



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

Ανάλυση Στατικής Ασφάλειας Δικτύου και
Σχεδιασμός Προστασίας Συστήματος με Μεγάλη
Αιολική Διείσδυση

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΑΡΙΑ ΜΠΑΝΑΣΙΟΥ

Επιβλέπων: Κωνσταντίνος Δ. Βουρνάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εποπτεία : Π. Μανδουλίδης
Υποψήφιος Διδάκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2018



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών
Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος

Ανάλυση Στατικής Ασφάλειας Δικτύου και Σχεδιασμός Προστασίας Συστήματος με Μεγάλη Αιολική Διείσδυση

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΑΡΙΑ ΜΠΑΝΑΣΙΟΥ

Επιβλέπων: Κωνσταντίνος Δ. Βουρνάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εποπτεία : Π. Μανδουλίδης
Υποψήφιος Διδάκτορας Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 27η Μαρτίου 2018.

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

.....

Κ. Βουρνάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Γ. Κορρές
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Σ. Παπαθανασίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2018

(Υπογραφή)

.....
ΜΑΡΙΑ ΜΠΑΝΑΣΙΟΥ

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

© 2018 – All rights reserved



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών
Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος

Copyright ©–All rights reserved Μαρία Μπανάσιου, 2018.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

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 τη συγγραφέα.

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

Περίληψη

Η αύξηση διείσδυσης Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας και ειδικότερα Αιολικής Παραγωγής στα σύγχρονα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας εισάγει αρκετές νέες προκλήσεις. Η στατική ασφάλεια του δικτύου είναι μία από αυτές. Ο περιορισμός, όμως, της αιολικής διείσδυσης για την αντιμετώπιση κάθε πιθανής διαταραχής θα μείωνε εξαιρετικά τη διαθεσιμότητα του δικτύου. Συνεπώς η εναλλακτική λύση που εξετάζεται είναι η αντιμετώπιση ενδεχόμενων διαταραχών που προκαλούν υπερφορτίσεις με ειδικά σχήματα προστασίας συστήματος. Αντικείμενο, λοιπόν, της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάλυση της στατικής ασφάλειας δικτύου και ο σχεδιασμός προστασίας συστήματος με μεγάλη αιολική διείσδυση.

Το εξεταζόμενο δίκτυο αποτελεί ένα κομμάτι του γαλλικού ΣΗΕ, το οποίο διαχειρίζεται από τον RTE. Αποτελείται από 17 ζυγούς και είναι ένα σύστημα με ένα δίκτυο υπομεταφοράς τάσης 90kV (ΥΤ), στο οποίο είναι συνδεδεμένα οχτώ αιολικά πάρκα, συνδεδεμένο με ένα δίκτυο μεταφοράς τάσης 225kV (ΥΥΤ). Το εξεταζόμενο στιγμιότυπο λειτουργίας είναι υψηλών τάσεων και χαμηλού φορτίου.

Προκειμένου να αναγνωριστούν οι καταστάσεις λειτουργίας που το δίκτυο είναι στατικά ανασφαλές εφαρμόζεται το κριτήριο N-1 και η ανάλυση πραγματοποιείται μέσω του προγράμματος *PSSE*. Ως διαταραχές θεωρούνται οι απώλειες γραμμών μεταφοράς του δικτύου και οι απώλειες των φορτίων. Επικίνδυνες είναι οι διαταραχές που προκαλούν την παραβίαση των θερμικών ορίων κλάδων του δικτύου. Θερμικές υπερφορτίσεις οδηγούν το δίκτυο σε ανασφαλή κατάσταση λειτουργίας και είναι δυνατόν να προκαλέσουν αλυσιδωτές απώλειες και άλλων στοιχείων του λόγω θερμικής υπερφόρτισης εξαιτίας της αρχικής διαταραχής.

Προκειμένου να αντιμετωπιστούν οι προαναφερόμενες διαταραχές προτείνεται ο σχεδιασμός σχημάτων προστασίας ακεραιότητας συστήματος προκειμένου να υπάρχει η δυνατότητα εγκατάστασης μέγιστης αιολικής παραγωγής σε συνδυασμό με την διασφάλιση της στατικής ασφάλειας του δικτύου.

Λέξεις Κλειδιά

Στατική ασφάλεια δικτύου, Σχήματα Προστασίας Ακεραιότητας Συστήματος, Σχήματα Προστασίας Συστήματος, N-1 κριτήριο, Μέγιστη αιολική διείσδυση, Απώλεια γραμμών μεταφοράς, Απώλεια φορτίων, *PSSE*, Αλυσιδωτή απώλεια στοιχείων, Θερμική υπερφόρτιση στοιχείων.

Abstract

The increased Renewable Energy Resources penetration and more specifically Wind Power production in the modern Electric Power Systems introduces new challenges. Static security is among them. However wind penetration constraints set to confront every possible contingency may decrease significantly network availability. Therefore, the alternative solution being investigated is confronting contingencies that cause thermal overloads with system protection schemes. This diploma thesis focuses on static security assessment in a meshed sub-transmission network with high wind penetration, as well as the design on system integrity protection schemes to avoid insecure operation.

The test network considered is an unnamed part of the French grid operated by RTE. The HV (90kV) sub-transmission network is connected to an EHV transmission system of 22kV. On the sub-transmission level eight Wind Farms (WFs) are connected. The network condition studied is a light load snapshot with relatively high voltages.

In order to identify the operational states that cause the network to be insecure the N-1 criterion is applied and the contingency analysis is performed using PSSE. All single transmission line and network load disconnections were considered. In case of the thermal limit of a branch is exceeded the system is considered insecure. Thermal overloads could potentially cause cascaded branch tripping in the system.

To restore system security after the contingencies that cause thermal overloads, event-driven protection is proposed. The main goal is to maximize use of wind energy and ensure static security of the test network. In this diploma thesis for each contingency that causes insecure operation, the generation limits of WFs are modified or bus couplers are opened/or closed. Event-driven protection is used, so that setpoint of each WF is changed, only after a specific contingency happens.

Keywords

Static Security, System Integrity Protection Schemes, System Protection Schemes, N-1 criterion, Maximum wind penetration, Line tripping, Load tripping, PSSE, Cascaded loss, Thermal overload.

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του προπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Θα ήθελα κατ' αρχάς να ευχαριστήσω εκ βαθέων τον καθηγητή της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών του ΕΜΠ, κ. Κωνσταντίνο Βουρνά, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση του για την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας. Θα ήθελα να τον ευχαριστήσω για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπο μου καθώς και για τη δυνατότητα που μου προσέφερε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον αντικείμενο. Οι συναντήσεις και συζητήσεις μας συνέβαλαν καθοριστικά στο αποτέλεσμα και στην ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Τον ευχαριστώ θερμά, τέλος, για την άψογη συνεργασία μας και το συνεχές ενδιαφέρον του.

Εν συνεχεία θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον υποψήφιο διδάκτορα κ. Παναγιώτη Μανδουλίδη για τις εύστοχες υποδείξεις του και τη χρήσιμη συνεργασία που είχαμε κατά τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω από τα βάθη της καρδιάς μου την οικογένεια μου, τους γονείς μου Σωτήρη και Ιωάννα και τα αδέρφια μου Λαμπρινή και Κωνσταντίνο, για την ηθική ψυχολογική και οικονομική στήριξη που μου παρείχαν όλα αυτά τα χρόνια, καθώς και για τη συμπαράσταση και υποστήριξη που μου παρείχαν σε όλες τις επιλογές μου. Δεν θα μπορούσα να παραλείψω να ευχαριστήσω θερμά τους αγαπημένους μου φίλους και συμφοιτητές Χαρούλα, Άλκη, Βασίλη, Μανώλη και Κώστα που ήταν δίπλα μου όλα αυτά τα χρόνια και και όποτε χρειάστηκε μου παρείχαν στήριξη και βοήθεια.

Περιεχόμενα

Περίληψη	1
Abstract	3
Ευχαριστίες	5
Περιεχόμενα	9
Κατάλογος Σχημάτων	12
Κατάλογος Πινάκων	13
1 Εισαγωγή	15
1.1 Δομή Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας	16
1.1.1 Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας και τύποι Σταθμών Παραγωγής	17
1.1.2 Μεταφορά Ηλεκτρικής Ενέργειας	18
1.1.3 Διανομή Ηλεκτρικής Ενέργειας	19
1.2 Αιολική Παραγωγή	20
1.2.1 Γενικά	20
1.2.2 Τεχνολογίες Ανεμογεννητριών	22
1.3 Ανάλυση Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας	24
1.3.1 Ανάλυση Μόνιμης Κατάστασης	25
1.3.2 Μοντέλα συνιστωσών ΣΗΕ	25
1.3.3 Εξισώσεις επίλυσης ροής φορτίου	27
1.3.4 Ταχεία Αποζευγμένη μέθοδος επίλυσης ροών φορτίου	28
1.4 Ασφάλεια Δικτύου	29
1.4.1 Στατική Ασφάλεια Δικτύου	31
1.4.2 Όριο φόρτισης γραμμών μεταφοράς	33
1.5 Σχήματα Προστασίας	35
1.6 Αντικείμενο και Δομή Εργασίας	36

2 Προστασία Ακεραιότητας Συστήματος	39
2.1 Εισαγωγή	39
2.2 Κριτήρια Σχεδίασης Σχήματος Προστασίας Ακεραιότητας Συστήματος	41
2.2.1 Περιγραφή Σχήματος Προστασίας Ακεραιότητας Συστήματος	42
2.3 Σχεδίαση Σχήματος Προστασίας Ακεραιότητας Συστήματος	43
2.4 Κατηγοριοποίηση Σχημάτων Προστασίας Ακεραιότητας Συστήματος	45
2.4.1 Ως προς την αρχή λειτουργίας τους	45
2.4.2 Ως προς την κρισιμότητα	47
2.4.3 Ως προς τη χρησιμότητα τους	47
2.4.4 Ως προς τη χρονική κλίμακα εφαρμογής	48
2.5 Προστασία Ακεραιότητας Συστήματος έναντι Αλυσιδωτής Απώλειας Στοιχείων λόγω Θερμικής Υπερφόρτισης	48
2.5.1 Κριτήρια Σχεδίασης Σχήματος Προστασίας Ακεραιότητας Συστήματος από Αλυσιδωτή Απώλεια Στοιχείων	50
2.6 Πλεονεκτήματα Σχημάτων Προστασίας Ακεραιότητας Συστήματος	53
3 Ανάλυση Στατικής Ασφάλειας εξεταζόμενου δικτύου	55
3.1 Εξεταζόμενο δίκτυο	55
3.1.1 Στοιχεία Αιολικών Πάρκων του δικτύου	58
3.1.2 Στοιχεία Μετασχηματιστών του δικτύου	58
3.1.3 Στοιχεία Φορτίων του δικτύου	59
3.1.4 Θερμικά Όρια των Κλάδων του δικτύου	59
3.1.5 Υπολογισμός αρχικής Ροής Φορτίου του δικτύου	60
3.2 Ανάλυση N-1 Απώλειας Γραμμών	62
3.2.1 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα	62
3.2.2 Μέγιστη αιολική παραγωγή, χωρίς διαταραχή	65
3.2.3 Διαταραχές που δεν προκαλούν υπερφόρτιση (Ανάλυση απώλειας γραμμών)	68
3.2.4 Απώλεια γραμμής B41 - Δ41	69
3.2.5 Απώλεια γραμμής A41 - Δ41	72
3.2.6 Απώλεια γραμμής Γ42 - Η41	75
3.2.7 Απώλεια γραμμής A61 - Β61	78
3.2.8 Απώλεια γραμμής B42 - Η41	80
3.3 Ανάλυση απώλειας φορτίων	83
3.3.1 Διαταραχές που δεν προκαλούν υπερφόρτιση (Ανάλυση απώλειας φορτίων)	84
3.3.2 Σενάριο Φ1	85
3.3.3 Σενάριο Φ2	87
3.4 Συμπεράσματα Ανάλυσης Στατικής Ασφάλειας Δικτύου	88
3.4.1 Συνέπειες Ανασφάλειας Δικτύου	90

4	Σχεδιασμός Προστασίας Συστήματος έναντι Θερμικής Υπερφόρτισης	93
4.1	Προσδιορισμός Ορίων Παραγωγής Αιολικών Πάρκων	93
4.1.1	Αρχικό στιγμιότυπο λειτουργίας	94
4.1.2	Ασφαλή Όρια Παραγωγής Αιολικών Πάρκων	94
4.2	Εφαρμογή Σχημάτων Προστασίας Ακεραιότητας του Δικτύου	95
4.2.1	Προτεινόμενα Σχήματα Προστασίας Συστήματος	95
4.2.2	Χαρακτηριστικά Σχημάτων Προστασίας Συστήματος	97
4.2.3	Σχήμα Προστασίας 5A (ΣΠ 5A)	99
4.2.4	Σχήμα Προστασίας Φ6B (ΣΠ Φ6B)	99
4.2.5	Σχήμα Προστασίας 23AB (ΣΠ 23AB)	102
4.2.6	Σχήμα Προστασίας Φ3AB (ΣΠ Φ3AB)	104
4.2.7	Σχήμα Προστασίας 4AB (ΣΠ 4AB)	106
4.3	Σύνοψη	108
5	Συμπεράσματα - Προοπτικές	111
5.1	Σύνοψη και κύρια Συμπεράσματα	111
5.2	Προοπτικές για μελλοντική έρευνα	113
	Βιβλιογραφία	115

Κατάλογος Σχημάτων

1.1	Γενική δομή Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας.[1]	16
1.2	Ισοδύναμο κύκλωμα Μ/Σ με ΣΑΤΥΦ.	19
1.3	Διείσδυση αιολικής παραγωγής σε χώρες της Ευρώπης (2017) [8].	21
1.4	Δομικά στοιχεία Α/Γ (εταιρίας Enercon) [12].	22
1.5	Ανεμογεννήτρια ΑΓΔΤ [10].	24
1.6	Ανεμογεννήτρια με μετατροπέα πλήρους ισχύος [10].	24
1.7	Μονοφασικό ισοδύναμο ΓΜ μικρού μήκους.	26
1.8	Ονομαστικό κύκλωμα Π Μ/Σ με ΣΑΤΥΦ.	27
1.9	Καταστάσεις λειτουργίας συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας [13].	30
1.10	Εκτίμηση Στατικής Ασφάλειας Δικτύου [16].	32
2.1	Δομή Σχήματος Προστασίας Ακεραιότητας Συστήματος [31].	42
2.2	Χρονική κλίμακα ενεργοποίησης σχημάτων προστασίας ακεραιότητας συστήματος [31].	49
3.1	Εξεταζόμενο Δίκτυο.	56
3.2	Ροές ενεργού ισχύος στον Υποσταθμό Α.(Σενάριο 1Α)	66
3.3	Ροές ενεργού ισχύος στους Υποσταθμούς Α και Β.(Σενάριο 1Β)	67
3.4	Ροές ενεργού ισχύος στους Υποσταθμούς Α και Β.(Σενάριο 1Β, Βελτίωση)	67
3.5	Ροές ενεργού ισχύος στους Υποσταθμούς Α και Β (Σενάριο 2Α).	70
3.6	Ροές ενεργού ισχύος στους Υποσταθμούς Α και Β (Σενάριο 2Β).	71
3.7	Ροές ενεργού ισχύος στους Υποσταθμούς Α και Β (Σενάριο 3Α).	73
3.8	Ροές ενεργού ισχύος στους Υποσταθμούς Α και Β (Σενάριο 3Β)	74
3.9	Ροές ενεργού ισχύος στους Υποσταθμούς Α και Β (Σενάριο 4Α).	76
3.10	Ροές ενεργού ισχύος στον Υποσταθμό Β (Σενάριο 4Β).	78
3.11	Ροές ενεργού ισχύος στον Υποσταθμό Α (Σενάριο 5Α)	79
3.12	Ροές ενεργού ισχύος στον Υποσταθμό Α (Σενάριο 5Β).	80
3.13	Ροές ενεργού ισχύος στον Υποσταθμό Γ (Σενάριο 6Α).	81
3.14	Ροές ενεργού ισχύος στον Υποσταθμό Γ (Σενάριο 6Β)	82
3.15	Ροές ενεργού ισχύος στον Υποσταθμό Γ (Σενάριο Φ1).	86
3.16	Ροές ενεργού ισχύος στον Υποσταθμό Β (Σενάριο Φ2).	87

3.17	Συνέπειες ανασφαλούς λειτουργίας λόγω Σεναρίου 2Α.	91
3.18	Μερική σβέση του δικτύου. (Σενάριο 5Α)	92
4.1	Σχήμα Προστασίας 5Α.	100
4.2	Σχήμα Προστασίας Φ6Β.	102
4.3	Σχήμα Προστασίας 23ΑΒ.	104
4.4	Σχήμα Προστασίας Φ3ΑΒ.	106
4.5	Σχήμα Προστασίας 4ΑΒ.	108

Κατάλογος Πινάκων

3.1	Ζυγοί Εξεταζόμενου Δικτύου.	57
3.2	Δεδομένα Αιολικών Πάρκων Εξεταζόμενου Δικτύου	58
3.3	Δεδομένα Μετασχηματιστών Εξεταζόμενου Δικτύου.	59
3.4	Δεδομένα Φορτίων του Εξεταζόμενου Δικτύου.	59
3.5	Θερμικά Όρια Κλάδων του Δικτύου.	60
3.6	Τάσεις Ζυγών για Μέγιστη Αιολική Παραγωγή.	61
3.7	Τάσεις Ζυγών για Μηδενική Αιολική Παραγωγή.	62
3.8	Ενεργός και Άεργος Ισχύς GENERA61.	62
3.10	Υπερφορτίσεις με ΔΔΖ κλειστούς.	63
3.9	Εκτίμηση Στατικής Ασφάλειας για μέγιστη αιολική παραγωγή <i>I</i> (Απώλεια ΓΜ).	64
3.11	Υπερφορτίσεις με ΔΔΖ ανοιχτούς.	64
3.12	Απώλεια ΓΜ Β41-Δ41, Όρια παραγωγής Α/Π.	72
3.13	Απώλεια ΓΜ Α41-Δ41, Όρια παραγωγής Α/Π.	75
3.14	Απώλεια ΓΜ Γ42-Η41, Όρια παραγωγής Α/Π.	79
3.15	Εκτίμηση Στατικής Ασφάλειας για μέγιστη αιολική παραγωγή <i>II</i> (Απώλεια Φορτίων).	84
3.16	Υπερφορτίσεις λόγω απώλειας φορτίων.	84
3.17	Απώλεια φορτίου ΦΒ2, Όρια παραγωγής Α/Π.	88
4.1	Κλάδοι του Δικτύου με Υψηλή Αρχική Φόρτιση (Σενάρια 1Α και 1Β).	94
4.2	Ασφαλή Όρια Παραγωγής για όλες τις N-1 Διαταραχές.	95
4.3	Διαταραχές προς αντιμετώπιση μέσω σχημάτων προστασίας (ΔΔΖ κλειστοί).	96
4.4	Διαταραχές προς αντιμετώπιση μέσω σχημάτων προστασίας (ΔΔΖ ανοιχτοί).	96
4.5	Σχήματα Προστασίας Ακεραιότητας Συστήματος.	97

Κεφάλαιο 1

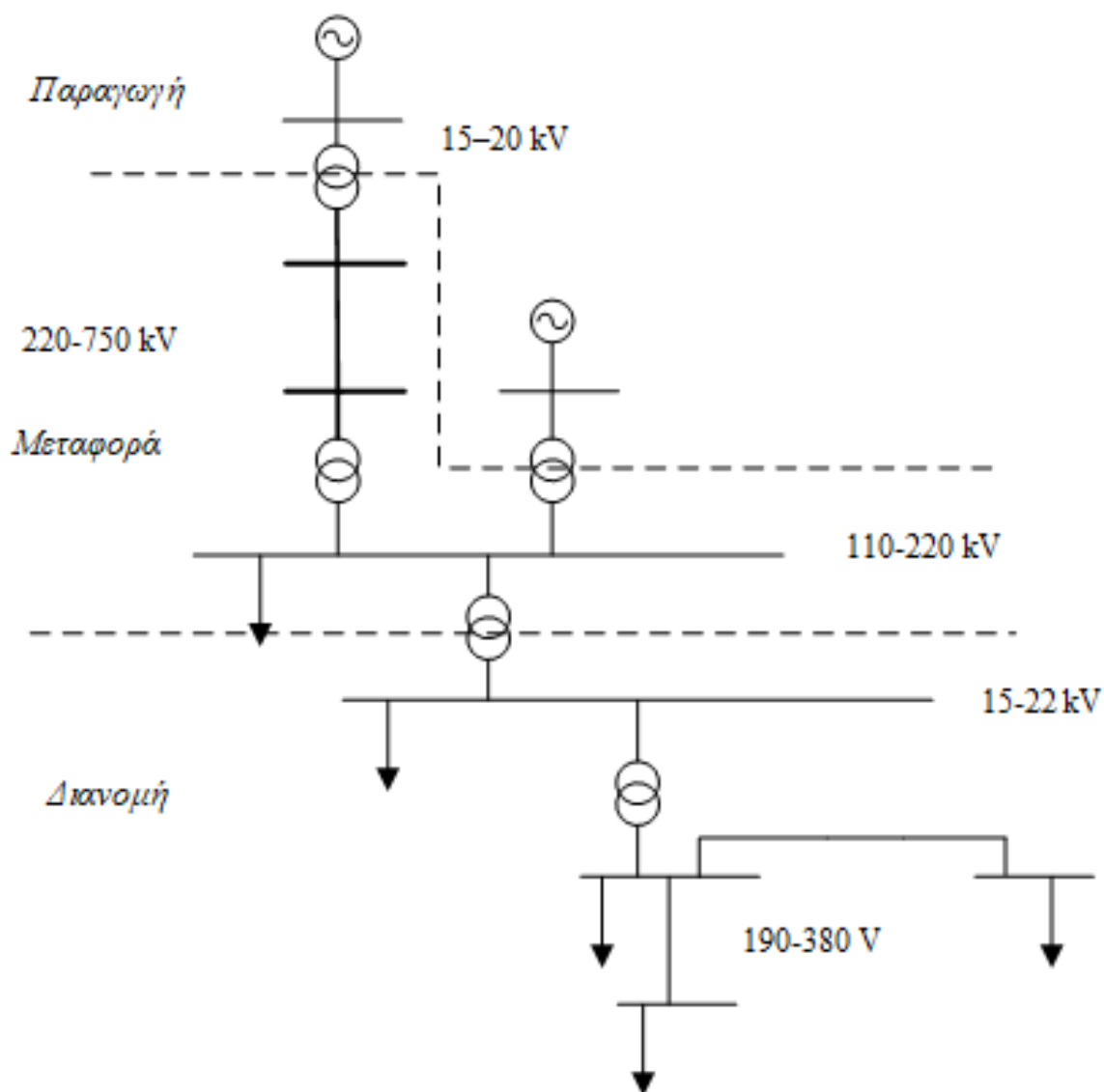
Εισαγωγή

Ως Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας ορίζεται το σύνολο των εγκαταστάσεων και των μέσων που χρησιμοποιούνται για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε εξυπηρετούμενες περιοχές κατανάλωσης.[1] Η ηλεκτρική ενέργεια αποτελεί μια μορφή ενέργειας, η οποία σχετίζεται με την παρουσία και την κίνηση ηλεκτρικών φορτίων και μπορεί εύκολα και αποδοτικά να μετατραπεί σε άλλες μορφές. Επίσης, είναι διαθέσιμη όποτε ζητηθεί και η μεταφορά της είναι εύκολη. Ένα ακόμη πλεονέκτημα της είναι η σχετικά εύκολη μετατροπή ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (αιολική, ηλιακή) σε ηλεκτρική με τη χρήση ανεμογεννητριών ή φωτοβολταϊκών στοιχείων αντίστοιχα.

Ένα Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ) πρέπει να ικανοποιεί τις ακόλουθες προϋποθέσεις, προκειμένου να εξασφαλίζεται η καλή λειτουργία του [2]:

- Πρέπει να παρέχει ηλεκτρική ενέργεια οπουδήποτε υπάρχει ζήτηση.
- Η ζήτηση ενεργού και άεργου ισχύος μεταβάλλεται με το χρόνο και το σύστημα πρέπει να έχει τη δυνατότητα να ικανοποιεί αυτή τη συνεχώς μεταβαλλόμενη ζήτηση.
- Η παρεχόμενη ενέργεια πρέπει να ικανοποιεί τρία κριτήρια που εξασφαλίζουν την ποιότητά της, σταθερή συχνότητα, σταθερή τάση και υψηλή αξιοπιστία τροφοδοτήσεως.
- Η ενέργεια πρέπει να παρέχεται με τα ελάχιστα οικονομικά αλλά και οικολογικά κόστη.

Η δομή των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας μεταβάλλεται ανά τον κόσμο και διαφοροποιούνται ως προς το μέγεθος και τα στοιχεία που απαρτίζουν το κάθε ΣΗΕ. Μια γενική δομή συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.1. Ωστόσο, η τροφοδότηση των καταναλωτών με ηλεκτρική ενέργεια απαιτεί τρεις ξεχωριστές λειτουργίες του ΣΗΕ, την παραγωγή, τη μεταφορά και τη διανομή.



Σχήμα 1.1: Γενική δομή Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας.[1]

Από το σημείο παραγωγής έως το σημείο κατανάλωσης, η ηλεκτρική ενέργεια βρίσκεται σε συνεχή ροή και λόγω της δυσκολίας στην αποθήκευσή της είναι αναγκαίο να παράγεται τη στιγμή που θα καταναλωθεί.

1.1 Δομή Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας

Στους σταθμούς παραγωγής πραγματοποιείται η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας και η μεταφορά της σε μεγάλες ποσότητες από τα εργοστάσια παραγωγής στις περιοχές κατανάλωσης γίνεται μέσω γραμμών υψηλής (ΥΤ) και υπερυψηλής (ΥΥΤ) τάσης. Μέσω των γραμμών η ηλεκτρική ενέργεια μεταφέρεται σε κεντρικά σημεία του δικτύου, τα οποία αποτελούν τους υποσταθμούς, και από εκεί εκκινούν τα δίκτυα διανομής μέσης τάσης (ΜΤ) που τη διανέμουν μέσω των υποσταθμών διανομής και των γραμμών χαμηλής τάσης (ΧΤ) 380/220V στους καταναλωτές.

Οι εγκαταστάσεις παραγωγής και μεταφοράς είναι συνήθως οικονομικά εξαρτημένες μεταξύ τους, σε αντίθεση με τη διανομή, η οποία είναι μια διαφορετική λειτουργία. Η διανομή εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της περιοχής που εξυπηρετεί και των καταναλωτών αυτής [1],[3].

Η δομή του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας επηρεάζεται σημαντικά από:

- το μέγεθος της ζήτησης της ηλεκτρικής ενέργειας
- τη χρονική της μεταβολή κατά τη διάρκεια του 24ωρου
- τη χωροταξική κατανομή της ζήτησης

Παρά τη διαφοροποίηση των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας ως προς το μέγεθος και τα στοιχεία τους, υπάρχουν κάποια βασικά χαρακτηριστικά τα οποία είναι κοινά σε όλα τα συστήματα. Κάθε ΣΗΕ αποτελείται από επιμέρους τριφασικά συστήματα εναλλασσόμενου ρεύματος σταθερής τάσης και ο εξοπλισμός στα υποσυστήματα παραγωγής και μεταφοράς είναι, επίσης, τριφασικός. Τα βιομηχανικά φορτία είναι κατά κανόνα τριφασικά, ενώ τα μονοφασικά οικιακά και εμπορικά φορτία είναι κατανομημένα στις τρεις φάσεις, προκειμένου να τηρείται κατά προσέγγιση η τριφασική συμμετρική φόρτιση στο σύστημα. Για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιούνται σύγχρονες γεννήτριες, οι οποίες μετατρέπουν τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική. Τέλος, η μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας σε μια διευρυμένη γεωγραφική περιοχή απαιτεί την παράλληλη λειτουργία υποσυστημάτων σε διαφορετικά επίπεδα τάσης [3].

1.1.1 Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας και τύποι Σταθμών Παραγωγής

Ως παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ορίζεται η διαδικασία, μέσω της οποίας μια μορφή πρωτογενούς ενέργειας μετατρέπεται σε ηλεκτρική. Ανάλογα με τη μορφή της πρωτογενούς ενέργειας οι σταθμοί παραγωγής διακρίνονται σε: *θερμοηλεκτρικούς, υδροηλεκτρικούς και εναλλακτικούς* [1], [4].

Θερμοηλεκτρικοί Σταθμοί Παραγωγής

Η θερμότητα, προερχόμενη είτε από καύση ορυκτών καυσίμων είτε από πυρηνική σχάση, μετατρέπεται με τη βοήθεια στροβίλων σε κινητική ενέργεια, η οποία οδηγεί τη σύγχρονη γεννήτρια. Το μέσο που χρησιμοποιούν οι σταθμοί αυτοί τους διαφοροποιεί σε ατμοηλεκτρικούς και πυρηνικούς, χρησιμοποιούν τον ατμό, και σε πετρελαϊκούς-ντιζελοηλεκτρικούς, οι οποίοι χρησιμοποιούν τις μηχανές εσωτερικής καύσης (ΜΕΚ), είτε εμβολοφόρες Ντιζελογεννήτριες (Ηλεκτροπαραγωγή Ζεύγη ΗΖ) είτε αεριοστροβίλοι (gas turbines).

Υδροηλεκτρικοί Σταθμοί Παραγωγής

Η δυναμική ενέργεια του νερού καθώς αυτό διέρχεται μέσα από διάφορους τύπους υδροστροβίλων, μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια. Οι σταθμοί διακρίνονται σε σταθμούς φυσικής ροής, ρυθμιζόμενης ροής και αντλητικούς, ανάλογα με τη ροή του νερού.

Εναλλακτικοί Σταθμοί Παραγωγής

Πρόκειται για σταθμούς παραγωγής στους οποίους γίνεται χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ). Οι περισσότερο διαδεδομένες εφαρμογές τους στα σημερινά συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας είναι τα αιολικά πάρκα, τα οποία αποτελούνται από συστοιχίες ανεμογεννητριών που συνδέονται στον ίδιο ζυγό του δικτύου, και οι φωτοβολταϊκοί σταθμοί. Εγκαθίστανται τόσο σε αυτόνομα δίκτυα, π.χ. νησιωτικά, που περιλαμβάνουν κυρίως Ντιζελοηλεκτρικούς σταθμούς με υψηλό κόστος καυσίμου, όσο και σε διασυνδεδεμένα συστήματα.

1.1.2 Μεταφορά Ηλεκτρικής Ενέργειας

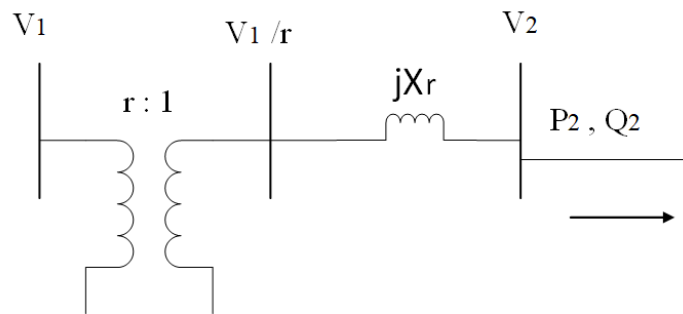
Ως μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας ορίζεται το σύνολο των διαδικασιών λειτουργίας και ελέγχου των εγκαταστάσεων και μέσων που χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας από τους σταθμούς παραγωγής στα μεγάλα κέντρα κατανάλωσης, από τα οποία εκκινούν τα δίκτυα διανομής. Στις εγκαταστάσεις περιλαμβάνονται γραμμές ΥΤ, υποσταθμοί για το μετασχηματισμό των διαφόρων επιπέδων τάσεων του συστήματος και υποσταθμούς υποβιβασμού τάσης σε Μέση Τάση (ΜΤ) για τροφοδότηση των περιοχών κατανάλωσης. Μέσω της μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας με Υψηλή Τάση επιτυγχάνεται η οικονομικότερη λειτουργία του συστήματος, αφού μειώνονται οι απώλειες. Οι πιο διαδεδομένες τιμές τάσεων κατά τη μεταφορά είναι 66kV, 110kV, 132kV, 138kV, 150kV, 220kV, 275kV, 345kV, 400kV, 500kV και 750kV. Το σύστημα μεταφοράς τροφοδοτεί και βιομηχανικούς καταναλωτές ΥΤ με δικό τους υποσταθμό υποβιβασμού της τάσης και εσωτερικά δίκτυα μέσης και χαμηλής τάσης. Στη βιβλιογραφία συχνά τα συστήματα παραγωγής και μεταφοράς αναφέρονται ως διασυνδεδεμένο ηλεκτρικό σύστημα.

Δίκτυο Υπομεταφοράς: Μεταφέρει ηλεκτρική ενέργεια σε μικρότερες ποσότητες και αποστάσεις υπό τάσεις 22kV έως και 150kV, συνήθως από υποσταθμούς υποβιβασμού σε ΥΤ/ΥΤ προς μικρότερα κέντρα κατανάλωσης στην ίδια περιοχή υψηλού φορτίου. Ο ρόλος του είναι παρόμοιος ενός δικτύου διανομής ΜΤ αλλά οι διακινούμενες ισχύεις είναι μεγαλύτερες υπό υψηλότερες τάσεις και με μεγαλύτερες εντάσεις [1].

Υποσταθμοί: Αποτελούν τους κόμβους του δικτύου και από αυτούς αναχωρούν και καταλήγουν οι γραμμές μεταφοράς του συστήματος. Σε αυτούς μπορεί να συνδέονται απλώς γραμμές χωρίς κάποιο μετασχηματισμό της τάσης, υποσταθμοί ζεύξεως ή να γίνεται υποβιβασμός της τάσης από μια βαθμίδα τάσης σε χαμηλότερη, υποσταθμοί υποβιβασμού. Αντίστοιχα, στο σύστημα παραγωγής ανήκουν υποσταθμοί ανύψωσης της τάσης, από την τιμή της τάσης παραγωγής (6-20 kV) στην τάση μεταφοράς.

Μετασχηματιστές με ΣΑΤΥΦ: Οι μεγάλοι μετασχηματιστές ισχύος ΥΥΤ/ΥΤ ή ΥΤ/ΜΤ είναι εφοδιασμένοι με μηχανισμούς μεταβολής της σχέσης μετασχηματισμού χωρίς διακοπή φορτίου, το οποίο επιτυγχάνεται με την αλλαγή λήψεως στα τυλίγματα του μετασχηματιστή, δεδομένου ότι η επαγόμενη ανά σπείρα τάση είναι σταθερή. Μέσω του μηχανισμού αυτού είναι δυνατό να διατηρηθεί μια κατά προσέγγιση σταθερή τάση στους σημαντικότερους ή και σε όλους τους ζυγούς των υποσταθμών διασυνδέσεως ή υποβιβασμού του δικτύου. Το Σύστημα Αλλαγής Τάσης Υπό Φορτίο (ΣΑΤΥΦ) λειτουργεί με ηλεκτροκινητήρες και ο χειρισμός του είναι αυτόματος. Ο μηχανισμός είναι εγκατεστημένος, συνήθως, στην πλευρά υψηλής τάσης του μετασχηματιστή, εξαιτίας των μικρότερων ρευμάτων σε αυτή την πλευρά που επιτρέπουν ευκολότερες μεταγωγές και του μεγαλύτερου αριθμού σπειρών επιτυγχάνοντας έτσι ακριβέστερη ρύθμιση. Η τάση που ελέγχεται συνήθως είναι αυτή στην πλευρά διανομής.

Πρόκειται για αργούς διακριτούς μηχανισμούς αποκατάστασης της τάσης, στους οποίους ο λόγος μετασχηματισμού αλλάζει κατά ένα βήμα τη φορά. Στη λειτουργία του ΣΑΤΥΦ ένας σημαντικός περιορισμός είναι ότι ο μεταβλητός λόγος μετασχηματισμού r πρέπει να έχει εύρος τιμών $[r_{min}, r_{max}]$. Τυπικές τιμές του κάτω ορίου είναι 0,8-0,9 αμ ενώ του άνω ορίου 1,1-1,2 αμ. Το μέγεθος του βήματος είναι 0,5-1,5 % [2].



Σχήμα 1.2: Ισοδύναμο κύκλωμα Μ/Σ με ΣΑΤΥΦ.

Στο Σχήμα 1.2 παρουσιάζεται το ισοδύναμο κύκλωμα ενός μετασχηματιστή με ΣΑΤΥΦ, θεωρώντας ότι η αντίδραση μαγνήτισης του μπορεί να αμεληθεί, αγνοώντας τις ωμικές απώλειες των τυλιγμάτων του και θεωρώντας σταθερή την αντίδραση σχεδάσεως X_t .

1.1.3 Διανομή Ηλεκτρικής Ενέργειας

Ως διανομή ηλεκτρικής ενέργειας ορίζεται το σύνολο των διαδικασιών λειτουργίας και ελέγχου με τις οποίες αυτή διανέμεται στους καταναλωτές. Περιλαμβάνουν της γραμμές ηλεκτρικής ενέργειας, μέσω των οποίων αυτή φτάνει στους καταναλωτές και τους υποσταθμούς υποβιβασμού της τάσης, που τις συνδέουν με το σύστημα μεταφοράς. Το δίκτυο διανομής εκτείνεται μέχρι το μετρητή της παρεχόμενης στον καταναλωτή ενέργειας (ή και ισχύος). Μετά το μετρητή αρχίζει η εσωτερική ηλεκτρική εγκατάσταση, η οποία περιλαμβάνει το εσωτερικό δίκτυο διανομής και τις συσκευές κατανάλωσης. Η διάκριση μεταξύ μεταφοράς και διανομής διαφέρει από χώρα σε

χώρα. Το Δίκτυο Διανομής χωρίζεται σε δύο βαθμίδες: τη διανομή MT και τη διανομή XT, την πρωτεύουσα και τη δευτερεύουσα διανομή αντίστοιχα. Το δίκτυο διανομής MT τροφοδοτείται από τους υποσταθμούς υποβιβασμού ΥΤ/MT και τροφοδοτεί τους υποσταθμούς διανομής MT/XT και τους καταναλωτές MT. Η MT διανομής λαμβάνει τιμές από 6,6 kV έως 20 kV. Σε περιοχές μεγάλης πυκνότητας φορτίου τα δίκτυα είναι κυρίως υπόγεια, δηλαδή οι γραμμές διανομής αποτελούνται από καλώδια, ενώ σε περιοχές με μικρότερη πυκνότητα φορτίου είναι, κυρίως, εναέριες. Η κατασκευή των δικτύων διανομής MT είναι, κυρίως, βροχοειδής, η οποία παρέχει οικονομία γραμμών για τον ίδιο βαθμό εξυπηρέτησης, αλλά η λειτουργία τους είναι ακτινική, λόγω της απλότητας της προστασίας και της ροής της ενέργειας σε αυτά [2].

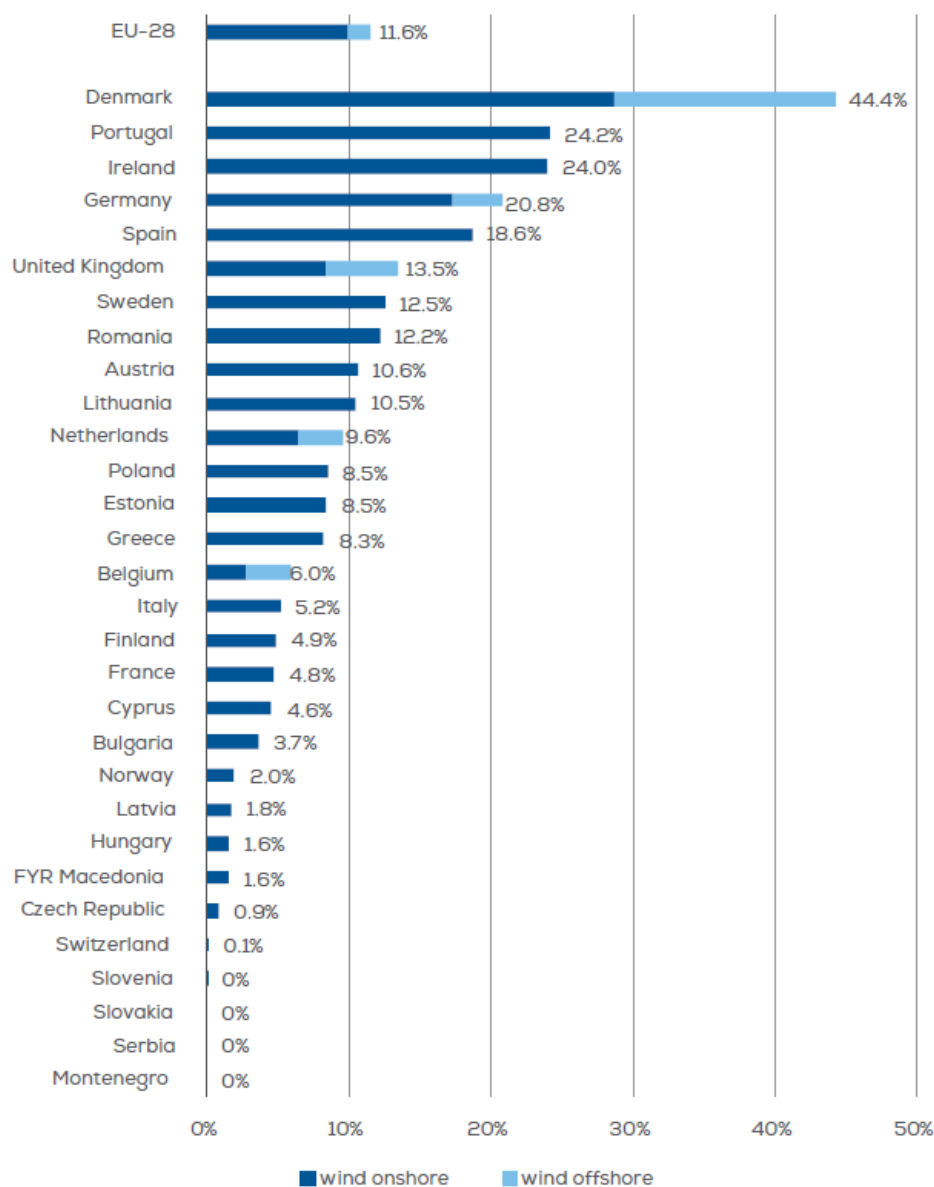
1.2 Αιολική Παραγωγή

1.2.1 Γενικά

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας προέρχονται από φυσικές διαδικασίες, όπως ο άνεμος, η γεωθερμία και η κίνηση του νερού, οι οποίες βρίσκονται στη φύση σε πρακτικά ανεξάντλητες ποσότητες και είναι πολύ φιλικές προς το περιβάλλον. Η χρήση τους παρουσιάζει δραματική αύξηση τα τελευταία χρόνια, εξαιτίας των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της ανθρώπινης δραστηριότητας η οποία γίνεται διαρκώς πιο έντονα αισθητή. Το κυριότερο πλεονέκτημά τους είναι η ήδη αξιοποιήσιμη μορφή τους για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, δεν απαιτείται, δηλαδή, κάποια επεξεργασία ή μετατροπή τους σε άλλη μορφή ενέργειας ώστε να είναι εκμεταλλεύσιμες [5].

Η αιολική ενέργεια αποτελεί την πιο διαδεδομένη και ευρύτερα χρησιμοποιούμενη από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Αυτό οφείλεται στη συνεχή βελτίωση της τεχνολογίας των ανεμογεννητριών και στη δυνατότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε τιμές συγκρίσιμες με αυτές των συμβατικών μονάδων σε μεγάλες σχετικά ισχύεις [6]. Ειδικότερα, σύμφωνα με στοιχεία της Ευρωπαϊκής Ένωσης, η χώρα με τη μεγαλύτερη αιολική διείσδυση είναι η Δανία με ποσοστό που αγγίζει το 44% για το έτος 2017. Το ποσοστό διείσδυσης αιολικής παραγωγής στην Ελλάδα είναι ίσο με 8,3% και σύμφωνα με στοιχεία του ΑΔΜΗΕ [7] μέχρι το τέλος του 2016, στην Ελλάδα τα εν λειτουργία αιολικά πάρκα ήταν εγκατεστημένης ισχύος ίσης με 2047MW, ενώ προβλέπεται ότι μέχρι το 2027 το ποσό αυτό θα ξεπεράσει τα 4300MW. Στο Σχήμα 1.3 παρουσιάζονται τα 28 υψηλότερα ποσοστά διείσδυσης αιολικής ενέργειας στην Ευρώπη [8].

Η κυριότερη πρόκληση στην ένταξη της αιολικής ισχύος σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας είναι η διατήρηση της τάσης του εντός των ορίων ασφαλούς λειτουργίας για όλους τους καταναλωτές του συστήματος. Εξίσου σημαντική είναι και η διατήρηση μιας ισορροπίας στην ισχύ του συστήματος, μεταξύ της αιολικής παραγωγής, αλλά και των συμβατικών σταθμών παραγωγής, και της ζήτησης του συστήματος. Προς αποφυγή πλεονάσματος παρεχόμενης ηλεκτρικής ισχύος, κρίνεται αναγκαία η χρήση μηχανισμών διαχείρισης ισχύος, όπως η εξαγωγή αυτής σε γειτονικά ΣΗΕ ή και η αποθήκευσή της [9].



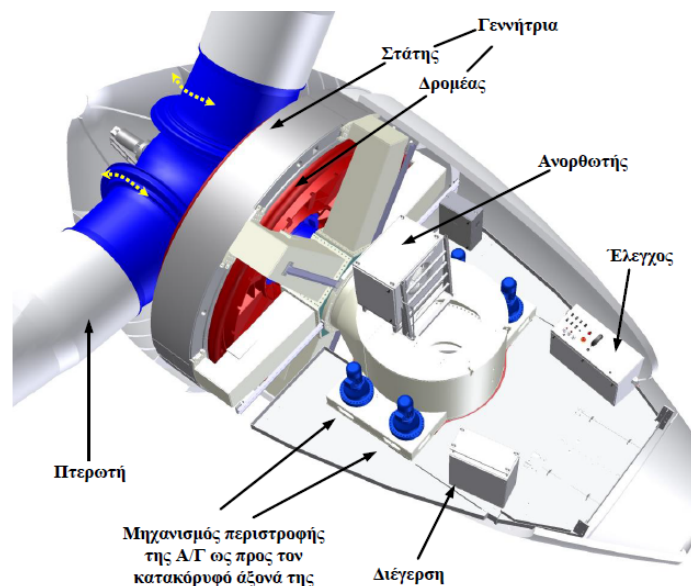
Σχήμα 1.3: Διείσδυση αιολικής παραγωγής σε χώρες της Ευρώπης (2017) [8].

Η αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας πραγματοποιείται από αιολικά πάρκα, τα οποία αποτελούνται από συστοιχίες ανεμογεννητριών που συνδέονται μεταξύ τους σε ένα δίκτυο μέσης τάσης, ενώ αν πρόκειται για μικρότερες μονάδες αιολικής παραγωγής χρησιμοποιούνται για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε πιο απομονωμένες περιοχές. Η συνολική εγκατάσταση συνδέεται στο δίκτυο μέσω υποσταθμίου, ο οποίος εγκαθίσταται σε κοντινή απόσταση από το αιολικό πάρκο και μέσω μετασχηματιστή ανυψώνει την τάση του, ώστε να μπορεί να συνδεθεί στο σύστημα μεταφοράς [10]. Σημείο Σύνδεσης στο Δίκτυο (ΣΣΔ) ονομάζεται το σημείο του δικτύου στο οποίο συνδέεται το αιολικό πάρκο στο δίκτυο ΜΤ ή ΧΤ. Στο ΣΣΔ εγκαθίσταται η διάταξη μέτρησης της ενέργειας που απορροφούν οι εγκαταστάσεις παραγωγής από το δίκτυο. Η ενέργεια που αποδίδει

το αιολικό πάρκο στο δίκτυο καθώς και αυτή που απορροφά αυτό ως καταναλωτής, μεταφέρεται μέσω της ίδιας παροχής [11].

1.2.2 Τεχνολογίες Ανεμογεννητριών

Η τεχνολογία της ανεμογεννήτριας (Α/Γ) βασίζεται σε δύο συστήματα μετατροπής ενέργειας: *μηχανικό σύστημα* που μετατρέπει την κινητική ενέργεια του ανέμου σε μηχανική ροπή στο δρομέα και το *ηλεκτρικό σύστημα*, στο οποίο η γεννήτρια μετατρέπει τη μηχανική ροπή του δρομέα σε ηλεκτρική ενέργεια. Η ανεμογεννήτρια αποτελεί ένα σύνθετο σύστημα και ο σχεδιασμός και η βελτιστοποίηση των επιμέρους στοιχείων και χαρακτηριστικών της απαιτούν εξειδικευμένες γνώσεις. Στο Σχήμα 1.4 παρουσιάζονται λεπτομερώς τα στοιχεία μιας τυπικής Α/Γ, της εταιρίας Enercon.



Σχήμα 1.4: Δομικά στοιχεία Α/Γ (εταιρίας Enercon) [12].

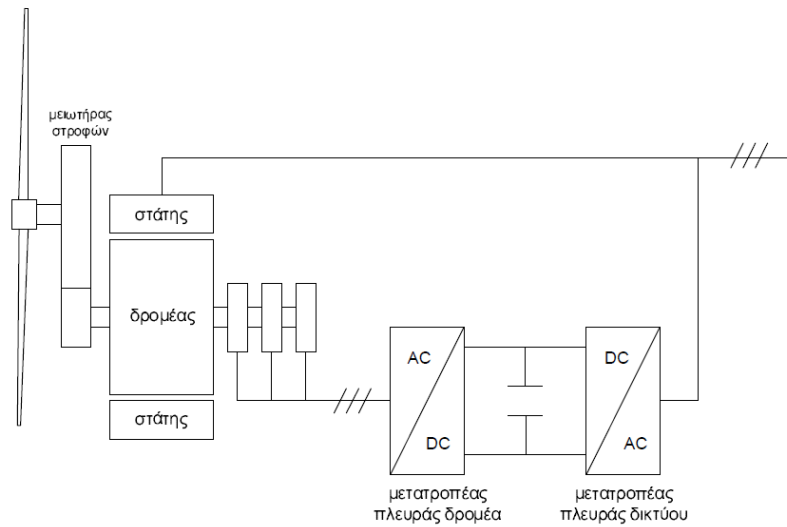
Οι ανεμογεννήτριες διαχωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, τις ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών και ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών. Ο διαχωρισμός αυτός βασίζεται στη συμπεριφορά των ανεμογεννητριών στις διακυμάνσεις του ανέμου. Μία ανεμογεννήτρια μεταβλητών στροφών επιτρέπει τη μεταβολή των στροφών του δρομέα ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου, αυξάνοντας έτσι σημαντικά την παραγόμενη ενέργεια από το ίδιο αιολικό πεδίο, συγκριτικά με μια Α/Γ σταθερών στροφών. Μία ανεμογεννήτρια σταθερών στροφών υλοποιείται με ασύγχρονη γεννήτρια κλωβού και συνδέεται απευθείας στο δίκτυο. Οι Α/Γ μεταβλητών στροφών υλοποιούνται είτε με ασύγχρονες γεννήτριες διπλής τροφοδότησης είτε με σύγχρονες γεννήτριες με πλήρη μετατροπέα ηλεκτρονικών ισχύος [5],[9].

Το κυριότερο πλεονέκτημα της Α/Γ σταθερών στροφών είναι η σχετικά απλή κατασκευή της και το χαμηλό της κόστος. Είναι απαραίτητο, όμως, να είναι μηχανικά πιο στιβαρή εξαιτίας των με-

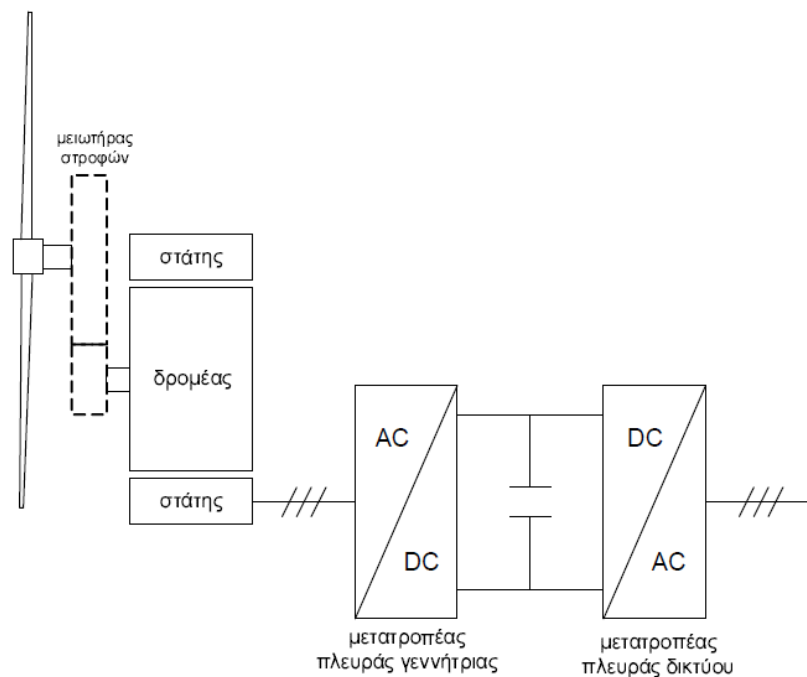
γαλύτερων μηχανικών καταπονήσεων, αφού η ταχύτητα του δρομέα δε μεταβάλλεται και πιθανές διαταραχές του ανέμου προκαλούν διαταραχές της ροπής. Διαταραχές παρατηρούνται και στην ισχύ εξόδου της ανεμογεννήτριας σταθερών στροφών. Το πλεονέκτημα των Α/Γ μεταβλητών στροφών είναι η δυνατότητα παραγωγής μεγαλύτερου ποσού ενέργειας για δεδομένες ταχύτητες ανέμου, ενώ οι μηχανικές καταπονήσεις είναι μικρότερες και επιτυγχάνεται εξομάλυνση της ισχύος εξόδου. Η δυνατότητα ρύθμισης της ταχύτητας ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου συμβάλλει στην αυξημένη ενεργειακή απόδοση και έχει οδηγήσει στην γενικευμένη χρήση και καθιέρωση των ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών. Η χρήση τους, όμως, απαιτεί τη χρησιμοποίηση ηλεκτρονικών ισχύος, τα οποία έχουν σχετικά υψηλό κόστος και παρουσιάζουν ευαισθησία σε πιθανά σφάλματα κατά τη λειτουργία τους [9],[10].

Ειδικότερα για τις ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών:

1. *Ασύγχρονες Γεννήτριες Διπλής Τροφοδότησης (ΑΓΔΤ ή DFIG)*: Πρόκειται για μηχανές επαγωγής τυλιγμένου δρομέα με στάτη και δρομέα συνδεδεμένους στο δίκτυο. Η απευθείας σύνδεση του στάτη στο δίκτυο υλοποιείται μέσω ενός μετατροπέα, ο οποίος αποτελείται από δύο μετατροπείς πηγής τάσης με διαμόρφωση εύρους παλμών (PWM) και κοινή DC πλευρά. Στο Σχήμα 1.5 παρουσιάζεται η υλοποίηση μιας Α/Γ αυτής της κατηγορίας. Η ενεργός ισχύς που εισάγεται στο δίκτυο ισούται με το άθροισμα της ισχύος του στάτη και -μέσω του μετατροπέα-του δρομέα. Δεδομένου ότι μόνο ένα μέρος της συνολικής ισχύος περνάει από το μετατροπέα, αυτός είναι μειωμένης ονομαστικής ισχύος (περίπου 25-30%) επομένως και μειωμένου κόστους συγκριτικά με ένα μετατροπέα πλήρους ισχύος. Ο μετατροπέας πλευράς δρομέα ρυθμίζει τις στροφές και την άεργο ισχύ που παράγει η μηχανή από το στάτη. Ο μετατροπέας πλευράς δικτύου ρυθμίζει το ενεργό ρεύμα που εγχέεται στο δίκτυο προκειμένου η DC τάση να παραμένει σταθερή και μπορεί να παρέχει άεργο ισχύ, συνήθως λειτουργεί με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος [10].
2. *Γεννήτριες Με Πλήρη Μετατροπέα (Full Converter)*: Για την υλοποίηση ανεμογεννητριών αυτού του τύπου χρησιμοποιούνται κυρίως σύγχρονες γεννήτριες και η χρήση του μετατροπέα ισχύος απεμπλέκει πλήρως τη συχνότητα του δρομέα από αυτή του δικτύου. Οι σύγχρονες γεννήτριες μπορεί να είναι με τύλιγμα διέγερσης ή μόνιμων μαγνητών και επιτρέπουν την αποφυγή του κιβωτίου ταχυτήτων, στην περίπτωση αυτή η γεννήτρια έχει μεγάλο αριθμό πόλων και μεγαλύτερη διάμετρο. Ο έλεγχος στροφών πραγματοποιείται μέσω της ρύθμισης της ενεργού έγχυσης του μετατροπέα πλευράς δικτύου που ρυθμίζει και την παραγωγή/κατανάλωση άεργου ισχύος. Η υλοποίηση της ανεμογεννήτριας με πλήρη μετατροπέα παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.6 [10].



Σχήμα 1.5: Ανεμογεννήτρια ΑΓΔΤ [10].



Σχήμα 1.6: Ανεμογεννήτρια με μετατροπέα πλήρους ισχύος [10].

1.3 Ανάλυση Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας

Προκειμένου να εξασφαλιστεί η σωστή σχεδίαση του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας αλλά και η αξιόπιστη λειτουργία του, απαιτείται η εκπόνηση εξειδικευμένων μελετών ανάλυσης του

συστήματος. Οι μελέτες αυτές ταξινομούνται σε μελέτες μόνιμης και μεταβατικής κατάστασης. Οι μελέτες μόνιμης κατάστασης περιλαμβάνουν την ανάλυση ροών φορτίου και την οικονομική κατανομή φορτίου, η οποία αναφέρεται στη βελτιστοποίηση της κατανομής του συνολικού φορτίου του συστήματος στις μονάδες παραγωγής με κυριότερο στόχο την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους λειτουργίας μεριμνώντας τους τεχνικούς περιορισμούς του ΣΗΕ. Οι μελέτες μεταβατικής κατάστασης περιλαμβάνουν την ανάλυση βραχυκυκλωμάτων, των ηλεκτρικών μεταβατικών φαινομένων και ζητήματα ευστάθειας του συστήματος [1],[3].

1.3.1 Ανάλυση Μόνιμης Κατάστασης

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται τα επιμέρους στοιχεία μια ανάλυσης μόνιμης κατάστασης. Παρουσιάζονται αναλυτικότερα οι τύποι των ζυγών, τα μοντέλα των επιμέρους συνιστωσών του συστήματος, οι εξισώσεις που αποτελούν το πρόβλημα της ροής φορτίου καθώς και η αριθμητική επαναληπτική μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία.

Τύποι Ζυγών Ροής Φορτίου

Σε κάθε ζυγό k του συστήματος αντιστοιχούν τέσσερις πραγματικές μεταβλητές:

- Έγχυση πραγματικής ισχύος $P_k = P_{Gk} - P_{Dk}$
- Έγχυση άεργου ισχύος $Q_k = Q_{Gk} - Q_{Dk}$
- Μέτρο τάσης V_k
- Φασική γωνία τάσης δ_k

Σύμφωνα με αυτές τις μεταβλητές οι ζυγοί ενός ΣΗΕ ταξινομούνται σε τρεις κατηγορίες:

- Ζυγός ταλάντωσης ή ζυγός αναφοράς: είναι ο ζυγός για τον οποίο η πραγματική και η άεργος εγχεόμενη ισχύς αφήνονται ελεύθερες, ενώ το μέτρο και η γωνία της τάσης θεωρούνται γνωστά. Ο ζυγός πρέπει να έχει τη δυνατότητα παραγωγής ενεργού και άεργου ισχύος.
- Ζυγός φορτίου ή ζυγός PQ : είναι ο ζυγός για τον οποίο η έγχυση πραγματικού και άεργου ισχύος θεωρούνται γνωστές.
- Ζυγός παραγωγής ή ζυγός PV : είναι ο ζυγός για τον οποίο η έγχυση πραγματικής ισχύος και το μέτρο της τάσης θεωρούνται γνωστά, ενώ πρέπει να έχει δυνατότητα άεργης παραγωγής.

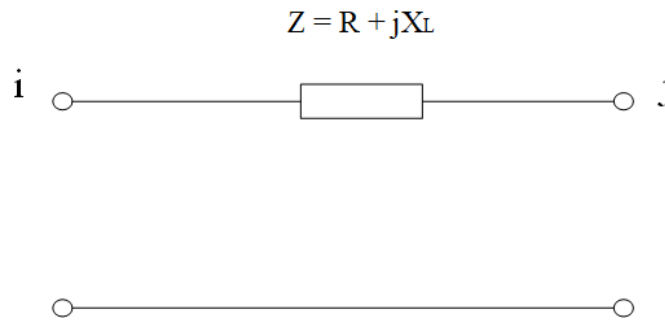
1.3.2 Μοντέλα συνιστωσών ΣΗΕ

Προκειμένου να υπολογιστεί η ροή φορτίου (ή ισχύος) του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας η ανάλυση βασίζεται σε κοινό ανά μονάδα σύστημα σε κοινή βάση ισχύος S_B .

Γραμμές Μεταφοράς μικρού μήκους

Σύμφωνα με την αναφορά [13] οι γραμμές μεταφοράς παριστάνονται με το μονοφασικό ισοδύναμο μοντέλο που παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.7. Στο μοντέλο αυτό αγνοούνται η εγκάρσια χωρητικότητα C ανά φάση και ανά μονάδα μήκους (σε $\frac{F}{m}$) της γραμμής και η εγκάρσια αγωγιμότητα g ανά φάση και ανά μονάδα μήκους (σε $\frac{\Omega^{-1}}{m}$) της γραμμής, ενώ η ακρίβεια του είναι ικανοποιητική για γραμμές μεταφοράς μήκους έως 80km.

Ειδικότερα, οι γραμμές μεταφοράς παριστάνονται με το ονομαστικό κύκλωμα Π , το οποίο παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.7.



Σχήμα 1.7: Μονοφασικό ισοδύναμο ΓΜ μικρού μήκους.

Όπου Z η συνολική σύνθετη αντίσταση σειράς της γραμμής μεταφοράς ανά φάση (σε Ω), R η συνολική ωμική αντίσταση της γραμμής μεταφοράς ανά φάση (σε Ω) και X_L η συνολική επαγωγική αντίσταση της γραμμής ανά φάση (σε Ω).

Η συνολική σύνθετη αντίσταση σειράς Z της γραμμής ανά φάση υπολογίζεται ως:

$$\mathbf{Z} = \mathbf{z}l = \mathbf{R} + \mathbf{jX}_L = rl + j2\pi fLl \quad (1.1)$$

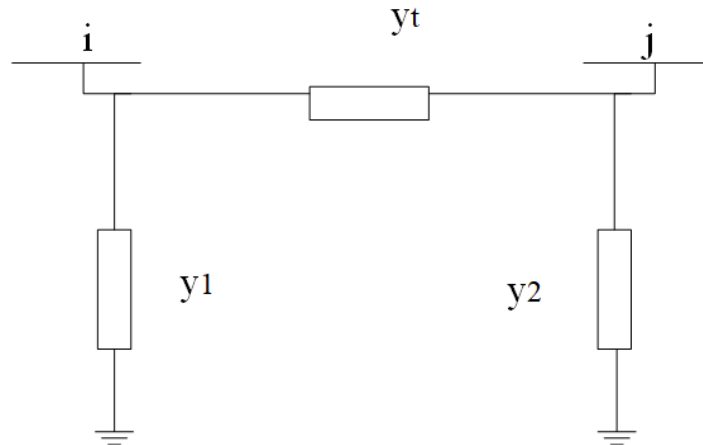
όπου \mathbf{z} η σύνθετη αντίσταση σειράς της γραμμής ανά φάση ανά μονάδα μήκους (σε $\frac{\Omega}{m}$), \mathbf{X}_L η επαγωγική αντίδραση της γραμμής ανά φάση ανά μονάδα μήκους (σε $\frac{\Omega}{m}$), f η συχνότητα (σε Hz), L η αυτεπαγωγή της γραμμής ανά φάση ανά μονάδα μήκους (σε $\frac{H}{m}$) και l το μήκος της γραμμής μεταφοράς.

Παράσταση φορτίων

Όταν τα φορτία του συστήματος είναι σταθερές ισχύος παριστάνονται ως αρνητικές εγχύσεις ισχύος, (P_D, Q_D) και αποτελούν τις ανεξάρτητες μεταβλητές του προβλήματος ροής φορτίου.

Παράσταση M/Σ με ΣΑΤΥΦ

Οι μετασχηματιστές με ΣΑΤΥΦ στο πρόβλημα υπολογισμού ροών φορτίου παριστάνονται με το ισοδύναμο κύκλωμα Π , το οποίο παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.8.

Σχήμα 1.8: Ονομαστικό κύκλωμα Π Μ/Σ με ΣΑΤΥΦ.

όπου $y_t = \frac{y}{t}$ με y την αγωγιμότητα του Μ/Σ και t ο λόγος μετασχηματισμού ($t:1$) ενώ $y_1 = \frac{1-t}{t}y$ και $y_2 = \frac{t-1}{t}y$ οι εγχάρσιες αγωγιμότητες του μετασχηματιστή.

Η ανάλυση ρών φορτίου (ή ροές ισχύος) συνίσταται στον υπολογισμό των τάσεων, κατά μέτρο και γωνία, σε όλους τους ζυγούς του ΣΗΕ, αλλά και των ρών ενεργού και άεργου ισχύος σε όλες τις γραμμές του για ένα δεδομένο σημείο λειτουργίας, το οποίο καθορίζεται από τις καταναλώσεις φορτίων και την παραγωγή ενεργού και άεργου ισχύος και τις τάσεις των γεννητριών. Αποτελούν το πιο συνηθισμένο εργαλείο των αναλυτών των ΣΗΕ. Το πρόβλημα του προσδιορισμού των ρών φορτίου ανάγεται στην επίλυση N μη γραμμικών εξισώσεων με N αγνώστους, όπου $N = n - 1 + m$, n είναι ο συνολικός αριθμός των ζυγών του συστήματος και m ο αριθμός των ζυγών φορτίου (PQ). Ο μη γραμμικός χαρακτήρας των εξισώσεων ροής φορτίου οφείλεται, κυρίως, στην εισαγωγή των ισχύων αντί των ρευμάτων ως μεταβλητών και αυξάνει τη δυσκολία επίλυσης του συστήματος [1],[3].

1.3.3 Εξισώσεις επίλυσης ροής φορτίου

Οι N εξισώσεις του προβλήματος ρών φορτίου μπορούν να γραφούν και με τη μορφή πινάκων:

$$\mathbf{b} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) \quad (1.2)$$

Ειδικότερα, ως ζυγός 1 αριθμείται ο ζυγός ταλάντωσης, οι ζυγοί 2 έως $n - m$ είναι ζυγοί παραγωγής και οι ζυγοί $n - m + 1$ είναι ζυγοί φορτίου. Το διάνυσμα κατάστασης \mathbf{x} αποτελείται από τις φασικές γωνίες τάσεων όλων των ζυγών εκτός από αυτή του ζυγού ταλάντωσης, δ_2 έως δ_n , άρα $\delta = [\delta_2, \dots, \delta_n]^T$, και τα μέτρα τάσεων όλων των ζυγών φορτίου, V_{n-m+1} έως V_n , άρα $\mathbf{V} = [V_{n-m+1}, \dots, V_n]^T$. Επομένως,

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \delta \\ \mathbf{V} \end{bmatrix} \quad (1.3)$$

Για τα διανύσματα \mathbf{b} και \mathbf{f} ισχύει:

$$\mathbf{b} = \begin{bmatrix} \mathbf{b}_P \\ \mathbf{b}_Q \end{bmatrix} \quad (1.4) \quad \mathbf{f}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_P \\ \mathbf{f}_Q \end{bmatrix} \quad (1.5)$$

Ειδικότερα,

- $\mathbf{b}_P = \mathbf{f}_P(\mathbf{x})$ είναι $n-1$ εξισώσεις πραγματικής ισχύος για κάθε ζυγό εκτός του ζυγού τάλαντωσης και τα διανύσματα \mathbf{b}_P και \mathbf{f}_P είναι διάστασης $n-1$. Για το ζυγό k ισχύει:

$$b_{Pk} = P_{Gk} - P_{Dk} \quad (1.6) \quad f_{Pk} = V_k^2 G_{kk} - V_k \sum_{m \in A(k)} V_m \alpha_{km} \quad (1.7)$$

$$\alpha_{km} = -G_{km} \cos \delta_k - \delta_m - B_{km} \sin \delta_k - \delta_m \quad (1.8)$$

με $A(k)$ το σύνολο των ζυγών που συνδέονται με το ζυγό k .

- $\mathbf{b}_Q = \mathbf{f}_Q(\mathbf{x})$ είναι m εξισώσεις άεργου ισχύος μία για κάθε ζυγό φορτίου και τα διανύσματα \mathbf{b}_Q και \mathbf{f}_Q είναι διάστασης m . Για το ζυγό k ισχύει:

$$b_{Qk} = Q_{Gk} - Q_{Dk} \quad (1.9) \quad f_{Qk} = -V_k^2 B_{kk} - V_k \sum_{m \in A(k)} V_m \beta_{km} \quad (1.10)$$

$$\beta_{km} = -G_{km} \sin \delta_k - \delta_m - B_{km} \cos \delta_k - \delta_m \quad (1.11)$$

Οι μιγαδικές ροές ισχύος σε κάθε κλάδο του συστήματος στη γραμμή km με φορά ισχύος από το ζυγό k στο ζυγό m προσδιορίζονται από την εξίσωση:

$$S_{km} = P_{km} + jQ_{km} = \hat{V}_k \hat{I}_{km}^* = \hat{V}_k [(y_{skm} + y_{km}) \hat{V}_k - y_{km} \hat{V}_m]^* \quad (1.12)$$

1.3.4 Ταχεία Αποζευγμένη μέθοδος επίλυσης ρών φορτίου

Το πρόβλημα ρών φορτίου συνίσταται στη λύση ενός συστήματος μη γραμμικών εξισώσεων, για την επίλυση του οποίου χρησιμοποιούνται αριθμητικές επαναληπτικές μέθοδοι. Η μέθοδος που χρησιμοποιείται στην παρούσα διπλωματική εργασία είναι η ταχεία αποζευγμένη, η οποία κάνει χρήση της στενότερης σύνδεσης ενεργού ισχύος και γωνίας, αλλά και άεργου ισχύος και τάσης. Σύμφωνα με τις αναφορές [14] και [2], η μέθοδος αυτή προκύπτει από την αποζευγμένη μέθοδο επίλυσης ρών φορτίου, πραγματοποιώντας απλουστεύσεις φυσικώς παραδεκτές για τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Αν ληφθεί υπόψη το διάνυσμα κατάστασης αρχικών τιμών, οι διορθώσεις των μεταβλητών κατάστασης, τα σφάλματα ζυγών και η ιακωβιανή μήτρα.

$$\mathbf{x}_0 = \begin{bmatrix} \delta_0 \\ \mathbf{V}_0 \end{bmatrix} \quad (1.13) \quad \left[\Delta \mathbf{x} = \begin{bmatrix} \Delta \delta_i \\ \Delta V_i \end{bmatrix} \right] \quad (1.14)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_i - P_{i0} \\ Q_i - Q_{i0} \end{bmatrix} \quad (1.15) \quad J = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \delta} & \frac{\partial P}{\partial V} \\ \frac{\partial Q}{\partial \delta} & \frac{\partial Q}{\partial V} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \quad (1.16)$$

προκύπτουν

$$[\Delta P] = [J_1][\Delta \delta] \quad (1.17) \quad [\Delta Q] = [J_4][\Delta V] \quad (1.18)$$

Υποθέτοντας ότι $\cos(\delta_k - \delta_m) \approx 1$, $G_{km} \sin \delta_k - \delta_m \ll B_{km}$ και $Q_k B_{kk} \ll V_k^2$ προκύπτει

$$\left[\frac{\Delta P}{|V|} \right] = [B'][\Delta \delta] \quad (1.19) \quad \left[\frac{\Delta Q}{|V|} \right] = [B''][\Delta |V|] \quad (1.20)$$

από τις οποίες προκύπτει η λύση του προβλήματος ροών φορτίου. Οι πίνακες $[B']$ και $[B'']$ είναι πραγματικοί, αραιοί και έχουν τη δομή των πινάκων $[J_1]$ και $[J_2]$, αντίστοιχα. Οι πίνακες είναι σταθεροί και η τριγωνοποίηση τους πραγματοποιείται μόνο στην αρχή της μελέτης. Οι προσεγγίσεις 1.19 και 1.20 παρέχουν μια πολύ γρήγορη και ακριβή σύγκλιση του προβλήματος των ροών φορτίου.

1.4 Ασφάλεια Δικτύου

Γενικά

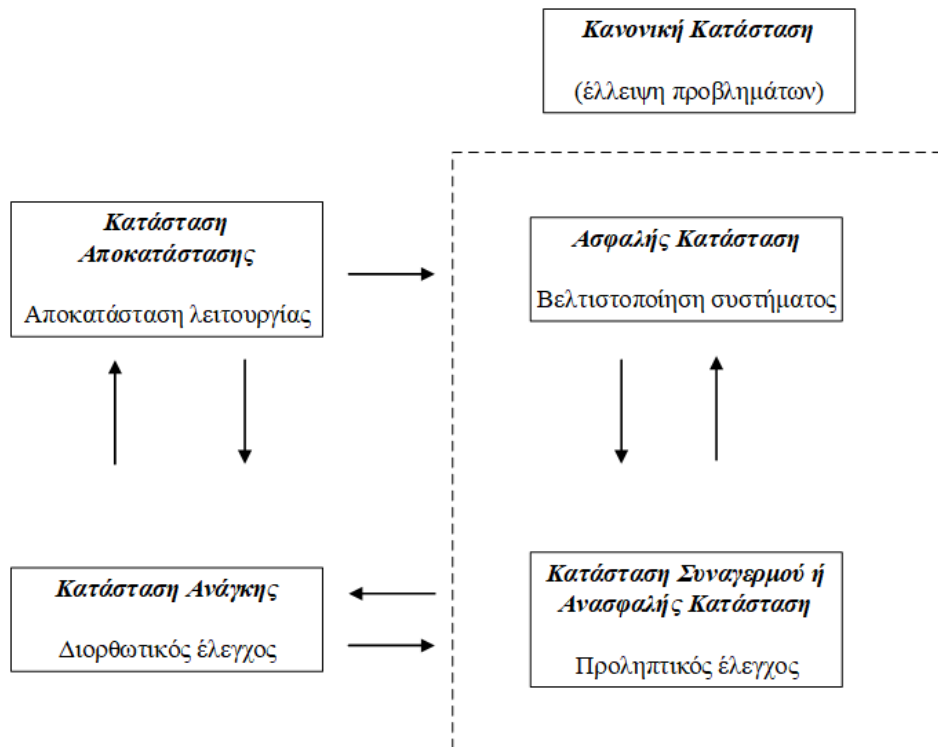
Οι παράγοντες που αυξάνουν την πολυπλοκότητα των σύγχρονων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας είναι τόσο το μέγεθός τους, όσο και οι βρόχοι στην τοπολογία τους, αλλά και η αυξημένη πολυπλοκότητα του εξοπλισμού τους. Επίσης, ο στόχος μείωσης του κόστους της ηλεκτρικής ενέργειας σε συνδυασμό με τη διαρκή βελτίωση της αξιοπιστίας στην παροχή αυτής, αυξάνουν την πολυπλοκότητα ενός σύγχρονου ΣΗΕ και καθιστούν σχεδόν αναγκαίο τη διασύνδεσή του με γειτονικά συστήματα. Εξαιτίας, λοιπόν, της αυξημένης πολυπλοκότητας, τόσο στη λειτουργία όσο και στην ανάπτυξη, καθίσταται αναγκαία η ανάπτυξη συστημάτων εποπτείας και ελέγχου του συστήματος για να διασφαλίζεται η κανονική λειτουργία του.

Η ασφάλεια του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας είναι συνάρτηση της ικανότητάς του να παραμένει σε εφικτή κατάσταση, χωρίς να παραβιάζει κανένα από τα επιβαλλόμενα όρια λειτουργίας [15]. Αξιολογείται η ικανότητα του συστήματος να παραμένει στην επιθυμητή κατάσταση κατά τη διάρκεια μεταβολής του φορτίου και της παραγωγής, αλλά και κατά τη διάρκεια διαταραχών.

Ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας έχει τέσσερις πιθανές καταστάσεις λειτουργίας, οι οποίες παρουσιάζονται στο Σχήμα 1.9, σύμφωνα με την αναφορά [13].

- Ως *ασφαλής* κατάσταση ορίζεται εκείνη που η ζήτηση και οι περιορισμοί λειτουργίας ικανοποιούνται.
- Στην *ανασφαλή* κατάσταση λειτουργίας δεν παραβιάζεται κάποιο όριο ασφαλείας, αλλά δεν πληρούνται τα κριτήρια ασφαλείας.

- Το σύστημα μεταβαίνει σε κατάσταση *ανάγκης* εξαιτίας κάποιας μη προγραμματισμένης μεταβολής του φορτίου είτε εξαιτίας κάποιας διαταραχής. Προκειμένου το σύστημα να επανέλθει στην κανονική κατάσταση και να εξαλειφθούν όλες οι παραβάσεις απαιτούνται διορθωτικές ενέργειες.
- Σε περίπτωση μη προγραμματισμένης διακοπής της εξυπηρέτησης κάποιων φορτίων το σύστημα εισέρχεται σε κατάσταση *αποκατάστασης*.



Σχήμα 1.9: Καταστάσεις λειτουργίας συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας [13].

Ο διορθωτικός έλεγχος έχει ως στόχο την επιστροφή του συστήματος στην κανονική κατάσταση λειτουργίας, είτε ασφαλή είτε ανασφαλής, προκειμένου να διασφαλίζεται η οικονομική λειτουργία του. Αν αποκατασταθεί η κανονική λειτουργία του συστήματος πραγματοποιείται οικονομικός έλεγχος με στόχο την ελαχιστοποίηση του κόστους παραγωγής. Ο προληπτικός έλεγχος αποσκοπεί στη διασφάλιση της λειτουργίας του συστήματος στην ασφαλή κατάσταση και είναι συνδεδεμένος με τους στόχους της οικονομίας και της ασφάλειας του συστήματος, χωρίς οι δύο αυτοί στόχοι να είναι πάντα προς την ίδια κατεύθυνση.

Ο υπολογισμός του βαθμού ασφάλειας ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας είναι συνάρτηση της *στατικής*, της *δυναμικής* και της *μεταβατικής* του ασφάλειας.

Η *στατική* ανάλυση ασφάλειας του δικτύου μπορεί να ερμηνευθεί ως η ασφάλεια έναντι ενός συνόλου καθορισμένων διαταραχών. Η *δυναμική* ασφάλεια του συστήματος αφορά τη μεταβολή της κατάστασης ευσταθούς λειτουργίας σε μια άλλη, η οποία προκλήθηκε από μια διαταραχή. Τέλος,

η ανάλυση μεταβατικής ασφάλειας επικεντρώνεται στην κατάσταση του συστήματος αμέσως μετά από μια σοβαρή διαταραχή και εξετάζει αν το σύστημα μπορεί να εξαλείψει τη διαταραχή χωρίς να διακοπεί η λειτουργία του [13],[16].

1.4.1 Στατική Ασφάλεια Δικτύου

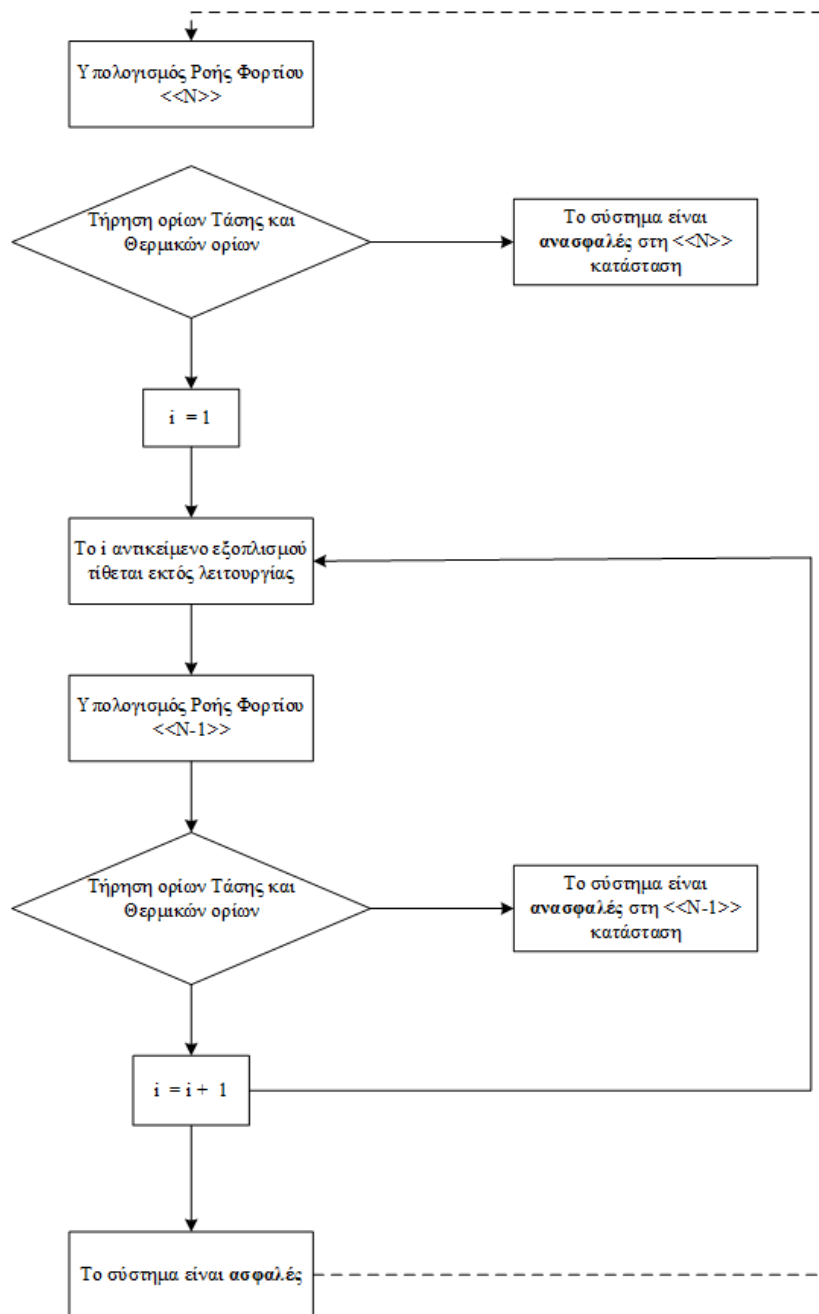
Η στατική ασφάλεια αναφέρεται στην ικανότητα του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας να λειτουργεί εντός των προκαθορισμένων ορίων του τόσο κατά την κανονική κατάσταση λειτουργίας όσο και σε περίπτωση απώλειας κάποιου στοιχείου του συστήματος. Ειδικότερα, προκειμένου το σύστημα να είναι ασφαλές πρέπει οι τάσεις όλων των ζυγών του να βρίσκονται εντός των προκαθορισμένων ορίων και να τηρούνται τα θερμικά όρια των κλάδων του συστήματος [17].

Η ανάλυση στατικής ασφάλειας ενός ΣΗΕ βασίζεται στο διάγραμμα ροής του Σχήματος 1.10. Αρχικά υπολογίζεται η ροή φορτίου του συστήματος και εξετάζεται αν οι τάσεις των ζυγών βρίσκονται εντός των προκαθορισμένων ορίων και αν τηρούνται τα θερμικά όρια των κλάδων του. Σε περίπτωση μη τήρησης κάποιου από αυτά τα κριτήρια διαπιστώνεται ότι το σύστημα σε αυτή την κατάσταση λειτουργίας («N κατάσταση») είναι ανασφαλές. Αν πληρούνται αυτά, το σύστημα θεωρείται «N» ασφαλές και διερευνάται το σενάριο «N-1». Γίνεται εκ νέου υπολογισμός της ροής φορτίου του συστήματος, λαμβάνοντας υπόψη ως διαταραχή την απλή διακοπή οποιουδήποτε ενός στοιχείου του συστήματος (γεννήτριας, γραμμής μεταφοράς, μετασχηματιστή ή φορτίου) και εξετάζεται η τήρηση των κριτηρίων ως προς τις τάσεις των ζυγών και των θερμικών ορίων των κλάδων [16].

Στις μελέτες ανάπτυξης του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας κατά την εκτίμηση της στατικής του ασφάλειας θεωρείται συχνά και το κριτήριο της ταυτόχρονης διακοπής οποιονδήποτε δύο στοιχείων του, το κριτήριο ασφάλειας N-2. Η στατική ανάλυση ασφάλειας είναι γνωστή και ως *ανάλυση διαταραχών* και αποτελείται από πολλαπλές μελέτες οι οποίες εξετάζουν την κατάσταση του συστήματος μετά τη διακοπή ενός ή περισσότερων στοιχείων του. Η ανάλυση αυτή συνεπάγεται τον υπολογισμό μιας πλήρους ροής φορτίου για κάθε επιλεγμένη διαταραχή.

Συχνά η ανάλυση στατικής ασφάλειας πραγματοποιείται σε συνδυασμό με ανάλυση ασφάλειας τάσεως, η οποία διερευνά και αντιμετωπίζει προβλήματα ευστάθειας τάσεως και αποτελεί τμήμα της δυναμικής ασφάλειας του συστήματος, σύμφωνα με την αναφορά [18]. Οι διαταραχές που εξετάζονται κατά την ανάλυση στατικής ασφάλειας τάσεως είναι απώλειες στοιχείων του συστήματος, όπως γεννήτριες, μετασχηματιστές ή γραμμές, εξαιρώντας τις απώλειες ακτινικών γραμμών, άνοιγμα των οποίων οδηγεί στην απομόνωση του ζυγού. Επομένως, ο συνδυασμός των δύο αναλύσεων παρέχει μια ολοκληρωμένη εικόνα για τη συμπεριφορά του δικτύου.

Όταν η ανάλυση στατικής ασφάλειας πραγματοποιείται σε πραγματικό χρόνο κατά τη λειτουργία του συστήματος η πολυπλοκότητα και η δυσκολία των υπολογισμών της αυξάνονται δραματικά, ειδικότερα για μεγάλα ΣΗΕ. Η συνηθέστερη προσέγγιση είναι αυτή εκτός πραγματικού χρόνου, η οποία βασίζεται σε παλαιότερα δεδομένα του συστήματος αλλά και στην εμπειρία των διαχειριστών



Σχήμα 1.10: Εκτίμηση Στατικής Ασφάλειας Δικτύου [16].

του, οι οποίοι γνωρίζουν τις πιο κρίσιμες διαταραχές σε διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας. Προκειμένου να υλοποιηθεί η ανάλυση στατικής ασφάλειας έχουν προταθεί διάφορες μέθοδοι, οι οποίες έχουν ως στόχο να μειώσουν τις διαταραχές που πρέπει να εξεταστούν ξεχωρίζοντας αυτές με το ισχυρότερο αντίκτυπο. Επίσης, τα τελευταία χρόνια επιχειρείται η εφαρμογή νευρωνικών δικτύων (Artificial Neural Networks) και μηχανικής μάθησης (Machine Learning), προκειμένου να συστηματοποιηθεί η ανάλυση αυτή και να εξαχθούν γρηγορότερα τα κρίσιμα για το σύστημα αποτελέσματά της [17]. Μια από τις πιο διαδεδομένες μεθόδους είναι η κατηγοριοποίηση και

ομαδοποίηση των διαταραχών, σύμφωνα με την αναφορά [19].

1.4.2 Όριο φόρτισης γραμμών μεταφοράς

Στους αγωγούς των γραμμών μεταφοράς (ΓΜ) χρησιμοποιούνται κυρίως ο χαλκός και το αλουμίνιο, ενώ ένας σύνθετος αγωγός, το ACSR αποτελείται από κλώνους αλουμινίου τοποθετημένους γύρω από ένα χαλύβδινο κεντρικό πυρήνα προκειμένου να παρέχει μηχανική αντοχή στον αγωγό. Οι κύριες απαιτήσεις από τα αγώγιμα υλικά που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή μιας γραμμής μεταφοράς είναι [1]:

1. υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα,
2. υψηλή μηχανική αντοχή,
3. μικρό ειδικό βάρος,
4. χαμηλή οξείδωση στον αέρα και
5. ευχέρεια σύνδεσης των αγωγών.

Τα τεχνικά όρια σύμφωνα με την αναφορά [20] που καθορίζουν τα όρια λειτουργίας των γραμμών μεταφοράς και προσδιορίζουν το τελικό μέγεθος της ισχύος που δύναται να μεταφέρει μια γραμμή είναι:

- **Θερμικό όριο ή ικανότητα μεταφοράς ρεύματος:** Η διατομή του αγωγού καθορίζεται από το ρεύμα που τον διαρρέει, αφού η ωμική αντίσταση της γραμμής είναι αντιστρόφως ανάλογη της διατομής αυτού. Οι ωμικές απώλειες προκαλούν τη θέρμανση του αγωγού και την ακτινοβολήση της θερμότητας αυτής στον αέρα, αναπτύσσοντας μια θερμοκρασία ισορροπίας στον αγωγό. Ωστόσο, σε υψηλές θερμοκρασίες η μηχανική αντοχή του αγωγού μειώνεται, επομένως, η θερμοκρασία ισορροπίας της γραμμής δεν πρέπει να υπερβαίνει ένα προκαθορισμένο όριο, το οποίο συνήθως ορίζεται ίσο με τους 100°C ή τους 90°C προκειμένου να υπάρχει ένα περιθώριο ασφαλείας. Μέσω του οριακού θερμικού ρεύματος, I_{max} , προκύπτει το θερμικό όριο του αγωγού, S_{Θ} :

$$S_{\Theta} = 3V_{\Phi}I_{max} \quad (1.21)$$

όπου V_{Φ} είναι η ονομαστική φασική τάση της γραμμής. Για μια τριφασική γραμμή απλού κυκλώματος προκύπτει:

$$S_{\Theta} = \sqrt{3}V_N I_{max} \quad (1.22)$$

όπου V_N είναι η πολική τάση της γραμμής. Σε γραμμή διπλού κυκλώματος το θερμικό όριο διπλασιάζεται σε σχέση με αντίστοιχη γραμμή απλού κυκλώματος.

- *Όριο Πτώσης Τάσης*: είναι το επί τοις εκατό ποσοστό της διαφοράς τάσης των άκρων της γραμμής μεταφοράς ως προς την ονομαστική τάση λειτουργίας. Δίνεται από τη σχέση:

$$\epsilon(\%) = \frac{||V_1| - |V_2||}{V_\Phi} 100\% \quad (1.23)$$

όπου V_1 είναι η φασική τάση του άκρου αναχώρησης της γραμμής, V_2 είναι η φασική τάση του άκρου αφίξεως της γραμμής και V_Φ είναι η φασική ονομαστική τάση λειτουργίας. Λόγω της απόλυτης τιμής στον τύπο καλύπτεται και η περίπτωση υπέρτασης της γραμμής.

- *Όριο Στατικής Ευστάθειας*: είναι η μέγιστη ισχύς που μπορεί να μεταφερθεί σε ένα κύκλωμα κατά τη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας. Ειδικότερα, ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας είναι στατικά ευσταθές αν μετά από μια οποιαδήποτε απείρως μικρή διαταραχή επανέλθει στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, την προηγούμενη ή σε μία απείρως γειτονική αυτής. Η διαταραχή θεωρείται αρκετά μικρή ώστε να εφαρμοστούν οι ηλεκτρικές εξισώσεις μόνιμης κατάστασης των μηχανών. Η μέγιστη ισχύς και το όριο ευστάθειας κατά κανόνα αναφέρονται στο άκρο άφιξης, καθώς η αφικνούμενη ισχύς είναι μεγαλύτερης σημασίας από την αναχωρούσα.

Σημαντικό είναι και το *όριο μεταβατικής ευστάθειας* για μια γραμμή μεταφοράς, το οποίο ορίζεται ως η μέγιστη ισχύς που μπορεί να φέρει μια γεννήτρια πριν από μια μεγάλη διαταραχή χωρίς να σημειωθεί κίνδυνος αποσυγχρονισμού της, λόγω απότομης μεγάλης αύξησης του φορτίου. Το όριο μεταβατικής ευστάθειας είναι μικρότερο από το όριο στατικής ευστάθειας και εξαρτάται από το είδος και το μέγεθος της διαταραχής.

Ως *φυσική φόρτιση* μιας γραμμής μεταφοράς ορίζεται η κατάσταση λειτουργίας υπό σταθερή τάση, όπου η συνολικά παραγόμενη άεργος ισχύς από τη χωρητικότητα της γραμμής bV^2 είναι ίση με τις άεργες απώλειες λόγω ρεύματος, xI^2 . θεωρώντας την ίδια γραμμή μεταφοράς χωρίς απώλειες και ισοδύναμη με μία κυματική αντίσταση Z_C συνδεδεμένη σε σειρά με μία ωμική αντίσταση R . Δηλαδή:

$$\frac{V^2}{I^2} = Z_C^2 = \frac{x}{b} \quad (1.24)$$

Επομένως αν

$$Z_C = \sqrt{\frac{x}{b}} \quad (1.25)$$

όπου x είναι η επαγωγική αντίδραση της γραμμής σε $(\frac{\Omega}{km})$ και b η χωρητική αγωγιμότητα σε $(\frac{\Omega^{-1}}{km})$, η φυσική φόρτιση επιτυγχάνεται όταν η ωμική αντίσταση R του φορτίου ισούται με την κυματική αντίσταση. Άρα η φυσική φόρτιση ισούται με:

$$S_\phi = \frac{V_N^2}{Z_C} \quad (1.26)$$

όπου V_N η ονομαστική πολική τάση της γραμμής, [21],[22]. Σύμφωνα με την αναφορά [20] το θερμικό όριο φόρτισης είναι συνήθως τριπλάσιο της φυσικής φόρτισης.

Σύμφωνα με τις καμπύλες St. Clair, το θερμικό όριο επιδρά περιοριστικά στις γραμμές μεταφοράς με μικρά μήκη, 50 έως 100 km ανάλογα με τα χαρακτηριστικά κάθε γραμμής. Το κριτήριο πτώσης τάσης επιδρά περιοριστικά σε γραμμές μεταφοράς μεγαλύτερου μήκους, ενώ σε αυτές κάτω των 50km δεν παίζει σημαντικό ρόλο. Τέλος, το κριτήριο στατικής ευστάθειας επιδρά σε γραμμές αρκετά μεγάλου μήκους. Η μέγιστη ισχύς που μπορεί να φέρει μια γραμμή μεταφοράς μπορεί να προσδιοριστεί μέσω των καμπυλών St. Clair [20].

Θερμική Υπερφόρτιση γραμμών μεταφοράς

Η θερμική υπερφόρτιση μιας γραμμής είναι αποτέλεσμα είτε ρεύματος υψηλότερου του I_{max} , το οποίο προέρχεται από σφάλμα ή υψηλό φορτίο, είτε υψηλών θερμοκρασιών, στις οποίες λειτουργούν οι γραμμές. Η θερμική υπερφόρτιση της γραμμής μπορεί να έχει αρκετές επιζήμιες επιπτώσεις, όπως η απώλεια λόγω προστασίας. Η συμφόρηση γραμμών μεταφοράς αποτελεί σύνηθες φαινόμενο, εξαιτίας της λειτουργίας των σύγχρονων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, τα οποία πρέπει να λειτουργούν πιο κοντά στα ονομαστικά τους μεγέθη παρακάμπτοντας την προστασία του εξοπλισμού τους [23],[24].

Θερμική Υπερφόρτιση μετασχηματιστών

Το θερμικό όριο ενός μετασχηματιστή εξαρτάται από τη μέγιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία που μπορεί να αναπτυχθεί στο κύκλωμα του μετασχηματιστή. Τιμή ρεύματος μεγαλύτερη του ονομαστικού του μετασχηματιστή είναι δυνατό να προκαλέσει αύξηση της θερμοκρασίας του μονωτικού λαδιού του μετασχηματιστή μειώνοντας την αποτελεσματικότητα της προστασίας του μετασχηματιστή. Το θερμικό όριο του μετασχηματιστή προκύπτει από τον πυρήνα, τα τυλίγματα και τη μόνωση του. Η κατασκευή κάθε μετασχηματιστή ισχύος είναι τέτοια ώστε να επιτρέπεται η λειτουργία του υπό ρεύμα ίσο με το διπλάσιο του ονομαστικού, χωρίς να ενεργοποιηθεί η προστασία υπέρντασης. Επιβαρύνονται, όμως, τα στοιχεία του και τη μόνωση του, λόγω της θερμικής αυτής υπερφόρτισης [25].

Η θερμική υπερφόρτιση είτε γραμμής είτε μετασχηματιστή του συστήματος μπορεί να προκαλέσει τη διαδοχική απώλεια στοιχείων του. Η διαδοχική απώλεια στοιχείων είναι μια ακολουθία συμβάντων, η οποία προκλήθηκε από μια αρχική διαταραχή, είτε ένα σύνολο διαταραχών. Η ανεξέλεγκτη αλυσιδωτή απώλεια στοιχείων του συστήματος είναι δυνατό να οδηγήσει στη μερική είτε ολική σβέση του [26]. Προκειμένου να μειωθεί ο κίνδυνος αλυσιδωτών απωλειών στοιχείων του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας είναι απαραίτητη η αναγνώριση των πιθανότερων αιτιών του φαινομένου αυτού. Μέθοδοι αντιμετώπισης προτείνονται στην αναφορά [27].

1.5 Σχήματα Προστασίας

Η λειτουργία Σχημάτων Προστασίας Ακεραιότητας Συστήματος προφυλάσσει το σύστημα από την αλυσιδωτή απώλεια στοιχείων του λόγω θερμικής υπερφόρτισης. Ειδικότερα, ως Σχήμα Προ-

στασίας Ακεραιότητας Συστήματος ορίζεται η προστασία η οποία είναι σχεδιασμένη κατάλληλα ώστε να ανιχνεύει μη κανονικές καταστάσεις του συστήματος και να εκτελεί προκαθορισμένες διορθωτικές ενέργειες (διαφορετικές από την απομόνωση διατάξεων υπό σφάλμα) ώστε να εξασφαλίζει τη συνοχή του συστήματος και την ικανοποιητική λειτουργία του. Σύμφωνα με τις μεταβλητές ελέγχου που ενεργοποιούν το κάθε σχήμα προστασίας, μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε δύο μεγάλες ομάδες,

- τα σχήματα προστασίας βασισμένα σε μετρήσεις
- και σε αυτά που λειτουργούν με ανίχνευση διαταραχής

Σχήματα προστασίας βασισμένα σε μετρήσεις στηρίζουν τη δράση τους σε μετρήσεις ηλεκτρικών μεταβλητών του συστήματος (όπως η τάση σε ζυγούς του, η συχνότητα του, η ροή ισχύος σε κλάδους του κ.α.). Εφαρμόζεται η διορθωτική του δράση, όταν εξαιτίας κάποιας διαταραχής οι μεταβλητές αυτές λάβουν τιμές εκτός των προκαθορισμένων ορίων ασφαλούς λειτουργίας. Σχήματα προστασίας με ανίχνευση διαταραχής ενεργοποιούνται με την ανίχνευση προκαθορισμένων διαταραχών οι οποίες απαιτούν διορθωτικές ενέργειες από το σχήμα, όπως η απώλεια κάποιας γραμμής του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας [28].

Οι δύο κυριότεροι τύποι αρχιτεκτονικής στην οποία βασίζεται η σχεδίαση ενός σχήματος προστασίας είναι η επίπεδη και η ιεραρχική (κλιμακωτή). Στην επίπεδη αρχιτεκτονική όλα τα διαφορετικά στοιχεία του σχήματος βρίσκονται στην ίδια τοποθεσία και είναι πιθανή η χρήση τηλεπικοινωνιακών συνδέσεων προκειμένου να εκκινήσει η λειτουργία του σχήματος. Στην ιεραρχική αρχιτεκτονική η επιθυμητή δράση του σχήματος περιλαμβάνει μία ακολουθία βημάτων, απαιτώντας τη μεταφορά δεδομένων σε διαφορετικά στοιχεία ελέγχου του σχήματος, τα οποία μπορεί να βρίσκονται σε διαφορετικές τοποθεσίες [29].

Τα σχήματα προστασίας ακεραιότητας συστήματος χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο στα σύγχρονα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, προκειμένου να αυξηθεί η ικανότητα μεταφοράς ισχύος και να ενισχυθεί η ασφάλεια τους [30]. Στο Κεφάλαιο 2 αναλύονται περαιτέρω τα χαρακτηριστικά και η λειτουργία των σχημάτων προστασίας.

1.6 Αντικείμενο και Δομή Εργασίας

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάλυση στατικής ασφάλειας δικτύου και ο σχεδιασμός προστασίας συστήματος με μεγάλη αιολική διείσδυση. Το εξεταζόμενο δίκτυο ένα βροχοειδές σύστημα 17 ζυγών με δύο επίπεδα τάσης, 90kV και 225kV, το οποίο αποτελεί ένα ρεαλιστικό δίκτυο υπομεταφοράς με 8 αιολικούς σταθμούς συνδεδεμένους με διαφορετικές ονομαστικές ισχύεις.

Στα πλαίσια της εργασίας πραγματοποιείται ανάλυση της στατικής ασφάλειας του εξεταζόμενου δικτύου, ανάλυση ροών φορτίου τόσο για την N κατάσταση αλλά και για όλες τις N-1 διαταραχές.

Η ανάλυση πραγματοποιείται μέσω του προγράμματος *PSSE*. Στόχος της ανάλυσης διαταραχών είναι να αναγνωριστούν οι διαταραχές που παραβιάζουν τη στατική ασφάλεια του δικτύου, η οποία είναι συνάρτηση της πτώσης των ζυγών και των θερμικών ορίων των κλάδων του δικτύου. Σε περίπτωση που η τάση κάποιου ζυγού λάβει τιμή εκτός των προκαθορισμένων ορίων ασφαλούς λειτουργίας το δίκτυο καθίσταται στατικά μη ασφαλές. Ωστόσο, το στιγμιότυπο λειτουργίας στο οποίο εστιάζεται η παρούσα ανάλυση είναι ένα στιγμιότυπο υψηλών τάσεων στο επίπεδο της ΥΥΤ το οποίο εμφανίζεται κατά τη διάρκεια ημερών με χαμηλό φορτίο ή/και αυξημένη φωτοβολταϊκή παραγωγή.

Προκειμένου να αντιμετωπιστούν οι θερμικές αυτές υπερφορτίσεις εξετάζονται διάφοροι τρόποι ώστε να διασφαλιστεί η ασφαλής λειτουργία του δικτύου. Για την υλοποίηση της προτεινόμενης μεθόδου συνιστάται η χρήση ειδικών σχημάτων προστασίας συστήματος, βασιζόμενα στη λειτουργία Σχημάτων Προστασίας Ακεραιότητας Συστήματος. Τα αποτελέσματα της παρούσας ανάλυσης μπορούν να αξιοποιηθούν κατάλληλα από το διαχειριστή του συστήματος ώστε να αυξηθεί η αιολική διείσδυση. Η εργασία διαρθρώνεται ως εξής:

Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά σχεδίασης και λειτουργίας των Σχημάτων Προστασίας Ακεραιότητας Συστήματος, στα οποία βασίζονται και τα προτεινόμενα σχήματα της παρούσας εργασίας.

Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης διαταραχών, από την οποία προκύπτουν οι διαταραχές που παραβιάζουν την στατική ασφάλεια του δικτύου. Προτείνονται, επίσης, κάποια ανώτατα όρια παραγωγής των αιολικών πάρκων προκειμένου να αντιμετωπίζεται η κάθε μία από αυτές τις διαταραχές.

Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται τα σχήματα προστασίας που απαιτούνται για την ασφαλή λειτουργία του δικτύου. Ειδικότερα, παρουσιάζονται όλα τα διαφορετικά σχήματα που αντιμετωπίζουν τις θερμικές υπερφορτίσεις σε μετασχηματιστές και γραμμές του δικτύου και περιγράφεται ο τρόπος λειτουργίας τους και η φιλοσοφία στην οποία πρέπει να βασιστεί η υλοποίησή τους.

Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την ανάλυση στατικής ασφάλειας και προτείνονται οι προοπτικές και πιθανές προεκτάσεις της παρούσας εργασίας.

Κεφάλαιο 2

Προστασία Ακεραιότητας Συστήματος

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται περιγραφή της λειτουργίας καθώς και των χαρακτηριστικών των Σχημάτων Προστασίας Ακεραιότητας Συστήματος (System Integrity Protection Schemes *SIPS*) ή Σχημάτων Προστασίας Συστήματος (System Protection Schemes *SPS*), εν γένει αλλά και ειδικότερα αυτών που χρησιμοποιούνται στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Επίσης στη βιβλιογραφία συχνά αναφέρονται και ως Σχήματα Διορθωτικής Επαναφοράς (Remedial Action Scheme *RAS*).

2.1 Εισαγωγή

Η Προστασία Ακεραιότητας Συστήματος αποτελείται από σχήματα τα οποία εστιάζουν στην προστασία του συνόλου του συστήματος και όχι στην προστασία κάποιου συγκεκριμένου τμήματος του εξοπλισμού. Σύμφωνα με την εργασία [28] και τη διδακτορική διατριβή [31], ο ορισμός του Σχήματος Προστασίας Ακεραιότητας Συστήματος είναι ο εξής:

Ένα Σχήμα Προστασίας Ακεραιότητας Συστήματος αποτελεί προστασία σχεδιασμένη κατάλληλα να ανιχνεύει μη κανονικές καταστάσεις του συστήματος και να εκτελεί προκαθορισμένες διορθωτικές ενέργειες (εκτός από την απομόνωση των διατάξεων υπό σφάλμα) ώστε να εξασφαλίζει τη συνοχή του συστήματος και την ικανοποιητική λειτουργία του.

Προκειμένου να γίνει σαφής ο διαχωρισμός μεταξύ της προστασίας εξοπλισμού και των σχημάτων προστασίας συστήματος είναι σημαντικό να αναφερθούμε και στο σκοπό και το ρόλο της Προστασίας Εξοπλισμού. Σύμφωνα, λοιπόν με την αναφορά [32] σε κάθε στοιχείο του εξοπλισμού ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας είναι δυνατόν να προκληθεί βλάβη, η οποία μπορεί να προέρχεται είτε από εσωτερικό (π.χ. γήρανση του εξοπλισμού) είτε από εξωτερικό (π.χ. κεραυνός) αίτιο. Σκοπός της προστασίας εξοπλισμού είναι, αρχικά, να προλάβει μια βλάβη, ή σε περίπτωση σφάλματος, να απομονώνεται το στοιχείο στο οποίο εντοπίζεται αυτό έτσι ώστε η

βλάβη να περιοριστεί όσο το δυνατόν περισσότερο. Δηλαδή, να ελαχιστοποιηθούν οι επιπτώσεις της βλάβης στο υπόλοιπο σύστημα, ώστε να μην τεθεί άλλο στοιχείο εκτός λειτουργίας, και να προστατευτούν τόσο το προσωπικό όσο και εγκαταστάσεις που μπορεί να βρίσκονται κοντά σε αυτό το στοιχείο.

Τα λειτουργικά χαρακτηριστικά μιας προστασίας, για να εξασφαλιστεί η αποτελεσματικότητά της, είναι τα ακόλουθα:

- *Αξιοπιστία (reliability)*, η οποία εκφράζεται ποσοτικά με την πιθανότητα να λειτουργήσει ορθά η προστασία, σύμφωνα με τις αρχές σχεδίασής της.
- *Επιλογικότητα (selectivity)*, η οποία εκφράζει την ικανότητα του συστήματος προστασίας να διαχωρίζει τις συνθήκες υπό τις οποίες πρέπει να λειτουργεί από εκείνες που δεν πρέπει να δράσει η προστασία. Επίσης, εισάγεται μια χρονική καθυστέρηση στην ενεργοποίηση του συστήματος προστασίας, σε περιπτώσεις που είναι απαραίτητο.
- *Χρόνος Λειτουργίας*, ορίζεται το προκαθορισμένο χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ της εμφάνισης του σφάλματος και της ενεργοποίησης της κλασικής προστασίας. Μια υπέρβαση του διαστήματος αυτού μπορεί να προκαλέσει περαιτέρω βλάβη στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας.

Αντίστοιχα, η λειτουργία ενός σχήματος προστασίας ακεραιότητας συστήματος έχει τις εξής απαιτήσεις σχεδίασης,[31]:

- *Εγκυρότητα (dependability)*: πρέπει αυτό να δρα όποτε χρειάζεται.
- *Ασφάλεια (security)*: το σχήμα προστασίας δεν πρέπει να δρα όταν δεν χρειάζεται.
- *Αξιοπιστία (reliability)*: πρέπει να καλύπτει τις απαιτήσεις εγκυρότητας και ασφάλειας.
- *Επιλογικότητα (selectivity)*: η δράση του σχήματος πρέπει να προσαρμόζεται στη σοβαρότητα της διαταραχής.
- *Σθεναρότητα (robustness)*: το σχήμα προστασίας πρέπει να έχει τη δυνατότητα να αντιμετωπίσει όσο το δυνατόν περισσότερες διαταραχές από αυτές που ενδεχομένως εμφανιστούν στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας.

Μια η ειδοποιός διαφορά ενός σχήματος προστασίας ακεραιότητας συστήματος από την προστασία εξοπλισμού είναι ότι κατά κανόνα ένα σχήμα προστασίας ακεραιότητας σχεδιάζεται κατά περίπτωση και δεν έχει τυποποιηθεί η κατασκευή του, επομένως, προσαρμόζεται στο εκάστοτε πρόβλημα που πρέπει να αντιμετωπιστεί. Όσον αφορά την προστασία εξοπλισμού η αρχή αυτή ισχύει σε πολύ μικρότερο βαθμό, κυρίως σε εξοπλισμό ΥΤ/ΥΤΤ όπου προσαρμόζεται κατάλληλα η προστασία. Εν γένει, όμως, στην προστασία εξοπλισμού υπάρχει αρκετή τυποποίηση.

2.2 Κριτήρια Σχεδίασης Σχήματος Προστασίας Ακεραιότητας Συστήματος

Η αξιοπιστία ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας καθορίζεται από δύο σημαντικούς παράγοντες, την επάρκεια και την ασφάλεια του συστήματος. Σύμφωνα, λοιπόν, με την αναφορά [31], ως επάρκεια (adequacy) ορίζεται η ικανότητα του συστήματος να παρέχει στους καταναλωτές του τη ζητούμενη ηλεκτρική ενέργεια, πληρώνοντας τις καθορισμένες προδιαγραφές ποιότητας και λαμβάνοντας υπόψη προγραμματισμένες (ή μη) απώλειες, συνιστώσών του. Ως ασφάλεια (security), ορίζεται η ικανότητα του συστήματος να αντιμετωπίζει διαταραχές που προκύπτουν κατά τη λειτουργία του, όπως μια πιθανή απώλεια κάποιας συνιστώσας του. Η επαρκής κατάσταση λειτουργίας του συστήματος είναι εκείνη κατά την οποία η συχνότητα του συστήματος, αλλά και οι τάσεις των ζυγών, κυμαίνονται εντός των προκαθορισμένων ορίων.

Τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας σχεδιάζονται με τέτοιο τρόπο, ώστε να αντιμετωπίζουν κάθε απλή διαταραχή χωρίς απώλεια φορτίου, ανάλογα με την προβλεπόμενη ζήτηση αλλά και την ικανότητα μεταφοράς του συστήματος. Τα κριτήρια σχεδίασης του συστήματος βασίζονται σε μια ισορροπία ανάμεσα στην πιθανότητα εμφάνισης μιας διαταραχής και στις συνέπειες που αυτή θα έχει στο σύστημα, δηλαδή μια διαταραχή με μικρή πιθανότητα εμφάνισης είναι αποδεκτό να έχει δυσμενέστερες επιπτώσεις στη λειτουργία του συστήματος από μια διαταραχή με μεγαλύτερη πιθανότητα εμφάνισης. Σκοπός ενός σχήματος προστασίας είναι να ενισχύσει το σύστημα, έτσι ώστε να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις που προκύπτουν κατά το σχεδιασμό του.

Ένα σχήμα προστασίας συστήματος μπορεί να το προστατεύσει σε περιπτώσεις που απειλείται η ακεραιότητα του από τα εξής φαινόμενα:

- Μεταβατική Αστάθεια
- Αστάθεια Μικρών Διαταραχών
- Αστάθεια Τάσης
- Αλυσιδωτή Απώλεια στοιχείων του συστήματος λόγω Θερμικής Υπερφόρτισης κυκλωμάτων

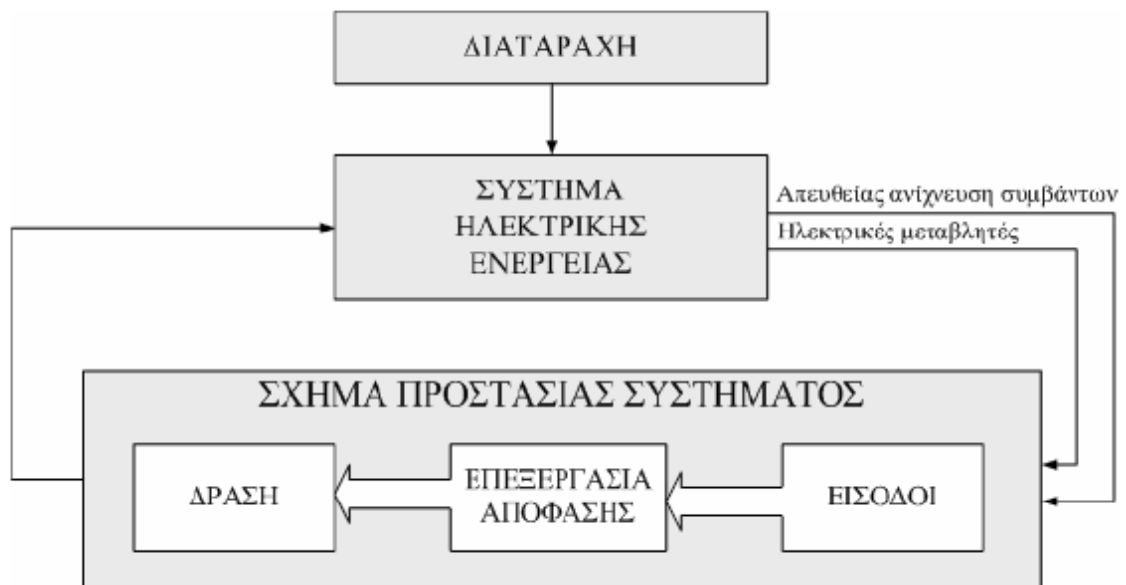
Επομένως, η λειτουργία ενός τέτοιου σχήματος συνδράμει στην καταπολέμηση των προαναφερόμενων φαινομένων αλλά και στην αύξηση της χρήσης των υποδομών του συστήματος. Δεν είναι εφικτό να προβλεφθούν όλα τα πιθανά σφάλματα κατά τη λειτουργία ενός συστήματος, ούτε να αντιμετωπιστούν όλες οι διαταραχές που μπορεί να προκαλέσουν την κατάρρευση του συστήματος. Σε λιγότερο πολύπλοκα συστήματα η λειτουργία λίγων σχημάτων προστασίας μπορεί να εξασφαλίσει την επάρκεια και την ασφαλή λειτουργία του. Σε μεγαλύτερα συστήματα, όμως, απαιτείται η συντονισμένη δράση και ο συνδυασμός πολλών σχημάτων προστασίας που είναι ειδικά σχεδιασμένα για το σύστημα στο οποίο επιδρούν και προσαρμοσμένα στις λειτουργίες του. Ένας τέτοιος συνδυασμός, λοιπόν, αποτελεί ένα σχέδιο άμυνας του συστήματος. Ως σχέδιο άμυνας, [28], ορίζεται:

«Ένα σύνολο από συντονισμένα σχήματα προστασίας ακεραιότητας συστήματος που αποσκοπούν στη διασφάλιση της ικανότητας του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας να αντιμετωπίζει ακραίες ή πολλαπλές διαταραχές, που διαφορετικά θα προκαλούσαν την κατάρρευσή του.»

Στον κόσμο συναντώνται λίγα ολοκληρωμένα σχέδια άμυνας, με πιο χαρακτηριστικά αυτά των ηλεκτρικών εταιρειών Hydro-Quebec του Καναδά και EDF της Γαλλίας [30].

2.2.1 Περιγραφή Σχήματος Προστασίας Ακεραιότητας Συστήματος

Ο σχεδιασμός ενός σχήματος προστασίας ακεραιότητας του συστήματος βασίζεται σε μελέτες που γίνονται προκαταβολικά εκτός πραγματικού χρόνου (off-line) και η γενική δομή του παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1: Δομή Σχήματος Προστασίας Ακεραιότητας Συστήματος [31].

Το μπλοκ εισόδου αντιπροσωπεύει τη συλλογή στοιχείων, αντιπροσωπευτικών της λειτουργικής κατάστασης του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, τα οποία μπορεί να είναι είτε μετρήσεις ηλεκτρικών μεγεθών είτε κατάλληλα σήματα που προσδιορίζουν ένα συνδυασμό συμβάντων στο σύστημα. Στο μπλοκ απόφασης γίνεται η εκτίμηση των στοιχείων εισόδου και συντάσσεται η εντολή για τη λειτουργία του σχήματος προστασίας ακεραιότητας συστήματος. Το μπλοκ δράσης είναι αυτό που εκτελεί την εντολή.

Λαμβάνοντας υπόψη τις συνθήκες ενεργοποίησης ενός σχήματος προστασίας ακεραιότητας συστήματος, χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες [31]:

1. Τα σχήματα που δέχονται ως εισόδους μετρήσεις συνεχών μεταβλητών του δικτύου.

2. Τα σχήματα που η λειτουργία τους βασίζεται σε ανίχνευση διακριτών γεγονότων που συμβαίνουν στο δίκτυο.

Τα σχήματα που ανήκουν στην πρώτη κατηγορία, βασίζονται τη λειτουργία τους σε μετρούμενες μεταβλητές του δικτύου, όπως η τάση και η συχνότητα, και ενεργοποιούνται όταν οι τιμές αυτών ξεπεράσουν τα προκαθορισμένα όρια. Αντίθετα, τα σχήματα ανίχνευσης συμβάντων εκκινούν με την αναγνώριση καθορισμένων γεγονότων, όπως η απώλεια μιας γραμμής ή μιας γεννήτριας του συστήματος.

Η δράση ενός σχήματος προστασίας μπορεί να είναι είτε επιθυμητή είτε ανεπιθύμητη, και σε κάποιες περιπτώσεις μπορεί να σημειωθεί και αποτυχία στην απόπειρα ενεργοποίησης του. Ο χαρακτηρισμός επιθυμητή ή ανεπιθύμητη στη λειτουργία ενός σχήματος προστασίας προκύπτει από τις συνέπειες αυτής στο σύστημα, συγκριτικά με το τι θα συνέβαινε αν το σχήμα δεν λειτουργούσε καθόλου. Εάν η δράση του σχήματος λειτουργεί διορθωτικά για το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, χαρακτηρίζεται επιθυμητή η δράση του. Αντίθετα, η λειτουργία του χαρακτηρίζεται ανεπιθύμητη αν έχει δυσμενέστερες επιπτώσεις από την αποτυχία δράσης του. Ως αποτυχία δράσης ορίζεται η αδυναμία του σχήματος προστασίας να εκτελέσει την εντολή του συστήματος απόφασης, παραβιάζοντας, έτσι, το σχεδιασμό του. Η αποτυχία αυτή μπορεί να οφείλεται σε σφάλμα στον υλικό εξοπλισμό του σχήματος είτε στο λογισμικό του. Επίσης, μπορεί να προκληθεί από λάθος κατά την αρχική σχεδίαση του σχήματος ή να οφείλεται και σε ανθρώπινο λάθος.

2.3 Σχεδίαση Σχήματος Προστασίας Ακεραιότητας Συστήματος

Προκειμένου να σχεδιαστεί άρτια ένα σχήμα προστασίας ακεραιότητας συστήματος ακολουθούνται τα παρακάτω βήματα,[31]:

- Η σχεδίαση της λογικής, στην οποία θα βασίζεται η λειτουργία του σχήματος. Στο στάδιο αυτό καθορίζονται τόσο οι διαταραχές και τα σφάλματα όσο και οι συνέπειες που αυτά μπορεί να έχουν στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Οι πιο κρίσιμες διαταραχές καθορίζονται είτε μέσω της γνώσης του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας είτε μέσω προσομοίωσης, και προκύπτουν έτσι και οι περιοχές του συστήματος που μπορεί να προκαλέσουν προβλήματα ασφάλειας. Μετά τον καθορισμό των διαταραχών, λοιπόν, που είναι πιθανό να αντιμετωπίσει το δίκτυο επιλέγεται και η αρχή λειτουργίας του σχήματος. Η λογική ενός σχήματος προστασίας ακεραιότητας συστήματος βασίζεται στον κανόνα: *η εκτέλεση των δράσεων του σχήματος απαιτεί την πλήρωση τόσο των συνθηκών οπλισμού όσο και των συνθηκών διέγερσης.*

Οι συνθήκες οπλισμού προσδιορίζονται με βάση μια παράμετρο του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ οι συνθήκες διέγερσης αναφέρονται σε ανίχνευση διαταραχών στο σύστημα ή μετρήσεις εντός ορίων. Οι δράσεις αναφέρονται είτε σε δραστικές μεταβολές στο

σύστημα είτε στον έλεγχο αυτού. Η πολυπλοκότητα λειτουργίας του σχήματος μειώνει την αξιοπιστία του λόγω της αλληλεπίδρασης του με άλλες λογικές προστασίες αλλά και της αυξημένης χρήσης λογισμικού και υλικοτεχνικού εξοπλισμού. Ο παραπάνω κανόνας πρέπει να ελέγχεται μέσω εργαλείων προσομοίωσης, προκειμένου να αποδειχθεί η ορθότητά του.

- Εξίσου σημαντική είναι και η επιλογή του υλικοτεχνικού εξοπλισμού που θα υλοποιήσει το σχήμα προστασίας. Πρωταρχικής σημασίας είναι η επιλογή του κατάλληλου λογικού επεξεργαστή, ο οποίος αποτελεί και τον πυρήνα του σχήματος. Είναι ένα προγραμματισμένο ηλεκτρονικό σύστημα, το οποίο εκτελεί τους λογικούς ελέγχους προκειμένου να εκκινήσει η λειτουργία του σχήματος. Μπορεί να είναι ένας μικροεπεξεργαστής, ένας μικροελεγκτής, ένας προγραμματιζόμενος λογικός ελεγκτής (PLC) ή ένα εξειδικευμένο ολοκληρωμένο κύκλωμα, και πρέπει να έχει υψηλό δείκτη αξιοπιστίας. Οι συνθήκες ενεργοποίησης λαμβάνονται από τις διατάξεις παρακολούθησης, οι οποίες είναι ηλεκτρονόμοι προστασίας και ανιχνευτές διακοπών ισχύος. Είναι σημαντικό μια πιθανή διακοπή της τροφοδοσίας τους να μη σταματά τη λειτουργία του σχήματος. Μέσω της καταγραφής των συμβάντων και του ελέγχου των διατάξεων αυτών είναι εφικτή η ακριβής ανάλυση της λειτουργίας τους ή και της μη λειτουργίας τους. Τέλος, η συλλογή της πληροφορίας γίνεται μέσω των διατάξεων επικοινωνίας και μεταφέρεται στο λογικό επεξεργαστή. Η απόφαση μεταδίδεται από το ίδιο δίκτυο στις διατάξεις προστασίας και ενεργοποιείται η λειτουργία του σχήματος. Σφάλμα στο δίκτυο επικοινωνίας δεν πρέπει να επηρεάζει τη λειτουργία του σχήματος, γι' αυτό πρέπει να ελέγχονται οι διατάξεις αυτές σε πραγματικό χρόνο.
- Το επόμενο στάδιο είναι αυτό της υλοποίησης και δοκιμής, στο οποίο ελέγχεται η σωστή εγκατάσταση των διατάξεων και η συμφωνία τους με την αρχική σχεδίαση. Κατά τη δοκιμή ελέγχονται όλες οι προηγούμενες διατάξεις.
- Το πρωτόκολλο λειτουργίας καθορίζει τον τρόπο που θα γίνεται ο οπλισμός του σχήματος, τότε αυτό θα διεγείρεται και στο πως θα λειτουργούν οι χειριστές του σχήματος. Το πρωτόκολλο συντήρησης καθορίζει τον περιοδικό έλεγχο της λειτουργίας του σχήματος προστασίας, τον προληπτικό έλεγχο των διατάξεών του και την επισκευή τους μετά από μια βλάβη. Τα δύο αυτά πρωτόκολλα εξασφαλίζουν την αξιοπιστία του και πρέπει το τεχνικό προσωπικό να έχει εύκολη πρόσβαση σε αυτά.
- Η συχνή επανεκτίμηση του σχήματος μπορεί να οδηγήσει σε μια αναγκαία αναθεώρηση της σχεδίασής του λόγω μεταβολών στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Επίσης, μέσω του συχνού ελέγχου της λειτουργίας του, υπάρχει η δυνατότητα να καθορίζεται η αποτελεσματικότητα του σχήματος προστασίας ακεραιότητας συστήματος σε σχέση με την τρέχουσα κατάσταση του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Στο τελευταίο αυτό στάδιο γίνεται η αναθεώρηση του, η οποία μπορεί να οδηγήσει και στην τροποποίηση της σχεδίασής του.

2.4 Κατηγοριοποίηση Σχημάτων Προστασίας Ακεραιότητας Συστήματος

Εκτός από τις δύο μεγάλες κατηγορίες που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα, τα σχήματα προστασίας ακεραιότητας συστήματος χωρίζονται, σύμφωνα με τις αναφορές [31] και [28], σε περισσότερες κατηγορίες ανάλογα με τη βασική αρχή λειτουργίας τους, την χρησιμότητα των διαταραχών που καλούνται να αντιμετωπίσουν, τη χρησιμότητά τους και, τέλος, με τη χρονική κλίμακα εφαρμογής τους.

2.4.1 Ως προς την αρχή λειτουργίας τους

Η βασική λειτουργική διάκριση μεταξύ των σχημάτων προστασίας είναι η ακόλουθη:

- Ως προς το εύρος της περιοχής στην οποία δρουν τα σχήματα προστασίας ακεραιότητας χωρίζονται σε:
 1. *Σχήματα Προστασίας ευρείας περιοχής*, τα οποία συλλέγουν πληροφορίες από διάφορα σημεία του συστήματος και δρουν, επίσης, σε διάφορα σημεία του συστήματος.
 2. *Τοπικά Σχήματα Προστασίας*, τα οποία συλλέγουν πληροφορίες σύμφωνα με τοπικές μετρήσεις και η δράση τους είναι, επίσης, τοπική. Με την έννοια τοπική δράση εννοείται πως η δράση του είναι γεωγραφικά περιορισμένη.
- Ως προς τον τρόπο που γίνεται η λήψη των αποφάσεων χωρίζονται σε:
 1. *Σχήματα Προστασίας με κεντρική λογική*, είναι εκείνα που δρουν πάντα υπό την εποπτεία ενός κέντρου ελέγχου και μπορεί να είναι είτε τοπικό είτε ευρείας περιοχής. Συγκεκριμένα, τα σχήματα προστασίας ακεραιότητας συστήματος κεντρικής λογικής και ευρείας περιοχής χρησιμοποιούνται σε συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας που το κέντρο ελέγχου είναι υπεύθυνο για το συντονισμό όλων των διαθέσιμων μέτρων ελέγχου. Αντίθετα, τοπικά τέτοια σχήματα συναντώνται σπανιότερα. Η πληροφορία συλλέγεται στο επίπεδο του υποσταθμού, μεταδίδεται στο κέντρο ελέγχου, όπου και λαμβάνεται η κατάλληλη απόφαση.
 2. *Σχήματα Προστασίας με αποκεντρωμένη λογική*, είναι εκείνα που δεν μεσολαβεί κέντρο ελέγχου στη λήψη αποφάσεων και στο σχεδιασμό της δράσης. Επίσης, μπορεί να είναι είτε τοπικό είτε ευρείας περιοχής. Τα τοπικά σχήματα με αποκεντρωμένη λογική εμφανίζουν μεγαλύτερη αξιοπιστία, αφού δεν βασίζονται στην μεταφορά δεδομένων και έχουν μικρό κόστος. Αντίθετα, ένα τέτοιο σχήμα ευρείας περιοχής απαιτεί εξειδικευμένα συστήματα τηλεπικοινωνιών για τη συλλογή των απαραίτητων πληροφοριών, αυξάνοντας το κόστος τους.
- Ως προς τη συνθήκη ενεργοποίησης τους τα σχήματα προστασίας ακεραιότητας συστήματος, όπως αναφέρθηκε και στην Ενότητα 2.2.1, χωρίζονται σε:

1. *Σχήματα Προστασίας βασισμένα σε μετρήσεις*, τα οποία ενεργοποιούνται με την ανίχνευση μετρήσεων ηλεκτρικών μεγεθών του δικτύου, που παραβιάζουν τα όρια ασφαλούς λειτουργίας. Η χρήση τους ενδείκνυται σε περιπτώσεις διαταραχών με χρονική καθυστέρηση, καθώς επεμβαίνουν στο σύστημα μετά την αντίδραση αυτού στη διαταραχή αλλά είναι αποτελεσματικά ακόμα και σε διαταραχές για τις οποίες δεν έχουν σχεδιαστεί. Η λειτουργία του είναι, κυρίως, τοπική και είναι πολύ σημαντικός ο καθορισμός των μεταβλητών εισόδου που δέχεται.
 2. *Σχήματα Προστασίας οδηγούμενα από ανίχνευση διαταραχής (διακριτού συμβάντος)*, είναι εκείνα που ενεργοποιούνται με την αναγνώριση προκαθορισμένου συμβάντος ή συνδυασμό συμβάντων. Η δράση του είναι αναγκαία σε διαταραχές που μπορεί να καταστήσουν το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας ανασφαλές. Έχουν το πλεονέκτημα γρήγορης απόκρισης, αφού μετά την εμφάνιση της διαταραχής, επομένως και της ενεργοποίησής τους, δεν απαιτείται η χρονική εξέλιξη της συμπεριφοράς του συστήματος προκειμένου να δράσουν. Υστερούν, όμως, σε σθεναρότητα αφού δεν μπορούν να προβλέψουν όλες τις πιθανές διαταραχές στο σύστημα. Η λειτουργία τους μπορεί να είναι είτε τοπική είτε ευρείας περιοχής και, κατά το σχεδιασμό τους πρέπει να ληφθεί υπόψη η αποτυχία ενεργοποίησης ενός σχήματος αυτού του τύπου και οι επιπτώσεις της στο σύστημα.
- Ως προς τη λογική στην οποία βασίζεται η σχεδίαση του σχήματος προστασίας ακεραιότητας χωρίζονται σε:
 1. *Σχήματα Προστασίας σχεδιασμένα σε λογική κανόνων*, στα οποία η λήψη των αποφάσεων γίνεται ακολουθώντας κανόνες και βασίζεται στη λογική επαλήθευσης απλών κανόνων, της μορφής «εάν...τότε...».
 2. *Σχήματα Προστασίας σχεδιασμένα σε λογική αλγορίθμων*, στα οποία η λήψη αποφάσεων στηρίζεται σε αλγορίθμους. Σχήματα αυτού του τύπου είναι πιο σύνθετα και πολύπλοκα και βασίζονται στη μοντελοποίηση και την προσομοίωση του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Μπορούν με αυτό τον τρόπο να αντιμετωπίζουν και απρόβλεπτες καταστάσεις αλλά και να προσαρμόζονται στο μέγεθος της διαταραχής. Αυξάνοντας, όμως, τη λεπτομέρεια της μοντελοποίησης του συστήματος μειώνεται η σθεναρότητα ενός τέτοιου σχήματος εξαιτίας πιθανών ανακριβειών κατά τη μοντελοποίηση, ανακριβειών στα δεδομένα πραγματικού χρόνου που έχουν χρησιμοποιηθεί αλλά και της εξάρτησης από τα χρησιμοποιούμενα πληροφοριακά συστήματα.
 - Ως προς τη διαδικασία δράσης διακρίνονται σε:
 1. *Σχήματα Προστασίας κλειστού βρόχου*, τα οποία μπορούν να ενεργοποιηθούν αρκετές φορές ανάλογα με το αποτέλεσμα της προηγούμενης δράσης. Η ασφάλεια και η εγκυρότητα αυτών των σχημάτων είναι αυξημένη αφού προσαρμόζονται αυτόματα στη σοβαρότητα της διαταραχής. Είναι όμως πιο σύνθετα από αυτά της δεύτερης κατηγορίας.

2. *Σχήματα Προστασίας ανοιχτού βρόχου*, τα οποία έχουν τη δυνατότητα να δράσουν μόνο μία φορά.

2.4.2 Ως προς την κρισιμότητα

Ένα σχήμα προστασίας ακεραιότητας συστήματος μπορεί να κατηγοριοποιηθεί και σύμφωνα με τη σοβαρότητα της διαταραχής που καλείται να καταπολεμήσει. Για κάθε μια από αυτές τις κατηγορίες υπάρχουν διαφορετικές απαιτήσεις ως προς τα κριτήρια εγκυρότητας, ασφάλειας και συντήρησης. Με τον τρόπο αυτό ταξινομούνται τα σχήματα προστασίας ακεραιότητας συστήματος και συντάσσονται ευκολότερα οι προδιαγραφές που πρέπει να πληρούνται κατά τη σχεδιάσή τους. Οι τρεις αυτές κατηγορίες είναι [28]:

1. *Τύπου I*: Είναι ένα σχήμα προστασίας που αναγνωρίζει ή προλαμβάνει μη κανονική κατάσταση του συστήματος, συνήθως $N-1$, η οποία έχει προβλεφθεί κατά το σχεδιασμό του. Η εσφαλμένη λειτουργία είτε η αστοχία ενεργοποίησης του σχήματος του έχει σημαντικό αρνητικό αντίκτυπο σε ολόκληρο το σύστημα.
2. *Τύπου II*: Είναι ένα σχήμα προστασίας, το οποίο αναγνωρίζει ή προλαμβάνει ασυνήθιστη κατάσταση λειτουργίας του συστήματος, που οφείλεται σε ακραίες διαταραχές ($N-2$ ή περισσότερο). Η εσφαλμένη λειτουργία του είτε η αδυναμία του να δράσει έχει σοβαρό αρνητικό αντίκτυπο σε ολόκληρο το σύστημα. Το κυριότερο μέλημα για τη λειτουργία αυτών των σχημάτων είναι η ασφάλεια του σχήματος προστασίας.
3. *Τύπου III*: Είναι ένα σχήμα προστασίας που η εσφαλμένη λειτουργία του ή η μη ενεργοποίηση του δεν έχει σοβαρή αρνητική επίδραση στο σύστημα, εκτός από προβλήματα σε τοπική κλίμακα. Είναι σημαντικό, όμως, να αναφερθεί πως λόγω αλλαγών στο δίκτυο ένα σχήμα προστασίας *Τύπου III* μπορεί να μετατραπεί σε *Τύπου II*, ή και *Τύπου I* σε κάποιες περιπτώσεις.

2.4.3 Ως προς τη χρησιμότητα τους

Σε περιπτώσεις που πραγματοποιείται μια μεγάλη επένδυση στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, είτε τίθεται ως στόχος η εξοικονόμηση του λειτουργικού κόστους του συστήματος, είτε απαιτείται ένα αποδεκτό επίπεδο ποιότητας εξυπηρέτησης, τα σχήματα προστασίας μπορούν να αποτελέσουν μια ενδιάμεση και βοηθητική λύση. Οι χρησιμότητες, λοιπόν, ενός SIPS είναι οι ακόλουθες:

1. *Βελτίωση των πρακτικών λειτουργίας*. Τα σχήματα προστασίας που ανήκουν σε αυτή την κατηγορία είναι σχεδιασμένα για την αντιμετώπιση προβλημάτων που εμφανίζονται κατά τη λειτουργία του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.
2. *Λειτουργία σε συνθήκες υψηλότερης φόρτισης*. Σε περιπτώσεις δικτύων μεταφοράς, τα οποία λόγω της σημαντικής αύξησης της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας σε συνδυασμό με

την παλαιότητα τους, πρέπει να λειτουργούν σε συνθήκες υψηλότερης φόρτισης, τα περιθώρια ασφάλειας μικραίνουν. Η λειτουργία κατάλληλων σχημάτων προστασίας ακεραιότητας συστήματος επιτρέπουν τη λειτουργία των συστημάτων με μικρά περιθώρια ασφάλειας, προκαλώντας, όμως, τη μη ασφαλή αντιμετώπιση όλων των πιθανών διαταραχών.

3. *Αύξηση της ικανότητας μεταφοράς για το ίδιο επίπεδο ασφάλειας.* Μέσω της εφαρμογής κατάλληλων σχημάτων προστασίας υπάρχει η δυνατότητα να αυξηθεί η ικανότητα μεταφοράς ισχύος του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, χωρίς να μειωθεί το επίπεδο ασφάλειας του. Μέσω των σχημάτων μπορούν να αγνοηθούν εν μέρει και βραχυπρόθεσμα προβλήματα ελλιπούς επέκτασης του δικτύου ή προβλήματα λειτουργίας που οφείλονται σε οικονομικούς λόγους.
4. *Προσωρινή λύση κατά τη διάρκεια έργων ανάπτυξης.* Στην περίπτωση ενός έργου υπό κατασκευή ή ενός έργου ανάπτυξης, μέχρι την ολοκλήρωσή του το σχήμα προστασίας μπορεί να αποτελέσει μια μεταβατική λύση ενίσχυσης της ασφάλειας του συστήματος.
5. *Αντιμετώπιση ακραίων διαταραχών.* Για την αντιμετώπιση ακραίων διαταραχών που εμπλέκουν πολλές διατάξεις του συστήματος και είναι πιθανό να οδηγήσουν σε διαδοχικές απώλειες μονάδων ή γραμμών, ο σχεδιασμός σχημάτων προστασίας ακεραιότητας συστήματος είναι μια διαδοδομένη λύση. Η χρήση αυτή των σχημάτων προστασίας αποτελεί, ίσως, τη σπουδαιότερη συμβολή των σχημάτων στην προστασία συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και την ενίσχυση της ασφάλειάς τους.

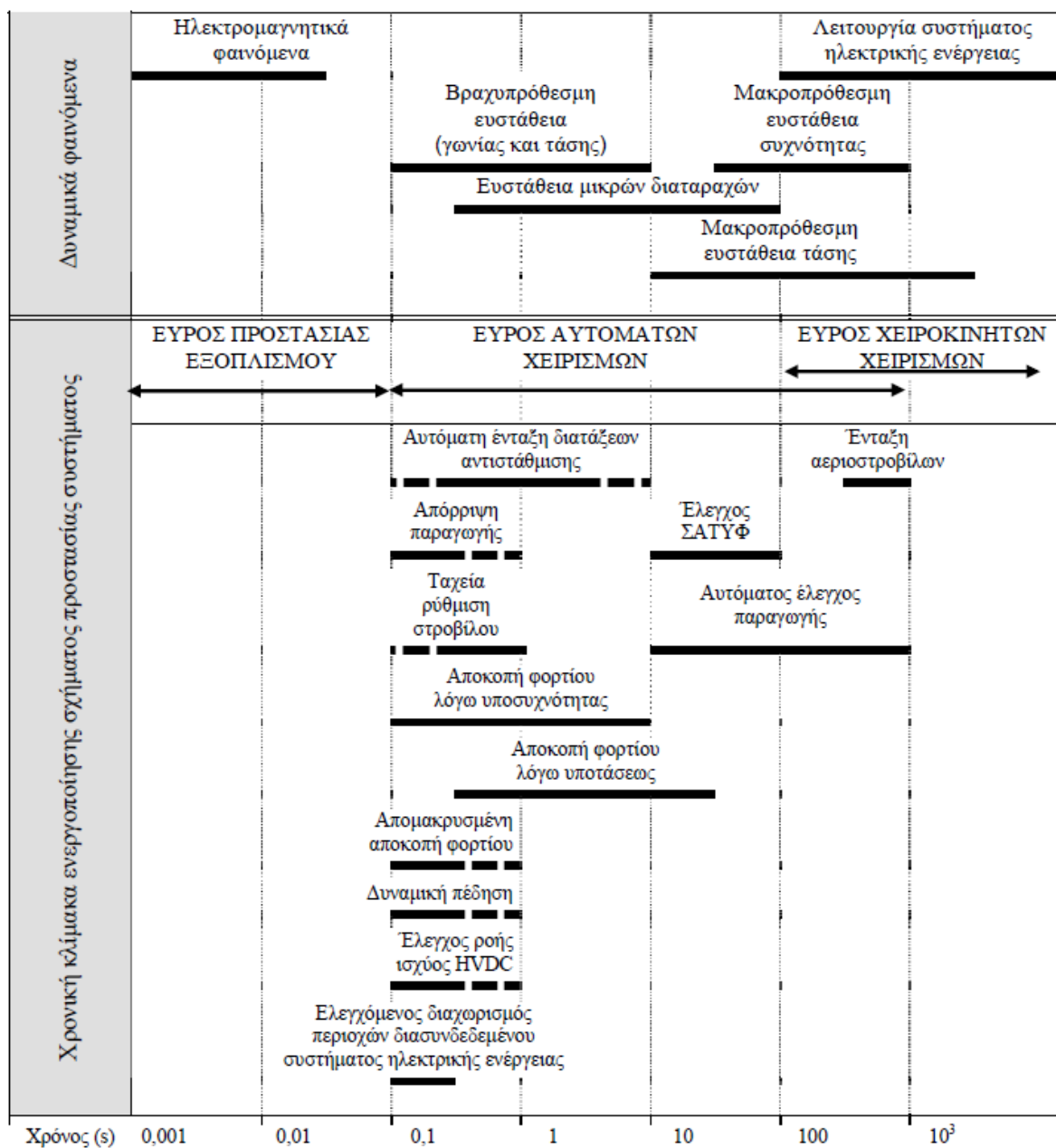
2.4.4 Ως προς τη χρονική κλίμακα εφαρμογής

Σύμφωνα με τις αναφορές [28] και [31] τα συνηθέστερα μέτρα προστασίας που υλοποιούνται σε σχήματα προστασίας ακεραιότητας συστήματος ως προς τη χρονική κλίμακα ενεργοποίησής τους και η συσχέτιση με τα δυναμικά φαινόμενα που συμβαίνουν σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, φαίνονται στο Σχήμα 2.2.

Η κλίμακα στο Σχήμα 2.2 είναι λογαριθμική και το συνεχές ευθύγραμμο τμήμα αντιπροσωπεύει το τυπικό χρονικό διάστημα εντός του οποίου μπορεί να ενεργοποιηθεί η λειτουργία του σχήματος προστασίας, ενώ η διακεκομμένη γραμμή αντιπροσωπεύει το εν δυνάμει εφικτό διάστημα ενεργοποίησης. Γίνεται, επίσης, σαφής η διάκριση των σχημάτων προστασίας από την προστασία εξοπλισμού και άλλες αυτόματες δράσεις που ενισχύουν την ασφάλεια του συστήματος.

2.5 Προστασία Ακεραιότητας Συστήματος έναντι Αλυσιδωτής Απώλειας Στοιχείων λόγω Θερμικής Υπερφόρτισης

Σε περίπτωση σφάλματος κατά τη λειτουργία του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας είναι πιθανή η θερμική υπερφόρτιση γραμμών λόγω υψηλών ρευμάτων. Η μη έγκαιρη αντιμετώπιση της υπερφόρτισης αυτής, μπορεί να προκαλέσει την αλυσιδωτή απώλεια και άλλων κλάδων του συστήματος



Σχήμα 2.2: Χρονική κλίμακα ενεργοποίησης σχημάτων προστασίας ακεραιότητας συστήματος [31].

μετά την πρώτη απώλεια. Σε περιπτώσεις μεγάλων διαταραχών απαιτείται η λειτουργία σχήματος προστασίας ακεραιότητας του συστήματος, το οποίο τίθεται, χωρίς χρονική καθυστέρηση, σε λειτουργία και μέσω διορθωτικών ενεργειών αντιμετωπίζει την αρχική διαταραχή. Στόχος των σχημάτων προστασίας αυτού του τύπου είναι να διατηρούν τη θερμοκρασία των αγωγών των γραμμών μεταφοράς σε τιμές χαμηλότερες του μέγιστου ορίου, το οποίο έχει καθοριστεί από τον κατασκευαστή, προτού το σύστημα προστασίας εξοπλισμού θέσει τη γραμμή εκτός λειτουργίας. Ένα τέτοιο σχήμα προστασίας χρησιμοποιείται στο ιταλικό διασυνδεδεμένο σύστημα, το

οποίο επιβλέπει συνεχώς τις κρίσιμες περιοχές του δικτύου μεταφοράς και ονομάζεται «Σύστημα Αυτόματης Αποκοπής» (System Automatic Shedding (SAS)). Το συγκεκριμένο σχήμα προστασίας, προκειμένου να αποτρέψει την ανεξέλεγκτη διαδοχική απώλεια γραμμών του συστήματος, βασίζεται στον περιορισμό της ροής ισχύος των κλάδων που πλήττονται από τη διαταραχή, μέσω της ελεγχόμενης αποκοπής φορτίου [24].

Η διαδοχική απώλεια στοιχείων του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας λόγω θερμικής υπερφόρτισης παραβιάζει το κριτήριο της ασφαλούς λειτουργίας του. Η δράση, λοιπόν, ενός σχήματος αυτού του τύπου εστιάζει στην αντιμετώπιση της υπερφόρτισης, μέσω της μείωσης της ροής ισχύος και όχι στον αποκλεισμό του στοιχείου του συστήματος. Δρα μετά την πρώτη υπερφόρτιση για την αποφυγή των επόμενων.

2.5.1 Κριτήρια Σχεδίασης Σχήματος Προστασίας Ακεραιότητας Συστήματος από Αλυσιδωτή Απώλεια Στοιχείων

Προκειμένου η θερμοκρασία των αγωγών των γραμμών μεταφοράς να μην υπερβεί τα όρια ασφαλούς λειτουργίας, πρέπει να ενεργοποιηθεί το σχήμα προστασίας του συστήματος. Οι πιθανές δράσεις είναι:

- ρύθμιση του ορίου παραγωγής ισχύος μονάδων (setpoint)
- αποκοπή φορτίου

Ρύθμιση του ορίου παραγωγής ισχύος μονάδων (setpoint)

Η λύση αυτή προτιμάται, κυρίως, σε περιπτώσεις που η υπερφόρτιση του κλάδου του συστήματος οφείλεται στο μέγιστο ρεύμα του. Προκειμένου, λοιπόν, να μειωθεί το ρεύμα αυτό και, ακολούθως, το ποσοστό φόρτισης της γραμμής ή του μετασχηματιστή, πρέπει να μειωθεί η ροή ισχύος σε αυτό. Ειδικότερα σε περιπτώσεις διανεμημένης παραγωγής, με την εφαρμογή των διακοπόμενων συμβολαίων αιολικών σταθμών,[33], ο περιορισμός του ορίου παραγωγής προκειμένου να αντιμετωπιστεί η διαταραχή που προκαλεί θερμική υπερφόρτιση στοιχείων του συστήματος είναι μια από τις αποδοτικότερες λύσεις για την αντιμετώπιση τους.

Σύμφωνα με την αναφορά [33], υπάρχει η δυνατότητα περιορισμού της παραγωγής των αιολικών σταθμών αν παραβιαστούν τα όρια ασφαλούς λειτουργίας του συστήματος. Μέσω διαρκούς ελέγχου των επικίνδυνων περιοχών του συστήματος μπορεί να αυξηθεί η διείσδυση αιολικής ενέργειας χωρίς να παραβιάζονται τα όρια ασφαλούς λειτουργίας του. Οι αιολικοί σταθμοί που δέχονται την εντολή ρύθμισης του ανώτατου ορίου παραγωγής πρέπει να την υλοποιήσουν εντός συγκεκριμένου χρονικού πλαισίου, διάρκειας λίγων λεπτών, ειδάλλως αυτόματα τίθονται εκτός συστήματος. Μέσω συνεχούς παρακολούθησης των κλάδων του συστήματος είναι δυνατή η ρύθμιση του ορίου του αιολικού σταθμού. Σε περίπτωση παραβίασης των ορίων ασφαλούς λειτουργίας αποστέλλεται η εντολή μείωσης του ορίου παραγωγής του αιολικού πάρκου προκειμένου να μειωθεί η ροή ισχύος στον κλάδο. Το κάθε όριο αντιπροσωπεύει την ανώτατη τιμή ενεργού

ισχύος που κάθε αιολικός σταθμός μπορεί να εισάγει στο σύστημα.

Ο έλεγχος που προσφέρει στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας ένα τέτοιο σχήμα προστασίας ακεραιότητας του μπορεί να είναι είτε προληπτικός είτε διορθωτικός. Με εφαρμογή προληπτικού ελέγχου εφαρμόζεται ο εξής κανόνας, η ροή ισχύος στις γραμμές μεταφοράς του συστήματος δεν πρέπει να υπερβαίνει το προκαθορισμένο όριο ασφαλούς λειτουργίας. Το όριο αυτό υπολογίζεται με εφαρμογή του N-1 κριτηρίου και σε περίπτωση παραβίασής του στέλνεται μέσω του σχήματος προστασίας η εντολή ρύθμισης του ανώτατου ορίου παραγωγής. Ο διορθωτικός έλεγχος ενεργοποιείται μόνο σε περίπτωση παραβίασης των ορίων, δηλαδή λαμβάνοντας υπόψη το αποτέλεσμα της διαταραχής.

Η υλοποίηση αυτή μπορεί να γίνει με σχήματα προστασίας βασισμένα σε μετρήσεις είτε με σχήματα με ανίχνευση διαταραχής. Ο οπλισμός ενός σχήματος βασισμένου σε μετρήσεις ενεργοποιείται μόλις η μέτρηση της ροής ισχύος στο ζυγό, που αποτελεί το άκρο άφιξης της γραμμής ή του μετασχηματιστή που έχει υπερφορτιστεί, είναι εκτός ορίων. Στα σχήματα προστασίας με ανίχνευση διαταραχής η διέγερση τους γίνεται με το άνοιγμα ή κλείσιμο ενός διακόπτη.

Ως «επικίνδυνος» καλείται ο κλάδος του συστήματος, ο οποίος μπορεί να αποτελέσει την αιτία μιας πιθανής δυσλειτουργίας του συστήματος. Οι περιορισμοί που εισάγονται στους κλάδους αυτούς οφείλονται, κυρίως, στα θερμικά τους όρια [30].

Ελεγχόμενη Αποκοπή Φορτίου

Σε περιπτώσεις που η θερμική υπερφόρτιση ενός κλάδου του συστήματος οφείλεται σε υψηλή θερμοκρασία του περιβάλλοντος στο οποίο βρίσκεται ο συγκεκριμένος κλάδος, προτιμάται η ελεγχόμενη αποκοπή φορτίου. Σύμφωνα με την αναφορά [24], μέσω προληπτικού ελέγχου, σε περίπτωση που ανιχνευτεί υψηλό ποσοστό φόρτισης, το σχήμα προστασίας μειώνει τη ροή ισχύος στον υπερφορτισμένο κλάδο και μειώνει το ποσοστό φόρτισης του. Με την εφαρμογή αυτού του αλγορίθμου προβλέπεται η μελλοντική συμπεριφορά του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, προκειμένου να υπάρξει η δυνατότητα περιορισμού του ρεύματος στον υπερφορτισμένο κλάδο εντός των προκαθορισμένων ορίων.

Προκειμένου η δράση του σχήματος να είναι βοηθητική για το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας πρέπει η ελεγχόμενη αποκοπή φορτίου να είναι η βέλτιστη. Το βασικό κριτήριο για την ενεργοποίηση του οπλισμού του συγκεκριμένου σχήματος είναι η μέτρηση της θερμοκρασίας στην οποία λειτουργεί ο ελεγχόμενος κλάδος και ο έλεγχος εάν αυτή βρίσκεται εντός των ορίων ασφαλούς λειτουργίας.

Κριτήρια Σχεδίασης

Τα κριτήρια σχεδίασης ενός σχήματος που αποτρέπει τη διαδοχική απώλεια στοιχείων του συστήματος λόγω θερμικής υπερφόρτισης είναι τα ακόλουθα:

- *Εγκυρότητα (dependability)*: η λειτουργία του εξαρτάται από την τιμή της υπερφόρτισης στις ελεγχόμενες περιοχές του συστήματος.

- *Ασφάλεια (security)*: προκειμένου να ικανοποιείται το κριτήριο της ασφάλειας, πρέπει να αποκλείεται η ταυτόχρονη αποτυχία λειτουργίας δύο ή περισσότερων στοιχείων του σχήματος.
- *Αξιοπιστία (reliability)*: πρέπει να καλύπτει τις απαιτήσεις εγκυρότητας και ασφάλειας.
- *Επιλογικότητα (selectivity)*: όπως και τα σχήματα προστασίας από άλλου τύπου διαταραχές, και το συγκεκριμένο σχήμα πρέπει να δρα μόνο για τις διαταραχές που έχει σχεδιαστεί και να είναι παροπλισμένο εάν δεν απαιτείται η λειτουργία του. Η αποκοπή φορτίου και παραγωγής πρέπει να ελαχιστοποιείται, όπως και η πιθανότητα ανθρωπίνου λάθους κατά το χειρισμό του.
- *Σθεναρότητα (robustness)* : πρέπει να λειτουργεί τόσο στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας όσο και κατά τη μεταβατική περίοδο.

Η ταχύτητα απόκρισης ενός σχήματος προστασίας ακεραιότητας συστήματος έναντι θερμικής υπερφόρτισης δεν είναι τόσο κρίσιμη για την προστασία του συστήματος, όσο σε περιπτώσεις αστάθειας τάσεως ή γωνίας, που απειλείται η ευστάθεια του συστήματος. Σε κάποιες περιπτώσεις το σχήμα ενεργοποιείται εντός δευτερολέπτων, ενώ σε άλλες οι διορθωτικές ενέργειες μπορεί να ολοκληρωθούν εντός χρονικού πλαισίου κάποιων λεπτών. Το χρονικό διάστημα οπλισμού του σχήματος προστασίας δεν διαφέρει για τους δύο τύπους που μπορεί να χρησιμοποιηθούν. [28]

Απαιτήσεις Τηλεπικοινωνίας

Στη λειτουργία ενός σχήματος προστασίας συστήματος οι τηλεπικοινωνιακοί δίαυλοι χρησιμοποιούνται είτε για τη μεταφορά δεδομένων ανάμεσα σε μακρινές τοποθεσίες, είτε προκειμένου να μεταβιβαστούν οι εντολές δράσεις του σχήματος προστασίας. Προκειμένου να διασφαλιστεί η ευστάθεια του συστήματος, το τηλεπικοινωνιακό σύστημα πρέπει να ικανοποιεί τις απαιτήσεις ως προς την ταχύτητα απόκρισης του, την ασφάλεια και την εγκυρότητα.[34]

Κατά το σχεδιασμό του τηλεπικοινωνιακού συστήματος λαμβάνονται υπόψη τα ακόλουθα [29]:

- Η αρχιτεκτονική του τηλεπικοινωνιακού συστήματος
- Τα τηλεπικοινωνιακά μέσα και τα αντίστοιχα πρωτόκολλα λειτουργίας τους
- Η επίπτωση μιας πιθανής αποτυχίας δράσης του τηλεπικοινωνιακού συστήματος στην αξιοπιστία και τη διαθεσιμότητα του σχήματος προστασίας.
- Η λειτουργία του σχήματος με μια αποτυχία λειτουργίας του τηλεπικοινωνιακού διαύλου

2.6 Πλεονεκτήματα Σχημάτων Προστασίας Ακεραιότητας Συστήματος

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται συνοπτικά οι δυνατότητες που μπορεί να προσφέρει σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας ένα σχήμα προστασίας, αλλά και οι αδυναμίες που αυτό έχει,[28].

Δυνατότητες ενός σχήματος προστασίας ακεραιότητας συστήματος

Ενισχύει την ασφάλεια του συστήματος, στο οποίο δρα, συμβάλλοντας στην αντιμετώπιση διαταραχών που μπορεί να έκαναν το σύστημα ανασφαλές. Επίσης, με τη λειτουργία ενός σχήματος προστασίας οι επιπτώσεις μιας ακραίας διαταραχής είναι μικρότερες για τον εξοπλισμό του συστήματος, βελτιώνοντας με αυτόν τον τρόπο την ποιότητα παροχής υπηρεσιών προς τους καταναλωτές.

Η ορθή λειτουργία του σχήματος προστασίας, όμως, ευνοεί σε μεγάλο βαθμό και το διαχειριστή του συστήματος, αφού μειώνει το ποσό μη μεταφερόμενης ηλεκτρικής ενέργειας και αποτρέπει την καταστροφή του εξοπλισμού που προκαλείται από διαταραχές. Επίσης, ελαχιστοποιεί την οικονομική επιβάρυνση του διαχειριστή του συστήματος λόγω διακοπής παροχής ηλεκτρικής ενέργειας προς τους καταναλωτές.

Αδυναμίες ενός σχήματος προστασίας ακεραιότητας συστήματος

Η λειτουργία ενός σχήματος προστασίας αυξάνει την πολυπλοκότητα του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, και σε αρκετές περιπτώσεις αυξάνει και το κόστος λειτουργίας αυτού. Είναι πιθανή η εμφάνιση προβλημάτων στο συντονισμό και την παράλληλη λειτουργία ενός σχήματος προστασίας με άλλα συστήματα ελέγχου και είναι πιθανό να προκληθούν σφάλματα στη λειτουργία του συστήματος. Επίσης, ένα σχήμα προστασίας είναι ευάλωτο σε αλλαγές της τοπολογίας και του εξοπλισμού του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, γι' αυτό απαιτείται συχνά η αναθεώρηση και η επανασχεδιάσή του. Επιπροσθέτως, μεταβολές στην τοπολογία του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να καταστήσουν το σχήμα ακατάλληλο και επομένως να μειώσουν τη χρηστικότητα του. Καταστάσεις λειτουργίας που δεν έχουν ληφθεί υπόψη κατά το σχεδιασμό του μπορεί να προκαλέσουν την ανεπιθύμητη ή τη μη λειτουργία του σχήματος προστασίας.

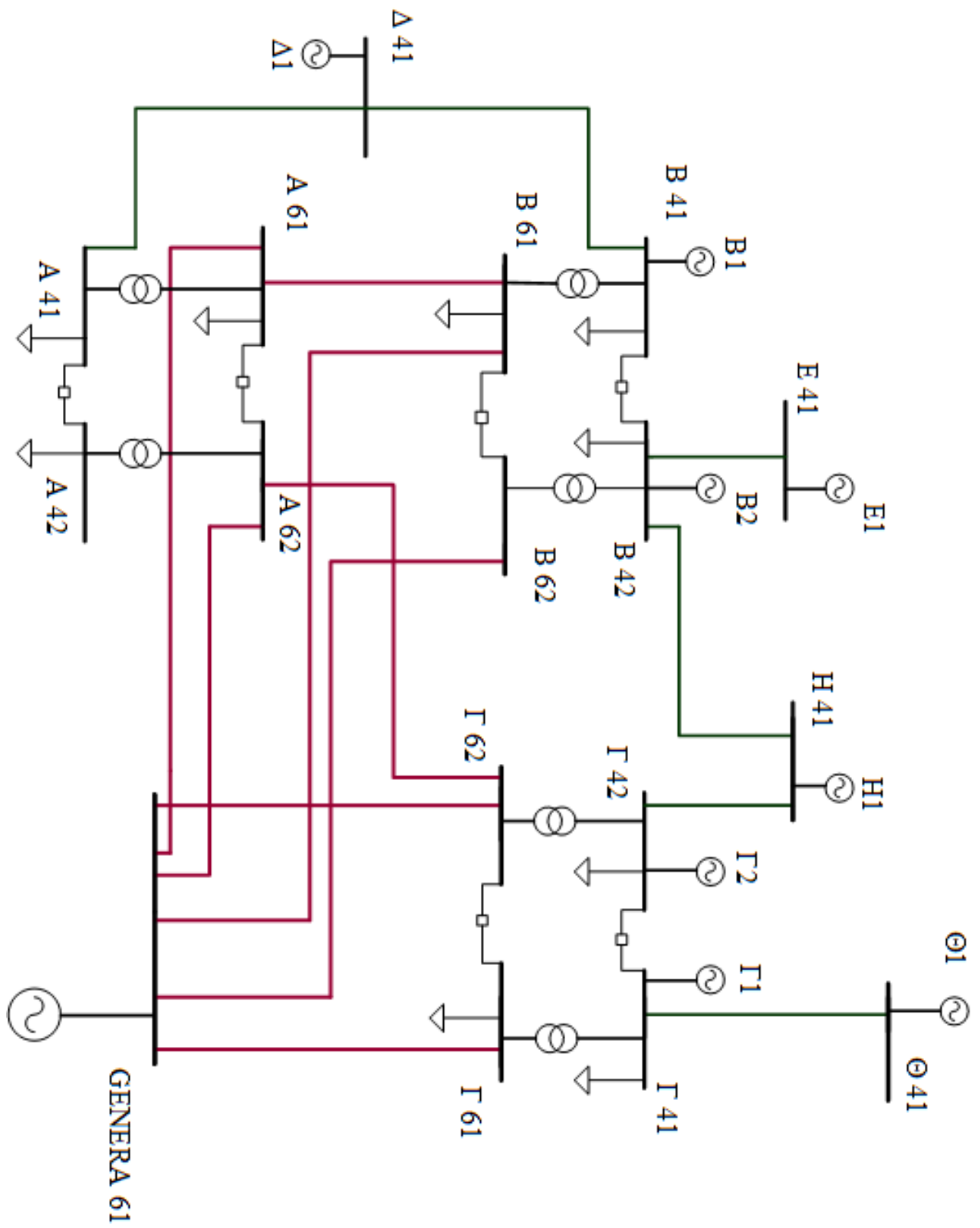
Κεφάλαιο 3

Ανάλυση Στατικής Ασφάλειας εξεταζόμενου δικτύου

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται το εξεταζόμενο δίκτυο δοκιμών, καθώς και το αρχικό στιγμιότυπο λειτουργίας του, που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία. Επίσης, γίνεται εκτίμηση της στατικής ασφάλειας του συστήματος και εξετάζεται σε ποιες περιπτώσεις παραβιάζονται τα θερμικά όρια των κλάδων του. Ειδικότερα, μέσω της εφαρμογής του κριτηρίου $N-1$, με την απώλεια κάθε φορά μιας από τις γραμμές του δικτύου, εξετάζονται οι επιπτώσεις που η κάθε διαταραχή έχει στη στατική του ασφάλεια, και σε ποιες περιπτώσεις το σύστημα είναι μη ασφαλές. Πραγματοποιείται, επίσης, $N-1$ ανάλυση θεωρώντας ως διαταραχή την απώλεια ενός φορτίου. Κάποιες από τις εξεταζόμενες διαταραχές έχουν ως αποτέλεσμα την υπερφόρτιση γραμμών ή μετασχηματισμών του δικτύου, καθιστώντας το μη ασφαλές. Προτείνονται, τέλος, κάποιοι τρόποι αντιμετώπισης αυτών των υπερφορτίσεων, προκειμένου να αποφευχθεί η αλυσιδωτή απώλεια στοιχείων του δικτύου, η οποία μπορεί να προκαλέσει τη μερική ή και ολική σβέση του. Η μελέτη πραγματοποιήθηκε με χρήση του προγράμματος *PSSE*.

3.1 Εξεταζόμενο δίκτυο

Το εξεταζόμενο δίκτυο είναι τμήμα του γαλλικού συστήματος και η διαχείριση του πραγματοποιείται από τον RTE. Αποτελείται από 17 ζυγούς και είναι ένα σύστημα με δύο επίπεδα τάσης, η υψηλή τάση (ΥΤ) είναι 90kV και η υπερυψηλή τάση είναι 225kV. Στο Σχήμα 3.1 παρουσιάζεται το μονογραμμικό διάγραμμα του δικτύου, στο οποίο οι γραμμές ΥΤ παριστάνονται με πράσινο χρώμα, ενώ οι γραμμές ΥΥΤ παριστάνονται με μωβ χρώμα.



Σχήμα 3.1: Εξεταζόμενο Δίκτυο.

Πρόκειται για ένα πραγματικό δίκτυο με διείσδυση αιολικής παραγωγής. Το δίκτυο είναι συνδεδεμένο με ένα σύστημα ΥΤΤ που αντιπροσωπεύεται από το ζυγό GENERA 61. Στον Πίνακα 3.1 παρουσιάζονται τα στοιχεία των ζυγών του συστήματος, δηλαδή, το όνομα, η ονομαστική τάση και ο τύπος του κάθε ζυγού. Ο ζυγός ταλάντωσης (αναφοράς) του δικτύου είναι ο GENERA61, του οποίου το μέτρο και η γωνία της τάσης παραμένουν σταθερά σε όλες τις περιπτώσεις που μελετήθηκαν. Ο ζυγός αυτός συνδέεται με το υπόλοιπο δίκτυο μέσω γραμμών μεταφοράς ΥΤΤ.

Πίνακας 3.1: Ζυγοί Εξεταζόμενου Δικτύου.

A/A ζυγού	Όνομα ζυγού	Ονομαστική τάση (kV)	Τύπος ζυγού
1	A61	225	Φορτίου (PQ)
2	A62	225	Φορτίου (PQ)
3	B61	225	Φορτίου (PQ)
4	B62	225	Φορτίου (PQ)
5	Γ61	225	Φορτίου (PQ)
6	Γ62	225	Φορτίου (PQ)
7	A41	90	Φορτίου (PQ)
8	A42	90	Φορτίου (PQ)
9	B41	90	Παραγωγής (PV)
10	B42	90	Παραγωγής (PV)
11	Γ41	90	Παραγωγής (PV)
12	Γ42	90	Παραγωγής (PV)
13	Δ41	90	Παραγωγής (PV)
14	E41	90	Παραγωγής (PV)
15	H41	90	Παραγωγής (PV)
16	Θ41	90	Παραγωγής (PV)
17	GENERA61	225	Ταλάντωσης (slack bus)

Διασυνδεδετικοί Διακόπτες Ζυγών

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1, κάποιοι ζυγοί είναι συνδεδεμένοι μέσω διασυνδεδετικών διακοπών ζυγού (ΔΔΖ). Συγκεκριμένα, οι ζυγοί ΥΤΤ A61-A62, B61-B62, Γ61-Γ62 και οι ζυγοί ΥΤ A41-A42, B41-B42, Γ41-Γ42, συνδέονται με διασυνδεδετικούς διακόπτες, αντίστοιχα. Οι διασυνδεδετικοί διακόπτες ζυγού (bus couplers) παριστάνονται ως γραμμές μηδενικής αντίστασης και αντίδρασης κατά τον υπολογισμό της ροής φορτίου του δικτύου, ενώ, στο εξεταζόμενο στιγμιότυπο λειτουργίας παραμένουν κατά κανόνα κλειστοί. Ωστόσο, είναι πιθανή η λειτουργία του εξεταζόμενου δικτύου και με ανοιχτούς τους διασυνδεδετικούς διακόπτες των ζυγών ΥΤ. Στο παρόν κεφάλαιο εξετάζεται η λειτουργία με ανοιχτούς τους διασυνδεδετικούς διακόπτες των ζυγών ΥΤ και οι επιπτώσεις της στη στατική ασφάλεια του εξεταζόμενου δικτύου.

3.1.1 Στοιχεία Αιολικών Πάρκων του δικτύου

Ως ζυγοί παραγωγής χαρακτηρίζονται οι ζυγοί στους οποίους είναι συνδεδεμένα αιολικά πάρκα (Α/Π), τα οποία θεωρούνται ως ισοδύναμες γεννήτριες που έχουν αντιστροφέα ώστε να μπορούν να απορροφούν αλλά και να εγχέουν άεργο ισχύ. Για τις ανάγκες της ανάλυσης στατικής ασφάλειας του δικτύου δεν διαφέρουν από ένα PV ζυγό. Οι αιολικοί σταθμοί, σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας, θεωρείται ότι μπορούν να εισάγουν στο σύστημα τη μέγιστη αιολική τους παραγωγή, επομένως, το άνω όριο ενεργού ισχύος σε κάθε Α/Π ισούται με την ονομαστική ισχύ του κάθε αιολικού σταθμού. Η παραγωγή ενεργού ισχύος και η τάση στους ζυγούς αυτούς, παραμένουν σταθερά κατά τον υπολογισμό της ροής φορτίου. Στον Πίνακα 3.2 παρουσιάζονται τα στοιχεία κάθε αιολικού πάρκου, ο ζυγός στον οποίο αυτό είναι συνδεδεμένο και η ενεργός, άεργη και φαινόμενη ισχύς του.

Πίνακας 3.2: Δεδομένα Αιολικών Πάρκων Εξεταζόμενου Δικτύου

Ζυγός	Όνομα Α/Π	$P_{max}(MW)$	$S_{nom}(MVA)$
B41	B1	70	80
B42	B2	40	50
Γ41	Γ1	55	65
Γ42	Γ2	32	40
Δ41	Δ1	120	150
E41	E1	65	75
H41	H1	90	110
Θ41	Θ1	80	110

3.1.2 Στοιχεία Μετασχηματιστών του δικτύου

Σε τρία σημεία του δικτύου (υποσταθμοί ΥΥΤ/ΥΤ) γίνεται υποβιβασμός της τάσης μέσω δύο παράλληλων μετασχηματιστών, οι οποίοι είναι εξοπλισμένοι με Σύστημα Αλλαγής Τάσης Υπό Φορτίο (ΣΑΤΥΦ). Οι μετασχηματιστές μεταξύ των ζυγών Α61-Α41 και Α62-Α42 αποτελούν τον υποσταθμό Α, οι μετασχηματιστές μεταξύ των ζυγών Β61-Β41 και Β62-Β42 αποτελούν τον υποσταθμό Β και, τέλος, οι μετασχηματιστές μεταξύ των ζυγών Γ61-Γ41 και Γ62-Γ42 αποτελούν τον υποσταθμό Γ. Ο ονομαστικός λόγος μετασχηματισμού, σε κάθε υποσταθμό, είναι 225kV/90kV. Η τιμή λήψης κάθε ΣΑΤΥΦ παραμένει σταθερή κατά τον υπολογισμό της ροής φορτίου, σε κάθε περίπτωση. Στο Πίνακα 3.3 παρουσιάζονται για κάθε μετασχηματιστή, το πρωτεύον και το δευτερεύον του, ο ζυγός που ελέγχεται, η αντίσταση και η αντίδραση του, η ονομαστική του ισχύς και η τιμή λήψης. Ειδικότερα, οι αμ τιμές της αντίστασης και αντίδρασης κάθε μετασχηματιστή είναι υπολογισμένες στη βάση ισχύος του κάθε μετασχηματιστή, ενώ για τον υπολογισμό των ροών φορτίου τα μεγέθη αυτά υπολογίζονται στην κοινή βάση ισχύος του δικτύου.

Πίνακας 3.3: Δεδομένα Μετασχηματιστών Εξεταζόμενου Δικτύου.

Πρωτεύον	Δευτερεύον	Ελεγχόμενος ζυγός	R_{eq} (α.μ.)	X_{eq} (α.μ.)	S_{nom} (MVA)	Τιμή λήψης
A41	A61	A41	0,00363	0,11263	107,7	1,01
A42	A62	A42	0,00363	0,11263	107,7	1,01
B41	B61	B41	0,00427	0,12036	111,1	0,992
B42	B62	B42	0,00427	0,12036	111,1	0,992
Γ41	Γ61	Γ41	0,00375	0,11121	107,7	1,01
Γ42	Γ62	Γ42	0,00375	0,11121	107,7	1,01

3.1.3 Στοιχεία Φορτίων του δικτύου

Κατά τη στατική ανάλυση η ενεργός και η άεργος ισχύς των φορτίων παραμένουν σταθερές και παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.4. Στον Πίνακα 3.4 παρουσιάζονται τα στοιχεία των φορτίων του συστήματος, ο ζυγός στον οποίο είναι συνδεδεμένα, το όνομα, η ενεργός και άεργος ισχύς τους.

Πίνακας 3.4: Δεδομένα Φορτίων του Εξεταζόμενου Δικτύου.

Ζυγός	Όνομα φορτίου	$P_L(MW)$	$Q_L(MVAr)$
A61	ΦΑ1	51	11
A41	ΦΑ2	15	3
A42	ΦΑ4	10	1,50
B61	ΦΒ1	55	11
B41	ΦΒ2	22	5
B42	ΦΒ3	9	-0,4
Γ61	ΦΓ1	25	7
Γ41	ΦΓ2	32	6
Γ42	ΦΓ3	8	-0,2

3.1.4 Θερμικά Όρια των Κλάδων του δικτύου

Στον Πίνακα 3.5 παρουσιάζονται τα θερμικά όρια κάθε κλάδου του δικτύου. Αν η ροή ισχύος υπερβεί το θερμικό όριο του κλάδου προκαλείται υπερφόρτιση του. Οι γραμμές μεταφοράς ΥΥΤ που συνδέουν τον άπειρο ζυγό με τους τρεις υποσταθμούς του δικτύου δεν αναφέρονται στον Πίνακα 3.5 γιατί το θερμικό τους όριο θεωρείται πολύ μεγαλύτερο των υπολοίπων γραμμών, επομένως, ανεξάρτητα από κάθε εξεταζόμενη διαταραχή, οι γραμμές αυτές είναι αφόρτιστες, κάτω από τη φυσική τους φόρτιση.

Προκειμένου να εξεταστεί το ποσοστό φόρτισης κάθε κλάδου του δικτύου μετράται η ροή ενεργού ισχύος σε αυτόν και συγκρίνεται με το θερμικό του όριο. Η βάση ισχύος του συστήματος είναι 100MVA.

Πίνακας 3.5: Θερμικά Όρια Κλάδων του Δικτύου.

Κλάδος	Θερμικό Όριο (MVA)
A61 - B61	490
A62 - Γ62	360
A41 - Δ41	85
B41 - Δ41	105
B42 - E41	95
B42 - H41	100
Γ41 - Θ41	115
Γ42 - H41	115
A61 - A41	107,7
A62 - A42	107,7
B61 - B41	111,1
B62 - B42	111,1
Γ61 - Γ41	107,7
Γ62 - Γ42	107,7

3.1.5 Υπολογισμός αρχικής Ροής Φορτίου του δικτύου

Στο εξεταζόμενο στιγμιότυπο του δικτύου, η ζήτηση ενεργού και άεργου ισχύος των φορτίων παραμένει σταθερή, ανεξάρτητα από την κατάσταση λειτουργίας του συστήματος, και ίση με αυτή του Πίνακα 3.4. Η επίδραση των εξεταζόμενων διαταραχών στο δίκτυο εξετάζεται όταν το δίκτυο είναι σχετικά αφόρτιστο, επομένως, σημειώνονται υπερτάσεις. Για το συγκεκριμένο στιγμιότυπο λειτουργίας θεωρούνται ως αποδεκτά ασφαλή όρια για την τάση του δικτύου από 0,95 αμ έως 1,1 αμ. Στον Πίνακα 3.6 φαίνεται, από τον υπολογισμό της αρχικής ροής φορτίου, πως όλοι οι ζυγοί έχουν υψηλές τάσεις (πάνω από 1,05 αμ).

Οι τάσεις αυτές υπολογίστηκαν για μέγιστη αιολική παραγωγή (κάθε Α/Π εισάγει στο δίκτυο την ονομαστική ενεργό ισχύ του) και για μηδενική αιολική παραγωγή, η τροφοδότηση των φορτίων του δικτύου πραγματοποιείται από τον άπειρο ζυγό GENERA 61. Στον Πίνακα 3.7 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του υπολογισμού της ροής φορτίου του δικτύου για μηδενική αιολική παραγωγή, για κλειστούς αλλά και ανοιχτούς διασυνδεδετικούς διακόπτες ζυγών. Οι τάσεις των ζυγών είναι, εξίσου υψηλές, άνω του 1,05αμ.

Ο Πίνακας 3.6 αναφέρεται στις τάσεις των ζυγών του δικτύου όταν οι διασυνδεδετικοί διακόπτες των ζυγών ΥΥΤ και ΥΥΤ των υποσταθμών είναι κλειστοί και όταν αυτοί των ζυγών ΥΤ είναι ανοιχτοί, με μέγιστη αιολική παραγωγή. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα παρατηρείται ότι οι διασυνδεδετικοί διακόπτες δεν έχουν ουσιαστική επίδραση στις τάσεις των ζυγών. Σε επόμενη ενότητα εξετάζεται ο ρόλος τους σε περίπτωση μιας διαταραχής στο δίκτυο. Παρόμοια είναι τα αποτελέσματα, σχετικά με την επίδραση αυτών στις τάσεις των ζυγών όταν η αιολική παραγωγή του δικτύου είναι μηδενική, όπως φαίνεται από τον Πίνακα 3.7. Οι διασυνδεδετικοί διακόπτες

των ζυγών ΥΤΤ παραμένουν πάντοτε κλειστοί, επομένως, όταν γίνεται αναφορά σε ανοιχτούς διασυνδετικούς διακόπτες, εννοείται μόνο αυτοί στους ζυγούς ΥΤ.

Πίνακας 3.6: Τάσεις Ζυγών για Μέγιστη Αιολική Παραγωγή.

Ζυγός	ΔΔΖ κλειστοί		ΔΔΖ ανοιχτοί	
	Μέτρο τάσης (αμ)	Γωνία τάσης (μοίρες)	Μέτρο τάσης (αμ)	Γωνία τάσης (μοίρες)
A61	1,0675	1,66	1,0686	1,60
A62	1,0675	1,66	1,0686	1,60
B61	1,0680	2,29	1,0685	2,30
B62	1,0680	2,29	1,0685	2,30
Γ61	1,0716	2,44	1,0720	2,49
Γ62	1,0716	2,44	1,0720	2,49
GENERA61	1,0711	0,00	1,0711	0,00
A41	1,0489	3,38	1,0429	4,94
A42	1,0489	3,38	1,0666	1,04
B41	1,0718	8,46	1,0718	7,84
B42	1,0718	8,46	1,0718	9,36
Γ41	1,0613	7,64	1,0613	8,28
Γ42	1,0613	7,64	1,0613	7,56
Δ41	1,0722	10,86	1,0722	11,18
E41	1,0733	11,36	1,0733	12,26
H41	1,0676	10,69	1,0676	11,04
Θ41	1,0626	10,11	1,0626	10,74

Για τον υπολογισμό των ροών φορτίου στο εξεταζόμενο δίκτυο επιλέγεται η ταχεία αποζευγμένη αριθμητική επαναληπτική μέθοδος. Και στις τέσσερις περιπτώσεις, είτε οι διασυνδετικοί διακόπτες ζυγού στους ζυγούς ΥΤ είναι κλειστοί είτε ανοιχτοί, είτε η αιολική παραγωγή είναι μέγιστη είτε μηδενική, η λύση της ροής φορτίου του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας συγκλίνει μετά από τρεις επαναλήψεις. Η επιλογή αυτή έγινε γιατί η φόρτιση του δικτύου είναι πολύ μικρή, επομένως είναι δυνατή η απόζευξη ενεργού και άεργου ισχύος. Η ενεργός και άεργος ισχύς του άπειρου ζυγού, σε κάθε περίπτωση, φαίνονται στον Πίνακα 3.8. Στο αρχικό στιγμιότυπο λειτουργίας μέγιστης αιολικής παραγωγής ο ζυγός ταλάντωσης απορροφά ενεργό ισχύ και παράγει άεργο ισχύ, ανεξάρτητα από την κατάσταση των διασυνδετικών διακοπών στους ζυγούς ΥΤ. Ενώ για μηδενική αιολική παραγωγή ο άπειρος ζυγός τροφοδοτεί τα φορτία του δικτύου με ενεργό ισχύ, αλλά καταναλώνει άεργο ισχύ, ανεξάρτητα από την κατάσταση των διασυνδετικών διακοπών των ζυγών ΥΤ του δικτύου.

Πίνακας 3.7: Τάσεις Ζυγών για Μηδενική Αιολική Παραγωγή.

Ζυγός	ΔΔΖ κλειστοί		ΔΔΖ ανοιχτοί	
	Μέτρο τάσης (αμ)	Γωνία τάσης (μοίρες)	Μέτρο τάσης (αμ)	Γωνία τάσης (μοίρες)
A61	1,0675	1,66	1,0686	1,60
A62	1,0675	1,66	1,0686	1,60
B61	1,0680	2,29	1,0685	2,30
B62	1,0680	2,29	1,0685	2,30
Γ61	1,0716	2,44	1,0720	2,49
Γ62	1,0716	2,44	1,0720	2,49
GENERA61	1,0711	0,00	1,0711	0,00
A41	1,0489	3,38	1,0429	4,94
A42	1,0489	3,38	1,0666	1,04
B41	1,0718	8,46	1,0718	7,84
B42	1,0718	8,46	1,0718	9,36
Γ41	1,0613	7,64	1,0613	8,28
Γ42	1,0613	7,64	1,0613	7,56
Δ41	1,0722	10,86	1,0722	11,18
E41	1,0733	11,36	1,0733	12,26
H41	1,0676	10,69	1,0676	11,04
Θ41	1,0626	10,11	1,0626	10,74

Πίνακας 3.8: Ενεργός και Άεργος Ισχύς GENERA61.

Κατάσταση ΔΔΖ	Μέγιστη Αιολική Παραγωγή		Μηδενική Αιολική Παραγωγή	
	$P_G(MW)$	$Q_G(MVAr)$	$P_G(MW)$	$Q_G(MVAr)$
ΔΔΖ Κλειστοί	-314,2	12,60	227,7	-55,9
ΔΔΖ Ανοιχτοί	-314,6	7,6	227,7	-56,8

3.2 Ανάλυση N-1 Απώλειας Γραμμών

3.2.1 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα

Η στατική ασφάλεια ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας εξαρτάται από την πτώση τάσης στους ζυγούς του συστήματος και τα θερμικά όρια των κλάδων του. Σε περίπτωση που η πτώση τάσης κάποιου ζυγού είναι εκτός των επιτρεπτών ορίων για την ασφαλή λειτουργία του συστήματος, είτε παραβιαστεί το θερμικό όριο κάποιου κλάδου του, το δίκτυο καθίσταται μη ασφαλές. Χρησιμοποιώντας το κριτήριο N-1, γίνεται εκτίμηση της στατικής ασφάλειας του εξεταζόμενου δικτύου. Συγκεκριμένα, θεωρώντας ως διαταραχή την απώλεια οποιασδήποτε γραμμής του δικτύου, υπολογίζεται η ροή φορτίου του δικτύου για κάθε επιλεγμένη διαταραχή και εξετάζονται

τα ποσοστά φόρτισης των υπολοίπων κλάδων του συστήματος. Εξετάζονται όλες οι απώλειες γραμμών.

Αρχικά πραγματοποιείται εκτίμηση της στατικής ασφάλειας του δικτύου όταν η αιολική παραγωγή είναι μηδενική. Εφαρμόζοντας, λοιπόν, το κριτήριο N-1 και θεωρώντας ως διαταραχή την απώλεια κάποιας γραμμής του δικτύου, διαπιστώθηκε ότι το δίκτυο είναι στατικά ασφαλές μετά από κάθε διαταραχή. Τόσο οι γραμμές όσο και οι μετασχηματιστές του δικτύου έχουν πολύ χαμηλό ποσοστό φόρτισης σε αυτό το στιγμιότυπο λειτουργίας. Αφού το δίκτυο κρίθηκε ασφαλές σε όλες τις εξεταζόμενες διαταραχές, μετά την εφαρμογή του κριτηρίου N-1, ερευνάται η στατική ασφάλεια του όταν η διείσδυση αιολικής παραγωγής είναι μέγιστη.

Όταν κάθε αιολικός σταθμός εισάγει τη μέγιστη ενεργό ισχύ του στο δίκτυο, σύμφωνα με τον Πίνακα 3.2, η ενεργός ισχύς που καταναλώνει κάθε φορτίο παρουσιάζεται στον Πίνακα 3.4, ενώ οι τάσεις είναι υψηλές με τιμές μεγαλύτερες του 1,05 α.μ., χωρίς να ξεπερνούν το 1,1 α.μ. και θεωρούνται αποδεκτές για τη συγκεκριμένη ανάλυση. Μέσω της εφαρμογής του N-1 κριτηρίου και του υπολογισμού των ροών φορτίου του δικτύου εξετάζονται οι επιπτώσεις κάθε διαταραχής στο δίκτυο και ελέγχεται η φόρτιση κάθε κλάδου του. Στον Πίνακα 3.9 καταγράφονται όλα τα σενάρια που εξετάστηκαν στην παρούσα ενότητα και οι επιπτώσεις του καθενός στη στατική ασφάλεια του δικτύου.

Τα σενάρια 2A, 2B, 3A, 3B, 4A, 4B, 5B και 6A καθιστούν το σύστημα μη ασφαλές προκαλώντας την υπερφόρτιση κάποιου κλάδου του δικτύου, ενώ οι υπόλοιπες διαταραχές δεν απειλούν τη στατική του ασφάλεια. Όπως φαίνεται από τους πίνακες 3.10 και 3.11 η απώλεια των γραμμών B41-Δ41, A41-Δ41 και Γ42-H41 έχει την ίδια επίπτωση στο σύστημα, ανεξάρτητα από την κατάσταση των διασυνδεδειγμένων διακοπών ζυγών. Αντίθετα, η απώλεια της γραμμής A61-B61 προκαλεί υπερφόρτιση σε κλάδο του δικτύου όταν οι διασυνδεδειγμένοι διακόπτες είναι κλειστοί, ενώ όταν αυτοί της ΥΤ είναι ανοιχτοί δεν παρατηρείται το ίδιο πρόβλημα. Τέλος, όταν οι διασυνδεδειγμένοι διακόπτες στους ζυγούς ΥΤ είναι ανοιχτοί η απώλεια της γραμμής B42-H41 προκαλεί υπερφόρτιση του ενός από τους δύο μετασχηματιστές του υποσταθμού Γ.

Πίνακας 3.10: Υπερφορτίσεις με ΔΔΖ κλειστούς.

Κωδικός διαταραχής	ΓΜ εκτός λειτουργίας	Κλάδος με μέγιστη φόρτιση	Ποσοστό φόρτισης
2A	B41 - Δ41	A41 - Δ41	132%
3A	A41 - Δ41	B41 - Δ41	111%
		B61 - B41	123%
		B62 - B42	123%
4A	Γ42 - H41	A41 - Δ41	107%
		B61 - B41	114%
		B62 - B42	114%
5A	A61 - B61	A41 - Δ41	101%

Πίνακας 3.9: Εκτίμηση Στατικής Ασφάλειας για μέγιστη αιολική παραγωγή I (Απώλεια ΓΜ).

Σενάριο	ΓΜ εκτός λειτουργίας	Κατάσταση $\Delta\Delta Z$	Δίκτυο Στατικά Ασφαλές
1A	Καμία διαταραχή	Κλειστοί	ΝΑΙ
1B	Καμία διαταραχή	Ανοιχτοί	ΟΧΙ
2A	B41 - $\Delta 41$	Κλειστοί	ΟΧΙ
2B	B41 - $\Delta 41$	Ανοιχτοί	ΟΧΙ
3A	A41 - $\Delta 41$	Κλειστοί	ΟΧΙ
3B	A41 - $\Delta 41$	Ανοιχτοί	ΟΧΙ
4A	$\Gamma 42$ - H41	Κλειστοί	ΟΧΙ
4B	$\Gamma 42$ - H41	Ανοιχτοί	ΟΧΙ
5A	A61 - B61	Κλειστοί	ΟΧΙ
5B	A61 - B61	Ανοιχτοί	ΝΑΙ
6A	B42 - H41	Κλειστοί	ΝΑΙ
6B	B42 - H41	Ανοιχτοί	ΟΧΙ
7A	A - GENERA 61	Κλειστοί	ΝΑΙ
7B	A - GENERA 61	Ανοιχτοί	ΝΑΙ
8A	B - GENERA 61	Κλειστοί	ΝΑΙ
8B	B - GENERA 61	Ανοιχτοί	ΝΑΙ
9A	Γ - GENERA 61	Κλειστοί	ΝΑΙ
9B	Γ - GENERA 61	Ανοιχτοί	ΝΑΙ
10A	B42 - E41	Κλειστοί	ΝΑΙ
10B	B42 - E41	Ανοιχτοί	ΝΑΙ
11A	$\Gamma 41$ - $\Theta 41$	Κλειστοί	ΝΑΙ
11B	$\Gamma 41$ - $\Theta 41$	Ανοιχτοί	ΝΑΙ
12A	A61 - $\Gamma 61$	Κλειστοί	ΝΑΙ
12B	A61 - $\Gamma 61$	Ανοιχτοί	ΝΑΙ

Πίνακας 3.11: Υπερφορτίσεις με $\Delta\Delta Z$ ανοιχτούς.

Κωδικός διαταραχής	ΓΜ εκτός λειτουργίας	Κλάδος με μέγιστη φόρτιση	Ποσοστό φόρτισης
2B	B41 - $\Delta 41$	A41 - $\Delta 41$	132%
3B	A41 - $\Delta 41$	B41 - $\Delta 41$	111%
		B61 - B41	123%
		B62 - B42	123%
4B	$\Gamma 42$ - H41	B61 - B41	118%
		B62 - B42	118%
6B	B42 - H41	$\Gamma 62$ - $\Gamma 42$	104%

Στις επόμενες ενότητες παρουσιάζονται η λειτουργία του δικτύου χωρίς καμία διαταραχή και οι διαταραχές που δεν προκαλούν κάποια υπερφόρτιση σε κλάδο του συστήματος, ενώ, αναλύονται εκτενέστερα οι διαταραχές για τις οποίες το σύστημα δεν είναι ασφαλές. Εξετάζονται, επίσης, οι επιπτώσεις του ανοίγματος των διασυνδετικών διακοπών των ζυγών ΥΤ κατά τις εξεταζόμενες

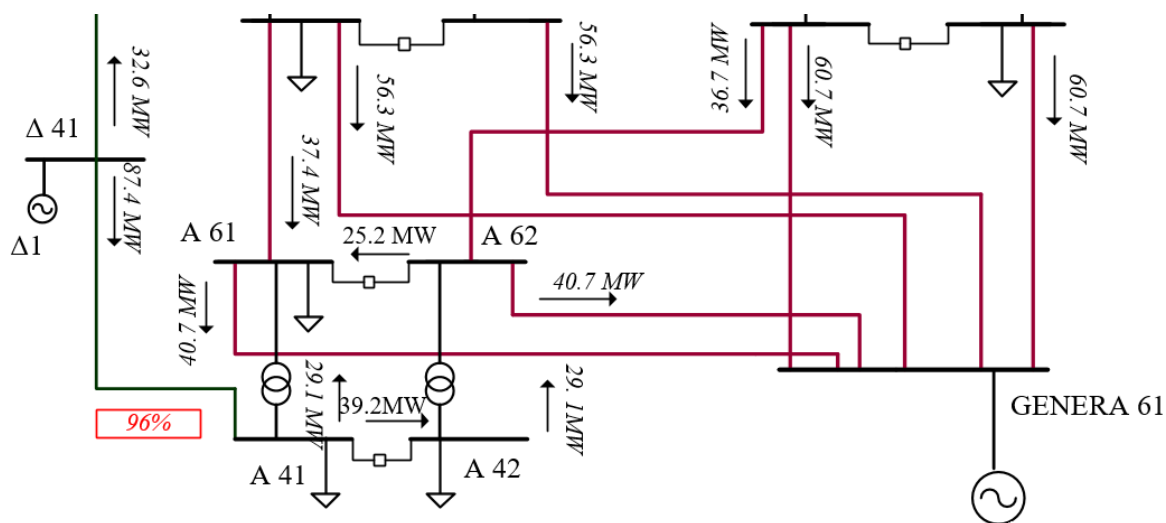
διαταραχές. Τα φορτία είναι σταθερές ισχύος, και ίσης με αυτής που παρουσιάζεται στον Πίνακα 3.4, καθώς και η παραγωγή κάθε αιολικού πάρκου είναι ίση με τη μέγιστη του, σύμφωνα με τον Πίνακα 3.2. Η κατάσταση των διασυνδεδειγμένων διακοπών του δικτύου επηρεάζει την αρχική φόρτιση των κλάδων που αποτελούν τα «τρωτά» του σημεία. Η ισχύς του άπειρου ζυγού, επίσης, μεταβάλλεται, όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.8. Στα Σχήματα που παρουσιάζονται οι ροές ενεργού ισχύος στο δίκτυο οι υπερφορτισμένοι κλάδοι αντιπροσωπεύονται με κόκκινο χρώμα, ενώ η γραμμή, σε κάθε εξεταζόμενη περίπτωση, που έχει τειθεί εκτός λειτουργίας αντιπροσωπεύεται με διακεκομμένη γραμμή.

3.2.2 Μέγιστη αιολική παραγωγή, χωρίς διαταραχή

Οι τάσεις των ζυγών στο εξεταζόμενο στιγμιότυπο λειτουργίας του δικτύου έχουν τις τιμές που παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.6. Στην ενότητα αυτή εξετάζεται η φόρτιση κάθε κλάδου του συστήματος και οι ροές ενεργού ισχύος όταν δεν σημειώνεται κάποια διαταραχή. Επίσης, επισημαίνονται τα στοιχεία του δικτύου με αρχική υψηλή φόρτιση, τόσο στη λειτουργία του με κλειστούς όλους τους διασυνδεδεικούς διακόπτες ζυγών όσο και με ανοιχτούς αυτούς των ζυγών ΥΤ.

Σενάριο 1Α, κλειστοί ΔΔΖ

Στην αρχική κατάσταση του δικτύου, όταν όλες οι γραμμές βρίσκονται εντός λειτουργίας, η φόρτιση της γραμμής A41-Δ41 είναι ίση με 96%. Το υψηλό ποσοστό φόρτισης οφείλεται στην παραγωγή του κοντινού πάρκου. Στο Σχήμα 3.2 φαίνεται το στιγμιότυπο του υποσταθμού Α, μετά τον υπολογισμό της αρχικής ροής φορτίου, οι ροές ενεργού ισχύος στους ζυγούς A41, A42 και A61, A62. Η γραμμή A41-Δ41, αποτελεί τη μια εκ των δύο οδύσεων του αιολικού σταθμού Δ1, και μέσω αυτής μεταφέρονται στο ζυγό A41 83,3MW από τα 120MW που παράγει το πάρκο, ενώ το θερμικό όριο της είναι 85MW. Στο Σχήμα 3.2 φαίνονται, επίσης, και τα MW που μεταφέρονται μέσω των διασυνδεδειγμένων διακοπών σε κάθε ζεύγος ζυγών.



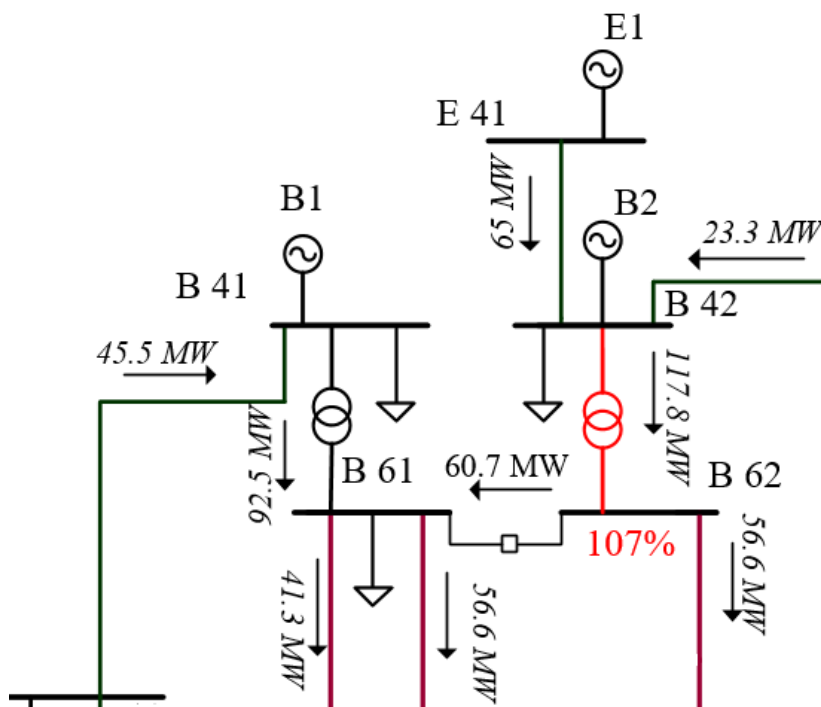
Σχήμα 3.2: Ροές ενεργού ισχύος στον Υποσταθμό Α. (Σενάριο 1Α)

Το υψηλό ποσοστό φόρτισης της γραμμής A41-Δ41 στην κατάσταση λειτουργίας χωρίς καμία διαταραχή, υποδεικνύει την υπερφόρτιση της, σε περίπτωση απώλειας της δεύτερης όδευσης του αιολικού σταθμού Δ1, καθιστώντας το δίκτυο μη ασφαλές μετά τη διαταραχή αυτή.

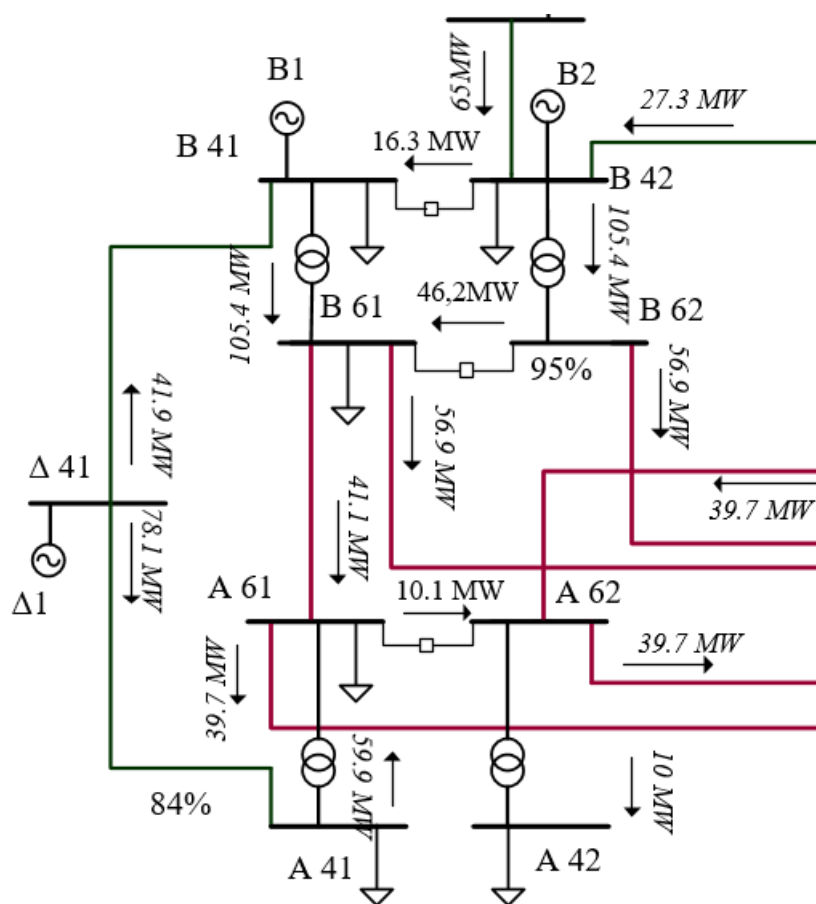
Σενάριο 1B, ανοιχτοί ΔΔΖ

Επιλύοντας τη ροή φορτίου, όταν οι διασυνδεδειμένοι διακόπτες των ζυγών ΥΤ είναι ανοιχτοί παρατηρείται ότι το δίκτυο είναι στατικά μη ασφαλές. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.3, όταν ο διασυνδεδειμένος διακόπτης μεταξύ των ζυγών B41 και B42 είναι ανοιχτός, ο μετασχηματιστής μεταξύ των ζυγών B62 και B42 είναι υπερφορτισμένος κατά 7%. Η υπερφόρτιση αυτή οφείλεται στην παραβίαση του θερμικού ορίου του μετασχηματιστή. Όταν ο διασυνδεδειμένος διακόπτης είναι κλειστός μεταφέρονται από το ζυγό B42 στο ζυγό B41 22,8MW, ενώ, με το άνοιγμα αυτού τα 22,8MW μεταφέρονται μέσω του μετασχηματιστή B62-B42 στο ζυγό B62. Το θερμικό όριο αυτού είναι 107,7MVA, ενώ στο στιγμιότυπο του Σχήματος 3.3 μεταφέρονται 117,3MVA.

Επομένως, προκειμένου το δίκτυο να είναι ασφαλές οι ζυγοί B41 και B42 πρέπει να συνδέονται, ο διασυνδεδειμένος διακόπτης πρέπει να είναι κλειστός. Το ποσοστό φόρτισης, μετά το κλείσιμο του, είναι 95% στους δύο παράλληλους μετασχηματιστές του υποσταθμού Β. Στο Σχήμα 3.4, φαίνονται οι ροές ενεργού ισχύος στους υποσταθμούς Α και Β. Τέλος, η φόρτιση της γραμμής A41 - Δ41, όταν οι διακόπτες των ζυγών A41-A42 και Γ41-Γ42 είναι ανοιχτοί, είναι 84%. Επομένως η αλλαγή αυτή της κατάστασης των διασυνδεδειμένων διακοπών λειτουργεί διορθωτικά για το εξεταζόμενο δίκτυο.



Σχήμα 3.3: Ροές ενεργού ισχύος στους Υποσταθμούς Α και Β.(Σενάριο 1B)



Σχήμα 3.4: Ροές ενεργού ισχύος στους Υποσταθμούς Α και Β.(Σενάριο 1B, Βελτίωση)

Συνεπώς στα σενάρια Β (ανοιχτοί διασυνδεδεικτοί διακόπτες ζυγών) θεωρείται ότι ανοίγουν μόνο οι διασυνδεδεικτοί διακόπτες των ζυγών ΥΤ στους υποσταθμούς Α και Γ.

3.2.3 Διαταραχές που δεν προκαλούν υπερφόρτιση (Ανάλυση απώλειας γραμμών)

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται οι διαταραχές που επηρεάζουν τη ροή ενεργού ισχύος στο δίκτυο αλλά δεν επηρεάζουν τη στατική του ασφάλεια. Η ανάλυση αυτή πραγματοποιείται τόσο για διασυνδεδεικτούς διακόπτες ζυγών κλειστούς όσο και για αυτούς των ζυγών ΥΤ ανοιχτούς.

- *Σενάρια 7Α και 7Β:* Η απώλεια μιας εκ των δύο γραμμών που συνδέουν τον άπειρο ζυγό με τον υποσταθμό Α δεν προκαλεί σοβαρές μεταβολές στις ροές ενεργού ισχύος του συστήματος. Εάν συμβεί η ίδια διαταραχή σε κατάσταση λειτουργίας με ανοιχτούς τους διασυνδεδεικτούς διακόπτες ζυγών ΥΤ, μέσω του μετασχηματιστή Α61-Α41 μεταφέρονται 59MW στο ζυγό Α61, ενώ μέσω του μετασχηματιστή Α62-Α42 μεταφέρονται 10MW στο ζυγό Α42.
- *Σενάρια 8Α και 8Β:* Η απώλεια μιας εκ των δύο γραμμών που συνδέουν τον άπειρο ζυγό με τον υποσταθμό Β προκαλεί την αύξηση του ποσού ενεργού ισχύος που μεταφέρεται από την εναπομένουσα γραμμή ΥΥΤ. Όταν και οι δύο παράλληλες γραμμές βρίσκονται εντός λειτουργίας η ροή ενεργού ισχύος στην κάθε μία από αυτές είναι 56,9MW, ενώ μετά τη διαταραχή μεταφέρονται 80MW. Αφού οι διασυνδεδεικτοί διακόπτες στον υποσταθμό Β παραμένουν πάντοτε κλειστοί, προκειμένου το δίκτυο να είναι στατικά ασφαλές, το άνοιγμα των των διακοπτών ζυγών στους άλλους δύο υποσταθμούς δεν επηρεάζει τις ροές στο δίκτυο, κατά τη συγκεκριμένη διαταραχή.
- *Σενάρια 9Α και 9Β:* Η απώλεια μιας εκ των δύο γραμμών που συνδέουν τον άπειρο ζυγό με τον υποσταθμό Γ αυξάνει τη ροή ισχύος στην εναπομένουσα γραμμή ΥΥΤ, από 60,7MW σε 66,5MW. Εάν οι διασυνδεδεικτοί διακόπτες ζυγών ΥΤ είναι ανοιχτοί ο μετασχηματιστής Γ61-Γ41 επιβαρύνεται με τη μεταφορά μεγαλύτερου ποσού ενεργού ισχύος.
- *Σενάρια 10Α και 10Β:* Η απώλεια της γραμμής Β42 - Ε41 προκαλεί την αποκοπή του Α/Π Ε1, επομένως χάνεται μια πηγή τροφοδότησης του ζυγού Β42. Στην κατάσταση λειτουργίας με ανοιχτούς διασυνδεδεικτούς διακόπτες μειώνεται το ποσό ενεργού ισχύος στη γραμμή Β42-Η1. Αυτό συμβαίνει γιατί εάν οι ζυγοί Γ41 και Γ42 δεν συνδέονται χάνεται μια πηγή τροφοδότησης του ζυγού Γ42, επομένως, το Α/Π Η1 αυξάνει το ποσό των MW που εισάγονται στο ζυγό Γ42.
- *Σενάρια 11Α και 11Β:* Η απώλεια της γραμμής Γ41 - Θ41 προκαλεί την πλήρη αποκοπή του Α/Π Θ1 και την απώλεια μιας πηγής τροφοδότησης του ζυγού Γ41. Στην περίπτωση κλειστών διασυνδεδεικτών διακοπτών η απώλεια αυτή αντισταθμίζεται με τη μεταφορά μέσω του αυτού 36,9MW από το ζυγό Γ42. Όταν, όμως, οι δύο ζυγοί δεν συνδέονται μόνο το Α/Π Γ1 εισάγει 55MW στο ζυγό Γ41, από τα οποία τα 32MW καταναλώνονται στο φορτίο

που είναι συνδεδεμένο στο ζυγό και μεταφέρονται μέσω του μετασχηματιστή Γ61-Γ41 μόλις 23MW στο ζυγό ΥΥΤ του υποσταθμού Γ.

- *Σενάρια 12Α και 12Β:* Η απώλεια της γραμμής Α61 - Γ61, σε κατάσταση λειτουργίας με κλειστούς διακόπτες ζυγών ΥΤ προκαλεί μείωση στην εισερχόμενη στο ζυγό Α61 ενεργό ισχύ. Ενώ όταν οι διασυνδεδετικοί διακόπτες των ζυγών ΥΤ είναι ανοιχτοί ο μετασχηματιστής Α61-Α41 επιβαρύνεται με τη μεταφορά 61,7MW προς το ζυγό Α61, ενώ μέσω του μετασχηματιστή Α62-Α42 μεταφέρονται 10MW στο ζυγό Α42.

3.2.4 Απώλεια γραμμής Β41 - Δ41

Η απώλεια της γραμμής Β41-Δ41 προκαλεί την υπερφόρτιση της γραμμής Α41-Δ41 κατά 32%. Κατά τη διαταραχή αυτή το σύστημα είναι μη ασφαλές, ανεξάρτητα από την κατάσταση των διασυνδεδετικών διακοπών ζυγών. Το αιολικό πάρκο Δ1 χάνει τη μια εκ των δύο οδύσεων του, επομένως, όλη η παραγωγή του μεταφέρεται μέσω της γραμμής Α41-Δ41, το ποσό ενεργού ισχύος είναι ίσο με 120MW.

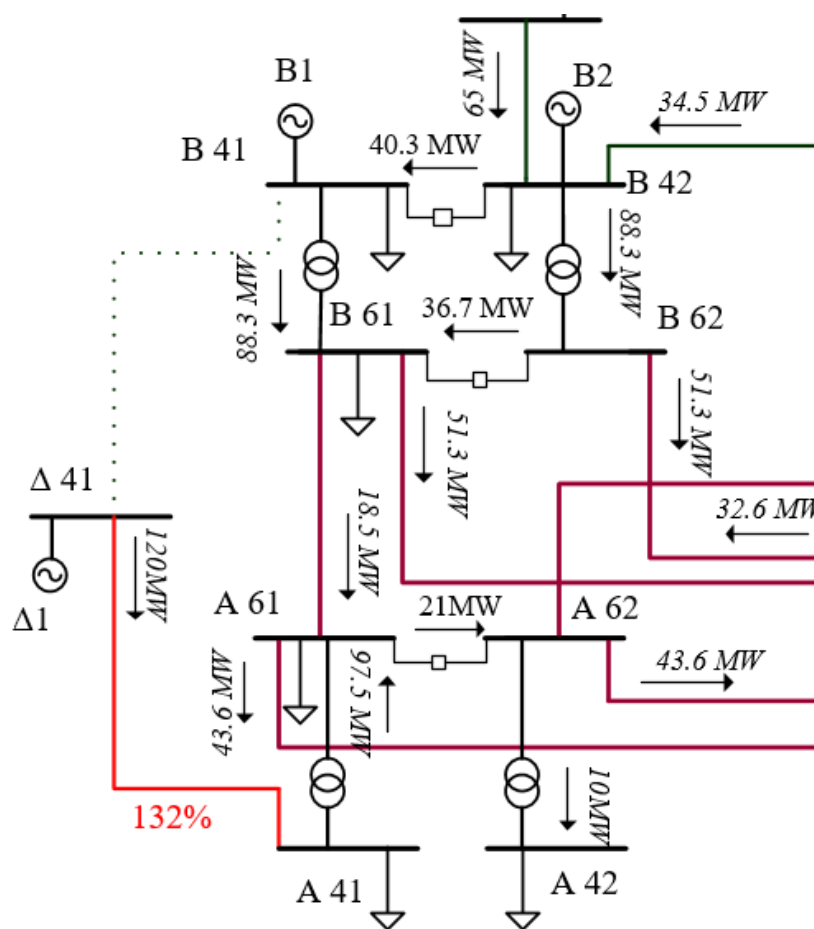
Σενάριο 2Α, κλειστοί ΔΔΖ

Στο Σχήμα 3.5 παρουσιάζονται οι ροές ενεργού ισχύος στους υποσταθμούς Α και Β. Όλη η παραγωγή του αιολικού σταθμού Δ1 μεταφέρεται μέσω της Α41-Δ41 στους ζυγούς Α41 και Α42. Επομένως, η φόρτιση των δύο παράλληλων μετασχηματιστών του υποσταθμού Α αυξάνεται, αφού μεταφέρουν μεγαλύτερο ποσό ενεργού ισχύος στο υπόλοιπο δίκτυο. Στους ζυγούς Α61 και Α62 εισέρχονται λιγότερα MW από τους ζυγούς Β62 και Γ62.

Μετά τη διαταραχή ο ζυγός Β41 τροφοδοτείται από το Α/Π Β2, μέσω του διασυνδεδετικού διακόπτη και όχι, πλέον από το Α/Π Δ1. Αποτέλεσμα αυτού είναι να μειωθεί η ενεργός ισχύς, που μέσω των δύο παράλληλων μετασχηματιστών, μεταφέρεται στο υπόλοιπο δίκτυο. Η ροή ενεργού ισχύος από τους ζυγούς Β61 και Β62 προς τους ζυγούς Α61, Α62 και τον άπειρο ζυγό μειώνεται. Αντίθετα, η ροή ενεργού ισχύος από και προς τον υποσταθμό Γ δεν μεταβάλλεται από τη διαταραχή.

Αντιμετώπιση της υπερφόρτισης της ΓΜ Α41 - Δ41

Όταν το αιολικό πάρκο Δ1 χάνει τη μια εκ των δύο οδύσεων του το σύστημα δεν είναι N-1 ασφαλές, μετά την απώλεια της γραμμής Β41-Δ41. Το ποσοστό φόρτισης του κλάδου μειώνεται αν μειωθεί η ενεργός ισχύς που μεταφέρεται μέσω αυτού. Αν το ανώτατο όριο παραγωγής του Δ1 γίνει ίσο με την τιμή των 84MW, αντί για 120MW, ώστε να μην παραβιάζεται το θερμοκτικό όριο της γραμμής Α41-Δ41, το νέο ποσοστό φόρτισης της είναι 93%. Το Α/Π Δ1 εισάγει στο δίκτυο το 70% της μέγιστης παραγωγής του και δεν παρατηρείται κάποιο άλλο πρόβλημα υπερφόρτισης κατά την απώλεια της γραμμής Β41-Δ41. Μεταβάλλεται μόνο το ανώτατο όριο παραγωγής του αιολικού σταθμού Δ1 προκειμένου το δίκτυο να είναι ασφαλές κατά την εξεταζόμενη διαταραχή, ενώ τα υπόλοιπα Α/Π εισάγουν τη μέγιστη ενεργό ισχύ τους.



Σχήμα 3.6: Ροές ενεργού ισχύος στους Υποσταθμούς A και B (Σενάριο 2B).

Οι ροές ισχύος στον υποσταθμό B είναι ίδιες με την προηγούμενη περίπτωση, αφού ο συγκεκριμένος διασυνδεδετικός διακόπτης παραμένει κλειστός για λόγους στατικής ασφάλειας. Η φόρτιση των δύο παράλληλων μετασχηματιστών του υποσταθμού μειώνεται λόγω του μειωμένου ποσού ενεργού ισχύος που εισέρχεται στους ζυγούς B41 και B42, έχει χαθεί η σύνδεση με το Δ1. Σχετικά με τον υποσταθμό Γ, οι ροές ισχύος είναι παρόμοιες με την προηγούμενη κατάσταση του συγκεκριμένου διακόπτη, αλλά οι δύο μετασχηματιστές έχουν διαφορετικό ποσοστό φόρτισης, λόγω της διαφορετικής ροής ενεργού ισχύος στον καθένα.

Αντιμετώπιση της υπερφόρτισης της ΓΜ A41 - Δ41

Το Α/Π Δ1 εισάγει στο δίκτυο το 70% της μέγιστης παραγωγής του προκειμένου να μειωθεί το ποσοστό φόρτισης της γραμμής A41-Δ41, ενώ η παραγωγή των υπόλοιπων αιολικών σταθμών δε χρειάζεται να περιοριστεί. Όπως είναι αναμενόμενο, μετά τη ρύθμιση αυτή το πρόβλημα διορθώνεται, αφού το νέο ποσοστό φόρτισης της γραμμής είναι 92%. Μειώνεται και το ποσοστό φόρτισης του μετασχηματιστή A61-A41, το νέο ποσοστό είναι ίσο με 63%.

Συνεπώς για να αποφευχθεί η υπερφόρτιση της γραμμής A41-Δ41 μετά την απώλεια της γραμμής

B41-Δ41 το όριο παραγωγής του αιολικού σταθμού πρέπει να περιοριστεί στο 70% της ονομαστικής ισχύος του. Η κατάσταση των διασυνδεδειγμένων διακοπών των ζυγών ΥΤ στους υποσταθμούς Α και Γ δεν μεταβάλλουν τις επιπτώσεις που έχει αυτή η διαταραχή στο δίκτυο. Στον Πίνακα 3.12 παρουσιάζονται τα όρια παραγωγής του Α/Π Δ1 για τα σενάρια 2Α και 2Β.

Πίνακας 3.12: Απώλεια ΓΜ B41-Δ41, Όρια παραγωγής Α/Π.

Σενάριο	Αιολικό Πάρκο	Όριο (MW) Παραγωγής	Ποσοστό της ονομαστικής ισχύος
2Α	Δ1	84	70%
2Β	Δ1	84	70%

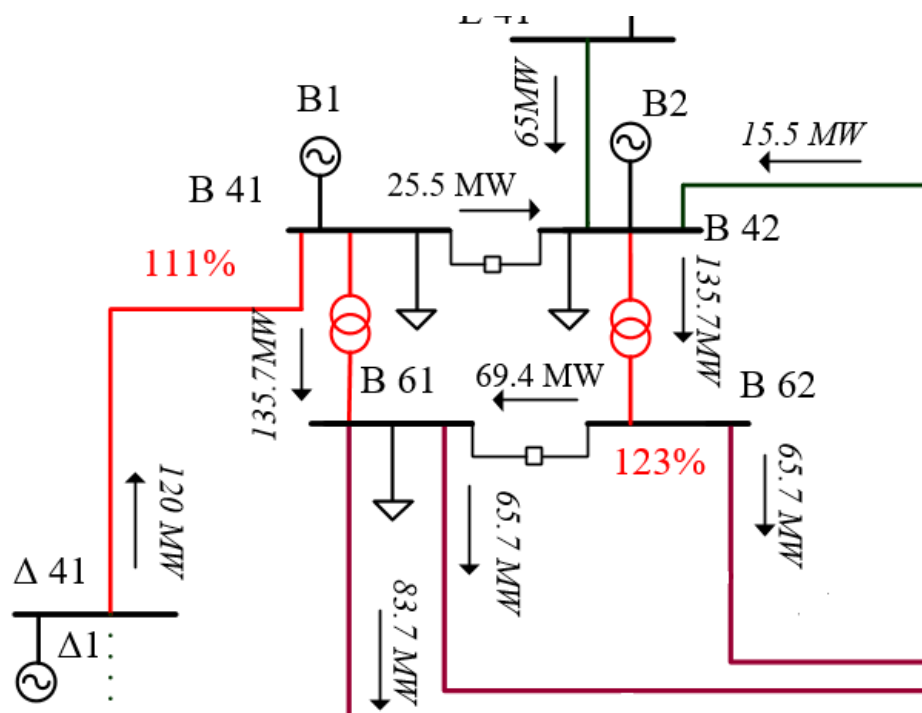
3.2.5 Απώλεια γραμμής Α41 - Δ41

Όταν η γραμμή Α41-Δ41 τεθεί εκτός λειτουργίας, ο αιολικός σταθμός Δ1 χάνει τη δεύτερη όδευση του, επομένως, όλη του η παραγωγή μεταφέρεται στον υποσταθμό Β μέσω της γραμμής Β41-Δ41. Η γραμμή Β41-Δ41 υπερφορτίζεται κατά 11% και οι μετασχηματιστές του υποσταθμού Β υπερφορτίζονται κατά 23%. Η αυξημένη ροή ενεργού ισχύος σε αυτούς τους κλάδους του δικτύου παραβιάζει τα θερμικά τους όρια. Η διαταραχή αυτή καθιστά το σύστημα ανασφαλές είτε οι διασυνδεδειγμένοι διακόπτες των ζυγών είναι κλειστοί είτε ανοιχτοί.

Σενάριο 3Α, κλειστοί ΔΔΖ

Στο Σχήμα 3.7 παρουσιάζονται οι ροές ενεργού ισχύος στους υποσταθμούς Α και Β μετά τη διαταραχή, καθώς και οι υπερφορτισμένοι κλάδοι. Μετά την απώλεια της γραμμής Α41-Δ41, μέσω της Β41-Δ41 μεταφέρονται 120MW, ενώ το θερμικό της όριο είναι 105MVA. Αντίστοιχα, μέσω των δύο παράλληλων μετασχηματιστών του υποσταθμού Β μεταφέρονται 135MW ενώ το θερμικό τους όριο είναι 111,1MVA. Η απώλεια αυτής της γραμμής έχει ως αποτέλεσμα οι ζυγοί ΥΤ του υποσταθμού Α να χάσουν τη μοναδική πηγή τροφοδότησης τους, το Α/Π Δ1. Επομένως, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.7, οι ζυγοί Α41 και Α42 τροφοδοτούνται, πλέον από τους ζυγούς Α61 και Α62, τους οποίους τροφοδοτούσαν στη λειτουργία χωρίς διαταραχές.

Ο υποσταθμός Β τροφοδοτεί, μετά τη διαταραχή, τους ζυγούς Β61 και Β62, αλλά και τον άπειρο ζυγό με όλη την παραγωγή του Δ1. Λόγω του αυξημένου ποσού ενεργού ισχύος που εισάγεται στο ζυγό Β41, μέσω του διασυνδεδειγμένου διακόπτη μεταφέρονται 25,5MW στον Β42. Στο αρχικό στιγμιότυπο λειτουργίας μεταφέρονται από το ζυγό Β42 προς τον Β41 22,8MW. Παρατηρείται, όμως, και αύξηση της φόρτισης των δύο παράλληλων μετασχηματιστών του υποσταθμού Γ, αφού αυξάνεται το ποσό ενεργού ισχύος που εισάγει ο ζυγός Γ62 στο ζυγό Α62. Απόρροια αυτού είναι η αύξηση της φόρτισης της γραμμής Γ42-Η41, γιατί ο αιολικός σταθμός Η1 εισάγει περισσότερη ενεργό ισχύ στο ζυγό Γ42 αντί του Β42. Προκειμένου να τροφοδοτηθεί επαρκώς ο ζυγός Α62, αυξάνεται και η ροή ενεργού ισχύος στη γραμμή Α62-Γ62.



Σχήμα 3.7: Ροές ενεργού ισχύος στους Υποσταθμούς A και B (Σενάριο 3A).

Αντιμετώπιση της υπερφόρτισης της ΓΜ B41 - Δ41

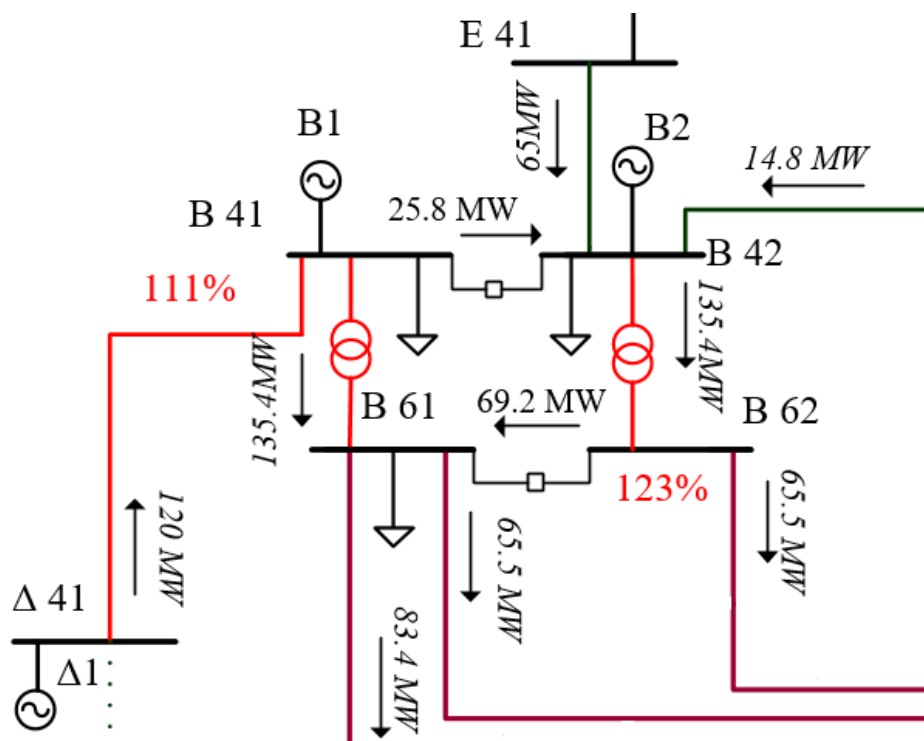
Εάν μειωθεί η ροή ενεργού ισχύος στην υπερφορτισμένη γραμμή, η φόρτιση της θα μειωθεί και δεν θα τεθεί εκτός λειτουργίας. Η μείωση αυτή μπορεί να επιτευχθεί με κατάλληλη ρύθμιση του ανώτατου ορίου παραγωγής στο Α/Π Δ1. Αν το όριο του γίνει ίσο με 104MW, εισάγει, δηλαδή, στο δίκτυο το 87% της ονομαστικής του ισχύος, αποφεύγεται η απώλεια της γραμμής B41-Δ41 ως αλυσιδωτή απώλεια της αρχικής διαταραχής. Το πρόβλημα υπερφόρτισης, όμως, των δύο μετασχηματιστών του υποσταθμού B παραμένει. Αν και μεταφέρονται, μετά τη ρύθμιση αυτή, 129,9MW αντί για 135MW μέσω των δύο μετασχηματιστών στους ζυγούς B61 και B62, η φόρτιση είναι ακόμα υψηλή και ίση με 117% και στους δύο κλάδους.

Αντιμετώπιση υπερφόρτισης των Μ/Σ του υποσταθμού B

Προκειμένου να μην υπερφορτιστούν οι μετασχηματιστές του υποσταθμού B πρέπει να μειωθεί η ενεργός ισχύς που εισάγεται στους ζυγούς B41 και B42. Επομένως πρέπει να ρυθμιστούν κατάλληλα τα ανώτατα όρια παραγωγής των αιολικών πάρκων Δ1, B1, B2 και E1 έτσι ώστε η απώλεια της γραμμής A41-Δ41 να μην προκαλέσει την υπερφόρτιση κάποιου άλλου κλάδου του συστήματος. Ειδικότερα, το Α/Π B1 πρέπει να εισάγει στο δίκτυο 49MW, το B2 28MW και E1 46MW, εισάγουν στο δίκτυο το 70% της μέγιστης δυνατής παραγωγής τους, ενώ τα υπόλοιπα Α/Π εισάγουν την ονομαστική ισχύ τους. Μετά τη ρύθμιση η φόρτιση των δύο παράλληλων μετασχηματιστών γίνεται ίση με 98%.

Σενάριο 3B, ανοιχτοί ΔΔΖ

Όπως προαναφέρθηκε στην Ενότητα 3.2.2 ο διασυνδεδετικός διακόπτης των ζυγών B41 και B42, για να είναι ασφαλές το δίκτυο, παραμένει κλειστός. Επομένως, οι επιπτώσεις της απώλειας της γραμμής A41-Δ41 είναι ίδιες, ανεξάρτητα από την κατάσταση των διασυνδεδετικών διακοπών των ζυγών ΥΤ. Οι ροές ενεργού ισχύος στο δίκτυο φαίνονται στο Σχήμα 3.8 και είναι παρόμοιες με αυτές του Σχήματος 3.7, με τη διαφορά να έγκειται στην ανόμοια φόρτιση των μετασχηματιστών στους υποσταθμούς Α και Β, αφού λόγω των ανοιχτών διακοπών δεν είναι, πλέον, παράλληλοι. Το ποσοστό φόρτισης του μετασχηματιστή A61 – A41 είναι 14%, ενώ του A62-A42 είναι 9%. Στον υποσταθμό Β ο μετασχηματιστής Β61-Β41 είναι φορτισμένος κατά 95%, ενώ ο Β62-Β42 κατά 91%.



Σχήμα 3.8: Ροές ενεργού ισχύος στους Υποσταθμούς Α και Β (Σενάριο 3B)

Αντιμετώπιση υπερφορτίσεων ΓΜ Β41 - Δ41 και Μ/Σ Υποσταθμού Β

Η στρατηγική αντιμετώπισης του προβλήματος υπερφόρτισης τόσο της γραμμής όσο και των δύο μετασχηματιστών είναι ίδια με αυτή της περίπτωσης των κλειστών διασυνδεδετικών διακοπών. Η νέα φόρτιση της γραμμής είναι 97%, ενώ των δύο μετασχηματιστών είναι 98%. Τα όρια παραγωγής των Α/Π Β1, Β2 Δ1 και Ε1, προκειμένου το δίκτυο να είναι στατικά ασφαλές μετά την απώλεια της γραμμής A41-Δ41 είναι ίδια με αυτά που ορίστηκαν στο σενάριο 3Α. Είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι παρόλο που και ο αιολικός σταθμός Η1 τροφοδοτεί τον ζυγό Β41, και τον Β42 μέσω του κλειστού διακόπτη, επιλέγεται να μην μεταβληθεί το όριο παραγωγής αυτού του

σταθμού και να συνεχίζει να εισάγει τη μέγιστη παραγωγή του στο δίκτυο κατά την εξεταζόμενη διαταραχή.

Προκειμένου να μην προκληθεί η υπερφόρτιση της γραμμής B41-Δ41 και των δύο παράλληλων μετασχηματιστών του υποσταθμού B, τα όρια παραγωγής των αιολικών πάρκων Δ1, B1, B2 και E1 πρέπει να ρυθμιστούν κατάλληλα. Παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.13 τα όρια παραγωγής των σταθμών για τα σενάρια 3A και 3B.

Πίνακας 3.13: Απώλεια ΓΜ A41-Δ41, Όρια παραγωγής Α/Π.

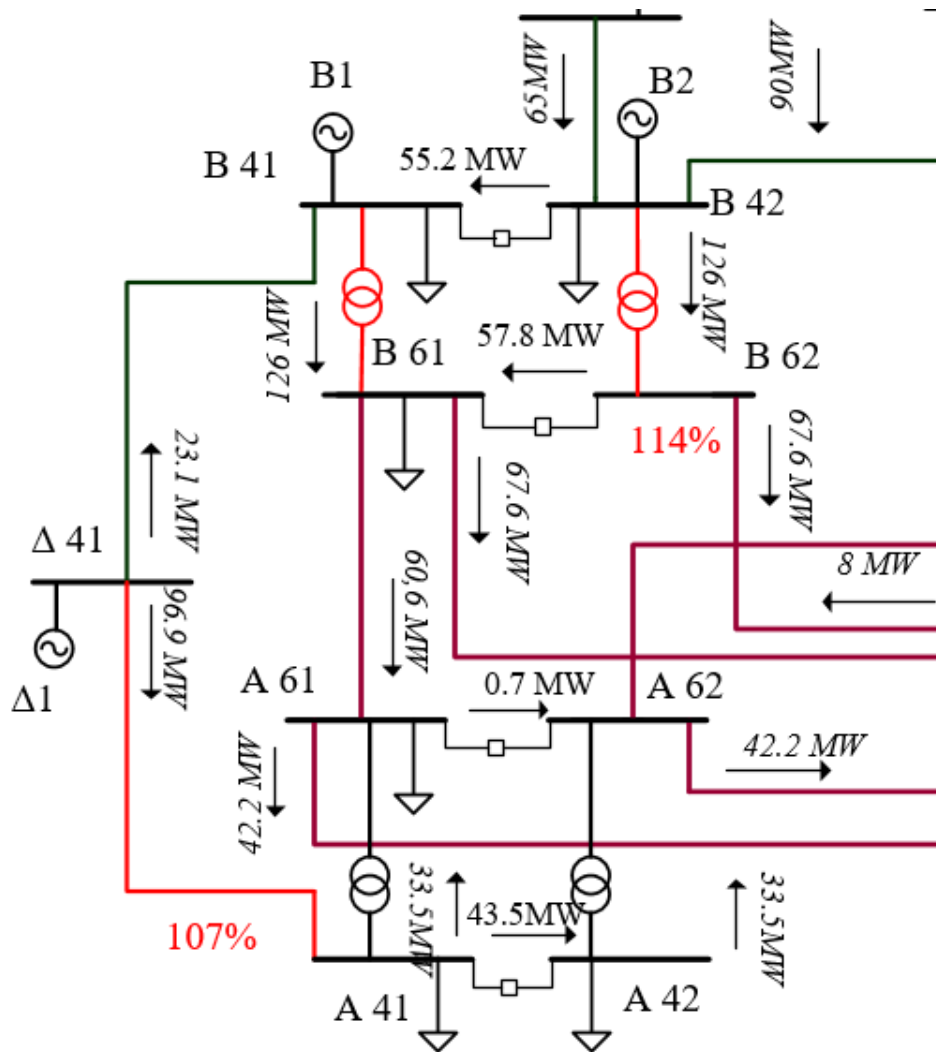
Σενάριο	Αιολικό Πάρκο	Όριο (MW) Παραγωγής	Ποσοστό της ονομαστικής ισχύος
3A	Δ1	104	87%
	B1	49	70%
	B2	28	70%
	E1	46	70%
3B	Δ1	104	87%
	B1	49	70%
	B2	28	70%
	E1	46	70%

3.2.6 Απώλεια γραμμής Γ42 - Η41

Όταν η γραμμή Γ42-Η41 τεθεί εκτός λειτουργίας προκαλείται η υπερφόρτιση της γραμμής A41-Δ41 καθώς και των δύο παράλληλων μετασχηματιστών του υποσταθμού B, άρα το σύστημα δεν είναι ασφαλές. Η διαταραχή αυτή καθιστά το σύστημα μη ασφαλές, ανεξάρτητα από την κατάσταση των διασυνδετικών διακοπών των ζυγών ΥΤ.

Σενάριο 4A, κλειστοί ΔΔΖ

Η γραμμή A41-Δ41 υπερφορτίζεται κατά 7%, ενώ οι δύο μετασχηματιστές του υποσταθμού B υπερφορτίζονται κατά 14%. Η θερμική υπερφόρτιση οφείλεται στο αυξημένο ποσό ενεργού ισχύος που μεταφέρεται τόσο μέσω της γραμμής όσο και μέσω των δύο μετασχηματιστών. Στο Σχήμα 3.9 φαίνονται οι ροές ενεργού ισχύος στους υποσταθμούς A και B μετά την απώλεια της γραμμής. Ο αιολικός σταθμός Η1 χάνει μετά τη διαταραχή αυτή τη μια εκ των δύο οδύσεων του. Επομένως, όλη η παραγωγή του Η1 εισάγεται στο ζυγό B42 μέσω της γραμμής B42-Η41, η φόρτιση της είναι 89% ενώ πριν τη διαταραχή ήταν 33%. Στο συγκεκριμένο κλάδο, λόγω της χαμηλής φόρτισης στο αρχικό στιγμιότυπο λειτουργίας, δε δημιουργείται πρόβλημα υπερφόρτισης. Μέσω των μετασχηματιστών του υποσταθμού B μεταφέρονται 126MW, ενώ το θερμικό όριο του καθενός είναι 111,1MVA, λόγω της αύξησης του ποσού ενεργού ισχύος που εισάγεται στο ζυγό B42, μετά τη διαταραχή. Αντίθετα, η φόρτιση της γραμμής B41-Δ41 μειώνεται, γιατί το Α/Π Δ1 δεν εισάγει 32,6MW, όπως στο αρχικό στιγμιότυπο λειτουργίας, αλλά μόνο 23,1MW. Αυτό συμβαίνει γιατί η τροφοδότηση του ζυγού ΥΤ του υποσταθμού B, B41 και B42, καλύπτεται από



Σχήμα 3.9: Ροές ενεργού ισχύος στους Υποσταθμούς A και B (Σενάριο 4A).

τον αολικό σταθμό H1.

Επομένως, μέσω της A41-Δ41 εισάγονται στο ζυγό A41 92MW, ενώ το θερμικό όριο της γραμμής είναι 85MW. Επίσης, αυξάνεται και η φόρτιση των δύο παράλληλων μετασχηματιστών του υποσταθμού A, λόγω της αυξημένης ροής ενεργού ισχύος. Εξαιτίας, όμως, του χαμηλού αρχικού ποσοστού φόρτισης τους δεν συνιστούν πρόβλημα για το δίκτυο. Τέλος, μεταβάλλονται και οι ροές ενεργού ισχύος στον υποσταθμό Γ, αφού λόγω της διαταραχής εισάγονται 39,1MW στο ζυγό Γ42 από το ζυγό Γ41, μέσω του διασυνδεδετικού διακόπτη.

Αντιμετώπιση υπερφόρτισης της ΓΜ A41 - Δ41 και των Μ/Σ του Υποσταθμού B

Η υπερφόρτιση των κλάδων αυτών του δικτύου είναι απόρροια της απώλειας της μίας από τις δύο οδεύσεις του Α/Π H1. Η γραμμή B42-H41 δεν υπερφορτίζεται λόγω της χαμηλής αρχικής φόρ-

τισης σε συνδυασμό με το θερμικό της όριο, το οποίο είναι 100MVA, ενώ η μέγιστη παραγωγή του Η1 είναι 90MVA. Στους δύο παράλληλους μετασχηματιστές, όμως, εισρέει ισχύς και από τα Α/Π που συνδέονται στους ζυγούς Β41 και Β42, γι'αυτό και υπερφορτίζονται. Ειδικότερα, το θερμικό τους όριο παραβιάζεται κατά 14,9MW. Με τη ρύθμιση του ανώτατου ορίου παραγωγής του αιολικού σταθμού Η1 στα 49MW, εισάγει, δηλαδή, το 53% της μέγιστης ενεργού ισχύος του, μειώνεται η φόρτιση των υπερφορτισμένων κλάδων. Η παραγωγή των υπόλοιπων αιολικών σταθμών δεν περιορίζεται. Σε αυτή την περίπτωση, η φόρτιση της γραμμής Α41-Δ41 είναι 99%, ενώ των δύο μετασχηματιστών 100%, αποφεύγοντας έτσι την απώλεια και αυτών των στοιχείων εξαιτίας της αρχικής διαταραχής.

Επιλέγεται οι αιολικοί σταθμοί Β1, Β2 και Ε1 να μη μεταβάλλουν το ανώτατο όριο παραγωγής τους, αλλά να εισάγουν στο δίκτυο την ονομαστική τους ισχύ.

Σενάριο 4B, ανοιχτοί ΔΔΖ

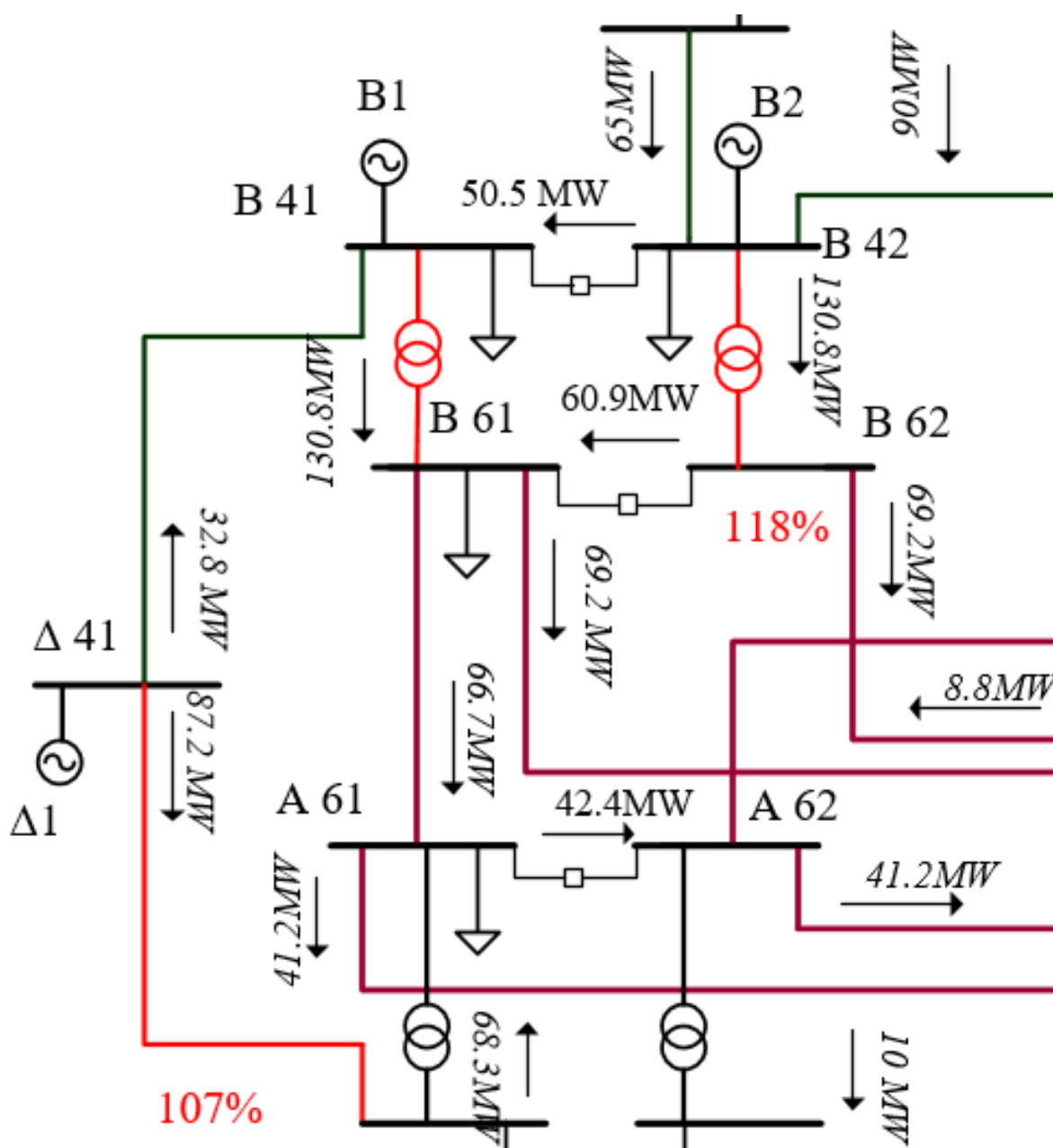
Η απώλεια της γραμμής Γ42-Η41, όταν οι διασυνδετικοί διακόπτες των ζυγών ΥΤ στους υποσταθμούς Α και Γ είναι ανοιχτοί, προκαλεί την υπερφόρτιση των δύο παράλληλων μετασχηματιστών του υποσταθμού Β αλλά όχι της γραμμής Α41-Δ41. Οι μετασχηματιστές Β61-Β41 και Β62-Β42 υπερφορτίζονται κατά 18%. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.10, η κατάσταση των διασυνδετικών διακοπών των ζυγών δεν μεταβάλλει σε μεγάλο βαθμό τις επιπτώσεις της εξεταζόμενης διαταραχής. Μέσω των δύο μετασχηματιστών μεταφέρονται 130,7MW στους ζυγούς ΥΥΤ του υποσταθμού, ενώ το θερμικό όριο τους είναι 111,1MW.

Οι μετασχηματιστές του υποσταθμού Α, οι οποίοι δεν είναι παράλληλοι μετά το άνοιγμα του διασυνδετικού διακόπτη, λειτουργούν με διαφορετικό ποσοστό φόρτισης. Συγκεκριμένα, μέσω του μετασχηματιστή Α61-Α41 μεταφέρονται 68,1MW στο ζυγό Α61, ενώ μέσω του Α62-Α42 μόλις 10MW. Το ποσοστό φόρτισης του πρώτου μετασχηματιστή είναι 65%, ενώ αρχικά ήταν 58%, και του δεύτερου μόλις 9%, και δεν αυξήθηκε μετά την απώλεια της γραμμής Γ42-Η41. Η ισχύς που εισέρχεται στον υποσταθμό Γ είναι λιγότερη, αφού χάνεται μια από τις πηγές τροφοδότησης του. Η ενεργός ισχύς που εισάγεται στον άπειρο ζυγό από τον υποσταθμό Γ είναι λιγότερη, αφού ο ζυγός Γ41 τροφοδοτείται μόνο από τα Α/Π Γ1 και Θ1, ενώ ο ζυγός Γ41 τροφοδοτείται από τον αιολικό σταθμό Γ2.

Αντιμετώπιση της υπερφόρτισης των Μ/Σ του υποσταθμού Β

Επειδή η αύξηση των MW που πρέπει να μεταφερθούν μέσω των δύο μετασχηματιστών Β61-Β41 και Β62-Β42 οφείλεται στην απώλεια της μίας εκ των δύο οδεύσεων του Η1, για την αντιμετώπιση της υπερφόρτισης αυτής ακολουθείται η στρατηγική με την οποία αντιμετωπίστηκαν οι προηγούμενες διαταραχές. Με τη ρύθμιση του ανώτατου ορίου παραγωγής του Η1, στα 42MW, να εισάγει, δηλαδή, το 47% της μέγιστης παραγωγής του, η φόρτιση των μετασχηματιστών είναι ίση με 100% και αποφεύγεται η απώλειά τους.

Συνεπώς για την αντιμετώπιση της εξεταζόμενης διαταραχής (απώλεια γραμμής Γ42-Η41) α-



Σχήμα 3.10: Ροές ενεργού ισχύος στον Υποσταθμό Β (Σενάριο 4B).

παιτείται η κατάλληλη ρύθμιση του ορίου παραγωγής του αιολικού σταθμού H1. Η τιμή του μεταβάλλεται ανάλογα με την κατάσταση των διασυνδετικών διακοπών των ζυγών ΥΤ στους υποσταθμούς Α και Γ. Οι τιμές του για τα σενάρια 4Α και 4Β παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.14.

3.2.7 Απώλεια γραμμής Α61 - Β61

Η απώλεια της γραμμής Α61-Β61, η οποία συνδέει τους υποσταθμούς Α και Γ προκαλεί την υπερφόρτιση της γραμμής Α41-Δ41, κατά 3%. Μέσω αυτής μεταφέρονται 91,7MW, ενώ το θερμικό όριο της γραμμής είναι 85MVA. Το σύστημα καθίσταται ανασφαλές από τη διαταραχή

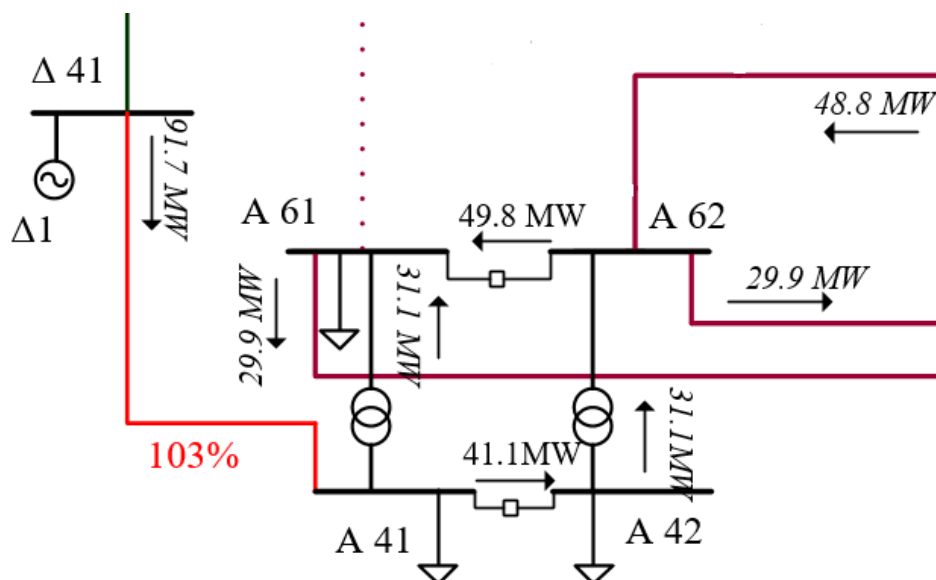
Πίνακας 3.14: Απώλεια ΓΜ Γ42-H41, Όρια παραγωγής Α/Π.

Σενάριο	Αιολικό Πάρκο	Όριο (MW) Παραγωγής	Ποσοστό της ονομαστικής ισχύος
4A	H1	49	53%
4B	H1	42	47%

αυτή, μόνο όταν οι διασυνδεδειμένοι διακόπτες των ζυγών ΥΤ στους υποσταθμούς Α και Γ είναι κλειστοί.

Σενάριο 5A, κλειστοί ΔΔΖ

Αφού η μία πηγή τροφοδότησης του ζυγού Α61-Α62 χάνεται, όταν η γραμμή Α61-Β61 τεθεί εκτός λειτουργίας, αυξάνεται το ποσό που εισάγεται από το Α/Π Δ1 στο ζυγό Α41. Εισάγονται 91,7MW, ενώ το θερμικό όριο της γραμμής είναι 85MW, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.11. Αντίθετα, το ποσοστό φόρτισης των δύο παράλληλων μετασχηματιστών του υποσταθμού Β μειώνεται, καθώς μειώνεται και η ροή ενεργού ισχύος από τον αιολικό σταθμό Δ1. Επίσης, μειώνεται και η ροή ισχύος από το Α/Π Ε1 στο ζυγό Β42, γιατί ο υποσταθμός Γ πρέπει να αυξήσει τη ροή ισχύος προς τον υποσταθμό Α, προκειμένου να τροφοδοτούνται επαρκώς τα φορτία του. Αποτέλεσμα αυτού είναι και η αυξημένη ροή στη γραμμή Γ42-Η41, προκειμένου να αυξηθεί το ποσό ενεργού ισχύος που εισάγεται στον υποσταθμό Γ.



Σχήμα 3.11: Ροές ενεργού ισχύος στον Υποσταθμό Α (Σενάριο 5A)

Στο Σχήμα 3.11 παρουσιάζονται οι ροές ενεργού ισχύος στον υποσταθμό Α και υποδεικνύεται η υπερφόρτιση της γραμμής Α41-Δ41.

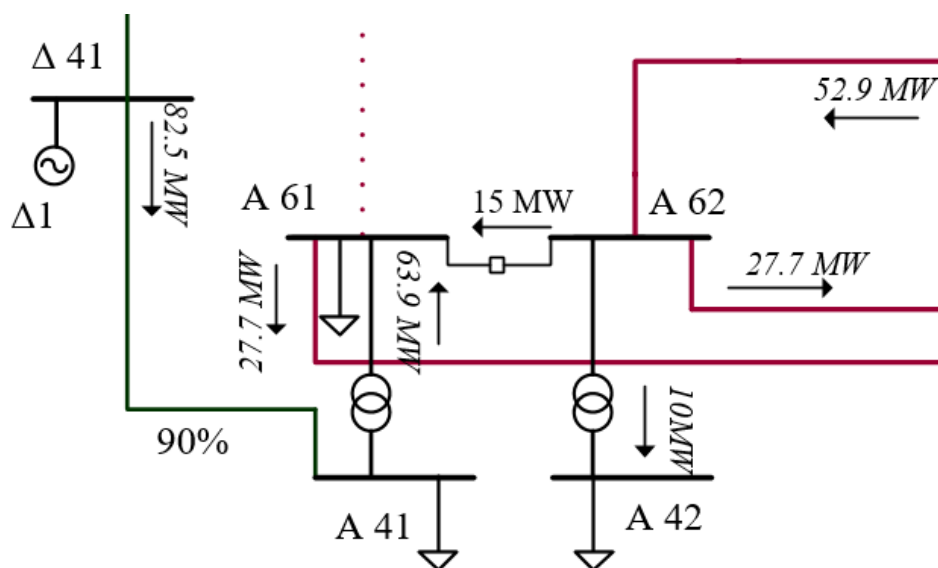
Αντιμετώπιση της υπερφόρτισης της ΓΜ A41 - Δ41

Προκειμένου να μειωθεί η φόρτιση της γραμμής A41-Δ41 προτείνονται δύο στρατηγικές αντιμετώπισης:

- Αν το ανώτατο όριο παραγωγής του Α/Π Δ1 μεταβληθεί από 120MW όχι σε 84MW αλλά σε μια τρίτη τιμή ίση με 113MW, εισάγει, δηλαδή, το 94% της μέγιστης παραγωγής του, το ποσοστό φόρτισης της γραμμής μειώνεται σε 98%.
- Ένας διαφορετικός τρόπος αντιμετώπισης είναι το άνοιγμα του διακόπτη μεταξύ των ζυγών A41 και A42 χωρίς καμία μεταβολή στα όρια παραγωγής των αιολικών σταθμών του συστήματος. Μετά το άνοιγμα του διακόπτη η φόρτιση της γραμμής μειώνεται σε 91%.

Σενάριο 5B, ανοιχτοί ΔΔΖ

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.12, σε κατάσταση λειτουργίας με τους διασυνδεδετικούς διακόπτες των ζυγών ΥΤ ανοιχτούς, το σύστημα είναι στατικά ασφαλές μετά την απώλεια της γραμμής A61-B61. Στο ζυγό A41 εισέρχονται 82,5MW, επομένως, το θερμικό όριο της γραμμής δεν παραβιάζεται. Το ποσοστό φόρτισης σε αυτή την περίπτωση είναι 90%.



Σχήμα 3.12: Ροές ενεργού ισχύος στον Υποσταθμό Α (Σενάριο 5B).

Ο τρόπος αντιμετώπισης της απώλειας της γραμμής A61-B61 είναι το άνοιγμα του διασυνδεδετικού διακόπτη των ζυγών A41 και A42. Με αυτόν τον τρόπο αντιμετώπισης δεν μειώνεται η αιολική διείσδυση και παραμένει μέγιστη.

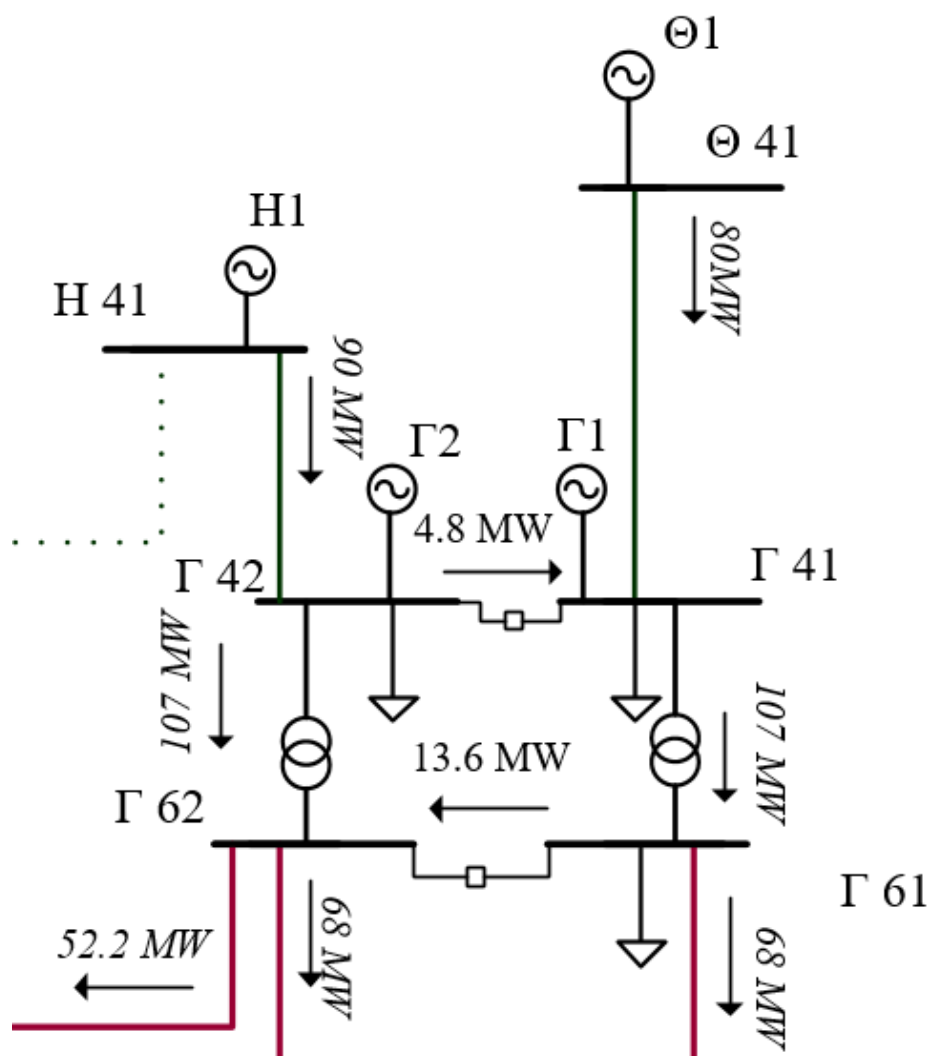
3.2.8 Απώλεια γραμμής B42 - H41

Η απώλεια της γραμμής B42-H41 καθιστά το σύστημα ανασφαλές όταν οι διασυνδεδετικοί διακόπτες των ζυγών ΥΤ στους υποσταθμούς Α και Γ είναι ανοιχτοί. Στην κατάσταση λειτουργίας με

κλειστούς τους διασυνδετικούς διακόπτες είναι στατικά ασφαλές και δεν προκαλούνται αλυσιδωτές απώλειες λόγω της αρχικής διαταραχής.

Σενάριο 6A, κλειστοί ΔΔΖ

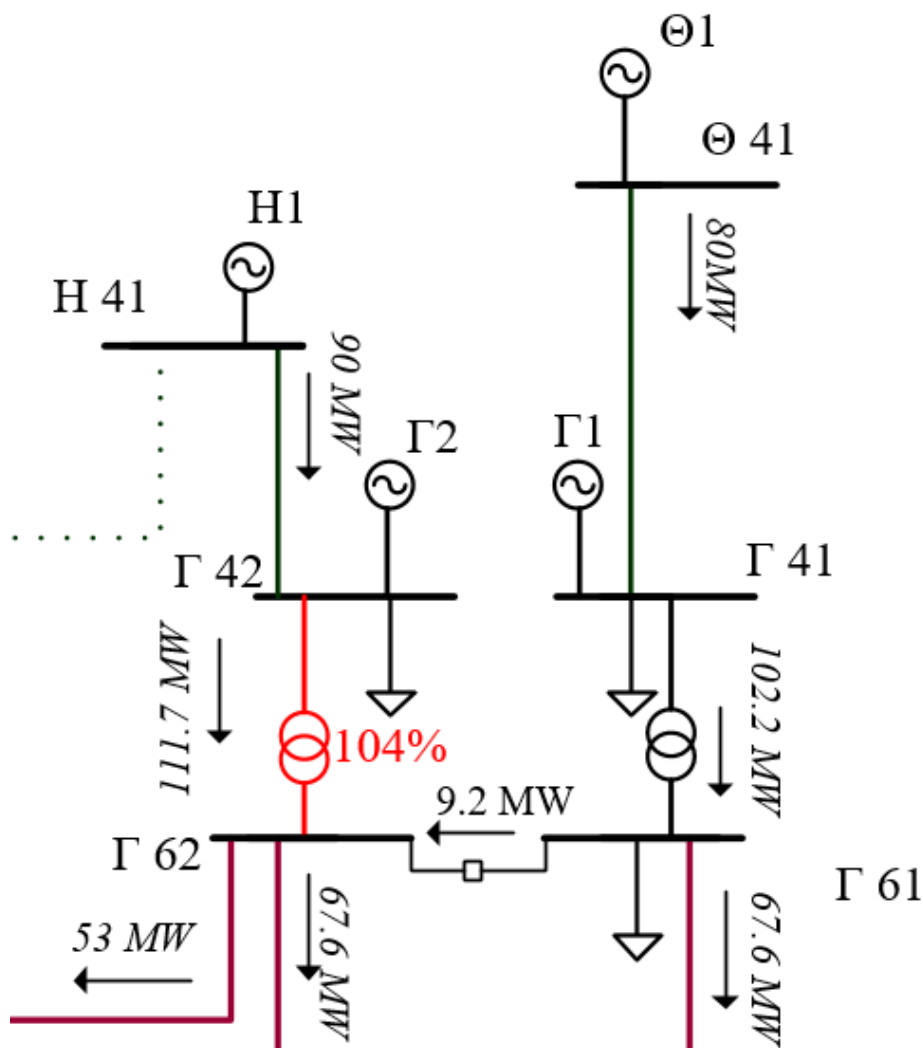
Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.13, οι ροές ισχύος δεν προκαλούν την υπερφόρτιση κάποιου κλάδου του δικτύου. Το Α/Π Η1 χάνει τη μια από τις δύο οδεύσεις του και όλη η παραγωγή του εισάγεται στο ζυγό Γ42. Ο διασυνδετικός διακόπτης των ζυγών Γ41 και Γ42, όμως, λειτουργεί διορθωτικά έτσι ώστε να μην υπερφορτιστούν οι δύο παράλληλοι μετασχηματιστές του υποσταθμού Γ. Ειδικότερα, μεταφέρονται μέσω του κάθε μετασχηματιστή 106,6MW και μέσω του διασυνδετικού διακόπτη από το ζυγό Γ42 στο ζυγό Γ41 4,8MW. Η φόρτιση των δύο αυτών κλάδων είναι 99%, ενώ στο αρχικό στιγμιότυπο λειτουργίας είναι 95%, επομένως επιβαρύνονται οι δύο μετασχηματιστές αλλά δεν απειλούν τη στατική ασφάλεια του δικτύου. Στο Σχήμα 3.13 παρουσιάζονται οι ροές ενεργού ισχύος από και προς τον υποσταθμό Γ.



Σχήμα 3.13: Ροές ενεργού ισχύος στον Υποσταθμό Γ (Σενάριο 6A).

Σενάριο 6B, ανοιχτοί ΔΔΖ

Όταν χαθεί η δεύτερη όδευση του αιολικού σταθμού H1 και οι ζυγοί Γ41 και Γ42 δεν συνδέονται, ο μετασχηματιστής Γ62-Γ42 υπερφορτίζεται κατά 4%, καθιστώντας το δίκτυο στατικά μη ασφαλές. Η φόρτιση, επίσης, της γραμμής Γ42-H41 είναι ίση με 74%, ενώ αρχικά ήταν 48%. Τα επιπλέον MW που εισάγονται στο ζυγό Γ42, λόγω της διαταραχής, προκαλούν την υπερφόρτιση του μετασχηματιστή, αφού μεταφέρονται μέσω αυτού στο ζυγό Γ62, παραβιάζοντας το θερμικό του όριο. Στο Σχήμα 3.14 φαίνονται οι ροές ενεργού ισχύος στον υποσταθμό Γ, μετά την απώλεια της γραμμής Γ42-H41. Ο μετασχηματιστής Γ61-Γ42 δεν επηρεάζεται από τη διαταραχή, το ποσοστό φόρτισης του παραμένει σταθερό και ίσο με 95%.



Σχήμα 3.14: Ροές ενεργού ισχύος στον Υποσταθμό Γ (Σενάριο 6B)

Λόγω της απώλειας της γραμμής B42-H41 μειώνεται η ροή ισχύος στον υποσταθμό B, λειτουργώντας διορθωτικά στο πρόβλημα υψηλής φόρτισης των δύο αυτών μετασχηματιστών. Αντίθετα, στους μετασχηματιστές του υποσταθμού A δεν παρατηρούνται μεταβολές ως προς τη φόρτιση τους. Μέσω της γραμμής A41-Δ41 μεταφέρονται λιγότερα MW, αποφορτίζοντας έτσι τη γραμμή

μεταφοράς.

Αντιμετώπιση της υπερφόρτισης του Μ/Σ Γ62 - Γ42

Προκειμένου να μειωθεί η φόρτιση του μετασχηματιστή Γ62-Γ42 του υποσταθμού Γ προτείνονται δύο στρατηγικές αντιμετώπισης:

- Για να μειωθεί η φόρτιση του μετασχηματιστή πρέπει να μειωθεί το ποσό ενεργού ισχύος που μεταφέρεται μέσω αυτού. Επομένως, αν το όριο παραγωγής του Α/Π Γ2 ρυθμιστεί στην τιμή των 28MW, δηλαδή εισάγει το 88% της μέγιστης ενεργού ισχύος του η φόρτιση στο μετασχηματιστή Γ62-Γ42 είναι 100%.
- Αντίστοιχα με το σενάριο 5A, αν ο διασυνδεδετικός διακόπτης των ζυγών Γ41 και Γ42 κλείσει το νέο ποσοστό φόρτισης του μετασχηματιστή Γ62-Γ42 είναι ίσο με 99%. Επομένως, το κλείσιμο του διακόπτη αντιμετωπίζει την εξεταζόμενη διαταραχή (απώλεια γραμμής Β42-Η41).

Ο τρόπος αντιμετώπισης της απώλειας της γραμμής Β42-Η41 είναι, σε αντιστοιχία με το σενάριο 5A, είναι το κλείσιμο του διασυνδεδετικού διακόπτη των ζυγών Γ41 και Γ42. Με αυτόν τον τρόπο αντιμετώπισης δεν μειώνεται η αιολική διείσδυση και παραμένει μέγιστη.

3.3 Ανάλυση απώλειας φορτίων

Στον Πίνακα 3.4 παρουσιάζεται η ζήτηση του δικτύου, η οποία παραμένει σταθερή. Η απώλεια ενός από τα φορτία του δικτύου θεωρείται ως διαταραχή, σε περίπτωση που η μετρούμενη ενεργός ισχύς του λάβει απότομα τιμή μικρότερη από αυτή που παρουσιάζεται στον Πίνακα 3.4. Η απώλεια φορτίων εξετάζεται ως διαταραχή, αφού μπορεί να προκαλέσει υπερφόρτιση κάποιου κλάδου του δικτύου κατά τη μέγιστη αιολική διείσδυση. Παρακάτω παρουσιάζονται οι επιπτώσεις στο δίκτυο μετά από κάθε διαταραχή. Οι υπερφορτίσεις προκαλούνται από την αδυναμία των υπολοίπων τοπικών φορτίων να απορροφήσουν τμήμα της αιολικής παραγωγής, επομένως, στέλνεται περισσότερη ισχύς προς το σύστημα ΥΤΤ. Παρουσιάζεται η ανάλυση απώλειας φορτίων μόνο για λειτουργία του δικτύου με ανοιχτούς τους διασυνδεδετικούς διακόπτες των ζυγών ΥΤ στους υποσταθμούς Α και Γ, αφού όταν αυτοί είναι κλειστοί καμία διαταραχή αυτού του είδους δεν προκαλεί ανασφάλεια στο δίκτυο. Στον Πίνακα 3.15 παρουσιάζονται τα εξεταζόμενα σενάρια και οι επιπτώσεις του καθενός στη στατική ασφάλεια του δικτύου. Προκειμένου να εντοπιστούν οι διαταραχές που καθιστούν το δίκτυο μη ασφαλές, εφαρμόζεται το κριτήριο N-1 και κάθε αιολικό πάρκο εισάγει στο δίκτυο τη μέγιστη ενεργό ισχύ του, σύμφωνα με τον Πίνακα 3.2.

Εξετάζοντας τον Πίνακα 3.15 παρατηρείται ότι η απώλεια των φορτίων ΦΓ2 και ΦΒ2 που είναι συνδεδεμένα στο ζυγό Γ41 και Β41 αντίστοιχα καθιστούν το δίκτυο στατικά ανασφαλές. Οι υπόλοιπες εξεταζόμενες διαταραχές δεν επηρεάζουν τη ασφαλή λειτουργία του. Στον Πίνακα 3.16 παρουσιάζονται οι υπερφορτίσεις που προκαλούν οι δύο παραπάνω διαταραχές.

Πίνακας 3.15: Εκτίμηση Στατικής Ασφάλειας για μέγιστη αιολική παραγωγή II (Απώλεια Φορτίων).

Σενάριο	Φορτίο εκτός λειτουργίας (MW)	Αιολική Παραγωγή	Δίκτυο Στατικά Ασφαλές
Φ1	ΦΓ2 (32)	Μέγιστη	OXI
Φ2	ΦΒ2 (22)	Μέγιστη	OXI
Φ3	ΦΑ1 (51)	Μέγιστη	NAI
Φ4	ΦΑ2 (15)	Μέγιστη	NAI
Φ5	ΦΑ3 (10)	Μέγιστη	NAI
Φ6	ΦΒ1 (55)	Μέγιστη	NAI
Φ7	ΦΒ3 (9)	Μέγιστη	NAI
Φ8	ΦΓ1 (25)	Μέγιστη	NAI
Φ9	ΦΓ3 (8)	Μέγιστη	NAI

Πίνακας 3.16: Υπερφορτίσεις λόγω απώλειας φορτίων.

Κωδικός διαταραχής	Φορτίο εκτός λειτουργίας	Υπερφορτισμένος κλάδος	Ποσοστό φόρτισης
Φ1	ΦΓ2	Γ61 - Γ41	125%
Φ2	ΦΒ2	B61 - B41 B62 - B42	103% 103%

Στις επόμενες ενότητες παρουσιάζονται συνοπτικά οι διαταραχές που δεν προκαλούν ανασφαλή λειτουργία του δικτύου και εκτενέστερα αυτές που το καθιστούν ανασφαλές.

3.3.1 Διαταραχές που δεν προκαλούν υπερφόρτιση (Ανάλυση απώλειας φορτίων)

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται οι διαταραχές που επηρεάζουν το δίκτυο, ως προς τις ροές ισχύος, αλλά δεν το καθιστούν ανασφαλές. Μετά την ολοκλήρωση της N-1 ανάλυσης προκύπτει για όλες τις διαταραχές ότι η απώλεια κάποιου από τα φορτία του συστήματος προκαλεί την αύξηση της εγγερόμενης ενεργού ισχύος στον άπειρο ζυγό του δικτύου.

- *Σενάριο Φ3:* Απώλεια του φορτίου στο ζυγό A61 προκαλεί μείωση της εισερχόμενης στον υποσταθμό A ενεργού ισχύος. Η ζήτηση στον υποσταθμό A μειώνεται κατά 51MW, επομένως, ο υποσταθμός B εισάγει λιγότερα MW, 27,8MW αντί για 41MW.
- *Σενάριο Φ4:* Απώλεια του φορτίου στο ζυγό A41 προκαλεί μειωμένη ροή ενεργού ισχύος από το A/Π Δ1 στον υποσταθμό A.
- *Σενάριο Φ5:* Απώλεια του φορτίου στο ζυγό A42 έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της ενεργού ισχύος που μεταφέρεται μέσω του μετασχηματιστή A61-A41 στους ζυγούς ΥΥΤ

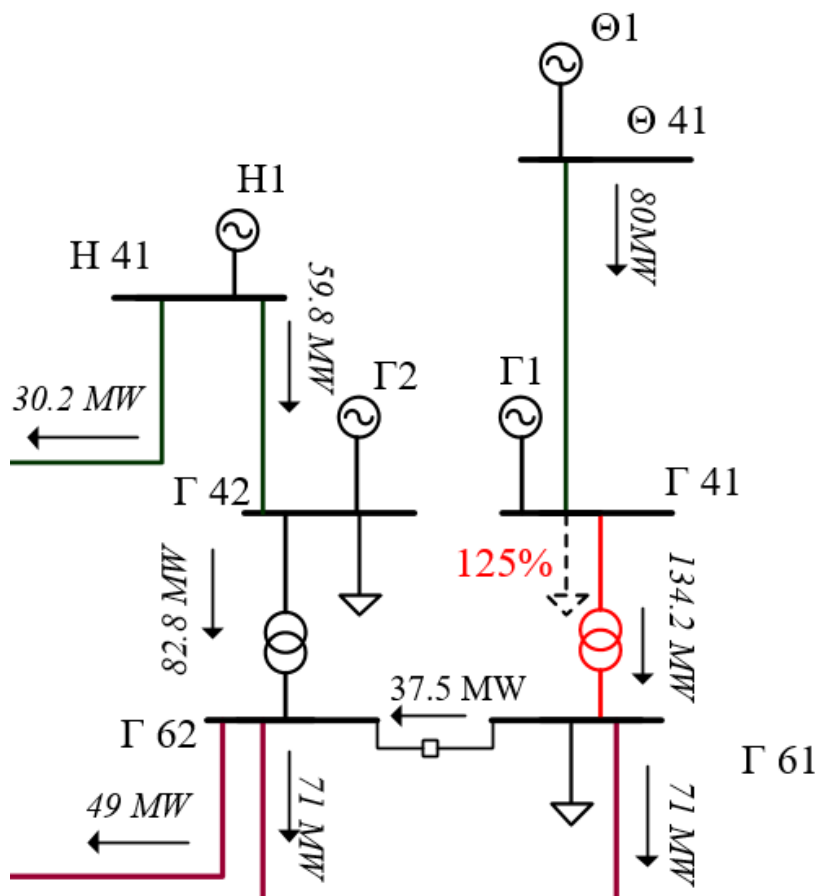
του υποσταθμού Α. Επίσης, μέσω του μετασχηματιστή Α62-Α42 μεταφέρονται μόλις 100kW έναντι 10MW, όπως στο αρχικό στιγμιότυπο λειτουργίας.

- **Σενάριο Φ6:** Απώλεια του φορτίου στο ζυγό Β61 προκαλεί τη μείωση της ζήτησης στον υποσταθμό Β κατά 55MW. Επομένως, ο υποσταθμός Β εισάγει περισσότερα MW στον υποσταθμό Α. Απόρροια αυτής της διαταραχής είναι η μεταβολή της ροής ισχύος στις δύο οδεύσεις του Α/Π Η1. Μειώνεται η ροή ενεργού ισχύος προς το ζυγό Β42, αφού η ζήτηση του υποσταθμού μειώνεται, και αυξάνεται η εγγεχόμενη ενεργός ισχύς στο ζυγό Γ42.
- **Σενάριο Φ7:** Απώλεια του φορτίου στο ζυγό Β42 προκαλεί μείωση της ζήτησης στον υποσταθμό Β κατά 9MW. Τα MW που πριν τη διαταραχή κατανάλωνε το φορτίο, μετά την απώλειά του μεταφέρονται μέσω των δύο παράλληλων μετασχηματιστών του υποσταθμού Β στους ζυγούς Β61 και Β62, μέσω κάθε κλάδου μεταφέρονται 108,7MW αντί για 105,4MW, που προκύπτουν από τον υπολογισμό της αρχικής ροής φορτίου.
- **Σενάριο Φ8:** Απώλεια του φορτίου στο ζυγό Γ61 έχει ως αποτέλεσμα τη μεταβολή της εγγεχόμενης και εκχεόμενης ενεργού ισχύος στον υποσταθμό Γ. Ο αολικός σταθμός Η1 αυξάνει το ποσό ενεργού ισχύος που εισάγει στο ζυγό Β42 ενώ μειώνει αυτό στο ζυγό Γ42, συγκριτικά με τις αντίστοιχες ροές στο αρχικό στιγμιότυπο λειτουργίας. Λόγω μειωμένης ζήτησης στον υποσταθμό Γ, αυξάνεται η ενεργός ισχύς που μεταφέρεται στον υποσταθμό Α.
- **Σενάριο Φ9:** Απώλεια του φορτίου στο ζυγό Γ42 έχει ως συνέπεια την αύξηση της φόρτισης του μετασχηματιστή Γ61-Γ41, η ροή ισχύος είναι ίση με 91,3MW έναντι 85,6MW της αρχικής ροής φορτίου.

3.3.2 Σενάριο Φ1

Όταν ο διασυνδεδεικτός διακόπτης στον υποσταθμό Γ είναι ανοιχτός, η απώλεια του φορτίου ΦΓ2 προκαλεί υπερφόρτιση του μετασχηματιστή Γ61-Γ41 ίση με 125%. Η μείωση της εκχεόμενης ενεργού ισχύος στο ζυγό Γ41 κατά 32MW, έχει ως συνέπεια την αύξηση της μεταφερόμενης ισχύος μέσω του μετασχηματιστή, 134,1MW παραβιάζοντας το θερμικό του όριο το οποίο είναι 107,7MW. Στο Σχήμα 3.15 παρουσιάζονται οι ροές ενεργού ισχύος σε κάθε κλάδο του υποσταθμού Γ.

Στον υποσταθμό Β αυξάνεται το ποσό εγγεχόμενης ισχύος από το Α/Π Η1, αφού μειώνεται η ζήτηση στον υποσταθμό Γ. Ωστόσο, η μεταβολή των ροών στον υποσταθμό αυτό είναι της τάξης λίγων kW. Λόγω της αύξησης του ποσού ενεργού ισχύος που εισάγεται από τον υποσταθμό Γ στον υποσταθμό Α, μειώνεται αυτό από τον υποσταθμό Β. Όπως και στις προαναφερόμενες περιπτώσεις, στις οποίες η διαταραχή που πλήττει το δίκτυο είναι η απώλεια φορτίου, αυξάνεται η ενεργός ισχύς που καταναλώνει ο άπειρος ζυγός.



Σχήμα 3.15: Ροές ενεργού ισχύος στον Υποσταθμό Γ (Σενάριο Φ1).

Αντιμετώπιση της υπερφόρτισης του Μ/Σ Γ61 - Γ41

Μετά τη διαταραχή, μέσω του μετασχηματιστή Γ61-Γ41 εισάγονται στο ζυγό Γ61 134,1MW, ενώ το θερμικό όριο του συγκεκριμένου κλάδου είναι 107,7MVA. Προκειμένου να μειωθεί η φόρτιση του μετασχηματιστή, υπάρχουν δύο πιθανές λύσεις:

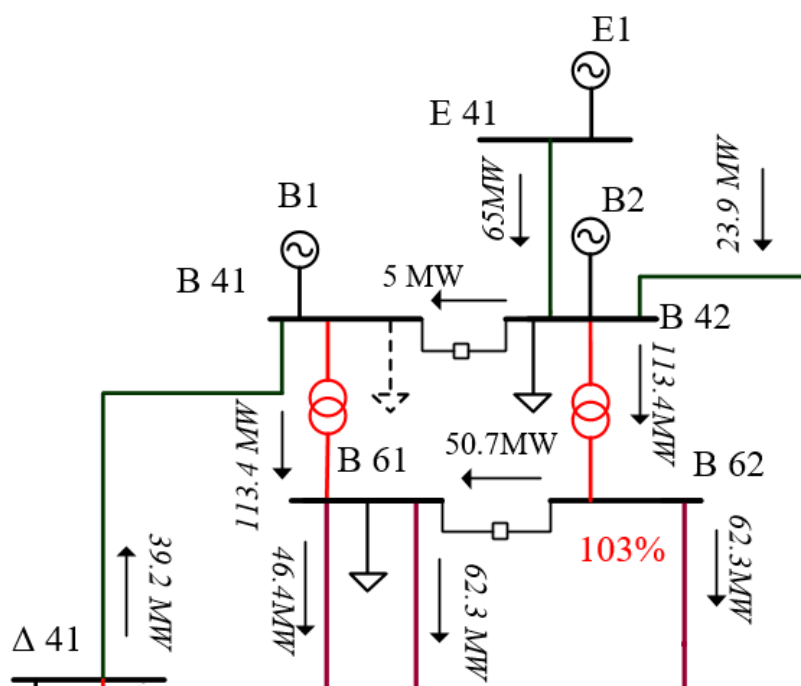
- Αν τα Α/Π Θ1 και Γ1 εισάγουν στο ζυγό Γ41 λιγότερα MW, η υπερφόρτιση του μετασχηματιστή Γ61-Γ41 αντιμετωπίζεται. Ειδικότερα, αν το ανώτατο όριο παραγωγής του Α/Π Γ1 είναι ίσο με 44MW, αντί της μέγιστης παραγωγής του (55MW), και του Θ1 είναι ίσο με 64MW, αντί για 80MW, το ποσοστό φόρτισης του μετασχηματιστή είναι 100%. Επομένως, αποφεύγεται μια αλυσιδωτή απώλεια εξαιτίας της αρχικής διαταραχής. Οι σταθμοί αυτοί εισάγουν στο δίκτυο, προκειμένου να μην υπερφορτιστεί ο μετασχηματιστής Γ61-Γ41 μετά την απώλεια του φορτίου στο ζυγό Γ41, το 80% της μέγιστης ενεργού ισχύος τους. Ο περιορισμός της παραγωγής των συγκεκριμένων πάρκων καθιστά το δίκτυο στατικά ασφαλές. Τα υπόλοιπα αιολικά πάρκα εισάγουν τη μέγιστη παραγωγή τους στο δίκτυο χωρίς κάποιο περιορισμό.
- Η υπερφόρτιση αυτή, όμως, αντιμετωπίζεται και χωρίς τη ρύθμιση των ορίων παραγωγής των δύο αιολικών σταθμών. Εάν μετά την απώλεια του φορτίου στο ζυγό Γ41, ο διασυν-

δεδειγμένος διακόπτης του υποσταθμού Γ κλείσει και οι ζυγοί Γ41 και Γ42 αντιμετωπίζονται ως ένας ζυγός, η φόρτιση του μετασχηματιστή ισούται με 98%. Μέσω του διασυνδεδετικού διακόπτη των ζυγών Γ41 και Γ42 μεταφέρονται 28,6MW από το ζυγό Γ41 στο ζυγό Γ42, και με αυτόν τον τρόπο μεταφέρονται μέσω των δύο, πλέον, παράλληλων μετασχηματιστών 105,6MW, αποτρέποντας την παραβίαση του θερμικού ορίου του μετασχηματιστή.

Ο τρόπος αντιμετώπισης της απώλειας του φορτίου ΦΓ2 είναι το κλείσιμο του διασυνδεδετικού διακόπτη των ζυγών Γ41 και Γ42. Με αυτόν τον τρόπο αντιμετώπισης δεν μειώνεται η αιολική διείσδυση και παραμένει μέγιστη.

3.3.3 Σενάριο Φ2

Η απώλεια του φορτίου που είναι συνδεδεμένο στο ζυγό B41 προκαλεί την υπερφόρτιση των δύο παράλληλων μετασχηματιστών του υποσταθμού B κατά 3%. Η ζήτηση στον υποσταθμό αυτό μειώνεται κατά 22MW, με αποτέλεσμα τα MW που καταναλώνει το φορτίο να μεταφέρονται μέσω των δύο αυτών μετασχηματιστών στους ζυγούς ΥΥΤ του υποσταθμού παραβιάζοντας το θερμικό τους όριο. Στο Σχήμα 3.16 παρουσιάζονται οι ροές ενεργού ισχύος από και προς τον υποσταθμό B μετά την εξεταζόμενη διαταραχή.



Σχήμα 3.16: Ροές ενεργού ισχύος στον Υποσταθμό B (Σενάριο Φ2).

Οι ροές ενεργού ισχύος στους άλλους δύο υποσταθμούς του δικτύου μεταβάλλονται σε μικρότερο βαθμό, χωρίς να υπερφορτίζεται κάποιος κλάδος. Όπως σε κάθε περίπτωση απώλειας φορτίου, η οποία αποτελεί διαταραχή για το δίκτυο, αυξάνεται το ποσό ενεργού ισχύος που καταναλώνει ο άπειρος ζυγός.

Αντιμετώπιση της υπερφόρτισης των Μ/Σ του υποσταθμού Β

Προκειμένου να αντιμετωπιστεί η υπερφόρτιση των δύο μετασχηματιστών πρέπει τη μείωση της ζήτησης (κατά 22MW) να ακολουθήσει η μείωση της εισερχόμενης ενεργού ισχύος στους ζυγούς Β41 και Β42. Με την κατάλληλη ρύθμιση του ανώτατου ορίου παραγωγής των αιολικών πάρκων Β1, Β2 και Ε1, το ποσοστό φόρτισης των δύο μετασχηματιστών είναι 100%, και αποτρέπεται η υπερφόρτιση των κλάδων αυτών. Ειδικότερα, οι αιολικοί σταθμοί αρκεί να εισάγουν στο δίκτυο λιγότερο από το 95% της μέγιστης ενεργού ισχύος τους. Στον Πίνακα 3.17 παρουσιάζονται τα ανώτατα όρια παραγωγής των αιολικών σταθμών Β1, Β2 και Ε1 καθώς και η συνολική παραγωγή και ζήτηση του δικτύου, προκειμένου να αντιμετωπιστεί η εξεταζόμενη διαταραχή.

Πίνακας 3.17: Απώλεια φορτίου ΦΒ2, Όρια παραγωγής Α/Π.

Σενάριο	Αιολικό Πάρκο	Όριο (MW) Παραγωγής	Ποσοστό της ονομαστικής ισχύος
Φ2	B1	67	95%
	B2	38	95%
	E1	62	95%

3.4 Συμπεράσματα Ανάλυσης Στατικής Ασφάλειας Δικτύου

Η ανάλυση ροών φορτίων κατέδειξε τις διαταραχές που καθιστούν το εξεταζόμενο δίκτυο στατικά ανασφαλές. Σε συνθήκες όπου η αιολική παραγωγή είναι μέγιστη και ο κάθε αιολικός σταθμός εισάγει την ονομαστική του ισχύ όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 3.2, ενώ όλα τα φορτία του δικτύου είναι σταθερής ισχύος και ίση με αυτή που παρουσιάζεται στον Πίνακα 3.4.

Ειδικότερα από την ανάλυση προέκυψε ότι:

- Σε περίπτωση απώλειας κάποιας από τις γραμμές Β41-Δ41, Α41-Δ41 και Γ42-Η41 παραβιάζεται η στατική ασφάλεια του δικτύου. Ανεξάρτητα από την κατάσταση των διασυνδεδετικών διακοπών των ζυγών ΥΤ, απώλεια κάποιας από αυτές τις γραμμές μεταφοράς προκαλεί την υπερφόρτιση κάποιου κλάδου του. Για την αντιμετώπιση αυτών των διαταραχών προτείνεται η αλλαγή του ορίου παραγωγής των αιολικών πάρκων σύμφωνα με τους Πίνακες 3.12, 3.13 και 3.14.
- Αντίθετα η απώλεια της γραμμής Α61-Β61 προκαλεί την υπερφόρτιση κλάδου του δικτύου μόνο όταν οι διασυνδεδετικοί διακόπτες είναι κλειστοί, ενώ η κατάσταση λειτουργίας με ανοιχτούς αυτούς των υποσταθμών Α και Γ λειτουργεί διορθωτικά στη συγκεκριμένη διαταραχή. Επίσης, η απώλεια της γραμμής Β42-Η41 καθιστά το σύστημα ανασφαλές όταν οι διακόπτες είναι ανοιχτοί. Προκειμένου να αντιμετωπιστεί η απώλεια της γραμμής Α61-Β61 προτείνεται το άνοιγμα του διασυνδεδετικού διακόπτη των ζυγών ΥΤ του υποσταθμού Α, ενώ για την αντιμετώπιση της απώλειας της γραμμής Β42-Η41 προτείνεται το κλείσιμο

του διακόπτη των ζυγών ΥΤ του υποσταθμού Γ. Με αυτό τον τρόπο αντιμετωπίζονται οι διαταραχές χωρίς να μειώνεται η αιολική διείσδυση στο δίκτυο.

- Τα προβλήματα υπερφόρτισης παρατηρούνται κυρίως στα επικίνδυνα στοιχεία του δικτύου, τα οποία ήδη από τη Ν κατάσταση έχουν υψηλή φόρτιση. Τα στοιχεία αυτά είναι η γραμμή μεταφοράς Α41-Δ41, η οποία αποτελεί τη μία εκ των δύο οδύσεων του αιολικού σταθμού Δ1 καθώς και οι δύο παράλληλοι μετασχηματιστές του υποσταθμού Β. Σε στιγμιότυπο λειτουργίας του δικτύου με ανοιχτό το διασυνδεδειγμένο διακόπτη των ζυγών ΥΤ του υποσταθμού Β καθιστά το δίκτυο ανασφαλές ήδη στη Ν κατάσταση, επομένως, δεν πρέπει να ανοίξει ο συγκεκριμένος διακόπτης.
- Η ανάλυση απώλειας φορτίων πραγματοποιείται μόνο για λειτουργία του δικτύου με ανοιχτούς τους διασυνδεδειγμένους διακόπτες των ζυγών ΥΤ των υποσταθμών Α και Γ, καθώς όταν αυτοί είναι κλειστοί η απώλεια ενός φορτίου δεν παραβιάζει τη στατική του ασφάλεια.
- Προκειμένου να αποφευχθεί η αλυσιδωτή απώλεια στοιχείων λόγω θερμικής υπερφόρτισης κλάδων του δικτύου προτείνονται δύο τρόποι αντιμετώπισης. Είτε η μείωση της ροής ενεργού ισχύος στον υπερφορτισμένο κλάδο μέσω της κατάλληλης ρύθμισης της μεταφερόμενης μέσω αυτού αιολικής παραγωγής, είτε το άνοιγμα (ή κλείσιμο) κάποιου διασυνδεδειγμένου διακόπτη ζυγών ΥΤ αν λειτουργεί διορθωτικά για το εκάστοτε πρόβλημα.

Συνεπώς προτάθηκαν οι ακόλουθες διορθωτικές κινήσεις:

1. Για την αντιμετώπιση της απώλειας της γραμμής Β41-Δ41 (σενάρια 2Α και 2Β) προτείνεται η ρύθμιση του ορίου παραγωγής του αιολικού σταθμού Δ1 στην τιμή των 84MW (70% της ονομαστικής του ισχύος).
2. Για την αντιμετώπιση της απώλειας της γραμμής Α41-Δ41 (σενάρια 3Α και 3Β) προτείνεται η ρύθμιση του ορίου παραγωγής του Α/Π Δ1 στα 104MW, ίσο με το 87% της ονομαστικής του ισχύος, ενώ των αιολικών σταθμών Β1, Β2 και Ε1 στο 70% της ονομαστικής τους ισχύος.
3. Για την αντιμετώπιση της απώλειας της γραμμής Γ42-Η41 (σενάρια 4Α και 4Β) προτείνεται η ρύθμιση του ορίου παραγωγής του Α/Π Η1. Το όριο παραγωγής του Η1 ρυθμίζεται στα 46MW όταν οι διασυνδεδειγμένοι διακόπτες των ζυγών ΥΤ είναι ανοιχτοί ενώ στα 42MW όταν αυτοί είναι κλειστοί.
4. Η απώλεια της γραμμής Α61-Β61 (σενάριο 5Α) καθιστά το δίκτυο ανασφαλές όταν οι διασυνδεδειγμένοι διακόπτες του υποσταθμού Α είναι κλειστοί. Επομένως, για την αντιμετώπιση της διαταραχής προτείνεται το άνοιγμα του διακόπτη μεταξύ των ζυγών Α41 και Α42.
5. Η απώλεια της γραμμής Β42-Η41 (σενάριο 6Β) καθιστά το δίκτυο ανασφαλές όταν οι διασυνδεδειγμένοι διακόπτες του υποσταθμού Γ είναι ανοιχτοί. Επομένως, για την αντιμετώπιση της διαταραχής προτείνεται το κλείσιμο του διακόπτη μεταξύ των ζυγών Γ41 και Γ42.

6. Η απώλεια του φορτίου ΦΓ2 (σενάριο Φ1) αντιμετωπίζεται με το κλείσιμο του διασυνδεδετικού διακόπτη των ζυγών ΥΤ του υποσταθμού Γ.
7. Η απώλεια του φορτίου ΦΒ2 (σενάριο Φ2) αντιμετωπίζεται με τη ρύθμιση των ορίων παραγωγής των αιολικών σταθμών Β1, Β2 και Ε1. Προτείνεται προς αποφυγή υπερφόρτισης των δύο παράλληλων μετασχηματιστών του υποσταθμού Β αυτά τα αιολικά πάρκα να εισάγουν το 95% της ονομαστικής τους ισχύος.

3.4.1 Συνέπειες Ανασφάλειας Δικτύου

Οι επιπτώσεις ανασφαλούς λειτουργίας του δικτύου μπορεί να συνεπάγονται την αποκοπή ενός αιολικού σταθμού ή να είναι και πιο σύνθετες προκαλώντας τη μερική σβέση του δικτύου. Ακολούθως παρουσιάζονται αναλυτικότερα δύο τέτοιες περιπτώσεις.

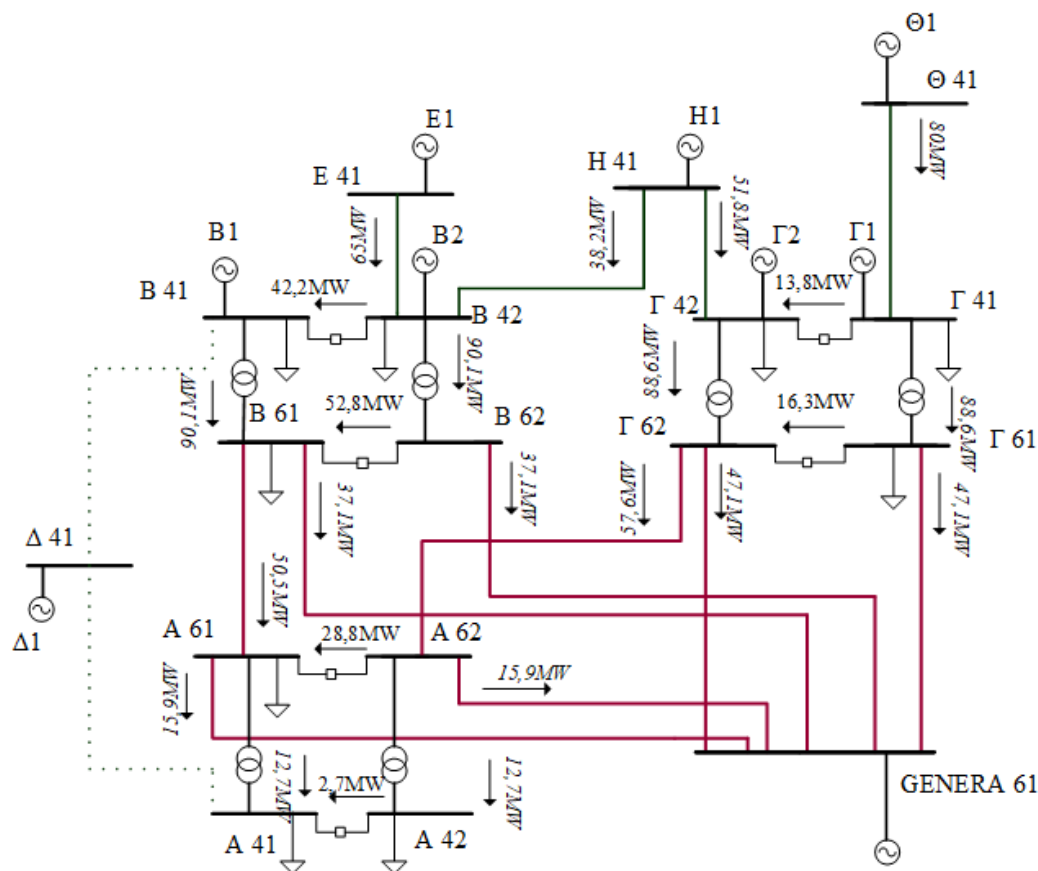
Μη αντιμετώπιση της απώλειας της ΓΜ Β41 - Δ41

Αν η γραμμή Β41-Δ41 τεθεί εκτός λειτουργίας, ανεξάρτητα από την κατάσταση των διασυνδεδετικών διακοπών στους ζυγούς ΥΤ, η γραμμή Α41-Δ41 υπερφορτίζεται κατά 32%. Οι δύο αυτές ακτινικές γραμμές ΥΤ αποτελούν τις δύο οδεύσεις του αιολικού πάρκου Δ1, επομένως η υπερφόρτιση της Α41-Δ41 οδηγεί στην απώλεια και της δεύτερης οδεύσης του Α/Π. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.17, ο αιολικός σταθμός Δ1 αποκόπτεται από το δίκτυο.

Μετά την αποκοπή του Α/Π Δ1 δεν παρατηρείται κάποιο άλλο πρόβλημα υπερφόρτισης κλάδου, επομένως, το δίκτυο λειτουργεί έχοντας μια λιγότερη πηγή τροφοδότησης. Απόρροια αυτού είναι η μείωση της καταναλισκόμενης ενεργού ισχύος στον άπειρο ζυγό, 199,5MW σε σύγκριση με τα 341,3MW του αρχικού στιγμιότυπου λειτουργίας. Επίσης, η απώλεια της πηγής τροφοδότησης του υποσταθμού Α προκαλεί μεταβολή της κατεύθυνσης της ροής ενεργού ισχύος στους δύο παράλληλους μετασχηματιστές. Τα φορτία στους ζυγούς ΥΤ του υποσταθμού Α τροφοδοτούνται μέσω των ζυγών Α61 και Α62 από τους υποσταθμούς Β και Γ. Η απομόνωση αυτή του αιολικού σταθμού Δ1 πλήττει μεν το δίκτυο αλλά δεν προκαλεί τη σβέση του.

Μη αντιμετώπιση της απώλειας της ΓΜ Α61 - Β61

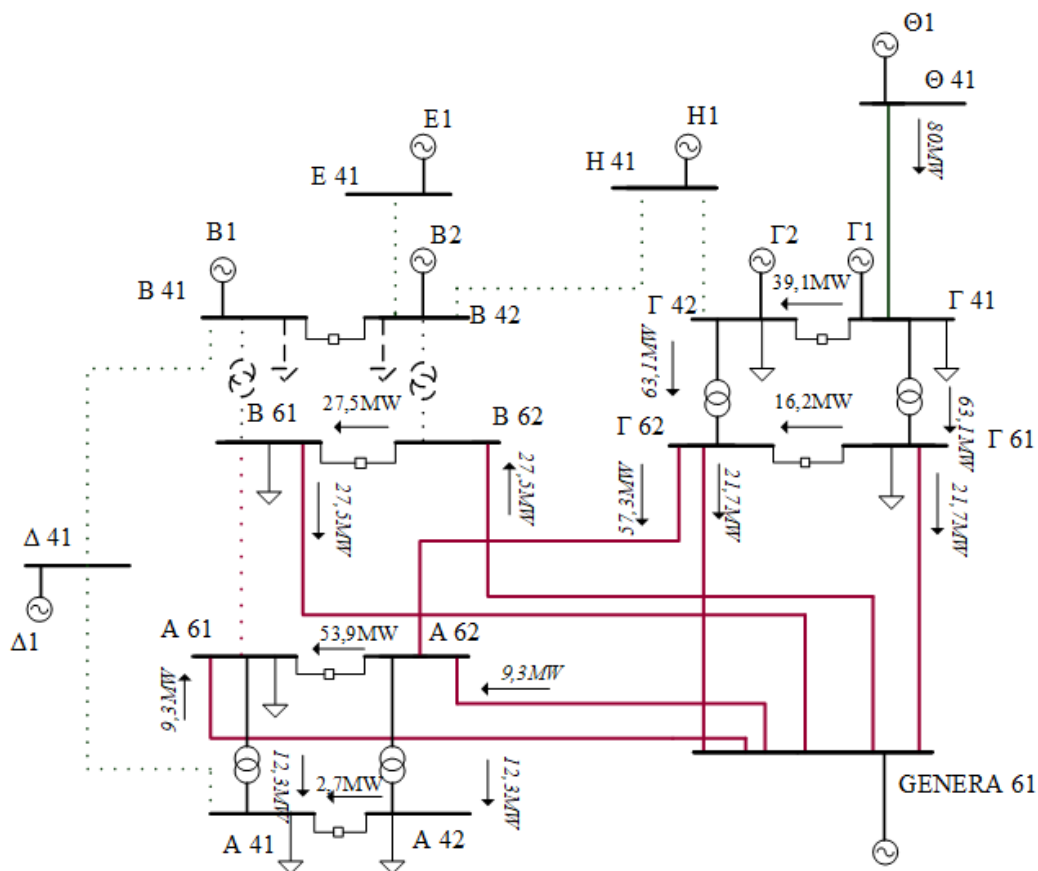
Αντίθετα αν η υπερφόρτιση 4.1 δεν αντιμετωπιστεί είναι πιθανό να προκληθεί η μερική σβέση του δικτύου. Ειδικότερα, η απώλεια της γραμμής Α61-Β61 προκαλεί την υπερφόρτιση της γραμμής Α41-Δ41, η οποία οφείλεται στην αύξηση της ροής ισχύος από το Α/Π Δ1 στο ζυγό Α41. Η τροφοδότηση του υποσταθμού Α από τον υποσταθμό Γ χάνεται, επομένως, ο αιολικός σταθμός Δ1 αυξάνει το ποσό ενεργού ισχύος που εισάγεται στο ζυγό Α41 και μειώνεται αυτό που εισάγεται στο ζυγό Β41. Αποτυχία μείωσης της ροής ισχύος στον υπερφορτισμένο κλάδο προκαλεί την απώλεια του. Η αλυσιδωτή αυτή απώλεια, όμως, προκαλεί την μεταφορά της ονομαστικής ισχύος του Δ1 μέσω της γραμμής Β41-Δ41, παραβιάζοντας το θερμικό όριο του κλάδου. Υπερφορτίζονται και οι δύο παράλληλοι μετασχηματιστές του υποσταθμού Β, λόγω παραβίασης του θερμικού τους ορίου.



Σχήμα 3.17: Συνέπειες ανασφαλούς λειτουργίας λόγω Σεναρίου 2Α.

Αν δεν αποσυμφορηθούν οι υπερφορτισμένοι κλάδοι του δικτύου αποσυνδέονται και αυτοί από το σύστημα. Η αλυσιδωτή αυτή απώλεια, όμως, προκαλεί την αποκοπή του αιολικού σταθμού Δ1 από το δίκτυο και την υπερφόρτιση των δύο οδεύσεων του αιολικού σταθμού H1. Ειδικότερα, η παραγωγή των Α/Π B1, B2 και E1 καλύπτει τη ζήτηση των δύο φορτίων στους ζυγούς ΥΤ του υποσταθμού B και η πλεονάζουσα ενεργός ισχύς, 142,9MW, μεταφέρεται μέσω της γραμμής B42-H41 στο ζυγό H41, παραβιάζοντας το θερμικό όριο της συγκεκριμένης γραμμής το οποίο είναι ίσο με 100MW. Όλη η παραγωγή του αιολικού σταθμού H1 μεταφέρεται μέσω της γραμμής Γ42-H41 στο ζυγό Γ42. Η συνολική ροή ενεργού ισχύος στη γραμμή είναι 224,4MW, ενώ το θερμικό όριο της γραμμής είναι 115MVA. Η γραμμή B42-H41 υπερφορτίζεται κατά 37% ενώ η Γ42-H41 κατά 48%. Απόρροια αυτής της αλυσιδωτής υπερφόρτισης είναι η απώλεια των δύο αυτών κλάδων. Η αλυσιδωτή αυτή απώλεια προκαλεί τη μερική σβέση του δικτύου αφού ο υποσταθμός B τίθεται εκτός λειτουργίας και αποκόπτονται τα αιολικά πάρκα Δ1, B1, B2, E1 και H1, όπως και τα φορτία στους ζυγούς B41 και B42. Η ζήτηση του φορτίου στο ζυγό B61 καλύπτεται από τον άπειρο ζυγό. Στο Σχήμα 3.18 παρουσιάζεται η μερική σβέση του δικτύου και οι ροές ενεργού ισχύος στους κλάδους του δικτύου που βρίσκονται εντός λειτουργίας.

Το άνοιγμα των διασυνδετικών διακοπών των ζυγών ΥΤ οξύνει τις αλυσιδωτές υπερφορτίσεις σε



Σχήμα 3.18: Μερική σβέση του δικτύου. (Σενάριο 5A)

κλάδους του δικτύου. Ανεξάρτητα, όμως, από την κατάσταση αυτών καταδεικνύεται απαραίτητη η λειτουργία σχημάτων προστασίας προκειμένου να πληρούνται τα κριτήρια επάρκειας και ασφάλειας του δικτύου και για τις δύο καταστάσεις.

Συνεπώς κρίνεται αναγκαία η λειτουργία σχημάτων προστασίας ακεραιότητας συστήματος που θα υλοποιούν τις προτεινόμενες λύσεις προς αποφυγή των θερμικών υπερφορτίσεων εξαιτίας της απώλειας γραμμών είτε φορτίων του δικτύου.

Κεφάλαιο 4

Σχεδιασμός Προστασίας Συστήματος έναντι Θερμικής Υπερφόρτισης

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται μια μέθοδος σχεδιασμού σχημάτων προστασίας ακεραιότητας συστήματος έναντι υπερφορτίσεων που προκύπτουν μετά την εκτίμηση στατικής ασφάλειας του εξεταζόμενου δικτύου. Στο Κεφάλαιο 3 διαπιστώθηκαν οι διαταραχές που καθιστούν το δίκτυο ανασφαλές. Ο τρόπος αντιμετώπισης των υπερφορτίσεων είναι η ρύθμιση του ανώτατου ορίου παραγωγής ορισμένων αιολικών πάρκων είτε το άνοιγμα ή κλείσιμο κάποιου διασυνδεδετικού διακόπτη ζυγών ΥΤ σε υποσταθμό του δικτύου, προκειμένου μέσω της μείωσης της ροής ενεργού ισχύος να μειώνεται και το ποσοστό φόρτισης του κλάδου, γραμμή μεταφοράς ή μετασχηματιστής του δικτύου. Για την υλοποίηση της μεθόδου επιλέγεται προστασία που ενεργοποιείται με ανίχνευση διαταραχής. Μέσω σχημάτων προστασίας ακεραιότητας του δικτύου, αποτρέπεται η αλυσιδωτή απώλεια στοιχείων λόγω θερμικής υπερφόρτισης ως αποτέλεσμα της αρχικής διαταραχής.

4.1 Προσδιορισμός Ορίων Παραγωγής Αιολικών Πάρκων

Όπως φάνηκε στο Κεφάλαιο 3, το δίκτυο καθίσταται ανασφαλές σε περίπτωση παραβίασης του θερμικού ορίου είτε μιας γραμμής μεταφοράς είτε ενός μετασχηματιστή. Το εξεταζόμενο στιγμιότυπο λειτουργίας είναι χαμηλού φορτίου και υψηλών τάσεων, επομένως, δεν παρατηρείται πρόβλημα υποτάσεων εντός των ορίων ασφαλούς λειτουργίας. Συγκεκριμένα, οι τάσεις σε όλους τους ζυγούς είναι άνω του 1,05 α.μ., αλλά διότι θεωρείται ότι το στιγμιότυπο λειτουργίας δεν αντιμετωπίζει προβλήματα υπέρτασης, τα όρια ασφαλούς λειτουργίας που λήφθηκαν υπόψη είναι από 0,95 α.μ. έως 1,1 α.μ. και σε κανένα ζυγό δεν παρατηρείται παραβίαση αυτών.

4.1.1 Αρχικό στιγμιότυπο λειτουργίας

Το αρχικό στιγμιότυπο λειτουργίας εξετάζεται χωρίς καμία διαταραχή, με μέγιστη αιολική διείσδυση (δηλαδή το κάθε αιολικό πάρκο εισάγει στο δίκτυο την ονομαστική ενεργό ισχύ του) και ζήτηση ίση με αυτή του Πίνακα 3.4. Θεωρείται ότι το εξεταζόμενο φορτίο είναι το ελάχιστο φορτίο του συγκεκριμένου δικτύου. Οι κλάδοι με υψηλό αρχικό ποσοστό φόρτισης παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1. Όπως φαίνεται το άνοιγμα των διασυνδεδειγμένων διακοπών των ζυγών ΥΤ στους υποσταθμούς του δικτύου αποφορτίζει τη γραμμή Α41-Δ41 και κάποιους μετασχηματιστές ενώ επιφορτίζει άλλους μετασχηματιστές.

Πίνακας 4.1: Κλάδοι του Δικτύου με Υψηλή Αρχική Φόρτιση (Σενάρια 1Α και 1Β).

Κλάδος	ΔΔΖ κλειστοί Ποσοστό Φόρτισης (%)	ΔΔΖ ανοιχτοί Ποσοστό Φόρτισης (%)
ΓΜ Α41 - Δ41	96	86
ΜΣ Β61 - Β41	93	84
ΜΣ Β62 - Β42	93	107
ΜΣ Γ61 - Γ41	85	95
ΜΣ Γ62 - Γ42	85	79

Οι κλάδοι που παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1 αποτελούν τα επικίνδυνα σημεία του δικτύου και η σχεδίαση των σχημάτων προστασίας που θα ακολουθήσει έχει ως βασικό γνώμονα τη μείωση του ποσοστού φόρτισης τους, προς αποφυγή αλυσιδωτών απωλειών λόγω θερμικής υπερφόρτισης. Εξετάζοντας τον Πίνακα 4.1, στη λειτουργία με ανοιχτούς τους διασυνδεδειγμένους διακόπτες στους ζυγούς ΥΤ σε όλους τους υποσταθμούς η φόρτιση στους μετασχηματιστές του υποσταθμού Β ξεπερνά το 100% επομένως, σύμφωνα με το Κεφάλαιο 3 (Πίνακας 3.3) ο διασυνδεδειγμένος διακόπτης στους ζυγούς Β41 και Β42 πρέπει να παραμένει πάντα κλειστός. Το άνοιγμα των διακοπών όμως στους άλλους δύο υποσταθμούς λειτουργεί βελτιωτικά για την υψηλή αρχική φόρτιση της γραμμής Α41-Δ41 και του μετασχηματιστή Γ62-Γ42. Οι δύο μετασχηματιστές του υποσταθμού Γ δεν είναι πλέον παράλληλοι, επομένως, το ποσοστό φόρτισης του μετασχηματιστή Γ61-Γ41 αυξάνεται, χωρίς όμως να απειλεί τη στατική ασφάλεια του δικτύου.

4.1.2 Ασφαλή Όρια Παραγωγής Αιολικών Πάρκων

Λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα της ανάλυσης στατικής ασφάλειας που παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 3, καθορίζεται το ανώτατο όριο παραγωγής κάθε αιολικού σταθμού, προκειμένου καμία απώλεια στοιχείου, είτε γραμμής είτε φορτίου του δικτύου, να προκαλεί την αλυσιδωτή απώλεια στοιχείων του λόγω θερμικής υπερφόρτισης. Στον Πίνακα 4.2 παρουσιάζονται τα ασφαλή ανώτατα όρια παραγωγής κάθε αιολικού πάρκου, τα οποία διαφυλάσσουν τη στατική ασφάλεια του δικτύου έναντι όλων των N-1 διαταραχών. Όπως φαίνεται, μόνο για τα Α/Π Γ1, Γ2 και Θ1 δεν υπάρχει ανάγκη περιορισμού της μέγιστης παραγωγής τους. Η αιολική παραγωγή πρέπει να μειωθεί

αισθητά προκειμένου το δίκτυο να είναι στατικά ασφαλές, όταν οι διασυνδεδεικτοί διακόπτες είναι ανοιχτοί στους ζυγούς ΥΤ των υποσταθμών Α και Γ.

Πίνακας 4.2: Ασφαλή Όρια Παραγωγής για όλες τις N-1 Διαταραχές.

Αιολικό Πάρκο	Ασφαλές Όριο Παραγωγής (MW)		Ονομαστική Αιολική Παραγωγή (MW)
	ΔΔΖ κλειστοί	ΔΔΖ ανοιχτοί	
B1	49	49	70
B2	28	28	40
Γ1	55	55	55
Γ2	32	32	32
Δ1	84	84	120
E1	46	46	65
H1	49	42	90
Θ1	80	80	80
Συνολική Παραγωγή	423	416	552

Η παραβίαση της στατικής ασφάλειας του δικτύου προκαλείται από συγκεκριμένες διαταραχές. Επομένως, υπάρχει η δυνατότητα το κάθε Α/Π να εισάγει στο δίκτυο την ονομαστική ισχύ του, όταν δεν υπάρχει διαταραχή συνεπώς δεν απαιτείται η ρύθμιση του ανώτατου ορίου παραγωγής του. Εξετάζοντας τον Πίνακα 4.2, παρατηρείται ότι μεγάλο ποσοστό της δυνητικά παραγόμενης ισχύος θα παραμένει ανεκμετάλλευτο εάν οριστούν τα όρια αυτά. Στην παρούσα εργασία έχει θεωρηθεί ότι έχει δοθεί άδεια εγκατάστασης και λειτουργίας των Α/Π με τις δοθείσες ονομαστικές ισχύεις, συνεπώς, θα πρέπει να βρεθεί τρόπος (κατάλληλα σχήματα προστασίας ακεραιότητας συστήματος) ώστε να μπορούν τα Α/Π να λειτουργούν χωρίς περιορισμούς μέχρι την εμφάνιση κάποιας επικίνδυνης διαταραχής. Επομένως, το κριτήριο για τη σχεδίαση των κατάλληλων σχημάτων προστασίας είναι η αύξηση της διείσδυσης της αιολικής ισχύος στο δίκτυο. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η εφαρμογή των σχημάτων προστασίας του δικτύου από θερμική υπερφόρτιση τόσο για λειτουργία με κλειστούς διασυνδεδεικτούς διακόπτες των ζυγών ΥΤ όσο και με ανοιχτούς στους υποσταθμούς Α και Γ.

4.2 Εφαρμογή Σχημάτων Προστασίας Ακεραιότητας του Δικτύου

4.2.1 Προτεινόμενα Σχήματα Προστασίας Συστήματος

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται τα σχήματα προστασίας που αποσκοπούν στην καταπολέμηση των θερμικών υπερφορτίσεων μετά από συγκεκριμένες διαταραχές προς αποφυγή της μερικής σβέσης του συστήματος.

Οι διαταραχές που καθιστούν το δίκτυο ανασφαλές και οι συνέπειες τους, όπως αναλύθηκαν και

στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.3, για λειτουργία με κλειστούς τους διασυνδετικούς διακόπτες όλων των ζυγών, και στον Πίνακα 4.4, για λειτουργία του δικτύου με ανοιχτούς τους διασυνδετικούς διακόπτες στους ζυγούς ΥΤ των υποσταθμών Α και Γ.

Πίνακας 4.3: Διαταραχές προς αντιμετώπιση μέσω σχημάτων προστασίας (ΔΔΖ κλειστοί).

Κωδικός Διαταραχής	Στοιχείο που τίθεται εκτός λειτουργίας	Υπερφορτισμένο Στοιχείο	Ποσοστό φόρτισης (%)
2A	B41 - Δ41	A41 - Δ41	132
3A	A41 - Δ41	B41 - Δ41 B61 - B41 B62 - B42	111 123 123
4A	Γ42 - Η41	A41 - Δ41 B61 - B41 B62 - B42	107 114 114
5A	A61 - B61	A41 - Δ41	101

Πίνακας 4.4: Διαταραχές προς αντιμετώπιση μέσω σχημάτων προστασίας (ΔΔΖ ανοιχτοί).

Κωδικός Διαταραχής	Στοιχείο που τίθεται εκτός λειτουργίας	Υπερφορτισμένο Στοιχείο	Ποσοστό φόρτισης (%)
2B	B41 - Δ41	A41 - Δ41	132
3B	A41 - Δ41	B41 - Δ41 B61 - B41 B62 - B42	111 123 123
4B	Γ42 - Η41	B61 - B41 B62 - B42	118 118
6B	B42 - Η41	Γ62 - Γ42	104
Φ1	ΦΓ2	Γ61 - Γ41	125
Φ2	ΦΒ2	B61 - B41 B62 - B42	103 103

Στη συνέχεια προτείνεται η εγκατάσταση και η λειτουργία Σχημάτων Προστασίας Συστήματος (ΣΠ) που είτε ρυθμίζουν κατάλληλα τα ανώτατα όρια παραγωγής κάποιων αιολικών σταθμών προκειμένου να μειώνεται η ροή ισχύος σε κλάδους του δικτύου, όταν αυτό κρίνεται απαραίτητο, είτε κλείνουν ή ανοίγουν κάποιον από τους διασυνδετικούς διακόπτες των ζυγών ΥΤ στους υποσταθμούς Α και Γ. Με τον τρόπο αυτό αυξάνεται η διείσδυση αιολικής ενέργειας στο δίκτυο, αφού κάθε Α/Π έχει τη δυνατότητα να εισάγει την ονομαστική ισχύ του, εκτός από τις περιπτώσεις διαταραχών, οπότε περιορίζεται το όριο παραγωγής του από το αντίστοιχο σχήμα προστασίας.

Τα σχήματα προστασίας που προτείνονται, προκειμένου να αντιμετωπιστούν οι διαταραχές που καθιστούν το δίκτυο ανασφαλές και να αποφευχθεί η αλυσιδωτή απώλεια στοιχείων λόγω θερμικής υπερφόρτισης παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.5.

Όπως παρατηρείται, για τη διασφάλιση της ασφαλούς λειτουργίας του εξεταζόμενου δικτύου απαιτείται η λειτουργία πέντε σχημάτων προστασίας. Τα δύο από αυτά τα σχήματα έχουν ως δράση το άνοιγμα ή κλείσιμο κάποιου διασυνδετικού διακόπτη των ζυγών ΥΤ σε κάποιο από τους υποσταθμούς Α ή Γ, ενώ τα υπόλοιπα τρία σχήματα προστασίας έχουν ως δράση τη ρύθμιση του

Πίνακας 4.5: Σχήματα Προστασίας Ακεραιότητας Συστήματος.

Όνομα	Ανίχνευση Διαταραχής	Δράση ΣΠ
ΣΠ 5Α	Απώλεια ΓΜ Α61-Β61	Άνοιγμα ΔΔ Α41-Α42
ΣΠ Φ6Β	Απώλεια ΓΜ Β42-Η41 Απώλεια ΦΓ2	Κλείσιμο ΔΔ Γ41-Γ42 Κλείσιμο ΔΔ Γ41-Γ42
ΣΠ 23ΑΒ	Απώλεια ΓΜ Β41-Δ41 Απώλεια ΓΜ Α41-Δ41	Ρύθμιση setpoint Α/Π Δ1 στα 84MW (70%) Ρύθμιση setpoint Α/Π Δ1 στα 104MW (87%)
ΣΠ Φ3ΑΒ	Απώλεια ΓΜ Α41-Δ41 Απώλεια ΦΒ2	Ρύθμιση setpoint Α/Π Β1 στα 49MW (70%) Α/Π Β2 στα 28MW (70%) Α/Π Ε1 στα 46MW (70%) Ρύθμιση setpoint Α/Π Β1 στα 67MW (95%) Α/Π Β2 στα 38MW (95%) Α/Π Ε1 στα 62MW (95%)
ΣΠ 4ΑΒ	Απώλεια ΓΜ Γ42-Η41 (ΔΔΖ κλειστοί) Απώλεια ΓΜ Γ42-Η41 (ΔΔΖ κλειστοί)	Ρύθμιση setpoint Α/Π Η1 στα 49MW (53%) Ρύθμιση setpoint Α/Π Η1 στα 42MW (47%)

ορίου παραγωγής σε αιολικά πάρκα του δικτύου. Το ΣΠ 5Α λειτουργεί για την αντιμετώπιση της διαταραχής 5Α, ενώ το ΣΠ Φ6Β έχει ως στόχο την αντιμετώπιση των διαταραχών ΦΓ2 και 6Β. Το ΣΠ 23ΑΒ αντιμετωπίζει τις διαταραχές 2Α, 2Β και 3Α, 3Β. Τέλος, το ΣΠ Φ3ΑΒ αντιμετωπίζει τις διαταραχές ΦΒ2, 3Α, 3Β και 4Α, 4Β, ενώ το ΣΠ 4ΑΒ λειτουργεί προς αντιμετώπιση των διαταραχών 4Α και 4Β. Οι εννέα αυτές διαταραχές που καθιστούν το δίκτυο ανασφαλές παρουσιάστηκαν αναλυτικά στο Κεφάλαιο 3 και στους Πίνακες 4.3 και 4.4. Τα προτεινόμενα σχήματα προστασίας ακεραιότητας συστήματος περιγράφονται αναλυτικά στην επόμενη ενότητα του παρόντος κεφαλαίου.

4.2.2 Χαρακτηριστικά Σχημάτων Προστασίας Συστήματος

Τα σχήματα προστασίας που προτείνονται ως λύση για την αντιμετώπιση της αλυσιδωτής απώλειας στοιχείων του δικτύου λόγω θερμικής υπερφόρτισης πρέπει να εξασφαλίζουν την τήρηση των κριτηρίων επάρκειας και ασφάλειας του δικτύου. Η προστασία που προτείνεται βασίζεται στην ανίχνευση συγκεκριμένης διαταραχής.

Η δομή κάθε σχήματος προστασίας συστήματος είναι παρόμοια με αυτή που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 2. Κάθε Σχήμα αποτελείται από τρία μπλοκ, το μπλοκ εισόδου, το μπλοκ απόφασης και

το μπλοκ δράσης. Η ανίχνευση των διακριτών γεγονότων πραγματοποιείται στο μπλοκ εισόδου. Η εντολή ρύθμισης του ανώτατου ορίου παραγωγής είτε της μεταβολής κατάστασης του διασυνδεδετικού διακόπτη ζυγών ΥΤ εφαρμόζεται στο μπλοκ απόφασης. Τέλος, δράση του Σχήματος ολοκληρώνεται στο μπλοκ δράσης. Η σχεδίαση του σχήματος παρουσιάστηκε αναλυτικά στο Κεφάλαιο 2 και τα βήματα που ακολουθούνται είναι τα εξής:

- Η σχεδίαση της λογικής, στην οποία βασίζεται η λειτουργία του και ο καθορισμός των διαταραχών που ενεργοποιούν το σχήμα και οι επιπτώσεις πιθανών σφαλμάτων αυτού στο δίκτυο.
- Η επιλογή του υλικοτεχνικού εξοπλισμού που θα χρησιμοποιηθεί, του κατάλληλου λογικού επεξεργαστή και των διατάξεων παρακολούθησης.
- Η δοκιμή της λειτουργίας του σχήματος μετά την υλοποίηση του ελέγχονται οι χρησιμοποιούμενες διατάξεις και η συμφωνία τους με την αρχική σχεδίαση.
- Ο καθορισμός του πρωτοκόλλου λειτουργίας και συντήρησης για την εξασφάλιση της ορθής λειτουργίας του και αποφυγή ανεπιθύμητη δράσης του.
- Η επανεκτίμηση της δράσης και η αξιολόγηση της οδηγούν σε αναθεώρηση της σχεδίασης του σχήματος και κάποιων από τις δράσεις του, προκειμένου να βελτιώνει τη συνολική λειτουργία του δικτύου.

Όλα τα σχήματα προστασίας που προτείνονται στην παρούσα διπλωματική εργασία, είναι τοπικά σχήματα προστασίας με αποκεντρωμένη λογική. Δηλαδή, δε μεσολαβεί κέντρο ελέγχου τόσο στη λήψη αποφάσεων όσο και στον καθορισμό της δράσης τους. Επίσης, η δράση τους βασίζεται στην τήρηση απλών κανόνων της μορφής «εάν... τότε...». Οι διαταραχές που αντιμετωπίζουν τα συγκεκριμένα σχήματα προστασίας είναι κυρίως της μορφής N-1, ωστόσο η μη λειτουργία τους έχει αρνητικό αντίκτυπο στο δίκτυο. Γι' αυτό το λόγο εντάσσονται στην ευρύτερη ομάδα σχημάτων προστασίας Τύπου I (Κεφάλαιο 2), στο διαχωρισμό ως προς την κρίσιμότητά τους. Η δράση τους έχει ως στόχο την αντιμετώπιση διαταραχών που απειλούν τη στατική ασφάλεια του δικτύου, ενώ λόγω της φύσης του προβλήματος που καλούνται να αντιμετωπίσουν (παραβίαση θερμικών ορίων κλάδων του δικτύου) η ταχύτητα απόκρισης του δεν είναι τόσο κρίσιμη ώστε να απειλείται η ευστάθεια του δικτύου.

Ο σχεδιασμός των σχημάτων προστασίας συστήματος γίνεται ενδεικτικά και προτείνεται ο αλγόριθμος στον οποίο βασίζεται η λειτουργία τους. Το συγκεκριμένο κεφάλαιο αποτελεί μια αρχική πρόταση για τη λειτουργία των σχημάτων που θα λειτουργούν στο εξεταζόμενο δίκτυο και πρέπει να συνδυαστεί με εξειδικευμένη μελέτη εφαρμογής τους. Τα σχήματα προστασίας ακεραιότητας συστήματος πρέπει να έχουν τα χαρακτηριστικά που προτείνονται και παρουσιάζονται αναλυτικά στις επόμενες ενότητες.

4.2.3 Σχήμα Προστασίας 5A (ΣΠ 5A)

Το ΣΠ 5A αντιμετωπίζει την υπερφόρτιση της γραμμής A41-Δ41 η οποία αποτελεί ένα επικίνδυνο σημείο του δικτύου λόγω της υψηλής αρχικής του φόρτισης.

Ανίχνευση Διαταραχής

Στον υποσταθμό A θεωρείται εγκατεστημένη μια διάταξη παρακολούθησης η οποία επιτρέπει το διακόπτη ισχύος της γραμμής A61-B61, η οποία αποτελεί και τη σύνδεση του υποσταθμού αυτού με τον υποσταθμό B. Σε περίπτωση, όμως, που ανοίξει ο διακόπτης ισχύος της γραμμής από την πλευρά του υποσταθμού B, μέσω τηλεμέτρησης ενεργοποιείται το ΣΠ 5A.

Δράση ΣΠ 5A

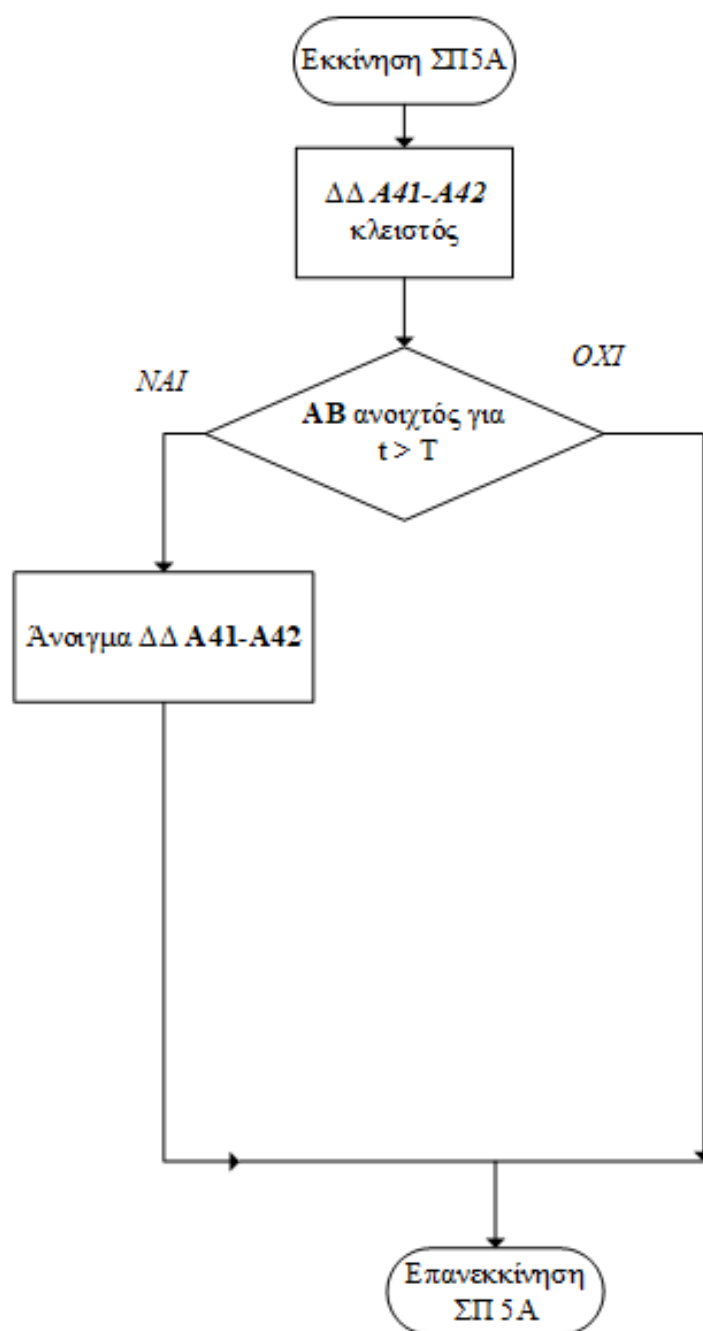
Μόλις ανιχνευτεί η απώλεια της γραμμής A61-B61 ο διασυνδετικός διακόπτης των ζυγών A41 και A42 ανοίγει, εάν είναι κλειστός αρχικά. Με αυτόν τον τρόπο μεταφέρεται μέσω της γραμμής A41-Δ41 λιγότερη ισχύς αφού τροφοδοτείται μόνο το φορτίο ΦΑ2 του ζυγού A41. Το φορτίο ΦΑ3 του ζυγού A42 τροφοδοτείται από το ζυγό A62 μέσω του μετασχηματιστή A62-A42. Μειώνοντας το φορτίο που πρέπει να τροφοδοτήσει ο αιολικός σταθμός Δ1 αποτρέπεται και η υπερφόρτιση της γραμμής A41-Δ41. Η λειτουργία του ΣΠ 5A είναι απλή και βασίζεται στον αλγόριθμο που παρουσιάζεται στο διάγραμμα ροής του Σχήματος 4.1.

Σε περίπτωση βραχυκυκλώματος της γραμμής A61-B61 το σχήμα προστασίας δεν πρέπει να δράσει αφού η γραμμή θα τεθεί στιγμιαία εκτός λειτουργίας για την εκκαθάριση του σφάλματος και θα ξανακλείσουν οι διακόπτες ισχύος της επαναφέροντάς την σε λειτουργία. Προκειμένου να διασφαλιστεί η ορθή λειτουργία του ΣΠ 5A πρέπει να υπάρχει θεσπισμένος χρόνος δράσης του σχήματος. Αν η γραμμή A61-B61 βρίσκεται εκτός λειτουργίας για χρονικό διάστημα μεγαλύτερο του ενός δευτερολέπτου, αφού σε αυτό το χρονικό διάστημα θα έχει ολοκληρωθεί η εκκαθάριση πιθανού βραχυκυκλώματος. Επομένως εάν ο διακόπτης ισχύος της γραμμής AB παραμείνει ανοιχτός τουλάχιστον για χρονικό διάστημα μεγαλύτερο του $T = 1\text{sec}$ ενεργεί το ΣΠ 5A και αν ο διασυνδετικός διακόπτης των ζυγών A41 και A42 είναι ανοιχτός, τον κλείνει.

Τέλος, μόλις ανιχνευτεί το κλείσιμο του διακόπτη ισχύος AB της γραμμής A61-B61 ο διασυνδετικός διακόπτης των ζυγών A41 και A42 επανέρχεται στην προ διαταραχής κατάσταση του, δηλαδή κλειστός.

4.2.4 Σχήμα Προστασίας Φ6B (ΣΠ Φ6B)

Σκοπός του ΣΠ Φ6B είναι η προστασία των δύο μετασχηματιστών του υποσταθμού Γ. Ειδικότερα προστατεύει τους δύο μετασχηματιστές από την απώλεια της γραμμής B42-H41 και την απώλεια του φορτίου ΦΓ2 στο ζυγό Γ42.



Σχήμα 4.1: Σχήμα Προστασίας 5Α.

Ανίχνευση Διαταραχής

Το ΣΠ Φ6Β δρα σε δύο διαφορετικές περιπτώσεις. Όταν το δίκτυο λειτουργεί με το διασυνδεδεμένο διακόπτη των ζυγών Γ41 και Γ42 ανοιχτό η απώλεια της γραμμής Β42-Η41 προκαλεί την υπερφόρτιση του μετασχηματιστή Γ62-Γ42, ενώ η απώλεια του φορτίου προκαλεί την υπερφόρτιση του μετασχηματιστή Γ61-Γ41. Η ανίχνευση της απώλειας της γραμμής Β42-Η41 μπορεί να πραγματοποιηθεί με δύο διαφορετικούς τρόπους:

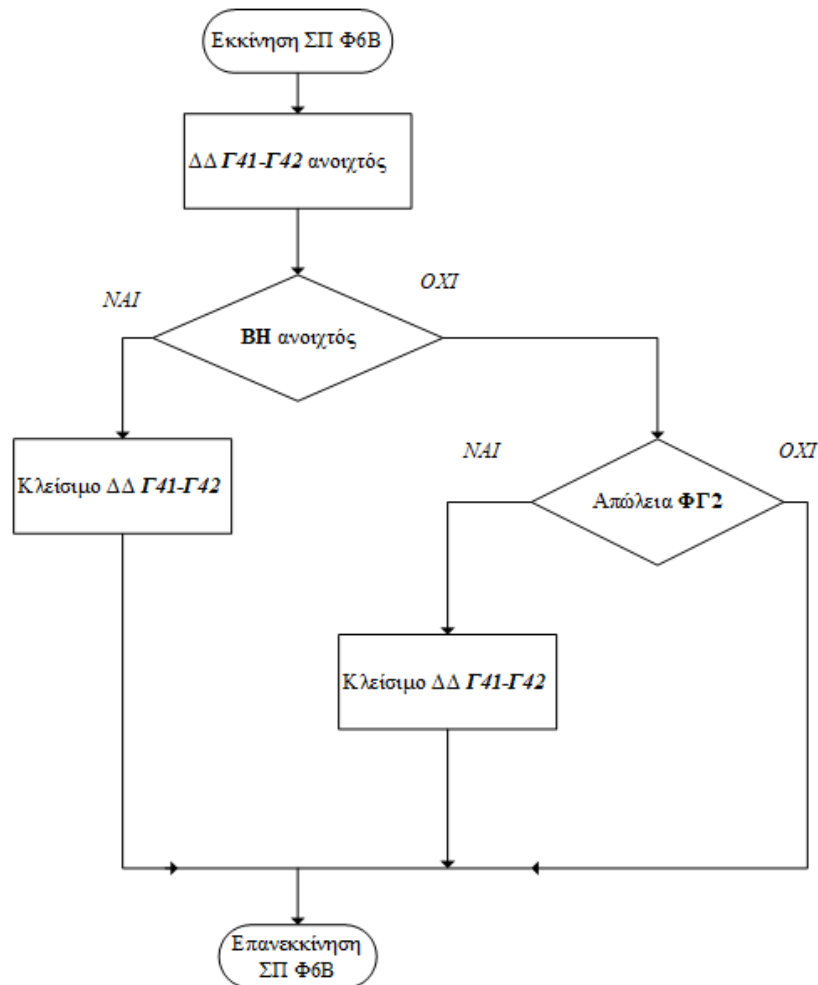
- Μέσω των διατάξεων παρακολούθησης στον αιολικό σταθμό Η1 επιτηρείται ο διακόπτης ισχύος των γραμμών Β42-Η41 (ΒΗ) και Γ42-Η41 (ΓΗ). Μόλις ανοίξει ο διακόπτης ισχύος της γραμμής Β42-Η41 αποστέλλεται μέσω τηλεπικοινωνιακού διαύλου το κατάλληλο σήμα στον υποσταθμό Γ για να κλείσει ο διασυνδεδετικός διακόπτης. Κατά αναλογία με τη λειτουργία του ΣΠ 5Α, μέσω τηλεμέτρησης επιτηρείται και ο διακόπτης της γραμμής από την πλευρά του υποσταθμού Γ. Το ΣΠ Φ6Β δρα μετά από ένα χρονικό διάστημα $T=1\text{sec}$, με σκοπό να αποφευχθεί η λειτουργία του σχήματος σε περίπτωση βραχυκυκλώματος, κάτι το οποίο είναι ανεπιθύμητο.
- Εναλλακτικά, η ενεργοποίηση του ΣΠ Φ6Β, για την απώλεια της γραμμής Β42-Η41, μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη μέτρηση της ροής ισχύος στους δύο μετασχηματιστές. Οι μετασχηματιστές έχουν τη δυνατότητα λειτουργίας, για ένα μικρό χρονικό διάστημα, με φόρτιση άνω των ονομαστικών τους ρευμάτων. Επομένως, δεν απαιτείται η άμεση μείωση της ροής ισχύος. Σε περίπτωση που η ροή ισχύος στο μετασχηματιστή ξεπεράσει απότομα το θερμικό όριο του, ενεργοποιείται το ΣΠ Φ6Β.

Για την ανίχνευση της απώλειας του φορτίου ΦΓ2 (32MW) μετράται η ζήτηση του ζυγού Γ41 και αν αυτή λάβει απότομα τιμή μικρότερη των 32MW, θεωρείται ως διαταραχή η απώλεια του φορτίου αυτού. Η ροή ενεργού ισχύος στον κλάδο αυτό είναι 134,2MW έναντι 107,7MVA που είναι το θερμικό όριο του μετασχηματιστή, επομένως, απαιτείται η μείωση εγχέομενης ισχύος στο ζυγό Γ41. Εναλλακτικά, η ανίχνευση του συμβάντος μπορεί να γίνει μέσω της μέτρησης της ροής ενεργού ισχύος στο μετασχηματιστή Γ61-Γ41 και αν η μετρούμενη τιμή ξεπεράσει απότομα το ονομαστικό θερμικό του όριο, δρα το ΣΠ Φ6Β, εντός μικρού χρονικού πλαισίου, προκειμένου να αντιμετωπιστεί η υπερφόρτιση. Ωστόσο η υπερφόρτιση του μετασχηματιστή πρέπει να αντιμετωπιστεί έτσι ώστε να μην χειροτερεύσει και έχει δυσμενέστερες επιπτώσεις στη λειτουργία του δικτύου.

Δράση ΣΠ Φ6Β

Όπως διαπιστώθηκε στην ανάλυση που πραγματοποιήθηκε στο Κεφάλαιο 3, δεν είναι απαραίτητη η ρύθμιση των ορίων παραγωγής ενός ή περισσότερων αιολικών πάρκων του δικτύου προκειμένου να αντιμετωπιστεί η απώλεια της γραμμής Β42-Η41 και του φορτίου ΦΓ2, οι οποίες προκαλούν την υπερφόρτιση του μετασχηματιστή Γ62-Γ42 και Γ61-Γ41 αντίστοιχα. Σε κατάσταση λειτουργίας με ανοιχτούς τους διασυνδεδετικούς διακόπτες των ζυγών ΥΤ του υποσταθμού Γ η ανίχνευση της απώλειας της γραμμής Β42-Η41 αλλά και η ανίχνευση της απώλειας του φορτίου ΦΓ2 ενεργοποιούν τη λειτουργία του σχήματος κλείνοντας το διασυνδεδετικό διακόπτη στον υποσταθμό Γ. Η φιλοσοφία του ΣΠ Φ6Β είναι απλή και βασίζεται στο διάγραμμα ροής του Σχήματος 4.2.

Σε αντιστοιχία με τη λειτουργία του ΣΠ 5Α, όταν από τις διατάξεις παρακολούθησης ανιχνευτεί το κλείσιμο του διακόπτη ισχύος ΒΗ της γραμμής Β42-Η41, που σηματοδοτεί την επαναλειτουργία της, ο διασυνδεδετικός διακόπτης των ζυγών Γ41 και Γ42 του υποσταθμού επανέρχεται στην προ διαταραχής κατάσταση του, δηλαδή ανοιχτός. Επίσης, όταν η ενεργός ισχύς του φορτίου ΦΓ2



Σχήμα 4.2: Σχήμα Προστασίας Φ6B.

στο ζυγό Γ41 λάβει τιμή ίση ή μεγαλύτερη των 32MW το φορτίο βρίσκεται εντός λειτουργίας, συνεπώς ο διασυνδετικός διακόπτης των ζυγών ΥΤ του υποσταθμού Γ επανέρχεται, επίσης, στην προ διαταραχής κατάσταση του, δηλαδή ανοιχτός.

4.2.5 Σχήμα Προστασίας 23AB (ΣΠ 23AB)

Σκοπός του ΣΠ 23AB είναι η αντιμετώπιση των υπερφορτίσεων των γραμμών Α41-Δ41 και Β41-Δ41 σε περίπτωση που το αιολικό πάρκο Δ1 χάσει τη μία εκ των δύο οδεύσεων του. Με την απώλεια της μίας οδεύσης του Δ1 προκαλείται η θερμική υπερφόρτιση της εναπομένουσας οδεύσης. Το ΣΠ 23AB λειτουργεί ανεξαρτήτως από το αν οι διασυνδετικοί διακόπτες στους ζυγούς ΥΤ των υποσταθμών Α και Γ είναι ανοιχτοί ή κλειστοί.

Ανίχνευση Διαταραχής

Στο Α/Π Δ1 είναι εγκατεστημένη μια διάταξη παρακολούθησης (sensors) η οποία επιτηρεί τους δύο διακόπτες ισχύος των οδεύσεων του, γραμμές Α41-Δ41 και Β41-Δ41. Αν οι δύο διακόπτες

είναι ανοιχτοί τότε μηδενίζεται το όριο παραγωγής του αιολικού σταθμού. Σε περίπτωση που ο διακόπτης ισχύος της γραμμής B41-Δ41 (BΔ) είναι ανοιχτός, αντίστοιχα, αν ο διακόπτης ισχύος της γραμμής A41-Δ41 (AΔ) είναι ανοιχτός ενεργοποιείται η λειτουργία του σχήματος για να περιορίσει την ισχύ του αιολικού σταθμού Δ1. Μέσω τηλεμέτρησης ελέγχονται και οι άλλοι δύο διακόπτες ισχύος των γραμμών. Ο διακόπτης της γραμμής A41-Δ41 στον υποσταθμό A και ο διακόπτης ισχύος της γραμμής B41-Δ41 στον υποσταθμό B αντίστοιχα. Στο Σχήμα 4.3 παρουσιάζεται η λογική λειτουργίας του ΣΠ 23AB και το αντίστοιχο διάγραμμα ροής. Είναι σημαντικό να αναφερθεί και σε αυτή την περίπτωση ότι ο κάθε διακόπτης πρέπει να παραμένει ανοιχτός για χρονικό διάστημα μεγαλύτερο του $T=1\text{sec}$ για να ενεργοποιηθεί το ΣΠ 23AB και να ρυθμιστεί το όριο παραγωγής του Δ1.

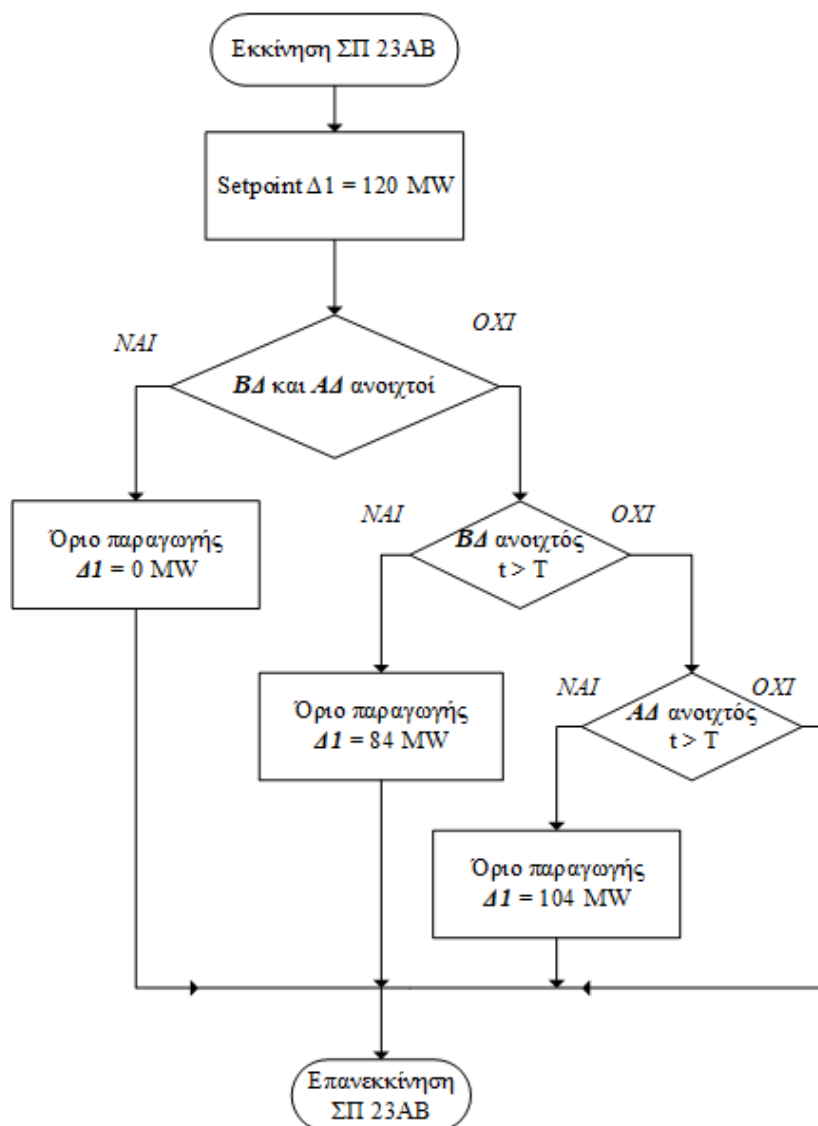
Η λογική ελέγχου σχεδιάζεται για χρήση προγραμματιζόμενου λογικού ελεγκτή (PLC) προκειμένου να μεταβιβάζεται η ανίχνευση του συμβάντος εγκαίρως στο μπλοκ απόφασης του ΣΠ 23AB και να ρυθμίζεται το ανώτατο όριο παραγωγής του Δ1. Σκοπός του είναι η έγκαιρη αντιμετώπιση των διαταραχών που προκαλούν την παραβίαση των θερμικών ορίων των συγκεκριμένων κλάδων, έτσι ώστε να αποφευχθεί η υπερφόρτιση τους και δευτερευόντως η απώλεια του αιολικού σταθμού Δ1.

Δράση ΣΠ 23AB

Με την ανίχνευση της απώλειας της γραμμής B41-Δ41 το όριο παραγωγής του αιολικού πάρκου Δ1 μειώνεται στο 70% της ονομαστικής του ισχύος, προκειμένου να μειωθεί η ροή ισχύος στη γραμμή A41-Δ41 και να αντιμετωπιστεί η υπερφόρτιση της. Με την ανίχνευση της απώλειας της γραμμής A41-Δ41 το όριο παραγωγής του σταθμού ορίζεται ίσο με το 87% της ονομαστικής ισχύος του.

Εάν μεταβληθεί το στιγμιότυπο λειτουργίας του δικτύου και η ζήτηση των φορτίων του υποσταθμού A αυξηθεί, η λειτουργία του ΣΠ 23AB δε μεταβάλλεται, ανεξάρτητα από την κατάσταση του διασυνδεδετικού διακόπτη μεταξύ των ζυγών A41 και A42. Η απώλεια μιας εκ των γραμμών A41-Δ41 είτε B41-41 συνεπάγεται την απώλεια μιας εκ των δύο οδεύσεων του αιολικού σταθμού Δ1, η παραγωγή του οποίου θα μεταφέρεται μέσω της εναπομένουσας γραμμής. Το ανώτατο όριο παραγωγής του πάρκου, όμως, παραβιάζει τα θερμικά όρια και των δύο γραμμών. Ανεξαρτήτως, λοιπόν, από το φορτίο του δικτύου η ρύθμιση του ορίου παραγωγής για την αποφυγή των εξεταζόμενων υπερφορτίσεων παραμένει ίδια.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι σε περίπτωση ανίχνευσης του κλεισίματος του ανοιχτού διακόπτη ισχύος, είτε της γραμμής A41-Δ41 είτε της B41-Δ41, το όριο παραγωγής του αιολικού σταθμού Δ1 τίθεται ίσο με την ονομαστική του τιμή, αφού όταν οι δύο οδεύσεις του βρίσκονται εντός λειτουργίας δεν απαιτείται ο περιορισμός της παραγωγής του.



Σχήμα 4.3: Σχήμα Προστασίας 23AB.

4.2.6 Σχήμα Προστασίας Φ3AB (ΣΠ Φ3AB)

Σκοπός του ΣΠ Φ3AB είναι η αντιμετώπιση της υπερφόρτισης των δύο παράλληλων μετασχηματιστών του υποσταθμού Β. Το σχήμα ρυθμίζει τα ανώτατα όρια παραγωγής των αιολικών σταθμών Β1, Β2 και Ε1 μετά την απώλεια της γραμμής Α41-Δ41, κατά την οποία δρα σε συνδυασμό με το ΣΠ 23AB, και μετά την απώλεια του φορτίου ΦΒ2. Στόχος της λειτουργίας του είναι η μείωση της μεταφερόμενης, μέσω των δύο μετασχηματιστών, ισχύος στους ζυγούς ΥΥΤ του υποσταθμού Β.

Ανίχνευση Διαταραχής

Μέσω των διατάξεων παρακολούθησης του αιολικού σταθμού Δ1 επιτηρείται ο διακόπτης ισχύος ΑΔ της γραμμής μεταφοράς Α41-Δ41. Όταν αυτός είναι ανοιχτός ενεργοποιείται η λειτουργία του ΣΠ 23ΑΒ και ταυτόχρονα μέσω του τηλεπικοινωνιακού διαύλου που συνδέει τον υποσταθμό Β με τον αιολικό σταθμό Δ1 αποστέλλεται το κατάλληλο σήμα (Σήμα Α/Π Δ1) στα Α/Π Β1, Β2 και Ε1, προκειμένου το ανώτατο όριο παραγωγής τους να οριστεί ίσο με το 70% της ονομαστικής τους ισχύος για να αποφευχθεί η υπερφόρτιση των δύο παράλληλων μετασχηματιστών του υποσταθμού Β. Αν το (Σήμα Α/Π Δ1) δεν αποσταλεί, τα Α/Π Β1, Β2 και Ε1, το ανώτατο όριο παραγωγής τους ισούται με την ονομαστική τους ισχύ.

Εναλλακτικά, η ενεργοποίηση του ΣΠ Φ3ΑΒ μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη μέτρηση της ροής ισχύος στους δύο μετασχηματιστές. Σε περίπτωση που η ροή ισχύος σε ένα μετασχηματιστή λάβει απότομα τιμή του ονομαστικού θερμικού του ορίου, ενεργοποιείται το ΣΠ Φ3ΑΒ.

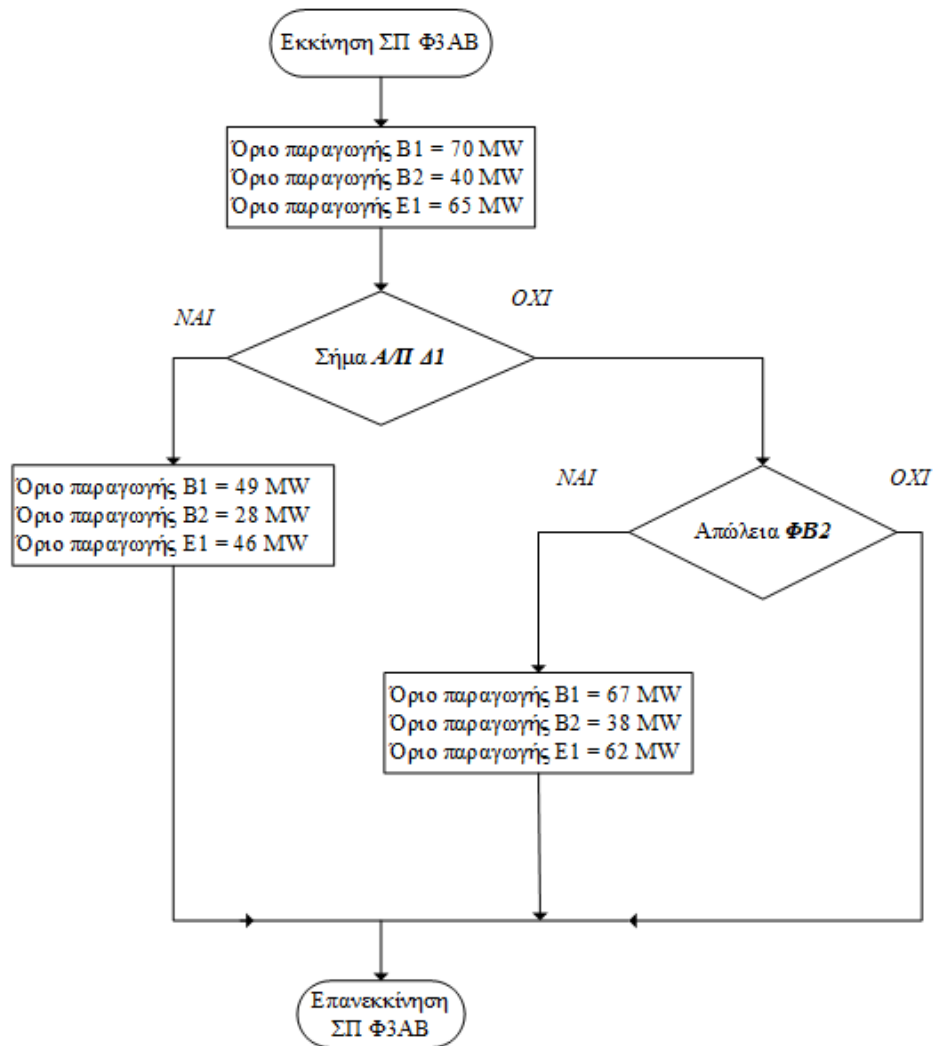
Η απώλεια του φορτίου ΦΒ2 του ζυγού Β41, η ζήτηση του οποίου στο εξεταζόμενο στιγμιότυπο λειτουργίας ισούται με 22MW, ενεργοποιεί επίσης το σχήμα. Αν η μέτρηση της ενεργού ισχύος που καταναλώνει το φορτίο υποδεικνύει απότομη σημαντική μείωση της κάτω των 22MW που θεωρείται το ελάχιστο φορτίο του ζυγού, θεωρείται ως διαταραχή η απώλεια του φορτίου ΦΒ2. Στο Σχήμα 4.4 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής στο οποίο βασίζεται η λειτουργία του ΣΠ Φ3ΑΒ.

Δράση ΣΠ Φ3ΑΒ

Μετά την ανίχνευση των εξεταζόμενων διαταραχών το ΣΠ Φ3ΑΒ ενεργοποιείται και ρυθμίζει κατάλληλα τα όρια παραγωγής των αιολικών πάρκων Β1, Β2 και Ε1. Προκειμένου να αποφευχθεί η υπερφόρτιση των δύο μετασχηματιστών του υποσταθμού Β μετά την απώλεια της γραμμής Α41-Δ41 οι αιολικοί σταθμοί Β1, Β2 και Ε1 εισάγουν στο δίκτυο το 70% της ονομαστικής τους ισχύος, ενώ όλοι οι υπόλοιποι αιολικοί σταθμοί εισάγουν τη μέγιστη παραγωγή τους. Μετά την ανίχνευση της απώλειας του φορτίου ΦΒ2 τα Α/Π Β1, Β2 και Ε1 εισάγουν στο δίκτυο το 95% της ονομαστικής τους ισχύος.

Η λειτουργία του ΣΠ Φ3ΑΒ, ανεξάρτητα από την κατάσταση των διασυνδεδειγμένων διακοπών των ζυγών ΥΤ στους υποσταθμούς Α και Γ, δε μεταβάλλεται σε περίπτωση μεταβολής του φορτίου. Ειδικότερα, η αύξηση του φορτίου ΦΒ1 από 55MW σε 65MW μεταβάλλει τη φόρτιση των δύο παράλληλων μετασχηματιστών του υποσταθμού από 123% σε 122%, ωστόσο αυτό δεν αποτελεί πρόβλημα για τη λειτουργία του σχήματος. Η μεταβολή κάποιου από τα φορτία στους ζυγούς ΥΤ του υποσταθμού Β λειτουργεί βοηθητικά για την αντιμετώπιση των δύο αυτών υπερφορτίσεων.

Σε περίπτωση ανίχνευσης του κλεισίματος του διακόπτη ισχύος ΑΔ της γραμμής Α41-Δ41 αποστέλλεται μέσω του τηλεπικοινωνιακού διαύλου το κατάλληλο σήμα στους αιολικούς σταθμούς



Σχήμα 4.4: Σχήμα Προστασίας Φ3AB.

B1, B2 και E1 προκειμένου να αρθεί ο περιορισμός της παραγωγής τους. Επίσης, μόλις η ζήτηση του φορτίου ΦB2 στο ζυγό B41 λάβει τιμή μεγαλύτερη ή ίση των 22MW, το φορτίο τίθεται εντός λειτουργίας και αποσύρεται ο περιορισμός της παραγωγής των αιολικών σταθμών B1, B2 και E1. Το όριο παραγωγής τους τίθεται ίσο με το προ διαταραχής όριο παραγωγής, δηλαδή ίσο με την ονομαστική τους ισχύ.

4.2.7 Σχήμα Προστασίας 4AB (ΣΠ 4AB)

Στόχος του ΣΠ 4AB είναι η αντιμετώπιση των υπερφορτίσεων της γραμμής A41-Δ41 και των δύο παράλληλων μετασχηματιστών του υποσταθμού B. Η κατάσταση των διασυνδεδειγμένων διακοπών των ζυγών ΥΤ μεταβάλλει τις επιπτώσεις της απώλειας της γραμμής Γ42-Η41. Όταν οι διακόπτες ΥΤ στους υποσταθμούς Α και Γ είναι ανοιχτοί η γραμμή A41-Δ41 δεν υπερφορτίζεται μετά την απώλεια της γραμμής Γ42-Η41. Στόχος της λειτουργίας του είναι η μείωση της ροής ισχύος στους κλάδους αυτούς προκειμένου να μην υπερφορτιστούν.

Ανίχνευση Διαταραχής

Μέσω των διατάξεων παρακολούθησης επιτηρείται ο διακόπτης ισχύος των γραμμών B42-H41 (BH) και Γ42-H41 (GH). Αν και οι δύο διακόπτες είναι ανοιχτοί, υποδεικνύοντας ότι το Α/Π Η1 χάνει και τις δύο οδεύσεις του, το όριο παραγωγής του μηδενίζεται. Αν μόνο η γραμμή Γ42-H41 τεθεί εκτός λειτουργίας, ο διακόπτης ισχύος ΓΗ είναι ανοιχτός. Οι δύο αυτοί διακόπτες πρέπει να επιτηρούνται και από τη μεριά των δύο υποσταθμών, Β και Γ αντίστοιχα. Επομένως, είτε σε περίπτωση που κάποιος από αυτούς τους δύο διακόπτες ισχύος είναι ανοιχτός ενεργοποιείται η κατάλληλη ρύθμιση του ΣΠ 4AB. Σημαντικός είναι και ο χρόνος δράσης του σχήματος, ο οποίος πρέπει να είναι μεγαλύτερος του ενός δευτερολέπτου προκειμένου να διασφαλιστεί η εγκυρότητα του σχήματος.

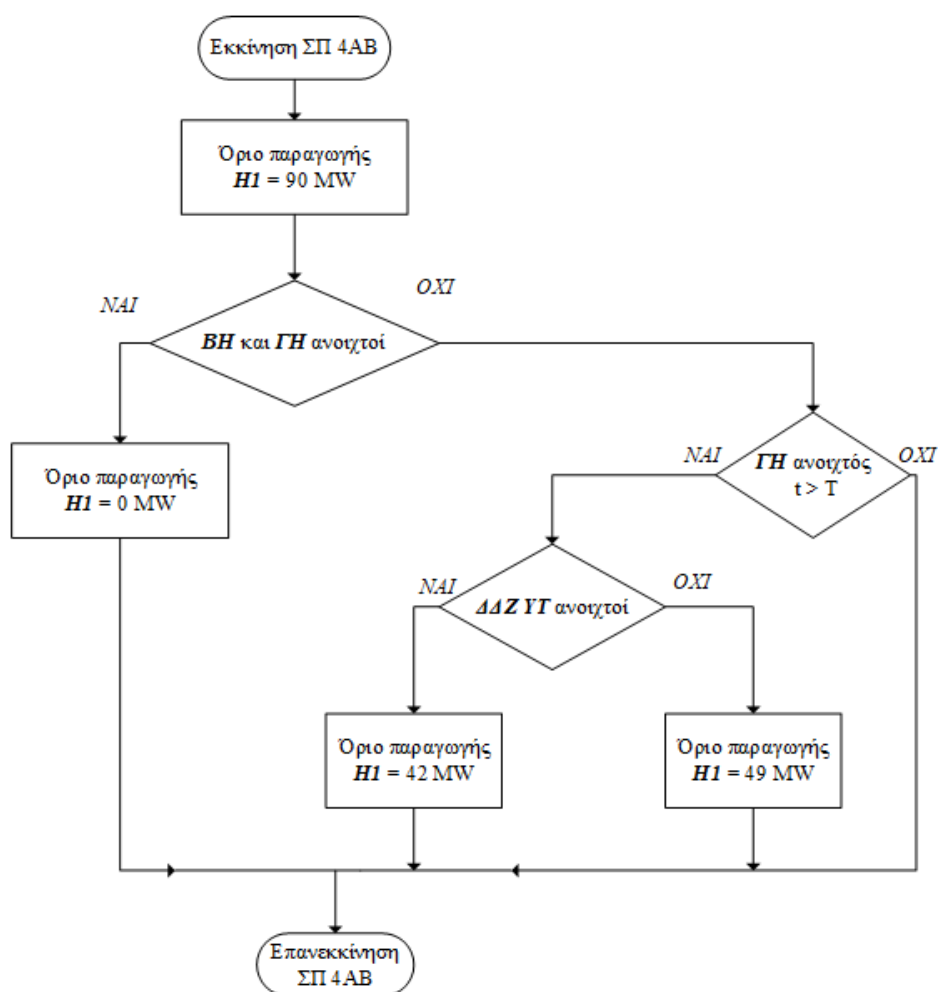
Ο αιολικός σταθμός Η1 «επωμίζεται» τον περιορισμό της ροής ισχύος σε αυτούς τους κλάδους, χωρίς τη ρύθμιση των ανώτατων ορίων παραγωγής και των υπολοίπων αιολικών πάρκων που συνδέονται με τους ζυγούς Β41 και Β42, λόγω του περιορισμού της παραγωγής αυτών προς αντιμετώπιση άλλων διαταραχών. Η ισχύς του Α/Π Η1 περιορίζεται μόνο με την ανίχνευση της συγκεκριμένης διαταραχής. Αντίστοιχα, όταν η γραμμή μεταφοράς Γ42-H41 τεθεί εκτός λειτουργίας και οι διασυνδεδειγμένοι διακόπτες των ζυγών ΥΤ στους υποσταθμούς Α και Γ είναι ανοιχτοί ενεργοποιείται εκ νέου το ΣΠ 4AB.

Δράση ΣΠ 4AB

Εάν ανιχνευτεί η απώλεια της γραμμής Γ42-H41 και οι διασυνδεδειγμένοι διακόπτες των ζυγών ΥΤ στους υποσταθμούς Α και Γ είναι ανοιχτοί το όριο παραγωγής του αιολικού σταθμού ορίζεται ίσο με 49MW εισάγοντας στο δίκτυο το 53% της ονομαστικής του ισχύος. Αντίστοιχα, όταν οι διακόπτες ΥΤ είναι ανοιχτοί η αντιμετώπιση των προαναφερόμενων υπερφορτίσεων απαιτεί νέα ρύθμιση στο όριο παραγωγής του αιολικού σταθμού Η1, το οποίο ισούται με 42MW και εισάγει το 47% της ονομαστικής του ισχύος. Η σχεδίαση του σχήματος βασίζεται στο διάγραμμα ροής του Σχήματος 4.5.

Η αύξηση του φορτίου ΦΒ1 του υποσταθμού Β δεν επηρεάζει τις συνέπειες της απώλειας της γραμμής Γ42-H41, αφού η γραμμή αυτή αποτελεί τη μία εκ των δύο οδεύσεων του αιολικού σταθμού Η1, επομένως, όταν αυτή τίθεται εκτός λειτουργίας όλη η παραγωγή του μεταφέρεται μέσω της εναπομένουσας γραμμής. Υπολογίζοντας κατάλληλα την τιμή του ορίου παραγωγής για το χαμηλότερο φορτίο του υποσταθμού, η λειτουργία του ΣΠ 4AB με αυτή τη ρύθμιση είναι αρκετή για την αντιμετώπιση πιθανής υπερφόρτισης των δύο μετασχηματιστών του υποσταθμού Β.

Με το κλείσιμο του διακόπτη ισχύος ΓΗ της γραμμής Γ42-H41 σηματοδοτείται η λειτουργία της γραμμής, επομένως αντίστοιχα με τα παραπάνω σχήματα προστασίας συστήματος, αποσύρεται ο περιορισμός του ορίου παραγωγής του αιολικού σταθμού Η1. Ανεξάρτητα από την κατάσταση των διασυνδεδειγμένων διακοπών στους ζυγούς ΥΤ των υποσταθμών Α και Γ, όταν η γραμμή Γ42-H41



Σχήμα 4.5: Σχήμα Προστασίας 4ΑΒ.

τεθεί εντός λειτουργίας το Α/Π Η1 έχει όριο παραγωγής ίσο με την ονομαστική του ισχύ.

4.3 Σύνοψη

Η λειτουργία των προτεινόμενων σχημάτων προστασίας αυξάνει την αιολική διείσδυση στο εξεταζόμενο δίκτυο, λαμβάνοντας υπόψη το συγκεκριμένο στιγμιότυπο λειτουργίας. Με την κατάλληλη ρύθμιση των ανώτατων ορίων παραγωγής κάθε αιολικού σταθμού μετά την εμφάνιση κρίσιμης διαταραχής και τη μεταβολή της κατάστασης των διασυνδεδετικών διακοπών των ζυγών ΥΤ στους υποσταθμούς Α και Γ είναι δυνατή η αντιμετώπιση θερμικών υπερφορτίσεων προς αποφυγή αλυσιδωτών απωλειών, οι οποίες μπορούν να έχουν δυσμενείς επιπτώσεις στη λειτουργία του δικτύου. Το όριο παραγωγής κάθε σταθμού μεταβάλλεται μόνο εάν συμβεί η διαταραχή που ενεργοποιεί το σχήμα προστασίας που το ενεργοποιεί. Σε όλες τις υπόλοιπες διαταραχές το αιολικό πάρκο έχει τη δυνατότητα να εισάγει τη μέγιστη αιολική παραγωγή του.

Η φιλοσοφία κάθε σχήματος προστασίας βασίζεται κυρίως στην παρακολούθηση των διακοπών

ισχύος των γραμμών μεταφοράς του δικτύου, προκειμένου να ανιχνευτεί η απώλεια τους. Όλα τα σχήματα προστασίας είναι τοπικά, ωστόσο απαιτείται η τηλεπικοινωνιακή σύνδεση κάποιων αιολικών πάρκων με άλλους αιολικούς σταθμούς του δικτύου είτε και με υποσταθμούς. Μέσω των διατάξεων παρακολούθησης ανιχνεύεται το συμβάν που οπλίζει το σχήμα και εκκινεί τη λειτουργία του. Προκειμένου να μειωθεί το ποσοστό φόρτισης των υπερφορτισμένων στοιχείων πρέπει να μειωθεί η ροή ενεργού ισχύος στο στοιχείο αυτό, γραμμή μεταφοράς είτε μετασχηματιστής. Αυτό επιτυγχάνεται με τη μείωση του ποσού αιολικής διείσδυσης από συγκεκριμένους αιολικούς σταθμούς είτε με την αλλαγή κατάστασης των διασυνδεδετικών διακοπών των ζυγών ΥΤ.

Προκειμένου να διασφαλιστεί η επιθυμητή λειτουργία των σχημάτων προστασίας απαιτείται αξιόπιστος εξοπλισμός των σχημάτων προστασίας. Τόσο ως προς τις τηλεπικοινωνίες που υλοποιούν την επικοινωνία αιολικών σταθμών και αυτών με υποσταθμούς του δικτύου, όσο και ως προς τον επιμέρους εξοπλισμό τους, τις διατάξεις παρακολούθησης και ελέγχου, τους διακόπτες ισχύος των γραμμών μεταφοράς κ.α. Όπως αναφέρεται και στο Κεφάλαιο 2, πολλές φορές η λανθασμένη δράση ενός σχήματος προστασίας μπορεί να έχει δυσμενέστερες επιπτώσεις στη λειτουργία του δικτύου από την αποτυχία ενεργοποίησής του. Επομένως, η λειτουργία του πρέπει να πληροί τα κριτήρια εγχυρότητας, ασφάλειας, αξιοπιστίας, επιλογικότητας και σθεναρότητας.

Ο έλεγχος που υλοποιούν τα προτεινόμενα σχήματα προστασίας είναι προληπτικός. Η ρύθμιση των ορίων παραγωγής και η μεταβολή κατάστασης των διασυνδεδετικών διακοπών ζυγών ΥΤ υλοποιείται προτού υπερφορτιστούν οι κλάδοι του δικτύου και όχι αφού φανούν οι επιδράσεις της διαταραχής στο δίκτυο. Σύμφωνα με την αναφορά [33], η υλοποίηση προληπτικού ελέγχου είναι αισθητά πιο απλή από αυτή του διορθωτικού ελέγχου. Η δυσκολία της προτεινόμενης υλοποίησης έγκειται στην εξάρτηση της λειτουργίας των σχημάτων προστασίας από το συντονισμό τους. Τα σχήματα είναι μεν τοπικά αλλά για την αντιμετώπιση μιας διαταραχής απαιτείται, σε κάποιες περιπτώσεις, η ταυτόχρονη λειτουργία δύο διαφορετικών σχημάτων προστασίας ταυτόχρονα, επομένως είναι σημαντικός ο συντονισμός τους.

Κεφάλαιο 5

Συμπεράσματα - Προοπτικές

5.1 Σύνοψη και κύρια Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε η στατική ασφάλεια ενός δικτύου υπομεταφοράς με μέγιστη αιολική διείδυση. Εξετάστηκαν οι περιπτώσεις που καθιστούν το δίκτυο στατικά μη ασφαλές, στις οποίες παραβιάζεται το θερμικό όριο κλάδων του. Στο δίκτυο είναι συνδεδεμένοι οχτώ αιολικοί σταθμοί με διαφορετική ονομαστική ισχύ. Θεωρώντας ότι το κάθε πάρκο εισάγει στο δίκτυο την ονομαστική του ενεργό ισχύ προτείνεται η λειτουργία των κατάλληλων σχημάτων προστασίας προκειμένου να μην υπάρχει κίνδυνος υπερφόρτισης κάποιου κλάδου του δικτύου.

Ειδικότερα μέσω της εφαρμογής του κριτηρίου N-1 και της ανάλυσης ρών φορτίου αναγνωρίστηκαν οι διαταραχές που καθιστούν το εξεταζόμενο δίκτυο στατικά ανασφαλές. Ως διαταραχές θεωρήθηκαν οι απώλειες των γραμμών μεταφοράς και τα φορτία του δικτύου. Η απώλεια ενός φορτίου του δικτύου εξετάζεται ως διαταραχή γιατί σε στιγμιότυπο λειτουργίας με μέγιστη αιολική διείδυση η απότομη μείωση της ζήτησης του δικτύου προκαλεί πλεονάζουσα ενεργό ισχύ η οποία δεν μπορεί να εξαχθεί από τις γραμμές του δικτύου. Επομένως, παραβιάζονται τα θερμικά όρια κάποιων κλάδων του δικτύου. Στο σενάριο που εξετάστηκε ο κάθε αιολικός σταθμός εισάγει την ονομαστική του ισχύ, ενώ όλα τα φορτία του δικτύου είναι σταθερής ισχύος, θεωρώντας ότι το εξεταζόμενο φορτίο του δικτύου είναι το χαμηλότερο δυνατό. Σε συνδυασμό με την ανάλυση των διαταραχών εξετάζεται και η επίδραση του ανοίγματος των διασυνδεδετικών διακοπών των ζυγών ΥΤ στους υποσταθμούς Α και Γ. Η στατική ασφάλεια του δικτύου απαιτεί ο διασυνδεδετικός διακόπτης των ζυγών Β41 και Β42 του υποσταθμού Β να είναι πάντα κλειστός.

Τα προβλήματα υπερφόρτισης παρατηρούνται κυρίως στα επικίνδυνα στοιχεία του δικτύου, τα οποία ήδη από τη Ν κατάσταση έχουν υψηλή φόρτιση. Τα στοιχεία αυτά είναι η γραμμή μεταφοράς Α41-Δ41, η οποία αποτελεί τη μία εκ των δύο οδεύσεων του αιολικού σταθμού Δ1 καθώς και οι δύο παράλληλοι μετασχηματιστές του υποσταθμού Β.

Κάποιες από τις εξεταζόμενες διαταραχές έχουν διαφορετική επίπτωση στο δίκτυο ανάλογα με

την κατάσταση των διασυνδεδειγμένων διακοπών των ζυγών ΥΤ των υποσταθμών. Διαπιστώθηκε ότι το άνοιγμα κάποιου διακόπτη μπορεί να λειτουργήσει βοηθητικά στην αντιμετώπιση κάποιας διαταραχής. Η ανάλυση απώλειας φορτίων πραγματοποιείται μόνο για λειτουργία του δικτύου με ανοιχτούς τους διακοπών των ζυγών ΥΤ των υποσταθμών Α και Γ, καθώς όταν αυτοί είναι κλειστοί η απώλεια ενός φορτίου δεν παραβιάζει τη στατική του ασφάλεια.

Μετά την ολοκλήρωση της ανάλυσης ροών φορτίου διαπιστώθηκε η βέλτιστη κατάσταση των διασυνδεδειγμένων διακοπών των ζυγών ΥΤ στους υποσταθμούς του δικτύου. Ειδικότερα:

- Ο διασυνδεδειγμένος διακόπτης των ζυγών Α41 και Α42 συνδράμει βέλτιστα στη στατική ασφάλεια του δικτύου όταν είναι ανοιχτός. Ωστόσο, επειδή μόνο κατά την απώλεια της γραμμής Α61-Β61 ο διακόπτης αυτός πρέπει να κλείσει για να είναι στατικά ασφαλές το εξεταζόμενο δίκτυο, προτείνεται το Σχήμα Προστασίας 5Α.
- Ο διασυνδεδειγμένος διακόπτης των ζυγών Β41 και Β42 δεν πρέπει να ανοίξει σε κανένα στιγμιότυπο λειτουργίας του δικτύου γιατί προκαλεί την υπερφόρτιση των δύο μετασχηματιστών του υποσταθμού Β, ήδη από τη Ν κατάσταση.
- Ο διασυνδεδειγμένος διακόπτης των ζυγών Γ41 και Γ42 πρέπει να είναι κλειστός έτσι ώστε να μην παραβιάζεται η στατική ασφάλεια του δικτύου. Ωστόσο, επειδή τυχόν απώλεια της γραμμής Β42-Η41 ή του φορτίου ΦΓ2 καθιστούν απαραίτητο το κλείσιμο του συγκεκριμένου διακόπτη προτείνεται το ΣΠ Φ6ΑΒ.

Συνολικά προτάθηκαν πέντε σχήματα προστασίας συστήματος για την αντιμετώπιση εφτά διαταραχών που καθιστούν το εξεταζόμενο δίκτυο στατικά ανασφαλές. Ο προτεινόμενος σχεδιασμός τους βασίζεται κυρίως στην παρακολούθηση των διακοπών ισχύος των γραμμών μεταφοράς του δικτύου είτε στη μέτρηση της ισχύος των φορτίων σε περίπτωση που κάποιο από αυτά τεθεί εκτός λειτουργίας, προκειμένου να ανιχνευτεί η απώλεια τους. Η επιτρεπόμενη μέγιστη παραγωγή κάθε σταθμού μεταβάλλεται μόνο εάν συμβεί η διαταραχή που ενεργοποιεί το σχήμα προστασίας που το ενεργοποιεί. Σε όλες τις υπόλοιπες διαταραχές το αιολικό πάρκο έχει τη δυνατότητα να παράγει τη μέγιστη αιολική παραγωγή του.

Θεωρώντας ότι το εξεταζόμενο φορτίο είναι το ελάχιστο δυνατό για το δίκτυο διερευνήθηκαν στο Κεφάλαιο 3 οι επιπτώσεις αύξησης της ζήτησης κάποιων φορτίων στη λειτουργία των προτεινόμενων σχημάτων προστασίας. Όπως διαπιστώθηκε, επειδή ο σχεδιασμός έγινε λαμβάνοντας υπόψη τη χαμηλότερη τιμή ζήτησης του δικτύου, η ρύθμιση του ορίου παραγωγής στα εμπλεκόμενα αιολικά πάρκα δεν επηρεάζεται από τη μεταβολή του φορτίου.

Ολοκληρώνοντας την παρούσα ανάλυση εξάγεται το συμπέρασμα ότι η σχεδίαση τέτοιων σχημάτων προστασίας ακεραιότητας συστήματος είναι δυνατή και επιτρέπει την εγκατάσταση μεγάλης αιολικής παραγωγής ακόμα και αν οδηγεί σε ανασφάλεια του συστήματος. Η πιθανότητα να συμπίψουν μία επικίνδυνη διαταραχή σε συνδυασμό με μέγιστη αιολική παραγωγή είναι σχετικά

μικρή, παρ' όλα αυτά μπορεί να διασφαλιστεί η στατική ασφάλεια του δικτύου με τη λειτουργία των κατάλληλων σχημάτων προστασίας που προτείνονται και γίνεται με αυτόν τρόπο καλύτερη εκμετάλλευση της παραγόμενης αιολικής ενέργειας.

5.2 Προοπτικές για μελλοντική έρευνα

Αρχικά στην παρούσα εργασία προτείνεται ο σχεδιασμός σχημάτων προστασίας συστήματος έναντι θερμικής υπερφόρτισης, ωστόσο αυτός γίνεται ενδεικτικά με βάση την ανάλυση στατικής ασφάλειας του δικτύου και προτείνεται ο κατάλληλος αλγόριθμος σε κάθε περίπτωση. Προκειμένου να ολοκληρωθεί η συγκεκριμένη πρόταση πρέπει να συνδυαστεί με μία εξειδικευμένη μελέτη εφαρμογής των προτεινόμενων σχημάτων, η οποία θα παρέχει όλες τις λεπτομέρειες σχεδιασμού και υλοποίησής τους.

Το εξεταζόμενο δίκτυο ένα τμήμα του γαλλικού συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας με χαμηλό φορτίο και υψηλές τάσεις. Μπορούν να εξαχθούν ρεαλιστικότερα αποτελέσματα αν ληφθούν υπόψη και άλλα στιγμιότυπα λειτουργίας του δικτύου με προβλήματα υποτάσεων σε συνδυασμό με την παραβίαση θερμικών ορίων κλάδων του δικτύου.

Επιπλέον, προκειμένου να παρέχεται η υπηρεσία της ρύθμισης τάσης από τα αιολικά πάρκα, για την οποία στην παρούσα εργασία έχει γίνει η θεώρηση ότι παραμένει σταθερή, θα πρέπει να υπάρχει σχετική συμφωνία μεταξύ των διαχειριστών του συστήματος μεταφοράς και του συστήματος υπομεταφοράς. Επομένως, μια εφικτή προοπτική για μελλοντική έρευνα θα ήταν η αποτίμηση της συγκεκριμένης υπηρεσίας σε χρηματικό ποσό.

Επίσης, ενώ το άπειρο σύστημα θεωρήθηκε πως αντιπροσωπεύεται από το ζυγό GENERA 61, η αναπαράστασή του από μία ισοδύναμη πηγή Thévenin ή ακριβέστερα από ένα πλήρες σύστημα με περισσότερες αναχωρήσεις και διακλαδώσεις θα απέδιδε ρεαλιστικότερα αποτελέσματα.

Ένα άλλο κομμάτι που χρήζει περαιτέρω διερεύνησης είναι και η εξέταση των καιρικών συνθηκών που επικρατούν στο περιοχή όπου βρίσκεται το δίκτυο σε συνδυασμό με τη στατική του ασφάλεια. Οι υψηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος μπορούν, επίσης, να προκαλέσουν τη θερμική υπερφόρτιση γραμμών μεταφοράς του δικτύου.

Σημαντική επέκταση της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι και η ανάλυση δυναμικής ασφάλειας του δικτύου, προκειμένου να αποκτηθεί πιο ολοκληρωμένη εικόνα για την ασφάλεια του δικτύου. Να εξεταστεί, επίσης, η ευστάθεια του συστήματος και πως επιδρά σε αυτή η μέγιστη διεύθυνση αιολικής παραγωγής.

Τέλος, σημειώνεται ότι παρόμοια προβλήματα που οδηγούν σε περιορισμό της αιολικής παραγωγής προς αποφυγή υπερφόρτισης στοιχείων του συστήματος μετά από διαταραχή εμφανίζονται

σε πολλά συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Όπως αναφέρεται εκτενέστερα και στο Κεφάλαιο 2 μία τέτοια περίπτωση είναι αυτή του ελληνικού διασυνδεδεμένου συστήματος στην περιοχή της Θράκης, όπου σε συνθήκες N-1 σημειώνονται υπερφορτίσεις οι οποίες καταπολεμούνται με περιορισμό της παραγωγής των συνδεδεμένων αιολικών πάρκων. Συνεπώς, ο σχεδιασμός που προτείνεται στην παρούσα διπλωματική εργασία, μετά από τις κατάλληλες τροποποιήσεις, μπορεί να εφαρμοστεί και σε άλλα συστήματα που αντιμετωπίζουν παρόμοια προβλήματα θερμικής υπερφόρτισης.

Βιβλιογραφία

- [1] Κ. Βουρνάς και Γ. Κονταξής. «Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας». Αθήνα: Εκδόσεις Συμμετρία, 2001.
- [2] Β. Κ Παπαδιάς. «Ανάλυση Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας». Αθήνα, 1985.
- [3] P. Kundur. «*Power System Stability And Control*». Palo Alto, California: Mc Graw-Hill, 1994.
- [4] Κ. Βουρνάς και Β. Κ Παπαδιάς. «Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας και Έλεγχος Συχνότητας και Τάσεως». Αθήνα: Εκδόσεις Συμμετρία, 1991.
- [5] F. Coyle. «*Introduction to Wind Power*». The English Press, 2011.
- [6] EWEA. «*Large Scale Integration of Wind Energy in the European Power Supply: analysis, issues and recommendations*». Δεκ. 2005.
- [7] ΑΔΜΗΕ. «*Μελέτη Επάρκειας Ισχύος για την περίοδο 2017-2027*». Μάι. 2017.
- [8] D.Fraile and A. Mbistrova. «*Wind in Europe 2017-Annual combined onshore and offshore wind energy statistics*». Wind Europe, Φεβ. 2018.
- [9] T. Ackermann. «*Wind Power in Power Systems*». John Wiley & Sons, Ltd, 2005.
- [10] Γ. Τσουράκης. «Συμβολή της Αιολικής Διείσδυσης στην Ευστάθεια των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας». Διδακτορική διατρ. ΣΗΜΜΥ, ΕΜΠ, Μαρ. 2010.
- [11] Σ. Παπαθανασίου. «*Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας - Σημειώσεις Παραδόσεων*». Αθήνα, 2014.
- [12] Σ. Νάνου. «Μοντέλο Ανεμογεννήτριας με Πλήρη Μετατροπέα για Μελέτες Ευστάθειας». ΣΗΜΜΥ, ΕΜΠ, Ιούλ. 2009.
- [13] Π. Σ Γεωργιλάκης. «*Σύγχρονα Συστήματα Μεταφοράς και Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας*». Αθήνα, 2015.
- [14] B. Stott and O. Alsac. «Fast Decoupled Load Flow». Στο: *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems (Volume: PAS-93, Issue: 3)* (Μάι. 1974).
- [15] A. Gomez-Exposito, A. J. Conejo and C. Canizares. «Electric energy systems: Analysis and operation». Στο: *CRC Press, Boca Raton* (2009).
- [16] S. Sterpu, W. Besanger and N. HadjSaid. «Power Systems Security Analysis». Στο: *Power Engineering Society General Meeting, IEEE* (Ιούν. 2006).

- [17] R. Napoli and F. Piglione. «On-Line Static Security Assessment of Power Systems by a Progressive Learning Neural Network». Στο: *Electrotechnical Conference, MELECON '96, 8th Mediterranean* (1996).
- [18] Savu C. Savulescu. «*Real-Time Stability in Power Systems*». Springer, 2014.
- [19] G. Ejebe and B. Wollenberg. «Automatic Contingency Selection». Στο: *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol.PAS-98, No.1* (Φεβ. 1979).
- [20] R. D. Dunlop, R. Gutman and P.P. Marchenko. «Analytical Development of Loadability Characteristics for EHV and UHV Transmission Lines». Στο: *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol.PAS-98, No.2* (Απρ. 1979).
- [21] Mircea Eremia. «*Electric Power Systems - Electric Networks*». EDITURA ACADEMIEI ROMANE, 2006.
- [22] T. Miller. «*Reactive Power Control In Electric Power Systems*». John Willey & Sons, Inc, 1982.
- [23] H. Wan, J. McCalley and V. Vitlal. «Increasing Thermal Rating by Risk Analysis». Στο: *IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 14, No. 3* (Αύγ. 1999).
- [24] J. Carneiro and L. Ferrarini. «Preventing Thermal Overloads in Transmission Circuits via Model Predictive Control». Στο: *IEEE TRANSACTIONS ON CONTROL SYSTEMS TECHNOLOGY, VOL. 18, NO. 6* (Νοέ. 2010).
- [25] R. Hunt and M. Giordano. «Thermal Overload Protection of Power Transformers – Operating Theory and Practical Experience». Στο: *59th Annual Protective Relaying Conference, Georgia Tech, Atlanta, Georgia* (Απρ. 2005).
- [26] M. Vaiman, K. Bell and Y. Chen. «Risk Assessment of Cascading Outages: Methodologies and Challenges». Στο: *IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, VOL. 27, NO. 2* (Μάι. 2012).
- [27] N. Samaan, J. Dagle and Y. Makarov. «*Dynamic Contingency Analysis Tool- Phase 1*». U.S. Department of Energy, Νοέ. 2015.
- [28] CIGRE Task Force 38-02-19. «System Protection Scheme in Power Networks». Στο: *CIGRE Publication* (2001).
- [29] M. Begovic, V. Madani and D. Novosel. «System Integrity Protection Schemes (SIPS)». Στο: *Bulk Power System Dynamics and Control - VII. Revitalizing Operational Reliability, iREP Symposium* (2007).
- [30] E. Hillberg, F. Trengereid and Ø. Breidbalik. «System Integrity Protection Schemes - Increasing operational security and system capacity». Στο: *CIGRE* (2012).
- [31] Β. Νικολαΐδης. «Σχεδίαση Προστασίας Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας από Μακροπρόθεσμη Αστάθεια Τάσης». Διδακτορική διατρ. ΣΗΜΜΥ, ΕΜΠ, Απρ. 2007.
- [32] Μ. Π Παπαδόπουλος. «*Προστασία Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας*». Αθήνα, 1997.

-
- [33] J. Kabouris and C. Vournas. «Application of Interruptible Contracts to Increase Wind-Power Penetration in Congested Areas». Στο: *IEEE Transactions on Power Systems (Volume: 19, Issue: 3)* (Αύγ. 2004).
- [34] J.Sykes, Y.Hu and M.Adamiak. «IEEE/PES PSRC Report on Design and Testing of Selected System Integrity Protection Schemes». Στο: *67th Annual Conference for Protective Relay Engineers* (2014).

