



## ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**Διερεύνηση τεχνικών απαιτήσεων κωδίκων συστήματος  
για τη διασύνδεση υπεράκτιων αιολικών σταθμών με  
τεχνολογία συνεχούς ρεύματος υψηλής τάσης (HVDC)**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

του

**ΜΑΡΙΟΥ ΖΑΓΓΑ**

**Επιβλέπων :** Σταύρος Παπαθανασίου  
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2014

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.



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

**Διερεύνηση τεχνικών απαιτήσεων κωδίκων συστήματος  
για τη διασύνδεση υπεράκτιων αιολικών σταθμών με  
τεχνολογία συνεχούς ρεύματος υψηλής τάσης (HVDC)**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

του

**ΜΑΡΙΟΥ ΖΑΓΓΑ**

**Επιβλέπων :** Σταύρος Παπαθανασίου  
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 01/10/2014.

*(Υπογραφή)*

.....  
Σταύρος Παπαθανασίου  
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

*(Υπογραφή)*

.....  
Στέφανος Μανιάς  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

*(Υπογραφή)*

.....  
Αντώνιος Κλαδάς  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2014

---

## Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η παρουσίαση των βασικών απαιτήσεων των Κωδίκων Συστήματος για τη διασύνδεση αιολικών σταθμών και η διερεύνηση της ικανοποίησης των απαιτήσεων αυτών για διασυνδέσεις υπεράκτιων αιολικών σταθμών τεχνολογίας HVDC-VSC.

Αφού παρουσιαστεί η ιστορική εξέλιξη των κωδίκων και η κύρια σκοπιμότητά τους, συγκεντρώνονται και παρουσιάζονται οι απαιτήσεις βασικών κωδίκων διαχειριστών μελών του ENTSO-e. Ύστερα, παρουσιάζονται οι διαθέσιμες τεχνολογίες για τη διασύνδεση υπεράκτιων αιολικών σταθμών με το χερσαίο δίκτυο. Από τις τεχνολογίες αυτές, επιλέγεται και αναλύεται σε βάθος η τεχνολογία HVDC-VSC και η δυνατότητες που αυτή προσφέρει για την ικανοποίηση των απαιτήσεων των Κωδίκων. Τέλος, γίνεται μελέτη εφικτότητας για την πρακτική εφαρμογή εναλλακτικών διαθέσιμων λύσεων προκειμένου να επιτευχθεί η αδιάλειπτη λειτουργία υπεράκτιου αιολικού σταθμού υπό χαμηλή τάση (Low Voltage Ride Through ή Fault Ride Through), θεωρώντας ανεμογεννήτριες με μετατροπέα πλήρους ισχύος και σύνδεση με το δίκτυο μέσω γραμμής HVDC-VSC.

---

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.

---

## **Abstract**

The aim of this thesis is to present the main requirements of Grid Codes as far as the interconnection of wind farms is concerned, as well as the investigation of the level of compliance of such requirements in the cases of HVDC-VSC interconnections of offshore wind farms to the onshore grid.

After presenting the history of development of grid codes, the main requirements of selected members of ENTSO-e are analyzed. After that, the available technologies for the interconnection of offshore wind farms to the onshore grid are presented. From these technologies, HVDC-VSC is further analyzed especially as far as its performance in the fulfillment of Grid Code requirements is concerned. Finally, a feasibility study for the practical application of available solutions on an offshore wind farm, for fulfilling Low Voltage Ride Through (LVRT) (or Fault Ride Through (FRT)) requirements, is performed for full-scale converter wind turbines connected via an HVDC-VSC link.

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.

## **Ευχαριστίες**

Ευχαριστώ θερμά τον Αν. Καθηγητή Σταύρο Παπαθανασίου για την καθοδήγηση και την ανοχή του.

Ευχαριστώ τον υποψήφιο διδάκτορα κ. Σωτήρη Νάνου για την διαθεσιμότητα και την βοήθεια του.

Ευχαριστώ τον Αλέξανδρο και τη Σοφία.

Ευχαριστώ τη Γεωργία.

## Πίνακας περιεχομένων

<b>1</b>	<b>Εισαγωγή.....</b>	<b>10</b>
1.1	Ενσωμάτωση υπεράκτιων αιολικών πάρκων στο δίκτυο.....	10
1.2	Αντικείμενο διπλωματικής.....	11
1.2.1	Συνεισφορά.....	12
1.3	Οργάνωση κειμένου.....	13
<b>2</b>	<b>Γενικά για τους κώδικες διασύνδεσης.....</b>	<b>14</b>
2.1	Κώδικες διασύνδεσης-ανάγκες και πεδίο εφαρμογής, ιστορική εξέλιξη.....	15
2.2	ENTSO-e.....	21
2.3	Κατηγοριοποίηση και επιλογή κωδίκων προς μελέτη.....	22
<b>3</b>	<b>Τεχνικές απαιτήσεις διασύνδεσης.....</b>	<b>26</b>
3.1	Γενικά χαρακτηριστικά και απαιτήσεις.....	27
3.2	Απαιτήσεις σε κατάσταση ισορροπίας.....	29
3.2.1	Όρια και έλεγχος συχνότητας.....	29
3.2.2	Έλεγχος ενεργού ισχύος.....	35
3.2.3	Όρια και έλεγχος τάσης.....	36
3.2.4	Όρια και έλεγχος αέργου ισχύος.....	39
3.2.5	Παράμετροι ποιότητας ισχύος.....	42
3.3	Δυναμική απόδοση.....	43
3.3.1	Ικανότητα αδιάλειπτης λειτουργίας σε σφάλμα δικτύου ( <i>Fault Ride Through-FRT</i> ) 43	
3.3.2	Έγχυση ρεύματος.....	48
3.3.3	Προσωρινές υπερτάσεις – <i>TOV (Temporary Overvoltages)</i> .....	50
3.3.4	Προστασίες δικτύου παραγωγού.....	50
3.4	Επικοινωνία και έλεγχος.....	51
<b>4</b>	<b>Γενικά για τη διασύνδεση υπεράκτιων αιολικών πάρκων με HVDC.....</b>	<b>53</b>
4.1	Τεχνολογία.....	54
4.1.1	<i>HVAC</i> .....	56

4.1.2	<i>HVDC-LCC</i> .....	57
4.1.3	<i>HVDC-VSC</i> .....	58
4.2	Τεχνικό-οικονομικά κριτήρια .....	62
4.3	Διεθνής εμπειρία .....	66
<b>5</b>	<b>Ενσωμάτωση υπεράκτιων αιολικών πάρκων διασυνδεδεμένων με HVDC στο ηλεκτρικό δίκτυο .....</b>	<b>68</b>
5.1	Γενικά για την ενσωμάτωση υπεράκτιου αιολικού πάρκου στο ηλεκτρικό δίκτυο ...	69
5.2	Κανονική λειτουργία.....	70
5.3	Λειτουργία σε σφάλμα.....	71
5.3.1	<i>Απαίτηση λειτουργίας σε σφάλμα δικτύου (Fault ride through FRT)</i> .....	71
5.3.2	<i>Αδρανειακή απόκριση και απόκριση συχνότητας</i> .....	72
5.4	Μέθοδοι ικανοποίησης της απαίτησης για λειτουργία σε σφάλμα δικτύου (Fault Ride Through-FRT) σε διασυνδέσεις HVDC-VSC .....	75
5.4.1	<i>Υπερδιαστασιολόγηση των μετατροπέων</i> .....	75
5.4.2	<i>Κατανάλωση σε βοηθητικά φορτία</i> .....	76
5.4.3	<i>Μείωση ισχύος του αιολικού πάρκου</i> .....	76
<b>6</b>	<b>Μελέτη επιτευξιμότητας λύσεων λειτουργίας σε σφάλμα δικτύου (Fault Ride Through-FRT) υπεράκτιου αιολικού πάρκου με σύνδεση HVDC-VSC .....</b>	<b>79</b>
6.1	Εισαγωγή.....	80
6.2	Ορισμός απαίτησης και μελέτη επιτευξιμότητας.....	80
6.2.1	<i>Υπερδιαστασιολόγηση</i> .....	81
6.2.2	<i>Βοηθητικά φορτία/choppers</i> .....	83
6.2.3	<i>Μείωση ισχύος του αιολικού πάρκου</i> .....	85
6.2.4	<i>Συνδυασμός λύσεων</i> .....	98
6.3	Προσομοιώσεις (Simulations) .....	99
6.4	Συμπεράσματα .....	109
<b>7</b>	<b>Επίλογος .....</b>	<b>113</b>
7.1	Σύνοψη και συμπεράσματα.....	114
7.2	Μελλοντικές επεκτάσεις .....	115
<b>8</b>	<b>Βιβλιογραφία.....</b>	<b>117</b>

# 1

## *Εισαγωγή*

### *1.1 Ενσωμάτωση υπεράκτιων αιολικών πάρκων στο δίκτυο*

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μία στροφή των ηλεκτρικών συστημάτων σε παγκόσμιο επίπεδο προς την αιολική ενέργεια. Ακόμα, με τον κορεσμό των χερσαίων εγκαταστάσεων και τη μετάλλαξη των αναγκών των χωρών και των προσφερόμενων λύσεων από την αιολική βιομηχανία, παρατηρείται αυξημένο ενδιαφέρον για εγκατάσταση μεγάλων αιολικών πάρκων στη θάλασσα. Τα υπεράκτια αυτά αιολικά πάρκα έχουν πολλά πλεονεκτήματα όπως η ταχύτητα και η ποιότητα του διαθέσιμου αέρα και η μικρή όχληση σε σχέση με τις αντίστοιχες χερσαίες εγκαταστάσεις.

Όμως, παρά τα μοναδικά τους πλεονεκτήματα, τα υπεράκτια αιολικά πάρκα αποτελούν μία πρωτόγνωρη πρόκληση για τους διαχειριστές ηλεκτρικών συστημάτων. Συγκεκριμένα, η θέση εγκατάστασης τους είναι μακριά από την κατανάλωση, και συνήθως γεωγραφικά επικεντρωμένη για πολλούς παραγωγούς σε συγκεκριμένη θέση του ηλεκτρικού συστήματος.

Οι διαχειριστές, σε μία προσπάθεια που συνεχίζεται και ιστορικά ωριμάζει, προσπαθούν να προσαρμόσουν τις απαιτήσεις των κωδίκων τους στο νέο είδος παραγωγού από τον αέρα και να αντιμετωπίσουν τις ιδιαίτερες της υπεράκτιας τεχνολογίας απαιτήσεις.

Εν τω μεταξύ, οι διασυνδέσεις υπεράκτιων αιολικών πάρκων με τη στεριά, που μέχρι πρότινος γίνονταν κατ' αποκλειστικότητα με υποθαλάσσιες συνδέσεις υψηλής τάσης εναλλασσόμενου ρεύματος (HVAC) αρχίζουν και στρέφονται, λόγω μεγέθους και απόστασης

από τη στεριά σε συνδέσεις υψηλής τάσης συνεχούς ρεύματος (HVDC-VSC). Ενώ το HVAC δεν παρουσιάζει προκλήσεις διαφορετικές από αυτές που αντιμετωπίζουμε σε οποιαδήποτε δικτυακή εγκατάσταση στη στεριά, το HVDC-VSC δημιουργεί αρκετά νέα προβλήματα προς επίλυση. Η φύση των συνδέσεων HVDC-VSC να απομονώνει ηλεκτρικά τα συνδεδεμένα συστήματα, απομονώνει το υπεράκτιο αιολικό πάρκο από το χερσαίο δίκτυο, παρουσιάζοντας αρκετές προκλήσεις στους διαχειριστές αλλά και τους κατασκευαστές του εξοπλισμού.

## **1.2 Αντικείμενο διπλωματικής**

Η μετεξέλιξη των κωδίκων διασύνδεσης για να συμπεριλάβουν τους αιολικούς σταθμούς, συνοδευόμενη από τις εξελίξεις στην τεχνολογία των ανεμογεννητριών και των διασυνδέσεων έχουν δημιουργήσει μία νέα ανάγκη. Η ανάγκη αυτή είναι να αναλυθούν και να παρουσιαστούν οι απαιτήσεις των διαχειριστών από τη σκοπιά του αιολικού παραγωγού και κατασκευαστών σχετικού εξοπλισμού. Γίνεται δε ακόμα πιο επείγουσα, δεδομένου ότι η ομογενοποίηση των κωδίκων είναι μία διαδικασία που παίρνει χρόνο και προς το παρόν, αντιμετωπίζονται πολλές και διαφορετικές απαιτήσεις ακόμα και σε γειτονικές χώρες ενοποιημένων δικτύων όπως αυτά της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Στην παρούσα εργασία, αφού δοθούν οι απαραίτητες εισαγωγικές πληροφορίες για τον λόγο και τον τρόπο ανάπτυξης των κωδίκων (στοιχείο απαραίτητο για να αξιολογηθούν σωστά οι επιμέρους απαιτήσεις) παρουσιάζονται οι βασικές απαιτήσεις ευρωπαϊκών χωρών-μελών του ENTSO-e. Σημασία δίδεται σε κώδικες με αναφορές ή ειδικά κεφάλαια στην αιολική ενέργεια (ή ακόμα και τα υπεράκτια αιολικά πάρκα) ενώ γίνονται αναφορές σε εξαιρετικές και άξιες αναφοράς απαιτήσεις άλλων χωρών. Έτσι, μπορεί ο αναγνώστης να αντιληφθεί τους βασικούς άξονες στους οποίους πρέπει κάποιος να εστιάσει σχεδιάζοντας εξοπλισμό και εγκαταστάσεις αιολικής παραγωγής, ικανοποιώντας συγχρόνως τις τεχνικές απαιτήσεις των δικτύων.

Η επιλογή διασύνδεσης του υπεράκτιου αιολικού πάρκου, HVAC, HVDC-LCC ή HVDC-VSC είναι ένα ακόμα θέμα που επηρεάζει το σχεδιασμό τόσο του παραγωγού όσο και των κατασκευαστών του εξοπλισμού. Οι διασυνδέσεις HVAC, που ήταν μέχρι πρόσφατα μονόδρομος για την διασύνδεση είχαν εγγενή χαρακτηριστικά που τις έκαναν «προβλέψιμες» και εύκολα ενσωματώσιμες στα ηλεκτρικά δίκτυα. Οι διασυνδέσεις HVDC έχουν δώσει λύσεις σε παραδοσιακά προβλήματα αλλά συγχρόνως έχουν παρουσιάσει νέες προκλήσεις τόσο τεχνικές όσο και οικονομικές. Έτσι η επιλογή διασύνδεσης είναι μία απαιτητική άσκηση για τον παραγωγό, ειδικά περίξ κάποιας απόστασης διασύνδεσης και κάποιας ισχύος αιολικού πάρκου. Σε μία προσπάθεια απλοποίησης της άσκησης της επιλογής, παρουσιάζονται αναλυτικά οι διαθέσιμες τεχνολογίες με τα θετικά και τα αρνητικά τους χαρακτηριστικά. Ύστερα, γίνεται ανάλυση της διαδικασίας επιλογής των βέλτιστων τεχνικό-οικονομικά λύσεων με βάση την απόσταση και την εγκατεστημένη ισχύ.

Επιλέγοντας την τεχνολογία HVDC-VSC για περαιτέρω ανάλυση-λόγω των μοναδικών της χαρακτηριστικών σε μεγάλα και απόμακρα υπεράκτια αιολικά που θεωρούνται εγκαταστάσεις σε άνθιση-χρίζει επιπλέον μελέτης το ζήτημα της ηλεκτρικής απομόνωσης που δημιουργούν μεταξύ του υπεράκτιου αιολικού σταθμού και του χερσαίου δικτύου μεταφοράς. Αυτή η απομόνωση κάνει εξαιρετικά δύσκολη την ικανοποίηση των απαιτήσεων των διαχειριστών για μία από τις πιο σπουδαίες υποστηρικτικές λειτουργίες σε σφάλμα, αυτή της λειτουργίας σε σφάλμα δικτύου (Fault ride through-FRT). Στην παρούσα εργασία, αναλύονται οι διάφορες λύσεις που έχουν προταθεί ως προς την τεχνική επιτευξιμότητά τους και την οικονομική βιωσιμότητα τους.

### **1.2.1 Συνεισφορά**

Η συνεισφορά της διπλωματικής συνοψίζεται ως εξής:

1. Αναλύονται οι ιστορικοί λόγοι ανάπτυξης των κωδίκων διασύνδεσης
2. Αναλύονται οι προσπάθειες ομογενοποίησης των κωδίκων μεταξύ χωρών
3. Δίνονται τα βασικά χαρακτηριστικά που ορίζουν οι κώδικες σε μορφή σύγκρισης μεταξύ χωρών
4. Καταγράφονται οι συνήθειες απαιτήσεις των διαχειριστών ορισμένων χωρών μελών του ENTSO-e
5. Γίνεται καταγραφή εστιάζοντας σε απαιτήσεις για αιολικούς παραγωγούς
6. Παρουσιάζονται οι διαφορετικές τεχνολογίες διασύνδεσης με τα θετικά και τα αρνητικά τους χαρακτηριστικά
7. Παρουσιάζεται αλγόριθμος επιλογής βέλτιστης διασύνδεσης με βάση την απόσταση από την ακτή και την ονομαστική ισχύ της εγκατάστασης
8. Παρουσιάζονται όλες οι προταθείσες λύσεις για την ικανοποίηση της απαίτησης για λειτουργία υπεράκτιου αιολικού σταθμού συνδεδεμένου με γραμμή HVDC-VSC σε σφάλμα του χερσαίου δικτύου
9. Γίνεται μελέτη επιτευξιμότητας των διαθέσιμων λύσεων για λειτουργία σε σφάλμα του χερσαίου δικτύου
10. Παρουσιάζονται προσομοιώσεις μίας εκ των διαθέσιμων λύσεων που δίνουν όμως πολύτιμες πληροφορίες για την επιρροή του παράγοντα του χρόνου στον εντοπισμό και την αντίδραση σε σφάλματα δικτύου και τη συνέχιση λειτουργίας του αιολικού σταθμού σύμφωνα με τις απαιτήσεις του διαχειριστή
11. Δίδεται μία ολοκληρωμένη εικόνα στον αναγνώστη του ζητήματος της ηλεκτρολογικής διασύνδεσης ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου με το δίκτυο περιλαμβάνοντας αναλυτικά όλα τα κομμάτια της αλυσίδας που το αποτελούν και

συγκεκριμένα: τους κώδικες διασύνδεσης εστιάζοντας σε αιολικά πάρκα, τις μεθόδους διασύνδεσης της στεριάς με το υπεράκτιο πάρκο και την ικανότητα εκπλήρωσης βασικής απαίτησης των διαχειριστών σε σφάλμα.

### ***1.3 Οργάνωση κειμένου***

Το Κεφάλαιο 2 εισάγει τον αναγνώστη στους κώδικες διασύνδεσης, τα γενικά τους χαρακτηριστικά και την ιστορική τους εξέλιξη. Αναλυτική παρουσίαση των συγκεκριμένων απαιτήσεων διαφόρων κωδίκων επιλεγμένων χωρών σε συγκριτική μορφή ακολουθεί στο Κεφάλαιο 3. Στο Κεφάλαιο 4 αναλύονται οι διαθέσιμες τεχνολογίες για τη διασύνδεση υπεράκτιων αιολικών πάρκων με το χερσαίο δίκτυο, ενώ στο κεφάλαιο 5 αναλύονται οι απαιτήσεις λειτουργίας σε σφάλμα και παρουσιάζονται επιγραμματικά οι διαθέσιμες λύσεις. Τέλος στο κεφάλαιο 6 γίνεται μελέτη επιτευξιμότητας των λύσεων λειτουργίας σε σφάλμα του υπεράκτιου παραγωγού.

# 2

*Γενικά για τους κώδικες διασύνδεσης*

## **2.1 Κώδικες διασύνδεσης-ανάγκες και πεδίο εφαρμογής,**

### **ιστορική εξέλιξη**

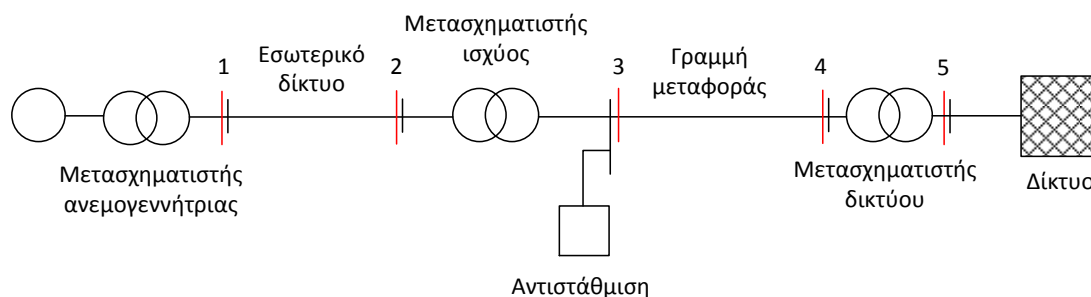
Στα περισσότερα ηλεκτρικά δίκτυα ανά τον κόσμο, οι κώδικες διασύνδεσης (Grid Codes-GC) ρυθμίζουν τις αρμοδιότητες του συστήματος μεταφοράς, των παραγωγών και των συνδεδεμένων πελατών στο σύστημα μεταφοράς (ή/και διανομής). Οι κώδικες διασύνδεσης είναι γνωστοί και με άλλους όρους, όπως π.χ. «απαιτήσεις διασύνδεσης» και αφορούν ένα σύνολο προτύπων που υπαγορεύουν τη λειτουργία και απόδοση του συστήματος. Βασικά, οι κώδικες αυτοί καθορίζουν ένα σύνολο από απαιτήσεις και κριτήρια απόδοσης που θα πρέπει να ικανοποιηθούν προκειμένου να διατηρηθεί η συνολική απόδοση του συστήματος (αξιοπιστία και οικονομία), τόσο βραχυπρόθεσμα όσο και μακροπρόθεσμα.

Η ανάπτυξη των κωδίκων διασύνδεσης στο δίκτυο βασίζεται σε απαιτήσεις που εξασφαλίζουν την αξιοπιστία του συστήματος. Τυπικά εκδίδονται από τους Διαχειριστές του Συστήματος Μεταφοράς (TSO's) ή τους Ανεξάρτητους Διαχειριστές του Συστήματος (ISO's) αλλά μπορεί επίσης να εκδοθούν από τις κυβερνήσεις, τα υπουργεία, τους ρυθμιστές ή όποιον άλλο οργανισμό έχει αναλάβει την ευθύνη να εξασφαλίσει την αξιοπιστία του συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Σημαντικές διαφορές υπάρχουν επίσης στον φορέα έγκρισης των κωδίκων από χώρα σε χώρα, με αποτέλεσμα ο έλεγχος και η εναρμόνιση να δυσχεραίνουν σημαντικά.

Οι τεχνικές απαιτήσεις τυπικά καθορίζονται σε ένα σημείο το οποίο είναι γνωστό ως Σημείο Κοινής Σύνδεσης (PCC-Point of Common Connection). Από χώρα σε χώρα και από έργο σε έργο η φυσική θέση του σημείου αυτού αλλάζει, ενώ άλλα ονόματα όπως σημείο σύνδεσης, σημείο εισόδου και άλλα χρησιμοποιούνται αντ' αυτού. Οι απαιτήσεις που ορίζονται στο PCC πρέπει να θεωρούνται πάντοτε ως οι ελάχιστες τεχνικές απαιτήσεις που πρέπει να ικανοποιηθούν.

Πρέπει να σημειωθεί ότι υπάρχουν τεχνικές διαφοροποιήσεις μεταξύ των ηλεκτρικών απαιτήσεων που πρέπει να ικανοποιηθούν στο PCC και στις απαιτήσεις στο σημείο σύνδεσης των ανεμογεννητριών. Η διαφοροποίηση αυτή γίνεται ιδιαίτερα σημαντική σε μεγάλα αιολικά πάρκα. Όσο μεγαλύτερο είναι το αιολικό πάρκο, τόσο αυξάνεται η πιθανότητα να υπάρχουν μεταξύ του PCC και των ανεμογεννητριών διάφορα είδη ηλεκτρικού εξοπλισμού. Στο σχήμα που ακολουθεί (σχήμα 2.1), είναι φανερό ότι οι απαιτήσεις του κώδικα διασύνδεσης στη θέση 5 (αν αυτό είναι το PCC) είναι πολύ διαφορετικές από τις απαιτήσεις

στο σημείο σύνδεσης των ανεμογεννητριών στη θέση 1. Παραδείγματος χάριν, η ικανότητα αντοχής σε υπερμαγνήτιση ( $U_{grid}/f_{grid}$ ) στο PCC θα ήταν διαφορετική στις ανεμογεννήτριες (θέση 1) αν η τάση σε αυτές μπορούσε να ελεγχθεί επαρκώς ( $U_{WTG}/f_{grid}$ ) (Vestas, (2012) [41]).



Σχήμα 2.1: Τυπική τοπολογία αιολικού πάρκου και οι διάφορες πιθανές θέσεις απαιτήσεων του κώδικα.

Η αυξανόμενη διείσδυση της αιολικής ενέργειας στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη συγκεκριμένων τεχνικών απαιτήσεων για την διασύνδεση των αιολικών πάρκων. Οι νέοι κώδικες διασύνδεσης ορίζουν ότι τα αιολικά πάρκα θα πρέπει να συμβάλλουν στον έλεγχο του δικτύου (συχνότητα και τάση), όμοια με έναν συμβατικό σταθμό ενέργειας και επικεντρώνονται στη συμπεριφορά του αιολικού πάρκου στην περίπτωση σφάλματος (π.χ. πτώση τάσης λόγω σφαλμάτων δικτύου). Τέτοιες σαφείς τεχνικές απαιτήσεις των κωδίκων διασύνδεσης αποτελούν πλέον έναν από τους κύριους παράγοντες για τον σχεδιασμό, έρευνα και εξέλιξη των ανεμογεννητριών και της αιολικής τεχνολογίας γενικά.

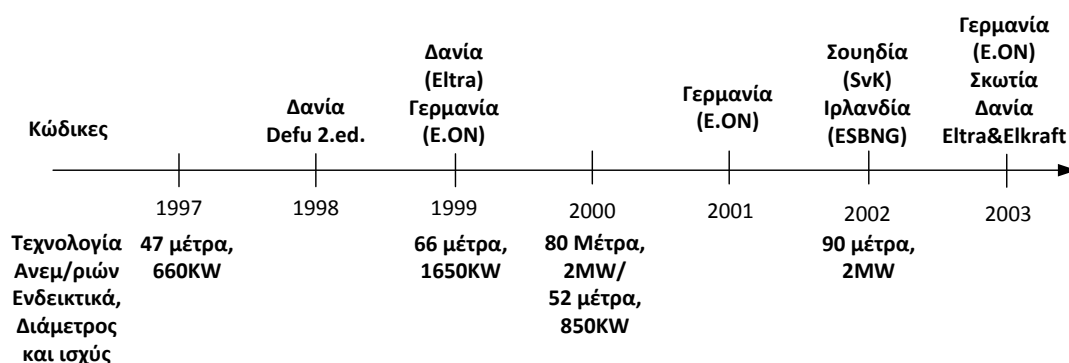
Μέχρι πρόσφατα, οι κώδικες διασύνδεσης αναπτύσσονταν περισσότερο μέσα στις εταιρίες ηλεκτρισμού, για εσωτερική χρήση. Δεν ήταν πολύ αναλυτικοί και ήταν περισσότερο μια καταγραφή κανόνων καλής λειτουργίας/εμπειρίας.

Σημαντικό σημείο καμπής για τη βιομηχανία ενέργειας ήταν η διακοπή ρεύματος μεγάλης κλίμακας που συνέβη στη Νότια Αμερική το 1965 και κάλυπτε το μεγαλύτερο μέρος του «Νοτιοανατολικού Συστήματος Ενέργειας». Αυτή η διακοπή επηρέασε 30 εκατομμύρια ανθρώπους σε ελάχιστα δευτερόλεπτα. Η μεγάλη επέκταση των συστημάτων ενέργειας στη δεκαετία του '60 έγινε πολύ γρήγορα και έγινε ξεκάθαρο σε όλους ότι κάποιοι βασικοί κανόνες και πρότυπα πρέπει να τεθούν προκειμένου να λειτουργούν τα μεγάλα συστήματα με την απαιτούμενη αξιοπιστία.

Την δεκαετία του 1960, ξεκίνησε με εντατικούς ρυθμούς η ανάπτυξη σταθμών παραγωγής ισχύος 600-1000MW και πάνω. Λόγω του μεγέθους των σταθμών αυτών, οι μεγαλύτεροι από αυτούς, θεωρήθηκαν ως «η μεγαλύτερη απώλεια συστήματος», και οι παράμετροι του συστήματος επιλέχθηκαν ανάλογα, για να αντέξουν τέτοια απώλεια. Με τον τρόπο αυτό γινόταν ο σχεδιασμός και η λειτουργία για πολλά χρόνια. Επίσης, επειδή η απώλεια ενός τέτοιου σταθμού θα δημιουργούσε θέματα ευστάθειας στο δίκτυο μεταφοράς, η πτώση τάσης μετά από σφάλμα άρχισε να γίνεται ένα σημαντικό θέμα. Η μεγαλύτερη ανησυχία ήταν η ανικανότητα συστημάτων να αντέξουν μεγάλες βυθίσεις τάσης. Έτσι, καθορίστηκαν οι πρώτες απαιτήσεις αντοχής σε βυθίσεις τάσεις.

Στη διάρκεια της δεκαετίας του '90 αναπτύχθηκαν αεριοστρόβιλοι συνδυασμένου κύκλου και μαζί τους έφεραν επιπλέον θέματα αξιοπιστίας του δικτύου. Όπως οι μεγάλοι σταθμοί παραγωγής του '60 και του '70, έτσι και αυτή η τεχνολογία έφερε μία ιδιαιτερότητα, την ικανότητα της διατήρησης της μονάδας συνδυασμένου κύκλου εντός, κατά τη διάρκεια βυθίσεων τάσης με ανησυχίες για τη διατήρηση της καύσης κατά τη διάρκεια του σφάλματος. Η συσχέτιση των κωδικών διασύνδεσης με την αιολική ενέργεια ξεκίνησε το 1997. Στο σχήμα που ακολουθεί (σχ. 2.2) απεικονίζεται το χρονοδιάγραμμα εξέλιξης των πρώτων κωδικών διασύνδεσης αιολικών σταθμών στην Δανία και στον κόσμο (Vestas, (2012) [41]).

Στην αρχή οι κωδικές διασύνδεσης στη Δανία επικεντρώνονταν στο δίκτυο διανομής και τα κύρια προβλήματα τότε αφορούσαν το ρεύμα (inrush) τους περιορισμούς ισχύος, την ποιότητα ισχύος (αρμονικές, flicker) και την προστασία.



Σχήμα 2.2: Χρονοδιάγραμμα εξέλιξης κωδικών διασύνδεσης

Κατά την ίδια περίοδο εκδόθηκε στη Δανία το σχέδιο δράσης για υπεράκτια αιολικά πάρκα. Το αρχικό πλάνο αφορούσε 3000 MW υπεράκτιας αιολικής ενέργειας ανεγείροντας 150 MW κάθε χρόνο. Η διεξαγωγή μελετών στη Δανία δημιούργησαν τις πρώτες απαιτήσεις για τα ηλεκτρολογικά χαρακτηριστικά λειτουργίας των ανεμογεννητριών προκειμένου να παραμένουν συνδεδεμένες στη διάρκεια σφαλμάτων. Εστιάζοντας στην ανάγκη «παραμονής

σε σύνδεση», επισημάνθηκε ότι υπήρχε αυξημένος κίνδυνος απώλειας μεγάλων συστημάτων καθώς και περαιτέρω επιβάρυνσης ήδη υπερφορτωμένων δικτύων μεταφοράς.

Εκείνη την εποχή, η πιο εξελιγμένη τεχνολογία ήταν η active stall (έλεγχος ισχύος λόγω αεροδυναμικής αποκόλλησης και μεταβλητού βήματος). Οι μηχανές double fed/DFIG (διπλής τροφοδότησης στάτη και δρομέα) βρίσκονταν ακόμα σε στάδιο σχεδιασμού. Ως αποτέλεσμα της ανάγκης «παραμονής σε σύνδεση», η κατάρρευση της τάσης αναδείχθηκε ως σημαντικό θέμα καθώς περιοχές με πολύ καλό αιολικό δυναμικό είχαν συνήθως αδύναμα ηλεκτρικά δίκτυα. Επίσης, προέκυψε η ανάγκη μοντελοποίησης των ανεμογεννητριών με μεγαλύτερη λεπτομέρεια ώστε κατά την μελέτη συστημάτων, να μπορέσει να απεικονιστεί το πρόβλημα της κατάρρευσης της τάσης.

Αρκετά χρόνια αργότερα, η Eon άρχισε να αλλάζει τις προτεραιότητές της προκειμένου να ανταπεξέλθει στα υψηλά επίπεδα διείσδυσης της αιολικής ενέργειας. Τα χρονικά όρια ανάκαμψης της τάσης επεκτάθηκαν, όπως και τα χρονικά όρια ανάκαμψης της ισχύος. Αυτή ήταν μια παραβίαση της θεμελιώδους ιδέας της «παραμονής σε σύνδεση».

Για διευκόλυνση της κατανόησης της έννοιας «παραμονής σε σύνδεση», μια καινούρια σειρά όρων εμφανίστηκε όπως:

- ικανότητα αδιάλειπτης λειτουργίας (Ride through) ,
- ικανότητα αδιάλειπτης λειτουργίας σε σφάλμα δικτύου (Fault ride through),
- ικανότητα αδιάλειπτης λειτουργίας υπό σφάλμα τάσης (Voltage fault ride through),
- ικανότητα αδιάλειπτης λειτουργίας υπό χαμηλή τάση (Low voltage fault ride through),
- ικανότητα αδιάλειπτης λειτουργίας υπό μηδενική τάση (Zero Voltage Fault Ride Through),
- ικανότητα αδιάλειπτης λειτουργίας υπό υψηλή τάση (High Voltage Fault Ride Through).

Έκτοτε, εκτός από την εισαγωγή της ανάγκης συνεισφοράς αέργου ισχύος σε μερικές χώρες (όπως η Γερμανία, η Ισπανία, και η Αυστραλία) γύρω στο 2005, δεν υπήρξε καμιά αξιοσημείωτη αλλαγή ή εξέλιξη στους κώδικες διασύνδεσης. Τα πιο σημαντικά θέματα, που διαρκώς ωριμάζουν και αποκτούν ολοένα και μεγαλύτερη σημασία είναι ο έλεγχος τάσης, ο έλεγχος συχνότητας, η δυναμική μοντελοποίηση, και σε κάποιο βαθμό, η σωστή πιστοποίηση των συστημάτων και των δυνατοτήτων τους (διαδικασία εξαιρετικά δύσκολη και κοστοβόρα σε ορισμένες περιπτώσεις).

Επίσης, η έγχυση ρεύματος κατά την διάρκεια συμμετρικών και κυρίως ασύμμετρων σφαλμάτων οδηγεί σε πολλές νέες αναζητήσεις. Τα προβλήματα που προκύπτουν είναι πολυσύνθετα, και οι συνέπειες των επιλογών, σωστών ή λάθος, πολύ σημαντικές για πολλά ηλεκτρικά συστήματα (πχ. απομακρυσμένες περιοχές υψηλού αιολικού δυναμικού, με υψηλή ηλεκτρική διείσδυση, απομακρυσμένες από την κατανάλωση).

Η τρέχουσα προσπάθεια για εναρμόνιση των απαιτήσεων έχει ως εξής (Vestas (2012) [41]):

- Στην Ευρώπη, το ENTSO-e, ο μεγαλύτερος οργανισμός των Διαχειριστών Συστήματος Μεταφοράς (TSOs), συγκεντρώνοντας 41 ευρωπαϊκούς TSOs, εξέδωσε ένα προσχέδιο κωδίκων διασύνδεσης. Αυτός το προσχέδιο εγείρει το θέμα της πολυπλοκότητας των απαιτήσεων των ευρωπαϊκών χωρών άμεσα και αποτελεσματικά. Επίσης, ο Ευρωπαϊκός Οργανισμός Αιολικής Ενέργειας (European Wind Energy Association-EWEA) συνεχίζει να δουλεύει πάνω στην εναρμόνιση των κωδίκων, μαχόμενος μάλιστα κάποιες τεχνικές κατευθύνσεις του προσχεδίου του ENTSO-e.
- Στην Βόρεια Αμερική, οι συζητήσεις συνεχίζονται, χωρίς όμως να έχει επέλθει ομοφωνία, πιθανόν λόγω έλλειψης θέλησης για εναρμόνιση. Οι Ηνωμένες Πολιτείες και ο Καναδάς φαίνεται να αφήνουν τις περισσότερες απαιτήσεις στα χέρια των διαχειριστών (μέσω συμφωνιών συνδέσεως στο δίκτυο).
- Η Ασία δεν φαίνεται να εργάζεται προς την εναρμόνιση σε ηπειρωτικό επίπεδο.
- Η Ωκεανία (Αυστραλία, Νέα Ζηλανδία, Τασμανία κτλ) παρουσιάζει σημαντική εναρμόνιση στο θέμα των κωδίκων.
- Η Νότια Αμερική δεν φαίνεται να σχεδιάζει κάποιας μεγάλης κλίμακας εναρμόνιση.

Όσον αφορά τις διασυνδέσεις HVDC (High Voltage Direct Current) και τα υπεράκτια αιολικά πάρκα η κατάσταση με τους κώδικες διασύνδεσης έχει ως εξής:

- Ο γερμανικός TenneT-κώδικας υπεράκτιας διασύνδεσης είναι ο μόνος κώδικας στον κόσμο που αφορά αποκλειστικά υπεράκτιες διασυνδέσεις.
- Στη Γερμανία, ο κώδικας μεταφοράς των 50Hz περιέχει μικρές αναφορές στα υπεράκτια πάρκα (γράφημα UQ για υπεράκτιο σταθμό)
- Στη Μεγάλη Βρετανία, ο NGET κώδικας διασύνδεσης, πρόσφατα, άρχισε να ενσωματώνει συγκεκριμένες απαιτήσεις για τα υπεράκτια πάρκα (προστέθηκαν άρθρα και αντιγράφηκαν κυρίως από τα αντίστοιχα συμβατικά αιολικά πάρκα).
- Ο Κώδικας Διασύνδεσης της ENTSO-e εισάγει ένα ολόκληρο κεφάλαιο αναφορικά με τις υπεράκτιες απαιτήσεις.
- Άλλες χώρες, όπως η Ισπανία, η Γαλλία κτλ. συζητούν σχετικές απαιτήσεις συγκεκριμένες για υπεράκτια αιολικά πάρκα.

Οι λόγοι που το θέμα των κωδίκων διασύνδεσης προκαλεί τόσες συζητήσεις και προβληματισμούς είναι πολλοί:

- Τα ηλεκτρικά συστήματα/δίκτυα είναι διαφορετικά σε δομή και μέγεθος.
- Τα κυρίαρχα προβλήματα είναι διαφορετικά στα διάφορα συστήματα.
- Οι κώδικες διασύνδεσης είναι γραμμένοι με αρκετά διαφορετικό τρόπο – και από άποψη δομής και από άποψη τεχνικών απαιτήσεων.
- Οι κώδικες διασύνδεσης είναι ασαφείς σε πολλά σημεία – και η ερμηνεία τους αποδεικνύεται δύσκολη.
- Οι διαχειριστές του συστήματος μεταφοράς (TSOs) δυσκολεύονται να προβλέψουν ποιές απαιτήσεις μπορούν να ικανοποιήσουν οι ανεμογεννήτριες.
- Οι απαιτήσεις των κωδίκων διασύνδεσης εγείρουν πολλούς περιορισμούς στο σχεδιασμό των ανεμογεννητριών.
- Ιστορικά, οι απαιτήσεις για τις ανεμογεννήτριες ήταν μικρότερης σημασίας κάποια χρόνια πριν απ' ότι είναι τώρα.
- Τα φαινόμενα που επηρεάζουν την μελέτη των διασυνδέσεων γίνονται όλο και περισσότερα και πιο πολύπλοκα.
- Οι διαθέσιμες τεχνολογίες σε επίπεδο ανεμογεννητριών δεν είναι ούτε συγκεκριμένες/σταθερές ούτε ώριμες (σε σχέση με παραδοσιακούς σταθμούς) για λειτουργίες όπως π.χ. ο έλεγχος της τάσης και της συχνότητας.
- Απαιτούνται εξαιρετικά πολύπλοκα μοντέλα προσομοίωσης.
- Δεν έχει καθιερωθεί μια μεθοδολογία που να αφορά την ενσωμάτωση και τον σχεδιασμό αιολικών πάρκων.
- Οι απαιτούμενοι πόροι για μελέτη δυναμικών φαινομένων είναι περιορισμένοι, και ο ρυθμός εκπαίδευσης νέων είναι μικρότερος από το ρυθμό αύξησης των αναγκών της αγοράς.

Παρ' όλα τα προβλήματα, όλες αυτές οι συζητήσεις και οι προβληματισμοί γύρω από τους κώδικες διασύνδεσης είναι ένα σημάδι της ραγδαίας αύξησης της εγκατεστημένης ισχύος της αιολικής ενέργειας τα τελευταία χρόνια.

Δυστυχώς, ο τρόπος με τον οποίο εξελίχθηκαν ιστορικά οι απαιτήσεις των κωδίκων διασύνδεσης στην Ευρώπη οδήγησε σε περιορισμό των δυνατοτήτων σχεδιαστών και κατασκευαστών ανεμογεννητριών. Όσο η διείσδυση της αιολικής ενέργειας στην Ευρώπη αυξάνεται, τόσο πιο αναγκαία γίνεται η εναρμόνιση του συνόλου των απαιτήσεων στους κώδικες διασύνδεσης. Η εναρμόνιση αυτή θα μεγιστοποιήσει τις δυνατότητες για όλα τα εμπλεκόμενα μέρη. (EWEA (2008) [13]).

## 2.2 ENTSO-e

Ο οργανισμός ENTSO-e (European Network of Transmission System Operators for Electricity) εκπροσωπεί τους ευρωπαϊούς διαχειριστές των συστημάτων μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας και όσους είναι συνδεδεμένοι στα δίκτυα τους, για όλες τις περιοχές και για όλα τα τεχνικά και εμπορικά θέματα.

Η νέα ευρωπαϊκή νομοθεσία αναθέτει σημαντικό ρόλο στον οργανισμό. Ο κανονισμός των διασυνοριακών συναλλαγών ηλεκτρικού ρεύματος που είναι μέρος του τρίτου πακέτου της ευρωπαϊκής νομοθεσίας ενέργειας, όπως ψηφίστηκε στην ευρωπαϊκή βουλή και είναι σε ισχύ από το Μάρτιο του 2011, αναθέτει στον ENTSO-e να προάγει την ολοκλήρωση και λειτουργία της εσωτερικής αγοράς ηλεκτρισμού και του διασυνοριακού εμπορίου και να διασφαλίσει τη βέλτιστη διαχείριση, την συντονισμένη λειτουργία και την τεχνική εξέλιξη του ευρωπαϊκού δικτύου μεταφοράς ηλεκτρικού ρεύματος.

Στόχος των διαχειριστών που απαρτίζουν τον ENTSO-e είναι να διαδραματίσουν έναν ενεργό ρόλο στην διαδικασία καθορισμού των ευρωπαϊκών κανόνων και να επιταχύνουν το σχεδιασμό του πανευρωπαϊκού δικτύου. Συνεργάζονται σε εθνικό επίπεδο αλλά και σε ευρωπαϊκή κλίμακα και μέσω του ENTSO-e επικοινωνούν τις ανάγκες και τις απόψεις τους σε εθνικά ή ευρωπαϊκά θέματα. Οι δραστηριότητες τους είναι οργανωμένες επιτροπή ανάπτυξης του συστήματος, την επιτροπή λειτουργίας/αγοράς και της νομικής επιτροπής και επικεντρώνονται:

- στην αξιόπιστη λειτουργία,
- στη βέλτιστη διαχείριση,
- στη μέγιστη τεχνολογική εξέλιξη του ηλεκτρικού δικτύου,
- στην ικανοποίηση των αναγκών της εσωτερικής αγοράς ενέργειας
- στην καταγραφή της εξέλιξης του δικτύου
- στους κώδικες του δικτύου,
- στην προώθηση των σχετικών τμημάτων έρευνας και ανάπτυξης
- στις διαβουλεύσεις με τους μετόχους και στην προώθηση θεμάτων ενεργειακής πολιτικής.

Τα μέλη της ομάδας της ηπειρωτικής Ευρώπης είναι:

- Αυστρία: APG-Austrian Power Grid AG and Vorarlberger Übertragungsnetz GmbH

- Βέλγιο: Elia System Operator SA
- Βοσνία Ερζεγοβίνη: Nezavisni operator sustava u Bosni i Hercegovini
- Βουλγαρία: Electroenergien Sistemen Operator EAD
- Κροατία: HEP-Operator prijenosnog sustava d.o.o.
- Τσεχία: CEPS a.s.
- Δανία (Δυτική): Energinet.dk
- Γαλλία: Réseau de Transport d'Electricité
- Γερμανία: TransnetBW GmbH, TenneT TSO GmbH, Amprion GmbH, και 50Hertz Transmission GmbH
- Ελλάδα: Independent Power Transmission Operator SA
- Ουγγαρία: MAVIR Magyar Villamosenergia-ipari Átviteli Rendszerirányító Zártkörűen Működő Részvénytársaság
- Ιταλία: Terna - Rete Elettrica Nazionale SpA
- Λουξεμβούργο: Creos Luxembourg S.A.
- ΠΓΔΜ: Macedonian Transmission System Operator AD
- Μαυροβούνιο: Crnogorski elektroprenosni sistem AD
- Ολλανδία: TenneT TSO B.V.
- Πολωνία: PSE Operator S.A.
- Πορτογαλία: Rede Eléctrica Nacional, S.A.
- Ρουμανία: C.N. Transelectrica S.A.
- Σερβία: JP Elektromreža Srbije
- Σλοβενία: Elektro Slovenija d.o.o.
- Σλοβακία: Slovenska elektrizacna prenosova sustava, a.s.
- Ισπανία: Red Eléctrica de España: S.A.
- Ελβετία: swissgrid ag

### ***2.3 Κατηγοριοποίηση και επιλογή κωδίκων προς μελέτη***

Βασισμένοι στη τεχνική φύση των απαιτήσεων, μπορούμε να κατηγοριοποιήσουμε τεχνικά τους κώδικες διασύνδεσης ανά χώρα ως εξής:

1. Οι νεωτεριστικοί κώδικες, που περιέχουν πολλές παραμέτρους, λεπτομέρειες και συγκεκριμένες απαιτήσεις για την αιολική ενέργεια, με τάση να δημιουργούν νέες

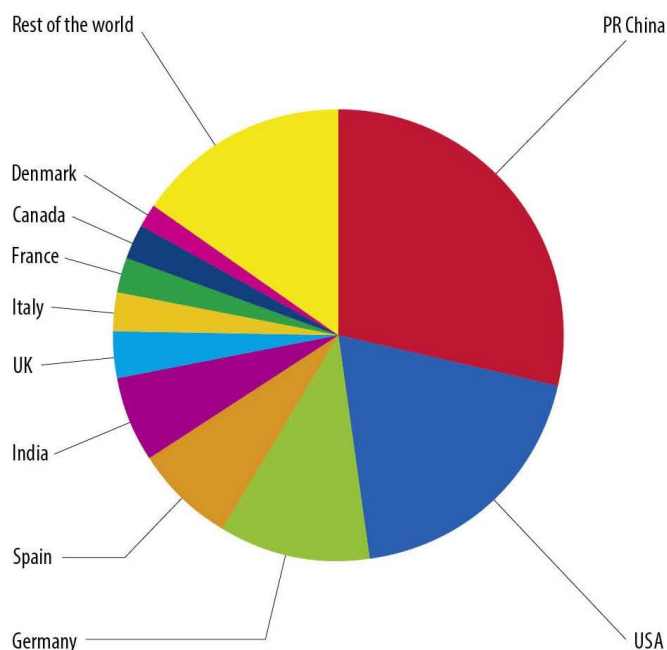
απαιτήσεις που δεν έχουν ξαναεμφανιστεί και χαρακτηρίζονται καθοδηγητές. Τέτοιοι κώδικες είναι αυτοί της Μεγάλης Βρετανίας, της Ιρλανδίας, της Ισπανίας, της Γερμανίας και της Δανίας.

2. Οι «ώριμοι» κώδικες, που περιέχουν πολλές παραμέτρους και λεπτομέρειες και συγκεκριμένες απαιτήσεις για την αιολική ενέργεια και χαρακτηρίζονται ως συντηρητικοί ή σταθεροί. Παραδείγματα αυτής της κατηγορίας είναι ο κώδικας του Καναδά, της Αυστραλίας, της Νέας Ζηλανδίας, της Σουηδίας και της Πορτογαλίας.
3. Οι εξελισσόμενοι κώδικες, που περιέχουν πολύ συχνά κομμάτια αντιγραμμένα από άλλους κώδικες –συνήθως τους «ώριμους», που απαιτήθηκαν γρήγορα σε μια ταχέως αναπτυσσόμενη αγορά αιολικής ενέργειας, αλλά χωρίς ουσιαστικό τεχνικό υπόβαθρο. Οι κώδικες που ανήκουν στην κατηγορία αυτή είναι της Κίνας, της Ινδίας, της Ρουμανίας, της Πολωνίας, της Κροατίας και της Νότιας Αφρικής.
4. Οι παλιοί κώδικες, που περιέχουν λίγες παραμέτρους, λίγα ή κανένα κεφάλαιο σχετικό με την αιολική ενέργεια και που περιλαμβάνουν πολλές απαιτήσεις εφαρμόσιμες μόνο σε σύγχρονες γεννήτριες χωρίς να χρησιμοποιούν επαρκώς τις αποδόσεις των αιολικών σταθμών. Παραδείγματα είναι αυτοί του Βελγίου, της Γαλλίας, της Ιταλίας, της Βραζιλίας, της Ολλανδίας, του Πακιστάν, της Σερβίας, της Χιλής και των ΗΠΑ (οι περισσότεροι κώδικες τους).

Πρέπει να σημειωθεί ότι περιπτώσεις όπως πολύ μεγάλα αιολικά πάρκα που είναι μακριά από την κατανάλωση (χαρακτηριστικές περιπτώσεις στην Κίνα και στις ΗΠΑ) θα πρέπει να «αναγκάσουν» τους διαχειριστές να καινοτομήσουν (όπως συμβαίνει με την περίπτωση του HVDC στην Ευρώπη). Κάποια κορεσμένα δίκτυα ακόμα και σε χώρες με χαμηλό επίπεδο διείσδυσης της αιολικής ενέργειας μπορούν να εγείρουν ζητήματα με δύσκολες απαιτήσεις (π.χ. η ποιότητα της ισχύος). Η κινητικότητα και πολυπλοκότητα των απαιτήσεων, πολύ συχνά, συμπίπτει με την κινητικότητα της αγοράς (π.χ. Κίνα, Μεγάλη Βρετανία).

Αναφορικά με τα μερίδια αγοράς στην αιολική ενέργεια μέχρι σήμερα, το παρακάτω γράφημα (Σχ. 2.3) δίνει μια πρώτη ιδέα για την παγκόσμια κατανομή της συνολικής εγκατεστημένης αιολικής ισχύος όπως καταγράφηκε τον Δεκέμβριο του 2013 (GWEC (2013) [16]). Το μερίδιο των χωρών χωρίς συγκεκριμένη αναφορά περιλαμβάνει την Πορτογαλία, Αίγυπτο, Μαρόκο, Ιαπωνία, Ταϊβάν, Νότια Κορέα, Ολλανδία, Σουηδία, Ελλάδα, Ιρλανδία, Τουρκία, Πολωνία, τις χώρες της Νότιας Αμερικής και την περιοχή της Ωκεανίας.

### TOP 10 CUMULATIVE CAPACITY DEC 2013



Country	MW	% SHARE
** PR China	91,424	28.7
USA	61,091	19.2
Germany	34,250	10.8
Spain	22,959	7.2
India	20,150	6.3
UK	10,531	3.3
Italy	8,552	2.7
France	8,254	2.6
Canada	7,803	2.5
Denmark	4,772	1.5
Rest of the world	48,352	15.2
<b>Total TOP 10</b>	<b>269,785</b>	<b>84.8</b>
<b>World Total</b>	<b>318,137</b>	<b>100.0</b>

\*\* Provisional Figure

\* Projects fully commissioned, grid connections pending in some cases

Σχήμα 2.3: Παγκόσμια κατανομή εγκατεστημένης αιολικής ισχύος

Προκειμένου να καταλήξουμε σε μία αντιπροσωπευτική καταγραφή των απαιτήσεων θα πρέπει να μελετήσουμε ποικίλους κώδικες διασύνδεσης. Η επιλογή των κωδίκων διασύνδεσης των μελών που θα αναλυθούν στην παρούσα εργασία βασίστηκε τόσο σε τεχνικούς παράγοντες (π.χ. οι νεωτεριστές) όσο και σε γεωγραφικούς περιορισμούς (κυρίως αναλύονται ευρωπαϊκοί κώδικες). Επιπλέον, οι κώδικες που επιλέχθηκαν ικανοποιούσαν συνθήκες όπως «λεπτομερές κεφάλαιο σχετικό με την αιολική ενέργεια μέσα στον κώδικα», και «ενδιαφέροντα χαρακτηριστικά δικτύου» (νησί, αδύναμο ή δυνατό δίκτυο, υψηλή διείδυση της αιολικής ενέργειας κλπ). Γενικά η προσοχή της παρούσας εργασίας δόθηκε σε ευρωπαϊκούς κώδικες, κώδικες με αναφορές στην αιολική ενέργεια ή κώδικες με

ιδιαιτερότητες (απαιτήσεις διαφορετικές του μέσου όρου), με κοινό τόπο τις απαιτήσεις σχεδιασμού των αιολικών πάρκων και των ανεμογεννητριών που τα απαρτίζουν.

# 3

## *Τεχνικές απαιτήσεις διασύνδεσης*

Ο σκοπός του παρόντος κεφαλαίου είναι να παρουσιαστούν οι βασικές απαιτήσεις γύρω από τις οποίες σχεδιάζονται και δημοσιεύονται οι διάφοροι κώδικες διασύνδεσης ανά τον κόσμο, εστιάζοντας πάντως στους πιο σημαντικούς Ευρωπαϊκούς κώδικες και σε αναφορές για αιολικά πάρκα. Σκοπός της παρουσίασης αυτής είναι να γίνει σαφές πόσα και ποια λειτουργικά χαρακτηριστικά επιβάλλεται να λαμβάνουν υπ' όψιν οι κατασκευαστές ανεμογεννητριών και αιολικών πάρκων κατά το σχεδιασμό τους. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας δεν είναι εφικτό και δεν κρίθηκε αναγκαίο να γίνει πλήρης καταγραφή όλων των λεπτομερειών (αριθμητικά ή αλλιώς) των εν λόγω απαιτήσεων. Αντίθετα, καταγράφονται οι συνήθεις απαιτήσεις της πλειοψηφίας των εν λόγω κωδίκων, γίνεται όπου χρειάζεται μία επεξήγηση της απαίτησης, και καταγράφονται αναφορές κωδίκων με πιθανές αξιοσημείωτες ιδιαιτερότητες έναντι του μέσου όρου. Η καταγραφή των τεχνικών απαιτήσεων βασίζεται στην Vestas (2012) [41] και στους Christiansen, Johnsen (2006) [42] .

### 3.1 Γενικά χαρακτηριστικά και απαιτήσεις

Στους διάφορους κώδικες διασύνδεσης παρατηρούνται ορισμένα γενικά χαρακτηριστικά που τους συγκεκριμενοποιούν όσον αφορά την εφαρμογή τους όπως τα παρακάτω:

- **Εξειδίκευση του κώδικα διασύνδεσης**

Οι κώδικες διασύνδεσης διαφοροποιούνται ανάλογα με το επίπεδο εξειδίκευσής τους για αιολικά πάρκα:

Γενικός κώδικας διασύνδεσης (χωρίς αναφορές στην αιολική ενέργεια)	Αυστραλία-W P, Ινδία, Καναδάς-AESO, Βραζιλία, Entso E
Γενικός με αναφορές στην αιολική ενέργεια (ενσωματωμένες σε όλη την έκταση του κώδικα)	Γαλλία, Ισπανία, Νέα Ζηλανδία, Σερβία
Γενικός με κεφάλαιο για την αιολική ενέργεια (οι σχετικές πληροφορίες βρίσκονται σε ξεχωριστό κεφάλαιο)	Σουηδία, Καναδάς-HQ, Καναδάς-AESO, Γερμανία –TenneT, Πακιστάν, Αυστραλία-AEMC, Κροατία_HEP, Ιρλανδία-EirGrid
Ειδικός για την αιολική ενέργεια (ο κώδικας διασύνδεσης είναι γραμμένος για την αιολική ενέργεια μόνο)	Ινδία, Δανία, Λιθουανία, Κίνα, Γερμανία-Transp. Off.
Όχι ξεκάθαρα προσδιορισμένο	ΗΠΑ-FERC, Βέλγιο

Πίνακας 3.1: Διαφοροποίηση κωδίκων διασύνδεσης ανάλογα με το επίπεδο εξειδίκευσής τους

- **Γεωγραφική περιοχή**

Οι περισσότεροι κώδικες διασύνδεσης έχουν αυτή την πληροφορία. Όλοι οι κώδικες εφαρμόζονται στη χώρα τους, σε μια πολιτεία ή/και περιοχή.

- **Όριο εγκατεστημένης ισχύος**

Οι περισσότεροι κώδικες δεν έχουν συγκεκριμένα όρια. Οι περισσότεροι κώδικες έχουν εφαρμογή πάνω από τα 10 MW. Η παράμετρος αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να γίνει σαφής διαχωρισμός μεταξύ οικιακών και βιομηχανικών ανεμογεννητριών. Ο Entso-E κάνει διαφοροποίηση ανάλογα με την εγκατεστημένη ισχύ και τη γεωγραφία σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα [12]:

	<b>Type B με ονομαστική ισχύ πάνω από</b>	<b>Type C με ονομαστική ισχύ πάνω από</b>	<b>Type D με ονομαστική ισχύ πάνω από</b>
Ηπειρωτική Ευρώπη	1 MW	50 MW	75 MW
Σκανδιναβία	1.5 MW	10 MW	30 MW
Ην. Βασίλειο	1 MW	10 MW	30 MW
Ιρλανδία	0.1 MW	5 MW	10 MW
Βαλτική	0.1 MW	5 MW	15 MW

Πίνακας 3.2: Διαφοροποίηση Entso-E ανάλογα με επίπεδα εγκατεστημένης ισχύος και γεωγραφία

- **Επίπεδο τάσης συστήματος**

Πολλοί κώδικες διασύνδεσης έχουν αυτή την πληροφορία. Οι περισσότεροι κώδικες μεταφοράς αφορούν συστήματα από τα 60-120kV και πάνω.

- **Είδος γείωσης του δικτύου**

Πολλοί κώδικες περιλαμβάνουν αυτή την πληροφορία. Το είδος της γείωσης είναι πολύ σημαντικό κυρίως σε σχέση με τη λειτουργία των προστασιών.

- **Προσδιορισμός του σημείου κοινής σύνδεσης (point of common coupling-PCC)**

Οι περισσότεροι κώδικες αναφέρουν ως PCC την πλευρά υψηλής τάσης του μετασχηματιστή ισχύος του υποσταθμού.

Η θέση του PCC (βλέπε σχήμα 2.1) είναι πολύ σημαντική καθώς καθορίζει το ακριβές σημείο στο οποίο είναι εφαρμόσιμες ηλεκτρικές απαιτήσεις του κώδικα. Παραδόξως, αυτή η πολύ σημαντική πληροφορία είναι ασαφής στους περισσότερους κώδικες.

- **Ισχύς βραχυκυκλώσεως**

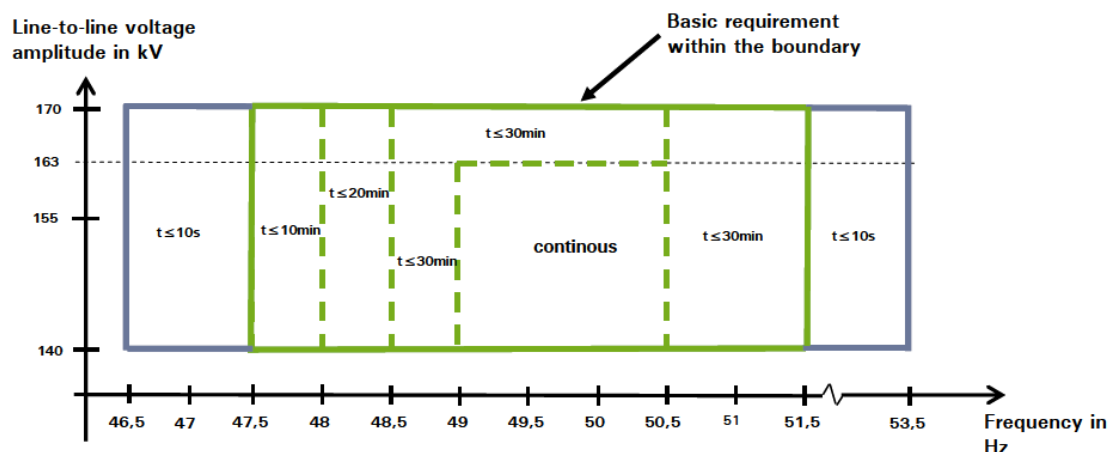
Οι περισσότεροι από τους κώδικες υποδεικνύουν ότι οι απαιτήσεις θα πρέπει να ικανοποιούνται από την ελάχιστη μέχρι τη μέγιστη ισχύ βραχυκυκλώματος του δικτύου, οι τιμές της οποίας θα πρέπει να καθορίζονται στις συμφωνίες των συνδέσεων δικτύου που γίνονται από τους διαχειριστές.

### 3.2 Απαιτήσεις σε κατάσταση ισορροπίας

Οι απαιτήσεις που περιγράφονται στην παρούσα παράγραφο, είναι απαιτήσεις σε μόνιμη κατάσταση. Ορισμένες από αυτές έχουν κάποια χρονικά όρια όμως περιλαμβάνονται στις απαιτήσεις σε κατάσταση ισορροπίας και αυτό για να διαχωριστούν καλύτερα από τη δυναμική απόδοση όπου εμφανίζονται απαιτήσεις σε κατάσταση σφάλματος.

#### 3.2.1 Όρια και έλεγχος συχνότητας

Οι διαχειριστές ζητούν ο εξοπλισμός του παραγωγού να μπορεί να λειτουργεί εντός κάποιων ορίων. Ορίζονται δε κάποια στενά όρια εντός των οποίων απαιτείται συνεχής λειτουργία και κάποια ευρύτερα όρια εντός των οποίων απαιτείται λειτουργία για κάποιο πεπερασμένο χρόνο. Η απαίτηση του TenneT παραδείγματος χάριν είναι αυτή που φαίνεται στο σχήμα 3.1 [39]:



Σχήμα 3.1: Όρια τάσεως και συχνότητας TenneT [39]

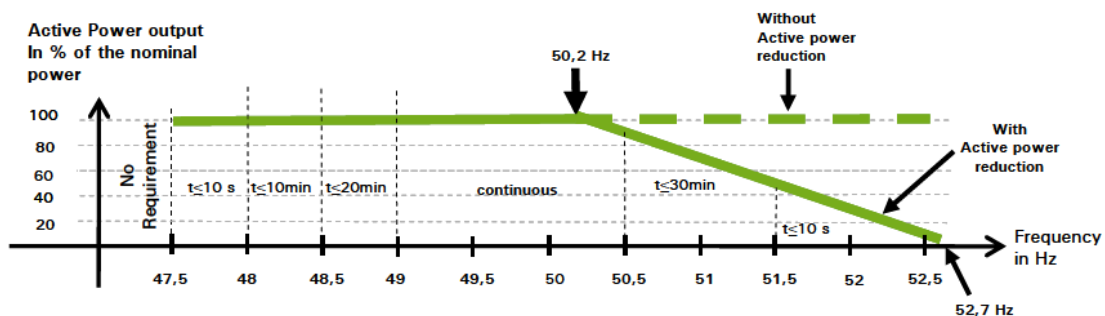
Οι τυπικές απαιτήσεις ορισμένων κωδίκων φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Εύρος λειτουργία συχνότητας					
Συχνότητα (Hz)	Χρονική απαίτηση παραμονής σε σύνδεση				
	Δανία	Γερμανία	Ιρλανδία	Σκωτία	Ηνωμένο βασίλειο
52-53Hz	3min	*	*	*	*
51.5-53Hz	30min	*	60min	Συνεχής λειτουργία	Συνεχής λειτουργία
51-51.5Hz	30min	Συνεχής λειτουργία	60min	Συνεχής λειτουργία	Συνεχής λειτουργία

50.5-51Hz	30min	Συνεχής λειτουργία	60min	Συνεχής λειτουργία	Συνεχής λειτουργία
49.5-50.5Hz	Συνεχής λειτουργία	Συνεχής λειτουργία	Συνεχής λειτουργία	Συνεχής λειτουργία	Συνεχής λειτουργία
49.5-47.5Hz	30min	Συνεχής λειτουργία	60min	Συνεχής λειτουργία	Συνεχής λειτουργία
45.5-47Hz	3min	*	20sec	20sec	20sec
<47Hz	*	*	20sec	20sec	20sec

Πίνακας 3.3: Τυπικές απαιτήσεις συχνότητας επιλεγμένων κωδίκων

Εκτός των ορίων συχνότητας κανονικής λειτουργίας οι περισσότεροι διαχειριστές ζητούν κάποια μορφή έλεγχου συχνότητας, διαμόρφωση δηλαδή της ενεργού ισχύος εξόδου του αιολικού πάρκου ανάλογης της συχνότητας του συστήματος. Ο TenneT π.χ. ζητάει την ακόλουθη καμπύλη συχνότητας-ενεργού ισχύος (Σχήμα 3.2) [39]:



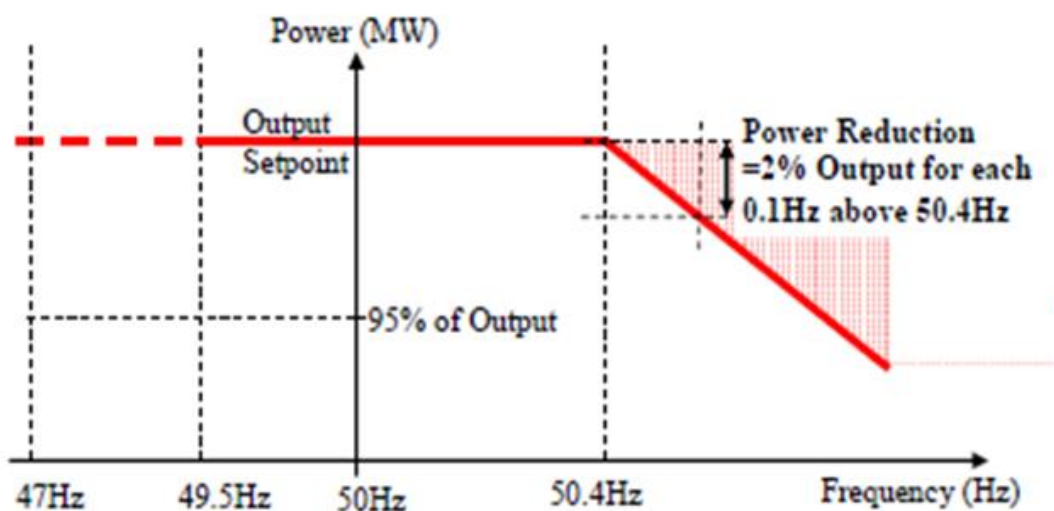
Σχήμα 3.2: Καμπύλη συχνότητας-ενεργού ισχύος ΤεννεΤ [39]

Οι βασικές αρχές είναι πανομοιότυπες, αλλά υπάρχουν διαφορές στους ορισμούς και στον τρόπο εφαρμογής. Ακολουθούν παραδείγματα άλλων σημαντικών κωδίκων:

- Η Μ.Βρετανία απαιτεί κάθε ενεργειακή μονάδα να μπορεί να συνεισφέρει στον έλεγχο συχνότητας και εκτός από τη συνηθισμένη απαίτηση για μείωση ισχύος, απαιτεί και μια λειτουργία αύξησης ισχύος.

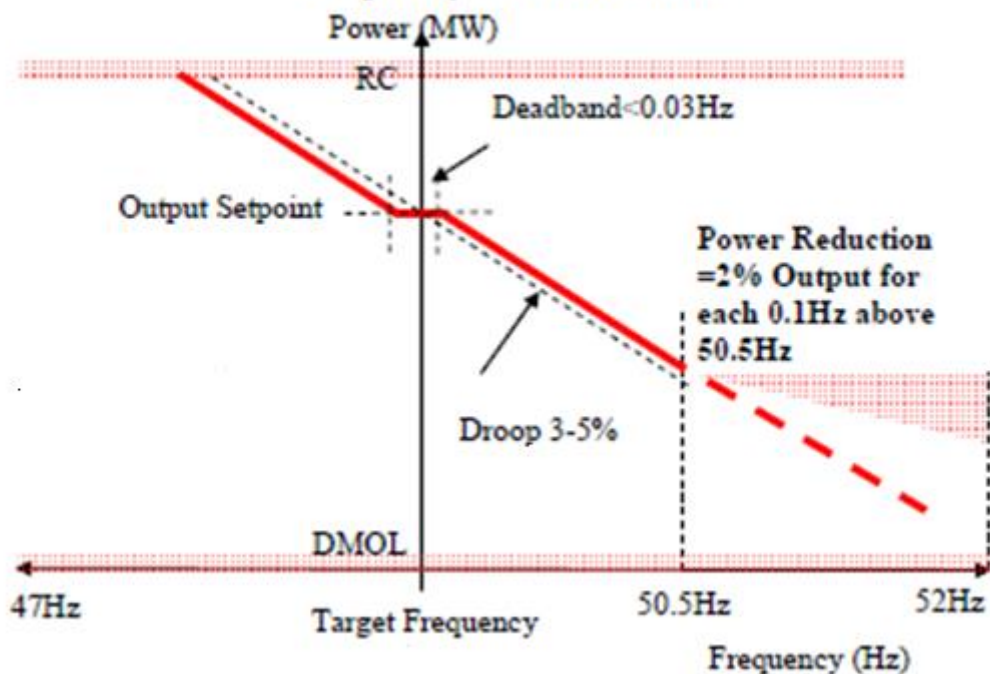
Έχει επίσης δύο απαιτούμενες λειτουργίες: Λειτουργία περιορισμένης ευαισθησίας συχνότητας (Limited Frequency Sensitive Mode-LFSM) όπως στο σχ. 3.3 και Λειτουργία ευαισθησίας συχνότητας (Frequency Sensitive Mode-FSM) όπως στο σχ. 3.4. Για όλα τα αιολικά πάρκα άνω των 50MW απαιτεί να υπάρχει διαθέσιμη λειτουργία FSM.

### Power/Frequency Characteristic for Limited Frequency Sensitive Mode



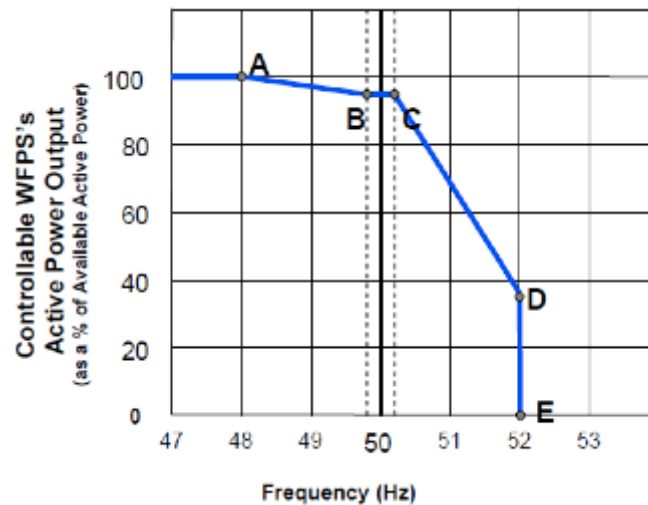
Σχήμα 3.3: Λειτουργία περιορισμένης ευαισθησίας συχνότητας, Μ. Βρετανία

### Power/Frequency Characteristic for Frequency Sensitive Mode



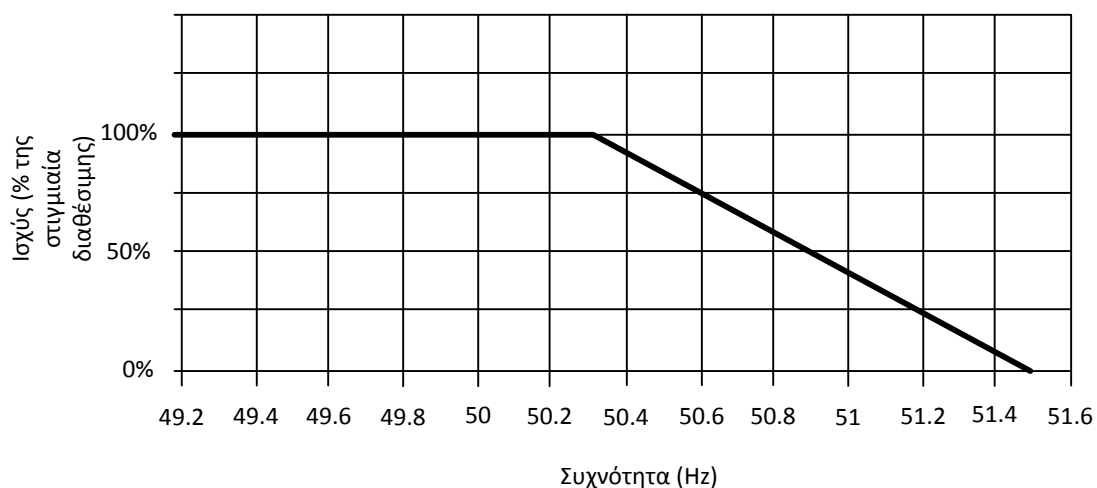
Σχήμα 3.4: Λειτουργία ευαισθησίας συχνότητας, Μ. Βρετανία

- Ο κώδικας της Ιρλανδίας-Eirgrid πραγματοποιεί συνεχή αυτο-ρύθμιση με προσυμφωνημένο τρόπο σε συνδυασμό με αυτόματο setpoint της ισχύος σε πραγματικό χρόνο. Το διάγραμμα των απαιτήσεων της είναι το ακόλουθο (σχ 3.5):



Σχήμα 3.5: Απαιτήσεις ελέγχου συχνότητας Eirgrid-Ιρλανδίας

- Η Ιταλία απαιτεί ο αιολικός σταθμός να είναι εξοπλισμένος με ένα αυτόματο κεντρικό σύστημα ελέγχου της ενεργού ισχύος (Σχ. 3.6) με τα εξής χαρακτηριστικά: α) το σύστημα ελέγχου πρέπει να μην περιορίσει την παραγωγή της διαθέσιμης ισχύος όταν η συχνότητα είναι 47,5-50,3HZ, β) το σύστημα ελέγχου πρέπει να μειώσει την παραγωγή με μια κλίση της τάξης του 2-5%, όταν η συχνότητα βρίσκεται μεταξύ 50,3Hz και 51,5Hz. Σημειώνεται ότι η πιο συνήθης κλίση που απαιτείται από τους διαχειριστές είναι 2,4%.



Σχήμα 3.6: Απαιτήσεις ελέγχου συχνότητας Ιταλίας

- Η Γαλλία-DG δεν δίνει λεπτομέρειες για τις λειτουργίες του ελέγχου, αφού ο κώδικας παραχωρεί την ευθύνη στον διαχειριστή του δικτύου και τον ιδιοκτήτη του σταθμού.

Γενικά, οι κώδικες μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες: σε αυτούς που ο ιδιοκτήτης αποφασίζει πώς θα διαχειριστεί το πρόγραμμα του ελέγχου συχνότητας και σε αυτούς που οι TSO θέλουν ένα πιο αυτοματοποιημένο τρόπο λειτουργίας του ελέγχου.

Ορισμένες τυπικές παράμετροι που συνδέονται με τον έλεγχο συχνότητας και εμφανίζονται στις απαιτήσεις των διαχειριστών είναι οι ακόλουθες και αναφέρονται μόνο για ενδεικτικούς λόγους:

- $F_{control-range}$  – Ενεργό Εύρος για Έλεγχο Συχνότητας σε [Hz]

Η παράμετρος αυτή καθορίζει το εύρος της συχνότητας μέσα στο οποίο πρέπει ο έλεγχος συχνότητας να είναι ενεργός.

Οι περισσότεροι κώδικες διασύνδεσης με έλεγχο συχνότητας έχουν αυτή την πληροφορία. Η τυπική απαίτηση είναι από 47Hz μέχρι 52Hz:

	Ενεργό Εύρος +	Ενεργό Εύρος -
Μεγάλη Βρετανία-NGET 2010/03/22	47	52
Ιρλανδία-Eirgrid 2009/10/16	47	52
Δανία-ENDK 2010/12/01	47	52
Ιταλία-Terna 2009/01/12	47,5	51,5
Γερμανία-BdeW 2009/01/01	47,5	51,5
Πολωνία –PSE Διαχειριστής 2011/01/01	50,5	51,5
Γαλλία –DG 2008/04/23	50,5	52
Γαλλία- TG 2008/04/23	50,5	52

Πίνακας 3.4: Ενεργό εύρος ελέγχου συχνότητας επιλεγμένων κωδικών

- $F_{meas-accuracy}$  – Ακρίβεια Μέτρησης Συχνότητας

Η παράμετρος αυτή καθορίζει την ακρίβεια στη μέτρηση της συχνότητας. Λίγοι κώδικες διασύνδεσης έχουν αυτή την απαίτηση. Η πιο τυπική τιμή είναι +/-0,02%.

- $F_{ref set-point range}$  – Εύρος Setpoint Συχνότητας Αναφοράς σε [Hz]

Η παράμετρος αυτή καθορίζει το εύρος του setpoint της συχνότητας αναφοράς. Πολλοί λίγοι κώδικες διασύνδεσης έχουν αυτή την απαίτηση. Δεν υπάρχει τυπική τιμή.

Η Ιρλανδία-Eirgrid απαιτεί από 49,5 έως 51Hz, η Δανία απαιτεί +/- 2%, δηλαδή από 49 έως 51Hz (ή +/-0,5% P).

- $F_{ref\ resolution}$  – Ανάλυση (resolution) Συχνότητας Αναφοράς

Η παράμετρος αυτή καθορίζει το επίπεδο ανάλυσης της συχνότητας αναφοράς. Πολύ λίγοι κώδικες διασύνδεσης έχουν αυτή την απαίτηση. Δεν υπάρχει τυπική τιμή.

Η Ιρλανδία-Eirgrid έχει 0,5 και η Μ.Βρετανία 0,1.

- $F_{dead\ band}$  – Dead band Ελέγχου Συχνότητας σε [Hz]

Λίγοι κώδικες διασύνδεσης έχουν αυτή την απαίτηση. Δεν υπάρχει τυπική τιμή.

Η Ιταλία έχει 0,2Hz, η Μ.Βρετανία έχει 0,03Hz (+/-0,15Hz) και η Γερμανία-BdeW έχει 0,01Hz. (Ο ENTSO-e έχει 20-30mHz).

- $K_{f-control-static}$  – Στατικότητα ισχύος Ελέγχου Συχνότητας (MW/Hz) σε [% ή MW/Hz]

Η παράμετρος αυτή καθορίζει το MW/Hz ή το droop σε %. Οι υπολογισμοί σε συστήματα των 50 και 60Hz είναι διαφορετικοί όταν γίνεται μετατροπή από % σε MW/Hz.

Πολλοί κώδικες διασύνδεσης έχουν αυτή την τιμή, συχνά έμμεσα και η τυπική τιμή κυμαίνεται από 2 έως 5%.

Η Ιρλανδία απαιτεί ένα ελάχιστο της τάξης του 1% της ονομαστικής ισχύος του αιολικού πάρκου ανά δευτερόλεπτο.

- $P_{ref-range\ f-control}$  – Εύρος Setpoint Ενεργού Ισχύος Ελέγχου Συχνότητας σε [%]

Η παράμετρος αυτή καθορίζει το εύρος της ενεργού ισχύος που δύναται να περιοριστεί.

Πολλοί κώδικες διασύνδεσης έχουν αυτή την απαίτηση. Η τυπική τιμή είναι από 20 έως 100%.

- $dP_{f-control/dt}$  – Ρυθμός Μεταβολής Ισχύος Ελέγχου Συχνότητας σε [pu/s]

Η παράμετρος αυτή καθορίζει τον ελάχιστο ρυθμό μεταβολής της ισχύος.

Πολλοί κώδικες διασύνδεσης έχουν αυτή την απαίτηση. Οι τιμές κυμαίνονται από 0,01 έως 0,45:

	Ρυθμός Μεταβολής Ελέγχου Συχνότητας
Μεγάλη Βρετανία	0,01
Ιρλανδία-Eirgrid	0,01
Πολωνία	0,05
Γερμανία TenneT Off.	0,25

Πίνακας 3.5: Ρυθμός μεταβολής ελέγχου συχνότητας επιλεγμένων κωδίκων

- $T_{0,max-f-control}$  – Μέγιστη Καθυστέρηση Ελέγχου Συχνότητας σε [s]

Η παράμετρος αυτή καθορίζει την μέγιστη αρχική καθυστέρηση από τη στιγμή που αρχίζει μια διαταραχή μέχρι την έναρξη του περιορισμού της ισχύος.

Πολύ λίγοι κώδικες διασύνδεσης έχουν αυτή την απαίτηση. Δεν υπάρχει τυπική τιμή.

Η Δανία απαιτεί 2s και ο ENTSO-e απαιτεί μέγιστη αρχική καθυστέρηση 2s.

### 3.2.2 Έλεγχος ενεργού ισχύος

Σε πολλά δίκτυα υπάρχει ανάγκη ελεγχόμενου περιορισμού της ισχύος των αιολικών παραγωγών. Αυτό γίνεται είτε διότι το υπόλοιπο σύστημα υπό συνθήκες δεν μπορεί να ισοσκελίσει τη μείωση της αιολικής παραγωγής λόγω μείωσης της ταχύτητας του αέρα, είτε διότι η αιολική παραγωγή είναι τόσο μεγάλη που υπερβαίνει τις ανάγκες της κατανάλωσης. Έτσι, ζητείται να υπάρχει η δυνατότητα περιορισμού της ενεργού ισχύος έως ένα τεχνικό ελάχιστο με συγκεκριμένο ρυθμό καθώς και η εισαγωγή στο σύστημα της πλήρους αιολικής δυναμικότητας με ελεγχόμενο ρυθμό. Ο συγκεκριμένος έλεγχος συμπίπτει μερικώς με τα περιγραφόμενα στο κεφάλαιο για τα όρια και τον έλεγχο της συχνότητας. Ο έλεγχος της ενεργού ισχύος γίνεται συνήθως με βάση την συχνότητα του συστήματος. Υπάρχουν και περιπτώσεις όπου ο έλεγχος γίνεται σε επίπεδο SCADA, δηλαδή ζητάει ο διαχειριστής τον περιορισμό της ενεργού ισχύος του αιολικού πάρκου για τους λόγους που προαναφέρθηκαν.

Ορισμένες τυπικές παράμετροι που συνδέονται με τον έλεγχο ενεργού ισχύος και εμφανίζονται στις απαιτήσεις των διαχειριστών είναι οι ακόλουθες και αναφέρονται μόνο για ενδεικτικούς λόγους:

- Μέγιστος Ρυθμός Μεταβολής (Ενεργού Ισχύος) στην Εκκίνηση σε [MW/min] ή [p pu/min]

Οι ρυθμοί μεταβολής της ενεργού ισχύος είναι σημαντικοί για τους διαχειριστές δικτύων: για παράδειγμα η εξασφάλιση ότι η ενεργός ισχύς ενός σταθμού ισχύος δεν θα αυξηθεί πολύ γρήγορα βοηθάει στον έλεγχο των ροών του ρεύματος σε ένα δίκτυο (αποφεύγοντας τον κορεσμό). Πολλοί κώδικες έχουν την συγκεκριμένη απαίτηση και μια τυπική τιμή της είναι 0,1pu/min.

- Μέγιστος Ρυθμός Μείωσης (Ενεργού Ισχύος) σε [MW/min] ή [p pu/min]

Οι ρυθμοί μεταβολής της ενεργού ισχύος είναι σημαντικοί για τους διαχειριστές δικτύων και αποτελούν ένα από τα «δυνατά χαρτιά» της αιολικής ενέργειας σε σύγκριση με άλλες μορφές παραγωγής ενέργειας (π.χ. υπάρχει δυνατότητα να περιορίσουν τα αιολικά πάρκα την ισχύ τους γρήγορα και με ελεγχόμενο τρόπο). Η παράμετρος αυτή δεν θα πρέπει να συγχέεται με

το «emergency stop» που θα επιτρέπεται πάντα όσο άμεσα χρειάζεται. Η πιο τυπική τιμή είναι το 0,1pu/min.

- Ελάχιστος Ρυθμός Αύξησης (Ενεργού Ισχύος) σε Κανονική Λειτουργία σε [MW/min] ή [p ru/min]

Η τιμή αυτή είναι ο ελάχιστος ρυθμός αύξησης της ενεργού ισχύος που απαιτείται από τα αιολικά πάρκα. Η πιο τυπική τιμή είναι το 0,1pu/min.

- Ελάχιστος Ρυθμός Μείωσης (Ενεργού Ισχύος) σε Κανονική Λειτουργία σε [MW/min] ή [p ru/min]

Η τιμή αυτή είναι ο ελάχιστος ρυθμός μείωσης της ενεργού ισχύος που απαιτείται από τα αιολικά πάρκα. Η πιο τυπική τιμή είναι το 0,1pu/min ενώ η Πολωνία απαιτεί μια ελάχιστη τιμή της τάξης των 0,02pu το δευτερόλεπτο.

### 3.2.3 Όρια και έλεγχος τάσης

Ο παραγωγός είναι υποχρεωμένος να παραμένει συνδεδεμένος όταν το δίκτυο έχει τάση την ονομαστική συν κάποιο εύρος πέριξ αυτού το οποίο εξαρτάται από την ονομαστική τάση και τον εκάστοτε διαχειριστή. Υπάρχουν επίσης όρια τάσης εντός των οποίων οι παραγωγοί πρέπει να παραμένουν συνδεδεμένοι για πεπερασμένο χρονικό διάστημα. Τυπικές απαιτήσεις φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Εύρος τάσης λειτουργίας										
	Δανία		Γερμανία		Ιρλανδία		Σκωτία		Ην. Βασίλειο	
Συνεχής λειτουργία	(-)10%-5%	400kV	(-)8%-10%	400kV	(-)13%-5%	400kV	(-)5%-5%	400kV	(-)10%-5%	400kV
	(-)3%-13%	150kV	(-)13%-12%	220kV	(-)9%-12%	220kV	(-)10%-10%	275kV	(-)10%-10%	275kV
	(-)5%-10%	132kV	(-)13%-12%	110kV	(-)10%-12%	110kV	(-)10%-10%	132kV	(-)10%-10%	132kV
Λειτουργία για 1ώρα (Δανία), 15min (Σκωτία), 15min (Ην. Βασίλειο)	(-)20%-10%	400kV					(-)10%-10%	400kV	(-)10%-10%	400kV
	(-)10%-20%	150kV					(-)15%-15%	275kV	(-)10%-10%	275kV
	(-)10%-18%	132kV					(-)20%-20%	132kV	(-)10%-10%	132kV

Πίνακας 3.6: Όρια τάσης επιλεγμένων κωδίκων

Σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι το εύρος της τάσης λειτουργίας καθορίζεται ορισμένες φορές από τους διαχειριστές ανά περίπτωση και για συγκεκριμένο σημείο σύνδεσης στο δίκτυο.

Οι διαχειριστές ζητούν επίσης έλεγχο της τάσης μέσω setpoint από το κέντρο ελέγχου του συστήματος για το σημείο κοινής σύνδεσης. Το σύστημα ελέγχου ρυθμίζει την τάση στο σημείο κοινής σύνδεσης ρυθμίζοντας αντίστοιχα την ανταλλαγή αέργου ισχύος. Συνήθως ζητείται ρύθμιση από το 95% μέχρι το 105% της ονομαστικής τάσης.

Μία συγκεντρωτική θεώρηση της απαίτησης για έλεγχο τάσης φαίνεται στον παρακάτω πίνακα:

<b>Απαιτήσεις για αιολικούς παραγωγούς</b>						
	<b>Τύπος 1</b>	<b>Τύπος 2</b>	<b>Τύπος 3</b>	<b>Τύπος 4</b>	<b>Τύπος 5</b>	<b>Τύπος 6</b>
<b>Κανονική Λειτουργία του Δικτύου</b>	Cos φ (min)	Έλεγχος Cos φ/ Q(U) (1s)	Αυτόματος Έλεγχος Setpoint (κλίση) (1s)	Δευτερεύων Έλεγχος Τάσης (εξωτερικό set point MVar) (10-30s)*	Πραγματι κός Έλεγχος Τάσης του Σημείου PCC	Αυτόματος Έλεγχος Setpoint (κλίση) (1s)
<b>Μεγάλες «Οχλήσεις» (βυθίσεις τάσης, σφάλματα)</b>	Καμία Ενέργεια	Έγχυση Iq (70-1000ms)	Ίδια/ δυναμική (1s)	Τοπική Μεταβατική Απόκριση (όχι ακόμα καθορισμένη)	Πραγματι κός Έλεγχος Τάσης του Σημείου PCC	Έγχυση Iq (70-1000ms)
<b>Παραδείγματα</b>	Γαλλία, Ιταλία	Ισπανία, Γερμανία, Αυστραλία, Δανία, Κίνα, Πορτογαλία	ΗΠΑ, Καναδάς	Γαλλία (μεταφορά)	Κανένας Κώδικας	Draft Κώδικας Διασύνδεσης Entsoe

\* τοπικός έλεγχος από κόμβο-οδηγό: ειδικό σχέδιο ελέγχου τάσης που χρησιμοποιείται από το Βέλγιο, την Ιταλία και την Γαλλία στα συστήματα ισχύος

Πίνακας 3.7: Απαιτήσεις ελέγχου τάσης επιλεγμένων κωδίκων

Ορισμένες τυπικές παράμετροι που συνδέονται με τον έλεγχο τάσης και εμφανίζονται στις απαιτήσεις των διαχειριστών είναι οι ακόλουθες και αναφέρονται μόνο για ενδεικτικούς λόγους:

- Όριο για Απαιτήση Ελέγχου Τάσης (επίπεδο τάσης, επίπεδο MW) σε [kV ή MW]

Οι περισσότεροι κώδικες διασύνδεσης εφαρμόζουν απαιτήσεις ελέγχου τάσης για όλα τα αιολικά πάρκα και όλα τα επίπεδα τάσης στα οποία μπορούν να εφαρμοστούν.

- Σημείο Αναφοράς για Μέτρηση Τάσης

Οι περισσότεροι κώδικες διασύνδεσης αναφέρονται στο σημείο κοινής σύνδεσης-PCC.

- Σημείο Αναφοράς για Έλεγχο Τάσης

Οι περισσότεροι κώδικες διασύνδεσης αναφέρονται στο σημείο κοινής σύνδεσης-PCC.

- $U_{ref-setpoint\ range}$  – Εύρος Αναφοράς Setpoint Τάσης σε [%]

Η παράμετρος αναφέρεται στο εύρος του setpoint της τάσης. Μόνο λίγοι κώδικες διασύνδεσης έχουν τέτοια απαίτηση. Οι περισσότεροι από αυτούς απαιτούν +/- 5%. Η Γερμανία-TenneT απαιτεί +/- 10%. Η Σουηδία απαιτεί +/- 5% του επιπέδου της ονομαστικής τάσης του σταθμού, αλλά είναι ασαφής ως προς το επίπεδο της ονομαστικής τάσης των σταθμών.

- $U_{ref-resolution}$  – Επίπεδο Ανάλυσης Τάσης Αναφοράς σε [%]

Καθορίζει το απαιτούμενο επίπεδο ανάλυσης της τάσης αναφοράς. Μόνο λίγοι κώδικες διασύνδεσης έχουν τέτοια απαίτηση. Η Μεγάλη Βρετανία απαιτεί 0,25%.

- $S_{ref-setpoint\ range}$  – Εύρος Κλίσης Αναφοράς Setpoint Τάσης σε [%]

Η συγκεκριμένη παράμετρος καθορίζει την κλίση στην οποία θα μπορεί να λειτουργεί ο έλεγχος τάσης. Η κλίση αυτή αναφέρεται στην ελάχιστη και τη μέγιστη κλίση της γραμμής  $Q=fct(U)$ . Συχνά, η κλίση αυτή δεν αναφέρεται στους κώδικες διασύνδεσης, παρά το γεγονός ότι αποτελεί μια πολύ σημαντική παράμετρο για το σχεδιασμό του ελέγχου τάσης (ταχύτητα και ποιότητα του MVAR). Οι περισσότεροι κώδικες διασύνδεσης δεν έχουν τέτοια απαίτηση. Οι απαιτήσεις κυμαίνονται από 0 έως 10%. Η Μεγάλη Βρετανία απαιτεί 2-7%. Η Γαλλία-TG απαιτεί 3-10%.

- $S_{ref-resolution}$  – Επίπεδο Ανάλυσης Κλίσης Αναφοράς σε [%]

Καθορίζει το απαιτούμενο επίπεδο ανάλυσης της κλίσης αναφοράς. Μόνο λίγοι κώδικες διασύνδεσης έχουν τέτοια απαίτηση. Η Μεγάλη Βρετανία απαιτεί 0,5%. (Ο draft κώδικας διασύνδεσης της Entso-e απαιτεί 0,5%).

- $T_{0, max-U-control}$  – Μέγιστη Αρχική Καθυστέρηση Ελέγχου Τάσης (Νεκρός Χρόνος) σε [s]

Η παράμετρος αυτή καθορίζει τον μέγιστο επιτρεπόμενο χρόνο που θα μεσολαβήσει από την αρχή της διαταραχής μέχρι τον εντοπισμό της αλλαγής στην έξοδο. Μόνο λίγοι κώδικες διασύνδεσης έχουν τέτοια απαίτηση. Η Γερμανία-TenneT απαιτεί 0,5s και η Μ.Βρετανία-NGET απαιτεί 0,2s.

- Συμπεριφορά Απόκρισης Ελέγχου Τάσης

Οι περισσότεροι κώδικες διασύνδεσης δεν έχουν τέτοιο επίπεδο λεπτομερειών. Μόνο η Μεγάλη Βρετανία δείχνει παραδείγματα αποδεκτής συμπεριφοράς.

- $U_{overshoot-max}$  – Μέγιστη «Υπέρβαση» Ελέγχου Τάσης σε [%]

Μια αύξηση στην παραγωγή της αέργου ισχύος μπορεί να οδηγήσει σε υψηλές τάσεις μετά από καθαρισμό του σφάλματος. Η παράμετρος αυτή είναι ακόμα πιο κρίσιμη σε περιπτώσεις με χαμηλή ισχύ βραχυκυκλώματος ή/και μακρινά φορτία που δυνητικά μπορεί να οδηγήσουν σε ενεργοποίηση (tripping) προστασιών υπέρτασης. Γι' αυτό μπορεί να δικαιολογηθεί πλήρως το γεγονός ότι ένας κώδικας απαιτεί να καλυφθεί αυτή η περίπτωση οριοθετώντας την υπέρταση. Οι περισσότεροι κώδικες διασύνδεσης δεν έχουν τέτοια απαίτηση. Η Μ. Βρετανία δείχνει 1,05pu «υπέρβαση» σε διάφορες απεικονίσεις παραδειγμάτων. Η Σουηδία αναφέρει για σύγχρονες μηχανές “15% της βηματικής αλλαγής”.

- $U_{error-max}$  – Μέγιστο Σφάλμα Ελέγχου Τάσης σε Κατάσταση Ισορροπίας σε [%]

Αυτή η παράμετρος καθορίζει το μέγιστο επιτρεπτό σφάλμα της τάσης σε κατάσταση ισορροπίας που συνήθως κυμαίνεται από 2-5%. Πολλοί κώδικες διασύνδεσης έχουν τέτοια απαίτηση. Η πιο τυπική τιμή είναι το 0,5% (κορυφή με κορυφή +/-0,25%). Η Μ. Βρετανία δείχνει 1,05pu

### 3.2.4 Όρια και έλεγχος αέργου ισχύος

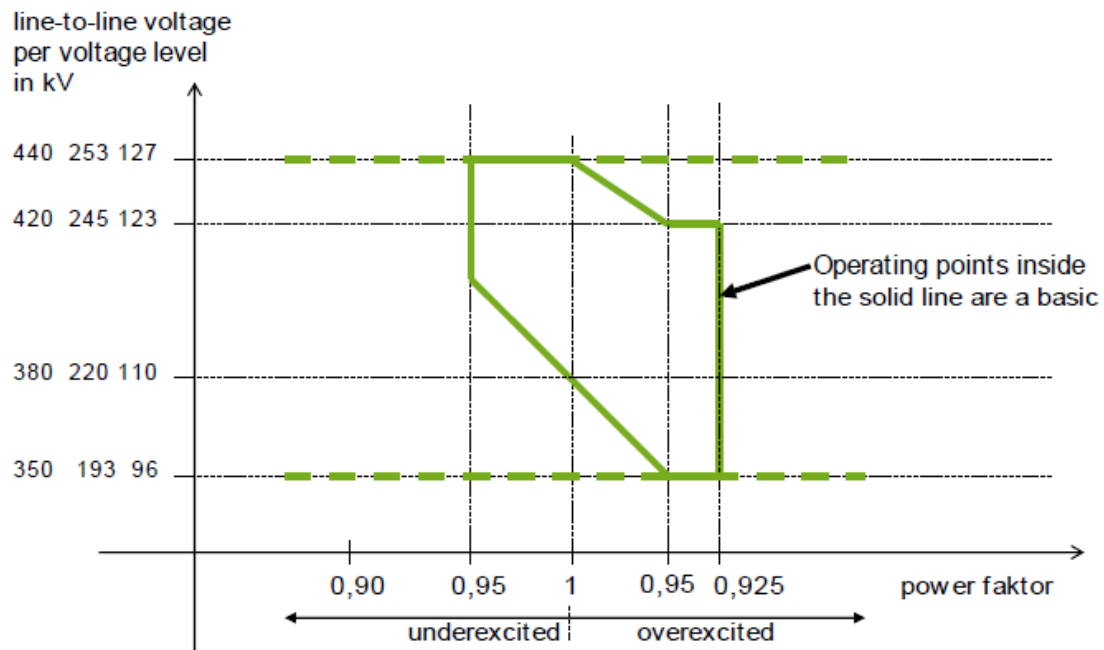
Οι διαχειριστές απαιτούν από τους αιολικούς παραγωγούς να λειτουργούν εντός κάποιων ορίων συντελεστή ισχύος. Γενικά προτιμητέο για τους διαχειριστές είναι οι αιολικοί παραγωγοί να είναι ουδέτεροι ως προς την κατανάλωση (ή και παραγωγή) αέργου ισχύος καθώς φυσικά σε αντίθετη περίπτωση, πρέπει να παραχθεί και να μεταφερθεί ισχύς για την αντιστάθμισή τους, με το αντίστοιχο κόστος. Οι απαιτήσεις ορισμένων κωδίκων για τον συντελεστή ισχύος φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

	Δανία	Γερμανία-Eon	Ιρλανδία	Σκωτία	Ην. Βασίλειο
Συντελεστής ισχύος σε μόνιμη κατάσταση	Q/Ρονομαστικό=0- Q/Ρονομαστικό=0.1 σε μέγιστη παραγωγή και σε ευθεία γραμμή μέχρι Q/Ρονομαστικό=-0.1- Q/Ρονομαστικό=0 σε μηδενική	0.95 επαγωγικό-0.95 χωρητικό για ονομαστική ισχύ λειτουργίας<100MW Για ονομαστική ισχύ λειτουργίας >100MW Ο συντελεστής ισχύος εξαρτάται από την τάση	0.95 επαγωγικό-0.95 χωρητικό σε μέγιστη παραγωγή 32.6MVA <sub>r</sub> ανά 100MW εγκατεστημένα, ενεργός από 100% παραγωγή	0.95 επαγωγικό για παραγωγή 100% μέχρι 20%. 0.95 χωρητικό για παραγωγή μεταξύ	0.95 επαγωγικό-0.95 χωρητικό

	παραγωγή		μέχρι 50% παραγωγή. 0.95 επαγωγικό-0.95 χωρητικό από 50% παραγωγή μέχρι μηδενική.	100% και 50%	
--	----------	--	---	--------------	--

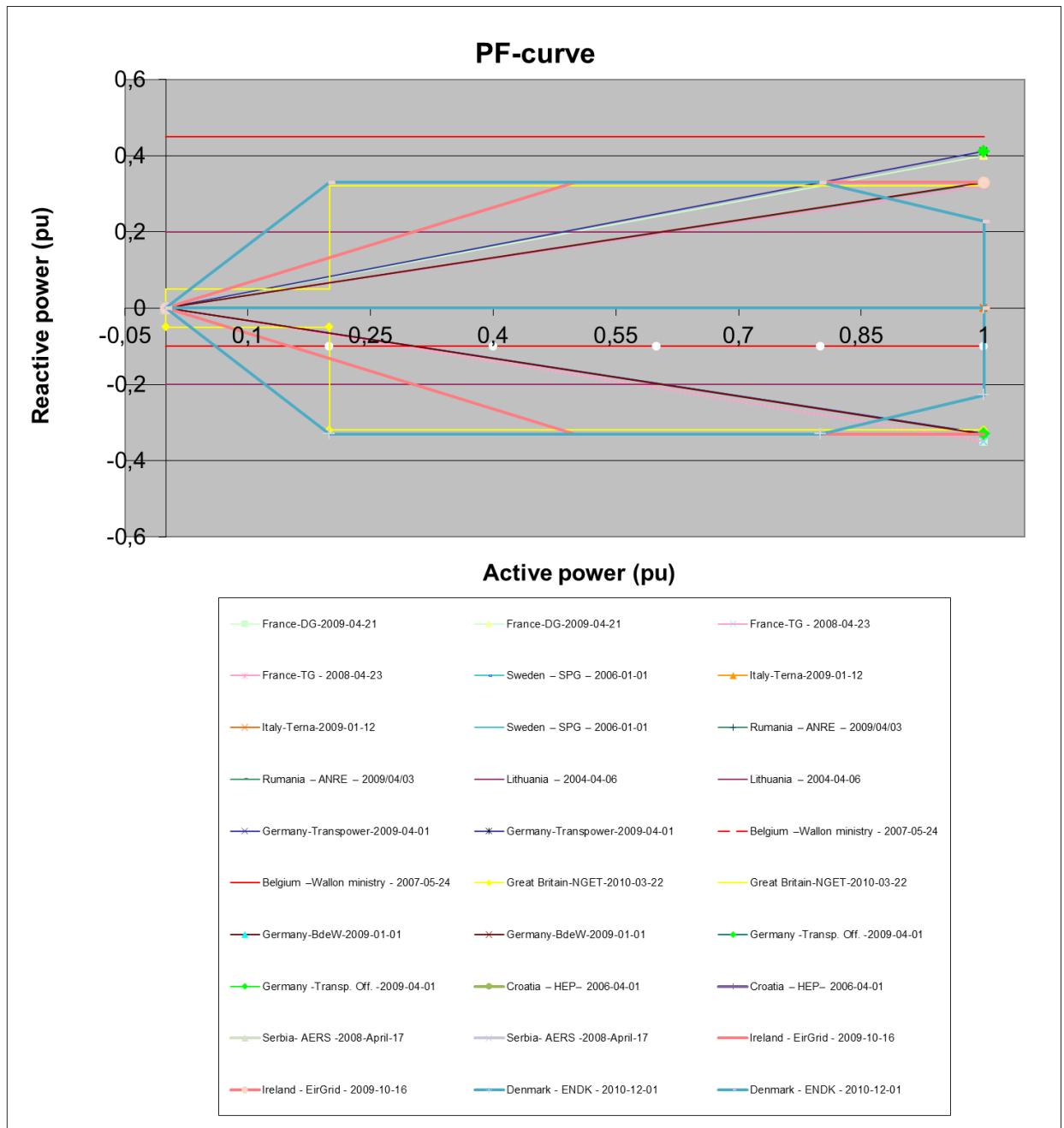
Πίνακας 3.8: Απαιτήσεις συντελεστή ισχύος επιλεγμένων κωδικών

Ο TenneT περιλαμβάνει επίσης πληροφορίες για απαιτήσεις αέργου ισχύος σε διαφορετικά επίπεδα τάσης όπως φαίνεται στο σχήμα 3.7 [39]. Ο λόγος γι' αυτό είναι ότι παραγωγή μεγάλης αέργου ισχύος προκαλεί αύξηση της τάσης, γεγονός που δεν είναι επιθυμητό αν το αρχικό επίπεδο της τάσης είναι ήδη υψηλό. Με αυτό τον τρόπο ουσιαστικά ο έλεγχος της αέργου ισχύος γίνεται μέρος του ελέγχου τάσης.



Σχήμα 3.7: Απαιτήσεις αέργου ισχύος για διαφορετικά επίπεδα τάσης, TenneT [39]

Η αέργου ισχύς ή η απαίτηση του συντελεστή ισχύος απεικονίζεται για ορισμένους κώδικες στο παρακάτω σχήμα 3.8:



Σχήμα 3.8: Απαιτήσεις αέργου ισχύος επιλεγμένων κωδίκων

Ορισμένες τυπικές παράμετροι που συνδέονται με τον έλεγχο αέργου ισχύος και εμφανίζονται στις απαιτήσεις των διαχειριστών είναι οι ακόλουθες και αναφέρονται μόνο για ενδεικτικούς λόγους:

- $Q_{ref-resolution}$  – Επίπεδο ανάλυσης σημείου αναφοράς Αέργου Ισχύος σε [%]

Η παράμετρος αυτή αναφέρεται στην ανάλυση της αέργου ισχύος αναφοράς. Το προσχέδιο του κώδικα διασύνδεσης της Entso-e απαιτεί 1%.

- $Q_{ref-update rate}$  – Ρυθμός ανανέωσης σημείου αναφοράς Αέργου Ισχύος σε [%]

Η παράμετρος αναφέρεται στο ρυθμό ανανέωσης του setpoint. Μόνο η Ισπανία έχει τη συγκεκριμένη πληροφορία και απαιτεί 60sec.

- $Q_{error-max}$  – Μέγιστο Σφάλμα Αέργου Ισχύος σε Κατάσταση Ισορροπίας σε [%]

Η παράμετρος αυτή αναφέρεται μέγιστο επιτρεπόμενο σφάλμα μεταξύ setpoint και μετρούμενης τιμής. Η Μεγάλη Βρετανία αναφέρει 2,5% (Η Entso-e αναφέρει 5%).

- $T_{setling-Q}$  – Χρόνος αποκατάστασης Αέργου Ισχύος

Αυτή η παράμετρος καθορίζει τον μέγιστο διαθέσιμο χρόνο από τη λήψη μιας αλλαγής στο setpoint μέχρι η έξοδος του σταθμού να είναι μέσα στο μέγιστο σφάλμα σε κατάσταση ισορροπίας. Ο TenneT απαιτεί «από ένα έως λίγα λεπτά».

- $N_{Q-full\ cycles}$  – Αριθμός Κύκλων Ανά Ώρα Αέργου Ισχύος από  $Q_{min}$  σε  $Q_{max}$

Η παράμετρος αναφέρεται στον αριθμό των επιτρεπόμενων εναλλαγών από την ελάχιστη στη μέγιστη άεργο ισχύ ανά ώρα. Ο TenneT αναφέρει «όσο συχνά απαιτείται».

### 3.2.5 Παράμετροι ποιότητας ισχύος

Βασικές παράμετροι ποιότητας ισχύος είναι το flicker και η παραμόρφωση λόγω αρμονικών. Το flicker ορίζεται ως μία στιγμιαία απότομη αλλαγή της ενεργού τιμής της τάσης. Το flicker προκαλείται από απότομη εισαγωγή στο ή απόρριψη από το σύστημα πυκνωτών, γραμμών, μετασχηματιστών κλπ. Οι διαχειριστές έχουν συγκεκριμένες απαιτήσεις σχετικά με τη συνεισφορά των ανεμογεννητριών στο φαινόμενο. Η αρμονική παραμόρφωση, που προκαλείται κυρίως από την παρουσία ηλεκτρονικών ισχύος στα σύγχρονα δίκτυα, είναι επίσης ένα φαινόμενο, τα αποδεκτά όρια του οποίου ορίζουν οι κώδικες διασύνδεσης. Εντός αυτών των ορίων, οι παραγωγοί είναι υποχρεωμένοι να λειτουργούν κανονικά.

Ορισμένες τυπικές παράμετροι που συνδέονται με τις παραμέτρους ποιότητας ισχύος και εμφανίζονται στις απαιτήσεις των διαχειριστών είναι οι ακόλουθες και αναφέρονται μόνο για ενδεικτικούς λόγους:

- $\Delta U$  – Μέγιστη Βηματική Αλλαγή Τάσης σε Κατάσταση Ισορροπίας

Αποτελεί μια κοινή απαίτηση στους κώδικες διασύνδεσης και η τιμή της κυμαίνεται γενικά από 2 έως 5%. (Στην Μεγάλη Βρετανία είναι 1%).

- $P_{st}$  – Βραχυπρόθεσμο Flicker [χωρίς μονάδα]

Οι περισσότεροι κώδικες διασύνδεσης έχουν αυτή την απαίτηση και η πιο συνήθης τάξη μεγέθους είναι το 0,8, σύμφωνα με το IEC 61000-4 και 3,25% για το IEEE 1453

(Το IEEE διατυπώνει τις υποδείξεις του σε %, ενώ το IEC χρησιμοποιεί γενικά απόλυτες τιμές)

- $P_{li}$  – Μακροπρόθεσμο Flicker [χωρίς μονάδα]

Οι περισσότεροι κώδικες έχουν την συγκεκριμένη απαίτηση και η τιμή της γενικά είναι 0,6 σύμφωνα με το IEC 61000-4, και 0,2 για 2 ώρες κατά μέσο όρο σε Δανία και Πολωνία (πάνω από 100kV και 220kV).

- $U/U_{+max-before}$  – Μέγιστη Αρνητική Ακολουθία Τάσης (bef.)σε [%]

Οι περισσότεροι κώδικες έχουν την συγκεκριμένη απαίτηση και η πιο τυπική τιμή είναι το 1%.

- $U/U_{+max-after}$  – Μέγιστη Αρνητική Ακολουθία Τάσης (aft.)σε [%]

Οι περισσότεροι κώδικες έχουν την συγκεκριμένη απαίτηση και η πιο τυπική τιμή είναι το 1%.

- $D_n$  – Μέγιστη Μεμονωμένη Αρμονική Παραμόρφωση Τάσης σε [%]

Οι περισσότεροι κώδικες έχουν την συγκεκριμένη απαίτηση και η πιο τυπική τιμή κυμαίνεται μεταξύ 1 και 2%.

- $THD_u$  – Συνολική Παραμόρφωση Τάσης λόγω Αρμονικών σε [%]

Οι περισσότεροι κώδικες έχουν την συγκεκριμένη απαίτηση και η πιο τυπική τιμή είναι 1,5%.

### 3.3 Δυναμική απόδοση

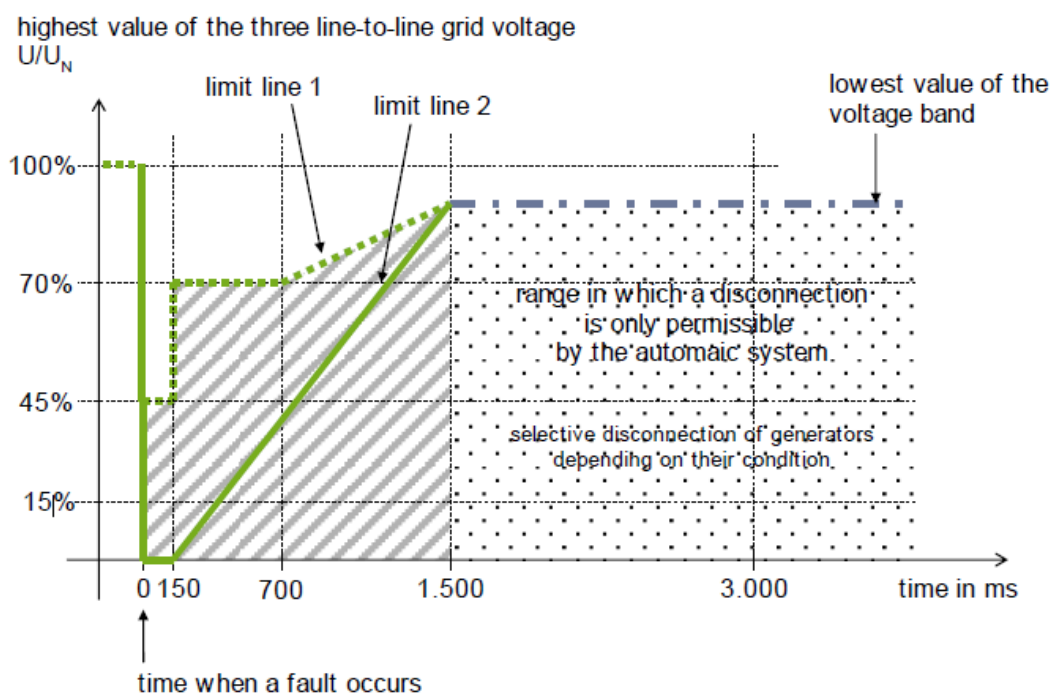
Οι απαιτήσεις που περιγράφονται στην παρούσα παράγραφο αφορούν τις απαιτήσεις των διαχειριστών για δυναμική απόδοση των παραγωγών. Ουσιαστικά αφορούν την συμπεριφορά τους σε συνθήκες διαταραχών και σφάλματος.

#### 3.3.1 Ικανότητα αδιάλειπτης λειτουργίας σε σφάλμα δικτύου (Fault Ride

##### *Through-FRT)*

Οι περισσότεροι κώδικες διασύνδεσης έχουν αυτή την απαίτηση, αλλά δεν υπάρχει κάποια κοινή/γενική περιγραφή. Η απαίτηση για ικανότητα αδιάλειπτης λειτουργίας σε σφάλμα δικτύου αφορά σφάλματα στο δίκτυο (μεταφοράς ή διανομής) και όχι στο εσωτερικό δίκτυο του αιολικού πάρκου. Ζητείται συγκεκριμένα, ο παραγωγός να παραμένει συνδεδεμένος για υποτάσεις σε κάποια (ες) ή όλες τις φάσεις όταν η τάση του συστήματος παραμένει πάνω από κάποιο προκαθορισμένο όριο και για συγκεκριμένο χρόνο.

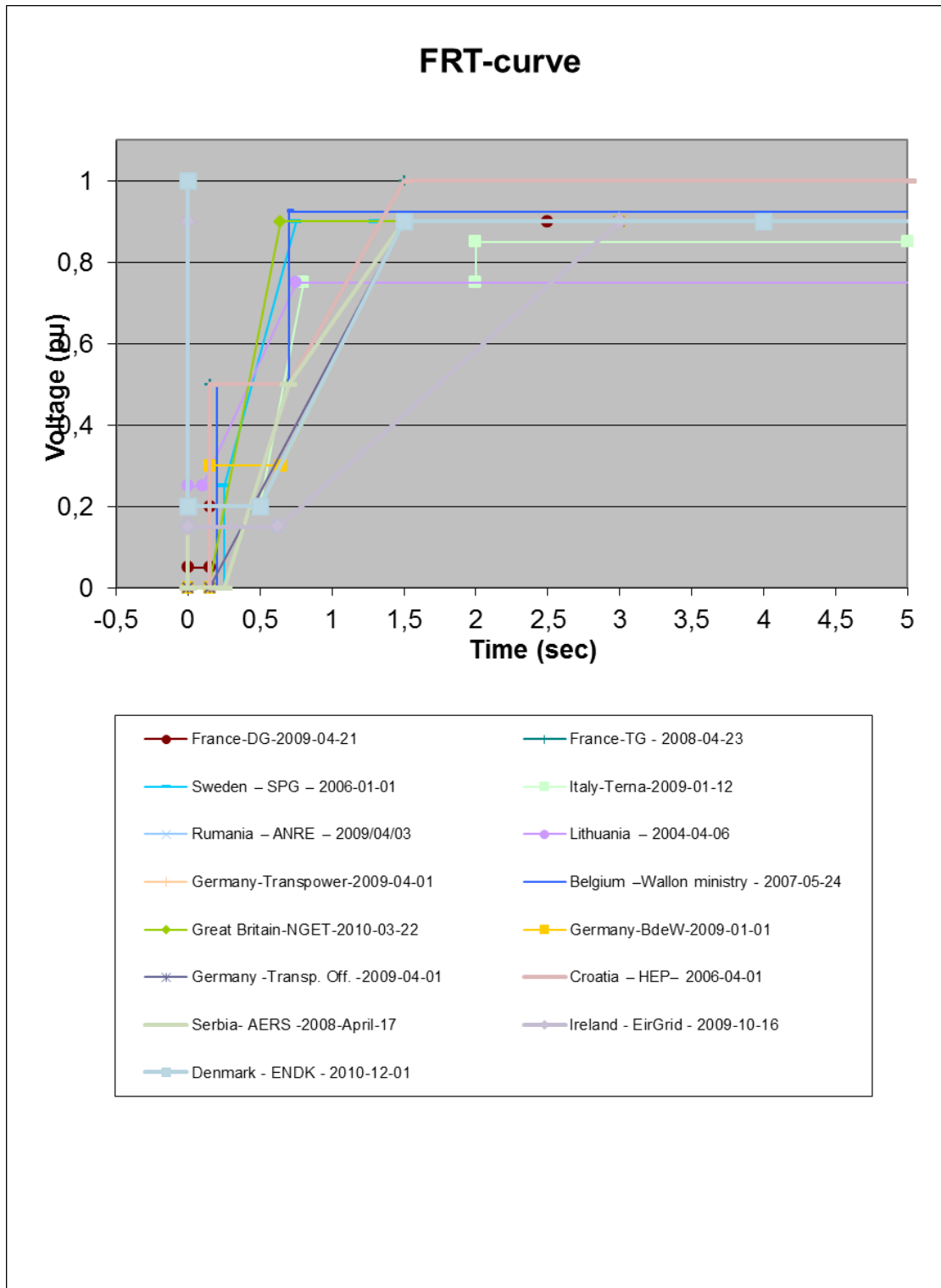
Ο TenneT ζητάει το ακόλουθο προφίλ λειτουργίας σε σφάλμα (Σχήμα 3.9) [38]:



Σχήμα 3.9 Απαιτήση λειτουργίας σε σφάλμα, TenneT [38]

Τριφασικά βραχυκυκλώματα ή σφάλματα που οδηγούν σε βύθιση τάσης δεν πρέπει να οδηγούν το σύστημα σε ανισορροπία ή αποσύνδεση πέραν του ορίου που καθορίζει η γραμμή 1 του σχήματος 3.9. Για τη διαγραμμισμένη περιοχή του ίδιου σχήματος και πάνω από τα όρια της γραμμής 2, όλοι οι παραγωγοί πρέπει να παραμένουν συνδεδεμένοι (εκτός αν υπάρχει ειδική έγκριση του διαχειριστή για μετακίνηση του ορίου, μειώνοντας το χρόνο επανασυγχρονισμού και εξασφαλίζοντας μέγιστη υποστήριξη αέργου ισχύος κατά το σφάλμα). Αν στην ίδια περιοχή ο παραγωγός γίνει ασταθής και ενεργοποιηθούν σχετικές προστασίες, με ειδική έγκριση του διαχειριστή επιτρέπεται βραχεία αποσύνδεση με επανασυγχρονισμό να απαιτείται σε μέγιστο 2 δευτερόλεπτων και με αύξηση της ενεργού ισχύος με ρυθμό 10%-20% της ονομαστικής ανά δευτερόλεπτο.

Επίσης, μία συγκεντρωτική απεικόνιση των απαιτήσεων διαφόρων κωδίκων φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 3.10:



Σχήμα 3.10: Απαιτήσεις λειτουργίας σε σφάλμα επιλεγμένων κωδίκων

Εκτός της απαίτησης οι παραγωγοί να παραμένουν σε σύνδεση, απαιτείται να αποδίδουν ενεργό ισχύ ανάλογη της τάσης του συστήματος. Επίσης, ζητείται να μεγιστοποιούν την απόδοση αέργου ισχύος κατά τη διάρκεια της βύθισης της τάσης χωρίς να ξεπερνιούνται τα σχετικά όρια των επιμέρους ανεμογεννητριών (περισσότερες λεπτομέρειες δίνονται στο κεφάλαιο 3.3.2).

Ορισμένες τυπικές παράμετροι που συνδέονται με την ικανότητα αδιάλειπτης λειτουργίας σε σφάλμα δικτύου και εμφανίζονται στις απαιτήσεις των διαχειριστών είναι οι ακόλουθες και αναφέρονται μόνο για ενδεικτικούς λόγους:

- $U_{FRT-profile}$  – Προφίλ Τάσης FRT

Οι περισσότεροι κώδικες διασύνδεσης έχουν ένα FRT προφίλ αλλά:

- Το σημείο αναφοράς των σφαλμάτων είναι διαφορετικό
- Έχει ισχύ στις σύγχρονες μηχανές ή στην αιολική ενέργεια ή και στα δύο
- Ισχύει για τη διανομή ή την μεταφορά ή και τα δύο
- Δεν υπάρχουν συγκεκριμένες συνθήκες για την ισχύ βραχυκυκλώματος
- Το είδος των σφαλμάτων μπορεί να είναι διαφορετικό
- Η τάση αναφοράς μπορεί να είναι διαφορετική
- Οι ηλεκτρικές προϋποθέσεις (τάση, άεργος ισχύς κτλ) μπορούν να υποτεθούν ή όχι.

- Μέγιστη Υπέρταση στη Διάρκεια Εκκαθάρισης Σφάλματος

Λίγοι κώδικες διασύνδεσης έχουν αυτή την απαίτηση και μια τυπική τιμή είναι το 1,1.

- Θέση αναφοράς FRT

Οι περισσότεροι κώδικες διασύνδεσης δίνουν μια θέση και αναφέρονται στο σημείο κοινής σύνδεσης-PCC που αντιστοιχεί κατά κύριο λόγο στην πλευρά υψηλής τάσης του μετασχηματιστή ισχύος. Η Σουηδία αναφέρεται στους πιο κοντινούς κόμβους των 400kV ή των 220kV δικτύων και η Μ.Βρετανία αναφέρεται στα 400kV και 275kV επίπεδα του συστήματος. Στον κώδικα της Γερμανία-TenneT δεν είναι ξεκάθαρο και δεν αναφέρεται ακριβώς σημείο σύνδεσης δικτύου.

- $Sk-min-PCC-FRT$  – Ελάχιστη FRT Ισχύς Βραχυκυκλώματος στο Σημείο PCC σε [MVA ή σε όρους αναλογίας]

Λίγοι κώδικες διασύνδεσης έχουν αυτή την πληροφορία. Η Ισπανία (μεταφορά) απαιτεί τουλάχιστον 20 WPP της ονομαστικής ισχύος. Η Γερμανία-TenneT απαιτεί το λιγότερο 4 φορές την ονομαστική ισχύ βραχυκυκλώματος. Από τεχνική/νομική άποψη είναι σημαντικό για τον ιδιοκτήτη του αιολικού σταθμού (και τον κατασκευαστή) να είναι ενήμερος σχετικά με τις πιθανές αλλαγές του δικτύου, κυρίως για λόγους εξασφάλισης έναντι πιθανών μελλοντικών προβλημάτων.

- Ακολουθία FRT Σφάλματος

Η Ιταλία απαιτεί να υπάρχει ανοχή τουλάχιστον για τρία προσωρινά τριφασικά σφάλματα σε τέσσερα λεπτά, όταν αυτά εκκαθαρίζονται σωστά από τα ρελέ προστασίας του δικτύου μεταφοράς. Ο Κώδικας της Δανίας δίνει τον παρακάτω πίνακα με τυπικά είδη σφαλμάτων και ακολουθίες:

<i>Τύπος</i>	<i>Διάρκεια Σφάλματος</i>
<i>Τριφασικό Βραχυκύκλωμα</i>	<i>Βραχυκύκλωμα για μια περίοδο 150ms</i>
<i>Διφασικό Βραχυκύκλωμα με ή χωρίς γείωση</i>	<i>Βραχυκύκλωμα για μια περίοδο 150ms, ακολουθούμενο από ένα νέο βραχυκύκλωμα μετά από 0,5-3s, επίσης για μια περίοδο 150ms</i>
<i>Μονοφασικό Βραχυκύκλωμα με τη γη</i>	<i>Μονοφασικό σφάλμα ως προς γη για μια περίοδο 150ms, ακολουθούμενο από ένα νέο βραχυκύκλωμα μετά από 0,5-3s, επίσης για μια περίοδο 150ms</i>

Πίνακας 3.9: Απαιτήσεις Ιταλικού κώδικα για ακολουθία FRT σφάλματος

- $T_{short\ disconnect(FRT)}$  Χρόνος Σύντομης Αποσύνδεσης FRT

Μόνο λίγοι κώδικες διασύνδεσης έχουν τέτοια απαίτηση. Η Γερμανία-TenneT απαιτεί μετά την αποσύνδεση να γίνει επανασυγχρονισμός του σταθμού παραγωγής μέσα σε δύο δευτερόλεπτα το πολύ. Η ενεργός ισχύς πρέπει να αυξηθεί στην αρχική τιμή με μια κλίση της τάξης του 10 και 20% της ονομαστικής ισχύος της γεννήτριας ανά δευτερόλεπτο. Ο Κώδικας της Ισπανίας απαιτεί τα αιολικά πάρκα να μην αποσυνδέονται από το δίκτυο σε περιπτώσεις πτώσεων τάσεων, και καμιά απώλεια ισχύος δεν είναι αποδεκτή ούτε κατά τη διάρκεια ούτε μετά το σφάλμα. Όμως, δεδομένου ότι πολλά αιολικά πάρκα κατασκευάστηκαν πριν την απαίτηση αυτή, είναι δεδομένο ότι δεν μπορούν να την ικανοποιήσουν. Η αποσύνδεση μικρής διάρκειας αποτελούσε μια μέθοδος αντιμετώπισης του FRT και επιτρέπεται ακόμα στη Γερμανία. Κάποιοι κώδικες διασύνδεσης επιτρέπουν το FRT με μια μικρή αποσύνδεση από το δίκτυο, ακολουθούμενη από έναν γρήγορο επανασυγχρονισμό. Αυτή η μέθοδος ήταν από τις πρώτες για την αντιμετώπιση της απαίτησης FRT και δεν φαίνεται να μπορεί να επιβιώσει στους υψηλούς ρυθμούς διεύθυνσης.

- $U_{system-initial(FRT)}$  Τάση Δικτύου πριν το FRT σε [pu]

Οι περισσότεροι κώδικες διασύνδεσης έχουν 1pu. Η Γερμανία-TenneT δείχνει για τα 380kV 0,921-1,158pu και για τα 220kV 0,877-1,15pu. Η παράμετρος αυτή έχει μια αβεβαιότητα σχετικά με το επίπεδο της τάσης πριν το σφάλμα: Πρέπει να θεωρείται πάντα η ονομαστική τάση, η τάση λειτουργίας ή είναι δυνατόν να απαιτηθεί FRT από ακραία υψηλές ή χαμηλές τάσεις;

- $TP_{recovery(FRT)}$  Χρόνος Ανάκτησης Ενεργού Ισχύος FRT σε [s]

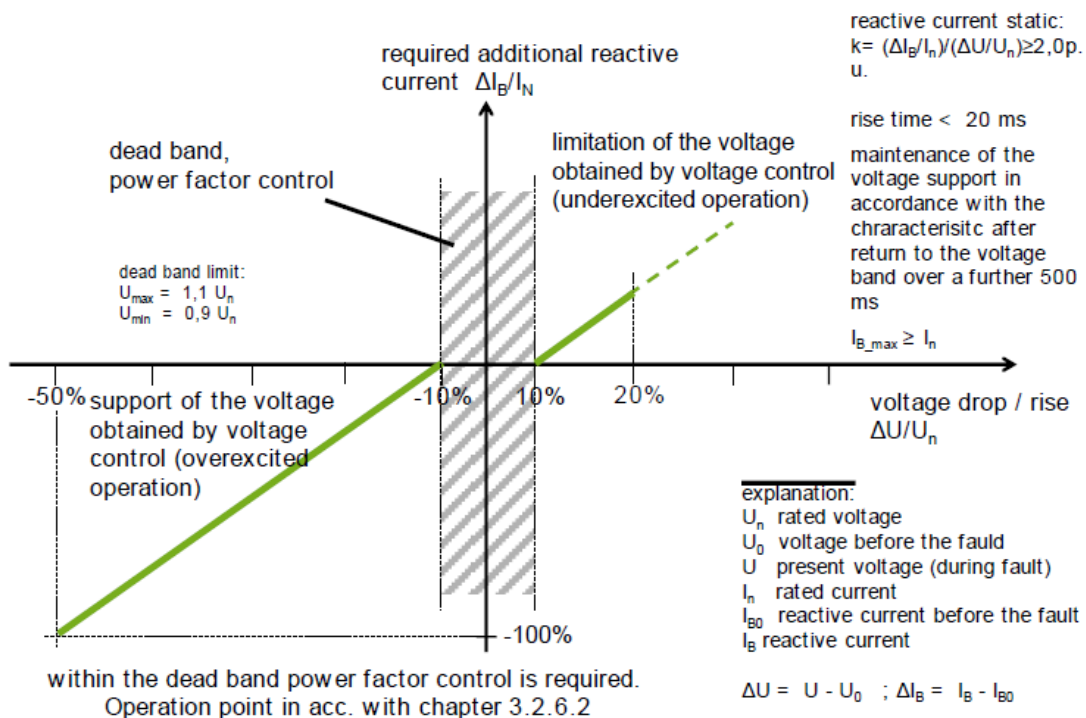
Πολλοί κώδικες διασύνδεσης έχουν αυτή την απαίτηση με μεγάλες αποκλίσεις στην απαίτηση.

Οι onshore απαιτήσεις της Μ.Βρετανίας είναι 0,5s όταν η τάση έχει φτάσει το +/- 10% (400, 275, 132KV) ή +/-6% (66, 33, 11KV), ενώ οι offshore είναι 1s για την ανάκτηση του 90% της

ισχύος πριν το σφάλμα. Ο ENTSO-e απαιτεί 0,5s χρόνο για την ανάκτηση του 85% του επιπέδου της P πριν το σφάλμα. Ο TenneT απαιτεί ανάκτηση της ενεργού ισχύος αμέσως μετά το πέρας του σφάλματος με ρυθμό μεταξύ 10% και 20% της ονομαστικής το δευτερόλεπτο.

### 3.3.2 Έγχυση ρεύματος

Οι παραγωγοί πρέπει να υποστηρίζουν την τάση σε ένα δίκτυο κατά τη διάρκεια διαταραχής, εγχέοντας άεργο ρεύμα. Για να ικανοποιήσουν την απαίτηση αυτή πρέπει να ενεργοποιηθεί η υποστήριξη τάσης για βύθιση πάνω από 10% της τάσης της γεννήτριας όπως απαιτεί ο TenneT σύμφωνα με το παρακάτω σχήμα 3.11 [38]:

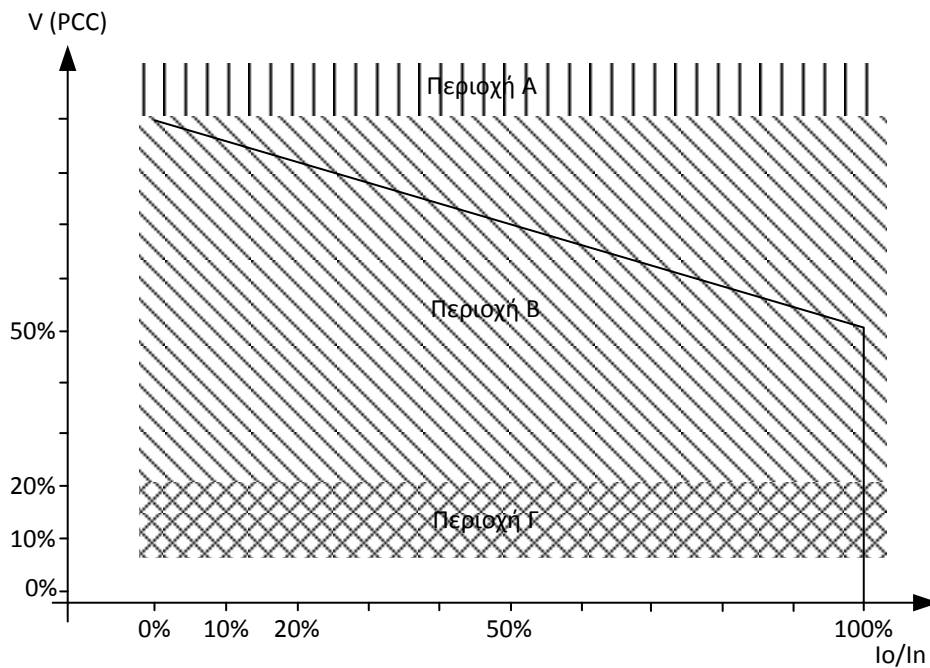


Σχήμα 3.11: Απαίτηση υποστήριξης τάσης TenneT [38]

Ορισμένες τυπικές παράμετροι που συνδέονται με την έγχυση ρεύματος σε σφάλμα δικτύου και εμφανίζονται στις απαιτήσεις των διαχειριστών είναι οι ακόλουθες και αναφέρονται μόνο για ενδεικτικούς λόγους:

- $I_Q(FRT)$  - Μέγιστη έγχυση ρεύματος κατά τη διάρκεια FRT σε [Iq pu]

Πολλοί κώδικες διασύνδεσης έχουν τέτοια απαίτηση. Οι περισσότερες απαιτήσεις είναι μέχρι 1 pu. Η Ιρλανδία-Eirgrid απαιτεί την μεγιστοποίηση του άεργου ρεύματος στο δίκτυο χωρίς να ξεπεραστούν τα όρια των ανεμογεννητριών και τη συνέχεια αυτού για 600ms ή μέχρι η τάση να είναι μέσα στο εύρος φυσιολογικής λειτουργίας. Η Δανία δίνει το παρακάτω διάγραμμα (Σχ. 3.12):



Σχήμα 3.12: Απαίτηση έγχυσης ρεύματος κώδικα Δανίας

Η απαίτηση της Ισπανίας είναι 1 pu αλλά η απαίτηση για πιστοποίηση είναι 0,9. Ο ENTSO-e προδιαγράφει 1 pu. Η παραπάνω λειτουργικότητα σχετίζεται πάντα με τα συμμετρικά σφάλματα (τριφασικά) και το ρεύμα έγχυσης είναι, επίσης, ένα συμμετρικό ρεύμα.

- Θέση Αναφοράς για το Εγγεώμενο Αέριο Ρεύμα

Πολλοί κώδικες έχουν αυτή την πληροφορία και οι περισσότεροι έχουν την απαίτηση στο σημείο κοινής σύνδεσης-PCC (κώδικας διασύνδεσης Ισπανίας, Δανία-ENDK), ενώ κάποιιοι στο σημείο σύνδεσης των ανεμογεννητριών (Γερμανία TenneT).

- Θέση Αναφοράς για Μέτρηση Τάσης (Έγχυση  $I_Q$ )

Πολλοί κώδικες διασύνδεσης έχουν αυτή την πληροφορία. Οι περισσότεροι έχουν την απαίτηση στο σημείο κοινής σύνδεσης-PCC (Ισπανία), αλλά κάποιιοι την έχουν στους στο σημείο σύνδεσης των ανεμογεννητριών (η Γερμανία-TenneT).

- $T_{rise-I_Q}$  – Χρόνος Αύξησης Έγχυσης Αέριου Ρεύματος σε [ms]

Λίγοι κώδικες διασύνδεσης έχουν τέτοια απαίτηση. Η Γερμανία-TenneT έχουν απαίτηση 40ms (και 20ms ανεπίσημα για τον εντοπισμό του σφάλματος) Ο ENTSO-e έχει 40ms απαίτηση «χρόνου ανταπόκρισης». Ο κώδικας της Πορτογαλίας έχει 50ms από τον εντοπισμό της βύθισης της τάσης. Η Δανία έχει 80ms για το 80% του απαιτούμενου  $I_Q$ .

Ο σχέδιο του κώδικα διασύνδεσης της Ελλάδας μιλάει για 70ms μετά την «αναγνώριση του σφάλματος».

- $T_{I_Q-post\ fault-support\ time}$  – Χρόνος μετά το Σφάλμα Υποστήριξης Έγχυσης Αέριου Ρεύματος σε [ms]

Αίγιοι κώδικες διασύνδεσης έχουν τέτοια απαίτηση. Η Γερμανία-TenneT απαιτεί 500ms. Το σχέδιο του κώδικα διασύνδεσης της Ελλάδας απαιτεί 500ms και η Ιρλανδία-Eirgrid απαιτεί 600ms ξεκινώντας από τη στιγμή που το άεργο ρεύμα φτάσει στη μέγιστη τιμή του.

### 3.3.3 Προσωρινές υπερτάσεις – TOV (Temporary Overvoltages)

Τυπικά σχετίζεται με τη λειτουργία σε σφάλμα. Μια προσωρινή υπέρταση είναι μια 50 ή 60Hz υπέρταση που διαρκεί για πάνω από δύο κύκλους. Αυτό συμβαίνει όταν έχουμε:

1. αύξηση της τάσης σε μια υγιή φάση κατά τη διάρκεια ασύμμετρων σφαλμάτων
2. εκκαθάριση σφάλματος
3. υπερτάσεις συστήματος μεγάλης διάρκειας (για παράδειγμα σε διαχωρισμό ή νησιδοποίηση συστήματος)
4. νησιδοποίηση σταθμού με εσωτερικά σφάλματα
5. μη γραμμικά φαινόμενα

Στην περίπτωση προσωρινών υπερτάσεων, ορισμένοι διαχειριστές ζητούν την αποσύνδεση του παραγωγού με μία μέγιστη χρονική καθυστέρηση.

Ο TenneT αναφέρει ότι αν η τάση στην πλευρά χαμηλής τάσης κάθε μετασχηματιστή αυξηθεί και παραμείνει πάνω από το 120% της άνω τιμής της τάσης τότε η γεννήτρια που επηρεάζεται θα πρέπει να αποσυνδεθεί μόνη της από το δίκτυο με μια χρονοκαθυστέρηση της τάξης των 100ms.

Ορισμένες τυπικές παράμετροι που συνδέονται με την προσωρινή υπέρταση και εμφανίζονται στις απαιτήσεις των διαχειριστών είναι οι ακόλουθες και αναφέρονται μόνο για ενδεικτικούς λόγους:

- $TOV_{max}$  – Μέγιστο Εύρος Προσωρινών Υπερτάσεων σε [kV pu]

Πολλοί κώδικες έχουν τέτοια απαίτηση. Υπάρχουν αποκλίσεις αλλά η πιο τυπική τιμή είναι το 1,3pu.

- $U_{TOV}(t)$  – Χρονική διάρκεια αντοχής μόνωσης

Πολλοί κώδικες έχουν αυτή την απαίτηση. Υπάρχουν μεγάλες αποκλίσεις, ειδικά για διάρκειες κάτω των 0,1s. Στο επίπεδο των ανεμογεννητριών η υπέρταση υπολογίζεται μικρότερη εξαιτίας φαινομένων κορεσμού και corona σε εναέριες γραμμές αν αυτές είναι διαθέσιμες.

### 3.3.4 Προστασίες δικτύου παραγωγού

Οι περισσότεροι κώδικες διασύνδεσης έχουν αυτή την απαίτηση. Η πιο τυπική απαίτηση είναι ότι οι ιδιοκτήτες των αιολικών πάρκων θα πρέπει να είναι υπεύθυνοι για την προστασία

του πάρκου και ο συντονισμός με τον διαχειριστή του συστήματος είναι υποχρεωτικός για τον σχεδιασμό και τις ρυθμίσεις των προστασιών των αιολικών πάρκων. Επίσης, τα δίκτυα θα πρέπει να προστατεύονται από σφάλματα στο δίκτυο, διαταραχές κτλ.

Η Γερμανία-BdeW έχει ένα μεγάλο αριθμό λεπτομερών απαιτήσεων σχετικών με τους ηλεκτρονόμους προστασίας. Η Δανία απαιτεί το αιολικό πάρκο να:

- Προστατεύεται από σφάλματα στο δίκτυο
- Προστατεύεται από κλείσιμο διακοπών εκτός φάσης
- Προστατεύει κατά το δυνατόν το δίκτυο από διαταραχές οφειλόμενες στο αιολικό πάρκο
- Προστατεύεται από αποσυνδέσεις σε στιγμές όχι κρίσιμες για το αιολικό πάρκο

Ορισμένες τυπικές παράμετροι που συνδέονται με τις προστασίες του δικτύου του παραγωγού και εμφανίζονται στις απαιτήσεις των διαχειριστών είναι οι ακόλουθες και αναφέρονται μόνο για ενδεικτικούς λόγους:

- $f >$ - Προστασία Υπο-Συχνότητας σε [ $f$  pu ή Hz]

Οι περισσότεροι κώδικες διασύνδεσης έχουν αυτή την απαίτηση. Οι τιμές κυμαίνονται από 0,9 έως 0,98pu με χρονικά «κατώφλια» από χιλιοστά του δευτερολέπτου μέχρι μερικά λεπτά.

- $f >$ - Προστασία Υπέρ-Συχνότητας σε [ $f$  pu ή Hz]

Οι περισσότεροι κώδικες διασύνδεσης έχουν αυτή την απαίτηση. Οι τιμές κυμαίνονται από 1,01 έως 1,1pu με χρονικά «κατώφλια» από χιλιοστά του δευτερολέπτου μέχρι κάποια δευτερόλεπτα.

- $U >$ - Προστασία Υπό-Τάσης σε [ $U$  pu ή kV]

Οι περισσότεροι κώδικες διασύνδεσης έχουν αυτή την απαίτηση. Οι τιμές κυμαίνονται από 0 έως 0,9pu με χρονικά «κατώφλια» από χιλιοστά του δευτερολέπτου μέχρι ένα λεπτό.

- $U >$ - Προστασία Υπέρ-Τάσης σε [ $U$  pu ή kV]

Οι περισσότεροι κώδικες διασύνδεσης έχουν αυτή την απαίτηση. Οι τιμές κυμαίνονται από 1,1 έως 1,65pu με χρονικά «κατώφλια» από χιλιοστά του δευτερολέπτου μέχρι ένα λεπτό.

### **3.4 Επικοινωνία και έλεγχος**

Οι περισσότεροι κώδικες διασύνδεσης έχουν τέτοιες απαιτήσεις. Τυπικά, ζητείται αναμετάδοση πληροφοριών σε πραγματικό χρόνο μεταξύ του διαχειριστή και του παραγωγού για τις βασικές καταστάσεις λειτουργίας του αιολικού πάρκου, ηλεκτρικές τιμές στο σημείο κοινής σύνδεσης, μετρήσεις ισχύος και ενέργειας, εντολές και αναγνώριση αυτών, θέση διακοπών, μέθοδος ελέγχου του αιολικού πάρκου, setpoints (σε έλεγχο τάσης, συχνότητας

κλπ). Πολλοί κώδικες ζητούν πλέον και μετεωρολογικά στοιχεία. Ενδεικτικά, οι παρακάτω απαιτήσεις εμφανίζονται σε διάφορους κώδικες:

- Παραγωγή Ενεργού Ισχύος P στο Σημείο PCC
- Πιθανή Παραγωγή Ενεργού Ισχύος P στο σημείο PCC

*Η πιθανή παραγωγή ενεργού ισχύος P υπολογίζει πάντα ποια θα είναι η δυναμική παραγωγή αν ένας σταθμός αιολικής ενέργειας είναι σε λειτουργία περιορισμού ισχύος .*

- Απολεσθείσα Παραγωγή Ενεργού Ισχύος P στο σημείο PCC

*Αποτελεί ένα σήμα που αντιπροσωπεύει την «χαμένη» ενεργό ισχύ εξαιτίας, για παράδειγμα περιορισμού ισχύος.*

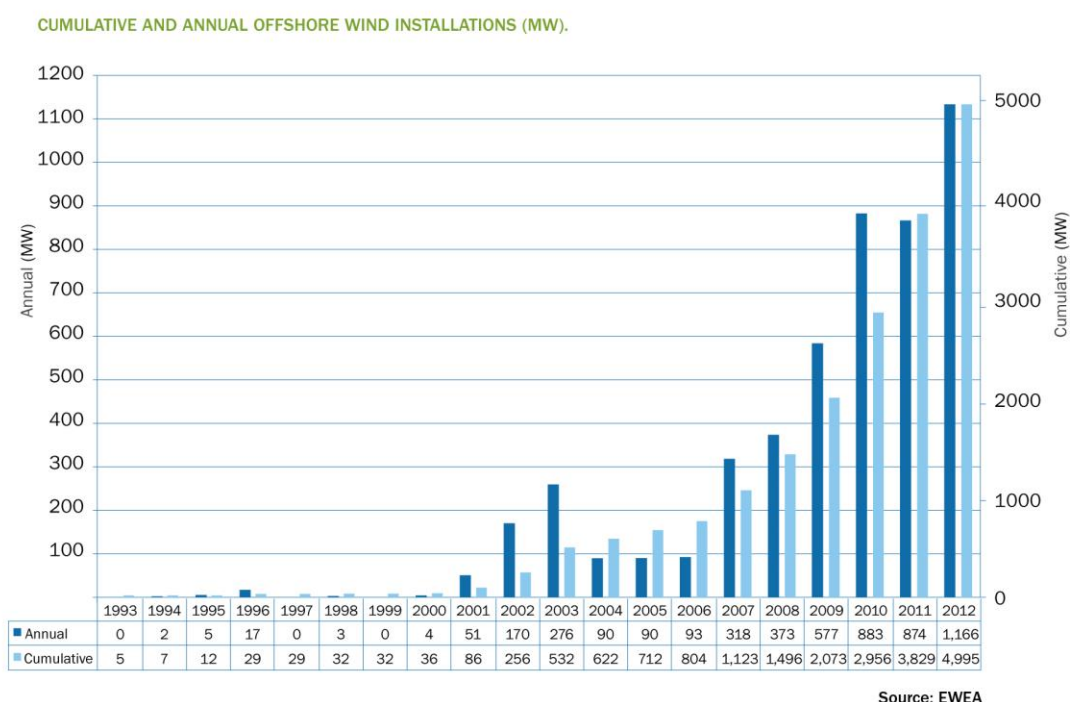
- Παραγωγή Άεργου Ισχύος Q στο σημείο κοινής σύνδεσης
- Τάση στο σημείο κοινής σύνδεσης
- Θέση Tap Changer μετασχηματιστή ισχύος
- Σφάλμα μετασχηματιστή ισχύος
- Θέση διακόπτη ισχύος
- Συχνότητα στο σημείο κοινής σύνδεσης
- Κατάσταση εξοπλισμού αντιστάθμισης
- Σταματημένες ανεμογεννήτριες λόγω υψηλού ή χαμηλού αέρα
- Σταματημένες ανεμογεννήτριες λόγω συντήρησης
- Σταματημένες ανεμογεννήτριες λόγω σφάλματος
- Ανεμογεννήτριες εκτός λειτουργίας
- Ανεμογεννήτριες με περιορισμό ισχύος
- Πληροφορίες σχετικές με την τοπολογία-εσωτερικό Δίκτυο
- Γενικοί συναγερμοί (alarms) αιολικού πάρκου.
- Λειτουργία/τύπος ελέγχου συχνότητας
- Ένδειξη κατάστασης συστήματος ελέγχου συχνότητας
- Ταχύτητα ανέμου
- Κατεύθυνση ανέμου
- Θερμοκρασία περιβάλλοντος
- Ατμοσφαιρική πίεση

# 4

*Γενικά για τη διασύνδεση υπεράκτιων αιολικών  
πάρκων με HVDC*

## 4.1 Τεχνολογία

Η εγκατάσταση ανεμογεννητριών στη θάλασσα (υπεράκτια-offshore αιολικά πάρκα) έχει τα τελευταία χρόνια αποκτήσει μία αξιοσημείωτη δυναμική. Τα υπεράκτια αιολικά έχουν πολλά πλεονεκτήματα, και ένα βασικό μειονέκτημα, το αυξημένο κόστος. Ο άνεμος μακριά από την ακτή είναι πιο ομαλός (ελλείψη επίγειων εμποδίων που προκαλούν τύρβη-ανακάτεμα- του αέρα και άλλα δυσμενή φαινόμενα), με αποτέλεσμα η εκμετάλλευση του να γίνεται πιο αποτελεσματικά και με μικρότερες φθορές για τις ανεμογεννήτριες. Συνήθως, οι ταχύτητες του ανέμου είναι υψηλότερες στη θάλασσα και πιο σταθερές σε σχέση με τη στεριά. Τέλος, σαν βασικό πλεονέκτημα θεωρείται η αδειοδοτική «άνεση» σε σχέση με τη στεριά, χωρίς αντιδράσεις περιοίκων, λιγότερες συνήθως περιβαλλοντικές επιπτώσεις, πιο ξεκάθαρο ιδιοκτησιακό καθεστώς. Για τους παραπάνω, μεταξύ άλλων, λόγους, η εγκατεστημένη ισχύς από υπεράκτια αιολικά πάρκα έχει επταπλασιαστεί από το 2005 όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.1 που ακολουθεί (EWEA (2014,10) [14]):



Σχήμα 4.1: Εγκατεστημένη ισχύς υπεράκτιων αιολικών σταθμών 1993-2012 [14]

Μαζί με τη θεμελίωση των ανεμογεννητριών στο βυθό της θάλασσας (ή την εγκατάσταση σε πλωτές εξέδρες-ακόμα σε ερευνητικό στάδιο), η σύνδεση του αιολικού πάρκου με το ηλεκτρολογικό δίκτυο στη στεριά αποτελούν τα μεγαλύτερα τεχνικά και πιο κοστοβόρα

προβλήματα. Σχετικά με την ηλεκτρική διασύνδεση, οι επιλογές είναι λίγο πολύ ίδιες με αυτές που η τεχνολογία επιτρέπει γενικά στα επίγεια δίκτυα. Συγκεκριμένα, οι επιλογές είναι σύνδεση με εναλλασσόμενο ρεύμα υψηλής τάσης (HVAC) ή με συνεχές ρεύμα υψηλής τάσης (HVDC). Το HVDC είναι διαθέσιμο σε δύο εκδόσεις, τελείως διαφορετικές ως προς τα χαρακτηριστικά, τις τεχνικές τους δυνατότητες και το κόστος, το HVDC-LCC και το HVDC-VSC, περισσότερες λεπτομέρειες για τα οποία δίδονται παρακάτω. Συνολικά λοιπόν, ο μελετητής μίας υπεράκτιας σύνδεσης έχει να επιλέξει μεταξύ τριών τεχνολογιών, HVAC, HVDC-LCC και HVDC-VSC. Η διάκριση της βέλτιστης τεχνικοοικονομικά λύσης δεν είναι εύκολη υπόθεση, και έχουν γραφτεί πολλές εργασίες σε μία προσπάθεια αποσαφήνισης της διαδικασίας επιλογής. Η δυσκολία έγκειται στο γεγονός ότι πέραν των συμβατικών παραγόντων που πρέπει κανείς να λάβει υπ' όψιν (κοινών με μία οποιαδήποτε επίγεια διασύνδεση), στην περίπτωση των υπεράκτιων συνδέσεων πρέπει να υπολογιστεί ο παράγοντας της λειτουργίας, προστασίας, και επιρροής στο υπάρχον επίγειο δίκτυο ενός πολύ μεγάλου-κατά κανόνα- σταθμού παραγωγής, με μεταβαλλόμενη παραγωγή και εμμέσως ελεγχόμενα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά. Συγκεκριμένα, ο μελετητής πρέπει να λάβει υπ' όψιν μεταξύ άλλων τα εξής:

- Κόστος υποσταθμών, επίγειων και υπεράκτιων
- Κόστος υποθαλάσσιων καλωδίων
- Μέγεθος του προς σύνδεση αιολικού πάρκου
- Μελλοντική επεκτασιμότητα
- Δυνατότητα σύνδεσης σε υπάρχον υπεράκτιο δίκτυο (tap-in) ή μελλοντική δυνατότητα σύνδεσης άλλου πάρκου σε αυτό
- Εκπλήρωση απαιτήσεων κώδικα στο σημείο κοινής σύνδεσης (συνήθως στη στεριά)
- Συμπεριφορά σε σφάλμα
- Συνεισφορά αέργου ισχύος
- Νησιδοποίηση αιολικού πάρκου
- Λειτουργία ελέγχου συχνότητας
- Συντήρηση (ευκολία/κόστος)
- Πλεονασμός/Redundancy συστήματος
- Ταχύτητα απόκρισης αιολικού πάρκου (εμμέσως συνδεδεμένο αλλά πιθανώς περιττό με ορισμένη επιλογή τεχνολογίας διασύνδεσης)

### 4.1.1 HVAC

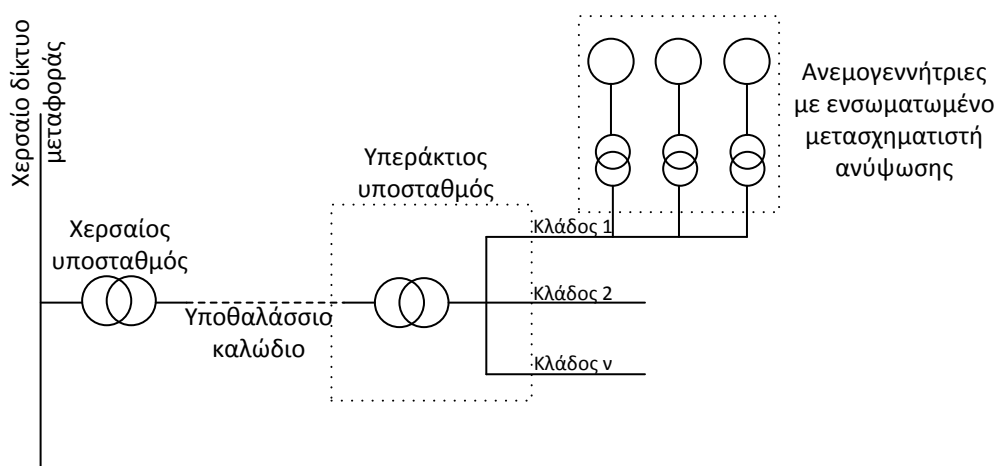
Παρά το γεγονός ότι η τεχνολογία μεταφοράς με εναλλασσόμενο ρεύμα δεν αποτελεί μέρος της παρούσας εργασίας, η παράλειψη αναφοράς της είναι αδύνατη για δύο βασικούς λόγους:

- Εξακολουθεί να κατέχει τη μερίδα του λέοντος των διασυνδέσεων υπεράκτιων αιολικών πάρκων

και

- Εξακολουθεί, παρά την εξέλιξη της τεχνολογίας HVDC (κυρίως-VSC), να αποτελεί μία θελκτική λύση, κυρίως για πάρκα μέχρι ένα συγκεκριμένο μέγεθος και απόσταση από τη στεριά.

Στις διασυνδέσεις HVAC ένας υπεράκτιος υποσταθμός αναλαμβάνει να συγκεντρώσει τους ακτινικά συνδεδεμένους κλάδους των ανεμογεννητριών και να μεταφέρει σε έναν χερσαίο υποσταθμό την αιολική παραγωγή μέσω κάποιου υποθαλάσσιου καλωδίου (Σχήμα 4.2). Το ακτινικό δίκτυο των ανεμογεννητριών αποτελείται επίσης από υποθαλάσσια καλώδια και λειτουργεί σε μέση τάση, ανάλογα με το σχεδιασμό του δικτύου και των ανεμογεννητριών. Η μεταφορά από τον υπεράκτιο στον χερσαίο υποσταθμό γίνεται συνήθως σε υψηλή τάση.



Σχήμα 4.2: Ακτινική σύνδεση ανεμογεννητριών σε υπεράκτιο αιολικό σταθμό

Πρόκειται δηλαδή για ένα καθ' όλα συμβατικό δίκτυο διασύνδεσης που συναντάμε εξ' ολοκλήρου στα χερσαία αιολικά πάρκα (με την εξαίρεση των υποθαλάσσιων καλωδίων που γενικά παρουσιάζουν μεγάλη χωρητικότητα σε σχέση με εναέρια δίκτυα).

Σε περιπτώσεις μικρών πάρκων κοντά στην ακτή, ο υποσταθμός μπορεί να παραλειφθεί και η διασύνδεση να γίνει απευθείας με μέση τάση.

Το βασικό πλεονέκτημα των διασυνδέσεων HVAC είναι το χαμηλό κόστος κτήσης τους, ενώ το βασικό μειονέκτημα τους είναι ξεκάθαρα η ανάγκη αντιστάθμισης της χωρητικότητας των καλωδίων διασύνδεσης. Αυξανόμενης δε της εγκατεστημένης ισχύος και της απόστασης, αυξάνεται η ανάγκη αντιστάθμισης και των συνδεόμενων με το φαινόμενο απωλειών. Τέλος, λόγω της μεγάλης χωρητικότητας των καλωδίων, μπορούν να εμφανιστούν και φαινόμενα συντονισμού στη γραμμή μεταφοράς τα οποία προκαλούν παραμόρφωση της κυματομορφής.

#### 4.1.2 HVDC-LCC

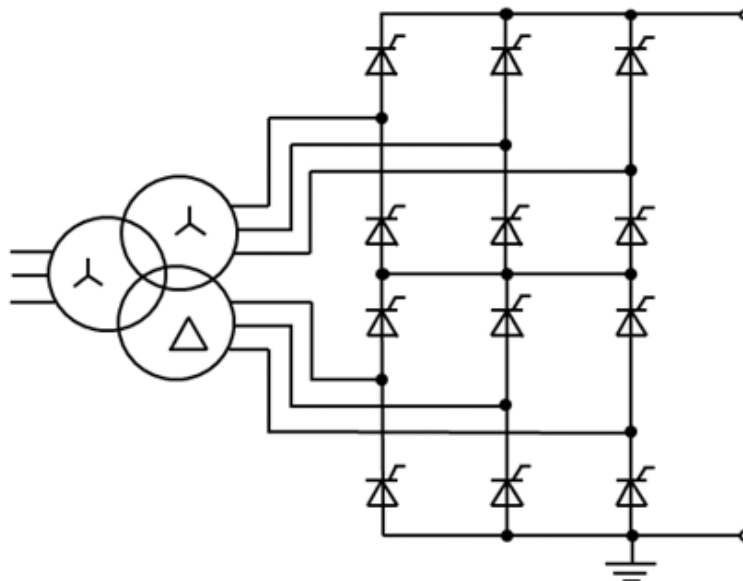
Η τεχνολογία HVDC-LCC (Line Commutated Converter-Μεταγωγέας Φυσικής Μεταγωγής) αποτελεί την πιο παλιά τεχνολογία μεταφοράς με συνεχές ρεύμα υψηλής τάσης. Πρωτοεμφανίστηκε γύρω στο 1950 και μονοπώλησε τις διασυνδέσεις HVDC, μέχρι την σχετικά πρόσφατη εμφάνιση της τεχνολογίας VSC. Πρακτικά εξακολουθεί να κατέχει τα σκήπτρα διασυνδέσεων μεγάλης ισχύος και εξακολουθεί να αποτελεί μονόδρομο για διασυνδέσεις άνω των 800-1000MW.

Στο HVDC-LCC συναντάμε δύο σταθμούς μετατροπής ο κάθε ένας εκ των οποίων είναι συνδεδεμένος με ένα δίκτυο AC και ένα DC, ενώ είναι συνδεδεμένοι μεταξύ τους με ένα δίκτυο DC εναέριας, υπόγειας ή υποθαλάσσιας καλωδίωσης (Σχήμα 4.3).



Σχήμα 4.3: Τυπική τοπολογία διασύνδεσης HVDC-LCC

Η τεχνολογία LCC στηρίζεται στη χρήση κυρίως εξαπαλμικών μετατροπέων (δύο εκ των οποίων συνδέονται εν σειρά για τη δημιουργία δωδεκαπαλμικού μετατροπέα) αποτελούμενων από θυρίστορ. Ως γνωστόν, στα θυρίστορ είναι δυνατή η ελεγχόμενη έναυση των ημιαγωγών αλλά όχι και η σβέση τους. Αυτό είναι το βασικό τεχνολογικό χαρακτηριστικό διαφοροποίησης από την τεχνολογία VSC που με τη χρήση IGBT μπορεί να ελέγξει και τη σβέση. Η βασική τοπολογία του δωδεκαπαλμικού μετατροπέα με θυρίστορ φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα (Σχήμα 4.4):



Σχήμα 4.4: Βασική τοπολογία μετατροπέα με θυρίστορ.

Στα θυρίστορ, η τάση πάντα προπορεύεται του ρεύματος. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τα θυρίστορ να καταναλώνουν άεργο ισχύ. Επομένως υπάρχει η ανάγκη και στον ένα και στον άλλο μετατροπέα του συστήματος HVDC-LCC να γίνεται αντιστάθμιση. Η αντιστάθμιση μπορεί να γίνει είτε με πυκνωτές είτε με STATCOM.

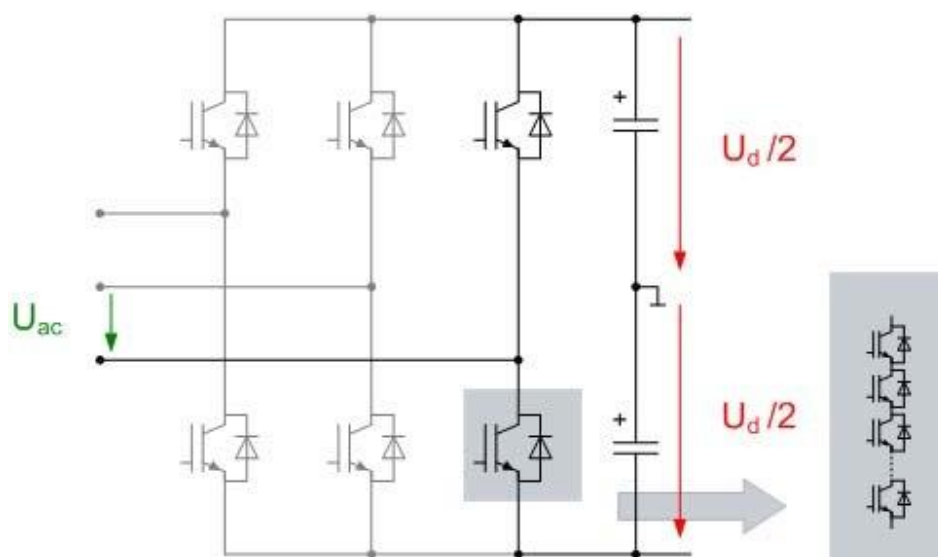
Εκτός της κατανάλωσης αέργου ισχύος, τα θυρίστορ εισάγουν ένα άλλο ανεπιθύμητο χαρακτηριστικό στο δίκτυο, αυτό του θορύβου (αρμονικών). Για την αντιμετώπιση τους, επιβάλλεται η χρήση φίλτρων σε κάθε μετατροπέα. Σύμφωνα με τους Marques, Castro, Almedia (2011:1,6) [24], τα μεγαλύτερα μειονεκτήματα των HVDC-LCC εκτός από την ανάγκη αντιστάθμισης και τις αρμονικές, είναι συγκεκριμένα για τη διασύνδεση υπεράκτιων αιολικών πάρκων η έλλειψη σχετικής εμπειρίας.

Από την άλλη, εκτός από το προφανές πλεονέκτημα της δυνατότητας διασύνδεσης συστημάτων με τελείως διαφορετικά χαρακτηριστικά (π.χ. συχνότητα) τα συστήματα HVDC-LCC χαρακτηρίζονται από τις χαμηλές τους απώλειες ειδικά σε σχέση με τα συστήματα AC. Σύμφωνα με τους Dorn, Gambach και Retzmann (2012:1,6) [10] τα βασικά πλεονεκτήματα των διασυνδέσεων HVDC-LCC είναι οι χαμηλές απώλειες, οι μεγάλες δυνατότητες υπερφόρτωσης, η αξιοπιστία και ο μεγάλος χρόνος ζωής. Ακόμα, το μήκος των διασυνδέσεων δεν περιορίζονται από τη φόρτιση των καλωδίων και τέλος δεν μεταφέρονται βραχυκυκλώματα από το ένα σύστημα στο άλλο.

### 4.1.3 HVDC-VSC

Η τεχνολογία HVDC-VSC (Voltage Source Control-Μετατροπέας πηγής τάσης) αποτελεί την εξέλιξη στο χώρο των διασυνδέσεων HVDC. Στηρίζεται σε ημιαγωγούς τύπου IGBT

(Insulated gate bipolar transistor-διπολικά τρανζίστορ μονωμένης πύλης) των οποίων έχουμε τη δυνατότητα να ελέγχουμε όχι μόνο την έναυση (όπως στο θυρίστορ) αλλά και τη σβέση. Μάλιστα, για τον έλεγχο αυτό μας αρκεί βοηθητική τάση ελέγχου και όχι εξωτερική τάση δικτύου όπως στην περίπτωση του LCC. Έτσι, η τεχνολογία αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε αδύναμα συστήματα όπου δεν έχουν στρεφόμενες μηχανές. Ο έλεγχος των ημιαγωγών στοιχείων γίνεται με τη βοήθεια PWM (Pulse width modulation-Διαμόρφωση εύρους παλμών), και αυτό μας δίνει απόλυτο έλεγχο επάνω στη διαμορφούμενη κυματομορφή. Η ενεργός και η άεργος ισχύς μπορούν να ελεγχθούν απόλυτα και ανεξάρτητα.



Σχήμα 4.5: Βασική τοπολογία μετατροπέα με IGBT.

Η πρώτη γενιά συστημάτων HVDC-VSC αποτελούνταν από δύο επίπεδα, όπως στο σχήμα 4.5 και υπέφεραν και αυτά, όπως το LCC, από σχετικά αυξημένες απώλειες και αρμονικές. Η μεγάλη καινοτομία ήταν η χρησιμοποίηση πολυεπίπεδων μετατροπέων (MMC-Modular multilevel converter) γεγονός που έλυσε και το θέμα των απωλειών, οι οποίες περιορίστηκαν σημαντικά, και το θέμα των αρμονικών, με τα σχετικά φίλτρα να είναι πλέον περιττά. Τα συστήματα HVDC-VSC αποτελούν σήμερα την πιο προηγμένη τεχνολογία διασύνδεσης, έχουν όμως τεχνικό άνω όριο ισχύος διασύνδεσης (και τεχνικό-οικονομικό κάτω όριο ισχύος, περισσότερο για το οποίο θα αναλύσουμε παρακάτω). Σύμφωνα με την Alstom, “Voltage source converter, Introduction to VSC technology” [5], τα βασικά πλεονεκτήματα της τεχνολογίας που την έχουν κάνει να ξεχωρίσει σαν τεχνική λύση, ειδικά για την διασύνδεση υπεράκτιων αιολικών πάρκων είναι τα παρακάτω:

- Έλεγχος ενεργού και αέργου ισχύος
- Ο έλεγχος της αέργου ισχύος επιτρέπει τη σύνδεση σε πολύ αδύναμα AC δίκτυα

- Η γέννηση κυματομορφής του δίνει τη δυνατότητα να ξεκινήσει εκ του μηδενός (black start) ένα δίκτυο
- Ο μετατροπέας μπορεί να λειτουργήσει μέχρι μηδενική ισχύ, χωρίς κάτω όρια όπως στην περίπτωση του LCC
- Δεν χρειάζονται φίλτρα αρμονικών
- Μικροί συγκριτικά σταθμοί μετατροπής
- Δεν χρειάζεται αναστροφή πολικότητας για την αναστροφή της ροής της ισχύος.
- Οι σταθμοί μετατροπής μπορούν να λειτουργήσουν σαν STATCOM αν η μεταφορά ισχύος δεν είναι διαθέσιμη

Καθώς γίνεται κατανοητό ότι η παρακολούθηση και η σύγκριση των βασικών πλεονεκτημάτων/μειονεκτημάτων των τριών τεχνολογιών δυσχεραίνει με την περαιτέρω ανάλυση, κρίνεται σκόπιμο να παρουσιαστεί συγκριτικός πίνακας όπως ο παρακάτω:

	<b>HVAC</b>	<b>HVDC-LCC</b>	<b>HVDC-VSC</b>
<b>Διεθνής εμπειρία/track record</b>	Μεγάλη	Μεγάλη	Μικρή
<b>Κόστος</b>	Χαμηλό	Μεσαίο	Μεγάλο
<b>Ανάγκη αντιστάθμισης</b>	Ναι	Όχι	Όχι
<b>Χωρητικότητα καλωδίων/ συντονισμός</b>	Ναι	Όχι	Όχι
<b>Χωρητικότητα καλωδίων/ περιορισμός μεταφερόμενης ισχύος</b>	Ναι	Όχι	Όχι
<b>Άνω όριο εγκατεστημένης ισχύος</b>	Όχι	Όχι	Ναι
<b>Κάτω όριο εγκατεστημένης ισχύος</b>	Όχι	Ναι (για οικονομικούς λόγους)	Όχι
<b>Ανάγκη αντιστάθμισης υποσταθμού/μετατροπέα</b>	Ναι	Ναι	Όχι
<b>Ανάγκη φιλτραρίσματος αρμονικών</b>	Όχι	Ναι	Όχι
<b>Δυνατότητα διασύνδεσης συστημάτων διαφορετικών χαρακτηριστικών</b>	Όχι	Ναι	Ναι
<b>Απώλειες</b>	Μεγάλες	Μεσαίες	Μικρές
<b>Δυνατότητα υπερφόρτισης</b>	Ναι	Ναι	Περιορισμένη
<b>Αξιοπιστία</b>	Μεγάλη	Μεγάλη	Μικρή
<b>Χρόνος ζωής</b>	Μεγάλος	Μεγάλος	Άγνωστος
<b>Απομόνωση συνδεδεμένων συστημάτων (π.χ. βραχυκύκλωμα)</b>	Όχι	Ναι	Ναι
<b>Χρήση σε αδύναμα συστήματα χωρίς στρεφόμενες μηχανές</b>	Ναι (με περιορισμούς)	Όχι	Ναι

<b>Ανεξάρτητος έλεγχος ενεργού και αέργου ισχύος</b>	Όχι	Όχι	Ναι
<b>Blackstart αυτόνομα</b>	Όχι	Όχι	Ναι
<b>Λειτουργία στο πλήρες εύρος ισχύος (min-max)</b>	Ναι	Όχι	Ναι
<b>Μέγεθος υποσταθμού/μετατροπέα</b>	Μικρός	Μεγάλος	Μικρός

Πίνακας 4.1: Σύγκριση τεχνολογιών διασύνδεσης

## 4.2 Τεχνικό-οικονομικά κριτήρια

Έχοντας διαθέσιμες τις παραπάνω εναλλακτικές (HVAC, HVDC-LCC, HVDC-VSC) για τη διασύνδεση υπεράκτιων αιολικών πάρκων με τη στεριά, εύλογο είναι να αναρωτηθεί κανείς ποιά τεχνολογία είναι τεχνικοοικονομικά βέλτιστη. Από τεχνικής καθαρά απόψεως, μπορεί κανείς να τολμήσει να παρατηρήσει ότι η τεχνολογία VSC υπερτερεί στους περισσότερους τομείς. Όμως όπως σε όλη τη μηχανική, οι εμπορικές λύσεις, διέπονται και από (αν όχι κυρίως) το οικονομικό κριτήριο. Δεδομένου δε και του γεγονότος ότι η παραγωγή ενέργειας από το αιολικό πάρκο δεν είναι καθορισμένη ούτε απολύτως προβλέψιμη, αντιλαμβάνεται κανείς τη δυσκολία επιλογής της βέλτιστης τεχνικοοικονομικά λύσης. Γενικά, μπορεί κανείς να πει ότι το πρόβλημα είναι πολυεπίπεδο και δυσεπίλυτο, καθώς οι παράγοντες επιρροής είναι τουλάχιστον οι ακόλουθοι:

- Ισχύς/σταθερότητα επίγειου δικτύου (για την επιλογή τεχνολογίας λιγότερο ευαίσθητη στο συνδεδεμένο δίκτυο)
- Απόσταση υπεράκτιου πάρκου από την ακτή (για το κόστος καλωδίου και την ανάγκη αντιστάθμισης)
- Βάθος πυθμένα της θάλασσας στο σημείο εγκατάστασης του αιολικού πάρκου και στο κομμάτι της ηλεκτρικής διασύνδεσης (άμεση επιρροή του βάθους στο κόστος θεμελίωσης/εγκατάστασης)
- Επιλεχθείσα τεχνολογία ανεμογεννητριών (διαφορετικές ικανότητες συνεισφοράς στη συμβατότητα στον κώδικα διασύνδεσης, διαφορετικό κόστος, διαφορετική αξιοπιστία)
- Εγκατεστημένη ισχύς υπεράκτιου αιολικού πάρκου (για τα τεχνολογικά όρια των διαφορετικών λύσεων διασύνδεσης)
- Χωροταξία σημείου κοινής σύνδεσης-PCC (για την συμβατότητα με τον κώδικα διασύνδεσης)

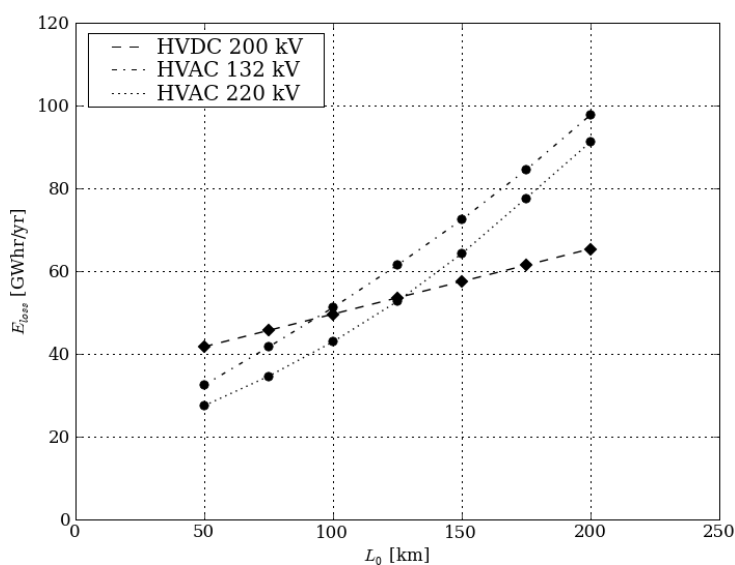
- Απαιτήσεις κώδικα διασύνδεσης (για την επιλογή τεχνολογίας διασύνδεσης περισσότερο συμβατής ή μοναδικά συμβατής-απόρριψη κάποιας τεχνολογίας)
- Αδειοδοτική δυσκολία/ευκολία (για την επιλογή τεχνολογίας με λιγότερη/περισσότερη όχληση στον επίγειο/υπεράκτιο υποσταθμό/μετατροπέα)
- Όριο ευθύνης επενδυτών-ένας για αιολικό πάρκο και γραμμή διασύνδεσης ή ξεχωριστές οντότητες; (για τον ακριβή ορισμό του επιχειρηματικού μοντέλου προς επίλυση)
- Αξία παραγόμενης μεγαβατώρας (για το επιχειρηματικό μοντέλο)
- Κόστος ανεμογεννητριών (για το επιχειρηματικό μοντέλο)
- Κόστος εξοπλισμού υποσταθμού/μετατροπέα (για το επιχειρηματικό μοντέλο)
- Κόστος χαλκού/καλωδίου, άμεσα εξαρτώμενου από την απόσταση και την τεχνολογία 2/3 αγωγών (για το επιχειρηματικό μοντέλο)
- Κόστος συντήρησης συνολικής εγκατάστασης (για το επιχειρηματικό μοντέλο)
- Επίπεδο πλεονασμού (redundancy) (για το κόστος εξοπλισμού αν χρησιμοποιηθούν π.χ. διπλές γραμμές μεταφοράς)
- Απαιτούμενη εμπειρία-track record/αξιοπιστία από την πλευρά του επενδυτή για τον πάροχο του εξοπλισμού. Νεότερες τεχνολογίες-μεγαλύτερο ρίσκο (για την επιλογή τεχνολογίας με περισσότερες ή λιγότερες εγκαταστάσεις)
- Πρόβλεψη παραγωγής με βάση μετρήσεις και ανεμολογικά μοντέλα (για τον καθορισμό του επιχειρηματικού μοντέλου)
- Απώλειες της κάθε τεχνολογίας διασύνδεσης (επίπεδο απωλειών έχει άμεση επιρροή στο επιχειρηματικό μοντέλο)
- Ανάγκη της εκάστοτε τεχνολογίας για αντιστάθμιση (ανάγκη αντιστάθμισης με στατικά στοιχεία ή STATCOM έχει άμεση επιρροή στο επιχειρηματικό μοντέλο και στην αξιοπιστία του συστήματος)
- Ανάγκη φίλτρων αρμονικών (ανάγκη φίλτρων έχει άμεση επιρροή στο επιχειρηματικό μοντέλο και στην αξιοπιστία του συστήματος)

Δεδομένου επίσης του γεγονότος ότι οι τιμές κτήσης των διαφόρων συστημάτων δεν είναι καθορισμένες και στις περισσότερες περιπτώσεις είναι απόρρητες μέχρι κάποια επίσημη προσφορά για συγκεκριμένο έργο, η θεωρητική άσκηση επιλογής τεχνολογίας για ένα θεωρητικό αιολικό πάρκο (με παραδοχές στην απόσταση από την ακτή, την εγκατεστημένη ισχύ, το αιολικό δυναμικό κλπ κλπ) γίνεται ακόμα πιο δύσκολη.

Παρόλα αυτά έχουν γίνει αρκετές προσπάθειες κυρίως σε ακαδημαϊκό επίπεδο για επιλογή της βέλτιστης τεχνολογίας με βάση κάποιες παραδοχές. Τα αποτελέσματα ορισμένων από αυτές τις προσπάθειες αναφέρονται παρακάτω. Το ενδιαφέρον συμπέρασμα από την μελέτη των εργασιών αυτών είναι ότι παρά το πολυπαραγοντικό του προβλήματος και τις διαφορετικές παραδοχές, οι περισσότεροι συγκλίνουν στο ότι η απόσταση που οι συνδέσεις HVDC αρχίζουν και αποκτούν ενδιαφέρον είναι γύρω στα 100 χιλιόμετρα.

Οι Morton et al (2006:236) [28] αξιολογώντας πιθανές διασυνδέσεις για τον δεύτερο γύρο των αιολικών του Ηνωμένου Βασιλείου, συνέκριναν 150kV HVDC-VSC με 132kV και 245kV HVAC. Τα προς διασύνδεση υπεράκτια αιολικά πάρκα ήταν εγκατεστημένης ισχύος 64MW και πάνω και σχετικά μικρής απόστασης από την ακτή. Το συμπέρασμά τους ήταν ότι η σύνδεση HVAC 132kV φαινόταν προτιμότερη, σημείωσαν όμως ότι αυτό είχε να κάνει και με τις υψηλές-την εποχή της μελέτης-τιμές των συστημάτων HVDC-VSC. Σημείωσαν μάλιστα ότι αντικείμενο μελέτης ήταν η μελλοντική χρησιμοποίηση της καλωδιακής υποδομής του συστήματος HVAC από HVDC-VSC.

Οι Sharma et al (2010:1) [34] επιχείρησαν να συγκρίνουν τις τεχνολογίες HVAC (132kV, 220kV), HVDC-VSC (200kV) σε επίπεδο απωλειών μόνο, αφήνοντας το οικονομικό σκέλος εκτός της άσκησης τους, φτάνοντας σε ενδιαφέροντα συμπεράσματα. Έλαβαν υπ' όψιν ένα υπεράκτιο αιολικό πάρκο 180MW και τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα τους για τις απώλειες σε σχέση με την απόσταση ήταν αυτά που φαίνονται στο σχήμα 4.6 που ακολουθεί:

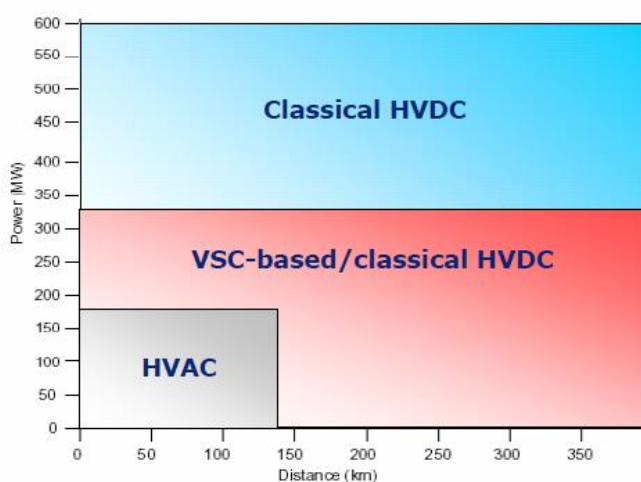


Σχήμα 4.6: Σύγκριση απωλειών HVDC-VSC, HVAC σε σχέση με την απόσταση από την ακτή [34]

Παρατηρούμε από το παραπάνω σχήμα ότι υπάρχει ένα σημείο περίξ των 100-130 χιλιομέτρων όπου οι απώλειες των διαφορετικών τεχνολογιών εξισώνονται, και ουσιαστικά

γίνεται ορθολογική η χρήση HVDC-VSC έναντι HVAC (πάντα σε επίπεδο συνολικών απωλειών μόνο). Αξιοσημείωτο γεγονός επίσης αποτελεί το συμπέρασμα των Sharma et al (2010:1) [34] για τη συντριπτική συνεισφορά (και πρωτοκαθεδρία) του καλωδίου στις απώλειες; 33% περίπου για το HVDC-VSC και 63% περίπου για το HVAC.

Οι Sprahic, Balzer (2005:1,6) [36] προτείνουν τη θέσπιση κάποιων γενικών (περισσότερο ενδεικτικών παρά απόλυτων) ορίων για την επιλογή τεχνολογίας διασύνδεσης ανάλογα με την εγκατεστημένη ισχύ και την απόσταση από την ακτή σύμφωνα με το παρακάτω σχήμα (Σχήμα 4.7):



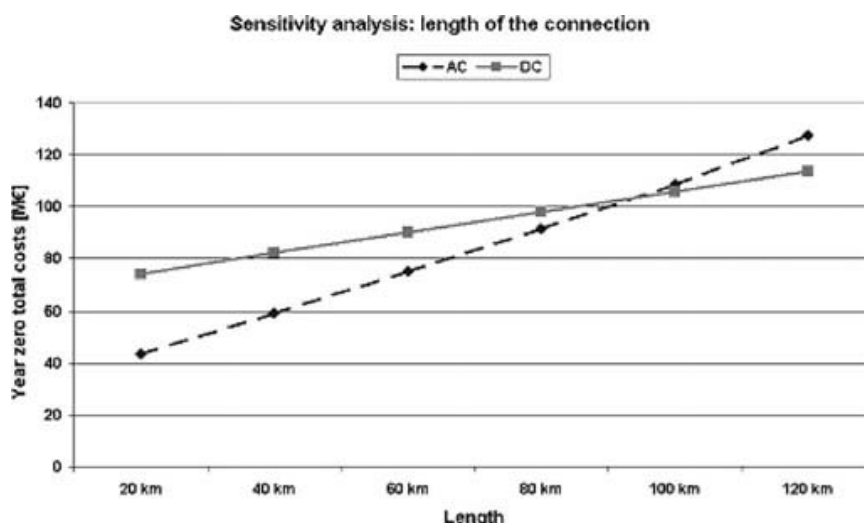
Σχήμα 4.7: Προτεινόμενα όρια επιλογής τεχνολογίας διασύνδεσης [36]

Τέλος οι Bresesti et al (2007:37) [7] στην μάλλον πιο εμπειριστατωμένη προσπάθεια εξαγωγής γενικών συμπερασμάτων λαμβάνουν υπ' όψιν τα εξής:

- Εγκατεστημένη ισχύ 100, 200 και 500MW
- HVAC 150kV, HVAC 400kV και HVSC-VSC
- Απόσταση 60 χιλιόμετρα από την ακτή (μεταβαλλόμενη στην μελέτη ευαισθησίας που αναλύεται πιο κάτω)
- Κόστη επένδυσης, συντήρησης και αγοράς ενέργειας
- Διαθεσιμότητα συστήματος
- Απώλειες συστήματος

Σε όλες τις περιπτώσεις φαίνεται ότι η πιο συμφέρουσα τεχνικό-οικονομικά επιλογή είναι η HVAC. Στη συνέχεια όμως, μία μελέτη ευαισθησίας με παράγοντες την απόσταση, το κόστος καλωδίου και μετατροπέα, τις απώλειες και τη διαθεσιμότητα του συστήματος, στην περίπτωση του υπεράκτιου πάρκου των 100 MW αποκαλύπτει ένα ενδιαφέρον στοιχείο. Γύρω στα 90 χιλιόμετρα απόσταση από την ακτή έχουμε πάλι ένα σημείο ισορροπίας

κόστους του HVAC και του HVDC, και πάνω από αυτήν, το HVDC υπερτερεί οικονομικά. Το συμπέρασμα των Bresesti et al (2007:37) [7] φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 4.8):



Σχήμα 4.8: Σύγκριση κόστους διασυνδέσεων HVAC, HVDC ως προς την απόσταση από την ακτή [7]

Συμπερασματικά, βλέπουμε ότι παρά το πολυπαραγοντικό της άσκησης επιλογής της βέλτιστης τεχνικό-οικονομικά τεχνολογίας διασύνδεσης, οι περισσότερες μελέτες συμφωνούν ότι υπάρχει μία απόσταση από την ακτή όπου η τεχνολογία HVDC-VSC γίνεται ιδιαίτερα θελκτική. Η απόσταση αυτή ορίζεται γύρω στα 100 χιλιόμετρα.

Τέλος και για λόγους πληρότητας της ανάλυσης, πρέπει να αναφερθεί ότι η τεχνολογία HVDC-LCC δεν αναφέρεται καθόλου για συγκεκριμένους λόγους. Καταρχήν η τεχνολογία αυτή από τη φύση της πιθανώς ταιριάζει σε έργα εκατοντάδων MW με τεράστιες αποστάσεις από την ακτή, αλλά αυτά είναι μάλλον μοναδικά/σπάνια, παρά ο κανόνας για να αναλυθούν περαιτέρω. Επίσης είναι τόσο μεγάλες οι ανάγκες αντιστάθμισης και χώρου για τη δημιουργία υποσταθμών/μετατροπέων τόσο υπεράκτια τόσο και επίγεια που μόνο σε κάποια πολύ ειδικά έργα μπορεί να υπερτερούν έναντι του HVDC-VSC.

### 4.3 Διεθνής εμπειρία

Καταγράφονται παρακάτω επιγραμματικά για λόγους αναφοράς, εφαρμογές HVDC ανά τον κόσμο:

- Borwin 1 Commissioning year: 2012 Power rating: 400 MW AC Voltage: 170 kV (Platform) 380 kV (Diele) DC Voltage:  $\pm 150$  kV DC underground cable: 2 x 75 km DC submarine cable: 2 x 125 km

- Dolwin 1 Commissioning year: 2013 Power rating: 800 MW No of circuits: 1 AC Voltage: 155 kV (Platform) 380 kV (Dörpen W) DC Voltage: 320 kV DC underground cable: 2 x 75 km DC submarine cable: 2 x 90 km
- Dolwin 2
- Commissioning year: 2015 Power rating: 900 MW No of circuits: 1 AC Voltage: 155 kV (Platform) 380 kV (Dörpen W) DC Voltage: 320 kV DC underground cable: 2 x 45 km DC submarine cable: 2 x 90 km
- Horns Rev 2002 160 MW offshore transformer substation 15-km 150 kV
- Nysted 2004 165.6-MW offshore transformer station, 10-km 132-kV
- Barrow 2006 90-MW offshore 33/132-kV substation 7 km 132-kV
- Kentish Flats 90 MW, since December 2005, 8.5-km offshore NO offshore substation
- Scroby Sands (60 MW, since 2004, 2.5-km offshore) NO offshore substation
- Netherlands' Egmond aan Zee Offshore Wind Farm (108 MW, since 2006) NO offshore substation
- North Hoyle (60 MW, since 2003, 12-km offshore) NO offshore substation

# 5

*Ενσωμάτωση υπεράκτιων αιολικών πάρκων  
διασυνδεδεμένων με HVDC στο ηλεκτρικό δίκτυο*

## ***5.1 Γενικά για την ενσωμάτωση υπεράκτιου αιολικού πάρκου στο ηλεκτρικό δίκτυο***

Η αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος εκάστου υπεράκτιου αιολικού πάρκου είναι δεδομένη, και είναι πλέον της τάξης των εκατοντάδων μεγαβάτ. Επίσης δεδομένη είναι η μεγάλη διείσδυση της αιολικής ενέργειας στα συστήματα ενέργειας, ειδικά ορισμένων χωρών όπως η Γερμανία. Τέλος, το σημείο σύνδεσης στο δίκτυο είναι μοναδικό και συνήθως γεωγραφικά γειτονικό με άλλα αιολικά πάρκα (κοντά στο αιολικό δυναμικό) και μακριά από την κατανάλωση. Ο συνδυασμός των παραπάνω δεδομένων, είναι ενδεικτικός για τη σημασία της συνεισφοράς των νέων αυτών εγκαταστάσεων στην ομαλή λειτουργία των δικτύων μεταφοράς.

Η συνεισφορά αυτή των υπεράκτιων αιολικών πάρκων στη σταθερότητα του δικτύου είναι συνώνυμη με την συμπεριφορά του αιολικού πάρκου σε συνθήκες σφάλματος. Πιο σωστά, είναι το σύνολο της υποδομής από το σημείο κοινής σύνδεσης (PCC) στη στεριά μέχρι και την τελευταία ανεμογεννήτρια του πάρκου που είναι αντικείμενο μελέτης για τη συμπεριφορά σε συνθήκες σφάλματος. Ειδικά για την περίπτωση όπου το αιολικό πάρκο συνδέεται με το PCC μέσω δικτύου HVDC, αυτό είναι σχεδόν εξολοκλήρου απομονωμένο ηλεκτρικά από το χερσαίο δίκτυο. Έτσι, οι ανεμογεννήτριες, που παραδοσιακά σχεδιάζονται για να συνεισφέρουν με τον καλύτερο δυνατό τρόπο στο σφάλμα και την ικανοποίηση των απαιτήσεων του κώδικα, βρίσκονται απομονωμένες σε λειτουργία σε ένα υπεράκτιο δίκτυο οχυρωμένο από τις χερσαίες διαταραχές. Το δίκτυο HVDC (και οι μετατροπείς αυτού) σε συνδυασμό με τα συστήματα επικοινωνίας επιβάλλεται να παίξουν ενεργό ρόλο, μαζί με τις ανεμογεννήτριες για την ικανοποίηση των απαιτήσεων του κώδικα.

Συγχρόνως, οι απαιτήσεις του κώδικα γίνονται όλο και πιο αυστηρές. Οι διαχειριστές, δικαίως, απαιτούν συμπεριφορά αντίστοιχη με αυτή των συμβατικών σταθμών παραγωγής. Αρκετές χώρες, όπως αναλυτικά περιγράφεται στα Κεφάλαια 2,3 εκδίδουν κώδικες ειδικούς για αιολικά πάρκα και ορισμένες εξ αυτών ειδικά για υπεράκτια αιολικά.

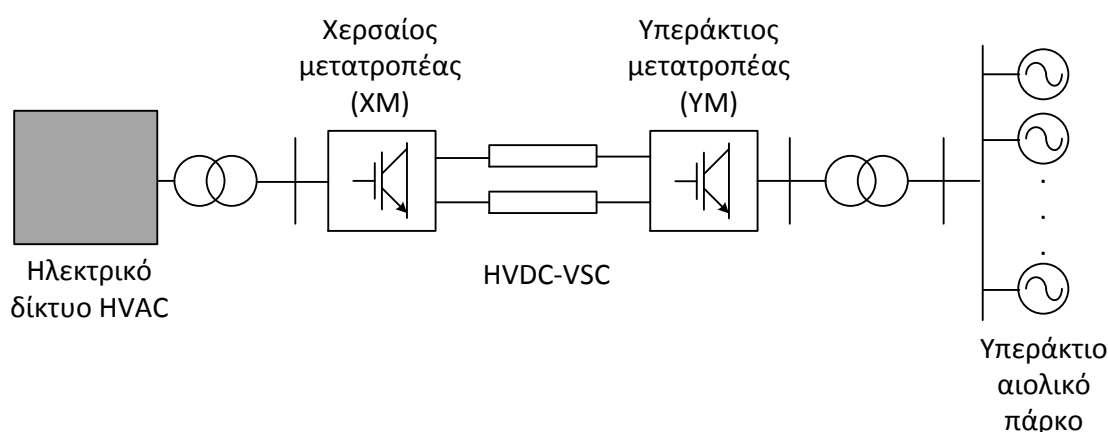
Όπως αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 4, οι διαθέσιμες τεχνολογίες για διασύνδεση υπεράκτιων αιολικών πάρκων είναι οι HVAC, HVDC-LCC, HVDC-VSC. Δεδομένης της γνωστής συμπεριφοράς και απαιτήσεων της διασύνδεσης HVAC λόγω της μεγάλης εμπειρίας τέτοιων εγκαταστάσεων, και του σπανίου της εφαρμογής HVDC-LCC λόγω ειδικών απαιτήσεων (εγκατεστημένης ισχύος, αποστάσεως κλπ), η παρούσα μελέτη θα επικεντρωθεί στο HVDC-VSC. Το HVDC-VSC αποτελεί την πιο πολλά υποσχόμενη τεχνολογία για διασύνδεση

πάρκων γύρω στα 100MW και άνω, ενώ συγχρόνως αποτελούν την πιο νέα, και συνεπώς πιο ενδιαφέρουσα για μελέτη, τεχνολογία.

Οι ανεμογεννήτριες που εγκαθίστανται είναι κατ' αποκλειστικότητα μεταβλητών στροφών. Οι τεχνολογίες των προσφερόμενων ανεμογεννητριών είναι κυρίως ασύγχρονες διπλής τροφοδότησης (Double Fed Induction Generator-DFIG) ή μόνιμου μαγνήτη/βραχυκυκλωμένου κλωβού με πλήρη μετατροπέα (permanent magnet/squirrel cage-full scale converter-FSC). Παρά το γεγονός ότι η πλειοψηφία των εγκατεστημένων ανεμογεννητριών είναι DFIG, η τάση της βιομηχανίας είναι οι FSC. Ανεμογεννήτριες FSC προσφέρονται πλέον σχεδόν από όλους τους μεγάλους κατασκευαστές για νέα υπεράκτια αιολικά πάρκα. Ο βασικός λόγος στροφής της βιομηχανίας προς την τεχνολογία πλήρους μετατροπέα, είναι οι αυξημένες δυνατότητες που προσφέρει για την ικανοποίηση των ολοένα και αυξανόμενων απαιτήσεων των κωδίκων δικτύου. Η μελέτη μας θα επικεντρωθεί στην τεχνολογία FSC καθώς όπως αναφέρθηκε είναι ουσιαστικά η μόνη προσφερόμενη σήμερα τεχνολογία για υπεράκτια αιολικά πάρκα. Όπου θεωρηθεί αναγκαίο όμως θα γίνει αναφορά σε πιθανά σημαντικά πλεονεκτήματα ή μειονεκτήματα άλλων τεχνολογιών.

## 5.2 Κανονική λειτουργία

Θεωρούμε μία τυπική τοπολογία διασύνδεσης υπεράκτιου αιολικού πάρκου με γραμμή HVDC όπως την παρακάτω (σχήμα 5.1):



Σχήμα 5.1: Τυπική τοπολογία διασύνδεσης με γραμμή HVDC

Υπό συνθήκες κανονικής λειτουργίας, ο υπεράκτιος μετατροπέας πρέπει να δημιουργεί τις συνθήκες για την απορρόφηση όλης της παραγόμενης ενέργειας και τη μεταφορά προς τον

χερσαίο μετατροπέα. Δημιουργεί μία εναλλασσόμενη κυματομορφή απαιτούμενης τάσης και συχνότητας για την ομαλή λειτουργία του υπεράκτιου AC δικτύου και ανορθώνει την παραγόμενη ενέργεια εγχέοντας την στο DC δίκτυο. Ο χερσαίος μετατροπέας, διαχειρίζεται την τάση του DC δικτύου, μετατρέπει την μεταφερθείσα ισχύ σε εναλλασσόμενη, και εγχέει την απαιτούμενη ενεργό και άεργο ισχύ στο ηλεκτρικό δίκτυο HVAC.

Οι ανεμογεννήτριες του υπεράκτιου αιολικού πάρκου λειτουργούν βλέποντας την τάση και τη συχνότητα που έχει δημιουργήσει ο υπεράκτιος μετατροπέας. Ανάλογα με τις εκάστοτε ρυθμίσεις στους ελεγκτές των ανεμογεννητριών και το SCADA του αιολικού πάρκου, μπορεί να λειτουργούν εντελώς συμβατικά (όπως σε ένα χερσαίο αιολικό σταθμό). Μπορούν να δέχονται και να εκτελούν μέσω SCADA, εντολές όπως αυτή του περιορισμού της ενεργού ισχύος. Μπορούν να ρυθμιστούν σε έλεγχο τάσης ή έλεγχο συχνότητας. Τέλος, μπορούν να ρυθμιστούν για αντιστάθμιση του υπεράκτιου δικτύου AC και έγχυση αέργου ισχύος κατά το δοκούν.

### **5.3 Λειτουργία σε σφάλμα**

Στο Κεφάλαιο 3 «Τεχνικές Απαιτήσεις Διασύνδεσης», αναφερθήκαμε με λεπτομέρειες στις απαιτήσεις των διαχειριστών δικτύων για τη διασύνδεση αιολικών παραγωγών. Οι απαιτήσεις αυτές, είναι αρκετές και οι περισσότερες ποικίλλουν ανάλογα με τις εκάστοτε ιδιαιτερότητες του εν λόγω συστήματος. Μία από τις πιο σημαντικές αλλά και πιο απαιτητικές προϋποθέσεις που συναντάται και σχεδόν πάντα στους κώδικες είναι οι απαιτήσεις για ικανότητα αδιάλειπτης λειτουργίας σε σφάλμα δικτύου (Fault ride through).

#### **5.3.1 Απαίτηση λειτουργίας σε σφάλμα δικτύου (Fault ride through FRT)**

Οι κώδικες απαιτούν από τους παραγωγούς να παραμένουν συνδεδεμένοι κατά την διάρκεια υποτάσεων για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Αυτή η απαίτηση είναι σίγουρα από τις πιο σημαντικές γενικά στις διασυνδέσεις παραγωγών στο σύστημα, αλλά και ειδικά για τη διασύνδεση υπεράκτιων αιολικών πάρκων μέσω γραμμών HVDC. Η ομαλή λειτουργία της γραμμής HVDC (με συνδεδεμένους πυκνωτές για την εξομάλυνση της συνεχούς τάσης) απαιτεί μία ισορροπία στην ενέργεια που εισέρχεται και που εξέρχεται από αυτήν. Αν για λόγους σφάλματος η εγχέομενη ενέργεια δεν ισούται με την απορροφώμενη, το επίπεδο της συνεχούς τάσης θα αυξηθεί. Λόγω της πολύ μικρής ανοχής των μετατροπέων σε υπερφόρτιση, αν το σφάλμα δεν αντιμετωπιστεί, οι προστασίες της γραμμής HVDC θα ενεργοποιηθούν και θα βγάλουν την γραμμή εκτός συστήματος. Κάτι τέτοιο φυσικά αντιτίθεται στις απαιτήσεις των κωδίκων διασύνδεσης. Αξίζει να σημειωθεί ότι αυτή η

μεταβολή της στάθμης της τάσης της γραμμής HVDC μπορεί να αποτελέσει μέτρο (παραδείγματος χάριν ενός συστήματος ελέγχου) για την ομαλή ή όχι λειτουργία της.

Για τη μελέτη της λειτουργίας της γραμμής HVDC-VSC σε κατάσταση σφάλματος, θεωρούμε τριφασικό σφάλμα στο χερσαίο δίκτυο HVAC. Η γραμμή HVDC δεν μπορεί πλέον να αποδώσει την μεταφερόμενη ενέργεια. Αυτό, αρχίζει και φορτίζει την γραμμή HVDC αυξάνοντας την τάση. Οι ανοχές της γραμμής HVDC σε υπερτάσεις είναι σχετικά μικρή. Σύμφωνα με τους Hendriks, Volzke, Kling (2009) [18], οι μετατροπείς είναι υπερδιαστασιοποιημένοι μόνο για το 0.9 α.μ. της τάσης ή 1.1 α.μ. της έντασης.

Εάν επιτραπεί αυτή η αύξηση της τάσης στη γραμμή HVDC, θα υπάρξει ενεργοποίηση των σχετικών προστασιών και απενεργοποίηση της γραμμής. Συνεπώς οι επιλογές που έχουμε είναι οι εξής:

- Υπερδιαστασιολόγηση των μετατροπέων ώστε να είναι ανθεκτικοί σε συνθήκες σφάλματος
- Κατανάλωση της εγγεόμενης ενέργειας σε βοηθητικά φορτία
- Μείωση της εγγεόμενης ενέργειας

### **5.3.2 Αδρανειακή απόκριση και απόκριση συχνότητας**

Μία άλλη απαίτηση των διαχειριστών που είναι άξια αναφοράς είναι η υποστήριξη της συχνότητας του χερσαίου δικτύου. Σε χερσαία αιολικά πάρκα αυτό αντιμετωπίζεται, ανάλογα με την τεχνολογία της χρησιμοποιούμενης ανεμογεννήτριας, με αδρανειακή απόκριση του ρότορα ή με έλεγχο της ισχύος των ανεμογεννητριών. Βέβαια, στη σύγχρονη τεχνολογία ανεμογεννητριών πλήρους μετατροπέα, ο τελευταίος απομονώνει την γεννήτρια από το δίκτυο και έτσι εμποδίζει ουσιαστικά την εκμετάλλευση της αδρανειακής απόκρισης.

Το ίδιο πρόβλημα σε μεγαλύτερο βαθμό παρουσιάζεται στις συνδέσεις υπεράκτιων αιολικών πάρκων με γραμμή HVDC-VSC όπου το υπεράκτιο δίκτυο και οι ανεμογεννήτριες του υπεράκτιου αιολικού πάρκου είναι απολύτως απομονωμένο ηλεκτρικά από το χερσαίο δίκτυο. Έτσι, διαταραχές στη συχνότητα του χερσαίου δικτύου δεν γίνονται αντιληπτές-οποιαδήποτε αναμενόμενη συμπεριφορά εκ μέρους των ανεμογεννητριών, αδρανειακή ή σε επίπεδο ελέγχου συχνότητας δεν είναι τεχνικά εφικτή.

Το γεγονός αυτό αντιτίθεται στις απαιτήσεις των διαχειριστών για υποστήριξη συχνότητας. Το πρόβλημα εξάλλου γίνεται ακόμα πιο σημαντικό δεδομένου ότι διαχειριστές αυξάνουν το όριο της μεγαλύτερης απώλειας συστήματος (δηλαδή την ισχύ παραγωγής που το σύστημα μπορεί να διαχειριστεί σε επίπεδο διαταραχής) με βάση το οποίο σχεδιάζουν ακριβώς για να αντιμετωπίσουν την αυξημένη σύνδεση αιολικών παραγωγών [43]. Αυτή η μεγαλύτερη απώλεια συστήματος, μεταφράζεται και σε μεγαλύτερες ανάγκες υποστήριξης συχνότητας.

Τρεις μέθοδοι έχουν προταθεί για την συνεισφορά υπεράκτιων αιολικών πάρκων συνδεδεμένων με γραμμή HVDC και παρουσιάζονται παρακάτω:

#### *5.3.2.1 Έλεγχος συχνότητας στο υπεράκτιο δίκτυο μέσω τηλεπικοινωνιών*

Ο χερσαίος σταθμός HVDC-VSC, παρακολουθεί την συχνότητα του χερσαίου δικτύου στο σημείο κοινής σύνδεσης (PCC) και μέσω του συστήματος SCADA και του δικτύου οπτικών ινών, μεταφέρει την μέτρηση της συχνότητας στον υπεράκτιο σταθμό. Ο τελευταίος, αναλαμβάνει να αναπαράξει τη συχνότητα αυτή στο υπεράκτιο δίκτυο. Με τον τρόπο αυτό μπορούμε να εκμεταλλευτούμε την ικανότητα των ανεμογεννητριών να λειτουργούν σε έλεγχο συχνότητας και να παράξουν επιπλέον ισχύ σε περίπτωση υποσυχνότητας ή λιγότερη σε περίπτωση υπερσυχνότητας.

Βέβαια, για να επιτευχθεί παραγωγή επιπλέον ισχύος, απαραίτητη προϋπόθεση είναι οι ανεμογεννήτριες να λειτουργούν με ένα βαθμό εφεδρείας. Αυτή η εφεδρεία έχει προφανώς δυσμενή επιρροή στην παραγωγικότητα του αιολικού πάρκου και πρέπει να είναι εμπορικά διασφαλισμένη.

Η μέθοδος εξαρτάται πολύ από την τηλεπικοινωνιακή ζεύξη του χερσαίου συστήματος με τον υπεράκτιο μετατροπέα. Συνεπώς, η αξιοπιστία της ζεύξης αυτής πρέπει να σχεδιαστεί σχετικά με κατάλληλη εφεδρεία.

Οι ανεμογεννήτριες αντιδρούν στον έλεγχο συχνότητας μέσω του αεροδυναμικού συστήματος περιορισμού ισχύος (pitch) και άρα με τη σχετική χρονική καθυστέρηση. Επίσης χρονική καθυστέρηση δημιουργεί το σύστημα των τηλεπικοινωνιών. Η αδρανειακή απόκριση αναμένεται σε λίγα msec ενώ στην περίπτωση της μέτρησης, επικοινωνίας, αεροδυναμικού ελέγχου οι χρόνοι προσεγγίζουν την τάξη μεγέθους των δευτερολέπτων όπως αναφέρει και ο Phulpin (2012) [32].

#### *5.3.2.2 Έλεγχος συχνότητας στο υπεράκτιο δίκτυο μέσω ελέγχου τάσης της γραμμής*

##### *HVDC-VSC*

Στην μέθοδο αυτή, ο χερσαίος μετατροπέας μεταβάλλει την τάση της γραμμής HVDC-VSC ανάλογα με τη συχνότητα του χερσαίου δικτύου. Με τη σειρά του ο υπεράκτιος μετατροπέας ρυθμίζει τη συχνότητα του υπεράκτιου δικτύου ανάλογα με την τάση της γραμμής.

Η μέθοδος στερείται της ανάγκης τηλεπικοινωνιακής μεταφοράς της συχνότητας του χερσαίου δικτύου στο υπεράκτιο σύστημα, με καλύτερη αξιοπιστία και μικρότερη χρονική καθυστέρηση.

Ο Phulpin (2012) [32] ο οποίος προτείνει το σύστημα, παρά τα προφανή του πλεονεκτήματα, καταγράφει και τρεις ιδιαιτερότητες: την επιλογή των παραμέτρων  $K$  των συστημάτων

ελέγχου, την μερική διαθεσιμότητα της υποστήριξης συχνότητας και την αλληλεπίδραση με τα συστήματα προστασίας του συστήματος.

Για την επιλογή των παραμέτρων  $K$ , αναφέρεται ότι πρέπει να επιλεγεί η βέλτιστη τιμή για γρήγορη ανίχνευση αλλά και διατήρηση της τάσης της γραμμής εντός επιτρεπτών ορίων. Για την μερική διαθεσιμότητα της υποστήριξης συχνότητας, σημειώνεται ότι αυτή εξαρτάται από τη διαθεσιμότητα του υπεράκτιου δικτύου και της γραμμής HVDC-VSC. Τέλος για τα συστήματα προστασίας του συστήματος, γίνεται αναφορά στο γεγονός ότι σφάλματα στη γραμμή HVDC-VSC μπορεί να μεταφραστούν εσφαλμένα σαν υποσυχνότητας του χερσαίου δικτύου και συνεπώς ως ανάγκη για αύξηση της εγχεόμενης ισχύος.

### *5.3.2.3 Προσομοίωση αδρανειακής απόκρισης με χρήση χωρητικότητας της γραμμής HVDC-VSC*

Στην μέθοδο αυτή, προσομοιώνεται η αδρανειακή απόκριση σύγχρονων μηχανών, χρησιμοποιώντας τη χωρητικότητα της γραμμής HVDC-VSC. Οι Zhu et al (2013) [43] που προτείνουν αυτή την εναλλακτική μέθοδο αδρανειακής απόκρισης, σημειώνουν ότι:

- Το χερσαίο δίκτυο υποστηρίζεται κατά τη διάρκεια και μετά τη διαταραχή χωρίς να επηρεάζεται κανένα σύστημα πέραν της γραμμής HVDC-VSC
- Το σύστημα μπορεί να αποδώσει αδρανειακή απόκριση ανάλογη του μεγέθους της χωρητικότητας της γραμμής και της επιτρεπόμενης διακύμανσης της τάσης της γραμμής HVDC-VSC
- Το υπεράκτιο αιολικό πάρκο παραμένει απομονωμένο από τη διαταραχή και επομένως δεν επιβαρύνεται σε επίπεδο φορτίων

Βλέπουμε συνολικά ότι η αδρανειακή απόκριση και η υποστήριξη συχνότητας είναι μία απαίτηση που όσο η ανάγκη της αυξάνει λόγω του ενεργειακού μίγματος της παραγωγής, τόσο μειώνεται η ικανότητα των παραγωγών αυτών να την ικανοποιήσουν. Οι ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών και περισσότερο αυτές με πλήρεις μετατροπείς έχουν χάσει την εγγενή δυνατότητα των σύγχρονων μηχανών να αποδίδουν αδρανειακή υποστήριξη. Η ικανοποίηση των σχετικών απαιτήσεων γίνεται με έμμεσο τρόπο χρησιμοποιώντας κατάλληλα συστήματα ελέγχου. Το πρόβλημα αποκτά ιδιαίτερες διαστάσεις όταν μελετάμε ανεμογεννήτριες συνδεδεμένες με γραμμή HVDC η οποία από τη φύση της απομονώνει ηλεκτρικά το χερσαίο και το υπεράκτιο δίκτυο φέρνοντας, σε πολλαπλάσια κλίμακα, τα προβλήματα που έχουν εμφανιστεί σε χερσαίες εφαρμογές με ανεμογεννήτριες πλήρους μετατροπέα.

Οι λύσεις που προτείνονται, δίνουν μερικώς λύση στο πρόβλημα, έχουν όμως τις ιδιαιτερότητες τους και πρέπει να μελετώνται μέσω προσομοιώσεων για κάθε εφαρμογή υπεράκτιου αιολικού πάρκου ως προς την ικανότητα τους να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις του διαχειριστή. Φαίνεται εξάλλου ότι οι επιδόσεις των λύσεων αυτών δεν είναι εφάμιλλες των επιδόσεων που προσφέρουν παραδοσιακοί παραγωγοί με σύγχρονες γεννήτριες. Αυτό βέβαια δεν είναι απαραίτητως κακό, αλλά υποδηλώνει την ανάγκη προσεκτικού σχεδιασμού του συστήματος με βάση τις επιδόσεις των νέων τεχνολογιών που εισχωρούν στο σύστημα. Αυτό θα πείσει και τους κατασκευαστές του σχετικού εξοπλισμού των υπεράκτιων αιολικών πάρκων να εργαστούν προς την κατεύθυνση της βελτίωσης της απόδοσης των συστημάτων τους. Σημαντικό επίσης είναι να αναφερθεί ότι σε περίπτωση που οι αιολικοί παραγωγί κληθούν να λειτουργούν με εφεδρεία ισχύος απαιτείται αντίστοιχη ρύθμιση της εμπορικής τους σχέσης με το διαχειριστή του δικτύου.

## **5.4 Μέθοδοι ικανοποίησης της απαίτησης για λειτουργία σε**

### **σφάλμα δικτύου (*Fault Ride Through-FRT*) σε**

#### **διασυνδέσεις HVDC-VSC**

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, τρεις είναι βασικά οι τρόποι που συζητούνται για την αποφυγή της ενεργοποίησης των προστασιών της γραμμής HVDC σε συνθήκες σφάλματος. Στο παρόν κεφάλαιο, γίνεται μία αναλυτική περιγραφή τους, χωρίς λεπτομέρειες για την τεχνική ή οικονομική βιωσιμότητά τους, θέμα που παρουσιάζεται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 6 «Μελέτη επιτευξιμότητας λύσεων λειτουργίας σε σφάλμα δικτύου (*Fault Ride Through-FRT*) υπεράκτιου αιολικού πάρκου με σύνδεση HVDC-VSC».

#### **5.4.1 Υπερδιαστασιολόγηση των μετατροπέων**

Οι μετατροπείς της γραμμής HVDC διαστασιολογούνται με βάση την ονομαστική ισχύ που πρέπει να μεταφέρουν και την ελάχιστη τάση συστήματος  $V_{min}$  υπό την οποία θα λειτουργεί. Σύμφωνα με τους Hendriks, Volzke, Kling (2009) [18] μπορούμε να εκτιμήσουμε το συντελεστή υπερδιαστασιολόγησης  $k$  ως εξής:

Μια τυπική τιμή  $V_{min}$  είναι 0,9 α.μ., η αντίστοιχη ένταση είναι 1,11 α.μ. και ο συντελεστής υπερδιαστασιολόγησης  $k$  μπορεί να υπολογιστεί κατ'εκτίμηση με βάση την εξίσωση

$$k \cong \frac{1}{Uk}$$

όπου  $U_k$  η σύνθετη αντίσταση βραχυκυκλώσεως του μετατροπέα ανά μονάδα. Για μία τυπική τιμή σύνθετης αντίστασης βραχυκυκλώσεως της τάξης του 14% λαμβάνουμε συντελεστή υπερδιαστασιολόγησης  $k$  ίσο με 7.14.

#### **5.4.2 Κατανάλωση σε βοηθητικά φορτία**

Η κατανάλωση της εγχεόμενης ενέργειας σε βοηθητικά φορτία είναι επίσης μία προτεινόμενη λύση. Στην λύση αυτή κατασκευάζεται μία διάταξη φορτίων (braking resistors-choppers) παράλληλα συνδεδεμένων προς τη γραμμή HVDC. Τα βοηθητικά αυτά φορτία (δηλαδή φορτία και choppers) πρέπει να έχουν ισχύ ίση με την ισχύ της γραμμής HVDC και να μπορούν να διαχειριστούν την παραγόμενη θερμότητα για την διάρκεια του σφάλματος. Όταν προκύψει σφάλμα, άμεσα (και για το λόγο αυτό η σύνδεση γίνεται με ηλεκτρονικά ισχύος παρά με συμβατικούς διακόπτες) τα φορτία συνδέονται και καταναλώνουν την επιπλέον ισχύ που το δίκτυο δεν μπορεί να αποδώσει στο χερσαίο σύστημα. Σύμφωνα με τους Hendriks, Volzke, Kling (2009) [18], τα βοηθητικά φορτία μπορούν να λειτουργούν με έλεγχο ανεξάρτητο από την υπόλοιπη γραμμή HVDC. Συγκεκριμένα, αναφέρουν ότι μπορεί το σύστημα ελέγχου τους να παρακολουθεί την τάση της γραμμής και να είναι ρυθμισμένο σε ένα σημείο λειτουργίας (set point) λίγο μεγαλύτερο από αυτό του υπεράκτιου σταθμού HVDC. Όταν ο τελευταίος δεν μπορεί να ικανοποιήσει το στόχο της τάσης της γραμμής, ενεργοποιούνται τα βοηθητικά φορτία τα οποία αντίστοιχα απενεργοποιούνται αυτόματα όταν η τάση επανέλθει στα επιθυμητά επίπεδα.

#### **5.4.3 Μείωση ισχύος του αιολικού πάρκου**

Η μείωση της εγχεόμενης ενέργειας μπορεί να γίνει με πολλούς τρόπους και γι' αυτό αποτελεί και το βασικό σημείο της επιστημονικής έρευνας. Πιο συγκεκριμένα, αυτό που μπορεί να διαφοροποιηθεί δεν είναι τόσο ο τρόπος περιορισμού της παραγωγής. Είναι ο τρόπος που η ανάγκη αυτής της μείωσης μεταφέρεται σαν πληροφορία στις ανεμογεννήτριες που διαφοροποιεί τις εκάστοτε τεχνικές:

- Ο υπεράκτιος σταθμός HVDC σηματοδοτεί απευθείας στις ανεμογεννήτριες την ανάγκη μείωσης της ισχύος
- Ο χερσαίος σταθμός HVDC σηματοδοτεί απευθείας στις ανεμογεννήτριες την ανάγκη μείωσης της ισχύος
- Ο υπεράκτιος σταθμός HVDC μεταβάλλει την συχνότητα του υπεράκτιου δικτύου AC και οι ανεμογεννήτριες, αντιλαμβάνονται εμμέσως μέσω συστημάτων ελέγχου συχνότητας την ανάγκη μείωσης της παραγωγής

- Ο υπεράκτιος σταθμός HVDC μεταβάλλει την τάση του υπεράκτιου δικτύου AC προκαλώντας αντίστοιχα μία μείωση της παραγωγής.

#### 5.4.3.1 Έλεγχος μέσω SCADA από το χερσαίο σταθμό

Η μεταφορά σημάτων σε συνθήκες σφάλματος προς τις ανεμογεννήτριες είναι μάλλον η πιο προφανής λύση. Οι ανεμογεννήτριες είναι δυνατόν μέσω των συστημάτων SCADA τους να δεχθούν και να διαβιβάσουν στις μηχανές εντολές περιορισμού ισχύος. Οι ανεμογεννήτριες μπορούν να εκτελέσουν αυτές τις εντολές αρκετά γρήγορα και έτσι να αποφορτιστεί το δίκτυο HVDC-VSC. Ο γενικός αλγόριθμος λειτουργίας της συγκεκριμένης λύσης έχει ως εξής:

- Οι RMS τιμές τάσης και ρεύματος μετρούνται μέσω κατάλληλων μετασχηματιστών τάσης και έντασης στο σημείο κοινής σύνδεσης στη στεριά.
- Ένας ελεγκτής πραγματοποιεί τους κατάλληλους υπολογισμούς και τροφοδοτεί τα αποτελέσματα σε κατάλληλο σύστημα SCADA του αιολικού πάρκου (master).
- Το σύστημα SCADA εκτελεί αλγόριθμο σύγκρισης των μετρούμενων μεγεθών με τις ονομαστικές τιμές του δικτύου. Σε περίπτωση σφάλματος εκτός προδιαγεγραμμένων ορίων, σηματοδοτεί εντολή περιορισμού ισχύος στο αιολικό πάρκο.
- Το σήμα περιορισμού ισχύος μεταδίδεται μέσω δικτύου οπτικών ινών υποθαλάσσια στο SCADA των ανεμογεννητριών (slave).
- Το SCADA των ανεμογεννητριών σηματοδοτεί τις κατάλληλες (ανάλογα με τις επικρατούσες συνθήκες) ανεμογεννήτριες για περιορισμό ισχύος
- Το σήμα περιορισμού ισχύος μεταδίδεται μέσω δικτύου οπτικών ινών υποθαλάσσια στις ανεμογεννήτριες
- Οι ανεμογεννήτριες λαμβάνουν το σήμα και διαβιβάζουν το setpoint στον ελεγκτή τους.
- Ο ελεγκτής περιορίζει την ισχύ μέσω αεροδυναμικού φρεναρίσματος του ρότορα ή με ενεργοποίηση του σχετικού chopper.

#### 5.4.3.2 Έλεγχος μέσω SCADA από τον υπεράκτιο σταθμό

Η βασική διαφορά του ελέγχου στον υπεράκτιο σταθμό έναντι του χερσαίου είναι ότι η ανίχνευση σφάλματος και η σηματοδότηση των ανεμογεννητριών γίνεται απευθείας στον υπεράκτιο σταθμό. Αυτό, σχετικά με την ανίχνευση του σφάλματος σημαίνει ότι πρέπει να παρακολουθείται η τάση της γραμμής HVDC η οποία σε περίπτωση σφάλματος στη στεριά

θα αρχίσει να ανυψώνεται. Ακόμα, σε σχέση με τη σηματοδότηση, στη λύση αυτή αποφεύγεται η χρήση όλου του εξοπλισμού από το PCC μέχρι και τον υπεράκτιο σταθμό.

#### *5.4.3.3 Έλεγχος συχνότητας*

Με τη μεταβολή της συχνότητας στο υπεράκτιο δίκτυο AC επιτυγχάνεται μείωση χωρίς ανάγκη τηλεπικοινωνιακής ζεύξης. Ο υπεράκτιος σταθμός HVDC παρακολουθεί την συνεχή τάση λειτουργίας του δικτύου. Όταν αντιληφθεί αστάθεια στην τάση, μεταβάλλει αντίστοιχα την συχνότητα του υπεράκτιου δικτύου AC. Οι ανεμογεννήτριες, οι οποίες θεωρούμε ότι βρίσκονται σε λειτουργία ελέγχου συχνότητας, αντιλαμβάνονται την υπερσυχνότητα και μειώνουν άμεσα την παραγωγή τους. Αντίστοιχα υπάρχει η δυνατότητα σε υποσυχνότητα (και αν θεωρήσουμε ότι οι ανεμογεννήτριες λειτουργούν μονίμως περιορισμένες κατά ένα μικρό ποσοστό) να αποδοθεί μεγαλύτερη ισχύς για υποστήριξη του χερσαίου ηλεκτρικού δικτύου.

#### *5.4.3.4 Έλεγχος τάσης*

Είναι εφικτό, μέσω του υπεράκτιου σταθμού HVDC να μεταβληθεί η τάση του υπεράκτιου δικτύου. Ο υπεράκτιος σταθμός, όπως και στον έλεγχο συχνότητας, παρακολουθεί την συνεχή τάση λειτουργίας του δικτύου και όταν αντιληφθεί αύξηση αυτής, μειώνει την τάση λειτουργίας του υπεράκτιου δικτύου. Επειδή οι ανεμογεννήτριες με μετατροπέα έχουν πεπερασμένες δυνατότητες απόδοσης ρεύματος, η μείωση της τάσης, οδηγεί τους μετατροπείς σε λειτουργία περιορισμού ρεύματος και σε αντίστοιχη μείωση της ισχύος που αποδίδεται στη γραμμή HVDC. Σε περίπτωση που επιλεγεί ο συγκεκριμένος αλγόριθμος προστασίας, σημαντικό είναι να απενεργοποιηθούν άλλες προστασίες των ανεμογεννητριών που ενεργοποιούνται από την διαταραχή της τάσης δικτύου. Τέτοιες είναι προστασίες σχετικές με τη λειτουργία σε σφάλμα (FRT), υποστήριξη τάσης με άεργα κλπ.

# 6

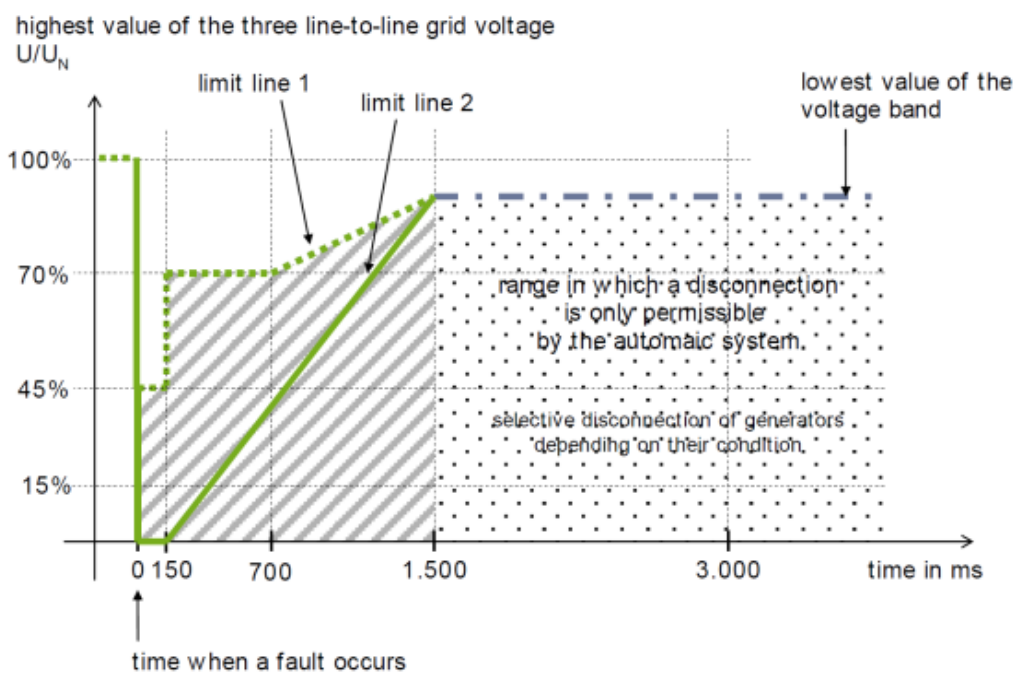
*Μελέτη επιτευξιμότητας λύσεων λειτουργίας σε  
σφάλμα δικτύου (Fault Ride Through-FRT)  
υπεράκτιου αιολικού πάρκου με σύνδεση HVDC-  
VSC*

## 6.1 Εισαγωγή

Στο προηγούμενο κεφάλαιο, παρουσιάστηκαν συνοπτικά οι βασικές προκλήσεις (λειτουργία σε σφάλμα δικτύου-FRT και υποστήριξη συχνότητας) που αντιμετωπίζονται στο σχεδιασμό ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου με σύνδεση HVDC-VSC. Στο παρόν κεφάλαιο, γίνεται μία μελέτη επιτευξιμότητας των διαθέσιμων λύσεων κυρίως για την ικανοποίηση της απαίτησης λειτουργίας σε σφάλμα δικτύου (FRT) καθώς αυτό αποτελεί αδιαμφισβήτητο κομμάτι με τις μεγαλύτερες προκλήσεις και πολυπλοκότητα. Δεν είναι τυχαίο ότι η συντριπτική πλειοψηφία της ακαδημαϊκής και βιομηχανικής έρευνας επικεντρώνεται ακριβώς σε αυτό το κομμάτι, της επιλογής δηλαδή της βέλτιστης τεχνικό-οικονομικά λύσης ικανοποίησης των απαιτήσεων του διαχειριστή όταν παρουσιαστεί σφάλμα στο σημείο κοινής σύνδεσης.

## 6.2 Ορισμός απαίτησης και μελέτη επιτευξιμότητας

Σύμφωνα με τους Sandeberg, Stendius (2008) [33], απαιτήσεις για λειτουργία σε σφάλμα μέχρι και το 15% της ονομαστικής τάσης (ή ακόμα και μηδέν) για μέχρι και 150 msec είναι σήμερα ο κανόνας. Αυτό επιβεβαιώνεται από την απαίτηση του κώδικα του TenneT, όπως αυτή απεικονίζεται στο παρακάτω γράφημα (Σχήμα 6.1) [39]:



Σχήμα 6.1 Απαίτηση λειτουργίας σε σφάλμα, TenneT [38]

Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, σε περίπτωση σφάλματος, η ενέργεια που δεν μπορεί να αποδοθεί στο χερσαίο δίκτυο αρχίζει να φορτίζει τη γραμμή HVDC-VSC. Όλη η γραμμή HVDC-VSC έχει μία συνολική χωρητικότητα που αντιστοιχεί στη χωρητικότητα των χερσαίων και υπεράκτιων μετατροπέων και στη χωρητικότητα του καλωδίου και είναι σχετικά μικρή. Όταν διακοπεί η τροφοδότηση του χερσαίου δικτύου λόγω σφάλματος, η υπεράκτια παραγωγή αρχίζει και φορτίζει αυτή ακριβώς τη χωρητικότητα μέχρι που η γραμμή φτάνει μία τάση που ενεργοποιεί τις προστασίες και την θέτει εκτός συστήματος. **Οι προστασίες είναι ρυθμισμένες σύμφωνα με τους Sandeberg, Stendius (2008) [33] σε υπέρταση της τάξης των 30% επίπεδο** το οποίο επιτυγχάνεται σε 5 με 10 msec. Προφανώς, για να ικανοποιηθεί η απαίτηση του διαχειριστή για λειτουργία σε σφάλμα, πρέπει να αποφευχθεί η ενεργοποίηση των προστασιών. Αυτό σημαίνει ότι το σύστημα μας πρέπει να έχει τη δυνατότητα να αντιδράσει στο σφάλμα σε 5 με 10 msec. Συνολικά σε αυτό το χρονικό περιθώριο πρέπει:

- Να μετρηθεί η διαταραχή
- Να σταλεί σήμα αντίδρασης στη διαταραχή
- Να επικοινωνηθεί το σήμα αντίδρασης στη διαταραχή
- Να αντιδράσει ο ανάλογος μηχανισμός περιορισμού της ισχύος του συστήματος

Είναι προφανές ότι η απαίτηση είναι ιδιαίτερος δύσκολη ειδικά αν αναλογιστεί κανείς ότι οι υπό εξέταση χρόνοι (περίπου μισός κύκλος σε ένα δίκτυο 50Hz) είναι τέτοιοι που θέτουν και την μέτρηση της διαταραχής αυτή καθεαυτή υπό αμφισβήτηση λόγω πιθανής μέτρησης μεταβατικών/θορύβου ή άλλων φαινομένων στο δίκτυο.

Ακολουθεί ανάλυση των διαθέσιμων λύσεων ως προς την ικανότητά τους να εμποδίσουν την εξέλιξη του σφάλματος και την απενεργοποίηση της γραμμής HVDC-VSC και την οικονομική και τεχνική βιωσιμότητα τους.

### **6.2.1 Υπερδιαστασιολόγηση**

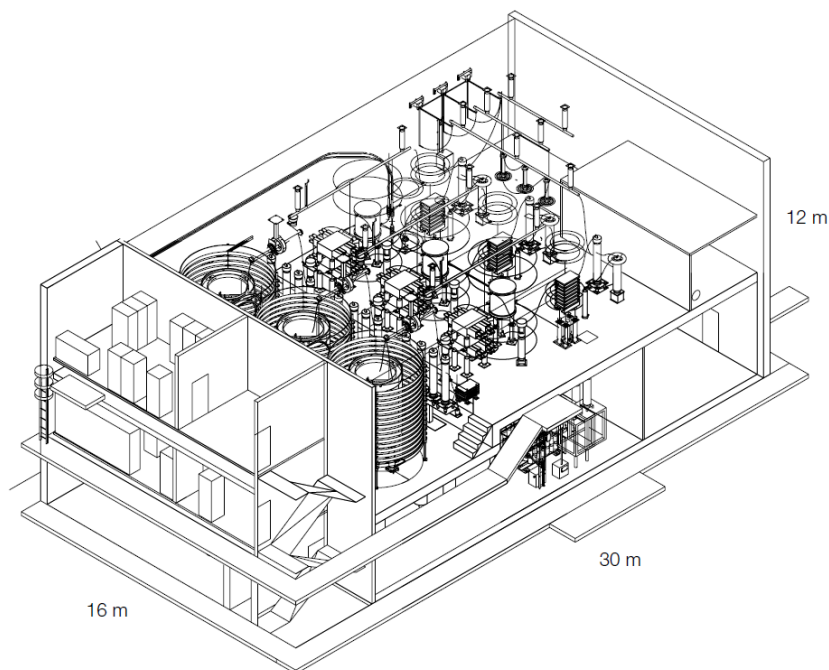
Η υπερδιαστασιολόγηση των μετατροπέων, αν και τεχνικά εφικτή είναι μάλλον μη βιώσιμη οικονομικά. Είναι ενδεικτικό ότι σύμφωνα με τους Hendriks, Volzke, Kling (2009) [18] και τον υπολογισμό που φαίνεται στο κεφάλαιο 5.4.1, η απαιτούμενη υπερδιαστασιολόγηση για συνθήκες σφάλματος θα ήταν προς ένα παράγοντα της τάξεως του 7 για ένα τυπικό σφάλμα βραχυκυκλώματος. Για την επίτευξη αυτού του επιπέδου της υπερδιαστασιολόγησης, ο μελετητής των μετατροπέων έχει δύο λύσεις στη διάθεση του:

- Την επιλογή ηλεκτρονικών ισχύος με μεγαλύτερο ονομαστικό ρεύμα λειτουργίας
- ή

- Τον σχεδιασμό των μετατροπέων με παράλληλες συστοιχίες με ηλεκτρονικά ισχύος μικρότερου ονομαστικού ρεύματος

Φυσικά, μία τέτοια υπερδιαστασιολόγηση του εξοπλισμού επηρεάζει πολλά συνοδά συστήματα μερικά εκ των οποίων είναι:

- Οι μεγαλύτεροι ή οι περισσότεροι μετατροπείς έχουν μεγαλύτερες απώλειες, συνεπώς πρέπει να χρησιμοποιηθούν μεγαλύτερες ή περισσότερες εγκαταστάσεις ψύξης
- Ο απαραίτητος χώρος υποσταθμού-παράγοντας πολύ σημαντικός σε υπεράκτιες εφαρμογές-αυξάνει σημαντικά



Approximate weight: 1280 tonnes

Σχήμα 6.2: Υπεράκτιος μετατροπέας (ABB: It's time to connect with offshore wind supplement [1])

Φυσικά ο αυξημένος εξοπλισμός επηρεάζει και το κόστος συντήρησης και την συνολική αξιοπιστία του συστήματος.

Χωρίς να είναι δημόσια διαθέσιμα στοιχεία κόστους για εφαρμογές υπεράκτιων αιολικών πάρκων με HVDC-VSC, είναι ασφαλές να υποτεθεί ότι η συνεισφορά της γραμμής μεταφοράς στη συνολική κεφαλαιακή δαπάνη (CAPEX) είναι σημαντική. Αντίστοιχα μπορούμε να υποθέσουμε ότι η συνεισφορά των μετατροπέων και των συνοδών αυτών συστημάτων στο κόστος της γραμμής HVDC-VSC είναι αντίστοιχα μεγάλη. Είναι εύκολο

κανείς να συμπεράνει, ότι επταπλασιασμός της δυναμικότητας των μετατροπέων εκτός πολύ ειδικών εφαρμογών φαντάζει οικονομικά αδύνατη.

### 6.2.2 Βοηθητικά φορτία/choppers

Η επιλογή της κατανάλωσης της επιπλέον ενέργειας κατά τη διάρκεια του σφάλματος σε βοηθητικά φορτία, έχει φυσικά τις δικές του προκλήσεις.

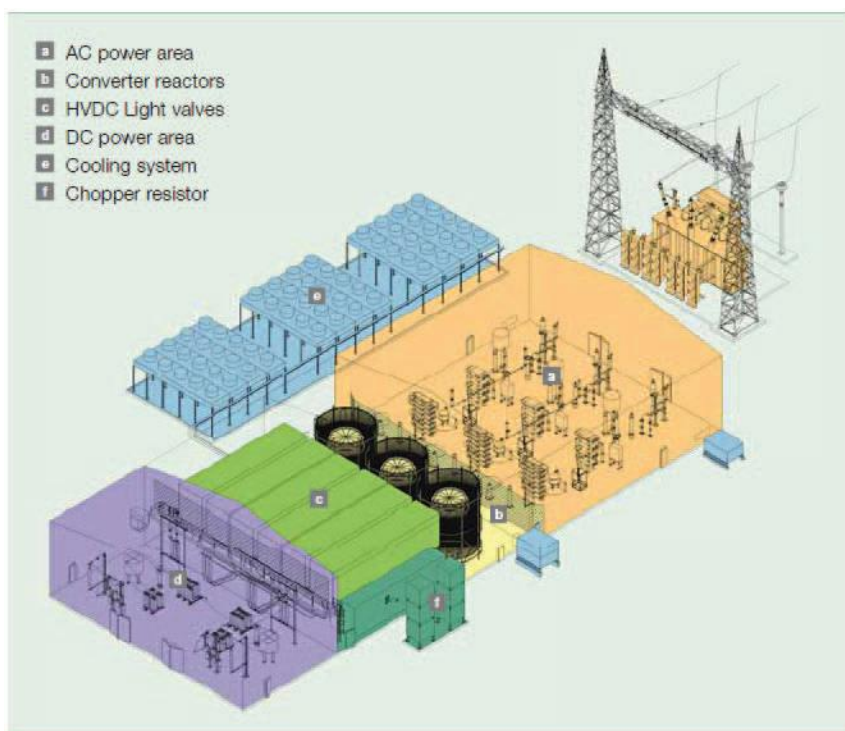
Καταρχήν, πρέπει να σχεδιαστεί με ισχύ ίση με τη μέγιστη ισχύ του αιολικού πάρκου (αν και παραλλαγές με μικρότερα φορτία που λειτουργούν επικουρικά με άλλες μεθόδους προστασίας έχουν επίσης προταθεί όπως από τους Harnefors et al (n.d.) [19] και αναλύονται παρακάτω). Καθώς η εγκατεστημένη ισχύς των υπεράκτιων αιολικών πάρκων είναι πλέον της τάξης των εκατοντάδων μεγαβάτ, η εγκατάσταση ισότιμων φορτίων φαίνεται να γίνεται όλο και δυσκολότερη.

Κατά δεύτερον, πρέπει να προβλεφθεί μέθοδος απαγωγής της παραγόμενης θερμότητας. Αυτό μπορεί να γίνει με φυσικό τρόπο (με διάρκεια αρκετές ώρες) ή με βεβιασμένη απαγωγή εάν είναι απαραίτητο το σύστημα να είναι γρήγορα διαθέσιμο. Τα βοηθητικά φορτία θα θερμαίνονται πολύ γρήγορα σε περιπτώσεις εφαρμογής της πλήρους ισχύος της γραμμής. Σύμφωνα με τους Hendriks, Volzke, Kling (2009) [18] η αύξηση της θερμοκρασίας των φορτίων μπορεί να περιγραφεί από την εξίσωση

$$\Delta T = \frac{1}{Cp} \int Q dt$$

όπου το Cp είναι η θερμοχωρητικότητα του φορτίου και Q η θερμική ενέργεια, και αν η καταναλωμένη ενέργεια είναι σταθερής ισχύος, η θερμοκρασία των βοηθητικών φορτίων αυξάνεται γραμμικά. Καθώς υπέρβαση κάποιου ορίου θερμοκρασίας θα καταστρέψει τα βοηθητικά φορτία, υπάρχει ένα πεπερασμένο όριο ενέργειας που μπορεί να καταναλωθεί. Επίσης αναφέρουν ότι, όταν τα βοηθητικά φορτία έχουν χρησιμοποιηθεί για την λειτουργία του αιολικού πάρκου σε σφάλμα δικτύου και έχουν θερμανθεί, δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν άμεσα για ένα νέο σφάλμα αφού θα πρέπει πρώτα να κρυώσουν (κάτι που χρειάζεται αρκετό χρόνο). Είναι προφανές ότι για τη χρήση βοηθητικών φορτίων πρέπει να δοθεί προσοχή στο θερμικό σχεδιασμό του συστήματος και τυχόν συστημάτων απαγωγής της θερμότητας (με το αντίστοιχο κόστος και απαίτηση χώρου στον υποσταθμό). Αυτός ο σχεδιασμός είναι που θα καθορίσει και τη δυνατότητα του συστήματος να ανταπεξέλθει σε σφάλματα, τον αριθμό αυτών, τη διάρκειά τους και την χρονική απόσταση του ενός από το άλλο. Παραδείγματος χάριν, το κεφάλαιο 3.3.4 και στην παράμετρο «Ακολουθία FTR σφάλματος» αναφέρονται σχετικές απαιτήσεις της Ιταλίας και της Δανίας για ικανότητα διαχείρισης ακολουθίας σφαλμάτων και όχι μοναδικού συμβάντος. Στο παρακάτω σχήμα (Σχ.

6.3) ενδιαφέρον έχει η παρατήρηση των βοηθητικών φορτίων (f-chopper resistor) καθώς και του συστήματος ψύξης (e-cooling system) ως προς το μέγεθός τους σε σχέση με το μέγεθος του υποσταθμού:



Σχήμα 6.3: Εικόνα τυπικού χερσαίου υποσταθμού γραμμής HVDC-VSC (Das D., Pan J., Bala (2012: 1-7)) [9]

Τέλος, προσοχή πρέπει να δοθεί στα ηλεκτρονικά ισχύος που πραγματοποιούν την διεπαφή της γραμμής HVDC-VSC με τα βοηθητικά φορτία. Αυτό το κομμάτι του συστήματος πρέπει επίσης να είναι ικανό να φέρει όλο το ονομαστικό ρεύμα της γραμμής και αυτό με τη σειρά του συνεισφέρει σημαντικά στο συνολικό κόστος, όπως αναφέρεται και από τους Hendriks, Volzke, Kling (2009) [18].

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα της λύσης αυτής είναι το γεγονός ότι οι ανεμογεννήτριες δεν θα υπόκεινται σε απότομες μεταβολές της ισχύος εξόδου τους (όπως απαιτείται σε άλλες λύσεις όπως αυτές αναλύονται παρακάτω). Έτσι, μειώνεται η μηχανική επιβάρυνση των ανεμογεννητριών. Σκόπιμο βέβαια είναι να αναφερθεί ότι η μηχανική αυτή επιβάρυνση είναι ούτως ή άλλως σχεδιαστικό χαρακτηριστικό των ανεμογεννητριών οι οποίες σε περίπτωση χερσαίας σύνδεσης θα έπρεπε να δεχθούν και να διαχειριστούν αντίστοιχα σφάλματα (Αντίστοιχα βέβαια, αν θεωρήσουμε ότι αυτή η μέθοδος αντιμετώπισης FRT ήταν θεσμοθετημένος, θα μπορούσαν να μειωθούν οι απαιτήσεις φορτίων σχεδιασμού των ανεμογεννητριών και να μειωθεί το κόστος του προϊόντος). Τέλος, τα βοηθητικά φορτία, επενεργώντας απευθείας στο φαινόμενο το οποίο απειλεί την ισορροπία της HVDC γραμμής

(και κατ' επέκταση την απαίτηση του διαχειριστή για λειτουργία σε σφάλμα) παρέχουν αποτελεσματική προστασία για μεγαλύτερο εύρος σφαλμάτων.

### **6.2.3 Μείωση ισχύος του αιολικού πάρκου**

Στη μείωση της ισχύος του αιολικού πάρκου, που όπως αναφέρθηκε φαντάζει και η πιο προφανής λύση, υπάρχει ένα βασικό πρόβλημα που πρέπει να μελετηθεί σε βάθος και αυτό είναι ο παράγοντας του χρόνου. Όπως ορίσαμε νωρίτερα, το φαινόμενο της υπέρτασης της γραμμής HVDC εξελίσσεται σε 5-10 msec. Πρέπει συνεπώς, οποιαδήποτε λύση και αν επιλέξουμε για να μειώσουμε την ισχύ του αιολικού πάρκου, να εξασφαλίσουμε την ολοκλήρωση του αλγορίθμου ελέγχου (μέτρηση διαταραχής-εντολή περιορισμού-περιορισμός) σε λίγα msec. Θεωρούμε ότι σχεδιάζοντας αντίστοιχα τη γραμμή HVDC (π.χ. χωρητικότητα, χρήση βοηθητικών φορτίων μικρής ισχύος) μπορεί το χρονικό όριο να αυξηθεί ελαφρώς. Αργότερα, γίνεται αναφορά σε συγκεκριμένα στοιχεία της γραμμής και προσομοίωση της γραμμής, με συγκεκριμένες παραδοχές (π.χ. για την ισοδύναμη σταθερά χρόνου της DC χωρητικότητας της γραμμής ή την καθυστέρηση της επικοινωνίας) για λόγους πληρότητας στοιχείων. Όμως, για λόγους βοηθητικούς στη σύνταξη της παρούσας εργασίας **θεωρούμε σαν γενικό στόχο ολοκλήρωσης του αλγορίθμου ελέγχου τα 10-20msec.**

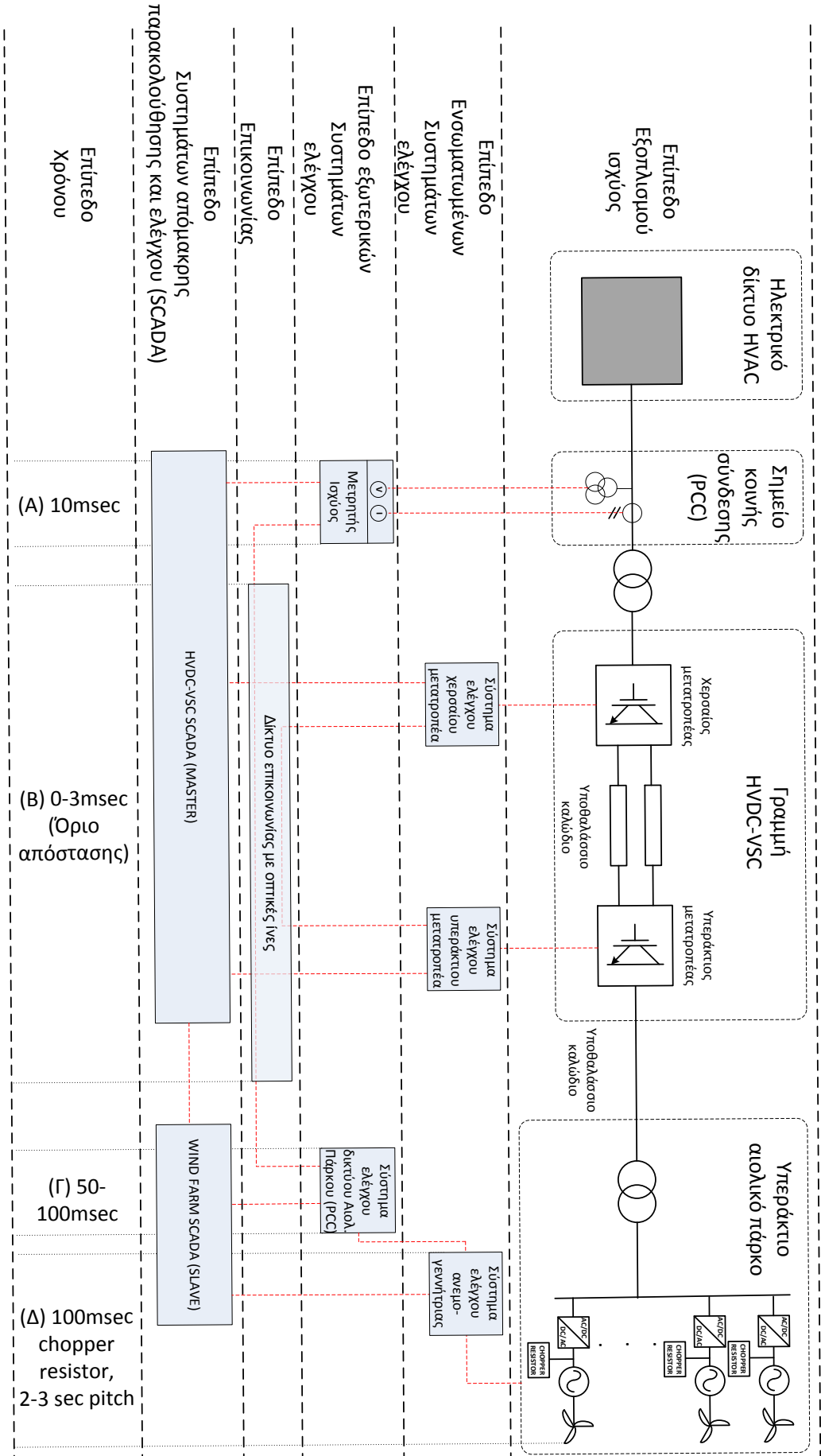
Αποδεικνύεται εξάλλου στην παράγραφο 6.3 ότι με συγκεκριμένες παραδοχές, 20msec δίνουν ικανοποιητική επίδοση λειτουργίας σε σφάλμα για βύθιση τάσης της τάξης του 90%.

Αναφέρθηκε και νωρίτερα, ότι η ακαριαία μείωση της ισχύος εξόδου συνοδεύεται από αύξηση της ροπής και κατ' επέκταση των κοπωτικών φορτίων των ανεμογεννητριών και αυτό αναφέρεται πολύ συχνά στη βιβλιογραφία σαν ένα σημαντικό μειονέκτημα της μεθόδου. Παρότι ο συγκεκριμένος μηχανισμός είναι αληθής επαναλαμβάνεται ότι η ακαριαία μείωση ισχύος σε συνθήκες σφάλματος δεν είναι ειδική περίπτωση στις εφαρμογές υπεράκτιων δικτύων/HVDC αλλά μία απαίτηση σε όλα τα αιολικά πάρκα. Ως εκ τούτου δεν θεωρείται ιδιαίτερο μειονέκτημα.

Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι, όπως αναφέρουν οι Sandeberg, Stendius (2008) [33], απότομη μείωση της ισχύος του αιολικού πάρκου, μπορεί να οδηγήσει σε υπέρταση του υπεράκτιου δικτύου και ενεργοποίηση των προστασιών των ανεμογεννητριών ή/και του υπεράκτιου μετατροπέα. Το πρόβλημα αυτό αφορά την μείωση ισχύος μέσω SCADA ή μέσω έλεγχου συχνότητας.

Προτού προχωρήσουμε σε περαιτέρω ανάλυση, είναι απαραίτητο να ορίσουμε μια «χρονική αλυσίδα», το σύνολο δηλαδή του εξοπλισμού που επηρεάζει την χρονική απόκριση του συστήματος περιορισμού ισχύος. Σε αυτόν τον ορισμό θα χρησιμοποιήσουμε τους χρόνους λειτουργίας που είναι σήμερα επιτεύξιμοι σε εμπορικά διαθέσιμο εξοπλισμό. Στη συνέχεια, θα ορίσουμε αν και πόσο χαμηλότερα μπορούν να διαμορφωθούν αυτοί οι χρόνοι

μελλοντικά. Τέλος, χρησιμοποιούμε μία όσο το δυνατόν πιο ανεπτυγμένη αλυσίδα που περιλαμβάνει όλο τον εξοπλισμό από το σημείο κοινής σύνδεσης μέχρι και τις ανεμογεννήτριες. Ύστερα (ανάλογα με την λύση που μελετάμε-SCADA από χερσαίο ή υπεράκτιο σταθμό, έλεγχος συχνότητας, έλεγχος τάσης) λαμβάνουμε το κομμάτι της «χρονικής αλυσίδας» που είναι σχετικό.



Σχήμα 6.4: Τυπική τοπολογία διασύνδεσης υπεράκτιου αιολικού σταθμού με HVDC-VSC και το σύνολο του εξοπλισμίου που επηρεάζει την χρονική απόκριση του συστήματος περιορισμού ισχύος

Πιο αναλυτικά, τα κομμάτια που συνιστούν αυτή τη «χρονική αλυσίδα» σύμφωνα και με το παραπάνω σχήμα είναι:

(A) Μετρητής ισχύος

Ο μετρητής ισχύος έχει μια χρονική καθυστέρηση της τάξης των 10msec. Χρόνοι μικρότεροι από αυτόν, ακόμα και αν ήταν τεχνικά εφικτό να επιτευχθούν, πιθανώς να μην είχαν αξία σε επίπεδο μέτρησης. Συγκεκριμένα, επειδή μιλάμε για χρόνους σε επίπεδο μισού κύκλου για σύστημα 50Hz, μπορεί να μετρηθεί κάποιο μεταβατικό φαινόμενο/θόρυβος το οποίο δεν έχει καμία αξία. Πάντως, οι εμπορικά διαθέσιμοι μετρητές ισχύος (ή ποιότητας ισχύος όπως αναφέρονται αλλού) έχουν τη δυνατότητα μέτρησης σε χρόνους της τάξης των 10msec.

(B) Δίκτυο επικοινωνίας με οπτικές ίνες.

Ως γνωστόν, υπάρχουν δύο διαθέσιμες τεχνολογίες οπτικών ινών, αυτή της μονότροπης (single mode) και της πολύτροπης (multi mode). Οι πολύτροπες χρησιμοποιούνται για αποστάσεις μέχρι λίγα εκατοντάδες μέτρα. Σε εφαρμογές υπεράκτιων αιολικών πάρκων, οι οπτικές ίνες πρέπει να καλύψουν αποστάσεις από την ακτή μέχρι τον υπεράκτιο μετατροπέα, και από τον τελευταίο προς τις ανεμογεννήτριες. Για τη σύνδεση του υπεράκτιου εξοπλισμού με τη στεριά οι μονότροπες οπτικές ίνες αποτελούν μονόδρομο, ενώ για την εσωτερική διασύνδεση του υπεράκτιου αιολικού πάρκου, πολύτροπες ίνες μπορεί να χρησιμοποιηθούν, αλλά η τάση από τους κατασκευαστές είναι και εκεί η χρήση μονότροπων ινών.

Βέβαια, οι μονότροπες οπτικές ίνες δεν στερούνται περιορισμών. Συγκεκριμένα, οι γνωστές εφαρμογές με μονότροπες οπτικές ίνες έχουν άνω όριο τα 80-100 χιλιόμετρα περίπου. Στην περίπτωση των εφαρμογών HVDC-VSC, και όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 4.2 οι ελάχιστες αποστάσεις που μας ενδιαφέρουν είναι κατά κανόνα περίπου 100 χιλιόμετρα. Αυτό σημαίνει ότι πιθανώς να υπάρχει ανάγκη χρησιμοποίησης είτε αναμεταδοτών είτε ειδικού σχεδιασμού της οπτικής ίνας. Στην πρώτη περίπτωση, και επειδή οι οπτικές ίνες μπορεί να βρίσκονται στο κέντρο των καλωδίων ισχύος, η τοποθέτηση αναμεταδότη στη μέση της θαλάσσιας διαδρομής, αποτελεί μία τεχνική πρόκληση από μόνη της. Στην δεύτερη περίπτωση, ασφαλώς προτιμητέα από τους αναμεταδότες, ο ειδικός σχεδιασμός ισοδυναμεί με αυξημένο κόστος, ενώ η χρησιμοποίηση μιας τεχνολογίας στα όρια της έχει και αυτή τα μειονεκτήματά της (όπως πιθανώς στην καθυστέρηση μετάδοσης).

Καθώς η εφαρμογή που εξετάζουμε έχει ανάλυση της τάξης των λίγων msec αξίζει να σημειωθεί ότι συνδέσεις των οπτικών ινών (splicing) χαμηλής ποιότητας μπορούν να έχουν αρνητική επίδραση στη συνολική χρονική καθυστέρηση του δικτύου οπτικών ινών και

συνεπώς ο ποιοτικός έλεγχος των εργασιών αυτών (που πάντως θεωρείται δεδομένος) πρέπει να είναι πολύ προσεκτικός.

Για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας θεωρούμε ότι η χρονική καθυστέρηση της μετάδοσης είναι σχεδόν μηδενική (0-3msec).

(Γ) Σύστημα ελέγχου δικτύου αιολικού πάρκου (Power Plant Controller-PPC).

Το PPC, χρησιμοποιείται τυπικά για τον έλεγχο των ανεμογεννητριών για την ικανοποίηση των απαιτήσεων των διαχειριστών σε χερσαία αιολικά πάρκα. Στην περίπτωση μας, αυτό το σύστημα χρησιμοποιείται για την διαβίβαση εντολών (όπως περιορισμού ισχύος ή άλλες) ή εκτέλεση αλγορίθμων ελέγχου (π.χ. παρακολούθηση της τάσης στο σημείο κοινής σύνδεσης και έναρξη διαδικασίας περιορισμού ισχύος) προς τις ανεμογεννήτριες. Ο έλεγχος αυτός μπορεί να γίνει και από το σύστημα SCADA του αιολικού πάρκου αλλά για λόγους ταχύτητας χρονικής απόκρισης (που προφανώς στην περίπτωση μας είναι μείζονος σημασίας) επιλέγεται αφοσιωμένο σύστημα ελέγχου με PLC (programmable logic controllers-προγραμματιζόμενους λογικούς ελεγκτές). Το σύστημα αυτό εισφέρει σημαντικά στην συνολική χρονική καθυστέρηση με περίπου 50-100msec.

Είναι ασφαλές να υποτεθεί ότι εάν γινόταν σχεδιασμός του συγκεκριμένου συστήματος ελέγχου συγκεκριμένα για την εφαρμογή διεπαφής υπεράκτιου αιολικού πάρκου με τη γραμμή HVDC ή τη στεριά, αυτός ο χρόνος θα μπορούσε να περιοριστεί. Το πιθανό μέγεθος του περιορισμού αυτού είναι αντικείμενο μίας πιο εξειδικευμένης μελέτης.

(Δ) Ανεμογεννήτρια

Η ανεμογεννήτρια (τεχνολογίας FSC για λόγους που αναφέρονται στο κεφάλαιο 5.1), αποτελείται από το δικό της σύστημα ελέγχου και τα ηλεκτρονικά/μηχανικά σύνολα που παράγουν ενέργεια. Πάνω στα τελευταία πρέπει να επενεργήσει το σύστημα ελέγχου για να περιοριστεί η ισχύς εξόδου. Αυτός ο περιορισμός μπορεί να γίνει με δύο τρόπους:

- Αεροδυναμικά, επιδρώντας δηλαδή στη γωνία πρόσπτωσης (pitch) των πτερυγίων
- Με ενεργοποίηση των βοηθητικών της φορτίων (chopper resistor)

Ο αεροδυναμικός περιορισμός είναι αργός για τα δεδομένα της παρούσας μελέτης και κυμαίνεται στα 2-3sec.

Η ενεργοποίηση των βοηθητικών φορτίων των ανεμογεννητριών είναι πολύ πιο γρήγορη και μπορεί να ολοκληρωθεί σε περίπου 100msec. Όμως, η ενεργοποίηση αυτή μέσω εξωτερικού ερεθίσματος (σήματος δηλαδή προερχόμενου από π.χ. το σύστημα ελέγχου του υπεράκτιου μετατροπέα) δεν είναι δεδομένη. Τα βοηθητικά φορτία των ανεμογεννητριών είναι

σχεδιασμένα για λειτουργία σε σφάλμα χερσαίου δικτύου που θα εντοπίσουν οι ελεγκτές της ίδιας της ανεμογεννήτριας.

### 6.2.3.1 Έλεγχος μέσω SCADA

Ορίζουμε ως SCADA, οποιοδήποτε σύστημα απόμακρου ελέγχου και παρακολούθησης ή σύνολο υποσυστημάτων SCADA ή ελεγκτών που απαρτίζουν το σύστημα του υπεράκτιου αιολικού πάρκου και τη γραμμή μεταφοράς (και όχι απαραίτητα το SCADA της γραμμής ή του αιολικού πάρκου). Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, στον αλγόριθμο λειτουργίας μίας λύσης βασισμένης στο SCADA, αυτό θα παρακολουθούσε την κατάσταση του δικτύου στο σημείο κοινής σύνδεσης και θα επικοινωνούσε στο υπεράκτιο πάρκο είτε απευθείας στις ανεμογεννήτριες είτε μέσω του PPC την ανάγκη για μείωση της ισχύος σε περίπτωση σφάλματος. Μία παραλλαγή του αλγόριθμου αυτού, περιγράψαμε ότι είναι η παρακολούθηση της τάσης της γραμμής HVDC-VSC στον υπεράκτιο μετατροπέα αντί για το σημείο κοινής σύνδεσης. Επειδή οι δύο λύσεις (παρακολούθησης του σημείου κοινής σύνδεσης ή του υπεράκτιου μετατροπέα) όπως φαίνεται και από το σχήμα 6.4 έχουν διαφορά στη χρονική καθυστέρηση της τάξης των 0-3msec, θα αντιμετωπιστούν ενιαία στην ανάλυση που ακολουθεί.

Η μέθοδος παρουσιάζει δύο προφανή θέματα προς επίλυση. Το ένα είναι η ταχύτητα της επικοινωνίας και της απόκρισης των ανεμογεννητριών. Το δεύτερο είναι η αξιοπιστία της τηλεπικοινωνιακής σύνδεσης.

Σχετικά με το τελευταίο, και εφόσον οι συνδέσεις γίνονται ενσύρματα (με οπτικές ίνες) και υπάρχει η δυνατότητα σχεδιασμού του συστήματος με τον απαραίτητο βαθμό πλεονασμού (redundancy), μπορούμε να θεωρήσουμε ότι είναι δυνατόν να επιτευχθούν υψηλοί βαθμοί αξιοπιστίας.

Υπάρχει και η δυνατότητα χρησιμοποίησης ασύρματων συνδέσεων με εμπορικά διαθέσιμες μικροκυματικές ζεύξεις με χρονική καθυστέρηση της τάξης των 0,1msec (σύμφωνα με την Ubiquity, " Air fiber Design Guide" [40]), η οποία βέβαια αυξάνει με την απόσταση. Οι ζεύξεις αυτές μπορούν επίσης να σχεδιαστούν με μεγάλο δείκτη πλεονασμού αλλά είναι περιορισμένες όσον αφορά την απόσταση της ζεύξης (περίπου 13 χιλιόμετρα για ονομαστικές συνθήκες). Το όριο της απόστασης της ζεύξης θα μπορούσαν να κάνουν τη λύση αυτή ενδιαφέρουσα για επικοινωνία εντός του υπεράκτιου αιολικού πάρκου αλλά για τη ζεύξη χερσαίου-υπεράκτιου τμήματος είναι απαγορευτικό, καθώς θα χρειαζόταν η χρήση αναμεταδοτών. Εξάλλου, θεωρώντας δεδομένη την ύπαρξη ζεύξεων με οπτικές ίνες οποιαδήποτε υπάρχει καλώδιο ισχύος (άρα ακτινικά σε όλα τα σημεία ενδιαφέροντος από το σημείο κοινή σύνδεσης μέχρι και την τελευταία ανεμογεννήτρια), η χρήση ασύρματης ζεύξης

κρίνεται περιττή (με αυξημένο κόστος κτήσης και συντήρησης, μικρότερη αξιοπιστία, χειρότερες προδιαγραφές ζεύξης).

Σχετικά με την ταχύτητα της επικοινωνίας, πρέπει να υπολογιστεί πόσος είναι ο συνολικός χρόνος για τον ολοκληρωμένο κύκλο ανίχνευσης του σφάλματος και περιορισμού της ισχύος. Προσπαθώντας να υπολογίσουμε το συνολικό χρόνο λαμβάνουμε υπ' όψιν τα εξής:

- Η καθυστέρηση 50-100msec ((Γ) σχήμα 6.4) που οφείλεται στην παρεμβολή του PPC, θα μπορούσε να παραλειφθεί με απευθείας σηματοδότηση των ανεμογεννητριών από τον υπεράκτιο μετατροπέα
- Η καθυστέρηση 100msec ((Δ) σχήμα 6.4) που σχετίζεται με το σύστημα ελέγχου της ανεμογεννήτριας και την ενεργοποίηση των βοηθητικών της φορτίων είναι ακριβής μόνο αν θεωρηθεί ότι αυτή η ενεργοποίηση μπορεί να γίνει με εξωτερικό σήμα ελέγχου. Αναφέρθηκε και προηγουμένως ότι δυνατότητα ενεργοποίησης των βοηθητικών φορτίων με εξωτερικό σήμα έλεγχου δεν είναι σήμερα διαθέσιμο, είναι όμως δύσκολο να σκεφτεί κανείς γιατί να μην είναι τεχνικά εφικτό. Αν οι κατασκευαστές των ανεμογεννητριών σχεδίαζαν κατάλληλα το σύστημα ελέγχου τους θα μπορούσαν να ενεργοποιήσουν τα βοηθητικά τους φορτία ως αποτέλεσμα ενός εξωτερικού σήματος ελέγχου. Πάντως σήμερα τούτο δεν είναι εφικτό.

Έτσι σύμφωνα με το σχήμα 6.4 έχουμε:

Συνολική καθυστέρηση=(Α)+(Β)+(Γ)+(Δ)

Έχουμε δηλαδή τις ακόλουθες υποπεριπτώσεις:

- *Ανίχνευση σφάλματος από το χειρσαίο μετρητή ισχύος/υπεράκτιο μετατροπέα, σηματοδότηση στο PPC και αεροδυναμικός περιορισμός ισχύος των ανεμογεννητριών.* Οι αντίστοιχοι χρόνοι είναι:

Χειρσαίος μετρητής ισχύος: 10 msec

Δίκτυο επικοινωνίας με οπτικές ίνες: 0-3msec

Υπεράκτιος μετατροπέας: Θεωρούμε ότι είναι αμελητέα η χρονική του καθυστέρηση

PPC: 50-100msec

Αεροδυναμικός περιορισμός ισχύος ανεμογεννητριών: 3sec

**Συνολική χρονική καθυστέρηση: ~3,1sec**

- *Ανίχνευση σφάλματος από το χειρσαίο μετρητή ισχύος/υπεράκτιο μετατροπέα, σηματοδότηση στο PPC και περιορισμός ισχύος των ανεμογεννητριών μέσω των βοηθητικών φορτίων τους.* Οι αντίστοιχοι χρόνοι είναι:

Χειρσαίος μετρητής ισχύος: 10 msec

Δίκτυο επικοινωνίας με οπτικές ίνες: 0-3msec

Υπεράκτιος μετατροπέας: Θεωρούμε ότι είναι αμελητέα η χρονική του καθυστέρηση

PPC: 50-100msec

Περιορισμός ισχύος μέσω βοηθητικών φορτίων: 100msec

**Συνολική χρονική καθυστέρηση: ~100-210msec**

- *Ανίχνευση σφάλματος από το χειρσαίο μετρητή ισχύος/υπεράκτιο μετατροπέα, σηματοδότηση στο σύστημα ελέγχου των ανεμογεννητριών και αεροδυναμικός περιορισμός ισχύος των ανεμογεννητριών. Οι αντίστοιχοι χρόνοι είναι:*

Χειρσαίος μετρητής ισχύος: 10 msec

Δίκτυο επικοινωνίας με οπτικές ίνες: 0-3msec

Υπεράκτιος μετατροπέας: Θεωρούμε ότι είναι αμελητέα η χρονική του καθυστέρηση

Ελεγκτής ανεμογεννήτριας: Θεωρούμε ότι είναι αμελητέα η χρονική του καθυστέρηση

Αεροδυναμικός περιορισμός ισχύος ανεμογεννητριών: 3sec

**Συνολική χρονική καθυστέρηση: ~3sec**

- *Ανίχνευση σφάλματος από το χειρσαίο μετρητή ισχύος/υπεράκτιο μετατροπέα, σηματοδότηση στο σύστημα ελέγχου των ανεμογεννητριών και περιορισμός ισχύος των ανεμογεννητριών μέσω των βοηθητικών φορτίων τους. Οι αντίστοιχοι χρόνοι είναι:*

Χειρσαίος μετρητής ισχύος: 10 msec

Δίκτυο επικοινωνίας με οπτικές ίνες: 0-3msec

Υπεράκτιος μετατροπέας: Θεωρούμε ότι είναι αμελητέα η χρονική του καθυστέρηση

Ελεγκτής ανεμογεννήτριας: Θεωρούμε ότι είναι αμελητέα η χρονική του καθυστέρηση

Περιορισμός ισχύος μέσω βοηθητικών φορτίων: 100msec

**Συνολική χρονική καθυστέρηση: ~100-110msec**

Χρησιμοποιώντας εξοπλισμό που είναι σήμερα εμπορικά διαθέσιμος (Ανίχνευση σφάλματος από το χειρσαίο μετρητή ισχύος ή τον υπεράκτιο μετατροπέα, σηματοδότηση στο PPC και αεροδυναμικός περιορισμός ισχύος των ανεμογεννητριών), μπορούμε να επιτύχουμε χρόνους

της τάξης των **3.1sec**. Θεωρώντας εφικτή την απευθείας σηματοδότηση των ελεγκτών των ανεμογεννητριών και την απευθείας ενεργοποίησης των βοηθητικών φορτίων οι χρόνοι του πλήρους κύκλου ελέγχου θα μπορούσαν να πλησιάσουν τα **100-110msec**.

Δεν πρέπει να παραλειφθεί το γεγονός ότι η ανίχνευση του σφάλματος από τον υπεράκτιο μετατροπέα με παρακολούθηση της στάθμης της τάσης της γραμμής HVDC-VSC, η επικοινωνία σε επίπεδο υπεράκτιου πάρκου και ο ελεγκτής της ανεμογεννήτριας εισφέρουν και αυτοί μια καθυστέρηση, αν και μικρή. Θεωρώντας ότι η καθυστέρηση αυτή δεν υπερβαίνει συνολικά τα 20msec μπορούμε να πούμε ότι **το σύστημα περιορισμού ισχύος με έλεγχο μέσω SCADA μπορεί να επιτύχει μέγιστη χρονική καθυστέρηση της τάξεως των 120-130msec.**

Δυστυχώς αυτή η χρονική επίδοση είναι πολύ μακριά-σχεδόν εξαπλάσια σχεδόν από την επιδιωκόμενη των 20msec.

#### 6.2.3.2 Έλεγχος Συχνότητας

Στον έλεγχο συχνότητας, έχουμε τη δυνατότητα να σηματοδοτήσουμε στις ανεμογεννήτριες τη διαταραχή στο σημείο κοινής σύνδεσης μεταβάλλοντας την συχνότητα του υπεράκτιου δικτύου. Με την προϋπόθεση ότι δεν έχουμε σύγχρονες μηχανές συνδεδεμένες στο υπεράκτιο δίκτυο, μπορούμε να μεταβάλλουμε τη συχνότητα σε ένα μικρό εύρος περίξ της ονομαστικής. Αντιλαμβανόμαστε αυτή τη διαταραχή παρακολουθώντας τη στάθμη της συνεχούς τάσης στη γραμμή HVDC-VSC.

Προφανώς, για να χρησιμοποιηθεί ο συγκεκριμένος τύπος ελέγχου θα πρέπει οι ανεμογεννήτριες να είναι σε θέση να αντιληφθούν την μεταβολή της συχνότητας για να αντιδράσουν αντίστοιχα. Γι αυτό το σκοπό πρέπει οι ανεμογεννήτριες να είναι εξοπλισμένες με ένα σύστημα ελέγχου της συχνότητας του υπεράκτιου δικτύου. Και ενώ το σύστημα αυτό υπάρχει κατά κανόνα στις προδιαγραφές των διαθέσιμων ανεμογεννητριών, ο έλεγχος συχνότητας συνήθως δεν γίνεται απ' ευθείας σε επίπεδο ανεμογεννήτριας. Συγκεκριμένα, ο κανόνας είναι ο έλεγχος να γίνεται μέσω του PPC, γεγονός που φυσικά εισφέρει σημαντικά στη χρονική καθυστέρηση του συστήματος. Αξίζει να σημειωθεί ότι σε επαγωγικές μηχανές σταθερών στροφών (εκτός αντικειμένου της παρούσας εργασίας καθώς επικεντρωνόμαστε σε μηχανές FSC), ο έλεγχος συχνότητας είναι εγγενής, καθώς η ισχύς είναι ανάλογη του slip.

Σύμφωνα με τους Hendriks, Volzke, Kling (2009) [18], οι μετατροπείς των ανεμογεννητριών είναι εξοπλισμένοι με έλεγχο PLL (phased locked loop), και είναι το ίδιο σύστημα που χρησιμοποιείται για έλεγχο συχνότητας. Επίσης αναφέρουν ότι μία τυπική καθυστέρηση χρόνου του PLL είναι της τάξης των 10-100msec.

Τα όρια των ανεμογεννητριών για μεταβολή της συχνότητας του υπεράκτιου δικτύου σχετίζονται με δύο προστασίες των ανεμογεννητριών. Την προστασία υπέρ ή υπό συχνότητας

και την προστασία έναντι απότομου ρυθμού μεταβολής της συχνότητας (Rate of Change of Frequency-RoCoF). Σχετικά με τα άνω και κάτω όρια συχνότητας, μία συνηθισμένη προδιαγραφή είναι το  $\pm 5\%$  της ονομαστικής, άρα 47,5 μέχρι 52,5 Hz ενώ για λειτουργία πάνω από το 106% ή κάτω από το 94% η ανεμογεννήτρια αποσυνδέεται σε 0,2sec. Σχετικά με το RoCoF, σύμφωνα με την AEMO (2013) [2] ο μέγιστος επιτρεπτός ρυθμός μεταβολής είναι 2-4Hz/sec για 200-300 msec. Αυτό μπορεί να είναι περιοριστικό για ορισμένους κατασκευαστές ανεμογεννητριών. Άλλοι δεν έχουν πρόβλημα με το ρυθμό μεταβολής της συχνότητας και η παρακολούθηση της φασικής γωνίας της τάσης από το PLL είναι αρκούτως γρήγορη.

Η ικανότητα παρακολούθησης της μεταβολής της συχνότητας έχει όμως ξεχωριστή σημασία από μόνη της. Όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω η χρονική καθυστέρηση του PLL είναι της τάξης των 10-100msec. Προσπαθώντας να κάνουμε την ανάλυση της παρακολούθησης της συχνότητας (και συνεπώς του ρυθμού μεταβολής αυτής) μεγαλύτερη, και συγχρόνως να μειώσουμε τη συνολική καθυστέρηση του PLL δημιουργούμε ένα νέο πρόβλημα. Λειτουργώντας σε περιοχές κοντά στο μισό κύκλο ενός συστήματος 50Hz, κάνουμε πιθανή τη μέτρηση κάποιου μεταβατικού φαινομένου/θορύβου χωρίς αξία (αντίστοιχο πρόβλημα με αυτό του μετρητή ισχύος στο σημείο κοινής σύνδεσης).

Σε κάθε περίπτωση είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η απόδοση του PLL όσον αφορά την παρακολούθηση της μεταβολής της συχνότητας είναι ο καθοριστικός παράγοντας για τη βιωσιμότητα ή όχι της συγκεκριμένης λύσης ελέγχου για μηχανές FSC (περιορισμός ισχύος με έλεγχο συχνότητας). Το PLL πρέπει να είναι αρκούτως γρήγορο ώστε να μην θέτει εκτός της ανεμογεννήτρια λόγω ενεργοποίησης των προστασιών. Πρέπει να είναι αρκετά γρήγορο ώστε να μπορέσει να ανιληφθεί πολύ γρήγορες μεταβολές της συχνότητας του δικτύου (ο υπεράκτιος μετατροπέας επιβάλλεται να μεταβάλλει τη συχνότητα πολύ γρήγορα για να σηματοδοτήσει το σφάλμα έγκαιρα) και να ενεργοποιηθούν ανάλογα τα συστήματα περιορισμού ισχύος. Τέλος πρέπει να μην είναι ευαίσθητο σε μετρήσεις θορύβου ή μεταβατικών φαινομένων που δεν έχουν αξία για τον έλεγχο συχνότητας.

Αν αποπειραθούμε να υπολογίσουμε την συνολική καθυστέρηση του συστήματος περιορισμού της ισχύος με έλεγχο της συχνότητας του υπεράκτιου δικτύου πρέπει να λάβουμε υπ' όψιν τα εξής:

- Οι ανεμογεννήτριες, όπως και στην περίπτωση του ελέγχου μέσω SCADA μπορούν να μειώσουν την ισχύ τους είτε χρησιμοποιώντας τα βοηθητικά τους φορτία είτε φρενάροντας αεροδυναμικά. Η χρήση των βοηθητικών φορτίων όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, δεν είναι διαθέσιμη με αφορμή εντολή από τον ελεγκτή της ανεμογεννήτριας λόγω εξωτερικού σήματος. Έτσι, μπορούμε να υποθέσουμε μόνο ότι κάποια τέτοια λειτουργία θα είναι διαθέσιμη από τους κατασκευαστές, αν χρειαστεί στο μέλλον.

- Οι ανεμογεννήτριες μπορούν να κάνουν έλεγχο συχνότητας σε συνεργασία με τον PPC και όχι απ' ευθείας. Μπορούμε να υποθέσουμε ότι μπορεί να γίνει έλεγχος συχνότητας απ' ευθείας από τον ελεγκτή της ανεμογεννήτριας εφόσον κάτι τέτοιο απαιτηθεί στο μέλλον, χωρίς μεγάλες αλλαγές στον εξοπλισμό.

Έτσι σύμφωνα με το σχήμα 6.4 έχουμε:

Συνολική καθυστέρηση=(Γ)+(Δ)

Έχουμε δηλαδή τις ακόλουθες υποπεριπτώσεις:

- *Ανίχνευση σφάλματος και μεταβολή της συχνότητας από τον υπεράκτιο μετατροπέα HVDC, ανίχνευση της μεταβολής από το PPC και αεροδυναμικός περιορισμός ισχύος των ανεμογεννητριών.* Οι αντίστοιχοι χρόνοι είναι:

Υπεράκτιος μετατροπέας: Θεωρούμε ότι είναι αμελητέα η χρονική του καθυστέρηση  
PPC: 50-100msec

Αεροδυναμικός περιορισμός ισχύος ανεμογεννητριών: 3sec

**Συνολική χρονική καθυστέρηση: ~3,1sec**

- *Ανίχνευση σφάλματος και μεταβολή της συχνότητας από τον υπεράκτιο μετατροπέα HVDC, ανίχνευση της μεταβολής από τα συστήματα ελέγχου των ανεμογεννητριών και αεροδυναμικός περιορισμός ισχύος των ανεμογεννητριών.* Οι αντίστοιχοι χρόνοι είναι:

Υπεράκτιος μετατροπέας: Θεωρούμε ότι είναι αμελητέα η χρονική του καθυστέρηση  
Σύστημα ελέγχου συχνότητας ανεμογεννήτριας: 10-100msec

Αεροδυναμικός περιορισμός ισχύος ανεμογεννητριών: 3sec

**Συνολική χρονική καθυστέρηση: ~3,1sec**

- *Ανίχνευση σφάλματος και μεταβολή της συχνότητας από τον υπεράκτιο μετατροπέα HVDC, ανίχνευση της μεταβολής από το PPC και περιορισμός ισχύος των ανεμογεννητριών μέσω των βοηθητικών φορτίων τους.* Οι αντίστοιχοι χρόνοι είναι:

Υπεράκτιος μετατροπέας: Θεωρούμε ότι είναι αμελητέα η χρονική του καθυστέρηση  
PPC: 50-100msec

Περιορισμός ισχύος μέσω βοηθητικών φορτίων: 100msec

**Συνολική χρονική καθυστέρηση: ~150-200msec**

- *Ανίχνευση σφάλματος και μεταβολή της συχνότητας από τον υπεράκτιο μετατροπέα HVDC, ανίχνευση της μεταβολής από τα συστήματα ελέγχου των ανεμογεννητριών και περιορισμός ισχύος μέσω των βοηθητικών φορτίων τους.* Οι αντίστοιχοι χρόνοι είναι:

Υπεράκτιος μετατροπέας: Θεωρούμε ότι είναι αμελητέα η χρονική του καθυστέρηση

Σύστημα ελέγχου συχνότητας ανεμογεννήτριας: Θεωρούμε ότι ο χρόνος συμπεριλαμβάνεται στο συνολικό χρόνο περιορισμού ισχύος μέσω βοηθητικών φορτίων καθώς πρόκειται για το ίδιο σύστημα ανίχνευσης-περιορισμού ισχύος.

Περιορισμός ισχύος μέσω βοηθητικών φορτίων: 100msec

**Συνολική χρονική καθυστέρηση: ~100msec**

Χρησιμοποιώντας τον εξοπλισμό που είναι σήμερα διαθέσιμος χωρίς παρεμβάσεις, βλέπουμε ότι ο βέλτιστος χρόνος καθυστέρησης που μπορούμε να επιτύχουμε είναι **3,1sec**.

Με την υπόθεση ότι οι ανεμογεννήτριες μπορούν να κάνουν έλεγχο συχνότητας και να ενεργοποιήσουν τα βοηθητικά τους φορτία απευθείας, ο καλύτερος χρόνος που μπορεί να επιτευχθεί είναι της τάξης των **100msec**. Η χρονική αυτή επίδοση, υποθέτει ότι ο χρόνος ανίχνευσης του σφάλματος της γραμμής HVDC και αλλαγής της συχνότητας από τον υπεράκτιο μετατροπέα και ο τηλεπικοινωνιακός χρόνος είναι αμελητέος, ενώ ο χρόνος του συστήματος ελέγχου συχνότητας της ανεμογεννήτριας συμπεριλαμβάνεται στα 100msec που απαιτούνται για την ενεργοποίηση των βοηθητικών φορτίων και την κατανάλωση της απαιτούμενης ενέργειας. Ακόμα και αν αυτή η παραδοχή δεν είναι ακριβής, η συνολική επιπλέον σχετική χρονική καθυστέρηση θα ήταν της τάξης των **20msec**.

Είναι λοιπόν ασφαλές να θεωρήσουμε ότι αν η βιομηχανία επενδύσει στην ανάπτυξη των απαιτούμενων λύσεων που αναφέρονται παραπάνω, **μπορούμε να επιτύχουμε περιορισμό της ισχύος με έλεγχο της συχνότητας του υπεράκτιου αιολικού πάρκου ως αποτέλεσμα διαταραχής στο σημείο κοινής σύνδεσης σε μέγιστο χρόνο περίπου 120msec**. Η ανάπτυξη δε των λύσεων αυτών δεν θεωρείται ότι θα επιβαρύνει επιπλέον το κόστος του εξοπλισμού (hardware) καθώς και στην περίπτωση του συστήματος ελέγχου της συχνότητας και στην περίπτωση της ενεργοποίησης των βοηθητικών φορτίων, η απαίτηση είναι μόνο για 2 νέους ελέγχους επί υφιστάμενου εξοπλισμού. Αυτό είναι φυσικά ένα εξαιρετικό πλεονέκτημα της συγκεκριμένης λύσης.

Ένα ακόμα πλεονέκτημα του ελέγχου συχνότητας είναι το γεγονός ότι αίρεται η ανάγκη χρησιμοποίησης τηλεπικοινωνιακού εξοπλισμού. Το σφάλμα γίνεται αντιληπτό στον υπεράκτιο μετατροπέα οπότε δεν υπάρχει ανάγκη επικοινωνίας με τη στεριά. Η ανάγκη περιορισμού επικοινωνείται μέσω του ελέγχου της συχνότητας του υπεράκτιου δικτύου οπότε δεν υπάρχει ανάγκη επικοινωνίας με τις ανεμογεννήτριες. Και εάν θεωρήσουμε ότι οι χρόνοι καθυστέρησης που δημιουργούν τα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα οπτικών ινών είναι ούτως ή άλλως αμελητέα, δεν συμβαίνει το ίδιο με την αξιοπιστία του συστήματος. Αφαιρώντας τελείως το τηλεπικοινωνιακό κομμάτι από την αλυσίδα του συστήματος ελέγχου σίγουρα αυξάνουμε την αξιοπιστία. Αντίστοιχα, τα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα επικοινωνίας με τη στεριά αλλά και σε επίπεδο υπεράκτιου δικτύου, μπορούν δυνητικά να χαρακτηριστούν

μειωμένης κρισιμότητας. Τούτο θα επέτρεπε την μείωση του βαθμού πλεονασμού (redundancy) και του συνδεόμενου με αυτόν κόστους.

Σε περίπτωση φυσικά που το υπεράκτιο αιολικό πάρκο συνδέεται σε δίκτυο με άλλες εγκαταστάσεις (πλατφόρμες, βοηθητικές καταναλώσεις, άλλα αιολικά πάρκα), η επιτηδευμένη διαμόρφωση της συχνότητας εκτός ονομαστικών ορίων είναι μάλλον απαγορευτική.

### 6.2.3.3 Έλεγχος τάσης

Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, στον περιορισμό ισχύος με έλεγχο της τάσης του υπεράκτιου δικτύου, παρακολουθείται η τάση της γραμμής HVDC-VSC στον υπεράκτιο μετατροπέα και όταν γίνει αντιληπτό σφάλμα, μειώνεται η τάση του υπεράκτιου δικτύου και με τη σειρά τους οι ανεμογεννήτριες μειώνουν την παραγόμενη ισχύ τους (καθώς οι μετατροπείς τους εισέρχονται σε λειτουργία προστασίας ρεύματος-current limit).

Η εποπτεία για την εμφάνιση σφάλματος μπορεί αντί για τον υπεράκτιο μετατροπέα να γίνεται και στον χερσαίο μετατροπέα. Στην περίπτωση αυτή ουσιαστικά μετρίεται η τάση στο σημείο κοινής σύνδεσης, επικοινωνείται μέσω του δικτύου οπτικών ινών στον υπεράκτιο μετατροπέα, ο οποίος με τη σειρά του αναπαράγει την τάση (του χερσαίου δικτύου) στο υπεράκτιο δίκτυο. Η τελευταία λύση απαιτεί τηλεπικοινωνιακό εξοπλισμό με τις αναλυθείσες νωρίτερα συνέπειες στο κόστος και την αξιοπιστία του συστήματος, συνεπώς η εποπτεία από τον υπεράκτιο μετατροπέα φαίνεται ως πιο λογική.

Το πλεονέκτημα της λύσης είναι ότι δεν χρειάζεται κανένας επιπλέον εξοπλισμός, ούτε επανασχεδιασμός των συστημάτων ελέγχου (όπως στην περίπτωση του ελέγχου συχνότητας). Πρέπει πάντως να απενεργοποιηθεί η υποστήριξη τάσης μέσω αέργου ισχύος.

Σχετικά με τη συνολική καθυστέρηση του ελέγχου τάσης, φαίνεται ότι πρόκειται για μία πολύ γρήγορη λύση, της τάξεως των λίγων δεκάδων msec. Συγκεκριμένα, το μόνο σύστημα που εμπλέκεται με τη χρονική επίδοση του συστήματος είναι ο υπεράκτιος μετατροπέας ο οποίος θεωρούμε ότι έχει αμελητέα χρονική καθυστέρηση.

Οι Harnefors et al (n.d.) [19] παρουσιάζουν ένα μειονέκτημα της λύσης αυτής. Συγκεκριμένα, για μεγάλες πτώσεις τάσεις, η πολύ γρήγορη μείωση της τάσης του υπεράκτιου δικτύου μπορεί να μην μπορεί να επιτευχθεί εγκαίρως. Αυτό εξαρτάται από τις εν σειρά αυτεπαγωγές μεταξύ της κάθε γεννήτριας και του υπεράκτιου μετατροπέα και είναι αναγκαία μία σχετικά μεγάλη επαγωγή για να αποφευχθεί η υπερένταση. Επίσης αναφέρουν ότι εάν ο περιορισμός της τάσης του υπεράκτιου δικτύου πρέπει να περιοριστεί για να αποφευχθεί η υπερένταση, δεν γίνεται αρκετά γρήγορα ο περιορισμός της ενεργού ισχύος. Συνεπώς η εκπλήρωση της απαίτησης για λειτουργία σε σφάλμα σε αυτή την περίπτωση αποτυγχάνει. Σημειώνεται

βέβαια ότι για να ισχύσει κάτι τέτοιο πρέπει οι εν λόγω αυτεπαγωγές να είναι πολύ μικρές. Πρακτικά θεωρείται ότι δεν υπάρχει τέτοιο πρόβλημα.

Προσοχή πρέπει να δοθεί στο γεγονός ότι ορισμένοι κώδικες απαιτούν τη βαθμιαία επαναφορά της ισχύος μετά το σφάλμα (π.χ. ο TenneT (2010)[38] ζητάει επαναφορά της ενεργού ισχύος του παραγωγού με ρυθμό μεταξύ 10% και 20% της ονομαστικής ισχύος ανά δευτερόλεπτο μετά το σφάλμα) γεγονός που δημιουργεί αντίστοιχες απαιτήσεις στο ρυθμό μεταβολής της τάσης του υπεράκτιου δικτύου. Αυτός ο ρυθμός και πριν αλλά και μετά το σφάλμα πρέπει να είναι σύμφωνος με τις ικανότητες λειτουργίας των ανεμογεννητριών σε μεταβολή τάσης δικτύου (καμπύλη V-t).

Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι σε μηχανές διπλής τροφοδότησης πρέπει να απενεργοποιηθούν άλλοι μηχανισμοί λειτουργίας σε σφάλμα για να μην γίνει έναυση του crowbar, και σε μηχανές σταθερής ταχύτητας υπάρχει ο κίνδυνος επιτάχυνσης του ρότορα.

Προφανώς και εδώ, βοηθητικός εξοπλισμός, πλατφόρμες, άλλα και αιολικά πάρκα συνδεδεμένα στο υπεράκτιο δίκτυο θα υπόκεινται σε ακραίες μεταβολές της τάσης με αποτέλεσμα στις περιπτώσεις αυτές, η λύση του ελέγχου της τάσης να μην είναι πρακτικά εφαρμόσιμη.

#### **6.2.4 Συνδυασμός λύσεων**

Οι Harnfors et al (n.d.) [19] και οι Hendriks, Volzke, Kling (2009) [18], προτείνουν τον συνδυασμό λύσεων από τις παραπάνω. Συγκεκριμένα, εξετάζεται η χρήση ενός μικρού βοηθητικού φορτίου στη γραμμή HVDC-VSC σε συνδυασμό με έλεγχο SCADA, συχνότητας ή τάσης. Με αυτόν τον τρόπο, μειώνουμε τα κόστη που σχετίζονται με την προμήθεια βοηθητικών φορτίων ονομαστικής ισχύος της γραμμής και την ψύξη και εγκατάσταση αυτών. Σημειώνεται βέβαια ότι το εν λόγω μικρό βοηθητικό φορτίο επιβάλλεται να φέρει chopper τα οποία να έχουν ονομαστικό ρεύμα ίσο με το ονομαστικό ρεύμα της γραμμής HVDC αλλά τα φορτία αυτά καθ' εαυτά (και τα συνοδά συστήματα) μπορούν να είναι κατά πολύ μικρότερα καθώς καλούνται να διαχειριστούν την ισχύ για πολύ μικρό χρονικό διάστημα.

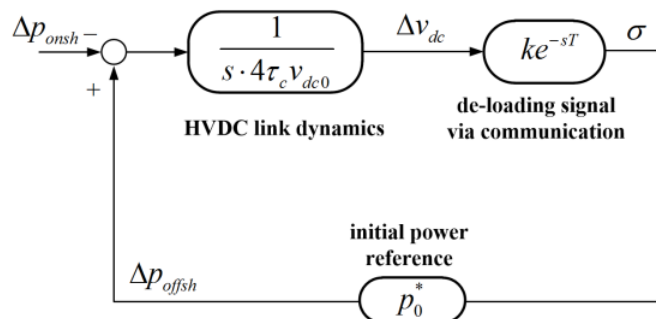
Συγχρόνως, αυξάνουμε το διαθέσιμο χρόνο για την αντίδραση των συστημάτων SCADA και συχνότητας. Συγκεκριμένα, η περίσσεια ενέργειας που προκύπτει λόγω χρονοκαυστέρησης του συστήματος SCADA και των συνοδών συστημάτων ισχύος ή λόγω της χρονοκαυστέρησης του ελεγκτή συχνότητας καταναλώνονται στο μικρό αυτό βοηθητικό φορτίο. Στην περίπτωση του ελέγχου τάσης η χρήση μικρού βοηθητικού φορτίου μπορεί να βοηθήσει στην αποφυγή των υπερεντάσεων που περιγράφηκαν νωρίτερα και έτσι συνολικά στην ταχύτερη δράση του συστήματος ελέγχου.

### 6.3 Προσομοιώσεις (Simulations)

Οι λύσεις ελέγχου μέσω SCADA και μέσω ελέγχου συχνότητας που αναλύθηκαν έχουν σαν βασική παράμετρο επιτευξιμότητας την χρονική καθυστέρηση που εισάγουν στο σύστημα λειτουργίας σε σφάλμα δικτύου. Συγκεκριμένα, είδαμε ότι χρόνοι της τάξης των 120msec είναι επιτεύξιμοι, ενώ χρόνοι της τάξης των 20msec είχαν τεθεί σαν στόχοι για την πρόληψη της υπέρτασης της γραμμής HVDC-VSC. Προφανώς, ο καλύτερος τρόπος ελέγχου της «πραγματικής» απόδοσης του συστήματος κατά τη λειτουργία σε σφάλμα με διάφορους χρόνους καθυστέρησης, είναι να γίνουν αντίστοιχες προσομοιώσεις.

Οι Νάνου, Παπαθανασίου (EWEA, 2014) [30], παρουσίασαν σχετικές προσομοιώσεις με έλεγχο SCADA (επικοινωνία του σφάλματος και της ανάγκης μείωσης της ισχύος μέσω SCADA στις ανεμογεννήτριες) και σφάλμα δικτύου μέχρι και υπόταση 90% και αναφέρουν μεταξύ άλλων τα εξής:

- I. Για τη μοντελοποίηση, επιλέχθηκε μία συμμετρική μονοπολική γραμμή με ένα μετατροπέα σε κάθε πλευρά. Ο κάθε μετατροπέας επιλέγεται να είναι συμβατικός τριφασικός δύο επιπέδων και θεωρείται σαν παραγωγός μία ανεμογεννήτρια μόνιμου μαγνήτη πλήρους μετατροπέα 300 MW. Δημιουργείται ένα μοντέλο στο πεδίο της συχνότητας (frequency domain) με το εξής μπλοκ διάγραμμα:



Σχήμα 6.5: Μπλόκ διάγραμμα μοντέλου συστήματος

Ο συντελεστής απόσβεσης (damping ratio) του συστήματος είναι:

$$\zeta = \frac{8v_{dc0} + kp_0^* \frac{T}{\tau_c}}{4\sqrt{(-2kp_0^* v_{dc0} \frac{T}{\tau_c})}}$$

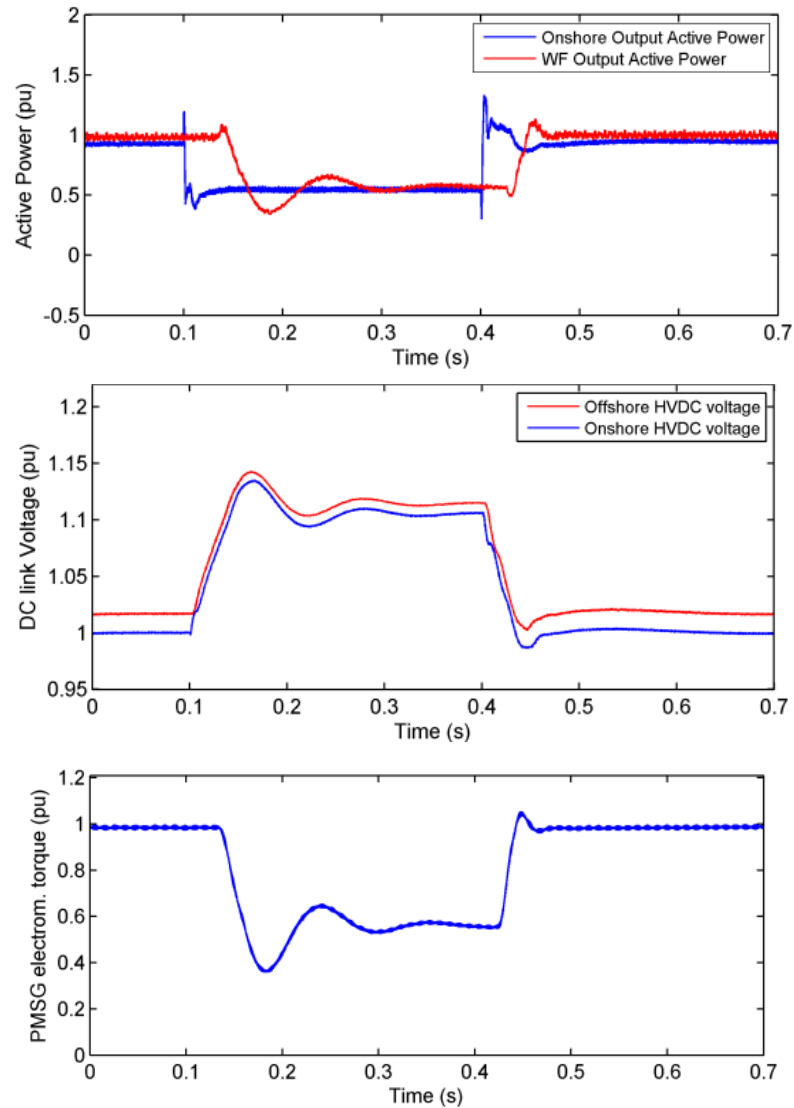
Απ' όπου φαίνεται ότι ο συντελεστής απόσβεσης εξαρτάται κυρίως από το κέρδος  $k$  και το λόγο  $T/\tau_c$ .

Στη μελέτη αυτή γίνεται σχεδιασμός του ελέγχου με βάση τη χειρότερη δυνατή περίπτωση σφάλματος στο 100% της τάσης την στιγμή που ο αιολικός παραγωγός λειτουργεί στην ονομαστική του ισχύ. Υπό αυτές τις συνθήκες ένα κέρδος  $k=-6.7$

οδηγεί σε αύξηση της τάσης στα 1.15 α.μ. το οποίο είναι ένας καλός συμβιβασμός μεταξύ σταθερότητας συστήματος και αύξηση της τάσης.

## II. Προσομοίωση για πτώση τάσης δικτύου στο 50% της ονομαστικής.

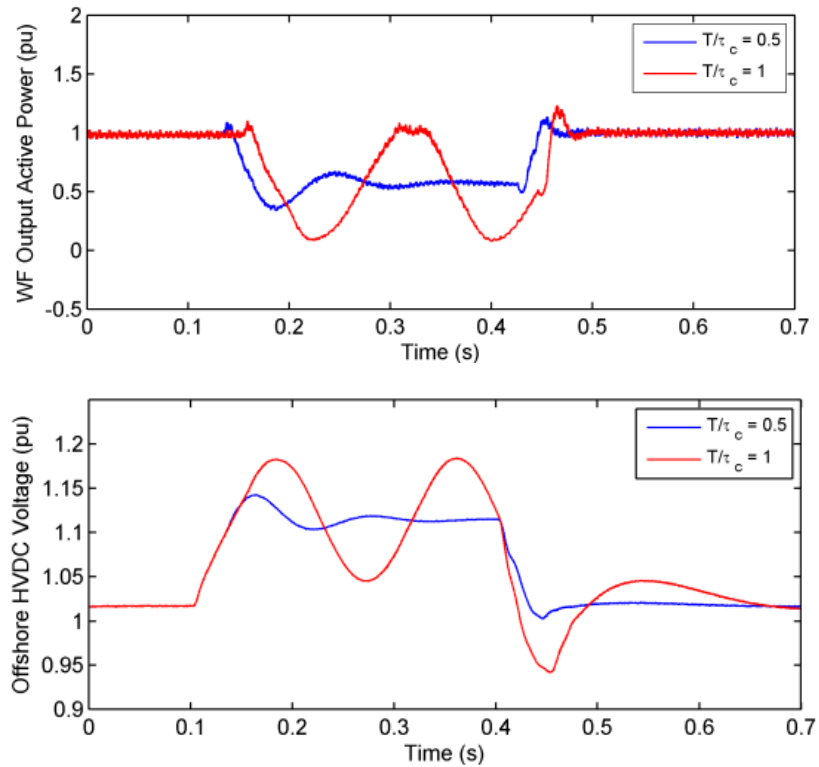
Υποθέτουμε ότι η ισοδύναμη σταθερά χρόνου της DC χωρητικότητας είναι  $\tau_c=0.04\text{sec}$  και η χρονική καθυστέρηση των επικοινωνιών είναι  $T=0.02\text{sec}$ . Τότε  $T/\tau_c=0.5$  και στο ακόλουθο σχήμα 6.6 παρουσιάζεται η αντίδραση του συστήματος:



Σχήμα 6.6: Αντίδραση συστήματος σε πτώση τάσης δικτύου 50%

Η έξοδος του αιολικού παραγωγού μειώνεται στο επίπεδο που μπορεί να εγχύσει ο χερσαίος μετατροπέας και η τάση της HVDC-VSC γραμμής παραμένει κάτω από 1.2 α.μ..

Η ικανότητα λειτουργίας σε σφάλμα γίνεται επικίνδυνα ασταθής για λόγο  $T/\tau_c$  κοντά στο 1 δηλαδή για χρονική καθυστέρηση των επικοινωνιών  $T$  κοντά στο  $0.04\text{sec}$ , όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα 6.7 όπου συγκρίνεται η αντίδραση συστήματος για  $T/\tau_c=0.5$  και  $T/\tau_c=1$ :

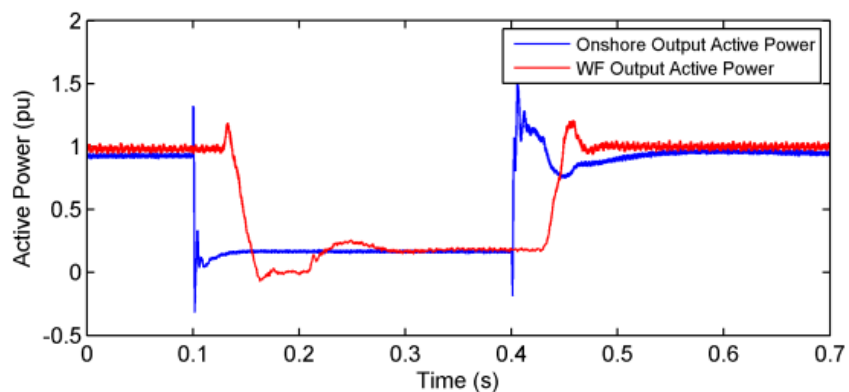


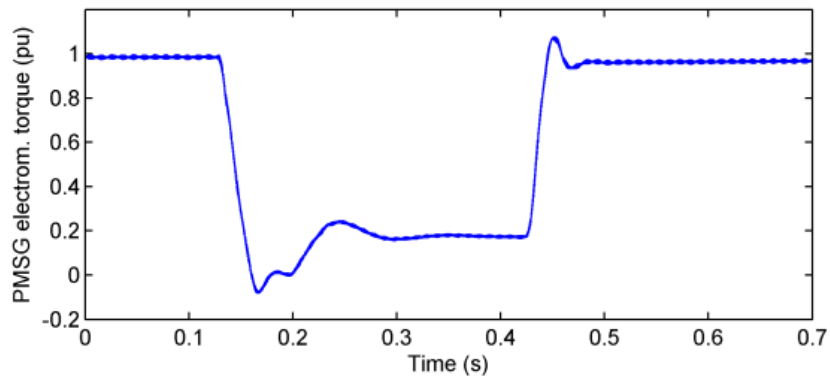
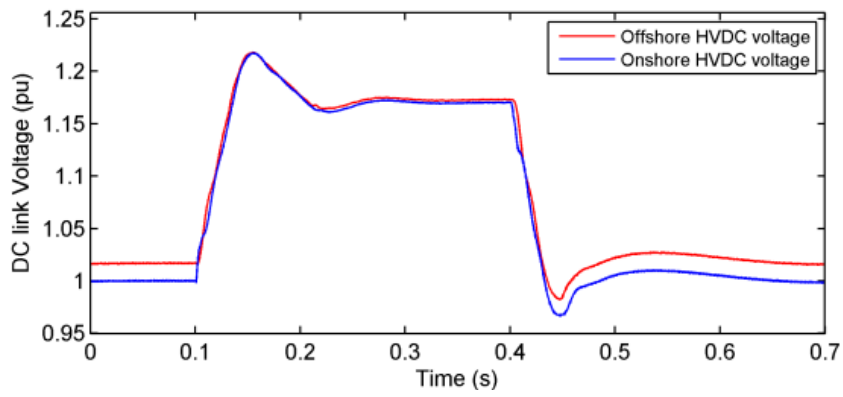
Σχήμα 6.7: Σύγκριση αντίδρασης συστήματος για  $T/\tau_c=0.5$  και  $T/\tau_c=1$

Από αυτό το σχήμα είναι προφανές ότι δημιουργούνται μεγάλες ταλαντώσεις στην ενεργό ισχύ του αιολικού παραγωγού αλλά παρ' όλα αυτά η τάση της γραμμής παραμένει κάτω από το 1.2 α.μ. με ικανοποίηση της απαίτησης λειτουργίας σε σφάλμα.

### III. Προσομοίωση για πτώση τάσης δικτύου στο 90% της ονομαστικής.

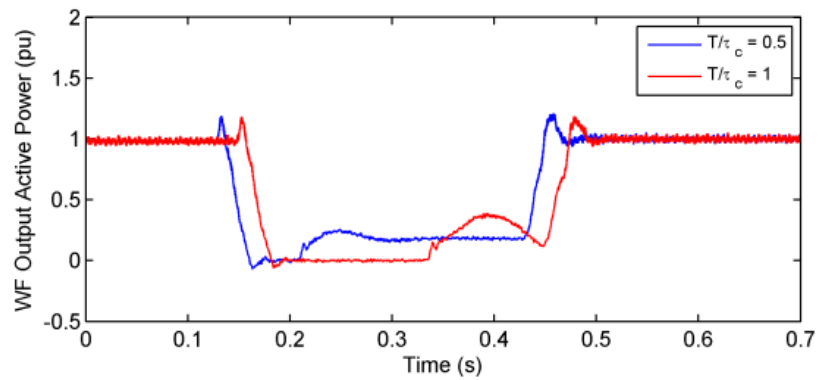
Για  $T/\tau_c=0.5$  παρουσιάζεται η αντίδραση του συστήματος στο ακόλουθο σχήμα 6.8:

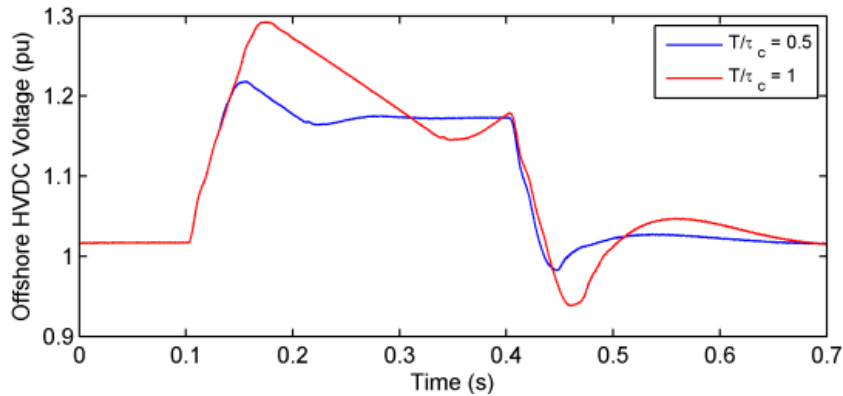




Σχήμα 6.8: Αντίδραση συστήματος σε πτώση τάσης δικτύου 90%

Και πάλι συγκρίνεται η αντίδραση συστήματος για  $T/\tau_c=0.5$  και  $T/\tau_c=1$  στο ακόλουθο σχήμα 6.9:





Σχήμα 6.9: Σύγκριση αντίδρασης συστήματος για  $T/\tau_c=0.5$  και  $T/\tau_c=1$

Παρατηρούμε ότι η τάση της γραμμής παραμένει κάτω από το 1.3 α.μ. με ικανοποίηση της απαίτησης λειτουργίας σε σφάλμα.

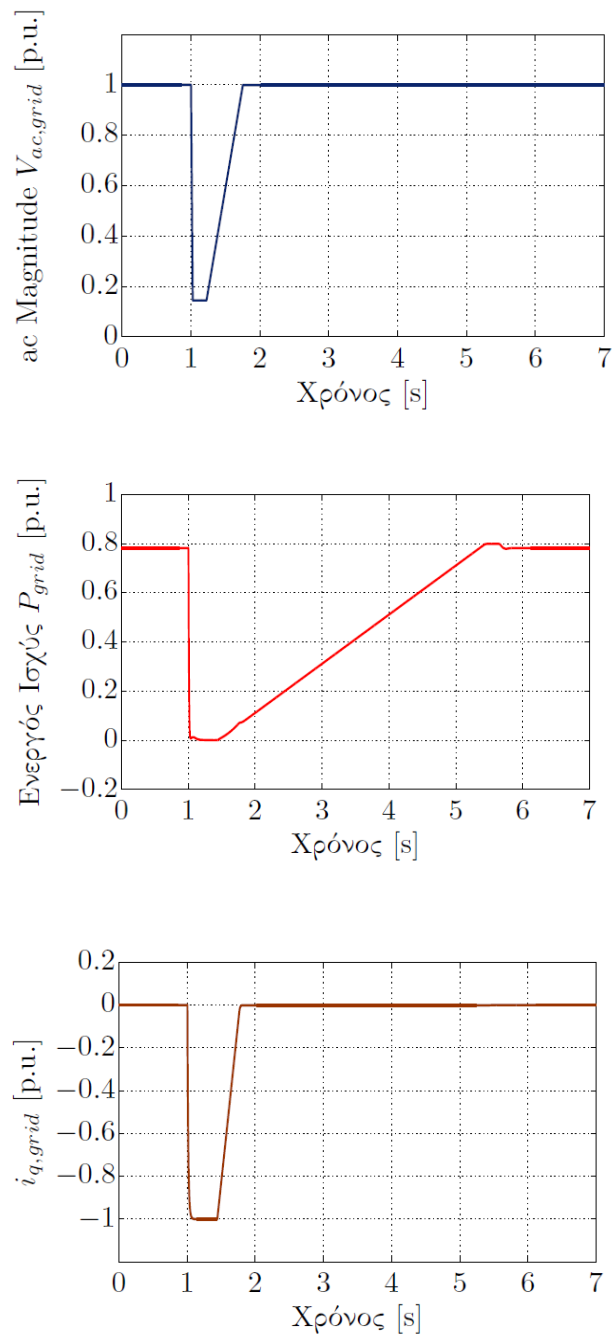
Αξίζει σε αυτό το σημείο να σχολιαστούν οι παραδοχές της συγκεκριμένης προσομοίωσης. Δεχτήκαμε ότι  $\tau_c=0.04\text{sec}$  και  $T=0.02\text{sec}$  που δίνει ένα λόγο  $T/\tau_c=0.5$ , ενώ έγινε προσομοίωση και για ένα λόγο  $T/\tau_c=1$  που δίνει περιθώριο αύξησης της χρονικής καθυστέρησης των επικοινωνιών ή μείωσης της ισοδύναμης χρονικής σταθεράς της χωρητικότητας DC.

Από την ανάλυση που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 6.2.3.1 είδαμε ότι η χρονική καθυστέρηση που μπορεί να επιτευχθεί είναι στην καλύτερη δυνατή περίπτωση της τάξης των 120msec δηλαδή  $T=0.12$ . Εξάλλου, υπάρχουν ενδείξεις ότι μία τυπική ισοδύναμη χρονική σταθερά της χωρητικότητας DC είναι της τάξης των 5-10msec δηλαδή  $\tau_c=0.005-0.01\text{sec}$ . **Είναι προφανές, ότι αν υποτεθεί ότι οι χρόνοι καθυστέρησης δεν μπορούν να βελτιωθούν κατά πολύ με την υπάρχουσα τεχνολογία και ότι η ισοδύναμη χρονική σταθερά της χωρητικότητας DC της γραμμής είναι ενδεικτική, βρισκόμαστε ακόμα πολύ μακριά από ένα λόγο  $T/\tau_c$  που θα έδινε αποδεκτή ισορροπία στο σύστημα και θα ικανοποιούσε την απαίτηση για λειτουργία σε σφάλμα.**

Ο Πατσάκης (2013) [31] παρουσίασε προσομοίωση με έλεγχο συχνότητας και σφάλμα δικτύου με βύθιση τάσης μέχρι 0.15 α.μ. και αναφέρει μεταξύ άλλων τα εξής:

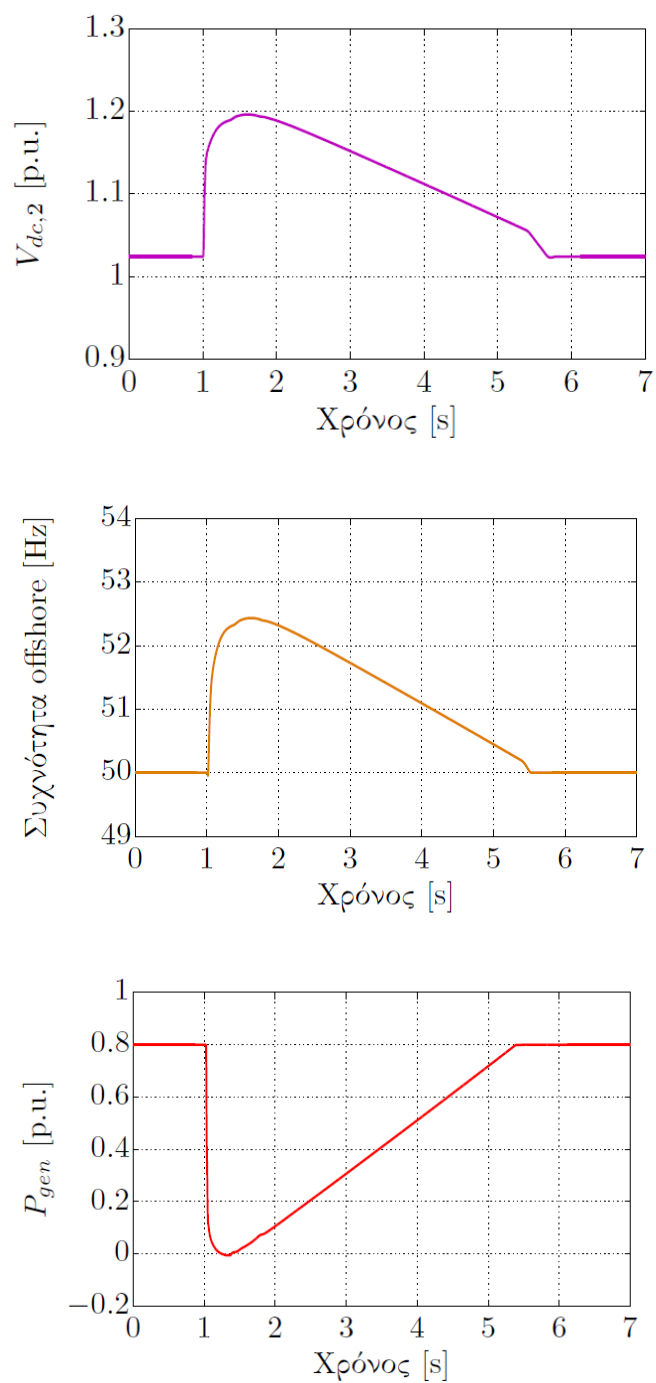
- I. Για τη μοντελοποίηση χρησιμοποιήθηκε αιολικό πάρκο με ονομαστική ενεργό παραγωγή 400MW, η μέθοδος της ομαδοποίησης με θεμελιώδη λίθο ανεμογεννήτρια 2MW και γραμμή HVDC ονομαστικής ισχύος 400MW με μετατροπέα δύο επιπέδων.
- II. Για διαταραχή συνολικής διάρκειας 750msec εκ των οποίων τα 200msec σε τάση 0.15 α.μ. η βύθιση τάσης του δικτύου, η ενεργός ισχύς στην έξοδο του χερσαίου

μετατροπέα και το ρεύμα  $i_q$  του χερσαίου μετατροπέα, φαίνονται στο ακόλουθο σχήμα 6.10:



Σχήμα 6.10: Έλεγχος συχνότητας-βύθιση τάσης του δικτύου, ενεργός ισχύς στην έξοδο του χερσαίου μετατροπέα και ρεύμα  $i_q$  του χερσαίου μετατροπέα

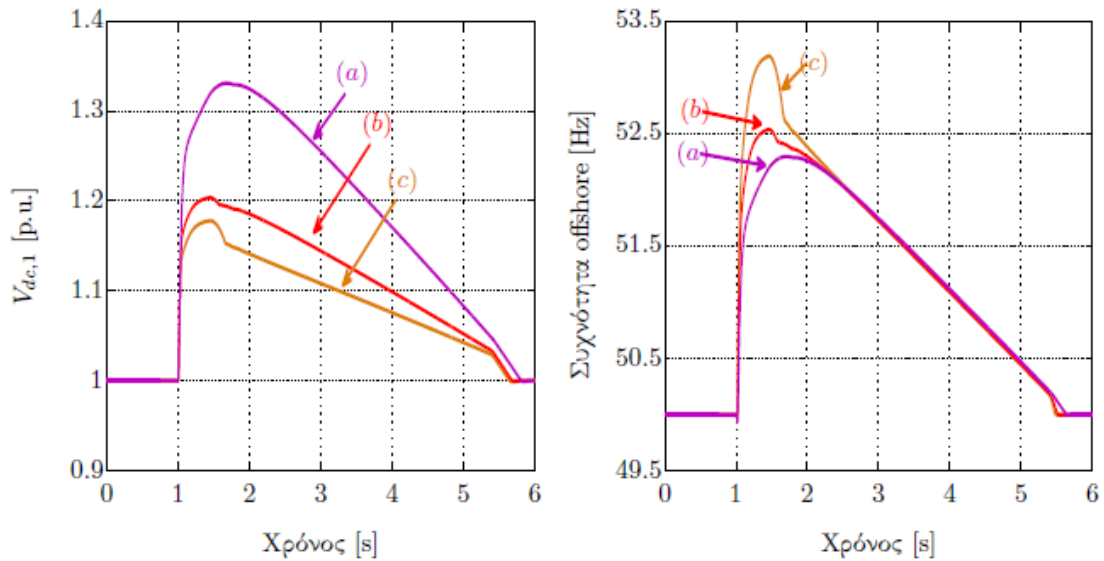
Η στάθμη της τάσης της γραμμής HVDC-VSC όπως ανιχνεύεται στην πλευρά του υπεράκτιου μετατροπέα, η αύξηση της συχνότητας του υπεράκτιου δικτύου και η ενεργός ισχύς που παράγει ο υπεράκτιος παραγωγός φαίνονται στο σχήμα 6.11 που ακολουθεί:



Σχήμα 6.11: Έλεγχος συχνότητας-στάθμη της τάσης της γραμμής HVDC-VSC όπως ανιχνεύεται στην πλευρά του υπεράκτιου μετατροπέα, συχνότητα του υπεράκτιου δικτύου και ενεργός ισχύς

III. Η απόκριση του συστήματος εξαρτάται από την επιλογή της παραμέτρου  $K_f$  του ελεγκτή του υπεράκτιου μετατροπέα, και συγκεκριμένα αύξηση της παραμέτρου οδηγεί σε μείωση της μέγιστης τάσης της γραμμής HVDC-VSC. Στο σχήμα 6.12 που

ακολουθεί παρατηρούμε την στάθμη της τάσης της γραμμής HVDC-VSC για διαφορετικές παραμέτρους  $K_f$  (a)8, (b)16, (c)24 Hz α.μ.



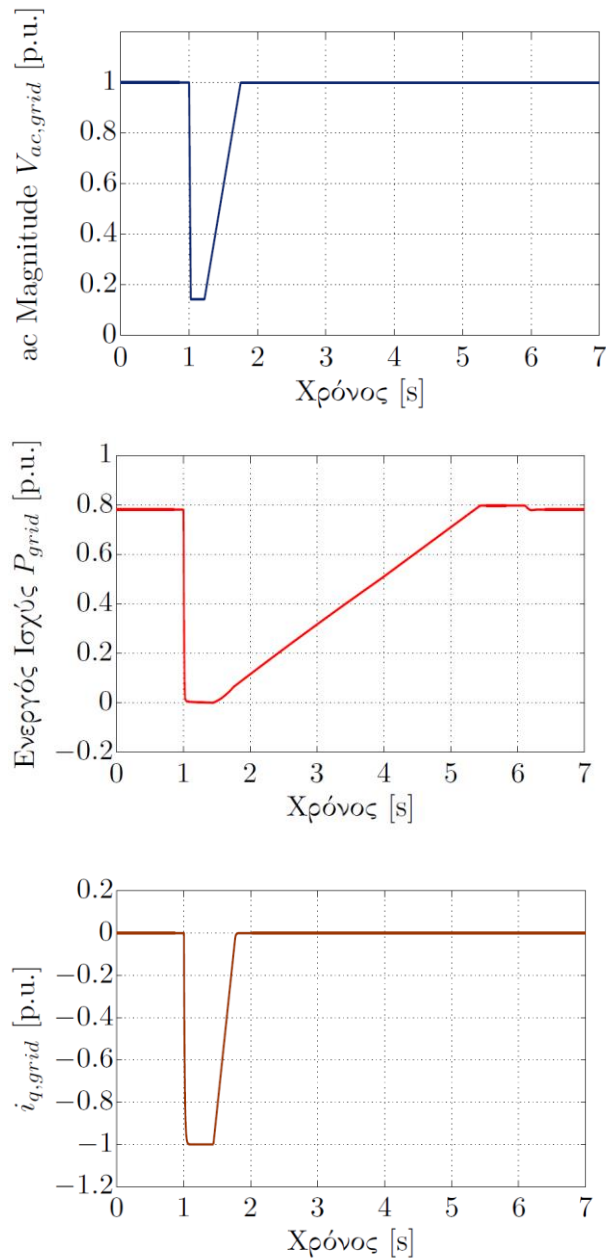
Σχήμα 6.12: Σύγκριση απόκρισης για  $K_f$  (a)8, (b)16, (c)24 Hz α.μ.

- IV. Δεν λαμβάνονται υπ' όψιν οι ενδεχόμενες καθυστερήσεις αδράνειας του αιολικού πάρκου λόγω του ελεγκτή συχνότητας της ανεμογεννήτριας ή του συστήματος περιορισμού ισχύος της.

**Παρατηρούμε ότι η τάση της γραμμής παραμένει κάτω από το 1.2 α.μ. με ικανοποίηση της απαίτησης λειτουργίας σε σφάλμα**, με την παραδοχή πάντως ότι ο ελεγκτής συχνότητας των ανεμογεννητριών και το σύστημα περιορισμού της ισχύος τους δεν εισφέρει καθυστερήσεις στο σύστημα.

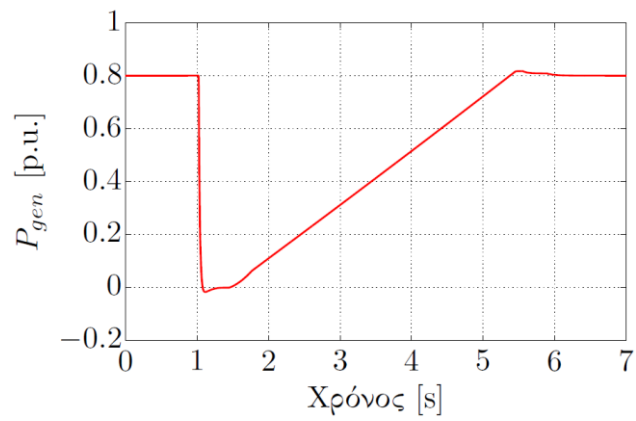
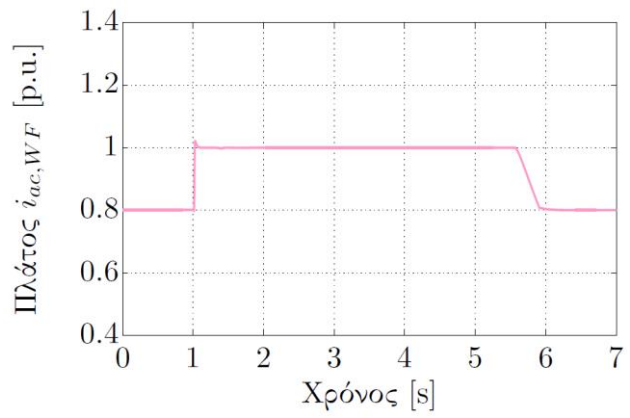
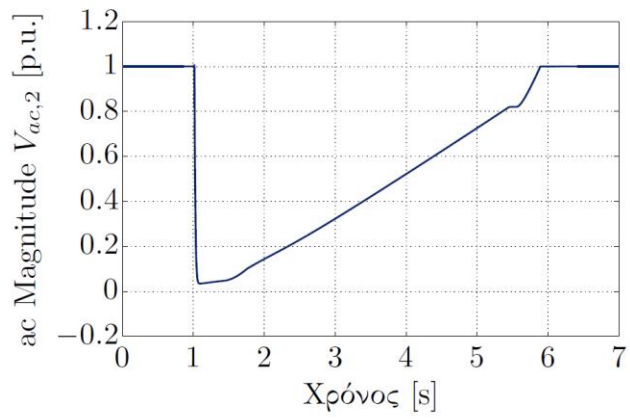
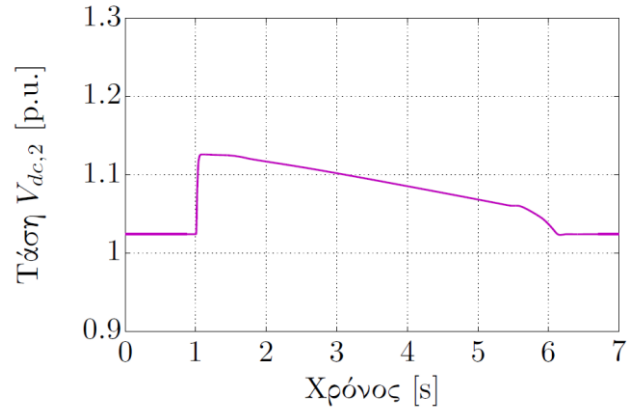
Ο Πατσάκης (2013) [31] επίσης παρουσίασε προσομοίωση με έλεγχο τάσης και σφάλμα δικτύου με βύθιση τάσης μέχρι 0.15 α.μ. και αναφέρει μεταξύ άλλων τα εξής:

- I. Για τη μοντελοποίηση χρησιμοποιήθηκε αιολικό πάρκο με ονομαστική ενεργό παραγωγή 400MW, η μέθοδος της ομαδοποίησης με θεμελιώδη λίθο ανεμογεννήτρια 2MW και γραμμή HVDC ονομαστικής ισχύος 400MW με μετατροπέα δύο επιπέδων.
- II. Για διαταραχή συνολικής διάρκειας 750msec εκ των οποίων τα 200msec σε τάση 0.15 α.μ. η βύθιση τάσης του δικτύου, η ενεργός ισχύς στην έξοδο του χερσαίου μετατροπέα και το ρεύμα  $i_q$  του χερσαίου μετατροπέα, φαίνονται στο ακόλουθο σχήμα 6.13



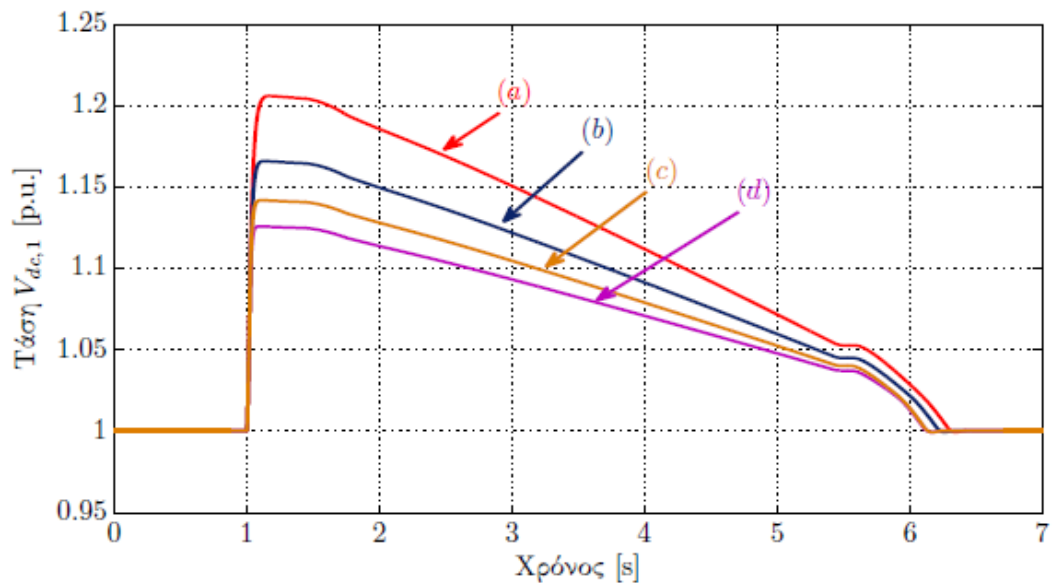
Σχήμα 6.13: Έλεγχος τάσης-βύθιση τάσης του δικτύου, ενεργός ισχύς στην έξοδο του χερσαίου μετατροπέα και ρεύμα  $i_q$  του χερσαίου μετατροπέα

Η στάθμη της τάσης της γραμμής HVDC-VSC όπως ανιχνεύεται στην πλευρά του υπεράκτιου μετατροπέα, η μείωση της τάσης του υπεράκτιου δικτύου, το ρεύμα και η ενεργός ισχύς που παράγει ο υπεράκτιος παραγωγός φαίνονται στο σχήμα 6.14 που ακολουθεί:



Σχήμα 6.14: Έλεγχος τάσης- στάθμη της τάσης της γραμμής HVDC-VSC όπως ανιχνεύεται στην πλευρά του υπεράκτιου μετατροπέα, τάση του υπεράκτιου δικτύου, ρεύμα και ενεργός ισχύς

III. Η απόκριση του συστήματος εξαρτάται από την επιλογή της παραμέτρου  $K_n$  της βύθισης της τάσης, και συγκεκριμένα αύξηση της παραμέτρου οδηγεί σε μείωση της μέγιστης τάσης της γραμμής HVDC-VSC. Στο σχήμα 6.15 που ακολουθεί φαίνεται σύγκριση της στάθμης συνεχούς τάσης της γραμμής HVDC-VSC για παράμετρο  $K_n$  (a) 6, (b) 8, (c) 10 και (d) 12:



Σχήμα 6.15: Σύγκριση απόκρισης για παράμετρο  $K_n$  (a) 6, (b) 8, (c) 10 και (d) 12

**Παρατηρούμε ότι η τάση της γραμμής παραμένει αρκετά κάτω από το 1.2 α.μ. με ικανοποίηση της απαίτησης λειτουργίας σε σφάλμα** και μάλιστα με απόδοση σχετικά καλύτερη και χωρίς χρονικές παραδοχές από αυτή του ελέγχου συχνότητας.

## 6.4 Συμπεράσματα

Είδαμε στην ανάλυση που προηγήθηκε ότι όλες οι διαθέσιμες λύσεις για τη λειτουργία του υπεράκτιου αιολικού πάρκου σε σφάλμα έχουν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους, με δύο βασικές κατευθύνσεις. Οι λύσεις υπερδιαστασιολόγησης και βοηθητικών φορτίων φαίνονται σαν πιο αξιόπιστες, πιο απαιτητικές σε εξοπλισμό (άρα πιο ακριβές), λιγότερο παρεμβατικές ως προς τη λειτουργία των ανεμογεννητριών, και με πολύ μικρή ευαισθησία στον χρονικό παράγοντα. Οι λύσεις του περιορισμού ισχύος (SCADA, έλεγχος

συχνότητας, έλεγχος τάσης) έχουν τις λιγότερες (σχεδόν μηδαμινές) απαιτήσεις επιπλέον εξοπλισμού, αλλά είναι πολύ παρεμβατικές στη λειτουργία του υπεράκτιου αιολικού πάρκου, εισφέρουν (εκτός από τον έλεγχο τάσης) μεγάλη χρονοκαθυστέρηση για τα δεδομένα του FRT, και φαίνονται λιγότερο αξιόπιστες.

Πιο αναλυτικά, η λύση με τα βοηθητικά φορτία είναι μία αξιόπιστη λύση με μεγάλη απαίτηση κεφαλαιακής επένδυσης και συντήρησης (αλλά παρ' όλα αυτά οικονομικά αποδεκτή). Είναι μάλιστα η μόνη λύση που εφαρμόζεται πρακτικά σήμερα σε πραγματικές εγκαταστάσεις υπεράκτιων πάρκων με σύνδεση HVDC-VSC.

Η λύση της υπέρ-διαστασιολόγησης είναι επίσης μία αξιόπιστη λύση αλλά δεδομένου του βαθμού της απαιτούμενης υπερδιαστασιολόγησης (περίπου επταπλάσιος), κρίνεται αδύνατη οικονομικά, εκτός πολύ συγκεκριμένων και εξεζητημένων εφαρμογών.

Η λύση του περιορισμού ισχύος μέσω SCADA, απαιτεί κάποια κεφαλαιακή επένδυση για την ενίσχυση του υπάρχοντος δικτύου για λόγους πλεονασμού και αξιοπιστίας και κάποια επένδυση στην έρευνα και ανάπτυξη από πλευράς κατασκευαστών για την έναυση των βοηθητικών τους φορτίων με εξωτερική εντολή. Οι χρόνοι που επιτυγχάνονται ακόμα και έτσι είναι πολύ μεγάλοι (όπως φάνηκε και με σύγκριση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης των Νάνου, Παπαθανασίου (EWEA, 2014) [30]) για την ικανοποίηση των απαιτήσεων των διαχειριστών για λειτουργία σε σφάλμα και συνεπώς η λύση δεν φαντάζει ως εφικτή. Πιθανώς, με συντονισμένες προσπάθειες για περιορισμό του χρόνου απόκρισης της ενεργοποίησης των βοηθητικών φορτίων από πλευράς κατασκευαστών ανεμογεννητριών και κατάλληλου σχεδιασμού της χωρητικότητας της γραμμής να μπορούσε να επιτευχθεί πιο αποδεκτή συμπεριφορά. Πάντως, με τα διαθέσιμα δεδομένα τούτο φαντάζει εξαιρετικά δύσκολο. Η λύση αποκτά ενδιαφέρον σε περίπτωση συνδυαστικής χρήσης με μικρά βοηθητικά φορτία στη γραμμή HVDC-VSC που μειώνουν τις απαιτήσεις χρονικής απόδοσης του συστήματος περιορισμού της ισχύος.

Η λύση του περιορισμού ισχύος μέσω ελέγχου συχνότητας είναι συγγενής ως προς την γενικότερη επίδοσή της με αυτή του SCADA. Αποφεύγουμε την επένδυση σε τηλεπικοινωνιακό εξοπλισμό, απαιτείται όμως έρευνα και ανάπτυξη στον τομέα του ελέγχου συχνότητας απ' ευθείας από τις ανεμογεννήτριες και στην ενεργοποίηση των βοηθητικών τους φορτίων. Οι χρονικές επιδόσεις του συστήματος είναι ανάλογα προβληματικές με το σύστημα SCADA. Η λύση θα μπορούσε να γίνει πιο θελκτική με μείωση του χρόνου ενεργοποίησης των βοηθητικών φορτίων των ανεμογεννητριών ή/και με το συνδυασμό της με μικρά βοηθητικά φορτία στη γραμμή HVDC-VSC.

**Η λύση του περιορισμού ισχύος μέσω ελέγχου τάσης παρουσιάζει εξαιρετικό ενδιαφέρον.** Πρόκειται για μία λύση με σχεδόν μηδενική απαίτηση κεφαλαιακής επένδυσης, και ο απαιτούμενος (και ούτως ή άλλως χρησιμοποιούμενος) εξοπλισμός χρειάζεται

ελάχιστες παρεμβάσεις. Οι χρόνοι αντίδρασης του συστήματος είναι πάρα πολύ μικροί καθώς εκμεταλλευόμαστε μία εγγενή λειτουργία του συστήματος (μείωση της τάσης, αύξηση του ρεύματος, λειτουργία σε περιορισμό ρεύματος, μείωση της ενεργού ισχύος) και όχι έναν επίκτητο αλγόριθμο σηματοδότησης και περιορισμού. Η μεγάλη (αν και μάλλον σπάνια αντιμετωπίσιμη) αδυναμία του συστήματος είναι η πιθανότητα σύνδεσης βοηθητικών φορτίων ή τρίτων καταναλωτών ή παραγωγών σε ένα δίκτυο με ακραία μεταβαλλόμενη τάση. Η συνδυαστική λύση μικρών βοηθητικών φορτίων στη γραμμή HVDC-VSC σε συνδυασμό με έλεγχο SCADA ή συχνότητας παρουσιάζει ενδιαφέρον αν συνοδευτεί με αντίστοιχες εξελίξεις στον σχεδιασμό των ανεμογεννητριών. Εξ' άλλου λειτουργώντας επικουρικά στη λύση του ελέγχου της τάσης μπορεί να μειώσει την μηχανική επιβάρυνση στις ανεμογεννήτριες και να μειώσει γενικά τις ακραίες απαιτήσεις λειτουργίας του συστήματος. Μία συγκεντρωτική θεώρηση των δυνατοτήτων των διαφόρων λύσεων για την ικανοποίηση λειτουργίας σε σφάλμα δικτύου φαίνεται στον παρακάτω πίνακα:

	<b>Υπερδιαστασιολόγηση</b>	<b>Βοηθητικά φορτία</b>	<b>Περιορισμός μέσω SCADA</b>	<b>Περιορισμός με έλεγχο συχνότητας</b>	<b>Περιορισμός με έλεγχο τάσης</b>
<b>Τεχνικά εφικτή</b>	Ναι (αλλά όχι τεχνικά αποδεκτή υπερδιαστασιολόγηση 7x)	Ναι	Όχι (υψηλοί χρόνοι)-δεν είναι εφικτή η απ' ευθείας ενεργοποίηση των βοηθητικών φορτίων των ανεμογεννητριών με εξωτερικό σήμα	Όχι (υψηλοί χρόνοι)-Δεν είναι εφικτός ο έλεγχος συχνότητας σε επίπεδο ανεμογεννήτριας	Ναι
<b>Οικονομικά βιώσιμη</b>	Όχι	Ναι	Ναι	Ναι	Ναι
<b>Απώλειες</b>	Μεσαίες	Μηδαμινές	Μηδαμινές	Μηδαμινές	Μηδαμινές
<b>Απαιτούμενος χώρος</b>	Μέτριος	Μεγάλος	Μηδαμινός	Μηδαμινός	Μηδαμινός
<b>Κόστος κτήσης</b>	Υψηλό	Υψηλό	Χαμηλό	Χαμηλό	Χαμηλό
<b>Κόστος συντήρησης</b>	Υψηλό	Υψηλό	Χαμηλό	Χαμηλό	Χαμηλό
<b>Αξιοπιστία</b>	Υψηλή	Υψηλή	Μέτρια (λόγω τηλεπικοινωνιών)	Υψηλή	Υψηλή
<b>Χρονική απόκριση</b>	-	-	Μεγάλη	Μεγάλη	Μικρή
<b>Παρεμβατικότητα στις ανεμογεννήτριες</b>	Μηδαμινή	Μηδαμινή	Μέτρια	Μεγάλη	Μεγάλη
<b>Δυνατότητα σύνδεσης βοηθητικών φορτίων/παραγωγών</b>	Ναι	Ναι	Ναι	Υπό συνθήκες	Όχι

Πίνακας 6.1: Σύγκριση λύσεων για την ικανοποίηση λειτουργίας σε σφάλμα δικτύου

# 7

## *Επίλογος*

## **7.1 Σύνοψη και συμπεράσματα**

Η σύγκριση των απαιτήσεων των κωδίκων ικανοποίησε τον στόχο για συνοπτική παρουσίαση των βασικών απαιτήσεων επιλεγμένων χωρών μελών του ENTSO-e από τη σκοπιά των αιολικών παραγωγών και κατασκευαστών. Επίσης επιβεβαίωσε την ανάγκη περαιτέρω ομογενοποίησης των απαιτήσεων διασυνδεδεμένων δικτύων (όπως του ENTSO-e) καθώς φάνηκαν οι διαφορές στην αντιμετώπιση των απαιτήσεων για σύνδεση αλλά και στην (ορθά) διαφορετική αντιμετώπιση μέρους αυτών για αιολικούς παραγωγούς. Τέλος, φάνηκαν σε ορισμένα σημεία ασάφειες στη διατύπωση των κωδίκων, που ενώ είναι ήσσονος σημασίας για παραδοσιακούς παραγωγούς, έχουν μεγάλη σημασία για τον σχεδιασμό των ανεμογεννητριών (όπως π.χ. ο ορισμός του σημείου κοινής σύνδεσης).

Στη συνέχεια, παρουσιάστηκαν οι διαθέσιμες μέθοδοι διασύνδεσης υπεράκτιων αιολικών πάρκων με τη στεριά, και παρουσιάστηκε η δυσκολία επιλογής της βέλτιστης τεχνικό-οικονομικής λύσης. Θεωρώντας ως βασικό στοιχείο για την διαδικασία απόφασης την απόσταση του υπεράκτιου αιολικού πάρκου από τη στεριά παρουσιάστηκαν σχετικές μελέτες που επιβεβαίωσαν το πολυδιάστατο της άσκησης (μέγεθος αιολικού πάρκου, τεχνολογία ανεμογεννήτριας, προφίλ αέρα και αναμενόμενος βαθμός απόδοσης κλπ) αλλά συγχρόνως συνέκλιναν στο ίδιο συμπέρασμα. Ότι δηλαδή, η απόσταση στην οποία η διασύνδεση HVDC δίνει τη θέση της ως βέλτιστη στην HVDC-VSC είναι περίπου 100-130 χιλιόμετρα. Επίσης παρουσιάστηκαν τα βασικά μειονεκτήματα που καθιστούν την τεχνολογία HVDC-LCC σχεδόν απαγορευτική για εφαρμογές υπεράκτιων αιολικών πάρκων.

Μελετώντας περαιτέρω την τεχνολογία HVDC-VSC, παρουσιάστηκαν οι απαιτήσεις για την ικανοποίηση των κωδίκων διασύνδεσης. Περαιτέρω ανάλυση για την ικανοποίηση λειτουργίας του αιολικού σταθμού σε σφάλμα δικτύου ακολούθησε δεδομένου της σημασίας και της δυσκολίας εκπλήρωσης της συγκεκριμένης απαίτησης. Φάνηκε ότι το πιο σημαντικό πρόβλημα προς επίλυση είναι η αύξηση της τάσης της γραμμής HVDC-VSC σε περίπτωση σφάλματος του χερσαίου δικτύου και ο κίνδυνος οι προστασίες της να την θέσουν εκτός συστήματος. Παρουσιάστηκαν επιγραμματικά οι διαθέσιμες λύσεις δηλαδή η υπερδιαστασιολόγηση των μετατροπέων, η χρήση βοηθητικών φορτίων και η μείωση ισχύος του αιολικού πάρκου. Η τελευταία, γίνεται να επιτευχθεί είτε με Τηλε-έλεγχο των ανεμογεννητριών για μείωση παραγωγής είτε με έλεγχο τάσης ή συχνότητας του υπεράκτιου δικτύου.

Τέλος, πραγματοποιήθηκε μελέτη επιτευξιμότητας των διαθέσιμων λύσεων για λειτουργία του υπεράκτιου αιολικού σε σφάλμα δικτύου. Φάνηκε ότι η λύση της υπερδιαστασιολόγησης

δεν είναι επιλέξιμη λόγω κόστους εξοπλισμού. Η λύση των βοηθητικών φορτίων, αν και η μόνη ευρέως χρησιμοποιούμενη είναι απαιτητική και χρίζει βελτιστοποίησης. Για τη λύση της μείωσης της ισχύος, ορίστηκε ο χρόνος απόκρισης του συνολικού συστήματος ελέγχου ως ο σημαντικότερος παράγοντας επιτυχίας. Είδαμε ότι οι επιδιωκόμενοι χρόνοι είναι της τάξης των 20msec. Η ανάλυση της λύσης με Τήλε-έλεγχο των ανεμογεννητριών μέσω SCADA έδωσε στην καλύτερη περίπτωση χρόνους σχεδόν εξαπλάσιους από τους επιδιωκόμενους, και αυτό με την προϋπόθεση ότι αναπτύσσονται περαιτέρω κάποια συστήματα από πλευράς κατασκευαστών (απευθείας ενεργοποίηση βοηθητικών φορτίων ανεμογεννήτριας-μεταξύ άλλων). Συνεπώς η λύση θεωρείται προς το παρόν απορριπτέα. Από ανάλυση του ελέγχου συχνότητας οι χρόνοι του επιτεύχθηκαν ήταν ανάλογα μεγάλοι σε σχέση με τους επιδιωκόμενους, με αντίστοιχες ανάγκες έρευνας και ανάπτυξης από τους κατασκευαστές. Τέλος, μελετήθηκε η λύση του περιορισμού ισχύος μέσω ελέγχου της τάσης του υπεράκτιου δικτύου, η οποία φαίνεται ότι είναι μία λύση που ικανοποιεί τις χρονικές μας απαιτήσεις, χωρίς μάλιστα να απαιτείται επένδυση σε επιπλέον του στάνταρ εξοπλισμού ή επιπλέον εργασιών ανάπτυξης του. Εκμεταλλευόμενοι ένα εγγενές χαρακτηριστικό των μετατροπέων των ανεμογεννητριών, τις οδηγούμε σε λειτουργία περιορισμού ρεύματος και μειώνουμε άμεσα την παραγόμενη ισχύ. Προφανής περιορισμός του συστήματος είναι η λειτουργία του υπεράκτιου δικτύου σε απαγορευτικές στάθμες τάσης για τρίτους παραγωγούς ή καταναλωτές. Μεγάλο ενδιαφέρον θεωρείται ότι παρουσιάζει η συνδυαστική λύση μικρών βοηθητικών φορτίων στη γραμμή HVDC-VSC με μία εκ των λύσεων περιορισμού ισχύος, που χρίζει πάντως περαιτέρω μελέτης.

## **7.2 Μελλοντικές επεκτάσεις**

Η καταγραφή των απαιτήσεων των κωδικών διασύνδεσης, χρίζει συχνής ανανέωσης δεδομένης της συνεχούς ανάπτυξης και τροποποίησης τους. Η τεχνολογία HVDC-VSC, ευρισκόμενη σε σχετικά ανώριμη φάση στην εξέλιξη της για διασύνδεση υπεράκτιων αιολικών πάρκων με τη στεριά, επίσης χρίζει παρακολούθησης και επικαιροποίησης καθώς οι κατασκευαστές παρουσιάζουν νέες λύσεις και πολυαναμενόμενα έργα διασύνδεσης γίνονται πραγματικότητα (δημοσιεύοντας συγχρόνως τεχνικά στοιχεία που σήμερα είναι δύσκολα προσβάσιμα).

Σχετικά με τις λύσεις ικανοποίησης της λειτουργίας του υπεράκτιου σταθμού σε σφάλμα υπάρχει μεγάλο περιθώριο περαιτέρω μελέτης. Συγκεκριμένα, οι ικανότητες των ανεμογεννητριών σε σχέση με την απευθείας σηματοδότηση από εξωτερικό αίτιο για ενεργοποίηση των βοηθητικών τους φορτίων και ο έλεγχος συχνότητας σε επίπεδο ανεμογεννήτριας (με έμφαση στην ταχύτητα και τους περιορισμούς του PLL) δεν είναι δεδομένες και σίγουρα χρίζουν βελτιστοποίησης και μελέτης. Τέλος, η χρήση μικρών

βοηθητικών φορτίων στη γραμμή HVDC-VSC σε συνδυασμό με κάποια λύση περιορισμού ισχύος (πιθανώς του ελέγχου τάσης) έχει μεγάλο περιθώριο μελέτης και εξέλιξης για να αναδειχθεί ως η χρυσή τομή μεταξύ της ακριβής και σίγουρης λύσης της κατανάλωσης της περισσής ενέργειας στη γραμμή και της πιο φθηνής αλλά εξαιρετικά απαιτητικής τεχνικά λύσης του άμεσου περιορισμού ισχύος του αιολικού παραγωγού.

# 8

## *Βιβλιογραφία*

1. ABB, "It's time to connect with offshore wind supplement", διαθέσιμο στη διαδικτυακή διεύθυνση [http://www05.abb.com/global/scot/scot221.nsf/veritydisplay/1bad1970cd0766eec1257b28005757df/\\$file/Pow0038%20R6%20LR.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot221.nsf/veritydisplay/1bad1970cd0766eec1257b28005757df/$file/Pow0038%20R6%20LR.pdf)
2. AEMO-Australian Energy Market Operator, "Wind turbine plant capabilities report", διαθέσιμο στη διαδικτυακή διεύθυνση [www.aemo.com.au](http://www.aemo.com.au), 2013
3. Alstom, "HVDC for beginners and above", διαθέσιμο στη διαδικτυακή διεύθυνση [http://www.sari-energy.org/PageFiles/What\\_We\\_Do/activities/HVDC\\_Training/Presentations/Day\\_7/ALSTOM\\_HVDC\\_for\\_Beginners\\_and\\_Beyond.pdf](http://www.sari-energy.org/PageFiles/What_We_Do/activities/HVDC_Training/Presentations/Day_7/ALSTOM_HVDC_for_Beginners_and_Beyond.pdf)
4. Alstom, "HVDC-VSC: transmission technology of the future", διαθέσιμο στη διαδικτυακή διεύθυνση <http://www.alstom.com/Global/Grid/Resources/Documents/Smart%20Grid/Think-Grid-08-%20EN.pdf>
5. Alstom, "Voltage source converter, Introduction to VSC technology", διαθέσιμο στη διαδικτυακή διεύθυνση <http://www.alstom.com/Global/Grid/Resources/Documents/Voltage%20source%20converter%20Introduction%20to%20VSC%20technology.pdf>
6. Bahrman, M.P., Johansson, J.G., Nilsson, B.A., "Voltage source converter transmission technologies –The right fit for the application, Panel session on VSC Technology", Power Engineering Society General Meeting, 2003, IEEE
7. Bresesti P., Kling W.L., Hendriks R.L., Vailati, R., "HVDC Connection of Offshore Wind Farms to the Transmission System" IEEE Transactions on Energy Conversion, vol.22, no.1, pp.37,43, March 2007
8. Careri F., Genesi C., Marannino P., Montagna M., Raboni P., Rossi S., Siviero I., "Identification of the best power plant layout for large offshore wind farms connected via VSC-HVDC links", 8th International Conference on the European Energy Market (EEM), 2011 , pp.281,287, 25-27 May 2011
9. Das D., Pan J., Bala S., "HVDC Light for large offshore wind farm integration," Power Electronics and Machines in Wind Applications (PEMWA), 2012 IEEE, pp.1,7, 16-18 July 2012
10. Dorn J., Gambach H., Retzmann D., "HVDC transmission technology for sustainable power supply", 9th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices (SSD), 2012, pp.1,6, 20-23 March 2012

11. E. Larsen, G. Drobnjak, H. Elahi, "Standardization of VSC-HVDC Interface with Offshore Wind Generation", 10<sup>th</sup> International Workshop on large scale integration of wind power into power systems as well as on transmission networks for offshore wind power plants, 2011, Denmark.
12. Entso-E "Draft requirements for grid connection applicable to all generators", 2011
13. EWEA "Working Group on Grid Code Requirements –Position Paper European Grid Code Requirements for Wind Power Generation", 2008
14. EWEA "The European offshore wind industry - key trends and statistics 2013", διαθέσιμο στη διαδικτυακή διεύθυνση [www.ewea.org](http://www.ewea.org), pp10 January 2014
15. Fazeli, M., Bozhko, S.V., Asher, G.M., Yao, L. "Voltage and Frequency Control of Offshore DFIG-based Wind Farms with Line Commutated HVDC Connection", Power Electronics, Machines and Drives, 2008. PEMD 2008.
16. GWEC, Global statistics, διαθέσιμο στην διαδικτυακή διεύθυνση <http://www.gwec.net/global-figures/graphs/>, 2013
17. Haileselassie T.M., Torres-Olguin R.E., Vrana T.K., Uhlen K., Undeland T., "Main grid frequency support strategy for VSC-HVDC connected wind farms with variable speed wind turbines," PowerTech, 2011 IEEE Trondheim , pp.1,6, 19-23 June 2011
18. Hendriks Ralph, Volzke Ronald, Kling Wil, "Fault ride through strategies for VSC-connected wind parks", EWEC 2009, 16-19 March 2009 διαθέσιμο στη διαδικτυακή διεύθυνση <http://proceedings.ewea.org/ewec2009/proceedings/index.php>
19. Harnefors L., Jiang-Häfner Y., Hyttinen M., and Jonsson T., "Ride-Through Methods for Wind Farms Connected to the Grid via a VSCHVDC Transmission" διαθέσιμο στη διαδικτυακή διεύθυνση <http://www.abb.com>.
20. Hongzhi Liu, Zhe Chen, "Fault ride-through and grid support of permanent magnet synchronous generator-based wind farms with HVAC and VSC-HVDC transmission systems", Energy Conference and Exhibition (ENERGYCON), 2012 IEEE International , pp.769,773, 9-12 Sept. 2012
21. HVDC Light- A Preferable Power Transmission System for Renewable Energies André Bodin
22. Kong Xiangyu, Jia Hongjie, "Techno-Economic Analysis of SVC-HVDC Transmission System for Offshore Wind", Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2011, pp.1,5, 25-28 March 2011
23. María Paz Comech, Miguel García-Gracia, Susana Martín Arroyo and Miguel Ángel Martínevz Guillén (2011), "Wind Farms and Grid Codes, From Turbine to Wind

- Farms - Technical Requirements and Spin-Off Products”, InTech, <http://www.intechopen.com/books/from-turbine-to-wind-farms-technical-requirements-and-spin-off-products/wind-farms-and-grid-codes>
24. Marques M., Castro R., Almeida M. E., "Connection of offshore wind parks: HVAC and HVDC-LCC links with STATCOM", 11th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation (EPQU), 2011, pp.1,6, 17-19 Oct. 2011
  25. Martinez de Alegria I., Martin J.L., Andreu J., Camblong H., Ibanez P., "Tapping wind turbines to HVDC lines", 13th European Conference on Power Electronics and Applications, 2009. EPE '09 pp.1,6, 8-10 Sept. 2009
  26. Miao Z., Fan L., Osborn D., Yuvarajan S., "Wind farms with HVDC delivery in inertial response and primary frequency control", IEEE, pp1171-1178, 2010
  27. Michael Bahrman P.E. ABB, "Offshore Wind Connections HVDC for Offshore Grids", Grid Systems, UWIG Technical Workshop, Maui, October 2011
  28. Morton A.B., Cowdroy S., Hill J. R A, Halliday M., Nicholson G.D., "AC or DC? Economics of grid connection design for offshore wind farms", The 8th IEE International Conference on AC and DC Power Transmission, 2006. ACDC 2006., pp.236,240, 28-31 March 2006
  29. Muyeen, S.M., Takahashi, R., Tamura, J. "Operation and Control of HVDC-Connected Offshore Wind Farm", IEEE Transactions on Sustainable Energy, (Volume:1 , Issue: 1 ), April 2010, Page(s): 30 – 37
  30. Nanou S., Papathanasiou S., "Evaluation of a communication-based fault ride through scheme for offshore wind farms connected through VSC-HVDC links", EWEA, 2014
  31. Patsakis G, "Διερεύνηση Συμβατότητας με Κώδικες Συστήματος Θαλάσσιων Αιολικών Πάρκων Διασυνδεδεμένων μέσω Συνδέσμων HVDC", 2013
  32. Phulpin Y, "Communication free inertia and frequency control for wind generators connected by an HVDC-Link", IEEE, pp1136-1137, 2012
  33. Sandeberg P., Stendius L., "Large scale offshore wind power energy evacuation by HVDC Light", EWEC 2008, διαθέσιμο στη διαδικτυακή διεύθυνση [http://www05.abb.com/global/scot/scot221.nsf/veritydisplay/ba91daab7c7f5f8dc125747a0051a5dc/\\$file/large%20scale%20offshore%20wind%20power%20energy%20evacuation%20by%20hvdc%20light.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot221.nsf/veritydisplay/ba91daab7c7f5f8dc125747a0051a5dc/$file/large%20scale%20offshore%20wind%20power%20energy%20evacuation%20by%20hvdc%20light.pdf)
  34. Sharma R., Rasmussen T.W., Jensen K.H., Akamatov V., "Modular VSC converter based HVDC power transmission from offshore wind power plant: Compared to the conventional HVAC system" Electric Power and Energy Conference (EPEC), 2010 IEEE, pp.1,6, 25-27 Aug. 2010

35. Siemens, "HVDC Plus-Basics and Principle of operation", διαθέσιμο στη διαδικτυακή διεύθυνση [http://www.energy.siemens.com/nl/pool/hq/power-transmission/HVDC/HVDC\\_Plus\\_Basics\\_and\\_Principle.pdf](http://www.energy.siemens.com/nl/pool/hq/power-transmission/HVDC/HVDC_Plus_Basics_and_Principle.pdf)
36. Spahic E., Balzer G., "Offshore wind farms - VSC-based HVDC connection", Power Tech, 2005 IEEE Russia , pp.1,6, 27-30 June 2005
37. Spahic E.; Balzer G., "Impact of the VSC HVDC Connection of Large Offshore Wind Farms on Power System Stability and Control", Power Tech, 2007 IEEE Lausanne, pp.207,212, 1-5 July 2007
38. TenneT TSO GmbH, "Grid Code-High and extra high voltage", 2012, διαθέσιμο στη διαδικτυακή διεύθυνση [www.TenneT.eu](http://www.TenneT.eu)
39. TenneT TSO GmbH, "Requirements for Offshore Grid Connections in the Grid of TenneT TSO GmbH", 2010, διαθέσιμο στη διαδικτυακή διεύθυνση [www.TenneT.eu](http://www.TenneT.eu)
40. Ubiquiti, "AirFiber design guide", διαθέσιμο στη διαδικτυακή διεύθυνση [www.ubnt.com](http://www.ubnt.com)
41. Vestas, "Grid Code Comparison Report", εσωτερική τεχνική έκθεση, 2012
42. Willi Christiansen & David T. Johnsen "Analysis of requirements in selected Grid Codes", Report submitted to Ørsted•DTU, Section of Electric power Engineering, 2006
43. Zhu J., Booth C., Adam G., Roscoe A., Bright C., "Inertia emulation control strategy for VSC-HVDC transmission systems", IEEE, pp1277-1287, 2013



*(Υπογραφή)*

.....

**ΜΑΡΙΟΣ ΖΑΓΓΑΣ**

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

© 2014 – All rights reserved