



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ &
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ



Εναέρια Οπτική Ίνα σε Κοινή Όδευση με Γραμμές Ισχύος

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ ΚΟΥΤΑΛΙΑΝΟΣ

Επιβλέπων: Δημήτριος Τσιαμήτρος

Αναπληρωτής Καθηγητής

ΚΟΖΑΝΗ/ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ/2023



HELLENIC DEMOCRACY
UNIVERSITY OF WESTERN MACEDONIA

FUCULTY OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF ELECTRICAL &
COMPUTER ENGINEERING



Overhead Optical Fiber Co-routed With Power Lines

THESIS

Athanasios Koutalianos

SUPERVISOR: Dimitrios Tsiamitros
Associate Professor

KOZANI/OCTOBER/2023



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
& ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΔΗΛΩΣΗ ΜΗ ΛΟΓΟΚΛΟΠΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΗΨΗΣ ΠΡΟΣΩΠΙΚΗΣ ΕΥΘΥΝΗΣ

Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν. 1599/1986 και τα άρθρα 2,4,6 παρ. 3 του Ν. 1256/1982, η παρούσα Διπλωματική Εργασία με τίτλο “Εναέρια Οπτική Ίνα σε Κοινή Όδευση με Γραμμές Ισχύος” καθώς και τα ηλεκτρονικά αρχεία και πηγαίοι κώδικες που αναπτύχθηκαν ή τροποποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας και αναφέρονται ρητώς μέσα στο κείμενο που συνοδεύουν, και η οποία έχει εκπονηθεί στο Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας, υπό την επίβλεψη του μέλους του Τμήματος κ. Δημήτριου Τσιαμήτρου αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής εργασίας και δεν προσβάλλει κάθε μορφής πνευματικά δικαιώματα τρίτων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον. Τα σημεία όπου έχω χρησιμοποιήσει ιδέες, κείμενο, αρχεία ή / και πηγές άλλων συγγραφέων, αναφέρονται ευδιάκριτα στο κείμενο με την κατάλληλη παραπομπή και η σχετική αναφορά περιλαμβάνεται στο τμήμα των βιβλιογραφικών αναφορών με πλήρη περιγραφή. 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 μόνο.

Copyright (C) Ονοματεπώνυμο Φοιτητή & Επιβλέποντα, Έτος, Πόλη

Copyright (C) ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ ΚΟΥΤΑΛΙΑΝΟΣ & ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΤΣΙΑΜΗΤΡΟΣ, 2023, ΚΟΖΑΝΗ

Υπογραφή Φοιτητή:ΑΚ

Περίληψη

Η εγκατάσταση καλωδίων οπτικών ινών υψηλής ικανότητας μετάδοσης πληροφορίας σε δίκτυα μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ισχύος δεν είναι νέα ιδέα. Εφαρμόζεται ήδη εκτεταμένα στις Ηνωμένες Πολιτείες και σε άλλες χώρες από τη δεκαετία του 1980 με μεγάλη επιτυχία. Γενικά υπάρχουν τέσσερις βασικές κατηγορίες καλωδίων οπτικών ινών για τέτοιου είδους χρήση: OPGW, OPAC, OPAC και ADSS τα οποία συγκεντρώνουν διαφορετικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα ανάλογα με την εγκατάσταση, το ήδη υπάρχον δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, τις κλιματολογικές συνθήκες και άλλους παράγοντες. Ανεξάρτητα από το καλώδιο που θα επιλεγεί θα πρέπει να πληρούνται όλες οι απαιτούμενες προδιαγραφές ασφαλούς εγκατάστασης και λειτουργίας, αποδοτικής λειτουργίας και αποφυγής αστοχίας υλικού, κάτι που επιτυγχάνεται με τη χρήση προτύπων (standards) που περιέχουν εκτεταμένες οδηγίες δοκιμών πριν από την εγκατάσταση

Λέξεις Κλειδιά: Γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος, Οπτικές ίνες, OPGW, OPAC, OPAC, ADSS

Abstract

The installation of high capacity fiber optic cables in electric power transmission and distribution networks cannot be considered as an innovation. It has already been widely applied in the United States and other countries since the 1980s with great success. There are generally four main categories of fiber optic cables for this type of use: OPGW, OPAC, OPAC and ADSS which have different advantages and disadvantages depending on the installation, the existing power transmission network, climatic conditions and other factors. Regardless of the cable chosen, all required specifications for safe installation and operation, efficiency and avoidance of hardware failure must be met, which is achieved through the use of standards that contain extensive testing instructions to be followed prior to installation.

Keywords: *Electric power transmission lines, Fiber optics, OPGW, OPAC, ADSS*

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέπων καθηγητή μου κύριο Δημήτριο Τσιαμήτρο για τη βοήθεια, την καθοδήγηση και την συνεργασία που μου παρείχε στην διάρκεια εκπόνησης της παρούσας μελέτης.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τους φίλους μου για την στήριξη και την πολύτιμη συμπαράστασή τους όλα αυτά τα χρόνια των σπουδών μου.

Περιεχόμενα

| | |
|---|-------|
| ΠΕΡΙΛΗΨΗ | - 1 - |
| ABSTRACT | 3 |
| ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ | 5 |
| ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ | 7 |
| ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ | 10 |
| ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ | 12 |
| ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ | 13 |
| ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΓΡΑΦΗΜΑΤΩΝ | 14 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ | 15 |
| 1.1 Αντικείμενο της διπλωματικής | 15 |
| 1.2 Υπόβαθρο της μελέτης | 15 |
| 1.3 Αντικείμενα/Στόχοι της μελέτης | 16 |
| 1.4 Διαδικασία που ακολουθήθηκε | 16 |
| 1.5 Γενικές παρατηρήσεις που προέκυψαν | 17 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΛΩΔΙΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ ΣΕ ΕΝΑΕΡΙΕΣ ΓΡΑΜΜΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ | 18 |
| 2.1 Γενικά θέματα | 18 |
| 2.2 OPGW - Encased within the Ground Wire | 23 |
| 2.3 OPPC - Encased within the Phase Conductor | 26 |
| 2.4 ADSS - All Dielectric Self-Supporting | 26 |
| 2.5 OPAC - Optical Attached Cable | 30 |
| 2.6 Τύποι καλωδίων | 31 |

| | |
|--|-----------|
| 2.6.1 Καλώδιο οπτικής ίνας μονής λειτουργίας – Μονότροπες (Single-mode fiber optic cable - SMF) | 32 |
| 2.6.2 Καλώδιο οπτικής ίνας πολλαπλής λειτουργίας - Πολύτροπες (Multi-mode fiber optic cable - MMF) | 33 |
| 2.6.3 Ενίσχυση του σήματος οπτικών ιών | 34 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΚΟΡΜΟΥ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ ΣΕ ΕΝΑΕΡΙΕΣ ΓΡΑΜΜΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΚΑΙ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (BPL) | 36 |
| 3.1 Σειριακή Αρχιτεκτονική Δικτύου Κορμού (Serial Backbone Network Architecture) | 38 |
| 3.2 Κατανεμημένη Αρχιτεκτονική Δικτύου Κορμού (Distributed Backbone Network Architecture) | 39 |
| 3.3 Συνεπτυγμένη Αρχιτεκτονική Δικτύου Κορμού (Collapsed Backbone Network Architecture) | 40 |
| 3.4 Παράλληλη Αρχιτεκτονική Δικτύου Κορμού (Parallel Backbone Network Architecture) | 42 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΡΟΤΥΠΑ | 44 |
| 4.1 Αμερικανικός Εθνικός Κανονισμός Ασφαλείας από Ηλεκτρομηχανολογικές Διατάξεις (IEEE National Electrical Safety Code) | 44 |
| 4.1.1 Ιστορικό | 44 |
| 4.1.2 Αμερικανικό πρότυπο για καλώδια οπτικών ιών ADSS (IEEE Std 1222™-2019) | 44 |
| 4.1.3 IEEE NESC 2023 – τελευταίες εξελίξεις | 51 |
| 4.2 ΕΛΟΤ EN 50174.03 Ευρωπαϊκό Πρότυπο | 53 |
| 4.2.1 Αποστάσεις ασφαλείας μεταξύ τηλεπικοινωνιακών καλωδίων και καλωδίων μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος | 54 |
| 4.2.2 Απαιτήσεις ασφαλείας στήριξης των εγκαταστάσεων | 55 |
| 4.2.3 Προδιαγραφές καλωδίων, και ασφάλεια από υπερτάσεις και περιβαλλοντικές συνθήκες | 60 |
| 4.3 Πρότυπα που εφαρμόζονται στην Ιταλία | 63 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ | 69 |
| 5.1 Συμπεράσματα της Μελέτης | 70 |
| 5.2 Μελλοντική Εργασία | 72 |
| ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ | 74 |
| ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ - ΑΡΚΤΙΚΟΛΕΞΑ - ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ | 79 |

Κατάλογος Σχημάτων

| | |
|--|----|
| Σχήμα 1 - Διατομή Καλωδίου OPGW..... | 24 |
| Σχήμα 2 - Διατομή καλωδίου OPPC | 26 |
| Σχήμα 3 - Διατομή καλωδίου ADSS..... | 27 |
| Σχήμα 4 - Διατομή καλωδίου OPAC | 31 |
| Σχήμα 5 - Διάμετροι πυρήνα οπτικών ινών (Optical Fiber Core Diameters) | 32 |
| Σχήμα 6 – Προτεινόμενη αρχιτεκτονική δικτύου πρόσβασης γραμμής ισχύος..... | 37 |
| Σχήμα 7 - Σειριακή Αρχιτεκτονική Δικτύου Κορμού (Serial Backbone Network Architecture) σε Ευρυζωνικές Γραμμές Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (Broadband Power Lines) ... | 39 |
| Σχήμα 8 - Κατανεμημένη Αρχιτεκτονική Δικτύου Κορμού (Serial Backbone Network Architecture) σε Ευρυζωνικές Γραμμές Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (Broadband Power Lines)..... | 40 |
| Σχήμα 9 - Συνεπτυγμένη Αρχιτεκτονική Δικτύου Κορμού (Collapsed Backbone Network Architecture) σε Ευρυζωνικές Γραμμές Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (Broadband Power Lines)..... | 41 |
| Σχήμα 10 - Παράλληλη Αρχιτεκτονική Δικτύου Κορμού (Parallel Backbone Network Architecture) σε Ευρυζωνικές Γραμμές Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (Broadband Power Lines)..... | 43 |
| Σχήμα 11 - Μοντέλο κατανεμημένων στοιχείων για τον υπολογισμό της μόλυνσης του καλωδίου ADSS..... | 46 |
| Σχήμα 12 -Παράδειγμα καλωδίωσης ADSS που διέρχεται από το δυναμικό του χώρου κοντά σε μια τυπική κατασκευή υψηλής τάσης | 48 |
| Σχήμα 13 - Παράδειγμα καλωδίωσης ADSS μέσα σε ηλεκτρικά πεδία (παράλληλη συνδεσμολογία) κοντά σε μια τυπική κατασκευή υψηλής τάσης..... | 49 |
| Σχήμα 14 - Παράδειγμα καλωδίωσης ADSS μέσα σε ηλεκτρικά πεδία (ΜΗ παράλληλη συνδεσμολογία) κοντά σε μια τυπική κατασκευή υψηλής τάσης..... | 50 |

| | |
|---|----|
| Σχήμα 15 - Παραδείγματα κατασκευών που απαιτούν τρισδιάστατη και μη παράλληλη ανάλυση για τη θέση των διακοπών και των αναρτήσεων καλωδίων ADSS | 51 |
| Σχήμα 16 - Παραστατική απεικόνιση ελαχίστων αποστάσεων ασφαλείας σε στύλους μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος..... | 55 |
| Σχήμα 17 - Ελάχιστες αποστάσεις εξαρτημάτων και καλωδίων σε εγκαταστάσεις σε στύλους..... | 58 |
| Σχήμα 18 - Ελάχιστες αποστάσεις εξαρτημάτων και καλωδίων που συνυπάρχουν με συσκευές φωτισμού | 59 |
| Σχήμα 19 - Άμεση κεραυνοπληξία στις γραμμές παροχής..... | 62 |
| Σχήμα 20 - Έμμεση κεραυνοπληξία στις γραμμές παροχής | 62 |
| Σχήμα 21 - Καλώδιο ADSS για προστασία από βλήματα κινηγετικών όπλων..... | 64 |
| Σχήμα 22 - Σύγκριση τοποθέτησης καλωδίωσης οπτικών ινών OPGW, OPPC και ADDS σε στύλο μεταφοράς υψηλής τάσης..... | 71 |

Κατάλογος Εικόνων

| | |
|--|----|
| Εικόνα 1 - Σημείο τοποθέτησης καλωδίου οπτικής ίνας OPGW σε πυλώνα υπερευψηλής τάσης | 56 |
| Εικόνα 2 -(α) μεταλλικός σύνδεσμος πρόσδεσης καλωδίου οπτικής ίνας στον πυλώνα υπερευψηλής, (β) σχηματική αναπαράσταση του τελικού σημείου πρόσδεσης | 57 |
| Εικόνα 3 - Εγκατάσταση οπτικής ίνας σε πυλώνα μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος..... | 57 |
| Εικόνα 4 - Ανάρτηση καλωδίου οπτικής ίνας | 58 |
| Εικόνα 5 - OPGW-DAB: 1x12E10/125..... | 60 |

Κατάλογος Πινάκων

| | |
|--|----|
| Πίνακας 1 - Συντελεστές θερμικής διαστολής..... | 21 |
| Πίνακας 2 - Ρυθμοί ερπυσμού αγωγών | 25 |
| Πίνακας 3 - Σύγκριση αποστάσεων μεταξύ οπτικών ινών μονής (SMF) και πολλαπλής λειτουργίας (MMF) | 32 |
| Πίνακας 4 - Ελάχιστες αποστάσεις ασφαλείας μεταξύ καλωδίων μεταφορά τηλεπικοινωνιών και καλωδίων μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ισχύος σε εναέριες γραμμές μεταφοράς (ενεργός τάση < 1000 Volt) | 54 |
| Πίνακας 5 - Ελάχιστες αποστάσεις ασφαλείας μεταξύ καλωδίων μεταφορά τηλεπικοινωνιών και καλωδίων μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ισχύος σε εναέριες γραμμές μεταφοράς (ενεργός τάση > 1500 Volt) | 55 |
| Πίνακας 6 - Ελάχιστες αποστάσεις ασφαλείας από το έδαφος για την εγκατάσταση τηλεπικοινωνιακών καλωδίων σε γραμμές εναέριας μεταφοράς..... | 59 |
| Πίνακας 7 - Κωδικοποίηση χρωμάτων οπτικής ίνας OPGW-DAB: 1x12E10/125 0.25H3.7 1x36 E9/1250.36F3.5..... | 61 |
| Πίνακας 8 - Κατασκευαστικά χαρακτηριστικά καλωδιώσεων οπτικών ινών ADSS στην Ιταλία..... | 66 |
| Πίνακας 9 - Χρωματική κωδικοποίηση οπτικών ινών ENEL Ιταλίας..... | 67 |
| Πίνακας 10 - Αρίθμηση ίνας και χρώμα για ENEL 57FOMD09ML ADSS καλώδιο οπτικής ίνας | 67 |

Κατάλογος Γραφημάτων

| | |
|--|----|
| Γράφημα 1 - Συσχέτιση μηχανικού φορτίου, διάρκειας ζωής και σχετικής υγρασίας..... | 22 |
| Γράφημα 2 - Διάγραμμα φορτίου-επιμήκυνσης καλωδίου ADSS..... | 28 |

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

1.1 Αντικείμενο της διπλωματικής

Ήδη από τη δεκαετία του 1980 στις Ηνωμένες Πολιτείες, στις ηλεκτρικές διασυνδέσεις εγκαθιστούνται καλώδια οπτικών ινών υψηλής χωρητικότητας (high capacity fiber optic cables), παράλληλα με τις γραμμές υψηλής τάσης, αυξάνοντας την ικανότητα των τηλεπικοινωνιακών συνδέσεων. Η παρούσα εργασία αποτελεί μία ανασκόπηση και αξιολόγηση των συνδέσεων οπτικών ινών σε διαδρόμους μεταφοράς δικτύου ηλεκτρικής ισχύος τελευταίας τεχνολογίας.

1.2 Υπόβαθρο της μελέτης

Η δίκτυα μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ισχύος (power grids) αποτελούν μία δομή συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ) με στόχο την μεταφορά και παροχή αδιάλειπτης ηλεκτρικής ισχύος από την παραγωγή της προς τους βιομηχανικούς και οικιακούς καταναλωτές (A. G. Lazaropoulos & Leligou, 2022) (Aalamifar & Lampe, 2017; A. Lazaropoulos, 2018; A. G. Lazaropoulos, 2012c, 2012b, 2014). Ακόμα και εντός του δικτύου μεταφοράς ενέργειας είναι σημαντικές οι εσωτερικές τηλεπικοινωνίες για την προστασία και τον έλεγχο του συστήματος. Οι αυτοματισμοί των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ) ενσωματώνουν όλο και περισσότερο ψηφιακά συστήματα ελέγχου (ψ-ΣΑΕ) (Ostendorp, 2000; Ostendorp & Gela, 1997).

Εκτός από τις ανάγκες επικοινωνίας και ελέγχου του έξυπνου δικτύου (smart grid) ηλεκτρικής ενέργειας, το ενσύρματο δίκτυο διανομής μέσης (mid voltage) και χαμηλής τάσης (low voltage) ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί ιεραρχική δομή με εκτεταμένες διακλαδώσεις προς καταναλωτές (Galli et al., 2011; Gebhardt et al., 2003; Jee et al., 2003; A. G. Lazaropoulos, 2012b), η οποία μπορεί να αξιοποιηθεί για την ανάπτυξη ενσύρματων

δικτύων κορμού (backbone networks) και ευρυζωνικότητας μέσω γραμμών ηλεκτρικής ενέργειας (Broadband Over Power Lines - BPL) (Aquilué et al., 2009; Galli et al., 2003; Götz et al., 2004), αναπτύσσοντας ένα προηγμένο συστήματος ισχύος βασισμένο σε IP εντάσσοντας ένα μεγάλο αριθμό εφαρμογών έξυπνου δικτύου (Smart Grid - SG) (Abrahamsen et al., 2021; Faheem et al., 2018; A. G. Lazaropoulos, 2013; A. G. Lazaropoulos & Leligou, 2022).

Παρά το μεγαλύτερο κόστος σε σχέση με άλλες εγκαταστάσεις (Abrahamsen et al., 2021; Faheem et al., 2018; A. G. Lazaropoulos & Leligou, 2022), η δυνατότητα των οπτικών ινών να μεταφέρουν όλο και περισσότερα δεδομένα (data) σε μεγαλύτερο εύρος ζώνης (bandwidth) δίνει σημαντικά πλεονεκτήματα (A. G. Lazaropoulos & Leligou, 2022). Μάλιστα ήδη από το τέλος της δεκαετίας του 1990 στις Ηνωμένες Πολιτείες είχαν τη δυνατότητα να μεταφέρουν πάνω από 8000 κανάλια φωνής σε μία γραμμή μεταφοράς (Ostendorp, 2000; Ostendorp & Gela, 1997). Το 2011 παρουσιάστηκε καλώδιο οπτικών ινών που ενσωμάτωνε 370 κανάλια με ρυθμό μεταφοράς μέχρι και 101 Tbits/s (Hecht, 2011). Σημαντικό πλεονέκτημα είναι ότι οι οπτικές ίνες εμφανίζουν αδρανοποίηση (αντοχή) σε ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές (A. G. Lazaropoulos & Leligou, 2022; Ostendorp, 2000; Ostendorp & Gela, 1997). Παρόλα αυτά η ενσωμάτωση καλωδίων οπτικών ινών σε διαδρομές υψηλής τάσης παρουσιάζει τεχνικές δυσκολίες και εγείρει θέματα ασφαλείας (Ostendorp, 2000; Ostendorp & Gela, 1997)

1.3 Αντικείμενα/Στόχοι της μελέτης

Βασικοί στόχοι της παρούσας εργασίας είναι:

- Η παρουσίαση των τεχνικών πληροφοριών και των τρεχόντων προτύπων (standards) και κανονισμών (regulations) της χρήσης καλωδίων οπτικών ινών σε διαδρομές υψηλής τάσης και
- Η κριτική αξιολόγηση της εγκατάστασης και χρήσης τους, όπως και πιθανές τεχνολογικές αναβαθμίσεις ή βελτιώσεις που επιδέχονται.

1.4 Διαδικασία που ακολουθήθηκε

Διεξάχθηκε διεξοδική συστηματική βιβλιογραφική ανασκόπηση σε επιστημονικά άρθρα, βιβλία, τεχνικές μελέτες και πρότυπα (standards) με θέμα την ενσωμάτωση οπτικών ινών σε εναέριες γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας (overhead power transmission lines), εξετάζοντας τους ισχύοντες κανονισμούς, τα χαρακτηριστικά των συνδέσεων αυτών και

ηλεκτρομηχανολογικά πλεονεκτήματα αλλά και περιορισμούς, σε θέματα που σχετίζονται με την εγκατάσταση, τον έλεγχο και την συντήρηση

Εξαιρέθηκαν βιβλιογραφικές αναφορές που εστίαζαν στα δίκτυα μεταφοράς της ηλεκτρικής ισχύος (transmission networks).

1.5 Γενικές παρατηρήσεις που προέκυψαν

Οι δυνατότητες ενσωμάτωσης οπτικών ινών σε εναέριες γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας (overhead power transmission lines) παραμένουν οι ίδιες με αυτές που εμφανίστηκαν τη δεκαετία του 1990 (A. G. Lazaropoulos & Leligou, 2022; Ostendorp, 2000; Ostendorp & Gela, 1997):

1. Περικλειόμενα μέσα στο καλώδιο γείωσης (Encased within the Ground Wire –OPGW)
2. Περικλειόμενα στον αγωγό φάσης (Encased within the Phase Conductor - OPPC)
3. Αυτοϋποστηριζόμενα πλήρως διηλεκτρικά καλώδια (All Dielectric Self Supporting - ADSS)
4. Τυλιγόμενα γύρω από τον αγωγό φάσης (Wrapped around the Phase Conductor – WRAP) ή Προσαρτημένα Οπτικά Καλώδια (Optical Attached Cable – OPAC) όπως αλλιώς ονομάζονται

Το κόστος κάθε καλωδίου ή αγωγού και η εργασία για την εγκατάσταση και ανάπτυξη του αποτελούν το κύριο κόστος ανάπτυξης του κάθε παραπάνω συστήματος (Ostendorp, 2000; Ostendorp & Gela, 1997). Η παρούσα εργασία πέρα από την εκτενή παρουσίαση των καλωδίων κάνει και μία εκτίμηση κόστους της εγκατάστασης, όπως και πιθανών φθορών. Στο τέλος της εργασίας παρουσιάζεται η επιστημονική και τεχνική βιβλιογραφία στην οποία στηρίχθηκε η εργασία.

Κεφάλαιο 2: Κατηγοριοποίηση Καλωδίων Δικτύων Οπτικών Ινών σε Εναέριες Γραμμές Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας

2.1 Γενικά Θέματα

Οι απαιτήσεις για ολοένα μεγαλύτερες ταχύτητες και όγκους μεταφοράς δεδομένων που επιτάσσει η 5^η γενιά τηλεπικοινωνιακών δικτύων (5G) όπως και η υλοποίηση του Διαδικτύου των Πραγμάτων (Internet of Things – IoT) που αποτελεί στόχο της νέας γενιάς 6G που ακολουθεί, στρέφουν το κατασκευαστικό ενδιαφέρον ένταξης των τηλεπικοινωνιακών δικτύων σε δίκτυα κορμού (backbone) που διαθέτουν συγκεκριμένα πλεονεκτήματα όπως είναι τα δίκτυα μεταφοράς και διανομής ενέργειας. Τα δίκτυα αυτά πέρα από το γεγονός ότι αποτελούν υπάρχουσα υποδομή και υψηλή αξιοπιστία σε μεγάλες αποστάσεις, προσφέρουν τεράστιο εύρος ζώνης (A. G. Lazaropoulos & Leligou, 2022). Στην πράξη δεν αποτελεί καινοτόμος πρακτική στην εγκατάσταση τηλεπικοινωνιακών δικτύων καθώς ήδη από τα τέλη της δεκαετίας του 1990 έχει εφαρμοστεί στις Ηνωμένες Πολιτείες (Ostendorp, 2000; Ostendorp & Gela, 1997). Στο εναέριο δίκτυο μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ισχύος μπορούν να ενταχθούν πολλές και διάφορες τεχνολογίες τηλεπικοινωνιακών συνδέσεων: Broadband Power Line (BPL), Digital Subscriber Line (DSL), optical fibers, Wireless Personal Area Network (WPAN), Wireless Fidelity (WiFi), WiMAX και συσκευές: πύλες, δρομολογητές, μεταγωγείς κα (A. G. Lazaropoulos & Leligou, 2022).

Πρακτικά η όδευση καλωδίων οπτικών ινών σε εναέριες γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος σημαίνει η ανάπτυξη, εγκατάσταση και διανομή τηλεπικοινωνιακών καλωδίων οπτικών ινών αξιοποιώντας την υποδομή των στύλων (πυλώνων) των γραμμών μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας, χωρίς να απαιτείται το σκάψιμο και η υποστύλωση νέων πυλώνων

για το τηλεπικοινωνιακό δίκτυο. Αυτό δίνει τη δυνατότητα ταχύτερης ανάπτυξης δικτύου με πολύ χαμηλότερο κόστος και με την εφαρμογή πρακτικών που ήδη αξιοποιούνται για την εγκατάσταση του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας (Αγγέλου et al., 2009)

Τα καλώδια και οι πυρήνες των αγωγών σε εναέρια γραμμές μεταφοράς ακολουθούν συγκεκριμένα πρότυπα για να περιλαμβάνουν πολλαπλές οπτικές ίνες και επιτελούν συνήθως πολλαπλές λειτουργίες. Υπάρχουν όμως και παραμετροποιημένες κατασκευές κατά παραγγελία πελατών (Ostendorp, 2000; Ostendorp & Gela, 1997). Οποιαδήποτε καλωδίωση και αν επιλεγεί για την εγκατάσταση δικτύων οπτικών ινών σε εναέρια γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας είναι σημαντικό να ακολουθείται ένα πρωτόκολλο / πρότυπο διασφάλισης ποιότητας της καλωδίωσης που να περιλαμβάνει:

- Τον σχεδιασμό της καλωδίωσης
- Την κατάλληλη επιλογή υλικών
- Τη διαδικασία παραγωγής
- Τις εργαστηριακές δοκιμές
- Την επίβλεψη της εγκατάστασης
- Την αξιολόγηση της απόδοσης και ασφάλειας σε βάθος χρόνου
- Την συντήρηση και πιθανή αντικατάσταση

(Bartlett et al., 1988; Ostendorp, 2000; Ostendorp & Gela, 1997; Wheeler et al., 1988)

Θα πρέπει να ληφθεί σοβαρά υπόψη ότι τα εναέρια καλώδια υφίστανται δυνάμεις εφελκυσμού (tensile forces) που προκαλούν επιμηκύνσεις:

- Σταθερή επιμήκυνση που εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το βάρος της κάθε μονάδας (unit weight), το μήκος ανοίγματος (span length), την κάμψη (sag) και τα μηχανικά χαρακτηριστικά του εναέρια καλωδίου ή σύρματος οπτικών ινών.
- Μεταβλητή επιμήκυνση που εξαρτάται από τις περιβαλλοντικές συνθήκες όπως την ένταση του αέρα, το ψύχος ή τον πάγο, μεταβολές της θερμοκρασίας
- Πιθανός ερπυσμός (creep) των φορέων/στοιχείων αντοχής (strength members) και των πολύκλωνων συρμάτων (strands) του εναέρια καλωδίου ή σύρματος οπτικών ινών ο οποίος προκαλείται από μακροχρόνιο εφελκυσμό

Για την αποφυγή του εφελκυσμού της καλωδίωσης πέρα από το αποδεκτό όριο κατά τη διάρκεια ζωής χρειάζεται να εγκατασταθούν φορείς (strength members) με υψηλό συντελεστή ελαστικότητας σε συνδυασμό με ελάχιστη μοναδιαία μάζα και ελάχιστη

εξωτερική διάμετρο η οποία όμως θα είναι ικανή να περιλαμβάνει τον επιθυμητό αριθμό οπτικών ινών (Berkers & Wetzler, 1988; IEEE 1138-2021, 2021; Ostendorp, 2000; Ostendorp & Gela, 1997). Επιπλέον τα καλώδια ή οι αγωγοί δέχονται αξονικές καταπονήσεις οι οποίες πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την σχεδιάσή τους. Οι περισσότεροι κατασκευαστές κατά τον σχεδιασμό εναέριων καλωδίων λαμβάνουν υπόψη διαφορετικά πρότυπα για τον πιθανό εφελκυσμό και για τις αξονικές καταπονήσεις. Με άλλα λόγια δεν υπάρχει ένα ενιαίο πρότυπο που να προβλέπει και τις δύο παραπάνω παραμέτρους και οι κατασκευαστές πρέπει να λειτουργήσουν συνδυαστικά (Ostendorp, 2000; Ostendorp & Gela, 1997)

Μία ακόμα σημαντική παράμετρος είναι ότι όλοι οι τύποι των εναέριων καλωδίων είναι εκτεθειμένοι σε ακραίες θερμοκρασίες σε αντίθεση με τις εγκαταστάσεις σε κλειστές μονάδες ή στο υπέδαφος, οι οποίες μπορεί να φτάσουν τους εκατό βαθμούς κελσίου (100°C). Παρά τις εξωτερικές συνθήκες η ελαστικότητα εξαρτάται κυρίως από τα χαρακτηριστικά των υλικών των φορέων (στελεχών αντοχής), αν θα είναι δηλαδή ασάλι, αλουμίνιο ή κάποιας μορφής σύνθετο κλώνου, καθώς η περιτύλιξη και το υλικό πλήρωσης των καλωδίων και των αγωγών έχουν χαμηλό συντελεστή θερμικής διαστολής και μεγάλη ελαστικότητα (A. G. Lazaropoulos & Leligou, 2022; Ostendorp, 2000; Ostendorp & Gela, 1997)

Σε χαμηλές θερμοκρασίες τα μη μεταλλικά καλώδια εμφανίζουν εντελώς διαφορετική συμπεριφορά όταν τοποθετούνται σε τύμπανα ινοποίησης (drums). Ορισμένα σύνθετα στοιχεία δε δύναται να απορροφήσουν καθόλου αξονικές δυνάμεις καταπόνησης. Σε αυτή την περίπτωση απαιτείται να είναι μεγαλύτερος ο συντελεστής στατικής τριβής (coefficient of friction) κατά το μήκος του καλωδίου να είναι μεγαλύτερος από ότι τις δυνάμεις που προκύπτουν από τις διαφορές θερμικού δυναμικού, ώστε να αποτραπεί πιθανή ολίσθηση των στρωμάτων καλωδίου. Ο παρακάτω πίνακας απεικονίζει τους συντελεστές θερμικής διαστολής για τις περισσότερες μορφές υλικών καλωδίων που χρησιμοποιούνται στις εναέριες οπτικές ίνες, όπως είναι ενισχυμένο γυαλί (fiber reinforced glass - FRP), ο πολυεστέρας (polyester), το πολυαιθυλένιο (polyethylene - PE) και το πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας (high density polyethylene – HDPE) και τα νήματα αραμιδίου (aramide yarns).

Πίνακας 1 - Συντελεστές θερμικής διαστολής

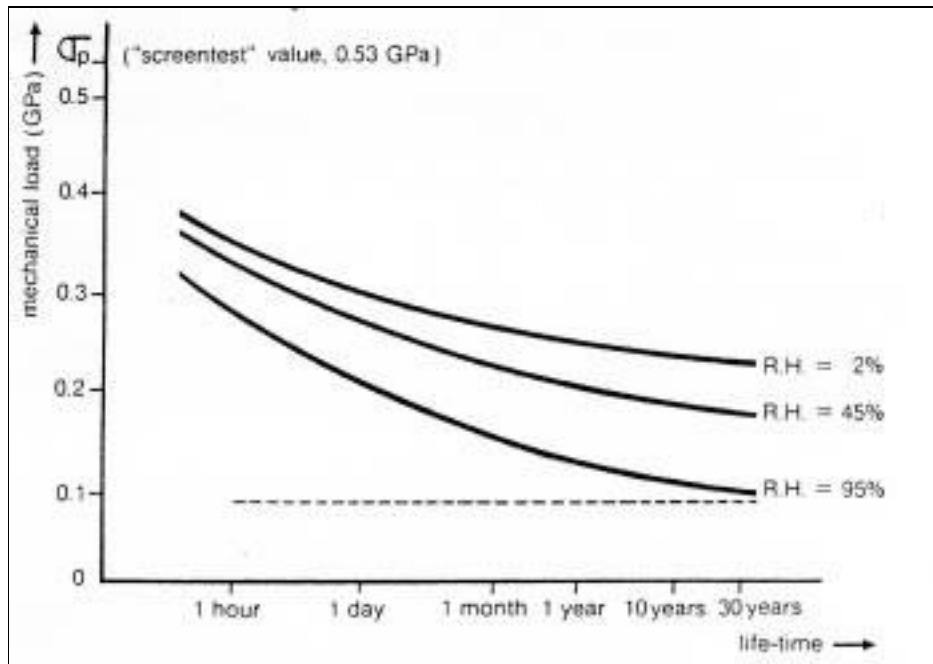
| Στοιχείο καλωδίου | υλικό | Θερμικός συντελεστής διαστολής ($10^{-6}K^{-1}$) |
|--|------------------|--|
| Κεντρικός φορέας (central strength member) | FRP | 5.0 |
| Αγωγός περιτύλιξης | Polyester | 80 |
| Εσωτερικό περίβλημα (inner sheath) | PE | 150 |
| Φορείς (strength members) | Aramide yarns | -2.0 |
| Εξωτερικό περίβλημα | HDPE | 150 |

(Glass, 1993; Ostendorp & Gela, 1997)

Η διάρκεια ζωής των οπτικών ινών εξαρτάται από:

1. Το επίπεδο της μηχανικής καταπόνησης που δέχεται κάθε ίνα
2. Την ποσότητα της σχετικής υγρασίας που δέχεται η επιφάνεια της κάθε ίνας στο βάθος του χρόνου

Στόχος επομένως είναι τόσο η μείωση της καταπόνησης όσο και της σχετικής υγρασίας για να επιβραδυνθεί ο ρυθμός φθοράς τους. Οι καταπονήσεις περιορίζονται μέσω της χρήσης μη εκτεταμένων (χαλαρών) αγωγών που επιτρέπουν την επιμήκυνση εντός των επιτρεπόμενων ορίων. Ιδανικά θα πρέπει η ακτίνα κάμψης (bending radius) θα πρέπει να είναι κατ' ελάχιστο 60 χιλιοστά για την αποφυγή καταπονήσεων, που αντιστοιχεί σε ακτίνα κάμψης 85 χιλιοστών για ίνες διαμέτρου 1550 νανόμετρων (nm) και μέγιστη τάση 0,075 μεγαπασκάλ (Mpa).



Γράφημα 1 - Συσχέτιση μηχανικού φορτίου, διάρκειας ζωής και σχετικής υγρασίας

Πέρα από την θερμοκρασία και τις μηχανικές καταπονήσεις τα καλώδια των εναέριων οπτικών ινών θα πρέπει να είναι ανθεκτικά και στις καιρικές συνθήκες και κυρίως:

- Την υπεριώδη ακτινοβολία
- Την όξινη βροχή
- Τα ηλεκτρικά πεδία

Ακόμη θα πρέπει να διαθέτουν:

- Πολύ υψηλή μηχανική αντοχή που να ανταποκρίνεται σε ακραίες συνθήκες μηχανικού φορτίου
- Εξαιρετικά χαμηλή υδραυλική αγωγιμότητα (hydraulic conductivity)
- Υψηλή περιεκτικότητα σε carbon black για προστασία από την θερμική οξείδωση των περιβλημάτων ADSS, OPAC και των σωλήνων OPGW αντίστοιχα
- Υψηλή αντοχή στην θερμική οξείδωση των περιβλημάτων ADSS και OPAC
- Υψηλή αντοχή των περιβλημάτων ADSS και OPAC σε φαινόμενα διηλεκτρικού τόξου (corona)

(Ostendorp, 2000; Ostendorp & Gela, 1997)

Υπάρχουν διάφορες δοκιμές για την αξιολόγηση της ηλεκτρικής, μηχανικής απόδοσης και αντοχής των εναέριων καλωδίων οπτικών ινών που ακολουθούν συγκεκριμένα πρότυπα. Τα πρότυπα μετρούν τα παρακάτω μεγέθη των καλωδίων και αγωγών:

- Την αντοχή στον εφελκυσμό
- Την αντίσταση σε κρούσεις
- Την στατική αντοχή κάμψης
- Την θερμική απόδοση στον κύκλο ζωής
- Την υγρομόνωση
- Την καταπόνηση και το ρυθμό ερπυσμού
- Την απόσβεση κραδασμών
- Την μόνωση από κεραυνοπληξίες
- Ακόμα και η αντοχή σε περίπτωση βλήματος από κυνηγετικό όπλο.

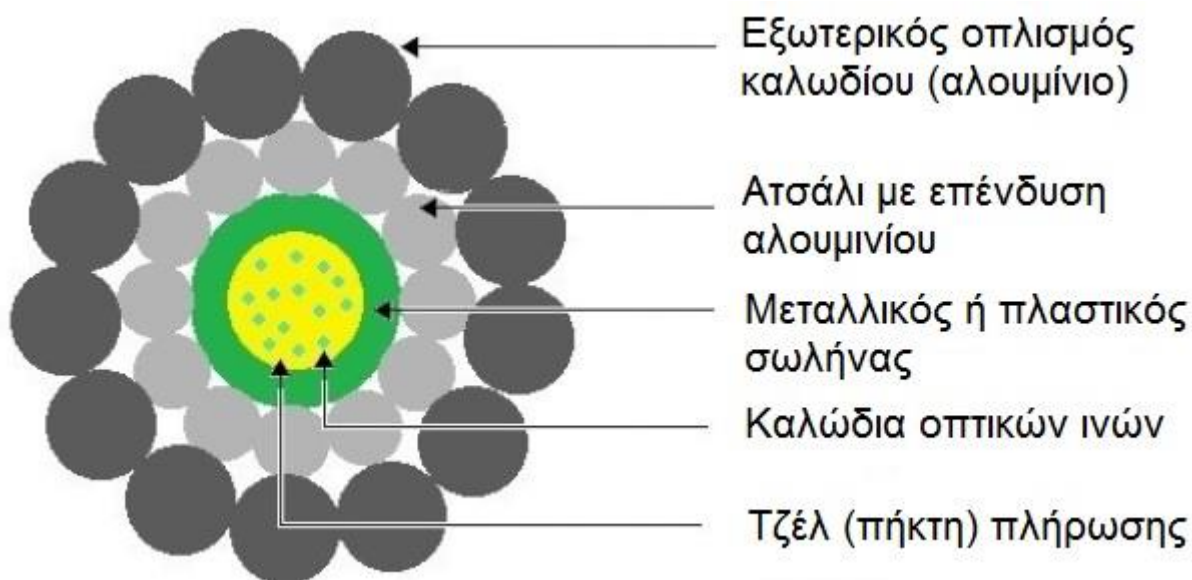
(IEEE 1138-2021, 2021)

Βασικό πρόβλημα της εγκατάστασης συστημάτων δικτύων οπτικών ινών σε εναέριες γραμμές μεταφοράς (Broadband over Power Lines – BPL) είναι η ενδολειτουργικότητα (intraoperability) και η διαλειτουργικότητά τους (interoperability), που ξεκινά από την εναρμόνιση των BPL σε γραμμές χαμηλής τάσης (LV) με αυτών σε γραμμές μέσης τάσης (MV) και έπειτα η επικοινωνία τους με άλλες τεχνολογίες ευρυζωνικότητας (broadband) (Kuhn et al., 2006; A. G. Lazaropoulos, 2013)

2.2 OPGW - Encased within the Ground Wire

Το OPGW έχει σχεδιαστεί ώστε να αποτελεί συνδυασμό της απαραίτητης γείωσης των εναέριων καλωδίων μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος και καλωδίων μεταφοράς τηλεπικοινωνιών. Στο παρακάτω σχήμα, απεικονίζεται μια τυπική διατομή ενός OPGW. Παρόμοια με τα ACSR που αναπτύσσονται κυρίως για τα καλώδια φάσης και γείωσης σε παραδοσιακά καλώδια ισχύος, τα OPGW εξωτερικά αποτελούνται από στρώματα αγωγών αλουμινίου και χάλυβα. Αλλά στα OPGW, τα προαναφερθέντα στρώματα περιβάλλουν μια σωληνοειδή δομή, η οποία μπορεί να είναι ένας μεταλλικός ή πλαστικός σωλήνας, όπου ένα ή περισσότερα καλώδια οπτικών ινών τοποθετούνται μέσα σε ένα τζελ πλήρωσης. Ανάλογα με την εφαρμογή, μπορεί να υπάρχουν πολλές επιλογές σχεδίασης, όπως χαλαρός ή σφιχτός σωλήνας και ελικοειδές ή μονός σωλήνας. Εκτός από τη γείωση παρακείμενων εναέριων πύργων HV και την προστασία του εναέριου ηλεκτρικού δικτύου HV από

κεραυνούς, τα OPGW είναι αυτοφερόμενα και ανθεκτικά σε περιβαλλοντικούς παράγοντες όπως ο άνεμος και ο πάγος. Παρόλο που τα OPGW εφαρμόζονται κυρίως σε εναέρια γραμμές ισχύος υψηλής τάσης, οι εναέρια γραμμές ηλεκτρικής ενέργειας MV και εναέρια γραμμές ισχύος χαμηλής τάσης μπορούν επίσης να φέρουν OPGW για γείωση και επικοινωνίες. (Baoping et al., 2021; De Villiers et al., 2002; A. G. Lazaropoulos, 2012c, 2012a; Suljanović et al., 2004; Vasileiou et al., 2004)



Σχήμα 1 - Διατομή Καλωδίου OPGW

(A. G. Lazaropoulos & Leligou, 2022; Ostendorp & Gela, 1997)

Οι ρυθμοί ερπυσμού και οι καταπονήσεις για τα εναέρια καλώδια OPGW είναι παρόμοιες με τις τιμές που παρατηρούνται για τους αγωγούς φάσης. Τυπικοί ρυθμοί ερπυσμού σε ποσοστιαία επιμήκυνση για διαφορετικούς τύπους αγωγών φαίνονται στον παρακάτω πίνακα. Ωστόσο, τα εναέρια καλώδια OPGW εγκαθίστανται συνήθως σε αυξημένη τάση για να διατηρούνται οι ελάχιστες απαιτήσεις απόστασης NESC σε ένα υπάρχον δικαίωμα διέλευσης που μπορεί να επιταχύνει τον ρυθμό ερπυσμού στους κλώνους αλουμινίου. Ταυτόχρονα, μια αύξηση της τάσης της χορδής θα μειώσει την αντίσταση κόπωσης και την αυτοαπόσβεση του OPGW που με τη σειρά του μειώνει τη διάρκεια ζωής.

Τα εναέρια καλώδια OPGW τοποθετούνται συνήθως στην κορυφή των κατασκευών και έτσι αντιμετωπίζουν κεραυνούς και ρεύματα βραχυκυκλώματος. Οι θερμοκρασίες του πυρήνα, υπό τη διέλευση των ρευμάτων βραχυκυκλώματος, μπορούν να φτάσουν σε θερμοκρασίες άνω των 100qC (212qF) που συνήθως οδηγεί σε ανόπτηση των εξαρτημάτων αλουμινίου.

Είναι σημαντικό να μην υπάρχει σημαντική αλλαγή στην οπτική εξασθένηση των οπτικών ινών υπό αυτές τις συνθήκες.

Δεδομένου ότι η πλειονότητα αυτών των μεταβατικών ενεργειών προκαλούνται από ρεύματα σφάλματος, είναι απαραίτητο να ληφθεί υπόψη το μέγιστο διαθέσιμο ρεύμα σφάλματος και η διάρκεια του σφάλματος κατά την επιλογή του καλωδίου κεραίας OPGW. Κατά συνέπεια, είναι σημαντικό να προσδιορίσετε σωστά το επίπεδο σφάλματος του συστήματος για να επιλέξετε το καταλληλότερο καλώδιο OPGW. Τα καλώδια κεραίας OPGW συνήθως βαθμολογούνται χρησιμοποιώντας τη μέγιστη τιμή I2t. Επίσης, φαίνεται ότι η δοκιμή ρεύματος σφάλματος που ορίζεται στο πρότυπο IEEE 1138 δεν είναι αντιπροσωπευτική της χρήσης συρμάτων κεραίας OPGW στο πεδίο. Μπορεί να υποστηριχθεί ότι ένα πλήρες ασύμμετρο σφάλμα που διαρκεί για 30 κύκλους είναι δύσκολο να βρεθεί στη μέση χρησιμότητα και σχεδόν αδύνατο να παραχθεί σε εργαστηριακές συνθήκες. Η εμπειρία μας δείχνει ότι τα σφάλματα είναι ως επί το πλείστον συμμετρικά (δηλαδή, εάν συμβεί μετατόπιση DC, συνήθως διασπάται σε 1 έως 2 κύκλους). Κατά συνέπεια, εφόσον επαληθεύεται η βαθμολογία I2t, το σχήμα του προσομοιωμένου σφάλματος δεν είναι σημαντικό.

Η προστασία των ινών από κεραυνούς παρέχεται από το εξωτερικό στρώμα του OPGW ή το μεταλλικό στρώμα του καλωδίου οπτικών ινών, το οποίο πρέπει να έχει πάχος τουλάχιστον 2 mm (5/64 ίντσες). Η ίδια η ίνα μπορεί να ανεχθεί πολύ υψηλές θερμοκρασίες, αλλά η θερμική απόδοση των πλαστικών σωλήνων, των επικαλύψεων με ίνες και των συρμάτων χάλυβα με επικάλυψη αλουμινίου ή αλουμινίου πρέπει να εξεταστεί προσεκτικά.

Πίνακας 2 - Ρυθμοί ερπυσμού αγωγών

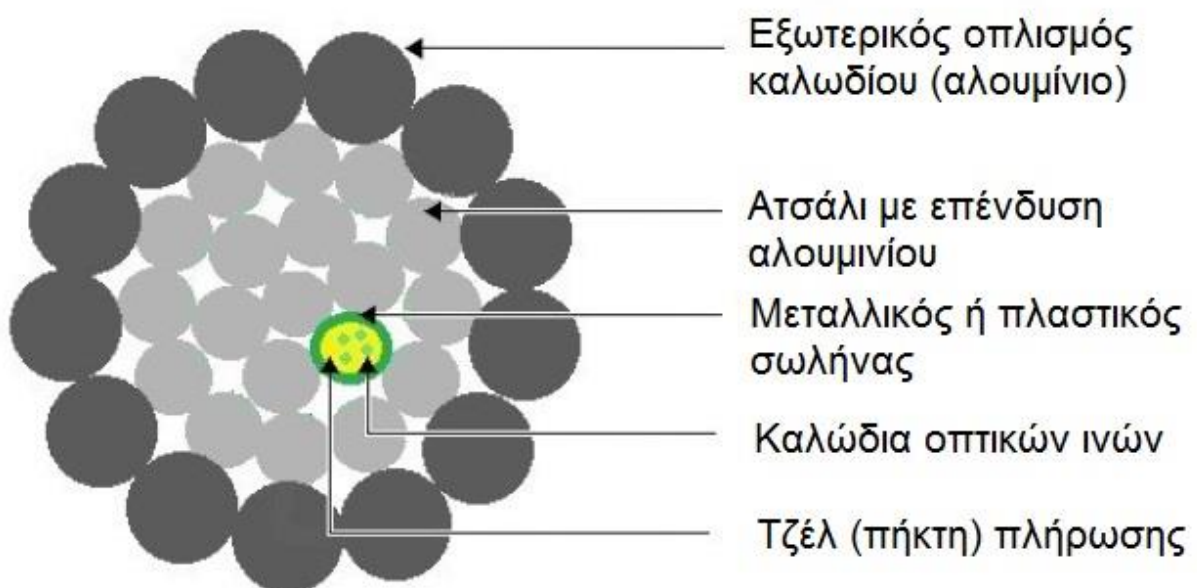
| Typical Creep Rates of 795-kcmil Electrical Conductor | | | | | | |
|---|-------------------|---------|---------|-------------------|---------|---------|
| | Tension @ 15% UTS | | | Tension @ 25% UTS | | |
| | (10yrs) | (20yrs) | (30yrs) | (10yrs) | (20yrs) | (30yrs) |
| | (%) | (%) | (%) | (%) | (%) | (%) |
| ACSR | 0.050 | 0.056 | 0.060 | 0.097 | 0.109 | 0.116 |
| AAAC | 0.075 | 0.084 | 0.090 | 0.146 | 0.164 | 0.174 |
| AAC | 0.101 | 0.114 | 0.121 | 0.198 | 0.221 | 0.236 |
| ACAR | 0.081 | 0.091 | 0.097 | 0.158 | 0.177 | 0.189 |
| AW | 0.010 | 0.011 | 0.012 | 0.019 | 0.022 | 0.023 |
| EHS | 0.008 | 0.008 | 0.009 | 0.015 | 0.016 | 0.017 |

| | | | | | | |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| HS | 0.009 | 0.010 | 0.011 | 0.017 | 0.020 | 0.021 |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|

Όλοι οι ρυθμοί ερπυσμού έχουν μετρηθεί σε θερμοκρασία δωματίου

2.3 OPPC - Encased within the Phase Conductor

Παρόμοια με τα OPGW, τα καλώδια οπτικών ινών OPPC βρίσκονται μέσα στο σύρμα, που συνήθως περιέχονται σε ένα σωλήνα από ανοξείδωτο χάλυβα γεμάτο με τζελ. Στο παρακάτω σχήμα, παρουσιάζεται μια τυπική διατομή ενός OPPC όπου υπάρχουν στρώματα αγωγών αλουμινίου και χάλυβα. Σε αντίθεση με τα OPGW, ένα OPPC αντικαθιστά έναν αγωγό φάσης που σημαίνει ότι αν απαιτηθεί κάποια επισκευή ή συντήρηση επηρεάζονται λειτουργίες του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας και του δικτύου επικοινωνιών. Τα OPPC είναι αυτοφερόμενα λόγω των εσωτερικών τους αγωγών από χάλυβα με επένδυση αλουμινίου, ενώ προτιμώνται για ανάπτυξη σε εναέρια καλώδια ρεύματος MV και εναέρια χαμηλής τάσης όπου δεν υπάρχει καλωδίωση γείωσης (Ezeh & Ibe, 2013; A. G. Lazaropoulos & Leligou, 2022).



Σχήμα 2 - Διατομή καλωδίου OPPC

(A. G. Lazaropoulos & Leligou, 2022; Ostendorp & Gela, 1997)

2.4 ADSS - All Dielectric Self-Supporting

Τα καλώδια ADSS είναι αυτοφερόμενα και εγκαθίστανται στους πύργους και στους πόλους μετάδοσης και διανομής ξεχωριστά από τα καλώδια ρεύματος. Επομένως, πρέπει να σιγουρευτεί ότι όλες οι δομές μπορούν να αντέξουν το φορτίο των καλωδίων ADSS και του σχετικού εξοπλισμού τους. Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται μια τυπική διατομή ενός σύρματος ADSS. Σε αντίθεση με τα OPGW και OPPC, τα καλώδια ADSS αποτελούνται εξωτερικά από δύο στρώματα θήκης, νήμα αραμιδίου και υδρομονωτική ταινία για την προστασία της διαμόρφωσης του εσωτερικού καλωδίου οπτικών ινών από τους διαβρωτικούς περιβαλλοντικούς παράγοντες, όπως μπορεί να είναι το φως του ήλιου, η θερμοκρασία, ο πάγος, η βροχή και ο άνεμος. Μέσα στην υδρομονωτική ταινία, πολλαπλοί μεταλλικοί ή πλαστικοί σωλήνες περιέχουν πολλαπλά καλώδια οπτικών ινών μέσα στο τζελ πλήρωσης. Το στέλεχος αντοχής διατηρεί την ακεραιότητα του καλωδίου κατά την έκταση ή τη χαλάρωση. Τα καλώδια ADSS αποτελούν μέρος ενός εντελώς ανεξάρτητου δικτύου επικοινωνιών που μπορεί να συνυπάρχει με το παραδοσιακό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας στις ίδιες δομές μεταφοράς και διανομής, και μπορεί να αξιοποιηθεί από τις επιχειρήσεις παροχής ενέργειας ή τηλεπικοινωνιακούς παρόχους (A. G. Lazagoroulos & Leligou, 2022; Vasileiou et al., 2004).

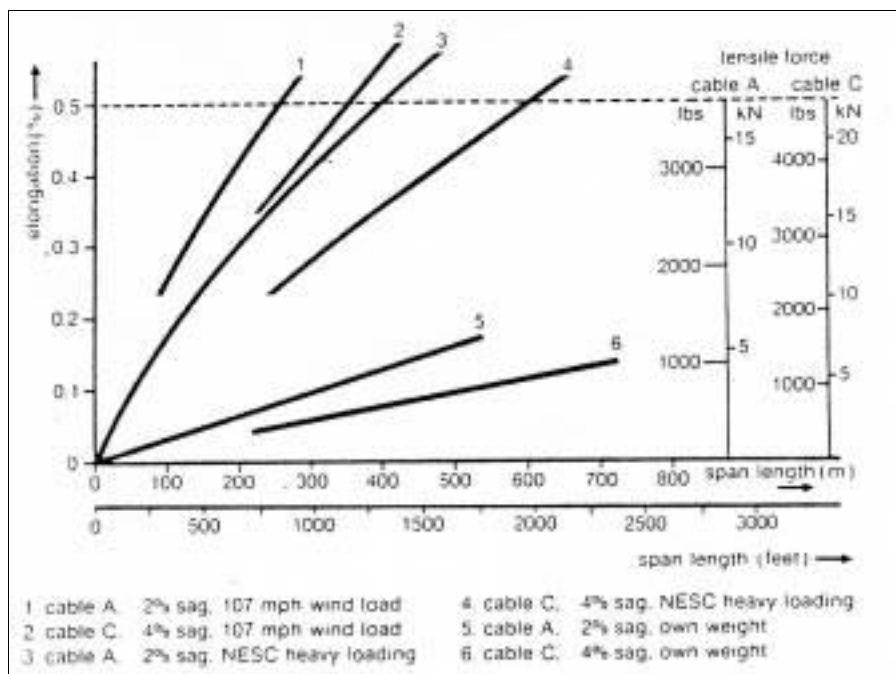


Σχήμα 3 - Διατομή καλωδίου ADSS

(A. G. Lazaropoulos & Leligou, 2022; Ostendorp & Gela, 1997)

Τυπικά, τα μέλη αντοχής των εναέριων καλωδίων ADSS κατασκευάζονται από ίνες υάλου υψηλής αντοχής συνδεδεμένα σε νήματα ρητίνης ή νήματα αραμιδίου. Το γεγονός ότι είναι άκαμπτα και ότι διατηρούν μόνιμα τις τάσεις κάμψης και στρέψης καθιστούν το υλικό ευαίσθητο στις μηχανικές καταπονήσεις. Παράλληλα, ανάλογα με τον τύπο του γυαλιού, το υλικό μπορεί να είναι ευαίσθητο στην υγρασία. Τα ευαίσθητα στην υγρασία στοιχεία αντοχής είναι πιθανό να χάσουν την ακεραιότητα και την αντοχή τους (IEEE Std 1222TM, 2019; A. G. Lazaropoulos & Leligou, 2022).

Οι σχέσεις φορτίου-επιμήκυνσης για καλώδια ADSS διαφέρουν σημαντικά από τις συγκρίσιμες τιμές για τα παραδοσιακά καλώδια γείωσης και τους αγωγούς φάσης, καθώς ποικίλλουν σημαντικά ανάλογα με το σχεδιασμό του καλωδίου. Η διαφορά μεταξύ της επιμήκυνσης του ελεύθερου καλωδίου και της επιμήκυνσης του καλωδίου στο μέγιστο φορτίο θα πρέπει να είναι τουλάχιστον 0,2 % (δηλαδή, το μήκος των ινών πρέπει να είναι τουλάχιστον 1,02 φορές το μήκος του σωλήνα), λαμβάνοντας υπόψη τον μακροπρόθεσμο ερπυσμό των νημάτων αραμιδίου, τη διακύμανση του υπερβολικού μήκους ινών στο χαλαρό σωλήνα και την αρχική απόκλιση (IEEE Std 1222TM, 2019; A. G. Lazaropoulos & Leligou, 2022).



Γράφημα 2 - Διάγραμμα φορτίου-επιμήκυνσης καλωδίου ADSS

(Tuominen & Olsen, 2000)

Η επιλογή των υλικών εναέριων καλωδίων ADSS θα πρέπει να γίνεται με βάση δύο βασικά κριτήρια: α) τεχνική απόδοση. β) μακροπρόθεσμη σταθερότητα και αντοχή στη γήρανση. Η τεχνική απόδοση των συρμάτων OPGW είναι παρόμοια με την απόδοση των παρόμοιας κατασκευής συρμάτων γείωσης και αγωγών φάσης, ενώ η τεχνική απόδοση των εναέριων καλωδίων ADSS επηρεάζεται έντονα από τον τύπο των υλικών που χρησιμοποιούνται, τη συμπεριφορά σε υψηλή και χαμηλή θερμοκρασία και τον συντελεστή θερμικής διαστολής του καλωδίου (IEEE Std 1222™, 2019; A. G. Lazaropoulos & Leligou, 2022).

Το γεγονός ότι τα καλώδια ADSS είναι σε μακροχρόνια έκθεση σε ηλεκτρικά πεδία άρα σε υψηλές ηλεκτρικές καταπονήσεις, συμβάλλει στη γήρανση του εξωτερικού περιβλήματος των καλωδίων. Γενικά, οι δύο μηχανισμοί γήρανσης προκαλούνται από:

- Φαινόμενα Corona (δηλαδή, φωτεινές και ηχητικές μερικές εκκενώσεις σε ένα ανομοιόμορφο ηλεκτρικό πεδίο)
- Dry-banding, πρόκληση φθοράς με αποτέλεσμα αγωγίμες διαδρομές από τη δράση ηλεκτρικών εκκενώσεων πάνω ή κοντά στη μονωτική επιφάνεια)

Συνήθως, το καλώδιο κεραίας ADSS γειώνεται στους πύργους (στύλους) ανάρτησης ενώ φορτίζεται με χωρητική σύζευξη στο μέσο του ανοίγματος. Ως αποτέλεσμα της χωρητικής φόρτισης, το καλώδιο ADSS θα έχει ένα δυναμικό που εξαρτάται από την τάση φάσης και τη θέση του καλωδίου σε σχέση με τους αγωγούς φάσης και τα καλώδια γείωσης. Δεδομένου ότι η επιφανειακή ηλεκτρική ειδική αντίσταση του εναέριου καλωδίου ADSS είναι πολύ υψηλή, το εξωτερικό στρώμα μόνωσης του ADSS δεν είναι ισοδυναμική επιφάνεια και οι προκύπτουσες αξονικές κλίσεις τάσης δημιουργούν διαφορές δυναμικού μεταξύ του καλωδίου ADSS και του γειωμένου υλικού στις δομές στήριξης (IEEE Std 1222™, 2019; A. G. Lazaropoulos & Leligou, 2022).

Η προκύπτουσα ισχύς ηλεκτρικού πεδίου στις άκρες του προδιαμορφωμένου υλικού προσάρτησης είναι πιθανό να δημιουργήσει φαινόμενο corona που μπορεί να οδηγήσει σε αστοχία υλικού σε σχετικά σύντομο χρονικό διάστημα ακόμα και σε δύο μήνες έως δώδεκα μήνες. Μπορεί να αντιμετωπιστεί το φαινόμενο corona με τη χρήση πλαστικού υλικού προσάρτησης αντί του παραδοσιακού μεταλλικού υλικού, αλλά δεν μπορεί να εξαλειφθεί. Ο αποτελεσματικότερος τρόπος για την αποφυγή μεγάλου μεγέθους επαγόμενων τάσεων είναι η τοποθέτηση του καλωδίου σε θέσεις με χαμηλό δυναμικό χώρου αρκετά κάτω από τα επίπεδα που παρατηρείται corona (20 kV/cm) (IEEE Std 1222™, 2019; A. G. Lazaropoulos & Leligou, 2022)

Για τα ADSS απαιτείται και η χρήση σπειροειδών αποσβεστήρων κραδασμών οι οποίοι πρέπει να εγκαθίστανται τουλάχιστον 3 μέτρα ή και περισσότερο από ράβδο θωράκισης και σε ηλεκτρικά πεδία με χαμηλό δυναμικό χώρου, ιδανικά μικρότερο των 2 kV/cm. Σημαντική παράμετρος είναι και η παρουσία επιμολύνσεων ή υγρασίας πάνω στο καλώδιο ADSS. Τότε είναι πιθανή η ροή ρεύματος από την μέση του ανοίγματος προς τον πύργο στήριξης, προκαλώντας τοπική εξάτμιση λόγω της θέρμανσης και έτσι σχηματίζονται ξηρές ζώνες οι οποίες εμφανίζουν ηλεκτρική καταπόνηση μέχρι του οριακού σημείου διάσπασης και σχηματισμού διηλεκτρικού τόξου. Το τόξο υποβαθμίζει το καλώδιο τόσο λόγω ενέργειας όσο και λόγω χημικών αντιδράσεων. Η πρόκληση τόξου μπορεί να είναι συνεχής κάτω από ορισμένες κλιματολογικές συνθήκες και μπορεί να οδηγήσει σε αστοχία υλικού σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα ακόμα και μερικών μηνών (IEEE Std 1222™, 2019; A. G. Lazaropoulos & Leligou, 2022).

2.5 OPAC - Optical Attached Cable

Τα OPAC δεν είναι αυτοφερόμενα καλώδια, καθώς εγκαθίστανται με σύνδεση σε καλώδιο γείωσης ή φάσης κατά μήκος των υφιστάμενων εναέριων γραμμών μεταφοράς ή διανομής ηλεκτρικής ενέργειας με clip ή/και σφιγκτήρες. Η εγκατάσταση OPAC απαιτεί ειδικό εξοπλισμό (σύστημα τυλιγμένου σύρματος) που ταξιδεύει κατά μήκος των εναέριων γραμμών μεταφοράς ή διανομής ηλεκτρικής ενέργειας από πύργο σε πύργο ή πόλο σε πόλο, αντίστοιχα. Τα Optical Attached Cables (OPAC) χρησιμοποιούνται στις Ηνωμένες Πολιτείες ήδη από τη δεκαετία του 1980. Τα OPAC είναι καλώδια οπτικών ινών μικρού μεγέθους, ευέλικτα και πλήρως διηλεκτρικά. Στο παρακάτω σχήμα, απεικονίζεται μια τυπική διατομή ενός OPAC. Όπως και στο καλώδιο ADSS, η διαμόρφωση του εσωτερικού καλωδίου οπτικών ινών πρέπει να προστατεύεται από τους περιβαλλοντικούς παράγοντες και για το λόγο αυτό περιβάλλεται από διάφραγμα νερού, νήμα αραμιδίου και εξωτερικό περίβλημα. Εφόσον το OPAC είναι αυτοφερόμενο, το εξωτερικό περίβλημα θα πρέπει να διατηρεί πρόσθετες ιδιότητες για την προστασία από τα ηλεκτρικά πεδία που προκαλούνται από τα καλώδια φάσης. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η παρουσία OPAC κατά μήκος των υφιστάμενων γραμμών ηλεκτρικής ενέργειας έχει μικρή επίδραση στη μηχανική και ηλεκτρική τους απόδοση. Τα OPAC συνδυάζονται με τα προαναφερθέντα καλώδια οπτικών ινών για την υποστήριξη ενός πυκνότερου δικτύου επικοινωνιών (Ezeh & Ibe, 2013; A. G. Lazaropoulos & Leligou, 2022; Moore, 2006).



Σχήμα 4 - Διατομή καλωδίου OPAC

(A. G. Lazaropoulos & Leligou, 2022; Ostendorp & Gela, 1997)

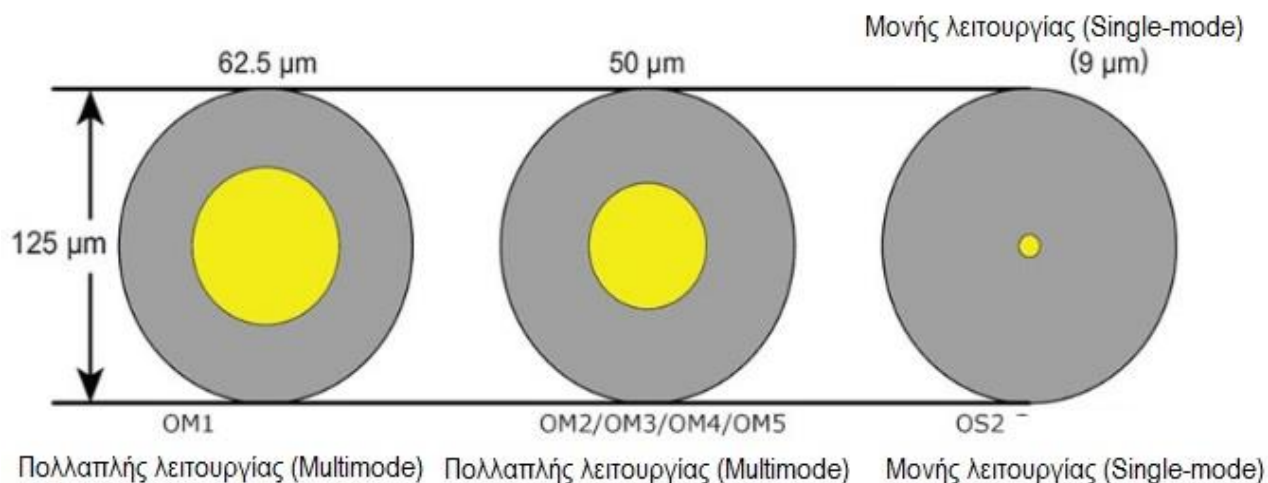
Όπως και τα εναέρια καλώδια ADSS, η επιλογή των υλικών εναέριων καλωδίων OPAC θα πρέπει να γίνεται με βάση τα κριτήρια: α) της τεχνικής απόδοσης. β) της μακροπρόθεσμης σταθερότητας και αντοχής στη γήρανση. Δεδομένου ότι το καλώδιο οπτικών ινών τύπου OPAC είναι ουσιαστικά ένα καλώδιο ADSS χωρίς στοιχείο αντοχής, ισχύουν περίπου τα ίδια και με τα καλώδια ADSS. Η εφαρμογή των εναέριων καλωδίων OPAC τυπικά περιορίζεται από τις επιφανειακές κλίσεις ηλεκτρικού πεδίου στα εναέρια καλώδια γείωσης καθώς και στους αγωγούς. Στο παρελθόν, οι εγκαταστάσεις εναέριων καλωδίων WRAP περιορίζονταν συνήθως σε εφαρμογές σε σύρματα με επιφανειακές κλίσεις περιορισμένες σε λιγότερο από 10 kV/cm. Τυπικά, θεωρείται ότι οι επιφανειακές κλίσεις άνω των 15 έως 20 kV/cm αλλοιώνουν σημαντικά το μανδύα του καλωδίου ως αποτέλεσμα του επιφανειακού φαινομένου Corona και επηρεάζουν σημαντικά την αποδοτική διάρκεια ζωής της εγκατάστασης (Ezeh & Ibe, 2013; A. G. Lazaropoulos & Leligou, 2022; Moore, 2006).

2.6 Τύποι καλωδίων

Δύο βασικοί τύποι καλωδίων οπτικής ίνας μπορούν να ενσωματωθούν σε εναέρια δίκτυα μεταφοράς, διανομής και μετάδοσης ηλεκτρικής ισχύος που σχετίζονται με τη διάμετρο του πυρήνα (core diameter), το εύρος ζώνης (broadband), την απόσταση μεταφοράς και το κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας:

1. Καλώδιο οπτικής ίνας μονής λειτουργίας (Single-mode fiber optic cable)
2. Καλώδιο οπτικής ίνας πολλαπλής λειτουργίας (Multi-mode fiber optic cable)

(A. G. Lazaropoulos & Leligou, 2022)



Σχήμα 5 - Διάμετροι πυρήνα οπτικών ινών (Optical Fiber Core Diameters)

<https://community.fs.com/blog/single-mode-cabling-cost-vs-multimode-cabling-cost.html>

Στον παρακάτω πίνακα συνοψίζονται και συγκρίνονται οι αποστάσεις που μπορούν να διανύσουν οπτικές ίνες μονής (Single-mode fiber optic cables) και πολλαπλής λειτουργίας (Multi-mode fiber optic cables).

Πίνακας 3 - Σύγκριση αποστάσεων μεταξύ οπτικών ινών μονής (SMF) και πολλαπλής λειτουργίας (MMF)

| Τύπος οπτικής ίνας | | 100Mb | 1Gb | 1Gb | 10Gb | 25Gb | 40Gb | 100Gb |
|-----------------------|-----|-----------------------|------|------|--------|------|------|-------|
| | | Απόσταση σε μέτρα (m) | | | | | | |
| Μονής λειτουργίας | OS2 | 200 | 5000 | 5000 | 10.000 | N/A | N/A | N/A |
| | OM1 | 200 | 275 | 550* | N/A | N/A | N/A | N/A |
| | OM2 | 200 | 550 | 550* | N/A | N/A | N/A | N/A |
| Πολλαπλής λειτουργίας | OM3 | 200 | 550 | 550* | 300 | 70 | 100 | 100 |
| | OM4 | 200 | 550 | 550* | 400 | 100 | 150 | 150 |
| | OM5 | 200α | 550 | 550* | 300 | 100 | 400 | 400 |

* απαιτείται καλώδιο ρύθμισης λειτουργίας

(A. G. Lazaropoulos & Leligou, 2022)

2.6.1 Καλώδιο οπτικής ίνας μονής λειτουργίας – Μονότροπες (Single-mode fiber optic cable - SMF)

Τα καλώδια που επιτελούν μία λειτουργία διαθέτουν στενό πυρήνα, άρα μικρές αποσβέσεις και έτσι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την μεταφορά δεδομένων σε μεγάλο μήκος και αποστάσεις. Θεωρείται ότι έχουν απεριόριστες δυνατότητες ευρυζωνικότητας, καθώς μεταφέρουν μόνο μία οπτική λειτουργία αλλά μόνο προς μία κατεύθυνση. Αν χρειάζεται να μεταφερθούν δεδομένα και προς τις δύο κατευθύνσεις: ανάντη (upstream) και κατόντη (downstream) τότε απαιτείται εγκατάσταση και δεύτερης οπτικής ίνας για τη δεύτερη κατεύθυνση (A. G. Lazaropoulos & Leligou, 2022)

Τα καλώδια οπτικής ίνας μονής λειτουργίας χρησιμοποιούνται συνήθως σε:

- Δίκτυα μεταφοράς
- Μητροπολιτικά δίκτυα (Metropolitan Area Network - MANs)
- Παθητικά Οπτικά Δίκτυα (Passive Optical Networks - PONs)

Τέτοιου τύπου καλώδια μπορούν να μεταδώσουν δεδομένα σε απόσταση μέχρι και 80 χιλιόμετρα χωρίς αναμεταδότες/ενισχυτές (repeaters)

(Chinenye, 2017; Ezeh & Ibe, 2013; Jachetta, 2007)

Λαμβάνοντας υπόψη: (1) την απόσταση που μπορούν να αναπτυχθούν καλώδια μονής λειτουργίας, (2) τα συστήματα οπτική μετάδοσης που χρησιμοποιούνται στην Ευρώπη (3) τη βελτιστοποίηση του κλάσματος κόστους/απόδοσης (cost efficiency) και (4) την ανάγκη για ταχύτερες συνδέσεις μεγαλύτερες των 10 GB, πιο ενδιαφέροντα καλώδια οπτικών ινών μονής λειτουργίας είναι αυτά που μπορούν να αναπτυχθούν σε αποστάσεις από 5 έως 10 χιλιόμετρα (A. G. Lazaropoulos & Leligou, 2022).

2.6.2 Καλώδιο οπτικής ίνας πολλαπλής λειτουργίας - Πολύτροπες (Multi-mode fiber optic cable - MMF)

Τα καλώδια οπτικής ίνας πολλαπλών λειτουργιών αποτελούν βέλτιστη επιλογή για μετάδοση πληροφορίας σε κοντινές αποστάσεις, καθώς μπορούν να μεταφέρουν μεγάλο όγκο πληροφοριών, λόγω του ότι διαθέτουν πολύ μεγαλύτερο πυρήνα καλωδίου από ότι τα καλώδια μονής λειτουργίας, επιτρέποντας έτσι την μεγαλύτερη συγκέντρωση οπτικών ινών. Από την άλλη οι οπτικές αλληλεπιδράσεις εξασθενούν το σήμα, άρα δεν ενδείκνυνται για χρήση σε μεγάλες αποστάσεις. Ακόμη προκαλούν διασπορά μεταφοράς η οποία με την σειρά του περιορίζει την μεταφορά δεδομένων σε μεγάλες αποστάσεις (Chinenye, 2017; Ezeh & Ibe, 2013; Jachetta, 2007; A. G. Lazaropoulos & Leligou, 2022).

Παρόλα αυτά έχουν τη δυνατότητα μεταφοράς δεδομένων και προς τις δύο κατευθύνσεις καθώς περιέχουν περισσότερες από μία ακτίνες φωτός. Ο παραπάνω περιορισμός στις αποστάσεις και η αυξημένη ταχύτητα και προς τις δύο κατευθύνσεις κάνουν τις οπτικές ίνες πολλαπλής λειτουργίας βέλτιστες προς χρήση σε βιομηχανικά κτίρια, κέντρα αποθήκευσης δεδομένων (data centers), τοπικά δίκτυα (Local Area Networks – LANs), αλλά και Πανεπιστήμια (Chinenye, 2017; Ezeh & Ibe, 2013; Jachetta, 2007). Παρόλο που υπάρχει η δυνατότητα μεταφοράς μέσω οπτικών ινών πολλαπλής λειτουργίας σε αποστάσεις μέχρι και 5 χιλιομέτρων χωρίς αναμεταδότες, (1) η σημερινή τεχνολογία σε οπτικούς πομποδέκτες, (2) το απαιτούμενο κόστος εγκατάστασης και (3) η απαίτηση για ευρυζωνικές συνδέσεις μεγάλης ταχύτητας, περιορίζουν το ενδιαφέρον σε όσες μεταφέρουν δεδομένα μέχρι και σε 500 μέτρα (A. G. Lazaropoulos & Leligou, 2022). Είναι δεδομένο όμως ότι η εγκατάσταση πολλαπλών καλωδίων οπτικών ινών εμπεριέχει τον κίνδυνο οπτικών απωλειών, παραμορφώσεων ζεύξης και αστοχιών λόγω των διαφορετικών μεγεθών πυρήνα και των υποστηριζόμενων λειτουργιών ακτίνας (Chinenye, 2017; Ezeh & Ibe, 2013; Jachetta, 2007; A. G. Lazaropoulos & Leligou, 2022)

2.6.3 Ενίσχυση του σήματος οπτικών ινών

Παρόλο που τα πολυτροπικά καλώδια οπτικών ινών περιορίζονται σε μικρές αποστάσεις, το ψηφιακό σήμα μπορεί να διανύσει μεγάλες αποστάσεις μέσω εναέριων δικτύων μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας μέσω επανάληψης αφού προηγηθεί ενίσχυση και αφαίρεση της παραμόρφωσης. Απαιτούνται δύο (2) βασικές διατάξεις τηλεπικοινωνιών:

1. Οπτική ενίσχυση μέσω συσκευής (optical amplifier) που ενισχύει το ψηφιακό σήμα χωρίς να συμβαίνει αναπαραγωγή. Η διαδικασία αυτή αναπόφευκτα όμως ενισχύει και το θόρυβο του σήματος. Οι συσκευές οπτικής ενίσχυσης έχουν πολύ απλή διάταξη άρα και πολύ χαμηλό κόστος.
2. Για την αφαίρεση του θορύβου απαιτείται ένας πομποδέκτης (electro-optical repeater) του οποίου ο δέκτης ανιχνεύει το σήμα των οπτικών ινών και το μετατρέπει σε ηλεκτρικό σήμα, έπειτα μία ειδική διάταξη εντός του πομποδέκτη αναπαράγει το σήμα μειώνοντας το θόρυβο αλλά και ρυθμίζοντας το χρονισμό του παλμού και το στέλνει στον πομπό που το ενισχύει. Καθώς πρόκειται για πιο πολύπλοκη διάταξη από τον ενισχυτή αυξάνει το κόστος, αλλά και απαιτεί και την εγκατάσταση συστήματος αυτομάτου ελέγχου για τον έλεγχο της λειτουργίας φιλτραρίσματος και ενίσχυσης.

(A. G. Lazaropoulos & Leligou, 2022; Nthate, 2017; Sun et al., 2019)

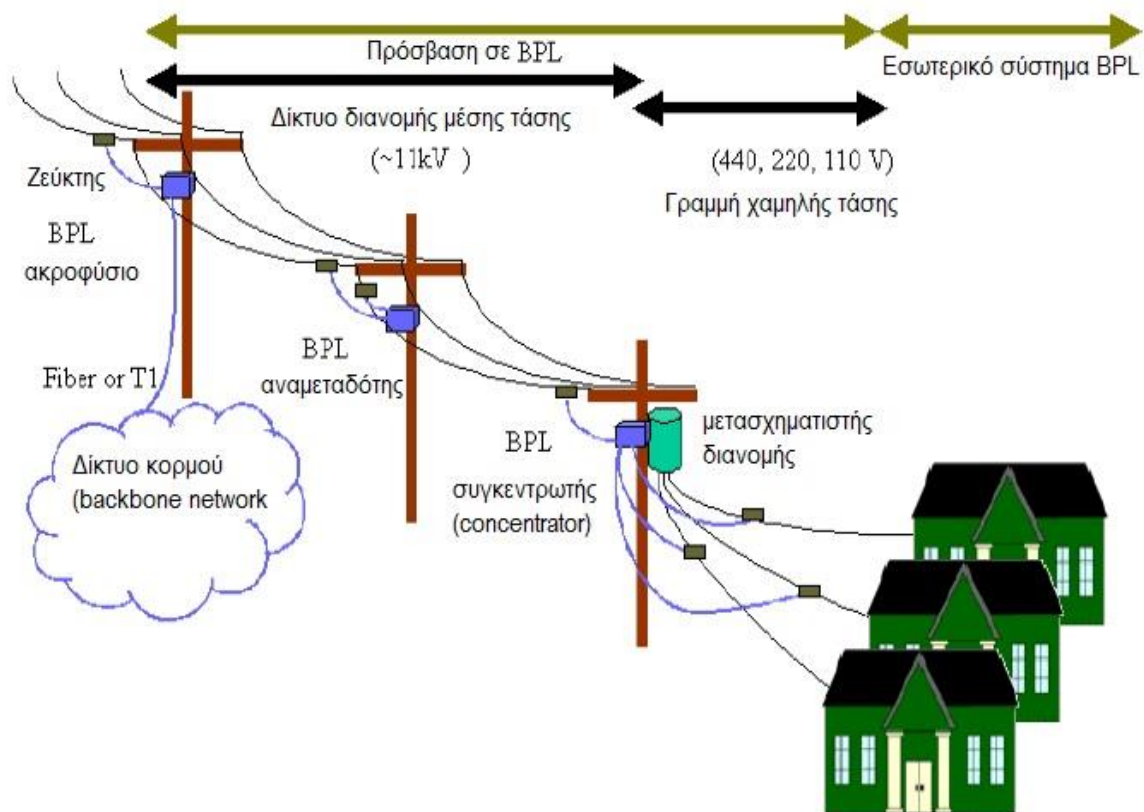
Κεφάλαιο 3: Αρχιτεκτονική τηλεπικοινωνιακού δικτύου κορμού οπτικών ινών σε εναέριες γραμμές μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας (BPL)

Ήδη από τις αρχές της δεκαετίας του 2000 η γρήγορη πρόσβαση στο διαδίκτυο άρχισε να μετατρέπεται από προνόμιο σε αναγκαιότητα της καθημερινότητας. Βασικό πρόβλημα της πρόσβασης σε δίκτυα ευρυζωνικότητας είναι ότι πρέπει να υπάρχει η ανάλογη υποδομή καλωδίωσης ακόμα και προς απομακρυσμένες περιοχές, κάτι που μπορεί να μην είναι οικονομικά αποδοτικό (cost-effective) (Amirshahi & Kavehrad, 2006). Το παραπάνω πρόβλημα αποκαλείται: «*πρόβλημα τελευταίου μιλίου (last mile problem)*», όπου έχει υπολογιστεί ότι το κόστος μεταφοράς τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών προς τον τελικό καταναλωτή μπορεί να φτάνει μέχρι και 53%, καθώς αναγκαστικά η τελική γραμμή θα αφορά έναν μόνο πελάτη (Horvat et al., 2012). Μία αποδοτική λύση είναι η αξιοποίηση των ήδη υπάρχουσών γραμμών ηλεκτρικής ισχύος (Broadband over Powerlines – BPL) για την εγκατάσταση οπτικών ινών, ανάλογα με την τάση (υψηλή, μέση και χαμηλή) και την τοπολογία (topology) της καλωδίωσης, δηλαδή αν θα είναι υπόγεια (underground) ή εναέρια (overhead) (Amirshahi & Kavehrad, 2006).

Οι εναέριες γραμμές μέσης τάσης διαφέρουν σε μεγάλο βαθμό ως προς τη δομή και τις ιδιότητες άλλων ενσύρματων γραμμών όπως είναι τα καλώδια συνεστραμμένου ζεύγους (twisted-pair cables), τα ομοαξονικά καλώδια (coaxial cables) και τα καλώδια οπτικών ινών (fiber-optics). Οι υπόγειες γραμμές καλωδίωσης μεταφοράς ηλεκτρικού δικτύου) έχουν πολύ

μεγαλύτερο κόστος από τις αντίστοιχες εναέριες (πολλές φορές αγγίζει το δεκαπλάσιο) κάτι που φαίνεται και από το γεγονός ότι τόσο στις Ηνωμένες Πολιτείες και την Ευρώπη η συντριπτική πλειοψηφία της υποδομής των ηλεκτρικών δικτύων μέσης και χαμηλής τάσης στηρίζεται σε εναέριες συνδέσεις (Amirshahi & Kavehrad, 2006; A. G. Lazaropoulos, 2012a; A. G. Lazaropoulos & Leligou, 2022).

Στην Ευρώπη βέβαια ήδη από τη δεκαετία 2000 έχουν γίνει προσπάθειες για τη χρήση του δικτύου χαμηλής τάσης ως μέσο μεταφοράς ευρυζωνικών συνδέσεων (Amirshahi & Kavehrad, 2006; Yavuz et al., 2000). Στις Ηνωμένες Πολιτείες αντίθετα χρησιμοποιούνται ήδη από τα τέλη της δεκαετίας του 1990 κατά κόρο εναέριες γραμμές χαμηλής και μέσης τάσης για την μεταφορά δεδομένων στους τελικούς καταναλωτές (σπίτια) σε συχνότητες μεταξύ 2 και 50 MHz (Amirshahi & Kavehrad, 2006; NTIA, 2004)



Σχήμα 6 – Προτεινόμενη αρχιτεκτονική δικτύου πρόσβασης γραμμής ισχύος

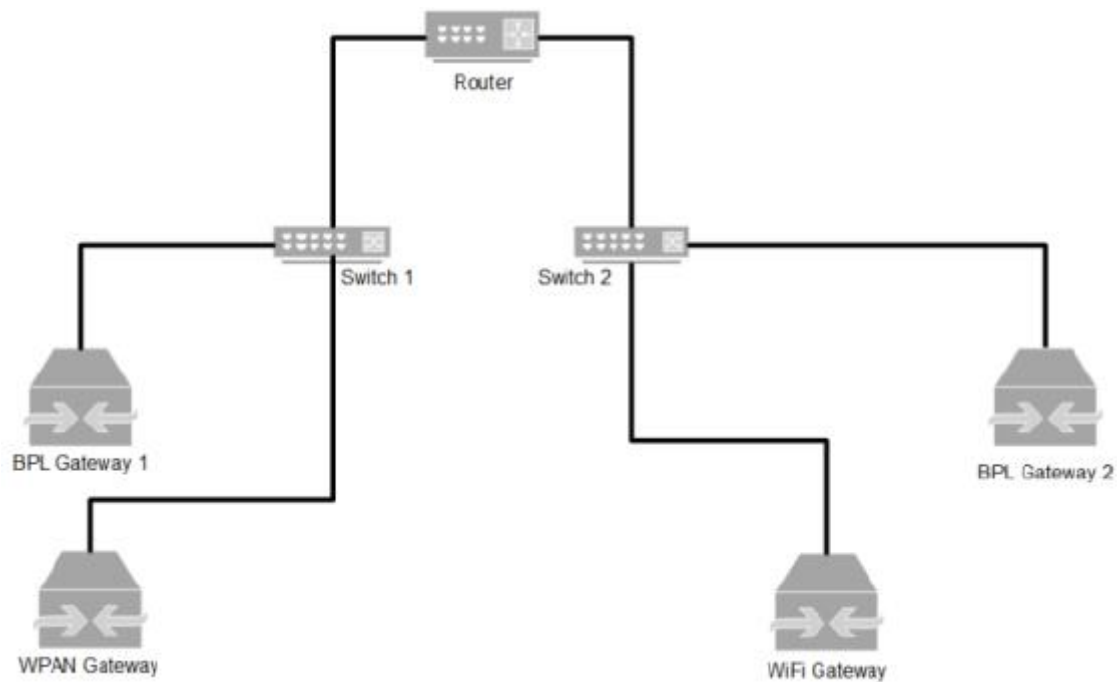
(Amirshahi & Kavehrad, 2006)

Τα καλώδια μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος όμως έχουν σχεδιαστεί για να μεταφέρουν ηλεκτρική ισχύ και όχι τηλεπικοινωνιακά σήματα. Οι μιγαδικές αντιστάσεις στις αρθρώσεις των καλωδίων προκαλούν ανακλάσεις που μπορούν να προκαλέσουν φαινόμενα εξασθένησης πολλαπλής διαδρομής (multipath fading) που παρατηρούνται στις ασύρματες

επικοινωνίες (Amirshahi & Kavehrad, 2006). Αρχικά σχεδιασμένο για παροχή ρεύματος αντί για μετάδοση σήματος, το καλώδιο τροφοδοσίας έχει πολλές μη ιδανικές ιδιότητες ως μέσο επικοινωνίας. Οι αναντιστοιχίες σύνθετης αντίστασης στις αρθρώσεις προκαλούν ανακλάσεις που δημιουργούν συνθήκες παρόμοιες με αυτές που δημιουργούνται από το ξεθώριασμα πολλαπλών διαδρομών στις ασύρματες επικοινωνίες. Ενώ έχουν γίνει πολλές ερευνητικές προσπάθειες για τον χαρακτηρισμό των ευρωπαϊκών καλωδίων γείωσης, δεν υπάρχει διαθέσιμο ένα κατάλληλο θεωρητικό μοντέλο για εναέριες γραμμές MV πολλαπλών αγωγών, μια τυπική κατάσταση στις ΗΠΑ.

3.1 Σειριακή Αρχιτεκτονική Δικτύου Κορμού (Serial Backbone Network Architecture)

Η σειριακή είναι η πιο απλή συνδεσμολογία σε μορφή αλυσίδας (linked serial) που μπορεί να περιλαμβάνει δύο ή και περισσότερα μεταγωγούς δεδομένων (switches) ή από πύλες (gateways) και δρομολογητές (routers) (Fiber Optic Solutions, 2016; A. G. Lazaropoulos & Leligou, 2022). Τα switches έχουν τη δυνατότητα διασύνδεσης πυλών διαφορετικών τεχνολογιών όπως Broadband Power Line (BPL), Global System for Mobile Communication (GSM), δορυφορική, Wireless Personal Area Network (WPAN) (A. G. Lazaropoulos & Leligou, 2022). Μία πρακτική εφαρμογή είναι στην υλοποίηση Δικτύων Ευρείας Ζώνης (Wide Area Networks – WANs) Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται από τους Lazaropoulos and Leligkou (2022) η αρχιτεκτονική ενός δικτύου που περιλαμβάνει ένα δρομολογητή και τρεις μεταγωγούς δεδομένων που συνδέονται σειριακά με οπτική ίνα



Σχήμα 7 - Σειριακή Αρχιτεκτονική Δικτύου Κορμού (Serial Backbone Network Architecture) σε Ευρυζωνικές Γραμμές Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (Broadband Power Lines)

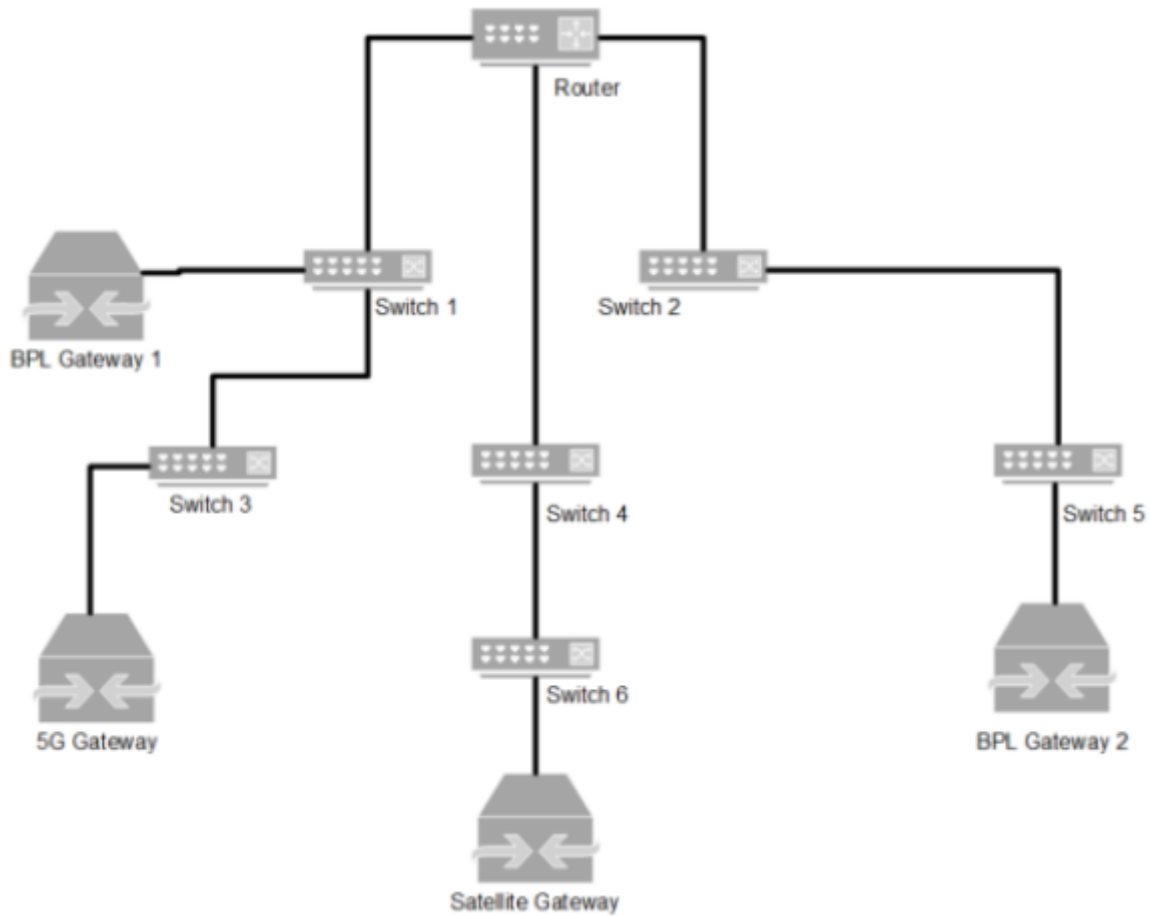
(Fiber Optic Solutions, 2016; Karamchati et al., 2017; A. G. Lazaropoulos & Leligou, 2022)

Αυτό που πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη είναι ότι η υπέρβαση του ορίου μεταφοράς, μεταγωγής και επεξεργασίας των δεδομένων της κάθε συσκευής μπορεί να οδηγήσει σε μη αναμενόμενα σφάλματα και απώλεια δεδομένων στο δίκτυο (Fiber Optic Solutions, 2016).

3.2 Κατανεμημένη Αρχιτεκτονική Δικτύου Κορμού (Distributed Backbone Network Architecture)

Τα κατανεμημένα δίκτυα κορμού (distributed backbone networks) «δανείζονται» την αρχιτεκτονική σχεδίαση του δικτύου (Fiber Optic Solutions, 2016; A. G. Lazaropoulos & Leligou, 2022) όπου πολλές ενδιάμεσες συσκευές συνδέονται σε μεταγωγούς ή δρομολογητές δεδομένων (Fiber Optic Solutions, 2016). Πλεονέκτηματά τους είναι η εύκολη εγκατάσταση, η κλιμάκωση (scalability) και η απλή διαχείριση του δικτύου (Fiber Optic Solutions, 2016; A. G. Lazaropoulos & Leligou, 2022). Έτσι μειώνεται το κόστος αλλά ο χρόνος ανάπτυξης τέτοιων δικτύων (Fiber Optic Solutions, 2016) κάτι που τα κάνει ιδιαίτερα δημοφιλή για δίκτυα μεγάλης κλίμακας (Fiber Optic Solutions, 2016; A. G. Lazaropoulos & Leligou, 2022). Είναι εύκολα επεκτάσιμα γιατί καθώς το δίκτυο αναπτύσσεται σε επίπεδα (layers), μπορεί να επεκταθεί με την ενσωμάτωση και άλλων επιπέδων πυλών (A. G. Lazaropoulos & Leligou, 2022). Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται από τους

Lazaropoulos and Leligkou (2022) η αρχιτεκτονική ενός κατακεντρωμένου δικτύου κορμού οπτικών ινών:



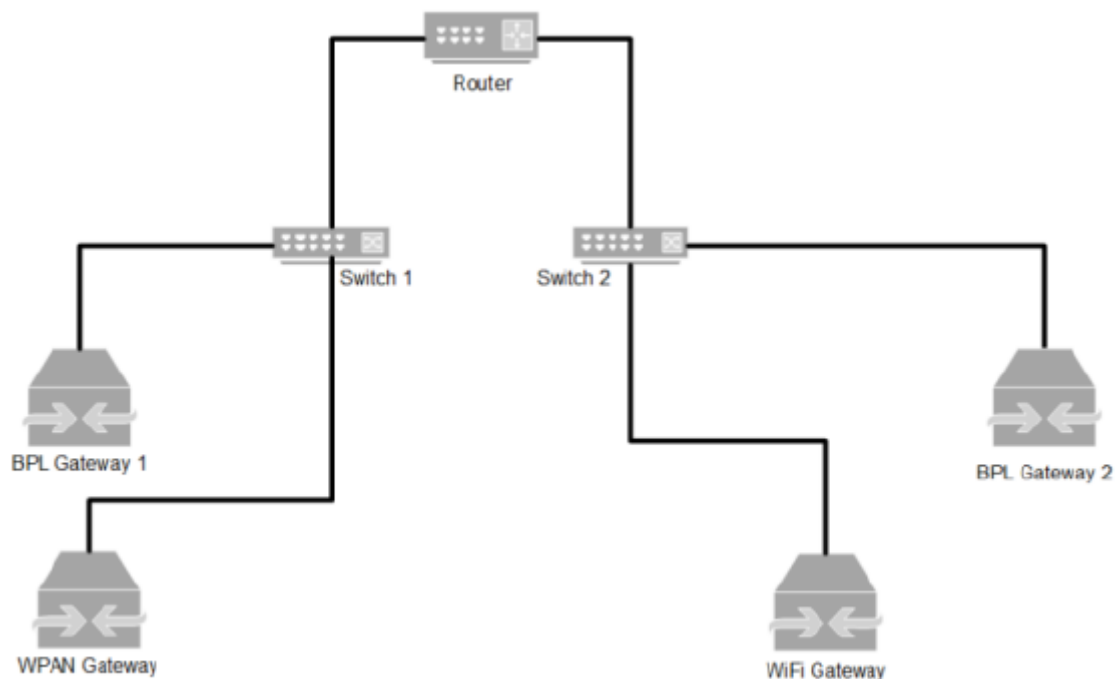
Σχήμα 8 - Κατακεντρωμένη Αρχιτεκτονική Δικτύου Κορμού (Serial Backbone Network Architecture) σε Ευρυζωνικές Γραμμές Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (Broadband Power Lines)

(Fiber Optic Solutions, 2016; Karamchati et al., 2017; A. G. Lazaropoulos & Leligou, 2022)

3.3 Συνεπτυγμένη Αρχιτεκτονική Δικτύου Κορμού (Collapsed Backbone Network Architecture)

Τα συμπυκνωμένα δίκτυα κορμού αποτελούνται από ένα δρομολογητή με μεγάλες δυνατότητες ο οποίος λειτουργεί ως κεντρικός κόμβος σύνδεσης πολλαπλών υπο-δικτύων (sub-networks) (Fiber Optic Solutions, 2016; A. G. Lazaropoulos & Leligou, 2022). Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται ένα συμπυκνωμένο δίκτυο κορμού με έναν δρομολογητή στο ανώτερο επίπεδο ιεραρχίας και δύο μεταγωγούς που συνδέουν δύο (2) διαφορετικά υπο-δίκτυα για τα οποία μπορεί να υπάρχει διαφορετική διαχείριση από πλευράς δρομολόγησης, μεταγωγής και αντιμετώπισης προβλημάτων (Fiber Optic Solutions, 2016). Ο ανώτερος δρομολογητής θα πρέπει να έχει μεγάλη υπολογιστική ισχύ για να μπορεί να διαχειριστεί

την κίνηση των πακέτων πληροφορίας (transfer packets) (Fiber Optic Solutions, 2016; A. G. Lazaropoulos & Leligou, 2022). Το συμπυκνόμενο δίκτυο κορμού λειτουργεί σαν σύνδεση τοπικών δικτύων (LAN) σε συνδεσμολογία αστέρα ή δέντρου όπως αλλιώς ονομάζεται (A. G. Lazaropoulos & Leligou, 2022). Σε αυτού του τύπου την αρχιτεκτονική δικτύου υπάρχει υπερβολική εξάρτηση από τον κεντρικό δρομολογητή. Αν δεν μπορεί να «σηκώσει» την κίνηση ή είναι εκτός λειτουργίας, τότε όλο το δίκτυο έχει δομικό πρόβλημα. Είναι όμως πολύ χρηστικό στην περίπτωση σύνδεσης δύο διαφορετικών υπο-δικτύων όπου είναι εύκολη η διαχείριση και επίλυση των προβλημάτων τους (Fiber Optic Solutions, 2016).

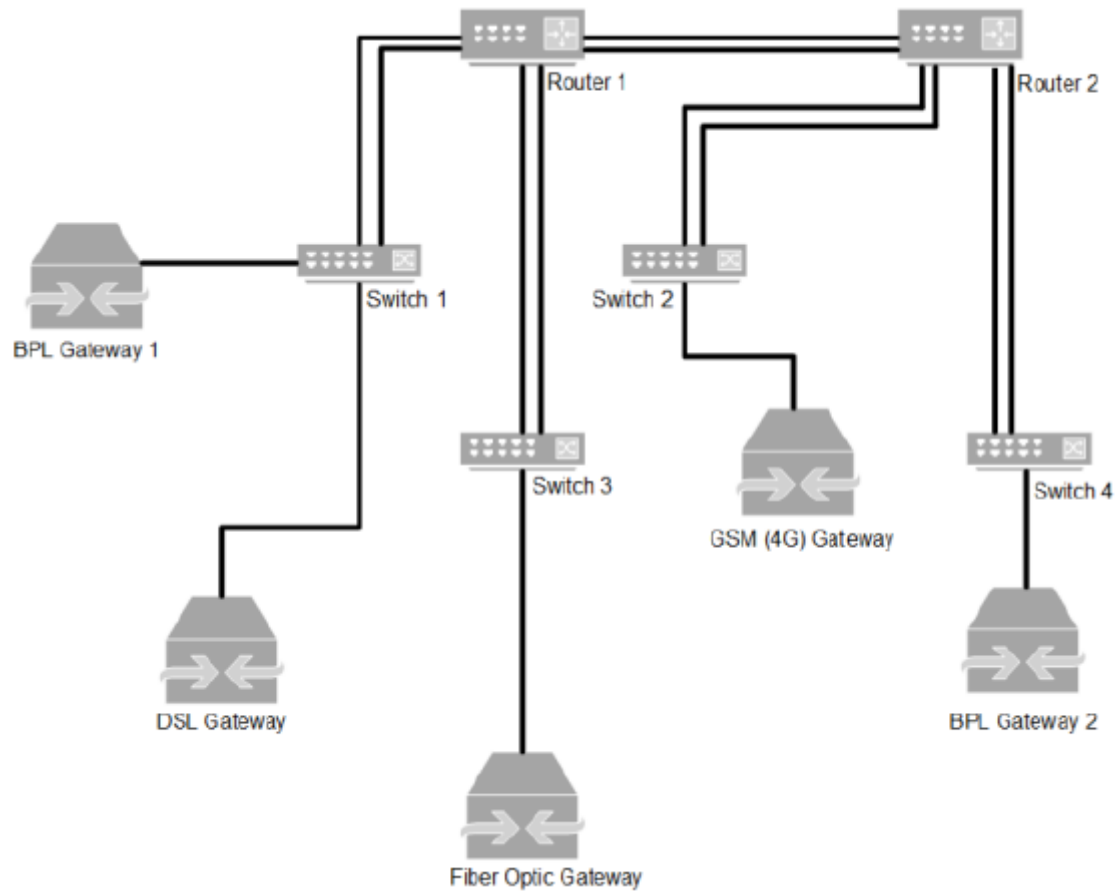


Σχήμα 9 - Συμπεπυκνόμενη Αρχιτεκτονική Δικτύου Κορμού (Collapsed Backbone Network Architecture) σε Ευρυζωνικές Γραμμές Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (Broadband Power Lines)

(Fiber Optic Solutions, 2016; Karamchati et al., 2017; A. G. Lazaropoulos & Leligou, 2022)

3.4 Παράλληλη Αρχιτεκτονική Δικτύου Κορμού (Parallel Backbone Network Architecture)

Τα δίκτυα κορμού σε παράλληλη σύνδεση αποτελούν τροποποιημένα συμπυκνμένα δίκτυα κορμού (Fiber Optic Solutions, 2016; A. G. Lazaropoulos & Leligou, 2022), όπου οι συσκευές έχουν περισσότερες από μία συνδέσεις μεταξύ τους (Fiber Optic Solutions, 2016). Οι πολλαπλές συνδέσεις των δρομολογητών που είναι ψηλά στην ιεραρχία του δικτύου και των τμημάτων του δικτύου μέσω αμφίδρομων συνδέσεων διασφαλίζουν την συνεχή διαθεσιμότητα, απόδοση σε μεγάλες ταχύτητες και μεγάλες ανοχές σε σφάλματα (Fiber Optic Solutions, 2016), απαιτήσεις τις οποίες έχουν τα επιχειρηματικά δίκτυα ευρείας ζώνης. Για τη διασφάλιση της συνδεσιμότητας σε όλο το εύρος του δικτύου ευρείας ζώνης παράλληλης αρχιτεκτονικής απαιτείται εκτεταμένη καλωδίωση η οποία αυξάνει σημαντικά το κόστος ανάπτυξης, εγκατάστασης και συντήρησης (Fiber Optic Solutions, 2016; Karamchati et al., 2017; A. G. Lazaropoulos & Leligou, 2022), οπότε η παράλληλη αρχιτεκτονική θα πρέπει να επιλέγεται στοχευμένα. Άλλωστε η αμφίδρομη επικοινωνία δεν είναι απαραίτητη σε όλη τη δομή του δικτύου (Fiber Optic Solutions, 2016). Στο ακόλουθο σχήμα παρουσιάζεται η βασική αρχιτεκτονική παράλληλου δικτύου κορμού:



Σχήμα 10 - Παράλληλη Αρχιτεκτονική Δικτύου Κορμού (Parallel Backbone Network Architecture σε Ευρυζωνικές Γραμμές Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (Broadband Power Lines)

(Fiber Optic Solutions, 2016; Karamchati et al., 2017; A. G. Lazaropoulos & Leligou, 2022)

Κεφάλαιο 4: Πρότυπα

4.1 Αμερικανικός Εθνικός Κανονισμός Ασφαλείας από Ηλεκτρομηχανολογικές Διατάξεις (IEEE National Electrical Safety Code)

4.1.1 Ιστορικό

Ο εθνικός κώδικας ηλεκτρικής ασφάλειας των Ηνωμένων Πολιτειών που εκδίδεται από το Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) οριοθετεί τους κανόνες και τις πρακτικές οδηγίες για προστασία εργαζομένων και των πολιτών κατά την εγκατάσταση, λειτουργία και συντήρηση για το σύνολο του εξοπλισμού παροχής ηλεκτρικής ισχύος και τηλεπικοινωνιακών συνδέσεων (Bingel, 2022; IEEE, 1996; Marne & Palmer, 2023). Ο κώδικας διατυπώθηκε για πρώτη φορά το 1914 και ανανεώνεται κάθε πέντε (5) χρόνια για να συμβαδίζει με τις αλλαγές της τεχνολογίας και της βιομηχανίας (Bingel, 2022; Marne & Palmer, 2023). Από το 2017 εκδίδεται σε μορφή βιβλίου, ηλεκτρονικού βιβλίου, σε μορφή για επιτραπέζιο και φορητό υπολογιστή, αλλά και για τάμπλετ και κινητά (Marne & Palmer, 2023)

4.1.2 Αμερικανικό πρότυπο για καλώδια οπτικών ινών ADSS (IEEE Std 1222™-2019)

Τα καλώδια ADSS οφείλουν να αποτελούνται από μονωμένες γυάλινες οπτικές ίνες ομαδοποιημένες σε μία ή περισσότερες προστατευτικές διηλεκτρικές μονάδες που μπορεί να περιβάλλονται από ή να συνδέονται με κατάλληλο τρόπο με περιβλήματα διηλεκτρικής αντοχής. Το καλώδιο δεν πρέπει να περιέχει μεταλλικά εξαρτήματα. Το καλώδιο πρέπει να είναι σχεδιασμένο ώστε να πληροί όλες τις απαιτήσεις σε όλες τις συνθήκες λειτουργίας, εγκατάστασης και περιβαλλοντικές συνθήκες (IEEE Std 1222™, 2019).

Πυρήνας καλωδίου οπτικής ίνας

Ο πυρήνας του καλωδίου οπτικής ίνας θα πρέπει να είναι εξ' ολοκλήρου διηλεκτρικός και θα πρέπει να περιέχει μονωμένες οπτικές ίνες από γυαλί οι οποίες θα προστατεύονται από μηχανικές, περιβαλλοντικές και ηλεκτρικές καταπονήσεις. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται στον πυρήνα θα πρέπει να είναι συμβατά μεταξύ τους, δεν θα πρέπει να επηρεάζονται από τις ηλεκτρικές διαταραχές και καταπονήσεις και δεν πρέπει να περιέχουν υδρογόνο σε ικανές ποσότητες που να προκαλέσει υποβάθμιση της οπτικής λειτουργίας. Η σύσφιξη θα πρέπει όχι να μην ξεπερνά την μέγιστη σύσφιξη καταπόνησης που έχει ορίσει ο κατασκευαστής αλλά να βρίσκεται εντός των ορίων αγωγής λειτουργίας. Εάν απαιτείται η χρήση στοιχείου αντοχής στο κέντρο του σωλήνα τότε θα πρέπει να είναι από διηλεκτρικό υλικό όπως ενισχυμένο πλαστικό ή εποξειδικό γυαλί. Οι χαλαροί σωλήνες που προσφέρουν αντιτασική προστασία (loose buffer tubes) θα πρέπει να είναι απολύτως στεγανοί με κατάλληλο υλικό συμβατό με το υλικό σωλήνων, την επίστρωση ινών και το χρωματισμό, για την προστασία των οπτικών ινών και την αποφυγή εισόδου υγρασίας. Στα διάκενα του σωλήνα μπορεί να περιέχεται και άλλο υλικό στεγάνωσης το οποίο και πάλι πρέπει να είναι συμβατό με τα υπόλοιπα υλικά (IEEE Std 1222™, 2019).

Μηχανική Αντοχή

Κάμψη (χαλάρωση) και έκταση

Το καλώδιο ADSS συμπεριφέρεται πολύ διαφορετικά από το καλώδιο OPGW όσο αφορά την κάμψη (χαλάρωση) και ο κατασκευαστής θα πρέπει να λαμβάνει σοβαρά υπόψη τις ελάχιστες απαιτούμενες αποστάσεις του καλωδίου από τους αγωγούς και το έδαφος. Η μέγιστη κάμψη θα πρέπει να υπολογίζεται στις χειρότερες δυνατές περιβαλλοντικές συνθήκες. Στο πρότυπο σημειώνεται ότι οι ελάχιστες αποστάσεις δύναται να διαφέρουν από χώρα σε χώρα. Η μέγιστη έκταση επίσης δύναται να διαφέρει ανάλογα με τις προδιαγραφές της κάθε εγκατάστασης και θα πρέπει να είναι προϊόν εμπειριστατωμένης μελέτης (IEEE Std 1222™, 2019)

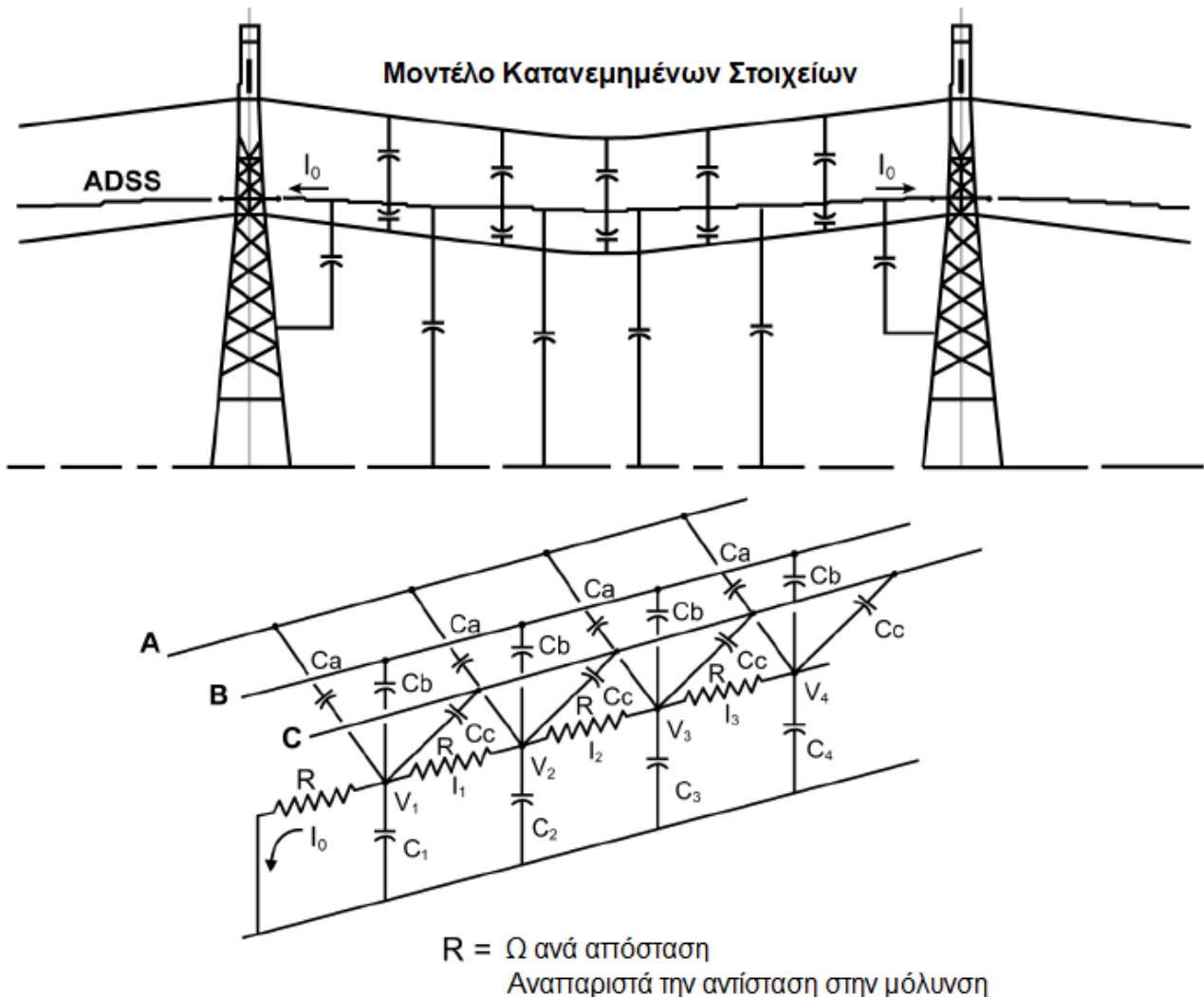
Ταλάντωση

Το καλώδιο πρέπει να είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε να μπορεί να αντέχει αιολικούς κραδασμούς με μόνιμες ή προσωρινές αυξήσεις στις αποσβέσεις (IEEE Std 1222™, 2019)

Περιβαλλοντική Μόλυνση

Το καλώδιο θα πρέπει να εμφανίζει αντοχή στο ατμοσφαιρικό περιβάλλον που θα εγκατασταθεί, το οποίο μπορεί να διαφέρει σημαντικά από περιοχή σε περιοχή ακόμα και στην ίδια γραμμή μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος. Για παράδειγμα ζώνες με αλμυρό ή υφάλμυρο νερό, ζώνες βιομηχανικής ρύπανσης, ηφαιστειακές ζώνες θείου, ή και συνδυασμός των παραπάνω απαιτούν ειδική προστασία για την αποφυγή πρόκλησης ξηρού διηλεκτρικού τόξου (IEEE Std 1222™, 2019)

Μπορεί να γίνει μοντελοποίηση της διάταξης για τον υπολογισμό του βαθμού της μόλυνσης με τη χρήση κατανεμημένων αντιστάσεων και πυκνωτών μεταξύ των αγωγών, του καλωδίου ADSS και των γειώσεων όπως στο παρακάτω σχήμα. Η επίλυση των επαναλαμβανόμενων εξισώσεων βρόχου οδηγεί στον υπολογισμό των ρευμάτων και των τάσεων



Σχήμα 11 - Μοντέλο κατανεμημένων στοιχείων για τον υπολογισμό της μόλυνσης του καλωδίου ADSS

Φαινόμενο Κορόνα

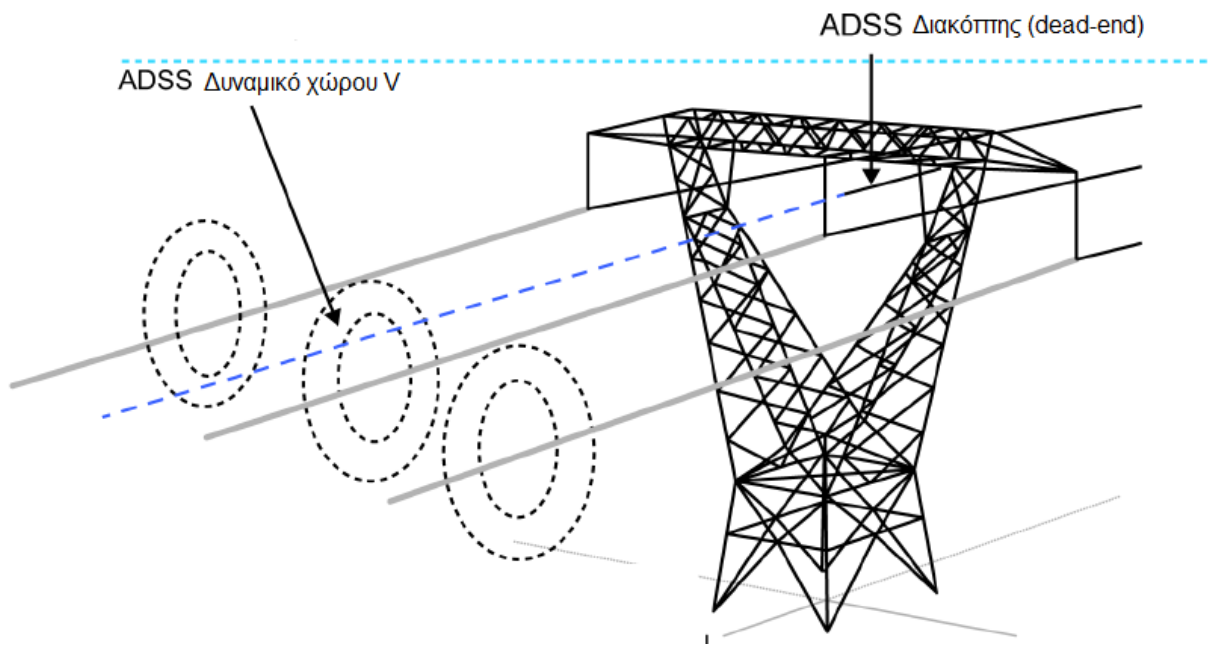
Το φαινόμενο Corona καταστρέφει όλους τους τύπους των περιβλημάτων των καλωδίων ADSS. Τα οξέα που δημιουργούνται από την αλληλεπίδραση της corona και των ατμοσφαιρικών συστατικών μπορούν να διαβρώσουν εντελώς το χιτώνιο επιτρέποντας στην υγρασία να διαπεράσει το υλικό εσωτερικής αντοχής (π.χ. το νήμα αραμιδίου). Το αποτέλεσμα είναι δημιουργίας εσωτερικής corona (που μερικές φορές ονομάζεται μερική εκφόρτιση) που υποβαθμίζει την αντοχή με αποτέλεσμα την αστοχία του υλικού. Μια τυπική αιτία δημιουργίας corona εντοπίζεται στις άκρες των ράβδων θωράκισης των διακοπών και του εξοπλισμού ανάρτησης. Θα πρέπει να χρησιμοποιούνται συσκευές που να μειώνουν την corona με στόχο την μείωση των επιφανειακών ηλεκτρικών πεδίων στο υλικό, ειδικά στις άκρες των ράβδων θωράκισης, σε επίπεδα σημαντικά μικρότερα από 20 kV/cm, όπου συνήθως αναπτύσσεται. Οι συσκευές αυτές είναι απαραίτητες σε γραμμές μεταφοράς 230 kV και άνω. Έχει παρατηρηθεί ότι όταν υπάρχουν «τραχιές» άκρες στο καλώδιο τότε το φαινόμενο corona μπορεί να αναπτυχθεί ακόμα και σε 14 kV/cm άρα οι διατάξεις πρέπει να παίρνουν ακόμα χαμηλότερο όριο ασφαλείας στα 10 kV/cm

(IEEE Std 1222™, 2019)

Επίδραση ηλεκτρικών πεδίων

Δυναμικό χώρου (space potential) είναι: «η διαφορά τάσης στο χώρο μεταξύ αντικειμένων που μεταφέρουν ενέργεια, όπως είναι οι αγωγοί μία γραμμής μεταφοράς υψηλής τάσης, και αντικειμένων που δεν έχουν ενέργεια. Μονάδα μέτρησής του είναι τα Volt και είναι μαθηματικά βαθμωτό μέγεθος» (IEEE Std 1222™, 2019, p. 38).

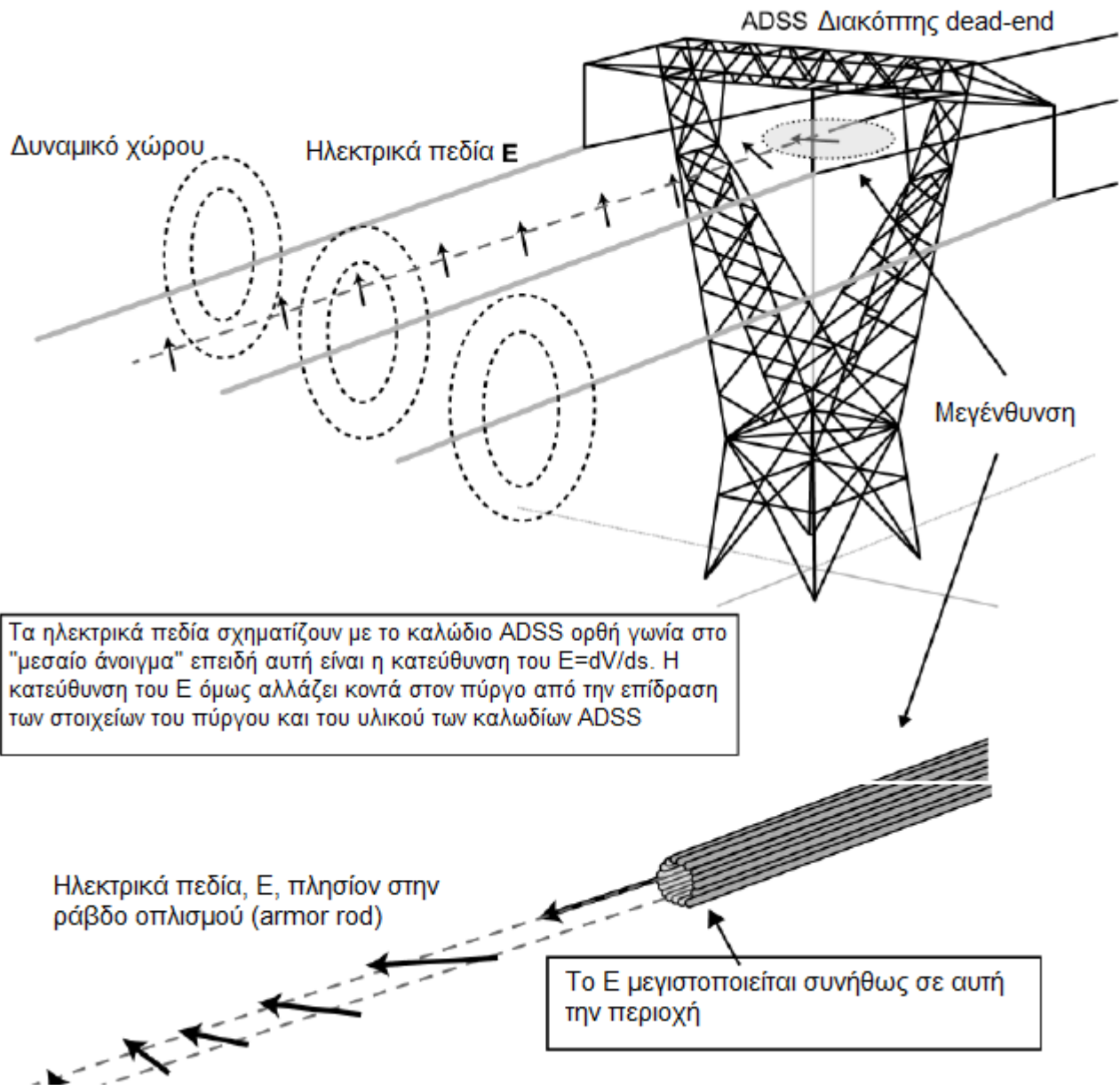
Σε πύργους υπερυψηλής τάσης όπου τα καλώδια οπτικών ινών ADSS και οι ηλεκτρικοί αγωγοί είναι σε παραλληλία, για να βρεθούν τα ελάχιστα ηλεκτρικά πεδία που θα καθορίσουν την κατασκευή χρησιμοποιούνται τα δυναμικά του χώρου. Ο κατασκευαστής θα πρέπει να παρέχει την θέση τοποθέτησης του καλωδίου ADSS σε σχέση με κάθε αγωγό όπως και με την τάση και τη φάση του αγωγού. Έτσι γίνεται εφικτός ο υπολογισμός του δυναμικού χώρου στα σημεία τοποθέτησης του καλωδίου ADSS



Σχήμα 12 -Παράδειγμα καλωδίωσης ADSS που διέρχεται από το δυναμικό του χώρου κοντά σε μια τυπική κατασκευή υψηλής τάσης

Το δυναμικό χώρου V υπολογίζεται στη μέση του ανοίγματος μακριά από τον πύργο υπερυψηλής τάσης. Οι αγωγοί θεωρούνται με άπειρο μήκος και παράλληλη συνδεσμολογία και ως αποτέλεσμα είναι υπολογισμός του σε δύο διαστάσεις. Οι τυχόν επιδράσεις του πύργου και του υλικού δεν μπορούν να συμπεριληφθούν στον υπολογισμό (IEEE Std 1222™, 2019).

Ένταση του ηλεκτρικού πεδίου θεωρείται: «η αλλαγή στο δυναμικό του χώρου με την μεταβολή της απόστασης. Συμβολίζεται με E και είναι περίπου ίσο με dV/ds . Η ένταση είναι διανυσματικό μέγεθος και μετριέται σε Volt/μέτρο, kVolt/μέτρο ή KVolt/εκατοστόμετρο). Η κατεύθυνση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο χώρο δίνεται από τα μοναδιαία διανύσματα διεύθυνσης μονάδας U_x, U_y, U_z » (IEEE Std 1222™, 2019, p. 39)

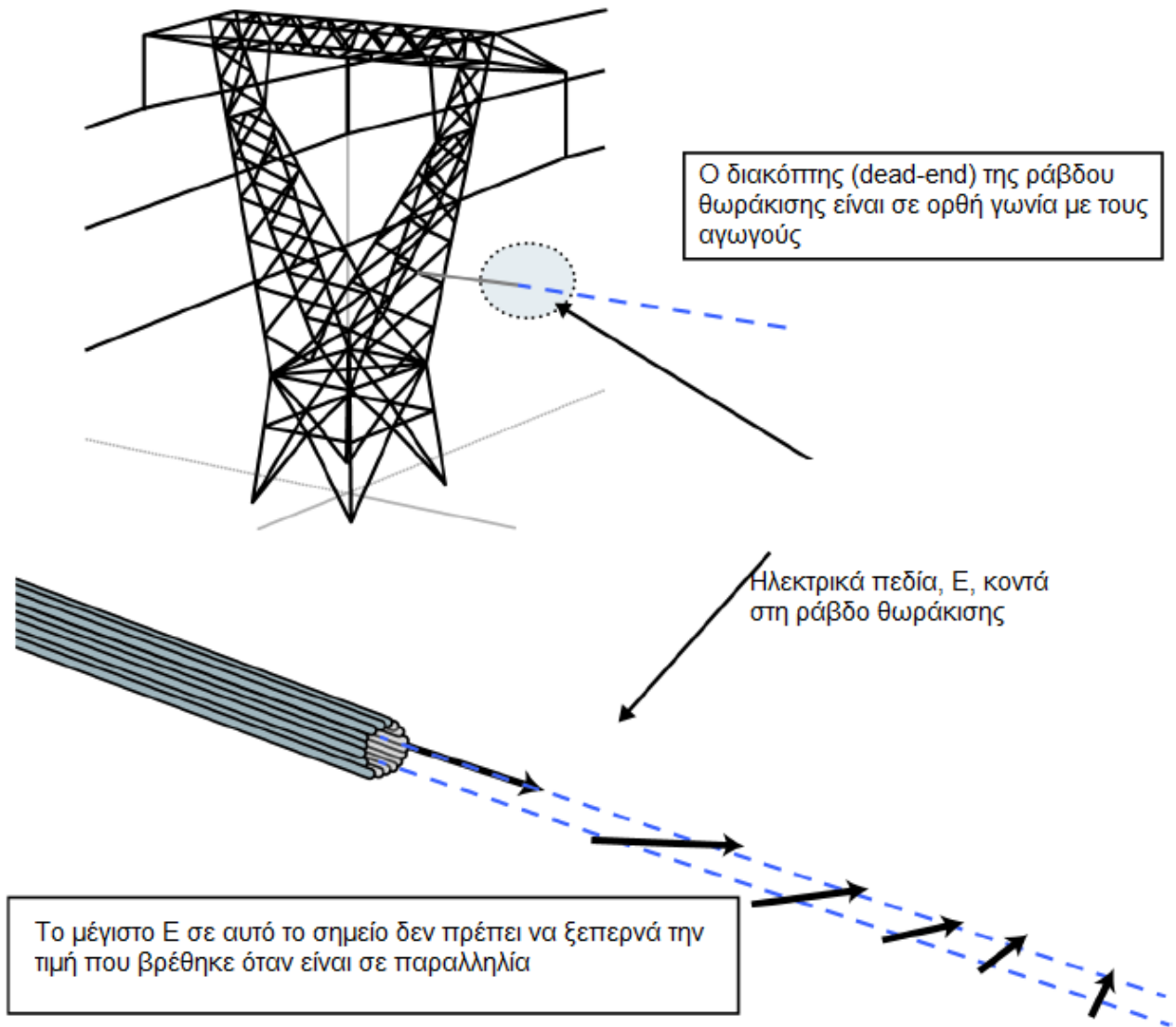


Σχήμα 13 - Παράδειγμα καλωδίωσης ADSS μέσα σε ηλεκτρικά πεδία (παράλληλη συνδεσμολογία) κοντά σε μια τυπική κατασκευή υψηλής τάσης

Όταν οι αγωγοί που μεταφέρουν την ηλεκτρική ισχύ και τα καλώδια ADSS δεν είναι σε παραλληλία, για παράδειγμα όταν είναι σε ορθή γωνία μεταξύ τους σε έναν πύργο, θα πρέπει να γίνουν υπολογισμοί στις τρεις διαστάσεις για να υπολογιστούν τα ηλεκτρικά πεδία. Το πρότυπο αναγνωρίζει ότι δεν έχουν θεσπιστεί ανώτατα όρια πεδίου.

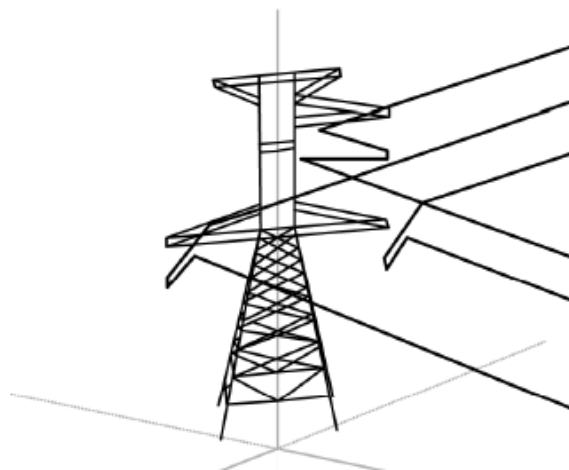
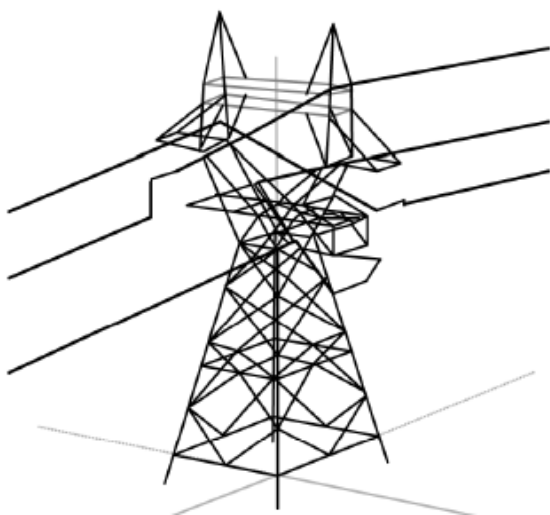
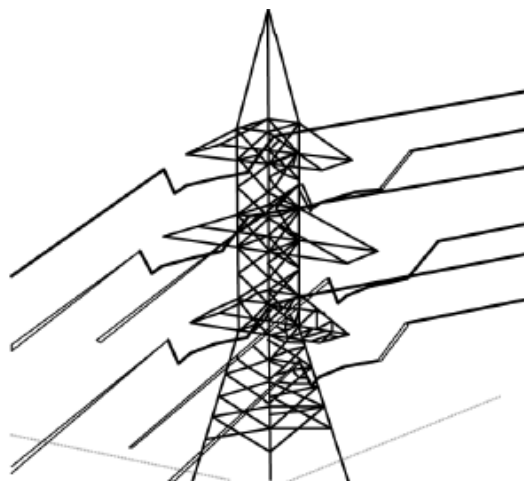
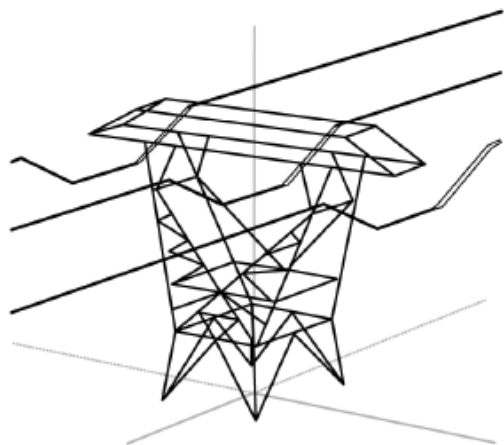
Ο κατασκευαστής θα πρέπει να επιλέξει μία θέση όπου το καλώδιο ADSS και ο αγωγός θα είναι σε παραλληλία και θα ικανοποιούνται οι μέγιστες ηλεκτρικές απαιτήσεις. Μέσω υπολογισμού σε τρεις διαστάσεις πρέπει να υπολογίσει τα ηλεκτρικά πεδία στο καλώδιο ADSS κοντά στο μεταλλικό υλικό υποστήριξης. Αν από το αποτέλεσμα της σύγκρισης

προκύπτει ότι το ηλεκτρικό πεδίο κατά την μη παράλληλη συνδεσμολογία είναι μικρότερο ή ίσο από αυτό της παράλληλης τότε η εγκατάσταση είναι αποδεκτή.



Σχήμα 14 - Παράδειγμα καλωδίωσης ADSS μέσα σε ηλεκτρικά πεδία (MH παράλληλη συνδεσμολογία) κοντά σε μια τυπική κατασκευή υψηλής τάσης

(IEEE Std 1222™, 2019)



Σχήμα 15 - Παραδείγματα κατασκευών που απαιτούν τρισδιάστατη και μη παράλληλη ανάλυση για τη θέση των διακοπών και των αναρτήσεων καλωδίων ADSS

(IEEE Std 1222™, 2019)

4.1.3 IEEE NESC 2023 – τελευταίες εξελίξεις

Στον τελευταίο κώδικα του 2023 έχουν γίνει σημαντικές αλλαγές στις μονάδες μέτρησης με στόχο να περιοριστούν τα λάθη στην εφαρμογή των κανόνων ασφαλείας. Παντού οι μονάδες μέτρησης αναφέρονται πρώτα στο αμερικανικό σύστημα CGS και μετά το βρετανικό και ευρωπαϊκό SI (Marne & Palmer, 2023).

Στο κεφάλαιο των ελαχίστων αποστάσεων ασφαλείας διασαφηνίζεται η ασφαλής χρήση μη επικίνδυνων καλωδίων οπτικών ινών κατά την επέκταση των τηλεπικοινωνιακών δικτύων.

Ακόμη εμπεριέχονται τροποποιήσεις για τις περιπτώσεις ισχυρών ανέμων που πλήττουν εναέριες γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος. Αξιοποιούνται τα μετεωρολογικά δεδομένα των τελευταίων 100 ετών και παρουσιάζονται δύο (2) διαφορετικοί χάρτες των τελευταίων 50 και 100 ετών. Σε αυτή την κατεύθυνση αξιοποιούνται οι τελευταίες πρακτικές μηχανολογικής και ηλεκτρικής εγκατάστασης ώστε να καθοριστούν οι αντοχές στα φορτία των ανέμων. Ειδική μνεία γίνεται για την σήμανση των αγκυρών προτόνου (anchor guy) που μπορεί να τοποθετούνται σε σημεία που διαβαίνουν πεζοί για την αποφυγή ατυχημάτων (Bingel, 2022)

Καθώς ο στόχος του κώδικα είναι να ανανεώνεται ώστε να μπορεί να προσαρμόζεται στις πρόσφατες εφευρέσεις και τεχνολογίες, προβλέπονται αλλαγές σχετικά με διατάξεις όπως συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας όπως ηλιακά πάνελ, ανεμογεννήτριες, και τα συναπτά συστήματα δικτύων ενέργειας μικρής κλίμακας που χρησιμεύουν στην αποθήκευση σε μπαταρίες και τη διανομή τους, αλλά και ηλεκτρονικά τηλεπικοινωνιακά συστήματα ελέγχου.

Πιο συγκεκριμένα:

- ενσωματώνονται δύο νέοι κανονισμοί για μπαταρίες οι οποίες δεν αντιμετωπίζονται πλέον ως πηγές ενέργειας σε περίπτωση ανάγκης
- Ανανεώνεται δομικά ο κανονισμός για τους φωτοβολταϊκούς σταθμούς μεγάλης κλίμακας, περιλαμβάνοντας την ασφαλή τοποθέτηση, γείωση, διαχείριση, προστασία από υπερτάσεις και μετασχηματιστές
- Τροποποιείται ο κανονισμός για τις κεραιές για να γίνει καλύτερα κατανοητός από τον μέσο πολίτη.
- Αναγνωρίζεται ότι υπάρχει μικρή τεχνογνωσία για τα δίκτυα 5G και όπου μπορεί να αξιοποιηθεί η χρήση Συστημάτων ισχύος με διαχείριση σφαλμάτων (Fault Managed Power Systems - FMPS)

NESC 2023

Αναθεώρηση Βασικών Κανόνων

RULES **190-195**

Νέοι κανονισμοί για φωτοβολταϊκούς σταθμούς

RULE **116c**

προσθήκη εξαιρέσεων για την παροχή προστασίας από βραχυκυκλώματα σε μονωμένα καλώδια ρεύματος με τάση κάτω των 1000 Volt

RULE **320B**

προσθήκη εξαιρέσεων για διαχωρισμό μεταξύ τηλεπικοινωνιών και παροχή τάσης σε διαφορετικούς αγωγούς

TABLE **410-4**

Προσθήκη πίνακα με πρόσφατε δοκιμές φαινομένου διηλεκτρικού τόξου σε μετασχηματιστές

RULE **092A**

Προσθήκη εξαιρέσης για την υποχρέωση γείωσης για τις μπαταρίες

RULES **234**

B1, C1, D1

διασαφήνιση των αποστάσεων ασφαλείας σε περίπτωση καταβατικών και αναβατικών ανέμων

RULE **120A**

διορθώσεις σχετικά με τις αποστάσεις ασφαλείας σε υψηλότερα υψόμετρα

TABLE **253-1**

απαιτήση συγκεκριμένου προγράμματος πρόγραμμα ασφαλείας ραδιοσυνητήτων για τους εναλλόμενους μειωμένος Συντελεστής Φορτίου για ενισχυμένα με τνες πολυμερή συστατικά υπό τάση σύρματος, συμπεριλαμβανομένων των αδιεξόδων

RULE **410A**

4.2 ΕΛΟΤ EN 50174.03 Ευρωπαϊκό Πρότυπο

Το πρότυπο που είναι εν ισχύ για σχεδιασμό και εγκαταστάσεις οπτικών ινών εκτός κτιρίων είναι το EN 50174.3. Το πρότυπο περιλαμβάνει τους κανόνες ασφαλείας, λειτουργίας και προστασίας του περιβάλλοντος αλλά δεν ασχολείται με τον σχεδιασμό των διαδρομών, των χώρων για την καλωδίωση του πυρήνα και του υπόλοιπου δικτύου, στοιχεία τα οποία εναπόκεινται στις εθνικές νομοθεσίες (ANIXTER, 2019)

Σύμφωνα με την ελληνική νομοθεσία, και πιο συγκεκριμένα τον Νόμο 3431/2006 και τα άρθρα 4 και 6δμ το Υπουργείο Μεταφορών και Επικοινωνιών είναι αρμόδιο για την τυποποίηση και πιστοποίηση εξοπλισμού και υπηρεσιών τηλεπικοινωνιών και την ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα (N 3431/2006). Κάθε εγκατάσταση οποιοδήποτε τηλεπικοινωνιακού δικτύου εκτός κτιρίων στην Ελλάδα, άρα και οπτικών ινών, πρέπει να συμμορφώνονται με το πρότυπο (standard): ΕΛΟΤ EN50174-3 με τίτλο: *Τεχνολογία πληροφοριών– Εγκατάσταση καλωδίωσης* (Αγγέλου et al., 2009). Ειδικά για τα καλώδια

οπτικών ινών ισχύει το μέρος 3: *Σχεδίαση και πρακτικές εγκατάστασης εξωτερικές των κτιρίων* το οποίο συμπληρώνεται από τα πρότυπα:

- ΕΛΟΤ EN 60794: Καλώδια οπτικών ινών: Μέρος 3: *Τμηματική προδιαγραφή – Καλώδια εξωτερικής χρήσης*
- ΕΛΟΤ EN 60794: Καλώδια οπτικών ινών: Μέρος 3–10: *Καλώδια εξωτερικής χρήσης – Προδιαγραφή οικογένειας για οπτικά τηλεπικοινωνιακά καλώδια τοποθετημένα σε σωληνώσεις ή απευθείας θαμμένα*
- ΕΛΟΤ EN 60794: Καλώδια οπτικών ινών – Μέρος 3–12: *Καλώδια εξωτερικής χρήσης – Λεπτομερής προδιαγραφή για οπτικά τηλεπικοινωνιακά καλώδια τοποθετημένα σε σωληνώσεις ή απευθείας θαμμένα, για χρήση σε καλωδίωση χώρων*
- ΕΛΟΤ EN 60794–4–10: *Ινοοπτικά καλώδια– Μέρος 4–10: Εναέρια οπτικά καλώδια κατά μήκος γραμμών ηλεκτρικής ενέργειας – Οικογένεια προδιαγραφών για OPGW (Οπτικά σύρματα γης)*

(Μπενμαγιώρ, 2009)

4.2.1 Αποστάσεις ασφαλείας μεταξύ τηλεπικοινωνιακών καλωδίων και καλωδίων μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος

Βασικό στοιχείο του προτύπου είναι ο καθορισμός των επιτρεπτών σημείων τοποθέτησης των καλωδίων τηλεπικοινωνιών. Αυτά πρέπει να τοποθετούνται χαμηλότερα από τα καλώδια μεταφοράς της ηλεκτρικής ισχύος και σε αποστάσεις τουλάχιστον μισού μέτρου από τα μονωμένα καλώδια παροχής ηλεκτρικής ισχύος για μέσες τάσεις εναλλασσόμενου ρεύματος μικρότερες των 1000 Volt (ΕΛΟΤ EN 50174-3/A1).

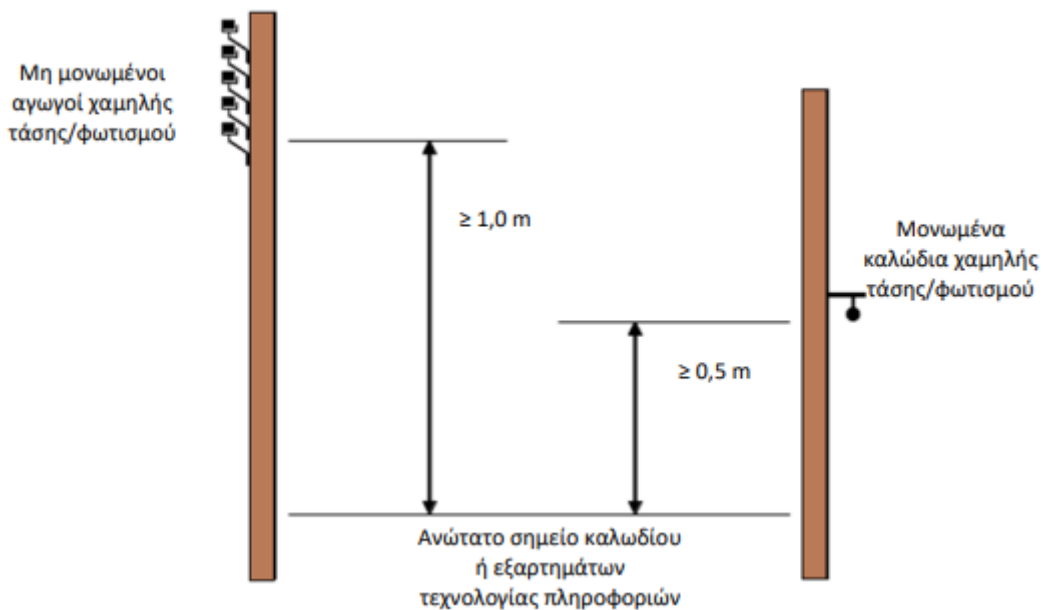
Πίνακας 4 - Ελάχιστες αποστάσεις ασφαλείας μεταξύ καλωδίων μεταφοράς τηλεπικοινωνιών και καλωδίων μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ισχύος σε εναέρια γραμμές μεταφοράς (ενεργός τάση < 1000 Volt)

| | Μονωμένα καλώδια παροχής ηλεκτρικής ισχύος | Μη μονωμένοι αγωγοί παροχής ηλεκτρικής ισχύος | Στύλοι |
|--------------------------|---|--|---------------|
| Τηλεπικοινωνιακά καλώδια | 0,5 μέτρο | 1 μέτρο | 0,5 μέτρο |
| Κολώνες τηλεπικοινωνιών | 0,5 μέτρο | 1 μέτρο | 0,5 μέτρο |

Η ελάχιστη απόσταση είναι 2 μέτρα για τάσεις εναλλασσόμενου ρεύματος μεγαλύτερες των 1000 Volt. Για τα μη μονωμένα καλώδια οι αποστάσεις αυξάνονται σε 1 m για τάσεις μικρότερες των 1000 Volt

Πίνακας 5 - Ελάχιστες αποστάσεις ασφαλείας μεταξύ καλωδίων μεταφορά τηλεπικοινωνιών και καλωδίων μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ισχύος σε εναέριες γραμμές μεταφοράς (ενεργός τάση > 1500 Volt)

| | Καλώδια ή/και αγωγοί παροχής ηλεκτρικής ισχύος | Στύλοι |
|--------------------------|--|---------|
| Τηλεπικοινωνιακά καλώδια | $1,5 + (0,015 \times \text{τάση τροφοδοσίας σε kV})$ μέτρα | 1 μέτρο |
| Κολώνες τηλεπικοινωνιών | $3 + (0,015 \times \text{τάση τροφοδοσίας σε kV})$ μέτρα | 1 μέτρο |



Σχήμα 16 - Παραστατική απεικόνιση ελαχίστων αποστάσεων ασφαλείας σε στύλους μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος

4.2.2 Απαιτήσεις ασφαλείας στήριξης των εγκαταστάσεων

Εφόσον πρόκειται για καλώδια τηλεπικοινωνιών που θα εγκατασταθούν στην ήδη υπάρχουσα υποδομή μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος τότε ισχύουν οι ίδιες προδιαγραφές για τα εξαρτήματα στήριξης τους στύλους μεταφοράς και τις αναμονές και αντηρίδες (ΕΛΟΤ EN 50174-3/A1).

Στα καλώδια OPGW οι οπτικές ίνες τοποθετούνται στο ψηλότερο σημείο του πυλώνα και αντικαθιστά το καλώδιο γείωσης της εγκατάστασης. Οι αποστάσεις των πυλώνων συνήθως

είναι στα 500 μέτρα μεταξύ τους και το μήκος των γραμμών φτάνει μέχρι και τα 10 χιλιόμετρα (Παναγογιαννόπουλος, 2008)

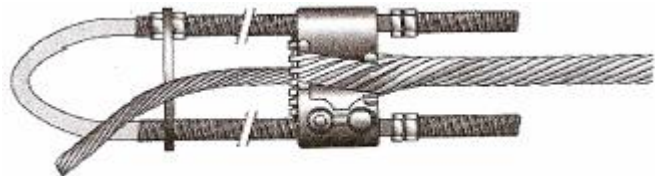


Εικόνα 1 - Σημείο τοποθέτησης καλωδίου οπτικής ίνας OPGW σε πυλώνα υπερυψηλής τάσης
(Παναγογιαννόπουλος, 2008)

Τα καλώδια οπτικών ινών στερεώνονται σε ειδικά εξαρτήματα που καταλήγουν σε μεταλλικούς συνδέσμους όπως στην παρακάτω εικόνα:



(α)



(β)

Εικόνα 2 -(α) μεταλλικός σύνδεσμος πρόσδεσης καλωδίου οπτικής ίνας στον πυλώνα υπερυψηλής, (β) σχηματική αναπαράσταση του τελικού σημείου πρόσδεσης

Γενικά θεωρείται ότι η εισαγωγή επιπλέον γραμμών σε δίκτυο που υπάρχει ήδη, και οι ταλαντώσεις επιβαρύνουν περαιτέρω την στήριξη. Η αντιστήριξη θα πρέπει να είναι τέτοια που να αντέχει το μέγιστο δυνατό φορτίο και να λαμβάνει υπόψη και την παλαιότητα των πυλώνων μεταφοράς του ηλεκτρικού δικτύου, όπως και πιθανές διαβρώσεις του εδάφους που συνέβησαν με την πάροδο των ετών (Αγγέλου et al., 2009)



Εικόνα 3 - Εγκατάσταση οπτικής ίνας σε πυλώνα μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος

(Αγγέλου et al., 2009)

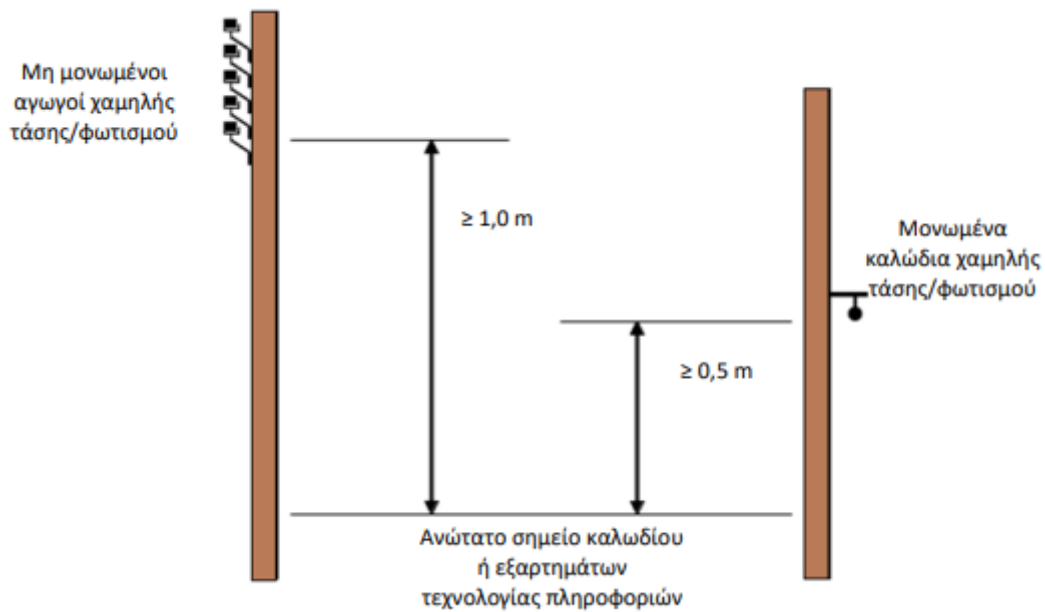
Γενικά τα καλώδια τοποθετούνται μέσω έλξης η οποία επιτυγχάνεται με τροχαλίες οι οποίες έχουν εγκατασταθεί από πριν και τεντώνονται από σφιγκτήρες τεντώματος και κρεμάσματος στους πυλώνες. Η εγκατάσταση συμβαίνει όταν δεν υπάρχουν ακραίες καιρικές συνθήκες βροχής ή έντονης ξηρασίας αλλά με την πάροδο του χρόνου οι περιβαλλοντικές συνθήκες: άνεμος, υγρασία, ξηρασία, θερμοκρασία επηρεάζουν την πίεση του καλωδίου. Γενικά τα καλώδια μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος εμφανίζουν μεγάλη αντοχή στον εφελκυσμό σε αντίθεση με τα καλώδια οπτικών ινών. Είναι κάτι που πρέπει να λάβει σοβαρά υπόψη ο εγκαταστάτης και ο συντηρητής (Αγγέλου et al., 2009). Γενικά τοποθετείται ανάρτηση η οποία περιορίζει το πλάτος της αξονικής τάνυσης η οποία φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:



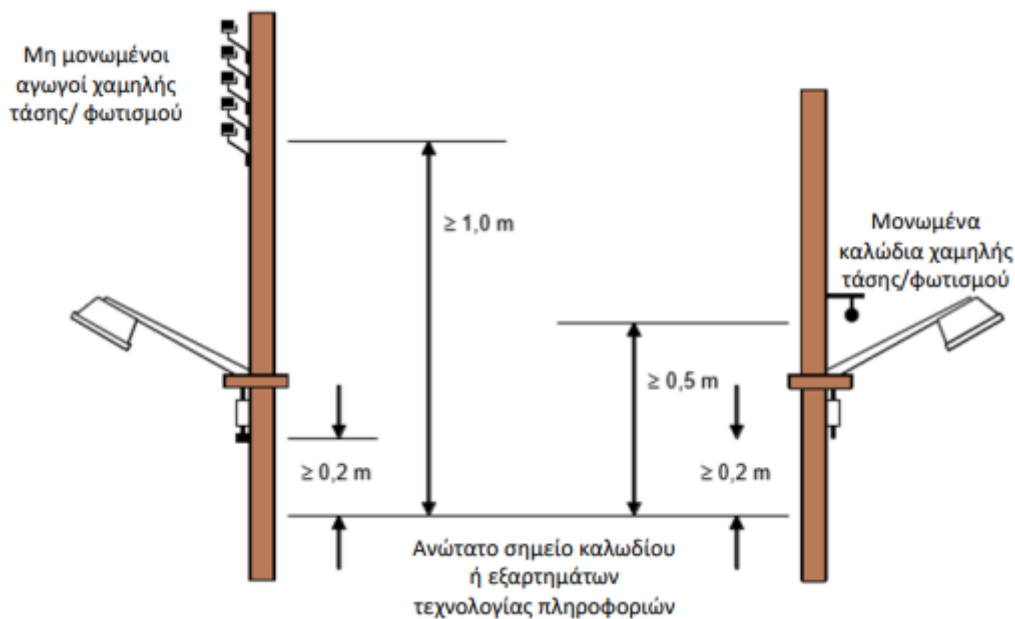
Εικόνα 4 - Ανάρτηση καλωδίου οπτικής ίνας

(Παναγογιαννόπουλος, 2008)

Επίσης ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται για την στήριξη θα πρέπει να έχει διηλεκτρική αντοχή 4000 Volt στα 50 Hz για 60 δευτερόλεπτα. Πρέπει επομένως να υπάρχει πρόβλεψη για στήριξη η οποία δεν θα επηρεάζεται από την εγκατάσταση, επισκευή, αντικατάσταση και αφαίρεση των τηλεπικοινωνιακών καλωδίων (ΕΛΟΤ EN 50174-3/A1).



Σχήμα 17 - Ελάχιστες αποστάσεις εξαρτημάτων και καλωδίων σε εγκαταστάσεις σε στύλους



Σχήμα 18 - Ελάχιστες αποστάσεις εξαρτημάτων και καλωδίων που συνυπάρχουν με συσκευές φωτισμού

Η ελάχιστη απόσταση των τηλεπικοινωνιακών καλωδίων από το έδαφος σε γραμμές εναέριας μεταφοράς είναι 4 μέτρα και αυτό στην περίπτωση που στο έδαφος δε υπάρχει περίπτωση διέλευσης πεζού ή κάποιου οχήματος μεταφοράς. Η ανώτερη απόσταση (6m) εφαρμόζεται στις κύριες οδικές αρτηρίες, αυτοκινητοδρόμους και μη ηλεκτροκίνητους σιδηροδρόμους. Στον παρακάτω πίνακα αναγράφονται οι ελάχιστες αποστάσεις από τις οδεύσεις του εδάφους.

Πίνακας 6 - Ελάχιστες αποστάσεις ασφαλείας από το έδαφος για την εγκατάσταση τηλεπικοινωνιακών καλωδίων σε γραμμές εναέριας μεταφοράς

| Τοποθεσίες | Ελάχιστη απόσταση |
|---|-------------------|
| Αυτοκινητόδρομοι | 6 μέτρα |
| Κύριοι δρόμοι | 6 μέτρα |
| Μη ηλεκτρικοί συρμοί | 6 μέτρα |
| Μικρές διασταυρώσεις οδών | 5,5 μέτρα |
| Περιοχές πρόσβασης σε οχήματα (πάρκινγκ κα) | 5,5 μέτρα |
| Οδοί γηπέδων | 5,5 μέτρα |
| Είσοδοι σε κτιριακά συγκροτήματα | 5,5 μέτρα |
| Χώροι που δε διέρχονται οχήματα | 4 μέτρα |
| Κήποι και άλλοι ειδικοί χώροι | 3 μέτρα |

(ΕΛΟΤ 50174.03, Προσάρτημα Α)

4.2.3 Προδιαγραφές καλωδίων, και ασφάλεια από υπερτάσεις και περιβαλλοντικές συνθήκες

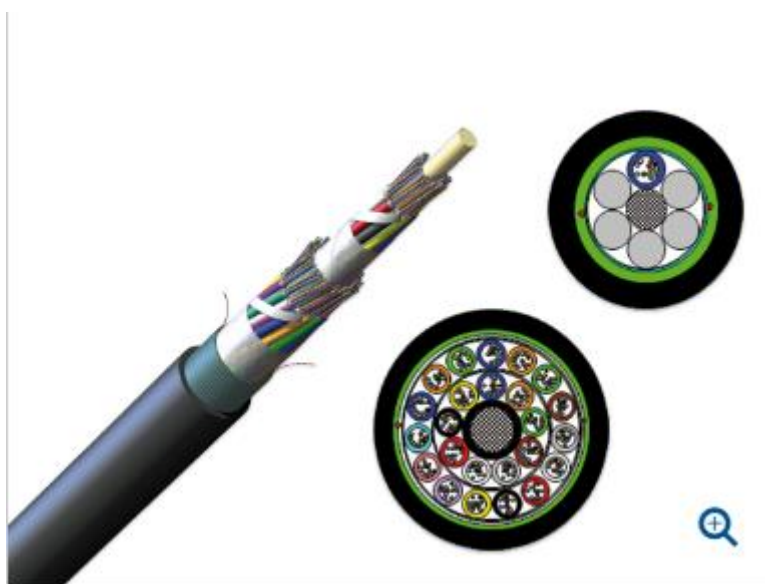
Τα καλώδια θα πρέπει να έχουν κατασκευαστεί σύμφωνα με το γενικό πρότυπο ΕΛΟΤ EN 50173.1 και ο εξοπλισμός θα πρέπει να αποτελείται από εξαρτήματα και να έχει κατασκευαστεί με τέτοιο τρόπο ώστε να δείχνει αντοχή στις περιβαλλοντικές συνθήκες της περιοχής (ηλιοφάνεια, άνεμοι, θερμοκρασία, σχετική υγρασία, ψύχος, πάγος) σύμφωνα με το σύστημα κατάταξης MICE το οποίο περιγράφει τις περιβαλλοντικές συνθήκες που εγκαθίσταται ένα κανάλι επικοινωνίας σύμφωνα με τις παραμέτρους:

- Μηχανικής Αντοχής (M)
- Καθαρότητας και Στεγανότητας (I)
- Κλιματολογικής και Χημικής Αντοχής (C)
- Ηλεκτρομαγνητικής Συμβατότητας (E)

(ΦΕΚ 2776/2012)

Ο έλεγχος των εγκαταστάσεων γίνεται με βάση τα πρότυπα ΕΛΟΤ EN50364, EN 50173.1, ISO/IEC 11801 και ISO/IEC 14763.3 (ΦΕΚ 2776/2012) και οι οπτικές ίνες με βάση τα πρότυπα ISO/IEC 60793.1 και 60794.4.10 (Αγγέλου et al., 2009)

Κατά το παρελθόν έχουν χρησιμοποιηθεί στην Ευρώπη καλώδια οπτικών συρμάτων γης (OPGW-DAB) των τύπων : OPGW-DAB: 1x12E10/125 0.25H3.7 1x36 E9/1250.36F3.5 και 0.22H18 (ACS49)



Εικόνα 5 - OPGW-DAB: 1x12E10/125

Το καλώδιο της παραπάνω εικόνας περιέχει:

- 12NZD5 ίνες με μήκος κύματος μεταξύ 1530 και 1565 νανόμετρα και μεταξύ 1565 και 1625 νανόμετρα
- 36SM ίνες με μήκος κύματος μεταξύ 1310 και 1550 νανόμετρα
- Κεντρικό σωλήνα απομόνωσης
- Τέσσερις σωλήνες μικρής διατομής χωρητικότητας δώδεκα οπτικών ινών
- Θωράκιση με σύρματα αλουμινίου

(Green, 1994; Παναγογιαννόπουλος, 2008)

Σε κάθε καλώδιο οπτικών ινών περιλαμβάνονται 12 ίνες με τα παρακάτω χρώματα:

Πίνακας 7 - Κωδικοποίηση χρωμάτων οπτικής ίνας OPGW-DAB: 1x12E10/125 0.25H3.7 1x36 E9/1250.36F3.5

| αρίθμηση οπτικής ίνας | χρώμα οπτικής ίνας |
|-----------------------|--------------------|
| 1 | κόκκινο |
| 2 | πράσινο |
| 3 | κίτρινο |
| 4 | καφέ |
| 5 | μπλε |
| 6 | μωβ |
| 7 | γκρι |
| 8 | πορτοκαλί |
| 9 | ροζ |
| 10 | άσπρο |
| 11 | μαύρο |
| 12 | τυρκουάζ |

(Παναγογιαννόπουλος, 2008)

Ο πυρήνας του καλωδίου πληρώνεται με σιλικόνη για την αποτροπή εισροής νερού και αποτελείται από έναν κεντρικό απομονωτικό σωλήνα που περιέχει με την σειρά του 4 σωλήνες με διαφορετικό χρωματισμό (σωλήνας:1 μπλε, σωλήνας 2: πορτοκαλί, σωλήνας 3: πράσινο, σωλήνας: 4 καφέ) οι οποίοι περιέχουν από 12 οπτικές ίνες, άρα συνολικά 48 ίνες ανά καλώδιο. Γύρω από τον πυρήνα τοποθετείται σώμα θωράκισης από σύρματα αλουμινίου για προστασία από κεραυνοπληξία ή θραύσματα από κυνηγετικό όπλο (Green, 1994; Παναγογιαννόπουλος, 2008).

Γενικά οι οπτικές ίνες ελέγχονται ως προς την λειτουργία και την απόδοση με τα παρακάτω εργαλεία:

- μετρητή οπτικής ισχύος
- οπτική πηγή φωτός
- μετρητή οπτικής απώλειας
- αναγνωριστής ίνας
- σετ ομιλίας
- οπτικό ανακλασίμετρο
- αναλυτή οπτικού φάσματος
- εξασθενητής οπτικής ίνας
- μετρητή αντανάκλασης
- σετ εύρους ζώνης
- τοπικό ανιχνευτή εμβολής

(Αγγέλου et al., 2009)

Η συνολική εγκατάσταση θα πρέπει να έχει πρόβλεψη ειδικής διάταξης για την προστασία του εξοπλισμού, του εγκαταστάτη αλλά και του τελικού χρήστη από υπερτάσεις σύμφωνα με το πρότυπο: ISO IEC/HD 60364-4-44. Οι εναέριες γραμμές μεταφοράς τηλεπικοινωνιών υπόκεινται σε πιθανές άμεσες κεραυνοπληξίες πάνω στον εξοπλισμό ή σε έμμεσες κεραυνοπληξίες σε κοντινά κτίρια ή δέντρα (φαινόμενο επαγωγής).



Σχήμα 19 - Άμεση κεραυνοπληξία στις γραμμές παροχής



Σχήμα 20 - Έμμεση κεραυνοπληξία στις γραμμές παροχής

4.3 Πρότυπα που εφαρμόζονται στην Ιταλία

Στην Ιταλία έχει τεθεί από τις 27 Ιουνίου 2023 σε δημόσια διαβούλευση από την Εθνική Ιταλική Αρχή για την Εγγύηση της Λειτουργίας και Ασφάλειας των Τηλεπικοινωνιών (Autorita Per Le Garanzie Nelle Comunicazioni - AGCOM) ο καθορισμός των τεχνικών προτύπων για στα οποία πρέπει να συμμορφωθούν οι νικητές των διαγωνισμών κατά την εγκατάσταση των καλωδίων οπτικών ινών. Τελευταία ενημέρωση του αρχείου έχει γίνει στις 10 Ιουλίου του 2023 αλλά είναι άγνωστο αν έχει ενσωματωθεί στην ιταλική νομοθεσία με την μορφή κανονισμού (Avvio Del Procedimento e Della Consultazione Pubblica Concernente La Definizione Degli Standard Tecnici per i Cavi in Fibra Ottica a Cui Devono Attenersi Gli Aggiudicatari Dei Bandi per La Realizzazione Dell'infrastruttura Di Rete, 2023)

Το πρότυπο αναφέρει ότι για εναέριες υποδομές τηλεπικοινωνιών είναι απαραίτητο να ενσωματώνονται:

1. μικροκαλώδια για εγκατάσταση σε εξωτερικούς χώρους σε αυτοφερόμενο στήριγμα,
2. αυτοφερόμενα καλώδια

Στο κεφάλαιο 4 και στην παράγραφο 4.1 με τίτλο: «*Τεχνική Προδιαγραφή - Καλώδια οπτικών ινών για εναέρια εγκατάσταση*» αναφέρει ότι: "Οι ίνες θα πρέπει να είναι μονοτροπικές μη μετατοπισμένης διασποράς εκτεταμένης ζώνης (SM) των οποίων τα οπτικά, μηχανικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά πρέπει να συμμορφώνονται με τα πρότυπα ITU-T G.657 A1/A2".

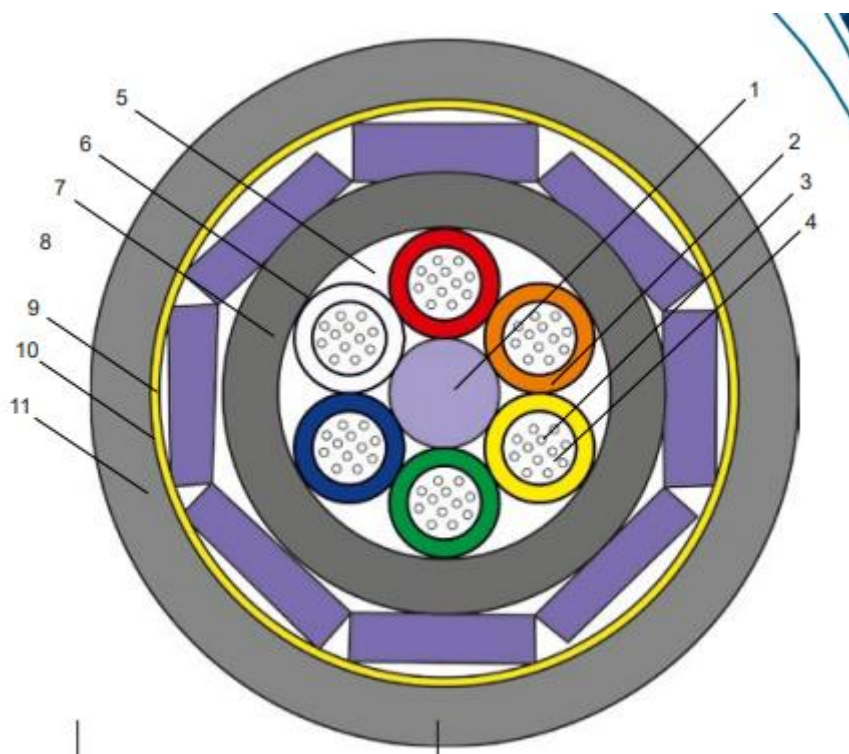
Σχετικά με τον τύπο των καλωδίων το προτεινόμενο πρότυπο δεν παίρνει σαφή θέση και δίνει στον κατασκευαστή τη διακριτική ευχέρεια επιλογής αρκεί να εξασφαλίζονται:

- Οι κατάλληλες συνθήκες υποδομής και κατασκευής
- Υψηλής ποιότητας και απόδοσης συνδεσιμότητας

Παρόμοια εκτίμηση γίνεται και τα γεωμετρικά και μηχανικά κατασκευαστικά χαρακτηριστικά για θωράκιση, αντίσταση σε καύση κα για τα οποία θεωρείται ότι εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από το πλαίσιο κατασκευής (constructional framework) (Avvio Del Procedimento e Della Consultazione Pubblica Concernente La Definizione Degli Standard Tecnici per i Cavi in Fibra Ottica a Cui Devono Attenersi Gli Aggiudicatari Dei Bandi per La Realizzazione Dell'infrastruttura Di Rete, 2023).

Ένας από τρόπους για να αναζητήσει ένας ερευνητής τι εφαρμόζεται στην Ιταλία είναι να αναζητήσει τα τεχνικά πρότυπα ιδιωτικών εταιρειών που εγκαθιστούν εναέριες οπτικές ίνες σε γραμμές ηλεκτρικής ισχύος όπως κάνει η κατασκευαστική εταιρεία *ENEL* η οποία δραστηριοποιείται στην Ιταλία και σε άλλες 30 χώρες. Οι εναέριες τηλεπικοινωνιακές γραμμές ηλεκτρικής ισχύος της πόλης του Μπέργκαμο το 2015 με καλώδια οπτικών ινών OPGW με 24 οπτικές ίνες (ENEL, 2015).

Το γεγονός ότι το νέο πρότυπο απαιτεί αυτοφερόμενα καλώδια οδήγησε την ENEL στον νέο κατάλογό της να αντικαταστήσει τα OPGW με καλώδια ADSS 24, 48 και 72 οπτικών ινών αντίστοιχα με τις προδιαγραφές του παρακάτω σχήματος:



Σχήμα 21 - Καλώδιο ADSS για προστασία από βλήματα κινηγετικών όπλων

- | | |
|---|-------------------------------------|
| 1. Κεντρικό στοιχείο στο υαλούφασμα (fiberglass) | 6. Απολίνωση ή επίδεσμος |
| 2. Χαλαρός σωλήνας (Loose tube) με ενσωματωμένες οπτικές ίνες | 7. Εσωτερική θήκη πολυαιθυλενίου |
| 3. Οπτικές ίνες (12 ανά σωλήνα) | 8. Ενίσχυση με στρώσεις υαλοβάμβακα |
| 4. Εσωτερικό συνθετικό ρυθμιστικό διάλυμα | 9. Σύρμα αποκοπής περιβλήματος |
| 5. Πυρήνας «ξηρού πυρήνα» αποτελούμενος από νήματα ή/και υγροδιογκώσιμες ίνες | 10. Ενισχυτικά νήματα αραμιδίου |
| | 11. Εξωτερική θήκη πολυαιθυλενίου |

(ENEL, 2023)

Στον παρακάτω πίνακα απεικονίζονται όλα τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά των καλωδίων οπτικών ινών ADSS που εγκαθίστανται σε γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος στον Ιταλικό Βορρά.

Πίνακας 8 - Κατασκευαστικά χαρακτηριστικά καλωδιώσεων οπτικών ινών ADSS στην Ιταλία

| Χαρακτηριστικά διάστασης του καλωδίου | | Μέγιστο μήκος 200m | Μέγιστο μήκος 350 m |
|---|--|--------------------------------------|--------------------------------------|
| ΕΞΩΤΕΡΙΚΗ ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ | | <= 16 | <= 18 |
| Εξωτερικό περίβλημα | Υλικό | Συγκολλητικό πολυαιθυλένιο | Συγκολλητικό πολυαιθυλένιο |
| | Πάχος (mm) | >= 1,5 mm | >= 1,5 mm |
| Μπάρες από υαλοβάμβακα | Πάχος (mm) | >= 0,8 mm | >= 0,8 mm |
| | Υλικό | Συγκολλητικό πολυαιθυλένιο | Συγκολλητικό πολυαιθυλένιο |
| Εσωτερική θήκη | Πάχος (mm) | >= 1,0 mm | >= 1,0 mm |
| | Υλικό | Μη μεταλλικό | Μη μεταλλικό |
| Προστατευτικοί σωλήνες για ομάδες οπτικών ινών | Διάκενα | με προσωρινή αποθήκευση ξηρού πυρήνα | με προσωρινή αποθήκευση ξηρού πυρήνα |
| | Τύπος ρυθμιστικού διαλύματος | Υδροδιογκώσιμες σκόνες ή νήματα | Υδροδιογκούμενες σκόνες ή νήματα |
| | Αριθμός σωλήνων | 6 | 6 |
| | Εξωτερική διάμετρος (mm) | >= 2,3mm | >= 2,3mm |
| | Πάχος (mm) | >= 0,45 mm | >= 0,45 mm |
| | Διάταξη των στοιχείων στο καλώδιο | Με κλειστή έλικα ή SZ | Με κλειστή έλικα ή SZ |
| Κεντρικό στοιχείο στήριξης | Υλικό | Μη μεταλλικό | Μη μεταλλικό |
| | Διάμετρος υλικού (mm) | >= 2,5 mm | >= 2,5 mm |
| Οπτικές ίνες | Αριθμός | 24 + 72 | 24 + 72 |
| | Βαθμός άρθρωσης | 12 | 12 |
| Βάρος ολόκληρου του καλωδίου ανά μονάδα μέτρου | (g/m) | <= 250 | <= 320 |
| | EA | (daN) | >= 260.000 |
| Μέγιστη τάση εφελκυσμού κατά την εγκατάσταση T_{AVMAX} | (daN) | 1.600 | 2.300 |

| Χαρακτηριστικά διάστασης του καλωδίου | | Μέγιστο μήκος 200m | Μέγιστο μήκος 350 m |
|---|-------|----------------------------|----------------------------|
| Μέγιστη τάση εφελκυσμού T_{MAX} | (daN) | 800 | 1.200 |
| Φορτίο θραύσης (μόνο σε σχέση με τη μηχανική απόδοση) | (daN) | ≥ 4.000 | ≥ 8.000 |
| Ελάχιστη ακτίνα κάμψης κατά την εγκατάσταση | (mm) | 20 φορές επί της διαμέτρου | 20 φορές επί της διαμέτρου |
| Ελάχιστη μόνιμη ακτίνα κάμψης | (mm) | 15 φορές επί της διαμέτρου | 15 φορές επί της διαμέτρου |

(ENEL, 2023)

Η χρωματική κωδικοποίηση των οπτικών ινών που εγκαθίστανται σε γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος στον Ιταλικό Βορρά είναι:

Πίνακας 9 - Χρωματική κωδικοποίηση οπτικών ινών ENEL Ιταλίας

| Αριθμός | Χρώμα |
|---------|--------------|
| 1 | Ανοιχτό μπλε |
| 2 | κόκκινο |
| 3 | κίτρινο |
| 4 | μαύρο |
| 5 | γκρι |
| 6 | λευκό |

(ENEL, 2023)

Αντίστοιχα οι ίνες για το καλώδιο ENEL 57FOMD09ML - ADSS είναι:

Πίνακας 10 - Αρίθμηση ίνας και χρώμα για ENEL 57FOMD09ML ADSS καλώδιο οπτικής ίνας

| Αρίθμηση ίνας | Χρώμα |
|---------------|-----------|
| 1η ίνα | κόκκινο |
| 2η ίνα | πράσινο |
| 3η ίνα | κίτρινο |
| 4η ίνα | καφέ |
| 5η ίνα | μπλε |
| 6η ίνα | βιολετί |
| 7η ίνα | ροζ |
| 8η ίνα | πορτοκαλί |

| Αρίθμηση ίνας | Χρώμα |
|---------------|----------|
| 9η ίνα | γκρι |
| 10 ίνα | μαύρο |
| 11η ίνα | τυρκουάζ |
| 12 ίνα | άσπρο |

(ENEL, 2023)

Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα

Η ενσωμάτωση τηλεπικοινωνιακών δικτύων με την μορφή οπτικών ινών αποτελούν μία ελκυστική πρόταση όδευσης κυρίως λόγω του χαμηλού κόστους. Βασικά προβλήματα που ανακύπτουν όμως είναι:

Τα δικαιώματα διέλευσης όταν οι γραμμές μεταφοράς ανήκουν σε πολλαπλούς οργανισμούς κοινής ωφέλειας, δημόσιους φορείς ή/και ιδιωτικούς φορείς

1. Οι δυσκολίες ανάπτυξης δικτύου ιδίως σε δύσβατες περιοχές
2. Πιθανή ασυμβατότητα με τις εναέριες γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος
3. Έκθεση σε περιβαλλοντικές συνθήκες
4. Επιβάρυνση του περιβάλλοντος και της αισθητικής
5. Η σταδιακή μετατροπή των υπέργειων γραμμών μεταφοράς ισχύος σε υπόγειες ιδίως στα αστικά κέντρα και πλησίον αυτών

Οι εναέριες οδεύσεις εφαρμόζονται εν μέρει ακόμη σε περιπτώσεις τελικής διασύνδεσης χρηστών (αν και σταδιακά εγκαταλείπεται ως τεχνική) και σε μακρές οδεύσεις με μικρή πιθανότητα ανάπτυξη νέων δικτύων σε εγκάρσιες τομές, δηλαδή σε μη κατοικημένες περιοχές όπου τις διαρρέουν γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος υπερυψηλής τάσης (Αγγέλου et al., 2009)

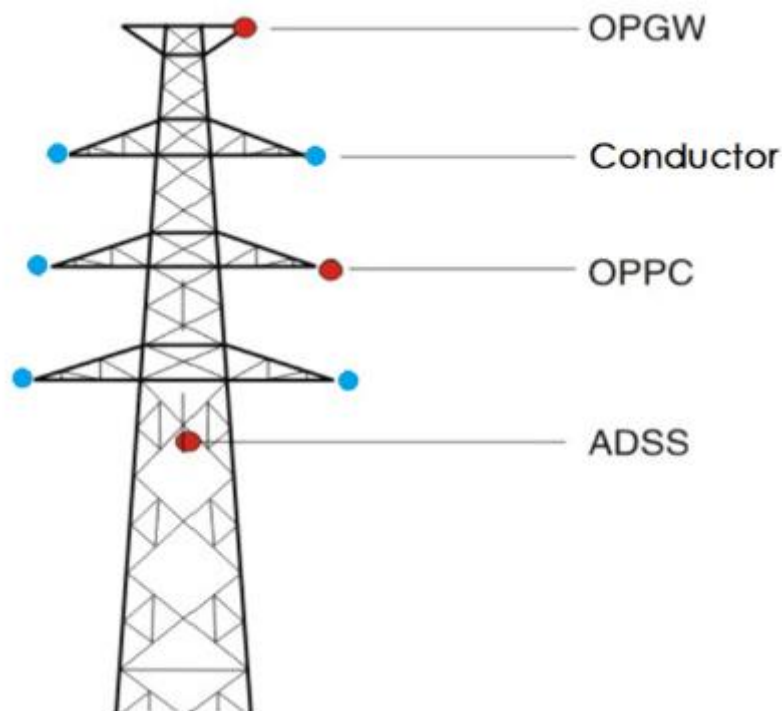
Η σημασία της υποδομής των δικτύων τεχνολογίας πληροφοριών είναι τουλάχιστον ίση, αν όχι ανώτερη, ως προς τα υπόλοιπα δίκτυα κοινής ωφέλειας όπως της ύδρευσης, αποχέτευσης, ηλεκτρικής τροφοδότησης

- Πρέπει να εξασφαλιστεί η ποιότητα της εγκατάστασης
 - Οι διακοπές παροχής υπηρεσίας μπορούν να έχουν σοβαρές επιπτώσεις

- Πρέπει να αποφεύγεται η χαμηλή ποιότητα υπηρεσίας λόγω έλλειψης επαρκούς σχεδιασμού, χρήσης ακατάλληλων εξαρτημάτων, λανθασμένης εγκατάστασης, φτωχής διαχείρισης ή ανεπαρκούς συντήρησης
- Ικανοποίηση των απαιτήσεων διασύνδεσης
- Ασφάλεια
- Για τη σωστή εγκατάσταση των δικτύων τεχνολογίας πληροφοριών υπάρχουν τέσσερις φάσεις:
 - Σχεδίαση και επιλογή των συνιστωσών του δικτύου
 - Κατάρτιση προδιαγραφών
 - Κατασκευή
 - Λειτουργία και συντήρηση
- Θέματα προς εξέταση είναι:
 - Χωρητικότητα και μήκος του δικτύου
 - Επιβιωσιμότητα
 - Λειτουργικότητα
 - Κόστος κατασκευής και συντήρησης
 - Δυνατότητες αναβάθμισης του δικτύου
- Είναι σημαντικό το διαχειριστικό σχήμα που θα επιλεγεί
- Απαιτείται έμπρακτη και σύμφωνα με τα Διεθνή & Ευρωπαϊκά πρότυπα επάρκεια σε τεχνογνωσία και σε εξοπλισμό

5.1 Συμπεράσματα της Μελέτης

Με βάση τα παραπάνω οι τέσσερις (4) διαφορετικές δυνατότητες ενσωμάτωσης οπτικών δικτύων επικοινωνιών σε εναέριες γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος: OPGW, OPFC, ADSS και OPAC συγκεντρώνουν διαφορετικά πλεονεκτήματα ή μειονεκτήματα ανάλογα την εγκατάσταση.



Σχήμα 22 - Σύγκριση τοποθέτησης καλωδίωσης οπτικών ινών OPGW, OPPC και ADSS σε στύλο μεταφοράς υψηλής τάσης

(Sun Telecom, 2022)

Τα καλώδια OPPC προτείνονται κυρίως σε δίκτυα μέσης και χαμηλής τάσης και όχι σε γραμμές υψηλής και υπερυψηλής τάσης καθώς τυχόν συντήρηση ή αντικατάστασή τους θα επηρέαζε το δίκτυο μεταφοράς ισχύος και τηλεπικοινωνιών. Το κόστος εγκατάστασης του καλωδίου OPGW είναι σχετικά υψηλό και πρέπει να επενδυθεί μεγάλο μέρος των χρημάτων από την αρχή, ενώ το κόστος εγκατάστασης του ADSS είναι σχετικά χαμηλό, επειδή μπορεί να τοποθετηθεί κοντά στην ήδη υπάρχουσα γραμμή ηλεκτρικής μεταφοράς (Hunan GL, 2023; IAC Electricals, 2022; Sun Telecom, 2022). Αν πρόκειται όμως για νέες γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος τότε προτείνεται η χρήση OPGW καλωδίων (IAC Electricals, 2022; Sun Telecom, 2022). Αν υπάρχει ήδη το δίκτυο μεταφοράς τότε προτείνεται η χρήση καλωδίωσης ADSS (Hunan GL, 2023; IAC Electricals, 2022; Sun Telecom, 2022) η οποία όμως εμφανίζει το σημαντικό μειονέκτημα ότι από την στιγμή που θα εγκατασταθεί είναι δύσκολο να επισκευαστεί ή αντικατασταθεί (Sun Telecom, 2022). Παράλληλα μία σειρά από προβλήματα που έχουν να κάνουν με την προστασία των καλωδίων ADSS από ηλεκτρικά πεδία, φαινόμενα corona, περιβαλλοντική μόλυνση, υπερεκτάσεις και διαβρώσεις πρέπει να αντιμετωπιστούν (IEEE Std 1222TM, 2019). Από την ανασκόπηση της βιβλιογραφίας όμως, διαφαίνεται η παγκόσμια τάση για χρήση καλωδίωσης ADSS σε ήδη υπάρχουσες εναέριες γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος. Στην πραγματικότητα όμως οι εθνικές νομοθεσίες

και τα πρότυπα δίνουν τη διακριτική ευχέρεια (δυνατότητα) στον κατασκευαστή/εργολάβο να επιλέξει την κατάλληλη καλωδίωση, αρκεί να τηρήσει τις προδιαγραφές ασφαλείας, λειτουργίας και απόδοσης. Οι μεγάλες βιομηχανίες μάλιστα κατασκευής καλωδίων οπτικών ινών (οι περισσότερες εδρεύουν στην Κίνα) παρέχουν με την ίδια ευκολία καλώδια OPGW, ADSS και OPPC (Hunan GL, 2023; IAC Electricals, 2022; Sun Telecom, 2022). Με δεδομένο ότι η Ελλάδα διαθέτει ένα εκτεταμένο δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας που θα μπορούσε να αξιοποιηθεί για την εγκατάσταση οπτικών ινών, η αντικατάσταση του οποίου με καλώδια OPGW μάλλον θα ήταν μη παραγωγική, προκρίνεται ως καλύτερη λύση η χρήση καλωδίων οπτικών ινών ADSS

5.2 Μελλοντική Εργασία

Κύριος σκοπός της εργασίας ήταν η παρουσίαση των τεχνικών πληροφοριών και των προτύπων (standards) εν ισχύ για την εγκατάσταση καλωδίων οπτικών ινών σε εναέρια γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος. Αναπόφευκτα, η κύρια πηγή πληροφοριών θα έπρεπε να ήταν οι κύριοι κανονισμοί και τα ισχύοντα πρότυπα (standards), εθνικά είτε υπερεθνικά, που ισχύουν για τη βιομηχανία και για τις επιτροπές ελέγχου μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος και τηλεπικοινωνιών. Τα πρότυπα αυτά, και ιδίως οι ενημερωμένες τους εκδόσεις, δεν είναι ευρέως διαθέσιμα, ούτε είναι προσβάσιμα μέσα από την επιστημονική βιβλιογραφία, καθώς αποτελούν βιομηχανικά σπάνια που αξιοποιούνται από μεγάλους κατασκευαστές, μεγάλες βιομηχανίες που αναλαμβάνουν έργα πολύ μεγάλης κλίμακας, τηλεπικοινωνιακούς παρόχους, ρυθμιστικές αρχές ενέργειας, πολλές φορές μάλιστα σε υπερεθνικό επίπεδο. Κατέστη δυνατή η ανάκτηση μέρους του πρόσφατου Αμερικανικού Εθνικού Κανονισμού Ασφάλειας από Ηλεκτρομηχανολογικές Διατάξεις (NESC 2023), το ισχύον αμερικανικό πρότυπο IEEE 1222. 2019 για τα καλώδια οπτικών ινών ADSS, έμμεσες αναφορές στο ευρωπαϊκό πρότυπο ΕΛΟΤ EN 50174.03 για εγκατάσταση τηλεπικοινωνιών και έμμεσες αναφορές στο νέο κανονισμό που θεσπίζεται για τη χώρα της Ιταλίας.

Προτείνεται ο έλεγχος και ο εμπλουτισμός της εργασίας αφού εξασφαλιστεί πλήρης πρόσβαση στην ενημερωμένη έκδοση του Αμερικανικού Εθνικού Κανονισμού Ηλεκτρικής Ασφάλειας (NESC 2023), στο ευρωπαϊκό πρότυπο ΕΛΟΤ EN 50174.03, αλλά και στον νέο ιταλικό κανονισμό ο οποίος κατά τη συγγραφή ήταν στη διαδικασία της διαβούλευσης χωρίς να δίνονται αναλυτικά στοιχεία.

Βιβλιογραφία

- Aalamifar, F., & Lampe, L. (2017). Optimized WiMAX Profile Configuration for Smart Grid Communications. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 8(6), 2723–2732. <https://doi.org/10.1109/TSG.2016.2536145>
- Abrahamsen, F. E., Ai, Y., & Cheffena, M. (2021). Communication technologies for smart grid: A comprehensive survey. In *Sensors* (Vol. 21, Issue 23). <https://doi.org/10.3390/s21238087>
- Avvio del procedimento e della consultazione pubblica concernente la definizione degli standard tecnici per i cavi in fibra ottica a cui devono attenersi gli aggiudicatari dei bandi per la realizzazione dell'infrastruttura di rete, (2023). <https://www.agcom.it/documents/10179/30983627/Delibera+162-23-CONS/c115384f-95c7-4c38-b427-2d4652f375e3?version=1.0>
- Amirshahi, P., & Kavehrad, M. (2006). Broadband access over medium and low voltage power-lines and use of white light emitting diodes for indoor communications. *2006 3rd IEEE Consumer Communications and Networking Conference, CCNC 2006*, 2. <https://doi.org/10.1109/CCNC.2006.1593168>
- ANIXTER. (2019). *European Standards Reference Guide*.
- Aquilué, R., Ribó, M., Regué, J. R., Pijoan, J. L., & Sánchez, G. (2009). Scattering parameters-based channel characterization and modeling for underground medium-voltage power-line communications. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 24(3). <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2008.2002963>
- Baoping, C., Di, Y., & Feng, Q. (2021). Optical Fiber Cables. In G. Beyer (Ed.), *The Global Cable Industry: Materials, Markets, Products* (pp. 351–388). WILEY-VCH GmbH. <https://doi.org/10.1002/9783527822263.ch13>
- Bartlett, A. D., Carlton, G., & Carter, C. N. (1988). Design and application of optical cables into overhead lines up to 150kV. *IEE Conference Publication*, 297, 166–172.
- Berkers, A. G. W. M., & Wetzler, J. M. (1988). Electrical stresses on a selfsupporting metal-free cable in high voltage networks. *IEE Conference Publication*, 289, 69–72.
- Bingel, N. (2022). Highlights of the next edition of the National Electrical Safety Code. *International*

Association of Electrical Inspectors (IAEI) Magazine.
<https://iaeimagazine.org/columns/beyond-the-service-point/highlights-of-the-next-edition-of-the-national-electrical-safety-code/>

- Chinenye, O. D. (2017). Enhancing signal production for promulgating information in a fiber optic communication system. *American Journal of Engineering Research (AJER)*, 6(11), 105–110.
- De Villiers, W., Cloete, J. H., & Herman, R. (2002). The feasibility of ampacity control on HV transmission lines using the PLC system. *IEEE AFRICON Conference*, 2, 865–870. <https://doi.org/10.1109/afrccon.2002.1160027>
- ENEL. (2015). G.2.4 Standard Tecnici Dei Collegamenti in Fibra Ottica. In *Guida Per le Connessioni Alla Rete Elettrica di Enel Distribuzione* (Ed. 5.0-). Enel Distribuzione. https://www.e-distribuzione.it/content/dam/e-distribuzione/documenti/connessione_alla_rete/regole_tecniche/SEZG_27_marzo_2015_sez_g.pdf
- ENEL. (2023). *CATALOGO GENERALE: Prodotti a specifica ENEL per linee elettriche.* <https://www.comcavi.it/wp-content/uploads/pdf/catalogo-ENEL.pdf>
- Ezeh, G. N., & Ibe, O. G. (2013). Efficiency of Optical Fiber Communication for Dissemination of Information within the Power System Network. *IOSR Journal of Computer Engineering (IOSR-JCE)*, 12(3), 68–75.
- Faheem, M., Shah, S. B. H., Butt, R. A., Raza, B., Anwar, M., Ashraf, M. W., Ngadi, M. A., & Gungor, V. C. (2018). Smart grid communication and information technologies in the perspective of Industry 4.0: Opportunities and challenges. In *Computer Science Review* (Vol. 30, pp. 1–30). <https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2018.08.001>
- Fiber Optic Solutions. (2016). Backbone Networks Analysis. *Fiber-Optic-Solutions.* <https://www.fiber-optic-solutions.com/analysis-backbone-networks.html>
- Galli, S., Scaglione, A., & Dostert, K. (2003). Broadband is power: Internet access through the power line network. In *IEEE Communications Magazine* (Vol. 41, Issue 5). <https://doi.org/10.1109/MCOM.2003.1200105>
- Galli, S., Scaglione, A., & Wang, Z. (2011). For the grid and through the grid: The role of power line communications in the smart grid. *Proceedings of the IEEE*, 99(6). <https://doi.org/10.1109/JPROC.2011.2109670>
- Gebhardt, M., Weinmann, F., & Dostert, K. (2003). Physical and regulatory constraints for communication over the power supply grid. *IEEE Communications Magazine*, 41(5). <https://doi.org/10.1109/MCOM.2003.1200106>
- Glass, A. (1993). Fiber Optics. *Physics Today*, 46(10), 34–38.
- Götz, M., Rapp, M., & Dostert, K. (2004). Power line channel characteristics and their effect on communication system design. *IEEE Communications Magazine*, 42(4). <https://doi.org/10.1109/MCOM.2004.1284933>
- Green, P. (1994). *Δίκτυα Οπτικών Ινών*. Παπσωτηρίου.

- Hecht, J. (2011). Ultrafast fibre optics set new speed record. *NewScientist* 210 (2809). <https://www.newscientist.com/article/mg21028095-500-ultrafast-fibre-optics-set-new-speed-record/>
- Horvat, G., Balkic, Z., & Zagar, D. (2012). Power Line Communication throughput analysis for use in last mile rural broadband. *2012 20th Telecommunications Forum, TELFOR 2012 - Proceedings*. <https://doi.org/10.1109/TELFOR.2012.6419192>
- Hunan GL. (2023). The Difference Between OPGW, OPPC, and ADSS Optical Cable. *News and Solutions*. <https://www.gl-fiber.com/news/the-difference-between-opgw-oppc-and-adss-optical-cable>
- IAC Electricals. (2022). *OPGW vs ADSS – Which is suitable for Overhead Transmission Lines?* <https://www.iacelectricals.com/opgw-vs-adss-which-is-suitable-for-overhead-transmission-lines/>
- IEEE. (1996). *National Electrical Safety Code C2-1997 edition*. Institute of Electrical and Electronics Engineer Inc.
- IEEE 1138-2021. (2021). *IEEE Standard for Testing and Performance of Optical Ground Wire (OPGW) for use on Electric Utility Power Lines*. <https://standards.ieee.org/ieee/1138/10325/>
- IEEE Std 1222™. (2019). *IEEE Standard for Testing and Performance for All-Dielectric Self-Supporting (ADSS) Fiber Optic Cable for Use on Electric Utility Power Lines*. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9052820>
- Jachetta, J. (2007). Fiber-Optic Transmission Systems. In *National Association of Broadcasters Engineering Handbook* (pp. 1667–1685). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-240-80751-5.50098-9>
- Jee, G., Rao, R. Das, & Cern, Y. (2003). Demonstration of the technical viability of PLC systems on medium- and low-voltage lines in the United States. *IEEE Communications Magazine*, 41(5). <https://doi.org/10.1109/MCOM.2003.1200109>
- Karamchati, S., Rawat, S., & Varma, V. (2017). A novel architecture to enhance Quality of Service in IP networks. *International Conference on Information Networking*. <https://doi.org/10.1109/ICOIN.2017.7899567>
- Kuhn, M., Berger, S., Hammerström, I., & Wittneben, A. (2006). Power line enhanced cooperative wireless communications. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 24(7). <https://doi.org/10.1109/JSAC.2006.874407>
- Lazaropoulos, A. (2018). Broadband Performance Metrics and Regression Approximations of the New Coupling Schemes for Distribution Broadband over Power Lines (BPL) Networks. *Trends in Renewable Energy*, 4(1), 43–73. <https://doi.org/10.17737/tre.2018.4.1.0059>
- Lazaropoulos, A. G. (2012a). Deployment concepts for overhead high voltage broadband over power lines connections with two-hop repeater system: Capacity countermeasures against aggravated topologies and high noise environments. *Progress In Electromagnetics Research B*, 44, 283–307. <https://doi.org/10.2528/PIERB12081104>

- Lazaropoulos, A. G. (2012b). Towards broadband over power lines systems integration: Transmission characteristics of underground low-voltage distribution power lines. *Progress In Electromagnetics Research B*, 39. <https://doi.org/10.2528/PIERB12012409>
- Lazaropoulos, A. G. (2012c). Towards Modal Integration of Overhead and Underground Low-Voltage and Medium-Voltage Power Line Communication Channels in the Smart Grid Landscape: Model Expansion, Broadband Signal Transmission Characteristics, and Statistical Performance Metrics (Invited Paper). *ISRN Signal Processing*, 2012. <https://doi.org/10.5402/2012/121628>
- Lazaropoulos, A. G. (2013). Broadband over Power Lines Systems Convergence: Multiple-Input Multiple-Output Communications Analysis of Overhead and Underground Low-Voltage and Medium-Voltage BPL Networks. *ISRN Power Engineering*, 2013. <https://doi.org/10.1155/2013/517940>
- Lazaropoulos, A. G. (2014). Wireless Sensor Network Design for Transmission Line Monitoring, Metering, and Controlling: Introducing Broadband over Power Lines-Enhanced Network Model (BPLeNM). *ISRN Power Engineering*, 2014(894628), 22. <https://doi.org/10.1155/2014/894628>
- Lazaropoulos, A. G., & Leligou, H. C. (2022). Fiber Optics and Broadband over Power Lines in Smart Grid: A CommunicationS System Architecture for Overhead High-Voltage, Medium-Voltage and Low-Voltage Power Grids. *Progress In Electromagnetics Research B*, 95, 185–205. <https://doi.org/10.2528/PIERB22062502>
- Marne, D. J., & Palmer, J. A. (2023). *National Electrical Safety Code (NESC) 2023 Handbook*. McGraw Hill's.
- Moore, G. F. (2006). *Electric Cables Handbook* (3rd editio). Blackwell Science Ltd. [https://gacbe.ac.in/images/E books/Electric Cables Handbook 3rd ed - C. Moore \(Blackwell, 1997\).pdf](https://gacbe.ac.in/images/E_books/Electric_Cables_Handbook_3rd_ed_-_C._Moore_(Blackwell,_1997).pdf)
- Nthate, S. (2017). *Improving the Reliability of Smart Grids through the Use of Fiber Optical Communication* [University of Johannesburg]. [https://ujcontent.uj.ac.za/vital/access/manager/Index?site_name=Research Output](https://ujcontent.uj.ac.za/vital/access/manager/Index?site_name=Research%20Output)
- NTIA. (2004). *Potential Interference From Broadband Over Power Line (BPL) Systems to Federal Government Radiocommunications at 1.7 - 80 MHz (Volume I)*. <https://ntia.gov/files/ntia/publications/covervol1.pdf>
- Ostendorp, M. (2000). Fiber optic installations in high voltage corridors: Overview of issues. *Proceedings of the Universities Power Engineering Conference*.
- Ostendorp, M., & Gela, G. (1997). *Fiber Optic Cables in Overhead Transmission Corridors. A State-of-the-Art Review*. <https://www.epri.com/research/products/TR-108959>
- Suljanović, N., Mujčić, A., Zajc, M., & Tasič, J. F. (2004). Approximate computation of high-frequency characteristics for power line with horizontal disposition and middle-phase to ground coupling. *Electric Power Systems Research*, 69(1), 17–24. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2003.07.005>
- Sun, K., Yu, D., Cao, L., Zhai, X., & Xing, Y. (2019). Electricity information collection system based on WDM-RoF-PON. *Proceedings of 2019 IEEE 3rd Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference, ITNEC 2019*.

<https://doi.org/10.1109/ITNEC.2019.8729086>

Sun Telecom. (2022). Understand the Difference Between ADSS and OPGW Fiber Optic Cable. *Product News*. <https://en.suntelecom.cn/Do-You-Want-to-Understand-the-Difference-Between-ADSS-and-OPGW-Fiber-Optic-Cable.html>

Tuominen, M. W., & Olsen, R. G. (2000). Electrical design parameters of all-dielectric-self-supporting fiber optic cable. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 15(3). <https://doi.org/10.1109/61.871356>

Vasileiou, D. K. E., Agoris, D., Pyrgioti, E., & Lymberopoulos, D. (2004). A review on the application of fiber optics on high voltage lines. *WSEAS Transactions on Circuits and Systems*, 3, 1192–1196.

Wheeler, J. C. G., Lissenburg, M. L., Hinchliffe, J. D. S., & Slevin, M. E. (1988). Development and testing of a track resistant sheathing material for aerial optical fibre cables. *IEE Conference Publication*, 289, 73–76.

Yavuz, E., Kural, F., Coban, N., Ercan, B., & Safak, M. (2000). Modeling of Power-Lines for Digital Communications. *Proceedings of 2000 International Symposium on Power-Line Communications and Its Applications*, 161–168.

Αγγέλου, Γ., Γκουντής, Β., Ιατρόπουλος, Α., Παπουλίδης, Π., & Σαλονικιός, Θ. (2009). Προδιαγραφές Ψηφιακών Υποδομών: Α΄ ΦΑΣΗ: Σχολιασμός – ερμηνεία σχεδίου Κ.Υ.Α. “Καθορισμός των Τεχνικών Προδιαγραφών για τα Εσωτερικά Δίκτυα Ηλεκτρονικών Επικοινωνιών” με εξειδίκευση στα δίκτυα οπτικών ινών (Πόρισμα Ομάδας Εργασίας του ΤΕΕ/ΤΚΜ όπως εγκρίθη. http://www.tkmactions.tee.gr/sections/6_Omades_Ergasias/6_Diktywn_Thlematikhs/31.pdf

Μπενμαγιώρ, Ν. (2009). Τεχνικός Κανονισμός για τις εργασίες που αφορούν στις εγκαταστάσεις τηλεπικοινωνιακών δικτύων εκτός κτιρίων (Υ.Α. 72146/2316, ΦΕΚ 21/Β/2009). <http://portal.tee.gr/portal/page/portal/teetkm/DRASTHRIOTHTES/OMADESERGASIAS>

Παναγογιαννόπουλος, Χ. (2008). Ανάλυση Τεχνολογίας Οπτικών Ινών και Δικτύων Οπτικών Ινών [Πανεπιστήμιο Πειραιώς]. <https://doi.org/https://dione.lib.unipi.gr/xmlui/handle/unipi/2401>

Συντομογραφίες - Αρκτικόλεξα - Ακρωνύμια

| | |
|--------|--|
| ADSS | All Dielectric Self Supporting |
| BPL | Broadband over Power Lines |
| BPL | Broadband Over Power Lines |
| BPL | Broadband Power Line |
| BPLeNM | Broadband over PowerLines-enhanced Network Model |
| DSL | Digital Subscriber Line |
| FRP | fiber reinforced glass |
| HCOC | High Capacity Fiber Optic Cables |
| HDPE | high density polyethylene |
| LANs | Local Area Networks |
| MAN | Metropolitan Area Network |
| OPAC | Optical Attached Cable |
| OPAC | Optical Attached Cable |
| OPGW | Optical Ground Wire |
| OPTL | Overhead Power Transmission Lines |
| PE | Polyethylene |
| PON | Passive Optical Networks |
| WiFi | Wireless Fidelity |
| WRAP | Wrapped around the Phase Conductor |
| ΣΗΕ | Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας |
| ψ-ΣΑΕ | Ψηφιακά Συστήματα Αυτομάτου Ελέγχου |