



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Προσαρμοστική Διαχείριση Πόρων σε Ευφυή Δίκτυα

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ελευθέριος Γ. Κόζιας

Επιβλέπων: Παναγιώτης Κωττής

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούνιος 2013



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Προσαρμοστική Διαχείριση Πόρων σε Ευφυή Δίκτυα

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ελευθέριος Γ. Κόξιας

Επιβλέπων: Παναγιώτης Κωττής

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 26^η Ιουνίου 2013.

.....
Π. Κωττής
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Χ. Καψάλης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Γ. Φικιώρης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούνιος 2013

.....
Ελευθέριος Γ. Κόξιας

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

Copyright © Ελευθέριος Γ. Κόξιας, Αθήνα 2013

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

Σκοπός της εργασίας είναι η διατύπωση αλγορίθμου προσαρμοστικής διαχείρισης πόρων σε ευφυή δίκτυα (ΕΔ). Επικρατέστερη φαίνεται η χρήση τεχνικής πολυπλεξίας με διαίρεση χρόνου (TDMA) για το στρώμα MAC του ΕΔ. Κάθε κόμβος του δικτύου αξιοποιεί όλο το διαθέσιμο φάσμα συχνοτήτων ενώ ο συνολικός χρόνος μοιράζεται σε χρονοθυρίδες. Στην περίπτωση αυτή, σημαντικό είναι το ζήτημα της κατανομής των διαθέσιμων χρονοθυρίδων στους κόμβους του δικτύου ώστε να ικανοποιούνται οι προδιαγραφές ως προς την ποιότητα υπηρεσίας (Quality of Service – QoS) των κόμβων. Κάθε κόμβος χαρακτηρίζεται από ένα βάρος που εκφράζει το ποσοστό των χρονοθυρίδων το οποίο ανατίθεται στον κόμβο. Εξετάζεται η εύρεση πόρων στην περίπτωση εισαγωγής νέου κόμβου στο δίκτυο με μείωση των βαρών των αρχικών κόμβων. Αρχικά επιδιώκεται η εύρεση των απαιτούμενων πόρων με μείωση των βαρών των κόμβων σε ίδιο ή χαμηλότερο επίπεδο με το νέο κόμβο. Αν αυτό δεν είναι εφικτό, πραγματοποιείται άνοδος σε υψηλότερο επίπεδο του δικτύου και επαναλαμβάνεται η διαδικασία. Για να είναι δίκαιη η κατανομή των πόρων, το ποσό του βάρους που αφαιρείται από κάθε κόμβο βρίσκεται χρησιμοποιώντας τη θεωρία της κυρτής βελτιστοποίησης.

Στο Κεφάλαιο 1 γίνεται αναφορά στο σημερινό ηλεκτρικό δίκτυο, στις λειτουργίες που επιτελεί και στα προβλήματα που αντιμετωπίζει. Περιγράφεται, επίσης, η λειτουργία του ΕΔ και ο τρόπος με τον οποίο αντιμετωπίζονται τα ανωτέρω προβλήματα. Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται το θέμα του χρονοπρογραμματισμού σε δίκτυα πολυπλεξίας με διαίρεση χρόνου και περιγράφεται το στρώμα MAC στο ΕΔ. Το Κεφάλαιο 3 παρουσιάζει συνοπτικά τη θεωρία της κυρτής βελτιστοποίησης. Στο Κεφάλαιο 4 διατυπώνεται μαθηματικά το πρόβλημα της προσαρμοστικής διαχείρισης πόρων σε ΕΔ και αναλύεται ο προτεινόμενος αλγόριθμος. Τέλος, στο Κεφάλαιο 5 απεικονίζονται διαγράμματα τα οποία προκύπτουν μετά από προσομοιώσεις σε δίκτυα στο περιβάλλον MATLAB και συζητούνται τα σχετικά αποτελέσματα.

Λέξεις κλειδιά

Ευφυές δίκτυο, Powerline Communications, Κυρτή βελτιστοποίηση, Στρώμα MAC, Χρονοπρογραμματισμός TDMA, Διαχείριση πόρων.

Abstract

This diploma thesis deals with adaptive resource management in smart grid networks. The proposed solution is the application of Time Division Multiple Access (TDMA) at the MAC layer of the nodes of a smart grid network. The network nodes use all the available frequency spectrum whereas the total time is split into time slots. In this case, it is important to allocate the available time slots to the nodes of the network, so that the Quality of Service requirements of each node are satisfied. Each node is characterized by a weight that expresses the percentage of the total number of time slots assigned to the node. The thesis examines resource allocation when a new node is inserted into the network. This is accomplished by appropriately reducing the weights of the original nodes. The required resources should be found by reducing the weights of nodes belonging to the same or to lower hierarchical levels. If this is not possible, the procedure is repeated at a higher level. For a fair resource allocation, the weight reduction of each node is determined employing the theory of convex optimization.

The first chapter provides an overview of the modern electric grid and the relevant operations and problems. It also describes the smart grid network and how these problems are solved. The second chapter outlines scheduling in TDMA networks and the MAC layer of smart grids. The third chapter provides an overview of the theory of convex optimization. The problem under consideration is formulated in the fourth chapter, where, also, the proposed algorithm is presented. Finally, the fifth chapter presents relevant diagrams and discusses the simulation results using the MATLAB environment.

Key words

Smart grid, Powerline Communications, Convex optimization, MAC Layer, TDMA Scheduling, Resource management.

Ευχαριστήριο σημείωμα

Με την ολοκλήρωση της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Καθηγητή Ε.Μ.Π. και επιβλέποντα της εργασίας, κ. Παναγιώτη Κωττή, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεση της διπλωματικής εργασίας και για την καθοδήγησή του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησής της. Επίσης, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου για τις γνώσεις που μου μετέδωσε κατά τη διάρκεια των προπτυχιακών μου σπουδών.

Θα ήθελα, επίσης, να ευχαριστήσω το Δρ. Αρτέμη Βουλκίδη για τη σημαντική βοήθεια και τις γνώσεις που μου προσέφερε αλλά και για την άψογη συνεργασία μας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω το οικογενειακό και φιλικό μου περιβάλλον για την υποστήριξη και τη συμπαράσταση κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

Αφιερώνεται στην αδελφή μου Όλγα

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	5
ABSTRACT	7
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	13
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΝΤΜΗΣΕΩΝ.....	15
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	17
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - ΤΟ ΕΥΦΥΕΣ ΔΙΚΤΥΟ	19
1.1 Εισαγωγή στο ευφύες δίκτυο	19
1.2 Τα προβλήματα του σημερινού δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας.....	22
1.2.1 Διακοπές ρεύματος – Black-out.....	22
1.2.2 Χρονικά συγκεντρωμένη ζήτηση.....	23
1.2.3 Ανάγκη ενσωμάτωσης της διασπαρμένης παραγωγής ΗΕ	24
1.2.4 Αδυναμία δυναμικής εκτίμησης της ζήτησης.....	25
1.2.5 Ανάγκη περιορισμού των κλοπών ρεύματος	25
1.3 Χαρακτηριστικά του ευφυούς δικτύου.....	27
1.3.1 Εισαγωγή – Στόχοι του ευφυούς δικτύου	27
1.3.2 Συστήματα έξυπνης μέτρησης (Smart metering).....	28
1.3.3 Συστήματα έξυπνης παρακολούθησης (Smart monitoring).....	29
1.4 Η τηλεπικοινωνιακή υποδομή του ευφυούς δικτύου	30
1.4.1 Απαιτήσεις από το ευφύες δίκτυο	30
1.4.2 Ασύρματοι τρόποι	31
1.4.3 Ενσύρματοι τρόποι.....	35
1.5 Τα πλεονεκτήματα του Smart Grid	37
1.5.1 Εκτίμηση της ζήτησης και μεταβολή της τιμής σε πραγματικό χρόνο.....	37
1.5.2 Εντοπισμός και επιδιόρθωση βλαβών.....	38
1.5.3 Αντιμετώπιση κλοπής ρεύματος	38
1.5.4 Ενσωμάτωση καταναμημένων πηγών ενέργειας.....	39
1.5.5 Παροχή ευρυζωνικού internet.....	39
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΧΡΟΝΟΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ ΣΤΟ ΕΥΦΥΕΣ ΔΙΚΤΥΟ	41
2.1 Εισαγωγή στην αρχιτεκτονική του ευφυούς δικτύου.....	41
2.2 Συνάθροιση δεδομένων (Aggregation)	42

2.3	Οι τρόποι εκπομπής δεδομένων	43
2.4	Το στρώμα ελέγχου πρόσβασης μέσου (MAC) στο ευφυές δίκτυο.....	43
2.4.1	Η ανάγκη για διαστρωματική προσέγγιση.....	43
2.4.2	Στρώμα MAC βασισμένο σε συγκρούσεις (contention-based)	44
2.4.3	Πρωτόκολλα χρονικής πολυπλεξίας (TDMA)	45
2.5	Χρονοπρογραμματισμός TDMA.....	47
2.6	Χρονοπρογραμματισμός στο πρότυπο IEEE 1901	49
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΚΥΡΤΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ.....		50
3.1	Εισαγωγή – Μαθηματική βελτιστοποίηση.....	50
3.2	Κυρτά σύνολα.....	51
3.3	Κυρτές συναρτήσεις	51
3.4	Προβλήματα βελτιστοποίησης	54
3.4.1	Προβλήματα κυρτής βελτιστοποίησης	55
3.4.2	Βέλτιστα σημεία.....	56
3.5	Δυϊκότητα.....	57
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΠΟΡΩΝ ΣΕ ΕΥΦΥΗ ΔΙΚΤΥΑ		60
4.1	Μαθηματική διατύπωση.....	60
4.2	Εισαγωγή νέου κόμβου στο δίκτυο	63
4.3	Βέλτιστη κατανομή βαρών σε κόμβους με κοινό πατέρα	64
4.4	Διατύπωση του προβλήματος για επίλυση σε περιβάλλον MATLAB.....	65
4.5	Επαναπροσδιορισμός των βαρών των κόμβων κάθε υποδένδρου	67
4.6	Σύνοψη – Διατύπωση του αλγορίθμου - Παράδειγμα.....	68
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ.....		72
5.1	Ο δείκτης δικαιοσύνης του Jain	72
5.2	Μετρήσεις του χρόνου εκτέλεσης του αλγορίθμου.....	73
5.3	Μετρήσεις δείκτη δικαιοσύνης.....	74
5.4	Συμπεράσματα.....	78
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....		79

Κατάλογος συντμήσεων

ΕΔ	Ευφυές δίκτυο
ΥΤ	Υψηλή τάση
ΜΤ	Μέση τάση
ΧΤ	Χαμηλή τάση
ΗΕ	Ηλεκτρική ενέργεια
ΗΔ	Ηλεκτρικό δίκτυο
AMI	Advanced Metering Infrastructure
PMU	Phase Measurement Unit
WMN	Wireless Mesh Network
GSM	Global System for Mobile Communications
PSTN	Public Switched Telephone Network
PLC	Powerline Communications
TDMA	Time Division Multiple Access
BB-PLC	Broadband over Powerline Communications
OSI	Open System Interconnection
NTU	Network Terminatal Unit
HE	Head End Station
RP	Repeater Point
QoS	Quality of Service
MAC	Medium Access Control
RTS	Request to Send
CTS	Clear to Send

Ευρετήριο σχημάτων

Σχήμα 1.1: Γενική απεικόνιση του σημερινού δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας	200
Σχήμα 1.2: Το μερίδιο κάθε μορφής ενέργειας στην Ελλάδα σήμερα	21
Σχήμα 1.3: Η ζήτηση για ηλεκτρική ενέργεια κατά τη διάρκεια μιας ημέρας	23
Σχήμα 1.4: Στύλος του ηλεκτρικού δικτύου σε επαρχία της Ινδίας.....	26
Σχήμα 1.5: Έξυπνος μετρητής	29
Σχήμα 1.6: Παράδειγμα Wireless Mesh Network.....	32
Σχήμα 1.7: Αρχιτεκτονική κυψελωτού δικτύου.....	33
Σχήμα 1.8: Τηλεπικοινωνιακή αρχιτεκτονική ενός ευφυούς δικτύου	36
Σχήμα 2.1: Γράφος δενδροειδούς μορφής	41
Σχήμα 2.2: Η λειτουργία των πακέτων RTS/CTS	45
Σχήμα 2.3: Πολυπλεξία με διαίρεση χρόνου.	46
Σχήμα 2.4: Γράφος δικτύου τοπολογίας δένδρου και απεικόνιση παρεμβολών.	48
Σχήμα 3.1: Κυρτό σύνολο, μη κυρτό σύνολο και κυρτή συνάρτηση	52
Σχήμα 4.1: Ενδεικτικό παράδειγμα τηλεπικοινωνιακού δικτύου σε ευφυές δίκτυο.....	60
Σχήμα 4.2: Υπολογισμός βαρών κόμβων δικτύου.....	62
Σχήμα 4.3: Εισαγωγή νέου κόμβου κάτω από τον ίδιο πατέρα.	67
Σχήμα 4.4: Προσδιορισμός των βαρών w_i σε ένα δένδρο	69
Σχήμα 4.5: Εισαγωγή νέου κόμβου σε δένδρο	70
Σχήμα 5.1: Χρόνος εκτέλεσης ανάλογα με επίπεδα ανόδου.....	73
Σχήμα 5.2: Χρόνος εκτέλεσης και επίπεδο εισαγωγής νέου κόμβου, αραιά δένδρα.....	74
Σχήμα 5.3: Χρόνος εκτέλεσης και επίπεδο εισαγωγής νέου κόμβου, πυκνά δένδρα	75
Σχήμα 5.4: Μεταβολή της δικαιοσύνης ανάλογα με το επίπεδο εισαγωγής.....	76
Σχήμα 5.5: Μεταβολή της δικαιοσύνης ανάλογα με το βάρος του νέου κόμβου	77
Σχήμα 5.6: Επίδραση της πυκνότητας του δένδρου στη δικαιοσύνη	77

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - ΤΟ ΕΥΦΥΕΣ ΔΙΚΤΥΟ

1.1 Εισαγωγή στο ευφύες δίκτυο

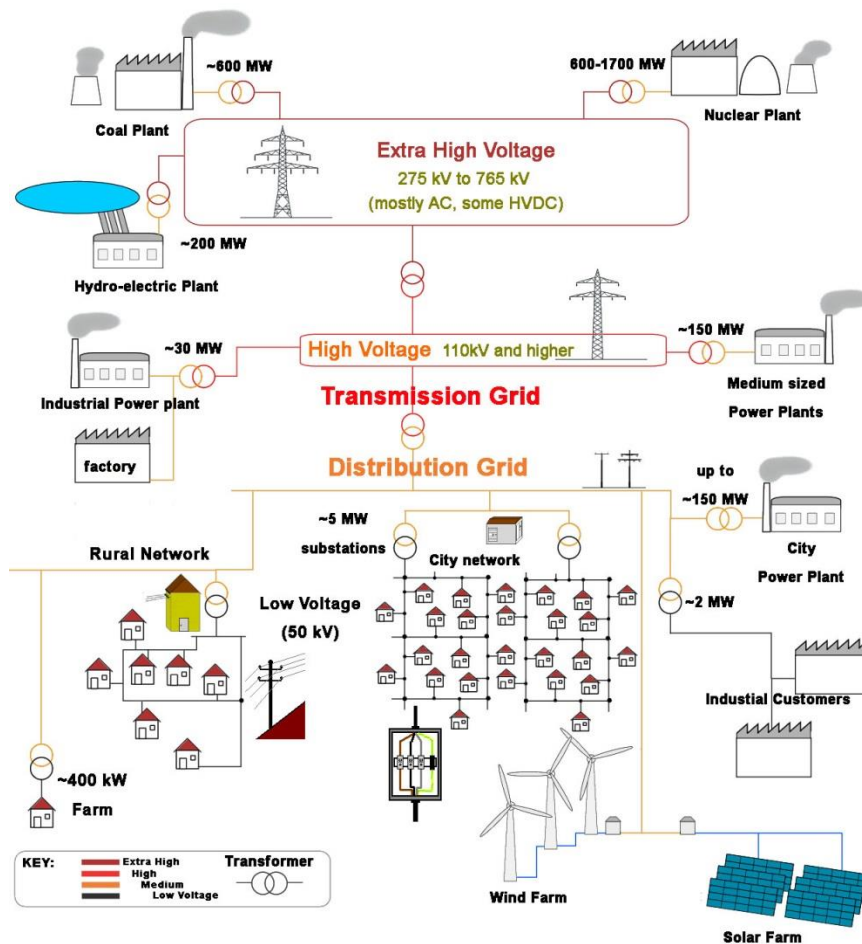
Το ηλεκτρικό δίκτυο είναι ένα διασυνδεδεμένο δίκτυο προσανατολισμένο στη μεταφορά και διανομή ηλεκτρικής ενέργειας από τους παραγωγούς στους καταναλωτές. Αποτελεί μία από τις σημαντικότερες εφευρέσεις του 20ού αιώνα, καθώς οι υπηρεσίες που προσφέρει στους καταναλωτές βελτίωσαν δραστικά την ποιότητα ζωής του πληθυσμού παγκοσμίως.

Το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας αποτελείται από τις υποδομές που καθιστούν εφικτή τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας από λίγους, συγκεκριμένους σταθμούς παραγωγής στους καταναλωτές. Προς το παρόν, οι σταθμοί παραγωγής είναι κυρίως συγκεντρωμένες μονάδες, περιορίζονται δηλαδή σε σημαντικό βαθμό σε συγκεκριμένες γεωγραφικές τοποθεσίες όπου είναι εγκατεστημένοι σταθμοί παραγωγής μεγάλης ισχύος. Οι σταθμοί αυτοί είναι στην Ελλάδα λιγνιτικοί, πετρελαϊκοί, φυσικού αερίου και υδροηλεκτρικοί ενώ σε άλλες χώρες είναι εγκατεστημένοι και διαφορετικοί τύποι σταθμών όπως οι πυρηνικοί. Τα τελευταία χρόνια, διαρκώς αυξανόμενο είναι το μερίδιο των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, που συνεπάγεται αύξηση του αριθμού των συνδεδεμένων φωτοβολταϊκών και αιολικών πάρκων. Οι μονάδες αυτές συχνά δεν περιορίζονται σε συγκεκριμένες γεωγραφικές περιοχές, και για το λόγο αυτό αποκαλούνται κατανεμημένοι σταθμοί παραγωγής ενέργειας. Το χαρακτηριστικό τους αυτό δημιουργεί πρόσθετες απαιτήσεις αναφορικά με το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας.

Η μεταφορά της ενέργειας επιτυγχάνεται με την αξιοποίηση γραμμών υψηλής, μέσης και χαμηλής τάσης (ΥΤ, ΜΤ και ΧΤ), όπου οι γραμμές ΥΤ είναι κατάλληλες για τη μεταφορά της ΗΕ σε μεγάλες αποστάσεις, οι γραμμές ΜΤ χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά και διανομή της ΗΕ σε συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή (όπως μία πόλη) ή σε σημαντικούς καταναλωτές και οι γραμμές ΧΤ αξιοποιούνται για τη διανομή της ΗΕ στον τελικό καταναλωτή. Εκτός των γραμμών μεταφοράς, για τη μεταφορά της ενέργειας χρησιμοποιούνται στο δίκτυο και πλήθος άλλων διατάξεων όπως οι μετασχηματιστές (ΥΤ/ΜΤ και ΜΤ/ΧΤ), διάφοροι τύποι διακοπών κτλ. έτσι ώστε το ηλεκτρικό ρεύμα να διαθέτει σε κάθε σημείο του δικτύου τα επιθυμητά χαρακτηριστικά. Σημαντικό χαρακτηριστικό του σημερινού δικτύου μεταφοράς και διανομής ΗΕ είναι το ότι στο μεγαλύτερο τμήμα του είναι σχεδιασμένο για μονόδρομη μεταφορά της ΗΕ, από τις μονάδες παραγωγής προς τον τελικό καταναλωτή ΗΕ.

Ο καταναλωτής ΗΕ μπορεί να είναι είτε οικιακός καταναλωτής, ο οποίος τροφοδοτείται από τις γραμμές ΧΤ, είτε εμπορικός ή βιομηχανικός. Στις τελευταίες περιπτώσεις συνηθισμένη είναι η παροχή ΗΕ απευθείας από τις γραμμές ΜΤ ή ακόμη και από τις γραμμές ΥΤ σε περιπτώσεις όπως αυτές των μεγάλων βιομηχανικών μονάδων. Στην περίπτωση των οικιακών και εμπορικών καταναλωτών ΧΤ, οι οποίοι αποτελούν και την πλειοψηφία, η εταιρεία ηλεκτρισμού αναλαμβάνει την περιοδική μέτρηση της κατανάλωσης ανά τακτά χρονικά διαστήματα.

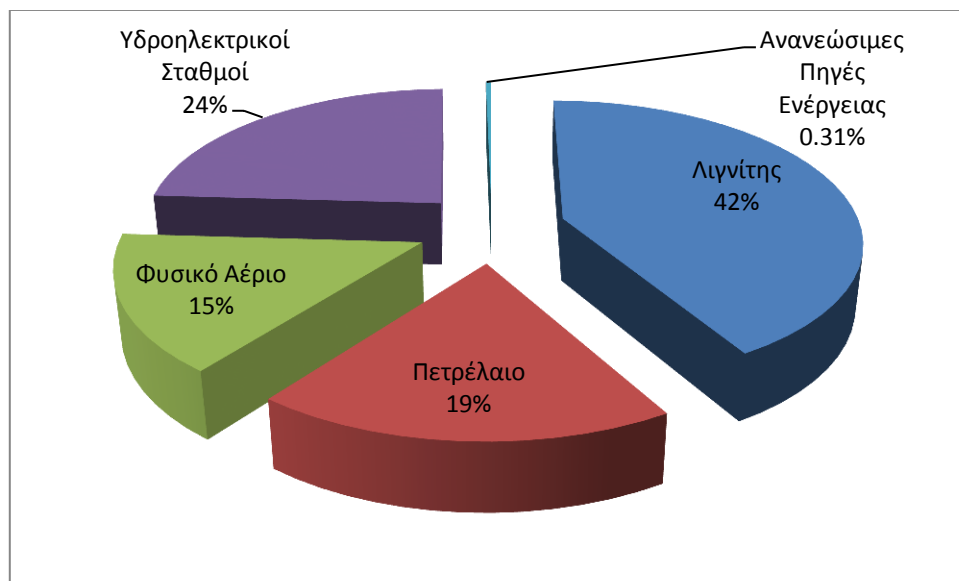
Ακολουθεί σχηματική απεικόνιση ενός σύγχρονου δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας, το οποίο μεταφέρει την ενέργεια από συγκεντρωμένες και διεσπαρμένες μονάδες παραγωγής στους τελικούς οικιακούς, εμπορικούς και βιομηχανικούς καταναλωτές. Στο σχήμα φαίνεται πώς αξιοποιούνται τα διάφορα στοιχεία του δικτύου (γραμμές ΥΤ/ΜΤ/ΧΤ, μετασχηματιστές κλπ) για τη μεταφορά ενέργειας από σταθμούς παραγωγής (πυρηνικούς, υδροηλεκτρικούς κλπ) σε μεγάλους βιομηχανικούς ή μικρότερους οικιακούς καταναλωτές.



Σχήμα 1.1: Γενική απεικόνιση του σημερινού δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας

Με διαρκείς επεκτάσεις, το ηλεκτρικό δίκτυο έχει εξαπλωθεί έτσι ώστε να καλύπτει σήμερα σχεδόν το σύνολο του πλανήτη. Πλέον, ακόμη και στις υποανάπτυκτες χώρες, ελάχιστες περιοχές παραμένουν χωρίς παροχή ηλεκτρικού ρεύματος. Η σχεδόν καθολική πρόσβαση σε ΗΕ είναι συνήθως αποτέλεσμα συμφωνιών των ρυθμιστικών αρχών κάθε χώρας με κάποια κυρίαρχη εταιρεία ηλεκτρισμού, η οποία αναλαμβάνει την υποχρέωση εγκατάστασης υποδομών που επιτρέπουν την πρόσβαση στο αγαθό της ΗΕ στο μεγαλύτερο τμήμα του πληθυσμού μιας χώρας. Οι ρυθμιστικές αρχές παράλληλα έχουν αρμοδιότητες παρακολούθησης και ελέγχου της αγοράς ενέργειας με στόχο την καλύτερη λειτουργία της.

Στην Ελλάδα την αρμοδιότητα της αγοράς ΗΕ έχει η Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (Ρ.Α.Ε.). Η αρμοδιότητα της διαχείρισης του συστήματος μεταφοράς έχει ανατεθεί στο Διαχειριστή Ελληνικού Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (Δ.Ε.Σ.Μ.Η.Ε.), ο οποίος φροντίζει τόσο για την ασφαλή, αξιόπιστη και με αποδεκτή ποιότητα μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας από την παραγωγή στην κατανάλωση όσο και για την εύρυθμη λειτουργία της αγοράς. Στην πλευρά της παραγωγής κυρίαρχη εταιρεία είναι η Δ.Ε.Η, η οποία κατέχει σήμερα το 70% της εγκατεστημένης ισχύος στην Ελλάδα ενώ στην αγορά συμμετέχουν ιδιώτες παραγωγοί μεγάλης ή, τα τελευταία χρόνια, μικρότερης ισχύος. Το διάγραμμα του σχήματος 1.2 απεικονίζει τη συμμετοχή κάθε μορφής παραγωγής στην ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώνεται στην Ελλάδα σύμφωνα με τα στοιχεία της Δ.Ε.Η.



Σχήμα 1.2: Το μερίδιο κάθε μορφής ενέργειας στην Ελλάδα σήμερα

1.2 Τα προβλήματα του σημερινού δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας

Παρά την καθοριστική συμβολή του δικτύου ΗΕ στη βελτίωση του βιοτικού επιπέδου της ανθρωπότητας, εξακολουθούν να υπάρχουν σημαντικές προκλήσεις, ο αριθμός των οποίων μάλιστα αυξάνεται με την πάροδο των χρόνων. Είναι σημαντικό να επισημανθεί ότι το ΗΔ είναι αρκετά παλαιό σε όλες τις χώρες καθώς η εγκατάστασή του ξεκίνησε στις αρχές του 20ού αιώνα. Μάλιστα, στις περισσότερες χώρες, συμπεριλαμβανομένης της Ελλάδας, ελάχιστες βελτιώσεις ή μεταβολές έχουν πραγματοποιηθεί τα τελευταία 40 χρόνια. Το ΗΔ είναι συνεπώς πεπαλαιωμένο και δεν έχει εναρμονιστεί με τις ταχύτερες τεχνολογικές εξελίξεις που έχουν συντελεστεί σε άλλους τομείς. Κατά συνέπεια, έχουν αυξηθεί οι προκλήσεις οι οποίες χρήζουν αντιμετώπισης.

1.2.1 Διακοπές ρεύματος – *Black-out*

Διακοπή ρεύματος είναι μια βραχείας ή μακράς διάρκειας διακοπή της παροχής ηλεκτρικού ρεύματος σε μια περιοχή. Στις βραχείες ή στιγμιαίες διακοπές ανήκουν οι διακοπές οι οποίες διαρκούν λιγότερο από 3 min στις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης, ενώ για τις αρχές των Η.Π.Α. βραχείες θεωρούνται οι διακοπές οι οποίες διαρκούν λιγότερο από 5 min. Οι υπόλοιπες διακοπές ρεύματος θεωρούνται μακράς διάρκειας.

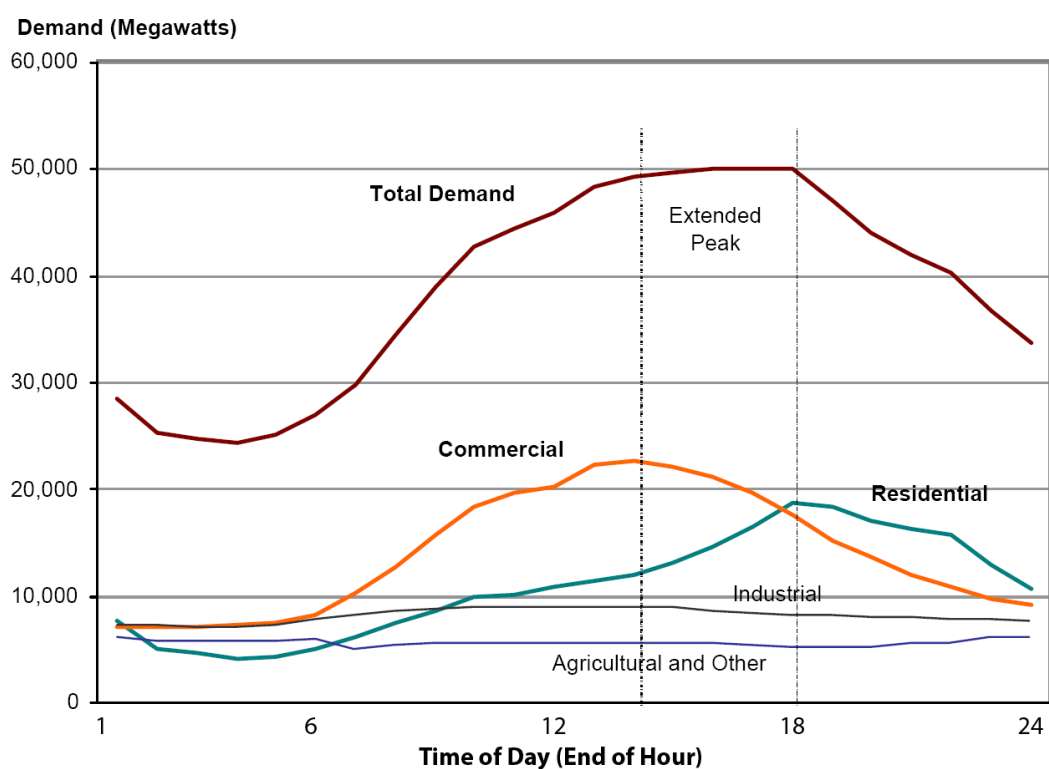
Το υπάρχον ηλεκτρικό δίκτυο δεν διαθέτει μηχανισμούς άμεσης επαναφοράς του συστήματος από ξαφνικές διακοπές ρεύματος. Η αποκατάσταση βλαβών απαιτεί τον εντοπισμό τους από το προσωπικό της επιχείρησης ώστε να χρησιμοποιηθεί κάποια εναλλακτική διαδρομή και να επιτευχθεί προσωρινή παροχή ρεύματος μέχρι την επιδιόρθωση της βλάβης. Λόγω της έλλειψης μεθόδων άμεσου εντοπισμού της βλάβης, μια διακοπή ενδέχεται να διαρκέσει επί αρκετά min αυξάνοντας τη ζημιά για τις επιχειρήσεις και τους οικιακούς καταναλωτές αλλά και για την επιχείρηση ηλεκτρισμού.

Στις ανεπτυγμένες χώρες διακοπές ρεύματος λαμβάνουν χώρα για λιγότερο από 0.5% του ετήσιου χρόνου λειτουργίας. Εντούτοις, αποτελούν σημαντικότατο πρόβλημα το οποίο επιβαρύνει σε μεγάλο βαθμό την κοινωνία και την οικονομία. Ενδεικτικά, η οικονομική επιβάρυνση λόγω των διακοπών ρεύματος στις Η.Π.Α. εκτιμάται κοντά στα 135 δισεκατομμύρια δολларία ετησίως (περίπου 0.9% του ΑΕΠ της χώρας). Γίνεται αντιληπτή, επομένως, η σημασία της μείωσης της ετήσιας διάρκειας διακοπής ρεύματος σε μία χώρα και η σημαντική επίπτωσή της στην οικονομία.

1.2.2 Χρονικά συγκεντρωμένη ζήτηση

Οι ανάγκες των καταναλωτών σε ηλεκτρική ενέργεια δεν παραμένουν σταθερές με την πάροδο του χρόνου. Αντιθέτως, μεταβάλλονται δυναμικά, όχι μόνο κατά τη διάρκεια ενός έτους αλλά και εντός μίας ημέρας. Είναι, επομένως, αναγκαία η ρύθμιση της ποσότητας της παραγόμενης ΗΕ κατά δυναμικό τρόπο ώστε να αντιμετωπίζονται οι διαρκείς μεταβολές στη ζήτηση.

Η στατιστική μελέτη της ζήτησης ΗΕ από τυπικές οικιακές καταναλώσεις οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η ζήτηση μεγιστοποιείται κάποια χρονική στιγμή, ενώ νωρίτερα αλλά και αργότερα μειώνεται απότομα. Καθώς τα περισσότερα νοικοκυριά λειτουργούν κατ' αυτό τον τρόπο, για την αποφυγή ολικών διακοπών, η εταιρεία παροχής ηλεκτρισμού πρέπει να σχεδιάσει το σύστημα παραγωγής και διανομής ΗΕ ώστε να καλύπτεται η μέγιστη ζήτηση κατά τη διάρκεια μιας ημέρας και να υπάρχει πλεόνασμα ασφαλείας. Όμως, η μέγιστη αυτή ζήτηση απαιτείται για μικρή χρονική διάρκεια, με αποτέλεσμα τη σπατάλη πόρων και δαπανηρές επενδύσεις προς την κατεύθυνση της αύξησης της δυναμικότητας παραγωγής ενέργειας.



Σχήμα 1.3: Η ζήτηση για ηλεκτρική ενέργεια κατά τη διάρκεια μιας καλοκαιρινής ημέρας στην Καλιφόρνια (Η.Π.Α.)

Το φαινόμενο αυτό απεικονίζεται στο σχήμα 1.3, όπου παρουσιάζεται η ανάγκη επέκτασης της δυναμικότητας παραγωγής λόγω της κατανάλωσης αιχμής. Όπως φαίνεται σε αυτό το σχήμα, μεταξύ 14:00 και 18:00, η συνολική ζήτηση ΗΕ είναι σημαντικά υψηλότερη από τη μέση ζήτηση κατά τη διάρκεια της ημέρας. Καθώς η απαιτούμενη δυναμικότητα παραγωγής ΗΕ εξαρτάται από τη μέγιστη τιμή της ζήτησης ΗΕ, με μείωση της κατανάλωσης κατά τις συγκεκριμένες ώρες είναι δυνατό να αποφευχθούν επενδύσεις στην αύξηση της δυναμικότητας παραγωγής. Το ΕΔ διευκολύνει το σκοπό αυτό καθώς με την εγκατάστασή του είναι εφικτή η τιμολόγηση της ΗΕ σε πραγματικό χρόνο. Με τον τρόπο αυτό ο καταναλωτής έχει κίνητρο να αποφύγει την κατανάλωση ΗΕ τις κρίσιμες αυτές ώρες (ώρες αιχμής) και να μεταθέσει χρονικά ορισμένες ενεργοβόρες δραστηριότητες, μειώνοντας τη συνολική ζήτηση που πρέπει να καλύψει η εταιρεία ηλεκτρισμού τις ώρες αιχμής.

Σύμφωνα με τα προηγούμενα είναι εφικτή μεγάλη εξοικονόμηση πόρων υπό την προϋπόθεση ότι η ζήτηση μπορεί να αποκτήσει μεγαλύτερη χρονική διασπορά σε ημερήσια βάση. Η αναγκαία δυναμικότητα του συστήματος μπορεί έτσι να μειωθεί ενώ και το δίκτυο διανομής δεν απαιτείται να έχει τόσο μεγάλη χωρητικότητα, δηλαδή δεν απαιτείται να διαθέτει υποδομές τέτοιες ώστε να μπορεί να μεταφέρει τόσο μεγάλες ποσότητες ΗΕ.

1.2.3 Ανάγκη ενσωμάτωσης της διασπαρμένης παραγωγής ΗΕ

Η ζήτηση για ΗΕ αυξάνεται με την πάροδο των ετών και η τάση αυτή αναμένεται να συνεχιστεί. Παράλληλα, υπάρχει αυξανόμενη ανησυχία για θέματα που άπτονται της προστασίας του περιβάλλοντος. Πολλά κράτη αλλά και η Ευρωπαϊκή Ένωση προβλέπουν ποινές σε περίπτωση μη κάλυψης τμήματος της ζήτησης ΗΕ χρησιμοποιώντας φιλικές προς το περιβάλλον μεθόδους. Η μείωση αυτή επηρεάζει και την τελική τιμή πώλησης του ρεύματος.

Λαμβάνοντας υπόψη τα ανωτέρω, θεωρείται αναμενόμενη η στροφή προς ήπιους τρόπους παραγωγής ΗΕ. Συγκεκριμένα, αναμένεται αύξηση του μεριδίου των αιολικών και των φωτοβολταϊκών πάρκων στη συνολικά παραγόμενη ΗΕ. Αν και ήδη έχουν πραγματοποιηθεί τέτοιες προσπάθειες, το υπάρχον ηλεκτρικό δίκτυο εμφανίζει αδυναμία ενσωμάτωσης της διασπαρμένης παραγωγής ΗΕ και ανταπόκρισης στην ανάγκη αξιοποίησης των τρόπων διασπαρμένης παραγωγής.

Επισημαίνεται ότι υπό τον όρο διασπαρμένη παραγωγή νοείται η παραγωγή ΗΕ σε εγκαταστάσεις οι οποίες δεν είναι γεωγραφικά συγκεντρωμένες, όπως ίσχυε τις περισσότερες φορές με τους συμβατικούς τρόπους παραγωγής. Ο όρος διασπαρμένη παραγωγή αναφέρεται σε εγκαταστάσεις παραγωγής, εκάστη των οποίων διαθέτει μικρότερη συγκριτικά δυναμικότητα

παραγωγής, και οι οποίες λειτουργούν σε πολλές και απομακρυσμένες μεταξύ τους γεωγραφικές περιοχές. Ένα οικείο παράδειγμα διασπαρμένης παραγωγής είναι η εγκατάσταση οικιακών φωτοβολταϊκών και η πώληση της παραγόμενης ΗΕ στην επιχείρηση ηλεκτρισμού.

Καθώς το ενδιαφέρον στρέφεται στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και στους διασπαρμένους τρόπους παραγωγής γίνεται αντιληπτό ότι το υπάρχον δίκτυο ΗΕ δεν μπορεί να ανταποκριθεί στις νέες αυτές απαιτήσεις. Το δίκτυο ΗΕ, έχοντας εγκατασταθεί σύμφωνα με τις ανάγκες των περασμένων δεκαετιών, είναι προσανατολισμένο σε μονόδρομη μεταφορά της ενέργειας από τον παραγωγό στον καταναλωτή. Δεν διευκολύνεται, επομένως, η μεταφορά ενέργειας από καταναλωτές οι οποίοι δρουν ως διεσπαρμένοι παραγωγείς δυσχεραίνοντας έτσι την αξιοποίηση των εναλλακτικών και φιλικότερων προς το περιβάλλον μορφών ενέργειας. Συνεπώς, είναι αναγκαία η αναβάθμιση του δικτύου προς την κατεύθυνση της λειτουργίας ως αμφίδρομου μέσου μεταφοράς ΗΕ, ώστε να είναι δυνατή η εναλλαγή των ρόλων του καταναλωτή και του παραγωγού ΗΕ.

1.2.4 Αδυναμία δυναμικής εκτίμησης της ζήτησης

Στις σημερινές απελευθερωμένες αγορές ΗΕ η κάλυψη της ζήτησης γίνεται μέσω ενός ρυθμιστή – διαχειριστή. Η τιμή πώλησης κάθε kWh μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια του έτους ανάλογα με τη σχέση προσφοράς και ζήτησης. Κάθε παραγωγός λαμβάνοντας υπόψη την προσφερόμενη τιμή ανά kWh επιλέγει τη λειτουργία αντίστοιχου αριθμού μονάδων. Η παραγόμενη ΗΕ αυτή μέσω κάποιας άλλης εταιρείας φθάνει στον τελικό καταναλωτή.

Το σημερινό ηλεκτρικό δίκτυο δεν παρέχει τη δυνατότητα ενημέρωσης σε πραγματικό χρόνο του παραγωγού ή του καταναλωτή ως προς την τρέχουσα κατάσταση της αγοράς ΗΕ. Το γεγονός αυτό αποτελεί εμπόδιο στην περαιτέρω απελευθέρωση της αγοράς ΗΕ. Με την ανάπτυξη και εγκατάσταση τεχνολογίας τέτοιας ώστε να καθίσταται εφικτή η εκτίμηση της ζήτησης και της προσφοράς αλλά και ο καθορισμός της τιμής σε πραγματικό χρόνο γίνεται ένα περαιτέρω βήμα προς την απελευθέρωση της αγοράς ΗΕ. Η διαμόρφωση τέτοιας αγοράς θα συμβάλει στη δημιουργία ενός ανταγωνιστικότερου περιβάλλοντος και θα λειτουργήσει θετικά για την κοινωνία και την οικονομία.

1.2.5 Ανάγκη περιορισμού των κλοπών ρεύματος

Ένα φαινόμενο έντονο σε ορισμένες χώρες είναι η κλοπή ηλεκτρικού ρεύματος. Πέραν των κινδύνων για την ασφάλεια του πληθυσμού, η κλοπή ρεύματος αποτελεί και σημαντικό πλήγμα στα έσοδα των εταιρειών ηλεκτρισμού που αυξάνει την τιμή του ρεύματος για τους υπόλοιπους καταναλωτές. Η έκταση που λαμβάνει αυτό το φαινόμενο παρουσιάζει σημαντικές

διαφοροποιήσεις από χώρα σε χώρα. Παράλληλα, ζημιές λόγω ανεπαρκούς ελέγχου του δικτύου ΗΕ εμφανίζονται και οι εταιρείες διαχείρισης του δικτύου λόγω των φαινομένων κλοπής καλωδίων και μετασχηματιστών.

Το ηλεκτρικό δίκτυο με τη σημερινή του μορφή δεν παρέχει υπηρεσίες άμεσου ελέγχου. Η καταπολέμηση των κρουσμάτων κλοπής ρεύματος είναι δύσκολη καθώς ο εντοπισμός και μόνο της παραβίασης απαιτεί σημαντικό χρονικό διάστημα. Είναι, επομένως, δύσκολο να ελεγχθεί αποτελεσματικά το φαινόμενο αυτό αν δεν βελτιωθεί το υπάρχον ΗΔ.



Σχήμα 1.4: Στύλος του ηλεκτρικού δικτύου σε επαρχία της Ινδίας.

Οι προαναφερθείσες αδυναμίες του ΗΔ αποτελούν εμπόδιο για την καλύτερη αξιοποίησή του. Παράλληλα, οι απαιτήσεις των εμπλεκόμενων φορέων, δηλαδή της κοινωνίας, των παραγωγών και των καταναλωτών, αναμένεται να συνεχίσουν να αυξάνονται κατά τα επόμενα χρόνια. Το όφελος, επομένως, από την εύρεση λύσης στο πρόβλημα αυτό αναμένεται να είναι σημαντικό.

1.3 Χαρακτηριστικά του ευφυούς δικτύου

1.3.1 Εισαγωγή – Στόχοι του ευφυούς δικτύου

Το ευφύές δίκτυο (smart grid, ΕΔ) είναι ένα δίκτυο ΗΕ που διαφέρει από το παραδοσιακό ΗΔ καθώς διαθέτει δυνατότητες συλλογής και αμφίδρομης μετάδοσης δεδομένων. Παρέχοντας τη δυνατότητα αμφίδρομης επικοινωνίας μεταξύ παραγωγών, καταναλωτών και διαχειριστών υποδομών, προσφέρει σημαντική βελτίωση στη λειτουργία του ΗΔ αυξάνοντας την αποδοτικότητα, την αξιοπιστία, την επεκτασιμότητα και την ασφάλειά του.

Το ΕΔ διαθέτει τη δυνατότητα μετάδοσης πληροφοριών σχετικά με την κατάσταση του δικτύου σε πραγματικό χρόνο. Για την υλοποίηση της δυνατότητας αυτής, είναι αναγκαία η ενίσχυση του ΗΔ με εγκατάσταση κατάλληλης υποδομής που θα καταστήσει δυνατή τη μεταφορά πληροφοριών σε όλη την έκταση του δικτύου μεταφοράς ΗΕ. Επομένως, λαμβάνοντας υπόψη τα χαρακτηριστικά και τις υπηρεσίες τις οποίες πρέπει να παρέχει το ΕΔ, είναι αναγκαίο να σχεδιαστεί το κατάλληλο τηλεπικοινωνιακό δίκτυο.

Καθώς η τεχνολογική ανάπτυξη του ΕΔ είναι πρόσφατη και στη φάση της ανάπτυξης, η τελική μορφή του δεν είναι γνωστή. Εντούτοις, έχουν διατυπωθεί ορισμένοι στόχοι για το ΕΔ, οι οποίοι μπορούν να λειτουργήσουν ως κατευθυντήριες γραμμές για το σχεδιασμό του. Οι στόχοι αυτοί είναι:

- Η βελτίωση της ποιότητας της ΗΕ.
- Η καλύτερη αξιοποίηση των υπαρχουσών εγκαταστάσεων και η αποφυγή κατασκευής πρόσθετων μονάδων παραγωγής για κάλυψη της ζήτησης των ωρών αιχμής.
- Η αύξηση της χωρητικότητας και η βελτίωση της αποτελεσματικότητας των υπαρχόντων ηλεκτρικών δικτύων.
- Η βελτιωμένη αντιμετώπιση των διακοπών.
- Η δυνατότητα προληπτικής συντήρησης και αυτο-ίασης (self-healing) του ΗΔ μετά από διακοπές.
- Η ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο δίκτυο.
- Η αυτοματοποιημένη συντήρηση και λειτουργία.
- Η αύξηση της ασφάλειας και της δυνατότητας επιτήρησης του δικτύου
- Η υποστήριξη της φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων και των νέων μεθόδων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας.

- Η αύξηση των διαθέσιμων επιλογών των καταναλωτών και της διαδραστικής συμμετοχής τους στην αγορά ΗΕ.

Προς την επίτευξη των ανωτέρω στόχων έχει ήδη αναπτυχθεί κάποια υποδομή αποτελούμενη από επιμέρους υποσυστήματα, έκαστο των οποίων είναι προσανατολισμένο στην υλοποίηση συγκεκριμένης λειτουργίας. Έτσι υπάρχουν συστήματα τα οποία υλοποιούν ή βελτιώνουν διάφορες λειτουργίες του ΕΔ όπως η παραγωγή ΗΕ από διάφορες πηγές, η αξιόπιστη μετάδοσή της, η προστασία από διακοπές και σφάλματα, η φυσική επιτήρηση, η καταγραφή της ζήτησης σε πραγματικό χρόνο και η αυτόματη διόρθωση βλαβών. Οι συσκευές οι οποίες υλοποιούν τις λειτουργίες αυτές επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω κάποιας τηλεπικοινωνιακής υποδομής και αποσκοπούν στη συλλογή και επεξεργασία δεδομένων σχετικών με την κατάσταση του δικτύου, τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας του, την επιτήρηση του δικτύου και την παρουσίαση πληροφοριών στις επιχειρήσεις ενέργειας και στους καταναλωτές. Οι συσκευές αυτές παρουσιάζονται ακολούθως.

1.3.2 Συστήματα έξυπνης μέτρησης (Smart metering)

Πρόκειται για την υποδομή που είναι υπεύθυνη για την αυτόματη συλλογή δεδομένων σχετικών με την κατάσταση του δικτύου, την κατανάλωση και ενδεχόμενα προβλήματα. Η υποδομή αυτή ονομάζεται AMI (Automatic Metering Infrastructure) και, εκτός των άλλων, πρέπει να παρέχει δυνατότητα αμφίδρομης επικοινωνίας από και προς τους διάφορους μετρητές του δικτύου.

Τα συστήματα ευφών μετρήσεων στηρίζονται στην εγκατάσταση διατάξεων, που ονομάζονται έξυπνοι μετρητές (smart meters), στα διάφορα σημεία ενδιαφέροντος του δικτύου. Οι μετρητές αυτοί υποστηρίζουν την αμφίδρομη μετάδοση δεδομένων από το σημείο μέτρησης προς το κεντρικό σύστημα και αντίστροφα. Ο όγκος της πληροφορίας την οποία αποστέλλουν οι έξυπνοι μετρητές δεν είναι ιδιαίτερα μεγάλος, καθώς στις περισσότερες περιπτώσεις αποστέλλουν στο κεντρικό σύστημα μόνο πληροφορίες σχετικές με την κατανάλωση ενέργειας ανά τακτά χρονικά διαστήματα.

Οι έξυπνοι μετρητές μπορούν να ελέγχουν τη λειτουργία οικιακών συσκευών. Είναι, επομένως, δυνατό να ελέγχουν την κατανάλωση ΗΕ ενός νοικοκυριού. Σε συνδυασμό με τη δυνατότητα απομακρυσμένου (remote) ελέγχου τους, το γεγονός αυτό τους καθιστά σημαντική υποδομή για τη λειτουργία της ευφυούς κατοικίας του μέλλοντος.



Σχήμα 1.5: Έξυπνος μετρητής

Με τη χρήση των συστημάτων έξυπνης μέτρησης, γίνεται δυνατή η μετάδοση σε πραγματικό χρόνο δεδομένων σχετικών με την κατανάλωση ΗΕ και, συνεπώς, με τη ζήτηση ΗΕ. Αυτό συνιστά σημαντική διαφοροποίηση ως προς τα παραδοσιακά δίκτυα ΗΕ, στα οποία η εκτίμηση της ζήτησης βασίζεται σε ιστορικά δεδομένα κατανάλωσης που ανανεώνονται με αργούς ρυθμούς (συνήθως σε ετήσια βάση).

1.3.3 Συστήματα έξυπνης παρακολούθησης (Smart monitoring)

Η παρακολούθηση και η επιτήρηση του δικτύου αποσκοπεί στον άμεσο εντοπισμό προβλημάτων έτσι ώστε να πραγματοποιείται και η πρόληψη ή η άμεση αποκατάστασή τους. Με την επιτήρηση του ευφυούς δικτύου είναι εφικτός ο προσδιορισμός της θέσης των μηχανικών βλαβών. Έτσι, τα συστήματα παρακολούθησης συμβάλλουν στη βελτίωση της αξιοπιστίας του ΗΔ και της ποιότητας της παρεχόμενης ΗΕ. Η λειτουργία της ευφυούς παρακολούθησης επιτυγχάνεται με χρήση αισθητήρων που εγκαθίστανται σε διάφορα σημεία του δικτύου. Οι αισθητήρες αυτοί συλλέγουν δεδομένα (τα οποία μπορούν να προέρχονται από μετρήσεις, από κοντινές κάμερες, από μονάδες μέτρησης φάσης – Phase Measurement Units κλπ). Το πλεονέκτημα των αισθητήρων είναι το χαμηλό κόστος που απαιτείται για την εγκατάστασή τους, καθιστώντας τους μια οικονομική και αποτελεσματική λύση για την παρακολούθηση του ΗΔ.

Με την εγκατάσταση τέτοιων αισθητήρων δημιουργείται ένα σύστημα καταναμημένων κόμβων σε όλη την έκταση του δικτύου. Σημειώνεται ότι, εκτός της συλλογής και της επεξεργασίας των δεδομένων, κάθε αισθητήρας είναι επιφορτισμένος και με τη μετάδοση των δεδομένων του στον επόμενο κόμβο έτσι ώστε διαδοχικά τα χρήσιμα δεδομένα να φθάσουν στο κέντρο ελέγχου. Επίσης, είναι υπεύθυνος και για τη λήψη και αναμετάδοση προς τον επόμενο κόμβο στην κατεύθυνση του παραλήπτη των δεδομένων που λαμβάνει από τον προηγούμενο αισθητήρα.

Τα δεδομένα που μεταδίδονται μέσω του δικτύου αισθητήρων στο ΕΔ ποικίλλουν. Σε ορισμένες περιπτώσεις τα δεδομένα αυτά μπορεί να αφορούν ανίχνευση σφαλμάτων στο δίκτυο ή παρακολούθηση της ποιότητας των υπηρεσιών που παρέχει το ΕΔ. Σε άλλες περιπτώσεις, το δίκτυο αισθητήρων μπορεί να μεταφέρει δεδομένα καταγραφής από μια κάμερα, που ενεργοποιείται όταν παρατηρηθεί κλοπή ρεύματος ή υλικού (καλωδίων, μετασχηματιστών κλπ) από το δίκτυο. Σημαντική είναι, επίσης, η μετάδοση δεδομένων σχετικών με την κατάσταση των γραμμών μεταφοράς, όπως η θερμοκρασία τους ή η ποσότητα της ΗΕ που μεταφέρεται μέσω αυτών. Πάντως, λόγω του πρώιμου σταδίου στο οποίο βρίσκεται το ΕΔ, δεν είναι δυνατόν να υπάρχει, προς το παρόν, ακριβής αποτύπωση των δεδομένων τα οποία θα μεταδίδονται μέσω αυτού.

1.4 Η τηλεπικοινωνιακή υποδομή του ευφυούς δικτύου

1.4.1 Απαιτήσεις από το ευφρές δίκτυο

Το ΕΔ απαιτείται να διαθέτει δυνατότητα αμφίδρομης μετάδοσης δεδομένων μεταξύ διαφόρων σημείων του δικτύου. Καθώς το παραδοσιακό ΗΔ περιορίζεται στη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας, αναγκαία είναι η εγκατάσταση τηλεπικοινωνιακής υποδομής ικανής να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις μετάδοσης των δεδομένων του ΕΔ. Προς το παρόν, υπάρχουν διάφορες προτάσεις για την υλοποίηση της βασικής αυτής λειτουργίας, χωρίς να έχει επικρατήσει κάποια. Όπως θα φανεί στη συνέχεια, κάποια επιλογή είναι κατάλληλη για ορισμένες περιπτώσεις ενώ ενδεχομένως υστερεί έναντι κάποιας άλλης σε άλλες περιπτώσεις.

Βασικό χαρακτηριστικό του ΕΔ είναι η παροχή υπηρεσιών διαφορετικών απαιτήσεων. Για παράδειγμα και σύμφωνα με όσα ήδη αναφέρθηκαν, είναι πιθανό το ΕΔ να χρησιμοποιείται για τη μετάδοση δεδομένων σχετικών με την κατανάλωση ενέργειας, με την κατάσταση του δικτύου αλλά και δεδομένα video σε περίπτωση διαπίστωσης κλοπής ρεύματος σε κάποια περιοχή. Σε

κάθε περίπτωση, το τηλεπικοινωνιακό δίκτυο που υποστηρίζει το ΕΔ πρέπει να ικανοποιεί για κάθε υπηρεσία αντίστοιχες προδιαγραφές. Συγκεκριμένα:

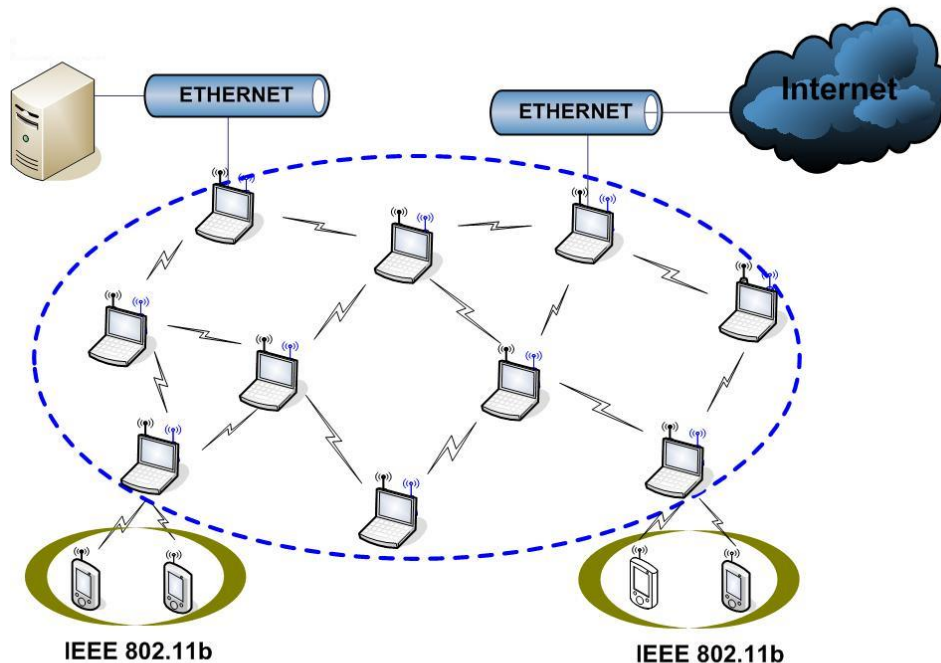
1. Το ΕΔ πρέπει να υποστηρίζει διαφορετική διαβάθμιση ποιότητας υπηρεσιών (Quality of Service – QoS) για κάθε υπηρεσία. Ορισμένες υπηρεσίες, όπως οι σχετιζόμενες με την αυτόματη διόρθωση βλαβών, απαιτούν μικρή καθυστέρηση των μεταδιδόμενων δεδομένων της τάξης των 10ms. Άλλες, όπως η μετάδοση δεδομένων video από σημεία ενδιαφέροντος, απαιτούν μεγαλύτερο εύρος ζώνης. Επομένως, είναι σημαντικός ο καθορισμός διαφορετικών κλάσεων υπηρεσιών, έκαστη των οποίων παρέχει διαφορετικού επιπέδου QoS.
2. Το σύστημα επικοινωνιών του ΕΔ πρέπει να είναι αξιόπιστο. Καθώς επιτελεί πολύ σημαντικές λειτουργίες, όπως η μέτρηση της κατανάλωσης ενέργειας και ο εντοπισμός βλαβών, είναι αναγκαίο να είναι πάντα διαθέσιμο και να ικανοποιεί τις απαιτήσεις QoS των υπηρεσιών που υποστηρίζει.
3. Το σύστημα επικοινωνιών του ΕΔ πρέπει να επιτυγχάνει υψηλό ποσοστό κάλυψης και να διαθέτει δυνατότητα χειρισμού συσκευών από απόσταση.
4. Το ΕΔ πρέπει να εγγυάται την ασφάλεια των δεδομένων. Το ζήτημα της ασφάλειας στο ΕΔ είναι κρίσιμο καθώς μέσω αυτού διακινούνται προσωπικά δεδομένα των χρηστών τα οποία απαιτείται να μην διαρρέουν αλλά και κρίσιμα δεδομένα για τη λειτουργία των εταιρειών παραγωγής και των παρόχων ΗΕ.

Με κριτήριο τις απαιτήσεις του ΕΔ έχουν προταθεί αρκετές λύσεις για την υλοποίηση του συστήματος επικοινωνιών, έκαστη των οποίων εμφανίζει πλεονεκτήματα σε κάποιες περιπτώσεις και μειονεκτήματα σε άλλες. Οι επιλογές για τη μετάδοση δεδομένων στο ΕΔ κατηγοριοποιούνται σε δύο ευρύτερες κατηγορίες, τις ασύρματες και τις ενσύρματες τεχνολογίες. Οι δύο εναλλακτικοί τρόποι μετάδοσης δεδομένων περιγράφονται ακολούθως:

1.4.2 Ασύρματοι τρόποι

1.4.2.1 Χρήση Wireless Mesh Networks – WMNs: Τα WMN είναι δίκτυα επικοινωνιών που διαφέρουν από τα παραδοσιακά δίκτυα καθώς δεν στηρίζονται σε κάποιον κεντρικό δρομολογητή/μεταγωγέα. Αντιθέτως, αποτελούνται από διάσπαρτους κόμβους που είναι υπεύθυνοι για την εξεύρεση μιας διαδρομής δρομολόγησης των δεδομένων με στόχο να διαβιβαστούν στον κεντρικό κόμβο/δρομολογητή. Δηλαδή τα δεδομένα δεν φθάνουν στο δρομολογητή απευθείας, όπως συμβαίνει σε πρωτόκολλα όπως το 3G και το IEEE 802.11, αλλά μέσω των κόμβων που επιλέγονται διαδοχικά. Αξιοσημείωτο είναι ότι τα

δίκτυα αυτά διαθέτουν τη δυνατότητα εύρεσης εναλλακτικής διαδρομής αν κάποιος κόμβος του δικτύου αποτύχει. Στο σχήμα 1.6 φαίνεται η λειτουργία ενός WMN και ο τρόπος με τον οποίο οι κόμβοι επικοινωνούν μεταξύ τους και διασυνδέονται με δίκτυα διαφορετικής αρχιτεκτονικής:



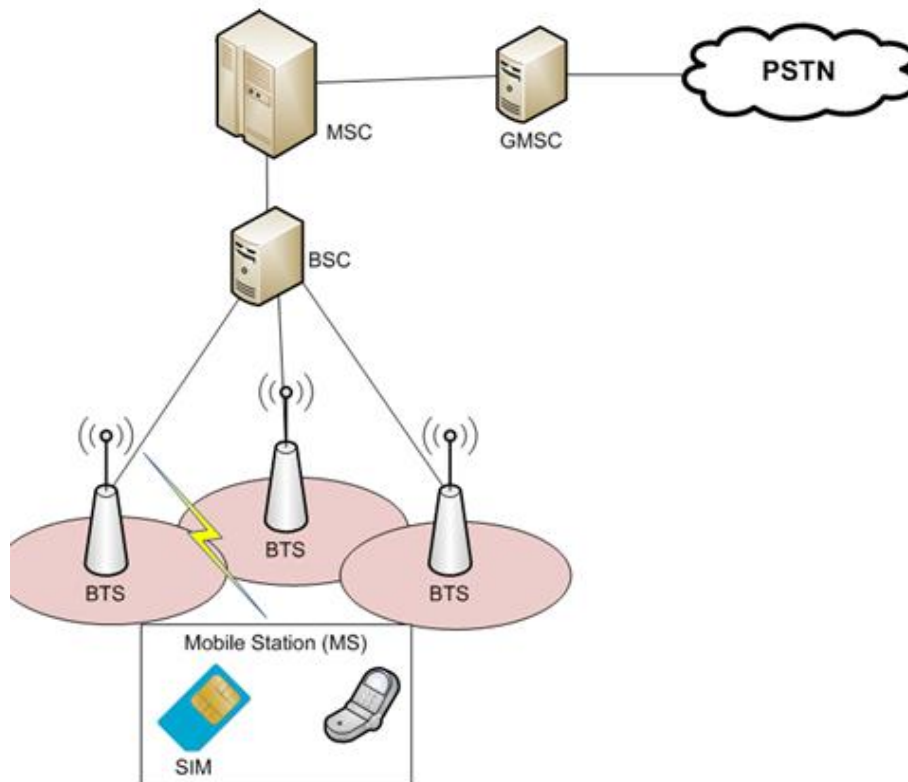
Σχήμα 1.6: Παράδειγμα Wireless Mesh Network

Τα δίκτυα αυτά θεωρούνται κατάλληλες λύσεις για το ΕΔ, καθώς είναι αξιόπιστα. Όταν κάποιος κόμβος τεθεί εκτός λειτουργίας, οι κόμβοι του δικτύου μπορούν να προσδιορίσουν, αυτόνομα και σε μικρό χρόνο, εναλλακτική διαδρομή έτσι ώστε η δρομολόγηση των δεδομένων να μη διακοπεί. Τα WMN διαθέτουν, επίσης, τη δυνατότητα μετάδοσης δεδομένων με υψηλούς ρυθμούς.

1.4.2.2 Κυβελωτά συστήματα: Μια άλλη προτεινόμενη λύση είναι η αξιοποίηση του δικτύου κινητής τηλεφωνίας το οποίο έχει το πλεονέκτημα ότι είναι ήδη εγκατεστημένο. Τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας δομούνται κατά κυψέλες· για το λόγο αυτό αποκαλούνται κυβελωτά δίκτυα. Η γεωγραφική περιοχή κάλυψης χωρίζεται σε κυψέλες, έκαστη των οποίων χρησιμοποιεί διαφορετικές συχνότητες. Επομένως, δύο γεωγραφικά

απομακρυσμένες κυψέλες μπορούν να χρησιμοποιούν τις ίδιες συχνότητες (frequency reuse) με αποτέλεσμα η χωρητικότητα του συστήματος να αυξάνεται.

Κάθε κυψέλη διαθέτει ένα σταθερό σταθμό βάσης (Base Station – BS), ο οποίος αναλαμβάνει την αποστολή και λήψη δεδομένων από τους κινητούς κόμβους (Mobile Station – MS) της κυψέλης. Οι σταθμοί βάσης επικοινωνούν με τους σταθμούς μεταγωγής (Mobile Switching Center - MSC), όπου, μέσω μιας πύλης MSC (Gateway MSC – GMSC), το κυψελωτό δίκτυο διασυνδέεται με το δίκτυο τηλεφωνίας PSTN. Τα βασικά πρότυπα κυψελωτών δικτύων σήμερα είναι το GSM (κυψελωτά δίκτυα δεύτερης γενιάς) και το 3G (κυψελωτά δίκτυα τρίτης γενιάς). Στο σχήμα 1.7 απεικονίζεται η αρχιτεκτονική ενός κυψελωτού δικτύου:



Σχήμα 1.7: Αρχιτεκτονική κυψελωτού δικτύου

Τα κυψελωτά συστήματα διαθέτουν το πλεονέκτημα της μεγάλης κάλυψης. Βασικό μειονέκτημα, όμως, αποτελεί το ότι για την αξιοποίησή τους είναι αναγκαία η συνεργασία με τους παρόχους κινητής τηλεφωνίας.

1.4.2.3 Πρωτόκολλα βασισμένα στο IEEE 802.15.4: Το πρωτόκολλο αυτό προσδιορίζει το φυσικό στρώμα και το στρώμα MAC για προσωπικά δίκτυα χαμηλού ρυθμού μετάδοσης (Low Rate Wireless Personal Area Networks – LR-WPAN). Στην περίπτωση του ΕΔ, τρία πρωτόκολλα βασισμένα στο IEEE 802.15.4 θεωρούνται κατάλληλα. Τα πρωτόκολλα αυτά είναι το ZigBee, το WirelessHART και το ISA 100.11a.

- Το **ZigBee** είναι μια σουίτα πρωτοκόλλων κατάλληλων για τη δημιουργία δικτύων mesh, χαμηλού ρυθμού μετάδοσης. Το πρωτόκολλο αυτό είναι κατάλληλο για το ΕΔ, ιδιαίτερα στο τμήμα εκείνο του δικτύου το οποίο βρίσκεται πλησιέστερα στον τελικό χρήστη. Αυτό διότι καταναλώνει χαμηλή ενέργεια και, αν και επιτρέπει μετάδοση δεδομένων υπό χαμηλούς ρυθμούς, οι ρυθμοί αυτοί αρκούν για τα δεδομένα μετρήσεων των οικιακών καταναλωτών. Είναι επίσης ένα ασφαλές πρωτόκολλο.
- Το **WirelessHART** είναι ένα πρωτόκολλο κατάλληλο για δίκτυα ασύρματων αισθητήρων. Χρησιμοποιεί χρονικό συγχρονισμό ενώ διαθέτει δυνατότητες αυτο-οργάνωσης και αυτο-ίασης.
- Το **ISA100.11a** είναι ένα ανοικτό πρωτόκολλο το οποίο αναπτύχθηκε από την ISA (International Society of Automation). Έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να είναι κατάλληλο για ασύρματα δίκτυα τα οποία χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία σε εφαρμογές αυτοματισμού και ελέγχου. Μαζί με το WirelessHART, θεωρούνται πιθανές λύσεις για το επικοινωνιακό σύστημα του ΕΔ σε υποσταθμούς και εργοστάσια παραγωγής ΗΕ.

1.4.2.4 Δορυφορικά συστήματα: Τα συστήματα δορυφορικών επικοινωνιών μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο ΕΔ καθώς διαθέτουν το πλεονέκτημα της παγκόσμιας κάλυψης. Επομένως, είναι κατάλληλα για την ένταξη στο ΕΔ υποσταθμών ή εργοστασίων που είναι εγκατεστημένα σε απομακρυσμένες τοποθεσίες και για τα οποία δεν είναι δυνατή άλλου είδους τηλεπικοινωνιακή κάλυψη. Σημαντικά μειονεκτήματά τους είναι το υψηλό κόστος και η υψηλή καθυστέρηση (150-300ms), αποτέλεσμα του υψηλού χρόνου που απαιτείται για τη μετάδοση του σήματος μέσω δορυφόρου.

1.4.2.5 Μικροκυματικές ζεύξεις – Οπτικές επικοινωνίες ελεύθερου χώρου: Οι μικροκυματικές και οι οπτικές ζεύξεις αποτελούν ζεύξεις σημείου προς σημείο (Point to Point). Μπορούν να επιτύχουν υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης σε μεγάλες αποστάσεις. Ως εκ τούτου, είναι κατάλληλες για την υλοποίηση του backbone τμήματος του δικτύου του ΕΔ. Μεγάλη είναι η σημασία τους για την κάλυψη των αναγκών του ΕΔ σε

απομακρυσμένες και αγροτικές περιοχές οι οποίες είτε δεν καλύπτονται από κάποιον από τους προηγούμενους τρόπους είτε το κόστος κάλυψης με άλλον τρόπο είναι πολύ μεγάλο.

1.4.3 Ενσύρματοι τρόποι

1.4.3.1 Οπτικές ίνες: Οι οπτικές ίνες διαθέτουν δυνατότητες μετάδοσης δεδομένων με πολύ υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης, ενώ το σημαντικότερο μειονέκτημά τους είναι το υψηλό κόστος εγκατάστασής τους και η υψηλή εξειδίκευση του προσωπικού συντήρησης και εγκατάστασης που απαιτείται συγκριτικά με τις υπόλοιπες λύσεις. Εντούτοις, χρησιμοποιούνται ήδη από πολλές εταιρείες ηλεκτρισμού για την τηλεπικοινωνιακή διασύνδεση των μονάδων παραγωγής. Καθώς υπάρχουν ήδη έτοιμες εγκαταστάσεις οπτικών ινών με αχρησιμοποίητο μεγάλο ποσοστό του διαθέσιμου εύρους ζώνης τους, είναι πιθανή η χρήση τους για το backbone τμήμα του δικτύου του ΕΔ.

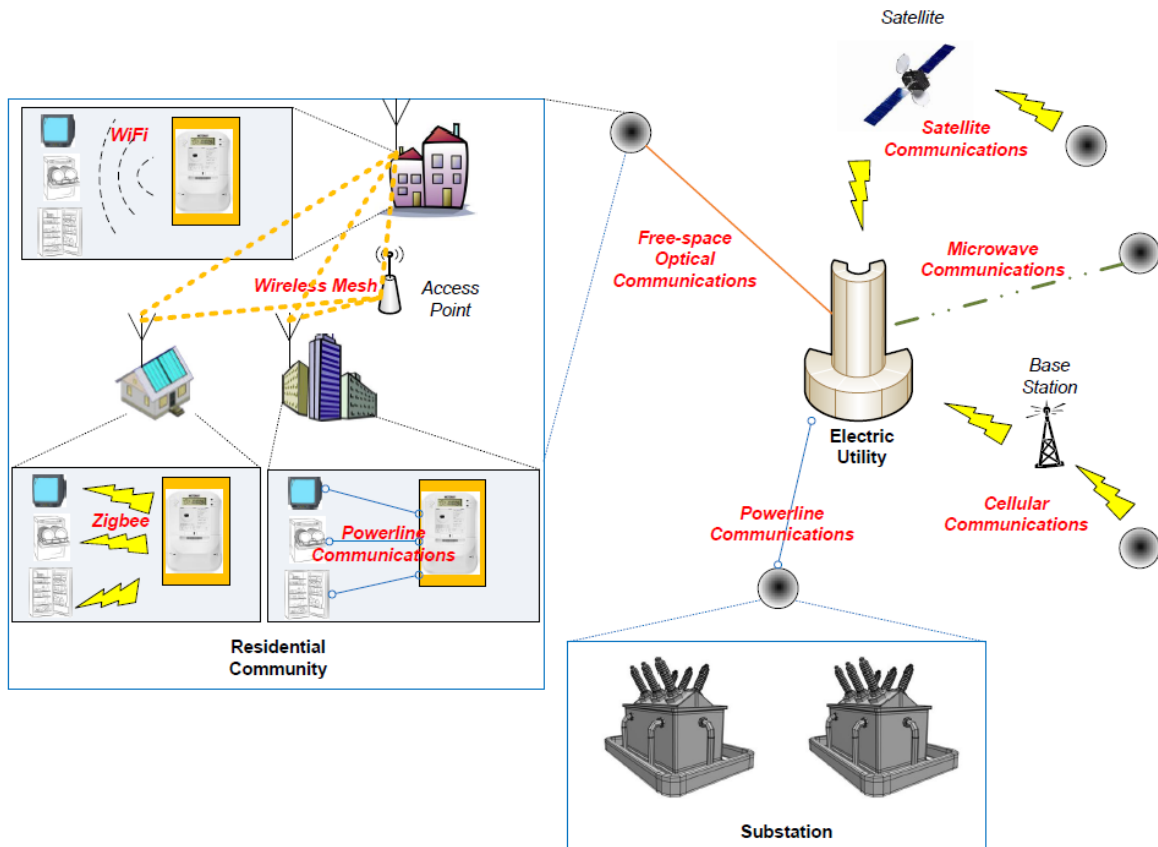
1.4.3.2 Powerline Communications (PLC): Η τεχνολογία PLC αφορά στη μετάδοση δεδομένων μέσω των καλωδίων μεταφοράς ΗΕ. Η πληροφορία μεταδίδεται χρησιμοποιώντας ως μέσο μετάδοσης τις ίδιες τις γραμμές μεταφοράς ΗΕ.

Η τεχνολογία PLC αξιοποιεί το ανεκμετάλλευτο εύρος ζώνης των καλωδίων μεταφοράς ηλεκτρικού ρεύματος για μετάδοση δεδομένων, αφήνοντας ένα περιθώριο ασφαλείας από τις χαμηλές συχνότητες. Η τεχνολογία PLC είναι δυνατό να αξιοποιηθεί για διάφορες εφαρμογές ΕΔ. Δεδομένου του εγκατεστημένου ηλεκτρικού δικτύου σε κάθε κατοικία, είναι πιθανή η εφαρμογή της τεχνολογίας αυτής για έλεγχο ηλεκτρικών συσκευών στην ευφυή κατοικία του μέλλοντος.

Μια άλλη εφαρμογή των επικοινωνιών PLC είναι η μετάδοση δεδομένων με υψηλό ρυθμό μετάδοσης μέσω των γραμμών ΗΕ (Broadband over Power Lines – BB-PLC) σε υψηλές σχετικά συχνότητες (1.6 – 80 MHz) επιτυγχάνοντας ρυθμούς μετάδοσης που υπερβαίνουν τα 200Mbps στο φυσικό στρώμα. Είναι, επομένως, κατάλληλη τεχνολογία για μετάδοση δεδομένων μεταξύ των διαφόρων κόμβων του ΕΔ, ιδιαίτερα στη ΜΤ.

Η αξιοποίηση της τεχνολογίας PLC εμφανίζει προκλήσεις. Καθώς το ΗΔ είναι προσανατολισμένο στη μεταφορά ΗΕ, πρέπει να ληφθούν πρόσθετα μέτρα για τη διασφάλιση της ασφάλειας και της ιδιωτικότητας των μεταδιδόμενων δεδομένων. Επίσης, πρέπει να ληφθεί υπόψη η περιορισμένη απόσταση στην οποία μπορεί να πραγματοποιηθεί μετάδοση δεδομένων μέσω των καλωδίων του δικτύου ΗΕ και, εφόσον απαιτείται, να τοποθετούνται επαναλήπτες μεταξύ απομακρυσμένων κόμβων.

Από τα προηγούμενα διαπιστώνεται ότι, από πλευράς τηλεπικοινωνιών, το ΕΔ δεν μπορεί να είναι ένα ομογενές δίκτυο. Αντιθέτως, πιθανότερη φαίνεται η υλοποίησή του με κατάλληλη διασύνδεση ετερογενών δικτύων. Έκαστο των επιμέρους δικτύων που απαρτίζουν το ΕΔ μπορεί να λειτουργεί με διαφορετικό πρωτόκολλο και να έχει διαφορετική αρχιτεκτονική. Τα διαφορετικά αυτά επιμέρους δίκτυα τα οποία ενδεχομένως απαρτίζουν το ΕΔ παρουσιάζονται στο σχήμα 1.8.



Σχήμα 1.8: Τηλεπικοινωνιακή αρχιτεκτονική ενός ευφυούς δικτύου

Το ΕΔ είναι επομένως ένα ετερογενές δίκτυο αποτελούμενο από επιμέρους δίκτυα διαφορετικής τοπολογίας. Στο παράδειγμα του σχήματος, οι έξυπνοι μετρητές λαμβάνουν δεδομένα από τις οικιακές συσκευές αξιοποιώντας διαφορετική τεχνολογία σε κάθε σπίτι, όπως το πρωτόκολλο ZigBee, το WiFi (IEEE 802.11) ή η τεχνολογία PLC. Οι οικιακοί καταναλωτές οργανώνονται μεταξύ τους σε μια τοπολογία WMN έτσι ώστε τα δεδομένα τους να φθάνουν σε κάποιον ανώτερο κόμβο. Ο κόμβος αυτός μπορεί να μεταφέρει τα δεδομένα στην εταιρεία ηλεκτρισμού με Οπτικές Επικοινωνίες Ελεύθερου Χώρου (Free-space Optical Communications) ενώ άλλοι υποσταθμοί και μονάδες παραγωγής μπορούν να επικοινωνούν με το κεντρικό σύστημα της εταιρείας με κυψελωτά συστήματα, μικροκυματικές και δορυφορικές ζεύξεις ή PLC. Επομένως,

είναι αναγκαία η ανάπτυξη των τεχνολογιών και των πρωτοκόλλων εκείνων που θα επιτρέψουν τη διασύνδεση των ετερογενών δικτύων και τη διασφάλιση του επιθυμητού QoS σε κάθε υπηρεσία του smart grid.

1.5 Τα πλεονεκτήματα του Smart Grid

Η αναβάθμιση του σημερινού ηλεκτρικού δικτύου και η υλοποίηση του ΕΔ είναι ικανή να επιλύσει πολλά από τα προβλήματα του σημερινού συστήματος ΗΕ αλλά και να αλλάξει σε μεγάλο βαθμό τον τρόπο λειτουργίας της αγοράς ΗΕ παγκοσμίως. Οι αλλαγές τις οποίες είναι ικανή να επιφέρει η αναβάθμιση του ηλεκτρικού δικτύου δεν περιορίζονται στην εξοικονόμηση πόρων αλλά βελτιώνουν τη συνολική ποιότητα των παρεχόμενων υπηρεσιών στους καταναλωτές. Όπως περιγράφεται παρακάτω, η εφαρμογή της νέας αυτής τεχνολογίας αναμένεται να επιφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα στις μελλοντικές κοινωνίες

1.5.1 Εκτίμηση της ζήτησης και μεταβολή της τιμής σε πραγματικό χρόνο

Το σημερινό δίκτυο ΗΕ στηρίζεται στη μέτρηση της κατανάλωσης ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Η κατανάλωση, μετρημένη σε kWh, πολλαπλασιάζεται με την τιμή ανά kWh και έτσι υπολογίζεται το ποσό το οποίο οφείλει να πληρώσει ο καταναλωτής στην επιχείρηση ηλεκτρισμού. Η τιμή της kWh είναι σε γενικές γραμμές σταθερή με μόνη εξαίρεση την ύπαρξη ειδικών τιμολογίων όπως το νυκτερινό. Με την εγκατάσταση των έξυπνων μετρητών και του ΕΔ, το οποίο επιτρέπει την επικοινωνία των πρώτων με την επιχείρηση ηλεκτρισμού, η κατάσταση αυτή αναμένεται να αλλάξει. Το ΕΔ παρέχει τη δυνατότητα εκτίμησης της κατανάλωσης σε πραγματικό χρόνο κατά τη διάρκεια της ημέρας. Αυτό είναι ένα ιδιαίτερα θετικό στοιχείο ικανό να προσφέρει σημαντικά οφέλη τόσο στους παραγωγούς όσο και στους καταναλωτές και την κοινωνία.

Κάθε καταναλωτής είναι δυνατό να γνωρίζει την ενέργεια που χρησιμοποιεί κάθε στιγμή καθώς και τις συσκευές στις οποίες διοχετεύεται η ενέργεια αυτή. Μπορεί να διαχειρίζεται συνεπώς τις οικιακές συσκευές με καλύτερο τρόπο έτσι ώστε να μειώνεται η κατανάλωση και η χρέωση.

Επιπλέον, η επιχείρηση ηλεκτρισμού μπορεί να μεταβάλλει δυναμικά κατά τη διάρκεια της ημέρας την τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος. Αυξάνοντας την τιμή του ρεύματος κατά τις ώρες μεγάλης ζήτησης όπως το μεσημέρι (ώρες αιχμής) και μειώνοντάς την κατά τις ώρες χαμηλότερης ζήτησης, ο καταναλωτής θα μεταβάλλει τη συμπεριφορά του ώστε να χρησιμοποιεί τις ενεργοβόρες συσκευές, σε χρονικές περιόδους κατά τις οποίες η τιμή του ρεύματος είναι

χαμηλότερη. Κατ' αυτό τον τρόπο είναι δυνατή η μείωση της κατανάλωσης στις ώρες αιχμής και η μετακύλιση της κατανάλωσης αυτής σε ώρες κατά τις οποίες η επιχείρηση ηλεκτρισμού μπορεί ευκολότερα να καλύψει τη ζήτηση. Αποφεύγεται έτσι η κατασκευή νέων μεγάλων μονάδων παραγωγής, χρήσιμων μόνο για την κάλυψη των αυξημένων αναγκών που παρουσιάζονται για μικρή χρονική διάρκεια κάθε ημέρα. Σημαντικό είναι, επίσης, και το όφελος για τον καταναλωτή λόγω των μικρότερων χρεώσεων τις οποίες μπορεί με αυτό τον τρόπο να έχει.

Με τη δυναμική μεταβολή των τιμών της ενέργειας κατά τη διάρκεια της ημέρας δημιουργείται στην ουσία ένα χρηματιστήριο ΗΕ. Ανάλογα με την προσφορά και τη ζήτηση, κάθε παραγωγός επιλέγει αν και πότε θα διαθέσει την ΗΕ την οποία παράγει στο σύστημα διανομής. Ομοίως, κάθε καταναλωτής επιλέγει αν και πότε θα καταναλώσει την ενέργεια την οποία χρειάζεται. Η λειτουργία ενός τέτοιου χρηματιστηρίου ΗΕ αναμένεται να δημιουργήσει και νέες θέσεις εργασίας αυξάνοντας το όφελος το οποίο προσφέρει το ΕΔ στην κοινωνία και την οικονομία.

1.5.2 Εντοπισμός και επιδιόρθωση βλαβών

Μέχρι σήμερα ο εντοπισμός της βλάβης μετά από κάποιο πρόβλημα του δικτύου είναι χρονοβόρα υπόθεση και πραγματοποιείται από την ηλεκτρική εταιρεία. Προσωπικό της τελευταίας με μετρήσεις εντοπίζει την ακριβή θέση του προβλήματος και κατόπιν ενεργοποιείται, εφόσον υπάρχει, εναλλακτική διαδρομή για την τροφοδότηση της αποκομμένης περιοχής μέχρι να αποκατασταθεί η βλάβη.

Το ΕΔ διαθέτοντας αισθητήρες σε πολλά σημεία του είναι ικανό να εντοπίζει το σημείο της βλάβης αμέσως. Είναι επίσης ικανό να προσδιορίζει μία εναλλακτική διαδρομή και να την ενεργοποιεί για την τροφοδότηση της περιοχής μέχρι το προσωπικό της αρμόδιας επιχείρησης να αποκαταστήσει τη βλάβη. Η δυνατότητα αυτή του ΕΔ ονομάζεται αυτο-ίαση (self-healing). Είναι πιθανό, εφόσον ο χρόνος αποκατάστασης είναι μικρός (<10ms), το πρόβλημα του δικτύου να μη γίνει αντιληπτό από τους καταναλωτές. Ιδιαίτερα σημαντικό είναι το όφελος από τη μείωση των διακοπών αν ληφθούν υπόψη τα μεγέθη των οικονομικών ζημιών εξαιτίας των διακοπών.

1.5.3 Αντιμετώπιση κλοπής ρεύματος

Όπως ήδη αναφέρθηκε, η κλοπή ρεύματος αποτελεί ένα πολύ σημαντικό πρόβλημα, ιδιαίτερα στις αναπτυσσόμενες χώρες που συνιστά σημαντική οικονομική ζημιά για τις εταιρείες ηλεκτρισμού. Το ΕΔ μπορεί να αντιμετωπίσει αποτελεσματικά το φαινόμενο αυτό καθώς διαθέτει συστήματα επιτήρησης σε πολλά σημεία του δικτύου. Οι κόμβοι τους οποίους διαθέτουν τέτοια συστήματα μπορούν να επισημάνουν ενδεχόμενη απώλεια ρεύματος ή διαταραχή λόγω κλοπής ρεύματος ή υλικού. Ο εντοπισμός των κλοπών ρεύματος βασίζεται σε μετρήσεις ισχύος

σε διάφορα σημεία μιας διαδρομής. Στην περίπτωση αυτή με ενημέρωση της εταιρείας ηλεκτρισμού είναι εφικτή η αποτροπή της όποιας παράνομης δραστηριότητας.

Σημαντική είναι η δυνατότητα του ευφυούς δικτύου να ενσωματώνει διαφορετικές διατάξεις στις οποίες επιτρέπει να επικοινωνούν με το κεντρικό σύστημα. Είναι δυνατή έτσι η εγκατάσταση καμερών σε συγκεκριμένες θέσεις του δικτύου οι οποίες αποστέλλουν δεδομένα βίντεο στο σταθμό επιτήρησης και ελέγχου. Οι κάμερες αυτές ενεργοποιούνται σε περίπτωση παρατήρησης κάποιου ύποπτου γεγονότος στην περιοχή επιτήρησής τους από κάποιον κοντινό αισθητήρα. Τότε, οι κάμερες αποστέλλουν κινούμενη εικόνα από το σημείο. Με δεδομένη την εξυπηρέτηση διαφορετικών κλάσεων ποιότητας υπηρεσίας, τα δεδομένα των καμερών μπορούν να λάβουν υψηλή προτεραιότητα ώστε να ενημερωθεί το αρμόδιο τμήμα της επιχείρησης ηλεκτρισμού. Έτσι είναι δυνατό να αντιμετωπίζονται άμεσα και αποτελεσματικά οι κλοπές υλικών του δικτύου και αποτρέπονται απόπειρες δολιοφθοράς κατά των εγκαταστάσεων της ηλεκτρικής εταιρείας.

1.5.4 Ενσωμάτωση κατανεμημένων πηγών ενέργειας

Το ΕΔ αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την ομαλή ενσωμάτωση των διασπαρμένων πηγών ΗΕ. Επιτρέπει την τιμολόγηση της ΗΕ σε πραγματικό χρόνο. Η δυνατότητα αυτή είναι αρκετά χρήσιμη αφού είναι εφικτό κάθε παραγωγός, έχοντας γνώση της τιμής πώλησης της ΗΕ, να αποφασίζει για τη σύνδεση ή όχι του συστήματός του στο δίκτυο με σκοπό την πώληση ΗΕ.

Επιπλέον, το ΕΔ διαθέτει μετρητικές διατάξεις οι οποίες μετρούν την ποιότητα της παρεχόμενης ΗΕ (πλάτος εναλλασσόμενης τάσης, αρμονικές συνιστώσες, συχνότητα κλπ) σε κάθε σημείο του δικτύου. Στην περίπτωση παροχής μη αποδεκτής ποιοτικά ενέργειας από κάποιον κατανεμημένο παραγωγό μπορεί αυτόματα να διακοπεί προσωρινά η σύνδεσή του με το υπόλοιπο δίκτυο αυτόματα. Όταν η ενέργεια διαθέτει πάλι αποδεκτή ποιότητα, συνδέεται πάλι αυτόματα ο παραγωγός. Μέσω του ΕΔ η ενσωμάτωση των κατανεμημένων πηγών γίνεται πολύ απλή.

1.5.5 Παροχή ευρυζωνικού internet

Αν και σήμερα τα περισσότερα αστικά κέντρα διαθέτουν ευρυζωνική πρόσβαση στο διαδίκτυο, αυτό δεν ισχύει παντού. Πολλές απομακρυσμένες περιοχές δεν διαθέτουν κατάλληλη υποδομή. Το πρόβλημα αυτό παρατηρείται κυρίως στις αναπτυσσόμενες χώρες αλλά και στις αγροτικές περιοχές πολλών ανεπτυγμένων χωρών.

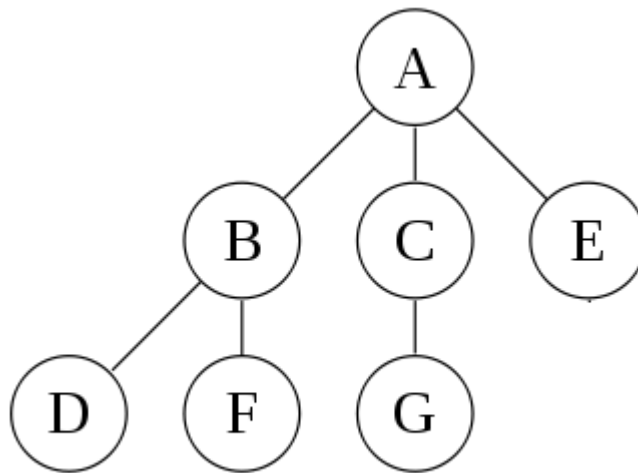
Η τεχνολογία BB-PLC παρέχει τη δυνατότητα ευρυζωνικής πρόσβασης χρησιμοποιώντας τις γραμμές μεταφοράς ΗΕ. Καθώς σχεδόν όλος ο πλανήτης σήμερα καλύπτεται από το δίκτυο ΗΕ, η υλοποίηση του ΕΔ και η δυνατότητα αξιοποίησης των γραμμών του ΗΔ για ευρυζωνική

μετάδοση πληροφορίας μπορούν να χρησιμεύσουν και για την παροχή ευρυζωνικού internet στις απομακρυσμένες αυτές περιοχές.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΧΡΟΝΟΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ ΣΤΟ ΕΥΦΥΕΣ ΔΙΚΤΥΟ

2.1 Εισαγωγή στην αρχιτεκτονική του ευφυούς δικτύου

Το ΕΔ είναι ένα ετερογενές δίκτυο, αποτελείται δηλαδή από δίκτυα τα οποία στηρίζονται σε διαφορετικά πρωτόκολλα. Η τηλεπικοινωνιακή υποδομή του ευφυούς δικτύου είναι επιφορτισμένη με τη μετάδοση δεδομένων μεταξύ διαφόρων διατάξεων, που ενδέχεται να χρησιμοποιούν διαφορετικά δικτυακά πρωτόκολλα. Απαιτείται, επομένως, η σχεδίαση και εγκατάσταση ενός δικτύου που θα καθιστά εφικτή την εξυπηρέτηση των αναγκών σε τηλεπικοινωνιακή κίνηση των διατάξεων οι οποίες είναι εγκατεστημένες σε διάφορα σημεία του ΗΔ.



Σχήμα 2.1: Γράφος δενδροειδούς μορφής

Για την τη σχεδίαση της υποδομής αυτής πρέπει να ληφθεί υπόψη η τοπολογία του ευφυούς δικτύου. Καθώς το ΕΔ αποτελεί ουσιαστικά αναβάθμιση του παραδοσιακού ηλεκτρικού δικτύου, η τοπολογία του είναι αυτή ενός γράφου δενδροειδούς μορφής. Στο σημείο αυτό σημειώνεται ότι δενδροειδής γράφος είναι ένας γράφος του οποίου κόμβοι ανά δύο συνδέονται με μία μόνο ακμή. Ένας τέτοιος γράφος μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελείται από πολλά ιεραρχικά επίπεδα, έκαστο των οποίων αποτελείται από κόμβους που απέχουν κατά ίδιο αριθμό ακμών από την κορυφή του δέντρου. Κάθε κόμβος του γράφου-δένδρου αποστέλλει πληροφορίες στον κόμβο πατέρα, ο

οποίος είναι ο αμέσως ανώτερος ιεραρχικά κόμβος. Έτσι, η πληροφορία μεταφέρεται διαδοχικά στον παραλήπτη, ο οποίος μπορεί να βρίσκεται αρκετά επίπεδα υψηλότερα στο γράφο. Στο σχήμα 2.1 φαίνεται ένας γράφος-δένδρο, έτσι ώστε να γίνει κατανοητή η δικτυακή τοπολογία ενός ΕΔ.

2.2 Συνάθροιση δεδομένων (Aggregation)

Καθώς η δομή του δικτύου είναι αυτή ενός γράφου-δένδρου, η πληροφορία μεταδίδεται διαδοχικά ένα επίπεδο κάθε φορά μέχρι να φθάσει στον επιθυμητό κόμβο (sink). Αυτό σημαίνει ότι κάθε κόμβος πρέπει να αποστέλλει στον επόμενο την πληροφορία την οποία αυτός παράγει αλλά και να προωθεί τα δεδομένα τα οποία λαμβάνει από τους κόμβους-παιδιά του. Για παράδειγμα και με βάση το σχήμα 2.1, ο κόμβος Β πρέπει να μεταδίδει στον κόμβο Α τα δεδομένα τα οποία λαμβάνει από τους κόμβους D και F καθώς και όσα δεδομένα παράγει ο ίδιος.

Κάθε κόμβος μπορεί να μεταδίδει τα δεδομένα των κόμβων-παιδιών χωρίς να προκαλεί κάποια μεταβολή σε αυτά. Στην περίπτωση αυτή δεν υπάρχει συνάθροιση δεδομένων. Σε κάθε περίπτωση αναμένεται η κίνηση να εμφανίζει αύξηση στα υψηλότερα επίπεδα του δένδρου.

Συχνά, τα δεδομένα γειτονικών κόμβων ενδέχεται να παρουσιάζουν ομοιότητες, ώστε να μην είναι αναγκαία η μετάδοση των δεδομένων όλων των κόμβων. Ένα παράδειγμα είναι η μετάδοση πληροφοριών σχετικών με την εξωτερική θερμοκρασία κάθε κόμβου. Στην περίπτωση αυτή, δεν είναι αναγκαία η λήψη πληροφοριών από γειτονικούς κόμβους καθώς η πρόσθετη αυτή πληροφορία ενδέχεται να είναι περιττή. Έτσι, ένας κόμβος του δικτύου ενδέχεται να μην απαιτείται να μεταδώσει αυτούσιες τις σχετικές πληροφορίες που λαμβάνει από όλους τους κόμβους-παιδιά στα υψηλότερα επίπεδα του δένδρου.

Γενικότερα, συχνά οι κόμβοι του δικτύου δεν απαιτείται να μεταδίδουν όλες τις πληροφορίες που λαμβάνουν από τα χαμηλότερα επίπεδα. Αντιθέτως, η μεταδιδόμενη πληροφορία μπορεί να είναι προϊόν επεξεργασίας των λαμβανόμενων δεδομένων. Ένας κόμβος μπορεί ενδεχομένως να εφαρμόζει συναρτήσεις μεγίστου/ελαχίστου ή μέσου όρου στα δεδομένα τα οποία λαμβάνει και να αποστέλλει το αποτέλεσμα των υπολογισμών στους επόμενους κόμβους. Στην περίπτωση αυτή, τα δεδομένα που αποστέλλει ο κόμβος είναι μικρότερου όγκου από τα δεδομένα τα οποία λαμβάνει από όλους τους κόμβους-παιδιά του. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται συνάθροιση δεδομένων (aggregation)· ο όρος αυτός δηλώνει τη συνένωση – εφόσον ικανοποιείται συγκεκριμένο κριτήριο – των πληροφοριών από πλήθος λαμβανόμενων πακέτων δεδομένων σε

λιγότερα πακέτα εκπομπής. Με την μέθοδο αυτή επιτυγχάνεται μείωση της ελάχιστης απαιτούμενης χωρητικότητας. Σημειώνεται ότι σε ένα δίκτυο η συνάθροιση δεδομένων μπορεί να εφαρμόζεται με μεταβλητό τρόπο. Πολλά λαμβανόμενα πακέτα ενδεχομένως συνενώνονται σε ένα (για παράδειγμα στην περίπτωση εφαρμογής κάποιας συνάρτησης μέσου όρου), ή ενδεχομένως σε περισσότερα.

2.3 Οι τρόποι εκπομπής δεδομένων

Το ΕΔ διακινεί πληροφορίες μεταξύ διαφορετικών διατάξεων. Οι διατάξεις αυτές μπορούν να μεταδίδουν δεδομένα είτε περιοδικά είτε άπαξ (one-shot). Στην πρώτη περίπτωση, οι κόμβοι του δικτύου συλλέγουν ή παράγουν πληροφορίες ανά τακτά χρονικά διαστήματα τις οποίες μεταδίδουν μέσω του ΕΔ. Παράδειγμα υπηρεσιών που μεταδίδουν δεδομένα κατά τρόπο περιοδικό είναι οι υπηρεσίες έξυπνης μέτρησης (smart metering). Στην περίπτωση αυτή δεδομένα που αφορούν, για παράδειγμα, την κατανάλωση ΗΕ μεταδίδονται μέσω του δικτύου ανά συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα.

Άλλες υπηρεσίες του ΕΔ αποστέλλουν δεδομένα μετά από συγκεκριμένα γεγονότα και όχι ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Αυτή είναι η περίπτωση της one-shot εκπομπής. Παράδειγμα τέτοιων υπηρεσιών είναι οι υπηρεσίες ανίχνευσης βλαβών του ΕΔ. Οι υπηρεσίες αυτές παρακολουθούν το ηλεκτρικό δίκτυο μέχρι να παρατηρηθεί κάποια βλάβη. Τότε, μεταδίδουν πληροφορίες σχετικά με τη βλάβη και τη θέση της με στόχο την άμεση επιδιόρθωσή της. Είναι πολύ σημαντικό οι πληροφορίες αυτές να φθάσουν στον προορισμό τους αξιόπιστα και με μικρή καθυστέρηση, το οποίο σημαίνει ότι τα πακέτα δεδομένων αυτά πρέπει να διακινούνται με υψηλή προτεραιότητα.

2.4 Το στρώμα ελέγχου πρόσβασης μέσου (MAC) στο ευφύες δίκτυο

2.4.1 Η ανάγκη για διαστρωματική προσέγγιση

Καθώς το ΕΔ απαιτείται να υποστηρίζει πλήθος υπηρεσιών, πολλές εκ των οποίων έχουν διαφορετικές απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσιών (QoS), κατά τη σχεδιάσή του είναι αναγκαίο να λαμβάνονται υπόψη τα χαρακτηριστικά κάθε υπηρεσίας. Για το λόγο αυτό, το ΕΔ διαφοροποιείται από τα περισσότερα δίκτυα καθώς απαιτείται διαστρωματική (cross layer) προσέγγιση και σχεδιάσή του. Αυτό σημαίνει ότι ενδέχεται να παραβιάζεται η αρχή της

ανεξαρτησίας των επιπέδων του OSI. Ενώ βασική απαίτηση του OSI είναι η ανεξαρτησία κάθε επιπέδου της στοίβας πρωτοκόλλων από τα πρωτόκολλα υψηλότερου και χαμηλότερου επιπέδου, η παραβίαση της αρχής αυτής ορισμένες φορές διευκολύνει την υλοποίηση του ΕΔ και την κάλυψη των απαιτήσεων QoS των διαφόρων υπηρεσιών. Έτσι, ενδέχεται το στρώμα MAC να λαμβάνει κάθε φορά υπόψη το είδος της υπηρεσίας ώστε να βελτιστοποιείται η ανάθεση πόρων.

Οι πιθανές υλοποιήσεις του πρωτοκόλλου MAC στο δίκτυο κορμού του ΕΔ βασίζονται είτε σε τεχνικές βασισμένες στον ανταγωνισμό (contention-based) είτε σε πολυπλεξία διαίρεσης χρόνου (Time Division Multiple Access – TDMA). Οι τεχνικές αυτές είναι ευρέως διαδεδομένες και χρησιμοποιούνται σε άλλα τηλεπικοινωνιακά συστήματα, όπως τα ασύρματα δίκτυα και τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας. Η χρήση έκαστης των ανωτέρω τεχνικών που συνοψίζονται στη συνέχεια, εμφανίζει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα τα οποία πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τη σχεδίαση του ΕΔ.

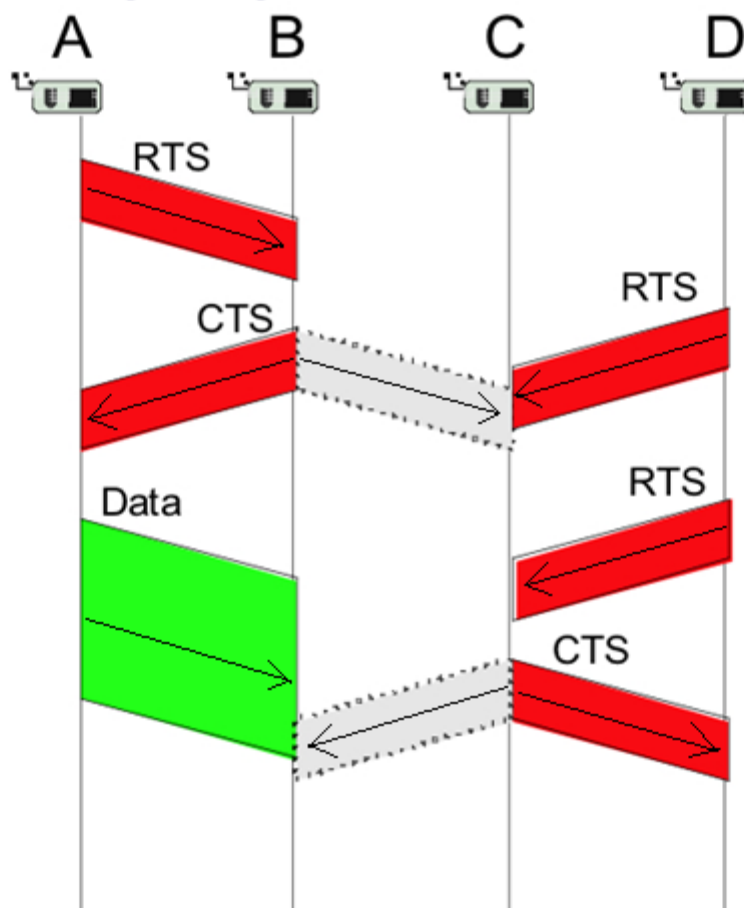
2.4.2 Στρώμα MAC βασισμένο σε συγκρούσεις (contention-based)

Στην περίπτωση αυτή κάθε κόμβος επιχειρεί να μεταδώσει δεδομένα όταν διαπιστώνει ότι ο δίαυλος είναι ελεύθερος. Το πλεονέκτημα είναι ότι δεν απαιτείται συγχρονισμός μεταξύ των διαφόρων κόμβων και συνεπώς απλοποιείται η υλοποίηση. Χαρακτηριστικό των πρωτοκόλλων της κατηγορίας αυτής είναι οι συχνές συγκρούσεις που συμβαίνουν όταν περισσότεροι από ένας γειτονικοί κόμβοι μεταδίδουν ταυτόχρονα. Αποτέλεσμα των συγκρούσεων είναι η καταστροφή και η αναμετάδοση των προβληματικών πακέτων.

Η μέθοδος αυτή είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη στα ασύρματα δίκτυα και στο πρωτόκολλο Ethernet. Για την αποφυγή των συγκρούσεων και άρα της σπατάλης πόρων παρέχεται η δυνατότητα αδειοδότησης των κόμβων πριν αυτοί μεταδώσουν δεδομένα. Η αδειοδότηση γίνεται με αποστολή πακέτων RTS (Request To Send) πριν τη μετάδοση ενός πακέτου πληροφορίας. Όταν ο παραλήπτης είναι σε θέση να λάβει τα δεδομένα αποστέλλει ως απάντηση ένα πακέτο CTS (Clear to Send). Κατ' αυτό τον τρόπο περιορίζεται σημαντικά το πλήθος των συγκρούσεων. Το μοντέλο αυτό εφαρμόζεται στο διαδεδομένο πρωτόκολλο IEEE 802.11. Η λειτουργία των contention-based MACs με πακέτα RTS/CTS απεικονίζεται στο σχήμα που ακολουθεί:

Εντούτοις, τα πρωτόκολλα MAC που βασίζονται σε ανταγωνισμό εμφανίζουν αρκετά μειονεκτήματα. Οι συγκρούσεις κόμβων που μεταδίδουν ταυτόχρονα οδηγούν σε σημαντική σπατάλη πόρων η οποία, όπως θα εξηγηθεί στη συνέχεια, θα μπορούσε να αποφευχθεί με χρήση άλλων πρωτοκόλλων βασισμένων στη διαίρεση χρόνου. Επιπλέον, η αποστολή πακέτων RTS/CTS αυξάνει τον πλεονασμό κατά τη διακίνηση της πληροφορίας ή, ισοδύναμα, μειώνει τον

ωφέλιμο ρυθμό μετάδοσης. Για την αντιμετώπιση των μειονεκτημάτων αυτών στα ΕΔ χρησιμοποιούνται συχνά τεχνικές TDMA.

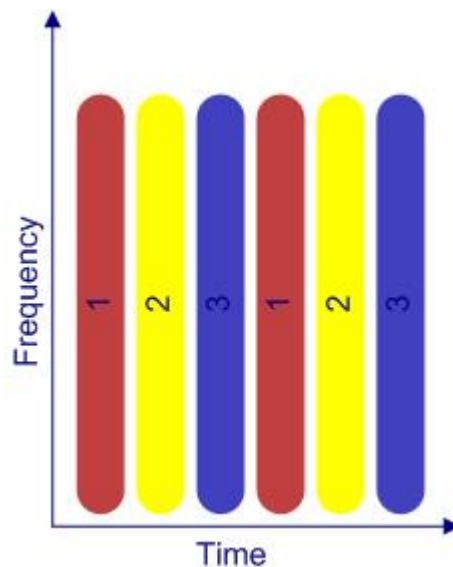


Σχήμα 2.2: Η λειτουργία των πακέτων RTS/CTS σε πρωτόκολλο MAC βασισμένο σε ανταγωνισμό

2.4.3 Πρωτόκολλα χρονικής πολυπλεξίας (TDMA)

Η τεχνική πολλαπλής πρόσβασης με διαίρεση χρόνου (Time Division Multiple Access – TDMA) επιτρέπει σε πολλούς κόμβους να μεταδίδουν μέσω ενός κοινού φυσικού διαύλου μοιραζόμενοι την ίδια ζώνη συχνοτήτων. Χρησιμοποιείται σε πολλά ήδη διαδεδομένα πρότυπα όπως το GSM (κινητές επικοινωνίες), αλλά και στις δορυφορικές επικοινωνίες. Πολλά πρωτόκολλα βασισμένα στο TDMA έχουν προταθεί για την υλοποίηση του στρώματος MAC σε δίκτυα ασύρματων αισθητήρων. Η τεχνική TDMA είναι κατάλληλη και για το ΕΔ και χρησιμοποιείται από το πρότυπο IEEE 1901 για τις επικοινωνίες PLC σε ΕΔ.

Η μέθοδος TDMA λειτουργεί διαιρώντας το χρόνο σε χρονοθυρίδες, σε εκάστη των οποίων μπορεί να μεταδίδει ένας ή περισσότεροι κόμβοι. Με την αποφυγή χρήσης της ίδιας χρονοθυρίδας από δύο δυνητικά αλληλοπαρεμβαλλόμενους κόμβους, αποφεύγονται οι παρεμβολές και οι συγκρούσεις. Ως εκ τούτου, είναι απαραίτητος ο συγχρονισμός μεταξύ των διαφόρων κόμβων. Η λειτουργία της μεθόδου διαίρεσης χρόνου απεικονίζεται στο ακόλουθο σχήμα 2.3.



Σχήμα 2.3: Πολυπλεξία με διαίρεση χρόνου. Κάθε διάταξη αποστέλλει δεδομένα αξιοποιώντας όλο το διαθέσιμο εύρος ζώνης εντός της χρονικής περιόδου που της αναλογεί.

Όπως φαίνεται από το σχήμα 2.3, οι κόμβοι ενός δικτύου μοιράζονται το μέσο διάδοσης μεταδίδοντας δεδομένα εντός του χρονικού διαστήματος το οποίο τους αναλογεί και το οποίο είναι χωρισμένο σε χρονοθυρίδες (time slots). Το πλεονέκτημα της μεθόδου είναι η δυνατότητα αποφυγής των συγκρούσεων με κατάλληλη ανάθεση χρονοθυρίδων σε κάθε κόμβο. Μειώνονται έτσι τα πακέτα ελέγχου (όπως τα πακέτα RTS και CTS των contention-based MACs) και η αξιοποίηση του μέσου και των πόρων είναι μεγαλύτερη.

Εντούτοις, για την εφαρμογή της τεχνικής TDMA είναι αναγκαίος ο συγχρονισμός των κόμβων έτσι ώστε να γνωρίζουν τα όρια των χρονικών σχισμών. Ακόμη, απαιτείται κατάλληλη μέθοδος ανάθεσης χρονικών σχισμών στους κόμβους του δικτύου ανάλογα με τις απαιτήσεις τους. Το πρόβλημα της ανάθεσης χρονικών σχισμών στους κόμβους του δικτύου ονομάζεται χρονοπρογραμματισμός (scheduling).

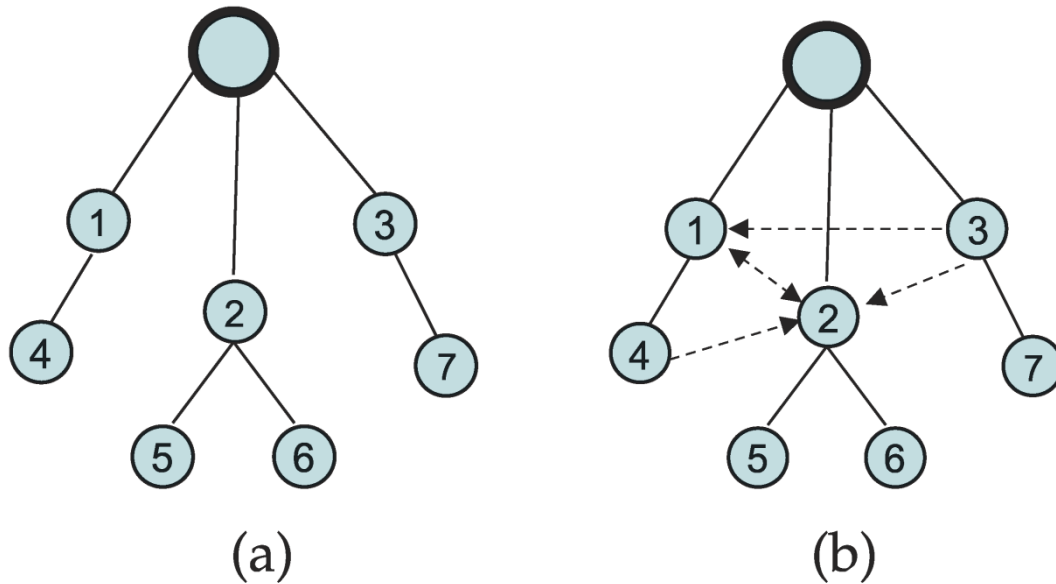
2.5 Χρονοπρογραμματισμός TDMA

Ο χρονοπρογραμματισμός TDMA αναφέρεται στη διαδικασία ανάθεσης χρονικών σχισμών (time slots) στους κόμβους ενός ΕΔ. Στόχος είναι η διάθεση σε κάθε κόμβο επαρκών χρονικών σχισμών έτσι ώστε να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις QoS της εκάστοτε εξυπηρετούμενης υπηρεσίας. Κατά τη διαδικασία αυτή πρέπει να ληφθούν υπόψη οι περιορισμοί εύρους ζώνης του μέσου μετάδοσης αλλά και οι ενδεχόμενες ανεπιθύμητες παρεμβολές. Συγκεκριμένα, πρέπει να αποφευχθεί η ανάθεση της ίδιας χρονικής σχισμής σε δύο κόμβους οι οποίοι παρεμβάλλουν σημαντικά αλλήλους.

Για τη διατύπωση του προβλήματος του χρονοπρογραμματισμού διευκολύνει η θεώρηση του δικτύου ως γράφου. Είναι δυνατή η περιγραφή του δικτύου υπό τη μορφή γράφου $G = (V, E)$ όπου V το σύνολο που περιέχει τους κόμβους του δικτύου και $E = \{(i, j) | i, j \in V\}$ το σύνολο των ακμών του γράφου. Στο σύνολο E περιέχεται το στοιχείο (i, j) εφόσον οι κόμβοι i και j επικοινωνούν άμεσα μεταξύ τους. Καθώς το ΕΔ και γενικότερα το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας έχει τοπολογία δένδρου, θεωρείται ο γράφος $T = (V, E_T)$. Ο γράφος αυτός έχει τη μορφή δένδρου και περιέχει τους ίδιους κόμβους με το γράφο G , δηλαδή τα στοιχεία του συνόλου V . Περιέχει όμως μόνο τις ακμές του δένδρου, και άρα το σύνολο των ακμών του T είναι υποσύνολο του συνόλου των ακμών του αρχικού γράφου G ($E_T \subseteq E$).

Δύο ή περισσότεροι κόμβοι ενός δικτύου PLC ενδέχεται να παρεμβάλλουν αλλήλους. Το φαινόμενο των παρεμβολών πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά τη διαδικασία ανάθεσης χρονοσχισμών στους κόμβους του δικτύου. Προς τούτο, θεωρείται ο γράφος $I = (V, E_I)$. Ο γράφος αυτός περιέχει τους ίδιους κόμβους με το γράφο G . Το στοιχείο (i, j) ανήκει στο σύνολο των ακμών του γράφου παρεμβολών I εφόσον ο κόμβος i παρεμβάλλεται στον κόμβο j . Καθώς η ισχύς έγχυσης διαφοροποιείται από κόμβο σε κόμβο, η πρόκληση παρεμβολής από τυχαίο κόμβο i σε τυχαίο κόμβο j δεν συνεπάγεται την πρόκληση παρεμβολής και από τον κόμβο j στον κόμβο i . Επίσης, το αν ένας κόμβος προκαλεί παρεμβολές σε ένα άλλο καθώς και το ποιές παρεμβολές θεωρούνται ανεκτές και άρα δεν απεικονίζονται στο γράφο, εξαρτάται από το μοντέλο παρεμβολών που χρησιμοποιείται κάθε φορά.

Στο σχήμα 2.4 απεικονίζεται ένα παράδειγμα γράφου δικτύου τοπολογίας δένδρου (σχήμα 2.4.α) καθώς και ο γράφος των παρεμβολών (σχήμα 2.4.β).



Σχήμα 2.4: α) Γράφος δικτύου τοπολογίας δένδρου.

β) Ενδεικτικός Γράφος με σημειωμένες τις παρεμβολές μεταξύ κόμβων (διακεκομμένες γραμμές). Η κατεύθυνση του βέλους δηλώνει τον κόμβο που υφίσταται την παρεμβολή.

Κατά τη διαδικασία της ανάθεσης χρονικών σχισμών ανατίθεται σε κάθε ακμή του γράφου T μία ή περισσότερες χρονικές σχισμές στις οποίες επιτρέπεται να αποστέλλει δεδομένα. Ισοδύναμα γίνεται να ανατεθούν χρονικές σχισμές σε κάθε κόμβο του γράφου, καθώς στο γράφο-δένδρο κάθε ακμή παριστάνει μονόδρομη μεταφορά δεδομένων μεταξύ δύο κόμβων. Κατά την ανάθεση των χρονικών σχισμών πρέπει να τηρηθούν ορισμένοι βασικοί περιορισμοί. Οι περιορισμοί αυτοί περιγράφονται ακολούθως:

- Δύο γειτονικές ακμές δεν επιτρέπεται να αποστέλλουν δεδομένα στην ίδια χρονική σχισμή. Δύο ακμές $(i, j) \subseteq E_T$ και $(k, l) \subseteq E_T$ θεωρούνται γειτονικές αν $\{i, j\} \cap \{k, l\} \neq \emptyset$. Ο περιορισμός αυτός οφείλεται στο ότι ο κάθε κόμβος δεν μπορεί να λαμβάνει και να αποστέλλει δεδομένα ταυτόχρονα.
- Δύο κόμβοι οι οποίοι αλληλοπαρεμβάλλονται δεν μπορούν να μεταδίδουν δεδομένα κατά τη διάρκεια της ίδιας χρονοσχισμής. Το πότε θεωρείται ότι δύο κόμβοι προκαλούν σημαντική παρεμβολή ο ένας στον άλλο εξαρτάται από τις υπηρεσίες που εξυπηρετούν και από το μοντέλο που υιοθετείται.

Σε κάθε κόμβο του γράφου ανατίθενται χρονοσχισμές έτσι ώστε στον καθένα να ανατεθεί τουλάχιστον μία χρονοσχισμή. Το πλήθος των χρονικών σχισμών το οποίο απαιτείται για την επίτευξη του στόχου αυτού ονομάζεται περίοδος χρονοπρογραμματισμού (schedule length). Είναι επιθυμητή η ελαχιστοποίηση της περιόδου χρονοπρογραμματισμού καθώς έτσι μειώνεται η καθυστέρηση για τους κόμβους του δικτύου αφού απαιτείται να περιμένουν λιγότερο για να αποστείλουν δεδομένα.

Το αποτέλεσμα του χρονοπρογραμματισμού μπορεί να περιγραφεί μαθηματικά με τη χρήση ενός πίνακα. Συγκεκριμένα, μπορεί να οριστεί πίνακας C διαστάσεων $N \times L$, όπου N το πλήθος των ακμών του δικτύου και L το πλήθος των χρονοσχισμών στην περίοδο χρονοπρογραμματισμού. Το στοιχείο (i, j) του πίνακα λαμβάνει είτε την τιμή 1, όταν στην ακμή i έχει ανατεθεί η χρονική σχισμή j , είτε την τιμή 0, σε άλλη περίπτωση.

2.6 Χρονοπρογραμματισμός στο πρότυπο IEEE 1901

Το πρότυπο IEEE 1901 για τις επικοινωνίες PLC το οποίο είναι κατάλληλο για ΕΔ, χρησιμοποιεί τεχνική πολλαπλής πρόσβασης με διαίρεση χρόνου και περιλαμβάνει οδηγίες για την υλοποίηση του χρονοπρογραμματισμού. Ακολούθως περιγράφεται συνοπτικά το στρώμα MAC στο πρωτόκολλο αυτό.

Κατά το πρότυπο IEEE 1901, το δίκτυο χωρίζεται σε επιμέρους κελιά (cells) έτσι ώστε να διευκολύνεται η ανάθεση πόρων στις διατάξεις του δικτύου. Σε κάθε κελί υπάρχουν συσκευές NTU (Network Termination Units) όπου συνδέονται οι τελικές συσκευές (end devices). Υπάρχουν επίσης αναμεταδότες (Repeater Units – RPs) και σταθμοί Head End (HE). Οι τελευταίοι είναι υπεύθυνοι για την ανάθεση χρονοσχισμών στους υπόλοιπους κόμβους κάθε κελιού.

Οι συσκευές NTU συλλέγουν τις πληροφορίες από τους τελικούς κόμβους του δικτύου και τις μεταδίδουν στους σταθμούς HE. Επομένως, η κίνηση είναι κυρίως ανοδική (uplink) από τους τελικούς κόμβους προς τους κόμβους HE. Η κίνηση μπορεί να υφίσταται συνάθροιση δεδομένων (βλ. παράγραφο 2.2) σε βαθμό που εξαρτάται από την προτεραιότητα και τα χαρακτηριστικά της υπηρεσίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΚΥΡΤΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ

3.1 Εισαγωγή – Μαθηματική βελτιστοποίηση

Για την επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης σημαντική είναι η θεωρία της κυρτής βελτιστοποίησης (convex optimization). Με κατάλληλη διατύπωση ορισμένων προβλημάτων και αξιοποίηση των υπαρχόντων αλγορίθμων γίνεται εφικτή η ταχεία επίλυσή τους. Μια σύντομη επισκόπηση της θεωρίας της κυρτής βελτιστοποίησης γίνεται στη συνέχεια, με στόχο την κατανόηση των μεθόδων που εφαρμόζονται για την επίλυση προβλημάτων του ΕΔ.

Ένα πρόβλημα μαθηματικής βελτιστοποίησης έχει τη μορφή:

$$\text{minimize } f_0(x) \quad (3.1.1)$$

$$\text{subject to } f_i(x) \leq 0, i = 1, \dots, m \quad (3.1.2)$$

$$h_i(x) = 0, i = 1, \dots, p \quad (3.1.3)$$

Στο ανωτέρω πρόβλημα διακρίνονται τα εξής στοιχεία:

- Το n -διάστατο διάνυσμα $x = (x_1, \dots, x_n)$ που αποτελεί τη μεταβλητή βελτιστοποίησης.
- Τη συνάρτηση $f_0: \mathbf{R}^n \rightarrow \mathbf{R}$ που αποτελεί την αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος.
- Τις συναρτήσεις $f_i: \mathbf{R}^n \rightarrow \mathbf{R}, i = 1, \dots, m$, που είναι οι συναρτήσεις περιορισμών ανισότητας του προβλήματος.
- Τις συναρτήσεις $h_i: \mathbf{R}^n \rightarrow \mathbf{R}, i = 1, \dots, p$, που είναι οι συναρτήσεις περιορισμών ισότητας του προβλήματος.

Στόχος της διαδικασίας βελτιστοποίησης είναι η εύρεση ενός διανύσματος x^* , το οποίο ικανοποιεί τους περιορισμούς ενώ, παράλληλα, δεν υπάρχει άλλο διάνυσμα x' που ικανοποιεί τους περιορισμούς και $f_0(x') < f_0(x^*)$. Τότε, το διάνυσμα x^* καλείται βέλτιστο και αποτελεί λύση του προβλήματος.

Με κριτήριο τη μορφή της αντικειμενικής συνάρτησης $f_0(x)$ και των συναρτήσεων περιορισμών $f_i(x)$, τα προβλήματα βελτιστοποίησης μπορούν να ενταχθούν σε διαφορετικές οικογένειες ή κατηγορίες προβλημάτων. Για παράδειγμα, στην περίπτωση όπου οι ανωτέρω συναρτήσεις είναι γραμμικές, δηλαδή:

$$f_i(ax + by) = af_i(x) + bf_i(y) \quad \forall x, y \in \mathbf{R}^n \text{ και } \forall a, b \in \mathbf{R}, \quad (3.2)$$

το πρόβλημα καλείται πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού και για την αποδοτική επίλυσή του μπορούν να χρησιμοποιηθούν γνωστοί αλγόριθμοι (π.χ. αλγόριθμος Simplex).

Στην παρούσα περίπτωση ενδιαφέρον παρουσιάζει η επίλυση των προβλημάτων βελτιστοποίησης που ανήκουν στην κατηγορία των προβλημάτων κυρτής βελτιστοποίησης. Χαρακτηριστικό των προβλημάτων αυτών είναι το ότι η αντικειμενική συνάρτηση $f_0(x)$ και οι συναρτήσεις των περιορισμών $f_i(x)$ είναι κυρτές. Σημειώνεται ότι κυρτή είναι μια συνάρτηση $f(x)$ για την οποία ισχύει:

$$f(ax + by) \leq af(x) + bf(y) \quad \forall x, y \in \mathbf{R}^n$$

$$\forall a, b \in \mathbf{R} \text{ τέτοια ώστε } a + b = 1, a \geq 0, b \geq 0 \quad (3.3)$$

3.2 Κυρτά σύνολα

Αναγκαία για τη διατύπωση προβλημάτων κυρτής βελτιστοποίησης (convex optimization) είναι η κατανόηση της έννοιας του κυρτού συνόλου. Στην περίπτωση του n-διάστατου χώρου, τα σύνολα αυτά ορίζονται ως εξής:

Ορισμός: Ένα σύνολο $C \in \mathbf{R}^n$ είναι κυρτό αν και μόνο αν για οποιαδήποτε $x_1, x_2 \in C$, και για οποιοδήποτε πραγματικό αριθμό θ για τον οποίο ισχύει $0 \leq \theta \leq 1$, ισχύει:

$$\theta x_1 + (1 - \theta)x_2 \in C \quad (3.4)$$

Διαισθητικά, κυρτό σύνολο είναι αυτό για το οποίο μια γραμμή που ενώνει δύο τυχαία στοιχεία του ανήκει εξ ολοκλήρου στο σύνολο. Η έννοια των κυρτών συνόλων γίνεται ευκολότερα κατανοητή μέσω παραδειγμάτων από το διδιάστατο χώρο. Όπως φαίνεται στο σχήμα 3.1(α,β), ένα πολύγωνο είναι κυρτό σύνολο ενώ το δεύτερο σχήμα δεν είναι, καθώς υπάρχουν σημεία των οποίων η γραμμή σύνδεσης δεν ανήκει εξ ολοκλήρου στο σύνολο. Σημαντική ιδιότητα των κυρτών συνόλων είναι ότι η τομή δύο ή περισσότερων κυρτών συνόλων είναι κυρτό σύνολο.

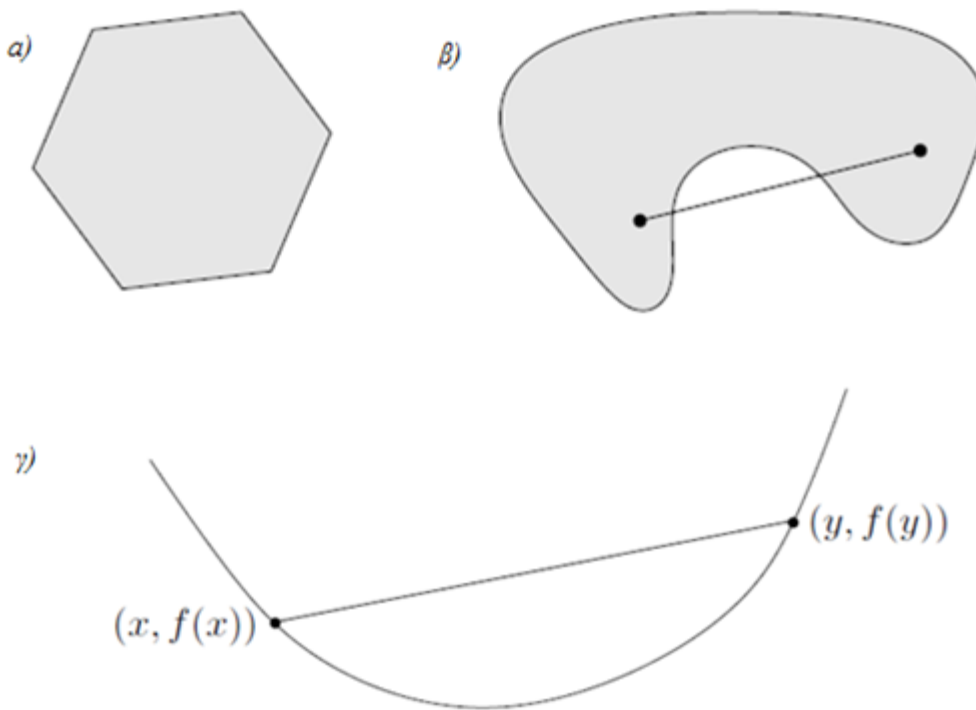
3.3 Κυρτές συναρτήσεις

Έχοντας ορίσει τα κυρτά σύνολα είναι εφικτός ο ορισμός των κυρτών συναρτήσεων:

Ορισμός: Μια συνάρτηση $f : \mathbf{R}^n \rightarrow \mathbf{R}$, ορισμένη σε πεδίο ορισμού A_f που είναι κυρτό σύνολο, είναι κυρτή εφόσον για κάθε $x, y \in A_f$ και για κάθε $\theta \in [0, 1]$ ισχύει:

$$f(\theta x + (1 - \theta)y) \leq \theta f(x) + (1 - \theta)f(y) \quad (3.5)$$

Γεωμετρικά στο διδιάστατο χώρο αυτό σημαίνει ότι κάθε ευθύγραμμο τμήμα που ενώνει δύο τυχαία σημεία της γραφικής παράστασης της κυρτής συνάρτησης βρίσκεται στον ημιχώρο που ορίζει η κυρτή συνάρτηση. Αυτό φαίνεται στο σχήμα 3.1(γ).



Σχήμα 3.1: α) Κυρτό σύνολο

β) Μη κυρτό σύνολο

γ) Κυρτή συνάρτηση

Αντίστοιχα με τις κυρτές ορίζονται και οι κοίλες συναρτήσεις. Ο ορισμός της κοίλης συνάρτησης (concave function) δίνεται ακολούθως:

Ορισμός: Μια συνάρτηση $f : \mathbf{R}^n \rightarrow \mathbf{R}$, ορισμένη σε πεδίο ορισμού A_f που είναι κυρτό σύνολο, είναι κοίλη εφόσον για κάθε $x, y \in A_f$ και για κάθε $\theta \in [0, 1]$ ισχύει:

$$f(\theta x + (1 - \theta)y) \geq \theta f(x) + (1 - \theta)f(y) \quad (3.6)$$

Ορισμένες σημαντικές ιδιότητες των κυρτών συναρτήσεων είναι οι ακόλουθες:

- Αν οι συναρτήσεις f και g είναι κυρτές, το άθροισμά τους $h(x) = f(x) + g(x)$ είναι κυρτή συνάρτηση
- Αν οι συναρτήσεις f και g είναι κυρτές και η συνάρτηση g είναι αύξουσα, η συνάρτηση $h(x) = g(f(x))$ είναι κυρτή συνάρτηση.
- Αν η συνάρτηση f είναι κοίλη και η συνάρτηση g είναι κυρτή και φθίνουσα, η συνάρτηση $h(x) = g(f(x))$ είναι κυρτή.
- Αν η συνάρτηση f είναι κυρτή, η συνάρτηση $g(x) = -f(x)$ είναι κοίλη και το αντίστροφο.

Για τη διατύπωση των θεωρημάτων που ακολουθούν διευκρινίζεται ότι η συνάρτηση f είναι παραγωγίσιμη στο πεδίο ορισμού της εφόσον υπάρχει το $\nabla(f)$ σε κάθε εσωτερικό σημείο του πεδίου ορισμού της. Επιπλέον, η συνάρτηση f είναι δύο φορές παραγωγίσιμη εφόσον υπάρχει το $\nabla^2 f$ σε κάθε εσωτερικό σημείο του πεδίου ορισμού της.

Σύμφωνα με τα ανωτέρω ισχύουν τα ακόλουθα θεωρήματα:

Θεώρημα: Έστω συνάρτηση $f : \mathbf{R}^n \rightarrow \mathbf{R}$ παραγωγίσιμη. Η συνάρτηση f είναι κυρτή αν και μόνο αν το πεδίο ορισμού της A_f είναι κυρτό σύνολο και ισχύει:

$$f(y) \geq f(x) + \nabla f(x)^T (y - x) \quad (3.7)$$

για κάθε $x, y \in A_f$.

Θεώρημα: Έστω συνάρτηση $f : \mathbf{R}^n \rightarrow \mathbf{R}$ δύο φορές παραγωγίσιμη. Η συνάρτηση f είναι κυρτή αν και μόνο αν το πεδίο ορισμού της A_f είναι κυρτό σύνολο και ισχύει:

$$\nabla^2 f \geq 0, \quad (3.8)$$

για κάθε $x, y \in A_f$.

Με βάση τα ανωτέρω, αποδεικνύεται ότι πολλές από τις γνωστές συναρτήσεις είναι κυρτές. Ακολούθως αναφέρονται ορισμένες από τις σημαντικότερες κυρτές συναρτήσεις ορισμένες στο \mathbf{R} :

- Η εκθετική συνάρτηση e^{ax} είναι κυρτή στο \mathbf{R} για κάθε πραγματικό αριθμό a .
- Η συνάρτηση x^a είναι κυρτή στο \mathbf{R}^+ όταν $a \leq 0$ ή $a \geq 1$ και κοίλη όταν $0 \leq a \leq 1$.
- Η συνάρτηση $|x|^p$ για $p \geq 1$ είναι κυρτή στο \mathbf{R} .

- Η λογαριθμική συνάρτηση $\log x$ είναι κυρτή στο \mathbf{R}^+ .

Εκτός από τις ανωτέρω συναρτήσεις πλήθος συναρτήσεων n -μεταβλητών είναι κυρτές. Ενδεικτικά αναφέρονται:

- Η συνάρτηση μεγίστου η οποία ορίζεται στο \mathbf{R}^n ως $f(x) = \max\{x_1, \dots, x_n\}$
- Όλες οι νόρμες στο \mathbf{R}^n .

Στο σημείο αυτό σημειώνεται ότι νόρμα είναι μια συνάρτηση η οποία αντιστοιχεί έναν πραγματικό αριθμό σε κάθε στοιχείο ενός n -διάστατου διανυσματικού χώρου. Η νόρμα ενός n -διάστατου διανύσματος x συμβολίζεται με $\|x\|$ και ικανοποιεί τις εξής ιδιότητες:

1. $\|x\| \geq 0$ και $\|x\| = 0 \Leftrightarrow x = 0$
2. $\|\lambda x\| = |\lambda| \|x\|, \forall \lambda \in \mathbf{R}$
3. $\|x + y\| \leq \|x\| + \|y\|$ (τριγωνική ανισότητα)

Ορίζονται διάφορες νόρμες, οι σημαντικότερες εκ των οποίων είναι οι εξής:

- $\|x\|_1 = \sum_{i=1}^n |x_i|$
- $\|x\|_2 = \sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2}$ (Ευκλείδεια νόρμα)
- $\|x\|_3 = \max_{1 \leq i \leq n} |x_i|$

Οι συναρτήσεις νόρμας είναι κυρτές λόγω της ιδιότητας της τριγωνικής ανισότητας την οποία πληρούν.

3.4 Προβλήματα βελτιστοποίησης

Υπενθυμίζεται (βλ. παράγραφο 3.1) ότι ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης μπορεί να διατυπωθεί υπό τη μορφή:

$$\text{minimize } f_0(x) \tag{3.9.1}$$

$$\text{subject to } f_i(x) \leq 0, i = 1, \dots, m \tag{3.9.2}$$

$$h_i(x) = 0, i = 1, \dots, p \tag{3.9.3}$$

Στόχος είναι η εύρεση του x^* που ελαχιστοποιεί την αντικειμενική συνάρτηση $f_0(x)$ και ικανοποιεί τους περιορισμούς ανισότητας $f_i(x) \leq 0, i = 1, \dots, m$ και τους περιορισμούς ισότητας $h_i(x) = 0, i = 1, \dots, p$.

Το σύνολο των σημείων του \mathbf{R}^n επί των οποίων ορίζονται όλες οι συναρτήσεις περιορισμών του προβλήματος καλείται πεδίο ορισμού του προβλήματος βελτιστοποίησης. Επομένως αν κάθε συνάρτηση περιορισμού f_i έχει πεδίο ορισμού το $A_{fi}, i = 1, 2, \dots, m$, και κάθε συνάρτηση περιορισμού ισότητας h_i έχει πεδίο ορισμού το $A_{hi}, i = 1, 2, \dots, p$, το πεδίο ορισμού του προβλήματος βελτιστοποίησης είναι το:

$$D = \bigcap_{i=0}^m A_{fi} \cap \bigcap_{i=1}^p A_{hi}$$

Ένα σημείο $x \in D$ είναι εφικτό (feasible) αν ικανοποιεί όλους τους περιορισμούς $f_i(x) \leq 0, i = 1, \dots, m$ και $h_i(x) = 0, i = 1, \dots, p$. Το πρόβλημα βελτιστοποίησης καλείται εφικτό όταν υπάρχει τουλάχιστον ένα εφικτό σημείο. Σε άλλη περίπτωση, καλείται μη εφικτό (infeasible). Το σύνολο το οποίο περιέχει όλα τα εφικτά σημεία του προβλήματος βελτιστοποίησης καλείται εφικτό σύνολο (feasible set).

Σύμφωνα με τα προηγούμενα, η βέλτιστη τιμή x^* του προβλήματος ορίζεται από τη σχέση:

$$x^* = \inf\{f_0(x) \mid f_i(x) \leq 0, i = 1, \dots, m, h_i(x) = 0, i = 1, \dots, p\} \quad (3.10)$$

Επιτρέποντας στο x^* να λάβει τις τιμές $\pm\infty$ και με τη σύμβαση ότι το infimum του κενού συνόλου είναι το ∞ , το x^* λαμβάνει την τιμή $x^* = \infty$ στην περίπτωση ενός μη εφικτού προβλήματος.

3.4.1 Προβλήματα κυρτής βελτιστοποίησης

Ένα πρόβλημα κυρτής βελτιστοποίησης είναι ένα πρόβλημα της μορφής:

$$\text{minimize } f_0(x) \quad (3.11.1)$$

$$\text{subject to } f_i(x) \leq 0, \quad i = 1, \dots, m \quad (3.11.2)$$

$$a_i^T x = b_i, \quad i = 1, \dots, p \quad (3.11.3)$$

όπου οι συναρτήσεις f_0, \dots, f_m είναι κυρτές. Τα προβλήματα αυτά αποτελούν επομένως υποκατηγορία των προβλημάτων βελτιστοποίησης που παρουσιάστηκαν προηγουμένως.

Παρατήρηση: Το εφικτό σύνολο (*feasible set*) ενός προβλήματος κυρτής βελτιστοποίησης

$D = \bigcap_{i=0}^m A_{f_i}$ είναι κυρτό ως τομή κυρτών συνόλων.

Αντικείμενο των προβλημάτων κυρτής βελτιστοποίησης είναι η ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης. Κατά παρόμοιο τρόπο μπορεί να θεωρηθούν τα προβλήματα κοίλης βελτιστοποίησης (*concave optimization*) κατά τα οποία ζητείται η μεγιστοποίηση μιας κοίλης συνάρτησης f_0 . Τα προβλήματα αυτά έχουν τη μορφή:

$$\text{maximize } f_0(x) \quad (3.12.1)$$

$$\text{subject to } f_i(x) \leq 0, \quad i = 1, \dots, m \quad (3.12.2)$$

$$a_i^T x = b_i, \quad i = 1, \dots, p \quad (3.12.3)$$

Η μεγιστοποίηση μιας κοίλης συνάρτησης $f_0(x)$ ισοδυναμεί με την ελαχιστοποίηση της κυρτής συνάρτησης $-f_0(x)$. Επομένως, κάθε πρόβλημα κοίλης βελτιστοποίησης (μεγιστοποίησης) μπορεί να αναχθεί σε πρόβλημα κυρτής βελτιστοποίησης (ελαχιστοποίησης).

3.4.2 Βέλτιστα σημεία

Τα βέλτιστα σημεία των προβλημάτων μπορούν να διακριθούν σε τοπικά και ολικά. Οι δύο αυτές κατηγορίες ορίζονται ακολούθως:

Ορισμός: Ένα εφικτό σημείο x ενός προβλήματος βελτιστοποίησης αποτελεί τοπικό βέλτιστο αν υπάρχει $\varepsilon > 0$ τέτοιο ώστε:

$$f_0(x) = \inf\{f_0(z) \mid z: \text{εφικτό}, \|z - x\|_2 \leq \varepsilon\}$$

Ορίζεται επίσης και το ολικό βέλτιστο ως εξής:

Ορισμός: Ένα εφικτό σημείο x ενός προβλήματος βελτιστοποίησης αποτελεί ολικό βέλτιστο αν για κάθε εφικτό σημείο y με $y \neq x$, ισχύει: $f_0(y) \geq f_0(x)$.

Για τον εντοπισμό των βέλτιστων σημείων σε ένα πρόβλημα κυρτής βελτιστοποίησης μπορεί να χρησιμοποιηθεί το ακόλουθο θεώρημα:

Θεώρημα: Έστω ότι η αντικειμενική συνάρτηση f_0 ενός προβλήματος κυρτής βελτιστοποίησης είναι διαφορίσιμη και για κάθε $x, y \in A_f$ ισχύει:

$$f_0(y) \geq f_0(x) + \nabla f_0^T(x)(y - x)$$

Έστω, επίσης, το εφικτό σύνολο του προβλήματος X , δηλαδή:

$$X = \{x | f_i(x) \leq 0, i = 1, \dots, m, h_i(x) = 0, i = 1, \dots, p\}$$

Τότε, το σημείο x είναι βέλτιστο αν και μόνο αν ανήκει στο εφικτό σύνολο X και επιπλέον ισχύει:

$$\nabla f_0^T(x)(y - x) \geq 0, \forall y \in X$$

Στην περίπτωση προβλήματος βελτιστοποίησης χωρίς περιορισμούς (δηλαδή $m=p=0$), η αναγκαία και ικανή συνθήκη βελτίστου (ή ακροτάτου της αντικειμενικής συνάρτησης) είναι η:

$$\nabla f_0(x) = 0$$

Θεμελιώδης ιδιότητα των βέλτιστων στα προβλήματα κυρτής βελτιστοποίησης είναι ότι, στην περίπτωση ύπαρξης τοπικού βελτίστου, το βέλτιστο αυτό είναι και ολικό βέλτιστο.

Έχουν μελετηθεί αρκετοί αλγόριθμοι επίλυσης προβλημάτων κυρτής βελτιστοποίησης οι οποίοι επιτυγχάνουν τον προσδιορισμό των βέλτιστων σημείων. Οι σημαντικότεροι αλγόριθμοι είναι οι ακόλουθοι:

- Subgradient method
- Interior point method
- Bundle methods

Καθώς οι μέθοδοι επίλυσης προβλημάτων κυρτής βελτιστοποίησης έχουν ενσωματωθεί σε βιβλιοθήκες λογισμικού, το σημαντικότερο βήμα είναι η κατάλληλη διατύπωση του προβλήματος και ο κατάλληλος ορισμός των περιορισμών.

3.5 Δυϊκότητα

Σημαντική ιδιότητα των προβλημάτων βελτιστοποίησης είναι η ιδιότητα της δυϊκότητας που επιτρέπει τη διατύπωση ενός εναλλακτικού προβλήματος, του δυϊκού, το οποίο βελτιστοποιείται στο ίδιο σημείο με το αρχικό πρόβλημα. Ο ορισμός του δυϊκού προβλήματος γίνεται με χρήση της συνάρτησης Lagrange η οποία ορίζεται στη συνέχεια:

Έστω πρόβλημα βελτιστοποίησης της μορφής:

$$\begin{aligned}
& \text{minimize} && f_0(x) \\
& \text{subject to} && f_i(x) \leq 0, i = 1, \dots, m \\
& && h_i(x) = 0, i = 1, \dots, p
\end{aligned}$$

Υπενθυμίζεται (βλ. παράγραφος 3.4) ότι το πεδίο ορισμού ενός προβλήματος βελτιστοποίησης είναι το

$$D = \bigcap_{i=0}^m A_{f_i} \cap \bigcap_{i=1}^p A_{h_i}$$

Με την υπόθεση ότι το πεδίο ορισμού του προβλήματος είναι μη κενό, θεωρείται ότι υπάρχει η λύση του προβλήματος p^* . Η συνάρτηση Lagrange ή Lagrangian ορίζεται μέσω της σχέσης:

$$L(x, \lambda, v) = f_0(x) + \sum_{i=1}^m \lambda_i f_i(x) + \sum_{i=1}^p v_i h_i(x) \quad (3.13)$$

με πεδίο ορισμού το σύνολο $D \times \mathbf{R}^m \times \mathbf{R}^p$. Οι αριθμοί λ_i και v_i καλούνται πολλαπλασιαστές Lagrange ενώ τα διανύσματα λ και v καλούνται διανύσματα πολλαπλασιαστών Lagrange ή δυϊκές μεταβλητές.

Η δυϊκή συνάρτηση Lagrange ορίζεται ως εξής:

$$g(\lambda, v) = \inf\{L(x, \lambda, v)\} = \inf\{(f_0(x) + \sum_{i=1}^m \lambda_i f_i(x) + \sum_{i=1}^p v_i h_i(x))\} \quad (3.14)$$

Αποδεικνύεται ότι η συνάρτηση Lagrange είναι πάντα κοίλη (ακόμη και όταν η αρχική αντικειμενική συνάρτηση δεν είναι κυρτή) και είναι μικρότερη ή ίση από το βέλτιστο και όχι μεγαλύτερη ή ίση όπως η αρχική συνάρτηση. Δηλαδή:

$$g(\lambda, v) \leq p^*$$

Κατ' αυτόν τον τρόπο, μπορεί να οριστεί το δυϊκό πρόβλημα του αρχικού μέσω της σχέσης:

$$\begin{aligned}
& \text{maximize} && g(\lambda, v) \\
& \text{subject to} && \lambda_i(x) \leq 0, i = 1, \dots, m
\end{aligned}$$

Σε κάθε ζεύγος αρχικού-δυϊκού προβλήματος βελτιστοποίησης ισχύει η ιδιότητα της ασθενούς δυϊκότητας, δηλαδή, αν d^* το βέλτιστο σημείο του δυϊκού προβλήματος, ισχύει:

$$d^* \leq p^* \quad (3.15)$$

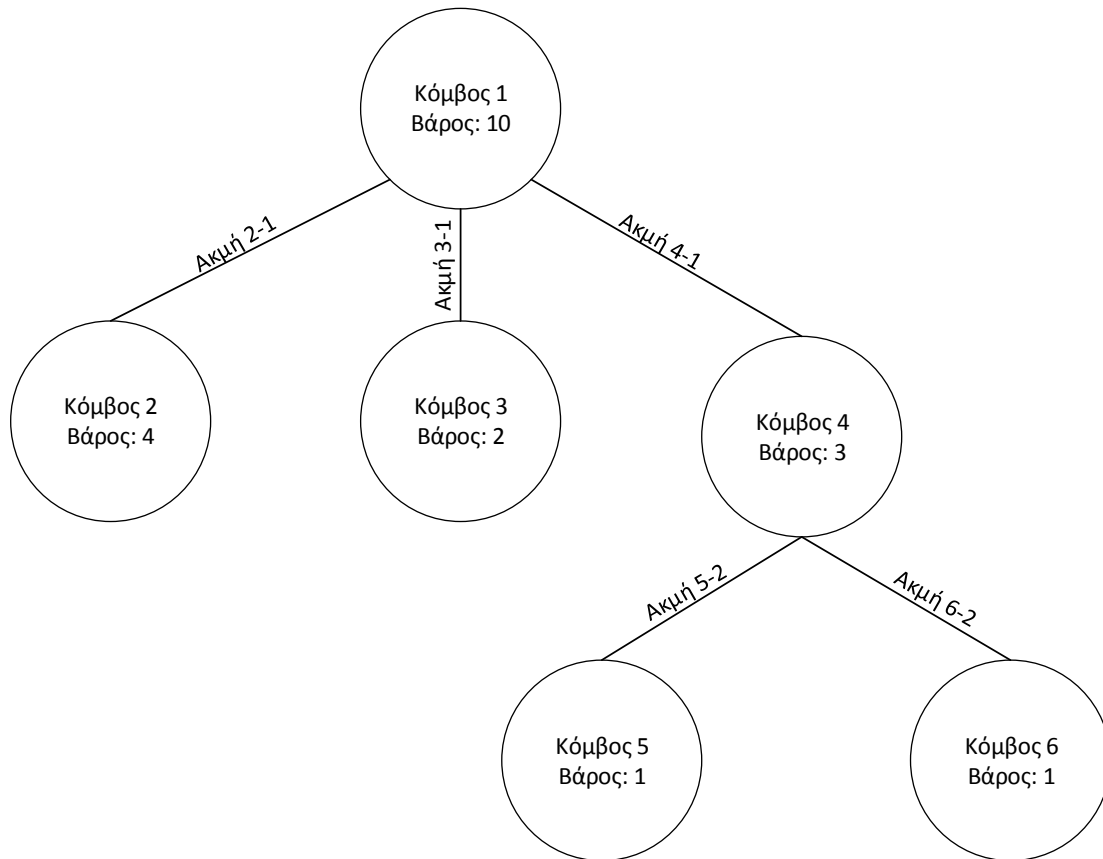
Σε πολλά προβλήματα κυρτής βελτιστοποίησης ισχύει και η ιδιότητα της ισχυρής δυϊκότητας, δηλαδή:

$$d^* = p^* \tag{3.16}$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΠΟΡΩΝ ΣΕ ΕΥΦΥΗ ΔΙΚΤΥΑ

4.1 Μαθηματική διατύπωση

Αντικείμενο της εργασίας είναι η δυναμική κατανομή πόρων σε ένα ΕΔ το οποίο χρησιμοποιεί τεχνολογία πολλαπλής πρόσβασης μέσω χρονικής πολυπλεξίας (TDMA). Συγκεκριμένα, θεωρείται ένα ευφρές δίκτυο το οποίο υποστηρίζει πολλαπλές υπηρεσίες με διαφορετικές απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας και αναλαμβάνει την ανάθεση πόρων στην περίπτωση όπου ένας νέος κόμβος προστίθεται στο δίκτυο. Η ανάθεση των πόρων γίνεται έτσι ώστε να ικανοποιούνται συγκεκριμένα κριτήρια βελτιστοποίησης.



Σχήμα 4.1: Ενδεικτικό παράδειγμα τηλεπικοινωνιακού δικτύου σε ευφρές δίκτυο

Το τηλεπικοινωνιακό δίκτυο ενός ΕΔ μπορεί να μοντελοποιηθεί ως ένας γράφος-δένδρο (βλ. Κεφάλαιο 2). Το δίκτυο ενδέχεται να εξυπηρετεί διαφορετικές υπηρεσίες και συνεπώς πρέπει να υποστηρίζει διαφορετικό QoS για κάθε υπηρεσία. Το χαρακτηριστικό αυτό πρέπει να ληφθεί υπόψη για τη μαθηματική περιγραφή του δικτύου. Στην παρούσα εργασία το δίκτυο περιγράφεται μέσω ενός πίνακα ακμών και από τα βάρη του κάθε κόμβου. Ως παράδειγμα τέτοιου δικτύου χρησιμοποιείται το δίκτυο του σχήματος 4.1.

Ο πίνακας των ακμών ενός δικτύου n κόμβων είναι ένας πίνακας διαστάσεων $N \times N$. Το στοιχείο (i, j) του πίνακα είναι ίσο με 1 αν και μόνο αν ο κόμβος i έχει πατέρα τον κόμβο j . Σε αντίθετη περίπτωση το στοιχείο του πίνακα λαμβάνει την τιμή 0. Έτσι, το στοιχείο με τιμή 1 στη γραμμή i δείχνει τον πατέρα του κόμβου i ενώ τα στοιχεία με τιμή 1 της στήλης j δείχνουν τα παιδιά του κόμβου j . Ο πίνακας ακμών του δικτύου του παραδείγματος είναι ο ακόλουθος:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Το βάρος του κάθε κόμβου αντιστοιχείται στο εύρος ζώνης που απαιτεί κάθε κόμβος. Συγκεκριμένα, διαιρώντας το βάρος του κάθε κόμβου με το άθροισμα των βαρών των κόμβων του δικτύου προκύπτει το ποσοστό επί του συνόλου των διαθέσιμων χρονικών σχισμών το οποίο απαιτείται για την εξυπηρέτηση του κόμβου. Για παράδειγμα, στο σχήμα 4.1, οι συνολικά απαιτούμενες χρονικές σχισμές είναι 21. Ο κόμβος 2 έχει βάρος 4, δηλαδή για την εξυπηρέτηση του απαιτούνται 4 χρονικές σχισμές. Συνεπώς, το απαιτούμενο ποσοστό επί του συνόλου των χρονοσχισμών είναι 19%.

Όπως προαναφέρθηκε, το δίκτυο καλείται να εξυπηρετεί υπηρεσίες διαφορετικών απαιτήσεων ποιότητας. Συνεπώς, ενδέχεται ορισμένες υπηρεσίες να επιδέχονται κάποιο ποσοστό συνάθροισης δεδομένων ενώ κάποιες άλλες όχι. Παράλληλα, σε κάθε κόμβο πρέπει να ανατίθενται επαρκείς χρονοσχισμές ώστε να μπορεί να αποστέλλει τα δικά του, τοπικά παραγόμενα δεδομένα, όπως επίσης και τα δεδομένα που λαμβάνει από τα παιδιά του (αφού ενδεχομένως προηγηθεί συνάθροιση). Επομένως, σε κάθε κόμβο i αντιστοιχείται μια μεταβλητή b_i η τιμή της οποίας είναι ίση με το βάρος που απαιτείται για την αποστολή των δεδομένων που παράγει ο κόμβος i . Επίσης, αντιστοιχείται μια μεταβλητή a_i που εξαρτάται από το είδος της υπηρεσίας και δείχνει το ποσοστό συνάθροισης που πραγματοποιεί ο κόμβος στις πληροφορίες

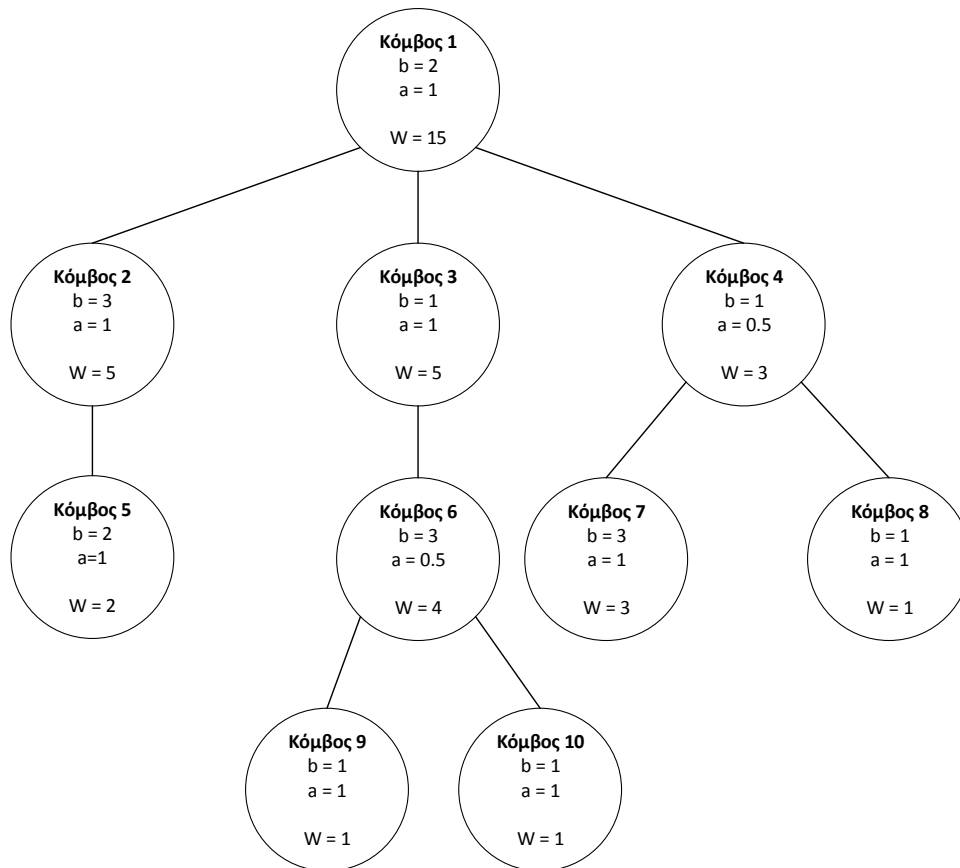
που λαμβάνει από τα παιδιά του. Η μεταβλητή a_i λαμβάνει τιμές που μπορεί να είναι κοντά στο 0, σε περίπτωση σημαντικού βαθμού συνάθροισης και φθάνουν το 1, στην περίπτωση όπου δεν πραγματοποιείται συνάθροιση.

Λαμβάνοντας υπόψη για τον υπολογισμό του συνολικού βάρους που απαιτεί κάθε κόμβος το προηγούμενο σκεπτικό, το συνολικό βάρος κάθε κόμβου προκύπτει από τη σχέση:

$$w_i = b_i + a_i * \sum_{j \in C_i} w_j \quad (4.1)$$

όπου C_i το σύνολο των κόμβων-παιδιών του κόμβου i . Η σχέση αυτή εφαρμόζεται επαναληπτικά για κάθε κόμβο καθώς το άθροισμα των βαρών των παιδιών μηδενίζεται για τους κόμβους-φύλλα του δένδρου.

Για την καλύτερη κατανόηση της τρόπου προσδιορισμού του βάρους κάθε κόμβου πραγματοποιείται η διαδικασία στο δένδρο του σχήματος 4.2. Στο σχήμα αυτό φαίνονται τα τοπικά βάρη κάθε κόμβου b_i και το ποσοστό συνάθροισης a_i . Με βάση αυτά, υπολογίζονται τα βάρη των κόμβων w_i .



Σχήμα 4.2: Υπολογισμός βαρών κόμβων δικτύου

Επισημαίνεται ότι κάθε κόμβος που μεταδίδει τοπικά παραγόμενη πληροφορία χαρακτηρίζεται από το δικό του βάρος b_i και το ελάχιστο βάρος το οποίο απαιτεί για την κάλυψη των ελάχιστων προδιαγραφών QoS $b_{min,i}$. Έτσι, εκτός από το συνολικό βάρος w_i κάθε κόμβου, προσδιορίζεται και το ελάχιστο απαιτούμενο βάρος κάθε κόμβου μέσω της σχέσης:

$$w_{min,i} = b_{min,i} + a_i * \sum_{j \in C_i} w_{min,j} \quad (4.2)$$

Συνοψίζοντας, με δεδομένα τα ελάχιστα απαιτούμενα βάρη και τα βάρη που αφορούν την τοπικά παραγόμενη πληροφορία ($b_{min,i}$, b_i) κάθε κόμβου αλλά και τον αντίστοιχο βαθμό συνάθροισης δεδομένων a_i , υπολογίζονται τα βάρη κάθε κόμβου μέσω των σχέσεων 4.1 και 4.2. Το δένδρο περιγράφεται μέσω του πίνακα ακμών και των βαρών w_i και $w_{min,i}$ των κόμβων.

4.2 Εισαγωγή νέου κόμβου στο δίκτυο

Κατά τη λειτουργία του δικτύου ενδέχεται να απαιτείται μετάδοση δεδομένων από ένα νέο κόμβο ο οποίος χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένο ελάχιστο απαιτούμενο βάρος ή από κάποιο κόμβο που αλλάζει χαρακτηριστικά (π.χ. εξυπηρετεί μια επιπλέον υπηρεσία και απαιτεί πρόσθετους πόρους). Το βάρος αυτό εγγυάται την απόδοση στο νέο κόμβο κατάλληλου πλήθους χρονικών σχισμών έτσι ώστε να είναι δυνατή η ικανοποίηση της προδιαγραφής QoS. Η περίπτωση απαίτησης πρόσθετων πόρων από ήδη συνδεδεμένο κόμβο ισοδυναμεί με την εισαγωγή νέου κόμβου κάτω από τον ίδιο πατέρα με ελάχιστο βάρος ίσο με το επιπλέον ζητούμενο βάρος. Συνεπώς, ανάγεται στην πρώτη περίπτωση.

Ζητούμενο αποτελεί η απόδοση του απαιτούμενου βάρους στο νέο κόμβο. Προς τούτο, είναι αναγκαία η μείωση των βαρών άλλων κόμβων. Θεωρείται ότι κάθε κόμβος του δικτύου χαρακτηρίζεται από το βάρος το οποίο του ανατίθεται και χρησιμοποιεί, και από το ελάχιστο βάρος το οποίο απαιτείται για την κάλυψη των ελάχιστων απαιτήσεων QoS του κόμβου. Για τον προσδιορισμό βάρους για το νέο κόμβο είναι δυνατή η μείωση των βαρών των υπολοίπων κόμβων κατά τρόπο ώστε το βάρος κάθε κόμβου να είναι πάντα μεγαλύτερο ή ίσο από το ελάχιστο απαιτούμενο βάρος του.

Αρχικά, το βάρος του νέου κόμβου επιδιώκεται να προσδιοριστεί μειώνοντας μόνο τα βάρη των κόμβων που έχουν τον ίδιο πατέρα με αυτόν. Στην περίπτωση όπου είναι δυνατό να επιλυθεί το πρόβλημα μειώνοντας τα βάρη μόνο αυτών των κόμβων, αναδρομικά μειώνονται τα βάρη των υποδένδρων που αντιστοιχούν σε έκαστο εξ αυτών των κόμβων. Επισημαίνεται ότι, σύμφωνα με

την (4.1), το βάρος κάθε κόμβου εμπεριέχει πληροφορία σχετική και με τα βάρη των κόμβων-παιδιών του.

Στην περίπτωση όπου τα βάρη των κόμβων με κοινό πατέρα με το νέο κόμβο δεν επαρκούν, επιδιώκεται η επίλυση του προβλήματος με άνοδο κατά ένα επίπεδο στο δένδρο και επαναλαμβάνοντας την ίδια διαδικασία. Η άνοδος επιπέδου μπορεί να επαναληφθεί το πολύ μέχρι την κορυφή του δένδρου. Ως παράδειγμα μπορεί να θεωρηθεί η εισαγωγή νέου κόμβου κάτω από τον κόμβο 6 του σχήματος 4.2. Αρχικά, επιδιώκεται η εύρεση του απαιτούμενου βάρους με μείωση των βαρών των κόμβων 9, 10 (παιδιά του κόμβου 6). Αν αυτό δεν είναι δυνατό και τα πλεονάζοντα βάρη των κόμβων 9, 10 δεν επαρκούν για την κάλυψη του νέου κόμβου, η διαδικασία επαναλαμβάνεται στο αμέσως ανώτερο επίπεδο. Αναζητείται, δηλαδή, το απαιτούμενο βάρος μέσω της μείωσης των βαρών των παιδιών του κόμβου 3 (δηλαδή του κόμβου 6). Σε περίπτωση αποτυχίας, αναζητείται το απαιτούμενο βάρος μέσω της μείωσης των βαρών των παιδιών του κόμβου 1, δηλαδή, των κόμβων 2, 3, 4. Εάν και πάλι δεν βρεθεί το ζητούμενο βάρος οι ανάγκες του νέου κόμβου δεν γίνεται να εξυπηρετηθούν.

4.3 Βέλτιστη κατανομή βαρών σε κόμβους με κοινό πατέρα

Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 4.2, η προτεινόμενη λύση βασίζεται στην απόδοση του απαιτούμενου βάρους σε ένα νέο κόμβο μέσω της μείωσης των βαρών των κόμβων με κοινό πατέρα με το νέο κόμβο. Σημαντικός είναι λοιπόν ο προσδιορισμός κριτηρίων τέτοιων ώστε να συγκεντρώνεται το απαιτούμενο βάρος ικανοποιώντας ορισμένα ελάχιστα κριτήρια ποιότητας υπηρεσίας αλλά και επιδιώκοντας δίκαιη αντιμετώπιση των ανταγωνιστικών κόμβων (fairness). Με βάση τα ανωτέρω είναι δυνατή η διατύπωση ενός προβλήματος κυρτής βελτιστοποίησης.

Έστω N κόμβοι με κοινό πατέρα, των οποίων το βάρος απαιτείται να μειωθεί κατά k μονάδες συνολικά. Σε κάθε κόμβο έχει γίνει ήδη κατανομή χρονικών σχισμών ώστε το βάρος κάθε κόμβου να είναι w_i , με $i=1, \dots, N$. Επιπλέον, για την κάλυψη των απαιτήσεων QoS το ελάχιστο βάρος κάθε κόμβου είναι $w_{\min,i}$ με $i=1, \dots, N$. Με $w_{\text{new},i}$, $i=1, \dots, N$ συμβολίζονται τα νέα βάρη των κόμβων μετά τη διαδικασία βελτιστοποίησης. Τέλος, ορίζονται τα διαθέσιμα βάρη κάθε κόμβου ως $d_i = w_i - w_{\min,i}$ και $d_{\text{new},i} = w_{\text{new},i} - w_{\min,i}$ που συμβολίζουν το βάρος που μπορεί να διαθέσει κάθε κόμβος ικανοποιώντας τις απαιτήσεις QoS του, πριν και μετά τη διαδικασία βελτιστοποίησης. Οι περιορισμοί του προβλήματος διατυπώνονται ως εξής:

- Το βάρος κάθε κόμβου μετά τη διαδικασία βελτιστοποίησης πρέπει να είναι μεγαλύτερο από το ελάχιστο απαιτούμενο, δηλαδή

$$w_{new,i} \geq w_{min,i} \text{ ή } d_{new,i} \geq 0, i = 1, 2, \dots, n \quad (4.3)$$

- Το συνολικό βάρος κατά το οποίο μειώνονται οι κόμβοι πρέπει να είναι ίσο με το ελάχιστο βάρος που απαιτεί ο νέος κόμβος, δηλαδή:

$$\sum_{i=1}^N (w_i - w_{new,i}) = k \text{ ή } \sum_{i=1}^N (d_i - d_{new,i}) \geq k \quad (4.4)$$

- Το κριτήριο βελτιστοποίησης είναι η ελαχιστοποίηση της συνολικής σχετικής διαφοράς των διαθέσιμων βαρών (d_i) πριν και μετά την ανάθεση πόρων στο νέο κόμβο. Η αντικειμενική συνάρτηση πρέπει να ελαχιστοποιηθεί έτσι ώστε με δίκαιο τρόπο να αφαιρείται βάρος από κάθε κόμβο. Επομένως, η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος βελτιστοποίησης είναι η συνάρτηση:

$$f_o(x) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{d_i - d_{new,i}}{d_i} \right)^2} \quad (4.5)$$

Η μορφή της ρίζας αθροίσματος τετραγώνων επιλέχθηκε διότι μπορεί εύκολα να υλοποιηθεί σε περιβάλλον MATLAB με χρήση συνάρτησης ευκλείδειας νόρμας διανύσματος.

Συνοψίζοντας τα ανωτέρω, το πρόβλημα κυρτής βελτιστοποίησης διατυπώνεται ως εξής:

$$\text{minimize} \quad \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{d_i - d_{new,i}}{d_i} \right)^2} \quad (4.6.1)$$

$$\text{subject to} \quad d_{new,i} \geq 0, i = 1, 2, \dots, N \quad (4.6.2)$$

$$\sum_{i=1}^N (d_i - d_{new,i}) = k \quad (4.6.3)$$

4.4 Διατύπωση του προβλήματος για επίλυση σε περιβάλλον MATLAB

Η επίλυση των προβλημάτων κυρτής βελτιστοποίησης μπορεί να πραγματοποιηθεί με χρήση της βιβλιοθήκης Convex Toolbox στο περιβάλλον του MATLAB. Η περιγραφή του δικτύου έγινε υπό τη μορφή δομής δεδομένων. Η δομή αυτή στην περίπτωση δικτύου με N κόμβους περιέχει το $N \times N$ πίνακα ακμών (βλ. Παράγραφο 4.1) καθώς, επίσης, και δύο N -διάστατα διανύσματα \mathbf{w} και $\mathbf{w_min}$. Τα τελευταία περιέχουν τα βάρη και τα ελάχιστα βάρη των κόμβων του δικτύου και προκύπτουν από τα τοπικά βάρη b_i και $b_{min,i}$ μέσω της διαδικασίας που περιγράφεται στην παράγραφο 4.1.

Με βάση τα προηγούμενα, διατυπώθηκε το πρόβλημα της παρ. 4.3 έτσι ώστε να καταστεί δυνατή η επίλυσή του με χρήση του Convex Toolbox. Συγκεκριμένα, θεωρήθηκε N-διάστατο διάνυσμα \mathbf{x} που αντιπροσωπεύει την ποσοστιαία μείωση του διαθέσιμου βάρους (d_i) κάθε κόμβου. Δηλαδή το i -οστό στοιχείο του διανύσματος \mathbf{x} είναι ίσο με $\left(\frac{d_i - d_{new,i}}{d_i}\right)$. Ζητούμενο είναι η ελαχιστοποίηση της ευκλείδειας νόρμας του διανύσματος \mathbf{x} .

Θεωρείται επίσης ο διαγώνιος NxN πίνακας \mathbf{A} , τα στοιχεία της διαγωνίου του οποίου είναι τα αρχικά διαθέσιμα βάρη των κόμβων (d_i) που πρόκειται να μειωθούν. Το γινόμενο πινάκων

$$\mathbf{z} = \mathbf{A} * \mathbf{x} \quad (4.7)$$

είναι διάνυσμα, κάθε στοιχείο του οποίου είναι ίσο με τη μείωση του d_i του αντίστοιχου κόμβου. Επομένως, το βάρος το οποίο μπορεί να διατεθεί στο νέο κόμβο μετά τη μείωση των βαρών των αρχικών κόμβων που έχουν τον ίδιο με αυτόν πατέρα είναι το άθροισμα των στοιχείων του διανύσματος \mathbf{z} . Με δεδομένο ότι η συνάρτηση της MATLAB $ones(1,N)$ επιστρέφει ένα N-διάστατο διάνυσμα με όλες τις τιμές ίσες με 1, ο περιορισμός (4.6.3) γράφεται υπό τη μορφή:

$$ones(1,n) * (\mathbf{A} * \mathbf{x}) \geq k$$

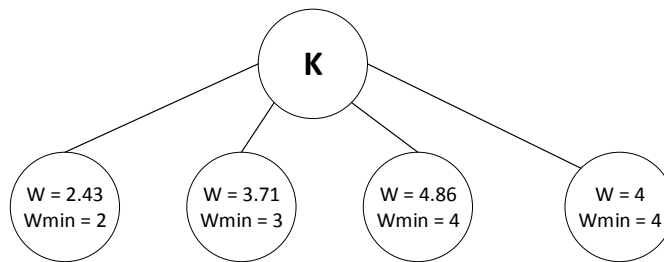
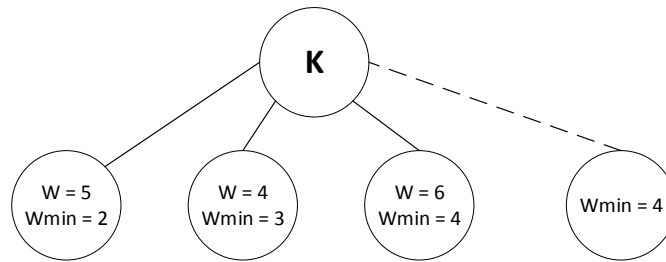
Αν κάθε στοιχείο του διανύσματος \mathbf{x} αφαιρεθεί από τη μονάδα προκύπτει το σχετικό βάρος (τιμές μεταξύ 0 και 1) του κόμβου το οποίο παραμένει διαθέσιμο. Πολλαπλασιάζοντας την ανωτέρω διαφορά με τον πίνακα \mathbf{A} προκύπτει το τελικό διαθέσιμο βάρος κάθε κόμβου. Επομένως, ο περιορισμός (4.6.2) γράφεται υπό τη μορφή:

$$\mathbf{A} * (ones(1,N) - \mathbf{x}) \geq \mathbf{0}$$

Έτσι προκύπτει ο κώδικας της συνάρτησης *optimiseNodes*, η οποία δέχεται τα βάρη και τα ελάχιστα βάρη των κόμβων καθώς και το ζητούμενο βάρος του νέου κόμβου και επιστρέφει την κατανομή των νέων βαρών. Η λειτουργία της συνάρτησης γίνεται καλύτερα κατανοητή μέσω του παραδείγματος του σχήματος 4.3. Όπως φαίνεται, πραγματοποιείται μεγαλύτερη μείωση των βαρών των κόμβων με μεγάλο διαθέσιμο βάρος. Μειώνεται σε μεγάλο βαθμό ο κόμβος με αρχικό βάρος 5, καθώς έχει το μεγαλύτερο διαθέσιμο βάρος, και, σε μικρότερο βαθμό, ο κόμβος με αρχικό βάρος 4 που έχει το μικρότερο διαθέσιμο βάρος.

Στην περίπτωση όπου το ζητούμενο βάρος του νέου κόμβου δεν είναι δυνατό να καλυφθεί από τους κόμβους με κοινό πατέρα με αυτόν, αφαιρείται το μέγιστο δυνατό βάρος από έκαστο εξ αυτών και το υπόλοιπο βάρος αναζητείται ανεβαίνοντας ένα επίπεδο στο δένδρο. Η διαδικασία

επαναλαμβάνεται διαδοχικά μέχρι την εξεύρεση του ζητούμενου βάρους ή μέχρι η διαδικασία να έχει φθάσει στην κορυφή του δένδρου χωρίς να έχει εξευρεθεί το ζητούμενο βάρος.



Σχήμα 4.3: Εισαγωγή νέου κόμβου κάτω από τον ίδιο πατέρα. Ο νέος κόμβος ζητεί να συνδεθεί στο δένδρο (διακεκομμένη γραμμή). Τα βάρη των τριών κόμβων μειώνονται από 5, 4, 6 σε 2.43, 3.71, 4.86 αντίστοιχα.

4.5 Επαναπροσδιορισμός των βαρών των κόμβων κάθε υποδένδρου

Μετά τη μείωση του βάρους από κάποιο κόμβο είναι αναγκαία η μείωση των βαρών και των κόμβων που ανήκουν στο υποδένδρο με πατέρα τον κόμβο αυτό. Υπενθυμίζεται στο σημείο αυτό ότι, σύμφωνα με την (4.1), το βάρος κάθε κόμβου καθορίζεται και από το βάρος των παιδιών του. Επομένως, μετά τον προσδιορισμό του βάρους που πρέπει να αφαιρεθεί από κάθε κόμβο με κοινό πατέρα με το νέο κόμβο, πρέπει να ληφθεί υπόψη το υποδένδρο κάθε τέτοιου κόμβου. Στην περίπτωση όπου κάποιος κόμβος είναι φύλλο του δένδρου δεν απαιτείται κάποια άλλη ενέργεια καθώς το βάρος του αφορά μόνο την πληροφορία που παράγει ο κόμβος. Στην περίπτωση όπου ο κόμβος είναι κορυφή υποδένδρου πρέπει να αφαιρεθούν βάρη και από τους κόμβους χαμηλότερου επιπέδου.

Ο αλγόριθμος που προτείνεται στην παρούσα εργασία επιδιώκει με δίκαιο τρόπο τη μείωση των βαρών του υποδένδρου με επαναληπτική μέθοδο και υλοποιείται στη συνάρτηση *optimiseSubtree*. Η συνάρτηση αυτή δέχεται ως είσοδο έναν κόμβο του δένδρου (έστω κόμβος *A*) και το βάρος το οποίο πρέπει να αφαιρεθεί από το υποδένδρο του κόμβου αυτού, και αφαιρεί

με δίκαιο τρόπο βάρη από όλους τους κόμβους του υποδένδρου του κόμβου A. Η συνάρτηση καλεί τη συνάρτηση *optimiseNodes* (βλ. Παράγραφο 4.4) με είσοδο το τοπικό βάρος του κόμβου A (b_A) και τα βάρη όλων των παιδιών του. Επιστρέφει το μειωμένο βάρος του κόμβου A ($b_{new,A}$) και τα βάρη που πρέπει να μειωθούν από κάθε παιδί του. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για κάθε παιδί του κόμβου A που δεν είναι φύλλο. Κατ' αυτόν τον τρόπο, μοιράζεται δίκαια η συνολική επιβάρυνση στους κόμβους ενός υπόδενδρου.

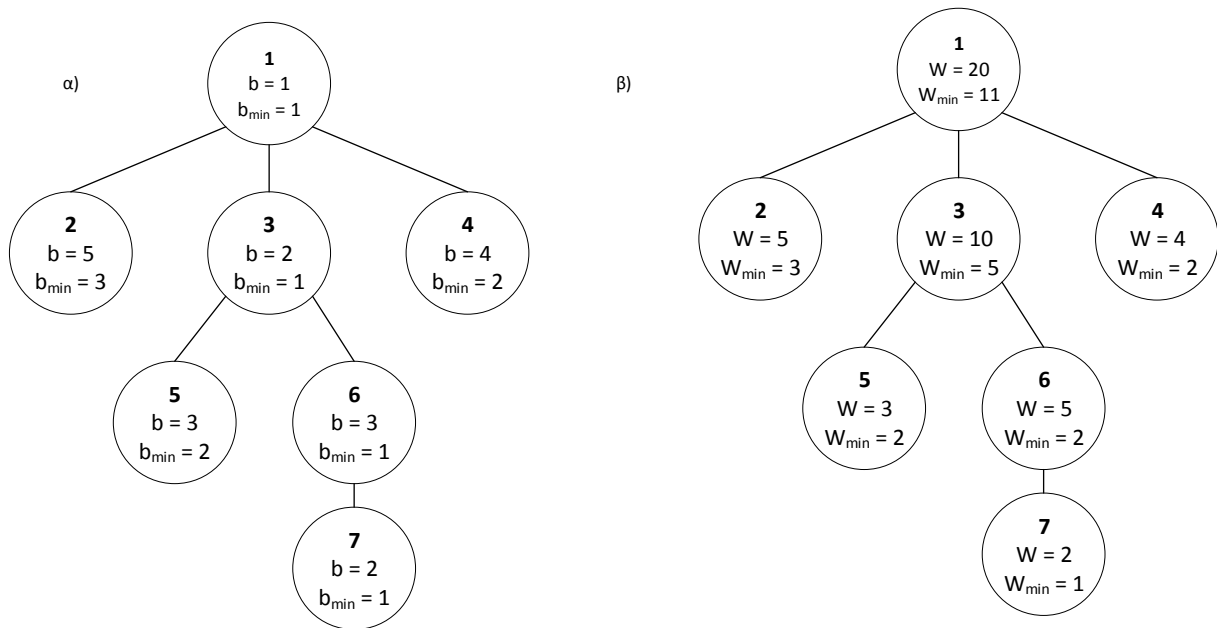
4.6 Σύνοψη – Διατύπωση του αλγορίθμου - Παράδειγμα

Συνοψίζοντας τα προηγούμενα, ο προτεινόμενος αλγόριθμος αντιμετωπίζει την είσοδο νέου κόμβου στο δίκτυο με τις εξής ενέργειες: Αρχικά επιδιώκει την εύρεση του βάρους που απαιτείται με μείωση των βαρών των κόμβων που έχουν τον ίδιο πατέρα με το νέο κόμβο και προσαρμόζει τα βάρη των υποδένδρων των κόμβων που έχουν κοινό πατέρα με το νέο κόμβο. Αν μετά τη διαδικασία αυτή δεν επιτυγχάνεται η κάλυψη των αναγκών του νέου κόμβου επαναλαμβάνεται η διαδικασία σε υψηλότερο επίπεδο του δένδρου. Επομένως, δίνεται προτεραιότητα κατά κύριο λόγο στην αποφυγή εφαρμογής της διαδικασίας σε ανώτερο επίπεδο και κατόπιν στην κατανομή της μείωσης των βαρών των κόμβων κατά δίκαιο τρόπο. Ο αλγόριθμος είναι ο ακόλουθος:

Αλγόριθμος 4.1

1. Με τη μέθοδο κυρτής βελτιστοποίησης προσδιορίζεται κατά πόσο πρέπει να μειωθούν τα βάρη των κόμβων κάτω από τον ίδιο κόμβο-πατέρα με το νέο κόμβο ώστε να εξευρεθεί το απαιτούμενο βάρος για τον τελευταίο.
 2. Για κάθε κόμβο του οποίου το συνολικό βάρος πρέπει να μειωθεί, εφόσον δεν είναι φύλλο του δένδρου, μειώνεται το τοπικό βάρος και τα βάρη των παιδιών του με τη μέθοδο κυρτής βελτιστοποίησης. Αν είναι φύλλο, μειώνεται απλώς το βάρος του κόμβου.
 3. Επαναλαμβάνεται το βήμα 2 για κάθε παιδί του κόμβου αυτού (στην περίπτωση όπου ο κόμβος δεν είναι φύλλο του δένδρου).
 4. Όταν το συνολικό διαθέσιμο βάρος που βρέθηκε δεν επαρκεί για να καλύψει τις ανάγκες του νέου κόμβου, επαναλαμβάνεται η διαδικασία για το ζητούμενο βάρος που απομένει στο αμέσως υψηλότερο επίπεδο.
 5. Επαναλαμβάνεται το βήμα 4 μέχρι να εξευρεθεί το απαιτούμενο βάρος ή μέχρι η διαδικασία να φθάσει στην κορυφή του δένδρου.
-

Για την καλύτερη κατανόηση του αλγορίθμου ακολουθεί ένα παράδειγμα εφαρμογής του βασιζόμενο στα σχήματα 4.4 και 4.5. Στο σχήμα 4.4 παρουσιάζονται τα τοπικά και τα συνολικά βάρη των αρχικών κόμβων ενός δένδρου.



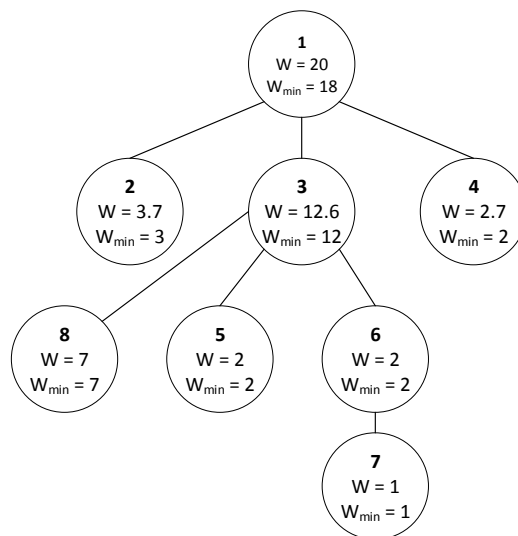
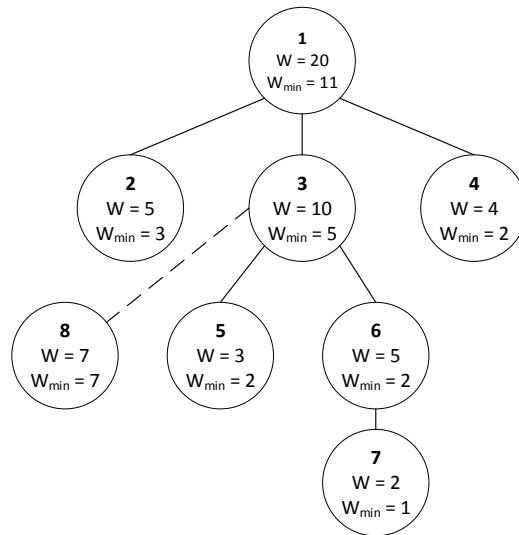
Σχήμα 4.4: α) Τα τοπικά βάρη (b_i και $b_{min,i}$) των αρχικών κόμβων ενός δένδρου

β) Τα βάρη (w_i και $w_{min,i}$) των αρχικών κόμβων του δένδρου

Στο σχήμα 4.5 παρουσιάζεται η εισαγωγή ενός νέου κόμβου κάτω από τον κόμβο 3 με απαιτούμενο βάρος 7. Εφαρμόζεται ο αλγόριθμος 4.1, δηλαδή, επιδιώκεται αρχικά η εύρεση του απαιτούμενου βάρους με μείωση των βαρών των ομολόγων κόμβων 5 και 6. Η μείωση του βάρους του κόμβου 6 συνεπάγεται και μείωση του βάρους του κόμβου 7 (βλ. βήμα 2 του αλγορίθμου 4.1) καθώς ο κόμβος 6 εξυπηρετεί και τον κόμβο 7, δηλαδή, το βάρος του κόμβου 6 συμπεριλαμβάνει και το βάρος του κόμβου 7. Καθώς δεν είναι εφικτή η εξεύρεση του συνόλου του απαιτούμενου βάρους από τους κόμβους με τον κοινό πατέρα (δηλαδή τον κόμβο 3) και τα παιδιά τους, αναγκαία είναι η άνοδος σε ανώτερο επίπεδο και η επανάληψη της διαδικασίας για το υπολειπόμενο βάρος. Αναλυτικότερα η διαδικασία περιγράφεται ακολούθως:

Βήμα 1: Ο νέος κόμβος (κόμβος 8) επιδιώκει την εύρεση του απαιτούμενου βάρους (7) με μείωση των βαρών των κόμβων με κοινό πατέρα με αυτόν (κόμβοι 5, 6). Το απαιτούμενο βάρος δεν είναι δυνατό να εξυρευθεί μόνο από τους κόμβους αυτούς, οπότε οι κόμβοι 5 και 6 διαθέτουν όλο το διαθέσιμο βάρος (1 και 3 αντίστοιχα).

Βήμα 2: Ο κόμβος 5 δεν διαθέτει παιδιά· επομένως, απλώς μειώνεται το w_5 από 3 σε 2. Ο κόμβος 6 έχει παιδί τον κόμβο 7. Αφού το βάρος του κόμβου 6 μειώνεται, πρέπει να μειωθεί και το βάρος του παιδιού του (κόμβος 7) διότι το βάρος του κόμβου 6 συμπεριλαμβάνει και το βάρος του κόμβου 7. Έτσι το w_7 (και άρα και το b_7) γίνεται ίσο με 1 (ίσο με το $w_{\min,7}$) ενώ το w_6 γίνεται ίσο με 2.



Σχήμα 4.5: α) Ένας νέος κόμβος, ο κόμβος 8, με ζητούμενο βάρος 7 ζητεί να συνδεθεί στο δένδρο (σύνδεση με διακεκομμένη γραμμή)

β) Τα βάρη των κόμβων μειώνονται για να εξευρεθεί το βάρος του νέου κόμβου.

Επειδή δεν αρκεί η μείωση των βαρών των δύο κόμβων με κοινό πατέρα (τον κόμβο 3), επαναλαμβάνεται η διαδικασία για το υπολειπόμενο βάρος στο αμέσως ανώτερο επίπεδο.

Βήμα 3: Ο κόμβος 3 ενημερώνεται για τις αλλαγές στα παιδιά του. Όμοια ενημερώνεται ο κόμβος 1. Αυξάνονται τα $w_{\min,3}$ και $w_{\min,1}$ έτσι ώστε να λαμβάνεται υπόψη το βάρος που έχει αποδοθεί έως τώρα στον κόμβο 8.

Βήμα 4: Αφού το βάρος που εξευρέθηκε από το επίπεδο στο οποίο συνδέεται ο νέος κόμβος δεν επαρκεί, ο κόμβος 8 ζητεί το βάρος που υπολείπεται από τα παιδιά του επόμενου ιεραρχικά κόμβου (του κόμβου 1). Ζητεί, επομένως, από τους κόμβους 2, 3 και 4 βάρος ίσο με 3. Συνεπώς, το βάρος των κόμβων 2, 3 και 4 μειώνεται σε 3.7, 9.6 και 2.7 αντίστοιχα ενώ, με την ενσωμάτωση του κόμβου 8, το βάρος του κόμβου 3 γίνεται ίσο με $9.6+3=12.6$.

Βήμα 5: Ο κόμβος 1 ενημερώνεται για τις αλλαγές στους κόμβους 2, 3 και 4 και επομένως το $w_{\min,1}$ λαμβάνει την τιμή 18.

Βήμα	Περιγραφή σταδίου	w/w _{min} κόμβων								b/b _{min} κόμβων								Υπολοιπόμενο βάρος
		1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8	
0	Αρχικό στάδιο	20/11	5/3	10/5	4/2	3/2	5/2	2/1	0/7	1/1	5/3	2/1	4/2	3/2	3/1	2/1	0/7	7
1	Εύρεση βαρών από κόμβους 5, 6	20/11	5/3	10/5	4/2	2/2	2/2	2/1	4/7	1/1	5/3	2/1	4/2	2/2	1/1	2/1	4/7	3
2	Αναδιοργάνωση υποδένδρου κάτω από τον κόμβο 6	20/11	5/3	10/5	4/2	2/2	2/2	1/1	4/7	1/1	5/3	2/1	4/2	2/2	1/1	1/1	4/7	3
3	Ενημέρωση των κόμβων 3 και 1 για τις αλλαγές στους κόμβους 5,6,7	20/15	5/3	10/9	4/2	2/2	2/2	1/1	4/7	1/1	5/3	2/1	4/2	2/2	1/1	1/1	4/7	3
4	Εύρεση υπόλοιπου βάρους από κόμβους 2,3,4	20/15	3.7/3	12.6/12	2.7/2	2/2	2/2	1/1	7/7	1/1	3.7/3	1.6/1	2.7/2	2/2	1/1	1/1	7/7	0
5	Ενημέρωση του κόμβου 1 για τις αλλαγές στους κόμβους 2,3,4	20/18	3.7/3	12.6/12	2.7/2	2/2	2/2	1/1	7/7	1/1	3.7/3	1.6/1	2.7/2	2/2	1/1	1/1	7/7	0

Πίνακας 4.1: Τα στάδια εκτέλεσης του αλγορίθμου στο παράδειγμα του σχήματος 4.4.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

5.1 Ο δείκτης δικαιοσύνης του Jain

Ο αλγόριθμος της εργασίας επιδιώκει την εξεύρεση πόρων για το νεοεισερχόμενο κόμβο αποφεύγοντας κατά το δυνατό την αναζήτηση πόρων από ανώτερο επίπεδο. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται μείωση του απαιτούμενου χρόνου εκτέλεσης του αλγορίθμου. Δεύτερος στόχος του αλγορίθμου είναι η δίκαιη κατανομή των πόρων του δικτύου μεταξύ των αρχικών κόμβων και του νέου κόμβου. Επομένως, είναι σημαντική η χρήση κάποιου μέτρου κατάλληλου για την εκτίμηση της δικαιοσύνης που επιτυγχάνεται. Ο δείκτης που χρησιμοποιείται είναι ο δείκτης δικαιοσύνης του Jain (Jain's Fairness Index). Ο δείκτης αυτός λαμβάνει τιμές μεταξύ 0 και 1. Τιμές του δείκτη κοντά στο 0 δηλώνουν μεγάλη ανισοκατανομή των πόρων στο δίκτυο. Αντίθετα, ο δείκτης λαμβάνει την τιμή 1 στην περίπτωση όπου ανατίθενται σε όλους τους κόμβους ίσοι πόροι.

Ο δείκτης δικαιοσύνης του Jain ορίζεται ως εξής:

$$J(x_1, x_2, \dots, x_n) = \frac{(\sum_{i=1}^N x_i)^2}{N * \sum_{i=1}^N x_i^2} \quad (5.1)$$

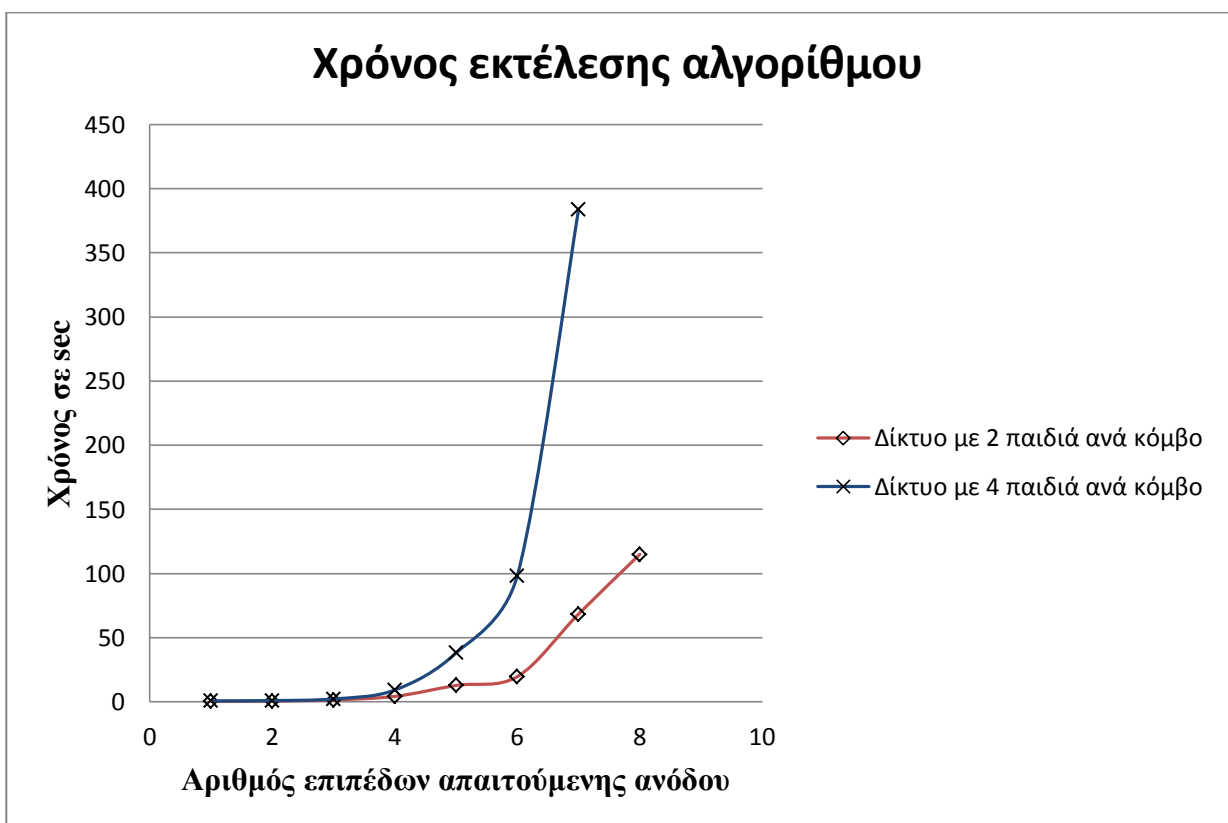
όπου N το πλήθος των κόμβων του δικτύου και x_i οι πόροι που έχουν ανατεθεί στον i-οστό κόμβο.

Με χρήση του δείκτη του Jain είναι εφικτή η σύγκριση της δικαιοσύνης στην κατανομή των πόρων πριν και μετά την εισαγωγή του νέου κόμβου στο δένδρο. Στην παρούσα εργασία υπολογίζεται η δικαιοσύνη σε ένα δένδρο αντικαθιστώντας στη θέση των x_i του δείκτη του Jain τα βάρη w_i , $i=1,2,\dots,N$ των κόμβων του δένδρου. Η επίπτωση της εφαρμογής του αλγορίθμου στη δικαιοσύνη προσδιορίζεται μέσω της ποσοστιαίας μεταβολής του δείκτη του Jain, δηλαδή της ποσότητας:

$$\Delta J\% = \frac{J_{new} - J_{old}}{J_{old}} * 100 \quad (5.2)$$

5.2 Μετρήσεις του χρόνου εκτέλεσης του αλγορίθμου

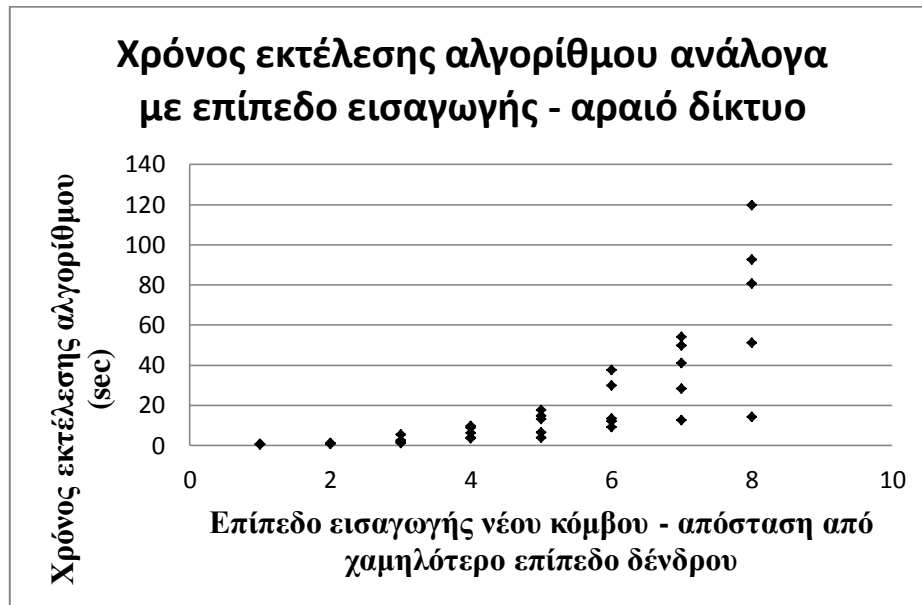
Στο διάγραμμα του σχήματος 5.1 απεικονίζεται ο χρόνος εκτέλεσης του αλγορίθμου ανάλογα με το πλήθος ανόδων επιπέδων που απαιτείται για την εξεύρεση των πόρων. Ο αλγόριθμος εφαρμόζεται διαδοχικά σε αραιότερα (2 παιδιά ανά κόμβο κατά μέσο όρο) και πυκνότερα (4 παιδιά ανά κόμβο κατά μέσο όρο) δένδρα. Σταδιακά αυξάνεται το ζητούμενο βάρος του νέου κόμβου ώστε να απαιτείται άνοδος κατά ένα επίπεδο κάθε φορά. Όπως φαίνεται από το σχήμα, ο χρόνος εκτέλεσης αυξάνεται εκθετικά όταν απαιτείται άνοδος σε ανώτερα επίπεδα, και τούτο πολύ εντονότερα όταν αυξάνεται η πυκνότητα των δένδρων.



Σχήμα 5.1: Χρόνος εκτέλεσης αλγορίθμου για εισαγωγή νέου κόμβου όταν απαιτείται διαφορετικός αριθμός επιπέδων ανόδου.

Ο χρόνος εκτέλεσης του αλγορίθμου επηρεάζεται, επίσης, σημαντικά από το επίπεδο εισαγωγής του νέου κόμβου. Η επίδραση αυτή απεικονίζεται στο σχήμα 5.2 (αραιό δίκτυο με 2 παιδιά ανά κόμβο κατά μέσο όρο) και στο σχήμα 5.3 (πυκνό δίκτυο με 4 παιδιά ανά κόμβο κατά μέσο όρο). Παρατηρείται σημαντική διασπορά στις μετρήσεις, ιδιαίτερα για εισαγωγή κόμβου σε υψηλότερα

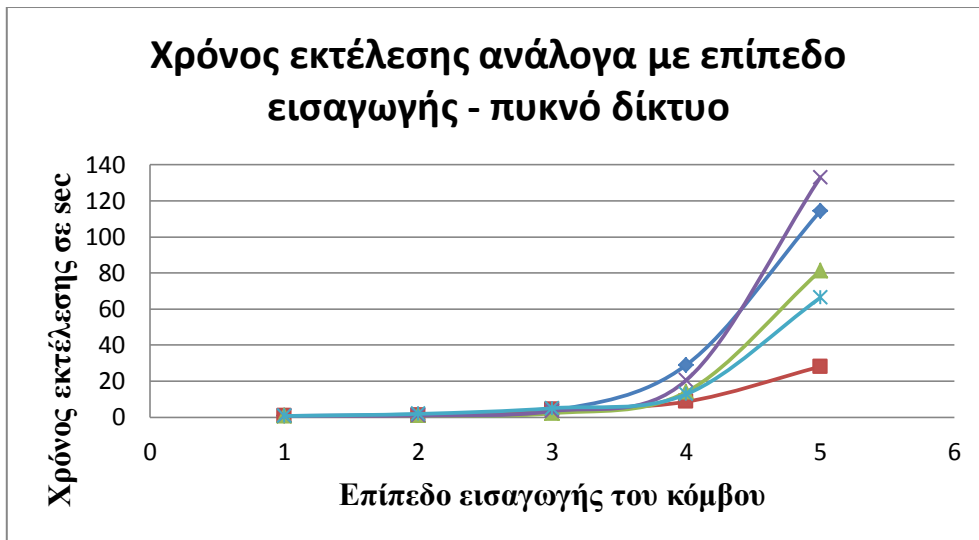
επίπεδα του δένδρου. Η διασπορά αυτή οφείλεται στην τυχαία κατανομή του πλήθους των παιδιών ανά κόμβο. Καθώς τα δένδρα των προσομοιώσεων αποτελούνται από 2000 κόμβους, ένα επιπλέον παιδί σε κόμβο υψηλού επιπέδου απαιτεί τον έλεγχο υποδένδρου με μεγάλο αριθμό κόμβων αυξάνοντας σημαντικά το χρόνο εκτέλεσης του αλγορίθμου. Επομένως, είναι πιθανό ο χρόνος εκτέλεσης του αλγορίθμου να διαφέρει σημαντικά ακόμη και στην περίπτωση δένδρων που χαρακτηρίζονται από τα ίδια στατιστικά χαρακτηριστικά.



Σχήμα 5.2: Επίδραση του επιπέδου εισαγωγής νέου κόμβου στο χρόνο εκτέλεσης του αλγορίθμου σε αραιό δίκτυο.

5.3 Μετρήσεις δείκτη δικαιοσύνης

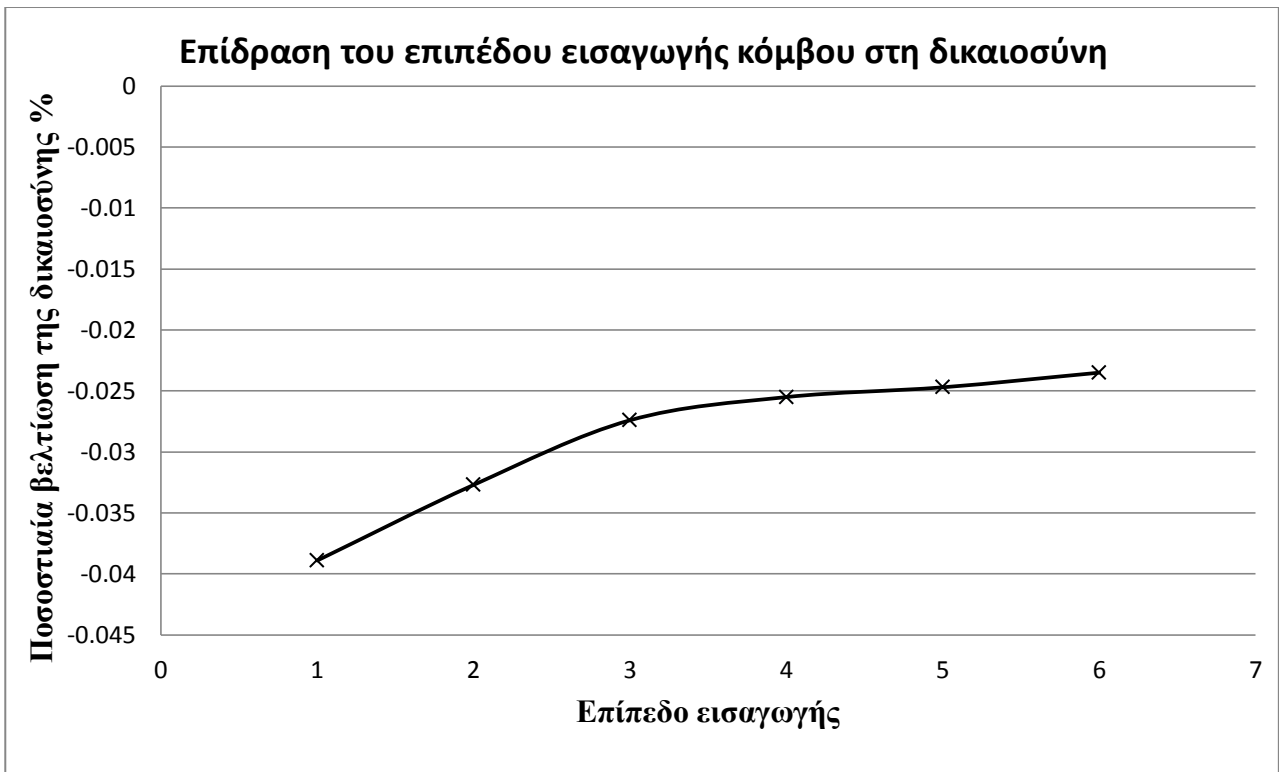
Όπως αναφέρθηκε (βλ. Παράγραφο 5.1) οι μετρήσεις της δικαιοσύνης κατανομής πόρων στο δίκτυο γίνονται με χρήση του δείκτη δικαιοσύνης του Jain. Συγκεκριμένα, υπολογίζεται ο ανωτέρω δείκτης πριν και μετά την εισαγωγή νέου κόμβου σε πλήθος δικτύων με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά και υπολογίζεται η ποσοστιαία μεταβολή του. Στη συνέχεια, υπολογίζεται ο μέσος όρος των μετρήσεων και η μεταβολή του απεικονίζεται στα διαγράμματα που ακολουθούν.



Σχήμα 5.3: Επίδραση του επιπέδου εισαγωγής νέου κόμβου στο χρόνο εκτέλεσης του αλγορίθμου σε 5 πυκνά δένδρα με διαφορετική κατανομή κόμβων. Κάθε γραμμή παρουσιάζει τα αποτελέσματα των μετρήσεων σε κάθε δένδρο.

Στο διάγραμμα του σχήματος 5.4 απεικονίζεται η μεταβολή στη δικαιοσύνη κατανομής πόρων στο δίκτυο μετά από την εισαγωγή νέου κόμβου στο δένδρο με μικρό βάρος. Η μεταβολή υπολογίζεται για εισαγωγή κόμβου σε διαφορετικά επίπεδα.

Όπως φαίνεται στο σχήμα 5.4, για εισαγωγή κόμβου μικρού βάρους σε υψηλότερο επίπεδο του δένδρου, ο δείκτης δικαιοσύνης υφίσταται μικρότερη μείωση. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι, λόγω της εισαγωγής ενός νέου κόμβου στο δένδρο, πραγματοποιείται ανακατανομή των βαρών των υποδένδρων των γειτονικών κόμβων σύμφωνα με τον αλγόριθμο 4.1. Η ανακατανομή αυτή οδηγεί σε δικαιότερη κατανομή βαρών στα υποδένδρα αν πραγματοποιηθεί σε υψηλότερο επίπεδο.

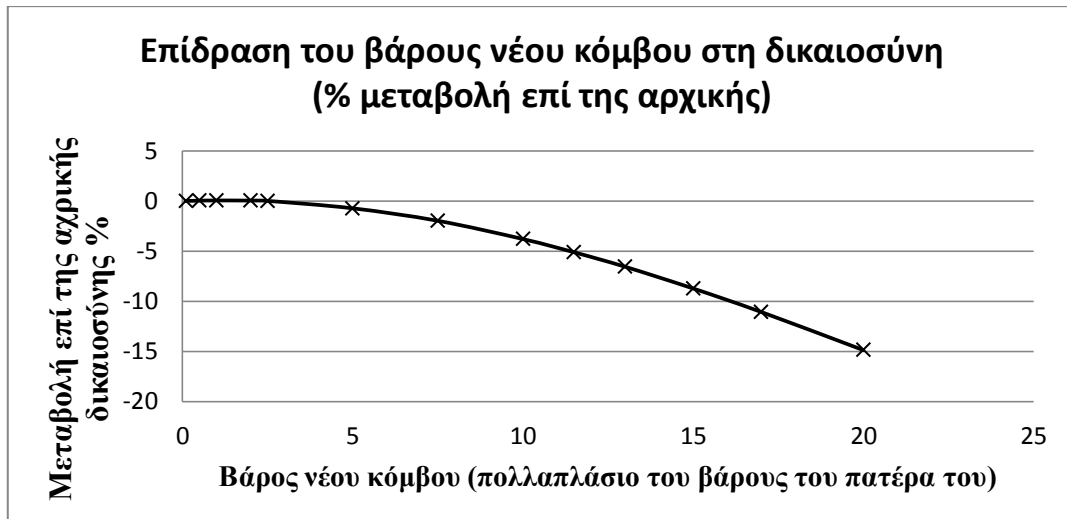


Σχήμα 5.4: Ποσοστιαία μεταβολή της δικαιοσύνης μετά από την εισαγωγή νέου κόμβου μικρού βάρους. Μεταβάλλεται το επίπεδο εισαγωγής του κόμβου που κυμαίνεται από 1 (εισαγωγή στο χαμηλότερο επίπεδο του δένδρου) μέχρι 6.

Στο διάγραμμα του σχήματος 5.5 απεικονίζεται η μεταβολή στη δικαιοσύνη κατανομής πόρων στο δένδρο μετά από εισαγωγή νέου κόμβου, το βάρος του οποίου μεταβάλλεται. Παρατηρείται ότι ο δείκτης δικαιοσύνης του δένδρου μειώνεται με αύξηση του βάρους του νέου κόμβου, καθώς νέος κόμβος με μεγάλο σχετικά βάρος απαιτεί δυσανάλογα πολλούς πόρους από τους υπόλοιπους κόμβους του δένδρου. Αντίθετα, στην περίπτωση εισαγωγής νέου κόμβου με μικρό βάρος, δεν παρατηρείται σημαντική μείωση του δείκτη δικαιοσύνης.

Στο σχήμα 5.6 απεικονίζεται η επίδραση της πυκνότητας του δένδρου στη μεταβολή της δικαιοσύνης που προκαλεί η εισαγωγή νέου κόμβου. Λαμβάνονται μετρήσεις σε δένδρα με 4000 κόμβους των οποίων το μέσο πλήθος παιδιών ανά κόμβο διαφέρει. Στα δένδρα εισάγεται κάθε φορά νέος κόμβος με σχετικά μεγάλο βάρος (ίσο με το δεκαπλάσιο του βάρους του κόμβου κάτω από τον οποίο εισάγεται) ώστε να προκαλέσει μείωση του δείκτη δικαιοσύνης. Παρατηρείται ότι τα πυκνότερα δένδρα εμφανίζουν μικρότερη επιδείνωση του δείκτη δικαιοσύνης. Σημειώνεται, όμως, ότι οι μετρήσεις στην περίπτωση των πυκνότερων δένδρων δεν μπορούν να θεωρηθούν

αρκετά αξιόπιστες διότι όλες οι μετρήσεις πραγματοποιούνται σε δένδρα με σταθερό αριθμό κόμβων και, συνεπώς, το πλήθος των επιπέδων των δένδρων μεταβάλλεται σημαντικά σε πυκνότερα δένδρα.



Σχήμα 5.5: Ποσοστιαία μεταβολή του δείκτη δικαιοσύνης σε δένδρα στα οποία εισάγεται νέος κόμβος. Το βάρος του νέου κόμβου εκφράζεται σε σχέση με το βάρος του πατέρα, κάτω από τον οποίο εισάγεται ο νέος κόμβος. Το βάρος του νέου κόμβου μεταβάλλεται από το υποδεκαπλάσιο του βάρους του πατέρα του μέχρι και το εικοσαπλάσιο του βάρους του πατέρα του.



Σχήμα 5.6: Ποσοστιαία μεταβολή του δείκτη δικαιοσύνης για εισαγωγή κόμβου σε δένδρα διαφορετικής πυκνότητας.

5.4 Συμπεράσματα

Με βάση τις προηγούμενες προσομοιώσεις, είναι δυνατή η εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικών με την επίδοση του αλγορίθμου. Συγκεκριμένα, παρατηρείται σημαντική αύξηση του χρόνου εκτέλεσης του αλγορίθμου όταν απαιτείται άνοδος σε ανώτερα επίπεδα του δένδρου, ιδιαίτερα σε πυκνότερα δένδρα. Για το λόγο αυτό, ο αλγόριθμος που προτείνεται δίνει έμφαση όπως αναφέρθηκε στην αποφυγή ανόδου σε ανώτερα επίπεδα του δένδρου και στην κάλυψη των αναγκών του νέου κόμβου με μείωση των βαρών των κόμβων με κοινό πατέρα, όταν αυτό είναι εφικτό.

Παρατηρείται, επίσης, μικρότερη μείωση του δείκτη δικαιοσύνης όταν ο νέος κόμβος εισάγεται σε υψηλότερα επίπεδα του δένδρου. Το κόστος, στην περίπτωση αυτή, είναι ο σχετικά αυξημένος χρόνος εκτέλεσης του αλγορίθμου (Σχήματα 5.2 και 5.3).

Τέλος, σημαντική είναι η επίπτωση της πυκνότητας του τόσο στο χρόνο εκτέλεσης όσο και στη δικαιοσύνη κατανομής των πόρων. Στην περίπτωση πυκνότερων δένδρων, η δικαιοσύνη υφίσταται μικρότερη μείωση ακόμη και στην περίπτωση εισαγωγής κόμβου με μεγάλο βάρος συγκριτικά με την εισαγωγή κόμβου σε αραιότερα δένδρα. Παρατηρείται, όμως, μεγάλη αύξηση του χρόνου εκτέλεσης του αλγορίθμου.

Βιβλιογραφία

- [1] *Ασύρματες Επικοινωνίες*, Κωττής Π., Αράπογλου Π., Εκδόσεις Τζιόλα, 2010
- [2] *Δίκτυα Υπολογιστών*, Tanenbaum A., Εκδόσεις Κλειδάριθμος, 2008
- [3] *Convex Optimization*, Boyd S, Vandenberghe L, Cambridge University Press, 2004
- [4] *Routing and Optimal TDMA Scheduling in Tree-Based Power Line Access Networks*, Sarafi A., Voulkidis A., Cottis P.
- [5] *Hybrid Wireless – Broadband over Power Lines: A Promising Broadband Solution in Rural Areas*, Sarafi A., Tsiropoulos G., Cottis P.
- [6] *A Distributed QoS Control Architecture for Heterogenous Networks Applied to PLC Networks*, Maia R. F., Gabos D., Moacyr M.
- [7] *Heterogenous Communication Architecture for the Smart Grid*, Zaballos A., Vallejo A., Selga J.
- [8] *Next-Generation QoS Control Architectures for Distribution Smart Grid Communication Networks*, Vallejo A., Zaballos A., Dalmau J., Selga J.
- [9] *Smart Grid – The New and Improved Power Grid: A Survey*, Fang X., Guoliang X., Jang D.
- [10] *Information Aggregation and Optimized Actuation in Sensor Networks: Enabling Smart Electrical Grids*, Pendarakis D., Shrivastava N., Liu Z., Ambrosio R.
- [11] *The Global Grid*, Chatzivasileiadis S., Ernst D., Andersson G.
- [12] *Impacts of Grid Reinforcements on the Strategic Behaviour of Power Market Participants*, Krause T., Chatzivasileiadis S., Katsampani M., Andersson G.
- [13] *Fast Data Collection in Tree-Based Wireless Sensor Networks*, Incel O. D., Ghosh A., Krishnamachari B., Chintalapudi K.