



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών

και Μηχανικών Υπολογιστών

Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος

Προσέγγιση της HVDC Μεταφοράς εξετάζοντας την Αν- θεκτικότητα, τις Προκλήσεις και τη Ροή Ισχύος.

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κωνσταντίνος Καραντώνης

Επιβλέπων : Χρήστος Χριστουδούλου,
Επ. Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Δεκέμβριος, 2025



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών
και Μηχανικών Υπολογιστών
Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος

Προσέγγιση της HVDC Μεταφοράς εξετάζοντας την Αν- θεκτικότητα, τις Προκλήσεις και τη Ροή Ισχύος.

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κωνσταντίνος Καραντώνης

Επιβλέπων : Χρήστος Χριστοδούλου
Επ. Καθηγητής, ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 5^η Δεκεμβρίου 2025

.....
Χρήστος Χριστοδούλου
Επ. Καθηγητής, ΕΜΠ

.....
Ιωάννης Γκόνος
Καθηγητής, ΕΜΠ

.....
Αντώνιος Αντωνόπουλος
Αν. Καθηγητής, ΕΜΠ

Αθήνα, Δεκέμβριος, 2025

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

Copyright © Κωνσταντίνος Καραντώνης, 2025
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Περίληψη

Η Τεχνολογία Υψηλής Τάσης Συνεχούς Ρεύματος (High Voltage Direct Current -HVDC) έχει αναδειχθεί ως η πλέον συμφέρουσα μέθοδος μεταφοράς ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις χάρη στα πολλαπλά οφέλη της, έναντι της Υψηλής Τάσης Εναλλασσόμενου Ρεύματος (High Voltage Alternating Current -HVAC). Οι διαθέσιμες τεχνολογίες επιτρέπουν βελτιωμένο έλεγχο και αποδοτικότερη διασύνδεση των μονάδων Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας -ΑΠΕ, ικανοποιώντας την διαρκώς αυξανόμενη ζήτηση για ενέργεια. Αυτή η αύξηση όμως, έχει επιφέρει νέες προκλήσεις στο περιβάλλον της ενέργειας με τις παραδοσιακές στρεφόμενες μηχανές να εκτοπίζονται και την θέση τους έχουν καταλάβει οι μετατροπείς. Παράλληλα, η ανθεκτικότητα του δικτύου δοκιμάζεται από εξωτερικές απειλές, όπως ακραία καιρικά φαινόμενα και κυβερνοεπιθέσεις. Έτσι κρίνεται αναγκαία η ενσωμάτωση τεχνολογιών στο σύστημα για την ταχεία απομόνωση σφαλμάτων και την άμεση αποκατάστασή του.

Μέσω νέων τεχνολογιών, όπως η ενσωμάτωση συστημάτων αποθήκευσης, ΑΠΕ και τοπολογικών διαμορφώσεων, αναλύεται η αντίδραση συστημάτων υπό σφάλματα και αναδεικνύεται η σημασία τους στη σταθερότητα του δικτύου. Επίσης σημαντική συμβολή για τα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας αποτελούν τα Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών, βάση των οποίων μπορεί να εξεταστεί η επέκταση του δικτύου και η εγκατάσταση ΑΠΕ και να διευκολυνθεί η εξέταση συστημάτων από προγράμματα προσομοίωσης. Η ανάλυση της ροής φορτίου (Power Flow) και τα εργαλεία προσομοίωσης, όπως το PowerFactory επιτρέπουν την βελτιστοποίηση της κατανομής ισχύος μέσω προηγμένων αλγορίθμων. Για την αξιολόγηση των προτεινόμενων μεθόδων και τεχνολογιών, δημιουργείται ένα μοντέλο βάση χαρακτηριστικών από την σύνδεση Αιγύπτου – Σαουδικής Αραβίας και εξετάζεται υπό κανονικές συνθήκες.

Λέξεις Κλειδιά: HVDC, HVAC, Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ), Ανθεκτικότητα Δικτύου, Μετατροπείς, Συστήματα Αποθήκευσης Ενέργειας (ESS), Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών (GIS), Ροή Ισχύος, Optimal Power Flow (OPF), PowerFactory

Abstract

High Voltage Direct Current (HVDC) technology has emerged as the most advantageous method for long-distance power transmission due to its multiple benefits over High Voltage Alternating Current (HVAC). Modern technologies enable improved control and more efficient integration of Renewable Energy Sources (RES), meeting the continuously increasing global energy demand. However, this rapid expansion has introduced new challenges in the energy sector, as traditional rotating machines are being replaced by converter-based technologies. At the same time, the resilience of the power grid is increasingly stressed by external threats such as extreme weather events and cyberattacks, making the integration of advanced technologies essential for rapid fault isolation and system restoration.

Through emerging technologies—such as energy storage systems, RES integration, and advanced topological configurations—the response of power systems under fault conditions is analyzed, highlighting their significance for grid stability. Geographic Information Systems (GIS) also play a crucial role by enabling the assessment of network expansion, RES placement, and improved system analysis through simulation platforms. Power Flow studies and simulation tools such as PowerFactory allow the optimization of power distribution through advanced algorithms. To evaluate the proposed methods and technologies, a model inspired by the Egypt–Saudi Arabia interconnection is developed and examined under normal operating conditions.

KeyWords: HVDC, HVAC, Renewable Energy Sources (RES), Grid Resilience, Power Converters, Energy Storage Systems (ESS), Geographic Information Systems (GIS), Power Flow Analysis, Optimal Power Flow (OPF), PowerFactory Simulation

Ευχαριστίες

Με το κλείσιμο της διπλωματικής μου εργασίας, θα ήθελα να εκφράσω την ειλικρινή μου ευχαρίστηση στον Επίκουρο Καθηγητή Ε.Μ.Π. κ. Χρήστο Χριστοδούλου, ο οποίος μου ανέθεσε το συγκεκριμένο θέμα και, με τη συμβολή του, κατάφερα να εμβαθύνω στα συστήματα μεταφοράς ενέργειας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την Δρ. Βασιλική Κονταργύρη για την παροχή συγγραφικού υλικού και τη διαρκή συνεργασία που είχαμε καθ' όλη τη διάρκεια της συγγραφής της εργασίας.

Επιπλέον, ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στον υποψήφιο διδάκτορα του Ε.Μ.Π. κ. Αθανάσιο Ζουρνατζή, ο οποίος αφιέρωσε πολύτιμο χρόνο και ενέργεια και συνέβαλε ουσιαστικά στην καθοδήγηση και διαμόρφωση αυτής της διπλωματικής. Η συνεργασία μας υπήρξε καίρια και σημαντική για την ανάπτυξη της εργασίας αλλά και για τη δική μου εξέλιξη.

Η συμβολή του καθενός σας ήταν σημαντική και ουσιαστική, οι γνώσεις που με βοηθήσατε να αποκτήσω θα συμβάλουν καθοριστικά στην επαγγελματική μου πορεία.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου, που ήταν διαρκώς πλάι μου και με στήριξε αληθινά σε όλη την διάρκεια των σπουδών μου. Φυσικά, η πορεία αυτή δεν θα ήταν το ίδιο χωρίς τους ανθρώπους που στάθηκαν δίπλα μου, τους φίλους και συμφοιτητές μου, με τους οποίους αυτό το ταξίδι έγινε πιο ευχάριστο και ουσιαστικό. Η παρέα σας ήταν το πολυτιμότερο δώρο αυτής της διαδρομής.

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	5
Abstract.....	7
Ευχαριστίες.....	9
Περιεχόμενα.....	11
1 Συνολική αξιολόγηση των συστημάτων μεταφοράς HVDC και HVAC.....	16
1.1 Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	16
1.1.1 Σύστημα Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	17
1.1.2 Γραμμές Μεταφοράς.....	17
1.1.3 Υποσταθμοί.....	21
1.1.4 Δίκτυο Διανομής.....	21
1.1.5 Η μεταφορά του Ηλεκτρικού ρεύματος από το παρελθόν στο παρόν.....	22
1.2 Σύγκριση της τεχνολογίας High Voltage Direct Current (HVDC) και High Voltage Alternate Current (HVAC).....	22
1.2.1 Οι τεχνολογίες HVDC και HVAC.....	23
1.2.2 Οικονομική σύγκριση HVDC και HVAC.....	24
1.2.3 Περιβαλλοντική σύγκριση HVDC και HVAC.....	25
1.3 Τοπολογίες HVDC.....	27
1.3.1 Μονοπολική Τοπολογία HVDC.....	28
1.3.2 Διπολική Τοπολογία HVDC.....	29
1.3.3 Τοπολογία πολλαπλών ακροδεκτών (Multi Terminal DC-MTDC).....	31
1.4 Γείωση στα HVDC.....	32
1.4.1 Βασικές Αρχές Γείωσης.....	32
1.4.2 Τύποι Ηλεκτροδίων Γείωσης.....	32
1.4.3 Χαρακτηριστικά Χώματος.....	34

1.4.4	Βηματική Τάση και Τάση Επαφής.....	34
1.5	Μετατροπείς HVDC.....	36
1.5.1	Μετατροπείς Πηγής Ρεύματος (CSC).....	36
1.5.2	Μετατροπείς Πηγής Τάσης (VSC).....	37
1.5.3	Σύγκριση CSC και VSC.....	38
1.6	Ψηφιοποίηση του ΣΗΕ.....	39
1.7	Διαχειριστής Συστήματος Μεταφοράς (Transmission System Operator -TSO) 40	
1.7.1	Phasor Measure Units (PMU).....	41
1.7.2	Έλεγχος Συστήματος.....	42
1.8	Διαχειριστής Δικτύου Διανομής (DSO).....	43
1.8.1	Active Distribution Networks.....	43
1.8.2	Advanced Metering Infrastructure -AMI.....	43
1.9	Μοντέλα Γραμμών Μεταφοράς.....	44
1.9.1	Παράμετροι γραμμών Μεταφοράς για Εναλλασσόμενο και Συνεχές Ρεύμα.....	46
1.9.2	Μοντέλο Γραμμής Μεταφοράς Μικρού Μήκους.....	47
1.9.3	Μοντέλο Γραμμής Μεταφοράς Μεσαίου Μήκους.....	48
1.9.4	Μοντέλο Γραμμής Μεταφοράς Μεγάλου Μήκους.....	49
2	Ανθεκτικότητα (Resilience).....	51
2.1	Η έννοια της Ανθεκτικότητας (Resilience).....	51
2.1.1	Δυσκολία εξασφάλισης της ανθεκτικότητας.....	53
2.1.2	Διαχείριση εργασιών για βελτίωση της Ανθεκτικότητας.....	54
2.2	Δείκτες ανθεκτικότητας στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	55
2.2.1	Αντίκτυπος απώλειας εσόδων (LRI).....	55
2.2.2	Συνολική Αποκατάσταση (TR).....	56
2.2.3	Ανάκτηση Ανθεκτικότητας (RR).....	56

2.3	Στρατηγικές Βελτίωσης της Ανθεκτικότητας.....	57
2.3.1	Η σημασία των τοπολογικών διαμορφώσεων.....	57
2.3.2	Τοποθέτηση Μονάδων Αποθήκευσης.....	61
2.3.3	Δημιουργία Δικτύου Ακτινικής Μορφής.....	62
2.3.4	Υπολογισμός Χωρητικότητας ESS.....	62
2.3.5	Υβριδικό Σύστημα Αποθήκευσης (HESS) σε Ανεμογεννήτρια.....	64
2.3.6	Καθορισμός Χωρητικότητας HESS.....	65
2.3.7	Συμβολή Οικιακών Πάνελ στην Ανθεκτικότητα.....	66
2.4	Χρηματοποίηση της Ανθεκτικότητας.....	68
2.5	Κυβερνοασφάλεια στα ΣΗΕ.....	68
2.6	Προκλήσεις των Συστημάτων HVDC.....	69
2.6.1	Τεχνικές δυσκολίες.....	69
2.6.2	Προκλήσεις μετατροπών και καλωδίων.....	70
2.6.3	Έλεγχος, Λειτουργία και Προστασία.....	70
2.6.4	Δυσκολίες εφαρμογής υβριδικού συστήματος HVDC-HVAC.....	71
2.7	Αδράνεια στα Συστήματα Ενέργειας.....	72
2.7.1	Η σημασία της αδράνειας στο ΣΗΕ.....	72
2.7.2	Εξασφάλιση αδράνειας.....	73
3	PowerFactory και Μοντελοποίηση.....	77
3.1	Βασικές λειτουργίες του PowerFactory.....	77
3.2	Δημιουργία Project – Study Cases.....	78
3.2.1	Δημιουργία Project.....	78
3.2.2	Μελέτη περιπτώσεων (Study Case).....	81
3.2.3	Σενάριο Λειτουργίας (Operation Scenario).....	84
3.3	Άλλες λειτουργίες του PowerFactory.....	85

3.4	Εισαγωγή – Εξαγωγή αρχείων.....	87
3.5	Βιβλιοθήκες PowerFactory.....	88
3.6	Αλγόριθμος Newton Raphson.....	89
3.7	Μελέτη ροής φορτίου.....	89
3.7.1	Ανάλυση αποτελεσμάτων μελέτης ροής φορτίου.....	95
3.8	Σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών (Geographical Information System -GIS)	95
3.8.1	Διασύνδεση PowerFactory και GIS.....	95
3.8.2	GIS και RES.....	97
3.8.3	GIS και Επέκταση Συστήματος Ενέργειας.....	98
3.9	Εισαγωγή στη Ροή Ισχύος.....	100
3.9.1	AC Ροή Ισχύος.....	101
3.9.2	DC ανάλυση ροής ισχύος.....	102
3.10	Βέλτιστη ανάλυση ροής ισχύος (OPF).....	103
3.10.1	Βέλτιστη DC ροής ισχύος (DC-OPF).....	104
3.10.2	Βέλτιστη AC ροής ισχύος.....	105
3.11	Αλγόριθμος Newton Raphson.....	106
3.12	Δυνατότητες PowerFactory.....	106
3.13	Μέθοδοι OPF.....	108
3.13.1	Παραδοσιακές μέθοδοι.....	108
3.13.2	Μέθοδοι τεχνητής νοημοσύνης.....	108
3.14	Άλλες μέθοδοι Power Flow.....	111
3.14.1	Πιθανοτική Ροή Ισχύος (Probabilistic Power Flow-PPF).....	111
3.14.2	Υβριδική Ροή Ισχύος (Hybrid).....	111
3.15	Παράδειγμα Ροής Ισχύος στο DIgSILENT.....	111
4	Εφαρμογές Συστημάτων στο PowerFactory.....	114

4.1	Μελέτη Σύνδεσης Αιγύπτου-Σαουδικής Αραβίας.....	114
4.2	Διαμόρφωση Δικτύου με VSC.....	114
4.3	Μελέτη Ροής Φορτίου.....	116
4.3.1	Case_Study_1 (Ροή Ισχύος με Αιολικό Πάρκο).....	116
4.3.2	Case_Study_2 (Αποκλειστική παροχή ισχύς από Υπεράκτιο Πάρκο προς τα δύο συστήματα).....	120
4.3.3	Case_Study_3 (Αιολικό Πάρκο εκτός λειτουργίας).....	122
4.3.4	(Case_Study_4) Προσδιορισμός θέσης και χωρητικότητας του ESS.....	125
5	Συμπεράσματα-Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.....	131
5.1	Συμπεράσματα.....	131
5.2	Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.....	132
6	Βιβλιογραφία.....	135

1 Συνολική αξιολόγηση των συστημάτων μεταφοράς HVDC και HVAC

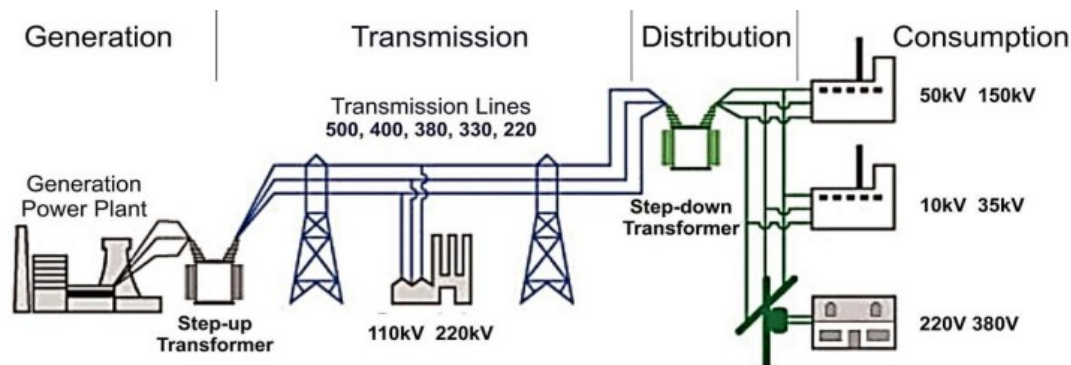
1.1 Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας

Η ηλεκτρική ενέργεια αποτελεί αγαθό της σύγχρονης κοινωνίας και βοήθησε στην εξέλιξη αυτής. Τα ορυκτά καύσιμα όπως ο άνθρακας, το φυσικό αέριο και το πετρέλαιο ήταν οι κύριοι πόροι για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και παρέμειναν στο επίκεντρο για πολλά χρόνια. Όμως, η αλλαγή από την παραδοσιακή μορφή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε ανανεώσιμες πηγές, ήρθε με την συνειδητοποίηση της περιβαλλοντικής αλλαγής που συνέβαινε από την εκμετάλλευση αυτών των ορυκτών πόρων. Παρότι ο συμβατικός τρόπος παραγωγής ενέργειας εξασφάλιζε το ισοζύγιο παραγωγής και ζήτησης, μεταφέροντας τα απαραίτητα ποσά ισχύος μέσω των γραμμών μεταφοράς και του δικτύου διανομής, οι ανανεώσιμες πηγές ηλεκτρικής ενέργειας υστερούσαν σε αυτό το κομμάτι, εξαιτίας της τυχαιότητας της παραγωγικής τους ικανότητας [1].

Τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας είναι σχεδιασμένα με τον ίδιο σχεδόν τρόπο σε όλες τις χώρες. Υπάρχουν κεντρικές μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με τιμή τάσης τυπικά τα 6-20kV και μετά μέσω μετασχηματιστών ισχύος αυτή η τάση ανυψώνεται σε τιμές των 110, 150, 220, 400, 700kV κ.α. ώστε να διευκολυνθεί η αποδοτική μεταφορά της σε μεγάλες αποστάσεις φτάνοντας τελικά στους υποσταθμούς υποβιβασμού. Στους υποσταθμούς αυτούς η τάση μέσω μετασχηματιστών υποβιβάζεται σε τιμές τυπικά των 220, 380 Volt ώστε να καταλήξει στους καταναλωτές μικρής κλίμακας. Μεγάλοι καταναλωτές όπως εργοστάσια δέχονται απευθείας υψηλή τάση και τον υποβιβασμό τον αναλαμβάνουν εκείνοι [1]. Μία τυπική αναπαράσταση της δομής του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να αποτυπωθεί στην παρακάτω εικόνα, έχοντας σχεδιάσει τις παραγωγικές μονάδες, τους μετασχηματιστές τις γραμμές μεταφοράς, το δίκτυο διανομής και τους καταναλωτές [2].

Δύο είναι οι μορφές που μπορεί να έχει το ηλεκτρικό ρεύμα, την εναλλασσόμενη (AC) και την συνεχή (DC). Η παραγωγή της ενέργειας πραγματοποιείται με AC ρεύμα, με την σύνδεση ενός σύρματος γύρω από ένα περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο και πραγματοποιείται είτε σε θερμικούς σταθμούς, είτε σε υδροηλεκτρικούς είτε σε ανεμογεννήτριες. Στο εναλλασσόμενο ρεύμα (AC) η ροή αλλάζει κατεύθυνση: στο πρώτο μισό της περιόδου το ρεύμα κινείται προς μία κατεύθυνση και στο δεύτερο μισό προς την αντίθετη με σταθερή συχνότητα που στην Ευ-

ρώπη είναι 50Hz. Αντίθετα το DC ρεύμα πηγαίνει προς μία μόνο κατεύθυνση και το λαμβάνουμε από μπαταρίες, ηλιακά πάνελ και κυψέλες καυσίμου. Η χρήση και των δύο πραγματοποιείται σε διαφορετικές περιπτώσεις, στο AC όταν θέλουμε ευελιξία στην ανύψωση και υποβιβασμό της τάσης, ενώ το DC όταν θέλουμε να μεταφέρουμε μεγάλα ποσά ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις [2].



Εικόνα Error: Reference source not found.1 Παραγωγή, Μεταφορά και Διανομή ηλεκτρισμού [2]

1.1.1 Σύστημα Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας

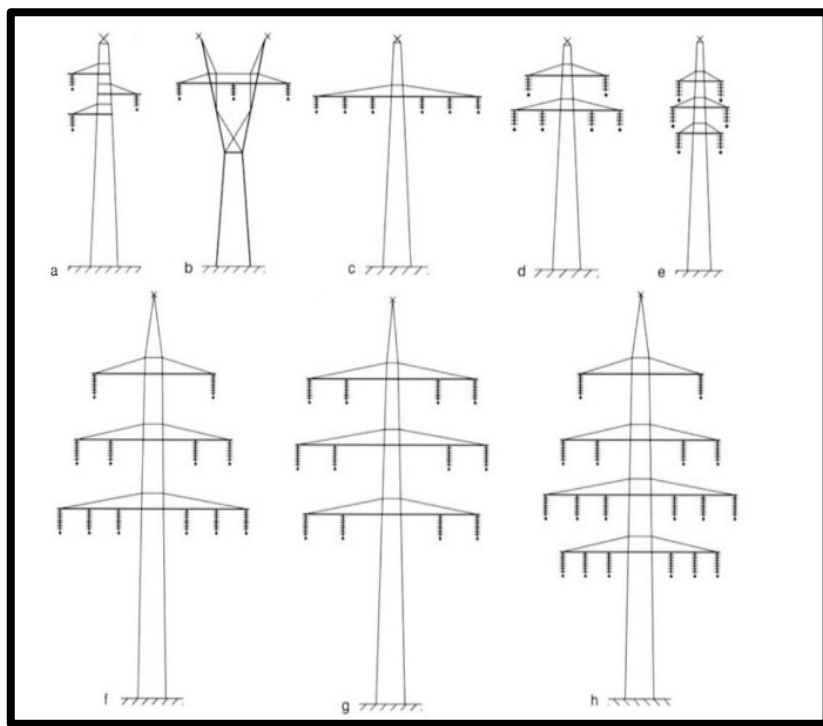
Το Σύστημα Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας, είναι αυτό που συνδέει τους μεγάλους παραγωγικούς σταθμούς ενέργειας, με τους καταναλωτές. Η ανάγκη για μεταφορά της ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις καθιστά απαραίτητα την εφαρμογή τεχνολογίας υψηλής τάσης (High Voltage), αφού μέσω αυτής μειώνονται οι απώλειες γραμμής. Το σύστημα μεταφοράς είναι υπεύθυνο για την εξισορρόπηση της παραγωγής και της ζήτησης και για αυτό το λόγο έχει σχεδιαστεί με τα απαραίτητα συστήματα και στοιχεία προστασίας ώστε να λειτουργεί απρόσκοπτα σε περιπτώσεις σφάλματος. Με την αύξηση της ζήτησης της ενέργειας, λογικό επακόλουθο ήταν και η αύξηση της χωρητικότητας μεταφοράς του συστήματος, αλλά και η ανάγκη για διασυννοριακή διασύνδεση. Παρότι η τεχνολογία εναλλασσομένου ρεύματος (AC) ήταν η κύρια τεχνολογία διασύνδεσης χάρις στους μετασχηματιστές AC, πλέον με την εξέλιξη των ηλεκτρονικών ισχύος υπάρχει η δυνατότητα για χρήση της υψηλής τάση συνεχούς ρεύματος (HVDC), αφού αυτή υπερτερεί στην μεταφορά υψηλών ποσών ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις [1].

1.1.2 Γραμμές Μεταφοράς

Οι γραμμές μεταφοράς συνδέουν τα κέντρα παραγωγής με το δίκτυο διανομής μέσω των μετασχηματιστών υποβιβασμού και χωρίζονται σε εναέρια και σε υπόγεια μεταφορές [2]. Τα καλώδια των γραμμών είναι αλουμινένια με μεταλλικό πυρήνα και ο πύργος στον οποίο είναι

τοποθετημένα έχει τις κατάλληλες προδιαγραφές για την ασφαλή απόσταση των καλωδίων μεταξύ τους, με την γη αλλά και με τον ίδιο τον πύργο. Για λόγους ασφαλείας επίσης υπάρχουν και μονωτήρες που ενώνουν το κάθε καλώδιο της γραμμής με τον πύργο, το πλήθος των οποίων εξαρτάται από την μονωτική τους ικανότητα και την τάση της γραμμής που θέλουμε να προστατέψουμε. Φυσικά όσο μεγαλύτερα ποσά ισχύος θέλουμε να μεταφέρουμε τόσες περισσότερες και οι προκλήσεις, οι οποίες μπορούν να μετριαστούν είτε με την αύξηση του πλήθους καλωδίων για κάθε φάση, είτε με αλλαγή της γεωμετρικής διάταξης του πύργου, σχέδια του οποίου για τα διάφορα επίπεδα τάσης παρατίθενται στην Εικόνα 1.2 [1]. Η επιλογή της δομής του πύργου επίσης εξαρτάται από περιβαλλοντικούς και αισθητικούς παράγοντες καθώς επίσης και από την μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου, την παρεμβολή ραδιοσημάτων και τον ακουστικό θόρυβο [3].

Όσο αναφορά στην υπόγεια διασύνδεση, αυτή εφαρμόζεται σε, κατοικημένες περιοχές όπου οι εναέριες γραμμές δεν ενδείκνυνται και κυρίως, σε διασυνδέσεις όπου λόγω της γεωγραφίας του συστήματος είναι φυσικά αδύνατον να υπάρχουν εναέρια καλώδια. Βέβαια υπεισέρχονται τεχνικές δυσκολίες στην εγκατάσταση και συντήρηση υπόγειων καλωδίων, με κύρια να αποτελεί την διαδικασία και το κόστος επισκευή τους σε περίπτωση σφάλματος, αλλά και στην περίπτωση αναβάθμισης της γραμμής θα χρειαζόταν να γίνει πάλι εκσκαφή του καλωδίου. Στο συνέδριο της Cigré SC22 JWG 21/22-01 παρουσιάστηκε μία έρευνα σχετικά με τις δαπάνες της εγκατάστασης εναέριων και υπόγειων καλωδίων μεταφοράς, τα αποτελέσματα της οποίας διαφαίνονται στον Πίνακα 1 [1].



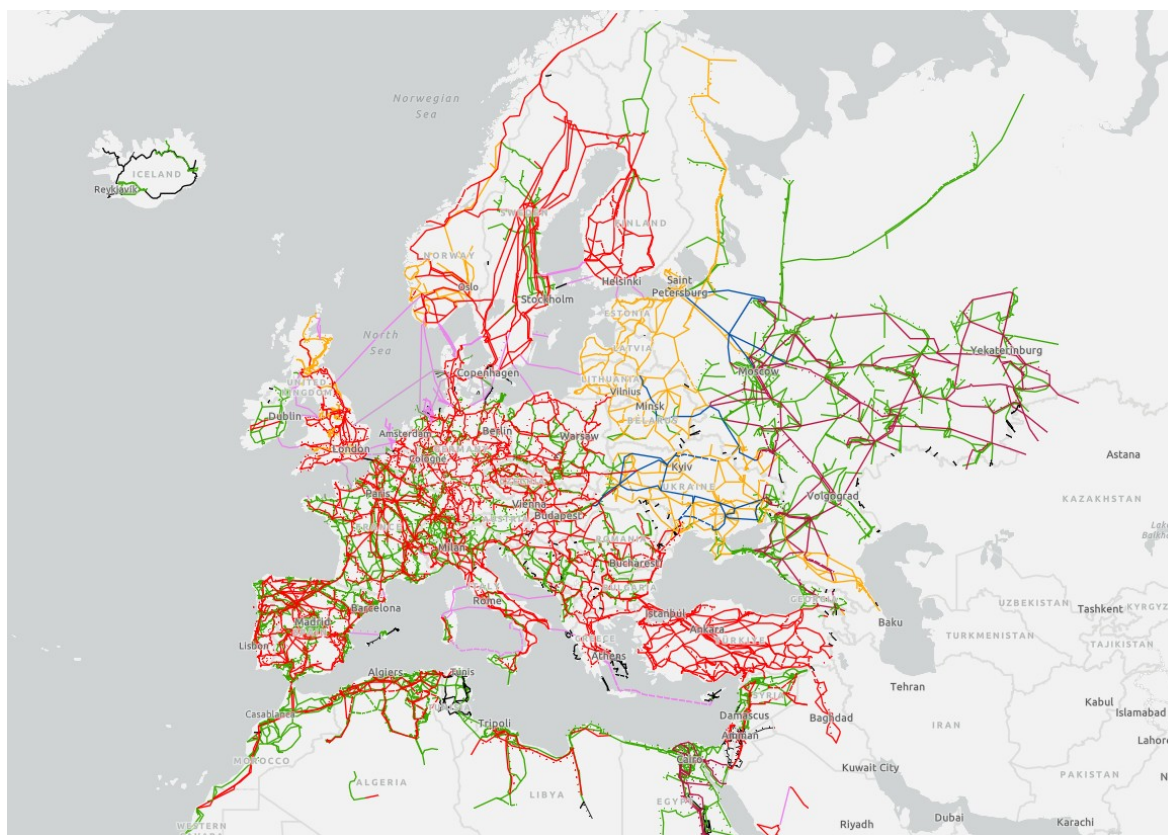
Εικόνα Error: Reference source not found.2 Πύργοι υψηλής (a-e) και υπερύψηλής τάσης (f-h) [1]

Πίνακας Error: Reference source not found.1 Περίληψη των διεθνών επενδυτικών δεδομένων για εναέρια και υπόγεια καλώδια [1]

Voltage range (kV)	110 to 229 kV	220 to 362 kV	363 to 764 kV
Mean power MVA/ circuit	220	600	1800
Mean over-head line investments EUR/(km ·MVA)	820	390	185
Mean under-ground cable investments EUR/(km ·MVA)	6100	4900	3700
Mean ratio	7	13	20
Spread	3.4 to 16	5.1 to 21.1	14.6 to 33.3

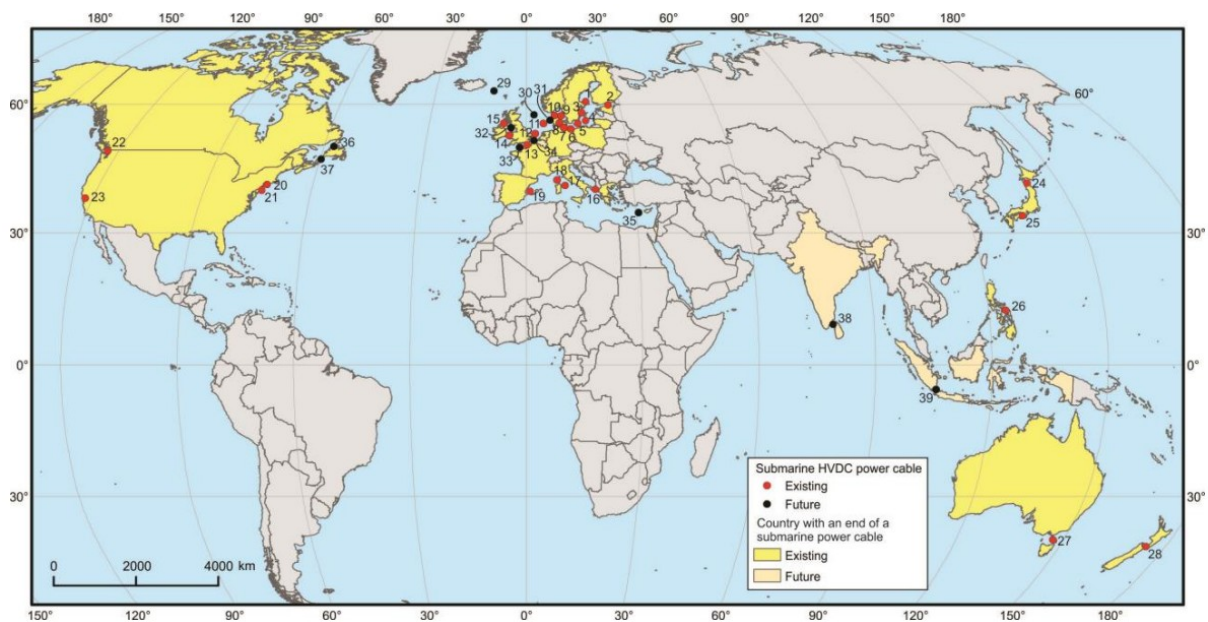
Από την έρευνα αυτή συμπεραίνουμε, το αυξημένο κόστος που απαιτείται για την εγκατάσταση των υπόγειων καλωδίων σε σχέση με τις εναέριες γραμμές μεταφοράς, το οποίο δεν αντισταθμίζεται πλήρως από τις λιγότερες απώλειες μεταφοράς που έχουμε στην υπόγεια διασύνδεση. Παρ' όλα αυτά στο μέλλον, όπου το πρόβλημα εύρεσης γης για εγκατάσταση γραμμών μεταφοράς θα επιδεινωθεί, θα αναζητηθούν τρόποι για εφαρμογή της υπόγειας καλωδίωσης αφού θα υπερτερεί έναντι της εναέριας και σε θέματα περιβαλλοντικής πολιτικής [1].

Μέσα από το Ευρωπαϊκό Δίκτυο Διαχειριστών Συστημάτων Μεταφοράς για Ηλεκτρισμό (ENTSO-E), βλέπουμε τις υπάρχουσες διασυνδέσεις υψηλής τάσης που έχουν δημιουργηθεί στις 36 χώρες που συμμετέχουν, αλλά και έργα που είναι υπό εξέλιξη ή συμφωνημένα να πραγματοποιηθούν. Παρακάτω παρατίθεται ο χάρτης με τις διασυνδέσεις αυτές [4].



Εικόνα Error: Reference source not found.3 Διασυνδέσεις υψηλής τάσης των μελών του ENTSO-E [4]

Ενώ στον 2^ο χάρτη βλέπουμε τις υποβρύχιες διασυνδέσεις HVDC, με τις 28 από τις 39 να έχουν ήδη γίνει και τις υπόλοιπες να είναι υπό κατασκευή. Σκοπός των διασυνδέσεων αυτών είναι η σύνδεση των διαφορετικών χωρών ή απομακρυσμένων περιοχών με στόχο την καλύτερη μεταφορά ενέργειας [2].



Εικόνα Error: Reference source not found.4 «Υποβρύχια καλώδια ισχύος στον κόσμο» [2]

1.1.3 Υποσταθμοί

Οι υποσταθμοί είναι υπεύθυνοι για τρεις κύριες λειτουργίες στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Αποτελούν διαύλους διασύνδεσης για τις γραμμές μεταφοράς, είναι υπεύθυνοι για την ανύψωση ή υποβιβασμό της τάσης, διευκολύνοντας την αποτελεσματικότητα για την μεταφορά της ισχύος στις γραμμές μεταφορές και στο δίκτυο διανομής, αφού στους υποσταθμούς βρίσκονται οι μετασχηματιστές. Ο μετασχηματισμός επιτυγχάνεται μέσω σύνδεσης των δύο πηνίων (υψηλής και χαμηλής τάσης) τυλιγμένα γύρω από έναν σιδηρομαγνητικό πυρήνα, και για λόγους μόνωσης η σύνδεση αυτή είναι βυθισμένη σε μια δεξαμενή με λάδι. Ο μετασχηματιστής αποτελεί έναν βαρύ και ακριβό εξοπλισμό, με μικρό ποσοστό αποτυχίας ή σφάλματος.[5]

Σε αυτές τις περιπτώσεις σφάλματος, υπάρχουν στους υποσταθμούς διακόπτες γραμμών που βοηθούν στην απομόνωσή του, με σκοπό την προστασία των καλωδίων αλλά και του εξοπλισμού. Οι πιο προηγμένοι διακόπτες είναι αυτόματοι και σε περίπτωση υπέρτασης ανοίγουν το κύκλωμα διακόπτοντας την ροή της υπέρτασης. Ανάλογα και με την τάση του συστήματος που θέλουμε να προστατέψουμε υπάρχουν και διαφορετικά είδη διακοπών που μονώνονται ακόμη και με λάδι. Επίσης έχουν την ικανότητα να ανοίγουν δύο φορές σε άμεσο χρόνο ελέγχοντας πρώτα εάν το σφάλμα από το πρώτο άνοιγμα του διακόπτη έχει εκκαθαριστεί, συνήθως αφορά σφάλματα μικρής διάρκειας, και έτσι το σύστημα προσπαθεί να τον ξανακλείσει, αυτό όμως, δεν είναι κάτι που είναι ευδιάκριτο. Επίσης στους υποσταθμούς βρίσκονται όλα τα συστήματα προστασίας, μέτρησης και οι διακόπτες. [5]

1.1.4 Δίκτυο Διανομής

Το δίκτυο διανομής αποτελεί την συνέχεια του συστήματος μεταφοράς, και από υψηλή τάση που μεταφερόταν η ισχύς, υποβιβάζεται με τον τρόπο που περιεγράφηκε άνωθεν, σε μέση και στη συνέχεια σε χαμηλή τάση για να διανεμηθεί στους καταναλωτές. Ο μετασχηματισμός της τάσης πραγματοποιείται πάλι σε υποσταθμούς και η σύνδεση αγροτικών περιοχών σε σχέση με οικιστών είναι πιο εύκολη και λιγότερο δαπανηρή, χάρις στην χαμηλότερη ζήτηση φορτίου και στον μη περιορισμό χώρου. Από την άλλη στις οικιστικές ζώνες υπάρχουν προβλήματα πτώσης τάσης που επιλύονται χάρις στην χρήση tap στους μετασχηματιστές. Η διανομή σε αυτές τις περιοχές γίνεται με εναέρια και υπόγεια καλώδια και υπάρχουν μεγαλύτερες απαιτήσεις για την αξιοπιστία του συστήματος αφού το πλήθος των καταναλωτών είναι αυξημένο. Η αξιοπιστία όμως του δικτύου διανομής είναι χαμηλότερη σε σχέση με αυτή του συστήματος μεταφοράς και οι οικονομικές απαιτήσεις του μεγαλύτερες. Σταδιακά ο παραδοσιακός δρόμος ροής ισχύος από τις κεντρικές μονάδες στους καταναλωτές αλλάζει με την δυνατότητα των διασπαρμένων πηγών παραγωγής να εγχέουν ισχύ σε οποιοδήποτε σημείο του δικτύου θέτοντας νέες απαιτήσεις για την παρακολούθηση και προστασία αυτών [5].

1.1.5 Η μεταφορά του Ηλεκτρικού ρεύματος από το παρελθόν στο παρόν

Από την πρώτη στιγμή η μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας βασίστηκε σε συστήματα συνεχούς ρεύματος (DC), με τον Thomas A. Edison να εγκαθιστά τον πρώτο ηλεκτρικό κεντρικό σταθμό DC στην Νέα Υόρκη το 1882 [6]. Παρότι οι τεχνολογίες εναλλασσόμενου ρεύματος (AC) κατέστησαν τελικά κυρίαρχες λόγω της αποτελεσματικότητάς τους στην μετατροπή τάσης και στην λειτουργία των κινητήρων, το συνεχές ρεύμα (DC) διατήρησε την σημασία του για την μετάδοση ισχύος σε μεγάλες αποστάσεις. [6].

Μετά τον Β' Παγκόσμιο Πόλεμο, η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας αυξήθηκε κατακόρυφα, γεγονός που απαιτούσε μεγάλες γραμμές μεταφοράς για την αξιοποίηση της υδροηλεκτρικής ενέργειας από απομακρυσμένες ορεινές περιοχές. Στην Σουηδία, οι υδροηλεκτρικοί πόροι στον βορρά έπρεπε να τροφοδοτήσουν με ηλεκτρική ενέργεια τα νότια πληθυσμιακά κέντρα, δημιουργώντας σημαντικές προκλήσεις στην μεταφορά. Μέχρι τα τέλη της δεκαετίας του 1940, παρά τις δυνατότητες του HVDC, οι μηχανικοί έκριναν ότι η τεχνολογία των μετατροπέων δεν ήταν επαρκώς προηγμένη και επέλεξαν αντ' αυτού γραμμές μεταφοράς εναλλασσόμενου ρεύματος με αντιστάθμιση σειράς 380kV [7].

Λίγο αργότερα, το 1954, το πρώτο εμπορικό σύστημα μεταφοράς HVDC, συνέδεε το σουηδικό νησί Gotland με την ηπειρωτική χώρα χρησιμοποιώντας υποβρύχιο καλώδιο. Το σύστημα αυτό στηριζόταν σε βαλβίδες τόξου υδραργύρου για την μετατροπή, φίλτρα μονής ρύθμισης με λάδι για το φιλτράρισμα και κυρίως αναλογικούς ελέγχους, οι οποίοι απαιτούσαν σημαντική χειροκίνητη λειτουργία [8].

1.2 Σύγκριση της τεχνολογίας High Voltage Direct Current (HVDC) και High Voltage Alternate Current (HVAC).

Η μεταφορά ισχύος στο σύστημα, γίνεται είτε μέσω της υψηλής τάσης συνεχούς ρεύματος (HVDC), είτε μέσω της υψηλής τάσης εναλλασσόμενου ρεύματος (HVAC), κάθε μία έχοντας τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά της που θα αναλυθούν στην παρούσα εργασία. Ενώ το εναλλασσόμενο ρεύμα (AC) χρησιμοποιείται ευρέως για βιομηχανικές και οικιακές εφαρμογές, έχει περιορισμούς για την μεταφορά ισχύος σε μεγάλες αποστάσεις, γεγονός που οδηγεί στην υιοθέτηση του HVDC.

Το HVDC προτιμάται για αυτές τις χρήσεις, χάρις στις χαμηλότερες απώλειες αντίστασης, των λιγότερων σοβαρών μεταγωγικών υπερτάσεων, των μειωμένων παρεμβολών Corona και ραδιοφωνικών παρεμβολών σε σύγκριση με το HVAC [4]. Επίσης τα συστήματα HVDC επιτρέπουν την αποτελεσματική ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, κυρίως στα υπεράκτια αιολικά πάρκα [5].

1.2.1 Οι τεχνολογίες HVDC και HVAC.

Οι μεγάλες γραμμές μεταφοράς HVAC αντιμετωπίζουν προβλήματα με την άεργο ισχύ, την οποία τόσο παράγουν όσο και καταναλώνουν, ενώ οι τιμές των σφαλμάτων του ρεύματος και της τάσης που μπορούν να προκύψουν γενικά από την AC τεχνολογία είναι πολύ μεγαλύτερες σε σχέση με αυτές της DC. Αυτή η άεργος ισχύς επηρεάζει την αυτεπαγωγή και την χωρητικότητα της γραμμής. Η χωρητικότητα ισχύος που μεταδίδεται μέσω της γραμμής επηρεάζεται τόσο από την τάση λειτουργίας όσο και από την σύνθετη αντίσταση κύματος της γραμμής. Στον Πίνακα 2 παρουσιάζονται οι τυπικές τιμές Τάσης-Ισχύος για HVAC τριφασικές εναέριες γραμμές. Η μετάδοση HVDC, συγκριτικά, αποφεύγει αυτά τα ζητήματα καθιστώντας την πιο κατάλληλη για την μετάδοση σε μεγάλες αποστάσεις [9].

Η ισχύς στην γραμμή είναι: $P_n = VI = \frac{V^2}{Z_s}$, όπου Z_s η σύνθετη αντίσταση της γραμμής και V η τάση της γραμμής [9].

Πίνακας 2: Ονομαστική τάση και Χωρητικότητα Ισχύος για HVAC

Voltage (kV)	132	230	345	500	700
Natural load (MW)	43	130	300	830	1600

Μπορούμε να αναφέρουμε κάποια από τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της χρήσης του HVDC σε σχέση με το HVAC στο σύστημα μεταφοράς. Αρχικά, το HVDC προσφέρει μεγαλύτερη ισχύ ανά αγωγό, καθώς το ρεύμα διαρρέει συνεχόμενα προς μία κατεύθυνση. Η δομή των καλωδίων του είναι πιο απλή από εκείνη του AC, ενώ ανάλογα με την τοπολογία του HVDC ένας αγωγός μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως γείωση.

Επίσης, κάθε αγωγός στο HVDC μπορεί να λειτουργεί ως ένα ανεξάρτητο κύκλωμα, χωρίς την ύπαρξη επιδερμικού φαινομένου, ενώ λόγω της φύσης της ροής του ρεύματος δεν υπάρχει άεργη ισχύς. Επιπλέον, υπάρχουν λιγότερες απώλειες Corona και μειωμένες ραδιοφωνικές παρεμβολές στον τηλεπικοινωνιακό εξοπλισμό. Ένα πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό της HVDC είναι ότι δεν απαιτεί συγχρονισμό, διευκολύνοντας την σύνδεση μεταξύ δικτύων AC διαφορετικής συχνότητας εξασφαλίζοντας έτσι την μετάδοση χωρίς προβλήματα σταθερότητας. Τέλος το σύστημα έχει χαμηλότερο ρεύμα βραχυκύκλωσης και διευκολύνει τον έλεγχο της ισχύος στην συνδετική γραμμή.

Ωστόσο, το HVDC παρουσιάζει ορισμένα μειονεκτήματα. Οι μετατροπείς που χρειάζεται είναι αυξημένου κόστους και η άεργος ισχύς που απαιτούν για την λειτουργία τους είναι υψηλή. Οι αρμονικές που παράγονται κατά την λειτουργία των μετατροπέων χρειάζονται φίλτρα για την εξάλειψή τους, ενώ οι πολυτεματικές τοπολογίες παρουσιάζουν επιπλέον προκλήσεις [10].

1.2.2 Οικονομική σύγκριση HVDC και HVAC

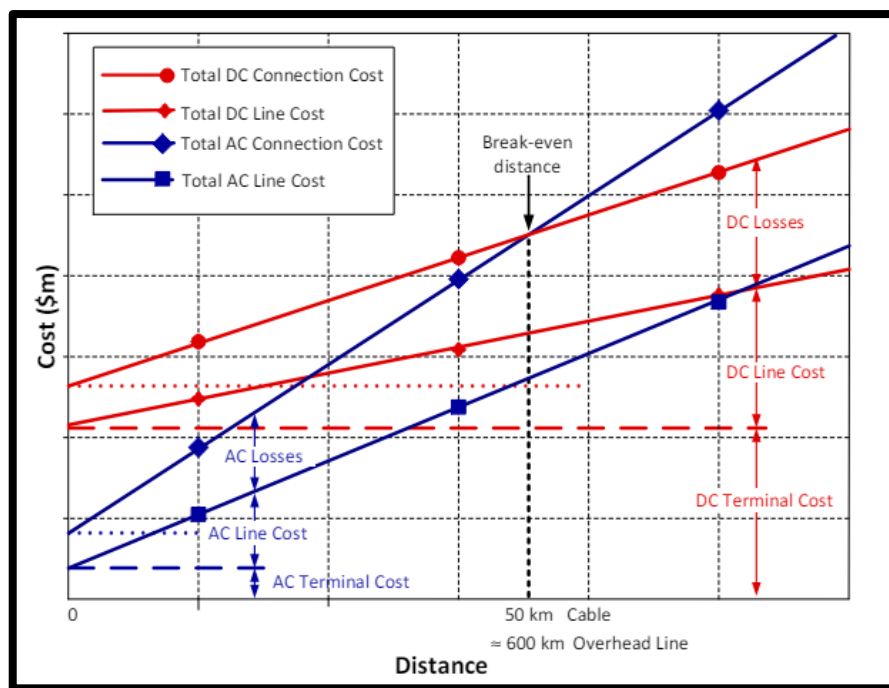
Για την επιλογή της τεχνολογίας HVDC ή HVAC στο σύστημα μεταφοράς, η σύγκριση του κόστους των δύο τεχνολογιών είναι απαραίτητη. Τα βασικά στοιχεία κόστους για HVDC περιλαμβάνουν τις απώλειες γραμμής, τα έξοδα συντήρησης και κατασκευής των γραμμών, τις απώλειες Corona και τις απώλειες από τους μετατροπείς καθώς και έξοδα για τα φίλτρα αρμονικών. Ενώ για HVAC περιλαμβάνουν έξοδα των γραμμών και των απωλειών Joule, κόστη συντήρησης και έξοδα των υποσταθμών και των μετασχηματιστές και εξοπλισμό αντιστάθμισης αέργου ισχύος. Το κόστος εποπτείας του συστήματος ισχύει και για τις δύο τεχνολογίες. [9], [11]

Όσο αναφορά στα έξοδα της HVAC τεχνολογίας μπορούν να διακριθούν σε δύο μέρη, τα έξοδα σταθμού και τα έξοδα γραμμών μεταφοράς. Το κόστος σταθμών εναλλασσόμενου ρεύματος περιλαμβάνει δαπάνες για στοιχεία όπως διακόπτες ισχύος, μετασχηματιστές, διακόπτες

αποσύνδεσης, πηνία, πυκνωτές, αντισταθμιστές, συστήματα προστασίας και ελέγχου. Οι γραμμές μεταφοράς εναλλασσόμενου ρεύματος χρειάζονται μεγαλύτερους χώρους διέλευσης (ROW -right of way-) και υψηλότερο κόστος κατασκευής από τις γραμμές συνεχούς ρεύματος, λόγω των τριών αγωγών μεταφορών ενέργειας, σε αντίθεση με τους δύο αγωγούς συνεχούς ρεύματος [9]. Στην αντίθετη πλευρά, για τις τεχνολογίες των HVDC, το μέγεθος των εξόδων μετατοπίζεται προς τον σταθμό και όχι τόσο στη γραμμή μεταφοράς. Ο κύριος εξοπλισμός ενός σταθμού συνεχούς ρεύματος περιλαμβάνει τους μετατροπείς, οι οποίοι αποτελούν πάνω από το 50% του κόστους του συστήματος μεταφοράς HVDC [9].

Για να αποτυπωθεί σαφέστερα η οικονομική διαφορά μεταξύ των δύο τεχνολογιών, είναι σημαντικό να εξετάσουμε τις συγκριτικές αναλύσεις που έχουν γίνει. [4, 12] Στο σύστημα της Βραζιλίας, όπου ελήφθησαν υπόψιν η τάση, το μήκος της γραμμής και η μεταφερόμενη ισχύς προέκυψε ότι, η περιοχή από την οποία το σύστημα HVDC ήταν σαφώς πιο οικονομικό σε σχέση με το HVAC ήταν μεταξύ των 1100-1500 km [11]. Ενώ στην περίπτωση του ποταμού του Νίλσον, το σημείο από το οποίο γινόταν προτιμητέο το HVDC σύστημα ήταν περίπου στα 700km [9].

Για οπτική κατανόηση, το παρακάτω σχήμα παρέχει μια γενική απεικόνιση των συγκριτικών εξόδων μεταξύ συστημάτων DC και AC σε συνάρτηση του μήκους των εναέριων γραμμών. Το σημείο «Break-even distance» είναι η ένδειξη ότι εκεί το κόστος χρήσης της τεχνολογίας HVDC είναι ίδιο με αυτό της HVAC. Στην περίπτωση της εναέριας γραμμής μεταφοράς μεταφράζεται σε 600km ενώ στην περίπτωση καλωδίου (υπόγειου ή υποβρύχιου) η απόσταση είναι στα 50km. Πριν το σημείο αυτό η HVAC είναι προτιμητέα, ενώ μετά από αυτό η HVDC αποκτά σαφές προβάδισμα, προφανώς κάθε διασύνδεση έχει τις δυσκολίες της και το πραγματικό μήκος από το οποίο ξεκινά να υπερτερεί το HVDC διαφέρει.



Εικόνα Error: Reference source not found.5 Συγκριτικό κόστος των συστημάτων μεταφοράς HVAC και HVDC [9].

1.2.3 Περιβαλλοντική σύγκριση HVDC και HVAC

Εκτός από τις οικονομικές πτυχές που αναλύθηκαν προηγουμένως είναι σημαντικό να εξεταστούν οι περιβαλλοντικές και λειτουργικές επιπτώσεις των συστημάτων μεταφοράς HVDC και HVAC. Η παρούσα ενότητα διερευνά αυτούς τους παράγοντες για να παράσχει μια ολοκληρωμένη αξιολόγηση και των δύο συστημάτων.

Τα συστήματα HVDC έχουν γενικά μικρότερο δικαίωμα διέλευσης (ROW) μικρότερο οπτικό αντίκτυπο σε σύγκριση με τα δίκτυα HVAC. Τα HVDC παράγουν χαμηλότερα μαγνητικά και ηλεκτρικά πεδία, ενώ το φαινόμενο κορώνα από τις γραμμές HVDC συμβάλλει ελάχιστα στην παραγωγή όζοντος, με τις γραμμές HVDC να παράγουν περίπου 10ppb σε σύγκριση με τη φυσική συγκέντρωση των 50ppb. Αντίθετα τα συστήματα HVAC απαιτούν μεγαλύτερα

ROWS έχουν υψηλότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις λόγω της εκτεταμένης υποδομής τους [10].

1.2.3.1 Μαγνητικό πεδίο:

Το μαγνητικό πεδίο δημιουργείται από την ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος. Στις γραμμές μεταφοράς το μαγνητικό πεδίο των 50/60 Hz, αναλόγως την ένταση και την διάρκεια έκθεσης μπορεί να έχει επιβλαβείς συνέπειες για τον άνθρωπο μετρημένες σε μT (μίκρο-Tesla). Οι γραμμές HVDC παράγουν χαμηλότερα μαγνητικά πεδία από τις γραμμές HVAC. Για παράδειγμα, μια γραμμή συνεχούς ρεύματος $\pm 450kV$ παράγει μαγνητικό πεδίο κάτω από τους αγωγούς περίπου 25 μT , η οποία είναι μικρότερη από το φυσικό μαγνητικό πεδίο της γης στην Ελλάδα των 45 μT . Η ένταση του μαγνητικού πεδίου μειώνεται ραγδαία με την απόσταση από τον αγωγό, ενώ υπάρχει και αυξομείωση της τιμής της αναλόγως του ρεύματος που διαπερνά την γραμμή κάθε στιγμή, έτσι έχουμε μέγιστη τιμή μαγνητικού πεδίου όταν η ένταση του ρεύματος είναι μέγιστη που συνήθως συμβαίνει τις ώρες αιχμής. Τα οικοδομικά υλικά, τα δέντρα και οι φράχτες δεν εμποδίζουν την διάδοση του μαγνητικού πεδίου και μόνο με την αύξηση της απόστασης επιτυγχάνεται η μείωση. [7] [8]

1.2.3.2 Ηλεκτρικό πεδίο:

Η τάση είναι η αιτία δημιουργίας του ηλεκτρικού πεδίου και μονάδα μέτρησης το $\frac{Volt}{meter}$. Λόγω του ότι το ανθρώπινο σώμα είναι αρκετά αγωγίμο, η επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου στον άνθρωπο δημιουργεί ηλεκτρικά ρεύματα, ανάλογα και την ένταση που επάγεται οι επιδράσεις είναι διαφορετικές αλλά σημαντικές. Τα συστήματα HVDC παράγουν λιγότερο προβληματικά ηλεκτρικά πεδία σε σύγκριση με τα συστήματα HVAC. Για μια γραμμή συνεχούς ρεύματος $\pm 450kV$, το ηλεκτρικό πεδίο ακριβώς κάτω από τον αγωγό είναι περίπου 5 $\frac{kV}{m}$. Τα συστήματα συνεχούς ρεύματος απαιτούν μικρότερο ROW και ύψος, ενώ τα συστήματα HVAC απαιτούν μεγαλύτερο ROW και μεγαλύτερο ύψος πύργου [2] [8].

1.2.3.3 Φαινόμενο Corona:

«Το φαινόμενα Corona περιγράφει τις μερικές στεμματοειδείς εκκενώσεις που συμβαίνουν γύρω από την επιφάνεια αγωγών υψηλής τάσης [14].» Ανάλογα με τις συνθήκες και την κατάσταση του αγωγού οι εκκενώσεις αυτές μπορεί να δημιουργηθούν με ύπαρξη χαμηλότερης τάσης από ότι θα συνέβαινε κανονικά. Προκαλούν οξείδωση και διάβρωση των αγωγών, ενώ

ακόμη συμβάλουν στην δημιουργία παρασίτων σε ραδιοφωνικούς και τηλεοπτικούς δέκτες που βρίσκονται κοντά. Οι απώλειες που προέρχονται από αυτές τις εκκενώσεις κυμαίνονται στα 1 με $2 \frac{kW}{km}$ υπό κανονικές συνθήκες, ενώ σε περιπτώσεις έντονης βροχόπτωσης φτάνουν τα 30 $\frac{kW}{km}$. Για τον περιορισμό του φαινομένου αυτού, η ένταση που δημιουργείται γύρο από τους αγωγούς είναι αντιστρόφως ανάλογη της ακτίνας του αγωγού, με αποτέλεσμα την ύπαρξη πολλαπλών αγωγών για μείωση της έντασης άρα και των απωλειών Corona [2] [8].

1.2.3.4 Ραδιοφωνικές τηλεοπτικές και τηλεφωνικές παρεμβολές:

Λόγω της ύπαρξης μετατροπών, η αλλαγή του ρεύματος και της τάσης συμβάλουν στην δημιουργία ρευματικών παρασίτων τα οποία σε συνδυασμό με τις αρμονικές δημιουργούν παρεμβολές σε σήματα συχνότητας σε kHz & MHz. Τα συστήματα HVDC προκαλούν λιγότερες ραδιοφωνικές παρεμβολές σε σύγκριση με τα συστήματα HVAC. Τα συστήματα μπορούν να μειώσουν περαιτέρω τις παρεμβολές μέσω ηλεκτρομαγνητικής θωράκισης και κατάλληλων κυκλωμάτων φιλτραρίσματος [8].

1.2.3.5 Ακουστικός θόρυβος:

Τα συστήματα HVDC παράγουν συνήθως λιγότερο ακουστικό θόρυβο από τα συστήματα HVAC. Οι κύριες πηγές θορύβου στα πρώτα, είναι οι μετασχηματιστές και οι σταθμοί μετατροπής, οι οποίοι μπορούν να μετριαστούν με τη χρήση εξοπλισμού χαμηλού θορύβου και μεθόδων εξασθένισης του θορύβου. Τα δεύτερα, με την εκτεταμένη υποδομή τους τείνουν να παράγουν υψηλότερα επίπεδα θορύβου, ιδίως κοντά σε υποσταθμούς και μετασχηματιστές [8].

1.3 Τοπολογίες HVDC

Οι τοπολογίες συστημάτων συνεχούς ρεύματος υψηλής τάσης (HVDC) είναι βασικές διαμορφώσεις που έχουν σχεδιαστεί για να διευκολύνουν την αποτελεσματική μεταφορά ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις, αντιμετωπίζοντας την αυξανόμενη παγκόσμια ζήτηση ενέργειας και την πολυπλοκότητα των σύγχρονων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτές οι τοπολογίες βοηθούν στη διαχείριση της ροής φορτίου, στον μετριασμό των ταλαντώσεων ισχύος και στη διατήρηση της ποιότητάς της σε εκτεταμένα συστήματα μεταφοράς, διαδραματίζοντας κρίσιμο ρόλο στην ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και στην ενίσχυση της σταθερότητας του δικτύου. [9] [10][12].

Μεταξύ των τοπολογιών HVDC, τα μονοπολικά συστήματα χρησιμοποιούν έναν μόνο αγωγό με επιστροφή στη γη ή στη θάλασσα, γεγονός που τα καθιστά οικονομικά αποδοτικά και κατάλληλα για υποβρύχιες εφαρμογές, παρά τις πιθανές περιβαλλοντικές προκλήσεις λόγω των

ρευμάτων γείωσης [13]. Από την άλλη πλευρά, τα διπολικά συστήματα HVDC διαθέτουν δύο αγωγούς με αντίθετες πολικότητες, προσφέροντας αυξημένη αξιοπιστία και αποδοτικότητα, διατηρώντας τη λειτουργία τους ακόμη και σε περίπτωση βλάβης του ενός αγωγού. Αυτό καθιστά τις διπολικές διαμορφώσεις ιδανικές για μεταφορά υψηλής χωρητικότητας σε μεγάλες αποστάσεις, με βελτιωμένη ανοχή σε σφάλματα και μειωμένες απώλειες μετάδοσης [8][14].

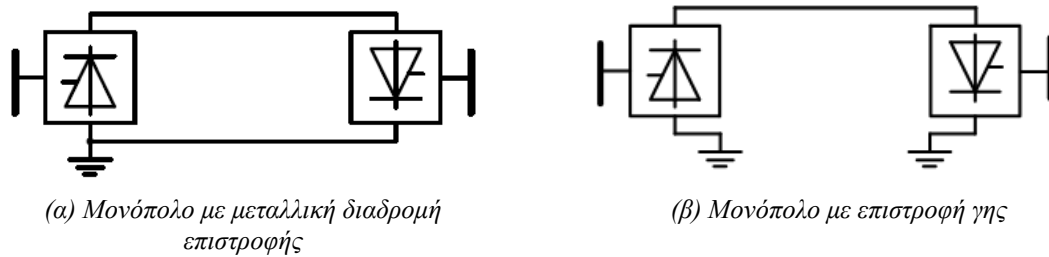
Η λειτουργικότητα των συστημάτων HVDC εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τους μετατροπείς τους, οι οποίοι μετατρέπουν το εναλλασσόμενο ρεύμα σε συνεχές και αντίστροφα. Οι μετατροπείς μεταγόμενης γραμμής (Line Commutated Converter -LCC) χρησιμοποιούν θυρίστορ και εξαρτώνται από το δίκτυο εναλλασσόμενου ρεύματος για την μεταγωγή, γνωστοί για την αποδοτικότητά τους σε εφαρμογές μεγάλων αποστάσεων [8]. Εν τω μεταξύ οι μετατροπείς πηγής τάσης (Voltage Source Converters -VSC), που χρησιμοποιούν IGBT, επιτρέπουν τον ανεξάρτητο έλεγχο της ροής ισχύος, καθιστώντας τους ιδιαίτερα κατάλληλους για την ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και την σύνδεση αδύναμων δικτύων.[15][16].

1.3.1 Μονοπολική Τοπολογία HVDC

Τα μονοπολικά συστήματα HVDC χρησιμοποιούν έναν μόνον αγωγό υψηλής τάσης με δύο δυνατές τεχνικές γείωσης. Η πρώτη και πιο διαδεδομένη είναι με την επιστροφή μέσω γης ή θάλασσας καθιστώντας την ιδανική για υποβρύχιες συνδέσεις. Ωστόσο, όσον αναφορά τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, το ρεύμα σφάλματος DC μπορεί να προκαλέσει διάβρωση στα ηλεκτρόδια γείωσης ή, μέσω του υποβρύχιο καλωδίου, να οδηγήσει σε χημική ρύπανση των υδάτων (Εικόνα 1.6.β) [17].

Η δεύτερη τεχνική γείωσης, χρησιμοποιεί ένα «μεταλλικό ουδέτερο ή ένα καλώδιο χαμηλής τάσης», στο οποίο διαρρέεται το ρεύμα σφάλματος, μειώνοντας την διάβρωση των ηλεκτροδίων γείωσης αλλά και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της ρύπανσης. Παρ' όλα αυτά, σε περίπτωση σφάλματος του καλωδίου επιστροφής, η τοπολογία λειτουργεί με τον πρώτο τρόπο γείωσης. [10][15][17] (Εικόνα 1.6.α).

Αυτά τα συστήματα μπορούν να χρησιμοποιούν είτε μετατροπείς με μεταγωγή σε γραμμή (LCC) είτε μετατροπείς πηγής τάσης (VSC), οι οποίοι επιλέγονται με βάση τις ανάγκες της εκάστοτε εφαρμογής και τις συνθήκες του δικτύου[8][18]. Τα μονοπολικά συστήματα HVDC προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως χαμηλότερο κόστος κατασκευής και υλικών και απλούστερη υλοποίηση και συντήρηση, ιδίως για υποβρύχιες και υπόγειες εγκαταστάσεις [10] [8]. Ωστόσο ενέχουν περιβαλλοντικοί κίνδυνοι, όπως η ηλεκτροχημική διάβρωση και πιθανές διακοπές του συστήματος λόγω σφάλματων ενός αγωγού [16][10]. Τα μονοπολικά συστήματα που χρησιμοποιούνται συνήθως σε έργα υποβρυχίων καλωδίων και απομακρυσμένων συνδέσεων, μπορούν να αναβαθμιστούν σε διπολικές διαμορφώσεις για μεγαλύτερη αξιοπιστία.



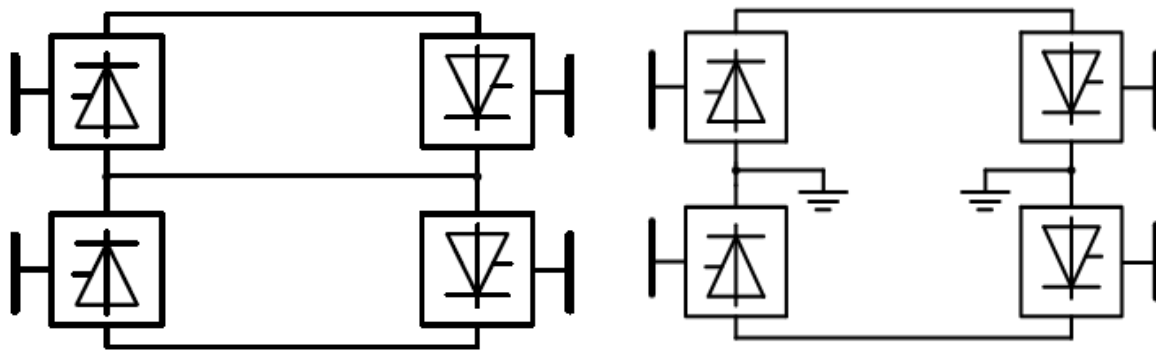
Εικόνα Error: Reference source not found.6 Διατάξεις πόλων συνεχούς ρεύματος υψηλής τάσης (HVDC): (α) Μονόπολος με μεταλλική διαδρομή επιστροφής, (β) Μονόπολος με επιστροφή γης [9]

1.3.2 Διπολική Τοπολογία HVDC

Τα διπολικά συστήματα HVDC είναι τα πιο ευρέως διαδεδομένα και εφαρμόσιμα. Χρησιμοποιούν δύο αγωγούς με αντίθετες πολικότητες και αποτελούνται από δύο μετατροπείς με έναν κοινό ουδέτερο, ενισχύουν την αξιοπιστία και την ανοχή σε σφάλματα για τη μετάδοση ισχύος υψηλής χωρητικότητας σε μεγάλες αποστάσεις [10][15]. Σε περίπτωση σφάλματος του ενός αγωγού και αποσύνδεσής του από το σύστημα, ο άλλος αγωγός είναι ικανός να μπορεί να υποστηρίξει το δίκτυο, να μην με το 50% της χωρητικής ικανότητας, αλλά δεν θέτει το σύστημα σε αχρηστία, όπως γίνεται στην μονοπολική τοπολογία. Υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας, το ρεύμα που διαρρέει το ουδέτερο σημείο τείνει στο μηδέν, ενώ σε περίπτωση σφάλματος, το ρεύμα διαρρέεται με μία από τις δύο διαθέσιμες τεχνικές που παρουσιάστηκαν και στην μονοπολική τοπολογία, είτε μέσω του μεταλλικού αγωγού, είτε μέσω της γης. Μπορούν να χρησιμοποιήσουν μετατροπείς γραμμής (LCC) για ανάγκες υψηλής ισχύος ή μετατροπείς πηγής τάσης (VSC) για ευέλικτο έλεγχο [8][16][17].

Η διπολική HVDC προσφέρει σημαντική αξιοπιστία και αποδοτικότητα μειώνοντας τις απώλειες μεταφοράς και βελτιώνοντας την σταθερότητα της τάσης. Ο σχεδιασμός με δύο αγωγούς εξασφαλίζει ελάχιστη διακοπή κατά τη διάρκεια σφαλμάτων, διατηρώντας την συνεχή λειτουργία [9][16]. Αυτό τα καθιστά ιδανικά για τη διασύνδεση μεγάλων δικτύων και την ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Τα διπολικά συστήματα χρησιμοποιούνται συνήθως σε εγκαταστάσεις εναέριων και υποβρύχιων καλωδίων μεγάλων αποστάσεων.

Στην Εικόνα 1.7, παρουσιάζεται η διάταξη της διπολικής σύνδεσης για σύστημα HVDC και στην επόμενη (1.8) εξηγούνται οι καταστάσεις λειτουργίας του ίδιου συστήματος σε τρεις διαφορετικές περιπτώσεις [9].



(δ) Διπολική σύνδεση με διαδρομή επιστροφής στη γη.

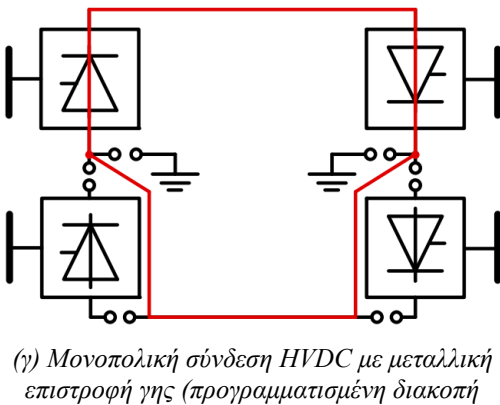
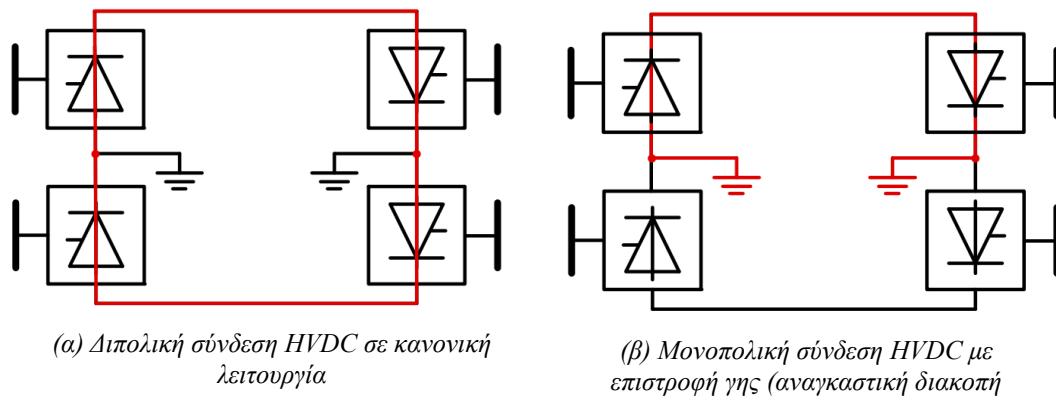
Εικόνα Error: Reference source not found.7 Διατάξεις πόλων υψηλής συνεχούς τάσης (γ) Διπολική με μεταλλική διαδρομή επιστροφής (δ) Διπολική με διαδρομή επιστροφής στη γη [9]

Στην Εικόνα 1.8 παρουσιάζονται οι διάφορες λειτουργικές καταστάσεις ενός συστήματος μεταφοράς HVDC, δείχνοντας πώς το σύστημα προσαρμόζεται σε κανονικές συνθήκες, σε σε- νάρια σφαλμάτων και προγραμματισμένη συντήρηση.

Στην (α) διπολική σύνδεση κανονικής λειτουργίας, το σύστημα λειτουργεί με δύο πόλους (θετικό και αρνητικό) που μεταφέρουν ίσα αλλά αντίθετα ρεύματα.

Στη (β) έχουμε μονοπολική σύνδεση με σύνδεση γης (αναγκαστική διακοπή πόλου), ένας πόλος είναι εκτός λειτουργίας λόγω σφάλματος. Ο υπόλοιπος πόλος συνεχίζει να λειτουργεί και το ρεύμα επιστροφής ρέει μέσω της γης χρησιμοποιώντας ηλεκτρόδια γείωσης

Στην (γ) το σύστημα λειτουργεί ως μονοπολική σύνδεση με μεταλλική επιστροφή γης (προγραμματισμένη διακοπή λειτουργίας πόλου), ένας πόλος απενεργοποιείται σκόπιμα για συντήρηση, αλλά αντί να χρησιμοποιείται η γη ως διαδρομή επιστροφής, χρησιμοποιείται ένας μεταλλικός αγωγός (γραμμή επιστροφής ουδετέρου) για την ολοκλήρωση του κυκλώματος.



Εικόνα Error: Reference source not found.8 Καταστάσεις λειτουργίας της διπολικής HVDC σύνδεσης σε (α) κανονική κατάσταση λειτουργίας (β) Μονοπολική λειτουργία εξαιτίας σφάλματος και επιστροφή μέσω γης (γ) Μονοπολική σύνδεση με μεταλλική επιστροφή [9]

1.3.3 Τοπολογία πολλαπλών ακροδεκτών (Multi Terminal DC-MTDC)

Η ανάγκη για μεταφορά ενέργειας σε περισσότερα από δύο σημεία, οδήγησε στην τοπολογία πολλαπλών ακροδεκτών, η οποία παρέχει μεγαλύτερη αξιοπιστία και ευελιξία στην σύνδεση πολλών παραγωγών με το δίκτυο. Συναντάται κυρίως στη σύνδεση υπεράκτιων αιολικών πάρκων με το υπάρχον σύστημα μεταφοράς [10]. Έρευνα πραγματοποιήθηκε για την διασύνδεση τριών υπεράκτιων αιολικών πάρκων στη Βόρεια θάλασσα με τις γειτονικές χώρες και διάφορες τοπολογίες πολλαπλών ακροδεκτών παρουσιάστηκαν, αναλύοντας τις καταστάσεις λειτουργίας σε κανονική συνθήκη, και σε διάφορες καταστάσεις σφαλμάτων [19]. Μερικές από τις προτεινόμενες τοπολογίες ήταν η δακτυλιοειδής και η ακτινική και κάποιες πιο σύνθετες παραλλαγές τους [19] [10].

Η δυσκολία που συναντάται στην ενσωμάτωση των MTDC είναι η προστασία του συστήματος, η γρήγορη και ασφαλής εκκαθάριση σφάλματος και ο έλεγχος του συστήματος στην έγχυση ή στην απορρόφηση ισχύος [10]. Επίσης ανάλογα και με την τοπολογία που χρησιμοποιείται, καλύπτονται και διαφορετικές απαιτήσεις του δικτύου, το κόστος αυξάνεται σημαντικά όταν έχουμε πολλές διασυνδέσεις μεταξύ των διάφορων υπεράκτιων πάρκων [19]. Σημαντικό

ρόλο στον έλεγχο, έχουν οι μετατροπείς που είναι υπεύθυνοι για την μετατροπή από εναλλασσόμενη σε συνεχή τάση και το ανάπαλιν. Κύρια τεχνολογία με την οποία συνδυάζεται η τοπολογία πολλαπλών ακροδεκτών είναι η VSC [10].

1.4 Γείωση στα HVDC

1.4.1 Βασικές Αρχές Γείωσης

Η γείωση στα συστήματα Υψηλής Τάσης Συνεχούς Ρεύματος (HVDC), διαφέρει σε σχέση με αυτή της Εναλλασσόμενης, καθώς χρησιμοποιείται τόσο σε κανονικές συνθήκες κανονικής λειτουργίας, όσο και σε περιπτώσεις σφάλματος. Ενώ στα Υψηλής Τάσης Εναλλασσόμενου Ρεύματος (HVAC) συστήματα, η γείωση παίζει κυρίως ρόλο προστασίας από σφάλματα [20].

Η επιλογή του σωστού ηλεκτροδίου διαφέρει ανάλογα με την εγκατάσταση και εξαρτάται από παράγοντες όπως η αντίσταση του εδάφους, η απόσταση από τον σταθμό μετατροπής, το κόστος, η συντήρηση και η ασφάλεια [20].

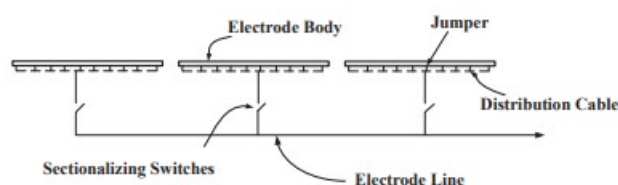
Το καλώδιο γείωσης παρέχει μία διαδρομή επιστροφής του ρεύματος στην γη και ο σχεδιασμός του πρέπει να λαμβάνει υπόψιν τις ηλεκτρικές και θερμικές ιδιότητες του αγωγού γείωσης. Η ένταση του ρεύματος είναι της τάξης των kA (kilo Ampere) , γεγονός που καθιστά απαραίτητη τη διασφάλιση της ασφαλούς διάχυσής του στο έδαφος και της σωστής διασποράς του όταν φτάσει στη γη [21].

1.4.2 Τύποι Ηλεκτροδίων Γείωσης

1.4.2.1 Ηλεκτρόδια Γης (Land Electrodes)

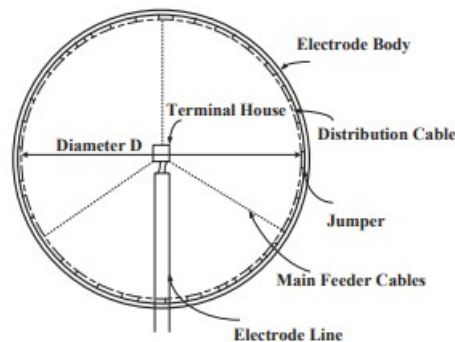
Η πιο κοινή μέθοδος γείωσης είναι αυτή που βασίζεται στο έδαφος, με διάφορες παραλλαγές που επιλέγονται ανάλογα με την αντίσταση του εδάφους και τη σύστασή του. Ενδεικτικά παρατίθενται, τρεις διατάξεις γείωσης

- Οριζόντιο Γραμμικό Ηλεκτρόδιο (Horizontal Linear Electrode): Ιδανικό όταν το ανώτερο στρώμα του εδάφους εμφανίζει χαμηλότερη αντίσταση σε σχέση με τα βαθύτερα στρώματα.



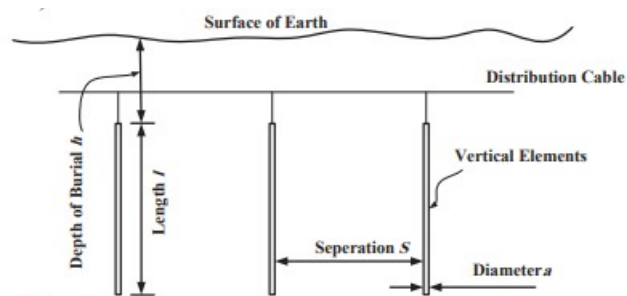
Εικόνα Error: Reference source not found.9 Οριζόντια στοίχιση ηλεκτροδίου [22]

- Δακτυλιοειδές Ηλεκτρόδιο (Ring Electrode): Κατάλληλο για εδάφη χαμηλής επιφανειακής αντίστασης, προσφέροντας βελτιωμένη αγωγιμότητα και χαμηλότερη συνολική αντίσταση γείωσης.



Εικόνα Error: Reference source not found.10 Δακτυλιοειδές Ηλεκτρόδιο [22]

- Κάθετο Ηλεκτρόδιο (Vertical Electrode): Χρησιμοποιείται όταν το χαμηλότερο στρώμα εδάφους έχει χαμηλότερη αντίσταση. Μπορούν να θαφτούν έως και 200 μέτρα για καλύτερη αγωγιμότητα [20].



Εικόνα Error: Reference source not found.11 Κάθετα μη συνεχή Ηλεκτρόδια [22]

Σημείωση βασικών στοιχείων των διατάξεων: Το «Electrode Body» διαχέει το ρεύμα στο έδαφος, με το «Distribution Cable» να μεταφέρει το ρεύμα, το «Jumper» συνδέει τα πολλαπλά ηλεκτρόδια για ομοιόμορφη κατανομή του ρεύματος

1.4.2.2 Ηλεκτρόδια Θαλάσσης (Sea Electrodes)

Τα ηλεκτρόδια αυτά χρησιμοποιούνται σε υποβρύχιες διασυνδέσεις HVDC και απαιτούν ιδιαίτερη προσοχή λόγω των ηλεκτρικών πεδίων που δημιουργούνται γύρω τους. Σε περιοχές με ρηγά νερά και πετρώδες υπόστρωμα, υπάρχει κίνδυνος ανάπτυξης ισχυρών ηλεκτρικών πεδίων, τα οποία μπορεί να εκτείνονται σε μεγάλες αποστάσεις, ακόμη και χιλιόμετρα μακριά από τα ηλεκτρόδια [20].

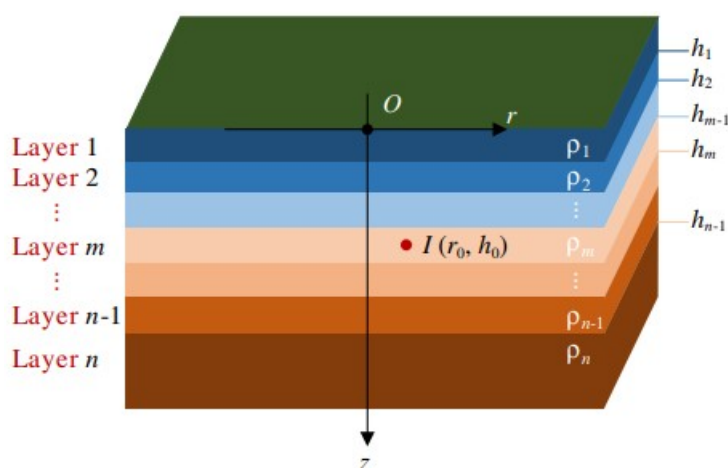
1.4.2.3 Ηλεκτρόδια Παραλίας (Beach Electrodes)

Τοποθετούνται κοντά σε ακτές σε χώμα εμπλουτισμένο με θαλασσινό νερό. Οι ιδιότητες του χώματος, αλλάζουν με τις παλίρροιες και τις εποχές, οπότε απαιτείται παρακολούθηση [20].

1.4.3 Χαρακτηριστικά Χώματος

Ο τρόπος με τον οποίο το ρεύμα διαχέεται στο έδαφος επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες, όπως η ηλεκτρική αντίσταση του εδάφους, η μορφολογία του, η περιεκτικότητα σε υγρασία, η θερμοκρασία και η στρωμάτωσή του. Το έδαφος αποτελείται από πολλαπλά επίπεδα με διαφορετικές φυσικές και ηλεκτρικές ιδιότητες, γεγονός που επηρεάζει τη συμπεριφορά της διασποράς του ρεύματος. Επιπλέον, η επιλογή του κατάλληλου τύπου ηλεκτροδίου γείωσης (οριζόντιο, κάθετο, δακτυλιοειδές) είναι καθοριστική, καθώς κάθε διαμόρφωση επιδρά διαφορετικά στη διασπορά του ρεύματος [23].

Η μορφολογία του εδάφους αποτελείται από πολλαπλά στρώματα (Layers), το καθένα με διαφορετικές ιδιότητες, ειδική αντίσταση ρ_i και συγκεκριμένο πάχος h_i , που συνολικά επηρεάζουν τη συμπεριφορά του εδάφους.



Εικόνα Error: Reference source not found.12 Πολυστρωματικό μοντέλο εδάφους [23]

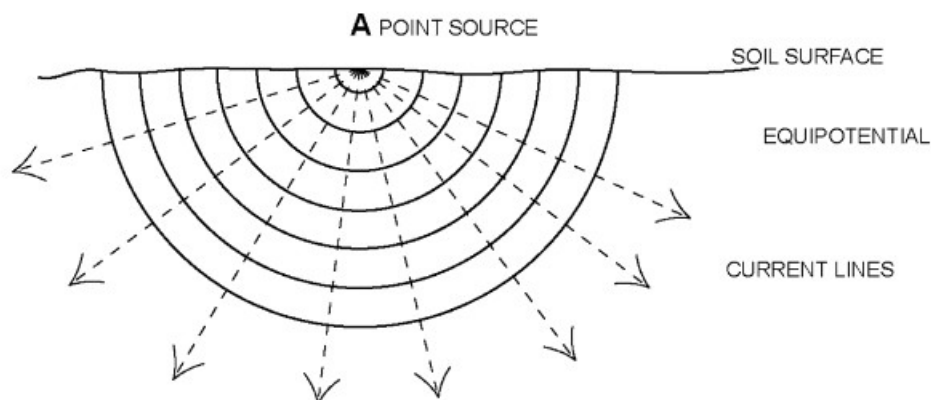
Στις προσομοιώσεις της δομής του εδάφους, χρησιμοποιείται είτε μονοστρωματική είτε διστρωματική αναπαράσταση, καθώς και άλλες μορφές μοντελοποίησης, οι οποίες ενσωματώνουν τις υπόλοιπες στρώσεις, παρέχοντας έναν πιο αντιπροσωπευτικό τύπο εδάφους.

Η ειδική αντίσταση ρ του εδάφους φανερώνει το πόσο αντιστέκεται το «υλικό» στην διέλευση του ρεύματος, μία μικρή τιμή υποδηλώνει εύκολη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος. Παράγοντες που επηρεάζουν την ειδική αντίσταση είναι το πορώδες, η περιεκτικότητα και η ποιότητα του νερού, αλλά κυρίως «η σύνθεση και η ποσότητα των διαλυτών αλάτων, οξέων ή αλκαλίων» τα οποία υπάρχουν στο έδαφος και με την ύπαρξη νερού επηρεάζουν εν συνεχεία την τιμή της ρ [24].

1.4.4 Βηματική Τάση και Τάση Επαφής

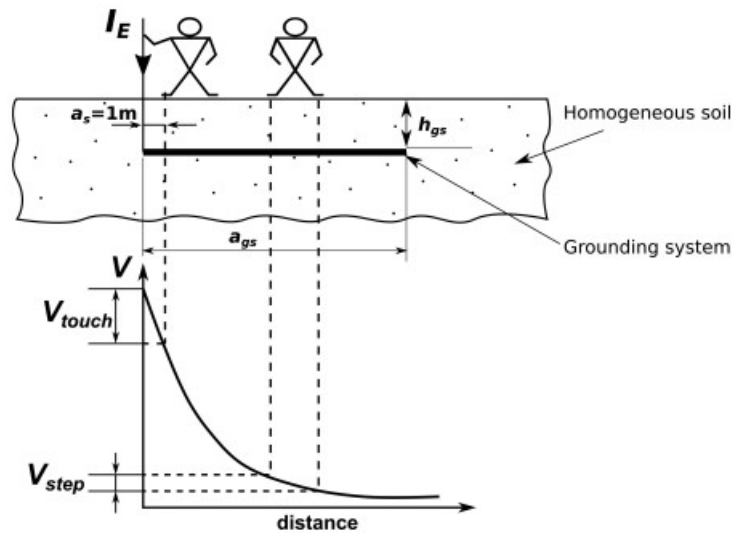
«Η Βηματική Τάση E_s (step voltage) είναι η διαφορά δυναμικού που αναπτύσσεται στην επιφάνεια του εδάφους.» Οι ισοδυναμικές γραμμές είναι αυτές που καθορίζουν την ένταση της βηματικής τάσης στην οποία υπόκειται το άτομο, με το ένα σκέλος να βρίσκεται στο ένα δυναμικό και το άλλο, σε μίαν άλλη ισοδυναμική και άρα σε άλλα δυναμικό και έτσι δημιουργείται μια διαφορά δυναμικού μεταξύ των άκρων του ανθρώπου εντέλει διαρρέεται με ρεύμα. Το κέντρο των γραμμών αυτών είναι η θέση της υπέρτασης που θα υπάρξει σε περίπτωση σφάλματος στο σύστημα [24]. Η τιμή της βηματικής τάσης εξαρτάται από το ρεύμα που πηγαίνει στην γη, την αντίσταση του ανθρώπινου σώματος και το πόσο εύκολα διαρρέει το ρεύμα μεταξύ του σώματος και του εδάφους [20].

Στην παρακάτω εικόνα, εμφανίζονται οι ισοδυναμικές γραμμές από την έγχυση του ρεύματος στην γη.



Εικόνα Error: Reference source not found.13 «Διάχυση του ρεύματος σε ομοιογενές έδαφος» [25]

«Η Τάση Επαφής E_t (touch voltage) είναι η διαφορά δυναμικού μεταξύ της ανύψωσης δυναμικού γης (Ground Potential Rise-GPR) και του δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους, στο σημείο όπου στέκεται ένα άτομο και ταυτόχρονα ακουμπά μία γειωμένη επιφάνεια» [24].



Εικόνα Error: Reference source not found.14 Απεικόνιση τάσης επαφής και βηματικής τάσης [26]

Στην άνωθεν εικόνα βλέπουμε παραστατικά πως ο άνθρωπος μπορεί να πληγεί από την υπέρταση. Η κλίμακα της τάσης στην αριστερή πλευρά, υποδηλώνει ότι η ένταση της τάσης που θα εκτεθεί ο άνθρωπος στην περίπτωση της τάση επαφής (touch) είναι μεγαλύτερη σε σχέση με την βηματική (step).

Η διαχείριση των επιπέδων τάσης είναι κρίσιμη για την ασφάλεια των ηλεκτρικών συστημάτων, ειδικά σε εφαρμογές υψηλής τάσης, όπως η μετάδοση HVDC. Τα συστήματα HVDC απαιτούν προηγμένους μετατροπείς ισχύος για την αποδοτική μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις, ελαχιστοποιώντας τις απώλειες και εξασφαλίζοντας τη σταθερότητα του δικτύου [27].

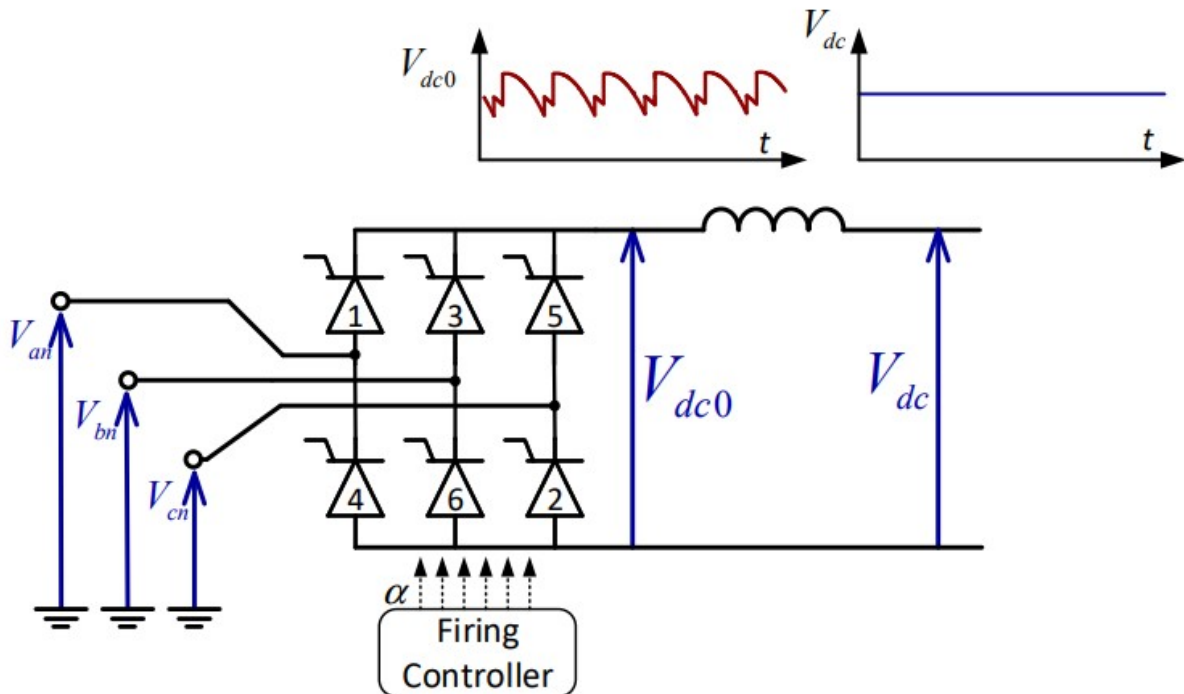
1.5 Μετατροπείς HVDC

Οι μετατροπείς ισχύος χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, τους μετατροπείς πηγής ρεύματος (Current Source Converters) και στους μετατροπείς πηγής τάσης (Voltage Source Converters -VSC). Ο διακόπτης των μετατροπέων είναι υπεύθυνος για το άνοιγμα ή κλείσιμο του μετατροπέα και υπάρχουν δύο κύριες τεχνολογίες, τα θυρίстор, το κλείσιμο των οποίων γίνεται με την πτώση του ρεύματος στο μηδέν και όχι από κάποιο σήμα κλεισίματος και αναφέρονται ως Line Commutated Switches, και από τα διπολικά τρανζίστορ μονωμένης πύλης (IGBT) τα οποία ανοίγουν και κλείνουν μέσω σήματος [9].

1.5.1 Μετατροπείς Πηγής Ρεύματος (CSC)

Οι συσκευές ημιαγωγών κλείνουν όταν η τιμή του ρεύματος μηδενίζεται για αυτό χρειάζεται να υπάρχει κάποιο σήμα που να τις ενεργοποιεί πρώτα. Ο μηχανισμός που γίνεται

αυτό αναφέρεται ως Line Commutated Converters (LCC) και εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της τάσης του εναλλασσομένου δικτύου. Στην Εικόνα 1.9, παρουσιάζεται η κυματομορφή της συνεχούς τάσης πριν την εξομάλυνση και μετά, η μετατροπή της οποίας από AC σε DC έγινε χάρις στην χρήση της γέφυρας 6 παλμών ως μετατροπέα πηγής ρεύματος [9].



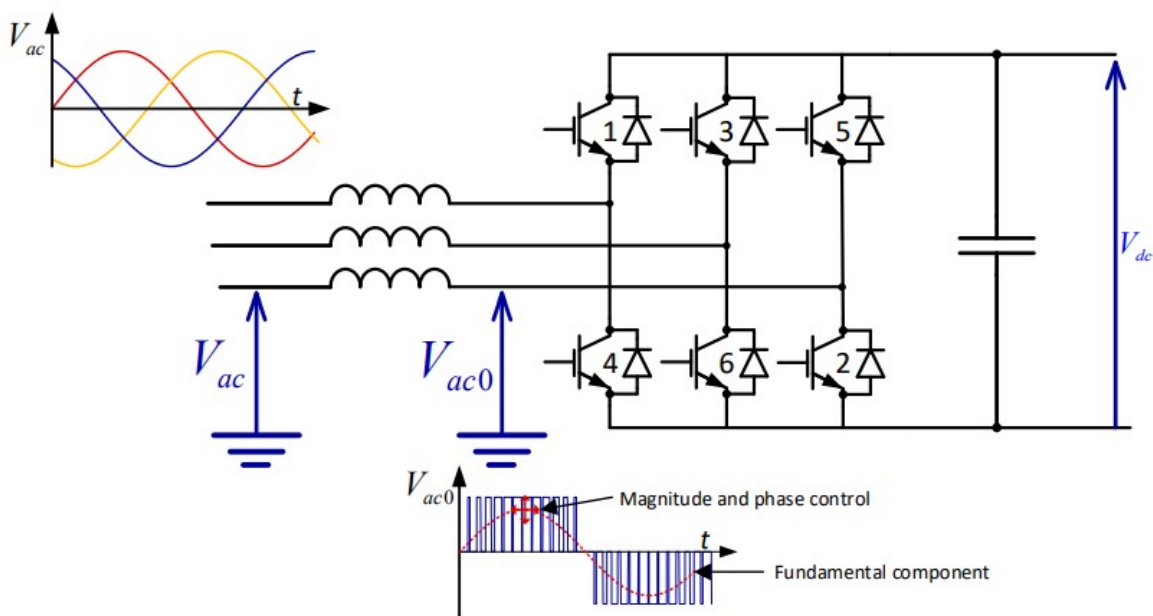
Εικόνα Error: Reference source not found.15 Γέφυρα 6 παλμών (Graetz) ως μετατροπέα πηγής ρεύματος (CSC) [9]

Η κυματομορφή της τάσης V_{dc0} είναι ακριβώς μετά την μετατροπή της εναλλασσόμενης σε συνεχή τάση, με χρήση θυρίστωρ, καθένα από το οποίο ενεργοποιείται μέσω της «γωνίας βολής α ». Κάθε χρονική στιγμή δύο θυρίστωρ άγουν, με την σειρά ενεργοποίησης να διαφαίνεται στην εικόνα, το ένα στο θετικό κύκλο του AC και το άλλο στον αρνητικό παρέχοντας κάθε στιγμή ρεύμα για την έξοδο DC. Η εξομάλυνση της οποίας επιτυγχάνεται με την χρήση πηνίου ώστε να είναι διαθέσιμη προς χρήση στο δίκτυο με την ενδεικνυόμενη κυματομορφή V_{dc} . Η διαδικασία μετατροπής της τάσης έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή αρμονικών ρευμάτων και η χρήση των φίλτρων είναι απαραίτητη [18].

1.5.2 Μετατροπείς Πηγής Τάσης (VSC)

Οι μετατροπείς πηγής τάσης χρησιμοποιούν τρανζίστορ IGBT για μεγαλύτερο έλεγχο στο άνοιγμα και το κλείσιμο του διακόπτη, ανεξαρτήτως της τάσης του συστήματος AC. Παράλληλα με χρήση της διαμόρφωσης πλάτους (PWM) σε υψηλές συχνότητες η οποία επιτρέπει το συνεχές άνοιγμα και κλείσιμο των IGBT, ελέγχεται το πλάτος και η συχνότητα των παλμών καθορίζοντας έτσι το πλάτος και την φάση της κυματομορφής εξόδου. Επίσης, οι μετατροπείς πηγής

τάσης έχουν την ικανότητα να ελέγχουν την ενεργή και άεργο ισχύ, ενισχύοντας την ευστάθεια του συστήματος, ειδικά σε αστικές περιοχές με έντονη διακίνηση ηλεκτρικής ενέργειας. Σε αντίθεση με την LCC που υπάρχει χρήση θυρίστορ, οι VCS έχουν την δυνατότητα να ξεκινούν χωρίς την ύπαρξη AC τάσης, δημιουργώντας μία δική τους τάση σε περίπτωση «blackstart» [15]. Μία αναπαράσταση του μετατροπέα πηγής τάσης είναι η κάτωθι [9].



Εικόνα Error: Reference source not found.16 Αυτοτροφοδοτούμενος μετατροπέας πηγής τάσης (VSC)[9]

Εδώ οι τρεις φάσεις εισέρχονται στον μετατροπέα, περνώντας πρώτα από τα πηνία για εξομάλυνση τυχόν αρμονικών και στην συνέχεια μέσω της γέφυρας των τρανζίστορ και της διαμόρφωσης PWM, παράγουν μια DC τάση η οποία με την βοήθεια του πυκνωτή παραμένει σταθερή σε περιπτώσεις διακύμανσης της AC πλευράς μετά και τον PWM έλεγχο.

1.5.3 Σύγκριση CSC και VSC

Και οι δύο τεχνολογίες μετατροπής της τάσης έχουν την σημασία τους για το σύστημα μεταφοράς, αφού κάθε μία εξυπηρετεί και διαφορετικό σκοπό. Κύρια χρήση του VSC, είναι για έλεγχο ενεργού και αέργου ισχύος σε περιπτώσεις αδύναμου συστήματος AC [10]. Ενώ, όταν υπάρχει ανάγκη για μεταφορά μεγάλων ποσών ισχύος, προτείνεται η χρήση του CSC, χάρις στις λιγότερες απώλειες που έχει στην διαδικασία μετατροπής σε σχέση με την άλλη τεχνολογία. Παρ' όλα αυτά, η μετατροπή πηγής τάσης μειώνει σταθερά το ποσοστό των απωλειών της σε σχέση με την άλλη μέθοδο, καθιστώντας την ικανή και πιο ελεγχόμενη για την μεταφορά ισχύος επίσης [9].

Η ανάγκη για μείωση των απωλειών από τις AC αρμονικές που προκαλούνται, έφερε στο προσκήνιο την εγκατάσταση πιο ακριβών φίλτρων γνωστό και ως «συνεχώς συντονιζόμενο AC

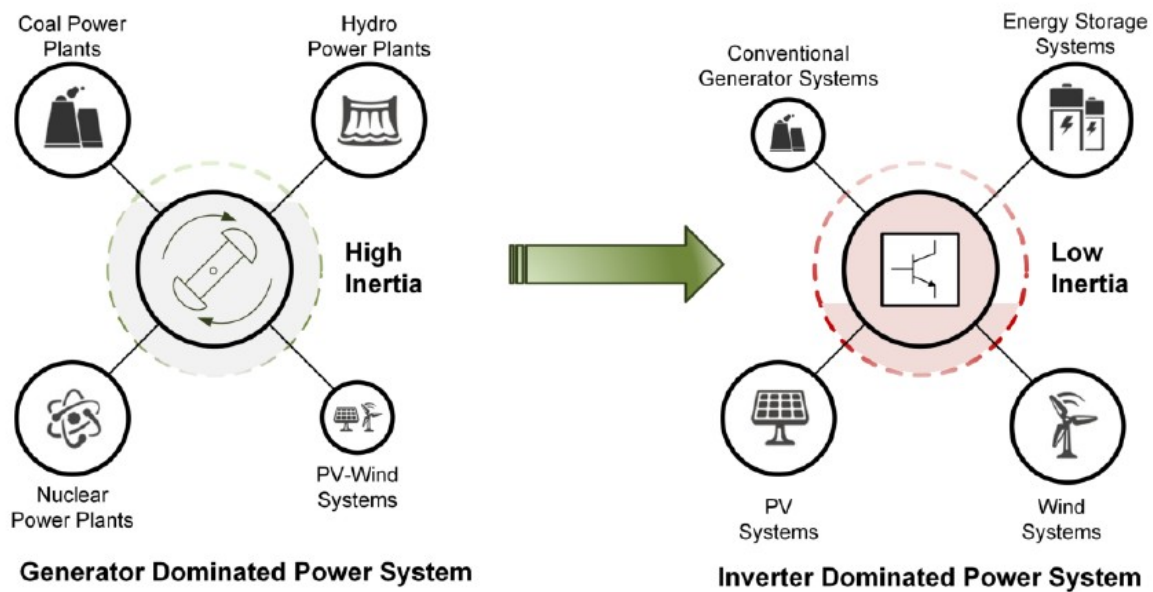
φίλτρο» (Continuously Tuned ac filter), το οποία αντισταθμίζουν το ακριβό κόστος τους με την καλύτερη απόδοση του συστήματος και η εγκατάσταση αυτών γίνεται σε μετατροπείς με πυκνωτές. Στο κομμάτι των DC αρμονικών επίσης είναι αναγκαία τα φίλτρα πλευράς DC, ώστε να μειώνεται ο θόρυβος που προκαλείται στα γύρω τηλεπικοινωνιακά κυκλώματα [9].

Σε περίπτωση σφάλματος στο κομμάτι της DC πλευράς, η τεχνολογία του CSC παρέχει μεγαλύτερη ασφάλεια, αφού αποσυνδέει το σύστημα συνεχούς τάσης, ενώ ο VSC δεν αντιλαμβάνεται το σφάλμα και περιμένει από την πλευρά AC να εκκαθαρίσει το πρόβλημα. Έχουν γίνει αρκετές προτάσεις ώστε να εξασφαλιστεί μεγαλύτερη ασφάλεια σε περίπτωση σφάλματος, ορισμένες από τις οποίες έχουν αναλυθεί [10].

1.6 Ψηφιοποίηση του ΣΗΕ

Με την αυξανόμενη είσοδο των ΑΠΕ, οδηγούμαστε σε μία νέα εποχή ψηφιοποίησης του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας που εν συνεχεία θέτει νέες προκλήσεις σχετικά με την κυβερνοασφάλεια και την παρακολούθηση των συστημάτων[28]. Αυτή η αλλαγή της παραδοσιακής μορφής παραγωγής σε μία νέα που βασίζεται στους μετατροπείς (Variable Inverter Based Renewable Energy Resources) και σε έξυπνες ηλεκτρονικές συσκευές που επιτρέπουν την ενσωμάτωση της αιολικής, ηλιακής ενέργειας καθιστούν απαραίτητη την διεπικοινωνία των συστημάτων και την προστασία τους από ψηφιακές και φυσικές επιθέσεις [28].

Το έξυπνο δίκτυο (Smart Grid), είναι αυτό που χαρακτηρίζει τα ΣΗΕ την σύγχρονη εποχή και αφορά στην επικοινωνία, αντίληψη και έλεγχο του συστήματος. Η παρακολούθηση των συστημάτων αυτών γίνεται με συστήματα μετρητών και συστήματα παρακολούθησης ευρείας περιοχής (Wide Area Monitoring Systems-WAMS), που χρησιμοποιούν μονάδες μέτρησης φασόρων (Phasor Measure Units-PMU). Η αλλαγή της παραδοσιακής παραγωγής μπορεί να αποτυπωθεί στην παρακάτω εικόνα [28].



Εικόνα Error: Reference source not found. 17 Η αλλαγή του τρόπου παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από τα μεγάλα κέντρα παραγωγής σε συστήματα που βασίζονται σε VIBRES. Η ποσότητα της παραγωγής είναι ανάλογη του μεγέθους του κύκλου που περιβάλλει το κάθε σύστημα [28]

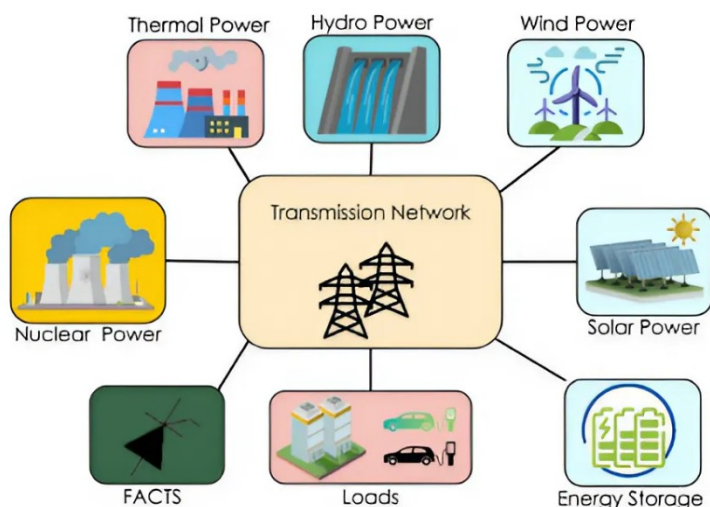
Οι παλιές μηχανές παραγωγής παρείχαν μεγάλη αδράνεια στο σύστημα και επέτρεπαν τον έλεγχο της συχνότητας του δικτύου, σε σύγκριση με τις σύγχρονες πηγές παραγωγής που δεν διαθέτουν ρότορα και δεν μπορούν να προσφέρουν υπηρεσίες σταθεροποίησης της συχνότητας. Επίσης λόγω της φύσης των ΑΠΕ, βασίζονται εξολοκλήρου στις καιρικές συνθήκες και σε περιόδους χαμηλής παραγωγής ή αυξημένης ζήτησης, το σύστημα εξυπηρετείται αποκλειστικά από φυσικό αέριο ή άλλο καύσιμο. Αυτή η έλλειψη της ποικιλίας του καυσίμου καθιστά το σύστημα ευάλωτο στις τιμές του φυσικού αερίου οδηγώντας την τιμή της kWh σε υψηλά σημεία. Ένας τρόπος να περιοριστεί η εξάρτηση από το φυσικό αέριο είναι τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας (Energy Storage Systems-ESS), τα οποία αναλύονται στο Κεφάλαιο 2.

Τις νέες αυτές απαιτήσεις καλείται να αντιμετωπίσουν οι διαχειριστές του συστήματος/δικτύου, αξιοποιώντας όλα τα διαθέσιμα τεχνολογικά μέσα που υπάρχουν, αλλά ενσωματώνοντας και νέες τεχνολογίες.

1.7 Διαχειριστής Συστήματος Μεταφοράς (Transmission System Operator -TSO)

Ο Διαχειριστής Συστήματος Μεταφοράς (Transmission System Operator-TSO) είναι υπεύθυνος για την αποτελεσματική διαχείριση των δικτύων μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας υψηλής (High Voltage-HV) και υπερυψηλής (Ultra High Voltage-UHV) τάσης. Αποτελείται από τις γραμμές μεταφοράς, τους υποσταθμούς, τους μετασχηματιστές και τα συστήματα ελέγχου. Οι TSOs διαδραματίζουν επίσης βασικό ρόλο στην ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών

ενέργειας μεγάλης κλίμακας, όπως η αιολική και η ηλιακή ενέργεια, στο σύστημα, ενώ παράλληλα διαχειρίζονται την τάση και τη συχνότητα για να υποστηρίξουν τη μετάβαση σε ένα καθαρότερο ενεργειακό μέλλον. [29] [30].



Εικόνα Error: Reference source not found.18 Σύστημα Μεταφοράς και οι διασυνδέσεις με τα κέντρα παραγωγής, αποθήκευσης και κατανάλωσης [30].

Ωστόσο, οι TSOs αντιμετωπίζουν προκλήσεις στο νέο ενεργειακό τοπίο. Η μεταβλητότητα των πηγών όπως η αιολική και η ηλιακή ενέργεια δημιουργούν προβλήματα ευστάθειας, συμπεριλαμβανομένων των διακυμάνσεων της τάσης, της μειωμένης αδράνειας του συστήματος και νέων μορφών αστάθειας από πηγές που βασίζονται σε μετατροπείς [30]. Ζητήματα όπως η καθυστερημένη αποκατάσταση τάσης λόγω σφάλματος (Fault Induced Delayed Voltage Recovery -FIDVR) και η διαχείριση της άεργου ισχύος δημιουργούν λειτουργικές πολυπλοκότητες. Επιπλέον, η ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας εισάγει σημαντική μεταβλητότητα και απαιτεί προηγμένες μεθόδους ελέγχου και προσομοιώσεις.

Η γήρανση της υποδομής επιδεινώνει περαιτέρω τα ζητήματα αυτά, καθώς τα υφιστάμενα συστήματα χρειάζονται αναβαθμίσεις για να εξυπηρετήσουν τις νέες απαιτήσεις. Τα ακραία καιρικά φαινόμενα δοκιμάζουν περαιτέρω την ανθεκτικότητα του δικτύου, ενώ οι απειλές για την κυβερνοασφάλεια και η ανάγκη για διαλειτουργικότητα μεταξύ των διαφόρων συστημάτων εγείρουν νέες απαιτήσεις για το σύστημα [30]. Επιπλέον, ο αποτελεσματικός συντονισμός με τους διαχειριστές δικτύων διανομής (DSO) καθίσταται όλο και πιο κρίσιμος καθώς επεκτείνεται η κατανεμημένη παραγωγή [29].

Για να αντιμετωπίσουν τα προβλήματα σχετικά με τον έλεγχο της τάσης και της συχνότητας, οι διαχειριστές (TSOs) πρέπει να βελτιώσουν την σταθερότητα του συστήματος από την ενσωμάτωση των ΑΠΕ. Τα ευέλικτα συστήματα μεταφοράς εναλλασσόμενου ρεύματος (Flexible AC Transmission Systems -FACTS) και τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας (Energy

Storage Systems -ESS) ενισχύουν την ευελιξία και τη σταθερότητα του δικτύου, ενώ τα συστήματα παρακολούθησης, προστασίας και ελέγχου ευρείας περιοχής (Wide Area Monitoring Protection And Control - WAMPAC), υποστηριζόμενα από μονάδες μέτρησης φασμάτων (Phasor Measure Units -PMU), επιτρέπουν την ανίχνευση και παρακολούθηση σφαλμάτων σε πραγματικό χρόνο.

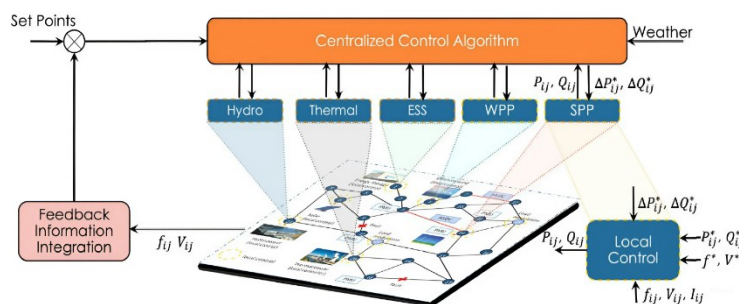
1.7.1 Phasor Measure Units (PMU)

Τα PMUs είναι ταχείες συσκευές που υποστηρίζουν μετρήσεις συγχρονισμένες με τους φάσορες (phasors) της τάσης και του ρεύματος. Επίσης χρησιμοποιούνται για την μέτρηση της συχνότητας και την αλλαγή αυτής και βοηθούν σε ζητήματα υποστήριξης της αδράνειας (inertia). Μέσω ταυτόχρονης δειγματοληψίας από τις κυματομορφές της τάσης και του ρεύματος, υπολογίζεται το μέτρο και η γωνία για την εναλλασσόμενη τάση και ρεύμα στο ακριβές σημείο της γραμμής. Η αναβάθμιση της υποδομής για τη διαχείριση αμφίδρομων ροών ισχύος (bi-directional power flows), που τα παραδοσιακά συστήματα μεταφοράς δεν υποστηρίζουν, μπορούν να βελτιώσουν την αξιοπιστία του δικτύου [29] [30] [31].

1.7.2 Έλεγχος Συστήματος

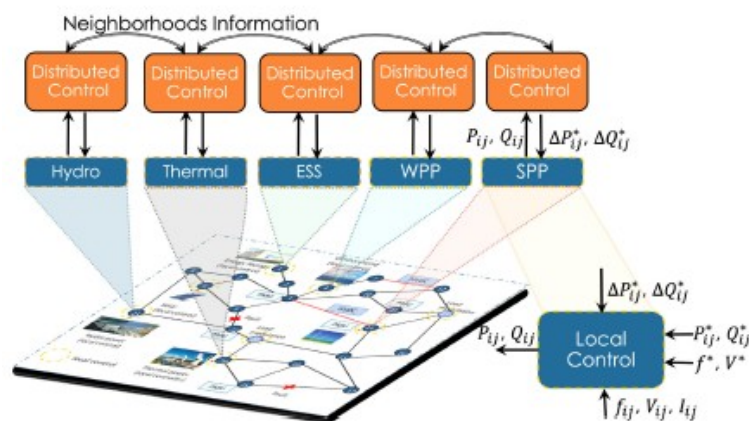
Ο έλεγχος του συστήματος μπορεί να γίνει είτε μέσω κεντρικού ελέγχου («Centralized Control»), είτε μέσω κατακεντρωμένου ελέγχου («Distributed Control»), είτε μέσω του αποκεντρωμένου ελέγχου («Decentralized Control»).

Ο πρώτος τρόπος ελέγχου «Centralized Control», εξασφαλίζει την πρόσβαση σε όλες τις πληροφορίες και στα δεδομένα του συστήματος σχετικά με τις ροές ισχύος, την παραγωγή, την κατανάλωση τις τάσεις και την συχνότητα και η μέτρησή τους γίνεται από τα PMUs συγχρονισμένα. Όμως εξαρτώνται αποκλειστικά από τις μετρήσεις των δεδομένων και σε μεγάλης έκτασης έργα ο συγχρονισμός και ο υπολογισμός τους καθίσταται δύσκολος. Επίσης είναι ευάλωτα σε κυβερνοεπιθέσεις, αφού ένα κεντρικό σύστημα είναι υπεύθυνο για τον έλεγχο όλων των υπολοίπων[30] .



Εικόνα Error: Reference source not found.19 Κεντρικός Έλεγχος

Σε αντίθεση με τον κεντρικό έλεγχο, στον κατακεντρωμένο έλεγχο, «Distributed Control», τα συστήματα λειτουργούν αυτόνομα για μία συγκεκριμένη περιοχή και επικοινωνούν με τα γειτονικά τους. Είναι ικανός να ελέγχει μεγάλης κλίμακας συστήματα και να περιορίζει την τάση και την συχνότητα εντός των επιθυμητών ορίων μέσω τοπικών PMUs, καθιστώντας έτσι πιο φιλικό για ενσωμάτωση ΑΠΕ και μπαταριών [30].



Εικόνα Error: Reference source not found.20Κατακεντρωμένος Έλεγχος

Τέλος ο αποκεντρωμένος έλεγχος, «Decentralized Control», παρουσιάζει τα πλεονεκτήματα του κατακεντρωμένου, αλλά η εφαρμογή του πραγματοποιείται σε έργα μεγαλύτερης κλίμακας, διαχωρίζοντάς τα σε μικρότερα. Μειώνει την μεταφορά δεδομένων από το ένα σύστημα στο άλλο, εξασφαλίζοντας την ανεξαρτησία του καθ' ενός από το κεντρικό έλεγχο. Όμως ο έλεγχος αυτός απαιτεί μεγάλη υπολογιστική ισχύ και εξελιγμένους αλγορίθμους που είναι δύσκολο να αναπτυχθούν [30].

1.8 Διαχειριστής Δικτύου Διανομής (DSO)

Ο Διαχειριστής Δικτύου Διανομής (Distribution System Operator- DSO) διαχειρίζεται τα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας μέσης (Medium Voltage -MV) και χαμηλής (Low Voltage -LV) τάσης που παρέχουν ενέργεια στους τελικούς χρήστες. Οι αρμοδιότητές τους περιλαμβάνουν τη συντήρηση του δικτύου, τη λειτουργική διαχείριση και την ενσωμάτωση των κατακεντρωμένων ενεργειακών πόρων (Distributed Energy Resources- DERs), όπως τα ηλιακά συστήματα στις στέγες και τα ηλεκτρικά οχήματα (Electric Vehicles- EVs).

Η αυξανόμενη υιοθέτηση των DERs εισάγει νέες προκλήσεις για τους DSOs. Η ρύθμιση της τάσης γίνεται όλο και πιο πολύπλοκη, ιδίως στα άκρα των τροφοδοτικών χαμηλής τάσης, όπου η υψηλή διείσδυση των DER μπορεί να προκαλέσει προβλήματα αύξησης της τάσης. Τα

παραδοσιακά δίκτυα διανομής, που έχουν σχεδιαστεί για μονόδρομες ροές ισχύος, αντιμετωπίζουν τώρα αμφίδρομες ροές που διαταράσσουν τις συσκευές ρύθμισης τάσης.

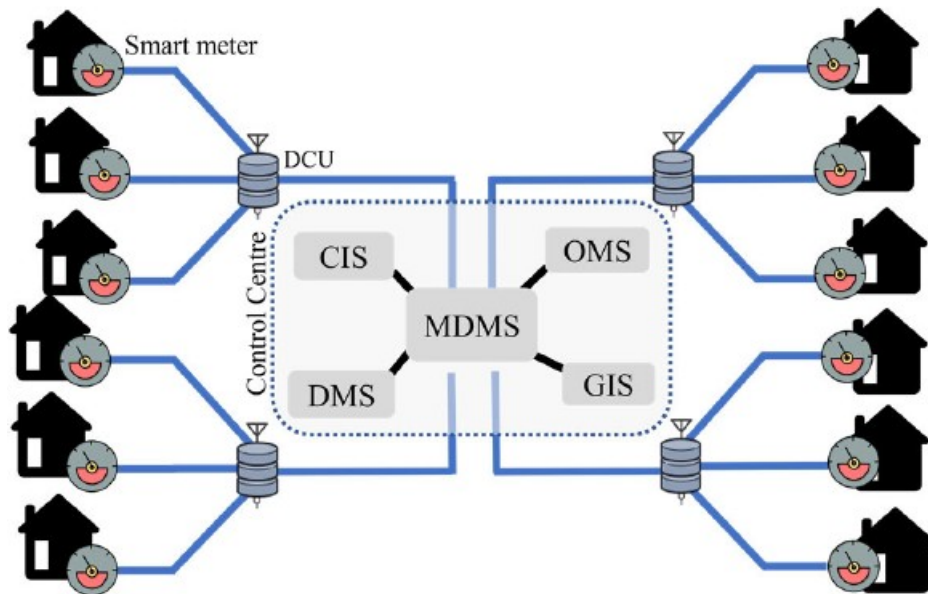
1.8.1 Active Distribution Networks

Για αυτό τον λόγο η έννοια των Active Distribution Networks ήρθε να επιλύσει το πρόβλημα της μονόδρομης ροής ισχύος. Αυτά τα δίκτυα περιλαμβάνουν ό,τι και το δίκτυο διανομής, συν την διεσπαρμένη παραγωγή και στην πλευρά του δικτύου, αλλά και στην πλευρά του καταναλωτή [32]. Σε αυτά τα δίκτυα είναι σημαντική η επικοινωνία μεταξύ των συσκευών μέτρησης σε τοπικό επίπεδο, αλλά και σε κεντρικό, σε καθ' ένα στα οποία θα πρέπει να λαμβάνονται αυτόματα αποφάσεις για το σύστημα [33].

1.8.2 Advanced Metering Infrastructure -AMI

Η επικοινωνία επιτυγχάνεται μέσω Προηγμένων Υποδομών Μέτρησης («Advanced Metering Infrastructures -AMI») τα οποία είναι υπεύθυνα για την συλλογή, αποθήκευση και ανάλυση των δεδομένων του συστήματος από τις εταιρίες κοινής ωφελείας. Αυτές με την σειρά τους, αξιοποιώντας τα δεδομένα αυτά, διαχειρίζονται το δίκτυο, τα πιθανά σφάλματα, αλλά και χρεώνουν τους καταναλωτές ή τους παραγωγούς-καταναλωτές (prosumers).

Το σύστημα AMI, αποτελείται από τους έξυπνους μετρητές («Smart meters») που είναι εγκατεστημένοι στους καταναλωτές, τα δίκτυα επικοινωνίας («Communication Networks») που μεταφέρουν τις πληροφορίες των έξυπνων μετρητών στους διαχειριστές και το σύστημα διαχείρισης δεδομένων μετρήσεων (Metering data management system -MDMS) το οποίο αποθηκεύει και αναλύει τα δεδομένα ή τα τροφοδοτεί σε άλλα συστήματα ελέγχου, όπως συστήματα χρέωσης, γεωχωρικά συστήματα (GIS) κ.α. [33]. Η δομή αυτού του τρόπου επικοινωνίας αποτυπώνεται στην κάτωθι εικόνα:



Εικόνα Error: Reference source not found.21 Δομή διεπικοινωνίας του AMI [33]

Για να ξεπεραστούν αυτές οι προκλήσεις, οι DSO θα πρέπει να αναπτύξουν έξυπνους μετατροπείς και συστήματα ελέγχου Volt-Var για να μετριάσουν την αύξηση της τάσης και τις διακυμάνσεις που προκαλούνται από τα DER. Οι προηγμένες τεχνικές διαχείρισης δικτύου, όπως ο κατακεντρωμένος έλεγχος τάσης και η συντονισμένη φόρτιση για ηλεκτρικά οχήματα, μπορούν να βοηθήσουν στην εξισορρόπηση φορτίου και παραγωγής σε τοπικό επίπεδο. Τέλος, η στενή συνεργασία με τους TSOs είναι απαραίτητη για να εξασφαλιστεί η ασφάλεια και η διαχείριση της άεργου ισχύος [29].

1.9 Μοντέλα Γραμμών Μεταφοράς

Σημαντικό κομμάτι στην κατανόηση των Συστημάτων Μεταφορές είναι οι Γραμμές Μεταφορές. Για την αναπαράσταση των γραμμών μεταφοράς, απαιτείται ο προσδιορισμός τεσσάρων βασικών παραμέτρων, που καθορίζουν τη συμπεριφορά τους. Αυτές επηρεάζουν την τάση, τις απώλειες και συνολικά την απόδοση της μεταφοράς [34][35]:

(Σημείωση: Οι παρακάτω παράμετροι αφορούν τις γραμμές μεταφοράς **AC** και **όχι τις DC**, αφού δεν υπάρχουν οι όροι αυτεπαγωγή και εγκάρσια χωρητικότητα)

- Αυτεπαγωγή (L)
- Εγκάρσια χωρητικότητα (C)
- Ωμική αντίσταση (R)
- Εγκάρσια αγωγιμότητα (G)

Η Διαφορά μεταξύ των Συστημάτων AC και DC όσον αναφορά σε αυτές τις παραμέτρους, συμπυκνώνονται στο πίνακα παρακάτω

Πίνακας Error: Reference source not found.2 Διαφορές στις Παραμέτρους AC και DC

	Παράμετρος	Μεταφορά AC	Μεταφορά DC
1	Αυτεπαγωγή (L)	Υπάρχει και συνεισφέρει στην επαγωγική αντίδραση ($X_L = 2\pi fL$)	Δεν υπάρχει
2	Εγκάρσια Χωρητικότητα (C)	Επηρεάζει την φόρτιση/εκφόρτιση της γραμμής $B = \frac{1}{X_C} = 2\pi fC$	Δεν υπάρχει
3	Ωμική Αντίσταση (R)	Επηρεάζει τις απώλειες	Επηρεάζει τις απώλειες
4	Εγκάρσια Αγωγιμότητα (G)	Συμβάλει στις απώλειες λόγω διαρροής	Συμβάλει στις απώλειες λόγω διαρροής

Οι γραμμές μεταφοράς διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες με βάση το μήκος τους:

Πίνακας Error: Reference source not found.3 Σύγκριση Μοντέλων Γραμμών Μεταφοράς

Τύπος	Μήκος (km)	Μοντέλο που χρησιμοποιείται
Μικρού μήκους	<80 km	Απλοποιημένο μοντέλο (μόνο ωμική και επαγωγική αντίσταση)
Μεσαίου μήκους	80-240 km	Μοντέλο T και μοντέλο Π (συνυπολογίζεται η εγκάρσια χωρητικότητα)
Μεγάλου μήκους	>240 km	Κατανεμημένο μοντέλο (οι παράμετροι θεωρούνται συνεχώς κατανεμημένες)

Κάθε μοντέλο περιγράφεται με διαφορετικές εξισώσεις ABCD, που προσδιορίζουν τις σχέσεις μεταξύ τάσεων και ρευμάτων [34].

Η βασική εξίσωση που ισχύει τόσο για το εναλλασσόμενο (AC) όσο και για το συνεχές ρεύμα (DC) είναι:

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix}$$

όπου οι παράμετροι ABCD καθορίζουν τα βασικά χαρακτηριστικά της γραμμής μεταφοράς.

- Οι τιμές V_S , I_S αντιπροσωπεύουν την φασική τάση και το φασικό ρεύμα στην αναχώρηση της γραμμής
- Οι τιμές V_R , I_R αντιστοιχούν στην φασική τάση και το φασικό ρεύμα στο άκρο άφιξης της γραμμής [35]

1.9.1 Παράμετροι γραμμών Μεταφοράς για Εναλλασσόμενο και Συνεχές Ρεύμα

Οι ακόλουθες παράμετροι καθορίζουν τα χαρακτηριστικά της γραμμής μεταφοράς και χρησιμοποιούνται για την ανάλυση της συμπεριφοράς της όσον αφορά την τάση, το ρεύμα και τις απώλειες. Το κάθε είδος γραμμής μεταφοράς (AC ή DC) λαμβάνει υπόψιν του και διαφορετικές παραμέτρους

1.9.1.1 Σειριακές Παράμετροι (AC & DC)

1.9.1.1.1 Γραμμές AC

Αυτές επηρεάζουν την αντίσταση και επαγωγικότητα της γραμμής μεταφοράς

- $z_{AC} = r + jx_L \rightarrow$ σύνθετη αντίστασης σειράς (ανά φάση) ανά μονάδα μήκους (περιλαμβάνει την ωμική αντίσταση και την επαγωγική αντίδραση της γραμμής

$r \rightarrow$ ωμική αντίσταση ΓΜ ανά φάση και ανά μονάδα μήκους Ω / m

(λόγω αγωγίμου υλικού)

$x_L = 2\pi fL \rightarrow$ επαγωγική αντίδραση ΓΜ ανά φάση και ανά μονάδα μήκους Ω / m

(λόγω μαγνητικών πεδίων στη γραμμή)

$L \rightarrow$ αυτεπαγωγή της ΓΜ ανά φάση και ανά μονάδα μήκους H / m

(εξαρτάται από την γεωμετρία της γραμμής και το μαγνητικό πεδίο) [35]

1.9.1.1.2 Γραμμές DC

Δεν ισχύουν οι όροι επαγωγικής αντίδρασης και αυτεπαγωγής, καθώς το ρεύμα δεν αλλάζει κατεύθυνση

- $z_{DC} = r \rightarrow$ Η σύνθετη αντίσταση είναι μόνον η ωμική

1.9.1.2 Εγκάρσιες Παράμετροι (AC & DC)

1.9.1.2.1 Γραμμές AC

Αυτές σχετίζονται με την χωρητικότητα και την διαρροή ρεύματος στην γείωση

- $y_{AC} = g + jb \rightarrow$ σύνθετη εγκάρσια αγωγιμότητα (ανά φάση) ανά μονάδα μήκους (Αποτελείται από την ωμική αγωγιμότητα και τη χωρητική αγωγιμότητα)

$g \rightarrow$ εγκάρσια ωμική αγωγιμότητα ΓΜ ανά φάση και ανά μονάδα μήκους Ω^{-1} / m

(Αντιπροσωπεύει τις απώλειες λόγω διαρροής της γραμμής)

$b = 2\pi fC \rightarrow$ εγκάρσια χωρητική αγωγιμότητα ΓΜ ανά φάση και ανά μονάδα μήκους Ω^{-1} / m

(Σχετίζεται με το ηλεκτρικό πεδίο που αναπτύσσεται μεταξύ των αγωγών)

$C \rightarrow$ εγκάρσια χωρητικότητα της ΓΜ ανά φάση και ανά μονάδα μήκους F / m
καθορίζει το φορτίου που μπορεί να αποθηκευτεί μεταξύ των αγωγών [35]

1.9.1.2.2 Γραμμές DC

Στις γραμμές DC δεν λαμβάνεται υπόψιν ο μιγαδικός όρος της σύνθετης εγκάρσιας αγωγιμότητας, άρα

- $y_{DC} = g$

1.9.1.3 Συνολικές Παράμετροι για Μήκος Γραμμής l

Αφορούν την συνολική αντίσταση και αγωγιμότητα για ολόκληρη τη γραμμή

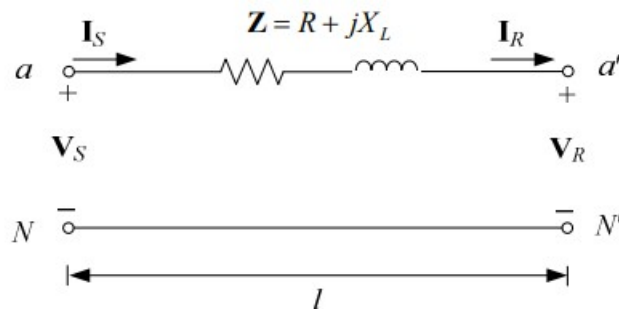
- $Z = zl \rightarrow$ συνολική σύνθετη αντίστασης σειράς για μήκος γραμμής l
- $Y = yl \rightarrow$ συνολική σύνθετη αγωγιμότητα σειράς για μήκος γραμμής l

Έτσι για τα τρία μοντέλα γραμμών μεταφοράς έχουμε και διαφορετικές εξισώσεις που τα περιγράφουν.

1.9.2 Μοντέλο Γραμμής Μεταφοράς Μικρού Μήκους

Το μοντέλο μικρού μήκους εφαρμόζεται σε γραμμές μεταφοράς έως 80 km, όπου η χωρητικότητα θεωρείται αμελητέα. Ως εκ τούτου, η συμπεριφορά της γραμμής περιγράφεται αποκλειστικά από τη σύνθετη αντίσταση σειράς: $Z = R + jX_L$

Το ισοδύναμο κύκλωμα αναπαρίσταται ως εξής:



Εικόνα Error: Reference source not found.22 «Μονοφασικό ισοδύναμο μοντέλο μικρού μήκους τριφασικής γραμμής μεταφοράς»

Η σχέση μεταξύ τάσης και ρεύματος στα δύο άκρα της γραμμής δίνεται από την εξίσωση

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & Z \\ C & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix}$$

Η τάση αναχώρησης (V_S) σχετίζεται με την τάση στο άκρο άφιξης (V_R) και την πτώση τάσης λόγω της αντίστασης Z της γραμμής

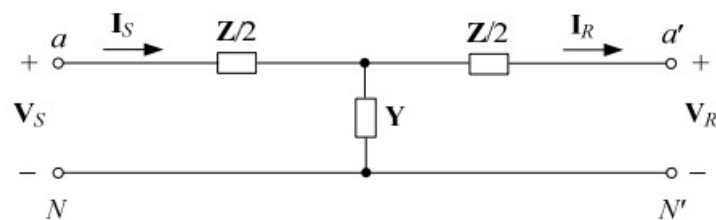
Το ρεύμα εισόδου (I_S) είναι ίσο με το ρεύμα εξόδου (I_R), καθώς η χωρητικότητα αμελείται [34]

1.9.3 Μοντέλο Γραμμής Μεταφοράς Μεσαίου Μήκους

Για γραμμές μεταφοράς μήκους 80 - 240 km, η χωρητικότητα δεν μπορεί να παραλειφθεί. Έτσι, η ανάλυση απαιτεί την εισαγωγή εγκάρσιων παραμέτρων. Για αυτό το λόγο, χρησιμοποιούνται δύο μοντέλα: το μοντέλο T και το μοντέλο Π, τα οποία λαμβάνουν υπόψη τη συνολική σύνθετη αντίσταση και αγωγιμότητα της γραμμής.

1.9.3.1 Μοντέλο T

Το μοντέλο T θεωρεί ότι η γραμμή μεταφοράς αποτελείται από δύο μισές αντιστάσεις σειράς και μία κεντρική εγκάρσια αγωγιμότητα.



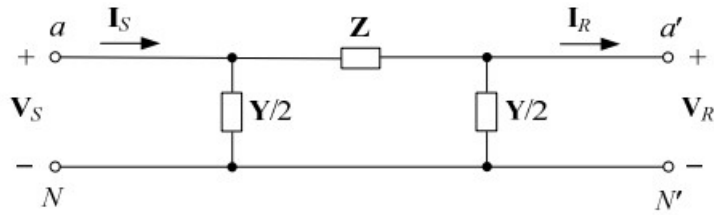
Εικόνα Error: Reference source not found.23 Ονομαστικό κύκλωμα T γραμμής μεταφοράς μεσαίου μήκους

Η αντίστοιχη μαθηματική εξίσωση δίνεται από:

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + \frac{Z \cdot Y}{2} & Z \cdot (1 + \frac{Z \cdot Y}{4}) \\ Y & 1 + \frac{Z \cdot Y}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix}$$

1.9.3.2 Μοντέλο Π

Το μοντέλο Π (Π) αναπαριστά την εγκάρσια χωρητικότητα ($Y/2$) ως δύο ισοδύναμες χωρητικές αγωγιμότητες στα άκρα της γραμμής, με τη συνολική σύνθετη αντίσταση (ZZZ) στο κέντρο.



Εικόνα Error: Reference source not found.24 Ονομαστικό κύκλωμα Π γραμμής μεταφοράς μεσαίου μήκους

Η μαθηματική εξίσωση δίνεται από την εξίσωση:

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + \frac{Z \cdot Y}{2} & Z \\ Y \cdot (1 + \frac{Z \cdot Y}{4}) & 1 + \frac{Z \cdot Y}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} \quad [34]$$

1.9.4 Μοντέλο Γραμμής Μεταφοράς Μεγάλου Μήκους

Το συγκεκριμένο μοντέλο χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των τάσεων και των ρευμάτων σε γραμμές μεταφοράς μεγάλων αποστάσεων. Η διαφορά του από τα προηγούμενα μοντέλα είναι ότι οι παράμετροι της γραμμής δεν θεωρούνται συγκεντρωμένες, αλλά αντίθετα κατανέμονται ομοιόμορφα σε όλο το μήκος του αγωγού.

Στις γραμμές μεταφοράς μεγάλου μήκους, οι ηλεκτρικές εξισώσεις εξαρτώνται από τη μετρούμενη απόσταση x κατά μήκος της γραμμής. Έτσι, η τάση και το ρεύμα σε οποιοδήποτε σημείο υπολογίζονται με βάση την απόσταση x από την αρχή της γραμμής.

1.9.4.1 Διαφορική Αναπαράσταση της Γραμμής Μεταφοράς

Η γενική εξίσωση που συνδέει τις τιμές τάσης και ρεύματος μεταξύ δύο σημείων της γραμμής μεταφοράς είναι:

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V(x) \\ I(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma \cdot x) & Z_C \cdot \sinh(\gamma \cdot x) \\ \frac{\sinh(\gamma \cdot x)}{Z_C} & \cosh(\gamma \cdot x) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix},$$

Όπου $Z_C = \sqrt{\frac{Z}{Y}} \rightarrow$ είναι η χαρακτηριστική αντίσταση της γραμμής μεταφοράς (Ω)

Και $\gamma = \sqrt{x \cdot Y} \rightarrow$ σταθερά μετάδοσης της γραμμής μεταφοράς

Ενώ για αρχικές συνθήκες, δηλαδή ($x = 0$), επιβάλλουν ότι

$$V(0) = V_R, I(0) = I_R$$

που σημαίνει ότι η τάση και το ρεύμα στο αρχικό σημείο της γραμμής ισούνται με τις αντίστοιχες τιμές στο άκρο άφιξης [34].

1.9.4.2 Σχέση του Μοντέλου Μεγάλου Μήκους με Μοντέλο Π & Τ

Για τη γραμμή μεταφοράς μεγάλου μήκους, είναι δυνατόν να προσεγγίσουμε το σύστημα χρησιμοποιώντας τα μοντέλα Π και Τ, με μικρές προσαρμογές στις μαθηματικές εξισώσεις.

1.9.4.2.1 Μοντέλο Π

Για το μεν μοντέλο Π, το ισοδύναμο κύκλωμα περιγράφεται από την εξίσωση:

$$\begin{bmatrix} 1 + \frac{Z' \cdot Y'}{2} & Z' \\ Y' \cdot (1 + \frac{Z' \cdot Y'}{4}) & 1 + \frac{Z' \cdot Y'}{2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma \cdot x) & Z_c \cdot \sinh(\gamma \cdot x) \\ \frac{\sinh(\gamma \cdot x)}{Z_c} & \cosh(\gamma \cdot x) \end{bmatrix}$$

1.9.4.2.2 Μοντέλο Τ

Και το δε Τ ισχύει ακολούθως

$$\begin{bmatrix} 1 + \frac{Z'' \cdot Y''}{2} & Z'' \cdot (1 + \frac{Z'' \cdot Y''}{4}) \\ Y'' & 1 + \frac{Z'' \cdot Y''}{2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma \cdot x) & Z_c \cdot \sinh(\gamma \cdot x) \\ \frac{\sinh(\gamma \cdot x)}{Z_c} & \cosh(\gamma \cdot x) \end{bmatrix} \quad [34]$$

2 Ανθεκτικότητα (Resilience)

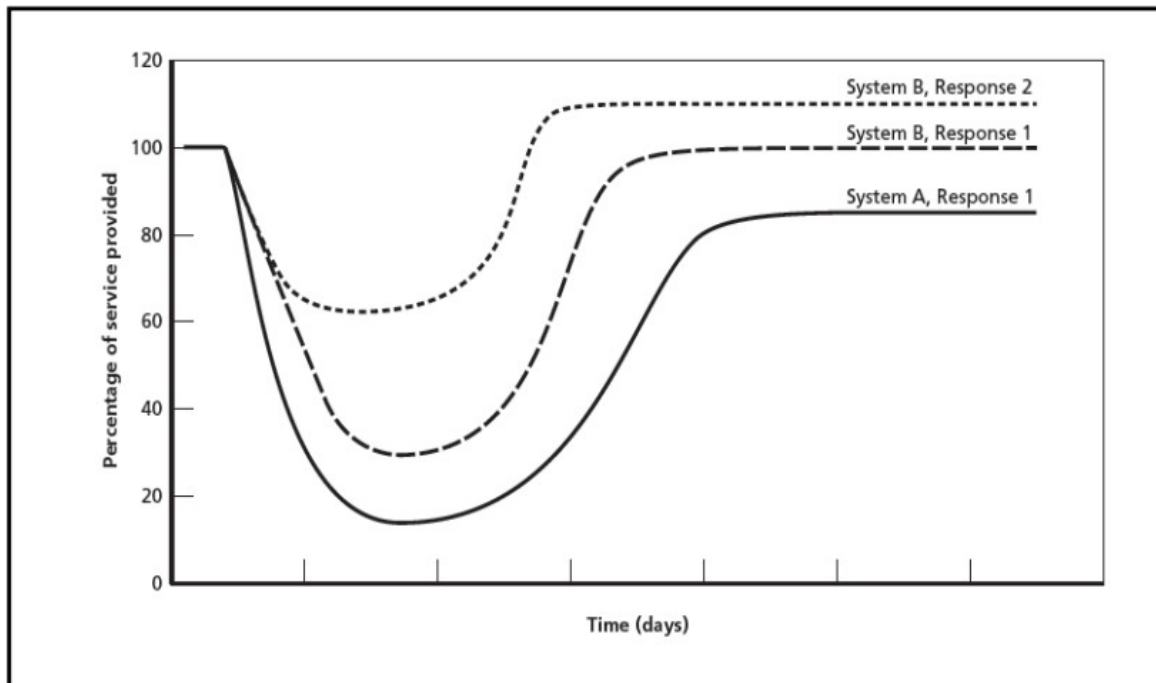
2.1 Η έννοια της Ανθεκτικότητας (Resilience)

Διάφοροι ορισμοί έχουν προσπαθήσει να αποτυπώσουν την έννοια της ανθεκτικότητας όμως δεν υπάρχει ένας κοινώς αποδεχόμενος. Το CIGRE την ορίζει ως «την ικανότητα να περιορίζει την έκταση, την σοβαρότητα και την διάρκεια ενός υποβαθμισμένου συστήματος μετά από κάποιο ακραίο γεγονός». Η IEEE δίνει έναν άλλον ορισμό «την ικανότητα να αντέχει και να μειώνει το μέγεθος και/ή την διάρκεια των διαταρακτικών γεγονότων, η οποία περιλαμβάνει την δυνατότητα να προβλέπει, να απορροφά, να προσαρμόζεται και/ή να ανακάμπτει γρήγορα από τις διαταραχές αυτές [28]. Ενώ ένας άλλος [14] αναφέρεται «στην ικανότητα προετοιμασίας και προσαρμογής σε μεταβαλλόμενες συνθήκες και την ικανότητα να αντέχει και να ανακάμπτει γρήγορα το σύστημα από διαταραχές. Η ανθεκτικότητα περιλαμβάνει την ικανότητα να αντέχει από εσκεμμένες επιθέσεις, ατυχήματα ή φυσικές απειλές ή περιστατικά».

Η ανθεκτικότητα δεν λαμβάνει υπόψιν απλά την κατάσταση του δικτύου και των υπηρεσιών που παρέχει σε περίπτωση σφάλματος, αλλά υπολογίζει τον χρόνο, την ποιότητα και την γεωγραφική θέση του σφάλματος στο δίκτυο [14]. Ένας κοινός παρονομαστής της έννοιας της ανθεκτικότητας έχει σχέση με

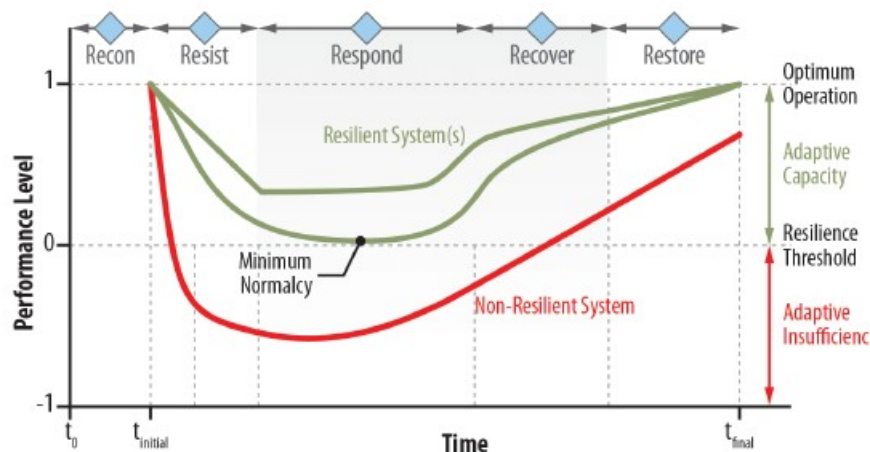
- 1) την πρόληψη
- 2) τον μετριασμό των πιθανών επιπτώσεων της διαταραχής και
- 3) την γρήγορη αποκατάσταση του συστήματος που έχει πληγεί [28].

Ένα σύστημα του οποίου ο σχεδιασμός έχει γίνει λαμβάνοντας υπόψιν πιθανές απειλές πιθανόν να έχει καλύτερη ανταπόκριση στην αντιμετώπιση προβλημάτων. Φυσικά όσο πιο πολύ επένδυση έχει γίνει για την ανθεκτικότητα ενός συστήματος, όσο αναφορά την εφεδρική προστασία και ανάκτηση, τόσο πιο ισχυρό είναι απέναντι στην εκκαθάριση σφαλμάτων. Η συνεχής συντήρηση και αναβάθμιση οδηγεί σε καλύτερη απόδοση αν και αυτό λειτουργεί συχνά σε υψηλότερο κόστος. Στην παρακάτω εικόνα διαφαίνεται η απόκριση του συστήματος σε διαφορετικές περιπτώσεις ανθεκτικότητας [14].



Εικόνα Error: Reference source not found.25 Διαφορετικές αποκρίσεις, με αυτήν του συστήματος A να είναι χειρότερη σε σχέση με τον B και το B2 έχει καλύτερη απόδοση σε σχέση με αυτήν του B1, που οδηγούν σε ξεχωριστά επίπεδα ανθεκτικότητας σε διαφορετικά κόστη [14]

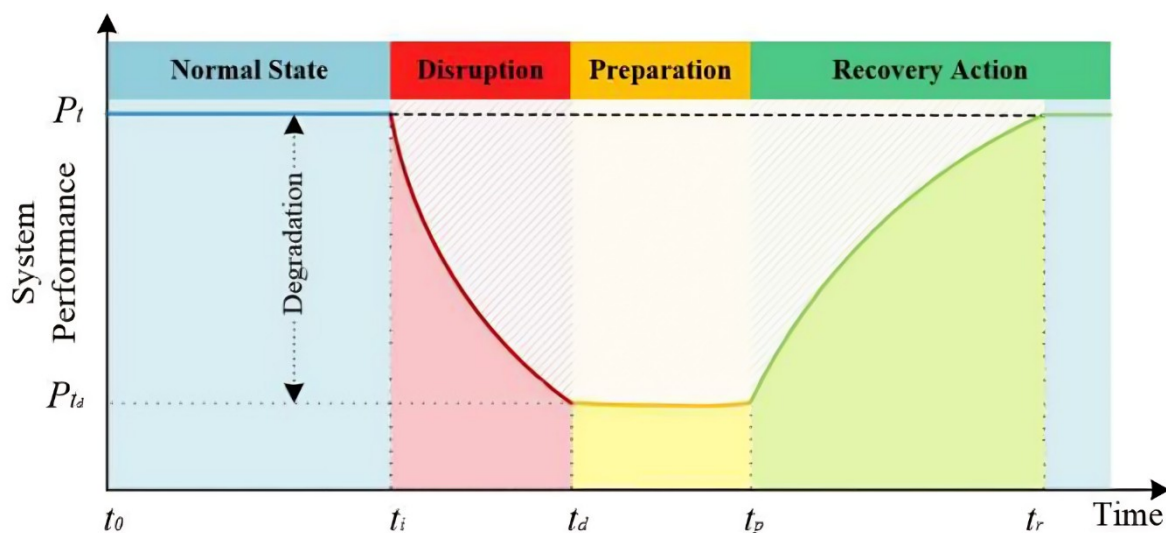
Μια άλλη αποτύπωση της ανθεκτικότητας μπορεί να γίνει βάσει των σταδίων τα οποία περνάει ένα σύστημα όταν προκαλείται σε αυτό κάποια μεγάλης κλίμακας διαταραχή. Η ανάλυση της ανθεκτικότητας γίνεται με βάση δύο καταστάσεις σύμφωνα με το [28], βάσει λειτουργίας και βάσει σχεδιασμού (operation based & planning based). Η πρώτη αφορά στην προστασία και στον έλεγχο του συστήματος με τα διαθέσιμα μέσα που έχει το σύστημα ώστε να παραμείνει σε λειτουργία κατά την διάρκεια και μετά το πέρας της διαταραχής και το δεύτερο αφορά στην βελτίωση του σχεδιασμού του δικτύου και στην ικανότητά του να αντέχει σε γνωστές διαταραχές Σχηματικά, η κατάσταση λειτουργίας του ΣΗΕ παρουσιάζεται παρακάτω με βάση τα στάδια στα οποία υπεισέρχεται σε περίπτωση βλάβης. [28].



Εικόνα Error: Reference source not found.26 Καμπύλη ανθεκτικότητας του ΣΗΕ σε διαταραχές και επιπτώσεις [28].

Τα στάδια αυτά περιγράφουν την κατάσταση λειτουργίας πριν, κατά την διάρκεια και μετά την διαταραχή και αναφέρονται ως «5 Rs» της ανθεκτικότητας. « Recon, resist, respond, recover, restore» δηλαδή, «ανασυγκρότηση, αντίσταση, ανταπόκριση, ανάκτηση και αποκατάσταση». Η φάση σχεδιασμού αφορά στην ετοιμότητα του συστήματος πριν την διαταραχή (recon) και μετά από αυτήν (restore) , ενώ η φάση λειτουργίας αναφέρεται στην ικανότητα μείωσης της ζημίας (resist), ανταπόκρισης (respond) και γρήγορης επαναφοράς του συστήματος (recover) [28].

Μία άλλη προσέγγιση, καθορίζει τέσσερα στάδια στην περίπτωση «υψηλής σημασίας χαμηλής πιθανότητας/συχνότητας» διαταραχών («High Importance Low Probability/Frequency»). Το πρώτο είναι στην κατάσταση κανονικής λειτουργίας, «Normal State», στην οποία το σύστημα λειτουργεί κανονικά ($t_0 < t < t_i$). Το δεύτερο είναι η κατάσταση διαταραχής «Disruption State» στην αρχή της οποίας, ($t_i < t < t_d$) συμβαίνει μία διαταραχή HILF και η λειτουργία και αξιοπιστία του συστήματος αρχίζει να φθίνει. Το τρίτο είναι το στάδιο της προετοιμασίας «Preparation State», στο οποίο γίνεται αξιολόγηση των κινδύνων ($t_d < t < t_p$) και τέλος είναι η κατάσταση ανάκαμψης «Recovery State» στην οποία γίνονται οι αλλαγές και οι επιδιορθώσεις ώστε το σύστημα να λειτουργήσει και πάλι κανονικά ($t_p < t < t_r$). Σχηματικά η καμπύλη ανθεκτικότητας μπορεί να λάβει και αυτή την μορφή [36].



Εικόνα Error: Reference source not found.27 Καταστάσεις που υπεισέρχεται το σύστημα σε περίπτωση HILF [36]

2.1.1 Δυσκολία εξασφάλισης της ανθεκτικότητας

Η δυσκολία στην εξασφάλιση της ανθεκτικότητας στα συστήματα ενέργειας, έγκεινται σε δύο απαιτήσεις. Η πρώτη αφορά στην πρόβλεψη των επικίνδυνων φαινομένων, της αναγκαίας

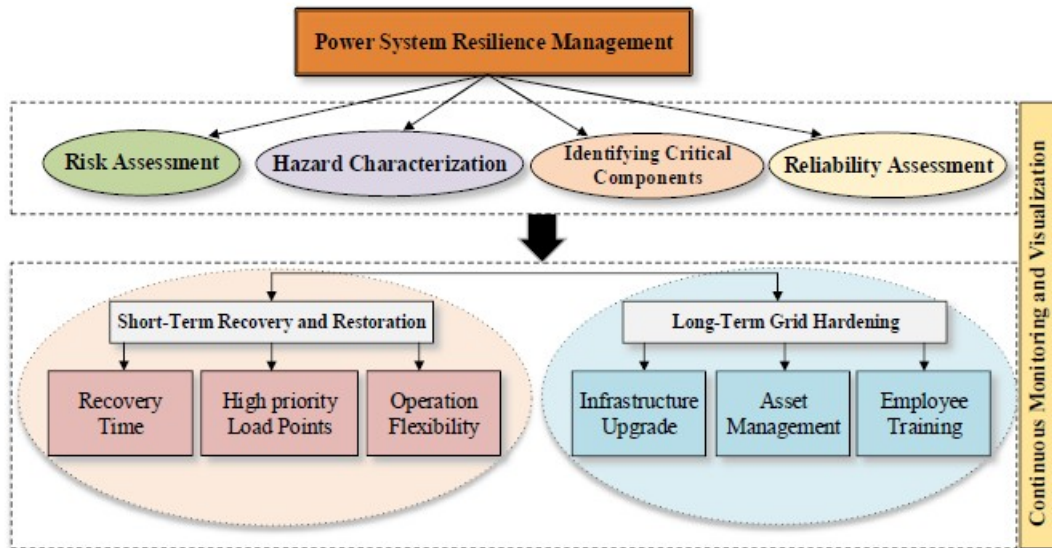
χωρητικότητας και τοποθέτησης των συστημάτων αποθήκευσης. Η δεύτερη δυσκολία εντοπίζεται στην ιεράρχηση επισκευής των εξοπλισμών που έχουν χτυπηθεί και στην αξιολόγησή τους για την σημαντικότητα στην λειτουργίας του ΣΗΕ. Η αντικατάσταση των οποίων μπορεί να είναι χρονοβόρα, οδηγώντας το σύστημα σε μεγάλες περιόδους διακοπών [36].

2.1.2 Διαχείριση εργασιών για βελτίωση της Ανθεκτικότητας

Ένας τρόπος για να βελτιωθεί η ανθεκτικότητα του δικτύου, είναι η αξιολόγηση και οργάνωση των διάφορων σταδίων στα οποία υπεισέρχεται το σύστημα. Αρχικά θα πρέπει να ορίζονται οι δείκτες μέτρησης της ανθεκτικότητας και ποσοτικοποίησης της ώστε να μπορεί να συγκριθεί μία προτεινόμενη μέθοδος με μίαν άλλη. Στη συνέχεια καθορίζεται η «φύση» της διαταραχής, αν προέρχεται από μια φυσική καταστροφή, από κυβερνοεπίθεση ή από σφάλμα ανθρώπου και καθορίζεται ένα χρονικό πλαίσιο στο οποίο θα ληφθούν αποφάσεις για την επιδιόρθωση του σφάλματος.

Αφού έχει καθοριστεί το πρόβλημα που πρέπει να αντιμετωπιστεί συνέχεια έχει η αξιολόγηση κινδύνου από αυτήν την καταστροφή. Μια μέθοδος ποσοτικοποίησης πρέπει να κατασκευαστεί ώστε να καθοριστούν η λειτουργία του συστήματος και η τρωτότητα των υποδομών στην περίπτωση διαταραχής. Τέλος από τα αποτελέσματα των δεικτών μέτρησης και των μεθόδων ποσοτικοποίησης, προτείνεται ένα μοντέλο ανάκαμψης σύμφωνα με το οποίο θα γίνουν οι επισκευές και η επαναλειτουργία του συστήματος.

Η επαναλειτουργία αυτή και η ενίσχυση της ανθεκτικότητας, μπορούν να δομηθούν βάσει δύο στρατηγικών. Μακροπρόθεσμη ενδυνάμωση του συστήματος, ή βραχυπρόθεσμη ανάκαμψη του συστήματος. Η μακροπρόθεσμη εστιάζει στην αναβάθμιση του δικτύου, στην αξιοποίηση των υπαρχόντων πόρων και στην εκπαίδευση των εργαζομένων, ενώ η βραχυπρόθεσμη αναλαμβάνει να καθορίσει τον χρόνο αποκατάστασης, την παροχή φορτίου σε υψηλής προτεραιότητας καταναλωτές και στην ευελιξία του δικτύου. Σχηματικά η οργάνωση του συστήματος με στόχο την βελτιστοποίηση της ανθεκτικότητάς του παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα [36].



Εικόνα Error: Reference source not found.28 Αξιολόγηση συστήματος βάσει βραχυπρόθεσμης και μακροπρόθεσμης στρατηγικής [36].

2.2 Δείκτες ανθεκτικότητας στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας

Οι δείκτες για την αποτύπωση της ανθεκτικότητας του δικτύου, από ενδεχόμενες διακοπές ή σφάλματα, χρησιμοποιούνται ως συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (PDF). Ανάλογα με την πολυπλοκότητα του συστήματος, ο τρόπος υπολογισμού της PDF μπορεί να διαφέρει [56]. Πάντως, ο τρόπος δημιουργίας ενός δείκτη μέτρησης της ανθεκτικότητας θα πρέπει να ακολουθεί ορισμένα πλαίσια και να αποτυπώνει ορισμένες πτυχές του προβλήματος. Αρχικά «το πλαίσιο του δείκτη ανθεκτικότητας ορίζεται ως η πιθανότητα της επίπτωσης X δεδομένου της απειλής Y» [56]. Για να είναι χρήσιμος ο δείκτης, θα πρέπει να εξασφαλίζονται ορισμένα βασικά χαρακτηριστικά, όπως η δυνατότητα σύγκρισης μεταξύ συστημάτων και η εφαρμογή του για λήψη αποφάσεων σε πραγματικές εφαρμογές κ.α.. Μερικοί τυπικοί δείκτες ανθεκτικότητας είναι οι επόμενοι [14].

2.2.1 Αντίκτυπος απώλειας εσόδων (LRI)

Χρησιμοποιεί ως οικονομικός δείκτης που αντικατοπτρίζει τα έσοδα που χάνει η επιχείρηση κοινής ωφελείας, η μέτρησή του γίνεται ως εξής:

$$LRI = \sum_i \sum_j C_j (PL_j^U - PL_{j,t}^D) \Delta t (1)$$

όπου,

PL_j^U = μέγιστο φορτίο υπό κανονική λειτουργία για το j-οστό φορτίο

$PL_{j,t}^D$ = μέγιστο φορτίο μετά το t-οστό βήμα ανάκαμψης έχει ολοκληρωθεί για το j-οστό φορτίο
 Δt = διάρκεια του t-οστό βήματος
 C_j = Συντελεστής στάθμισης για το j-οστό φορτίο [14]

2.2.2 Συνολική Αποκατάσταση (TR)

Συμπεριλαμβάνει τους συνολικούς πόρους που χρησιμοποιήθηκαν κατά την διάρκεια ανάκαμψης του συστήματος στην περίπτωση μιας καταστροφής.

$$TR = \sum_t \left\{ \sum_i LC_i \times LC_{i,t} + \left(\sum_k UC_k \times R_{pk,t} \right) + \left(\sum_m [C_{m,t} - C_{m,u}] \times P_{m,t} \Delta t \right) \right\}$$

Όπου,

LC_i = κόστος εργασίας ανά ώρα της κατηγορίας i

$L_{i,t}$ = ώρες εργασίας ατόμου στην κατηγορία i κατά την διάρκεια του t-οστού βήματος επισκευής

UC_k = κόστος ανταλλακτικού στην κατηγορία k

$R_{pk,t}$ = αποσότητα ανταλλακτικών της κατηγορίας k που χρησιμοποιήθηκαν στο t-οστό βήμα επισκευής

$C_{m,u}$ = κόστος λειτουργίας της γεννήτριας σε κανονικές συνθήκες

$C_{m,t}$ = κόστος λειτουργίας της γεννήτριας στο t-οστό βήμα

$P_{m,t}$ = ωριαία ισχύς που παράγεται από την γεννήτρια m κατά την διάρκεια του t-οστού χρονικού βήματος

2.2.3 Ανάκτηση Ανθεκτικότητας (RR)

Αντικατοπτρίζει την συνολική επίπτωση της φυσικής καταστροφής στο σύστημα, η οποία καθορίζεται από έναν συγκεκριμένο αλγόριθμο ελέγχου. Εφαρμόζεται ένας συντελεστής στάθμισης για την σχετική σημασία της LRI και της TR.

$$RR = \frac{LRI + \lambda TR}{\sum_t \sum_j C_j (PL_j^U) \Delta t}$$

Όπου,

λ = συντελεστής στάθμισης που δείχνει τη σχέση μεταξύ της μεταφερόμενης ισχύος και των πόρων ανάκαμψης

$\lambda < 1$ δίνεται προτεραιότητα για την ροή ισχύος στο φορτίο

$\lambda > 1$ δίνεται προτεραιότητα για τους πόρους ανάκαμψης

$\lambda = 1$ εξίσου ίσα

Στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας ο τρόπος για την αποκατάσταση της ενέργειας γίνεται μέσω μιας συγκεκριμένης διαδικασίας που αξιολογεί την διαμόρφωση του συστήματος και των εξαρτημάτων που έχουν υποστεί βλάβη. Έπειτα γίνεται ιεράρχηση στην επισκευή των βλαβών και ο προγραμματισμός τους, ενώ μόλις το σύστημα λειτουργεί και πάλι γίνεται υπολογισμός των δεικτών ανθεκτικότητας [14].

2.3 Στρατηγικές Βελτίωσης της Ανθεκτικότητας

Η έννοια της ανθεκτικότητας του δικτύου έχει αναδειχθεί ως κρίσιμη προτεραιότητα για τη διασφάλιση της σταθερής παροχής ενέργειας τόσο στα συστήματα μεταφοράς όσο και στο δίκτυο διανομής. Οι προκλήσεις που προκύπτουν από την αυξανόμενη ενσωμάτωση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) και τη μείωση των παραδοσιακών μονάδων παραγωγής ενέργειας, απαιτούν να εξεταστεί μια διαφορετική προσέγγιση που περιλαμβάνει τον σχεδιασμό της τοπολογίας του συστήματος, την τοποθέτηση συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας (Energy Storage Systems), τη δημιουργία ανθεκτικών δικτύων και τον προσδιορισμό της κατάλληλης χωρητικότητάς τους [14] [36] [37].

2.3.1 Η σημασία των τοπολογικών διαμορφώσεων

Μέσω της διαμόρφωσης της τοπολογίας του συστήματος, κατά την διάρκεια λειτουργίας αλλά και κατά την διάρκεια επέκτασής, μπορούν να μετριαστούν τα σφάλματα και να επανέλθει το σύστημα σε κατάσταση κανονικής λειτουργίας γρηγορότερα.

2.3.1.1 Έλεγχος τοπολογίας μέσω Transmission Line Switching -TLS

Όπως η αλλαγή της τοπολογίας του συστήματος για αντιμετώπιση τυχόν σφαλμάτων σε κανονικές περιπτώσεις λειτουργία βελτιώνει την απόδοση του συστήματος, έτσι και σε επείγουσες περιπτώσεις, ο έλεγχος διακοπής γραμμής μεταφοράς «Transmission Line Switching» (TLS) αποδεικνύεται ωφέλιμος. Από την φύση του το ρεύμα θα βρει τον βέλτιστο τρόπο ροής στα σύστημα μεταφοράς περιορίζοντας τυχόν υπερ-υποτάσεις που μπορεί να προκύψουν [36].

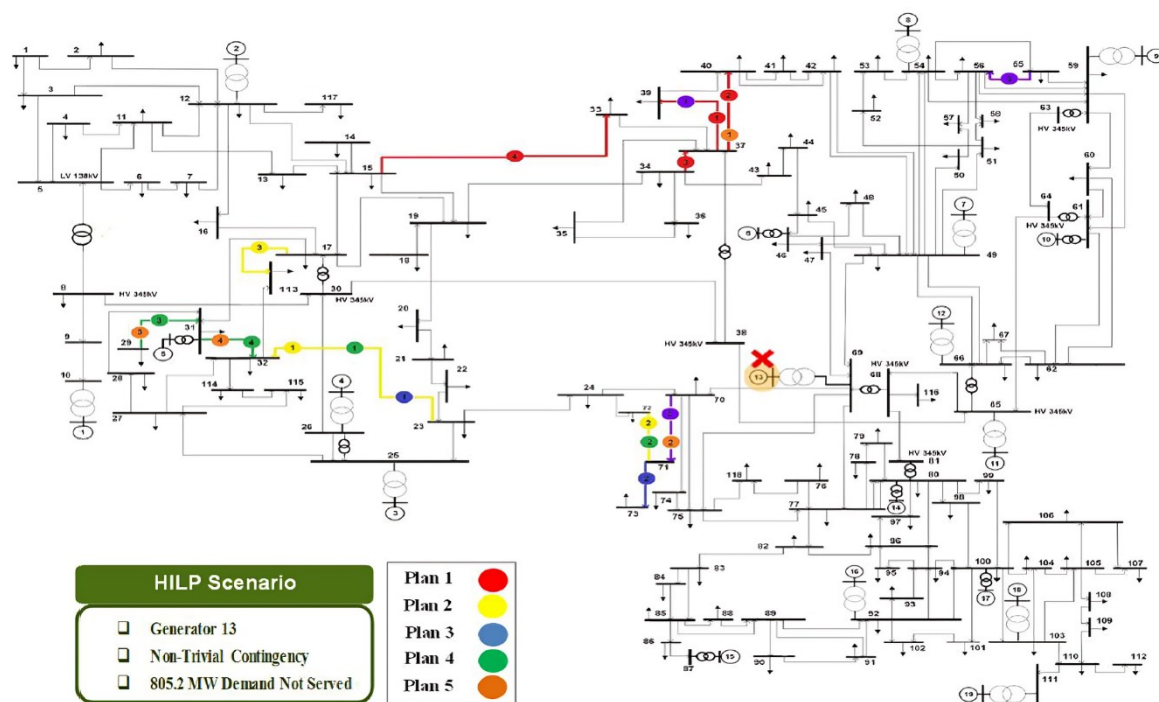
Η μέθοδος που προτείνεται χρησιμοποιεί έλεγχο τοπολογίας, «topology control» και μέσω μεικτού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού στοχεύεται η βελτιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης που καθρεφτίζει την ανθεκτικότητα του συστήματος. Μέσω μονάδων μέτρησης που έχουν δημιουργηθεί γίνεται η σύγκριση των αποτελεσμάτων.

Η προσομοίωση πραγματοποιείται στον IEEE 118-bus και εφαρμογές της μεθόδου TLS ενσωματώνονται στο πρόγραμμα ώστε να προκύψουν διαφορετικές τοπολογίες για κάθε σενάριο σφάλματος. Η γεννήτρια με την μεγαλύτερη παραγωγικότητα τίθεται εκτός λειτουργίας

και το 72,6% της παραγωγής που χάθηκε μπορεί να αναπληρωθεί από τις υπόλοιπες γεννήτριες (generation re-dispatch). Για το υπόλοιπο ποσοστό της ισχύς που χάθηκε ο έλεγχος τοπολογίας τίθεται σε ισχύ και δημιουργούνται πέντε (5) πιθανά σενάρια τοπολογίας, καθ' ένα από τα οποία παρέχει και διαφορετικά επίπεδα ισχύς στο σύστημα. Σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να αναπληρωθεί το 97,3% της παραγωγής που χάθηκε και ο χρόνος αποκατάστασης φτάνει τα 40 λεπτά καθώς απαιτείται ένα διάστημα για ανακατανομή της παραγωγής.

Η επιλογή του διαθέσιμου σεναρίου λειτουργίας από τα εξαγόμενα της αντικειμενικής συνάρτησης καθορίζεται από διάφορους παράγοντες, όπως ο χρόνος αποκατάστασης, το ποσοστό αποκατάστασης της διαταραχής και η παροχή ισχύς σε φορτία προτεραιότητας. Ένα σενάριο μπορεί να εξασφαλίζει χαμηλότερα ποσοστά αποκατάστασης της βλάβης, αλλά μπορεί να παρέχει ισχύ σε φορτία προτεραιότητας πιο γρήγορα, τέτοια φορτία είναι κέντρα υγείας και νοσοκομεία, στρατιωτικές βάσεις και εξοπλισμός επικοινωνίας και εργοστάσια.

Το παράδειγμα TLS control παρατίθεται παρακάτω για τα πέντε διαφορετικά σενάρια λειτουργίας του συστήματος.

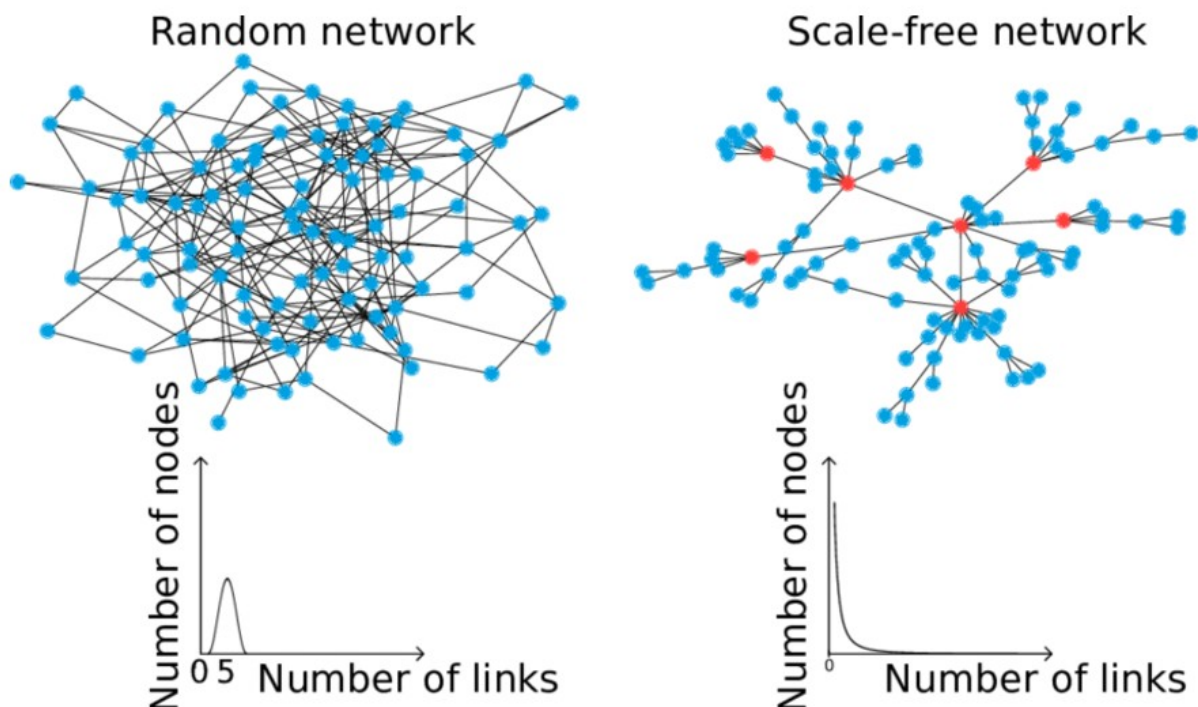


Εικόνα Error: Reference source not found.29 Παράδειγμα εφαρμογής του ελέγχου τοπολογίας μέσω TLS ενεργειών. Τα πέντε (5) βέλτιστα σενάρια λειτουργίας σε περίπτωση HILP

Όσο πιο διασυνδεδεμένο είναι ένα σύστημα, δηλαδή όσες περισσότερες συνδέσεις έχει με άλλα συστήματα μεταφοράς ή δίκτυα διανομής, τόσο μεγαλύτερη ευελιξία υπάρχει σε περίπτωση σφάλματος για την παροχή ισχύς στα απαιτούμενα φορτία μέσω και διαφορετικών διαδρομών [36].

2.3.1.2 Σύγκριση δικτύων

Δημιουργήθηκαν τρία διαφορετικά δίκτυα με σκοπό να αναλυθούν οι ιδιότητες του δικτύου της Νότιας Κορέας (KPG) σε σύγκριση με τα άλλα δύο είδη δικτύων. Το ένα από αυτά είναι το «random network» και το άλλο είναι «scale-free network». Η επιλογή των δύο βασίστηκε στην αντισυμμετρική συμπεριφορά τους στην κατανομή βαθμών «degree distribution» [38]. Η δημιουργία του γράφου του συστήματος της Νότιας Κορέας έγινε ως εξής. Τα εργοστάσια ηλεκτροπαραγωγής και οι υποσταθμοί ορίστηκαν ως οι κόμβοι (nodes) και οι γραμμές μεταφοράς ως ακμές (links). Για λόγους απλούστευσης ο γράφος που δημιουργήθηκε ήταν μη κατευθυνόμενος (undirected) και μη σταθμισμένος (unweighted) και ορίστηκε ως $G = (N, M)$, με N να είναι οι κόμβοι και M οι ακμές [38]. Παρακάτω παρατίθεται η μορφή των δύο δικτύων.



Εικόνα Error: Reference source not found.30 Τυχαίο δίκτυο(Random Network) και δίκτυο χωρίς κλίμακα (Scale-free Network) [39].

2.3.1.2.1 Random network

Το Random network κατασκευάζεται με σταθερή πιθανότητα συνδέσεις ανάμεσα στους κόμβους (εργοστάσια, υποσταθμοί). Οι περισσότεροι κόμβοι έχουν τον ίδιο αριθμό ακμών, κάτι που αποτυπώνεται στην γραφική παράσταση της άνωθεν εικόνας που έχει σχήμα καμπάνας, ενώ συνήθως το πλήθος των ακμών αυτών είναι πέντε.

2.3.1.2.2 Scale-free Network

Το Scale-free Network έχει διαφορετική κατασκευή. Υπάρχουν κάποιοι κεντρικοί κόμβοι (hubs), οι κόκκινοι, οι οποίοι συνδέονται με μεγαλύτερο αριθμό κόμβων σε σχέση με τους υπόλοιπους. Έτσι υπάρχουν διάσπαρτοι κάποιοι κόμβοι οι οποίοι συνδέονται με του hubs κόμβους [39]. Η έννοια αυτή αποτυπώνεται και στην γραφική αφού υπάρχουν λίγοι κόμβοι που έχουν πολλές συνδέσεις και πολλοί κόμβοι που έχουν λίγες συνδέσεις [39].

Η αρχιτεκτονική του KPG παρομοιάζεται με αυτήν του small-world network παρά το μεγάλο μήκος του για μεταφορά ενέργειας. Παρουσιάζει όμως υψηλό συντελεστή ομαδοποίησης (cluster coefficient) που σημαίνει ότι οι κόμβοι είναι στενά συνδεδεμένοι μεταξύ τους δημιουργώντας ομάδες [38].

Αναλύοντας χαρακτηριστικά μεγέθη των κόμβων (βαθμός, συντελεστής ομαδοποίησης, κεντρικότητα ενδιάμεσης θέσης) («degree, clustering coefficient, betweenness») και των ακμών (κατανομή βαθμών, μέσος συντελεστής ομαδοποίησης και αποτελεσματικότητα) («degree distribution, average clustering coefficient, efficiency»), προκύπτουν αποτελέσματα σχετικά με την ανθεκτικότητα του δικτύου σε σχέση με τα άλλα δύο [38].

2.3.1.3 Ανοχή σε σφάλματα και επιθέσεις

Τα τρία συστήματα υπεβλήθησαν σε απομάκρυνση των κόμβων τους υπό τρεις διαφορετικές περιπτώσεις. Η πρώτη απομάκρυνση έγινε τυχαία, η δεύτερη έγινε βάσει βαθμού (degree) του κόμβου και η τρίτη απομάκρυνση έγινε βάσει της betweenness του κόμβου. Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων έγινε με την χρήση των εξής μονάδων μέτρησης:

- 1) Κανονικοποιημένη αποτελεσματικότητα δικτύου («Normalized network efficiency»):

$E_n = E / E_0$, όπου E_0 είναι η αποτελεσματικότητα του δικτύου πριν την αφαίρεση του κόμβου και E η αποτελεσματικότητα μετά.

- 2) Κανονικοποιημένο μέγεθος του γιγαντιαίου στοιχείου «Normalized giant component size»:

$$N_n = N / N_0.$$

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα δίκτυα με τυχαία αφαίρεση του 20% των κόμβων τους ήταν πιο ανθεκτικά σε σχέση με την ίδια αφαίρεση κόμβων σε στοχευμένες περιοχές (degree based), η αποτελεσματικότητα E_n των οποίων έφτασε το μηδέν. Στην περίπτωση της στοχευμένης αφαίρεσης κόμβου, το scale-free αποδείχθηκε το πιο εύαλωτο (με την απομάκρυνση των κόκκινων κόμβων επιβαρύνεται βαρύτερα το σύστημα), μετά ήταν το KPG και τέλος το random. Ενώ τέλος στην απομάκρυνση βάσει betweenness το KPG έχει την χαμηλότερη απόδοση N_n .

Με τον υπολογισμό μόνο της υψηλής τάσης του δικτύου, μπορεί να υπερεκτιμηθεί η ανθεκτικότητα σε περίπτωση επίθεσης. Η μεγάλη ετερογένεια (διαφορετικός βαθμός των κόμβων, άλλοι κόμβοι πιο μεγάλο βαθμό, άλλοι πιο μικρό) του KPG και ο μεγάλος μέγιστο βαθμός των κόμβων καθιστούν το σύστημα ευάλωτο σε εσκεμμένες επιθέσεις.

2.3.1.4 Degree distribution

«Ο βαθμός ενός κόμβου σε ένα δίκτυο, είναι ο αριθμός των συνδέσεων ή των ακμών που έχει ο κόμβος σε όλους τους κόμβους και η κατανομή βαθμών είναι η κατανομή πιθανότητας αυτών των βαθμών σε ολόκληρο το δίκτυο» [40].

2.3.2 Τοποθέτηση Μονάδων Αποθήκευσης

2.3.2.1 Αλγόριθμος Artificial Immune System (AIS)

Η βέλτιστη τοποθέτηση των κινητών μπαταριών στο δίκτυο, υπολογίζεται μέσω διαφόρων αλγορίθμων όπως, του Artificial Immune System (AIS). Η μέθοδος αυτή προσομοιώνει τη συμπεριφορά του ανοσοποιητικού συστήματος η οποία, σε συνδυασμό με διάφορα σενάρια κατάστασης των διακοπών, υπολογίζει τον καλύτερο τρόπο παροχής ενέργειας κυρίως σε φορτία προτεραιότητας (priority loads). Ο αλγόριθμος AIS εξετάζει τη θέση της κάθε μπαταρίας, λαμβάνοντας υπόψη παράγοντες όπως η χωρική απόσταση από κρίσιμα φορτία, η ευκολία σύνδεσης στο δίκτυο και η δυνατότητα κάλυψης ενεργειακών απαιτήσεων σε περίπτωση σφάλματος. [14].

2.3.2.2 Particle Swarm Optimization (PSO)

Ένας άλλος τρόπος εύρεσης της βέλτιστης λύσης καθορισμού του χώρου και της χωρητικότητας του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας, μέσω μιας αντικειμενικής συνάρτησης, είναι μέσω του Particle Swarm Optimization (PSO). Ως είσοδο για την συνάρτηση βελτιστοποίησης λαμβάνει δεδομένα για τις παραμέτρους του δικτύου (τοπολογία, πλήθος διεσπαρμένων μονάδων, τιμή ενέργειας, κόστος μπαταρίας κ.α.) και ως έξοδο δίνει την τοποθεσία, χωρητικότητα και την βελτιστοποιημένη λειτουργία του Battery Energy Storage System (BESS). Αφού ξεκινήσει η προσομοίωση του αλγορίθμου, λαμβάνονται τα απαραίτητα δεδομένα και κάθε χρόνο προστίθεται στο σύστημα 5% φορτίου, έτσι προκύπτει μια βέλτιστη λύση για το ESS [37].

2.3.3 Δημιουργία Δικτύου Ακτινικής Μορφής

2.3.3.1 Αλγόριθμος Prim

Με την χρήση του αλγορίθμου Prim, δημιουργείται ένα ακτινωτό δίκτυο, το οποίο προσομοιάζεται ως γράφος και ο τρόπος που γίνονται οι συνδέσεις μεταξύ των κόμβων (nodes) και

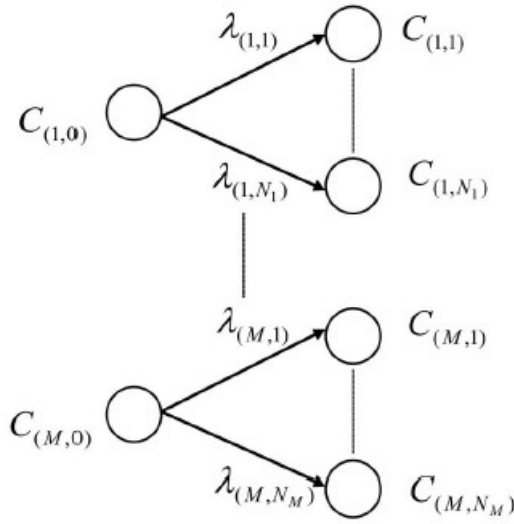
των ακμών (δίκτυο διανομής και διακόπτες) είναι τέτοιος ώστε να επιτυγχάνεται η ακτινωτή μορφή και η ευστάθεια. Ο αλγόριθμος αυτός επαναλαμβάνεται έως ότου προκύψει ένα δίκτυο το οποίο θα περιέχει όλα τα συστήματα και δεν θα δημιουργείται λούπα. Σε καταστάσεις σφάλματος όπου το δίκτυο απαιτεί ενέργεια, αλλά δεν μπορεί να την παρέχει, το Mobile BESS (MBESS) δίνει ενέργεια στο σύστημα, την οποία είχε αποθηκεύσει όταν υπήρχε πλεόνασμα στο δίκτυο. Το σύστημα όμως που θα έχει δημιουργηθεί και θα χρειάζεται αυτό το ποσό ενέργειας, θα είναι ένα απομονωμένο μικροδίκτυο χάρις στη χρήση του αλγορίθμου Prim και η θέση της μονάδας θα έχει εξασφαλιστεί σε καίριο σημείο από την εφαρμογή του AIS [14].

2.3.4 Υπολογισμός Χωρητικότητας ESS

Αφού έχει γίνει η βέλτιστη τοποθέτηση των κινητών μονάδων αποθήκευσης ενέργειας σκοπός πλέον είναι ο καθορισμός της χωρητικότητας των μπαταριών αυτών. Με την μείωση των παραδοσιακών μηχανών παραγωγής, οι οποίες συμμετείχαν στην διατήρηση της συχνότητας του δικτύου, η είσοδος των ανανεώσιμων, φέρει στο προσκήνιο το πρόβλημα της αδράνειας του δικτύου σε περιπτώσεις που έχουμε ξαφνικές απώλειες στην παραγωγή ενέργειας από αυτές. Προκύπτει ένα τεχνοοικονομικό ζήτημα σχετικά με την χωρητικότητα των μονάδων αποθήκευσης και την ικανότητά τους να αντισταθμίζουν την μειωμένη αδρανειακή απόκριση του δικτύου.

Η μέθοδος υπολογισμού την χωρητικότητας των μπαταριών, γίνεται μέσω μιας πιθανοτικής αξιολόγησης κινδύνου (Probabilistic Risk Assessment) που λαμβάνει υπόψιν τις μεταβατικές καταστάσεις σε διάφορα σενάρια σφαλμάτων του συστήματος. Αρχικά κατασκευάζονται πιθανοτικά μοντέλα για σφάλματα του εξοπλισμού και μείωσης της παραγόμενης ηλιακής ενέργειας και στη συνέχεια πραγματοποιείται μία ανάλυση Monte Carlo για να ελεγχθεί η αδράνεια του συστήματος. Η επιλογή της χωρητικότητας των ESS καθορίζεται ώστε να διασφαλίζεται η σταθερότητα της συχνότητας του συστήματος εντός του επιτρεπτού ορίου (π.χ. $0,5 \Delta f$ στα εξεταζόμενα σενάρια) [41].

Μετά την συλλογή δεδομένων για τις πιθανές διαταραχές του συστήματος, πραγματοποιείται η ανάλυση Monte Carlo, η οποία επιλέγει μία διαταραχή, ή μια ομάδα διαταραχών του συστήματος από αυτές που έχουν συγκεντρωθεί παραπάνω και στη συνέχεια, χρησιμοποιείται το πιθανοτικό μοντέλο της επιλεγμένης διαταραχής για την δημιουργία ενός σεναρίου που θα αναλυθεί. Αρχικά επιλέγονται μονές διαταραχές, χωρίς τον συνδυασμό με κάποιαν άλλη και στη συνέχεια εξετάζονται ταυτόχρονα, ενώ το μοντέλο Markov χρησιμοποιείται για να αποτυπώσει την πιθανότητα κατάστασης του κάθε στοιχείου (Εικόνα 2.2) [41].



+ *Eικόνα Error: Reference source not found.* 31 Μοντέλο Markov για M ανεξάρτητα στοιχεία [41]

«Το σύστημα αποτελείται από M διαφορετικά στοιχεία με το καθένα να έχει $N_i, i \in [1, M]$ καταστάσεις σφάλματος και αποτυπώνονται ως $C_{i,j}, \forall i \in [1, M], j \in [0, N_i]$ και $\lambda_{(i,j)}$ φανερώνει τον ρυθμό μεταβολής του στοιχείου i στην κατάσταση σφάλματος j .» Η πιθανότητα της κάθε κατάστασης του στοιχείου μπορεί να υπολογιστεί ως

$$P(C_{i,0}, t) = e^{-\lambda_i t}$$

$$P(C_{i,j}, t) = \frac{\lambda_{i,j}}{\lambda_i} (1 - e^{-\lambda_i t})$$

$$\text{Όπου } \lambda_i = \sum_{u=1}^{N_i} \lambda_{i,u} \text{ για } i \in [1, M], j \in [0, N_i], 0 < t < \infty.$$

Ενώ για όλο το σύστημα η πιθανότητα για μια δεδομένη κατάσταση δίνεται ως εξής:

$$P(C_{i_1,0} \dots C_{i_1,j_1} \dots C_{i_M,0}, t) = P(C_{i_1,j_1}, t) \dots P(C_{i_1,j_1}, t) \prod_{\substack{u=1 \\ u \neq i_k \\ \dots \\ u \neq i_l}}^{i_l} P(C_{u,0}, t).$$

Για την μεταβατική κατάσταση ακτινοβολίας σε όλο ηλιακό πάρκο, η συχνότητα βάση των στοιχείων που έχουν συλλεχθεί, υπολογίζεται ως

$$F_{SST} = \frac{-\ln(1 - P_{SST}(T))}{T}$$

Και λαμβάνει υπόψιν ότι το ηλιακό μεταβατικό φαινόμενο ακολουθεί συνάρτηση Poisson.

Αφού δημιουργηθούν τα πιθανοτικά μοντέλα, η ανάλυση Monte Carlo παράγει σενάρια για τις πιθανές διαταραχές που μπορεί να προκύψουν στο σύστημα. Οι διαταραχές αυτές επιλέγονται με βάση την πιθανότητα εμφάνισής τους, δίνοντας προτεραιότητα σε αυτές με μεγα-

λύτερη πιθανότητα. Στη συνέχεια, εξετάζεται η χωρητικότητα της κινητής μονάδας αποθήκευσης ενέργειας (BESS) που απαιτείται ώστε το σύστημα να διατηρεί τη συχνότητά του πάνω από ένα προκαθορισμένο όριο. Εάν η απαίτηση για τη συχνότητα, π.χ. $0,5 \Delta f$, δεν ικανοποιείται, η χωρητικότητα της μπαταρίας αυξάνεται και η προσομοίωση επαναλαμβάνεται [41].

Με αυτή την επαναληπτική διαδικασία βρίσκεται η ελάχιστη απαιτούμενη χωρητικότητα για την Battery Energy Storage System (BESS) που μπορεί να διασφαλίσει την σταθερότητα του συστήματος σε όλα τα ενδεχόμενα διαταραχών. Φυσικά θα πρέπει να οριστεί ένα επίπεδο εμπιστοσύνης για το σύστημα, αφού όσο αυξάνεται η δυνατότητα αποθήκευσης άρα και η αξιοπιστία του συστήματος, τόσο αυξάνεται και το κόστος του συστήματος, ενώ επίσης θα πρέπει να εξεταστούν και τα όρια ισχύος του εξοπλισμού που χρησιμοποιείται. Όμως με την ενσωμάτωση των ΑΠΕ, είναι σημαντικό να ελεγχθεί και η αδρανειακή απόκριση του συστήματος, κάτι που πετυχαίνετε με τις μονάδες αποθήκευσης, αφού είναι ταχύτερες ακόμη και από τις συμβατικές [41].

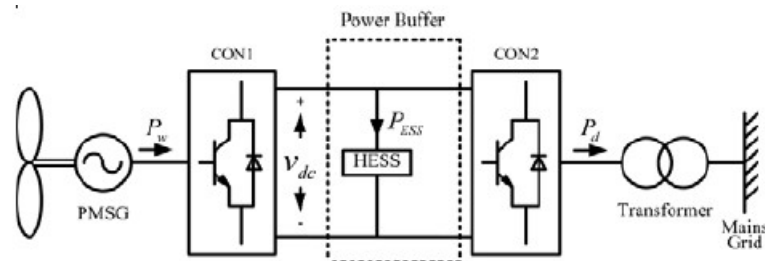
2.3.5 Υβριδικό Σύστημα Αποθήκευσης (HESS) σε Ανεμογεννήτρια

Με την ενσωμάτωση των αιολικών πάρκων γίνεται σαφές ότι η διακύμανση του ανέμου επηρεάζει σημαντικά την ισχύ που παράγουν οι ανεμογεννήτριες, δεδομένου ότι η ισχύς αυτών είναι συνάρτηση της ταχύτητας του ανέμου:

$$P = 0,5 \rho A C_p V_w^3 \quad (2.1)$$

όπου P η ισχύς της ανεμογεννήτριας και V_w η ταχύτητα του ανέμου.

Προκειμένου το αιολικό πάρκο να παρέχει στο δίκτυο συγκεκριμένα ποσά ισχύος είναι σημαντικό η τελική ισχύς (P_d) που εγχέεται στο δίκτυο να είναι σταθερή. Ένας τρόπος για να επιτευχθεί αυτό είναι με την ενσωμάτωση Battery Energy Storage Systems (BESS), το οποίο θα καλύπτει την διαφορά ισχύος που έχει συμφωνηθεί με αυτή που θα παράξει τελικά το πάρκο.



Εικόνα Error: Reference source not found.32 Σύγχρονη γεννήτρια μόνιμου μαγνήτη (PMSG), σε σύνδεση στο δίκτυο μέσω συστήματος απομόνωσης ισχύος [42].

Στην Εικόνα 2.8 παρατηρούμε την διάταξη σύνδεσης της γεννήτριας με το δίκτυο, με την P_w να είναι η ισχύς εξόδου της γεννήτριας, την P_{BESS} να είναι η ισχύς που θα παρέχει η μπαταρία

στο σύστημα και P_d η συμφωνημένη ισχύς της γεννήτριας. Η βασική συνάρτηση που καθορίζει το προς μελέτη σύστημα είναι η εξής:

$$P_{ESS}(t) = P_d(t) - P_w(t) \quad (2.2)$$

Λόγω της στοχαστικότητας της παραγωγής ισχύος της ανεμογεννήτριας, (το αιολικό πάροκο τείνει να έχει μια πιο σταθερή παραγωγή ισχύος, αφού η ισχύς παράγεται από πολλές γεννήτριες και η κάθε μία αποζημιώνει την έλλειψη ισχύος της άλλης), οι μπαταρίες παίζουν καθοριστικό παράγοντα στην εγγύηση παροχής ισχύος. Όμως οι απλές μπαταρίες (BESS) τείνουν να έχουν μειονεκτήματα όσο αναφορά στην διαχείριση του ρεύματος φόρτωσης και εκφόρτωσης στις τιμές αιχμής το οποίο φθείρει και την μπαταρία.

Για αυτό το λόγο δημιουργήθηκε ένα Hybrid Energy Storage System (HESS), το οποίο συνδυάζει το BESS και έναν υπερπυκνωτή ο οποίος αναλαμβάνει να καλύψει το φορτίο στις υψηλές τιμές φόρτισης και εκφόρτισης, προστατεύοντας την μπαταρία από τα υψηλά ρεύματα, ενώ το υπόλοιπο σύστημα BESS είναι υπεύθυνο για την αποθήκευση και παροχή ισχύς τις υπόλοιπες στιγμές.

2.3.6 Καθορισμός Χωρητικότητας HESS

Σημαντικό κομμάτι είναι ο καθορισμός της χωρητικότητας του BESS και του υπερπυκνωτή. Μέσω της Εκτίμησης Πυρηνικής Ομαλοποιημένης Πυκνότητας (Kernel Smoothing Density Estimation) χρησιμοποιούνται τυχαίες μεταβλητές της απόλυτης τιμής της χωρητικότητας της μπαταρίας ($|P_{ESS}|$) και από αυτές προκύπτει η Συνάρτηση Πυκνότητας Πιθανότητας (PDF) από την οποία λαμβάνουμε την Συσσωρευτική Συνάρτηση Κατανομής (CDF). Έτσι ορίζεται η ισχύς του P_{ESS} για ένα συγκεκριμένο επίπεδο εμπιστοσύνης του HESS και το υπόλοιπο ποσοστό καλύπτεται από τον υπερπυκνωτή [42].

Από την εξίσωση 2.2, αντιλαμβανόμαστε πως η συμφωνημένη ισχύς P_d , είναι εξαρτώμενη από αυτή της μπαταρίας και του υπερπυκνωτή. Για να οριστεί η βέλτιστη συμφωνημένη ισχύς P_d , δημιουργείται μια συνάρτηση βελτιστοποίησης η οποία είναι:

$$B = aP_d - \beta P_{b,P_d} - \gamma P_{C,P_d} \quad (2.3)$$

Όπου P_{b,P_d} η χωρητικότητα του BESS και P_{C,P_d} η χωρητικότητα του υπερπυκνωτή, ενώ οι συντελεστές των χωρητικοτήτων α , β , γ , ορίζονται ως λιανική τιμή πώλησης ενέργειας και η αποσβεσμένη τιμή του BESS και του υπερπυκνωτή αντίστοιχα. Η συνάρτηση αυτή θα καθορίσει την τελικά συμφωνημένη ισχύ που θα παρέχει η ανεμογεννήτρια. Τα αποτελέσματα μιας τέτοιας μελέτης για ένα πραγματικό σύστημα αναφέρουν διπλάσιο κόστος της τεχνολογίας

HESS (\$3.35M) σε σχέση με το BESS (\$1,48M). Όμως δεν λαμβάνεται υπόψιν η αντικατάσταση του BESS και τα έξοδα που θα επιφέρει σε ένα σύστημα το οποίο απαιτεί τακτική αντικατάσταση σε αντίθεση με το HESS [42].

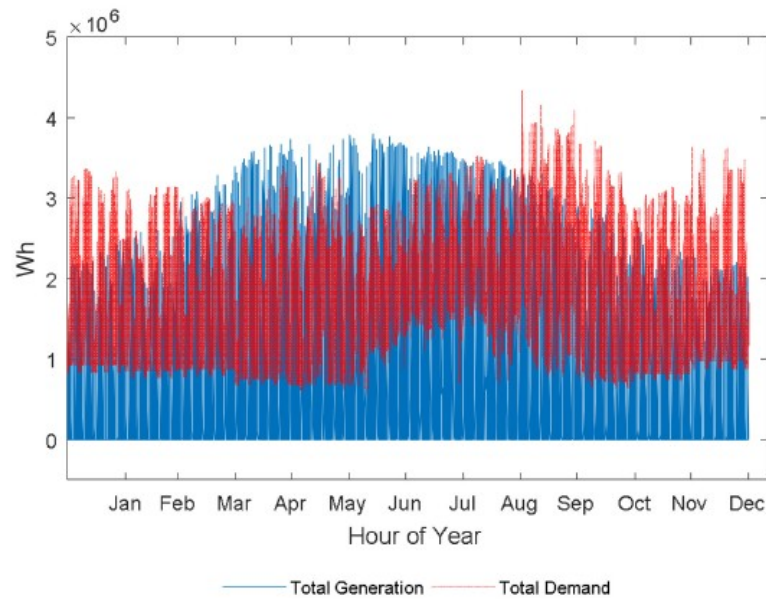
2.3.7 Συμβολή Οικιακών Πάνελ στην Ανθεκτικότητα

Τα Ηλιακά πάνελ, όντας μια μορφή ανανεώσιμης πηγής ενέργειας (Renewable Energy Source), εξαρτώνται από τις καιρικές συνθήκες και η παραγωγή τους εξαρτάται από την ηλιακή ακτινοβολία που δέχονται. Ο τρόπος λειτουργίας τους στην παροχή ισχύς στο δίκτυο είναι ο εξής, απορροφούν την ηλιακή ακτινοβολία και στην συνέχεια την διοχετεύουν στο δίκτυο. Με την είσοδο των ESS, αυτή η ενέργεια που δεν χρησιμοποιήθηκε λόγω μεγαλύτερης παραγωγής σε σχέση με την κατανάλωση μπορεί να αποθηκευτεί και τροφοδοτηθεί στο σύστημα κάποιαν άλλην στιγμή που θα υπάρχει έλλειμμα σε αυτήν [43].

Σε περιπτώσεις ακραίων καιρικών φαινομένων όπου υπάρχουν διακοπές στην ηλεκτροδότηση του δικτύου, σημαντική φαίνεται η συνεισφορά των οικιακών ηλιακών πάνελ. Σε μια μελέτη που πραγματοποιήθηκε [44], αποφάνθηκε η συμβολή τους στην διατήρηση του δικτύου, σε δύο περιπτώσεις σφαλμάτων, μέτριας και μεγάλης κλίμακας. Για κάθε περίπτωση υπήρχαν πέντε διαφορετικά σενάρια λειτουργίας. Το πρώτο αφορούσε την ύπαρξη σφάλματος χωρίς διεσπαρμένη παραγωγή (DER), το δεύτερο και το τρίτο ενσωμάτωνε τα πάνελ σε περίοδο με ήλιο και εξυπηρετούσε όλα τα φορτία στη μία περίπτωση και μόνο τα κρίσιμα φορτία στην άλλη. Στο τέταρτο και πέμπτο σενάριο, ενσωματώθηκαν τα πάνελ σε περίοδο βροχόπτωσης, εξυπηρετώντας όλα τα φορτία και τα κρίσιμα φορτία αντίστοιχα [44].

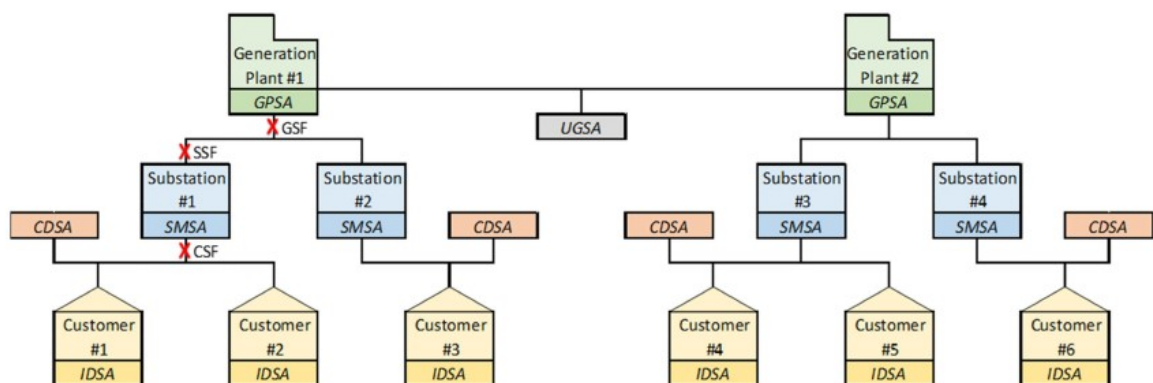
Η έρευνα κατέληξε στο ότι τα οικιακά πάνελ μπορούν να συμβάλλουν στην μείωση του ποσοστού των καταναλωτών που επηρεάζονται από κάποια σφάλμα στο δίκτυο σε ποσοστό 38%-58% σε περίοδο ηλιοφάνειας και σε ποσοστό 8%-9% σε περίοδο βροχόπτωσης. Φυσικά αυτή η ανθεκτικότητα του δικτύου που εξασφαλίζεται, μεταφράζεται σε χρήματα και διάφορες προσπάθειες για την ποσοτικοποίησή της έχουν γίνει [44][45].

Μια άλλη έρευνα προσπάθησε να ενσωματώσει την συμβολή των ηλιακών πάνελ μαζί με μπαταρίες (ESS) στην εξυπηρέτηση του φορτίου στην περίπτωση του Mission Viejo, CA, USA. Τα αποτελέσματα αυτής έδειξαν την ικανότητα των πάνελ να προμηθεύσουν το ~42,1% της ζήτησης φορτίου 16996GWh τον χρόνο. Στην διάρκεια του χρόνου, έγινε προσομοίωση της σχέσης παραγωγής από οικιακά ηλιακά πάνελ (rooftop PV) και ζήτησης και τα αποτελέσματα αυτής διαγραμματικά ήταν τα ακόλουθα.



Εικόνα Error: Reference source not found.33 Αποτελέσματα προσομοίωσης για το σύστημα του Mission Viejo, με την παραγωγή από PVs (Total Generation) και την συνολική ζήτηση (Total Demand) [43]

Διάφορα σενάρια σφάλματος, από πιο μικρά μέχρι πιο μεγάλα, τροφοδοτήθηκαν σε ένα σύστημα προσομοίωσης (OpenDSS) και εφαρμόζοντας διαφορετικές αρχιτεκτονικές αποθήκευσης ή συνδυάζοντάς τες προέκυπτει ένας δείκτης ανθεκτικότητας. Ο υπολογισμός του οποίου έλαβε υπόψιν την ισχύ πριν και μετά το σφάλμα, τον χρόνο εκκαθάρισης σφάλματος και άλλες παραμέτρους [43]. Εφαρμόστηκαν τρία βαθμωτά σενάρια σφάλματος, με το πρώτο να επηρεάζει σε μικρό βαθμό το σύστημα και το τρίτο να το επηρεάζει σημαντικά και αναλύθηκαν τέσσερις αρχιτεκτονικές αποθήκευσης [43].



Εικόνα Error: Reference source not found.34 Απλοποιημένο δίκτυο συμπεριλαμβανομένου των τεχνολογιών ESS και η θέση σφάλματος στο δίκτυο [43]

1. In-building Distributed Storage Architecture (IDSA): υπάρχει ένα σύστημα αποθήκευσης (ESS) σε κάθε κτήριο.
2. Circuit/Distribution Storage Architecture (CDSA): Σε αυτή την αρχιτεκτονική υπάρχουν συστοιχίες ESS σε κάθε γραμμή διανομής που μοιράζονται τα κτήρια

3. Substation/Microgrid Storage Architecture (SMSA): Σε κάθε υποσταθμό υπάρχει ένα ESS το οποίο μοιράζονται οι συνδεδεμένοι καταναλωτές, σαν ένα μικροδίκτυο (Micro Grid).
4. Generation Plant Storage Architecture (GPSA): Σε κάθε γραμμή του κέντρο παραγωγής συνδέεται το σύστημα ESS.
5. Utility/Grid Storage Architecture (UGSA): Το σύστημα έχει ένα κεντρικό ESS για όλο το δίκτυο.

Οι αρχιτεκτονικές αυτές ξεκινούν από την αποθήκευση της μονάδας (1) και καταλήγουν στο δίκτυο(5). Από την ανάλυση που έγινε, ο βέλτιστος δείκτης ανθεκτικότητας προέκυψε, και για τα τρία σενάρια σφάλματος, με τη χρήση της IDSA, όμως το κόστος αυτής της είναι πολύ μεγάλο και χρειάζεται να γίνουν περαιτέρω έρευνες για να συγκριθούν οι διάφορες αρχιτεκτονικές αποθήκευσης [43].

2.4 Χρηματοποίηση της Ανθεκτικότητας

Η έννοια της αξιοπιστίας και της ανθεκτικότητας συχνά ταυτίζονται λανθασμένα. Η πρώτη αφορά στην επίλυση προβλημάτων μικρής κλίμακας αλλά σε τακτικό χρονικό διάστημα και η δεύτερη αφορά στην επίλυση μεγάλων καταστροφών που συμβαίνουν όμως πολύ σπάνια, αλλά είναι καταστρεπτικές για το σύστημα. Η ύπαρξη των συστημάτων αποθήκευσης όπως το BESS και η αντλησιοταμίευση συμβάλουν στην ενδυνάμωση του συστήματος, καθιστώντας το πιο ανθεκτικό σε περιπτώσεις διαταραχών. Αυτό σημαίνει ότι το σύστημα έχει εφεδρείες ή έχει κατασκευάσει μικροδίκτυα διατηρώντας τα φορτία προτεραιότητας και στο τέλος επανέρχεται στην αρχική του κατάσταση [45].

Το όφελος αυτής της επαναφοράς πολλές φορές δεν συνειδητοποιείται με αποτέλεσμα να μην έχει τεθεί ένα πλαίσιο αξιολόγησης της ανθεκτικότητας. Η εκτιμώμενη αξία της ανθεκτικότητας διαφέρει από δίκτυο σε δίκτυο και δεν μπορεί να οριστεί σαφώς. Ένα σημαντικό στοιχείο για την ποσοτικοποίηση της ανθεκτικότητας είναι η απώλεια φορτίου (Value of Lost Load) [45].

2.5 Κυβερνοασφάλεια στα ΣΗΕ

Με την αύξηση της χρήσης των IEDs, (Intelligent Electronic Devices), τα σύγχρονα συστήματα ηλιακής, αιολικής και διεσπαρμένης παραγωγής τίθενται σε κίνδυνο από κυβερνοεπιθέσεις, λόγω έλλειψης προτύπων ασφαλείας. Στις ΗΠΑ, έχουν δαπανηθεί πολλοί πόροι για να εξασφαλιστεί η κυβερνοασφάλεια του ΣΗΕ, με έμφαση στην άμεση επικοινωνία, την ανίχνευση-

ση και ανταπόκριση σε επιθέσεις και τον ανθεκτικό σχεδιασμό [28]. Πιθανή τοποθεσία των κυβερνοφυσικών επιθέσεων είναι τα μεγάλα κέντρα παραγωγής με υψηλής χωρητικότητα, η απουσία των οποίων, θα δυσχέραινε σημαντικά την λειτουργία του ΣΗΕ [36].

2.6 Προκλήσεις των Συστημάτων HVDC

Με την συνεχόμενη ενσωμάτωση των ΑΠΕ και την ανάγκη ελέγχου της ροής ισχύος τα σύγχρονα συστήματα δεν βασίζονται τόσο σε σύγχρονες γεννήτριες (Synchronous Generators -SG) , αλλά σε ηλεκτρονικά ισχύος. Ένα νέο μοντέλο του ΣΗΕ αφορά σε μεγάλα έργα Ανανεώσιμων Πηγών τα οποία συνδέονται με το υπόλοιπο δίκτυο μέσω HVDC στο άκρο των οποίων βρίσκονται υψηλής διείσδυσης συστήματα ηλεκτρονικών ισχύος (High-penetration Power Electronic Systems -HPPEs). Τα συστήματα αυτά περιλαμβάνουν τους μετατροπείς LCCs VSCs, μετατροπείς των ΦΒ αλλά και των Α/Γ και φέρουν στο προσκήνιο νέες προκλήσεις για το σύστημα [46].

Τα παραδοσιακά συστήματα λειτουργούσαν σε χαμηλές συχνότητες λόγω της λειτουργίας των σύγχρονων γεννητριών, και η δομή τους ήταν προσαρμοσμένη σε αυτές τις ταχύτητες. Με την είσοδο των ηλεκτρονικών ισχύος, τα οποία λειτουργούν σε υψηλές συχνότητες, δημιουργείται ένα χάσμα μεταξύ της συχνότητας λειτουργίας του παραδοσιακού συστήματος (χαμηλή συχνότητα) και της συχνότητας των ηλεκτρονικών ισχύος (υψηλή συχνότητα). Αυτό το χάσμα προκαλεί ταλαντώσεις υψηλής συχνότητας (Broadband oscillations) [46].

Επιπλέον, στα παραδοσιακά συστήματα η εκκαθάριση των σφαλμάτων εξασφαλιζόταν μέσω του οπλισμού (armature) των σύγχρονων γεννητριών. Στα σύγχρονα συστήματα με ηλεκτρονικά ισχύος, ο χρόνος εκκαθάρισης σφάλματος εξαρτάται από τη μέθοδο ελέγχου και την εναλλαγή των διαφορετικών λειτουργιών ελέγχου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη δυσκολία διαχείρισης περιπτώσεων υπερτάσεων ή υψηλών ρευμάτων, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να οδηγήσει ακόμη και στη διακοπή λειτουργίας τους [46].

2.6.1 Τεχνικές δυσκολίες

Η ανάγκη προστασίας των συστημάτων HVDC προκύπτει από το γεγονός ότι τα σφάλματα στα συνδεδεμένα συστήματα AC μπορούν να τροφοδοτήσουν το HVDC δίκτυο με ρεύματα σφάλματος στη μορφή DC. Επιπλέον, λόγω της χαμηλής αντίστασης των γραμμών DC, το σύστημα προστασίας πρέπει να ενεργοποιείται εξαιρετικά γρήγορα, μέσα σε λίγα χιλιοστά του δευτερολέπτου (ms). Ένα βραχυκύκλωμα μπορεί να προκαλέσει σημαντική πτώση τάσης σε ολόκληρο το δίκτυο, ενώ η αποκοπή του ρεύματος DC παρουσιάζει ιδιαίτερη δυσκολία. Τέλος,

οι μετατροπείς HVDC δεν μπορούν να αντέξουν υψηλά ρεύματα σφάλματος, γεγονός που απαιτεί συστήματα προστασίας για χαμηλότερες τιμές ρεύματος σε σύγκριση με τα συστήματα AC [47]. Μια ιδανική μορφή προστασίας αποτελούν οι DC διακόπτες και ιδιαίτερα οι IGBT DC διακόπτες που έχουν χαμηλότερες απώλειες από τους απλούς, γρηγορότερη εκκαθάριση σφάλματος και έχουν την δυνατότητα αυτοπροστασίας [47].

2.6.2 Προκλήσεις μετατροπών και καλωδίων

Η ανάγκη για μεγαλύτερη μεταφορά ενέργειας σε υψηλότερες τάσεις και με λιγότερες απώλειες, απαιτεί την δημιουργία και τον σχεδιασμό νέων τοπολογιών των μετατροπών. Εκτός των AC/DC μετατροπών πιθανότατα να εφαρμοσθούν οι DC/DC μετατροπείς οι οποίοι θα επιτρέπουν την σύνδεση συστημάτων διαφορετικών επίπεδων τάσης αλλά θα επιτρέπουν και τον έλεγχο της ροής ισχύος στην DC πλευρά. Για να μπορέσουν αυτές οι τεχνολογίες να είναι προσιτές στα εκάστοτε έργα, θα πρέπει να γίνει μια τυποποίηση των μετατροπών, αφού μέχρι τώρα κάθε σχεδιασμός συστήματος είναι μοναδικός οδηγώντας σε υψηλά κόστη για την δημιουργία προσαρμοσμένων μετατροπών [48].

Επίσης, τα συστήματα HVDC έχουν αξιοποιήσει την πρόοδο της τεχνολογίας των γραμμών μεταφοράς και των καλωδίων, επιτρέποντας την μεταφορά ενέργειας σε υψηλές και υπερυψηλές τάσεις. Όμως περαιτέρω έρευνα χρειάζεται να γίνει επάνω στα μονωτικά υλικά ώστε να είναι δυνατή η ανύψωση της τάσης σε ακόμη υψηλότερα επίπεδα. Αυτό συμβαίνει διότι με την αύξηση της τάσης, αυξάνεται και το πάχος του μονωτικού υλικού που όμως πρέπει να είναι εντός προκαθορισμών ορίων, επομένως απαιτείται η αύξηση της αντοχής της τάσης με το ίδιο πάχος μονωτικού υλικού [48].

2.6.3 Έλεγχος, Λειτουργία και Προστασία

Ο έλεγχος των μετατροπών του HVDC συστήματος γίνεται ιεραρχικά σε τρία στάδια με το πρώτο να ελέγχει το ρεύμα, το δεύτερο την τάση και το τρίτο την ροή ισχύος. Με την δημιουργία ενός ενιαίου συστήματος HVDC είναι αναγκαίος ο συντονισμός των μετατροπών και των λειτουργιών τους. Επίσης είναι σημαντική και η επικοινωνία των συστημάτων σε πολύ μεγάλες αποστάσεις που όμως μπορεί να επιλυθεί με την ενσωμάτωση πολλαπλών ελεγκτών που θα συντονίζουν την λειτουργία του HVDC συστήματος παρακάμπτοντας το πρόβλημα της καθυστερούμενης διάδοσης εξαιτίας της μεγάλης απόστασης [48].

Επιπλέον για να αντιμετωπιστούν τα προβλήματα σχετικά με τις διαφορετικές συχνότητες λειτουργίας που υπάρχουν στο σύστημα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν φίλτρα με στόχο των συντονισμό των συχνοτήτων. Ενώ τέλος αυτή η μεταφορά ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις μπορεί να προκαλέσει προβλήματα πτώσης τάσης στα δύο άκρα του συστήματος, κάτι

που θα μπορούσε να επιλυθεί με την ανύψωση της τάσης σε ακόμη μεγαλύτερα επίπεδα (υπερυψηλή), ή μέσω υπεραγωγίων γραμμών μεταφοράς για λιγότερες απώλειες [48].

Σχετικά με την λειτουργία του συστήματος είναι σημαντικό να καθοριστεί ο χειριστής αυτού και το σύστημα το οποίο θα παρακολουθεί και θα διαχειρίζεται, είτε αυτό είναι μία περιοχή, χώρα ή θα είναι συγκεκριμένα τμήματα του HVDC. Ο έλεγχος μπορεί να πραγματοποιείται διαδίκτυακά, λαμβάνοντας τόσο προληπτικά μέτρα για την αποτροπή προβλημάτων όσο και κατασταλτικά μέτρα για την αντιμετώπιση σφαλμάτων που προκύπτουν. Σε περιπτώσεις βλαβών σε γραμμές DC ή σε μετατροπείς, ο έλεγχος του HVDC δικτύου πρέπει να διασφαλίζει συγκεκριμένα πρότυπα αξιοπιστίας, όπως το κριτήριο $N - 1$. Τέλος, πρέπει να ενσωματωθούν βοηθητικές υπηρεσίες, όπως η ρύθμιση της συχνότητας και της τάσης, στο πλαίσιο λειτουργίας της ενεργειακής αγοράς (energy market) [48].

Η προστασία των HVDC συστημάτων επικεντρώνεται σε θέματα όπως «οι αλγόριθμοι προστασίας, η εκκαθάριση σφαλμάτων, η ανάκτηση του συστήματος (recovery) και η διαχείριση γειώσεων και ασύμμετρων σφαλμάτων». Οι αλγόριθμοι προστασίας είναι απαραίτητοι για την ασφάλεια των συστημάτων που περιλαμβάνουν εναέριες γραμμές και καλώδια. Ωστόσο, απαιτούνται πιο προηγμένες τεχνικές για να εξασφαλιστεί η αξιοπιστία αυτών των αλγορίθμων, ειδικά σε συστήματα υπερυψηλής τάσης (UHV), όπου η μετάδοση σημάτων προστασίας εξασθενεί. Πιθανές λύσεις περιλαμβάνουν εντοπισμό σφαλμάτων και περιορισμό ρευμάτων σφάλματος από διεσπαρμένους αισθητήρες και από τους μετατροπείς αντίστοιχα. Τέλος μπορούν να χρησιμοποιηθούν DC circuit breakers (DCCBs) [48].

Παράλληλα είναι σημαντικός ο ρόλος των μετατροπέων για την εκκαθάριση σφαλμάτων και η ανάγκη προστασίας και γρήγορης επαναφοράς του συστήματος σε περίπτωση σφάλματος, που όμως δεν θα στηρίζεται σε συστήματα επικοινωνίας μιας και η ανάγκη για επαναφορά του συστήματος θα είναι άμεση, ενώ η μετάδοση της πληροφορίας θα εμπεριέχει καθυστερήσεις. Επίσης εξαιτίας αυτής της καθυστέρησης, η αλλαγή της γείωσης του συστήματος θα πρέπει να γίνεται σε πολλαπλά σημεία στο σύστημα. Τα ασύμμετρα σφάλματα θα πρέπει να αντιμετωπίζονται άμεσα τόσο με τον συγχρονισμό των μετατροπέων και των ελεγκτών ροής ισχύος, αλλά όσο και με εξοπλισμούς υπερτάσεων [48].

2.6.4 Δυσκολίες εφαρμογής υβριδικού συστήματος HVDC-HVAC

Η σημασία της χρήσης υβριδικών συστημάτων HVDC-HVAC έγκειται στο γεγονός ότι συνδυάζονται τα πλεονεκτήματα των δύο τεχνολογιών, αξιοποιώντας ήδη τις υποδομές των HVAC συστημάτων και βοηθούν στη γενικότερη σταθερότητα της τάσης και της συχνότητας, ενώ παράλληλα είναι δυνατή και η διασύνδεση συστημάτων διαφορετικών συχνοτήτων. Ένα

τέτοιο εγχείρημα εμπεριέχει πολλές προκλήσεις τόσο από άποψη ελέγχου, όσο και από θέμα προστασίας και μοντελοποίησης [49].

Η ανάγκη για διακόπτες HVDC είναι επιτακτική ώστε να περιορίζεται το σφάλμα το συστήματος μόνο στο υπό εξέταση υποδίκτυο και όχι σε όλο το σύστημα. Ο χρόνος απόκρισης θα πρέπει να είναι μικρός εξαιτίας της χαμηλής αντίστασης των καλωδίων DC, αλλά και της δυσκολίας του να μηδενιστεί ένα σφάλμα συνεχούς ρεύματος του οποίου η τιμή δεν περνάει από το μηδέν. Η κύρια τεχνολογία HVDC που εξετάζεται ο συνδυασμός της με το HVAC είναι αυτή του μετατροπέα πηγής τάσης (VSC), χάρις στα πλεονεκτήματά του έναντι του LCC. Επιπλέον είναι σημαντική η ανάπτυξη μοντέλων που θα συμπεριλαμβάνουν αυτές τις δύο τεχνολογίες και θα λαμβάνουν υπόψιν τις υψηλής ταχύτητας διαδικασίες των μετατροπέων. Τέλος λαμβάνονται υπόψιν και οικονομικά, κοινωνικά και περιβαλλοντικά ζητήματα [49].

2.7 Αδράνεια στα Συστήματα Ενέργειας

2.7.1 Η σημασία της αδράνειας στο ΣΗΕ

Η αδράνεια (inertia) αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για τη σταθερότητα του ενεργειακού συστήματος, καθώς περιορίζει τις μεταβολές της συχνότητας που προκαλούνται από ξαφνικές διαταραχές και επηρεάζει τον Ρυθμό Μεταβολής της Συχνότητας (Rate of Change of Frequency - RoCoF). Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 1, στα παραδοσιακά δίκτυα, η αδράνεια εξασφαλιζόταν από τις περιστρεφόμενες μάζες των σύγχρονων γεννητριών (Synchronous Generators - SG) και των κινητήρων φορτίου, ενώ πλέον που κυριαρχούν οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) και τα συστήματα με αντιστροφείς, η αδράνεια του συστήματος έχει μειωθεί δραματικά, ειδικά σε περιόδους χαμηλής ζήτησης και υψηλής παραγωγής ΑΠΕ. Αυτή η μείωση επιδεινώνει τον RoCoF και δυσχεραίνει τη διατήρηση σταθερών συχνοτήτων, αυξάνοντας την ανάγκη για προηγμένες μεθόδους υποστήριξης. Για να αντιμετωπιστούν αυτές οι προκλήσεις, είναι απαραίτητο οι διαχειριστές του συστήματος να έχουν ακριβείς εκτιμήσεις και προβλέψεις για τα επίπεδα αδράνειας σε κάθε χρονική στιγμή [53-55].

Όταν η αδράνεια στο σύστημα είναι πολύ χαμηλή, τότε μια ξαφνική αλλαγή στην ισχύ (αύξηση φορτίου, απώλεια παραγωγής), οδηγεί το σύστημα σε αστάθεια και σε περίπτωση που ο RoCoF είναι υψηλός μπορεί να οδηγήσει στο άνοιγμα διακοπών υποσυχνότητας, προστατεύοντας μεν τον εξοπλισμό αλλά προκαλώντας δε περεταίρω αστάθεια και πιθανά black out [31].

2.7.2 Εξασφάλιση αδράνειας

2.7.2.1 Μέτρα TSO

Για να αντιμετωπιστούν οι προκλήσεις που προκύπτουν από τη μειωμένη αδράνεια του συστήματος, οι Διαχειριστές Συστημάτων Μεταφοράς (TSOs) εφαρμόζουν μέτρα όπως η εγκατάσταση Σύγχρονων Αντισταθμιστών (Synchronous Compensators - SCs) και η ανάπτυξη προηγμένων τεχνικών ελέγχου συχνότητας σε μονάδες που βασίζονται σε αντιστροφείς. Ένας από τους βασικούς στόχους αυτών των δράσεων είναι ο περιορισμός του Ρυθμού Μεταβολής της Συχνότητας (RoCoF). Επιπλέον, οι νέες απαιτήσεις των Διαχειριστών επιτρέπουν στις ΑΠΕ και στα Συστήματα Αποθήκευσης Ενέργειας Μπαταριών (Battery Energy Storage Systems - BESS) να συνεισφέρουν μέσω της Συνθετικής Αδράνειας (Synthetic Inertia - SI), παρέχοντας υπηρεσίες που ενισχύουν τη σταθερότητα του συστήματος [50].

Οι ανεμογεννήτριες, τα ηλιακά πάρκα και τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας μπορούν να παρέχουν υπηρεσίες υποστήριξης συχνότητας μέσω προηγμένων τοπολογιών και τεχνολογιών Συνθετικής Αδράνειας. Ένας κρίσιμος παράγοντας για τη διατήρηση της σταθερότητας της συχνότητας είναι ο ακριβής προσδιορισμός της απαραίτητης αδράνειας, τόσο από τεχνική όσο και από οικονομική άποψη. Όμως ο υπολογισμός της αδράνειας στο ΣΗΕ, είναι χρονοεξαρτώμενος και σχετίζεται με το μείγμα των πηγών παραγωγής και την ζήτηση [52]. Στο πλαίσιο μιας μελέτης για τον Ιταλικό Διαχειριστή Συστήματος Μεταφοράς (TSO), αναλύθηκε η συνολική ανάγκη αδράνειας για το έτος 2030. Η μελέτη περιλάμβανε τον καθορισμό της συνεισφοράς από Συνθετική Αδράνεια (π.χ., από ΑΠΕ και Συστήματα Αποθήκευσης Ενέργειας Μπαταριών - BESS) καθώς και από συμβατική αδράνεια μέσω Σύγχρονων Αντισταθμιστών (Synchronous Compensators -SCs) [50].

Με βάση τα δεδομένα και τον αλγόριθμο που χρησιμοποιήθηκε, τα αποτελέσματα της ανάλυσης έδειξαν ότι ήταν δυνατή η μείωση του Ρυθμού Μεταβολής της Συχνότητας (RoCoF) κατά περισσότερο από 1 Hz/s σε περιπτώσεις σοβαρών διαταραχών. Επιπλέον, εντοπίστηκε το βέλτιστο μείγμα τεχνολογιών και η κατανομή των πηγών ανά ζώνη της Ιταλικής αγοράς, προσφέροντας σημαντική ευελιξία και αποδοτικότητα στο δίκτυο. Οι ΑΠΕ και τα BESS απέδειξαν την ικανότητά τους να παρέχουν άμεση υποστήριξη, μειώνοντας τον κίνδυνο αστάθειας της συχνότητας, ενώ οι SCs συμπλήρωσαν τη συνολική αδράνεια όπου ήταν απαραίτητο [50].

Μια άλλη προσέγγιση αντιμετώπισης της χαμηλής αδράνειας στο σύστημα προσπαθεί να ακολουθήσει ο διαχειριστής στην Σκανδιναβική περιοχή. Εκεί, γνωρίζοντας εκ των προτέρων την μεγαλύτερη πιθανή απώλεια ισχύος, φροντίζει να υπάρχουν διαθέσιμες SGs και διαχειρίζεται την ροή ισχύος μεταξύ των διαθέσιμων διασυνδέσεων, αυξάνοντας άμεσα την αδράνεια του συστήματος. Στην Μεγάλη Βρετανία, παράλληλα με την ισορρόπηση της παραγωγής από τις

σύγχρονες γεννήτριες βάσει των τεχνικών προδιαγραφών και λειτουργιών τους, αξιοποιούνται και υπηρεσίες γρήγορης απόκρισης συχνότητας (Fast Frequency Response -FFR) [31]. Τέλος προτείνεται μια μεθοδολογία για την ημερήσια προγραμματισμένη παροχή αδράνειας, λαμβάνοντας υπόψιν παραγωγή από ΑΠΕ, κατανομή αδράνειας και ροές ισχύος [52].

2.7.2.2 Έλεγχος Σχηματισμού Δικτύου (Grid-Forming Control-GFC)

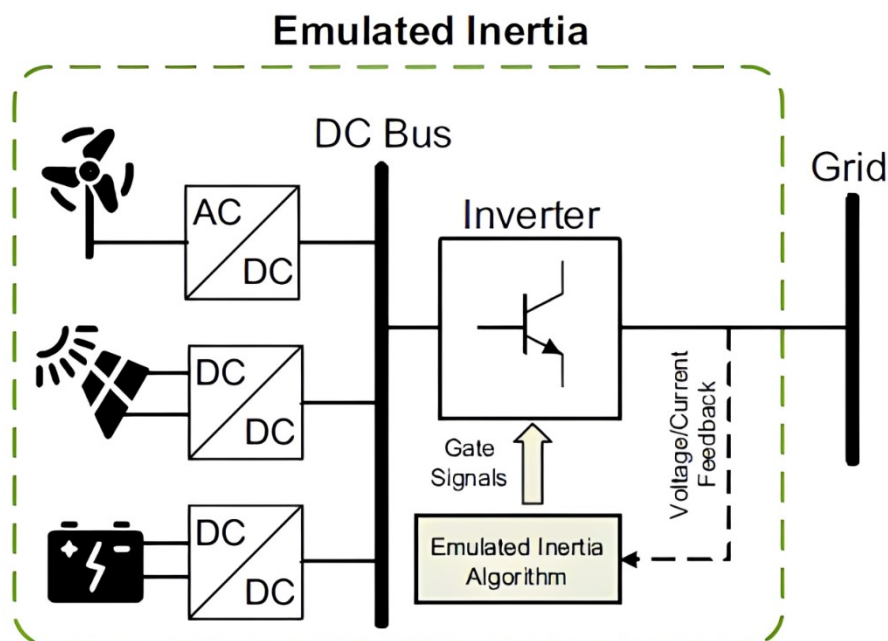
Επίσης για να αντιμετωπιστούν τα προβλήματα της χαμηλής αδράνειας στο σύστημα, προτείνονται δύο στρατηγικές ελέγχου των μετατροπέων, η μία είναι η «grid following control» και η άλλη η «grid-forming control -GFC». Στην πρώτη ο μετατροπέας, ακολουθεί την τιμή της τάσης και της συχνότητας ενώ στην δεύτερη, ορίζει τις τιμές αυτές. Ο grid-forming control, μιμείται την συμπεριφορά των σύγχρονων μηχανών και απευθείας ελέγχει τις τιμές της τάσης και της συχνότητας, ενώ άλλες τεχνικές ελέγχου, όπως ο έλεγχος πτώσης (droop control), η εικονική σύγχρονη μηχανή (Virtual Synchronous Machine -VSM) και ο αποσπώμενος έλεγχος εικονικού ταλαντωτή (dispatchable virtual oscillator) παρέχουν σταθερότητα στο σύστημα [51].

Μία προσομοίωση πραγματοποιήθηκε για το σύστημα στο Κεμπέκ, με στόχο την αξιολόγηση της στρατηγικής grid-forming control, όπου οι SMs αντικαταστάθηκαν από τους GFCs μετατροπείς. Σε μικρά επίπεδα διείσδυσης GFC, το σύστημα παρέμενε σταθερό, ενώ σε πιο υψηλά επίπεδα διείσδυσης (80-90%) ήταν αναγκαίος ο επανασυντονισμός των σταθεροποιητών συστημάτων ισχύος (Power Systems Stabilizers -PSS). Στην περίπτωση της πλήρους λειτουργίας του συστήματος με GFCs, η κατάσταση του συστήματος ήταν σταθερή, αλλά απαιτούσε λεπτομερή συντονισμό μεταξύ των συστημάτων ελέγχου. Σε περιπτώσεις διαταραχής του συστήματος, το GFC λειτουργούσε καλύτερα (η απόκλιση συχνότητας ήταν μικρότερη) και είχε πιο άμεση ανταπόκριση σε σχέση με μία σύγχρονη μηχανή. Για διάρκεια λίγων δευτερολέπτων (π.χ. 0,1sec), το RoCoF χειροτέρευε με την αύξηση διείσδυσης GFCs, ενώ σε μεγαλύτερης διάρκειας παράθυρα (π.χ. 0,5sec) βελτιωνόταν. Η προσομοίωση αφορούσε μία σύνδεση HVDC 2GW και στην περίπτωση απώλειας SM, μαζί με το GFC κατάφερε να κρατήσει σταθερό το σύστημα και να διαμοιράσει την ενέργεια [51].

2.7.2.3 Εξομοιωμένη αδράνεια (emulated inertia)

Η παροχή αδράνειας στο σύστημα γίνεται είτε μέσω SGs είτε μέσω συστημάτων που προσομοιώνουν αδράνεια (emulated inertia) με τη χρήση fast-acting reserve (FAR). Το FAR διακρίνεται σε τρεις κατηγορίες: εικονικές σύγχρονες μηχανές, έλεγχο συνθετικής αδράνειας και γρήγορο έλεγχο συχνότητας. Η παροχή αδράνειας μέσω ΑΠΕ και ESSs επιτυγχάνεται με τον

συνδυασμό αλγορίθμων ελέγχου και ηλεκτρονικών ισχύος, δημιουργώντας μια προσομοιωμένη αδράνεια που προσεγγίζει εκείνη των SGs. Μπορεί να αναπαρασταθεί σύμφωνα με την παρακάτω Εικόνα 2.11 [53]



Εικόνα Error: Reference source not found.35 Δημιουργία προσομοιωμένης αδράνειας (emulated inertia) [53]

Οι εικονικές σύγχρονες μηχανές (Virtual Synchronous Machines -VSMs) προσομοιώνουν τη δυναμική συμπεριφορά των σύγχρονων γεννητριών, παρέχοντας δυνατότητες διαμόρφωσης του δικτύου και σταθεροποίησης της συχνότητας μέσω ηλεκτρονικών ισχύος. Ο έλεγχος συνθετικής αδράνειας (Synthetic Inertia Control -SIC) αξιοποιεί τον ρυθμό μεταβολής της συχνότητας (RoCoF) για να ρυθμίσει άμεσα την έγχυση ισχύος από ΑΠΕ ή συστήματα αποθήκευσης, μιμούμενος την παραδοσιακή απόκριση αδράνειας. Τέλος, ο γρήγορος έλεγχος συχνότητας (Fast Frequency Control -FFC) παρέχει άμεσες ρυθμίσεις ισχύος σε αποκλίσεις της συχνότητας, λειτουργώντας μέσα σε χιλιοστά του δευτερολέπτου για να διατηρήσει τη σταθερότητα του δικτύου και να αντιμετωπίσει τη μειωμένη αδράνεια. Η ενσωμάτωση της προσομοιωμένης αδράνειας αντιμετωπίζει δυσκολίες όπως η καθυστέρηση απόκρισης, πολυπλοκότητα αλγορίθμων ελέγχου, η ακρίβεια στην μέτρηση της συχνότητας κ.α. [53].

Όμως τα συστήματα HVDC είναι ικανά να αξιοποιήσουν τις υπάρχουσες τεχνολογίες και να αντιμετωπίσουν το πρόβλημα των σύγχρονων συστημάτων χαμηλής αδράνειας. Είτε μέσω προηγμένων αλγορίθμων, εγχέοντας συνθετική αδράνεια όποτε χρειάζεται, είτε διαμοιράζοντας την ισχύ επιλύοντας προβλήματα ανισορροπίας του συστήματος. Γενικότερα από την φύση τους τα συστήματα HVDC είναι ικανά να ενσωματώσουν τις ΑΠΕ και τα ESSs, προσφέροντας ικανότητες ρύθμισης συχνότητας [53].

3 PowerFactory και Μοντελοποίηση

Η διεπικοινωνία των συστημάτων ενέργειας και η συλλογή γεωγραφικών δεδομένων αποδεικνύεται απαραίτητη και αναγκαία για τον σχεδιασμό και την λειτουργία του ΣΗΕ. Η συλλογή δεδομένων σχετικά με εξαρτήματα του συστήματος (τους μετασχηματιστές, τις γραμμές, του διακόπτες, κ.α.), όταν συνδυάζονται με εργασίες επισκευής και συντήρησης του εξοπλισμού ή σε περιόδους ξαφνικής απώλειας ισχύς (HILF), παρέχουν ένα νέο πλαίσιο ανάλυσης του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας μέσω ενημερωμένων γεωγραφικών και γλωσσικών δεδομένων [54].

Η ανάλυση του συστήματος μπορεί να πραγματοποιηθεί με διάφορα προγράμματα προσομοίωσης ένα εξ' αυτών είναι το PowerFactory της DIgSILENT, ενώ η αλληλεπίδραση με γεωχωρικά δεδομένα μπορεί να πραγματοποιηθεί με ένα πρόγραμμα για συστήματα γεωγραφικών πληροφοριών όπως το ArcGIS της Esri ή το QGIS ένα λογισμικό ανοιχτού κώδικα.

3.1 Βασικές λειτουργίες του PowerFactory

Στην παρούσα διπλωματική γίνεται χρήση του λογισμικού Power Factory έκδοσης 15.1.6 της εταιρείας DIgSILENT (Digital Simulation of Electrical NeTworks). Το λογισμικό αυτό έχει εφαρμογή στην ανάλυση συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, στην παραγωγή, στην μεταφορά και στην διανομή καθώς επίσης και σε βιομηχανικά συστήματα. Διαθέτει την δυνατότητα προσομοίωσης μοντελοποίησης και ανάλυσης των συστημάτων αυτών και εποπτεία σε πραγματικό χρόνο. Το λογισμικό αυτό είναι συμβατό με τα Windows και δίνει την δυνατότητα δημιουργίας σεναρίων για ολοκληρωμένες και αυτοματοποιημένες εφαρμογές [55].

Αρχικά στα συστήματα μεταφοράς, στα οποία υπεισέρχονται μεγάλες αλλαγές με την ενσωμάτωση των διεσπαρμένων παραγωγών, αιολικών και φωτοβολταϊκών πάρκων, το PowerFactory διαθέτει έναν πλήρη κατάλογο με λειτουργίες που υποστηρίζει την προσομοίωση σε AC και DC τοπολογίες, στους μετατροπείς VSC, στα εναέρια καλώδια, σε φίλτρα και διακόπτες. Υπάρχει η δυνατότητα δημιουργίας πολλαπλών σεναρίων για τις διάφορες καταστάσεις του συστήματος (σφάλματα, αποσύνδεση γεννητριών κ.α.) και είναι επίσης συμβατό με το πρότυπο ανταλλαγής δεδομένων ENTO-E CGMES.

Σε αυτό το κεφάλαιο, θα αναλυθεί ο τρόπος χρήσης του προγράμματος, παραθέτοντας τις βασικές λειτουργίες ώστε να μπορεί ο χρήστης να δημιουργεί τα διάφορα σενάρια λειτουργίας τους συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας και να εξάγει γραφικές παραστάσεις που θα βοηθήσουν στην καλύτερη αποτύπωση των αποτελεσμάτων [55].

Παρότι οι λειτουργίες του λογισμικού καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα, παρατίθενται αρχικά ενδεικτικά ορισμένες από αυτές:

- Ανάλυση ροής φορτίου
- Βέλτιστη ροής ισχύος
- Ανάλυση βραχυκυκλώματος
- Αναπαράσταση δικτύου
- Διαγράμματα δικτύου και γραφικά χαρακτηριστικά
- Αξιολόγηση αιτήματος σύνδεσης με το δίκτυο
- Ανάλυση αρμονικών

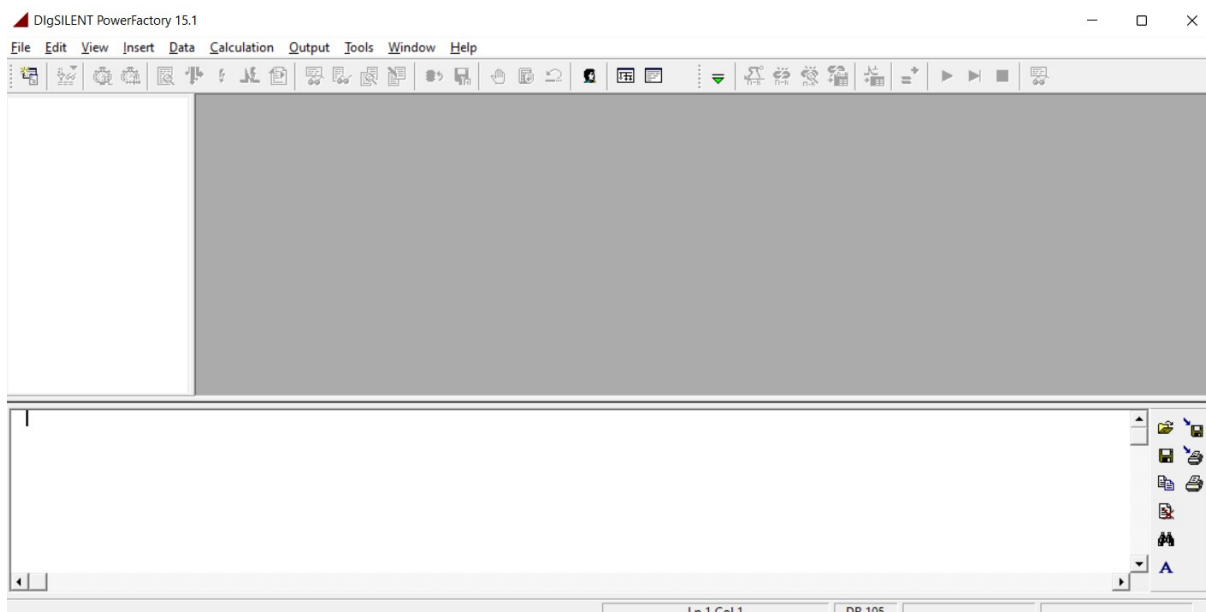
Στα συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας το πρόγραμμα έχει προεγκατεστημένα εργαλεία για τα συστήματα αυτά και αφορούν την αξιολόγηση της τάσης και του σημείου αστάθειάς της, την ανάλυση της επίπτωσης από την μεταφορά ενέργειας μεταξύ δύο περιοχών και την μέγιστη μεταφορά ισχύς που μπορεί να υπάρξει. Επίσης διαθέτει εργαλεία για την αξιολόγηση της αέργου ισχύος, την ανάλυση χωρητικότητας μεταφοράς και παράγοντες κατανομής μεταφοράς ισχύος [55].

Η χρήση και η λειτουργία του προγράμματος πραγματοποιείται σε γραφικό περιβάλλον, το οποίο σημαίνει ότι γίνεται εισαγωγή των στοιχείων που θέλει ο χρήστης προκειμένου να αποτυπώσει το σύστημά του. Οι τιμές των μεγεθών του κάθε στοιχείου (τάση γραμμής, συνδεσμολογία μετασχηματιστή, ισχύς γεννήτριας κ.α.) εισάγονται από τον ίδιο [56].

3.2 Δημιουργία Project – Study Cases

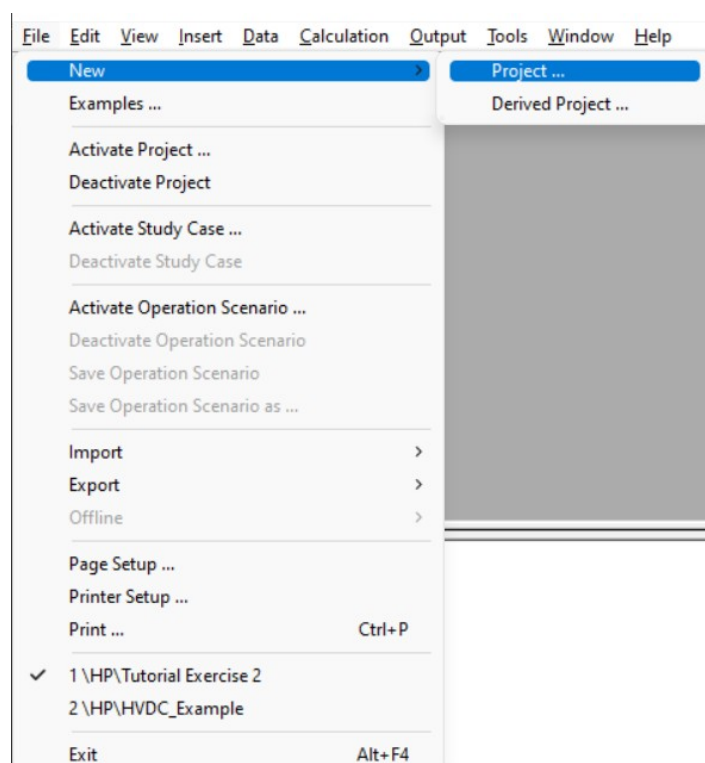
3.2.1 Δημιουργία Project

Ο χρήστης μόλις ανοίξει το πρόγραμμα θα δει το περιβάλλον εργασίας στο οποίο θα δημιουργήσει το σύστημα που θα μελετήσει (Εικόνα 3.1).



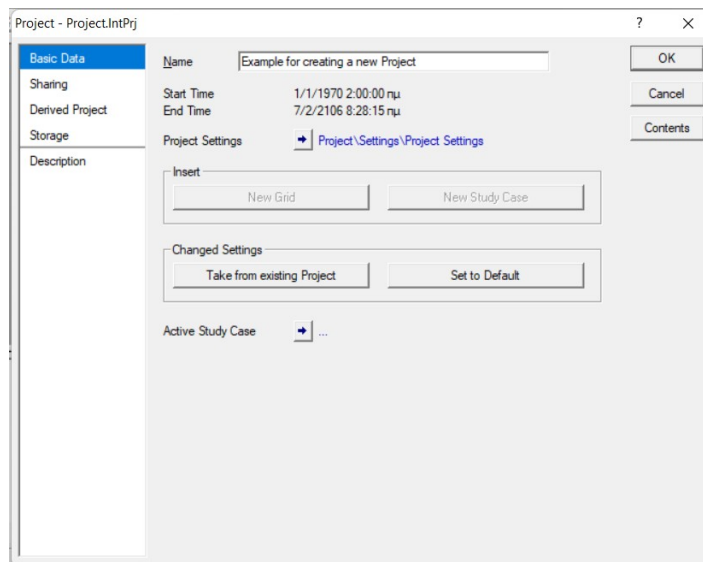
Εικόνα Error: Reference source not found.³⁶ Περιβάλλον εργασίας PowerFactory.

Όταν ο χρήστης θέλει να δημιουργήσει έναν νέο σύστημα για να μελετήσει, θα πρέπει να φτιάξει ένα νέο project. Ο τρόπος για να το κάνει είναι ο εξής: Στο μενού, (Menu Bar), επιλέγοντας την εντολή «File» → «New» → «Project...», ο χρήστης δημιουργεί το δικό του νέο project στο οποίο μπορεί να δημιουργήσει το προς μελέτη σύστημα (Εικόνα 3.2).



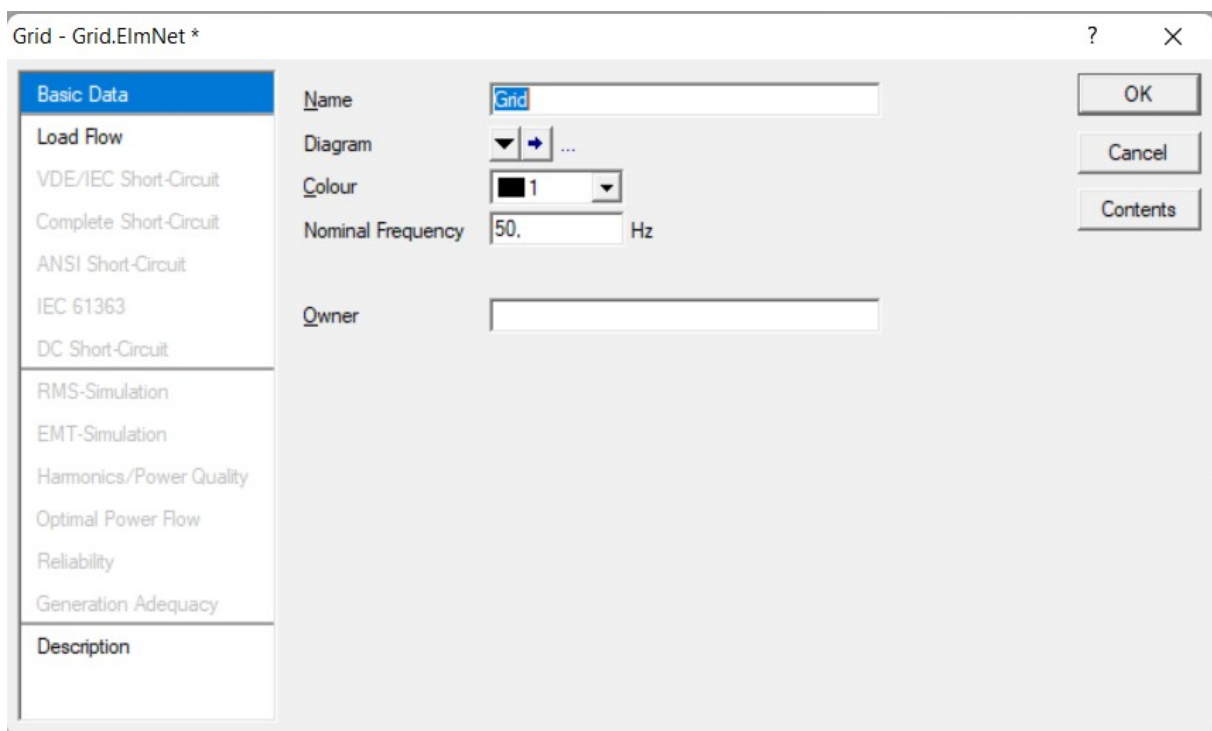
Εικόνα Error: Reference source not found.³⁷ Δημιουργία νέου Project.

Μόλις γίνει η επιλογή «Project...», αναδύεται ένα δεύτερο παράθυρο στο οποίο επεξεργάζεται ο χρήστης το όνομα του έργου (Εικόνα 3.3).



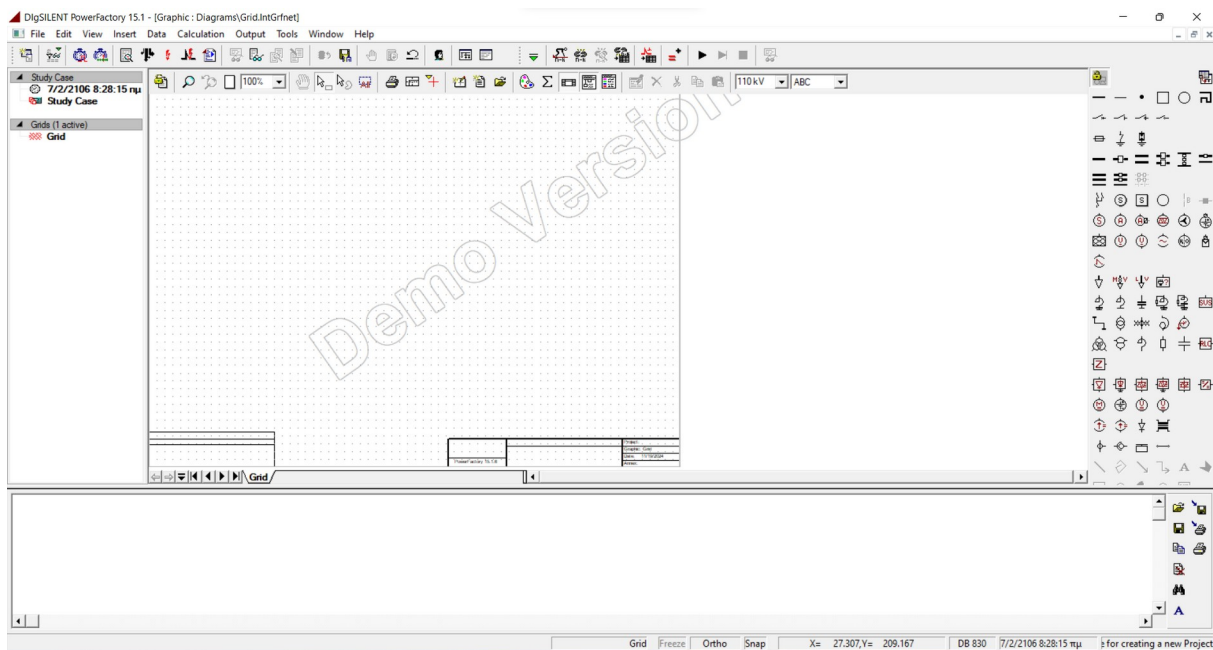
Εικόνα Error: Reference source not found.38 Εισαγωγή ονόματος Project.

Πατώντας «OK» εμφανίζεται ένα τρίτο παράθυρο στο οποίο ο χρήστης ονοματοδοτεί το δίκτυο και επιλέγει την κατάλληλη τιμή συχνότητας του δικτύου «Nominal Frequency» (50 ή 60 Hz), ενώ επίσης μπορεί να επιλέξει και χρωματικό κώδικα από την επιλογή «Colour» (Εικόνα 3.4).



Εικόνα Error: Reference source not found.39 Ονοματοδοσία δικτύου.

Μόλις και πάλι ο χρήστης πατήσει «OK», το πρόγραμμα τον οδηγεί στο περιβάλλον εργασίας, στο οποίο πλέον μπορεί να δημιουργήσει το σύστημα το οποίο θέλει να μελετήσει (Εικόνα 3.5).



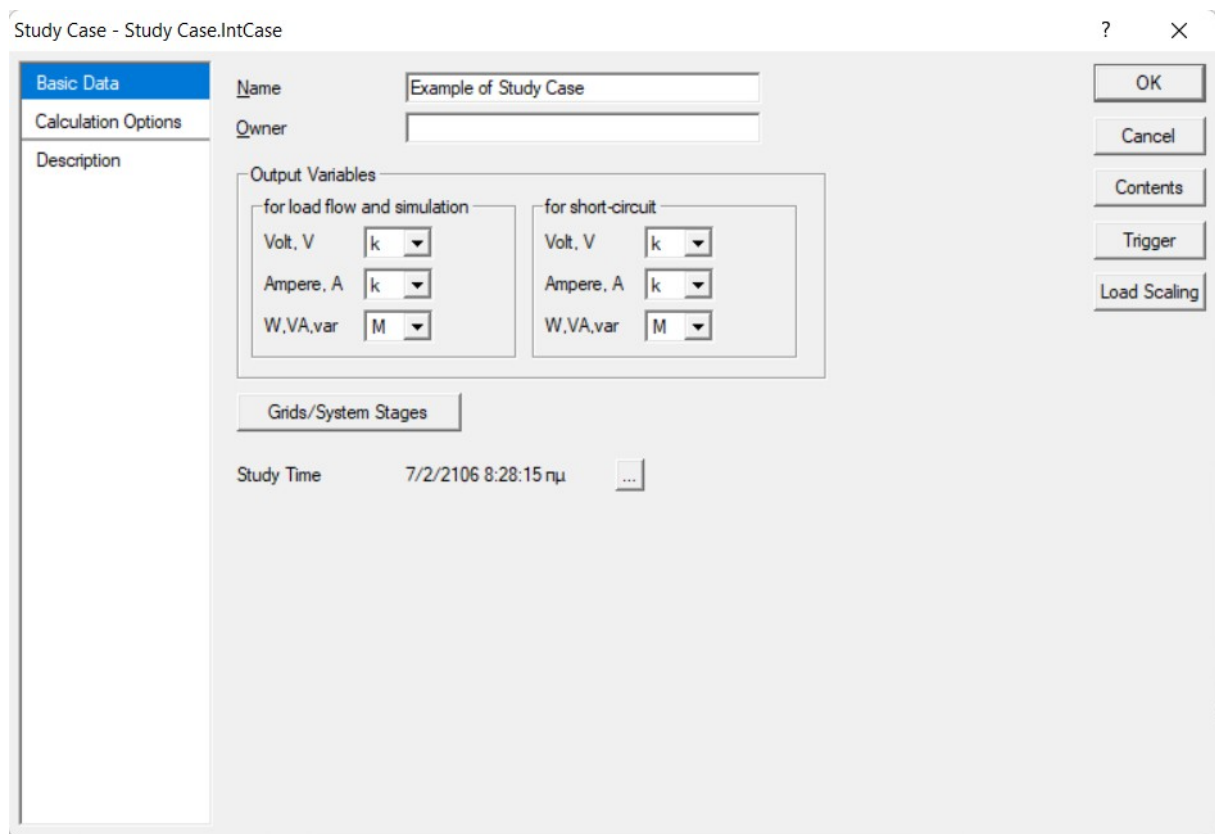
Εικόνα Error: Reference source not found.40 Περιβάλλον εργασίας του νέου project

Και αφού πλέον ο χρήστης βρίσκεται στο περιβάλλον εργασίας του PowerFactory, μπορεί να δημιουργήσει το σύστημα που θα μελετήσει. Στην Εικόνα 3.10, στην δεξιά πλευρά βρίσκονται τα διάφορα στοιχεία με τα οποία θα συναρμολογηθεί το σύστημα. Τα συνηθέστερα στην χρήση είναι οι ζυγοί, οι διακόπτες, οι μετασχηματιστές, τα φορτία και οι γεννήτριες, οι χαρακτηριστικές τιμές των οποίων καθορίζονται από τον χρήστη για το κάθε στοιχείο ξεχωριστά.

Αφού έχει δημιουργηθεί το προς μελέτη σύστημα, επόμενο βήμα είναι να προσομοιωθούν τα διάφορα σενάρια λειτουργίας του προβλήματος μέσω της επιλογής «Study Case». Ήδη παρατηρούμε στην αριστερά πλευρά της Εικόνας 3.10 την ενεργοποίηση ενός «Study Case» με Bold χαρακτήρες, το οποίο δημιουργήθηκε με την δημιουργία του «Project». Για την δημιουργία περισσότερων περιπτώσεων, ακολουθείτε η διαδικασία παρακάτω.

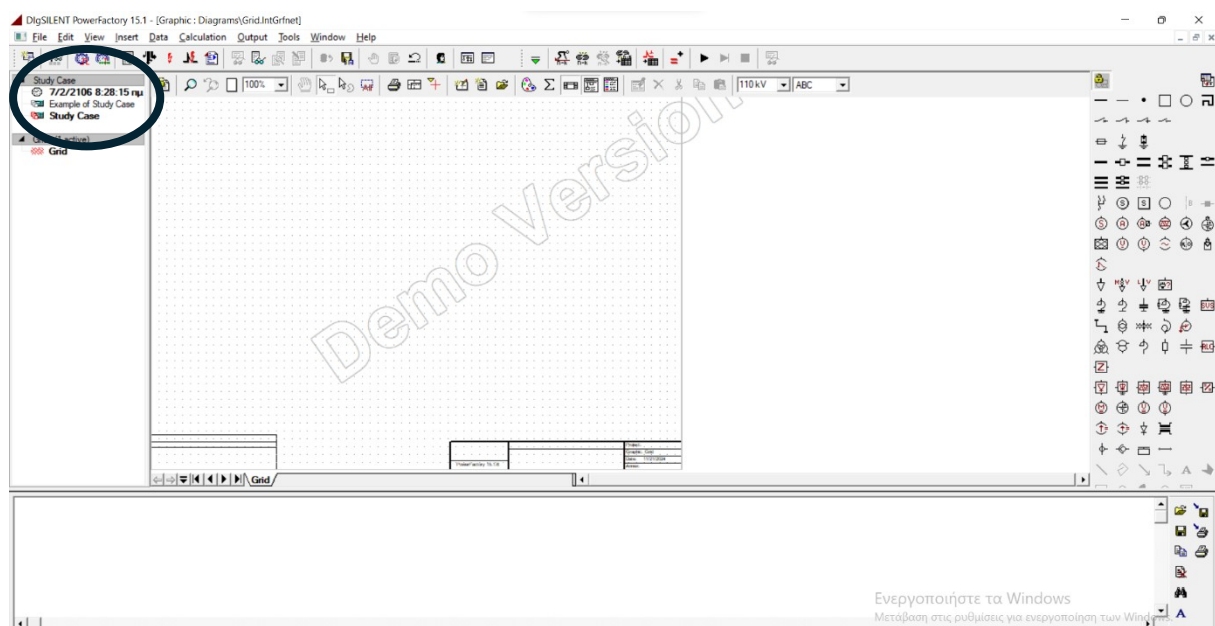
3.2.2 Μελέτη περιπτώσεων (Study Case)

Το Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας έχει πολλαπλά σενάρια λειτουργίας, τα οποία περιλαμβάνουν σφάλματα σε γραμμές μεταφοράς, αποσύνδεση μετασχηματιστών ή διακοπών κ.α. Στο PowerFactory, υπάρχει η επιλογή δημιουργίας μελέτης περίπτωσης στην οποία εξετάζεται το κάθε σφάλμα ή αλλαγή που συμβαίνει και οι επιπτώσεις αυτού στο σύστημα μεταφοράς, εξάγοντας σε κάθε σενάριο και διαφορετικά αποτελέσματα. Ο τρόπος που γίνεται αυτό είναι ο εξής, στο Menu Bar επιλέγοντας «Insert»→ «Study Case...», αναδύεται ένα παράθυρο στο οποίο γίνεται εισαγωγή του ονόματος της περίπτωσης και οι μονάδες μέτρησης των μεγεθών στην ροή ισχύος και στην περίπτωση του βραχυκυκλώματος (Εικόνα 3.6).



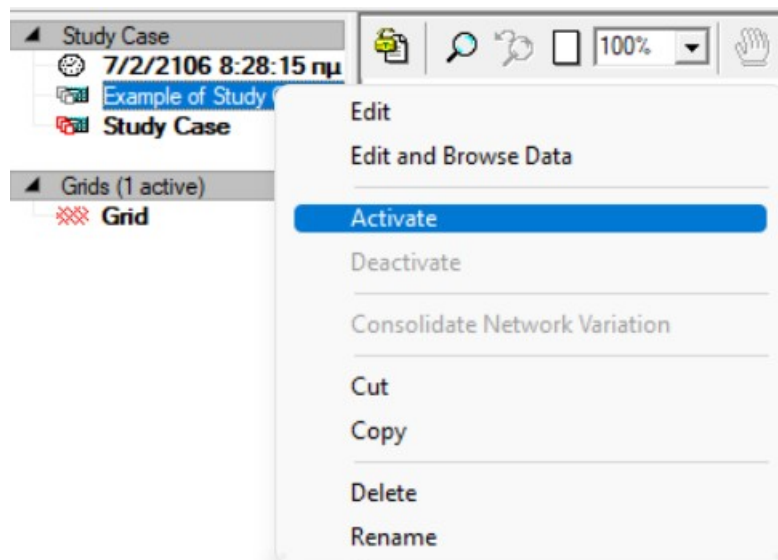
Εικόνα Error: Reference source not found.41 Περιβάλλον αρχικοποίησης του Study Case

Επιλέγοντας το «OK», δημιουργήθηκε το νέο Study Case , το οποίο μπορούμε να δούμε στα αριστερά του Περιβάλλοντος Εργασίας, στο πλαίσιο «Study Case» (Εικόνα 3.7). Αυτή την στιγμή όμως παρατηρούμε ότι είναι με Bold χαρακτήρες το «Study Case», που δημιουργήθηκε με το που δημιουργήσαμε το νέο «Project».



Εικόνα Error: Reference source not found.42 Δημιουργία Study Case και η θέση του στο Περιβάλλον Εργασίας

Για να ενεργοποιήσουμε ή απενεργοποιήσουμε την κάθε Μελέτη Περίπτωσης, πηγαίνουμε στο πλαίσιο που είναι σημειωμένο στην Εικόνα 3.12 και επιλέγουμε με δεξί κλικ το Study Case που θέλουμε και το απενεργοποιούμε ή ενεργοποιούμε (Εικόνα 3.8).



Εικόνα Error: Reference source not found.⁴³ Παράθυρο ενεργοποίησης ή απενεργοποίησης του Study Case.

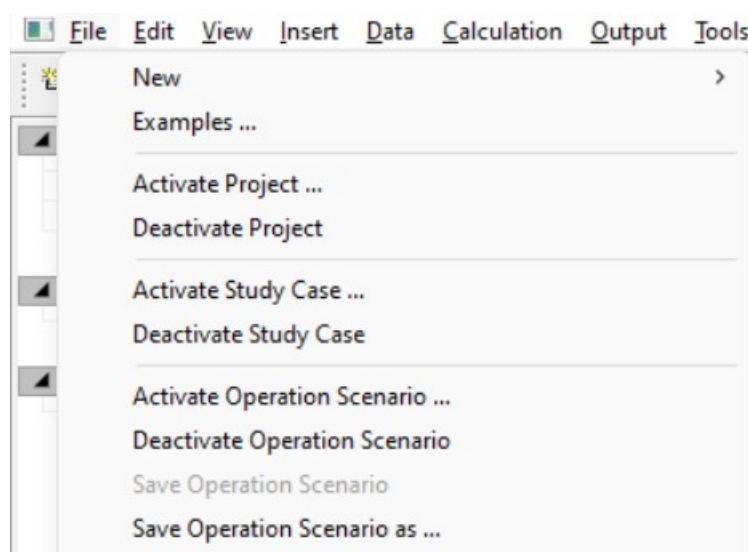
Αφού έχει ενεργοποιηθεί και το ζητούμενο Project προς μελέτη και το σύστημά μας είναι έτοιμο προς εξέταση μπορούμε πλέον να προσομοιώσουμε τα διαφορετικά σενάρια λειτουργίας (Operation Scenario) που συμβαίνουν σε ένα Study Case.

3.2.3 Σενάριο Λειτουργίας (Operation Scenario)

Με την χρήση ενός σεναρίου λειτουργίας (Operation Scenario), είναι δυνατόν να τροποποιηθούν οι παράμετροι οποιουδήποτε στοιχείου του δικτύου, όπως η κατάσταση λειτουργίας ενός διακόπτη, η ισχύς που παράγεται από την κάθε γεννήτρια, η αποσύνδεση μετασχηματιστών κ.α. Αυτή η ευελιξία, δίνει την δυνατότητα των συχνών εναλλαγών που συμβαίνουν κατά διάρκεια λειτουργίας του συστήματος και την εφαρμογή του στην προσομοίωση του Study Case. Έτσι έχουμε πολλά σενάρια λειτουργίας για το Δίκτυο, καλύπτοντας πολλές πιθανές καταστάσεις του συστήματος.

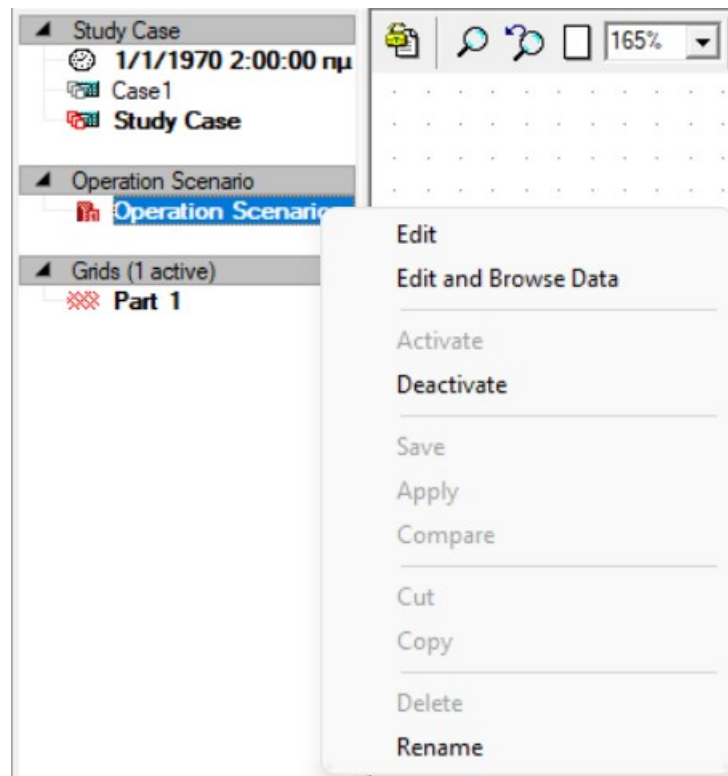
Οποιοσδήποτε αλλαγές συμβαίνουν στο σενάριο λειτουργίας αφορούν αποκλειστικά και μόνο το σενάριο αυτό. Μόλις απενεργοποιηθεί το σενάριο, το πρόγραμμα διαβάζει τα δεδομένα που είχε το σύστημα στις αρχικές λειτουργικές του ρυθμίσεις.

Για την αποθήκευση του Σεναρίου Λειτουργίας που έχουμε δημιουργήσει πηγαίνουμε «File»→«Save Operation Scenario as» ονοματοδοτούμε και πατάμε «OK» (Εικόνα 3.9).



Εικόνα Error: Reference source not found.44 Αποθήκευση Σεναρίου Λειτουργίας

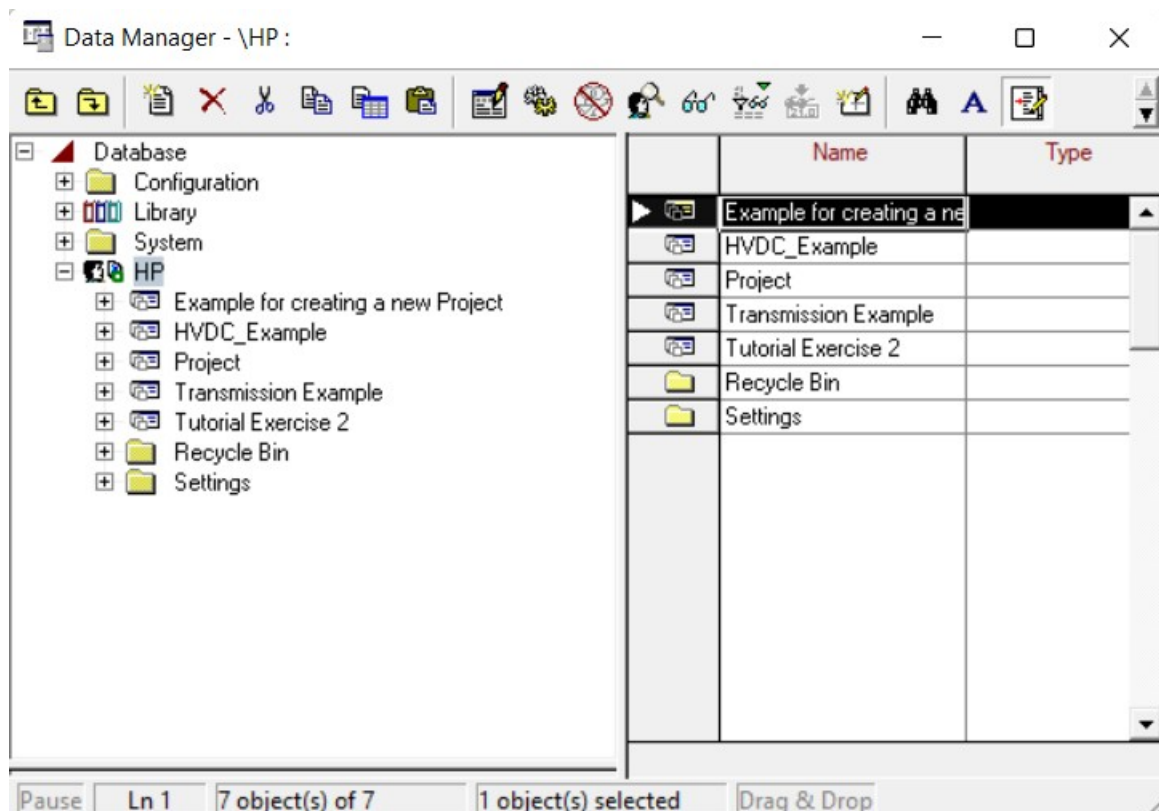
Για την ενεργοποίηση ή απενεργοποίησή του πηγαίνουμε είτε μέσω του «File» «Activate Operation Scenario» ή «Deactivate Operation Scenario» (Εικόνα 3.9) αντίστοιχα, είτε από το περιβάλλον εργασίας, στο αριστερό πλαίσιο με τα «Operation Scenario» πατώντας δεξί κλικ στο σενάριο λειτουργίας που θέλουμε επιλέγουμε «Activate» ή «Deactivate»(Εικόνα 3.10).



Εικόνα Error: Reference source not found.⁴⁵ Ενεργοποίηση ή Απενεργοποίηση Σεναρίου Λειτουργίας

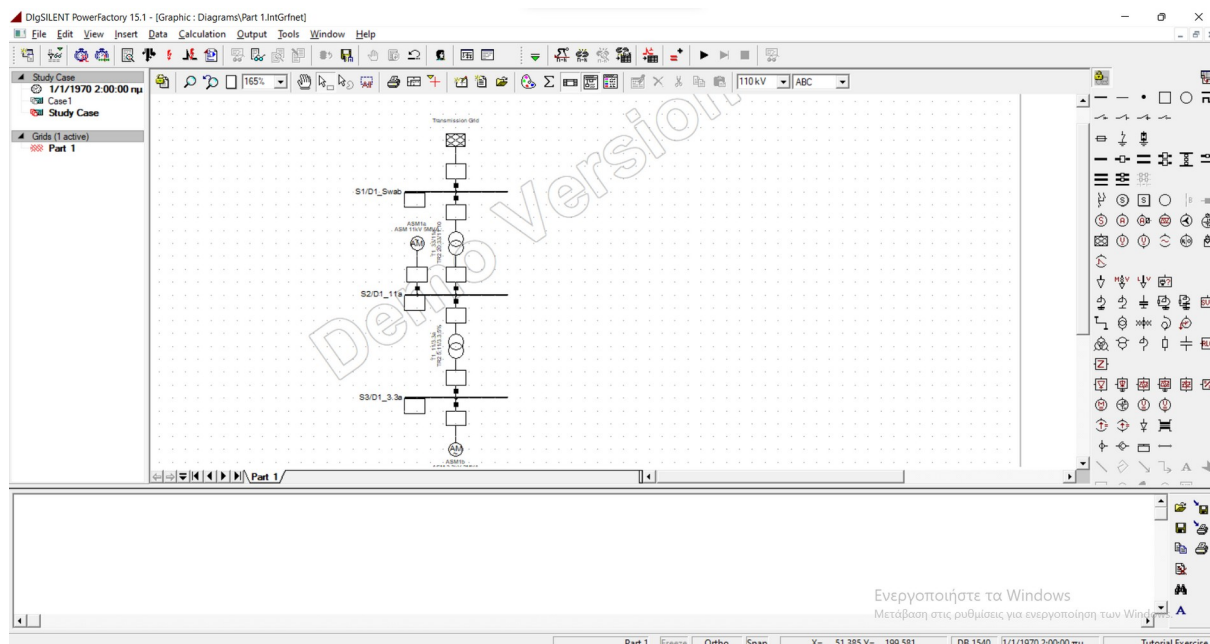
3.3 Άλλες λειτουργίες του PowerFactory

Το πρώτο εικονίδιο από αριστερά είναι ο Διαχειριστής Δεδομένων (Data Manager): και από εκεί ο χρήστης έχει πρόσβαση στα projects που έχει δημιουργήσει (Εικόνα 3.11).



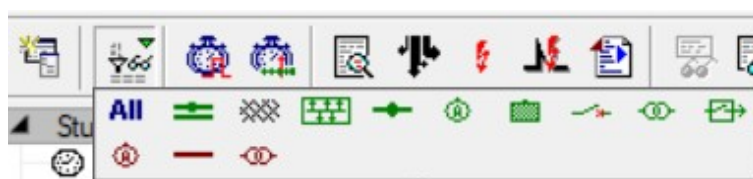
Εικόνα Error: Reference source not found.46 Καρτέλα Διαχειριστή Δεδομένων (Data Manager).

Πατώντας δεξί κλικ στο αντίστοιχο έργο που θέλει να έχει π.χ. «Tutorial Exercise 2»→ «Activate», εμφανίζεται στο περιβάλλον εργασίας το έργο αυτό (Εικόνα 3.12).



Εικόνα Error: Reference source not found.47 Ενεργοποίηση επιθυμητού Project στο περιβάλλον εργασίας

Στο περιβάλλον εργασίας στο οποίο έχει ενεργοποιηθεί το επιθυμητό έργο, για την καλύτερη διαχείριση των στοιχείων του συστήματος (project) που έχει εισάγει ο χρήστης,  μπορεί να χρησιμοποιήσει την λειτουργία Edit Relevant Objects for Calculation: που βρίσκεται στο Menu, επάνω μέρος της επιφάνειας εργασίας, ώστε να εμφανίζονται κατηγοριοποιημένα τα στοιχεία που έχουν χρησιμοποιηθεί σε αυτό όπως ζυγοί, μετασχηματιστές, διακόπτες, μηχανές κ.α. (Εικόνα3.13) [56] .



Εικόνα Error: Reference source not found.48 Λειτουργία Edit Relevant Objects for Calculation

Επιλέγοντας ένα από τα στοιχεία που θέλω να επεξεργαστώ, π.χ. τους μετασχηματιστές ανοίγει ένα καινούριο παράθυρο(Εικόνα 3.5) Στο κάτω μέρος του παραθύρου, αναλόγως την περίπτωση που έχω, παρατηρώ και διαφορετική συμπεριφορά στον κάθε μετασχηματιστή. Στο προκείμενο παράδειγμα είναι σε λειτουργία «Basic Data».

Name	In Folder	Grid	Technology	rtd. Pow. MVA	Nominal Frequency Hz	HV-rtd. Volt. kV	LV-Rtd. Volt. kV	Shc Volt. %	Cop. Los. kW
TR2 20.33/11.10	Types Transformers		Transformer	20,	50,	33,	11,	10,	0,
TR2 5.11/3.35%	Types Transformers		Transformer	5,	50,	11,	3,3	5,	0,

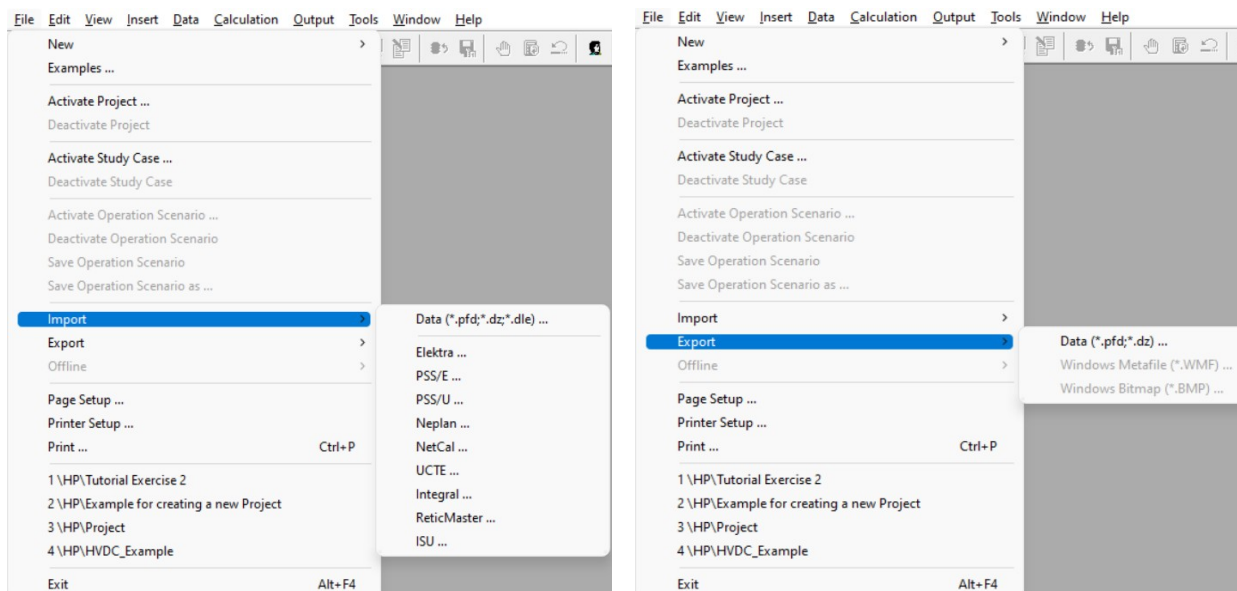
Εικόνα Error: Reference source not found.49 Φιλτράρισμα στοιχείων από την επιλογή *Edit Relevant Objects for Calculation*.

Πατώντας πάνω στο εικονίδιο του μετασχηματιστή με διπλό κλικ, ανοίγει ένα δεύτερο παράθυρο στο οποίο μπορώ να αλλάξω τα χαρακτηριστικά του μεγέθη (Εικόνα 3.6).

Εικόνα Error: Reference source not found.50 Επεξεργασία Χαρακτηριστικών του στοιχείου, μέσω του *Edit Relevant Objects for Calculation*

3.4 Εισαγωγή – Εξαγωγή αρχείων

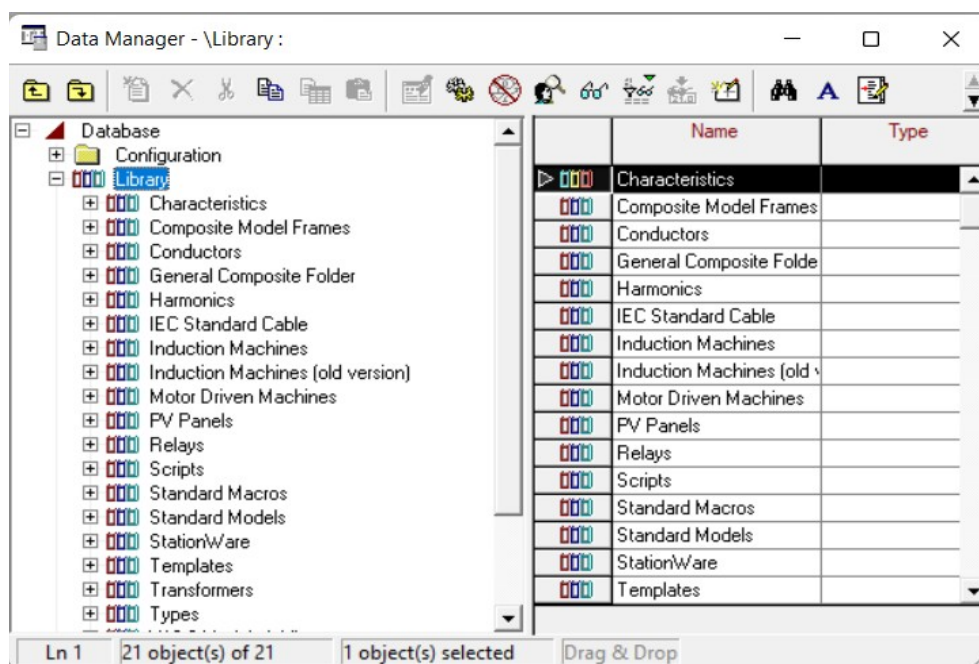
Στο PowerFactory υπάρχει η δυνατότητα εισαγωγής αρχείων τύπου «dz», «pdf» ή «dle», ενώ επίσης μπορεί να γίνει και εξαγωγή σε αρχείο τύπου «dz», «pdf». Ο τρόπος για να γίνει αυτό είναι μέσω του «File» → «Import» / «Export», (Εικόνα 3.16), αντίστοιχα.



Εικόνα Error: Reference source not found.51 Εισαγωγή αρχείου τύπου (pdf, dz, dle) / Εξαγωγή αρχείου τύπου (pdf, dz)

3.5 Βιβλιοθήκες PowerFactory

Το PowerFactory δίνει την δυνατότητα στον χρήστη να έχει ομαδοποιημένα τα στοιχεία που χρησιμοποιεί σε κάθε σύστημα που μελετάει. Η ομαδοποίηση αυτή γίνεται στις Βιβλιοθήκες (Library) του προγράμματος (Εικόνα 3.17), στις οποίες τα στοιχεία κατηγοριοποιούνται με βάση κοινά χαρακτηριστικά τους, όπως οι μετασχηματιστές διανομής 50Hz. Για κάθε Project που δημιουργεί ο χρήστης, εισάγοντας τα στοιχεία που χρησιμοποιεί, φτιάχνει μία Βιβλιοθήκη αποκλειστική για αυτό και έχει πρόσβαση σε αυτήν μέσω του Data Manager, επιλέγοντας το Project που μελετάει και πηγαίνοντας στην επιλογή «Library» [56].



Εικόνα Error: Reference source not found.52 Βιβλιοθήκη του PowerFactory

3.6 Αλγόριθμος Newton Raphson

Το PowerFactory χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο Newton-Raphson, ο οποίος μέσω επαναληπτικής γραμμικής προσέγγισης εντοπίζει την ρίζα (λύση) του προβλήματος. Έστω $f(x)$ η εξίσωση που θέλουμε να επιλύσουμε και r η ρίζα της εξίσωσης $f(x)=0$. Υποθέτουμε μία λύση x_0 , με εκτίμηση τιμής κοντά σε αυτήν της r , και από αυτή την λύση προκύπτει μία καλύτερη x_1 κ.ο.κ. έως ότου φτάσουμε σε μία σύγκλιση της τιμής αυτής στο r .

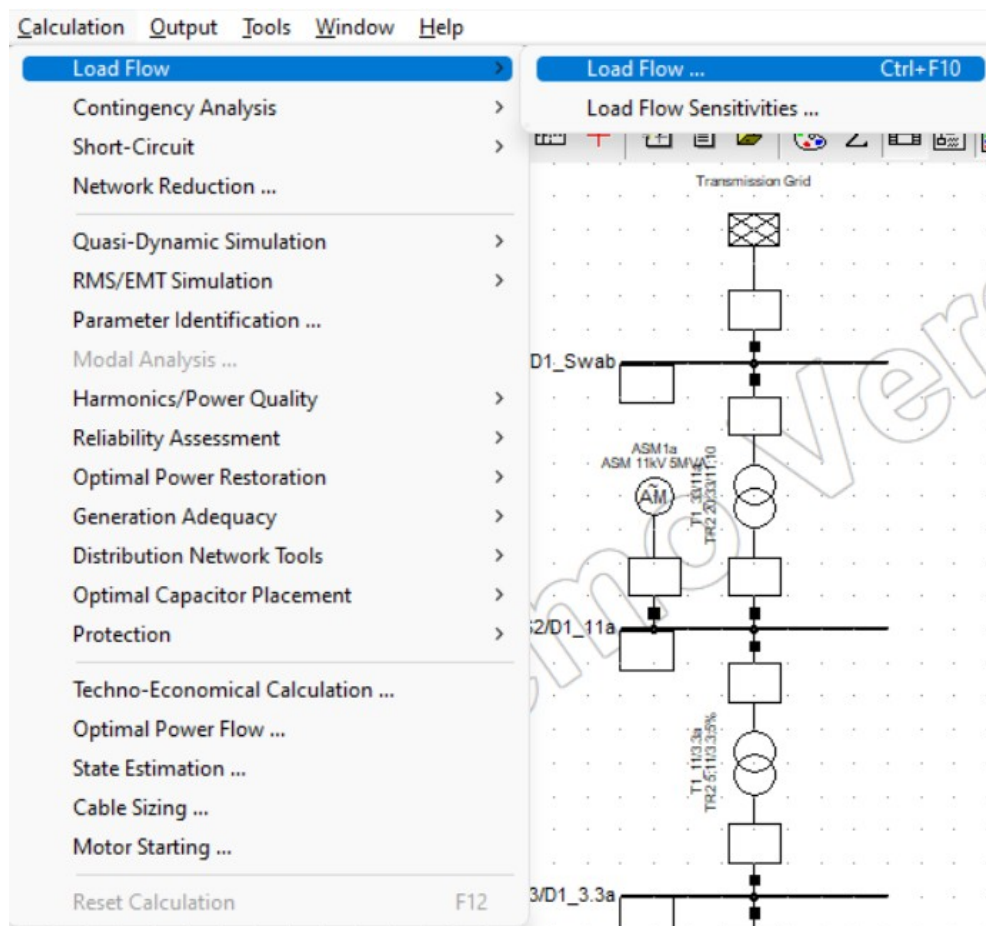
Τελικά έχουμε μια επαναληπτική εξίσωση η οποία, από την αρχική υπόθεση της x_n προκύπτει η βελτιωμένη νέα τιμή x_{n+1} , $f(x)$ η συνάρτηση της οποίας αναζητούμε την ρίζα και $f'(x)$ η παράγωγος αυτής.

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)}$$

Το αν θα συγκλίνει τελικά ο αλγόριθμος και ο ρυθμός θα που γίνεται αυτό, εξαρτάται από την πρώτη τιμή (x_0) που θα επιλεγεί για να ξεκινήσει η επαναληπτική διαδικασία. Εάν η τιμή αυτή, είναι μακριά από την ρίζα r , τότε υπάρχει και η πιθανότητα μη σύγκλισης του αλγορίθμου [57].

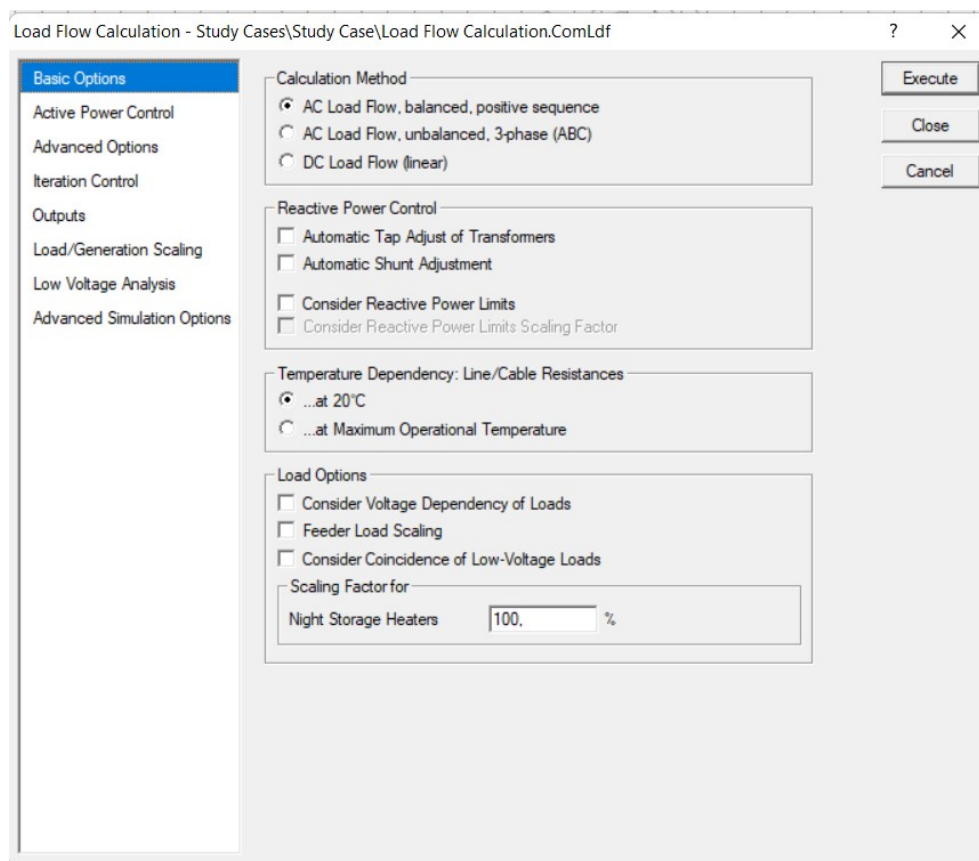
3.7 Μελέτη ροής φορτίου

Η διαδικασία μελέτης ροής φορτίου ξεκινάει με την ενεργοποίηση ενός από τα διαθέσιμα project που έχει δημιουργήσει ο χρήστης. Ο τρόπος επιλογής και ενεργοποίησης ή ο τρόπος δημιουργίας ενός Project έχει αναλυθεί παραπάνω και πλέον ο χρήστης μπορεί να ξεκινήσει την μελέτη ροής φορτίου πηγαίνοντας στο Menu Bar και επιλέγοντας «Calculation» → «Load Flow» → «Load Flow» (εικόνα 3.18) ή εναλλακτικά επιλέγεται απευθείας πατώντας το εικονίδιο . Μόλις ο χρήστης έχει ορίσει τα μεγέθη των στοιχείων που έχει το δίκτυο και ενεργοποιήσει την μελέτη φορτίου, τότε το σύστημα λύνει τον επαναληπτικό αλγόριθμο Newton-Raphson που αναλύθηκε προηγουμένως.



Εικόνα Error: Reference source not found.53 Επιλογή ανάλυσης ροής φορτίου.

Πατώντας την ανάλυση ροής φορτίου, το πρόγραμμα εμφανίζει ένα παράθυρο στο οποίο ο χρήστης επεξεργάζεται τον τρόπο υπολογισμού της ροής φορτίου και επιλέγει τις ρυθμίσεις υπό τις οποίες θα γίνει αυτή η ανάλυση. (Εικόνα 3.19).



Εικόνα Error: Reference source not found.54 Καρτέλα ρύθμισης της ροής φορτίου «Basic Option».

Ο χρήστης έχει πλέον στην διάθεσή του μία πληθώρα επιλογών για να μπορέσει να προσομοιώσει το σύστημα που θέλει να μελετήσει. Στην επιλογή «Basic Options» μπορεί να επιλέξει την μέθοδο υπολογισμού, τον έλεγχο αέργου ισχύος, την θερμοκρασία που γίνονται οι υπολογισμοί και τέλος διάφορες επιλογές σχετικά με την φύση των φορτίων (συσχέτιση τάσης, ετεροχρονισμός κ.α.)

Στην επιλογή «Calculation Method» υπάρχουν διαθέσιμοι τρεις τρόποι υπολογισμού της ροής φορτίου

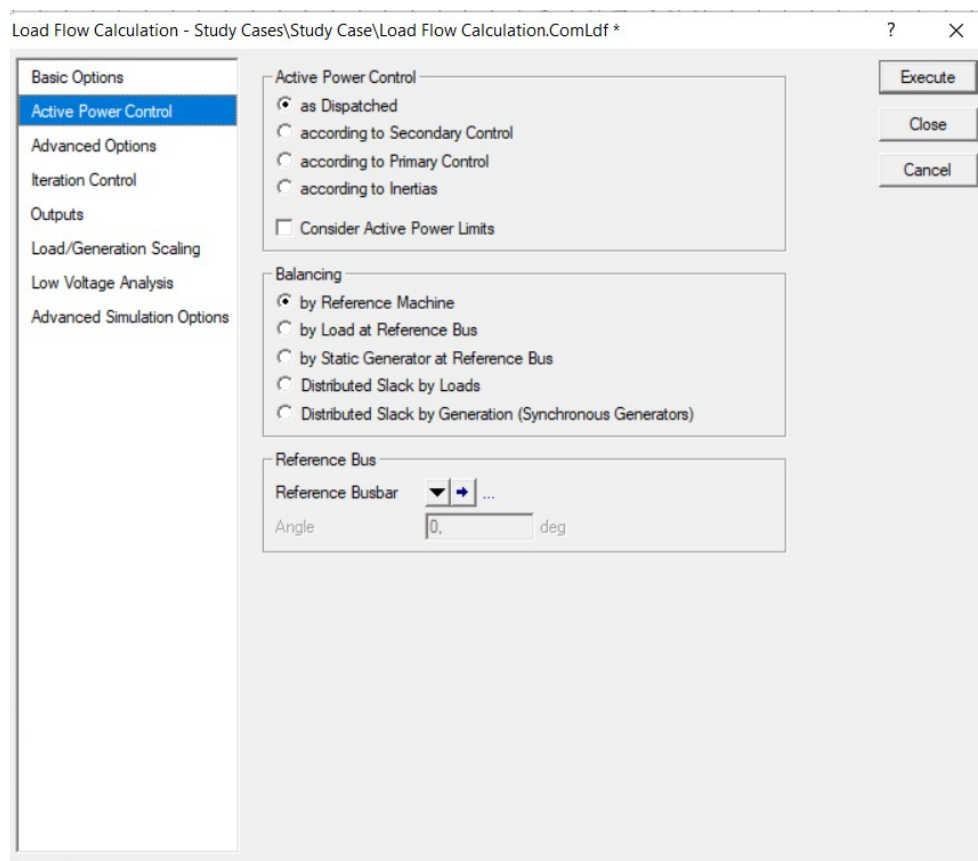
- 1) «AC Load Flow, balanced, positive sequence»: Η μέθοδος αυτή υποθέτει ότι το σύστημα είναι ισορροπημένο, δηλαδή η κάθε φάση μεταφέρει το ίδιο φορτίο με διαφορά φάσης 120° και χρησιμοποιεί θετική ακολουθία για να επιλύσει την ροή φορτίου. Συνήθως χρησιμοποιείται σε ιδανικές συνθήκες όπου το σύστημα λειτουργεί συμμετρικά και οι υπολογισμοί βασίζονται στη ροή ισχύος εναλλασσόμενου ρεύματος με ισορροπημένες τάσεις και ρεύματα σε όλες τις φάσεις.
- 2) «AC Load Flow, unbalanced, 3-phase (ABC)»: Η μέθοδος αυτή αντιμετωπίζει μη ισορροπημένες συνθήκες σε ένα τριφασικό σύστημα, όπου το φορτίο ή/και η παραγωγή μπορεί να είναι ασύμμετρα. Χρησιμοποιεί ένα πιο πολύπλοκο σύνολο εξισώσεων επειδή οι τρεις

φάσεις του συστήματος δεν είναι ίσες σε μέγεθος ή φάση. Αυτός ο τύπος ανάλυσης ροής φορτίου παρέχει μια πιο ακριβή αναπαράσταση της ροής ισχύος υπό ασύμμετρες συνθήκες.

- 3) «DC Load Flow (linear)»: Είναι μια απλουστευμένη μορφή της AC ανάλυσης, εστιάζοντας μόνο στην πραγματική ισχύ και αγνοώντας την άεργο. Συνήθως εφαρμόζεται στα συστήματα μεταφοράς όπου δεν έχουμε άεργο και υποθέτει ότι οι τάσεις είναι σταθερές. Είναι πιο γρήγορη ως ανάλυση αλλά δεν λαμβάνει υπόψιν μεταβολές στην τάση.

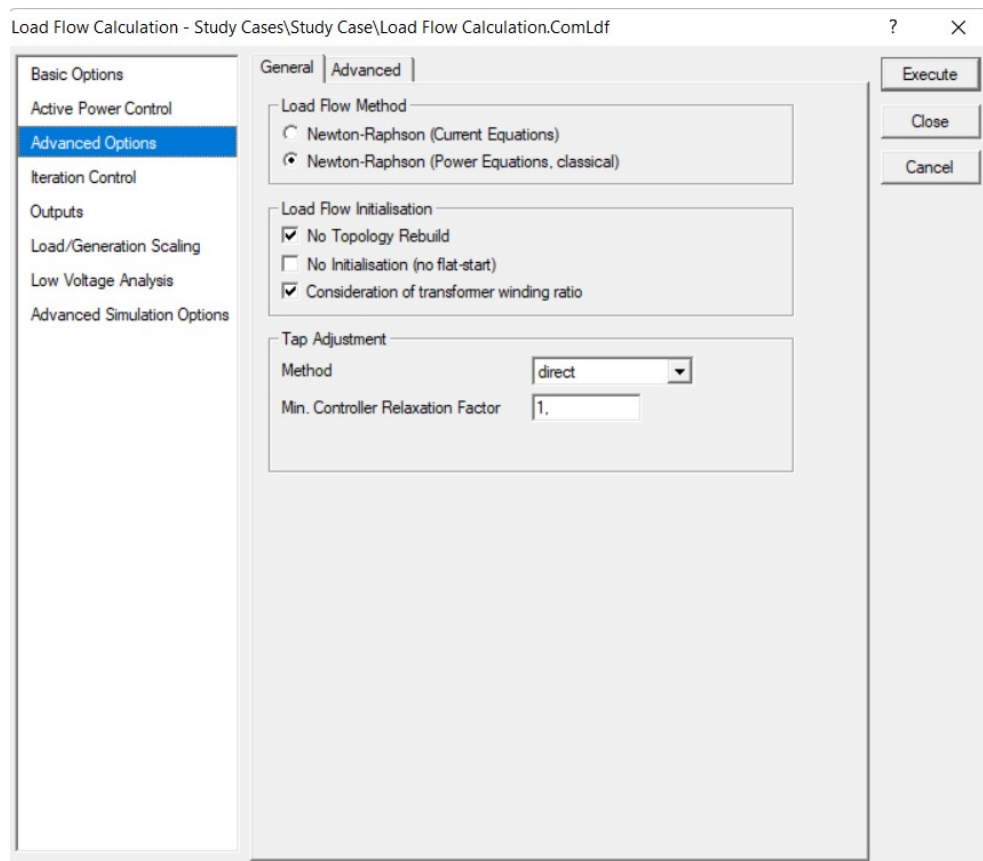
Στην επιλογή Ελέγχου Αέργου Ισχύος «Reactive Power Control» υπάρχουν οι επιλογές «Automatic tap adjustment of transformers», αλλάζοντας αυτόματα τα επίπεδα τάσης του μετασχηματιστή, «Automatic Shunt adjustment» συνδέοντας αυτόματα εγκάρσια φίλτρα και θέτοντας όρια για την άεργο ισχύ «Consider Reactive Power Limits» [56]. Στην επιλογή «Temperature Dependency: Line/Cable Resistance» καθορίζεται η θερμοκρασία στην οποία θα πραγματοποιηθεί η ανάλυση ροής φορτίου είτε στους « 20°C» είτε στην μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας « at Maximum Operational Temperature». Στην επιλογή «Load Options», καθορίζονται επιπλέον παράμετροι που αφορούν σε συσχέτιση τάσης μεταξύ των φορτίων ή τυχαιότητας της χαμηλής τάσης των φορτίων και συντελεστή κλιμάκωσης του φορτίου για να αναπαραστήσει τυχόν διακυμάνσεις.

Συνεχίζοντας στο επόμενο παράθυρο ρυθμίσεως της μελέτης ροής φορτίου «Active Power Control», ο χρήστης μπορεί να καθορίσει τον έλεγχο της ροής ενεργού ισχύος (Εικόνα 3.20)



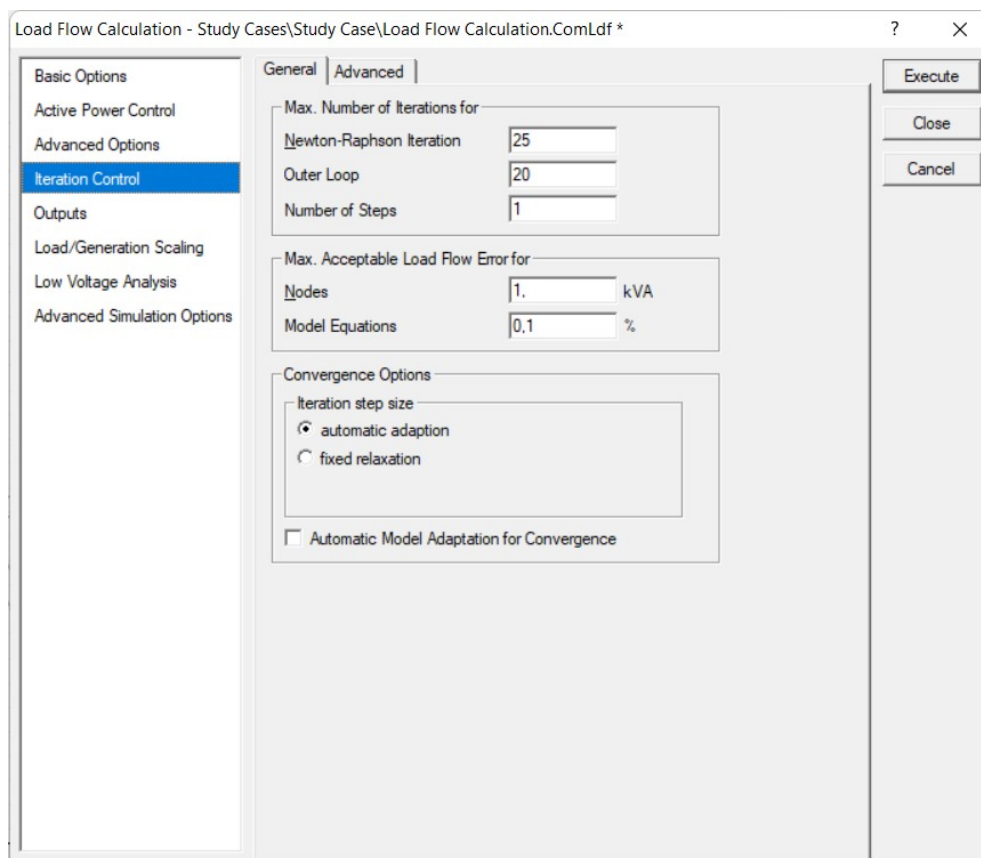
Εικόνα Error: Reference source not found.55 Επεξεργασία μελέτης ροής ισχύος «Active Power Control».

Στην επιλογή αυτή (Active Power Control), ο χρήστης έχει την δυνατότητα να διαχειρίζεται την ποσότητα πραγματικής ισχύος (μετρούμενης σε MW) που παράγεται ή καταναλώνεται από διάφορες γεννήτριες, φορτία και συσκευές εντός του συστήματος. Επιλέγοντας στο «Active Power Control» και «as Dispatched» υπολογίζεται η ισχύς που τροφοδοτείται στο σύστημα και προκύπτει η επιλογή «Balancing» στην οποία καθορίζεται ο τρόπος που γίνεται η ισορροπία μεταξύ παραγωγής και κατανάλωσης. Σύμφωνα με τον δευτεροβάθμιο έλεγχο «according to Secondary Control», αν προκύψει ανισορροπία μεταξύ των προγραμματισμένων τιμών ενεργού ισχύος κάθε μονάδας παραγωγής και των φορτίων συν τις απώλειες, ο πρωτογενής έλεγχος «according to Primary Control» θα προσαρμόσει (θα αυξήσει/μειώσει) την παραγωγή ενεργού ισχύος κάθε μονάδας, οδηγώντας σε κατάσταση υπερ- ή υποσυχνότητας. Ο δευτερεύων έλεγχος συχνότητας θα επαναφέρει στη συνέχεια τη συχνότητα στην ονομαστική της τιμή, αποκαθιστώντας την αποδοτική παραγωγή που παρέχει κάθε μονάδα. «According to Inertias» σύμφωνα με αυτή την λειτουργία το ισοζύγιο ισχύος καθορίζεται από όλες τις γεννήτριες



Εικόνα Error: Reference source not found.56 Επεξεργασία μελέτης ροής ισχύος «Advanced Options».

Στην επιλογή «Load Flow Method» ο χρήστης μπορεί να επιλέξει μία από τις μεθόδους Newton-Raphson. Στα συστήματα μεταφοράς που υπάρχει μεγάλο φορτίο, συνήθως ο κλασικός αλγόριθμος Newton-Raphson συγκλίνει καλύτερα, ενώ στα δίκτυα διανομής προτείνεται ο αλγόριθμος «Current Equations». Στην επιλογή «Load Flow Initialisation» έχουμε την «No Topology Rebuild», η οποία επιταχύνει την μελέτη ροής φορτίου εφόσον δεν αλλάζει η τοπολογία του συστήματος. Η επιλογή «No initialisation (no flat-start)», αρχικοποιεί μια ροή φορτίου από μια προηγούμενη συγκλίνουσα λύση. Ενώ η επιλογή «Consideration of Transformer winding ratio», ορίζει τον τρόπο που γίνεται η αρχικοποίηση της τάσης στους κόμβους. Στο πλαίσιο «Tap adjustment» ορίζεται ο τρόπος που θα υπολογιστεί η τάση του μετασχηματιστή. Ο «Relaxation Factor» ορίζει την ταχύτητα των συστημάτων ελέγχου της αλλαγής τάσης των μετασχηματιστών.



Εικόνα Error: Reference source not found.57 Επεξεργασία μελέτης ροή φορτίου «Iteration Control».

Σε αυτή την επιλογή ο χρήστης καθορίζει το μέγιστο πλήθος των επαναλήψεων «Max. Number of Iteration for» που θα πραγματοποιήσει η επαναληπτική μέθοδος Newton-Raphson, ενώ στο πεδίο «Max Acceptable Load Flow Error for» καθορίζεται το όριο σύγκλισης για τον τερματισμό της επαναληπτικής διαδικασίας. Εάν το σύστημα δεν καταφέρει να βρει λύση μέσω της μη γραμμικής εξίσωσης που επιλύει, ο χρήστης ενεργοποιώντας την επιλογή «Automatic Model Adaptation for Convergence», δίνει την δυνατότητα στο σύστημα να αλλάξει ελαφρώς το πρόβλημα που επιλύει και να το κάνει γραμμικό. Τυχόν μεταβολές θα αναφερθούν στο «Output Window».

3.7.1 Ανάλυση αποτελεσμάτων μελέτης ροής φορτίου

Μόλις έχουν ολοκληρωθεί οι ρυθμίσεις για την μελέτη φορτίου και πατήσει ο χρήστης την ένδειξη «Execute» (Εικόνα 3.22), το σύστημα επιλύει την μελέτη και τα αποτελέσματα αυτής είναι πλέον φανερά.

3.8 Σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών (Geographical Information System -GIS)

Ο τρόπος συλλογής γεωχωρικών δεδομένων γίνεται βάσει Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών (Geographic Information System -GIS). Το GIS είναι ένα σύστημα το οποίο συλλέγει, αποθηκεύει, επεξεργάζεται και αναλύει δεδομένα, παρέχοντας πληροφορίες για το προς εξέταση πρόβλημα. Συνήθως ένα μέρος των δεδομένων είναι χωρικά, δηλαδή κάποιο στοιχείο αντιστοιχεί σε μια γεωγραφική θέση στον χάρτη. Αυτό επιτρέπει την εμφάνιση των δεδομένων στον χάρτη και βοηθούν στην ποσοτικοποίηση και στις αλλαγές που μπορεί να συμβαίνουν σε μια συγκεκριμένη περιοχή. Τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται είναι συνήθως σε μορφή πίνακα και ονομάζονται δεδομένα χαρακτηριστικών (attribute data) [58].

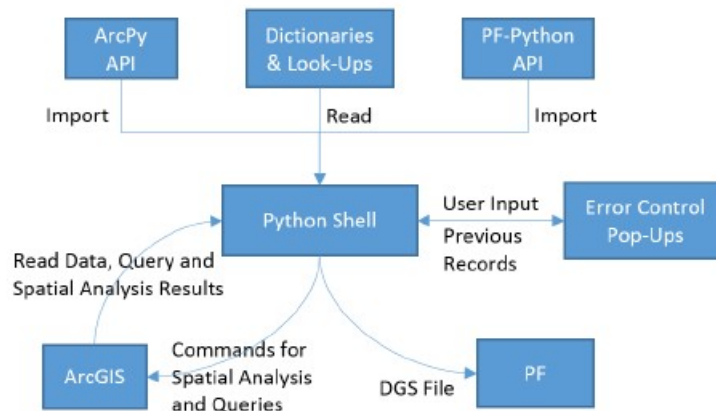
Η λειτουργία του GIS μπορεί να χωριστεί σε τέσσερα στάδια, το πρώτο αφορά στην διαχείριση δεδομένων (data management) όπως αποθήκευση και ανάλυση, το δεύτερο αφορά στην οπτικοποίηση των δεδομένων στον χάρτη (mapping and visualization), το τρίτο παρέχει χωρική ανάλυση των δεδομένων (spatial analysis) και εντοπίζει χωρικές ομοιότητες των στοιχείων και το τέταρτο εξασφαλίζει την επικοινωνία (communication) μεταξύ των δεδομένων και του προβλήματος που επιθυμούμε την λύση [59].

3.8.1 Διασύνδεση PowerFactory και GIS

Η διασύνδεση της βάσης δεδομένων του GIS με το λογισμικό DIgSILENT PowerFactory μπορεί να πραγματοποιηθεί κυρίως με δύο τρόπους. Ο πρώτος, και πιο πρακτικός, περιλαμβάνει τη δημιουργία χαρακτηριστικών πινάκων (attribute tables) στη βάση δεδομένων GIS, διαμορφωμένων κατάλληλα ώστε να διαβάζονται απευθείας από το PowerFactory, το οποίο στη συνέχεια δημιουργεί αυτόματα το μοντέλο του συστήματος.

Η δεύτερη μέθοδος για την ενσωμάτωση δεδομένων GIS στο DIgSILENT PowerFactory βασίζεται στη χρήση ενός εξαγωγικού φίλτρου (export filter). Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει την ανάγνωση των δεδομένων GIS και τη δημιουργία αρχείου DGS, το οποίο μπορεί να εισαχθεί στο PowerFactory. Αν και η μέθοδος αυτή προσφέρει μονόδρομη εξαγωγή δεδομένων, η χρήση του ArcGIS Python API (ArcPy) δίνει τη δυνατότητα δημιουργίας αμφίδρομης επικοινωνίας μεταξύ GIS και PowerFactory [54].

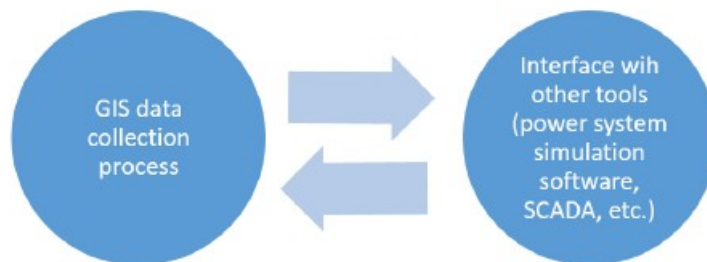
Η δομή του προγράμματος αμφίδρομης διασύνδεσης των δύο προγραμμάτων είναι η κάτωθι:



Εικόνα Error: Reference source not found.58 Βασική δομή διασύνδεσης λογισμικού [54]

Σε αυτό το παράδειγμα του συστήματος Başkent DISCO της Τουρκίας, το Python Shell, επιτρέπει την επικοινωνία μεταξύ του GIS (ArcPy API) και του PowerFactory (PF-Python API). Η βάση δεδομένων GIS της Başkent DISCO αποθηκεύει τις περισσότερες πληροφορίες για τα στοιχεία του συστήματος (όπως διατομές καλωδίων μέσης τάσης ή εγκατεστημένη ισχύ μετασχηματιστών) με αριθμητικές τιμές. Οι εξηγήσεις αυτών των αριθμών αποθηκεύονται σε Πίνακες Αντιστοίχισης (Look-Up Tables) στο ArcGIS. Αυτοί οι πίνακες λειτουργούν σαν «λεξικά» που μετατρέπουν τις αριθμητικές τιμές σε περιγραφές και μπορούν να εισαχθούν ως Python Dictionaries για να χρησιμοποιηθούν στον αλγόριθμο διασύνδεσης. Έτσι, γίνεται η αυτόματη μετάφραση των δεδομένων σε κατανοητή μορφή για ανάλυση.

Δεδομένης της μεγάλης βάσης δεδομένων του συστήματος GIS, είναι πιθανόν να προκύψουν σφάλματα με την τοπολογία, τους μετασχηματιστές, την μοντελοποίηση των γραμμών κ.α. Για αυτό προτείνεται η παράλληλη μελέτη διασύνδεσης των δεδομένων του GIS με το PowerFactory [54].

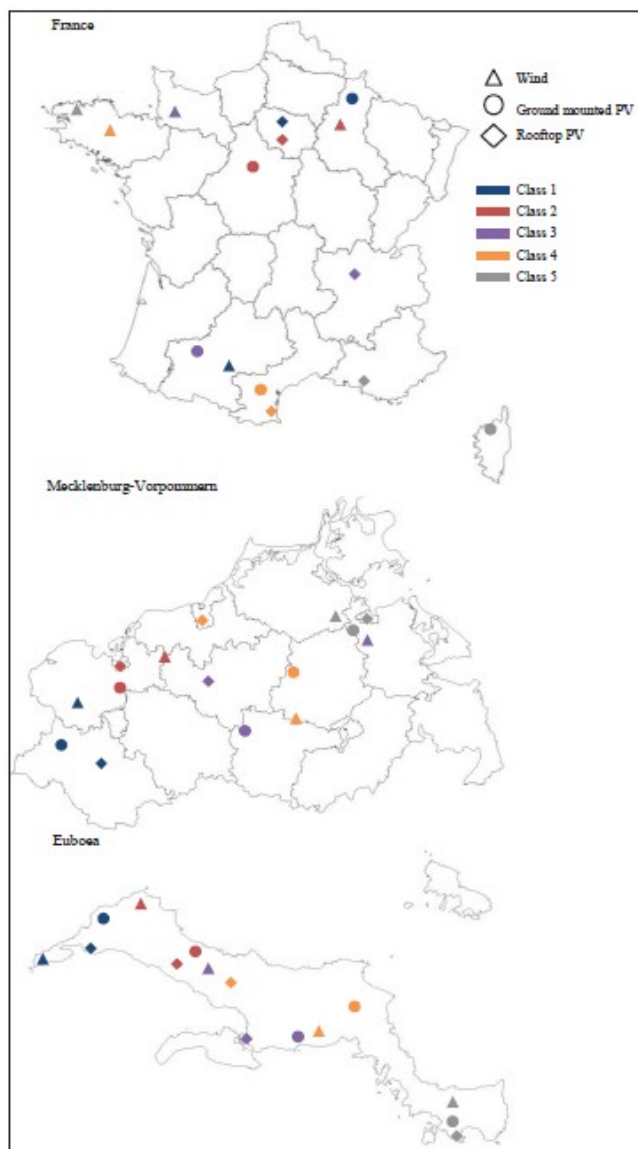


Εικόνα Error: Reference source not found.59 Προτεινόμενος τρόπος λειτουργίας [54]

3.8.2 GIS και RES

Η χρήση του συστήματος GIS αποδεικνύεται κρίσιμη για την ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (Renewable Energy Sources -RES), αφού εντοπίζει τις πιθανές θέσεις

εγκατάστασής τους. Η μεθοδολογία ξεκινά με τον εντοπισμό και τον υπολογισμό τους διαθέσιμου πεδίου γης για εγκατάσταση των RES. Ο καθορισμός της διαθέσιμης γης γίνεται βάσει δεδομένων που έχουν εισαχθεί στο GIS και επιπλέον παράγοντες όπως δάση, προστατευόμενες περιοχές και ακατάλληλες μορφολογίες του εδάφους, μειώνουν ακόμη την διαθέσιμη έκταση. Ιστορικά δεδομένα σχετικά με κλιματικές συνθήκες όπως η ταχύτητα του ανέμου και το επίπεδο ακτινοβολίας κατηγοριοποιούν τις περιοχές προς εξέταση σε πέντε κλιματικές κατηγορίες (weather classes), με την πρώτη να παρέχει την χαμηλότερη ισχύ και την πέμπτη να παρέχει την μεγαλύτερη [60].



Εικόνα Error: Reference source not found.60 Υποψήφια σημεία αναφοράς ("sites") για την Γαλλία, το Mecklenburg-Vorpommern και την Εύβοια [60]

Αφού έχει γίνει ο διαχωρισμός των περιοχών σε weather classes, το GIS επιλέγει σε κάθε κατηγορία περιοχές υψηλού δυναμικού (hotspot). Σε κάθε μία κατηγορία ένα σημείο αναφοράς (reference site) επιλέγεται για την αντιπροσώπευση της παραγόμενης ισχύς σε αυτήν την κλάση. Για κάθε site δημιουργούνται ωριαία προφίλ καιρού αποτυπώνοντας τις διακυμάνσεις του καιρού μέσα στην μέρα, επομένως και τις διακυμάνσεις της παραγωγής.

Οι υποψήφιες θέσεις των RES και η παραγόμενη ισχύς τους, τροφοδοτούνται στο σύστημα RESlion-Europe το οποίο προσομοιώνει το πως η ανανεώσιμη ενέργεια μπορεί να καλύψει την περιφερειακή ζήτηση και να βελτιστοποιήσει την ισορροπία μεταξύ ΑΠΕ και συμβατικής παραγωγής. Επιπλέον, εντοπίζονται οι απαραίτητες επεκτάσεις του δικτύου για την υποστήριξη της παραγωγής ανανεώσιμης ενέργειας. Η μεθοδολογία εφαρμόζεται

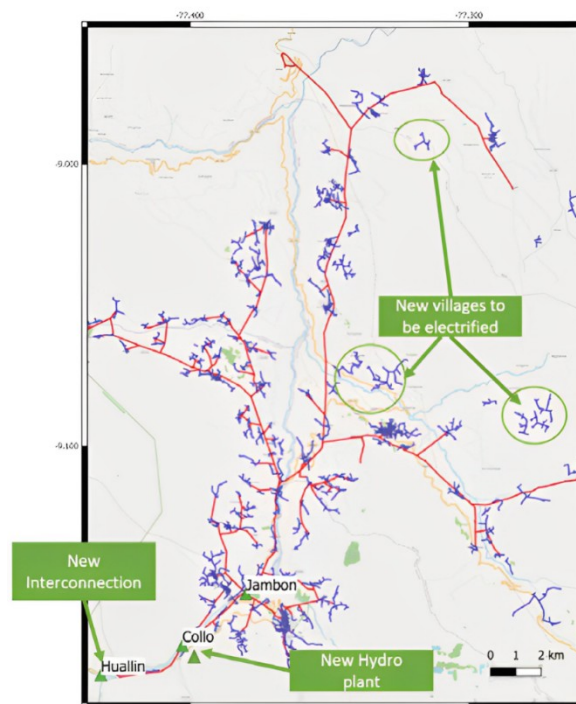
επαναληπτικά σε όλες τις κλιματικές κατηγορίες και περιοχές, δημιουργώντας μια ολοκληρωμένη αναπαράσταση των δυνατοτήτων ανανεώσιμης ενέργειας [60].

3.8.3 GIS και Επέκταση Συστήματος Ενέργειας

Μια άλλη χρήση του GIS είναι η συμβολή του στην επέκταση του ΣΗΕ, λαμβάνοντας υπόψιν τον πληθυσμό μιας περιοχής και τις καταναλωτικές τους ανάγκες. Μια τέτοια εφαρμογή εφαρμόστηκε στην πόλη Chacas και Eilhicha στο Περού. Χρονικά στοιχεία λήφθηκαν υπόψιν για τις ανάγκες ισχύος στην πόλη, αλλά και στοιχεία σχετικά με την τοποθεσία του κέντρου παραγωγής και των καταναλωτών δημιουργώντας ένα δίκτυο ακτινικής μορφής. Τα στοιχεία του δικτύου, με τις γραμμές μεταφορές του υποσταθμούς και τις ονομαστικές τάσεις σε κάθε περιοχή τροφοδοτήθηκαν από ένα αρχείο CAD στο πρόγραμμα QGIS με σκοπό την επέκταση του συστήματος ενέργειας και την διασύνδεση 32 νέων χωριών [61].

Αυτή η μετάβαση των στοιχείων από το πρόγραμμα CAD σε ένα πρόγραμμα GIS, επέτρεψε την καλύτερη οπτικοποίηση των στοιχείων του συστήματος, διευκολύνοντας την συντήρηση και τον σχεδιασμό νέων συνδέσεων. Με την απεικόνιση πύργων, γραμμών μεταφοράς, μετασχηματιστών και φορτίων παρέχεται άμεση κατανόηση των ικανοτήτων και των περιορισμών του δικτύου [61].

Επίσης, είναι δυνατή η οπτικοποίηση της κατάστασης του δικτύου από τον διαχειριστή ενημερώνοντας για την ενεργοποίηση ή απενεργοποίηση της κατάστασης των στοιχείων του συστήματος. Αυτές οι πληροφορίες είναι άμεσα διαθέσιμες και επιτρέπουν την δημιουργία αναφορών από τον αρμόδιο φορέα, διευκολύνοντας και την αλληλεπίδραση με εμπορικές βάσεις δεδομένων (χρέωση πελάτη). Τέλος μέσω μια διαδικασίας Python, τα δεδομένα από το QGIS τροφοδοτούνται στο πρόγραμμα αυτό και δημιουργείται αυτοματοποιημένα το σύστημα.

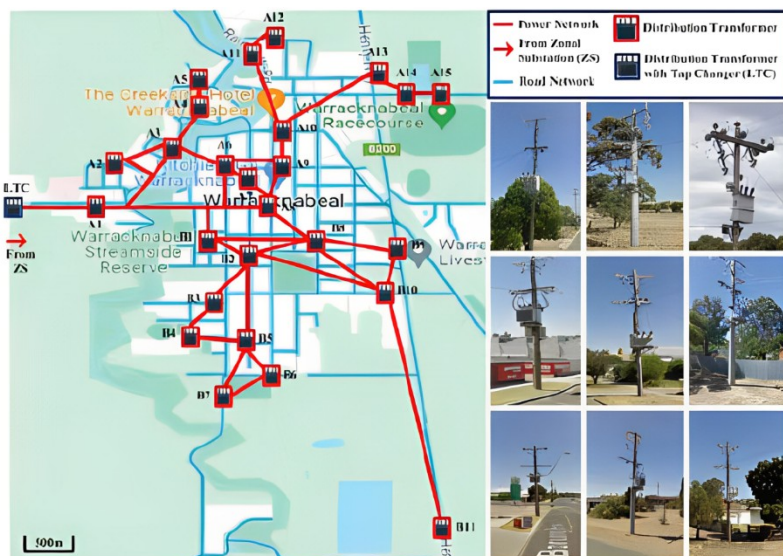


Εικόνα Error: Reference source not found.61 Οπτικοποίηση μέσω του GIS για τις νέες παρεμβάσεις στον σχεδιασμό του συστήματος του Περού [61].

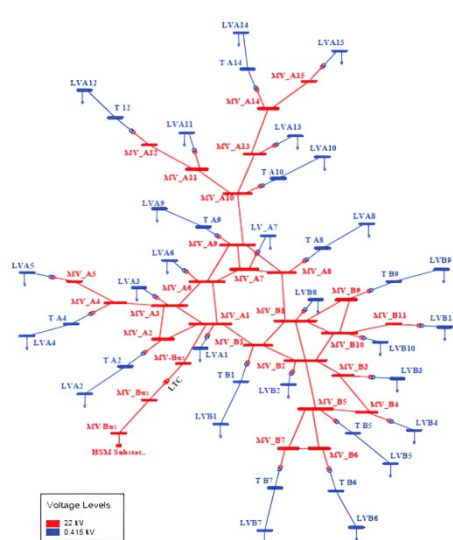
Αφού δημιουργήθηκε η αυτοματοποιημένη διαδικασία, τα δεδομένα τροφοδοτήθηκαν στο PowerFactory και αναλύθηκαν τρεις περιπτώσεις λειτουργίας του εξεταζόμενου συστήματος. Η πρώτη ήταν μια ανάλυση ροής ισχύος της τωρινής κατάστασης του συστήματος, η δεύτερη ενσωμάτωσε νέα διασύνδεση ενός κέντρου παραγωγής απευθείας με το σύστημα μεταφοράς και ανέλυσε πάλι την λειτουργία του συστήματος. Η τρίτη έλαβε υπόψιν την επέκταση για την διασύνδεση των 32 νέων χωριών που εξετάζει το κράτος και συμπέρανε ότι μακροπρόθεσμα παρά την αύξηση της ζήτησης η φόρτιση των γραμμών θα παραμείνουν κάτω από τον 40% της ονομαστικής τους [61].

Σε μία άλλη έρευνα, με στόχο την δημιουργία ενός συνθετικού δικτύου που αντικατοπτρίζει την λειτουργία του πραγματικού δικτύου στην Βικτώρια της Αυστραλίας χρησιμοποιήθηκαν το GIS και το PowerFactory μαζί. Πραγματοποιήθηκαν τρία σενάρια λειτουργίας και η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε ήταν η εξής [62].

Το πρώτο βήμα περιλάμβανε την συλλογή δεδομένων από δημόσιες πηγές, όπως το OpenStreetMap και το Google Street View, για την καταγραφή γεωγραφικών πληροφοριών του δικτύου. Τα δεδομένα περιελάμβαναν τοποθεσίες υποσταθμών, μήκη και κατευθύνσεις γραμμών διανομής, και χαρακτηριστικά φορτίου (οικιακά, εμπορικά, βιομηχανικά). Αυτές οι πληροφορίες επέτρεψαν τη διαμόρφωση μιας λεπτομερούς εικόνας της τοπολογίας του δικτύου στην αγροτική περιοχή της Βικτώριας (Εικόνα 3.4) [62].



Εικόνα Error: Reference source not found.63 Χάρτης της Βικτώριας βάσει του οποίου θα σχεδιαστεί το νέο δίκτυο [62].



Εικόνα Error: Reference source not found.62 Δίκτυο της Βικτώριας (Αυστραλία) [62].

Στο δεύτερο βήμα, με βάση τα δεδομένα GIS, δημιουργήθηκε ένα ηλεκτρικό μοντέλο του δικτύου χρησιμοποιώντας το DIgSILENT PowerFactory (Εικόνα 3.5). Το μοντέλο περιελάμβανε 26 υποσταθμούς διανομής με μετασχηματιστές διαφορετικής χωρητικότητας (100, 200 και 315

kVA) και ανάλυση των γραμμών μέσης και χαμηλής τάσης. Προσδιορίστηκαν οι κύριοι κλάδοι του δικτύου και τα χαρακτηριστικά τους, όπως η συνολική χωρητικότητα, η πυκνότητα φορτίου (420 kVA ανά τ.χλμ.) και η τοπολογία των γραμμών. Το μοντέλο έλαβε υπόψη τις πτώσεις τάσης και τις απώλειες ισχύος, ειδικά για απομακρυσμένες περιοχές με μεγάλες αποστάσεις από τους κύριους υποσταθμούς [62].

Ενώ το τρίτο βήμα ακολούθησε την προσομοίωση των τριών σεναρίων που αναλύθηκαν, σε κανονική λειτουργία, σε συνδυασμό με ΑΠΕ και τέλος, συνδυασμός ΑΠΕ και ηλεκτρικά οχήματα (EVs). Οι δοκιμές σε συνθήκες μέγιστης και ελάχιστης φόρτισης έδειξαν επιτρεπτά επίπεδα τάσης (0,94 p.u έως 1,10 p.u) [62].

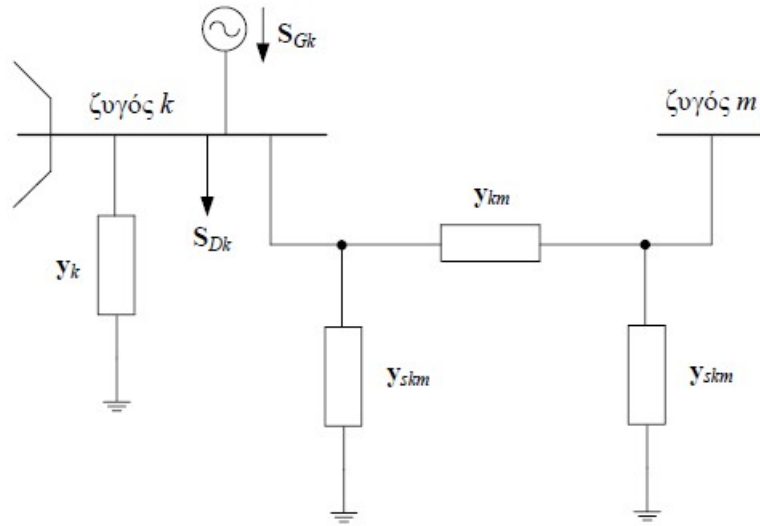
3.9 Εισαγωγή στη Ροή Ισχύος

Η ανάλυση ροής ισχύος μπορεί να διαχωριστεί μεταξύ εναλλασσομένου (AC) και σε συνεχούς (DC) ρεύματος. Μέσω αυτής υπολογίζονται οι άγνωστες τάσεις των ζυγών, καθώς και η άγνωστη ροή ισχύος στο σύστημα, βάσει συγκεκριμένης παραγωγής και κατανάλωσης ισχύος. Η σημαντικότητά τους έγκεινται στο γεγονός ότι οι ροές ισχύος χρησιμοποιούνται κυρίως για τους εξής λόγους:

1. Κατά την διάρκεια της ημέρας η ζήτηση μεταβάλλεται και η παραγωγή οφείλει να καλύψει τα φορτία με τον πλέον οικονομικό τρόπο. Έτσι η εύρεση της απαιτούμενης παραγωγής ισχύος από τα κέντρα παραγωγής γίνεται μέσω της ανάλυσης ροής ισχύος.
2. Είναι κρίσιμες για την εξασφάλιση ότι οι τάσεις και οι ροές ισχύος παραμένουν εντός των ορισθέντων ορίων.
3. Είναι αναγκαίες για τον έλεγχο του συστήματος σε περίπτωση διαταραχών και σφαλμάτων
4. Είναι κρίσιμες για τις μελέτες που απαιτούν επέκταση του συστήματος μεταφοράς και παραγωγής ενέργειας [34].

3.9.1 AC Ροή Ισχύος

Η ανάλυση αυτή θα γίνει βασισμένη στο ανά μονάδα σύστημα (per unit) και ο ζυγός προς εξέταση είναι ο ακόλουθος.



Εικόνα Error: Reference source not found.64 Ζυγός ΣΗΕ προς ανάλυση [34]

3.9.1.1 Ισοζύγιο Ισχύος

Το Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας, υπάρχουν δύο ζυγοί, ο ζυγός k και ο ζυγός m . Στον πρώτο είναι συνδεδεμένη μία γεννήτρια με μιγαδική παραγόμενη ισχύ S_{Gk} , φορτίο μιγαδική ισχύς S_{Dk} και μια εγκάρσια σύνθετη αγωγιμότητα y_k . Οι δύο ζυγοί συνδέονται μέσω μιας γραμμής μεταφοράς που παριστάνεται με το ονομαστικό κύκλωμα Π .

Ο κάθε ζυγός αναλύεται από δύο εξισώσεις ροής φορτίου: το ισοζύγιο ενεργού ισχύος και το ισοζύγιο αέργου ισχύος.

Η εξίσωση ροής ενεργού ισχύος στο ανά μονάδα σύστημα για τον ζυγό k

$$P_{Gk} - P_{Dk} = G_{kk} \cdot V_k^2 + V_k \cdot \sum_{m \in A(k)} V_m \cdot G_{km} \cdot \cos(\delta_k - \delta_m) + V_k \cdot \sum_{m \in A(k)} V_m \cdot B_{km} \cdot \sin(\delta_k - \delta_m) \quad (3.1)$$

Η εξίσωση ροής αέργου ισχύος στο ανά μονάδα σύστημα για τον ζυγό k :

$$Q_{Gk} - Q_{Dk} = -B_{kk} \cdot V_k^2 + V_k \cdot \sum_{m \in A(k)} V_m \cdot G_{km} \cdot \sin(\delta_k - \delta_m) - V_k \cdot \sum_{m \in A(k)} V_m \cdot B_{km} \cdot \cos(\delta_k - \delta_m) \quad (3.2)$$

3.9.1.2 Γραμμής μεταφοράς και υπολογισμός Ροής Ισχύος

Για τον υπολογισμό της ανά μονάδας ροής ενεργού ισχύος που ξεκινά από την γεννήτρια στον ζυγό k και καταλήγει στον ζυγό m δίδεται η ακόλουθη εξίσωση:

$$P_{km} = (g_{km} + g_{skm}) \cdot V_k^2 - V_k \cdot V_m \cdot g_{km} \cdot \cos(\delta_k - \delta_m) - V_k \cdot V_m \cdot b_{km} \cdot \sin(\delta_k - \delta_m) \quad (3.3)$$

Ενώ για την ροή ισχύος από τον ζυγό m προς στη γραμμή μεταφοράς έχουμε:

$$P_{mk} = (g_{mk} + g_{skm}) \cdot V_m^2 - V_m \cdot V_k \cdot g_{km} \cdot \cos(\delta_m - \delta_k) - V_m \cdot V_k \cdot b_{km} \cdot \sin(\delta_m - \delta_k) \quad (3.4)$$

Οι ανά μονάδα απώλειες ενεργού ισχύος στην γραμμή μεταφοράς $k-m$ υπολογίζονται από

$$PLOSS_{km} = P_{km} + P_{mk} \quad (3.5)$$

Ενώ για την ανά μονάδα άεργο ισχύ η σχέση υπολογισμού που χρησιμοποιούνται στον ζυγό k με κατεύθυνση από τον ζυγό k προς τον ζυγό m είναι η εξής:

$$Q_{km} = -(b_{km} + b_{skm}) \cdot V_k^2 - V_k \cdot V_m \cdot g_{km} \cdot \sin(\delta_k - \delta_m) - V_k \cdot V_m \cdot b_{km} \cdot \cos(\delta_k - \delta_m) \quad (3.6)$$

Ενώ οι ανά μονάδα άεργος ισχύς στον ζυγό m , που ρέει από τον ζυγό m προς τον ζυγό k υπολογίζεται:

$$Q_{mk} = -(b_{km} + b_{skm}) \cdot V_m^2 - V_m \cdot V_k \cdot g_{km} \cdot \sin(\delta_m - \delta_k) + V_k \cdot V_m \cdot b_{km} \cdot \cos(\delta_m - \delta_k) \quad (3.7)$$

Και οι συνολικές απώλειες αέργου ισχύος στο ανά μονάδα σύστημα υπολογίζονται από την σχέση (3,8)

$$QLOSS_{km} = P_{km} + P_{mk} \quad (3.8)$$

3.9.2 DC ανάλυση ροής ισχύος

Η ανάλυση της DC ροής ισχύος γίνεται με ορισμένες παραδοχές βασισμένες στην ανάλυση AC ροής ισχύος.

- 1) Όλοι οι ζυγοί έχουν μέτρο τάσης ίσο με αυτό του ονομαστικού ζυγού αναφοράς δηλαδή 1.
- 2) Οι γωνίες (σε ακτίνια) των τάσεων οποιωνδήποτε ζυγών θεωρούνται ίσες, άρα προκύπτει η απλούστευση ότι $\sin(\delta_k - \delta_m) = \delta_k - \delta_m$ και $\cos(\delta_k - \delta_m) = 1$, στους αντίστοιχους ζυγούς k , m που αναλύθηκαν προηγουμένως.
- 3) Ο υπολογισμός της ανάλυσης DC ροής ισχύος έχει ως αφετηρία το μοντέλο γραμμής μεταφοράς μικρού μήκους χωρίς απώλειες [34]

Με βάση αυτές τις υποθέσεις και την αντικατάστασή τους στους τύπους που αναλύθηκαν άνωθεν, η ανάλυση DC περιγράφεται από τις εξής εξισώσεις

Για τον υπολογισμό της ανά μονάδας ροής ενεργού ισχύος που ξεκινά από την γεννήτρια στον ζυγό k και καταλήγει στον ζυγό m :

$$P_{km} = \frac{(\delta_k - \delta_m)}{X_{km}} \quad (3.9)$$

Ενώ για τον υπολογισμό της ανά μονάδας ροής ενεργού ισχύος που ξεκινά από τον ζυγό m και καταλήγει στον ζυγό k :

$$P_{mk} = \frac{(\delta_m - \delta_k)}{X_{km}} = -P_{km} \quad (3.10)$$

Έτσι οι συνολικές απώλειες ενεργού ισχύος στην γραμμής μεταφοράς $k - m$ ισούνται με το μηδέν όταν γίνεται χρήση της DC ανάλυσης ροής φορτίου

$$PLOSS_{km} = P_{km} + P_{mk} = 0 \quad (3.11)$$

Η DC ανάλυση δεν έχει άεργα και έτσι οι απώλειες σε άεργο ισχύ είναι μηδενικές, αφού δεν ρέει καθόλου σε καμία από τις δύο κατευθύνσεις k προς m ή m προς k , άρα

$$QLOSS_{km} = Q_{km} + Q_{mk} = 0 \quad (3.12)$$

Για τον ακριβή ορισμό των μεγεθών του Κεφαλαίου 3.1, ο αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει στο [34].

3.10 Βέλτιστη ανάλυση ροής ισχύος (OPF)

Σε αυτή την περίπτωση ανάλυσης υπάρχουν δύο διαθέσιμα μοντέλα βέλτιστης ροής ισχύος (Optimal Power Flow -OPF)

- 1) *Βέλτιστη DC ροή ισχύος*. Σύμφωνα με αυτή την ανάλυση, γίνεται χρήση του μοντέλου της DC ροής ισχύος που αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 3.1.2. Ο υπολογισμός της ενεργού ισχύος γίνεται προσεγγιστικά, παραλείπονται οι ροές αέργου ισχύος στο σύστημα (αφού είναι ίσες με το μηδέν-0) και τα μέτρα των τάσεων σε όλους τους ζυγούς ταυτίζονται με την ονομαστική τους τιμή.
- 2) *Βέλτιστη AC ροή ισχύος*. Σύμφωνα με αυτή την ανάλυση ο υπολογισμός της, ροής ενεργού και άεργου ισχύος και της τάσης και γωνίας των ζυγών, γίνεται με βάση το Κεφάλαιο 3.1.1, εξασφαλίζοντας υπολογισμό με ακρίβεια [34].

3.10.1 Βέλτιστη DC ροής ισχύος (DC-OPF)

Ο υπολογισμός της βέλτιστη DC ροής ισχύος γίνεται βάσει του Κεφαλαίου 3.1.2 και συνδυάζεται με την χρήση διαφορετικών αντικειμενικών συναρτήσεων. Η ανάλυση αυτή θα πρέπει να ακολουθεί ορισμένους περιορισμούς, οι πιο συνηθισμένοι είναι οι εξής:

- «Τήρηση του ισοζυγίου ισχύος σε κάθε ζυγό του συστήματος
- Η γωνία της τάσης κάθε ζυγού κυμαίνεται εντός προκαθορισμένων ορίων
- Η γωνία της τάσης του ζυγού αναφοράς είναι προκαθορισμένη και συνήθως ίση με μηδέν
- Η παραγωγή ενεργού ισχύος κάθε γεννήτριας κυμαίνεται εντός των τεχνικών ορίων της δηλαδή μεταξύ της ελάχιστης και της μέγιστης παραγόμενης ενεργού ισχύος

- Η ροή ενεργού ισχύος σε κάθε γραμμή μεταφοράς πρέπει να μην υπερβαίνει την ονομαστική ικανότητα φόρτισης (ονομαστική ενεργό ισχύ) της κάθε γραμμής μεταφοράς θα» [34].

3.10.1.1 Παράδειγμα εφαρμογής DC-OPF

Στην παρούσα περίπτωση εξετάζεται η τοποθέτηση μπαταριών στο IEEE RTS 24-bus system και αξιολογείται βάσει DC-OPF [63]. Η αντικειμενική συνάρτηση στοχεύει στην ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους της παροχής ηλεκτρικής ενέργειας, λαμβάνοντας υπόψη και αυτή της μπαταρίας. Στη συνέχεια καθορίζονται οι περιορισμοί στην παραγωγή και στην ροή ισχύος, ενώ τέλος εξετάζονται συγκεκριμένα η παραγωγή των ανεμογεννητριών και οι καταστάσεις φόρτισης και εκφόρτισης της μπαταρίας.

Τροφοδοτώντας τα πραγματικά δεδομένα για την αντικειμενική συνάρτηση (ισχύς γεννητριών, τιμή kWh κ.α.) και για την DC-OPF, εξετάζονται τέσσερα διαφορετικά σενάρια λειτουργίας καθ' ένα στα οποία εξετάζεται η ενσωμάτωση του BESS. Τα αποτελέσματα της έρευνας παρουσιάζονται στην κάτωθι εικόνα:

Case	C^T without BESS (\$)	C^T with BESS (\$)	C^T Saving	P_S^R (MW)	E_S^R (MWh)
Basic	142,426,300.0	137,902,736.0	-3.18%	518.7	55,532.5
Wind	129,124,900.0	123,044,116.9	-4.71%	664.6	60,776.3
Solar	139,000,200.0	134,686,711.1	-3.10%	512.9	75,340.5
Hybrid	144,472,100.0	120,544,099.6	-16.56%	622.8	44,976.4

Εικόνα Error: Reference source not found.65 Αποτελέσματα DC-OPF για διαφορετικά σενάρια λειτουργίας, βέλτιστα κόστη με και χωρίς BESS [63].

Στο πρώτο σενάριο εξετάζεται το σύστημα χωρίς ΑΠΕ και χωρίς BESS, ενώ στην επόμενη στήλη παρουσιάζονται τα αποτελέσματα με τη χρήση BESS. Η τρίτη στήλη δείχνει το ποσοστό εξοικονόμησης κόστους, η τέταρτη καταγράφει την ονομαστική ισχύ της μπαταρίας (MW), ενώ η τελευταία παρουσιάζει την ονομαστική ενέργεια του BESS (MWh). Στα υπόλοιπα τρία σενάρια εξετάζονται οι επιπτώσεις της αιολικής, της ηλιακής ενέργειας, καθώς και ο συνδυασμός τους (Hybrid). Ο συνδυασμός των δύο ΑΠΕ (Hybrid) με τη χρήση BESS επιτυγχάνει τη μεγαλύτερη εξοικονόμηση κόστους, φτάνοντας το 16,56% [63].

3.10.2 Βέλτιστη AC ροής ισχύος

Ο υπολογισμός της βέλτιστη AC ροής ισχύος γίνεται βάσει του Κεφαλαίου 3.1.1 και συνδυάζεται με την χρήση διαφορετικών αντικειμενικών συναρτήσεων. Η ανάλυση αυτή θα πρέπει να ακολουθεί ορισμένους περιορισμούς, οι πιο συνηθισμένοι είναι οι εξής:

- «Τήρηση του ισοζυγίου ενεργού ισχύος σε κάθε ζυγό του συστήματος
- Τήρηση του ισοζυγίου αέργου ισχύος σε κάθε ζυγό του συστήματος
- Το μέτρο της τάσης κάθε ζυγού κυμαίνεται εντός προκαθορισμένων ορίων, δηλαδή μεταξύ μιας ελάχιστης και μιας μέγιστης τιμής
- Η γωνία της στάσης κάθε ζυγού κυμαίνεται εντός προκαθορισμένων ορίων.
- Η γωνία της τάσης του ζυγού αναφοράς είναι προκαθορισμένη και συνήθως ίση με το μηδέν.
- Η παραγωγή ενεργού ισχύος κάθε γεννήτριας κυμαίνεται εντός των τεχνικών της ορίων, δηλαδή μεταξύ της ελάχιστης και της μέγιστης παραγόμενης ενεργού ισχύος.
- Η παραγωγή αέργου ισχύος κάθε γεννήτριας κυμαίνεται εντός των τεχνικών της ορίων, δηλαδή μεταξύ της ελάχιστης και της μέγιστης παραγόμενης αέργου ισχύος.
- Η ροή φαινόμενης ισχύος σε κάθε γραμμή μεταφοράς πρέπει να μην υπερβαίνει την ονομαστική ικανότητα φόρτισης (ονομαστική φαινόμενη ισχύ) της κάθε γραμμής μεταφοράς» [34].

3.11 Αλγόριθμος Newton Raphson

Το PowerFactory χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο Newton-Raphson, ο οποίος μέσω επαναληπτικής γραμμικής προσέγγισης εντοπίζει την ρίζα (λύση) του προβλήματος. Έστω $f(x)$ η εξίσωση που θέλουμε να επιλύσουμε και r η ρίζα της εξίσωσης $f(x)=0$. Υποθέτουμε μία λύση x_0 , με εκτίμηση τιμής κοντά σε αυτήν της r , και από αυτή την λύση προκύπτει μία καλύτερη x_1 κ.ο.κ. έως ότου φτάσουμε σε μία σύγκλιση της τιμής αυτής στο r .

Τελικά έχουμε μια επαναληπτική εξίσωση η οποία, από την αρχική υπόθεση της x_n προκύπτει η βελτιωμένη νέα τιμή x_{n+1} , $f(x)$ η συνάρτηση της οποίας αναζητούμε την ρίζα και $f'(x)$ η παράγωγος αυτής.

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)}$$

Το αν θα συγκλίνει τελικά ο αλγόριθμος και ο ρυθμός θα που γίνεται αυτό, εξαρτάται από την πρώτη τιμή (x_0) που θα επιλεγεί για να ξεκινήσει η επαναληπτική διαδικασία. Εάν η τιμή αυτή, είναι μακριά από την ρίζα r , τότε υπάρχει και η πιθανότητα μη σύγκλισης του αλγορίθμου [57].

Μερικές από τις εξισώσεις που καλείται να επιλύσει το PowerFactory στην ανάλυση ροής ισχύος (power flow analysis) έχουν εξηγηθεί άνωθεν και μέσω αυτών το σύστημα εξάγει τα αποτελέσματα που θέλουμε, εφαρμόζοντας την επαναληπτική μέθοδο Newton Raphson σε κάθε μία από αυτές.

3.12 Δυνατότητες PowerFactory

Το DIgSILENT PowerFactory είναι ένα ολοκληρωμένο λογισμικό ανάλυσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας που προσφέρει ένα ευρύ φάσμα δυνατοτήτων για τη μοντελοποίηση, προσομοίωση και βελτιστοποίηση ηλεκτρικών δικτύων. Τα βασικά χαρακτηριστικά του περιλαμβάνουν:

- 1) Ανάλυση ροής φορτίου (load flow analysis): Πραγματοποιεί ανάλυση κανονικής λειτουργίας (steady-state) για να ελέγξει τα επίπεδα τάσης, τις απώλειες και την ροή ισχύος.
- 2) Δυναμικές και Μεταβατικές Προσομοιώσεις (dynamic and transient simulation): Μοντελοποιεί την συμπεριφορά του συστήματος υπό συνθήκες σφάλματος ή μεταβατικών καταστάσεων.
- 3) Ανάλυση αρμονικών (harmonic analysis): Προσδιορίζει τις παραμορφώσεις που προκαλούνται από τις αρμονικές στο δίκτυο και προτείνει τρόπους βελτίωσής τους.
- 4) Ενσωμάτωση ΑΠΕ (renewable integration): Υποστηρίζει την μοντελοποίηση και προσομοίωση των αιολικών πάρκων, των φωτοβολταϊκών και των συστημάτων αποθήκευσης, λαμβάνοντας υπόψιν την μεταβλητότητά τους στο δίκτυο.
- 5) Ανάλυση αξιοπιστίας και ρίσκου (reliability and risk assessment): Αξιολογεί την αξιοπιστία του συστήματος υπό διαφορετικά σενάρια λειτουργίας και πραγματοποιεί πιθανοτικές αξιολογήσεις.
- 6) Οικονομική Βελτιστοποίηση (economic optimization): Βελτιστοποιεί τις επιχειρησιακές στρατηγικές, όπως η δέσμευση μονάδων, η οικονομική κατανομή και ο σχεδιασμός επενδύσεων [55].

Το PowerFactory είναι ευέλικτο και συμβατό με άλλα προγραμματιστικά εργαλεία και συστήματα καθιστώντας το ικανό να λειτουργήσει παράλληλα με αυτά.

- Ενσωμάτωση GIS: Συνδυάζεται με πλατφόρμες GIS, όπως το ArcGIS ή το QGIS, για την ενσωμάτωση χωρικών δεδομένων για τη χαρτογράφηση της υποδομής και τη βελτιστοποίηση της διάταξης του δικτύου.

- Συστήματα SCADA: Συνδέεται με συστήματα εποπτικού ελέγχου και συλλογής δεδομένων (SCADA) για παρακολούθηση και έλεγχο σε πραγματικό χρόνο.
- Συστήματα διαχείρισης ενέργειας (EMS): Ενσωματώνεται με EMS για τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας του δικτύου με βάση τη ζήτηση φορτίου και την παραγωγή.
- Python Scripting: Επιτρέπει την αυτοματοποίηση και την προηγμένη ανάλυση μέσω της διεπαφής σεναρίων (scripting interface), διευκολύνοντας την εισαγωγή/εξαγωγή δεδομένων.
- Μοντέλα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας: Διασυνδέεται με εργαλεία προσομοίωσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για τη μελέτη των επιπτώσεων της μεταβλητότητας της ηλιακής και αιολικής ενέργειας στα δίκτυα [54][60-62].

3.13 Μέθοδοι OPF

Η διεσπαρμένη παραγωγή (Distributed Generation -DG), έφερε στο προσκήνιο νέες μεθόδους OPF, με τις μεν παραδοσιακές να χρησιμοποιούν μαθηματικά μοντέλα και τις δε σύγχρονες να βασίζονται σε αλγορίθμους τεχνητής νοημοσύνης (Artificial Intelligence -AI) [64].

3.13.1 Παραδοσιακές μέθοδοι

Οι παραδοσιακές μέθοδοι βασίζονται σε μαθηματικές τεχνικές για την επίλυση της ροής ισχύος και αναλύονται οι μέθοδος αντικειμενικής συνάρτησης (objective function sets method) και η μέθοδος εσωτερικού σημείου (Interior point method) [64].

3.13.1.1 Objective function sets method

Σε αυτή την μέθοδο απαιτείται συνεργασία συστημάτων και η μεταφορά δεδομένων σχετικά με το σύστημα ενέργειας. Χρησιμοποιούνται πολλές αντικειμενικές συναρτήσεις και βάσει των δεδομένων που έχουν συλλεχθεί, δημιουργούνται διαφορετικές τοπολογίες για το σύστημα. Αφού επιλεχθεί η κατάλληλη διαμόρφωση του συστήματος, υπολογίζονται όρια τάσης με την εφαρμογή των DG, οι απώλειες και οι περιορισμοί από την ίδια την DG [64].

3.13.1.2 Interior point method

Η χρήση γραμμικού προγραμματισμού πραγματοποιείται για αυτήν την μέθοδο, χρησιμοποιώντας μια βοηθητική συνάρτηση που περιλαμβάνει τις συναρτήσεις απώλειας και τους περιορισμούς. Έτσι εντοπίζεται η μικρότερη δυνατή λύση της συνάρτησης που ισοδυναμεί με την εύρεση της μικρότερης τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης Lagrangian. Η αποτελεσματικότητά της βασίζεται στην ορθή επιλογή των περιορισμών και της αρχικής τιμής βάσει της οποίας γίνεται η επαναληπτική διαδικασία [64].

3.13.2 Μέθοδοι τεχνητής νοημοσύνης

3.13.2.1 Bees algorithm

Σε αυτήν την μέθοδο δεν απαιτείται να εισαχθούν οι αντικειμενικές συναρτήσεις και οι περιορισμού *a priori* με στόχο την εύρεση μόνο μίας λύσης, αλλά μπορούν να εισαχθούν πολλές αντικειμενικές συναρτήσεις και να εντοπιστεί μια λύση που να ικανοποιεί ένα πρόβλημα με πολλές αντικειμενικές συναρτήσεις. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στον ασαφή έλεγχο (fuzzy control) όπου τα δεδομένα εισόδου του προβλήματος λαμβάνουν συνεχή τιμές από το 0 έως το 1 και στο multi-objective bees algorithm (MOBA) [64].

3.13.2.2 Sine-cosine αλγόριθμος

Ο αλγόριθμος αυτός παράγει τυχαία μία λύση, μετά την αξιολογεί και την ανανεώνει βάσει επίλυσης μέσω εξισώσεων ημιτόνων και συνημίτονων. Βέβαια παράγει ανακριβή λύση με πρόωρη σύγκλιση και δεν εφαρμόζεται εύκολα σε μεγάλης έκτασης έργα [64].

3.13.2.3 Whale optimization αλγόριθμος (WOA)

Αυτή η μέθοδος προσομοιώνει το κυνήγι της φάλαινας με στόχο την εύρεση λύσης στο πρόβλημα. Ο αλγόριθμος αυτός παράγει τυχαία ένα σύνολο φαλαινών (whales) τις οποίες προσομοιάζει με τις πιθανές λύσεις. Κατά την επαναληπτική διαδικασία εντοπίζονται οι βέλτιστες λύσεις από το σύνολο των λύσεων των φαλαινών και ορίζονται ως θηράματα (prey). Οι θέσεις των φαλαινών στη συνέχεια ενημερώνονται μέσω τριών βασικών διαδικασιών που προσομοιώνουν τη συμπεριφορά τους: την αναζήτηση θηράματος, την περικύκλωση του θηράματος και την προσομοίωση της συμπεριφοράς «φυσαλίδων».

Η αναζήτηση θηράματος περιλαμβάνει την προσαρμογή της θέσης των φαλαινών ώστε να πλησιάζουν την καλύτερη γνωστή λύση. Η περικύκλωση του θηράματος σηματοδοτεί μια φάση όπου οι φάλαινες σχηματίζουν έναν κυκλικό σχηματισμό γύρω από την καλύτερη λύση, υποδεικνύοντας τη σύγκλιση προς τη βέλτιστη λύση. Η συμπεριφορά με «φυσαλίδες» προσομοιώνει την ικανότητα των φαλαινών να περιορίζουν την κίνηση του θηράματος, μειώνοντας ουσιαστικά τον χώρο αναζήτησης.

Όμως αυτή η μέθοδος μπορεί να αντιμετωπίσει δυσκολίες, όπως αργό ρυθμό σύγκλισης και εύρεση υπο-βέλτιστων λύσεων λόγω πρόωρης σύγκλισης [64].

3.13.2.4 Γενετικός αλγόριθμος

Αυτός ο αλγόριθμος, δημιουργεί την έννοια του γονιδίου (genes) βάσει την οποίας αξιολογεί την κατάσταση των ατόμων. Έπειτα παράγει ένα σύνολο ατόμων, επιλέγει αυτούς με την καλύτερη επίδοση γονιδίου και τους υπόλοιπους τους εξαλείφει. Έπειτα δημιουργούνται νέες

λύσεις από τον συνδυασμό των παραπάνω ατόμων και αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται και βελτιώνονται τα γονίδια του πληθυσμού με την πάροδο του χρόνου. Παρ' όλα αυτά, η μέθοδος αυτή απαιτεί πολύ υπολογιστική ισχύ και είναι ευαίσθητη στις παραμέτρους, για αυτό προτάθηκε μία άλλη μέθοδος η non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-II). Η NSGA, εισάγει μια γρήγορη μέθοδο ταξινόμησης για την κατάταξη των λύσεων με βάση την κυριαρχία (dominance) και την απόσταση συνωστισμού (crowding distance), βελτιώνοντας τις επιδόσεις και μειώνοντας την πολυπλοκότητα [64].

3.13.2.5 Particle Swam Optimization (PSO)

Η Βελτιστοποίηση σμήνους σωματιδίων πολλαπλών στόχων (MOPS) είναι μια επέκταση της βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων (PSO) που έχει σχεδιαστεί για να χειρίζεται πολλαπλούς στόχους. Ξεκινά με την αρχικοποίηση ενός τυχαίου πληθυσμού και ταχυτήτων στο χώρο αναζήτησης. Κάθε σωματίδιο αξιολογείται με βάση την κυριαρχία Pareto και τα μη κυριαρχούμενα σωματίδια αποθηκεύονται σε ένα εξωτερικό αρχείο που ονομάζεται μέτωπο Pareto. Το αρχείο χωρίζεται σε υποπεριοχές και τα σωματίδια επιλέγονται από περιοχές χαμηλής πυκνότητας για να διατηρηθεί η ποικιλομορφία. Τα σωματίδια ενημερώνουν τις θέσεις και τις ταχύτητές τους χρησιμοποιώντας τύπους που ενσωματώνουν την προσωπική τους καλύτερη θέση (P_{best}) και μια παγκόσμια καλύτερη θέση (G_{best}) που επιλέγεται από το αρχείο. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται επαναληπτικά μέχρι να ικανοποιηθεί μια συνθήκη διακοπής. Παραλλαγές όπως το MOFESPO βελτιώνουν το MOPS αντιμετωπίζοντας διαφορετικά τις εφικτές και τις μη εφικτές λύσεις, δίνοντας προτεραιότητα στην ικανοποίηση των περιορισμών και αξιοποιώντας την κοινωνική έλξη, ακόμη και χωρίς αρχικές εφικτές λύσεις [64] [65].

3.13.2.6 Επιβλεπόμενη μάθηση (Supervised learning)

Η επιβλεπόμενη μάθηση είναι μια προσέγγιση μηχανικής μάθησης (Machine learning) που χρησιμοποιεί σύνολα δεδομένων με ετικέτες για την εκπαίδευση αλγορίθμων για ακριβείς προβλέψεις ή ταξινομήσεις. Λειτουργεί με επαναληπτική προσαρμογή των παραμέτρων με βάση την ανατροφοδότηση από τις σωστές απαντήσεις. Οι δύο κύριες τεχνικές είναι η ταξινόμηση (classification), η οποία αποδίδει διακριτές ετικέτες και η παλινδρόμηση (regression), η οποία προβλέπει συνεχείς τιμές. Μέθοδοι όπως οι k-κοντινότεροι γείτονες (KNN) προβλέπουν τα αποτελέσματα με βάση την εγγύτητα σε παραδείγματα με ήδη γνωστές ετικέτες, αλλά αυτή η μέθοδος απαιτεί υψηλούς υπολογιστικούς πόρους. Τα νευρωνικά δίκτυα (NN), από την άλλη πλευρά, επεξεργάζονται δεδομένα μέσω διασυνδεδεμένων επιπέδων για την επίλυση σύνθετων

προβλημάτων όπως η βέλτιστη ροή ισχύος (OPF). Τα NN υποστηρίζουν την παράλληλη επεξεργασία, αλλά είναι δύσκολο να ερμηνευτεί ο τρόπος με τον οποίο παίρνονται οι αποφάσεις τους [64].

3.13.2.7 Deep Reinforcement Learning (DRL)

Η βαθιά ενισχυτική μάθηση (DRL) συνδυάζει την ενισχυτική (reinforcement) και την βαθιά (deep) μάθηση για τη βελτιστοποίηση της λήψης αποφάσεων σε δυναμικά περιβάλλοντα. Ένας πράκτορας αλληλεπιδρά με το περιβάλλον του και λαμβάνει ανταμοιβές βάσει ενεργειών που κάνει, από τις οποίες μαθαίνει και προσπαθεί να μεγιστοποιήσει αυτές τις ανταμοιβές. Η DRL υπερέχει στην επίλυση διαδοχικών εργασιών, καθώς μαθαίνει χωρίς επίβλεψη, ωστόσο, απαιτεί εκτεταμένα δεδομένα και υπολογιστικούς πόρους. Αλγόριθμοι όπως ο Deep Deterministic Policy Gradient (DDPG) χρησιμοποιούν δίκτυα φορέων (actor) και κριτών (critic) για να αντιστοιχίσουν καταστάσεις σε ενέργειες και να εκτιμήσουν τις μελλοντικές ανταμοιβές. Ο DDPG χειρίζεται αποτελεσματικά συνεχείς χώρους δράσης και μαθαίνει αποτελεσματικές, ντετερμινιστικές πολιτικές, καθιστώντας τον κατάλληλο για τη βελτιστοποίηση σύνθετων, μη γραμμικών προβλημάτων όπως η παραγωγή και η παράδοση ενέργειας [64].

3.14 Άλλες μέθοδοι Power Flow

3.14.1 Πιθανοτική Ροή Ισχύος (Probabilistic Power Flow-PPF)

Μερικές τεχνικές για να υπολογιστεί η πιθανοτική ροής ισχύος είναι η ανάλυση Monte Carlo (MCS) και η τεχνική εκτίμησης δύο σημείων (two point estimate method-2PEM). Λόγω της στοχαστικότητας της παραγωγής εξαιτίας των ΑΠΕ, δημιουργούνται συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας (PDF) λαμβάνοντας υπόψιν και ιστορικά δεδομένα. Αφού έχει γίνει η αρχικοποίηση των παραμέτρων, με βάση το ένα από τα δύο μοντέλα (MCS ή 2PEM), ορίζονται οι τιμές της τάσης και της γωνίας, συνήθως με 1 p.u. και γωνία 0°. Ενώ στην συνέχεια γίνεται ο υπολογισμός των απωλειών ισχύος και ο υπολογισμός του μέτρου και της γωνίας της τάσης στους κόμβους με εμπρός/πίσω σάρωση (forward/backward). Έπειτα ελέγχεται το σφάλμα και αν είναι στα επιτρεπτά όρια η MCS συνεχίζει και στους υπόλοιπους κόμβους έως ότου έχουν ελεγχθεί όλοι, εξάγοντας τελικά την πιθανοτική ροή ισχύος [66].

3.14.2 Υβριδική Ροή Ισχύος (Hybrid)

Αυτός ο τρόπος υπολογισμού της ροής ισχύος, συνδυάζει τα πλεονεκτήματα της AC και της DC ροής ισχύος. Αρχικά επιλέγονται τα σημεία του συστήματος στα οποία θα εφαρμοστεί η

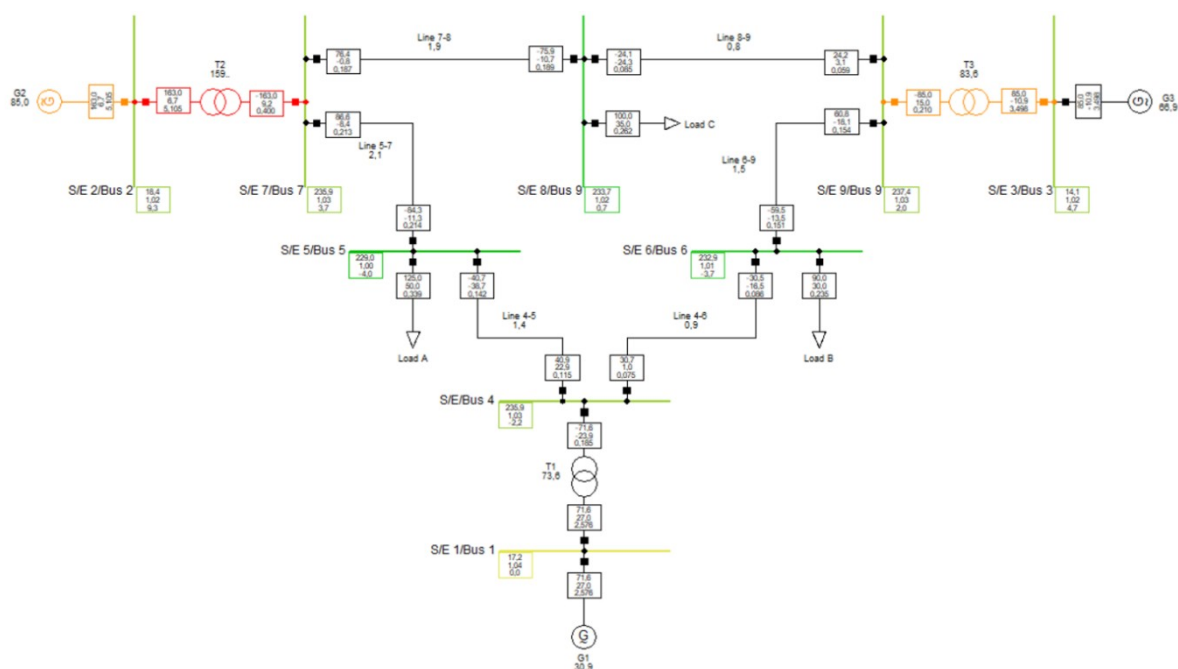
κάθε μέθοδος, η μεν AC (μη γραμμική) και δε η DC (γραμμική) και δημιουργούνται οι εξισώσεις της ροής ισχύος με τους περιορισμούς του κάθε συστήματος. Επιλύοντας τις εξισώσεις με την επαναληπτική μέθοδο Newton-Raphson μπορεί να γίνει μια σύγκριση με το σφάλμα που προκύπτει από την υβριδική μέθοδο σε σχέση με την AC και την DC ροή ισχύος [67].

3.15 Παράδειγμα Ροής Ισχύος στο DIgSILENT

Αφού αναφερθήκαμε στις δυνατότητες του PowerFactory μπορούμε να εκτελέσουμε ένα παράδειγμα για να δούμε εμπράκτως την εφαρμογή του Power Flow στο περιβάλλον εργασίας του DIgSILENT.

Αρχικά έχοντας εισάγει ή δημιουργήσει το προς μελέτη project, εκτελώντας ροή ισχύος μας εμφανίζονται οι τιμές της ενεργούς και αέργου ισχύος και το ρεύμα, ενώ για κάθε ζυγό έχουμε την τιμή της τάσης σε kV και σε α.μ., καθώς επίσης και την γωνία της τάσης. Στις γεννήτριες και στους μετασχηματιστές έχουμε τα επίπεδα φόρτισης προκειμένου να ικανοποιηθεί το ζητούμενο φορτίο.

Ενδεικτικά το σύστημα που έχουμε δημιουργήσει είναι το ακόλουθο και τα αποτελέσματά της ροής ισχύος εμφανίζονται στα αντίστοιχα πινακάκια κάθε στοιχείου του συστήματος. Οι χρωματικοί κώδικες αναπαριστούν το επίπεδο φόρτισης των στοιχείων



Εικόνα Error: Reference source not found.66 Παράδειγμα μοντέλου δικτύου στο PowerFactory για την παρουσίαση της λειτουργίας και των αποτελεσμάτων του OPF [62].

4 Εφαρμογές Συστημάτων στο PowerFactory

4.1 Μελέτη Σύνδεσης Αιγύπτου-Σαουδικής Αραβίας

Σε αυτό το κεφάλαιο αναλύεται η λειτουργία του συστήματος διασύνδεσης VSC HVDC μεταξύ Αιγύπτου και Σαουδικής Αραβίας, καθώς και η επίδραση της ενσωμάτωσης ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου εγκατεστημένης ισχύος 9GW στο HVDC σύστημα 3000 MW. Ειδικότερα, εξετάζεται η σταθερότητα τάσης του συστήματος και η δυνατότητα βελτίωσής της μέσω της χρήσης συστήματος αποθήκευσης ενέργειας (Energy Storage System -ESS).



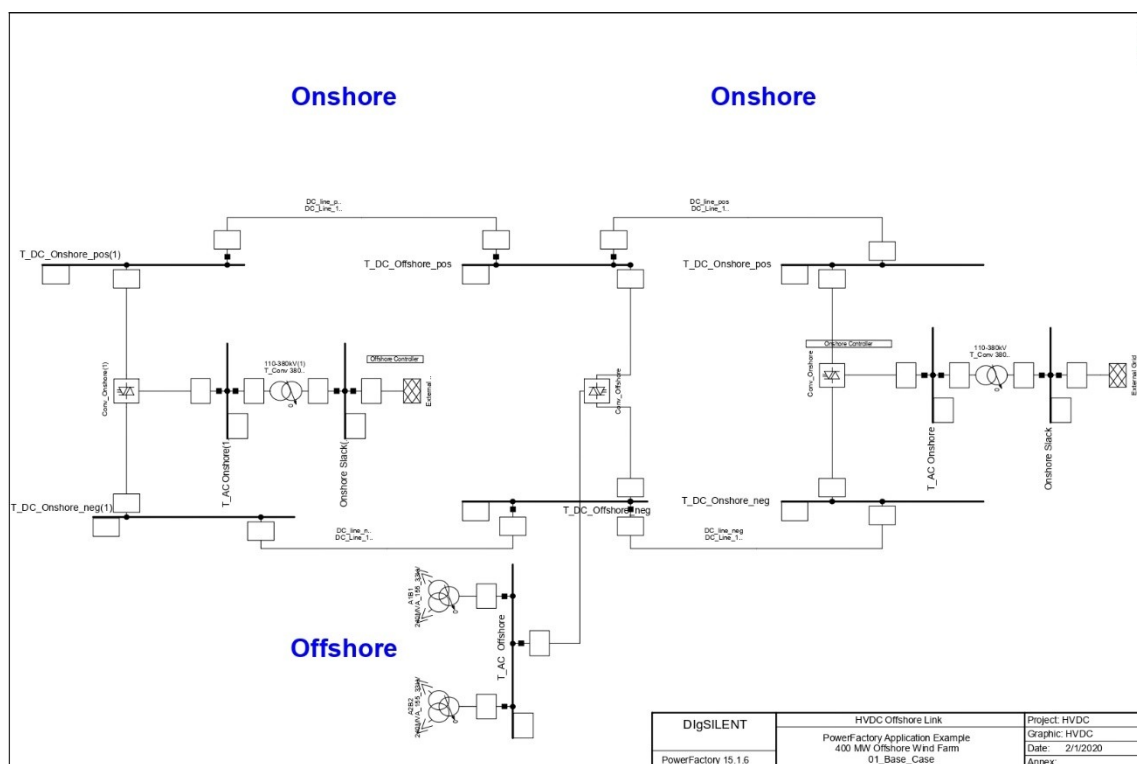
Εικόνα Error: Reference source not found.67 Χάρτης σύνδεσης Αιγύπτου -Σαουδικής Αραβίας με την ύπαρξη Υπεράκτιου Αιολικού [68]

Ο χάρτης του συστήματος παρουσιάζεται άνωθεν, με το Badr να αποτελεί το ένα άκρο της HVDC σύνδεσης και το Madinah το άλλο. Στην περιοχή της Ερυθράς θάλασσας (Red Sea) εξετάζεται η εγκατάσταση αιολικού πάρκου 900 Α/Γ (Vestas MHI “V164-10.0MW) ισχύς 10MW, συνολική εγκατεστημένης ισχύς 9GW. Ωστόσο εξαιτίας του περιορισμένου χώρου εγκατάστασης και του συντελεστή φορτίου (Capacity Factor) που ανέρχεται στα 46,4%, η πραγματική ισχύς εξόδου είναι τελικά στα 2,25GW. Επιπλέον υπάρχει ένα ενδιάμεσο σημείο σύνδεσης στο Tabuk της Αραβίας, που αφενός επηρεάζει το σύστημα, αφετέρου δεν λαμβάνεται υπόψιν στην προσομοίωση [68].

4.2 Διαμόρφωση Δικτύου με VSC

Στην πραγματικότητα, έχει χρησιμοποιηθεί η τεχνολογία μετατροπής με βάση το θυρίστορ (Line Commutated Converter-LCC) χάρις στην ικανότητα μεταφοράς μεγάλων ποσών ενέργειας με χαμηλότερες απώλειες. Όμως, για τον σκοπό της προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκε ως βάση δικτύου όλου του συστήματος ένα από τα ενσωματωμένα συστήματα του PowerFactory με μετατροπέα πηγής τάσης (Voltage Source Converter- VSC) και εμπλουτίστηκε για τις ανάγκες της προσομοίωσης.

Η σύνδεση πραγματοποιείται με διπολική τοπολογία με έναν θετικό και έναν αρνητικό πόλο να συνδέονται στον μετατροπέα πηγής τάσης επιτρέποντας καλύτερο έλεγχο στην έγχυση ισχύος. Το προς μελέτη σύστημα που δημιουργείτε τελικά στο PowerFactory είναι το κάτωθι:



Εικόνα Error: Reference source not found.68 Προσομοίωση συστήματος σύνδεσης HVDC Αιγύπτου Σαουδικής Αραβίας με το πρόγραμμα «PowerFactory».

Στις δοκιμές των προσομοιώσεων, προκειμένου το σύστημά μας να λειτουργεί εύρυθμα, εξετάζουμε ορισμένα μεγέθη των συστημάτων ενέργειας :

- Τάση και συχνότητα, οι τιμές των οποίων θα πρέπει να βρίσκονται εντός συγκεκριμένων ορίων (τάση: $\pm 10\%$ της α.μ. δηλαδή 0,9-1,1 α.μ. συχνότητα : $\pm 1\%$ δηλαδή 49,5-50,5 Hz).
- Η φόρτιση των στοιχείων του συστήματος δεν θα πρέπει να υπερβαίνει το 100% σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας, ενώ παράλληλα ενδείκνυται η φόρτισή τους να παραμένει περίπου στο 80% λόγω ασφάλειας.

4.3 Μελέτη Ροής Φορτίου

Αφού έχει κατασκευαστεί το προς μελέτη σύστημα, συμπληρώνοντας τα τεχνικά χαρακτηριστικά των στοιχείων, μπορούμε να αναπαραστήσουμε την κατάσταση του δικτύου σε τέσσερις (4) διαφορετικές πιθανές καταστάσεις. Το δίκτυο που έχει δημιουργηθεί είναι συμμετρικό και αξιολογείται υπό διαφορετικές συνθήκες η τάση στους ζυγούς και η σωστή λειτουργία των στοιχείων που έχουν εισαχθεί, προσπαθώντας να τηρούνται τα όρια σε τάση και φόρτιση. Οι μελέτες περιπτώσεων στο σύστημα είναι οι επόμενες :

1^η: «Case_Study_1»: Ροή Ισχύος από το Αιολικό Πάρκο και την Αίγυπτο προς Σαουδική Αραβία.

2^η: «Case_Study_2»: Ροή Ισχύος από το Αιολικό Πάρκο προς τα δύο συστήματα.

3^η: «Case_Study_3»: Ροή Ισχύος χωρίς Αιολικό Πάρκο και διαμοιρασμός ενέργειας μεταξύ Αιγύπτου και Σαουδικής Αραβίας.

4^η: «Case_Study_4»: Ροή Ισχύος χωρίς Αιολικό Πάρκο και με χρήση μπαταριών.

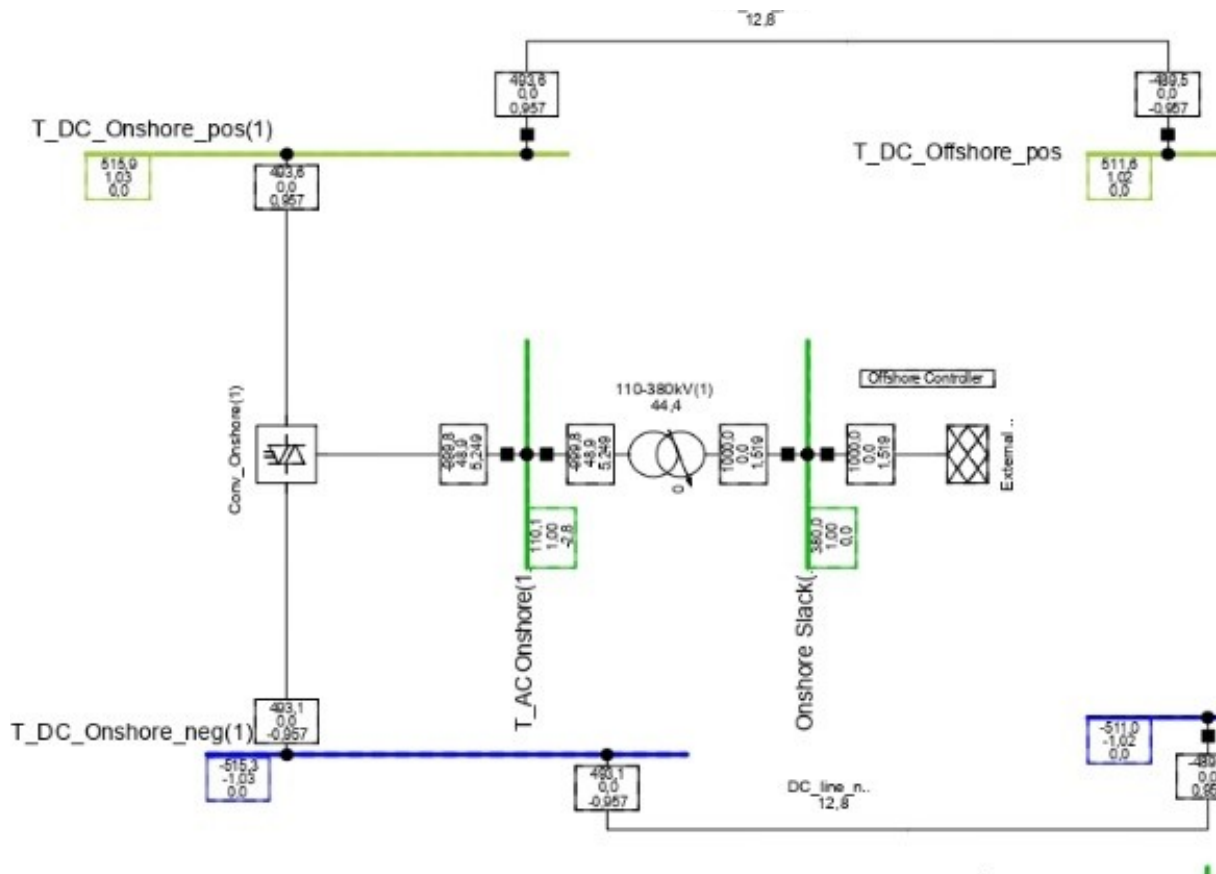
Επίσης, πρέπει να τονιστεί ότι στο πρόγραμμα προσομοίωσης έχει ήδη δημιουργηθεί το αιολικό πάρκο και η δομή αυτού δεν παρατίθεται στην εργασία. Το αντιλαμβανόμαστε απλά ως μία γεννήτρια, (αποτελείται από σύγχρονες και ασύγχρονες γεννήτριες) η οποία παρέχει ισχύ στο σύστημα. Το σημαντικό κομμάτι είναι αυτό του μετατροπέα στον οποία είναι συνδεδεμένη και ρυθμίζει την έγχυση ισχύος και την συμβολή στην τάση των ζυγών.

4.3.1 Case_Study_1 (Ροή Ισχύος με Αιολικό Πάρκο)

Σε αυτή την περίπτωση έχουμε ορίσει το σύστημα της Σαουδικής Αραβίας να απορροφά ενέργεια από το σύστημα το οποίο τροφοδοτείται τόσο από το υπεράκτιο πάρκο (Offshore) όσο και από το «εξωτερικό» δίκτυο της Αιγύπτου (Egypt_Onshore). Η διαστασιολόγηση του εξοπλισμού έγινε με βάση την μέγιστη ικανότητα μεταφοράς ενέργειας (στα 3GW) και τη μέγιστη απόδοση ενέργειας από το αιολικό πάρκο (στα 2,25 GW).

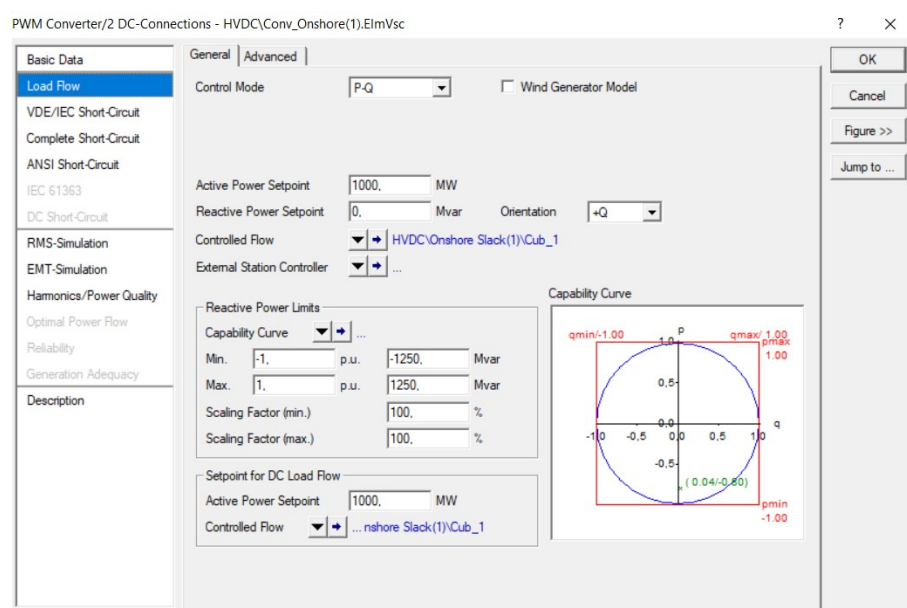
Οι ροές ισχύος που προκύπτουν είναι τμηματικά οι παρακάτω

1. Πλευρά Αιγύπτου

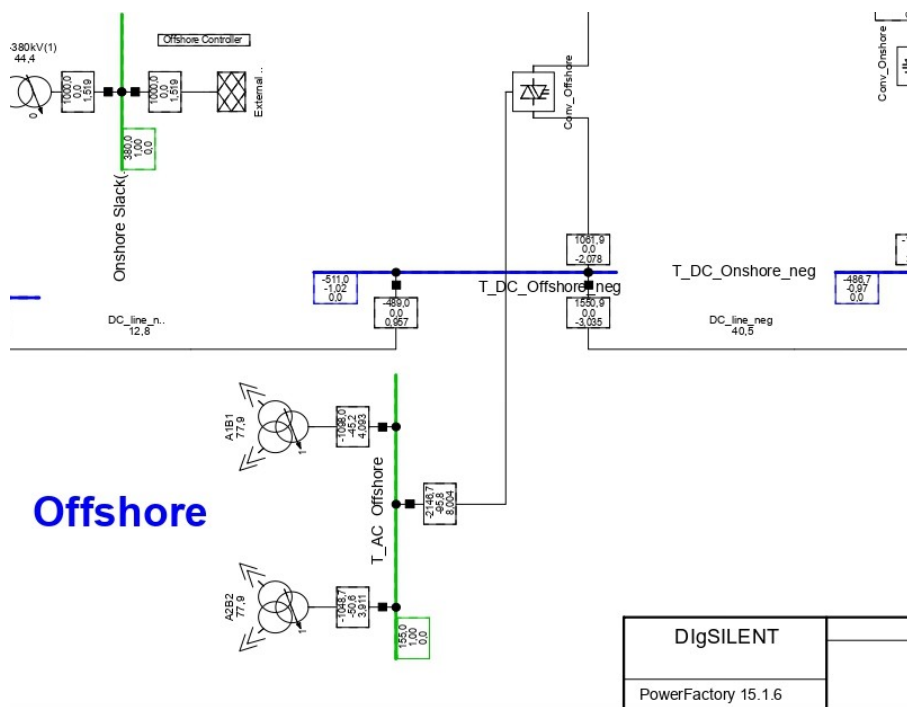


Εικόνα Error: Reference source not found.69 Χαρακτηριστικά τιμών στην πλευρά της Αιγύπτου

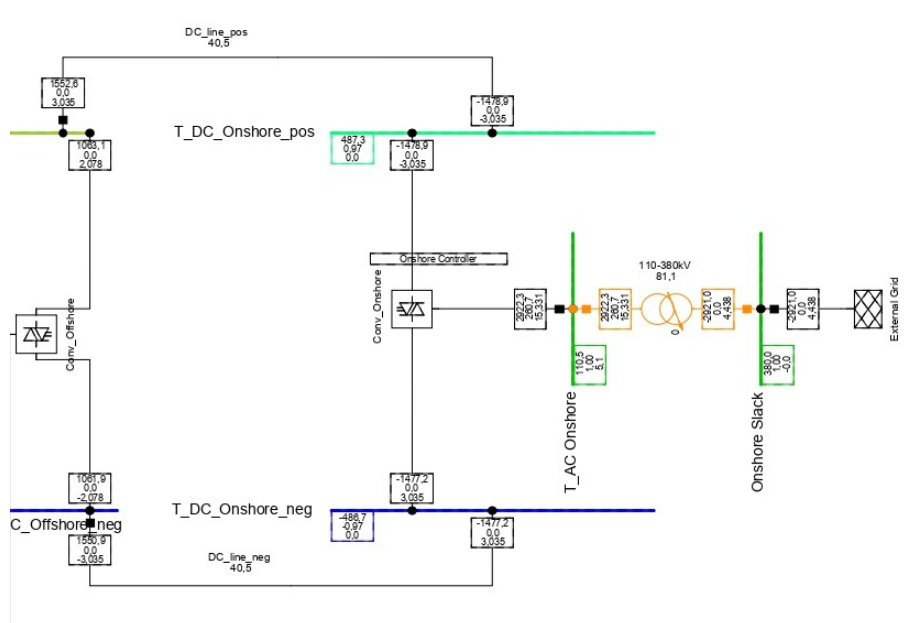
- 1) Τα στοιχεία και η φόρτιση αυτών βρίσκονται εντός επιτρεπτών ορίων (1,00-1,03 p.u.) (M/Σ 44,4%),
- 2) Υπάρχει έγχυση ενεργού ισχύος $P > 0$ προς το σύστημα
- 3) Ο καθορισμός έγχυσης ή απορρόφησης γίνεται με βάση των μετατροπέα και έχει οριστεί στο 1GW έγχυσης.



Εικόνα Error: Reference source not found.70 Μετατροπέας στην πλευρά της Αιγύπτου

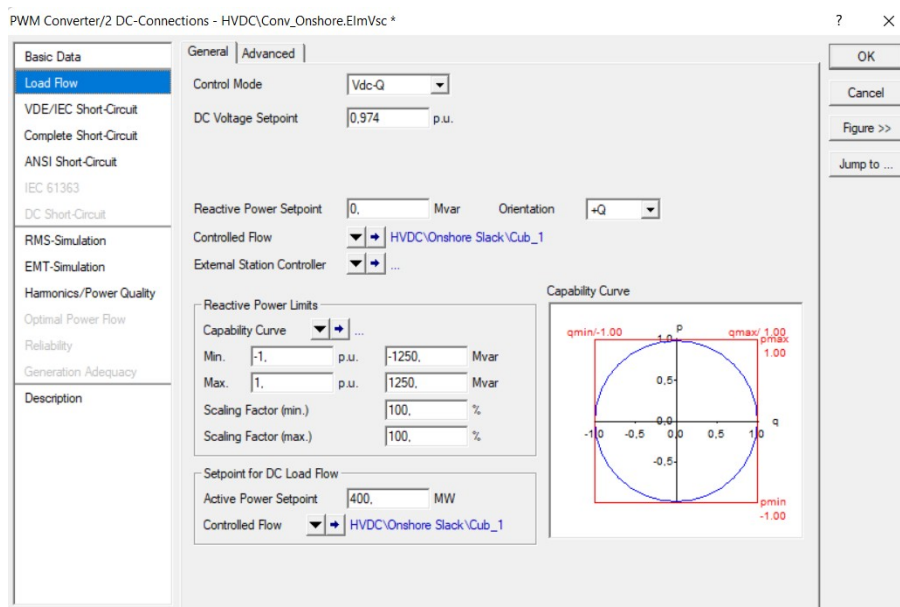


*Εικόνα Error: Reference source not found.*⁷¹ Χαρακτηριστικά τιμών στην πλευρά του Αιολικού Πάρκου



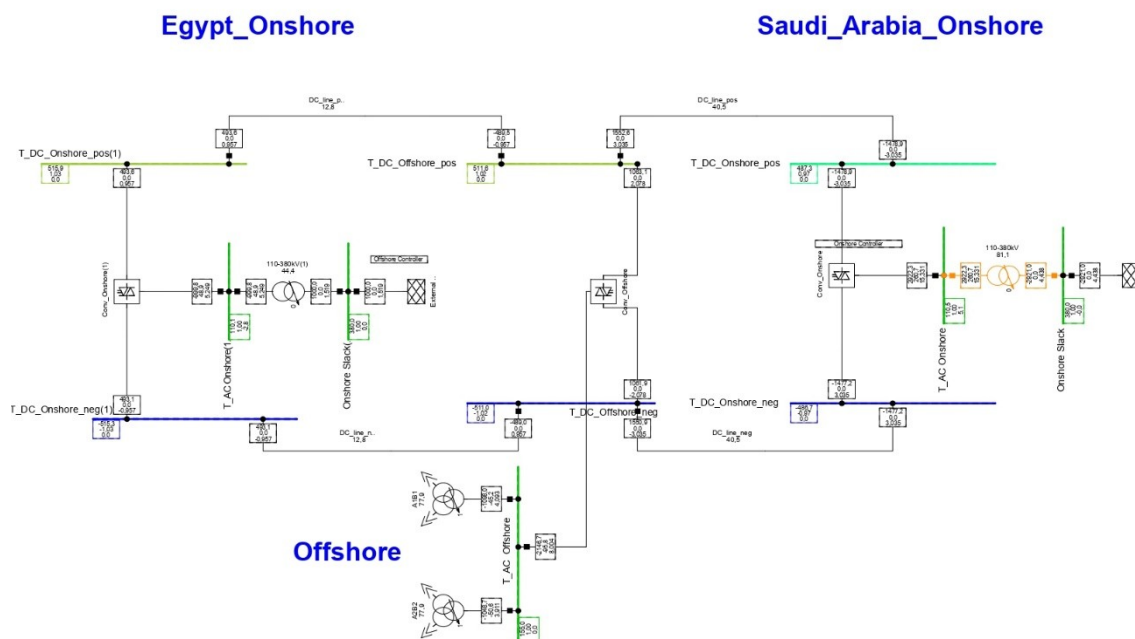
*Εικόνα Error: Reference source not found.*⁷² Χαρακτηριστικά τιμών στην πλευρά της Σαουδικής Αραβίας

Επίσης έχει επιτευχθεί μια καλή διαστασιολόγηση με στόχο την μη υπερφόρτιση του δικτύου με τον σύνολο των μετασχηματιστών να διαχειρίζονται φορτίο 3GW και να μην ξεπερνούν το ~85% της λειτουργίας τους.



Εικόνα Error: Reference source not found.73 Μετατροπέας στην πλευρά της Σαουδικής Αραβίας

4. Συνολικό σύστημα



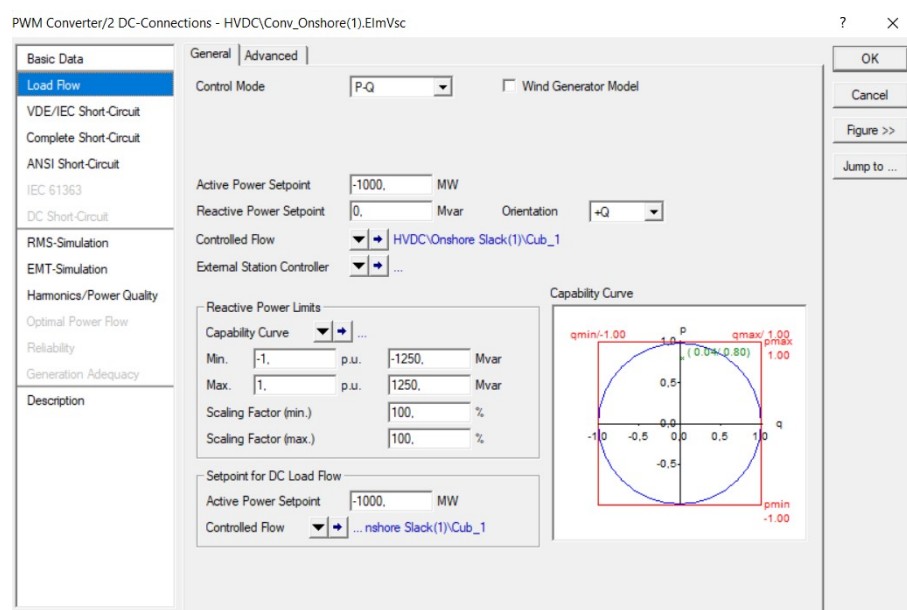
Εικόνα Error: Reference source not found.74 Συνολικό σύστημα

Έχουμε ένα ισοζύγιο ισχύος : $P_{Egypt} + P_{Offshore} + P_{Losses} = P_{Saudi}$

Συμπεράσματα: Με την λειτουργία και των τριών τμημάτων του συστήματος η τάση δεν εμφανίζει πτώση και η φόρτιση των στοιχείων βρίσκεται εντός επιτρεπτών ορίων μιας και βρισκόμαστε στην μέγιστη ικανότητα παροχής ισχύς από το αιολικό πάρκο.

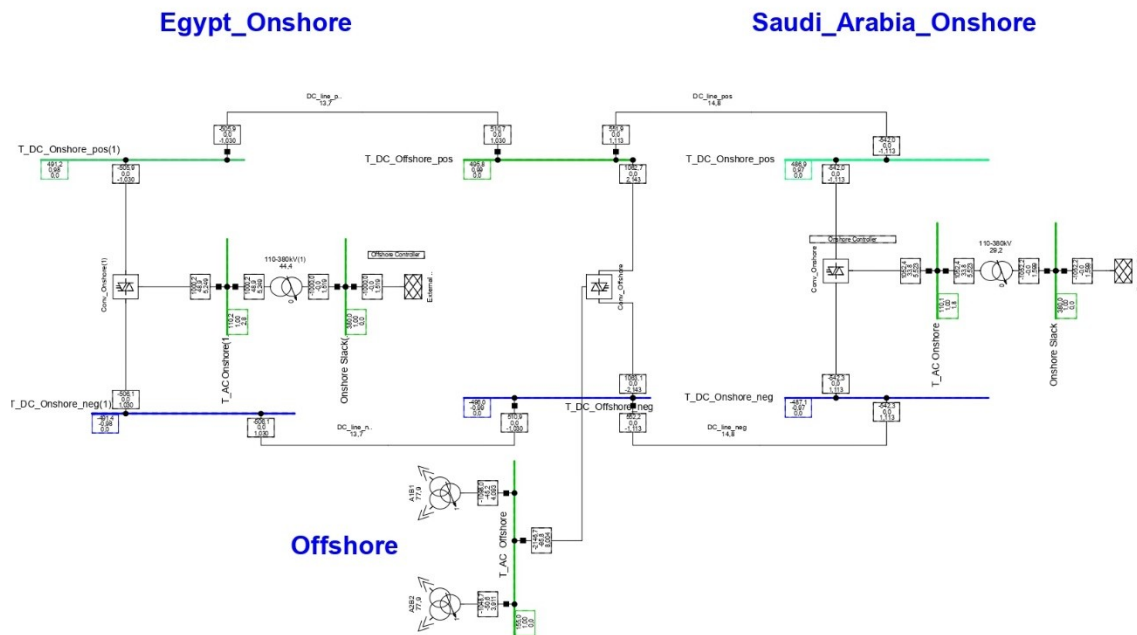
4.3.2 Case_Study_2 (Αποκλειστική παροχή ισχύς από Υπεράκτιο Πάρκο προς τα δύο συστήματα)

Στην περίπτωση αυτή, το προς μελέτη σύστημα παραμένει το ίδιο και το μόνο που αλλάζει είναι οι ρυθμίσεις του μετατροπέα στην πλευρά της Αιγύπτου, όπου από έγχυση ισχύος που παρείχε πριν, πλέον θα απορροφά ισχύ από το υπόλοιπο δίκτυο. Αυτό επιτυγχάνεται με την ρύθμιση στο πλαίσιο του «Active Power Setpoint» από 1000 MW σε -1000 MW όπου και υποδηλώνει την απορρόφηση ισχύος από το σύστημα (Εικόνα 5.8) . Το αιολικό Πάρκο συνεχίζει την ίδια έγχυση ισχύος στην μέγιστη ικανότητά του στα 2,25GW.



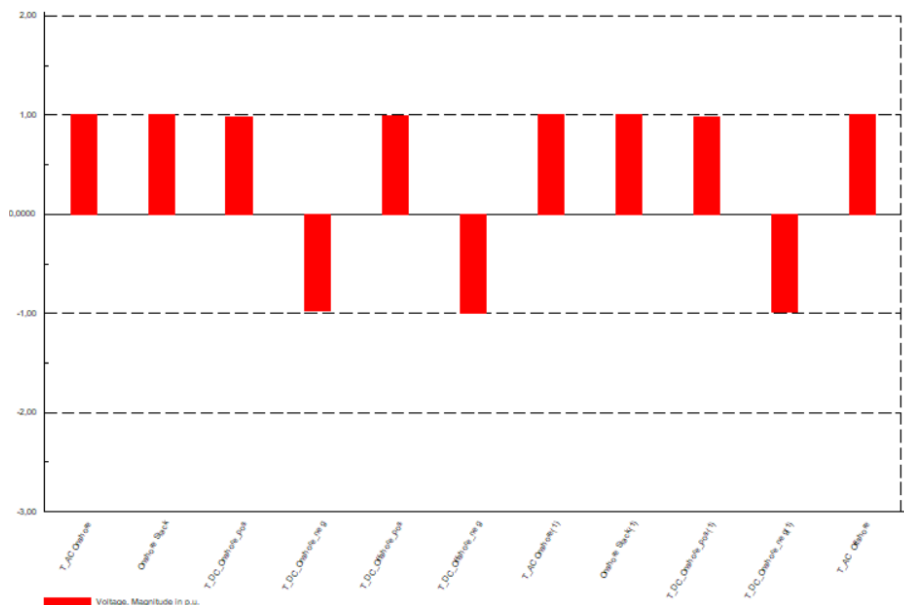
Εικόνα Error: Reference source not found.75 Ρυθμίσεις μετατροπέα Αιγύπτου, με στόχο την απορρόφηση ισχύος.

Η ροή ισχύος που προκύπτει πάλι, δεν εμφανίζει προβλήματα και η ικανότητα του αιολικού πάρκου να παρέχει ισχύ στα 2,25 GW επιτυγχάνεται χωρίς απρόοπτα στην φόρτιση των στοιχείων.



Εικόνα Error: Reference source not found.76 Ποή Ισχύος από το αιολικό προς τα δύο συστήματα

Από τον χρωματικό κώδικα αντιλαμβανόμαστε ότι η φόρτιση των στοιχείων είναι σε επιτρεπτά όρια, ενώ από το επόμενο διάγραμμα οι τάσεις των στοιχείων ανά μονάδα δεν παρουσιάζουν απρόοπτα



Εικόνα Error: Reference source not found.77 Ανά μονάδα τάση στους ζυγούς του συστήματος

Η αρνητική τάση που υπάρχει οφείλεται στον αρνητικό πόλο σύνδεσης μεταξύ των τριών συστημάτων.

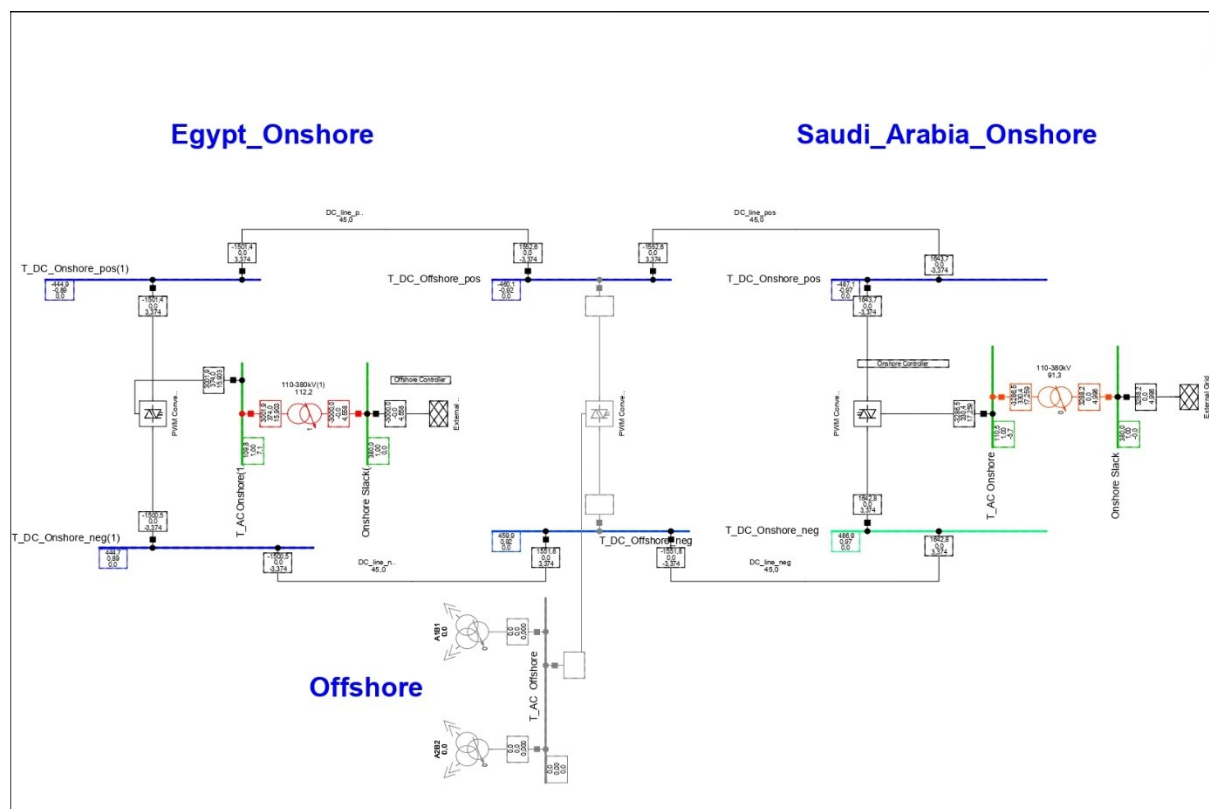
Αφού έχουμε εξετάσει το σύστημα σε λειτουργία με το Αιολικό Πάρκο, πλέον εξετάζουμε στις περιπτώσεις «Case_Study_3» και «Case_Study_4» το σύστημα στις καταστάσεις όπου δεν έχουμε την υποστήριξη από τις Α/Γ και συνεπώς το ενδιάμεσο σημείο σύνδεσης.

4.3.3 Case_Study_3 (Αιολικό Πάρκο εκτός λειτουργίας)

Σε αυτή την περίπτωση εξετάζεται το σενάριο όπου το αιολικό πάρκο τίθεται εκτός λειτουργίας, είτε λόγω χαμηλού αιολικού δυναμικού είτε λόγω βλάβης/καταστροφής του εξοπλισμού και αξιολογείται η τάση στους ζυγούς και η φόρτιση των στοιχείων. Η ανταλλαγή ενέργειας μεταξύ των δύο συστημάτων γίνεται αποκλειστικά μέσω ελέγχου και πάλι του μετατροπέα P-Q στην πλευρά της Αιγύπτου.

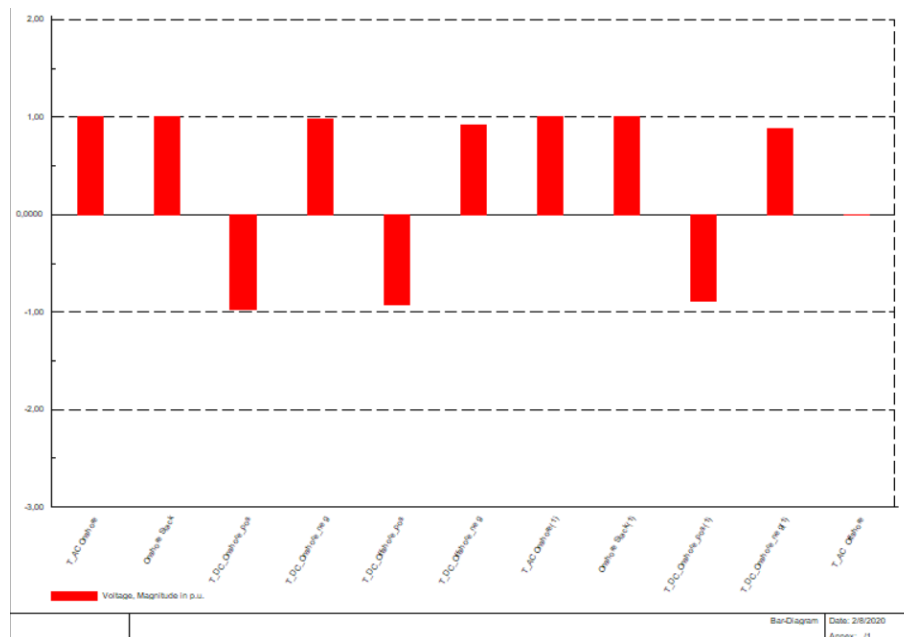
Με στόχο τον έλεγχο των επιπέδων τάσης και την υπερφόρτιση των στοιχείων η προσομοίωση πραγματοποιείται με την μέγιστη ικανότητα μεταφοράς ενέργειας στα 3GW.

1. Ροή Ισχύος από την Σαουδική Αραβία προς Αίγυπτο



Εικόνα Error: Reference source not found.78 Ροή Ισχύος χωρίς Αιολικό Πάρκο από Σαουδική Αραβία προς Αίγυπτο

Και οι τιμές στις τάσεις των ζυγών είναι οι ακόλουθες:



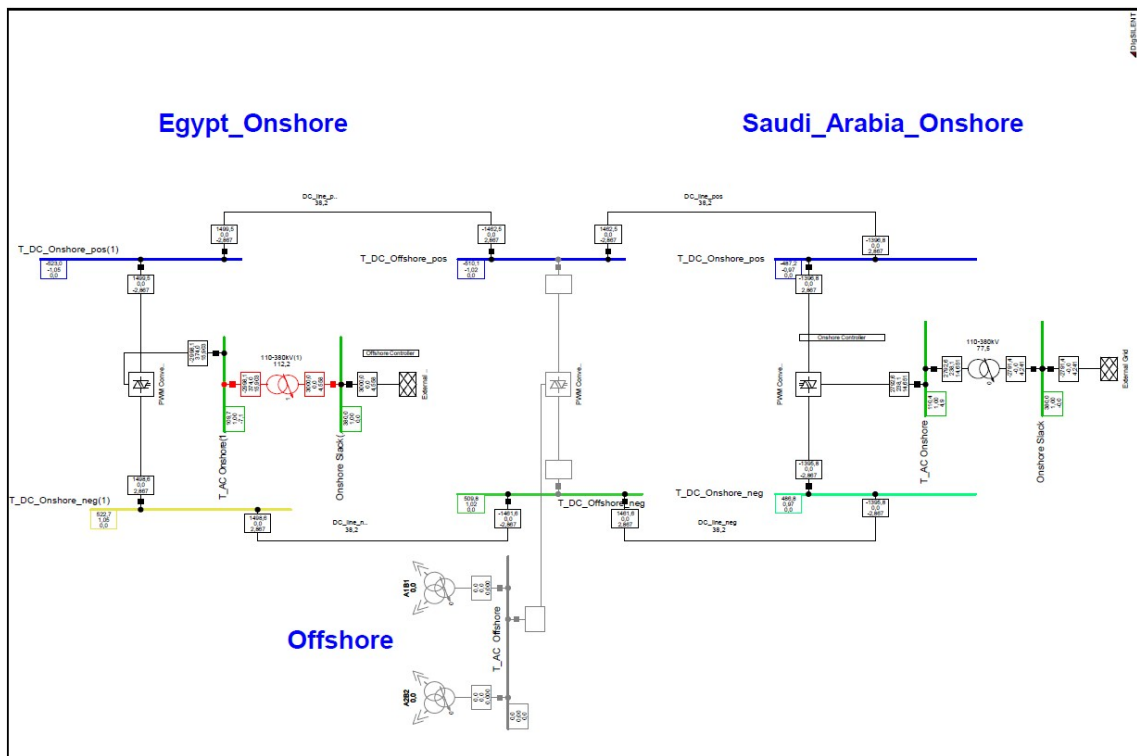
Εικόνα Error: Reference source not found.79 Τάση των ζυγών στην περίπτωση ροής ισχύος αποκλειστικά από Σαουδικής Αραβία προς Αίγυπτο

Από το διάγραμμα των τάσεων και τον χρωματικό κώδικα, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι κατά μήκος της διαδρομής της ενέργειας η τάση στους ζυγούς μειώνεται με αποτέλεσμα να φτάνουν οι ζυγοί σε χαμηλά επίπεδα τάσης (0,89 p.u.). Κάτι τέτοιο δεν είναι επιθυμητό και επιδιώκουμε την ανύψωση τάσης στον ζυγό. Ενώ και ο μετασχηματιστής στην πλευρά της Αιγύπτου είναι σε υψηλά επίπεδα φόρτισης 112,2%.

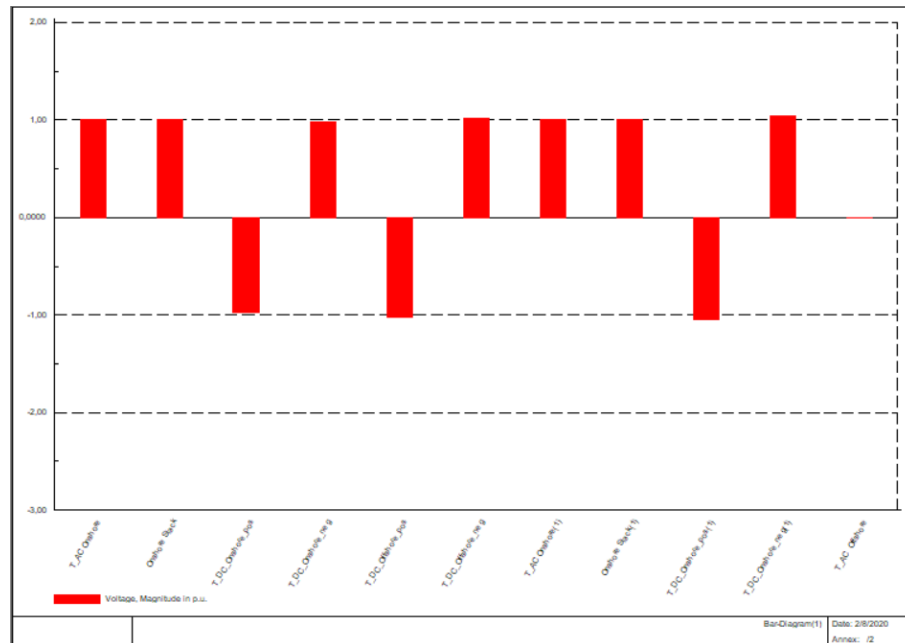
$$P_{Saudi} = P_{Egypt} + P_{Losses} \Rightarrow 3288,2 = 3000 + 288,2 \text{ (MW)}$$

2. Ροή Ισχύος από Αίγυπτο προς την Σαουδική Αραβία

Στην 2^η υποπερίπτωση έχουμε την έγχυση ισχύος από την Αίγυπτο προς την άλλη πλευρά και από τον μετατροπέα έχουμε ορίσει παραγωγή 3GW. Το σύστημα λειτουργεί και πάλι με το Αιολικό Πάρκο εκτός λειτουργίας και εξετάζεται εκ νέου η φόρτιση των στοιχείων και η τάση των ζυγών. Η ροή ισχύος που προκύπτει φαίνεται στην Εικόνα 5.14 και οι τάσεις στην 5.15.



Εικόνα Error: Reference source not found.80 Ροή Ισχύος χωρίς Αιολικό Πάρκο από Αίγυπτο προς Σαουδική Αραβία



Εικόνα Error: Reference source not found.81 Τάση των ζυγών στην περίπτωση ροής ισχύος αποκλειστικά από Αίγυπτο προς Σαουδικής Αραβία

Η τιμή των τάσεων στους ζυγούς σε αυτή την περίπτωση κινούνται σε καλύτερα επίπεδα, με την μέγιστη τάση να παρουσιάζεται στον ζυγό DC της Αιγύπτου στα 1,05%p.u. (523kV) και η ελάχιστη στην DC στην πλευρά της Σαουδικής Αραβίας στα 0,97%p.u. (487,2kV)

$$P_{Egypt} = P_{Saudi} + P_{Losses} \Rightarrow 3000 = 2791,4 + 208,26 \text{ (MW)}$$

Επίσης παρατηρούμε υπερφόρτιση στον Μετασχηματιστή στην πλευρά της Αιγύπτου κάτι που υποδεικνύει την ανάγκη για ύπαρξη είτε ενός με μεγαλύτερη φαινόμενη ισχύ είτε περισσότερων παρόμοιων με μικρότερη φαινόμενο ισχύ. Θα επιλέξουμε για την συνέχεια των προσομοιώσεων την εισαγωγή ενός ή ακόμη και δύο παρόμοιων μετασχηματιστών παράλληλα συνδεδεμένο με τους υπόλοιπους. Η επιλογή αυτή δικαιολογείται στο γεγονός ότι έχουμε καλύτερο ισομοιρασμό ισχύς με την παράλληλη σύνδεση και ευκολότερη αντικατάσταση σε περίπτωση βλάβης του ενός από το να έχουμε διαφορετικά μοντέλα για εφεδρείες για κάθε ξεχωριστό μετασχηματιστή που μπορεί να υπάρχει.

Επιπλέον, στην πρώτη υποπερίπτωση παρατηρήσαμε σημαντική μείωση της τάσης του ζυγού στην πλευρά της Αιγύπτου, στα 0,89 α.μ. Παρ' όλ' αυτά, στην πρώτη υποπερίπτωση που παρατηρείται και η μεγαλύτερη απόκλιση στην τάση, έχουμε μεγαλύτερη έγχυση ισχύος (3288,2 MW) στο σύστημα από όση έχει υπολογιστεί, κάτι τέτοιο δεν είναι επιθυμητό

Έτσι στην τελευταία περίπτωση του VSC συστήματος θα γίνει εγκατάσταση μπαταριών για την αξιολόγηση της τάσης και της φόρτισης των στοιχείων όταν το Αιολικό Πάρκο θα βρίσκεται εκτός λειτουργίας.

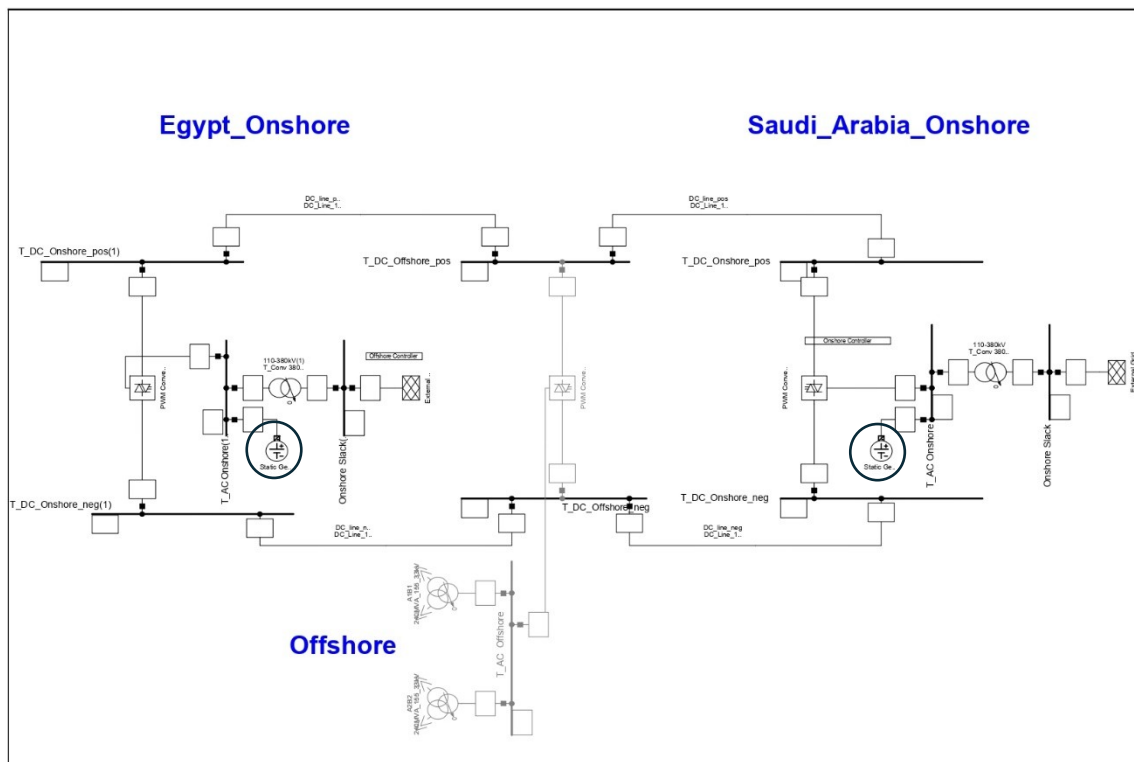
4.3.4 (Case_Study_4) Προσδιορισμός θέσης και χωρητικότητας του ESS

Σε αυτή την περίπτωση έχουμε εισάγει δύο συστήματα μπαταριών, ένα στην πλευρά της Αιγύπτου συνδεδεμένο με τον AC ζυγό και ένα άλλο σύστημα στην πλευρά της Σαουδικής Αραβίας συνδεδεμένο πάλι στον ζυγό AC.

Στόχος της εγκατάστασης και των δύο συστημάτων μπαταριών είναι ο έλεγχος της τάσης στους ζυγούς αλλά και η παροχή ισχύς στην περίπτωση όπου υπάρχει αποθηκευμένη ενέργεια στις μπαταρίες ενώ το εξωτερικό σύστημα των δύο χωρών δεν μπορούν να παρέχουν ισχύ από το ένα σύστημα στο άλλο.

Ο τρόπος λειτουργίας των συστημάτων μπαταριών έχει αναλυθεί στο προηγούμενο Κεφάλαιο και συνοπτικά μπορεί να περιγραφεί ως εξής: οι μπαταρίες αποθηκεύουν ενέργεια από το δίκτυο όταν υπάρχει πλεόνασμα παραγωγής και την αποδίδουν εκ νέου στο σύστημα όταν η διαθέσιμη παραγωγή δεν επαρκεί για να καλύψει τη ζήτηση.

Επομένως το σύστημα που δημιουργείτε είναι το κάτωθι:



Εικόνα Error: Reference source not found.82 Σύστημα με το Αιολικό Πάρκο εκτός και με εγκατάσταση δύο συστημάτων μπαταριών στο PowerFactory

Τα δύο συστήματα μπαταριών έχουν αποτυπωθεί στην εικόνα εξυπηρετούν διαφορετικές περιπτώσεις. Είτε απορροφούν ισχύ από το «κοντινό» σύστημα είτε από το πιο «απομακρυσμένο» αναλόγως την προσομοίωση που θα γίνει και στην συνέχεια εγχέεται με τον ίδιο τρόπο αναλόγως τις ανάγκες που υπάρχουν.

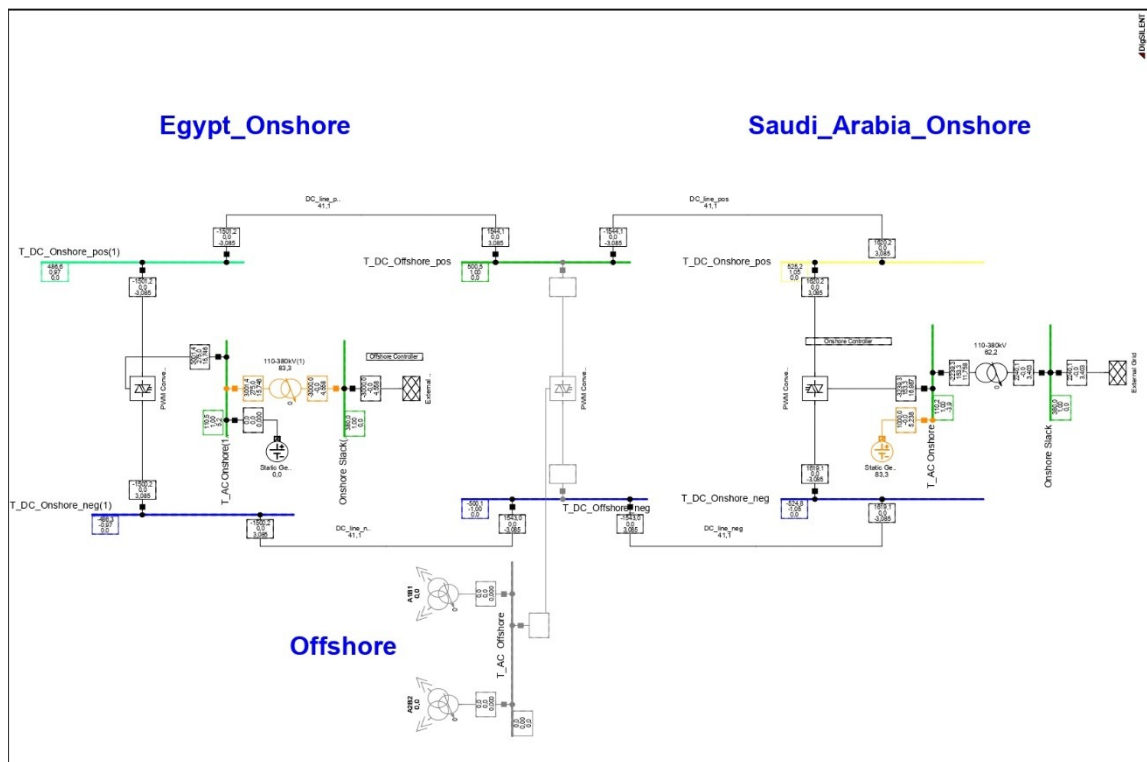
Επομένως μπορώ να έχω τέσσερις διαφορετικές καταστάσεις στο σύστημα :

- 1) Μπαταρία στην πλευρά της Αιγύπτου και απορρόφηση από το σύστημα της Αραβίας
- 2) Μπαταρία στην πλευρά της Αιγύπτου και απορρόφηση από το ίδιο το σύστημα
- 3) Μπαταρία στην πλευρά της Αραβίας και απορρόφηση από το σύστημα της Αιγύπτου
- 4) Μπαταρία στην πλευρά της Αραβίας και απορρόφηση από το ίδιο το σύστημα

Ουσιαστικά, οι περιπτώσεις (2) και (4) δεν επιφέρουν ουσιαστική μεταβολή στη λειτουργία του διασυνδεδεμένου συστήματος, καθώς αφορούν αποκλειστικά την αλληλεπίδραση της μπαταρίας με το τοπικό της δίκτυο. Ως εκ τούτου, η προσομοίωσή τους δεν προσφέρει σημαντική επιπλέον πληροφορία για την αξιολόγηση της συμπεριφοράς του συστήματος.

Ο έλεγχος της παροχής ή της απορρόφησης ισχύος πραγματοποιείται μέσω του μετατροπέα, ενώ οι ρυθμίσεις της μπαταρίας καθορίζουν τη λειτουργία της όσον αφορά την απορρόφηση ή την έγχυση ισχύος στο σύστημα. Συμβατικά, το αρνητικό πρόσημο αντιστοιχεί σε απορρόφηση ισχύος (η οποία στη συνέχεια μπορεί να αποδοθεί στο σύστημα όταν παρουσιαστεί έλλειμμα), ενώ το θετικό πρόσημο δηλώνει έγχυση ισχύος.

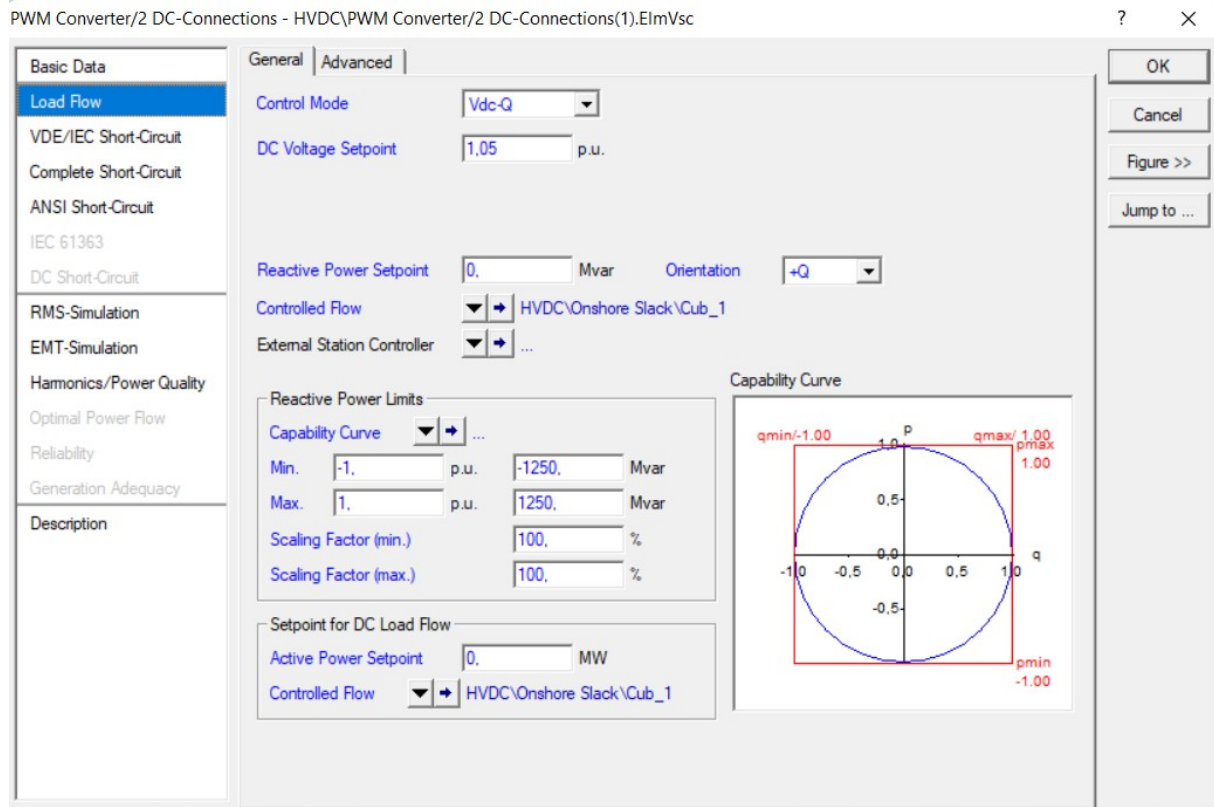
Αρα έχουμε ενδεικτικά στις ρυθμίσεις της μπαταρίας τις εξής δύο περιπτώσεις:



Εικόνα Error: Reference source not found.86 Απορρόφηση Ισχύος της Αιγύπτου από την Σαουδική Αραβία (μπαταρία και εξωτερικό δίκτυο)

Το πρόβλημα το οποίο προσπαθήσαμε να επιλύσουμε είναι η ρύθμιση της τάσης. Στην περίπτωση «Case_Study_3» όπου δεν λειτουργούσε το Αιολικό Πάρκο, είδαμε πτώση τάσης στους ζυγούς και με την εφαρμογή των μπαταριών εξετάσαμε και εκ νέου την τάση. Το σύστημα μεταφοράς δεν αντιλαμβάνεται κάποια διαφορά και η ροή ισχύος ουσιαστικά προκύπτει είναι σαν αυτή της «Εικόνας 5.12» και «Εικόνα 5.13» .

Επομένως επιχειρήσαμε, αλλάζοντας τις ιδιότητες του μετατροπέα στην πλευρά της Σαουδικής Αραβίας και θέτοντας την «DC Voltage Setpoint» στα 1,05 α.μ. , να βελτιώσουμε την πτώση τάσης. Αυτή η αλλαγή βοήθησε ώστε από τα 0,89 α.μ. που είχε η τιμή της τάσης στον ζυγό DC Onshore στην πλευρά της Αιγύπτου να πάει στα 0,97 α.μ.



Εικόνα Error: Reference source not found.87 Αλλαγή στις ρυθμίσεις του μετατροπέα στο «DC Voltage Setpoint» στην πλευρά της Αραβίας από 0,974 στα 1,05

Ενώ παράλληλα, με την αποθήκευση ενέργειας της μπαταρίας στην τοπική πλευρά του κάθε ElmXnet βοηθά ώστε το σύστημα να μην υπερφορτώνεται συνολικά και ο διαμοιρασμός της ισχύς να γίνεται τοπικά, χωρίς να χρειάζονται διαρκώς αλλαγές στο Setpoint του μετατροπέα.

5 Συμπεράσματα-Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

5.1 Συμπεράσματα

Στο προηγούμενο κεφάλαιο δημιουργήθηκε, στο πρόγραμμα PowerFactory, ένα σύστημα βασισμένο στο υπάρχον έργο διασύνδεσης μεταξύ Αιγύπτου και Σαουδικής Αραβίας λαμβάνοντας υπόψιν την εγκατάσταση ενός Αιολικού Πάρκου. Η δημιουργία του συστήματος πραγματοποιήθηκε με την χρήση τεχνολογίας VSC και εξετάστηκε η συμπεριφορά αυτού υπό διαφορετικές περιπτώσεις. Δημιουργήθηκαν τέσσερα διαφορετικά σενάρια λειτουργίας του συστήματος με τα δύο να λαμβάνουν υπόψιν το Αιολικό Πάρκο και τα άλλα δύο έχοντάς το εκτός λειτουργίας. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για να δημιουργηθεί το σύστημα ήταν η ικανότητα μεταφοράς ισχύος στα 3GW και η ικανότητα παραγωγής από το Πάρκο στα 2,25GW.

Μερικά συμπεράσματα από τις παραπάνω προσομοιώσεις είναι τα κάτωθι:

- Η χρήση της τεχνολογίας των Voltage Source Converter-VSC, επέτρεψε τον αποτελεσματικό έλεγχο στις τιμές τάσης και στην έγχυση ή απορρόφηση ισχύος. Στην περίπτωση λειτουργίας του πάρκου, αυτό επέτρεπε τον διαμοιρασμού της ισχύς με συγκεκριμένες τιμές για το κάθε σύστημα ξεχωριστά και την οριοθέτηση της τάσης εντός επιτρεπτών τιμών. Αντίθετα, στην περίπτωση όπου το πάρκο ήταν εκτός λειτουργίας, η ικανότητα διατήρησης της τάσης στους ζυγούς παρουσίαζε δυσκολίες, με αποτέλεσμα να απαιτείται ο χειρισμός ενός εκ των δύο μετατροπέων ώστε να αποφευχθούν προβλήματα πτώσης ή ανύψωσης της τάσης. Με αυτό τον τρόπο συνειδητοποιήθηκε η αξία του τρίτου μετατροπέα στο αιολικό πάρκο και η σημασία λειτουργίας του υπεράκτιου πάρκου με το υπόλοιπο σύστημα. Η δημιουργία των τεσσάρων περιπτώσεων αποδείχθηκε επαρκής για την αξιολόγηση τόσο της διαστασιολόγησης όσο και της απόκριση του συστήματος, μέσω της κατάλληλης ρύθμισης των μετατροπέων για να διασφαλίζεται η διατήρηση της τάσης εντός επιτρεπτών ορίων.
- Η εξέταση του συστήματος υπό την εγκατάσταση μπαταριών δεν παρουσίασε άμεσα κάποια βελτίωση όσον αφορά στην τάση του συστήματος. Αντίθετα μέσω αυτής της περίπτωσης (Case_Study_4), έγινε αντιληπτή η σημασία αποθήκευσης της ενέργειας τοπικά στα κέντρα κατανάλωσης και απόδοσης της ισχύς όταν χρειάζεται πάλι τοπικά, ώστε να μειώνονται αρχικά οι απώλειες αλλά και να μην δημιουργούνται ζητήματα ευστάθειας του υπόλοιπου συστήματος. Παρ' όλα αυτά, η τοποθεσία εγκατάστασης και η χωρητικότητα ισχύς των μπαταριών είναι ένα πολύ σημαντικό πεδίο έρευνας αφού τα

συστήματα αποθήκευσης έχουν την ικανότητα παροχής υπηρεσιών στην συχνότητα καις την τάση.

- Για την ανάγκη δημιουργίας του συστήματος, χρησιμοποιήθηκε ένα έτοιμο παράδειγμα του PowerFactory και προστέθηκαν στοιχεία για την ολοκληρωμένη λειτουργία αυτού όπως είναι επιθυμητή. Για τον έλεγχο της διαστασιολόγησης των στοιχείων όμως ήταν απαραίτητη η δοκιμή ροής ισχύος με διαφορετικές τιμές ελέγχοντας την φόρτιση των στοιχείων και των γραμμών. Επιπλέον σε περιπτώσεις υπερφόρτισης του εξοπλισμού γινόταν επιλογή παρόμοιων στοιχείων παράλληλα συνδεδεμένων μεταξύ τους για τον ισομοιασμό της ισχύς όπως στην περίπτωση των μετασχηματιστών.

Σε ένα ευρύτερο πλαίσιο αξιολόγησης της προσομοίωσης αντιλαμβανόμαστε τον σχετικά εύκολο τρόπο αξιοποίησης της τεχνολογίας των μετατροπέων VSC στον έλεγχο τάσης και ισχύος. Η ενσωμάτωση του Αιολικού Πάρκου και των μπαταριών δείχνουν έμπρακτα την έννοια της ανθεκτικότητας στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας όπως στο Κεφάλαιο 2 και καθρεφτίζεται η συμβολή τους στα μεγέθη της τάσης και της ισχύος. Ενώ παράλληλα η ροή ισχύος που πραγματοποιείται, είναι η εφαρμογή των κανόνων που έχει αναπτυχθεί στο Κεφάλαιο 3. Μία απλή προσομοίωση αρκεί για να συνδυάσει τη βασική αρχή της ροής ισχύος σε σύνθετα συστήματα, όπως το υπό εξέταση, με τις νέες τεχνολογίες, αναδεικνύοντας την πρακτική τους αξία.

Επιπλέον, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η πραγματική κατασκευή του συστήματος πραγματοποιήθηκε με χρήση τεχνολογίας LCC και όχι VSC, όπως εφαρμόστηκε στην προσομοίωση. Παρ' όλα αυτά, η προσομοίωση αποτέλεσε ένα πρότυπο για την ανάπτυξη παρόμοιων συστημάτων μεταφοράς, τα οποία να μην θα επιτρέπουν μεγαλύτερο έλεγχο και αξιοποίηση των δυνατοτήτων των μετατροπέων IGBT, αλλά θα συνοδεύονται από αυξημένες απώλειες στη μεταφορά ισχύος.

Μέσω της χρήσης του λογισμικού του PowerFactory καταφέραμε να αποτυπώσουμε τα δεδομένα του προβλήματος, με στόχο τον έλεγχο λειτουργίας του συστήματος σε κάθε μία από τις περιπτώσεις που εξετάσαμε. Σαφώς, μπορεί να χρησιμοποιηθεί οποιοδήποτε άλλο μέσω προσομοίωσης παρόμοιων ικανοτήτων για την μελέτη και ανάλυση των συστημάτων μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας

5.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτέλεσε μια ολοκληρωμένη αποτύπωση της λειτουργίας των συστημάτων μεταφοράς, αναδεικνύοντας την ανάγκη υιοθέτησης νέων μέτρων και τεχνολογιών που θα ενισχύουν τα σύγχρονα ΣΗΕ και την ανθεκτικότητα αυτών. Οι συνεχείς

μεταβολές στον τρόπο λειτουργίας τους, καθιστούν αναγκαία τη συνέχιση της έρευνας και προσφέρουν σημαντικά περιθώρια για περαιτέρω διερεύνηση και ανάπτυξη των μεθόδων που παρουσιάστηκαν.

Μερικές προτάσεις για έρευνα με στόχο την βελτιστοποίηση της λειτουργίας των ΣΗΕ, αλλά και την γενικότερη εμβάθυνση στον συνδυασμό των νέων τεχνολογιών αποτελούν τα κάτωθι:

- Προτείνεται η δημιουργία της ίδια προσομοίωσης με χρήση της τεχνολογίας LCC και αξιολόγηση των εξαγόμενων αποτελεσμάτων σε άμεση σύγκριση με αυτά που προέκυψαν από την παρούσα διπλωματική. Επίσης θα μπορούσαν να ληφθούν υπόψιν σφάλματα, που μπορεί να προκύψουν στο σύστημα, πέραν της απώλειας του Αιολικού Πάρκου, όπως για παράδειγμα η απώλεια μίας γραμμής μεταφοράς από την διπολική τοπολογία, ή βλάβη σε έναν μετασχηματιστή. Με ποια σύγχρονα μέσα θα μπορούσαμε να άρουμε τις αρνητικές συνέπειες από κάτι τέτοιο και να επαναφέρουμε το σύστημά μας στην αρχική του μορφή σε γρήγορο χρονικό διάστημα.
- Σε αυτό το σημείο κρίνεται αναγκαίος ο σωστός χειρισμός των μεθόδων ενίσχυσης της ανθεκτικότητας. Η ενσωμάτωση μπαταριών και η εφαρμογή μεθόδων για τον καθορισμό της θέσης και της βέλτιστης χωρητικότητάς τους στο σύστημα, όπως ο αλγόριθμος PSO ή ο αλγόριθμος AIS, αποτελούν βασικά εργαλεία προς αυτή την κατεύθυνση. Επίσης η ταυτόχρονη δυσλειτουργία του συστήματος και τα εξαγόμενα συμπεράσματα από κάτι τέτοιο τροφοδοτούν νέες λύσεις για ενίσχυση της ανθεκτικότητας.
- Σε μεγάλης κλίμακας έργα, όπως οι διασυνδέσεις, σημαντικό ρόλο διαδραματίζει και η μορφολογία του εδάφους, τόσο σε ζητήματα γείωσης όσο και στην ακριβή αποτύπωση του έργου στον χάρτη. Ο σωστός και έγκυρος έλεγχος των στοιχείων του έργου υποστηρίζεται από τεχνολογίες επιτήρησης, είτε σε κεντρικό είτε σε αποκεντρωμένο επίπεδο, με τη χρήση συστημάτων SCADA. Ωστόσο, ένα αναδυόμενο πεδίο μελέτης αποτελεί η αξιοποίηση των GIS, τα οποία μπορούν να προσφέρουν σημαντική προστιθέμενη αξία σε συνδυασμό με σύγχρονες τεχνολογίες παρακολούθησης, όπως τα AMI και οι PMU. Η αποτύπωση αυτών σε πραγματικό χρόνο και η διερεύνηση για το πως μπορούν να αποτυπωθούν τα δεδομένα αυτά σε πραγματικό χρόνο σε πλατφόρμες προσομοίωσης και ελέγχου είναι ένα πεδίο που χρήζει έρευνας.
- Επιπλέον, η ενέργεια αποτελεί και πεδίο οικονομικής ανάπτυξης, με τις νέες τεχνολογίες να καθίστανται ανταγωνιστικότερες από τις παραδοσιακές, χάρη στο μικρότερο κόστος και την ευκολότερη μαζική παραγωγή τους (φωτοβολταϊκά πάνελ, μπαταρίες, ανεμογεννήτριες κ.ά.). Η δημιουργία προσομοιώσεων και η εφαρμογή της βέλτιστης

ροής ισχύος (Optimal Power Flow – OPF), με ενσωμάτωση των τεχνοοικονομικών δεδομένων των συστημάτων, επιτρέπει την άμεση αξιολόγηση της απόδοσης νέων τεχνολογιών σε σύγκριση με τις παραδοσιακές λύσεις. Η ανάπτυξη ενός νέου πλαισίου σύγκρισης των δύο προσεγγίσεων θα μπορούσε να αποτελέσει αντικείμενο πολυκριτηριακής ανάλυσης, λαμβάνοντας υπόψη παραμέτρους όπως το κόστος, την αξιοπιστία και την ανθεκτικότητα των συστημάτων.

- Σημαντικό κομμάτι στο οποίο δεν έχει δοθεί η απαιτούμενη προσοχή είναι η ασφάλεια των ΣΗΕ. Με την διαρκή ψηφιοποίησή τους και τον ηλεκτρονικό έλεγχο, καθίστανται ευάλωτα σε κυβερνοεπιθέσεις, κάτι το οποίο δεν είναι επιθυμητό. Παράλληλα, το μοντέλο παραγωγής ενέργειας που βασίζεται σε μετατροπείς και λιγότερο σε στρεφόμενες μηχανές είναι ευάλωτο σε μεγάλες μεταβολές της αδράνειας. Τι μπορεί να κάνει έμπρακτα ο διαχειριστής για να αντιμετωπίσει αυτούς τους κινδύνους, και ποια διαθέσιμα μέσα πρέπει να χρησιμοποιήσει προς αυτή την κατεύθυνση.

6 Βιβλιογραφία

- [1] Overhead Power Lines : Planning Design, Construction, F. Kiessling, P.Nefzger, J.F. Nolascou. Kaintzyk
- [2] M. Ardelean and P. Minnebo, “HVDC Submarine Power Cables in the World: State-of-the-Art Knowledge,” JRC Publications Repository, Dec. 10, 2015. <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC97720>
- [3] “Analysis of 50/60-Hz Magnetic Fields in 2-D Induced by High-Voltage Transmission Lines | IEEE Conference Publication | IEEE Xplore,” [ieeexplore.ieee.org](https://ieeexplore.ieee.org/document/9532811). <https://ieeexplore.ieee.org/document/9532811>
- [4] “Grid Map,” www.entsoe.eu. <https://www.entsoe.eu/data/map/>
- [5] Electrical Energy Systems: Analysis and Operation, edited by Antonio Gómez-Expósito, Antonio J.Conejo, Claudio A. Cañizares. Second edition.
- [6] W. Long and S. Nilsson, “HVDC transmission: yesterday and today,” IEEE Power and Energy Magazine, vol. 5, no. 2, pp. 22–31, Mar. 2007, doi: <https://doi.org/10.1109/mpae.2007.329175>.
- [7] V.F. Lescale, “Modern HVDC: state of the art and development trends,” Nov. 2002, doi: <https://doi.org/10.1109/icpst.1998.729003>.
- [8] K. Meah and S. Ula, “Comparative Evaluation of HVDC and HVAC Transmission Systems,” 2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting, Jun. 2007, doi: <https://doi.org/10.1109/pes.2007.385993>.
- [9] N. R. Watson and J. D. Watson, “An Overview of HVDC Technology,” Energies, vol. 13, no. 17, p. 4342, Aug. 2020, doi: <https://doi.org/10.3390/en13174342>.
- [10] O. E. Oni, I. E. Davidson, and K. N. I. Mbangula, “A review of LCC-HVDC and VSC-HVDC technologies and applications,” IEEE Xplore, Jun. 01, 2016. <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7555677>
- [11] T. Sousa, M. L. dos Santos, J. A. Jardini, R. P. Casolari, and G. L. C. Nicola, “An evaluation of the HVDC and HVAC transmission economic,” 2012 Sixth IEEE/PES Transmission and Distribution: Latin America Conference and Exposition (T&D-LA). IEEE, Sep. 2012. doi: [10.1109/tdc-la.2012.6401828](https://doi.org/10.1109/tdc-la.2012.6401828).
- [12] «Χαμηλόσυχνα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία : Πηγές ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων – Βιολογικές επιπτώσεις-Έλεγχοι από την ΕΕΑΕ»
- [13] R. F. Alonso and A. C. Zambroni de Souza, “Resilience of active networks with optimal mobile energy storage systems management,” Electric Power Systems Research, vol. 217, p. 109152, Jan. 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2023.109152>.
- [14] R. K. Mathew, Ashok S., and Kumaravel S., “Resilience assessment of Electric Power Systems: A scoping study,” 2016 IEEE Students’ Conference on Electrical, Electronics and Computer Science (SCEECS), Mar. 2016, doi: <https://doi.org/10.1109/sceecs.2016.7509351>

- [15] E. Kontos, R. T. Pinto, S. Rodrigues, and P. Bauer, "Impact of HVDC Transmission System Topology on Multiterminal DC Network Faults," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 30, no. 2, pp. 844–852, Apr. 2015, doi: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2014.2357056>.
- [16] B. R. Andersen, "HVDC transmission - opportunities and challenges," 8th IEE International Conference on AC and DC Power Transmission (ACDC 2006), 2006, doi: <https://doi.org/10.1049/cp:20060006>.
- [17] H. Hamzehbahmani, H. Griffiths, A. Haddad, and D. Guo, "Earthing requirements for HVDC systems," 2015 50th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), pp. 1–7, Sep. 2015, doi: <https://doi.org/10.1109/UPEC.2015.7339768>.
- [18] M. K. Bucher, R. Wiget, G. Andersson, and C. M. Franck, "Multiterminal HVDC Networks—What is the Preferred Topology?," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 29, no. 1, pp. 406–413, Feb. 2014, doi: <https://doi.org/10.1109/tpwr.2013.2277552>.
- [19] O. Gomis-Bellmunt, J. Liang, J. Ekanayake, R. King, and N. Jenkins, "Topologies of multiterminal HVDC-VSC transmission for large offshore wind farms," *Electric Power Systems Research*, vol. 81, no. 2, pp. 271–281, Feb. 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2010.09.006>.
- [20] Ibrahim Alwazah, R. R. Nasyrov, and F. Shaban, "The Importance of Grounding in HVDC Power Transmission Systems," 2021 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), pp. 131–135, Sep. 2020, doi: <https://doi.org/10.1109/uralcon49858.2020.9216269>.
- [21] Samar Akef, Ahdab Elmorshdy, A. M. Emam, and M. M. Samy, "Safe Grounding Grid Design for HVDC Converter Station," pp. 1020–1024, Dec. 2019, doi: <https://doi.org/10.1109/mepcon47431.2019.9007970>.
- [22] M. Marzinotto, G. Mazzanti, and M. Nervi, "Ground/sea return with electrode systems for HVDC transmission," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 100, pp. 222–230, Sep. 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2018.02.011>.
- [23] L. Zou, F. Yang, B. Gao, H. Luo, L. Ye, and W. Li, "GROUNDING CURRENT DISPERSION OF HVDC GROUNDING SYSTEM UNDER DYNAMIC SEASONAL FROZEN SOIL," *Progress In Electromagnetics Research C*, vol. 103, pp. 211–223, 2020, doi: <https://doi.org/10.2528/pierc20041904>.
- [24] Ιωάννης Φ. Γκόνοϋ, Βασίλειος Π. Ανδροβιτσάνεας, «Προστασία Ηλεκτρικών Εγκαταστάσεων Από Υπερτάσεις»
- [25] A. Samouëlian, I. Cousin, A. Tabbagh, A. Bruand, and G. Richard, "Electrical resistivity survey in soil science: a review," *Soil and Tillage Research*, vol. 83, no. 2, pp. 173–193, Sep. 2005, doi: <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.10.004>.
- [26] "Reduction of the step voltages of MV/LV substation grounding system based on shaping electric field," *Archives of Electrical Engineering*, Nov. 2023, doi: <https://doi.org/10.24425/aee.2021.137576>.

- [27] «Υψηλές Τάσεις» 3η Έκδοση Λάμπρος οικονόμου Γεώργιος Φώτης, Χρήστος Χριστοδούλου
- [28] P. Cicilio et al., “Resilience in an Evolving Electrical Grid,” *Energies*, vol. 14, no. 3, p. 694, Jan. 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/en14030694>
- [29] H. Sun et al., “Review of Challenges and Research Opportunities for Voltage Control in Smart Grids,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 34, no. 4, pp. 2790–2801, Jul. 2019, doi: <https://doi.org/10.1109/tpwrs.2019.2897948>.
- [30] Y. Gui et al., “Review of Challenges and Research Opportunities for Control of Transmission Grids,” *IEEE Access*, vol. 12, pp. 94543–94569, Jan. 2024, doi: <https://doi.org/10.1109/access.2024.3425272>.
- [31] E. Heylen, F. Teng, and G. Strbac, “Challenges and opportunities of inertia estimation and forecasting in low-inertia power systems,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 147, p. 111176, Sep. 2021, doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111176>.
- [32] Preshaan Jaglal, A. L. Marnewick, and D. Johan, “Distribution network planning practices based on the transition toward active distribution networks,” Jan. 2023, doi: <https://doi.org/10.1109/saupec57889.2023.10057843>.
- [33] K. H. Mohd Azmi, N. A. Mohamed Radzi, N. A. Azhar, F. S. Samidi, I. Thaqifah Zulkifli, and A. M. Zainal, “Active Electric Distribution Network: Applications, Challenges, and Opportunities,” *IEEE Access*, vol. 10, pp. 134655–134689, 2022, doi: <https://doi.org/10.1109/access.2022.3229328>.
- [34] Π. Γεωργιάκης and P. Georgilakis, “Σύγχρονα συστήματα μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας,” *Kallipos.gr*, 2021, doi: <https://doi.org/978-960-603-038-3>.
- [35] Z. Yang, “PI-based Simulation Modeling for Performance Testing of the Power Transmission Line,” *Energy*, vol. 301, pp. 131753–131753, Aug. 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.131753>.
- [36] P. Dehghanian, S. Aslan, and P. Dehghanian, “Maintaining Electric System Safety Through An Enhanced Network Resilience,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 54, no. 5, pp. 4927–4937, Sep. 2018, doi: <https://doi.org/10.1109/tia.2018.2828389>
- [37] A. A. Alguhi, M. A. Alotaibi, and E. A. Al-Ammar, “Probabilistic Planning for an Energy Storage System Considering the Uncertainties in Smart Distribution Networks,” *Sustainability*, vol. 16, no. 1, pp. 290–290, Dec. 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/su16010290>
- [38] Dong Hwan Kim, D. A. Eisenberg, Yeong Han Chun, and J. Park, “Network topology and resilience analysis of South Korean power grid,” vol. 465, pp. 13–24, Jan. 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.physa.2016.08.002>
- [39] M. Ciba, “Synchrony Measurement and Connectivity Estimation of Parallel Spike Trains from in vitro Neuronal Networks,” Jan. 01, 2021. https://www.researchgate.net/publication/349924155_Synchrony_Measurement_and_Connectivity_Estimation_of_Parallel_Spike_Trains_from_in_vitro_Neuronal_Networks

- [40] “Degree distribution,” Wikipedia, Feb. 17, 2023. https://en.wikipedia.org/wiki/Degree_distribution
- [41] M. Yue and X. Wang, “Grid Inertial Response-Based Probabilistic Determination of Energy Storage System Capacity Under High Solar Penetration,” *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 6, no. 3, pp. 1039–1049, Jul. 2015, doi: <https://doi.org/10.1109/tste.2014.2328298>
- [42] X. Wang, M. Yue, Eduard Muljadi, and W. Gao, “Probabilistic Approach for Power Capacity Specification of Wind Energy Storage Systems,” vol. 50, no. 2, pp. 1215–1224, Mar. 2014, doi: <https://doi.org/10.1109/tia.2013.2272753>
- [43] J. Confrey, A. H. Etemadi, S. M. F. Stuban, and T. J. Eveleigh, “Energy Storage Systems Architecture Optimization for Grid Resilience With High Penetration of Distributed Photovoltaic Generation,” *IEEE Systems Journal*, vol. 14, no. 1, pp. 1135–1146, Mar. 2020, doi: <https://doi.org/10.1109/jsyst.2019.2918273>
- [44] E. Galvan, P. Mandal, and Y. Sang, “Networked microgrids with roof-top solar PV and battery energy storage to improve distribution grids resilience to natural disasters,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 123, p. 106239, Dec. 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106239>.
- [45] P. Balducci, K. Mongird, and M. Weimar, “Understanding the Value of Energy Storage for Power System Reliability and Resilience Applications,” *Current Sustainable/Renewable Energy Reports*, Jun. 2021, doi: <https://doi.org/10.1007/s40518-021-00183-7>
- [46] W. Wang, G. Li, and J. Guo, “Large-scale renewable energy transmission by HVDC: Challenges and proposals,” *Engineering*, Jun. 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.eng.2022.04.017>.
- [47] E. Pierri, O. Binder, N. G. A. Hemdan, and M. Kurrat, “Challenges and opportunities for a European HVDC grid,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 70, pp. 427–456, Apr. 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.233>.
- [48] M. Wang et al., “Review and outlook of HVDC grids as backbone of transmission system,” in *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, vol. 7, no. 4, pp. 797–810, July 2021, doi: [10.17775/CSEEPES.2020.04890](https://doi.org/10.17775/CSEEPES.2020.04890)
- [49] U. Javed et al., “A Systematic Review of Key Challenges in Hybrid HVAC–HVDC Grids,” *Energies*, vol. 14, no. 17, p. 5451, Sep. 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/en14175451>.
- [50] Matteo Fresia et al., “A Techno-Economic Assessment to Define Inertia Needs of the Italian Transmission Network in the 2030 Energy Scenario,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 39, no. 3, pp. 5050–5061, Nov. 2023, doi: <https://doi.org/10.1109/tpwrs.2023.3331178>.
- [51] A. Crivellaro et al., “Beyond low-inertia systems: Massive integration of grid-forming power converters in transmission grids,” *arXiv (Cornell University)*, Aug. 2020, doi: <https://doi.org/10.1109/pesgm41954.2020.9282031>.
- [52] Theodor Borsche, T. Liu, and D. J. Hill, “Effects of rotational Inertia on power system damping and frequency transients,” Dec. 2015, doi: <https://doi.org/10.1109/cdc.2015.7403153>.

- [53] M. Rezkalla, M. Pertl, and M. Marinelli, “Electric power system inertia: requirements, challenges and solutions,” *Electrical Engineering*, vol. 100, no. 4, pp. 2677–2693, Aug. 2018, doi: <https://doi.org/10.1007/s00202-018-0739-z>.
- [54] Mahmut Erkut Cebeci, Osman Bulent Tor, S. Yilmaz, Ozan Gurec, and Okan Benli, “Lessons learnt from interfacing ArcGIS and DIgSILENT powerfactory at Başkent DISCO,” Apr. 2016, doi: <https://doi.org/10.1109/sgcf.2016.7492436>.
- [55] “Home - DIgSILENT,” www.digsilent.de. <https://www.digsilent.de/en/>
- [56] X. Χριστοδούλου, “ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ Τεχνικές Υψηλών Τάσεων για την ενίσχυση της ανθεκτικότητας των Δικτύων Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ Θεοδώρα Νίκου.” Available: <http://artemis.cslab.ece.ntua.gr:8080/jspui/bitstream/123456789/19327/1/%ce%94%ce%b9%cf%80%ce%bb%cf%89%ce%bc%ce%b1%cf%84%ce%b9%ce%ba%ce%ae%20%ce%95%cf%81%ce%b3%ce%b1%cf%83%ce%af%ce%b1-%ce%9d%ce%af%ce%ba%ce%bf%cf%85%20%ce%98%ce%b5%ce%bf%ce%b4%cf%8e%cf%81%ce%b1.pdf>
- [57] Wikipedia Contributors, “Newton’s method,” Wikipedia, Apr. 05, 2019. https://en.wikipedia.org/wiki/Newton%27s_method
- [58] C. Dempsey, “Research Guides: Mapping and Geographic Information Systems (GIS): What is GIS?,” Wisc.edu, 2019. <https://researchguides.library.wisc.edu/GIS>
- [59] “What is GIS? | Geographic Information System Mapping Technology,” Esri.com, 2022. <https://www.esri.com/en-us/what-is-gis/overview#planning-for-the-future>
- [60] C. Kost et al., “Renewable energy expansion and interaction in Europe: High resolution of RES potentials in energy system modeling,” 2015 12th International Conference on the European Energy Market (EEM), pp. 1–6, May 2015, doi: <https://doi.org/10.1109/eem.2015.7216677>.
- [61] M. Moncecchi, S. Corigliano, A. Bosisio, L. Pruneri, and M. Merlo, “Development of a GIS-based model for the planning and operation of electrical distribution grids in rural areas: a case study in Peru,” *IEEE Xplore*, Jul. 01, 2021. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9501205> (accessed Sep. 20, 2022)
- [62] Usman Bashir Tayab, M. T. Rahman, S. Aziz, and K. N. Hasan, “Modelling and Validation of Geographic Information System (GIS)-Based Synthetic Distribution Network,” 2021 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM), pp. 1–5, Jul. 2024, doi: <https://doi.org/10.1109/pesgm51994.2024.10761101>.
- [63] M. A. Abdulgalil, M. Ali, Fahad Saleh Al-Ismael, and M. Khalid, “One-Step Solution for Sizing and Allocation of Battery Energy Storage System Using DC Optimal Power Flow,” 2022 11th International Conference on Renewable Energy Research and Application (ICRERA), Sep. 2022, doi: <https://doi.org/10.1109/icrera55966.2022.9922869>.

- [64] Y. Sun et al., “Optimization Methods for Optimal Power Flow Problems in Distribution Networks: A Brief Review,” 2023 8th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE), Apr. 2023, doi: <https://doi.org/10.1109/acpee56931.2023.10135989>.
- [65] “Battery Energy Storage System Sizing Using PSO Algorithm in DIgSILENT PowerFactory,” International Journal of Renewable Energy Research, no. V12i4, 2022, doi: <https://doi.org/10.20508/ijrer.v12i4.13470.g8591>.
- [66] M. E. Nassar and A. Salama, “A novel probabilistic load model and probabilistic power flow,” pp. 881–886, May 2015, doi: <https://doi.org/10.1109/ccece.2015.7129391>.
- [67] S. Kim and T. J. Overbye, “Hybrid power flow analysis: Combination of AC and DC models,” pp. 1–4, Feb. 2011, doi: <https://doi.org/10.1109/peci.2011.5740495>.
- [68] Iman Elzemeity, Ibrahim Elsayeed, and Asmaa Elzemeity, “Feasibility study of an Offshore Wind Farm with the Egyptian-Saudi Arabia HVDC link,” pp. 168–172, Feb. 2021, doi: <https://doi.org/10.1109/icrega50506.2021.9388222>.

Πίνακας Εικόνων

Εικόνα 1.1 Παραγωγή, Μεταφορά και Διανομή ηλεκτρισμού [2].....	2
Εικόνα 1.2 Πύργοι υψηλής (a-e) και υπερύψηλης τάσης (f-h) [1].....	3
Εικόνα 1.3 Διασυνδέσεις υψηλής τάσης των μελών του ENTSO-E [4].....	5
Εικόνα 1.4 «Υποβρύχια καλώδια ισχύος στον κόσμο» [2].....	5
Εικόνα 1.5 Συγκριτικό κόστος των συστημάτων μεταφοράς HVAC και HVDC [9].....	10
Εικόνα 1.6 Διατάξεις πόλων συνεχούς ρεύματος υψηλής τάσης (HVDC): (α) Μονοπόλος με μεταλλική διαδρομή επιστροφής, (β) Μονοπόλος με επιστροφή γης [9].....	14
Εικόνα 1.7 Διατάξεις πόλων υψηλής συνεχούς τάσης (γ) Διπολική με μεταλλική διαδρομή επιστροφής (δ) Διπολική με διαδρομή επιστροφής στη γη [9].....	15
Εικόνα 1.8 Καταστάσεις λειτουργίας της διπολικής HVDC σύνδεσης σε (α) κανονική κατάσταση λειτουργίας (β) Μονοπολική λειτουργία εξαιτίας σφάλματος και επιστροφή μέσω γης (γ) Μονοπολική σύνδεση με μεταλλική επιστροφή [9].....	16
Εικόνα 1.9 Οριζόντια στοίχιση ηλεκτροδίου [22].....	17
Εικόνα 1.10 Δακτυλιοειδές Ηλεκτρόδιο [22].....	18
Εικόνα 1.11 Κάθετα μη συνεχή Ηλεκτρόδια [22].....	18
Εικόνα 1.12 Πολυστρωματικό μοντέλο εδάφους [23].....	19
Εικόνα 1.13 «Διάχυση του ρεύματος σε ομοιογενές έδαφος» [25].....	20
Εικόνα 1.14 Απεικόνιση τάσης επαφής και βηματικής τάσης [26].....	20
Εικόνα 1.15 Γέφυρα 6 παλμών (Graetz) ως μετατροπέα πηγής ρεύματος (CSC)[9].....	22
Εικόνα 1.16 Αυτοτροφοδοτούμενος μετατροπέας πηγής τάσης (VSC)[9].....	23
Εικόνα 1.17 Η αλλαγή του τρόπου παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από τα μεγάλα κέντρα παραγωγής σε συστήματα που βασίζονται σε VIBRES. Η ποσότητα της παραγωγής είναι ανάλογη του μεγέθους του κύκλου που περιβάλλει το κάθε σύστημα [28]....	24
Εικόνα 1.18 Σύστημα Μεταφοράς και οι διασυνδέσεις με τα κέντρα παραγωγής, αποθήκευσης και κατανάλωσης [30].....	25
Εικόνα 1.19 Κεντρικός Έλεγχος.....	27
Εικόνα 1.20 Κατανεμημένος Έλεγχος.....	27
Εικόνα 1.21 Δομή διεπικοινωνίας του AMI [33].....	29

Εικόνα 1.22 «Μονοφασικό ισοδύναμο μοντέλο μικρού μήκους τριφασικής γραμμής μεταφοράς».....	32
Εικόνα 1.23 Ονομαστικό κύκλωμα T γραμμής μεταφοράς μεσαίου μήκους.....	33
Εικόνα 1.24 Ονομαστικό κύκλωμα Π γραμμής μεταφοράς μεσαίου μήκους.....	33
Εικόνα 2.1 Διαφορετικές αποκρίσεις, με αυτήν του συστήματος A να είναι χειρότερη σε σχέση με του B και το B2 έχει καλύτερη απόδοση σε σχέση με αυτήν του B1, που οδηγούν σε ξεχωριστά επίπεδα ανθεκτικότητας σε διαφορετικά κόσθη [14].....	37
Εικόνα 2.2 Καμπύλη ανθεκτικότητας του ΣΗΕ σε διαταραχές και επιπτώσεις [28].....	37
Εικόνα 2.3 Καταστάσεις που υπεισέρχεται το σύστημα σε περίπτωση HILF [36].....	38
Εικόνα 2.4 Αξιολόγηση συστήματος βάσει βραχυπρόθεσμης και μακροπρόθεσμης στρατηγικής [36].....	40
Εικόνα 2.5 Παράδειγμα εφαρμογής του ελέγχου τοπολογίας μέσω TLS ενεργειών. Τα πέντε (5) βέλτιστα σενάρια λειτουργίας σε περίπτωση HILP.....	43
Εικόνα 2.6 Τυχαίο δίκτυο(Random Network) και δίκτυο χωρίς κλίμακα (Scale-free Network) [39].....	44
+ Εικόνα 2.7 Μοντέλο Markov για M ανεξάρτητα στοιχεία [41].....	48
Εικόνα 2.8 Σύγχρονη γεννήτρια μόνιμου μαγνήτη (PMSG), σε σύνδεση στο δίκτυο μέσω συστήματος απομόνωσης ισχύος [42].....	49
Εικόνα 2.9 Αποτελέσματα προσομοίωσης για το σύστημα του Mission Viejo, με την παραγωγή από PVs (Total Generation) και την συνολική ζήτηση (Total Demand) [43].....	52
Εικόνα 2.10 Απλοποιημένο δίκτυο συμπεριλαμβανομένου των τεχνολογιών ESS και η θέση σφάλματος στο δίκτυο [43].....	52
Εικόνα 2.11 Δημιουργία προσομοιωμένης αδράνειας (emulated inertia) [53].....	60
Εικόνα 3.1 Περιβάλλον εργασίας PowerFactory.....	64
Εικόνα 3.2 Δημιουργία νέου Project.....	64
Εικόνα 3.3 Εισαγωγή ονόματος Project.....	65
Εικόνα 3.4 Ονοματοδοσία δικτύου.....	65
Εικόνα 3.5 Περιβάλλον εργασίας του νέου project.....	66
Εικόνα 3.6 Περιβάλλον αρχικοποίησης του Study Case.....	67
Εικόνα 3.7 Δημιουργία Study Case και η θέση του στο Περιβάλλον Εργασίας.....	67

Εικόνα 3.8 Παράθυρο ενεργοποίησης ή απενεργοποίησης του Study Case.....	68
Εικόνα 3.9 Αποθήκευση Σεναρίου Λειτουργίας.....	69
Εικόνα 3.10 Ενεργοποίηση ή Απενεργοποίηση Σεναρίου Λειτουργίας.....	70
Εικόνα 3.11 Καρτέλα Διαχειριστή Δεδομένων (Data Manager).....	71
Εικόνα 3.12 Ενεργοποίηση επιθυμητού Project στο περιβάλλον εργασίας.....	71
Εικόνα 3.13 Λειτουργία Edit Relevant Objects for Calculation.....	71
Εικόνα 3.14 Φιλτράρισμα στοιχείων από την επιλογή Edit Relevant Objects for Calculation.....	72
Εικόνα 3.15 Επεξεργασία Χαρακτηριστικών του στοιχείου, μέσω του Edit Relevant Objects for Calculation.....	72
Εικόνα 3.16 Εισαγωγή αρχείου τύπου (pdf, dz, dle) / Εξαγωγή αρχείου τύπου (pdf, dz)	73
Εικόνα 3.17 Βιβλιοθήκη του PowerFactory.....	73
Εικόνα 3.18 Επιλογή ανάλυσης ροής φορτίου.....	75
Εικόνα 3.19 Καρτέλα ρύθμισης της ροής φορτίου «Basic Option».....	76
Εικόνα 3.20 Επεξεργασία μελέτης ροής ισχύος «Active Power Control».....	77
Εικόνα 3.21 Επεξεργασία μελέτης ροής ισχύος «Advanced Options».....	78
Εικόνα 3.22 Επεξεργασία μελέτης ροή φορτίου «Iteration Control».....	79
Εικόνα 3.23 Βασική δομή διασύνδεσης λογισμικού [54].....	81
Εικόνα 3.24 Προτεινόμενος τρόπος λειτουργίας [54].....	81
Εικόνα 3.25 Υποψήφια σημεία αναφοράς ("sites") για την Γαλλία, το Mecklenburg-Vorpommern και την Εύβοια [60].....	82
Εικόνα 3.26 Οπτικοποίηση μέσω του GIS για τις νέες παρεμβάσεις στον σχεδιασμό του συστήματος του Περού [61].....	84
Εικόνα 3.27 Δίκτυο της Βικτώριας (Αυστραλία) [62].....	85
Εικόνα 3.28 Χάρτης της Βικτώριας βάσει του οποίου θα σχεδιαστεί το νέο δίκτυο [62].	85
Εικόνα 3.29 Ζυγός ΣΗΕ προς ανάλυση [34].....	86
Εικόνα 3.30 Αποτελέσματα DC-OPF για διαφορετικά σενάρια λειτουργίας, βέλτιστα κόστη με και χωρίς BESS [63].....	90

Εικόνα 3.31 Παράδειγμα μοντέλου δικτύου στο PowerFactory για την παρουσίαση της λειτουργίας και των αποτελεσμάτων του OPF [62].....	97
Εικόνα 4.1 Χάρτης σύνδεσης Αιγύπτου -Σαουδικής Αραβίας με την ύπαρξη Υπεράκτιου Αιολικού [68].....	99
Εικόνα 4.2 Προσομοίωση συστήματος σύνδεσης HVDC Αιγύπτου Σαουδικής Αραβίας με το πρόγραμμα «PowerFactory».....	100
Εικόνα 4.3 Χαρακτηριστικά τιμών στην πλευρά της Αιγύπτου.....	102
Εικόνα 4.4 Μετατροπέας στην πλευρά της Αιγύπτου.....	102
Εικόνα 4.5 Χαρακτηριστικά τιμών στην πλευρά του Αιολικού Πάρκου.....	103
Εικόνα 4.6 Χαρακτηριστικά τιμών στην πλευρά της Σαουδικής Αραβίας.....	103
Εικόνα 4.7 Μετατροπέας στην πλευρά της Σαουδικής Αραβίας.....	104
Εικόνα 4.8 Συνολικό σύστημα.....	104
Εικόνα 4.9 Ρυθμίσεις μετατροπέα Αιγύπτου, με στόχο την απορρόφηση ισχύος.....	105
Εικόνα 4.10 Ροή Ισχύος από το αιολικό προς τα δύο συστήματα.....	106
Εικόνα 4.11 Ανά μονάδα τάση στους ζυγούς του συστήματος.....	106
Εικόνα 4.12 Ροή Ισχύος χωρίς Αιολικό Πάρκο από Σαουδική Αραβία προς Αίγυπτο...	107
Εικόνα 4.13 Τάση των ζυγών στην περίπτωση ροής ισχύος αποκλειστικά από Σαουδικής Αραβία προς Αίγυπτο.....	108
Εικόνα 4.14 Ροή Ισχύος χωρίς Αιολικό Πάρκο από Αίγυπτο προς Σαουδική Αραβία...	109
Εικόνα 4.15 Τάση των ζυγών στην περίπτωση ροής ισχύος αποκλειστικά από Αίγυπτο προς Σαουδικής Αραβία.....	109
Εικόνα 4.16 Σύστημα με το Αιολικό Πάρκο εκτός και με εγκατάσταση δύο συστημάτων μπαταριών στο PowerFactory.....	111
Εικόνα 4.17 Ρυθμίσεις μπαταρίας για απορρόφηση ισχύος από την μπαταρία.....	112
Εικόνα 4.18 Ρυθμίσεις μπαταρίας για έγχυση ισχύος από την μπαταρία.....	112
Εικόνα 4.19 Έγχυση ισχύος από το σύστημα της Αιγύπτου (εξωτερικό και μπαταρία) προς της Σαουδική Αραβία.....	112
Εικόνα 4.20 Απορρόφηση Ισχύος της Αιγύπτου από την Σαουδική Αραβία (μπαταρία και εξωτερικό δίκτυο).....	113

Εικόνα 4.21 Αλλαγή στις ρυθμίσεις του μετατροπέα στο «DC Voltage Setpoint» στην πλευρά της Αραβίας από 0,974 στα 1,05.....114