύων δικτύων	49
3.2.1	<i>Ενεργειακά συστήματα.....</i>	50
3.2.2	<i>Τηλεπικοινωνιακά συστήματα</i>	55
3.2.3	<i>Συστήματα εφαρμογών πληροφορικής.....</i>	64
3.3	Επισκόπηση πιλοτικών ευφύων δικτύων	67
3.3.1.	<i>Επισκόπηση νομοθεσίας για τα ευφυή δίκτυα.....</i>	68
3.3.2.	<i>Παραδείγματα έργων ευφύων δικτύων</i>	70
3.4	Ενδεικτικό πιλοτικό ευφύες δίκτυο μεγάλης κλίμακας τεχνολογίας BB-PLC ...	72
3.4.1.	<i>Κίνητρα για την εγκατάσταση ευφύων δικτύων.....</i>	73
3.4.2.	<i>Σχεδίαση του πιλοτικού δικτύου</i>	74
3.4.2.1.	<i>Κέντρο Διαχείρισης Δικτύου</i>	78
3.4.2.2.	<i>Εγκατάσταση δικτύου πρόσβασης.....</i>	80
3.4.2.3.	<i>Διασύνδεση τελικών χρηστών.....</i>	83
3.4.3.	<i>Διασφάλιση ποιότητας υπηρεσίας στο πιλοτικό δίκτυο PLC της Λάρισας.....</i>	83
3.4.3.1.	<i>Στατική ανάθεση προτεραιοτήτων στο W-PLC δίκτυο.....</i>	85
3.4.3.2.	<i>Προτάσεις για βελτίωση του μηχανισμού ανάθεσης πόρων</i>	85
3.4.4.	<i>Χρήσιμα συμπεράσματα για τη σχεδίαση PLC δικτύων</i>	86
3.4.4.1.	<i>Θέματα που αφορούν την PLC μετάδοση</i>	86
3.4.4.2.	<i>Θέματα διαχείρισης QoS απαιτήσεων.....</i>	86
3.4.4.3.	<i>Θέματα ασφάλειας επικοινωνίας.....</i>	88
3.4.4.4.	<i>Θέματα σχεδιασμού ευφύων δικτύων</i>	89
3.5	Περίληψη.....	90
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4:	91
ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ TCP ΣΥΝΔΕΣΕΩΝ ΣΕ ΔΙΑΥΛΟΥΣ BB-PLC ..	91	
4.1.	Εισαγωγή στο TCP και επισκόπηση διεθνούς βιβλιογραφίας	91
4.2.	Περιορισμοί επίδοσης του TCP σε δίκτυα BB-PLC.....	94

4.2.1.	<i>Υψηλή τιμή BER, θόρυβος και παρεμβολές</i>	96
4.2.2.	<i>Υψηλή τιμή γινομένου καθυστέρησης-εύρους ζώνης</i>	96
4.2.3.	<i>Περιορισμένο εύρος ζώνης</i>	97
4.2.4.	<i>Ασυμμετρία δικτύου</i>	97
4.3.	<i>Μοντέλα επίδοσης του TCP</i>	98
4.3.1.	<i>Ορισμοί και υποθέσεις</i>	98
4.3.2.	<i>Υπολογισμός της TCP διέλευσης</i>	99
4.4.	<i>Προσδιορισμός της διέλευσης TCP σε BB-PLC δίκτυα</i>	101
4.4.1.	<i>Περιγραφή του MAC πρωτοκόλλου</i>	102
4.4.2.	<i>Προσδιορισμός TCP διέλευσης των διαύλων BB-PLC</i>	105
4.4.2.1.	<i>Εφαρμογή για δίκτυα ευρυζωνικής πρόσβασης</i>	106
4.4.2.2.	<i>Εφαρμογή για ευφνή δίκτυα</i>	111
4.5.	<i>Επαλήθευση του προτεινόμενου μοντέλου προσδιορισμού της διέλευσης μέσω προσομοίωσης</i>	112
4.5.1.	<i>Επισκόπηση πειραματικού δικτύου</i>	112
4.5.2.	<i>Αποτελέσματα προσομοίωσης διέλευσης</i>	114
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5:		117
ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΠΟΡΩΝ ΣΕ PLC ΔΙΚΤΥΑ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΔΙΑΣΤΡΩΜΑΤΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ		117
5.1.	<i>Εισαγωγή</i>	117
5.2.	<i>Κατάστρωση του προβλήματος βέλτιστης κατανομής του εύρους ζώνης</i>	118
5.3.	<i>Επίλυση του προβλήματος με αριθμητικές μεθόδους</i>	122
5.3.1.	<i>Στρατηγικές βελτιστοποίησης</i>	122
5.3.2.	<i>Αλγόριθμος υπολογισμού συνολικής διέλευσης</i>	123
5.4.	<i>Προσομοιώσεις - Συζήτηση Αποτελεσμάτων</i>	126
5.4.1.	<i>Απαιτήσεις προσομοίωσης</i>	126
5.4.2.	<i>Μελέτη της επίδρασης της ποιότητας των PLC ζεύξεων</i>	129
5.4.3.	<i>Μελέτη της επίδρασης της κατανομής των χρηστών</i>	138
5.5.	<i>Μεθοδολογία σχεδιασμού PLC δικτύων ευρείας κλίμακας</i>	142
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6:		145
ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΧΡΟΝΟΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗΣ TDMA ΣΕ PLC ΔΙΚΤΥΑ		145
6.1	<i>Εισαγωγή</i>	145
6.2	<i>Επισκόπηση της διεθνούς βιβλιογραφίας</i>	146

6.2.1	<i>Αλγόριθμοι χρονοπρογραμματισμού σε LV-PLC δίκτυα</i>	147
6.2.2	<i>Αλγόριθμοι χρονοπρογραμματισμού σε MV-PLC δίκτυα</i>	149
6.3	Φυσικό στρώμα SGC δικτύων	151
6.4	Σχηματισμός δένδρων επί PLC δικτύων	153
6.4.1.	<i>Ορισμοί</i>	153
6.4.2.	<i>Σχηματισμός SGC δένδρων επί PLC δικτύων</i>	156
6.5	Κατανομή πόρων με χρήση ελέγχου ισχύος και διαστρωματικής σχεδίασης... 157	
6.5.1	<i>Φάση 1: Ανακάλυψη δικτύου</i>	158
6.5.2	<i>Φάση 2: Βελτιστοποίηση χρονοδρομολόγησης</i>	159
6.5.3	<i>Φάση 3: Σταθεροποίηση και δυναμική προσαρμογή</i>	161
6.6	Εφαρμογή του προτεινόμενου σχήματος στο δίκτυο της Λάρισας.....	162
6.6.1	<i>Σενάρια προσομοίωσης</i>	162
6.6.2	<i>Παρουσίαση αποτελεσμάτων</i>	163
6.6.3	<i>Συμπεράσματα για το σχεδιασμό δικτύων BB-PLC ευρείας κλίμακας</i>	169
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	171

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1.1: Παράδειγμα οικιακού τριφασικού δικτύου προσαρμοσμένο από το πρότυπο IEEE 1901 για BB-PLC δίκτυα [IEEE1901].....	11
Σχήμα 1.2: Παραδείγματα διαφορετικών BSS σε οικιακό δίκτυο προσαρμοσμένα από το πρότυπο IEEE 1901 για BB-PLC δίκτυα [IEEE1901]	12
Σχήμα 2.1: Μπλοκ διάγραμμα σχήματος μετάδοσης IEEE 1901 βασισμένου σε FFT-OFDM PHY (Σχήμα προσαρμοσμένο από IEEE1901).	21
Σχήμα 2.2: Μπλοκ διάγραμμα σχήματος μετάδοσης IEEE 1901 βασισμένου σε wavelet-OFDM PHY (Σχήμα προσαρμοσμένο από IEEE1901).	22
Σχήμα 2.3: BER ως συνάρτηση του μήκους της PLC σύνδεσης για τις τοπολογίες MT που εμφανίζονται στον Πιν.2.1.	24
Σχήμα 2.4: Χρονοπρογραμματισμός μεταδόσεων κατά την πρόσβαση TDMA [IEEE1901].	32
Σχήμα 2.5: Αλλαγή χρονοπρογραμματισμού (front loading) κατά την πρόσβαση TDMA [IEEE1901].	33
Σχήμα 2.6 α: Παράδειγμα σταθερής κατανομής εύρους ζώνης [IEEE1901].....	34
Σχήμα 2.6 β: Παράδειγμα δυναμικής κατανομής εύρους ζώνης [IEEE1901].	34
Σχήμα 2.7: Μηχανισμός πρόσβασης σύμφωνα με το DVTP πρωτόκολλο [IEEE1901].....	35
Σχήμα 2.8: Πρόσβαση CSMA/CA με σχήμα PRS [IEEE1901].	37
Σχήμα 2.9: Διαδικασία ελέγχου προτεραιότητας [IEEE1901].	41
Σχήμα 2.10: Δίκτυο BB-PLC πολλαπλών αλμάτων (Σχήμα προσαρμοσμένο από IEEE1901).	43
Σχήμα 2.11: Γενική δομή χρονοπρογραμματισμού TDMA (Σχήμα προσαρμοσμένο από IEEE1901).	45
Σχήμα 2.12: Δίκτυο PLC με τέσσερα συστήματα.	45
Σχήμα 2.13 α: TDMA χρονοπρογραμματισμός χωρίς αναχρησιμοποίηση χρονοσχημάτων.	46
Σχήμα 2.13 β: TDMA χρονοπρογραμματισμός με αναχρησιμοποίηση χρονοσχημάτων.....	46
Σχήμα 3.1: Εννοιολογικό μοντέλο ευφυούς δικτύου κατά NIST [NIST]	48
Σχήμα 3.2: Ποσοστιαία παραγωγή Ενέργειας στην Ευρώπη ανά πηγή [Eurostat]	51
Σχήμα 3.3: Τηλεπικοινωνιακό μοντέλο ευφών δικτύων [IEEE2030]	56
Σχήμα 3.4: Παράδειγμα κυκλικής εναλλαγής καναλιών μεταξύ διαδοχικών PLC κυψελών	75
Σχήμα 3.5: Μοντέλο Αναφοράς W-PLC δικτύου	76
Σχήμα 3.6: Αρχιτεκτονική υβριδικού δικτύου W-PLC	77
Σχήμα 3.7: Τοπικό και Απομακρυσμένο κέντρο διαχείρισης W-PLC δικτύου	78
Σχήμα 3.8: Σχηματική αναπαράσταση του υβριδικού W-PLC δικτύου που υλοποιήθηκε στην περιοχή της Λάρισας.	79

Σχήμα 3.9: Το υβριδικό δίκτυο W-PLC στην περιοχή της Λάρισας:.....	81
α) W-PLC κόμβοι που είναι εγκατεστημένοι επί της πρώτης γραμμής MT,	81
β) W-PLC κόμβοι που είναι εγκατεστημένοι επί της δεύτερης γραμμής MT.	81
Σχήμα 3.10: Παράδειγμα κάθετης και οριζόντιας αντιστοίχισης προτεραιοτήτων QoS. [Val12]	87
Σχήμα 3.11: Ενσωμάτωση ετερογενών δικτύων [Zab11].....	88
Σχήμα 4.1: Επικοινωνία υβριδικών κόμβων WiFi-PLC μέσω ασύμμετρου PLC διαύλου .	98
Σχήμα 4.4: Εξυπηρέτηση τερματικών κόμβων από τους PLC κόμβους.....	107
Σχήμα 4.5: Κατεύθυνση κίνησης downlink σε μια PLC κυψέλη	108
Σχήμα 4.6: Σύγκριση θεωρητικών τιμών και τιμών προσομοίωσης συνολικής διέλευσης TCP σε κυψέλη με μία κακή ζεύξη προς την αρχή της κυψέλης	114
Σχήμα 4.7: Σύγκριση θεωρητικών τιμών και τιμών προσομοίωσης συνολικής διέλευσης TCP σε κυψέλη με μία κακή ζεύξη προς το τέλος της κυψέλης	115
Σχήμα 4.8: Σύγκριση θεωρητικών τιμών και τιμών προσομοίωσης συνολικής διέλευσης TCP σε κυψέλη με καλές ζεύξεις.....	116
Σχήμα 5.1: Σύγκριση θεωρητικών τιμών και τιμών προσομοίωσης συνολικής διέλευσης TCP σε κυψέλες τύπου CT1 για διάφορες τιμές του JFI_{min}	130
Σχήμα 5.2: Αθροιστική διέλευση TCP ανά κόμβο κυψέλης τύπου CT1. Η ζεύξη (2) αποτελεί τη στενωπό της κυψέλης.	131
Σχήμα 5.3: Αθροιστική διέλευση TCP ανά κόμβο κυψέλης τύπου CT2. Η ζεύξη (4) αποτελεί τη στενωπό της κυψέλης.	133
Σχήμα 5.4: Αθροιστική διέλευση TCP ανά κόμβο. Η ζεύξη (5) αποτελεί τη στενωπό της κυψέλης.	135
Σχήμα 5.5: Αθροιστική διέλευση TCP ανά κόμβο κυψέλης τύπου CT3. Οι ζεύξεις (2) και (4) αποτελούν ζεύξεις-στενωπούς.	136
Σχήμα 5.6: Αθροιστική διέλευση TCP ανά κόμβο στην περίπτωση κυψέλης τύπου CT4. Η PLC ζεύξη (4) αποτελεί τη ζεύξη-στενωπό.	137
Σχήμα 5.7: Διέλευση TCP ανά σύνδεση στους κόμβους εξυπηρέτησης κυψέλης CT4. Οι κόμβοι (5) και (6) εξυπηρετούν το 68% της κίνησης.	139
Σχήμα 5.8: Διέλευση TCP ανά σύνδεση στους κόμβους εξυπηρέτησης κυψέλης CT2. Οι κόμβοι (5) και (6) εξυπηρετούν το 68% της κίνησης.	140
Σχήμα 5.9: Διέλευση TCP ανά σύνδεση συναρτήσει του κόμβου εξυπηρέτησης σε κυψέλες τύπου CT2 όταν οι κόμβοι node (2) και node (3) εξυπηρετούν το 68% της κίνησης.	141
Σχήμα 6.1: α) Παράδειγμα αραιού SGC δένδρου, β) Παράδειγμα πυκνού SGC δένδρου.	156
Σχήμα 6.2: Ποσοστιαία μεταβολή στη συνολική διέλευση του SGC δικτύου ανάλογα με την μέγιστη επιτρεπόμενη ισχύ έγχυσης.	164
Σχήμα 6.3: Ποσοστιαία μεταβολή στην κατανάλωση ενέργειας για τη λειτουργία του SGC δικτύου ως συνάρτηση της μέγιστης επιτρεπόμενης ισχύος έγχυσης.	165
Σχήμα 6.4: Διάρκεια χρονοπρογραμματισμού συναρτήσει της μέγιστης επιτρεπόμενης ισχύος έγχυσης α) για αγροτικό SGC δίκτυο και β) για αστικό SGC δίκτυο....	166
Σχήμα 6.5: Διάρκεια χρονοπρογραμματισμού συναρτήσει της μέγιστης επιτρεπόμενης ισχύος έγχυσης α) για αγροτικό SGC δίκτυο και β) για αστικό SGC δίκτυο....	168

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1.1: Προδιαγραφές και πρότυπα NB-PLC και στοιχεία λειτουργίας.....	2
Πίνακας 1.2: Πρότυπα BB-PLC και στοιχεία λειτουργίας.....	4
Πίνακας 2.1: Τοπολογίες γραμμών MT	25
Πίνακας 2.2: Αντιστοίχιση προτεραιοτήτων πρόσβασης διαύλου κατά την περίοδο επίλυσης προτεραιότητας [IEEE 1901]	37
Πίνακας 2.3: Αντιστοίχιση προτεραιοτήτων διαύλου κλάσεων υπηρεσιών και υποστηριζόμενων εφαρμογών (Πίνακας προσαρμοσμένος από IEEE1901). ...	38
Πίνακας 2.4: Υπολογισμός INTP συναρτήσει του UP και της κατάστασης του δικτύου (Πίνακας προσαρμοσμένος από IEEE1901).	39
Πίνακας 2.5: Υπολογισμός CW συναρτήσει της τιμής INTP [IEEE1901].	40
Πίνακας 2.6: Υπολογισμός διάρκειας σε χρονοσχισμές της περιόδου αναμονής (Πίνακας προσαρμοσμένος από IEEE1901).	41
Πίνακας 3.1: Τεχνολογίες πρόσβασης ευφών δικτύων.....	58
Πίνακας 3.2: Τεχνολογίες πρόσβασης CPN δικτύων [Usm12]	59
Πίνακας 3.3: Απαιτήσεις QoS για εφαρμογές του παρακολούθησης υποσταθμών και πεδίου [Des11]	65
Πίνακας 3.4: Απαιτήσεις QoS των υπηρεσιών που υποστήριξε το πιλοτικό δίκτυο W-PLC της Λάρισας	84
Πίνακας 4.1: Τιμές ρυθμού μετάδοσης (R) και ποσοστού απωλειών (BER) για ενδεικτικές PLC ζεύξεις και για διαφορετικούς ρυθμούς κωδικοποίησης	113
Πίνακας 5.1: Επιλεγόμενες τιμές συνδυασμών (R-BER) για ενδεικτικές PLC ζεύξεις.....	124
Πίνακας 5.2: Τιμές ρυθμού μετάδοσης και BER των ζεύξεων που απαρτίζουν τις PLC κυψέλες για διάφορες τιμές ρυθμού κώδικα.	127
Πίνακας 5.3: Τιμές THT και αθροιστικής διέλευσης για την κυψέλη CT1.	132
Πίνακας 5.4: Τιμές THT και αθροιστικής διέλευσης για κυψέλη τύπου CT2.	134
Πίνακας 5.5: Τιμές THT και αθροιστικής διέλευσης για κυψέλη τύπου CT3.	138
Πίνακας 6.1: Βασικοί ορισμοί στη δενδρική περιγραφή δικτύων.....	154
Πίνακας 6.2: Χρονοπρογραμματισμός TDMA για μη συγκεντρώσιμα δεδομένα.....	161
Πίνακας 6.3: Χρονοπρογραμματισμός TDMA για πλήρως συγκεντρώσιμα δεδομένα.	161
Πίνακας 6.4: Παράμετροι ενεργειακού δικτύου σε τυπική αγροτική και αστική περιοχή. .	162

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διατριβή εκπονήθηκε στα πλαίσια της ερευνητικής δουλειάς του Εργαστηρίου Ασυρμάτου και Επικοινωνίας Μεγάλων Αποστάσεων που ανήκει στον Τομέα Μετάδοσης Πληροφορίας και Τεχνολογίας Υλικών της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών στα πλαίσια των υποχρεώσεων του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Αντικείμενο της παρούσας διατριβής αποτελεί η μελέτη των προβλημάτων κατανομής πόρων και χρονοπρογραμματισμού σε PLC (Power Line Communications) ευφυή δίκτυα. Παράλληλα, εξετάζονται οι τηλεπικοινωνιακές απαιτήσεις των σύγχρονων ενεργειακών ευφυών δικτύων και προσδιορίζονται οι σχεδιαστικές απαιτήσεις των BB-PLC δικτύων προκειμένου να εξυπηρετηθούν οι απαιτήσεις ποιότητας των εφαρμογών ευφυών δικτύων. Η έρευνα που παρουσιάζεται στην παρούσα διατριβή λαμβάνει υπόψη τις προδιαγραφές των τεχνικών προτύπων που θεσπίστηκαν τα τελευταία χρόνια για τις επικοινωνίες PLC.

Στο Κεφάλαιο 1 της διατριβής παρέχεται μία γενική επισκόπηση των κατηγοριών PLC δικτύων που αναπτύσσονται τόσο στη χαμηλή όσο και στη μέση τάση. Πραγματοποιείται αναφορά στα εγγενή προβλήματα του PLC διαύλου και παρουσιάζονται οι κύριες αρχιτεκτονικές οικιακών δικτύων και δικτύων πρόσβασης που συναντώνται στα PLC δίκτυα. Έμφαση αποδίδεται στις εφαρμογές των PLC δικτύων για την υποστήριξη επικοινωνιών ευφυών δικτύων καθώς και άλλων ευρυζωνικών εφαρμογών δικτύων πρόσβασης.

Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζονται τα βασικότερα τεχνικά πρότυπα που καλύπτουν την υποστήριξη ευρυζωνικών PLC (BB-PLC) δικτύων πρόσβασης. Αναλύεται το φυσικό στρώμα των BB-PLC δικτύων και εξετάζονται οι απαιτήσεις σχεδίασης για το σχηματισμό BB-PLC δικτύων ευρείας ζώνης. Ιδιαίτερη έμφαση αποδίδεται στις προδιαγραφές που θέτουν τα πρότυπα για τη διευθέτηση της πολλαπλής πρόσβασης των χρηστών στον PLC δίαυλο, εξετάζοντας τεχνικές τυχαίας και εγγυημένης πρόσβασης. Παρουσιάζονται τα βασικότερα σχήματα σταθερής και δυναμικής εκχώρησης πόρων καθώς και οι τεχνικές εξασφάλισης ποιότητας σε κάθε μια από τις δύο τεχνικές πρόσβασης. Τέλος, μελετώνται ζητήματα συνύπαρξης μεταξύ δικτύων PLC διαφορετικών προτύπων.

Στο Κεφάλαιο 3 πραγματοποιείται εκτενής επισκόπηση των δομικών στοιχείων που απαρτίζουν τα σύγχρονα ευφυή δίκτυα, εξετάζοντας τα ενεργειακά συστήματα, τα τηλεπικοινωνιακά μέσα και τις εφαρμογές πληροφορικής που τα αποτελούν. Κύρια έμφαση αποδίδεται στα τηλεπικοινωνιακά συστήματα που διασφαλίζουν την τήρηση των προδιαγραφών QoS των ευφυών εφαρμογών. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται επισκόπηση και αξιολόγηση των βασικότερων έργων ευφυών δικτύων που αναπτύχθηκαν στην Ευρώπη την τελευταία δεκαετία. Τέλος, εξετάζεται το πιλοτικό ευφύες δίκτυο τεχνολογίας BB-PLC που υλοποιήθηκε το 2007 στην Ελλάδα και αναλύονται τα βασικότερα σχεδιαστικά συμπεράσματα που προέκυψαν από το συγκεκριμένο έργο.

Συγκεκριμένα, για το πιλοτικό δίκτυο της Ελλάδας εξετάζονται ζητήματα αρχιτεκτονικής, διασφάλισης ποιότητας υπηρεσιών και προτάσεις βελτίωσης του μηχανισμού ανάθεσης πόρων που υλοποιήθηκε.

Στο Κεφάλαιο 4 μελετάται το πρόβλημα επίδοσης του πρωτοκόλλου TCP στα BB-PLC δίκτυα και διατυπώνεται μαθηματικό πρότυπο για τη συμπεριφορά του TCP λαμβάνοντας υπόψη τα εγγενή προβλήματα του PLC διαύλου. Αρχικά, εξετάζονται οι βασικοί περιορισμοί επίδοσης του TCP σε δίκτυα BB-PLC. Βάσει των ανωτέρω περιορισμών καταστρώνεται ένα μοντέλο για τον υπολογισμό της TCP διέλευσης σε μια BB-PLC κυψέλη. Τα αποτελέσματα προσομοίωσης που ακολουθούν επαληθεύουν την ορθότητα του προτεινόμενου μοντέλου.

Στο Κεφάλαιο 5, αξιοποιείται η προηγηθείσα μαθηματική διατύπωση της διέλευσης TCP προκειμένου να καταστρωθεί πρόβλημα βελτιστοποίησης χρονοπρογραμματισμού που μεγιστοποιεί τη διέλευση TCP, διασφαλίζοντας ένα ελάχιστο επίπεδο ισοτιμίας μεταξύ των TCP συνδέσεων που υποστηρίζονται. Οι προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν εξετάζουν την επίδραση της ποιότητας των ζεύξεων και της κατανομής των TCP τερματικών σε μια PLC κυψέλη. Αποτέλεσμα της συγκεκριμένης μελέτης είναι η εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων για το σχεδιασμό δικτύων PLC ευρείας κλίμακας, το σχηματισμό των PLC κυψελών και της κατανομής των τερματικών που αιτούνται εξυπηρέτηση.

Τέλος, στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάζεται επισκόπηση των αλγορίθμων χρονοπρογραμματισμού που συναντώνται στη βιβλιογραφία και έχουν εφαρμοσθεί σε PLC δίκτυα και προτείνεται κατανομημένος αλγόριθμος κατανομής πόρων, ο οποίος με χρήση ελέγχου ισχύος έγχυσης, αυξάνει την αναχρησιμοποίηση χρονοσχισμών, οδηγώντας σε σημαντική αύξηση της διέλευσης σε BB-PLC δίκτυα και μείωση της περιόδου χρονοπρογραμματισμού. Η ανωτέρω μελέτη παρέχει χρήσιμα συμπεράσματα για τη δομή των PLC κυψελών και των υπερκείμενων επικοινωνιακών ροών που απαρτίζουν τα SGC (Smart Grid Communications) δένδρα.

Επί τη λήξει της διδακτορικής μου πορείας θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου σε μία σειρά ανθρώπων που στάθηκαν δίπλα μου και με στήριξαν στην πολυετή ερευνητική σταδιοδρομία μου.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή τόσο της διδακτορικής μου διατριβής όσο και της διπλωματικής μου εργασίας, κ. Παναγιώτη Κωττή. Θα ήθελα να τον ευχαριστήσω θερμά για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα και την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου. Η καθοδήγησή του, η αμέριστη συμπαράστασή του και ενθάρρυνση, η υπομονή του και η προσήλωσή του στην τελειότητα συνέβαλλαν ουσιαστικά στην ολοκλήρωση και συγγραφή ενός ερευνητικού έργου υψηλής ποιότητας. Οι υψηλές επιστημονικές του αξίες, η αγάπη του για την ορθή και λακωνική χρήση της γλώσσας, οι επιστημονικές του γνώσεις και η μεταδοτικότητά του ως δάσκαλος έπαιξαν καθοριστικό ρόλο στη διαμόρφωσή μου ως Μηχανικό Επικοινωνιών και μου ενέπνευσαν το πάθος για την έρευνα.

Τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες θα ήθελα να εκφράσω προς τους αξιότιμους κ. Ιωάννη Κανελλόπουλο, κ. Χρήστο Καψάλη, κ. Συμεών Παπαβασιλείου, κ. Μιχαήλ Θεολόγου και κ. Γεώργιο Ευθύμογλου για τη συνεργασία τους. Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να εκφράσω προς τον κ. Λιβιεράτο για την άριστη συνεργασία μας στο ερευνητικό έργο επί των ευφυών δικτύων. Επίσης, ευχαριστώ ιδιαίτερος τους φίλους και συνεργάτες μου Αθανάσιο Δρούγκα και Αρτέμη Βουλκίδη. Επίσης, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες

μου στα μέλη του εργαστηρίου με τα οποία συνεργάστηκα κατά τη διάρκεια της διατριβής μου, Μάρκο Αναστασόπουλο, Αθανάσιο Λαζαρόπουλο, Γεώργιο Τσιρόπουλο, Πέτρο Παπαϊωάννου, Άννα Βαζιντάρη και Αγγελική Κορδαλή.

Στα πλαίσια της εργασίας μου ως Μηχανικός Επικοινωνιών και Σύμβουλος επί της τεχνολογίας PLC στην εταιρία Ampereion, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους κ. Γεώργιο Μακρυδάκη, την κ. Ράνια Μακρυδάκη και τον κ. John Dickinson που μου έδωσαν την ευκαιρία να δω στην πράξη το αντικείμενο που στη συνέχεια αποτέλεσε βασικό πυρήνα της διδακτορικής μου πορείας.

Ολοκληρώνοντας, θα ήθελα να εκφράσω την αγάπη μου και την ευγνωμοσύνη μου στους γονείς μου Μιχάλη και Ματίνα και στην αδελφή μου Εύα, για όλη την αγάπη και την υποστήριξή τους κατά τη διάρκεια των σπουδών μου. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Αντώνη για την αγάπη του και τη συμπαράστασή του και τους φίλους μου Γεωργία, Φωτεινή, Ανδρέα Π., Γιώργο Σ., Διονυσία, Ανδρέα Σ., Κώστα Α., Αριάδνη, Δημήτρη, Ράνια και Κώστα Χ. για την παρέα και τη φιλία τους. Τέλος, ευχαριστώ τους συναδέλφους μου στο Μεσογειακό Κολέγιο και την Nokia Solutions and Networks για τη στήριξη και συμπαράστασή τους.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας διατριβής αποτελεί η μελέτη των προβλημάτων κατανομής πόρων και χρονοπρογραμματισμού σε PLC (Power Line Communications) ευφυή δίκτυα. Η έρευνα που παρουσιάζεται στην παρούσα διατριβή λαμβάνει υπόψη τις προδιαγραφές των τεχνικών προτύπων που δημιουργήθηκαν τα τελευταία χρόνια για τις επικοινωνίες PLC.

Στο Κεφάλαιο 1 της διατριβής παρέχεται μία γενική επισκόπηση των PLC δικτύων με αναφορά στα εγγενή προβλήματα των δικτύων αυτών και στις κύριες αρχιτεκτονικές που χρησιμοποιούνται. Έμφαση δίνεται στις εφαρμογές των PLC δικτύων για την υποστήριξη επικοινωνιών ευφυών δικτύων καθώς και άλλων ευρυζωνικών εφαρμογών δικτύων πρόσβασης. Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζονται τα βασικότερα τεχνικά πρότυπα που καλύπτουν την υποστήριξη ευρυζωνικών PLC (BB-PLC) δικτύων πρόσβασης. Ιδιαίτερη έμφαση αποδίδεται στις προδιαγραφές που θέτουν τα ανωτέρω πρότυπα για τη διευθέτηση της πολλαπλής προσπέλασης διασφαλίζοντας την τήρηση των απαιτήσεων QoS και την ομαλή συνύπαρξη μεταξύ δικτύων PLC διαφορετικών προτύπων.

Στο Κεφάλαιο 3 πραγματοποιείται εκτενής επισκόπηση των δομικών στοιχείων που απαρτίζουν τα σύγχρονα ευφυή δίκτυα. Κύρια έμφαση δίνεται στα τηλεπικοινωνιακά συστήματα που διασφαλίζουν την τήρηση των προδιαγραφών QoS των ευφυών εφαρμογών. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται επισκόπηση των βασικότερων έργων ευφυών δικτύων που αναπτύχθηκαν στην Ευρώπη την τελευταία δεκαετία. Τέλος, εξετάζεται το πιλοτικό ευφυές δίκτυο τεχνολογίας BB-PLC που υλοποιήθηκε το 2007 στην Ελλάδα και αναλύονται τα βασικότερα σχεδιαστικά συμπεράσματα που προέκυψαν από το συγκεκριμένο έργο.

Στα υπόλοιπα κεφάλαια εξετάζονται τα προβλήματα της κατανομής των πόρων και του χρονοπρογραμματισμού σε BB-PLC δίκτυα πρόσβασης. Συγκεκριμένα, στο Κεφάλαιο 4 μελετάται το πρόβλημα επίδοσης του πρωτοκόλλου TCP στα BB-PLC δίκτυα και μοντελοποιείται η συμπεριφορά του TCP λαμβάνοντας υπόψη τα εγγενή προβλήματα του PLC διαύλου. Στο Κεφάλαιο 5, αξιοποιείται η μοντελοποίηση της διέλευσης TCP προκειμένου να καταστρωθεί πρόβλημα βέλτιστου χρονοπρογραμματισμού που μεγιστοποιεί τη διέλευση TCP, διασφαλίζοντας ένα ελάχιστο επίπεδο ισοτιμίας μεταξύ των TCP συνδέσεων που υποστηρίζονται. Τέλος, στο Κεφάλαιο 6, παρουσιάζεται επισκόπηση των αλγορίθμων χρονοπρογραμματισμού που συναντώνται στη βιβλιογραφία και προτείνεται ένας κατανομημένος αλγόριθμος κατανομής πόρων ο οποίος με χρήση ελέγχου ισχύος έγχυσης, αυξάνει την αναχρησιμοποίηση χρονοσχισμών οδηγώντας σε σημαντική αύξηση της διέλευσης στα BB-PLC δίκτυα.

Λέξεις κλειδιά: BB-PLC, TDMA χρονοπρογραμματισμός, Ευφυή δίκτυα, επίδοση TCP, προδιαγραφές QoS, κατανομή πόρων, δίκτυο μέσης τάσης.

ABSTRACT

The present thesis deals with problems related to Resource Allocation and Scheduling in Power Line Communications (PLC) smart grid networks. The relevant research is compliant with the specifications concerning the technical standards that have been proposed over the last years for PLC.

Chapter 1 provides a general overview of PLC networks, outlining the inherent problems of PLC medium and relevant network architectures. Emphasis is given on smart grid and other broadband applications supported by PLC access networks. In Chapter 2 a presentation of the technical standards that have been proposed for BB-PLC networks is given. Special attention is given on the specifications of the standards concerning the smart grid applications QoS assurance and the coexistence between systems of multiple PLC specifications.

In Chapter 3, a thorough survey of modern Smart Grids integral parts is provided. Special attention is given in underlying telecommunications systems that reassure optimal assurance of smart grid applications QoS restrictions. In the rest of the chapter, the most important smart grid pilot networks developed across Europe during the last decade are presented. Finally, the pilot BB-PLC network, developed in Greece during 2007, destined to support smart grid applications is presented, and the most critical network design considerations are discussed.

The remaining chapters deal with resource allocation and scheduling in BB-PLC access networks. Specifically, Chapter 4 deals with the issue of TCP performance over BB-PLC network and after taking into consideration the inherent problems of power line medium TCP behavior is modeled. In Chapter 5, TCP throughput modeling on BB-PLC networks is employed by a cross-layer resource allocation scheme to maximize network throughput, while reassuring fairness among TCP connections according to a given threshold. Finally, in Chapter 6, a thorough overview of scheduling algorithms met in PLC networks is provided and a distributed power control algorithm is proposed. The proposed scheme enhances slot reuse and leads to significant increase in throughput on BB-PLC networks.

Λέξεις κλειδιά: BB-PLC, TDMA scheduling, Smart Grids, TCP performance, QoS assurances, Resource Allocation, Medium Voltage grid.

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΝΤΜΗΣΕΩΝ

AMI	<i>Advanced Metering Infrastructure</i>
AMR	<i>Automatic Meter Reading</i>
AN	<i>Access Network</i>
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
BB-PLC	<i>Broadband PLC</i>
BC	<i>Backoff Counter</i>
BDP	<i>Bandwidth-Delay Product</i>
BEMS	<i>Building Energy Management Systems</i>
BER	<i>Bit Error Ratio</i>
BM	<i>BSS manager</i>
BSS	<i>Basic Service Set</i>
CFP	<i>Contention Free Period</i>
CIFS	<i>Contention Interframe Space</i>
CNR	<i>Carrier to Noise Ratio</i>
CP	<i>Contention Period</i>
CPE	<i>Customer Premises Equipment</i>
CPN	<i>Customer Premises Network</i>
CSMA/CA	<i>Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance</i>
CT-IAP	<i>Communications Technology Interoperability Architectural Perspective</i>
CTS	<i>Clear to Send</i>
CW	<i>Contention Window</i>
CWND	<i>Congestion window</i>
DA	<i>Distribution Automation</i>
DER	<i>Distributed Energy Resources</i>
DG	<i>Distributed Generation</i>
DS	<i>Distribution System</i>
DSM	<i>Demand Side Management</i>
DVTP	<i>Dynamic Virtual Token Passing</i>
EAP	<i>Extensible Authentication Protocol</i>
EMC	<i>Electromagnetic Compatibility</i>
EMI	<i>Electro Magnetic Interference</i>
EPRI	<i>Electric Power Research Institute</i>
ESI	<i>Energy Secure Interface</i>
EVSE	<i>Electric Vehicle Supply Equipment</i>
FAN	<i>Field Area Network</i>
FCC	<i>Federal Communications Commission</i>
FDR	<i>Rfrequency Division Repeater</i>
FEC	<i>Forward Error Control</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
HAN	<i>Home Area Network</i>
HDR	<i>High data rate</i>

HE	<i>Head End</i>
HEMS	<i>Home Energy Management Systems</i>
IAN	<i>Industrial Area Networks</i>
ICT	<i>Information and Communications Technologies</i>
IDWT	<i>Inverse Discrete Wavelet Transformer</i>
IH	<i>In Home</i>
INTP	<i>Internal Priority</i>
IPP	<i>Inter-PHY Protocol</i>
ISP	<i>Inter System Protocol</i>
IT-IAP	<i>Information Technology Interoperability Architectural Perspective</i>
JFI	<i>Jain's Fairness Index</i>
LAN	<i>Local Area Networks</i>
LDPC	<i>Low-Density Parity-check Convolutional code</i>
LDR	<i>Low data rate</i>
LMM	<i>Link Management Module</i>
LV	<i>Low Voltage</i>
MAC	<i>Medium Access Control</i>
MSS	<i>Maximum Segment Size</i>
MV	<i>Medium Voltage</i>
NAN	<i>Neighborhood Area Network</i>
NAV	<i>Network Allocation Vector</i>
NB-PLC	<i>Narrow Band PLC</i>
NEK	<i>Network Encryption Key</i>
NGN	<i>Next Generation Access Network</i>
NGN	<i>Next Generation Networks</i>
NIST	<i>National Institute of Standards and Technology</i>
NTU	<i>Network Termination Unit</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency-Division Multiplexing</i>
OMS	<i>Outage Management Systems</i>
PCS	<i>Physical Carrier Sense</i>
PHEV	<i>Plug-in Hybrid Electric Vehicle</i>
PHY	<i>Physical Layer</i>
PLC	<i>Power Line Communications</i>
PLR	<i>Packet Loss Ratio</i>
PRS	<i>Priority Resolution Slots</i>
PS-IAP	<i>Power Systems Interoperability Architectural Perspective</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
RIFS	<i>Response Interframe Space</i>
RP	<i>Repeater</i>
RTS	<i>Request to send</i>
RTT	<i>Round Trip Time</i>
RWND	<i>Receiver window</i>
SCADA	<i>Supervisory Control And Data Acquisition</i>
SG	<i>Smart Grid</i>
SGC	<i>Smart Grid Communications</i>
SGTF	<i>Smart Grid Task Force</i>
SLA	<i>Service Level Agreement</i>
SN	<i>Substation Network</i>
SNIR	<i>Signal to Noise and Interference Ratio</i>

SNR	<i>Signal-to-Noise Ration</i>
STA	<i>Station</i>
STID	<i>Station IDentifier</i>
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>
TDMA	<i>Time Division Multiple Access</i>
TDR	<i>Time Division Repeater</i>
TEI	<i>Terminal Equipment Identifier</i>
UNB	<i>Ultra Narrow Band</i>
UP	<i>User Priority</i>
V2G	<i>Vehicle-to-Grid Communications</i>
VBR	<i>Variable Bit-Rate</i>
VCS	<i>Virtual Carrier Sense</i>
VLAN	<i>Virtual Local Area Network</i>
VoD	<i>Video on Demand</i>
VoIP	<i>Voice over IP</i>
VPN	<i>Virtual Private Network</i>
WAN	<i>Wide Area Networks</i>
WMN	<i>Workforce Mobile Network</i>
W-PLC	<i>Wireless-PLC</i>
ΗΔ	<i>Ηλεκτρικό Δίκτυο</i>
ΗΕ	<i>Ηλεκτρική Ενέργεια</i>
ΚΥΤ	<i>Κέντρο Υψηλής Τάσης</i>
ΜΤ	<i>Μέση Τάση</i>
ΥΤ	<i>Υψηλή Τάση</i>
ΧΤ	<i>Χαμηλή Τάση</i>

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1:

ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΕΠΙ ΤΟΥ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ

1.1 Εισαγωγή

Η ιδέα της μετάδοσης δεδομένων μέσω του ενεργειακού δικτύου, γνωστή ως Επικοινωνίες Γραμμών Ισχύος - Power Line Communications (PLC) - , δεν είναι νέα, αφού οι πρώτες αναφορές στην τεχνολογία PLC χρονολογούνται από την αρχή του προηγούμενου αιώνα [Sch09]. 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). Πρόκειται για επικοινωνίες που λειτουργούν στις συχνότητες 0.3-3kHz και επιτυγχάνουν ρυθμούς μετάδοσης μικρότερους των 100bps [Gal11]. Οι συγκεκριμένες λύσεις είναι ιδιωτικές και χρησιμοποιούνται επί τουλάχιστον δύο δεκαετίες από ενεργειακούς παρόχους για την υποστήριξη των συστημάτων SCADA.

Η δεύτερη κατηγορία τεχνολογιών PLC καλύπτει τις επικοινωνίες στενής ζώνης (Narrow Band – NB) και χρησιμοποιήθηκε αρχικά από τους παρόχους ηλεκτρικής ενέργειας για εφαρμογές όπως η παρακολούθηση απομακρυσμένων μετρητών [Gal11]. Τα συστήματα NB-PLC¹ λειτουργούν στις συχνότητες 3-500kHz, που αντιστοιχούν στις ζώνες CENELEC στην Ευρώπη (συχνότητες 3-148.5kHz), FCC στις Ηνωμένες Πολιτείες (συχνότητες 10-490kHz) και ARIB στην Ιαπωνία (συχνότητες 10-450kHz). Η συγκεκριμένη κατηγορία μπορεί να χωριστεί περαιτέρω σε συστήματα χαμηλού ρυθμού μετάδοσης (low data rate – LDR) και υψηλού ρυθμού μετάδοσης (high data rate - HDR). Τα συστήματα LDR παρουσιάζουν ρυθμούς μετάδοσης που δεν υπερβαίνουν τα μερικά kbps και βασίζονται σε μετάδοση απλού φέροντος, ενώ τα συστήματα HDR εμφανίζουν

¹ Για τις επικοινωνίες NB-PLC, χρησιμοποιείται στη βιβλιογραφία και ο όρος PLC

Πίνακας 1.1: Προδιαγραφές και πρότυπα NB-PLC και στοιχεία λειτουργίας

	G3-PLC	PRIME	ITU-T G.HNEM
<i>Χρονολογία</i>	2009	2010	2011
<i>Ζώνη Συχνοτήτων</i>	36-91kHz CENELEC A	42-89kHz	36-143.5kHz CENELEC
	150-487.5kHz FCC 2		150-487.5kHz FCC 2
	10-487.5kHz FCC		10-487.5kHz FCC
<i>Μέγιστος Ρυθμός Μετάδοσης</i>	34.1kbps	128.6kbps	>1Mbps
	έως 300kbps		
<i>OFDM</i>	FFT	FFT	Windowed
	36 φέροντα	96 φέροντα	128, 256 φέροντα
<i>FEC</i>	RS, convolutional, repetition code	convolutional code	RS, convolutional code
<i>MAC</i>	IEEE 802.15.4- 2006	TDM, CSMA/CA	CSMA/CA (4 επίπεδα προτεραιοτήτων)
<i>Διαμόρφωση</i>	DBPSK, DQPSK	DBPSK, DQPSK, D8PSK	QAM-2, QAM- 4, QAM-16

ρυθμούς μετάδοσης που φθάνουν τα 500kbps και βασίζονται σε μετάδοση πολλαπλών φερόντων.

Ο Πιν.1.1 παρουσιάζει τις βασικότερες προδιαγραφές των τεχνολογιών HDR NB-PLC με τα κύρια χαρακτηριστικά λειτουργίας τους. Στοιχεία για τη συμπλήρωση των πινάκων αντλήθηκαν από τις δημοσιεύσεις [Hoc11], [Ber12], [Oks11], [Bum12] και [Raz10]. Σημειώνεται ότι, από τις προδιαγραφές συστημάτων NB-PLC, πρότυπα αποτελούν μόνο οι προδιαγραφές που προέρχονται από τους οργανισμούς προτυποποίησης ITU και IEEE. Οι ενέργειες προτυποποίησης των τεχνολογιών NB-PLC ξεκίνησαν το 2010 από ITU και IEEE, και κατέληξαν στα πρότυπα ITU-T G.HNEM και το IEEE P1901. Από τον Πιν.1.1 απουσιάζει το πρότυπο IEEE P1901.2 [P1901.2] που δεν ήταν διαθέσιμο κατά τον καιρό

συγγραφής της διατριβής. Αναφορικά με τις προδιαγραφές συστημάτων LDR NB-PLC, οι κυριότεροι εκπρόσωποί τους είναι οι τεχνολογίες ISO/IEC 14908-3 [LonWork], ISO/IEC 14543-3-5 [KNX], ISO 16484-5 [BACnet], CEA-600.31, IEC 61334-3-1 και IEC 61334-5.

Η τρίτη κατηγορία τεχνολογιών PLC καλύπτει τις επικοινωνίες ευρείας ζώνης (Broad Band – BB) και αποτελεί το πλέον πρόσφατο πεδίο έρευνας της τεχνολογίας PLC. Στη διάρκεια της τελευταίας δεκαετίας, η ανάγκη για υποστήριξη νέων εφαρμογών οδήγησε στην εμφάνιση των πρώτων PLC chip που υποστηρίζουν ευρυζωνική μετάδοση από τις εταιρίες Intellon, DS2 και Panasonic [Ber12]. Ακολούθησε η δημιουργία ευρεσιτεχνιών και η έκδοση προτύπων για την τεχνολογία BB-PLC² με κυριότερα αυτά των HomePlug [TIA-1133], IEEE [IEEE 1901] και ITU [ITU-TG.hn]. Τα συστήματα BB-PLC λειτουργούν στις ζώνες HF και VHF (συχνότητες 1.8-250MHz) ενώ οι ρυθμοί μετάδοσης ξεκινούν από μερικές δεκάδες Mbps και φθάνουν σε εκατοντάδες Mbps. Η συγκεκριμένη κατηγορία μπορεί να χωριστεί περαιτέρω σε οικιακά δίκτυα πρόσβασης (In-Home) που εκτείνονται στο δίκτυο χαμηλής τάσης –XT (Low Voltage – LV) και δίκτυα πρόσβασης (Access Networks) που εκτείνονται και σε γραμμές μέσης τάσης –MT (Medium Voltage – MV). Περισσότερα στοιχεία για την προτυποποίηση των δικτύων BB-PLC εξετάζονται στο Κεφ.2 της διατριβής.

Ο Πιν.1.2 παρουσιάζει τα δύο κύρια πρότυπα των τεχνολογιών BB-PLC με τα βασικότερα χαρακτηριστικά λειτουργίας τους. Στοιχεία για τη συμπλήρωση των πινάκων αντλήθηκαν από τις δημοσιεύσεις [Gal08], [HPA], [Gal11], [Gal09], [Jun05] και [Oks09]. Άλλες προδιαγραφές λειτουργίας συστημάτων BB-PLC που δεν προέρχονται από οργανισμούς προτυποποίησης είναι το HomePlug AV/Extended [HPA], HomePlug Green PHY [HPA], HD-PLC [HDPLC] and UPA Powermax [UPA].

Σήμερα, το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας στρέφεται γύρω από την τεχνολογία BB-PLC, η οποία προβάλλει ως μία πολύ ελκυστική λύση για την υλοποίηση εφαρμογών διαχείρισης του ενεργειακού δικτύου και των δεδομένων λειτουργίας αυτού, οι οποίες είναι γνωστές ως εφαρμογές ευφυών δικτύων, καθώς και για την υλοποίηση τηλεπικοινωνιακών ευρυζωνικών εφαρμογών, γνωστών ως εφαρμογές

² Στην περίπτωση όπου το ενεργειακό δίκτυο έχει το ρόλο τηλεπικοινωνιακού δικτύου πρόσβασης οι επικοινωνίες BB-PLC αναφέρονται στη βιβλιογραφία ως BPL (Broadband over Power Lines).

Πίνακας 1.2: Πρότυπα BB-PLC και στοιχεία λειτουργίας

ITU-T G.hn		IEEE 1901	
		FFT-PHY	Wavelet-PHY
<i>Ζώνη Συχνότητας</i>	2-25MHz, 2-50MHz, 2-100MHz	2-30MHz, 2-48MHz, 2-60MHz	2-28MHz, 2-60MHz
<i>Μέγιστος Ρυθμός Μετάδοσης</i>	1Gbps	545Mbps	544Mbps
<i>OFDM</i>	Windowed	FFT	Wavelet
	2048, 4096 φέροντα	3072, 6144 φέροντα	512, 1024 φέροντα
<i>FEC</i>	QC-LDPC	Turbo convolutional code	RS, RS-CC, LDPC
<i>Διαμόρφωση</i>	BPSK, QPSK, 8-, 16-, 64-, 256-, 1024-, 4096-QAM	BPSK, QPSK, 8-, 16-, 64-, 256-, 1024-, 4096-QAM	BPSK, 4-, 8-, 16-, 32-PAM
<i>Contention-based MAC scheme</i>	CSMA/CA (4 επίπεδα προτεραιοτήτων)	CSMA/CA (4 επίπεδα προτεραιοτήτων)	CSMA/CA (8 επίπεδα προτεραιοτήτων)
<i>Contention-free MAC scheme</i>	TDMA	TDMA	TDMA
<i>Δίκτυο Πρόσβασης (Access)</i>	Δεν υποστηρίζεται	Υποστηρίζεται	Υποστηρίζεται
<i>Οικιακό δίκτυο (In home)</i>	Υποστηρίζεται	Υποστηρίζεται	Υποστηρίζεται

τηλεπικοινωνιακού δικτύου πρόσβασης. Οι κυριότεροι λόγοι που οδήγησαν στην ανάπτυξη των επικοινωνιών BB-PLC ήταν οι ακόλουθοι:

- i. *Κίνητρα για τους ενεργειακούς παρόχους*
 - Παραδοσιακά, οι ενεργειακοί πάροχοι είχαν ανάγκη από τη χρήση τηλεπικοινωνιακού δικτύου προκειμένου να μεταδώσουν και να διαχειρισθούν την πληροφορία που δημιουργούν τα συστήματα ελέγχου και συλλογής

πληροφοριών γνωστά ως Supervisory Control And Data Acquisition SCADA. Για το λόγο αυτό, πλήθος τεχνολογιών έχουν εξετασθεί για να υλοποιηθεί το τηλεπικοινωνιακό δίκτυο [Χιω12], [Sau11]. Η τεχνολογία BB-PLC κρίνεται ως η μόνη ενσύρματη ευρυζωνική τεχνολογία που μπορεί να υποστηρίξει τη συλλογή δεδομένων από οποιοδήποτε σημείο του ενεργειακού δικτύου ενώ οι υψηλοί ρυθμοί μετάδοσης που επιτυγχάνονται κρίνονται ικανοί να εγγυηθούν την υποστήριξη νέων υπηρεσιών [Pim04].

- Η χρήση των επικοινωνιών PLC προσφέρει στον ενεργειακό πάροχο ανεξαρτησία από άλλη τηλεπικοινωνιακή υποδομή. Η συγκεκριμένη δυνατότητα κρίνεται ιδιαίτερα σημαντική αφού το κόστος εγκατάστασης ενός PLC καναλιού είναι συγκρίσιμο με αυτό των ασυρμάτων δικτύων [Fan12], ενώ, παράλληλα, εγγυάται την ασφαλή μετάδοση των προσωπικών δεδομένων που συλλέγονται [Hir12], [Ade11].
- Η τεχνολογία NB-PLC κρίνεται κατάλληλη μόνο όταν υπάρχει μικρή ροή πληροφορίας από και προς τους κόμβους – κυρίως απομακρυσμένους - του ενεργειακού δικτύου που αφορά την παρακολούθηση ενός μεγέθους ενδιαφέροντος (τάση δικτύου, ισχύς παραγωγής/κατανάλωσης, περιβαλλοντικές συνθήκες) [Χιω12]. Εντούτοις, η πρόσφατη οδηγία της ITU [ITU08] που αφορά τη διασφάλιση ποιότητας υπηρεσίας (Quality of Service – QoS) σε όλα τα επικοινωνιακά δίκτυα επόμενης γενιάς (Next Generation Networks – NGN) αναμένεται να επηρεάσει και την επικοινωνία στα ενεργειακά ευφυή δίκτυα [Val12] επιβάλλοντας τη χρήση της τεχνολογίας BB-PLC προκειμένου να υποστηριχθεί η μετάδοση της απαιτούμενης πληροφορίας ελέγχου. Συγκεκριμένα, προκειμένου να υποστηριχθούν ορισμένες εφαρμογές ευφυών δικτύων [Sad12] όπως η τηλεπροστασία, απαιτείται καθυστέρηση μετάδοσης μικρότερη των 10ms που δεν μπορεί να υποστηριχθεί από τεχνολογίες NB-PLC.

ii. Κίνητρα για τους τηλεπικοινωνιακούς παρόχους

- Η αξιοποίηση του BB-PLC διαύλου ως τηλεπικοινωνιακού δικτύου πρόσβασης αποτελεί πολύ καλή λύση, αν όχι τη μοναδική, για την κάλυψη αγροτικών/απομακρυσμένων περιοχών όπου δεν υπάρχει εγκατεστημένη δικτυακή υποδομή [Sar09]. Παράλληλα, η τεχνολογία BB-PLC συγκρινόμενη με άλλες υπάρχουσες ενσύρματες τηλεπικοινωνιακές λύσεις [Kri10]

αποδεικνύεται ως η πλέον συμφέρουσα επιλογή για αγροτικές περιοχές, δεδομένης της ήδη εγκατεστημένης υποδομής.

- Εκτός από την κάλυψη των αγροτικών περιοχών, η τεχνολογία BB-PLC κρίνεται κατάλληλη για την υποστήριξη ευρυζωνικών εφαρμογών στην περίπτωση των οικιακών χρηστών και των μικρών επιχειρήσεων των αστικών κέντρων, σε περιπτώσεις όπου καμία άλλη επένδυση εγκατάστασης νέας καλωδιακής ή οπτικής υποδομής δεν είναι οικονομικά βιώσιμη [Beh07], [Hra04].

Τα ανωτέρω σαφή πλεονεκτήματα της τεχνολογίας BB-PLC αναμένεται να στρέψουν το ενδιαφέρον τόσο των ενεργειακών όσο και των τηλεπικοινωνιακών παρόχων στην αξιοποίηση των δικτύων BB-PLC τόσο για την υποστήριξη εφαρμογών ευφών δικτύων όσο και για την υποστήριξη ευρυζωνικών τηλεπικοινωνιακών εφαρμογών. Προκειμένου, όμως, να επιτευχθεί η διάδοση της BB-PLC τεχνολογίας, κρίνεται απαραίτητο να διευθετηθούν οι κρίσιμοι περιοριστικοί παράγοντες που αναλύονται στην επόμενη ενότητα και αφορούν ζητήματα μετάδοσης τηλεπικοινωνιακού σήματος μέσω των γραμμών μεταφοράς της Ηλεκτρικής Ενέργειας (HE) καθώς και ρυθμιστικά θέματα.

1.2 Κρίσιμα ζητήματα κατά τη μετάδοση σημάτων μέσω του ενεργειακού δικτύου

Τα PLC δίκτυα διαφέρουν σημαντικά από τα παραδοσιακά τηλεπικοινωνιακά δίκτυα λόγω πλήθους παραγόντων που σχετίζονται τόσο με τα εγγενή χαρακτηριστικά του ενεργειακού δικτύου, που δεν ευνοούν τη μετάδοση τηλεπικοινωνιακών σημάτων, όσο και με το περιβάλλον λειτουργίας αυτών. Σημειώνεται ότι η PLC μετάδοση προκαλεί ηλεκτρομαγνητικές εκπομπές που εμπίπτουν σε ρυθμίσεις και περιορισμούς αντίστοιχους με αυτούς των ασύρματων επικοινωνιών. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι κρίσιμοι παράγοντες που διαφοροποιούν τη μετάδοση σημάτων μέσω PLC δικτύων από τη μετάδοση μέσω των παραδοσιακών τηλεπικοινωνιακών δικτύων [IEEE 1901], [Col04].

1.2.1 Τοπολογία

Η τοπολογία του ενεργειακού δικτύου, αν και είναι ήδη εγκατεστημένη, μεταβάλλεται λειτουργικά λόγω συνδέσεων και αποσυνδέσεων κυκλωμάτων και συσκευών. Συγκεκριμένα, η μετάδοση τηλεπικοινωνιακού σήματος επηρεάζεται δυσμενώς από τους εξής παράγοντες:

- *Σύνδεση/Αποσύνδεση συσκευών*: Η σύνδεση νέων συσκευών, που παρατηρείται συχνότερα στο περιβάλλον της ΧΤ, μεταβάλλει διαρκώς την τοπολογία του δικτύου άρα και τη μετάδοση σημάτων μέσω αυτού.
- *Υπαρξη μετασχηματιστών/διακοπών*: Η ύπαρξη μετασχηματιστών και διακοπών στις γραμμές ΜΤ και ΧΤ δρα αρνητικά στη μετάδοση τηλεπικοινωνιακών σημάτων αφού αυξάνονται δραματικά οι ανακλάσεις στα σημεία όπου προϋπάρχει εγκατεστημένος ο ηλεκτρολογικός εξοπλισμός [Sen11].
- *Εμφάνιση/Υπαρξη ανοικτοκυκλωμάτων/ κλειστών βρόχων/ διακλαδώσεων*: Η τοπολογία του ενεργειακού δικτύου είναι συνήθως αρκετά σύνθετη αφού εμφανίζει δακτυλίους, ανοικτοκυκλώματα και πολλαπλές διακλαδώσεις [Λαζ10]. Η παρουσία διακλαδώσεων στο δίκτυο οδηγεί σε αύξηση των ανακλάσεων, ενισχύοντας το φαινόμενο της πολυδιαδρομικής διάδοσης (multipath propagation) των PLC σημάτων. Έχει παρατηρηθεί ότι όσο αυξάνονται οι διακλαδώσεις σε ένα ενεργειακό δίκτυο τόσο αυξάνεται το ποσοστό λαθών (Bit Error Ratio – BER) [Cha10] και το πλήθος των φασματικών βυθίσεων (spectral notches) [Laz101] στις εμπλεκόμενες τηλεπικοινωνιακές ζεύξεις PLC.
- *Μήκος γραμμών και διακλαδώσεων*: Εκτός από την εκθετική εξασθένηση του σήματος καθώς αυξάνεται το μήκος της γραμμής μεταφοράς [Zim02], η παρουσία διακλαδώσεων οδηγεί σε αύξηση του πλήθους και του βάθους των φασματικών βυθίσεων [Ago11]. Επίσης, το ηλεκτρικό μήκος και το πλήθος των διακλαδώσεων επηρεάζει την από-άκρο-σε-άκρο εξασθένηση, αφού ολιγάριθμες διακλαδώσεις μεγάλου μήκους επιβαρύνουν κατά κανόνα λιγότερο τη μετάδοση σημάτων σε σχέση με πολυάριθμες διακλαδώσεις μικρού μήκους [Laz09].

1.2.2 Θόρυβος

Ο BB-PLC δίαυλος έχει υλοποιηθεί για τη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας. Επομένως, έχει εγγενή χαρακτηριστικά που δυσχεραίνουν τη μετάδοση τηλεπικοινωνιακών σημάτων. Συγκεκριμένα, ο θόρυβος που επηρεάζει τη γραμμή μεταφοράς προέρχεται από

πληθώρα διατάξεων του ηλεκτρικού δικτύου που επηρεάζει τις γραμμές μεταφοράς και χρησιμοποιεί τμήμα του φάσματος των συστημάτων BB-PLC. Οι τύποι θορύβου που επιβαρύνουν την BB-PLC μετάδοση είναι οι ακόλουθοι:

- i. *Είδη Θορύβου στο δίκτυο MT* [Laz101, Laz103]
 - Έγχρωμος Θόρυβος Υποβάθρου (Colored background noise) που αποτελεί την κύρια πηγή θορύβου στο δίκτυο BB-PLC. Πρόκειται για θόρυβο υποβάθρου (background noise) τον οποίο εμφανίζουν ως παθητικά μέσα μετάδοσης τα καλώδια ισχύος και εξαρτάται από τις κλιματικές συνθήκες, την υγρασία, το ύψος τοποθέτησης των καλωδίων από την επιφάνεια της γης, τη γεωγραφική περιοχή και άλλους παράγοντες.
 - Θόρυβος Στενής Ζώνης (Narrowband noise) που προέρχεται από τις εκπομπές άλλων ασύρματων υπηρεσιών που εκπέμπουν στην ίδια ζώνη με την τεχνολογία BB-PLC. Αυτό συμβαίνει διότι τμήματα της ζώνης 1-100MHz έχουν αποδοθεί σε ασύρματες υπηρεσίες οι οποίες, όπου και όταν βρίσκονται σε λειτουργία αδειοδοτημένες από τις αρμόδιες αρχές, παρεμβάλλουν και παρεμβάλλονται στη μετάδοση PLC.
- ii. *Είδη Θορύβου που απαντώνται αποκλειστικά στο δίκτυο XT* [Hoo98, And10]
 - Παλμικός Θόρυβος (Impulsive Noise) που μπορεί να είναι περιοδικός ή μη, σύγχρονος με τη συχνότητα των αγωγών ή ασύγχρονος. Αυτός ο τύπος θορύβου περιγράφει καταγισμούς θορύβου που προέρχονται από άνοιγμα και κλείσιμο διακοπών, τροφοδοτικών και άλλων τύπων εξοπλισμού.

1.2.3 Ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα (Electromagnetic compatibility - EMC)

Η μετάδοση σημάτων μέσω του BB-PLC διαύλου προκαλεί ακούσιες παρεμβολές σε ασύρματες υπηρεσίες και συστήματα που λειτουργούν στην περιοχή που τα περιβάλλει [Λαζ10]. Παράλληλα, η μετάδοση σημάτων PLC σε μη αδειοδοτημένη προς τούτο ζώνη συχνοτήτων (αλλά αδειοδοτημένη για άλλες υπηρεσίες) [IEEE1901] μπορεί να επηρεασθεί από οποιοδήποτε τηλεπικοινωνιακό σύστημα αδειοδοτημένο να εκπέμπει στη ζώνη 1-100MHz. Επομένως, κατά τη μετάδοση σημάτων PLC πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι ακόλουθοι περιορισμοί σχετικοί με θέματα EMC:

- i. *Ρυθμιστικοί κανονισμοί με στόχο τη μείωση των ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών (Electro Magnetic Interference – EMI):* Διάφορες χώρες και οργανισμοί θέτουν

διαφορετικούς κανονισμούς για τη λειτουργία των συστημάτων BB-PLC, με στόχο να περιορίσουν τις παρεμβολές που αυτά προκαλούν στους αδειοδοτημένους χρήστες. Αναλυτική παρουσίαση των ορίων εκπομπής για κάθε χώρα μπορεί να βρεθεί στις αναφορές [Raz10], [Laz10] και [Tom09]. Οι πλέον πρόσφατες προσπάθειες για τη ρύθμιση των παρεμβολών που προκαλούνται από την BB-PLC τεχνολογία γίνονται σήμερα από

- την IEEE, η οποία στις αρχές του 2011 εξέδωσε το πρότυπο των απαιτήσεων EMC για την τεχνολογία PLC [IEEE1775],
- την CISPR (Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques) που σε συνεργασία με την CENELEC (Comité Européen de Normalisation Électrotechnique) έχουν αναπτύξει το πρότυπο CISPR 22 [CISPR22]. Βελτιώσεις στο παρόν πρότυπο είναι σε εξέλιξη. Μόλις ολοκληρωθούν, το βελτιωμένο πρότυπο αναμένεται να αποτελέσει την επίσημη νομοθεσία της Ευρωπαϊκής Ένωσης.
- την FCC (Federal Communications Commission) που είναι ο υπεύθυνος φορέας προτυποποίησης των ηλεκτρομαγνητικών εκπομπών στις Ηνωμένες Πολιτείες. Κάθε τύπος ψηφιακού εξοπλισμού πρέπει να συμμορφώνεται με τα κανονικοποιημένα όρια εκπομπής του FCC Part 15 [FCC/P.15]

ii. *Τεχνικές μείωσης παρεμβολών:* Στο νέο πρότυπο της CISPR που αναμένεται να εκδοθεί ενσωματώνονται οι ακόλουθες τροποποιήσεις:

- *Αποκλεισμός Καναλιών από τη λειτουργία PLC (Notching) στη ζώνη συχνοτήτων 1-100MHz :* Στα τμήματα του φάσματος όπου οι εκπομπές υπερβαίνουν τα καθορισμένα όρια, έχει προταθεί ο μηδενισμός της εκπομπής (στατική αποκοπή συχνοτήτων) [Vuk08] προκειμένου να τηρούνται τα όρια EMC. Επίσης, σε ζώνες όπου ανιχνεύεται μετάδοση ασύρματων εκπομπών, προτείνεται η δυναμική αποκοπή προκειμένου να μην επηρεασθεί η μετάδοσή τους από τη λειτουργία του BB-PLC συστήματος [Laz10b, Pra10].
- *Ρύθμιση της ισχύος έγχυσης:* Προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν οι παρεμβολές εξετάζεται η δυνατότητα μείωσης της ισχύος έγχυσης σε περιπτώσεις καλών συνθηκών διάδοσης [Wei10], [Pag10] ώστε συγκεκριμένοι κόμβοι του PLC δικτύου να λειτουργούν με μειωμένες στάθμες έγχυσης ισχύος. Κάτι τέτοιο επηρεάζει άμεσα την εμβέλεια ενός

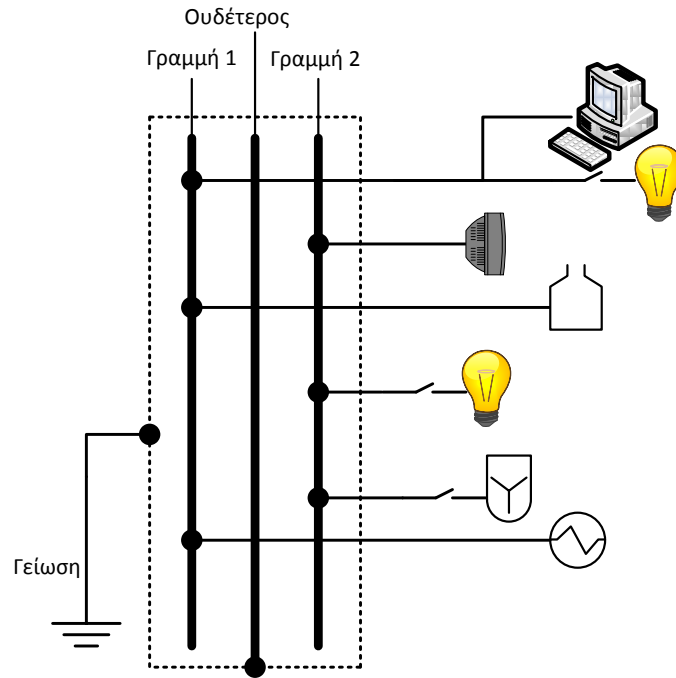
κόμβου PLC άρα και τη σχεδίαση του δικτύου αφού ένας κόμβος μπορεί να μην είναι προσβάσιμος καίτοι είναι συνδεδεμένος στο δίκτυο και λειτουργεί κανονικά [IEEE1901].

1.3 Βασικές αρχιτεκτονικές PLC δικτύων

Τα δίκτυα BB-PLC συναντώνται τόσο στο εσωτερικό των κτιρίων, εκτεινόμενα στο δίκτυο XT, όσο και στο δίκτυο MT. Όταν εκτείνονται στο εσωτερικό των κτιρίων μπορούν να θεωρηθούν τοπικά δίκτυα (Local Area Networks – LAN) ενώ όταν εκτείνονται στο δίκτυο MT καλύπτουν πολύ μεγαλύτερη έκταση που υπερβαίνει τα όρια του τοπικού δικτύου. Ως εκ τούτου, μπορούν να θεωρηθούν και δίκτυα ευρείας ζώνης (Wide Area Networks – WAN). Για την αρχιτεκτονική των δύο αυτών διακριτών τύπων δικτύων έχουν αντληθεί στοιχεία από το πρότυπο της IEEE για τη λειτουργία των BB-PLC δικτύων [IEEE1901]. Τα στοιχεία που παρουσιάζονται εδώ συμφωνούν και με προγενέστερες μελέτες αρχιτεκτονικής [Hra04], [Sar09], [Vla11], [ITU10], [OPERA05].

1.3.1 Οικιακά Δίκτυα (In-home - IH networks)

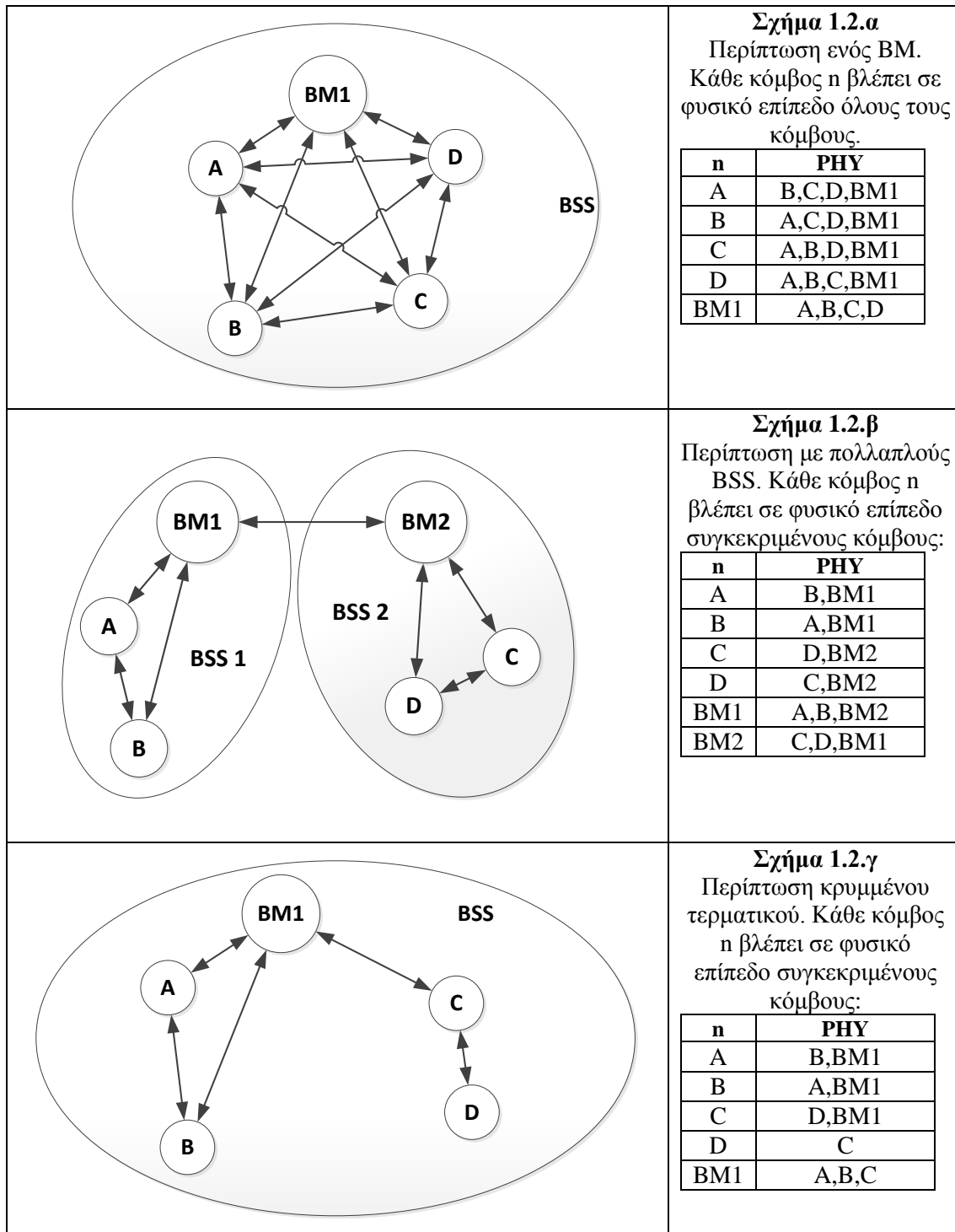
Τα οικιακά δίκτυα BB-PLC έχουν σχεδιασθεί για να καλύπτουν αποκλειστικά εγκαταστάσεις κατοικιών και άλλων κτιρίων εκτεινόμενα στο δίκτυο διανομής XT. Στο εσωτερικό κτιρίων το δίκτυο διανομής δεν έχει συγκεκριμένη τοπολογία. Ένα παράδειγμα από τμήμα οικιακού τριφασικού δικτύου XT απεικονίζεται στο Σχ.1.1, παρατηρώντας το οποίο προκύπτει ότι, στην περίπτωση της BB-PLC μετάδοσης, μπορεί να επιτευχθεί επικοινωνία μεταξύ συσκευών συνδεδεμένων στην ίδια φάση (same line communications). Οι μικρές αποστάσεις των γραμμών σε ένα οικιακό δίκτυο οδηγούν σε χαμηλή εξασθένηση, της τάξης των 15 με 20dB [Cav04], [IEEE1901]. Επομένως, το H/M περιβάλλον ενός δικτύου IH είναι κατάλληλο για μετάδοση σημάτων, εφόσον η μετάδοση δεν επηρεάζεται από το φαινόμενο της πολυδιαδρομικής διάδοσης (multipath propagation), δηλαδή στην κοινή φάση δεν υπάρχουν διακλαδώσεις. Η διαφασική επικοινωνία (cross line communications) γίνεται μέσω του μετασχηματιστή MT προς XT. Ως εκ τούτου, είναι εφικτή αλλά με μεγαλύτερη εξασθένηση επηρεαζόμενη και από την



Σχήμα 1.1: Παράδειγμα οικιακού τριφασικού δικτύου προσαρμοσμένο από το πρότυπο IEEE 1901 για BB-PLC δίκτυα [IEEE1901]

πολυδιαδρομικότητα (multipath) φαινόμενο. Σε πρακτικές εφαρμογές η διαφασική επικοινωνία αποφεύγεται αφού η εξασθένηση που εισάγει ο μετασχηματιστής είναι της τάξης των 20dB [Cat11]. Σημειώνεται ότι στα δίκτυα IH η μετάδοση τηλεπικοινωνιακών σημάτων επηρεάζεται σε διάφορες ζώνες συχνοτήτων από ανακλάσεις από τις ηλεκτρικές πρίζες και τις συνδεδεμένες σε αυτές συσκευές. Η πολυδιαδρομικότητα προκαλεί υψηλές τιμές εξασθένησης που προσεγγίζουν τα 50dB στις εμπλεκόμενες ζώνες συχνοτήτων [IEEE1901]. Τεχνικές δυναμικής αποκοπής ζωνών συχνοτήτων μπορούν να βελτιώσουν σημαντικά τα χαρακτηριστικά μετάδοσης.

Στα δίκτυα IH, οι BB-PLC κόμβοι ονομάζονται σταθμοί (stations – STAs) και είναι οργανωμένοι κατά ομάδες σε σταθμούς βασικών υπηρεσιών (Basic Service Sets – BSSs), κατ’ αναλογία της ορολογίας που χρησιμοποιείται για τα ασύρματα δίκτυα. Σε κάθε BSS όλοι οι σταθμοί επικοινωνούν με το σταθμό διαχειριστή του BSS (BSS manager – BM). Παραδείγματα BSS παρουσιάζονται στο Σχ.1.2. Στο Σχ.1.2.α παρουσιάζεται περίπτωση τοπολογίας με ένα BM. Λόγω του μικρού μήκους των γραμμών που συναντώνται στα IH δίκτυα, όλοι οι κόμβοι βρίσκονται εντός της εμβέλειας όλων, σχηματίζοντας μία πλήρως διασυνδεδεμένη τοπολογία. Η περίπτωση αυτή είναι η πλέον συνηθισμένη περίπτωση IH δικτύων. Σημειώνεται ότι η παρεμβολή μεταξύ των κόμβων μπορεί να ελαχιστοποιηθεί ρυθμίζοντας την ισχύ έγχυσης ή μεταβάλλοντας τις φασματικές ζώνες εκπομπής. Στην



Σχήμα 1.2: Παραδείγματα διαφορετικών BSS σε οικιακό δίκτυο προσαρμοσμένα από το πρότυπο IEEE 1901 για BB-PLC δίκτυα [IEEE1901]

περίπτωση του Σχ.1.2.β εμφανίζονται περισσότερα BSS, η επικοινωνία μεταξύ των οποίων γίνεται μέσω των BMs όπως και στην κυβελωτή τηλεφωνία. Στο Σχ.1.2.γ παρουσιάζεται η περίπτωση του «κρυμμένου τερματικού», αφού το STA D επικοινωνεί με τον BM μέσω του C. Ο κόμβος C δρα σε αυτή την περίπτωση ως αντιπρόσωπος (proxy) BM.

1.3.2 Δίκτυα Πρόσβασης (Access networks - ANs)

Σε αντίθεση με τα οικιακά δίκτυα, τα δίκτυα πρόσβασης (AN) ανήκουν σε συγκεκριμένο πάροχο υπηρεσιών και μπορούν να υποστηρίξουν υπηρεσίες ευρυζωνικής μετάδοσης τηλεπικοινωνιακών δεδομένων και υπηρεσίες ευφυούς δικτύου. Τα δίκτυα AN εκτείνονται σε γραμμές MT και XT του δικτύου διανομής, ενώ στην περίπτωση όπου το δίκτυο BB-PLC χρησιμοποιείται ως τηλεπικοινωνιακό δίκτυο, η απόσταση που καλύπτει κατατάσσει ένα δίκτυο AN σε WAN δίκτυο ή δίκτυο τελευταίου μιλίου (last mile).

Ένα AN περιλαμβάνει μία ή περισσότερες κυψέλες (cells). Η κυψέλη είναι το ισοδύναμο του BSS για το AN. Κάθε κυψέλη αποτελείται από ένα σύνολο κόμβων που ανάλογα με τη θέση τους στην κυψέλη έχουν διαφορετική λειτουργία. Οι κατηγορίες κόμβων που απαντώνται σε μία κυψέλη είναι οι ακόλουθες [IEEE1901]:

- *Επικεφαλής Κόμβοι HE (Head End)*: Κάθε κυψέλη έχει ένα BB-PLC κόμβο που έχει ρόλο κεντρικού διαχειριστή, όπως αντίστοιχα είναι ο BM για το IH δίκτυο. Κύριες λειτουργίες του είναι η κατανομή των πόρων στους υπόλοιπους κόμβους της κυψέλης και η προώθηση της κίνησης από και προς την κυψέλη.
- *Επαναλήπτες (Repeater – RP)*: Πρόκειται για κόμβους που χρησιμοποιούνται για να αυξήσουν την κάλυψη του BB-PLC δικτύου. Η απόσταση στην οποία μπορεί να φθάσει το τηλεπικοινωνιακό σήμα μέσω των γραμμών του ενεργειακού δικτύου είναι συνάρτηση της ποιότητας των καλωδίων, του θορύβου, των παρεμβολών και των περιορισμών στην ισχύ έγχυσης και τη συχνότητα. Ως εκ τούτου, όταν είναι επιθυμητή η επικοινωνία δύο απομακρυσμένων κόμβων ή όταν η ποιότητα μεταξύ δύο γειτονικών κόμβων δεν είναι ικανοποιητική, πρέπει να εγκαθίστανται RPs.
- *Τερματικός κόμβος του δικτύου (Network Termination Unit – NTU)*: Πρόκειται για τους κόμβους που επικοινωνούν με τον εξοπλισμό των τελικών χρηστών. Οριοθετούν το τέλος της κυψέλης.
- *Κόμβοι που ανήκουν στον εξοπλισμό του πελάτη (Customer Premises Equipment – CPE)*: Πρόκειται για τους κόμβους μέσω των οποίων διασυνδέονται οι τελικοί χρήστες στο AN BB-PLC δίκτυο.

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι κόμβοι μίας κυψέλης διαφοροποιούνται ανάλογα με τη θέση τους και όχι ανάλογα με τις δυνατότητές τους. Αυτό σημαίνει ότι, όταν το δίκτυο BB-PLC χρησιμοποιείται για να προσφέρει υπηρεσίες ευφυούς δικτύου, μπορεί να

εξυπηρετήσει χρήστες ακόμα και αν είναι RP, δεδομένου ότι πρέπει να συλλέξει δεδομένα από όλα τα σημεία του δικτύου και όχι μόνο από τα άκρα αυτού όπως συμβαίνει στα AN [Sar09], [Sar12a]. Οι κόμβοι RP, NTU και CPE είναι ισοδύναμοι των STA που απαντώνται στο δίκτυο IH.

Η τοπολογία των δικτύων πρόσβασης ποικίλλει αφού εξαρτάται τόσο από τη δομή του δικτύου διανομής όσο και από την ποιότητα των γραμμών μεταφοράς που διασυνδέουν τους κόμβους. Σε δίκτυα που παρουσιάζουν πολλές διακλαδώσεις ή αρκετά κακή ποιότητα γραμμών, η τοπολογία του AN δικτύου είναι πλήρως διασυνδεδεμένη (mesh topology). Τέτοια δομή παρουσιάζεται σε αστικές περιοχές [Sar12a]. Σε τέτοιες τοπολογίες υπάρχουν περισσότερες της μίας διαδρομές ανάμεσα σε δύο BB-PLC κόμβους, ενώ η τοπολογία μπορεί να μεταβάλλεται δυναμικά προκειμένου να υπάρχει κάθε στιγμή μία μόνο ενεργή διαδρομή και να αποφεύγονται οι κλειστοί βρόχοι (loops). Η ενεργή τοπολογία ακολουθεί κάθε φορά τη μορφή δένδρου (tree topology). Περισσότερες πληροφορίες αναφορικά με τη δυναμική δενδρική τοπολογία δικτύων BB-PLC παρέχονται στο Κεφ.6.

Σε περιοχές όπου το δίκτυο διανομής έχει λιγότερες διακλαδώσεις ή η ποιότητα των γραμμών είναι καλύτερη, όπως είναι οι απομακρυσμένες / αγροτικές περιοχές, η δομή του AN ακολουθεί είτε δενδρική τοπολογία είτε τοπολογία διαύλου (bus topology). Στις περιπτώσεις αυτές, η θέση των κόμβων εξαρτάται από την ποιότητα των γραμμών μεταφοράς που τους διασύνδεουν. Έτσι, είναι πιθανό απομακρυσμένοι μεταξύ τους κόμβοι να έχουν καλύτερη συνδεσιμότητα συγκριτικά με πλησιέστερους κόμβους. Στο Κεφ.3 παρουσιάζεται παράδειγμα τοπολογίας διαύλου, ενώ χρήσιμα συμπεράσματα για τη σχεδίαση των κυψελών παρουσιάζονται στο Κεφ.5.

1.4 Εφαρμογές PLC δικτύων

Τα δίκτυα BB-PLC προσφέρουν την ευρυζωνική τηλεπικοινωνιακή υποδομή προς υλοποίηση πλήθους εφαρμογών που κατηγοριοποιούνται κυρίως σε: (i) υπηρεσίες για τον ενεργειακό πάροχο, που εστιάζονται σε εφαρμογές ευφυούς δικτύου για την παρακολούθηση και διαχείριση του ενεργειακού δικτύου και (ii) υπηρεσίες για τελικούς

χρήστες, που εστιάζονται κυρίως σε ευρυζωνικές τηλεπικοινωνιακές εφαρμογές. Η πρώτη κατηγορία αποτελεί βασικό προαπαιτούμενο, αλλά και κίνητρο, ανάπτυξης δικτύων BB-PLC για τους ενεργειακούς παρόχους, ενώ η δεύτερη μπορεί να αποδειχθεί εξίσου σημαντική για χρήστες αγροτικών ή αραιοκατοικημένων περιοχών [Sar12b]. Σημειώνεται ότι στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται οι κυριότερες εφαρμογές με τις οποίες έχει συνδεθεί η ανάπτυξη BB-PLC δικτύων τόσο στην Ελλάδα [Sar09], [Sar12b] όσο και σε άλλες χώρες όπως Ινδία [Mit07], [Ray11], στο Καράκας [Flo06] και στην Κίνα [Qin09]. Για την υλοποίηση των εφαρμογών που εξετάζονται στη συνέχεια, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και άλλες τηλεπικοινωνιακές τεχνολογίες. Όμως, η χρήση της BB-PLC τεχνολογίας μπορεί να προσφέρει σημαντικά συγκριτικά πλεονεκτήματα τα οποία αναλύονται στη συνέχεια.

1.4.1 Εφαρμογές ευφών δικτύων

Η αποτελεσματικότητα των λειτουργιών παρακολούθησης και διαχείρισης του ενεργειακού δικτύου αποτελεί το βασικότερο κίνητρο ανάπτυξης ευφών δικτύων [Gal08]. Ένα μεγάλο μέρος των λειτουργιών αυτών σχετίζεται με τις διακοπές ηλεκτρικού ρεύματος, με στόχο ή την πρόβλεψη και αποτροπή αυτών ή την έγκαιρη αποκατάσταση αυτών. Οι ενεργειακοί πάροχοι επιθυμούν την ελαχιστοποίηση των διακοπών όχι μόνο για να αυξήσουν το ποσοστό ικανοποίησης των πελατών τους αλλά και για να συμμορφωθούν με τη σχετική νομοθεσία. Ένα αποτελεσματικό σύστημα παρακολούθησης του ηλεκτρικού δικτύου πρέπει να ανιχνεύει μία διακοπή όταν αυτή συμβεί, να προλαμβάνει μία επικείμενη διακοπή και, τέλος, να αναγνωρίζει την αιτία της διακοπής. Για το σκοπό αυτό έχουν δοκιμασθεί πολλές ασύρματες λύσεις [Pat11] ενώ εφαρμογές ασυρμάτων δικτύων αισθητήρων έχουν εφαρμοσθεί επιτυχώς και σε ενσύρματα δίκτυα BB-PLC τεχνολογίας [Sel07]. Η τεχνολογία BB-PLC εμφανίζει σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι των ασύρματων υποδομών αφού μπορεί με επιτυχία να πραγματοποιήσει ανίχνευση αστοχιών με μεγάλη ακρίβεια εντοπισμού, πρόβλεψη αστοχιών σε περιπτώσεις όπου ο σηματοθορυβικός λόγος (Signal-to-Noise Ratio - SNR) παρουσιάζει αυξομειώσεις. Τέλος, μπορούν να ανιχνεύονται τα αίτια που προκαλούν μία διακοπή στο δίκτυο μέσω αναγνώρισης των αντίστοιχων στιγμιότυπων του θορύβου [Kap09].

Εκτός της ανίχνευσης και αποκατάστασης βλαβών του ενεργειακού δικτύου, οι εφαρμογές ευφών δικτύων επιτρέπουν την απομακρυσμένη παρακολούθηση και

διαχείριση των κρίσιμων διατάξεων σε υποσταθμούς διανομής (Distribution Automation – DA). Η συγκεκριμένη εφαρμογή παρουσιάζει μικρή ανεκτικότητα σε καθυστέρηση και προβλέπει τη συλλογή, μεταφορά και επεξεργασία δεδομένων που παράγονται από κατάλληλα εγκατεστημένους αισθητήρες, και συνήθως υλοποιείται σε συνεργασία με τα συστήματα SCADA.

Μία άλλη βασική λειτουργία που αυτοματοποιείται με την εγκατάσταση ευφυών δικτύων είναι η διασύνδεση κατανεμημένων πηγών ενέργειας (Distributed Energy Resources – DERs). Η συγκεκριμένη εφαρμογή έχει ως στόχο την αύξηση της διείσδυσης μικροδικτύων στο ηλεκτρικό δίκτυο (ΗΔ), συμβάλλοντας ουσιαστικά στην ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και τη μείωση των εκπομπών CO₂, δράσεις που αποτελούν στρατηγικούς στόχους της Ευρωπαϊκής Ένωσης για το 2020 [2020].

Μία άλλη εφαρμογή παρακολούθησης του ενεργειακού δικτύου είναι η αυτόματη ανάγνωση μετρητών (Automatic Meter Reading – AMR), δημιουργώντας ταυτόχρονα μία μετρητική υποδομή (Advanced Metering Infrastructure – AMI) που προσφέρει αμφίδρομη επικοινωνία με τα συστήματα και τις συσκευές των τελικών χρηστών [Gal10], [Gal11]. Η τεχνολογία BB-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. Επίσης, η τεχνολογία BB-PLC μπορεί να προσφέρει καθολική διαθεσιμότητα της συγκεκριμένης εφαρμογής αφού ακολουθεί τη δομή του ενεργειακού δικτύου, φθάνοντας σε απομακρυσμένες περιοχές ή σε περιοχές με ασθενή ασύρματη κάλυψη.

Επίσης, η αμφίδρομη επικοινωνία με τους κόμβους του ΗΔ που επιτυγχάνεται μέσω της AMI υποδομής κινητροδοτεί τη δημιουργία εφαρμογών διαχείρισης της ζήτησης του ρεύματος (Demand Side Management – DSM). Δεδομένου ότι η ζήτηση για κατανάλωση δεν είναι ομοιόμορφα κατανεμημένη κατά τη διάρκεια μιας ημέρας, διαχείριση της ζήτησης μέσω δυναμικής τιμολόγησης μπορεί να περιορίσει τη ζήτηση σε περιόδους αιχμής, εξοικονομώντας σημαντικό ποσοστό ενέργειας. Άμεσα συνδεδεμένη με την εφαρμογή διαχείρισης ζήτησης είναι η υλοποίηση οικιακών ή κτιριακών συστημάτων διαχείρισης ενέργειας (Home/Building Energy Management Systems – HEMS/BEMS), όπου μέσω τις εγκατάστασης αισθητήρων και μετρητών μετρείται όχι μόνο η ενεργειακή κατανάλωση αλλά και η ενεργειακή παραγωγή σε περιπτώσεις ενσωμάτωσης εναλλακτικών πηγών ενέργειας. Έτσι, η συστηματική παρακολούθηση της συμπεριφοράς

ενός οικιακού δικτύου παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ή ενός μικροδικτύου μπορεί να συμβάλει στην καλύτερη αξιοποίηση της παραγόμενης ενέργειας.

Κλείνοντας τις εφαρμογές ευφυών δικτύων, αξίζει να αναφερθεί μία νέα εφαρμογή που συγκεντρώνει σημαντικό ερευνητικό ενδιαφέρον, αυτή της επικοινωνίας οχήματος-δικτύου (Vehicle-to-Grid Communications – V2G). Η συγκεκριμένη εφαρμογή αφορά τη φόρτιση υβριδικών οχημάτων μέσω εξοπλισμού παροχής ενέργειας (Electric Vehicle Supply Equipment – EVSE) ο οποίος με τη σειρά του συνδέεται στο δίκτυο διανομής. Η τεχνολογία BB-PLC αναμένεται να αποτελέσει την κύρια τεχνολογία υποστήριξης συστημάτων φόρτισης υβριδικών οχημάτων, όπως προδιαγράφεται στο πρόσφατα δημοσιευμένο πρότυπο ISO/IEC 15118 [IEC10]. Βασικό κίνητρο για την εγκαθίδρυση της τεχνολογίας BB-PLC στην υποστήριξη επικοινωνίας V2G αποτελεί η αυξημένη ασφάλεια που προσφέρει μία λύση που προσφέρει φυσική επαφή των συστημάτων έναντι κάποιας ασύρματης υποδομής [Gal11].

1.4.2 Εφαρμογές ευρυζωνικής πρόσβασης

Αξιοποιώντας την ευρυζωνική πρόσβαση που προσφέρεται από την τεχνολογία BB-PLC, μπορεί να υποστηριχθεί μια πρόσθετη οικογένεια εφαρμογών. Ένα AN BB-PLC δίκτυο μπορεί να αποτελέσει το σημείο πρόσβασης των χρηστών στο Internet ή σε οποιοδήποτε άλλο LAN, αφού κάθε στιγμή υποστηρίζεται IP επικοινωνία [Sar12b]. Ως εκ τούτου, μέσω των AN BB-PLC δικτύων μπορούν να προσφερθούν θεωρητικά όλες οι δικτυακές εφαρμογές. Το σημαντικό πλεονέκτημα που διαφοροποιεί ένα BB-PLC δίκτυο από δίκτυα πρόσβασης άλλης τεχνολογίας είναι η κάλυψη που μπορεί να προσφέρει το ήδη εγκατεστημένο ενεργειακό δίκτυο φθάνοντας και στις πλέον απομακρυσμένες περιοχές, συμβάλλοντας ουσιαστικά στη μείωση του ψηφιακού χάσματος [Tsi09] οδηγώντας σε καθολική ευρυζωνικότητα με εφαρμογές στο χώρο της εκπαίδευσης (Distance Learning), της ιατρικής (tele-medicine) και της απομακρυσμένης εργασίας (tele-work) [Zhe08].

Σε πιλοτικό δίκτυο εγκατεστημένο στη Λάρισα έχουν προσφερθεί υπηρεσίες VoIP (Voice over IP) και παρακολούθησης χώρων μέσω της εγκατάστασης IP καμερών [Sar09]. Περισσότερα στοιχεία για το συγκεκριμένο δίκτυο εξετάζονται στο Κεφ.3. Επίσης, στη βιβλιογραφία [Rul06] αναφέρεται η ύπαρξη AN BB-PLC δικτύου προς υποστήριξη απομακρυσμένης μάθησης σε περιοχή της Ινδονησίας. Επίσης, αναφέρονται μετρήσεις που αποδεικνύουν την αποτελεσματική υποστήριξη εφαρμογών μετάδοσης εικόνας

(Video Steaming) [Cha06], ολοκληρώνοντας την παροχή triple play στους χρήστες δικτύων BB-PLC [Pim04].

Κλείνοντας την παρούσα ενότητα, αξίζει να σημειωθεί ότι η παροχή ευρυζωνικών υπηρεσιών θέτει άμεσα την ανάγκη σχεδίασης αποτελεσματικού συστήματος διασφάλισης της προσφερόμενης ποιότητας των υπηρεσιών (QoS), αφού οι ευρυζωνικές εφαρμογές χρειάζονται σημαντικά περισσότερο εύρος ζώνης συγκριτικά με της εφαρμογές ευφυούς δικτύου. Γενικά, οι απαιτήσεις για καθυστέρηση, εύρος ζώνης και διαθεσιμότητα ποικίλλουν: η πρόσβαση στο Internet χρειάζεται όσο εύρος ζώνης είναι διαθέσιμο και είναι εφαρμογή βέλτιστης προσπάθειας με ελάχιστες απαιτήσεις QoS. Αντιθέτως, η υποστήριξη VoIP εφαρμογών απαιτεί σημαντικά μικρότερο εύρος ζώνης αλλά με εγγυημένη κατανομή πόρων για όλη τη διάρκεια των αντίστοιχων συνδέσεων. Επίσης, οι εφαρμογές VoIP είναι ευαίσθητες στην καθυστέρηση μετάδοσης και τη διακύμανση αυτής (jitter). Τέλος, οι εφαρμογές μετάδοσης εικόνας έχουν υψηλές απαιτήσεις σε εύρος ζώνης και μεγαλύτερη ανεκτικότητα στην καθυστέρηση. Η εξασφάλιση ποιότητας κατά την υποστήριξη εφαρμογών σε ένα BB-PLC δίκτυο εξετάζεται στο Κεφ.2 της διατριβής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2:	ΠΡΟΤΥΠΟΠΟΙΗΣΗ ΔΙΚΤΥΩΝ BB-PLC
--------------------	---

2.1. Εισαγωγή

Η πρώτη απόπειρα προτυποποίησης των BB-PLC δικτύων πραγματοποιήθηκε από τον οργανισμό ANSI (American National Standards Institute) [TIA-1113] και βασίσθηκε στις προδιαγραφές HomePlug 1.0 [Lee03], [Min06]. Το πρότυπο TIA-1113 βασίσθηκε στην εισαγωγή της OFDM διαμόρφωσης στο φυσικό στρώμα (PHY), γεγονός που διαφοροποίησε τις NB από τις BB-PLC τεχνολογίες, ορίζοντας ρυθμούς μετάδοσης της τάξης των 14Mbps. Το σχήμα πρόσβασης MAC που χρησιμοποιήθηκε βασίσθηκε στο σχήμα CSMA/CA εφαρμόζοντας μεταβλητό παράθυρο καθώς και σχήμα προτεραιοτήτων τεσσάρων επιπέδων.

Παράλληλα, το 2005 ξεκίνησαν οι διεργασίες προτυποποίησης της τεχνολογίας BB-PLC από την IEEE [IEEE 1901] και ένα χρόνο αργότερα από την ITU [ITU-T G.hn]. Σημειώνεται ότι οι δράσεις των IEEE και ITU-T βασίσθηκαν στο ευρωπαϊκό έργο OPERA [OPERA 1], [OPERA 2] του οποίου τα αποτελέσματα εκδόθηκαν το 2006. Ανάλυση των προδιαγραφών OPERA πραγματοποιείται στις αναφορές [Do07], [Che11], [Vuk08], [Sel08] και [Sar12a]. Το σχήμα πρόσβασης που χρησιμοποιείται στις προδιαγραφές OPERA είναι βασισμένο στη λειτουργία των πρωτοκόλλων MAC με χρήση σκυτάλης (token-based) που προσφέρουν υπηρεσία εγγυημένης πρόσβασης. Παράλληλα, η χρήση OFDM διαμόρφωσης στο εύρος 2-30MHz επιτρέπει την υποστήριξη ρυθμών μετάδοσης που φθάνουν τα 200Mbps.

Σύγκριση των βασικότερων χαρακτηριστικών των προτύπων IEEE 1901 και ITU-T G.hn πραγματοποιήθηκε στο Κεφ.1 (Πιν.1.2). Στη συνέχεια του κεφαλαίου αυτού αναλύονται οι βασικότεροι μηχανισμοί του προτύπου IEEE 1901, οι οποίοι είναι κοινοί και για τα δύο βασικά πρότυπα, επιτρέποντας τη μεταξύ τους διαλειτουργικότητα. Συγκεκριμένα, στην ενότητα 2.2 γίνεται σύντομη αναφορά στις βασικές έννοιες φυσικού στρώματος οι

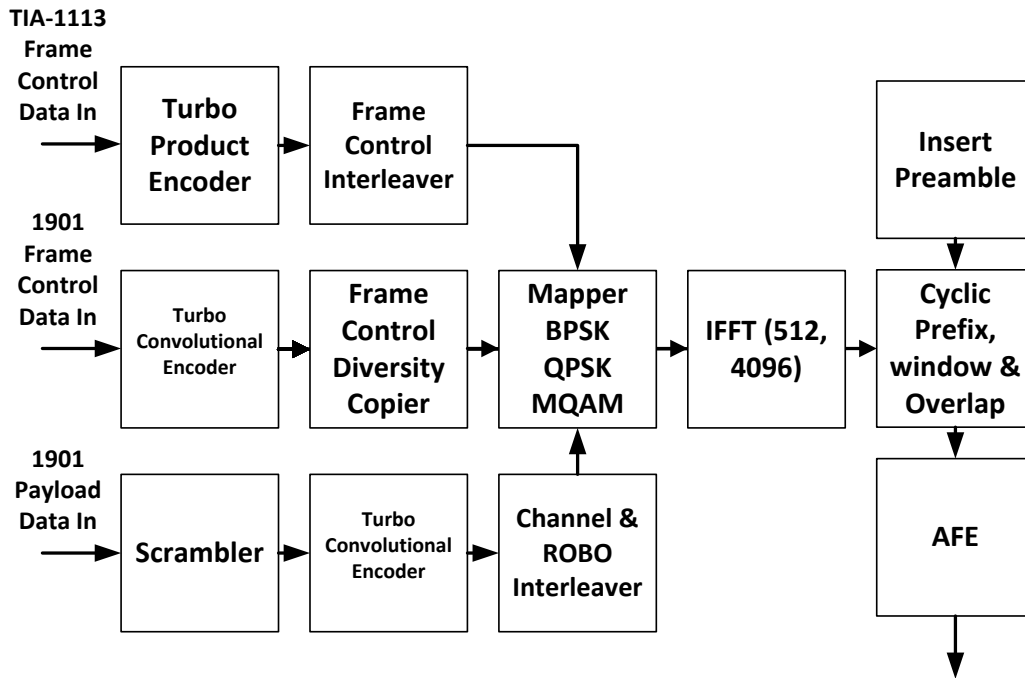
οποίες καθορίζουν τη δομή των κυψελών σε ένα BB-PLC δίκτυο. Παράλληλα, εξετάζονται οι βασικές αρχιτεκτονικές σχεδιασμού δικτύων BB-PLC ευρείας κάλυψης. Στις ενότητες 2.3 και 2.4 εξετάζονται τα δύο πρωτόκολλα τυχαίας και εγγυημένης πρόσβασης CSMA/CA και TDMA αντίστοιχα, καθώς και οι μηχανισμοί διασφάλισης ποιότητας μέσω της ανάθεσης κλάσεων υπηρεσιών και προτεραιοτήτων. Τέλος, στην ενότητα 2.5 αναπτύσσεται η λειτουργία του πρωτοκόλλου συνύπαρξης (Inter System Protocol – ISP) που υιοθετήθηκε στο IEEE 1901 και επιτρέπει, αφενός, τη διευθέτηση της κοινής πρόσβασης μεταξύ συσκευών που ακολουθούν και συσκευών που δεν ακολουθούν το πρότυπο IEEE 1901, και αφετέρου, την αποτελεσματική κατανομή των πόρων με αξιοποίηση της αναχρησιμοποίησης χρονοσχημάτων.

2.2. Αρχιτεκτονική δικτύων πρόσβασης βασισμένων στο πρότυπο IEEE 1901

2.2.1. Επισκόπηση φυσικού στρώματος BB-PLC

Το πρότυπο IEEE 1901 προσφέρει ευελιξία ως προς το φυσικό στρώμα των BB-PLC δικτύων υποστηρίζοντας δύο επιλογές φυσικού στρώματος (PHY). Το πρώτο PHY βασίζεται στο σχήμα Wavelet-orthogonal frequency-division multiplexing (OFDM) (wavelet-OFDM) ενώ το δεύτερο βασίζεται στο σχήμα windowed Fast Fourier Transform OFDM (FFT-OFDM). Ο Πιν.1.2 (Κεφ.1) περιλαμβάνει τις βασικές παραμέτρους των δύο PHY. Ο κύριος λόγος ύπαρξης περισσότερων του ενός PHY είναι η εξασφάλιση συμβατότητας με τα πρότυπα που προηγήθηκαν του IEEE 1901.

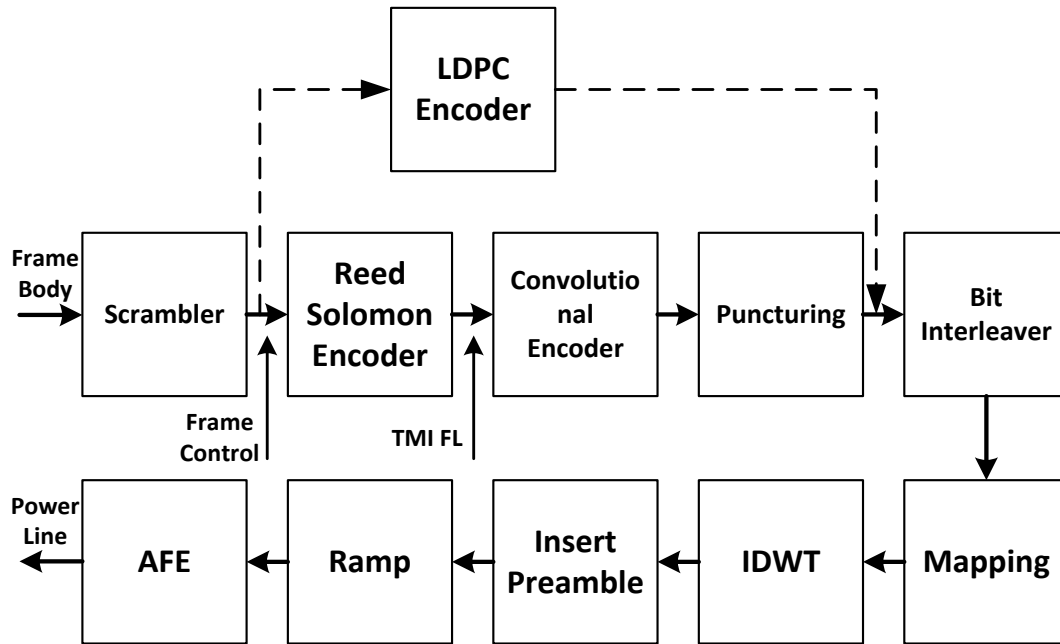
Κύρια χαρακτηριστικά του FFT-OFDM PHY αποτελούν η προσαρμοστική συμπεριφορά του σε διαύλους επιλεκτικούς ως προς τη συχνότητα, η ανθεκτικότητά του σε παρεμβολές στενής ζώνης και σε παλμικό θόρυβο. Το σημαντικό πλεονέκτημα του FFT-OFDM PHY είναι ότι προσφέρεται η δυνατότητα αποκλεισμού συγκεκριμένων συχνοτήτων χωρίς τη χρήση επιπλέον φίλτρου [Gal08]. Η δυνατότητα αυτή είναι πολύ σημαντική για τη σχεδίαση BB-PLC δικτύων αφού οι επιβαρυνόμενες συχνότητες αποκλείονται από τη μετάδοση, με ταυτόχρονη αύξηση της εγγεόμενης ισχύος στις



Σχήμα 2.1: Μπλοκ διάγραμμα σχήματος μετάδοσης IEEE 1901 βασισμένου σε FFT-OFDM PHY (Σχήμα προσαρμοσμένο από IEEE1901).

υπόλοιπες συχνότητες του BB-PLC φάσματος. Επίσης, το συγκεκριμένο σχήμα PHY επιτρέπει τη δυναμική προσαρμογή του PLC διαύλου στις συνθήκες μετάδοσης.

Στο Σχ.2.1 απεικονίζεται το λειτουργικό διάγραμμα του σχήματος μετάδοσης IEEE 1901 βασισμένου σε FFT-OFDM PHY. Λόγω της διαφορετικής κωδικοποίησης που χρησιμοποιείται για την πληροφορία ελέγχου TIA-1113 και 1901 και για τα δεδομένα παρουσιάζονται τρεις διαφορετικές εισοδοί στο διάγραμμα του πομπού. Η πληροφορία ελέγχου (frame control – FC) στην περίπτωση του IEEE 1901 προτύπου διέρχεται από τον κωδικοποιητή που περιλαμβάνει έναν turbo συνελκτικό κωδικοποιητή (turbo convolutional encoder) και ένα κύκλωμα ελέγχου διαφορικής λήψης (frame control diversity copier), ενώ η ροή των δεδομένων διέρχεται από έναν περιπλέκτη (scrambler), turbo συνελκτικό κωδικοποιητή και ένα κύκλωμα ανάδευσης (interleaver). Η πληροφορία ελέγχου TIA-1113 διέρχεται από ιδιαίτερο κύκλωμα κωδικοποίησης. Η έξοδος των τριών κωδικοποιητών εισάγεται σε κοινό κύκλωμα OFDM διαμόρφωσης που αποτελείται από ένα κύκλωμα αντιστοίχισης (mapper) και ένα κύκλωμα αντίστροφου μετασχηματισμού Fourier (IFFT). Στη συνέχεια, προστίθεται το προοίμιο (preamble) και ένα κυκλικό πρόθεμα (cyclic prefix) και τελικά η πληροφορία οδηγείται στο κύκλωμα



Σχήμα 2.2: Μπλοκ διάγραμμα σχήματος μετάδοσης IEEE 1901 βασισμένου σε wavelet-OFDM PHY (Σχήμα προσαρμοσμένο από IEEE1901).

αναλογικής διαμόρφωσης (Analogue Front End – AFE) για να οδηγηθεί στο συζεύκτη (coupler) που εισάγει το σήμα στο PLC μέσο.

Το σχήμα wavelet-OFDM αποτελεί εξέλιξη των συστημάτων OFDM αφού αντιμετωπίζει δύο από τα βασικότερα μειονεκτήματα της OFDM διαμόρφωσης. Αρχικά, εξαλείφει την ανάγκη εισαγωγής προστατευτικής ζώνης (guard band) μεταξύ των καναλιών OFDM, ενώ, παράλληλα, μειώνει τη φασματική εξάπλωση του διαμορφωμένου σήματος [Gal08a].

Στο Σχ.2.2 απεικονίζεται το λειτουργικό μπλοκ διάγραμμα του σχήματος μετάδοσης IEEE 1901 βασισμένου σε wavelet-OFDM PHY. Αρχικά, η πληροφορία διέρχεται από κύκλωμα περιπλέκτη, Reed Solomon κωδικοποιητή, συνελκτικού κωδικοποιητή και puncturing κυκλώματος. Εναλλακτικά, υποστηρίζεται και η χρήση κωδικοποιητή LDPC (low-density parity-check convolutional code). Ο LDPC ανήκει στην κατηγορία των τεχνικών διόρθωσης λαθών υψηλής απόδοσης που εμφανίζουν καλύτερη επίδοση έναντι των RS και συνελκτικών κωδικοποιητών. Μετά την κωδικοποίηση, ακολουθεί κύκλωμα ανάδευσης και αντιστοίχησης. Το τελευταίο παράγει το πλήθος των ρών δεδομένων που αντιστοιχούνται στα διάφορα σύμβολα που χρησιμοποιεί το φέρον σήμα στη wavelet OFDM διαμόρφωση. Το κύκλωμα IDWT (Inverse Discrete Wavelet Transformer) που ακολουθεί διαμορφώνει τα φέροντα σε wavelet κυματομορφές που διατηρούν τη μεταξύ

τους ορθογωνιότητα. Ακολουθεί η εισαγωγή του προοιμίου, το κύκλωμα αναρρίχησης (ramp) που αναλαμβάνει τη δημιουργία της σύνθετης κυματομορφής IDWT και, τέλος, το κύκλωμα AFE που αναλαμβάνει τη μετατροπή της κυματομορφής σε αναλογικό σήμα.

Η από άκρο-σε-άκρο συνάρτηση μεταφοράς μιας PLC ζεύξης έχει ευρέως μελετηθεί στη βιβλιογραφία [Laz09], [Laz10b], [Zim02]. Στην ανάλυση που ακολουθεί χρησιμοποιείται το μοντέλο της πολυδιαδρομικής διάδοσης για PLC ζεύξεις που περιγράφεται στην εργασία [Zim02]. Η συνάρτηση μεταφοράς $H(f)$ που περιγράφεται στις εργασίες [Laz09], [Laz10a] καθορίζει την εγγεόμενη ισχύ P που απαιτείται για να μεγιστοποιηθεί η χωρητικότητα του διαύλου με χρήση μεθόδων Lagrange. Η εφαρμογή του water-filling (W-F) μπορεί να επιτύχει τη βέλτιστη κατανομή της ισχύος στα πολλαπλά κανάλια που χρησιμοποιούνται για την PLC μετάδοση [Gal68]. Σύμφωνα με τη μέθοδο W-F, η φασματική κατανομή της πυκνότητας της εγγεόμενης ισχύος (injected power spectral density - IPSD) $p_w(f)$ που μεγιστοποιεί τη χωρητικότητα του διαύλου ικανοποιεί τη σχέση

$$P = \int_0^{\infty} (p_w(f) - N(f)/|H(f)|^2)^+ df \quad (2.1)$$

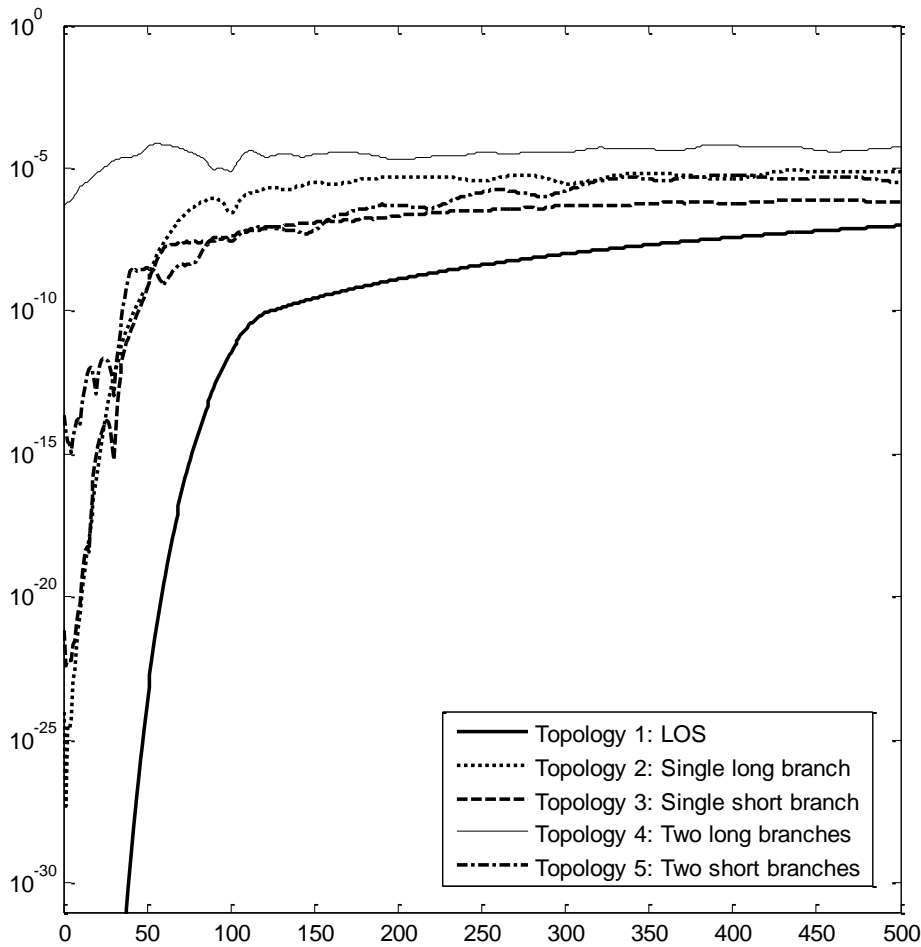
όπου $N(f)$ είναι η φασματική πυκνότητα του θορύβου του διαύλου και συνήθως λαμβάνεται ίση με -105 dBm/Hz [Ami06], $H(f)$ είναι η συνάρτηση μεταφοράς του BB-PLC διαύλου και $(x)^+ = \max\{x, 0\}$. Μετά τον προσδιορισμό της $p_w(f)$, η φασματική κατανομή του σηματοθορυβικού λόγου (signal-to-noise ration - SNR) προσδιορίζεται από τη σχέση

$$SNR(f) = (p_w(f) \cdot |H(f)|^2)/N(f) \quad (2.2)$$

Στην εργασία [Tra09] αναλύεται ένας τρόπος προσδιορισμού του SNR κατάλληλος για διαύλους λευκού θορύβου τύπου Gauss (AWGN) σε OFDM συστήματα βασισμένος στην ανάλυση φάσης. Ο λόγος CNR (Carrier to Noise Ratio) εκφράζει το λόγο ισχύος φέροντος προς ισχύ θορύβου μετά την επίδραση της διαμόρφωσης και προσδιορίζεται από τη σχέση

$$CNR(f) = \frac{SNR(f)}{\Gamma} \quad (2.3)$$

όπου Γ εκφράζει την επίδραση του κέρδους κωδικοποίησης. Μια τυπική τιμή του Γ για κωδικοποίηση M-QAM ($M > 2$) είναι το 1.3. Έχοντας προσδιορίσει το λόγο CNR, το BER



Σχήμα 2.3: BER ως συνάρτηση του μήκους της PLC σύνδεσης για τις τοπολογίες MT που εμφανίζονται στον Πιν.2.1.

μιας PLC ζεύξης μεταξύ των κόμβων n_i και n_j εξάγεται από τη θεωρητική σχέση μεταξύ SNR και BER για κανάλια AWGN και είναι ίσο με

$$BER_{ij} = \frac{7}{24} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{CNR(f)}{42}} \right) \quad (2.4)$$

όπου το erfc είναι η συμπληρωματική συνάρτηση λάθους.

Στο Σχ.2.3 εξετάζεται η επίδραση της τοπολογίας του δικτύου MT επί του BER στις τοπολογίες MT που εμφανίζονται στον Πιν.2.1. Το σημείο A αντιστοιχεί στο σημείο έγχυσης του σήματος, ενώ το σημείο B αντιστοιχεί στο σημείο μέτρησης του BER. Σημειώνεται, ότι για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων του BER θεωρήθηκε ισχύ έγχυσης

Πίνακας 2.1: Τοπολογίες γραμμών MT

Τοπολογία 1: $L=0:500m, L1,L2=0$	
Τοπολογία 2: $L=0:500m, L1=100m, L2=0$	
Τοπολογία 3: $L=0:500m, L1=30m, L2=0$	
Τοπολογία 4: $L=0:500m, L1=100m, L2=100$	
Τοπολογία 5: $L=0:500m, L1=30m, L2=30m$	

ίση με 10dBm. Οι εργασίες [Laz09], [Cha11] έχουν εξετάσει τη μελέτη των απωλειών σε PLC συνδέσεις που περιλαμβάνουν διακλαδώσεις. Έχει αποδειχθεί ότι η ύπαρξη διακλαδώσεων δρα επιβαρυντικά στην PLC μετάδοση και επομένως πρέπει να αποφεύγονται. Οι τοπολογίες που επιλέχθηκαν στο παρόν κεφάλαιο εξετάζουν την επίδραση του πλήθους και του μήκους των διακλαδώσεων που ακολουθούν το σημείο τερματισμού, και ως εκ τούτου μπορούν να επηρεάσουν μία PLC ζεύξη ακόμα και αν δεν συμπεριλαμβάνονται σε αυτή. Μελετώντας τις διαφορετικές τοπολογίες μπορούν να εξαχθούν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Παρατηρείται ότι εκτός της επίδρασης της εξασθένησης λόγω μετάδοσης που εξαρτάται από το μήκος της PLC ζεύξης, που συναντάται στη βιβλιογραφία ως εξασθένηση LOS [Laz09], [Laz10a], εισάγεται μία πρόσθετη εξασθένηση που δρα επιβαρυντικά στο BER της PLC ζεύξης και εξαρτάται από το πλήθος, το φορτίο τερματισμού και το μήκος των διακλαδώσεων στο σημείο τερματισμού της PLC ζεύξης.
- Η τοπολογία 1 αντιστοιχεί σε PLC ζεύξη του συγκεντρώνει τα χαρακτηριστικά της LOS μετάδοσης, δηλαδή δεν περιλαμβάνει διακλαδώσεις. Ο συγκεκριμένος τύπος ζεύξεων είναι θεωρητικός αφού, στην πράξη, ένα δίκτυο MT περιλαμβάνει διακλαδώσεις, το πλήθος των οποίων εξαρτάται από το πλήθος συνδρομητών που εξυπηρετεί.
- Μελετώντας τις τοπολογίες 2 και 3 που αντιστοιχούν σε ζεύξεις με μία διακλάδωση, προκύπτει ότι διακλαδώσεις μικρού μήκους επηρεάζουν λιγότερο τη μετάδοση σε ζεύξεις PLC. Παράλληλα, όσο αυξάνει το μήκος της διακλάδωσης, τόσο χειροτερεύει το BER της ζεύξης. Παρόμοια συμπεράσματα για την επίδραση

της εξασθένησης επί των PLC ζεύξεων αντλούν και οι συγγραφείς της εργασίας [Ana07].

- Παρόμοια συμπεράσματα αντλούνται και από τη μελέτη των τοπολογιών 4 και 5 που περιλαμβάνουν δύο διακλαδώσεις μεγάλου και μικρού μήκους αντίστοιχα. Από τη μελέτη της τοπολογίας 5 προκύπτει ότι όσο μεγαλώνει η διαφορά μήκους μεταξύ της PLC ζεύξης και των διακλαδώσεων στο άκρο αυτής, τόσο μεγαλύτερη βελτίωση παρουσιάζει το BER της ζεύξης.
- Από τη μελέτη όλων των τοπολογιών προκύπτει ότι η αύξηση του μήκους της ζεύξης οδηγεί σε σημαντική χειροτέρευση του BER λόγω της σημαντικής αύξησης της εξασθένησης της γραμμής μεταφοράς που λειτουργεί ως φυσικό μέσο μετάδοσης [Laz09].

2.2.2. Δίκτυα BB-PLC ευρείας κάλυψης

Όπως προκύπτει από την προηγηθείσα ανάλυση, ο περιορισμός που τίθεται στην ισχύ έγχυσης, η εξασθένηση που εισάγεται από τη γραμμή μεταφοράς καθώς και η τοπολογία των δικτύων MT, επιβάλλουν τη χρήση επαναληπτών και την οργάνωση του BPL δικτύου σε κυσέλες, όπως ήδη αναφέρθηκε στο Κεφ.1. Παράλληλα, το πλήθος των BB-PLC κόμβων εξαρτάται από την προς τις συνθήκες μετάδοσης του δικτύου που επηρεάζονται από την τοπολογία του δικτύου MT και το εύρος της περιοχής κάλυψης του BB-PLC δικτύου, καθώς και από τις απαιτήσεις QoS των υποστηριζομένων υπηρεσιών. Απαιτείται η βέλτιστη διαχείριση του ισοζυγίου μεταξύ της όσο το δυνατόν μεγαλύτερης κάλυψης και της μικρότερης δυνατής καθυστέρησης στην εξυπηρέτηση των BB-PLC κόμβων της κυσέλης.

Ανάλογα με το χρησιμοποιούμενο PHY, ο σχηματισμός δικτύων BB-PLC ευρείας κάλυψης ακολουθεί τις εξής αρχές:

1. Περίπτωση FFT-OFDM PHY

Στην περίπτωση του σχήματος FFT PHY, το δίκτυο πρόσβασης BB-PLC αποτελείται από το συνδυασμό κυσελών κορμού (core cells) και υποκυσελών (subcells). Βασικό χαρακτηριστικό μιας FFT κυσέλης κορμού είναι ότι όλοι οι κόμβοι που την απαρτίζουν ακολουθούν ενιαίο σχήμα πρόσβασης, ασφάλειας και QoS. Δεδομένου ότι η απαίτηση ασφάλειας είναι ιδιαίτερα αυστηρή στα PLC δίκτυα [Cor10], όλοι οι κόμβοι μιας κυσέλης FFT έχουν κοινό κλειδί κρυπτογράφησης δικτύου (Network Encryption Key – NEK), η λειτουργία του

οποίου παρουσιάζεται στο πρότυπο [IEEE1901]. Στα δίκτυα πρόσβασης, η κυψέλη κορμού αποτελείται από ένα (μοναδικό) κόμβο HE, από επαναλήπτες RPs και τερματικούς κόμβους NTUs. Στα δίκτυα πρόσβασης, οι κυψέλες κορμού δεν περιλαμβάνουν κόμβους CPE. Σημειώνεται ότι οι κόμβοι CPE αντιστοιχούν σε τερματικούς κόμβους που διαφέρουν από τους NTU κατά το ότι αποτελούν το σημείο διασύνδεσης των τελικών χρηστών στην PLC κυψέλη. Αντίστοιχα, κάθε κόμβος NTU μπορεί να αποτελεί το σημείο διασύνδεσης υποκυψελών στην κυψέλη κορμού.

Κάθε υποκυψέλη έχει το δικό της κλειδί NEK και περιλαμβάνει αποκλειστικά κόμβους CPE. Ο ρόλος του κόμβου NTU εξαρτάται από τις υποστηριζόμενες εφαρμογές που υποστηρίζει το BB-PLC δίκτυο. Συγκεκριμένα, ένας κόμβος NTU μπορεί να δράσει ως πρόξενος (proxy) – σε εφαρμογές με αυξημένες απαιτήσεις ασφαλείας-, ως επαναλήπτης (repeater) – στις περιπτώσεις όπου η υποκυψέλη δρα ως επέκταση της κυψέλης κορμού-, ή ως επικεφαλής κόμβος HE στις περιπτώσεις όπου η υποκυψέλη συνδέεται στο σύστημα διανομής (Distribution System – DS), όπως θα εξηγηθεί στη συνέχεια.

Κατά τη λειτουργία FFT PHY οι κόμβοι διαθέτουν δύο είδη διευθύνσεων. Εκτός της διεύθυνσης MAC, που αποτελεί κοινό χαρακτηριστικό όλων των κόμβων ενός IP δικτύου, διαθέτουν και ένα αναγνωριστικό τερματικού εξοπλισμού (Terminal Equipment Identifier – TEI). Το TEI έχει μήκος 12 ψηφίων στην περίπτωση των δικτύων πρόσβασης και περιλαμβάνει την πληροφορία του HE και του αναγνωριστικού της κυψέλης στην οποία ανήκει ο κόμβος. Σημειώνεται ότι ο HE είναι μοναδικός σε μια κυψέλη πρόσβασης, η οποία περιλαμβάνει την κυψέλη κορμό και τις υποκυψέλες αυτής. Η εισαγωγή του αναγνωριστικού TEI επιτρέπει την αποτελεσματική δρομολόγηση των πακέτων μέσα σε ένα BB-PLC δίκτυο. Μέσω της εισαγωγής του TEI, κάθε κόμβος αποκτά τη δυνατότητα εύρεσης της βέλτιστης διαδρομής ανάμεσα στο σύνολο των άμεσων γειτόνων αυτού. Σχήματα δρομολόγησης σε BB-PLC δίκτυα εξετάζονται στο Κεφ.6 της διατριβής.

Βάσει του προτύπου IEEE 1901 μία FFT κυψέλη πρόσβασης (κυψέλη κορμός και υποκυψέλες) υποστηρίζει μέχρι 63 επαναλήπτες, ενώ οι συνολικοί κόμβοι που ανήκουν στην κυψέλη μπορεί να φθάσουν τους 4095.

II. Περίπτωση wavelet-OFDM PHY

Στην περίπτωση των wavelet κυψελών, ακολουθούνται οι αρχές που παρουσιάστηκαν στο Κεφ.1 για τα οικιακά δίκτυα BB-PLC (Σχ.2.1). Οι κόμβοι

του BB-PLC δικτύου, STAs και BMs, είναι κοινοί είτε χρησιμοποιούνται σε οικιακά δίκτυα είτε σε δίκτυα πρόσβασης. Η διαφοροποίηση των κόμβων πραγματοποιείται από πρωτόκολλα ανωτέρου επιπέδου, όπως το IEEE 802.1D [IEEE802.1D] και 802.1Q [IEEE802.1Q], που είναι υπεύθυνα για τη διασύνδεση με τα δίκτυα ευρείας ζώνης υλοποιώντας τις διαφορετικές λειτουργίες των HE, RPs και NTUs. Σε αυτή την περίπτωση, ο BM αντικαθίσταται από τον HE, ο οποίος αναλαμβάνει κεντρικά την κατανομή των πόρων και τη διαχείριση πρόσβασης των BB-PLC κόμβων στην κυψέλη. Η διασύνδεση διαφορετικών κυψελών επιτυγχάνεται μέσω του τηλεπικοινωνιακού DS (Distribution System). Παράδειγμα αντίστοιχης υλοποίησης BB-PLC δικτύου αποτελεί το πιλοτικό δίκτυο της Λάρισας που παρουσιάζεται στο Κεφ.3 της διατριβής.

Ανεξαρτήτως του χρησιμοποιούμενου PHY, στις περιπτώσεις όπου απαιτείται αύξηση της κάλυψης του δικτύου BB-PLC, εισάγεται η έννοια του DS. Σε αναλογία με τις ασύρματες επικοινωνίες, το DS χρησιμοποιείται για τη διασύνδεση διαφορετικών κυψελών. Σημείο πρόσβασης μίας κυψέλης στο DS αποτελεί ο HE ο οποίος μέσω μίας πύλης (portal) διασυνδέεται με ένα λογικά απομονωμένο δίκτυο. Δεν υπάρχει κάποιος περιορισμός στις τεχνολογίες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως DS, ενώ σε περιπτώσεις όπου οι γραμμές MT είναι απομονωμένες, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και η PLC τεχνολογία. Η απόφαση για την τεχνολογία υλοποίησης του DS εξαρτάται από τις απαιτήσεις QoS των υποστηριζόμενων εφαρμογών και από το μέγεθος της γεωγραφικής περιοχής κάλυψης του δικτύου BB-PLC. Αναλυτική περιγραφή των διαφόρων τεχνολογιών πρόσβασης παρουσιάζεται στο Κεφ.3 της διατριβής.

2.3. Μηχανισμοί πρόσβασης

Το πρότυπο IEEE 1901 καθορίζει δύο βασικούς τρόπους πρόσβασης στο μέσο υποστηρίζοντας τόσο την τυχαία πρόσβαση, μέσω του CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance) πρωτοκόλλου, όσο και την εγγυημένη πρόσβαση, μέσω του TDMA (Time Division Multiple Access) πρωτοκόλλου. Δεδομένα αυστηρών απαιτήσεων QoS, όπως πολύ χαμηλής καθυστέρησης, υψηλού ρυθμού μετάδοσης ή σταθερής καθυστέρησης στην αποστολή πλαισίων, μεταδίδονται κατά τις περιόδους

χωρίς ανταγωνισμό (Contention Free Periods – CFPs) με χρήση TDMA πρωτοκόλλου. Δεδομένα με ελαστικότερες απαιτήσεις QoS μεταδίδονται κατά τις περιόδους ανταγωνισμού (Contention Periods – CPs) με χρήση CSMA/CA πρωτοκόλλου. Σημειώνεται ότι τα δεδομένα που μεταδίδονται κατά τις CPs, αν και δεν έχουν αυστηρές απαιτήσεις QoS, έχουν, πάντως, διαφορετικές απαιτήσεις. Συνεπώς, στη λειτουργία του CSMA/CA, πρέπει να προστεθεί σχήμα διευθέτησης προτεραιοτήτων όπως περιγράφεται στην ενότητα 2.4.

Στη συνέχεια της ενότητας, εξετάζονται οι γενικές αρχές λειτουργίας των δύο πρωτοκόλλων, με έμφαση στα στοιχεία των πρωτοκόλλων που διαφοροποιούνται κατά την PLC μετάδοση. Εξετάζονται οι βασικές αρχές σχεδίασης των πρωτοκόλλων MAC που ακολουθούνται στα δίκτυα πρόσβασης. Αναλυτική περιγραφή των πρωτοκόλλων MAC για οικιακά δίκτυα και δίκτυα πρόσβασης μπορεί να αντληθεί από τη διπλωματική εργασία [Μπι11].

2.3.1. Τυχαία πρόσβαση στο δίκτυο: CSMA/CA

Ο μηχανισμός CSMA/CA προέρχεται από τα ασύρματα δίκτυα [IEEE802.11] και χαρακτηρίζεται από τα ακόλουθα βασικά χαρακτηριστικά:

Αλγόριθμος ανίχνευσης φέροντος (carrier sense)

Αφορά τη δυνατότητα κάθε κόμβου να ανιχνεύει την ύπαρξη ενεργών μεταδόσεων κατά μήκος μιας γραμμής μεταφοράς. Σημειώνεται ότι, ενώ ο συγχρονισμός μεταξύ των μεταδόσεων επιτελείται από τον HE, η πρόσβαση των κόμβων στο μέσο αποτελεί κατανεμημένη διαδικασία. Η ανίχνευση φέροντος επιτελείται αρχικά μέσω φυσικών μηχανισμών (Physical Carrier Sense – PCS), όπως η ανίχνευση του συμβόλου PRS (Priority Resolution Slots), στην περίπτωση του FFT MAC, ή του προοιμίου (Preamble), στην περίπτωση του wavelet MAC. Στη συνέχεια, ενεργοποιείται ο εικονικός μηχανισμός ανίχνευσης (Virtual Carrier Sense – VCS), κατά τον οποίο ο κόμβος που καταλαμβάνει το μέσο μετάδοσης μεταδίδει την αναμενόμενη διάρκεια κατάληψης του διαύλου για τη μετάδοση των δεδομένων του. Οι κόμβοι που λαμβάνουν την τρέχουσα μετάδοση ανιχνεύουν τη διάρκεια μετάδοσης και αναστέλλουν τις μεταδόσεις τους. Η καταγραφή του διαστήματος κατάληψης μιας PLC ζεύξης που πραγματοποιείται από κάθε κόμβο σχηματίζει το διάνυσμα κατανομής των πόρων του δικτύου (Network Allocation Vector –

NAV). Η τιμή του NAV καθορίζει τη χρονική διάρκεια κατά την οποία ο διάυλος – στη συγκεκριμένη περίπτωση μια PLC ζεύξη - θα είναι κατειλημμένος.

Αλγόριθμος τυχαίας υπαναχώρησης (random backoff algorithm)

Ο αλγόριθμος τυχαίας υπαναχώρησης έχει ως στόχο τον αποσυγχρονισμό των μεταδόσεων που ακολουθούν μια επιτυχημένη μετάδοση. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της μεταβολής του μέγιστου παραθύρου ανταγωνισμού CW (Contention Window), το οποίο καθορίζει το πλήθος των χρονοσχισμών που ένας κόμβος πρέπει να περιμένει μετά από μία αποτυχημένη απόπειρα μετάδοσης μέχρι να επιχειρήσει νέα μετάδοση. Το πλήθος αυτό αυξάνει εκθετικά με το πλήθος των αποτυχημένων μεταδόσεων, ενώ η τυχαία επιλογή της χρονοσχισμής μειώνει την πιθανότητα νέας αποτυχίας. Ο αλγόριθμος τυχαίας υπαναχώρησης έχει χρησιμοποιηθεί εκτενώς στα IEEE 802.11 δίκτυα και έχει τεκμηριωθεί επαρκώς στη διεθνή βιβλιογραφία [Min07], [Jin09]. Οι συγγραφείς στην εργασία [Tso13] επεκτείνουν τον αλγόριθμο για BB-PLC δίκτυα τροποποιώντας τη λειτουργία του μετρητή BC (Backoff Counter). Ο συγκεκριμένος μετρητής καθορίζει τη νέα χρονοσχισμή που θα επιλεγεί για μετάδοση επιλέγοντας μια τυχαία ακέραια τιμή θεωρώντας ομοιόμορφα κατανεμημένη κατανομή στο διάστημα $[1, CW]$. Στη εργασία [Tso13], διερευνάται και η εφαρμογή μη-ομοιόμορφων κατανομών για την τιμή του μετρητή BC, καταλήγοντας σε σημαντικό κέρδος στην επίδοση του CSMA/CA σε PLC δίκτυα.

Αλγόριθμος αποφυγής συγκρούσεων (collision avoidance)

Ο αλγόριθμος αποφυγής συγκρούσεων υλοποιείται μέσω της εισαγωγής των πλαισίων αίτησης αποστολής (Request to Send – RTS) και αποδοχής αίτησης (Clear to Send - CTS). Κύριος στόχος της εισαγωγής του αποτελεί η μείωση των συγκρούσεων εκείνων που οφείλονται σε κρυμμένα τερματικά (hidden terminal) [War01]. Η ύπαρξη των πλαισίων RTS/CTS καθιστά δυνατή τη λειτουργία της VCS ανίχνευσης και του σχηματισμού του διανύσματος NAV, αφού κάθε πλαίσιο RTS φέρει την πληροφορία για τη χρονική διάρκεια κατάληψης του καναλιού. Οι συγγραφείς της εργασίας [Par11] τροποποιούν την πληροφορία που μεταφέρεται μέσω του πλαισίου RTS υλοποιώντας ένα υβριδικό MAC, όπου η περίοδος CP χρησιμοποιείται για τη μεταφορά δεδομένων συγχρονισμού και τη μετάδοση πλαισίων RTS/CTS. Το πλαίσιο RTS τροποποιείται μέσω της εισαγωγής ενός επιπλέον πεδίου, του TRINFO (Transmission Information), που δηλώνει την προτεραιότητα και το προφίλ QoS των προς μετάδοση πλαισίων. Στην

περίπτωση αυτή, ο HE χρησιμοποιεί τη μετάδοση των πληροφοριών που συνέλεξε κατά την περίοδο CP για να πραγματοποιήσει το χρονοπρογραμματισμό των δεδομένων κατά την περίοδο CFP.

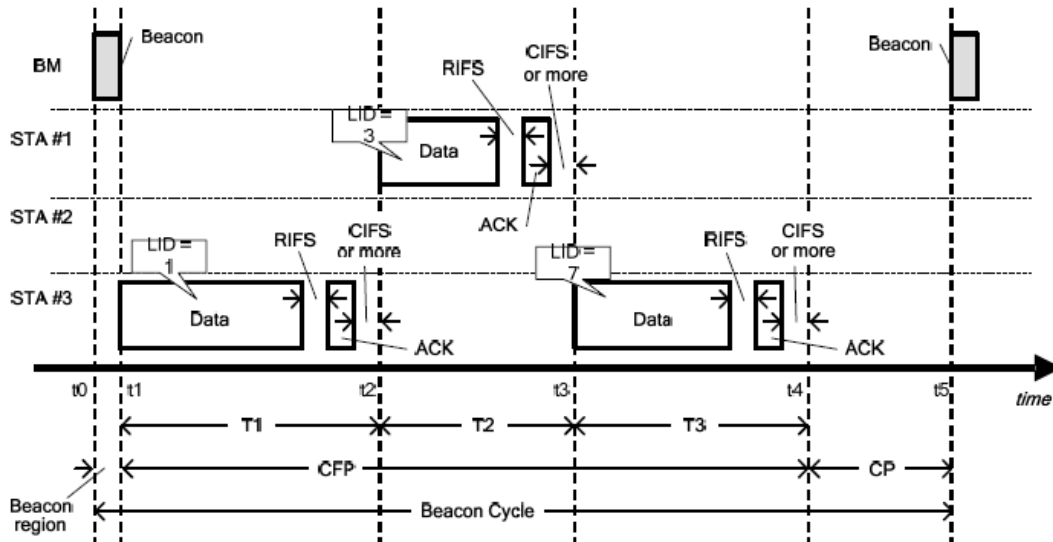
2.3.2. Εγγυημένη πρόσβαση στο δίκτυο: TDMA

Το πρωτόκολλο TDMA αποτελεί τον αποκλειστικό μηχανισμό πρόσβασης κατά την περίοδο χωρίς ανταγωνισμό (CFP). Με τη χρήση του πρωτοκόλλου TDMA ανατίθεται συγκεκριμένος χρόνος κατάληψης σε κάθε ζεύξη και όχι σε κάθε κόμβο PLC. Παράλληλα, παρέχονται τα μέσα που προσδιορίζουν το ποιοί κόμβοι θα μεταδώσουν σε κάθε ζεύξη κατά το χρόνο που εκχωρήθηκε. Το πρωτόκολλο TDMA παρέχει υπηρεσία εγγυημένης πρόσβασης στο μέσο μετάδοσης. Στην περίπτωση των BB-PLC διαύλων, όμως, σημειώνεται ότι, η εγγυημένη πρόσβαση δεν οδηγεί και σε εγγυημένη επιτυχή μετάδοση, αφού οι συνθήκες μετάδοσης του καναλιού διαφέρουν τόσο χωρικά, κατά μήκος του ενεργειακού δικτύου, όσο και χρονικά, στις περιπτώσεις όπου χρησιμοποιούνται ζεύξεις του δικτύου XT. Κατά την πρόσβαση TDMA μπορεί να ακολουθηθεί σταθερή ή δυναμική εκχώρηση εύρου ζώνης. Οι δύο τρόποι πρόσβασης αναλύονται στη συνέχεια.

2.3.2.1. Σταθερή εκχώρηση εύρους ζώνης κατά την CFP περίοδο

Η ανάθεση χρονοσχησμών στους BB-PLC κόμβους πραγματοποιείται από τον HE κάθε κυψέλης. Ο χρονοπρογραμματισμός για τις μεταδόσεις που θα πραγματοποιηθούν κατά τον επόμενο κύκλο στην CFP περίοδο πραγματοποιείται με την αποστολή του πλαισίου Beacon από τον HE. Το Σχ.2.4 παρουσιάζει ένα παράδειγμα ενός κύκλου χρονοπρογραμματισμού των μεταδόσεων με χρήση TDMA πρόσβασης. Επισημαίνεται ότι, όπως φαίνεται και από το Σχ.2.4, ο χρόνος που ανατίθεται για την κατάληψη κάθε PLC ζεύξης περιλαμβάνει το χρόνο αποστολής των πλαισίων ACK, CIFS (Contention Interframe Space) και RIFS (Response Interframe Space). Οι χρόνοι CIFS και RIFS αποτελούν τα διαστήματα ασφαλείας μεταξύ διαδοχικών μεταδόσεων και μεταξύ πλαισίων δεδομένων και επιβεβαιώσεων, αντίστοιχα.

Το ενδεικτικό δίκτυο του οποίου ο χρονοπρογραμματισμός παρουσιάζεται στο Σχ.2.4 αποτελείται από τον HE και τρεις BB-PLC κόμβους. Η χρονική περίοδος T1 έχει ανατεθεί από τον HE για τη μετάδοση στη ζεύξη 1 (Link ID=1) για την οποία ο κόμβος αποστολέας είναι ο STA 3. Αντίστοιχα, η χρονική περίοδος T2 αντιστοιχεί στη μετάδοση στη ζεύξη με LID 3, στην οποία κόμβος αποστολέας είναι ο STA 1. Τέλος, η χρονική

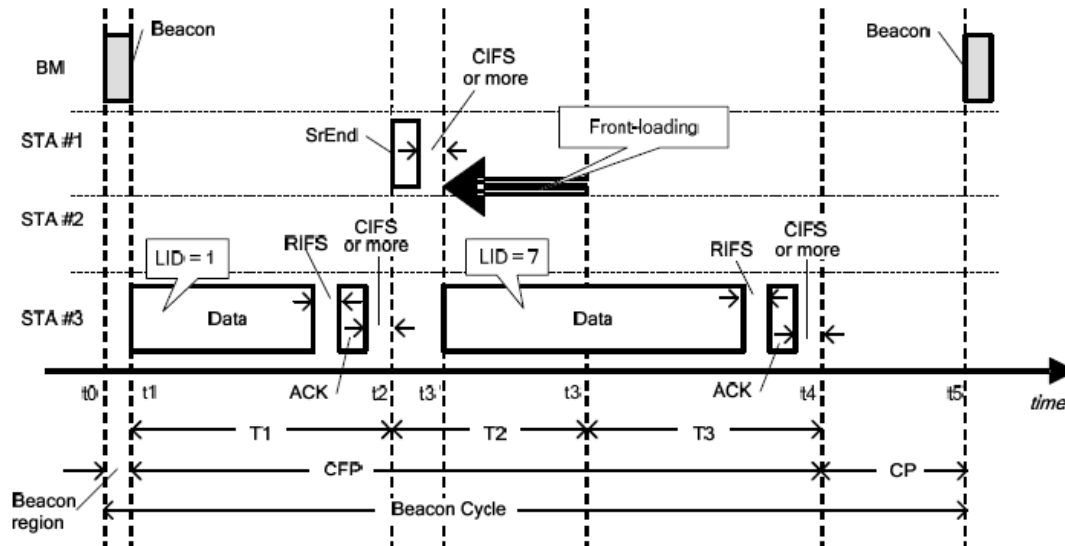


Σχήμα 2.4: Χρονοπρογραμματισμός μεταδόσεων κατά την πρόσβαση TDMA [IEEE1901].

στιγμή T3 εκχωρείται για μετάδοση στη ζεύξη με LID 7. Από τη μελέτη του Σχ.2.4 προκύπτει ότι ο κόμβος STA 3 μπορεί να μεταδώσει τόσο στη ζεύξη 3 όσο και στη ζεύξη 7. Αυτό αντανακλά τις διαφορετικές ζεύξεις που χρησιμοποιεί ο STA 3 για μετάδοση κατά τη φορά της άνω και κάτω ζεύξης. Συγκεκριμένα, λόγω της δενδρικής τοπολογίας των PLC δικτύων, η ροή των δεδομένων ακολουθεί διαφορετική ζεύξη για μετάδοση προς τον HE (άνω ζεύξη) και διαφορετική ζεύξη για μετάδοση προς άλλους PLC κόμβους που βρίσκονται σε μεγαλύτερη απόσταση από τον HE (κάτω ζεύξη) σε σχέση με τον εγγέοντα κόμβο. Αναλυτική παρουσίαση της φοράς και του χρονοπρογραμματισμού μετάδοσης σε μία BB-PLC κυψέλη ακολουθεί στο Κεφ.4 της διατριβής.

Παρατηρείται ότι καμία από τις χρονοσχισμές δεν έχει ανατεθεί στον κόμβο STA 2. Αυτό σημαίνει ότι, κατά τη διάρκεια του συγκεκριμένου στιγμιότυπου που εξετάζεται στο Σχ.2.4, ο συγκεκριμένος κόμβος δεν είχε δεδομένα προς μετάδοση ή ότι οι άλλοι κόμβοι του δικτύου είχαν να μεταδώσουν δεδομένα υψηλότερης προτεραιότητας. Σημειώνεται ότι στο πρότυπο IEEE 1901 δεν καθορίζεται ο τρόπος που προκύπτει ο χρονοπρογραμματισμός για κάθε κύκλο. Στα Κεφ.5 και 6 που ακολουθούν παρουσιάζονται δύο προτεινόμενοι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης του χρονοπρογραμματισμού κατά την CFP περίοδο.

Σημειώνεται ότι κατά τη διάρκεια της χρονικής περιόδου κατάληψης κάθε ζεύξης ένας κόμβος μπορεί να μεταδώσει περισσότερα από ένα πλαίσια δεδομένων, μέχρι να εξαντληθεί ο προβλεπόμενος χρόνος μετάδοσης. Στην περίπτωση όπου ένας κόμβος

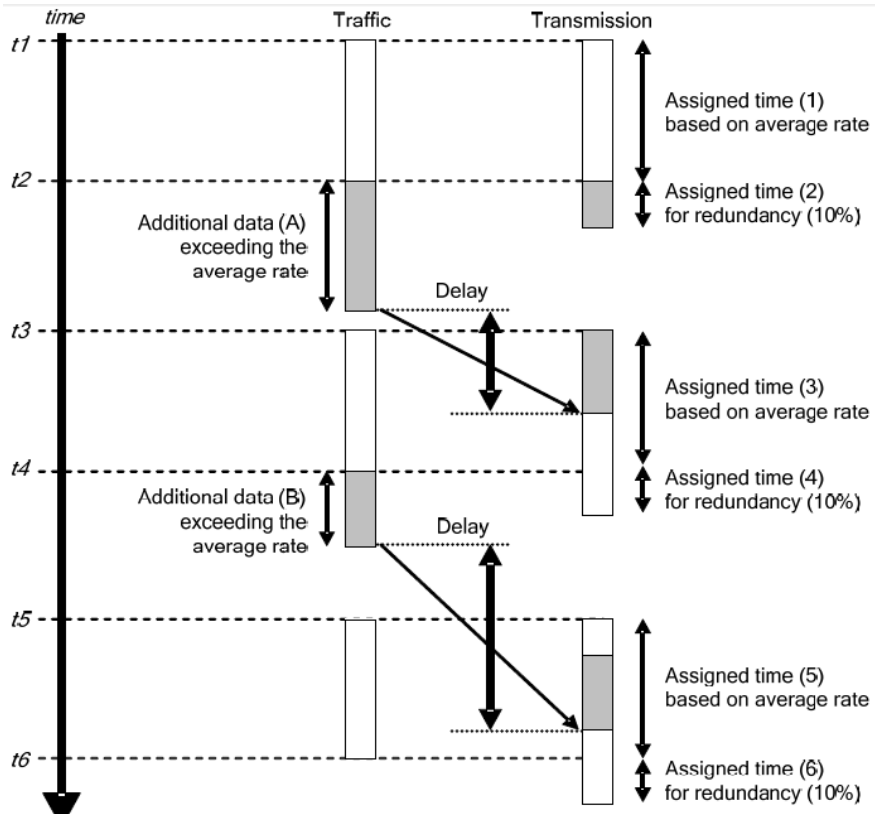


Σχήμα 2.5: Αλλαγή χρονοπρογραμματισμού (front loading) κατά την πρόσβαση TDMA [IEEE1901].

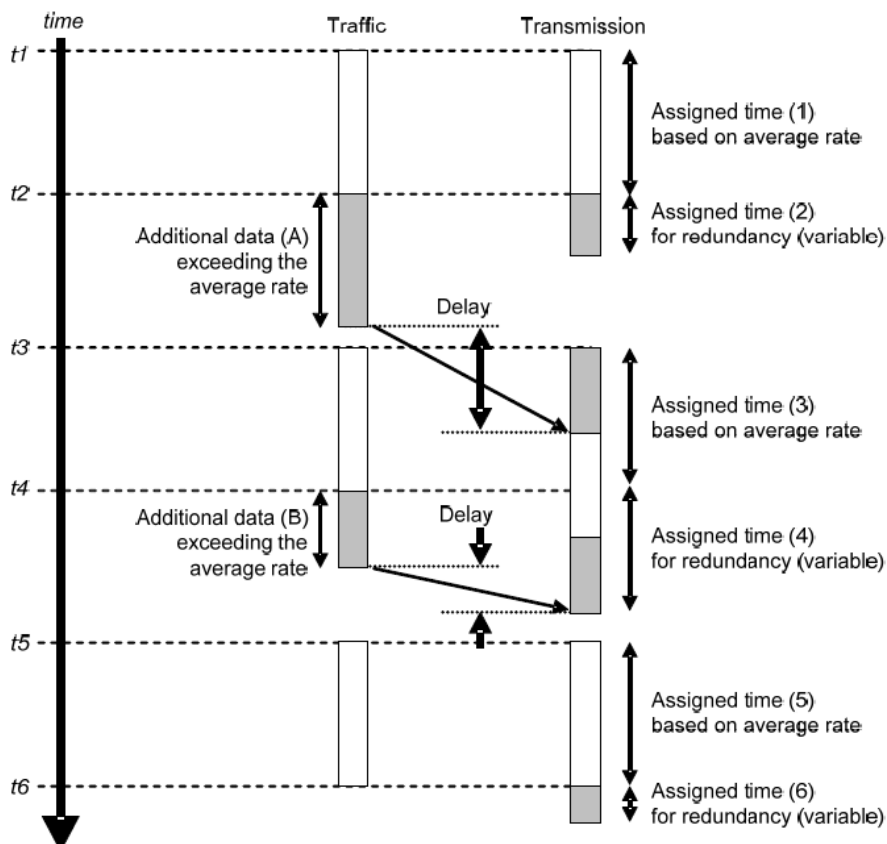
ολοκληρώσει τη μετάδοση των πλαισίων του πριν παρέλθει ο προγραμματισμένος χρόνος, μπορεί να ξεκινήσει η επόμενη προγραμματισμένη μετάδοση, όπως προκύπτει από το πλαίσιο Beacon. Αυτή η διαδικασία αναφέρεται ως front loading. Το Σχ.2.5 παρουσιάζει τη διαδικασία αλλαγής χρονοπρογραμματισμού στο δίκτυο του προηγούμενου παραδείγματος. Από το Σχ.2.5 προκύπτει ότι ο κόμβος STA 1 δεν είχε δεδομένα προς μετάδοση. Σε αυτή την περίπτωση, ο STA 1 αποστέλλει το πλαίσιο τερματισμού μετάδοσης (Stream End frame), με το οποίο ενημερώνεται ο επόμενος κόμβος να ξεκινήσει τη μετάδοση. Παρατηρείται, επομένως, ότι η μετάδοση του STA 3 επεκτάθηκε και στην χρονική περίοδο T2 αξιοποιώντας το χρόνο κατά τον οποίο ο διάυλος θα ήταν ανενεργός.

2.3.2.2. Δυναμική εκχώρηση εύρους ζώνης κατά την CFP περίοδο

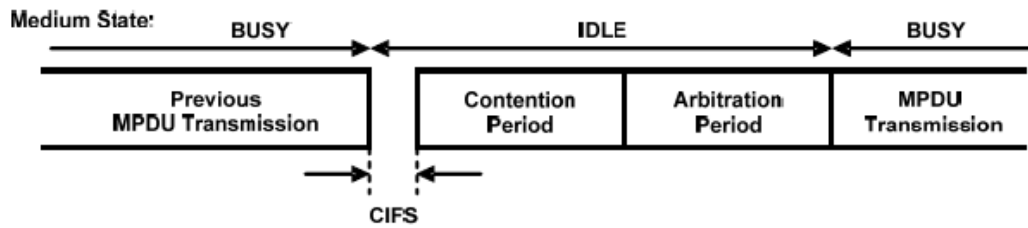
Η επιλογή της δυναμικής εκχώρησης χρονοσχισμών αντιμετωπίζει το πρόβλημα κατανομής πόρων στην περίπτωση όπου υπάρχουν πολλά πακέτα προς μετάδοση στους ενταμιευτές των BB-PLC κόμβων. Αυτή η κατάσταση μπορεί να είναι αποτέλεσμα της ύπαρξης πηγών κίνησης μεταβλητής ροής (Variable Bit-Rate – VBR) ή της παρουσίας επιβαρυνμένων PLC ζεύξεων, οι οποίες χαρακτηρίζονται από υψηλές τιμές BER, και, επομένως, προκαλούν απώλειες και αναμεταδόσεις πλαισίων. Στην περίπτωση της σταθερής εκχώρησης εύρους ζώνης, η χρονική διάρκεια που ανατίθεται σε κάθε κόμβο για την αποστολή των δεδομένων του προκύπτει από το μέσο όρο του ρυθμού μετάδοσης του κόμβου. Παράλληλα, ανατίθεται επιπλέον 10% του χρόνου που έχει ανατεθεί μέσω



Σχήμα 2.6 α: Παράδειγμα σταθερής κατανομής εύρους ζώνης [IEEE1901].



Σχήμα 2.6 β: Παράδειγμα δυναμικής κατανομής εύρους ζώνης [IEEE1901].



Σχήμα 2.7: Μηχανισμός πρόσβασης σύμφωνα με το DVTP πρωτόκολλο [IEEE1901].

της σταθερής εκχώρησης εύρους ζώνης για να εξυπηρετηθούν ενδεχόμενες αποκλίσεις από το μέσο ρυθμό μετάδοσης. Στην περίπτωση όπου εφαρμόζεται δυναμική εκχώρηση εύρους ζώνης, ο επιπλέον χρόνος που μπορεί να ανατεθεί υπερβαίνει το 10% και προσαρμόζεται δυναμικά στις απαιτήσεις της κίνησης.

Στα Σχ.2.6 α και β συγκρίνονται δύο παραδείγματα σταθερής και δυναμικής κατανομής εύρους ζώνης. Στην περίπτωση της σταθερής κατανομής, παρατηρείται ότι τα επιπλέον δεδομένα, που δεν αποστέλλονται εντός του χρόνου που έχει ανατεθεί στον κόμβο A, καθυστερούν τη μετάδοση των δεδομένων του κόμβου B. Στην περίπτωση της δυναμικής κατανομής η καθυστέρηση μειώνεται σημαντικά, αφού μεγαλώνει ο επιπλέον χρόνος που ανατίθεται για εξυπηρέτηση της επιπλέον κίνησης του κόμβου B.

2.3.3. Μηχανισμός πρόσβασης DVTP

Ο μηχανισμός πρόσβασης DVTP (Dynamic Virtual Token Passing) αποτελεί προαιρετικό μηχανισμό διευθέτησης συγκρούσεων βασισμένο στην ανίχνευση φέροντος. Το Σχ.2.7 παρουσιάζει το βασικό μηχανισμό πρόσβασης που ακολουθείται από το πρωτόκολλο DVTP, κατά την εφαρμογή του οποίου, οι κόμβοι έχουν τη δυνατότητα ανίχνευσης της κίνησης που μεταδίδεται στο διάλυο και υπολογισμού του διαστήματος NAV, που αντιστοιχεί στη διάρκεια κατάληψης του διαύλου από άλλες μεταδόσεις. Κατά την περίοδο ανταγωνισμού CP ο διάλυος PLC είναι κατειλημμένος και οι κόμβοι εκτελούν τον αλγόριθμο τυχαίας υπαναχώρησης μέχρι το μέσο να γίνει διαθέσιμο, δηλαδή να παρέλθει ο χρόνος που καθορίστηκε από το NAV. Στην περίπτωση όπου δεν υπάρχει άλλη ενεργή μετάδοση, το δίκτυο εισέρχεται στην περίοδο διαιτησίας (arbitration period), κατά την οποία αποφασίζεται ποιος θα είναι ο επόμενος κόμβος που θα μεταδώσει βάσει της προτεραιότητας των κόμβων και του αναγνωριστικού STID (Station ID) που υποδηλώνει την ταυτότητά τους. Στις περιπτώσεις κόμβων που έχουν προς μετάδοση δεδομένα ίσης προτεραιότητας, οι κόμβοι μεταδίδουν σειριακά, δηλαδή ο χρόνος αναμονής τους εξαρτάται από τον κόμβο που μεταδίδει και το STID που τους

αντιστοιχεί. Το συγκεκριμένο σχήμα αποτελεί ακολουθεί το μηχανισμό εικονικής επίδοσης σκυτάλης. Στις περιπτώσεις όπου οι κόμβοι μεταδίδουν δεδομένα διαφορετικής προτεραιότητας, ο μέγιστος χρόνος αναμονής είναι αντιστρόφως ανάλογος της προτεραιότητας των δεδομένων του κάθε κόμβου. Κατ' αυτό τον τρόπο, πλαίσια υψηλότερης προτεραιότητας μπορούν να μεταδοθούν νωρίτερα από τη σειρά που είχε προσδιορισθεί με βάση το STID.

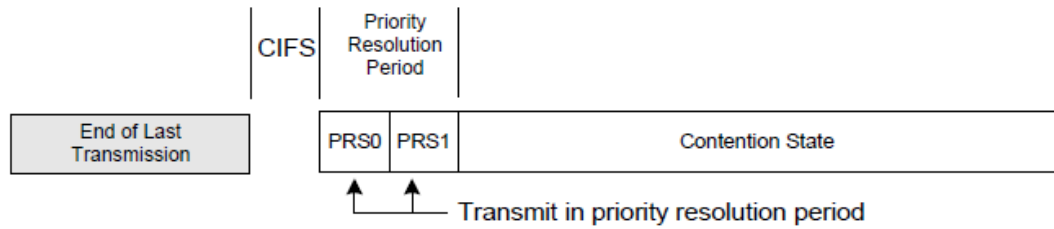
Στην περίπτωση εφαρμογής του DVTP προς διευθέτηση της πρόσβασης κόμβων που ανήκουν σε διαφορετικές κυψέλες ή σε κυψέλες όπου παρατηρείται το πρόβλημα του κρυμμένου τερματικού, η χρήση του πρωτοκόλλου DVTP δεν εγγυάται την εξάλειψη των συγκρούσεων. Αυτό συμβαίνει γιατί το DVTP παραμένει ένα πρωτόκολλο χωρίς σύνδεση, όπου οι αποφάσεις για τη διαιτησία των μεταδόσεων λαμβάνονται καταναμημένα, δηλαδή από τους κόμβους και όχι κεντρικά, όπως στην περίπτωση του TDMA. Η ενότητα που ακολουθεί περιγράφει την καταναμημένη διαδικασία ανάθεσης προτεραιοτήτων σε δίκτυα CSMA, μηχανισμό που εξασφαλίζει την τήρηση των απαιτήσεων QoS σε BB-PLC δίκτυα.

2.4. Ποιότητα υπηρεσίας σε δίκτυα BB-PLC

2.4.1. CSMA/CA βασισμένο στην ανάλυση προτεραιοτήτων

Βασικός μηχανισμός του MAC πρωτοκόλλου που ακολουθείται στα δίκτυα πρόσβασης είναι το σχήμα επίλυσης προτεραιοτήτων (Priority Resolution Scheme – PRS) που εφαρμόζεται στην περίπτωση της τυχαίας πρόσβασης. Σύμφωνα με το συγκεκριμένο σχήμα, η επίλυση των προτεραιοτήτων μετάδοσης επιτυγχάνεται με την εισαγωγή περιόδων ανάλυσης προτεραιότητας που προηγούνται της περιόδου CP.

Στο Σχ.2.8 παρουσιάζεται η βασική διαδικασία πρόσβασης με σχήμα ανάλυσης προτεραιοτήτων, όπου η επίλυση προτεραιοτήτων πραγματοποιείται στις χρονοσχισμές PRS0 και PRS1 που προηγούνται της περιόδου CP. Η κίνηση που μεταφέρει κάθε PLC κόμβος αντιστοιχεί σε τέσσερα επίπεδα προτεραιότητας, τα οποία με τη σειρά τους μεταφράζονται στην ακολουθία ψηφίων που εικονίζεται στον Πιν.2.2. Το επίπεδο CA3 αντιστοιχεί στην υψηλότερη προτεραιότητα μετάδοσης, ενώ το CA0 στη χαμηλότερη



Σχήμα 2.8: Πρόσβαση CSMA/CA με σχήμα PRS [IEEE1901].

Πίνακας 2.2: Αντιστοίχιση προτεραιοτήτων πρόσβασης διαύλου κατά την περίοδο επίλυσης προτεραιότητας [IEEE 1901]

Προτεραιότητα πρόσβασης στο κανάλι	Εκπομπή κατά την PRS0 περίοδο	Εκπομπή κατά την PRS1 περίοδο
CA3	1	1
CA2	1	0
CA1	0	1
CA0	0	0

προτεραιότητα. Δεδομένου ότι ο μηχανισμός ανίχνευσης φέροντος είναι ενεργός, αν ένας κόμβος ανιχνεύσει μετάδοση κατά την περίοδο PRS0, ενώ εκείνος δεν έχει μεταδώσει, χάνει το δικαίωμα μετάδοσης κατά την περίοδο PRS1 και CP. Αυτό σημαίνει ότι ο κόμβος ήθελε να μεταδώσει κίνηση προτεραιότητας CA0 ή CA1 και έχασε από τον ανταγωνισμό με κίνηση υψηλότερης προτεραιότητας. Στην περίπτωση όπου ο κόμβος έχει εκπέμψει κατά την περίοδο PRS0, επαναλαμβάνεται η διευθέτηση του ανταγωνισμού κατά την περίοδο PRS1. Τελικά κατά την περίοδο CP μπορούν να μεταδώσουν μόνο οι κόμβοι που δήλωσαν την πρόθεσή τους να μεταδώσουν κατά την περίοδο επίλυσης προτεραιότητας και δεν αποκλείστηκαν από άλλους κόμβους με κίνηση υψηλότερης προτεραιότητας.

Όπως αναφέρθηκε, υποστηρίζονται τέσσερα επίπεδα προτεραιότητας από το IEEE 1901 PHY. Ο Πιν.2.3 παρουσιάζει την επίλυση προτεραιοτήτων στη χρήση του PLC διαύλου που προτείνεται από το πρότυπο IEEE 1901. Ο αριθμός των στηλών αναφέρεται στο σύνολο των κλάσεων υπηρεσιών που εξυπηρετούνται από ένα PLC δίκτυο. Στην περίπτωση του IEEE 1901 όπου υπάρχουν τέσσερις προτεραιότητες διαύλου (CA0-CA3), όπως αναφέρονται στον Πιν.2.2, χρησιμοποιείται η στήλη 4 του Πιν.2.3 για την αντιστοίχιση προτεραιοτήτων διαύλου και κλάσεων υπηρεσιών, σύμφωνα με την οποία στις οκτώ κλάσεις υπηρεσιών αντιστοιχούν οι τιμές προτεραιοτήτων 0 έως 3.

Πίνακας 2.3: Αντιστοίχιση προτεραιοτήτων διαύλου κλάσεων υπηρεσιών και υποστηριζόμενων εφαρμογών (Πίνακας προσαρμοσμένος από IEEE1901).

Διαθέσιμες προτεραιότητες διαύλου								
	1	2	3	4	5	6	7	8
A	0	1	2	3	4	5	6	7
Υπηρεσία Ελέγχου Δικτύου: Κίνηση που προέρχεται από υπηρεσίες ελέγχου και παρακολούθησης των κρίσιμων τμημάτων του ενεργειακού δικτύου και του εξοπλισμού.								
B	0	1	2	3	4	5	5	6
Υπηρεσία Φωνής (Voice): Κίνηση με απαίτηση για ελάχιστη καθυστέρηση, μικρότερης των 10ms. Υπηρεσία πραγματικού χρόνου.								
C	0	1	1	2	3	4	4	5
Υπηρεσία αποστολής εικόνας ή ήχου (Video / Audio): Κίνηση που χαρακτηρίζεται από μέγιστη καθυστέρηση μικρότερη των 100ms.								
D	0	1	1	2	2	3	3	4
Υπηρεσία ελεγχόμενου φορτίου: Κίνηση που υπόκειται σε έλεγχο αποδοχής κλήσεων αφού ο αριθμός των συνδέσεων που μπορεί να εξυπηρετηθούν είναι συγκεκριμένος. Υπάρχει εγγύηση ελάχιστου εύρους ζώνης.								
E	0	0	0	1	1	2	2	3
Υπηρεσία άριστης προσπάθειας: Κίνηση τύπου βέλτιστης προσπάθειας που εξυπηρετεί τους σημαντικότερους χρήστες του δικτύου.								
F	0	0	0	1	1	1	1	2
Υπηρεσία βέλτιστη προσπάθειας: Κίνηση τοπικών δικτύων LAN. Η συγκεκριμένη κλάση αποτελεί την προεπιλεγμένη επιλογή.								
G	0	0	0	0	0	0	0	1
Υπηρεσίες Υποβάθρου (Background): Κίνηση που επιτρέπεται σε ένα δίκτυο αλλά δεν πρέπει να επηρεάζει τους άλλους χρήστες και εφαρμογές.								
G	0	0	0	0	0	0	0	0
Υπηρεσίες Υποβάθρου.								

Σημειώνεται ότι οι οκτώ κλάσεις υπηρεσιών που παρουσιάζονται στον Πιν.2.3 καθορίζονται βάσει του προτύπου IEEE 802.1D-2004 [IEEE802.1]. Πραγματοποιώντας την αντιστοίχιση αυτή στο επίπεδο πρόσβασης στο δίκτυο, απαλλάσσονται τα υψηλότερα επίπεδα από την ανάγκη εκτέλεσης της συγκεκριμένης λειτουργίας. Όπως αναλύεται στο σχήμα IFS που εξετάζεται στη συνέχεια, είναι δυνατή η περαιτέρω αύξηση των επιπέδων προτεραιότητας, αυξάνοντας τη διαφοροποίηση στην επεξεργασία των πολυμεσικών δεδομένων.

Πίνακας 2.4: Υπολογισμός INTP συναρτήσει του UP και της κατάστασης του δικτύου (Πίνακας προσαρμοσμένος από IEEE1901).

		Κατάσταση χρησιμοποίησης του δικτύου		
		Κατάσταση 1	Κατάσταση 2	Κατάσταση 3
Προτεραιότητα χρήστη	7	14	13	13
	6	14	14	14
	5	14	11	10
	4	14	11	8
	3	14	8	8
	2	14	4	6
	1	14	1	0
	0	14	0	0

2.4.2. Έλεγχος προτεραιοτήτων στο CSMA/CA βάσει του χρονικού διαστήματος μεταξύ των πλαισίων

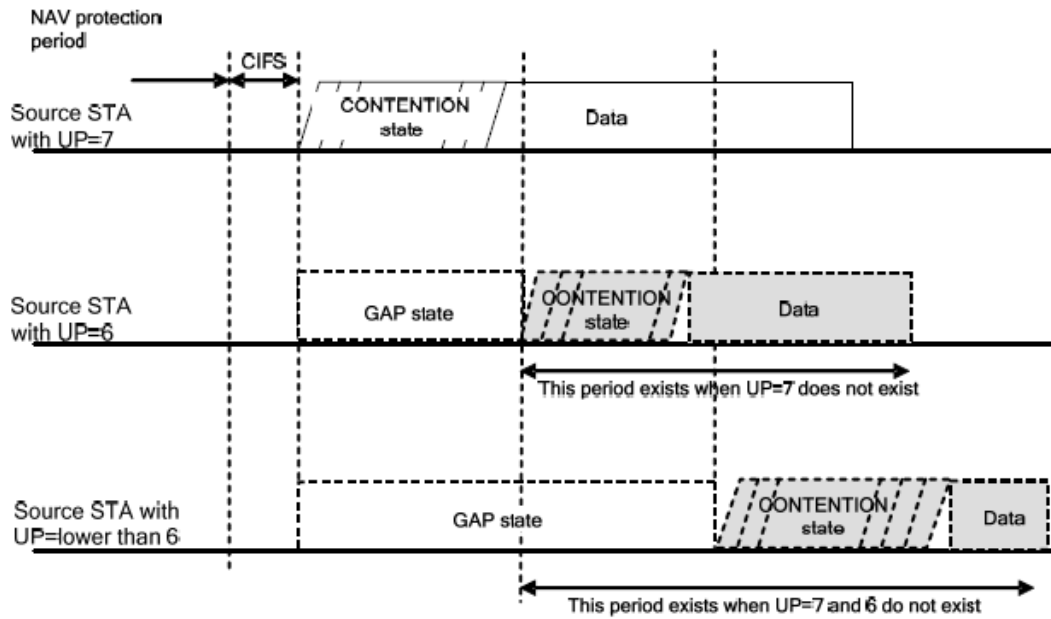
Πέραν της λειτουργικότητας που αναλύθηκε στο σχήμα PRS, το σχήμα πρόσβασης κατά το πρότυπο IEEE 1901 υποστηρίζει και το μηχανισμό ελέγχου προτεραιοτήτων βάσει του χρονικού διαστήματος μεταξύ των πλαισίων (Interframe space –IFS– prioritized CSMA/CA). Βασική διαφοροποίηση του συγκεκριμένου σχήματος είναι η κατάργηση της περιόδου επίλυσης προτεραιοτήτων και η τροποποίηση του αλγορίθμου τυχαίας υπαναχώρησης ώστε ο χρόνος CW να εξαρτάται όχι μόνο από το πλήθος των αποτυχημένων αποπειρών για μετάδοση αλλά και από την προτεραιότητα της προς μετάδοση κίνησης. Συγκεκριμένα, η τιμή CW του αλγορίθμου τυχαίας υπαναχώρησης εξαρτάται από δύο νέες παραμέτρους: την προτεραιότητα χρήστη (User Priority – UP), που παίρνει τιμές από 0 έως 7, και την εσωτερική προτεραιότητα (Internal Priority – INTP). Σημειώνεται ότι η προτεραιότητα χρήστη UP του σχήματος ελέγχου προτεραιοτήτων CSMA/CA αντιστοιχεί στις κλάσεις υπηρεσιών A-G του Πιν2.3 που αναλύθηκαν κατά την περίοδο ανάλυσης προτεραιότητας. Συγκεκριμένα, η κλάση A έχει την υψηλότερη προτεραιότητα (UP=7) ενώ η κλάση G έχει τη χαμηλότερη προτεραιότητα (UP=0).

Ο Πιν.2.4 παραθέτει τον υπολογισμό της τιμής INTP ανάλογα με την UP και την κατάσταση που βρίσκεται εκείνη τη στιγμή το δίκτυο. Η κατάσταση 1 αντιστοιχεί στην κατάσταση ελεύθερου διαύλου, κατά την οποία δεν μεταδίδει κανένας άλλος κόμβος στο

Πίνακας 2.5: Υπολογισμός CW συναρτήσει της τιμής INTP [IEEE1901].

INTP	CW πλαισίων δεδομένων	CW πλαισίων διαχείρισης
15	3	3
14	7	7
13	11	11
12	15	15
11	19	19
10	23	23
9	27	27
8	31	31
7	35	35
6	39	39
5	47	47
4	56	56
3	66	66
2	77	77
1	89	89
0	512	102

PLC δίκτυο. Κατά την κατάσταση 2 υπάρχουν ενεργές μεταδόσεις στο δίκτυο που φέρουν προτεραιότητα $UP=3$. Τέλος, κατά την κατάσταση 3, υπάρχει τουλάχιστον μία μετάδοση με υψηλότερη προτεραιότητα, δηλαδή $UP>3$. Βάσει του Πιν.2.4, σε μία υπηρεσία ελεγχόμενου φορτίου (κλάση D) αντιστοιχεί προτεραιότητα $UP=4$. Σε αυτή την περίπτωση, αν το δίκτυο είναι ελεύθερο (κατάσταση 1) τότε ανατίθεται στη συγκεκριμένη υπηρεσία εσωτερική προτεραιότητα $INTP=14$. Αντίθετα, αν υπάρχουν στο δίκτυο άλλες μεταδόσεις με αντίστοιχα υψηλή προτεραιότητα ($UP>3$), τότε ανατίθεται στην ίδια υπηρεσία χαμηλότερη προτεραιότητα $INTP=8$. Η τελική τιμή του CW που καθορίζει την πιθανότητα μετάδοσης του πλαισίου εξαρτάται από την τιμή INTP και μεταβάλλεται δυναμικά σε κάθε νέα περίοδο μετάδοσης. Η σχέση μεταξύ CW και INTP απεικονίζεται στον Πιν.2.5. Παρατηρείται ότι όσο χαμηλότερη είναι η τιμή του INTP τόσο περισσότερες είναι και οι χρονοσχισμές του παραθύρου CW. Επίσης, τα πλαίσια δεδομένων και διαχείρισης έχουν αντίστοιχη μεταχείριση από το σχήμα ελέγχου προτεραιοτήτων, εκτός από την περίπτωση που $INTP=0$, η οποία αντιστοιχεί σε κλάσης χαμηλής προτεραιότητας σε συνδυασμό με την παρουσία άλλων κλάσεων υψηλής προτεραιότητας, όπου στα πλαίσια διαχείρισης αντιστοιχίζεται μικρότερος χρόνος αναμονής.



Σχήμα 2.9: Διαδικασία ελέγχου προτεραιότητας [IEEE1901].

Πίνακας 2.6: Υπολογισμός διάρκειας σε χρονοσχισμές της περιόδου αναμονής (Πίνακας προσαρμοσμένος από IEEE1901).

		Χρόνος Αναμονής σε χρονοσχισμές			
		Κατάσταση A	Κατάσταση B	Κατάσταση C	Κατάσταση D
UP	7	0	0	N/A	N/A
	6	7	N/A	0	N/A
	5-0	19	9	7	0

H

διασφάλιση της ποιότητας υπηρεσίας κατά τη λειτουργία IFS επιτυγχάνεται με την εισαγωγή ενός διαστήματος αναμονής που προηγείται της περιόδου CP. Στόχος της εισαγωγής της περιόδου αναμονής είναι ο διαχωρισμός των μεταδόσεων της κίνησης υψηλής προτεραιότητας (UP=6 και 7) από την κίνηση χαμηλότερης προτεραιότητας.

Με αναφορά στο Σχ.2.9, μετά την πάροδο της χρονικής διάρκειας CIFS (contention interframe space) εκκινεί ο ανταγωνισμός πλαισίων με προτεραιότητα UP=7. Εφόσον δεν σταλεί πλαίσιο RTS κατά τη διάρκεια της περιόδου αναμονής, μπορούν να εκκινήσουν τη φάση ανταγωνισμού πλαίσια με UP=6. Τέλος, αν το μέσο δεν καταληφθεί μετά τον ανταγωνισμό των πλαισίων υψηλής προτεραιότητας, εκκινεί η φάση ανταγωνισμού των πλαισίων χαμηλότερης προτεραιότητας. Η χρονική διάρκεια της περιόδου αναμονής εξαρτάται από την ύπαρξη ή όχι πλαισίων υψηλής προτεραιότητας και προκύπτει από τον

Πιν.2.6. Συγκεκριμένα, με κριτήριο την ύπαρξη πλαισίων υψηλής προτεραιότητας, διακρίνονται οι ακόλουθες καταστάσεις δικτύου:

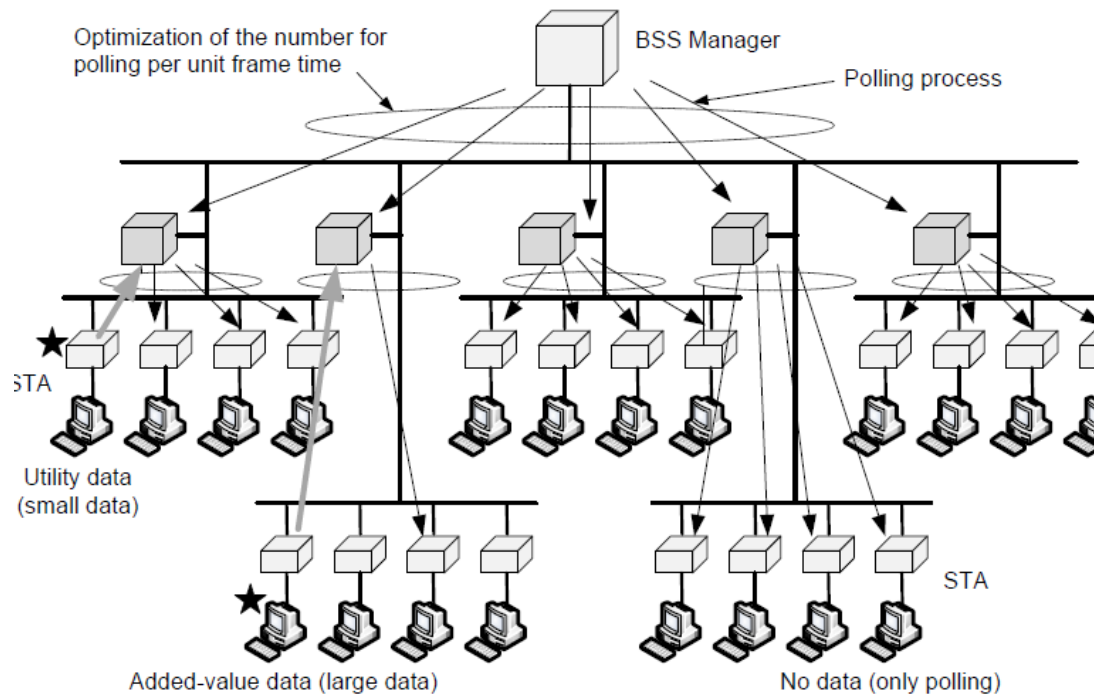
- *Κατάσταση a:* Υπάρχουν πλαίσια υψηλής προτεραιότητας με $UP=7$ και $UP=6$. Σημειώνεται ότι οι συγκεκριμένες κατηγορίες πλαισίων αντιστοιχούν στις κλάσεις υπηρεσιών ελέγχου δικτύου και φωνής αντίστοιχα.
- *Κατάσταση b:* Υπάρχουν αποκλειστικά πλαίσια με $UP=7$.
- *Κατάσταση c:* Υπάρχουν αποκλειστικά πλαίσια με $UP=6$.
- *Κατάσταση d:* Δεν υπάρχουν πλαίσια υψηλής προτεραιότητας.

2.4.3. Έλεγχος αποδοχής κλήσεων σε δίκτυα TDMA

Η περίοδος CFP χρησιμοποιείται κυρίως για την εξυπηρέτηση εφαρμογών με μικρή ανοχή σε καθυστέρηση, όπως είναι οι εφαρμογές ελέγχου του ευφυούς δικτύου και η επικοινωνία VoIP. Η αποτελεσματικότητα του TDMA να εξυπηρετήσει τις υποστηριζόμενες εφαρμογές εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη διαδικασία ελέγχου αποδοχής κλήσεων που ακολουθείται. Η συγκεκριμένη διαδικασία καθορίζει την μακροπρόθεσμη κατανομή του εύρους ζώνης στους κόμβους του δικτύου καθώς, επίσης, και το πλήθος των κόμβων που μπορούν να εξυπηρετηθούν από το BB-PLC δίκτυο και εξαρτάται από την κατάσταση χρονοπρογραμματισμού TDMA.

Ο χρονοπρογραμματισμός TDMA σε ένα δίκτυο πρόσβασης καθορίζεται από τον HE και γνωστοποιείται σε όλους τους κόμβους της PLC κυψέλης. Για λόγους συγχρονισμού, ένας χρονοπρογραμματισμός περιέχει ακέραια πολλαπλάσια του κύκλου Beacon που εξετάσθηκε στην προηγούμενη ενότητα. Στα BB-PLC δίκτυα πρόσβασης η περίοδος του κύκλου beacon αντιστοιχεί στο διπλάσιο της περιόδου του εναλλασσόμενου ρεύματος, δηλαδή για λειτουργία του δικτύου στη συχνότητα των 60Hz αντιστοιχεί κύκλος beacon ίσος με 33.33ms, ενώ για λειτουργία στη συχνότητα των 50Hz η αντίστοιχη περίοδος του κύκλου beacon είναι 40ms.

Ο καθορισμός της διάρκειας χρονοπρογραμματισμού είναι σημαντικός σχεδιαστικός παράγοντας σε ένα BB-PLC δίκτυο. Αύξηση της διάρκειας του χρονοπρογραμματισμού οδηγεί στην ανάθεση μεγαλύτερου πλήθους χρονοσχισμών σε κάθε κόμβο προκειμένου να εξυπηρετηθεί η BB-PLC κίνηση. Παράλληλα, όμως, ο μεγάλης διάρκειας χρονοπρογραμματισμός μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλες καθυστερήσεις αναμονής. Από την άλλη πλευρά, αν και η μικρή διάρκεια χρονοπρογραμματισμού μειώνει το χρόνο



Σχήμα 2.10: Δίκτυο BB-PLC πολλαπλών αλμάτων (Σχήμα προσαρμοσμένο από IEEE1901).

αναμονής, οδηγεί σε αύξηση της πληροφορίας διαχείρισης και της ισχύος, παράγοντα πολύ σημαντικού στα δίκτυα BB-PLC. Αυτό συμβαίνει γιατί οδηγεί σε συχνότερους υπολογισμούς του χρονοπρογραμματισμού που απαιτούν υπολογιστική ισχύ και μετάδοση πλαισίων διαχείρισης τόσο από τους κόμβους της κυψέλης προς τον HE, προκειμένου να ενημερωθεί ο HE για την προς μετάδοση κίνηση, όσο και από τον HE προς τους κόμβους, προκειμένου να γνωστοποιηθεί σε όλους ο νέος χρονοπρογραμματισμός. Κατά το σχεδιασμό ενός BB-PLC δικτύου αναζητείται η βέλτιστη διαχείριση του ανωτέρω ισοζυγίου.

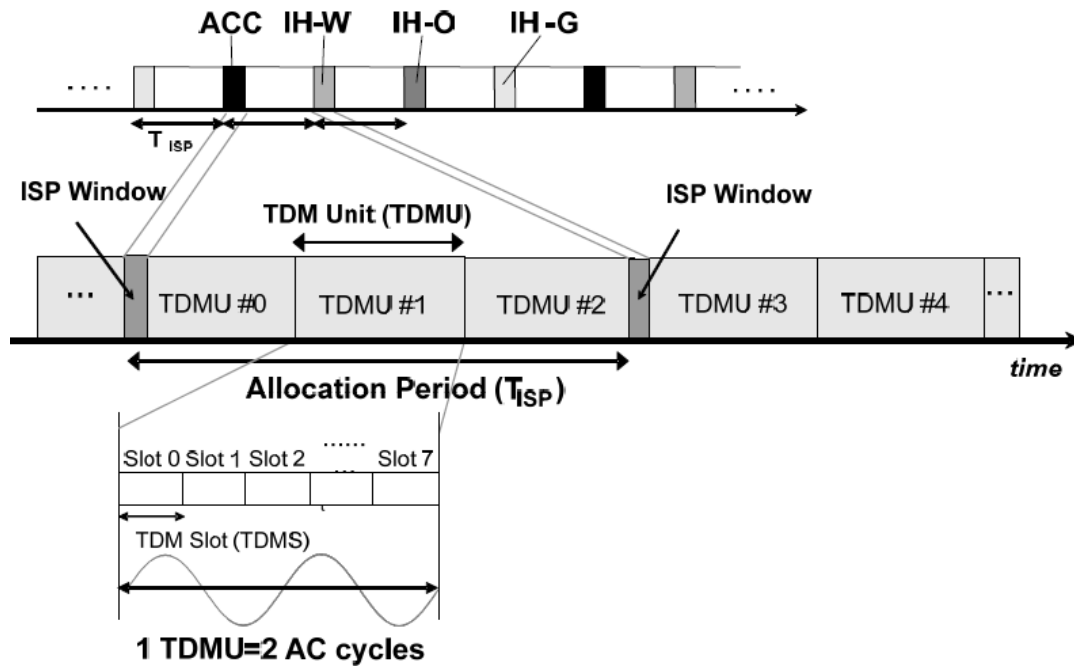
Η κατάστρωση του TDMA χρονοπρογραμματισμού πραγματοποιείται κεντρικά από τον HE και περιλαμβάνει τρία μέρη: (i) την κατανομή των πόρων για την κάτω ζεύξη, (ii) την κατανομή των πόρων για την άνω ζεύξη και (iii) την κατανομή των πόρων για CP πρόσβαση. Στην περίπτωση της CFP πρόσβασης, ο HE αναθέτει συγκεκριμένο πλήθος χρονοσχημάτων στους BB-PLC κόμβους, με βάση διάφορους παράγοντες όπως η προτεραιότητα της κίνησης κάθε κόμβου, οι ρυθμοί μετάδοσης φυσικού στρώματος κ.α. Στο Κεφ.5 της διατριβής προτείνεται αλγόριθμος βελτιστοποίησης του TDMA χρονοπρογραμματισμού αξιοποιώντας τους δυνατούς ρυθμούς μετάδοσης των διαθέσιμων PLC ζεύξεων και το πλήθος των συνδέσεων που εξυπηρετεί κάθε κόμβος.

Στην περίπτωση δικτύων BB-PLC πολλαπλών αλμάτων (Σχ.2.10) μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατανεμημένη κατάστρωση TDMA χρονοπρογραμματισμού. Σε αυτή τη λειτουργία, κάθε κόμβος καθορίζει την κατανομή των πόρων στους κόμβους του επόμενου ιεραρχικού επιπέδου. Η κατανεμημένη λειτουργία οδηγεί σε αύξηση των μηνυμάτων γνωστοποίησης του TDMA χρονοπρογραμματισμού που ανταλλάσσονται περιοδικά μεταξύ των κόμβων. Στο Κεφ.6 της διατριβής προτείνεται κατανεμημένος αλγόριθμος κατανομής πόρων κατάλληλος για δίκτυα ευρείας κάλυψης.

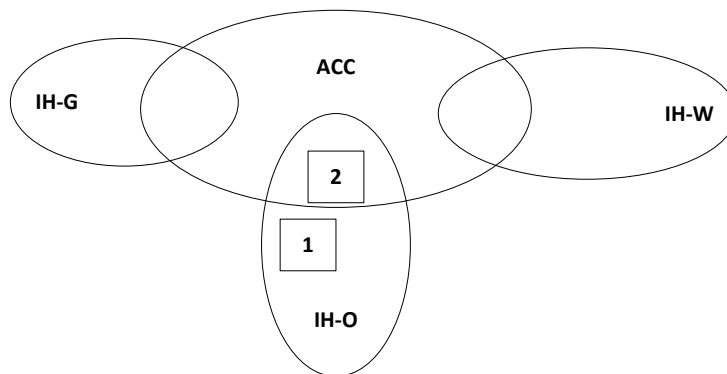
2.5. Πρωτόκολλο Συνύπαρξης ISP

Τόσο η IEEE όσο και η ITU-T [G.9972] χρησιμοποιούν κοινό διασυστημικό πρωτόκολλο (Inter System Protocol – ISP) για να εξασφαλίσουν τη διαλειτουργικότητα μεταξύ των τριών οικιακών PLC πρωτοκόλλων – IEEE 1901 OFDM, IEEE 1901 Wavelet και ITU-T G.hn – και με το πρωτόκολλο πρόσβασης (IEEE 1901). Στην εργασία [Gal09] προτείνεται το πρώτο πρωτόκολλο συνύπαρξης που υιοθετήθηκε στην PLC τεχνολογία και μεσολαβούσε μεταξύ PHY και MAC (Inter-PHY Protocol – IPP). Το πρωτόκολλο αυτό εξελίχθηκε στο πρωτόκολλο συνύπαρξης ISP που ακολουθείται από την PLC προτυποποίηση. Αυτό, επιτρέπει την κατανομή των πόρων ενός PLC δικτύου μεταξύ των διαφορετικών συστημάτων PLC. Στα δίκτυα πρόσβασης υπάρχει η συνύπαρξη κόμβων που υποστηρίζουν πολυπλεξία στα πεδία της συχνότητας (Frequency Division Multiplexing – FDM) και του χρόνου (Time Division Multiplexing). Στην περίπτωση FDM κόμβων, η ζώνη συχνοτήτων 2-30MHz χωρίζεται σε δύο επιμέρους ζώνες, με τη χαμηλότερη ζώνη συχνοτήτων να ανατίθεται στο δίκτυο πρόσβασης. Αντίστοιχα, στην περίπτωση των TDM κόμβων, η περίοδος χρονοπρογραμματισμού χωρίζεται σε μικρότερα τμήματα έτσι ώστε να εξυπηρετούνται όλα τα υποστηριζόμενα συστήματα.

Στο Σχ.2.11 απεικονίζεται η γενική δομή του TDMA χρονοπρογραμματισμού. Ο χρόνος διαμοιράζεται εξίσου στα τέσσερα διαφορετικά συστήματα, οικιακά δίκτυα – IH-W, IH-G, IH-O - και δίκτυο πρόσβασης, ACC, ενώ τα πλαίσια ISP υποδηλώνουν την έναρξη κάθε περιόδου. Όταν δεν υπάρχει κάποιο από τα συστήματα, ο χρόνος που του αναλογεί κατανέμεται στα υπόλοιπα, με κριτήρια που εξαρτώνται από την πολιτική του δικτύου.



Σχήμα 2.11: Γενική δομή χρονοπρογραμματισμού TDMA (Σχήμα προσαρμοσμένο από IEEE1901).



Σχήμα 2.12: Δίκτυο PLC με τέσσερα συστήματα.

Γενικά, όταν συνυπάρχουν οικιακά δίκτυα και δίκτυο πρόσβασης, το δίκτυο πρόσβασης μπορεί να λάβει μέχρι 50% των πόρων, αφήνοντας τους υπόλοιπους στα οικιακά δίκτυα.

Κύρια αιτία της υιοθέτησης του διασυστημικού πρωτοκόλλου αποτελεί ο καταμερισμός των πόρων του δικτύου σε περίπτωση λειτουργίας διαφορετικών συστημάτων. Για την αποτελεσματικότερη κατανομή των πόρων, σημαντικό μηχανισμό του ISP πρωτοκόλλου αποτελεί η υιοθέτηση της αναχρησιμοποίησης χρονοσχισμών, σύμφωνα με την οποία, όταν δύο συστήματα δεν αλληλοπαρεμβάλλονται, επιτρέπονται ταυτόχρονες μεταδόσεις σε μια χρονοσχισμή.

Στο Σχ.2.12 παρουσιάζεται παράδειγμα δικτύου με 4 συστήματα. Για το συγκεκριμένο δίκτυο, στα Σχ.2.13α και β δίδονται παραδείγματα χρονοπρογραμματισμού με και χωρίς

ACC	IH-O	ACC	IH-W	ACC	IH-G	ACC	IH-O	ACC	IH-W	ACC	IH-G
-----	------	-----	------	-----	------	-----	------	-----	------	-----	------

Σχήμα 2.13 α: TDMA χρονοπρογραμματισμός χωρίς αναχρησιμοποίηση χρονοσχισμών.

ACC	IH-O IH-W IH-G	ACC	IH-O IH-W IH-G	ACC	IH-O IH-W IH-G	ACC	IH-O IH-W IH-G	ACC	IH-O IH-W IH-G	ACC	IH-O IH-W IH-G
-----	----------------------	-----	----------------------	-----	----------------------	-----	----------------------	-----	----------------------	-----	----------------------

Σχήμα 2.13 β: TDMA χρονοπρογραμματισμός με αναχρησιμοποίηση χρονοσχισμών.

αναχρησιμοποίηση. Στην πρώτη περίπτωση, το δίκτυο πρόσβασης καταλαμβάνει το 50% των διαθέσιμων χρονοσχισμών, ενώ τα οικιακά δίκτυα δεν υπερβαίνουν τις 2 χρονοσχιμές ανά χρονοπρογραμματισμό. Αυτό σημαίνει ότι οι κόμβοι 1 και 2 μπορούν να επικοινωνήσουν αποκλειστικά κατά τις χρονοσχιμές 2 και 8. Μέσω της εισαγωγής του μηχανισμού αναχρησιμοποίησης χρονοσχισμών, η επικοινωνία μεταξύ των κόμβων 1 και 2 μπορεί να πραγματοποιηθεί και κατά τις χρονοσχιμές που μεταδίδουν τα μη παρεμβάλλοντα συστήματα IH-W και IH-G, καταλήγοντας στο χρονοπρογραμματισμό του Σχ. 2.12 β.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3:

ΕΥΦΥΗ ΔΙΚΤΥΑ

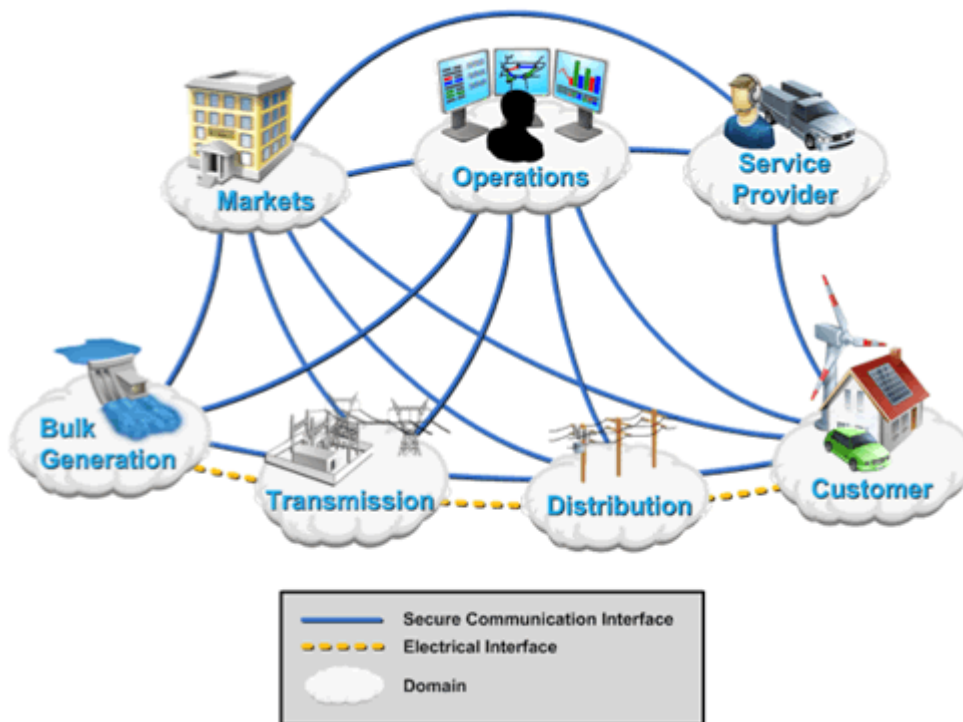
3.1 Εισαγωγή

Ο όρος ευφύες δίκτυο (Smart Grid – SG) αναφέρεται στη χρήση εφαρμογών ICT (Information and Communications Technologies) που συντελούν στην αναβάθμιση του παραδοσιακού ενεργειακού δικτύου του 20^{ου} αιώνα που υποστηρίζει τέσσερις βασικές λειτουργίες: την παραγωγή, τη μεταφορά, τη διανομή και τον έλεγχο της ηλεκτρικής ενέργειας [Fan12]. Βασική λειτουργία του παραδοσιακού ενεργειακού δικτύου αποτελεί η μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας που προσφέρεται από συγκεκριμένους κεντρικούς παρόχους σε ένα μεγάλο πλήθος καταναλωτών. Στο ευφύες δίκτυο η βασική λειτουργία μεταφοράς ενέργειας εμπλουτίζεται με την αμφίδρομη ροή πληροφορίας και επεξεργασίας της με στόχο τη δημιουργία ενός αυτοματοποιημένου και κατανεμημένου ενεργειακού δικτύου διανομής που θα επιτρέπει, μεταξύ άλλων, και την αμφίδρομη ροή ενέργειας.

Καίτοι δεν υπάρχει σαφής ορισμός για το ευφύες δίκτυο, το Εθνικό Ινστιτούτο Προτύπων και Τεχνολογίας (National Institute of Standards and Technology – NIST) [NIST] των Ηνωμένων Πολιτειών περιέγραψε τα αναμενόμενα οφέλη από τη χρήση των ευφύων δικτύων, τα οποία όπως αναφέρουν οι συγγραφείς στην αναφορά [Fan12] είναι τα ακόλουθα:

1. Βελτίωση της αξιοπιστίας και της ποιότητας στην παροχή ηλεκτρικής ενέργειας.
2. Βελτιστοποίηση της χρησιμοποίησης των μονάδων παραγωγής ενέργειας και αποτροπή κατασκευής και χρήσης εφεδρικών μονάδων παραγωγής ενέργειας για την ικανοποίηση της υπερβάλλουσας ζήτησης (peak load shaving).
3. Αύξηση της χωρητικότητας και της αποτελεσματικότητας του ενεργειακού δικτύου.
4. Βελτίωση της ανθεκτικότητας σε διακοπές.
5. Προληπτική συντήρηση και αυτοϊαση του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.
6. Αυτοματοποιημένη συντήρηση και λειτουργία.

7. Ενσωμάτωση κατανεμημένων πηγών ενέργειας.
8. Αύξηση της διείσδυσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο ηλεκτρικό δίκτυο.
9. Αυτοματοποιημένη συντήρηση και λειτουργία
10. Μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου μέσω της ενσωμάτωσης ηλεκτρικών οχημάτων και νέων πηγών ενέργειας.
11. Μείωση της κατανάλωσης πετρελαίου μέσω της μείωσης της ενσωμάτωσης μη αποτελεσματικών πηγών παραγωγής ενέργειας (διασυνδέσεις νέων μονάδων παραγωγής, υδροηλεκτρικά εργοστάσια) κατά τις περιόδους υπερβάλλουσας ζήτησης.
12. Ενίσχυση της φυσικής ασφάλειας του δικτύου.
13. Μετάβαση στα ηλεκτρικά οχήματα και σε νέους τρόπους αποθήκευσης ενέργειας.
14. Αύξηση επιλογών των καταναλωτών.
15. Εισαγωγή νέων προϊόντων, υπηρεσιών και αγορών.



Σχήμα 3.1: Εννοιολογικό μοντέλο ευφυούς δικτύου κατά NIST [NIST]

Η νέα δομή του δικτύου, όπως περιγράφεται από τον NIST, παρουσιάζεται στο Σχ.3.1, όπου διακρίνονται οι κύριες λειτουργικές και επιχειρηματικές οντότητες που επηρεάζονται και, ως εκ τούτου, θα εμπλακούν στη μετάβαση στα ευφυή δίκτυα. Παράλληλα με τις Ηνωμένες Πολιτείες, και στην Ευρώπη συγκροτήθηκε το 2009 η

Ομάδα Εργασίας για τα Ευφυή Δίκτυα (Smart Grid Task Force – SGTF) της Ευρωπαϊκής Επιτροπής που έχει ως στόχο το συντονισμό και τη συγκέντρωση των αποτελεσμάτων των Ευρωπαϊκών Έργων Ευφύων Δικτύων ώστε να διευκολυνθεί και να συντονισθεί η μετάβαση σε αυτά. Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή εξέδωσε το 2012 μία σύσταση για την υιοθέτηση των συστημάτων ευφύων μετρητών και τη διεξαγωγή μελετών οφέλους από τη μετάβαση στα ευφυή δίκτυα [SGTF]. Λόγω των αναμενόμενων οφελών από τη μετάβαση στα ευφυή δίκτυα, οι επιπτώσεις από τη συγκεκριμένη δράση θεωρούνται αντίστοιχες αυτών της μετάβασης στο Διαδίκτυο (Internet) στις αρχές του 1990, δικαιολογώντας το αντίστοιχο παγκόσμιο ενδιαφέρον.

Στη συνέχεια του κεφαλαίου παρουσιάζονται οι βασικές αρχές υλοποίησης των ευφύων δικτύων. Εξετάζονται τα κύρια συστήματα που απαρτίζουν τα ευφυή δίκτυα καθώς και οι εφαρμογές αυτών που καθορίζουν τις ροές επικοινωνίας μεταξύ των διαφορετικών οντοτήτων. Στην ενότητα 3.3 παρουσιάζονται τα σημαντικότερα έργα ευφύων δικτύων παγκοσμίως ενώ στην ενότητα 3.4 εξετάζεται το πιλοτικό ευφύες δίκτυο με τεχνολογία BB-PLC που υλοποιήθηκε το 2007 στην περιοχή της Λάρισας. Εξετάζεται η αρχιτεκτονική αυτού και οι υπηρεσίες ευφύους δικτύου που υποστηρίχθηκαν. Τέλος, στην ενότητα 3.5 παρουσιάζονται τα σχεδιαστικά συμπεράσματα που προέκυψαν από το συγκεκριμένο έργο και θα αξιοποιηθούν σε μελλοντικά έργα ευφύων δικτύων με χρήση BB-PLC τεχνολογίας.

3.2 Δομικά στοιχεία ευφύων δικτύων

Στη μέχρι τώρα βιβλιογραφία έχουν παρουσιασθεί πολυάριθμες απόπειρες κατηγοριοποίησης και ταξινόμησης των δομικών μονάδων που απαρτίζουν τα ευφυή δίκτυα. Οι συγγραφείς της [Fan12] παρουσιάζουν μία θεώρηση των ευφύων δικτύων από τη σκοπιά των συστημάτων που τα απαρτίζουν, με βάση την οποία τα ευφυή δίκτυα διακρίνονται στα συστήματα υποδομής, διαχείρισης και προστασίας δικτύου. Οι συγγραφείς στις αναφορές [Lop11], [Met10], [Sad12] ακολουθούν το εννοιολογικό μοντέλο του NIST (Σχ.3.1) βλέποντας τα ευφυή δίκτυα από την σκοπιά του διαχειριστή δικτύου, ενώ στην αναφορά [Hwa12] γίνεται επισκόπηση πολλών άλλων μοντέλων αναφοράς που υπάρχουν στη βιβλιογραφία. Τέλος, πολύ δημοφιλής είναι η

κατηγοριοποίηση των δομικών μονάδων ενός ευφυούς δικτύου κατά επίπεδα (Layered Models) με τυπικά παραδείγματα αυτών να βρίσκονται στις αναφορές [Chu12] και [GTM].

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα βασικά δομικά στοιχεία των ευφών δικτύων οργανωμένα κατά το μοντέλο αναφοράς διαλειτουργικότητας ευφών δικτύων (Smart Grid Interoperability Reference Model – SGIRM) της IEEE [IEEE2030]. Το συγκεκριμένο πρότυπο καθορίζει τη διαλειτουργικότητα των ενεργειακών, τηλεπικοινωνιακών και πληροφοριακών συστημάτων σε ένα ευφές ενεργειακό δίκτυο που υποστηρίζει φορτία και εφαρμογές τελικών χρηστών. Σύμφωνα με το πρότυπο IEEE 2030, το ευφές δίκτυο εξετάζεται μέσω τριών διαφορετικών συστημάτων: *i)* των ενεργειακών συστημάτων *ii)* των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων και *iii)* των συστημάτων εφαρμογών πληροφορικής. Καίτοι τα τρία ανεξάρτητα συστήματα αποσκοπούν στην επίτευξη διαλειτουργικότητας στα ευφυή δίκτυα, κάθε σύστημα διαφοροποιείται σημαντικά ως προς τα ειδικά χαρακτηριστικά λειτουργίας του. Στη συνέχεια του κεφαλαίου, ο όρος δίκτυο αναφέρεται στο ενεργειακό δίκτυο στις ενότητες που καλύπτουν την παρουσίαση των απαιτήσεων των ενεργειακών συστημάτων και την παρουσίαση των εφαρμογών πληροφορικής, ενώ ο όρος δίκτυο αντιστοιχεί στο τηλεπικοινωνιακό δίκτυο στην ενότητα που καλύπτει την παρουσίαση των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων.

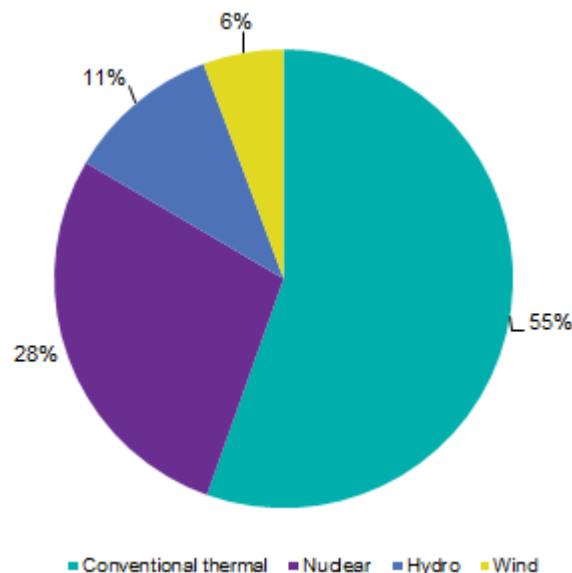
3.2.1 Ενεργειακά συστήματα

Στόχος των ενεργειακών συστημάτων είναι η διασφάλιση της μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας σε όλους τους καταναλωτές κατά τρόπο οικονομικά αποδοτικό και υπό υψηλές απαιτήσεις ποιότητας, αξιοπιστίας και διαθεσιμότητας. Βασική προϋπόθεση για την επίτευξη του στόχου αυτού είναι η εξασφάλιση ότι η ενέργεια που παράγεται κάθε χρονική στιγμή είναι ίση με αυτή που καταναλώνεται. Η μη τήρηση του ισοζυγίου αυτού ακόμα και για πολύ μικρά χρονικά διαστήματα μπορεί να οδηγήσει είτε σε καταστροφή των εξοπλισμών των ενεργειακών δικτύων είτε σε διακοπή της παροχής ηλεκτρικού ρεύματος στους καταναλωτές. Επομένως, κύρια προτεραιότητα των υπαρχόντων και μελλοντικών ενεργειακών συστημάτων είναι η βελτιστοποίηση της λειτουργίας των σχημάτων μεταφοράς και διανομής ενέργειας που διασφαλίζουν την ανωτέρω ισορροπία.

Τα βασικά δομικά στοιχεία των ενεργειακών συστημάτων (Power Systems Interoperability Architectural Perspective – PS-IAP) είναι η παραγωγή, η παράδοση και η κατανάλωση της ηλεκτρικής ενέργειας, συμπεριλαμβανομένων των μετρητών, των εφαρμογών και των διαδικασιών συντήρησης και διασφάλισης της λειτουργίας των ενεργειακών συστημάτων. Συγκεκριμένα, εξετάζονται η μαζική παραγωγή ενέργειας, τα δίκτυα μεταφοράς και διανομής, οι πάροχοι ενεργειακών υπηρεσιών (συνήθως πρόκειται για τους διαχειριστές του ενεργειακού δικτύου) και οι καταναλωτές.

3.2.1.1 Μαζική Παραγωγή Ενέργειας

Σε αντίθεση με τον παραδοσιακό τρόπο λειτουργίας του δικτύου διανομής, το κίνητρο για την ενσωμάτωση ευφύων δικτύων στην παραγωγή είναι η υποστήριξη αμφίδρομης ροής ενέργειας και πληροφορίας σε όλη την έκταση του ενεργειακού δικτύου, η οποία αποτελεί βασική προϋπόθεση για την ενσωμάτωση των κατανεμημένων πηγών παραγωγής ενέργειας (Distributed Generation - DG) και των μικροδικτύων (microgrids) [Put03]. Τα συστήματα DG χρησιμοποιούν τους κατανεμημένους ενεργειακούς πόρους (Distributed Energy Resources – DER), που σχετίζονται κυρίως με φωτοβολταϊκά συστήματα και ανεμογεννήτριες μικρής παραγωγής ενέργειας (3kW-10.000kW) [Fan12], με στόχο να βελτιώσουν την ποιότητα και την αξιοπιστία της παρεχόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Παράδειγμα αυτόνομων συστημάτων DG είναι τα μικροδίκτυα που απαρτίζουν ένα τοπικό δίκτυο πηγών παραγωγής και φορτίων που διαθέτουν τη



Σχήμα 3.2: Ποσοστιαία παραγωγή Ενέργειας στην Ευρώπη ανά πηγή [Eurostat]

δυνατότητα αυτόνομης λειτουργίας, δηλαδή ακόμη και όταν είναι αποκομμένα από το υπόλοιπο ενεργειακό δίκτυο [Qia11].

Σύμφωνα με το διεθνές πρακτορείο ενέργειας [IEA02] και άλλες πηγές [Dan11], έχει αποδειχθεί ότι η ενσωμάτωση μεγάλου αριθμού κατανεμημένων πηγών ενέργειας μπορεί να οδηγήσει σε λειτουργία του ενεργειακού δικτύου με την ίδια αξιοπιστία που προκύπτει όταν χρησιμοποιούνται μεγάλοι σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής. Η προσέγγιση αυτή μειώνει σημαντικά το αναγκαίο περιθώριο ασφαλείας της συνολικής χωρητικότητας του δικτύου, οδηγώντας σε αποδοτικότερη λειτουργία του δικτύου. Σημειώνεται ότι ο όρος περιθώριο ασφαλείας αναφέρεται στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας που εξασφαλίζει ότι η ζήτηση ενέργειας μπορεί να καλυφθεί παρά τις όποιες διακυμάνσεις της ζήτησης. Προς το παρόν, η ενσωμάτωση κατανεμημένων πηγών παραγωγής στα ΗΔ είναι μειωμένη. Στο Σχ.3.2 παρουσιάζεται το ποσοστό της παραγόμενης ενέργειας ανά κατηγορία πηγής. Λόγω του υψηλού κόστους των καυσίμων υλών και της υψηλής περιβαλλοντικής επιβάρυνσης που προκαλεί η καύση τους, η ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών παραγωγής αναμένεται να αυξηθεί σημαντικά τα προσεχή έτη [IEA].

Καθοριστικό παράγοντα για την ενσωμάτωση των κατανεμημένων πηγών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας αναμένεται να αποτελέσει η αντιμετώπιση των ακόλουθων ανοικτών ζητημάτων:

- Προς το παρόν, η παραγόμενη ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές υπολείπεται σημαντικά της ζητούμενης ενέργειας [Mo110]. Παράλληλα, η αβεβαιότητα της υπόψη παραγωγής διατηρεί χαμηλό το ποσοστό ενσωμάτωσης αυτών στην παραγωγή. Η ανάπτυξη καλύτερων μοντέλων πρόβλεψης της παραγωγής από κατανεμημένες πηγές αναμένεται να οδηγήσει στην αποδοτικότερη λειτουργία αυτών.
- Η ενσωμάτωση πηγών DER επιφέρει αστάθεια στο ΗΔ. Η ενσωμάτωση των ευφύων δικτύων στο ΗΔ μπορεί να περιορίσει, ή και να εξαλείψει, την εν λόγω αστάθεια.
- Το υψηλό κόστος λειτουργίας των κατανεμημένων πηγών παραγωγής συγκριτικά με αυτό των παραδοσιακών σταθμών παραγωγής αποτελεί ένα ακόμα περιοριστικό παράγοντα. Αναμένεται ότι η χρήση των τεχνολογιών ευφύων δικτύων θα συντελέσει σημαντικά στην αποδοτικότερη αξιοποίηση των κατανεμημένων πηγών, βελτιστοποιώντας την ενσωμάτωσή τους στο ΗΔ και μειώνοντας τις απώλειες λειτουργίας τους.

3.2.1.2 Δίκτυο Μεταφοράς

Το τμήμα αυτό του ενεργειακού δικτύου επικοινωνεί με το σύνολο των μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και επηρεάζει τις περισσότερες λειτουργίες ελέγχου και λειτουργίας του δικτύου. Συνήθως, το δίκτυο μεταφοράς βρίσκεται υπό τον έλεγχο ενός τοπικού διαχειριστή (Regional Transmission Organization – RTO) ή του τοπικού ενεργειακού παρόχου. Το δίκτυο μεταφοράς ενσωματώνει τρία βασικά συστήματα: *i*) το ενεργειακό δίκτυο μεταφοράς *ii*) τους υποσταθμούς και *iii*) το κέντρο ελέγχου.

Το ενεργειακό δίκτυο μεταφοράς καλείται να ενσωματώσει προηγμένα ηλεκτρονικά ισχύος, σύγχρονα συστήματα αισθητήρων και τηλεπικοινωνιακή υποδομή προκειμένου να επιτύχει υψηλή ποιότητα της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, αποτελεσματική ενσωμάτωση των καταναμημένων πηγών ηλεκτρικής ενέργειας και, τέλος, ασφάλεια και αξιοπιστία των δεδομένων που διακινούνται προς εξασφάλιση των ανωτέρω στόχων. Οι απαιτήσεις αυτές επιβάλλουν την ενσωμάτωση τηλεπικοινωνιακών δικτύων, ικανών να μεταφέρουν την πληροφορία που παράγεται στα ευφυή ενεργειακά δίκτυα. Βασική σχεδιαστική απαίτηση των τηλεπικοινωνιακών δικτύων αυτών είναι η εξασφάλιση ανθεκτικότητας σε βλάβες του ενεργειακού δικτύου, δηλαδή η εξασφάλιση της αδιάκοπης ροής πληροφορίας, ανεξαρτήτως της λειτουργίας του ενεργειακού δικτύου.

Στους υποσταθμούς του δικτύου μεταφοράς, είναι ήδη διαθέσιμο πλήθος λειτουργιών αυτοματισμού (SCADA). Καίτοι οι υποσταθμοί υψηλής τάσης δεν έχουν αλλάξει σημαντικά από τεχνολογικής άποψης, οι λειτουργίες παρακολούθησης, μέτρησης και ελέγχου έχουν αυξηθεί σε πλήθος και διαφοροποιηθεί λειτουργικά σε μεγάλο βαθμό [Bos10]. Οι ευφυείς υποσταθμοί καλούνται να υποστηρίξουν ψηφιοποιημένες λειτουργίες μέσω κατάλληλης ψηφιακής υποδομής αποσκοπώντας στην ανίχνευση, μέτρηση, μετάδοση, έλεγχο, οπτικοποίηση και συντήρηση ολόκληρου του δικτύου μεταφοράς. Παράλληλα, η λειτουργία των υποσταθμών πρέπει να εμφανίζει μεγάλο βαθμό αυτονομίας και χαρακτηριστικά αυτοϊασης ώστε τα δεδομένα που παράγονται από τους υποσταθμούς να είναι ευκολότερα διαχειρίσιμα. Κρίσιμη σχεδιαστική απαίτηση είναι η άμεση ανταπόκριση σε εντολές ελέγχου και η αυξημένη ασφάλεια όλου του προσωπικού που σχετίζεται με το ενεργειακό δίκτυο.

Τέλος, το κέντρο ελέγχου καλείται να διαχειρίζεται τις προαναφερθείσες λειτουργίες παρακολούθησης, περιγραφής και ανάλυσης των συλλεγόμενων πληροφοριών.

3.2.1.3 Δίκτυο Διανομής

Κύριο στόχος του δικτύου διανομής είναι η τεχνικά και οικονομικά αποδοτική και αξιόπιστη παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στους τελικούς χρήστες. Παράλληλα, το δίκτυο διανομής είναι το τμήμα του δικτύου όπου συνδέονται οι κατανεμημένες πηγές παραγωγής. Ως εκ τούτου, η ανάγκη για αμφίδρομη ροή ενέργειας επιβάλλει την εξεύρεση ευφών μηχανισμών διανομής της ενέργειας από όπου και με όποιον τρόπο αυτή παράγεται. Κύριες οντότητες του συστήματος διανομής αποτελούν οι υποσταθμοί διανομής, οι διάφοροι αισθητήρες και μετρητές που ελέγχουν τα ηλεκτρονικά ισχύος και οι μονάδες διασύνδεσης των διάφορων DER. Καθοριστικές για την επιτυχή διασύνδεση των ανωτέρω οντοτήτων είναι οι λειτουργίες ελέγχου και παρακολούθησης του δικτύου διανομής.

Οι συγγραφείς στην [Bro08] θεωρούν ότι καθοριστική επίδραση στη σχεδίαση του δικτύου διανομής αναμένεται να έχει η εγκατάσταση της ευφυούς μετρητικής υποδομής (Advanced Metering Infrastructure – AMI) για την αυτόματη ανάγνωση δεδομένων από μετρητές (Automatic Meter Reading – AMR), την υποστήριξη λειτουργιών αυτοματισμού (Distribution Automation – DA) και την ενσωμάτωση των DER. Η εγκατάσταση υποδομής AMI θα επιτρέψει την σε πραγματικό χρόνο συλλογή των μετρητικών δεδομένων από ευφυείς μετρητές, οδηγώντας στην καλύτερη διαχείριση του δικτύου προσδίδοντας μεγαλύτερη αξιοπιστία στην παροχή ηλεκτρικής ενέργειας. Παράλληλα, θα καταστεί εφικτή η χρέωση με βάση την πραγματοποιηθείσα κατανάλωση, γεγονός που θα συμβάλει στην καθοριστική βελτίωση της χρηματοοικονομικής ροής των παρόχων, την εξομάλυνση των φορτίων κατανάλωσης και τη διαχείριση της ζήτησης ενέργειας μέσω της αμφίδρομης επικοινωνίας των μετρητικών συστημάτων.

Οι λειτουργίες DA σχετίζονται με την παρακολούθηση, τον έλεγχο και την επικοινωνία των κρίσιμων διατάξεων προστασίας και μεταγωγής. Ευφυείς κόμβοι έχουν τη δυνατότητα μέσω της παρακολούθησης του ρεύματος και της τάσης να προβλέπουν και προλαμβάνουν βλάβες ή να επαναφέρουν το σύστημα στην ομαλή κατάσταση. Παράλληλα, το ευφές δίκτυο έχει τη δυνατότητα ενσωμάτωσης πηγών DER μεγάλης δυναμικότητας. Σημειώνεται ότι, παρά το γεγονός ότι οι DER καλύπτουν κάτω από το 15% της συνολικής ζήτησης, σε συγκεκριμένες περιοχές το εν λόγω ποσοστό μπορεί να υπερβαίνει το 40% επηρεάζοντας τοπικά τη λειτουργία του Η/Δ. Για μεγαλύτερα ποσοστά διείσδυσης, επιβάλλεται η λειτουργία των DER υπό τη μορφή μικροδικτύων ή

εικονικών εργοστασίων ισχύος (Virtual Power Plants), δηλαδή ως ομάδα DER με κεντρικό έλεγχο που λειτουργούν για την κάλυψη της αιχμής φορτίου.

3.2.1.4 Πάροχοι Υπηρεσιών Ηλεκτρικής Ενέργειας

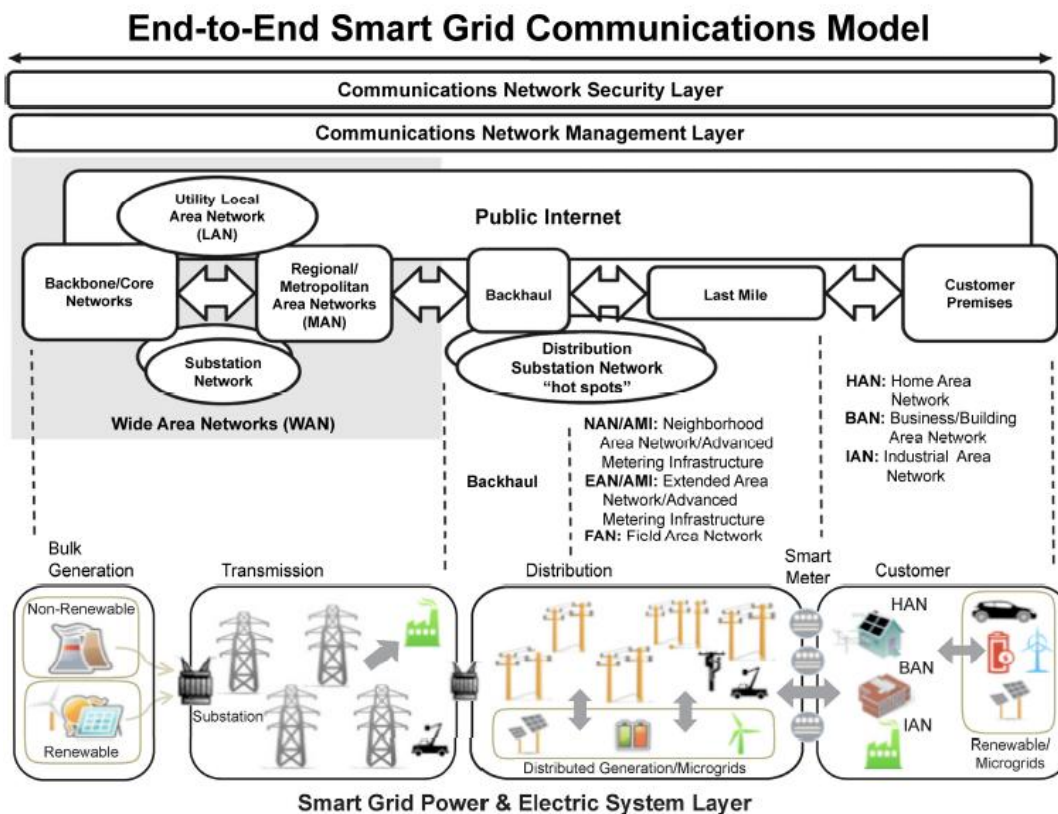
Ο συγκεκριμένος όρος περιλαμβάνει ενεργειακούς παρόχους ή τρίτους που παρέχουν υπηρεσίες σχετικές με την ηλεκτρική ενέργεια. Πρόκειται για οντότητες που συνδέουν την αγορά ηλεκτρικής ενέργειας με τους τελικούς καταναλωτές. Οι κύριες παρεχόμενες υπηρεσίες αφορούν πρόσθετες επιλογές που σχετίζονται με την ενεργειακή κατανάλωση, όπως επιλογή τιμολογίων, ή άλλες λειτουργίες διαχείρισης της ζήτησης (Demand-Side Management – DSM), όπως η προστασία από σπινθηρισμούς και διακυμάνσεις τάσης. Επίσης, παρεχόμενη υπηρεσία αποτελεί και η παρακολούθηση του εξοπλισμού για φυσική προστασία και συντήρηση. Ο προς παρακολούθηση εξοπλισμός περιλαμβάνει πηγές παραγωγής και αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, εξοπλισμό υποσταθμών ή άλλον εξοπλισμό εγκατεστημένο στο δίκτυο μεταφοράς και διανομής.

3.2.1.5 Καταναλωτές

Υπάρχουν διάφοροι τύποι καταναλωτών που εξυπηρετούνται από το δίκτυο διανομής ή μεταφοράς κατά περίπτωση. Οι καταναλωτές αυτές μπορεί να είναι οικιακοί, εταιρικοί ή βιομηχανικοί και μπορεί να έχουν είτε μόνο φορτία είτε και μονάδες παραγωγής και αποθήκευσης ενέργειας. Σημειώνεται ότι, όταν η παραγωγή και αποθήκευση ενέργειας διασυνδέεται στο δίκτυο μεταφοράς, το συγκεκριμένο σύστημα ανήκει στη μαζική παραγωγή και όχι στην κατανάλωση. Στην πλευρά των καταναλωτών βρίσκονται και τα ηλεκτρικά οχήματα (Plug-in Hybrid Electric Vehicles – PHEVs), τα οποία μπορεί να αποτελούν είτε φορτία κατά τις περιόδους φόρτισης είτε πηγές ενέργειας όταν επιστρέφουν την αποθηκευμένη ενέργειά τους στο δίκτυο.

3.2.2 Τηλεπικοινωνιακά συστήματα

Στόχος των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων (Communications Technology Interoperability Architectural Perspective – CT-IAP) είναι η επίτευξη τηλεπικοινωνιακής συνδεσιμότητας μεταξύ των συστημάτων, των συσκευών και των εφαρμογών που εμπλέκονται στα ευφυή δίκτυα. Τα συστήματα που συνεργάζονται περιλαμβάνουν την τηλεπικοινωνιακή δικτύωση, το φυσικό μέσο μετάδοσης των διαφόρων τεχνολογιών που χρησιμοποιούνται, τα συστήματα μέτρησης και παρακολούθησης της επίδοσης των δικτύων και τα πρωτόκολλα που υποστηρίζουν. Το σύνολο των δικτύων που συνεργάζονται για την υποστήριξη των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων ενός ευφυούς



Σχήμα 3.3: Τηλεπικοινωνιακό μοντέλο ευφών δικτύων [IEEE2030]

δικτύου παρουσιάζονται στο Σχ.3.3. Παρατηρείται ότι τα τηλεπικοινωνιακά συστήματα διαφοροποιούνται αντίστοιχα προς το σύστημα του ενεργειακού δικτύου που εξυπηρετούν. Έτσι, τα δίκτυα καταναλωτών (Customer Premises Networks – CPNs) ποικίλλουν ως προς το μέγεθος και το πλήθος των συσκευών που διασυνδέουν και κατηγοριοποιούνται σε οικιακά δίκτυα (Home Area Networks – HANs), επιχειρησιακά δίκτυα (BAN) ή βιομηχανικά δίκτυα (Industrial Area Networks – IANs).

Στο δίκτυο διανομής εμφανίζονται τρεις τύποι δικτύων. Το δίκτυο πεδίου (Field Area Network – FAN) αποτελεί το κύριο δίκτυο μέσω του οποίου εξυπηρετούνται οι λειτουργίες παρακολούθησης και ελέγχου του εξοπλισμού που καθορίζει την καλή λειτουργία του δικτύου διανομής. Το δίκτυο γειτονιάς (Neighborhood Area Network–

NAN) διακινεί τα δεδομένα που συλλέγονται από την AMI υποδομή. Το δίκτυο αυτό αποτελεί την περιοχή τελευταίου μιλίου (last mile) αφού συνδέει τους τελικούς κόμβους παρακολούθησης και τους τελικούς χρήστες με το δίκτυο διανομής. Μία γενική επισκόπηση των τεχνολογιών που χρησιμοποιούνται για εφαρμογές τελευταίου μιλίου για

την πρόσβαση στο δίκτυο του ενεργειακού παρόχου πραγματοποιείται στην αναφορά [Gun06]. Τέλος, το δίκτυο κορμού (backhaul) οδηγεί την κίνηση που συλλέγεται από τα NAN στο κέντρο διαχείρισης του ενεργειακού παρόχου, γνωστό και με την ονομασία back-office (BO).

Στο δίκτυο παραγωγής και μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας συναντώνται τεχνολογίες τοπικών δικτύων (LAN) ή και μητροπολιτικών (MAN) που έχουν εγκατασταθεί από τον ενεργειακό πάροχο. Τα δίκτυα αυτά διασυνδέουν το BO με το δίκτυο των υποσταθμών (Substation Network – SN) και το υπόλοιπο Διαδίκτυο. Επιπλέον, χρησιμοποιείται και ένα ακόμα δίκτυο που δεν εμφανίζεται στο Σχ.3.3 αφού δεν σχετίζεται με κάποιο τμήμα του ενεργειακού δικτύου. Πρόκειται για τη χρήση του δικτύου κινητής τηλεφωνίας από το τεχνικό προσωπικό του ενεργειακού παρόχου (Workforce Mobile Network – WMN) κατά τις λειτουργίες συντήρησης και επιδιόρθωσης βλαβών για να διασφαλισθεί η καθημερινή καλή λειτουργία του.

Δεδομένου ότι είναι ήδη τεχνικά διαθέσιμη, στο Σχ.3.3 παρουσιάζεται και η λύση του Διαδικτύου ως τηλεπικοινωνιακής υποδομής για τα ευφυή δίκτυα. Σημειώνεται, εντούτοις, ότι οι περισσότεροι ενεργειακοί πάροχοι αποφεύγουν τη χρήση δικτύων δημόσιας πρόσβασης για την εξυπηρέτηση των τηλεπικοινωνιακών απαιτήσεων των ευφυών δικτύων και συχνά στρέφονται στην ανάπτυξη δικής τους τηλεπικοινωνιακής υποδομής. Στο Σχ.3.3 παρουσιάζονται, επίσης, τα επίπεδα ασφαλείας και διαχείρισης δεδομένου ότι η ασφάλεια είναι βασική απαίτηση για τη μετάδοση των εμπιστευτικών δεδομένων των παρόχων και των καταναλωτών, ενώ η διαχείριση των στοιχείων που συλλέγονται κρίνεται απαραίτητη δεδομένων των υψηλών απαιτήσεων συγχρονισμού που επιβάλλονται από την ανάγκη ενσωμάτωσης στα ευφυή δίκτυα του τεράστιου πλήθους των τερματικών συσκευών.

Ακολουθεί ανάλυση των τηλεπικοινωνιακών δικτύων που απαρτίζουν τα ευφυή δίκτυα ως προς την τεχνολογία πρόσβασης στην οποία βασίζονται. Ο Πιν.3.1 παρουσιάζει τις διαφορετικές τεχνολογίες πρόσβασης που χρησιμοποιούνται ως τηλεπικοινωνιακές τεχνολογίες πρόσβασης στα ευφυή δίκτυα. Παρουσιάζονται οι δυνατοί ρυθμοί μετάδοσης και τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα από τη χρήση τους. Επισημαίνεται, ότι η προτιμητέα τεχνολογία πρόσβασης εξαρτάται από την εφαρμογή ευφυούς δικτύου για την οποία προορίζεται. Αναλυτική αντιστοίχιση των απαιτήσεων QoS των εφαρμογών ευφυών δικτύων με την αντίστοιχη τεχνολογία πρόσβασης εξετάζεται στη συνέχεια.

3.2.2.1 Δίκτυο Καταναλωτών (Customer Premises Network - CPN)

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, τα δίκτυα καταναλωτών μπορούν να κατηγοριοποιηθούν περαιτέρω σε οικιακά, επιχειρησιακά και βιομηχανικά δίκτυα. Ανεξαρτήτως τύπου, για την επικοινωνία εντός ενός CPN μπορεί να χρησιμοποιηθεί οποιαδήποτε προτυποποιημένη τεχνολογία LAN, είτε ενσύρματη είτε ασύρματη. Ο Πίν.3.2 προσφέρει μία σύντομη επισκόπηση των διαφόρων τεχνολογιών που συναντώνται σε εφαρμογές

Πίνακας 3.1: Τεχνολογίες πρόσβασης ευφυών δικτύων

Τεχνολογία Πρόσβασης	Ρυθμοί μετάδοσης (βέλτιστες τιμές)	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Κυψελωτά Δίκτυα (GPRS/3G/4G)	GPRS 56-115Kbps 3G 2Mbps 4G 50-100Mbps	Κύρια τεχνολογία για εφαρμογές SG	Ακατάλληλη για εφαρμογές πραγματικού χρόνου ή συνεχούς παρακολούθησης, Μεσολάβηση τρίτων παρόχων
WiFi (IEEE 802.11)	~100Mbps	Εύκολη εγκατάσταση, μειωμένο κόστος	Μειωμένη επεκτασιμότητα και αξιοπιστία
Ethernet	100Mbps-10Gbps	Εύκολη εγκατάσταση, μειωμένο κόστος	Μειωμένη επεκτασιμότητα
WiMAX (IEEE 802.16) and LTE	WiMAX (8062.16m) 300Mbps LTE 100Mbps	Ευρεία κάλυψη, επεκτασιμότητα, ευρυζωνικότητα	Αδειοδοτημένη πρόσβαση
Fiber Optics (SONET/SDH E/GPON)	40-1600 Gbps (για WDM)	Χωρητικότητα, αξιοπιστία, ασφάλεια	Κόστος, μειωμένη διείσδυση σε αγροτικές περιοχές
DSL	10Mbps	Εύκολη εγκατάσταση, ευρυζωνικότητα	Δίκτυο δημόσιας πρόσβασης, ακατάλληλη τεχνολογία για εφαρμογές πραγματικού χρόνου
PLC (NB / BB / BPL)	BB-PLC 500Mbps	Ήδη εγκατεστημένη καθολική υποδομή, ανεξαρτησία από τρίτους παρόχους	Ανομοιόμορφο νομοθετικό πλαίσιο λειτουργίας, κακό φυσικό περιβάλλον μετάδοσης σημάτων
WSN / WPAN (IEEE 802.15.4 ZigBee, DASH7)	ZigBee 250Kbps DASH7 200Kbps	Υψηλή αξιοπιστία, μειωμένη καθυστέρηση	Πολύ μικρή εμβέλεια

Πίνακας 3.2: Τεχνολογίες πρόσβασης CPN δικτύων [Usm12]

Τεχνολογίες Πρόσβασης	HAN	IAN	AMR	PHEV
PLC	√	√	√	Δ
ZigBee	√	√	√	Δ
WiFi	√	√	√	Δ
WiMAX	~	~	Δ	~
GSM/GPRS	√	√	√	√
DASH 7	Δ	Δ	Δ	Δ

√ = Τεχνολογία σε χρήση, εμπορικά διαθέσιμες λύσεις

Δ = Δε χρησιμοποιείται, λύσεις είναι τεχνικά διαθέσιμες

~ = Τρέχουσα έρευνα, κάποιες λύσεις είναι διαθέσιμες σε δοκιμαστικό στάδιο

ευφυών δικτύων στα CPN. Κύριες λειτουργίες των δικτύων HAN είναι η υποστήριξη υπηρεσιών AMR και ελέγχου της ζήτησης (Demand Response – DR). Ο καταναλωτής συνδέεται με τον ενεργειακό πάροχο μέσω μιας ασφαλούς αμφίδρομης διεπαφής (Energy Secure Interface – ESI), η οποία επικοινωνεί με την υποδομή AMI προκειμένου ο καταναλωτής να μπορεί να διαχειρισθεί την κατανάλωσή του μέσω των διαθέσιμων, διαδικτυακών ή μη εφαρμογών [Wan11a]. Επίσης, το σημείο αυτό του δικτύου αποτελεί και το σημείο διασύνδεσης των υβριδικών ηλεκτρικών οχημάτων (PHEV) ενεργειακό δίκτυο. Κύριο χαρακτηριστικό των εφαρμογών ευφυούς δικτύου είναι οι χαμηλές απαιτήσεις σε εύρος ζώνης δεδομένου ότι πρόκειται για εφαρμογές ελέγχου και παρακολούθησης με ανεκτικότητα σε καθυστέρηση (delay tolerant applications). Σε κάθε περίπτωση αξιοποιούνται τόσο ασύρματες όσο και ενσύρματες επιλογές.

Οι εφαρμογές AMR έχουν μελετηθεί εκτενώς στη βιβλιογραφία [Sel07], [Wan11b], [Vai12], [Hui11]. Οι συγγραφείς της [Sel07] μελετούν τους μηχανισμούς πρόσβασης των ασύρματων δικτύων αισθητήρων και εξετάζουν κατά πόσο η τεχνολογία PLC είναι σε θέση να εξυπηρετήσει την κίνηση που παράγεται από συστήματα AMR και μεταδίδεται μέσω της AMI. Οι συγγραφείς της [Wan11b] μελετούν τα διάφορα πρότυπα που διέπουν τη λειτουργία και τη διαλειτουργικότητα των συστημάτων AMI/AMR και συγκρίνουν τις διαθέσιμες λύσεις. Οι συγγραφείς της [Vai12] εξετάζουν τη δρομολόγηση στην AMI υποδομή, που αποτελεί μέρος του NAN δικτύου αφού εκτείνεται εκτός του CPN, ενώ οι συγγραφείς της [Hui12] παρουσιάζουν σενάρια δρομολόγησης σε εφαρμογές AMI αγροτικών περιοχών. Τέλος, οι συγγραφείς της [Pat11] συνοψίζουν τις κύριες λειτουργίες των εφαρμογών AMI που είναι η απομακρυσμένη σύνδεση και αποσύνδεση των

χρηστών, η περιοδική μετάδοση μετρήσεων και περιστατικών που σχετίζονται με την ασφάλεια του ηλεκτρολογικού εξοπλισμού, καθώς και η ειδοποίηση σε περιπτώσεις διακοπής της παροχής ηλεκτρικού ρεύματος.

Με την προώθηση εφαρμογών DR οι ενεργειακοί πάροχοι αποσκοπούν στην παροχή κινήτρων προς τους καταναλωτές για να μειώσουν την κατανάλωση κατά την ώρα αιχμής φορτίου και να μετατοπίσουν τη ζήτηση ηλεκτρικού ρεύματος σε περιόδους μειωμένης κατανάλωσης. Αυτή η λειτουργία ονομάζεται διαχείριση ζήτησης (Demand Side Management – DSM) [Saf10]. Η εύρεση των κατάλληλων κινήτρων προς μείωση της κατανάλωσης αντιμετωπίζεται στη βιβλιογραφία ως πρόβλημα βελτιστοποίησης που επιλύεται με θεωρία παιγνίων [Moh10] ή άλλες τεχνικές [Log12]. Παράλληλα, εφαρμογή DR αποτελεί και η παροχή κινήτρων για την ενσωμάτωση των DER [Rah10], κάτι βέβαια που υπερβαίνει τα όρια του HAN και καλύπτει τις εφαρμογές των NAN που εξετάζονται στη συνέχεια.

Πρόσφατες μελέτες καταλήγουν ότι μέχρι το 2020 τα PHEVs θα έχουν διεισδύσει στο 5% της αγοράς στις Ηνωμένες Πολιτείες [USDoE] και αναμένεται να ακολουθήσει και η Ευρώπη [Tur10]. Ένα δίκτυο CPN πρέπει να μπορεί να υποστηρίξει ασφάλεια, εγγυημένο εύρος ζώνης, αξιοπιστία και χαμηλή καθυστέρηση μετάδοσης με οικονομικά προσιτό τρόπο.

Η λειτουργία των ανωτέρω εφαρμογών ενός CPN δικτύου ακολουθεί τα ακόλουθα πρότυπα [Gun11]:

- **IEEE 1901:** Υποστήριξη BB-PLC πρόσβασης για εφαρμογές πολυμέσων εντός του CPN
- **ITU-T G.9955, 9956, ANSI C12.22, ANSI C12.18, ANSI C12.19, M-Bus, PRIME, G3-PLC:** Υποστήριξη εφαρμογών AMI
- **HomePlug, HomePlug Green PHY:** Προδιαγραφές διασύνδεσης ευφυών συσκευών. Το Green PHY ενσωματώνει το χαρακτηριστικό μειωμένης κατανάλωσης ισχύος.
- **U-SNAP, Z-Wave:** Ενσύρματη και ασύρματη διασύνδεση ευφυών συσκευών με τους ευφυείς μετρητές.
- **BACnet:** Υποστηρίζει εφαρμογές αυτοματισμού κτιρίων. Χρησιμοποιείται σε δίκτυα BAN.

- **ISA 100.11a:** Πρότυπο για ασύρματη σύνδεση βιομηχανικών αυτοματισμών. Χρησιμοποιείται σε δίκτυα IAN.
- **SAE J2836, SAE J2847, SAE J2293:** Πρότυπο για την ενσωμάτωση PHEV στο ενεργειακό δίκτυο.
- **OpenADR:** Πρότυπο για εφαρμογές DSM.

3.2.2.2 Δίκτυο Γειτονιάς (*Neighborhood Area Network - NAN*)

Το δίκτυο NAN συλλέγει τα δεδομένα που παράγονται από τα HANs και τα προωθεί στο BO του ενεργειακού παρόχου με το οποίο συνδέεται μέσω δικτύων ευρείας ζώνης (WAN). Τα δεδομένα αυτά αφορούν πληροφορία κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας που συλλέγεται από τους AMI/AMR, ή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που προέρχεται από την ενσωμάτωση των DERs ή μικροδικτύων. Τα δίκτυα NAN μπορούν να υλοποιηθούν με οποιαδήποτε ενσύρματη ή ασύρματη τεχνολογία. Αναφορικά με την ενσύρματη πρόσβαση, η λύση των δικτύων πρόσβασης PLC όπως προδιαγράφεται από το IEEE 1901 κρίνεται κατάλληλη για την υποστήριξη δικτύων NAN. Επίσης, σε περίπτωση δεδομένων χαμηλού ρυθμού μετάδοσης, οι τεχνολογίες NB-PLC κρίνεται ότι είναι οι καταλληλότερες και οι ωριμότερες τεχνολογικά για την υποστήριξη των NANs [Gal11].

Αναφορικά με την ασύρματη πρόσβαση, οι συγγραφείς της [Zha11] μελετούν τη δυνατότητα χρήσης της τεχνολογίας WiFi ως υποδομής για το δίκτυο NAN. Εντούτοις, η δημιουργία ενός ασύρματου δικτύου πολλαπλών αλμάτων σε μία μη αδειοδοτημένη ζώνη συχνοτήτων, δηλαδή σε ζώνη όπου επιτρέπεται η ταυτόχρονη εκπομπή σημάτων άλλων εφαρμογών, δεν μπορεί να εγγραφεί ούτε ελάχιστη καθυστέρηση ούτε υψηλή διαθεσιμότητα. Επίσης, οι συγγραφείς της [Lop12], στο πλαίσιο ευρωπαϊκού προγράμματος τα αποτελέσματα του οποίου δεν είναι ακόμα διαθέσιμα, μελετούν διαφορετικά σενάρια αγροτικών και αστικών περιοχών για να αποφανθούν αν οι ασύρματες τεχνολογίες WiFi, GPRS/EDGE και WiMAX μπορούν να αποτελέσουν την τηλεπικοινωνιακή υποδομή των NANs.

Μεγάλο ενδιαφέρον για την υποστήριξη δικτύων NAN συγκεντρώνουν οι γνωστικές επικοινωνίες (Cognitive Communications). Οι συγγραφείς της [Ron11] εξετάζουν τη χρήση γνωστικών επικοινωνιών σε HAN, NAN και WAN επίπεδο. Βασικό κίνητρο για την ενσωμάτωση των γνωστικών επικοινωνιών αποτελεί η ανάγκη για εξυπηρέτηση μεγάλου όγκου δεδομένων, που εμφανίζουν πολύ διαφορετικά χαρακτηριστικά και

απαιτήσεις QoS. Οι συγγραφείς εξετάζουν την ενσωμάτωση αδειοδοτημένων και μη ζωνών συχνοτήτων σε ένα υβριδικό σχήμα δυναμικής πρόσβασης στο φάσμα. Παράλληλα, στην αναφορά [Ron12] εξετάζεται ένας αλγόριθμος αποδοχής κλήσεων σε ευφυή δίκτυα με χρήση παρόμοιας υβριδικής αρχιτεκτονικής. Τέλος, οι συγγραφείς της [Vin12] υιοθετούν μία ετερογενή αρχιτεκτονική με ενσωμάτωση γνωστικών επικοινωνιών σε HAN, NAN και WAN επίπεδο και επιδιώκουν να βελτιστοποιήσουν με χρήση γενετικών αλγορίθμων την επίδοση του ευφυούς δικτύου.

Η λειτουργία των ανωτέρω εφαρμογών ενός NAN δικτύου ακολουθεί το πρότυπο [Gun11]:

- **IEC 60870-6/TASE.2:** Πρότυπο διαχείρισης της επικοινωνίας μεταξύ του BO του ενεργειακού παρόχου και των κέντρων διαχείρισης των NANs

3.2.2.3 Δίκτυο Πεδίου (*Field Area Network - FAN*)

Τα δίκτυα FAN αποτελούν την τηλεπικοινωνιακή υποδομή για τη μεταφορά δεδομένων που συλλέγονται από τα συστήματα του δικτύου διανομής. Τα δεδομένα που συλλέγουν προέρχονται από (i) αισθητήρες τοποθετημένους επί των μετασχηματιστών και των τροφοδοτών διανομής, (ii) τις ευφυείς ηλεκτρονικές συσκευές (Intelligent Electronic Devices – IEDs) που ενεργοποιούνται από τα συστήματα διαχείρισης του δικτύου διανομής (Distribution Management System – DMS) και τις DER και εκτελούν λειτουργίες ελέγχου στα συστήματα διανομής, (iii) τους σταθμούς φόρτισης των PHEV και (iv) τους ευφυείς μετρητές. Τα δίκτυα NAN μεταφέρουν τη συλλεγόμενη πληροφορία στα συστήματα DMS.

Οι κύριες εφαρμογές που υποστηρίζονται από τα NANs αφορούν εφαρμογές πεδίου που σχετίζονται με γραμμές μεταφοράς, αισθητήρες, ρυθμιστές τάσης, κ.α.. Με κριτήριο τον τρόπο υλοποίησης των ευφυών δικτύων, στη βιβλιογραφία προτείνεται τα FAN να εκτελούν και λειτουργίες NAN, δηλαδή να υποστηρίζουν εφαρμογές που αφορούν τη συλλογή δεδομένων από CPN [Wan11a]. Επισημαίνεται, ότι οι FAN και NAN λειτουργίες έχουν πολύ διαφορετικές απαιτήσεις και, ως εκ τούτου, η υλοποίησή τους δεν μπορεί να γίνει από ένα δίκτυο. Συγκεκριμένα, οι υπηρεσίες πεδίου περιλαμβάνουν συστήματα τύπου SCADA, συστήματα διαχείρισης βλαβών (Outage Management Systems – OMS) και συστήματα ελέγχου των DER. Συνεπώς, απαιτούν αξιοπιστία και μικρή καθυστέρηση. Από την άλλη πλευρά, οι εφαρμογές καταναλωτών AMR, DR, όπως και άλλες μέθοδοι μέτρησης και ελέγχου του φορτίου, έχουν βασική απαίτηση την

επεκτασιμότητα, δηλαδή τη δυνατότητα μελλοντικής ενσωμάτωσης νέων εφαρμογών. Οι ανωτέρω απαιτήσεις αναγκάζουν τους ενεργειακούς παρόχους να χρησιμοποιούν διαφορετικές τηλεπικοινωνιακές υποδομές για την υποστήριξη των FAN και NAN. Μία ενοποιημένη υποδομή για NAN και FAN πρέπει να ενσωματώνει τα πλεονεκτήματα της επικοινωνίας πραγματικού χρόνου, επεκτασιμότητας και ασφάλειας. Η απαίτηση αυτή, αν και οικονομικά αποδοτική, αποτελεί ένα σύνθετο και απαιτητικό τηλεπικοινωνιακό πρόβλημα.

Η λειτουργία των ανωτέρω εφαρμογών ενός FAN δικτύου ακολουθεί τα ακόλουθα πρότυπα [Gun11]:

- **IEC 61970, IEC 61969:** Υποστήριξη συστημάτων διαχείρισης του δικτύου μεταφοράς και διανομής αντίστοιχα.
- **ITU-T G.9955, 9956:** Καθορισμός απαιτήσεων των εφαρμογών αυτοματισμού διανομής (Distribution Automation – DA).

3.2.2.4 Δίκτυο Υποσταθμών (Substation Network - SN)

Κάθε υποσταθμός έχει το δικό του ευρυζωνικό LAN για τη μετάδοση των δεδομένων που συλλέγονται από τα συστήματα SCADA και τους διάφορους αισθητήρες που είναι γνωστοί ως PMUs (Phasor Measurement Units) και συλλέγουν μετρήσεις ρεύματος και τάσης από τις συσκευές στις οποίες προσαρτώνται. Προς το παρόν, τα συστήματα SCADA συλλέγουν τα δεδομένα που παράγονται από όλες τις συσκευές με περίοδο σάρωσης της τάξης των 2-10s [Bos10]. Αύξηση της ταχύτητας συλλογής των δεδομένων επιτυγχάνεται με την αντικατάσταση των μικροκυματικών ζεύξεων που χρησιμοποιούνται για δίκτυα SN από οπτικές ίνες και τη μετάβαση σε περισσότερο κατανεμημένες αρχιτεκτονικές δικτύου. Μία επισκόπηση των συστημάτων αυτοματισμού των υποσταθμών υπό κατανεμημένη αρχιτεκτονική πραγματοποιείται από τους συγγραφείς της [Hig11].

3.2.2.5 Δίκτυο Κορμού (Backhaul)

Το δίκτυο κορμού είναι υπεύθυνο για τη μεταφορά της πληροφορίας που συλλέγεται από τα NANs, τα FANs και τους υποσταθμούς σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές (time-stamped) και σε πραγματικό χρόνο. Προκειμένου να μεταδοθούν τα δεδομένα που παράγονται από τους αισθητήρες PMUs, χρειάζεται ένα αξιόπιστο ευρυζωνικό δίκτυο. Προς το παρόν, οι ενεργειακοί πάροχοι χρησιμοποιούν ασύρματες μικροκυματικές ζεύξεις σημείου προς σημείο για την υποστήριξη του δικτύου κορμού. Τα δεδομένα που

παράγονται στους υποσταθμούς έχουν απαίτηση χαμηλής καθυστέρησης και η μεταφορά τους καλύπτεται από οπτικό δίκτυο. Επομένως, τα δεδομένα που παράγονται από τους υποσταθμούς δεν μπορούν να γίνουν διαθέσιμα στο ΒΟ του ενεργειακού παρόχου [Hau05].

3.2.2.6 Κινητό Δίκτυο Εργασίας (Workforce Mobile Network – WMN)

Το συγκεκριμένο δίκτυο κάνει χρήση των δικτύων κυψελωτής τηλεφωνίας για την επικοινωνία με το προσωπικό συντήρησης και αποκατάστασης βλαβών. Δεδομένου ότι η παροχή της συγκεκριμένης υπηρεσίας έχει ιδιαίτερα υψηλό κόστος για τους ενεργειακούς παρόχους, είναι επιθυμητή η χρήση εναλλακτικών τεχνολογιών. Στην αναφορά [Sar09] μελετάται η χρήση του δικτύου FAN και NAN με χρήση BB-PLC τεχνολογίας για την υποστήριξη VoIP επικοινωνίας και αντικατάσταση του WMN δικτύου.

3.2.3 Συστήματα εφαρμογών πληροφορικής

Στόχος των συστημάτων εφαρμογών πληροφορικής (Information Technology Interoperability Architectural Perspective – IT-IAP) είναι η διαχείριση των δεδομένων που παράγονται από τα ευφυή δίκτυα και ο έλεγχος των διαδικασιών. Περιλαμβάνουν εφαρμογές αποθήκευσης, επεξεργασίας, διαχείρισης και ελέγχου της ασφαλούς ροής μετάδοσης δεδομένων. Στη συνέχεια της ενότητας παρουσιάζονται οι βασικότερες εφαρμογές που υποστηρίζονται από διάφορα σημεία του ευφυούς δικτύου.

3.2.3.1 Εφαρμογές μαζικής παραγωγής

Στη μαζική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας απαντώνται οι ακόλουθες εφαρμογές:

- *Εφαρμογή προγραμματισμού παραγωγής:* Κύρια δράση της εφαρμογής αυτής είναι ο προγραμματισμός των αναγκών ως προς την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Παράλληλα, παρέχονται στις αγορές πληροφορίες ως προς τη διαθεσιμότητα της παραγωγής.
- *Εφαρμογή ελέγχου μονάδων παραγωγής:* Η εφαρμογή αυτή συνδέει και αποσυνδέει τις μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με το δίκτυο μεταφοράς ώστε να επιτυγχάνεται ο συγχρονισμός της παραγωγής με την κατανάλωση.

3.2.3.2 Εφαρμογές Δικτύου Μεταφοράς

Το δίκτυο μεταφοράς επικοινωνεί τόσο με τη μαζική παραγωγή όσο και με το κέντρο διαχείρισης και ελέγχου (ΒΟ) του ενεργειακού παρόχου. Οι βασικές εφαρμογές που υποστηρίζονται στη μεταφορά είναι οι ακόλουθες:

Πίνακας 3.3: Απαιτήσεις QoS για εφαρμογές του παρακολούθησης υποσταθμών και πεδίου [Des11]

Εφαρμογή	Ελάχιστη απαίτηση καθυστέρησης (ms)	Προτεραιότητα 0-max 100-min	Τύπος Εφαρμογής
Πληροφορίες προστασίας	8, 10	2	Προστασία
Εφαρμογές διαχείρισης φορτίου	10	20	SCADA
Κλείσιμο Διακοπών	16	15	Προστασία
Εφαρμογές κλειδώματος	16	12	Προστασία
Εφαρμογές προστασίας και ελέγχου μετασχηματιστών	16	12	Προστασία
Προστασία συστημάτων (λειτουργία αισθητήρων PMU)	20	12	Προστασία
Μετρήσεις PMU	60	10	Συλλογή μετρήσεων
Μετάδοση δεδομένων από σάρωση συσκευών μέσω SCADA	100	25	Μετρήσεις SCADA
Μεταφορά πληροφορίας συγχρονισμού PMU	100	20	Συλλογή μετρήσεων

- *Εφαρμογές SCADA για παρακολούθηση υποσταθμών και πεδίου:* Οι συγκεκριμένες εφαρμογές αναλαμβάνουν τη συλλογή των δεδομένων που παράγονται από τους αισθητήρες παρακολούθησης του δικτύου μεταφοράς και των συσκευών του υποσταθμού. Μελέτη των προδιαγραφών QoS για τον έλεγχο και τη διαχείριση του δικτύου μεταφοράς έχει πραγματοποιηθεί στις αναφορές [Kha13] , [Des11] και [Kan12] ενώ ανάλυση όλων των απαιτήσεων QoS για εφαρμογές υποσταθμών πραγματοποιείται στο πρότυπο IEEE 1646 [IEEE1646]. Ο Πιν.3.3 παρουσιάζει μία σύνοψη των απαιτήσεων ποιότητας των εφαρμογών αυτοματισμού υποσταθμών. Φαίνεται ότι οι εφαρμογές προστασίας εξοπλισμού έχουν απαίτηση για εξυπηρέτηση σε πραγματικό χρόνο. Σημειώνεται ότι οι προαναφερθείσες εφαρμογές είναι διαθέσιμες μόνο μεταξύ δύο υποσταθμών που συνδέονται μέσω γραμμής μεταφοράς με ζεύξη ενός άλματος. Για τις υπόλοιπες εφαρμογές, είναι επιτρεπτό να μεσολαβήσουν περισσότερα άλματα.

- *Εφαρμογές συντήρησης δικτύου από το προσωπικό συντήρησης:* Πρόκειται για εφαρμογές VoIP και VoD (Video on Demand) με ελάχιστη καθυστέρηση 200ms που παρέχονται μέσω του δικτύου WMN.
- *Εφαρμογές διαχείρισης ενέργειας:* Οι εφαρμογές αυτές ελέγχουν τις ροές ενέργειας, την αξιοπιστία στην παροχή ηλεκτρικής ενέργειας και την κατάσταση του ηλεκτρολογικού εξοπλισμού. Συγκεντρώνουν όλα τα δεδομένα που παράγονται από το δίκτυο μεταφοράς και τα αποστέλλουν στο κέντρο διαχείρισης του ενεργειακού παρόχου. Επίσης, διατίθενται εφαρμογές προγραμματισμού παραγωγής, προληπτικής συντήρησης, ελέγχου αποθεμάτων και κοστολόγησης.

3.2.3.3 Εφαρμογές Δικτύου Διανομής

Το δίκτυο διανομής επικοινωνεί τόσο με τον τελικό καταναλωτή όσο και με το κέντρο διαχείρισης και ελέγχου (BO) του ενεργειακού παρόχου. Σε αντιστοιχία με το δίκτυο μεταφοράς, και στο δίκτυο διανομής υποστηρίζονται εφαρμογές SCADA για παρακολούθηση υποσταθμών και πεδίου καθώς και εφαρμογές συντήρησης δικτύου από το προσωπικό συντήρησης και εφαρμογές διαχείρισης ενέργειας. Εκτός αυτών, παρέχονται οι ακόλουθες εφαρμογές που προκύπτουν από τη διασύνδεση του δικτύου διανομής με την κατανάλωση:

- *Εφαρμογές γεωγραφικού εντοπισμού:* Εφαρμογές που απεικονίζουν γεωγραφικά τα στοιχεία που συλλέγονται από τους αισθητήρες του δικτύου διανομής και αποσκοπούν στον εντοπισμό, πρόληψη και αποκατάσταση βλαβών και την καλύτερη συντήρηση του δικτύου διανομής.
- *Εφαρμογές μέτρησης των εσόδων του ενεργειακού παρόχου:* Οι εφαρμογές αυτές συλλέγουν τα δεδομένα κατανάλωσης μέσω της AMI/AMR υποδομής και αποσκοπούν, αφενός, στην τιμολόγηση των τελικών καταναλωτών με βάση τα πραγματικά στοιχεία κατανάλωσης και, αφετέρου, στη συγκέντρωση της πληροφορίας και επεξεργασία αυτής προκειμένου να επιτευχθεί αποδοτικότερη διαχείριση της παραγωγής και της λειτουργίας του δικτύου.
- *Εφαρμογές διαχείρισης διακοπών:* Πρόκειται για εφαρμογές που ανιχνεύουν, αναλύουν και αποκαθιστούν τις διακοπές του δικτύου ηλεκτροδότησης. Επίσης, παρέχουν επικοινωνία μεταξύ καταναλωτών, ενεργειακού παρόχου και προσωπικού αποκατάστασης βλαβών του δικτύου ηλεκτροδότησης.

3.2.3.4 Εφαρμογές Καταναλωτών

Οι καταναλωτές επικοινωνούν (i) με το δίκτυο διανομής, με το οποίο διασυνδέονται, επίσης, οι μονάδες DER και μέσω του οποίου μεταδίδονται τα στοιχεία των διαφορετικών καταναλώσεων και (ii) με τους παρόχους υπηρεσιών μέσω εφαρμογών διαχείρισης της ζήτησης

- *Εφαρμογές ενσωμάτωσης DER:* Οι συγκεκριμένες εφαρμογές καλύπτουν τη διαχείριση των τοπικών DER και περιλαμβάνουν λειτουργίες παραγωγής και αποθήκευσης ενέργειας. Επίσης, στην περίπτωση των μικροδικτύων μπορούν να υποστηρίζουν και λειτουργίες διακοπής και αυτόνομης λειτουργίας.
- *Εφαρμογές διαχείρισης καταναλώσεων:* Πρόκειται για οικιακά, κτιριακά ή βιομηχανικά συστήματα διαχείρισης ενέργειας (Energy Management Systems – HEMS, BEMS, IEMS). Τα συγκεκριμένα συστήματα μπορεί να είναι αυτόνομα ή να διασυνδέονται με κάποιον πάροχο ενεργειακών υπηρεσιών προκειμένου να υποστηρίζουν λειτουργίες διαχείρισης της ζήτησης, κοστολόγησης ή δυναμικής επιλογής παρόχων και τιμολογήσεων.

3.2.3.5 Εφαρμογές ελέγχου και λειτουργίας ηλεκτρικού δικτύου

Οι περισσότερες ανωτέρω εφαρμογές καταλήγουν στο κέντρο διαχείρισης του ενεργειακού παρόχου προκειμένου να διασφαλισθεί η καλή λειτουργία του δικτύου μεταφοράς και διανομής και να διασφαλισθεί η αποτελεσματική διασύνδεση των πηγών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (καλύτερη ευθυγράμμιση ρεύματος και φάσης) για την επίτευξη σταθερότητας σε δίκτυα μεταφοράς όπου εμπλέκονται περισσότεροι ενεργειακοί πάροχοι.

3.3 Επισκόπηση πιλοτικών ευφυών δικτύων

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται τα σημαντικότερα πιλοτικά έργα ευφυών δικτύων ανά τον κόσμο, με έμφαση στα πιλοτικά δίκτυα που αναπτύχθηκαν στην Ευρώπη. Εξετάζεται, επίσης, το ρυθμιστικό πλαίσιο που διέπει την υλοποίηση ευφυών δικτύων και συμβάλλει στη διάδοσή τους. Σημειώνεται ότι παρουσιάζονται πιλοτικά έργα που υλοποιούν τμήμα του τηλεπικοινωνιακού δικτύου των ευφυών δικτύων και όχι άλλα

έργα που αφορούν αποκλειστικά τη διαχείριση ή υλοποίηση ενεργειακών συστημάτων ή το σχεδιασμό εφαρμογών πληροφορικής.

3.3.1. Επισκόπηση νομοθεσίας για τα ευφυή δίκτυα

Οι δράσεις για τη διάδοση των ευφύων δικτύων εκκίνησαν το 2001, οπότε το Υπουργείο Ενέργειας των ΗΠΑ εκκίνησε ένα κύκλο σεμιναρίων με αντικείμενο την ενσωμάτωση των DER [Fan12], [Lig10] και αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας συμμαχίας εταιριών και κυβερνητικών οντοτήτων που είχαν σχέση με την ενέργεια. Στόχος υπήρξε να εκπονηθεί ένα πρόγραμμα υλοποίησης των ευφύων δικτύων και να προσδιορισθεί ο στόχος αυτών [IEEESGUS]. Μεταξύ των φορέων που συνεργάστηκαν για την υλοποίηση των ανωτέρω στόχων ήταν η συμμαχία GridWise, το Ερευνητικό Ινστιτούτο Ηλεκτρικής Ενέργειας (Electric Power Research Institute – EPRI), το Ινστιτούτο Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών (IEEE), καθώς και η Ομοσπονδιακή Ρυθμιστική Επιτροπή Ενέργειας (Federal Regulatory Commission – FERC). Ακολούθησε η ψήφιση πλήθους νόμων στις ΗΠΑ που διέπουν τη λειτουργία και διάδοση των ευφύων δικτύων, οι σημαντικότεροι από τους οποίους είναι:

- **Νόμος Ενεργειακής Ανεξαρτησίας και Ασφάλειας (Energy Independence and Security Act – EISA), 2007 [EISA]:** Ο συγκεκριμένος νόμος θέτει ως στόχο τον εκσυγχρονισμό του ενεργειακού δικτύου μεταφοράς και διανομής, θέτει το πλαίσιο για τη διεξαγωγή έργων έρευνας, ανάπτυξης και εγκατάστασης ευφύων δικτύων, ενώ ταυτόχρονα δημιουργεί ένα πρόγραμμα χρηματοδότησης για να ενθαρρύνει επενδύσεις σε ευφυή δίκτυα.
- **Νόμος Αμερικανικής Ανάκαμψης και Επανεπένδυσης (American Recovery and Reinvestment Act – ARRA), 2009 [ARRA]:** Ο συγκεκριμένος νόμος επεκτείνει τη χρηματοδότηση των έργων ευφύων δικτύων που αφορούν την υλοποίηση νέων προϊόντων και πιλοτικών δικτύων.
- **Νόμος Αμερικανικής Καθαρής Ενέργειας και Ασφάλειας (American Clean Energy and Security Act), 2009 [ACESA]:** Μεταξύ άλλων δράσεων που αφορούν τα ευφυή δίκτυα, ο συγκεκριμένος νόμος απαιτεί από τους ενεργειακούς παρόχους να αναπτύξουν τεχνολογία για την ενσωμάτωση των PHEVs και καθιστά την επιτροπή FERC υπεύθυνη για το εθνικό πρόγραμμα μείωσης των αιχμών ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας για αιχμές φορτίου άνω των 250MW.

Τις δράσεις που εκκίνησαν οι ΗΠΑ για τη διάδοση των ευφύων δικτύων ακολούθησε και η Ευρωπαϊκή Ένωση. Το Σεπτέμβριο του 2007 υιοθετήθηκε το τρίτο νομοθετικό πλαίσιο [IEESGEU] που αποτελεί σειρά μέτρων που διασφαλίζουν την παροχή στον πολίτη των ακόλουθων δικαιωμάτων ως προς τη χρήση της ενέργειας: Επιλογή κατανάλωσης, δίκαιες τιμές, καθαρότερη ενέργεια και ασφάλεια στην παροχή ενέργειας.

Τη συγκεκριμένη νομοθεσία ακολούθησε η σειρά μέτρων που έλαβε το 2008 η Ευρωπαϊκή Ένωση προς αντιμετώπιση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής. Τα μέτρα αυτά, που είναι γνωστά και ως στόχοι 20-20-20, αποσκοπούν στη μείωση των εκπομπών CO₂ κατά 20%, στην αύξηση του ποσοστού ενσωμάτωσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο 20% και στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας από μη ανανεώσιμες πηγές κατά 20% [2020]. Η συγκεκριμένη νομοθεσία θέτει ως χρονικό ορίζοντα επίτευξης των ανωτέρω στόχων το 2020.

Άλλοι σημαντικοί νόμοι που ψηφίσθηκαν στην Ευρωπαϊκή Ένωση είναι:

- **Το Ευρωπαϊκό Ενεργειακό Πρόγραμμα Ανάκαμψης (European Energy Programme for Recovery), 2009 [EEPR]:** Το συγκεκριμένο πρόγραμμα αναλαμβάνει τη χρηματοδότηση έργων τεσσάρων δισεκατομμυρίων ευρώ που έχουν ως στόχο την αξιόπιστη παροχή ενεργείας με ταυτόχρονη μείωση των εκπομπών του θερμοκηπίου.
- Άλλα προγράμματα χρηματοδότησης έργων ευφύων δικτύων περιλαμβάνουν τα Intelligent Energy – Europe (IEE) [IEE], Eco-innovation [ECO], BUILD UP [BUP], Covenant of Mayors [COM], Sustainable Energy Europe Campaign [SEEC], CONCERTO [CON], ManagEnergy [ME], καθώς και τα πλαίσια προγραμμάτων FP6 και FP7.
- **Εντολή προτυποποίησης σε Ευρωπαϊκούς Οργανισμούς Προτυποποίησης στον τομέα των μετρητικών εργαλείων για την ανάπτυξη ανοικτής αρχιτεκτονικής ενεργειακών μετρητών καθώς και των απαραίτητων τηλεπικοινωνιακών πρωτοκόλλων που θα διασφαλίσουν τη διαλειτουργικότητα [M/441], 2009:** Η συγκεκριμένη εντολή αφορά τους τρεις Ευρωπαϊκούς Οργανισμούς Προτυποποίησης, CEN, CENELEC και ETSI, και έχει στόχο να συμβάλει στη δημιουργία Ευρωπαϊκού προτύπου για τη λειτουργία των μετρητών κατανάλωσης. Το πρότυπο αυτό ρυθμίζει τη λειτουργία των μετρητών, που αναφέρονται ως ευφυείς μετρητές, ώστε να παρέχουν στον καταναλωτή στοιχεία πραγματικής κατανάλωσης και να επιτρέπουν

τη ρύθμιση της ζήτησης ηλεκτρικού ρεύματος από τους τελικούς χρήστες βάσει διαφορετικών τιμολογίων. .

- **Εντολή προτυποποίησης σε Ευρωπαϊκούς Οργανισμούς Προτυποποίησης για την υποστήριξη των εγκαταστάσεων ευφύων δικτύων [M/490], 2011:** Η συγκεκριμένη εντολή αφορά τους τρεις Ευρωπαϊκούς Οργανισμούς Προτυποποίησης, CEN, CENELEC και ETSI, και τους προτρέπει να διατυπώσουν συγκεκριμένο πρότυπο για την ανάπτυξη ευφύων δικτύων, το οποίο θα επιταχύνει την ανάπτυξη των ευφύων δικτύων και θα συμβάλει στη διαλειτουργικότητα διαφορετικών προτύπων και την προώθηση της καινοτομίας.

Άλλοι σημαντικοί σταθμοί στη νομοθεσία των ευφύων δικτύων είναι η προτυποποίηση της IEEE για τη διαλειτουργικότητα των ευφύων δικτύων [IEEE2030], το χρονοδιάγραμμα υλοποίησης των ευφύων δικτύων της IEC (International Electrotechnical Commission) [IECSMB] καθώς και πλήθος άλλων προτύπων που έχουν διατυπωθεί σε Κίνα, Γερμανία, Κορέα, Αυστραλία, Ινδία, Ιαπωνία κ.α. [Gio11].

3.3.2. Παραδείγματα έργων ευφύων δικτύων

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται ορισμένα από τα σημαντικότερα έργα υλοποίησης ευφύων δικτύων ανά τον κόσμο. Εξετάζονται ως προς το τμήμα του ευφυούς δικτύου που υλοποιούν καθώς και τις υπηρεσίες που υποστηρίζουν. Επισημαίνεται ότι ενώ στη βιβλιογραφία υπάρχουν πολυάριθμα πιλοτικά προγράμματα που εξετάζουν τα ευφυή δίκτυα [Gio11], πολύ λίγα εξετάζουν την επίδραση της τηλεπικοινωνιακής υποδομής στην επίδοση του ευφυούς δικτύου.

3.3.2.1 DLC+VIT4IP

Το έργο DLC+VIT4IP (Distribution Line Carrier: Verification, Integration and Test of PLC Technologies and IP Communication for Utilities) [Hai11], [Ade11], [Hai12] είχε ως στόχο την ανάπτυξη, επαλήθευση και έλεγχο μιας NB-PLC υποδομής η οποία, βασισμένη στο πρωτόκολλο IP, υποστηρίζει τρέχουσες αλλά και μελλοντικές τηλεπικοινωνιακές εφαρμογές.

Στο συγκεκριμένο έργο πραγματοποιήθηκε η εισαγωγή ενός ενδιάμεσου στρώματος σύγκλισης μεταξύ του στρώματος δικτύου και του στρώματος πρόσβασης στο μέσο που υλοποίησε τη διαλειτουργικότητα μεταξύ της NB-PLC τεχνολογίας και του IPv6. Παράλληλα, με χρήση διαστρωματικής σχεδίασης εξασφαλίστηκε η ικανοποίηση των απαιτήσεων QoS για διάφορες κλάσεις υπηρεσιών του ευφυούς δικτύου.

3.3.2.2 Grid4EU

Το συγκεκριμένο έργο [GRID4EU] ξεκίνησε το Νοέμβριο του 2011 και αναμένεται να ολοκληρωθεί το 2015. Έχει ως στόχο να ελέγξει στην πράξη την αποτελεσματικότητα των τεχνολογιών του ευφυούς δικτύου και να άρει τους τεχνικούς, οικονομικούς κοινωνικούς, περιβαλλοντικούς και ρυθμιστικούς περιορισμούς για την ευρεία εγκατάσταση ευφυών δικτύων.

Η καινοτομία του έργου έγκειται στη μεγάλη κλίμακα του προς υλοποίηση έργου και στο πλήθος των χρηστών που θα συμμετάσχουν, αφού την οργάνωση του έργου έχει αναλάβει η ERDF, που αποτελεί τον κύριο διανομέα ηλεκτρικής ενέργειας (DSO) στη Γαλλία. [Mic12]. Επίσης, σημαντική συνεισφορά του Grid4EU θα αποτελέσει η μελέτη για καλύτερη αξιοποίηση των DER μέσω της χρήσης τεχνικών πρόβλεψης παραγωγής και κατανάλωσης ενέργειας που παράγεται από φωτοβολταϊκά. Τέλος, θα εξετασθεί η αποτελεσματικότητα της χρήσης συσσωρευτών για αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας και απόδοση της τελευταίας σε περιόδους υψηλής κατανάλωσης εναλλακτικά των DSM εφαρμογών, καθώς και η ευρεία χρήση ευφυών μετρητών για έλεγχο της κατανάλωσης.

3.3.2.3 INTEGRIS

Το έργο Intelligent Electrical Grid Sensor Communications [INTEGRIS] αφορά την ανάπτυξη μίας ετερογενούς ICT υποδομής που βασίζεται στις τεχνολογίες BB-PLC, τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (Wireless Sensor Networks – WSN) και τη χρήση ραδιοσυχνοτήτων για αναγνώριση (Radio Frequency Identifiers – RFID). Στόχος του έργου είναι η ικανοποίηση των απαιτήσεων ποιότητας των διαφόρων υπηρεσιών ευφυούς δικτύου. Στο συγκεκριμένο έργο αξιοποιείται η δυνατότητα ευρυζωνικής μετάδοσης υψηλής αξιοπιστίας που προσφέρει το περιβάλλον μέσης τάσης (MT) για να μεταδοθούν εφαρμογές DA με ανοχή σε καθυστέρηση. Παράλληλα, αφήνεται ανοικτό το ζήτημα της καταλληλότητας της BB-PLC τεχνολογίας για την υλοποίηση κρίσιμων εφαρμογών προστασίας με καθυστέρηση μετάδοσης χαμηλότερη των λίγων ms [Giu12]. Τέλος, το έργο καταλήγει στην πρόταση για υλοποίηση αρχιτεκτονικής διασφάλισης και αντιστοίχισης QoS, αντίστοιχης με αυτή που προτείνουν οι συγγραφείς στην [Sar12a].

3.3.2.4 More Microgrids

Το έργο More Microgrids [MMIC] αφορά τον έλεγχο των μικροδικτύων τόσο με κεντρική όσο και με κατανεμημένη διαχείριση. Αρχικά είχε ως στόχο την ανάπτυξη μεθοδολογιών διαχείρισης της κατανεμημένης παραγωγής και την ενσωμάτωση των μικροδικτύων στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Επίσης, μέσω της δημιουργίας

πilotικών δικτύων επαληθεύθηκαν οι τεχνικές ελέγχου των μικροδικτύων και αποτιμήθηκε ποσοτικά το όφελος από τη χρήση μικροδικτύων για τη σχεδίαση και τον προγραμματισμό των ενεργειακών συστημάτων. Παρά το γεγονός ότι για το συγκεκριμένο έργο έγινε χρήση τηλεπικοινωνιακών δικτύων WiFi, Ethernet και PLC, δεν εξετάστηκε η επίδρασή τους στην ενσωμάτωση των μικροδικτύων.

3.3.2.5 Open Meter

Το συγκεκριμένο έργο, που ολοκληρώθηκε τον Ιανουάριο του 2012, εξετάζει το σύνολο των διεθνών προτύπων για τη λειτουργία της μετρητικής υποδομής AMI [OpMeter]. Λαμβάνει υπόψη του τις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας των ενεργειακών παρόχων για να εντοπίσει και να διαχειρισθεί τις ελλείψεις στο ρυθμιστικό πλαίσιο, τις συναρτήσεις μέτρησης, την τηλεπικοινωνιακή υποδομή και την αναγνώριση και κατηγοριοποίηση των δεδομένων που παράγουν μετρητές διαφορετικής τεχνολογίας. Αναφορικά με την προτυποποίηση της τηλεπικοινωνιακής υποδομής για την υποστήριξη της λειτουργίας AMI, εξετάζονται τόσο η PLC προσέγγιση όσο και ασύρματες τεχνολογίες και εντοπίζονται τα καταλληλότερα πρότυπα και από τις δύο ομάδες.

3.4 Ενδεικτικό πιλοτικό ευφύες δίκτυο μεγάλης κλίμακας τεχνολογίας BB-PLC

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζεται ένα πιλοτικό ευφύες δίκτυο που εγκαταστάθηκε στην περιοχή της Λάρισας κατά τον Ιούλιο-Αύγουστο 2007 και είχε ως στόχο την παροχή υπηρεσιών ευφυούς δικτύου. Οι εφαρμογές που κατέστησαν διαθέσιμες αφορούσαν την απομακρυσμένη διαχείριση συσκευών του δικτύου διανομής, την παρακολούθηση του τοπικού υποσταθμού MT προς XT και την υλοποίηση του δικτύου MWN που αποσκοπεί στην επικοινωνία του προσωπικού συντήρησης και αποκατάστασης βλαβών του ενεργειακού παρόχου (ΔΕΗ). Για την υλοποίηση του πιλοτικού έργου έγινε χρήση υβριδικού δικτύου τεχνολογίας BB-PLC και ασύρματης (W-PLC) πρόσβασης το οποίο κάλυψε συνολικό μήκος δικτύου 107km. Αποτέλεσμα της χρήσης του υβριδικού δικτύου W-PLC ήταν η δημιουργία ευρυζωνικής υποδομής ικανής να εξυπηρετεί όχι μόνο τις ανάγκες διαχείρισης του τοπικού ευφυούς δικτύου αλλά και να παρέχει διαδικτυακή κάλυψη σε μία αγροτική περιοχή όπου δεν υπήρχε άλλη δυνατότητα ευρυζωνικής

πρόσβασης. Το συγκεκριμένο έργο έχει παρουσιασθεί στη διεθνή βιβλιογραφία στις αναφορές [Sar09], [Sar12b], [Tsi09], [Kap09] και [Vla11].

3.4.1. Κίνητρα για την εγκατάσταση ευφυσών δικτύων

Το πιλοτικό δίκτυο W-PLC χρηματοδοτήθηκε από τη Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού (ΔΕΗ) για να υλοποιήσει την τηλεπικοινωνιακή υποδομή ενός ευφυσού δικτύου με στόχο τον απομακρυσμένο έλεγχο και παρακολούθηση 200 αρδευτικών αντλιών που ήταν διάσπαρτες σε αγροτικές εκτάσεις στην περιοχή της Λάρισας. Η συγκεκριμένη υπηρεσία ανήκει στην κατηγορία υπηρεσιών DA. Το κίνητρο για τη συγκεκριμένη εγκατάσταση ήταν η επιβολή συμμόρφωσης των αγροτών με τις συμφωνίες επιπέδου υπηρεσίας (Service Level Agreements – SLAs) που επέβαλαν τη λειτουργία των αρδευτικών συστημάτων μόνο κατά τις βραδινές ώρες οπότε η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας είναι χαμηλή. Η μη συμμόρφωση των αγροτών με τα SLAs οδηγούσε σε υπερβάλλουσα ζήτηση ενέργειας και προκαλούσε συχνές πολύωρες διακοπές ηλεκτροδότησης κατά τις περιόδους αυξημένης ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας. Το συγκεκριμένο έργο επέτυχε την αποφυγή διακοπών ηλεκτροδότησης, εξοικονομώντας παράλληλα δεκάδες MW κατά τις περιόδους αιχμής φορτίου.

Δεδομένης της εγκατάστασης της τηλεπικοινωνιακής υποδομής και της ευρυζωνικής δυνατότητας που αυτή προσέφερε, έγινε δυνατή η αξιοποίηση του εγκατασταθέντος W-PLC δικτύου και για άλλες υπηρεσίες ευφυσού δικτύου όπως οι ακόλουθες:

- Υλοποίηση των επικοινωνιών του WMN δικτύου προς υποβοήθηση των εργασιών συντήρησης του δικτύου.
- Φυσική παρακολούθηση κρίσιμων τμημάτων του δικτύου, όπως ο υποσταθμός MT/XT.
- Η ανάγνωση των δεδομένων που παρήγαγαν μετρητικές συσκευές εγκατεστημένες στον υποσταθμό MT/XT.

Ένα σημαντικό πρόσθετο όφελος από την εγκατάσταση τηλεπικοινωνιακής υποδομής για τους σκοπούς του ευφυσού δικτύου ήταν η εκμετάλλευση της συγκεκριμένης ευρυζωνικής υποδομής και για υπηρεσίες τηλεπικοινωνιακής πρόσβασης, όπως η πρόσβαση στο Διαδίκτυο. Σημειώνεται ότι η συγκεκριμένη δυνατότητα, αν και δεδομένη στα αστικά κέντρα, είναι πολύ σημαντική στις αγροτικές περιοχές όπου συνήθως δεν υπάρχει προεγκατεστημένη τηλεπικοινωνιακή υποδομή. Το ζήτημα αυτό αναφέρεται στη

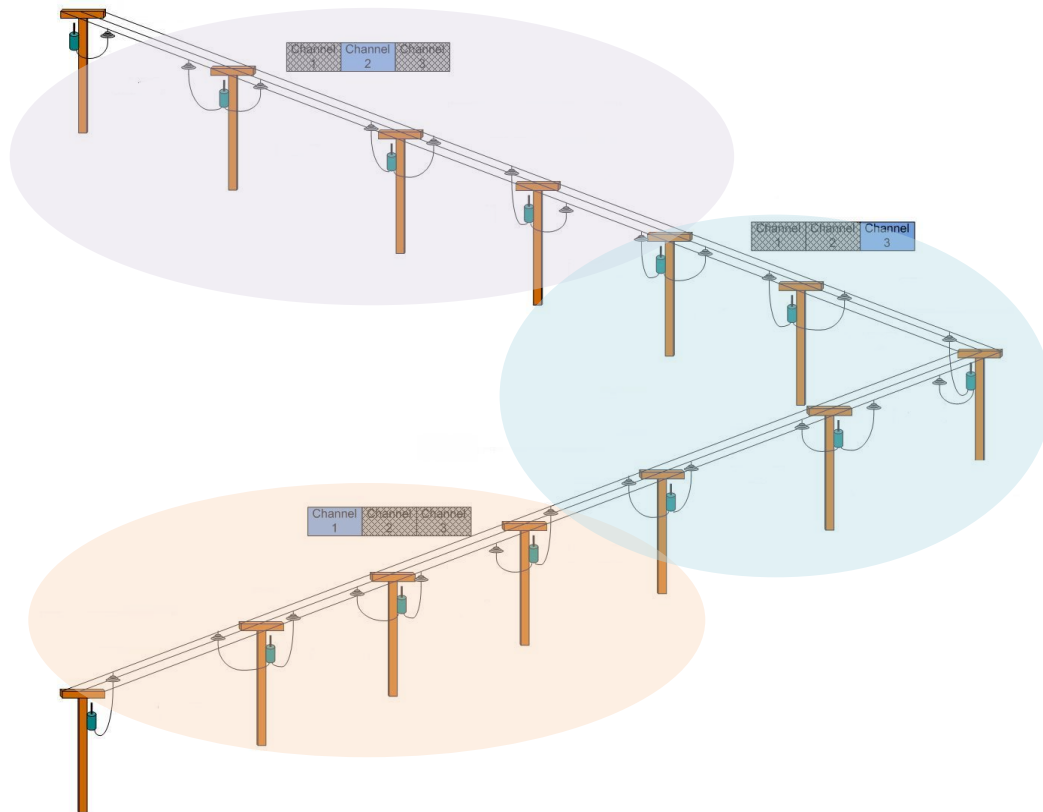
βιβλιογραφία ως ψηφιακό χάσμα (digital divide) μεταξύ των αγροτικών και αστικών περιοχών, για τη μείωση του οποίου εξετάζεται πλήθος εναλλακτικών τηλεπικοινωνιακών υποδομών [Zha04]. Η τεχνολογία BB-PLC κρίνεται ως η πλέον κατάλληλη για τη μείωση του ψηφιακού χάσματος αφού έχει κόστος συγκρίσιμο με αυτό των ασύρματων τεχνολογιών λόγω της προεγκατεστημένης υποδομής ενώ, ταυτόχρονα, αποτελεί μία ενσύρματη ευρυζωνική λύση ικανή να εξυπηρετήσει την τηλεπικοινωνιακή κίνηση ενός δικτύου πρόσβασης.

3.4.2. Σχεδίαση του πιλοτικού δικτύου

Το υβριδικό δίκτυο W-PLC που υλοποιήθηκε στην περιοχή της Λάρισας καλύπτει τμήμα δικτύου MT συνολικού μήκους 107km. Για την υλοποίηση του δικτύου χρησιμοποιήθηκαν 110 W-PLC κόμβοι οι οποίοι εμπίπτουν στις εξής κατηγορίες:

- **Head End (HE):** Πρόκειται για τον κόμβο που λειτουργεί ως master στην PLC κυψέλη.
- **Time Division Repeaters (TDRs):** Πρόκειται για κόμβους επαναλήπτες που έχουν ως στόχο να επεκτείνουν την κάλυψη της PLC κυψέλης πέραν της εμβέλειας του HE. Οι επαναλήπτες λειτουργούν ως slave του κόμβου HE. Κάθε TDR εκπέμπει επί όσο διάστημα ορίζει ο κόμβος HE σύμφωνα με τις QoS απαιτήσεις του TDR. Κάθε PLC κυψέλη μπορεί να έχει ορισμένο πλήθος επαναληπτών, το πλήθος των οποίων καθορίζει τη μέση καθυστέρηση μετάδοσης στην κυψέλη αυτή και, ως εκ τούτου, αποτελεί κρίσιμη σχεδιαστική παράμετρο. Αποδεκτές τιμές για το συγκεκριμένο πιλοτικό δίκτυο W-PLC και τις υπηρεσίες που αυτό εξυπηρετεί ήταν οι 5 επαναλήπτες ανά κυψέλη κατά μέσο όρο. Περαιτέρω μελέτη του χρονοπρογραμματισμού των επαναληπτών πραγματοποιείται στο Κεφ.4 και 5 της διατριβής.
- **Customers Premises Equipment (CPE):** Πρόκειται κόμβους TDR που επιτρέπουν και τη διασύνδεση τελικών χρηστών. Στο συγκεκριμένο πιλοτικό δίκτυο πραγματοποιείται ασύρματη σύνδεση των τελικών χρηστών στους κόμβους CPE μέσω WiFi τεχνολογίας πρόσβασης.
- **Frequency Division Repeaters (FDRs):** Πρόκειται για κόμβους επαναλήπτες που εφαρμόζουν αναχρησιμοποίηση συχνότητας, χωρίζοντας το διαθέσιμο προς PLC μετάδοση εύρος συχνοτήτων σε διακριτά κανάλια. Οι κόμβοι FDRs χρησιμοποιούνται για να διαχωρίζουν γειτονικές κυψέλες, έτσι ώστε κάθε κυψέλη να

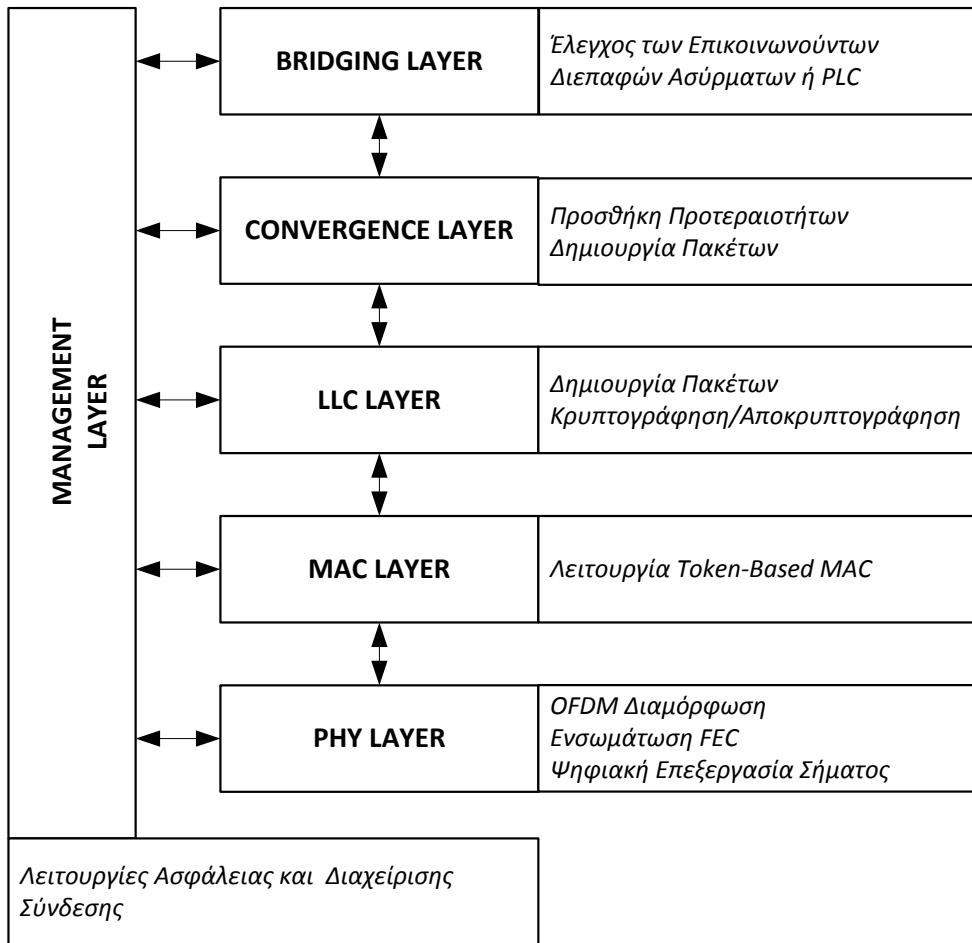
μην παρεμβάλλει στη λειτουργία γειτονικών κυψελών. Οι συγκεκριμένοι κόμβοι είναι υβριδικοί, δηλαδή περιλαμβάνουν μία οντότητα που έχει το ρόλο του HE μιας κυψέλης και μία άλλη οντότητα που έχει το ρόλο TDR ή CPE της γειτονικής κυψέλης. Παράδειγμα κυκλικής εναλλαγής καναλιών φαίνεται στο Σχ.3.4.



Σχήμα 3.4: Παράδειγμα κυκλικής εναλλαγής καναλιών μεταξύ διαδοχικών PLC κυψελών

Το μοντέλο αναφοράς του W-PLC δικτύου παρουσιάζεται στο Σχ.3.5, όπου, παράλληλα, συνοψίζονται οι βασικότερες λειτουργίες κάθε στρώματος. Ανεξαρτήτως κατηγορίας, οι W-PLC κόμβοι που χρησιμοποιήθηκαν είχαν τα εξής χαρακτηριστικά:

- **Ευρυζωνική PLC μετάδοση:** Η λειτουργία του PLC modem που χρησιμοποιήθηκε στους κόμβους W-PLC ακολουθεί το πρότυπο OPERA [OPERA1], [OPERA2] που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο Ευρωπαϊκού Έργου FP6 που προηγήθηκε και αποτέλεσε τη βάση για τη δημιουργία του προτύπου IEEE 1901. Για την PLC μετάδοση χρησιμοποιήθηκε η ζώνη συχνοτήτων 1-34MHz που επιτρέπει ρυθμούς μετάδοσης που υπερβαίνουν τα 200Mbps στο φυσικό στρώμα. Έγινε περιορισμένη χρήση FDR κόμβων προκειμένου να αξιοποιηθεί όλο το επιτρεπόμενο εύρος ζώνης για PLC

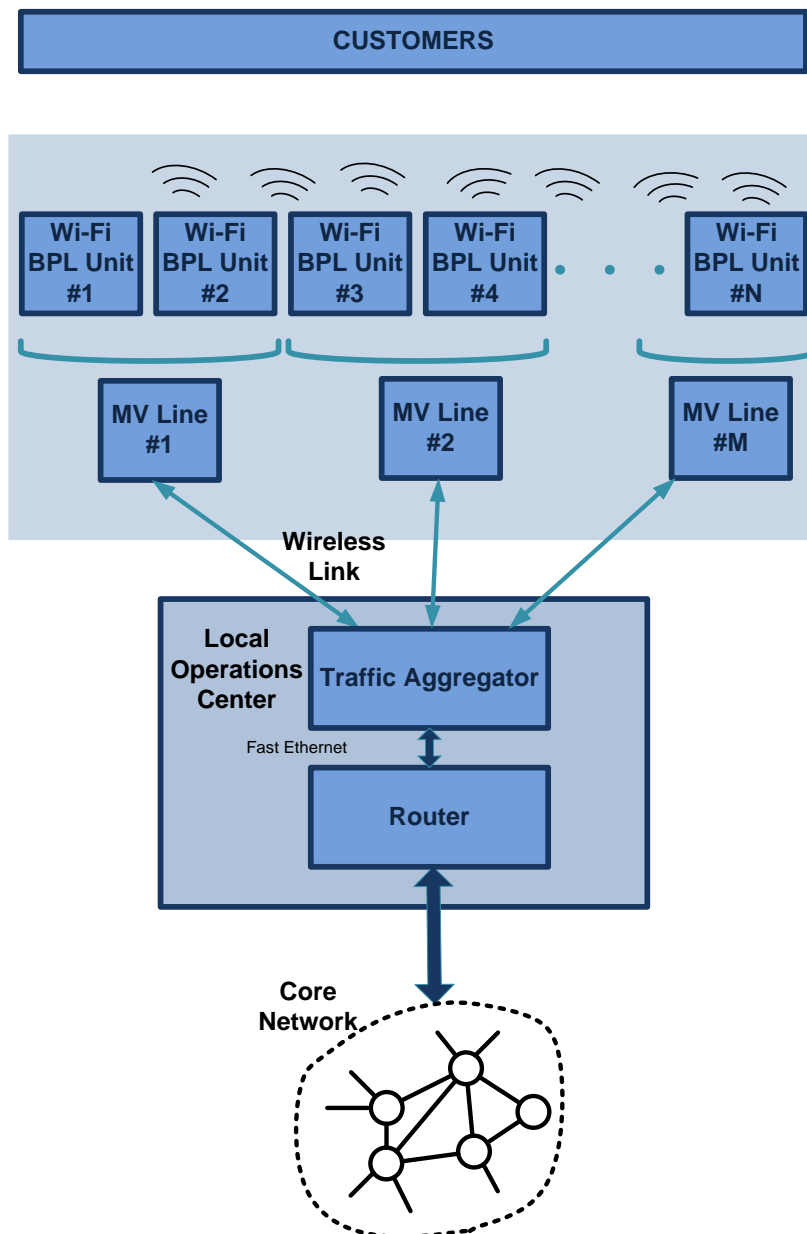


Σχήμα 3.5: Μοντέλο Αναφοράς W-PLC δικτύου

μετάδοση. Το στρώμα MAC που χρησιμοποιήθηκε είναι token-based με λειτουργία αντίστοιχη του TDMA πρωτοκόλλου που προδιαγράφεται στο πρότυπο IEEE 1901.

- **Ασύρματη διεπαφή για συλλογή δεδομένων WiFi δικτύων:** Κύριο χαρακτηριστικό του συγκεκριμένου W-PLC δικτύου αποτέλεσε η εύκολη πρόσβαση σε αυτό των τελικών χρηστών μέσω ασύρματης διεπαφής IEEE 802.11 b/g των W-PLC κόμβων που εξασφαλίζει ρυθμούς μετάδοσης μέχρι 54Mbps. Η προσάρτηση ασύρματων ελεγκτών στις προς έλεγχο αρδευτικές αντλίες επέτρεψε τον απομακρυσμένο έλεγχό τους μέσω του W-PLC δικτύου. Παράλληλα, η χρήση του ευρέως χρησιμοποιούμενου IEEE 802.11 b/g, έναντι των άλλων ασύρματων τεχνολογιών που επίσης υποστηρίζουν DA εφαρμογές (π.χ. Zigbee), επέτρεψε την πρόσβαση στο δίκτυο και ασύρματων χρηστών προς εξυπηρέτηση άλλων τηλεπικοινωνιακών εφαρμογών (VoIP, πρόσβαση στο Διαδίκτυο).
- **Λειτουργία εκτός τροφοδοσίας:** Ανεξαρτήτως της χρήσης του W-PLC δικτύου ως ευφυούς δικτύου ή ως τηλεπικοινωνιακού δικτύου πρόσβασης, βασικό λειτουργικό

χαρακτηριστικό αυτού πρέπει να είναι η ανθεκτικότητα, δηλαδή η διασφάλιση της λειτουργίας του τηλεπικοινωνιακού δικτύου σε περίπτωση βλάβης του ενεργειακού δικτύου. Ως εκ τούτου, κατά το σχεδιασμό του W-PLC δικτύου δόθηκε έμφαση στη δυνατότητα λειτουργίας των W-PLC κόμβων εκτός τροφοδοσίας. Επομένως, κάθε κόμβος είναι σε θέση να υποστηρίζει ολιγόωρη λειτουργία με χρήση μπαταρίας, ενώ, παράλληλα, είναι εφοδιασμένος με εφεδρική ασύρματη διεπαφή που τίθεται σε λειτουργία όταν υπάρχει διακοπή σε κάποια γραμμή MT.



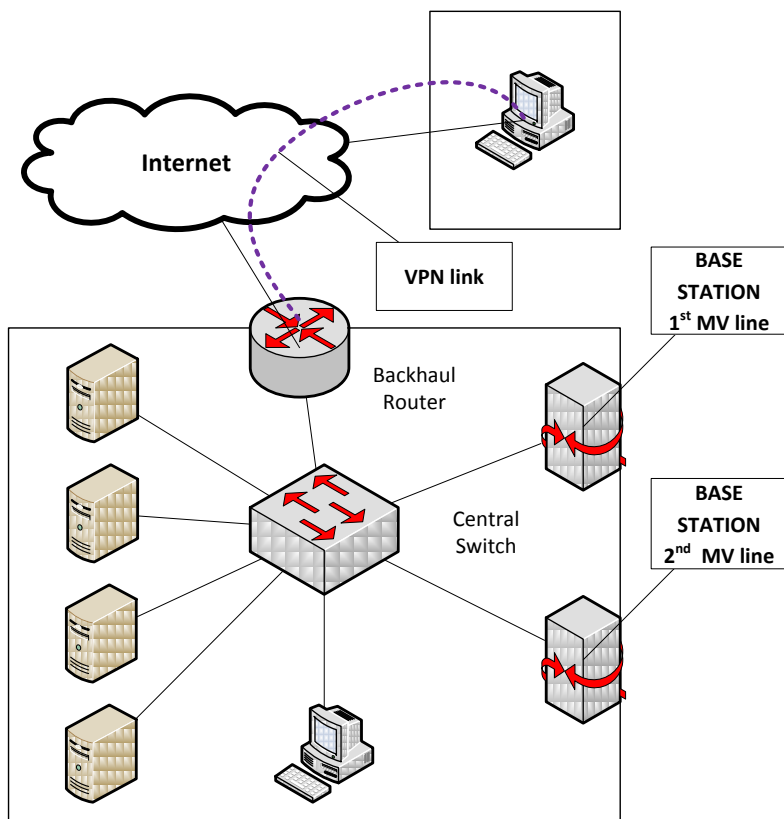
Σχήμα 3.6: Αρχιτεκτονική υβριδικού δικτύου W-PLC

Το Σχ.3.6 απεικονίζει την αρχιτεκτονική του υβριδικού δικτύου W-PLC που αναλύεται στη συνέχεια.

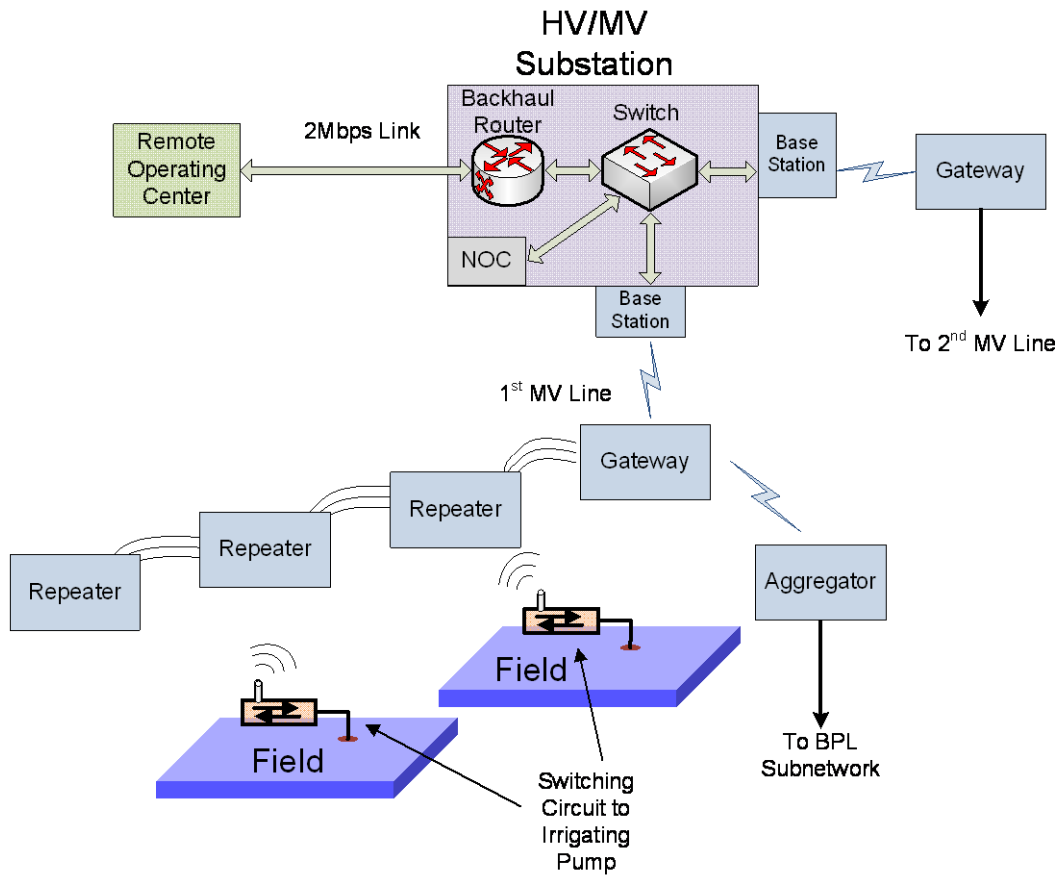
3.4.2.1. Κέντρο Διαχείρισης Δικτύου

Για τους σκοπούς του πιλοτικού δικτύου W-PLC, το Κέντρο Διαχείρισης Δικτύου, που αποτελεί και το τοπικό κέντρο ελέγχου του ευφυούς δικτύου, εγκαταστάθηκε στο Κέντρο Υψηλής Τάσης (ΚΥΤ) που τροφοδοτεί τον υποσταθμό Υψηλής Τάσης (ΥΤ) προς ΜΤ, από τον οποίο εκκινούν και οι δύο γραμμές ΜΤ που διασχίζουν την περιοχή όπου εγκαταστάθηκε το W-PLC δίκτυο. Το Σχ.3.6 περιλαμβάνει το λογικό διάγραμμα του τοπικού και απομακρυσμένου κέντρου διαχείρισης δικτύου. Το απομακρυσμένο κέντρο διαχείρισης βρίσκεται στα κεντρικά γραφεία του ενεργειακού παρόχου και αποτελείται από ένα υπολογιστή ελέγχου και διαχείρισης που διασυνδέεται στο τοπικό δίκτυο μέσω ιδιωτικού δικτύου Virtual Private Network (VPN). Ο συγκεκριμένος τρόπος διασύνδεσης κρίνεται προτιμητέος έναντι του δημόσιου Διαδικτύου λόγω της αυξημένης ασφάλειας που παρέχει [Cao11].

Το τοπικό κέντρο δικτύου αποτελεί και το δίκτυο SN του πιλοτικού ευφυούς δικτύου. Ο



Σχήμα 3.7: Τοπικό και Απομακρυσμένο κέντρο διαχείρισης W-PLC δικτύου



Σχήμα 3.8: Σχηματική αναπαράσταση του υβριδικού W-PLC δικτύου που υλοποιήθηκε στην περιοχή της Λάρισας.

κεντρικός μεταγωγέας του δικτύου υλοποιεί το ενσύρματο τοπικό δίκτυο κορμού και δρομολογεί την κίνηση μεταξύ του υπολογιστή ελέγχου και διαχείρισης του τοπικού δικτύου, των εξυπηρετητών των ευφών εφαρμογών και των δύο γραμμών MT που καλύπτουν την περιοχή του W-PLC δικτύου. Ο μεταγωγέας διασυνδέεται με τον κεντρικό δρομολογητή που αναλαμβάνει τη σύνδεση του W-PLC δικτύου στο

Διαδίκτυο και στο ιδιωτικό δίκτυο VPN. Οι εξυπηρετητές (servers) που εμφανίζονται στο Σχ.3.7 αναλαμβάνουν την υποστήριξη VoIP πρωτοκόλλου για την επικοινωνία στο δίκτυο MWN, τον έλεγχο και παρακολούθηση των μετρητών που έχουν εγκατασταθεί σε συγκεκριμένα σημεία του δικτύου, τη διαχείριση του διακοπτικού εξοπλισμού που ρυθμίζει τη λειτουργία των αντλιών άρδευσης, τη διαχείριση του W-PLC δικτύου και τον εντοπισμό των αστοχιών του ενεργειακού δικτύου μέσω της PLC δυνατότητας.

Το Σχ.3.8 απεικονίζει τη διασύνδεση του τοπικού κέντρου διαχείρισης δικτύου και του SN με το πιλοτικό δίκτυο W-PLC. Οι δύο κόμβοι-σταθμοί βάσεις (base stations) που

εικονίζονται στο Σχ.3.7 αποτελούν το ασύρματο σημείο πρόσβασης για τη σύνδεση του ενσύρματου δικτύου κορμού (SN) με το δίκτυο W-PLC που εκτείνεται στις δύο γραμμές MT. Η ασύρματη διεπαφή υλοποιείται με πρωτόκολλο IEEE 802.11g που επιτρέπει ταχύτητες 54Mbps. Η επιλογή του ασύρματου μέσου για την υλοποίηση της κρίσιμης αυτής ζεύξης, η οποία συγκεντρώνει όλη την κίνηση που παράγεται από το W-PLC δίκτυο, πραγματοποιήθηκε για την αποφυγή της υψηλής εξασθένησης που εμφανίζει το PLC μέσο μετάδοσης λόγω της μεσολάβησης των μετασχηματιστών του υποσταθμού. Το ασύρματο μέσο, αν και επιτρέπει μικρότερους ρυθμούς μετάδοσης, είναι ικανό, εφόσον συνδυασθεί με προτεραιοποίηση της μετάδοσης κίνησης διαφορετικών κλάσεων, να ικανοποιήσει τη μικρού εύρους ζώνης κίνηση που παράγεται από ένα W-PLC δίκτυο. Αναλυτική παρουσίαση των διαφορετικών κλάσεων υπηρεσιών θα γίνει στη συνέχεια του κεφαλαίου.

3.4.2.2. Εγκατάσταση δικτύου πρόσβασης

Κύριος στόχος του W-PLC δικτύου είναι η κάλυψη των αγροτικών εκτάσεων της Λάρισας που διατρέχουν δύο γραμμές MT μήκους 107km. Η γεωγραφική περιοχή που καλύφθηκε από το πιλοτικό δίκτυο απεικονίζεται στο Σχ.3.9. Οι W-PLC κόμβοι είναι οργανωμένοι σε κυψέλες PLC. Το πλήθος των επαναληπτών σε κάθε κυψέλη εξαρτάται από την τοπολογία του δικτύου MT. Η ύπαρξη ασυνεχειών στις γραμμές MT λόγω ανοικτοκυκλωμάτων, μετασχηματιστών, απομονωτών ή άλλων διατάξεων προκαλούν ανακλάσεις άρα και μείωση του ρυθμού μετάδοσης. Στις περιπτώσεις αυτές ενεργοποιείται η εφεδρική ασύρματη διεπαφή προκειμένου να παρακάμπτονται τα προβληματικά αυτά σημεία των γραμμών. Επομένως, όταν χρειάζεται γειτονικές κυψέλες επικοινωνούν μεταξύ τους ασύρματα μέσω της εφεδρικής ασύρματης διεπαφής, αποφεύγοντας κατ' αυτό τον τρόπο την απομόνωση συγκεκριμένων τμημάτων του δικτύου. Εναλλακτικά της συγκεκριμένης υλοποίησης, ο χωρισμός του φάσματος σε διακριτά κανάλια σε συνδυασμό με την εγκατάσταση κόμβων FDR μπορεί να οδηγήσει σε υλοποίηση που επιτυγχάνει υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης. Αυτό υλοποιείται με αναχρησιμοποίηση καναλιών σε μη γειτονικές κυψέλες (έτσι ώστε να μην παρεμβάλλουν) και της επακόλουθης αύξησης των ταυτόχρονων μεταδόσεων σε μη γειτονικές κυψέλες. Σημειώνεται ότι στη συγκεκριμένη εγκατάσταση όλοι οι TDRs είχαν ταυτόχρονα και το ρόλο του CPE αφού συνέλεξαν δεδομένα από τις διατάξεις ελέγχου των αντλιών άρδευσης που ήταν διασπαρμένες σε όλη την έκταση του πιλοτικού δικτύου.



Σχήμα 3.9: Το υβριδικό δίκτυο W-PLC στην περιοχή της Λάρισας:

α) W-PLC κόμβοι που είναι εγκατεστημένοι επί της πρώτης γραμμής MT,

β) W-PLC κόμβοι που είναι εγκατεστημένοι επί της δεύτερης γραμμής MT.

Όπως ήδη αναφέρθηκε, η δεύτερη ασύρματη διεπαφή χρησιμοποιήθηκε από κάθε κόμβο του δικτύου για τη συλλογή των δεδομένων που παράγονται από τις ευφυείς διατάξεις.

Κάθε γραμμή MT συνδέεται στο δίκτυο SN μέσω του W-PLC κόμβου που είναι εγκατεστημένος στην αρχή της γραμμής και έχει το ρόλο της πύλης εξόδου (gateway) για τους επόμενους κόμβους που είναι εγκατεστημένοι στην ίδια γραμμή. Ο κόμβος gateway αποτελεί παράλληλα και τον κόμβο HE της πρώτης κυψέλης κάθε γραμμής, δηλαδή της κυψέλης που βρίσκεται εγγύτερα προς το Σταθμό Βάσης και συνδέεται μαζί του με απευθείας ασύρματη ζεύξη. Οι πλέον απομακρυσμένες κυψέλες συνδέονται μέσω του HE της κυψέλης τους, ο οποίος συγκεντρώνει την κίνηση που παράγεται σε κάθε κυψέλη (aggregator) και την προωθεί στη γειτονική κυψέλη που βρίσκεται εγγύτερα στην πύλη εξόδου της κάθε γραμμής.

Συμπερασματικά, υλοποιήθηκε ένα υβριδικό δίκτυο πρόσβασης W-PLC το οποίο αποτελείται από:

- Ενσύρματα BB-PLC υποδίκτυα με ρυθμούς μετάδοσης που υπερβαίνουν τα 200Mbps.
- Ασύρματες ζεύξεις που συνδέουν τα BB-PLC υποδίκτυα είτε με τον εγγύτερο κόμβο W-PLC είτε με την πύλη εξόδου κάθε γραμμής.

Επισημαίνεται ότι η ενεργοποίηση μιας ασύρματης ζεύξης πραγματοποιείται όταν ο ρυθμός μετάδοσης μιας PLC ζεύξης είναι αρκετά χαμηλός. Στις περιπτώσεις όπου μία κακή PLC ζεύξη μπορεί να οδηγήσει σε αστάθεια του δικτύου ή σε απομόνωση συγκεκριμένων τμημάτων, γίνεται χρήση εφεδρικών διαδρομών δρομολόγησης, αυξάνοντας κατ' αυτόν τον τρόπο τη διαθεσιμότητα και σταθερότητα του δικτύου. Επομένως, ο ρόλος των ασύρματων ζεύξεων σε ένα υβριδικό W-PLC είναι τριπλός:

1. Μονίμως ενεργοποιημένες σταθερές ασύρματες ζεύξεις για διασύνδεση των πυλών εξόδου της κυψέλης προς τους σταθμούς βάσης του NOC.
2. Σταθερή ενεργοποίηση της κατάλληλης ασύρματης ζεύξης όταν και όπου προκύπτουν φυσικές ασυνέχειες του ενεργειακού δικτύου.
3. Δυναμική ενεργοποίηση ασυρμάτων ζεύξεων σε περίπτωση υποβάθμισης των απαιτήσεων QoS. Στις περιπτώσεις αυτές, η ασύρματη ζεύξη ενεργοποιείται κατ' εντολή της κεντρικής μονάδας διαχείρισης ζεύξεων (Link Management Module – LMM) που αναλύεται στη συνέχεια.

Το δίκτυο πρόσβασης W-PLC έχει διπλό ρόλο στο ευφυές δίκτυο. Από τη μία πλευρά υλοποιεί το δίκτυο NAN, αφού συλλέγει την κίνηση που παράγεται από τους τελικούς ενεργειακούς κόμβους και χρήστες. Πιλοτικά συλλέγονται δεδομένα μετρητών που είχαν τοποθετηθεί σε οικιακές καταναλώσεις προς υλοποίηση εφαρμογών AMR/AMI. Από την άλλη πλευρά, κύρια δράση του συγκεκριμένου πιλοτικού δικτύου υπήρξε η παροχή DA υπηρεσιών, αφού μέσω αυτού ελέγχονται συσκευές πεδίου που είναι εγκατεστημένες κατά μήκος των γραμμών MT υλοποιώντας ένα δίκτυο FAN.

3.4.2.3. Διασύνδεση τελικών χρηστών

Όπως τονίστηκε στα προηγούμενα, κάθε κόμβος W-PLC έχει τη δυνατότητα λειτουργίας και ως σημείο πρόσβασης WiFi προκειμένου να συνδεθούν τελικοί χρήστες ή ευφυείς συσκευές στο W-PLC δίκτυο. Το τμήμα του δικτύου που συνδέει τους τελικούς χρήστες υλοποιεί το CPN ενός ευφυούς δικτύου. Αντιθέτως, το τμήμα του δικτύου στο οποίο διασυνδέονται οι ευφυείς συσκευές είναι το δίκτυο FAN που αναλύθηκε στην προηγούμενη ενότητα.

3.4.3. Διασφάλιση ποιότητας υπηρεσίας στο πιλοτικό δίκτυο PLC της Λάρισας

Το δίκτυο W-PLC προσέφερε όχι μόνο υπηρεσίες ευφυούς δικτύου αλλά και υπηρεσίες τηλεπικοινωνιακού δικτύου πρόσβασης. Συνολικά, υποστηρίχθηκαν τρεις κατηγορίες υπηρεσιών (service classes – SCs) ευφυών δικτύων και δύο κατηγορίες υπηρεσιών δικτύου πρόσβασης, οι απαιτήσεις των οποίων παρουσιάζονται στον Πίν.3.4. Αναλυτικότερα οι υπηρεσίες που προσφέρθηκαν είναι οι ακόλουθες:

- **Απομακρυσμένη διαχείριση συσκευών:** Αφορά τον απομακρυσμένο έλεγχο των διακοπτικών συσκευών που ελέγχουν τις αντλίες άρδευσης. Αν και απαιτεί μικρό εύρος ζώνης, η συγκεκριμένη εφαρμογή DA χαρακτηρίζεται από πολύ μικρή ανεκτικότητα σε καθυστέρηση.
- **Φυσική παρακολούθηση περιοχής:** Η συγκεκριμένη εφαρμογή αφορά την επιτήρηση κρίσιμων περιοχών του ηλεκτρικού δικτύου, όπως υποσταθμοί ΥΤ/ΜΤ. Στο συγκεκριμένο πιλοτικό δίκτυο, μια IP κάμερα τοποθετήθηκε στον υποσταθμό ΥΤ/ΜΤ. Πρόκειται για εφαρμογή που απαιτεί μεγάλο εύρος ζώνης και χαμηλή καθυστέρηση.
- **Συλλογή δεδομένων καταγραφής:** Πρόκειται για εφαρμογή AMR, μέσω της οποίας συλλέγονται τα δεδομένα των μετρητών κατανάλωσης. Επίσης, στη συγκεκριμένη

Πίνακας 3.4: Απαιτήσεις QoS των υπηρεσιών που υποστήριξε το πιλοτικό δίκτυο W-PLC της Λάρισας

Κατηγορία Υπηρεσιών	Εφαρμογές & Υπηρεσίες	Περιγραφή	QoS Απαιτήσεις	Προτεραιότητα
Υπηρεσίες Ευφυούς Δικτύου	Απομακρυσμένη διαχείριση συσκευών	Αποστολή πολυμεσικών μηνυμάτων	Χαμηλό εύρος ζώνης. Χαμηλή καθυστέρηση	2
	Παρακολούθηση	Υψηλής ποιότητας αποστολή βίντεο	Υψηλό εύρος ζώνης. Χαμηλή καθυστέρηση	3
	Συλλογή Δεδομένων	Αποστολή απλών μηνυμάτων	Χαμηλό εύρος ζώνης. Ανεκτικότητα σε καθυστέρηση	4
Ευρυζωνικές Υπηρεσίες	VoIP	Τηλεφωνία δεδομένων	Χαμηλό εύρος ζώνης. Υπηρεσία πραγματικού χρόνου	1
	Internet	Πλοήγηση μικρών απαιτήσεων σε εύρος ζώνης	Υπηρεσία βέλτιστης προσπάθειας	5

κατηγορία εμπίπτουν και οι εφαρμογές DA που αφορούν τη συλλογή δεδομένων θερμοκρασίας και υγρασίας από αισθητήρες εγκατεστημένους σε κατάλληλες θέσεις του δικτύου. Πρόκειται για εφαρμογή που παράγει αποκλειστικά κίνηση άνω ζεύξης (uplink) με χαμηλή απαίτηση σε εύρος ζώνης που χαρακτηρίζεται από ανεκτικότητα σε καθυστέρηση.

- **VoIP:** Πρόκειται για εφαρμογή IP τηλεφωνίας που αξιοποιείται από το προσωπικό συντήρησης του δικτύου προς διεξαγωγή των σχετικών επικοινωνιών. Αποτελεί εφαρμογή χαμηλού εύρους ζώνης αλλά απαίτησης για ελάχιστη καθυστέρηση. Για το λόγο αυτό, της αποδόθηκε η υψηλότερη προτεραιότητα.
- **Internet:** Η πρόσβαση στο Διαδίκτυο αποτελεί επικουρική εφαρμογή βέλτιστης προσπάθειας. Επομένως, της αποδόθηκε η χαμηλότερη προτεραιότητα.

3.4.3.1. Στατική ανάθεση προτεραιοτήτων στο W-PLC δίκτυο

Στο πιλοτικό δίκτυο W-PLC της Λάρισας χρησιμοποιήθηκε στατική ανάθεση πόρων μέσω της δημιουργίας εικονικών τοπικών δικτύων (Virtual Local Area Networks – VLANs) που χρησιμοποιήθηκαν για τη λογική ομαδοποίηση της κίνησης που παράγεται από όμοιες συσκευές. Οι προτεραιότητες που δόθηκαν παρουσιάζονται στον Πιν.3.4. Βάσει του συγκεκριμένου σχήματος, υπεύθυνος για τη δρομολόγηση σύμφωνα με τις καθορισμένες προτεραιότητες είναι ο κεντρικός μεταγωγέας του δικτύου. Το σχήμα στατικής ανάθεσης πόρων θέτει πολλούς περιορισμούς για την ανάπτυξη του W-PLC δικτύου. Συγκεκριμένα:

- Πραγματοποιεί διαχείριση προτεραιοτήτων σε επίπεδο δικτύου κορμού, χωρίς να παρέχει κάποιον τρόπο διαχωρισμού της κίνησης που παράγεται από διαφορετικού τύπου διατάξεις που εξυπηρετούνται από κοινό W-PLC κόμβο.
- Θέτει περιορισμούς ως προς τα σημεία του W-PLC δικτύου με τα οποία επιτρέπεται να διασυνδέονται οι διαφορετικές διατάξεις.

3.4.3.2. Προτάσεις για βελτίωση του μηχανισμού ανάθεσης πόρων

Εξετάσθηκε η ενσωμάτωση δύο λειτουργικών μονάδων που αναμένεται να βελτιώσουν τη διαχείριση προτεραιοτήτων στο W-PLC δίκτυο. Οι μονάδες αυτές είναι:

- **Μονάδα δυναμικής επιλογής νοητής κλάσης υπηρεσίας (Dynamic virtual class (VC)-selection module):** Ο σχετικός αλγόριθμος εκτελείται τοπικά σε κάθε κόμβο W-PLC. Με την έλευση νέου πακέτου δεδομένων ο κόμβος ευφυούς δικτύου ελέγχει την κατηγορία υπηρεσίας όπου ανήκει το πακέτο και το συνολικό χρόνο αναμονής στην ουρά του κόμβου. Βάσει των δύο αυτών χαρακτηριστικών ανατίθεται ένας δείκτης VC. Το πακέτο με το χαμηλότερο VC έχει προτεραιότητα για μετάδοση μόλις επιτραπεί στον κόμβο η μετάδοση πλαισίων.
- **Μονάδα διαχείρισης ζεύξεων (Link-management module):** Η συγκεκριμένη μονάδα αποφασίζει αν οι διαθέσιμοι πόροι κάθε κόμβου μπορούν να εξυπηρετήσουν τις απαιτήσεις QoS της νέας σύνδεσης πραγματοποιώντας έλεγχο αποδοχής κλήσεων. Στην περίπτωση όπου το διαθέσιμο εύρος ζώνης του W-PLC δικτύου δεν μπορεί να εξυπηρετήσει τις απαιτήσεις QoS μιας σύνδεσης, η μονάδα διαχείρισης συνδέσεων ενεργοποιεί την ασύρματη διεπαφή. Με αυτό τον τρόπο πραγματοποιείται η δυναμική ενεργοποίηση των ασυρμάτων ζεύξεων και ο λογικός διαχωρισμός του W-PLC δικτύου σε κυψέλες. Το πακέτο απορρίπτεται όταν η ενεργοποίηση της ασύρματης

διεπαφής δεν εγγυάται την ανάθεση ενός VC που τηρεί τις απαιτήσεις QoS της σύνδεσης.

3.4.4. Χρήσιμα συμπεράσματα για τη σχεδίαση PLC δικτύων

Κατά τη σχεδίαση BB-PLC δικτύων με στόχο να εξυπηρετηθούν οι τηλεπικοινωνιακές απαιτήσεις ενός ευφυούς ενεργειακού δικτύου πρέπει να ληφθούν υπόψη οι ακόλουθοι παράγοντες:

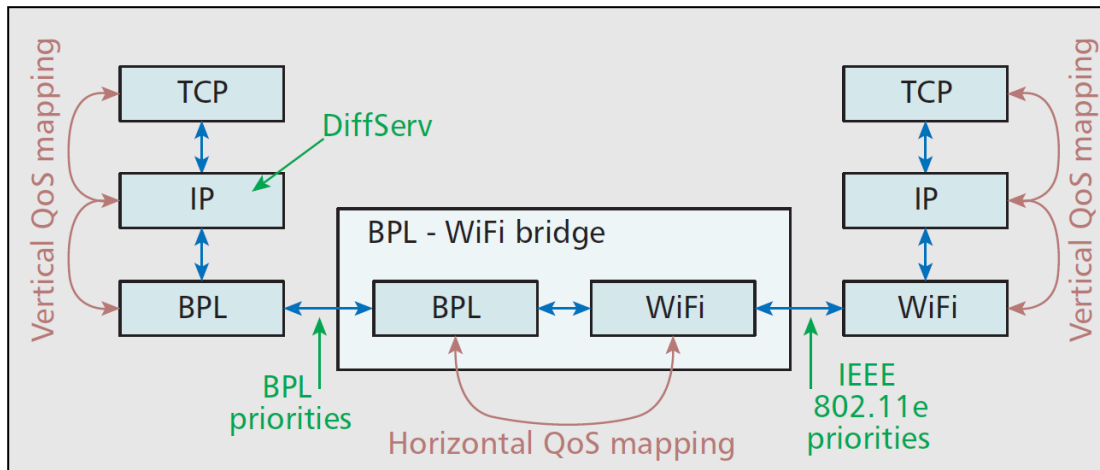
3.4.4.1. Θέματα που αφορούν την PLC μετάδοση

Σημαντικά ζητήματα που αφορούν τις PLC ζεύξεις αποτελούν η εξασθένηση, που επηρεάζει περισσότερο τις υψηλές συχνότητες, καθώς και η πολυδιαδρομική διάδοση λόγω διακλαδώσεων, μετασχηματιστών ή ανοικτοκυκλωμάτων [Laz09]. Αυτό διαφοροποιεί σημαντικά το διαθέσιμο εύρος κάθε PLC ζεύξης. Η λύση που δόθηκε για το συγκεκριμένο πρόβλημα ήταν η ενεργοποίηση των εφεδρικών ασυρμάτων ζεύξεων για να εξασφαλισθεί η συνδεσιμότητα μεταξύ γειτονικών W-PLC κόμβων παρουσία επιβαρυσμένων PLC ζεύξεων. Επισημαίνεται ότι η δομή του δικτύου MT είναι στατική, δηλαδή παρουσιάζει πολύ μικρές μεταβολές σε σχέση με το δίκτυο XT. Παράλληλα, οι ενδεχόμενες αλλαγές που εμφανίζονται, συνήθως απροσδόκητα, αποτελούν ένδειξη βλάβης του ενεργειακού δικτύου και, επομένως, είναι επιθυμητό να ανιχνευθούν. Η εκ των προτέρων γνώση της δομής του δικτύου MT επιτρέπει την αποτελεσματική σχεδίαση ενός W-PLC δικτύου καθορίζοντας την ανάγκη ύπαρξης και ασυρμάτων ζεύξεων, την απόσταση τοποθέτησης και το πλήθος των W-PLC κόμβων.

Άλλες λύσεις που απαντώνται στη βιβλιογραφία προς βελτίωση των συνθηκών μετάδοσης με χρήση PLC ζεύξεων μόνο είναι η αποκοπή των επιβαρυσμένων λόγω πολυδιαδρομικής διάδοσης ζωνών συχνοτήτων (notching) [Laz10a] που επιτυγχάνεται με κατάλληλο φιλτράρισμα των κατά OFDM διαμορφωμένων σημάτων. Περισσότερα για τη συγκεκριμένη τεχνική παραθέτονται στο Κεφ.1 της διατριβής. Παράλληλα, η χρήση της τεχνολογίας NB-PLC εξασφαλίζει μεγαλύτερη ανθεκτικότητα σε εξασθένηση. Ως εκ τούτου, συχνά κρίνεται καταλληλότερη για την υλοποίηση NAN δικτύων παρουσία γραμμών XT [Gal11], [Χιω12].

3.4.4.2. Θέματα διαχείρισης QoS απαιτήσεων

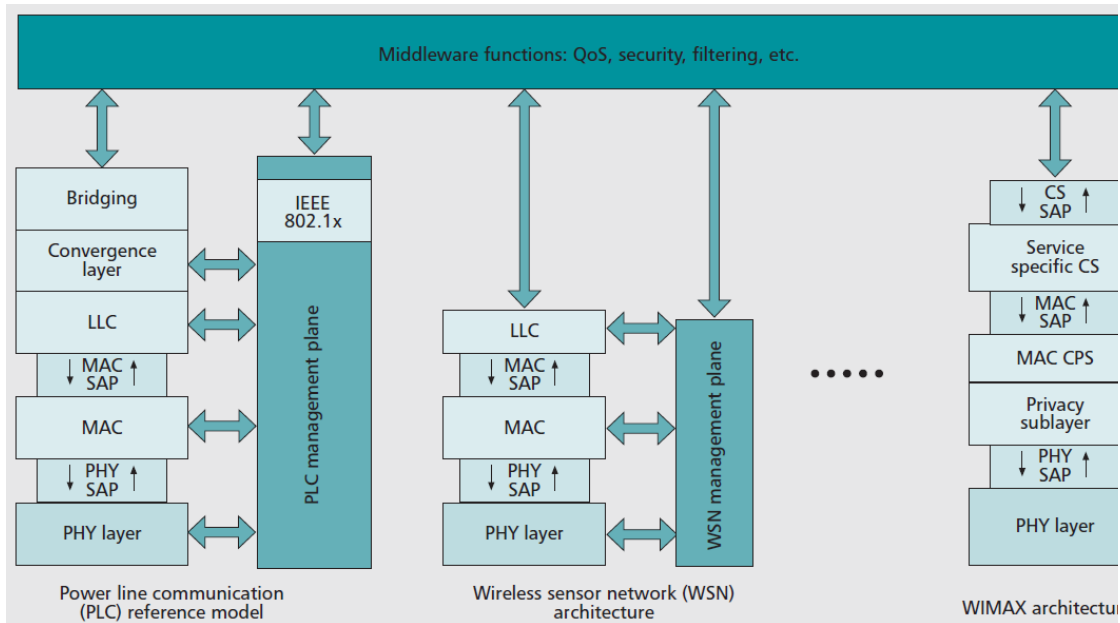
Το πρόβλημα εξασφάλισης QoS σε υβριδικά τηλεπικοινωνιακά δίκτυα δεν είναι νέο. Η ITU-T (International Telecommunication Union, Telecommunication Standardization



Σχήμα 3.10: Παράδειγμα κάθετης και οριζόντιας αντιστοίχισης προτεραιοτήτων QoS. [Val12]

Sector) προδιέγραψε το 2008 την ανάγκη εξασφάλισης μιας από άκρο-σε-άκρο αρχιτεκτονικής ελέγχου QoS για την υποστήριξη πολυμεσικής κίνησης διαφορετικών απαιτήσεων μέσω ετερογενών τηλεπικοινωνιακών μέσων [ITU]. Το πρόβλημα αυτό είναι εντονότερο στα δίκτυα πρόσβασης επόμενης γενιάς (Next Generation Access Networks – NGNs) αφού ενσωματώνουν διαφορετικές τεχνολογίες, συνήθως χαμηλότερης χωρητικότητας από το δίκτυο κορμού, οι οποίες αποτελούν τη στενωπό μετάδοσης δεδομένων [Jon07]. Το υβριδικό W-PLC δίκτυο αποτελεί NGN δίκτυο, αφού παρέχει διαφοροποιημένες υπηρεσίες μέσω ετερογενών δικτύων [Sar08].

Οι συγγραφείς της [Val12] εξετάζουν την εισαγωγή ενός μεσίτη QoS (QoS broker) που ελέγχει κεντρικά τις απαιτήσεις QoS των διαφορετικών υπηρεσιών του ευφυούς δικτύου και δημιουργεί σταθερή οριζόντια αντιστοίχιση των κατηγοριών υπηρεσιών του PLC και του ασύρματου μέσου (βλ. Σχ.3.10). Παρόμοια αρχιτεκτονική είχαν προτείνει και οι συγγραφείς στη [Hau05] στο πλαίσιο του πιλοτικού προγράμματος GridStat. Παρόμοια τεχνική ακολουθούν και οι συγγραφείς της [Puj05] στο πλαίσιο του έργου [6POWER] προτείνοντας την εισαγωγή ενός κεντρικού QoS broker για την αντιστοίχιση των απαιτήσεων που προδιαγράφονται στις PLC επικοινωνίες με τις απαιτήσεις για VoIP επικοινωνία μέσω του πρωτοκόλλου SIP. Τέλος, οι συγγραφείς στα πλαίσια του έργου INTEGRIS παρουσιάζουν μία γενικευμένη αρχιτεκτονική διασφάλισης QoS εισάγοντας ένα ενδιάμεσο στρώμα διασφάλισης ποιότητας και ασφάλειας. Το Σχ.3.11 παρουσιάζει την προτεινόμενη αρχιτεκτονική που επιτυγχάνει την αποτελεσματική διαχείριση και διασύνδεση στο ευφυές δίκτυο των δεδομένων που διακινούνται σε διαφορετικά μέσα όπως PLC, WSN και WIMAX δίκτυα.



Σχήμα 3.11: Ενσωμάτωση ετερογενών δικτύων [Zab11]

3.4.4.3. Θέματα ασφάλειας επικοινωνίας

Η εξασφάλιση ασφάλειας είναι καθοριστικός σχεδιαστικός παράγοντας ενός υβριδικού δικτύου. Στο W-PLC δίκτυο χρησιμοποιούνται δύο διεπαφές μετάδοσης δεδομένων, η ενσύρματη πρόσβαση μέσω των γραμμών MT και η ασύρματη. Συγκεκριμένα, το πρωτόκολλο OPERA ενσύρματης μετάδοσης [OPEMS] χρησιμοποιεί για την εξασφάλιση ασφάλειας σε δίκτυα BB-PLC τον αλγόριθμο ανταλλαγής κλειδιού Diffie-Hellman με κρυπτογράφηση 3DES. Παράλληλα, η τεχνολογία WiFi χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο WEP που προτείνεται από την IEEE. Οι συγγραφείς της [Dra07] προτείνουν ένα κεντρικό μοντέλο ασφάλειας για την περίπτωση του W-PLC δικτύου που επιτυγχάνει από άκρο-σε-άκρο εμπιστευτικότητα με χρήση του πρωτοκόλλου EAP (Extensible Authentication Protocol) που εκτελείται σε ένα κεντρικό RADIUS server. Η βασική ιδέα λειτουργίας του προτεινόμενου σχήματος είναι ότι κάθε διεπαφή ανεξαρτήτως τεχνολογίας θεωρείται ως δικτυακή διεπαφή, οπότε εμπίπτει στον κεντρικό έλεγχο ασφάλειας. Τέλος, για την επικοινωνία εκτός των τοπικών δικτύων, η χρήση της σύνδεσης VPN εξασφαλίζει ασφαλή επικοινωνία μέσω του Διαδικτύου, εγκαθιστώντας ένα νοητό κύκλωμα μέσα στο δίκτυο ευρείας ζώνης. Επισημαίνεται ότι η ασφάλεια είναι καίριο ζήτημα στα ευφυή δίκτυα αφού τα μετρητικά δεδομένα θεωρούνται προσωπικά δεδομένα και, ως εκ τούτου, πρέπει να μεταδίδονται με εμπιστευτικότητα.

3.4.4.4. Θέματα σχεδιασμού ευφρών δικτύων

Σημαντικά ερωτήματα που καθορίζουν την αρχιτεκτονική ενός W-PLC δικτύου είναι τα ακόλουθα:

- **Ποιό είναι το βασικό κίνητρο για την εγκατάσταση ενός W-PLC δικτύου;**
Πρέπει να αποσαφηνισθεί αν η εγκατάστασή του αφορά ευφυές ενεργειακό δίκτυο ή τηλεπικοινωνιακό δίκτυο πρόσβασης. Η απάντηση σε αυτήν την ερώτηση καθορίζει το αναμενόμενο κόστος αλλά και όφελος από την εγκατάσταση του δικτύου.
- **Ποιό είναι το αναμενόμενο πλήθος συνδρομητών και ποιές οι υπηρεσίες που θα εξυπηρετηθούν;**
Η απάντηση στη συγκεκριμένη ερώτηση καθορίζει τις απαιτήσεις χωρητικότητας στα διάφορα σημεία του δικτύου.
- **Πού θα εγκατασταθεί το W-PLC δίκτυο;**
Η δομή του δικτύου στην έκταση της εγκατάστασης καθορίζει την απόσταση των W-PLC κόμβων προκειμένου να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις QoS των υπηρεσιών καθώς και το πλήθος των ασύρματων ζεύξεων και, κατ' επέκταση, των PLC κυψελών που θα απαρτίζουν το W-PLC δίκτυο. Επιπλέον, η εισαγωγή ασύρματων ζεύξεων επιβάλλει τη μελέτη και αξιολόγηση του κατά πόσο είναι εφικτή η ασύρματη διασύνδεση γειτονικών κόμβων του δικτύου. Συνεπώς, χρειάζεται λεπτομερής αποτύπωση της τοπολογίας του δικτύου, της γεωγραφικής μορφολογίας της περιοχής αλλά και της κατανομής των χρηστών/συσκευών που θα εξυπηρετεί το W-PLC δίκτυο, προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η κάλυψη του δικτύου και το όφελος από την εκμετάλλευσή του.
- **Ποιό το τοπικό σημείο πρόσβασης του τηλεπικοινωνιακού παρόχου;**
Η συγκεκριμένη ερώτηση καθορίζει τον τρόπο διασύνδεσης του W-PLC δικτύου με το Διαδίκτυο και μπορεί να έχει σημαντική σχεδιαστική επίπτωση σε αγροτικές και αποκεντρωμένες περιοχές.

3.5 Περίληψη

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάστηκαν τα βασικά δομικά μέρη των σύγχρονων ευφυών δικτύων. Έμφαση δόθηκε στις απαιτήσεις των τηλεπικοινωνιακών δικτύων που συνεργάζονται προκειμένου να υποστηρίξουν την αμφίδρομη επικοινωνία μεταξύ των κόμβων και των διαφόρων οντοτήτων του ευφυούς δικτύου. Στη συνέχεια, εξετάστηκε το ρυθμιστικό πλαίσιο που διέπει την ανάπτυξη των ευφυών δικτύων και παρουσιάστηκαν τα κυριότερα Ευρωπαϊκά έργα υλοποίησης τηλεπικοινωνιακών δικτύων που αποσκοπούν στην εξυπηρέτηση αναγκών του ευφυούς δικτύου.

Στο δεύτερο μέρος του κεφαλαίου, παρουσιάστηκε η υλοποίηση ενός υβριδικού πιλοτικού W-PLC δικτύου που αναπτύχθηκε το 2007 στην περιοχή της Λάρισας και είχε ως στόχο την υποστήριξη της αμφίδρομης επικοινωνίας ενός ευφυούς δικτύου. Το πιλοτικό αυτό W-PLC δίκτυο υλοποίησε δίκτυα NAN, CPN, FAN, MWN και SN προσφέροντας ένα μεγάλο εύρος υπηρεσιών όπως ο έλεγχος ευφυών συσκευών, η απομακρυσμένη διαχείριση του ενεργειακού δικτύου, η επικοινωνία VoIP και η απομακρυσμένη ανάγνωση μετρητικών δεδομένων. Παράλληλα, το συγκεκριμένο πιλοτικό δίκτυο αποτέλεσε και τηλεπικοινωνιακό δίκτυο πρόσβασης για τον τοπικό πληθυσμό. Τέλος, εξετάστηκαν οι τρόποι αντιμετώπισης των προβλημάτων διαθεσιμότητας δικτύου και ικανοποίησης απαιτήσεων QoS και προέκυψαν βασικά σχεδιαστικά συμπεράσματα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4:	ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ TCP ΣΥΝΔΕΣΕΩΝ ΣΕ ΔΙΑΥΛΟΥΣ BB-PLC
--------------------	---

4.1. Εισαγωγή στο TCP και επισκόπηση διεθνούς βιβλιογραφίας
--

Ανεξαρτήτως των διαφορετικών απαιτήσεων καθυστέρησης που εμφανίζουν οι εφαρμογές ευφυούς δικτύου και της τεχνολογίας που χρησιμοποιείται για τη μετάδοση των SGC δεδομένων από και προς το δίκτυο, όλες οι SG εφαρμογές απαιτούν αξιόπιστη μετάδοση. Επομένως, το πρωτόκολλο TCP (Transmission Control Protocol) αναδεικνύεται ως το καταλληλότερο πρωτόκολλο μεταφοράς δεδομένων [Bau09], [Jam11], καίτοι η αυξημένη αξιοπιστία που προσφέρει προκαλεί παράλληλα αυξημένη καθυστέρηση μεταφοράς πακέτων [Sal12]. Διεξοδική ανάλυση του πρωτοκόλλου TCP, των βασικών μηχανισμών του και των διαφορετικών εκδοχών του που συναντώνται στη βιβλιογραφία πραγματοποιείται στη διδακτορική διατριβή [Δρο08].

Παρά την ανάγκη για υιοθέτηση του TCP στις επικοινωνίες ευφυών δικτύων, το TCP είναι σχεδιασμένο για συμβατικά ενσύρματα δίκτυα που χαρακτηρίζονται από χαμηλό BER, στα οποία οι απώλειες πακέτων οφείλονται αποκλειστικά σε συμφόρηση διαύλων και όχι σε παράγοντες που σχετίζονται με τις συνθήκες μετάδοσης. Η υποστήριξη των SG επικοινωνιών από πλήθος διαφορετικών τεχνολογιών διαφοροποιεί σημαντικά την επίδοση του TCP, η οποία σε ετερογενή περιβάλλοντα είναι σημαντικά χειρότερη από τη λειτουργία του στα παραδοσιακά ενσύρματα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα πρόσβασης.

Το πρόβλημα της επίδοσης του TCP σε ασύρματα δίκτυα έχει μελετηθεί εκτενώς στη βιβλιογραφία [Tia05]. Ανάλογα με το ασύρματο μέσο οι συγγραφείς προτείνουν τη

χρήση τροποποιημένων εκδοχών του TCP για να αντιμετωπίσουν την απώλεια πακέτων που οφείλεται είτε σε αυξημένο BER είτε σε μεγάλη καθυστέρηση μετάδοσης αλλά όχι σε συμφόρηση του δικτύου. Έτσι, οι συγγραφείς της [Aky01] προτείνουν τη χρήση του TCP-Reach ως καταλληλότερη εκδοχή του TCP που μπορεί να αντιμετωπίσει τη μεγάλη καθυστέρηση μετάδοσης και το υψηλό BER που συναντάται στις δορυφορικές επικοινωνίες, ενώ το Freeze-TCP [Gof00] φαίνεται καταλληλότερο να αντιμετωπίσει την κινητικότητα των χρηστών που συναντάται στα κυψελωτά δίκτυα. Τέλος, η εισαγωγή του ATCP που προτείνεται στην εργασία [Liu01] κρίνεται ότι μπορεί να αντιμετωπίσει αποτελεσματικότερα τις συχνές αλλαγές τοπολογίας και την παροδική απομόνωση τμημάτων του δικτύου που παρατηρούνται στα αδόμητα ασύρματα δίκτυα (Ad-Hoc networks).

Σε αντίθεση με τα ασύρματα δίκτυα, λίγες μελέτες έχουν εστιασθεί στη μελέτη της επίδοσης του TCP σε περιβάλλον μετάδοσης όπως αυτό του BB-PLC, το οποίο παρουσιάζει σημαντικές διαφορές από το ασύρματο μέσο μετάδοσης. Οι συγγραφείς της [Hor12] εντοπίζουν πειραματικά ότι η αύξηση των χρηστών που εξυπηρετούνται από μία BB-PLC κυψέλη οδηγεί σε μεγάλες καθυστερήσεις στη μετάδοση TCP. Στην εργασία [Olv12] εξετάζεται η επίδοση του TCP σε περιβάλλον IH BB-PLC δικτύων. Οι συγγραφείς επεμβαίνουν στο MAC πρωτόκολλο εισάγοντας ένα αλγόριθμο επιλογής της βέλτιστης διαδρομής, έτσι ώστε η κίνηση να διοχετεύεται στη διαδρομή που διαθέτει το μεγαλύτερο διαθέσιμο εύρος ζώνης. Η διαθεσιμότητα των ζεύξεων αποτιμάται σε πραγματικό χρόνο μέσω της μέτρησης του εύρους ζώνης που καταλαμβάνει η κάθε TCP σύνδεση, ενώ δεν επιχειρείται καμία άλλη τροποποίηση στον τρόπο λειτουργίας του TCP. Οι συγγραφείς της [Zar11] επιχειρούν τη δημιουργία μίας πλατφόρμας δοκιμών σε IH BB-PLC δίκτυα με CSMA/CA MAC και μετρούν τη μέγιστη διέλευση για TCP και UDP κίνηση. Οι συγγραφείς στις αναφορές [Miz09], [Mun12] προτείνουν την τροποποίηση του παραθύρου του TCP ώστε να ενημερώνεται ο κόμβος-αποστολέας ποιες PLC ζεύξεις είναι επιβαρυνμένες ώστε να μειώνει το ρυθμό αποστολής δεδομένων. Τα αποτελέσματα της εφαρμογής του μεταβλητού παραθύρου εξασφαλίζουν δικαιοσύνη μεταξύ των χρηστών του δικτύου και ελαχιστοποίηση του χρόνου παραμονής πακέτων στη μνήμη των κόμβων. Επισημαίνεται ότι η επίδοση του προτεινόμενου σχήματος μετρήθηκε σε περιβάλλον τοπικού δικτύου με δύο ενεργές TCP συνδέσεις. Επίσης, προτάσεις που τροποποιούν τους μηχανισμούς του TCP έχουν εφαρμογή σε αυτόνομα δίκτυα, αφού η πλειοψηφία του Διαδικτύου λειτουργεί με TCP Reno, γεγονός που

καθιστά δύσκολη την ενσωμάτωση δικτύων που λειτουργούν με άλλη έκδοση του TCP πρωτοκόλλου. Από την άλλη πλευρά, η ενσωμάτωση τεχνικών διαχωρισμού της σύνδεσης (TCP-split), ώστε να μπορεί να γίνει χρήση διαφορετικών εκδόσεων TCP σε διαφορετικά τμήματα του δικτύου, αφαιρούν από το TCP τον από άκρο-σε-άκρο (end-to-end) έλεγχο της σύνδεσης, που αποτελεί τον κύριο λόγο εφαρμογής του.

Τέλος, στη βιβλιογραφία συναντώνται και άλλες μελέτες της επίδοσης του TCP σε ευφυή δίκτυα που δεν περιλαμβάνουν BB-PLC μετάδοση. Οι συγγραφείς των [Kha10] και [Kha12] εντοπίζουν την προβληματική συμπεριφορά του TCP σε δίκτυα SGC χαμηλού ρυθμού μετάδοσης που χρησιμοποιούνται για την ανάγνωση των μετρητών. Η μελέτη τους εστιάζεται σε ένα ετερογενές δίκτυο που συλλέγει την κίνηση AMR μέσω ασύρματου NAN και τη μεταδίδει στον κεντρικό εξυπηρετητή μέσω ενσύρματου δικτύου κορμού. Στο ετερογενές αυτό δίκτυο, εντοπίζουν μέσω προσομοιώσεων ότι το TCP λανθασμένα μεταφράζει το χαμηλό ρυθμό μετάδοσης σε απώλειες πακέτων, γεγονός που οδηγεί σε ακόμα χαμηλότερους ρυθμούς μετάδοσης και περιττές αναμεταδόσεις πακέτων. Η λύση που προτείνεται είναι η εισαγωγή της λειτουργίας διαχωρισμού σύνδεσης και συγκέντρωσης των δεδομένων στη λειτουργία του TCP (Split and Aggregated TCP – SA-TCP), ώστε η κίνηση που παράγεται από τους μετρητές να μεταδίδεται σε δύο άλματα (hops), ένα από το μετρητή στο συγκεντρωτή και ένα δεύτερο από το συγκεντρωτή στον κεντρικό εξυπηρετητή. Παράλληλα, ο κόμβος που αποτελεί την πύλη εξόδου για την κίνηση του ευφυούς δικτύου διασυνδέοντας το BB-PLC δίκτυο με τον κεντρικό εξυπηρετητή πραγματοποιεί συγκέντρωση δεδομένων και αποστολή αυτών με χρήση μοναδικής TCP σύνδεσης. Επίσης, εξετάζεται το ισοζύγιο μεταξύ του πλήθους συγκεντρωτών και της επίδοσης του δικτύου και προσδιορίζεται το βέλτιστο πλήθος συγκεντρωτών.

Στη συνέχεια του κεφαλαίου, εξετάζονται οι σημαντικότεροι παράγοντες του BB-PLC διαύλου που δρουν επιβαρυντικά στην επίδοση και την αποτελεσματική λειτουργία του πρωτοκόλλου TCP. Παράλληλα, τροποποιούνται τα υφιστάμενα μοντέλα επίδοσης του πρωτοκόλλου TCP ώστε να προσαρμόζονται αποτελεσματικά στις ιδιαίτερες συνθήκες μετάδοσης μέσω του BB-PLC τηλεπικοινωνιακού διαύλου. Η χρήση του μοντέλου εφαρμόζεται σε επίπεδο BB-PLC κυψέλης, ενώ η ακρίβεια αυτού επαληθεύεται μέσω προσομοιώσεων. Η παρούσα μελέτη της επίδοσης του TCP σε δίκτυα BB-PLC αποτελεί μία προσπάθεια διατύπωσης μαθηματικού προτύπου περιγραφής της διέλευσης TCP στα BB-PLC δίκτυα στη βιβλιογραφία. Τα αποτελέσματα του παρόντος κεφαλαίου

αξιοποιούνται στο Κεφ.5, όπου τροποποιώντας τη λειτουργία της στατικής χρονοδρομολόγησης TDMA, προτείνεται αλγόριθμος βέλτιστης ανάθεσης των πόρων της BB-PLC κυψέλης.

4.2. Περιορισμοί επίδοσης του TCP σε δίκτυο BB-PLC

Στην παρούσα ενότητα εξετάζονται οι κύριοι περιορισμοί που τίθενται στην επίδοση του TCP λόγω των εγγενών χαρακτηριστικών της PLC μετάδοσης. Ακολουθεί σύνοψη των θεμελιωδών εννοιών και μηχανισμών που σχετίζονται με την επίδοση του TCP [Tan11], [For10] προκειμένου να αναλυθούν στη συνέχεια οι παράγοντες που εμποδίζουν τη σωστή λειτουργία του. Αναλυτική παρουσίαση των μηχανισμών του TCP παρουσιάζεται στη διατριβή [Δρο08].

Βασικός στόχος του TCP είναι η αξιόπιστη σύνδεση μεταξύ αποστολέα και παραλήπτη δεδομένων. Αναπόσπαστος μηχανισμός του TCP είναι η ύπαρξη επιβεβαιώσεων (Acknowledgements – Ack) που αποστέλλονται από τον παραλήπτη για κάθε επιτυχημένη λήψη πλαισίου. Συνήθως, οι επιβεβαιώσεις αποστέλλονται σωρευτικά (Cumulative acknowledgements), γεγονός που σημαίνει ότι μία επιβεβαίωση για συγκεκριμένο πακέτο επιβεβαιώνει και την επιτυχή λήψη όλων των πακέτων που έχουν αποσταλεί μέχρι εκείνη τη στιγμή. Το TCP ενσωματώνει τρεις βασικούς μηχανισμούς: (i) τον έλεγχο ροής, (ii) τον έλεγχο λαθών και (iii) τον έλεγχο συμφόρησης:

- i. **Έλεγχος ροής (flow control):** Στο TCP ο παραλήπτης μπορεί να δεχθεί το πολύ όσα bytes επιτρέπει το μέγεθος του ενταμιευτή του (buffer). Κάθε στιγμή, ο παραλήπτης γνωστοποιεί στον αποστολέα το πλήθος των πακέτων που μπορεί να αποστείλει χωρίς επιβεβαίωση. Το πλήθος αυτό αντιστοιχεί στο παράθυρο του δέκτη (receiver window – rwnd) και είναι ίσο με

$$rwnd = (buffer.size - buffer.queue) \quad (4.1)$$

Βασική ιδέα του ελέγχου ροής είναι ότι ο παραλήπτης δεν μπορεί να προσαρμόσει το μέγεθος του παραθύρου του, ενώ ο αποστολέας μπορεί να μειώσει ή αυξήσει το ρυθμό αποστολής δεδομένων σύμφωνα με την τιμή του rwnd που του γνωστοποιήθηκε από τον παραλήπτη.

- ii. **Έλεγχος λαθών (error control):** Ο έλεγχος λαθών πραγματοποιείται είτε με την ύπαρξη πεδίου ελέγχου checksum που ανιχνεύει κατεστραμμένα bytes στην επικεφαλίδα, είτε μέσω των επιβεβαιώσεων που ανιχνεύουν χαμένα bytes. Με την αποστολή ενός πακέτου ενεργοποιείται ο χρονομετρητής αναμεταδόσεων (Retransmission TimeOut – RTO), η εκπνοή του οποίου πριν τη λήψη της αντίστοιχης επιβεβαίωσης Ack σημαίνει απώλεια πακέτου. Σημειώνεται ότι κατά τη μελέτη των μηχανισμών του TCP θεωρείται ότι, λόγω του μικρού μήκους τους, τα πακέτα Ack δεν χάνονται ούτε καθυστερούν.
- iii. **Έλεγχος συμφόρησης (congestion control):** Πρόκειται για τον κύριο μηχανισμό του TCP που διασφαλίζει την αξιόπιστη μετάδοση δεδομένων και ελαχιστοποιεί τις απώλειες. Λόγω του ελέγχου συμφόρησης το πραγματικό παράθυρο του TCP επηρεάζεται τόσο από την ικανότητα του παραλήπτη να επεξεργάζεται την πληροφορία που λαμβάνει, όσο και από την προσπάθεια αποφυγής συμφόρησης. Δηλαδή ισχύει:

$$actual.window = \min(cwnd, rwnd) \quad (4.2)$$

όπου το $cwnd$ είναι το παράθυρο συμφόρησης. Το TCP αντιμετωπίζει τις συγκρούσεις μέσω ενός γενικού αλγορίθμου τριών φάσεων, οι οποίες καθορίζουν κατά διαφορετικό τρόπο το μέγεθος του $cwnd$. Η πρώτη φάση ονομάζεται αργή εκκίνηση (slow start) και η τιμή του $cwnd$ λαμβάνει αρχική τιμή ίση προς το μέγιστο μέγεθος τεμαχίου TCP που χρησιμοποιείται στη σύνδεση (Maximum Segment Size – MSS). Στη συνέχεια της πρώτης φάσης, το $cwnd$ αυξάνεται εκθετικά, αφού διπλασιάζεται με κάθε επιτυχημένη αποστολή μέχρι να φθάσει μία προκαθορισμένη τιμή κατώφλιου, αυτήν του κατώφλιου αργής εκκίνησης ($ssthresh$). Στη συνέχεια ακολουθεί η δεύτερη φάση, αυτή της αποφυγής συμφόρησης (congestion avoidance), όπου το $cwnd$, το οποίο στην αρχή της (δεύτερης) φάσης είναι ίσο με το κατώφλι $ssthresh$, αυξάνει πλέον κατά ένα τεμάχιο με κάθε επιβεβαίωση επιτυχημένης αποστολής. Ο γενικός αλγόριθμος αποφυγής συγκρούσεων εισέρχεται στην τρίτη φάση, αυτή της ανίχνευσης σύγκρουσης (congestion detection), όταν εντοπισθεί χαμένο πακέτο. Στην περίπτωση αυτή, το παράθυρο επιστρέφει στην αποστολή ενός τεμαχίου και το κατώφλι $ssthresh$ υποδιπλασιάζεται. Παραλλαγή του γενικού αλγορίθμου αποτελεί η εισαγωγή και τέταρτης φάσης, αυτής της ταχείας αναμεταδόσης (fast retransmission), η οποία χρησιμοποιείται σε αρκετές σύγχρονες υλοποιήσεις του TCP όπως το TCP Reno [Lin98]. Στην περίπτωση αυτή, μετά τη λήψη τριών επιτυχημένων Ack, το

cwnd επιστρέφει στην τιμή *ssth* και στη φάση αποφυγής συμφόρησης. Η συγκεκριμένη φάση έχει εισαχθεί προς αντιμετώπιση της καταγιστικής συμπεριφοράς του Διαδικτύου όπου τα λάθη συμβαίνουν κατά καταιγισμούς. Προς τούτο, η επιβεβαίωση τριών επιτυχημένων παραδόσεων πακέτων σημαίνει συνήθως την επιστροφή του δικτύου σε σταθερή κατάσταση.

Στη συνέχεια της παρούσας ενότητας, παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του PLC μέσου που επηρεάζουν την απόδοση των μηχανισμών του TCP και το καθιστούν αναποτελεσματικό σε δίκτυα μεγάλης και μεταβλητής καθυστέρησης που εξυπηρετούν πολλές ταυτόχρονες ροές TCP (cross-traffic).

4.2.1. Υψηλή τιμή BER, θόρυβος και παρεμβολές

Η συμπεριφορά του TCP σε δίκτυα που παρουσιάζουν υψηλό ποσοστό απωλειών έχει μελετηθεί ευρέως στη διεθνή βιβλιογραφία [Bal97], [Kum98]. Ο κύριος περιοριστικός παράγοντας της απόδοσης του TCP στα δίκτυα αυτά είναι ο αλγόριθμος αποφυγής συμφόρησης του TCP. Σύμφωνα με το συγκεκριμένο αλγόριθμο, και επειδή το TCP δεν είναι σε θέση να διακρίνει αν η απώλεια ενός πακέτου οφείλεται σε λάθη στο δίαυλο ή σε ενδεχόμενη συμφόρηση στο δίκτυο, κάθε απώλεια πακέτου μεταφράζεται από το TCP ως ένδειξη συμφόρησης. Επομένως, η εκπνοή του μετρητή RTO πυροδοτεί τη μείωση του ρυθμού μετάδοσης πακέτων αφού το παράθυρο υποδιπλασιάζεται και το TCP επανέρχεται στη φάση αργής εκκίνησης.

Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενα κεφάλαια, τα δίκτυα PLC είναι ανομοιογενή ως προς την ποιότητα των ζεύξεων που τα απαρτίζουν. Όλες πλήττονται από το θόρυβο υποβάθρου ενώ ορισμένες PLC ζεύξεις μπορεί να είναι περισσότερο επιβαρυνμένες από την παρουσία θορύβου στενής ζώνης. . Επίσης, σε περιβάλλον XT η ύπαρξη παλμικού θορύβου μπορεί να προκαλέσει απρόβλεπτες απώλειες πακέτων. Το ιδιαίτερα υψηλό BER που συνεπάγεται η παρουσία θορύβου αλλά και η παρουσία παρεμβολών από αδειοδοτημένες ασύρματες υπηρεσίες στη ζώνη 1-100MHz είναι πιθανό να επηρεάσουν την από άκρο-σε-άκρο σύνδεση του TCP οδηγώντας σε απώλειες δεδομένων που λανθασμένα ερμηνεύονται από το TCP ως ένδειξη συμφόρησης.

4.2.2. Υψηλή τιμή γινομένου καθυστέρησης-εύρους ζώνης

Μία βασική παράμετρος που περιγράφει την επίδοση ενός δικτύου είναι το γινόμενο εύρους ζώνης-καθυστέρησης (Bandwidth-Delay Product – BDP). Το BDP καθορίζει

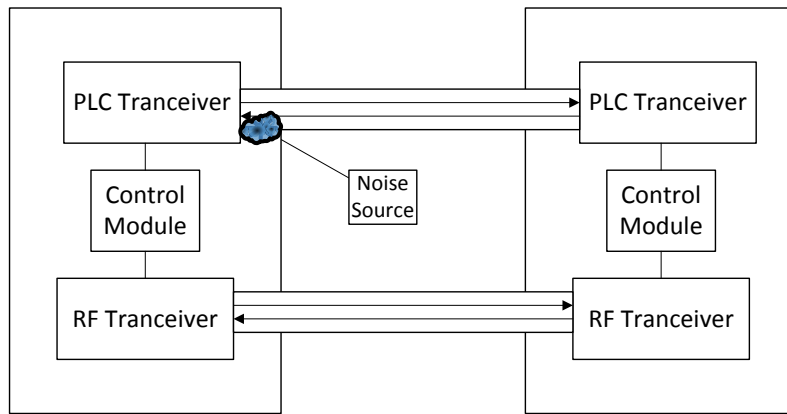
πόσα δεδομένα πρέπει να βρίσκονται κάθε στιγμή υπό μετάδοση ώστε να μεγιστοποιείται η χρησιμοποίηση του διαύλου, δηλαδή να αξιοποιείται όλη η χωρητικότητα αυτού. Στο ανωτέρω γινόμενο το εύρος ζώνης είναι ίσο με τη χωρητικότητα του διαύλου, ενώ η καθυστέρηση αντιστοιχεί στο χρόνο RTT (round trip time), δηλαδή στο χρόνο που μεσολαβεί μεταξύ της αποστολής ενός πακέτου και λήψης της αντίστοιχης Ack για το πακέτο αυτό. Ο PLC διάυλος χαρακτηρίζεται από θεωρητικά μεγάλη χωρητικότητα σε μη επιβαρυσμένες ζεύξεις [Laz10a] ενώ η καθυστέρηση, αν και σχετικά μικρή στο εσωτερικό μιας PLC κυψέλης, μπορεί να λάβει αρκετά μεγάλη τιμή σε ένα δίκτυο PLC μεγάλης κλίμακας. Υψηλή τιμή του BDP καθιστά δύσκολη την πλήρη αξιοποίηση του διαύλου, ιδίως όταν αυτό περιλαμβάνει ζεύξεις υψηλού BER.

4.2.3. Περιορισμένο εύρος ζώνης

Όπως αναφέρθηκε στο Κεφ.3, οι κόμβοι ενός PLC δικτύου αποστέλλουν την κίνηση που παράγουν στην πύλη εξόδου του δικτύου μέσω ενός συνόλου ζεύξεων και κυψελών. Η παρουσία έστω και μίας κακής ζεύξης στη διαδρομή που συνδέει τον κόμβο με την πύλη εξόδου οδηγεί σε συμφόρηση πακέτων κατά μήκος της κακής ζεύξης και υποχρησιμοποίησης όλων των ζεύξεων που προηγούνται της κακής ζεύξης. Το συγκεκριμένο ζήτημα υποβαθμίζει σημαντικά την επίδοση σε ένα PLC δίκτυο αν και δεν σχετίζεται άμεσα με το TCP. Στο Κεφ.5 εξετάζεται το ζήτημα του περιορισμένου εύρους ζώνης λόγω της παρουσίας κακών ζεύξεων και προτείνονται λύσεις, τόσο για τη λειτουργία του χρονοπρογραμματισμού όσο και για τη σχεδίαση του PLC δικτύου και το σχηματισμό των κυψελών.

4.2.4. Ασυμμετρία δικτύου

Σύμφωνα με τους συγγραφείς της ευρεσιτεχνίας [Sun13], ο PLC διάυλος εμφανίζει χαρακτηριστικά ασύμμετρου δικτύου, δηλαδή οι συνθήκες μετάδοσης στην κάτω ζεύξη μπορεί να είναι πολύ διαφορετικές σε σχέση με αυτές της άνω ζεύξης. Συγκεκριμένα, είναι πιθανό μία εκ των δύο ζεύξεων να χαρακτηρίζεται από υψηλότερο BER λόγω δυσμενών φαινομένων διάδοσης τοπικού χαρακτήρα. Στο Σχ.4.1 παρουσιάζεται η επικοινωνία μεταξύ δύο υβριδικών κόμβων WiFi-PLC. Παρατηρείται ότι η πηγή θορύβου κοντά στην είσοδο του πρώτου κόμβου μπορεί να αποτρέψει την επιτυχημένη λήψη δεδομένων από τον κόμβο A, ενώ να μην έχει επίδραση στην αποστολή σημάτων από τον κόμβο A προς τον κόμβο B.



Σχήμα 4.1: Επικοινωνία υβριδικών κόμβων WiFi-PLC μέσω ασύμμετρου PLC διαδύλου

4.3. Μοντέλα επίδοσης του TCP

4.3.1. Ορισμοί και υποθέσεις

Στην ανάλυση που ακολουθεί εξετάζεται η επίδοση του TCP όταν χρησιμοποιείται ως πρωτόκολλο μεταφοράς για την κίνηση που παράγεται από ευφυείς συσκευές. Οι TCP συνδέσεις που σχηματίζουν οι ευφυείς συσκευές έχουν μακρά διάρκεια (long-lived TCP connections) αφού είναι συνεχώς ενεργοποιημένες για την αποστολή των δεδομένων κατάστασης των ευφύων συσκευών. Παράλληλα, στη συνέχεια της ανάλυσης γίνεται η υπόθεση ότι σε ένα SG τηλεπικοινωνιακό δίκτυο (SG Communication Network – SGN) που εξυπηρετεί επικοινωνίες ευφύων κόμβων δεν εμφανίζονται συνδέσεις TCP μικρής διάρκειας, δηλαδή δεν υπάρχουν κόμβοι οι οποίοι συνδέονται και αποσυνδέονται δυναμικά ύστερα από μικρή διάρκεια. Οι δύο τύποι συνδέσεων μικρής και μεγάλης διάρκειας είναι γνωστοί στη βιβλιογραφία ως *mice* και *elephants* αντίστοιχα, ενώ τα χαρακτηριστικά τους έχουν μελετηθεί ευρέως [Mar04].

Ένα SGN υλοποιείται μέσω κατάλληλα τοποθετημένων BB-PLC κόμβων οι οποίοι συλλέγουν την κίνηση που παράγεται από τις ευφυείς συσκευές. Οι ευφυείς συσκευές συνδέονται με τον κόμβο BB-PLC από τον οποίο εξυπηρετούνται μέσω ασύρματης διεπαφής, σχηματίζοντας με αυτό τον τρόπο ένα ετερογενές δίκτυο που αποτελείται τόσο από ενσύρματες όσο και από ασύρματες ζεύξεις. Κατά την παρούσα μελέτη εξετάζεται η επίδοση της TCP διέλευσης στο ενσύρματο BB-PLC μέσο και όχι στο ασύρματο μέσο για τους εξής λόγους:

- Η επίδραση του ασύρματου μέσου στην επίδοση του TCP έχει αναλυθεί εκτενώς στη βιβλιογραφία και έχουν προταθεί λύσεις για κάθε ασύρματη τεχνολογία [Bal97], [Sha03], [Lak97], [Hai02]. Το τρέχον εδάφιο εστιάζεται στη διερεύνηση της επίδρασης του BB-PLC μέσου στην επίδοση του TCP.
- Οι ασύρματες ζεύξεις που διασυνδέουν ευφυείς συσκευές με τους ενδιάμεσους κόμβους συλλογής πληροφοριών είναι συνήθως μικρής απόστασης, LOS. Σε συνδυασμό με τη χρήση κατάλληλων κεραιών, οι απώλειες που παρατηρούνται σε ασύρματες ζεύξεις τέτοιου τύπου είναι πολύ μικρές συγκριτικά με τις συναφείς ενσύρματες ζεύξεις που αποτελούν την στενωπό επίδοσης του TCP.

Στη συνέχεια της ανάλυσης, εξετάζεται η TCP διέλευση σε SGN μιας κυψέλης. Συγκεκριμένα, η κυψέλη περιλαμβάνει τυπικούς κόμβους και κόμβο HE, ο οποίος έχει το ρόλο συντονιστή (master) και καθορίζει την πρόσβαση των υπόλοιπων κόμβων της κυψέλης στο φυσικό μέσο ελέγχοντας τη διάρκεια και το πλήθος των χρονοσχισμών που ανατίθενται στους κόμβους. Σημειώνεται ότι κάθε κόμβος μπορεί να αναμεταδίδει το PLC σήμα αλλά και να διασυνδέει τις προσαρτημένες σε αυτόν ευφυείς συσκευές, έχοντας ταυτόχρονα το ρόλο TDR και CPE συσκευής. Η επικοινωνία μεταξύ των κόμβων ενός SGN πραγματοποιείται με χρήση πρωτοκόλλου MAC με σκυτάλη (Token-based), όπως ορίζει το πρότυπο OPERA [OPERA1], [OPERA2]. Το συγκεκριμένο MAC πρωτόκολλο αντιστοιχεί στην λειτουργία DVTP του IEEE 1901 που εξετάστηκε στο Κεφ.2 και επιλέχθηκε προκειμένου να υπάρχει συμβατότητα με την πειραματική λειτουργία του SGN δικτύου της Λάρισας από όπου και αντλήθηκαν μετρήσεις για τη διεξαγωγή των προσομοιώσεων που επαληθεύουν το προτεινόμενο μοντέλο. Σημειώνεται ότι υπάρχει συμβατότητα μεταξύ του Token-based πρωτοκόλλου και του πρωτοκόλλου TDMA που χρησιμοποιείται από τα μεταγενέστερα πρότυπα IEEE 1901 και ITU-T G.hn και καθορίζει τη χωρίς ανταγωνισμό πρόσβαση των ευφυών συσκευών στο BB-PLC μέσο.

4.3.2. Υπολογισμός της TCP διέλευσης

Στην παρούσα ενότητα πραγματοποιείται συνοπτική παρουσίαση των κυριότερων προσεγγίσεων που απαντώνται στη βιβλιογραφία για την εκτίμηση της διέλευσης των TCP συνδέσεων. Λεπτομερέστερη ανάλυση των μοντέλων επίδοσης του TCP υπάρχει στη διδακτορική διατριβή [Δρο08].

Οι συγγραφείς της [Mat97] εισάγουν μία προσεγγιστική σχέση της διέλευσης, γνωστή ως *square root formula*, σύμφωνα με την οποία η TCP διέλευση είναι ίση με

$$Tg = \frac{MSS}{RTT} \sqrt{\frac{3}{2PLR}} \quad (4.3)$$

όπου το *MSS* (Maximum Segment Size) αντιστοιχεί στο μέγιστο μήκος πακέτου που μπορεί να αποσταλεί, ο χρόνος *RTT* είναι ίσος με τη χρονική διάρκεια που μεσολαβεί από την αποστολή ενός πακέτου μέχρι τη λήψη της αντίστοιχης επιβεβαίωσης (Ack), και *PLR* είναι το ποσοστό απωλειών πακέτων στην περίπτωση μη συσχετισμένων λαθών. Επισημαίνεται ότι η (4.3) δεν λαμβάνει υπόψη την επίδραση του μέγιστου παραθύρου ούτε το χρόνο εκπνοής (RTO).

Μία ακριβέστερη προσέγγιση της διέλευσης για δίκτυα που παρουσιάζουν υψηλότερο ποσοστό απωλειών παρέχεται από τους συγγραφείς της [Pad00] και [Cel05], οι οποίοι αποτιμούν τη διέλευση των TCP συνδέσεων εισάγοντας τον όρο *goodput*, ο οποίος εκφράζει τον από άκρο-σε-άκρο ρυθμό μετάδοσης μιας TCP σύνδεσης. Στην περίπτωση αυτή, λαμβάνεται υπόψη ο χρόνος RTO και η διέλευση μιας TCP σύνδεσης εκφράζεται μέσω της σχέσης

$$Tg = \frac{1 - q}{\frac{\mu}{n} \left[RTT \sqrt{\frac{2bPLR}{3}} + T_0 \min \left[1, 3 \sqrt{\frac{3bPLR}{8}} \right] PLR (1 + 32PLR^2) \right]} \quad (4.4)$$

όπου μ είναι το μέγιστο εύρος ζώνης που μπορεί να υποστηρίξει η ζεύξη μεταξύ δύο κόμβων εκφρασμένο σε πλαίσια/s, n είναι το πλήθος των ενεργών συνδέσεων TCP, b είναι το πλήθος πακέτων που επαληθεύονται με κάθε Ack και T_0 είναι ο χρόνος RTO.

Στην περίπτωση όπου λαμβάνεται υπόψη ο περιορισμός της διέλευσης που τίθεται από την ύπαρξη του μέγιστου παραθύρου, η διέλευση εκφράζεται μέσω της σχέσης [Pad00]

$$Tg = \min \left(\frac{W_m}{RTT}, \frac{1}{RTT \sqrt{\frac{2bPLR}{3}} + T_0 \min \left[1, 3 \sqrt{\frac{3bPLR}{8}} \right] PLR (1 + 32PLR^2)} \right) \quad (4.5)$$

όπου το W_m αντιστοιχεί στο μέγιστο εύρος του παραθύρου. Σημειώνεται ότι η (4.4) εμφανίζεται από τους συγγραφείς της [Cel06] ως καλύτερη προσέγγιση της (4.5). Και οι

δύο σχέσεις παρέχουν τη δυνατότητα ακριβούς υπολογισμού της διέλευσης των συνδέσεων TCP ακόμα και για υψηλές τιμές του q .

Οι συγγραφείς της [Bar02] επεκτείνουν την (4.3) λαμβάνοντας υπόψη τη χωρητικότητα του διαύλου και καταλήγουν στον υπολογισμό της διέλευσης για διαύλους με περιορισμένο εύρος ζώνης μέσω της σχέσης

$$Tg = \min \left\{ \frac{1}{RTT} \sqrt{\frac{3}{2bPLR}}, \mu \right\} \quad (4.6)$$

Στην (4.4) το μ είναι το εύρος ζώνης που εμφανίζει η στενωπός της από-άκρο-σε-άκρο TCP σύνδεσης (bottleneck) κατά την από άκρο-σε-άκρο ζεύξη της TCP σύνδεσης. Τέλος, στην περίπτωση όπου εφαρμόζεται σχήμα κωδικοποίησης FEC (Forward Error Control) με ρυθμό κώδικα k/n , μειώνεται το ποσοστό απωλειών πακέτων ενώ, παράλληλα, δεσμεύεται περισσότερο εύρος ζώνης. Σε αυτή την περίπτωση, η (4.6) γράφεται:

$$Tg = \min \left\{ \frac{1}{RTT} \sqrt{\frac{3}{2b}} T(k/n), (k/n)\mu \right\} \quad (4.7)$$

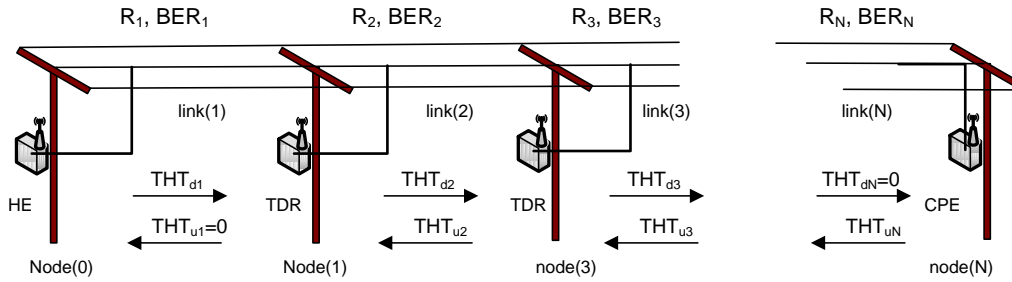
όπου $T(k/n)$ είναι το μέσος πλήθος πακέτων που μεταδίδονται χωρίς λάθη μεταξύ δύο απωλειών ως συνάρτηση του χρησιμοποιούμενου ρυθμού κώδικα. Σε περίπτωση μη συσχετισμένων λαθών ισχύει $T(k/n) = 1/p(k, n)$ όπου το $p(k, n)$ εκφράζει το ποσοστό απωλειών πλαισίων ύστερα από την εφαρμογή σχήματος FEC με ρυθμό κωδικοποίησης k/n και προσδιορίζεται από τη σχέση [Bar02]:

$$p(k, n) = \sum_{i=0}^{k-1} \binom{n}{i} (1-q)^i q^{n-i} \quad (4.8)$$

όπου το q αντιστοιχεί στην πιθανότητα να χαθεί κατά τη μετάδοση ένα ψηφίο του TCP πακέτου.

4.4. Προσδιορισμός της διέλευσης TCP σε BB-PLC δίκτυα

Στην παρούσα ενότητα προσδιορίζεται η διέλευση των TCP συνδέσεων λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς που θέτει το φυσικό μέσο PLC και η δομή της PLC κυψέλης.



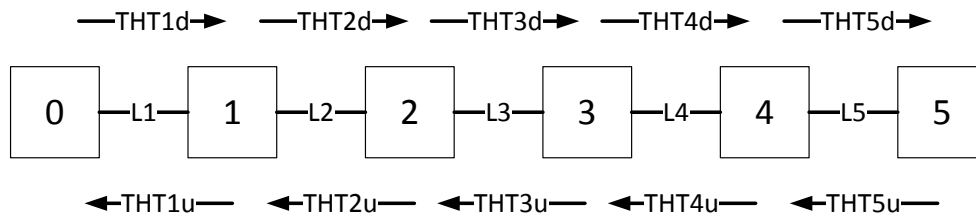
Σχήμα 4.2: Δομή μιας PLC κυψέλης

Για τον υπολογισμό της διέλευσης χρησιμοποιούνται οι προσεγγιστικές σχέσεις (4.6) και (4.7) υπό τις ακόλουθες υποθέσεις:

1. Ο ρυθμός κώδικα έχει επιλεγεί έτσι ώστε το PLR να είναι μικρότερο του 1%. Σε αντίθετη περίπτωση οι σχέσεις (4.6) και (4.7) δεν οδηγούν σε ορθά αποτελέσματα [Pad02], [Dro08]. Για την εξασφάλιση αποδεκτών τιμών του PLR σε κάθε κόμβο απαιτείται η χρήση (i) ανθεκτικών σχημάτων διαμόρφωσης και (ii) κωδικοποίησης FEC χαμηλού ρυθμού κώδικα, τα οποία, όμως, περιορίζουν την αξιοποίηση του εύρους ζώνης των TCP συνδέσεων. Στο Κεφ.5 εξετάζεται το ισοζύγιο (trade-off) μεταξύ PLR και διέλευσης προς εξασφάλιση των απαιτήσεων QoS κάθε υπηρεσίας.
2. Τα πακέτα επιβεβαίωσης Ack μεταδίδονται χωρίς λάθη. Η συγκεκριμένη υπόθεση θεωρείται, γενικά, αποδεκτή για την ανάλυση της διέλευσης των TCP συνδέσεων, αφού το μικρό μέγεθος των πακέτων επιβεβαίωσης ελαχιστοποιεί την αντίστοιχη πιθανότητα απώλειας.
3. Στην ανάλυση που ακολουθεί έχει υποτεθεί ότι το μέγεθος των ενταμιευτών των ενδιάμεσων κόμβων BB-PLC είναι σε θέση να αποθηκεύσει όλη την κίνηση που παράγεται από τις ευφυείς συσκευές που εξυπηρετούνται. Δηλαδή, γίνεται η υπόθεση ότι δεν υπάρχουν απώλειες πακέτων λόγω υπερχειλίσης των ενταμιευτών.

4.4.1. Περιγραφή του MAC πρωτοκόλλου

Όπως αναλύθηκε στα Κεφ.2 και 3, η δομή μιας PLC κυψέλης είναι αυτή του Σχ.4.2. Συνήθως, ο κόμβος που βρίσκεται πλησιέστερα στο δίκτυο κορμού και αναλαμβάνει τη διασύνδεση της PLC κυψέλης με αυτό αποτελεί τον HE της κυψέλης. Παράλληλα, ο πρώτος αυτός κόμβος αποτελεί και τη ρίζα του επικοινωνιακού δένδρου που σχηματίζει μία PLC κυψέλη. Περισσότερα για τη δενδρική δομή των κυψελών αναφέρονται στο Κεφ.6. Ο HE είναι υπεύθυνος για την κατανομή των πόρων στο χρονικό διάστημα



Σχήμα 4.3: Δομή PLC κυψέλης που αποτελείται από 6 BB-PLC κόμβους

πρόσβασης χωρίς ανταγωνισμό (Contention Free Period – CFP) του IEEE 1901. Η διαδικασία κατανομής πόρων στο token-based MAC σχήμα που ακολουθείται αφορά την κατανομή του μέγιστου χρόνου κατά τον οποίο κάθε κόμβος n_i μπορεί να μεταδώσει (token holding time – THT_i).

Όπως προκύπτει και από το Σχ.4.2, επιτρέπεται τόσο η μετάδοση κάτω ζεύξης (downlink) με φορά από τον HE προς τους υπόλοιπους κόμβους της κυψέλης όσο και η μετάδοση άνω ζεύξης (uplink) με την αντίστροφη φορά. Η σκυτάλη μεταδίδεται από τον πρώτο κόμβο, τον HE, ακολουθώντας την κατεύθυνση μετάδοσης κάτω ζεύξης και φθάνει μέχρι τον τελευταίο – υπό την έννοια της δενδρικής δομής της PLC κυψέλης – κόμβο της κυψέλης. Όταν ολοκληρωθούν οι μεταδόσεις κάτω ζεύξης, αρχίζουν οι μεταδόσεις άνω ζεύξης, όπου πρώτος μεταδίδει ο τελευταίος κόμβος μέχρι η σκυτάλη να φθάσει ξανά στον πρώτο κόμβο της κυψέλης. Με την επιστροφή της σκυτάλης στον πρώτο κόμβο ολοκληρώνεται ένας πλήρης κύκλος μετάδοσης (total cycle time – TCT). Με τη λήψη της σκυτάλης, κάθε κόμβος μπορεί να μεταδώσει στους γειτονικούς κόμβους του ή προς την άνω ή την κάτω κατεύθυνση. Κάθε κόμβος n_i διατηρεί τη σκυτάλη από την έναρξη του THT_i μέχρι ή να εξαντληθούν τα προς μετάδοση πακέτα του ή να εκπνεύσει το THT_i . Σημειώνεται ότι σε λειτουργία του δικτύου κοντά στον κορεσμό, οπότε παρατηρείται συμφόρηση, οι κόμβοι μεταδίδουν για όλο το διάστημα που ορίζεται από το αντίστοιχο THT . Στην ανάλυση που ακολουθεί καθώς και στο πρόβλημα βελτιστοποίησης του χρονοπρογραμματισμού που εξετάζεται στο Κεφ.5, το δίκτυο λειτουργεί σε συνθήκες κορεσμού, συνθήκες, άλλωστε, υπό τις οποίες έχει νόημα η εφαρμογή ενός σχήματος βέλτιστης κατανομής πόρων.

Υποθέτοντας TCP συνδέσεις μακράς διάρκειας μεταξύ των κόμβων της υποθετικής PLC κυψέλης του Σχ.4.3, το RTT της σύνδεσης με αποστολέα τον κόμβο n_1 και παραλήπτη τον κόμβο n_3 είναι ίσο με:

$$RTT_{13} = THT_{2d} + THT_{3d} + THT_{4d} + THT_{5d} + THT_{5u} + THT_{4u} + THT_{3u} + THT_{2u} \quad (4.9)$$

Φαίνεται ότι η προαναφερθείσα σύνδεση ακολουθεί τη φορά μετάδοσης κάτω ζεύξης και είναι ανεξάρτητη από τον προορισμό της κίνησης. Δηλαδή προκύπτει ότι $RTT_{12} = RTT_{13} = RTT_{14} = RTT_{15}$. Αντίστοιχα συμπεράσματα αντλούνται και από τη μελέτη της κίνησης κατά τη φορά άνω ζεύξης. Στην περίπτωση όπου ο κόμβος n_3 είναι η πηγή της κίνησης και ο κόμβος n_1 ο παραλήπτης, το RTT προκύπτει από τη σχέση:

$$RTT_{31} = THT_{3u} + THT_{2u} + THT_{1u} + THT_{1d} + THT_{2d} + THT_{3d} \quad (4.10)$$

Βάσει της προηγούμενης ανάλυσης, η γενική σχέση υπολογισμού του RTT στην περίπτωση N κόμβων και με πηγή κίνησης τον κόμβο n_i και παραλήπτη τον κόμβο n_j δίνεται προκύπτει από τη σχέση:

$$RTT_i = \begin{cases} \sum_{k=i}^N (THT_{kd} + THT_{ku}), & \text{για } i < j \text{ για } \textit{downlink} \text{ μετάδοση} \\ \sum_{k=1}^i (THT_{kd} + THT_{ku}), & \text{για } i > j \text{ για } \textit{uplink} \text{ μετάδοση} \end{cases} \quad (4.11)$$

Η σκυτάλη ανατίθεται κάθε φορά για την κατάληψη κάποιας ζεύξης. Επομένως, η αρίθμηση των δεικτών των THT υποδηλώνει τη ζεύξη που χρησιμοποιείται για μετάδοση κατά την THT χρονοσχισμή. Παρόμοια λογική ακολουθείται και από το πρότυπο IEEE 1901 όπου η χρονοσχισμή ανατίθεται για χρήση συγκεκριμένης ζεύξης και όχι για τη μετάδοση συγκεκριμένου κόμβου.

Από τον προσδιορισμό του RTT και τον τρόπο λειτουργίας BB-PLC δικτύων μορφής κυψέλης προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Όταν το δίκτυο BB-PLC (κυψέλη PLC) χρησιμοποιείται ως τηλεπικοινωνιακό δίκτυο ευρυζωνικής πρόσβασης στο Διαδίκτυο, υπάρχει κυρίως μετάδοση κάτω ζεύξης, δηλαδή πηγή της κίνησης είναι ο HE. Αυτό ισχύει και για εφαρμογές ευφυούς δικτύου που λαμβάνουν δεδομένα από τον πάροχο ηλεκτρικής ενέργειας όπως είναι οι εφαρμογές DSM. Στις περιπτώσεις αυτές, το RTT είναι σταθερό, ανεξαρτήτως του κόμβου προορισμού, δηλαδή του κόμβου μέσω του οποίου διασυνδέονται οι ελεγχόμενες ευφυείς συσκευές στο BB-PLC δίκτυο.

- Όταν το δίκτυο BB-PLC (κυψέλη PLC) χρησιμοποιείται για τη μετάδοση δεδομένων που συλλέγονται από μετρητές και αισθητήρες και αποστέλλονται στο δίκτυο κορμού, υπάρχει κυρίως μετάδοση άνω ζεύξης, δηλαδή πηγή της κίνησης θεωρείται ο κόμβος BB-PLC μέσω του οποίου διασυνδέονται οι μετρητές στο SGN. Βάσει της προηγούμενης ανάλυσης κατά τη λειτουργία αυτή μιας PLC κυψέλης οι διάφορες μετρητικές οντότητες χαρακτηρίζονται από διαφορετικό RTT. Γενικώς, οι συσκευές που εξυπηρετούνται από κόμβους που βρίσκονται πλησιέστερα στον HE, δηλαδή απέχουν κατά λιγότερα άλματα από τον HE, χαρακτηρίζονται από μικρότερο RTT, οπότε είναι πιθανότερο να μονοπωλούν εκείνες τη μετάδοση στον κοινό δίαυλο και να καταλαμβάνουν μεγαλύτερο εύρος ζώνης. Επομένως, σε μεταδόσεις άνω ζεύξης (measurement ή data reporting) προκύπτει σημαντικό ζήτημα ισοτιμίας μεταξύ του εύρους ζώνης που καταλαμβάνουν οι διάφορες TCP συνδέσεις που εξυπηρετεί το BB-PLC δίκτυο, ζήτημα το οποίο εξετάζεται στο Κεφ.5
- Σημειώνεται ότι ζήτημα δικαιοσύνης εμφανίζεται και στην περίπτωση όπου το δίκτυο λειτουργεί για τη μετάδοση κάτω ζεύξης. Στην περίπτωση αυτή, η έλλειψη δικαιοσύνης οφείλεται όχι στη διαφοροποίηση του RTT, αφού αυτό παραμένει σταθερό, αλλά στη μεταβλητότητα του ποσοστού απωλειών. Έτσι, όσο αυξάνεται το πλήθος ζεύξεων που μεσολαβούν μεταξύ HE και παραλήπτη τόσο αυξάνεται και η πιθανότητα να χαθεί ένα TCP πακέτο κατά τη μετάδοση.
- Τέλος, κατά τη λειτουργία ορισμένων υπηρεσιών ευφυών δικτύων, όπως είναι η χρήση του SGN ως WMN (Workforce Mobile Network), δηλαδή ως δικτύου επικοινωνιών του προσωπικού συντήρησης του δικτύου διανομής, είναι ενδεχόμενο να προκύψει απευθείας επικοινωνία μεταξύ κόμβων BB-PLC, χωρίς τη μεσολάβηση του HE. Στην περίπτωση αυτή, το RTT είναι μεταβλητό και η τιμή του εξαρτάται από τη σχετική θέση των κόμβων μέσω των οποίων διασυνδέονται στο SGN οι συσκευές που επικοινωνούν.

4.4.2. Προσδιορισμός TCP διέλευσης των διαύλων BB-PLC

Εφαρμόζοντας την (4.7) η διέλευση των TCP συνδέσεων σε ενσύρματα δίκτυα με περιορισμένη χωρητικότητα προσδιορίζεται με εφαρμογή της σχέσης

$$Tg = \min \left\{ \frac{1}{RTT} \sqrt{\frac{3}{2b} \frac{1}{PLR}}, B \right\} \quad (4.12)$$

Σημειώνεται ότι τόσο το PLR όσο και το εύρος ζώνης B που ανατίθεται σε κάθε σύνδεση εξαρτώνται από το ρυθμό του κώδικα που χρησιμοποιείται. Αυτό συμβαίνει γιατί με την εφαρμογή FEC μειώνεται το ποσοστό απωλειών ενώ, παράλληλα, δεσμεύεται μεγαλύτερο εύρος ζώνης.

Στη συνέχεια, θα προσδιορισθεί η διέλευση μίας TCP σύνδεσης είτε για την περίπτωση όπου το SGN χρησιμοποιείται αποκλειστικά ως δίκτυο ευρυζωνικής πρόσβασης (αποστολή κίνησης κατά την κάτω ζεύξη) είτε για την περίπτωση όπου το SGN συλλέγει τα δεδομένα που παράγονται από ευφρείς διατάξεις και μετρητές (αποστολή κίνησης κατά την άνω ζεύξη).

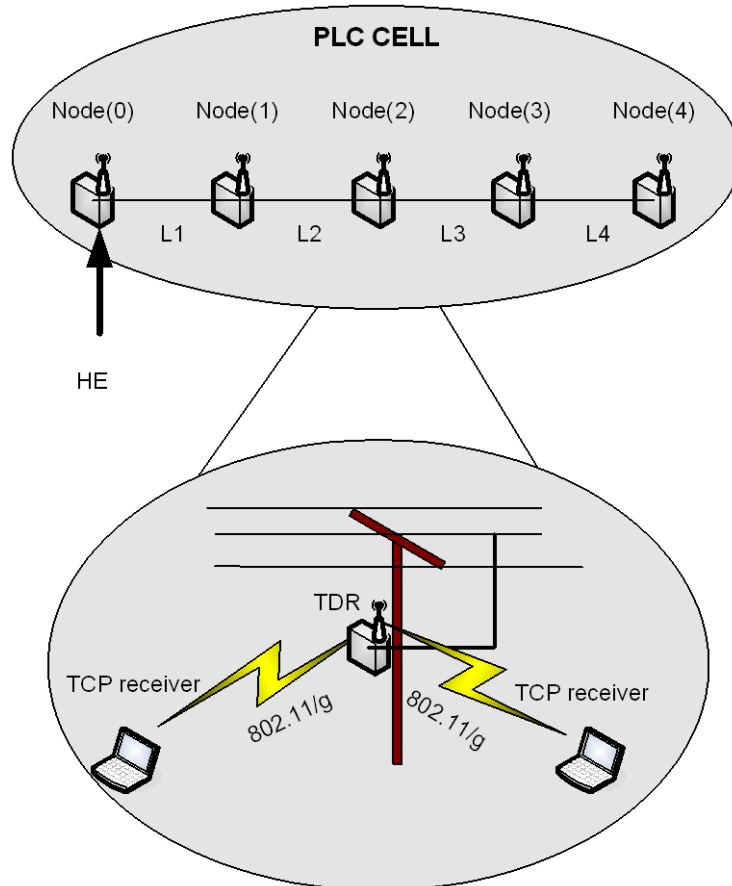
4.4.2.1. Εφαρμογή για δίκτυα ευρυζωνικής πρόσβασης

Για τον προσδιορισμό της TCP διέλευσης απαιτείται ο προσδιορισμός του PLR για τα πακέτα που μεταδίδονται από τον HE με προορισμό τον κόμβο k . Στην περίπτωση αυτή, το ποσοστό λαθών PLR_k της σύνδεσης που εξυπηρετεί τον κόμβο k εξαρτάται από τις συνθήκες μετάδοσης στις ζεύξεις $1, \dots, k$ που προηγούνται του κόμβου k στην PLC κυψέλη. Το ποσοστό λαθών αυτό προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$PLR_k = 1 - \prod_{i=1}^k (1 - p_i)^l \quad (4.13)$$

όπου p_i είναι το BER της ζεύξης i και το l το μήκος των διακινούμενων TCP πακέτων. Όπως προκύπτει από την (4.13), η πιθανότητα να μη χαθεί κάποιο πακέτο είναι ίση με την πιθανότητα να μη χαθεί κανένα ψηφίο του πακέτου κατά τη μετάδοση σε όλες τις προηγούμενες ζεύξεις. Σημειώνεται ότι το BER κάθε ζεύξης είναι συνάρτηση του ρυθμού k/n του κώδικα FEC που χρησιμοποιείται. Συμπερασματικά, ανεκτά επίπεδα του PLR σε κάθε κόμβο της PLC κυψέλης καθορίζουν την απαίτηση για εφαρμογή ανθεκτικών σχημάτων διαμόρφωσης και κωδικοποίηση FEC, που με τη σειρά τους μειώνουν το διαθέσιμο εύρος ζώνης B . Το σχήμα βελτιστοποίησης που εξετάζεται στο Κεφ.5 αναλαμβάνει τη βέλτιστη διαχείριση του ισοζυγίου μεταξύ ανεκτού PLR και μέγιστου εύρους ώστε να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις QoS κάθε εφαρμογής.

Για τον προσδιορισμό του εύρους ζώνης που ανατίθεται σε κάθε TCP σύνδεση υπεισέρχεται η θέση του προς εξυπηρέτηση τερματικού κόμβου, συγκεκριμένα η θέση του PLC κόμβου μέσω του οποίου ο τερματικός κόμβος διασυνδέεται στο δίκτυο. Σημειώνεται, ότι όπως φαίνεται στο Σχ.4.4 κάθε PLC κόμβος εξυπηρετεί ένα σύνολο

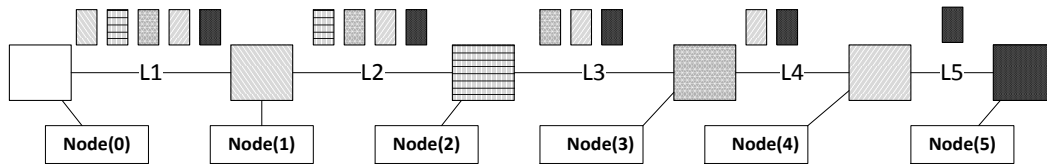


Σχήμα 4.4: Εξυπηρέτηση τερματικών κόμβων από τους PLC κόμβους

TCP κόμβων. Επομένως, με αναφορά στο Σχ.4.5, στην περίπτωση όπου ο κόμβος προορισμός μιας TCP σύνδεσης εξυπηρετείται από τον node(4), η κίνηση της TCP σύνδεσης διέρχεται μέσω των ζεύξεων L1, L2 και L3. Συγκεκριμένα, για τον προσδιορισμό της διέλευσης των TCP συνδέσεων ισχύουν οι ακόλουθες διαπιστώσεις:

1. Το εύρος ζώνης κάθε PLC ζεύξης διαμοιράζεται εξίσου στις συνδέσεις TCP που εξυπηρετούνται από τον αντίστοιχο PLC κόμβο.
2. Όταν η παρουσία στενωπού μειώνει το εύρος ζώνης κάποιων PLC ζεύξεων, το εύρος ζώνης κάθε PLC ζεύξης που μένει αναξιοποίητο διαμοιράζεται στις υπόλοιπες TCP συνδέσεις που δεν επιβαρύνονται από την παρουσία της ζεύξης στενωπού.

Στην περίπτωση της επικοινωνίας κάτω ζεύξης, ο χρόνος που δεσμεύεται για την αποστολή πακέτων προς την άνω ζεύξη αντιστοιχεί αποκλειστικά στη μετάδοση επιβεβαιώσεων Ack. Λόγω του πολύ μικρού μήκους των πακέτων Ack απαιτείται ελάχιστος χρόνος για τη μετάδοσή τους και μπορεί να θεωρηθεί αμελητέος. Επομένως, στη συνέχεια της ενότητας ο χρόνος κατάληψης της i ζεύξης θεωρείται ίσος προς $THT_i = THT_{id}$.



Σχήμα 4.5: Κατεύθυνση κίνησης downlink σε μια PLC κυψέλη

Ορισμός 1

Έστω ότι οι χρόνοι κατάληψης της κάθε PLC ζεύξης περιγράφονται από το διάνυσμα

$$\mathbf{THT} = (THT_1, THT_2, \dots, THT_N) \quad (4.14)$$

και οι ρυθμοί μετάδοσης των εμπλεκόμενων PLC ζεύξεων είναι γνωστοί και περιγράφονται από το αντίστοιχο διάνυσμα

$$\mathbf{R} = (R_1, R_2, \dots, R_N) \quad (4.15)$$

Τότε, το εύρος ζώνης κάθε ζεύξης προκύπτει ίσο με

$$B_{wi} = R_i \frac{THT_i}{TCT}, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (4.16)$$

Σημειώνεται ότι το TCT (Token Cycle Time) αποτελεί το συνολικό χρόνο διακίνησης της σκυτάλης, και καθορίζεται από το σχεδιαστή του δικτύου. Όπως ήδη έχει αναφερθεί σε προηγούμενη ενότητα, κάθε PLC κόμβος αποτελεί το σημείο πρόσβασης στο δίκτυο για συγκεκριμένο πλήθος TCP τερματικών. Ο πίνακας

$$\mathbf{M} = (M_1, M_2, \dots, M_N) \quad (4.17)$$

προσδιορίζει το πλήθος των TCP τερματικών που προσαρτώνται σε ένα από των N κόμβων του PLC δικτύου. Επισημαίνεται ότι ο κόμβος node(0), που αποτελεί τον HE και τον αποστολέα της κίνησης, μπορεί και ο ίδιος να εξυπηρετεί συγκεκριμένο πλήθος TCP τερματικών. Το πλήθος των τελευταίων δεν λαμβάνεται υπόψη κατά τη μελέτη της επίδοσης των TCP συνδέσεων, αφού η κίνηση που παράγουν οι M_0 αυτές συσκευές δεν επηρεάζεται από τη μετάδοση μέσω της PLC κυψέλης.

Βάσει της διαπίστωσης (1) της σελ. 120 και των Σχ.4.4 και 4.5 προκύπτει ότι κάθε downlink ζεύξη μεταφέρει την TCP κίνηση που προορίζεται για τους κόμβους που την ακολουθούν, δηλαδή εξυπηρετεί πλήθος TCP τερματικών ίσο με

$$\mathbf{M}_s = (M_1, M_1 + M_2, \dots, \sum_{i=1}^N M_i) \quad (4.18)$$

Επομένως, το εύρος είναι ίσο με το εύρος ζώνης κάθε PLC ζεύξης διαιρούμενο με το πλήθος των χρηστών που εξυπηρετούνται από τη ζεύξη αυτή. Επομένως, το εύρος W_i μίας ζεύξης i μπορεί να εκφραστεί ως

$$W_i = B_{wi}/M_{si} \quad (4.19)$$

όπου τα B_{wi} , M_{si} , αποτελούν το i -οστό στοιχείο των πινάκων \mathbf{B}_w και \mathbf{M}_s αντίστοιχα. Από την (4.19) προκύπτει ότι οι κόμβοι που έπονται της ζεύξης στενωπού μιας PLC κυψέλης δεν μπορούν να διεκδικήσουν περισσότερο εύρος ζώνης από όσο τους αναλογεί βάσει της (4.19). Η διαπίστωση (2) της σελ. 120, όμως, συνεπάγεται ότι οι κόμβοι που προηγούνται της στενωπού είναι σε θέση να διεκδικήσουν μεγαλύτερο εύρος ζώνης, καταλαμβάνοντας το εύρος ζώνης που δεν μπορεί να απορροφηθεί από τους κόμβους που ακολουθούν τη στενωπό της κυψέλης.

Συγκεκριμένα, στην υποθετική κυψέλη των Σχ.4.3 και 4.4 και υποθέτοντας τις ακόλουθες τιμές για τους πίνακες \mathbf{B}_w (εύρος ζώνης κάθε ζεύξης σε Mbps) και \mathbf{M} (πλήθος τελικών συσκευών που εξυπηρετούνται από κάθε PLC κόμβο)

$$\mathbf{B}_w = (125, 80, 45, 20, 60) \text{ και } \mathbf{M} = (5, 5, 5, 5, 5)$$

προκύπτει ότι ο πίνακας \mathbf{W} έχει τις τιμές (5,4,3,2,12) (Mbps) που αντιστοιχούν στο μέγιστο ρυθμό μετάδοσης κάθε που επιτρέπεται σε κάθε PLC ζεύξη. Σημειώνεται ότι η ζεύξη W_4 αποτελεί τη ζεύξη στενωπό της PLC κυψέλης. Επομένως, ξεκινώντας την εξέταση της κυψέλης από το άκρο της κυψέλης, προκύπτει ότι ο PLC κόμβος 5 δεν θα μπορέσει να εξασφαλίσει στα TCP τερματικά που εξυπηρετεί σύνδεση ταχύτερη των 2Mbps $W_5 = \frac{B_{w5}}{M_{s5}} = \frac{45}{25} = 2\text{Mbps}$. Επομένως, η τελευταία ζεύξη υποχρησιμοποιείται, αφού οι 5 χρήστες του κόμβου 5 δεν μπορούν να αξιοποιήσουν περισσότερο από 10Mbps, αφήνοντας αχρησιμοποίητα τα υπόλοιπα 50Mbps που μπορεί να υποστηρίξει η ζεύξη 5. Την ίδια μειωμένη επίδοση έχουν και οι TCP συνδέσεις που εξυπηρετούνται από τον κόμβο 4, αφού και αυτές βλέπουν την ίδια ζεύξη στενωπό που περιορίζει το εύρος ζώνης τους σε 2Mbps. Προχωρώντας στον κόμβο 3 παρατηρείται ότι η στενωπός που περιορίζει το ρυθμό μετάδοσης των συνδέσεων που εξυπηρετούνται από τους κόμβους 4 και 5 αφήνει περισσότερο εύρος διαθέσιμο για να αξιοποιηθεί από τους χρήστες του

κόμβου 3. Επομένως, τα διαθέσιμα 45Mbps δεν ισοκατανέμονται στις TCP συνδέσεις των κόμβων 3, 4, 5 αλλά οι κόμβοι 4 και 5 καταλαμβάνουν 20Mbps και αφήνουν τα υπόλοιπα 25Mbps για να αξιοποιηθούν από τις συνδέσεις που εξυπηρετεί ο κόμβος 3.

Με βάση της προηγηθείσα ανάλυση, το εύρος ζώνης που αντιστοιχεί σε κάθε TCP σύνδεση μπορεί να προσδιορισθεί ως άθροισμα δύο όρων:

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_{fs} + \mathbf{B}_{surplus} \quad (4.20)$$

όπου το \mathbf{B}_{fs} (fair share) αντιστοιχεί στο ελάχιστο μερίδιο του φάσματος που θα λάμβαναν οι TCP συνδέσεις αν μοιράζονταν εξίσου το εύρος της ζεύξης στενωπού (διαπίστωση 1) και το $\mathbf{B}_{surplus}$ (water filling) αντιστοιχεί στο τμήμα του φάσματος που δεν μπορεί να απορροφηθεί από τους κόμβους PLC που ακολουθούν τη ζεύξη στενωπό (διαπίστωση 2).

Ο πίνακας προσδιορισμού του \mathbf{B}_{fs} για κάθε κόμβο της κυψέλης που εξυπηρετεί TCP συνδέσεις προκύπτει ίσος με

$$\mathbf{B}_{fs} = (W_1, \min(W_1, W_2), \dots, \min(W_1, W_2, \dots, W_N)) \quad (4.21)$$

Σημειώνεται ότι ο πίνακας \mathbf{B}_{fs} παρέχει απαισιόδοξη πρόβλεψη για το εύρος ζώνης που μπορεί να καταλάβει μία TCP σύνδεση. Όπως προαναφέρθηκε, λόγω της διαπίστωσης (2), στις περιπτώσεις όπου μία PLC ζεύξη στενωπός περιορίζει το διαθέσιμο εύρος ζώνης για τις συνδέσεις που εξυπηρετούνται από τους PLC κόμβους που ακολουθούν τη στενωπό, το εύρος ζώνης που δεν μπορεί να αξιοποιηθεί ανατίθεται στις συνδέσεις που εξυπηρετούν οι κόμβοι που προηγούνται της PLC ζεύξης στενωπού. Το εύρος αυτό ορίζεται ως $\mathbf{B}_{surplus}$ και προκύπτει ίσο με:

$$\mathbf{B}_{surplus} = \left(\frac{\sum_{i=2}^N M_i B_{fsi} - \sum_{i=2}^N M_i B_i}{M_1}, \dots, \frac{M_{N-1} B_{fs(N-1)} - M_N B_N}{M_{N-1}}, 0 \right) \quad (4.22)$$

Επισημαίνεται ότι ο τελευταίος κόμβος μιας PLC κυψέλης δεν αξιοποιεί το εύρος $\mathbf{B}_{surplus}$, αφού επηρεάζεται πάντα από την ύπαρξη PLC ζεύξης στενωπού.

Συνδυάζοντας τις σχέσεις (4.16)-(4.22) προκύπτει ότι το διαθέσιμο για TCP συνδέσεις εύρος ζώνης \mathbf{B} εξαρτάται από την τιμή των \mathbf{THT} που ανατίθενται σε κάθε PLC κόμβο. Συγκεκριμένα, η διέλευση μιας TCP σύνδεσης εξαρτάται τόσο από τα \mathbf{THT} που ανατίθενται για την κατάληψη όχι μόνο των ζεύξεων που προηγούνται του PLC κόμβου

που την εξυπηρετεί, όπως προκύπτει από την παρουσία του όρου \mathbf{B}_{fs} στην (4.20), όσο και από όλες τις τιμές των THT λόγω της παρουσίας του όρου $\mathbf{B}_{surplus}$ στην (4.20). Όπως αναλύεται στο Κεφ.5, η βέλτιστη ανάθεση των \mathbf{THT} μπορεί να επιφέρει αύξηση της διέλευσης αλλά και της δικαιοσύνης μεταξύ των TCP συνδέσεων.

Τέλος, αντικαθιστώντας την (4.20) στη σχέση υπολογισμού της διέλευσης των TCP συνδέσεων (4.12), προκύπτει ότι σε κάθε TCP σύνδεση που εξυπηρετείται από κάποιο κόμβο της PLC κυψέλης θα αντιστοιχεί διέλευση ίση με

$$\mathbf{T} = \min \left\{ \frac{1}{RTT} \sqrt{\frac{3}{2b} \frac{1}{PLR}}, \mathbf{B} \right\} \quad (4.23)$$

Σημειώνεται ότι στην περίπτωση όπου μια κυψέλη SGC λειτουργεί ως δίκτυο πρόσβασης, δηλαδή όταν πηγή της κίνησης είναι ο πρώτος κόμβος της κυψέλης, στο συγκεκριμένο παράδειγμα ο HE, το RTT όπως προσδιορίστηκε από την (4.11) είναι σταθερό για τις συνδέσεις που εξυπηρετούνται από οποιοδήποτε PLC κόμβο της κυψέλης και ίσο με

$$RTT = \sum_{i=1}^N (THT_{id} + THT_{iu}) = \sum_{i=1}^N THT_i \quad (4.24)$$

4.4.2.2. Εφαρμογή για ευφνή δίκτυα

Σε αντιστοιχία με τη μελέτη της κίνησης κάτω ζεύξης, το PLR εξαρτάται αποκλειστικά από τις συνθήκες μετάδοσης στις PLC ζεύξεις μέσω των οποίων μεταδίδεται η κίνηση και συνεπώς, προσδιορίζεται από την (4.13). Σημειώνεται ότι, κατά τις μεταδόσεις άνω ζεύξης, ο κόμβος k που αναφέρεται στην (4.13) είναι ο αποστολέας της κίνησης και όχι ο παραλήπτης. Επίσης, την ίδια συμπεριφορά εμφανίζει και το εύρος ζώνης B , το οποίο εξαρτάται από το πλήθος και την ποιότητα των PLC ζεύξεων μέσω των οποίων διέρχονται τα πακέτα μιας TCP σύνδεσης και όχι από τη φορά με την οποία διανύουν την από άκρο-σε-άκρο σύνδεση. Επομένως, το μόνο που διαφοροποιεί την επίδοση άνω και κάτω ζεύξης είναι το RTT το οποίο προσδιορίζεται από τη σχέση (4.11) και είναι ίσο με

$$\mathbf{RTT} = (RTT_1, RTT_2, \dots, RTT_N) \quad (4.25)$$

Στην περίπτωση μεταδόσεων άνω ζεύξης, οι χρόνοι THT_{iu} αξιοποιούνται πλήρως, ενώ οι χρόνοι μετάδοσης THT_{id} αξιοποιούνται αποκλειστικά για τη μετάδοση επιβεβαιώσεων. Επομένως, οι χρόνοι RTT_i προσδιορίζονται από τη σχέση:

$$RTT_i = \sum_{k=1}^i (THT_{kd} + THT_{ku}) = \sum_{k=1}^i THT_k \quad (4.26)$$

Τέλος, η σχέση υπολογισμού της διέλευσης ενός τερματικού κόμβου που εξυπηρετείται από τον PLC κόμβο i στην περίπτωση λειτουργίας μιας κυψέλης για εφαρμογές SG είναι η ακόλουθη:

$$T_i = \min \left\{ \frac{1}{RTT_i} \sqrt{\frac{3}{2b}} \frac{1}{PLR_i}, B_i \right\} \quad (4.27)$$

Ακολουθεί η επαλήθευση της μεθόδου υπολογισμού της διέλευσης των TCP συνδέσεων μέσω προσομοιώσεων.

4.5. Επαλήθευση του προτεινόμενου μοντέλου προσδιορισμού της διέλευσης μέσω προσομοίωσης

Η ανάλυση που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα αποτέλεσε τη βάση για το προτεινόμενο σχήμα βελτιστοποίησης. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το προτεινόμενο μοντέλο επαληθεύθηκαν με χρήση του προσομοιωτή OPNET Modeler [OPNET] και δημοσιεύθηκαν στην εργασία [Sar12a].

4.5.1. Επισκόπηση πειραματικού δικτύου

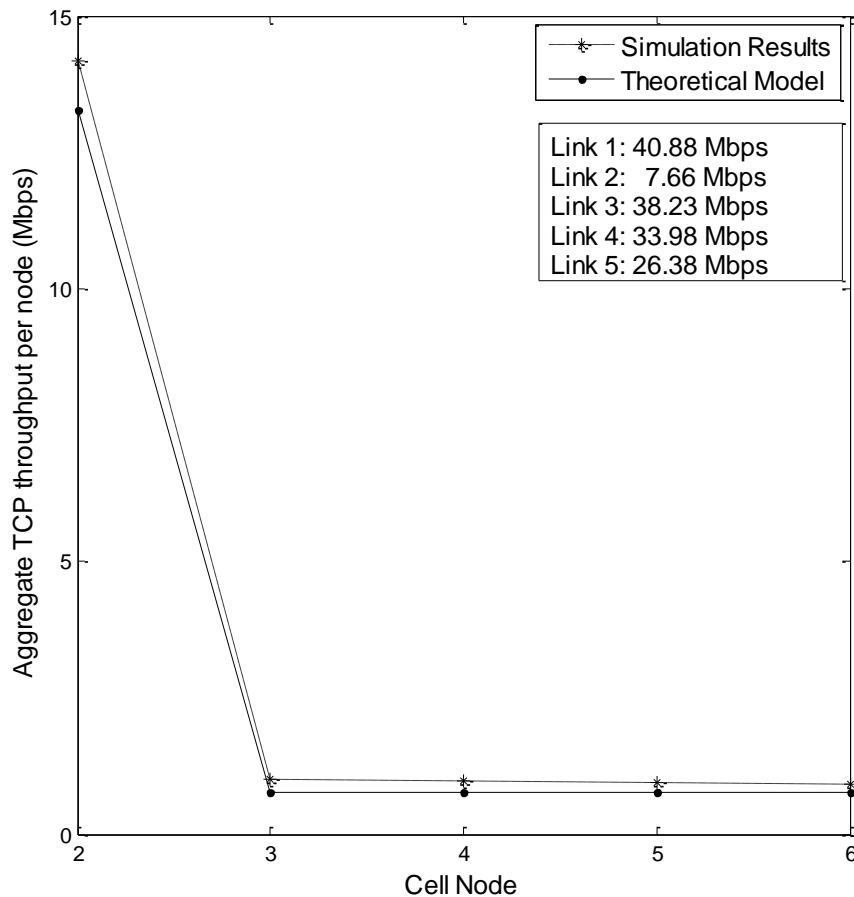
Με στόχο την επαλήθευση της προτεινόμενης μεθόδου χρησιμοποιήθηκε η ενδεικτική PLC κυψέλη του Σχ.4.5. Ο κόμβος n_0 αποτελεί τον HE και είναι υπεύθυνος για την ανάθεση των THT_i στους υπόλοιπους SGC κόμβους της κυψέλης έκαστος των οποίων εξυπηρετεί σταθερό πλήθος TCP χρηστών. Επίσης, έχει υποτεθεί κίνηση TCP κάτω ζεύξης η οποία αποστέλλεται αδιαλείπτως για όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Σημειώνεται ότι αυτού του τύπου η κίνηση αντιστοιχεί στη μεταφορά αρχείων μεγάλου

Πίνακας 4.1: Τιμές ρυθμού μετάδοσης (*R*) και ποσοστού απωλειών (*BER*) για ενδεικτικές PLC ζεύξεις και για διαφορετικούς ρυθμούς κωδικοποίησης

Available Code Rates								
	1/4		1/2		2/3		3/4	
	R(Mbps)	BER	R(Mbps)	BER	R(Mbps)	BER	R(Mbps)	BER
L1	9,89	2,5E-54	19,79	2,4E-25	26,38	3,3E-11	29,68	3,2E-06
L2	8,59	6,0E-21	17,17	1,8E-06	22,90	1,1E-01	25,76	7,1E-01
L3	6,27	9,7E-01	12,55	1,0E+00	16,73	1,0E+00	18,82	1,0E+00
L4	9,61	2,2E-63	19,21	6,1E-31	25,61	1,5E-14	28,82	1,6E-08
L5	7,66	1,8E-18	15,33	2,6E-05	20,43	2,5E-01	22,99	8,6E-01
L6	10,51	1,2E-65	21,01	2,3E-32	28,01	2,0E-15	31,52	4,0E-09
L7	9,55	1,2E-43	19,11	6,6E-19	25,48	1,5E-07	28,66	7,6E-04
L8	11,47	1,5E-92	22,94	1,5E-49	30,59	2,8E-26	34,41	5,9E-17
L9	10,11	7,4E-52	20,22	7,9E-24	26,96	2,5E-10	30,33	1,2E-05
L10	11,92	1,7E-11	23,85	1,3E-60	31,80	1,9E-33	35,77	2,7E-22
L11	8,03	2,6E-11	16,06	2,1E-02	21,42	8,9E-01	24,09	1,0E+00
L12	10,62	9,4E-81	21,24	5,8E-42	28,32	2,0E-21	31,86	2,1E-13
L13	7,81	1,9E-21	15,61	1,0E-06	20,81	9,2E-02	23,42	6,8E-01
L14	8,33	2,8E-12	16,67	9,5E-03	22,22	8,3E-01	25,00	1,0E+00
	4/5		5/6		6/7		7/8	
	R(Mbps)	BER	R(Mbps)	BER	R(Mbps)	BER	R(Mbps)	BER
L1	31,66	1,4E-03	32,98	2,0E-02	33,92	9,6E-02	34,62	2,1E-01
L2	27,48	9,7E-01	28,62	1,0E+00	29,44	1,0E+00	30,05	1,0E+00
L3	20,08	1,0E+00	20,91	1,0E+00	21,51	1,0E+00	21,96	1,0E+00
L4	30,74	4,0E-05	32,02	1,4E-03	32,93	1,3E-02	33,62	4,6E-02
L5	24,52	9,9E-01	25,54	1,0E+00	26,27	1,0E+00	26,82	1,0E+00
L6	33,62	1,5E-05	35,02	6,8E-04	36,02	7,5E-03	36,77	2,9E-02
L7	30,57	4,5E-02	31,84	2,1E-01	32,75	4,6E-01	33,44	6,5E-01
L8	36,70	2,7E-11	38,23	1,9E-08	39,32	1,6E-06	40,14	2,3E-05
L9	32,36	3,5E-03	33,70	3,8E-02	34,67	1,5E-01	35,39	3,0E-01
L10	38,15	2,4E-15	39,74	9,2E-12	40,88	2,7E-09	41,73	9,1E-08
L11	25,70	1,0E+00	26,77	1,0E+00	27,54	1,0E+00	28,11	1,0E+00
L12	33,98	1,2E-08	35,40	2,6E-06	36,41	8,9E-05	37,17	7,3E-04
L13	24,98	9,6E-01	26,02	1,0E+00	26,76	1,0E+00	27,32	1,0E+00
L14	26,66	1,0E+00	27,78	1,0E+00	28,57	1,0E+00	29,16	1,0E+00

μεγέθους με χρήση FTP πρωτοκόλλου και οδηγεί το δίκτυο σε λειτουργία σε επίπεδο κορεσμού. Επομένως, η χωρητικότητα του PLC διαύλου περιορίζει το ρυθμό μετάδοσης των TCP συνδέσεων που εξυπηρετούνται.

Για την προσομοίωση του φυσικού στρώματος των PLC διαύλων χρησιμοποιήθηκαν μετρήσεις από πραγματικές PLC ζεύξεις του πιλοτικού δικτύου της Λάρισας που παρουσιάστηκε στο Κεφ.3. Στον Πιν.4.1 παρουσιάζονται τα ζεύγη ρυθμών μετάδοσης -

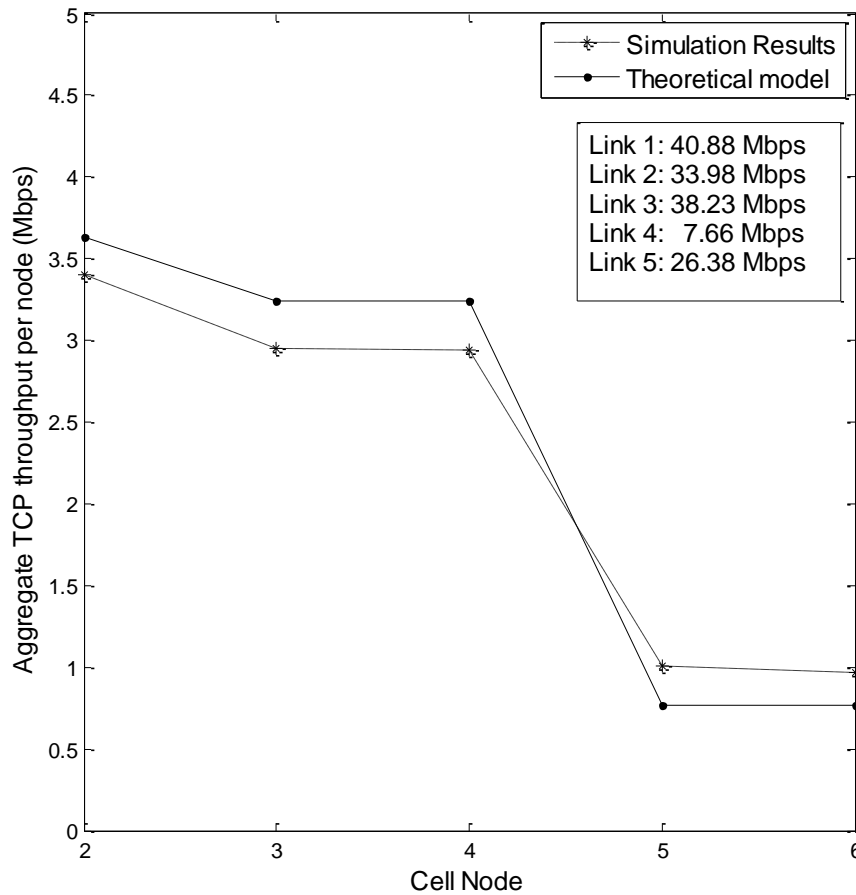


Σχήμα 4.6: Σύγκριση θεωρητικών τιμών και τιμών προσομοίωσης συνολικής διέλευσης TCP σε κυψέλη με μία κακή ζεύξη προς την αρχή της κυψέλης

BER για τις διαφορετικές PLC ζεύξεις που χρησιμοποιήθηκαν και για τις διαφορετικές τιμές ρυθμών κώδικα που εφαρμόστηκαν. Σημειώνεται ότι για κάθε ζεύξη PLC επιλέχθηκε BER και αντίστοιχος ρυθμός μετάδοσης R, ώστε το συνολικό PLR για κάθε σύνδεση να μην υπερβαίνει το 1%, δεδομένου ότι σε αντίθετη περίπτωση, η σχέση (4.27) δεν αποτελεί ακριβή προσέγγιση της διέλευσης των TCP συνδέσεων. Τέλος, το MAC πρωτόκολλο υλοποιήθηκε σύμφωνα με το πρότυπο OPERA, με σταθερά THT_i ίσα με 10ms.

4.5.2. Αποτελέσματα προσομοίωσης διέλευσης

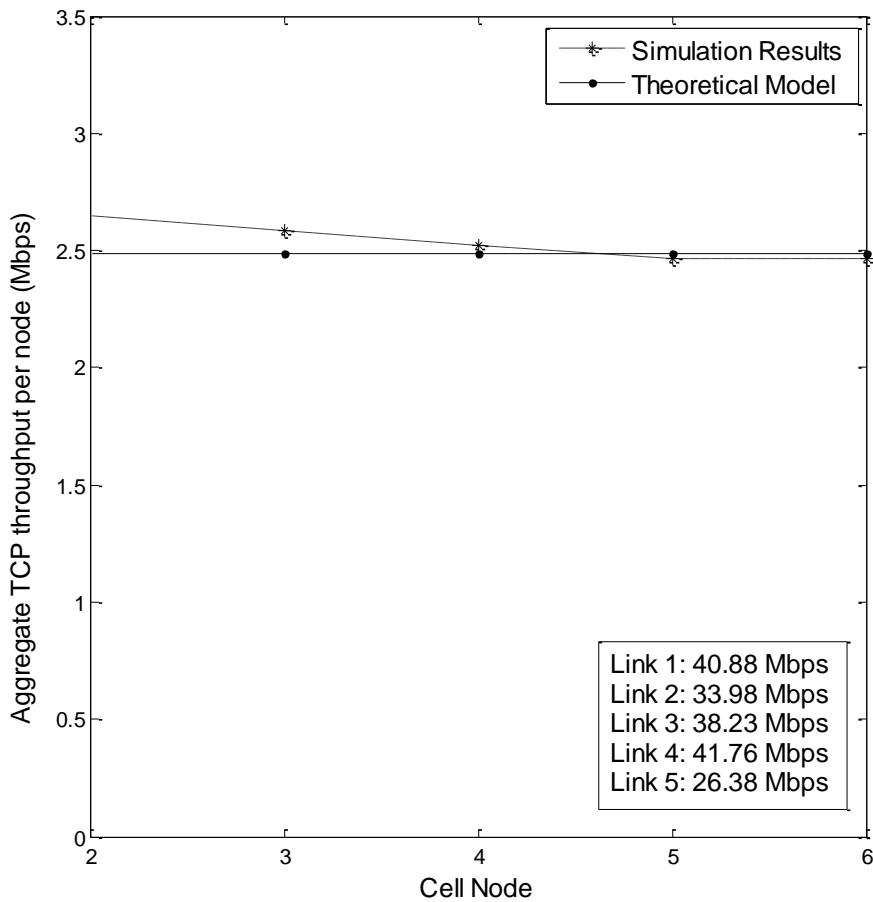
Στα Σχ. 4.6, 4.7 και 4.8 που ακολουθούν παρουσιάζεται η αθροιστική διέλευση των TCP συνδέσεων για τρεις διαφορετικούς τύπους κυψελών όπως προέκυψε εφαρμόζοντας προσομοίωση (Simulation Results) και την προτεινόμενη μέθοδο προσδιορισμού της διέλευσης των TCP συνδέσεων (Theoretical Model). Σε κάθε σχήμα δίνονται οι ρυθμοί



Σχήμα 4.7: Σύγκριση θεωρητικών τιμών και τιμών προσομοίωσης συνολικής διέλευσης TCP σε κυψέλη με μία κακή ζεύξη προς το τέλος της κυψέλης

μετάδοσης των PLC ζεύξεων που απαρτίζουν την PLC κυψέλη. Η αρίθμηση των ζεύξεων γίνεται σύμφωνα με την ονοματολογία των ζεύξεων που εμφανίζεται στο Σχ.4.5. Όπως προκύπτει από τα Σχ. 4.6, 7 και 8 που ακολουθούν, η προτεινόμενη μέθοδος οδήγησε σε εξαιρετικά ακριβή αποτελέσματα και στις τρεις περιπτώσεις που εξετάστηκαν.

Στο Σχ.4.6 παρουσιάζεται η συνολική διέλευση κάθε PLC κόμβου. Είναι φανερό ότι η ύπαρξη της κακής δεύτερης ζεύξης, Link 2, που εμφανίζει μέγιστο ρυθμό μετάδοσης 7.66Mbps, περιορίζει τη διέλευση και υποβαθμίζει τη συνολική χρησιμοποίηση των επόμενων PLC ζεύξεων. Επομένως, οι TCP συνδέσεις που εξυπηρετούνται από το δεύτερο PLC κόμβο έχουν πολύ υψηλότερη τιμή διέλευσης σε σχέση με τις συνδέσεις που εξυπηρετούνται από κόμβους που ακολουθούν τη ζεύξη στενωπό. Παρόμοια συμπεράσματα μπορεί να αντληθούν και από το Σχ.4.7, με τη διαφορά ότι η ύπαρξη της κακής ζεύξης προς το τέλος της PLC κυψέλης (Ζεύξη 4) οδηγεί σε περισσότερο δίκαιη



Σχήμα 4.8: Σύγκριση θεωρητικών τιμών και τιμών προσομοίωσης συνολικής διέλευσης TCP σε κυψέλη με καλές ζεύξεις

κατανομή των πόρων αφού λιγότεροι PLC κόμβοι – άρα και TCP τερματικά – επηρεάζονται από τη ζεύξη στενωπό.

Τέλος, στο Σχ.4.8 παρουσιάζεται μία PLC κυψέλη η λειτουργία της οποίας δεν επιβαρύνεται από την ύπαρξη κακής ζεύξης. Στην περίπτωση αυτή, οι πόροι κατανέμονται πρακτικά ισομερώς στις συνδέσεις που εξυπηρετεί η κυψέλη. Σημειώνεται ότι σε ρεαλιστικές υλοποιήσεις PLC δικτύων η ύπαρξη διακλαδώσεων επιβαρύνει ορισμένες ζεύξεις μειώνοντας σημαντικά το ρυθμό μετάδοσης που μπορούν να υποστηρίξουν. Η παρουσία στενωπών σε PLC κυψέλες οδηγεί σε άνιση κατανομή πόρων επιβάλλοντας την ανάπτυξη αποτελεσματικότερων σχημάτων πρόσβασης που λαμβάνουν υπόψη τους τις συνθήκες που επικρατούν στο φυσικό στρώμα προκειμένου να διαχειριστούν κατά βέλτιστο τρόπο τη σχέση (trade-off) μεταξύ αποτελεσματικής και δίκαιης κατανομής του εύρους ζώνης των TCP διαύλων (σχεδίαση cross layer).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5:	ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΠΟΡΩΝ ΣΕ PLC ΔΙΚΤΥΑ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΔΙΑΣΤΡΩΜΑΤΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ
--------------------	---

5.1. Εισαγωγή

Στο Κεφ.4 προτάθηκε μέθοδος για τον προσδιορισμό της διέλευσης των TCP συνδέσεων που εξυπηρετούνται από μία PLC κυψέλη. Στο παρόν κεφάλαιο προτείνεται ένα σχήμα δυναμικής κατανομής των πόρων που αποσκοπεί στη βέλτιστη διαχείριση του ισοζυγίου διέλευσης-δικαιοσύνης που TCP συνδέσεις που υποστηρίζονται από κόμβους μιας PLC κυψέλης. Συγκεκριμένα, επιχειρείται η μεγιστοποίηση της αθροιστικής TCP διέλευσης σε μία PLC κυψέλη, ενώ παράλληλα διασφαλίζεται η όσο το δυνατό δικαιότερη αντιμετώπιση των TCP συνδέσεων ανεξαρτήτως της θέσης στην κυψέλη του PLC κόμβου που τις εξυπηρετεί.

Σε κάθε είδος δικτύου πρόσβασης, η ανάγκη για πόρους μεταφράζεται σε ανάγκη για εύρος ζώνης. Στην περίπτωση όπου το PLC δίκτυο εξυπηρετεί τις τηλεπικοινωνιακές ανάγκες ευφών δικτύων χρησιμοποιούνται πρωτόκολλα εγγυημένης πρόσβασης στο μέσο. Η επιλογή αυτή έχει ως αποτέλεσμα το ποσοστό του εύρους ζώνης που διατίθεται σε κάθε PLC κόμβο να είναι ανάλογο προς τον αντίστοιχο χρόνο μετάδοσης που αναθέτει ο ΗΕ. Επομένως, στη συνέχεια του κεφαλαίου επιχειρείται η βέλτιστη κατανομή των χρόνων μετάδοσης κάθε PLC κόμβου με στόχο τη μεγιστοποίηση της αθροιστικής διέλευσης σε PLC κυψέλες.

Κατά τη μελέτη του προβλήματος κατανομής πόρων σε PLC κυψέλες λήφθηκαν υπόψη οι ιδιαίτερες συνθήκες που επικρατούν στα ευφυή ενεργειακά δίκτυα. Συγκεκριμένα, θεωρείται ότι ισχύουν τα ακόλουθα:

- Οι χρήστες που εξυπηρετούνται από τις PLC κυψέλες είναι ευφρείς διατάξεις / μετρητές, η θέση των οποίων επί του ενεργειακού δικτύου είναι γνωστή εκ των προτέρων και συνήθως δεν μεταβάλλεται. Παράλληλα, οι εφαρμογές ελέγχου του ενεργειακού δικτύου έχουν απαίτηση για ομοιόμορφη κίνηση, επομένως, η κίνηση που διαχειρίζεται η PLC κυψέλη είναι σταθερή.
- Εκτός από τη δική του κίνηση, κάθε PLC κόμβος εξυπηρετεί και την κίνηση που παράγουν οι κόμβοι που τον ακολουθούν υπό την έννοια της δενδρικής δομής μιας PLC κυψέλης. Αντίστοιχα, το εύρος ζώνης κάθε PLC ζεύξης μοιράζεται σε όλους τους κόμβους που την ακολουθούν στη δομή της PLC κυψέλης.

Στην ενότητα 5.2 προτείνεται ένα σχήμα κατανομής πόρων κατάλληλο για PLC δίκτυα, το οποίο με χρήση διαστρωματικής σχεδίασης προσδιορίζει τις βέλτιστες τιμές των χρόνων THT και τους ρυθμούς κώδικα στις PLC ζεύξεις που υπό συγκεκριμένο δείκτη δικαιοσύνης για την κατανομή των πόρων βελτιστοποιούν την αθροιστική διέλευση των TCP συνδέσεων. Στην ενότητα 5.3 προτείνεται στρατηγική υπολογισμού των ανωτέρω μεγεθών, ενώ στην ενότητα 5.4 παρουσιάζονται τα αριθμητικά αποτελέσματα από την εφαρμογή της στρατηγικής αυτής σε διάφορους τύπους κυψελών για διάφορες κατανομές κίνησης. Τέλος, στην ενότητα 5.5, γενικεύονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τη μελέτη της επίδοσης σε μια PLC κυψέλη και προτείνεται γενική μεθοδολογία σχεδίασης PLC δικτύων ευρείας γεωγραφικής κάλυψης.

5.2. Κατάστρωση του προβλήματος βέλτιστης κατανομής του εύρους ζώνης

Στην ανάλυση που ακολουθεί γίνεται η υπόθεση ότι υπάρχει ένα πλήθος PLC ζεύξεων, μέσω του οποίου διέρχεται η κίνηση των προς εξυπηρέτηση TCP συνδέσεων, και ένα πλήθος PLC κόμβων, μέσω των οποίων τα τερματικά TCP, που έχουν το ρόλο αποστολέα ή προορισμού μιας TCP σύνδεσης, διασυνδέονται στην PLC κυψέλη. Με βάση τα ανωτέρω, η δομή των PLC κυψελών που εξετάζονται αντιστοιχεί στο Σχ.4.2 που εξετάστηκε στο Κεφ.4. Επίσης, από τη μελέτη της TCP διέλευσης του Κεφ. 4 που υπολογίζεται από τη σχέση

$$Tg = \min \left\{ \frac{1}{RTT} \sqrt{\frac{3}{2b}} T(k/n), (k/n)\mu \right\} \quad (5.1)$$

προκύπτει ότι η διέλευση εξαρτάται από τις παραμέτρους του φυσικού στρώματος και του στρώματος πρόσβασης. Συγκεκριμένα, η διέλευση των TCP συνδέσεων που εξυπηρετούνται από μια PLC κυψέλη εξαρτάται από:

- Το εύρος ζώνης που ανατίθεται σε κάθε PLC κόμβο, όπως προσδιορίζεται από το λόγο THT/RTT. Σε περιπτώσεις όπου το RTT είναι σταθερό, δηλαδή όταν η πηγή της TCP κίνησης είναι σταθερή, η τιμή του THT προσδιορίζει μονοσήμαντα το διαθέσιμο εύρος ζώνης σε κάθε PLC κόμβο.
- Τις συνθήκες μετάδοσης των PLC διαύλων, όπως αυτές προσδιορίζονται από τον αντίστοιχο ρυθμό μετάδοσης R και το αντίστοιχο BER. Υπενθυμίζεται ότι οι τιμές αυτές εξαρτώνται από το ρυθμό κώδικα που χρησιμοποιείται κατά περίπτωση. Χαρακτηριστικές τιμές για ενδεικτικές PLC ζεύξεις παρουσιάστηκαν στον Πιν.4.1.

Παράλληλα, κάθε σχήμα βελτιστοποίησης πρέπει να λαμβάνει υπόψη του την ποιότητα των εμπλεκόμενων PLC ζεύξεων καθώς και τη συνολική κίνηση που εξυπηρετείται από κάθε PLC κυψέλη. Το πρόβλημα βελτιστοποίησης που εξετάζεται στη συνέχεια προσδιορίζει την κατανομή των πόρων του δικτύου μεταβάλλοντας την κατανομή του χρόνου εξυπηρέτησης στους PLC κόμβους και το ρυθμό κώδικα που χρησιμοποιείται σε κάθε περίπτωση.

Για την κατάστροψη και επίλυση του προβλήματος βέλτιστης κατανομής του εύρους ζώνης θεωρήθηκε ότι κάθε PLC κυψέλη λειτουργεί υπό σταθερές συνθήκες κίνησης και PLC μετάδοσης. Δηλαδή, το πλήθος των TCP συνδέσεων που εξυπηρετούνται από κάθε PLC κόμβο είναι σταθερός, ενώ, παράλληλα, οι συνθήκες μετάδοσης σε κάθε PLC ζεύξη δεν μεταβάλλονται. Εύκολα προκύπτει ότι στις περιπτώσεις όπου οι ανωτέρω υποθέσεις δεν ισχύουν, το προτεινόμενο σχήμα βελτιστοποίησης μπορεί δυναμικά να προσαρμοσθεί μέσω του επανυπολογισμού των βέλτιστων τιμών εύρους ζώνης και ρυθμού κώδικα όταν αυτό απαιτείται. Η δυναμική λειτουργία του προτεινόμενου σχήματος προβλέπεται στις περιπτώσεις όπου υπάρχει:

- Σύνδεση νέου χρήστη. Τότε, το προτεινόμενο σχήμα βελτιστοποίησης δρα ως αλγόριθμος αποδοχής κλήσεων ώστε η εξυπηρέτηση μιας νέας σύνδεσης να απορρίπτεται όταν αυτή οδηγεί σε μη ικανοποίηση των απαιτήσεων QoS των

συνδέσεων που είναι ήδη σε λειτουργία. Σε αυτή την περίπτωση, το δίκτυο λειτουργεί σε κατάσταση κορεσμού και, ως εκ τούτου, δεν ανατίθεται εύρος ζώνης στη νέα σύνδεση. Σημειώνεται ότι σε εφαρμογές ευφυών ενεργειακών δικτύων οι προς εξυπηρέτηση χρήστες αντιστοιχούν σε ευφυείς διατάξεις / μετρητές, το πλήθος και η θέση των οποίων είναι καθορισμένα.

- Σύνδεση/ αποσύνδεση ή βλάβη του εξοπλισμού του ενεργειακού δικτύου που προκαλεί μεταβολή των συνθηκών μετάδοσης. Στην περίπτωση αυτή, τροποποιούνται οι καλές και οι επιβαρυνμένες ζεύξεις, οπότε οι τιμές που βελτιστοποιούν την κατανομή των πόρων πρέπει να επανυπολογισθούν.

Σημειώνεται ότι η χρήση τεχνικών ACM (Advanced Coding and Modulation) από το προτεινόμενο σχήμα κατανομής πόρων αποτελεί μορφή διαστρωματικής σχεδίασης (cross-layer design), που όμως δεν επηρεάζει το διακριτό ρόλο των στρωμάτων, αφού κάθε στρώμα συνεχίζει να επιτελεί τις λειτουργίες που του αντιστοιχούν. Συγκεκριμένα, δεν επηρεάζεται ο από άκρο-σε-άκρο έλεγχος του TCP στις συνδέσεις που εξυπηρετούνται μέσω των PLC κυψελών, ούτε επηρεάζονται οι λειτουργίες MAC. Για τη διεξαγωγή των προσομοιώσεων χρησιμοποιήθηκαν οι PLC ζεύξεις που παρουσιάστηκαν στον Πιν.4.1. Με χρήση ACM στο φυσικό στρώμα, ο ρυθμός μετάδοσης κάθε ζεύξης μεγιστοποιήθηκε προσδιορίζοντας ένα βέλτιστο ζεύγος $(R, BER)^*$ για κάθε ζεύξη της PLC κυψέλης. Στις περιπτώσεις όπου η βελτιστοποίηση οδήγησε στον προσδιορισμό περισσότερων του ενός ζευγών (R, BER) , ως βέλτιστο επιλέχθηκε εκείνο με το χαμηλότερο BER. Επίσης, προς μείωση του χρόνου σύγκλισης του αλγορίθμου βελτιστοποίησης, οι συνδυασμοί που παρουσιάζονται στον Πιν.4.1 περιορίστηκαν σε εκείνους που διασφαλίζουν $BER < 10^{-8}$, ένα όριο απαραίτητο από τις περισσότερες εφαρμογές ευφυών δικτύων. Ο συγκεκριμένος περιορισμός εξασφάλισε την διατήρηση του κατωφλίου για το PLR σε τιμές μικρότερες του 1%.

Οι βέλτιστες τιμές των **THT** καθώς και τα βέλτιστα $(R, BER)^*$ ζεύγη προσδιορίζονται με στόχο την επίτευξη των δύο συμπληρωματικών στόχων:

I. Μεγιστοποίηση της συνολικής διέλευσης σε κάθε PLC κυψέλη.

Ο συγκεκριμένος στόχος εκφράζεται υπό τη μορφή του προβλήματος μεγιστοποίησης

$$\max \left\{ g(T_N, \mathbf{TH}T_N) = \sum_{j=1}^N M_j \tau_j(T_N, \mathbf{TH}T_N) \right\} \quad (5.2)$$

$$\text{υπό τους περιορισμούς} \quad \sum_{j=0}^N \mathbf{TH}T_j = TCT = RTT \quad (5.3)$$

$$\mathbf{TH}T_j \geq 0 \quad \forall j=0,1,\dots,N \quad (5.4)$$

II. Δίκαιη κατανομή του εύρους ζώνης σε όλες τις TCP συνδέσεις που εξυπηρετούνται από την PLC κυψέλη.

Ο συγκεκριμένος στόχος εκφράζεται μέσω της μεγιστοποίησης του δείκτη ισοτιμίας Jain's Fairness Index (JFI) [Jai84], που δίδεται από τη σχέση

$$\max \left\{ f(T_N, \mathbf{TH}T_N) = \frac{(|\sum_{j=1}^N M_j \tau_j(T_N, \mathbf{TH}T_N)|)^2}{(\sum_{j=1}^N M_j) \sum_{j=1}^N (M_j \tau_j(T_N, \mathbf{TH}T_N))^2} \right\}, \quad \tau_j \geq 0 \quad (5.5)$$

υπό τους περιορισμούς (5.3) και (5.4).

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι ανωτέρω δύο στόχοι βελτιστοποίησης είναι αντιτιθέμενοι. Πράγματι, η μεγιστοποίηση της διέλευσης μπορεί να οδηγήσει σε μη ισότιμη κατανομή των πόρων, αποδίδοντας περισσότερους πόρους στους TCP χρήστες που αντιμετωπίζουν καλύτερες συνθήκες μετάδοσης. Υπό μια ακραία εκδοχή, η μέγιστη τιμή διέλευσης επιτυγχάνεται όταν όλοι οι πόροι ανατεθούν στον κόμβο (1) δηλαδή όταν ισχύει $\mathbf{TH}T = [TCT, 0, \dots, 0]$. Η μέγιστη τιμή της διέλευσης προκύπτει ίση με $g(T_{N-1}, \mathbf{TH}T_{N-1}) = R_1$. Όμως, ο συγκεκριμένος τρόπος ανάθεσης αφήνει χωρίς εξυπηρέτηση τους υπόλοιπους PLC κόμβους της κυψέλης.

Επίσης, η επίτευξη πλήρως δίκαιης κατανομής πόρων στους TCP χρήστες οδηγεί σε αρκετά χαμηλή αθροιστική διέλευση και σε μικρή χρησιμοποίηση του φυσικού μέσου μετάδοσης που είναι οι εμπλεκόμενοι PLC δίαυλοι, αφού, προκειμένου να επιτευχθεί η δικαιότερη κατανομή, TCP χρήστες που αντιμετωπίζουν κακές συνθήκες μετάδοσης επιβάλλουν τους χαμηλούς ρυθμούς μετάδοσης στο σύνολο της κυψέλης.

Προκειμένου να προσδιοριστεί η βέλτιστη τιμή για το ισοζύγιο μεταξύ διέλευσης και ισοτιμίας που προκύπτει με κατάλληλη διαχείριση των δύο αντιτιθέμενων στόχων, το πρόβλημα βελτιστοποίησης διατυπώνεται υπό την παραλλαγμένη εκδοχή

$$\max \left\{ g(T_N, \mathbf{THT}_N) = \sum_{j=1}^N M_j \tau_j(T_N, \mathbf{THT}_N) \right\} \quad (5.6)$$

υπό τους περιορισμούς (5.3), (5.4) και εξασφαλίζοντας

$$f(T_N, \mathbf{THT}_N) = \frac{(|\sum_{j=1}^N M_j \tau_j(T_j, \mathbf{THT}_j)|)^2}{(\sum_{j=1}^N M_j) \sum_{j=1}^N (M_j \tau_j(T_N, \mathbf{THT}_N))} \geq JFI_{\min}, \tau_j \geq 0 \quad (5.7)$$

όπου JFI_{\min} αντιστοιχεί στον ελάχιστο επιθυμητό δείκτη ισοτιμίας μεταξύ των TCP συνδέσεων. Στην επόμενη ενότητα περιγράφονται αριθμητικές τεχνικές επίλυσης του ανωτέρω προβλήματος βελτιστοποίησης με στόχο τον προσδιορισμό των τιμών $(\mathbf{R}, \mathbf{BER})^*$ και \mathbf{THT}^* .

5.3. Επίλυση του προβλήματος με αριθμητικές μεθόδους

5.3.1. Στρατηγικές βελτιστοποίησης

Προκειμένου να προσδιορισθεί αριθμητικά η βέλτιστη λύση του προβλήματος κατανομής πόρων υπό περιορισμούς, στη βιβλιογραφία προτείνονται οι εξής στρατηγικές [Cel06]:

i. Στρατηγική Tradeoff

Βάσει της συγκεκριμένης στρατηγικής προσδιορίζονται χωριστά οι τιμές $(\mathbf{R}, \mathbf{BER})^*$ και \mathbf{THT}^* που βελτιστοποιούν τη διέλευση ή που επιτυγχάνουν τη μεγαλύτερη δυνατή ισοτιμία μεταξύ των TCP συνδέσεων. Η τελική ανάθεση πόρων προκύπτει από σταθμισμένο άθροισμα των βέλτιστων τιμών που προσδιορίστηκαν και εξαρτάται από το βαθμό ισοτιμίας που απαιτείται. Στην εξεταζόμενη περίπτωση, η στρατηγική tradeoff περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα:

- a. Υπολογισμός των τιμών $(\mathbf{R}, \mathbf{BER})^*$ και \mathbf{THT}^* που επιτυγχάνουν τη μεγιστοποίηση που εκφράζει η (5.2) υπό τους περιορισμούς (5.3) και (5.4). Η λύση αυτή, έστω \mathbf{THT}_1 , προσδιορίζει την υψηλότερη αθροιστική διέλευση.
- b. Υπολογισμός των τιμών $(\mathbf{R}, \mathbf{BER})^*$ και \mathbf{THT}^* που επιτυγχάνουν τη μεγιστοποίηση που εκφράζει η (5.5) υπό τους περιορισμούς (5.3) και (5.4). Η

λύση αυτή, έστω \mathbf{THT}_2 , αντιστοιχεί στη διέλευση που προκύπτει όταν η κατανομή των πόρων είναι πλήρως δίκαιη.

- c. Η τελική λύση προκύπτει από τη σταθμισμένη τιμή α

$$\mathbf{THT} = \mathbf{THT}_1 \cdot \rho + \mathbf{THT}_2 \cdot (1 - \rho) \quad (5.8)$$

όπου $0 \leq \rho \leq 1$. Σημειώνεται ότι το ρ έχει αντίστροφη σχέση με το δείκτη ισοτιμίας JFI. Όταν σχεδιαστικό κριτήριο αποτελεί η ισοτιμία μεταξύ των TCP συνδέσεων, επιλέγονται τιμές του ρ κοντά στο 0.

ii. *Στρατηγική Range*

Βάσει της στρατηγικής Range υπολογίζονται αρχικά οι τιμές που βελτιστοποιούν τον πρώτο στόχο. Στη συνέχεια, η τελική λύση προκύπτει μεταβάλλοντας τις τιμές που προσδιορίστηκαν στο πρώτο βήμα σε ένα συγκεκριμένο εύρος. Στην εξεταζόμενη περίπτωση ισχύουν τα ακόλουθα:

- Υπολογισμός του \mathbf{THT}_1 , όπως έγινε ακολουθώντας τη στρατηγική tradeoff.
- Εύρεση της τιμής που ικανοποιεί τον περιορισμό (5.5) σε εύρος τιμών $[\max(\mathbf{THT}_1(1 - b), 0), \min(\mathbf{THT}_1(1 + b), TCT)]$.

Στην περίπτωση αυτή το όφελος του αλγορίθμου είναι ότι ο προσδιορισμός λύσης που εξυπηρετεί και το δεύτερο στόχο γίνεται μέσα σε ένα μικρό εύρος $2b$ και όχι σε όλο το εύρος TCT. Η τιμή του b καθορίζει το χρόνο σύγκλισης του αλγορίθμου και εξαρτάται από το δείκτη ισοτιμίας που απαιτείται.

5.3.2. Αλγόριθμος υπολογισμού συνολικής διέλευσης

Για τη μεγιστοποίηση της αθροιστικής διέλευσης των TCP συνδέσεων και τη βέλτιστη διαχείριση του ισοζυγίου διέλευσης-δικαιοσύνης ακολουθήθηκε η στρατηγική Tradeoff. Συγκεκριμένα, ο αλγόριθμος κατανομής των πόρων που προτείνεται περιλαμβάνει τις ακόλουθες φάσεις:

Φάση 1: Περιορισμός των πιθανών συνδυασμών (R-BER).

Μελετώντας τα ζεύγη (R-BER) του Πιν.4.1 προκύπτει ότι η μεταβολή των τιμών του ρυθμού κώδικα επιτρέπει την εμφάνιση ζευγών με πολύ υψηλό ή πολύ χαμηλό BER. Για το πρόβλημα βελτιστοποίησης, υιοθετήθηκε ως άνω όριο για το BER η τιμή $BER_{TH} = 10^{-8}$. Επίσης, δεν επιλέχθηκαν τιμές πολύ χαμηλότερες από το προαναφερθέν όριο, αφού επέφεραν σημαντική μείωση της διέλευσης χωρίς αισθητή βελτίωση του PLR. Κατά τη φάση βελτιστοποίησης που ακολουθεί αυτό το βήμα, σε κάθε ζεύξη

Πίνακας 5.1: Επιλεγόμενες τιμές συνδυασμών (R-BER) για ενδεικτικές PLC ζεύξεις.

		Available Code Rates							
		1/4		1/2		2/3		3/4	
		R(Mbps)	BER	R(Mbps)	BER	R(Mbps)	BER	R(Mbps)	BER
L1		9,89	2,5E-54	19,79	2,4E-26	26,38	3,3E-11	29,68	3,2E-06
L2		8,59	6,0E-21	17,17	1,8E-06	22,90	1,1E-01	25,76	7,1E-01
L3		6,27	9,7E-01	12,55	1,0E+00	16,73	1,0E+00	18,82	1,0E+00
L4		9,61	2,2E-63	19,21	6,1E-31	25,61	1,5E-14	28,82	1,6E-08
L5		7,66	1,8E-18	15,33	2,6E-05	20,43	2,5E-01	22,99	8,6E-01
L6		10,51	1,2E-66	21,01	2,3E-32	28,01	2,0E-15	31,52	4,0E-09
L7		9,55	1,2E-43	19,11	6,6E-19	25,48	1,5E-07	28,66	7,6E-04
L8		11,47	1,5E-92	22,94	1,5E-49	30,59	2,8E-26	34,41	5,9E-17
L9		10,11	7,4E-52	20,22	7,9E-24	26,96	2,5E-10	30,33	1,2E-05
L10		11,92	1,7E-11	23,85	1,3E-60	31,80	1,9E-33	35,77	2,7E-22
L11		8,03	2,6E-11	16,06	2,1E-02	21,42	8,9E-01	24,09	1,0E+00
L12		10,62	9,4E-81	21,24	5,8E-42	28,32	2,0E-21	31,86	2,1E-13
L13		7,81	1,9E-21	15,61	1,0E-06	20,81	9,2E-02	23,42	6,8E-01
L14		8,33	2,8E-12	16,67	9,5E-03	22,22	8,3E-01	25,00	1,0E+00
		4/5		5/6		6/7		7/8	
		R(Mbps)	BER	R(Mbps)	BER	R(Mbps)	BER	R(Mbps)	BER
L1		31,66	1,4E-03	32,98	2,0E-02	33,92	9,6E-02	34,62	2,1E-01
L2		27,48	9,7E-01	28,62	1,0E+00	29,44	1,0E+00	30,05	1,0E+00
L3		20,08	1,0E+00	20,91	1,0E+00	21,51	1,0E+00	21,96	1,0E+00
L4		30,74	4,0E-06	32,02	1,4E-03	32,93	1,3E-02	33,62	4,6E-02
L5		24,52	9,9E-01	25,54	1,0E+00	26,27	1,0E+00	26,82	1,0E+00
L6		33,62	1,5E-05	35,02	6,8E-04	36,02	7,5E-03	36,77	2,9E-02
L7		30,57	4,5E-02	31,84	2,1E-01	32,75	4,8E-01	33,44	6,5E-01
L8		36,70	2,7E-11	38,23	1,9E-08	39,32	1,6E-06	40,14	2,3E-05
L9		32,36	3,5E-03	33,70	3,8E-02	34,67	1,5E-01	35,39	3,0E-01
L10		38,15	2,4E-15	39,74	9,2E-12	40,88	2,7E-09	41,73	9,1E-08
L11		25,70	1,0E+00	26,77	1,0E+00	27,54	1,0E+00	28,11	1,0E+00
L12		33,98	1,2E-08	35,40	2,6E-06	36,41	8,9E-05	37,17	7,3E-04
L13		24,98	9,6E-01	26,02	1,0E+00	26,76	1,0E+00	27,32	1,0E+00
L14		26,66	1,0E+00	27,78	1,0E+00	28,57	1,0E+00	29,16	1,0E+00

αντιστοιχούν τα ζεύγη (R-BER) που ικανοποιούν τις ανωτέρω απαιτήσεις ως προς το BER. Λαμβάνοντας υπόψη τους ανωτέρω περιορισμούς, ο Πιν.4.1 μετασχηματίζεται στον Πιν.5.1, σύμφωνα με τον οποίο επιλέγεται για κάθε PLC ζεύξη ένα ζεύγος ανάμεσα σε δύο πιθανούς συνδυασμούς (R-BER). Ο Πιν.5.1 απεικονίζει τους τελικούς συνδυασμούς (R-BER) που πληρούν τους προαναφερθέντες προσδιορισμούς

Φάση 2: Προσδιορισμός της βέλτιστης διέλευσης.

Ο αλγόριθμος μεγιστοποίησης της αθροιστικής διέλευσης που προτείνεται περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα:

Βήμα 1: Επιλογή των ζευγών (R-BER) τιμών από τον Πιν5.1 έτσι ώστε για κάθε ζεύξη της PLC κυψέλης να ισχύει $PLR_k \geq 0.01$, όπου οι τιμές PLR_k προσδιορίζονται από τη σχέση (4.13). Τα ζεύγη PLC που επιλέγονται εξαρτώνται από τη θέση μιας ζεύξης στην PLC κυψέλη και του BER που τη χαρακτηρίζει.

Βήμα 2: Υπολογισμός της τιμής B_{fs} από τη σχέση (4.21) για κάθε κόμβο του δικτύου. Η συγκεκριμένη τιμή εξαρτάται από τη ζεύξη στενωπό που κατά περίπτωση προηγείται κάθε κόμβου.

Βήμα 3: Υπολογισμός του συνολικού εύρους ζώνης B της σχέσης (4.20). Σε αυτό το βήμα ο υπολογισμός του εύρους ζώνης πραγματοποιείται ξεκινώντας από τον τελευταίο κόμβο του δικτύου. Σε αυτόν ανατίθεται το εύρος ζώνης που προέκυψε από την αντίστοιχη τιμή B_{fs}/M , όπου M είναι το πλήθος χρηστών που εξυπηρετούνται από τον τελευταίο κόμβο. Αναδρομικά, διατρέχοντας την PLC κυψέλη από το τέλος προς την αρχή, υπολογίζεται το εύρος ζώνης και για τους υπόλοιπους PLC κόμβους οι οποίοι με τη σειρά τους αφαιρούν από το B_{fs} το εύρος ζώνης που έχουν καταλάβει οι προηγούμενοι PLC κόμβοι και διαμοιράζουν το υπόλοιπο στους χρήστες που εξυπηρετούν. Ο υπολογισμός του εύρους ζώνης ολοκληρώνεται στο επίπεδο του πρώτου κόμβου, ο οποίος λαμβάνει το εύρος ζώνης που δεν κατέλαβαν οι προηγούμενοι κόμβοι.

Βήμα 4: Επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης της συνολικής διέλευσης, δηλαδή εύρεση των τιμών THT καθώς και των συνδυασμών (R-BER) που οδηγούν στη μεγιστοποίηση που εκφράζεται από την (5.2). Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα, αυτό ισοδυναμεί με την ανάθεση όλων των πόρων του δικτύου στον πρώτο κόμβο, επομένως ο πρώτος κόμβος κατασπαταλεί σε αυτή την περίπτωση όλο το εύρος ζώνης του δικτύου αφού μεταδίδει για χρόνο ίσο με TCT.

Βήμα 5: Έλεγχος αν ο δείκτης ισοτιμίας JFI που έχει προκύψει από την τρέχουσα κατανομή πόρων υπερβαίνει την τιμή του JFI_{min} που έχει προδιαγραφεί. Αν αυτό δεν ισχύει, συνεχίζεται η βελτιστοποίηση αναθέτοντας αυτή τη φορά πόρους και στον επόμενο χρήστη. Δηλαδή ισχύει $THT_1 + THT_2 = TCT$. Με τον νέο περιορισμό επιλύεται εκ νέου το πρόβλημα μεγιστοποίησης της (5.2) που οδηγεί στην εύρεση των βέλτιστων τιμών THT_1 και THT_2 , δηλαδή στις τιμές εκείνες που μεγιστοποιούν τη συνολική διέλευση TCP. Μετά από κάθε υπολογισμό των τιμών THT, υπολογίζεται ο δείκτης ισοτιμίας για τον οποίο πρέπει να ισχύει $JFI \geq JFI_{min}$. Το Βήμα 5 εκτελείται αναδρομικά μέχρι να βρεθεί η τιμή του JFI που ικανοποιεί τον προδιαγραφέντα περιορισμό. Σημειώνεται, ότι για μεγάλες τιμές του JFI_{min} ανατίθενται πόροι σε όλους τους κόμβους της κυψέλης.

Βήμα 6: Νέα εκτέλεση των προηγούμενων βημάτων σε περίπτωση όπου υπάρξει σύνδεση νέου TCP χρήστη ή αλλαγή στις συνθήκες μετάδοσης στο PLC μέσω μετάδοσης.

5.4. Προσομοιώσεις - Συζήτηση Αποτελεσμάτων

5.4.1. Απαιτήσεις προσομοίωσης

Το προτεινόμενο σχήμα κατανομής πόρων εφαρμόστηκε σε αντιπροσωπευτικά δείγματα PLC κυψελών αστικών και αγροτικών περιοχών. Οι κυψέλες PLC που προσομοιώθηκαν απαρτίζονται από 6 PLC κόμβους και έχουν τη δομή που απεικονίζεται στο Σχ.4.5. Σημειώνεται ότι οι κυψέλες που επιλέχθηκαν περιλαμβάνουν PLC ζεύξεις με χαρακτηριστικά φυσικού στρώματος που έχουν ληφθεί από το πιλοτικό PLC δίκτυο της Λάρισας [Sar09]. Οι τέσσερις αντιπροσωπευτικοί τύποι κυψελών παρουσιάζονται στον Πιν.5.2. Σε κάθε κυψέλη, η PLC ζεύξη με έντονη γραφή αντιστοιχεί στη ζεύξη στενωπό της PLC κυψέλης. Οι ρυθμοί κώδικα επιλέχθηκαν έτσι ώστε το PLR σε κάθε σύνδεση να μην υπερβαίνει το 1%. Σημειώνεται ότι διαφορετικές απαιτήσεις βελτιστοποίησης που μεταβάλλουν την τιμή του JFI_{min} , οδηγούν σε διαφορετικούς ρυθμούς κώδικα που επηρεάζουν τις τιμές R-BER των ζεύξεων. Οι τιμές του Πιν.5.2 αντιστοιχούν σε

Πίνακας 5.2: Τιμές ρυθμού μετάδοσης και BER των ζεύξεων που απαρτίζουν τις PLC κυψέλες για διάφορες τιμές ρυθμού κώδικα.

		LINK	Code Rate	R (Mbps)	BER
Rural case	CT1	link(1)	6/7	40.9	3.E-09
		link(2)	1/4	7.7	2.E-18
		link(3)	4/5	34.0	1.E-08
		link(4)	5/6	38.2	2.E-08
		link(5)	2/3	26.4	3.E-11
	CT2	link(1)	6/7	40.9	3.E-09
		link(2)	4/5	34.0	1.E-08
		link(3)	5/6	38.2	2.E-08
		link(4)	1/4	7.7	2.E-18
		link(5)	2/3	26.4	3.E-11
	CT4	link(1)	6/7	40.9	3.E-09
		link(2)	4/5	34.0	2.E-18
		link(3)	2/3	27.0	2.E-10
		link(4)	5/6	38.2	2.E-08
		link(5)	2/3	26.4	3.E-11
Urban case	CT3	link(1)	6/7	40.9	3.E-09
		link(2)	1/4	7.7	2.E-18
		link(3)	5/6	38.2	2.E-08
		link(4)	1/4	17.2	2.E-06
		link(5)	2/3	26.4	3.E-11

JFI>90%. Τέλος, σημειώνεται ότι τα αποτελέσματα προέκυψαν υποθέτοντας σταθερή τιμή έγχυσης ισχύος από κάθε PLC Κόμβο ίση προς 10dBm.

Οι τέσσερις αντιπροσωπευτικοί τύποι κυψελών (Cell Types – CTs), των οποίων η δομή παρουσιάζεται στο Σχ.4.5, είναι:

- Οι κυψέλες τύπου CT1 περιλαμβάνουν μία ζεύξη αρκετά χαμηλού ρυθμού μετάδοσης στην αρχή της κυψέλης, τη link(2). Οι υψηλότεροι ρυθμοί μετάδοσης που επιτυγχάνονται στις υπόλοιπες ζεύξεις και η ύπαρξη μιας μόνο κακής ζεύξης υποδηλώνουν κυψέλη που συναντάται σε αγροτικές περιοχές. Η παρουσία της κακής ζεύξης στην αρχή της κυψέλης περιορίζει δραστικά το διαθέσιμο εύρος ζώνης για την εξυπηρέτηση των κόμβων που ακολουθούν. Η ύπαρξη κυψελών αυτού του τύπου υποδηλώνει την ύπαρξη ενδεχόμενης αστοχίας στη διάταξη του ενεργειακού δικτύου που μειώνει δραστικά το SNR στην PLC ζεύξη που επηρεάζεται από την αστοχία.

- Οι κυψέλες CT2 περιλαμβάνουν μία κακή ζεύξη προς το τέλος της κυψέλης, τη link(4), εμποδίζοντας την περαιτέρω επέκταση αυτής με προσθήκη νέων κόμβων. Πρόκειται για τυπικές κυψέλες που συναντώνται σε αγροτικές περιοχές. Η κακή ζεύξη υποδηλώνει συνήθως την ύπαρξη διακλάδωσης του ενεργειακού δικτύου που προκαλεί ανάκλαση των PLC σημάτων. Στην περίπτωση αυτή, οι κόμβοι που επηρεάζονται από τη συγκεκριμένη επιλογή θέσης της κακής ζεύξης είναι μόνο οι κόμβοι 5 και 6.
- Οι κυψέλες CT3 συναντώνται συχνότερα σε αστικές περιοχές, το ηλεκτρικό δίκτυο των οποίων περιλαμβάνει πολλές διακλαδώσεις, χαρακτηριστικό που οδηγεί σε υποβάθμιση του SNR σε περισσότερες από μια PLC ζεύξεις. Όπως προκύπτει από τον Πιν.5.1, οι ζεύξεις (2) και (4) εμφανίζουν χαμηλούς ρυθμούς μετάδοσης, με τη ζεύξη (2) να αποτελεί τη στενωπό μετάδοσης της κυψέλης.
- Οι κυψέλες CT4 δεν περιλαμβάνουν κάποια κακή ζεύξη, γεγονός που τις κατατάσσει στις κυψέλες που συναντώνται σε αγροτικές περιοχές, όπου το ενεργειακό δίκτυο δεν εμφανίζει διακλαδώσεις για αρκετά μεγάλες αποστάσεις.

Στόχος των προσομοιώσεων επί των ανωτέρω τύπων κυψελών για τα διάφορα σενάρια που εξετάζονται είναι η ανάδειξη:

- i. Της αναγκαιότητας ενός βέλτιστου σχήματος κατανομής πόρων ως αποτελεσματικού τρόπου στατικής κατανομής πόρων που υποστηρίζεται από τα πρωτόκολλα PLC MAC, για τις περιπτώσεις όπου μια κυψέλη PLC λειτουργεί υπό συνθήκες συμφόρησης για τις οποίες υπάρχουν αυστηρές απαιτήσεις ως προς τη μεταχείριση των TCP συνδέσεων.
- ii. Της αποτελεσματικότητας του προτεινόμενου σχήματος ως προς τη διαχείριση του ισοζυγίου μεταξύ της δικαιοσύνης στην κατανομή πόρων στους διάφορους κόμβους, και κατ' επέκταση στα υποστηριζόμενα από αυτούς TCP τερματικά, και της φασματικής χρησιμοποίησης των PLC διαύλων.

Σε όλα τα σενάρια που προσομοιώθηκαν λήφθηκαν υπόψη τα χαρακτηριστικά φυσικού στρώματος του Πιν.5.1. Σημειώνεται ότι υπήρξαν περιπτώσεις με δείκτη ισοτιμίας JFI < 90% όπου η βελτιστοποίηση ανέδειξε διαφορετικούς ρυθμούς κώδικα από τις τιμές που εικονίζονται στον Πιν.5.1. Στην περίπτωση αυτή, οι συνδυασμοί R και BER έχουν αντληθεί από τον Πιν.4.1. Στα σενάρια που ακολουθούν, ο κόμβος HE αποτελεί τον αποστολέα της TCP κίνησης που αποστέλλεται προς τους χρήστες που εξυπηρετούν οι

υπόλοιποι PLC κόμβοι. Κάθε TCP τερματικό επικοινωνεί με τον HE μέσω μιας TCP σύνδεσης μακράς διάρκειας, δηλαδή υπάρχουν δεδομένα προς μετάδοση καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης, οδηγώντας το δίκτυο σε λειτουργία κοντά στο σημείο κορεσμού, όπου η ανάγκη βέλτιστης κατανομής των πόρων είναι απαραίτητη.

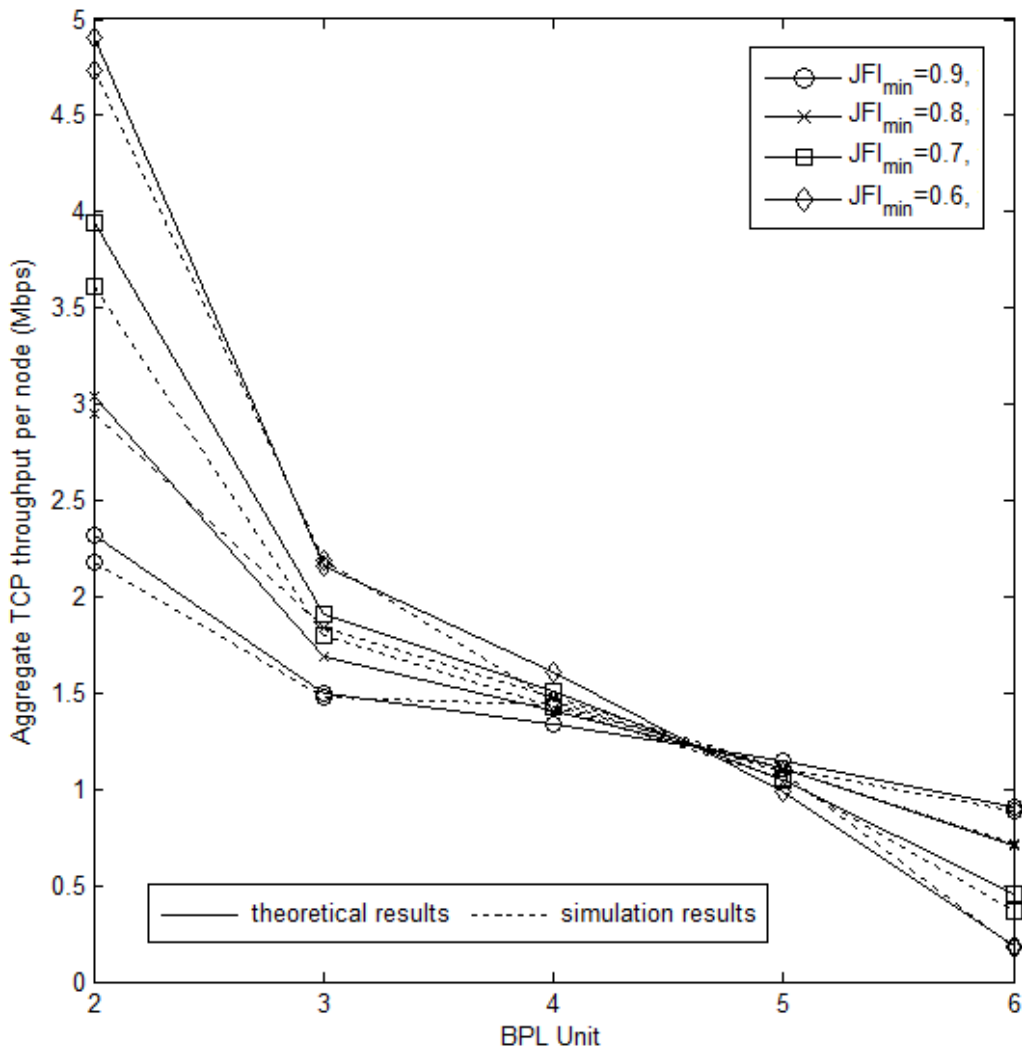
Ως προς την προσομοίωση του TCP πρωτοκόλλου, χρησιμοποιήθηκε η έκδοση TCP New Reno, η επιλογή SACK παρέμεινε απενεργοποιημένη, ενώ το παράθυρο του παραλήπτη τέθηκε ίσο με 64kbytes. Σημειώνεται ότι λόγω της σημαντικής επίδρασης που έχει το παράθυρο στη διέλευση μιας TCP σύνδεσης, εξετάζονται στη συνέχεια σενάρια με μεταβλητό παράθυρο δέκτη. Για όλα τα σενάρια, το TCT τέθηκε ίσο με 50ms. Τέλος, ενεργοποιήθηκε η επιλογή του TCP Delayed ACKs, δηλαδή τέθηκε $b=2$ στη σχέση (4.12).

Η αξιολόγηση του προτεινόμενου σχήματος έγινε με χρήση του προσομοιωτή OPNET [OPNET], με τη χρήση του οποίου εξετάστηκαν δύο χαρακτηριστικές περιπτώσεις λειτουργίας. Η πρώτη περίπτωση σεναρίων εξετάζει την επίδραση της ποιότητας των ζεύξεων στην επίδοση του TCP, μελετώντας την επίδραση της στενωπού και της θέσης όπου αυτή εμφανίζεται στο εσωτερικό της PLC κυψέλης που εξετάζεται κατά περίπτωση. Τα συμπεράσματα που προκύπτουν είναι ιδιαίτερα χρήσιμα για σχεδίαση PLC δικτύων ευρείας κλίμακας. Στη δεύτερη περίπτωση σεναρίων, εξετάζεται η επίδραση της κατανομής των TCP χρηστών σε μια PLC κυψέλη. Στόχος είναι η εύρεση της βέλτιστης κατανομής των κόμβων PLC και σχηματισμού των PLC κυψελών ώστε να αυξάνεται τόσο η χρησιμοποίηση του δικτύου όσο και η δικαιοσύνη μεταξύ των συνδέσεων.

5.4.2. Μελέτη της επίδρασης της ποιότητας των PLC ζεύξεων

Για τη μελέτη της επίδρασης της ποιότητας των PLC ζεύξεων στην αθροιστική διέλευση των TCP συνδέσεων χρησιμοποιήθηκαν οι τύποι κυψελών CT1, CT2 και CT3 που παρουσιάστηκαν στον Πιν.5.1. Κατά τη διεξαγωγή των σχετικών προσομοιώσεων, το πλήθος των ενεργών TCP συνδέσεων που εξυπηρετούνται από κάθε κόμβο διατηρήθηκε σταθερό, ενώ οι συνδέσεις θεωρήθηκαν ομοιόμορφα κατανεμημένες στους κόμβους της PLC κυψέλης, δηλαδή κάθε κόμβος PLC εξυπηρετεί ίσο πλήθος TCP συνδέσεων.

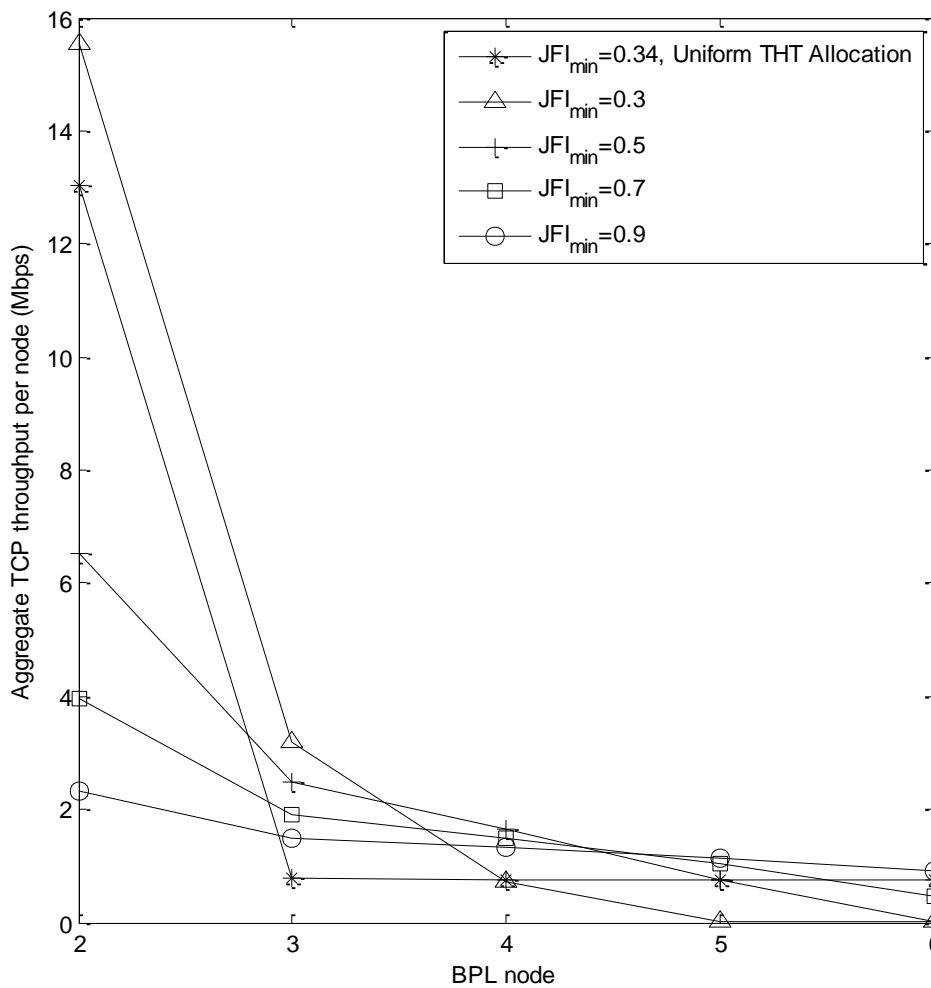
Όπως αναφέρθηκε στο εδάφιο 5.4.1, η επαλήθευση του προτεινόμενου αλγόριθμου μεγιστοποίησης της διέλευσης πραγματοποιήθηκε μέσω του προσομοιωτή OPNET [OPNET]. Για τις προσομοιώσεις λήφθηκαν υπόψη το σχήμα κωδικοποίησης που



Σχήμα 5.1: Σύγκριση θεωρητικών τιμών και τιμών προσομοίωσης συνολικής διέλευσης TCP σε κυψέλες τύπου CT1 για διάφορες τιμές του JFI_{min} .

χρησιμοποιήθηκε σε κάθε ζεύξη, μέσω των τιμών R-BER, και οι προτεινόμενοι χρόνοι **THT** που προέκυψαν από τις σχέσεις (5.6) και (5.7). Όπως μπορεί εύκολα να διαπιστωθεί από το Σχ.5.1, επαληθεύεται η ορθότητα του προτεινόμενου σχήματος αφού για ελάχιστο δείκτη ισοτιμίας $JFI_{min} = 0.7$, η απόκλιση μεταξύ των θεωρητικών τιμών και των τιμών προσομοίωσης δεν υπερβαίνει τα 100kbps.

Στο Σχ.5.2 απεικονίζεται η αποτελεσματικότητα του προτεινόμενου σχήματος για κυψέλες τύπου CT1 και διάφορες τιμές του ελάχιστου δείκτη ισοτιμίας JFI_{min} . Τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν επίσης με την επίδοση της περίπτωσης όπου δεν εφαρμόζεται σχήμα βελτιστοποίησης, δηλαδή την περίπτωση σταθερής κατανομής των **THT**, που αποτελεί το βασικό πρότυπο MAC που υιοθετήθηκε στα PLC δίκτυα μέχρι την έλευση του IEEE 1901. Το βασικό συμπέρασμα που προκύπτει από τα αποτελέσματα του Σχ.5.2 είναι ότι η ύπαρξη ζεύξης-στενωπού στην αρχή μιας PLC



Σχήμα 5.2: Αθροιστική διέλευση TCP ανά κόμβο κυψέλης τύπου CT1. Η ζεύξη (2) αποτελεί τη στενωπό της κυψέλης.

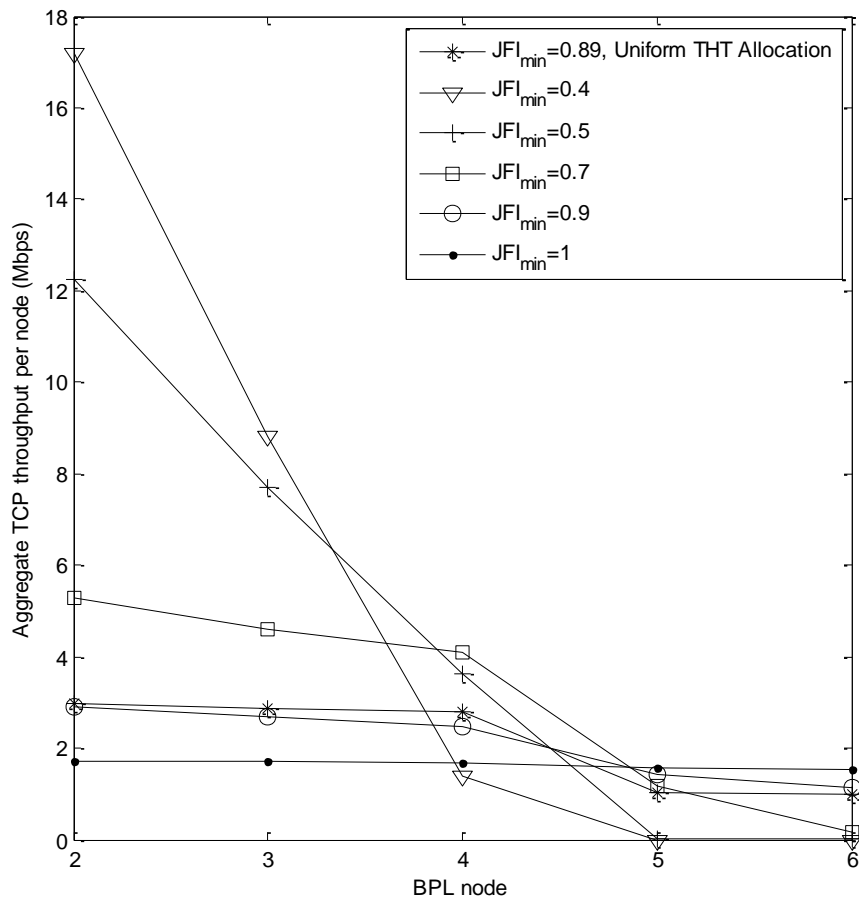
κυψέλης, δηλαδή κοντά στον HE, επηρεάζει σημαντικά όλους τους TCP χρήστες που εξυπηρετούνται από τους PLC κόμβους που έπονται της ζεύξης-στενωπού. Το ανωτέρω συμπέρασμα προκύπτει διαπιστώνοντας ότι η διέλευση των TCP συνδέσεων που εξυπηρετούνται από τον κόμβο (2), είναι αρκετά υψηλότερη σε σχέση με αυτή των κόμβων που ακολουθούν την κακή ζεύξη (ζεύξη 2). Επίσης, συμπεραίνεται ότι, καθώς αυξάνεται η τιμή του δείκτη ισοτιμίας JFI_{min} , μειώνεται η διέλευση των TCP συνδέσεων κατά μήκος της PLC κυψέλης, επιβεβαιώνοντας την αντισταθμιστική σχέση μεταξύ δικαιοσύνης και διέλευσης. Σε σύγκριση με τη σταθερή κατανομή των THT και για ίδιες τιμές του δείκτη JFI_{min} η χρήση του προτεινόμενου σχήματος οδηγεί σε υψηλότερη ή αντίστοιχη αθροιστική διέλευση. Η διαπίστωση αυτή επαληθεύεται και από τον Πιν.5.3,

Πίνακας 5.3: Τιμές *THT* και αθροιστικής διέλευσης για την κυψέλη *CT1*.

	JFI_{min}	THT_1	THT_2	THT_3	THT_4	THT_5	Αθροιστική Διέλευση (Mbps)
CT1 Η ζεύξη link(2) αποτελεί τη ζεύξη στενωπό	1	0.01	0.01	30.61	1.28	18.10	0.57
	0.9	8.83	31.95	4.45	3.04	1.73	7.22
	0.8	9.73	32.03	4.22	2.67	1.35	7.95
	0.7	10.54	33.35	4.04	2.02	0.40	8.62
	0.6	12.04	32.23	3.64	1.73	0.36	9.84
	0.5	13.74	31.99	3.17	1.10	0.00	11.40
	0.4	16.83	30.50	2.35	0.32	0.00	13.97
	0.3	23.42	25.64	0.94	0.00	0.00	19.43
Ομοιόμορφη κατανομή <i>THT</i>	0.34	10	10	10	10	10	16.12

όπου παρουσιάζονται οι βέλτιστες τιμές των **THT** που επιλέχθηκαν από το μοντέλο, καθώς και η αθροιστική διέλευση σε όλη την PLC κυψέλη για κάθε τιμή του δείκτη JFI_{min} . Όπως προκύπτει από τη συνδυασμένη μελέτη του Σχ.5.2 και του Πιν.5.3, η ομοιόμορφη κατανομή των **THT** οδηγεί σε άνιση κατανομή του εύρους ζώνης που οδηγεί σε δείκτη ισοτιμίας $JFI=0.34$. Επισημαίνεται ότι, οι δύο κόμβοι που ακολουθούν την κακή ζεύξη – κόμβοι (5) και (6) –έχουν σχεδόν μηδενική διέλευση. Επομένως, για χαμηλές τιμές του δείκτη JFI_{min} οι κόμβοι που βρίσκονται προς το τέλος της PLC κυψέλης δεν εξυπηρετούνται προς όφελος αυτών που προηγούνται της κακής ζεύξης, αναδεικνύοντας την αναμενόμενη άδικη κατανομή των πόρων. Επίσης, για χαμηλές τιμές του δείκτη JFI_{min} , το προτεινόμενο σχήμα κατανομής πόρων οδηγεί σε υψηλότερες τιμές συνολικής διέλευσης, αφού ο χρόνος που δεν αξιοποιείται από τους κόμβους που έπονται της ζεύξης-στενωπού ανατίθεται στους κόμβους που προηγούνται αυτής.

Στο Σχ.5.3 απεικονίζεται η αθροιστική διέλευση TCP στους κόμβους κυψέλης τύπου CT2. Η ύπαρξη κακής ζεύξης προς το τέλος της PLC κυψέλης οδηγεί σε υψηλότερη αθροιστική διέλευση αφού η ζεύξη-στενωπός επηρεάζει μόνο τους κόμβους (5) και (6). Η λειτουργία κυψελών τύπου CT2 οδηγεί σε σημαντικά δικαιότερη κατανομή πόρων



Σχήμα 5.3: Αθροιστική διέλευση TCP ανά κόμβο κυψέλης τύπου CT2. Η ζεύξη (4) αποτελεί τη στενωπό της κυψέλης.

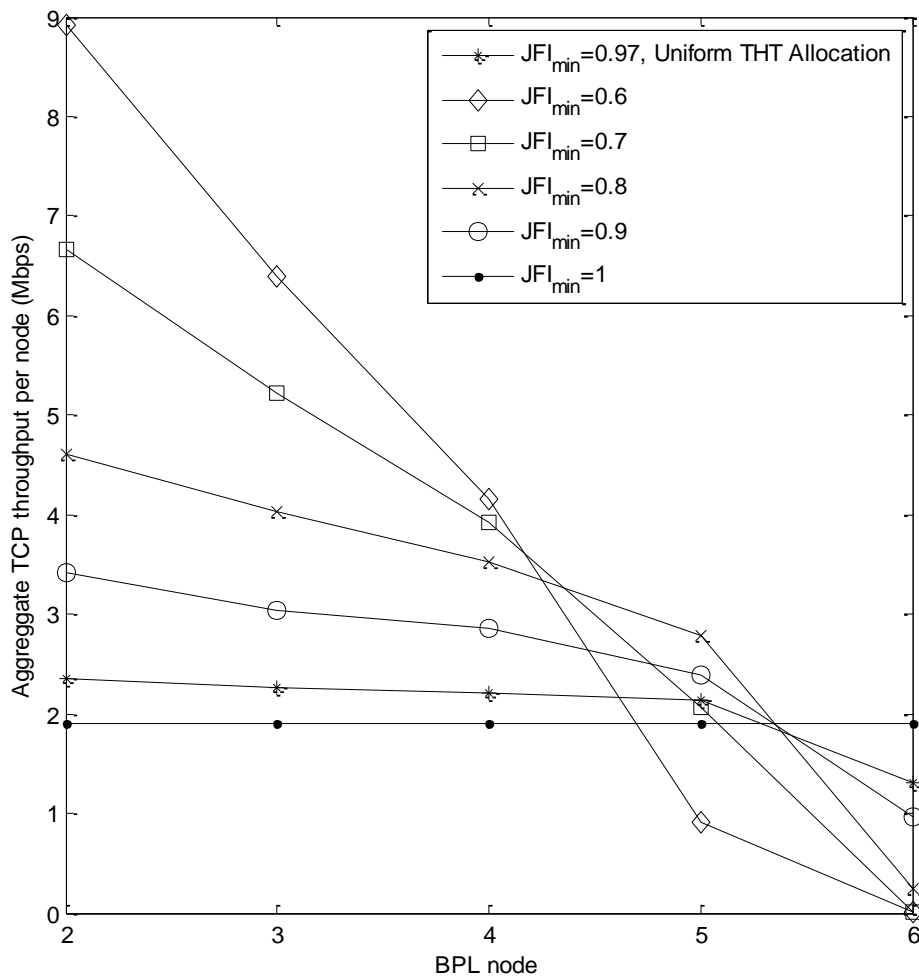
αφού, στην περίπτωση αυτή, η ομοιόμορφη κατανομή των **THT** επιτυγχάνει δείκτη ισοτιμίας $JFI=0.89$. Όπως παρατηρείται και από τον Πιν.5.4, σημαντικό πλεονέκτημα του προτεινόμενου σχήματος αποτελεί η δυνατότητα ρύθμισης της αντισταθμιστικής σχέσης διαχείρισης μεταξύ δικαιοσύνης και διέλευσης. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι στην περίπτωση όπου ο ελάχιστος δείκτης ισοτιμίας τεθεί ίσος με 0.80, δηλαδή λίγο χαμηλότερος από την τιμή που επιτυγχάνεται με ομοιόμορφη κατανομή **THT**, επιτυγχάνεται συνολική αύξηση 2Mbps στην αθροιστική διέλευση TCP της κυψέλης. Επιπλέον, περαιτέρω μείωση στην τιμή $JFI_{min}=0.70$ οδηγεί σε αντίστοιχη αύξηση μεγαλύτερη των 4.5Mbps της αθροιστικής διέλευσης της κυψέλης. Παρόμοια συμπεράσματα αντλούνται και από το Σχ.5.4, όπου παρουσιάζεται η περίπτωση κυψέλης με ζεύξη-στενωπό τη ζεύξη (5), δηλαδή την τελευταία PLC ζεύξη της κυψέλης. Στην περίπτωση αυτή, η ομοιόμορφη κατανομή των **THT** οδηγεί σε ιδιαίτερα χαμηλές τιμές

Πίνακας 5.4: Τιμές THT και αθροιστικής διέλευσης για κυψέλη τύπου CT2.

	JFI_{min}	<i>THT1</i>	<i>THT2</i>	<i>THT3</i>	<i>THT4</i>	<i>THT5</i>	Αθροιστική Διέλευση (Mbps)
CT2 Η ζεύξη link(4) αποτελεί τη ζεύξη στενωπού	1	10.12	9.66	6.38	20.83	3.00	8.28
	0.9	13.03	11.39	6.62	16.81	2.16	10.65
	0.8	15.26	12.92	6.86	13.50	1.45	12.67
	0.7	18.53	14.90	7.14	8.95	0.48	15.37
	0.6	23.62	17.78	7.35	1.26	0.00	19.60
	0.5	28.42	16.79	4.80	0.00	0.00	23.58
	0.4	33.05	15.13	1.82	0.00	0.00	27.42
	0.3	39.69	10.31	0.00	0.00	0.00	32.94
Ομοιόμορφη κατανομή THT	0.89	10	10	10	10	10	10.68

διέλευσης, ενώ η δυνατότητα διαχείρισης της αντισταθμιστικής σχέσης δικαιοσύνης-διέλευσης που προσφέρεται από το προτεινόμενο σχήμα οδηγεί σε υψηλότερες τιμές διέλευσης, αφού ο μοναδικός κόμβος που επηρεάζεται από την ύπαρξη της ζεύξης-στενωπού είναι ο κόμβος (6).

Στο Σχ.5.5 παρουσιάζεται η αθροιστική διέλευση TCP για κυψέλες τύπου CT3, που αποτελούν χαρακτηριστική περίπτωση PLC κυψελών σε αστικές περιοχές. Παρατηρείται ότι η ομοιόμορφη κατανομή των **THT** οδηγεί σε ιδιαίτερα άδικη κατανομή πόρων ($JFI=0.3$). Παράλληλα, όπως προκύπτει από τον Πιν.5.5, η αθροιστική διέλευση TCP επηρεάζεται κυρίως από τη θέση της κύριας ζεύξης-στενωπού, δηλαδή της ζεύξης (2). Η επίδραση της στενωπού γίνεται εντονότερη για χαμηλές τιμές του δείκτη ισοτιμίας. Περαιτέρω μελέτη της τοπολογίας των κυψελών σε αστικές περιοχές οδήγησε στο είδος κυψέλης που εξετάζεται στο Σχ.4.6 όπου οι link (2) και link (4) έχουν αντιμετωπιστεί, με αποτέλεσμα η link (4) να είναι η κύρια ζεύξη-στενωπός. Όπως προκύπτει από τις τιμές της διέλευσης του Σχ.5.6, η ύπαρξη της κακής ζεύξης προς το άκρο μιας κυψέλης οδηγεί

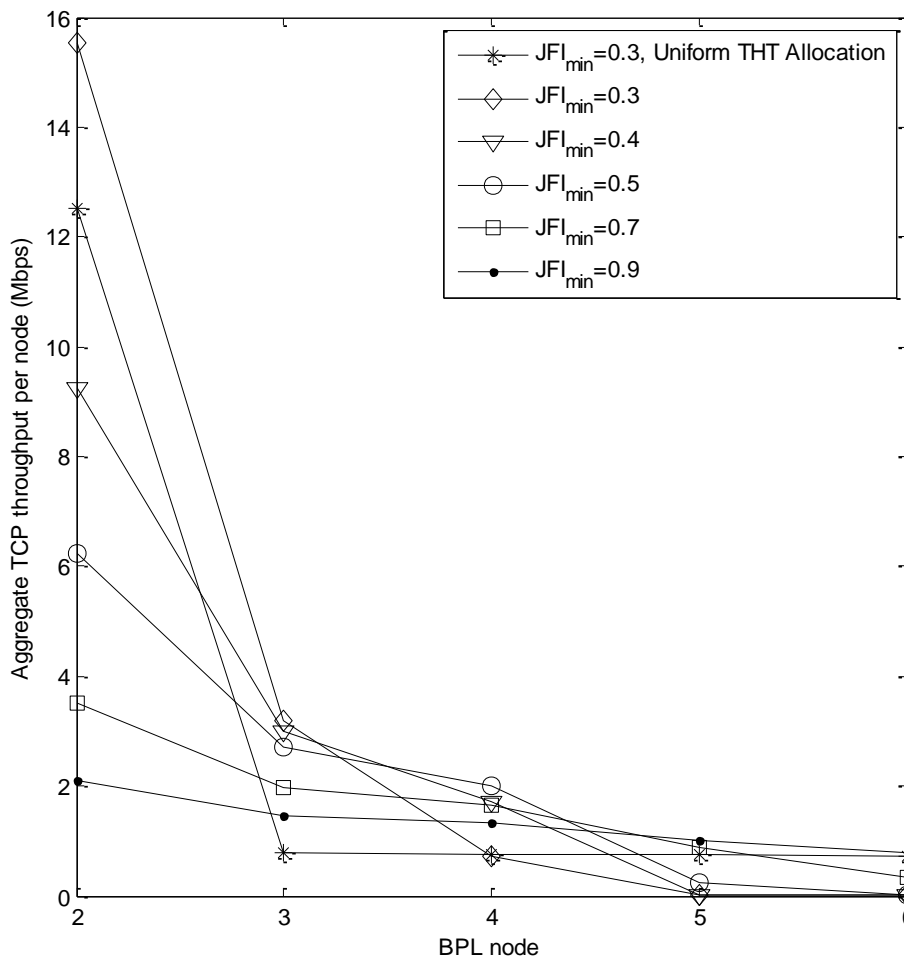


Σχήμα 5.4: Αθροιστική διέλευση TCP ανά κόμβο. Η ζεύξη (5) αποτελεί τη στενωπό της κυψέλης.

σε σημαντικά υψηλότερες τιμές διέλευσης για όλους τους κόμβους της κυψέλης.

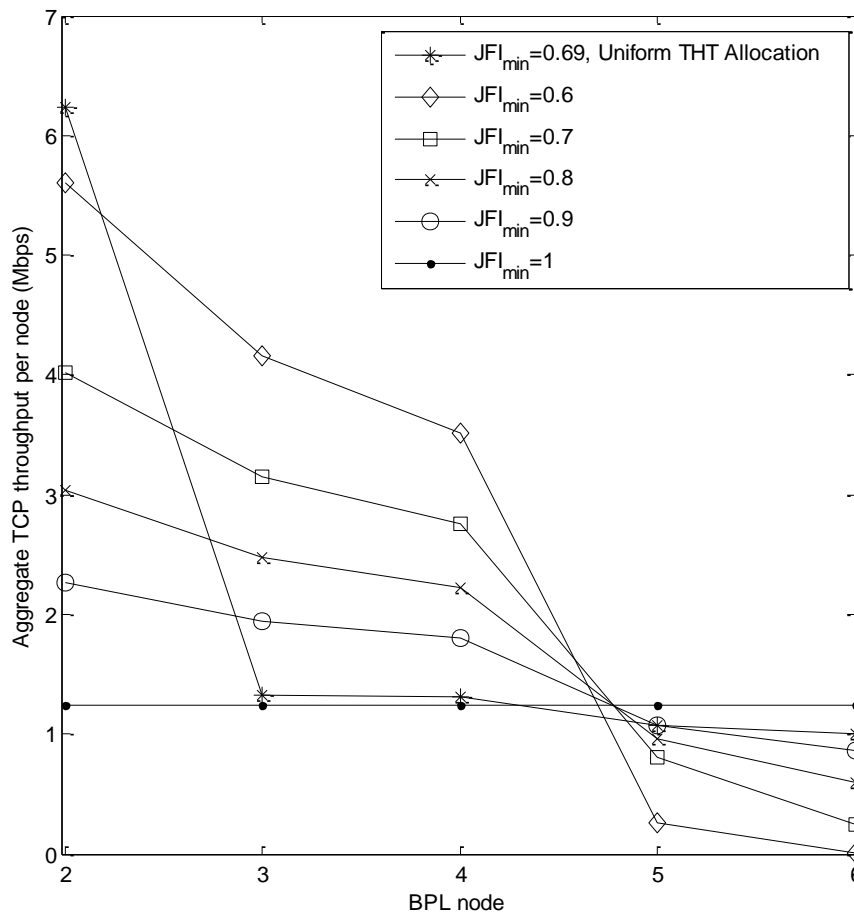
Από την επίδραση των ζεύξεων στενωπών στη διέλευση των συνδέσεων TCP μιας PLC κυψέλης, προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Η ύπαρξη κακών PLC ζεύξεων σε μια PLC κυψέλη έχει δυσμενή επίδραση στη διέλευση όλων των κόμβων της κυψέλης, ιδίως αυτών που έπονται της ζεύξης-στενωπού. Σε κυψέλες με περισσότερες της μιας κακές ζεύξεις, όπως συνήθως είναι οι PLC κυψέλες σε αστικές περιοχές, η συνολική TCP διέλευση εξαρτάται κυρίως από τη θέση και από το βαθμό επιβάρυνσης της χειρότερης εμπλεκόμενης ζεύξης, δηλαδή της PLC ζεύξης-στενωπού.



Σχήμα 5.5: Αθροιστική διέλευση TCP ανά κόμβο κυψέλης τύπου CT3. Οι ζεύξεις (2) και (4) αποτελούν ζεύξεις-στενωπούς.

- Η ύπαρξη κακών ζεύξεων επηρεάζει δυσμενώς τη συνολική διέλευση μιας PLC κυψέλης για κάθε τιμή του δείκτη δικαιοσύνης. Με αναφορά στις κυψέλες τύπου CT1 και CT3, το προτεινόμενο σχήμα κατανομής πόρων, συγκρινόμενο με την ομοιόμορφη κατανομή των **THT**, οδηγεί σε υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης ενώ, παράλληλα, προσφέρει το σημαντικό πλεονέκτημα διαχείρισης του ισοζυγίου μεταξύ διέλευσης και δικαιοσύνης στην κατανομή των πόρων. Στην περίπτωση κυψελών τύπου CT2, όπου η κακή ζεύξη συναντάται προς το τέλος της PLC κυψέλης, το προτεινόμενο σχήμα έχει συγκρίσιμα αποτελέσματα με την ομοιόμορφη κατανομή των **THT**, αλλά, και στην περίπτωση αυτή, προσφέρει τη δυνατότητα διαχείρισης του ισοζυγίου διέλευσης-δικαιοσύνης στην κατανομή των πόρων.



Σχήμα 5.6: Αθροιστική διέλευση TCP ανά κόμβο στην περίπτωση κυψέλης τύπου CT4. Η PLC ζεύξη (4) αποτελεί τη ζεύξη-στενωπό.

- Όπως παρατηρείται από τους Πίν. 5.3-5.5, η τιμή των **THT** μειώνεται όσο αυξάνει το πλήθος των αλμάτων από τον HE. Η συμπεριφορά αυτή είναι αναμενόμενη, αφού οι κόμβοι που βρίσκονται πλησιέστερα προς τον HE είναι επιφορτισμένοι με τη μεταφορά των πακέτων που προορίζονται για τους κόμβους που έπονται σε μια PLC κυψέλη. Παράλληλα, προκειμένου να επιτευχθεί υψηλή τιμή του δείκτη δικαιοσύνης η ύπαρξη κακής PLC ζεύξης οδηγεί σε αυξημένη τιμή του THT για τους κόμβους που ακολουθούν τη ζεύξη-στενωπό.
- Με την εφαρμογή του προτεινόμενου σχήματος κατανομής πόρων είναι δυνατό να επιτευχθεί οποιαδήποτε τιμή δείκτη δικαιοσύνης με παράλληλη επίτευξη βέλτιστης διαχείρισης της κυψέλης. Σημειώνεται ότι, στην περίπτωση της ομοιόμορφης κατανομής των χρόνων **THT**, η τιμή του JFI είναι συνήθως χαμηλή και δεν μπορεί να ρυθμισθεί.

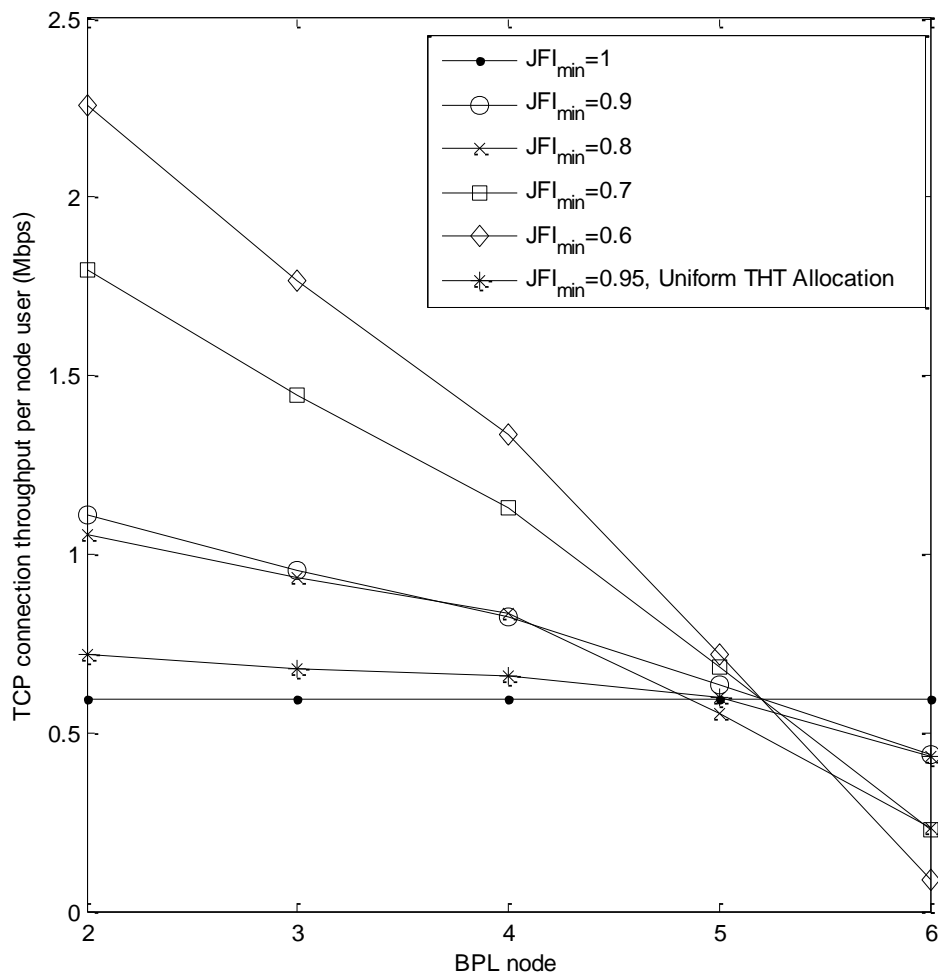
Πίνακας 5.5: Τιμές THT και αθροιστικής διέλευσης για κυψέλη τύπου $CT3$.

	JFI_{\min}	THT_1	THT_2	THT_3	THT_4	THT_5	Αθροιστική Διέλευση (Mbps)
CT3 Οι ζεύξεις link(2) και link(4) αποτελούν τις ζεύξεις στενωπούς	1	0.01	0.01	30.60	12.85	18.08	0.57
	0.9	7.55	28.00	3.79	9.28	1.38	6.17
	0.8	8.52	29.21	3.67	7.59	1.01	6.97
	0.7	10.08	32.33	3.83	3.75	0.01	8.24
	0.6	11.63	32.35	3.46	2.52	0.04	9.51
	0.5	13.70	32.50	2.97	0.83	0.00	11.20
	0.4	16.82	30.91	2.27	0.00	0.00	13.96
	0.3	23.42	25.64	0.94	0.00	0.00	19.43
Ομοιόμορφη κατανομή THT	0.3	10	10	10	10	10	15.51

Τέλος, σημειώνεται ότι κυψέλες του τύπου $CT2$, όπου η κακή PLC ζεύξη εμφανίζεται προς το άκρο της κυψέλης, είναι προτιμητέες έναντι των υπόλοιπων τύπων, αφού οδηγούν σε σημαντικά υψηλότερες τιμές συνολικής TCP διέλευσης. Στην περίπτωση αυτή, τόσο το σχήμα ομοιόμορφης κατανομής των THT όσο και το προτεινόμενο σχήμα κρίνονται αποτελεσματικά. Επομένως, κατά το σχηματισμό PLC κυψελών σε ένα BB-PLC δίκτυο, προτείνεται ο αποκλεισμός των κακών ζεύξεων από τις PLC κυψέλες ή, αν αυτό οδηγεί σε απομόνωση συγκεκριμένων τμημάτων του δικτύου, η τοποθέτηση των κακών PLC ζεύξεων προς το τέλος των κυψελών που σχηματίζονται.

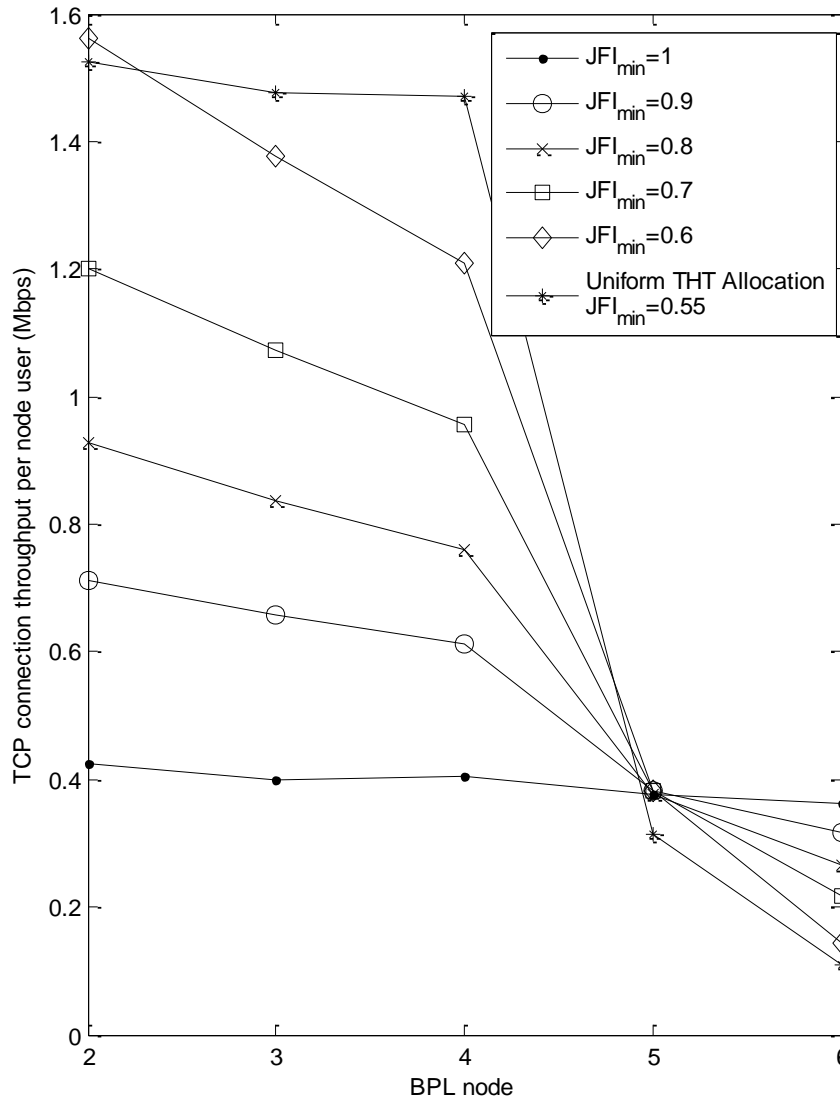
5.4.3. Μελέτη της επίδρασης της κατανομής των χρηστών

Στην παρούσα ενότητα εξετάζεται η επίδραση της κατανομής των χρηστών, άρα και της TCP κίνησης, στην αθροιστική διέλευση των TCP συνδέσεων μιας κυψέλης. Για το σκοπό αυτό, εξετάστηκαν κυψέλες τύπου $CT2$ και $CT4$. Σημειώνεται ότι οι κυψέλες τύπου $CT4$ δεν περιλαμβάνουν επιβεβαρυνμένες ζεύξεις και εξετάζονται με στόχο την αποκλειστική εξέταση της επίδρασης της κατανομής των χρηστών. Το συνολικό πλήθος ενεργών TCP συνδέσεων παραμένει σταθερό σε κάθε σενάριο της προσομοίωσης, ενώ μεταβάλλεται η κατανομή τους στους διάφορους PLC κόμβους της εκάστοτε υπό εξέταση κυψέλης.



Σχήμα 5.7: Διέλευση TCP ανά σύνδεση στους κόμβους εξυπηρέτησης κυψέλης CT4. Οι κόμβοι (5) και (6) εξυπηρετούν το 68% της κίνησης.

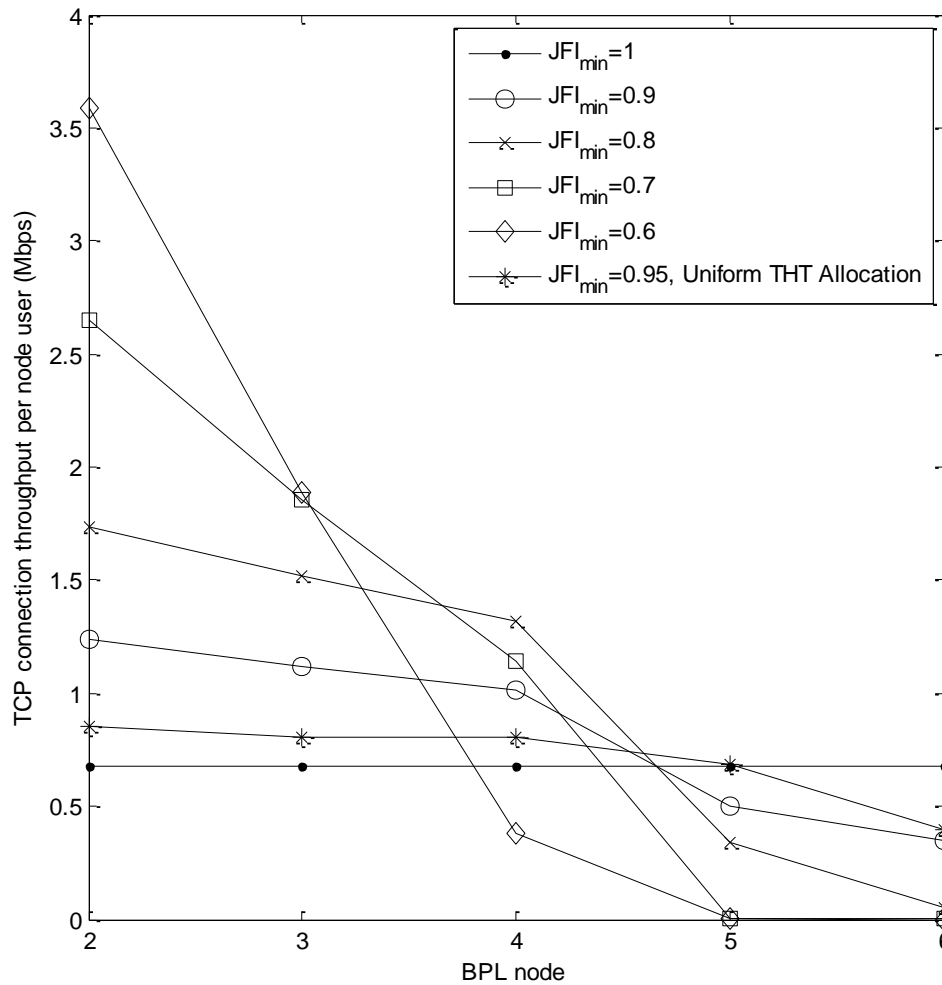
Εξετάζονται δύο σενάρια λειτουργίας. Σύμφωνα με το πρώτο, το 68% των TCP συνδέσεων θεωρείται ότι εξυπηρετείται από τους κόμβους node (5) και node (6), παραδοχή που σημαίνει ότι το μεγαλύτερο μέρος της κίνησης παράγεται από το άκρο της κυψέλης. Στην περίπτωση αυτή, εξετάζεται η επίδοση του προτεινόμενου σχήματος σε κυψέλες τύπου CT2 και CT4. Στο δεύτερο σενάριο λειτουργίας, η πλειοψηφία της κίνησης παράγεται από τους δύο κόμβους που βρίσκονται πλησιέστερα στον HE, δηλαδή παράγεται στους κόμβους node (2) και node (3). Στην περίπτωση αυτή μελετάται η αθροιστική διέλευση των TCP συνδέσεων σε κυψέλες τύπου CT2. Σημειώνεται ότι, κατά τη μελέτη της επίδρασης της κατανομής των χρηστών στη συνολική διέλευση, το δίκτυο λειτουργεί υπό συνθήκες κορεσμού. Η μόνη διαφορά από την προηγούμενη ενότητα όπου εξετάστηκε η επίδραση της ποιότητας των PLC ζεύξεων και της θέσης της ζεύξης-



Σχήμα 5.8: Διέλευση TCP ανά σύνδεση στους κόμβους εξυπηρέτησης κυψέλης CT2. Οι κόμβοι (5) και (6) εξυπηρετούν το 68% της κίνησης.

στενωπού είναι ότι αποδίδεται μικρότερο ποσοστό του εύρους ζώνης στις συνδέσεις που εξυπηρετούνται από τους κόμβους που εξυπηρετούν μεγαλύτερη κίνηση.

Στα Σχ.5.7 και 5.8 εξετάζεται η επίδραση στη διέλευση των TCP συνδέσεων κατά το πρώτο σενάριο, σύμφωνα με το οποίο η πλειοψηφία της κίνησης παράγεται από τους κόμβους node (5) και node (6). Όπως φαίνεται από το Σχ.5.7, η απουσία επιβαρυσμένων PLC ζεύξεων (κυψέλη τύπου CT4) έχει ως αποτέλεσμα τη δίκαιη κατανομή των πόρων στην περίπτωση της ομοιόμορφης κατανομής των **THT**. Εντούτοις, οι καμπύλες του Σχ.5.8 επιβεβαιώνουν ότι, παρουσία κακής PLC ζεύξης, οι κόμβοι node (5) και node (6) υποεξυπηρετούνται. Στην περίπτωση όπου οι δύο αυτοί κόμβοι εξυπηρετούν την



Σχήμα 5.9: Διέλευση TCP ανά σύνδεση συναρτήσει του κόμβου εξυπηρέτησης σε κυψέλες τύπου CT2 όταν οι κόμβοι node (2) και node (3) εξυπηρετούν το 68% της κίνησης.

πλειοψηφία της παραγόμενης κίνησης, η ομοιόμορφη κατανομή των **THT** οδηγεί σε σημαντικά μικρότερες τιμές διέλευσης σε σχέση με το προτεινόμενο σχήμα.

Στο Σχ.5.9 απεικονίζεται η επίδοση του προτεινόμενου σχήματος κατά το δεύτερο σενάριο, όταν δηλαδή η πλειοψηφία της κίνησης παράγεται από τους κόμβους node (2) και node (3). Παρατηρείται ότι η ομοιόμορφη κατανομή των **THT** οδηγεί σε δίκαιη κατανομή των πόρων, όπως άλλωστε αναμενόταν, αφού εφαρμόζοντας το συγκεκριμένο σχήμα το εύρος ζώνης καταλαμβάνεται κυρίως από τους κόμβους που βρίσκονται στην αρχή της PLC κυψέλης, οι οποίοι κατά το σενάριο που εξετάζεται στο Σχ.5.9 παράγουν και το μεγαλύτερο μέρος της κίνησης. Συμπερασματικά, το προτεινόμενο σχήμα επιτυγχάνει υψηλότερες τιμές αθροιστικής TCP διέλευσης, αφού βελτιστοποιεί την

κατανομή των πόρων, επιτυγχάνοντας υψηλότερη διέλευση για το ίδιο επίπεδο δικαιοσύνης στην κατανομή των πόρων.

Από τη μελέτη της επίδρασης της κατανομής των χρηστών στην αθροιστική διέλευση των TCP συνδέσεων προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Η ομοιόμορφη κατανομή των **ΤΗΤ**, που χρησιμοποιείται στην πλειοψηφία των σχημάτων PLC MAC, οδηγεί σε δίκαιη κατανομή των πόρων στην περίπτωση όπου οι TCP συνδέσεις εξυπηρετούνται από κόμβους που βρίσκονται τοπολογικά κοντά στον HE, δηλαδή που απέχουν μικρό αριθμό αλμάτων από τον HE.
- Κατά το σχηματισμό PLC κυψελών είναι προτιμότερη η εξυπηρέτηση των περισσότερων TCP χρηστών από γειτονικούς προς τον HE PLC κόμβους. Στην περίπτωση αυτή, συγκρινόμενο με το σχήμα ομοιόμορφης κατανομής των **ΤΗΤ**, το προτεινόμενο σχήμα επιτυγχάνει υψηλότερες τιμές διέλευσης και μεγαλύτερη δικαιοσύνη μεταξύ των TCP συνδέσεων.
- Η ύπαρξη επιβαρυσμένων PLC ζεύξεων είναι ο κύριος λόγος υποβάθμισης της αθροιστικής TCP διέλευσης σε PLC κυψέλες.
- Σημαντικό πλεονέκτημα του προτεινόμενου σχήματος αποτελεί η δυνατότητα βέλτιστης διαχείρισης του ισοζυγίου διέλευσης-δικαιοσύνης.

5.5. Μεθοδολογία σχεδιασμού PLC δικτύων ευρείας κλίμακας

Τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα προσφέρουν χρήσιμα συμπεράσματα αναφορικά με:

- Την επίδραση των επιβαρυσμένων ζεύξεων στη συνολική TCP διέλευση και δικαιοσύνη σε PLC κυψέλες.
- Την ανάγκη εφαρμογής ενός σχήματος κατανομής πόρων που είναι σε θέση να διαχειρισθεί το ισοζύγιο διέλευσης-δικαιοσύνης μεταξύ των χρηστών TCP μιας PLC κυψέλης.

- Τη συγκριτικά καλύτερη επίδοση του προτεινόμενου σχήματος σε σχέση με το συμβατικό σχήμα ομοιόμορφης κατανομής των **ΤΗΤ**.

Συγκεκριμένα, βάσει της προηγούμενης μελέτης μπορούν να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με το σχεδιασμό MV/BB-PLC δικτύων πρόσβασης, δηλαδή δικτύων ευρείας ζώνης που περιλαμβάνουν μεγάλο αριθμό PLC κυψελών. Κατά τη σχεδίαση PLC κυψελών πρέπει να λαμβάνεται υπόψη τόσο η δομή του δικτύου MT, μέσω του πλήθους και του μήκους των διακλαδώσεων που αυτό εμφανίζει, όσο και η χωρική κατανομή των χρηστών που θα εξυπηρετηθούν από το BB-PLC δίκτυο πρόσβασης. Καθώς η επίδραση των διακλαδώσεων και την παρουσίας εμποδίων που επηρεάζουν την PLC μετάδοση έχει μελετηθεί επαρκώς στη βιβλιογραφία [Zim02], [Ton10], η εκ των προτέρων γνώση της τοπολογίας του δικτύου MT και η αναγνώριση των επιβαρυνμένων ζεύξεων μπορεί να προσφέρει μία ικανοποιητική εκτίμηση της επίδοσης στα διάφορα τμήματα του PLC δικτύου. Μία επιβαρυνμένη ζεύξη PLC μπορεί είτε να αποκλεισθεί, και να μην αποτελεί τμήμα κάποιας PLC κυψέλης, είτε να αντιμετωπισθεί με την τοποθέτηση PLC κόμβων σε μικρότερες αποστάσεις και τον αντίστοιχο σχηματισμό PLC ζεύξεων μικρού μήκους. Τα σενάρια που εξετάστηκαν κατά τις προσομοιώσεις έδειξαν ότι οι επιβαρυνμένες ζεύξεις έχουν σαφώς αρνητική επίδραση στη συνολική διέλευση μιας PLC κυψέλης, ιδίως όταν απέχουν μικρό αριθμό αλμάτων από τον HE. Συμπερασματικά, οι θέσεις των HEs πρέπει να επιλέγονται έτσι ώστε να μην περιλαμβάνονται επιβαρυνμένες ζεύξεις σε PLC κυψέλες. Ιδανικά, οι ζεύξεις που απαρτίζουν μια PLC κυψέλη πρέπει να είναι LOS, δηλαδή να μην επηρεάζονται από την παρουσία ασυνεχειών ή διακλαδώσεων επί της MT γραμμής. Επίσης, στην περίπτωση αγροτικών περιοχών, όπου το BB-PLC δίκτυο εμφανίζει τοπολογία διαύλου και όχι δένδρου όπως αναλύεται στο Κεφ.6, προτείνεται η τοποθέτηση των HE αμέσως μετά από επιβαρυνμένες ζεύξεις. Στην περίπτωση αυτή, η συνέχιση και επεκτασιμότητα του PLC δικτύου επιτυγχάνεται μέσω της διασύνδεσης των κυψελών με άλλα φυσικά μέσα (Ethernet ή ασύρματες τεχνολογίες, βλ. Κεφ.3). Στην περίπτωση όπου η ύπαρξη επιβαρυνμένων ζεύξεων δεν μπορεί να αποφευχθεί, όπως συμβαίνει στα BB-PLC δίκτυα αστικών περιοχών, ο σχηματισμός των PLC κυψελών πρέπει να είναι τέτοιος ώστε οι επιβαρυνμένες ζεύξεις να εμφανίζονται προς το τέλος των κυψελών, ελαχιστοποιώντας το πλήθος των PLC κόμβων, και κατ' επέκταση TCP τερματικών, που επηρεάζονται δυσμενώς από την παρουσία τους.

Επίσης, η χωρική κατανομή των τελικών χρηστών σε μια PLC κυψέλη αποτελεί σημαντικό παράγοντα κατά τη σχεδίαση PLC κυψελών. Επομένως, οι χρήστες που παράγουν τη μεγαλύτερη κίνηση προτείνεται να εξυπηρετούνται από PLC κόμβους που βρίσκονται στην αρχή μιας PLC κυψέλης. Πρακτικά, το συμπέρασμα αυτό σημαίνει ότι στην περίπτωση όπου ένας χρήστης μπορεί να εξυπηρετηθεί από περισσότερες της μιας PLC κυψέλες, προτιμάται η εξυπηρέτησή του από PLC κόμβο της κυψέλης που απέχει λιγότερα άλματα από τον αντίστοιχο HE.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6:	ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΧΡΟΝΟΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗΣ TDMA ΣΕ PLC ΔΙΚΤΥΑ
--------------------	--

6.1 Εισαγωγή

Σημαντική πρόκληση για τους ενεργειακούς παρόχους αποτελεί η παροχή αξιόπιστων και αποτελεσματικών υπηρεσιών ευφυών δικτύων με στόχο την πραγματοποίηση λειτουργιών ελέγχου και διαχείρισης των δεδομένων που παράγονται, μεταφέρονται και συλλέγονται από ένα δίκτυο που υποστηρίζει την επικοινωνία ευφυών ενεργειακών δικτύων (Smart Grid Communications Network – SGC Network). Προκειμένου να επιτευχθεί ο στόχος αυτός και, ταυτόχρονα, να ικανοποιηθούν τα απαραίτητα επίπεδα QoS των διαφόρων υπηρεσιών, είναι επιτακτική η χρήση αποτελεσματικών σχημάτων χρονοδρομολόγησης.

Η φύση των δεδομένων που παράγονται από διάφορες διατάξεις, μετρητές και αισθητήρες, και μεταφέρονται μέσω ενός SGC δικτύου έχει εξετασθεί στο Κεφ.3 της διατριβής. Στο παρόν κεφάλαιο, εξετάζονται αρχικά οι διάφοροι αλγόριθμοι δρομολόγησης για PLC μετάδοση δεδομένων σε ένα SGC δίκτυο. Αναλύεται ο τύπος της κίνησης που παράγεται καθώς και τα διάφορα σχήματα συγκεντρωτικής ή μη δρομολόγησης. Στη δεύτερη ενότητα, εξετάζονται οι διάφοροι αλγόριθμοι χρονοδρομολόγησης για τη μετάδοση συγκεντρώσιμων ή μη δεδομένων. Στην τρίτη ενότητα, εισάγεται και αναλύεται η δενδρική δομή ενός PLC δικτύου. Η συγκεκριμένη θεώρηση βασίζεται στην αξιοποίηση της ιδιότητας των PLC κόμβων να αυξομειώνουν την ισχύ έγχυσης προκειμένου να ανακαλύψουν τους γείτονές τους ικανοποιώντας, παράλληλα, τους περιορισμούς που απορρέουν από τις EMI και EMC προδιαγραφές. Η λογική αναπαράσταση του PLC δένδρου εξαρτάται δραστικά από την τοπολογία του ενεργειακού δικτύου και το μήκος και τα χαρακτηριστικά των καλωδίων. Ως εκ τούτου, η

τρίτη ενότητα εστιάζεται στις διαφορές τοπολογίας μεταξύ αγροτικών και αστικών περιοχών. Στην τέταρτη ενότητα, προτείνεται ένας νέος αλγόριθμος που βελτιστοποιεί την TDMA χρονοδρομολόγηση με χρήση ελέγχου ισχύος και διαστρωματικής σχεδίασης. Το βασικό πλεονέκτημα του συγκεκριμένου σχήματος είναι η προσαρμοστικότητα, αφενός σε κάθε τύπο γραμμής και δικτύου, αποφεύγοντας με αυτό τον τρόπο τη χρήση των υβριδικών λύσεων που εξετάστηκαν στο Κεφ.3, και αφετέρου σε αλλαγές της τοπολογίας του δικτύου. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της δυναμικής προσαρμογής σε κάθε κατάσταση του δικτύου επιτυγχάνοντας συνδεσιμότητα και ελάχιστη κατανάλωση ισχύος τηρώντας παράλληλα τους διεθνείς κανονισμούς EMI και EMC. Στο τέλος του Κεφ.6 εξετάζεται η εφαρμογή του προτεινόμενου σχήματος στην τοπολογία του δικτύου της Λάρισας που παρουσιάστηκε στο Κεφ.3

6.2 Επισκόπηση της διεθνούς βιβλιογραφίας

Όπως αναφέρθηκε στο Κεφ.2, για τη χρονοδρομολόγηση σε PLC δίκτυα μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο πρωτόκολλα τυχαίας πρόσβασης, όπως το CSMA/CA, όσο και πρωτόκολλα προκαθορισμένης πρόσβασης, όπως το TDMA. Στην περίπτωση των δικτύων SGC, η χρονοδρομολόγηση TDMA κρίνεται καταλληλότερη δεδομένου ότι απαιτείται εγγυημένη υπηρεσία πρόσβασης. Επίσης σημειώνεται, ότι στη βιβλιογραφία συναντάται συχνά ο όρος δρομολόγηση [Bia12], [Zhe09], [Bum05], [Lee12], [Che12], [Can12], στη περίπτωση όπου χρησιμοποιείται σχήμα χρονοδρομολόγησης TDMA πολλαπλών αλμάτων (multi-hop) που επιτρέπει την αναχρησιμοποίηση χρονοσχισμών. Στην περίπτωση αυτή, μεταβάλλοντας τις υποθέσεις ως προς το μοντέλο παρεμβολών που θα χρησιμοποιηθεί, μπορούν να προκύψουν πολλαπλές διαδρομές προς τον προορισμό, οπότε ανακύπτει και η έννοια της δρομολόγησης των δεδομένων που παράγονται σε ένα SGC δίκτυο.

Στην περίπτωση των SGC δικτύων τα δεδομένα που προκύπτουν από ευφρείς διατάξεις εγκατεστημένες επί του δικτύου συλλέγονται από τους PLC κόμβους και δρομολογούνται προς τον κόμβο προορισμό, ο οποίος δρομολογεί τα δεδομένα προς τη μονάδα ελέγχου που βρίσκεται εκτός του PLC δικτύου. Ο κόμβος αυτός παίζει το ρόλο της πύλης εξόδου (gateway) που αναφέρθηκε στο Κεφ.3. Η συλλογή των δεδομένων που παράγονται από

το σύνολο των κόμβων ενός PLC δένδρου και κατευθύνονται στον κόμβο προορισμό συνδέεται με το χαρακτηριστικό μοντέλο κίνησης πολλών-προς-ένα που απαντάται σε SGC δίκτυα και για το οποίο έχει επικρατήσει η ονομασία συγκλίνουσα μετάδοση ή *convergecast*. Στη διεθνή βιβλιογραφία η ονομασία αυτή έχει καθιερωθεί για να περιγραφεί η κίνηση που παράγεται σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων [Dur12].

Οι αλγόριθμοι που παρουσιάζονται στη συνέχεια έχουν συγκεκριμένους σχεδιαστικούς στόχους [Dur11] όπως: η ελαχιστοποίηση της διάρκειας χρονοπρογραμματισμού (schedule length), η ελαχιστοποίηση της καθυστέρησης (latency), η ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας (energy consumption), η μεγιστοποίηση της χωρητικότητας του δικτύου (network capacity), η επίτευξη δικαιοσύνης (fairness), η ανθεκτικότητα (network resilience) του δικτύου ή και συνδυασμός των προηγούμενων. Στη συνέχεια, εξετάζονται διάφοροι αλγόριθμοι χρονοπρογραμματισμού/δρομολόγησης που προτείνονται για PLC δίκτυα και κατηγοριοποιούνται ανάλογα με το σχεδιαστικό στόχο που έχουν. Σημειώνεται ότι, καίτοι υπάρχει πλήθος αλγορίθμων χρονοπρογραμματισμού που βασίζονται στο CSMA/CA για δίκτυα τυχαίας πρόσβασης [Ron11], [Kua12], [Siv11], [Shu11], στο παρόν κεφάλαιο εξετάζονται οι αλγόριθμοι που βασίζονται στο TDMA, δεδομένου ότι είναι καταλληλότεροι για SGC δίκτυα.

6.2.1 Αλγόριθμοι χρονοπρογραμματισμού σε LV-PLC δίκτυα

Στην υπάρχουσα βιβλιογραφία η δρομολόγηση για δίκτυα PLC εξετάζεται κυρίως στο περιβάλλον της χαμηλής τάσης (XT). Ο κύριος λόγος για αυτό είναι η μεγάλη διακύμανση στη διαθεσιμότητα των γραμμών καθώς και οι αλλαγές τοπολογίας που συμβαίνουν στο περιβάλλον XT και αποκλείουν τη χρήση στατικών σχημάτων δρομολόγησης στα LV-PLC δίκτυα [Can12].

Ελαχιστοποίηση χρονοπρογραμματισμού: Οι συγγραφείς στην [Bum05] εξετάζουν τα πρώτα πρωτόκολλα δρομολόγησης που εφαρμόστηκαν σε PLC δίκτυα. Τα δύο πρωτόκολλα που εξετάζονται είναι το DLC1000 που χρησιμοποιεί δυναμική δρομολόγηση και το SFN που χρησιμοποιεί μεθόδους τύπου πλημμύρας (flooding). Καταλήγουν ότι οι αλγόριθμοι τύπου πλημμύρας έχουν μικρότερο χρονοπρογραμματισμό και προκαλούν μικρότερο κόστος επεξεργασίας στους κόμβους PLC. Όμως, τέτοια σχήματα κατασπαταλούν τους πόρους του δικτύου και ως εκ τούτου αποφεύγονται πλέον.

Ελαχιστοποίηση ισχύος εκπομπής και αναμεταδόσεων: Οι συγγραφείς στην [Bia12] προτείνουν ένα μοντέλο δρομολόγησης κατάλληλο για LV-PLC δίκτυα που αξιοποιεί την εκ των προτέρων γνώση της θέσης των κόμβων ενός δικτύου για να βασίσει τις αποφάσεις δρομολόγησης. Το συγκεκριμένο μοντέλο συνεισφέρει στη μείωση των άχρηστων αναμεταδόσεων, αφού αποφεύγεται η δρομολόγηση τύπου πλημμύρας, συμβάλλοντας, παράλληλα, στην ενεργειακά αποδοτικότερη διαχείριση του SGC δικτύου. Επίσης, ο προτεινόμενος αλγόριθμος μπορεί να προσαρμόζεται δυναμικά σε αλλαγές της τοπολογίας. Το μειονέκτημα του συγκεκριμένου αλγορίθμου έγκειται στην υπόθεση της εκ των προτέρων γνώσης της τοπολογίας του PLC δικτύου. Αποτέλεσμα αυτού είναι η ανάγκη για κεντρική λειτουργία και έλεγχο του αλγορίθμου, χαρακτηριστικό που προσδίδει στο υπόψη σχήμα μειωμένη επεκτασιμότητα.

Αύξηση αξιοπιστίας: Οι συγγραφείς στην [Wan09] υιοθετούν τη δενδρική δομή του δικτύου LV-PLC και εισάγουν τη θεώρηση της ομάδας κόμβων (cluster) ανά επίπεδο του δένδρου, δηλαδή με κριτήριο το πλήθος αλμάτων που απαιτούνται μέχρι τη ρίζα του δένδρου. Οι κόμβοι ομαδοποιούνται σε ομάδες (συστάδες), εκάστη των οποίων έχει ένα και μόνο κόμβο υπεύθυνο για τη συγκέντρωση και δρομολόγηση της κίνησης που παράγεται στην ομάδα. Ο κόμβος-συγκεντρωτής προωθεί την κίνηση προς τα ανώτερα επίπεδα, δηλαδή σε κόμβους που είναι πλησιέστερα προς την πύλη εξόδου. Κάποιος κόμβος μπορεί να ανήκει σε περισσότερες της μιας συστάδες με αποτέλεσμα κάθε φορά να επιλέγεται η συστάδα, άρα και η διαδρομή, που παρέχει την πλέον αξιόπιστη μετάδοση. Ίδια λογική ακολουθούν οι συγγραφείς και στην εργασία [Liu12] όπου αποδεικνύεται ότι η ύπαρξη εραπτομενικών συστάδων αυξάνει τη μέση αξιοπιστία ενός PLC δικτύου. Μειονέκτημα της συγκεκριμένης προσέγγισης είναι ότι απαιτείται η ύπαρξη πυκνού δικτύου, ώστε να μπορούν να υπάρξουν πολλαπλές επικαλυπτόμενες συστάδες. Παράλληλα, η δρομολόγηση τύπου πλημμύρας που ακολουθείται, λόγω του διαμοιραζόμενου μέσου κατά την PLC μετάδοση, έχει ως αποτέλεσμα την πρόκληση παρεμβολών που μειώνουν δραματικά την αποδοτικότητα του αλγορίθμου. Η υλοποίηση που προτείνουν οι συγγραφείς έχει ενδεχομένως νόημα σε περιπτώσεις όπου κάποιος κόμβος συνδέεται ασύρματα στο PLC δίκτυο, οπότε και έχει νόημα η επιλογή της καταλληλότερης συστάδας. Πάντως, παρόμοια σχεδιαστικά συμπεράσματα έχουν εξετασθεί στα Κεφ.3 και 5 της διατριβής.

6.2.2 Αλγόριθμοι χρονοπρογραμματισμού σε MV-PLC δίκτυα

Αναφορικά με τη δρομολόγηση σε δίκτυα MV-PLC, είναι διαθέσιμο στη βιβλιογραφία μικρό πλήθος μελετών. Σημειώνεται ότι, δεδομένου ότι καλύπτουν μία περισσότερο πολύπλοκη περίπτωση, οι περισσότεροι αλγόριθμοι για LV-PLC δίκτυα μπορούν να προσαρμοσθούν για λειτουργία σε περιβάλλον MV-PLC. Συνήθως, οι σχεδιαστικές απαιτήσεις μπορεί να διαφέρουν αφού τα MV-PLC δίκτυα χρησιμοποιούνται αποκλειστικά ως δίκτυα πρόσβασης.

Εξασφάλιση ανθεκτικότητας σε διακοπή ζεύξης (resilience): Οι συγγραφείς στην [Can12] αναπτύσσουν έναν αλγόριθμο υπολογισμού της βέλτιστης θέσης των CPEs, δηλαδή των μονάδων που δρουν ως σημεία πρόσβασης των ευφυών διατάξεων ενός SGC δικτύου. Ο αλγόριθμος υπολογίζει, επίσης, ένα διαθέσιμο σύνολο βέλτιστων διαδρομών, ώστε κάθε φορά να επιτυγχάνεται συνδεσιμότητα όλων των κόμβων με χρήση των πλέον αξιόπιστων διαδρομών του δικτύου. Παράλληλα, το σχήμα που προτείνεται προϋπολογίζει τις βέλτιστες διαδρομές για την περίπτωση όπου η σύνδεση μεταξύ δύο κόμβων του δικτύου διακοπεί ώστε να επιτυγχάνεται ο κύριος στόχος του αλγορίθμου που είναι η επιβιωσιμότητα μετά τη διακοπή μιας ζεύξης. Σημειώνεται ότι οι συγγραφείς έχουν με ακρίβεια εντοπίσει τον κύριο σχεδιαστικό στόχο σε δίκτυα MV-PLC, αυτόν της επιβιωσιμότητας σε διακοπή ζεύξης, δεδομένου ότι στην περίπτωση αυτή το τμήμα του δικτύου που εκτείνεται στη MT αποτελεί το δίκτυο κορμού μέσω του οποίου δρομολογείται όλη η κίνηση που παράγεται στο SGC δίκτυο. Καίτοι το σχήμα που προτείνουν οι συγγραφείς αποτελεί χρήσιμο εργαλείο για τη σχεδίαση SGC δικτύων μικρής ή και μέσης κλίμακας, χαρακτηρίζεται από τα ακόλουθα μειονεκτήματα: *i)* παρέχει επιβιωσιμότητα ως προς μια μόνο διακοπή ζεύξης μεταξύ δύο κόμβων. Κάτι τέτοιο δεν είναι επαρκές δεδομένου ότι βλάβες σε εξοπλισμό του δικτύου διανομής επηρεάζουν συνήθως περισσότερες της μιας ζεύξεις, *ii)* απαιτεί κεντρικό έλεγχο και εκ των προτέρων προσδιορισμό των διαδρομών, εισάγοντας πολυπλοκότητα που αποκλείει την επεκτασιμότητα που σχήματος σε μεγαλύτερα δίκτυα.

Ελαχιστοποίηση χρονοπρογραμματισμού: Οι συγγραφείς στην [Lee12] εξετάζουν τη δρομολόγηση σε MV-PLC δίκτυα υλοποιώντας κατάλληλο αλγόριθμο δρομολόγησης που αποσκοπεί στην ελαχιστοποίηση του χρονοπρογραμματισμού. Ο αλγόριθμος που προτείνεται βασίζεται στην έννοια της αναχρησιμοποίησης χρονοσχημάτων όταν οι

κόμβοι είναι επαρκώς απομακρυσμένοι ώστε να μην παρεμβάλλουν μεταξύ τους. Στις περιπτώσεις αυτές αποδεικνύεται ότι υπάρχει πάντα σημαντική μείωση του χρονοπρογραμματισμού λόγω της αναχρησιμοποίησης χρονοσχισμών. Το όφελος αυτό αυξάνεται ανάλογα προς το μέγεθος της διάρκειας των χρονοσχισμών. Σημειώνεται ότι η διάρκεια των χρονοσχισμών εξαρτάται από το πλήθος των χρηστών του SGC δικτύου. Επίσης, εξετάζεται η χρήση προσαρμοστικής κωδικοποίησης ανάλογα με την ποιότητα του PLC διαύλου. Αντίστοιχη τεχνική έχει χρησιμοποιηθεί και στην εργασία [Sar12a]. Επαληθεύεται ότι η αύξηση του ρυθμού κώδικα που αυξάνει το ρυθμό μετάδοσης μειώνει και τον χρονοπρογραμματισμό. Οι συγγραφείς στην εργασία [Lee12] δεν θεωρούν ότι υπάρχει κατώφλι του BER, οπότε η αύξηση του ρυθμού μετάδοσης χωρίς περιορισμό BER είναι πιθανό να προκαλέσει πρόβλημα QoS για τις διάφορες υπηρεσίες. Σημαντική καινοτομία που εισάγει η [Lee12] είναι η μαθηματική περιγραφή του PLC δικτύου υπό τη μορφή κατευθυνόμενου γράφου στην προσπάθεια αντιμετώπισης του προβλήματος της ασυμμετρίας που εμφανίζουν τα PLC δίκτυα. Σύμφωνα με την περιγραφή αυτή, το κόστος μετάδοσης από τον κόμβο i στον κόμβο j διαφέρει από το κόστος μετάδοσης από j σε i και είναι ανάλογο των συνθηκών μετάδοσης που παρατηρούνται στην άνω ζεύξη και στην κάτω ζεύξη, αντίστοιχα. Σημειώνεται, όμως, ότι η ασυμμετρία στα PLC δίκτυα παρατηρείται κυρίως σε περιβάλλον LV-PLC όπου εγκαθίστανται IH-PLC δίκτυα. Τέλος, οι συγγραφείς της [Lee12] εισάγουν την έννοια της δρομολόγησης δεδομένου ότι επιτρέπουν μεταδόσεις όχι μόνο μεταξύ γειτονικών κόμβων αλλά και μεταξύ περισσότερο απομακρυσμένων κόμβων που απέχουν απόσταση μέχρι 4 άλματα (hops). Σημειώνεται ότι, ανάλογα με την τοπολογία του ηλεκτρικού δικτύου, η επικοινωνία απομακρυσμένων κόμβων μπορεί να μην είναι εφικτή. Παράλληλα, το αναμενόμενο όφελος από το προτεινόμενο σχήμα είναι σημαντικό όταν η διάρκεια των χρονοσχισμών είναι μεγάλη, άρα αφορά μικρής έκτασης SGC δίκτυα. Τέλος, το προτεινόμενο σχήμα χρονοδρομολόγησης στην εργασία [Lee12] έχει ελεγχθεί για μικρής κλίμακας PLC δίκτυα, γεγονός που περιορίζει την επεκτασιμότητα του προτεινόμενου σχήματος.

Αλγόριθμοι δυναμικής προσαρμογής σε αλλαγές τοπολογίας: Κλείνοντας την ανασκόπηση της σχετικής βιβλιογραφίας, οι συγγραφείς της [Che12] εξετάζουν ένα δίκτυο MV-PLC μικρής κλίμακας που αποτελείται από 40 κόμβους διασπαρμένους σε έκταση 100m². Στη συγκεκριμένη εργασία εξετάζεται η δενδρική δομή του PLC

δικτύου και ακολουθείται η θεώρηση της συστάδας κόμβων ανά επίπεδο του δένδρου. Ο αλγόριθμος που προτείνεται προσαρμόζει τη δομή των συστάδων μέσω της δυναμικής προσθήκης ή αφαίρεσης κόμβων, προωθώντας κατάλληλα την πληροφορία προς την πύλη εξόδου. Επίσης, εξετάζεται η επίδραση της απόστασης των κόμβων, επαληθεύοντας ότι, εφόσον είναι εφικτή, η αραιή τοποθέτηση PLC κόμβων οδηγεί στη δημιουργία λιγότερων επιπέδων στην δενδρική τοπολογία άρα και ταχύτερης δρομολόγησης. Σημειώνεται ότι πρόκειται για αλγόριθμο αποδοχής κλήσεων και όχι δρομολόγησης όπως αναφέρουν οι συγγραφείς.

6.3 Φυσικό στρώμα SGC δικτύων

Καίτοι η μετάδοση σημάτων μέσω των PLC διαύλων έχει πολλές ομοιότητες με την ασύρματη μετάδοση, τα δύο φυσικά μέσα έχουν σημαντικές διαφορές [Laz09], [Laz10b], [Zim02]. Η τοπολογία των δικτύων PLC ακολουθεί την τοπολογία του ενεργειακού δικτύου διανομής. Το χαρακτηριστικό αυτό, καθορίζει τις δυνατότητες επικοινωνίας μεταξύ των SGC κόμβων. Επιπλέον, λόγω της παρουσίας διακλαδώσεων και ανοικτοκυκλωμάτων επί του ενεργειακού δικτύου προκαλείται πολυδιαδρομική διάδοση ή απομόνωση ορισμένων PLC ζεύξεων, επηρεάζοντας, κατ' αυτόν τον τρόπο, την ποιότητα μετάδοσης του PLC μέσου. Παράλληλα, η ταυτόχρονη μετάδοση γειτονικών κόμβων σε ένα SGC δίκτυο προκαλεί αμοιβαίες παρεμβολές, οδηγώντας σε περαιτέρω χειροτέρευση του SNIR κατά μήκος των εμπλεκόμενων ζεύξεων. Το μέγεθος SNIR (Signal to Noise and Interference Ratio) εκφράζει το λόγο της ισχύος του PLC σήματος προς την ισχύ του θορύβου και των παρεμβολών από γειτονικές μεταδόσεις.

Ένα SGC δίκτυο εξυπηρετεί υπηρεσίες με μικρή ανοχή σε καθυστέρηση, όπως η παρακολούθηση και διαχείριση των δεδομένων που συλλέγονται από τους υποσταθμούς. Άλλες εφαρμογές, όπως το AMR, απαιτούν πολύ χαμηλά επίπεδα SNIR. Στην ανάλυση που ακολουθεί, οι διάφορες απαιτήσεις QOS μεταφράζονται σε κατάλληλα όρια SNIR.

Ορισμός 1: Μία μετάδοση επί PLC ζεύξης από τον κόμβο n_i προς τον κόμβο n_j θεωρείται επιτυχημένη αν $SNIR(n_i, n_j) \geq SNIR_{th}$, όπου το $SNIR_{th}$ αντιστοιχεί στην ελάχιστη

επιτρεπόμενη τιμή $SNIR$ που επιτρέπει την ικανοποίηση των απαιτήσεων ποιότητας της υπηρεσίας που εξυπηρετείται.

Η τιμή του ορίου $SNIR_{th}$ εξαρτάται από τις απαιτήσεις ποιότητας της υπηρεσίας που εξυπηρετείται κατά περίπτωση. Καθώς η δομή του ενεργειακού δικτύου είναι καθορισμένη, η σχεδίαση ενός SGC δικτύου βασίζεται στην κατάλληλη ενσωμάτωση ευφυΐας σε επίπεδο κόμβων. Οι SGC κόμβοι μεταβάλλουν τις παραμέτρους μετάδοσης ελέγχοντας τη συνολική εγχεόμενη ισχύ και προσαρμόζοντας την πολιτική μετάδοσης ώστε να αποφεύγονται οι παρεμβολές. Λόγω της υψηλής εξασθένησης που εμφανίζει το PLC μέσο, οι κόμβοι τείνουν να αυξάνουν την ισχύ έγχυσης προσπαθώντας να αυξήσουν το $SNIR$ και να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις ποιότητας των υπηρεσιών που εξυπηρετούν. Περιοριστικοί παράγοντες στην αύξηση της ισχύος έγχυσης είναι (i) οι EMI περιορισμοί και (ii) η ανάγκη αποφυγής της ενδο-συστημικής παρεμβολής. Συμπερασματικά, τα χαρακτηριστικά μετάδοσης του PLC διαύλου σε συνδυασμό με τους περιορισμούς στην επικοινωνία των κόμβων που θέτει η τοπολογία του ενεργειακού δικτύου επιβάλλουν τον έλεγχο της εγχεόμενης ισχύος των κόμβων προκειμένου να ελαχιστοποιούνται οι παρεμβολές και να εξασφαλίζεται η τήρηση του $SNIR_{th}$ της εκάστοτε εξυπηρετούμενης εφαρμογής.

Στην ανάλυση που ακολουθεί, οι PLC ζεύξεις χαρακτηρίζονται από μία τιμή κόστους που περιγράφει τις αντίστοιχες συνθήκες μετάδοσης. Τα κόστη που χαρακτηρίζουν τις ζεύξεις του SGC δικτύου εξαρτώνται από (i) το μήκος και τον τύπο των γραμμών μεταφοράς – οι ζεύξεις μεγαλύτερου μήκους προκαλούν μεγαλύτερη εξασθένηση -, (ii) την ύπαρξη εμποδίων (όπως μετασχηματιστές) κατά μήκος των γραμμών μεταφοράς και (iii) την ύπαρξη διακλαδώσεων των γραμμών μεταφοράς που προκαλούν πολυδιαδρομική διάδοση.

6.4 Σχηματισμός δένδρων επί PLC δικτύων

6.4.1. Ορισμοί

Η δομή ενός SGC δικτύου είναι συνήθως αρκετά διαφορετική από τη δομή του αντίστοιχου υποκειμένου ηλεκτρικού δικτύου. Στη γενική περίπτωση, η δομή ενός SGC δικτύου μπορεί να περιγραφεί μέσω ενός γράφου

$$\mathbf{G} = \{\mathbf{V}, \mathbf{E}\} \quad (6.1)$$

όπου

$$\mathbf{V} = \{1, \dots, N\} \quad (6.2)$$

Το \mathbf{V} αντιστοιχεί στο σύνολο των N PLC κόμβων που απαρτίζουν το SGC δίκτυο. και

$$\mathbf{E} = \{(n_i, n_j): SNIR(n_i, n_j) \geq SNIR_{th}\} \quad (6.3)$$

το σύνολο των ακμών που αντιπροσωπεύουν τα ζεύγη των κόμβων που έχουν επικοινωνία. Σύμφωνα με την (6.3), οι κόμβοι n_i και n_j θεωρούνται συνδεδεμένοι εφόσον ο λόγος SNIR δεν υπολείπεται μιας τιμής κατωφλίου απαραίτητης για την ικανοποίηση των απαιτήσεων QoS.

Η δομή ενός SGC δικτύου εξαρτάται δραστικά από την ισχύ έγχυσης κάθε PLC κόμβου, αφού το συγκεκριμένο μέγεθος σε συνδυασμό με την ποιότητα των γραμμών καθορίζει το SNIR των ζεύξεων, άρα και την ύπαρξη ακμών στο γράφο. Οι διεθνείς περιορισμοί ως προς την ισχύ έγχυσης, σε συνδυασμό με τη φυσική δομή δένδρου που ακολουθεί το δίκτυο διανομής στη MT και τη XT, επηρεάζουν τη λογική δομή των τηλεπικοινωνιακών δικτύων SGC η οποία καταλήγει σε μορφή δένδρου, δηλαδή απουσιάζουν οι κλειστοί βρόχοι. Στη συνέχεια του κεφαλαίου, ακολουθείται η δενδρική περιγραφή του SGC δικτύου,

$$\mathbf{T} = \{\mathbf{V}, \mathbf{E}\} \quad (6.5)$$

Ο Πιν.6.1 συνοψίζει τους κυριότερους ορισμούς που ακολουθούνται κατά την δενδρική περιγραφή δικτύων. Η υπόθεση της δενδρικής περιγραφής ενός SGC δικτύου είναι ακριβής και ισχύει σε κάθε περίπτωση δεδομένου ότι η κίνηση που παράγεται από ένα SGC δίκτυο είναι μορφής *convergecast*. Παράλληλα, λόγω της δενδρικής μορφής του δικτύου διανομής, κάθε κόμβος έχει τη δυνατότητα να επικοινωνεί με το γειτονικό του

Πίνακας 6.1: Βασικοί ορισμοί στη δενδρική περιγραφή δικτύων.

Δένδρο Tree	Είναι ένα σύνολο κόμβων (ίδιου τύπου) και ακμών που συνδέουν τους κόμβους με βάση κάποια σχέση που δημιουργεί ιεραρχική δομή μεταξύ των κόμβων.
Ρίζα Root	Ένας από τους κόμβους του δένδρου αποτελεί τη ρίζα του δένδρου. Ο συγκεκριμένος κόμβος βρίσκεται στο ανώτερο ιεραρχικά επίπεδο.
Πρόγονοι Ascendants	Σε ένα δένδρο με ρίζα, πρόγονοι ενός κόμβου n είναι όλοι οι κόμβοι που βρίσκονται στη διαδρομή από τον κόμβο n μέχρι τη ρίζα.
Απόγονοι Descendants	Απόγονοι ενός κόμβου n είναι όλοι οι κόμβοι των οποίων ο n αποτελεί πρόγονο.
Πατέρας ή Γονέας Parent	Πατέρας ενός κόμβου n είναι ο μοναδικός πρόγονος που έχει ακμή προς αυτόν.
Παιδιά Children	Τα παιδιά του κόμβου n είναι όλοι οι κόμβοι των οποίων ο n αποτελεί πατέρα.
Φύλλο Leaf	Είναι ένας κόμβος χωρίς παιδιά.
Υπο-δένδρο Sub-tree	Τα υπο-δένδρα T_1, T_2, \dots, T_k ενός κόμβου n με k παιδιά είναι τα δένδρα που σχηματίζονται αν αφαιρεθεί ο κόμβος n και τα παιδιά του γίνουν ρίζες.
Μήκος Length	Το μήκος μιας διαδρομής από τον κόμβο n_i στον κόμβο n_j είναι το πλήθος των ενδιάμεσων ακμών.
Επίπεδο Level	Επίπεδο ενός κόμβου είναι το μήκος της μοναδικής διαδρομής από τη ρίζα προς τον κόμβο αυτόν. Η ρίζα κάθε δένδρου βρίσκεται στο μηδενικό επίπεδο.
Βαθμός Degree	Βαθμός ενός κόμβου είναι το πλήθος των παιδιών του.
k-μήνυμα k-message	Είναι το μήνυμα που εγχέεται από τον κόμβο n_i με ισχύ έγχυσης $P_i(k)$.
k-γείτονας k-neighbor	Ένας κόμβος n_j είναι k -απόγονος ενός ιεραρχικά υψηλότερου κόμβου n_i αν μπορεί να του μεταδώσει επιτυχώς ένα k -μήνυμα. Σε αυτή την περίπτωση, ο κόμβος n_i ονομάζεται k -πρόγονος του κόμβου n_j .
k-γειτονιά k-neighborhood	Η k -γειτονιά ενός κόμβου n_i είναι το σύνολο των k -γειτόνων του.

(1-hop neighbor) ή με τους κόμβους που τους χωρίζουν δύο (2-hop neighbor) ή και περισσότερα άλματα. Συνήθως, λόγω των περιορισμών στην ισχύ έγχυσης, οι 2-hop γείτονες δεν ικανοποιούν τον περιορισμό της (6.3). Ως εκ τούτου, δεν υπάρχει ακμή, δηλαδή απευθείας επικοινωνία, μεταξύ 2 ή περισσότερων –hop γειτόνων. Ακόμα και σε περιπτώσεις πολύ καλών PLC διαύλων ή συνδέσεων όπου ικανοποιείται η (6.3) για την περίπτωση των 2-hop γειτόνων, η ύπαρξη αλγορίθμων δρομολόγησης, αντίστοιχων με αυτούς που παρουσιάστηκαν στις [Liu12], [Can12], εξασφαλίζει ότι, καίτοι η φυσική δομή του δικτύου είναι αυτή του γράφου, η λογική δομή του είναι δενδρική.

Ακολουθώντας δενδρική περιγραφή για το SGC δίκτυο και δεδομένου ότι η κίνηση σε ένα SGC δίκτυο είναι κυρίως ανοδικής μορφής (uplink), κάθε κόμβος χρειάζεται να επικοινωνήσει με το μοναδικό 1-hop γείτονα που βρίσκεται στο αμέσως ανώτερο επίπεδο του δένδρου, δηλαδή πλησιέστερα στην πύλη εξόδου, δηλαδή τον πατέρα του στο δένδρο. Ο κόμβος ρίζα του δένδρου (root node) αποτελεί και την πύλη εξόδου (gateway ή sink) για την κίνηση που παράγεται στο SGC δίκτυο, ενώ αποτελεί και τον HE του δικτύου PLC.

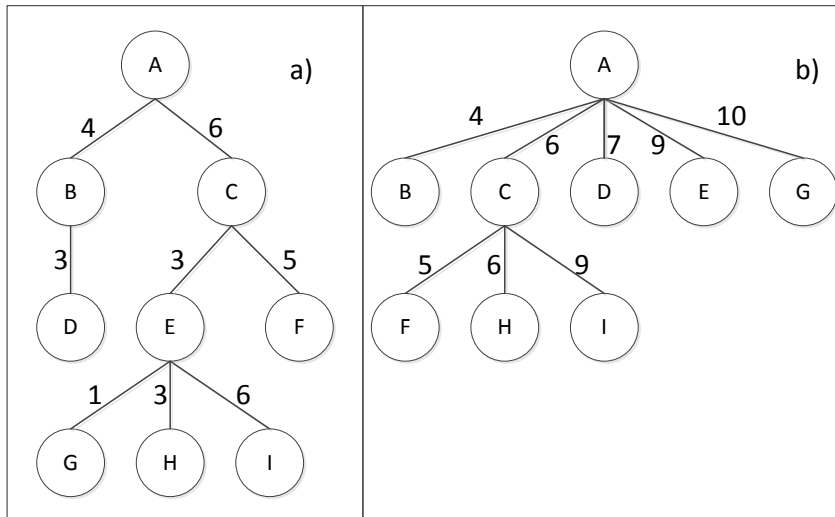
Στην ανάλυση που ακολουθεί γίνεται η θεώρηση κβαντισμένης ισχύος έγχυσης, δηλαδή κάθε κόμβος n_i του SGC δικτύου εγγχεί ισχύ σύμφωνα με τη σχέση

$$P(n_i, k) = k \cdot P_{th} \leq P_{max}, \quad k = 1, 2, \dots, K \quad (6.5)$$

όπου το P_{max} είναι η μέγιστη επιτρεπόμενη ισχύς έγχυσης, όπως αυτή καθορίζεται από τους τοπικούς EMI περιορισμούς, και $K = P_{max}/P_{th}$. Συγκεκριμένα, όριο ισχύος έγχυσης $-70dBm/Hz$ σημαίνει ότι:

- Όταν δεν υπάρχει έλεγχος στην ισχύ έγχυσης, η ύπαρξη του ανωτέρω ορίου σημαίνει ότι όλοι οι κόμβοι μεταδίδουν με σταθερή ισχύ έγχυσης $-70dBm/Hz$.
- Όταν αξιοποιείται η δυνατότητα των κόμβων να εκπέμπουν κβαντισμένα επίπεδα ισχύος, το ανωτέρω όριο υποδηλώνει ότι $P_{max} = -70dBm/Hz$, δηλαδή ότι ένας κόμβος μπορεί να χρησιμοποιήσει ένα μέγιστο k_{max} για το οποίο ισχύει $k_{max} \cdot P_{th} \leq -70dBm/Hz$.

Η τιμή P_{th} είναι η ελάχιστη ισχύς που απαιτείται για επιτυχημένη μετάδοση όλων των κόμβων στον 1-hop γείτονά τους και καθορίζει τη δομή και το μέγεθος του SGC δένδρου. Συγκεκριμένα, μικρές τιμές του P_{th} αυξάνουν την προσαρμοστικότητα και την



Σχήμα 6.1: α) Παράδειγμα αραιού SGC δένδρου, β) Παράδειγμα πυκνού SGC δένδρου.

Οι αριθμοί κατά μήκος των ακμών δηλώνουν την κανονικοποιημένη εξασθένιση στην αντίστοιχη ζεύξη.

αποτελεσματικότητα του προτεινόμενου σχήματος. Από την άλλη, οι μικρές τιμές του P_{th} επηρεάζονται από τις συνθήκες μετάδοσης του PLC διαύλου επιφέροντας συχνές αλλαγές της τοπολογίας του SGC δένδρου. Μεγάλες τιμές του P_{th} μειώνουν την προσαρμοστικότητα και, πιθανώς, το όφελος από το προτεινόμενο σχήμα κερδίζοντας όμως σε ανεκτικότητα στις μικρές αλλαγές των συνθηκών μετάδοσης των PLC διαύλων.

6.4.2. Σχηματισμός SGC δένδρων επί PLC δικτύων

Με βάση την τοπολογία του ενεργειακού δικτύου στην περιοχή εγκατάστασης των PLC δικτύων και την ισχύ έγχυσης των κόμβων, τα σχηματιζόμενα SGC δένδρα, τα οποία ενδεχομένως διαφέρουν σημαντικά ως προς τη δομή τους, μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε δύο ομάδες, τα αραιά δένδρα που χαρακτηρίζονται από πολλά επίπεδα και μεγάλο ύψος, και τα πυκνά δένδρα που χαρακτηρίζονται από λίγα επίπεδα και μικρό ύψος. Χαρακτηριστικά παραδείγματα των δύο κατηγοριών φαίνονται στο Σχ.6.1. Όπως ήδη αναφέρθηκε, η δομή του SGC δικτύου εξαρτάται τόσο από την ισχύ έγχυσης όσο και από τη δομή και την τοπολογία του δικτύου διανομής. Επομένως, τα αραιά δένδρα απαντώνται κυρίως σε αγροτικές / αραιοκατοικημένες περιοχές όπου υπάρχουν λιγότερες διακλαδώσεις κατά μήκος των γραμμών του ενεργειακού δικτύου. Παράλληλα, τα αραιά δένδρα συνήθως υπόκεινται και σε έλεγχο της ισχύος έγχυσης, αφού περιορισμός αυτής οδηγεί σε περιορισμό των τιμών του k , άρα σε αύξηση του πλήθους επιπέδων ενός δένδρου. Στην ακραία περίπτωση, ένα αραιό δένδρο που

καλύπτει αγροτικές περιοχές μπορεί να έχει μορφή σειριακού διαύλου από το οποίο λείπουν οι διακλαδώσεις. Εντελώς αντίστοιχα, πυκνά δένδρα απαντώνται σε αστικές περιοχές που χαρακτηρίζονται από δίκτυα διανομής με πολλές διακλαδώσεις. Στις περιπτώσεις αυτές γίνεται απαιτούνται υψηλές τιμές ισχύος έγχυσης προκειμένου να επιτευχθεί η συνδεσιμότητα όλων των κόμβων παρά την ύπαρξη διακλαδώσεων. Στην ακραία περίπτωση, η δομή του SGC δικτύου σε αστικά κέντρα καταλήγει στο σχηματισμό μιας 1-hop γειτονιάς, όπου όλοι οι κόμβοι επικοινωνούν απευθείας με τον κοινό γονέα που είναι ο HE. Η συγκεκριμένη τοπολογία απαντάται συχνά σε IH δίκτυα, όπου οι μικρές αποστάσεις μεταξύ των κόμβων οδηγούν σε πλήρως διασυνδεδεμένη τοπολογία.

6.5 Κατανομή πόρων με χρήση ελέγχου ισχύος και διαστρωματικής σχεδίασης

Σχεδιαστικός στόχος του αλγορίθμου TDMA χρονοπρογραμματισμού που προτείνεται στη συνέχεια είναι ο προσδιορισμός του ελάχιστου χρονοπρογραμματισμού προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η καθυστέρηση μετάδοσης δεδομένων σε ένα SGC δίκτυο. Για την επίτευξη του στόχου αυτού εφαρμόζεται έλεγχος ισχύος που οδηγεί στη δημιουργία ανεξάρτητων περιοχών σε ένα SGC δίκτυο, δηλαδή περιοχών που δεν επηρεάζονται από τις παρεμβολές που δημιουργεί η μετάδοση σε άλλα τμήματα του SGC δένδρου.

Το συγκεκριμένο πρόβλημα λαμβάνει υπόψη του και προσαρμόζεται στη μεγάλη διαφορά κανονικοποιημένης εξασθένησης που εμφανίζεται μεταξύ γειτονικών ζεύξεων. Συγκεκριμένα και με αναφορά στο Σχ.6.1α, ο κόμβος G μεταδίδει με P_{min} ($k=1$) για να φθάσει τον κόμβο γονέα του E, ενώ ο κόμβος F πρέπει να μεταδώσει με $5 \cdot P_{min}$ ($k=5$) για να επικοινωνήσει με τον κόμβο γονέα του C. Παράλληλα, από το Σχ.6.1α φαίνεται ότι οι κόμβοι D και F μπορούν να μεταδώσουν ταυτόχρονα με τους κόμβους G, H και I αφού ανήκουν σε διαφορετικές ανεξάρτητες περιοχές. Διαισθητικά, το πλήθος των ανεξάρτητων περιοχών μειώνεται με την αύξηση της ισχύος έγχυσης αφού αυτό αυξάνει και την παρεμβολή μεταξύ των κόμβων. Το προτεινόμενο σχήμα ελέγχου ισχύος επιτρέπει στους κόμβους ενός SGC δένδρου να επικοινωνούν με τους 1-hop γείτονές

τους, ελαχιστοποιώντας τις παρεμβολές στους υπόλοιπους κόμβους, και επομένως μεγιστοποιώντας το πλήθος των ανεξάρτητων περιοχών σε ένα SGC δίκτυο.

6.5.1 Φάση 1: Ανακάλυψη δικτύου

Για τη λειτουργία του συγκεκριμένου αλγορίθμου έχει γίνει η υπόθεση ότι το μέγεθος της προσωρινής μνήμης (buffer) κάθε κόμβου SGC επαρκεί για να αποθηκεύσει τα στοιχεία θέσης και ισχύος των γειτόνων του, ενώ κάθε κόμβος έχει συγκεκριμένη ταυτότητα αναγνώρισης ID.

Κατά την έναρξη της φάσης ανακάλυψης του δικτύου ο HE, δηλαδή η ρίζα του δένδρου, έστω n_0 , εκπέμπει μηνύματα αναγνώρισης / φάρους (beacon) με την πληροφορία του ID και του επιπέδου ισχύος έγχυσης k . Το επίπεδο k , άρα και το επίπεδο εγγεόμενης ισχύος, αυξάνεται προοδευτικά από 1 μέχρι K . Στην περίπτωση όπου κάποιος άλλος κόμβος του δικτύου, έστω n_1 , λάβει το k -μήνυμα, αποθηκεύει το ID του n_0 και το k που αντιστοιχεί στη συγκεκριμένη μετάδοση και απαντά αποστέλλοντας με ίδια ισχύ ($P(n_1, k)$) μήνυμα επαλήθευσης στον κόμβο n_0 . Κατ' αυτό τον τρόπο, ο κόμβος n_0 ενημερώνεται για όλους τους k -γείτονές του αποθηκεύοντας την ταυτότητα και το αντίστοιχο k των επαληθεύσεων που έλαβε. Σημειώνεται ότι το k -μήνυμα μπορεί να ληφθεί και από άλλους κόμβους ανάλογα με τη θέση τους και την ποιότητα των καλωδίων. Όταν το k φθάσει το όριο του K , όλοι οι k -γείτονες του n_0 έχουν ανακαλυφθεί οπότε, ο κόμβος n_0 ειδοποιεί διαδοχικά όλους τους k -γείτονές του, $k=1,2,..K$, οι οποίοι με τη σειρά τους προχωρούν να ανακαλύψουν τις δικές του k -γειτονιές.

Ανάλογα με την τοπολογία του δικτύου, την ποιότητα των γραμμών και την τιμή του k ένας κόμβος μπορεί να ανήκει σε πολλές k -γειτονιές. Ανάμεσα στους k -γονείς ενός κόμβου n_i , επιλέγεται ως γονέας του ο κόμβος που χαρακτηρίζεται από τη μικρότερη τιμή του k . Ο γονέας ενός κόμβου αποτελεί και την πύλη εξόδου του συγκεκριμένου κόμβου προς τη ρίζα, δηλαδή τον κόμβο που προωθεί όλα τα πακέτα που λαμβάνει από το συγκεκριμένο κόμβο και τους κόμβους χαμηλότερου επιπέδου. Σημειώνεται, επίσης, ότι κατά την επαλήθευση των k -μηνυμάτων, κάθε κόμβος αγνοεί τα μηνύματα εκείνα που αντιστοιχούν σε ταυτότητα που υπάρχει ήδη καταχωρισμένη στη μνήμη του, δηλαδή κόμβων που έχουν αναγνωρισθεί ως προγονοί του.

Στην περίπτωση όπου κάποιος κόμβος δεν λάβει k -μήνυμα από κάποιον κόμβο που δεν έχει ήδη αποθηκεύσει, τότε επιβεβαιώνει τον εαυτό του ως κόμβο-φύλλο, δηλαδή

τερματικό κόμβο του SGC δικτύου. Στην περίπτωση αυτή, μεταδίδει σχετική ειδοποίηση στον κόμβο-γονέα του ορίζοντας ως παραλήπτη του μηνύματος τη ρίζα n_0 του δένδρου. Ο γονέας του κόμβου-φύλλου προωθεί αντίστοιχα το μήνυμα στο δικό του γονέα μέχρι να φθάσει στον προορισμό. Το μήνυμα ειδοποίησης που αποστέλλει ένας κόμβος-φύλλο ενθυλακώνει κάθε φορά την ταυτότητά του, η οποία θα φθάσει τελικά στον n_0 , ενημερώνοντας με αυτό τον τρόπο τους ενδιάμεσους κόμβους για τη δομή του δένδρου.

Συμπερασματικά, η φάση ανακάλυψης του δικτύου επιτυγχάνει τα ακόλουθα:

- Κάθε κόμβος επιλέγει ως γονέα του τον πρόγονό του στον οποίο φθάνει με την ελάχιστη ισχύ έγχυσης.
- Σε κάθε κόμβο γίνεται γνωστή η δομή του δικτύου που τον αφορά, με αποτέλεσμα κάθε κόμβος να αποκτά δυνατότητα δρομολόγησης.
- Ο κόμβος HE σχηματίζει το SGC δένδρο για κάθε τιμή $P(n_i, k)$ που εξετάζεται.

6.5.2 Φάση 2: Βελτιστοποίηση χρονοδρομολόγησης

Μετά την επιτυχή λήψη όλων των ειδοποιήσεων από τους κόμβους του δικτύου, ο HE εκκινεί τη φάση βελτιστοποίησης της TDMA χρονοδρομολόγησης. Στόχος του αλγορίθμου είναι η ελαχιστοποίηση του χρονοπρογραμματισμού με αντίστοιχη μείωση της καθυστέρησης. Αυτό επιτυγχάνεται με μείωση της ισχύος έγχυσης που οδηγεί στην αύξηση των ταυτόχρονων αναμεταδόσεων. Οι βασικές αρχές που ακολουθούνται κατά τη χρονοδρομολόγηση TDMA είναι οι ακόλουθες:

- Οι 1-hop γείτονες χρησιμοποιούν διαφορετικές χρονοσχισμές αφού ανήκουν στην ίδια ανεξάρτητη περιοχή του δένδρου, δηλαδή σε περιοχή όπου ταυτόχρονες μεταδόσεις προκαλούν αλληλοπαρεμβολές.
- Η επικοινωνία των κόμβων σε ένα PLC δίκτυο είναι ημιαμφίδρομη (half-duplex).
- Ένας κόμβος δεν είναι σε θέση να λάβει ταυτόχρονα περισσότερα του ενός μηνύματα.

Οι συγγραφείς στην [Dur12] παρέχουν θεωρητικά όρια αναφορικά με την ελάχιστη διάρκεια χρονοπρογραμματισμού, υποθέτοντας ότι η χρήση ελέγχου ισχύος έχει εξαλείψει τις παρεμβολές πέραν της 1-hop γειτονιάς. Σημειώνεται ότι η πρώτη φάση του αλγορίθμου εξασφαλίζει ότι η μετάδοση ενός κόμβου δεν επηρεάζει τους προγόνους του χωρίς, όμως, να εξασφαλίζεται ότι δεν επηρεάζονται οι κόμβοι στο ίδιο ή σε χαμηλότερο από αυτόν επίπεδο. Επομένως, τα όρια που αναφέρονται στην [Dur12] δεν μπορούν

πάντα να επιτευχθούν με χρήση του προτεινόμενου σχήματος για SGC δίκτυα. Στην περίπτωση που εξετάζεται, η κίνηση είναι τύπου convergecast, επομένως η μετάδοση προς την άνω ζώνη αποτελεί και τον μοναδικό τύπο επιτρεπόμενης μετάδοσης. Σε αυτή την περίπτωση το προτεινόμενο σχήμα επιτυγχάνει την ελαχιστοποίηση της διάρκειας χρονοπρογραμματισμού, επαληθεύοντας τα όρια που αναφέρονται στην [Dur12].

Προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η διάρκεια χρονοπρογραμματισμού, ο κόμβος HE καθορίζει το μέγιστο αριθμό ανεξάρτητων περιοχών του δένδρου. Οι κόμβοι που ανήκουν στην ίδια ανεξάρτητη περιοχή είναι γειτονικοί ή ισχύει για αυτούς ο περιορισμός

$$P(n_{up}, k) \leq \max_j \{P(n_j, k)\} \quad (6.6)$$

όπου ο κόμβος n_j είναι κόμβος-τέκνο του n_i και το μέγεθος $P(n_{up}, k)$ ορίζει την αθροιστική ισχύ έγχυσης όλων των προγόνων του n_i .

Στην περίπτωση μη συγκεντρώσιμων δεδομένων, ο HE αναθέτει μία χρονοσχισμή στον κόμβο-τέκνο με την υψηλότερη προτεραιότητα και στους αντίστοιχους με αυτόν κόμβους που δεν παρεμβάλλουν, έστω n_j , δηλαδή που ανήκουν σε διαφορετικές ανεξάρτητες περιοχές. Αναδρομικά, μπορούν να μεταδώσουν στην ίδια χρονοσχισμή και οι ανεξάρτητοι κόμβοι με τον / τους n_j , μέχρι να καλυφθούν οι κόμβοι όλων των ανεξάρτητων περιοχών. Οι προτεραιότητες σε ένα SGC δίκτυο προκύπτουν από την κλάση υπηρεσιών της προς μετάδοση κίνησης. Στην περίπτωση που είναι ενεργοποιημένες διαφοροποιημένες υπηρεσίες, περισσότερες χρονοσχισμές μπορούν να ανατεθούν σε κάποιο κόμβο με κριτήριο την κλάση όπου ανήκουν οι υπηρεσίες.

Στην περίπτωση συγκεντρώσιμων δεδομένων, κάθε κόμβος μεταδίδει μία φορά. Επίσης, κόμβοι που ανήκουν σε ανεξάρτητες περιοχές μπορούν να μεταδώσουν ταυτόχρονα. Η χρήση ή όχι του συγκεκριμένου τρόπου μετάδοσης εξαρτάται από τις εφαρμογές που υποστηρίζονται από το δίκτυο SGC και τις κλάσεις υπηρεσιών στις οποίες ανήκουν.

Η φάση βελτιστοποίησης της χρονοδρομολόγησης TDMA ολοκληρώνεται όταν πραγματοποιηθεί αναδρομικά η ανάθεση χρονοσχισμών σε όλους τους κόμβους του SGC δένδρου. Η διάρκεια χρονοπρογραμματισμών TDMA για το υποθετικό δένδρο του Σχ.6.1α παρουσιάζεται στους Πίν.6.2 και 6.3.

Πίνακας 6.2: Χρονοπρογραμματισμός TDMA για μη συγκεντρώσιμα δεδομένα.

TS	Με έλεγχο ισχύος								Χωρίς έλεγχο ισχύος							
	B	C	D	E	F	G	H	I	B	C	D	E	F	G	H	I
1		x								x						
2	x			x					x							
3		x	x								x		x			
4	x				x	x				x						
5		x										x				
6				x										x		
7		x													x	
8							x			x						
9				x												x
10		x								x						
11								x								
12				x												
13		x														

Πίνακας 6.3: Χρονοπρογραμματισμός TDMA για πλήρως συγκεντρώσιμα δεδομένα.

TS	Με έλεγχο ισχύος								Χωρίς έλεγχο ισχύος							
	B	C	D	E	F	G	H	I	B	C	D	E	F	G	H	I
1	x			x					x							
2		x	x							x						
3					x	x					x		x			
4							x					x				
5								x						x		
6															x	
7																x

6.5.3 Φάση 3: Σταθεροποίηση και δυναμική προσαρμογή

Μόλις ολοκληρωθούν οι δύο πρώτες φάσεις του προτεινόμενου σχήματος, ο HE έχει προσδιορίσει το βέλτιστο TDMA χρονοπρογραμματισμό ο οποίος και αποστέλλεται στους απογόνους του με τον επόμενο κύκλο beacon. Ο συγκεκριμένος χρονοπρογραμματισμός εκτελείται μέχρι να συμβεί κάποια αλλαγή στο δίκτυο, όπως διακοπή γραμμών ή προσθήκη νέων κόμβων. Στην περίπτωση αυτή, η φάση βελτιστοποίησης εκτελείται εκ νέου για τον προσδιορισμό νέου χρονοπρογραμματισμού.

Κατ' αυτόν τον τρόπο, το προτεινόμενο σχήμα προσαρμόζεται στις αλλαγές που συμβαίνουν στο SGC δίκτυο

6.6 Εφαρμογή του προτεινόμενου σχήματος στο δίκτυο της Λάρισας

6.6.1 Σενάρια προσομοίωσης

Για την εγκατάσταση PLC δικτύων κρίνονται κατάλληλες τόσο οι αγροτικές όσο και οι αστικές περιοχές. Το ηλεκτρικό δίκτυο σε αγροτικές περιοχές αποτελεί πρόσφορο φυσικό μέσο μετάδοσης για τη PLC τεχνολογία, αφού εμφανίζει περιορισμένες διακλαδώσεις συγκριτικά με τις αστικές περιοχές. Το προτεινόμενο σχήμα έχει εφαρμοσθεί σε δύο σενάρια SGC δικτύων αντιπροσωπευτικά των αγροτικών και των αστικών περιοχών. Οι προδιαγραφές των δικτύων που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται στον Πίν.6.4 Σημειώνεται ότι το αντιπροσωπευτικό παράδειγμα αγροτικού δικτύου αποτελεί τμήμα του δικτύου της Λάρισας που παρουσιάστηκε στο Κεφ.3 της διατριβής, ενώ το παράδειγμα που περιλαμβάνει τμήμα αστικού δικτύου είναι υποθετικό. Από τον Πίν.6.4 μπορούν να εξαχθούν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

Πίνακας 6.4: Παράμετροι ενεργειακού δικτύου σε τυπική αγροτική και αστική περιοχή.

Ενεργειακό Δίκτυο	Αγροτική περιοχή	Αστική περιοχή
<i>Μέση απόσταση κόμβων (m)</i>	365.2	305
<i>Τυπική απόκλιση της απόστασης (m)</i>	133.7	91.5
<i>Πλήθος κόμβων</i>	79	140
<i>Μέγιστη απόσταση κόμβων</i>	600	480
<i>Μέσος αριθμός παιδιών</i>	1.4	2.4
<i>Ύψος SGC δικτύου</i>	28	10

- Όπως έχει προκύψει και από τα προηγούμενα κεφάλαια της διατριβής, στην περίπτωση των αγροτικών περιοχών οι κόμβοι PLC μπορούν να εγκατασταθούν αραιότερα. Αντιθέτως, στα αστικά δίκτυα οι κακές ζεύξεις επιβάλλουν την πυκνότερη εγκατάσταση κόμβων.

- Η πυκνότερη εγκατάσταση κόμβων στο υποθετικό αστικό δίκτυο δικαιολογεί και το αυξημένο πλήθος τους, δεδομένου ότι τα δύο είδη δικτύων που εξετάζονται καλύπτουν ίδια γεωγραφική έκταση για λόγους καλύτερης σύγκρισης των αποτελεσμάτων.
- Το μέσο πλήθος απογόνων εκφράζει και το μέσο πλήθος των διακλαδώσεων που απαντώνται στο PLC δίκτυο. Επισημαίνεται ότι για το αγροτικό δίκτυο έχει χρησιμοποιηθεί ένα αραιό SGC δίκτυο με λιγότερες διακλαδώσεις και μεγαλύτερο μήκος, ενώ, για το αστικό δίκτυο, το πλήθος των διακλαδώσεων είναι μεγαλύτερο, το δίκτυο είναι πυκνότερο και το ύψος του SGC δένδρου αρκετά μικρότερο.

Για να εξετασθεί η επίδραση του προτεινόμενου σχήματος στα δύο τυπικά σενάρια SGC που εξετάστηκαν, εισάγεται η ποσοστιαία μεταβολή κάποιου μέτρου επίδοσης που εκφράζεται μέσω της σχέσης

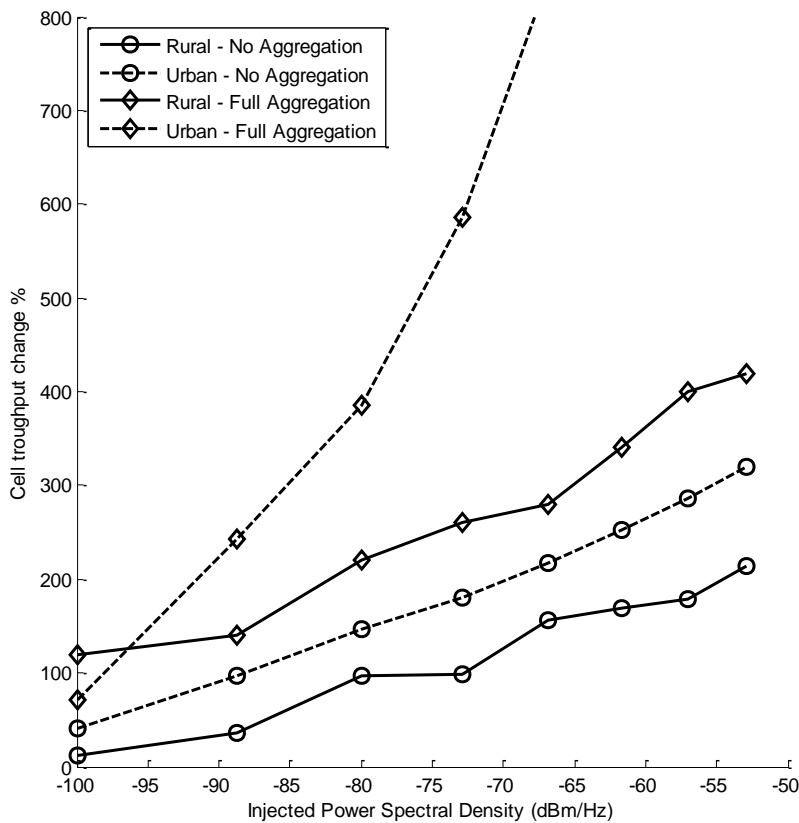
$$X(\%) = \frac{X_{with\ power\ control} - X_{without\ power\ control}}{X_{without\ power\ control}} \cdot 100\% \quad (6.7)$$

όπου X το μέτρο επίδοσης που εξετάζεται κάθε φορά. Τέλος, η επίδοση του αλγορίθμου εξετάζεται για περιπτώσεις μη συγκεντρώσιμων και συγκεντρώσιμων δεδομένων.

6.6.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Το πρώτο μέγεθος που εξετάζεται είναι η επίδραση του προτεινόμενου αλγορίθμου στη συνολική διέλευση του SGC δικτύου. Στο Σχ.6.2 σχεδιάζεται η ποσοστιαία μεταβολή στη διέλευση του δικτύου συναρτήσει της μέγιστης επιτρεπόμενης πυκνότητας ισχύος έγχυσης. Μπορεί να παρατηρηθεί ότι η χρήση ελέγχου ισχύος αυξάνει δραστικά τη διέλευση και στα δύο σενάρια που εξετάστηκαν. Από το Σχ.6.2 φαίνεται ότι το όφελος είναι σημαντικότερο στα SGC δίκτυα των αστικών περιοχών όπου το πρόβλημα των παρεμβολών απουσία ελέγχου της ισχύος έγχυσης είναι εντονότερο. Επομένως, επιβεβαιώνεται το μεγάλο όφελος που αποφέρει το προτεινόμενο σχήμα, το οποίο μάλιστα ενισχύεται σημαντικά όταν μεταδίδονται πλήρως συγκεντρώσιμα δεδομένα (full aggregation).

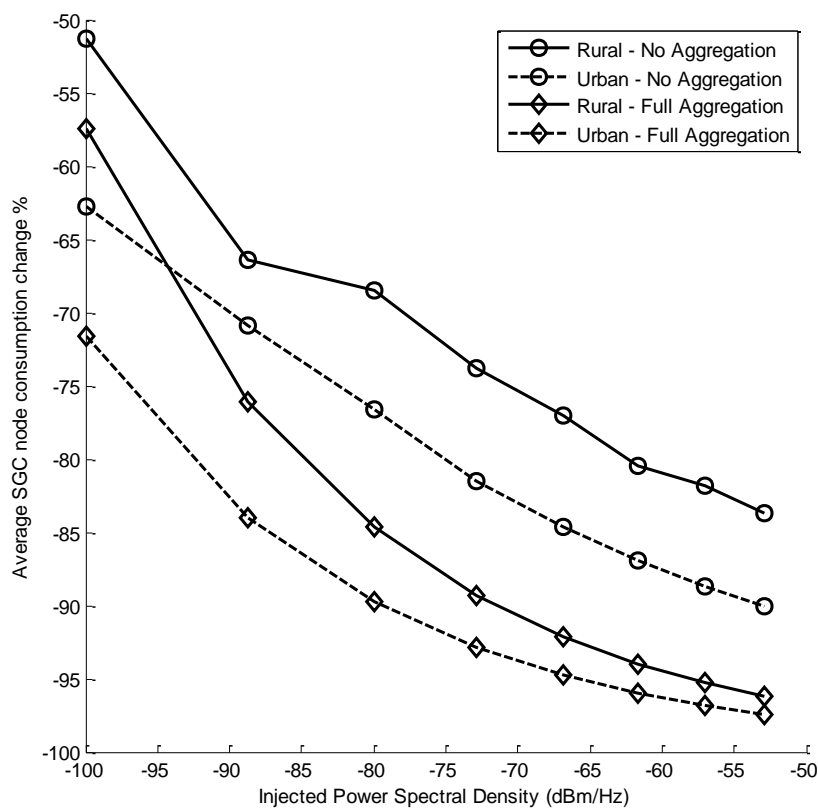
Η σημαντική βελτίωση που εμφανίζει η συνολική χρησιμοποίηση του SGC δικτύου λόγω χρήσης ελέγχου της ισχύος έγχυσης σχετίζεται με την αξιοποίηση της δυνατότητας μετάδοσης στις σχηματιζόμενες ανεξάρτητες περιοχές του. Επισημαίνεται ότι όσο



Σχήμα 6.2: Ποσοστιαία μεταβολή στη συνολική διέλευση του SGC δικτύου ανάλογα με την μέγιστη επιτρεπόμενη ισχύ έγχυσης.

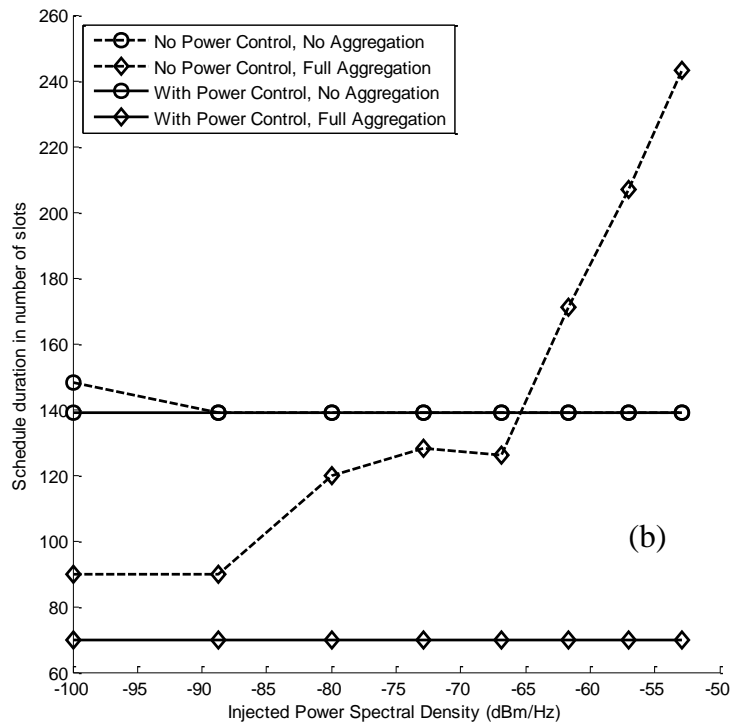
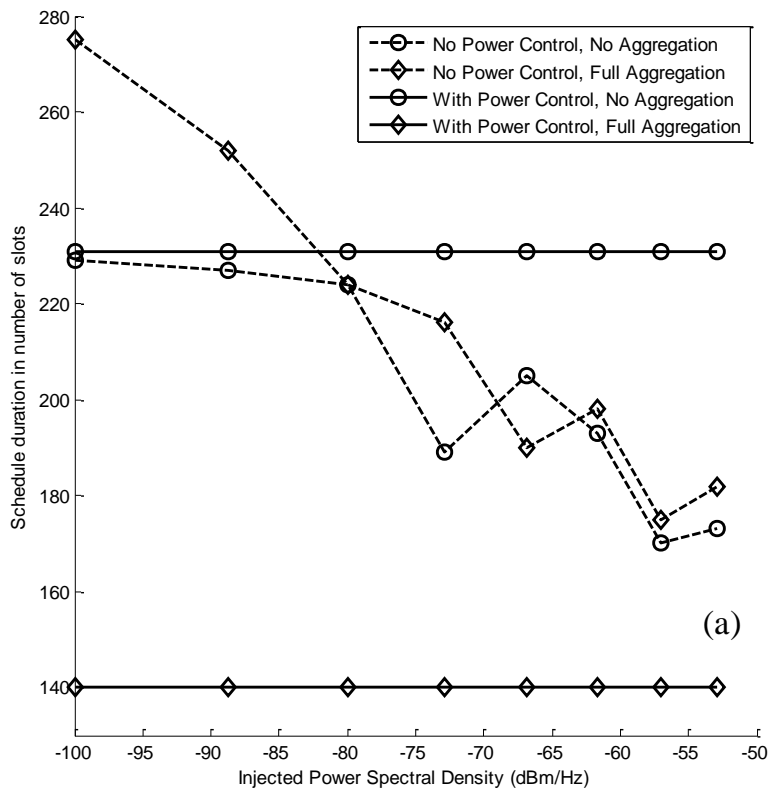
αυξάνεται η ισχύς έγχυσης, απουσία ελέγχου ισχύος, τόσο αυξάνονται και οι παρεμβολές σε γειτονικές μεταδόσεις. Αποτέλεσμα αυτού είναι η σημαντική μείωση της διέλευσης, φαινόμενο που ενισχύεται στα αστικά δίκτυα λόγω της μεγάλης συγκέντρωσης των SGC κόμβων. Η ανακάλυψη και αξιοποίηση των ανεξάρτητων περιοχών ενός SGC δένδρου που επιτυγχάνει το προτεινόμενο σχήμα οδηγούν σε σημαντική αύξηση της διέλευσης.

Στο Σχ.6.3 εξετάζεται η επίδραση του ελέγχου ισχύος στην κατανάλωση ενέργειας από τους PLC κόμβους ενός δικτύου SGC. Σημειώνεται ότι, όταν χρησιμοποιείται για το σχηματισμό SGC δικτύων, η τεχνολογία PLC έχει ως στόχο την αποδοτική διαχείριση του ενεργειακού δικτύου. Επομένως, η πιθανή εξοικονόμηση ενέργειας από το προτεινόμενο σχήμα αποτελεί και βασικό σχεδιαστικό στόχο του SGC δικτύου. Από το Σχ.6.3 προκύπτει ότι, όπως αναμενόταν και ανεξαρτήτως της μετάδοσης συγκεντρώσιμων ή μη δεδομένων, ο έλεγχος ισχύος μειώνει σημαντικά την κατανάλωση ενέργειας.



Σχήμα 6.3: Ποσοστιαία μεταβολή στην κατανάλωση ενέργειας για τη λειτουργία του SGC δικτύου ως συνάρτηση της μέγιστης επιτρεπόμενης ισχύος έγχυσης.

Τα Σχ.6.4α και 6.4β απεικονίζουν τη διάρκεια του βέλτιστου χρονοπρογραμματισμού TDMA η οποία καθορίζει και την καθυστέρηση μετάδοσης των δεδομένων όλων των κόμβων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται συναρτήσει της μέγιστης επιτρεπόμενης ισχύος έγχυσης *IPSD*. Σημειώνεται ότι, στην περίπτωση αποστολής συγκεντρώσιμων δεδομένων, η συνολική διάρκεια του χρονοπρογραμματισμού εξαρτάται από τη συχνότητα με την οποία ο HE ανανεώνει της μετρήσεις κάθε κόμβου. Για το λόγο αυτό στα σχήματα 6.4α και 6.4β η διάρκεια του χρονοπρογραμματισμού για τη μετάδοση συγκεντρώσιμων δεδομένων πολλαπλασιάζεται με το συνολικό ύψος του δικτύου και αντιπροσωπεύει το συνολικό χρόνο που απαιτείται για τη συλλογή των δεδομένων που παράγονται από όλους τους κόμβους σε συγκεκριμένη στιγμή ανανέωσης. Όπως προκύπτει από το Σχ.6.4α, ο έλεγχος ισχύος δεν αρκεί για να μειώσει την καθυστέρηση. Παρατηρείται, επιπλέον, ότι ο έλεγχος ισχύος σε αγροτικά SGC δίκτυα μπορεί υπό αυξημένες τιμές ισχύος έγχυσης να οδηγεί σε μεγαλύτερη καθυστέρηση, στις περιπτώσεις όπου δεν μεταδίδονται συγκεντρώσιμα δεδομένα. Αυτό οφείλεται στο ότι,



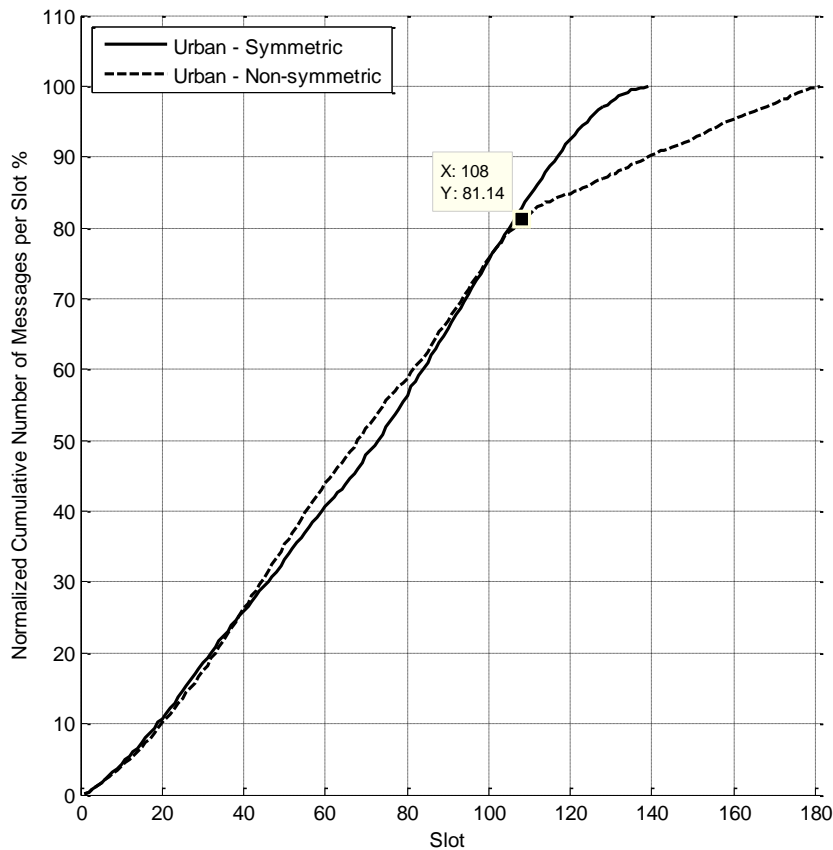
Σχήμα 6.4: Διάρκεια χρονοπρογραμματισμού συναρτήσει της μέγιστης επιτρεπόμενης ισχύος έγχυσης α) για αγροτικό SGC δίκτυο και β) για αστικό SGC δίκτυο.

στην περίπτωση συγκεντρώσιμων δεδομένων, τα μεγάλα υπο-δίκτυα που σχηματίζονται σε ένα αγροτικό, μη ισορροπημένο δένδρο, καθυστερούν να μεταδώσουν την κίνηση που συλλέγουν από τους απογόνους τους. Επίσης, ένας κόμβος δεν μπορεί να πραγματοποιεί συνεχόμενες μεταδόσεις, δεδομένου ότι, κατ' αυτόν τον τρόπο, δεν θα άφηνε τους απογόνους του να μεταδώσουν. Αυτό οδηγεί σε μείωση της χρησιμοποίησης του SGC δικτύου, και επακόλουθα, σε αυξημένη καθυστέρηση. Σημειώνεται ότι ένα δένδρο καλείται ισορροπημένο όταν κάθε υπο-δίκτυο ίδιου επιπέδου έχει το ίδιο πλήθος απογόνων.

Η επίδραση της μορφής του SGC δένδρου στη συνολική διέλευση του δικτύου εξετάζεται με λεπτομέρεια στο Σχ.6.5, όπου απεικονίζεται το συνολικό πλήθος μηνυμάτων ανά χρονοσχισμή κανονικοποιημένο προς το απαιτούμενο πλήθος μηνυμάτων για μετάδοση όλων των κόμβων του SGC δένδρου. Το συγκεκριμένο ποσοστό εξετάζεται για δύο κατηγορίες αστικών SGC δικτύων, συμμετρικής τοπολογίας και μη συμμετρικής τοπολογίας, που οδηγούν στο σχηματισμό ισορροπημένων και μη ισορροπημένων SGC δένδρων, αντίστοιχα.

Το Σχ.6.4β εξετάζει την διάρκεια του χρονοπρογραμματισμού στο υποθετικό αστικό SGC δίκτυο του Πίν.6.4 συναρτήσει της μέγιστης ισχύος έγχυσης. Παρατηρείται ότι ο έλεγχος ισχύος έγχυσης μειώνει δραστικά τη διάρκεια χρονοπρογραμματισμού όταν συνδυάζεται με συγκεντρώσιμα δεδομένα, ενώ δεν προκαλεί διαφοροποίηση της διάρκειας χρονοπρογραμματισμού στην περίπτωση μη συγκεντρώσιμων δεδομένων.

Συμπερασματικά, παρατηρείται ότι, απουσία ελέγχου ισχύος και καθώς αυξάνεται η μέγιστη ισχύς έγχυσης, το SGC δένδρο μετατρέπεται από αραιό δένδρο μεγάλου ύψους σε ένα περισσότερο ισορροπημένο δένδρο. Αυτή η ιδιότητα οδηγεί σε μικρότερους χρόνους χρονοπρογραμματισμού, παρά την αύξηση των παρεμβολών. Εντούτοις, όταν ο έλεγχος ισχύος συνδυασθεί με μετάδοση συγκεντρώσιμων δεδομένων, οδηγεί σε σημαντική μείωση της διάρκειας χρονοπρογραμματισμού. Στην περίπτωση αυτή, το πρόβλημα χρονοπρογραμματισμού μεταπίπτει στο γνωστό πρόβλημα χρωματισμού γράφου (graph coloring problem) που έχει μελετηθεί ευρέως στη βιβλιογραφία [Dur12], σύμφωνα με το οποίο η διάρκεια χρονοπρογραμματισμού εξαρτάται αποκλειστικά από το βαθμό των κόμβων, δηλαδή το πλήθος των ακμών που συντρέχουν σε αυτούς. Αύξηση της επιτρεπόμενης ισχύος έγχυσης οδηγεί σε αύξηση του βαθμού των κόμβων, με



Σχήμα 6.5: Διάρκεια χρονοπρογραμματισμού συναρτήσει της μέγιστης επιτρεπόμενης ισχύος έγχυσης α) για αγροτικό SGC δίκτυο και β) για αστικό SGC δίκτυο.

αποτέλεσμα τη μείωση της συνολικής καθυστέρησης όταν πραγματοποιείται έλεγχος ισχύος.

Όπως έχει ήδη φανεί από τα προηγούμενα κεφάλαια, δεν είναι όλες οι PLC ζεύξεις κατάλληλες για μετάδοση. Ως εκ τούτου, η δομή ενός SGC δικτύου καταλήγει στο να είναι μη συμμετρική προκαλώντας μεγάλες διαφοροποιήσεις στις συνθήκες μετάδοσης σε κάθε υπο-δένδρο. Στο Σχ.6.5 εξετάζονται δύο αντιπροσωπευτικά παραδείγματα αστικών SGC δικτύων ένα συμμετρικό και ένα μη συμμετρικό. Συγκεκριμένα, το μη συμμετρικό SGC δένδρο αποτελείται από 4 υπο-δίκτυα, δηλαδή ο HE μπορεί να επικοινωνήσει απευθείας με 4 κόμβους. Τα υπο-δίκτυα αυτά περιλαμβάνουν το 53%, 17%, 17% και 13% των κόμβων, αντίστοιχα. Από την άλλη πλευρά, το συμμετρικό δίκτυο αποτελείται από 5 υπο-δίκτυα τα οποία περιλαμβάνουν το 26%, 27%, 17%, 17% και 13% των κόμβων, αντίστοιχα. Στα υποθετικά δίκτυα που εξετάζονται, η μη συμμετρική περίπτωση προκύπτει από τη συμμετρική ενώνοντας τα δύο μεγαλύτερα υπο-δίκτυα σε ένα.

Όπως προκύπτει από το Σχ.6.5, όταν ο έλεγχος ισχύος και ο βέλτιστος TDMA χρονοπρογραμματισμός εφαρμοσθούν στη συμμετρική τοπολογία επιτυγχάνουν τον θεωρητικά ελάχιστης διάρκειας χρονοπρογραμματισμό των 140 χρονοσχισμών. Αντιθέτως, στη μη συμμετρική περίπτωση, παρατηρείται ότι ο χρονοπρογραμματισμός καθυστερεί να ολοκληρωθεί κατά 40 χρονοσχισμές. Αυτό οφείλεται στην παρουσία του μεγαλύτερου υπο-δένδρου το οποίο απαιτεί περισσότερο χρόνο αφού περιλαμβάνει περισσότερους κόμβους με δεδομένα προς μετάδοση. Συγκεκριμένα, η αύξηση στην κίνηση προκύπτει διότι ένας κόμβος του m -επιπέδου ενός SGC δένδρου αναπαράγεται $m-1$ φορές μέχρι να φθάσει στον HE. Δηλαδή, όταν δεν μεταδίδονται συγκεντρώσιμα δεδομένα, κάθε ζεύξη PLC ενεργοποιείται τόσες φορές όσοι είναι οι κόμβοι που περιέχονται στο υπο-δένδρο με ρίζα τον κόμβο n_j . Επομένως, εκτός από μεγαλύτερη καθυστέρηση, η πλεονάζουσα κίνηση που αναπαράγεται στην περίπτωση μη ισορροπημένων δένδρων εξαλείφει το πλεονέκτημα από την πραγματοποίηση ελέγχου ισχύος.

Η συμπεριφορά της μετάδοσης στα μη ισορροπημένα δένδρα επαληθεύεται και από το Σχ.6.5, από όπου φαίνεται ότι μετά την 108 χρονοσχισμή η επίδοση στο μη-συμμετρικό δένδρο μειώνεται. Η συγκεκριμένη χρονική στιγμή αντανακλά την ολοκλήρωση της μετάδοσης στα μικρότερα υπο-δίκτυα αφήνοντας το μεγαλύτερο υπο-δίκτυο να είναι το μοναδικό ενεργό υπο-δίκτυο. Από τη στιγμή αυτή και μετά χάνεται το πλεονέκτημα που προκύπτει λόγω πραγματοποίησης ελέγχου ισχύος και αναχρησιμοποίησης των χρονοσχισμών από κόμβους που ανήκουν σε ανεξάρτητες περιοχές του δένδρου, και μεταδίδουν σειριακά μόνο οι κόμβοι του μεγαλύτερου υπο-δένδρου, μεταβάλλοντας την τοπολογία δενδρικής δομής σε δίαυλο.

6.6.3 Συμπεράσματα για το σχεδιασμό δικτύων BB-PLC ευρείας κλίμακας

Εκτός από το προφανές πλεονέκτημα της εξοικονόμησης ισχύος, ο έλεγχος της ισχύος έγχυσης και η αξιοποίηση των ταυτόχρονων μεταδόσεων σε ανεξάρτητες περιοχές μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική αύξηση της διέλευσης και μείωση της καθυστέρησης. Ανάλογα με την εφαρμογή στόχο του ευφυούς δικτύου (target smart grid application – TSGA) και τα χαρακτηριστικά του ενεργειακού δικτύου, μπορούν να εξαχθούν τα ακόλουθα βασικά συμπεράσματα για τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας του SGC δικτύου.

- **Μετάδοση συγκεντρώσιμων δεδομένων:** Όταν τα δεδομένα που παράγονται από την TSGA είναι συγκεντρώσιμα, τότε και στις δύο περιπτώσεις δένδρων, δηλαδή είτε αραιών είτε πυκνών, ο έλεγχος ισχύος αυξάνει τη συνολική διέλευση και μειώνει τη μέση καθυστέρηση μετάδοσης των κόμβων.
- **Σχεδιασμός αστικών SGC δικτύων:** Ο προσεκτικός σχεδιασμός των αστικών SGC δικτύων μπορεί να οδηγήσει σε μείωση των ασκόπων μεταδόσεων και της καθυστέρησης που αυτές εισάγουν. Οι συχνά εμφανιζόμενες μη συμμετρικές τοπολογίες SGC δένδρων, που οφείλονται στην εμφάνιση ακόμη και μιας ακατάλληλης προς μετάδοση ζεύξης στο δίκτυο, μπορεί να επηρεάσουν δυσμενώς την PLC μετάδοση. Από την άλλη πλευρά, ο σχηματισμός συμμετρικών τοπολογιών, μπορεί να οδηγήσει στη βελτιστοποίηση της λειτουργίας των SGC δικτύων. Συμπερασματικά, η θέση της ρίζας του SGC δικτύου, δηλαδή του HE, πρέπει να επιλέγεται έτσι ώστε να ελαχιστοποιούνται: *i*) η μέση κανονικοποιημένη εξασθένηση μεταξύ των κόμβων και *ii*) η τυπική απόκλιση του ύψους των υπο-δένδρων που σχηματίζονται.
- **Επίδραση του μεγέθους P_{min} :** Η επιλογή της τιμής P_{min} έχει άμεση επίδραση στην συμπεριφορά του δικτύου αφού υψηλές τιμές P_{min} αυξάνουν τις παρεμβολές μεταξύ των κόμβων, μειώνοντας το πλήθος των ανεξάρτητων περιοχών σε ένα SGC δίκτυο, ενώ μικρές τιμές του P_{min} καθιστούν το δίκτυο ευάλωτο σε χρονικές μεταβολές των συνθηκών μετάδοσης στις PLC ζεύξεις. Δεδομένου ότι η σταθερότητα είναι ιδιαίτερης σημασίας σε ένα SGC δίκτυο, αφού αποτελεί το δίκτυο κορμού που μεταφέρει την κίνηση που παράγεται από τις διάσπαρτες ευφυείς διατάξεις, ο προσδιορισμός της βέλτιστης τιμής P_{min} αποσκοπεί στην εξισορρόπηση της αποτελεσματικότητας με τη σταθερότητα λειτουργίας του δικτύου. Σχεδιαστικά, η βέλτιστη τιμή του P_{min} προκύπτει από την κατάλληλη τοποθέτηση των SGC κόμβων ώστε η τυπική απόκλιση της κανονικοποιημένης εξασθένησης των PLC ζεύξεων να είναι μικρή. Σε αυτή την περίπτωση, ελαχιστοποιείται η επίδραση του P_{min} στην επίδοση του SGC δικτύου ή τη σταθερότητα αυτού.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [2020] The EU climate and energy package 2020, *Available at:* <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2010:0265:FIN:en:PDF>
- [6POWER] 6POWER project, Deliverable D5.1. "Application Layer Requirements Derived from the Use of PLC Technology". June 2003
- [Ade11] Adebisi, B.; Treytl, A.; Haidine, A.; Portnoy, A.; Shan, R.U.; Lund, D.; Pille, H.; Honary, B.; , "IP-centric high rate narrowband PLC for smart grid applications," *Communications Magazine, IEEE* , vol.49, no.12, pp.46-54, December 2011
- [Ade11] Adebisi, B.; Treytl, A.; Haidine, A.; Portnoy, A.; Shan, R.U.; Lund, D.; Pille, H.; Honary, B., "IP-centric high rate narrowband PLC for smart grid applications," *Communications Magazine, IEEE* , vol.49, no.12, pp.46,54, December 2011
- [Afk05] Afkhamie, K.H.; Katar, S.; Yonge, L.; Newman, R., "An overview of the upcoming HomePlug AV standard," *Power Line Communications and Its Applications, 2005 International Symposium on* , vol., no., pp.400,404, 6-8 April 2005
- [Aky01] Akyildiz, I.F.; Morabito, G.; Palazzo, S., "TCP-Peach: a new congestion control scheme for satellite IP networks," *Networking, IEEE/ACM Transactions on* , vol.9, no.3, pp.307,321, Jun 2001
- [Ami06] Amirshahi, P.; Kavehrad, M., "High-frequency characteristics of overhead multiconductor power lines for broadband communications," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 24, no. 7, pp. 1292–1303, Jul. 2006
- [Ana07] Anatory, J.; Theethayi, N.; Kissaka, M.M.; Mvungi, N.H.; Thottappillil, R., "The Effects of Load Impedance, Line Length, and Branches in the BPLC—Transmission-Lines Analysis for Medium-Voltage Channel," *Power Delivery, IEEE Transactions on* , vol.22, no.4, pp.2156,2162, Oct. 2007
- [And10] Andreadou, N.; Pavlidou, F.-N.; , "Modeling the Noise on the OFDM Power-Line Communications System," *Power Delivery, IEEE Transactions on* , vol.25, no.1, pp.150-157, Jan. 2010
- [Aro11] Arora, S.; Chandna, V.K.; Thomas, M.S.; , "Modeling of broadband indoor power line channel for various network topologies," *Innovative Smart Grid*

Technologies - India (ISGT India), 2011 IEEE PES, vol., no., pp.229-235, 1-3 Dec. 2011

- [ARRA] The Congress of the United States, American Recovery and Reinvestment Act of 2009, *Available at:* <http://www.gpo.gov/fdsys/pkg/PLAW-111publ5/pdf/PLAW-111publ5.pdf> [Accessed: May 2013]
- [Aru10] Aruzuaga, A.; Berganza, I.; Sendin, Alberto; Sharma, M.; Varadarajan, B., "PRIME Interoperability Tests and Results from Field," *Smart Grid Communications (SmartGridComm), 2010 First IEEE International Conference on*, vol., no., pp.126,130, 4-6 Oct. 2010
- [BACnet] International Organization for Standardization, "Building Automation and Control Systems-Part 5: Data Communication Protocol," *International Standard ISO 16484-5*, 2010
- [Bal97] Balakrishnan, H.; Padmanabhan, V.N.; Seshan, S.; Katz, R.H., "A comparison of mechanisms for improving TCP performance over wireless links," *Networking, IEEE/ACM Transactions on*, vol.5, no.6, pp.756,769, Dec 1997
- [Bal97] Balakrishnan, H.; Padmanabhan, V.N.; Seshan, S.; Katz, R.H., "A comparison of mechanisms for improving TCP performance over wireless links," *Networking, IEEE/ACM Transactions on*, vol.5, no.6, pp.756,769, Dec 1997
- [Bar02] Barakat, C.; Altman, E., "Bandwidth tradeoff between TCP and link-level FEC," *Computer Networks*, vol.39, no.2, pp.133,150, Jun 2002
- [Bau09] Bauer, M.; Plappert, W.; Chong Wang; Dostert, K., "Packet-oriented communication protocols for Smart Grid Services over low-speed PLC," *Power Line Communications and Its Applications, 2009. ISPLC 2009. IEEE International Symposium on*, vol., no., pp.89,94, March 29 2009-April 1 2009
- [Beh07] Behlilovic, N.; Hadzialic, M.; Begovic, P.; , "An approach to techno-economical analysis for PLC broadband access telecommunication networks," *ELMAR, 2007*, vol., no., pp.129-133, 12-14 Sept. 2007
- [Ber12] Berger, L.T.; , "Wireline Communications in Smart Grids," , In: Berger, L.T.; Iniewski, K.; "Smart Grid Applications, Communications and Security". John Wiley & Sons, pp. 191-230, 2012
- [Bia12] Biagi, M.; Greco, S.; Lampe, L.; , "Neighborhood-knowledge based geo-routing in PLC," *Power Line Communications and Its Applications (ISPLC), 2012 16th IEEE International Symposium on*, vol., no., pp.7-12, 27-30 March 2012

- [Bos10] Bose, A., "Smart Transmission Grid Applications and Their Supporting Infrastructure," *Smart Grid, IEEE Transactions on* , vol.1, no.1, pp.11,19, June 2010
- [Bro08] Brown, R.E., "Impact of Smart Grid on distribution system design," *Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE* , vol., no., pp.1,4, 20-24 July 2008
- [Bum05] Bumiller, G.; Liping Lu; Yeqiong Song; , "Analytic performance comparison of routing protocols in master-slave PLC networks," *Power Line Communications and Its Applications, 2005 International Symposium on* , vol., no., pp. 116- 120, 6-8 April 2005
- [Bum12] Bumiller, G.; , "Transmitt signal design for NB-PLC," *Power Line Communications and Its Applications (ISPLC), 2012 16th IEEE International Symposium on* , vol., no., pp.132-137, 27-30 March 2012
- [BUP] BUILD UP, Available at: http://ec.europa.eu/energy/doc/actions_efficiency_renewable/factsheet_buildup.pdf [Accessed: May 2013]
- [Can12] Canale, S.; Di Giorgio, A.; Lanna, A.; Mercurio, A.; Panfili, M.; Pietrabissa, A.; , "Optimal Planning and Routing in Medium Voltage PowerLine Communications Networks," *Smart Grid, IEEE Transactions on* , vol.PP, no.99, pp.1-9, 0, 2012
- [Cao11] Di Cao; Andonovic, Ivan, "Research on backbone communication network in smart grid by using OPNET," *Smart Measurements for Future Grids (SMFG), 2011 IEEE International Conference on* , vol., no., pp.130,134, 14-16 Nov. 2011
- [Cel05] Celandroni, N.; Davoli, F.; Ferro, E.; Gotta, A., "Adaptive bandwidth partitioning among TCP elephant connections over multiple rain-faded satellite channels," *Proceedings of the Third international conference on Quality of Service in Multiservice IP Networks*, Springer-Verlag, vol., no., pp.559-573, 2005
- [Cel06] Celandroni, N.; Davoli, Franco; Ferro, E.; Gotta, A., "Long-Lived TCP Connections Via Satellite: Cross-Layer Bandwidth Allocation, Pricing, and Adaptive Control," *Networking, IEEE/ACM Transactions on* , vol.14, no.5, pp.1019,1030, Oct. 2006
- [Cha06] Chang-Kuan Lin; Hao-Wei Chu; Shiann-Chang Yen; Meng-Ting Lu; Yao, J.; Chen, H.; , "Robust Video Streaming over Power Lines," *Power Line Communications and Its Applications, 2006 IEEE International Symposium on* , vol., no., pp.196-201, 2006

- [**Cha10**] Chandna, V.K.; Zahida, M.; , "Effect of Varying Topologies on the Performance of Broadband Over Power Line," *Power Delivery, IEEE Transactions on* , vol.25, no.4, pp.2371-2375, Oct. 2010
- [**Cha12**] Chang-Un Park; Jae-Jo Lee; Sang-Ki Oh; Jung-Mok Bae; Jong-Kwan Seo; , "Study and field test of power line communication for an electric-vehicle charging system," *Power Line Communications and Its Applications (ISPLC), 2012 16th IEEE International Symposium on* , vol., no., pp.344-349, 27-30 March 2012
- [**Che11**] Chen, Chen; Yuebin Huang; Yizhi Wang; Chen, Yun; Xiaoyang Zeng, "A robust frame synchronization scheme for Broadband Power-line Communication," *ASIC (ASICON), 2011 IEEE 9th International Conference on* , vol., no., pp.212,215, 25-28 Oct. 2011
- [**Che12**] Chenchen Huang; Yonghai Ning; , "Study on cluster-based dynamic routing algorithm in Power Line Communication network," *Automation and Logistics (ICAL), 2012 IEEE International Conference on* , vol., no., pp.461-465, 15-17 Aug. 2012
- [**Chu12**] Chun-Hao Lo; Ansari, N., "The Progressive Smart Grid System from Both Power and Communications Aspects," *Communications Surveys & Tutorials, IEEE* , vol.14, no.3, pp.799,821, Third Quarter 2012
- [**CISPR22**] CISPR; , "Information Technology Equipment; Radio Disturbances Characteristics; Limits and Methods of Measurement," *International Standard Norme CISPR 22, Edition 6.0, ICS CISPR, September 2008*
- [**Col04**] Collier, S.E.; , "Delivering broad band Internet over power lines: what you should know," *Rural Electric Power Conference, 2004* , vol., no., pp. A1- 1-11, 23-25 May 2004
- [**COM**] Covenant of Mayors, *Available at:* http://ec.europa.eu/energy/doc/actions_efficiency_renewable/factsheet_covenant_of_mayors.pdf [Accessed: May 2013]
- [**CON**] CONCERTO, *Available at:* http://ec.europa.eu/energy/doc/actions_efficiency_renewable/factsheet_concerto.pdf [Accessed: May 2013]
- [**Cor10**] Corral, G.; Selga, J.M.; Zaballos, A.; González-Tarragó, D.; Torres, L.M.; Haberler, B., "Security in OPERA Specification Based PLC Systems," *Telecommunications (AICT), 2010 Sixth Advanced International Conference on* , vol., no., pp.474,478, 9-15 May 2010

- [**Dan11**] Ke Dang; Jiqing Yu; Tong Dang; Bo Han, "Benefit of distributed generation on line loss reduction," *Electrical and Control Engineering (ICECE), 2011 International Conference on* , vol., no., pp.2042,2045, 16-18 Sept. 2011
- [**Des11**] Deshpande, J.G.; Kim, E.; Thottan, M., "Differentiated services QoS in smart grid communication networks," *Bell Labs Technical Journal Wiley Subscription Services*, vol.16, no.3, pp.61,81, 2011
- [**Do07**] Le Phu Do; Hrasnica, H.; Lehnert, R., "Performance Evaluation of the PLC-MAC Protocol in Accordance with the OPERA Specification," *Power Line Communications and Its Applications, 2007. ISPLC '07. IEEE International Symposium on* , vol., no., pp.447,452, 26-28 March 2007
- [**Dra07**] Drakakis, K.E.; Kapareliotis, E.; Domouhtsidis, F.; Cottis, P.G., "A Security Framework for Hybrid Broadband over Power Line (BPL)/Wireless Networks," *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2007. PIMRC 2007. IEEE 18th International Symposium on* , vol., no., pp.1,4, 3-7 Sept. 2007
- [**Dro08**] Drougas, A.; Panagopoulos, A.; Cottis, P., "Estimation of packet losses due to propagation impairments: application to TCP performance over satellite", *International Journal of Satellite Communications and Networking*, vol.26, no.1, pp.57-81, Jan. 2008
- [**Dur11**] Durmaz Incel, O.; Ghosh, A.; Krishnamachari, B.; , "Scheduling Algorithms for tree-based data collection in Wireless Sensor Networks," In: Nikolettseas, S.; Rolim, J.D.P.; "Theoretical Aspects of Distributed Computing in Sensor Networks". Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp. 407-444, 2011
- [**Dur12**] Durmaz Incel, O.; Ghosh, A.; Krishnamachari, B.; Chintalapudi, K.; , "Fast Data Collection in Tree-Based Wireless Sensor Networks," *Mobile Computing, IEEE Transactions on* , vol.11, no.1, pp.86-99, Jan. 2012
- [**ECO**] Eco-innovation, *Available at:* http://ec.europa.eu/energy/doc/actions_efficiency_renewable/factsheet_eco_innovation.pdf [Accessed: May 2013]
- [**EEPR**] European Union, European Energy Programme for Recovery 2009, *Available at:* http://ec.europa.eu/energy/eepr/index_en.htm [Accessed: May 2013]
- [**EISA**] The Congress of the United States, Energy Independence and Security Act of 2007, *Available at:* <http://www.gpo.gov/fdsys/pkg/BILLS-110hr6enr/pdf/BILLS-110hr6enr.pdf> [Accessed: May 2013]
- [**Fan10**] Fangxing Li; Wei Qiao; Hongbin Sun; Hui Wan; Jianhui Wang; Yan Xia; Zhao Xu; Pei Zhang, "Smart Transmission Grid: Vision and Framework," *Smart Grid, IEEE Transactions on* , vol.1, no.2, pp.168,177, Sept. 2010

- [Fan12] Fang, Xi; Misra, Satyajayant; Xue, Guoliang; Yang, Dejun; , "Smart Grid — The New and Improved Power Grid: A Survey," *Communications Surveys & Tutorials, IEEE* , vol.14, no.4, pp.944-980, Fourth Quarter 2012
- [Fan12] Fang, Xi; Misra, Satyajayant; Xue, Guoliang; Yang, Dejun; , "Smart Grid — The New and Improved Power Grid: A Survey," *Communications Surveys & Tutorials, IEEE* , vol.14, no.4, pp.944-980, Fourth Quarter 2012
- [FCC/P.15] FCC; , "Title 47 of the Code of Federal Regulations (CFR)," *Tech. Rep. 47 CFR 15*, Federal Communications Commission, July 2008
- [Flo06] Florio, A.; Murillo, F.; , "BPL O&M Applications in C.A. La Electricidad de Caracas," *Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America, 2006. TDC '06. IEEE/PES* , vol., no., pp.1-5, 15-18 Aug. 2006
- [For10] Forouzan, B.; "Chapter 15: Transmission Control Protocol (TCP)," In: *TCP/IP Protocol Suite*, 4th edition, McGraw-Hill, pp. 432-501, 2010
- [G.9960] "Unified high-speed wire-line based home networking transceivers – Foundation," *ITU-T Recommendation G.9960*, Jan. 2010
- [G.9961] "Data Link Layer (DLL) for unified high-speed wire-line based home networking transceivers," *ITU-T Recommendation G.9961*, Jan. 2010
- [G.9972] "Coexistence mechanism for wire-line based home networking transceivers," *ITU-T Recommendation G.9972*, Jun. 2010
- [Gal08] Galli, S.; Logvinov, O.; , "Recent Developments in the Standardization of Power Line Communications within the IEEE," *Communications Magazine, IEEE* , vol.46, no.7, pp.64-71, July 2008
- [Gal09] Galli, S.; Kurobe, A.; Ohura, M.; , "The inter-PHY protocol (IPP): A simple coexistence protocol for shared media," *Power Line Communications and Its Applications, 2009. ISPLC 2009. IEEE International Symposium on* , vol., no., pp.194-200, March 29 2009-April 1 2009
- [Gal10] Galli, S.; Scaglione, A.; Zhifang Wang; , "Power Line Communications and the Smart Grid," *Smart Grid Communications (SmartGridComm), 2010 First IEEE International Conference on* , vol., no., pp.303-308, 4-6 Oct. 2010
- [Gal11] Galli, S.; Scaglione, A.; Zhifang Wang; , "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
- [Gal68] Gallager, R., *Information Theory and Reliable Communication*. New York: Wiley, 1968

- [**Gio11**] Giordano, V.; “Smart Grid projects in Europe: lessons learned and current developments,” *JRC Reference Reports, Institute for Energy, European Union*, 2011.
- [**Gio11**] Giordano, V.; Gangale, F.; Fulli, G.; Jim’enez, M. S.; Onyeji, I.; Colta, A.; Papaioannou, I.; Mengolini, A.; Alecu, C.; Ojala, T.; Maschio, I.; “Smart Grid projects in Europe: lessons learned and current developments,” *JRC Reference Reports, Publications Office of the European Union*, 2011.
- [**Giu12**] Della Giustina, D.; Andersson, L.; Casirati, C.; Zanini, S.; Cremaschini, L., "Testing the Broadband Power Line communication for the Distribution grid management in a real operational environment," *Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), 2012 International Symposium on* , vol., no., pp.785,789, 20-22 June 2012
- [**Gof00**] Goff, T.; Moronski, J.; Phatak, D.S.; Gupta, V., "Freeze-TCP: a true end-to-end TCP enhancement mechanism for mobile environments," *INFOCOM 2000. Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE* , vol.3, no., pp.1537,1545 vol.3, 26-30 Mar 2000
- [**GRID4EU**] Grid4EU, Project funded by the European Commission under FP7, Available at: <http://www.grid4eu.eu/> [Accessed: May 2013]
- [**GTM**] David J. Leeds; , “The Smart Grid in 2010: Market Segments, Applications and Industry Players,” GTM Research, 2009, Available at: <http://www.greentechmedia.com/research/report/smart-grid-in-2010> [Accessed March 2013].
- [**Gun06**] Gungor V.C.; Lambert F.C.; “A survey on communication networks for electric system automation,” *Computer Networks*, vol.50, no.7, pp.877,897, May 2006
- [**Gun11**] Gungor, V.C.; Sahin, D.; Kocak, T.; Ergut, S.; Buccella, C.; Cecati, C.; Hancke, G.P., "Smart Grid Technologies: Communication Technologies and Standards," *Industrial Informatics, IEEE Transactions on* , vol.7, no.4, pp.529,539, Nov. 2011
- [**Hai02**] Haitao Wu; Yong Peng; Keping Long; Shiduan Cheng; Jian Ma, "Performance of reliable transport protocol over IEEE 802.11 wireless LAN: analysis and enhancement," *INFOCOM 2002. Twenty-First Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE* , vol.2, no., pp.599,607, 2002
- [**Hai11**] Haidine, A.; Adebisi, B.; Treytl, A.; Pille, H.; Honary, B.; Portnoy, A., "High-speed narrowband PLC in Smart Grid landscape — State-of-the-art," *Power Line Communications and Its Applications (ISPLC), 2011 IEEE International Symposium on* , vol., no., pp.468,473, 3-6 April 2011

- [Hai12]** Haidine, A.; Portnoy, A.; Mudrievskiy, S.; Lehnert, R., "DLC+VIT4IP project: High-speed NB-PLC for smart grid communication — Design of field trial," *Power Line Communications and Its Applications (ISPLC), 2012 16th IEEE International Symposium on* , vol., no., pp.88,93, 27-30 March 2012
- [Hau05]** Hauser, C.H.; Bakken, D.E.; Bose, A., "A failure to communicate: next generation communication requirements, technologies, and architecture for the electric power grid," *Power and Energy Magazine, IEEE* , vol.3, no.2, pp.47,55, March-April 2005
- [Hau05]** Hauser, C.H.; Bakken, D.E.; Bose, A., "A failure to communicate: next generation communication requirements, technologies, and architecture for the electric power grid," *Power and Energy Magazine, IEEE* , vol.3, no.2, pp.47,55, March-April 2005
- [HDPLC]** High Definition Power Line Communication Alliance (HD-PLC), "About Us," Web page. Available at: <http://hd-plc.org> [Accessed February 2013]
- [Hig11]** Higgins, N.; Vyatkin, V.; Nair, N.C.; Schwarz, K., "Distributed Power System Automation With IEC 61850, IEC 61499, and Intelligent Control," *Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, IEEE Transactions on* , vol.41, no.1, pp.81,92, Jan. 2011
- [Hir12]** Hirschler, B.; Treytl, A.; , "Internet Protocol security and Power Line Communication," *Power Line Communications and Its Applications (ISPLC), 2012 16th IEEE International Symposium on* , vol., no., pp.102-107, 27-30 March 2012
- [Hoc11]** Hoch, M.; , "Comparison of PLC G3 and PRIME," *Power Line Communications and Its Applications (ISPLC), 2011 IEEE International Symposium on* , vol., no., pp.165-169, 3-6 April 2011
- [Hoo98]** Hooijen, O.G.; , "On the channel capacity of the residential power circuit used as a digital communications medium," *Communications Letters, IEEE* , vol.2, no.10, pp.267-268, Oct. 1998
- [Hor12]** Horvat, G.; Balkic, Z.; Zagar, D., "Power Line Communication throughput analysis for use in last mile rural broadband," *Telecommunications Forum (TELFOR), 2012 20th* , vol., no., pp.245,248, 20-22 Nov. 2012
- [HPA]** HomePlug Powerline Alliance, "About Us", Web page. Available at: <http://www.homeplug.org/home> [Accessed February 2013]
- [Hra04]** Hrasnica, H.; Haidine, A.; Lehnert, R.; , "Broadband PLC Networks; Network Design" John Wiley & Sons, pp. 7-38, 2004

- [**Hui11**] Huibin Sui; Wei-jen Lee, "An AMI based measurement and control system in smart distribution grid," *Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference (I&CPS), 2011 IEEE* , vol., no., pp.1,5, 1-5 May 2011
- [**Hwa12**] Taein Hwang; Moonok Choi; Shinyuk Kang; Ilwoo Lee, "Design of application-level reference models for micro energy grid in IT perspective," *Computing and Networking Technology (ICCNT), 2012 8th International Conference on* , vol., no., pp.180,183, 27-29 Aug. 2012
- [**IEA02**] International Energy Agency, "Distributed generation in liberalized electricity markets," 2002.
- [**IEC10**] IEC, "Road vehicles - Vehicle to grid communication interface - Part 1: General information and use-case definition," ISO/IEC 15118-1: 2010
- [**IECSMB**] SMB Smart Grid Strategic Group (SG3), *IEC smart grid standardization roadmap*, 2010.
- [**IEE**] Intelligent Energy – Europe, *Available at:* http://ec.europa.eu/energy/doc/actions_efficiency_renewable/factsheet_iee.pdf [Accessed: May 2013]
- [**IEEE 1901**] "IEEE Standard for Broadband over Power Line Networks: Medium Access Control and Physical Layer Specifications," *IEEE Std 1901-2010* , vol., no., pp.1-1586, Dec. 30 2010
- [**IEEE1646**] IEEE Standard Communication Delivery Time Performance Requirements for Electric Power Substation Automation," *IEEE Std 1646-2004* , vol., no., pp.0_1,24, 2005
- [**IEEE1775**] IEEE; , "IEEE Standard for Power Line Communication Equipment--Electromagnetic Compatibility (EMC) Requirements--Testing and Measurement Methods," *IEEE Std 1775-2010* , vol., no., pp.1-66, Jan. 7 2011
- [**IEEE2030**] "IEEE Guide for Smart Grid Interoperability of Energy Technology and Information Technology Operation with the Electric Power System (EPS), End-Use Applications, and Loads," *IEEE Std 2030-2011* , vol., no., pp.1-126, Sept. 10 2011
- [**IEEE802.1**] IEEE Standard for Local and metropolitan area networks: Media Access Control (MAC) Bridges," *IEEE Std 802.1D-2004 (Revision of IEEE Std 802.1D-1998)* , vol., no., pp.1,277, June 9 2004
- [**IEESGEU**] IEEE Smart Grid technical community, "IEEE: the expertise to make smart grid a reality", *Available at:* <http://smartgrid.ieee.org/resources/public-policy/european-union> [Accessed: May 2013]

- [IEEESGUS]** IEEE Smart Grid technical community, "IEEE: the expertise to make smart grid a reality", *Available at:* <http://smartgrid.ieee.org/resources/public-policy/united-states> [Accessed: May 2013]
- [INTEGRIS]** Intelligent Electrical Grid Sensor Communications, Project funded by the European Commission under FP7, *Available at:* <http://fp7integris.eu/> [Accessed: May 2013]
- [ITU08]** Resource and Admission Control Functions in NGN (version2), ITU-T Rec. Y.2111, (2008).
- [ITUT]** Resource and Admission Control Functions in NGN (version2), *ITU-T Rec. Y.2111*, 2008
- [Jai84]** Jain, R.; Chiu, D.; Hawe, W., "A quantitative measure of fairness and discrimination for resource allocation in shared computer system," Hudson, MA, *DEC Res. Rep. TR-301*, 1984.
- [Jam11]** Jamian, J.J.; Mustafa, M.W.; Mokhlis, H.; Bahamdin, M.A., "Conceptual data management and communication for smart distribution system," *Clean Energy and Technology (CET)*, 2011 *IEEE First Conference on* , vol., no., pp.364,368, 27-29 June 2011
- [Jin09]** Jingqi, F.; Qiang, Z.; Haikuan, W., "A New Backoff Algorithm Based on the Dynamic Modulating Parameters of IEEE 802.11," *Proceedings of Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*, 2009
- [Jon07]** Jongtae Song; Mi Young Chang; Soon-Seok Lee; Jinoou Joung, "Overview of ITU-T NGN QoS Control," *Communications Magazine, IEEE* , vol.45, no.9, pp.116,123, September 2007
- [Jun05]** Myoung-Hee Jung; Min Young Chung; Tae-Jin Lee; , "MAC throughput analysis of HomePlug 1.0," *Communications Letters, IEEE* , vol.9, no.2, pp. 184-186, Feb. 2005
- [Kan12]** Kansal, P.; Bose, A., "Bandwidth and Latency Requirements for Smart Transmission Grid Applications," *Smart Grid, IEEE Transactions on* , vol.3, no.3, pp.1344,1352, Sept. 2012
- [Kap09]** Kapareliotis, E.S.; Drakakis, K.E.; Dimitriadis, H.P.K.; Capsalis, C.N.; , "Fault Recognition on Power Networks via SNR Analysis," *Power Delivery, IEEE Transactions on* , vol.24, no.4, pp.2428-2433, Oct. 2009
- [Kha10]** Khalifa, T.; Naik, K.; Alsabaan, M.; Nayak, A.; Goel, N., "Transport protocol for smart grid infrastructure," *Ubiquitous and Future Networks (ICUFN)*, 2010 *Second International Conference on* , vol., no., pp.320,325, 16-18 June 2010

- [**Kha12**] Khalifa, T.; Abdrabou, A.; Naik, K.; Alsabaan, M.; Nayak, A.; Goel, N., "Design and analysis of Split- and Aggregated-transport control protocol (SA-TCP) for Smart Metering Infrastructure," *Smart Grid Communications (SmartGridComm), 2012 IEEE Third International Conference on* , vol., no., pp.139,144, 5-8 Nov. 2012
- [**Kha13**] Khan, R.H.; Khan, J.Y., "A comprehensive review of the application characteristics and traffic requirements of a smart grid communications network," *Computer Networks*, vol.57, no.3, pp.825,845, Feb. 2013.
- [**KNX**] International Organization for Standardization, "Information Technology-Home Electronic System (HES) Architecture-Part 3-5: Media and media Dependent Layers-PowerLine for Network Based Control of HES Class 1," *International Standard ISO/IEC 14543-3-5*, 1st edition, May 2007
- [**Kri10**] Krizanovic, V.; Grgic, K.; Zagar, D.; , "Analyses and comparisons of fixed access technologies for rural broadband implementation," *Information Technology Interfaces (ITI), 2010 32nd International Conference on* , vol., no., pp.483-488, 21-24 June 2010
- [**Kua12**] Kuan-Hung Liu; Dung-Rung Hsieh; Jen-Yuan Hsu; Shih-Yu Chang; , "Throughput improvement for power line communication by adaptive MAC protocol," *Power Engineering and Optimization Conference (PEDCO) Melaka, Malaysia, 2012 Ieee International* , vol., no., pp.135-140, 6-7 June 2012
- [**Kum98**] Kumar, A., "Comparative performance analysis of versions of TCP in a local network with a lossy link," *Networking, IEEE/ACM Transactions on* , vol.6, no.4, pp.485,498, Aug 1998
- [**Lak97**] Lakshman, T. V.; Madhow, U., "The performance of TCP/IP for networks with high bandwidth-delay products and random loss," *Networking, IEEE/ACM Transactions on* , vol.5, no.3, pp.336,350, Jun 1997
- [**Laz09**] Lazaropoulos, A.G.; Cottis, P.G.; , "Transmission Characteristics of Overhead Medium-Voltage Power-Line Communication Channels," *Power Delivery, IEEE Transactions on* , vol.24, no.3, pp.1164-1173, July 2009
- [**Laz10a**] Lazaropoulos, A.G.; Cottis, P.G.; , "Capacity of Overhead Medium Voltage Power Line Communication Channels," *Power Delivery, IEEE Transactions on* , vol.25, no.2, pp.723-733, April 2010
- [**Laz10b**] Lazaropoulos, A.G.; Cottis, P.G.; , "Broadband Transmission via Underground Medium-Voltage Power Lines—Part I: Transmission Characteristics," *Power Delivery, IEEE Transactions on* , vol.25, no.4, pp.2414-2424, Oct. 2010

- [Laz10c]** Lazaropoulos, A.G.; Cottis, P.G.; , "Broadband Transmission via Underground Medium-Voltage Power Lines—Part II: Capacity," *Power Delivery, IEEE Transactions on* , vol.25, no.4, pp.2425-2434, Oct. 2010
- [Lee03]** Lee, M.; Newman, H.; Latchman H.; Katar, S.; Yonge, L., "Homeplug 1.0 powerline communications LANs - protocol description and performance results," *Int. J. Commun. Syst.*, vol. 46, no. 5, pp. 447,473, Jun. 2003
- [Lee12]** Lee, S.S.W.; Kuang-Yi Li; Cheng-Shong Wu; Jen-Yi Pan; Chih-Yang Chuang; "Optimal bandwidth guaranteed routing and time slot assignment for broadband PLC access networks," *Power Line Communications and Its Applications (ISPLC), 2012 16th IEEE International Symposium on* , vol., no., pp.224-229, 27-30 March 2012
- [Lig10]** Lightner, E.M.; Widergren, S.E., "An Orderly Transition to a Transformed Electricity System," *Smart Grid, IEEE Transactions on* , vol.1, no.1, pp.3,10, June 2010
- [Lin98]** Lin, D.; Kung, H. T., "TCP fast recovery strategies: analysis and improvements," *INFOCOM '98. Seventeenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE* , vol.1, no., pp.263,271 vol.1, 29 Mar-2 Apr 1998
- [Liu01]** Liu, J.; Singh, S., "ATCP: TCP for mobile ad hoc networks," *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on* , vol.19, no.7, pp.1300,1315, Jul 2001
- [Liu12]** Xiaosheng Liu; Weiqi Wang; Jian Zheng; Tianxiang Hai; Liang Zhang; Bo Liu; , "Tangential connection clustering routing algorithm for L-PLC based AMR systems," *Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC), 2012 7th International* , vol.4, no., pp.2932-2936, 2-5 June 2012
- [Log12]** Logenthiran, T.; Srinivasan, D.; Tan Zong Shun, "Demand Side Management in Smart Grid Using Heuristic Optimization," *Smart Grid, IEEE Transactions on* , vol.3, no.3, pp.1244,1252, Sept. 2012
- [LonWork]** International Organization for Standardization, "Interconnection of Information Technology Equipment-Control Network Protocol-Part 3: Power Line Specification," *International Standard ISO/IEC 14908-3*, Rev. 11, January 2011
- [Lop11]** A.J. Lopes, R. Lezama, R. Pineda, "Model Based Systems Engineering for Smart Grids as Systems of Systems," *Procedia Computer Science*, Vol.6, pp.441-450, 2011
- [Lop12]** Lopez, G.; Moura, P.S.; Custodio, V.; Moreno, J.I., "Modeling the Neighborhood Area Networks of the Smart Grid," *Communications (ICC), 2012 IEEE International Conference on* , vol., no., pp.3357,3361, 10-15 June 2012

- [M/441] European Commission, Standardization mandate to CEN, CENELEC and ETSI in the field of measuring instruments for the development of an open architecture for utility meters involving communication protocols enabling interoperability, *M/441 EN*, Brussels, March 2009.
- [M/490] Standardization Mandate to European Standardisation Organisations (ESOs) to support European Smart Grid deployment, 2011, *Available at: <ftp://ftp.cen.eu/CEN/Services/Innovation/M490.pdf>* [Accessed: May 2013]
- [Mar05] Ajmone Marsan, M.; Garetto, M.; Giaccone, P.; Leonardi, E.; Schiattarella, E.; Tarello, A., "Using partial differential equations to model TCP mice and elephants in large IP networks," *Networking, IEEE/ACM Transactions on*, vol.13, no.6, pp.1289,1301, Dec. 2005
- [ME] ManagEnergy, *Available at: http://ec.europa.eu/energy/doc/actions_efficiency_renewable/factsheet_managenergy.pdf* [Accessed: May 2013]
- [Met10] Metke, A.R.; Ekl, R.L., "Security Technology for Smart Grid Networks," *Smart Grid, IEEE Transactions on*, vol.1, no.1, pp.99,107, June 2010
- [Mic12] Michiorri, A.; Girard, R.; Kariniotakis, G.; Lebosse, C.; Albou, S., "A local energy management system for solar integration and improved security of supply: The Nice Grid project," *Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Europe), 2012 3rd IEEE PES International Conference and Exhibition on*, vol., no., pp.1,6, 14-17 Oct. 2012
- [Min06] Min Young Chung; Myoung-Hee Jung; Tae-Jin Lee; Yutae Lee, "Performance analysis of HomePlug 1.0 MAC with CSMA/CA," *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, vol.24, no.7, pp.1411,1420, July 2006
- [Min07] Minooei, H.; Nojumi, H., "Performance evaluation of a new backoff method for IEEE 802.11," *Journal "Computer Communications*, Jul. 2007
- [Mit07] Mittal, A.; Proothi, A.; , "Broadband over power lines in India: Are we ready for it?," *Advanced Networks and Telecommunication Systems, 2007 First International Symposium on*, vol., no., pp.1-2, 17-18 Dec. 2007
- [Miz09] Mizutani, M.; Miyoshi, Y.; Tsukamoto, K.; Tsuru, M.; Oie, Y., "Network-Supported TCP Rate Control for High-Speed Power Line Communications," *Intelligent Networking and Collaborative Systems, 2009. INCOS '09. International Conference on*, vol., no., pp.372,377, 4-6 Nov. 2009
- [MMIC] More Microgrids, Project funded by the European Commission under FP7, *Available at: <http://www.microgrids.eu/default.php>* [Accessed: May 2013]
- [Moh10] Mohsenian-Rad, A.-H.; Wong, V.W.S.; Jatskevich, J.; Schober, R.; Leon-Garcia, A., "Autonomous Demand-Side Management Based on Game-Theoretic

- Energy Consumption Scheduling for the Future Smart Grid," *Smart Grid, IEEE Transactions on* , vol.1, no.3, pp.320,331, Dec. 2010
- [**Mol10**] Molderink, A.; Bakker, V.; Bosman, M. G C; Hurink, J.L.; Smit, G. J M, "Management and Control of Domestic Smart Grid Technology," *Smart Grid, IEEE Transactions on* , vol.1, no.2, pp.109,119, Sept. 2010
- [**Mun12**] Muniz, A.; Tsukamoto, K.; Tsuru, M.; Oie, Y., "Network-supported TCP rate control for the coexistence of multiple flows in IP over PLC," *Power Line Communications and Its Applications (ISPLC), 2012 16th IEEE International Symposium on* , vol., no., pp.13,18, 27-30 March 2012
- [**NIST**] National Institute of Standards and Technology. NIST framework and roadmap for smart grid interoperability standards, release 1.0, January 2010, Available at: http://www.nist.gov/public_affairs/releases/upload/smartgrid_interoperability_final.pdf. [Accessed March 2013].
- [**Oks09**] Oksman, V.; Galli, S.; , "G.hn: The new ITU-T home networking standard," *Communications Magazine, IEEE* , vol.47, no.10, pp.138-145, October 2009
- [**Oks11**] Oksman, V.; Jin Zhang; , "G.HNEM: the new ITU-T standard on narrowband PLC technology," *Communications Magazine, IEEE* , vol.49, no.12, pp.36-44, December 2011
- [**Olv12**] Olvera-Irigoyen, O.; Kortebi, A.; Toutain, L., "Available Bandwidth Probing for path selection in heterogeneous home Networks," *Globecom Workshops (GC Wkshps), 2012 IEEE* , vol., no., pp.492,497, 3-7 Dec. 2012
- [**OPEMS**] EC/IST FP6 Project No 026920, "D20 – Requirements on OPERA for Implementation of Multipurpose PLC Network Including EMS," OPERA, pp. 15-16, Nov. 2007
- [**OPERA1**] Open PLC European Research Alliance, "OPERA specification – Part 1: Technology, EC/IST FP6 Project No 507667, 2006
- [**OPERA2**] Open PLC European Research Alliance, "OPERA specification – Part 1: System, EC/IST FP6 Project No 507667, 2006
- [**OpMeter**] Open Meter, Project funded by the European Commission under FP7, Available at: <http://www.openmeter.com> [Accessed: May 2013]
- [**P1901.2**] IEEE: "Low Frequency Narrow-Band Power Line Communications," Available at: <http://grouper.ieee.org/groups/1901/2/>, [Accessed: Jan 2013]
- [**Pad00**] Padhye, J.; Firoiu, V.; Towsley, D.F.; Kurose, J.F., "Modeling TCP Reno performance: a simple model and its empirical validation," *Networking, IEEE/ACM Transactions on*, vol.8, no.2, pp.133,145, Apr 2000

- [Pag10] Pagani, P.; Razafferson, R.; Zeddami, A.; Praho, B.; Tlich, M.; Baudais, J.; Maiga, A.; Isson, O.; Mijic, G.; Kriznar, K.; Drakul, S.; , "Electro magnetic compatibility for Power Line Communications," *Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), 2010 IEEE 21st International Symposium on* , vol., no., pp.2799-2804, 26-30 Sept. 2010
- [Par11] Jae Yong Park; Choong-seon Hong; Sungwon Lee, "An efficient MAC scheme with modified RTS/CTS of IEEE P1901," *Information Networking (ICOIN), 2011 International Conference on* , vol., no., pp.230,234, 26-28 Jan. 2011
- [Pat11] Patel, A.; Aparicio, J.; Tas, N.; Loiacono, M.; Rosca, J.; , "Assessing communications technology options for smart grid applications," *Smart Grid Communications (SmartGridComm), 2011 IEEE International Conference on* , vol., no., pp.126-131, 17-20 Oct. 2011
- [Pat11] Patel, A.; Aparicio, J.; Tas, N.; Loiacono, M.; Rosca, J., "Assessing communications technology options for smart grid applications," *Smart Grid Communications (SmartGridComm), 2011 IEEE International Conference on* , vol., no., pp.126,131, 17-20 Oct. 2011
- [Pim04] Pimentel, P.R.S.; Baldissin, A.; Cesar, L.S.; Framil, R.R.; Pascalicch, A.; , "Revolution in the distribution (use of the technology power line communication in the transmission of data, voice and images)," *Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America, 2004 IEEE/PES* , vol., no., pp. 314-320, 8-11 Nov. 2004
- [Pra10] Praho, B.; Tlich, M.; Pagani, P.; Zeddami, A.; Nouvel, F.; , "Cognitive detection method of radio frequencies on power line networks," *Power Line Communications and Its Applications (ISPLC), 2010 IEEE International Symposium on* , vol., no., pp.225-230, 28-31 March 2010
- [Puj05] Pujante, J.J.; Martinez, D.; Gomez, A.; Marin, I., "PLC QoS management and integration for IPv6 applications and services," *Power Line Communications and Its Applications, 2005 International Symposium on* , vol., no., pp.131,135, 6-8 April 2005
- [Put03] Puttgen, Hans B.; MacGregor, P.R.; Lambert, F.C., "Distributed generation: Semantic hype or the dawn of a new era?," *Power and Energy Magazine, IEEE* , vol.1, no.1, pp.22,29, Jan-Feb 2003
- [Qia11] Jin Qiang; Zhang Shuo; Li Yong-li, "A study on capacity of distributed generation and its effect on short circuit current at micro-grid operation mode," *Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT), 2011 4th International Conference on* , vol., no., pp.1109,1112, 6-9 July 2011

- [Qin09] Qingyang Liu; Bingzhen Zhao; Yirong Wang; Jing Hu; , "Experience of AMR systems based on BPL in China," *Power Line Communications and Its Applications, 2009. ISPLC 2009. IEEE International Symposium on*, vol., no., pp.280-284, March 29 2009-April 1 2009
- [Rah10] Rahimi, F.; Ipakchi, A., "Demand Response as a Market Resource Under the Smart Grid Paradigm," *Smart Grid, IEEE Transactions on* , vol.1, no.1, pp.82,88, June 2010
- [Rah11] Rahman, M.M.; Choong Seon Hong; Sungwon Lee; Jaejo Lee; Razzaque, M.A.; Jin Hyuk Kim; , "Medium access control for power line communications: an overview of the IEEE 1901 and ITU-T G.hn standards," *Communications Magazine, IEEE* , vol.49, no.6, pp.183-191, June 2011
- [Ray11] Ray, P.K.; Hazra, A.; Basu, S.; Mitra, S.K.; Roy, S.; , "Broadband powerline communication an Indian experience," *Power Line Communications and Its Applications (ISPLC), 2011 IEEE International Symposium on*, vol., no., pp.364-369, 3-6 April 2011
- [Raz10] Razafferson, R.; Pagani, P.; Zeddani, A.; Praho, B.; Tlich, M.; Baudais, J.; Maiga, A.; Issouf, O.; Mijic, G.; Kriznar, K.; Drakul, S.; , "Report on Electro Magnetic Compatibility of Power Lines Communications," *European Union Project Deliverable D3.3 v3.0*, IST Integrated Project No. ICT-213311, OMEGA, April 2010
- [Raz10] Razazian, K.; Umari, M.; Kamalizad, A.; Loginov, V.; Navid, M.; , "G3-PLC specification for powerline communication: Overview, system simulation and field trial results," *Power Line Communications and Its Applications (ISPLC), 2010 IEEE International Symposium on* , vol., no., pp.313-318, 28-31 March 2010
- [Ron11] Rong Yu; Yan Zhang; Gjessing, S.; Chau Yuen; Shengli Xie; Guizani, M., "Cognitive radio based hierarchical communications infrastructure for smart grid," *Network, IEEE* , vol.25, no.5, pp.6,14, September-October 2011
- [Ron11] Rongping Dong; Ouzzif, M.; Saoudi, S.; , "An opportunistic random access MAC protocol for indoor PLC networks with short-term fairness," *Power Line Communications and Its Applications (ISPLC), 2011 IEEE International Symposium on* , vol., no., pp.382-387, 3-6 April 2011
- [Ron12] Rong Yu; Yan Zhang; Yanrong Chen, "Hybrid spectrum access in cognitive Neighborhood Area Networks in the smart grid," *Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2012 IEEE* , vol., no., pp.1478,1483, 1-4 April 2012
- [Rul06] Rully, A.; Untoro, A.; Fujisaki, T.; Kanemitsu, H.; Thu, Y.K.; Urano, Y.; Umezawa, Y.; Uchiyama, Y.; , "Wireless LAN and power line communication platform for e-learning multimedia system in underdeveloped area in Lombok

Island," *Testbeds and Research Infrastructures for the Development of Networks and Communities, 2006. TRIDENTCOM 2006. 2nd International Conference on* , vol., no., pp.4 pp.-428, 2006

- [Sad12] Sadeghi, S.; Yaghmaee Moghddam, M.H.; Bahekmat, M.; Heydari Yazdi, A.S.; , "Modeling of Smart Grid traffics using non-preemptive priority queues," *Smart Grids (ICSG), 2012 2nd Iranian Conference on* , vol., no., pp.1-4, 24-25 May 2012
- [Sad12] Sadeghi, S.; Yaghmaee Moghddam, M.H.; Bahekmat, M.; Heydari Yazdi, A.S., "Modeling of Smart Grid traffics using non-preemptive priority queues," *Smart Grids (ICSG), 2012 2nd Iranian Conference on* , vol., no., pp.1,4, 24-25 May 2012
- [Saf10] Saffre, F.; Gedge, R., "Demand-Side Management for the Smart Grid," *Network Operations and Management Symposium Workshops (NOMS Wksp), 2010 IEEE/IFIP* , vol., no., pp.300,303, 19-23 April 2010
- [Sal12] Abdul Salam, S.; Mahmud, S.A.; Khan, G. M.; Al-Raweshidy, H.S., "M2M communication in Smart Grids: Implementation scenarios and performance analysis," *Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW), 2012 IEEE* , vol., no., pp.142,147, 1-1 April 2012
- [Sar08] Sarafi, A.; Cottis, P.; "Providing QoS Assurance in a Wireless-Broadband over Power Lines Network", *WSPLC08*, September 2008
- [Sar09] Sarafi, A.; Tsiropoulos, G.; Cottis, P.; , "Hybrid wireless-broadband over power lines: A promising broadband solution in rural areas," *Communications Magazine, IEEE* , vol.47, no.11, pp.140-147, November 2009
- [Sar12a] Sarafi, A.M.; Drougas, A.E.; Cottis, P.G.; , "Cross-Layer Resource Allocation in Medium-Voltage Broadband Over Power-Line Networks," *Power Delivery, IEEE Transactions on* , vol.27, no.4, pp.2247-2254, Oct. 2012
- [Sar12b] Sarafi, A.; Drougas, A.; Papaioannou P.; Cottis P.; , "Hybrid wireless-PLC smart grid in Rural Greece," In: Berger, L.T.; Iniewski, K.; "Smart Grid Applications, Communications and Security". John Wiley & Sons, pp. 191-230, 2012
- [Sau11] Sauter, T.; Lobashov, M.; , "End-to-End Communication Architecture for Smart Grids," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* , vol.58, no.4, pp.1218-1228, April 2011
- [Sch09] Schwartz, M.; , "Carrier-wave telephony over power lines: Early history [History of Communications]," *Communications Magazine, IEEE* , vol.47, no.1, pp.14-18, January 2009

- [SEEC] Sustainable Energy Europe Campaign, Available at: http://ec.europa.eu/energy/doc/actions_efficiency_renewable/factsheet_sustainable.pdf [Accessed: May 2013]
- [Sel07] Selga, J.M.; Zaballos, A.; Corral, G.; Vives, J., "Lessons Learned from Wireless Sensor Networks with Application to AMR and PLC," *Power Line Communications and Its Applications, 2007. ISPLC '07. IEEE International Symposium on* , vol., no., pp.98,103, 26-28 March 2007
- [Sel07] Selga, J.M.; Zaballos, A.; Corral, G.; Vives, J.; , "Lessons Learned from Wireless Sensor Networks with Application to AMR and PLC," *Power Line Communications and Its Applications, 2007. ISPLC '07. IEEE International Symposium on* , vol., no., pp.98-103, 26-28 March 2007
- [Sel08] Selga, J.M.; Zaballos, A.; Abella, J.; Corral, G., "Model for polling in noisy multihop systems with application to PLC and AMR," *Computers and Communications, 2008. ISCC 2008. IEEE Symposium on* , vol., no., pp.664,669, 6-9 July 2008
- [Sen11] Sendin, A.; Llano, A.; Arzuaga, A.; Berganza, I.; , "Strategies for PLC signal injection in electricity distribution grid transformers," *Power Line Communications and Its Applications (ISPLC), 2011 IEEE International Symposium on* , vol., no., pp.346-351, 3-6 April 2011
- [SGTF] European Task Force for the implementation of the smart grids into the European internal market, Available at: http://ec.europa.eu/energy/gas_electricity/smartgrids/doc/mission_and_workprogramme.pdf [Accessed March 2013]
- [Sha03] Shakkottai, S.; Rappaport, T.S.; Karlsson, P.C., "Cross-layer design for wireless networks," *Communications Magazine, IEEE* , vol.41, no.10, pp.74,80, Oct 2003
- [Shu11] Shucheng Liang; Shumin Chen; Xueli Ding; Cuizhi Zhang; Yuanxin Xu; , "A broadcasting algorithm of multipath routing in narrowband power line communication networks," *Communication Software and Networks (ICCSN), 2011 IEEE 3rd International Conference on* , vol., no., pp.467-471, 27-29 May 2011
- [Siv11] Sivaneasan, B.; So, P.L.; Gunawan, E.; , "A New Routing Protocol for PLC-Based AMR Systems," *Power Delivery, IEEE Transactions on* , vol.26, no.4, pp.2613-2620, Oct. 2011
- [Sun13] Sun, Y.; Xu, G.; Choi, S.; Sandeep, B.; Lu, X.; Xhafa, A.; Fu, M.; Liang, R.; Yim, S.; "Dynamic improvement of link symmetry in co-located plc and rf networks", WO 2013016281 A1, *Texas Instruments Incorporated*, Jan 2013

- [**Tan11**] Tanenbaum, A.; Weatherall, D.; “The internet transport protocols: TCP,” In: *Computer networks*, 5th edition, Pearson, pp. 552-581, 2011
- [**Tia05**] Ye Tian; Xu, K.; Ansari, N., "TCP in wireless environments: problems and solutions," *Communications Magazine, IEEE* , vol.43, no.3, pp.S27,S32, March 2005
- [**TIA-1113**] “Medium-Speed (Up to 14Mbps) Power Line Communications (PLC) Modems Using Windowed OFDM,” *TIA Std. 1113*, 2008.
- [**Tom09**] Tomimura, D.; Neto, V.V.; , "A regulatory framework for Broadband PLC," *Power Line Communications and Its Applications, 2009. ISPLC 2009. IEEE International Symposium on* , vol., no., pp.319-324, March 29 2009-April 1 2009
- [**Ton10**] Tonello, A.M.; Versolatto, F., "Bottom-Up Statistical PLC Channel Modeling—Part II: Inferring the Statistics," *Power Delivery, IEEE Transactions on* , vol.25, no.4, pp.2356,2363, Oct. 2010
- [**Tsi09**] Tsiropoulos, G.I.; Sarafi, A.M.; Cottis, P.G.; , "Wireless-broadband over power lines networks: A promising broadband solution in rural areas," *PowerTech, 2009 IEEE Bucharest* , vol., no., pp.1-6, June 28 2009-July 2 2009
- [**Tso13**] Tsokalo, I.; Radeke, R.; Lehnert, R., "Enhancement of backoff algorithm in CSMA/CA protocols for broadband PLC," *Power Line Communications and Its Applications (ISPLC), 2013 17th IEEE International Symposium on* , vol., no., pp.47,52, 24-27 March 2013
- [**Tur10**] Turker, H.; Bacha, S.; Chatroux, D., "Impact of Plug-in Hybrid Electric Vehicles (PHEVs) on the French electric grid," *Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe), 2010 IEEE PES* , vol., no., pp.1,8, 11-13 Oct. 2010
- [**UPA**] Universal Powerline Association (UPA),” Web page. Available at: <http://upapl.org/> [Accessed September 2009]
- [**USDoE**] United States Department of Energy; “Energy Information Administration,” *Energy Outlook*, 2011.
- [**Usm13**] Usman, A.; Shami, S.D.,; “Evolution of Communication Technologies for Smart Grid applications,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol.19, pp.191,199, March 2013
- [**Vai12**] Vaidya, B.; Makrakis, D.; Mouftah, H., "Secure multipath routing for AMI network in Smart Grid," *Performance Computing and Communications Conference (IPCCC), 2012 IEEE 31st International* , vol., no., pp.408,415, 1-3 Dec. 2012

- [Val12] Vallejo, A.; Zaballos, A.; Selga, J.M.; Dalmau, J., "Next-generation QoS control architectures for distribution smart grid communication networks," *Communications Magazine, IEEE*, vol.50, no.5, pp.128,134, May 2012
- [Val12] Vallejo, A.; Zaballos, A.; Selga, J.M.; Dalmau, J.; , "Next-generation QoS control architectures for distribution smart grid communication networks," *Communications Magazine, IEEE*, vol.50, no.5, pp.128-134, May 2012
- [Vin12] Vineeta; Thathagar, Jitendra. K., "Cognitive radio communication architecture in smart grid reconfigurability," *Emerging Technology Trends in Electronics, Communication and Networking (ET2ECN), 2012 1st International Conference on*, vol., no., pp.1,6, 19-21 Dec. 2012
- [Vla11] Vlachos, I.K., "A hybrid W-PLC Smart Grid project in Greece — Lessons learnt and next steps," *Innovative Smart Grid Technologies - Middle East (ISGT Middle East), 2011 IEEE PES Conference on*, vol., no., pp.1,8, 17-20 Dec. 2011
- [Vuk08] Vukicevic, A.; Rubinstein, A.; Rubinstein, A.; Rachidi, F., "On the efficiency of notching technique to reduce EM radiations from PLC networks," *Power Line Communications and Its Applications, 2008. ISPLC 2008. IEEE International Symposium on*, vol., no., pp.253,258, 2-4 April 2008
- [Vuk08] Vukicevic, A.; Rubinstein, A.; Rubinstein, M.; Rachidi, F.; , "On the efficiency of notching technique to reduce EM radiations from PLC networks," *Power Line Communications and Its Applications, 2008. ISPLC 2008. IEEE International Symposium on*, vol., no., pp.253-258, 2-4 April 2008
- [Wan09] Zhenchao Wang; Yijin Wang; Jing Wang; , "Overlapping clustering routing algorithm based on L-PLC meter reading system," *Automation and Logistics, 2009. ICAL '09. IEEE International Conference on*, vol., no., pp.1350-1355, 5-7 Aug. 2009
- [Wan11a] Wenye Wang, Yi Xu, Mohit Khanna,; "A survey on the communication architectures in smart grid," *Computer Networks*, vol.55, no.15, pp. 3604,3629, October 2011
- [Wan11b] Jun Wang; Leung, V. C M, "A survey of technical requirements and consumer application standards for IP-based smart grid AMI network," *Information Networking (ICOIN), 2011 International Conference on*, vol., no., pp.114,119, 26-28 Jan. 2011
- [War01] Ware, C.; Wysocki, T.; Chicharo, J., "Hidden terminal jamming problems in IEEE 802.11 mobile ad hoc networks," *Communications, 2001. ICC 2001. IEEE International Conference on*, vol.1, no., pp.261,265 vol.1, 11-14 Jun 2001

- [Wel10] Weling, N.; , "Field analysis of 40.000 PLC channels to evaluate the potentials for adaptive transmit power management," *Power Line Communications and Its Applications (ISPLC), 2010 IEEE International Symposium on* , vol., no., pp.201-206, 28-31 March 2010
- [Xia11] Xiang Lu; Zhuo Lu; Wenye Wang; JianFeng Ma, "On Network Performance Evaluation toward the Smart Grid: A Case Study of DNP3 over TCP/IP," *Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2011), 2011 IEEE* , vol., no., pp.1,6, 5-9 Dec. 2011
- [Zab11] Zaballos, A.; Vallejo, A.; Selga, J.M., "Heterogeneous communication architecture for the smart grid," *Network, IEEE* , vol.25, no.5, pp.30,37, September-October 2011
- [Zar11] Zarikoff, B.; Malone, D., "Construction of a PLC test bed for network and transport layer experiments," *Power Line Communications and Its Applications (ISPLC), 2011 IEEE International Symposium on* , vol., no., pp.135,140, 3-6 April 2011
- [Zha04] Zhang, M.; Wolff, R.S., "Crossing the digital divide: cost-effective broadband wireless access for rural and remote areas," *Communications Magazine, IEEE* , vol.42, no.2, pp.99,105, Feb 2004
- [Zha11] Yichi Zhang; Weiqing Sun; Lingfeng Wang; Hong Wang; Green, R.C.; Alam, M., "A multi-level communication architecture of smart grid based on congestion aware wireless mesh network," *North American Power Symposium (NAPS), 2011* , vol., no., pp.1,6, 4-6 Aug. 2011
- [Zhe08] Ce Zheng; Kezunovic, M.; , "Integrated solutions for ubiquitous use of electricity and cyber services," *Power Symposium, 2008. NAPS '08. 40th North American* , vol., no., pp.1-7, 28-30 Sept. 2008
- [Zim02] Zimmermann, M.; Dostert, K., "A multipath model for the powerline channel," *Communications, IEEE Transactions on* , vol.50, no.4, pp.553,559, Apr 2002
- [Zim02] Zimmermann, M.; Dostert, K.; , "A multipath model for the powerline channel," *Communications, IEEE Transactions on* , vol.50, no.4, pp.553-559, Apr 2002
- [Δρο08] Δρούγκας, Α. Ε.; "Μοντέλα Επίδοσης των Πρωτοκόλλων TCP/IP σε Δορυφορικά και LMDS Δίκτυα," *Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Μάιος 2008*
- [Λαζ10] Λαζαρόπουλος, Α. Γ.; "Ευρυζωνική Μετάδοση Σημάτων μέσω Γραμμών Μέσης Τάσης: Μοντέλα Διάδοσης – Χωρητικότητα," *Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Φεβ. 2010*

- [Μπι11] Μπιρσίμη, Θ. Σ.; “ Πολλαπλή πρόσβαση σε δίκτυα BPL σύμφωνα με το πρότυπο IEEE 1901, Προσομοίωση λειτουργίας TDMA,” *Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Ιουλ. 2011*
- [Χιω12] Χιωτέλλης, Ν. Ι.; “Η χρήση της ζώνης NB-PLC για επικοινωνίες ευφυούς δικτύου μέσω γραμμών μεταφοράς Μέσης Τάσης,” *Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Οκτ. 2012*