



---

**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών  
*«Παραγωγή και Διαχείριση Ενέργειας»*

---

**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

***«ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ  
ΔΙΑΚΟΠΤΩΝ ΑΠΟΜΟΝΩΣΗΣ  
ΣΕ ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ  
ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ»***

**Της Μεταπτυχιακής Φοιτήτριας**

Γεωργίας Τ. Τζιάσιου

**Επιβλέπων**

Πάυλος Σ. Γεωργιλάκης, Επ. Καθηγητής ΕΜΠ





**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών  
«Παραγωγή και Διαχείριση Ενέργειας»**

**«ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΔΙΑΚΟΠΤΩΝ  
ΑΠΟΜΟΝΩΣΗΣ ΣΕ ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ  
ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ»**

**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

Γεωργία Τ. Τζιάσιου

**Επιβλέπων :** Παύλος Σ. Γεωργιλιάκης, Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 28<sup>η</sup> Σεπτεμβρίου 2016.

.....  
Παύλος Γεωργιλιάκης  
Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Ευάγγελος Διαλονάς  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Στάυρος Παπαθανασίου  
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2016

.....  
Γεωργία Τ. Τζιάσιου

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

Copyright © Γεωργία Τζιάσιου, 2016.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

<b>ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:</b>	<b>«Βέλτιστη τοποθέτηση διακοπών απομόνωσης σε δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας»</b>
<b>ΦΟΙΤΗΤΡΙΑ:</b>	<b>Γεωργία Τ. Τζιάσιου</b>
<b>ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:</b>	<b>Π. Γεωργιάκης, Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ</b>
<b>ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΟ ΕΤΟΣ:</b>	<b>2015-2016</b>

## Σύνοψη

Τα δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας είναι μέρος του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας που συνδέουν το σύστημα μεταφοράς με τους τελικούς καταναλωτές. Ο σχεδιασμός των δικτύων διανομής πραγματοποιείται με σκοπό να ικανοποιηθεί η αυξανόμενη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας με τον βέλτιστο τεχνικά και οικονομικό τρόπο και σε αποδεκτά επίπεδα αξιοπιστίας. Η πλειοψηφία των διακοπών ηλεκτρικής ενέργειας που υφίστανται οι καταναλωτές οφείλεται σε βλάβες των δικτύων διανομής. Επομένως, είναι σημαντική η εξέταση της επίδρασης των διακοπών στα κόστη διακοπών των καταναλωτών και στην αξιοπιστία του συστήματος. Οι διακόπτες απομόνωσης χρησιμοποιούνται στις γραμμές των δικτύων διανομής με στόχο τη βελτίωση της αξιοπιστίας τους, την απομόνωση σφαλμάτων, τη διαμόρφωση ή την επαναδιαμόρφωση του δικτύου και την αποκατάσταση της τροφοδοσίας. Η βέλτιστη τοποθέτηση και επιλογή του κατάλληλου πλήθους των διακοπών απομόνωσης αποτελεί σημαντικό παράγοντα στον σχεδιασμό των δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Όσο μεγαλύτερο είναι το πλήθος των διακοπών απομόνωσης, τόσο μειώνεται ο χρόνος διακοπής της τροφοδοσίας των καταναλωτών και συνεπώς αυξάνεται το επίπεδο αξιοπιστίας του δικτύου. Ωστόσο, ένα μεγάλο πλήθος διακοπών απομόνωσης προϋποθέτει υψηλό επενδυτικό κόστος. Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η βέλτιστη τοποθέτηση διακοπών απομόνωσης σε δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, με σκοπό την ελαχιστοποίηση του αναμενόμενου κόστους διακοπών των καταναλωτών σε συνδυασμό με την ελαχιστοποίηση του κόστους επένδυσης, εγκατάστασης, και του ετήσιου κόστους λειτουργίας και συντήρησης των διακοπών απομόνωσης με αποτέλεσμα τη βελτίωση της αξιοπιστίας των δικτύων διανομής. Η βέλτιστη τοποθέτηση διακοπών απομόνωσης σε δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας μοντελοποιήθηκε σαν πρόβλημα μεικτού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού. Για την επίλυσή του αναπτύχθηκε λογισμικό σε περιβάλλον GAMS χρησιμοποιώντας τον επίλυτή CPLEX. Το λογισμικό που αναπτύχθηκε εφαρμόστηκε σε δίκτυα διανομής 14 κόμβων και 29 κόμβων.

## ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, διακόπτες απομόνωσης, συνάρτηση βλάβης καταναλωτών, αναμενόμενο κόστος διακοπών καταναλωτών, αξιοπιστία, μεικτός ακέραιος γραμμικός προγραμματισμός

## Περίληψη

Τα δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας αποτελούν μέρος του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας που συνδέουν το σύστημα μεταφοράς με τους τελικούς καταναλωτές. Η λειτουργία ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας πρέπει να διασφαλίζει αδιάλειπτη παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στους καταναλωτές. Τα δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας πρέπει να εξασφαλίζουν τη συνέχεια της παροχής ηλεκτρικής ενέργειας από τα σημεία τροφοδοσίας μέχρι τους τελικούς καταναλωτές με τον πιο αξιόπιστο και οικονομικό τρόπο. Μέσα από τη στατιστική ανάλυση δεδομένων σχετικά με τις διακοπές τροφοδοσίας, είναι φανερό ότι τα σφάλματα στα δίκτυα διανομής αποτελούν τη συνηθέστερη αιτία για τη μη διαθεσιμότητα ισχύος στους τελικούς καταναλωτές. Επομένως, είναι σημαντική η εξέταση της επίδρασης των διακοπών στα κόστη διακοπών των

καταναλωτών και στην αξιοπιστία του συστήματος.

Το κόστος που είναι διατεθειμένος να πληρώσει ένας καταναλωτής για καλύτερο επίπεδο αξιοπιστίας, σχετίζεται άμεσα με τα κόστη διακοπών εξαιτίας σφαλμάτων στα δίκτυα διανομής. Για την εκτίμησή τους χρησιμοποιούνται μέθοδοι βασισμένες σε έρευνες καταναλωτών μέσω ερωτηματολογίων. Οι μέθοδοι αυτές θεωρούνται οι πιο αξιόπιστες, δεδομένου ότι οι καταναλωτές είναι οι πλέον κατάλληλοι να εκτιμήσουν την επίδραση που έχουν οι διακοπές της τροφοδοσίας στις δραστηριότητές τους, οπότε τα κόστη διακοπών καθορίζονται με περισσότερη ακρίβεια. Τα κόστη διακοπών καταναλωτών είναι συνάρτηση και των χαρακτηριστικών της διακοπής (διάρκεια, συχνότητα διακοπών, χρονική στιγμή μέσα στο έτος που συμβαίνει η κάθε διακοπή, αν οι διακοπές είναι ολικές ή μερικές, αν έχει προηγηθεί κάποια ειδοποίηση για την εκάστοτε διακοπή) αλλά και των χαρακτηριστικών των καταναλωτών (είδος των καταναλωτών, φύση των εργασιών, η ζήτηση, οι απαιτήσεις ενέργειας και η ενεργειακή εξάρτηση κάθε ώρα της ημέρας). Η συνάρτηση βλάβης καταναλωτών αναπαριστά το κόστος που προκύπτει από τη ζημιά που υφίστανται οι καταναλωτές εξαιτίας μιας διακοπής τροφοδοσίας σε συνάρτηση με τη διάρκεια της διακοπής.

Δείκτες αξιοπιστίας όπως η μέση διάρκεια διακοπών, η μέση συχνότητα διακοπών, η αναμενόμενη μη τροφοδοτούμενη ενέργεια και το αναμενόμενο κόστος διακοπών καταναλωτών (ECOST) χρησιμοποιούνται ευρέως από εταιρείες διανομής για τη μέτρηση και ποσοτικοποίηση του βαθμού απόδοσης ενός συστήματος. Παρόλα αυτά τα κόστη διακοπών ποσοτικοποιούνται με τον καλύτερο τρόπο μέσω του δείκτη ECOST, δεδομένου ότι λαμβάνει υπόψη την τοπολογία του δικτύου, τις διακοπές των καταναλωτών, την πυκνότητα φορτίου, τον ρυθμό βλαβών των στοιχείων του δικτύου, καθώς επίσης και τα διάφορα είδη των καταναλωτών και τις αντίστοιχες συναρτήσεις βλάβης τους.

Οι διακόπτες απομόνωσης διαδραματίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στα δίκτυα διανομής και χρησιμοποιούνται για την απομόνωση περιοχών του δικτύου όταν εκδηλωθεί κάποιο σφάλμα, με αποτέλεσμα τη μείωση του χρόνου διακοπής των καταναλωτών. Με αυτόν τον τρόπο, η αξιοπιστία του συστήματος αυξάνεται. Όμως, λόγω του υψηλού κόστους των διακοπών αυτών, η εγκατάστασή τους οδηγεί σε αυξημένο επενδυτικό κόστος. Είναι σημαντικό λοιπόν για τον σχεδιασμό των δικτύων διανομής, να βρεθεί η βέλτιστη θέση των διακοπών απομόνωσης στο δίκτυο λαμβάνοντας υπόψη το επενδυτικό κόστος και βελτιώνοντας τους δείκτες αξιοπιστίας.

Σε περίπτωση βραχυκυκλώματος σε κάποιο από τα τμήματα του δικτύου, ανοίγει ακαριαία ο διακόπτης ισχύος στην αρχή της γραμμής τροφοδοσίας. Αν δεν υπάρχουν εγκατεστημένοι διακόπτες απομόνωσης για να απομονωθεί το τμήμα στο οποίο συνέβη το σφάλμα, τότε όλοι οι καταναλωτές οι οποίοι τροφοδοτούνται από την ίδια γραμμή τροφοδοσίας, θα παραμείνουν εκτός τροφοδότησης μέχρι να αποκατασταθεί το σφάλμα. Οι διακόπτες απομόνωσης απομονώνουν όσο γίνεται μικρότερο τμήμα του δικτύου διασφαλίζοντας την ομαλή λειτουργία του υπόλοιπου. Όταν ένα σφάλμα εκδηλωθεί, η διάρκεια μη διαθεσιμότητας ενός καταναλωτή εξαρτάται από τη θέση του καταναλωτή σε σχέση με τη θέση του στοιχείου του δικτύου στο οποίο εκδηλώθηκε σφάλμα, αλλά και σε σχέση με τους πλησιέστερους διακόπτες απομόνωσης. Συνεπώς, η κατανομή των διακοπών απομόνωσης στο δίκτυο επηρεάζει την αξιοπιστία του. Δεδομένου ότι οικονομικοί και τεχνικοί παράγοντες περιορίζουν το πλήθος των διακοπών απομόνωσης που μπορεί να εγκατασταθούν, η βέλτιστη κατανομή τους θα οδηγήσει και στη μεγαλύτερη πιθανή βελτίωση της αξιοπιστίας του δικτύου.

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η βέλτιστη τοποθέτηση διακοπών απομόνωσης σε δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, με σκοπό την ελαχιστοποίηση του αναμενόμενου κόστους διακοπών των καταναλωτών σε συνδυασμό με την ελαχιστοποίηση του κόστους επένδυσης, εγκατάστασης, και του ετήσιου κόστους λειτουργίας και συντήρησης των διακοπών απομόνωσης με αποτέλεσμα τη βελτίωση της αξιοπιστίας των δικτύων διανομής. Η βέλτιστη τοποθέτηση διακοπών απομόνωσης σε δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας μοντελοποιήθηκε σαν πρόβλημα μεικτού ακεραίου γραμμικού προγραμματισμού. Για την επίλυση του αναπτύχθηκε λογισμικό σε περιβάλλον GAMS χρησιμοποιώντας τον επιλυτή CPLEX.

Με βάση το λογισμικό που αναπτύχθηκε, το προτεινόμενο μοντέλο εφαρμόστηκε σε δύο ακτινικά δίκτυα διανομής 14 κόμβων και 29 κόμβων του συστήματος RBTS. Για κάθε δίκτυο εξετάζονται δύο διαφορετικά σενάρια. Στο πρώτο σενάριο θεωρείται ότι υπάρχει δυνατότητα εναλλακτικής παροχής τροφοδοσίας, ενώ στο δεύτερο θεωρείται ότι δεν υπάρχει αυτή η δυνατότητα. Επίσης, διεξάγεται ανάλυση ευαισθησίας προκειμένου να εξεταστεί η επίδραση διαφόρων παραμέτρων στη βέλτιστη τοποθέτηση των διακοπών απομόνωσης. Επιπλέον, παρουσιάζονται και συγκρίνονται τα αποτελέσματα των δύο δικτύων. Εξάγονται σημαντικά συμπεράσματα και προτείνονται τρόποι επέκτασης της εργασίας.

**POST-GRADUATE THESIS:** «Optimal placement of sectionalizing switches in power distribution networks»

**STUDENT:** Georgia T. Tziasiou

**SUPERVISOR:** Pavlos S. Georgilakis, Assistant Professor, N.T.U.A.

**ACADEMIC YEAR:** 2015-2016

## **Abstract**

The power distribution network is part of the electric power system that connects the bulk transmission system with the individual customers. The distribution networks are designed to meet the increasing load demand at the minimum cost with satisfactory reliability levels. The majority of outages experienced by the customers are due to failures in the distribution system. Therefore, it is important to understand the impact of the outages on the customer outage costs and the system reliability. The sectionalizing switches are used for reliability improvement, network reconfiguration, fault isolation and service restoration. The optimal location and number of sectionalizing switches is a major factor in distribution network planning. If the number of the installed sectionalizing switches is increased, the duration of interruption of the network consumers will be decreased. Thus, the network reliability is improved. However, a large number of sectionalizing switches requires high network investment cost. The scope of this thesis is to evaluate the optimal placement of sectionalizing switches in power distribution networks, in order to minimize the expected interruption costs of customers in conjunction with the investment and installation cost, as well as the annual operation and maintenance cost of sectionalizing switches resulting in the reliability improvement of the distribution network. The optimal placement of sectionalizing switches in the distribution network is modelled as a mixed-integer linear programming (MILP) problem. It is solved in GAMS environment using CPLEX solver. The developed software is applied to a 14-bus and 29-bus distribution networks.

## **KEYWORDS**

Power distribution networks, sectionalizing switches, customer damage function, expected customer interruption cost, reliability, mixed integer linear programming

## **Summary**

The power distribution network is part of the electric power system that connects the bulk transmission system with the individual customers. The most important function of a power system is to supply its customers. The reliability evaluation of a distribution network is associated with the continuity of power supply from the transmission system to the individual customers with the minimum cost. According to customer failure statistics compiled by most utilities, it is clear that the distribution network failures are mostly responsible for the unsupplied load demand. Therefore, it is important to understand the impact of the outages on the customer outage costs and the system reliability.

The price that a customer is willing to pay for higher reliability is directly connected to the interruption costs created by network failures. The customer survey approach, in which customers are specifically contacted, is the most practical and reliable process to obtain these costs. Customer interruption costs are a function of both interruption characteristics (duration, frequency, time of occurrence, advance warning and its nature) and user characteristics (type of customer, activities interrupted, demand and energy requirements, energy dependency according to time of day). The costs incurred due to power supply interruptions can be

presented as a function of outage duration, and when expressed in this form is known as a customer damage function (CDF).

The reliability indices, such as system average interruption frequency index, system average interruption duration index, expected unsupplied energy, and system expected outage cost to customers (ECOST) are widely used by electric utilities to measure and quantify the degree of system performance. However, the customer outage costs can be quantified by ECOST in the best way since it accounts for the effects of the system topology, interruption durations, load variations, equipment failure probability, and recognizes the various customer types and their damage functions.

Sectionalizing switches play a significant role in modern power distribution networks and they are used to isolate the faulted areas when possible faults occur in the system, which results in reduction of customers outages. In this way the system reliability is increased. However, sectionalizing switches are comparatively expensive, and hence installing them in distribution systems will increase the network investment cost. It is necessary for the system planners to consider the optimal placement of these switching devices taking into account the trade-offs between their investment cost and the reliability improvement.

Short-circuit in a system component causes the main feeder circuit breaker to trip. If the part of the system, where the fault occurred, is not isolated then all customers in the same feeder will not be supplied until the fault is fixed. Sectionalizing switches are used to isolate the failed components of the system while the rest of the system is supplied normally. When a fault occurs, the outage duration for an individual customer depends on their location regarding the failure point and the nearby sectionalizers. Therefore, the allocation of sectionalizers affects the distribution system's reliability. Due to economic and technical factors the number of sectionalizers is limited. Thus, their optimal allocation is of high importance for the system's reliability improvement.

The scope of this thesis is to evaluate the optimal placement of sectionalizing switches in power distribution networks, considering the minimization of the expected interruption costs of customers in conjunction with investment and installation cost, as well as the annual operation and maintenance costs of the sectionalizing switches resulting in the reliability improvement of the distribution network. The optimal placement of sectionalizing switches in the distribution network is modelled as a mixed-integer linear programming (MILP) problem. It is solved in GAMS environment using CPLEX solver.

The developed software is applied to a 14-bus and 29-bus radial distribution systems, which are the distribution networks connected at bus 2 and bus 4 of the Roy Billinton Test System (RBTS), respectively. For each network two different scenarios are examined. In the first scenario an alternate supply path is considered, while in the second scenario it is not. Furthermore, several sensitivity analyses are conducted on these systems in order to assess the effects of different parameters on the optimal placement of sectionalizing switches. Moreover, the results of each case are presented and comparisons on the results are discussed. Important conclusions are drawn and future research is proposed.



## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Η διπλωματική αυτή εργασία εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2015-2016 υπό την επίβλεψη του κ. Παύλου Γεωργιάκη, Επίκουρου Καθηγητή της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Ε.Μ.Π., στον οποίο οφείλω ιδιαίτερες ευχαριστίες για την ανάθεσή της, δίνοντας μου την ευκαιρία να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα Νικόλαο Κουτσούκη, για την πολύτιμη βοήθεια και την καθοδήγηση που μου παρείχε κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας. Τέλος, οφείλω να ευχαριστήσω και την οικογένειά μου που με στήριξε και με στηρίζει όλα αυτά τα χρόνια.



# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1	Εισαγωγή	1
1.2	Δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας	2
1.3	Αντικείμενο και δομή της εργασίας	4

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΔΙΚΤΥΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

2.1	Εισαγωγή	7
2.2	Μέσα προστασίας	8
2.3	Διακοπτικά στοιχεία	9
2.3.1	Αποζεύκτης και γειωτής	10
2.3.2	Διακόπτης φορτίου	11
2.3.3	Διακόπτης ισχύος	11
2.4	Λειτουργία διακοπών απομόνωσης	12

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑ ΔΙΚΤΥΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

3.1	Εισαγωγή	17
3.2	Είδη σφαλμάτων	18
3.3	Δείκτες αξιοπιστίας	18
3.3.1	Δείκτες καταναλωτή	19
3.3.2	Ενεργειακοί δείκτες	20
3.4	Κόστος αξιοπιστίας	21
3.5	Συνάρτηση βλάβης καταναλωτών	22
3.5.1	Συνάρτηση βλάβης καταναλωτών ανά τομέα	23
3.5.2	Σύνθετη συνάρτηση βλάβης καταναλωτών	24
3.6	Αναμενόμενο κόστος διακοπών καταναλωτών	25
3.7	Εφαρμογή σε ακτινικά δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας	26
3.7.1	Αρχικό δίκτυο	26
3.7.2	Επίδραση συσκευών προστασίας	28

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΔΙΑΚΟΠΤΩΝ ΑΠΟΜΟΝΩΣΗΣ ΣΕ ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ

4.1	Εισαγωγή	31
4.2	Ταξινόμηση προβλημάτων βελτιστοποίησης	32
4.2.1	Γραμμικά προβλήματα	33
4.2.2	Μεικτά – ακέραια γραμμικά προβλήματα	33
4.3	Μοντελοποίηση προβλήματος βέλτιστης τοποθέτησης διακοπών απομόνωσης σε δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας	34
4.3.1	Περιγραφή του προβλήματος βέλτιστης τοποθέτησης διακοπών απομόνωσης σε ΔΔΗΕ	34
4.3.2	Αντικειμενική συνάρτηση	35
4.3.3	Περιορισμοί	36
4.4	Αριθμητικό παράδειγμα	38

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΕΠΙΛΥΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗΣ ΔΙΑΚΟΠΤΩΝ ΑΠΟΜΟΝΩΣΗΣ ΣΕ ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ**

5.1	Εισαγωγή	41
5.2	Το λογισμικό GAMS	41
5.2.1	Σύνολα	43
5.2.2	Εισαγωγή δεδομένων	44
5.2.3	Μεταβλητές	46
5.2.4	Εξισώσεις	47
5.2.5	Είδη μοντέλων	48
5.2.6	Ο solver Cplex	48
5.2.7	Αρχείο εξόδου	49
5.2.8	Διαδικασία επίλυσης	51

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ**

6.1	Εισαγωγή	53
6.2	Εφαρμογή σε δίκτυο 14 κόμβων	54
6.2.1	Δεδομένα του συστήματος	54
6.2.2	Αποτελέσματα	56
6.2.2.1	Σενάριο 1	57
6.2.2.2	Σενάριο 2	58
6.2.2.3	Ανάλυση ευαισθησίας	60
6.3	Εφαρμογή σε δίκτυο 29 κόμβων	66
6.3.1	Δεδομένα του συστήματος	66

6.3.2	Αποτελέσματα	68
6.3.2.1	Σενάριο 1	68
6.3.2.2	Σενάριο 2	71
6.3.2.3	Ανάλυση ευαισθησίας	72
6.4	Σχολιασμός αποτελεσμάτων	78

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

7.1	Εισαγωγή	81
7.2	Σύνοψη της εργασίας και των αποτελεσμάτων της	81
7.3	Επεκτάσεις της εργασίας	84

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

85



## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ) καλείται το σύνολο των εγκαταστάσεων και των μέσων που χρησιμοποιούνται για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε εξυπηρετούμενες περιοχές κατανάλωσης. Βασικές προϋποθέσεις καλής λειτουργίας ενός ΣΗΕ είναι να παρέχει ηλεκτρική ενέργεια οπουδήποτε υπάρχει ζήτηση με το ελάχιστο δυνατό κόστος και τις ελάχιστες οικολογικές επιπτώσεις, εξασφαλίζοντας σταθερή συχνότητα, σταθερή τάση και υψηλή αξιοπιστία τροφοδότησης.

Η τροφοδότηση των καταναλωτών με ηλεκτρική ενέργεια προϋποθέτει τρεις ξεχωριστές λειτουργίες του ΣΗΕ: την παραγωγή, τη μεταφορά και τη διανομή. Η ηλεκτρική ενέργεια από το σημείο που θα παραχθεί μέχρι το σημείο που θα καταναλωθεί βρίσκεται σε μια συνεχή ροή και επειδή η ηλεκτρική ενέργεια δεν μπορεί να αποθηκευτεί σε μεγάλες ποσότητες με οικονομικό τρόπο, πρέπει να παράγεται τη στιγμή ακριβώς που χρειάζεται η κατανάλωσή της.

Η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται στους σταθμούς παραγωγής. Κύριοι σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι οι θερμικοί και οι υδροηλεκτρικοί. Τελευταία γίνεται μια ανάπτυξη στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας κυρίως με την εκμετάλλευση του αέρα και του ήλιου.

Η μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλες ποσότητες από τα εργοστάσια παραγωγής προς τις περιοχές κατανάλωσης γίνεται με τις γραμμές υψηλής τάσης (ΥΤ) και υπερυψηλής τάσης (ΥΥΤ), οι οποίες μεταφέρουν την ηλεκτρική ενέργεια σε κεντρικά σημεία του δικτύου, τους υποσταθμούς, από όπου ξεκινούν τα δίκτυα διανομής μέσης τάσης (ΜΤ) που διανέμουν την ηλεκτρική ενέργεια στους καταναλωτές δια μέσου των υποσταθμών διανομής και των γραμμών χαμηλής τάσης (ΧΤ).

Η δομή του συστήματος επηρεάζεται σημαντικά από το μέγεθος της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας, τη χρονική της μεταβολή κατά τη διάρκεια του 24ώρου και από τη χωροταξική της κατανομή. Τα συστήματα που χρησιμοποιούνται είναι τριφασικά εναλλασσόμενου ρεύματος, συχνότητας 50 ή 60 Hz, χρησιμοποιούνται όμως και συστήματα συνεχούς ρεύματος για τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας. Η τάση λειτουργίας πρέπει να παραμένει σταθερή στην ονομαστική τιμή. Οι γραμμές μεταφοράς και οι γραμμές διανομής μέσης τάσης έχουν τρεις αγωγούς φάσεων, ενώ οι γραμμές διανομής χαμηλής τάσης διαθέτουν επίσης και τον ουδέτερο αγωγό. Στα τριφασικά συστήματα η ροή της ενέργειας είναι συνεχής και κάνει τη λειτουργία τους πολύ πιο ομαλή και αποδοτική από ότι θα ήταν αν η ροή ήταν παλλόμενη, όπως συμβαίνει στα μονοφασικά συστήματα.

Οι πελάτες που είναι συνδεδεμένοι στα δίκτυα υψηλής και μέσης τάσης είναι στην πλειονότητά τους βιομηχανικοί καταναλωτές ενώ στα δίκτυα χαμηλής τάσης συνδέονται πελάτες οικιακής χρήσης και ένα μεγάλο μέρος των πελατών εμπορικής χρήσης.

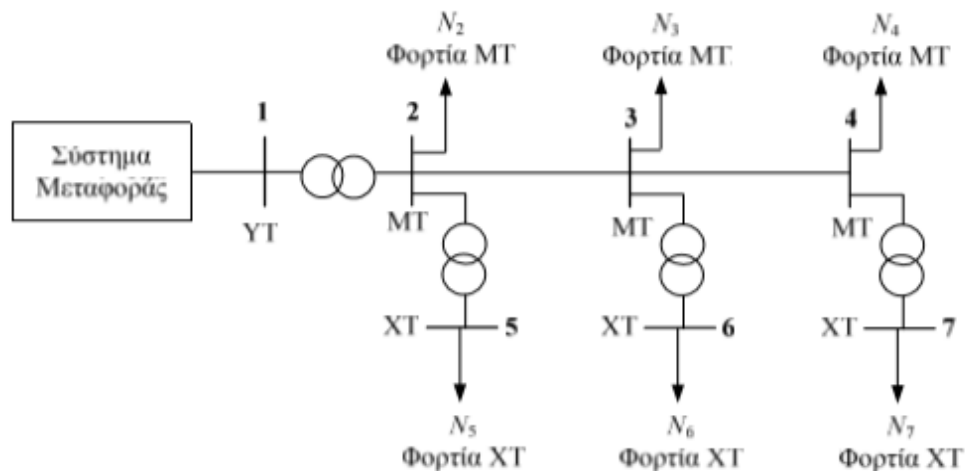
Η συνολική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας καθορίζει την ποσότητα των καυσίμων που χρησιμοποιούνται για τη λειτουργία των σταθμών παραγωγής, ενώ η καμπύλη ζήτησης περιγράφει χρονικά την απασχόληση των εγκαταστάσεων μεταφοράς και διανομής από τους καταναλωτές. Τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα της ζήτησης διαμορφώνουν το κόστος λειτουργίας μιας επιχείρησης ηλεκτρισμού. Το κόστος προοδευτικά αυξάνει από την παραγωγή προς τη διανομή, γιατί μεσολαβούν πρόσθετες εγκαταστάσεις [1].

## 1.2 ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Η διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας είναι το σύνολο των διαδικασιών λειτουργίας και ελέγχου με σκοπό την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στους καταναλωτές μέσης και χαμηλής τάσης.

Τα δίκτυα διανομής είναι τριφασικά και έχουν ως αφετηρία τους υποσταθμούς υποβιβασμού υψηλής τάσης προς μέση τάση (Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ), όπου σταματά το δίκτυο μεταφοράς. Περιλαμβάνουν το σύνολο των γραμμών ηλεκτροδότησης μέσης και χαμηλής τάσης μέχρι τους μετρητές παροχής ενέργειας των καταναλωτών. Μετά από κάθε μετρητή ξεκινά η ιδιωτική εσωτερική ηλεκτρική εγκατάσταση, που αποτελείται από το εσωτερικό δίκτυο διανομής και τις συσκευές κατανάλωσης. Οι υποδομές της διανομής είναι εκτεταμένες, προκειμένου να εξυπηρετηθούν όλοι οι καταναλωτές είτε πρόκειται για πυκνοκατοικημένες αστικές περιοχές είτε για απομακρυσμένες αγροτικές περιοχές [1].

Το Σχήμα 1.1 δείχνει ένα τυπικό ΔΔΗΕ, το οποίο αποτελείται από 7 κόμβους (1 έως 7). Το ΔΔΗΕ τροφοδοτεί φορτία Μέσης Τάσης (ΜΤ) στους κόμβους 2, 3 και 4, καθώς και φορτία Χαμηλής Τάσης (ΧΤ) στους κόμβους 5, 6 και 7. Ο Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ (υποσταθμός υψηλής τάσης / μέσης τάσης) μεταξύ των κόμβων 1 και 2, συνδέει το ΔΔΗΕ (κόμβοι 1 έως 7) με το σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Το ΔΔΗΕ έχει τρεις Υ/Σ ΜΤ/ΧΤ (υποσταθμούς μέσης τάσης / χαμηλής τάσης), που βρίσκονται στους κλάδους 2-5, 3-6 και 4-7, αντίστοιχα. Κάθε Υ/Σ ΜΤ/ΧΤ διαθέτει μετασχηματιστή (Μ/Σ) διανομής ΜΤ/ΧΤ. Το ΔΔΗΕ διαθέτει τη γραμμή τροφοδοσίας (γραμμή διανομής μέσης τάσης, feeder) 2-3-4, μέσω της οποίας συνδέονται οι κόμβοι ΜΤ 2, 3 και 4 με τον Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ [2].



Σχήμα 1.1: Τυπικό δίκτυο διανομής [2].



Σε αντίθεση με τα δίκτυα μεταφοράς, που παρουσιάζουν εν γένει παρόμοια χαρακτηριστικά κατασκευής σε μεγάλο εύρος χωρών, η μορφολογία των δικτύων διανομής εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το είδος και την πυκνότητα φορτίων των καταναλωτών, που καθορίζονται τόσο από τη χωροταξική διαμόρφωση της κάθε χώρας, όσο και από τα χαρακτηριστικά δόμησης των επιμέρους περιοχών. Για το λόγο αυτό απαντώνται διαφορές μεταξύ των δικτύων διανομής ακόμη και εντός της ίδιας χώρας, όχι μόνο όσον αφορά στα χαρακτηριστικά λειτουργίας, όπως τα επίπεδα τάσης, αλλά ακόμα και στην τοποθέτηση και τον τρόπο διασύνδεσης των γραμμών.

Κατασκευαστικά τα ΔΔΗΕ διακρίνονται σε δύο κατηγορίες: τα εναέρια και τα υπόγεια δίκτυα. Τα εναέρια δίκτυα κατασκευάζονται συνηθέστερα σε περιοχές με μικρή πυκνότητα φορτίου καθώς καταλαμβάνουν σημαντικό χώρο. Αντιθέτως, τα υπόγεια δίκτυα κατασκευάζονται κατά κύριο λόγο στα κέντρα μεγάλων πόλεων με μεγάλη πυκνότητα φορτίου τόσο για λόγους διαθέσεως χώρου, όσο και για λόγους αισθητικής. Τα εναέρια δίκτυα έχουν επικρατήσει έναντι των υπογείων δεδομένου ότι είναι λιγότερο δαπανηρά από τα υπόγεια, ενώ η συντήρηση και η επισκευή τους σε περίπτωση βλάβης είναι ευκολότερη και ταχύτερη. Σε ορισμένες περιπτώσεις βέβαια συναντάται η χρήση συνδυασμού και των δύο ειδών δικτύων [1].

Ανάλογα με τη θέση και το είδος των φορτίων τροφοδότησης τα δίκτυα μπορεί να εμφανίζουν από διαφορετικές τιμές λειτουργίας έως και διαφορετική συνδεσμολογία μεταξύ των γραμμών. Συγκεκριμένα διακρίνουμε τις εξής βασικές τοπολογίες δικτύων: τα ακτινικά και τα βροχοειδή.

Στα ακτινικά δίκτυα κάθε κύρια γραμμή διανομής συνδέεται μόνο από το ένα άκρο του σε μετασηματιστή υποβιβασμού τάσης και διακλαδίζεται σε ολοένα μικρότερες γραμμές δημιουργώντας έτσι δενδροειδές δίκτυο, με απολήξεις τους μετασηματιστές διανομής. Αυτή η τοπολογία χρησιμοποιείται κυρίως σε εναέρια δίκτυα. Τόσο η προστασία όσο και η επέκταση των συστημάτων αυτών είναι σχετικά εύκολες λόγω του απλού σχεδιασμού τους. Ωστόσο βασικό μειονέκτημα είναι η σχετικά μεγάλη πτώση τάσης που σημειώνεται στα άκρα τους με αποτέλεσμα πιο αυξημένη δυσκολία στη ρύθμιση του επιπέδου τάσης τους. Επίσης, η αξιοπιστία παροχής ηλεκτρικής ενέργειας σε αυτά είναι περιορισμένη.

Στα βροχοειδή δίκτυα παρέχεται ηλεκτρική ενέργεια στις κύριες γραμμές διανομής από τα δύο άκρα τους, τα οποία μπορεί να βρίσκονται στον ίδιο ή και σε διαφορετικούς μετασηματιστές υποβιβασμού. Κάθε κύρια γραμμή σχηματίζει βρόχο μέσω ενός αποζεύκτη ο οποίος παραμένει ανοικτός σε κανονική λειτουργία διαχωρίζοντας το βρόχο σε δύο ίσα τμήματα. Καθένα από αυτά τα τμήματα σχεδιάζεται ώστε να μπορεί να εξυπηρετήσει τα συνδεδεμένα σε αυτό φορτία μαζί με τα φορτία του άλλου μισού. Με αυτό τον τρόπο είναι δυνατή η μεταφορά των φορτίων του ενός μισού στο άλλο σε περίπτωση βλάβης τμήματος της κύριας γραμμής, κλείνοντας τον αποζεύκτη στο σημείο σύνδεσης. Τα βροχοειδή δίκτυα είναι κυρίως υπόγεια και εμφανίζουν μεγαλύτερη αξιοπιστία παροχής ενέργειας από τα ακτινικά [3].

Υπεύθυνοι για την λειτουργία, συντήρηση και ανάπτυξη των δικτύων διανομής διάφορων περιοχών ή και χωρών είναι οι Διαχειριστές Δικτύων Διανομής (Distribution System Operators – DSOs). Τη διαχείριση του ελληνικού δικτύου διανομής έχει από το 2010 ο Δ.Ε.Δ.Δ.Η.Ε. (Διαχειριστής Ελληνικού Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας), θυγατρική εταιρεία της Δ.Ε.Η. που όμως είναι ανεξάρτητη λειτουργικά και διοικητικά. Σύμφωνα με τα στοιχεία του ΔΕΔΔΗΕ τα ποσοτικά μεγέθη του ελληνικού δικτύου διανομής για το τέλος του έτους 2015 είναι τα ακόλουθα [4]:

- Δίκτυο Μέσης Τάσης (Μ.Τ.): 111.130 χλμ
- Δίκτυο Χαμηλής Τάσης (Χ.Τ.): 125.160 χλμ
- Υποσταθμοί Μέσης Τάσης προς Χαμηλή Τάση (Υ/Σ ΜΤ/ΧΤ): 161.180
- Υποσταθμοί Υψηλής Τάσης προς Μέση Τάση (Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ): 225

Η πολύ μεγάλη έκταση των ΔΔΗΕ σε συνδυασμό με την πολυπλοκότητα τους, που αναπόφευκτα υπεισέρχεται στη λειτουργία τους εξαιτίας του τεράστιου πλήθους των επί μέρους συνιστωσών που τα αποτελούν, επιβάλλουν τον προσεκτικό σχεδιασμό τους ή τη βέλτιστη επαναδιαμόρφωσή τους. Η ανάπτυξη των ΔΔΗΕ, δηλαδή η κατασκευή νέων έργων και η αντικατάσταση των υφιστάμενων, πραγματοποιείται σταδιακά, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται με το βέλτιστο τεχνικά και οικονομικά τρόπο, η ικανοποιητική εξυπηρέτηση των καταναλωτών, των οποίων το πλήθος και το φορτίο συνεχώς μεταβάλλονται. Η ίδια η δομή των ΔΔΗΕ επιτρέπει παρεμβατικές προσεγγίσεις σε αυτά, τόσο σε πραγματικό χρόνο όσο και σε επίπεδο προγραμματισμένου σχεδιασμού δράσης, με σκοπό την απρόσκοπτη λειτουργία τους αλλά και τη βελτιστοποίησή τους αντίστοιχα. Ως βέλτιστη λειτουργία σημαίνει αξιόπιστη εξασφάλιση τροφοδοσίας στο σύνολο των καταναλωτών με το μικρότερο δυνατό κόστος, ενώ από την άλλη αναποτελεσματική λειτουργία οφείλεται πρακτίστως σε εκδηλώσεις σφαλμάτων των λειτουργικών στοιχείων των ΔΔΗΕ.

Δεδομένου ότι βλάβες σε οποιοδήποτε σημείο του ΔΔΗΕ προκαλούν τη διακοπή της τροφοδοσίας των τελικών καταναλωτών, όλα τα κριτήρια σχεδιασμού των ΔΔΗΕ έχουν στόχο την ελαχιστοποίηση των διακοπών εντός οικονομικών ορίων. Ακόμη και οι σύντομες στιγμιαίες διακοπές μπορούν να προκαλέσουν τεράστιες ζημιές σε διάφορα είδη καταναλωτών. Στη σημερινή εποχή, η συνεχής τροφοδοσία των καταναλωτών κρίνεται απαραίτητη. Όμως δεν είναι ούτε τεχνικά ούτε οικονομικά εφικτό να σχεδιαστεί, να κατασκευαστεί και να λειτουργήσει ένα δίκτυο με μηδενική πιθανότητα βλάβης. Συνεπώς κάθε ΔΔΗΕ θα πρέπει να εξοπλιστεί κατάλληλα με διακοπτικά στοιχεία εξασφαλίζοντας την τροφοδότηση όλων των φορτίων, επιδιώκοντας υψηλά επίπεδα ποιότητας και αξιοπιστίας [2].

Με τη βοήθεια των διακοπών απομόνωσης είναι δυνατή η απομόνωση τμημάτων δικτύων διανομής στα οποία εμφανίστηκε σφάλμα και η αποκατάσταση της τροφοδοσίας σε όσο το δυνατόν περισσότερους καταναλωτές πριν ολοκληρωθεί η διαδικασία διόρθωσης των σφαλμάτων αυτών. Η επιλογή του κατάλληλου πλήθους και της θέσης τους στα ΔΔΗΕ συμβάλει στην ελαχιστοποίηση του συνολικού φορτίου που θα αποσυνδεθεί και επομένως συντελεί σε μειωμένα κόστη που οφείλονται στις διακοπές τροφοδοσίας των καταναλωτών.

### 1.3 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΚΑΙ ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας αποτελεί η βέλτιστη τοποθέτηση διακοπών απομόνωσης σε δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας (ΔΔΗΕ) με σκοπό την ελαχιστοποίηση του αναμενόμενου κόστους διακοπών των καταναλωτών σε συνδυασμό με την ελαχιστοποίηση του κόστους επένδυσης, εγκατάστασης, ετήσιας λειτουργίας και συντήρησης των διακοπών αυτών, με σκοπό τη βελτίωση της αξιοπιστίας των ΔΔΗΕ. Πιο αναλυτικά, η παρούσα εργασία οργανώνεται σε επτά κεφάλαια:

Στο **Κεφάλαιο 2** περιγράφεται γενικά ο εξοπλισμός των δικτύων διανομής. Γίνεται αναφορά στις σημαντικότερες διατάξεις και τα μέσα προστασίας που απαρτίζουν τα ΔΔΗΕ, καθώς επίσης επεξηγείται και η λειτουργία των διακοπών απομόνωσης.

Στο **Κεφάλαιο 3** γίνεται ανάλυση της αξιοπιστίας ακτινικών δικτύων διανομής και παρουσιάζονται οι βασικότεροι δείκτες που χαρακτηρίζουν την αξιοπιστία των δικτύων διανομής. Για την αποτίμηση της αξιοπιστίας των ΔΔΗΕ με οικονομικούς όρους ορίζονται και αναλύονται οι έννοιες της συνάρτησης βλάβης καταναλωτών και του αναμενόμενου κόστους διακοπών των καταναλωτών.

Στο **Κεφάλαιο 4** παρουσιάζεται η μαθηματική διατύπωση του προβλήματος της βέλτιστης τοποθέτησης διακοπών απομόνωσης σε ΔΔΗΕ με τον ορισμό της αντικειμενικής συνάρτησης και των αντίστοιχων περιορισμών. Παρατίθεται αριθμητικό παράδειγμα εφαρμογής του μοντέλου σε ένα δίκτυο δύο κόμβων.

Στο **Κεφάλαιο 5** περιγράφεται το λογισμικό GAMS που χρησιμοποιήθηκε για την ανάπτυξη του σχετικού κώδικα επίλυσης του μοντέλου.

Στο **Κεφάλαιο 6** γίνεται εφαρμογή του λογισμικού που αναπτύχθηκε σε δύο ακτινικά δίκτυα διανομής. Παρουσιάζονται τα δεδομένα των δικτύων που χρησιμοποιήθηκαν, τα αποτελέσματα που προέκυψαν μέσα από τα σενάρια που μελετήθηκαν, πραγματοποιείται ανάλυση ευαισθησίας καθώς και σχολιασμός των αποτελεσμάτων από την εκτέλεση των σεναρίων του προγράμματος. Συγκεκριμένα, το πρόγραμμα εφαρμόστηκε στα δίκτυα διανομής που είναι συνδεδεμένα στους ζυγούς 2 και 4 του πρότυπου συστήματος RBTS (Roy Billinton Test System).

Στο **Κεφάλαιο 7** παρατίθεται μία σύνοψη της εργασίας, παρουσιάζονται συμπεράσματα που προέκυψαν από αυτήν και προτείνονται τρόποι βελτίωσης και επέκτασης της εργασίας.

Στο **Κεφάλαιο 8** εκτίθεται η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε στην εργασία.



## **ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΔΙΚΤΥΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

### **2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Η λειτουργία ενός Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΔΔΗΕ) μπορεί να χαρακτηριστεί ως βέλτιστη όταν τροφοδοτεί το φορτίο του κατά τρόπο ώστε οι απώλειες να είναι οι ελάχιστες δυνατές και η ποιότητα εξυπηρέτησης των καταναλωτών βέλτιστη. Δεδομένου ότι η ποιότητα εξυπηρέτησης εκφράζεται κυρίως από τη συνέχεια της παροχής ηλεκτρικής ενέργειας (αξιοπιστία) και τη σταθερότητα της τάσης τροφοδότησης των καταναλωτών, η βέλτιστη λειτουργία καθορίζεται από τους ακόλουθους τρεις παράγοντες: απώλειες, συνέχεια (αξιοπιστία) τροφοδότησης και σταθερότητα της τάσης. Πρωταρχικό ρόλο λοιπόν παίζει ο εξοπλισμός του ΔΔΗΕ με τον οποίο επιτυγχάνεται η βέλτιστη λειτουργία [2].

Η προστασία γενικά των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας και ειδικότερα των Δικτύων Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας αποβλέπει σε τρεις κύριους στόχους οι οποίοι καθορίζουν και τον τρόπο διαμόρφωσής τους [5]:

- 1) την πρόληψη ή τον περιορισμό των βλαβών των στοιχείων ΔΔΗΕ σε περίπτωση σφάλματος
- 2) τον περιορισμό των επιπτώσεων στο υπόλοιπο δίκτυο σε περίπτωση που εκδηλωθεί βλάβη και ιδιαίτερα την αποφυγή της θέσεως εκτός λειτουργίας και άλλων στοιχείων του δικτύου, καθώς και την ελαχιστοποίηση των διακοπών τροφοδότησης των καταναλωτών και
- 3) την αποφυγή της δημιουργίας επικίνδυνων καταστάσεων για πρόσωπα (ηλεκτροπληξία) και πράγματα (πυρκαγιά εξοπλισμού).

Επιπρόσθετα, κάθε υπέρβαση των χαρακτηριστικών μεγεθών λειτουργίας του ΔΔΗΕ (π.χ. της τάσης) ή της ικανότητας φόρτισής του μπορεί να οδηγήσει σε βλάβη του. Ένας λάθος χειρισμός ή μια λανθασμένη ενέργεια (όπως το άνοιγμα ενός διακόπτη ΜΤ, υπερτάσεις χειρισμών) σε μια εγκατάσταση, μπορεί να έχει σοβαρές συνέπειες σε αυτήν και να προκαλέσει ακόμα και θανατηφόρα ατυχήματα. Τα μέσα προστασίας ΜΤ πρέπει να επιλέγονται με πολύ μεγάλη προσοχή.

Έτσι ο ρόλος του συστήματος προστασίας είναι η ανίχνευση και απομόνωση ενός σφάλματος και ο περιορισμός των επιπτώσεών του στο υπόλοιπο σύστημα. Τα συστήματα προστασίας αυξάνουν την ευστάθεια των ΣΗΕ και κατά συνέπεια επιτρέπουν καλύτερη αξιοποίηση των δυνατοτήτων του συστήματος.

Όπως όλα τα μέρη ενός συστήματος ισχύος, τα συστήματα προστασίας αξιολογούνται με βάση τη συμβολή τους στην καλύτερη και οικονομικότερη εξυπηρέτηση των πελατών.

## 2.2 ΜΕΣΑ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ

Εκτός από τον εξοπλισμό των γραμμών και υποσταθμών, που έχει ως στόχο τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας (καλώδια, αγωγοί, μετασχηματιστές κλπ), στα ΣΗΕ, είναι εγκατεστημένος και εξοπλισμός που έχει ως στόχο την προστασία και τη λειτουργία τους.

Με τον όρο «προστασία» υποδηλώνεται η αντιμετώπιση σφαλμάτων και υπερφορτίσεων των δικτύων. Κατά κανόνα, η προστασία συνίσταται στη διακοπή της ηλεκτροδότησης και την απομόνωση στοιχείων των δικτύων σε περίπτωση σφάλματος ή υπερφόρτισης, έγκαιρα, πριν δημιουργηθούν επικίνδυνες καταστάσεις για πρόσωπα και εγκαταστάσεις.

Ένα σύστημα προστασίας αποτελείται κατά κύριο λόγο από δύο είδη συσκευών: τους ηλεκτρονόμους (relays) που ανιχνεύουν μέσω εξοπλισμού μετρήσεων την εμφάνιση των σφαλμάτων και τους διακόπτες που δέχονται τις εντολές των ηλεκτρονόμων για άνοιγμα ή κλείσιμο των επαφών τους, ώστε να απομονώσουν το εσφαλμένο τμήμα.

Συγκεκριμένα οι ηλεκτρονόμοι δέχονται ως εισόδους στοιχεία σχετικά με την κατάσταση του δικτύου (κατά κανόνα στοιχεία τάσεων και εντάσεων) μέσω μετασχηματιστών μετρήσεων και τα επεξεργάζονται. Εάν διαγνώσουν σφάλμα, δίνουν εντολή λειτουργίας (trip) στο μέσο προστασίας το οποίο ελέγχουν. Οι πιο διαδεδομένοι ηλεκτρονόμοι στα ΔΔΗΕ είναι:

- Ηλεκτρονόμοι υπερέντασης
- Ηλεκτρονόμοι τάσης
- Ηλεκτρονόμοι απόστασης
- Ηλεκτρονόμοι διαφορικής προστασίας
- Ψηφιακοί ηλεκτρονόμοι

Μέσα προστασίας είναι και οι ασφάλειες, οι οποίες έχουν τη δυνατότητα να ανιχνεύουν και να διακόπτουν υπερεντάσεις ταυτόχρονα. Οι ασφάλειες ΜΤ χρησιμοποιούνται για να προστατεύσουν ένα κύκλωμα ΜΤ, όταν σε αυτό υπάρχει βραχυκύκλωμα αλλά και υπερφόρτιση η οποία διαρκεί αρκετή ώρα. Οι ασφάλειες ΜΤ χωρίζονται σε δυο βασικές κατηγορίες:

- Ασφάλειες Σκόνης
- Ασφάλειες Εκτόνωσης

Ο τηλεχειρισμός και η τηλεοπτεία των κύριων μέσων προστασίας των ΔΔΗΕ από τοπικό Κέντρο Ελέγχου Δικτύων είναι μια πρακτική η οποία διευρύνεται σταδιακά στις ηλεκτρικές επιχειρήσεις, διεθνώς. Με τον τηλεχειρισμό και την τηλεοπτεία και ακόμη περισσότερο με την αυτοματοποίηση των δικτύων μειώνονται σημαντικά οι χρόνοι εντοπισμού και απομόνωσης σφαλμάτων και βελτιώνεται αντίστοιχα η ποιότητα ηλεκτροδότησης.

Οι κυριότεροι παράγοντες που χαρακτηρίζουν ποιοτικά χαρακτηριστικά ένα σύστημα προστασίας είναι οι ακόλουθοι [6]:

- ✓ η *αξιοπιστία* (reliability): είναι η πιθανότητα όταν συμβεί σφάλμα, το σύστημα προστασίας να λειτουργήσει ορθά και σύμφωνα με τις προδιαγραφές του (ως προς

το χρόνο διακοπής του ρεύματος σφάλματος). Επιπλέον, δεν θα πρέπει να ενεργοποιείται χωρίς να υπάρχει σφάλμα.

- ✓ η *επιλογικότητα* (selectivity): είναι η ικανότητα ενός συστήματος να ενεργοποιεί μόνο τις πλησιέστερες στο σφάλμα συσκευές προστασίας. Δηλαδή για να διακόψει ένα μέσο γρηγορότερα από ένα άλλο, εφόσον διαρρέονται από το ίδιο ρεύμα, πρέπει ο χρόνος αντίδρασης του πρώτου να είναι μικρότερος από το χρόνο του δεύτερου. Έτσι ώστε σε περίπτωση σφάλματος να τεθεί εκτός τάσης το μικρότερο δυνατό τμήμα του δικτύου διασφαλίζοντας την ομαλή λειτουργία του υπόλοιπου.
- ✓ η *διαβάθμιση* (coordination): έγκειται στον καθορισμό των κατάλληλων κλιμακωτών ρυθμίσεων για τη επίτευξη της επιλογικότητας.
- ✓ η *ευαισθησία* (sensitivity): είναι η ικανότητα ενός συστήματος προστασίας να ανιχνεύει ασθενείς ενδείξεις σφάλματος, χωρίς ωστόσο να επηρεάζεται από διαταραχές του δικτύου που δεν αποτελούν σφάλματα (μεταβατικά φαινόμενα λόγω χειρισμών) ή από εξωγενείς παράγοντες (ηλεκτρομαγνητικά πεδία στο περιβάλλον). Συνήθως σχετίζεται με την ελάχιστη τιμή ρεύματος σφάλματος για την οποία λειτουργεί μια διάταξη προστασίας.
- ✓ η *ταχύτητα λειτουργίας* (operating time): το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ της εμφάνισης ενός σφάλματος και της λειτουργίας του Η/Ν πρέπει να τηρείται σε μια προκαθορισμένη τιμή. Μία υπέρβαση μπορεί να προκαλέσει τη διακοπή της λειτουργίας ενός ολόκληρου Υ/Σ αντί μιας γραμμής. Αλλά από την άλλη πλευρά μια πολύ ταχεία προστασία (πχ κάτω των 10 msec) μπορεί να προκαλέσει τη λειτουργία των προστασιών χωρίς λόγο. Το κριτήριο αυτό έχει σχέση με την ασφάλεια προσώπων και εγκαταστάσεων καθώς και με το κόστος (αποκατάστασης ζημιών).
- ✓ η *διακριτικότητα* (discrimination): είναι η ικανότητα ενός Η/Ν να διακρίνει μεταξύ σφάλματος ή μιας υπερβάσεως οφειλόμενης σε μεταβατική κατάσταση. Για παράδειγμα η διάκριση μεταξύ ρεύματος σφάλματος και ρεύματος παρεμβολής (ζεύξης) ενός Μ/Σ.

### 2.3 ΔΙΑΚΟΠΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Με τη χρήση των διακοπών είναι δυνατή η απομόνωση διαφόρων τμημάτων του δικτύου για λόγους ασφαλείας, συντήρησης ή επισκευής διατηρώντας παράλληλα την παροχή ενέργειας στο υπόλοιπο δίκτυο. Με την τοποθέτησή τους σε κατάλληλα σημεία μπορούν να ελαχιστοποιήσουν το εκάστοτε μέρος που αποσυνδέεται αυξάνοντας έτσι την αξιοπιστία του δικτύου. Απαιτείται βέβαια κατάλληλος σχεδιασμός των γραμμών ώστε να μπορούν σε τέτοιες περιπτώσεις να παρέχουν εναλλακτικές οδούς παροχής ενέργειας σε σημεία του δικτύου.

Για το λόγο αυτό σε κάποια δίκτυα σχεδιάζονται γραμμές οι οποίες υπό φυσιολογικές συνθήκες δεν λαμβάνουν μέρος στην τροφοδότηση, αλλά ως σκοπό έχουν τη δημιουργία συνδέσεων μεταξύ κατάλληλων σημείων των κυρίων γραμμών διανομής του δικτύου. Αυτές ονομάζονται γραμμές διασύνδεσης (tie lines). Ως αποτέλεσμα, σε περίπτωση αποσύνδεσης μιας ή περισσότερων γραμμών τροφοδότησης, μπορεί να αποκατασταθεί η παροχή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω των γραμμών διασύνδεσης σε σημεία που ειδάλλως θα έμεναν εκτός δικτύου [7].

Υπάρχουν επομένως διακόπτες κανονικά κλειστοί, οι οποίοι συνδέουν τις γραμμές μεταξύ τους κατά την φυσιολογική λειτουργία του δικτύου και άλλοι που είναι κανονικά ανοικτοί (για τη διατήρηση της ακτινικής δομής των ΔΔΗΕ) και κλείνουν μόνον όταν κριθεί απαραίτητο. Με αυτό τον τρόπο πραγματοποιείται επαναδιαμόρφωση (reconfiguration) του δικτύου ανακατευθύνοντας τη ροή ισχύος σε διαφορετικά τμήματά του. Οι κανονικά κλειστοί ονομάζονται διακόπτες απομόνωσης (sectionalizing switches) ενώ οι κανονικά ανοικτοί λέγονται αποζεύκτες ανοικτοί υπό φορτίο (tie switches). Οι διακόπτες και των δύο κατηγοριών μπορούν να είναι χειροκίνητοι ή τηλεχειριζόμενοι.

Στα δίκτυα διανομής συμπεριλαμβάνεται πλήθος συσκευών που χρησιμοποιούνται για σύνδεση και αποσύνδεση τμημάτων τους. Διακρίνονται ανάλογα με τα χαρακτηριστικά και τη χρήση τους σε:

- Αποζεύκτες και γειωτές : Χρησιμοποιούνται για απομόνωση τμημάτων κυκλώματος αλλά μόνο όταν το κύκλωμα έχει ήδη τεθεί εκτός τάσης και δε διαρρέεται από ρεύμα.
- Διακόπτες Φορτίου : Χρησιμοποιούνται για αποσύνδεση μερών του κυκλώματος όταν αυτό λειτουργεί μέχρι και το ονομαστικό ρεύμα.
- Διακόπτες Ισχύος : Πρόκειται για μέσα προστασίας που προκαλούν τη διακοπή λειτουργίας του κυκλώματος όταν το ρεύμα σε αυτό υπερβεί τα επιτρεπτά όρια λειτουργίας.

### 2.3.1 Αποζεύκτης και γειωτής

Οι αποζεύκτες (disconnectors) και οι γειωτές (earthing switches) ανοίγουν και κλείνουν το κύκλωμα, όταν αυτό διαρρέεται από ελάχιστο ρεύμα ή υπάρχει μηδενική τάση. Οι διατάξεις αυτές έχουν ορατές επαφές, οι οποίες χρησιμοποιούνται σε μια εγκατάσταση, για να μπορεί κάποιος να βλέπει από απόσταση κάθε στιγμή και να είναι σίγουρος αν η εγκατάσταση είναι υπό τάση ή εκτός τάσης.

Συγκεκριμένα, ο κύριος ρόλος τους είναι η δημιουργία επαρκούς διακένου απομόνωσης μεταξύ του τμήματος του δικτύου που τίθεται εκτός τάσης και του υπόλοιπου δικτύου, ώστε να μπορούν να γίνουν εργασίες με ασφάλεια στο απομονωμένο τμήμα. Αφού απομονωθεί ορατά ένα μέρος της εγκατάστασης από την υπόλοιπη, η υπόλοιπη εγκατάσταση μπορεί να τεθεί πάλι υπό τάση. Επειδή όμως μπορεί να υπάρχει τάση 20 kV στην πλευρά που έγινε η διακοπή, υπάρχει περίπτωση να επαχθεί τάση στο απομονωμένο τμήμα. Η τάση που επάγεται ενδέχεται να πάρει μεγάλη τιμή, επικίνδυνη για κάποιον που εργάζεται στο απομονωμένο τμήμα. Για το λόγο αυτό, αφού ανοίξουν οι αποζεύκτες και απομονώσουν ένα τμήμα, κλείνουν οι γειωτές, οι οποίοι γειώνουν το τμήμα αυτό, οπότε είναι δυνατόν να εκτελεστούν πιθανές εργασίες επισκευής ή συντήρησης στο απομονωμένο τμήμα με ασφάλεια.

Οι αποζεύκτες πρέπει να αντέχουν στα ρεύματα σφαλμάτων όταν είναι κλειστοί, καθώς επίσης και στις υπερτάσεις που ενδεχομένως να εμφανισθούν, όταν αυτοί είναι ανοικτοί. Για λόγους ασφαλείας, οι αποζεύκτες και οι γειωτές πρέπει να μανδάλωνονται μηχανικά με τους διακόπτες φορτίου ή ισχύος, δηλαδή να ανοίγουν πρώτα οι διακόπτες και στη συνέχεια οι αποζεύκτες και οι γειωτές. Σε αντίθετη περίπτωση θα δημιουργηθεί ένα μεγάλο ηλεκτρικό τόξο επικίνδυνο για την εγκατάσταση. Η σειρά χειρισμών που πρέπει να τηρείται κατά τη διακοπή τροφοδοσίας σε ένα τμήμα είναι:



1. Άνοιγμα διακόπτη (φορτίου ή ισχύος)
2. Άνοιγμα αποζεύκτη
3. Κλείσιμο γειωτή

Η σειρά χειρισμών που πρέπει να τηρείται κατά την επανατροφοδότηση του απομονωμένου τμήματος είναι η αντίστροφη.

### 2.3.2 Διακόπτης Φορτίου

Οι διακόπτες φορτίου (load switches) μπορούν να ανοίξουν και να κλείσουν τις επαφές τους όταν διαρρέονται από τα ονομαστικά ρεύματα, δηλαδή σε κανονική κατάσταση λειτουργίας, αλλά φυσικά, και από μηδενικά ρεύματα. Δεν μπορούν όμως να διακόπτουν ρεύματα βραχυκύκλωσης. Κατά το άνοιγμα ή κλείσιμο του διακόπτη σε κανονικές συνθήκες δημιουργείται ένα τόξο, το οποίο πρέπει να ψυχθεί και να σβήσει. Για αυτό υπάρχει ο θάλαμος σβέσης του τόξου, στον οποίο υπάρχει ένα μέσο που βοηθάει τη διαδικασία αυτή. Ένας διακόπτης φορτίου μπορεί να χαρακτηριστεί ανάλογα με το μέσο που χρησιμοποιεί για τη σβέση του τόξου. Έτσι υπάρχουν τα παρακάτω είδη διακοπών φορτίου:

- Διακόπτης με μονωτικά τοιχώματα
- Διακόπτης αερίου SF<sub>6</sub> (εξαφθοριούχου θείου)
- Διακόπτης κενού

Οι διακόπτες φορτίου μπορεί να έχουν ορατές επαφές. Αν όμως δεν υπάρχουν αυτές πρέπει να εγκατασταθεί και ο αποζεύκτης, ο οποίος να είναι μανδαλωμένος με τον διακόπτη. Συνήθως βρίσκονται στο εμπόριο σαν συνδυασμένη μονάδα. Οι διακόπτες φορτίου μπορούν να τοποθετούνται είτε σε εξωτερικό είτε σε εσωτερικό χώρο, ανάλογα με την κατασκευή τους. Ένας διακόπτης φορτίου δεν μπορεί να χαρακτηριστεί ως μέσο προστασίας σε συνθήκες σφάλματος, επειδή σε έναν διακόπτη φορτίου μπορούν να γίνουν χειρισμοί μόνο σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας. Για αυτό ο διακόπτης φορτίου χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με ασφάλειες και ονομάζεται ασφαλειοδιακόπτης φορτίου. Ο χειρισμός του διακόπτη φορτίου γίνεται είτε χειροκίνητα, με ειδικό σύστημα μοχλού μεγάλου μήκους, για τις περιπτώσεις που αυτοί είναι υπαίθριοι και τοποθετούνται σε στύλους είτε με κινητήρα ενσωματωμένο στην διάταξή του.

### 2.3.3 Διακόπτης Ισχύος

Η βασική λειτουργία των διακοπών ισχύος (circuit breakers - CB) είναι να συνδέουν και να αποσυνδέουν κυκλώματα των ΣΗΕ σε συνθήκες κανονικής φόρτισης αλλά και βραχυκυκλώματος. Ο κύριος ρόλος τους είναι η προστασία (αυτόματο άνοιγμα του κυκλώματος σε περίπτωση σφάλματος), αλλά και η εκτέλεση χειρισμών διακοπής/αποκατάστασης του κυκλώματος. Για την προστασία των δικτύων ελέγχονται από ηλεκτρονόμους. Τοποθετούνται στους Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ στις αρχές των αναχωρήσεων γραμμών ΜΤ. Αποτελούν ένα σημαντικό συστατικό στοιχείο του ΣΗΕ, καθώς επηρεάζουν καθοριστικά την τοπολογία του και τον τρόπο λειτουργίας του. Λειτουργούν είτε αυτόματα (για απομόνωση και εκκαθάριση σφαλμάτων) είτε με χειρισμό (σε ζεύξεις- αποζεύξεις στοιχείων).

Για να επιτύχουν τη διακοπή του ρεύματος βραχυκυκλώματος, τουλάχιστον μια από τις επαφές του διακόπτη ισχύος απομακρύνεται γρήγορα από την άλλη, για να δημιουργήσει μια απόσταση μεταξύ τους ικανή για μόνιμη μόνωση μεταξύ των επαφών. Καθώς οι επαφές απομακρύνονται, δημιουργείται ηλεκτρικό τόξο μεταξύ τους, η σβέση του οποίου

επιτυγχάνεται με τις επαφές να τοποθετούνται μέσα σε ρευστό υλικό, που στόχο έχει να επιμηκύνει και να ψύξει το τόξο. Τέτοια υλικά είναι ο αέρας υπό πίεση ή όχι, ορυκτό λάδι, υψηλό κενό αέρος και εξαφθοριούχο θείο (SF<sub>6</sub>). Αμέσως μετά τη διακοπή του ρεύματος μπορεί να δημιουργηθούν επικίνδυνες υπερτάσεις, που είναι δυνατόν να προκαλέσουν επανέναρξη του τόξου και αποτυχία της λειτουργίας του διακόπτη ισχύος.

Οι διακόπτες ισχύος μπορούν να ομαδοποιηθούν με διάφορα κριτήρια όπως το επίπεδο ονομαστικής τάσης λειτουργίας τους, η ονομαστική ικανότητα διακοπής και ζεύξης τους, το μέσο σβέσης που περιέχουν, το αν λειτουργούν αυτόματα ή χειροκίνητα. Ανάλογα με το μέσο που χρησιμοποιούν για τη σβέση του ηλεκτρικού τόξου κατηγοριοποιούνται στα παρακάτω είδη διακοπτών ισχύος εσωτερικού ή εξωτερικού χώρου:

- Διακόπτης πτωχού ελαίου
- Διακόπτης αερίου SF<sub>6</sub>
- Διακόπτης κενού

Οι διακόπτες ισχύος που προτιμούνται σήμερα για προστασία είναι οι διακόπτες ισχύος πτωχού ελαίου. Ο όρος «πτωχός» αναφέρεται στην ποσότητα του λαδιού που χρησιμοποιείται σήμερα σε σχέση με παλαιότερους διακόπτες που χρησιμοποιούσαν τριπλάσιες ποσότητες. Στο δίκτυο της Δ.Ε.Η., χρησιμοποιούνται συνήθως στην αναχώρηση της γραμμής Μ.Τ. και αναφέρονται ως Ελαιοδιακόπτες (Ε/Δ).

Επειδή οι διακόπτες ισχύος δεν έχουν ορατές επαφές πρέπει να τοποθετείται πάντα ένας αποζεύκτης, ο οποίος να μανδαλώνεται με τον διακόπτη ισχύος. Και στην περίπτωση αυτή πρέπει να γίνονται χειρισμοί με τη σωστή σειρά όπως αναφέρθηκε στην Ενότητα 2.3.1. Όταν συμβεί κάποιο βραχυκύκλωμα και ανοίξει ο διακόπτης ισχύος πρέπει στη συνέχεια να ελέγχεται η κατάσταση του διακόπτη σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή.

## 2.4 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΔΙΑΚΟΠΤΩΝ ΑΠΟΜΟΝΩΣΗΣ

Οι διακόπτες απομόνωσης (sectionalizers) τοποθετούνται σε τμήματα αναχωρήσεων που προστατεύονται από διακόπτες ισχύος στις αρχές των αναχωρήσεων. Διεγείρονται από το ρεύμα βραχυκύκλωσης και από τους κύκλους λειτουργίας του διακόπτη ισχύος στην αναχώρηση της γραμμής. Μετρούν με εσωτερικό μηχανισμό, αμέσως μόλις περάσει από αυτούς το ρεύμα βραχυκύκλωσης, τους κύκλους λειτουργίας του διακόπτη ισχύος. Στον τελευταίο κύκλο ανοίγουν, αφού ανοίξει ο διακόπτης ισχύος, απομονώνοντας την περιοχή με το σφάλμα. Στη συνέχεια, ο διακόπτης ισχύος κλείνει, μένει κλειστός, ενώ ο διακόπτης απομόνωσης μένει ανοιχτός. Αν το σφάλμα είναι παροδικό και εκκαθαρίζεται πριν ο μετρητής του διακόπτη απομόνωσης φτάσει στο προκαθορισμένο όριο, ο διακόπτης απομόνωσης παραμένει κλειστός και επανέρχεται στην αρχική του κατάσταση ύστερα από καθορισμένο χρονικό διάστημα [8].

Σε παροχές ΜΤ, μπορεί ο διακόπτης απομόνωσης να ρυθμιστεί για να ανοίγει ήδη από τον πρώτο κύκλο, δηλαδή αμέσως μετά το άνοιγμα του διακόπτη ισχύος στην αναχώρηση της γραμμής ΜΤ. Έτσι απομονώνεται ο καταναλωτής, ενώ ο διακόπτης ισχύος παραμένει κλειστός. Η τροφοδότηση των λοιπών καταναλωτών ΜΤ υφίσταται μόνο τις διακοπές που προέρχονται από τους κύκλους λειτουργίας του διακόπτη ισχύος στην αναχώρηση. Ο διακόπτης απομόνωσης δεν έχει τη δυνατότητα διακοπής υπό φορτίο, πολύ περισσότερο δεν έχει τη δυνατότητα διακοπής ρεύματος σφάλματος.

Πλεονεκτήματα των διακοπών απομόνωσης έναντι των ασφαλειών είναι ότι δεν χρειάζονται αλλαγή, όπως οι ασφάλειες και έχουν πλήρη συνεργασία με το διακόπτη ισχύος στην αναχώρηση της γραμμής ΜΤ. Η επανάρθεσή τους γίνεται είτε αυτόματα είτε χειροκίνητα αφού πρώτα βέβαια αποκατασταθεί το σφάλμα.

Σε περίπτωση βραχυκυκλώματος, αν δεν υπάρχουν εγκατεστημένοι διακόπτες απομόνωσης για να απομονωθεί το τμήμα στο οποίο συνέβη το σφάλμα, τότε όλοι οι καταναλωτές οι οποίοι τροφοδοτούνται από την ίδια γραμμή τροφοδοσίας, θα παραμείνουν εκτός τροφοδότησης μέχρι να αποκατασταθεί το σφάλμα (repair time). Οι διακόπτες απομόνωσης απομονώνουν όσο γίνεται μικρότερο τμήμα του δικτύου διασφαλίζοντας την ομαλή λειτουργία του υπόλοιπου. Όταν ένα σφάλμα εκδηλωθεί, η διάρκεια μη διαθεσιμότητας ενός καταναλωτή εξαρτάται από τη θέση του καταναλωτή σε σχέση με τη θέση του στοιχείου του δικτύου στο οποίο εκδηλώθηκε σφάλμα, αλλά και σε σχέση με τους πλησιέστερους διακόπτες απομόνωσης.

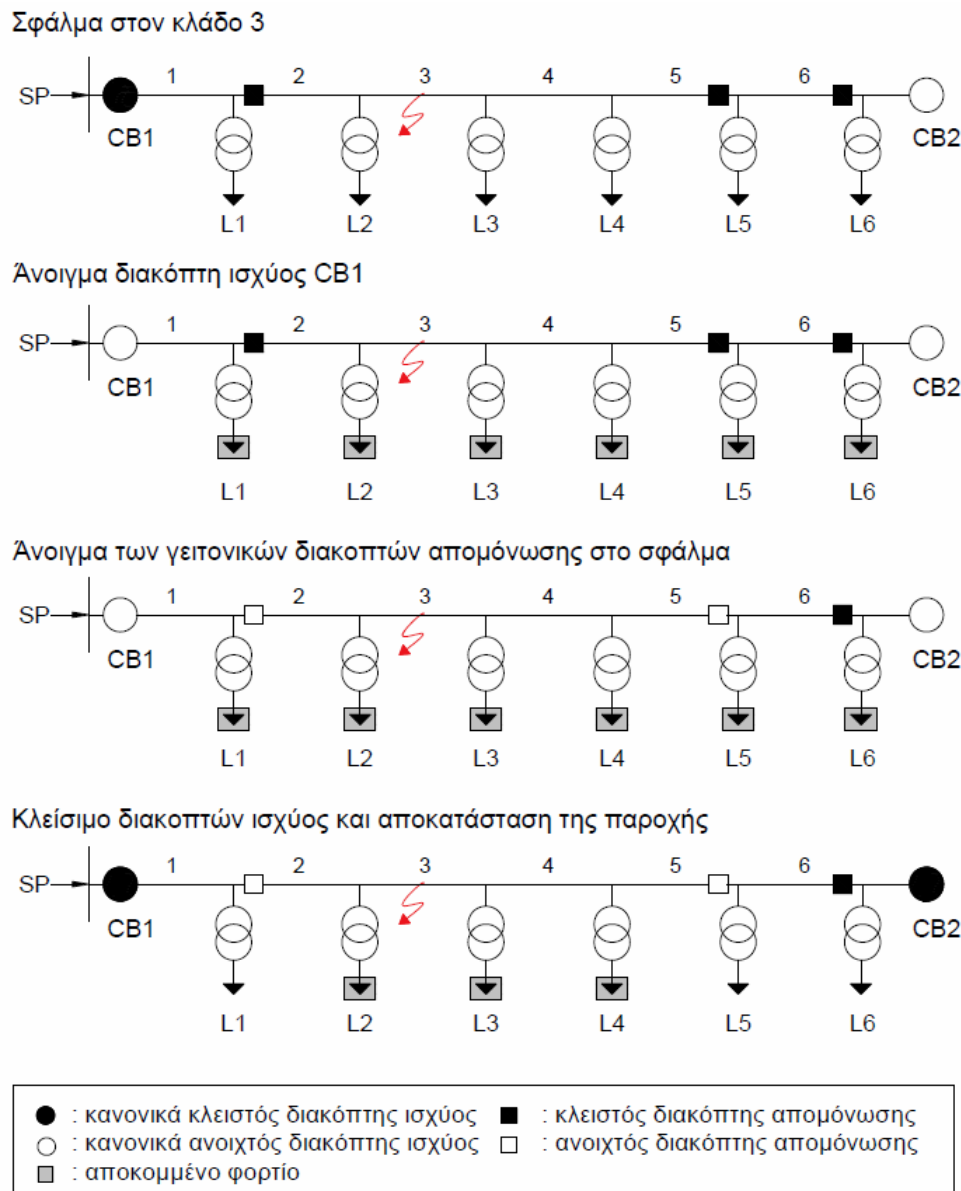
Μία επιπλέον εφαρμογή των διακοπών απομόνωσης βασίζεται στη διαμόρφωση του ΔΔΗΕ. Κάποιο τμήμα του δικτύου το οποίο έχει αποσυνδεθεί από το ζυγό τροφοδοσίας, μπορεί να τροφοδοτηθεί μέσω γραμμών διασύνδεσης οι οποίες συνδέουν διαφορετικές γραμμές τροφοδοσίας (feeders) μεταξύ τους. Μέσω των διακοπών απομόνωσης, το στοιχείο του δικτύου στο οποίο εκδηλώθηκε σφάλμα πρέπει να απομονωθεί και από τις δύο πηγές τροφοδοσίας (κύρια και εναλλακτική) έτσι ώστε να τροφοδοτηθούν οι υπόλοιποι καταναλωτές μέσω εναλλακτικής τροφοδότησης από διαφορετική γραμμή τροφοδοσίας, η οποία αποτελεί ταυτόχρονα και κύρια πηγή τροφοδοσίας άλλης γραμμής διανομής. Το εναλλακτικό σενάριο τροφοδοσίας εφαρμόζεται μετά την εκτέλεση των κατάλληλων χειρισμών ή και αυτόματα, χωρίς να προηγείται κατά ανάγκη επισκευή της βλάβης.

Σε περίπτωση που δεν υπάρχουν γραμμές διασύνδεσης στο ΔΔΗΕ, τότε μόνο όσα φορτία βρίσκονται μεταξύ του σημείου τροφοδοσίας και του πλησιέστερου διακόπτη απομόνωσης πριν το σημείο σφάλματος θα τροφοδοτηθούν αμέσως μόλις απομονωθεί το σφάλμα. Ενώ όσα φορτία βρίσκονται μετά τη θέση σφάλματος, θα παραμείνουν εκτός τροφοδοσίας μέχρι να επιδιορθωθεί η βλάβη ώστε να αποκατασταθεί η σύνδεση όλων των τμημάτων του δικτύου. Το πλήθος των αποκομμένων καταναλωτών εξαρτάται από την ύπαρξη γραμμών διασύνδεσης, καθώς και από το πλήθος των διακοπών απομόνωσης [7].

Στα σχήματα 2.1 και 2.2 που ακολουθούν επεξηγείται η λειτουργία των διακοπών απομόνωσης σε ένα τυπικό ακτινικό ΔΔΗΕ με δύο διαφορετικούς βαθμούς αυτοματισμού προκειμένου να διερευνηθεί το κόστος και τα οφέλη από την εφαρμογή αυτοματισμού όσον αφορά την τοποθέτηση των διακοπών απομόνωσης [9].

Το συγκεκριμένο ΔΔΗΕ αποτελείται από ένα ζυγό τροφοδοσίας SP, ο οποίος τροφοδοτεί μέσω 6 τμημάτων μιας γραμμής διανομής έξι φορτία (L1 έως L6), στην αναχώρηση της οποίας είναι τοποθετημένος ένας κανονικά κλειστός διακόπτης ισχύος CB1, ενώ στην άφιξή της, ένας κανονικά ανοιχτός διακόπτης ισχύος CB2. Οι καταναλωτές συνδέονται στο δίκτυο μέσω μετασηματιστών διανομής.

Στο δίκτυο του Σχήματος 2.1, το οποίο είναι μερικώς αυτοματοποιημένο, έχουν εγκατασταθεί διακόπτες απομόνωσης σε τρεις θέσεις του δικτύου, στην αρχή ή στο τέλος των κλάδων 2, 5 και 6. Ενώ στο δίκτυο του Σχήματος 2.2, το οποίο είναι πλήρως αυτοματοποιημένο, έχουν εγκατασταθεί διακόπτες απομόνωσης στην αρχή και στο τέλος κάθε τμήματος της γραμμής τροφοδοσίας (κλάδοι 1 έως 6). Οι διακόπτες απομόνωσης είναι κανονικά κλειστοί διακόπτες κατά τη φυσιολογική λειτουργία του δικτύου.



**Σχήμα 2.1:** Λειτουργία διακοπών απομόνωσης σε μερικώς αυτοματοποιημένο ακτινικό ΔΔΗΕ.

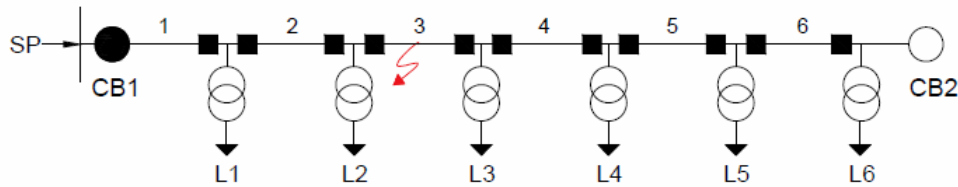
Σε περίπτωση σφάλματος (βραχυκυκλώματος) σε κάποιο τμήμα του δικτύου, για παράδειγμα στον κλάδο 3, οι ενέργειες των διακοπών που εκτελούνται μόλις εμφανιστεί το σφάλμα, είναι οι ακόλουθες [9]:

1. Ο κανονικά κλειστός διακόπτης ισχύος CB1 στην αρχή της γραμμής τροφοδοσίας ανοίγει ακαριαία. Συνεπώς, διακόπτεται η τροφοδοσία σε όλη τη γραμμή και τα φορτία L1 έως L6 μένουν εκτός τροφοδότησης.
2. Οι γειτονικοί διακόπτες απομόνωσης εκατέρωθεν της θέσης όπου εκδηλώθηκε το σφάλμα (κλάδος 3) ανοίγουν. Στο Σχήμα 2.1 ανοίγουν οι διακόπτες απομόνωσης στους κλάδους 2 και 5. Ενώ στο Σχήμα 2.2 ανοίγουν οι διακόπτες απομόνωσης που βρίσκονται στην αρχή και στο τέλος του

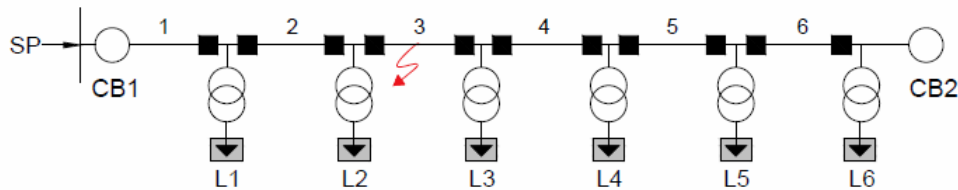
κλάδου 3. Οι υπόλοιποι διακόπτες απομόνωσης του δικτύου παραμένουν κλειστοί.

3. Οι διακόπτες ισχύος CB1 και CB2 κλείνουν για την επαναφορά της τροφοδοσίας σε όσο το δυνατόν περισσότερους αποκομμένους καταναλωτές, μέσω της κύριας και εναλλακτικής πηγής τροφοδοσίας.

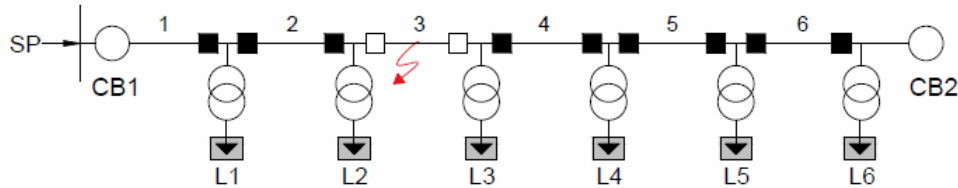
Σφάλμα στον κλάδο 3



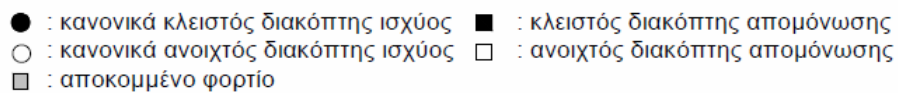
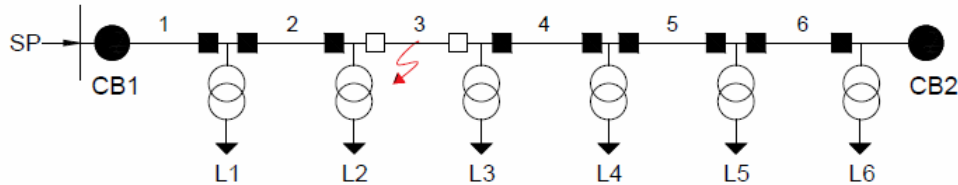
Ανοίγμα διακόπτη ισχύος CB1



Ανοίγμα των γειτονικών διακοπών απομόνωσης στο σφάλμα



Κλείσιμο διακοπών ισχύος και αποκατάσταση της παροχής



**Σχήμα 2.2:** Λειτουργία διακοπών απομόνωσης σε πλήρως αυτοματοποιημένο ακτινικό ΔΔΗΕ.

Παρατηρώντας τα δύο Σχήματα, κάποιοι καταναλωτές υφίστανται σχετικά μεγάλη διάρκεια διακοπής εξαιτίας του σφάλματος στον κλάδο 3 του δικτύου, για παράδειγμα ίση με το χρόνο επισκευής ή αντικατάστασης του εσφαλμένου τμήματος, ενώ άλλοι καταναλωτές υπόκεινται σε μικρότερης διάρκειας διακοπές δεδομένου ότι η τροφοδοσία αποκαθίσταται και από τους κανονικά ανοιχτούς και κλειστούς διακόπτες ισχύος.

Συγκεκριμένα, στο Σχήμα 2.1, η τροφοδοσία των καταναλωτών στα σημεία L1, L5 και L6 θα αποκατασταθεί αμέσως μετά την απομόνωση του τμήματος του δικτύου στο οποίο

εκδηλώθηκε το σφάλμα, μετά δηλαδή από το χρόνο χειρισμού των διακοπών ισχύος και διακοπών απομόνωσης (διάρκεια διακοπής ίση με το χρόνο απομόνωσης και επανασύνδεσης). Ενώ τα φορτία L2, L3 και L4 θα επανατροφοδοτηθούν αφού αποκατασταθεί το σφάλμα στον κλάδο 3 και το δίκτυο επανέλθει στην αρχική κατάσταση λειτουργίας, δηλαδή υφίστανται διάρκεια διακοπής ίση με το χρόνο επισκευής της βλάβης, η οποία είναι πολύ μεγαλύτερη από το χρόνο απομόνωσης και επανασύνδεσης. Αντίθετα, στο Σχήμα 2.2 και τα έξι φορτία (L1 έως L6) υφίστανται διάρκεια διακοπής ίση με το χρόνο χειρισμού των διακοπών ισχύος και απομόνωσης.

Παρά το γεγονός ότι οι πελάτες που τροφοδοτούνται μέσω του δεύτερου, τρίτου, και τέταρτου κλάδου του δικτύου στο Σχήμα 2.2 βιώνουν πολύ σύντομης διάρκειας διακοπή σε σύγκριση με το Σχήμα 2.1, το κόστος επένδυσης, ετήσιας λειτουργίας και συντήρησης στο πλήρως αυτοματοποιημένο δίκτυο του Σχήματος 2.2 είναι πολύ υψηλότερο, λόγω του μεγάλου αριθμού των εγκατεστημένων διακοπών απομόνωσης σε αυτό.

Τα οφέλη των διακοπών απομόνωσης μπορούν να προσδιοριστούν λαμβάνοντας υπόψη όλους τους πιθανούς συνδυασμούς τοποθέτησης διακοπών και αξιολογώντας όλες τις πιθανές θέσεις σφάλματος σε όλα τα τμήματα ΔΔΗΕ δηλαδή σφάλματα σε κύριες γραμμές διανομής, διακλαδώσεις ή μετασημαπιστές.

Οι διακόπτες απομόνωσης χρησιμοποιούνται στις γραμμές των δικτύων διανομής με στόχο την απομόνωση σφαλμάτων, τη μείωση της διάρκειας διακοπών, τη μείωση του αριθμού των πελατών που επηρεάζονται κατά τη διάρκεια μόνιμων βλαβών και τη γρήγορη αποκατάσταση της τροφοδοσίας στο μεγαλύτερο πλήθος καταναλωτών μέσω γραμμών διασύνδεσης [9].

Δεδομένου ότι οι διακοπές τροφοδοσίας των καταναλωτών στα ΔΔΗΕ είναι αναπόφευκτες, ο αυτοματισμός των ΔΔΗΕ παίζει σημαντικό ρόλο στη μείωση του χρόνου αποκατάστασης της τροφοδοσίας στους αποκομμένους πελάτες μέσω της εγκατάστασης κατάλληλων διακοπών ελεγχόμενων από απόσταση.

Η βέλτιστη τοποθέτηση και επιλογή του κατάλληλου πλήθους των διακοπών απομόνωσης αποτελεί σημαντικό παράγοντα στο σχεδιασμό των δικτύων διανομής. Όσο μεγαλύτερο είναι το πλήθος των διακοπών απομόνωσης, τόσο μειώνεται ο χρόνος διακοπής της τροφοδοσίας των καταναλωτών και συνεπώς αυξάνεται το επίπεδο αξιοπιστίας του δικτύου. Ωστόσο, ένα μεγάλο πλήθος διακοπών απομόνωσης προϋποθέτει υψηλό επενδυτικό κόστος.

Η επιλογή των κατάλληλων διακοπών στα ΔΔΗΕ και η βέλτιστη τοποθέτηση τους επηρεάζει σημαντικά τους δείκτες αξιοπιστίας, όπως περιγράφεται στο επόμενο κεφάλαιο.

## **ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑ ΔΙΚΤΥΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

### **3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Στον τομέα των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ), ένα δίκτυο θεωρείται αξιόπιστο όταν διανέμει ενέργεια στους καταναλωτές τη στιγμή που το επιθυμούν ή το χρειάζονται, και είναι τέτοιας ποιότητας ικανοποιώντας τις ενεργειακές ανάγκες των πελατών και επιδιώκοντας τη συνέχεια της τροφοδότησής τους [10]. Η εκτίμηση της αξιοπιστίας ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας υποδιαιρείται, σε δύο τομείς, στην επάρκεια και στην ασφάλεια του συστήματος. Ο όρος επάρκεια του συστήματος σχετίζεται με την ύπαρξη εγκαταστάσεων, ώστε να ικανοποιηθεί η ζήτηση φορτίου, ενώ η ασφάλεια του συστήματος αναφέρεται στην ικανότητα απόκρισης του συστήματος σε διαταραχές που μπορεί να εμφανιστούν [11].

Η αξιοπιστία λειτουργίας ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί ένα από τα μεγαλύτερης σημασίας ζητήματα σχετικά με το σχεδιασμό των Δικτύων Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΔΔΗΕ) αφού σχετίζεται με μερικές ή ολικές διακοπές της τροφοδότησης του φορτίου. Σφάλματα σε οποιοδήποτε σημείο του δικτύου μπορούν να προκαλέσουν διακοπή της τροφοδοσίας στους τελικούς καταναλωτές. Όλα τα κριτήρια σχεδιασμού των ΔΔΗΕ έχουν στόχο την ελαχιστοποίηση των διακοπών εντός οικονομικών ορίων, δεδομένου ότι ένα σύστημα δεν μπορεί να εγγυηθεί μια συνεχόμενη τροφοδοσία στα φορτία του, δηλαδή οι διακοπές τροφοδότησης είναι πρακτικά αναπόφευκτες σε ένα δίκτυο [12].

Μέσα από τη στατιστική ανάλυση δεδομένων σχετικά με διακοπές τροφοδοσίας, είναι φανερό ότι τα σφάλματα στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας και κυρίως στα Δίκτυα Διανομής αποτελούν τη συνηθέστερη αιτία για τη μη διαθεσιμότητα ισχύος στους τελικούς καταναλωτές [13]. Το γεγονός αυτό υπογραμμίζει την ανάγκη για τη βελτίωση της αξιοπιστίας των ΔΔΗΕ, είτε με μείωση της συχνότητας σφαλμάτων που συμβαίνουν σε αυτά είτε με μείωση του χρόνου της διακοπής τροφοδοσίας των καταναλωτών μετά την εκδήλωση ενός σφάλματος.

Τα οφέλη από τη βελτίωση της αξιοπιστίας είναι πολλά και για την εταιρεία διαχείρισης του δικτύου διανομής αλλά και για τους καταναλωτές οι οποίοι απολαμβάνουν υπηρεσίες καλύτερης ποιότητας, αποφεύγοντας ανεπιθύμητες καταστάσεις, χάρη στις μειωμένες διακοπές τροφοδοσίας.

Στο κεφάλαιο αυτό, αρχικά γίνεται αναφορά στα είδη σφαλμάτων τα οποία μπορεί να οδηγήσουν στη διακοπή της τροφοδοσίας των καταναλωτών των ΔΔΗΕ. Στη συνέχεια περιγράφονται οι βασικότεροι δείκτες που χρησιμοποιούνται για την ποσοτικοποίηση της αξιοπιστίας των ΔΔΗΕ. Επιπλέον, ορίζονται η συνάρτηση βλάβης των καταναλωτών καθώς επίσης και το αναμενόμενο κόστος διακοπών των καταναλωτών. Τέλος, παρατίθεται ένα αριθμητικό παράδειγμα για την καλύτερη κατανόηση των παραπάνω εννοιών.

### 3.2 ΕΙΔΗ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ

Μια πρώτη διάκριση των σφαλμάτων μπορεί να γίνει ανάλογα με την διάρκεια και τον τρόπο σβέσης του τόξου τους. Έτσι στα εναέρια δίκτυα στα οποία η μόνωση τους είναι κυρίως ο αέρας, μπορούν να διακριθούν σε *παροδικά σφάλματα*, στα οποία αρκεί η διακοπή της τάσης για μικρό χρονικό διάστημα για την εξάλειψή τους. Ορισμένα από αυτά τα σφάλματα μπορεί να αποσβένονται μόνο τους χωρίς την διακοπή της τάσης και ονομάζονται *παροδικά αυτοσβενύμενα*. Σε άλλα σφάλματα που οφείλονται κυρίως σε εξωτερικά αίτια, απαιτείται για την απαλοιφή τους χρονικό διάστημα τουλάχιστον μερικών δευτερολέπτων. Τα σφάλματα αυτά ονομάζονται *ημιμόνιμα*. *Μόνιμα* ονομάζονται τα σφάλματα στα οποία είναι απαραίτητη η ανθρώπινη παρέμβαση για την απαλοιφή τους. Στα υπόγεια δίκτυα, στα οποία η μόνωση τους είναι ένα στερεό μονωτικό, η διάσπασή του κατά την εκδήλωση ενός σφάλματος οδηγεί στην καταστροφή του. Έτσι τα σφάλματα στα υπόγεια δίκτυα είναι κυρίως μόνιμα αφού απαιτείται η ανθρώπινη παρέμβαση για την απαλοιφή τους.

Τα σφάλματα μπορούν να διακριθούν και ανάλογα με τον αριθμό των φάσεων που εμπλέκονται σε αυτά. Έτσι, τα σφάλματα διακρίνονται σε *τριφασικά* όταν εμπλέκονται και οι τρεις φάσεις, σε *διφασικά ως προς γη* όταν εμπλέκονται δυο φάσεις και η γη, σε *διφασικά* και σε *μονοφασικά ως προς γη*. Υπάρχουν και τα *εξελισσόμενα* σφάλματα, τα οποία ξεκινούν ως μονοφασικά ως προς γη και στη συνέχεια εμπλέκονται περισσότερες φάσεις σε αυτά.

Τα σφάλματα οφείλονται σε εξωτερικά και εσωτερικά αίτια. Τα εξωτερικά είναι τα κυριότερα αίτια για τα εναέρια δίκτυα και συνίστανται κυρίως σε σφάλματα από εξωτερικές υπερτάσεις (κεραυνοί), ξένα αντικείμενα, την ρύπανση των μονωτήρων, και την επιφόρτιση των γραμμών (άνεμος, χιόνι). Το κυριότερο εξωτερικό αίτιο για τα υπόγεια δίκτυα είναι οι εκσκαφές που γίνονται διπλά ή πάνω από αυτά. Τα εσωτερικά αίτια συνίστανται κυρίως σε σφάλματα λόγω γήρανσης της μόνωσης, κατασκευαστικής αδυναμίας και αστοχίας υλικού. Τα σφάλματα που οφείλονται σε εσωτερικά αίτια είναι κυρίως μόνιμα [6].

### 3.3 ΔΕΙΚΤΕΣ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑΣ

Ένα ακτινικό δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας αποτελείται από ένα σύνολο εν σειρά στοιχείων, συμπεριλαμβανομένων των γραμμών, καλωδίων, διακοπών, αποξυεκτών, ζυγών. Λόγω της δομής του ακτινικού δικτύου, για την απρόσκοπτη τροφοδοσία των πελατών που συνδέονται σε οποιοδήποτε σημείο του δικτύου, απαιτείται η λειτουργία όλων των στοιχείων μεταξύ του σημείου σύνδεσης των καταναλωτών και του σημείου τροφοδοσίας [11].

Για τη μελέτη της αξιοπιστίας των ακτινικών δικτύων διανομής χρησιμοποιούνται τρεις βασικές παράμετροι αξιοπιστίας, ο μέσος ρυθμός βλαβών (*average failure rate*)  $\lambda_s$ , η μέση διάρκεια διακοπών (*average outage time*)  $r_s$ , και η μέση ετήσια διάρκεια διακοπών (*average annual outage time*) ή μη διαθεσιμότητα (*unavailability*)  $U_s$ , οι οποίες υπολογίζονται από τις σχέσεις (3.1) - (3.3) [14]:

$$\lambda_s = \sum_i \lambda_i \quad (3.1)$$

$$U_s = \sum_i \lambda_i \cdot r_i \quad (3.2)$$



$$r_s = \frac{U_s}{\lambda_s} = \frac{\sum_i \lambda_i \cdot r_i}{\sum_i \lambda_i} \quad (3.3)$$

Στις σχέσεις (3.1) έως (3.3) ο δείκτης  $s$  αναφέρεται στις παραμέτρους αξιοπιστίας του συστήματος, ενώ ο δείκτης  $i$  αναφέρεται στις παραμέτρους αξιοπιστίας των επιμέρους εν σειρά στοιχείων του συστήματος.

Παρά το γεγονός ότι οι τρεις αυτές παράμετροι αξιοπιστίας  $\lambda$ ,  $r$  και  $U$  που υπολογίζονται με τη χρήση των σχέσεων (3.1) - (3.3), είναι θεμελιωδώς σημαντικές, συχνά δεν αναπαριστούν πλήρως τη συμπεριφορά και την απόκριση ενός συστήματος, με την έννοια ότι σε ένα σύστημα υπολογίζονται οι ίδιες ακριβώς παράμετροι αξιοπιστίας, ανεξάρτητα από το πλήθος των καταναλωτών και το μέγεθος των φορτίων που είναι συνδεδεμένα στους ζυγούς του συστήματος. Για τη συσχέτιση της σημασίας μιας διακοπής με το πλήθος των καταναλωτών και την αντίστοιχη ζήτηση ισχύος, είναι απαραίτητη η θεώρηση επιπρόσθετων δεικτών αξιοπιστίας [11], [15]. Οι βασικότεροι δείκτες που χρησιμοποιούνται για την ποσοτικοποίηση της αξιοπιστίας λειτουργίας των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας και ειδικότερα των ΔΔΗΕ ορίζονται στις Ενότητες 3.3.1 και 3.3.2.

### 3.3.1 Δείκτες καταναλωτή

Οι δείκτες αξιοπιστίας καταναλωτή είναι δείκτες οι οποίοι ορίζονται αναφερόμενοι στον αριθμό των καταναλωτών  $N$  που είναι συνδεδεμένοι στους ζυγούς ενός συστήματος [11].

Ορίζονται και διατυπώνονται μαθηματικά ως ακολούθως:

- *Δείκτης μέσης συχνότητας διακοπών συστήματος (System average interruption frequency index, SAIFI):* δείχνει πόσο συχνά ένας μέσος καταναλωτής υφίσταται μια παρατεταμένη διακοπή κατά τη διάρκεια μιας χρονικής περιόδου (συνήθως ενός έτους) [16]. Μονάδα μέτρησης του δείκτη SAIFI: διακοπές/ έτος.

$$SAIFI = \frac{\text{συνολικός αριθμός διακοπών καταναλωτών}}{\text{συνολικός αριθμός εξυπηρετούμενων καταναλωτών}} = \frac{\sum_i \lambda_i \cdot N_i}{\sum_i N_i} \quad (3.4)$$

- *Δείκτης μέσης διάρκειας διακοπών συστήματος (System average interruption duration index, SAIDI):* δείχνει τη συνολική διάρκεια των διακοπών που θα παρατηρηθούν σε ένα μέσο καταναλωτή κατά τη διάρκεια μιας χρονικής περιόδου (συνήθως ενός έτους) [16]. Μονάδα μέτρησης του δείκτη SAIDI: ώρες/έτος.

$$SAIDI = \frac{\text{συνολική διάρκεια διακοπών καταναλωτών}}{\text{συνολικός αριθμός εξυπηρετούμενων καταναλωτών}} = \frac{\sum_i U_i \cdot N_i}{\sum_i N_i} \quad (3.5)$$

- *Δείκτης μέσης διάρκειας διακοπών καταναλωτών (Customer average interruption duration index, CAIDI):* αναπαριστά τη μέση χρονική διάρκεια που απαιτείται για την αποκατάσταση της παροχής ισχύος [16]. Εναλλακτικά, δείχνει πόσο διαρκεί μία μέση διακοπή του συστήματος και είναι χρήσιμος για το πως το σύστημα θα αντιδράσει [15]. Μονάδα μέτρησης του δείκτη CAIDI: ώρες/διακοπή καταναλωτή.

$$CAIDI = \frac{\text{συνολική διάρκεια διακοπών καταναλωτών}}{\text{συνολικός αριθμός διακοπών καταναλωτών}} = \frac{\sum_i U_i \cdot N_i}{\sum_i \lambda_i \cdot N_i} = \frac{SAIDI}{SAIFI} \quad (3.6)$$

- Δείκτης μέσης μη διαθεσιμότητας εξυπηρέτησης (*Average service unavailability index, ASUI*): δείχνει το ποσοστό του χρόνου που το σύστημα αδυνατεί να διαθέσει ισχύ στον πελάτη σε μία ορισμένη χρονική περίοδο (συνήθως ένα έτος) [16].

$$ASUI = \frac{\text{ώρες μη διαθέσιμης παροχής ισχύος καταναλωτών}}{\text{ώρες ζήτησης ισχύος καταναλωτών}} = \frac{\sum_i U_i \cdot N_i}{8760 \cdot \sum_i N_i} = \frac{SAIDI}{8760} \quad (3.7)$$

- Δείκτης μέσης διαθεσιμότητας εξυπηρέτησης (*Average service availability index, ASAI*): δείχνει το ποσοστό του χρόνου που το σύστημα διαθέτει ισχύ στον πελάτη εντός μίας ορισμένης χρονικής περιόδου (συνήθως ένα έτος) [16].

$$ASAI = \frac{\text{ώρες διαθέσιμης παροχής ισχύος καταναλωτών}}{\text{ώρες ζήτησης ισχύος καταναλωτών}} = 1 - ASUI \quad (3.8)$$

$$= 1 - \frac{\sum_i U_i \cdot N_i}{8760 \cdot \sum_i N_i}$$

Οι δείκτες *ASUI* και *ASAI* είναι καθαροί αριθμοί. Στις σχέσεις (3.4) έως (3.8),  $\lambda_i$  είναι ο ρυθμός βλαβών,  $U_i$  η ετήσια διάρκεια διακοπών (μη διαθεσιμότητα) και  $N_i$  ο αριθμός των συνδεδεμένων καταναλωτών στο ζυγό  $i$ , ενώ 8760 είναι ο αριθμός των ωρών ενός έτους.

### 3.3.2 Ενεργειακοί Δείκτες

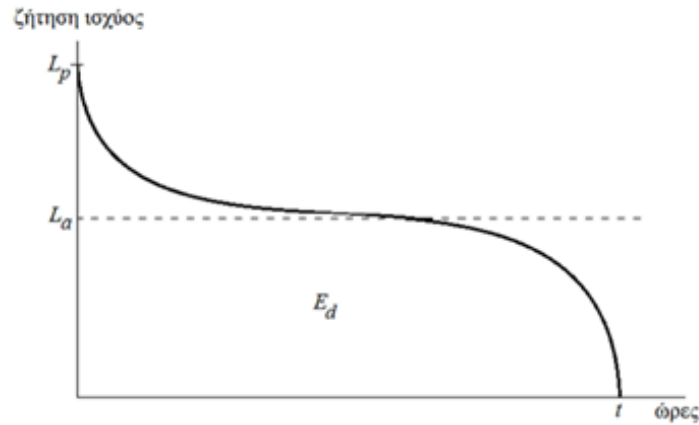
Οι ενεργειακοί δείκτες αξιοπιστίας είναι δείκτες οι οποίοι ορίζονται με αναφορά στο μέσο φορτίο και στην καταναλισκόμενη ενέργεια ενός συστήματος [11]. Το μέσο φορτίο  $L_a$  δίνεται από τη σχέση:

$$L_a = L_p \cdot f \quad (3.9)$$

όπου  $L_p$  είναι το φορτίο αιχμής (*peak load*) και  $f$  είναι ο συντελεστής φορτίου. Ισοδύναμα, το μέσο φορτίο υπολογίζεται και από τη σχέση:

$$L_a = \frac{\text{συνολική ζητούμενη ενέργεια στην εξεταζόμενη περίοδο}}{\text{εξεταζόμενη περίοδος}} = \frac{E_d}{t} \quad (3.10)$$

όπου τα  $E_d$  και  $t$  απεικονίζονται στην καμπύλη διάρκειας φορτίου του Σχήματος 3.1, και η περίοδος  $t$  αναφέρεται συνήθως σε ένα έτος (8760 ώρες). Η ενέργεια  $E_d$  αντιστοιχεί στο εμβαδόν του τμήματος που βρίσκεται κάτω από την καμπύλη διάρκειας φορτίου.



Σχήμα 3.1: Ετήσια καμπύλη διάρκειας φορτίου.

Οι ενεργειακοί δείκτες που χρησιμοποιούνται συχνά στα ΔΔΗΕ είναι οι ακόλουθοι [11]:

- Δείκτης μη τροφοδοτούμενης ενέργειας (*Energy not supplied index, ENS*) [kWh/έτος]:

$$ENS = \text{συνολική μη τροφοδοτούμενη ενέργεια από το σύστημα} = \sum_i L_{a,i} \cdot U_i \quad (3.11)$$

- Μέση μη τροφοδοτούμενη ενέργεια (*Average energy not supplied, AENS*):

$$AENS = \frac{\text{συνολική μη τροφοδοτούμενη ενέργεια}}{\text{συνολικός αριθμός εξυπηρετούμενων καταναλωτών}} = \frac{\sum_i L_{a,i} \cdot U_i}{\sum_i N_i} \quad (3.12)$$

$$= \frac{ENS}{\sum_i N_i}$$

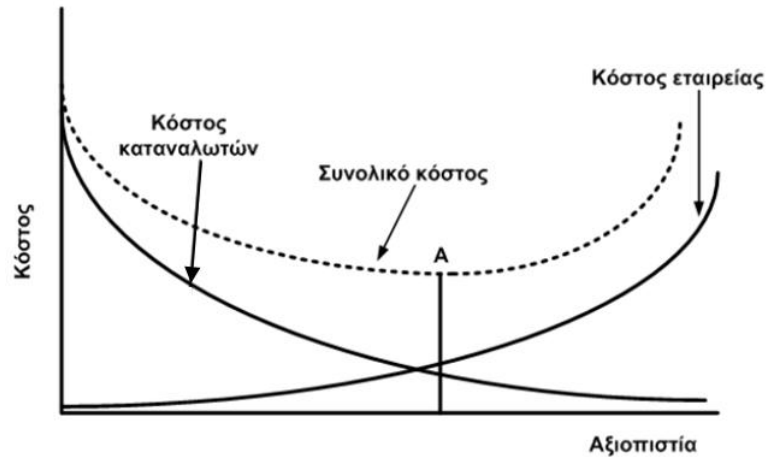
Μονάδα μέτρησης του δείκτη *AENS*: kWh/καταναλωτή·έτος . Στις σχέσεις (3.11) και (3.12),  $L_{a,i}$  είναι το μέσο φορτίο που είναι συνδεδεμένο στο ζυγό  $i$ .

### 3.4 ΚΟΣΤΟΣ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑΣ

Κόστος αξιοπιστίας για μια εταιρεία διανομής ορίζεται το κόστος της επένδυσης που χρειάζεται στο σύστημα για την επίτευξη συγκεκριμένου επιπέδου αξιοπιστίας, και αξία αξιοπιστίας ορίζεται το όφελος που αποκομίζει από την επένδυση ο πελάτης και φυσικά η ίδια η εταιρεία [12]. Για την αποτίμηση της αξιοπιστίας με οικονομικούς όρους, συχνά χρησιμοποιείται ο όρος αποτίμηση αναξιοπιστίας, όπου η αξία της αξιοπιστίας ταυτίζεται με τη ζημία που υφίστανται οι καταναλωτές κατά τη διάρκεια των σφαλμάτων στα ΔΔΗΕ.

Στο Σχήμα 3.2 [17] παρουσιάζεται η οικονομική σχέση μεταξύ του κόστους που επιβαρύνονται οι καταναλωτές και του κόστους επένδυσης για την εταιρεία διαχείρισης του δικτύου σε σχέση με το επίπεδο αξιοπιστίας. Για την καμπύλη του κόστους των καταναλωτών, αυξημένη αξιοπιστία συνεπάγεται μικρό κόστος ζημίας, ενώ αντίστροφα για την εταιρεία αυξημένη αξιοπιστία σημαίνει υψηλό κόστος επενδύσεων. Η υπέρθεση των δύο καμπυλών παρέχει την καμπύλη συνολικού κόστους σε συνάρτηση με την αξιοπιστία, με το ελάχιστο της να ορίζει τη βέλτιστη τιμή αξιοπιστίας για τη βέλτιστη λύση επένδυσης, με την ελάχιστη δυνατή ζημία για τους καταναλωτές. Οποιαδήποτε λύση δεξιά αυτού του βέλτιστου

σημείου καθιστά την οποιαδήποτε επενδυτική πρόταση ασύμφορη, όπως προκύπτει και από την καμπύλη συνολικού κόστους [17], [18]. Συνεπώς, στο Σχήμα 3.2 το βέλτιστο επίπεδο αξιοπιστίας επιτυγχάνεται στο σημείο A, το οποίο αντιστοιχεί στην τιμή ελάχιστου συνολικού κόστους.



Σχήμα 3.2: Συνάρτηση κόστους με επίπεδο αξιοπιστίας.

Το κόστος που οφείλεται σε μία διακοπή διαφέρει σημαντικά από πελάτη σε πελάτη και από χώρα σε χώρα. Τα κόστη διακοπών καταναλωτών είναι στενά συνδεδεμένα με τον τρόπο που οι δραστηριότητες των καταναλωτών εξαρτώνται από την ηλεκτρική ενέργεια. Η εξάρτηση αυτή είναι συνάρτηση και των χαρακτηριστικών της διακοπής αλλά και των χαρακτηριστικών των καταναλωτών.

Στα χαρακτηριστικά των καταναλωτών περιλαμβάνονται το είδος των καταναλωτών, η φύση των εργασιών, το μέγεθος της λειτουργίας και άλλα δεδομένα, όπως η ζήτηση, οι απαιτήσεις ενέργειας και η ενεργειακή εξάρτηση κάθε ώρα της ημέρας.

Αντίστοιχα, τα χαρακτηριστικά των διακοπών περιλαμβάνουν τη διάρκεια, τη συχνότητα των διακοπών, καθώς και η χρονική στιγμή μέσα στο έτος, στη βδομάδα και στη μέρα που συμβαίνει η κάθε διακοπή παροχής ηλεκτρικής ενέργειας, αν οι διακοπές είναι ολικές ή μερικές, αν έχει προηγηθεί κάποια ειδοποίηση για την εκάστοτε διακοπή ή αν υπάρχει εκ των προτέρων πληροφορία για τη διάρκεια της και αν η περιοχή που επηρεάζεται από τη διακοπή είναι τοπική ή εκτείνεται σε μεγάλο μέρος του δικτύου. Τέλος, η επίδραση μιας διακοπής εξαρτάται και από τη συμπεριφορά και την ετοιμότητα των καταναλωτών, η οποία σχετίζεται με τα υπάρχοντα επίπεδα αξιοπιστίας [11].

### 3.5 ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΒΛΑΒΗΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΤΩΝ

Για να ποσοτικοποιηθούν οι συνέπειες μιας διακοπής εξαιτίας των σφαλμάτων στα ΔΔΗΕ χρησιμοποιείται η συνάρτηση βλάβης καταναλωτών (*Customer Damage Function, CDF*) που παρέχει σε νομισματικές μονάδες τα αποτελέσματα που φέρει μια διακοπή παροχής ηλεκτρικής ενέργειας [18]. Εκφράζει τι είναι διατεθειμένοι να πληρώσουν οι καταναλωτές προκειμένου να αποφευχθεί μια ενδεχόμενη διακοπή ή το ελάχιστο ποσό που θα αποδεχόντουσαν ως αποζημίωση για κάθε αρνητική επίδραση που προκάλεσε η διακοπή.

Για την εκτίμηση του κόστους διακοπών των καταναλωτών έχουν χρησιμοποιηθεί διάφορες προσεγγίσεις οι οποίες περιλαμβάνουν αναλυτικές μεθόδους, μελέτες περιπτώσεων

και προσεγγίσεις βασισμένες σε πελατειακές έρευνες μέσω ερωτηματολογίων [19]. Η μέθοδος της πελατειακής έρευνας υπερισχύει έναντι των υπολοίπων, δεδομένου ότι οι καταναλωτές βρίσκονται στην καλύτερη θέση να εκτιμήσουν την επίδραση που έχουν οι διακοπές της τροφοδοσίας στις δραστηριότητές τους και επομένως με αυτόν τον τρόπο τα κόστη διακοπών καθορίζονται με περισσότερη ακρίβεια [20].

Σκοπός μιας τέτοιας έρευνας λοιπόν είναι να καταγράψει την επίδραση της διακοπής τροφοδοσίας στις οικονομικές δραστηριότητες των καταναλωτών του ΔΔΗΕ. Τα ερωτηματολόγια που έχουν χρησιμοποιηθεί στη διεθνή βιβλιογραφία [20], [21] περιλαμβάνουν ερωτήσεις που σχετίζονται με συγκεκριμένες συνέπειες από τις διακοπές της τροφοδοσίας αλλά και τις πιθανές δράσεις που υλοποιούνται προκειμένου αυτές να ελαχιστοποιηθούν. Επίσης μία λίστα από δραστηριότητες και συσκευές επιλέγονται ώστε οι διαφορετικές ομάδες καταναλωτών να αξιολογήσουν τις αρνητικές συνέπειες που έχει μία ενδεχόμενη διακοπή τροφοδοσίας και να εκτιμήσουν τα αντίστοιχα κόστη. Οι πελάτες καλούνται να καθορίσουν το μήνα του έτους για τον οποίο υφίστανται τις μεγαλύτερες οικονομικές συνέπειες από μία διακοπή στην τροφοδοσία τους και πως αυτή η οικονομική ζημία επηρεάζεται από τη διάρκεια της διακοπής. Επιπλέον οι έρευνες καταγράφουν και το όφελος που προκύπτει από την έγκαιρη ενημέρωση από την εταιρεία διαχείρισης του δικτύου για μια προγραμματισμένη διακοπή τροφοδοσίας.

### 3.5.1 Συνάρτηση βλάβης καταναλωτών ανά τομέα

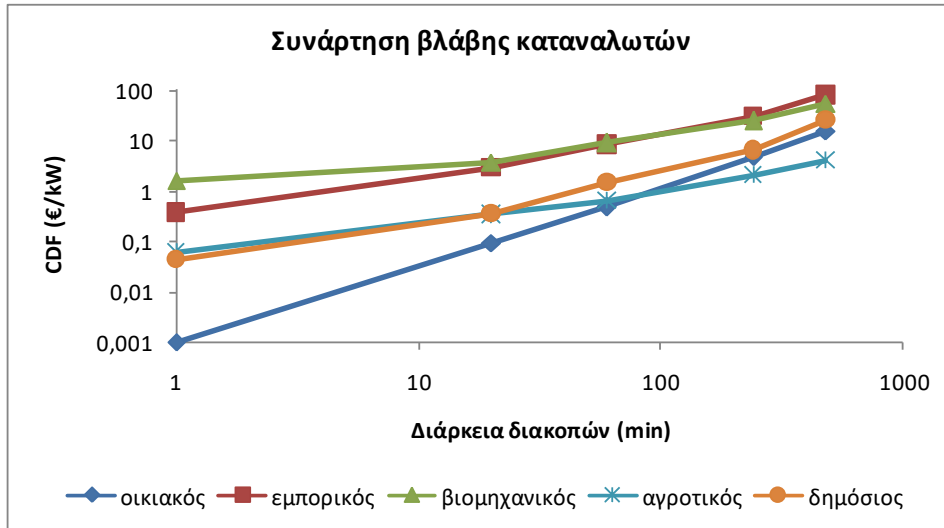
Η συνάρτηση βλάβης καταναλωτών ανά τομέα (*Sector Customer Damage Function, SCDF*) αναπαριστά το κόστος που προκύπτει από τη ζημιά που υφίσταται οι καταναλωτές εξαιτίας μιας διακοπής τροφοδοσίας σε συνάρτηση με τη διάρκεια της διακοπής για συγκεκριμένη σύνθεση καταναλωτών [10].

Επειδή το πραγματικό κόστος μιας διακοπής εξαρτάται από το είδος στο οποίο ανήκουν οι πελάτες που επηρεάζονται, διαφορετικές τιμές κόστους λαμβάνονται για τις διάφορες κατηγορίες καταναλωτών. Για κάθε κατηγορία καταναλωτών υπάρχει επιπλέον διαφοροποίηση ανάλογα με τη διάρκεια αλλά και τη χρονική περίοδο κατά την οποία λαμβάνει χώρα η διακοπή. Οι κατηγορίες των πελατών περιλαμβάνουν τον οικιακό, τον βιομηχανικό, τον εμπορικό, τον αγροτικό και το δημόσιο τομέα. Έτσι μπορεί να δημιουργηθεί μια συνάρτηση βλάβης για τον κάθε τομέα όπου μια διακοπή επιδρά διαφορετικά στα διάφορα είδη καταναλωτών.

Τα κόστη διακοπών των καταναλωτών που ανήκουν στον ίδιο τομέα προκύπτουν από πελατειακές έρευνες που διενεργούνται όπως περιγράφηκε στην Ενότητα 3.5.

Η συνάρτηση βλάβης καταναλωτών ανά τομέα είναι το κανονικοποιημένο κόστος διακοπών των καταναλωτών ως προς την αιχμή της ζήτησης ισχύος, δηλαδή υπολογίζεται για κάθε τομέα χωριστά ως ο λόγος του συνολικού κόστους διακοπών των καταναλωτών προς την αιχμή που ζητείται από όλους τους καταναλωτές που ανήκουν στον ίδιο τομέα. Εκφράζεται σε €/kW [18], [21].

Η συνάρτηση βλάβης καταναλωτών ανά τομέα παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.3 [11], όπως προκύπτει μέσα από στοιχεία έρευνας θεωρώντας σενάρια διακοπής τροφοδοσίας διάρκειας 1 min, 20 min, 1h, 4h, 8h.



**Σχήμα 3.3:** Κόστος διακοπών ανά είδος καταναλωτών σε συνάρτηση με τη διάρκεια διακοπής.

Από το παραπάνω σχήμα παρατηρείται ότι για μεγαλύτερη διάρκεια διακοπών, τα κόστη διακοπών αυξάνονται με μη γραμμικό ρυθμό. Επίσης, το μεγαλύτερο κόστος εξαιτίας μιας διακοπής παροχής ηλεκτρικής ενέργειας το υφίσταται ο εμπορικός και ο βιομηχανικός τομέας, ενώ το χαμηλότερο οι καταναλωτές του οικιακού τομέα. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι ένα μεγάλο μέρος των φορτίων σε μια εμπορική ή βιομηχανική εγκατάσταση περιλαμβάνει ηλεκτρονικές διατάξεις και υπηρεσίες που εξαρτώνται άμεσα από την τεχνολογία, οι οποίες απαιτούν ένα πολύ υψηλό επίπεδο ποιότητας ισχύος για τη λειτουργία τους. Ακόμα και μια σύντομη διάρκεια διακοπή αρκεί για να επιβαρυνθούν οι καταναλωτές σε αυτούς του τομείς με υψηλά κόστη εξαιτίας βλάβης σε ηλεκτρονικό εξοπλισμό και απώλειες δεδομένων. Οι απώλειες στην παραγωγική διαδικασία και την παραγωγικότητα, καθώς και ο αντίκτυπος στην ασφάλεια των εργαζομένων αποτελούν ζητήματα μέγιστης σημασίας. Οι δαπάνες αυτές εκφράζονται σε αυξημένες χρεώσεις στα προϊόντα και τις υπηρεσίες.

Όσον αφορά τον οικιακό τομέα οι διακοπές παροχής ηλεκτρισμού έχουν άμεση επίδραση στη ζωή των καταναλωτών μιας κατοικίας, αφού με την απουσία ηλεκτρισμού τα συστήματα θέρμανσης, ψύξης, φωτισμού και όλες οι ηλεκτρικές συσκευές δεν λειτουργούν. Οι οικιακοί καταναλωτές που υποφέρουν από εκτεταμένες περιόδους έλλειψης ενέργειας, βιώνοντας καταστάσεις όπως πλημμυρισμένα υπόγεια, αλλοίωση τροφίμων αντιλαμβάνονται εντονότερα τα οφέλη ενός αξιόπιστου δικτύου. Ωστόσο το κόστος για τον οικιακό τομέα παραμένει το χαμηλότερο σε σύγκριση με τα υπόλοιπα είδη καταναλωτών [22].

### 3.5.2 Σύνθετη συνάρτηση βλάβης καταναλωτών

Η σύνθετη συνάρτηση βλάβης καταναλωτών (*Composite Customer Damage Function, CCDF*) μπορεί να υπολογιστεί σε κάθε κόμβο του δικτύου στον οποίο είναι συνδεδεμένα φορτία, αθροίζοντας για όλους τους τομείς καταναλωτών τα στοιχεία κόστους από τις συναρτήσεις βλάβης καταναλωτών ανά τομέα που αντιστοιχούν στην ίδια χρονική διάρκεια διακοπής πολλαπλασιασμένα με κατάλληλους συντελεστές - ποσοστά της σύνθεσης

των καταναλωτών [18]. Σε αυτήν την περίπτωση γίνεται η υπόθεση ότι όλες οι περικοπές φορτίου κατανέμονται ανάλογα σε όλα τα είδη των καταναλωτών [11].

Η σύνθετη συνάρτηση βλάβης καταναλωτών αναπαριστά λοιπόν το συνολικό κόστος διακοπών ως συνάρτηση της διάρκειας διακοπών για ένα συνδυασμό καταναλωτών που είναι συνδεδεμένοι σε μια συγκεκριμένη περιοχή εξυπηρέτησης ή στον ίδιο κόμβο. Για να υπολογιστεί, πρέπει σε κάθε κόμβο του δικτύου να είναι γνωστή η σύνθεση του φορτίου όσον αφορά τα ποσοστά της ετήσιας αιχμής της ζήτησης και της ενεργειακής κατανάλωσης. Το ποσοστό της ετήσιας αιχμής χρησιμοποιείται για μικρές διάρκειες διακοπής (μικρότερες της μιας ώρας) ενώ το ποσοστό της ετήσιας ενεργειακής κατανάλωσης για διακοπές διάρκειας μεγαλύτερης ή ίσης της μιας ώρας [23]. Για τον υπολογισμό της σύνθετης συνάρτησης βλάβης καταναλωτών ισχύουν οι δύο ακόλουθες σχέσεις [23]:

$$\sum_{\text{τομέας } m} \text{αιχμή τομέα } m \text{ στον κόμβο } k = \text{Αιχμή φορτίου στον κόμβο } k \quad (3.13)$$

$$\sum_{\text{κόμβος } k} \text{αιχμή στον κόμβο } k \text{ από τον τομέα } m = \text{Αιχμή συστήματος από τον τομέα } m \quad (3.14)$$

### 3.6 ΑΝΑΜΕΝΟΜΕΝΟ ΚΟΣΤΟΣ ΔΙΑΚΟΠΩΝ ΚΑΤΑΝΑΛΩΤΩΝ

Το αναμενόμενο κόστος για κάθε διακοπή (*Expected customer interruption cost, ECOST*) εκτιμάται από τους ίδιους τους καταναλωτές και προκύπτει κατά βάση μέσα από πελατειακές έρευνες που διενεργούνται.

Εκφράζεται σε χρηματικές μονάδες (€/έτος) και αποτελεί δείκτη μέτρησης της αναξιπιστίας του συστήματος, αφού όσο αυξάνεται, η αξιοπιστία χειροτερεύει. Επισημαίνεται ότι δεν εκφράζει το κόστος ανά μη τροφοδοτούμενη ενέργεια ή ανά μη τροφοδοτούμενο φορτίο [12].

Ο δείκτης αυτός υπερισχύει έναντι των δεικτών της Ενότητας 3.3 δεδομένου ότι λαμβάνει υπόψη την τοπολογία του δικτύου, τις διακοπές των καταναλωτών, την πυκνότητα φορτίου, το ρυθμό βλαβών των στοιχείων του δικτύου, καθώς επίσης και τα διάφορα είδη των καταναλωτών και τις αντίστοιχες συναρτήσεις βλάβης τους [24].

Το αναμενόμενο κόστος διακοπών τροφοδότησης *ECOST* για τους καταναλωτές που είναι συνδεδεμένοι σε κάποιο κόμβο του δικτύου  $j$  και ανήκουν στην ίδια κατηγορία  $k$ , λαμβάνοντας υπόψη όλες τις πιθανές θέσεις σφάλματος που επηρεάζουν την τροφοδοσία του συγκεκριμένου κόμβου δίνεται από την σχέση (3.15) [23], ενώ ο συνολικός δείκτης *ECOST* για όλο το δίκτυο δίνεται από τη σχέση (3.16) [9].

$$ECOST_{j,k} = \sum_{i=1}^{N_c} \lambda(i) \cdot C^{dij}(i, j, k) \cdot L(j, k) \quad (3.15)$$

$$ECOST = \sum_{i=1}^{N_c} \sum_{j=1}^{NL} \sum_{k=1}^{CT} \lambda(i) \cdot C^{d_{ij}}(i, j, k) \cdot L(j, k) \quad (3.16)$$

όπου:

$i$	δείκτης θέσης σφάλματος ΔΔΗΕ
$j$	δείκτης φορτίου στο ΔΔΗΕ
$k$	δείκτης τύπου καταναλωτή στο ΔΔΗΕ
$N_c$	σύνολο όλων των πιθανών θέσεων σφάλματος στο ΔΔΗΕ
$NL$	σύνολο των φορτίων στο ΔΔΗΕ
$CT$	σύνολο των κατηγοριών των καταναλωτών στο ΔΔΗΕ
$\lambda(i)$	ρυθμός βλαβών στοιχείου $i$ (βλ./έτος)
$C^{d_{ij}}(i, j, k)$	συνάρτηση βλάβης καταναλωτή $j$ τύπου $k$ , λόγω σφάλματος στη θέση $i$ για χρονική διάρκεια διακοπής $d_{ij}$ (€/kW)
$L(j, k)$	μέσο φορτίο καταναλωτή $j$ τύπου $k$ (kW)

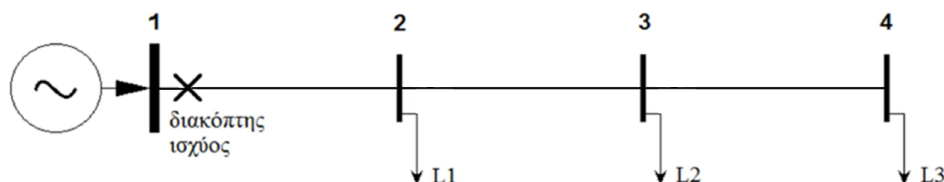
Έτσι, το αναμενόμενο κόστος διακοπών των καταναλωτών μπορεί να υπολογιστεί για κάθε φορτίο χωριστά ή για όλο το σύστημα συνολικά. Επίσης, αντί για τη συνάρτηση βλάβης καταναλωτών ανά τομέα μπορεί να χρησιμοποιηθεί η σύνθετη συνάρτηση βλάβης καταναλωτών.

### 3.7 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΑΚΤΙΝΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

#### 3.7.1 Αρχικό δίκτυο

Ας θεωρηθεί το δίκτυο του Σχήματος 3.4. Στο δίκτυο αυτό, ο ζυγός 1 είναι ο ζυγός του υποσταθμού ενώ στους κόμβους 2, 3 και 4 είναι συνδεδεμένα τα φορτία L1, L2, L3 και στην αναχώρηση της γραμμής 1-2 είναι τοποθετημένος ο διακόπτης ισχύος του δικτύου.

Θεωρώντας ότι όλα τα σφάλματα των γραμμών είναι βραχυκυκλώματα, τότε κάθε σφάλμα προκαλεί το άνοιγμα του διακόπτη ισχύος. Εφόσον στο σύστημα δεν υπάρχουν σημεία τα οποία να μπορούν να απομονωθούν μέσω κατάλληλων συσκευών (π.χ. διακοπών απομόνωσης), κάθε σφάλμα θα πρέπει να διορθωθεί πριν κλείσει ξανά ο διακόπτης ισχύος, οπότε ο χρόνος διακοπής για κάθε φορτίο θα ισούται με το χρόνο επισκευής του τμήματος στο οποίο εμφανίστηκε το σφάλμα.



Σχήμα 3.4: Ακτινικό δίκτυο 4 ζυγών.

Για το δίκτυο του Σχήματος 3.4, λαμβάνονται τα δεδομένα του Πίνακα 3.1. Επίσης, το μέσο φορτίο που ζητείται σε κάθε κόμβο του δικτύου δίνεται στον Πίνακα 3.2.



**Πίνακας 3.1:** Παράμετροι αξιοπιστίας των γραμμών του δικτύου του Σχήματος 3.4.

Γραμμή	Κόμβος αναχώρησης	Κόμβος άφιξης	Ρυθμός βλαβών $\lambda$ (βλ./έτος)	Χρόνος διακοπής $r$ (ώρες)
1	1	2	0,2	4
2	2	3	0,1	4
3	3	4	0,3	4

**Πίνακας 3.2:** Δεδομένα ζήτησης του δικτύου του Σχήματος 3.4.

Ζυγός φορτίου	Μέσο φορτίο $L$ (kW)
2	5000
3	4000
4	3000

Η συνάρτηση βλάβης καταναλωτών ανά τομέα παρουσιάζεται στον Πίνακα 3.3 [11], θεωρώντας σενάρια διακοπής τροφοδοσίας διάρκειας 1 min, 20 min, 1h, 4h και 8h. Στο συγκεκριμένο δίκτυο γίνεται η υπόθεση ότι συνδέονται μόνο εμπορικοί και οικιακοί καταναλωτές σε κάθε κόμβο.

**Πίνακας 3.3:** Συνάρτηση βλάβης καταναλωτών ανά τομέα (€/ kW).

Είδος καταναλωτή	Διάρκεια Διακοπών				
	1 min	20 min	1 h	4 h	8 h
εμπορικός	0,381	2,969	8,552	31,317	83,008
οικιακός	0,001	0,093	0,482	4,914	15,690

Θεωρώντας ότι σε κάθε κόμβο του δικτύου, η ετήσια αιχμή και η ετήσια ενεργειακή κατανάλωση εκπροσωπείται από το ίδιο ποσοστό καταναλωτών και συγκεκριμένα προέρχεται κατά 40% από εμπορικούς καταναλωτές και κατά 60% από οικιακούς καταναλωτές, τότε προσδιορίζεται η σύνθετη συνάρτηση βλάβης καταναλωτών, όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.4.

**Πίνακας 3.4:** Σύνθετη συνάρτηση βλάβης καταναλωτών *CCDF* (€/ kW).

Διάρκεια Διακοπών				
1 min	20 min	1 h	4 h	8 h
0,153	1,2434	3,71	15,4752	42,6172

όπου:

$$CCDF(1h) = 0,4 \cdot 8,552 + 0,6 \cdot 0,482 = 3,71 \text{ €/ kW}$$

Το αναμενόμενο κόστος διακοπών καταναλωτών ECOST υπολογίζεται για κάθε φορτίο του δικτύου, με βάση τη σχέση (3.15), λαμβάνοντας υπόψη τη σύνθετη συνάρτηση βλάβης καταναλωτών για κάθε διάρκεια διακοπής και τα αντίστοιχα δεδομένα του δικτύου. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.5.

**Πίνακας 3.5:** Αναμενόμενο κόστος διακοπών καταναλωτών για το δίκτυο του Σχήματος 3.4.

Φορτία			L1	L2	L3
Γραμμή	$\lambda$ (βλ./έτος)	$r$ (ώρες)	$ECOST$ (k€)	$ECOST$ (k€)	$ECOST$ (k€)
1-2	0,2	4	15,4752	12,3802	9,2851
2-3	0,1	4	7,7376	6,1901	4,6426
3-4	0,3	4	23,2128	18,5702	13,9277
<b>Σύνολο</b>			46,4256	37,1405	27,8554

όπου:

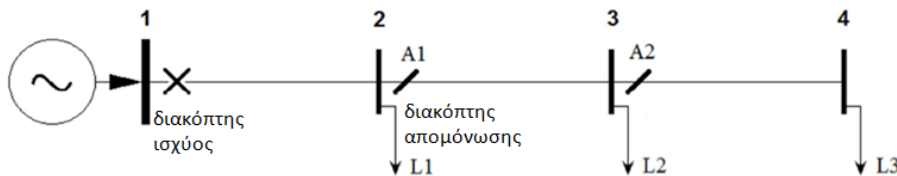
$$ECOST_{L1}^{12} = \lambda_{12} \cdot L_1 \cdot CCDF(4h) = 0,2 \cdot 5000 \cdot 15,4752 = 15,4752 \text{ k€}$$

$$ECOST_{L1} = ECOST_{L1}^{12} + ECOST_{L1}^{23} + ECOST_{L1}^{34}$$

### 3.7.2 Επίδραση συσκευών προστασίας

Για τη βελτίωση του επιπέδου της αξιοπιστίας των δικτύων διανομής, προβλέπεται συχνά η τοποθέτηση κατάλληλων συσκευών, όπως αποζευκτών ή διακοπών απομόνωσης, σε συγκεκριμένα σημεία κατά μήκος των γραμμών των δικτύων διανομής. Η λειτουργία των παραπάνω στοιχείων δεν αφορά στην απόξευση σφαλμάτων, αλλά στη συνεργασία με το διακόπτη ισχύος του δικτύου, και έπεται της ενεργοποίησης του διακόπτη ισχύος, ο οποίος και εκκαθαρίζει το σφάλμα. Μετά την ενεργοποίηση του διακόπτη ισχύος και το άνοιγμα του κυκλώματος, ο αντίστοιχος διακόπτης απομόνωσης ανοίγει για την απομόνωση από το υπόλοιπο δίκτυο του τμήματος στο οποίο έχει συμβεί το σφάλμα, οπότε και ο διακόπτης ισχύος μπορεί να ξανακλείσει για την αποκατάσταση της σύνδεσης του τμήματος του δικτύου μεταξύ του σημείου της τροφοδοσίας και του σημείου του σφάλματος [11].

Στο δίκτυο 4 ζυγών του Σχήματος 3.4 που περιγράφηκε στην Ενότητα 3.7.1, θεωρείται ότι εγκαθίστανται διακόπτες απομόνωσης A1 και A2 στις αναχωρήσεις των γραμμών 2-3 και 3-4 αντίστοιχα, ενώ ο χρόνος απομόνωσης και επανασύνδεσης λαμβάνεται ίσος με 0,5 h. Ο χρόνος απομόνωσης και επανασύνδεσης αντιστοιχεί στο χρόνο που μεσολαβεί από το άνοιγμα του διακόπτη ισχύος μέχρι αυτός να ξανακλείσει, αφού στο ενδιάμεσο χρονικό διάστημα έχει απομονωθεί το τμήμα του δικτύου με το σφάλμα. Το νέο δίκτυο απεικονίζεται στο Σχήμα 3.5.

**Σχήμα 3.5:** Ακτινικό δίκτυο 4 ζυγών με διακόπτες απομόνωσης στην αρχή των γραμμών 2-3 και 3-4.

Στην περίπτωση σφάλματος στο τμήμα 2-3, ενεργοποιείται ο διακόπτης ισχύος και ανοίγει το κύκλωμα. Στη συνέχεια ανοίγει ο διακόπτης απομόνωσης A1 στην αναχώρηση της γραμμής 2-3 και απομονώνει τα τμήματα 2-3 και 3-4 από το υπόλοιπο δίκτυο. Έτσι, μπορεί πλέον να ξανακλείσει ο διακόπτης ισχύος, οπότε αποκαθίσταται η τροφοδοσία του φορτίου L1 στο ζυγό 2, χωρίς να είναι απαραίτητη προηγουμένως η διόρθωση του σφάλματος στο

τμήμα 2-3. Συνεπώς ο διακόπτης απομόνωσης συντελεί στη μείωση του χρόνου διακοπής του καταναλωτή L1. Σε αυτή την περίπτωση, ο χρόνος διακοπής του ζυγού 2 θα ισούται με το χρόνο απομόνωσης και επανασύνδεσης (0,5 h).

Ομοίως, σε περίπτωση σφάλματος στο τμήμα 3-4, με τη βοήθεια του διακόπτη απομόνωσης A2 στην αναχώρηση της γραμμής 3-4, αποκαθίσταται η σύνδεση των κόμβων 2 και 3 με την τροφοδοσία, πριν ολοκληρωθεί η διαδικασία διόρθωσης του σφάλματος στο τμήμα 3-4, συντελώντας στη μείωση του χρόνου διακοπής των καταναλωτών L1 και L2 σε 0,5 h (χρόνος απομόνωσης και επανασύνδεσης).

Για το δίκτυο του Σχήματος 3.5 ισχύουν τα δεδομένα των Πινάκων 3.1 - 3.4, της Ενότητας 3.7.1. Σε αυτή την περίπτωση, το αναμενόμενο κόστος διακοπών καταναλωτών, ECOST υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τη σχέση (3.15), κατά αντιστοιχία με την Ενότητα 3.7.1. Τα αποτελέσματα αυτών των υπολογισμών φαίνονται στον Πίνακα 3.6.

Από τον Πίνακα 3.6 παρατηρείται ότι σφάλμα για παράδειγμα στη γραμμή 2-3 και 3-4 θα οδηγήσει σε μικρότερο χρόνο διακοπής της τροφοδοσίας του φορτίου L1 και σε μικρότερη τιμή του ECOST σε σχέση με τα αντίστοιχα αποτελέσματα του Πίνακα 3.5, λόγω της εγκατάστασης των διακοπών απομόνωσης. Αντίστοιχα συμπεράσματα εξάγονται για το φορτίο L2 στην περίπτωση σφάλματος στο τμήμα 2-3, ενώ δεν παρατηρείται μεταβολή στο ECOST για το φορτίο L3.

**Πίνακας 3.6:** Αναμενόμενο κόστος διακοπών καταναλωτών για το δίκτυο του Σχήματος 3.5.

Φορτία		L1		L2		L3	
Γραμμή	$\lambda$ (βλ./έτος)	$r$ (ώρες)	ECOST (κ€)	$r$ (ώρες)	ECOST (κ€)	$r$ (ώρες)	ECOST (κ€)
1-2	0,2	4	15,4752	4	12,3802	4	9,2851
2-3	0,1	0,5	0,9307	4	6,1901	4	4,6426
3-4	0,3	0,5	2,7921	0,5	2,2337	4	13,9277
Σύνολο			19,1980	-	20,8039	-	27,8554

Τα αποτελέσματα για κάθε φορτίο αλλά και για όλο το δίκτυο συνολικά παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.7. για τις δύο περιπτώσεις του δικτύου διανομής:

- Αρχικό δίκτυο χωρίς διακόπτες απομόνωσης
- Τελικό δίκτυο με διακόπτες απομόνωσης

**Πίνακας 3.7:** Σύγκριση αποτελεσμάτων του αναμενόμενου κόστους διακοπών καταναλωτών.

Φορτία	Αρχικό δίκτυο	Τελικό δίκτυο	Μείωση (%)
	ECOST (κ€)	ECOST (κ€)	
L1	46,4256	19,1980	58,65
L2	37,1405	20,8039	43,99
L3	27,8554	27,8554	0,00
Σύνολο	111,4214	67,8573	39,10

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των δύο περιπτώσεων του Πίνακα 3.7, παρατηρείται ότι με την εγκατάσταση διακοπών απομόνωσης επιτυγχάνεται μείωση του αναμενόμενου κόστους διακοπών για τα φορτία L1 και L2 κατά 58,65% και 43,99% αντίστοιχα. Η συνολική μείωση του αναμενόμενου κόστους διακοπών καταναλωτών του δικτύου προκύπτει 39,1% και άρα συνολικά επιτυγχάνεται βελτίωση της αξιοπιστίας του δικτύου. Το κόστος διακοπών

για το φορτίο L3 δεν μεταβάλλεται, λόγω των θέσεων των διακοπών απομόνωσης αλλά και επειδή δεν υπάρχει εναλλακτική όδευση παροχής τροφοδοσίας μέσω κανονικά ανοικτού διακόπτη στο τέλος της γραμμής διανομής του δικτύου.

Συμπερασματικά, το αναμενόμενο κόστος διακοπών καταναλωτών εξαρτάται από το ρυθμό βλαβών, το μέσο φορτίο που ζητείται σε κάθε κόμβο, τη διάρκεια διακοπών των καταναλωτών, η οποία επηρεάζει τη συνάρτηση βλάβης των καταναλωτών, τις θέσεις των διακοπών απομόνωσης, αλλά και την ύπαρξη εναλλακτικών οδεύσεων στο δίκτυο διανομής. Η βέλτιστη θέση των διακοπών απομόνωσης θα οδηγήσει στην ελαχιστοποίηση του κόστους διακοπών καταναλωτών λαμβάνοντας υπόψη και το κόστος επένδυσης των αντίστοιχων διακοπών. Η μαθηματική διατύπωση αυτού του προβλήματος περιγράφεται στο Κεφάλαιο 4.

## **ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΔΙΑΚΟΠΤΩΝ ΑΠΟΜΟΝΩΣΗΣ ΣΕ ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

### **4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Ο σχεδιασμός των δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας (ΔΔΗΕ) πραγματοποιείται με σκοπό να ικανοποιηθεί η αυξανόμενη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας με το βέλτιστο τεχνικά και οικονομικά τρόπο εξασφαλίζοντας αποδεκτά επίπεδα αξιοπιστίας.

Οι διακόπτες απομόνωσης χρησιμοποιούνται στις γραμμές των δικτύων διανομής με στόχο τη βελτίωση της αξιοπιστίας τους, την απομόνωση σφαλμάτων, τη διαμόρφωση ή την επαναδιαμόρφωση του δικτύου. Η βέλτιστη τοποθέτηση και επιλογή του κατάλληλου πλήθους των διακοπών απομόνωσης αποτελεί σημαντικό παράγοντα στον σχεδιασμό των δικτύων διανομής. Όσο μεγαλύτερο είναι το πλήθος των διακοπών απομόνωσης, τόσο μειώνεται ο χρόνος διακοπής της τροφοδοσίας των καταναλωτών και συνεπώς αυξάνεται το επίπεδο αξιοπιστίας του δικτύου. Ωστόσο, ένα μεγάλο πλήθος διακοπών απομόνωσης προϋποθέτει υψηλό επενδυτικό κόστος [24].

Σκοπός της βέλτιστης τοποθέτησης διακοπών απομόνωσης σε ΔΔΗΕ είναι η ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους διακοπών των καταναλωτών σε συνδυασμό με την ελαχιστοποίηση του κόστους επένδυσης, εγκατάστασης, λειτουργίας και συντήρησης των διακοπών απομόνωσης έτσι ώστε να επιτευχθεί η βελτίωση της αξιοπιστίας του ΔΔΗΕ [9].

Κάθε πρόβλημα βελτιστοποίησης έχει ως στόχο την ελαχιστοποίηση ή μεγιστοποίηση της τιμής μίας αντικειμενικής συνάρτησης και την εύρεση των τιμών των μεταβλητών απόφασης (μεταβλητών σχεδίασης) για την ελάχιστη ή μέγιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης με ταυτόχρονη ικανοποίηση όλων των περιορισμών του προβλήματος.

Στο πρόβλημα της βέλτιστης τοποθέτησης διακοπών απομόνωσης σε ΔΔΗΕ, ως αντικειμενική συνάρτηση μπορεί να ληφθεί κάποια από τις ακόλουθες:

- η ελαχιστοποίηση του αναμενόμενου κόστους διακοπών καταναλωτών
- η ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους επένδυσης, εγκατάστασης, λειτουργίας και συντήρησης των διακοπών απομόνωσης
- η ελαχιστοποίηση της μέσης διάρκειας διακοπών καταναλωτών
- η ελαχιστοποίηση των πιθανοτήτων εμφάνισης σφαλμάτων
- η μεγιστοποίηση της ποιότητας ισχύος.

και ως μεταβλητές απόφασης του προβλήματος βελτιστοποίησης μπορούν να ληφθούν οι ακόλουθες:

- η συνάρτηση βλάβης των καταναλωτών
- οι πιθανές θέσεις και το πλήθος των διακοπών απομόνωσης στο ΔΔΗΕ
- οι πιθανές θέσεις και το πλήθος των διακοπών ισχύος

Ταυτόχρονα πρέπει να ικανοποιούνται οι περιορισμοί του προβλήματος βελτιστοποίησης, δηλαδή οι τεχνικοί περιορισμοί του ΔΔΗΕ, καθώς και όποιοι άλλοι περιορισμοί κρίνονται απαραίτητοι από τον διαχειριστή του δικτύου.

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει αναφορά στα προβλήματα βελτιστοποίησης. Συγκεκριμένα, θα παρουσιαστούν τα προβλήματα γραμμικού προγραμματισμού και μεικτού ακέραίου γραμμικού προγραμματισμού στη γενική τους μορφή. Στη συνέχεια, θα διατυπωθεί το μαθηματικό μοντέλο βέλτιστης τοποθέτησης διακοπών απομόνωσης σε ΔΔΗΕ και θα παρουσιαστεί ένα παράδειγμα εφαρμογής του μαθηματικού μοντέλου σε ένα δίκτυο δύο κόμβων.

## 4.2 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

Ανάλογα με το είδος των συναρτήσεων και των μεταβλητών του προβλήματος τα μοντέλα μαθηματικού προγραμματισμού διακρίνονται σε διαφορετικές κατηγορίες:

- 1) Μοντέλα γραμμικού προγραμματισμού, αν η αντικειμενική συνάρτηση και οι περιορισμοί εκφράζονται ως γραμμικές συναρτήσεις των μεταβλητών απόφασης. Μοντέλα μη γραμμικού προγραμματισμού, αν έστω και μία συνάρτηση είναι μη γραμμική.
- 2) Συνεχή μοντέλα, αν οι μεταβλητές απόφασης παίρνουν μόνο συνεχείς τιμές. Ακέραια μοντέλα, αν οι μεταβλητές απόφασης λαμβάνουν μόνο ακέραιες τιμές. Μεικτά – ακέραια μοντέλα, αν κάποιες μεταβλητές απόφασης είναι συνεχείς και κάποιες ακέραιες.
- 3) Στοχαστικά μοντέλα, αν κάποια από τις μεταβλητές απόφασης ή τις αριθμητικές παραμέτρους των συναρτήσεων συνδέονται με συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας. Αν όχι, τότε καλούνται αιτιοκρατικά μοντέλα.
- 4) Δυναμικά μοντέλα, αν κάποια από τις μεταβλητές απόφασης είναι συνάρτηση του χρόνου, αλλιώς τα μοντέλα είναι στατικά.
- 5) Μοντέλα με ένα μόνο κριτήριο απόφασης, δηλαδή μία αντικειμενική συνάρτηση. Επίσης, υπάρχουν και μοντέλα πολυκριτηριακά (ή πολυαντικειμενικά).

Κάθε μοντέλο χαρακτηρίζεται από στοιχεία και των πέντε αυτών κατηγοριών. Για παράδειγμα ένα μοντέλο μπορεί να είναι γραμμικό, μεικτό – ακέραιο, αιτιοκρατικό, στατικό, με μία αντικειμενική συνάρτηση [25].

Σε ένα συνεχές πρόβλημα βελτιστοποίησης με  $n$  μεταβλητές η περιοχή των αποδεκτών λύσεων (feasible region) είναι υποσύνολο του χώρου  $\mathbb{R}^n$ . Τα σύνορά της καθορίζονται σε κάθε περίπτωση από τους περιορισμούς του προβλήματος, κάθε ένας από τους οποίους αντιστοιχεί σε μια καμπύλη οριοθέτησης στον χώρο. Είναι προφανές ότι η δυσκολία και ο χρόνος επίλυσης εξαρτώνται άμεσα τόσο από τη μορφολογία της αποδεκτής περιοχής κάθε προβλήματος όσο και από τις μεθόδους που επιλέγονται για τη "σάρωση" της προς αναζήτηση βέλτιστης λύσης. Η λύση αυτή μπορεί να είναι η καλύτερη δυνατή από το σύνολο της αποδεκτής περιοχής, οπότε ονομάζεται ολικό βέλτιστο, ή να είναι απλά καλύτερη

από όλες τις άλλες λύσεις σε κάποια γειτονιά κοντά σε αυτή, οπότε ονομάζεται τοπικό βέλτιστο. Σε ένα πρόβλημα υπάρχουν πολλά τοπικά βέλτιστα αλλά μόνο ένα ολικό. Είναι επίσης δύσκολο να αποδειχθεί αν ένα τοπικό βέλτιστο είναι και ολικό.

#### 4.2.1 Γραμμικά Προβλήματα

Τα προβλήματα γραμμικού προγραμματισμού (LP–Linear Programming) συνήθως μετασχηματίζονται και μελετώνται στην κανονική τους μορφή [26]:

$$\text{Ελαχιστοποίηση της } \mathbf{z} = \mathbf{c}^T \cdot \mathbf{x} \quad (4.1)$$

υπό τους περιορισμούς:

$$\begin{aligned} \mathbf{A} \cdot \mathbf{x} &= \mathbf{b} \\ \mathbf{x} &\geq \mathbf{0} \end{aligned} \quad (4.2)$$

όπου:

$$\mathbf{c} \in R^n$$

$$\mathbf{b} \in R^m \quad : \text{ μη μηδενικό διάνυσμα}$$

$$\mathbf{A} \quad : \text{ πίνακας } m \times n$$

Το κύριο ζητούμενο στην επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης είναι η εύρεση του διανύσματος που είναι ολικά βέλτιστο. Τη σύγκλιση σε ολικά βέλτιστο σημείο την εγγυώνται τα κυρτά προβλήματα (CP – Convex Programming) που στη γενική τους μορφή γράφονται ως ακολούθως [26]:

$$\text{Ελαχιστοποίηση της } \mathbf{z} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) \quad (4.3)$$

υπό τους περιορισμούς:

$$\begin{aligned} \mathbf{h}(\mathbf{x}) &= \mathbf{0} \\ \mathbf{g}(\mathbf{x}) &\leq \mathbf{0} \end{aligned} \quad (4.4)$$

όπου  $\mathbf{f}$ ,  $\mathbf{g}$  κυρτές και συνεχώς παραγωγίσιμες συναρτήσεις. Τα γραμμικά προβλήματα είναι μία ειδική περίπτωση των κυρτών προβλημάτων και επομένως, ως συνέπεια της κυρτότητας, κάθε τοπικά βέλτιστη λύση είναι και ολικά βέλτιστη. Στα προβλήματα αυτά είναι δυνατή η εύρεση του ολικού βέλτιστου εντός πολυωνυμικού χρόνου, όπου οι γραμμικοί περιορισμοί δημιουργούν μια κυρτή περιοχή λύσεων. Το ολικό βέλτιστο για οποιαδήποτε γραμμική αντικειμενική συνάρτηση θα βρίσκεται πάντα σε μια από τις κορυφές του συνόρου της.

Υπάρχουν αρκετοί αλγόριθμοι που επιλύουν τα γραμμικά προβλήματα. Οι πιο διαδεδομένοι είναι ο αλγόριθμος Simplex και ο δυαδικός αλγόριθμος Simplex [26].

#### 4.2.2 Μεικτά – Ακέραια Γραμμικά Προβλήματα

Όταν σε ένα γραμμικό πρόβλημα προγραμματισμού κάποιες μεταβλητές απόφασης είναι ακέραιες, τότε το πρόβλημα είναι μεικτού-ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού (MILP – Mixed Integer Linear Programming).

Στην πράξη, στα περισσότερα προβλήματα υπάρχει ανάγκη κάποιες μεταβλητές απόφασης να είναι ακέραιες και συχνά περιορίζονται μόνο στο να λαμβάνουν την τιμή 1 ή 0 (δυαδικές μεταβλητές). Αυτό προσθέτει πολυπλοκότητα στην επίλυση του προβλήματος, επειδή δεν υπάρχει συνέχεια και άρα το πρόβλημα δεν είναι κυρτό.

Ωστόσο, οι δυαδικές μεταβλητές είναι πολύ χρήσιμο εργαλείο στη μοντελοποίηση μη γραμμικών προβλημάτων τα οποία, με τη χρήση κάποιων επιπρόσθετων περιορισμών, μπορούν να γίνουν γραμμικά. Ένα τέτοιο πρόβλημα γράφεται στην κανονική του μορφή ως ακολούθως [26]:

$$\text{Ελαχιστοποίηση της } z = c_j \cdot x_j \quad (4.5)$$

υπό τους περιορισμούς:

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^n a_{ij} \cdot x_j &= b_i, \quad i = 1, 2, \dots, m \\ x_j &\geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, n \\ x_j &\in N, \text{ για κάποια ή για όλα τα } j = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (4.6)$$

όπου το  $N$  αναφέρεται στο σύνολο  $\{0, 1, 2, \dots, n\}$

### 4.3 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗΣ ΔΙΑΚΟΠΤΩΝ ΑΠΟΜΟΝΩΣΗΣ ΣΕ ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

#### 4.3.1 Περιγραφή του Προβλήματος Βέλτιστης Τοποθέτησης Διακοπών Απομόνωσης σε ΔΔΗΕ

Τα ΔΔΗΕ διανέμουν την ισχύ που προέρχεται από το δίκτυο μεταφοράς στους καταναλωτές (πελάτες) του δικτύου διανομής. Βασικό κριτήριο στη σχεδίαση των δικτύων διανομής είναι η διατήρηση της συνεχούς τροφοδοσίας της μεταβαλλόμενης ζήτησης των καταναλωτών. Γενικά, κατά τη διαδικασία λήψης αποφάσεων επιλέγεται η βέλτιστη τεχνοοικονομικά λύση, η οποία εξασφαλίζει το ελάχιστο συνολικό κόστος επενδύσεων, λειτουργίας και συντήρησης για ολόκληρη την εξεταζόμενη περίοδο και παρουσιάζει το μεγαλύτερο βαθμό εξυπηρέτησης καταναλωτών, δηλαδή τη μεγαλύτερη συνέχεια τροφοδότησης.

Η μείωση των ολικών ή μερικών διακοπών τροφοδότησης της ζήτησης φορτίου του συστήματος, μικρής ή μεγαλύτερης διάρκειας, μπορεί να επιτευχθεί με τους διακόπτες απομόνωσης. Οι διακόπτες απομόνωσης τοποθετούνται στις γραμμές των δικτύων διανομής για να απομονώσουν τμήματα του δικτύου που έχουν υποστεί βλάβη (μόνιμο σφάλμα), για ελαχιστοποίηση του χρόνου και του κόστους διακοπής, για ελαχιστοποίηση των απωλειών λόγω επαναδιαμόρφωσης των δικτύων διανομής και γενικά για τη βελτίωση της αξιοπιστίας των δικτύων διανομής. Η αξιοπιστία των ΔΔΗΕ μπορεί να βελτιωθεί μειώνοντας το σύνολο των περιπτώσεων βλάβης, περιορίζοντας τις μη τροφοδοτούμενες περιοχές και αυξάνοντας τη ταχύτητα επανατροφοδότησης του συστήματος ύστερα από βλάβη [9], [27].

Όταν συμβεί κάποιο σφάλμα, απομονώνεται το τμήμα του δικτύου που έχει υποστεί βλάβη με το άνοιγμα των γειτονικών διακοπών απομόνωσης εκατέρωθεν της θέσης σφάλματος. Στη συνέχεια, τροφοδοτούνται τα υπόλοιπα φορτία εκτός της περιοχής



σφάλματος. Αφού επιδιορθωθεί το σφάλμα, οι διακόπτες απομόνωσης κλείνουν και αποκαθίσταται η τροφοδοσία των αποκομμένων καταναλωτών λόγω σφάλματος, οπότε το σύστημα επανέρχεται στην αρχική του κατάσταση [9].

Γενικά, η αξιοπιστία του συστήματος βελτιώνεται όσο αυξάνεται το πλήθος και συνεπώς το αντίστοιχο επενδυτικό κόστος των διακοπών. Παράλληλα το κόστος βλάβης των καταναλωτών μειώνεται όσο το επίπεδο αξιοπιστίας βελτιώνεται. Ανάλογα με την τοπολογία του δικτύου, τον τύπο των καταναλωτών, τη συνάρτηση βλάβης των καταναλωτών και την πυκνότητα του φορτίου, στην αντικειμενική συνάρτηση πρέπει να ληφθούν υπόψη οι κατάλληλοι δείκτες αξιοπιστίας.

Μαθηματικά, το πρόβλημα της βέλτιστης τοποθέτησης διακοπών απομόνωσης σε ΔΔΗΕ αποτελεί ένα σύνθετο, συνδυαστικό πρόβλημα βελτιστοποίησης [28]. Για την επίλυση του έχουν χρησιμοποιηθεί στη βιβλιογραφία διάφορες μέθοδοι, όπως ευριστικοί αλγόριθμοι [24], μέθοδοι προσομοιωμένης ανόπτησης [24], [28], προσεγγίσεις βασισμένες στην ασαφή λογική [29], γενετικοί αλγόριθμοι [13] αλλά και αλγόριθμοι βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων [27]. Οι μέθοδοι βελτιστοποίησης γραμμικού, μη γραμμικού προγραμματισμού ή μεικτού ακέραίου προγραμματισμού έχουν αποδειχτεί ότι καταλήγουν σε ολική βέλτιστη λύση μέσα από συγκεκριμένο αριθμό βημάτων [9].

Στην παρούσα εργασία το πρόβλημα βέλτιστης τοποθέτησης διακοπών απομόνωσης μοντελοποιείται ως πρόβλημα μεικτού ακέραίου γραμμικού προγραμματισμού, όπως περιγράφεται στη συνέχεια.

### 4.3.2 Αντικειμενική Συνάρτηση

Στην παρούσα εργασία, η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος της βέλτιστης τοποθέτησης διακοπών απομόνωσης σε ΔΔΗΕ είναι η ακόλουθη [9]:

$$\begin{aligned} \min \sum_{t=1}^T \sum_{f=1}^{N_f} \sum_{i=1}^{NC_f} \sum_{j=1}^{NL_f} \sum_{k=1}^{CT_f} & [\lambda(i, f, t) \cdot L(j, k, f) \cdot (1 + q)^{t-1} \cdot C^{d_{ij}}(i, j, k, f) \cdot (1 + DR)^{-t}] \\ & + \sum_{t=1}^T \sum_{f=1}^{N_f} \sum_{s=1}^{N_s} [CI(s) + IC(s) + MC(s) \cdot (1 + DR)^{-t}] \cdot X(s, f) \end{aligned} \quad (4.7)$$

όπου:

$t$	χρονική στιγμή (έτος)
$T$	χρονικός ορίζοντας προγραμματισμού
$f$	δείκτης κύριας γραμμής τροφοδοσίας (feeder)
$N_f$	σύνολο κύριων γραμμών τροφοδοσίας
$i$	δείκτης θέσης σφάλματος ΔΔΗΕ
$NC_f$	σύνολο των πιθανών θέσεων σφάλματος στη γραμμή τροφοδοσίας $f$ του ΔΔΗΕ

$j$	δείκτης φορτίου στο ΔΔΗΕ
$NL_f$	σύνολο των φορτίων στη γραμμή τροφοδοσίας $f$ του ΔΔΗΕ
$k$	δείκτης τύπου καταναλωτή στο ΔΔΗΕ
$CT_f$	σύνολο των κατηγοριών των καταναλωτών στη γραμμή τροφοδοσίας $f$ του ΔΔΗΕ
$\lambda(i,f,t)$	ρυθμός βλαβών στοιχείου $i$ της γραμμής τροφοδοσίας $f$ το έτος $t$
$L(j,k,f)$	μέσο φορτίο καταναλωτή $j$ τύπου $k$ της γραμμής τροφοδοσίας $f$ (kW)
$q$	ετήσιος ρυθμός αύξησης φορτίου (%)
$C^{dij}(i,j,k,f)$	συνεχής θετική μεταβλητή, η οποία εκφράζει τη συνάρτηση βλάβης καταναλωτή $j$ τύπου $k$ στη γραμμή τροφοδοσίας $f$ , λόγω σφάλματος στη θέση $i$ για χρονική διάρκεια διακοπής $d_{ij}$ (€/kW)
$s$	δείκτης θέσης διακόπτη απομόνωσης στο ΔΔΗΕ
$N_s$	σύνολο πιθανών θέσεων των διακοπών απομόνωσης στο ΔΔΗΕ
$X(s,f)$	δυαδική μεταβλητή η οποία παίρνει την τιμή 1 αν τοποθετηθεί διακόπτης απομόνωσης στη θέση $s$ της γραμμής τροφοδοσίας $f$ , αλλιώς παίρνει την τιμή 0
$CI(s)$	κόστος επένδυσης διακόπτη απομόνωσης (€)
$IC(s)$	κόστος εγκατάστασης διακόπτη απομόνωσης (€)
$MC(s)$	κόστος λειτουργίας και συντήρησης διακόπτη απομόνωσης (€)
$DR$	επιτόκιο αναγωγής (%)

Ο πρώτος όρος της (4.7) υπολογίζει το συνολικό αναμενόμενο κόστος διακοπών των καταναλωτών κατά τη διάρκεια προγραμματισμού και εξαρτάται από τον ρυθμό βλαβών  $\lambda$  κάθε στοιχείου του δικτύου, το μέσο φορτίο των καταναλωτών  $L$ , τη συνάρτηση βλάβης των καταναλωτών  $C^{dij}$  και τον ετήσιο ρυθμό αύξησης φορτίου  $q$ , ενώ ο δεύτερος όρος της (4.7) υπολογίζει το συνολικό κόστος επένδυσης, εγκατάστασης, λειτουργίας και συντήρησης των διακοπών απομόνωσης.

Οι διακόπτες απομόνωσης θεωρούνται ότι τοποθετούνται στην αρχή και το τέλος του εκάστοτε τμήματος της κύριας γραμμής τροφοδοσίας του δικτύου το έτος αναφοράς (έτος 0) και παραμένουν εγκατεστημένοι για ολόκληρο τον χρονικό ορίζοντα προγραμματισμού, π.χ. για 15 έτη. Επιπλέον, πιθανές θέσεις σφάλματος θεωρούνται οι κύριες γραμμές τροφοδοσίας, οι διακλαδώσεις και οι Μ/Σ διανομής μέσω των οποίων συνδέονται οι καταναλωτές. Επίσης, ο ρυθμός βλαβών  $\lambda$  κάθε στοιχείου του δικτύου θεωρείται σταθερός για κάθε έτος  $t$ . Όλα τα μέσα προστασίας θεωρούνται 100% αξιόπιστα. Τέλος, κάθε σφάλμα εκκαθαρίζεται πριν συμβεί κάποιο άλλο.

### 4.3.3 Περιορισμοί

Οι περιορισμοί του προβλήματος της βέλτιστης τοποθέτησης διακοπών απομόνωσης σε δίκτυα διανομής είναι οι εξής [9]:

$$\sum_{f=1}^{N_f} \sum_{s=1}^{N_s} X(s, f) \leq N \quad (4.8)$$

$$C^{d_{ij}}(i, j, k, f) \geq CDF^{d_{ij}^{switching}}(i, j, k, f) \quad (4.9)$$

$$C^{d_{ij}}(i, j, k, f) \geq CDF^{d_{ij}^{repair}}(i, j, k, f) \cdot \left( 1 - \sum_{s=S_i}^{S_j} X(s, f) \right) \quad (4.10)$$

όπου:

$s_i$	δείκτης πλησιέστερης θέσης διακόπτη απομόνωσης στο σφάλμα $i$
$s_j$	δείκτης πλησιέστερης θέσης διακόπτη απομόνωσης στον καταναλωτή $j$
$CDF^{d_{ij}^{switching}}(i, j, k, f)$	συνάρτηση βλάβης καταναλωτή $j$ τύπου $k$ στη γραμμή τροφοδοσίας $f$ , λόγω σφάλματος στη θέση $i$ για χρονική διάρκεια διακοπής ίση με τον χρόνο χειρισμού των διακοπών απομόνωσης (χρόνος απομόνωσης και επανασύνδεσης) (€/kW)
$CDF^{d_{ij}^{repair}}(i, j, k, f)$	συνάρτηση βλάβης καταναλωτή $j$ τύπου $k$ στη γραμμή τροφοδοσίας $f$ , λόγω σφάλματος στη θέση $i$ για χρονική διάρκεια διακοπής ίση με τον χρόνο επισκευής του στοιχείου στη θέση $i$ που έγινε το σφάλμα (€/kW)

Ο περιορισμός (4.8) εκφράζει το μέγιστο επιτρεπόμενο πλήθος ( $N$ ) των διακοπών απομόνωσης που μπορεί να τοποθετηθούν στο δίκτυο, το οποίο καθορίζεται από τον χρήστη.

Οι περιορισμοί (4.9) και (4.10) σχετίζονται με τη συνεχή θετική μεταβλητή της συνάρτησης βλάβης των καταναλωτών ( $C^{d_{ij}}(i, j, k, f)$ ). Συγκεκριμένα, σε περίπτωση σφάλματος στη θέση  $i$ , τότε η συνάρτηση βλάβης του καταναλωτή  $j$  τύπου  $k$  στη γραμμή τροφοδοσίας  $f$ , εφόσον παρεμβάλλεται διακόπτης απομόνωσης μεταξύ των θέσεων σφάλματος και καταναλωτή, θα είναι ίση με τη συνάρτηση βλάβης χειρισμού των διακοπών [ $CDF^{d_{ij}^{switching}}(i, j, k, f)$ ] και η εξίσωση (4.9) υπερισχύει της (4.10). Στην περίπτωση που δεν παρεμβάλλεται κάποιος διακόπτης απομόνωσης μεταξύ των θέσεων σφάλματος και καταναλωτή, τότε η συνάρτηση βλάβης του καταναλωτή θα είναι ίση με τη συνάρτηση βλάβης λόγω επισκευής του τμήματος που έγινε το σφάλμα [ $CDF^{d_{ij}^{repair}}(i, j, k, f)$ ] και η εξίσωση (4.10) υπερισχύει της (4.9).

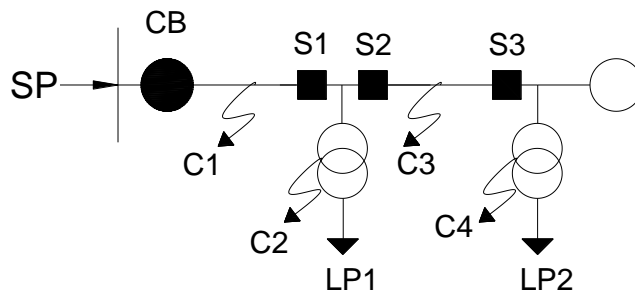
Στο παραπάνω πρόβλημα βελτιστοποίησης η δυαδική μεταβλητή  $X(s, f)$  παίρνει την τιμή 1 αν ο διακόπτης απομόνωσης τοποθετηθεί στη θέση  $s$  της γραμμής διανομής  $f$ , αλλιώς λαμβάνει την τιμή 0. Οι παράμετροι  $CDF^{d_{ij}^{switching}}$  και  $CDF^{d_{ij}^{repair}}$  δηλώνουν τις τιμές της

συνάρτησης βλάβης των καταναλωτών, οι οποίες αντιστοιχούν σε διάρκεια διακοπής ίση με  $d^{switching}$  και  $d^{repair}$  αντίστοιχα.

Η βέλτιστη λύση του προβλήματος προκύπτει λαμβάνοντας υπόψη όλες τις πιθανές θέσεις των διακοπών απομόνωσης σε συνδυασμό με όλες τις πιθανές θέσεις σφάλματος σε κάθε γραμμή τροφοδοσίας και όλες τις θέσεις και τα είδη των καταναλωτών.

#### 4.4 Αριθμητικό Παράδειγμα

Οι περιορισμοί (4.9) και (4.10) του προβλήματος βελτιστοποίησης που ορίστηκε στην Ενότητα 4.3.3 εξηγούνται στη συνέχεια με ένα αριθμητικό παράδειγμα.



Σχήμα 4.1: Απλοποιημένο δίκτυο δύο κόμβων.

Το απλοποιημένο δίκτυο στο Σχήμα 4.1 περιλαμβάνει έναν ζυγό τροφοδοσίας (SP), ο οποίος τροφοδοτεί δύο φορτία LP1 και LP2 στα οποία είναι συνδεδεμένοι βιομηχανικοί καταναλωτές μέσω δύο μετασχηματιστών διανομής. Έτσι οι δείκτες  $f$  και  $k$  παίρνουν την τιμή 1. Στην αρχή της γραμμής τροφοδοσίας είναι εγκατεστημένος ένας κανονικά κλειστός διακόπτης ισχύος CB, ενώ στο τέλος της ένας κανονικά ανοικτός διακόπτης ισχύος. Υπάρχουν 4 πιθανές θέσεις σφάλματος, οι δύο σε κύριες γραμμές του δικτύου διανομής (θέσεις C1 και C3) και δύο στους μετασχηματιστές (θέσεις C2 και C4). Επίσης, προκύπτουν τρεις πιθανές θέσεις διακοπών απομόνωσης ( $s_1$ ,  $s_2$  και  $s_3$ ), οι οποίες στο παράδειγμα αυτό θεωρούνται δεδομένες.

Πίνακας 4.1: Συνάρτηση βλάβης καταναλωτών CDF (€/kW).

Είδος καταναλωτή	Διάρκεια Διακοπών		
	$d^{switching}$ 10 min	$d^{repair}$ 5 h	$d^{repair} M/\Sigma$ 10 h
βιομηχανικός	2,88	13,87	27,6

Θεωρώντας χρόνο χειρισμού των διακοπών ( $d^{switching}$ ) ίσο με 10 λεπτά, χρόνο επιδιόρθωσης μιας βλάβης ( $d^{repair}$ ) σε κύρια γραμμή ή σε διακλάδωση του δικτύου ίσο με 5 ώρες και χρόνο αντικατάστασης του μετασχηματιστή διανομής ίσο με 10 ώρες καθώς επίσης και τη συνάρτηση βλάβης των καταναλωτών του Πίνακα 4.1, οι περιορισμοί οι οποίοι σχετίζονται με την συνάρτηση βλάβης των καταναλωτών στα δύο σημεία που είναι συνδεδεμένα φορτία με βάση τις παραπάνω συνθήκες, περιγράφονται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$\left. \begin{aligned} C^{d_{11}}(1,1,1,1) &\geq CDF^{d_{11}^{switching}}(1,1,1,1) \Rightarrow C^{d_{11}}(1,1,1,1) \geq 2,88 \\ C^{d_{11}}(1,1,1,1) &\geq CDF^{d_{11}^{repair}}(1,1,1,1) \cdot [1 - X(s_1)] \Rightarrow C^{d_{11}}(1,1,1,1) \geq 0 \end{aligned} \right\} \Rightarrow \\ C^{d_{11}}(1,1,1,1) &\geq 2,88 \quad (4.11)$$

Η εξίσωση (4.11) σημαίνει ότι η συνάρτηση βλάβης του καταναλωτή 1 (LP1), με τύπο καταναλωτή 1, για σφάλμα στη θέση 1 (C1) της γραμμής τροφοδοσίας 1, είναι μεγαλύτερη ή ίση του 2,88 €/kW.

$$\left. \begin{aligned} C^{d_{12}}(1,2,1,1) &\geq CDF^{d_{12}^{switching}}(1,2,1,1) \Rightarrow C^{d_{12}}(1,2,1,1) \geq 2,88 \\ C^{d_{12}}(1,2,1,1) &\geq CDF^{d_{12}^{repair}}(1,2,1,1) \cdot [1 - X(s_1) - X(s_2) - X(s_3)] \Rightarrow \\ &\Rightarrow C^{d_{12}}(1,2,1,1) \geq 0 \end{aligned} \right\} \Rightarrow \\ C^{d_{12}}(1,2,1,1) &\geq 2,88 \quad (4.12)$$

Η εξίσωση (4.12) σημαίνει ότι η συνάρτηση βλάβης του καταναλωτή 2 (LP2), με τύπο καταναλωτή 1, για σφάλμα στη θέση 1 (C1) της γραμμής τροφοδοσίας 1, είναι μεγαλύτερη ή ίση του 2,88 €/kW.

$$\left. \begin{aligned} C^{d_{21}}(2,1,1,1) &\geq CDF^{d_{21}^{switching}}(2,1,1,1) \Rightarrow C^{d_{21}}(2,1,1,1) \geq 2,88 \\ C^{d_{21}}(2,1,1,1) &\geq CDF^{d_{21}^{repair}}(2,1,1,1) \Rightarrow C^{d_{21}}(2,1,1,1) \geq 27,6 \end{aligned} \right\} \Rightarrow \\ C^{d_{21}}(2,1,1,1) &\geq 27,6 \quad (4.13)$$

$$\left. \begin{aligned} C^{d_{22}}(2,2,1,1) &\geq CDF^{d_{22}^{switching}}(2,2,1,1) \Rightarrow C^{d_{22}}(2,2,1,1) \geq 2,88 \\ C^{d_{22}}(2,2,1,1) &\geq CDF^{d_{22}^{repair}}(2,2,1,1) \cdot [1 - X(s_2) - X(s_3)] \Rightarrow \\ &\Rightarrow C^{d_{22}}(2,2,1,1) \geq 0 \end{aligned} \right\} \Rightarrow \\ C^{d_{22}}(2,2,1,1) &\geq 2,88 \quad (4.14)$$

$$\left. \begin{aligned} C^{d_{31}}(3,1,1,1) &\geq CDF^{d_{31}^{switching}}(3,1,1,1) \Rightarrow C^{d_{31}}(3,1,1,1) \geq 2,88 \\ C^{d_{31}}(3,1,1,1) &\geq CDF^{d_{31}^{repair}}(3,1,1,1) \cdot [1 - X(s_2)] \Rightarrow C^{d_{31}}(3,1,1,1) \geq 0 \end{aligned} \right\} \Rightarrow \\ C^{d_{31}}(3,1,1,1) &\geq 2,88 \quad (4.15)$$

$$\left. \begin{aligned} C^{d_{32}}(3,2,1,1) &\geq CDF^{d_{32}^{switching}}(3,2,1,1) \Rightarrow C^{d_{32}}(3,2,1,1) \geq 2,88 \\ C^{d_{32}}(3,2,1,1) &\geq CDF^{d_{32}^{repair}}(3,2,1,1) \cdot [1 - X(s_3)] \Rightarrow C^{d_{32}}(3,2,1,1) \geq 0 \end{aligned} \right\} \Rightarrow \\ C^{d_{32}}(3,2,1,1) &\geq 2,88 \quad (4.16)$$

$$\left. \begin{aligned} C^{d_{41}}(4,1,1,1) &\geq CDF^{d_{41}^{switching}}(4,1,1,1) \Rightarrow C^{d_{41}}(4,1,1,1) \geq 2,88 \\ C^{d_{41}}(4,1,1,1) &\geq CDF^{d_{41}^{repair}}(4,1,1,1) \cdot [1 - X(s_2) - X(s_3)] \Rightarrow \\ &\Rightarrow C^{d_{41}}(4,1,1,1) \geq 0 \end{aligned} \right\} \Rightarrow \\ C^{d_{41}}(4,1,1,1) &\geq 2,88 \quad (4.17)$$

$$\left. \begin{aligned} C^{d_{42}}(4,2,1,1) &\geq CDF^{d_{42}^{switching}}(4,2,1,1) \Rightarrow C^{d_{42}}(4,2,1,1) \geq 2,88 \\ C^{d_{42}}(4,2,1,1) &\geq CDF^{d_{42}^{repair}}(4,2,1,1) \Rightarrow C^{d_{42}}(4,2,1,1) \geq 27,6 \end{aligned} \right\} \Rightarrow \\ C^{d_{42}}(4,2,1,1) &\geq 27,6 \quad (4.18)$$

Όπως φαίνεται από τις εξισώσεις (4.11) – (4.18), η συνάρτηση βλάβης των καταναλωτών  $C^{d_{ij}}(i, j, k, f)$  εξαρτάται από την ύπαρξη ή όχι των διακοπών απομόνωσης μεταξύ της θέσης που έγινε το σφάλμα και των σημείων που είναι συνδεδεμένα τα φορτία. Συνεπώς, εξαρτάται από τη χρονική διάρκεια διακοπής που απαιτείται για την τροφοδοσία των αποκομμένων φορτίων ύστερα από σφάλμα, η οποία γενικά διαφοροποιείται ανάλογα με το είδος των καταναλωτών, εξασφαλίζοντας το ελάχιστο συνολικό αναμενόμενο κόστος διακοπών των καταναλωτών του ΔΔΗΕ και το βέλτιστο επίπεδο αξιοπιστίας.

## **ΕΠΙΛΥΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗΣ ΔΙΑΚΟΠΤΩΝ ΑΠΟΜΟΝΩΣΗΣ ΣΕ ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ**

### **5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Η αυξημένη πολυπλοκότητα των προβλημάτων βελτιστοποίησης των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας οδήγησε στην ανάγκη για καλύτερη διαχείριση των βάσεων δεδομένων και για εφαρμογή νέων τεχνικών μαθηματικού προγραμματισμού. Για αυτό το λόγο αναπτύχθηκε ένα πλήθος από γλώσσες μοντελοποίησης προβλημάτων βελτιστοποίησης. Το λογισμικό GAMS είναι ένα υπολογιστικό περιβάλλον που ορίζει, αναλύει και επιλύει προβλήματα βελτιστοποίησης. Είναι μία πολύ δημοφιλής και ευέλικτη γλώσσα υψηλού επιπέδου για τη δημιουργία μαθηματικών μοντέλων με συνοπτικές αλγεβρικές παραστάσεις.

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται το λογισμικό GAMS, το οποίο χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία για την επίλυση του προβλήματος της βέλτιστης τοποθέτησης διακοπών απομόνωσης σε ΔΔΗΕ, το οποίο διατυπώθηκε μαθηματικά στο Κεφάλαιο 4. Περιγράφονται τα βασικά χαρακτηριστικά του λογισμικού και η διαδικασία που ακολουθεί ο χρήστης για να το τρέξει. Η παρουσίαση του GAMS, των δυνατοτήτων και των δομικών συστατικών του γίνεται μέσα από παραδείγματα του κώδικα που αναπτύχθηκε στην διπλωματική εργασία.

### **5.2 ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ GAMS**

Στην παρούσα εργασία αναπτύχθηκε κώδικας στο λογισμικό GAMS (General Algebraic Modeling System), ένα υπολογιστικό περιβάλλον για τον καθορισμό, την ανάλυση και την επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης. Είναι μια πολύ ισχυρή γλώσσα και έχει τη δυνατότητα να λύσει όλα τα προβλήματα που μπορεί και ο μαθηματικός προγραμματισμός. Η γλώσσα, που χρησιμοποιεί το GAMS, είναι τυπικά παρόμοια με τις συνήθως χρησιμοποιημένες γλώσσες προγραμματισμού, καθιστώντας την οικεία σε οποιονδήποτε, που έχει κάποια επαφή με τον προγραμματισμό. Ο σχεδιασμός στο GAMS έχει ενσωματώσει τις έννοιες, που προέρχονται από τη θεωρία βάσεων δεδομένων και το μαθηματικό προγραμματισμό και προσπαθεί να συγχωνεύσει αυτές τις ιδέες να ανταποκριθούν στις ανάγκες των σχεδιασμών των μοντέλων. Ο κώδικας στο GAMS είναι σχεδιασμένος ώστε να [30]:

- Παρέχει μια αλγεβρικά βασισμένη και υψηλού επιπέδου γλώσσα για την παρουσίαση μεγάλων και πολύπλοκων μοντέλων,
- Επιτρέπει αλλαγές στο μοντέλο σχεδιασμού με απλότητα και ασφάλεια,
- Δηλώνονται σαφώς οι αλγεβρικές σχέσεις,

- Επιτρέπει τη χρήση περισσότερων μεταβλητών, εξισώσεων, ονόματα δεικτών, σχολίων και ορισμών δεδομένων, τα οποία συνοδεύονται από υπολογισμούς δημιουργώντας ένα τεκμηριωμένο και αυτόνομο αρχείο,
- Ενημερώνεται με τις νεότερες και αποτελεσματικότερες εκδόσεις επιλυτών,
- Αυτοματοποιεί τη μοντελοποίηση με τους υπολογισμούς δεδομένων, την ορθή διάρθωση των δηλώσεων, τον έλεγχο των λαθών, την διασύνδεση με επιλυτές και την αποθήκευση λύσεων,
- Επιτρέπει τη φορητότητα του μοντέλου σε διαφορετικούς υπολογιστές,
- Διευκολύνει την εισαγωγή και εξαγωγή δεδομένων από και προς διαφορετικά πακέτα υπολογιστών,
- Επιτρέπει τη χρήση από άτομα ή ομάδες διαφορετικής εμπειρίας,
- Παρέχει πρότυπα μοντέλα, τα οποία βοηθούν το χρήστη, μέσω βιβλιοθήκης πληροφοριών.

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα του προγράμματος GAMS είναι τα ακόλουθα [26]:

- Έχει την ικανότητα να επιλύει από μικρά προβλήματα (δεκάδες μεταβλητές και περιορισμοί) έως μεγάλα προβλήματα (χιλιάδες μεταβλητές και περιορισμοί), χρησιμοποιώντας περίπου την ίδια έκταση κώδικα. Με τη χαρακτηριστική λειτουργία δεικτών που προσφέρει καθιστά δυνατό τον ορισμό πολλών παρόμοιων περιορισμών με τη γραφή ενός μόνο "τύπου" περιορισμού. Μπορεί δηλαδή κάποιος να καθορίσει ένα πλήθος παρόμοιων περιορισμών, γράφοντας ουσιαστικά μόνο έναν που να ισχύει για όλες τις τιμές μιας παραμέτρου, εκτός των εξαιρέσεων που θα καθορίσει ρητά.
- Διαχωρίζει τη διαδικασία μοντελοποίησης του προβλήματος από τη χρησιμοποιούμενη τεχνική επίλυσης αυτού. Ο χρήστης φροντίζει να ορίσει με συνέπεια το πρόβλημα και, αφού το διατυπώσει στη γλώσσα του GAMS, μπορεί έπειτα να καθορίσει ποιόν από τους πολλούς διαθέσιμους solvers θα χρησιμοποιήσει για την επίλυση του. Ως αποτέλεσμα, ο χρήστης επικεντρώνεται αποκλειστικά στη μοντελοποίηση του προβλήματος χωρίς να ασχολείται με τις λεπτομέρειες των αλγοριθμικών τεχνικών επίλυσης.
- Μιμείται σε μεγάλο βαθμό τη μαθηματική περιγραφή ενός προβλήματος. Ακόμα, υπάρχει η δυνατότητα προσθήκης σχολίων σε όλες τις γραμμές του κώδικα. Συνεπώς, ο κώδικας είναι σχεδόν επεξηγηματικός από μόνος και για αυτό το λόγο γίνεται εύκολα κατανοητός σε χρήστες με στοιχειώδεις γνώσεις μαθηματικού προγραμματισμού και βελτιστοποίησης.
- Παρέχει μηχανισμούς επίλυσης συλλογών από δομημένα προβλήματα βελτιστοποίησης, όπως αυτά που προκύπτουν από τεχνικές αποδόμησης.
- Διευκολύνει την ανάλυση ευαισθησίας. Ο χρήστης μπορεί εύκολα να προγραμματίσει ένα μοντέλο να επιλύει για διαφορετικές τιμές ενός στοιχείου και μετά να δημιουργήσει μια αναφορά με τα χαρακτηριστικά της λύσης της κάθε περίπτωσης.

Τα βασικά συστατικά που αποτελούν τη δομή οποιουδήποτε μοντέλου του GAMS [31], παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίνακα 5.1.



**Πίνακας 5.1:** Δομή ενός μοντέλου σε GAMS.

Σύνολα (Sets)	Δήλωση και ανάθεση των μελών τους.
Δεδομένα (Data) με την μορφή σταθερών, παραμέτρων και πινάκων	Δήλωση και ανάθεση των τιμών τους.
Μεταβλητές (Variables)	Δήλωση, αρχικοποίηση και καθορισμός του τύπου τους και των ορίων.
Εξισώσεις (Equations)	Δήλωση και ορισμός τους.
Εντολές δημιουργίας μοντέλου και επίλυσης (Model and solve statements)	Δήλωση του μοντέλου, ανάθεση κατάλληλου solver.
Έξοδος (Output)	Εντολές απεικόνισης (display).

Σε αυτό το σημείο, είναι απαραίτητο να επισημανθούν κάποιες απαραίτητες παρατηρήσεις που αποτελούν και απαράβατους κανόνες του προγράμματος GAMS [31]:

- Ένα μοντέλο στο GAMS είναι μια συλλογή των δηλώσεων στη γλώσσα GAMS. Κάθε οντότητα στο μοντέλο δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί αν δεν έχει δηλωθεί προηγουμένως. Επιτρέπονται οι δηλώσεις σε πολλαπλές γραμμές, οι κενές γραμμές μεταξύ των δηλώσεων, όπως και οι πολλαπλές δηλώσεις ανά γραμμή. Η ολοκλήρωση κάθε δήλωσης πρέπει να συνοδεύεται με το σύμβολο ελληνικού ερωτηματικού «;». Ο μεταγλωττιστής (compiler) του GAMS δεν διακρίνει κεφαλαία και πεζά γράμματα, έτσι είναι και τα δύο είδη αποδεκτά.
- Τα επεξηγηματικά σχόλια (comments) είναι χρήσιμα για την τεκμηρίωση των μαθηματικών μοντέλων. Είναι καλύτερο να ενσωματώνονται μέσα στο ίδιο το μοντέλο παρά να παρουσιάζονται ξεχωριστά. Υπάρχουν δύο τρόποι να συμπεριληφθούν τα σχόλια σε μια εφαρμογή του GAMS. Καταρχήν, οποιαδήποτε γραμμή αρχίζει με έναν αστερίσκο (\*) στην πρώτη θέση χαρακτηρίζεται ως γραμμή σχολίου από το μεταγλωττιστή του GAMS. Οι υπόλοιποι χαρακτήρες στη γραμμή αγνοούνται αλλά τυπώνονται στο αρχείο εξόδου (output). Δεύτερον, τα σχόλια μπορούν να παρεμβληθούν μετά από τις δηλώσεις των οντοτήτων του GAMS.
- Η δημιουργία οντοτήτων στο GAMS περιλαμβάνει δύο βήματα: μια δήλωση (declaration) και μια ανάθεση (assignment). Η δήλωση περιλαμβάνει την ύπαρξη της οντότητας στο πρόγραμμα δίνοντας ένα όνομα. Η ανάθεση δίνει μια συγκεκριμένη τιμή.

### 5.2.1 Σύνολα

Τα Σύνολα (sets) είναι θεμελιώδεις δομικές μονάδες για οποιοδήποτε μοντέλο του GAMS και του επιτρέπουν να δηλωθεί και να διαβάζεται εύκολα και λειτουργικά. Το σύνολο S που περιλαμβάνει τα στοιχεία a, b και c γράφεται με μαθηματική αναπαράσταση  $S = \{ a, b, c \}$ . Στο GAMS, λόγω των περιορισμών των χαρακτήρων, το ίδιο σύνολο γράφεται: `set S / a, b, c /`.

Η δήλωση του συνόλου αρχίζει με τη λέξη κλειδί `set(s)`, όπου S το όνομα του συνόλου, και τα μέλη ή στοιχεία του είναι τα a, b, c.

Τα σύνολα αντιστοιχούν στους δείκτες των αλγεβρικών εξισώσεων. Με τη δεσμευμένη λέξη `set` δηλώνεται το όνομά τους και το σύνολο των τιμών που μπορούν να πάρουν, το οποίο μπορεί να είναι και διατεταγμένο. Μετά το όνομα μπορεί να υπάρχουν και

σχόλια που περιγράφουν το δείκτη και τα οποία αγνοούνται από το μεταγλωττιστή του GAMS. Στο ακόλουθο παράδειγμα δηλώνονται κάποια σύνολα που χρησιμοποιήθηκαν για το δίκτυο των 14 κόμβων που περιγράφεται στο Κεφάλαιο 6:

#### sets

f index of feeders /F1\*F4/  
 k type of customers /k1\*k4/  
 j load points /L1\*L22/  
 s sectionalizer's locations /s1\*s24/;

Σύνολα σαν τα παραπάνω είναι γνωστά ως στατικά σύνολα και τα στοιχεία τους δεν αλλάζουν κατά την εκτέλεση του προγράμματος. Είναι δυνατός ο ορισμός δυναμικών συνόλων που θα περιέχουν κάποια από τα στοιχεία ενός δεδομένου στατικού συνόλου και τα στοιχεία τους μπορούν να αλλάξουν κατά την εκτέλεση του προγράμματος. Επιπλέον μπορούν να ορισθούν πολυδιάστατα σύνολα για την αντιστοίχιση στοιχείων που ανήκουν σε διαφορετικά σύνολα [26]. Για παράδειγμα,

#### set

map(f,j) associates feeders with loads /f1.L1\*L7,f2.L8\*L9,f3.L10\*L15,f4.L16\*L22/;

Σε μερικά προγράμματα παρουσιάζεται η ανάγκη ταυτόχρονης αναφοράς σε στοιχεία του ίδιου συνόλου. Στην περίπτωση αυτή παρέχεται από το GAMS η εντολή *alias*, η οποία δηλώνει ένα διαφορετικό όνομα για ένα ήδη ορισμένο σύνολο:

**alias** (j, j1);

Τέλος, στο GAMS υπάρχουν έξι επιτρεπτοί χειριστές διατεταγμένων συνόλων [26]: *card*, *ord*, *+*, *-*, *++* και *--*. Ως διατεταγμένα ορίζονται τα μονοδιάστατα σύνολα που αποτελούνται από μια διατεταγμένη ακολουθία στοιχείων. Δοσμένου ενός στοιχείου ενός *set* μπορεί κάποιος να αναφερθεί στο επόμενο ή στο προηγούμενο στοιχείο χρησιμοποιώντας τους χειριστές *+1* ή *-1* αντίστοιχα. Επίσης οι χειριστές *++* και *--* δίνουν τη δυνατότητα χειρισμού του *set* ως μίας κυκλικής λίστας, όπου πάντα θα υπάρχει προηγούμενο και επόμενο στοιχείο. Επιπρόσθετα ο χειριστής *card* επιστρέφει το πλήθος των στοιχείων ενός συνόλου και ο χειριστής *ord* τη θέση του ζητούμενου στοιχείου μέσα στο σύνολο.

### 5.2.2 Εισαγωγή δεδομένων

Στο GAMS μπορεί ο χρήστης να εισάγει τα δεδομένα που επιθυμεί με τρεις διαφορετικούς τρόπους: είτε σε μορφή *σταθερών (scalars)* είτε σε μορφή *πινάκων (tables)* είτε σε μορφή *παραμέτρων (parameters)*.

**Σταθερές (Scalars):** Στο GAMS οι σταθερές δηλώνονται και προαιρετικά ανατίθεται σε αυτές μία τιμή χρησιμοποιώντας τη δεσμευμένη λέξη *Scalar(s)*. Η σύνταξη της εντολής για μια δήλωση σταθεράς είναι η εξής:

**Scalar** όνομα\_σταθεράς κείμενο /τιμή\_σταθεράς/;

Το όνομα της σταθεράς ακολουθείται από προαιρετικά σχόλια και η τιμή της δίνεται εντός των συμβόλων "/". Στο επόμενο παράδειγμα το επιτόκιο αναγωγής με τη μορφή σταθεράς:

**Scalar** DR discount rate /0.08/;

Οι σταθερές χρησιμοποιούνται συχνά για ανάθεση τιμών σε μεγέθη τα οποία δεν αλλάζουν κατά τη διάρκεια προσομοίωσης ενός μοντέλου και είναι πολύ χρήσιμες για εποπτικούς κυρίως λόγους.

**Πίνακες (Tables):** Η εντολή αυτή χρησιμοποιείται για τη δήλωση δεδομένων σε μορφή πινάκων. Η δεσμευμένη λέξη Table δηλώνει το διάνυσμα των δεδομένων και επιτρέπει την ανάθεση των τιμών του και την εισαγωγή ενδιάμεσων σχολίων. Οι πίνακες δηλώνονται με τη χρήση δύο ή περισσότερων δεικτών ενώ σχόλιο μπορεί προαιρετικά να ακολουθεί το όνομα του πίνακα όπως στο ακόλουθο παράδειγμα όπου δηλώνεται το μέσο φορτίο καταναλωτών:

**Table** custd(k,j,\*) customer data

	average
*	(MW)
k1.(L1*L3,L10*L11)	0.535
k1.(L12,L17*L19)	0.45
k2.L8	1
k2.L9	1.15
k3.(L4,L5,L13,L14,L20,L21)	0.566
k4.(L6,L7,L15,L16,L22)	0.454 ;

**Παράμετροι (Parameters):** Οι παράμετροι είναι δομές στο GAMS που χρησιμοποιούνται για να ορίσουν τα δεδομένα ενός μοντέλου. Συμπεριφέρονται ακριβώς με τον ίδιο τρόπο όπως και οι Πίνακες με μόνη διαφορά ότι οι πίνακες στο GAMS πρέπει να έχουν δύο ή και περισσότερες διαστάσεις και ότι οι παράμετροι ουσιαστικά είναι μονοδιάστατοι πίνακες. Η σύνταξη στο GAMS για μια δήλωση παραμέτρου είναι:

parameter(s) όνομα\_παραμέτρου κείμενο /τιμή\_παραμέτρου/;

όπου οι κάθετοι "/" πρέπει να χρησιμοποιηθούν στην αρχή και στο τέλος του καταλόγου, τα κόμματα πρέπει να χωρίζουν τα στοιχεία που εισήχθησαν σε μια γραμμή και το κενό χρησιμοποιείται για να χωρίσει τις ετικέτες από τις αντίστοιχες τιμές τους. Τέλος η τιμή που αναθέτει το GAMS σε παραμέτρους που δεν έχει προσδιοριστεί η τιμή από το χρήστη είναι το μηδέν. Στο επόμενο παράδειγμα δηλώνεται ο μέσος ρυθμός βλαβών κάποιων γραμμών του δικτύου, με τη μορφή της παραμέτρου fl(i) στο GAMS:

**parameter** fl(i) average failure rate

/(ms4,ms6,ms9,ms14,11,14,110,115,117,118) 0.039/

### 5.2.3 Μεταβλητές

Η δεσμευμένη λέξη Variable(s) χρησιμοποιείται από το GAMS για να δηλώσει τις μεταβλητές απόφασης του προβλήματος βελτιστοποίησης που θα κληθεί αργότερα να επιλύσει το μοντέλο. Μαζί με τη μεταβλητή δηλώνονται και οι διαστάσεις της, αν χρειάζεται, που ορίζονται από τους δείκτες. Μετά το όνομα της μεταβλητής μπορούν να ακολουθούν επεξηγηματικά σχόλια. Μια σημαντική διαφορά μεταξύ των δηλώσεων μεταβλητής και παραμέτρου είναι ότι στη δήλωση μεταβλητής δεν μπορούν να δηλωθούν αρχικές τιμές. Έτσι λοιπόν οι μεταβλητές απαγορεύεται να πάρουν τιμές πριν την επίλυση του προβλήματος. Γενικά, η σύνταξη στο GAMS για μια δήλωση μεταβλητών είναι η ακόλουθη:

**Variables** όνομα\_μεταβλητής (σύνολο δεικτών) κείμενο;

Κατά τη δημιουργία του προγράμματος GAMS πρέπει πάντα να ορίζεται και μία μεταβλητή που να αναπαριστά την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης. Μπορεί επίσης να δηλώνεται και το είδος της μεταβλητής. Οι διάφοροι τύποι μεταβλητών που υποστηρίζει το GAMS είναι [31]:

- *Free* : Ελεύθερες, δεν έχουν κανένα περιορισμό στην τιμή τους, από  $-\infty$  έως  $+\infty$
- *Positive* : Θετικές, δέχονται μόνο τιμές από 0 έως  $+\infty$
- *Negative* : Αρνητικές, δέχονται μόνο αρνητικές τιμές, από  $-\infty$  έως 0
- *Binary* : Δυαδικές, δέχονται μόνο τις τιμές 0 ή 1
- *Integer* : Ακέραιες, δέχονται μόνο ακέραιες τιμές, από 0 έως 100

Πολύ σημαντικό ρόλο παίζουν τα επιτρεπτά όρια μέσα στα οποία ανήκει το σύνολο τιμών μιας μεταβλητής. Ο τύπος προεπιλογής είναι ελεύθερος, που σημαίνει ότι εάν ο τύπος της μεταβλητής δεν διευκρινίζεται, αυτό δεν θα έχει όρια καθόλου. Οι πιο συχνά χρησιμοποιημένοι τύποι είναι οι ελεύθεροι και οι θετικοί για τις περιγραφές των μεταβλητών για τις οποίες οι αρνητικές τιμές είναι χωρίς νόημα. Ο πιο δημοφιλής τρόπος δήλωσης των μεταβλητών είναι η απαρίθμηση κατά ομάδες ανάλογα με τον τύπο. Για παράδειγμα οι μεταβλητές που χρησιμοποιήθηκαν στην διπλωματική εργασία δηλώθηκαν ως εξής:

**Variables** z objective function variable

cd(i,j,k,f) customer damage function ;

**Binary variable**

X(s,f);

Επίσης το GAMS διαθέτει καταλήξεις (suffixes) είτε για τον καθορισμό ενός άνω και κάτω ορίου των μεταβλητών είτε για την επεξεργασία και την εποπτεία μεταβλητών. Συνεπώς μια μεταβλητή στο GAMS, μπορεί να έχει πέντε καταλήξεις [31]:

- .lo Ορίζεται το χαμηλότερο όριο της μεταβλητής.
- .up Ορίζεται το υψηλότερο όριο της μεταβλητής.
- .fx Δίνεται μία συγκεκριμένη σταθερή τιμή στη μεταβλητή, η οποία έχει άνω και κάτω όριο το ίδιο. Μία μεταβλητή σταθερής τιμής μπορεί να πάρει αργότερα περισσότερες τιμές, αν επαναπροσδιοριστούν τα όριά της.
- .l Η κατάληξη αυτή επιστρέφει τη βέλτιστη τιμή μιας μεταβλητής.
- .m Η κατάληξη αυτή επιστρέφει την οριακή τιμή μιας μεταβλητής.

### 5.2.4 Εξισώσεις

Η δεσμευμένη λέξη Equations (εξισώσεις) χρησιμοποιείται στο GAMS για να δηλώσει τις αλγεβρικές σχέσεις που θα χρησιμοποιηθούν για να παράγουν τους περιορισμούς του επιλυόμενου μοντέλου. Στο GAMS μία εξίσωση πρέπει πρώτα να δηλωθεί και ύστερα να συνταχθεί η αλγεβρική της σχέση. Για τη δήλωση μιας εξίσωσης χρησιμοποιείται η παρακάτω σύνταξη:

**Equations** όνομα\_εξίσωσης(σύνολο δεικτών) κείμενο;

Ενώ για τη σύνταξή της:

όνομα\_εξίσωσης(σύνολο δεικτών).. παράσταση τύπος\_σχέσης παράσταση;

Πρέπει να σημειωθεί ότι οι δύο τελείες ".." απαιτούνται πάντα μεταξύ του ονόματος της εξίσωσης και της έναρξης της αλγεβρικής σχέσης. Ο τύπος σχέσης αναφέρεται στο σύμβολο μεταξύ των δύο εκφράσεων που διαμορφώνουν την εξίσωση, και μπορεί να είναι κάποιο από τα ακόλουθα [31]:

- =e= (Equality) : το δεξί μέρος της εξίσωσης πρέπει να είναι ίσο με το αριστερό μέρος
- =g= (Greater or equal) : το αριστερό μέρος της εξίσωσης πρέπει να είναι μεγαλύτερο ή ίσο από το δεξί
- =l= (Lower or equal) : το αριστερό μέρος της εξίσωσης πρέπει να είναι μεγαλύτερο ή ίσο από το δεξί
- =n= (Διάφορο) : δεν επιτρέπεται στο αριστερό και στο δεξί μέρος της εξίσωσης να πάρουν την ίδια τιμή. Αυτός ο τύπος εξίσωσης χρησιμοποιείται σπάνια.

Όταν μία εξίσωση ορίζεται ως συνάρτηση ενός (ή και περισσότερων δεικτών), τότε αυτή η εξίσωση ισοδυναμεί με πλήθος εξισώσεων ίσο με τον αριθμό των στοιχείων που ανήκουν στο αντίστοιχο σύνολο. Παρατηρείται λοιπόν εύκολα η συμπαγής δομή που προσφέρει στο μοντέλο αυτός ο συμβολισμός. Για παράδειγμα δύο από τις εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν στην διπλωματική εργασία είναι οι εξής:

#### Equations

maxnumber maximum number of sectionalizer's

mincd1 minimum customer damage function due to switching time;

maxnumber.. sum(f,sum(s,X(s,f)))=e=N;

mincd1(i,j,k,f)\$ (map(f,j) and link(k,j)).. cd(i,j,k,f) =g= cdf\_sw(i,j,k,f);

Το “SUM” στην πρώτη εξίσωση συμβολίζει το άθροισμα, το οποίο γίνεται για όλα τα στοιχεία των συνόλων f και s. Το σύμβολο “\$” έχει ιδιαίτερη σημασία στο GAMS και χρησιμοποιείται για δηλώσεις υπό συνθήκη. Για παράδειγμα, στον ορισμό εξισώσεων ελέγχει τις τιμές των δεικτών δημιουργώντας εξισώσεις μόνο για τις τιμές εκείνες των δεικτών που

ικανοποιούν τη συνθήκη. Τέλος σημειώνεται ότι πάντα η αντικειμενική συνάρτηση δηλώνεται και συντάσσεται στο μέρος των equations.

### 5.2.5 Είδη μοντέλων

Το GAMS υποστηρίζει διάφορες διαδικασίες επίλυσης των προβλημάτων. Ο χρήστης δημιουργεί ένα αυτόνομο μοντέλο και καθορίζει ποια ή ποιες θα χρησιμοποιηθούν. Προφανώς, το ίδιο μοντέλο μπορεί να επιλυθεί με διαφορετικές διαδικασίες, κάνοντας ελάχιστες τροποποιήσεις. Οι διαδικασίες επίλυσης είναι οι ακόλουθες [31]:

LP	: Linear Programming - Γραμμικός Προγραμματισμός
MIP	: Mixed Integer Programming - Μεικτός Ακέραιος Προγραμματισμός
NLP	: Non-Linear Programming - Μη Γραμμικός Προγραμματισμός
MCP	: Mixed Complementarity Problems - Μεικτά προβλήματα Συμπληρωματικότητας
MPEC	: Mathematical Programs with Equilibrium Constraints - Μαθηματικά προγράμματα με περιορισμούς ισοροπίας
CNS	: Constrained Non-Linear Systems - Μη γραμμικά συστήματα με περιορισμούς
DNLP	: Non-Linear Programming with Discontinuous Derivatives - Ασυνεχής μη γραμμικός προγραμματισμός
MINLP	: Mixed Integer Non-Linear Programming - Μεικτός ακέραιος μη γραμμικός προγραμματισμός
QCP	: Quadratically Constrained Programs - Προβλήματα Τετραγωνικών Περιορισμών
MIQCP	: Mixed Integer Quadratically Constrained Programs - Προβλήματα μεικτών ακεραίων με τετραγωνικούς περιορισμούς

Σημειώνεται ότι η εντολή επίλυσης του μοντέλου δηλώνεται με την δεσμευμένη λέξη *Solve* και πριν την εντολή αυτή, με την εντολή *Model* καθορίζονται οι εξισώσεις που θα συμπεριληφθούν στο μοντέλο. Για παράδειγμα:

```
Model bus14a_cost /all;  
Solve bus14a_cost using mip minimizing z;
```

Με την πρώτη εντολή (*Model*) περιλαμβάνονται όλες οι εξισώσεις που έχουν δηλωθεί προηγουμένως με την εντολή “equations” και ο συμβολισμός “all” δείχνει ότι το μοντέλο θα εφαρμοστεί σε όλες τις εξισώσεις. Σε διαφορετική περίπτωση, πρέπει να οριστούν οι ονομασίες των συγκεκριμένων εξισώσεων, που πρόκειται να μοντελοποιηθούν. Με τη δεύτερη εντολή του παραδείγματος ζητείται η επίλυση του προβλήματος ελαχιστοποιώντας την τιμή της μεταβλητής *z* (που αντιπροσωπεύει την αντικειμενική συνάρτηση). Η δεσμευμένη λέξη *mip* χρησιμοποιείται για τα προβλήματα μεικτού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού.

### 5.2.6 Ο solver Cplex

Ο Cplex είναι ένας επιλυτής, που χρησιμοποιείται από το GAMS και είναι σχεδιασμένος για να επιλύει μεγάλα και δύσκολα προβλήματα γρήγορα και με ελάχιστη

παρέμβαση από το χρήστη. Διαθέτει διαφορετικές επιλογές επίλυσης και χρησιμοποιείται κυρίως σε μοντέλα γραμμικά (LP), τετραγωνικά περιορισμένα (QCP – Quadratically Constrained Programming) ή μεικτά-ακέραια (MIP – Mixed Integer Programming). Ο Cplex μπορεί να οριστεί ως επιλυτής από προεπιλογή κατά την εγκατάσταση του GAMS ή μέσω της εντολής:

Option LP = Cplex ;

Στην παραπάνω εντολή δηλώνεται ότι θα χρησιμοποιηθεί ο Cplex για την επίλυση προβλήματος γραμμικού προγραμματισμού και η εντολή πρέπει να προηγείται της εντολής επίλυσης.

Ο Cplex λύνει τα περισσότερα γραμμικά προβλήματα με τον δυαδικό αλγόριθμο Simplex. Για τα μεικτά-ακέραια προβλήματα χρησιμοποιεί τη μέθοδο branch and cut και επιλύει μία σειρά από γραμμικά υποπροβλήματα. Ακόμα και ένα μικρό MIP πρόβλημα μπορεί να παράγει πολλά υποπροβλήματα, γεγονός που το κάνει απαιτητικό σε μνήμη και πολύπλοκο υπολογιστικά και άρα μπορεί να χρειάζεται αρκετό χρόνο για να επιλυθεί. Ο χρήστης μπορεί να καθορίσει το ανώτατο χρονικό όριο που ο Cplex θα επιχειρεί προσέγγιση της βέλτιστης τιμής, μέσω της εντολής:

Option Reslim=x;

όπου το x είναι ο χρόνος σε δευτερόλεπτα.

Ο Cplex είναι σχεδιασμένος να επιλύει το κάθε πρόβλημα με προεπιλεγμένες ρυθμίσεις για τη μέθοδο που θα ακολουθηθεί, ανάλογα και με το είδος του προβλήματος, επομένως ο χρήστης αρκεί μόνο να καθορίσει το είδος του προβλήματος, και η επίλυση γίνεται με τη χρήση του κατάλληλου αλγορίθμου. Διαθέτει όμως και πλήθος επιλογών, προκειμένου να μπορεί παρέμβει ο χρήστης στη διαδικασία βελτιστοποίησης, αν κριθεί αναγκαίο [32]. Ο επιλυτής Cplex χρησιμοποιήθηκε στη διπλωματική εργασία για την επίλυση του προβλήματος της βέλτιστης τοποθέτησης διακοπών απομόνωσης σε ΔΔΗΕ.

### 5.2.7 Αρχείο εξόδου

Στο GAMS κατά την επίλυση του μοντέλου δημιουργείται πάντα ένα αρχείο εξόδου με κατάληξη .lst (π.χ. bus14a\_cost.lst), στο οποίο εμφανίζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Το πρώτο μέρος του αρχείου εξόδου είναι πάντα το Echo Print (αποτύπωση του προγράμματος), το οποίο απαριθμεί τις εντολές που έχει δώσει ο χρήστης και ελέγχει για τυχόν σφάλματα. Το επόμενο μέρος του αρχείου εξόδου είναι το Reference Map (χάρτης αναφοράς), το οποίο απαριθμεί με αλφαβητική σειρά τις εμφανίσεις οποιασδήποτε οντότητας (set, parameter, variable, equation). Μετά το Reference Map ακολουθεί το Equation Listing (λίστα εξισώσεων) το οποίο αναπαριστά τις εξισώσεις/περιορισμούς που έχει δώσει ο χρήστης. Η λίστα εξισώσεων είναι εξαιρετικά χρήσιμη για τυχόν διόρθωση στο πρόγραμμα. Όλοι οι όροι που εξαρτώνται από τις μεταβλητές πηγαίνουν στο αριστερό μέρος, και οι σταθεροί όροι στο δεξί μέρος της λίστας εξισώσεων.

Επιπλέον το αρχείο εξόδου εμφανίζει τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Χρησιμοποιώντας την εντολή display μπορεί κάποιος να πάρει πληροφορίες για την τιμή οποιασδήποτε μεταβλητής. Για παράδειγμα χρησιμοποιώντας την εντολή:

**display X.l;**

εμφανίζονται στο αρχείο εξόδου τα αποτελέσματα που αντιστοιχούν στις βέλτιστες θέσεις των διακοπών απομόνωσης σε κάθε γραμμή τροφοδοσίας του δικτύου 14 κόμβων και παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.1.

```

|---- 136 VARIABLE X.L
          F1          F2          F3          F4
s3      1.000
s5      1.000
s6      1.000
s10           1.000
s13           1.000
s15           1.000
s17           1.000
s19                   1.000
s21                   1.000
s24                   1.000

```

**Σχήμα 5.1:** Βέλτιστες τιμές της μεταβλητής  $X(s,f)$  στο αρχείο εξόδου.

Τέλος, στο αρχείο εξόδου δίνονται στατιστικά στοιχεία για το μέγεθος του μοντέλου (Σχήμα 5.2) και στοιχεία για την κατάσταση του μοντέλου και του επιλυτή (Σχήμα 5.3).

Στα Στατιστικά του Μοντέλου (Model Statistics) υπολογίζεται το συνολικό πλήθος των μπλοκ των εξισώσεων και μεταβλητών, ο αντίστοιχος αριθμός των μονών εξισώσεων και μεταβλητών, το πλήθος των μη μηδενικών στοιχείων και τέλος ο αριθμός των διακριτών μεταβλητών.

```

MODEL STATISTICS
BLOCKS OF EQUATIONS          9      SINGLE EQUATIONS          2,466
BLOCKS OF VARIABLES          3      SINGLE VARIABLES          1,329
NON ZERO ELEMENTS           4,743  DISCRETE VARIABLES          96

```

**Σχήμα 5.2:** Τα στατιστικά στοιχεία του μοντέλου στο αρχείο εξόδου.

Το GAMS παρουσιάζει μια σύντομη περίληψη της επίλυσης (Solve Summary), όπου αναγράφονται:

- Το όνομα του μοντέλου και των μεταβλητών απόφασης,
- Το είδος και η κατεύθυνση της επίλυσης,
- Το όνομα του επιλυτή και ο αριθμός της γραμμής όπου ξεκινά η επίλυση,
- Η βέλτιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης,
- Ο πραγματικός χρόνος επίλυσης και ο μέγιστος επιτρεπτός χρόνος επίλυσης ο οποίος ορίζεται συνήθως στα 1.000 δευτερόλεπτα,
- Ο πραγματικός αριθμός επαναλήψεων επίλυσης και ο μέγιστος επιτρεπτός αριθμός επαναλήψεων,
- Η κατάσταση της επίλυσης (Solver Status), δηλαδή αν η επίλυση ολοκληρώθηκε κανονικά (normal completion), αν οι επαναλήψεις διακόπηκαν (iteration interrupted), αν ο χρόνος επίλυσης τελείωσε, αν ο επιλυτής δεν είναι ικανός να βρει λύσεις (non capable),



- Η κατάσταση του μοντέλου (Model Status), δηλαδή αν οι τιμές που προέκυψαν είναι βέλτιστες (optimal), απεριόριστες (unbounded), ακατόρθωτες (infeasible), άγνωστες λόγω κάποιου λάθους (unknown), καμία λύση δεν προέκυψε (non optimized).

```

S O L V E      S U M M A R Y

MODEL  bus14a_cost      OBJECTIVE  z
TYPE   MIP              DIRECTION  MINIMIZE
SOLVER CPLEX           FROM LINE  134

**** SOLVER STATUS      1 Normal Completion
**** MODEL STATUS      1 Optimal
**** OBJECTIVE VALUE    266936.9947

RESOURCE USAGE, LIMIT      0.078      1000.000
ITERATION COUNT, LIMIT    6      2000000000

```

Σχήμα 5.3: Η αναφορά της κατάστασης του μοντέλου και του επιλυτή στο αρχείο εξόδου.

### 5.2.8 Διαδικασία επίλυσης

Συμπερασματικά, τα βήματα που ακολουθεί ο χρήστης για την επίλυση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης και τα οποία εφαρμόστηκαν και στη διπλωματική εργασία είναι τα ακόλουθα:

- Ο χρήστης καθορίζει το πλήρες μαθηματικό μοντέλο (δεδομένα, μεταβλητές, αντικειμενική συνάρτηση, περιορισμοί).
- Ανοίγει το πρόγραμμα gamside.exe και εισάγει τα αριθμητικά δεδομένα σε μορφή παραμέτρων ή πινάκων ή σταθερών.
- Καθορίζει τις μεταβλητές.
- Γράφει τις εξισώσεις.
- Καθορίζει τον ή τους solvers που θα χρησιμοποιηθούν για την επίλυση του προβλήματος.
- Καθορίζει ποια είναι η αντικειμενική συνάρτηση και αν πρέπει να ελαχιστοποιηθεί ή να μεγιστοποιηθεί.
- Αποθηκεύει το αρχείο κώδικα ως filename.gms.
- Πατάει το κουμπί εκτέλεσης Run GAMS.
- Διαβάζει τα παράθυρα που προκύπτουν, τα οποία περιέχουν την αναφορά εκτέλεσης του κώδικα και τα αποτελέσματα (τις τιμές όλων των μεταβλητών) στο αρχείο filename.lst.

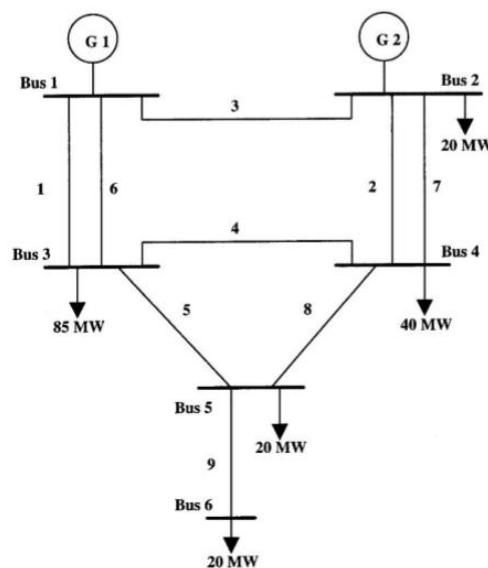


## ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

### 6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται εφαρμογή του λογισμικού το οποίο χρησιμοποιήθηκε στην διπλωματική εργασία για τη βέλτιστη τοποθέτηση διακοπών απομόνωσης σε περιπτώσεις ακτινικών δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, βάσει των όσων παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια, εξετάζοντας διάφορα σενάρια. Παρουσιάζονται και αναλύονται τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης, όπως προέκυψαν από την επίλυση που πραγματοποιήθηκε στο περιβάλλον του GAMS (έκδοση GAMS win64 24.1.3) με χρήση του επιλυτή CPLEX. Γίνεται εξέταση δύο συστημάτων, αρχικά ενός ακτινικού δικτύου διανομής 14 κόμβων και έπειτα ενός δικτύου διανομής 29 κόμβων.

Ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο πρότυπο σύστημα για την εκτίμηση της αξιοπιστίας είναι το Roy Billinton Test System (RBTS), το οποίο αναπτύχθηκε σε Πανεπιστήμιο του Καναδά για εκπαιδευτικούς σκοπούς [33]. Είναι ένα σύστημα μεταφοράς έξι ζυγών με 9 γραμμές μεταφοράς, με συνολική εγκατεστημένη ισχύ 240 MW και αιχμή φορτίου 185 MW. Αποτελείται από πέντε ζυγούς φορτίου (bus 2 – bus 6) σε καθέναν από τους οποίους είναι συνδεδεμένο ένα δίκτυο διανομής μέσω υποσταθμών ΥΤ/ΜΤ [34]. Σε αυτό το κεφάλαιο εξετάζονται τα δίκτυα διανομής που είναι συνδεδεμένα στο ζυγό 2 (ακτινικό δίκτυο 14 κόμβων) και στο ζυγό 4 (ακτινικό δίκτυο 29 κόμβων) του συστήματος RBTS, τα οποία είναι τυπικά ακτινικά δίκτυα τάσης 11 kV. Παρουσιάζονται τα δεδομένα των δικτύων, καθώς επίσης γίνεται σχολιασμός και επεξήγηση των αποτελεσμάτων, με τη βοήθεια γραφημάτων, αλλά και μέσα από την ανάλυση ευαισθησίας που πραγματοποιήθηκε.



Σχήμα 6.1: Πρότυπο σύστημα Roy Billinton Test System (RBTS).

## 6.2 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΔΙΚΤΥΟ 14 ΚΟΜΒΩΝ

### 6.2.1 Δεδομένα του δικτύου

Το δίκτυο διανομής 14 κόμβων το οποίο είναι συνδεδεμένο στο ζυγό 2 του συστήματος RBTS, είναι ένα τυπικό ακτινικό δίκτυο διανομής, με έναν ζυγό τροφοδοσίας (SP), τάσης 11 kV, 4 κύριες γραμμές διανομής (feeders F1-F4), 14 τμήματα κορμού, 22 τμήματα διακλαδώσεων για τη σύνδεση φορτίων (L1-L22) στα οποία είναι συνδεδεμένοι καταναλωτές οι οποίοι ανήκουν στον οικιακό, εμπορικό, βιομηχανικό και δημόσιο τομέα. Οι βιομηχανικοί καταναλωτές συνδέονται μέσω δικών τους μετασχηματιστών (Μ/Σ), οι οποίοι δεν ανήκουν στην κυριότητα του διαχειριστή του δικτύου, για αυτό δεν απεικονίζονται στο δίκτυο. Ενώ οι υπόλοιποι καταναλωτές συνδέονται μέσω Μ/Σ διανομής του δικτύου [33]. Στην αναχώρηση κάθε γραμμής διανομής είναι εγκατεστημένος ένας κανονικά κλειστός διακόπτης ισχύος, ενώ στην άφιξη τους ένας κανονικά ανοιχτός διακόπτης ισχύος για παροχή εναλλακτικής τροφοδοσίας σε περίπτωση σφάλματος σε κάποιο τμήμα του δικτύου. Στην αρχή και στο τέλος σε κάθε ένα από τα 14 τμήματα κορμού είναι δυνατόν να τοποθετηθούν διακόπτες απομόνωσης. Έτσι προκύπτουν συνολικά 24 πιθανές θέσεις διακοπών απομόνωσης.

Η τοπολογία του δικτύου με όλες τις πιθανές θέσεις των διακοπών απομόνωσης παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.3, ενώ τα δεδομένα του δικτύου παρουσιάζονται στους Πίνακες 6.1 – 6.7. Ο Πίνακας 6.1 περιλαμβάνει στοιχεία για τα διάφορα είδη των καταναλωτών που συνδέονται στο δίκτυο, οι δύο τελευταίες στήλες του οποίου αναφέρονται ανά σημείο φορτίου. Ο Πίνακας 6.2 περιλαμβάνει στοιχεία για το μέσο φορτίο ανά ζυγό τροφοδοσίας, ενώ ο Πίνακας 6.3 περιλαμβάνει δεδομένα της αιχμής φορτίου ανά είδος καταναλωτών. Ο Πίνακας 6.4 περιέχει τα μήκη των γραμμών του κορμού αλλά και των διακλαδώσεων μέσω των οποίων συνδέονται τα φορτία [33]. Ο ετήσιος ρυθμός βλαβών των στοιχείων του δικτύου παρουσιάζεται στον Πίνακα 6.5. Τα στοιχεία της επένδυσης (Πίνακας 6.6) αφορούν για κάθε διακόπτη απομόνωσης το κόστος επένδυσης και εγκατάστασης του ( $C_{inv}$ ), το ετήσιο κόστος λειτουργίας και συντήρησής του ( $C_{O+M}$ ), το οποίο ισούται με το 2% του κόστους επένδυσης, το επιτόκιο αναγωγής DR και τον ετήσιο ρυθμό αύξησης φορτίου  $q$ , ο οποίος θεωρείται σταθερός για τον χρονικό ορίζοντα προγραμματισμού (15 έτη) [9]. Στον Πίνακα 6.7 και το Σχήμα 6.2 παρουσιάζεται η συνάρτηση βλάβης καταναλωτών (CDF) ανά τομέα [2],[21], θεωρώντας χρόνο χειρισμού των διακοπών ( $d^{switching}$ ) ίσο με 10 λεπτά, χρόνο επιδιόρθωσης μιας βλάβης ( $d^{repair}$ ) σε κύρια γραμμή ή σε διακλάδωση του δικτύου ίσο με 5 ώρες και χρόνο αντικατάστασης του μετασχηματιστή διανομής ( $d^{repair} M/\Sigma$ ) ίσο με 10 ώρες.

**Πίνακας 6.1:** Στοιχεία καταναλωτών του δικτύου 14 κόμβων.

Πλήθος Φορτίων	Φορτία	Είδος τομέα καταναλωτή	Μέσο Φορτίο (MW)	Πλήθος καταναλωτών
5	L1-L3,L10,L11	Οικιακός	0,535	210
4	L12,L17-L19	Οικιακός	0,450	200
1	8	Βιομηχανικός	1	1
1	9	Βιομηχανικός	1,15	1
6	L4,L5,L13, L14,L20,L21	Δημόσιος /Ιδρύματα	0,566	1
5	L6,L7,L15, L16,L22	Εμπορικός	0,454	10

Πίνακας 6.2: Μέσο φορτίο ανά ζυγό τροφοδοσίας του δικτύου 14 κόμβων.

Γραμμές τροφοδοσίας	Φορτία	Μέσο Φορτίο (MW)
F1	L1-L7	3,645
F2	L8-L9	2,15
F3	L10-L15	3,106
F4	L16-L22	3,39

Πίνακας 6.3: Αιχμή φορτίου ανά τομέα καταναλωτών του δικτύου 14 κόμβων.

Τομέας καταναλωτών	Φορτίο Αιχμής (MW)	Ποσοστό (%)
Οικιακός	7,25	36,25
Βιομηχανικός	3,5	17,5
Δημόσιος/ Ιδρύματα	5,55	27,75
Εμπορικός	3,7	18,5
<b>Σύνολο</b>	<b>20</b>	<b>100</b>

Πίνακας 6.4: Μήκος κύριων γραμμών και διακλαδώσεων.

Μήκος (km)	Τμήματα κορμού	Τμήματα διακλαδώσεων για τη σύνδεση των φορτίων
0,6	4,6,9,14	L1, L4, L10, L15, L17, L18
0,75	1,2,3,5,7,10,12,13	L6, L11, L13, L16, L21
0,8	8,11	L2, L3, L5, L7, L8, L9, L12, L14, L19, L22

Πίνακας 6.5: Ετήσιος ρυθμός βλαβών.

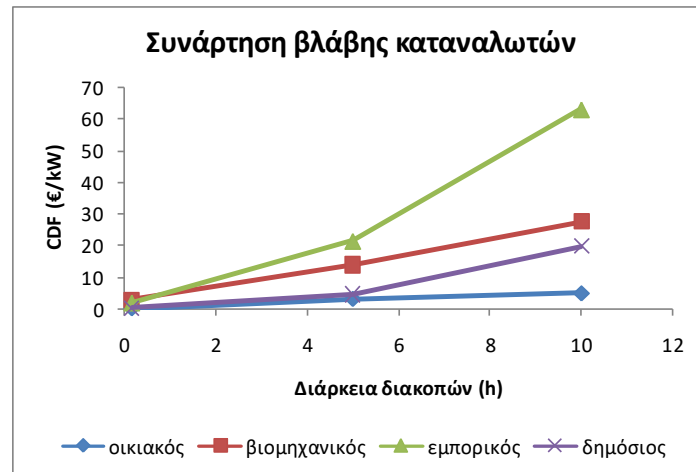
$\lambda_{\text{Γραμμών}} (\text{f/y/km})$	0,065
$\lambda_{\text{ΜΣ}} (\text{f/y})$	0,015

Πίνακας 6.6: Στοιχεία Επένδυσης.

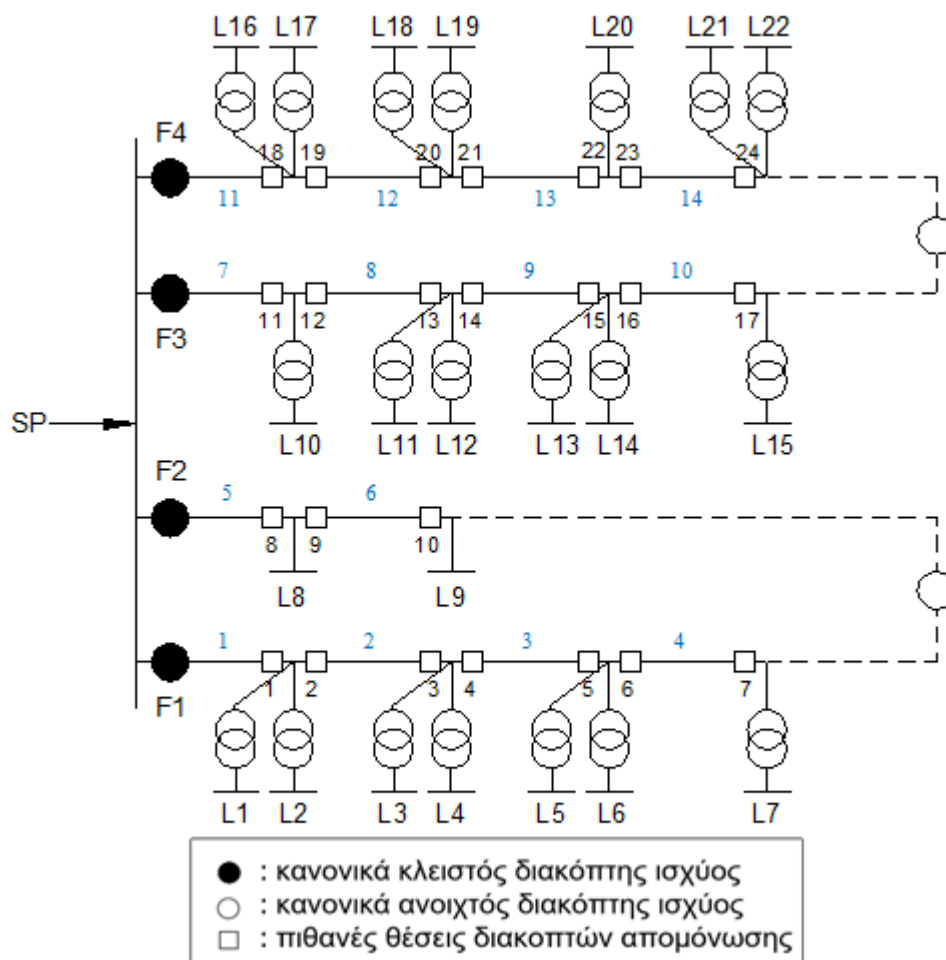
$C_{\text{inv}} (\text{€})$	4700
$C_{\text{O+M}} (\text{€})$	94
<b>DR (%)</b>	8
<b>q (%)</b>	3
<b>T (y)</b>	15

Πίνακας 6.7: Συνάρτηση βλάβης καταναλωτών (CDF) ανά τομέα (€/kW).

Είδος καταναλωτή	Διάρκεια Διακοπών		
	$d^{\text{switching}}$ 10 min	$d^{\text{repair}}$ 5 h	$d^{\text{repair}}_{\text{Μ/Σ}}$ 10 h
οικιακός	0,06	3,16	5
βιομηχανικός	2,88	13,87	27,6
δημόσιος	0,25	4,54	19,78
εμπορικός	2,05	21,51	63,06



Σχήμα 6.2: Συνάρτηση βλάβης καταναλωτών (CDF) ανά τομέα.



Σχήμα 6.3: Αρχικό δίκτυο με τις υποψήφιες θέσεις των διακοπών απομόνωσης.

### 6.2.2 Αποτελέσματα

Για το δίκτυο 14 κόμβων, παρουσιάζονται αποτελέσματα από δύο διαφορετικά σενάρια που μελετήθηκαν:

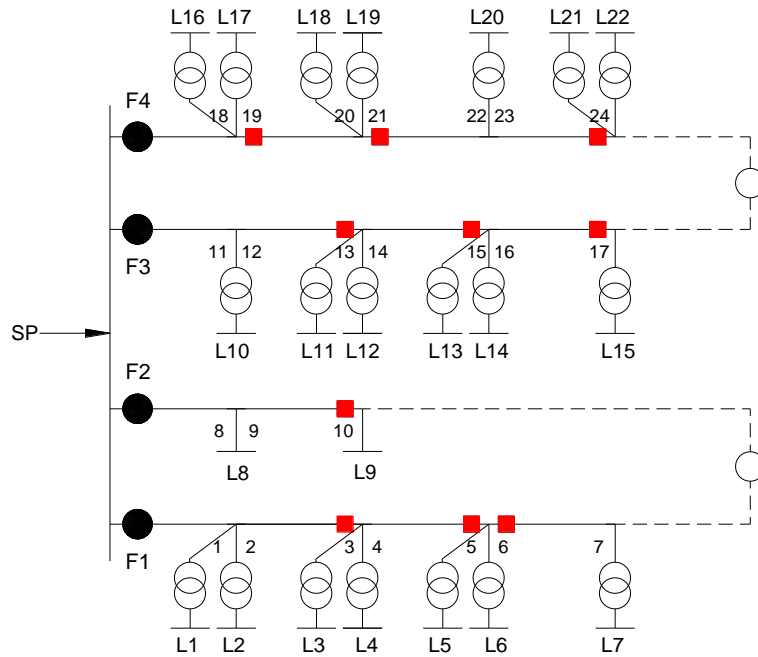
- Σενάριο 1: Σφάλμα στις κύριες γραμμές διανομής (14 θέσεις σφάλματος), στους Μ/Σ (20 θέσεις σφάλματος) και σε όλα τα τμήματα διακλαδώσεων (22 θέσεις σφάλματος), με δυνατότητα εναλλακτικής τροφοδοσίας στο τέλος της κάθε γραμμής τροφοδοσίας.
- Σενάριο 2: Σφάλμα στις κύριες γραμμές διανομής (14 θέσεις σφάλματος), στους Μ/Σ (20 θέσεις σφάλματος) και σε όλα τα τμήματα διακλαδώσεων (22 θέσεις σφάλματος), χωρίς τη δυνατότητα εναλλακτικής τροφοδοσίας στο τέλος της κάθε γραμμής τροφοδοσίας.

### 6.2.2.1 Σενάριο 1

Σε αυτήν την περίπτωση θεωρούνται όλες οι θέσεις σφάλματος σε τμήματα γραμμών και σε Μ/Σ (συνολικά 56 θέσεις σφάλματος) και λαμβάνονται υπόψη οι ανοιχτοί διακόπτες ισχύος στο τέλος κάθε γραμμής διανομής για παροχή εναλλακτικής τροφοδοσίας σε περίπτωση σφάλματος. Στον Πίνακα 6.8 παρουσιάζονται οι βέλτιστες θέσεις των διακοπών απομόνωσης σε κάθε γραμμή τροφοδοσίας, καθώς επίσης και τα στοιχεία κόστους όπως προκύπτουν από την επίλυση του GAMS. Στα στοιχεία κόστους περιλαμβάνονται το συνολικό κόστος του δικτύου (Total Cost), το αναμενόμενο κόστος διακοπών των καταναλωτών (Ecost) και το κόστος επένδυσης, λειτουργίας και συντήρησης (Switch Cost) για χρονικό ορίζοντα προγραμματισμού 15 ετών. Το βέλτιστο πλήθος των διακοπών απομόνωσης είναι 10 διακόπτες και αποτελεί τη βέλτιστη λύση η οποία οδηγεί στο ελάχιστο συνολικό κόστος του δικτύου (267 k€), που είναι και η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης. Στο Σχήμα 6.4 παρουσιάζονται με κόκκινο χρώμα οι βέλτιστες θέσεις των διακοπών απομόνωσης για το δίκτυο των 14 κόμβων.

**Πίνακας 6.8:** Αποτελέσματα Σεναρίου 1 για το δίκτυο 14 κόμβων.

<b>Βέλτιστη λύση:</b>	10 διακόπτες απομόνωσης	
<b>Θέσεις διακοπών απομόνωσης</b>	F1	3, 5, 6
	F2	10
	F3	13, 15, 17
	F4	19, 21, 24
<b>Ecost (k€)</b>	211,891	
<b>Κόστος επένδυσης, λειτουργίας και συντήρησης των διακοπών (k€)</b>	55,046	
<b>Συνολικό κόστος (k€)</b>	266,937	



**Σχήμα 6.4:** Βέλτιστες θέσεις των διακοπών απομόνωσης για το Σενάριο 1.

Από τα αποτελέσματα του Σεναρίου 1 για το δίκτυο των 14 κόμβων παρατηρείται ότι τοποθετούνται 3 διακόπτες σε κάθε μία από τις γραμμές τροφοδοσίας F1, F3 και F4, ενώ ένας διακόπτης τοποθετείται στη γραμμή F2. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η συγκεκριμένη γραμμή τροφοδοσίας (F2) παρουσιάζει τη χαμηλότερη πυκνότητα φορτίου σε σχέση με τις υπόλοιπες γραμμές του δικτύου (Πίνακας 6.2). Επίσης τοποθετούνται διακόπτες σε κόμβους του δικτύου στους οποίους συνδέονται δύο διαφορετικά φορτία λόγω της υψηλότερης ζήτησης στους αντίστοιχους κόμβους (π.χ. φορτία L5-L6).

Επιπλέον, εκτός από το μέσο φορτίο που ζητείται σε κάθε κόμβο αλλά και συνολικά σε κάθε γραμμή τροφοδοσίας, σημαντικό ρόλο παίζει και το είδος των καταναλωτών που συνδέονται σε κάθε κόμβο. Συνεπώς, διακόπτες απομόνωσης εγκαθίστανται κοντά στους εμπορικούς καταναλωτές του δικτύου (φορτία L6, L7, L15, L16, L22) που παρουσιάζουν την υψηλότερη συνάρτηση βλάβης καταναλωτών. Αντίθετα στα φορτία L1 και L2 που συνδέονται στον πρώτο κόμβο του δικτύου επειδή συνδέονται οικιακοί καταναλωτές με τη χαμηλότερη συνάρτηση βλάβης καταναλωτών δεν τοποθετείται διακόπτης απομόνωσης πλησιέστερα σε αυτούς.

Τέλος η θέση των φορτίων στο δίκτυο, επηρεάζει και τις θέσεις των διακοπών απομόνωσης. Έτσι δεν τοποθετείται διακόπτης πλησιέστερα στο φορτίο L7 (θέση 7) παρόλο που συνδέονται σε αυτό εμπορικοί καταναλωτές, αλλά τοποθετείται στη θέση 6. Έτσι σφάλμα στο τμήμα 4 της κύριας γραμμής διανομής F1, ή στον Μ/Σ ή στη διακλάδωση μέσω της οποίας συνδέεται το φορτίο L7, θα οδηγήσει σε άνοιγμα του διακόπτη απομόνωσης στη θέση 6, οπότε τα φορτία L1-L6 υφίστανται διάρκεια διακοπής ίση με το χρόνο χειρισμού του διακόπτη (10 min) και μόνο το φορτίο L7 θα παραμείνει εκτός τροφοδοσίας για το χρόνο επισκευής της βλάβης στο αντίστοιχο τμήμα του δικτύου.

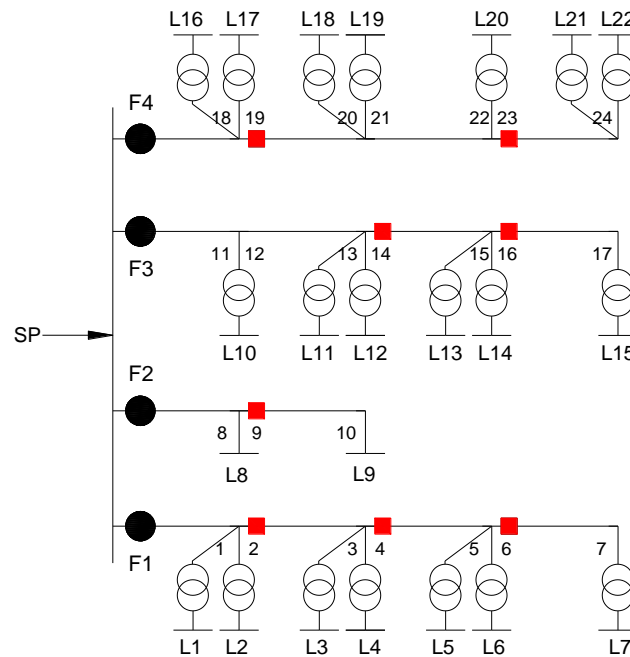
### 6.2.2.2 Σενάριο 2



Σε αυτήν την περίπτωση θεωρούνται όλες οι θέσεις σφάλματος σε τμήματα γραμμών και σε Μ/Σ (συνολικά 56 θέσεις σφάλματος) χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι ανοιχτοί διακόπτες ισχύος στο τέλος κάθε γραμμής διανομής για παροχή εναλλακτικής τροφοδοσίας για κάθε περίπτωση σφάλματος. Στον Πίνακα 6.9 παρουσιάζονται οι βέλτιστες θέσεις των διακοπών απομόνωσης σε κάθε γραμμή τροφοδοσίας, καθώς επίσης και τα στοιχεία κόστους όπως προκύπτουν από την επίλυση του GAMS. Το βέλτιστο πλήθος των διακοπών απομόνωσης είναι 8 διακόπτες. Στο Σχήμα 6.5 παρουσιάζονται με κόκκινο χρώμα οι βέλτιστες θέσεις των διακοπών απομόνωσης για το δίκτυο των 14 κόμβων.

**Πίνακας 6.9:** Αποτελέσματα Σεναρίου 2 για το δίκτυο 14 κόμβων.

<b>Βέλτιστη λύση:</b>	8 διακόπτες απομόνωσης	
<b>Θέσεις διακοπών απομόνωσης</b>	F1	2, 4, 6
	F2	9
	F3	14, 16
	F4	19, 23
<b>Ecost (κ€)</b>	545,725	
<b>Κόστος επένδυσης, λειτουργίας και συντήρησης των διακοπών (κ€)</b>	44,0367	
<b>Συνολικό κόστος (κ€)</b>	589,762	



**Σχήμα 6.5:** Βέλτιστες θέσεις των διακοπών απομόνωσης για το Σενάριο 2.

Από τα αποτελέσματα του Σεναρίου 2 για το δίκτυο των 14 κόμβων παρατηρείται ότι το συνολικό κόστος του δικτύου (590 κ€) αυξάνεται κατά 120% περίπου σε σχέση με το Σενάριο 1. Επίσης το πλήθος των διακοπών απομόνωσης μειώνεται κατά 2 διακόπτες σε σχέση με το Σενάριο 1. Οι μόνοι κοινοί διακόπτες και στα 2 Σενάρια βρίσκονται στις θέσεις 6 και 19 του δικτύου. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στο Σενάριο 2 δεν υπάρχει δυνατότητα εναλλακτικής τροφοδοσίας σε περιπτώσεις σφάλματος σε κάποιο τμήμα του δικτύου. Έτσι, οι

διακόπτες απομόνωσης του Σχήματος 6.5 για την απομόνωση των περιοχών του δικτύου σε περίπτωση σφάλματος συντελούν στην μείωση του χρόνου διακοπής των καταναλωτών που βρίσκονται μεταξύ του σημείου τροφοδοσίας και του σημείου του σφάλματος. Ενώ όλοι οι καταναλωτές που βρίσκονται μετά το σημείο σφάλματος ανεξαρτήτως της θέσης των διακοπών απομόνωσης, υφίστανται διακοπή τροφοδοσίας διάρκειας ίσης με το χρόνο επισκευής του αντίστοιχου τμήματος με τη βλάβη. Συνεπώς οι καταναλωτές αυτοί παρουσιάζουν υψηλότερο αναμενόμενο κόστος διακοπών (Ecost). Τέλος, παρατηρείται ότι τοποθετούνται περισσότεροι διακόπτες στη γραμμή τροφοδοσίας F1 (3 διακόπτες) λόγω της υψηλότερης πυκνότητας φορτίου σε σχέση με τις υπόλοιπες γραμμές του δικτύου, ενώ στη γραμμή τροφοδοσίας F2 με τη χαμηλότερη ζήτηση φορτίου τοποθετείται μόνο ένας διακόπτης.

### 6.2.2.3 Ανάλυση ευαισθησίας

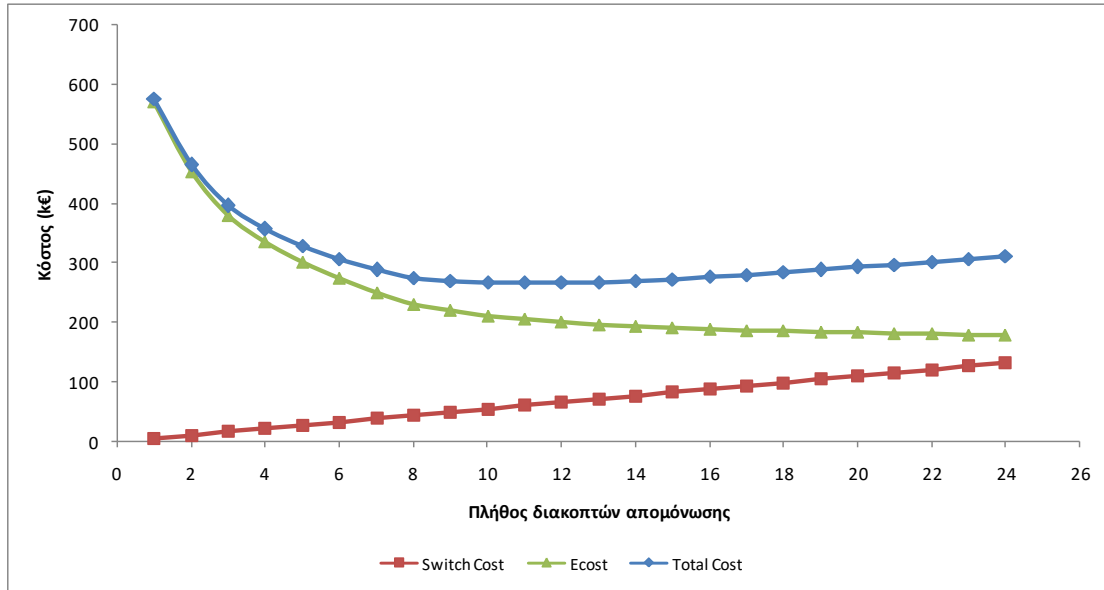
Προκειμένου να εξεταστεί η επίδραση διαφόρων παραμέτρων στη βέλτιστη τοποθέτηση των διακοπών απομόνωσης πραγματοποιείται ανάλυση ευαισθησίας για το Σενάριο 1 του δικτύου 14 κόμβων εξετάζοντας 4 διαφορετικές περιπτώσεις.

#### **1<sup>η</sup> Περίπτωση: Μεταβολή του μέγιστου επιτρεπόμενου ορίου του πλήθους των διακοπών απομόνωσης**

Το πλήθος των διαθέσιμων διακοπών απομόνωσης μεταβάλλεται από  $N=1$  έως  $N=24$  διακόπτες περιορίζοντας έτσι σε κάθε επανάληψη το μέγιστο επιτρεπόμενο όριο στο πλήθος των διακοπών που είναι δυνατόν να εγκατασταθούν. Το πρόβλημα που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 4 λύνεται για τον περιορισμό ισότητας:

$$\sum_{f=1}^{N_f} \sum_{s=1}^{N_s} X(s, f) = N$$

Στο Σχήμα 6.6 παρουσιάζεται η μεταβολή του αναμενόμενου κόστους διακοπών των καταναλωτών (Ecost), του κόστους επένδυσης, λειτουργίας και συντήρησης των διακοπών απομόνωσης (Switch Cost) και του συνολικού κόστους του δικτύου (Total Cost) σε συνάρτηση με το πλήθος των διαθέσιμων διακοπών απομόνωσης για το Σενάριο 1 του δικτύου 14 κόμβων.

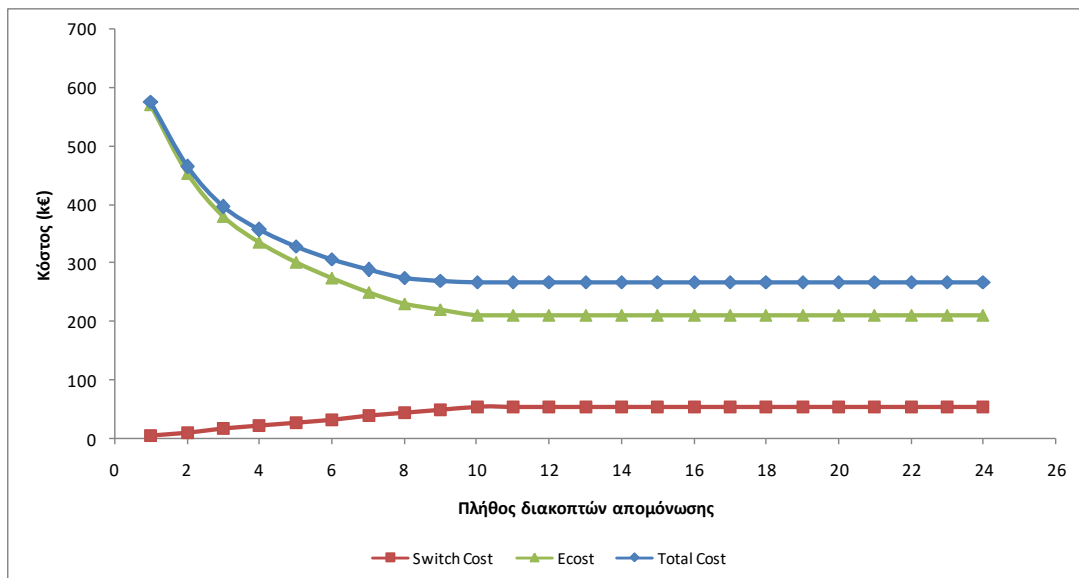


**Σχήμα 6.6:** Κόστη δικτύου σε συνάρτηση με τη μεταβολή του πλήθους των διακοπών απομόνωσης για τον περιορισμό ισότητας για το Σενάριο 1.

Το πρόβλημα που περιγράφηκε παραπάνω επιλύεται και για τον περιορισμό ανισότητας:

$$\sum_{f=1}^{N_f} \sum_{s=1}^{N_s} X(s, f) \leq N$$

Οι διακόπτες απομόνωσης αυξάνονται από  $N=1$  μέχρι  $N=24$  προκειμένου να διερευνηθεί η επίδραση της τοποθέτησης των διακοπών αυτών στην αξιοπιστία του δικτύου. Το Σχήμα 6.7 παρουσιάζει τα αποτελέσματα για τα κόστη του δικτύου για το Σενάριο 1 του δικτύου 14 κόμβων.



**Σχήμα 6.7:** Κόστη δικτύου σε συνάρτηση με τη μεταβολή του πλήθους των διακοπών απομόνωσης για τον περιορισμό ανισότητας για το Σενάριο 1.

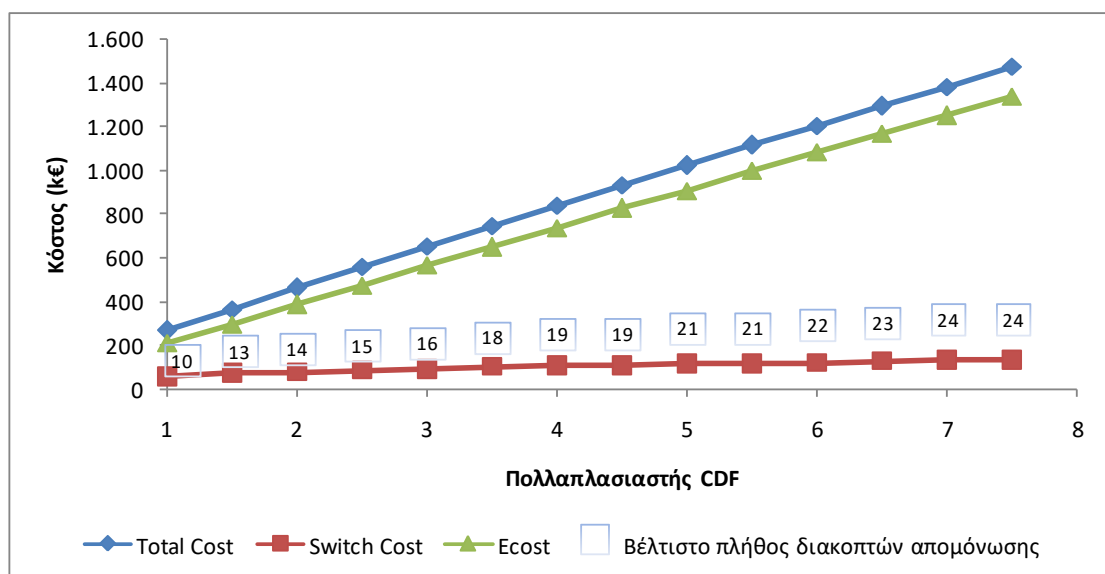
Όπως φαίνεται από τα διαγράμματα (Σχήματα 6.6 - 6.7) η τοποθέτηση των πρώτων διακοπών απομόνωσης έχει μεγαλύτερη επίδραση στη μείωση του αναμενόμενου κόστους διακοπών των καταναλωτών (Ecost) και αυτή η επίδραση μειώνεται καθώς αυξάνεται το πλήθος των διακοπών απομόνωσης. Για παράδειγμα κατά την τοποθέτηση των 4 πρώτων διακοπών το Ecost μειώνεται από 571 κ€ σε 335 κ€ (μείωση κατά 41,04%) ενώ από κει και πέρα μειώνεται από 335 κ€ σε 212 κ€ (μείωση κατά 36,72%), όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.7.

Το βέλτιστο επίπεδο αξιοπιστίας επιτυγχάνεται στο ελάχιστο της καμπύλης συνολικού κόστους, το οποίο αντιστοιχεί στη βέλτιστη λύση επένδυσης που είναι  $N = 10$  διακόπτες απομόνωσης (Σχήμα 6.6 και Σχήμα 6.7) Δεξιά από το βέλτιστο σημείο της καμπύλης Total Cost στο Σχήμα 6.7, αύξηση του επιτρεπόμενου ορίου στο πλήθος των διακοπών απομόνωσης θα οδηγούσε σε μείωση του αναμενόμενου κόστους διακοπών των καταναλωτών, όπως στο Σχήμα 6.6. Παρόλα αυτά το όφελος από την τοποθέτηση επιπλέον διακοπών προκύπτει μικρότερο από τα κόστη του δικτύου. Τέλος, από τα διαγράμματα στα Σχήματα 6.6 - 6.7 επιβεβαιώνεται η βέλτιστη λύση που υπολογίστηκε στην Ενότητα 6.2.2.1.

## 2<sup>η</sup> Περίπτωση: Μεταβολή της συνάρτησης βλάβης καταναλωτών CDF

Σε αυτήν την περίπτωση αναλύεται η επίδραση της μεταβολής της συνάρτησης βλάβης των καταναλωτών CDF στο βέλτιστο πλήθος των διακοπών απομόνωσης για το Σενάριο 1 στο δίκτυο των 14 κόμβων. Για να γίνει αυτό αυξάνεται η συνάρτηση βλάβης καταναλωτών από 100% μέχρι 750% από τις αρχικές τιμές του Πίνακα 6.7 με βήματα επαύξησης κατά 50%.

Στο Σχήμα 6.8 παρουσιάζεται το βέλτιστο πλήθος των διακοπών απομόνωσης, το αναμενόμενο κόστος διακοπών των καταναλωτών (Ecost), το κόστος των εγκατεστημένων διακοπών απομόνωσης (Switch Cost) και η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης (Total Cost) όπως μεταβάλλονται σε συνάρτηση με τη συνάρτηση βλάβης των καταναλωτών για το Σενάριο 1 του δικτύου 14 κόμβων.



**Σχήμα 6.8:** Κόστη δικτύου σε συνάρτηση με τη μεταβολή του πολλαπλασιαστή CDF για το Σενάριο 1.

Στο Σχήμα 6.8 παρατηρείται ότι το βέλτιστο πλήθος των διακοπών απομόνωσης μεταβάλλεται από 10 έως 24 διακόπτες. Όπως είναι αναμενόμενο, το βέλτιστο πλήθος των διακοπών απομόνωσης αυξάνεται με την αύξηση της συνάρτησης βλάβης των καταναλωτών. Παρόλα αυτά η μεταβολή του βέλτιστου πλήθους των διακοπών είναι μη γραμμική. Αυτή η μη γραμμικότητα οφείλεται στην μη γραμμική εξάρτηση της συνάρτησης βλάβης των καταναλωτών σε σχέση με τη διάρκεια διακοπών αλλά και την τοπολογία του δικτύου.

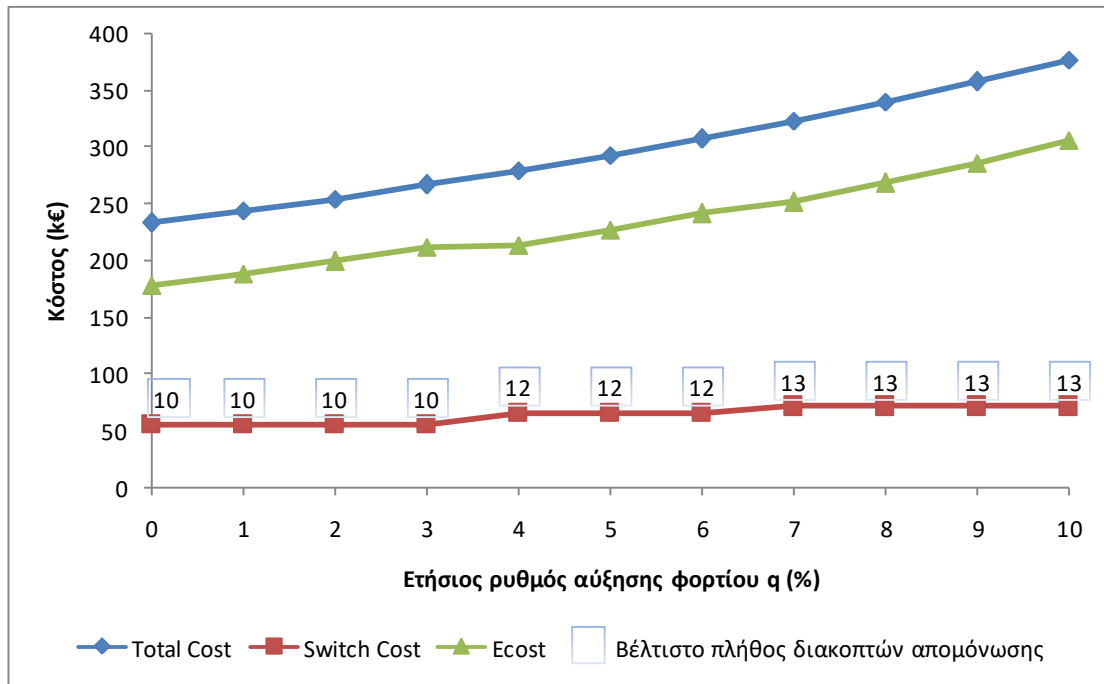
Επίσης, από το Σχήμα 6.8 παρατηρείται ότι τα κόστη του δικτύου αυξάνονται με διαφορετικό ρυθμό με την αύξηση του πολλαπλασιαστή CDF. Για παράδειγμα, τα κόστη Ecost και Switch Cost είναι συγκρίσιμα στις μικρότερες τιμές του πολλαπλασιαστή CDF. Αυξάνοντας τη συνάρτηση βλάβης των καταναλωτών, το αναμενόμενο κόστος διακοπών αυξάνεται δραματικά σε σχέση με το Switch Cost. Για παράδειγμα, αυξάνοντας τη συνάρτηση βλάβης των καταναλωτών κατά 600%, το Ecost αυξάνεται στα 1084 k€, ενώ το Switch Cost γίνεται ίσο με 121 k€ (22 διακόπτες απομόνωσης).

Επιπλέον, καθώς μεταβάλλεται ο πολλαπλασιαστής CDF από 1,5 μέχρι 7,5 τα κόστη του δικτύου Ecost και Total Cost παίρνουν πολύ υψηλές τιμές με την αύξηση της συνάρτησης βλάβης καταναλωτών. Η μέγιστη τιμή παρουσιάζεται για αύξηση του CDF κατά 750%, όπου το Ecost παίρνει την τιμή 1342 k€ και το Total Cost παίρνει την τιμή 1475 k€.

Από το διάγραμμα στο Σχήμα 6.8 συμπεραίνεται ότι ένα πλήρως αυτοματοποιημένο δίκτυο, δηλαδή τοποθέτηση διακοπών σε όλες τις πιθανές θέσεις του δικτύου (N=24 διακόπτες απομόνωσης) δικαιολογείται μόνο όταν υπάρχουν πολύ υψηλά κόστη διακοπών καταναλωτών (Ecost).

### **3<sup>η</sup> Περίπτωση: Μεταβολή του ετήσιου ρυθμού αύξησης φορτίου**

Σε αυτήν την περίπτωση ο ετήσιος ρυθμός αύξησης φορτίου  $q$  (%) μεταβάλλεται από 0% έως 10% για το Σενάριο 1 του δικτύου 14 κόμβων για το χρονικό ορίζοντα προγραμματισμού (15 έτη). Το Σχήμα 6.9 απεικονίζει τα αποτελέσματα σε μορφή διαγράμματος για τα κόστη του δικτύου (Total Cost, Ecost, Switch Cost) και για το βέλτιστο πλήθος των διακοπών απομόνωσης σε συνάρτηση με την αύξηση του ετήσιου ρυθμού αύξησης φορτίου.



**Σχήμα 6.9:** Κόστη δικτύου σε συνάρτηση με τη μεταβολή του ετήσιου ρυθμού αύξησης φορτίου  $q$  για το Σενάριο 1.

Στο Σχήμα 6.9 παρατηρείται ότι το βέλτιστο πλήθος διακοπών μεταβάλλεται από 10 μέχρι 13 διακόπτες απομόνωσης, ενώ υπάρχουν σημεία στα οποία το πλήθος των διακοπών παραμένει σταθερό όπως και το κόστος επένδυσης αντίστοιχα δεν μεταβάλλεται. Στο συγκεκριμένο Σενάριο το αναμενόμενο κόστος διακοπών των καταναλωτών αυξάνεται με την αύξηση του ετήσιου ρυθμού του φορτίου, το οποίο οδηγεί και σε αύξηση του συνολικού κόστους του δικτύου. Όμως δεν μεταβάλλεται ανάλογα με την αύξηση του ετήσιου ρυθμού του φορτίου. Για παράδειγμα για ρυθμό αύξησης φορτίου 4% το αναμενόμενο κόστος διακοπών των καταναλωτών του δικτύου (Ecost) προκύπτει περίπου ίσο σε σχέση με το κόστος διακοπών (Ecost) για ρυθμό αύξησης φορτίου 3%. Αυτό οφείλεται στην απότομη μεταβολή του βέλτιστου πλήθους των διακοπών απομόνωσης (από 10 σε 12 διακόπτες) όπου σε συνδυασμό με την τοπολογία του δικτύου μειώνεται ο χρόνος διακοπής των καταναλωτών και άρα και το Ecost. Η υπέρθεση όμως των δύο καμπυλών (Ecost και Switch Cost) οδηγεί σε αύξηση του συνολικού κόστους του δικτύου (Total Cost).

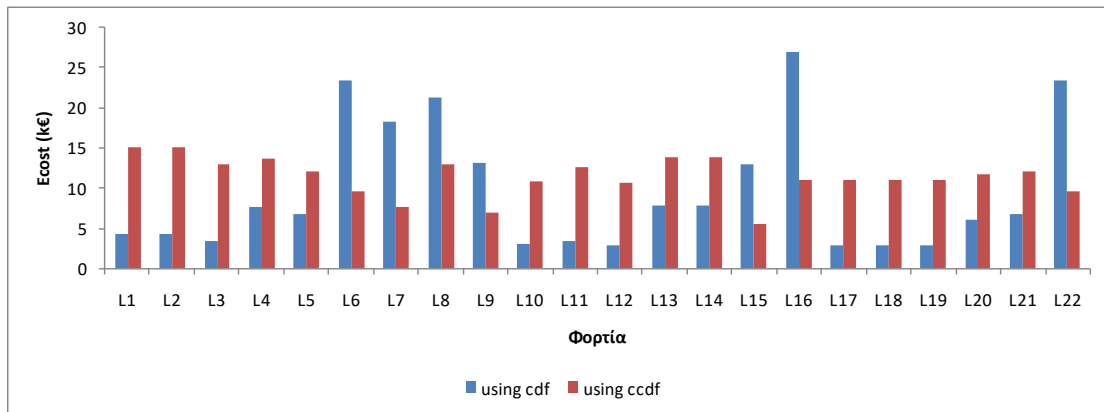
#### **4<sup>η</sup> Περίπτωση: Υπολογισμός αναμενόμενου κόστους διακοπών καταναλωτών με χρήση της σύνθετης συνάρτησης βλάβης καταναλωτών CCDF και της συνάρτησης βλάβης καταναλωτών CDF**

Στην παρούσα διπλωματική υπολογίστηκε το αναμενόμενο κόστος διακοπών καταναλωτών του δικτύου Ecost με βάση τη συνάρτηση βλάβης των καταναλωτών CDF ανά τομέα. Σε αυτήν την περίπτωση υπολογίζεται για κάθε φορτίο αλλά και συνολικά για το δίκτυο των 14 κόμβων με βάση τη σύνθετη συνάρτηση βλάβης καταναλωτών CCDF για δεδομένες θέσεις των διακοπών απομόνωσης (Πίνακας 6.8). Το κόστος επομένως των διακοπών απομόνωσης (Switch Cost) παραμένει ίδιο και για τις δύο Περιπτώσεις. Για τον υπολογισμό της σύνθετης συνάρτησης βλάβης καταναλωτών χρησιμοποιήθηκαν τα ποσοστά ζήτησης αιχμής φορτίου του Πίνακα 6.3. Τα αποτελέσματα όσον αφορά τη διαφοροποίηση

του αναμενόμενου κόστους διακοπών καταναλωτών (Ecost) για το δίκτυο συνολικά αλλά και για κάθε φορτίο χωριστά παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.10 και στο Σχήμα 6.10 αντίστοιχα.

**Πίνακας 6.10:** Στοιχεία καταναλωτών για το δίκτυο 14 κόμβων.

Δίκτυο 14 κόμβων	Ecost (κ€)		Μεταβολή (%)
	με CDF	με CCDF	
Σενάριο 1	211,891	250,698	18,31



**Σχήμα 6.10:** Αναμενόμενο κόστος διακοπών καταναλωτών (Ecost) για κάθε φορτίο του δικτύου με χρήση α) της συνάρτησης βλάβης καταναλωτών CDF και β) της σύνθετης συνάρτησης βλάβης καταναλωτών CCDF για το Σενάριο 1.

Όπως φαίνεται από το Σχήμα 6.10 οι καταναλωτές που υφίστανται το υψηλότερο κόστος διακοπών καταναλωτών με βάση τη συνάρτηση βλάβης καταναλωτών ανά τομέα είναι κυρίως εμπορικοί καταναλωτές (κατά φθίνουσα σειρά τα φορτία L16, L6, L22, L7) αλλά και ο βιομηχανικός καταναλωτής στο φορτίο L8. Αντίθετα με χρήση της σύνθετης συνάρτησης βλάβης καταναλωτών το υψηλότερο κόστος διακοπών το υφίστανται οικιακοί καταναλωτές (L1, L2) και καταναλωτές του δημόσιου τομέα (L4, L13, L14, L20, L21). Εμπορικοί και βιομηχανικοί καταναλωτές που παρουσιάζουν υψηλότερη συνάρτηση βλάβης καταναλωτών ανά τομέα εμφανίζουν χαμηλότερο κόστος διακοπών όταν αυτό υπολογίζεται με βάση τη σύνθετη συνάρτηση βλάβης καταναλωτών. Αντίθετα οι υπόλοιποι καταναλωτές του δικτύου που ανήκουν στον οικιακό και στο δημόσιο τομέα παρουσιάζουν υψηλότερο κόστος διακοπών (Ecost) όταν αυτό υπολογίζεται με βάση τη σύνθετη συνάρτηση βλάβης καταναλωτών CCDF.

Επιπλέον, το κόστος διακοπών (Ecost) με βάση τη συνάρτηση βλάβης καταναλωτών CDF φτάνει σε μέγιστη τιμή (26,94 κ€ για το φορτίο L16), τιμή πολύ μεγαλύτερη από ότι με τη χρήση της σύνθετης συνάρτησης βλάβης καταναλωτών CCDF από όπου προκύπτει μέγιστο κόστος 15,08 κ€ για το φορτίο L1. Όμως το κόστος διακοπών (Ecost) με βάση τη συνάρτηση βλάβης καταναλωτών ανά τομέα είναι αυτό που φτάνει σε πιο χαμηλές τιμές (κάτω από 5 κ€ για 9 φορτία) σε σχέση με το αντίστοιχο κόστος με τη χρήση της σύνθετης συνάρτησης βλάβης καταναλωτών, όπου παρατηρείται ελάχιστο κόστος στα 5,5 κ€ για το φορτίο L15.

Συνεπώς τα κόστη διακοπών όταν υπολογίζονται με βάση τη σύνθετη συνάρτηση βλάβης καταναλωτών, παρουσιάζουν περισσότερη ομοιομορφία μεταξύ των φορτίων αλλά το συνολικό κόστος του δικτύου προκύπτει υψηλότερο κατά 18,31 % σε σχέση με το αντίστοιχο

που προκύπτει με βάση τη συνάρτηση βλάβης καταναλωτών CDF ανά τομέα, σύμφωνα με τον Πίνακα 6.10.

### 6.3 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΔΙΚΤΥΟ 29 ΚΟΜΒΩΝ

#### 6.3.1 Δεδομένα του δικτύου

Η τοπολογία του δικτύου των 29 κόμβων φαίνεται στο Σχήμα 6.12, τα δεδομένα του δικτύου στους Πίνακες 6.11 – 6.15, ενώ ισχύουν και οι Πίνακες 6.5 και 6.6. Το δίκτυο αυτό τροφοδοτείται μέσω 3 ζυγών τροφοδοσίας, τάσης 11 kV και αποτελείται από 7 κύριες γραμμές διανομής (feeders F1-F7), 29 τμήματα κορμού και 38 φορτία (L1-L38) όπου συνδέονται μέσω διακλαδώσεων οικιακοί, εμπορικοί και βιομηχανικοί καταναλωτές, με τη συνάρτηση βλάβης καταναλωτών ανά τομέα του Σχήματος 6.11 [9],[21]. Οι βιομηχανικοί καταναλωτές συνδέονται μέσω δικών τους μετασχηματιστών (Μ/Σ), οι οποίοι δεν ανήκουν στην κυριότητα του διαχειριστή του δικτύου, για αυτό δεν απεικονίζονται στο δίκτυο του Σχήματος 6.12. Ενώ οι υπόλοιποι καταναλωτές συνδέονται μέσω Μ/Σ διανομής του δικτύου. Στην αναχώρηση κάθε γραμμής διανομής είναι εγκατεστημένος ένας κανονικά κλειστός διακόπτης ισχύος, ενώ στην άφιξη τους ένας κανονικά ανοιχτός διακόπτης ισχύος για παροχή εναλλακτικής τροφοδοσίας σε περίπτωση σφάλματος σε κάποιο τμήμα του δικτύου. Στην αρχή και στο τέλος σε κάθε ένα από τα 29 τμήματα κορμού είναι δυνατόν να τοποθετηθούν διακόπτες απομόνωσης. Έτσι προκύπτουν συνολικά 51 πιθανές θέσεις διακοπών απομόνωσης.

**Πίνακας 6.11:** Στοιχεία καταναλωτών για το δίκτυο 29 κόμβων.

Πλήθος Φορτίων	Φορτία	Είδος τομέα καταναλωτή	Μέσο Φορτίο (MW)	Πλήθος καταναλωτών
15	L1-L4,L11-L13, L18-L21,L32-L35	Οικιακός	0,545	220
7	L5,L14,L15,L22, L23,L36,L37	Οικιακός	0,5	200
7	L8,L10,L26-L30	Βιομηχανικός	1	1
2	L9, L31	Βιομηχανικός	1,5	1
7	L6,L7,L16,L17, L24,L25,L38	Εμπορικός	0,415	10

**Πίνακας 6.12:** Αιχμή φορτίου ανά τομέα καταναλωτών του δικτύου 29 κόμβων.

Τομέας καταναλωτών	Φορτίο Αιχμής (MW)	Ποσοστό (%)
Οικιακός	19	47,5
Βιομηχανικός	16,3	40,75
Εμπορικός	4,7	11,75
<b>Σύνολο</b>	<b>40</b>	<b>100</b>



**Πίνακας 6.13:** Μέσο φορτίο ανά ζυγό τροφοδοσίας του δικτύου 29 κόμβων.

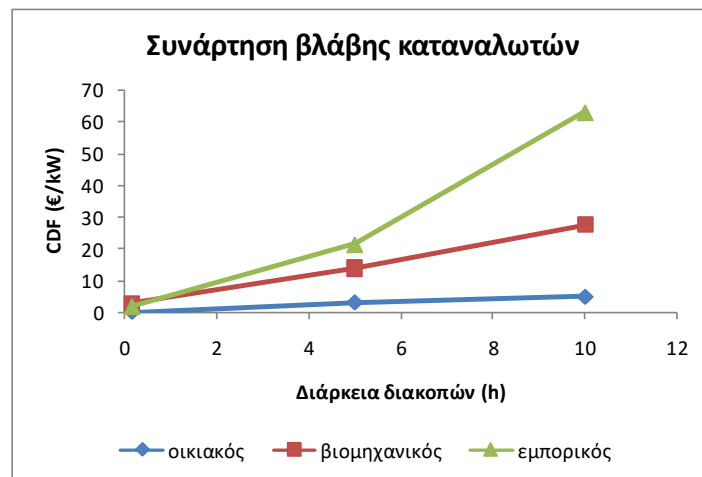
Γραμμές τροφοδοσίας	Φορτία	Μέσο Φορτίο (MW)
F1	L1-L7	3,51
F2	L8-L10	3,5
F3	L11-L17	3,465
F4	L18-L25	4,01
F5	L26-L28	3
F6	L29-L31	3,5
F7	L32-L38	3,595

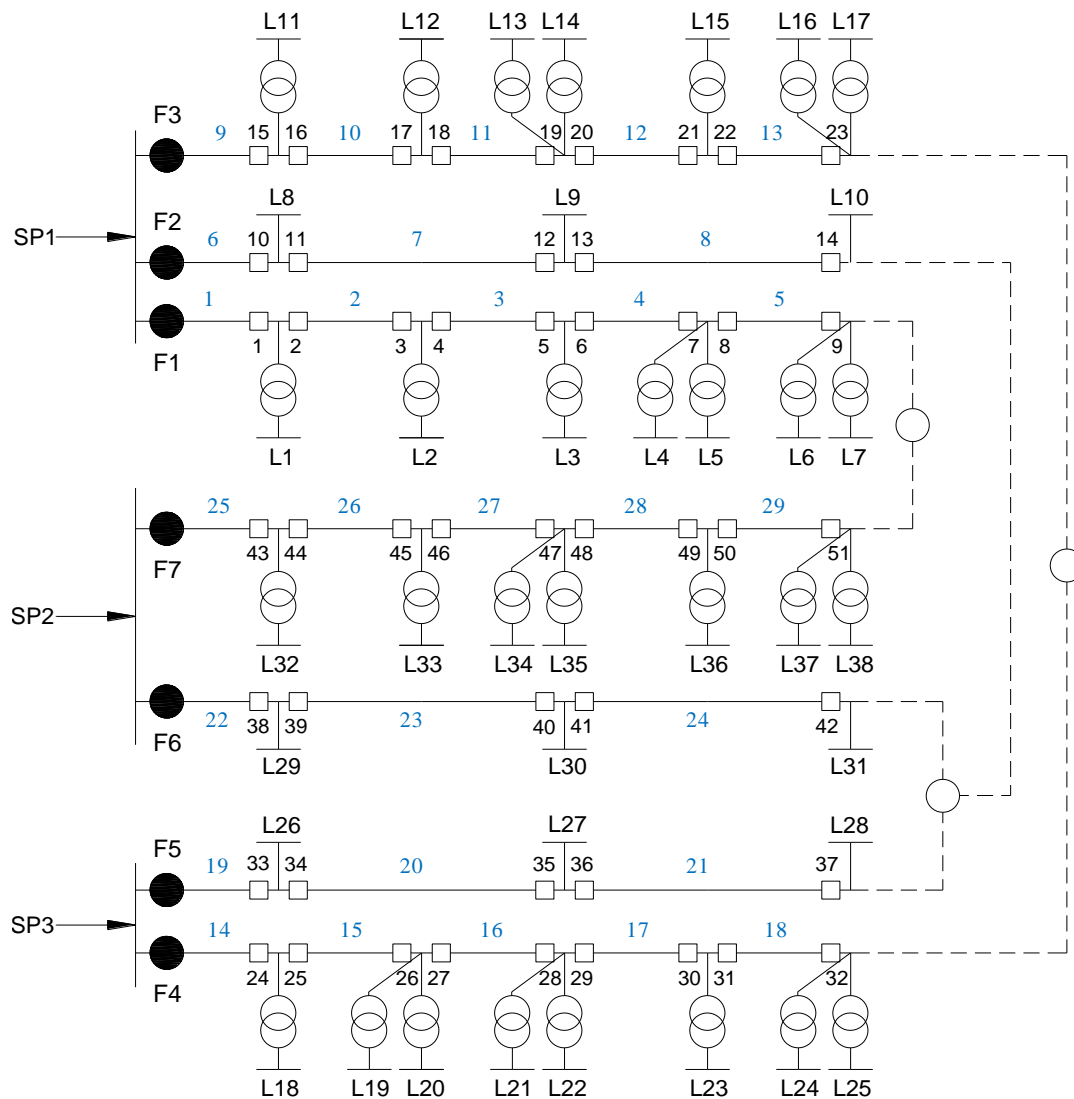
**Πίνακας 6.14:** Μήκος κύριων γραμμών και διακλαδώσεων.

Μήκος (km)	Τμήματα κορμού	Τμήματα διακλαδώσεων για τη σύνδεση των φορτίων
0,6	5,8,10,13,18,20,26	L1,L3,L8,L14,L16,L19,L22,L25,L28,L29,L31,L34,L36,L38
0,75	1,4,9,21,22,25,27,28,29	L2,L5,L7,L9,L12,L13,L15,L17,L18,L20,L21,L23,L24,L26,L30
0,8	2,3,6,7,11,12,14,15,16,17,19,23,24	L4,L6,L10,L11,L27,L32,L33,L35,L37

**Πίνακας 6.15:** Συνάρτηση βλάβης καταναλωτών (CDF) ανά τομέα (€/kW).

Είδος καταναλωτή	Διάρκεια Διακοπών		
	$d^{switching}$ 10 min	$d^{repair}$ 5 h	$d^{repair} M/\Sigma$ 10 h
οικιακός	0,06	3,16	5
βιομηχανικός	2,88	13,87	27,6
εμπορικός	2,05	21,51	63,06

**Σχήμα 6.11:** Συνάρτηση βλάβης καταναλωτών (CDF) ανά τομέα.



Σχήμα 6.12: Αρχικό δίκτυο με τις υποψήφιες θέσεις των διακοπών απομόνωσης.

### 6.3.2 Αποτελέσματα

Για το δίκτυο 29 κόμβων, μελετήθηκαν δύο διαφορετικά σενάρια, όπως και στο δίκτυο 14 κόμβων:

Σενάριο 1: Σφάλμα στις κύριες γραμμές διανομής (29 θέσεις σφάλματος), στους Μ/Σ (29 θέσεις σφάλματος) και σε όλα τα τμήματα διακλαδώσεων (38 θέσεις σφάλματος), με δυνατότητα εναλλακτικής τροφοδοσίας.

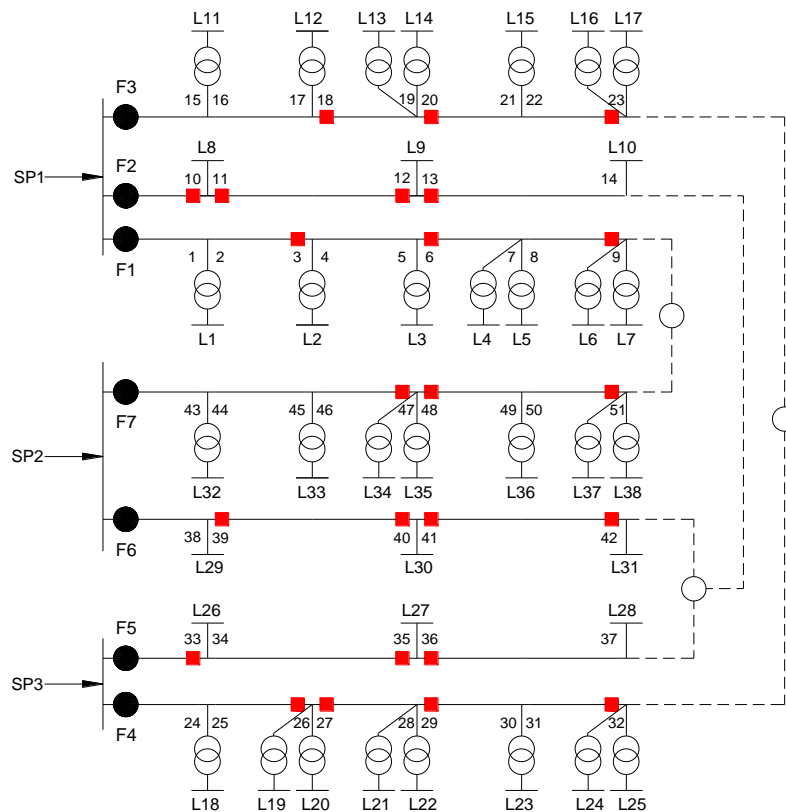
Σενάριο 2: Σφάλμα στις κύριες γραμμές διανομής (29 θέσεις σφάλματος), στους Μ/Σ (29 θέσεις σφάλματος) και σε όλα τα τμήματα διακλαδώσεων (38 θέσεις σφάλματος), χωρίς τη δυνατότητα εναλλακτικής τροφοδοσίας.

#### 6.3.2.1 Σενάριο 1

Σε αυτήν την περίπτωση θεωρούνται όλες οι θέσεις σφάλματος σε τμήματα γραμμών και σε Μ/Σ (συνολικά 96 θέσεις σφάλματος) και λαμβάνονται υπόψη οι ανοιχτοί διακόπτες ισχύος στο τέλος κάθε γραμμής διανομής για παροχή εναλλακτικής τροφοδοσίας σε περίπτωση σφάλματος. Στον Πίνακα 6.16 παρουσιάζονται οι βέλτιστες θέσεις των διακοπών απομόνωσης σε κάθε γραμμή τροφοδοσίας, καθώς επίσης και τα στοιχεία κόστους όπως προκύπτουν από την επίλυση του GAMS. Στα στοιχεία κόστους περιλαμβάνονται το συνολικό κόστος του δικτύου (Total Cost), το αναμενόμενο κόστος διακοπών των καταναλωτών (Ecost) και το κόστος επένδυσης, λειτουργίας και συντήρησης (Switch Cost) για χρονικό ορίζοντα προγραμματισμού 15 ετών. Το βέλτιστο πλήθος των διακοπών απομόνωσης είναι 24 διακόπτες και αποτελεί τη βέλτιστη λύση η οποία οδηγεί στο ελάχιστο συνολικό κόστος του δικτύου που είναι 507 κ€. Στο Σχήμα 6.13 παρουσιάζονται με κόκκινο χρώμα οι βέλτιστες θέσεις των διακοπών απομόνωσης για το δίκτυο των 29 κόμβων.

**Πίνακας 6.16:** Αποτελέσματα Σεναρίου 1 για το δίκτυο 29 κόμβων.

<b>Βέλτιστη λύση:</b>	<b>24 διακόπτες απομόνωσης</b>	
<b>Θέσεις διακοπών απομόνωσης</b>	F1	3, 6, 9
	F2	10, 11, 12, 13
	F3	18, 20, 23
	F4	26, 27, 29, 32
	F5	33, 35, 36
	F6	39, 40, 41, 42
	F7	47, 48, 51
<b>Ecost (κ€)</b>	375,381	
<b>Κόστος επένδυσης, λειτουργίας και συντήρησης των διακοπών (κ€)</b>	132,110	
<b>Συνολικό κόστος (κ€)</b>	507,491	



**Σχήμα 6.13:** Βέλτιστες θέσεις των διακοπών απομόνωσης για το Σενάριο 1.

Από τα αποτελέσματα του Σεναρίου 1 για το δίκτυο των 29 κόμβων παρατηρείται ότι τοποθετούνται τρεις διακόπτες σε κάθε μία από τις γραμμές τροφοδοσίας F1, F3, F5 και F7 ενώ 4 διακόπτες σε κάθε μία από τις γραμμές τροφοδοσίας F2, F4 και F6. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η γραμμή τροφοδοσίας F4 παρουσιάζει την υψηλότερη πυκνότητα φορτίου σε σχέση με τις υπόλοιπες γραμμές του δικτύου, για αυτό και τοποθετείται εκεί ο πρώτος διακόπτης απομόνωσης. Και οι γραμμές τροφοδοσίας F2, F6 εξυπηρετούν φορτία με την υψηλότερη τιμή ζήτησης στο δίκτυο (L9, L31). Επίσης τοποθετούνται διακόπτες σε κόμβους του δικτύου στους οποίους συνδέονται δύο διαφορετικά φορτία λόγω της υψηλότερης ισχύος που ζητείται αθροιστικά από τα 2 φορτία στους αντίστοιχους κόμβους (πχ. φορτία L34-L35).

Επιπλέον, το είδος των καταναλωτών που συνδέονται σε κάθε κόμβο επηρεάζει τις θέσεις των διακοπών απομόνωσης. Συνεπώς, διακόπτες απομόνωσης εγκαθίστανται κοντά στους εμπορικούς καταναλωτές του δικτύου (φορτία L6, L7, L16, L17, L24, L25, L38) που παρουσιάζουν την υψηλότερη συνάρτηση βλάβης καταναλωτών. Αντίθετα στα φορτία L1, L4, L5, L32, L33 που συνδέονται οικιακοί καταναλωτές με τη χαμηλότερη συνάρτηση βλάβης καταναλωτών δεν τοποθετείται διακόπτης απομόνωσης πλησιέστερα σε αυτούς.

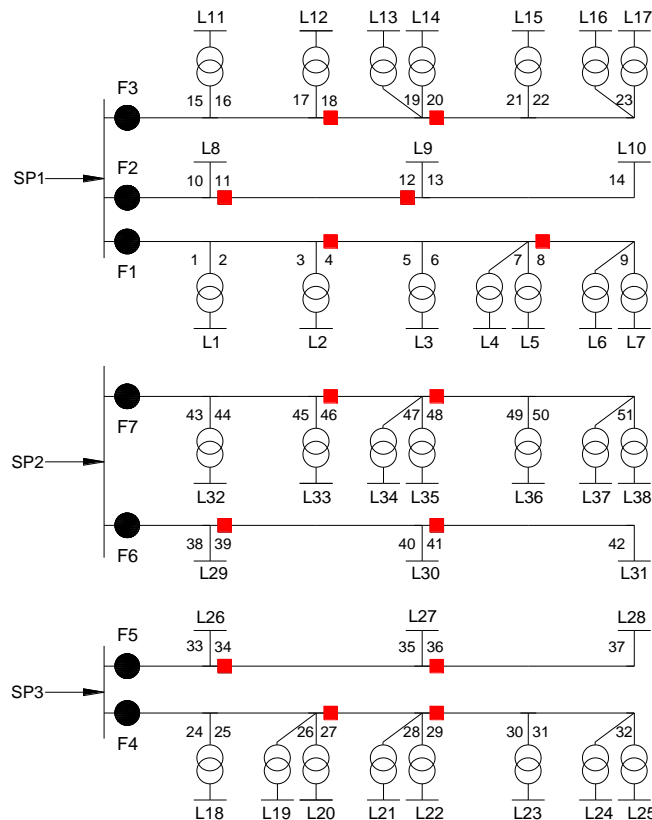
Τέλος η θέση των φορτίων στο δίκτυο, επηρεάζει και τις θέσεις των διακοπών απομόνωσης. Έτσι δεν τοποθετείται διακόπτης πλησιέστερα στα φορτία L10 και L28 παρόλο που συνδέονται σε αυτά βιομηχανικοί καταναλωτές, ούτε κοντά σε οικιακούς καταναλωτές που συνδέονται στην αρχή του δικτύου και τροφοδοτούνται κατευθείαν από την πηγή τροφοδοσίας αλλά τοποθετούνται πλησιέστερα σε οικιακούς καταναλωτές οι οποίοι βρίσκονται πιο κεντρικά στο δίκτυο (φορτία L34, L35), ώστε σε περιπτώσεις σφάλματος να απομονωθεί το τμήμα του δικτύου που υπέστη βλάβη και να τροφοδοτηθούν όσο γίνεται περισσότεροι καταναλωτές.

### 6.3.2.2 Σενάριο 2

Σε αυτήν την περίπτωση θεωρούνται όλες οι θέσεις σφάλματος σε τμήματα γραμμών και σε Μ/Σ (συνολικά 96 θέσεις σφάλματος) χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι ανοιχτοί διακόπτες ισχύος στο τέλος κάθε γραμμής διανομής για παροχή εναλλακτικής τροφοδοσίας για κάθε περίπτωση σφάλματος. Στον Πίνακα 6.17 παρουσιάζονται οι βέλτιστες θέσεις των διακοπών απομόνωσης σε κάθε γραμμή τροφοδοσίας, καθώς επίσης και τα στοιχεία κόστους όπως προκύπτουν από την επίλυση του GAMS. Το βέλτιστο πλήθος των διακοπών απομόνωσης είναι 14 διακόπτες. Στο Σχήμα 6.14 παρουσιάζονται με κόκκινο χρώμα οι βέλτιστες θέσεις των διακοπών απομόνωσης για το δίκτυο των 29 κόμβων.

**Πίνακας 6.17:** Αποτελέσματα Σεναρίου 2 για το δίκτυο 29 κόμβων.

<b>Βέλτιστη λύση:</b>	<b>14 διακόπτες απομόνωσης</b>	
<b>Θέσεις διακοπών απομόνωσης</b>	F1	4, 8
	F2	11, 12
	F3	18, 20
	F4	27, 29
	F5	34, 36
	F6	39, 41
	F7	46, 48
<b>Ecost (κ€)</b>	1032,321	
<b>Κόστος επένδυσης, λειτουργίας και συντήρησης των διακοπών (κ€)</b>	77,064	
<b>Συνολικό κόστος (κ€)</b>	1109,386	



**Σχήμα 6.14:** Βέλτιστες θέσεις των διακοπών απομόνωσης για το Σενάριο 2.

Από τα αποτελέσματα του Σεναρίου 2 για το δίκτυο των 29 κόμβων παρατηρείται ότι το συνολικό κόστος του δικτύου (1109 k€) αυξάνεται κατά 118% περίπου σε σχέση με το Σενάριο 1. Επίσης, τοποθετούνται δύο διακόπτες σε κάθε γραμμή τροφοδοσίας σε κεντρικές θέσεις του δικτύου και το πλήθος των διακοπών απομόνωσης μειώνεται κατά 10 διακόπτες σε σχέση με το Σενάριο 1. Οι κοινοί διακόπτες και στα δύο Σενάρια βρίσκονται στις θέσεις 11, 12, 18, 20, 27, 29, 36, 39 και 41 του δικτύου όπου συνδέονται βιομηχανικοί καταναλωτές, αλλά και οικιακοί καταναλωτές με υψηλή ζήτηση. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στο Σενάριο 2 δεν υπάρχει δυνατότητα εναλλακτικής τροφοδοσίας σε περιπτώσεις σφάλματος σε κάποιο τμήμα του δικτύου. Έτσι, οι διακόπτες απομόνωσης του Σχήματος 6.14 για την απομόνωση των περιοχών του δικτύου σε περίπτωση σφάλματος συντελούν στην μείωση του χρόνου διακοπής των καταναλωτών που βρίσκονται μεταξύ του σημείου τροφοδοσίας και της θέσης του πλησιέστερου διακόπτη απομόνωσης πριν το σημείο του σφάλματος. Για παράδειγμα σε περίπτωση σφάλματος στο τελευταίο τμήμα της γραμμής τροφοδοσίας F4, οι καταναλωτές L23-L25 θα παραμείνουν εκτός τροφοδοσίας μέχρι να επιδιορθωθεί η βλάβη, ενώ οι υπόλοιποι καταναλωτές (L18-L22) θα υποστούν διάρκεια διακοπής ίση με το χρόνο χειρισμού του διακόπτη που βρίσκεται στη θέση 29, άρα θα έχουν μειωμένο κόστος διακοπών Ecost λόγω της εγκατάστασης του διακόπτη απομόνωσης. Αντίθετα όλοι οι καταναλωτές που βρίσκονται μετά το σημείο σφάλματος ανεξαρτήτως της θέσης των διακοπών απομόνωσης στο δίκτυο διανομής, υφίστανται διακοπή τροφοδοσίας διάρκειας ίσης με το χρόνο επισκευής του αντίστοιχου τμήματος με τη βλάβη. Συνεπώς οι καταναλωτές αυτοί επιβαρύνονται με υψηλότερο κόστος διακοπών (Ecost). Για παράδειγμα σε περίπτωση σφάλματος στο πρώτο τμήμα της γραμμής τροφοδοσίας F7 όλα τα φορτία της γραμμής διανομής (L32-L38) δεν επηρεάζονται από τις θέσεις των διακοπών απομόνωσης και παραμένουν εκτός τροφοδοσίας μέχρι να αποκατασταθεί η βλάβη στο τμήμα αυτό με αποτέλεσμα να εμφανίζουν υψηλότερα κόστη διακοπών (Ecost). Τέλος υψηλά κόστη διακοπών προκύπτουν για όλους τους εμπορικούς καταναλωτές που έχουν την υψηλότερη συνάρτηση βλάβης καταναλωτών επειδή συνδέονται σε κόμβους του δικτύου στο τέλος των γραμμών τροφοδοσίας χωρίς να επηρεάζονται από την εγκατάσταση διακοπών.

### 6.3.2.3 Ανάλυση ευαισθησίας

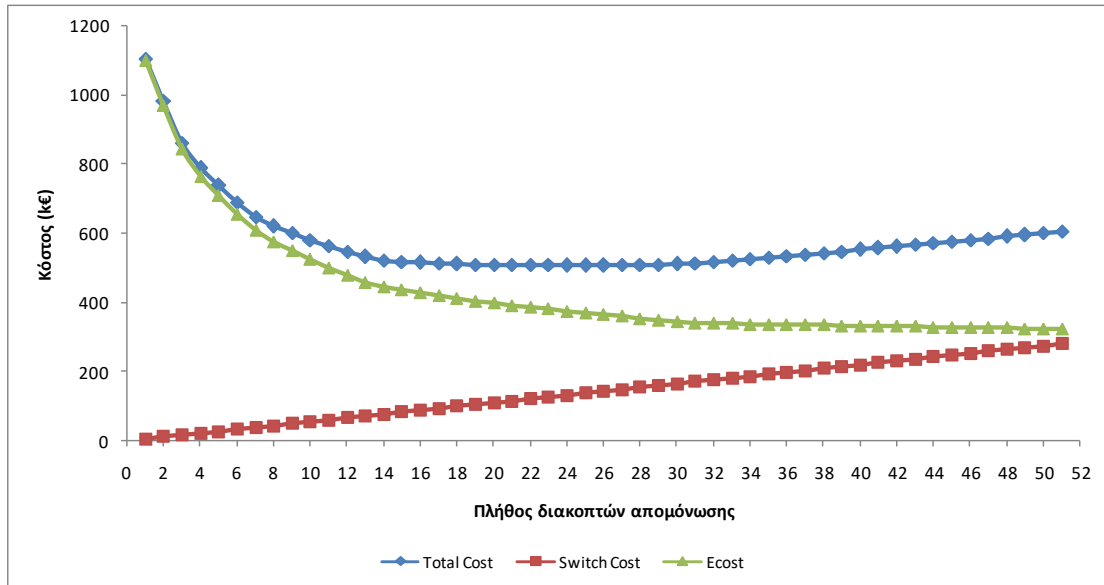
Προκειμένου να εξεταστεί η επίδραση διαφόρων παραμέτρων στη βέλτιστη τοποθέτηση των διακοπών απομόνωσης πραγματοποιείται ανάλυση ευαισθησίας για το Σενάριο 1 του δικτύου 29 κόμβων εξετάζοντας 4 διαφορετικές περιπτώσεις όπως και στο δίκτυο των 14 κόμβων.

#### **1<sup>η</sup> Περίπτωση: Μεταβολή του μέγιστου επιτρεπόμενου ορίου του πλήθους των διακοπών απομόνωσης**

Το πλήθος των διαθέσιμων διακοπών απομόνωσης μεταβάλλεται από N=1 έως N=51 διακόπτες περιορίζοντας έτσι σε κάθε επανάληψη το μέγιστο επιτρεπόμενο όριο στο πλήθος των διακοπών που είναι δυνατόν να εγκατασταθούν. Το πρόβλημα που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 4 λύνεται για τον περιορισμό ισότητας:

$$\sum_{f=1}^{N_f} \sum_{s=1}^{N_s} X(s, f) = N$$

Στο Σχήμα 6.15 παρουσιάζεται η μεταβολή του αναμενόμενου κόστους διακοπών των καταναλωτών (Ecost), του κόστους επένδυσης, λειτουργίας και συντήρησης των διακοπών απομόνωσης (Switch Cost) και του συνολικού κόστους του δικτύου (Total Cost) σε συνάρτηση με το πλήθος των διαθέσιμων διακοπών απομόνωσης για το Σενάριο 1 του δικτύου 29 κόμβων.

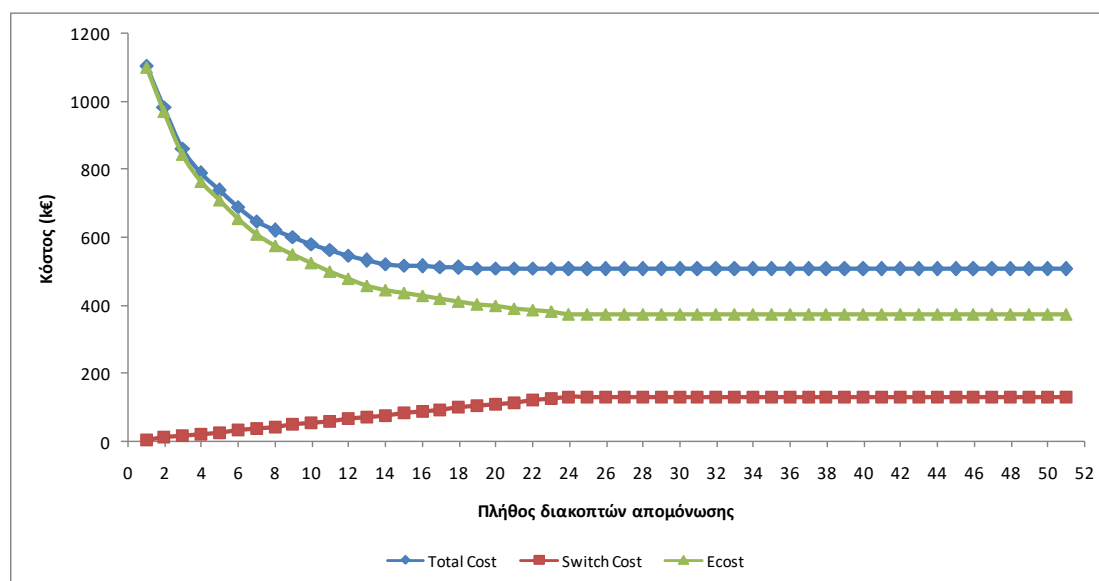


**Σχήμα 6.15:** Κόστη δικτύου σε συνάρτηση με τη μεταβολή του πλήθους των διακοπών απομόνωσης για τον περιορισμό ισότητας για το Σενάριο 1.

Το πρόβλημα που περιγράφηκε παραπάνω επιλύεται και για τον περιορισμό ανισότητας:

$$\sum_{f=1}^{N_f} \sum_{s=1}^{N_s} X(s, f) \leq N$$

Οι διακόπτες απομόνωσης αυξάνονται από  $N=1$  μέχρι  $N=51$  προκειμένου να διερευνηθεί η επίδραση της τοποθέτησης των διακοπών αυτών στην αξιοπιστία του δικτύου. Το Σχήμα 6.16 παρουσιάζει τα αποτελέσματα για τα κόστη του δικτύου για το Σενάριο 1 του δικτύου 29 κόμβων.



**Σχήμα 6.16:** Κόστη δικτύου σε συνάρτηση με τη μεταβολή του πλήθους των διακοπών απομόνωσης για τον περιορισμό ανισότητας για το Σενάριο 1.

Όπως φαίνεται από τα διαγράμματα που αποτυπώνουν τα αποτελέσματα για το Σενάριο 1 του δικτύου διανομής 29 κόμβων (Σχήματα 6.15 - 6.16) παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται το πλήθος των διακοπών απομόνωσης αυξάνεται ανάλογα το επενδυτικό κόστος (Switch Cost) ενώ τα κόστη διακοπών Ecost μειώνονται με μη γραμμικό ρυθμό. Η τοποθέτηση των πρώτων διακοπών απομόνωσης έχει μεγαλύτερη επίδραση στη μείωση του αναμενόμενου κόστους διακοπών των καταναλωτών (Ecost) και αυτή η επίδραση μειώνεται καθώς αυξάνεται το πλήθος των διακοπών απομόνωσης. Για παράδειγμα κατά την τοποθέτηση των 8 πρώτων διακοπών το Ecost μειώνεται από 1100 κ€ σε 575 κ€ (μείωση κατά 47,72%) ενώ από κει και πέρα μειώνεται από 575 κ€ σε 375 κ€ (μείωση κατά 34,72%) για το Σενάριο 1 (Σχήμα 6.16).

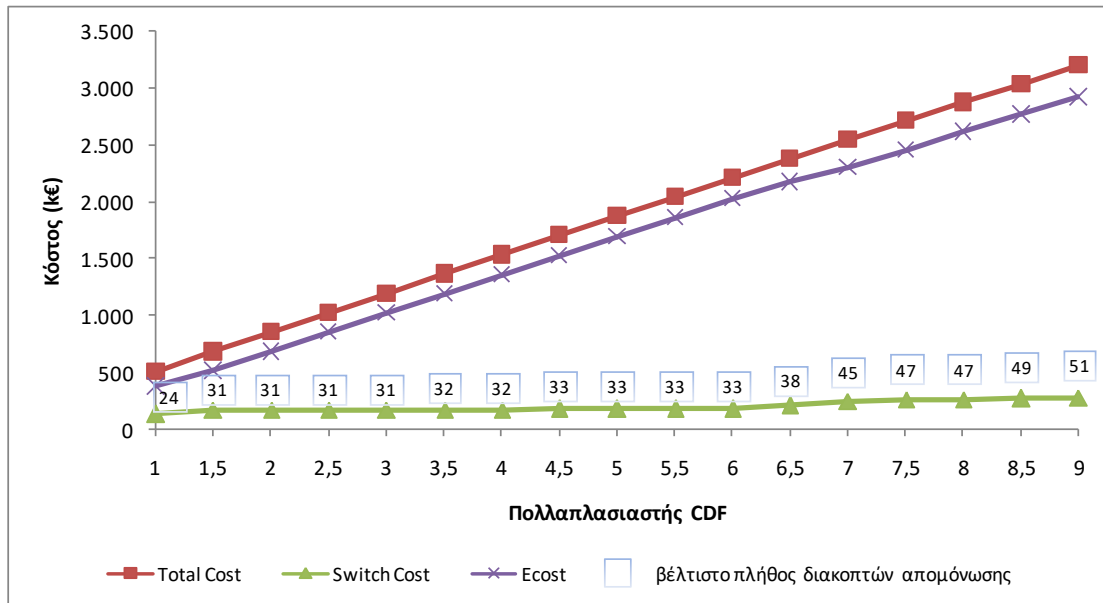
Το βέλτιστο επίπεδο αξιοπιστίας επιτυγχάνεται στο ελάχιστο της καμπύλης συνολικού κόστους (Total Cost), το οποίο αντιστοιχεί στη βέλτιστη λύση επένδυσης που είναι  $N = 24$  διακόπτες απομόνωσης. Σε αυτό το σημείο ορίζεται και η ελάχιστη δυνατή ζημία για τους καταναλωτές. Δεξιά από το βέλτιστο σημείο της καμπύλης Total Cost (Σχήμα 6.15), αύξηση του επιτρεπόμενου ορίου στο πλήθος των διακοπών απομόνωσης οδηγεί σε μείωση του αναμενόμενου κόστους διακοπών των καταναλωτών. Παρόλα αυτά δεν προκύπτει οικονομικό όφελος από την τοποθέτηση επιπλέον διακοπών στο δίκτυο.

## **2<sup>η</sup> Περίπτωση: Μεταβολή της συνάρτησης βλάβης καταναλωτών CDF**

Σε αυτήν την περίπτωση αναλύεται η επίδραση της μεταβολής της συνάρτησης βλάβης των καταναλωτών CDF στο βέλτιστο πλήθος των διακοπών απομόνωσης στο δίκτυο των 29 κόμβων για το Σενάριο 1. Για να γίνει αυτό αυξάνεται η συνάρτηση βλάβης καταναλωτών από 100% μέχρι 900% από τις αρχικές τιμές του Πίνακα 6.15 με βήματα επαύξησης κατά 50%.

Στο Σχήμα 6.17 παρουσιάζεται το βέλτιστο πλήθος των διακοπών απομόνωσης και τα κόστη του δικτύου διανομής (Ecost, Switch Cost και Total Cost) όπως μεταβάλλονται σε συνάρτηση με τη συνάρτηση βλάβης των καταναλωτών για το Σενάριο 1 του δικτύου.





**Σχήμα 6.17:** Κόστη δικτύου σε συνάρτηση με τη μεταβολή του πολλαπλασιαστή CDF για το Σενάριο 1.

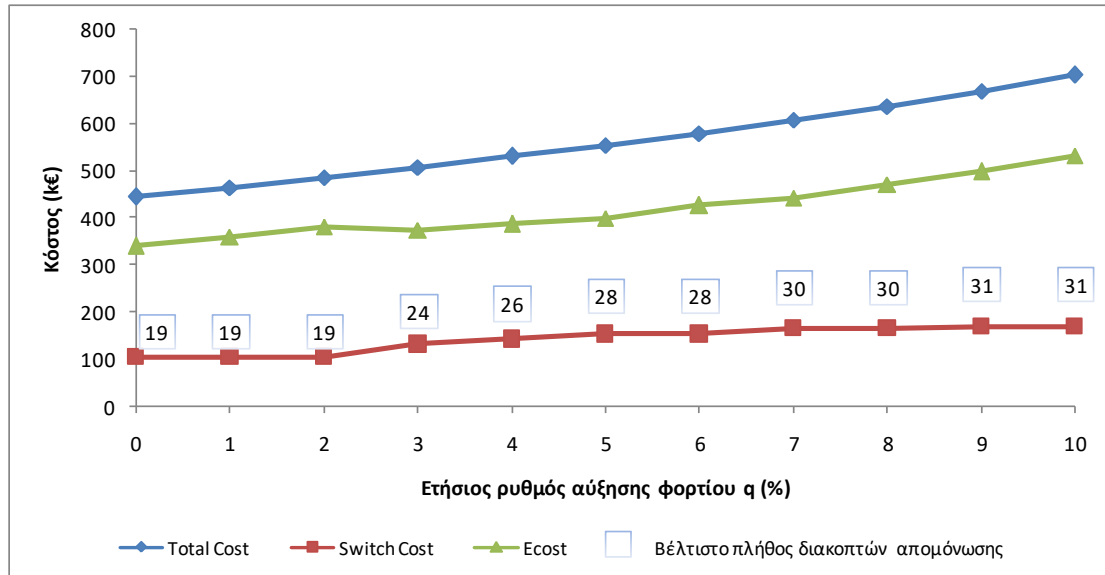
Παρατηρείται ότι στο Σχήμα 6.17 το βέλτιστο πλήθος των διακοπών μεταβάλλεται από 24 μέχρι 51 διακόπτες. Όπως είναι αναμενόμενο, το βέλτιστο πλήθος των διακοπών απομόνωσης αυξάνεται με την αύξηση της συνάρτησης βλάβης των καταναλωτών υποδεικνύοντας ότι απαιτείται υψηλότερο επίπεδο αξιοπιστίας. Παρόλα αυτά η μεταβολή του βέλτιστου πλήθους των διακοπών είναι μη γραμμική. Για παράδειγμα μεταβάλλοντας τη συνάρτηση βλάβης καταναλωτών από 450% σε 600% το βέλτιστο πλήθος των διακοπών απομόνωσης παραμένει 33, ενώ αυξάνοντας τη συνάρτηση βλάβης καταναλωτών από 650% σε 700% το πλήθος των διακοπών αυξάνεται από 38 σε 45 διακόπτες. Αυτή η μη γραμμικότητα οφείλεται στην μη γραμμική εξάρτηση της συνάρτησης βλάβης των καταναλωτών σε σχέση με τη διάρκεια διακοπών αλλά και την τοπολογία του δικτύου.

Επίσης, από το Σχήμα 6.17 παρατηρείται ότι τα κόστη του δικτύου αυξάνονται με διαφορετικό ρυθμό με την αύξηση του πολλαπλασιαστή CDF. Για παράδειγμα, τα κόστη Ecost και Switch Cost είναι συγκρίσιμα στις μικρότερες τιμές του πολλαπλασιαστή CDF (από 100% μέχρι 300%). Αυξάνοντας τη συνάρτηση βλάβης των καταναλωτών κατά 700% το αναμενόμενο κόστος διακοπών αυξάνεται δραματικά σε σχέση με το Switch Cost. Από το διάγραμμα συμπεραίνεται ότι ένα πλήρως αυτοματοποιημένο δίκτυο (N=51 διακόπτες απομόνωσης) δικαιολογείται μόνο όταν υπάρχουν πολύ υψηλά κόστη διακοπών καταναλωτών (Ecost). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η εγκατάσταση των πρώτων διακοπών απομόνωσης διαδραματίζει σημαντικότερο ρόλο στη μείωση του Ecost και αυτή η επίδραση μειώνεται όσο αυξάνεται το πλήθος των εγκατεστημένων διακοπών. Με άλλα λόγια μεταβαίνοντας από ένα μερικώς αυτοματοποιημένο δίκτυο σε ένα πλήρως αυτοματοποιημένο δίκτυο η επίδραση της εγκατάστασης διακοπών απομόνωσης στο Ecost μειώνεται σημαντικά.

### **3<sup>η</sup> Περίπτωση: Μεταβολή του ετήσιου ρυθμού αύξησης φορτίου**

Σε αυτήν την περίπτωση ο ετήσιος ρυθμός αύξησης φορτίου  $q$  (%) μεταβάλλεται από 0% έως 10% για το Σενάριο 1 του δικτύου 29 κόμβων για το χρονικό ορίζοντα

προγραμματισμού (15 έτη). Το Σχήμα 6.18 απεικονίζει τα αποτελέσματα σε μορφή διαγράμματος για τα κόστη του δικτύου (Total Cost, Ecost, Switch Cost) και για το βέλτιστο πλήθος των διακοπών απομόνωσης σε συνάρτηση με την αύξηση του ετήσιου ρυθμού αύξησης φορτίου.



**Σχήμα 6.18:** Κόστη δικτύου σε συνάρτηση με τη μεταβολή του ετήσιου ρυθμού αύξησης φορτίου q για το Σενάριο 1.

Στο Σχήμα 6.18 παρατηρείται ότι το βέλτιστο πλήθος διακοπών απομόνωσης μεταβάλλεται από 19 μέχρι 31 διακόπτες απομόνωσης, ενώ υπάρχουν σημεία στα οποία το πλήθος των διακοπών παραμένει σταθερό όπως και το κόστος επένδυσης αντίστοιχα δεν μεταβάλλεται. Για παράδειγμα μεταβάλλοντας το ρυθμό αύξησης φορτίου q από 0% σε 2% το πλήθος των διακοπών απομόνωσης παραμένει ίσο με 19.

Επιπλέον, στη συγκεκριμένη περίπτωση το αναμενόμενο κόστος διακοπών των καταναλωτών δεν μεταβάλλεται ανάλογα με την αύξηση του ετήσιου ρυθμού του φορτίου. Για παράδειγμα για ρυθμό αύξησης φορτίου 3% το αναμενόμενο κόστος διακοπών των καταναλωτών του δικτύου (Ecost) προκύπτει μικρότερο (375 κ€) σε σχέση με το κόστος διακοπών για ρυθμό αύξησης φορτίου 2% (381 κ€). Αυτό οφείλεται στην απότομη μεταβολή του βέλτιστου πλήθους των διακοπών απομόνωσης (από 19 σε 24 διακόπτες) όπου σε συνδυασμό με την τοπολογία του δικτύου μειώνεται ο χρόνος διακοπής των καταναλωτών και άρα και το Ecost. Η υπέρθεση όμως των δύο καμπυλών (Ecost και Switch Cost) οδηγεί σε αύξηση του συνολικού κόστους αξιοπιστίας του δικτύου.

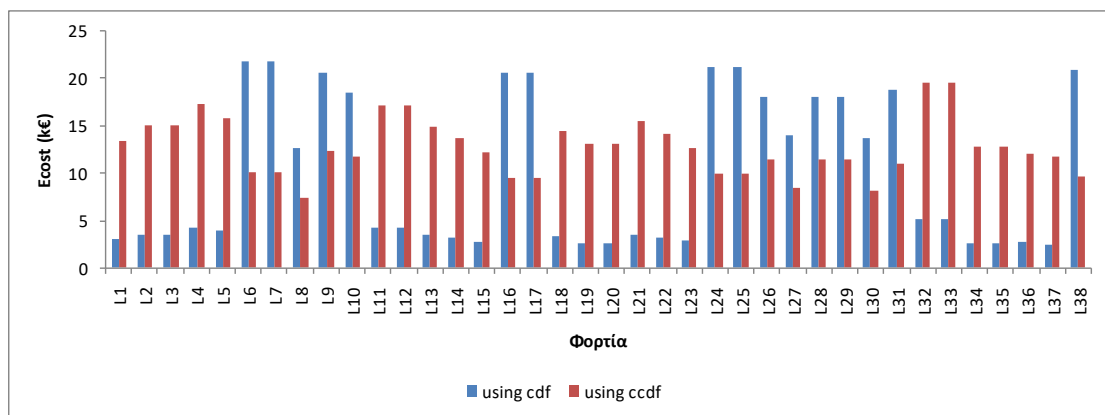
#### **4<sup>η</sup> Περίπτωση:** Υπολογισμός αναμενόμενου κόστους διακοπών καταναλωτών με χρήση της σύνθετης συνάρτησης βλάβης καταναλωτών CCDF και της συνάρτησης βλάβης καταναλωτών CDF

Σε αυτήν την περίπτωση υπολογίζεται το αναμενόμενο κόστος διακοπών καταναλωτών του δικτύου 29 κόμβων για κάθε φορτίο χωριστά αλλά και συνολικά για το δίκτυο διανομής με βάση τη σύνθετη συνάρτηση βλάβης καταναλωτών CCDF για δεδομένες θέσεις των διακοπών απομόνωσης (Πίνακας 6.16). Το κόστος επομένως των διακοπών απομόνωσης

(Switch Cost) παραμένει ίδιο και για τις δύο περιπτώσεις υπολογισμού του Ecost (με βάση τη συνάρτηση βλάβης των καταναλωτών CDF ανά τομέα και με βάση τη σύνθετη συνάρτηση βλάβης CCDF). Για τον υπολογισμό της σύνθετης συνάρτησης βλάβης καταναλωτών χρησιμοποιήθηκαν τα ποσοστά ζήτησης αιχμής φορτίου του Πίνακα 6.12. Τα αποτελέσματα όσον αφορά τη διαφοροποίηση του αναμενόμενου κόστους διακοπών καταναλωτών (Ecost) για το δίκτυο συνολικά αλλά και για κάθε φορτίο χωριστά παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.18 και στο Σχήμα 6.19 αντίστοιχα.

**Πίνακας 6.18:** Στοιχεία καταναλωτών για το δίκτυο 29 κόμβων.

Δίκτυο 29 κόμβων	Ecost (κ€)		Μεταβολή (%)
	με CDF	με CCDF	
Σενάριο 1	375,81	485,692	29,24



**Σχήμα 6.19:** Αναμενόμενο κόστος διακοπών καταναλωτών (Ecost) για κάθε φορτίο του δικτύου με χρήση α) της συνάρτησης βλάβης καταναλωτών CDF και β) της σύνθετης συνάρτησης βλάβης καταναλωτών CCDF για το Σενάριο 1.

Όπως φαίνεται από το Σχήμα 6.19 οι καταναλωτές που υφίστανται το υψηλότερο κόστος διακοπών καταναλωτών με βάση τη συνάρτηση βλάβης καταναλωτών ανά τομέα είναι οι εμπορικοί καταναλωτές (φορτία L6, L7, L24, L25, L38, L16, L17) αλλά και βιομηχανικοί καταναλωτές (φορτία L9, L31, L10, L26, L28, L29). Αντίθετα με βάση τη σύνθετη συνάρτηση βλάβης καταναλωτών το υψηλότερο κόστος διακοπών το υφίστανται οικιακοί καταναλωτές (L32, L33, L4, L11, L12, L5, L21).

Συνεπώς οι εμπορικοί και βιομηχανικοί καταναλωτές που παρουσιάζουν υψηλότερη συνάρτηση βλάβης καταναλωτών ανά τομέα εμφανίζουν το χαμηλότερο κόστος διακοπών όταν αυτό υπολογίζεται με βάση τη σύνθετη συνάρτηση βλάβης καταναλωτών. Αντίθετα οι υπόλοιποι καταναλωτές του δικτύου που ανήκουν στον οικιακό τομέα παρουσιάζουν υψηλότερο κόστος διακοπών (Ecost) όταν αυτό υπολογίζεται με βάση τη σύνθετη συνάρτηση βλάβης καταναλωτών CCDF. Έτσι προκύπτουν μεγάλες διαφορές στο κόστος για κάποια φορτία όταν αυτό υπολογίζεται με βάση το CDF ή το CCDF. Για παράδειγμα στα φορτία L19, L20 παρατηρείται αύξηση 408% στο Ecost με βάση το CCDF σε σύγκριση με το αντίστοιχο κόστος με βάση το CDF.

Τέλος παρατηρείται ότι τα κόστη που υπολογίζονται με βάση τη συνάρτηση βλάβης καταναλωτών CDF ανά τομέα μεταβάλλονται από 2,3 κ€ (φορτίο L37) μέχρι 21,8 κ€ (φορτία L6, L7) ενώ με βάση τη σύνθετη συνάρτηση βλάβης καταναλωτών CCDF μεταβάλλονται

από 7,4 κ€ (φορτίο L8) μέχρι 19,5 κ€ (για τα φορτία L32-L33). Οπότε σε αυτήν την περίπτωση τα κόστη διακοπών παρουσιάζουν περισσότερη ομοιομορφία μεταξύ των φορτίων. Όμως το συνολικό κόστος του δικτύου προκύπτει υψηλότερο κατά 29,24% σε σχέση με το αντίστοιχο που προκύπτει με βάση τη συνάρτηση βλάβης καταναλωτών CDF ανά τομέα σύμφωνα με τον Πίνακα 6.18.

#### 6.4 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Στον Πίνακα 6.19 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα βελτιστοποίησης όπως προέκυψαν από το GAMS και παρουσιάστηκαν στις Ενότητες 6.2.2.1-6.2.2.2 και 6.3.2.1-6.3.2.2 για τα δύο δίκτυα διανομής 14 και 29 κόμβων του συστήματος RBTS.

**Πίνακας 6.19:** Συγκεντρωτικά αποτελέσματα των 2 Σεναρίων για τα 2 δίκτυα διανομής.

Δίκτυα	Αποτελέσματα	Σενάριο 1	Σενάριο 2
Δίκτυο 14 κόμβων	Πλήθος διακοπών	10	8
	Ecost (κ€)	211,891	545,725
	Switch Cost (κ€)	55,046	44,037
	Total Cost (κ€)	266,937	589,762
Δίκτυο 29 κόμβων	Πλήθος διακοπών	24	14
	Ecost (κ€)	375,381	1032,321
	Switch Cost (κ€)	132,110	77,064
	Total Cost (κ€)	507,491	1109,386

Με βάση τα αποτελέσματα και τα διαγράμματα που παρουσιάστηκαν για τα δίκτυα 14 κόμβων και 29 κόμβων εξάγονται τα ακόλουθα συμπεράσματα.

Από τα 2 Σενάρια που μελετήθηκαν (Πίνακας 6.19) χαμηλότερο κόστος διακοπών εμφανίζεται όταν λαμβάνεται υπόψη η παροχή εναλλακτικής τροφοδοσίας μέσω ανοιχτών διακοπών ισχύος στο τέλος των γραμμών τροφοδοσίας, ενώ όσο μεγαλύτερο είναι το δίκτυο και άρα λαμβάνονται υπόψη περισσότερες θέσεις σφάλματος, τόσο περισσότερο αυξάνονται τα κόστη αξιοπιστίας του δικτύου. Έτσι προκύπτει υψηλότερο κόστος για το Σενάριο 1 και περισσότεροι διακόπτες από ότι για το Σενάριο 2. Τα συμπεράσματα αυτά γίνονται περισσότερο αντιληπτά όσο πιο πολύπλοκο είναι το δίκτυο διανομής και εξυπηρετεί περισσότερα φορτία.

Επίσης με βάση την ανάλυση ευαισθησίας, όσο αυξάνεται το πλήθος των διακοπών απομόνωσης, το αναμενόμενο κόστος διακοπών μειώνεται και συνεπώς το επίπεδο αξιοπιστίας του δικτύου βελτιώνεται. Όμως λαμβάνοντας υπόψη και το επενδυτικό κόστος το βέλτιστο επίπεδο αξιοπιστίας επιτυγχάνεται για μία μόνο τιμή, πέρα από την οποία, οποιαδήποτε άλλη λύση οδηγεί σε υψηλότερα κόστη συνολικά του δικτύου.

Επιπλέον, η συνάρτηση βλάβης καταναλωτών και ο ετήσιος ρυθμός αύξησης φορτίου επηρεάζουν σημαντικά το βέλτιστο πλήθος διακοπών απομόνωσης, η μεταβολή του οποίου είναι μη γραμμική καθώς αλλάζουν οι παράμετροι του δικτύου.

Τέλος, το είδος των καταναλωτών και το ποσοστό της ετήσιας αιχμής που ζητείται από κάθε τομέα καταναλωτών λαμβάνονται υπόψη όταν εφαρμόζεται η σύνθετη συνάρτηση βλάβης καταναλωτών CCDF για τον υπολογισμό του Ecost. Οι καταναλωτές των οποίων η συνάρτηση βλάβης καταναλωτών ανά τομέα είναι υψηλότερη από τους υπόλοιπους του

δικτύου, εμφανίζουν χαμηλότερο κόστος διακοπών  $E_{cost}$ , ενώ οι υπόλοιποι καταναλωτές έχουν υψηλότερο  $E_{cost}$  όταν αυτά υπολογίζονται με βάση το CCDF. Αυτό οφείλεται στην υπόθεση ότι οι περικοπές φορτίου κατανέμονται ανάλογα σε όλα τα είδη των καταναλωτών για τη δημιουργία της σύνθετης συνάρτησης βλάβης καταναλωτών.



## **ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

### **7.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε η βέλτιστη τοποθέτηση διακοπών απομόνωσης σε δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Για την επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης χρησιμοποιήθηκε το υπολογιστικό περιβάλλον του λογισμικού GAMS, ένα υπολογιστικό περιβάλλον που ορίζει, αναλύει και επιλύει προβλήματα βελτιστοποίησης. Το πρόβλημα της βέλτιστης τοποθέτησης διακοπών απομόνωσης μοντελοποιήθηκε ως πρόβλημα μεικτού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού ενώ για την επίλυση του μοντέλου χρησιμοποιήθηκε ο επιλυτής CPLEX.

Μελετήθηκαν δύο ακτινικά δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, ένα δίκτυο 14 κόμβων και έπειτα ένα δίκτυο 29 κόμβων του συστήματος RBTS. Και στα δύο δίκτυα διανομής εφαρμόστηκε το λογισμικό που αναπτύχθηκε και εξετάστηκε η εύρεση της βέλτιστης θέσης και του βέλτιστου πλήθους των διακοπών απομόνωσης. Η αντικειμενική συνάρτηση που επιλέχθηκε στη συγκεκριμένη περίπτωση, σχεδιάστηκε με σκοπό την ελαχιστοποίηση αφενός του αναμενόμενου κόστους διακοπών των καταναλωτών και αφετέρου του κόστους επένδυσης, εγκατάστασης, και του ετήσιου κόστους λειτουργίας και συντήρησης των διακοπών απομόνωσης, στοχεύοντας στη βελτίωση της αξιοπιστίας των δικτύων διανομής.

### **7.2 ΣΥΝΟΨΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΗΣ**

Οι διακόπτες απομόνωσης είναι κανονικά κλειστοί διακόπτες κατά τη φυσιολογική λειτουργία του δικτύου διανομής και χρησιμοποιούνται στις γραμμές των ΔΔΗΕ με στόχο την απομόνωση σφαλμάτων, τη μείωση της διάρκειας διακοπών καταναλωτών, τη μείωση του αριθμού των πελατών που επηρεάζονται κατά τη διάρκεια μόνιμων βλαβών και τη γρήγορη αποκατάσταση της τροφοδοσίας στο μεγαλύτερο πλήθος καταναλωτών μέσω γραμμών διασύνδεσης.

Δεδομένου ότι οι διακοπές τροφοδοσίας των καταναλωτών στα ΔΔΗΕ είναι αναπόφευκτες, η βέλτιστη τοποθέτηση και επιλογή του κατάλληλου πλήθους των διακοπών απομόνωσης αποτελεί σημαντικό παράγοντα στον σχεδιασμό των δικτύων διανομής. Το γεγονός αυτό υπογραμμίζει την ανάγκη θεώρησης του συνολικού κόστους αξιοπιστίας, όπου λαμβάνεται υπόψη εκτός από το επενδυτικό κόστος και η ζημιά που υφίστανται οι καταναλωτές κατά τη διάρκεια των σφαλμάτων στα ΔΔΗΕ.

Η συνάρτηση βλάβης καταναλωτών (CDF) ανά τομέα αναπαριστά το κόστος που προκύπτει από τη ζημιά που υφίστανται οι καταναλωτές εξαιτίας μιας διακοπής τροφοδοσίας σε συνάρτηση με τη διάρκεια της διακοπής για συγκεκριμένη σύνθεση καταναλωτών και προκύπτει από έρευνες πελατών. Η σύνθετη συνάρτηση βλάβης καταναλωτών (CCDF)

αναπαριστά το συνολικό κόστος διακοπών ως συνάρτηση της διάρκειας διακοπών για ένα συνδυασμό καταναλωτών που είναι συνδεδεμένοι σε μια συγκεκριμένη περιοχή εξυπηρέτησης ή στον ίδιο κόμβο. Έτσι προκύπτει το αναμενόμενο κόστος διακοπών καταναλωτών (*Ecost*), ένας δείκτης αξιοπιστίας ο οποίος λαμβάνει υπόψη την τοπολογία του δικτύου, τις διακοπές των καταναλωτών, την πυκνότητα φορτίου, τον ρυθμό βλαβών των στοιχείων του δικτύου, καθώς επίσης και τα διάφορα είδη των καταναλωτών και τις αντίστοιχες συναρτήσεις βλάβης τους.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάστηκαν τα οφέλη από την εγκατάσταση των διακοπών απομόνωσης λαμβάνοντας υπόψη όλους τους πιθανούς συνδυασμούς τοποθέτησης διακοπών και αξιολογώντας όλες τις πιθανές θέσεις σφάλματος σε όλα τα τμήματα ΔΔΗΕ, δηλαδή σφάλματα σε κύριες γραμμές διανομής, διακλαδώσεις ή μετασχηματιστές. Η διπλωματική εργασία είχε ως σκοπό τα παρακάτω:

- Εύρεση βέλτιστης θέσης και πλήθους των διακοπών απομόνωσης
- Ελαχιστοποίηση του αναμενόμενου κόστους διακοπών καταναλωτών (*Ecost*)
- Ελαχιστοποίηση του κόστους επένδυσης, εγκατάστασης, καθώς και του ετήσιου κόστους λειτουργίας και συντήρησης των διακοπών απομόνωσης (*Switch Cost*)
- Βελτίωση αξιοπιστίας δικτύων διανομής

Το λογισμικό που αναπτύχθηκε, εφαρμόστηκε στα δίκτυα διανομής 14 και 29 κόμβων, σε καθένα από τα οποία μελετήθηκαν δύο σενάρια:

Σενάριο 1: Θέσεις σφάλματος στις κύριες γραμμές διανομής, στους Μ/Σ διανομής και σε όλα τα τμήματα διακλαδώσεων με δυνατότητα εναλλακτικής τροφοδοσίας στο τέλος της κάθε γραμμής τροφοδοσίας.

Σενάριο 2: Θέσεις σφάλματος στις κύριες γραμμές διανομής, στους Μ/Σ διανομής και σε όλα τα τμήματα διακλαδώσεων, χωρίς τη δυνατότητα εναλλακτικής τροφοδοσίας στο τέλος της κάθε γραμμής τροφοδοσίας.

Επιπλέον προκειμένου να εξεταστεί η επίδραση διαφόρων παραμέτρων στη βέλτιστη τοποθέτηση των διακοπών απομόνωσης πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας για το Σενάριο 1 για τα δύο δίκτυα διανομής 14 και 29 κόμβων, εξετάζοντας 4 διαφορετικές περιπτώσεις σε καθένα από αυτά:

1<sup>η</sup> Περίπτωση: Μεταβολή του μέγιστου επιτρεπόμενου ορίου του πλήθους των διακοπών απομόνωσης

2<sup>η</sup> Περίπτωση: Μεταβολή της συνάρτησης βλάβης καταναλωτών CDF

3<sup>η</sup> Περίπτωση: Μεταβολή του ετήσιου ρυθμού αύξησης φορτίου

4<sup>η</sup> Περίπτωση: Υπολογισμός αναμενόμενου κόστους διακοπών καταναλωτών με χρήση της σύνθετης συνάρτησης βλάβης καταναλωτών CCDF και της συνάρτησης βλάβης καταναλωτών CDF

Από την εφαρμογή του λογισμικού που αναπτύχθηκε στα δίκτυα διανομής 14 και 29 κόμβων του συστήματος RBTS, και μέσα από τα σενάρια που μελετήθηκαν αλλά και από την ανάλυση ευαισθησίας που πραγματοποιήθηκε, εξάγονται τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Το αναμενόμενο κόστος διακοπών καταναλωτών (*Ecost*) μειώνεται όσο αυξάνεται το πλήθος των διακοπών απομόνωσης, σε αντίθεση με το επενδυτικό κόστος (*Switch Cost*) το οποίο αυξάνεται.



- Το συνολικό κόστος (Total Cost) του δικτύου μειώνεται με την αύξηση του πλήθους των διακοπών απομόνωσης μέχρι την εύρεση της βέλτιστης λύσης, στην οποία επιτυγχάνεται το βέλτιστο επίπεδο αξιοπιστίας, εκφρασμένο σε χρηματικές μονάδες.
- Το βέλτιστο επίπεδο αξιοπιστίας επιτυγχάνεται στο ελάχιστο της καμπύλης συνολικού κόστους (Total Cost), το οποίο αντιστοιχεί στη βέλτιστη λύση επένδυσης και στο σημείο αυτό ορίζεται και η ελάχιστη δυνατή ζημιά για τους καταναλωτές.
- Η τοποθέτηση των πρώτων διακοπών απομόνωσης παίζει σημαντικότερο ρόλο στη μείωση του αναμενόμενου κόστους διακοπών (Ecost) αλλά και του συνολικού κόστους των ΔΔΗΕ.
- Οι πρώτοι διακόπτες απομόνωσης τοποθετούνται πλησιέστερα σε εμπορικούς καταναλωτές οι οποίοι εμφανίζουν την υψηλότερη συνάρτηση βλάβης καταναλωτών CDF ανά τομέα, αλλά και σε κεντρικά σημεία του δικτύου.
- Μεγαλύτερο κόστος διακοπών προκύπτει για εμπορικούς και βιομηχανικούς καταναλωτές οι οποίοι υφίστανται διακοπή διάρκειας ίσης με τον χρόνο επισκευής του εκάστοτε τμήματος του δικτύου στο οποίο εμφανίστηκε βλάβη.
- Περισσότεροι διακόπτες τοποθετούνται σε γραμμές τροφοδοσίας που εμφανίζουν υψηλότερη πυκνότητα φορτίου σε σχέση με τις υπόλοιπες γραμμές του δικτύου.
- Όταν υπάρχει εναλλακτική τροφοδοσία στο τέλος μιας γραμμής τροφοδοσίας μέσω κανονικά ανοιχτού διακόπτη ισχύος και γραμμών διασύνδεσης, μειώνεται το κόστος διακοπών (Ecost) και το συνολικό κόστος του δικτύου (Total Cost) κατά περίπου 60% και 50%, αντίστοιχα, και στα δύο δίκτυα.
- Όταν δεν υπάρχει εναλλακτική τροφοδότηση, οι διακόπτες απομόνωσης που εγκαθίστανται για την απομόνωση των περιοχών του δικτύου σε περίπτωση σφάλματος συντελούν στην μείωση του χρόνου διακοπής των καταναλωτών που βρίσκονται μεταξύ του σημείου τροφοδοσίας και του πλησιέστερου διακόπτη πριν το σημείο του σφάλματος. Οι υπόλοιποι καταναλωτές επιβαρύνονται με υψηλότερα κόστη διακοπών (Ecost).
- Ένα πλήρως αυτοματοποιημένο δίκτυο δικαιολογείται μόνο όταν υπάρχουν πολύ υψηλά κόστη διακοπών καταναλωτών (Ecost).
- Η συνάρτηση βλάβης καταναλωτών επηρεάζει σημαντικά το βέλτιστο πλήθος διακοπών απομόνωσης, η μεταβολή του οποίου είναι μη γραμμική καθώς αλλάζουν οι παράμετροι του δικτύου. Αυτή η μη γραμμικότητα οφείλεται στην μη γραμμική εξάρτηση της συνάρτησης βλάβης των καταναλωτών σε σχέση με τη διάρκεια διακοπών αλλά και την τοπολογία του δικτύου.
- Τα κόστη Ecost και Switch Cost είναι συγκρίσιμα στις μικρότερες τιμές του πολλαπλασιαστική CDF.
- Οι καταναλωτές των οποίων η συνάρτηση βλάβης καταναλωτών (CDF) ανά τομέα είναι υψηλότερη από τους υπόλοιπους καταναλωτές του δικτύου, εμφανίζουν χαμηλότερο κόστος διακοπών Ecost, ενώ οι υπόλοιποι καταναλωτές έχουν υψηλότερα κόστη Ecost όταν αυτά υπολογίζονται με βάση τη σύνθετη συνάρτηση βλάβης καταναλωτών (CCDF). Σε αυτήν την περίπτωση τα κόστη διακοπών παρουσιάζουν περισσότερη ομοιομορφία μεταξύ των φορτίων αλλά το συνολικό κόστος του δικτύου προκύπτει υψηλότερο σε σχέση με το αντίστοιχο που προκύπτει με βάση τη συνάρτηση βλάβης καταναλωτών CDF ανά τομέα.
- Η τοποθέτηση των διακοπών απομόνωσης συντελεί στη βελτίωση της αξιοπιστίας.

Συμπερασματικά από τα αποτελέσματα που προέκυψαν και παρουσιάστηκαν στην εργασία, η βέλτιστη τοποθέτηση των διακοπών απομόνωσης σε ένα ΔΔΗΕ εξαρτάται από:

- Την τοπολογία του δικτύου
- Το είδος των καταναλωτών (οικιακός, εμπορικός, βιομηχανικός, αγροτικός τομέας)
- Τη διάρκεια διακοπών (χρόνος που απαιτείται για την αποκατάσταση τροφοδοσίας των καταναλωτών)
- Τον μέσο ρυθμό βλαβών των στοιχείων του δικτύου (γραμμές διανομής, Μ/Σ)
- Τον ετήσιο ρυθμό αύξησης φορτίου
- Τη συνάρτηση βλάβης καταναλωτών
- Τη θέση των φορτίων σε σχέση με το σημείο σφάλματος και με το σημείο τροφοδοσίας
- Το μέσο φορτίο που ζητείται σε κάθε κόμβο αλλά και σε κάθε γραμμή τροφοδοσίας συνολικά.

### 7.3 ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Στην παρούσα εργασία εξετάστηκε η βέλτιστη τοποθέτηση διακοπών απομόνωσης σε ακτινικά δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν και η ανάλυση ευαισθησίας αποδεικνύουν την αποτελεσματικότητα της μεθοδολογίας που εφαρμόστηκε και την ενδεχόμενη εφαρμογή της σε μεγαλύτερα και πιο σύνθετα δίκτυα τα οποία μπορεί να μην είναι απαραίτητα ακτινικά, αλλά βροχοειδή.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον θα είχε η μελέτη της επίδρασης των έξυπνων δικτύων στην αξιοπιστία του συστήματος. Πρόκειται για συστήματα διαχείρισης της διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας με αισθητήρες, συσκευές επικοινωνίας και έξυπνους ελέγχους που βρίσκονται σε συνεχή λειτουργία και παρέχουν στους διαχειριστές αυξημένη πληροφόρηση για την κατάσταση του δικτύου διανομής. Η έγκαιρη ανίχνευση ελαττωματικού εξοπλισμού οδηγεί στην αντικατάστασή του πριν προλάβει να συμβεί κάποια βλάβη στο σύστημα.

Επιπλέον, άλλη μελλοντική επέκταση της εργασίας μπορεί να θεωρηθεί η τροποποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης ώστε σε αυτήν να συμπεριλαμβάνεται η ελαχιστοποίηση και άλλων δεικτών αξιοπιστίας εκτός από τα κόστη διακοπών και επένδυσης με σκοπό την εύρεση της βέλτιστης θέσης και άλλων διακοπτικών μέσων σε ΔΔΗΕ, όπως διακοπών ισχύος και ασφαλειών, λαμβάνοντας υπόψη τη δομή του δικτύου, τις θέσεις των φορτίων, το πλήθος των καταναλωτών, τις αποστάσεις από ζυγούς ΥΤ/ΜΤ, αλλά και τα μήκη γραμμών, καθώς και φυσικά στοιχεία όπως η συχνότητα σφαλμάτων και η διάρκεια αποκατάστασης σφαλμάτων και επιδιόρθωσης βλαβών σε ΔΔΗΕ.

Μελλοντική επέκταση της παρούσας εργασίας αποτελεί η ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε ΔΔΗΕ ή η διείσδυση μονάδων διανεμημένης παραγωγής με σκοπό τη διερεύνηση της επίδρασης αυτών των παραγόντων στην αξιοπιστία ενός ΔΔΗΕ.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Κ. Βουρνάς, Γ. Κονταξής, *Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2001.
- [2] Π. Σ. Γεωργιλιάκης, *Σύγχρονα Συστήματα Μεταφοράς και Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας*. Ηλεκτρονικό Βιβλίο, Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών (ΣΕΑΒ), Αθήνα, 2015.  
Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα : <http://repository.kallipos.gr/handle/11419/2013>
- [3] T. Gonen, *Electric Power Distribution System Engineering*, New York: McGraw Hill, 1986.
- [4] ΔΕΔΔΗΕ - Βασικά μεγέθη του δικτύου ηλεκτρισμού, Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: <http://www.deddie.gr/el/to-diktuo-ilektrismou/vasika-megethi-tou-diktuou-ilektrismou>
- [5] Μ. Π. Παπαδόπουλος, *Δίκτυα Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας*, Τόμος Ι, Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 1994.
- [6] Γ. Κορρές, *Προστασία Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας*. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: <http://ecourses.dbnet.ntua.gr/14783.html>.
- [7] G. Levitin, S. Mazal-Tov, and D. Elmakis, “Genetic Algorithm for Optimal Sectionalizing in Radial Distribution Systems with Alternative Supply”, *Elect. Power Syst. Res.*, vol. 35, no. 3, pp. 149–155, 1995.
- [8] M. Daldal, *Optimal Allocation of Sectionalizing Switches in Rural Distribution Systems*, Dec. 2011.
- [9] A. Abiri-Jahromi, M. Fotuhi-Firuzabad, M. Parvania, and M. Mosleh, “Optimized sectionalizing switch placement strategy in distribution systems”, *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 27, no. 1, pp. 362–370, Jan. 2012.
- [10] L. Goel, R. Billinton, and R. Gupta, “Basic Data and Evaluation of Distribution System Reliability Worth,” in *Proc. IEEE Wescanex 91 Conf.*, Canada, 1991.
- [11] R. Billinton and R. N. Allan, *Reliability evaluation of power systems*, 2nd ed. New York: Plenum Press, 1984.
- [12] R. Allan and R. Billinton, “Probabilistic assessment of power systems,” in *Proc. IEEE*, vol. 88, no. 2, pp. 140-162, Feb. 2000.
- [13] G. Levitin, S. Mazal-Tov, and D. Elmakis, “Optimal sectionalizer allocation in electric distribution systems by genetic algorithm,” *Elect. Power Syst. Res.*, vol. 31, no. 2, pp. 97–102, Nov. 1994.
- [14] Ε. Ν. Διαλυνάς, *“Ανάλυση Αξιοπιστίας Τεχνολογικών Συστημάτων,”* Αθήνα: Εκδόσεις Συμμεών, 1998.
- [15] P. Mazidi and G. N. Sreenivas, “Reliability analysis of a radial distributed generation distribution system”, *Int. J. Elect. Electron. Eng.*, vol. 3 no. 2, pp. 82–88, 2013.
- [16] IEEE Guide for Electric Power Distribution Reliability Indices, IEEE Std 1366-2003 (Revision of IEEE Std 1366–1998), USA, May 2004.
- [17] R. Billinton, “Evaluation of reliability worth in an electric power system,” *Reliab. Eng. Syst. Safety*, vol. 46, pp. 15–23, 1994.

- [18] J. M. Rao, P. V. N. Prasad, and G. T. R. Das, "Customer outage cost evaluation in electric power systems," *ARNP J. Eng. Applied Sciences*, vol. 5, no. 8, pp. 88–96, Aug. 2010.
- [19] G. Wacker and R. Billinton, "Customer cost of electric service interruptions," in *Proc. IEEE*, vol. 77, no. 6, pp. 919–930, 1989.
- [20] E. N. Dialynas, S. M. Megaloconomos, and V.C Dali, "Interruption cost analysis for the electrical power customers in Greece," in *Proc. CIRED*, 2001.
- [21] G. Tollefson, R. Billinton, R. G. Wacker, E. Chan, and J. Aweya, "A Canadian Customer Survey to Assess Power System Reliability Worth," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 9, no. 1, pp. 443–450, Feb. 1994.
- [22] P. J. Balducci, J. M. Roop, L. A. Schienbein, J. G. DeSteeze, and M. R. Weimar, "Electrical Power Interruption Cost Estimates for Individual Industries, Sectors, and U.S. Economy," U.S. Department of Energy, Springfield, VA DE-AC06-76RL01830, Feb. 2002.
- [23] R.F. Ghajar and R. Billinton, "Economic costs of power interruptions: a consistent model and methodology," *Elect. Power Energy Systems*, vol. 28, pp. 29-35, 2006.
- [24] R. Billinton and S. Jonnavithula, "Optimal switching device placement in radial distribution systems," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 11, no. 3, pp. 1646–1651, Jul. 1996.
- [25] Π. Κάπρος, *Μοντέλα Μαθηματικού Προγραμματισμού*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2008.
- [26] E. Castillo, A. J. Conejo, P. Pedregal, R. Garcia, and N. Alguacil, *Building and Solving Mathematical Programming Models in Engineering and Science*. New York: John Wiley & Sons, 2002.
- [27] A. Moradi and M. Fotuhi-Firuzabad, "Optimal switch placement in distribution systems using trinary particle swarm optimization algorithm," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 23, no. 1, pp. 271–279, Jan. 2008.
- [28] A. Moradi, M. Fotuhi-Firuzabad, and M. Rashidi- Nejad, "A reliability cost/worth approach to determine optimum switching placement in distribution systems," *IEEE/Power Eng. Soc. Transm. Distrib. Conf. Exhibit.: Asia Pacific*, 2005.
- [29] V. Miranda, "Using fuzzy reliability in a decision aid environment for establishing interconnection and switching location policies," in *Proc. CIRED*, 1991.
- [30] GAMS Development Corporation, *McCarl Expanded GAMS User Guide*, Feb. 2016 Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: <https://www.gams.com/help/index.jsp>
- [31] R. E. Rosenthal, *GAMS A User's Guide*. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: <http://www.gams.com/dd/docs/bigdocs/GAMSUsersGuide.pdf>
- [32] GAMS Development Corporation, *GAMS - The Solver Manuals*, Washington, DC, USA, Jul. 2016. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: <http://www.gams.com/help/topic/gams.doc/solvers/allsolvers.pdf>
- [33] R. N. Allan, R. Billinton, I. Sjarief, L. Goel, and K. S. So, "A reliability test system for educational purposes - Basic distribution system data and results," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 6, no. 2, pp. 813–820, May 1991.
- [34] R. Billinton and S. Jonnavithula, "A Test System for Teaching Overall Power System Reliability Assessment," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 11, no. 4, pp. 1670–1676, Nov. 1996.

