



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**Ρύθμιση Ηλεκτρονόμων Υπερέντασης-Κατεύθυνσης για  
Προσαρμοστικά Συστήματα Προστασίας, με χρήση  
της Υβριδικής μεθόδου βελτιστοποίησης PSO-LP**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

**Ταμάς Σ. Κουρασβίλι**

**Επιβλέπων:** Γεώργιος Κορρές  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Απρίλιος 2014





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**Ρύθμιση Ηλεκτρονόμενων Υπερέντασης-Κατεύθυνσης για  
Προσαρμοστικά Συστήματα Προστασίας, με χρήση  
της Υβριδικής μεθόδου βελτιστοποίησης PSO-LP**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

**Ταμάζ Σ. Κουρασβίλι**

**Επιβλέπων:** Γεώργιος Κορρές  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή την <sup>η</sup> Απριλίου 2014

.....  
Γεώργιος Κορρές  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Κωνσταντίνος Βουράς  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Πάυλος Γεωργιάκης  
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Απρίλιος 2014

.....  
**Ταμάζ Σ. Κουρασβίλι**

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

Copyright © Ταμάζ Σ. Κουρασβίλι, 2014.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

*Στον πατέρα μου, που έφυγε πρόωρα από τη ζωή μας*



## Περίληψη

Τα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας (Σ.Η.Ε.) έχουν ως σκοπό την αδιάλειπτη παροχή Ηλεκτρικής Ενέργειας στους καταναλωτές, με όσο το δυνατόν πιο αξιόπιστο, ασφαλές και οικονομικό τρόπο. Για να καλυφθούν οι προαναφερθείσες απαιτήσεις, απαιτούνται σύγχρονα και πολύπλοκα συστήματα προστασίας. Με την πολυπλοκότητα των συστημάτων προστασίας να αυξάνει ολοένα και περισσότερο, σε συνδυασμό με τις εξελιγμένες δυνατότητες των σύγχρονων ψηφιακών ηλεκτρονόμων, δημιουργείται η ανάγκη χρήσης εξομοιωτών στους οποίους θα ελέγχονται τα καινούρια σχήματα προστασίας, πριν εφαρμοστούν στο Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας. Επομένως, η ρύθμιση των στοιχείων προστασίας ενός Σ.Η.Ε. είναι ζωτικής σημασίας για την εύρυθμη και ομαλή λειτουργία του συστήματος.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιείται η Ρύθμιση των Ηλεκτρονόμων Υπερέντασης με στοιχεία Κατεύθυνσης, με χρήση υβριδικής μεθόδου βελτιστοποίησης, η οποία συνδυάζει από τη μέθοδο *Βελτιστοποίηση Σμήνους Σωματιδίων* και τον *Γραμμικό Προγραμματισμό*. Πιο συγκεκριμένα, υπολογίζονται οι τιμές των δύο παραμέτρων που διαθέτει ο κάθε ηλεκτρονόμος υπερέντασης, δηλαδή το ρεύμα ρύθμισης (pick up current) και η χρονική σταθερά (Time Dial Setting), οι οποίες ελαχιστοποιούν το συνολικό χρόνο λειτουργία τους.

Στην αρχή της εργασίας αναφέρεται το γενικό θεωρητικό υπόβαθρο προστασίας και τα προβλήματα που δημιουργούνται στα σύγχρονα δίκτυα διανομής, με έντονη διεύθυνση μονάδων Διεσπαρμένης Παραγωγής. Στην συνέχεια, περιγράφεται και διατυπώνεται το πρόβλημα συνεργασίας των ηλεκτρονόμων υπερέντασης. Ακολούθως, γίνεται εκτενής περιγραφή της κλασικής μεθόδου Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων και της προτεινόμενης «υβριδικής» μεθόδου βελτιστοποίησης.

Οι υπολογισμοί που προηγούνται της εφαρμογής της βελτιστοποίησης, είναι η ανάλυση ροών φορτίου και η ανάλυση βραχυκυκλωμάτων, οι οποίες υπολογίζονται με χρήση του λογισμικού πακέτου NEPLAN. Στη συνέχεια, σχεδιάζεται και υλοποιείται η μέθοδος βελτιστοποίησης σε περιβάλλον Matlab και πραγματοποιείται η εφαρμογή της σε τρία διαφορετικά συστήματα. Πιο συγκεκριμένα, εξετάστηκαν δύο πρότυπα συστήματα της IEEE των 14 και 39 ζυγών και ένα Δίκτυο Διανομής με Διεσπαρμένη Παραγωγή, το οποίο δημιουργήθηκε κατάλληλα ώστε να μελετηθούν διάφορες περιπτώσεις. Τέλος, για κάθε εξεταζόμενο σύστημα αξιολογούνται τα αποτελέσματα και εξάγονται τα απαραίτητα συμπεράσματα.

**Λέξεις Κλειδιά**

Προστασία Σ.Η.Ε., Ηλεκτρονόμος υπερέντασης κατεύθυνσης, συνεργασία ηλεκτρονόμων, ρεύμα ρύθμισης, χρονική σταθερά, Βελτιστοποίηση Σμήνους Σωματιδίων, Γραμμικός Προγραμματισμός, Δίκτυα Διανομής, Διεσπαρμένη Παραγωγή. Συστήματα Προσαρμοστικής Προστασίας.



# Abstract

The purpose of an electrical power system is to generate and supply electrical energy to consumers, in a safe, reliable and economic way. In order to meet the needs of Power Systems, in reliability and safety, protection systems tend to be more and more complex and sophisticated. The constant increase in protection system's complexity, combined with the advanced features of modern relays, brings the need of using a simulator, as a test system, in order to confirm the proper functionality of protection schemes, before their application on Power Systems. Therefore, the correct configuration of the Power System's protection devices is vital for its proper functioning.

In this thesis, a configuration of Directional Overcurrent Relay is developed using a hybrid optimization approach, which consists of the Particle Swarm Optimization method combined with Linear Programming. In particular, the two values of each Relay are optimized in order to be proper set. These values are the pick-up current and the Time Dial Setting.

In the beginning of this study, a general theoretical background regarding the Power Systems protection is presented, as well as, the various problems which might occur when distributed energy resources become a part of a distribution network. In addition, the problem of coordination of overcurrent relays it is outlined. Subsequently, an extensive analysis of the basic Particle Swarm Optimization method and the proposed "hybrid" optimization method are presented.

The calculations preceding the application of the optimization method, are the load flow and the short circuit analysis, which are calculated using NEPLAN software suite. Moreover, the optimization method is designed and implemented using MATLAB and is applied in three different systems. More specifically, two standard IEEE systems, regarding the 14 and 39 bus, along with one distribution network with distributed generation, which is designed properly in order to study different cases, are studied. Finally, the results for each system under study are evaluated and the necessary conclusions are extracted.

## Keywords

Power System Protection, Directional Overcurrent Relay, Relay Coordination, pick up current, time dial setting (TDS), Particle Swarm Optimization, Linear Programming, Distribution Networks, Distributed Generation, Adaptive protection systems.



## Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του Προπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου υπό την επίβλεψη του Καθηγητή Ε.Μ.Π. Γεωργίου Κορρέ.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερος τον κ. Κορρέ για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, καθώς και για την πολύτιμη συμβολή και βοήθεια του στην περάτωση της. Ήταν πάντα διαθέσιμος και ιδιαίτερα συνεργάσιμος, παρά την έλλειψη χρόνου. Επίσης, ευχαριστώ τον υποψήφιο διδάκτορα Βασίλειο Παπασπηλιωτόπουλο για τον χρόνο του και τις επισημάνσεις του προκειμένου να ολοκληρωθεί η εργασία.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την οικογένεια μου και τους φίλους μου για την αμέριστη συμπαράσταση και τη στήριξη τους όλα αυτά τα χρόνια.

Ταμάζ Ανδρέας Κουρασβίλι  
Αθήνα, 5 Μαΐου 2014



# Περιεχόμενα

Περίληψη . . . . .	7
Abstract . . . . .	9
Ευχαριστίες . . . . .	11
Λίστα Σχημάτων . . . . .	15
Λίστα Πινάκων . . . . .	17
Συντομογραφία . . . . .	19
<b>Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή στην προστασία Σ.Η.Ε.</b> . . . . .	<b>21</b>
1.1. Εισαγωγή . . . . .	21
1.1.1. Έννοια της προστασίας . . . . .	21
1.1.2. Ο ρόλος της προστασίας σε ένα Σ.Η.Ε. . . . .	21
1.1.3. Βασικές απαιτήσεις προστασίας . . . . .	22
1.1.4. Ζώνες προστασίας - Πρωτεύουσα και Εφεδρική προστασία . . . . .	23
1.1.5. Είδη σφαλμάτων (Type of faults) . . . . .	24
1.1.6. Ηλεκτρονόμοι (Relays) . . . . .	24
1.1.7. Μετασχηματιστές έντασης και τάσης . . . . .	27
1.2. Είδη προστασίας . . . . .	28
1.2.1. Διαφορική προστασία . . . . .	29
1.2.2. Προστασία αποστάσεως . . . . .	30
1.2.3. Προστασία κατεύθυνσης . . . . .	32
1.2.4. Προστασία υπερέντασης με ή χωρίς στοιχεία κατεύθυνσης . . . . .	35
<b>Κεφάλαιο 2. Δίκτυα Διανομής με Διεσπαρμένη Παραγωγή</b> . . . . .	<b>39</b>
2.1. Διεσπαρμένη Παραγωγή . . . . .	39
2.2. Το μικροδίκτυο . . . . .	40
2.2.1. Ορισμός του μικροδικτύου . . . . .	40
2.2.2. Προκλήσεις στα μικροδίκτυα . . . . .	41
2.2.3. Προβλήματα στα μικροδίκτυα . . . . .	42
2.2.4. Θέματα προστασίας . . . . .	43
2.3. Θεωρία Νησιδοποίησης . . . . .	47
2.3.1. Ορισμός Νησιδοποίησης . . . . .	47
2.3.2. Αιτίες πρόκλησης του φαινομένου της νησιδοποίησης . . . . .	47
2.3.3. Η προστασία αντι-νησιδοποίησης . . . . .	48
2.4. Προσαρμοστική προστασία στα Δίκτυα Διανομής με ΔΠ . . . . .	49
2.4.1. Εισαγωγή . . . . .	49
2.4.2. Off-line ανάλυση . . . . .	50
2.4.3. On-line λειτουργία . . . . .	51

2.4.4. Διαδικασία για τον καθορισμό των ζωνών . . . . .	51
<b>Κεφάλαιο 3. Συνεργασία των ηλεκτρονόμων υπερέντασης . . . . .</b>	<b>53</b>
3.1. H/N υπερέντασης . . . . .	53
3.2. Πρόβλημα Συνεργασίας . . . . .	54
3.3. Περιγραφή του προβλήματος συνεργασίας . . . . .	54
3.4. Διατύπωση του προβλήματος συνεργασίας . . . . .	55
3.4.1. Αντικειμενική συνάρτηση (objective function) . . . . .	55
3.4.2. Περιορισμοί (Constraints) . . . . .	56
3.5. Τρόποι ρύθμισης ηλεκτρονόμων υπερέντασης . . . . .	58
3.5.1. Παραδοσιακές μέθοδοι τεχνικών βελτιστοποίησης . . . . .	58
3.5.2. Τεχνητή νοημοσύνη και αλγόριθμος εμπνευσμένος από φύση . . . . .	59
3.6. Περιγραφή της μεθόδου Βελτιστοποίηση Σμήνους Σωματιδίων . . . . .	62
3.6.1. Εισαγωγή . . . . .	62
3.6.2. Η λειτουργία του αλγορίθμου PSO . . . . .	63
3.6.3. Ολικό και προσωπικό βέλτιστο (Global best και Personal Best) . . . . .	64
3.6.4. Παράμετροι ελέγχου της μεθόδου PSO . . . . .	66
3.6.5. Ψευδο-κώδικας και το διάγραμμα ροής του βασικού αλγορίθμου PSO . . . . .	67
<b>Κεφάλαιο 4. Προτεινόμενη μέθοδος βελτιστοποίησης . . . . .</b>	<b>71</b>
4.1. Εισαγωγή . . . . .	71
4.2. Περιγραφή προτεινόμενης μεθόδου για την επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης . . . . .	71
4.3. Περιγραφή Συναρτήσεων του λογισμικού που αναπτύχθηκε . . . . .	74
<b>Κεφάλαιο 5. Εφαρμογή . . . . .</b>	<b>77</b>
5.1. Εισαγωγή . . . . .	77
5.2. Σύστημα 14 ζυγών της IEEE . . . . .	78
5.3. Σύστημα 39 ζυγών της IEEE . . . . .	83
5.4. Δίκτυο MT 5 ζυγών . . . . .	90
5.4.1. Περίπτωση 1 (χωρίς ΔΠ στο δίκτυο) . . . . .	90
5.4.2. Περίπτωση 2 (με ΔΠ στο δίκτυο) . . . . .	92
5.4.3. Περίπτωση 3 (κατάσταση νησιδοποίησης) . . . . .	95
<b>Κεφάλαιο 6. Επίλογος . . . . .</b>	<b>99</b>
6.1. Σύνοψη . . . . .	99
6.2. Συμπεράσματα . . . . .	99
6.3. Μελλοντικές επεκτάσεις . . . . .	100
<b>Βιβλιογραφία . . . . .</b>	<b>101</b>

## Λίστα Σχημάτων

1.1	Χωρισμός Σ.Η.Ε. σε κλειστές και ανοικτές ζώνες προστασίας [3] . . . . .	23
1.2	Ηλεκτρομηχανικός ηλεκτρονόμος επαγωγικού τύπου με το μαγνητικό του κύκλωμα . . . . .	25
1.3	Δομή στατικού ηλεκτρονόμου υπερέντασης και κυματομορφές διαφόρων μεγεθών του. . . . .	26
1.4	Μπλοκ διάγραμμα βασικών λειτουργιών ψηφιακών ηλεκτρονόμων. . . . .	26
1.5	Είδη μετασχηματιστών . . . . .	27
1.6	Σύνδεσμολογία διαφορικού H/N . . . . .	29
1.7	Χαρακτηριστική λειτουργίας ηλεκτρονόμου διαφορικής προστασίας [31] . . . . .	30
1.8	Παράδειγμα εφαρμογής H/N αποστάσεως για προστασία γραμμής μεταφοράς [5] . . . . .	30
1.9	Οι τυπικές χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας των H/N αποστάσεως . . . . .	31
1.10	Χαρακτηριστική λειτουργίας H/N απόστασης τύπου τετραπλεύρου (quadrilateral distance relay) . . . . .	32
1.11	Σύνδεσμολογία ηλεκτρονόμου κατεύθυνσης με πόλωση τάσης [5] . . . . .	33
1.12	Σύνδεσμολογία ηλεκτρονόμου κατεύθυνσης με πόλωση έντασης [5] . . . . .	34
1.13	Χαρακτηριστική λειτουργίας ηλεκτρονόμων κατεύθυνσης [24] . . . . .	34
1.14	Χαρακτηριστική λειτουργίας στιγμιαίου ηλεκτρονόμου υπερέντασης . . . . .	36
1.15	Χαρακτηριστική λειτουργίας ηλεκτρονόμου υπερέντασης σταθερού χρόνου . . . . .	36
1.16	Οικογένεια χαρακτηριστικών λειτουργίας ηλεκτρονόμου υπερέντασης αντιστρόφου χρόνου . . . . .	37
1.17	Χαρακτηριστική λειτουργίας ηλεκτρονόμων υπερέντασης με στοιχείο κατεύθυνσης [24] . . . . .	37
2.1	Τυπικό Δίκτυο Διανομής με ΔΠ [8] . . . . .	41
2.2	Συνεισφορά της ΔΓ στο σφάλμα . . . . .	44
2.3	Περίπτωση «reduction of reach» του H/N αποστάσεως . . . . .	45
2.4	Δύο περιπτώσεις αποτυχίας των συστημάτων προστασίας [12] . . . . .	46
2.5	Προσαρμοστικό σύστημα προστασίας στο δίκτυο διανομής με ΔΠ [8] . . . . .	49
2.6	Δομή ενός πίνακα γεγονότων [8] . . . . .	50
2.7	Φάσεις αλγορίθμου κατά την on-line λειτουργία [8] . . . . .	51
2.8	Σύστημα διανομής που χωρίζεται σε ζώνες σύμφωνα με την ικανότητα της ΔΠ [15] . . . . .	52
2.9	Αποκεντρωμένη αρχιτεκτονική με ένα κέντρο ελέγχου και τρεις μονάδες ΔΑΕ [15] . . . . .	52
3.1	Απεικόνιση λειτουργίας προστασιών στα δίκτυα διανομής [16] . . . . .	53
3.2	Χρόνοι λειτουργίας και σφάλματα . . . . .	56
3.3	χρόνος λειτουργίας H/N ως συνάρτηση της απόστασης από το σφάλμα [23] . . . . .	57
3.4	Συμβατικές μέθοδοι για εύρεση βελτίστου . . . . .	58
3.5	Κατηγορίες υπολογιστικής νοημοσύνης με διαφορετικές τεχνικές [16] . . . . .	60
3.6	Έξυπνος έλεγχος και παρακολούθηση [16] . . . . .	60
3.7	Διάφορες μέθοδοι για coordination H/N υπερέντασης [16] . . . . .	61
3.8	Συσχέτιση μεταξύ συστημάτων [16] . . . . .	62
3.9	Συμπεριφορά των ζωικών ομάδων . . . . .	62
3.10	Διάνυσμα κίνησης του σωματιδίου στο χώρο αναζήτησης . . . . .	66

3.11	Διάγραμμα ροής του βασικού αλγορίθμου PSO . . . . .	68
4.1	Αναπαράσταση σωματιδίων και μεταβλητών . . . . .	72
4.2	Διάγραμμα κατανοήσης εξαρτήσεων PSO και LP . . . . .	72
4.3	Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου PSO-LP . . . . .	74
4.4	Διάγραμμα δομής λογισμικού . . . . .	76
5.1	Κύκλος διαδικασίας ρύθμισης H/N . . . . .	77
5.2	Σύστημα 14 ζυγών της IEEE [30] . . . . .	79
5.3	Σύστημα 14 ζυγών της IEEE στο NEPLAN . . . . .	80
5.4	Σύστημα 39 ζυγών της IEEE . . . . .	83
5.5	Σύστημα 39 ζυγών της IEEE στο NEPLAN . . . . .	84
5.6	Δίκτυο MT 5 ζυγών . . . . .	90
5.7	Δίκτυο MT 5 ζυγών χωρίς ΔΠ (Περίπτωση 1) . . . . .	91
5.8	Καμπύλες λειτουργίας H/N (Περίπτωση 1) . . . . .	92
5.9	Δίκτυο MT 5 ζυγών με ΔΠ (Περίπτωση 2) . . . . .	93
5.10	3φ σφάλμα στον ζυγό 1.2 (Περίπτωση 2) . . . . .	94
5.11	3φ σφάλμα στον ζυγό 2.1 (Περίπτωση 2) . . . . .	94
5.12	Καμπύλες λειτουργίας H/N (Περίπτωση 2) . . . . .	95
5.13	Κατάσταση νησιδοποίησης (Περίπτωση 3) . . . . .	96
5.14	Καμπύλες λειτουργίας H/N (Περίπτωση 3) . . . . .	97
5.15	3φ σφάλμα στον ζυγό 1.2 (Περίπτωση 3) . . . . .	98
5.16	3φ σφάλμα στο 50% της εφεδρικής γραμμής (Περίπτωση 3) . . . . .	98



## Λίστα Πινάκων

1.1	Συνδεσμολογίες H/N κατεύθυνσης . . . . .	35
2.1	Επιπτώσεις των Διεσπαρμένων Πηγών Ενέργειας στα συστήματα προστασίας . . . . .	43
5.1	Αποτελέσματα ανάλυσης από NEPLAN και Matlab του συστήματος 14 ζυγών . . . . .	81
5.2	Τα ζεύγη H/N και οι χρόνοι λειτουργίας τους του συστήματος 14 ζυγών . . . . .	82
5.3	Αποτελέσματα ανάλυσης από NEPLAN και Matlab του συστήματος 39 ζυγών . . . . .	85
5.4	Τα ζεύγη H/N και οι χρόνοι λειτουργίας τους του συστήματος 39 ζυγών . . . . .	88
5.5	Αποτελέσματα ανάλυσης περίπτωσης 1 . . . . .	91
5.6	Αποτελέσματα ανάλυσης περίπτωσης 2 . . . . .	93
5.7	Αποτελέσματα ανάλυσης περίπτωσης 3 . . . . .	96



## Συντομογραφία

ΔΑΕ	Διακόπτης Αυτόματης Επαναφοράς-
ΔΔ	Δίκτυο Διανομής
ΔΙ	Διακόπτης Ισχύος
ΔΠ	Διεσπαρμένη Παραγωγή
ΔΠΕ	Διεσπαρμένη Πηγή Ενέργειας
ΓΠ	Γραμμικός Προγραμματισμός
Η/Ν	Ηλεκτρονόμος
Μ/Σ	Μετασχηματιστής
Σ.Η.Ε.	Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας
ΣΚΣ	Σημείο Κοινής Σύνδεσης
CB	Circuit Breaker
CT	Current Transformer
CTI	Coordination Time Interval
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
LP	Linear programming
MCC	Microgrid Central Controller
MINLP	Mixed Integer Nonlinear Programming
PSO	Particle Swarm Optimization
SCADA	Supervisory Control And Data Acquisition
TDS	Time Dial Setting



## Κεφάλαιο 1

# Εισαγωγή στην προστασία Σ.Η.Ε.

## 1.1. Εισαγωγή

### 1.1.1. Έννοια της προστασίας

Η τεχνολογία στον τομέα της ηλεκτρικής ισχύος εξελίσσεται ταχύτατα τα τελευταία χρόνια και συμβάλλει στην οικονομική σχεδίαση και κατασκευή. Επιπλέον τα συστήματα ισχύος είναι αξιόπιστα και μπορούν να ικανοποιήσουν τη συνεχή αύξηση της ζήτησης της ηλεκτρικής ενέργειας. Η αξιοπιστία οφείλεται στην προστασία και στον έλεγχο των συστημάτων ενέργειας. Η πρόοδος στο σχεδιασμό και στην ανάπτυξη των δύο αυτών «πεδίων» συμβαδίζει υποχρεωτικά με τις εξελίξεις στο σχεδιασμό του βασικού εξοπλισμού της βιομηχανίας όπως γεννήτριες, μετασχηματιστές, διακόπτες, εναέριες γραμμές και υπόγεια καλώδια. Πράγματι, η πρόοδος της προστασίας και του ελέγχου είναι απαραίτητη προϋπόθεση για την αποτελεσματική λειτουργία και τη συνεχή ανάπτυξη των συστημάτων παροχής ενέργειας στο σύνολό τους.

Η λέξη «προστασία» χρησιμοποιείται για να περιγράψει όλη την ιδέα της προστασίας ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Ο όρος «προστατευτικός εξοπλισμός» χρησιμοποιείται με την ευρεία του έννοια, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί και με τη στενή έννοια ως των πραγματικών στοιχείων που χρησιμοποιούνται για την επίτευξη της επιθυμητής προστασίας.

### 1.1.2. Ο ρόλος της προστασίας σε ένα Σ.Η.Ε.

Αρχικά πρέπει να σημειωθεί ότι χωρίς τη διακριτική προστασία θα ήταν αδύνατο να λειτουργήσει ένα σύγχρονο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Η προστασία είναι υποχρεωτική ώστε να απομονωθεί όσο το δυνατόν συντομότερα η εσφαλμένη περιοχή. Αν το στοιχείο παραμένει συνδεδεμένο στο δίκτυο τότε όλο το σύστημα τίθεται σε κίνδυνο επειδή:

1. μπορεί να αποσυγχρονιστούν κάποιες γεννήτριες ενός ή πολλών διαφορετικών σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και να προκληθεί κατάρρευση του συστήματος,
2. υπάρχει ο κίνδυνος καταστροφής του προσβαλλόμενου εξοπλισμού
3. μπορεί να χαθεί η τροφοδοσία σε υγιή μέρη του Σ.Η.Ε.

Υπάρχει και μια άλλη επίπτωση που δεν είναι απαραίτητα επικίνδυνη για το σύστημα αλλά είναι σημαντική για τους καταναλωτές. Πρόκειται για τον κίνδυνο των σύγχρονων κινητήρων, οι οποίοι σε μεγάλες βιομηχανικές εγκαταστάσεις μπορούν να προκαλέσουν απώλεια της παραγωγής και διακοπή σημαντικών διαδικασιών. Ο εξοπλισμός προστασίας μαζί με τους διακόπτες ισχύος μπορούν να αποτρέψουν τους παραπάνω κινδύνους. Αυτό συμβαίνει εξ' ολοκλήρου στα δίκτυα

υψηλής τάσης ή στα συστήματα μετάδοσης. Στα συστήματα διανομής χαμηλής τάσης η κύρια λειτουργία της προστασίας είναι να διατηρηθεί η συνεχής τροφοδοσία.

Προφανώς ο στόχος αυτός δεν μπορεί να επιτευχθεί μόνο με την προστασία. Ακόμα, το Σ.Η.Ε. και τα δίκτυα διανομής πρέπει να σχεδιάζονται έτσι ώστε να υπάρχουν περισσότερες από μία οδοί τροφοδότησης των φορτίων (η επαρκής παραγωγή μπορεί να θεωρηθεί δεδομένη), και τουλάχιστον δύο πηγές τροφοδοσίας σε κάθε σταθμό διανομής. Υπάρχουν ορισμένοι συμβατικοί τρόποι εξασφάλισης εναλλακτικής παροχής, αλλά εάν πλήρης πλεονέκτημα είναι να ληφθεί παροχή τους (πάντα μια δαπανηρή ύλη) η προστασία πρέπει να είναι εξαιρετικά επιλεκτική στη λειτουργία του. Υπάρχουν ορισμένοι συμβατικοί τρόποι εξασφάλισης εναλλακτικών πηγών, αλλά αν αξιοποιηθεί πλήρως η παροχή τους (ζήτημα δαπάνης), η προστασία θα πρέπει να είναι εξαιρετικά επιλεκτική στη λειτουργία της. Γι' αυτό πρέπει να υπάρχει ικανότητα «αναγνώρισης» του ελαττωματικού στοιχείου του δικτύου και απομόνωση αυτού ώστε να συνεχιστεί η ομαλή λειτουργία αν είναι δυνατό. Με λίγες εξαιρέσεις, η ανίχνευση και η ενεργοποίηση του κυκλώματος «αποσύνδεσης» ενός στοιχείου που προκαλεί πρόβλημα στο δίκτυο αποτελεί πολύ απλό θέμα. Επειδή πολλά στοιχεία ενός δικτύου π.χ. γεννήτριες, μετασχηματιστές κ.ά. συνήθως επηρεάζονται από κάποια δυσλειτουργία του δικτύου υπάρχουν διάφοροι τύποι ηλεκτρονόμων.[6]

### 1.1.3. Βασικές απαιτήσεις προστασίας

Μία συσκευή προστασίας έχει τρεις βασικές λειτουργίες/καθήκοντα:

1. Διασφάλιση συνεχής τροφοδότησης όλου του συστήματος.
2. Ελαχιστοποίηση ζημιών και κόστους επισκευών, όπου ανιχνεύει ένα σφάλμα.
3. Διασφάλιση της ασφάλειας του προσωπικού.

Αυτές οι απαιτήσεις είναι αναγκαίες, πρώτον, για πρόωμη ανίχνευση και τον εντοπισμό των σφαλμάτων και δεύτερον για την άμεση απομάκρυνση του ελαττωματικού εξοπλισμού από το σύστημα. Προκειμένου να πραγματοποιηθούν τα παραπάνω καθήκοντα, η προστασία πρέπει να έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- **Επιλεκτικότητα (Selectivity):** Για να εντοπίσει και να απομονώσει μόνο το ελαττωματικό στοιχείο.
- **Ευστάθεια (Stability):** Για να μείνουν όλα τα υγιές κυκλώματα υπό λειτουργία και να εξασφαλιστεί η συνεχής τροφοδότηση.
- **Ευαισθησία (Sensitivity):** Για την ανίχνευση ακόμη και του μικρότερου σφάλματος, είτε ρεύμα, είτε διαταραχές του συστήματος και σωστή λειτουργία ρυθμίσεων πριν το σφάλμα προκαλέσει ανεπανόρθωτη ζημιά.
- **Ταχύτητα (Speed):** Για να λειτουργήσει γρήγορα όταν πρέπει να δράσει, ελαχιστοποιώντας έτσι τη ζημιά στον περιβάλλοντα χώρο και διασφαλίζοντας την ασφάλεια του προσωπικού.

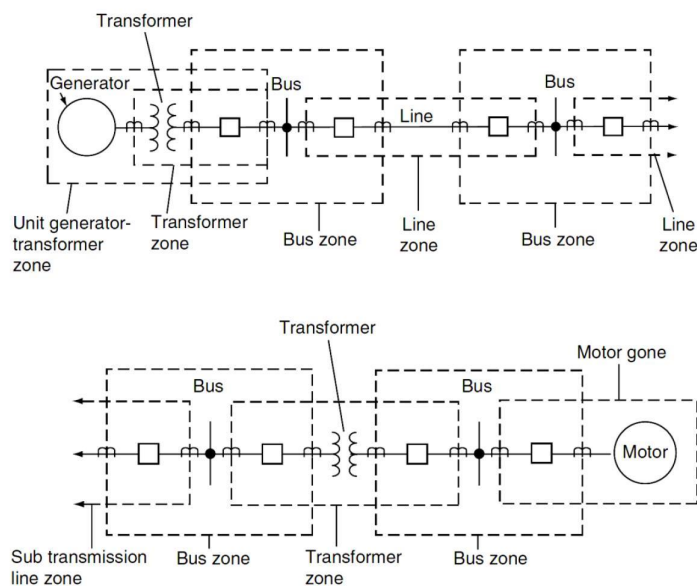
Για να πληρούνται όλες οι παραπάνω απαιτήσεις, ένα σύστημα προστασίας πρέπει επιπλέον να είναι:

- **Αξιοπίστο (Dependable):** να ενεργοποιείται (trip), όταν καλείται να το κάνει.

- **Ασφαλής (Secure):** να μη ενεργοποιηθεί όταν δεν είναι αναγκαίο. [7]

#### 1.1.4. Ζώνες προστασίας - Πρωτεύουσα και Εφεδρική προστασία

Ένα Σ.Η.Ε. μπορεί να χωριστεί σε ζώνες προστασίας, οι οποίες καθορίζονται εν γένει από τον διαθέσιμο εξοπλισμό και τους διακόπτες ισχύος που είναι εγκατεστημένοι σε αυτό. Κάθε ζώνη προστασίας οφείλει να περιέχει ένα ή δύο στοιχεία του Σ.Η.Ε. και να επικαλύπτει την γειτονική της, ούτως ώστε να εξασφαλίζεται ότι κανένα στοιχείο δεν μένει απροστάτευτο. Υπάρχουν, συνεπώς, οι ζώνες προστασίας των γεννητριών, των μετασχηματιστών, των ζυγών, των γραμμών μεταφοράς και διανομής, των φορτίων (παθητικών και δυναμικών) και των εγκάρσιων στοιχείων αντιστάθμισης (πυκνωτών, πηνίων). Οι προστασίες κάθε ενός από τα προαναφερθέντα δομικά στοιχεία ενός Σ.Η.Ε. είναι διαφορετικές λόγω της φύσης λειτουργίας τους, αλλά οι γενικές αρχές που τις διέπουν είναι ίδιες.



Σχ. 1.1: Χωρισμός Σ.Η.Ε. σε κλειστές και ανοικτές ζώνες προστασίας [3]

Όταν μια ζώνη προστασίας είναι κλειστή, όπως είναι οι ζώνες των ζυγών στο Σχήμα 1.1, τότε ο εξοπλισμός ο οποίος περιέχεται σε αυτή επιτηρείται από τα άκρα της και γι' αυτό ονομάζεται «διαφορική» ή «απολύτως επιλογική» ζώνη προστασίας. Αντιθέτως, όταν μια ζώνη προστασίας είναι ανοικτή, όπως είναι οι ζώνες των γραμμών μεταφοράς στο ίδιο σχήμα, τότε αυτή η ζώνη καλείται «σχετικά επιλογική».

Σε περίπτωση εμφάνισης σφάλματος σε κάποιο σημείο του Σ.Η.Ε. του Σχήματος 1.1, τα στοιχεία προστασίας της ζώνης προστασίας που το περιέχει, θα πρέπει να λειτουργήσουν στον ελάχιστο δυνατό χρόνο, φροντίζοντας παράλληλα να αφαιρέσουν από το δίκτυο τον ελάχιστο απαιτούμενο αριθμό στοιχείων. Αυτή είναι η λεγόμενη πρωτεύουσα προστασία της εκάστοτε περιοχής ενός Σ.Η.Ε.. Όταν, όμως, λόγω π.χ. κάποιας βλάβης, η πρωτεύουσα προστασία δεν καταφέρει να λειτουργήσει, τότε επιβάλλεται να λειτουργήσουν τα στοιχεία προστασίας των γειτονικών ζωνών προστασίας, δρώντας ως απομακρυσμένη δευτερεύουσα ή εφεδρική προστασία του Σ.Η.Ε. που δυσλειτουργεί. Συνεπώς, η δευτερεύουσα προστασία ρυθμίζεται ώστε να

λειτουργεί με κάποια καθυστέρηση σε σχέση με την πρωτεύουσα και αφαιρεί από το δίκτυο περισσότερα μέρη απ' όσα πραγματικά απαιτούνται. [25]

### 1.1.5. Είδη σφαλμάτων (Type of faults)

Τα σφάλματα που μπορούν να προκληθούν στον εξοπλισμό ενός Σ.Η.Ε. χωρίζονται στις παρακάτω κατηγορίες, με κριτήριο τη χρονική διάρκεια εκκαθάρισή τους.

- **Παροδικά σφάλματα (transient faults):** είναι τα σφάλματα, για τα οποία αρκεί η διακοπή της τροφοδοσίας για πολύ μικρό χρονικό διάστημα ώστε να εκκαθαριστούν. Παρατηρούνται ως επί το πλείστον στα εναέρια δίκτυα. Τέτοια σφάλματα οφείλονται, σε διασπάσεις του ατμοσφαιρικού αέρα (π.χ. υπερπηδήσεις σε μονωτήρες, ηλεκτρικά τόξα μεταξύ φάσεων κ.α.), κεραυνοπληξίες, επικαθήσεις πτηνών στους αγωγούς γραμμής μεταφοράς ή σπασμένων κλαδιών γειτονικών δέντρων, και η διακοπή της τάσης για κλάσματα του δευτερολέπτου είναι αρκετή για να απαλειφτούν. Τα αίτια που προαναφέραμε αποκαλούνται εξωτερικά. Υπάρχουν, όμως, και περιπτώσεις που απαιτούνται μερικά δευτερόλεπτα για την εκκαθάριση του σφάλματος. Τέτοιου είδους σφάλματα αποκαλούνται *ημιμόνιμα*, συνιστώντας αρκετές φορές και ξεχωριστή κατηγορία. Τα δίκτυα μεταφοράς και διανομής περιέχουν διακόπτες ισχύος αυτόματης επαναφοράς, οι οποίοι επιτηρούν το σύστημα για περιπτώσεις τέτοιων σφαλμάτων. Οι διακόπτες αυτοί ανοίγουν όταν εντοπίζεται σφάλμα σε ένα σημείο του συστήματος και κλείνουν ξανά, μετά την πάροδο κάποιων κύκλων, όταν και έχει εκκαθαριστεί το σφάλμα.
- **Μόνιμα σφάλματα (persistent faults):** Παρατηρούνται κατ' εξοχήν στα υπόγεια δίκτυα και σπανιότερα στα εναέρια. Αφορούν σφάλματα, όπως είναι η γήρανση και η καταστροφή υλικών (π.χ. μονωτήρων), για τα οποία η εκκαθάριση μπορεί να επιτευχθεί μόνο έπειτα από ανθρώπινη παρέμβαση και ο χρόνος επιδιόρθωσης είναι της τάξης μίας ημέρας. Τα αίτια πρόκλησης αυτού του είδους σφαλμάτων αποκαλούνται *εσωτερικά*.

Επιπλέον, τα σφάλματα που αφορούν βραχυκυκλώματα φάσεων μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ανάλογα με το πλήθος των αγωγών που εμπλέκονται στο βραχυκύκλωμα. Τέτοια σφάλματα είναι τα μονοφασικά προς γη, τα διφασικά, τα διφασικά προς γη και τα τριφασικά (με ή χωρίς γη). [24]

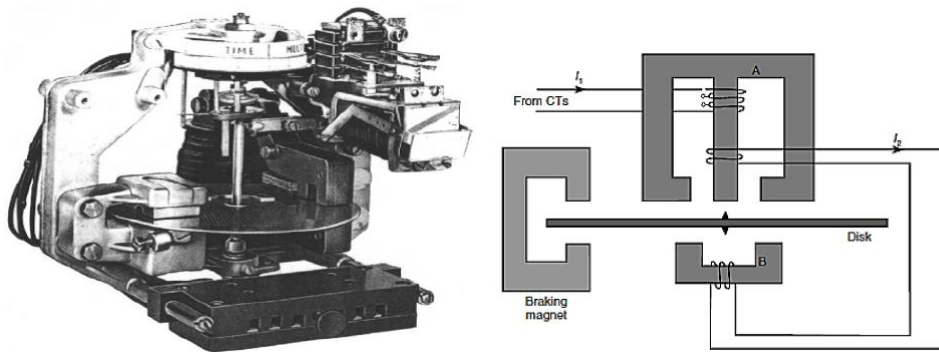
### 1.1.6. Ηλεκτρονόμοι (Relays)

Τα μέσα προστασίας των Σ.Η.Ε. αποτελούνται από ηλεκτρονόμους, οι οποίοι μετρούν ηλεκτρικά μεγέθη, μέσω των εισόδων τους και έπειτα από υπολογισμούς που εκτελούν, επενεργούν, μέσω των εξόδων τους, στα μέρη του συστήματος που επιτηρούν. Είναι σχεδιασμένοι να δέχονται ως εισόδους τιμές ρευμάτων και τάσεων υποβιβασμένες από μετασχηματιστές έντασης (Current Transformers, CTs) και τάσης (Voltage Transformers, VTs). Υπάρχουν διάφορα είδη ηλεκτρονόμων, όσον αφορά την κατασκευή τους, τα οποία είναι:

1. Ηλεκτρομηχανικοί ηλεκτρονόμοι (Electromechanical relays)
2. Στατικοί ηλεκτρονόμοι (Static or solid state relays)
3. Ψηφιακοί ηλεκτρονόμοι (Digital relays)



**Ηλεκτρομηχανικοί ηλεκτρονόμοι (Electromechanical relays):** Οι ηλεκτρονόμοι αυτής της κατηγορίας είναι κατασκευασμένοι από πυρήνα σιδήρου και μέσω τυλιγμάτων που φέρουν ρεύματα, επάγονται ροές στο μαγνητικό κύκλωμα, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη δυνάμεων ή ροπών, οι οποίες είναι υπεύθυνες για τη λειτουργία ή μη του ηλεκτρονόμου. Στο Σχήμα 1.2 απεικονίζεται παράδειγμα ηλεκτρομηχανικού ηλεκτρονόμου, με το μαγνητικό του κύκλωμα.

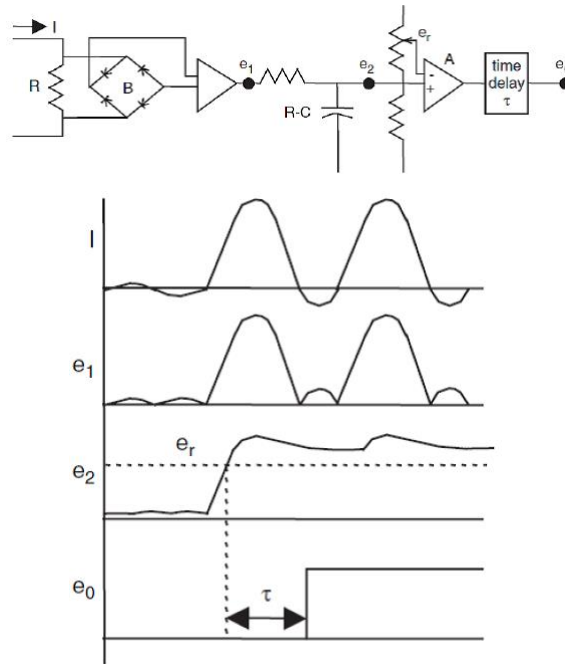


Σχ. 1.2: Ηλεκτρομηχανικός ηλεκτρονόμος επαγωγικού τύπου με το μαγνητικό του κύκλωμα

**Στατικοί ηλεκτρονόμοι (Static or solid state relays):** Οι στατικοί ηλεκτρονόμοι είναι κυκλώματα κατασκευασμένα από ηλεκτρονικά στοιχεία και χωρίζονται σε αναλογικού και ψηφιακού τύπου, ανάλογα τις λειτουργίες που είναι σχεδιασμένα να επιτελούν. Κλήθηκαν να αντικαταστήσουν τους ηλεκτρομηχανικούς, λόγω των ακόλουθων πλεονεκτημάτων τους:

- πολύ μικρότερη κατανάλωση ισχύος,
- μεγαλύτερη ακρίβεια και ταχύτητα λειτουργίας,
- μεγαλύτερη ευελιξία στο σχεδιασμό των κυκλωμάτων προστασίας,
- δεν απαιτούν συντήρηση.

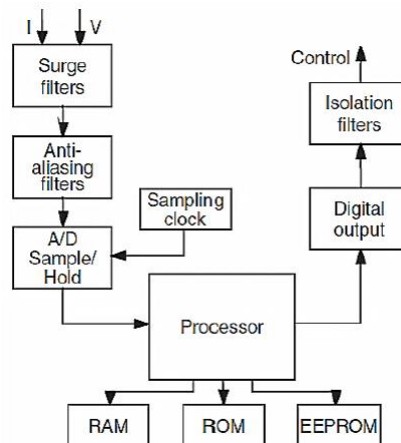
Στο Σχήμα 1.3 απεικονίζεται παράδειγμα δομής στατικού ηλεκτρονόμου.



Σχ. 1.3: Δομή στατικού ηλεκτρονόμου υπερτάσης και κυματομορφές διαφόρων μεγεθών του.

**Ψηφιακοί ηλεκτρονόμοι (Digital relays):** Είναι οι πιο σύγχρονοι ηλεκτρονόμοι, οι οποίοι έχουν καθιερωθεί στις νέες εφαρμογές και αποτελούνται από ψηφιακά κυκλώματα. Οι ηλεκτρονόμοι αυτού του τύπου έχουν τεράστιες δυνατότητες ως προς την ακρίβεια, την ευελιξία ρύθμισής τους και την αξιοπιστία τους, καθιστώντας επιπλέον εφικτή την επικοινωνία με πολλές συνιστώσες του δικτύου (SCADA Υποσταθμών, Κέντρα Ελέγχου Ενέργειας κτλ.). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ευκολότερη και αποτελεσματικότερη εποπτεία και προστασία των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας.

Στο Σχήμα 1.4 απεικονίζεται το μπλοκ διάγραμμα βασικών λειτουργιών ψηφιακών ηλεκτρονόμων. [24]



Σχ. 1.4: Μπλοκ διάγραμμα βασικών λειτουργιών ψηφιακών ηλεκτρονόμων.

### 1.1.7. Μετασχηματιστές έντασης και τάσης

Οι μετασχηματιστές έντασης και τάσης (στην ξένη βιβλιογραφία αναφέρονται και ως instrument transformers) χρησιμεύουν στο να παρέχουν ρεύμα και τάση στους ηλεκτρονόμους και σε άλλα όργανα μέτρησης του δικτύου, υποβιβασμένα στα επίπεδα που μπορούν να λειτουργήσουν καθώς και γαλβανική απομόνωση των συσκευών από το δίκτυο. Στα δίκτυα υψηλής και υπερυψηλής τάσης χρησιμοποιούνται πυκνωτικοί μετασχηματιστές τάσης (Coupling capacitor voltage transformers, CCVTs). Τα παραπάνω είδη μετασχηματιστών φαίνονται στο Σχήμα 1.5.



Σχ. 1.5: Είδη μετασχηματιστών

Οι μετασχηματιστές έντασης και τάσης μπορούν να χωρισθούν σε δύο επιμέρους κατηγορίες,

- τους μετασχηματιστές μέτρησης
- και τους μετασχηματιστές οργάνων ή προστασίας,

των οποίων η κύρια διαφορά έγκειται στην ακρίβεια που έχουν καθοριστεί να λειτουργούν (στους μετασχηματιστές μέτρησης χρειάζεται ακρίβεια για εντάσεις μέχρι 1,2IN, ενώ στους μετασχηματιστές προστασίας μέχρι 20IN). Για να μην υπάρχουν σφάλματα κατά τη μέτρηση των αντίστοιχα μετασχηματιζόμενων μεγεθών, θα πρέπει αυτά να βρίσκονται σε φάση. Στην πράξη, όμως, αυτό δεν είναι δυνατό, λόγω των εσωτερικών καταναλώσεων. Για το λόγο αυτό, οι μετασχηματιστές έντασης και τάσης κατατάσσονται σε διάφορες κλάσεις ακριβείας, ανάλογα με το μέγεθος του σφάλματος που εισάγουν.

Παρακάτω, καταγράφουμε τις κυριότερες παραμέτρους καθορισμού των μετασχηματιστών έντασης και τάσης.

- **Για τους μετασχηματιστές έντασης:**
  - Ονομαστικό ρεύμα πρωτεύοντος: είναι της τάξεως των τιμών του δικτύου. Τυποποιημένες τιμές είναι: 10, 12.5, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 75 και τα δεκαπλάσια αυτών.
  - Ονομαστικό ρεύμα δευτερεύοντος: είναι 5A ή 1A.
  - Ονομαστική ισχύς εξόδου: Τυποποιημένες τιμές είναι: 2,5, 5, 10, 15, 30 VA.

- ο Μέγιστη τάση: Ορίζεται ως η μέγιστη πολική τάση που μπορεί να δεχτεί ο μετασχηματιστής έντασης υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας του δικτύου, στο οποίο πρόκειται να εγκατασταθεί.
- ο Ονομαστικό επίπεδο μόνωσης: Ορίζεται ως ο συνδυασμός τιμών τάσεων (π.χ. 50 Hz και κρουστική) που χαρακτηρίζουν την αντοχή της μόνωσης του μετασχηματιστή έντασης υπό συνθήκες διηλεκτρικών καταπονήσεων.
- ο Κλάση ακρίβειας: Είναι μια κατηγοριοποίηση των μετασχηματιστών έντασης ανάλογα με το σφάλμα που εισάγουν στα ρεύματα δευτερεύοντος υπό καθορισμένες συνθήκες.
- **Για τους μετασχηματιστές τάσης:**
  - ο Ονομαστική τάση πρωτεύοντος: Οι τυποποιημένες τιμές ταυτίζονται με τα διάφορα επίπεδα τάσης των δικτύων.
  - ο Ονομαστική τάση δευτερεύοντος: Τυποποιημένες τιμές είναι:
    - ◆ Στην Ευρώπη: 100 ή 110 V και 200 V για εκτεταμένα κυκλώματα.
    - ◆ Στην Αμερική: 120 V στο δίκτυο διανομής, 115 V στο δίκτυο μεταφοράς και 230 V σε εκτεταμένα κυκλώματα.
  - ο Ονομαστική ισχύς εξόδου: Τυποποιημένες τιμές για τις ισχύεις εξόδου είναι (για  $\cos\varphi = 0,8$  επαγωγικό): 10, 15, 25, 30, 50, 75, 100, 150, 200, 300, 400, 500 VA.
  - ο Παράγοντας ονομαστικής τάσης: Ορίζεται ως ο συντελεστής επί τον οποίο αν πολλαπλασιαστεί η ονομαστική τάση πρωτεύοντος, προκύπτει τάση που μπορεί να ανεχτεί ο μετασχηματιστής τάσης για ορισμένο χρονικό διάστημα, χωρίς να μεταβληθεί η ακρίβειά του. Τυποποιημένες τιμές είναι:
    - ◆ 1,2 χωρίς χρονικό περιορισμό,
    - ◆ 1,5 επί 30 sec, για αποτελεσματικά γειωμένα συστήματα (effective grounded systems),
    - ◆ 1,9 επί 30 sec για αγείωτα συστήματα (ungrounded systems), με αυτόματη διακοπή για σφάλματα γης,
    - ◆ 1,9 επί 8 h για αγείωτα συστήματα, χωρίς αυτόματη διακοπή για σφάλματα γης.
  - ο Κλάση ακρίβειας: Όπως και στους μετασχηματιστές έντασης αφορά την κατηγοριοποίηση των μετασχηματιστών τάσης ανάλογα με το σφάλμα που εισάγουν στις τάσεις δευτερεύοντος.

## 1.2. Είδη προστασίας

Στην ενότητα αυτή θα αναλύσουμε τα κυριότερα είδη προστασίας, τα οποία είναι:

- προστασία κατεύθυνσης (Directional protection),
- προστασία υπερέντασης με ή χωρίς στοιχεία κατεύθυνσης (Directional or Non-directional overcurrent protection),
- διαφορική προστασία (Differential protection),
- προστασία απόστασης (Distance protection).

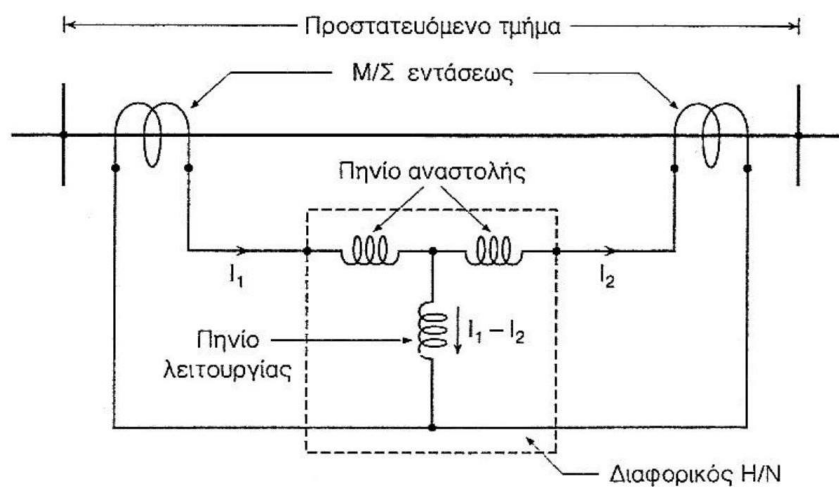
Εκτός από τα παραπάνω είδη προστασιών, υπάρχουν και πολλά άλλα που αφορούν συγκεκριμένες εφαρμογές, ανάλογα τον εξοπλισμό του οποίου μελετούμε την προστασία. Σ' αυτό το σημείο

πρέπει να σημειωθεί ότι για να είναι ένα Σ.Η.Ε. πλήρως προστατευμένο, απαιτείται η εφαρμογή συνδυασμών των παραπάνω ειδών προστασίας.[24]

### 1.2.1. Διαφορική προστασία

Η διαφορική προστασία είναι εξαιρετικά ευαίσθητη στην ανίχνευση εσωτερικών σφαλμάτων και γι' αυτό θεωρείται ένα από τα καλύτερα είδη προστασίας. Χρησιμοποιείται πολύ συχνά ως πρωτεύουσα προστασία των δομικών στοιχείων ενός δικτύου (γεννήτριες, μετασχηματιστές κλπ.). Η αρχική λειτουργία της διαφορικής προστασίας είναι σχετικά απλή. Γίνεται σύγκριση μεταξύ του εισερχόμενου στη ζώνη προστασίας ηλεκτρικού μεγέθους με το εξερχόμενο από αυτή και με βάση την μεταξύ τους διαφορά προκύπτει αν πρέπει να λειτουργήσει ο ηλεκτρονόμος ή όχι. Το μέγεθος που χρησιμοποιείται συνήθως για αυτό το σκοπό είναι το ηλεκτρικό ρεύμα.

Στο Σχήμα 1.6 φαίνεται ο τρόπος σύνδεσης των διαφορικών Η/Ν προστασίας. Οι δύο Μ/Σ εντάσεως αναλαμβάνουν να τροφοδοτήσουν τα πηνία αναστολής (restraint coils) με τα μετρούμενα ρεύματα από την αρχή και το πέρας της ζώνης προστασίας του προστατευόμενου τμήματος, ώστε να γίνει η απαραίτητη σύγκριση στο πηνίο λειτουργίας (operating coil).



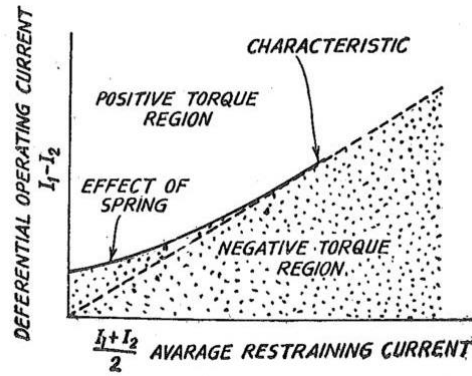
Σχ. 1.6: Σύνδεσμολογία διαφορικού Η/Ν

Η χαρακτηριστική λειτουργίας της ποσοστιαίας διαφορικής προστασίας (percentage differential protection), όπως αποκαλείται είναι της μορφής

$$I_1 - I_2 = K \cdot \frac{I_1 + I_2}{2} \Rightarrow y = a \cdot x \text{ (ευθεία)} \quad (1.1)$$

και φαίνεται στο Σχήμα 1.7.

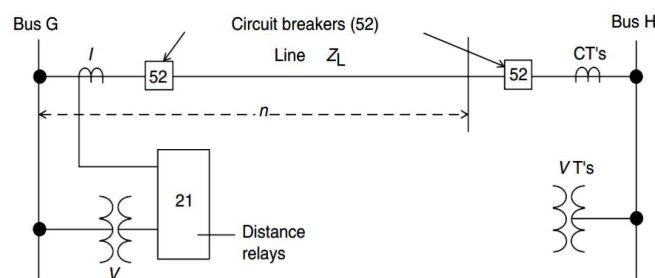
Οι βασικές ποσότητες που ρυθμίζονται στη διαφορική προστασία είναι το ελάχιστο ρεύμα διέγερσης και η κλίση της ευθείας. Σε πολλές εφαρμογές, χρησιμοποιείται διπλή κλίση, για την αποφυγή ανεπιθύμητης λειτουργίας, π.χ. λόγω κορεσμού στους μετασχηματιστές έντασης.



Σχ. 1.7: Χαρακτηριστική λειτουργίας ηλεκτρονόμου διαφορικής προστασίας [31]

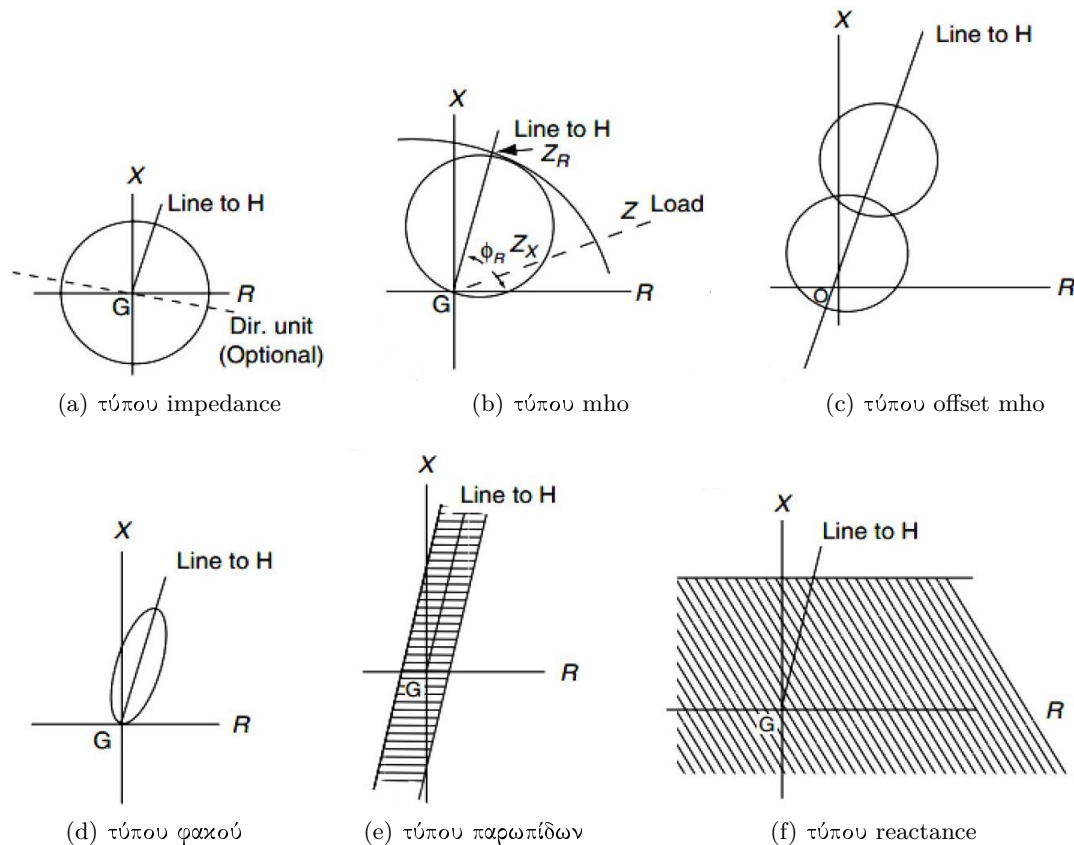
### 1.2.2. Προστασία αποστάσεως

Η προστασία αποστάσεως συναντάται κυρίως ως πρωτεύουσα προστασία στις γραμμές μεταφοράς. Όπως κανείς αντιλαμβάνεται από την ονομασία της, η προστασία αυτή λειτουργεί με βάση την απόσταση του σφάλματος από τον Η/Ν. Στην πραγματικότητα, ο ηλεκτρονόμος δεν επιτρέπει την απόσταση από κάποιο σφάλμα, αλλά το διάνυσμα της σύνθετης αντίστασης μεταξύ του ιδίου και του εκάστοτε σφάλματος, μέσω κατάλληλα συνδεδεμένων Μ/Σ τάσης και έντασης.



Σχ. 1.8: Παράδειγμα εφαρμογής Η/Ν αποστάσεως για προστασία γραμμής μεταφοράς [5]

Το διάνυσμα σύνθετης αντίστασης που μετρούν οι Η/Ν αποστάσεως όπως και η χαρακτηριστική λειτουργίας τους μπορεί να αποτυπωθεί σε διάγραμμα R-X. Όταν το εν λόγω διάνυσμα βρεθεί εντός του χωρίου που ορίζει η εκάστοτε χαρακτηριστική λειτουργίας, τότε ο ηλεκτρονόμος αναγνωρίζει την ύπαρξη σφάλματος και λειτουργεί προσπαθώντας να το απομονώσει. Στο Σχήμα 1.9 φαίνονται οι πιο διαδεδομένες χαρακτηριστικές λειτουργίας ηλεκτρονόμων αποστάσεως.



Σχ. 1.9: Οι τυπικές χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας των H/N αποστάσεως

α) Η χαρακτηριστική τύπου impedance είναι ένας κύκλος με κέντρο την αρχή των αξόνων του διαγράμματος R-X και ρυθμιζόμενη ακτίνα. Πρόκειται για μία από τις παλαιότερες χαρακτηριστικές λειτουργίας, η οποία έχει πλέον εγκαταλειφθεί. Το βασικό μειονέκτημα είναι ότι δεν μπορεί να διακρίνει την κατεύθυνση των σφαλμάτων, πράγμα το οποίο καθιστούσε αναγκαία τη χρήση της σε συνδυασμό με στοιχεία κατεύθυνσης.

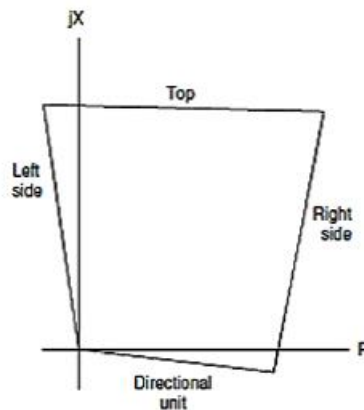
β) Οι ηλεκτρονόμοι, των οποίων η χαρακτηριστική λειτουργίας σε διάγραμμα R – X είναι κύκλος που διέρχεται από την αρχή των αξόνων, ονομάζονται τύπου mho και έχουν ευρεία χρήση στην προστασία γραμμών μεταφοράς. Δεν απαιτούν στοιχείο κατεύθυνσης και ρυθμίζονται (μέσω της ακτίνας του κύκλου, αλλά και την κλίση της διαμέτρου που περνά από την αρχή των αξόνων) έτσι ώστε να είναι ιδιαίτερα ευαίσθητοι σε ρεύματος σφάλματος με επιπορεία  $60^\circ-85^\circ$  και όσο το δυνατόν αναισθητοι σε φορτία με γωνία  $0^\circ-30^\circ$  επιπορείας.

ε) Για να συμπεριληφθεί στη ζώνη προστασίας του ηλεκτρονόμου απόστασης και μία μικρή περιοχή, πίσω από τη γραμμή μεταφοράς που επιτηρεί, σε σχέση με τη ροή ισχύος (για παράδειγμα, στο κύκλωμα του Σχήματος 1.8, μια μικρή περιοχή αριστερά του ζυγού G), χρησιμοποιούνται οι ηλεκτρονόμοι απόστασης τύπου offset-mho, στους οποίους εκτός από την ακτίνα και την κλίση της διαμέτρου, ρυθμίζεται και η απόσταση (offset) που απέχει το κάτω άκρο της διαμέτρου

από την αρχή των αξόνων. Οι ηλεκτρονόμοι αυτού του τύπου χρησιμοποιούνται επίσης και για αποδοτικότερη προστασία σε περιπτώσεις με σχεδόν μηδενική (ή και μηδενική) τάση σφάλματος.

**d, e)** Οι ηλεκτρονόμοι τύπου lens (φακοειδής χαρακτηριστική) και τύπου simple blinders (χαρακτηριστική απλών παρωπίδων) χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις που έχουμε μεγάλες, σε μήκος, γραμμές μεταφοράς και βαριά φορτισμένες, όπου υπάρχει ο κίνδυνος το διάνυσμα της συνολικής σύνθετης αντίστασης που υπολογίζει ο ηλεκτρονόμος, να έχει το πέρας του εντός του κύκλου, αν γινόταν χρήση ηλεκτρονόμων τύπου impedance.

**f)** Η χαρακτηριστική των ηλεκτρονόμων τύπου reactance είναι μία ευθεία παράλληλη στον άξονα R, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.9f. Δε διαθέτουν λειτουργία κατεύθυνσης, συνεπώς, μπορούν να λειτουργήσουν για σφάλματα εκτός της ζώνης προστασίας τους καθώς και για μεγάλα φορτία ή ταλαντώσεις του συστήματος και γι' αυτό συνήθως, περιορίζεται αυτή τους η αδυναμία με την ταυτόχρονη χρήση ηλεκτρονόμων τύπου mho.



**Σχ.** 1.10: Χαρακτηριστική λειτουργίας H/N απόστασης τύπου τετραπλεύρου (quadrilateral distance relay)

Η εξέλιξη και εδραίωση των ψηφιακών ηλεκτρονόμων έδωσε την ευκαιρία στους σχεδιαστές και μελετητές των Σ.Η.Ε., να μπορούν να δημιουργήσουν χαρακτηριστικές λειτουργίες, για τους ηλεκτρονόμους απόστασης, οποιασδήποτε μορφής επιθυμούν. Ένα τέτοιο παράδειγμα χαρακτηριστικής φαίνεται στο Σχήμα 1.10, η οποία ανήκει σε ηλεκτρονόμο απόστασης τύπου τετραπλεύρου. Στην ουσία πρόκειται για συνδυασμό στοιχείων τύπου επαγωγικής αντίστασης (πάνω πλευρά), τύπου αντίστασης (δεξιά και αριστερή πλευρά) και στοιχείου κατεύθυνσης (κάτω πλευρά), τα οποία δημιουργούν τον επιθυμητό γεωμετρικό τόπο. Η δυνατότητα σχηματισμού οποιασδήποτε πολυγωνικής μορφής χαρακτηριστικών λειτουργίας δεν υπήρχε στους κλασικούς ηλεκτρομηχανικούς ηλεκτρονόμους, γεγονός που αναδεικνύει τη σπουδαιότητα της χρήσης ευέλικτων ψηφιακών ηλεκτρονόμων για προστασία απόστασης.

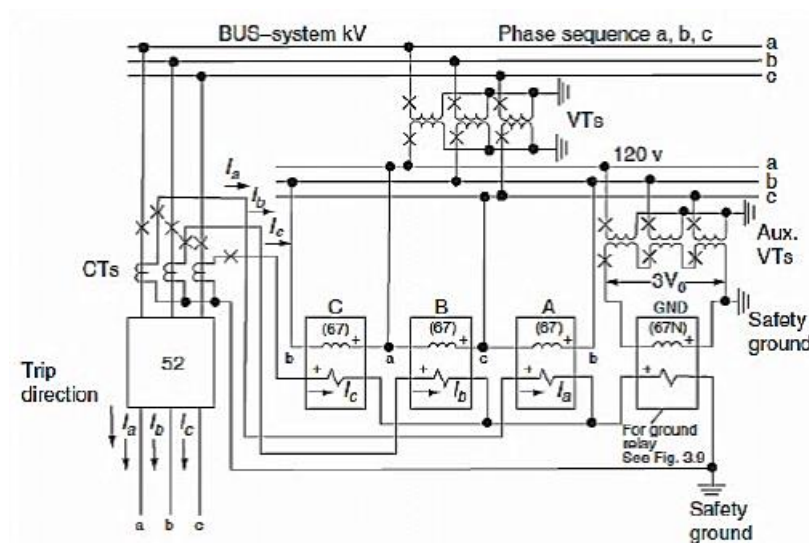
### 1.2.3. Προστασία κατεύθυνσης

Οι ηλεκτρονόμοι που επιτελούν αυτού του είδους προστασίας, γνωστοί ως ηλεκτρονόμοι κατεύθυνσης, χρησιμοποιούνται για να αναγνωρίζουν την αλλαγή της φοράς τάσεων και εντάσεων, στο μέρος του δικτύου που προστατεύουν, κατά τη διάρκεια σφαλμάτων. Αυτό επιτυγχάνε-



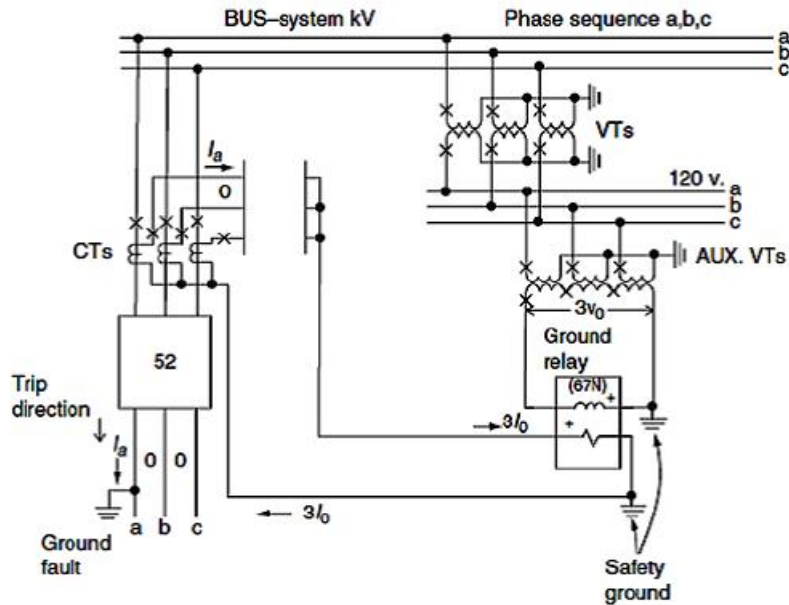
ται μέσω της μέτρησης και της σύγκρισης των φασικών γωνιών δύο ηλεκτρικών μεγεθών (τάσεις και εντάσεις). Στη συνέχεια, το ένα μέγεθος χρησιμοποιείται ως μέγεθος αναφοράς και δημιουργεί την πόλωση. Ο ηλεκτρονόμος συγκρίνει τη φασική γωνία του δεύτερου μεγέθους με αυτήν της μεταβλητής αναφοράς και αποφασίζει αν πρέπει να λειτουργήσει ή όχι. Υπάρχουν δύο ειδών πολώσεις που εφαρμόζονται στους ηλεκτρονόμους κατεύθυνσης.

**Πόλωση τάσης (voltage polarization):** Έχει επικρατήσει στις περισσότερες εφαρμογές, επειδή οι γωνίες των τάσεων ενός Σ.Η.Ε. δε μεταβάλλονται σημαντικά κατά τη διάρκεια ενός σφάλματος και έτσι το διάνυσμά τους διατηρείται σχεδόν σταθερό. Οι ηλεκτρονόμοι αυτής της περίπτωσης ονομάζονται και ηλεκτρονόμοι τάσης – έντασης. Στο Σχήμα 1.11 φαίνεται ο τρόπος συνδεσμολογίας ηλεκτρονόμου κατεύθυνσης με πόλωση τάσης.



Σχ. 1.11: Συνδεσμολογία ηλεκτρονόμου κατεύθυνσης με πόλωση τάσης [5]

**Πόλωση ρεύματος (current polarization):** Χρησιμοποιείται σε ηλεκτρονόμους – γης τύπου  $0^\circ$  ( $0^\circ$  – type ground relays), οι οποίοι δέχονται σαν εισόδους το ρεύμα του δικτύου και το ρεύμα του ουδετέρου του μετασχηματιστή στον πλησίον υποσταθμό, τα οποία είναι σε φάση κατά τη διάρκεια σφαλμάτων γης. Οι ηλεκτρονόμοι της κατηγορίας αυτής καλούνται επίσης ηλεκτρονόμοι έντασης – έντασης και η συνδεσμολογία τους φαίνεται στο Σχήμα 1.12.

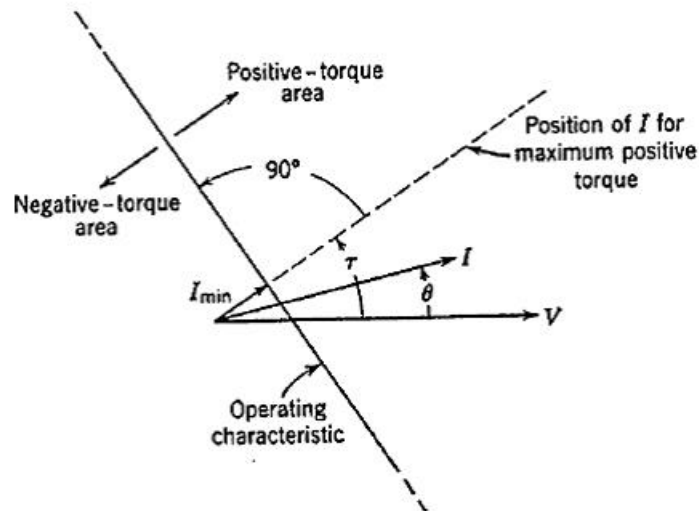


Σχ. 1.12: Συνδεσμολογία ηλεκτρονόμου κατεύθυνσης με πόλωση έντασης [5]

Η χαρακτηριστική λειτουργίας των ηλεκτρονόμων κατεύθυνσης προκύπτει από την αντίστοιχη εξίσωση ροπής. Αν υποθέσουμε ότι η τάση λαμβάνεται ως μέγεθος αναφοράς, τότε προκύπτει η Σχέση 1.2

$$I \cdot \cos(\theta - \tau) = \text{σταθερά} \quad (1.2)$$

η οποία σε πολικές συντεταγμένες παριστάνει μια ευθεία και φαίνεται στο Σχήμα 1.13.



Σχ. 1.13: Χαρακτηριστική λειτουργίας ηλεκτρονόμων κατεύθυνσης [24]

Όταν το πέρας του διανύσματος έντασης βρίσκεται στην περιοχή θετικής ροπής, τότε ο ηλεκτρονόμος λειτουργεί, ενώ όταν βρίσκεται στην περιοχή αρνητικής ροπής δεν ενεργοποιείται ή επανέρχεται σε περίπτωση που είχε ενεργοποιηθεί. Το τελευταίο σημαντικό στοιχείο των ηλεκτρονόμων κατεύθυνσης, είναι η κατηγοριοποίηση τους ανάλογα με το ποια τάση και ποια

ένταση του δικτύου δέχονται στις εισόδους τους. Στον Πίνακα 1.1 συγκεντρώνονται όλες οι περιπτώσεις που χρησιμοποιούνται στις εφαρμογές ηλεκτρονόμων κατεύθυνσης.

Συνδεσμολογία	Φάση Α		Φάση Β		Φάση C		Μέγιστη ροπή
	I	V	I	V	I	V	
30°	$I_a$	$V_{ac}$	$I_b$	$V_{ba}$	$I_c$	$V_{cb}$	Επιπορεία I κατά 30°
60° delta	$I_a - I_b$	$V_{ac}$	$I_b - I_c$	$V_{ba}$	$I_c - I_a$	$V_{cb}$	Επιπορεία I κατά 60°
60° wye	$I_a$	$-V_c$	$I_b$	$-V_a$	$I_c$	$-V_b$	Επιπορεία I κατά 60°
90° - 45°	$I_a$	$V_{bc}$	$I_b$	$V_{ca}$	$I_c$	$V_{ab}$	Επιπορεία I κατά 45°
90° - 60°	$I_a$	$V_{bc}$	$I_b$	$V_{ca}$	$I_c$	$V_{ab}$	Επιπορεία I κατά 60°

**Παρατηρήσεις:**  
 1. Η ονομασία των συνδεσμολογιών προέρχεται από τη γωνία που προπορεύεται το ρεύμα εισόδου, με  $\Sigma.I. = 1,0$ , σε σχέση με την τάση εισόδου.  
 2. Η μέγιστη ροπή εμφανίζεται όταν το ρεύμα εισόδου επιπορεύεται του ίδιου ρεύματος με  $\Sigma.I. = 1,0$ , κατά τη γωνία που αναγράφεται σε κάθε περίπτωση.

Πίν. 1.1: Συνδεσμολογίες H/N κατεύθυνσης

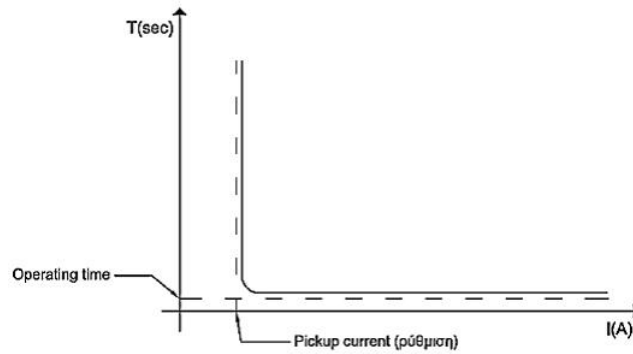
#### 1.2.4. Προστασία υπερέντασης με ή χωρίς στοιχεία κατεύθυνσης

Αποτελεί το απλούστερο και οικονομικότερο είδος προστασίας και έχει εφαρμογή είτε ως κύρια είτε ως δευτερεύουσα προστασία. Οι ασφάλειες (fuses), οι διακόπτες ισχύος (circuit breakers) και οι διακόπτες αυτόματης επαναφοράς (reclosers) είναι ορισμένα μέσα που παρέχουν προστασία υπερέντασης. Εκτός από τις ασφάλειες, όλα τα υπόλοιπα μέσα προστασίας ελέγχονται από ηλεκτρονόμους υπερέντασης (overcurrent relays). Σε αυτό το σημείο, αξίζει να επισημανθεί η διαφορά δύο όρων. Υπερένταση (overcurrent) θεωρείται οποιαδήποτε τιμή ρεύματος πάνω από το διπλάσιο του ονομαστικού, ενώ ο όρος υπερφόρτιση (overload) χρησιμοποιείται για εντάσεις μεταξύ της ονομαστικής τιμής και της διπλάσιάς της. Οι ηλεκτρονόμοι υπερέντασης χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

1. στους ηλεκτρονόμους υπερέντασης χωρίς στοιχείο κατεύθυνσης (non-directional overcurrent relays), οι οποίοι χρησιμοποιούνται στα ακτινικά δίκτυα και
2. στους ηλεκτρονόμους υπερέντασης με στοιχείο κατεύθυνσης (directional overcurrent relays), οι οποίοι χρησιμοποιούνται σε μέρη του συστήματος που σχηματίζονται βρόχοι και υπάρχει δυνατότητα ροής ισχύος και στις δύο κατευθύνσεις.

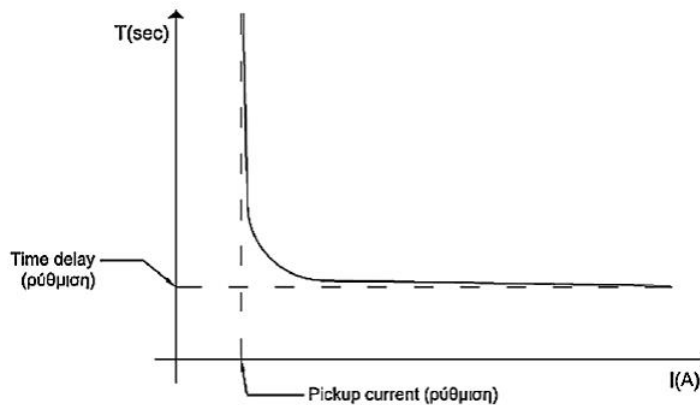
Επιπλέον, οι ηλεκτρονόμοι υπερέντασης μπορούν να διαβαθμιστούν ως προς την τιμή του ρεύματος, ως προς το χρόνο, αλλά και ως προς τα δύο ταυτόχρονα. Η τελευταία περίπτωση αποτελεί την ιδανική επιλογή και αυτή χρησιμοποιείται στις περισσότερες εφαρμογές. Εκτός από τις δύο μεγάλες κατηγορίες που προαναφέρθηκε οι ηλεκτρονόμοι υπερέντασης μπορούν να διακριθούν και στις ακόλουθες κατηγορίες, ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας τους.

**Στιγμιαίοι (instantaneous):** Σε αυτό το είδος ηλεκτρονόμων ρυθμίζεται μόνο το ρεύμα διέγερσης ή κατωφλίου (pickup current). Μόλις το εισερχόμενο ρεύμα στον ηλεκτρονόμο ξεπεράσει την τιμή αυτή, τότε η λειτουργία του είναι ακαριαία. Στην πράξη, χρειάζονται κάποια κλάσματα δευτερολέπτου για τη λειτουργία του ηλεκτρονόμου (operating time). Η χαρακτηριστική καμπύλη των ηλεκτρονόμων αυτών φαίνεται στο Σχήμα 1.14.



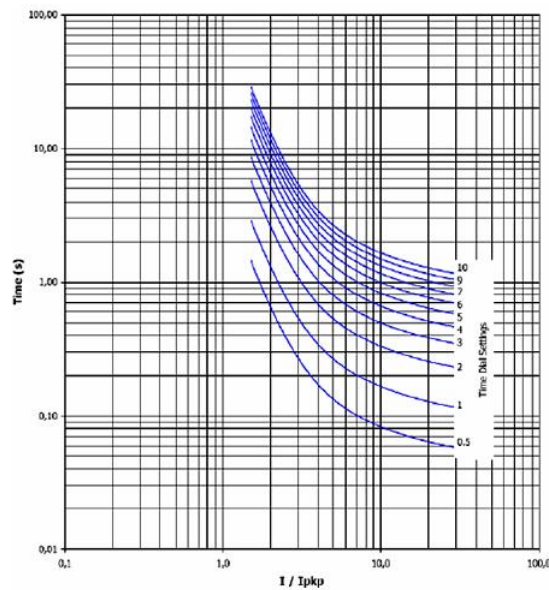
Σχ. 1.14: Χαρακτηριστική λειτουργίας στιγμιαίου ηλεκτρονόμου υπερέντασης

**Σταθερού χρόνου (definite time):** Σε αυτό το είδος ηλεκτρονόμων ρυθμίζεται το ρεύμα διέγερσης (pickup current) και η χρονική καθυστέρηση με την οποία θέλουμε να λειτουργεί ο ηλεκτρονόμος (time delay), η οποία είναι σταθερή. Όταν το εισερχόμενο ρεύμα στον ηλεκτρονόμο ξεπεράσει την τιμή αυτή, τότε ανεξάρτητα από την τιμή του, ο ηλεκτρονόμος θα στείλει σήμα στο διακόπτη ισχύος που ελέγχει έπειτα από τη χρονική καθυστέρηση που έχει οριστεί. Κατά τη ρύθμιση του time delay πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψιν η καθυστέρηση λειτουργίας του ηλεκτρονόμου, η καθυστέρηση μετάδοσης του σήματος στο διακόπτη ισχύος, καθώς και η καθυστέρηση λειτουργίας του ίδιου του διακόπτη. Η χαρακτηριστική λειτουργίας των ηλεκτρονόμων υπερέντασης σταθερού χρόνου φαίνεται στο Σχήμα 1.15.



Σχ. 1.15: Χαρακτηριστική λειτουργίας ηλεκτρονόμου υπερέντασης σταθερού χρόνου

**Αντιστρόφου χρόνου (inverse time):** Σε αυτό το είδος, όπως και πριν, ρυθμίζεται το ρεύμα διέγερσης (pickup current) καθώς και μια χρονική παράμετρος (time dial setting). Η ιδιαιτερότητα αυτού του είδους ηλεκτρονόμων είναι ότι όσο η τιμή του ρεύματος σφάλματος αυξάνεται, τόσο μειώνεται ο χρόνος λειτουργίας του ηλεκτρονόμου. Οι ηλεκτρονόμοι υπερέντασης αντιστρόφου χρόνου εφοδιασμένοι με στιγμιαίο στοιχείο λειτουργίας έχουν επικρατήσει στο μεγαλύτερο πλήθος των εφαρμογών προστασίας υπερέντασης. Στο Σχήμα 1.16 φαίνεται ένα παράδειγμα οικογένειας χαρακτηριστικών καμπυλών ηλεκτρονόμου αντιστρόφου χρόνου.

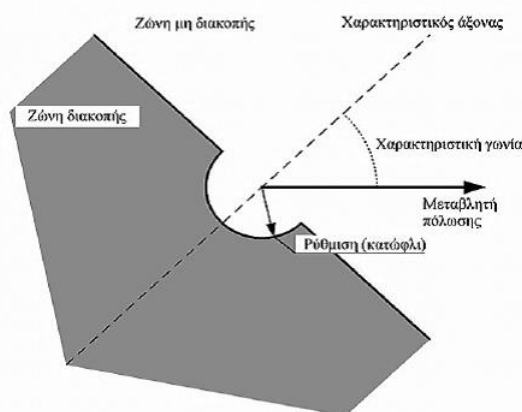


**Σχ.** 1.16: Οικογένεια χαρακτηριστικών λειτουργίας ηλεκτρονόμου υπερέντασης αντιστρόφου χρόνου

Σε πολλές εφαρμογές, όπως περιοχές συστήματος με βρόχους, οι ηλεκτρονόμοι υπερέντασης είναι εφοδιασμένοι με στοιχεία κατεύθυνσης. Τα στοιχεία αυτά λειτουργούν ως εξής: δέχονται δύο εισόδους (τάση και ρεύμα), χρησιμοποιούν τη μία (συνήθως την τάση) ως μεταβλητή αναφοράς ή πόλωσης και μετρούν τη διαφορά της γωνίας φάσης από την άλλη. Με τον τρόπο αυτό μπορούν να αντιληφθούν αν έχει υπάρξει αλλαγή στη φορά ισχύος ή όχι. Οι ηλεκτρονόμοι υπερέντασης με στοιχείο κατεύθυνσης ενεργοποιούνται όταν

- το εισερχόμενο ρεύμα ξεπεράσει το ρεύμα διέγερσης (pickup current)
- και η διαφορά φάσης μεταξύ του ρεύματος και του χαρακτηριστικού άξονα, ο οποίος ορίζεται από τη γωνία της μεταβλητής πόλωσης προσαυξημένη με τη χαρακτηριστική γωνία, είναι στο διάστημα  $(-90^\circ, +90^\circ)$ .

Η προηγούμενη περιγραφή φαίνεται στο *Σχήμα 1.17*.



**Σχ.** 1.17: Χαρακτηριστική λειτουργίας ηλεκτρονόμων υπερέντασης με στοιχείο κατεύθυνσης [24]



## Κεφάλαιο 2

# Δίκτυα Διανομής με Διεσπαρμένη Παραγωγή

### 2.1. Διεσπαρμένη Παραγωγή

Η Διεσπαρμένη Παραγωγή (Distributed Energy Resources, - DER, Distributed Generation, DG) ορίζεται ως η πηγή παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος που βρίσκεται πλησίον του σημείου κατανάλωσης της ηλεκτρικής ενέργειας (π.χ. περιοχή οικιακών φορτίων, βιομηχανία κτλ.) και αποτελεί μια εναλλακτική και βελτιωμένη έκδοση του παραδοσιακού δικτύου ηλεκτρικής ισχύος. Επιπλέον, υπερτερεί της παραγωγής εκείνης που στηρίζεται σε μεγάλα κεντρικά εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και συστήματα μεταφοράς, αφού είναι ταχύτερη και πιο οικονομική επιλογή. Επίσης, παρέχει στους καταναλωτές την προοπτική μικρότερου κόστους, μεγαλύτερης αξιοπιστίας υπηρεσιών, καλύτερης ποιότητας ισχύος, αυξημένης ενεργειακής απόδοσης και ενεργειακής ανεξαρτησίας.

Οι τεχνολογίες διεσπαρμένης παραγωγής έχουν ως κύριο χαρακτηριστικό την χαμηλή ονομαστική ισχύ. Στο τέλος αυτής της παραγράφου αναφέρονται διάφορες κατηγορίες βαθμίδων της διεσπαρμένης παραγωγής. Τοποθετούνται μέσα στο ηλεκτρικό σύστημα διανομής κοντά στον τελικό καταναλωτή και έχουν την δυνατότητα να λειτουργούν, είτε αυτόνομα, είτε παράλληλα με το υπόλοιπο δίκτυο.

Πολύ μικρή (Micro) ΔΠ	$\sim 1 \text{ Watt} < 5 \text{ kW}$
Μικρή (Small) ΔΠ	$5 \text{ kW} < 5 \text{ MW}$
Μεσαία (Medium) ΔΠ	$5 \text{ MW} < 50 \text{ MW}$
Μεγάλη (Large) ΔΠ	$50 \text{ MW} < 300 \text{ MW}$

Τέλος προσφέρουν και περιβαλλοντικό όφελος αφού για τη λειτουργία κάποιων τεχνολογιών απαιτούνται ενεργειακοί πόροι που αφθονούν στην φύση, όπως ο ήλιος, ο άνεμος, το νερό κλπ. [11, 26]

### Τύποι τεχνολογιών διεσπαρμένης παραγωγής (DER)

Οι τεχνολογίες DER αποτελούνται κυρίως από συστήματα παραγωγής ενέργειας και συστήματα αποθήκευσης που τοποθετούνται στον τελικό καταναλωτή ή κοντά σε αυτόν. Αυτές είναι:

- Μικροτουρμπίνες
- Τουρμπίνες σωτερικής καύσης
- Μηχανές εσωτερικής καύσης
- Μηχανές Stirling
- Κυψέλες καυσίμου
- Αποθήκευση ενέργειας / Συστήματα UPS
- Φωτοβολοταϊκά συστήματα

- Αιολικά συστήματα
- Υβριδικά συστήματα

## 2.2. Το μικροδίκτυο

### 2.2.1. Ορισμός του μικροδικτύου

Ένα μικροδίκτυο (Microgrid) αποτελεί ουσιαστικά ένα δίκτυο κεντρικά ελεγχόμενων μονάδων παραγωγής ενέργειας μέσα στο οποίο εξυπηρετούνται φορτία. Έχει τη δυνατότητα να λειτουργεί αυτόνομα (islanded mode), ή διασυνδεδεμένο με το κύριο δίκτυο (connected mode) με το οποίο δύναται να ανταλλάξει ενέργεια.

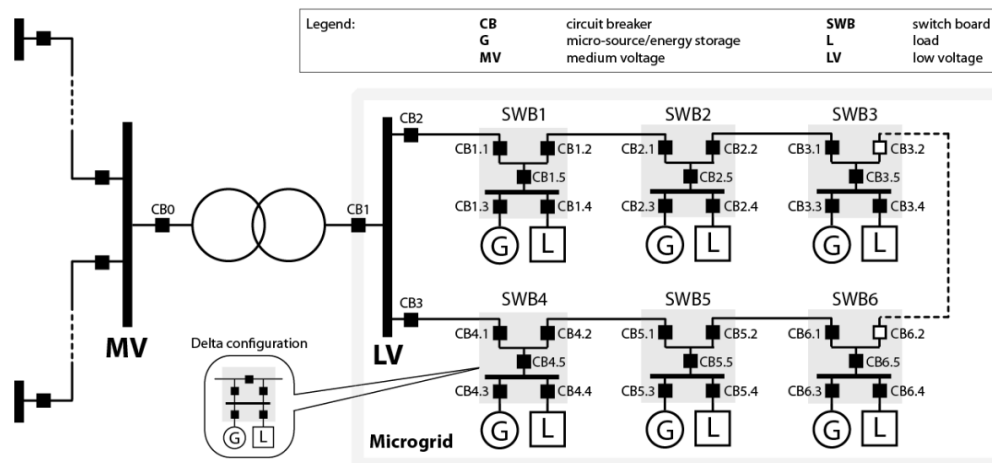
Οι μονάδες αυτές αποτελούν ουσιαστικά μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής και χρησιμοποιούν όλες τις υπάρχουσες και εμπορικά διαθέσιμες τεχνολογίες παραγωγής. Έτσι σε ένα μικροδίκτυο μπορεί να συναντήσει κανείς ανεμογεννήτριες, φωτοβολταϊκά, μικρά υδροηλεκτρικά, μικρο-τουρμπίνες, κυψέλες καυσίμου, συστήματα συμπαραγωγής ηλεκτρικής ισχύος - θερμότητας κ.α. Η ισχύς των μονάδων αυτών ξεκινά από μερικά kW και φτάνουν μέχρι λίγα MW. Για την κατασκευή ενός μικροδικτύου λοιπόν, υπάρχει μεγάλη ευελιξία στις τεχνολογίες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν, με την τελική επιλογή να εξαρτάται από την γεωγραφική θέση της εγκατάστασης, τις κλιματολογικές συνθήκες, την διαθεσιμότητα των πόρων κλπ. [26]

Επίσης, προσφέρει διάφορα πλεονεκτήματα σε υπηρεσίες κοινής ωφέλειας και στην κοινωνία, όπως:

- Βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης
- Ελαχιστοποίηση συνολικής κατανάλωσης ενέργειας
- Μείωση των αερίων του φαινομένου του θερμοκηπίου και εκπομπών ρύπων
- Βελτίωση της ποιότητας παροχής υπηρεσιών και αξιοπιστίας
- Αντικατάσταση υποδομών ηλεκτρικής ενέργειας λαμβάνοντας υπόψη την αποδοτικότητα ως προς το κόστος

Μία τυπική διάταξη ενός μικροδικτύου απεικονίζεται στο Σχήμα 2.1. Είναι συνδεδεμένο με τη μέση τάση του κύριου δικτύου όταν ο διακόπτης ισχύος 1 (CB1) είναι κλειστός (και οι διακόπτες ισχύος CB3.2 και 6.2 είναι ανοικτοί).





Σχ. 2.1: Τυπικό Δίκτυο Διανομής με ΔΠ [8]

Η αυξανόμενη διείσδυση της διεσπαρμένης παραγωγής σε συστήματα μικροδικτύου γεννά μεγάλες προκλήσεις στον τομέα των σχημάτων προστασίας τους. Συγκεκριμένα, η ποιότητα ισχύος, η διαχείριση ενέργειας, η ευστάθεια, ο έλεγχος ροής ισχύος, τα συστήματα προστασίας και η ενσωμάτωση των διαφόρων διεσπαρμένων γεννητριών είναι τα βασικά λειτουργικά ζητήματα ενός μικροδικτύου. Επιπρόσθετα, η συνύπαρξη των πολλαπλών πηγών ενέργειας που έχουν πολύπλευρες δυναμικές ιδιότητες και ηλεκτρικά χαρακτηριστικά έχουν αντίκτυπο στην ασφάλεια, την αποδοτικότητα, τον έλεγχο και την ευστάθεια.

Τα τεχνικά ζητήματα που αφορούν τη λειτουργία του μικροδικτύου σχετίζονται με τη διασύνδεση και την κατάσταση νησιδοποίησης. Η πολυπλοκότητα στη διασύνδεση του με το κύριο δίκτυο επηρεάζεται από το είδος της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, τον αριθμό των πηγών ενέργειας, τη θέση των σημείων διασύνδεσης και το επίπεδο της διείσδυσης του συστήματος αυτού με το κύριο δίκτυο.[8, 9]

### 2.2.2. Προκλήσεις στα μικροδίκτυα

Η αύξηση της διείσδυσης της διεσπαρμένης παραγωγής στο σύστημα μικροδικτύου θέτει σοβαρά τεχνικά προβλήματα στη λειτουργία του δικτύου όπως η μόνιμη και μεταβατική κατάσταση για υπέρταση και υπόταση στο σημείο σύνδεσης, η αύξηση της στάθμης βραχυκύκλωσης και προβλήματα ποιότητας ισχύος.

Μία από τις μεγαλύτερες προκλήσεις στο μικροδίκτυο είναι ο κατάλληλος σχεδιασμός των συστημάτων προστασίας τα οποία πρέπει να ανταποκρίνονται στα σφάλματα που εμφανίζονται στο κύριο δίκτυο, αλλά και στο μικροδίκτυο.

- Στην πρώτη περίπτωση, το σύστημα προστασίας θα πρέπει να απομονώσει το μικροδίκτυο από το κύριο δίκτυο τόσο γρήγορα όσο απαιτείται για να προστατέψει τα φορτία του.
- Στη δεύτερη περίπτωση, το σύστημα προστασίας θα πρέπει να απομονώσει το μικρότερο τμήμα του μικροδικτύου.

Η διαίρεση του μικροδικτύου σε ζώνες, π.χ. δημιουργία πολλαπλών νησίδων ή υπό - μικροδικτύων (sub-microgrids), θα πρέπει να υποστηρίζεται από μικρό-πηγές και ελεγχτές φορτίου. Υπό αυτές τις συνθήκες μπορεί να προκύψουν προβλήματα που σχετίζονται με την επιλεκτικότητα (σφάλματα, μη επιθυμητή λειτουργία ΔΙ) και την ευαισθησία (μη ανιχνεύσιμα σφάλματα ή καθυστέρηση λειτουργίας ΔΙ) του συστήματος προστασίας. Συνεπώς, όταν οι διεσπαρμένες γεννήτριες εντάσσονται για να σχηματίσουν το μικροδίκτυο είναι σημαντικό να εξασφαλιστεί ότι τα φορτία, οι γραμμές και διεσπαρμένες γεννήτριες στην κατάσταση νησιδοποίησης είναι προστατευμένα. Η γρήγορη λειτουργία της προστασίας βελτιώνει την ικανότητα να διατηρηθεί ο συγχρονισμός κατά τη μετάβαση σε κατάσταση νησιδοποίησης, η οποία είναι κρίσιμη από άποψη ευστάθειας. [8, 9]

### 2.2.3. Προβλήματα στα μικροδίκτυα

Υπάρχουν δύο βασικά θέματα που σχετίζονται με την προστασία των μικροδικτύων και δικτύων διανομής με μεγάλη διείσδυση των διεσπαρμένων πηγών ενέργειας. Το πρώτο σχετίζεται με τον αριθμό των εγκατεστημένων μικροπηγών στο μικροδίκτυο και το δεύτερο με τη διαθεσιμότητα ενός επαρκούς επιπέδου ρεύματος βραχυκύκλωσης όταν το μικροδίκτυο λειτουργεί απομονωμένα, αφού αυτό το επίπεδο μπορεί να μειωθεί σημαντικά μετά την αποσύνδεση του από το κύριο δίκτυο.

Οι καταστάσεις λειτουργίας του μικροδικτύου αλλάζουν συνεχώς λόγω των διακοπόμενων μικροπηγών (αιολική ή ηλιακή) και των περιοδικών διακυμάνσεων φορτίου. Επίσης η τοπολογία του δικτύου μπορεί να αλλάζει τακτικά με στόχο την ελαχιστοποίηση απωλειών ή την επίτευξη άλλων οικονομικών ή λειτουργικών στόχων.

Κάτω από αυτές τις συνθήκες μπορεί να μη λειτουργήσει η συνεργασία των ηλεκτρονόμων και γενικότερα η προστασία υπερέντασης μπορεί να είναι ανεπαρκής, δηλαδή δεν θα εγγυάται μία επιλεκτική λειτουργία για όλα τα πιθανά σφάλματα. Επομένως, είναι απαραίτητο να εξασφαλιστεί ότι οι ρυθμίσεις που επιλέγονται για ηλεκτρονόμους προστασίας υπερέντασης λαμβάνουν υπ' όψιν την τοπολογία του δικτύου και τις μεταβολές στην περιοχή, στο είδος και στην ποσότητα παραγωγής. Διαφορετικά, μπορεί να συμβεί μία ανεπιθύμητη λειτουργία ή αποτυχία λειτουργίας όταν απαιτηθεί.

Προκειμένου να αντιμετωπιστούν οι αμφίδρομες κατευθύνσεις ισχύος και τα χαμηλού επιπέδου ρεύματα βραχυκύκλωσης των μικροδικτύων που κυριαρχούνται από μικροπηγές με ηλεκτρονικά ισχύος, απαιτείται μία νέα φιλοσοφία προστασίας, όπου οι παράμετροι ρυθμίσεων των ηλεκτρονόμων πρέπει να ελέγχονται/ενημερώνονται περιοδικά για να διασφαλιστεί ότι εξακολουθούν να λειτουργούν κατάλληλα.

Στον Πίνακα 2.1 συνοψίζονται οι κυριότερες επιπτώσεις των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής στα σχήματα προστασίας των σύγχρονων δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας [10].

#	Επίπτωση	Παρατήρηση
1	Αλλαγή ροής ρεύματος σφάλματος	Η ροή ρεύματος δεν είναι ακτινική με DG, υπάρχουν ρεύματα στα οποία συμβάλουν τα DG, που είναι πάνω ή κάτω από το σημείο του σφάλματος
2	Αύξηση ή μείωση του ρεύματος σφάλματος	Εξαρτάται από την τοπολογική λειτουργία του συστήματος
3	Εσφαλμένη λειτουργία ασφαλειών	Είναι πιθανό να γίνει αναποτελεσματική λειτουργία ή καταστροφή ασφαλειών χωρίς να υπάρχει πραγματική βλάβη
4	Εσφαλμένη λειτουργία ηλεκτρονόμων	Λόγω αύξησης ροής του ονομαστικού ρεύματος
5	Χαλάρωση της συνεργασίας	Απώλεια επιλεκτικότητας και ευαισθησίας, ως αποτέλεσμα, το ρεύμα σφάλματος να αλλάξουν ροή και κατεύθυνση
6	Μη ανιχνεύσιμα σφάλματα	Όταν το νέο επίπεδο ρεύμα σφάλματος είναι χαμηλό
7	Ζημιά στη συσκευή διακοπής	Ως αποτέλεσμα ενός σφάλματος το ρεύμα αυξάνει και μπορεί να είναι μεγαλύτερο απ' τη ικανότητα διακοπής της εφαρμοζόμενης συσκευής.
8	1Φ σφάλμα μεγαλύτερο από 3Φ σφάλμα	Λόγων DG που έχουν μεγαλύτερο μονοφασικό ρεύμα σφάλματος
9	Απαραίτητοι διπλής κατεύθυνσης ηλεκτρονόμοι	Λόγω της επίπτωσης # 1
10	Μέγεθος ρεύματος σφάλματος εκτός των ορίων του εύρους λειτουργίας του ηλεκτρονόμου	Είναι πιθανό ότι το νέο μέγεθος ρεύματος σφάλματος (ανεξάρτητα αν αυξήθηκε ή μειώθηκε) δεν ανιχνεύεται από ηλεκτρονόμο με την σχέση μετασχηματισμού έντασης που είχε αρχικά εγκατασταθεί.
11	Λειτουργία ηλεκτρονόμου εκτός χρόνου	Ο ηλεκτρονόμος παύει να λειτουργεί λόγω σφάλματος, αλλά με μεγάλη καθυστέρηση, η οποία θεωρείται μη αποδεκτή.

**Πίν. 2.1:** Επιπτώσεις των Διεσπαρμένων Πηγών Ενέργειας στα συστήματα προστασίας

#### 2.2.4. Θέματα προστασίας

Τα ρεύματα σφάλματος καθορίζονται από τον τρόπο λειτουργίας του μικροδικτύου. Δηλαδή, αν είναι διασυνδεδεμένο με το κύριο δίκτυο ή λειτουργεί ως νησίδα. Κατά συνέπεια, η ισχύς βραχυκύκλωσης μπορεί να διαφέρει σημαντικά κατά περίπτωση. Ακόμη, τα σφάλματα προκαλούν απώλεια ευστάθειας, υπερένταση, διαρροή προς γη, αποσύνδεση γεννητριών, νησιδοποίηση κ.α.. Αναλόγως τα σημεία σφάλματος, σε σχέση με τις διεσπαρμένες γεννήτριες και τον υφιστάμενο εξοπλισμό προστασίας, εμφανίζονται προβλήματα όπως η αμφίδρομη ροή ισχύος και διακύμανση της τάσης.

Η ακριβής συνεισφορά των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής στο σφάλμα είναι απρόβλεπτη, λόγω του γεγονότος ότι η παραγόμενη και εγχυόμενη ισχύς τους αλλάζει διαρκώς. Τα βασικά ζητήματα της προστασία του δικτύου είναι:

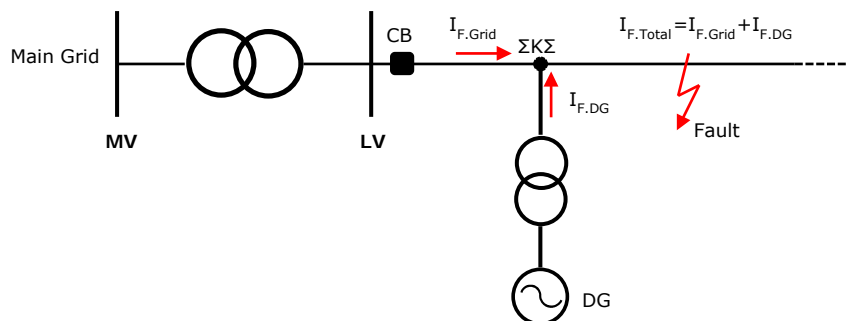
- η μεταβολή της στάθμης βραχυκύκλωσης

- η αμφίδρομη ροή ρεύματος και ρευμάτων βραχυκύκλωσης
- η νησιδοποίηση
- η πιθανή τύφλωση προστασίας και η εσφαλμένη λειτουργία των προστασιών
- η επιλεκτικότητα.

### Μεταβολή των ρευμάτων βραχυκύκλωσης

Όταν ένας μεγάλος αριθμός μικρών μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής, όπως είναι σύγχρονες ή ασύγχρονες γεννήτριες, συνδέεται στο δίκτυο διανομής το επίπεδο ρεύματος σφάλματος αλλάζει. Για παράδειγμα, αν τα προηγούμενα συνδέονται με αντιστροφείς το ρεύμα σφάλματος περιορίζεται σε μια χαμηλότερη τιμή, με αποτέλεσμα, ο ηλεκτρονόμος να λειτουργήσει ή να ανταποκριθεί με χρονική καθυστέρηση. Κατά συνέπεια, το μη ανιχνεύσιμο ρεύμα σφάλματος να παραμένει στο σύστημα και να προκαλέσει ανεπανόρθωτη ζημιά στον εξοπλισμό.

Επίσης, όταν η μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής συνδέεται στο δίκτυο παράλληλα με άλλα στοιχεία η αντίσταση σφάλματος μειώνεται. Για παράδειγμα, παρατηρείται στο Σχήμα 2.2 ότι όταν συμβαίνει σφάλμα μετά το Σημείο Κοινής Σύνδεσης συμβάλλει σε αυτό τόσο η κύρια πηγή, όσο και η μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής. Όμως, ο ηλεκτρονόμος τοποθετείται πριν το ΣΚΣ και μετρά μόνο το ρεύμα που παρέχει η κύρια πηγή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το πραγματικό ρεύμα σφάλματος να διαφέρει από το μετρούμενο, συνεπώς να μη λειτουργήσει σωστά ο ηλεκτρονόμος και να υπάρχουν προβλήματα συνεργασίας.

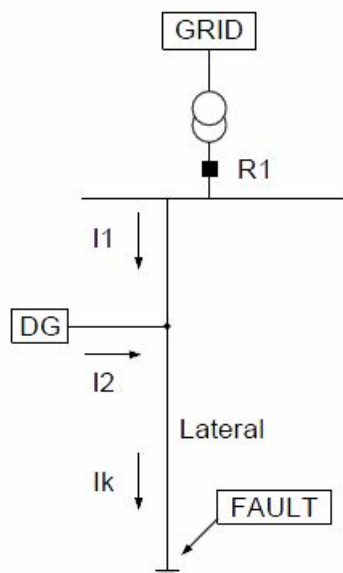


Σχ. 2.2: Συνεισφορά της ΔΓ στο σφάλμα

Γενικά, η διακύμανση στο μέγεθος του ρεύματος σφάλματος χρησιμοποιείται για τη διάκριση επιπέδου σφάλματος. Για παράδειγμα, όταν στο σύστημα υπάρχουν μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής που είναι συνδεδεμένες στο τέλος του δικτύου, το μέγεθος του ρεύματος σφάλματος μειώνεται με την αύξηση της απόστασης, λόγω αύξησης της σύνθετης αντίστασης. Ακόμη, όταν το μικροδίκτυο λειτουργεί αυτόνομα οι διεσπαρμένες πηγές ενέργειας μπορεί να είναι συνδεδεμένες με αντιστροφείς, τότε το μέγεθος του ρεύματος σφάλματος περιορίζεται σε μια χαμηλότερη τιμή, με αποτέλεσμα το επίπεδο σφαλμάτων να θεωρείται σχεδόν σταθερό. Τα παραδοσιακά σχέδια προστασίας που χρησιμοποιούν τη διακύμανση του μεγέθους του ρεύματος σφάλματος για διάκριση δεν λειτουργούν σωστά. Επομένως, είναι απαραίτητα τα νέα συστήματα προστασίας για τη προστασία στοιχείων του δικτύου.

Η παρουσία της διεσπαρμένης παραγωγής στο δίκτυο διανομής μπορεί να προκαλέσει ανεπάρκεια της προστασίας που ονομάζεται «reduction of reach». Το φάσμα (reach) της σύνθετης αντίστασης του ηλεκτρονόμου αποστάσεως εξαρτάται από την απόσταση μεταξύ της θέσης του ηλεκτρονόμου και του σημείου σφάλματος. Συγκεκριμένα, η μέγιστη απόσταση σημαίνει ότι ανιχνεύεται το ελάχιστο ρεύμα σφάλματος. Όταν η ΔΓ είναι ενταγμένη στο σύστημα, ο ηλεκτρονόμος αποστάσεως μπορεί να μην λειτουργήσει σύμφωνα με τις προκαθορισμένες ρυθμίσεις των ζωνών προστασίας. Όταν εμφανίζεται ένα σφάλμα μετά το ζυγό σύνδεσης της γεννήτριας στο δίκτυο, επειδή ο ηλεκτρονόμος βρίσκεται στην αρχή της προστατευόμενης γραμμής, θα μετρήσει υψηλότερη τιμή σε σχέση με την πραγματική τιμή της σύνθετης αντίστασης σφάλματος.

Στο Σχήμα 2.3 παρατηρείται ότι ο ηλεκτρονόμος «βλέπει»  $I_1$  σαν ρεύμα σφάλματος ενώ στη πραγματικότητα συμβάλλει σε αυτό και η ΔΓ με ρεύμα  $I_2$ . Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να επηρεάζει τη βαθμονόμηση των ηλεκτρονόμων και να προκαλέσει καθυστερημένη λειτουργία ή μερικές φορές αδυναμία λειτουργίας του ηλεκτρονόμου.



Σχ. 2.3: Περίπτωση «reduction of reach» του H/N αποστάσεως

### Αντίστροφη ροή ρεύματος

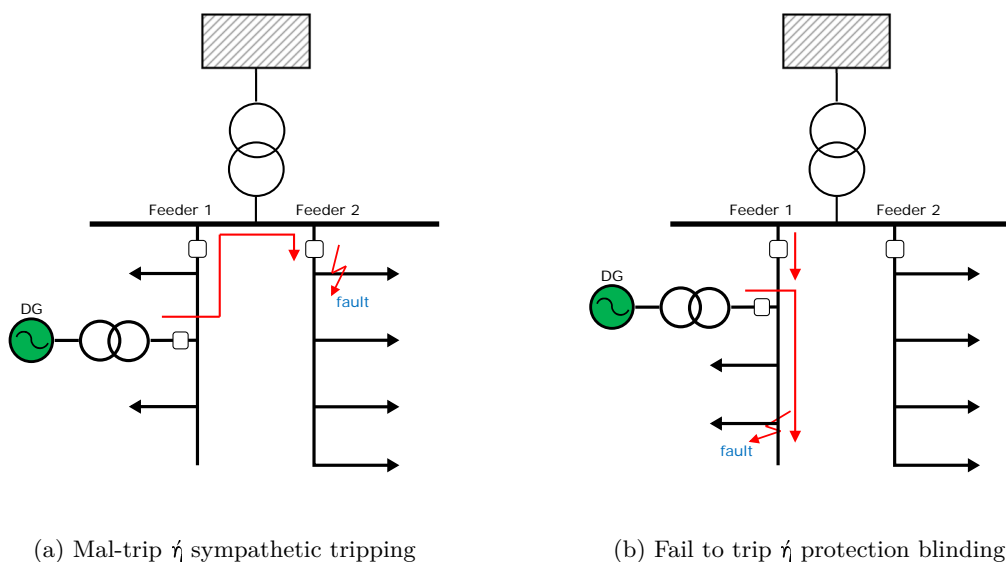
Η κύρια πρόκληση για την προστασία του μικροδικτύου πηγάζει από το γεγονός ότι η ισχύς βραχυκύκλωσης μπορεί να ρέει και στις δύο κατευθύνσεις, στο σημείο που συνδέεται η διεσπαρμένη παραγωγή, καθιστώντας ανεπαρκή τα τρέχοντα συστήματα προστασίας των δικτύων διανομής, που στηρίζονται σε μέσα προστασίας υπερέντασης χωρίς στοιχείο κατεύθυνσης. Επίσης, η ροή ισχύος αλλάζει κατεύθυνση στην περίπτωση όπου η τοπική παραγωγή - από διεσπαρμένη παραγωγή - υπερβαίνει την τοπική κατανάλωση. Τέλος, η ροή ισχύος μπορεί να προκαλέσει προβλήματα στην ποιότητα ισχύος καθώς και στη διακύμανση της τάσης. [9]

### Mal-trip (sympathetic tripping) και fail to trip (protection blinding)

Τα συστήματα προστασίας μπορεί να αποτύχουν σε δύο διαφορετικές περιπτώσεις: να αφαιρέσουν χωρίς λόγο μία μη-εσφαλμένη γραμμή (mal-trip ή sympathetic tripping) ή να μην αφαιρέσουν μία εσφαλμένη γραμμή (fail to trip ή protection blinding).

Η περίπτωση mal-trip ή sympathetic tripping συμβαίνει όταν η ΔΠ τροφοδοτεί το σφάλμα που έχει εμφανιστεί στη δεύτερη γραμμή τροφοδοσίας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.4a. Το ρεύμα αυτό μπορεί να υπερβαίνει το όριο του ηλεκτρονόμου που επιτηρεί την πρώτη γραμμή τροφοδοσίας, ως αποτέλεσμα να τη θέσει σε εκτός λειτουργίας χωρίς αυτό να είναι απαραίτητο.

Το fail to trip ή protection blinding συμβαίνει για σφάλματα που τυχαίνουν μετά τη ΔΠ, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.4b. Στην περίπτωση αυτή, το ρεύμα σφάλματος αποτελείται κυρίως από το ρεύμα που προέρχεται από τη μονάδα ΔΠ. Επομένως, το μέγεθος του ρεύματος σφάλματος που «αντιλαμβάνεται» ο Η/Ν, ο οποίος επιτηρεί την εν λόγω γραμμή τροφοδοσία, να είναι μικρό. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η προστασία να παραμένει παθητική και να μη γίνεται αποσύνδεση της γραμμής τροφοδοσίας. [12]



ΣΧ. 2.4: Δύο περιπτώσεις αποτυχίας των συστημάτων προστασίας [12]

Μερικές μονάδες της διεσπαρμένης παραγωγής, για παράδειγμα τα φωτοβολταϊκά συστήματα, εγχύουν μονοφασική ισχύ στο δίκτυο διανομής. Αυτό επηρεάζει τη συμμετρία του τριφασικού ρεύματος εξαιτίας της αύξησης του μη συμμετρικού ρεύματος που εμφανίζεται στον ουδέτερο αγωγό.

### Επιλεκτικότητα

Το σύστημα προστασίας είναι επιλεκτικό όταν κατά την εμφάνιση της βλάβης λειτουργήσει η πλησιέστερη συσκευή προστασίας για να αφαιρέσει το εσφαλμένο τμήμα. Στην περίπτωση που η ισχύς ρέει προς τη μία κατεύθυνση μπορεί να ανιχνευτεί χρησιμοποιώντας χρονοδιαβαθμισμένους ηλεκτρονόμους υπέρτασης. Όμως, όταν στο δίκτυο είναι ενσωματωμένη η μονάδα ΔΠ η ισχύς δεν ρέει μόνο προς τη μία κατεύθυνση, συνεπώς αυτά τα συστήματα προστασίας είναι ανεπαρκή.

Δηλαδή, υπάρχει πιθανότητα αποσύνδεσης του υγιούς τμήματος δικτύου χωρίς αυτό να είναι απαραίτητο.

Επίσης, το ρεύμα ενεργοποίησης του στοιχείου προστασίας κυμαίνεται μεταξύ του μεγίστου ρεύματος φορτίου και του ελαχίστου ρεύματος σφάλματος, το οποίο εξαρτάται από την κατάσταση του δικτύου, των διεσπαρμένων πηγών ενέργειας και τον τρόπο λειτουργίας του μικροδικτύου – αυτόνομα ή μη. [9]

## 2.3. Θεωρία Νησιδοποίησης

### 2.3.1. Ορισμός Νησιδοποίησης

Ως νησιδοποίηση ορίζεται η κατάσταση κατά την οποία ένα τμήμα του δικτύου, το οποίο περιλαμβάνει τόσο φορτίο και παραγωγή όσο και αποθήκευση, απομονώνεται από το υπόλοιπο δίκτυο αλλά συνεχίζει να λειτουργεί τροφοδοτούμενο από τις μονάδες παραγωγής και αποθήκευσης που συνδέονται στο τμήμα αυτό. Η νησιδοποίηση μπορεί να γίνεται σκόπιμα ή όχι.

Η δυνατότητα σκόπιμης νησιδοποίησης προϋποθέτει την ύπαρξη ελέγχου τάσης και συχνότητας μέσα στη νησίδα προκειμένου να διατηρείται ευσταθής η λειτουργία της. Αυτός ο έλεγχος μπορεί να περιλαμβάνει έλεγχο της παραγωγής (μέσω ρυθμιστών τάσης και συχνότητας), έλεγχο φορτίων (π.χ. απόρριψη μη κρίσιμων φορτίων), κατάλληλο έλεγχο πιθανών αποθηκευτικών μέσων κ.ά. Ένα σύννηθες παράδειγμα της σκόπιμης νησιδοποίησης είναι η απομονωμένη λειτουργία ενός Μικροδικτύου.

Όσον αφορά την μη σκόπιμη νησιδοποίηση, η επίδραση του ισοζυγίου της ισχύος παραγωγής – κατανάλωσης σ' αυτήν είναι μεγάλη. Μία μη σκόπιμη νησίδα συνήθως έχει μικρή διάρκεια ζωής. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι, καθώς η νησίδα περιλαμβάνει τυχαία φορτία και παραγωγούς, η παραγωγή της πιθανώς δεν ταυτίζεται με την ζήτησή της με αποτέλεσμα την ανισορροπία ισχύος κατά το σχηματισμό της. Η ανισορροπία αυτή με τη σειρά της συνεπάγεται μεγάλες αλλαγές στο μέτρο και τη συχνότητα της τάσης εκτός των προκαθορισμένων ορίων. Αυτό θα οδηγήσει σε διακοπή της λειτουργίας των συμμετεχόντων παραγωγών. Υπάρχει όμως η οριακή περίπτωση σχετικής ισορροπίας του ενεργειακού ισοζυγίου με αποτέλεσμα τη διατήρηση της νησίδας για μεγάλο χρονικό διάστημα. Η μη σκόπιμη νησιδοποίηση ενδέχεται να συμβεί εξαιτίας μιας πληθώρας αιτιών και είναι μη επιθυμητή καθώς συνοδεύεται από μια σειρά αρνητικών επιπτώσεων.

### 2.3.2. Αιτίες πρόκλησης του φαινομένου της νησιδοποίησης

Η μεγαλύτερη πρόκληση του σχεδιασμού του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας με συμπαραγωγή ήταν η προστασία αντι-νησιδοποίησης. Μία άλλη εξίσου σημαντική λειτουργική απαίτηση του δικτύου είναι η αποφυγή τυχαίας νησιδοποίησης οποιασδήποτε μονάδας ΔΠ με το δίκτυο. Το φαινόμενο της νησιδοποίησης μπορεί να συμβεί:

- σαν αποτέλεσμα ενός σφάλματος που να μην ανιχνεύει από τον προστατευτικό εξοπλισμό του δικτύου και οδηγεί σε απομόνωση του τμήματος του δικτύου το οποίο περιέχει το σφάλμα, εντούτοις δεν ανιχνεύεται από τις μονάδες ΔΠ του τμήματος αυτού

- σαν αποτέλεσμα διακοπής της τροφοδότησης από το δίκτυο διανομής για λόγους συντήρησης
- σαν αποτέλεσμα ανθρώπινου λάθους ή κακόβουλων ενεργειών.

Ένα παράδειγμα της πρώτης περίπτωσης (μη ανίχνευση του σφάλματος από την μονάδα ΔΠ) είναι όταν ένας μονοφασικός αντιστροφέας Φ/Β συστήματος συνδέεται σε μια από τις τρεις φάσεις του δικτύου διανομής. Ο μονοφασικός αντιστροφέας συνήθως διαθέτει ένα μονοπολικό μέσο προστασίας, όπως μια μονοπολική ασφάλεια, ή οποία συνεργάζεται επιλεκτικά μ' έναν τριπολικό διακόπτη. Όταν συμβεί μονοφασικό σφάλμα σε μια από τις άλλες δύο φάσεις του δικτύου διανομής, ο τριπολικός διακόπτης θα διακόψει την τροφοδότηση από το δίκτυο διανομής έως ότου εκκαθαριστεί το σφάλμα. Ωστόσο, η ασφάλεια που προστατεύει τον μονοφασικό αντιστροφέα δεν θα διεγερθεί, καθώς δεν υφίσταται διαταραχή της τάσης στη συγκεκριμένη φάση του τριφασικού δικτύου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το τμήμα του δικτύου από το διακόπτη κι έπειτα να παραμείνει ενεργοποιημένο από τον μονοφασικό αντιστροφέα. [27]

Τα συστήματα προστασίας αντι-νησιδοποίησης επιβάλλουν τις μονάδες ΔΠ να αποσυνδεθούν αμέσως για τα σφάλματα του δικτύου μέσω του συστήματος προστασίας «αντι-νησιδοποίηση». Αυτό μειώνει σημαντικά τα οφέλη της εφαρμογής των μονάδων αυτών. Για την πρόληψη αποσύνδεσης των μονάδων ΔΠ κατά τη διάρκεια νησιδοποίησης, αναπτύσσονται διάφορα συστήματα προστασίας αντι-νησιδοποίησης.

Μια μεγάλη πρόκληση για τα συστήματα προστασίας αντι-νησιδοποίησης είναι η προστασία του συντονισμού συσκευών προστασίας του συστήματος διανομής με αμφίδρομες ροές ρευμάτων σφάλματος. Αυτό είναι σε αντίθεση με την συμβατική προστασία υπερέντασης για ακτινικά δίκτυα με μονής κατεύθυνσης ροή ρεύματος σφάλματος. [13]

### 2.3.3. Η προστασία αντι-νησιδοποίησης

Ο βασικός στόχος της προστασίας αντι-νησιδοποίησης είναι να εντοπίζονται οι περιπτώσεις που οι μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής μένουν συνδεδεμένες στο τμήμα του δικτύου που έχει απομονωθεί από το κύριο σύστημα. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να παρατηρηθεί έπειτα από διακοπτική λειτουργία του συστήματος που προκλήθηκε από εκκαθάριση σφάλματος, προγραμματισμένη ή μη προγραμματισμένη απόρριψη φορτίου, διακοπές για συντήρηση ή αποτυχία εξοπλισμού κτλ.

Ο σκοπός της προστασίας αντι-νησιδοποίησης είναι να εντοπίσει και να αποσυνδέσει τις μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής από το δίκτυο μετά από κάθε περιστατικό απώλειας του τμήματος δικτύου.

Οι τυπικές απαιτήσεις για αυτή την προστασία είναι οι ακόλουθες:

1. Θα πρέπει οι ηλεκτρονόμοι να ενεργοποιηθούν το ταχύτερο δυνατό μετά την απομόνωση της νησίδας.
2. Οι μονάδες ΔΠ θα πρέπει να διατηρούν την τάση και τη συχνότητα του συστήματος μέσα σε προκαθορισμένα όρια.
3. Να αποφευχθεί οποιαδήποτε επανάζευξη εκτός συγχρονισμού.



Τα συστήματα ανίχνευσης αντι-νησιδοποίησης που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι:

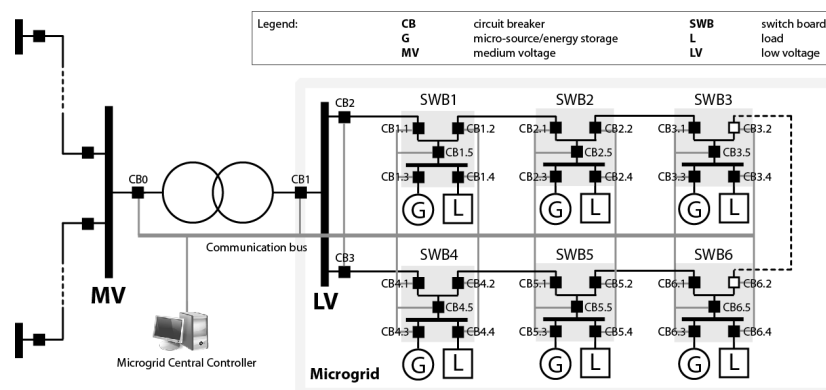
- a. Για DG μικρότερες από 200kVA:** Για μικρές DG, η νησιδοποίηση είναι ανιχνεύσιμη είτε από έναν ηλεκτρονόμο αντίστροφης ισχύος (reverse power relay), που παρακολουθεί την ροή ισχύος μέσα στο κύκλωμα, είτε μέσω ηλεκτρονόμων υπότασης και υποσυχνότητας. Η νησιδοποίηση συνήθως προκαλεί σοβαρή υπερφόρτιση της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής, προκαλώντας πτώση της τάσης και της συχνότητας. Σε αυτή την περίπτωση, οι ηλεκτρονόμοι υπότασης και υποσυχνότητας θα λειτουργήσουν και αυτόματα θα αποσυνδέσουν την μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής από τα φορτία του δικτύου.
- b. Για DG μεγαλύτερες από 200kVA:** Οι μεγάλες DG συνήθως περιέχουν αυτόματο ρυθμιστή τάσης υψηλής ταχύτητας. Επομένως, η παραγωγή τους μπορεί να διατηρήσει την τάση και τη συχνότητα στο ζυγό του φορτίου εντός των προκαθορισμένων ορίων. Έτσι για κάθε DG απαιτούνται εξειδικευμένοι ηλεκτρονόμοι για την ανίχνευση νησιδοποίησης και τη λειτουργία του Διακόπτη Ισχύος.[13]

## 2.4. Προσαρμοστική προστασία στα Δίκτυα Διανομής με ΔΠ

### 2.4.1. Εισαγωγή

Με τον όρο η *προσαρμοστική προστασία* αναφερόμαστε ως «μία online» δραστηριότητα που τροποποιεί κατάλληλα στη χρήση σχημάτων προστασίας που μπορούν να αλλάζουν και να προσαρμόζουν τις ρυθμίσεις των Η/Ν σε πραγματικό χρόνο, σύμφωνα με την τρέχουσα κατάσταση λειτουργίας του Δικτύου Διανομής (αλλαγές τοπολογίας, σύνδεση ΔΠ) [9]. Η εφαρμογή προσαρμοστικών συστημάτων προστασίας απαιτεί χρήση ψηφιακών ηλεκτρονόμων και σύγχρονων υποδομών επικοινωνίας και αποτελεί μια επιτυχή μέθοδο προστασίας δικτύων διανομής με ΔΠ.

Ένα σύστημα προσαρμοστικής προστασίας, συνήθως, χαρακτηρίζεται από ένα σχετικά υψηλό επενδυτικό κόστος σε σύγκριση με ένα πιο απλό συμβατικό σύστημα προστασίας βασισμένο σε ασφάλειες (fuses). Παράδειγμα ενός προσαρμοστικού συστήματος με χρήση ενός κεντρικού υπολογιστή σ' ένα δίκτυο διανομής με ΔΠ παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.5.



Σχ. 2.5: Προσαρμοστικό σύστημα προστασίας στο δίκτυο διανομής με ΔΠ [8]

Υπάρχει ένας κεντρικός ελεγκτής  $\Delta\Delta$  με  $\Delta\Pi$  «Microgrid Central Controller» (MCC) και ένα σύστημα επικοινωνίας επιπλέον από τα στοιχεία που εμφανίζονται στο Σχήμα 2.1. Τα ηλεκτρονικά στοιχεία που είναι υπεύθυνα για την επικοινωνία καθιστούν κάθε  $\Delta I$  με ενσωματωμένο ηλεκτρονόμο υπερέντασης κατεύθυνσης ικανό να ανταλλάσσει πληροφορίες με ένα MCC. Στις επόμενες ενότητες περιγράφονται διάφορες υλοποιήσεις της προσαρμοστικής φιλοσοφίας.

### 2.4.2. Off-line ανάλυση

Δημιουργείται ένας πίνακας γεγονότων (event table) όπου καταγράφονται οι σημαντικές ρυθμίσεις του δικτύου διανομής με  $\Delta\Pi$  καθώς και οι καταστάσεις διακοπών των διεσπαρμένων πηγών ενέργειας (on/off) για την off-line ανάλυση σφαλμάτων. Κάθε καταχώρηση στον πίνακα γεγονότων έχει έναν αριθμό στοιχείων ίσο με το πλήθος των επιτηρούμενων  $\Delta I$  του δικτύου διανομής με  $\Delta\Pi$  (κάποια στοιχεία ενδέχεται να έχουν μεγαλύτερη προτεραιότητα σε σχέση με άλλα, π.χ. ο κεντρικός  $\Delta I$  που συνδέει το δίκτυο XT με το δίκτυο MT τάσης) και είναι κωδικοποιημένα στο δυαδικό σύστημα, π.χ. στοιχείο = 1, αν ο αντίστοιχος  $\Delta I$  είναι κλειστός και 0 αν είναι ανοικτός (Σχήμα 2.6).

	CB 0	CB 1	CB 2	CB 3	CB 1.1	CB 1.2	CB 1.3	CB 1.4	CB 1.5	CB 2.1	CB 2.2	CB 2.3	CB 2.4	CB 2.5	CB 3.1	CB 3.2	CB 3.3	CB 3.4	CB 3.5	CB 6.4	CB 6.5	
Base case	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	...	1	1
Case 1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0	1	1	...	0	1
...																						
Case n	1	1	1	1	1	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	...	1	1

Σχ. 2.6: Δομή ενός πίνακα γεγονότων [8]

Στη συνέχεια, τα ρεύματα σφάλματος που διέρχονται μέσα από τους  $\Delta I$  υπολογίζονται με ανάλυση βραχυκυκλωμάτων (τριφασικό, διφασικό, μονοφασικό, κ.ά.) σε διαφορετικές τοποθεσίες του  $\Delta\Delta$  με  $\Delta\Pi$  σύμφωνα με το πρότυπο IEC 60909. Κατά τη διάρκεια επαναλαμβανόμενων υπολογισμών βραχυκυκλώσεων, λαμβάνονται υπόψη όλες οι πιθανές τοπολογίες του δικτύου και τα σενάρια σύνδεσης των μονάδων  $\Delta\Pi$ . Καθώς επεξεργάζονται οι τιμές σφάλματος που έχει υποστεί σε διαφορετικές τοποθεσίες και καταστάσεις του  $\Delta\Delta$  με  $\Delta\Pi$ , τα αποτελέσματα (το μέγεθος και η κατεύθυνση του ρεύματος σφάλματος που αντιλαμβάνεται κάθε ηλεκτρονόμος) αποθηκεύονται σε μία κατάλληλη δομή δεδομένων (data structure).

Με βάση αυτά τα αποτελέσματα, υπολογίζονται κατάλληλες ρυθμίσεις για κάθε ηλεκτρονόμο υπερέντασης κατεύθυνσης και για κάθε συγκεκριμένη κατάσταση συστήματος, έτσι ώστε να είναι εγγυημένη η επιλεκτική λειτουργία (selective operation) της προστασίας του  $\Delta\Delta$  με  $\Delta\Pi$ . Αυτές οι ρυθμίσεις ομαδοποιούνται σε ένα πίνακα δράσης (action table) που έχει τις ίδιες διαστάσεις με τον πίνακα γεγονότων. Επιπλέον, εκτός της παραμετροποίησης των ρυθμίσεων προστασίας, άλλες ενέργειες όπως η ενεργοποίηση της λειτουργίας προστασίας είναι εφικτές. Π.χ. ένα κλείδωμα (interlock) σε μία κατεύθυνση μπορεί να ενεργοποιηθεί σε κατάσταση νησιδοποίησης. Οι πίνακες γεγονότων και δράσεων αποτελούν τμήμα της διαμόρφωσης της προστασίας του  $\Delta\Delta$  με  $\Delta\Pi$  και του συστήματος ελέγχου.

### 2.4.3. On-line λειτουργία

Κατά τη διάρκεια της On-line λειτουργίας ο κεντρικός ελεγκτής ΔΔ με ΔΠ (MCC) παρακολουθεί την κατάσταση του ΔΔ με ΔΠ ελέγχοντας τις καταστάσεις των επιμέρους ηλεκτρονόμων υπερέντασης κατεύθυνσης. Αυτή η διαδικασία εκτελείται περιοδικά ή ενεργοποιείται μετά από ένα γεγονός (π.χ. ενεργοποίηση του ΔΙ, συναγερμός προστασίας, κτλ.) και χρησιμοποιεί το σύστημα επικοινωνίας που φαίνεται στο Σχήμα 2.5.

Η πληροφορία της κατάστασης του ΔΔ με ΔΠ που λαμβάνονται από τον MCC χρησιμοποιούνται στη δημιουργία μίας καταγραφής κατάστασης (Status record), η οποία έχει παρόμοιες διαστάσεις με μία μονή καταχώρηση στον πίνακα γεγονότων. Αυτή η καταγραφή κατάστασης χρησιμοποιείται για να αναγνωρισθεί μία αντίστοιχη καταγραφή στον πίνακα γεγονότων. Τέλος, ο αλγόριθμος λαμβάνει τις προϋπολογισμένες ρυθμίσεις των ηλεκτρονόμων από τις αντίστοιχες καταχωρίσεις στον πίνακα δράσης (Action table) και ενημερώνει τις ρυθμίσεις στις συσκευές προστασίας που βρίσκονται στο πεδίο μέσω συστημάτων επικοινωνίας. Το Σχήμα 2.7 παρουσιάζει τις φάσεις του αλγορίθμου προσαρμοστικής προστασίας.



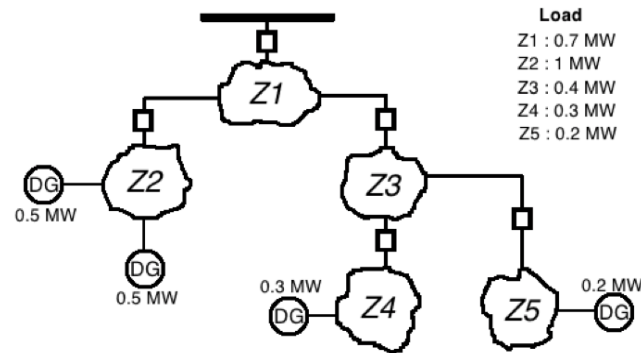
Σχ. 2.7: Φάσεις αλγορίθμου κατά την on-line λειτουργία [8]

### 2.4.4. Διαδικασία για τον καθορισμό των ζωνών

Σε άλλες υλοποιήσεις της προσαρμοστικής φιλοσοφίας το δίκτυο χωρίζεται σε ζώνες οι οποίες μελετιούνται ανεξάρτητα. Μία απ' αυτές τις υλοποιήσεις περιγράφεται παρακάτω.

Η διαδικασία καθορίζει τις πιθανές ανεξάρτητες ζώνες που μπορούν να λειτουργήσουν τόσο ως νησίδες, όσο και ως λειτουργία της ΔΠ εγκατεστημένη σε μία ζώνη μόνη της. Στη συνέχεια, το σύστημα μιας ζώνης θα προσδιοριστεί από τη θέση και τη δυναμικότητα της ΔΠ που εγκαθίσταται σε αυτή. Η ιδέα είναι να ξεκινάει κάποιος από τους ζυγούς στους οποίους συνδέεται η ΔΠ και να προεκτείνει την κάθε ζώνη όσο η ΔΠ που βρίσκεται μέσα σε αυτή είναι ικανή να παρέχει το φορτίο αιχμής της ζώνης αυτής. Όταν το φορτίο αιχμής της ζώνης ξεπεράσει την ικανότητα της ΔΠ, η εν λόγω ζώνη έχει τελειώσει, και ένας Διακόπτης Αυτόματης Επαναφοράς - ΔΑΕ (recloser) πρέπει να τοποθετηθεί στην αρχή και στο τέλος της ζώνης μόνο εάν αυτά τα σημεία συνδέονται με άλλες ζώνες.

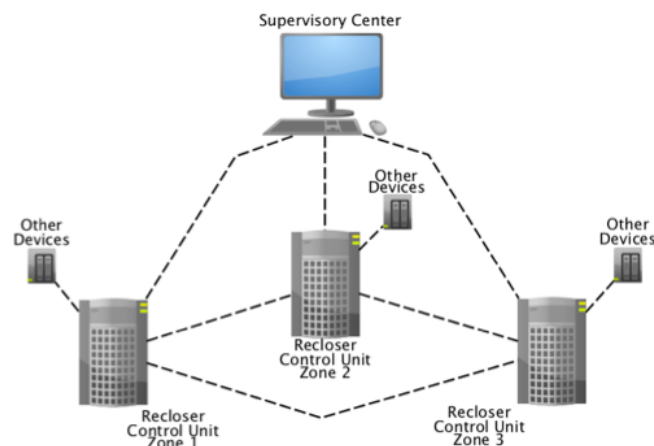
Το Σχήμα 2.8 απεικονίζει ένα σύστημα που χωρίζεται σε πέντε ζώνες χρησιμοποιώντας την προηγούμενη διαδικασία. Κάθε ζώνη αποτελεί μια ομάδα από ζυγούς του συστήματος. Επίσης, η ζώνη 1 τροφοδοτείται από τον υποσταθμό ΥΤ/ΜΤ. Δεν υπάρχουν ΔΠ στις ζώνες 1 και 3.



Σχ. 2.8: Σύστημα διανομής που χωρίζεται σε ζώνες σύμφωνα με την ικανότητα της ΔΠ [15]

Σκοπός του συγκεκριμένου σχήματος είναι να συντονίζει και να ελέγχει κατάλληλα τις μονάδες ΔΑΕ που χωρίζουν κάθε ζώνη. Οι ΔΑΕ μεταξύ των ζωνών θα πρέπει να επικοινωνούν και να ανταποκρίνονται κατάλληλα σε κάθε σφάλμα και να προσαρμόζονται σε οποιαδήποτε αλλαγή της τοπολογίας του συστήματος.

Επιπλέον, η ιδέα του συστήματος είναι επίσης να αυξηθεί η αξιοπιστία. Έτσι, προτείνεται μια αποκεντρωμένη αρχιτεκτονική, όπου όλες οι μονάδες ΔΑΕ αλληλεπιδρούν μεταξύ τους και με άλλες συσκευές κατά ανεξάρτητο τρόπο (Σχήμα 2.9). Το κέντρο ελέγχου είναι τοποθετημένο στον υποσταθμό ΥΤ/ΜΤ, όπου συγκεντρώνει πληροφορίες για το σύστημα και αποστέλλει σήματα πληροφορίας και ελέγχου στους ΔΑΕ [15].



Σχ. 2.9: Αποκεντρωμένη αρχιτεκτονική με ένα κέντρο ελέγχου και τρεις μονάδες ΔΑΕ [15]

## Κεφάλαιο 3

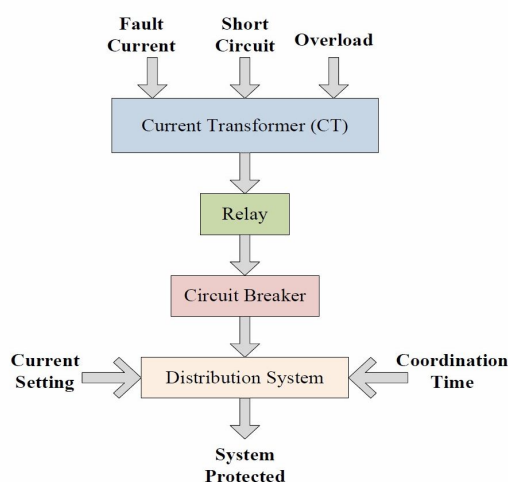
# Συνεργασία των ηλεκτρονόμων υπερέντασης

### 3.1. Η/N υπερέντασης

Οι Η/Ν υπερέντασης είναι ένα είδος προστασίας το οποίο λειτουργεί όταν το ρεύμα φόρτισης υπερβεί μία προκαθορισμένη τιμή. Έχει μία είσοδο σε μορφή εναλλασσόμενου ρεύματος. Η έξοδος του ηλεκτρονόμου, σε κανονική κατάσταση, είναι ανοιχτή επαφή και μπορεί να αλλάζει σε κλειστή επαφή όταν ο ηλεκτρονόμος ενεργοποιείται (trips). Διαθέτει δύο ρυθμίσεις, οι οποίες είναι γνωστές συνήθως ως ρύθμιση χρόνου (time setting) και ρύθμιση ρεύματος (plug setting). Η λειτουργία της ρύθμισης χρόνου είναι να καθορίσει τον χρόνο λειτουργίας (ενεργοποίησης) του ηλεκτρονόμου, ενώ το ρεύμα ρύθμισης καθορίζει το ρεύμα κατωφλιού του ηλεκτρονόμου.

Ο Η/Ν υπερέντασης χρησιμοποιείται ευρέως σε πολλές εφαρμογές προστασίας σε όλα τα συστήματα ισχύος. Όταν εμφανιστεί ένα σφάλμα, μεγάλη ποσότητα ρεύματος διέρχεται μέσα από το κύκλωμα με αποτέλεσμα να υπάρχει κίνδυνος καταστροφών συστήματος εξοπλισμού. Επομένως, ο Η/Ν υπερέντασης αναλαμβάνει να απομονώσει την εσφαλμένη περιοχή το συντομότερο δυνατό. Ο ηλεκτρονόμος υπερέντασης τροφοδοτείται από ένα μετασχηματιστή έντασης και βαθμονομείται για να λειτουργεί σε συγκεκριμένο επίπεδο ρεύματος. Σε περίπτωση λειτουργίας του, μία ή περισσότερες επαφές θα κλείσουν και θα ενεργοποιήσουν ένα πηνίο μανδάλωσης που επιτηρεί, ο οποίος στη συνέχεια θα ανοίξει τον ΔΙ.

Στο Σχήμα 3.1 απεικονίζεται η λειτουργία της προστασίας υπερέντασης στα δίκτυα διανομής με το ρεύμα ρύθμισης και τον χρόνο συνεργασίας [16].



Σχ. 3.1: Απεικόνιση λειτουργίας προστασιών στα δίκτυα διανομής [16]

### 3.2. Πρόβλημα Συνεργασίας

Η προστασία υπερέντασης θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως βασική προστασία των δικτύων διανομής ή μεταφοράς. Η προστασία υπερέντασης κατεύθυνσης είναι απαραίτητη για δίκτυα που εμπεριέχουν βρόχους ή πολλαπλές πηγές τροφοδότησης ώστε να περιορίσει την ευαισθησία του ηλεκτρονόμου για σφάλματα σε μία μόνο κατεύθυνση. Ο σκοπός του προβλήματος συνεργασίας (coordination) είναι να βρεθούν βέλτιστες τιμές για τη σταθερά χρόνου (Time Dial Setting - TDS) και το ρεύμα ρύθμισης (Pickup Current) των ηλεκτρονόμων καθώς αυτές υπόκεινται σε ορισμένους περιορισμούς. Οι περιορισμοί αυτοί κυμαίνονται από τα χαρακτηριστικά του ηλεκτρονόμου μέχρι τις τοπολογικές αλλαγές του δικτύου. Γενικά, το πρόβλημα συνεργασίας είναι ένα πρόβλημα μη γραμμικού προγραμματισμού το οποίο θα μπορούσε να λυθεί από γνωστές μαθηματικές ή εξελικτικές τεχνικές.

### 3.3. Περιγραφή του προβλήματος συνεργασίας

Το πρόβλημα συνεργασίας θα μπορούσε να διατυπωθεί ως ένα γραμμικό ή μη γραμμικό πρόβλημα. Στο γραμμικό μοντέλο, μόνο η χρονική σταθερά βελτιστοποιείται ενώ το ρεύμα ρύθμισης είναι καθορισμένο και λαμβάνει τιμή ανάμεσα στο μέγιστο ρεύμα φόρτισης και το ελάχιστο ρεύμα σφάλματος. Ωστόσο, κατά την προσέγγιση μη γραμμικού προγραμματισμού, με βάση τα χαρακτηριστικά του ηλεκτρονόμου, η σταθερά χρόνου και το ρεύμα ρύθμισης βελτιστοποιούνται ταυτόχρονα. Λόγω της αβεβαιότητας του φορτίου και τις τοπολογικές αλλαγές του δικτύου, οι ρυθμίσεις που προκύπτουν δεν είναι βέλτιστες σε όλα τα πιθανά σενάρια. Επομένως, το πρόβλημα συνεργασίας θα πρέπει να τροποποιηθεί έτσι ώστε να λαμβάνει υπ' όψιν όλα τα πιθανά σενάρια.

Το ρεύμα ρύθμισης του ηλεκτρονόμου παραμένει στο διάστημα ανάμεσα στη μέγιστη και στην ελάχιστη τιμή όλων των ρευμάτων βραχυκύκλωσης που μπορούν να παρατηρηθούν στο τμήμα της γραμμής που επιβλέπει. Το ρεύμα ρύθμισης θα πρέπει να είναι πάνω από το μεγαλύτερο δυνατό ρεύμα φόρτισης και κάτω από το ελάχιστο ρεύμα βραχυκύκλωσης, με ένα περιθώριο ασφάλειας (security margin). Κάθε ηλεκτρονόμος έχει δύο ζώνες προστασίας, πρωτεύουσα (primary) και εφεδρική (backup). Η ρύθμιση, επίσης, θα πρέπει να παρέχει εφεδρική προστασία σε γειτονικές γραμμές μεταφοράς ισχύος (neighbor feeders).

Ο σκοπός της σταθεράς χρόνου είναι να επιτρέψει στους ηλεκτρονόμους τη μεταξύ τους συνεργασία. Παρέχοντας ένα σύνολο καμπυλών, δύο ή περισσότεροι ηλεκτρονόμοι, εντοπίζοντας το ίδιο σφάλμα, μπορούν να λειτουργήσουν σε διαφορετικούς χρόνους. Για το λόγο αυτό, ο κύριος στόχος του προβλήματος συνεργασίας είναι να βρεθούν βέλτιστες τιμές σταθεράς χρόνου και ρεύματος ρύθμισης, με έναν ελάχιστο χρόνο λειτουργίας των ηλεκτρονόμων της πρωτεύουσας ζώνης προστασίας και σε συνδυασμό με τοπολογικές και προσωρινές αλλαγές των παραμέτρων του δικτύου. Επομένως, υπάρχει μία εμφανής ανάγκη βελτίωσης του προβλήματος συνεργασίας υπερέντασης, με στόχο την εύρεση βέλτιστων ρυθμίσεων σε σχέση με τις τοπολογικές ή λειτουργικές αλλαγές σε πραγματικά συστήματα ισχύος.

### 3.4. Διατύπωση του προβλήματος συνεργασίας

Η συνεργασία των ηλεκτρονόμων υπερέντασης κατεύθυνσης σε ένα σύστημα με πολλαπλούς βρόχους διατυπώνεται ως ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης. Το πρόβλημα συνεργασίας, που συμπεριλαμβάνει την αντικειμενική συνάρτηση και τους περιορισμούς, θα πρέπει να πληροί και τις τρεις παρακάτω απαιτήσεις:

1. Ο συνολικός χρόνος λειτουργίας των ηλεκτρονόμων πρωτεύουσας προστασίας θα πρέπει να ελαχιστοποιηθεί διατηρώντας τη συνεργασία μεταξύ όλων των ηλεκτρονόμων.
2. Το ρεύμα ρύθμισης και η σταθερά χρόνου θα πρέπει να παραμένουν αμετάβλητα σε σχέση με όλα τα δυνατά τοπολογικά και λειτουργικά σενάρια.
3. Η τεχνική βελτιστοποίησης θα πρέπει να είναι ικανή να βρει τις όσο το δυνατό ολικά βέλτιστες ρυθμίσεις.

#### 3.4.1. Αντικειμενική συνάρτηση (objective function)

Σκοπός του προβλήματος συνεργασίας είναι να ελαχιστοποιηθεί το συνολικό άθροισμα με συντελεστές βαρύτητας των χρόνων λειτουργίας των ηλεκτρονόμων πρωτεύουσας προστασίας. Στη Σχέση 3.1 παρουσιάζεται η μαθηματική μορφή της αντικειμενικής συνάρτησης.

$$\min_{I_{pu,i}, TDS_i} z = \sum_{i=1}^m T_{ik} \quad (3.1)$$

όπου οι μεταβλητές  $I_{pu,i}$  και  $TDS_i$  παριστάνουν το ρεύμα ρύθμισης και τη σταθερά χρόνου του ηλεκτρονόμου  $i$  αντίστοιχα. Ο χρόνος λειτουργίας του ηλεκτρονόμου  $i$  στη θέση  $k$  (π.χ.:  $T_{ik}$ ) ορίζεται από τη Σχέση 3.2.

$$T_{ik} = f_i(I_{pu,i}, I_{ik}) \cdot TDS_i \quad (3.2)$$

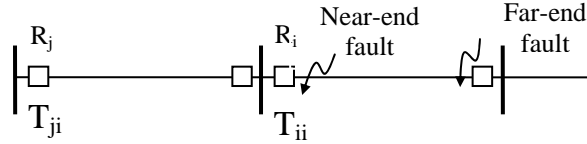
όπου το  $I_{ik}$  είναι το ρεύμα βραχυκύκλωσης που βλέπει ο ηλεκτρονόμος  $i$  για σφάλμα στη θέση  $k$ .

Οι χαρακτηριστικές που επιλέχθηκαν ανήκουν στις οικογένειες καμπυλών IEC/IEEE και ορίζονται σύμφωνα με τη Σχέση 3.3.

$$T_{ik} = TDS_i \cdot \left( \frac{K}{\left( \frac{I_{ik}}{I_{pu,i}} \right)^a - 1} + L \right) \quad (3.3)$$

Όπου το  $K$  και το  $a$  είναι σταθερές παράμετροι. Για καμπύλες IEC, η μεταβλητή  $L$  ισούται με μηδέν [17].

Επίσης, να σημειωθεί πως το  $T_{ik}$  (ή το  $T_{ii}$  όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.2) είναι ο χρόνος λειτουργίας του ηλεκτρονόμου  $R_i$  πρωτεύουσας προστασίας για ένα σφάλμα αμέσως μετά τον ηλεκτρονόμο αυτό (close-in ή Near-end fault), όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.2 [29].



Σχ. 3.2: Χρόνοι λειτουργίας και σφάλματα

### 3.4.2. Περιορισμοί (Constraints)

Το πρόβλημα συνεργασίας έχει δύο τύπους περιορισμών, συμπεριλαμβανομένου τους περιορισμούς από τις χαρακτηριστικές του ηλεκτρονόμου και τους περιορισμούς συνεργασίας. Οι περιορισμοί ηλεκτρονόμου περιλαμβάνουν τα όρια του χρόνου λειτουργίας του ηλεκτρονόμου και των ρυθμίσεων. Οι περιορισμοί συνεργασίας σχετίζονται με τη συνεργασία των πρωτεύοντων και εφεδρικών ηλεκτρονόμων.

1) Περιορισμός του χρόνου λειτουργίας του ηλεκτρονόμου: ο χρόνος λειτουργίας ενός ηλεκτρονόμου είναι μία συνάρτηση του ρεύματος ρύθμισης και του ρεύματος σφάλματος που βλέπει ο ηλεκτρονόμος. Με βάση το είδος του ρελέ, ο χρόνος λειτουργίας καθορίζεται μέσω τυποποιημένων καμπυλών αντίστροφου χρόνου ή αναλυτικής συνάρτησης. Το εύρος του χρόνου λειτουργίας εκφράζεται από τη Σχέση 3.4.

$$T_{ik}^{min} \leq T_{ik} \leq T_{ik}^{max}, i = 1, \dots, m. \quad (3.4)$$

όπου  $T_{ik}^{min}$  και  $T_{ik}^{max}$  είναι οι ελάχιστοι και οι μέγιστοι χρόνοι λειτουργίας του ηλεκτρονόμου  $i$  στη θέση  $k$ .

2) Περιορισμοί ρυθμίσεων χρόνου και ρεύματος: τα όρια των  $TDS$  και  $I_{pu}$  εκφράζονται από τις Σχέσεις 3.5 και 3.6 αντίστοιχα.

$$TDS_i^{min} \leq TDS_i \leq TDS_i^{max}, i = 1, \dots, m. \quad (3.5)$$

$$I_{pu,i}^{min} \leq I_{pu,i} \leq I_{pu,i}^{max}, i = 1, \dots, m. \quad (3.6)$$

Το ρεύμα ρύθμισης θα πρέπει να είναι μεγαλύτερο από το μέγιστο πιθανό ρεύμα φόρτισης και μικρότερο από το ελάχιστο ρεύμα σφάλματος με ένα λογικό περιθώριο ασφαλείας.

3) Περιορισμοί συνεργασίας: ο χρόνος λειτουργίας του εφεδρικού ηλεκτρονόμου θα πρέπει να επιλεγεί κατάλληλα ώστε να είναι μεγαλύτερος από τον χρόνο λειτουργίας του αντίστοιχου ηλεκτρονόμου πρωτεύουσας προστασίας. Αυτό το χρονικό διάστημα ονομάζεται Χρονικό Διάστημα Συνεργασίας (Coordination Time Interval – CTI) και προστίθεται στον χρόνο λειτουργίας των πρώτων εφεδρικών ηλεκτρονόμων [17]. Αυτό το χρονικό διάστημα συνεργασίας καθορίζεται με βάση τη Σχέση 3.7.

$$CTI = breaker\ time + overtravel\ time + security\ margin \quad (3.7)$$

όπου:



<i>CTI</i>	το χρονικό Διάστημα Συνεργασίας
<i>breaker time</i>	ο χρόνος λειτουργίας του διακόπτη ισχύος
<i>overtravel time</i>	ο χρόνος μετάδοσης του σήματος από τον ηλεκτρονόμο στον διακόπτη ισχύος
<i>security margin</i>	ο συντελεστής ασφαλείας που εξαρτάται από την ακρίβεια του ηλεκτρονόμου και τη διακύμανση των χρόνων λειτουργίας των διακοπών ισχύος [21].

Για ένα δεδομένο σφάλμα στη θέση  $k$  ο περιορισμός συνεργασίας μπορεί να περιγράφεται από τη Σχέση 3.8, όπου ο  $H/N$   $j$  είναι εφεδρικός του  $H/N$   $i$ .

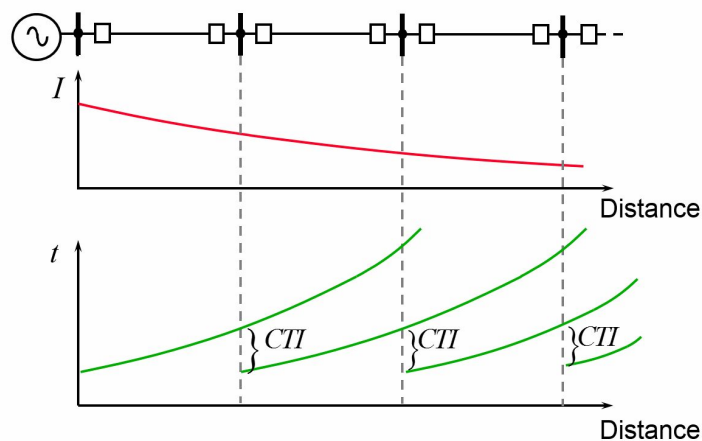
$$T_{jk} \geq T_{ik} + CTI, \quad i = 1, \dots, m. \quad (3.8)$$

Οι τιμές του *CTI* μεταβάλλονται από 0,2 έως 0,3 sec.

4) Τοπολογικές αλλαγές: Εξετάζοντας όλα τα πιθανά σενάρια τοπολογικών αλλαγών του δικτύου, η βέλτιστη ρύθμιση είναι η ρύθμιση που παρέχει τον ελάχιστο συνολικό χρόνο λειτουργίας για όλες τις πιθανές διαμορφώσεις [17].

Στο Σχήμα 3.3 παρουσιάζεται ο χρόνος λειτουργίας του ηλεκτρονόμου αντίστροφου χρόνου ως συνάρτηση της απόστασης από το σφάλμα. Σημειώνεται ότι κάθε καμπύλη αρχίζει στη θέση του ηλεκτρονόμου και εκτείνεται πέρα από το τέλος της προκειμένης γραμμής. Αυτό σημαίνει ότι το στοιχείο υπερέντασης παρέχει πρωτεύουσα προστασία στην προστατευόμενη γραμμή και εφεδρική προστασία στην προκειμένη γραμμή.

### Inverse-Time Relay Coordination



ΣΧ. 3.3: χρόνος λειτουργίας  $H/N$  ως συνάρτηση της απόστασης από το σφάλμα [23]

Παρατηρείται ότι ο χρόνος λειτουργίας του ηλεκτρονόμου υπερέντασης αντίστροφου χρόνου αυξάνεται όταν το ρεύμα σφάλματος μειώνεται, ή ισοδύναμα, όταν αυξάνει η απόσταση από το σφάλμα [23].

### 3.5. Τρόποι ρύθμισης ηλεκτρονόμων υπερέντασης

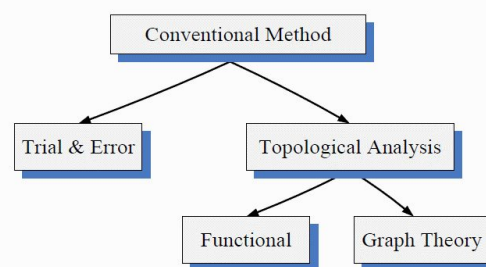
#### 3.5.1. Παραδοσιακές μέθοδοι τεχνικών βελτιστοποίησης

Αρκετές μέθοδοι έχουν προταθεί τις τελευταίες δεκαετίες (από το 1960) για συνεργασία των ηλεκτρονόμων υπερέντασης. Αυτές οι μέθοδοι μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις κατηγορίες: δοκιμής και λάθους (trial and error), τοπολογικής ανάλυσης (Topological Analysis) και μεθόδου βελτιστοποίησης (Optimization Method).

Η προσέγγιση της μεθόδου δοκιμής και λάθους χρησιμοποιήθηκε αλλά έχει βραδύ ρυθμό σύγκλισης, ως αποτέλεσμα του μεγάλου αριθμού επαναλήψεων που χρειάζεται να γίνουν ώστε να επιτευχθεί μια κατάλληλη ρύθμιση ηλεκτρονόμων. Για να ελαχιστοποιηθεί ο αριθμός των επαναλήψεων που απαιτούνται για τη διαδικασία συνεργασίας, προτείνεται μία τεχνική η οποία διακόπτει όλους τους βρόχους του συστήματος σε σημεία διακοπής (breakpoints) και εντοπίζει τους ηλεκτρονόμους από τους οποίους πρέπει να ξεκινήσει η διαδικασία ρύθμισης. Η εύρεση των σημείων διακοπής είναι το σημαντικό μέρος για να ξεκινήσει η διαδικασία συνεργασίας.

Οι τοπολογικές μέθοδοι, οι οποίες περιλαμβάνουν τη συναρτησιακή μέθοδο (functional) και θεωρία γραφημάτων (Graph theory) χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό των σημείων διακοπής. Στη συναρτησιακή μέθοδο, οι περιορισμοί σχετικά με τις ρυθμίσεις των ηλεκτρονόμων διατυπώνονται από ένα σύνολο εξαρτημένων εξισώσεων. Άλλη τοπολογική ανάλυση είναι η γραμμική θεωρία γραφημάτων, η οποία έχει επεκταθεί για να αναλύσει όλους τους απλούς βρόχους του δικτύου και στις δύο κατευθύνσεις λαμβάνοντας υπόψη το ελάχιστο σύνολο των σημείων διακοπής και τα ζεύγη ηλεκτρονόμων, πρωτεύον και εφεδρικό.

Η λύση που βρέθηκε με τη μέθοδο αυτή είναι καλύτερη αλλά δεν είναι βέλτιστη, με την αυστηρή έννοια του όρου. Αυτό σημαίνει ότι, οι σταθερές χρόνου είναι υψηλές. Επομένως, λόγω της πολυπλοκότητας του συστήματος η προσέγγιση δοκιμής και λάθους και η τοπολογική ανάλυση είναι χρονοβόρες και μη βέλτιστες. Το Σχήμα 3.4 δείχνει την κατηγοριοποίηση των κλασικών μεθόδων που χρησιμοποιείται για τη βέλτιστη ρύθμιση ηλεκτρονόμων υπερέντασης.



Σχ. 3.4: Συμβατικές μέθοδοι για εύρεση βελτίστου

Στις περιπτώσεις όπου το δίκτυο διανομής έχει συνδεδεμένες περισσότερες από μία πηγές, οι ηλεκτρονόμοι υπερέντασης κατεύθυνσης (Directional Overcurrent Relay) αποδεικνύονται να είναι η καλύτερη λύση. Η ρύθμιση τους πλέον επιτυγχάνεται με χρήση τεχνικών βελτιστοποίησης.

Οι ηλεκτρονόμοι υπερέντασης κατεύθυνσης χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες:

1. Τεχνική καμπύλης (curve fitting technique)
2. Θεωρητική Τεχνική γραφήματος (graph theoretical technique)

### 3. Τεχνική βελτιστοποίησης (optimization technique)

1. Οι τεχνικές καμπύλης χρησιμοποιούνται για να καθορίσουν την καλύτερη συνάρτηση για την αναπαράσταση των δεδομένων. Οι χαρακτηριστικές των ηλεκτρονόμων μοντελοποιούνται μαθηματικά με την πολυωνυμική μορφή χρησιμοποιώντας τεχνικές καμπύλης.
2. Η θεωρητική τεχνική γραφήματος χρησιμοποιείται για την ανάλυση των πληροφοριών σχετικά με το ελάχιστο σύνολο των σημείων διακοπής, την ακολουθία για τη ρύθμιση του ηλεκτρονόμου και όλων των πρωτευόντων και εφεδρικών ηλεκτρονόμων και την κατεύθυντικότητα της γραμμής για ηλεκτρονόμους κατεύθυνσης.
3. Οι τεχνικές βελτιστοποιήσεις γενικά υπερβαίνουν την συμβατική προσέγγιση όπου οι ηλεκτρονόμοι τοποθετούνταν σε μια σειρά πριν εξεταστούν για συνεργασία και λόγω των πλεονεκτημάτων τους, έγιναν δημοφιλείς για τους ερευνητές. Επίσης, οι τεχνικές βελτιστοποίησης εξαλείφουν την ανάγκη να βρεθεί το σύνολο των σημείων διακοπής (set of breakpoints).

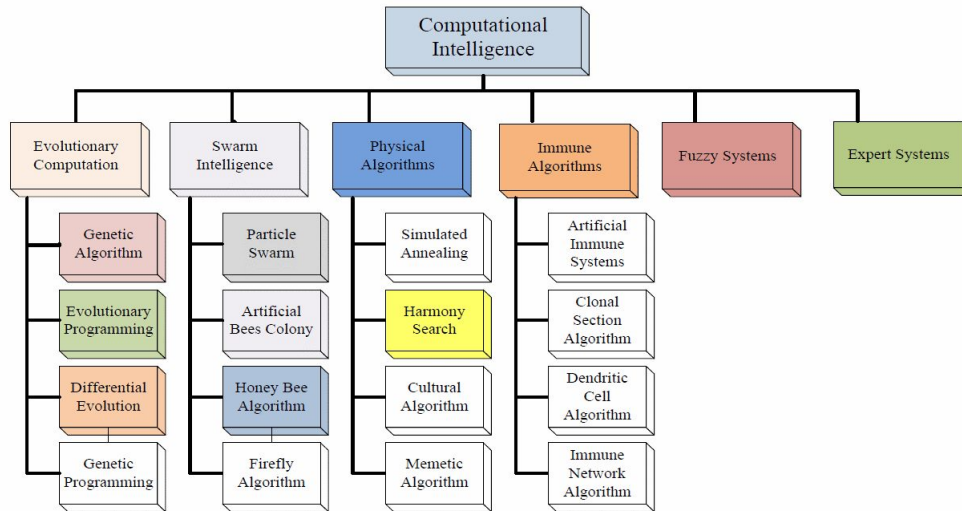
Έχει επικρατήσει η χρήση αλγορίθμου μη γραμμικού προγραμματισμού για την επίλυση του προβλήματος συνεργασίας, όμως αυτές οι μέθοδοι είναι πολύπλοκες και χρονοβόρες. Αυτό οφείλεται στη προσέγγιση του προβλήματος με μη γραμμικό προγραμματισμό, η οποία βασιζόμενη στη χαρακτηριστική του ηλεκτρονόμου, βελτιστοποιεί ταυτόχρονα το  $TDS$  και το  $I_{pu}$ .

Το πρόβλημα συνεργασίας των ηλεκτρονόμων διατυπώνεται ως πρόβλημα μικτού αέριου μη γραμμικού προγραμματισμού (MINLP) και μπορεί να λυθεί με ειδικά λογισμικά όπως το GAMS (General Algebraic Modeling System). Ωστόσο, η χρήση των δυαδικών μεταβλητών, για να ληφθούν υπόψη τα διακριτά ρεύματα ρύθμισης, αυξάνει τη πολυπλοκότητα του προβλήματος συνεργασίας. Λόγω της πολυπλοκότητας αυτής της τεχνικής, η συνεργασία των ηλεκτρονόμων υπερέντασης συνήθως εκτελείται από τεχνικές γραμμικού προγραμματισμού (LP) όπως Simplex, δυϊκό (dual) Simplex και μέθοδοι διφασικής (two-phase) Simplex. Το μειονέκτημα αυτών των τεχνικών είναι ότι βασίζονται σε μια αρχική υπόθεση και μπορεί να παγιδευτούν στο τοπικό ελάχιστο. Σε αυτές τις μεθόδους, το ρεύμα ρύθμισης θεωρείται γνωστό και ο χρόνος λειτουργίας του κάθε ηλεκτρονόμου θεωρείται γραμμική συνάρτηση του  $TDS$ .

Γενικά, οι τεχνικές ΓΠ είναι απλές και εύκολα συγκλίνουν σε βέλτιστες λύσεις, όμως μόνο οι τιμές των  $TDS$  μπορούν να βελτιστοποιηθούν, ενώ τα  $Pick - up$  ρεύματα πρέπει να επιλέγονται εμπειρικά από τα δεδομένα σφαλμάτων και φορτίου. Σε γενικές γραμμές, δεν είναι αυτή η καθολικά βέλτιστη απάντηση ή λύση του προβλήματος. Ως εκ τούτου, η χρήση αυτών των τεχνικών ΓΠ έχει όρια, όσον αφορά τον αριθμό των περιορισμών.

#### 3.5.2. Τεχνητή νοημοσύνη και αλγόριθμος εμπνευσμένος από φύση

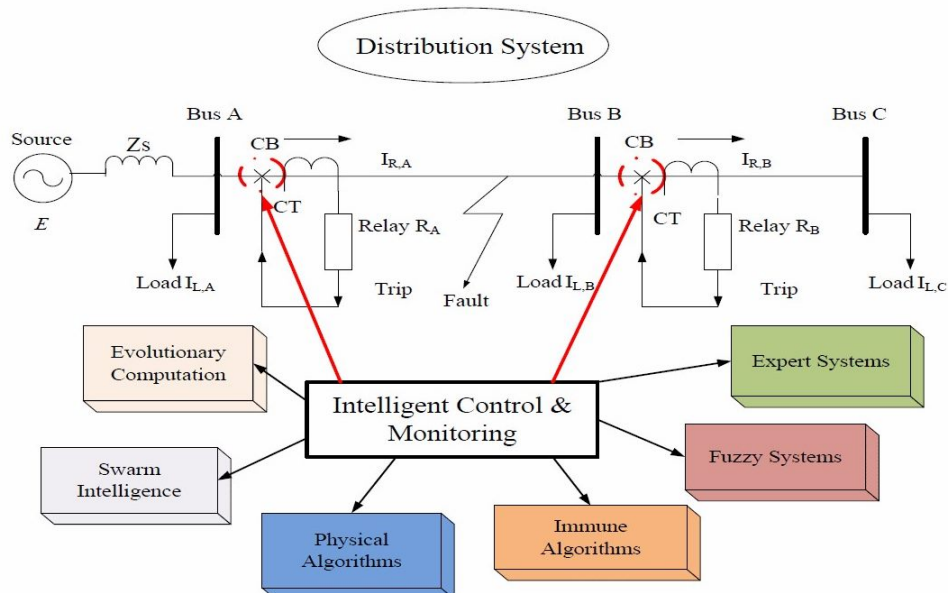
Σήμερα, οι μέθοδοι βελτιστοποίησης που βασίζονται στην Τεχνητή Νοημοσύνη (Artificial Intelligence) και σε Αλγορίθμους Εμπνευσμένους από τη Φύση (Nature Inspire Algorithms) εφαρμόζονται για την επίλυση του προβλήματος συνεργασίας, και των ηλεκτρονόμων υπερέντασης, αλλά και των ηλεκτρονόμων υπερέντασης κατεύθυνσης. Διάφορες κατηγορίες της Υπολογιστικής Νοημοσύνης (Computational Intelligence), με διαφορετικές τεχνικές, κατηγοριοποιούνται στο Σχήμα 3.5.



Σχ. 3.5: Κατηγορίες υπολογιστικής νοημοσύνης με διαφορετικές τεχνικές [16]

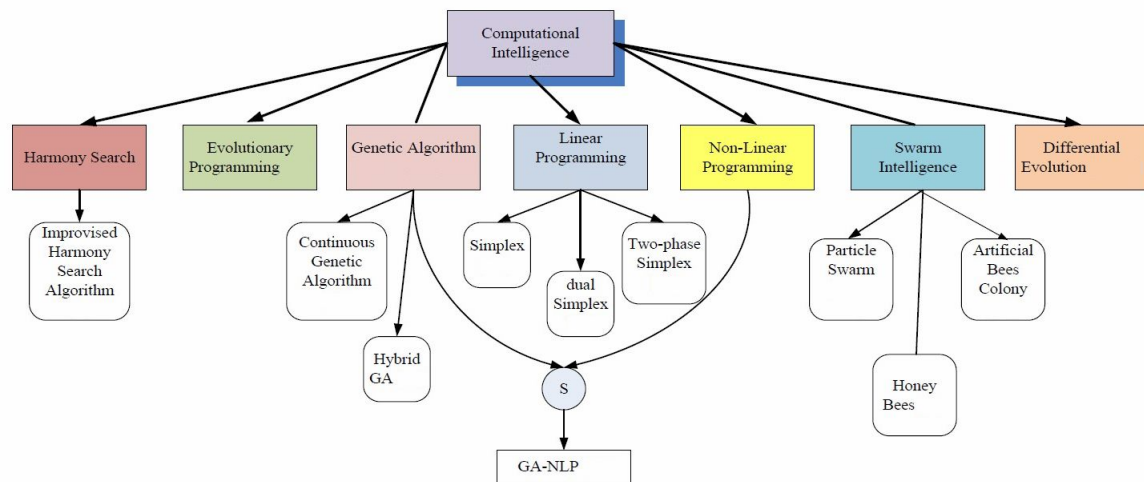
Μερικές από τις μεθόδους τεχνητής νοημοσύνης, όπως η ασαφής λογική (fuzzy logic) και οι εμπειρικοί κανόνες συστήματος (expert system rules) έχουν επίσης εφαρμοστεί για να λύσουν τέτοιου είδους προβλήματα. Με τεχνικές τεχνητής νοημοσύνης, εφόσον χρησιμοποιείται γραμμική σχέση, μόνο το  $TDS$  μπορεί να βελτιστοποιηθεί, αλλά η βελτιστοποίηση και των δύο ρυθμίσεων του ηλεκτρονόμου απαιτεί μη γραμμική διατύπωση του προβλήματος συνεργασίας.

Στο Σχήμα 3.6 δίνεται μία σαφής εικόνα σχετικά με τον τρόπο λειτουργίας της διαδικασίας Έξυπνος Έλεγχος και Παρακολούθηση (Intelligent Control & Monitoring), η οποία ενεργεί ως ένας «εγκέφαλος» με διαφορετικές μεθόδους Υπολογιστικής Νοημοσύνης για να καθορίσει βέλτιστα αποτελέσματα για ηλεκτρονόμενους υπερέντασης.



Σχ. 3.6: Έξυπνος έλεγχος και παρακολούθηση [16]

Διάφορες μέθοδοι που είχαν προταθεί σε παλιότερες αναφορές σε ηλεκτρονόμενους υπερέντασης συνοψίζονται στο Σχήμα 3.7.

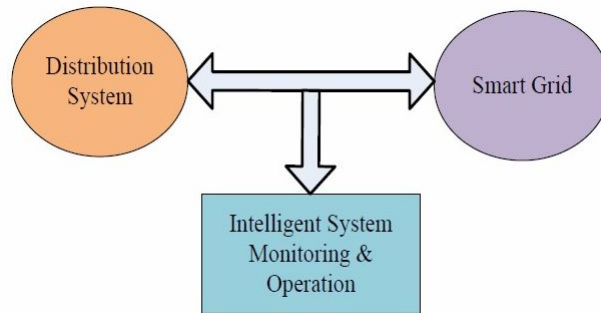


Σχ. 3.7: Διάφορες μέθοδοι για coordination H/N υπερέντασης [16]

Πρόσφατα, διάφορες χώρες που εκπροσωπούνται από τις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής και την Ευρωπαϊκή Ένωση, προτείνουν τη δημιουργία ενός ευέλικτου, ασφαλούς, οικονομικού και φιλικού ευφυούς δικτύου, θεωρώντας το ως η μελλοντική μορφή του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό οφείλεται στην επέκταση της κλίμακας του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας και την κατασκευή δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας υπερυψηλής τάσης (ΥΥΤ) που οδηγεί σε αύξηση επίπεδου βραχυκύκλωσης. Έτσι, θα επηρεαστούν οι λειτουργίες του ηλεκτρικού εξοπλισμού και η αξιοπιστία του συστήματος.

Επιπλέον, η ανάπτυξη της τεχνολογίας του δικτύου διανομής με ΔΠ προκαλεί προβλήματα, όπως η συνεργασία των ηλεκτρονόμενων υπερέντασης και οι ροές ισχύος σε πολλές κατευθύνσεις. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την παρουσίαση δυσκολιών στις ρυθμίσεις και στη λειτουργία της προστασίας από συμβατικούς ηλεκτρονόμους. Ως εκ τούτου, με τις έρευνες πάνω στο πεδίο του ευφυούς δικτύου, η περιοχή της προστασίας υπερέντασης προσελκύει μεγαλύτερο ενδιαφέρον.

Η εφαρμογή των συμβατικών μεθόδων για την επίλυση ζητημάτων που σχετίζονται με τα συστήματα ενέργειας έχουν σχεδόν αντικατασταθεί από προηγμένα συστήματα και τεχνολογίες, δηλαδή υπολογιστική νοημοσύνη. Τα χαρακτηριστικά του έξυπνου δικτύου, όπως η ανάπτυξη νέων υπηρεσιών, αγορών, η παροχή ποιότητας ισχύος και η αποδοτικότητα στη λειτουργία μπορούν να δημιουργήσουν μια νέα διάσταση στην έρευνα της προστασίας υπερέντασης. Το Σχήμα 3.8 απεικονίζει την συσχέτιση ανάμεσα στο ευφύες δίκτυο και την εφαρμογή του σε δίκτυα διανομής με την ενσωμάτωση του έξυπνου συστήματος παρακολούθησης και λειτουργίας.



Σχ. 3.8: Συσχετιση μεταξύ συστημάτων [16]

Πολλές μέθοδοι και τεχνικές προτείνονται και εφαρμόζονται τις τελευταίες τέσσερις δεκαετίες και για την ικανοποίηση των σημερινών απαιτήσεων, μέθοδοι βελτιστοποίησης που βασίζονται σε μαθηματικά εργαλεία όπως η τεχνητή νοημοσύνη και οι αλγόριθμοι εμπνευσμένοι από τη φύση φαίνεται να είναι αξιόπιστες και ταχείες. [16]

### 3.6. Περιγραφή της μεθόδου Βελτιστοποίηση Σμήνους Σωματιδίων

#### 3.6.1. Εισαγωγή

Η μέθοδος Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων «Particle Swarm Optimization» (PSO) είναι ένας αλγόριθμος ικανός να βελτιστοποιήσει ένα μη-γραμμικό και πολυδιάστατο πρόβλημα το οποίο συνήθως καταλήγει αποτελεσματικά σε ικανοποιητικές λύσεις ενώ απαιτεί ελάχιστη παραμετροποίηση.

Ο αλγόριθμος και η έννοια της Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων προτάθηκε από τους James Kennedy και Russel Ebbhart το 1995 [18]. Ωστόσο, οι ρίζες του προέρχονται από την παρατήρηση της συμπεριφοράς των ζωικών ομάδων. Συγκεκριμένα, αρχικός σκοπός του ήταν η προσομοίωση της κίνησης των οργανισμών σε ένα σμήνος πουλιών ή ένα κοπάδι ψαριών (Σχήμα 3.9a και 3.9b αντίστοιχα). Έτσι, η προέλευση του αλγορίθμου είναι η ίδια η φύση. Αυτή η ρίζα στις φυσικές διεργασίες των σμηνών οδηγεί στην κατηγοριοποίηση του αλγορίθμου που εντάσσεται ως Νοημοσύνη Σμήνους (Swarm Intelligence) και Τεχνητή Ζωή (Artificial Life).



(a) Σμήνος πουλιών [35]



(b) Κοπάδι ψαριών[36]

Σχ. 3.9: Συμπεριφορά των ζωικών ομάδων

Ο αλγόριθμος αυτός είναι ένας στοχαστικός αλγόριθμος βελτιστοποίησης που χρησιμοποιεί έναν μεγάλο αριθμό σημείων βελτιστοποίησης. Η βασική ιδέα του αλγορίθμου είναι να δημιουργηθεί ένα σμήνος (swarm) αποτελούμενο από πιθανές λύσεις οι οποίες ονομάζονται σωματίδια (particles). Κάθε σωματίδιο αναπαριστά μια υποψήφια λύση (candidate solution) για το πρόβλημα βελτιστοποίησης. Αυτά τα σωματίδια κινούνται σε ένα πολυδιάστατο χώρο αναζήτησης (search-space) σύμφωνα με μία απλή μαθηματική συνάρτηση. Κάθε κίνηση σωματιδίου επηρεάζεται από την τοπική γνωστή του θέση, αλλά επίσης κατευθύνεται προς γνωστές θέσεις στον χώρο αναζήτησης οι οποίες επικαιροποιούνται όσο τα υπόλοιπα σωματίδια βρίσκουν καλύτερες θέσεις [34]. Άρα κινούνται στο χώρο αναζητώντας την καλύτερη θέση με την οποία ικανοποιούν τις ανάγκες μιας αντικειμενικής συνάρτησης (μεγιστοποίηση ή ελαχιστοποίηση ανάλογα με το πρόβλημα).

Αντίστοιχα στη φύση: ένα σμήνος πτηνών πετά στο περιβάλλον αναζητώντας το καλύτερο μέρος για να ξεκουραστεί (το καλύτερο μέρος μπορεί να είναι ένας συνδυασμός χαρακτηριστικών όπως μέρος για να χωρέσει όλο το σμήνος, πρόσβαση στα τρόφιμα, πρόσβαση στο νερό ή οποιοδήποτε άλλο χαρακτηριστικό). Βάση αυτής της έννοιας υπάρχουν δύο βασικές ιδέες πίσω από τις ιδιότητες βελτιστοποίησης της:

1. Ένα σωματίδιο (το οποίο μπορεί να δει κανείς ως μία πιθανή λύση του προβλήματος) μπορεί να καθορίσει «πόσο καλή» είναι η τρέχουσα θέση του. Εκμεταλλεύεται όχι μόνο τη γνώση που έχει λόγω της εξερεύνησης του χώρου προβλήματος (problem space) αλλά και τη γνώση που αποκτά και μοιράζεται με τα υπόλοιπα σωματίδια.
2. Ένας στοχαστικός παράγοντας στην ταχύτητα του κάθε σωματιδίου τα κάνει να κινούνται μέσα σε άγνωστες περιοχές του χώρου. Όταν αυτή η ιδιότητα συνδυάζεται με την καλή αρχική κατανομή του σμήνους, τότε γίνεται εκτεταμένη έρευνα του χώρου προβλήματος και υπάρχει πολύ υψηλή πιθανότητα να βρεθούν αποδοτικά οι καλύτερες λύσεις.

### 3.6.2. Η λειτουργία του αλγορίθμου PSO

Από τότε που εφευρέθηκε ο αλγόριθμος PSO έχουν παρουσιαστεί διάφορες παραλλαγές. Αρχικά, παρουσιάζεται η βασική (ή κλασική) μέθοδος. Όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη ενότητα, η βασική ιδέα είναι ότι υπάρχουν σωματίδια ενός σμήνους τα οποία κινούνται μέσα σε ένα πολυδιάστατο χώρο (χώρος προβλήματος) και αξιολογείται η θέση τους μέσω μιας συνάρτησης καταλληλότητας (fitness function). Μόλις οριστεί ένας χώρος του προβλήματος, θα εμφανιστεί μέσα σε αυτό ένα σύνολο από σωματίδια, όπου η θέση και η ταχύτητα τους ενημερώνεται επαναληπτικά σύμφωνα με τον κώδικα του αλγορίθμου PSO. Ο PSO έχει αποδειχθεί ότι είναι ένας αποδοτικός αλγόριθμος που δίνει καλά αποτελέσματα, δεν μπορεί όμως να εγγυηθεί, λόγω του σχεδιασμού του, ότι η λύση που βρίσκει είναι η βέλτιστη. Αυτό οφείλεται στο ότι βασίζεται στην πιθανοτική κίνηση των σωματιδίων μέσα στο χώρο του προβλήματος και όχι στην ντετερμινιστική επίσκεψη όλων των πιθανών θέσεων του χώρου του προβλήματος.

Παρόλο που υπάρχουν πολλές παραλλαγές, συνήθως όλες έχουν μία συνάρτηση καταλληλότητας (fitness function). Ο καθορισμός αυτής της συνάρτησης εξαρτάται από το πρόβλημα που πρέπει να βελτιστοποιηθεί (κυρίως από τις διαστάσεις του) και είναι της μορφής  $f(x_i) = f(x_{i,1}, \dots, x_{i,D}) : R^D \rightarrow R$ . Αυτή η συνάρτηση δείχνει πόσο καλή είναι η θέση του σωματιδίου  $i$  (όπου  $i = 1, \dots, S$  και  $S$  το σύνολο των σωματιδίων σε ένα σμήνος) μέσα στον πολυδιά-

τατο χώρο προβλήματος ως προς τον επιθυμητό στόχο. Ο στόχος είναι η μεγιστοποίηση ή ελαχιστοποίηση της  $f(x_i)$  [19].

### 3.6.3. Ολικό και προσωπικό βέλτιστο (Global best και Personal Best)

Έστω ότι η θέση ενός σωματιδίου  $i$  την χρονική στιγμή  $t$  συμβολίζεται με  $x(t)$  και ότι το  $t$  αναφέρεται σε διακριτά χρονικά βήματα, που αντιστοιχούν στις επαναλήψεις του αλγορίθμου PSO. Τότε η θέση του σωματιδίου την χρονική στιγμή  $t + 1$  θα είναι:

$$x_i(t + 1) = x_i(t) + v_i(t + 1) \quad (3.9)$$

όπου  $v_i$  είναι το διάνυσμα της ταχύτητας του σωματιδίου το οποίο «κινεί» τη διαδικασία βελτιστοποίησης και περιγράφεται απ'τη Σχέση 3.10:

$$v_i(t + 1) = w \cdot v_i(t) + \underbrace{c_1 \cdot r_1 \cdot [pbest_i(t) - x_i(t)]}_{\text{γνωστική συνιστώσα}} + \underbrace{c_2 \cdot r_2 \cdot [gbest(t) - x_i(t)]}_{\text{κοινωνική συνιστώσα}} \quad (3.10)$$

η οποία περιλαμβάνει την εμπειρική γνώση του σωματιδίου και την κοινωνική ανταλλασσόμενη πληροφορία με τα υπόλοιπα σωματίδια του σμήνους. Η εμπειρική γνώση του σωματιδίου αποκαλείται γνωστική συνιστώσα (cognitive component), ενώ η κοινωνική ανταλλασσόμενη πληροφορία αποκαλείται κοινωνική συνιστώσα (social component).

Κατά την κίνηση ενός σωματιδίου στο χώρο αναζήτησης, το σωματίδιο εξετάζει την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης για διάφορες υποψήφιες λύσεις (κάθε θέση του σωματιδίου είναι μία υποψήφια λύση). Η θέση του σωματιδίου για την οποία η αντικειμενική συνάρτηση δίνει τη βέλτιστη τιμή (μέγιστη ή ελάχιστη ανάλογα το πρόβλημα) σε σχέση με τις υπόλοιπες θέσεις του καλείται προσωπικό βέλτιστο (personal best,  $pbest$ ). Έστω ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης με αντικειμενική συνάρτηση  $f$ . Το προσωπικό βέλτιστο θα περιγράφεται απ' τη Σχέση 3.11:

$$pbest_i(t + 1) = \begin{cases} pbest_i(t), & \text{για } f(x_i(t + 1)) \geq f(pbest_i(t + 1)) \\ x_i(t + 1), & \text{για } f(x_i(t + 1)) < f(pbest_i(t + 1)) \end{cases} \quad (3.11)$$

Εάν από όλα τα σωματίδια επιλεγούν το προσωπικό βέλτιστο του καθενός και συγκριθούν οι τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης για καθένα από αυτά, αυτό που δίνει τη βέλτιστη τιμή αυτής καλείται ολικό βέλτιστο (global best,  $gbest$ ). Το ολικό βέλτιστο θα είναι η Σχέση 3.12 τότε :

$$gbest(t) \in (pbest_1(t), pbest_2(t), \dots, pbest_S(t)) \\ \text{με } f(gbest(t)) = \min(f(pbest_1(t)), f(pbest_2(t)), \dots, f(pbest_S(t))) \quad (3.12)$$

Το μέγεθος  $v_i(t)$  στη Σχέση 3.10 αντιστοιχεί στην προηγούμενη ταχύτητα του σωματιδίου, η οποία λειτουργεί ως μνήμη για την παρελθοντική κίνηση του. Ορίζεται μια τυχαία τιμή, αλλά χαμηλή ώστε να αποφευχθούν οι μεγάλες αποκλίσεις (offsets) [19]. Ο όρος αυτός μπορεί να χαρακτηριστεί και ως ορμή του σωματιδίου, καθώς το αποτρέπει να αλλάξει απότομα την κατεύθυνσή του. Ωστόσο, συνήθως αναφέρεται ως συνιστώσα αδράνειας και δέχεται ένα συντε-



λεστή βαρύτητας, όπως θα φανεί και στη συνέχεια, το συντελεστή βαρύτητας αδράνειας (inertia weight).

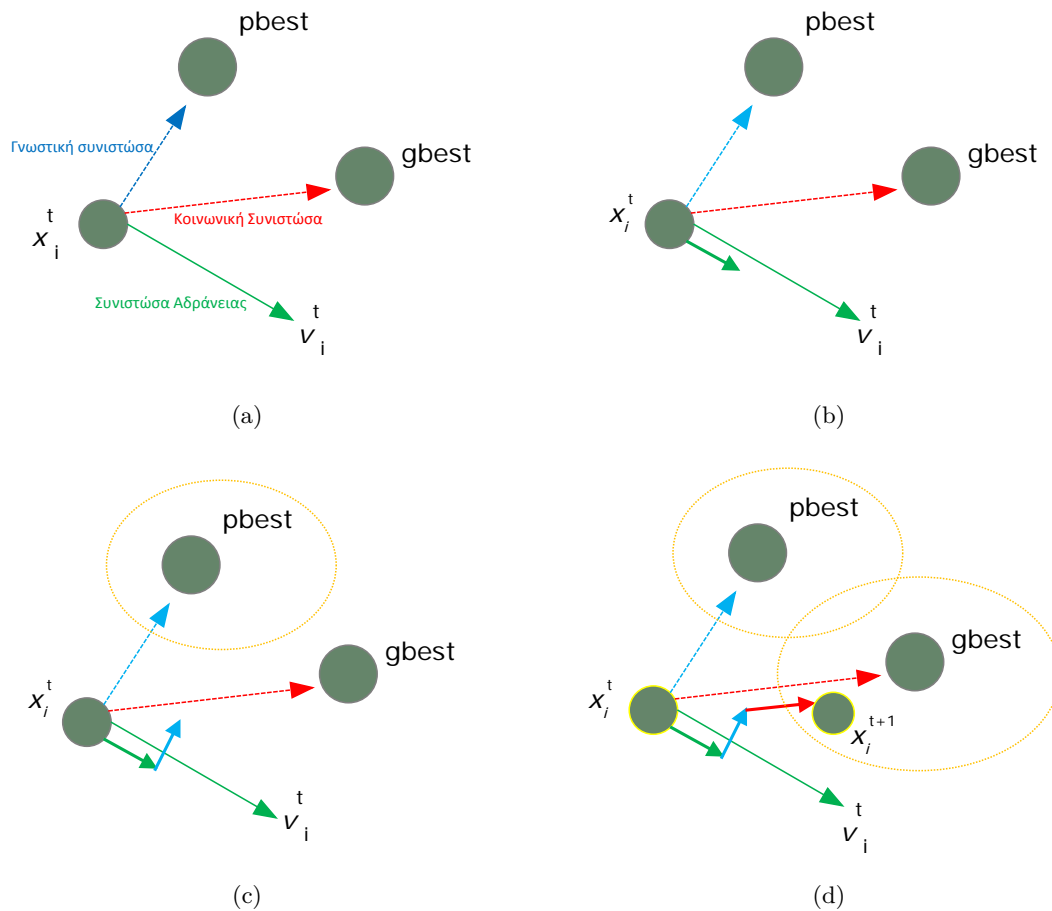
Τα  $r_1$  και  $r_2$  που εμφανίζονται στους όρους γνωστικής και κοινωνικής συνιστώσας αντίστοιχα στη Σχέση 3.10 είναι τυχαίες τιμές στο διάστημα  $[0, 1]$ . Αυτές οι τυχαίες τιμές εισάγουν στον αλγόριθμο το στοχαστικό στοιχείο. Οι συντελεστές  $c_1$  και  $c_2$  ονομάζονται συντελεστές επιτάχυνσης (acceleration coefficients) και είναι στην ουσία οι συντελεστές βαρύτητας για τη γνωστική και την κοινωνική συνιστώσα αντίστοιχα.

Η γνωστική συνιστώσα του σωματιδίου εκφράζεται στη Σχέση 3.10 μέσω του όρου  $c_1 \cdot r_1 \cdot [pbest_i(t) - x_i(t)]$ . Γενικά, η γνωστική συνιστώσα εκφράζει την ατομική μνήμη του σωματιδίου για την καλύτερη θέση στην οποία έχει βρεθεί. Όσο μεγαλύτερος είναι ο όρος αυτός, γεγονός που εξαρτάται και από το συντελεστή βαρύτητας  $c_1$ , τόσο μεγαλύτερη είναι η τάση του σωματιδίου να επιστρέψει σε θέσεις που το ικανοποίησαν περισσότερο το παρελθόν.

Η κοινωνική συνιστώσα του σωματιδίου εκφράζεται στη Σχέση 3.10 μέσω του όρου  $c_2 \cdot r_2 \cdot [gbest(t) - x_i(t)]$ . Ο όρος αυτός αναφέρεται στην επίδραση που ασκεί το κοινωνικό σύνολο στο σωματίδιο το οποίο καλείται να υιοθετήσει μια κοινή με το σύνολο συμπεριφορά. Όσο μεγαλύτερος είναι ο όρος αυτός, τόσο μεγαλύτερη η τάση του σωματιδίου να κινηθεί προς το ολικό βέλτιστο, τη θέση δηλαδή που ικανοποίησε περισσότερο το σμήνος.

Υπενθυμίζεται ότι οι εξισώσεις αυτές περιγράφουν τη βασική μέθοδο PSO. Οι διάφορες τροποποιήσεις που έχουν κατά καιρούς προταθεί βασίζονται στις Σχέσεις 3.9 έως 3.12 με κάποιες αλλαγές που έχουν ως σκοπό συνήθως τη βελτίωση της σύγκλισης της μεθόδου ή τη βελτίωση της κίνησης του σμήνους στο χώρο αναζήτησης. Η αρκετά μεγάλη ποικιλία των παραλλαγών και το γεγονός ότι ξεφεύγουν από το αντικείμενο της παρούσας εργασίας δεν καθιστούν σκόπιμη την παρουσίαση τους.

Στο Σχήμα 3.10 παρουσιάζεται εποπτικά το διάγραμμα της κίνησης του σωματιδίου  $i$  στο χώρο αναζήτησης. Σε κάθε βήμα  $t$ , το σωματίδιο ενημερώνει την θέση του και την ταχύτητά του. Σύμφωνα με τη Σχέση 3.10 η νέα ταχύτητα του σωματιδίου προκύπτει από το άθροισμα των εξής διανυσμάτων: της συνιστώσας αδράνειας  $v_i(t)$ , της γνωστικής συνιστώσας που το μέτρο της είναι ανάλογο της απόστασης του σωματιδίου από το προσωπικό του βέλτιστο (μνήμη σωματιδίου) και της κοινωνικής συνιστώσας που το μέτρο του είναι ανάλογο της απόστασης του σωματιδίου από το ολικό βέλτιστο (επιρροή σμήνους). Η νέα του θέση δίνεται από τη Σχέση 3.9.



Σχ. 3.10: Διάγραμμα κίνησης του σωματιδίου στο χώρο αναζήτησης

#### 3.6.4. Παράμετροι ελέγχου της μεθόδου PSO

Η βασική τεχνική του αλγορίθμου PSO επηρεάζεται από ένα σύνολο παραμέτρων ελέγχου. Αυτές είναι:

- το μέγεθος του σμήνους
- η μέγιστη ταχύτητα
- ο αριθμός επαναλήψεων
- οι συντελεστές επιτάχυνσης
- και ο συντελεστής αδράνειας.

Επειδή οι βέλτιστες ρυθμίσεις των παραμέτρων αυτών διαφέρουν από πρόβλημα σε πρόβλημα είναι σημαντικό να καθοριστεί ο τρόπος με τον οποίο αυτές επηρεάζουν την λειτουργία και την επίδοση της μεθόδου. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι εν λόγω παράμετροι.

**Μέγεθος του σμήνους:** Αφορά το πλήθος των σωματιδίων σε αυτό. Όσο μεγαλύτερο είναι το πλήθος, τόσο μεγαλύτερη είναι η διασπορά των σωματιδίων στο χώρο αναζήτησης. Εμπειρικές μελέτες έχουν δείξει ότι οι βέλτιστες λύσεις μπορούν κάλλιστα να επιτευχθούν με

μέγεθος σμήνους από 10 έως 30 σωματίδια και για τον λόγο αυτό είναι κοινή πλέον πρακτική να επιλέγονται τέτοιου μεγέθους σμήνη (συχνά έως και 60 σωματίδια).

**Μέγιστη ταχύτητα:** Καθορίζει τη μέγιστη μεταβολή που μπορεί να δεχθεί ένα σωματίδιο στη θέση του σε μια επανάληψη και χρησιμοποιείται για να αποφεύγεται η άσκοπη κίνηση των σωματιδίων εκτός των ορίων αναζήτησης.

**Αριθμός επαναλήψεων:** Ο αριθμός επαναλήψεων που χρειάζεται για να επιτύχει η διαδικασία μια καλή λύση εξαρτάται από το πρόβλημα.

**Συντελεστές Επιτάχυνσης:** Είναι οι τιμές  $c_1$  και  $c_2$  της Σχέσης 3.10. Οι τιμές και η αναλογία των συντελεστών καθορίζουν τη συμπεριφορά του σμήνους. Σε αρκετές εφαρμογές οι τιμές των δύο συντελεστών εξισώνονται με αποτέλεσμα τα σωματίδια να κατευθύνονται προς το μέσο όρο του προσωπικού βέλτιστου και του ολικού βέλτιστου. Γενικά, οι τιμές που θα δοθούν στους συντελεστές επιτάχυνσης εξαρτώνται από το είδος του προβλήματος.

**Συντελεστής Αδράνειας (inertia weight,  $w$ ):** Έχει σαν σκοπό να ελέγχει την ορμή (momentum) του σωματιδίου, λειτουργώντας ως συντελεστής βαρύτητας στη συνεισφορά της προηγούμενης ταχύτητας. Αυτό σημαίνει ότι ο συντελεστής αυτός ελέγχει τι ποσοστό μνήμης από την προηγούμενη πορεία του σωματιδίου θα επηρεάσει τη νέα ταχύτητα. Η τιμή του συντελεστή αδράνειας είναι σημαντική για την επίδραση του αλγορίθμου.

**Κριτήριο Τερματισμού:** Ένα σύνηθες κριτήριο τερματισμού είναι η χρήση ενός μέγιστου αριθμού επαναλήψεων. Όταν η διαδικασία ολοκληρώσει ένα προκαθορισμένο πλήθος επαναλήψεων τότε αυτή τερματίζεται. Το πρόβλημα που προκύπτει στην περίπτωση αυτή είναι η επιλογή του μέγιστου αριθμού επαναλήψεων ο οποίος δεν πρέπει να είναι ούτε πολύ μεγάλος (αύξηση υπολογιστικής πολυπλοκότητας) ούτε πολύ μικρός (πρόωρη σύγκλιση) [28].

Δεδομένου ότι η ενημέρωση των εξισώσεων είναι αναδρομική με την έννοια ότι χρειάζονται τις προηγούμενες τιμές ταχύτητας και θέσης, είναι σημαντικό να κατανοηθεί η αρχικοποίηση των τιμών αυτών. Επίσης, ο τρόπος που κινούνται οι τιμές αυτές μπορούν να έχουν μια σημαντική επίδραση στην απόδοση του αλγορίθμου. Σχετικά με τη θέση, όλα τα σωματίδια του σμήνους είναι κατανομημένα στο  $n$ -διάστατο χώρο τυχαία ή ομοιόμορφα. Η ταχύτητα συνήθως ορίζεται με μία τυχαία τιμή, αλλά μικρή ώστε να αποφευχθούν οι μεγάλες αποκλίσεις (offsets). Οι σταθερές τιμές της γνωστικής (cognitive) και της κοινωνικής συνιστώσας (social component) ορίζονται κατά την αρχικοποίηση και παραμένουν σταθερές καθ' όλη τη διάρκεια της βελτιστοποίησης.

### 3.6.5. Ψευδο-κώδικας και το διάγραμμα ροής του βασικού αλγορίθμου PSO

Στον Αλγόριθμο 2 παρουσιάζεται ο ψευδο-κώδικας της βασικής έκδοσης του αλγορίθμου PSO. Ένα μέρος του ψευδο-κώδικα αυτού είναι η αρχικοποίηση παραμέτρων, οι οποίες παρουσιάζονται αναλυτικά στον Αλγόριθμο 1 και το δεύτερο μέρος είναι η συνθήκη τερματισμού που περιέχει το κυρίως πρόγραμμα. Στον αλγόριθμο αυτό, η κύρια παραμετροποίηση που χρειάζεται αφορά στους πολλαπλασιαστές επιτάχυνσης και στη μέγιστη ταχύτητα. Επίσης, δεν αναφέρεται ο τρόπος χειρισμού σε περίπτωση που κάποιο σωματίδιο βγει έξω από το χώρο αναζήτησης.

**Διάγραμμα ροής του βασικού αλγορίθμου PSO:** Στο Σχήμα 3.11 φαίνεται το διάγραμμα ροής του κλασικού αλγορίθμου PSO. Αρχικά γίνεται η αρχικοποίηση των παραμέτρων, στη συνέχεια πραγματοποιείται μία επαναληπτική διαδικασία - υπολογισμός συνάρτησης καταλληλότητας και ενημέρωση της θέσης και της ταχύτητας του κάθε σωματιδίου - έως ότου συγκλίνει στη προκαθορισμένη τιμή.

---

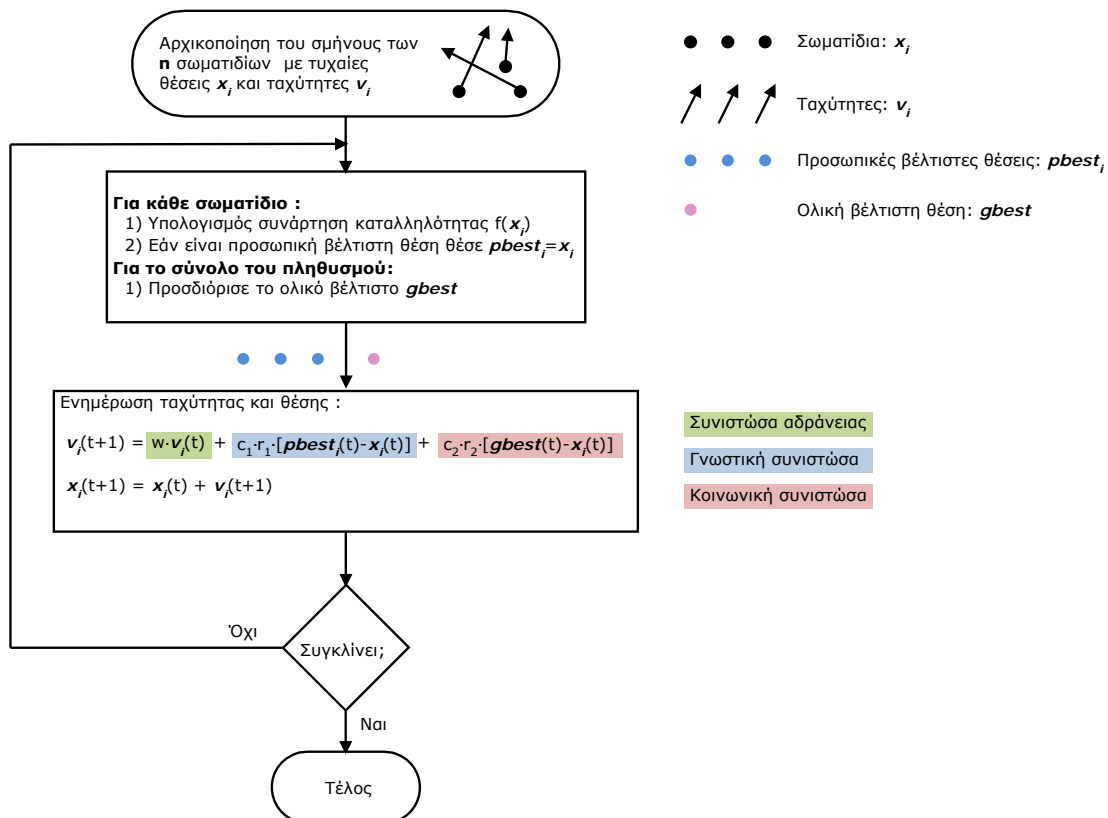
**Algorithm 1** Initialize
 

---

```

1: for each particle  $i$  in  $S$  do
2:   for each dimension  $d$  in  $D$  do
3:     //initialize all particles' position and velocity
4:      $x_{i,d} = \text{Random}(x_{min}, x_{max})$ 
5:      $v_{i,d} = \text{Random}(-v_{max}, v_{max})$ 
6:   end for
7:
8:   //initialize particle's best position
9:    $pbest_i = x_i$ 
10:  //update the global best position
11:  if  $f(pbest_i) < f(gbest)$  then
12:     $gbest = pbest_i$ 
13:  end if
14: end for
  
```

---



Σχ. 3.11: Διάγραμμα ροής του βασικού αλγορίθμου PSO

---

**Algorithm 2** PSO (Global Best)

---

```
1: Initialize()
2: repeat
3:   for each particle  $i$  in  $S$  do
4:     //update the particle's best position
5:     if  $f(x_i) < f(pbest_i)$  then
6:        $pbest_i = x_i$ 
7:     end if
8:     //update the global best position
9:     if  $f(pbest_i) < f(gbest)$  then
10:       $gbest = pbest_i$ 
11:    end if
12:  end for
13:
14:  //update the particle's velocity and position
15:  for each particle  $i$  in  $S$  do
16:    for each dimension  $d$  in  $D$  do
17:       $v_{i,d} = w \cdot v_{i,d} + c_1 \cdot r_1 \cdot (pbest_{i,d} - x_{i,d}) + c_2 \cdot r_2 \cdot (gbest_d - x_{i,d})$ 
18:       $x_{i,d} = x_{i,d} + v_{i,d}$ 
19:    end for
20:  end for
21:
22:  //increase iteration counter  $t$ 
23:   $t = t + 1$ 
24: until  $t < MAX\_ITERATIONS$ 
```

---



## Κεφάλαιο 4

# Προτεινόμενη μέθοδος βελτιστοποίησης

### 4.1. Εισαγωγή

Στα προηγούμενα κεφάλαια παρουσιάστηκαν και διατυπώθηκαν το υπό μελέτη πρόβλημα βελτιστοποίησης, καθώς και η μαθηματική τεχνική επίλυσής του, δηλαδή η βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων.

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται αρχικά περιγραφή της μεθόδου που εφαρμόστηκε για την επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης με την συνδυασμένη τεχνική γραμμικού προγραμματισμού και βελτιστοποίηση σμήνους σωματιδίων σε επίπεδο λογισμικού. Η προγραμματιστική υλοποίηση αυτής της μεθόδου έγινε στο περιβάλλον Matlab και θα παρουσιαστεί στη συνέχεια, μέσω των κύριων συναρτήσεων που αναπτύχθηκαν.

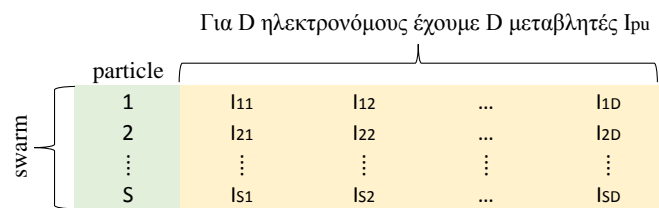
### 4.2. Περιγραφή προτεινόμενης μεθόδου για την επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης

Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε, προκειμένου να λυθεί το πρόβλημα, είναι μία υβριδική μέθοδος, η οποία αποτελείται από την τεχνική βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων σε συνδυασμό με τον γραμμικό προγραμματισμό. Ο λόγος που θα χρησιμοποιηθεί αυτή η υβριδική μέθοδος είναι ότι αφ' ενός εκμεταλλευόμαστε όλα τα πλεονεκτήματα που αλγορίθμου PSO και αφ' ετέρου είναι εύκολος ο χειρισμός των μη γραμμικών περιορισμών που περιέχει το πρόβλημα συνεργασίας με τη χρήση του ΓΠ.

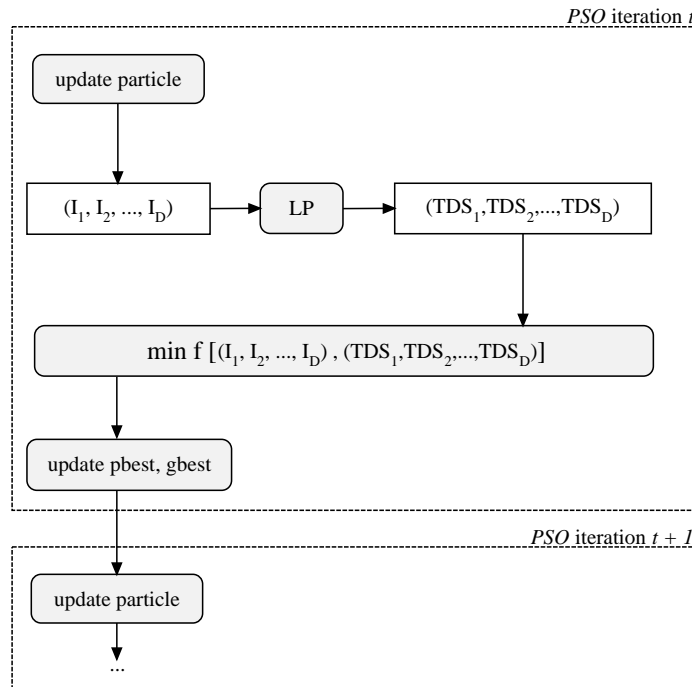
Για την επίλυση του προβλήματος, απαιτείται η δήλωση κάποιων παραμέτρων εξωτερικά. Αρχικά, απαιτείται να καθοριστεί το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας που θα χρησιμοποιηθεί, δηλαδή ο καθορισμός των δεδομένων των ζυγών και των γραμμών του συστήματος. Καθώς και τα ζεύγη ηλεκτρονόμων – πρωτεύουσας και δευτερεύουσας ζώνης προστασίας. Η χαρακτηριστική των ηλεκτρονόμων λαμβάνεται από τις οικογένειες καμπυλών IEC και τις IEEE. Επιπλέον αυτών, απαιτείται ο καθορισμός των παραμέτρων που αφορούν την τεχνική βελτιστοποίησης. Τέλος, επιπρόσθετες εξωτερικές παράμετροι που απαιτούν τον καθορισμό είναι το πλήθος των επαναλήψεων για την εύρεση λύσης. Όπως περιγράφεται στην *Ενότητα 3.4*, ο σκοπός του προβλήματος βελτιστοποίησης είναι να ελαχιστοποιηθεί το άθροισμα των χρόνων λειτουργίας των ηλεκτρονόμων, λαμβάνοντας υπ' όψιν τους περιορισμούς των καμπυλών λειτουργίας του ηλεκτρονόμου και των συνεργασιών μεταξύ τους. Οι παράμετροι του ηλεκτρονόμου που πρέπει να βελτιστοποιηθούν είναι δύο, το ρεύμα ρύθμισης και η χρονική σταθερά. Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι το πρόβλημα συνεργασίας των ηλεκτρονόμων διατυπώνεται ως ένα μη γραμμικό πρόβλημα. Αυτό οφείλεται στη μη γραμμικότητα αφ' ενός της *Σχέσης 3.3* που περιγράφει την

χαρακτηριστική καμπύλη λειτουργίας του ηλεκτρονόμου και αφ' ετέρου των περιορισμών μεταξύ των ηλεκτρονόμων ώστε να επιτευχθεί επιλεκτική λειτουργία (Σχέση 3.8). Η βασική ιδέα της υβριδικής μεθόδου είναι πως η βελτιστοποίηση των παραμέτρων ρευμάτων ρύθμισης επιτυγχάνεται με τον αλγόριθμο PSO, ενώ των παραμέτρων  $TDS$  άμεσα από τον γραμμικό προγραμματισμό [20]. Για να γίνει αυτό πιο κατανοητό το Σχήμα 4.2 απεικονίζει τη σχέση μεταξύ του PSO και LP.

Για παράδειγμα, έστω ότι έχουμε ένα δίκτυο με  $k$  ηλεκτρονόμους. Υποθέτοντας πως εξετάζεται μόνο ένα σωματίδιο (particle), το διάνυσμα ρευμάτων ρύθμισης μεγέθους  $k$  μεταβλητών, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.1, λαμβάνει τιμές τόσο κατά την αρχικοποίησή του με τυχαίες τιμές όσο και στο βρόχο επαναλήψεων κατά την ενημέρωση των εξισώσεων PSO (Σχέσεις 3.9 και 3.10)



Σχ. 4.1: Αναπαράσταση σωματιδίων και μεταβλητών

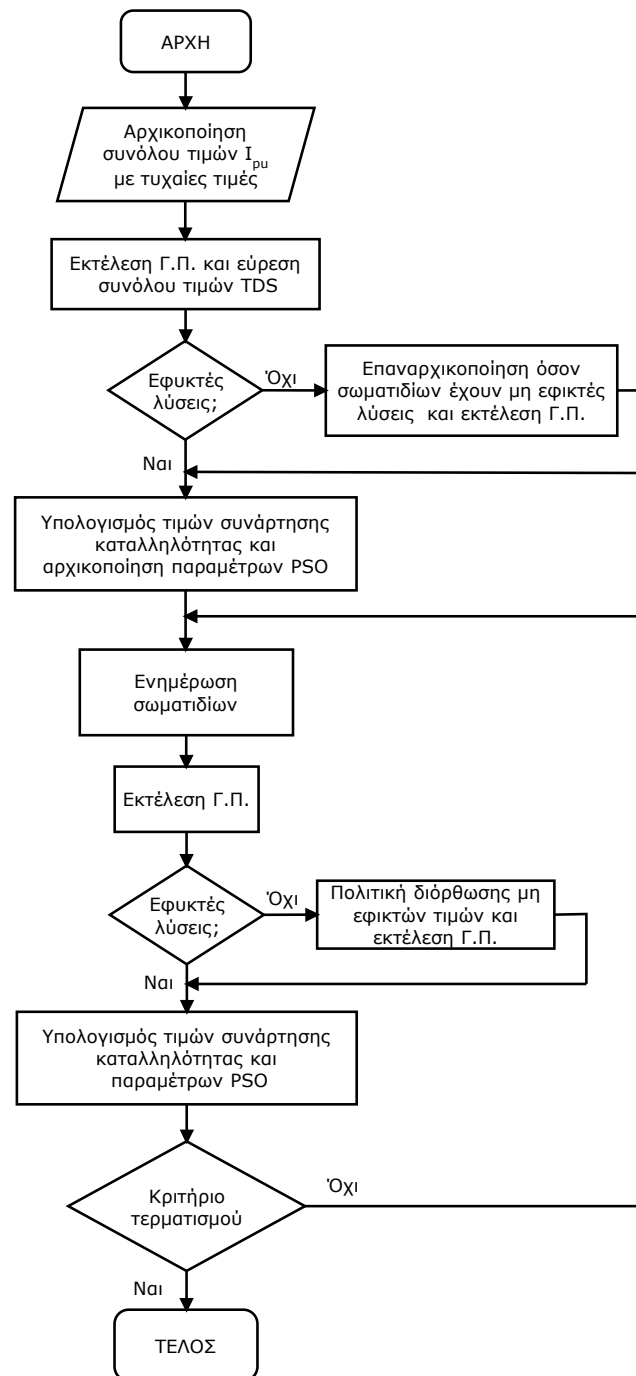


Σχ. 4.2: Διάγραμμα κατανόησης εξαρτήσεων PSO και LP



Τα ρεύματα ρύθμισης έχουν λάβει τιμές, οπότε η αντικειμενική συνάρτηση (Σχέση 3.1), που περιγράφει το άθροισμα των χρόνων λειτουργίας του κάθε ηλεκτρονόμου, γίνεται γραμμική (συναρτήσει των μεταβλητών  $TDS$ ). Στη συνέχεια χρησιμοποιείται ο γραμμικός προγραμματισμός για την εύρεση των τιμών  $TDS$ . Στο Σχήμα 4.2 απεικονίζεται ένα βοηθητικό διάγραμμα προκειμένου να κατανοηθεί η αλληλεξάρτηση μεταξύ των PSO και LP. Υπολογίζεται η αντικειμενική συνάρτηση και κατά συνέπεια τροποποιούνται οι τιμές των  $pbest$  και  $gbest$  οι οποίες περιγράφηκαν στην Ενότητα 3.6.3. Είναι σημαντικό να τονιστεί πως η κατεύθυνση του κάθε σωματιδίου (δηλαδή οι τιμές  $I_{pu}$ ) επηρεάζεται από τις τιμές  $TDS$ . Η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου ικανοποιηθεί η συνθήκη τερματισμού.

Στο Σχήμα 4.3 παρουσιάζεται το λογικό διάγραμμα που περιγράφει τη μέθοδο PSO-LP. Αρχικά γίνεται η αρχικοποίηση του συνόλου τιμών των ρευμάτων ρύθμισης  $I_{pu}$  με τυχαίες τιμές. Στη συνέχεια εκτελείται ο LP για την εύρεση των τιμών  $TDS$ . Εφόσον βρεθούν εφικτές λύσεις η διαδικασία συνεχίζεται, αλλιώς επαναρχικοποιούνται μόνο τα σωματίδια με μη εφικτές λύσεις και εκτελείται ο LP. Κατόπιν υπολογίζονται οι συναρτήσεις καταλληλότητας για κάθε σωματίδιο και γίνεται αρχικοποίηση των παραμέτρων του PSO. Εν συνεχεία, εκτελείται η επανάληψη PSO όπου βελτιστοποιεί τις τιμές των ρευμάτων ρύθμισης. Ακολουθεί ο γραμμικός προγραμματισμός για την εύρεση βέλτιστων τιμών  $TDS$  και η συνθήκη ελέγχου εφικτών λύσεων. Υπολογίζονται ξανά οι τιμές των συναρτήσεων καταλληλότητας και προσαρμόζονται οι παράμετροι του PSO. Τέλος, οι επαναλήψεις ολοκληρώνονται με βάση το κριτήριο τερματισμού.



Σχ. 4.3: Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου PSO-LP

### 4.3. Περιγραφή Συναρτήσεων του λογισμικού που αναπτύχθηκε

Για την υλοποίηση του προβλήματος βελτιστοποίησης, χρησιμοποιήθηκε ένα σύνολο συναρτήσεων γραμμένων σε κώδικα της MatLab και ένα σύνολο αρχείων. Συνολικά, το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε αποτελείται από 11 αρχεία: 5 αρχεία *.mat* και 6 αρχεία *.m*. Στη συνέχεια περιγράφεται η λειτουργία των βασικότερων συναρτήσεων και παρουσιάζονται συνοπτικά τα υπόλοιπα αρχεία του προγράμματος.

### Συνάρτηση `main.m`

Η συνάρτηση `main.m` είναι η κύρια συνάρτηση στην οποία ο χρήστης μπορεί να επιλέξει ποιο δίκτυο και ποια χαρακτηριστική χρόνου λειτουργίας του ηλεκτρονόμου θα χρησιμοποιήσει. Επίσης, καθορίζει και κάποιες τιμές παραμέτρων, όπως είναι τα όρια ρεύματος ρύθμισης και σταθερά χρόνου *TDS*, ο αριθμός πληθυσμού, ο αριθμός επαναλήψεων κ.ά.. Τέλος, είναι μια συνάρτηση απ' όπου καλούνται οι υπόλοιπες συναρτήσεις οι οποίες περιγράφονται στη συνέχεια.

### Συνάρτηση `pairsRelays.m`

Η συνάρτηση `pairsRelays.m` καλείται από την κύρια συνάρτηση `main.m` η οποία παίρνει σαν είσοδο έναν πίνακα `Numbers`. Ο πίνακας αυτός περιγράφει την τοπολογία του δικτύου, δηλαδή ποιοι ζυγοί συνδέονται μεταξύ τους και ποια είναι η γραμμή που τους συνδέει. Επομένως, έχει διαστάσεις ίση με τον αριθμό των ζυγών επί τον αριθμό των γραμμών του δικτύου. Τέλος, επιστρέφει έναν πίνακα `pairsRelay` μεγέθους δύο στηλών επί τον αριθμό των ζευγών που προκύπτει. Η πρώτη στήλη αφορά τους ηλεκτρονόμους που λειτουργούν ως πρωτεύουσα προστασία ενώ η δεύτερη στήλη ως δευτερεύουσα προστασία. Προφανώς, κάθε γραμμή του πίνακα `pairsRelay` αποτελεί ένα ζεύγος πρωτεύουσας και δευτερεύουσας προστασίας.

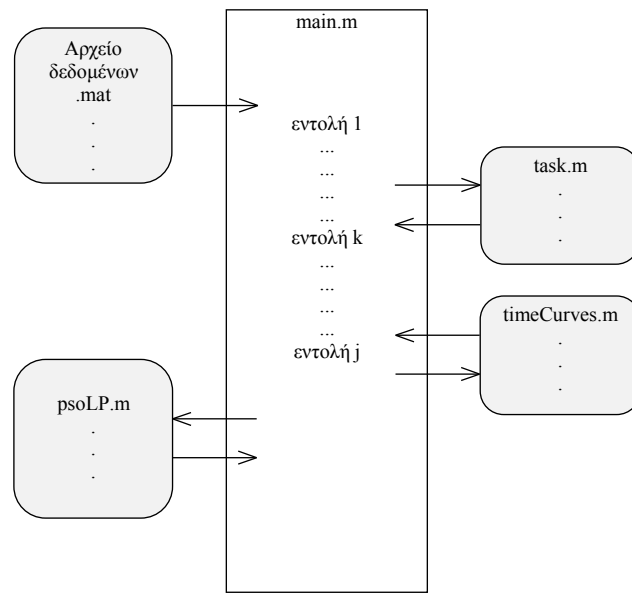
### Συνάρτηση `task.m`

Η συνάρτηση `task.m` καλείται από την κύρια συνάρτηση `main.m` η οποία παίρνει σαν είσοδο διάφορες τιμές αποτελεσμάτων από την ανάλυση του δικτύου. Αυτές είναι, τα ρεύματα ροής φορτίου και τα ρεύματα βραχυκύκλωσης, τα οποία στην παρούσα διπλωματική εργασία έχουν υπολογιστεί με το λογισμικό `NEPLAN` και καταγράφηκαν στο αρχείο `.mat`. Η συνάρτηση `task.m` υπολογίζει για κάθε ηλεκτρονόμο τους μετασχηματιστές έντασης, το εύρος τιμών ρευμάτων ρύθμισης και ρεύματα βραχυκύκλωσης υποβιβασμένα στο επίπεδο λειτουργίας του ηλεκτρονόμου. Τα αποτελέσματα επιστρέφονται στην κύρια συνάρτηση.

### Συνάρτηση `psoLP.m`

Η συνάρτηση `psoLP.m` είναι ο πυρήνας του αλγορίθμου βελτιστοποίησης και καλείται από την κύρια συνάρτηση `main.m`. Παίρνει σαν είσοδο τις τιμές που προέκυψαν από τις προαναφερθείσες συναρτήσεις. Βελτιστοποιεί το πρόβλημα και επιστρέφει τα αποτελέσματα στην κύρια συνάρτηση.

Προκειμένου να υπάρχει μια εικόνα της δομής των συναρτήσεων ακολουθεί ένα διάγραμμα στο Σχήμα 4.4.



Σχ. 4.4: Διάγραμμα δομής λογισμικού

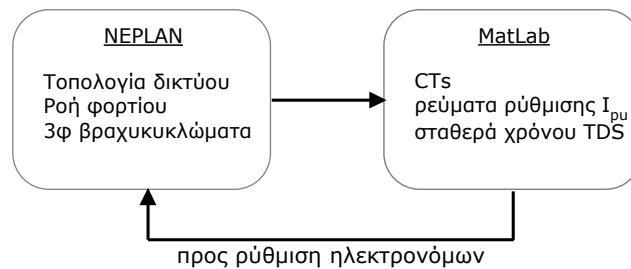
## Κεφάλαιο 5

# Εφαρμογή

### 5.1. Εισαγωγή

Σ' αυτό το κεφάλαιο περιγράφονται η εφαρμογή και τα αποτελέσματα της μεθοδολογίας PSO-LP για τρία διαφορετικά δίκτυα. Πιο συγκεκριμένα, εξετάστηκαν δύο δίκτυα της IEEE των 14 και 39 ζυγών και ένα δίκτυο το οποίο δημιουργήθηκε κατάλληλα ώστε να μελετηθούν τα προβλήματα που εμφανίζονται κατά την αλλαγή της τοπολογίας του δικτύου, τα οποία αναφέρθηκαν στην *Ενότητα 2.2.4*.

Αρχικά, δημιουργούνται τα δίκτυα στο λογισμικό πακέτο NEPLAN. Στη συνέχεια γίνεται ανάλυση ροής φορτίου και τριφασικών βραχυκυκλωμάτων. Τα αποτελέσματα αναλύσεων εισάγονται ως δεδομένα στο λογισμικό MatLab (*Σχήμα 5.1*), υπολογίζονται οι λόγοι μετασχηματισμού των μετασχηματιστών έντασης (CTs), και με τη μέθοδο PSO-LP βρίσκονται οι βέλτιστες παράμετροι του ηλεκτρονόμου, τα ρεύματα ρύθμισης (pickup current) και οι σταθερές χρόνου (*TDS*). Εν συνεχεία, ρυθμίζονται οι ηλεκτρονόμοι στο NEPLAN με τις βελτιστοποιημένες παραμέτρους και ακολουθούν τριφασικά βραχυκυκλώματα σε διάφορα σημεία του δικτύου προκειμένου να επιβεβαιωθεί η επιλεκτικότητά (*selectivity*) τους.



**Σχ.** 5.1: Κύκλος διαδικασίας ρύθμισης H/N

Για κάθε υπό μελέτη σύστημα, η βελτιστοποίηση στο Matlab γίνεται με βάση την παρακάτω επιλογή παραμέτρων.

- όρια pick-up ρευμάτων για κάθε ηλεκτρονόμο:

$$I_{pu}^{min} \leq I_{pu} \leq I_{pu}^{max}$$
$$sm \cdot \frac{I_{flow}}{CT} \leq I_{pu} \leq \frac{I_{sc}}{sm \cdot CT}$$

όπου ο συντελεστής ασφαλείας  $sm = 1.5$ , τα ρεύματα  $I_{flow}$  και  $I_{sc}$  είναι το ρεύμα φόρτισης και το ρεύμα σφάλματος αντίστοιχα.

- όρια  $TDS$  για κάθε ηλεκτρονόμο:

$$TDS_{min} \leq TDS \leq TDS_{max}$$

$$0.05 \leq TDS \leq 1.0$$

- επιλέγεται το Standard Inverse Curve της οικογένειας καμπυλών IEC:

$$K = 0.14, \quad a = 0.02, \quad L = 0$$

- χρονική καθυστέρηση μέχρι να αντιδράσει ο εφεδρικός ηλεκτρονόμος:  $CTI = 0.3 \text{ sec}$

Επίσης, σε κάθε υπό μελέτη σύστημα τοποθετήθηκαν σε διάφορα σημεία, τυχαία, διεσπαρμένες γεννήτριες (DGs) ώστε να υπάρχουν εντός του δικτύου μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Σ' αυτό το σημείο να σημειωθεί ότι ο σκοπός ένταξης των διεσπαρμένων γεννητριών στο σύστημα ήταν να γίνει πιο σύνθετο το δίκτυο και να συμβάλουν στα ρεύματα βραχυκύκλωσης. Δεν μελετήθηκαν οι διάφορες επιπτώσεις που προκαλούνται λόγω αυτών στο σύστημα, οι οποίες αναφέρθηκαν στην *Ενότητα 2.2.3*.

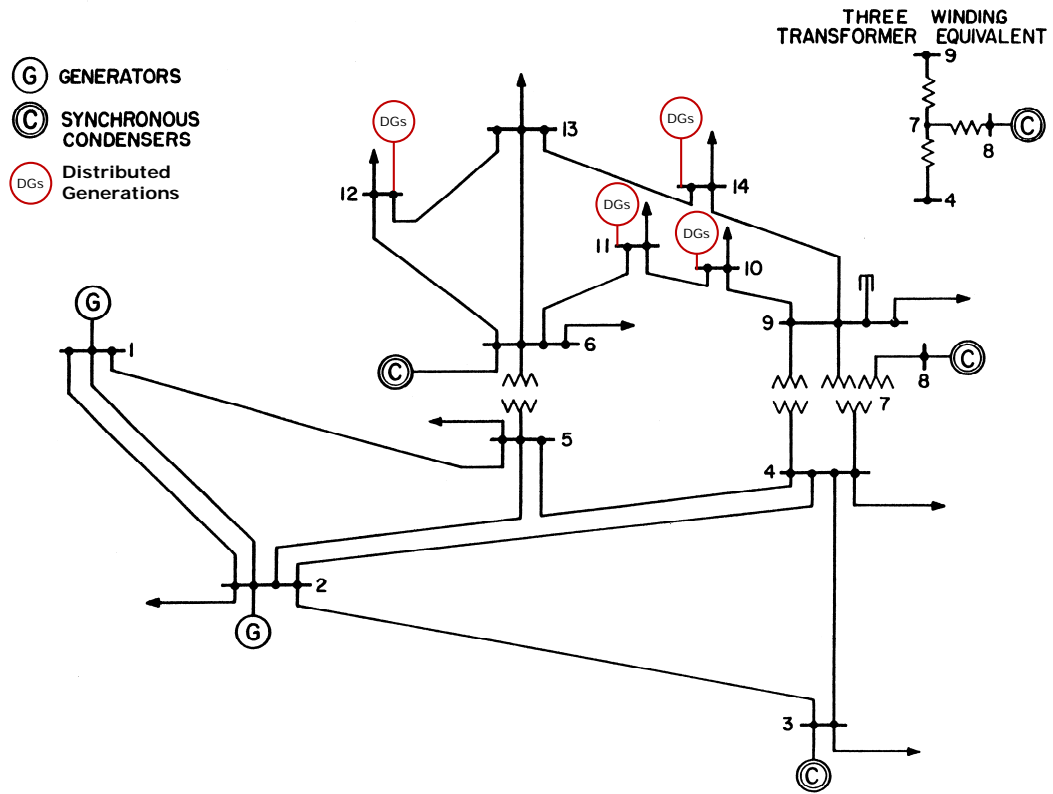
Στις επόμενες ενότητες γίνεται περιγραφή του κάθε υπό μελέτη δικτύου, γεγονός που θα βοηθήσει στην κατανόηση της διαδικασίας. Στο τέλος ακολουθούν τα συμπεράσματα και οι σχολιασμοί αποτελεσμάτων.

## 5.2. Σύστημα 14 ζυγών της IEEE

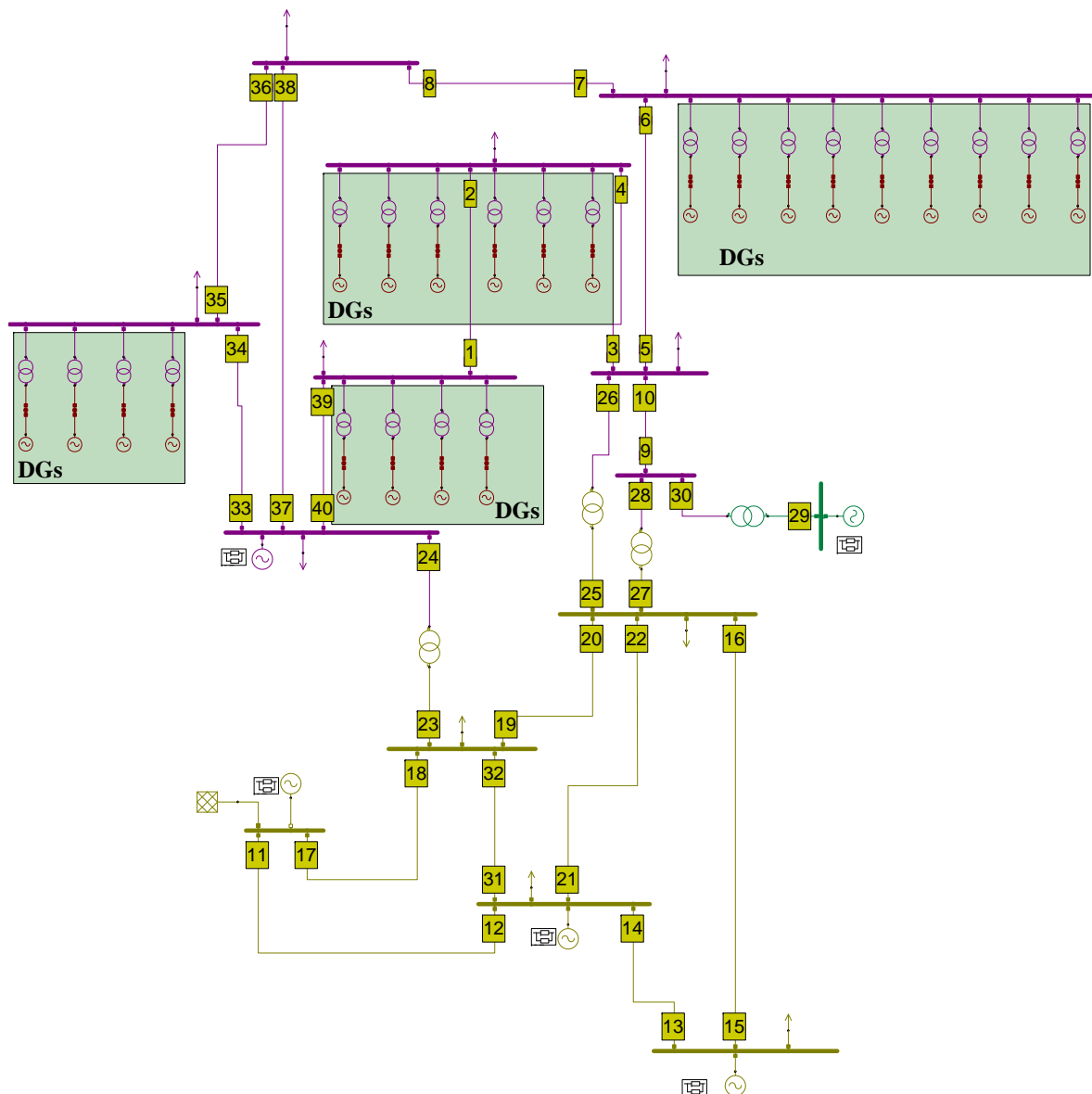
Το τυποποιημένο σύστημα 14 ζυγών της IEEE που επιλέχθηκε για να μελετηθεί φαίνεται στο *Σχήμα 5.2*. Το προηγούμενο υλοποιήθηκε στο λογισμικό πακέτο NEPLAN, το οποίο φαίνεται στο *Σχήμα 5.3*. Είναι ένα σύστημα υπομεταφοράς και διανομής ΥΤ/ΜΤ που έχει τρία επίπεδα τάσης των 13,8 kV, 18kV και 69kV. Τυχαία επιλέχθηκαν οι ζυγοί 10, 11, 12, και 14 στους οποίους προστέθηκαν γεννήτριες (ΔΠ ΧΤ με μετασχηματιστή ανύψωση τάσης για το επίπεδο λειτουργίας του συστήματος).

Στον *Πίνακα 5.1* παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης. Συγκεκριμένα, στον *Πίνακα 5.1a* φαίνονται οι τιμές ανάλυσης ροής φορτίου και τριφασικών βραχυκύκλωμάτων του δικτύου, οι οποίες υπολογίστηκαν με χρήση του λογισμικού πακέτου NEPLAN. Ο αριθμός των ηλεκτρονόμων που εμφανίζονται στο εν λόγω δίκτυο είναι 40. Στην πρώτη στήλη αναγράφονται οι αύξοντες αριθμοί των ηλεκτρονόμων, στη δεύτερη τα ρεύματα φόρτισης ( $I_{flow}$ ) ενώ στην τρίτη και στην τέταρτη στήλη τα τριφασικά ρεύματα βραχυκύκλωσης των πρωτευόντων ( $I_{sc,pr}$ ) και των εφεδρικών ( $I_{sc,bu}$ ) ηλεκτρονόμων αντίστοιχα.

Τα αποτελέσματα αυτά εισήχθησαν, ως δεδομένα, στο λογισμικό πακέτο Matlab, απ' όπου λήφθηκαν οι βελτιστοποιημένες τιμές που αναγράφονται στον *Πίνακα 5.1b*. Το πλήθος των σωματιδίων και των επαναλήψεων ήταν 100 και 150 αντίστοιχα, και η αντικειμενική συνάρτηση έλαβε την ελάχιστη τιμή 8, 133 sec. Στη δεύτερη στήλη αναγράφονται οι λόγοι μετασχηματισμού του μετασχηματιστή έντασης (CT), στην τρίτη στήλη οι τιμές των ρευμάτων ρύθμισης ( $I_{pu}$ ), στην τέταρτη στήλη οι χρονικές σταθερές (TDS) ενώ στην τελευταία στήλη οι χρόνοι λειτουργίας ( $t$ ) των πρωτευόντων ηλεκτρονόμων.



Σχ. 5.2: Σύστημα 14 ζυγών της IEEE [30]



Σχ. 5.3: Σύστημα 14 ζυγών της IEEE στο NEPLAN

## Αξιολόγηση

Παρατηρείται πως τα αποτελέσματα είναι άκρως ικανοποιητικά. Οι χρόνοι λειτουργίας των πρωτεύοντων ηλεκτρονόμων κυμαίνονται περίπου από 0,1 έως 0,4 sec, ενώ των δευτερευόντων δεν ξεπερνάνε τα 0,85 sec, τιμές που είναι λογικές και εντός των ορίων που χρησιμοποιούνται στην πράξη. Επίσης, παρατηρείται στην τελευταία στήλη του Πίνακα 5.2 πως όλες οι τιμές είναι μεγαλύτερες ή ίσες της τιμής 0,3 sec, η οποία είναι η χρονική καθυστέρηση ενεργοποίησης του εφεδρικού ηλεκτρονόμου όταν αποτύχει ο πρωτεύον ηλεκτρονόμος. Ακολουθείται ο Πίνακα 5.2 που αναγράφονται τα ζεύγη των ηλεκτρονόμων και οι χρόνοι λειτουργίας τους.



<i>Relay</i>	$I_{flow}(A)$	$I_{sc,pr}(A)$	$I_{sc,bu}(A)$
<b>1</b>	486	23096	9595
<b>2</b>	486	26772	7478
<b>3</b>	257	32434	8171
<b>4</b>	257	26772	15995
<b>5</b>	90	32434	5519
<b>6</b>	90	20678	9286
<b>7</b>	369	20678	6445
<b>8</b>	369	23372	5762
<b>9</b>	1400	32920	12191
<b>10</b>	1400	32434	12449
<b>11</b>	1113	14869	4913
<b>12</b>	1087	14454	5281
<b>13</b>	794	9567	2799
<b>14</b>	398	14454	1909
<b>15</b>	355	9567	2683
<b>16</b>	370	11056	2334
<b>17</b>	397,5	14869	1640
<b>18</b>	786	10871	2303
<b>19</b>	685	10871	4444
<b>20</b>	682	11056	4189
<b>21</b>	537	14454	1598
<b>22</b>	540	11056	2405
<b>23</b>	386	10871	1707
<b>24</b>	1799	34219	12830
<b>25</b>	119	11056	734
<b>26</b>	576	32434	6519
<b>27</b>	207	11056	1404
<b>28</b>	1010	32920	13829
<b>29</b>	1021	17373	10286
<b>30</b>	1331	32920	6931
<b>31</b>	392	14454	1557
<b>32</b>	400	10871	2431
<b>33</b>	426	34219	2004
<b>34</b>	426	18020	9111
<b>35</b>	159	18020	6924
<b>36</b>	159	23372	4267
<b>37</b>	1043	34219	4089
<b>38</b>	1043	23372	13407
<b>39</b>	761	23096	11291
<b>40</b>	761	34219	6295

(a) από Neplan

<i>Relay</i>	<i>CT</i>	$I_{pu}$	<i>TDS</i>	<i>t(sec)</i>
<b>1</b>	1200	3,20	0,092	0,351
<b>2</b>	1400	3,20	0,050	0,192
<b>3</b>	1700	2,41	0,050	0,166
<b>4</b>	1400	3,20	0,102	0,394
<b>5</b>	1700	1,88	0,050	0,148
<b>6</b>	1100	3,20	0,078	0,302
<b>7</b>	1100	3,20	0,058	0,224
<b>8</b>	1200	2,82	0,050	0,178
<b>9</b>	1700	2,67	0,066	0,230
<b>10</b>	1700	3,20	0,066	0,256
<b>11</b>	1200	2,40	0,050	0,210
<b>12</b>	1100	2,13	0,050	0,189
<b>13</b>	800	2,09	0,050	0,197
<b>14</b>	800	1,15	0,050	0,124
<b>15</b>	500	2,78	0,050	0,178
<b>16</b>	600	2,01	0,050	0,155
<b>17</b>	800	1,13	0,050	0,122
<b>18</b>	800	1,65	0,050	0,162
<b>19</b>	700	2,96	0,050	0,208
<b>20</b>	700	2,82	0,050	0,200
<b>21</b>	800	1,26	0,050	0,128
<b>22</b>	600	2,01	0,050	0,154
<b>23</b>	600	1,90	0,050	0,152
<b>24</b>	1800	3,18	0,059	0,227
<b>25</b>	600	0,82	0,050	0,109
<b>26</b>	1700	2,00	0,050	0,152
<b>27</b>	600	1,24	0,050	0,126
<b>28</b>	1700	3,20	0,067	0,257
<b>29</b>	1100	3,08	0,089	0,377
<b>30</b>	1700	1,59	0,050	0,137
<b>31</b>	800	1,27	0,050	0,128
<b>32</b>	600	1,97	0,051	0,157
<b>33</b>	1800	0,74	0,050	0,104
<b>34</b>	1000	3,15	0,081	0,319
<b>35</b>	1000	3,20	0,074	0,293
<b>36</b>	1200	2,30	0,050	0,160
<b>37</b>	1800	1,48	0,050	0,134
<b>38</b>	1200	3,20	0,095	0,363
<b>39</b>	1200	3,20	0,082	0,314
<b>40</b>	1800	2,23	0,050	0,160

(b) από Matlab

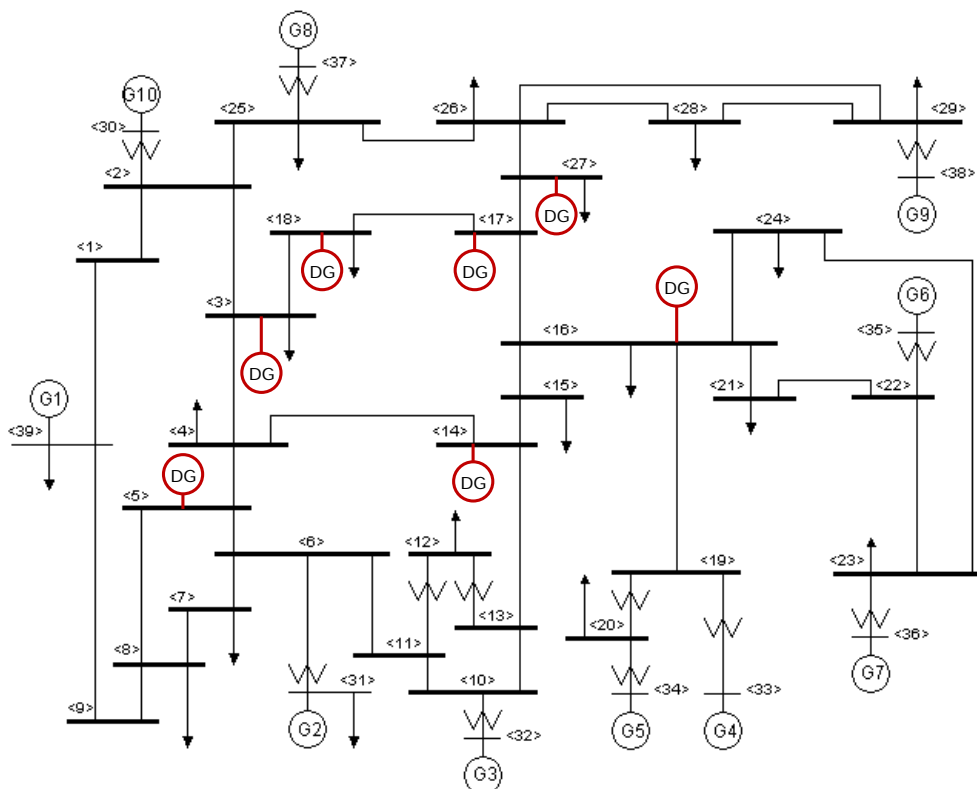
**Πίν. 5.1:** Αποτελέσματα ανάλυσης από NEPLAN και Matlab του συστήματος 14 ζυγών

pairsRelay		Standard Inverse Curve			Συνέχεια				
<i>pr</i>	<i>bu</i>	<i>t<sub>pr</sub></i>	<i>t<sub>bu</sub></i>	$[t_{bu} - t_{pr}]$	<i>pr</i>	<i>bu</i>	<i>t<sub>pr</sub></i>	<i>t<sub>bu</sub></i>	$[t_{bu} - t_{pr}]$
4	1	0,394	0,694	0,300	12	22	0,189	0,503	0,314
39	2	0,314	0,679	0,365	14	22	0,124	0,503	0,379
2	3	0,192	0,504	0,312	31	22	0,128	0,503	0,375
5	4	0,148	0,556	0,408	33	23	0,104	0,858	0,754
10	4	0,256	0,556	0,300	37	23	0,134	0,858	0,724
26	4	0,152	0,556	0,404	40	23	0,160	0,858	0,698
7	5	0,224	0,639	0,415	18	24	0,162	0,508	0,345
3	6	0,166	0,556	0,390	19	24	0,208	0,508	0,300
10	6	0,256	0,556	0,300	32	24	0,157	0,508	0,351
26	6	0,152	0,556	0,404	3	25	0,166	0,860	0,694
36	7	0,160	0,663	0,502	5	25	0,148	0,860	0,712
38	7	0,363	0,663	0,300	10	25	0,256	0,860	0,604
6	8	0,302	0,653	0,351	16	26	0,155	0,535	0,380
3	9	0,166	0,466	0,300	20	26	0,200	0,535	0,335
5	9	0,148	0,466	0,318	22	26	0,154	0,535	0,380
26	9	0,152	0,466	0,314	27	26	0,126	0,535	0,409
28	10	0,257	0,557	0,300	9	27	0,230	0,547	0,317
30	10	0,137	0,557	0,420	30	27	0,137	0,547	0,410
14	11	0,124	0,654	0,530	16	28	0,155	0,500	0,346
21	11	0,128	0,654	0,526	20	28	0,200	0,500	0,300
31	11	0,128	0,654	0,526	22	28	0,154	0,500	0,346
17	12	0,122	0,428	0,306	25	28	0,109	0,500	0,391
12	13	0,189	0,676	0,487	9	29	0,230	0,557	0,327
21	13	0,128	0,676	0,548	28	29	0,257	0,557	0,300
31	13	0,128	0,676	0,548	18	31	0,162	0,811	0,649
15	14	0,178	0,478	0,300	19	31	0,208	0,811	0,604
20	15	0,200	0,528	0,327	23	31	0,152	0,811	0,660
22	15	0,154	0,528	0,373	12	32	0,189	0,489	0,300
25	15	0,109	0,528	0,419	14	32	0,124	0,489	0,365
27	15	0,126	0,528	0,401	21	32	0,128	0,489	0,361
13	16	0,197	0,527	0,330	35	33	0,293	0,857	0,564
19	17	0,208	0,587	0,379	24	34	0,227	0,527	0,300
23	17	0,152	0,587	0,435	37	34	0,134	0,527	0,393
32	17	0,157	0,587	0,430	40	34	0,160	0,527	0,367
11	18	0,210	0,624	0,415	8	35	0,178	0,663	0,485
16	19	0,155	0,455	0,300	38	35	0,363	0,663	0,300
22	19	0,154	0,455	0,300	34	36	0,319	0,801	0,483
25	19	0,109	0,455	0,346	8	37	0,178	0,819	0,641
27	19	0,126	0,455	0,328	36	37	0,160	0,819	0,659
18	20	0,162	0,462	0,300	24	38	0,227	0,527	0,300
23	20	0,152	0,462	0,311	33	38	0,104	0,527	0,422
32	20	0,157	0,462	0,306	40	38	0,160	0,527	0,367
16	21	0,155	0,750	0,595	24	39	0,227	0,527	0,300
20	21	0,200	0,750	0,550	33	39	0,104	0,527	0,422
25	21	0,109	0,750	0,641	37	39	0,134	0,527	0,393
27	21	0,126	0,750	0,624	1	40	0,351	0,771	0,420

Πίν. 5.2: Τα ζεύγη H/N και οι χρόνοι λειτουργίας τους του συστήματος 14 ζυγών

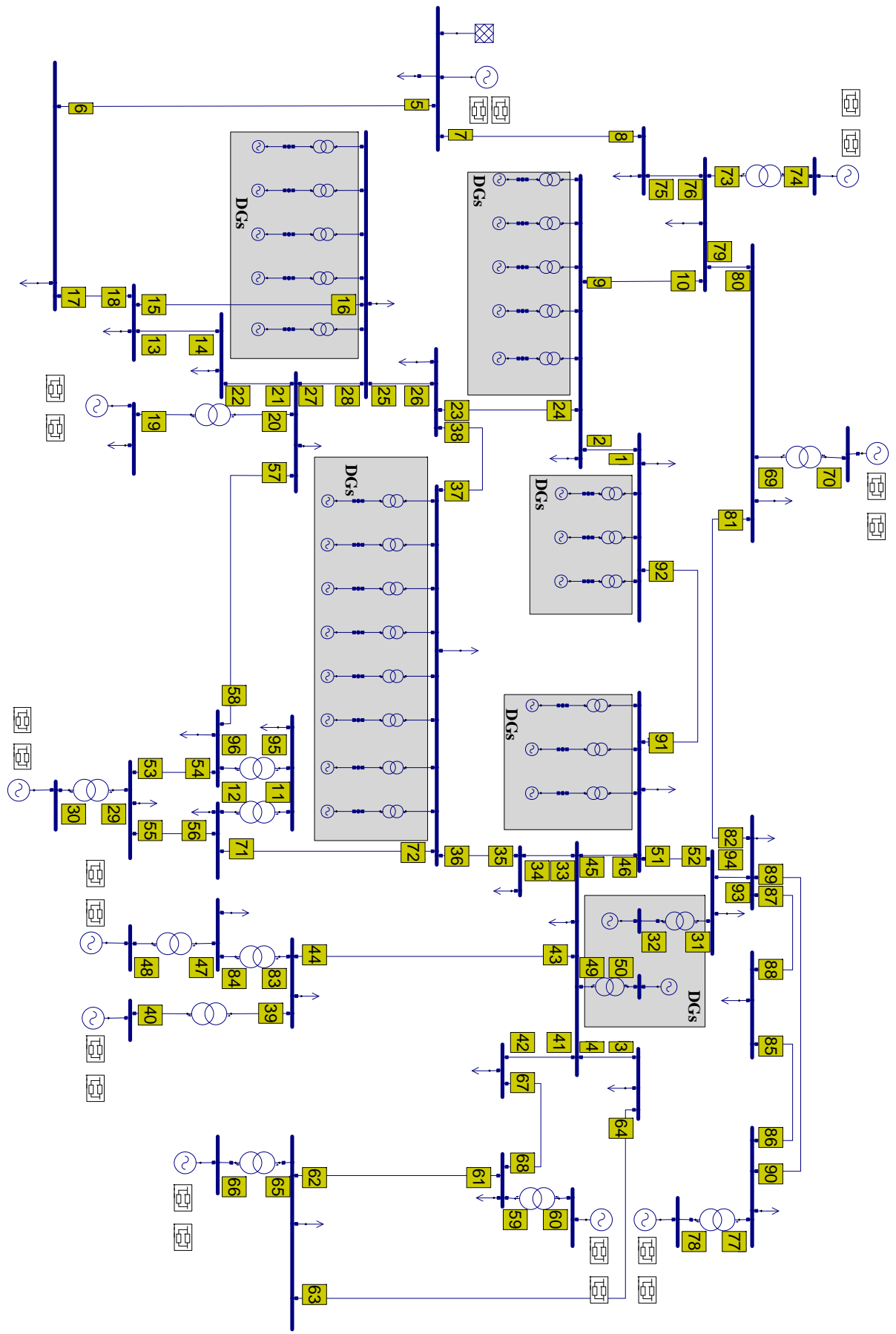
### 5.3. Σύστημα 39 ζυγών της IEEE

Το σύστημα 39 ζυγών της IEEE το οποίο επιλέχθηκε για να μελετηθεί φαίνεται στο Σχήμα 5.4. Το προηγούμενο υλοποιήθηκε στο λογισμικό πακέτο NEPLAN, το οποίο φαίνεται στο Σχήμα 5.5. Πρόκειται για δίκτυο διανομής MT που έχει ένα επίπεδο τάσης των 10 kV. Σε τυχαία σημεία εντός του συστήματος προστέθηκαν γεννήτριες (ΔΠ XT με μετασχηματιστή ανύψωση τάσης για το επίπεδο λειτουργίας του δικτύου). Οι προστιθέμενες γεννήτριες φαίνονται στο ίδιο σχήμα με κόκκινο χρώμα.



Σχ. 5.4: Σύστημα 39 ζυγών της IEEE

Στον Πίνακα 5.3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης του συστήματος 39 ζυγών. Συγκεκριμένα, εκτελέστηκαν ανάλυση ροής φορτίου και βραχυκυκλωμάτων με το λογισμικό πακέτο NEPLAN και οι βελτιστοποιημένες παράμετροι των H/N ελήφθησαν από το λογισμικό πακέτο Matlab. Ο αριθμός των ηλεκτρονόμενων που χρησιμοποιείται στο σύστημα είναι 96 και τα ζεύγη ηλεκτρονόμενων που προκύπτουν είναι 178. Για την πραγματοποίηση της διαδικασίας βελτιστοποίησης επιλέχθηκε το πλήθος των σωματιδίων και των επαναλήψεων 100 και 150 αντίστοιχα όπου η αντικειμενική συνάρτηση έλαβε την ελάχιστη τιμή 37 sec. Ακολουθείται ο Πίνακα 5.3 που αναγράφονται τα ζεύγη των ηλεκτρονόμενων και οι χρόνοι λειτουργίας τους.



Σχ. 5.5: Σύστημα 39 ζυγών της IEEE στο NEPLAN

**Πίν.** 5.3: Αποτελέσματα ανάλυσης από NEPLAN και Matlab του συστήματος 39 ζυγών

<i>Relay</i>	$I_{flow}(A)$	$I_{sc,pr}(A)$	$I_{sc,bu}(A)$	$I_{pu}$	<i>TDS</i>	$t(sec)$
1	21000	420887	168255	2,85	0,100	0,353
2	21000	447620	148738	2,66	0,104	0,355
3	8000	440635	359685	4,11	0,123	0,538
4	8000	627244	56730	0,60	0,100	0,193
5	35000	203563	70583	1,36	0,100	0,474
6	37000	187154	85344	1,46	0,100	0,557
7	28000	203563	75338	1,43	0,100	0,423
8	28000	194544	83191	1,70	0,100	0,491
9	26000	447620	175352	2,74	0,100	0,374
10	26000	493428	150506	2,67	0,100	0,350
11	4000	166911	83285	3,86	0,102	0,428
12	4000	360492	13715	0,42	0,100	0,175
13	3000	312899	120345	2,27	0,134	0,422
14	3000	309007	135955	3,15	0,104	0,389
15	10000	312899	139628	3,22	0,108	0,406
16	9000	381907	45682	1,00	0,100	0,227
17	24000	187154	52931	1,18	0,100	0,363
18	24000	312899	52931	1,54	0,100	0,321
19	64000	282520	135342	1,15	0,100	0,512
20	60000	391635	92222	0,94	0,100	0,355
21	18000	391635	35120	1,13	0,100	0,237
22	18000	309007	173054	3,85	0,100	0,461
23	29000	395781	140353	2,11	0,100	0,368
24	29000	447620	119758	2,01	0,100	0,336
25	8000	381907	138767	2,45	0,105	0,342
26	8000	395781	125833	2,50	0,100	0,330
27	27000	391635	136488	2,14	0,100	0,359
28	27000	381907	193630	2,89	0,100	0,433
29	46000	374646	99573	1,56	0,100	0,417
30	49000	292480	145292	1,54	0,100	0,509
31	47000	409218	107065	1,48	0,100	0,388
32	48000	317971	170785	1,80	0,100	0,530
33	47000	627244	91726	1,55	0,100	0,319
34	48000	414115	289182	2,46	0,100	0,551
35	27000	414115	124935	2,18	0,100	0,352
36	28000	392824	133483	2,23	0,100	0,374
37	10000	392824	132319	2,15	0,110	0,338

Συνεχίζεται στην επόμενη σελίδα

<i>Relay</i>	$I_{flow}(A)$	$I_{sc,pr}(A)$	$I_{sc,bu}(A)$	$I_{pu}$	$TDS$	$t(sec)$
38	10000	395781	129605	2,36	0,103	0,329
39	36000	379071	134385	1,94	0,100	0,407
40	39000	351346	156104	2,00	0,100	0,458
41	10000	627244	80954	1,23	0,100	0,244
42	10000	379693	234335	4,13	0,100	0,437
43	14000	627244	116029	1,47	0,100	0,261
44	13000	379071	198549	4,62	0,100	0,472
45	5000	627244	174767	1,82	0,101	0,289
46	6000	522041	264808	3,25	0,101	0,384
47	31000	241686	51525	0,98	0,100	0,331
48	32000	182764	122064	1,97	0,100	0,652
49	48000	627244	107065	1,22	0,100	0,288
50	49000	370968	223774	2,10	0,100	0,540
51	31000	522041	129958	2,07	0,100	0,327
52	31000	409218	181001	2,24	0,100	0,388
53	23000	374646	141409	2,59	0,100	0,374
54	24000	364261	178261	2,97	0,100	0,422
55	10000	374646	133714	2,64	0,100	0,340
56	11000	360492	184332	3,27	0,118	0,448
57	5000	391635	127843	2,80	0,100	0,349
58	4000	364261	172908	3,84	0,100	0,419
59	39000	389086	109595	1,85	0,100	0,409
60	40000	316428	169244	2,05	0,100	0,511
61	3000	389086	141760	2,74	0,100	0,345
62	4000	369672	167630	3,35	0,102	0,392
63	15000	369672	97073	2,34	0,100	0,319
64	16000	440635	80950	1,57	0,100	0,268
65	32000	369672	104987	1,88	0,100	0,378
66	32000	317475	122236	1,92	0,100	0,420
67	27000	379693	145363	2,23	0,100	0,373
68	26000	389086	137746	2,35	0,100	0,371
69	30000	412161	94703	1,92	0,100	0,349
70	31000	292551	145506	2,21	0,100	0,476
71	6000	360492	162477	3,43	0,100	0,391
72	6000	392824	120908	1,55	0,149	0,398
73	25000	493428	156825	2,57	0,100	0,336
74	25000	460791	169445	2,31	0,101	0,333
75	5000	194544	111429	3,73	0,105	0,431
76	2000	493428	46136	0,50	0,152	0,277

Συνεχίζεται στην επόμενη σελίδα

<i>Relay</i>	$I_{flow}(A)$	$I_{sc,pr}(A)$	$I_{sc,bu}(A)$	$I_{pu}$	$TDS$	$t(sec)$
<b>77</b>	46000	224337	107065	1,44	0,100	0,566
<b>78</b>	47000	237512	90347	1,55	0,100	0,584
<b>79</b>	29000	493428	141597	2,13	0,100	0,330
<b>80</b>	29000	412161	222935	3,46	0,100	0,488
<b>81</b>	12000	412161	97595	1,48	0,119	0,313
<b>82</b>	12000	349136	112599	2,68	0,100	0,342
<b>83</b>	8000	379071	46161	1,15	0,100	0,238
<b>84</b>	8000	241686	190163	6,68	0,100	0,632
<b>85</b>	20000	191272	111770	2,57	0,100	0,526
<b>86</b>	20000	224337	58660	1,80	0,100	0,376
<b>87</b>	8000	349136	35018	0,93	0,100	0,222
<b>88</b>	9000	191272	79509	3,32	0,100	0,383
<b>89</b>	11000	349136	35018	1,23	0,100	0,244
<b>90</b>	12000	224337	58660	2,34	0,100	0,330
<b>91</b>	29000	522041	124976	2,08	0,100	0,318
<b>92</b>	30000	420887	250332	3,44	0,100	0,491
<b>93</b>	5000	349136	166682	3,05	0,113	0,414
<b>94</b>	7000	409218	121219	2,14	0,100	0,307
<b>95</b>	3000	166911	83626	3,81	0,100	0,417
<b>96</b>	3000	364261	13105	0,34	0,100	0,165
						Τέλος

Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται οι χρόνοι λειτουργίας των πρωτευόντων και των εφεδρικών ηλεκτρονόμων του συστήματος 39 ζυγών.

**Πίν. 5.4:** Τα ζεύγη H/N και οι χρόνοι λειτουργίας τους του συστήματος 39 ζυγών

$pr$	$bu$	$t_{pr}$	$t_{bu}$	$[t_{bu} - t_{pr}]$	$pr$	$bu$	$t_{pr}$	$t_{bu}$	$[t_{bu} - t_{pr}]$	$pr$	$bu$	$t_{pr}$	$t_{bu}$	$[t_{bu} - t_{pr}]$
9	1	0,374	0,674	0,300	49	34	0,288	0,774	0,486	62	64	0,392	0,818	0,426
24	1	0,336	0,674	0,338	37	35	0,338	0,923	0,585	65	64	0,378	0,818	0,440
92	2	0,491	0,791	0,300	72	35	0,398	0,923	0,525	62	66	0,392	1,013	0,621
33	3	0,319	0,619	0,300	34	36	0,551	0,916	0,365	63	66	0,319	1,013	0,694
41	3	0,244	0,619	0,375	23	37	0,368	0,668	0,300	59	67	0,409	0,787	0,378
43	3	0,261	0,619	0,357	26	37	0,330	0,668	0,338	61	67	0,345	0,787	0,441
45	3	0,289	0,619	0,329	36	38	0,374	0,698	0,324	42	68	0,437	0,853	0,417
49	3	0,288	0,619	0,330	72	38	0,398	0,698	0,300	80	70	0,488	0,924	0,435
64	4	0,268	0,632	0,364	44	40	0,472	1,003	0,531	81	70	0,313	0,924	0,610
17	5	0,363	1,756	1,392	83	40	0,238	1,003	0,764	36	71	0,374	0,721	0,347
7	6	0,423	1,530	1,107	67	41	0,373	0,934	0,561	37	71	0,338	0,721	0,383
75	7	0,431	1,098	0,667	4	42	0,193	0,632	0,439	12	72	0,175	0,748	0,573
5	8	0,474	1,251	0,777	33	42	0,319	0,632	0,314	56	72	0,448	0,748	0,300
73	9	0,336	0,769	0,433	43	42	0,261	0,632	0,371	10	74	0,350	0,650	0,300
76	9	0,277	0,769	0,492	45	42	0,289	0,632	0,343	76	74	0,277	0,650	0,373
79	9	0,330	0,769	0,439	49	42	0,288	0,632	0,344	79	74	0,330	0,650	0,320
2	10	0,355	0,899	0,544	39	43	0,407	0,753	0,346	10	75	0,350	0,650	0,300
24	10	0,336	0,899	0,563	83	43	0,238	0,753	0,515	73	75	0,336	0,650	0,314
56	11	0,448	0,748	0,300	4	44	0,193	0,851	0,658	79	75	0,330	0,650	0,320
71	11	0,391	0,748	0,357	33	44	0,319	0,851	0,532	8	76	0,491	0,791	0,300
95	12	0,417	1,198	0,781	41	44	0,244	0,851	0,607	86	78	0,376	3,211	2,835
22	13	0,461	0,761	0,300	45	44	0,289	0,851	0,562	90	78	0,330	3,211	2,881
15	14	0,406	0,706	0,300	49	44	0,288	0,851	0,563	69	79	0,349	0,838	0,489
18	14	0,321	0,706	0,385	51	45	0,327	0,627	0,300	81	79	0,313	0,838	0,524
25	15	0,342	0,733	0,391	91	45	0,318	0,627	0,309	10	80	0,350	0,870	0,520
28	15	0,433	0,733	0,300	4	46	0,193	0,619	0,425	73	80	0,336	0,870	0,534
13	16	0,422	0,799	0,377	33	46	0,319	0,619	0,300	76	80	0,277	0,870	0,593
18	16	0,321	0,799	0,478	41	46	0,244	0,619	0,375	87	81	0,222	0,714	0,493
13	17	0,422	1,109	0,687	43	46	0,261	0,619	0,357	89	81	0,244	0,714	0,470
15	17	0,406	1,109	0,704	49	46	0,288	0,619	0,330	93	81	0,414	0,714	0,300
6	18	0,557	1,939	1,382	84	48	0,632	1,056	0,424	69	82	0,349	0,794	0,444
21	19	0,237	1,136	0,899	4	50	0,193	0,896	0,703	80	82	0,488	0,794	0,305
27	19	0,359	1,136	0,777	33	50	0,319	0,896	0,578	47	83	0,331	0,930	0,599
57	19	0,349	1,136	0,786	41	50	0,244	0,896	0,652	39	84	0,407	0,811	0,403
14	21	0,389	1,509	1,121	43	50	0,261	0,896	0,635	44	84	0,472	0,811	0,339
20	22	0,355	0,758	0,403	45	50	0,289	0,896	0,607	77	85	0,566	0,895	0,329

Συνεχίζεται στην επόμενη σελίδα



$pr$	$bu$	$t_{pr}$	$t_{bu}$	$[t_{bu} - t_{pr}]$	$pr$	$bu$	$t_{pr}$	$t_{bu}$	$[t_{bu} - t_{pr}]$	$pr$	$bu$	$t_{pr}$	$t_{bu}$	$[t_{bu} - t_{pr}]$
27	22	0,359	0,758	0,400	31	51	0,388	0,986	0,597	90	85	0,330	0,895	0,565
57	22	0,349	0,758	0,409	94	51	0,307	0,986	0,679	88	86	0,383	1,433	1,050
2	23	0,355	0,835	0,480	46	52	0,384	0,725	0,341	85	87	0,526	0,910	0,384
9	23	0,374	0,835	0,461	91	52	0,318	0,725	0,407	82	88	0,342	0,758	0,416
26	24	0,330	0,962	0,633	58	53	0,419	0,804	0,385	89	88	0,244	0,758	0,514
38	24	0,329	0,962	0,633	96	53	0,165	0,804	0,639	93	88	0,414	0,758	0,344
23	25	0,368	0,668	0,300	29	54	0,417	0,756	0,339	77	89	0,566	1,422	0,855
38	25	0,329	0,668	0,338	55	54	0,340	0,756	0,416	86	89	0,376	1,422	1,046
16	26	0,227	0,743	0,516	12	55	0,175	0,701	0,526	82	90	0,342	0,945	0,603
28	26	0,433	0,743	0,310	71	55	0,391	0,701	0,310	87	90	0,222	0,945	0,723
16	27	0,227	0,808	0,581	29	56	0,417	0,717	0,300	93	90	0,414	0,945	0,530
25	27	0,342	0,808	0,466	53	56	0,374	0,717	0,343	1	91	0,353	0,957	0,604
20	28	0,355	0,762	0,407	54	57	0,422	0,822	0,400	46	92	0,384	0,783	0,399
21	28	0,237	0,762	0,525	96	57	0,165	0,822	0,657	51	92	0,327	0,783	0,456
57	28	0,349	0,762	0,412	20	58	0,355	0,771	0,416	31	93	0,388	0,688	0,300
53	30	0,374	1,057	0,683	21	58	0,237	0,771	0,534	52	93	0,388	0,688	0,300
55	30	0,340	1,057	0,718	27	58	0,359	0,771	0,412	82	94	0,342	0,683	0,341
52	32	0,388	1,018	0,630	61	60	0,345	0,957	0,611	87	94	0,222	0,683	0,461
94	32	0,307	1,018	0,711	68	60	0,371	0,957	0,586	89	94	0,244	0,683	0,439
35	33	0,352	3,069	2,717	63	61	0,319	0,710	0,390	54	95	0,422	0,722	0,300
4	34	0,193	0,774	0,581	65	61	0,378	0,710	0,332	58	95	0,419	0,722	0,303
41	34	0,244	0,774	0,530	59	62	0,409	0,709	0,300	11	96	0,428	0,920	0,492
43	34	0,261	0,774	0,513	68	62	0,371	0,709	0,338					
45	34	0,289	0,774	0,485	3	63	0,538	0,859	0,321					

Τέλος

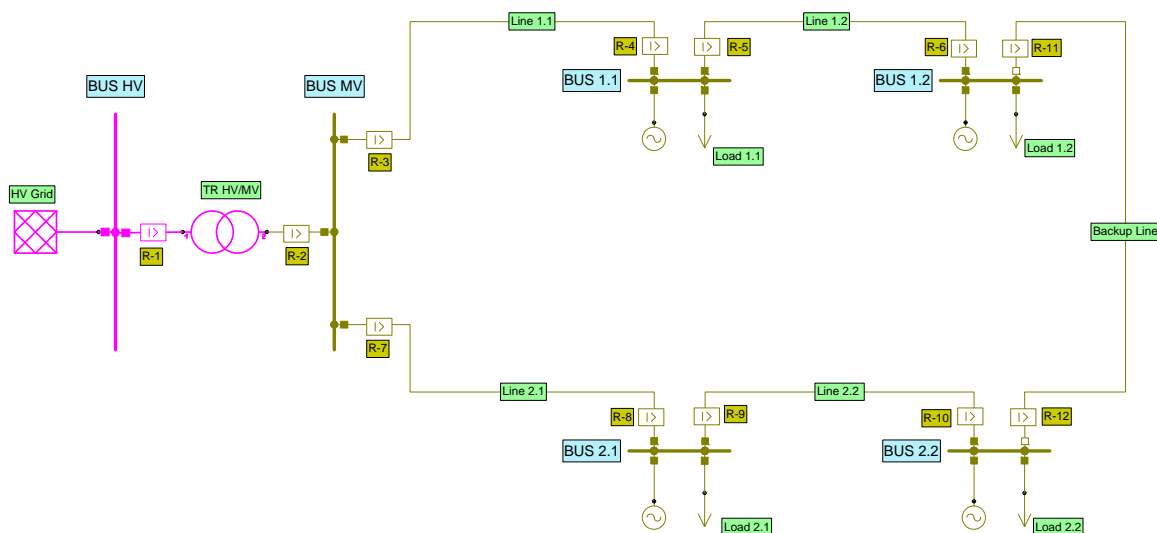
## Αξιολόγηση

Παρατηρείται στον Πίνακα 5.3 ότι παρόλο που το σύστημα είναι αρκετά μεγάλο και πολύπλοκο, με πολλούς βρόχους και διεσπαρμένες γεννήτριες, οι βελτιστοποιημένες παράμετροι είναι πολύ καλές, καθώς οι ηλεκτρονόμοι αποκρίνονται σε λογικούς χρόνους. Αυτό σημαίνει πως ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης λειτουργεί αποτελεσματικά τόσο στα μικρά δίκτυα (σύστημα 14 ζυγών) όσο και σε μεγαλύτερα (σύστημα 39 ζυγών).

## 5.4. Δίκτυο MT 5 ζυγών

Σ' αυτή την ενότητα θα μελετηθεί το δίκτυο του Σχήματος 5.6, το οποίο επιλέχθηκε για τη μελέτη διάφορων σεναρίων λειτουργίας. Συγκεκριμένα, θα γίνει δοκιμή τριών περιπτώσεων εκ των οποίων η πρώτη δεν θα εμπεριέχει ΔΓ στο δίκτυο, η δεύτερη θα εμπεριέχει ενώ η τρίτη ένα μέρος του δικτύου θα είναι απομονωμένο από το σύστημα και θα λειτουργεί σε κατάσταση νησιδοποίησης.

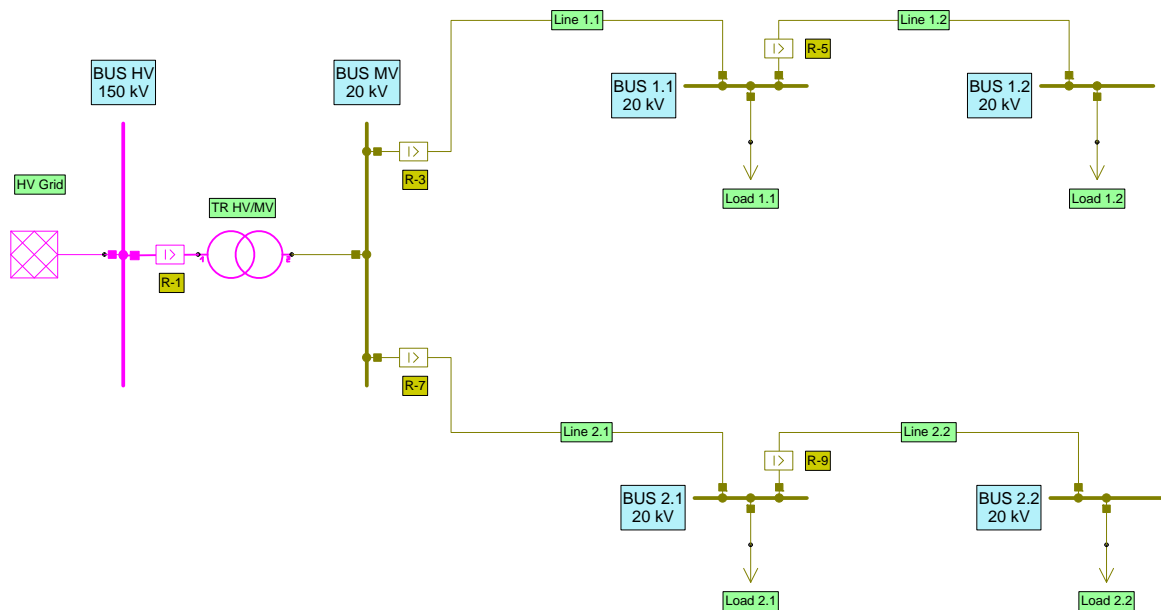
Σε κάθε περίπτωση θα ρυθμίζονται οι αντίστοιχοι ηλεκτρονόμοι στο NEPLAN (με τις βελτιστοποιημένες παραμέτρους) και θα πραγματοποιούνται τριφασικά βραχυκυκλώματα σε τυχαία σημεία ώστε να επιβεβαιωθεί η επιλεκτικότητά τους. Όλοι οι ηλεκτρονόμοι που χρησιμοποιούνται είναι SEL 311B (1 A Phase and Ground), οι οποίοι είναι διαθέσιμοι στις βιβλιοθήκες του NEPLAN.



Σχ. 5.6: Δίκτυο MT 5 ζυγών

### 5.4.1. Περίπτωση 1 (χωρίς ΔΠ στο δίκτυο)

Στην πρώτη περίπτωση, η οποία φαίνεται στο Σχήμα 5.7, εξετάζεται η περίπτωση που το δίκτυο δεν διαθέτει καμία διασπαρμένη γεννήτρια και τροφοδοτείται από το σύστημα MT, μέσω Υποσταθμού ΥΤ/MT.



Σχ. 5.7: Δίκτυο MT 5 ζυγών χωρίς ΔΠ (Περίπτωση 1)

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν μετά την ανάλυση φαίνονται στον Πίνακα 5.5. Στην περίπτωση αυτή έχουμε 5 ηλεκτρονόμους απ' τους οποίους προκύπτουν 4 ζεύγη ηλεκτρονόμων. Με αυτά τα αποτελέσματα ρυθμίστηκαν όλοι οι ηλεκτρονόμοι και πραγματοποιήθηκαν τριφασικά βραχυκυκλώματα στους ζυγούς 1.2 και 2.1, οι οποίοι επιλέχθηκαν τυχαία. Οι καμπύλες λειτουργίας των ηλεκτρονόμων φαίνονται στο Σχήμα 5.8.

Relay	$I_{flow}(A)$	$I_{sc,pr}(A)$	$I_{sc,bu}(A)$
1	100	1219	520
3	300	3903	2203
5	100	2203	0
7	300	3903	2203
9	200	2203	0

(a) από NEPLAN

Relay	CT	$I_{pu}$	TDS	$t(sec)$
1	100	2,85	0,050	0,237
3	300	3,20	0,051	0,251
5	200	0,75	0,050	0,127
7	300	3,20	0,056	0,278
9	200	1,50	0,050	0,172

(b) από Matlab

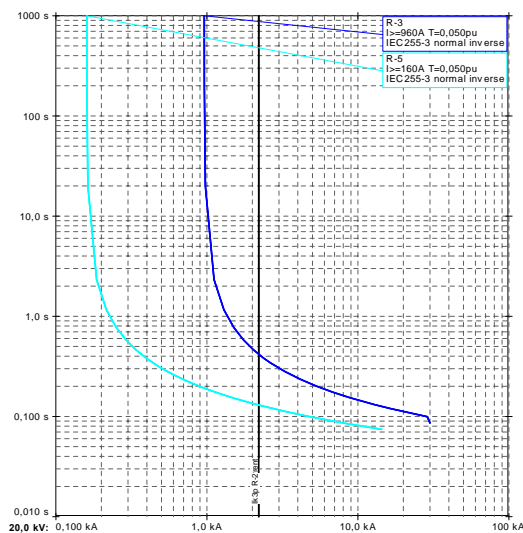
pairsRelay		Standard Inverse Curve		
$pr$	$bu$	$t_{pr}$	$t_{bu}$	$[t_{bu} - t_{pr}]$
5	3	0,127	0,427	0,300
3	1	0,251	0,578	0,327
5	7	0,172	0,472	0,300
7	1	0,278	0,578	0,300

(c) Ζεύγιοι και χρόνοι λειτουργίας τους σε (sec)

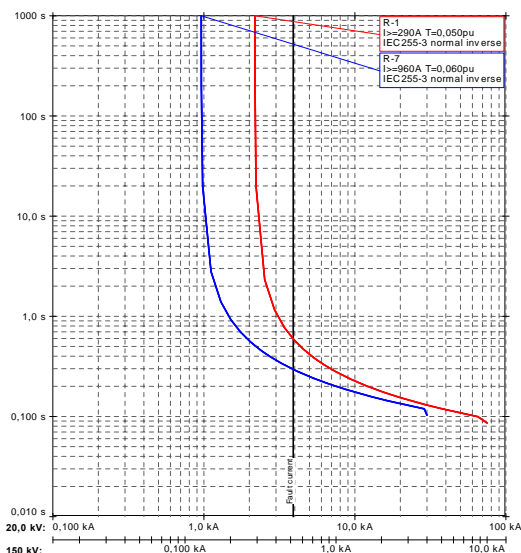
Πίν. 5.5: Αποτελέσματα ανάλυσης περίπτωσης 1

## Αξιολόγηση

Οι χρόνοι λειτουργίας των ηλεκτρονόμων είναι πολύ καλοί αφού οι πρωτεύοντες ηλεκτρονόμοι δεν ξεπερνάνε τα 0,3 sec και οι εφεδρικοί τα 0,6 sec. Επίσης, οι καμπύλες λειτουργίας των ηλεκτρονόμων του Σχήματος 5.8 επιβεβαιώνουν τη σωστή ρύθμιση τους και την επιλεκτικότητα μεταξύ τους. Συγκεκριμένα στο σχήμα (a) ο πρωτεύον ηλεκτρονόμος R – 5 λειτουργήσει σε χρόνο 0,13 sec και ακολούθησε ο εφεδρικός με 0,43 sec για ένα σφάλμα μεγέθους 2,2 kA. Επίσης, στο σχήμα (b) φαίνεται ότι ο πρωτεύον ηλεκτρονόμος R – 7 ενεργοποιήθηκε σε χρόνο 0,3 sec (για ένα σφάλμα μεγέθους 3,9 kA) και ακολούθησε ο εφεδρικός R – 1 σε χρόνο 0,6 sec (για ένα σφάλμα μεγέθους 0,5 kA στην πλευρά ΥΤ).



(a) 3φ βραχυκύκλωμα στον ζυγό 1.2

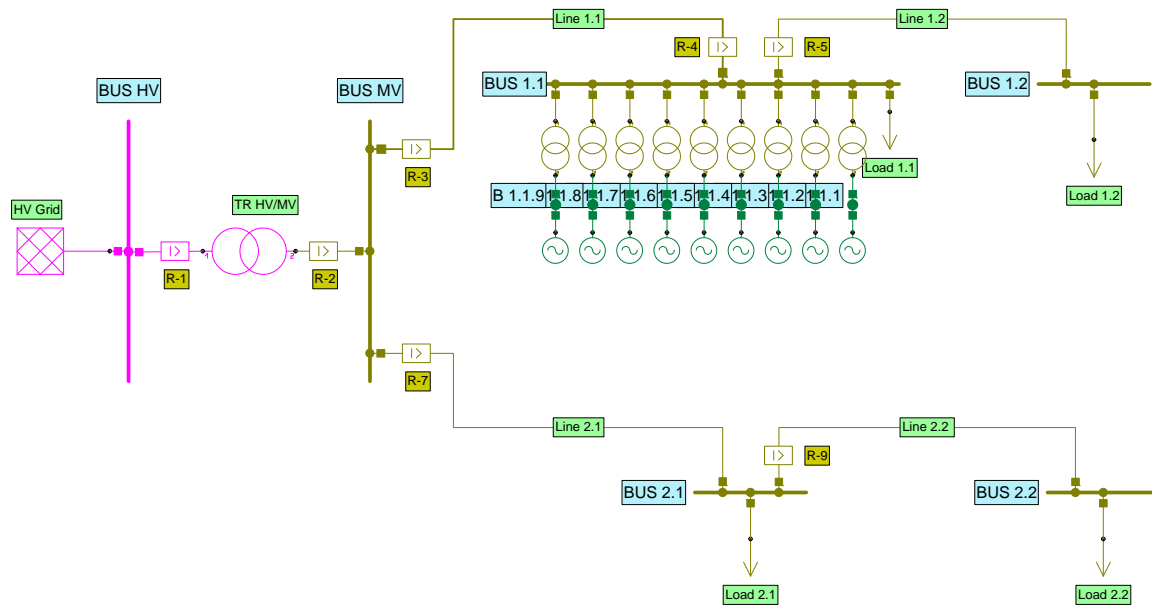


(b) 3φ βραχυκύκλωμα στον ζυγό 2.1

Σχ. 5.8: Καμπύλες λειτουργίας H/N (Περίπτωση 1)

### 5.4.2. Περίπτωση 2 (με ΔΠ στο δίκτυο)

Στη δεύτερη περίπτωση εξετάζεται η περίπτωση που εντός του δικτύου υπάρχουν διεσπαρμένες γεννήτριες και το δίκτυο τροφοδοτείται από το σύστημα ΜΤ, μέσω Υποσταθμού ΥΤ/ΜΤ. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.9, τοποθετήθηκαν 9 όμοιες γεννήτριες ΧΤ των 2,1 MVA μαζί με μετασχηματιστή ανύψωσης ΧΤ/ΜΤ στον ζυγό 1.1.



Σχ. 5.9: Δίκτυο MT 5 ζυγών με ΔΠ (Περίπτωση 2)

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης φαίνονται στον Πίνακα 5.6. Στην προκειμένη περίπτωση έχουμε 7 ηλεκτρονόμους απ' τους οποίους προκύπτουν 6 ζεύγη ηλεκτρονόμων. Με αυτά τα αποτελέσματα ρυθμίστηκαν όλοι οι ηλεκτρονόμοι στο NEPLAN και πραγματοποιήθηκαν τριφασικά βραχυκυκλώματα στους ζυγούς 1.2 και 2.1, οι οποίοι επιλέχθηκαν τυχαία. Ο καμπύλες λειτουργίας των ηλεκτρονόμων φαίνονται στο Σχήμα 5.12.

Relay	$I_{flow}(A)$	$I_{sc,pr}(A)$	$I_{sc,bu}(A)$
1	100	1219	407
2	300	3028	0
3	300	3903	943
4	300	4212	1406
5	100	3703	0
7	300	4389	2313
9	200	2313	0

(a) από NEPLAN

Relay	CT	$I_{pu}$	TDS	$t(sec)$
1	100	2,21	0,05	0,202
2	300	1,50	0,05	0,180
3	300	1,50	0,05	0,159
4	300	2,54	0,05	0,201
5	200	0,75	0,05	0,106
7	300	3,20	0,06	0,269
9	200	1,50	0,05	0,168

(b) από Matlab

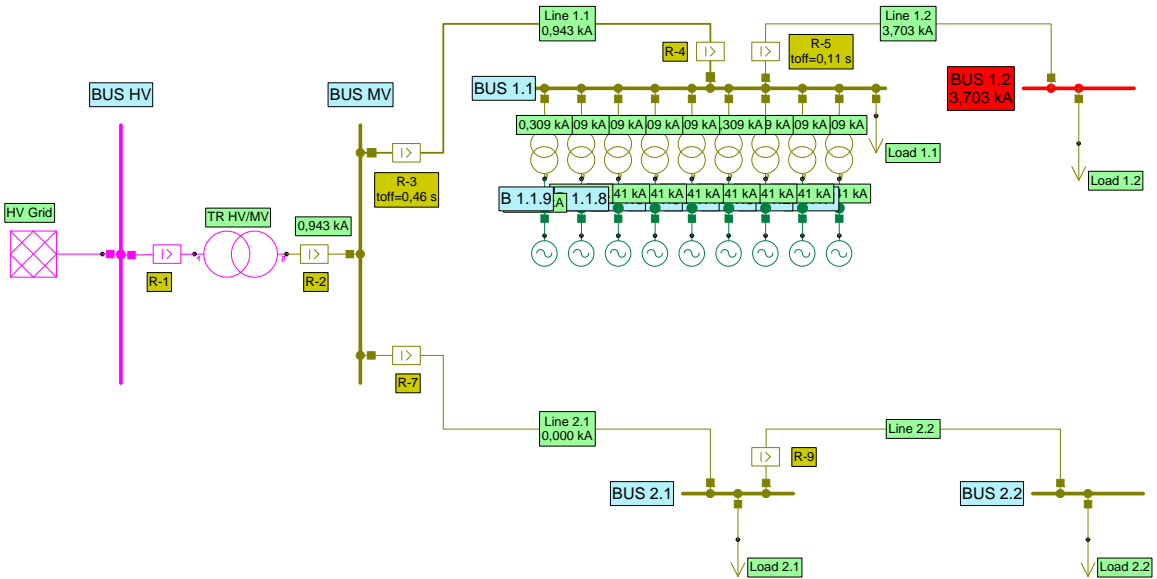
pairsRelay		Standard Inverse Curve		
$pr$	$bu$	$t_{pr}$	$t_{bu}$	$[t_{bu} - t_{pr}]$
5	3	0,106	0,470	0,364
3	1	0,159	0,569	0,410
2	4	0,180	0,569	0,389
9	7	0,168	0,468	0,300
7	1	0,270	0,570	0,300
7	4	0,270	0,570	0,300

(c) Ζεύγιοι και χρόνοι λειτουργίας τους σε (sec)

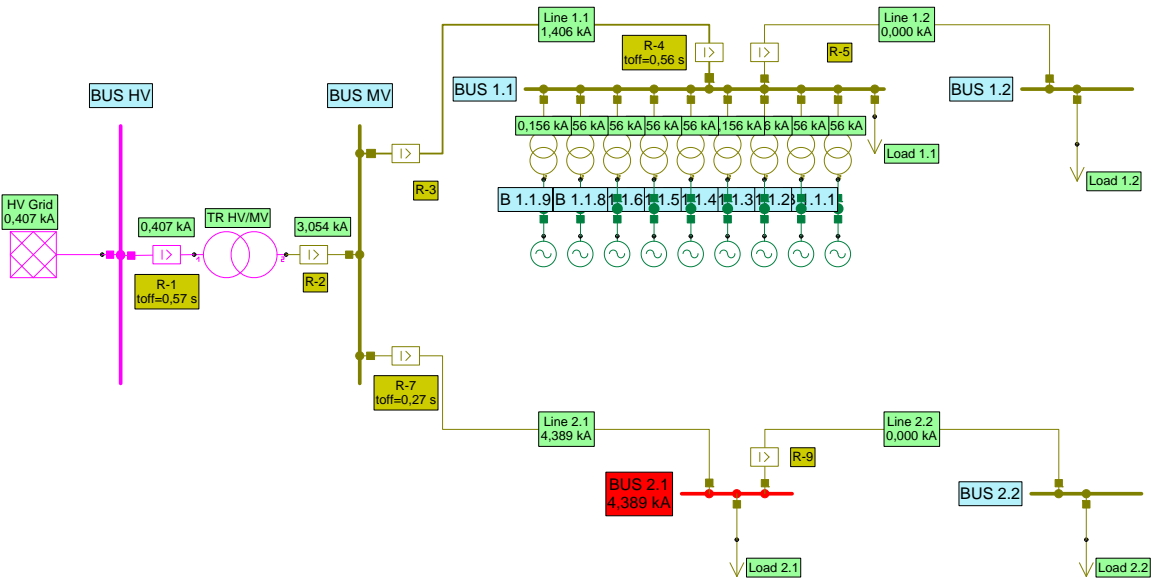
Πίν. 5.6: Αποτελέσματα ανάλυσης περίπτωσης 2

**Αξιολόγηση**

Οι χρόνοι λειτουργίας των ηλεκτρονόμων είναι εξαιρετικά καλοί. Εξετάζοντας την περίπτωση τριφασικών βραχυκυκλωμάτων στον ζυγό 1.2 παρατηρείται πως δεν τίθεται πρόβλημα protection blinding, το οποίο αναφέρθηκε στην Ενότητα 2.2.4. Βλέποντας στο Σχήμα 5.10 παρατηρείται πως, παρόλο που το δίκτυο συμβάλλει λιγότερο ρεύμα στο σφάλμα σε σχέση με τις ΔΓ, ο δευτερεύον ηλεκτρονόμος R – 3 λειτούργησε σε ικανοποιητικό χρόνο στα 0,460 sec.



Σχ. 5.10: 3φ σφάλμα στον ζυγό 1.2 (Περίπτωση 2)

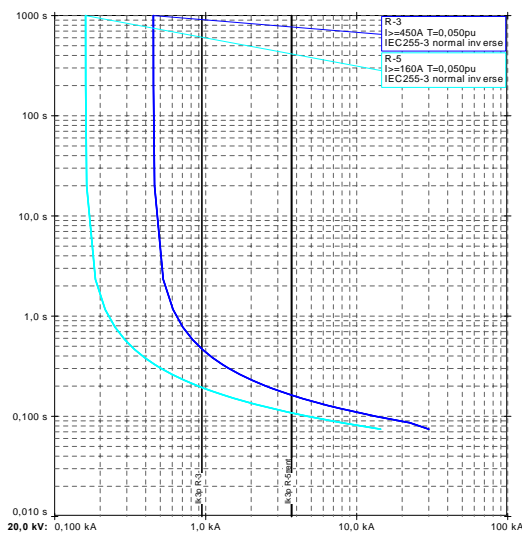


Σχ. 5.11: 3φ σφάλμα στον ζυγό 2.1 (Περίπτωση 2)

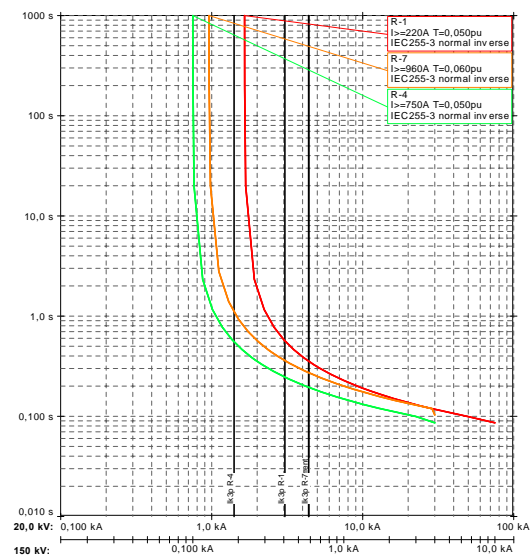
Ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα αποτελέσματα στην περίπτωση του σφάλματος στον ζυγό 2.1. Παρατηρείται στο Σχήμα 5.11 πως οι χρόνοι λειτουργίας των εφεδρικών ηλεκτρονόμων R – 1

και  $R-4$  είναι περίπου ίδιοι. Επομένως, αν αποτύχει ο προτεύον  $H/N R-7$ , οι εφεδρικοί  $H/N$  θα λειτουργήσουν στον ίδιο χρόνο στα  $0,57 \text{ sec}$ .

Τέλος, από τις καμπύλες του Σχήματος 5.12 παρατηρείται η σωστή ρύθμιση των  $H/N$  και η επιλεκτικότητα μεταξύ τους.



(a) 3φ βραχυκύκλωμα στον ζυγό 1.2

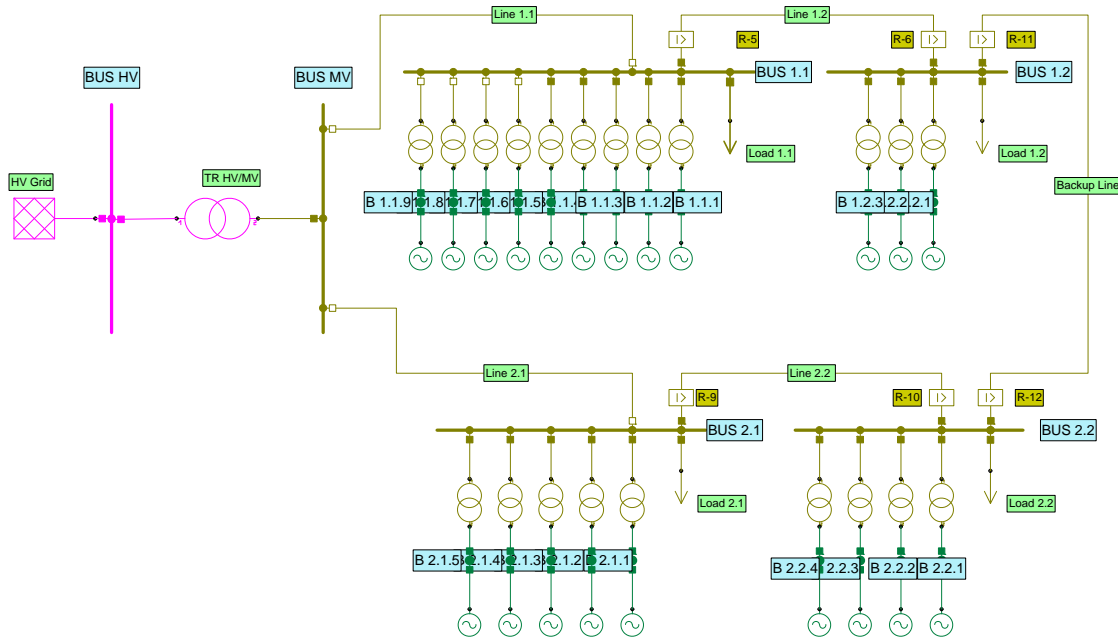


(b) 3φ βραχυκύκλωμα στον ζυγό 2.1

Σχ. 5.12: Καμπύλες λειτουργίας  $H/N$  (Περίπτωση 2)

### 5.4.3. Περίπτωση 3 (κατάσταση νησιδοποίησης)

Στην τρίτη περίπτωση εξετάζεται η περίπτωση που το δίκτυο MT είναι απομονωμένο από το υπόλοιπο σύστημα και λειτουργεί σε κατάσταση νησιδοποίησης. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.13, τοποθετήθηκαν συνολικά 21 όμοιες γεννήτριες στο δίκτυο και κατανεμήθηκαν με τέτοιο τρόπο ώστε η τάση σε κάθε ζυγό να είναι κοντά στο 1 α.μ..



Σχ. 5.13: Κατάσταση νησιδοποίησης (Περίπτωση 3)

Τα αποτελέσματα τα οποία πάρθηκαν μετά την ανάλυση φαίνονται στον Πίνακα 5.7. Στην περίπτωση αυτή έχουμε 6 ηλεκτρονόμους απ’ τους οποίους προκρίπτονται 4 ζεύγη ηλεκτρονόμων. Με αυτά τα αποτελέσματα ρυθμίστηκαν όλοι οι H/N στο NEPLAN και πραγματοποιήθηκαν, τυχαία, τριφασικά βραχυκυκλώματα στον ζυγό 1.2 και στο 50% του μήκους της εφεδρικής γραμμής προκειμένου να επιβεβαιωθούν τα αποτελέσματα. Οι καμπύλες λειτουργίας των H/N φαίνονται στο Σχήμα 5.14.

Relay	$I_{flow}(A)$	$I_{sc,pr}(A)$	$I_{sc,bu}(A)$
5	200	2907	1252
6	200	2796	0
9	100	2907	1129
10	100	2987	0
11	100	2815	1105
12	100	3025	1291

(a) από NEPLAN

Relay	CT	$I_{pu}$	TDS	$t(sec)$
5	200	3,10	0,05	0,223
6	200	1,50	0,05	0,153
9	200	2,87	0,05	0,212
10	200	0,75	0,05	0,114
11	200	2,39	0,05	0,194
12	200	3,00	0,05	0,213

(b) από Matlab

pairsRelay		Standard Inverse Curve		
$pr$	$bu$	$t_{pr}$	$t_{bu}$	$[t_{bu} - t_{pr}]$
12	9	0,213	0,513	0,300
10	11	0,114	0,414	0,300
6	12	0,153	0,453	0,300
11	5	0,194	0,494	0,300

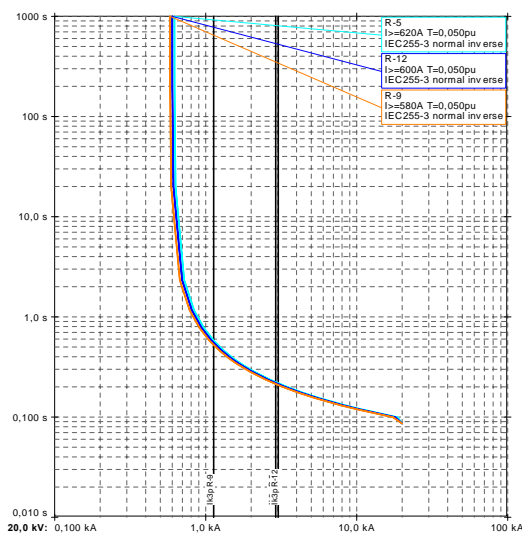
(c) Ζεύγιοι και χρόνοι λειτουργίας τους σε (sec)

Πίν. 5.7: Αποτελέσματα ανάλυσης περίπτωσης 3

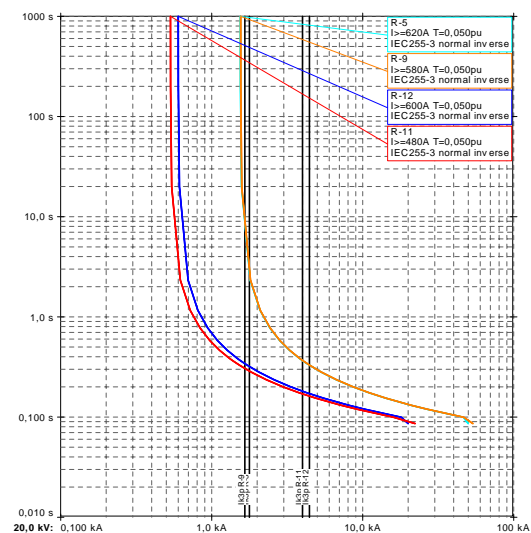


## Αξιολόγηση

Οι χρόνοι λειτουργίας των πρωτεύοντων ηλεκτρονόμων είναι ικανοποιητικοί καθώς κυμαίνονται από 0,100 sec έως 0,250 sec, όπως, επίσης, και οι χρόνοι των δευτερευόντων ηλεκτρονόμων. Στα Σχήματα 5.15 και 5.16 φαίνονται οι χρονικές αποκρίσεις των ηλεκτρονόμων για τριφασικά σφάλματα (με κόκκινο χρώμα) στον ζυγό 1.2 και στο 50% της εφεδρικής γραμμής αντίστοιχα. Παρατηρείται πως οι χρόνοι λειτουργίας των ηλεκτρονόμων συμπίπτουν με τους χρόνους λειτουργίας που αναγράφονται στον Πίνακα 5.7. Επίσης, οι καμπύλες λειτουργίας του Σχήματος 5.14 επιβεβαιώνουν τη σωστή ρύθμιση και την επιλεκτικότητα μεταξύ των ηλεκτρονόμων.

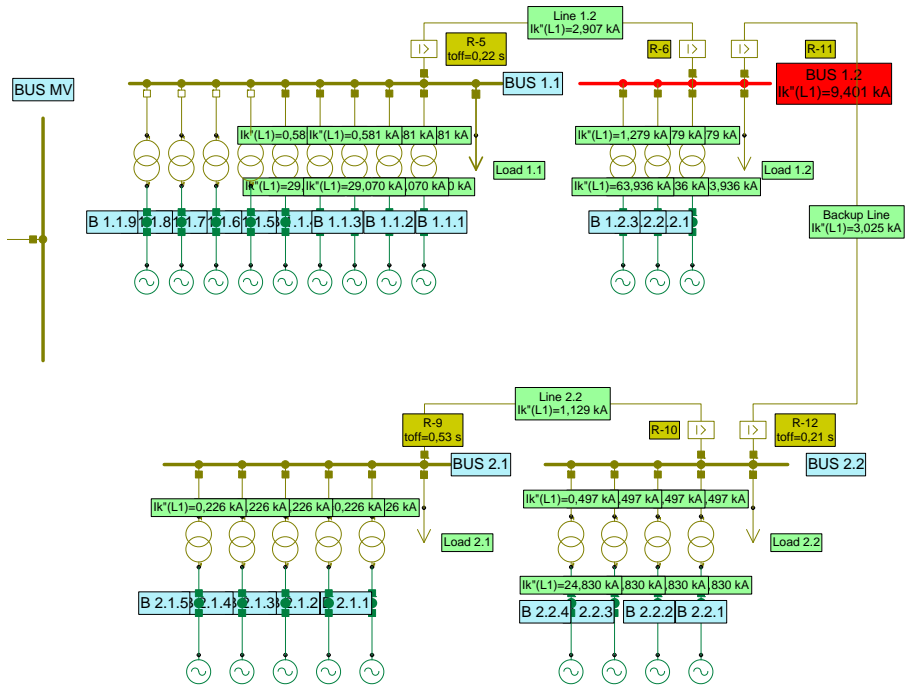


(a) 3φ βραχυκύκλωμα στον ζυγό 1.2

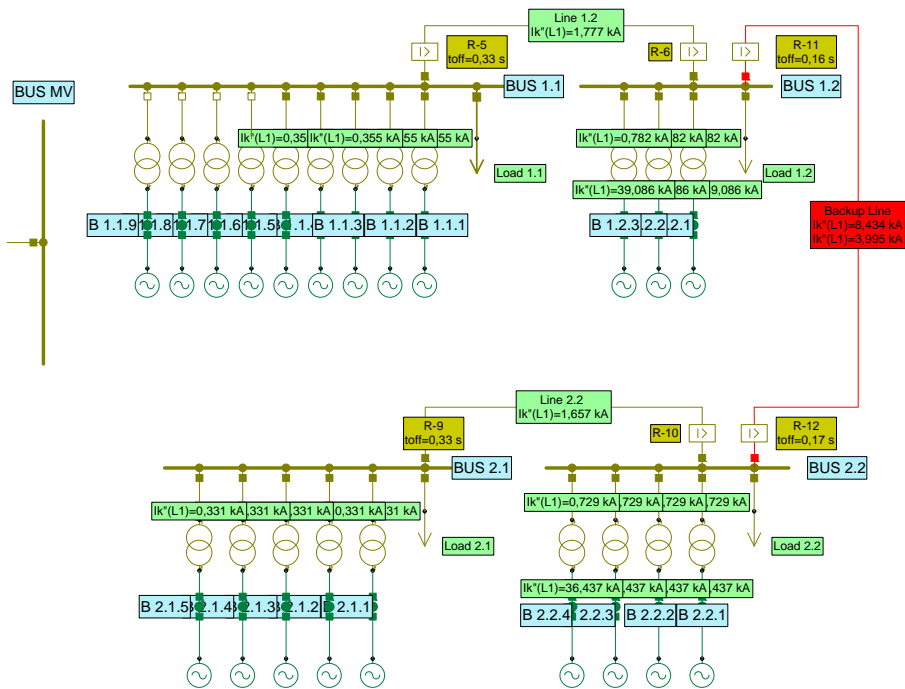


(b) 3φ βραχυκύκλωμα στο 50% της εφεδρικής γραμμής

Σχ. 5.14: Καμπύλες λειτουργίας H/N (Περίπτωση 3)



Σχ. 5.15: 3φ σφάλμα στον ζυγό 1.2 (Περίπτωση 3)



Σχ. 5.16: 3φ σφάλμα στο 50% της εφεδρικής γραμμής (Περίπτωση 3)

## Κεφάλαιο 6

# Επίλογος

### 6.1. Σύνοψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν ο σχεδιασμός μιας μεθόδου βελτιστοποίησης η οποία θα λύσει το πρόβλημα συνεργασίας (Coordination) των ηλεκτρονόμων υπερέντασης με και χωρίς στοιχεία κατεύθυνσης. Ως μέθοδος βελτιστοποίησης χρησιμοποιήθηκε η «Βελτιστοποίηση Σμήνους Σωματιδίων» (Particle Swarm Optimization) που ανήκει στους «Αλγόριθμους Εμπνευσμένους από τη Φύση» (Nature Inspire Algorithms), σε συνδυασμό με το Γραμμικό Προγραμματισμό (Linear Programming). Η υβριδική αυτή μέθοδος σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε σε περιβάλλον Matlab.

Αρχικά, παρουσιάστηκε το θεωρητικό υπόβαθρο της προστασίας των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας, καθώς επίσης ο ρόλος και τα είδη της. Έπειτα, εξετάστηκε η περίπτωση ενός Δικτύου Διανομής με Διεσπαρμένη Παραγωγή που προκαλεί προβλήματα τόσο στην προστασία του, όσο και στην αξιοπιστία του. Επίσης, αναφέρθηκε η έννοια της Προσαρμοστικής Προστασίας στα Δίκτυα διανομής με Διεσπαρμένη Παραγωγή.

Ακολούθως, διατυπώθηκε και περιγράφηκε το πρόβλημα συνεργασίας των ηλεκτρονόμων υπερέντασης, καθώς και οι τρόποι ρύθμισής τους. Επίσης, εξηγήθηκε η κλασική μέθοδος *Βελτιστοποίηση Σμήνους Σωματιδίων* και η προτεινόμενη (υβριδική) μέθοδος βελτιστοποίησης. Μετά το σχεδιασμό και την υλοποίηση της τελευταίας, ακολούθησε η εφαρμογή της σε τρία διαφορετικά συστήματα. Συγκεκριμένα, εξετάστηκαν δύο πρότυπα συστήματα της IEEE των 14 και 39 ζυγών και ένα Δίκτυο Διανομής με Διεσπαρμένη Παραγωγή που δημιουργήθηκε έτσι ώστε να μελετηθούν διάφορες περιπτώσεις.

Στη συνέχεια, παρουσιάστηκε η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων βελτιστοποίησης για κάθε εξεταζόμενο σύστημα, βάσει των οποίων ρυθμίστηκαν οι αντίστοιχοι ηλεκτρονόμοι στο λογισμικό πακέτο NEPLAN. Τέλος, δόθηκαν οι καμπύλες λειτουργίας των ηλεκτρονόμων, προκειμένου να επιβεβαιωθεί η σωστή ρύθμιση και η διατήρηση της επιλεκτικότητας μεταξύ τους.

### 6.2. Συμπεράσματα

Το πρόβλημα ρύθμισης και συνεργασίας των ηλεκτρονόμων υπερέντασης-κατεύθυνσης που τέθηκε στην *Ενότητα 3.2* επιλύθηκε με επιτυχία. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν μετά την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου βελτιστοποίησης σε τρία διαφορετικά συστήματα είναι λογικά και ικανοποιητικά. Δηλαδή, εξασφαλίζεται η απαραίτητη συνεργασία των ηλεκτρονόμων υπερέντασης βελτιστοποιώντας τις παραμέτρους ρύθμισης. Επίσης, αντιμετωπίστηκαν επιτυχώς

τα προβλήματα που προξενεί η Διεσπαρμένη Παραγωγή όταν εντάσσεται στο Δίκτυο Διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Τέλος, είναι σημαντικό να τονιστεί ότι η μέθοδος που υλοποιήθηκε λειτουργεί αποτελεσματικά τόσο σε μικρά συστήματα, όσο και σε μεγαλύτερα.

### 6.3. Μελλοντικές επεκτάσεις

Η παρούσα εργασία πραγματεύεται τη σχεδίαση και υλοποίηση της μεθόδου «Βελτιστοποίηση Σμήνους Σωματιδίων» σε συνδυασμό με Γραμμικό Προγραμματισμό. Η πρώτη μέθοδος έχει αποδειχθεί ότι είναι ένας αποδοτικός αλγόριθμος που δίνει καλά αποτελέσματα. Όμως δεν μπορεί να εγγυηθεί, λόγω του σχεδιασμού του, ότι η λύση που βρίσκει είναι η βέλτιστη. Επομένως, προτείνεται ο σχεδιασμός διαφορετικών τεχνικών βελτιστοποίησης, η οποίες θα ανήκουν στις κατηγορίες υπολογιστικής νοημοσύνης που αναφέρθηκαν στην *Ενότητα 3.5.2*, και στη συνέχεια θα συγκριθούν τα αποτελέσματά τους με αυτά της παρούσας εργασίας.

## Βιβλιογραφία

- [1] Β. Κ. Παπαδιάς, *Ανάλυση Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας, Τόμος Ι*, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 1985.
- [2] Β. Κ. Παπαδιάς, *Ανάλυση Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας, Τόμος ΙΙ*, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 1993.
- [3] Μ. Π. Παπαδόπουλος, *Δίκτυα Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας*, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 1994.
- [4] Μ. Π. Παπαδόπουλος, *Προστασία Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας*, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 1997.
- [5] J. L. Blackburn, T. J. Domin, *Protective Relaying, Principles and Applications*, Third Edition, CRC Press, 2007.
- [6] M. Kaufmann and G. S. H. Jarrett, *Power System Protection 1: Principles and components*, 1995.
- [7] L.G. Hewitson, Mark Brown and Ramesh Balakrishnan, *Practical Power Systems Protection*, 2004.
- [8] A. Oudalov, A. Fidigatti, *Adaptive Network Protection in Microgrids*, International Journal of Distributed Energy Resources, Vol. 5, 2009, pp. 201-225.
- [9] J. Priolkar, V. Shet, , International Journal of Emerging Trends in Electrical and Electronics, Vol. 2, Issue. 1, April 2013.
- [10] A. F. Contreras, G. Ramos, M. Rios, *Methodology and Design of an Adaptive Overcurrent Protection for Distribution Systems with DG*, International Journal of Engineering & Technology, Vol. 12 No:04, August 2012, pp. 128-136.
- [11] T. Ackermann, G. Andersson & L. Soder, *Distributed Generation: A Definition*, Electric Power Systems Research, Vol. 57, 2001, pp. 195-204.
- [12] M. Hager, F. Sollerkvist, M.H.J. Bollen, *The Impact of Distributed Energy Resources on Distribution - System Protection*, STRI AB, Ludvika, Sweden.
- [13] S. P. Chowdhury, S. Chowdhury, Chui Fen Ten and P. A. Crossley, *Islanding Protection of Distribution Systems with Distributed Generators – A Comprehensive Survey Report*, IEEE, 2008.
- [14] J. Mulhausen, J. Schaefer, M. Mynam, A. Guzman and M. Donolo, *Anti-Islanding Today, Successful Islanding in the Future*.
- [15] A. Botero, M. Rios, *in Distribution Networks with Distributed Generation*, PowerTech, IEEE, 2013.
- [16] M.H. Hussain, I. Musirin, S.R.A. Rahim, A.F. Abidin, *Computational Intelligence Based Technique in Optimal Overcurrent Relay Coordination: A Review*, The IJES, Vol. 2, 2013, pp. 01-09.
- [17] T. Amraee, *Coordination of Directional Overcurrent Relays Using Seeker Algorithm*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 27, No. 3, July 2012.
- [18] J. Kennedy, R.C. Eberhart, *Particle Swarm Optimization*, in: Proc. IEEE Conf. on Neural Networks, pp. 1942-1948, 1995.
- [19] G. Pereira, *Particle Swarm Optimization*, INESC-ID and Instituto Superior Tecnico, April 2011.

- [20] A.M. Birjandi, M. Pourfallah, *Optimal coordination of Overcurrent and Distance Relays by a New Particle Swarm Optimization Method*, IJEAT, Vol. 2, Issue 2, December 2011.
- [21] Γ. Κορρές, Σημειώσεις «Θεωρία προστασίας υπερέντασης», Αθήνα 2005.
- [22] Γ. Κορρές, Διαφάνειες μαθήματος «Προστασία Σ.Η.Ε.».
- [23] Διαφάνειες της SEL, 2008.
- [24] Β. Α. Παπασπηλιωτόπουλος, *Εργαστηριακό σύστημα προστασίας & εποπτείας μονάδας παραγωγής & μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας - Μελέτη και έλεγχος προστασίας του μετασχηματιστή ανύψωσης*, Ε.Μ.Π., Αθήνα, Ιούνιος 2012.
- [25] Δ. Ε. Καραλέξης, *Εργαστηριακό Σύστημα Προστασίας & Εποπτείας Σ.Η.Ε. - Προστασία Γραμμής Μεταφοράς Μέσω Ψηφιακού Ηλεκτρονόμενου*, Ε.Μ.Π., Αθήνα, Ιούλιος 2013.
- [26] Δ. Σταματιάδης, *Συστήματα διεσπαρμένης παραγωγής σε συνδυασμό με τεχνολογίες συμπαραγωγής και τιμολόγια dynamic pricing*, Ε.Μ.Π., Αθήνα, Νοέμβριος 2011.
- [27] Ν. Στεφόπουλος, Π. Τριανταφύλλου, *Διερεύνηση Προβλημάτων Νησιδοποίησης σε Δίκτυα Διανομής με Ιδιοπαραγωγούς*, Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη 2011.
- [28] Φ. Παλαιογιάννης, *Μεθοδολογία βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων για την εύρεση της βέλτιστης θέσης και των βέλτιστων ρυθμίσεων ευέλικτων συστημάτων μεταφοράς*, Ε.Μ.Π., Αθήνα, Οκτώβριος 2010.
- [29] Μ. Καλυβιώτη, *Βέλτιστη Ρύθμιση Ηλεκτρονόμων Υπερέντασης - Κατεύθυνσης*, Ε.Μ.Π., Αθήνα 2008.
- [30] University of Washington Electrical Engineering:  
<http://www.ee.washington.edu/>
- [31] Blog - Differential Protection  
<http://kbreee.blogspot.gr/2013/11/differential-protection.html>
- [32] Electrical grid  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Electrical\\_grid](http://en.wikipedia.org/wiki/Electrical_grid)
- [33] Σ.Η.Ε με διεσπαρμένες πηγές ενέργειας  
<http://iys.inonu.edu.tr/?web=eem&mw=8888&dil=en>
- [34] *Particle swarm optimization*, wikipedia  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Particle\\_swarm\\_optimization](http://en.wikipedia.org/wiki/Particle_swarm_optimization)
- [35] *Collective animal behavior*, wikipedia.  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Collective\\_animal\\_behavior](http://en.wikipedia.org/wiki/Collective_animal_behavior)
- [36] *Underwater Photography*, geekfill.  
<http://www.geekfill.com/2012/10/23/underwater-photography-photos/>