



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

Εξασφάλιση Ποιότητας Υπηρεσίας σε Ευφυή Δίκτυα Τεχνολογίας BB-PLC

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Χαρίλαος Ι. Κανατσούλης

Επιβλέπων : Παναγιώτης Κωττής

Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2014



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

Εξασφάλιση Ποιότητας Υπηρεσίας σε Ευφυή Δίκτυα Τεχνολογίας BB-PLC

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Χαρίλαος Ι. Κανατσούλης

Επιβλέπων : Παναγιώτης Κωττής

Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 29η Ιουλίου 2014.

.....
Παναγιώτης Κωττής
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Χρήστος Καψάλης
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Γεώργιος Φικιώρης
Επ. Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2014

.....

Χαρίλαος Ι. Κανατσούλης

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Ε.Μ.Π.

Copyright © Χαρίλαος Ι. Κανατσούλης, 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

Περίληψη

Η πρόσφατη τάση για εκσυγχρονισμό του απαρχαιωμένου συμβατικού ηλεκτρικού δικτύου σε δίκτυο πληροφορίας και επικοινωνιών νέας γενιάς έχει καταστήσει το ευφυές δίκτυο αντικείμενο έρευνας και μελέτης. Το ευφυές δίκτυο είναι μια εξέλιξη του συμβατικού ηλεκτρικού δικτύου, ικανό να παρακολουθεί να ελέγχει και να διαχειρίζεται το ηλεκτρικό κομμάτι του δικτύου. Οι επικοινωνίες γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας (PLC) αποτελούν τη βασική υποψήφιο τεχνολογία για την υλοποίηση του ευφυούς δικτύου. Εντούτοις τα δυσμενή φαινόμενα μετάδοσης πληροφορίας στις γραμμές ηλεκτρικής ενέργειας και η σύνθετη τοπολογία του ηλεκτρικού δικτύου απαιτούν συγκεκριμένο χειρισμό για να καταστήσουν τις επικοινωνίες γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας μια αξιόπιστη τεχνολογία για μετάδοση πληροφορίας των υπηρεσιών του ευφυούς δικτύου. Για το σκοπό αυτό διάφορες τεχνικές χρησιμοποιούνται τόσο στο φυσικό στρώμα του μέσου όσο και στο υποεπίπεδο ελέγχου προσπέλασης μέσων (MAC).

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η εξασφάλιση ποιότητας υπηρεσίας σε ευφυή δίκτυα με τεχνικές που χρησιμοποιούνται στο υποεπίπεδο MAC της ευρυζωνικής τεχνολογίας PLC (BB-PLC) . Αρχικά παρουσιάζεται μια επισκόπηση των υπηρεσιών που υποστηρίζονται από το ευφυές δίκτυο και οι απαιτήσεις τους σε ποιότητα υπηρεσίας. Στη συνέχεια εξετάζεται ένα σχήμα δυναμικής κατανομής πόρων με χρήση διαστρωματικής σχεδίασης ως προς τον πλέον κρίσιμο παράγοντα ποιότητας υπηρεσίας, την χρονική καθυστέρηση μετάδοσης. Τέλος προτείνεται ένα υβριδικό μοντέλο προγραμματισμού του υποεπιπέδου MAC με στόχο την εξασφάλιση επιτρεπτών ορίων καθυστέρησης για τις υπηρεσίες του ευφυούς δικτύου. Το μοντέλο αυτό κάνει χρήση τόσο ενός δυναμικού σχήματος πολλαπλής πρόσβασης διαίρεσης χρόνου όσο και ενός υβριδικού προγραμματισμού ζεύξης με υλοποίηση αυστηρής προτεραιότητας ουράς για υπηρεσίες υψηλής προτεραιότητας και σταθμικά δίκαιης μεταχείρισης για τις υπόλοιπες.

Λέξεις κλειδιά

Ευφυές δίκτυο, επικοινωνίες μέσω γραμμών ηλεκτρικής ενέργειας, διαφοροποιημένες υπηρεσίες, ποιότητα υπηρεσίας, πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης χρόνου, χρονική καθυστέρηση μετάδοσης, μέθοδος προγραμματισμού ζεύξης

Abstract

The recent impetus in modernizing the aging power grid into a next generation information and communication technology network has established Smart Grid as a challenging research area. Smart grid is an enhancement of the existing power grid, capable of monitoring, controlling and managing the electrical part of the grid. Powerline communications seem to be the best candidate technology for serving smart grid applications. However, the adverse propagation phenomena along the medium and the complex topology of the grid necessitate the use of special techniques to establish powerline communications as a reliable solution for smart grid services. Therefore, several methods are used both in the physical layer and the MAC layer.

The purpose of this thesis to provide quality of service to smart grid applications, using MAC layer techniques on broadband powerline communication (BB-PLC) technology. Firstly, the smart grid services and their QoS requirements are presented. Consequently, the transmission delay of a smart grid traffic is examined when a cross layer resource allocation scheme is implemented. Finally, a hybrid MAC layer model is proposed in order to assure a specified level of delay to smart grid services. This model uses a dynamic Time Division Multiple Access mechanism in addition to a hybrid packet scheduling method of strict priority queuing, for high priority applications and weighted fair queuing, for the rest of the applications.

Key words

Smart grid, powerline communications, differentiated services, quality of service, time division multiple access, delay, packet scheduling method

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμότερες ευχαριστίες μου στον καθηγητή Ε.Μ.Π. και επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας μου κ. Παναγιώτη Κωττή για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεση αυτής της εργασίας, την πολύτιμη καθοδήγηση που μου παρείχε κατά την εκπόνηση της, τις γνώσεις και τα κίνητρα που μου προσέφερε καθόλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την Διδάκτορα Ε.Μ.Π. Αγγελική Σαράφη για τις ουσιαστικές υποδείξεις της και την άριστη συνεργασία που είχαμε κατά τη διάρκεια της εκτέλεσης της παρούσας εργασίας. Τέλος θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στην αδελφή μου και τους γονείς μου για την αμέριστη συμπαράστασή τους καθόλη τη διάρκεια των σπουδών μου και τη στήριξη τους σε όλους τους τομείς της ζωής μου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ ΜΕΣΩ ΓΡΑΜΜΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΟ ΕΥΦΥΕΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ	15
1.1 Ευφυές Δίκτυο (Smart Grid – SG)	15
1.2 Επικοινωνίες μέσω γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας	18
1.3 Βασικές Αρχιτεκτονικές PLC Δικτύων	19
1.3.1 Οικιακά Δίκτυα (In-home networks)	20
1.3.2 Δίκτυα πρόσβασης (Access Networks – ANs)	21
1.4 Η τεχνολογία PLC στο ευφυές δίκτυο	22
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΠΡΟΤΥΠΟΠΟΙΗΣΗ	26
2.1 Το πρότυπο IEEE 1901	26
2.2 Τεχνικές πρόσβασης IEEE 1901 FFT-OFDM	26
2.3 ΠΡΟΣΒΑΣΗ ΣΤΟ ΚΑΝΑΛΙ	27
2.3.1 Επίπεδο MAC.....	27
2.3.2 ΤΥΧΑΙΑ ΠΡΟΣΒΑΣΗ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ: CSMA/CA	28
2.3.3 ΕΓΓΥΗΜΕΝΗ ΠΡΟΣΒΑΣΗ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ: TDMA	28
Κεφάλαιο 3: ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΥΠΗΡΕΣΙΑΣ (QoS) ΣΤΟ ΕΥΦΥΕΣ ΔΙΚΤΥΟ	34
3.1 Πολλαπλές υπηρεσίες (Multi service).....	34
3.2 ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΥΠΗΡΕΣΙΑΣ - QoS	35
3.3 Απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας εφαρμογών ευφυούς δικτύου(Quality of Service – QoS requirements of Smart Grid – SG applications).....	36
3.4 Διαφοροποιημένες Υπηρεσίες (Differentiated Services – DiffServ)	39
3.5 Παροχή εγγυημένης ποιότητας υπηρεσίας	42
Κεφάλαιο 4 ΣΧΗΜΑ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΠΟΡΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΔΙΑΣΤΡΩΜΑΤΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ	43
4.1 Εισαγωγή	43
4.2 Διατύπωση του προβλήματος βελτιστοποίησης των ΤΗΤ	44
4.3 Προσομοιώσεις - Αποτελέσματα	46
4.3.1 Κυψέλη τύπου CT1	49
4.3.2 Κυψέλη τύπου CT2	51
4.3.3 Κυψέλη τύπου CT3	54
4.4 Γενικά Συμπεράσματα.....	57

Κεφάλαιο 5 ΕΞΑΣΦΑΛΙΣΗ QoS ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΥΒΡΙΔΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΤΟ ΥΠΟΕΠΙΠΕΔΟ MAC	58
5.1 Περιγραφή του προτεινόμενου μοντέλου	58
5.2 Κατηγοριοποίηση των SG εφαρμογών.....	60
5.3 Προσομοιώσεις – Αποτελέσματα	61
Κεφάλαιο 6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	71

Ευρετήριο Σχημάτων και Πινάκων

Σχήμα 1.1 Εννοιολογικό μοντέλο του ευφυούς δικτύου κατά NIST. [2].....	17
Σχήμα 1.2: Ιεραρχική επισκόπηση της επικοινωνιακής υποδομής του ευφυούς δικτύου.	18
Σχήμα 1.3: Συνολικό μοντέλο PLC δικτύου.	18
Σχήμα 1.4: Παράδειγμα οικιακού δικτύου	20
Σχήμα 1.5: Δομή ενός δικτύου πρόσβασης κατά το πρότυπο 1901.	22
Σχήμα1.6: Απεικόνιση του EMC προβλήματος όπου η διάταξη PLC να είναι θύμα παρεμβολής,	25
Σχήμα1.7: Απεικόνιση του EMC προβλήματος με τον ραδιοδέκτη να είναι θύμα παρεμβολής. 25	
Σχήμα2.1: Ο κύκλος MAC στο πρότυπο IEEE 1901.....	28
Σχήμα2.2: Χρονοπρογραμματισμός μεταδόσεων κατά την πρόσβαση TDMA	29
Σχήμα2.3: Αλλαγή χρονοπρογραμματισμού (front loading) κατά την πρόσβαση TDMA	31
Σχήμα 2.4 α: Παράδειγμα σταθερής κατανομής εύρους ζώνης.....	32
Σχήμα 2.4 β : Παράδειγμα δυναμικής κατανομής εύρους ζώνης.....	33
Πίνακας 3.1 Απαιτήσεις σε καθυστέρηση και προτεραιότητα για SG εφαρμογές.....	37
Πίνακας 3.2 Τιμές DSCP για διάφορες SG εφαρμογές.....	40
Σχήμα 4.1: Δομή αντιπροσωπευτικών τύπων κυψελών	47
Σχήμα 4.2: Βέλτιστοι χρόνοι THT για διάφορες τιμές του JFI σε κυψέλη τύπου CT1.....	49
Σχήμα 4.3: Μέση συνολική καθυστέρηση της κίνησης σε κυψέλες τύπου CT1.....	50
Σχήμα 4.4: Καθυστέρηση σε κάθε κόμβο της κυψέλης τύπου CT1	51
Σχήμα 4.5: Βέλτιστοι χρόνοι THT για διάφορες τιμές του JFI σε κυψέλη τύπου CT2.....	52
Σχήμα 4.6: Συνολική καθυστέρηση της κίνησης σε κυψέλες τύπου CT2	53
Σχήμα 4.7: Καθυστέρηση σε κάθε κόμβο της κυψέλης τύπου CT2	54
Σχήμα 4.8: Βέλτιστοι χρόνοι THT για διάφορες τιμές του JFI σε κυψέλη τύπου CT3.....	55
Σχήμα 4.9: Συνολική καθυστέρηση της κίνησης σε κυψέλες τύπου CT3	56
Σχήμα 4.10: Καθυστέρηση σε κάθε κόμβο της κυψέλης τύπου CT3.....	56
Σχήμα 5.1: Σχηματική απεικόνιση της προτεινόμενης μεθόδου προγραμματισμού ζεύξης	59
Πίνακας 5.1: Χαρακτηριστικά κατηγοριών κίνησης που εξετάζονται	60
Πίνακας 5.2: Περιθώριο καθυστέρησης, προτεραιότητα και DSCP των κλάσεων υπηρεσίας που εξετάζονται.....	61
Πίνακας 5.3: Ποσοτική περιγραφή του υβριδικού μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε.....	61
Σχήμα 5.2: Καθυστέρηση κλάσης 1.....	62

Σχήμα 5.3: Καθυστέρηση κλάσης 2.....	63
Σχήμα 5.4: Καθυστέρηση κλάσης 3.....	63
Σχήμα 5.5: Καθυστέρηση κλάσης 4.....	64
Σχήμα 5.6: Καθυστέρηση κλάσης 5.....	64
Σχήμα 5.7: Καθυστέρηση κλάσης 6.....	65
Σχήμα 5.6: Καθυστέρηση κλάσης 7.....	65
Σχήμα 5.9: Καθυστέρηση κλάσης 1.....	66
Σχήμα 5.10: Καθυστέρηση κλάσης 2.....	67
Σχήμα 5.11: Καθυστέρηση κλάσης 3.....	67
Σχήμα 5.12: Καθυστέρηση κλάσης 4.....	68
Σχήμα 5.13: Καθυστέρηση κλάσης 5.....	68
Σχήμα 5.14: Καθυστέρηση κλάσης 6.....	69
Σχήμα 5.15: Καθυστέρηση κλάσης 7.....	69

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ ΜΕΣΩ ΓΡΑΜΜΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΟ ΕΥΦΥΕΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ

1.1 Ευφυές Δίκτυο (Smart Grid – SG)

Παραδοσιακά ο όρος δίκτυο χρησιμοποιείται για ένα ηλεκτρικό σύστημα που υποστηρίζει όλες ή ορισμένες από τις ακόλουθες λειτουργίες: παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας, διανομή ηλεκτρικής ενέργειας και έλεγχος ηλεκτρικής ενέργειας

Το ευφυές δίκτυο(Smart Grid) είναι η αναβάθμιση του ηλεκτρικού δικτύου του 20^{ου} αιώνα. Τα παραδοσιακά ηλεκτρικά δίκτυα χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας από λίγες κεντρικές γεννήτριες σε πλήθος χρηστών και πελατών. Αντίθετα το ευφυές δίκτυο, επιτρέπει αμφίδρομες ροές ηλεκτρικής ενέργειας και πληροφορίας με σκοπό τη δημιουργία ενός αυτοματοποιημένου, κατανεμημένου και προηγμένου δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας. Ο πίνακας 1.1 δίνει μια συνοπτική σύγκριση μεταξύ του υπάρχοντος δικτύου και του ευφυούς δικτύου.

ΣΥΜΒΑΤΙΚΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ	ΕΥΦΥΕΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ (SMART GRID)
Ηλεκτρομηχανικό	Ψηφιακό
Μονόδρομη επικοινωνία	Αμφίδρομη επικοινωνία
Κεντρική παραγωγή	Κατανεμημένη παραγωγή
Λίγοι αισθητήρες	Αισθητήρες παντού
Χειροκίνητη παρακολούθηση	Αυτόματη παρακολούθηση
Χειροκίνητη επαναφορά	Αυτόματη ίαση
Αστοχίες και blackouts	Προσαρμοστικότητα και υπειδοποίηση
Περιορισμένος έλεγχος	Διάχυτος έλεγχος
Λίγες επιλογές πελατών	Πολλές επιλογές πελατών

ΠΙΝΑΚΑΣ 1.1: Σύντομη σύγκριση μεταξύ του συμβατικού ηλεκτρικού δικτύου και του ευφυούς δικτύου. [2]

Με τη χρήση σύγχρονων τεχνολογιών πληροφορίας, το ευφυές δίκτυο είναι ικανό να διανέμει την ηλεκτρική ενέργεια αποδοτικότερα και προσαρμοστικά στις ευρέως κυμαινόμενες συνθήκες και γεγονότα. Σε γενικές γραμμές το ευφυές δίκτυο μπορεί να ανταποκριθεί σε διαδικαστικά περιστατικά που συμβαίνουν οπουδήποτε στο δίκτυο όπως παραγωγή, μεταφορά, διανομή και κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας και να υιοθετήσει αντίστοιχες στρατηγικές.

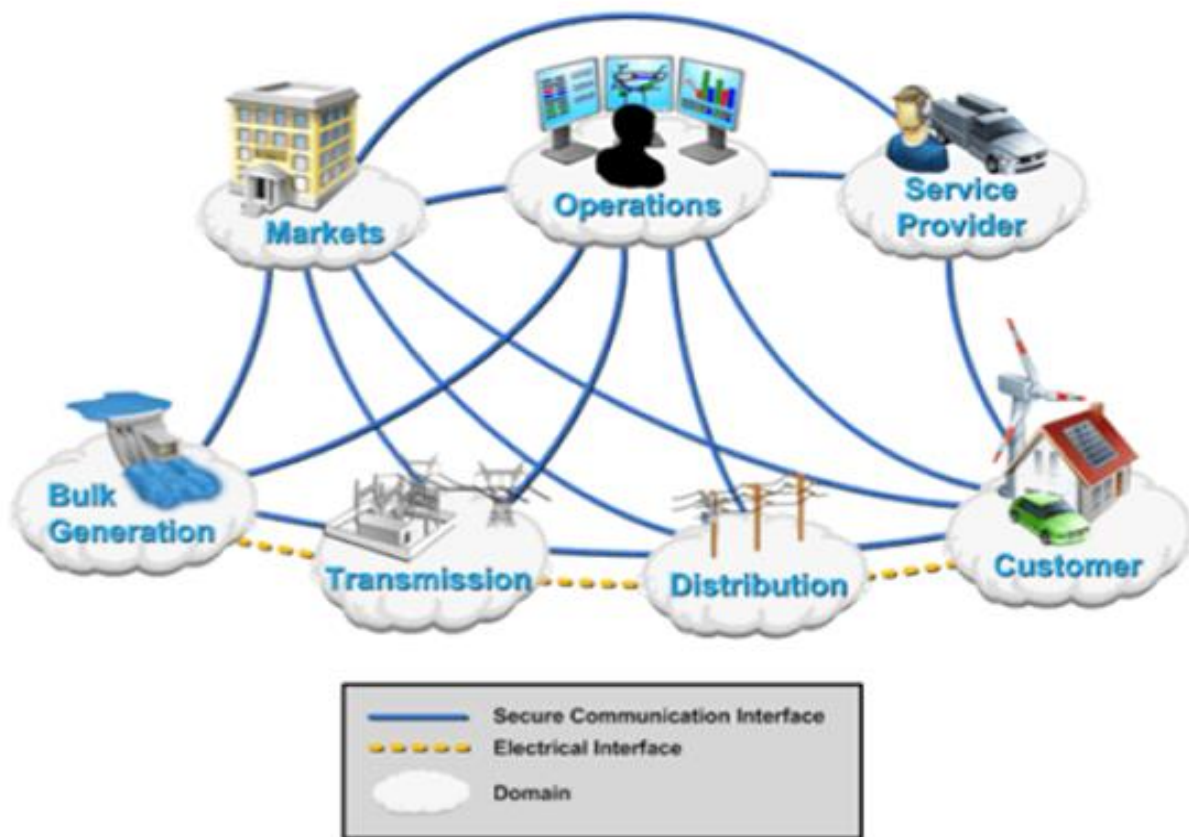
Η έννοια του ευφυούς δικτύου ξεκίνησε με την υλοποίηση των υποδομών προηγμένων μετρήσεων (advanced metering infrastructure, AMI) με σκοπό τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης, τη διαχείριση της ζήτησης (demand-side management) και την

υλοποίηση ενός αξιόπιστου δικτύου με δυνατότητα αυτοϊασης. Εντούτοις, οι νέες απαιτήσεις οδήγησαν εταιρίες, ερευνητές και κυβερνήσεις να επεκτείνουν την αρχική σύλληψη του ευφυούς δικτύου.

Καθώς δεν υπάρχει σαφής ορισμός για το ευφυές 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 ευφυών δικτύων, τα οποία είναι τα ακόλουθα:

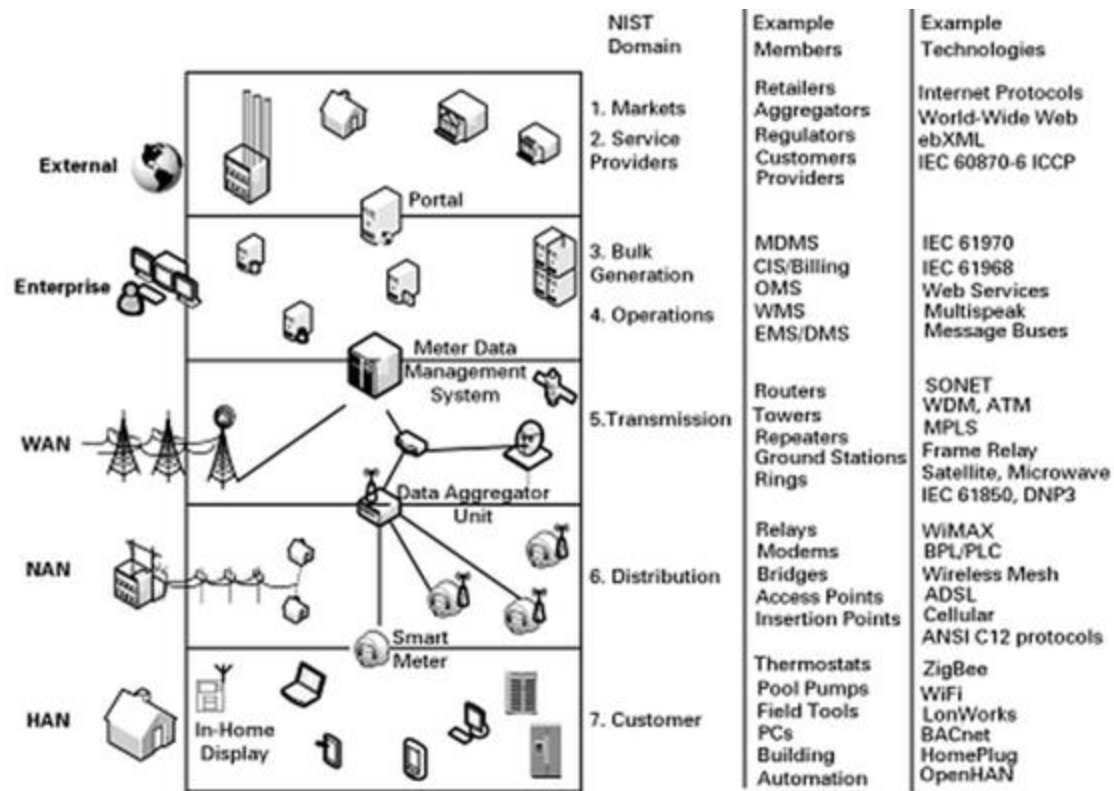
1. Βελτίωση της αξιοπιστίας και της ποιότητας στην παροχή ηλεκτρικής ενέργειας.
2. Βελτιστοποίηση της χρησιμοποίησης των μονάδων παραγωγής ενέργειας και αποτροπή κατασκευής και χρήσης εφεδρικών μονάδων παραγωγής ενέργειας για την ικανοποίηση της υπερβάλλουσας ζήτησης (peak load shaving).
3. Αύξηση της χωρητικότητας και της αποτελεσματικότητας του ενεργειακού δικτύου.
4. Βελτίωση της ανθεκτικότητας σε διακοπές.
5. Προληπτική συντήρηση και αυτοϊαση του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.
6. Ενσωμάτωση κατανεμημένων πηγών ενέργειας.
7. Αύξηση της διείσδυσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο ηλεκτρικό δίκτυο.
8. Αυτοματοποιημένη συντήρηση και λειτουργία.
9. Μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου μέσω της ενσωμάτωσης ηλεκτρικών οχημάτων και νέων πηγών ενέργειας.
10. 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.
11. Ενίσχυση της φυσικής ασφάλειας του δικτύου.
12. Μετάβαση στα ηλεκτρικά οχήματα και σε νέους τρόπους αποθήκευσης ενέργειας.
13. Αύξηση επιλογών των καταναλωτών.
14. Εισαγωγή νέων προϊόντων, υπηρεσιών και αγορών.

Η νέα δομή του δικτύου, όπως περιγράφεται από τον NIST, παρουσιάζεται στο Σχ.1.1, όπου διακρίνονται οι κύριες λειτουργικές και επιχειρηματικές οντότητες που επηρεάζονται και, ως εκ τούτου, θα εμπλακούν στη μετάβαση στα ευφυή δίκτυα.



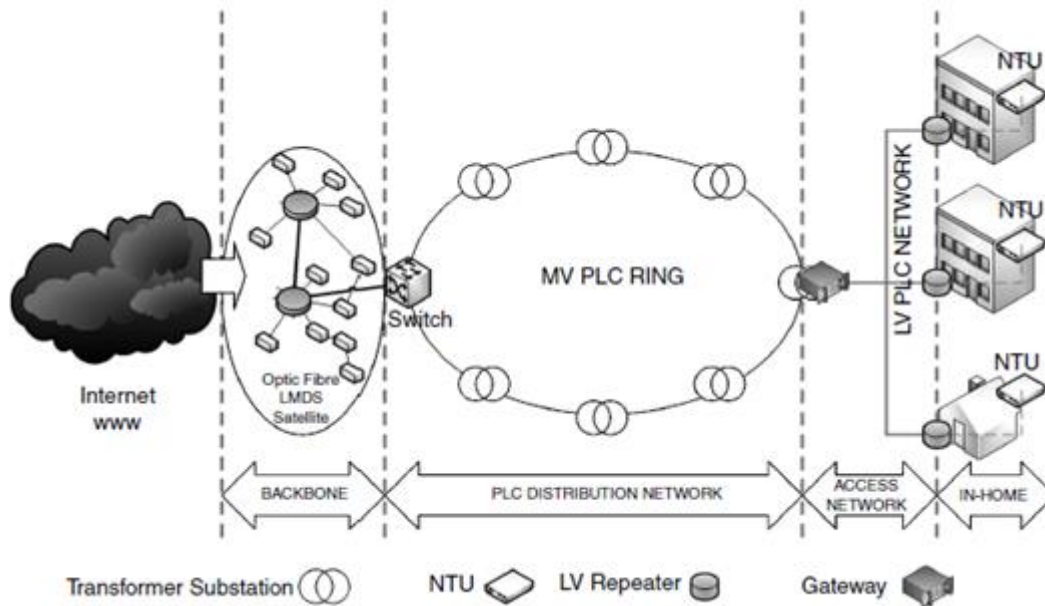
Σχήμα 1.1 Εννοιολογικό μοντέλο του ευφυούς δικτύου κατά NIST. [2]

Το συγκεκριμένο εννοιολογικό μοντέλο χωρίζει το ευφυές δίκτυο σε 7 τομείς. Το Σχ. 1.2 παρουσιάζει μια επισκόπηση του ευφυούς δικτύου, τη σχέση του με τους τομείς κατά NIST, καθώς και συναφή παραδείγματα με μέλη και τεχνολογίες του ευφυούς δικτύου



Σχήμα 1.2: Ιεραρχική επισκόπηση της επικοινωνιακής υποδομής του ευφυούς δικτύου. [4]

1.2 Επικοινωνίες μέσω γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας



Σχήμα 1.3: Συνολικό μοντέλο PLC δικτύου. [5]

Οι επικοινωνίες μέσω γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας – Powerline Communications (PLC) είναι μια αναδυόμενη τεχνολογία. Η έρευνα πάνω στην τεχνολογία PLC εντατικοποιήθηκε στα μέσα του 1990, κινώντας το ενδιαφέρον ερευνητών και μηχανικών από τα πανεπιστήμια τη βιομηχανία και τις εταιρίες κοινής ωφέλειας. Τον Ιούνιο του 1990 το αμερικάνικο ινστιτούτο ηλεκτρολόγων μηχανικών American Institute of Electrical Engineers(AIEE) δημοσίευσε την αναφορά: « Guide to Application and Treatment of Channels for Power Line Carrier». Έκτοτε το ενδιαφέρον για την PLC τεχνολογία αυξήθηκε καθιστώντας αυτήν, τη βασική υποψήφια τεχνολογία για μετάδοση δεδομένων στο ευφυές δίκτυο.

Στη βιβλιογραφία συναντώνται τρεις βασικές κατηγορίες PLC :

1. Εξαιρετικά στενής ζώνης(Ultra Narrow Band- UNB).

Πρόκειται για επικοινωνίες που λειτουργούν στη ζώνη συχνοτήτων 0.3-3 kHz και επιτυγχάνουν πολύ χαμηλούς ρυθμούς μετάδοσης(~100bps). Η συγκεκριμένη τεχνολογία χρησιμοποιείται από τους διαχειριστές ηλεκτρικών δικτύων επί τουλάχιστον δύο δεκαετίες.

2. Στενής ζώνης(Narrowband- NB).

Πρόκειται για επικοινωνίες που λειτουργούν στις συχνότητες 3-500kHz, που αντιστοιχούν στις ζώνες CENELEC στην Ευρώπη(3-148.5kHz), FCC στις Ηνωμένες Πολιτείες(10-490kHz), ARIB στην Ιαπωνία(10-450kHz) και στη Ζώνη 3-500kHz στην Κίνα. Η συγκεκριμένη κατηγορία χωρίζεται περαιτέρω βάσει του ρυθμού μετάδοσης. Συγκεκριμένα, τεχνολογίες απλού φέροντος επιτυγχάνουν χαμηλούς ρυθμούς μετάδοσης- Low Data Rate(LDR) μερικών kbps. Τεχνολογίες πολλαπλού φέροντος επιτυγχάνουν υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης- High Data Rates(HDR) έως 500 kbps.

3. Ευρείας ζώνης(Broadband- BB)

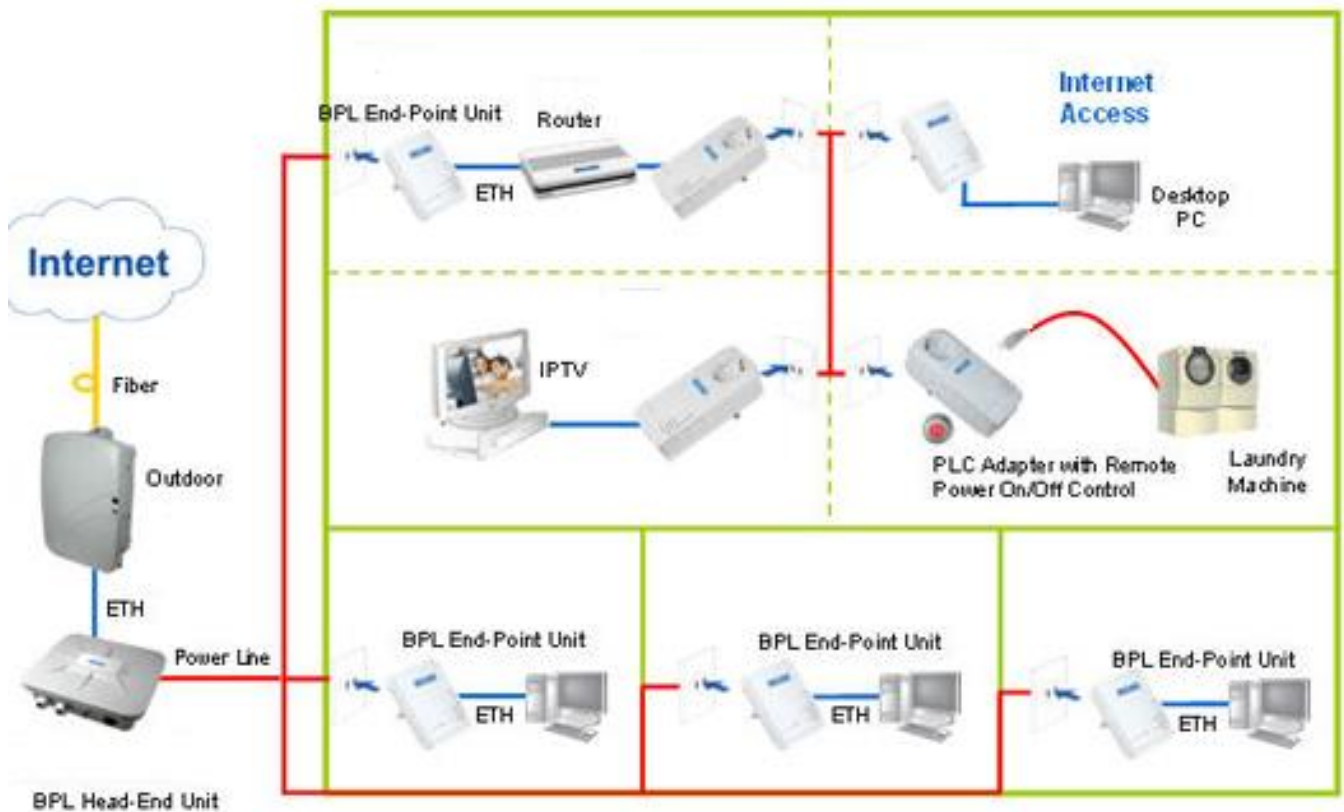
Πρόκειται για τεχνολογίες που λειτουργούν στη ζώνη των υψηλών ή υπερυψηλών συχνοτήτων (HF/VHF, 1.8-250 MHz) και επιτυγχάνουν ρυθμούς φυσικού στρώματος που φθάνουν τις εκατοντάδες Mbps.

1.3 Βασικές Αρχιτεκτονικές PLC Δικτύων

Τα δίκτυα BB-PLC εμφανίζονται τόσο στο εσωτερικό των κτιρίων, υλοποιούμενη επί του δικτύου ΧΤ, όσο και στο δίκτυο ΜΤ. Όταν εκτείνονται στο εσωτερικό των κτιρίων θεωρούνται τοπικά δίκτυα (Local Area Networks – LAN), ενώ όταν εκτείνονται στο δίκτυο ΜΤ θεωρούνται δίκτυα ευρείας ζώνης(Wide Area Networks- WAN)

1.3.1 Οικιακά Δίκτυα (In-home networks)

Τα οικιακά δίκτυα είναι σχεδιασμένα να καλύπτουν αποκλειστικά εγκαταστάσεις κτηρίων που εκτείνονται στο δίκτυο διανομής ΧΤ. Στο εσωτερικό των κτηρίων η τοπολογία δεν είναι συγκεκριμένη. Η επικοινωνία προτιμάται μεταξύ συσκευών συνδεδεμένων στην ίδια φάση. Η διαφασική επικοινωνία αποφεύγεται καθώς η εξασθένηση που εισάγει ο μετασχηματιστής είναι της τάξης των 20 dB. Το Η/Μ περιβάλλον των οικιακών δικτύων είναι κατάλληλο για μετάδοση σημάτων καθώς οι μικρές αποστάσεις των γραμμών οδηγούν σε χαμηλή εξασθένηση της τάξης των 15 με 20dB. Πρόβλημα μπορεί να προκαλέσει το φαινόμενο της πολυδιαδρομικής διάδοσης μόνον όταν στην κοινή φάση υπάρχουν διακλαδώσεις. Παράδειγμα οικιακού δικτύου φαίνεται στο σχήμα 1.4



Σχήμα 1.4: Παράδειγμα οικιακού δικτύου [16]

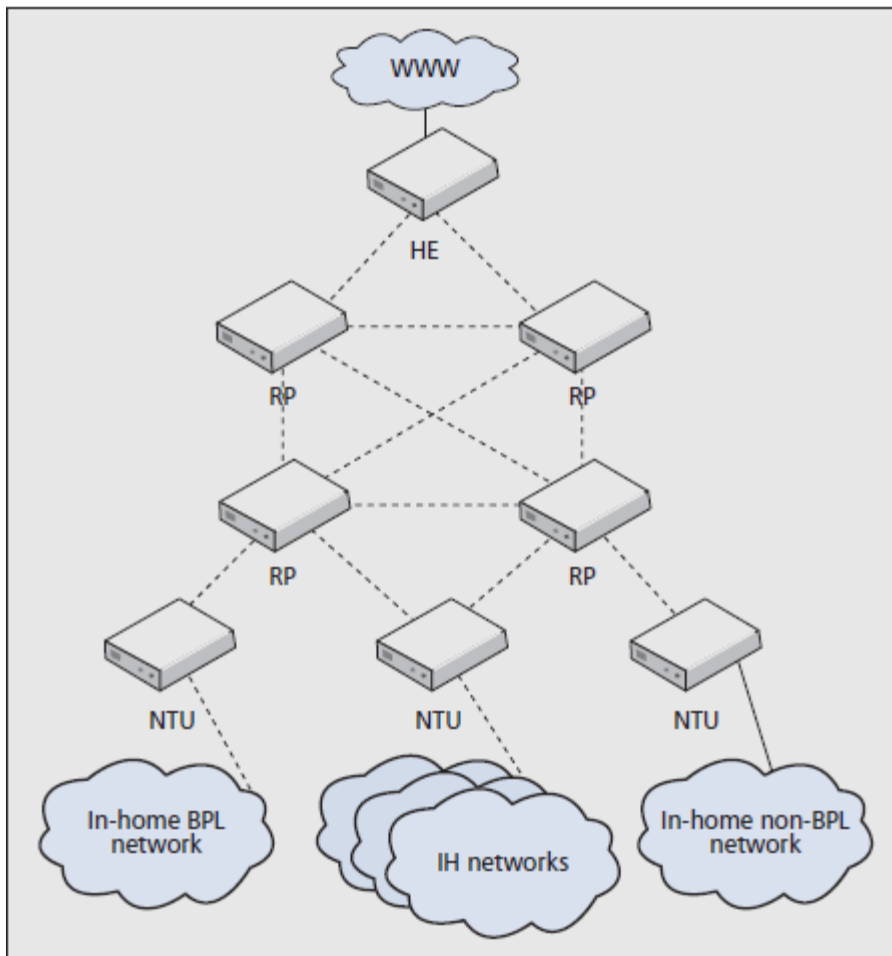
1.3.2 Δίκτυα πρόσβασης (Access Networks – ANs)

Τα δίκτυα πρόσβασης εκτείνονται σε γραμμές ΜΤ και ΧΤ και ανήκουν σε συγκεκριμένο πάροχο ηλεκτρικής ενέργειας. Υποστηρίζουν τόσο υπηρεσίες ευφυούς δικτύου όσο και υπηρεσίες ευρυζωνικής μετάδοσης.

Σύμφωνα με το πρότυπο ΙΕΕΕ 1901 τα δίκτυα πρόσβασης οργανώνονται σε κυψέλες(cells)

Η κυψέλη συγκροτείται από ένα σύνολο κόμβων (σταθμών) που διευθύνεται από ένα ειδικό κόμβο, τον επικεφαλής κόμβο(head end station – HE). Η κυψέλη αποτελείται από τον HE, ένα πλήθος επαναληπτών (repeater units- RPs) και τερματικών κόμβων δικτύου(Network termination unit-NTU) επί των οποίων είναι προσαρτημένοι κόμβοι που ανήκουν στον εξοπλισμό των πελατών (Customer premises equipment – CPE). Οι HE είναι υπεύθυνοι για την κατανομή πόρων στους υπολοίπους κόμβους και την προώθηση της κίνησης από τους CPE στον HE και αντίστροφα.

Η τοπολογία των δικτύων πρόσβασης ποικίλλει καθώς εξαρτάται τόσο από τη δομή του δικτύου διανομής όσο και από την ποιότητα των γραμμών μεταφοράς που συνδέουν τους κόμβους. Σε αστικές περιοχές συναντώνται δίκτυα που παρουσιάζουν αρκετές διακλαδώσεις ή κακή ποιότητα γραμμών. Σε αυτήν την περίπτωση η τοπολογία του AN είναι πλήρως διασυνδεδεμένη (mesh topology). Σε περιοχές όπου το δίκτυο διανομής έχει λιγότερες διακλαδώσεις ή η ποιότητα των γραμμών είναι καλή, όπως σε δίκτυα απομακρυσμένων αγροτικών περιοχών, η δομή του AN ακολουθεί είτε δενδρική τοπολογία είτε τοπολογία διαύλου (bus topology). Η δομή ενός δικτύου πρόσβασης φαίνεται στο σχήμα 1.5



Σχήμα 1.5: Δομή ενός δικτύου πρόσβασης κατά το πρότυπο 1901. [8]

1.4 Η τεχνολογία PLC στο ευφυές δίκτυο

Καίτοι πολλές τεχνολογίες επικοινωνιών είναι διαθέσιμες για να υποστηρίξουν τις επικοινωνίες ευφυούς δικτύου, η τεχνολογία PLC κρίνεται προτιμητέα σε πολλές περιπτώσεις για τους ακόλουθους λόγους.

- Η εγκατάσταση τμημάτων PLC(PLC segments) σε ένα υβριδικό ευφυές δίκτυο είναι άμεση, απλή και επεκτάσιμη
- Όσο αφορά τα PLC τμήματα του ευφυούς δικτύου, οι ενεργειακοί πάροχοι δεν προμηθεύονται υπηρεσίες τηλεπικοινωνιών από τηλεπικοινωνιακούς παρόχους

- Η ιδιωτική και ανεξάρτητη επεξεργασία των SG δεδομένων είναι εγγυημένες, αφού οι ίδιοι οι ενεργειακοί πάροχοι είναι οι ιδιοκτήτες των PLC τμημάτων του SG δικτύου
- Καθώς η PLC τεχνολογία χρησιμοποιεί τις γραμμές μεταφοράς ως φυσικό μέσο μετάδοσης, είναι η μόνη που έχει τη δυνατότητα να παρακολουθεί την λειτουργική κατάσταση του ηλεκτρικού δικτύου με κατάλληλη επεξεργασία του εγγενούς θορύβου (inherent noise patterns) και των εκτάκτων σημάτων (spurious signals) που συλλέγονται από τους PLC κόμβους.
- Τεχνολογίες εναλλακτικές της PLC τεχνολογίας μπορούν να εξυπηρετήσουν τμήμα μόνο των επιθυμητών εφαρμογών, ειδικά στο δίκτυο μέσης τάσης. Σε κάθε περίπτωση οι κόμβοι PLC μπορούν να ενσωματώσουν οποιαδήποτε σχετική τεχνολογία με στόχο τη βελτίωση των λειτουργικών και επικοινωνιακών τους αναγκών και την παροχή συμβατότητας με εναλλακτικές τεχνολογίες τηλεπικοινωνιών.
- Στους κόμβους του δικτύου μπορεί να υλοποιηθεί άμεση και επιλεκτική επεκτατική ενσωμάτωση όλων των απαιτήσεων των εφαρμογών του ευφυούς δικτύου.

Εκτός από τεχνολογίες ευφυούς δικτύου η BB-PLC τεχνολογία μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως μια πολύ καλή λύση για παροχή ευρυζωνικών εφαρμογών ιδιαίτερα σε

- Αγροτικές/απομακρυσμένες περιοχές όπου δεν υπάρχει ή δε συμφέρει εγκατεστημένη τηλεπικοινωνιακή δικτυακή υποδομή.
- Οικιακούς χρήστες και μικρές επιχειρήσεις αστικών κέντρων , στις περιπτώσεις όπου καμία άλλη επένδυση εγκατάστασης νέας καλωδιακής ή οπτικής υποδομής δεν είναι οικονομικά βιώσιμη.

Παρά τα πολλά και σαφή πλεονεκτήματα που αναφέρθηκαν προηγουμένως, η PLC τεχνολογία δεν είναι ακόμα ευρέως διαδεδομένη. Αυτό οφείλεται σε ορισμένους κρίσιμους περιοριστικούς παράγοντες που αφορούν τη μετάδοση σημάτων μέσω του ενεργειακού δικτύου και χρήζουν περαιτέρω διερεύνηση.

- Τοπολογία:

Η τοπολογία του δικτύου μεταβάλλεται συνεχώς λόγω σύνδεσης και αποσύνδεσης ηλεκτρικών διατάξεων στην πλευρά της Χ.Τ. Η ύπαρξη μετασχηματιστών και διακοπών προκαλεί ανακλάσεις που επηρεάζουν αρνητικά τη μετάδοση τηλεπικοινωνιακών σημάτων. Η παρουσία διακλαδώσεων στο δίκτυο προκαλεί φαινόμενα πολυδιαδρομικής διάδοσης με αποτέλεσμα την αύξηση του ποσοστού λαθών και των φασματικών

βυθίσεων. Τέλος το μήκος των γραμμών και το πλήθος των διακλαδώσεων προκαλούν εκθετική εξασθένηση του σήματος.

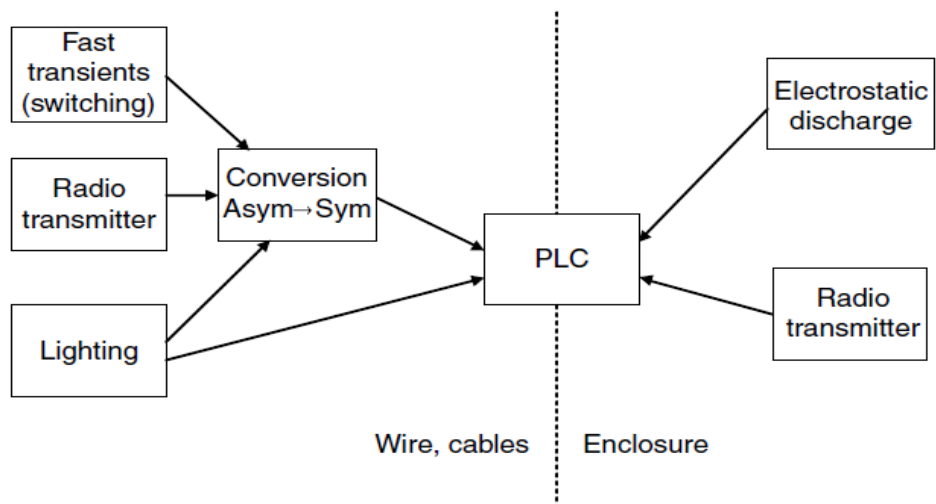
- Θόρυβος:

Ο θόρυβος στον PLC δίαυλο μετάδοσης έχει ασυνήθιστα χαρακτηριστικά και τα επίπεδα θορύβου μπορεί να είναι πολύ υψηλά. Συγκεκριμένα, στο δίαυλο PLC εμφανίζονται τα εξής είδη θορύβου:

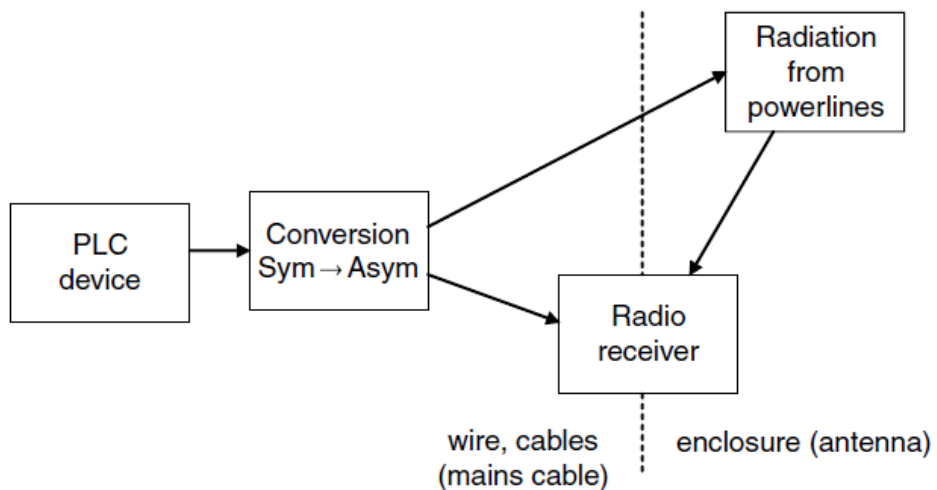
1. Έγχρωμος θόρυβος υποβάθρου (colored background noise) που αποτελεί την κύρια πηγή θορύβου στο δίαυλο BB-PLC. Είναι ο θόρυβος που εμφανίζουν ως παθητικά μέσα μετάδοσης τα καλώδια ισχύος.
2. Θόρυβος στενής ζώνης (narrowband noise) που προέρχεται από τις εκπομπές ασυρμάτων υπηρεσιών που λειτουργούν στην ίδια ζώνη με την τεχνολογία BB-PLC.
3. Κρουστικής μορφής θόρυβος (Impulsive noise) που προκαλείται στο δίκτυο ΧΤ από το άνοιγμα κλείσιμο διακοπών, τροφοδοτικών και άλλων συσκευών

- Ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα (Electromagnetic Compatibility- EMC):

Η ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα αποτελεί σημαντικό παράγοντα για την ανάπτυξη και λειτουργία των PLC συστημάτων. Πρώτον η είσοδος κρουστικών παρεμβολών στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας είναι παρενοχλούν τη μετάδοση σημάτων πάνω από τις γραμμές μεταφοράς. Δεύτερον, η έλλειψη συμμετρίας των γραμμών μεταφοράς και των PLC εγκαταστάσεων οδηγεί στη μετατροπή των επιθυμητών συμμετρικών σημάτων (differential mode) σε ασύμμετρα (common mode), γεγονός που μπορεί να προκαλέσει παρεμβολή σε γειτονικούς ραδιοδέκτες στη ζώνη των βραχέων. Τα μοντέλα παρεμβολής (δέκτης και πηγή) μιας συσκευής PLC φαίνονται στα ακόλουθα σχήματα 1.6, 1.7.



Σχήμα1.6: Απεικόνιση του EMC προβλήματος όπου η διάταξη PLC να είναι θύμα παρεμβολής. [5]



Σχήμα1.7: Απεικόνιση του EMC προβλήματος με τον ραδιοδέκτη να είναι θύμα παρεμβολής. [5]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΠΡΟΤΥΠΟΠΟΙΗΣΗ

2.1 Το πρότυπο IEEE 1901

Τον Ιούνιο του 2005 20 εταιρίες συμφώνησαν να σχηματίσουν το IEEE Working Group (WG) με τη χρηματοδότηση της κοινότητας επικοινωνιών του IEEE (communications society) με σκοπό την ανάπτυξη ενός καθολικού προτύπου για υψηλής ταχύτητας επικοινωνίες σε γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Δύο τεχνολογίες επιλέχθηκαν στο πρότυπο που δημοσιεύτηκε το Δεκέμβριο του 2010, ο γρήγορος μετασχηματισμός Fourier (Fast Fourier Transform-FFT) και η πολύπλεξη ορθογωνικής διαίρεσης συχνότητας (orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) ή Wavelet-OFDM (W-OFDM) .

Το πρότυπο 1901 διαιρείται σε τρία μέρη

1. IH(In-Home). Διαχειρίζεται τις απαιτήσεις και τις λειτουργίες που αφορούν τη μετάδοση σε δίκτυα χαμηλής τάσης μέσα σε κτίρια
2. Πραγματεύεται τις απαιτήσεις και τις λειτουργίες που αφορούν τη μετάδοση ευρυζωνικών σημάτων σε δίκτυα χαμηλής πρόσβασης στη μέση τάση.
3. Διαχειρίζεται τις απαιτήσεις και τις λειτουργίες που αφορούν τη δυνατότητα να συνυπάρχουν PLC τεχνολογίες με άλλες τεχνολογίες ακόμα και αν δεν βασίζονται στο πρότυπο.

Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται με το δεύτερο μέρος.

2.2 Τεχνικές πρόσβασης IEEE 1901 FFT-OFDM

Κρίνεται αναγκαία η αναφορά σε προγενέστερες τεχνολογίες όπως η narrowband power line communication (NBPLC) η οποία χρησιμοποιεί τις γραμμές μεταφοράς ως φυσικό μέσο για τις επικοινωνίες. Οι διαφορές μεταξύ Access και IH συστημάτων πρέπει να περιγραφούν σαφώς, ώστε να γίνουν αντιληπτές οι διαφορετικές προσεγγίσεις και φιλοσοφίες των δύο αυτών τομέων.

Δίκτυο Πρόσβασης BPL έναντι NB PLC

Κατά τη διάρκεια των περασμένων ετών διάφορα συστήματα NB PLC έχουν αναπτυχθεί. Στην Ευρώπη NB PLC συστήματα λειτουργούν σε ένα εύρος συχνοτήτων από 9 έως 150 kHz (ITU Περιοχή 1). Ο αρχικός σχεδιασμός για αυτά τα συστήματα PLC βασιζόταν κατά

ένα πολύ μεγάλο βαθμό στις εφαρμογές που παρέχει ολόκληρο το σύστημα. Στις περισσότερες των περιπτώσεων το NB PLC χρησιμοποιήθηκε για να δημιουργήσει συνδέσεις χαμηλού εύρους ζώνης για ολιγάριθμα και επιλεγμένα απομακρυσμένα τερματικά σημεία. Η χαμηλή εξασθένιση του NB PLC διαύλου (λόγω της χαμηλής συχνότητας λειτουργίας) τα και υψηλά επίπεδα ισχύος μεταφοράς έκαναν εφικτή την από-άκρο-σε-άκρο επικοινωνία μεταξύ τερματικών σημείων. Εντούτοις τα επίπεδα θορύβου στη ζώνη συχνοτήτων έως 150 kHz είναι αυξημένα με αποτέλεσμα υπηρεσίες αυστηρότερων απαιτήσεων καθυστέρησης και υψηλότερου εύρους ζώνης να μην ικανοποιούνται από την τεχνολογία NB PLC.

Από την άλλη πλευρά το BB-PLC χρησιμοποιεί ένα μεγαλύτερο εύρος συχνοτήτων (2-30 MHz). Το επίπεδο θορύβου στις υψηλότερες συχνότητες είναι χαμηλότερο και μετριάζεται ευκολότερα με τις υπάρχουσες τεχνικές.

Ο αυξανόμενος αριθμός τερματικών σημείων προκαλεί πρόσθετο πρόβλημα στην προσέγγιση στενής ζώνης, αφού περισσότεροι κόμβοι διαγωνίζονται για χρήση του μέσου, γεγονός που περιορίζει το διατιθέμενο εύρος ζώνης ανά κόμβο σε επίπεδο χαμηλής χρησιμότητας. Η ευρύτερη ζώνη συχνοτήτων της τεχνολογίας BPL προσφέρει μεγαλύτερη ελευθερία στην επιλογή φερόντων σήματος και ως εκ τούτου είναι καταλληλότερη για δίκτυα πρόσβασης μεγαλύτερης κλίμακας.

2.3 ΠΡΟΣΒΑΣΗ ΣΤΟ ΚΑΝΑΛΙ

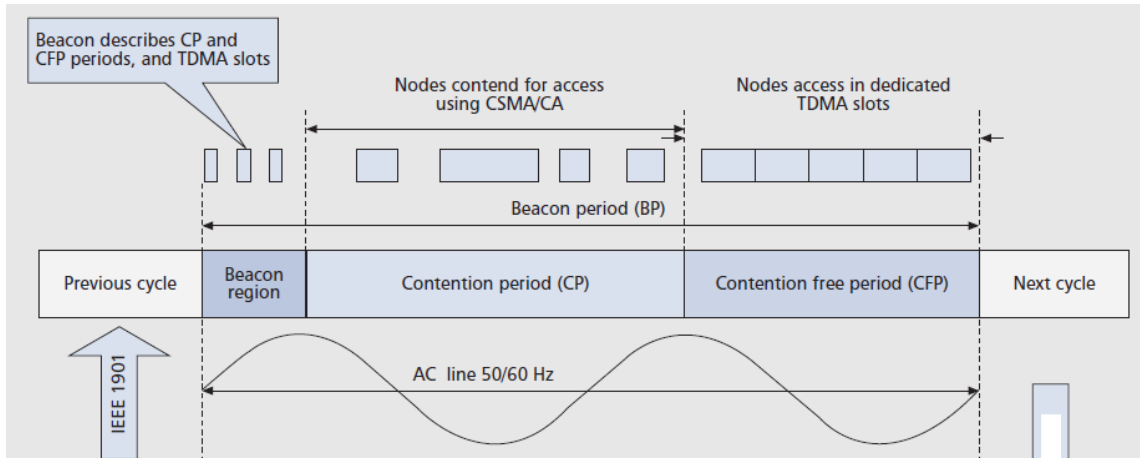
Υποεπίπεδο ελέγχου πρόσβασης Μέσων(Medium Access Control- MAC)

Τα πρωτόκολλα που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό αυτού που έχει σειρά για μετάδοση σε δίαυλο πολλαπλής πρόσβασης ανήκουν σε ένα υποεπίπεδο του επιπέδου συνδέσμου μετάδοσης δεδομένων, το υποεπίπεδο MAC.

2.3.1 Επίπεδο MAC

Τα PLC MAC πρωτόκολλα διευθετούν την πρόσβαση στο μέσο με συνεχείς κύκλους MAC. Ο κύκλος MAC στο πρότυπο IEEE 1901 διαιρείται σε τρεις φάσεις για τρεις τύπους πρόσβασης στο κανάλι όπως φαίνεται στο Σχ. 2.1. Ο τοπικός διαχειριστής εκκινεί ένα νέο κύκλο MAC μεταδίδοντας ένα σήμα φάρο(beacon) στην αρχική φάση (beacon period). Τα σήματα φάροι περιέχουν το χρόνο ενεργοποίησης των άλλων δύο φάσεων του κύκλου. Κατά την περίοδο ανταγωνισμού(contention period-CP), ένας σταθμός μεταδίδει στο κανάλι με τυχαία πρόσβαση μέσω CSMA/CA (carrier sense multiple access/coollision avoidance). Κατά την περίοδο χωρίς ανταγωνισμό (contention free period –CFP) υποστηρίζεται εγγυημένη πρόσβαση στο μέσο μέσω TDMA(time division multiple access). Δεδομένα αυστηρών απαιτήσεων QoS, όπως πολύ χαμηλής ή σταθερής καθυστέρησης, υψηλού ρυθμού μετάδοσης μεταδίδονται κατά τις περιόδους χωρίς

ανταγωνισμό με χρήση TDMA. Δεδομένα με ελαστικότερες απαιτήσεις QoS μεταδίδονται κατά τις περιόδους ανταγωνισμού με χρήση CSMA/CA.



Σχήμα2.1: Ο κύκλος MAC στο πρότυπο IEEE 1901. [9]

2.3.2 ΤΥΧΑΙΑ ΠΡΟΣΒΑΣΗ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ: CSMA/CA

Στο πρότυπο IEEE 1901 το πρωτόκολλο CSMA/CA προτείνεται ως βασικό πρωτόκολλο για πρόσβαση στο μέσο. Εντούτοις, η δομή του δικτύου πρόσβασης εμφανίζει το πρόβλημα κρυμμένων κόμβων. Για να αντιμετωπιστεί το συγκεκριμένο πρόβλημα, χρησιμοποιούνται πλαίσια αιτημάτων αποστολής (Request to send –RTS) και αποδοχής αίτησης (Clear to send-CTS) με σκοπό τη μείωση της πιθανότητας συγκρούσεων δεδομένων. Πριν αρχίσει να μεταδίδει κάθε σταθμός αποστέλλει στο σταθμό δέκτη ένα πλαίσιο RTS. Στην περίπτωση όπου το απαραίτητο κανάλι είναι διαθέσιμο ο σταθμός δέκτης επιτρέπει τη μετάδοση με ένα CTS πλαίσιο. Οι υπόλοιποι σταθμοί, που μοιράζονται το ίδιο κανάλι, ενημερώνονται για την προγραμματισμένη μετάδοση και σταματούν να μεταδίδουν δεδομένα στο κατειλημένο κανάλι για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα.

2.3.3 ΕΓΓΥΗΜΕΝΗ ΠΡΟΣΒΑΣΗ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ: TDMA

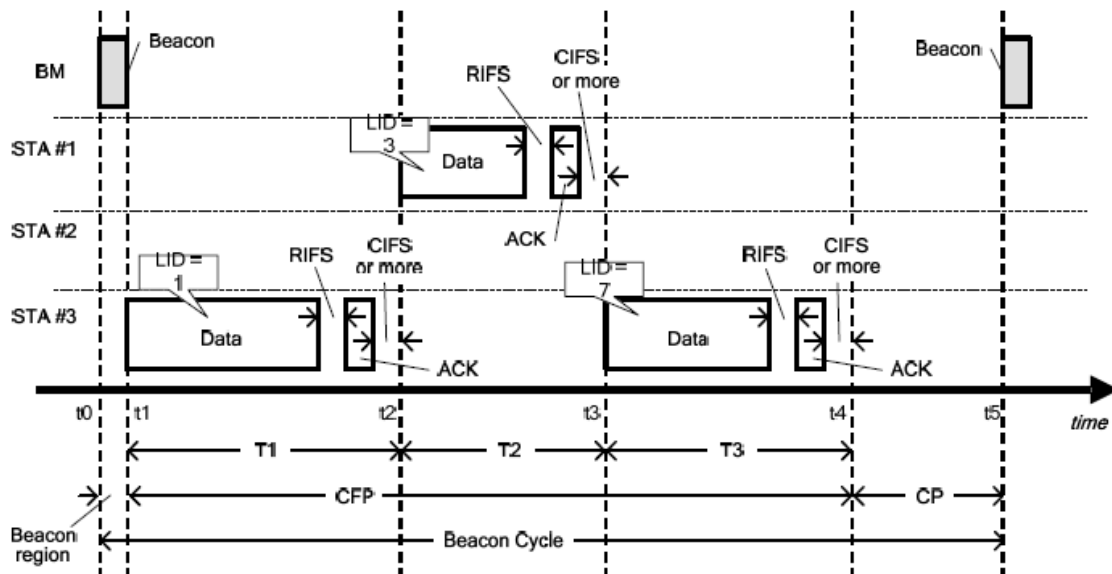
Ένα βασικό μειονέκτημα του CSMA/CA είναι το ότι βασίζεται σε στατιστικό αλγόριθμο, που αποδίδει εγγυημένο εύρος ζώνης σε συγκεκριμένους χρήστες. Για την παροχή υπηρεσίας εγγυημένης πρόσβασης το IEEE 1901 χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο TDMA. Το πρωτόκολλο TDMA αποτελεί τον αποκλειστικό μηχανισμό πρόσβασης κατά την περίοδο χωρίς ανταγωνισμό (CFP). Μέσω του πρωτοκόλλου TDMA ανατίθεται συγκεκριμένος

χρόνος κατάληψης σε κάθε ζεύξη PLC και παρέχονται τα μέσα που προσδιορίζουν το ποιο κόμβοι θα μεταδώσουν σε κάθε ζεύξη κατά το χρόνο που εκχωρήθηκε. Χρησιμοποιούνται δύο είδη TDMA: TDMA σταθερής εκχώρησης εύρους ζώνης και TDMA δυναμικής εκχώρησης εύρους ζώνης.

2.3.3.1 TDMA σταθερής εκχώρησης εύρους ζώνης

Η ανάθεση χρονοσχισμών 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. 2.2 απεικονίζει ένα παράδειγμα ενός κύκλου χρονοπρογραμματισμού των μεταδόσεων με χρήση TDMA πρόσβασης. Επισημαίνεται ότι, όπως φαίνεται και από το Σχ. 2.2, 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.



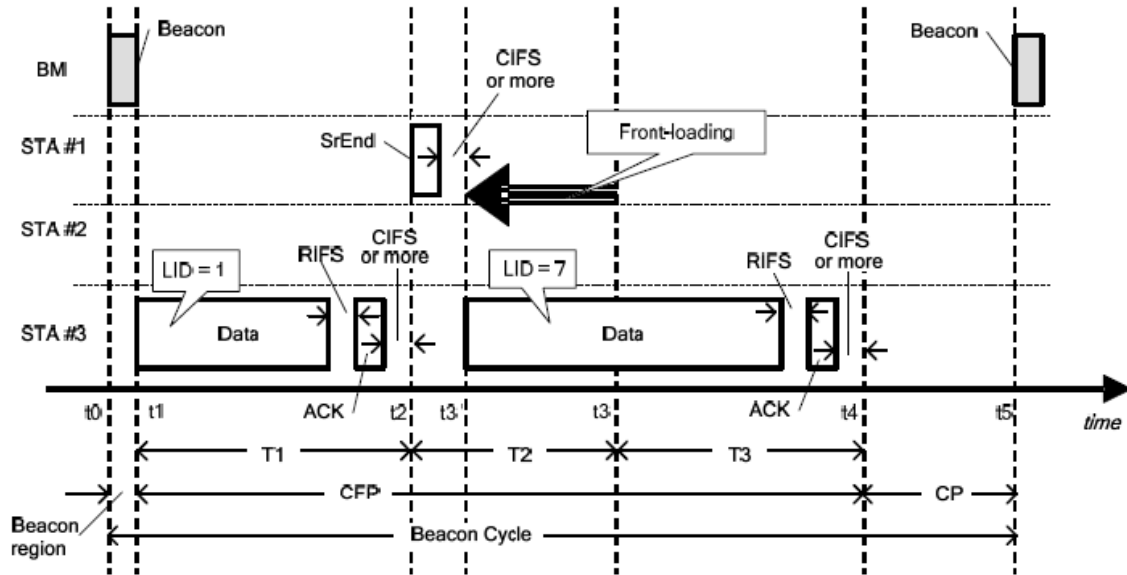
Σχήμα 2.2: Χρονοπρογραμματισμός μεταδόσεων κατά την πρόσβαση TDMA [IEEE1901].[1]

Το ενδεικτικό δίκτυο του οποίου ο χρονοπρογραμματισμός απεικονίζεται στο Σχ. 2.2 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 στιγμή T3 εκχωρείται για μετάδοση στη ζεύξη με LID 7. Από τη μελέτη του Σχ. 2.2 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.

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. 2.2, 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.

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 ολοκληρώσει τη μετάδοση των πλαισίων του πριν παρέλθει ο προγραμματισμένος χρόνος, μπορεί να εκκινήσει η επόμενη προγραμματισμένη μετάδοση, σύμφωνα με το πλαίσιο Beacon. Αυτή η διαδικασία αναφέρεται ως front loading.

Το Σχ. 2.3 απεικονίζει τη διαδικασία αλλαγής χρονοπρογραμματισμού στο δίκτυο του προηγούμενου παραδείγματος. Από το Σχ. 2.3 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 εκκινήσει τη μετάδοση. Παρατηρείται, επομένως, ότι η μετάδοση του STA 3 επεκτάθηκε και στη χρονική περίοδο T2, αξιοποιώντας το χρόνο κατά τον οποίο ο δίαυλος θα ήταν ανενεργός.



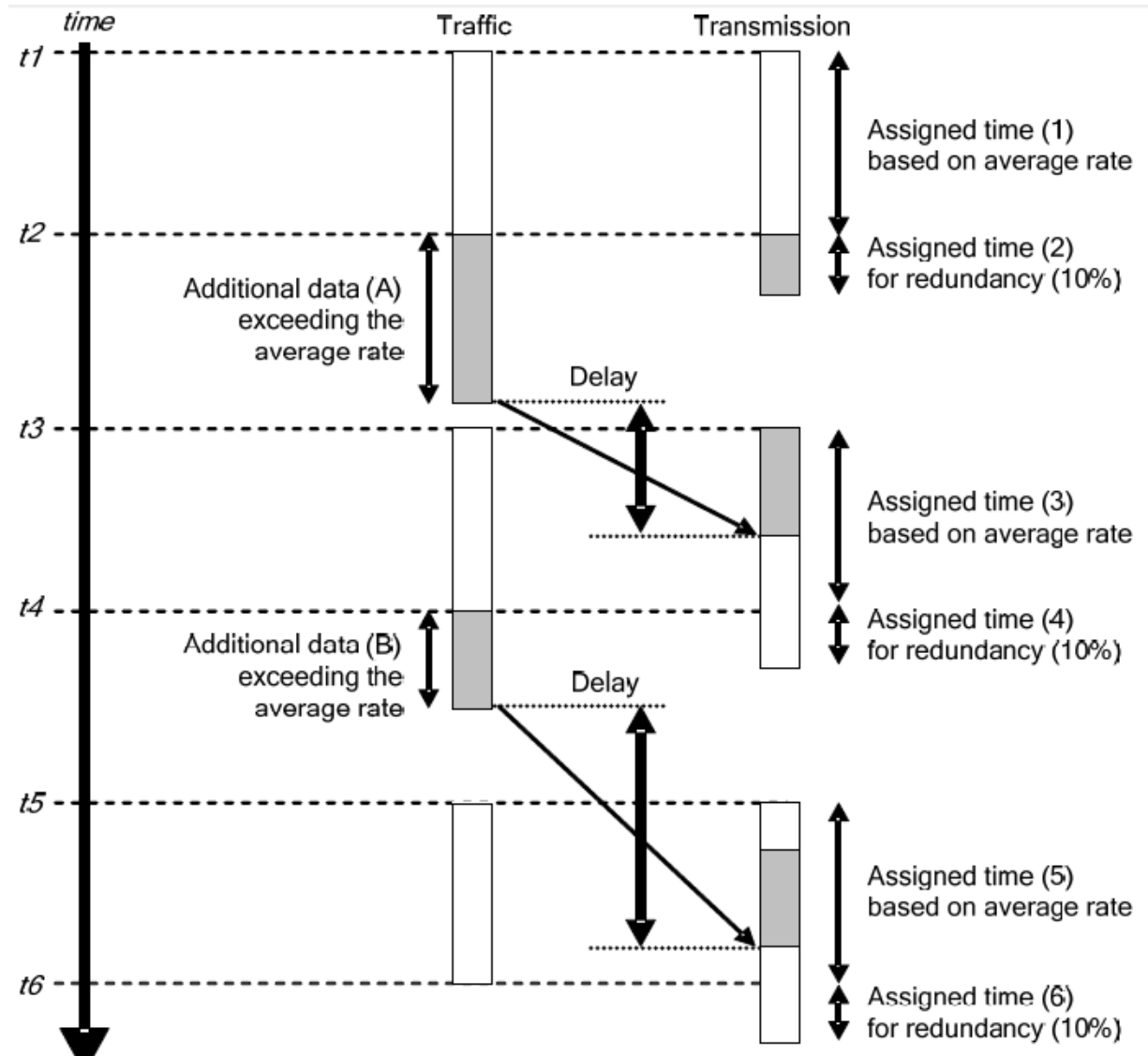
Σχήμα2.3: Αλλαγή χρονοπρογραμματισμού (front loading) κατά την πρόσβαση TDMA [IEEE1901].[1]

2.3.3.2 TDMA δυναμικής εκχώρησης εύρους ζώνης

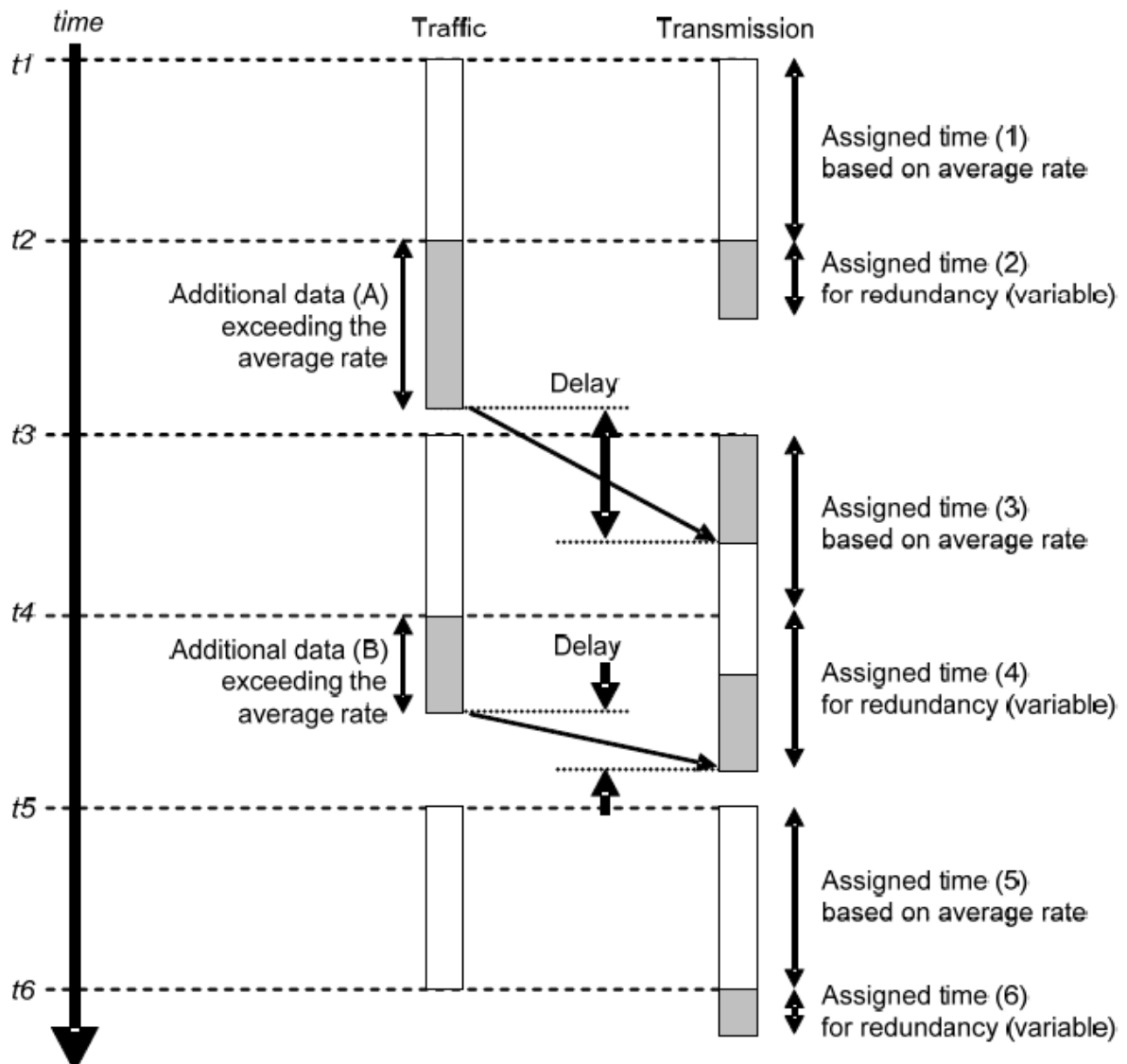
Η επιλογή της δυναμικής εκχώρησης χρονοσχισμών αντιμετωπίζει το πρόβλημα κατανομής πόρων στην περίπτωση όπου υπάρχουν πολλά πακέτα προς μετάδοση στους ενταμιευτές των BB-PLC κόμβων. Η κατάσταση αυτή μπορεί να είναι αποτέλεσμα της ύπαρξης κόμβων που παράγουν κίνηση μεταβλητής ροής (Variable Bit-Rate – VBR) ή της ύπαρξης επιβαρυσμένων PLC ζεύξεων που 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 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. 2.4 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.



Σχήμα 2.4 α: Παράδειγμα σταθερής κατανομής εύρους ζώνης [IEEE1901].[1]



Σχήμα 2.4 β : Παράδειγμα δυναμικής κατανομής εύρους ζώνης [IEEE1901].[1]

Κεφάλαιο 3: ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΥΠΗΡΕΣΙΑΣ (QoS) ΣΤΟ ΕΥΦΥΕΣ ΔΙΚΤΥΟ

3.1 Πολλαπλές υπηρεσίες (Multi service)

Ως ευφυή δίκτυα (smart grid) νοούνται τα σύνθετα δίκτυα έξυπνων ηλεκτρονικών συσκευών (intelligent electronic devices-IEDs), ενσύρματων και ασύρματων αισθητήρων, έξυπνων μετρητών, κατανεμημένων γεννητριών και διασκορπισμένων φορτίων που απαιτούν συνεργασία και συντονισμό έτσι ώστε να επιτελέσουν το ρόλο που αναμένονται από αυτά. Κρίσιμες για το σενάριο αυτό το σενάριο είναι οι τεχνολογίες πληροφορίας και επικοινωνίας (ICTs).

Το ευφύες δίκτυο υπόσχεται να αλλάξει όλο το υπάρχων επιχειρηματικό μοντέλο και αυτό αφορά επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας, ρυθμιστικούς φορείς, παρόχους υπηρεσιών, προμηθευτές τεχνολογίας και καταναλωτές ηλεκτρικής ενέργειας. Το smart grid επιβάλλει μία ευρεία διάταξη απαιτήσεων που διαφέρουν από αυτές άλλων δικτύων όπως για παράδειγμα πολύ υψηλή διαθεσιμότητα. Αυτός ο μετασχηματισμός του συμβατικού δικτύου προς ένα έξυπνο δίκτυο θα καταστεί εφικτό εισάγοντας τη φιλοσοφία, την έννοια και τις τεχνολογίες του γενικού πλαισίου του Internet.

Πρώτο και κύριο συστατικό του ευφυούς δικτύου είναι το δίκτυο αισθητήρων το οποίο συγκροτεί ένα σύστημα κατανεμημένων κόμβων αισθητήρων που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους και με την υποδομή του SG έτσι ώστε να συλλέξουν, επεξεργαστούν, μεταφέρουν και παρέχουν πληροφορίες που εξάγονται από το φυσικό κόσμο. Οι κόμβοι αισθητήρων μπορούν να έχουν δυνατότητες επεξεργασίας και δρομολόγησης χρησιμοποιώντας είτε ασύρματο είτε ενσύρματο μέσο μετάδοσης. Η επεξεργασία της πληροφορίας αισθητήρων πρέπει να επιτρέπει την τροποποίηση της συμπεριφοράς του ηλεκτρικού δικτύου μέσω έξυπνων ενεργοποιητών.

Ένα άλλο σημαντικό συστατικό του ευφυούς δικτύου είναι ο έξυπνος μετρητής που αποτελεί τη γέφυρα μεταξύ της συμπεριφοράς του χρήστη και της μέτρησης κατανάλωσης ισχύος. Περισσότερα ένα ενισχυμένο σύστημα διαχείρισης διανομής (distribution management system - DMS) απαιτείται έτσι ώστε να αναλύει, ελέγχει και να παρέχει χρήσιμες πληροφορίες στις εταιρίες κοινής ωφέλειας. Το ευφύες δίκτυο συντίθεται επίσης από απομακρυσμένες τερματικές μονάδες (RTUs) που μπορούν να πραγματοποιούν λειτουργίες πύλης δικτύου αισθητήρων λειτουργώντας ως ενδιάμεσα σημεία σε ένα δίκτυο μέσης τάσης. Η πύλη δικτύου αισθητήρων είναι η γέφυρα μεταξύ του δικτύου αισθητήρων και του back-end system. Επομένως παρέχει ενσύρματες/ασύρματες ζεύξεις με άλλους κόμβους αισθητήρων, καθώς επίσης ενσύρματες/ασύρματες ζεύξεις με υπάρχουσες υποδομές ICT.

Προηγμένες υποδομές μέτρησης (Advanced Metering Infrastructure - AMI) αποτελούνται από έξυπνους μετρητές, διαχείριση δεδομένων, δίκτυο και εφαρμογές επικοινωνίας. Οι AMI είναι ένας από τους τρεις πυλώνες των ευφυών δικτύων μαζί με τις καταναλωμένες πηγές ενέργειας (distributed energy resource - DER) και τα προηγμένα συστήματα αυτοματισμού (advanced distributed automation - ADA). Τέλος ένα γεωγραφικό σύστημα πληροφοριών (geographic information system - GIS) και ένα σύστημα πληροφόρησης καταναλωτών (consumer information system - CIS) συνήθως συμβάλλουν με εργαλεία και σημαντικές διαδικασίες. Όλες οι πληροφορίες που επανασυλλέγονται και αξιοποιούνται από το DMS πρέπει να αναφέρονται στο σύστημα εποπτικού ελέγχου και απόκτησης δεδομένων (SCADA).

Τα δίκτυα SG θα διαχειριστούν πληροφορίες πραγματικού χρόνου και θα συλλέξουν πληροφορίες από θεσμοθετημένα IEDs για λόγους ελέγχου και αυτοματισμού. Αυτού του είδους τα δίκτυα δεδομένων δεν εξαιρούνται από τις αυξημένες ανάγκες QoS. Τα ευφυή δίκτυα πρέπει να επικοινωνούν με πολλούς τύπους συσκευών που υπόκεινται σε διαφορετικές απαιτήσεις QoS μέσω διαφορετικών μέσων μετάδοσης. Ανάλογα με τις λειτουργίες που διενεργούνται τα IEDs μπορεί να έχουν πολύ διαφορετικές ανάγκες QoS. Για παράδειγμα, σε περίπτωση ανίχνευσης σφάλματος απαιτούνται επικοινωνίες σε πραγματικό χρόνο, για αποκατάσταση ή έλεγχο ποιότητας. Περιοδικές επικοινωνίες απαιτούνται σε συστήματα αυτόματης ανάγνωσης μετρήσεων (automatic meter reading - AMR) και μετάδοσης δεδομένων με στόχο την ανάγνωση και καταγραφή πληροφορίας για την ποιότητας ενέργειας.

3.2 ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΥΠΗΡΕΣΙΑΣ - QoS

Από τα προηγούμενα γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι το ευφυές δίκτυο είναι ένα ICT δίκτυο νέας γενιάς πολλαπλών υπηρεσιών και πολλαπλών απαιτήσεων. Ένα δίκτυο επικοινωνιών υψηλής απόδοσης, αξιόπιστο και ασφαλές είναι αναπόσπαστο τμήμα της εξέλιξης του ευφυούς δικτύου. Το δίκτυο αυτό πρέπει ταυτόχρονα να υποστηρίζει μεγάλο εύρος εφαρμογών, ευρυζωνικών, ευφυούς δικτύου και IN-HOME, έκαστη των οποίων έχει τις δικές τις απαιτήσεις QoS. Λαμβάνοντας υπόψη τη ραγδαία αύξηση της ανάγκης ανταλλαγής πληροφοριών και δεδομένων στο SG δίκτυο καθίσταται απαραίτητη η υλοποίηση αρχιτεκτονικής που θα εξασφαλίζει την απαιτούμενη QoS.

Μια αρχιτεκτονική QoS πρέπει να λαμβάνει υπόψη τα εξής:

- Επίγνωση του QoS (QoS awareness) : Παρακολούθηση και διαχείριση των στοιχείων της υπηρεσίας
- Επίγνωση της θέσης (Location awareness): Ενεργοποίηση αποφάσεων πραγματικού χρόνου βασισμένων στην τοπολογία του δικτύου και τους διαθέσιμους πόρους
- Προσαρμογή σε συγκεκριμένα τμήματα (Domain specific adaptation) : Συσχέτιση της διανομής των υπηρεσιών με τις δυναμικές αλλαγές του περιβάλλοντος
- Προσαρμογή στις παραμέτρους του δικτύου (Parameter adaptation): Μετάφραση των απαιτήσεων του χρήστη σε παραμέτρους QoS κάθε δικτυακής τεχνολογίας
- Διαφάνεια (Transparency) : Οι εφαρμογές δεν εξετάζουν τη διαχείριση και τον έλεγχο της QoS
- Αρχή Ενσωμάτωσης (Integration principle) : Η QoS είναι μια προδιαγραφή που αφορά διαφορετικές εφαρμογές με διαφορετικές απαιτήσεις. Επομένως πρέπει να είναι ρυθμίσιμη, προβλέψιμη και διατηρήσιμη
- Αρχή Διαχωρισμού (Separation principle) : Οι υπηρεσίες προορίζονται για διαφορετικούς χρήστες που μπορεί να ανήκουν σε διαφορετικά επίπεδα επικοινωνιακών υποδομών
- Προγραμματισμός (Scheduling) : Οι κόμβοι πρέπει να διαχειρίζονται το πρόγραμμα της ροής δεδομένων του δικτύου
- Διαμόρφωση (Shaping): Τεχνικές για τη ρύθμιση των ροών δεδομένων βασιζόμενες στις συμφωνίες για QoS μεταξύ των κόμβων
- Διαμόρφωση πολιτικής (Policing): Οι κόμβοι πρέπει να εξακριβώνουν εάν οι εγγυήσεις QoS εφαρμόζονται.

3.3 Απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας εφαρμογών ευφυούς δικτύου(Quality of Service – QoS requirements of Smart Grid – SG applications)

Ένα σημαντικό στοιχείο του ευφυούς δικτύου είναι ότι μετατρέπει ένα δίκτυο γραμμών ηλεκτρικής ενέργειας σε ένα τηλεπικοινωνιακό δίκτυο που μεταδίδει πληροφορία με το πρωτόκολλο του διαδικτύου (Internet Protocol-IP). Καθίσταται λοιπόν απαραίτητη η ανάλυση των απαιτήσεων των εφαρμογών ευφυούς δικτύου σε QoS όταν η κίνηση των εφαρμογών μεταφέρεται πάνω από ένα δίκτυο IP. Η αρχιτεκτονική επικοινωνιών για ένα ενσωματωμένο IP δίκτυο υποστηρίζει όλες τις εφαρμογές ευφυούς δικτύου. Τέτοιες εφαρμογές είναι συστήματα ελέγχου και συλλογής πληροφοριών γνωστά ως Supervisory Control And Data Acquisition SCADA, τηλεπροστασία (teleprotection) και νέες SG εφαρμογές όπως η προηγμένη μετρητική υποδομή (Advanced Metering Infrastructure – AMI), συγχρονισμένοι φασιθέτες (synchronphasors) και παρακολούθηση video (video

surveillance). Οι απαιτήσεις των εφαρμογών αυτών σε καθυστέρηση (delay requirements) διαφέρουν αισθητά, καθώς κυμαίνονται από 8 ms έως 1s. Συνεπώς το δίκτυο είναι απαραίτητο να υποστηρίζει όλες τις υπηρεσίες με τις διαφορετικές απαιτήσεις σε καθυστέρηση, αποδίδοντας προτεραιότητα σε υπηρεσίες χαμηλής καθυστέρησης. Στον Πιν. 3.1 έχουν καταχωρηθεί οι απαιτήσεις σε καθυστέρηση για εφαρμογές του ευφυούς δικτύου και η προτεραιότητα που τους αποδίδεται.

Πίνακας 3.1 Απαιτήσεις σε καθυστέρηση και προτεραιότητα για SG εφαρμογές [13]:

Application	Delay allowance (minimum)	Priority	Application type
	ms	0-max 100-min	
Delay 10 ms			
(High speed) protection information*	8, 10	2	Protection (for 60 Hz, 50 Hz)
Load shedding for underfrequency	10	20	SCADA
10 ms Delay 20 ms			
Breaker reclosures*	16	15	Protection
Lockout functions*	16	12	Protection
Many transformer protection and control applications*	16	12	Protection
System protection (PMU)*	20	12	Protection
20 ms Delay 100 ms			
Synchrophasor measurements (class A)	60	10	(100 ms) synchrophasors
SCADA data poll response	100	25	SCADA—critical measurements
PTT signaling—critical	100	30	
PMU clock synchronization	100	20	Synchrophasors
100 ms Delay 250 ms			
VoIP bearer (inc. PTT)	175	50	Enterprise, mobile WF
VoIP signaling (inc. PTT—normal)	200	60	Enterprise, mobile WF
Dynamic line rating (DLR)	200	40	
Real-time video (mobile WF)	200	55	Mobile WF
On demand CCTV video	200	55	CCTV
Other SCADA operation	200	45	
Enterprise data—preferred	250	70	Enterprise, mobile WF
Most distribution and SCADA apps	250	65	SCADA
AMI—critical	250	40	AMI
250 ms Delay 1 s			

AMI—priority	300	70	AMI
CCTV stream—normal	400	75	
PMU (class C)	500	80	Synchrophasors
Some transformer protection and control applications	500	80	Protection
Enterprise data—other	500	80	Enterprise
1 s Delay			
Image files	1,000	90	SCADA
Fault recorders	1,000	90	SCADA
(Medium speed) monitoring and control information	1,000	90	SCADA
(Low speed) O and M information	1,000	90	SCADA
Fault isolation and service restoration	1,000	90	Protection
Distribution applications	1,000	90	
AMI—periodic measurements	1,000	85	AMI
Text strings	1,000	90	SCADA
Audio and video data streams	1,000	78	SCADA
Fault recorders	1,000	90	SCADA
Best effort, default	2,000	100	Many

AMI—Advanced metering infrastructure
CCTV—Closed circuit television
DLR—Dynamic line rating
SCADA—Supervisory control and data acquisition
max—Maximum
Internet Protocol
min— Minimum

PMU—Phasor measurement unit
PTT—Push-to-talk
VoIP—Voice over
WF—Workforce

Παρουσιάζει ενδιαφέρον το ότι οι απαιτήσεις σε καθυστέρηση της υπηρεσίας VoIP που θεωρούνται απαιτήσεις πολύ χαμηλής καθυστέρησης είναι 170 ms, ενώ υπάρχουν υπηρεσίες ευφυούς δικτύου με απαιτήσεις για χαμηλότερη καθυστέρηση. Παραδείγματα τέτοιων κρίσιμων υπηρεσιών είναι teleprotection(~10ms), synchrophasor(~60ms), SCADA(~100ms). Στον Πιν. 3.1 οι σχετικές προτεραιότητες των εφαρμογών του ευφυούς δικτύου που βαθμονομούνται σε κλίμακα από 0 έως 100 με το 0 να είναι η υψηλότερη προτεραιότητα και το 100 η χαμηλότερη. Σημειώνεται ότι οι τιμές προτεραιότητας στον Πίν. 3.1 για οποιοδήποτε ζεύγος εφαρμογών αποδίδουν μόνο τη σχετική προτεραιότητα της μιας ως προς την άλλη. Οι τιμές αυτές από μόνες τους δεν είναι αξιοποιήσιμες. Επιπλέον, μερικές από τις εφαρμογές ενδέχεται να απαιτούν

διαφορετικές προτεραιότητες υπό διαφορετικές συνθήκες που εξαρτώνται από τη χρήση των δεδομένων τους. Για παράδειγμα, η περιοδικές μετρήσεις έξυπνων μετρητών (smart meter measurements) για εφαρμογές AMI έχουν συνήθως χαμηλότερη προτεραιότητα. Όμως, οι μετρήσεις AMI μπορεί να απαιτούν υψηλότερη προτεραιότητα, όταν απαιτούνται σε εφαρμογές απαιτήσεων ζήτησης.

3.4 Διαφοροποιημένες Υπηρεσίες (Differentiated Services – DiffServ)

Καθώς έξι bits εκχωρούνται στην επικεφαλίδα IP για διαφοροποιημένες υπηρεσίες επιτρέποντας την κωδικοποιημένη υποστήριξη μέχρι 64 κωδικά σημεία διαφοροποιημένων υπηρεσιών (Differentiated Services Code points – DSCPs), πρέπει να είναι δυνατή η απόδοση ποιότητας υπηρεσίας διαφοροποιημένων υπηρεσιών (DiffServ QoS) για να υποστηρίξει τη μεγάλη διακύμανση στις απαιτήσεις των εφαρμογών ευφυούς δικτύου. Ωστόσο οι περισσότερες υλοποιήσεις δικτύων υποστηρίζουν μόνο τρεις ή τέσσερις κλάσεις. Έτσι, η κίνηση για πολλές εφαρμογές με διαφορετικές απαιτήσεις σε καθυστέρηση και προτεραιότητα αντιστοιχείται σε κάποια κλάση, και υφίσταται την ίδια μεταχείριση QoS αυτής της κλάσης που ανήκει. Σημειώνεται ότι καθώς το VoIP λαμβάνει την υψηλότερη προτεραιότητα στις περισσότερες υλοποιήσεις δικτύων, όταν υλοποιούνται εφαρμογές με προτεραιότητα υψηλότερη αυτής του VoIP κατατάσσονται στην ίδια κλάση και αντιμετωπίζονται ισότιμα με την εφαρμογή VoIP. Για παράδειγμα, εφαρμογές όπως teleprotection και synchrophasor, οι οποίες έχουν τόσο αυστηρές απαιτήσεις καθυστέρησης, θα λάβουν QoS μεταχείριση αυτήν που επιφυλάσσεται για τη VoIP, καίτοι η τελευταία έχει μια λιγότερο αυστηρή απαίτηση καθυστέρησης.

Ως εκ τούτου, εφαρμογή QoS που μεταφράζει ρεαλιστικά τις απαιτήσεις σε QoS με μια πολύ μεγάλη επιλογή τιμών DSCP κρίνεται απαραίτητη.

Ο Πιν. 3.2 είναι μια πρόταση της [13] για την ανάθεση των τιμών DSCP σε πολλές SG και άλλες εφαρμογές για DiffServ QoS στο ολοκληρωμένο δίκτυο IP για τα ευφυή δίκτυα.

Πίνακας 3.2 Τιμές DSCP για διάφορες SG εφαρμογές [13]

DSCP (octal)	DSCP (binary)	Proposed traffic class assignment	CSx (class selector)
77	111 111		
76	111 110		
75	111 101		
74	111 100		
73	111 011		
72	111 010		
71	111 001		
70	111 000	Network control (e.g., IP routing)	CS7
67	110 111	Teleprotection*	
66	110 110		
65	110 101		
64	110 100	PMU measurements (class A) synchrophasor*	
63	110 011		
62	110 010		
61	110 001		
60	110 000	Network control (e.g., IP routing)	CS6
57	101 111		
56	101 110	PTT signaling (critical)*	
55	101 101	SCADA data poll response*	
54	101 100	DLR*, AMI (critical)*	
53	101 011	EF VoIP	
52	101 010		
51	101 001		
50	101 000	Voice, video signaling (incl. PTT signaling—normal)*	CS5
47	100 111		
46	100 110	AF43 interactive video, on demand CCTV*	
45	100 101		
44	100 100	AF42, interactive video	
43	100 011	AMI	
42	100 010	AF41, interactive video	
41	100 001		
40	100 000	Video conferencing, gaming	CS4
37	011 111		
36	011 110	AF33, critical apps, streaming	
35	011 101		

34	011 100	AF32, critical apps, streaming	
33	011 011		
32	011 010	AF31, critical apps, streaming, CCTV normal*	
31	011 001		
30	011 000	Broadcast TV	CS3
27	010 111		
26	010 110	AF23, preferred (low latency) data	
25	010 101		
24	010 100	AF22, preferred (low latency) data	
23	010 011		
22	010 010	AF21, preferred (low latency) data	
21	010 001		
20	010 000	OA&M	CS2
17	001 111		
16	001 110	AF13, other (store and forward) data	
15	001 101	AMI (periodic measurements)*	
14	001 100	AF12, other (store and forward) data	
13	001 011		
12	001 010	AF11, other (store and forward) data	
11	001 001		
10	001 000	Scavenger, no BW assurance	CS1
07	000 111	Low priority smart grid operations data*	
06	000 110		
05	000 101		
04	000 100		
03	000 011		
02	000 010		
01	000 001		
00	000 000	BE, best effort, default	CS0

*Possible DSCP assignments for some of the smart grid applications—values not already proposed or assigned in standards and other documents. AF—Assured forwarding EF—Expedited

forwarding

AMI—Advanced metering infrastructure

Apps—Applications maintenance

BE—Best effort

BW—Bandwidth

CCTV—Closed circuit television

CSx—Class selector (x)

TV—Television DLR—Dynamic line rating

VoIP—Voice over IP

DSCP Differentiated services code point

IP—Internet Protocol

OA&M—Operations, administration, and

PMU—Phasor measurement unit

PTT—Push-to-talk

SCADA—Supervisory control and data acquisition

3.5 Παροχή εγγυημένης ποιότητας υπηρεσίας

Η παροχή εγγυημένης ποιότητας υπηρεσίας βασίζεται στις ακόλουθες τέσσερις αρχές [15].

Αρχή 1: Η κατηγοριοποίηση των πακέτων παρέχει στους δρομολογητές την δυνατότητα να ξεχωρίζουν τα πακέτα που ανήκουν σε υπηρεσίες κίνησης με διαφορετικές απαιτήσεις σε QoS.

Αρχή 2: Είναι επιθυμητό να παρέχεται απομόνωση μεταξύ διαφορετικών μορφών κίνησης, ώστε η κίνηση μιας εφαρμογής να μην επηρεάζεται αρνητικά από την κίνηση οποιασδήποτε άλλης προβληματικά συμπεριφερόμενης εφαρμογής.

Αρχή 3: Πέραν της απομόνωσης της κίνησης διαφορετικών εφαρμογών, είναι επιθυμητό να χρησιμοποιούνται όσο το δυνατό αποτελεσματικότερα οι διαθέσιμοι πόροι.

Αρχή 4: Όταν δεν είναι διαθέσιμοι επαρκείς πόροι και πρέπει να υπάρχει εγγύηση ποιότητας υπηρεσίας, απαιτείται μια διαδικασία αποδοχής κλήσεων (call admission control) με βάση την οποία οι ροές των διαφόρων υπηρεσιών δηλώνουν τις απαιτήσεις τους σε ποιότητα υπηρεσίας και στη συνέχεια, είτε γίνονται αποδεκτές στο δίκτυο (με το ζητούμενο επίπεδο ποιότητας υπηρεσίας), είτε αποκλείονται (εάν το δίκτυο δεν μπορεί να προσφέρει το ζητούμενο επίπεδο ποιότητας υπηρεσίας).

Η Αρχή 3 επιτυγχάνεται με δέσμευση πόρων (resource reservation)

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετώνται κυρίως οι Αρχές 3 και 2. Συγκεκριμένα στο Κεφ. 4 εξετάζεται ένα σχήμα δυναμικής κατανομής πόρων με χρήση διαστρωματικής σχεδίασης ως προς τον πλέον κρίσιμο παράγοντα ποιότητας υπηρεσίας, την χρονική καθυστέρηση μετάδοσης, ενώ στο Κεφ. 5 μελετάται ένα υβριδικό μοντέλο μηχανισμού προγραμματισμού ζεύξης με υλοποίηση αυστηρής προτεραιότητας ουράς για υπηρεσίες υψηλής προτεραιότητας και σταθμικά δίκαιης μεταχείρισης για τις υπόλοιπες.

Κεφάλαιο 4 ΣΧΗΜΑ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΠΟΡΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΔΙΑΣΤΡΩΜΑΤΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ

4.1 Εισαγωγή

Μία σημαντική πρόκληση των BB-PLC δικτύων είναι η παροχή αξιόπιστων υπηρεσιών ευφυούς δικτύου. Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο ο BB-PLC δίαυλος χαρακτηρίζεται από αρκετούς δυσμενείς παράγοντες, γεγονός που υποβαθμίζει σημαντικά την ποιότητα υπηρεσίας ορισμένων κόμβων του δικτύου. Παράλληλα η μεταβλητή ποιότητα διαφόρων BB-PLC συνδέσεων καθώς και η σύνθετη τοπολογία του δικτύου οδηγούν σε ανόμοια μεταχείριση των τερματικών χρηστών που εξυπηρετούνται από του κόμβους της κυψέλης BB-PLC (BB-PLC cell). Κατά συνέπεια, κρίνεται απαραίτητη η όσο το δυνατόν αποτελεσματικότερη χρησιμοποίηση των διαθέσιμων πόρων του δικτύου. Μια τέτοια προσπάθεια επιχειρείται στο [17].

Συγκεκριμένα στο [17] προτείνεται ένα σχήμα δυναμικής κατανομής πόρων, με χρήση διαστρωματικής σχεδίασης που αποσκοπεί στη μεγιστοποίηση της διέλευσης (throughput), προσφέροντας ταυτόχρονα εγγύηση συγκεκριμένου επιπέδου δικαιοσύνης για τις τελικές διατάξεις που εξυπηρετούνται από μια BB-PLC κυψέλη. Το προτεινόμενο σχήμα επιτυγχάνει τη βέλτιστη διαχείριση του ισοζυγίου μεταξύ διέλευσης και δικαιοσύνης σε ένα BB-PLC cell κατανέμοντας τους πόρους στο υποπίπεδο MAC βασιζόμενο σε μετρήσεις που χαρακτηρίζουν την ποιότητα του φυσικού στρώματος του BB-PLC δικτύου.

Το πρότυπο 1901 προτείνει δύο σχήματα επιπέδου MAC, τα οποία αναλύονται στο Κεφ. 2. Για την υλοποίηση του σχήματος που προτείνεται στο [17] χρησιμοποιείται το σχήμα TDMA που αποτελεί μία μέθοδο πολλαπλής πρόσβασης που εξασφαλίζει εγγυημένη πρόσβαση στο μέσο σε αντίθεση με το CSMA που αποτελεί μια μέθοδο βέλτιστης προσπάθειας (best effort). Για την υλοποίηση του δυναμικού TDMA μελετάται ένα token based πρωτόκολλο στο οποίο ένας κόμβος BB-PLC έχει τη δυνατότητα να μεταδώσει σε γειτονικούς κόμβους επί όσο χρόνο διατηρεί το token. Ο μέγιστος χρόνος κατά τον οποίο ένας κόμβος μπορεί να διατηρήσει το token ορίζεται ως THT (Token Holding Time). Ως εκ τούτου, αυτό που επιχειρείται είναι ο προσδιορισμός των βέλτιστων τιμών των χρόνων THT με στόχο την κατανομή των πόρων έτσι ώστε να βελτιστοποιείται η αθροιστική διέλευση των συνδέσεων υπό ορισμένο δείκτη δικαιοσύνης .

Λαμβάνοντας υπόψη ότι σε κάθε δίκτυο πρόσβασης η ανάγκη για πόρους μεταφράζεται σε ανάγκη για εύρος ζώνης το συγκεκριμένο πρωτόκολλο διαθέτει σε κάθε κόμβο ένα συγκεκριμένο χρόνο για μετάδοση THT που αντιστοιχεί στο ποσοστό εύρους ζώνης που αναθέτει ο HE στον κόμβο.

4.2 Διατύπωση του προβλήματος βελτιστοποίησης των THT

Η ανάλυση που ακολουθεί έχει πραγματοποιηθεί στο [17]. Χρησιμοποιείται ένα πλήθος PLC ζεύξεων, μέσω των οποίων διέρχεται η TCP κίνηση των προς εξυπηρέτηση 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. Επομένως, το μέγεθος που λαμβάνεται υπόψη είναι η TCP διέλευση το μέτρο της οποίας δίδεται από τη σχέση 4.1.

$$\tau_j = \min \left\{ \frac{1}{RTT} \sqrt{3/(2bPLRj)}, B_j \right\} \quad \{4.1\}$$

όπου $RTT = \sum_{k=1}^N THT_k$ είναι η χρονική διάρκεια που μεσολαβεί από την αποστολή ενός πακέτου μέχρι τη λήψη της επιβεβαίωσης αποστολής (round trip time),
 b ο αριθμός των τεμαχίων TCP που αναγνωρίζονται από κάθε επιβεβαίωση αποστολής,
 PLR_j ο λόγος απώλειας πακέτων που λαμβάνονται από τον κόμβο j
 Και B_j το εύρος ζώνης που διανέμεται σε μια τερματική συσκευή που εξυπηρετείται από τον κόμβο j.

Η διέλευση εξαρτάται από 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.

Οι βέλτιστες τιμές των **ΤΗΤ** 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

$$\max \left\{ g(T_N, TH_{T_N}) = \sum_{j=1}^N M_j \tau_j(T_N, TH_{T_N}) \right\} \quad \{4.2\}$$

Υπό του περιορισμούς

$$\sum_{j=0}^N TH_{T_j} = TCT = RTT \quad \{4.3\}$$

$$TH_{T_j} \geq 0 \quad \forall j=0,1,\dots,N \quad \{4.4\}$$

Όπου M_j οι τερματικές συσκευές που εξυπηρετούνται από τον κόμβο j και $T_N = (T_1, T_2, \dots, T_N)$ το διάνυσμα των κανονικοποιημένων ρυθμών μετάδοσης που υποστηρίζονται από τις συνδέσεις.

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):

$$\mathcal{J}(x_1, x_2, \dots, x_n) = \frac{(\sum_{i=1}^n x_i)^2}{n \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2} \quad \{4.5\}$$

Εξίσωση Raj Jain's:

Μετρά τη δικαιοσύνη ενός συνόλου n χρηστών, με x_i τη διέλευση για την i ζεύξη. Ο δείκτης J κυμαίνεται από $1/n$ (worst case) μέχρι 1 (best case) και λαμβάνει τη μέγιστη τιμή του για ομοιόμορφη κατανομή του x_i στους n χρήστες. Ο δείκτης λαμβάνει την τιμή k/n όταν οι πόροι διαμοιράζονται εξίσου στους k χρήστες και οι υπόλοιποι $n - k$ χρήστες δεν διανέμονται πόρους.

Η μεγιστοποίηση δίνεται από τη σχέση

$$\max \left\{ f(T_N, TH T_N) = \frac{(|\sum_{j=1}^N M_j \tau_j(T_N, TH T_N)|)^2}{(\sum_{j=1}^N M_j) \sum_{j=1}^N (M_j \tau_j(T_N, TH T_N))^2} \right\}, \quad \tau_j \geq 0 \quad \{4.6\}$$

Υπό τους περιορισμούς {4.3} και {4.4}

Η ανάλυση που ακολουθεί στο υπόλοιπο του κεφαλαίου διαφοροποιείται από την εργασία [17]. Συγκεκριμένα, λαμβάνοντας υπόψη τις τιμές των TH T που έχουν προκύψει από την εργασία [17] για τους διάφορους τύπους κυψελών και τα διάφορα επίπεδα δικαιοσύνης, μελετάται η καθυστέρηση μετάδοσης της TCP κίνησης που επιτυγχάνεται. Η διαφοροποίηση αυτή πραγματοποιείται με γνώμονα το ότι η καθυστέρηση αποτελεί τον πλέον κρίσιμο δείκτη για την ποιότητα μιας SG υπηρεσίας, όπως άλλωστε προκύπτει και από το Κεφ. 3.

Για το υπολογισμό της καθυστέρησης της TCP κίνησης χρησιμοποιείται το μέτρο του TCP segment delay. Αυτό ορίζεται ως η χρονική καθυστέρηση του TCP τεμαχίου σε κάποιο κόμβο. Υπολογίζεται από τη στιγμή που στέλνεται ένα τεμάχιο TCP από το επίπεδο μεταφοράς της πηγής TCP κίνησης, μέχρι το τεμάχιο TCP να ληφθεί από το επίπεδο μεταφοράς του προορισμού της TCP κίνησης.

4.3 Προσομοιώσεις - Αποτελέσματα

Για την εφαρμογή των σεναρίων και την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων θεωρήθηκαν 4 διαφορετικοί τύποι κυψελών χαρακτηριστικοί αστικών και αγροτικών δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας. Οι BB-PLC ζεύξεις κατηγοριοποιήθηκαν με βάση τα επίπεδα SNR που μετρήθηκαν σε υπάρχοντα BB-PLC δίκτυα. Ο ρυθμός μετάδοσης (R_j) σε κάθε ζεύξη βελτιστοποιήθηκε στο [17] εφαρμόζοντας (adaptive coding and modulation – ACM) στο φυσικό στρώμα υπό τον περιορισμό ότι το ποσοστό απώλειας πακέτων (packet loss ratio) πρέπει να είναι κάτω του 1%.

Τα BB-PLC cells που θεωρήθηκαν αποτελούνται από 6 κόμβους συμπεριλαμβανομένου του HE.

		LINK	R (Mbps)	BER
RURAL CASE	CT1	link(1)	40.9	3.E-09
		link(2)	7.7	2.E-18
		link(3)	34.0	1.E-08
		link(4)	38.2	2.E-08
		link(5)	26.4	3.E-11
	CT2	link(1)	40.9	3.E-09
		link(2)	34.0	1.E-08
		link(3)	38.2	2.E-08
		link(4)	7.7	2.E-18
		link(5)	26.4	3.E-11
	CT4	link(1)	40.9	3.E-09
		link(2)	34.0	2.E-18
		link(3)	27.0	2.E-10
		link(4)	38.2	2.E-08
		link(5)	26.4	3.E-11
URBAN CASE	CT3	link(1)	40.9	3.E-09
		link(2)	7.7	2.E-18
		link(3)	38.2	2.E-08
		link(4)	17.2	2.E-06
		link(5)	26.4	3.E-11

Σχήμα 4.1: Δομή αντιπροσωπευτικών τύπων κυψελών[1]

Οι τέσσερις αντιπροσωπευτικοί τύποι κυψελών (Cell Types – CTs), των οποίων η δομή παρουσιάζεται στο Σχ. 4.1, 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.

Πρέπει να σημειωθεί ότι η κυψέλη τύπου CT2 που εξετάζεται στις προσομοιώσεις αποτελεί μια πραγματική BPL κυψέλη που συναντάται στο δίκτυο της Λάρισας [18], ενώ τα υπόλοιπα είδη κυψελών είναι υποθετικά.

Στόχος των προσομοιώσεων που διενεργούνται στο παρών κεφάλαιο και χρησιμοποιούν τις προαναφερθείσες κυψέλες είναι η ανάδειξη της αποτελεσματικότητας του σχήματος κατανομής πόρων που προτείνεται στο [17] ως προς τη διαχείριση του ισοζυγίου μεταξύ της δικαιοσύνης ως προς την κατανομή πόρων στους διάφορους κόμβους και της χρονικής καθυστέρησης μετάδοσης των PLC διαύλων.

Για την προσομοίωση των σεναρίων χρησιμοποιήθηκε ο προσομοιωτής OPNET. Συγκεκριμένα εξετάζεται η επίδραση της ποιότητας των ζεύξεων στην καθυστέρηση μετάδοσης της TCP κίνησης, μελετώντας την επίδραση της θέσης της στενωπού εντός μιας κυψέλης. Η κίνηση που χρησιμοποιείται για της ανάγκες της προσομοίωσης είναι μια TCP κίνηση μεγάλου φορτίου που οδηγεί το δίκτυο στα όρια λειτουργίας του και ως μέτρο της χρονικής καθυστέρησης μετάδοσης χρησιμοποιείται το average TCP segment Delay. Τέλος, οι προτεινόμενοι χρόνοι THT για τα διάφορα επίπεδα δικαιοσύνης που εξετάζονται έχουν ληφθεί από την εργασία [17]

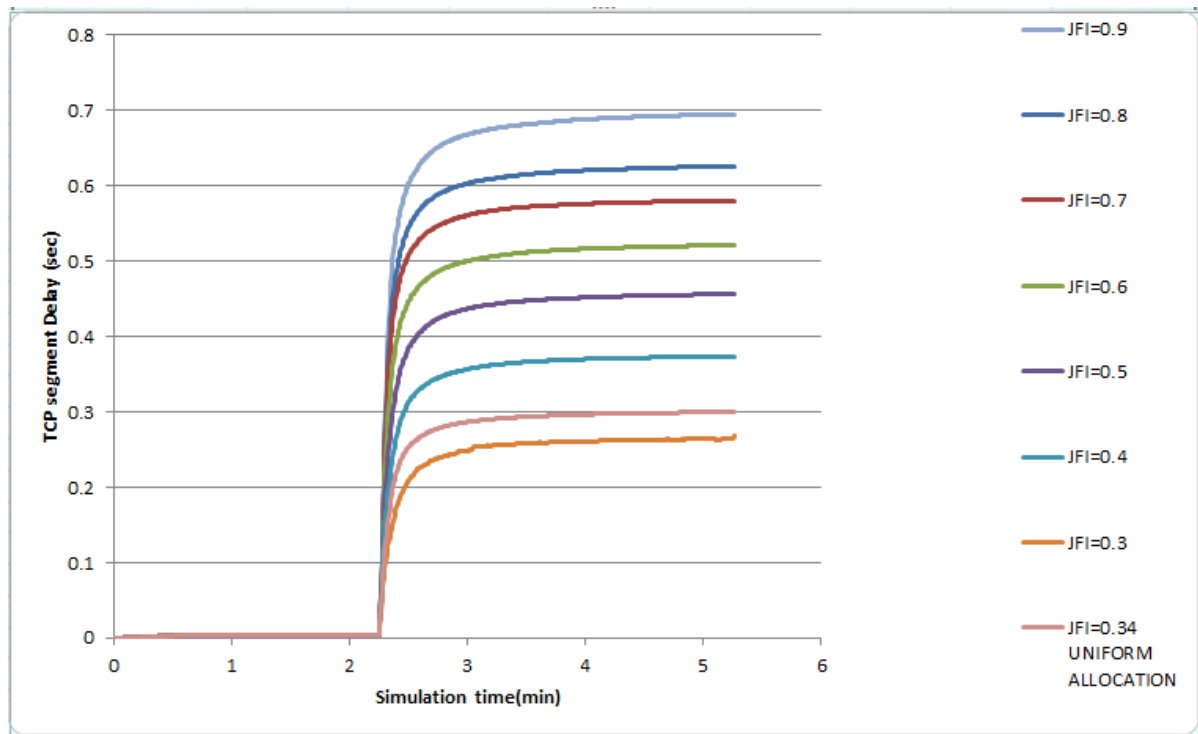
4.3.1 Κυψέλη τύπου CT1

Στο Σχ. 4.2 παρουσιάζονται οι βέλτιστοι χρόνοι THT για τις διάφορες τιμές του επιπέδου δικαιοσύνης (JFI), σε κυψέλη τύπου CT1. Από τα μεγέθη γίνεται αντιληπτό ότι η ομοιόμορφη κατανομή των THT οδηγεί σε άνιση μεταχείριση των κόμβων που οδηγεί σε δείκτη ισοτιμίας $JFI=0.34$. Η ζεύξη 2 αποτελεί τη ζεύξη στενωπό

	JFI_{\min}	THT_1	THT_2	THT_3	THT_4	THT_5
CT1 Η ζεύξη link(2) αποτελεί τη ζεύξη στενωπό	1	0.01	0.01	30.61	1.28	18.10
	0.9	8.83	31.95	4.45	3.04	1.73
	0.8	9.73	32.03	4.22	2.67	1.35
	0.7	10.54	33.35	4.04	2.02	0.40
	0.6	12.04	32.23	3.64	1.73	0.36
	0.5	13.74	31.99	3.17	1.10	0.00
	0.4	16.83	30.50	2.35	0.32	0.00
	0.3	23.42	25.64	0.94	0.00	0.00
Ομοιόμορφη κατανομή THT	0.34	10	10	10	10	10

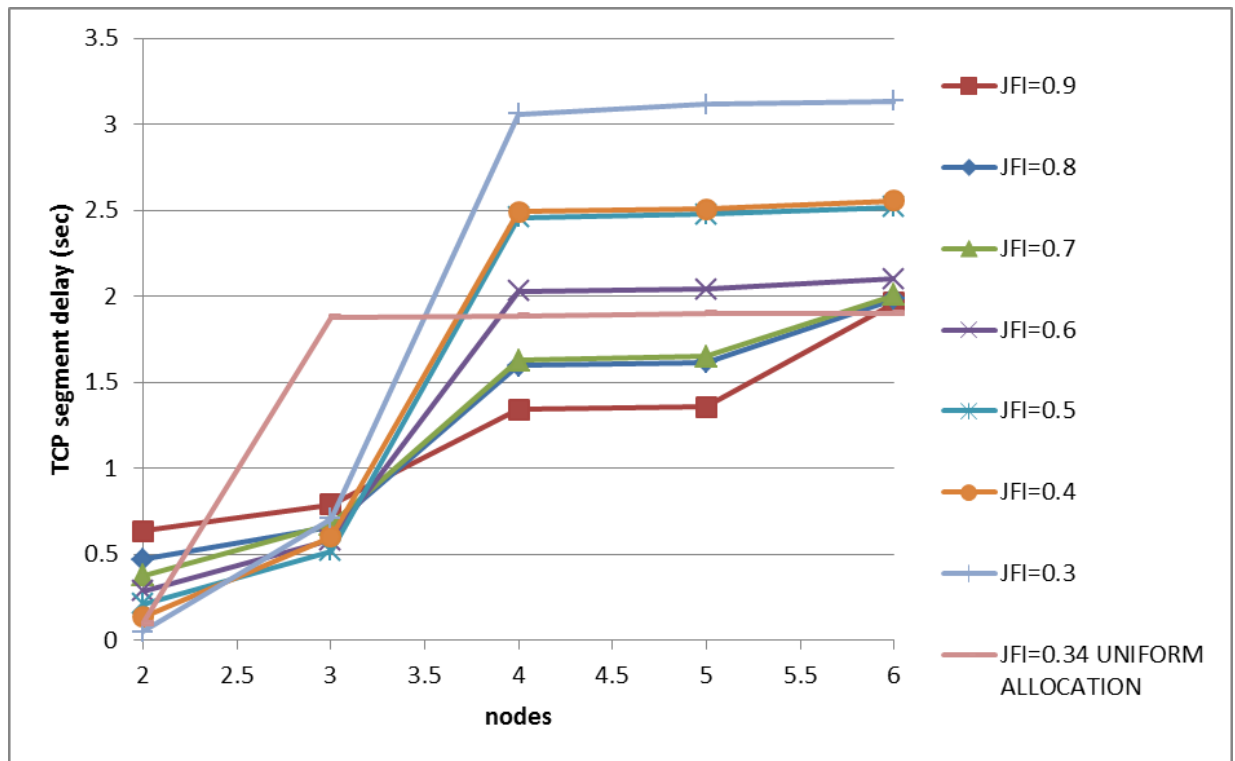
Σχήμα 4.2: Βέλτιστοι χρόνοι THT για διάφορες τιμές του JFI σε κυψέλη τύπου CT1 [1]

Στο Σχ. 4.3 απεικονίζεται η μέση συνολική καθυστέρηση της κίνησης που εφαρμόζεται στις κυψέλες τύπου CT1 για διάφορες τιμές του δείκτη ισοτιμίας JFI όπως και την περίπτωση όπου δεν εφαρμόζεται σχήμα βελτιστοποίησης, δηλαδή στην περίπτωση σταθερής κατανομής των THT. Ως μέση συνολική καθυστέρηση ορίζουμε το μέσο όρο της χρονικής καθυστέρησης όλων των TCP τεμαχίων που παράγονται στο δίκτυο που στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι μια BB-PLC κυψέλη. Το βασικό συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι όσο αυξάνεται η τιμή του δείκτη ισοτιμίας JFI, δηλαδή όσο δικαιότερα κατανέμονται οι πόροι στους κόμβους της κυψέλης, τόσο αυξάνεται η μέση συνολική καθυστέρηση της κίνησης. Αντίθετα, χαμηλές τιμές μέσης συνολικής καθυστέρησης, το οποίο άλλωστε είναι επιθυμητό, επιτυγχάνονται υπό χαμηλές τιμές ισοτιμίας.



Σχήμα 4.3: Μέση συνολική καθυστέρηση της κίνησης σε κυψέλες τύπου CT1

Το Σχ. 4.4 απεικονίζει την χρονική καθυστέρηση τεμαχίου που επιτυγχάνεται σε κάθε κόμβο της κυψέλης τύπου CT1 για διάφορες τιμές του δείκτη ισοτιμίας. Συγκεκριμένα μετριέται η χρονική καθυστέρηση των τεμαχίων που αποστέλλουν ή δέχονται οι τερματικές συσκευές σε κάθε κόμβο. Η χρονική καθυστέρηση κάθε κόμβου είναι ουσιαστικά η χρονική καθυστέρηση των τεμαχίων των τερματικών συσκευών που εξυπηρετούνται από τον κόμβο. Από το Σχ. 4.4 γίνεται αντιληπτή η σημασία της θέσης της ζεύξης στενωπού σε μια BB-PLC κυψέλη για την χρονική καθυστέρηση της κίνησης σε κάθε κόμβο. Συγκεκριμένα, η ύπαρξη ζεύξης στενωπού στην αρχή μιας κυψέλης, κοντά στον HE, επηρεάζει αρνητικά τους κόμβους που έπονται της ζεύξης στενωπού. Το ανωτέρω συμπέρασμα προκύπτει διαπιστώνοντας ότι η καθυστέρηση της κίνησης που εξυπηρετεί τον κόμβο 2 είναι αρκετά χαμηλότερη συγκρινόμενη με την καθυστέρηση της κίνησης των κόμβων που έπονται της ζεύξης στενωπού. Παρατηρείται δηλαδή μια αρκετά μεγάλη αύξηση της χρονικής καθυστέρησης στους κόμβους που έπονται της ζεύξης στενωπού γεγονός που διαπιστώνεται από τη μεγάλη κλίση στις καμπύλες του σχήματος μεταξύ των κόμβων 3 και 4.



Σχήμα 4.4: Καθυστέρηση σε κάθε κόμβο της κυψέλης τύπου CT1

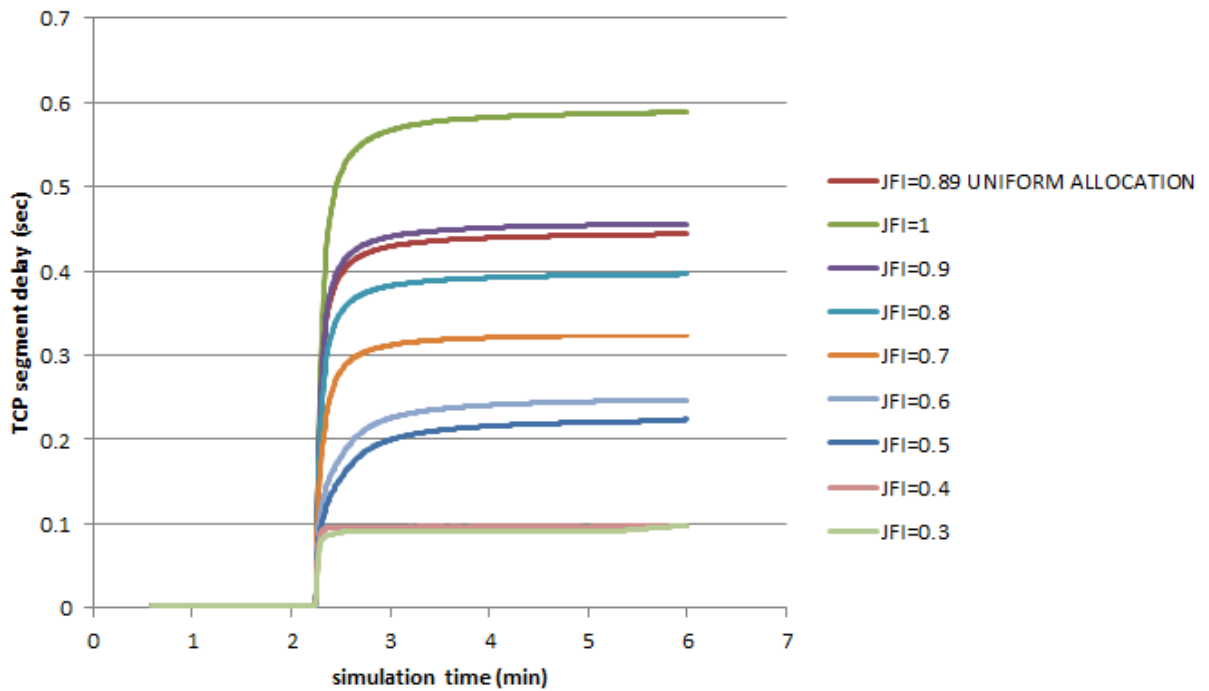
4.3.2 Κυψέλη τύπου CT2

Στο Σχ.4.5 παρουσιάζονται οι βέλτιστοι χρόνοι ΤΗΤ για τις διάφορες τιμές του επιπέδου δικαιοσύνης (JFI) σε κυψέλες τύπου CT2. Στην περίπτωση αυτή η ζεύξη στενωπός βρίσκεται στη προτελευταία ζεύξη της κυψέλης (ζεύξη 4), γεγονός που προσφέρει σαφώς ευνοϊκότερες συνθήκες μετάδοσης, καθώς η κακή ζεύξη επηρεάζει μόνο τους κόμβους 5 και 6. Το προαναφερθέν συμπέρασμα επιβεβαιώνεται από το ότι, στην περίπτωση κυψελών CT2, η ομοιόμορφη κατανομή πόρων επιτυγχάνει σαφώς υψηλότερο δείκτη ισοτιμίας $JFI=0.89$.

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

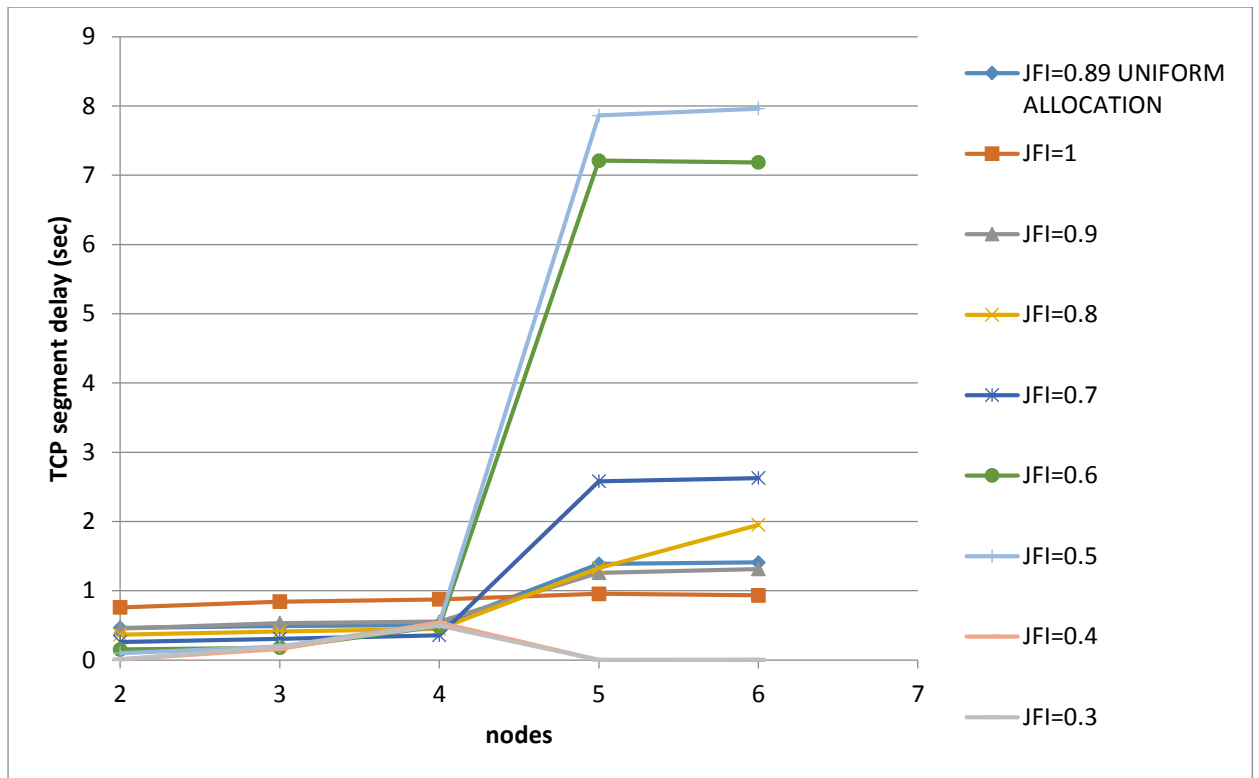
Σχήμα 4.5: Βέλτιστοι χρόνοι ΤΗΤ για διάφορες τιμές του JFI σε κυψέλη τύπου CT2 [1]

Στο Σχ. 4.6 απεικονίζεται η μέση συνολική καθυστέρηση της κίνησης για διάφορες τιμές ισοτιμίας σε κυψέλες τύπου CT2. Εκ νέου παρατηρείται ότι χαμηλότερες τιμές καθυστέρησης επιτυγχάνονται υπό χαμηλότερους δείκτες ισοτιμίας. Η διαφορά από τον προηγούμενο τύπο κυψέλης έγκειται στο ότι με τον ίδιο δείκτη ισοτιμίας JFI μπορούν να επιτευχθούν αρκετά χαμηλότερες τιμές καθυστέρησης. Για παράδειγμα, θεωρώντας την περίπτωση JFI=0.6, στην κυψέλη τύπου CT1 η συνολική καθυστέρηση είναι λίγο μεγαλύτερη από 0.5 sec, ενώ στην κυψέλη τύπου CT2 η τιμή της καθυστέρησης υποδιπλασιάζεται.



Σχήμα 4.6: Συνολική καθυστέρηση της κίνησης σε κυψέλες τύπου CT2

Το Σχ. 4.7 απεικονίζει την καθυστέρηση που επιτυγχάνεται σε κάθε κόμβο μιας κυψέλης τύπου CT2 για διάφορες τιμές του δείκτη ισοτιμίας. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, είναι σαφώς ομαλότερη η διακύμανση των τιμών της καθυστέρησης ανά κόμβο. Μεγάλες διαφοροποιήσεις εμφανίζονται στις περιπτώσεις όπου το JFI είναι μικρότερο του 0.6. Αυτό συμβαίνει καθώς όπως φαίνεται από το Σχ. 4.7 στους κόμβους παρέχονται ελάχιστες ή μηδενικές δυνατότητες μετάδοσης με αποτέλεσμα να έχουν πολύ υψηλές τιμές καθυστέρησης ή και να μη μεταδίδουν καθόλου.



Σχήμα 4.7: Καθυστερήση σε κάθε κόμβο της κυψέλης τύπου CT2

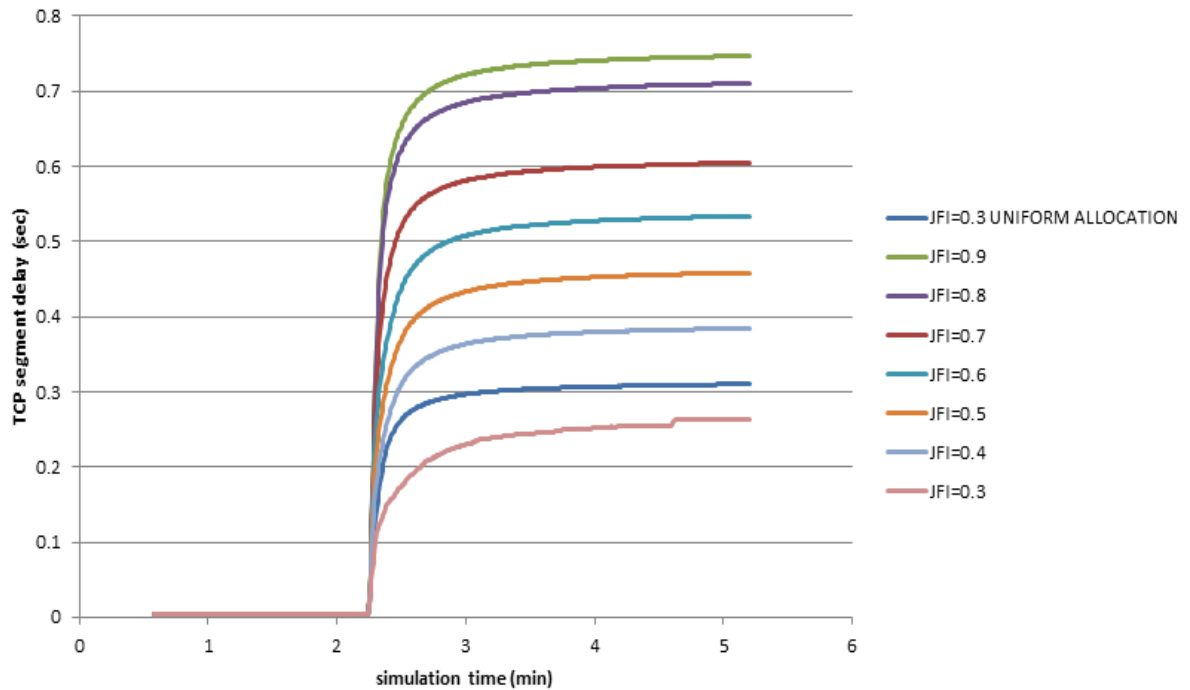
4.3.3 Κυψέλη τύπου CT3

Στο Σχ. 4.8 παρουσιάζονται οι βέλτιστοι χρόνοι ΤΗΤ για διάφορες τιμές του δείκτη ισοτιμίας (JFI), σε κυψέλες τύπου CT3. Οι κυψέλες CT3 αποτελούν χαρακτηριστική περίπτωση BB-PLC κυψελών σε αστική περιοχή. Στη συγκεκριμένη περίπτωση ζεύξη στενωπό αποτελεί τόσο η ζεύξη 2 όσο και η ζεύξη 4. Η ομοιόμορφη κατανομή των ΤΗΤ οδηγεί σε ιδιαίτερα άδικη κατανομή πόρων που οδηγεί σε δείκτη ισοτιμίας JFI=0.3.

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

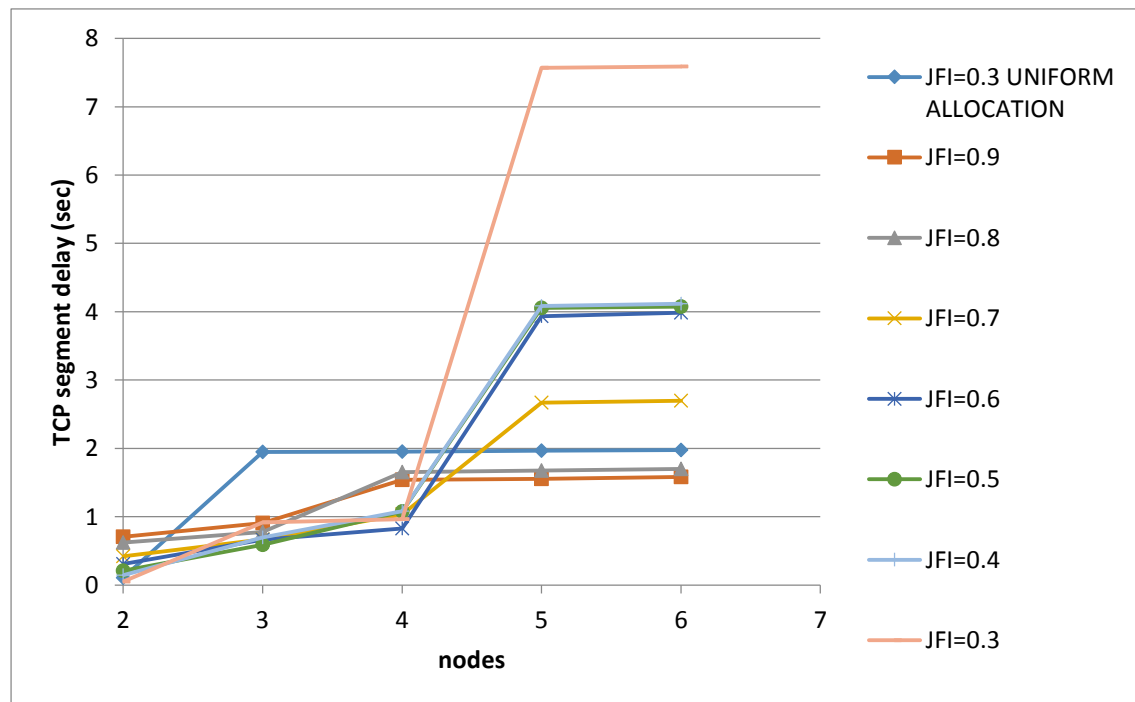
Σχήμα 4.8: Βέλτιστοι χρόνοι THT για διάφορες τιμές του JFI σε κυψέλη τύπου CT3 [1]

Το Σχ. 4.9 παρουσιάζει τη συνολική καθυστέρηση της κίνησης για διάφορες τιμές του δείκτη ισοτιμίας σε κυψέλες τύπου CT3. Παρατηρείται ότι τα επίπεδα καθυστέρησης σε αυτό τον τύπο κυψελών είναι υψηλότερα σε σχέση με τους προηγούμενους τύπους κυψελών.



Σχήμα 4.9: Συνολική καθυστέρηση της κίνησης σε κυψέλες τύπου CT3

Τέλος, το Σχ. 4.10 απεικονίζει την καθυστέρηση που επιτυγχάνεται σε κάθε κόμβο της κυψέλης τύπου CT3 για διάφορες τιμές του δείκτη ισοτιμίας. Η διακύμανση της καθυστέρησης στους κόμβους είναι αρκετά υψηλή όπως τα επίπεδα καθυστέρησης επίσης.



Σχήμα 4.10: Καθυστέρηση σε κάθε κόμβο της κυψέλης τύπου CT3

4.4 Γενικά Συμπεράσματα.

- Η ύπαρξη ζεύξεων σε μια κυψέλη με δυσμενείς συνθήκες μετάδοσης επιδρά αρνητικά στην χρονική καθυστέρηση μετάδοσης της κίνησης των υπολοίπων κόμβων, ιδιαιτέρως αυτών που έπονται της ζεύξης. Οι κυψέλες όπου οι κακές ζεύξεις βρίσκονται προς το τέλος της κυψέλης εμφανίζουν σαφώς μικρότερες τιμές καθυστέρησης σε σχέση με τους τύπους κυψελών όπου η ζεύξη στενωπός εμφανίζεται στην αρχή της κυψέλης.
- Η τιμή των ΤΗΤ μειώνεται όσο αυξάνει το πλήθος των αλμάτων από τον ΗΕ. Η συμπεριφορά αυτή είναι αναμενόμενη, αφού οι κόμβοι που βρίσκονται πλησιέστερα προς τον ΗΕ είναι επιφορτισμένοι με τη μεταφορά των πακέτων που προορίζονται για τους κόμβους που έπονται σε μια PLC κυψέλη . Με τον τρόπο αυτό μειώνεται η μέση συνολική καθυστέρηση κίνησης στην κυψέλη.
- Η ομοιόμορφη κατανομή των ΤΗΤ δεν αποτελεί αποτελεσματική μέθοδο κατανομής πόρων σε μια BB-PLC κυψέλη. Ακόμα και στην περίπτωση όπου η κακή ζεύξη βρίσκεται στο τέλος της κυψέλης και η ομοιόμορφη κατανομή ΤΗΤ δεν επιτυγχάνει τα επίπεδα καθυστέρησης που μπορεί να πετύχει η προσαρμοστική κατανομή ΤΗΤ.
- 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. Με τον τρόπο αυτό οι κυψέλες και κατ' επέκταση τα BB-PLC δίκτυα μπορούν να υποστηρίξουν χαμηλότερες τιμές χρονικής καθυστέρησης της κίνησης του δικτύου που είναι επιθυμητό στα σύγχρονα PLC δίκτυα

Κεφάλαιο 5 ΕΞΑΣΦΑΛΙΣΗ QoS ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΥΒΡΙΔΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΤΟ ΥΠΟΕΠΙΠΕΔΟ MAC

5.1 Περιγραφή του προτεινόμενου μοντέλου

Στο Κεφ. 4 προτάθηκε ένα σχήμα δυναμικής κατανομής πόρων με στόχο τη βέλτιστη αξιοποίηση των πόρων του δικτύου και την παροχή εγγυημένης ποιότητας υπηρεσίας στους κόμβους μιας BB-PLC κυψέλης. Εντούτοις, η ανάλυση που έγινε δεν είναι πλήρης καθώς θεωρήθηκε ότι ένα μόνο είδος TCP κίνησης υποστηρίζεται από τους κόμβους.

Στα ευφυή δίκτυα, διαφορετικοί τύποι κίνησης με διαφορετικές απαιτήσεις εξυπηρετούνται από το δίκτυο όπως εφαρμογές ευφυούς δικτύου αλλά και ευρυζωνικές εφαρμογές. Λεπτομερής περιγραφή παρουσιάζεται στο Κεφ. 3 της διπλωματικής. Είναι λοιπόν φανερό ότι οι κόμβοι εξυπηρετούν πολλαπλές εφαρμογές, έκαστη των οποίων έχει συγκεκριμένες απαιτήσεις σε ποιότητα υπηρεσίας. Για την εξασφάλιση της ποιότητας υπηρεσίας των εφαρμογών αυτών στο Κεφ. 5 προτείνεται ένας υβριδικός μηχανισμός προγραμματισμού του υποεπιπέδου MAC για τις επικοινωνίες του ευφυούς δικτύου.

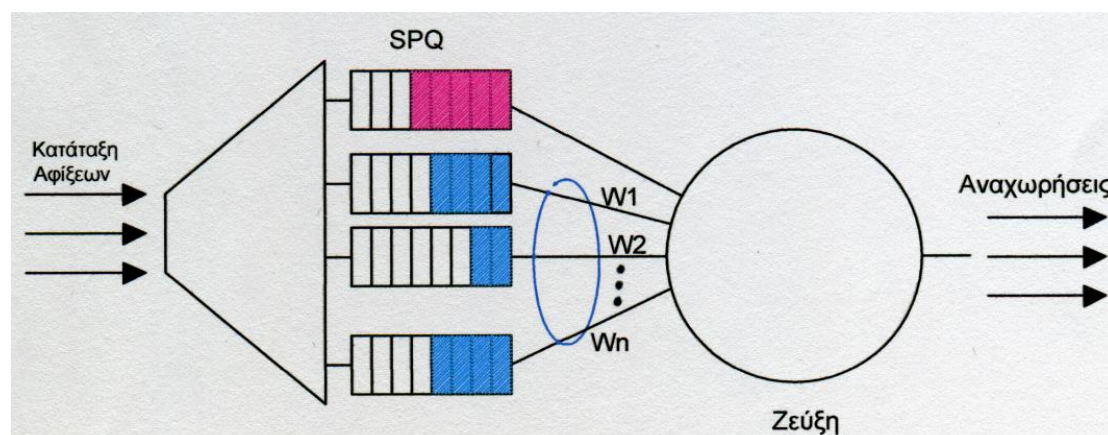
Συγκεκριμένα χρησιμοποιείται ένα σχήμα TDMA δυναμικής εκχώρησης εύρους ζώνης για πρόσβαση στο μέσο. Ο χρονοπρογραμματισμός ρυθμίζεται ανάλογα με την ποιότητα των ζεύξεων δεδομένου του επιθυμητού επιπέδου δικαιοσύνης μεταξύ των κόμβων όπως αναλύθηκε στο Κεφ. 4. Οι κόμβοι της BB-PLC κυψέλης λειτουργούν χωρίς ανταγωνισμό μεταξύ τους καθώς σε κάθε κόμβο εκχωρείται συγκεκριμένος χρόνος μετάδοσης και συνεπώς συγκεκριμένο ποσοστό του διαθέσιμου εύρους ζώνης. Καθώς κάθε κόμβος εξυπηρετεί πολλαπλές εφαρμογές, οι εφαρμογές αυτές ανταγωνίζονται μεταξύ τους για το εύρος ζώνης που εκχωρείται από τον HE σε κάθε κόμβο. Κρίνεται συνεπώς αναγκαία μια πολιτική διαχείρισης των εφαρμογών σε κάθε κόμβο ανάλογα με τις απαιτήσεις τους από ποιότητα υπηρεσίας.

Καθώς διαφορετικές κλάσεις κίνησης σε εφαρμογές ευφυούς δικτύου χαρακτηρίζονται από διαφορετικές απαιτήσεις σε ποιότητα υπηρεσίας, για την υλοποίηση του μοντέλου χρησιμοποιείται το μοντέλο διαφοροποιημένων υπηρεσιών. Στο προτεινόμενο μοντέλο οι εισερχόμενες κινήσεις κατηγοριοποιούνται σε 7 διαφορετικές κλάσεις με κριτήριο τις απαιτήσεις τους σε καθυστέρηση. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιείται ο DSCP (Differentiated Services Code Point) ενδείκτης. Τα πακέτα κάθε υπηρεσίας φθάνουν στους ενταμιευτές εξόδου των ζεύξεων και ανάλογα με το δείκτη DSCP, επιλέγεται ο τρόπος που η ουρά αναμονής θα διαχειριστεί τη μετάδοση κάθε πακέτου στη ζεύξη. Ο τρόπος με τον οποίο επιλέγονται από την ουρά αναμονής τα πακέτα για μετάδοση μέσω της PLC ζεύξης αναφέρεται ως μέθοδος προγραμματισμού της ζεύξης (link scheduling discipline).

Η μέθοδος προγραμματισμού που χρησιμοποιείται στο προτεινόμενο μοντέλο είναι μια υβριδική μέθοδος στην οποία χρησιμοποιείται αυστηρή προτεραιότητα ουράς (strict priority queuing – SPQ) για κίνηση υψηλής προτεραιότητας και σταθμικά δίκαιη μεταχείριση (weighted fair queuing – WFQ) για τις υπόλοιπες κατηγορίες κίνησης.

Με βάση τη λειτουργία SPQ, εφόσον υπάρχει πακέτο στην SPQ και η ζεύξη εξόδου είναι διαθέσιμη για μετάδοση, το πακέτο στην κορυφή της SPQ μεταδίδεται άμεσα. Ο δρομολογητής επιτρέπει τη μετάδοση άλλων ουρών μόνον εφόσον η SPQ είναι εντελώς άδεια.

Με βάση τη λειτουργία WFQ τα πακέτα που φθάνουν στην ουρά εξόδου της ζεύξης ταξινομούνται σε κατηγορίες και τοποθετούνται στην κατάλληλη για κάθε κατηγορία περιοχή αναμονής. Ένας μηχανισμός προγραμματισμού WFQ εξυπηρετεί τις κατηγορίες πακέτων με κυκλικό τρόπο – πρώτα την κατηγορία 1, κατόπιν την κατηγορία 2, και μετά συνεχίζει κατά τον ίδιο τρόπο. Επειδή η WFQ είναι μια αποτελεσματική μέθοδος, εφόσον βρει άδεια την ουρά αναμονής μιας κατηγορίας, προχωρεί αμέσως στην επόμενη κατηγορία της σειράς. Στην WFQ, κάθε κατηγορία μπορεί να λαμβάνει ένα διαφορετικό ποσοστό του εύρους ζώνης σε οποιοδήποτε χρονικό διάστημα. Συγκεκριμένα, σε κάθε κατηγορία i αποδίδεται αντίστοιχο ειδικό βάρος, w_i . Σύμφωνα με τη μέθοδο WFQ, σε οποιοδήποτε χρονικό διάστημα κατά τη διάρκεια του οποίου υπάρχουν πακέτα της κατηγορίας i προς αποστολή, η μέθοδος εγγυάται ότι η κατηγορία αυτή θα λαμβάνει ένα κλάσμα της υπηρεσίας ίσο με $w_i/(\sum w_i)$, όπου το άθροισμα στον παρονομαστή συνυπολογίζει όλες τις κατηγορίες που διαθέτουν πακέτα για μετάδοση. Στη χειρότερη περίπτωση, ακόμα και αν υπάρχουν πακέτα προς μετάδοση σε όλες τις κατηγορίες, για την κατηγορία i θα είναι και πάλι εγγυημένο ότι θα λάβει ένα κλάσμα του εύρους ζώνης ίσο με $w_i/(\sum w_i)$. Έτσι, για μία ζεύξη με ταχύτητα μετάδοσης R , η κατηγορία i θα επιτυγχάνει πάντα ταχύτητα μετάδοσης ίση ή μεγαλύτερη από $R * w_i/(\sum w_i)$. Μια σχηματική περιγραφή της μεθόδου προγραμματισμού που προτείνεται φαίνεται στο Σχ. 5.1.



Σχήμα 5.1: Σχηματική απεικόνιση της προτεινόμενης μεθόδου προγραμματισμού ζεύξης

5.2 Κατηγοριοποίηση των SG εφαρμογών

Οι SG εφαρμογές μπορούν να κατηγοριοποιηθούν βάσει 3 παραμέτρων: καθυστέρηση, εύρος ζώνης και απώλεια πακέτων. Στον Πιν. 5.1 φαίνονται οι κατηγορίες κίνησης που χρησιμοποιούνται για την επαλήθευση του προτεινόμενου μοντέλου και τα χαρακτηριστικά τους.

κλάση κίνησης	είδος υπηρεσίας	μέγεθος πακέτου(bytes)	ρυθμός μετάδοσης
κλάση 1	teleprotection	64	5πακέτα/sec
κλάση 2	PMU	53	20πακέτα/sec
κλάση 3	Remote control	64	50πακέτα/sec
κλάση 4	VoIP	PCM quality Speech G.711 codec	
κλάση 5	Real-time Video	High resolution video	
κλάση 6	SCADA	64	10πακέτα/sec
κλάση 7	best effort	HTTP browsing	

Πίνακας 5.1: Χαρακτηριστικά κατηγοριών κίνησης που εξετάζονται

Teleprotection: τηλεπροστασία

PMU: μονάδα μέτρησης φασιθετών (phasor measurement unit)

Remote control: απομακρυσμένος έλεγχος

VoIP: υπηρεσία φωνής που μεταφέρεται με τεχνολογία IP

Real time Video: υπηρεσία βίντεο πραγματικού χρόνου

Best effort: υπηρεσία βέλτιστης προσπάθειας

High resolution video: βίντεο υψηλής ανάλυσης

HTTP browsing: πλοήγηση με πρωτόκολλο εφαρμογής HTTP

Όπως φαίνεται και από τον Πιν. 5.1 στην κλάση 1 κατατάσσεται υψηλής προτεραιότητας υπηρεσία πραγματικού χρόνου όπως είναι η τηλεπροστασία, ενώ στην κλάση 2 κατατάσσονται οι υπηρεσίες φασιθέτη συγχρονισμού (PMU). Η κλάση 3 αναφέρεται σε υπηρεσίες απομακρυσμένου ελέγχου και η κλάση 4 σε υπηρεσίες φωνής. Η κλάση 5 έχει αποδοθεί σε υπηρεσίες βίντεο πραγματικού χρόνου όπως οι κάμερες παρακολούθησης, ενώ η κλάση 6 σε υπηρεσίες μετρήσεων δεδομένων. Τέλος, ευρυζωνικές υπηρεσίες πρόσβασης όπως και υπηρεσίες βέλτιστης προσπάθειας καταχωρούνται στην κλάση 7. Αξίζει να σημειωθεί ότι η τηλεπροστασία είναι υπηρεσία απλού βήματος(one-hop) οπότε μεταδίδεται μόνο μεταξύ δύο κόμβων. Στον Πίν. 5.2 φαίνονται οι κλάσεις υπηρεσιών, η ανοχή τους σε καθυστέρηση, η προτεραιότητά τους και ο ενδείκτης DSCP που τους εκχωρείται.

κλάση υπηρεσίας	περιθώριο καθυστέρησης (ms)	προτεραιότητα(0-max, 100 min)	DSCP(octal)
1	10	2	67
2	20	12	64
3	100	30	60
4	175	50	53
5	200	55	46
6	200	65	36
7	2000	100	0

Πίνακας 5.2: Περιθώριο καθυστέρησης, προτεραιότητα και DSCP των κλάσεων υπηρεσίας που εξετάζονται.

5.3 Προσομοιώσεις – Αποτελέσματα

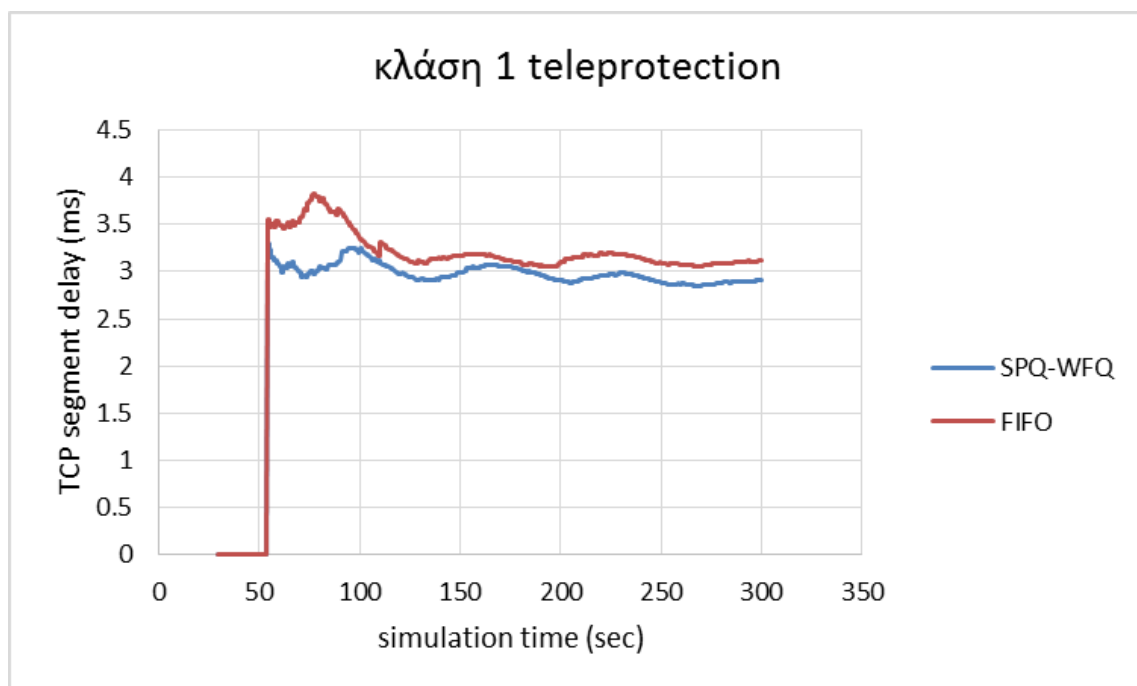
Για την προσομοίωση του προτεινόμενου μοντέλου χρησιμοποιείται η πλατφόρμα του OPNET. Συγκεκριμένα σε μια BB-PLC κυψέλη τύπου CT2 μελετάται η καθυστέρηση των κλάσεων υπηρεσιών τόσο χρησιμοποιώντας τον προτεινόμενο προγραμματισμό ζεύξης όσο και χωρίς. Ο λόγος που μελετάται η κυψέλη τύπου CT2 είναι το ότι αποτελεί μια πραγματική κυψέλη του πιλοτικού δικτύου στη Λάρισα[18] και το ότι οι συνθήκες μετάδοσης, όταν η ζεύξη στενωπός βρίσκεται στο τέλος, είναι ευνοϊκότερες. Το γεγονός ότι επιλέγεται η μελέτη μιας κυψέλης δεν μειώνει την αποτελεσματικότητα του προτεινόμενου μοντέλου σε μεγαλύτερο εύρος κυψελών καθώς, όπως αναφέρεται στο Κεφ. 4, κατά το σχεδιασμό ενός PLC δικτύου είναι δυνατή η επιλογή κυψελών ώστε οι κακές ζεύξεις να βρίσκονται προς το τέλος της κυψέλης.

Η πλήρης περιγραφή του υβριδικού μοντέλου που χρησιμοποιείται φαίνεται στον Πιν. 5.3:

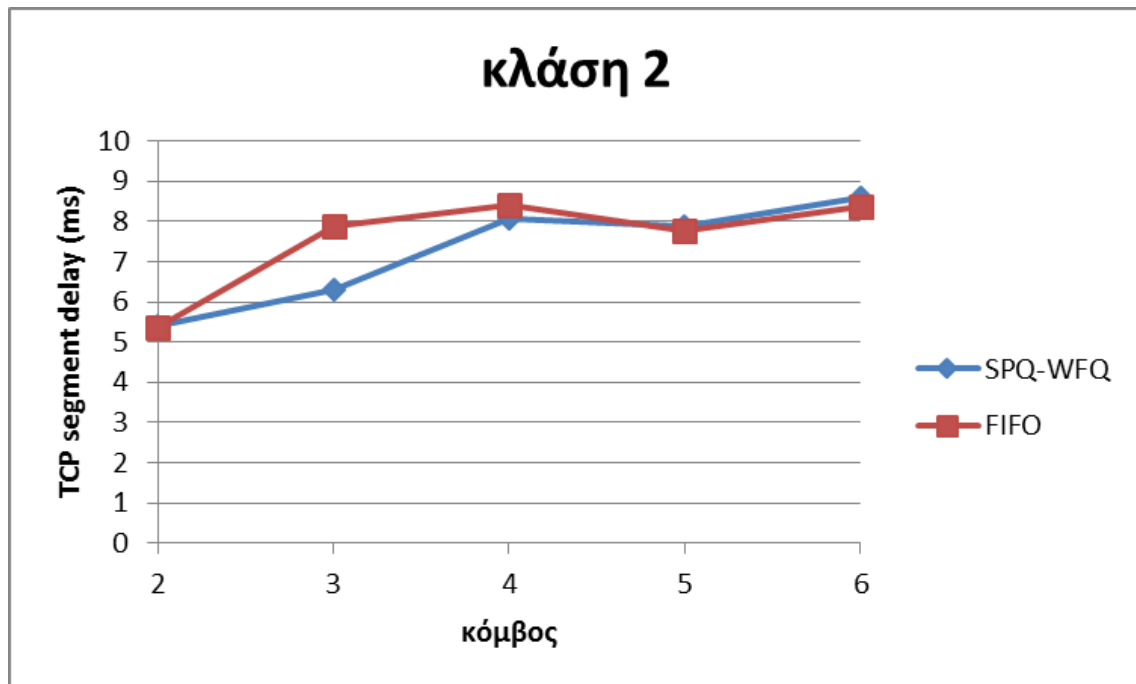
χρονοπρογραμματισμός TDMA		δείκτης δικαιοσύνης	μέθοδος προγραμματισμού ζεύξης	
THT1 (ms)	18.53		JFI=0.7	κλάση υπηρεσίας
THT2 (ms)	14.90	1,2		SPQ
THT3 (ms)	7.14	3		35
THT4 (ms)	8.95	4		30
THT5 (ms)	2.00	5		20
		6		10
		7		5

Πίνακας 5.3: Ποσοτική περιγραφή του υβριδικού μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε

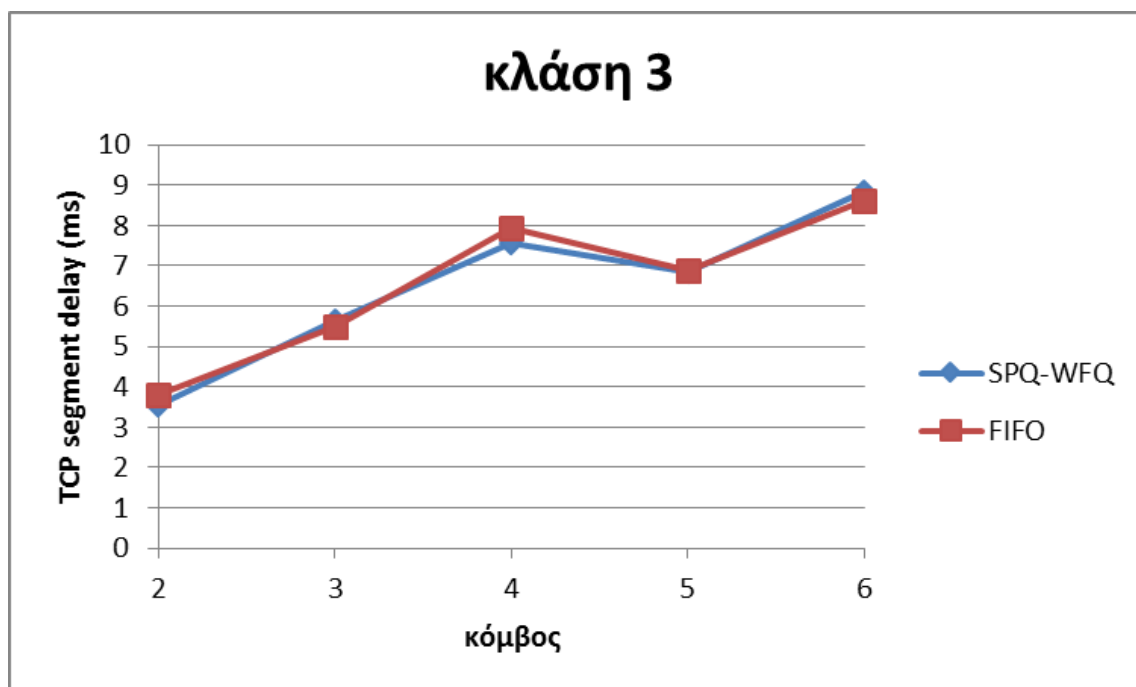
Στα Σχ. 5.2-5.8 έχουν σχεδιαστεί τα αποτελέσματα που αφορούν την καθυστέρηση των υπηρεσιών σε μια BB-PLC κυψέλη. Στην κυψέλη αυτή κάθε κόμβος ικανοποιεί ένα χρήστη από κάθε κλάση υπηρεσίας. Ως μέτρο της καθυστέρησης χρησιμοποιήθηκε το μέγεθος της καθυστέρησης ενός TCP τεμαχίου (TCP segment delay) για τις υπηρεσίες που χρησιμοποιούν πρωτόκολλο μεταφοράς TCP και η από άκρο σε άκρο καθυστέρηση της εφαρμογής (end-to-end delay) για τις υπηρεσίες φωνής και βίντεο που χρησιμοποιούν το πρωτόκολλο μεταφοράς UDP. Η καθυστέρηση του TCP τεμαχίου ταυτίζεται με την καθυστέρηση της εφαρμογής, καθώς τα πακέτα στο επίπεδο εφαρμογής των υπηρεσιών που εξετάζονται είναι μικρότερα σε μέγεθος του ωφέλιμου φορτίου (payload) του TCP τεμαχίου. Ως εκ τούτου ένα πλήρες πακέτο της εφαρμογής αποστέλλεται μέσω ενός τεμαχίου TCP. Για την αξιολόγηση του προτεινόμενου μοντέλου πραγματοποιείται μια σύγκριση σεναρίων. Στο πρώτο σενάριο υλοποιήθηκε η προτεινόμενη μέθοδος προγραμματισμού ζεύξης ενώ στο δεύτερο δεν χρησιμοποιείται μέθοδος προγραμματισμού, δηλαδή τα πακέτα μπαίνουν στην ουρά αναμονής με βάση το χρόνο άφιξης στον ενταμιευτή του δρομολογητή (first in first out – FIFO). Όλα τα σχήματα απεικονίζουν τη μέγιστη χρονική καθυστέρηση των κλάσεων σε κάθε κόμβο. Μοναδική εξαίρεση αποτελεί η κλάση 1 που υποστηρίζει την απλού βήματος υπηρεσία της τηλεπροστασίας, η καθυστέρηση της οποίας απεικονίζεται καθόλη τη διάρκεια της προσομοίωσης.



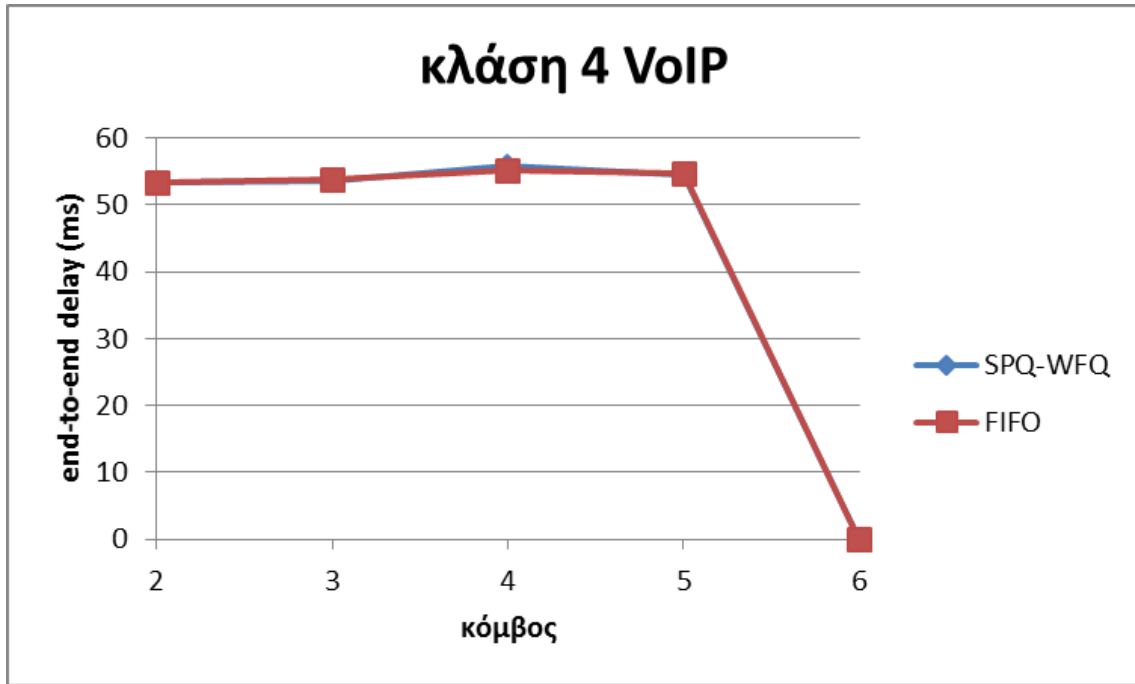
Σχήμα 5.2: Καθυστέρηση κλάσης 1



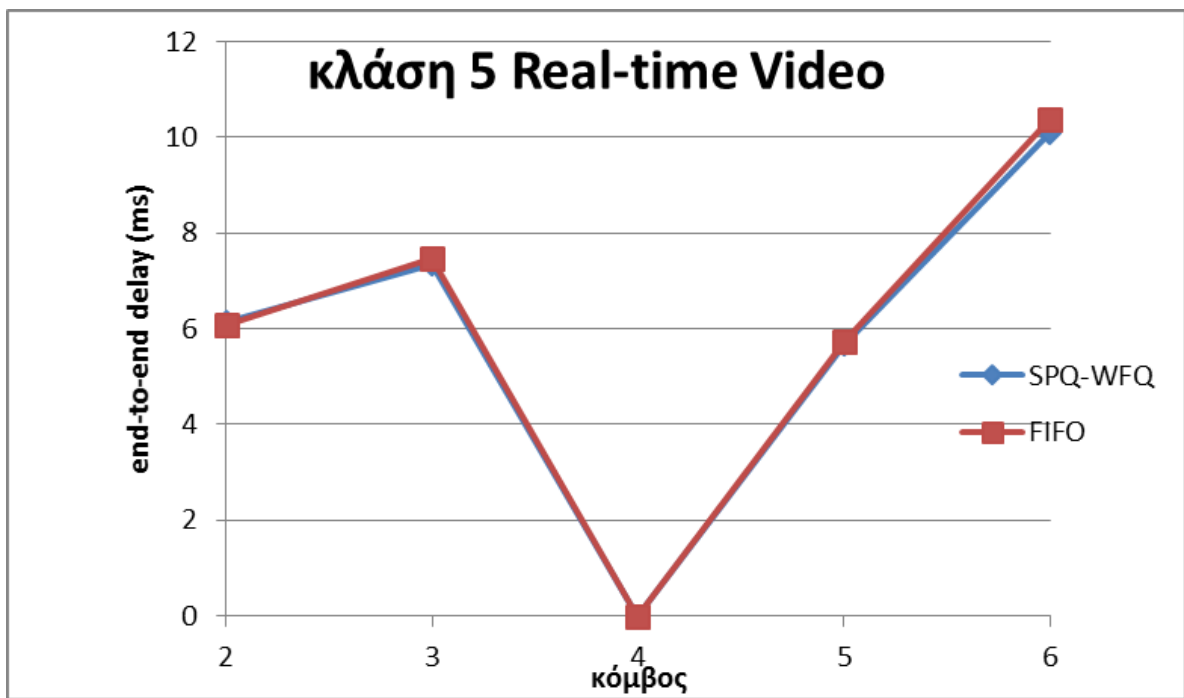
Σχήμα 5.3: Καθυστερήση κλάσης 2



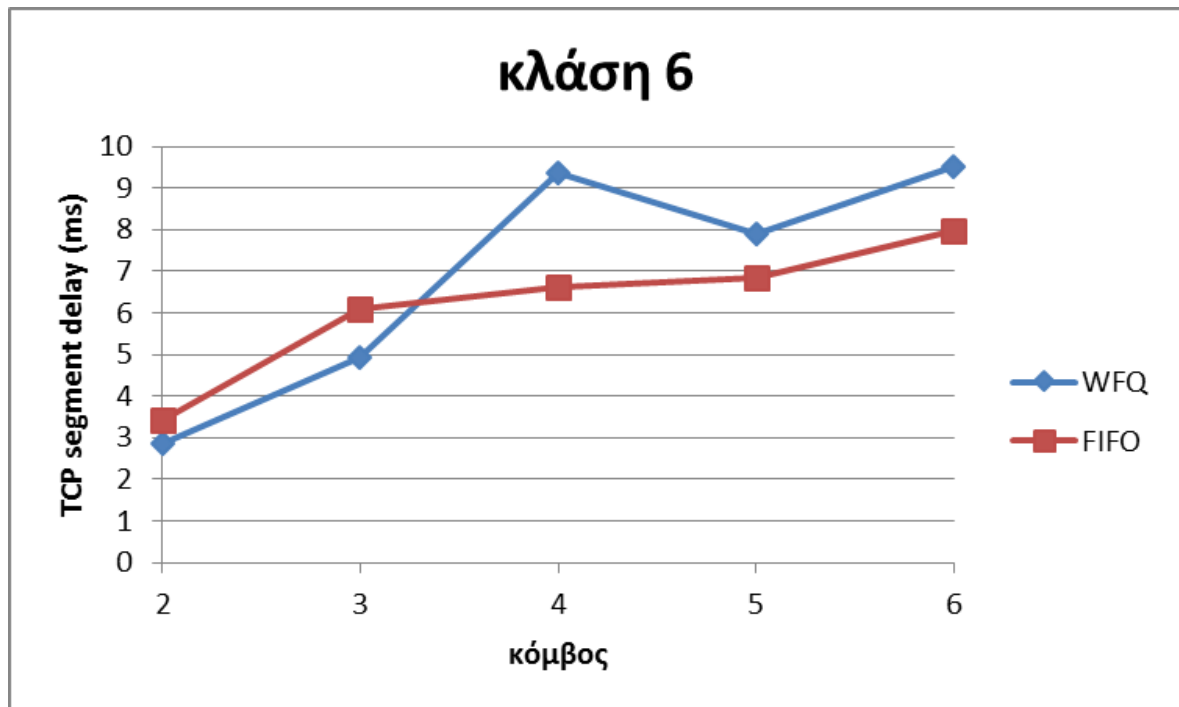
Σχήμα 5.4: Καθυστερήση κλάσης 3



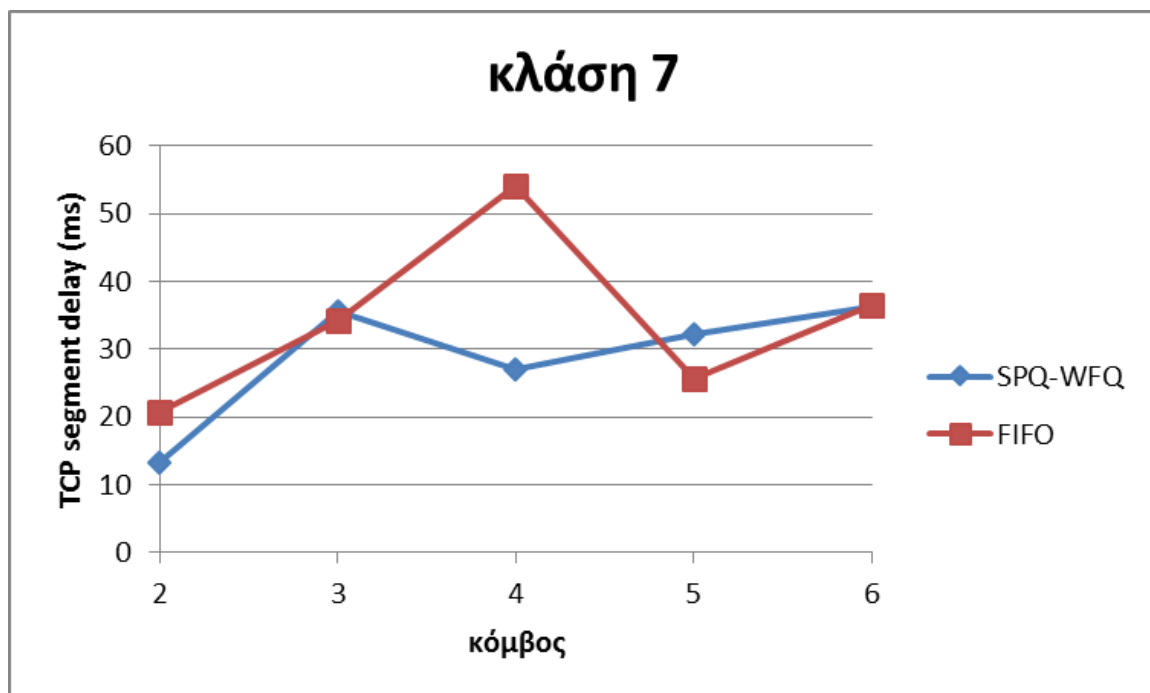
Σχήμα 5.5: Καθυστέρηση κλάσης 4



Σχήμα 5.6: Καθυστέρηση κλάσης 5



Σχήμα 5.7: Καθυστερήση κλάσης 6



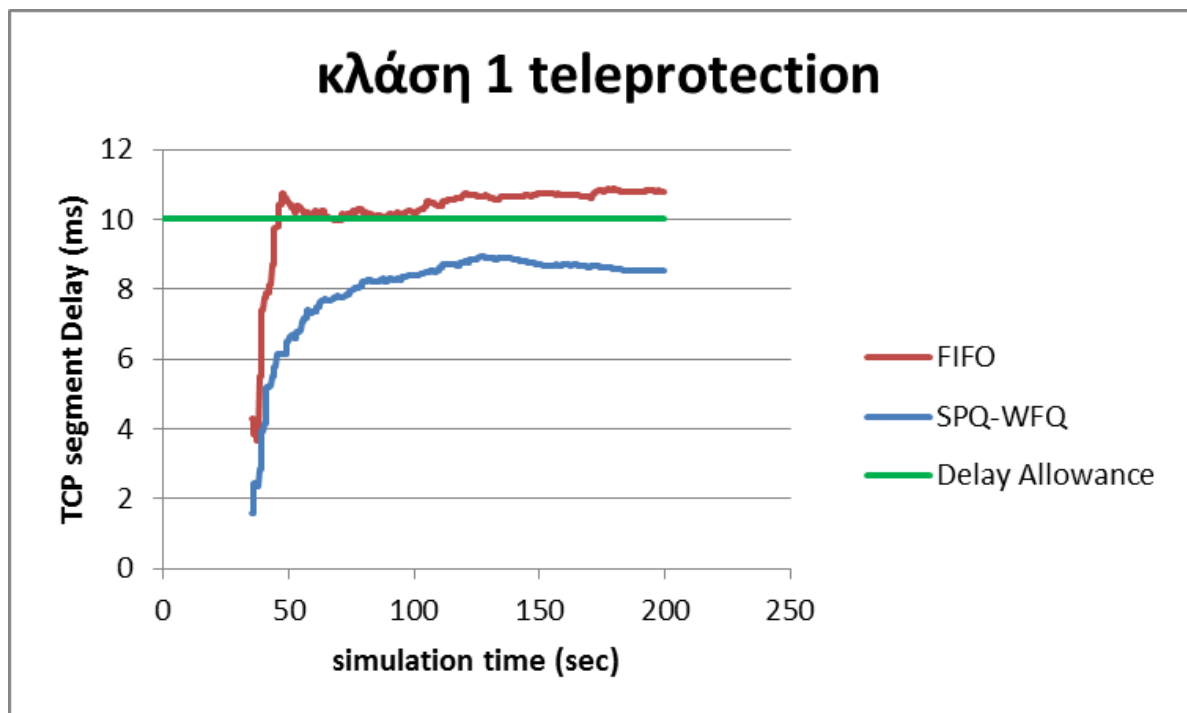
Σχήμα 5.6: Καθυστερήση κλάσης 7

Παρατηρήσεις

- Στα ανωτέρω γραφήματα παρατηρείται ότι οι καθυστερήσεις όλων των υπηρεσιών είναι πολύ χαμηλότερες από τα επιτρεπόμενα όρια.

- Με την εφαρμογή του προτεινόμενου μοντέλου παρατηρείται μια μικρή βελτίωση στην καθυστέρηση των κλάσεων υπηρεσιών υψηλής προτεραιότητας, καθυστέρηση περίπου ίση και στα δυο σενάρια στις κλάσεις μέσης προτεραιότητας. Στις κλάσεις χαμηλής προτεραιότητας παρατηρείται αύξηση της καθυστέρησης με τη χρήση του προτεινόμενου μοντέλου, εντός όμως των επιτρεπόμενων ορίων.
- Στη κλάση 7 μέγιστης προσπάθειας παρατηρείται ότι η καθυστέρηση της υπηρεσίας βελτιώνεται με τη χρήση του προτεινόμενου μοντέλου. Κάτι τέτοιο είναι σαφώς εικονικό καθώς ο όγκος της κίνησης μειώνεται σε σχέση με τον όγκο της κίνησης που εξυπηρετεί η FIFO περίπτωση.

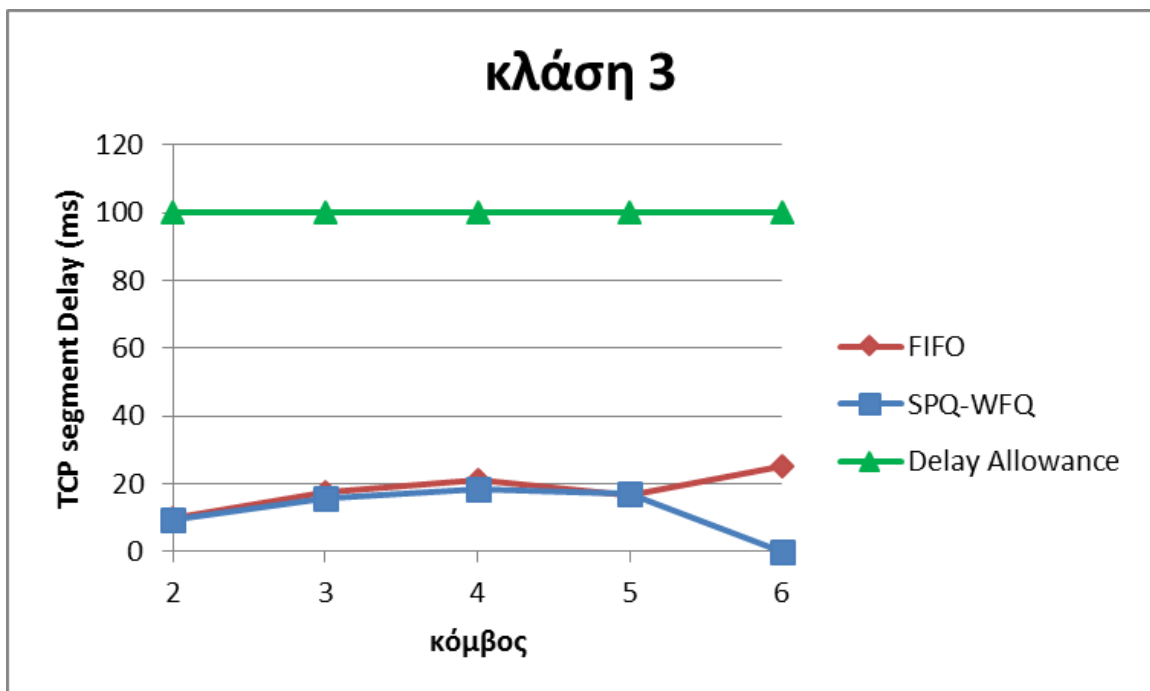
Μια πρώτη προσέγγιση για την αξιολόγηση του προτεινόμενου μοντέλου πραγματοποιείται με την προσομοίωση των ανωτέρω σεναρίων SPQ-WFQ και FIFO. Εντούτοις δεν μπορούν να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα καθώς και στα δύο σενάρια ικανοποιούνται οι απαιτήσεις όλων των υπηρεσιών σε ποιότητα υπηρεσίας ως προς την καθυστέρηση. Για την εξαγωγή ασφαλέστερων συμπερασμάτων θα ήταν προτιμότερο κάποια από τις υπηρεσίες να μην ικανοποιείται από την BB-PLC κυψέλη όσο αφορά τις απαιτήσεις της σε καθυστέρηση. Για το σκοπό αυτό, σε κάθε κόμβο αυξάνονται οι χρήστες των υπηρεσιών φωνής, βίντεο και μετρήσεων δεδομένων και καταστρώνονται δύο νέα σενάρια SPQ-WFQ και FIFO. Ως delay allowance ορίζεται το περιθώριο κάθε κλάσης υπηρεσίας σε καθυστέρηση. Τα αποτελέσματα των συγκεκριμένων σεναρίων φαίνονται στα Σχ. 5.9-5.15.



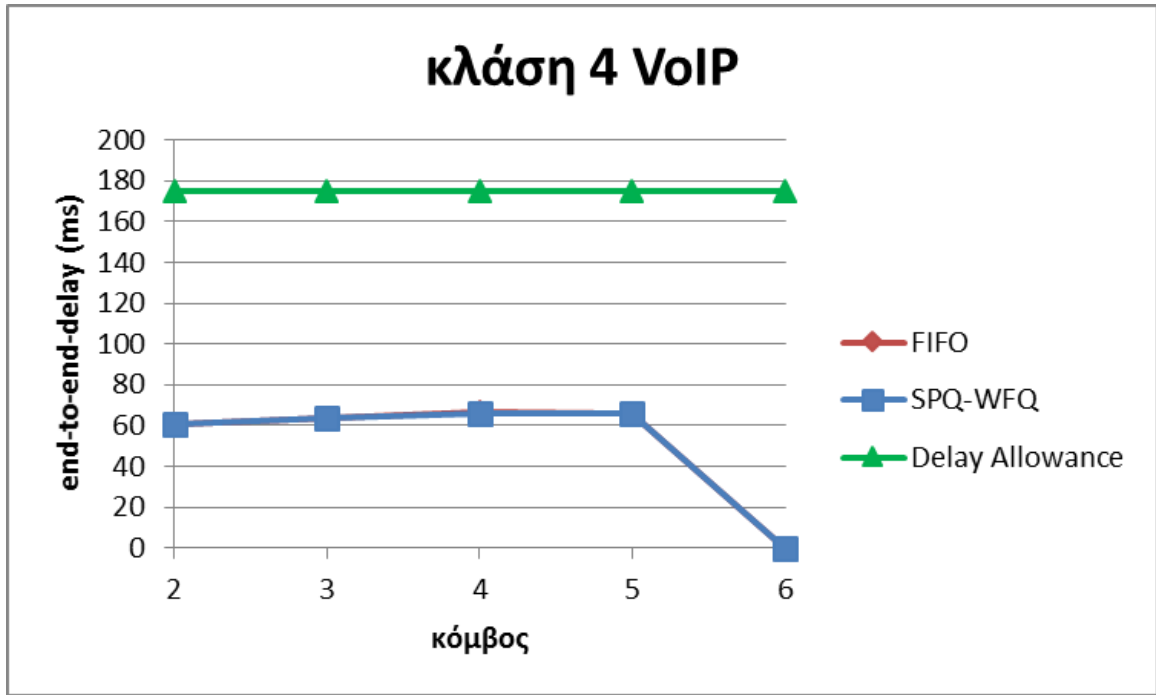
Σχήμα 5.9: Καθυστέρηση κλάσης 1



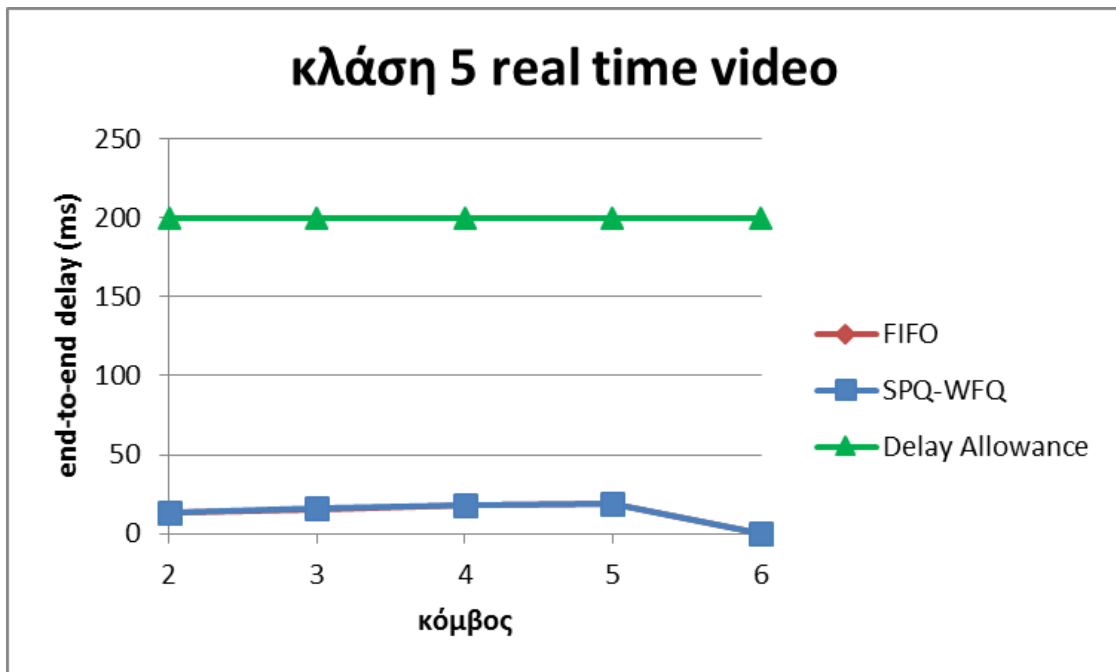
Σχήμα 5.10: Καθυστερήση κλάσης 2



Σχήμα 5.11: Καθυστερήση κλάσης 3



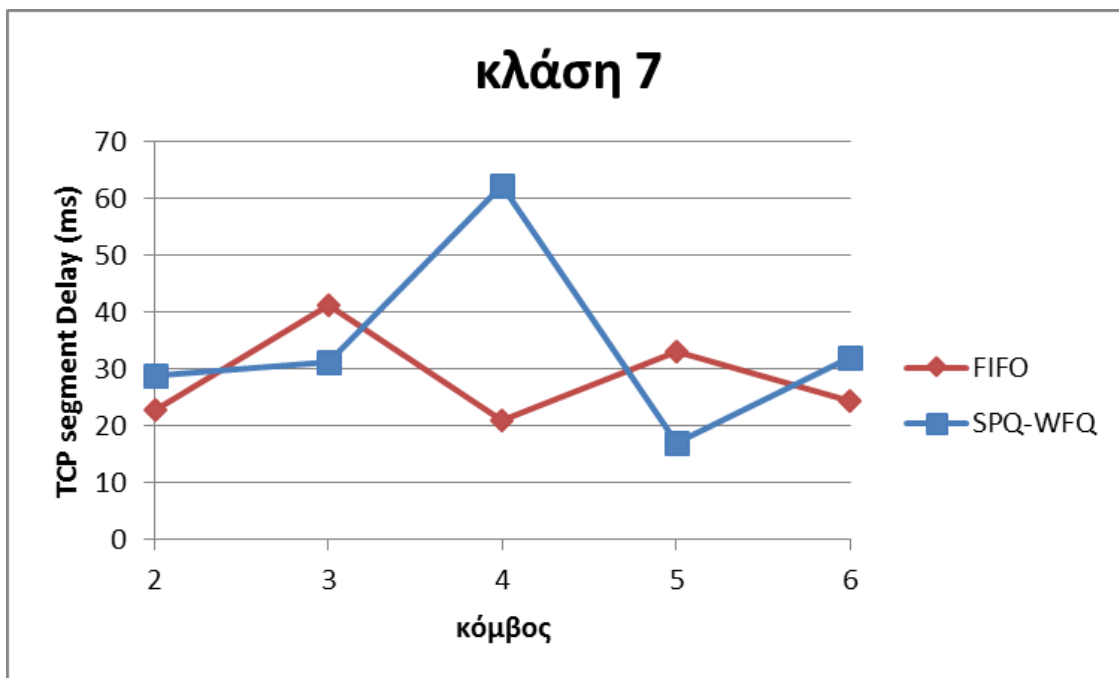
Σχήμα 5.12: Καθυστερήση κλάσης 4



Σχήμα 5.13: Καθυστερήση κλάσης 5



Σχήμα 5.14: Καθυστερήση κλάσης 6



Σχήμα 5.15: Καθυστερήση κλάσης 7

Παρατηρήσεις

- Όπως σαφώς προκύπτει από τα Σχ. 5.9 μέχρι 5.15, αυξάνοντας τους χρήστες συγκεκριμένων υπηρεσιών της κυψέλης αυξάνεται και η καθυστέρηση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα συγκεκριμένες κρίσιμες υπηρεσίες να μην ικανοποιούν τις αντίστοιχες απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας χωρίς να εφαρμοστεί κάποια πολιτική προγραμματισμού ζεύξης.
- Με τη χρήση του προτεινόμενου προγραμματισμού καθίσταται εφικτή η ικανοποίηση των απαιτήσεων σε καθυστέρηση των δύο κρίσιμότερων υπηρεσιών του ευφυούς δικτύου. Συγκεκριμένα, από Σχ. 5.9 φαίνεται ότι η κλάση υπηρεσίας 1 που ικανοποιεί εφαρμογές τηλεπροστασίας δεν θα μπορούσε να λειτουργήσει χωρίς να εφαρμοστεί η προτεινόμενη μέθοδος. Κατά παρόμοιο τρόπο από το σχήμα 5.10 προκύπτει ότι η κλάση υπηρεσίας 2, αν και ικανοποιείται σε ορισμένους κόμβους, σε άλλους αδυνατεί να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις της σε QoS, όπως απεικονίζεται στο Σχ. 5.10.
- Στις υπηρεσίες χαμηλότερης προτεραιότητας αν και αυξάνεται η καθυστέρηση όταν χρησιμοποιείται η προτεινόμενη μέθοδος προγραμματισμού, παραμένει πάντως αρκετά κάτω από τα επιτρεπόμενα όρια.
- Στις κλάσης 4, που αποτελεί κλάση μέσης προτεραιότητας η καθυστέρηση της υπηρεσίας προκύπτει ίδια και στα δύο σενάρια, με αποτέλεσμα να μην φαίνεται διαφορά στο σχήμα 5.12

Κεφάλαιο 6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Σαράφη Α. Μ.; “Βέλτιστος Χρονοπρογραμματισμός σε PLC Ευφυή Ενεργειακά Δίκτυα,” Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Φεβ. 2014

[2] 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

[3] 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

[4] Ekram, Hossain; Zhu, Han; H. , Vincent, Poor; , “Smart Grid Communications and Networking,” Cambridge University Press, 2012

[5] Hendrik, C., Ferreira; Lutz, Lampe; John, Newbury; Theo, G., Swart; , “*Power Line Communications: Theory and Applications for Narrowband and Broadband Communications over Power Lines,*” John Wiley and Sons, Ltd, Publication, 2010

[6] Sarafi, A.M. ; Voulkidis, A.C ; Livieratos, S. ; Cottis, P.G. ; , “The role of PLC technology in Smart Grid Communication Networks”

[7] Berger, L.T. ; Schwager, A. ; Pagani, P. ; Schneider D.M. ; , “MIMO Power Line Communications, Narrow and Broadband Standards, EMC, and Advanced Processing,” CRC Press, Taylor & Francis Group, LLC, 2014

[8] *Shmuel, Goldfisher; Shinji, Tanabe;* , “IEEE 1901 Access System: An Overview of Its Uniqueness and Motivation,” *IEEE 2010 Communications Magazine*

[9] 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

[10] 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

[11] 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

[12]] Rodrigo, Filev, Maia; Denis, Gabos; Moacyr, Martucci Jr.; , “A Distributed QoS Control Architecture for Heterogeneous Networks Applied to PLC Networks,” *IEEE* 2008

[13] 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

[14] Tanenbaum, A.S.; , "Δίκτυα Υπολογιστών(4^η έκδοση),"2003 Κλειδάριθμος, Αθήνα.

[15] Kurose, J.F.; Ross, K.W. ; , "Δικτύωση Υπολογιστών, Προσέγγιση από πάνω προς τα κάτω (4^η Έκδοση)," Εκδόσεις Μόσχος Γκιούρδας, Αθήνα, 2009.

[16]<http://www.billion.com/product/home-networking-inbuilding.html>
[ηλεκτρονικό]

[17] 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

[18] 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

[19] 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

[20] Yaghmaee, M.H.; Yousefi, Z.; Zabihi, M.; Alishahi, S.; , " Quality of service guarantee in smart grid infrastructure communication using traffic classification," 22nd International Conference on Electricity Distribution , Stockholm 10-13 June 2013

[21] http://en.wikipedia.org/wiki/Fairness_measure [ηλεκτρονικό]

[22] 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

[23] Sethi, Adarshpal, S.; Hnatyshin, Vasil, Y.; , "The Practical OPNET User Guide for Computer Network Simulation," CRC Press Taylor & Francis Group, 2013