



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

**Συμβολή στην Ανάπτυξη Τεχνικών Ελέγχου για Συστήματα  
Διασύνδεσης Υψηλής Τάσης, Συνεχούς Ρεύματος, Τύπου Πηγής  
Τάσης (VSC-HVDC), Θαλάσσιων Αιολικών Πάρκων και Νησιών**

**ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ**

Σωτήριος Ι. Νάνου

Αθήνα, Ιούλιος 2016





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


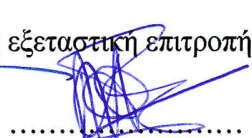
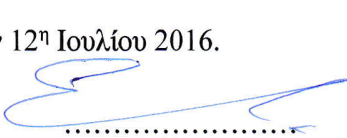
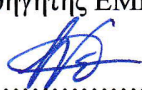

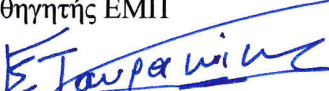
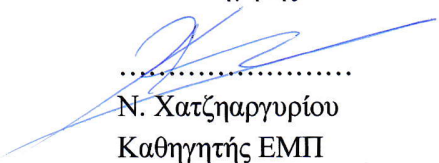
**Συμβολή στην Ανάπτυξη Τεχνικών Ελέγχου για Συστήματα  
Διασύνδεσης Υψηλής Τάσης, Συνεχούς Ρεύματος, Τύπου Πηγής  
Τάσης (VSC-HVDC), Θαλάσσιων Αιολικών Πάρκων και Νησιών**

**ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ**

**Σωτήριος Ι. Νάνου**

**Συμβουλευτική Επιτροπή:** Σταύρος Α. Παπαθανασίου (Επιβλέπων)  
Αντώνιος Κλαδάς  
Στέφανος Μανιάς

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την 12<sup>η</sup> Ιουλίου 2016.

 ..... Σ. Παπαθανασίου Αναπ. Καθηγητής ΕΜΠ	 ..... Α. Κλαδάς Καθηγητής ΕΜΠ	 ..... Σ. Μανιάς Καθηγητής ΕΜΠ
 ..... Π. Γεωργιάκης Επ. Καθηγητής ΕΜΠ	 ..... Γ. Κορρές Καθηγητής ΕΜΠ	 ..... Γ. Σταυρακάκης Καθηγητής Πολυτεχνείου Κρήτης
 ..... Ν. Χατζηαργυρίου Καθηγητής ΕΜΠ		

Αθήνα, Ιούλιος 2016

Η παρούσα διατριβή υποστηρίχτηκε από το Πρόγραμμα «Υποτροφίες Αριστείας Ι.Κ.Υ. Μεταπτυχιακών Σπουδών στην Ελλάδα – Πρόγραμμα SIEMENS»

.....

Σωτήριος Ι. Νάνου

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

Copyright © Σωτήριος Ι. Νάνου, 2016.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

## Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας διατριβής είναι η συμβολή στη μεταβατική μοντελοποίηση και στην ανάπτυξη τεχνικών ελέγχου συστημάτων διασύνδεσης υψηλής τάσης, συνεχούς ρεύματος, τύπου πηγής τάσης (VSC-HVDC), για εφαρμογές διασύνδεσης θαλάσσιων αιολικών πάρκων (ΘΑΠ) και νησιωτικών συστημάτων με το ηπειρωτικό σύστημα. Η διατριβή κινήθηκε σε τέσσερις βασικούς άξονες: (α) στην ανάπτυξη δυναμικών μοντέλων προσομοίωσης υπεράκτιων ανεμογεννητριών (Α/Γ) και μετατροπέων ισχύος HVDC πολλαπλών επιπέδων, (β) στη συγκριτική αξιολόγηση εναλλακτικών τεχνικών επίτευξης αδιάλειπτης λειτουργίας και απόκρισης συχνότητας σε ακτινική διασύνδεση VSC-HVDC ενός ΘΑΠ, (γ) στη διερεύνηση της ικανότητας συγχρονισμού ενός συνδέσμου VSC-HVDC που συνδέεται σε νησιωτικό σύστημα με συνύπαρξη πολλαπλών πηγών ηλεκτροδότησης, και (δ) στον έλεγχο πολυτεματικών δικτύων VSC-HVDC, τόσο σε συνθήκες μόνιμης κατάστασης όσο και σε μεταβατικές συνθήκες.

Αρχικά, παρουσιάζονται τα μεταβατικά μοντέλα και οι παραλλαγές ελέγχου που αναπτύχθηκαν για μετατροπείς HVDC, ανάλογα με την εξεταζόμενη εφαρμογή. Παρουσιάζονται αποτελέσματα προσομοιώσεων με στόχο την αξιολόγηση της δυναμικής συμπεριφοράς ακτινικής διασύνδεσης VSC-HVDC, και την επικύρωση των απλοποιημένων μοντέλων μέσης τιμής. Ακολούθως, η ανάλυση επικεντρώνεται στη συγκριτική αξιολόγηση εναλλακτικών τεχνικών ελέγχου υπεράκτιων Α/Γ και μετατροπέων VSC-HVDC, με στόχο την επίτευξη αδιάλειπτης λειτουργίας και απόκρισης συχνότητας. Εξετάζονται συμβατικές τεχνικές ελέγχου που έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία, αλλά και μια νέα στρατηγική ελέγχου που προτείνεται στην παρούσα διατριβή για το σύστημα ΘΑΠ-υπεράκτιου μετατροπέα HVDC. Στη συνέχεια, η ανάλυση επικεντρώνεται στη διερεύνηση της ικανότητας συγχρονισμού ενός νησιωτικού μετατροπέα VSC-HVDC σε οποιαδήποτε πιθανή κατάσταση λειτουργίας, όπως πχ σε παράλληλη λειτουργία με εξωτερική διασύνδεση εναλλασσόμενου ρεύματος (EP) ή/και τοπική συμβατική παραγωγή, καθώς και κατά τη μετάβαση σε λειτουργία παθητικού συστήματος.

Το τελευταίο μέρος της διατριβής αφορά στην ανάλυση πολυτεματικών δικτύων HVDC σε συνθήκες μόνιμης κατάστασης αλλά και σε μεταβατικές συνθήκες λειτουργίας. Πραγματοποιείται συγκριτική αξιολόγηση εναλλακτικών τεχνικών ελέγχου ισχύος-τάσης με ανάλυση ροής ισχύος, και στη συνέχεια εξετάζεται η ικανότητα αδιάλειπτης λειτουργίας του πολυτεματικού δικτύου σε συνθήκες σφάλματος, καθώς και η συμβολή του στη ρύθμιση συχνότητας του ηπειρωτικού συστήματος.

## Λέξεις κλειδιά

Τεχνολογία υψηλής τάσης συνεχούς ρεύματος, μετατροπέας τύπου πηγής τάσης, διασυνδέσεις νησιών, πολυτεματικά δίκτυα συνεχούς ρεύματος, αιολική ενέργεια, μεταβατική μοντελοποίηση, κώδικες συστήματος, αδιάλειπτη λειτουργία σε συνθήκες σφάλματος, έλεγχος συγχρονισμού ισχύος, απόκριση συχνότητας, αδρανειακή απόκριση, έλεγχος στατισμού, βέλτιστη ροή ισχύος.



## **Abstract**

The main contribution of this PhD thesis lies in the field of modeling and control of offshore wind farms and island systems interconnected via high voltage direct current links based on voltage source converters (VSC-HVDC). The selected research topics include: (a) development of dynamic simulation models for offshore wind turbines and multilevel HVDC VSCs, (b) comparative assessment of alternative control techniques, applicable to VSC-HVDC connected offshore wind farms, in order to achieve fault ride-through and frequency response capabilities, (c) evaluation of control schemes for VSC-HVDC links connected to island systems, where a multitude of generating units might operate in parallel, such as an external ac interconnector along with conventional local generation, and (d) modeling and control of multi-terminal HVDC (MTDC) grids, under steady-state and transient conditions.

In the first part of the thesis, the dynamic models and the relevant controllers are presented for VSC-HVDC links, in order to evaluate their dynamic response as well as to validate the developed average-value converter models, compared with the detailed switching models. Then, particular emphasis is placed on the ability of a VSC-HVDC connected offshore wind farm to meet present day grid code requirements, such as fault ride-through and frequency response. Conventional control techniques are tested, whereas a novel control scheme is also proposed in this thesis, particularly tailored to the offshore wind turbines and the offshore HVDC converter, which manages to achieve grid code compatibility solely via offshore frequency modulation. The analysis is then extended to island VSC-HVDC interconnectors, where the main objective is to design a suitable control scheme for the island VSC, yielding a stable response under severe contingency events, such as the sudden loss of the external ac interconnector or the local power station, which could lead from non-islanded to passive network operation.

The last part of the thesis deals with optimal power flow analysis of multi-terminal HVDC grids, as well as with dynamic modeling of the MTDC grid, in order to evaluate its fault ride-through response and its contribution to frequency regulation, selecting study-cases which include the connection of the MTDC grid to a single or even to asynchronous ac grids.

## **Keywords**

High voltage direct current, voltage source converter, island interconnectors, multi-terminal direct current grid, wind power, dynamic modeling, grid codes, fault ride-through, power synchronization control, frequency response, inertial response, droop control, optimal power flow.





## Ευχαριστίες

Η παρούσα διατριβή αποτελεί αντικείμενο ερευνητικής προσπάθειας πέντε ετών, από τον Νοέμβριο του 2011 έως σήμερα, και εκπονήθηκε υπό την επίβλεψη του κ. Σταύρου Παπαθανασίου, Αναπληρωτή Καθηγητή ΕΜΠ.

Το μεγαλύτερο ευχαριστώ το οφείλω στον επιβλέποντα της διατριβής μου κ. Σταύρο Παπαθανασίου, τον οποίο είχα την τύχη να γνωρίσω από τις προπτυχιακές σπουδές. Αισθάνομαι ευγνώμων, καθώς με οδήγησε όχι μόνο στο να ακολουθήσω το μονοπάτι της ερευνητικής δραστηριότητας, αλλά και στην επιλογή ενός ερευνητικού θέματος αιχμής για το επάγγελμα του Ηλεκτρολόγου Μηχανικού. Η μετέπειτα πολυετής και υποδειγματική καθοδήγησή του ως προς τον τρόπο ανάδειξης και αντιμετώπισης ενός ανοιχτού ερευνητικού προβλήματος προς επίλυση, αναμφίβολα αποτέλεσε βασικό παράγοντα για την επιτυχή περάτωση της παρούσας διατριβής. Τον ευχαριστώ για τη διαρκή εμπιστοσύνη και την έμπρακτη στήριξή του προς το πρόσωπό μου.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω θερμά και τα άλλα δύο μέλη της συμβουλευτικής μου επιτροπής, τους Καθηγητές ΕΜΠ κκ. Αντώνιο Κλαδά και Στέφανο Μανιά, για την ένθερμη υποστήριξη και την προθυμία τους να με βοηθήσουν κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διατριβής. Ευχαριστώ επίσης και τον Καθηγητή ΕΜΠ κ. Κωνσταντίνο Βουρνά, για τη δυνατότητα που μου προσέφερε να ασχοληθώ κατά τις προπτυχιακές σπουδές μου με το αντικείμενο της ευστάθειας ΣΗΕ υπό αυξημένη αιολική διείσδυση.

Εκ βαθέων οφείλω να ευχαριστήσω τον Ομότιμο Καθηγητή ΕΜΠ κ. Μιχαήλ Παπαδόπουλο, καθώς είχα την τιμή να συνεργαστώ μαζί του κυρίως τα τελευταία έτη εκπόνησης της διατριβής. Οι αμέτρητες συζητήσεις που είχα και συνεχίζω να έχω μαζί του σε άκρως επίκαιρα ζητήματα ενεργειακού ενδιαφέροντος για τα ελληνικά δεδομένα, με βοήθησαν στο να διευρύνω σημαντικά το γνωστικό μου αντικείμενο. Αποτελεί παράδειγμα για όλους μας το δραστήριο και ανήσυχο πνεύμα του.

Δε θα μπορούσα να παραλείψω τη συνεισφορά των συναδέλφων Ιωάννη Σφακιανάκη, Γεώργιου Πατσάκη, Ορέστη Τζορτζόπουλου, Μάριου Ζάγγα, Αργύρη Σπετσιώτη, Παναγιώτη Μενεγάτου, Αποστόλη Παπακωνσταντίνου, και Ελένης Νάκου, καθώς μέσω της γόνιμης συνεργασίας που είχαμε στα πλαίσια εκπόνησης των Διπλωματικών/Μεταπτυχιακών τους εργασιών, τέθηκαν προβληματισμοί-ορόσημα για τη συνέχιση της ερευνητικής μου δραστηριότητας σε ορισμένα από τα θέματα της παρούσας διατριβής.

Ευχαριστώ τους γονείς μου Ιωάννη και Διονυσία και τον αδερφό μου Χαρίλαο, για την αμέριστη συμπαράσταση και τη διαρκή ηθική στήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ το οφείλω στη σύντροφό μου Ιφιγένεια, όχι μόνο για την υποστήριξη και κατανόησή της, αλλά και για το κοινό όραμα που μοιραζόμαστε.

*Σωτήριος Νάνου  
Ιούνιος 2016*



## Περιεχόμενα

Συνομεύσεις – Ακρωνύμια .....	17
Αντιστοίχιση Αγγλικών-Ελληνικών Όρων .....	19
Αντιστοίχιση Ελληνικών-Αγγλικών Όρων .....	21
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	23
1.1 Τεχνολογία HVDC .....	23
1.1.1 Εισαγωγή .....	23
1.1.2 Τεχνολογία διασύνδεσης CSC-HVDC.....	23
1.1.3 Τεχνολογία διασύνδεσης VSC-HVDC.....	24
1.2 Κώδικες Συστήματος.....	28
1.2.1 Εισαγωγή .....	28
1.2.2 Αδιάλειπτη λειτουργία σε συνθήκες σφάλματος .....	28
1.2.3 Έλεγχος συχνότητας και ενεργού ισχύος.....	29
1.2.4 Ρύθμιση συντελεστή ισχύος.....	30
1.3 Επισκόπηση βιβλιογραφίας .....	32
1.4 Αντικείμενο – Δομή διατριβής .....	35
2 ΔΥΝΑΜΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΘΑΠ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΗΣ VSC-HVDC .....	39
2.1 Τοπολογία και αρχές ελέγχου εξεταζόμενου ΘΑΠ με σύστημα διασύνδεσης VSC-HVDC.....	39
2.1.1 Εισαγωγή .....	39
2.1.2 Αρχές ελέγχου επίγειου σταθμού μετατροπής dc/ac.....	39
2.1.3 Αρχές ελέγχου υπεράκτιου σταθμού μετατροπής dc/ac.....	40
2.2 Μοντέλο A/Γ με σύστημα μετατροπέων πλήρους ισχύος.....	42
2.3 Μοντέλο πολυεπίπεδου μετατροπέα τύπου πηγής τάσης για εφαρμογές HVDC .....	45
2.3.1 Δομή και αρχές λειτουργίας .....	45
2.3.2 Κυκλωματική ανάλυση .....	50
2.3.3 Σύστημα ελέγχου μετατροπέα MMC .....	55
2.3.4 Επιλογή παραμέτρων στο αναλυτικό μοντέλο του μετατροπέα MMC.....	59
2.3.5 Μοντέλο μέσης τιμής μετατροπέα MMC.....	61
3 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΩΝ MMC .....	65

3.1	Εισαγωγή .....	65
3.2	Τοπολογία εξεταζόμενου συστήματος .....	65
3.3	Συστήματα ελέγχου σταθμών μετατροπής dc/ac.....	66
3.3.1	Περιγραφή σχημάτων ελέγχου .....	66
3.3.2	Κανόνες ρύθμισης κερδών ελεγκτών .....	67
3.4	Συγκριτική αξιολόγηση μεταβατικών μοντέλων μετατροπέων MMC.....	74
3.4.1	Απόκριση συστήματος MMC-HVDC σε αντιστροφή ροής ισχύος.....	74
3.4.2	Απόκριση συστήματος MMC-HVDC σε διαταραχές δικτύου.....	79
4	<b>ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΜΒΑΤΙΚΩΝ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ ΓΙΑ ΤΗ ΣΥΜΒΑΤΟΤΗΤΑ ΘΑΠ ΜΕ ΚΩΔΙΚΕΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ .....</b>	<b>83</b>
4.1	Διερεύνηση αδιάλειπτης λειτουργίας ΘΑΠ με αποστολή εντολής περιορισμού ισχύος 83	
4.1.1	Εισαγωγή .....	83
4.1.2	Περιγραφή στρατηγικής ελέγχου FRT .....	84
4.1.3	Μοντέλο μικρού σήματος ΘΑΠ – συστήματος διασύνδεσης VSC-HVDC.....	86
4.1.4	Παραμετρική ανάλυση αδιάλειπτης λειτουργίας ΘΑΠ σε συνθήκες σφάλματος..	89
4.1.5	Αποτελέσματα προσομοιώσεων.....	91
4.2	Διερεύνηση αδιάλειπτης λειτουργίας ΘΑΠ με τεχνητή βύθιση τάσης .....	96
4.2.1	Απόκριση σε 3Φ σφάλμα δικτύου.....	96
4.2.2	Επίδραση ρυθμού αύξησης ισχύος μετά την εκκαθάριση του σφάλματος .....	98
4.3	Διερεύνηση αδιάλειπτης λειτουργίας ΘΑΠ με τεχνητή αύξηση συχνότητας .....	100
4.4	Διερεύνηση συμβολής ΘΑΠ στη ρύθμιση συχνότητας του ηπειρωτικού συστήματος 102	
4.4.1	Επίδραση ελέγχου στατισμού.....	104
4.4.2	Επίδραση ελέγχου αδρανειακής απόκρισης.....	106
4.4.3	Επίδραση επιπέδου εφεδρείας ισχύος .....	107
4.4.4	Επίδραση χρονικής καθυστέρησης τηλεπικοινωνιακού μέσου αποστολής μεταβολών συχνότητας .....	109
5	<b>ΣΥΜΒΑΤΟΤΗΤΑ ΘΑΠ ΜΕ ΚΩΔΙΚΕΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕ ΕΛΕΓΧΟ ΣΥΓΧΡΟΝΙΣΜΟΥ ΙΣΧΥΟΣ .....</b>	<b>111</b>
5.1	Εισαγωγή .....	111
5.2	Φιλοσοφία ελέγχου συγχρονισμού ισχύος.....	111
5.2.1	Φυσικός μηχανισμός συγχρονισμού ισχύος σε ac συστήματα.....	111

5.2.2	Έλεγχος συγχρονισμού ισχύος σε υπεράκτιες Α/Γ και ανάλυση στο πεδίο της συχνότητας .....	113
5.2.3	Ενσωμάτωση ελεγκτή συγχρονισμού ισχύος στο σχήμα ελέγχου υπεράκτιων Α/Γ	119
5.3	Ρυθμιστής συχνότητας λειτουργίας υπεράκτιου μετατροπέα HVDC .....	122
5.4	Διερεύνηση ικανότητας αδιάλειπτης λειτουργίας ΘΑΠ με έλεγχο συγχρονισμού ισχύος	124
5.4.1	Απόκριση σε 3Φ σφάλμα δικτύου.....	124
5.4.2	Επίδραση ρυθμού αύξησης ισχύος μετά την εκκαθάριση του σφάλματος .....	126
5.5	Διερεύνηση συμβολής ΘΑΠ στη ρύθμιση συχνότητας του ηπειρωτικού συστήματος με έλεγχο συγχρονισμού ισχύος.....	127
5.5.1	Συγκριτική αξιολόγηση ελεγκτών συχνότητας .....	127
5.5.2	Επίδραση ελέγχου στατισμού.....	129
5.5.3	Επίδραση ελέγχου αδρανειακής απόκρισης.....	130
5.5.4	Επίδραση επιπέδου εφεδρείας ισχύος .....	132
6	ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΥΓΧΡΟΝΙΣΜΟΥ ΙΣΧΥΟΣ ΣΕ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ MMC-HVDC ΝΗΣΙΩΤΙΚΩΝ ΣΗΕ ΜΕ ΣΥΝΥΠΑΡΞΗ ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΗΣ ΕΡ.....	135
6.1	Εισαγωγή .....	135
6.2	Εξεταζόμενη τοπολογία και σχήματα ελέγχου .....	136
6.3	Απόκριση νησιωτικού ΣΗΕ σε μεταβολές φορτίου .....	140
6.4	Απόκριση νησιωτικού ΣΗΕ σε απώλεια παραγωγής.....	142
6.5	Βελτίωση απόκρισης νησιωτικού μετατροπέα MMC-HVDC με εικονική αδράνεια .	144
7	ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ ΣΕ ΠΟΛΥ-ΤΕΡΜΑΤΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ VSC-HVDC	147
7.1	Εισαγωγή .....	147
7.2	Τεχνικές ελέγχου ρύθμισης ισχύος – τάσης σε MTDC δίκτυα .....	148
7.2.1	Έλεγχος λειτουργίας κύριου-ακόλουθου (master – slave).....	149
7.2.2	Έλεγχος περιθωρίου τάσης (voltage margin).....	150
7.2.3	Έλεγχος στατισμού τάσης (voltage droop) .....	152
7.2.4	Έλεγχος στατισμού με νεκρή ζώνη (voltage droop with dead-band).....	152
7.2.5	Ενσωμάτωση χαρακτηριστικών ισχύος –τάσης στο σύστημα ελέγχου του μετατροπέα HVDC.....	153
7.3	Ανάλυση μόνιμης κατάστασης τεχνικών ελέγχου ισχύος – τάσης σε δοκιμαστικό MTDC δίκτυο διασύνδεσης νησιών.....	154

7.3.1	Εισαγωγή .....	154
7.3.2	Συγκριτικά αποτελέσματα Στρατηγικών I-III .....	159
7.4	Ανάπτυξη μεθοδολογίας βέλτιστης ρύθμισης ισχύος-τάσης σε MTDC δίκτυα.....	162
7.4.1	Εισαγωγή .....	162
7.4.2	Περιγραφή προβλήματος βέλτιστης ροής ισχύος.....	163
7.4.3	Εφαρμογή μεθοδολογίας σε δοκιμαστικό MTDC δίκτυο διασύνδεσης νησιών ..	165
7.4.4	Συγκριτικά αποτελέσματα στρατηγικών ελέγχου ισχύος-τάσης.....	170
7.4.5	Επίδραση συντελεστών βαρύτητας στην επίδοση της βέλτιστης ροής ισχύος ....	173
7.5	Διερεύνηση ικανότητας αδιάλειπτης λειτουργίας MTDC δικτύων σε συνθήκες σφάλματος του ηπειρωτικού συστήματος.....	175
7.5.1	Εισαγωγή .....	175
7.5.2	Απόκριση MTDC δικτύου σε τριφασική βύθισης τάσης στο ΕΣΜΗΕ.....	176
7.6	Διερεύνηση συμβολής MTDC δικτύων στη ρύθμιση συχνότητας του ηπειρωτικού συστήματος.....	179
7.6.1	Εισαγωγή .....	179
7.6.2	Επίδραση λειτουργιών ρύθμισης συχνότητας ΘΑΠ .....	180
7.6.3	Επίδραση κέρδους στατισμού dc τάσης των επίγειων μετατροπέων .....	184
7.7	Διερεύνηση συμβολής MTDC δικτύων στη ρύθμιση συχνότητας ασύγχρονων ΣΗΕ	185
7.7.1	Εισαγωγή .....	185
7.7.2	Προτεινόμενη τεχνική απόκρισης συχνότητας MTDC δικτύου που συνδέεται σε ασύγχρονα ΣΗΕ.....	186
7.7.3	Απόκριση MTDC δικτύου σε διαταραχές συχνότητας του ενός ΣΗΕ.....	189
7.7.4	Απόκριση MTDC δικτύου σε ταυτόχρονες διαταραχές συχνότητας των ασύγχρονων ΣΗΕ	191
8	ΣΥΝΟΨΗ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	195
8.1.1	Ανακεφαλαίωση .....	195
8.1.2	Τελικά συμπεράσματα.....	196
8.1.3	Πρωτοτυπία – Συμβολή.....	201
8.1.4	Προεκτάσεις .....	203
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΜΕΤΑΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ PARK.....	205
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: ΕΞΑΓΩΓΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ $J_{p\theta}(s)$ ΚΑΙ $J_{q1}(s)$ , ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΜΙΚΡΟΥ ΣΗΜΑΤΟΣ.....	207
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ .....	211

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ: ΤΙΜΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΕΛΕΓΚΤΩΝ.....	213
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	215
ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ ΤΟΥ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ .....	227





## Συντομεύσεις – Ακρωνύμια

AGC	Automatic Generation Control
AVM	Average Value Model
CSC	Current Source Converter
DSOGI	Double Second Order Generalized Integrator
EMT	Electromagnetic Transient
ENTSO-E	European Network of Transmission System Operators for Electricity
FCWT	Full Converter Wind Turbine
FRT	Fault Ride-Through
GSC	Grid Side Converter
HVAC	High Voltage Alternating Current
HVDC	High Voltage Direct Current
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
MMC	Modular Multilevel Converter
MPPT	Maximum Power Point Tracking
MSC	Machine Side Converter
MTDC	Multi-terminal Direct Current
NLC	Nearest Level Control
NPC	Neutral Point Clamped
NS	Negative Sequence
OPF	Optimal Power Flow
PD-SPWM	Phase Disposition – Sinusoidal Pulse Width Modulation
PI	Proportional Integral
PLL	Phase Locked Loop
PMSG	Permanent Magnet Synchronous Generator
PS	Positive Sequence
PSC	Power Synchronization Control
PSS	Power System Stabilizer
PWM	Pulse Width Modulation
REC	Receiving End Converter
RFO	Rotor Field Oriented
ROCOF	Rate Of Change Of Frequency
SCR	Short Circuit Ratio
SEC	Sending End Converter
SHE-PWM	Selective Harmonic Elimination Pulse Width Modulation
SM	Submodule
SPWM	Sinusoidal Pulse Width Modulation
SRF	Synchronous Reference Frame
STATCOM	Static Synchronous Compensator
SVC	Static Var Compensator
SVPWM	Space Vector Pulse Width Modulation

THD	Total Harmonic Distortion
TSO	Transmission System Operator
VSC	Voltage Source Converter
WF	Wind Farm
WT	Wind Turbine
WTCU	Wind Turbine Control Unit
A/Γ	Ανεμογεννήτρια
A/Π	Αιολικό Πάρκο
ΑΔΜΗΕ	Ανεξάρτητος Διαχειριστής Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας
ΑΠΕ	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας
ΑΡΤ	Αυτόματος Ρυθμιστής Τάσης
ΔΠΑ	Δεκαετές Πρόγραμμα Ανάπτυξης
ΕΡ	Εναλλασσόμενο Ρεύμα
ΕΣΜΗΕ	Ελληνικό Σύστημα Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας
ΗΕΔ	Ηλεκτρεγερτική Δύναμη
ΘΑΠ	Θαλάσσιο Αιολικό Πάρκο
ΚΥΤ	Κέντρο Υπερυψηλής Τάσης
Μ/Σ	Μετασχηματιστής
ΜΕΚ	Μηχανή Εσωτερικής Καύσης
ΜΤ	Μέση Τάση
ΝΖ	Νεκρή Ζώνη
ΝΤΚ	Νόμος Τάσεων Kirchhoff
ΡΑΕ	Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας
ΣΗΕ	Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας
ΣΜ	Σύγχρονη Μηχανή
ΥΤ	Υψηλή Τάση

## Αντιστοίχιση Αγγλικών-Ελληνικών Όρων

Arm	Βραχίονας ή υποσκέλος
Asynchronous grids	Ασύγχρονα δίκτυα
Automatic generation control	Αυτόματο σύστημα ρύθμισης παραγωγής
Average value model	Μοντέλο μέσης τιμής
Bandwidth	Εύρος ζώνης
Boxplot	Θηκόγραμμα
Capacitor voltage balancing	Εξισορρόπηση τάσης πυκνωτών
Current controller	Ελεγκτής ρεύματος
Current source converter	Μετατροπέας πηγής ρεύματος
DC chopper resistor	Βοηθητικό dc φορτίο κατανάλωσης ισχύος
Damping controller	Ελεγκτής απόσβεσης
Damping factor	Συντελεστής απόσβεσης
Dead band	Νεκρή ζώνη
Decoupling term	Όρος αποσύζευξης
Droop response	Απόκριση στατισμού
EMT model	Διακοπτικό μοντέλο
Fault ride-through	Αδιάλειπτη λειτουργία σε συνθήκες σφάλματος
Feed-forward term	Όρος πρόσω-τροφοδότησης
Frequency response	Απόκριση συχνότητας
Full converter wind turbine	Ανεμογεννήτρια με μετατροπέα πλήρους ισχύος
Fundamental frequency model	Μοντέλο θεμελιώδους συχνότητας
Grid code compatibility	Συμβατότητα με κώδικες συστήματος
Grid side converter	Μετατροπέας πλευράς δικτύου
Inertia response	Αδρανειακή απόκριση
Insulated gate bipolar transistor	Διπολικό τρανζίστορ με μονωμένη πύλη
Linearized small-signal model	Γραμμικοποιημένο μοντέλο μικρού σήματος
Low-pass filter	Βαθυπερατό φίλτρο
Machine side converter	Μετατροπέας πλευράς γεννήτριας
Master – slave control	Έλεγχος κύριου – ακόλουθου
Maximum Power Point Tracking	Μέγιστη Απολαβή Ισχύος
Modular multilevel converter	Μετατροπέας πολλαπλών επιπέδων με χρήση υπομονάδων
Modulation index	Συντελεστής διαμόρφωσης
Multi-terminal DC grid	Πολυτερματικό δίκτυο συνεχούς ρεύματος
Nearest level control	Έλεγχος πλησιέστερου επιπέδου
Negative sequence	Αρνητική ακολουθία
Neutral point clamped converter	Μετατροπέας ουδέτερου σημείου με διόδους περιορισμού
Notch filter	Φίλτρο εγκοπής
Offshore grid	Υπεράκτιο δίκτυο

Onshore grid	Ηπειρωτικό δίκτυο
Optimal power flow	Βέλτιστη ροή ισχύος
Permanent magnet synchronous generator	Σύγχρονη γεννήτρια μονίμων μαγνητών
Phase disposition sinusoidal PWM	Ημιτονοειδής διαμόρφωση εύρους παλμών με πολλαπλά φέροντα μετατεθειμένα κατά πλάτος
Phase locked loop	Διάταξη κλειδώματος φάσης
Phase margin	Περιθώριο φάσης
Phasor simulation	Προσομοίωση με χρήση φασιθετών
Point-to-point interconnection	Ακτινική διασύνδεση
Positive sequence	Θετική ακολουθία
Power synchronization control	Έλεγχος συγχρονισμού ισχύος
Power synchronization loop	Βρόχος συγχρονισμού ισχύος
Power system stabilizer	Σταθεροποιητής ταλαντώσεων ισχύος
Proportional-integral controller	Αναλογικός-ολοκληρωτικός ελεγκτής
Pulse width modulation	Διαμόρφωση εύρους παλμών
Rate of change of frequency	Ρυθμός μεταβολής συχνότητας
Receiving end converter	Ηπειρωτικός μετατροπέας θαλάσσιου αιολικού πάρκου
Rolling window	Κυλιόμενο παράθυρο
Rotor field oriented	Προσανατολισμένο πεδίο δρομέα
Second order generalized integrator	Γενικευμένος ολοκληρωτής δεύτερης τάξης
Selective harmonic elimination PWM	Διαμόρφωση εύρους παλμών με επιλεκτική εξάλειψη αρμονικών
Sending end converter	Υπεράκτιος μετατροπέας θαλάσσιου αιολικού πάρκου
Short circuit ratio	Λόγος βραχυκύκλωσης
Sinusoidal pulse width modulation	Ημιτονοειδής διαμόρφωση εύρους παλμών
Space vector PWM	Διαμόρφωση εύρους παλμών με χρήση διανυσμάτων χώρου
Static synchronous compensator	Στατός σύγχρονος αντισταθμιστής
Static Var compensator	Στατός αντισταθμιστής αέργου ισχύος
Submodule	Υπομονάδα
Symmetric monopole	Συμμετρικό μονόπολο
Synchronous reference frame	Σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς
Total harmonic distortion	Συντελεστής αρμονικής παραμόρφωσης
Virtual inertia	Εικονική αδράνεια
Voltage droop	Στατισμός τάσης
Voltage margin	Περιθώριο τάσης
Voltage source converter	Μετατροπέας πηγής τάσης
VSC-HVDC link	Σύνδεσμος VSC-HVDC
Washout filter	Υψιπερατό φίλτρο

## Αντιστοίχιση Ελληνικών-Αγγλικών Όρων

Αδιάλειπτη λειτουργία σε συνθήκες σφάλματος	Fault ride-through
Αδρανειακή απόκριση	Inertia response
Ακτινική διασύνδεση	Point-to-point interconnection
Αναλογικός-ολοκληρωτικός ελεγκτής	Proportional-integral controller
Ανεμογεννήτρια με μετατροπέα πλήρους ισχύος	Full converter wind turbine
Απόκριση στατισμού	Droop response
Απόκριση συχνότητας	Frequency response
Αρνητική ακολουθία	Negative sequence
Ασύγχρονα δίκτυα	Asynchronous grids
Αυτόματο σύστημα ρύθμισης παραγωγής	Automatic generation control
Βαθυπερατό φίλτρο	Low-pass filter
Βέλτιστη ροή ισχύος	Optimal power flow
Βοηθητικό dc φορτίο κατανάλωσης ισχύος	DC chopper resistor
Βραχίονας ή υποσκέλος	Arm
Βρόχος συγχρονισμού ισχύος	Power synchronization loop
Γενικευμένος ολοκληρωτής δεύτερης τάξης	Second order generalized integrator
Γραμμικοποιημένο μοντέλο μικρού σήματος	Linearized small-signal model
Διακοπτικό μοντέλο	EMT model
Διαμόρφωση εύρους παλμών	Pulse width modulation
Διαμόρφωση εύρους παλμών με επιλεκτική εξάλειψη αρμονικών	Selective harmonic elimination PWM
Διαμόρφωση εύρους παλμών με χρήση διανυσμάτων χώρου	Space vector pulse width modulation
Διάταξη κλειδώματος φάσης	Phase locked loop
Διπολικό τρανζίστορ με μονωμένη πύλη	Insulated gate bipolar transistor
Εικονική αδράνεια	Virtual inertia
Ελεγκτής απόσβεσης	Damping controller
Ελεγκτής ρεύματος	Current controller
Έλεγχος κύριου – ακόλουθου	Master – slave control
Έλεγχος πλησιέστερου επιπέδου	Nearest level control
Έλεγχος συγχρονισμού ισχύος	Power synchronization control
Εξισορρόπηση τάσης πυκνωτών	Capacitor voltage balancing
Εύρος ζώνης	Bandwidth
Ημιτονοειδής διαμόρφωση εύρους παλμών	Sinusoidal pulse width modulation
Ημιτονοειδής διαμόρφωση εύρους παλμών με πολλαπλά φέροντα μετατεθειμένα κατά πλάτος	Phase disposition sinusoidal PWM
Ηπειρωτικό δίκτυο	Onshore grid
Ηπειρωτικός μετατροπέας θαλάσσιου αιολικού πάρκου	Receiving end converter
Θετική ακολουθία	Positive sequence
Θηκόγραμμα	Boxplot

Κυλιόμενο παράθυρο	Rolling window
Λόγος βραχυκύκλωσης	Short circuit ratio
Μέγιστη Απολαβή Ισχύος	Maximum Power Point Tracking
Μετατροπέας ουδέτερου σημείου με διόδους περιορισμού	Neutral point clamped converter
Μετατροπέας πηγής ρεύματος	Current source converter
Μετατροπέας πηγής τάσης	Voltage source converter
Μετατροπέας πλευράς γεννήτριας	Machine side converter
Μετατροπέας πλευράς δικτύου	Grid side converter
Μετατροπέας πολλαπλών επιπέδων με χρήση υπομονάδων	Modular multilevel converter
Μοντέλο θεμελιώδους συχνότητας	Fundamental frequency model
Μοντέλο μέσης τιμής	Average value model
Νεκρή ζώνη	Dead band
Όρος αποσύζευξης	Decoupling term
Όρος πρόσω-τροφοδότησης	Feed-forward term
Περιθώριο τάσης	Voltage margin
Περιθώριο φάσης	Phase margin
Πολυτερματικό δίκτυο συνεχούς ρεύματος	Multiterminal DC grid
Προσανατολισμένο πεδίο δρομέα	Rotor field oriented
Προσομοίωση με χρήση φασιθετών	Phasor simulation
Ρυθμός μεταβολής συχνότητας	Rate of change of frequency
Σταθεροποιητής ταλαντώσεων ισχύος	Power system stabilizer
Στατισμός τάσης	Voltage droop
Στατός αντισταθμιστής αέργου ισχύος	Static Var compensator
Στατός σύγχρονος αντισταθμιστής	Static synchronous compensator
Σύγχρονη γεννήτρια μονίμων μαγνητών	Permanent magnet synchronous generator
Σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς	Synchronous reference frame
Συμβατότητα με κώδικες συστήματος	Grid code compatibility
Συμμετρικό μονόπολο	Symmetric monopole
Σύνδεσμος VSC-HVDC	VSC-HVDC link
Συντελεστής απόσβεσης	Damping factor
Συντελεστής αρμονικής παραμόρφωσης	Total harmonic distortion
Συντελεστής διαμόρφωσης	Modulation index
Υπεράκτιο δίκτυο	Offshore grid
Υπεράκτιος μετατροπέας θαλάσσιου αιολικού πάρκου	Sending end converter
Υπομονάδα	Submodule
Υψιπερατό φίλτρο	Washout filter
Φίλτρο εγκοπής	Notch filter

# 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1.1 Τεχνολογία HVDC

### 1.1.1 Εισαγωγή

Η τεχνολογία διασύνδεσης υψηλής τάσης συνεχούς ρεύματος (high voltage dc-HVDC) υιοθετείται ολοένα και περισσότερο παγκοσμίως για τη μεταφορά μεγάλων ποσοτήτων ισχύος σε μεγάλες αποστάσεις, καθιστώντας εφικτή τη διασύνδεση τόσο συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ) με διαφορετική συχνότητα λειτουργίας, όσο και τη διασύνδεση θαλάσσιων αιολικών πάρκων (ΘΑΠ) και απομακρυσμένων νησιών με το ηπειρωτικό ΣΗΕ. Η προοδευτικά αυξανόμενη χρήση της τεχνολογίας HVDC σε εφαρμογές υποβρυχίων διασυνδέσεων προέρχεται από την εγγενή αδυναμία της συμβατικής τεχνολογίας υψηλής τάσης εναλλασσόμενου ρεύματος (high voltage ac-HVAC) που σχετίζεται με τον περιορισμό της ικανότητας μεταφοράς ενεργού ισχύος σε μεγάλες αποστάσεις, λόγω του χωρητικού ρεύματος που διαρρέει τα υποβρύχια καλώδια, καθιστώντας παράλληλα προβληματική τη ρύθμιση τάσης [1].

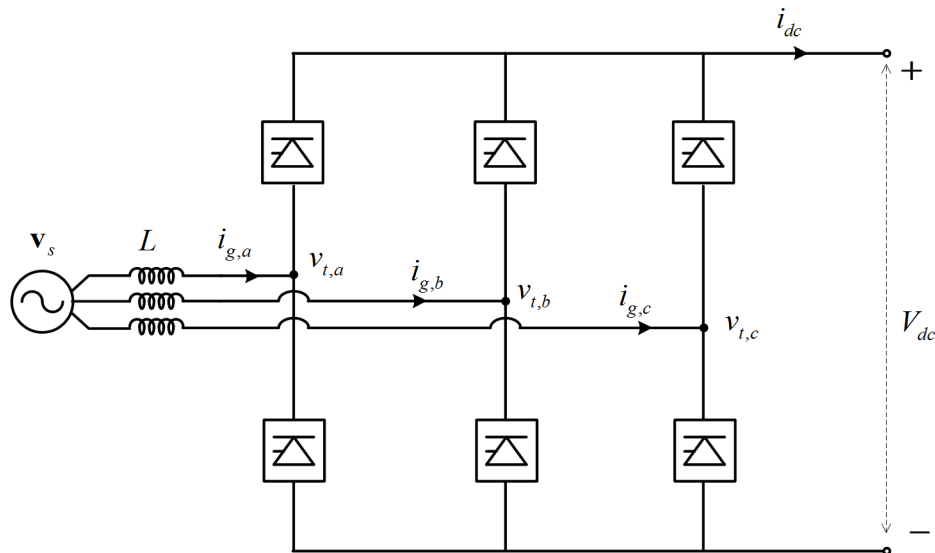
Οι εμπορικές εφαρμογές HVDC σήμερα χωρίζονται σε δύο κατηγορίες με κριτήριο την τεχνολογία των χρησιμοποιούμενων μετατροπέων ισχύος [1]-[4]: (α) η συμβατική τεχνολογία HVDC με μετατροπείς τύπου πηγής ρεύματος (current source converter(CSC) – HVDC), με χρήση ελεγχόμενων θυρίστωρ, και (β) η τεχνολογία HVDC με μετατροπείς τύπου πηγής τάσης (voltage source converter (VSC) – HVDC), οι οποίοι χρησιμοποιούν αυτομεταγόμενα ημιαγωγικά στοιχεία.

### 1.1.2 Τεχνολογία διασύνδεσης CSC-HVDC

Η τεχνολογία διασύνδεσης HVDC με χρήση μετατροπέων CSC αποτέλεσε την καθιερωμένη τεχνολογία διασύνδεσης HVDC, πρωτοεμφανίστηκε το 1954 και η εμπειρία στη χρήση της είναι μεγάλη. Στο Σχήμα 1.1 παρουσιάζεται ένα απλοποιημένο διάγραμμα ενός μετατροπέα CSC-HVDC, στον οποίο χρησιμοποιούνται ελεγχόμενα θυρίστωρ από την δεκαετία του 1970, η αγωγή των οποίων εξαρτάται από κατάλληλο παλμό έναυσης σε συνδυασμό με την τάση του δικτύου. Συγκεκριμένα, η αγωγή τους επιτυγχάνεται όταν δοθεί παλμός έναυσης με την προϋπόθεση ότι αυτά είναι θετικά πολωμένα. Ο έλεγχος της διακινούμενης ενεργού ισχύος επί της διασύνδεσης επιτυγχάνεται με κατάλληλο έλεγχο των παλμών έναυσης. Για την αύξηση της ικανότητας ενός συγκροτήματος μετατροπής είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν περισσότερες της μιας γέφυρες.

Η μεταφορική ικανότητα λειτουργούντων συστημάτων CSC-HVDC υπερβαίνει τα 3000 MW με τάση λειτουργίας έως  $\pm 800$  kV, με χρήση εναέριων γραμμών μεταφοράς HVDC, ενώ παρουσιάζει και το πλεονέκτημα των χαμηλών απωλειών ισχύος, της τάξης του 1% [1]. Βασική απαίτηση για την αποτελεσματική λειτουργία των σταθμών μετατροπής CSC είναι η σύνδεση σε ισχυρό σημείο του συστήματος, που χαρακτηρίζεται από τον λόγο βραχυκύκλωσης (Short-Circuit-Ratio- SCR), ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος της ισχύος

βραχυκύκλωσης του ΣΗΕ στο σημείο σύνδεσης, προς την ονομαστική ισχύ του μετατροπέα. Ως ασθενή χαρακτηρίζονται τα ΣΗΕ που έχουν λόγο SCR στο εύρος 2-3. Σε τέτοιες περιπτώσεις, απαιτείται η εγκατάσταση πρόσθετων διατάξεων αντιστάθμισης αέργου ισχύος στο σημείο σύνδεσης στο σύστημα, όπως τα ηλεκτρονικά συστήματα αντιστάθμισης τύπου STATCOM ή SVC [1], για την αποτελεσματική μεταγωγή των ελεγχόμενων θυρίστορ. Η συγκεκριμένη λύση όμως αυξάνει το απαιτούμενο κόστος και ο σταθμός μετατροπής καταλαμβάνει ακόμα μεγαλύτερη έκταση.



Σχήμα 1.1. Γέφυρα τύπου Graetz τεχνολογίας διασύνδεσης CSC-HVDC.

### 1.1.3 Τεχνολογία διασύνδεσης VSC-HVDC

Οι μετατροπείς ισχύος τύπου πηγής τάσης (VSC) πρωτοπαρουσιάστηκαν το 1997. Έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως σε εφαρμογές ηλεκτρικής κίνησης όπου παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα συγκριτικά με τους μετατροπείς CSC. Τα ημιαγωγικά στοιχεία που χρησιμοποιούνται είναι τα IGBTs (Insulated-Gate Bipolar Transistors) και είναι αυτομεταγόμενα, δηλαδή η δυνατότητα αγωγής και σβέσης τους δεν εξαρτάται από την τάση του δικτύου, όπως συμβαίνει με τους μετατροπείς CSC. Το γεγονός αυτό αποτελεί τη βασικότερη διαφορά μεταξύ των δύο τεχνολογιών μετατροπέων, και επιτρέπει πιο ευέλικτη λειτουργία στον σταθμό μετατροπής VSC. Συνεπώς, τα συστήματα VSC-HVDC προτιμούνται για εφαρμογές διασύνδεσης ΘΑΠ και ασθενών νησιωτικών συστημάτων, συγκριτικά με τα συστήματα CSC-HVDC, καθώς δεν απαιτείται η σύνδεση σε ισχυρό δίκτυο. Επιπρόσθετα, λόγω της μικρότερης γεωγραφικής έκτασης που καταλαμβάνουν, η χρήση τους σε υπεράκτιους σταθμούς είναι εμφανώς καταλληλότερη.

Η τεχνολογία μετατροπέων VSC παρουσιάζει συνεχή εξέλιξη τα τελευταία έτη, γεγονός που οδηγεί στην αυξανόμενη χρήση της σε εφαρμογές HVDC. Οι μετατροπείς δύο επιπέδων αποτελούν τον απλούστερο τύπο μετατροπέων με το μικρότερο κόστος και ήταν η βασική επιλογή του κατασκευαστικού οίκου ABB με την τεχνολογία HVDC Light [5]. Η συμβατική τεχνολογία μετατροπέων ισχύος 2 επιπέδων φαίνεται στο Σχήμα 1.2(α). Χρησιμοποιώντας κατάλληλες τεχνικές διαμόρφωσης εύρους παλμών (Pulse-Width Modulation, PWM), σε

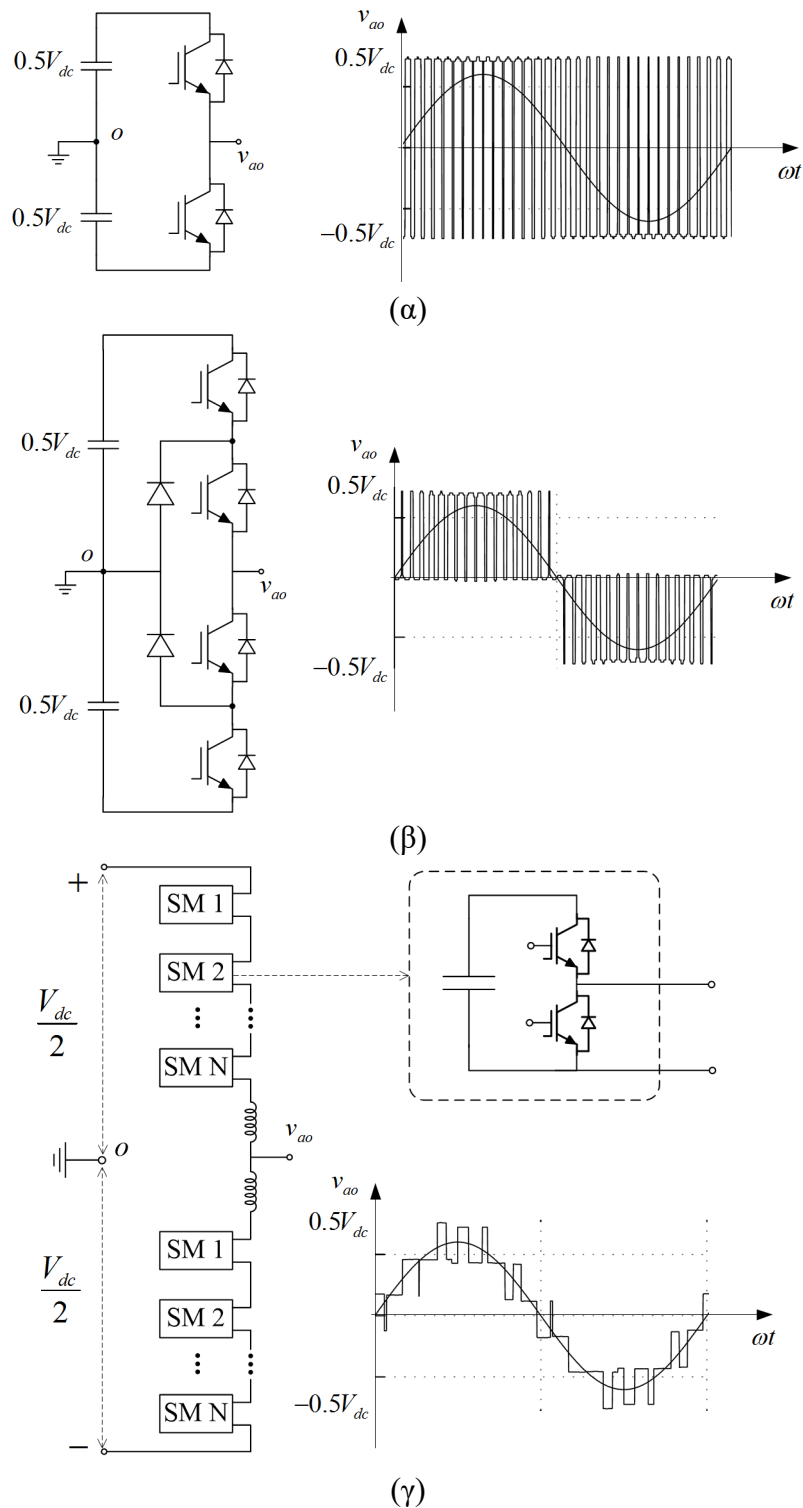


κάθε ακροδέκτη ac του μετατροπέα μπορεί να εφαρμοστεί το θετικό ή αρνητικό δυναμικό της dc τάσης. Έτσι δημιουργείται η κυματομορφή τάσης 2 επιπέδων που εικονίζεται απλοποιημένα στο Σχήμα 1.2(α), η οποία με χρήση κατάλληλων φίλτρων προσεγγίζει την επιθυμητή κυματομορφή της θεμελιώδους συνιστώσας της τάσης εξόδου. Βασικό μειονέκτημα της τεχνολογίας αυτής είναι η απαίτηση υψηλής διακοπτικής συχνότητας λειτουργίας των IGBTs, γεγονός που αυξάνει σημαντικά τις απώλειες ισχύος σε εφαρμογές HVDC. Κάθε ημιαγωγικό στοιχείο που εικονίζεται στο Σχήμα 1.2(α) αποτελείται στην πραγματικότητα από κατάλληλο αριθμό IGBTs συνδεδεμένων εν σειρά, η αγωγή των οποίων είναι συγχρονισμένη.

Με βάση τη θεμελιώδη τοπολογία δύο επιπέδων μπορεί να κατασκευαστεί ένας μετατροπέας ισχύος τριών επιπέδων. Στο Σχήμα 1.2(β) φαίνεται η τοπολογία μιας φάσης του μετατροπέα VSC τύπου Neutral-Point Clamped (NPC) και αποτέλεσε τη δεύτερη γενιά μετατροπέων HVDC που χρησιμοποιήθηκαν από τον κατασκευαστικό οίκο ABB. Η τοπολογία αυτή επιτρέπει τη μείωση της διακοπτικής συχνότητας λειτουργίας χωρίς επιδείνωση του αρμονικού περιεχομένου της κυματομορφής, επιφέροντας έτσι μείωση των απωλειών ισχύος συγκριτικά με ένα ισοδύναμο μετατροπέα δύο επιπέδων. Ωστόσο, οι υπόψη σταθμοί μετατροπής καλύπτουν μεγαλύτερη έκταση και παρουσιάζουν αυξημένο κόστος [3].

Οι πρόσφατες τεχνολογικές εξελίξεις στον τομέα των ηλεκτρονικών ισχύος έχουν οδηγήσει στη σταδιακά αυξανόμενη χρήση πολυεπίπεδων μετατροπέων ισχύος (multi-level) [6], [7]. Σήμερα, οι μεγάλοι κατασκευαστικοί οίκοι διαθέτουν μετατροπείς αυτής της τεχνολογίας, όπως η τεχνολογία HVDC PLUS (Siemens) [8], HVDC Light (ABB) και HVDC MaxSine (Alstom Grid) [9].

Από την πρωτοεμφάνισή τους το 1997, τα συστήματα VSC-HVDC σταδιακά αυξάνουν τα επίπεδα τάσης και ισχύος λειτουργίας. Σήμερα υπάρχουν έργα διασύνδεσης ΘΑΠ όπως π.χ. το BorWin 2 (Siemens HVDC PLUS  $\pm 300$  kV) και το DolWin 1 (ABB HVDC Light  $\pm 320$  kV) που χρησιμοποιούν συνδέσμους VSC-HVDC μεταφορικής ικανότητας 800 MW. Αντιπροσωπευτικό παράδειγμα σύγχρονου έργου ηλεκτρικής διασύνδεσης συστημάτων μεταξύ χωρών αποτελεί το έργο Inelfe, το οποίο αφορά στη διασύνδεση των ΣΗΕ Ισπανίας και Γαλλίας και αποτελείται από δύο ανεξάρτητα δίπολα  $\pm 320$  kV 1000 MW έκαστο, χρησιμοποιώντας την τεχνολογία Siemens HVDC PLUS. Μεγαλύτερα επίπεδα τάσης λειτουργίας εντοπίζονται στο έργο Skagerrak 4, το οποίο αφορά στην προσθήκη νέας διασύνδεσης των ήδη διασυνδεδεμένων ΣΗΕ της Νορβηγίας και Δανίας και έχει μεταφορική ικανότητα 700 MW και τάση λειτουργίας 500 kV. Με βάση τα χαρακτηριστικά αυτά, η μεταφορική ικανότητα διπολικής διασύνδεσης VSC-HVDC αναμένεται να φτάσει τα 1400 MW [1].

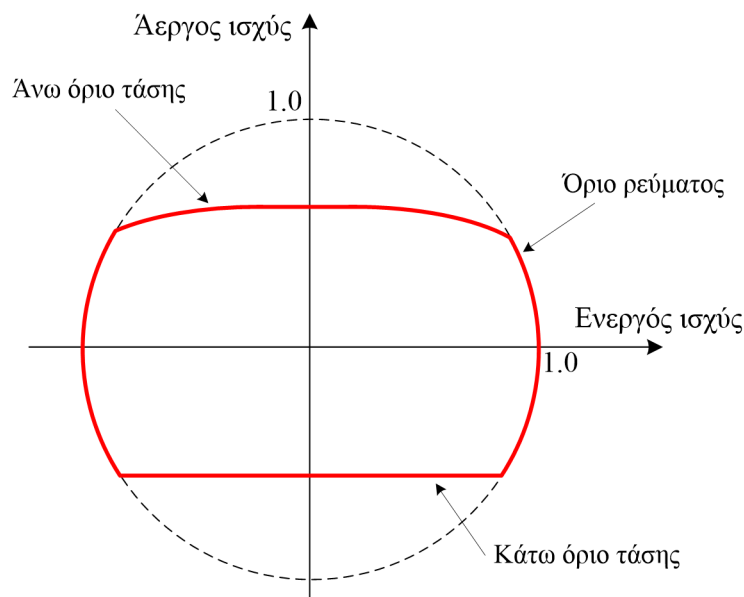


Σχήμα 1.2. Τοπολογίες μετατροπέων VSC, (α) δύο επιπέδων, (β) τριών επιπέδων, (γ) πολλαπλών επιπέδων (6 στο παράδειγμα του σχήματος).

Ο μετατροπέας VSC προσφέρει τη δυνατότητα πλήρως ανεξάρτητου ελέγχου της ροής ενεργού και αέργου ισχύος στο ac σύστημα. Η ενεργός ισχύς διακινείται με την επιθυμητή κατεύθυνση μεταξύ των άκρων της διασύνδεσης από/προς τα ac συστήματα, με ρύθμιση του ισοζυγίου ισχύος, δηλαδή η εγχεόμενη ισχύς στο ένα άκρο να ρυθμίζεται στην απορροφούμενη ισχύ στην ac πλευρά του άλλου άκρου. Για να διασφαλιστεί η ισορροπία,

ένας μετατροπέας αναλαμβάνει τον έλεγχο της dc τάσης και ο άλλος μετατροπέας μπορεί να ελέγχει την ισχύ του σε εξωτερική εντολή αναφοράς.

Με βάση τα παραπάνω, ο μετατροπέας VSC μπορεί να ελεγχθεί ως μια ιδανική πηγή τάσης, όπου το σύστημα ελέγχου καθορίζει το μέτρο, συχνότητα και φάση της επιθυμητής κυματομορφής τάσης. Ωστόσο, στη σχεδίαση του συστήματος ελέγχου θα πρέπει να συνεκτιμηθούν εγγενείς περιορισμοί λειτουργίας ως προς την ικανότητα έγχυσης ενεργού και αέργου ισχύος. Ο βασικότερος περιορισμός λειτουργίας πηγάζει από τη μέγιστη επιτρεπόμενη ένταση του ρεύματος εξόδου που εξαρτάται από το ονομαστικό ρεύμα λειτουργίας των διακοπτικών στοιχείων. Συνεπώς, η επιτρεπόμενη περιοχή λειτουργίας προδιαγράφεται καταρχήν από τον κύκλο που αναπαρίσταται στο  $PQ$  διάγραμμα στο Σχήμα 1.3. Επόμενος βασικός περιορισμός, που περιορίζει περαιτέρω την επιτρεπόμενη  $PQ$  περιοχή λειτουργίας, είναι η μέγιστη και ελάχιστη ac τάση λειτουργίας του μετατροπέα VSC. Το άνω όριο τάσης εξαρτάται από την ονομαστική dc τάση και τη μέγιστη τιμή του συντελεστή διαμόρφωσης, περιορίζοντας τη μέγιστη ικανότητα έγχυσης αέργου ισχύος, ενώ η ελάχιστη ac τάση λειτουργίας σε κανονικές συνθήκες επηρεάζει τη μέγιστη τιμή της απορροφούμενης αέργου ισχύος από το ac σύστημα. Λόγω των προαναφερθέντων ιδιοτήτων, η τελική περιοχή λειτουργίας αποκτά τη μορφή της συμπαγούς γραμμής που εικονίζεται στο Σχήμα 1.3.



Σχήμα 1.3.  $PQ$  διάγραμμα λειτουργίας ενός μετατροπέα VSC-HVDC.

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, ένα βασικό πλεονέκτημα της τεχνολογίας διασύνδεσης VSC – HVDC αποτελεί η ικανότητα ταχείας αντιστροφής της ροής ενεργού ισχύος επί της διασύνδεσης χωρίς την ανάγκη αντιστροφής της πολικότητας της dc τάσης, όπως συνέβαινε με τη συμβατική τεχνολογία CSC-HVDC, καθώς υπάρχει η δυνατότητα αντιστροφής της κατεύθυνσης του dc ρεύματος όταν αυτό απαιτηθεί σε κανονική λειτουργία μέσω των συστημάτων ελέγχου. Η ιδιότητα αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη όχι μόνο για τις ανάγκες ρύθμισης της διακινούμενης ισχύος μεταξύ μεγάλων ac συστημάτων, αλλά και για την περίπτωση διασυνδεδεμένης λειτουργίας νησιωτικών συστημάτων με αυξημένη διεύθυνση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ), η μεταβλητότητα των οποίων σε

συνδυασμό με τις διακυμάνσεις της ζήτησης φορτίου μπορεί να επιβάλλει συχνές εναλλαγές της κατεύθυνσης της διακινούμενης ενεργού ισχύος επί της διασύνδεσης.

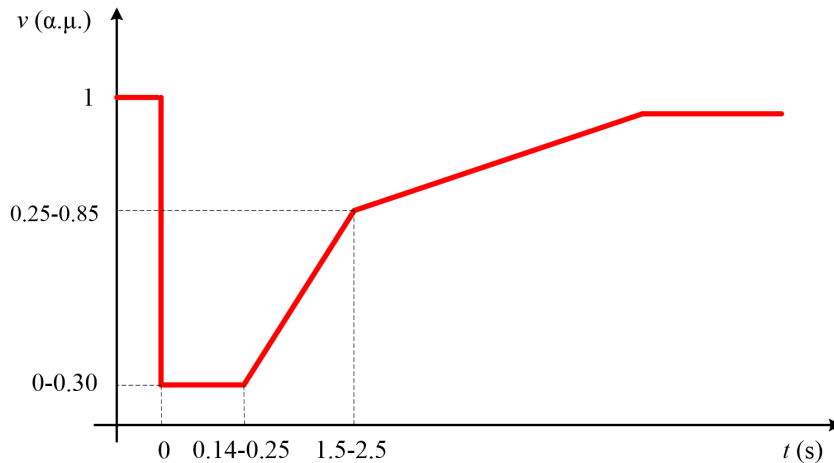
## 1.2 Κώδικες Συστήματος

### 1.2.1 Εισαγωγή

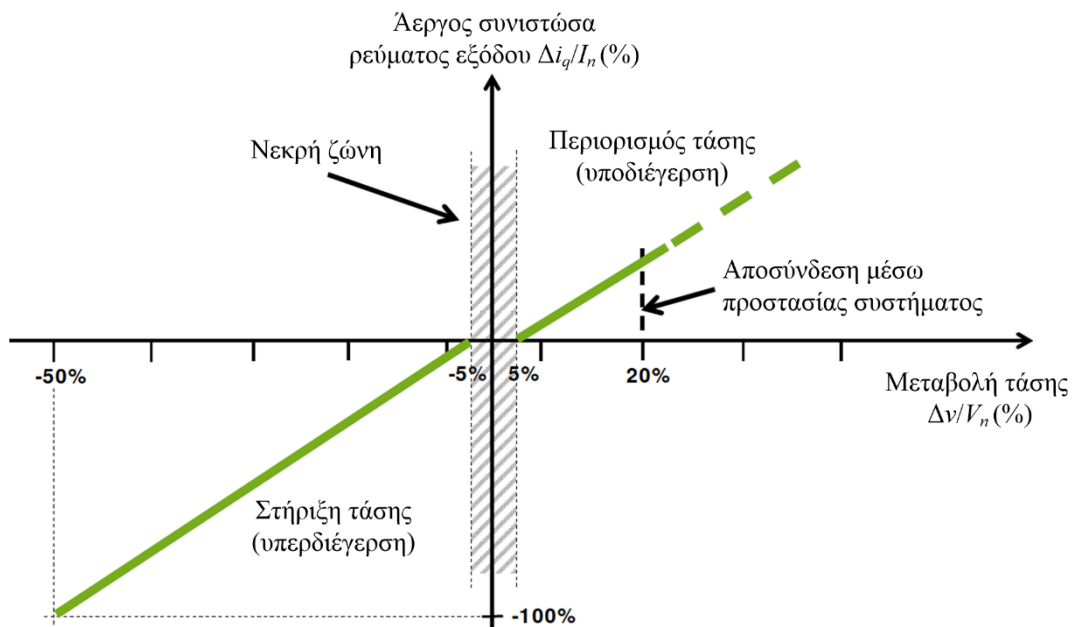
Η προοδευτική αύξηση της διείσδυσης σταθμών ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ, τόσο στο δίκτυο Διανομής όσο και στο σύστημα Μεταφοράς, έθεσε την ανάγκη επανακαθορισμού του τρόπου διαχείρισης των σταθμών με την επιβολή αυστηρότερων τεχνικών απαιτήσεων από τους διαχειριστές, με γνώμονα την ενίσχυση της ευσταθούς λειτουργίας του συστήματος ιδίως σε συνθήκες διαταραχών. Το πλέγμα των τιθέμενων τεχνικών απαιτήσεων για την αποδοχή της σύνδεσης ενός σταθμού ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ ή και συνδέσμου HVDC στο Σύστημα συμπεριλαμβάνεται σε κώδικες συστήματος. Τυπικά παραδείγματα σύγχρονων κωδικών συστήματος είναι ο Βρετανικός και ο Γερμανικός, οι οποίοι εκδόθηκαν από τους διαχειριστές συστήματος NGET plc [10] και Tennet TSO GmbH [11], [12] αντίστοιχα, όπως επίσης και το προσχέδιο κώδικα για συνδέσεις HVDC του Ευρωπαϊκού Συνδέσμου Διαχειριστών ENTSO-E [13]. Οι συγκεκριμένοι κώδικες περιγράφουν ελάχιστες τεχνικές προϋποθέσεις για τη σύνδεση στο σύστημα υψηλής τάσης (ΥΤ). Παρακάτω ακολουθεί μια συνοπτική περιγραφή των κυριότερων απαιτήσεων, οι οποίες λήφθηκαν υπόψη στο πλαίσιο εκπόνησης της παρούσας διατριβής τόσο για τους σταθμούς μετατροπής VSC-HVDC όσο και για τις υπεράκτιες Α/Γ.

### 1.2.2 Αδιάλειπτη λειτουργία σε συνθήκες σφάλματος

Θεμελιώδης απαίτηση των σύγχρονων κωδικών συστήματος αποτελεί η ικανότητα αδιάλειπτης λειτουργίας (Fault Ride-Through – FRT) ενός σταθμού ΑΠΕ ή μετατροπέα HVDC σε συνθήκες σφάλματος δικτύου. Η απαίτηση αυτή είναι ζωτικής σημασίας για την ευσταθή λειτουργία του ΣΗΕ κατόπιν εμφάνισης διαταραχής, λόγω της δυσμενούς επίδρασης που θα επέφερε στη μεταβατική ευστάθεια ΣΗΕ ενδεχόμενη αποσύνδεση σταθμών ΑΠΕ ή συστημάτων HVDC που διακινούν σημαντικές ποσότητες ενεργού ισχύος. Συνήθως προδιαγράφεται με προφίλ τάσης – χρόνου όπως αυτό που εικονίζεται στο Σχήμα 1.4, επιβάλλοντας την παραμονή σε λειτουργία του εξεταζόμενου σταθμού εφόσον η τάση του δικτύου παραμένει άνω του ορίου καμπύλης που έχει οριστεί από τον διαχειριστή. Επιπροσθέτως της ανωτέρω απαίτησης, επιβάλλεται και η ταυτόχρονη υποστήριξη της τάσης του δικτύου με ταχεία ρύθμιση της αέργου συνιστώσας του ρεύματος εξόδου, ανάλογη της μετρούμενης πτώσης τάσης. Στο παράδειγμα του Γερμανικού κώδικα που εικονίζεται στο Σχήμα 1.5, η αέργος συνιστώσα του ρεύματος εξόδου θα πρέπει να αυξάνεται με ρυθμό τουλάχιστον 2% του ονομαστικού ανά 1% απόκλιση της τάσης, ώστε για βύθισης τάσης 50% η αύξηση της αέργου συνιστώσας να ισούται με το 100% του ονομαστικού ρεύματος. Η απαιτούμενη λειτουργία θα πρέπει να ενεργοποιηθεί το πολύ 20 ms μετά την ανίχνευση του σφάλματος. Στην παρούσα διατριβή, η χαρακτηριστική που εικονίζεται στο Σχήμα 1.5 έχει υιοθετηθεί και ενσωματωθεί στα συστήματα ελέγχου τόσο των μετατροπέων VSC-HVDC, όσο και των μετατροπέων των υπεράκτιων Α/Γ.



Σχήμα 1.4. Τυπική καμπύλη τάσης – χρόνου για την απαίτηση αδιάλειπτης λειτουργίας – Κώδικας ENTSO-E για συνδέσμους HVDC [13].



Σχήμα 1.5. Χαρακτηριστική τάσης – ρεύματος για τη ρύθμιση της άεργου συνιστώσας του ρεύματος εξόδου σε συνθήκες σφάλματος – Γερμανικός κώδικας για τη σύνδεση ΘΑΠ[12].

### 1.2.3 Έλεγχος συχνότητας και ενεργού ισχύος

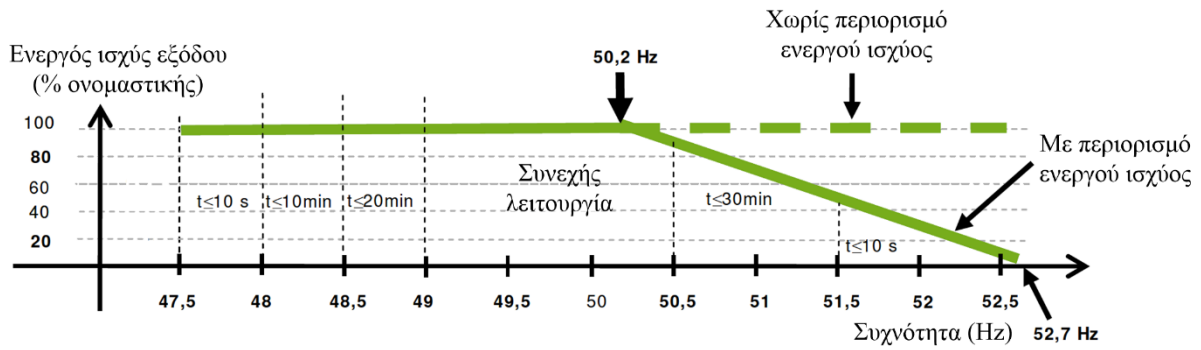
Η προαναφερθείσα ικανότητα παραμονής σταθμών ΑΠΕ σε λειτουργία, σε συνθήκες σφάλματος, αποτελεί μια πρωταρχική απαίτηση με στόχο την κατά το δυνατό αποφυγή επισφαλούς λειτουργίας ενός ΣΗΕ σε περιβάλλον υψηλής διείσδυσης ΑΠΕ ή/και διασυνδέσεων HVDC. Ωστόσο, οι σημερινοί κώδικες δεν περιορίζονται μόνο στην ανωτέρω απαίτηση αλλά επεκτείνουν τη φιλοσοφία μεταχείρισης των υπόψη σταθμών ως ελεγχόμενες μονάδες παραγωγής. Χαρακτηριστικό παράδειγμα τεχνικής απαίτησης αποτελεί η ικανότητα ενός σταθμού ΑΠΕ ή HVDC να παρέχει τη δυνατότητα αναπροσαρμογής της εγχεόμενης ενεργού ισχύος εξόδου συναρτήσει της συχνότητας λειτουργίας, προσομοιάζοντας τη λειτουργία πρωτεύουσας ρύθμισης συχνότητας των συμβατικών μονάδων παραγωγής.

Οι ανάγκες ρύθμισης της ενεργού ισχύος συναρτήσει μεταβολών συχνότητας προδιαγράφονται με κατάλληλες καμπύλες ισχύος – συχνότητας που προσομοιάζουν τις καμπύλες στατισμού των συμβατικών μονάδων. Μια ευρέως διαδεδομένη χαρακτηριστική εικονίζεται στο Σχήμα 1.6(α), του Γερμανικού κώδικα, σύμφωνα με την οποία το ΘΑΠ θα πρέπει να περιορίζει την εγγεόμενη ισχύ εξόδου σε συνθήκες υπερ-συχνότητας του δικτύου, κατόπιν υπέρβασης της τιμής των 50.2 Hz, με ρυθμό ίσο με το 40% της ονομαστικής για αύξηση της συχνότητας κατά 1 Hz. Ωστόσο, σε αρκετούς κώδικες συμπεριλαμβάνονται και αυστηρότερες απαιτήσεις ρύθμισης συχνότητας, όπως του Βρετανικού κώδικα, του προσχεδίου κώδικα για συνδέσμους HVDC και του Ιρλανδικού κώδικα για αιολικά πάρκα (Α/Π) (Σχήμα 1.6(β) και (γ)), οι οποίοι εισάγουν την απαίτηση απελευθέρωσης πρόσθετης ενεργού ισχύος κατόπιν ανίχνευσης συνθηκών υπο-συχνότητας. Ειδικά σε συνδέσμους HVDC, οι οποίοι διακινούν ισχύ που παράγεται από μια πρωτογενή πηγή, η συγκεκριμένη απαίτηση προϋποθέτει την ανάγκη τήρησης εφεδρείας ισχύος της πρωτογενούς πηγής σε κανονική λειτουργία. Η λειτουργικότητα αυτή, που επανακαθορίζει τη φιλοσοφία ελέγχου της παραγόμενης ισχύος σταθμών ΑΠΕ, βρίσκεται σε ώριμο στάδιο και αποτελεί βασική λειτουργική συνιστώσα των σύγχρονων εμπορικών Α/Γ [15], [16].

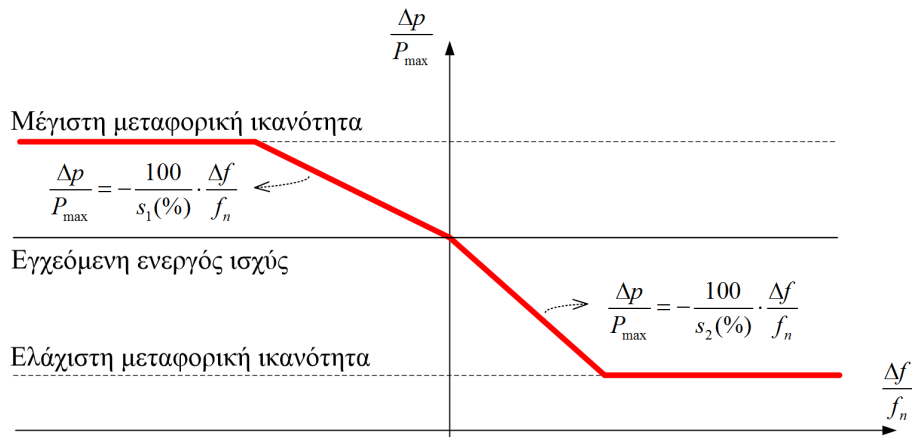
Τέλος, μια πρόσθετη λειτουργική απαίτηση που εμφανίζεται σε σύγχρονους κώδικες συστήματος αφορά στην ικανότητα ενός σταθμού ΑΠΕ ή HVDC να προσφέρει λειτουργία αδρανειακής απόκρισης, σε αντιστοιχία με τη φυσική απόκριση των στρεφόμενων ηλεκτρικών μηχανών που είναι απευθείας συνδεδεμένες στο δίκτυο, με σκοπό τον περιορισμό του ρυθμού μεταβολής της συχνότητας λειτουργίας τα πρώτα δευτερόλεπτα κατόπιν εμφάνισης διαταραχής [13]. Η εν λόγω απαίτηση θέτει την ανάγκη σχεδίασης προηγμένων τεχνικών ελέγχου είτε στον σταθμό HVDC είτε στην πρωτογενή πηγή ενέργειας, προκειμένου να παρέχεται η ταχεία απόκριση ενεργού ισχύος προς το ηπειρωτικό ac σύστημα, χωρίς να παραβιάζεται το ισοζύγιο ισχύος επί της διασύνδεσης.

#### 1.2.4 Ρύθμιση συντελεστή ισχύος

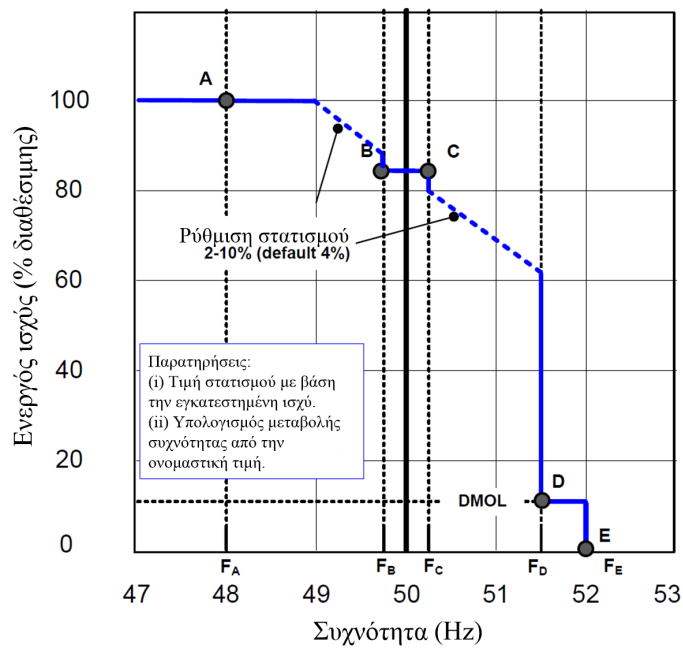
Η δυνατότητα ελέγχου τάσης και αέργου ισχύος αποτελεί βασική συνιστώσα κωδίκων συστήματος με στόχο την ενίσχυση της ευστάθειας τάσης του ΣΗΕ. Ο συμβατικός έλεγχος τάσης επιτελείται από τις σύγχρονες γεννήτριες των συμβατικών μονάδων παραγωγής μέσω των αυτόματων ρυθμιστών τάσης και του πεδίου διέγερσης. Η σύνδεση σταθμών ΑΠΕ ή HVDC μεγάλης ισχύος επιβάλλει την ανάγκη συμμετοχή τους στη ρύθμιση της τάσης, η οποία μπορεί να υλοποιηθεί με διάφορες μεθόδους, όπως η ενεργός ρύθμιση τάσης, σε αντιστοιχία με τις συμβατικές γεννήτριες, η ρύθμιση του συντελεστή ισχύος με βάση εντολές από το κεντρικό σύστημα ρύθμισης του διαχειριστή ή και με χαρακτηριστικές ρύθμισης αέργου ισχύος –τάσης.



(α)



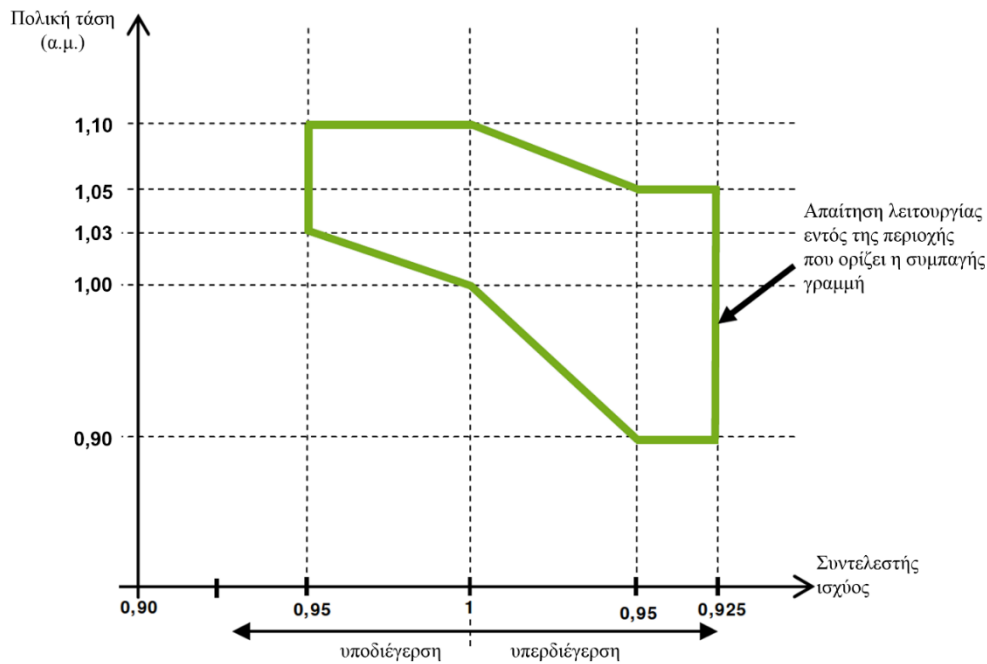
(β)



(γ)

Σχήμα 1.6. Καμπύλες ρύθμισης ενεργού ισχύος συναρτήσει της συχνότητας του συστήματος. (α) Γερμανικός κώδικας για τη σύνδεση ΘΑΠ, (β) προσχέδιο κώδικα ENTSO-E για σταθμούς HVDC, (γ) Ιρλανδικός Κώδικας[14].

Στο παράδειγμα του Γερμανικού κώδικα στο Σχήμα 1.7, προδιαγράφεται η δυνατότητα ρύθμισης του συντελεστή ισχύος ενός ΘΑΠ συναρτήσει της τάσης του δικτύου, στο σύνολο των σημείων της επιφάνειας που περικλείεται από τη συμπαγή πράσινη γραμμή, ανεξαρτήτως επιπέδου ενεργού ισχύος και για συχνότητα λειτουργίας που κυμαίνεται στο εύρος 47.5 – 51.5 Hz. Η μορφή της αποδεκτής περιοχής λειτουργίας είναι διαμορφωμένη με τρόπο που να επιβάλλει τη ρύθμιση του συντελεστή ισχύος σε λειτουργία υπερδιέγερσης σε συνθήκες χαμηλής τάσης και σε λειτουργία υποδιέγερσης σε συνθήκες υψηλότερης τάσης λειτουργίας από την ονομαστική.



Σχήμα 1.7. Απαιτήση δυνατότητας ρύθμισης του συντελεστή ισχύος συναρτήσει της τάσης χωρίς περιορισμό ενεργού ισχύος. Γερμανικός κώδικας για τη σύνδεση ΘΑΠ[12].

### 1.3 Επισκόπηση βιβλιογραφίας

Τα τελευταία έτη η έρευνα στο αντικείμενο της τεχνολογίας διασύνδεσης VSC-HVDC με χρήση πολυεπίπεδων μετατροπέων ισχύος για εφαρμογές διασύνδεσης ΘΑΠ και ασύγχρονων ac συστημάτων έχει λάβει μεγάλη έκταση στη διεθνή βιβλιογραφία [17], λόγω του ενδιαφέροντος που παρουσιάζει σε εμπορικές εφαρμογές.

Πρωταρχικό ερευνητικό ζήτημα στην ανάλυση συστημάτων VSC-HVDC αποτελεί η ανάπτυξη κατάλληλων μεταβατικών μοντέλων προσομοίωσης μετατροπέων πολλαπλών επιπέδων. Οι αναφορές [18]-[22] παρουσιάζουν ολοκληρωμένο μοντέλα ακτινικής διασύνδεσης VSC-HVDC που βασίζονται στην αναλυτική μοντελοποίηση των διακοπτικών στοιχείων που συγκροτούν τον μετατροπέα πολλαπλών επιπέδων. Ωστόσο, λόγω του αυξημένου υπολογιστικού φορτίου που εισάγει η ανάγκη προσομοίωσης μετατροπέων πολλών επιπέδων, ένα μέρος της βιβλιογραφίας έχει επικεντρωθεί στη χρήση ισοδύναμων μοντέλων προσομοίωσης που αναπαράγουν την ίδια διακοπτική λειτουργία αλλά μέσω ισοδύναμων κυκλωμάτων που βασίζονται στη χρήση ελεγχόμενων πηγών τάσης [23]-[25].



Οι αναφορές [26]-[28] επιχειρούν τη μαθηματική ανάλυση του κυκλώματος του μετατροπέα με στόχο την εξαγωγή ισοδύναμων περιγραφικών σχέσεων που μπορούν να αναπαράγουν την αναμενόμενη απόκριση και στο πεδίο του χρόνου. Τέλος, έχουν προταθεί και απλοποιημένα μοντέλα μέσης τιμής [29]-[33], τα οποία τις περισσότερες φορές εξάγονται με ορισμένες απλοποιήσεις, όπως π.χ. αμελώντας την κυμάτωση τάσης των πυκνωτών των υπομονάδων που συγκροτούν τον μετατροπέα πολλαπλών επιπέδων.

Ένα σημαντικό μέρος της βιβλιογραφίας επικεντρώνεται στην κατηγοριοποίηση τεχνικών ελέγχου μετατροπέων τύπου πηγής τάσης, ανάλογα με την εφαρμογή και την επιθυμητή φιλοσοφία ελέγχου [34]-[37]. Ενδιαφέρον παρουσιάζουν αρκετές αναφορές που προτείνουν εναλλακτικές τεχνικές ελέγχου που δεν βασίζονται στον καθιερωμένο διανυσματικό έλεγχο στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς, αλλά επιδιώκουν την εξομοίωση της λειτουργίας των μετατροπέων ως στρεφόμενες ηλεκτρικές μηχανές. Τυπικά παραδείγματα εργασιών αυτού του αντικείμενου αποτελούν οι [34], [38]-[41], ενώ ενδιαφέρει και η [42], στην οποία βελτιώνεται η απόκριση του συμβατικού συστήματος συγχρονισμού με το δίκτυο, εξετάζοντας τη σύνδεση μετατροπέα HVDC σε ασθενές σύστημα. Τέλος, αναλυτικότερες μελέτες της δυναμικής συμπεριφοράς μετατροπέων HVDC συνδεδεμένων σε ασθενή συστήματα πραγματοποιούνται στις [34], [36], [43]-[45].

Ο τρόπος συμμόρφωσης ενός ΘΑΠ, συνδεδεμένου μέσω συστήματος VSC-HVDC, με τις τεχνικές απαιτήσεις των σύγχρονων κωδίκων συστήματος έχει αποτελέσει αντικείμενο δεκάδων ερευνητικών εργασιών, οι οποίες πραγματεύονται τα ακόλουθα αντικείμενα:

- **Αδιάλειπτη λειτουργία σε συνθήκες ac σφάλματος.** Στη βιβλιογραφία έχουν προταθεί τεχνικές επίτευξης αδιάλειπτης λειτουργίας που βασίζονται είτε στη μεταβολή των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών λειτουργίας είτε στη χρήση τηλεπικοινωνιακών μέσων και ελεγχόμενων διατάξεων απορρόφησης ισχύος. Αναλυτικότερα, στις αναφορές [46]-[51] προτείνεται η εφαρμογή της μεθόδου τεχνητής βύθισης τάσης για τον ταχύ περιορισμό της ισχύος εξόδου του ΘΑΠ σε συνθήκες ac σφάλματος, αξιοποιώντας την ικανότητα αδιάλειπτης λειτουργίας των υπεράκτιων Α/Γ σε βυθίσεις τάσης. Οι τρόποι επίτευξης αδιάλειπτης λειτουργίας σε επίπεδο Α/Γ έχουν τεκμηριωθεί στις αναφορές [52]-[56]. Μια εναλλακτική μέθοδος βασίζεται στην ταχεία αύξηση της συχνότητας λειτουργίας [46],[47],[49],[57], η οποία όμως έχει αναγνωριστεί στη βιβλιογραφία ως επισφαλής λύση, καθώς οι ελεγκτές απόκρισης συχνότητας των Α/Γ είναι σχεδιασμένοι να αποκρίνονται σε μεγαλύτερες χρονικές κλίμακες που λαμβάνουν χώρα διακυμάνσεις συχνότητας μεγάλων ΣΗΕ. Επιπρόσθετα, στην [58] εξετάστηκε και η αποστολή εντολής περιορισμού ισχύος κατόπιν συνθηκών ανίχνευσης σφάλματος, χωρίς ωστόσο να πραγματοποιείται αναλυτικότερη διερεύνηση ως προς την επίδραση της χρονικής καθυστέρησης του τηλεπικοινωνιακού συστήματος ελέγχου σε εύλογα εύρη τιμών. Τέλος, μια απλούστερη λύση που έχει παρουσιαστεί στη βιβλιογραφία βασίζεται στην ήδη εφαρμοζόμενη τεχνική στις Α/Γ της χρήσης βοηθητικών φορτίων στο dc κύκλωμα, για την τοπική κατανάλωση της περίσσειας ισχύος σε συνθήκες σφάλματος [46]-[48], [50], [59].

- *Ανάπτυξη τεχνικών ελέγχου για την επίτευξη απόκρισης συχνότητας.* Η συγκεκριμένη απαίτηση απαιτεί την αναδιαμόρφωση της ενεργού ισχύος εξόδου συναρτήσει της συχνότητας λειτουργίας του ηπειρωτικού συστήματος. Οι αναφορές [60]-[64] βασίζονται στην επιβολή ελεγχόμενων μεταβολών συχνότητας από τον υπεράκτιο μετατροπέα HVDC, με στόχο την ενεργοποίηση των ελεγκτών απόκρισης συχνότητας των υπεράκτιων Α/Γ, η λειτουργία των οποίων έχει τεκμηριωθεί στα παραδείγματα των αναφορών [65]-[72]. Ενδιαφέρον παρουσιάζουν και εναλλακτικές τεχνικές απόκρισης συχνότητας [73], [74], οι οποίες επιτυγχάνουν αδρανειακή απόκριση με ταχεία αναπροσαρμογή της dc τάσης λειτουργίας της διασύνδεσης από τον επίγειο μετατροπέα HVDC.

Ιδιαίτερη έκταση έχει λάβει στη βιβλιογραφία η ανάπτυξη τεχνικών ελέγχου των ροών ισχύος και επιπέδων dc τάσης σε πολυτεματικά δίκτυα HVDC. Στις αναφορές [75]-[81] επιχειρείται η κατηγοριοποίηση εναλλακτικών τεχνικών ελέγχου που βασίζονται στη χρήση χαρακτηριστικών ρύθμισης ισχύος-τάσης ή ρεύματος-τάσης, σε συνδυασμό με χρήση νεκρών ζωνών προκειμένου να επιτυγχάνεται ακριβέστερος έλεγχος ισχύος ή τάσης, ανάλογα με τις ανάγκες της εκάστοτε εφαρμογής. Στις ανωτέρω αναφορές πραγματοποιείται κυρίως ανάλυση ροής ισχύος σε συνθήκες μόνιμης κατάστασης. Στις [82]-[90] προτείνονται τρόποι ενσωμάτωσης των χαρακτηριστικών ελέγχου στο σύστημα ελέγχου των μετατροπέων VSC και παρουσιάζονται αποτελέσματα προσομοίωσης της δυναμικής συμπεριφοράς πολυτεματικών δικτύων HVDC στο πεδίο του χρόνου.

Από τα παραπάνω διαπιστώνεται ότι ο προσδιορισμός τεχνικών ρύθμισης ροών ισχύος-dc τάσης βρίσκεται ήδη σε ώριμο στάδιο σε ερευνητικό επίπεδο, γεγονός που δίνει έναυσμα για την περαιτέρω διερεύνηση ζητημάτων βέλτιστης λειτουργίας πολυτεματικών δικτύων HVDC. Ένα μεγάλο μέρος στη βιβλιογραφία επικεντρώνεται στον προσδιορισμό μεθοδολογιών βέλτιστης ροής ισχύος που επιφέρουν ελαχιστοποίηση των απωλειών ισχύος [91]-[95], ενώ στις [96]-[98] συμπεριλαμβάνονται και πρόσθετα κριτήρια ασφαλούς λειτουργίας σε συνθήκες N-1.

Η ανάλυση της δυναμικής συμπεριφοράς MTDC δικτύων σε συνθήκες ac σφάλματος εξετάζεται στις [99], [100], όπου αξιολογούνται εναλλακτικές μέθοδοι που βασίζονται είτε στην επιβολή βύθισης ac τάσης είτε στην αύξηση της συχνότητας λειτουργίας των υπεράκτιων ac δικτύων, σε αντιστοιχία με την περίπτωση εξέτασης ακτινικών διασυνδέσεων VSC-HVDC. Ο τρόπος επίτευξης απόκρισης συχνότητας σε MTDC δίκτυα που διασυνδέουν ασύγχρονα ac συστήματα αποτελεί αντικείμενο διερεύνησης των αναφορών [101]-[103]. Αναλυτικότερα, στις [101], [102], προτείνεται η τεχνητή μεταβολή της dc τάσης λειτουργίας του MTDC δικτύου ως εικονικό μέσο επικοινωνίας, έτσι ώστε οι υπεράκτιοι σταθμοί μετατροπής dc/ac να επιβάλλουν παρόμοια μεταβολή συχνότητας στο υπεράκτιο ac δίκτυο, με στόχο την ενεργοποίηση των ελεγκτών απόκρισης συχνότητας των υπεράκτιων Α/Γ. Μια εναλλακτική προσέγγιση παρουσιάζεται στην [103], όπου οι επίγειοι μετατροπέες HVDC διαθέτουν ενσωματωμένο ελεγκτή στατισμού για την αναπροσαρμογή της ενεργού ισχύος

εξόδου, ωστόσο επιχειρείται η διόρθωση της ακρίβειας απόκρισης του ελεγκτή συχνότητας, λόγω της αλληλεπίδρασής με τον ελεγκτή της dc τάσης λειτουργίας.

#### 1.4 Αντικείμενο – Δομή διατριβής

Αντικείμενο της παρούσας διατριβής αποτελεί η μοντελοποίηση και η ανάπτυξη τεχνικών ελέγχου συνδέσμων υψηλής τάσης, συνεχούς ρεύματος, τύπου πηγής τάσης, για εφαρμογές διασύνδεσης ΘΑΠ και νησιωτικών συστημάτων. Βασικός γνώμονας της σχεδίασης των ελεγκτών αποτελεί η ικανοποίηση των τεχνικών απαιτήσεων των σύγχρονων κωδικών συστήματος ως προς την επίτευξη αδιάλειπτης λειτουργίας σε συνθήκες ac σφάλματος και τη δυνατότητα συμμετοχής σταθμών HVDC στη ρύθμιση συχνότητας του ηπειρωτικού συστήματος.

Παρακάτω παρατίθενται τα επιμέρους στάδια εκπόνησης της διατριβής και τα σημεία πρωτοτυπίας που εντοπίζονται:

1. **Ανάπτυξη μεταβατικών μοντέλων προσομοίωσης ΘΑΠ και πολυεπίπεδων μετατροπέων HVDC.** Στόχος αποτελεί τόσο η ανάπτυξη διακοπτικών μοντέλων προσομοίωσης που αναπαράγουν τη λεπτομερή μεταβατική απόκριση συστημάτων VSC-HVDC, αλλά και η εξαγωγή ισοδύναμων απλοποιημένων μοντέλων μέσης τιμής που επιτρέπουν τη μοντελοποίηση ευρύτερων τοπολογιών διασύνδεσης συστημάτων HVDC και την ανάλυση της λειτουργίας τους σε μεγαλύτερες χρονικές κλίμακες εξέτασης. Ειδικότερα, αναπτύσσεται ένα ισοδύναμο μοντέλο μέσης τιμής πολυεπίπεδου μετατροπέα HVDC, που δεν αναπαράγει απλά τη θεμελιώδη συνιστώσα κυματομορφής της ac τάσης εξόδου, αλλά υπερθέτει και μια μικρή κυμάτωση τάσης που αναπαριστά τη δυναμική των πυκνωτών των υπομονάδων που συγκροτούν τον πολυεπίπεδο μετατροπέα, αναπαράγοντας την αναμενόμενη απόκριση ακόμα και στο εσωτερικό κύκλωμα του μετατροπέα.
2. **Σχεδίαση τεχνικών ελέγχου για την συμβατότητα ενός ΘΑΠ με σύνδεσμο VSC-HVDC με τις τεχνικές απαιτήσεις κωδικών συστήματος.** Στόχος αποτελεί η σχεδίαση και συγκριτική αξιολόγηση εναλλακτικών μεθόδων επίτευξης αδιάλειπτης λειτουργίας σε συνθήκες σφάλματος και απόκρισης συχνότητας. Το πρώτο σημείο συμβολής έγκειται στην ανάπτυξη ενός γραμμικοποιημένου μοντέλου ΘΑΠ με σύνδεσμο VSC-HVDC στο πεδίο της συχνότητας [104], που επιτρέπει την ανάλυση της δυναμικής συμπεριφοράς σε συνθήκες σφάλματος του ηπειρωτικού ΣΗΕ χωρίς την ανάγκη χρήσης μοντέλων προσομοίωσης στο πεδίο του χρόνου. Επόμενο και βασικό σημείο πρωτοτυπίας της παρούσας διατριβής εντοπίζεται στην ανάπτυξη μιας νέας τεχνικής ελέγχου των υπεράκτιων Α/Γ και του υπεράκτιου μετατροπέα HVDC [105], με την οποία επιχειρείται η απαλοιφή των περιορισμών επίδοσης των συμβατικών ελεγκτών συχνότητας Α/Γ για την επίτευξη αδιάλειπτης λειτουργίας, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται αδιάλειπτη λειτουργία και απόκριση συχνότητας αποκλειστικά και μόνο με την επιβολή ελεγχόμενων μεταβολών συχνότητας στο υπεράκτιο δίκτυο του ΘΑΠ.

3. **Έλεγχος μετατροπέα VSC-HVDC νησιωτικού ΣΗΕ με συνύπαρξη εξωτερικής διασύνδεσης EP.** Πραγματοποιείται συγκριτική αξιολόγηση εναλλακτικών σχημάτων ελέγχου για τον νησιωτικό μετατροπέα HVDC, με στόχο την αξιολόγηση της δυναμικής συμπεριφοράς του νησιωτικού ΣΗΕ κατόπιν διακυμάνσεων της ζήτησης φορτίου αλλά και σε απρόβλεπτα γεγονότα απώλειας των εξωτερικών πηγών ηλεκτροδότησης, όπως πχ σε ξαφνική απώλεια της διασύνδεσης EP. Στόχος της ανάλυσης αποτελεί ο εντοπισμός πιθανών περιορισμών επίδοσης των εξεταζόμενων ελεγκτών και η ανάδειξη της τεχνικής ελέγχου που επιφέρει τη μεγαλύτερη ευελιξία σε οποιαδήποτε κατάσταση λειτουργίας, όπως πχ σε παράλληλη λειτουργία του συνδέσμου VSC-HVDC με εξωτερική διασύνδεση EP ή/και τοπική συμβατική παραγωγή, καθώς και σε λειτουργία παθητικού συστήματος. Ένα σημείο πρωτοτυπίας της παρούσας διατριβής εντοπίζεται στην προσθήκη ενός αδρανειακού ελεγκτή στο σύστημα ελέγχου του νησιωτικού μετατροπέα HVDC, που επενεργεί στον ρυθμό μεταβολής της συχνότητας λειτουργίας του, με στόχο την ομαλότερη μεταβολή της συχνότητας λειτουργίας του νησιωτικού ΣΗΕ κατά την εμφάνιση σοβαρών διαταραχών.
4. **Μοντελοποίηση και έλεγχος πολυτεματικών συστημάτων VSC-HVDC.** Το πρώτο μέρος της ανάλυσης αφορά στη σχεδίαση και συγκριτική αξιολόγηση εναλλακτικών τεχνικών ρύθμισης ισχύος-τάσης πολυτεματικών δικτύων σε συνθήκες μόνιμης κατάστασης. Το σημείο συμβολής εντοπίζεται στη διαμόρφωση ενός προβλήματος βέλτιστης ροής ισχύος [106], που βασίζεται στην εν λειτουργία αναπροσαρμογή των συμβατικών χαρακτηριστικών ελέγχου στατισμού των επίγειων μετατροπέων HVDC, και δεν αποσκοπεί μόνο στην ελαχιστοποίηση των απωλειών, αλλά συνυπολογίζει το σφάλμα ρύθμισης της ενεργού ισχύος των μετατροπέων από τις εντολές κατανομής που αποστέλλονται από τον διαχειριστή, με στόχο τη ρύθμισή τους εντός αποδεκτών ορίων ανοχής, προς συμμόρφωση με τις απαιτήσεις του προσχεδίου κώδικα του ENTSO-E για συνδέσεις HVDC. Στο δεύτερο μέρος της ανάλυσης, διερευνάται η μεταβατική συμπεριφορά πολυτεματικών δικτύων HVDC σε συνθήκες ac σφάλματος και διαταραχών συχνότητας του ηπειρωτικού συστήματος, με χρήση των αρχών ελέγχου και μοντελοποίησης των προηγούμενων ενοτήτων της παρούσας διατριβής. Ένα σημείο πρωτοτυπίας εντοπίζεται στον έλεγχο των επίγειων μετατροπέων HVDC του πολυτεματικού δικτύου που συνδέεται σε διαφορετικούς ζυγούς του ίδιου ηπειρωτικού ΣΗΕ, οι οποίοι εμφανίζουν τις λειτουργίες ελέγχου στατισμού και αδρανειακής απόκρισης, χωρίς την ανάγκη ενσωμάτωσης ειδικών ελεγκτών στο σύστημα ελέγχου τους, καθώς η επιθυμητή λειτουργία εξάγεται απευθείας από τους ελεγκτές απόκρισης συχνότητας των διασυνδεόμενων ΘΑΠ [107]. Ωστόσο, για την περίπτωση σύνδεσης σε ασύγχρονα ΣΗΕ, προτείνεται μια πρόσθετη τεχνική μεταβατικής ρύθμισης του στατισμού dc τάσης των ηπειρωτικών μετατροπέων συναρτήσει των μετρούμενων μεταβολών συχνότητας, προκειμένου να επιτευχθεί ελεγχόμενη διακίνηση αιολικής ισχύος προς το ΣΗΕ που εμφανίζει τη διαταραχή, ελαχιστοποιώντας την επίπτωση στη λειτουργία των υπόλοιπων ΣΗΕ, στα οποία δεν υφίσταται κάποια διαταραχή.

Αναφορικά με τη δομή της παρούσας διατριβής, στο Κεφ. 2 παρουσιάζονται οι βασικές αρχές λειτουργίας και τα δυναμικά μοντέλα προσομοίωσης των υπεράκτιων Α/Γ και των πολυεπίπεδων μετατροπέων HVDC. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην κυκλωματική ανάλυση της λειτουργίας των μετατροπέων πολλαπλών επιπέδων, με στόχο την εξαγωγή ενός ισοδύναμου μοντέλου μέσης τιμής που αναπαράγει με την απαιτούμενη ακρίβεια την πλήρη μεταβατική συμπεριφορά τόσο στο εξωτερικό όσο και στο εσωτερικό του κύκλωμα. Στο Κεφ. 3, πραγματοποιείται η μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς ακτινικής διασύνδεσης VSC-HVDC μεταξύ δύο ac συστημάτων, τόσο κατά την επιβολή αντιστροφής ροής ισχύος σε κανονική λειτουργία όσο και σε συνθήκες ασύμμετρων ac σφαλμάτων. Στόχος της ανάλυσης είναι η επικύρωση των μοντέλων και τεχνικών ελέγχου που αναπτύχθηκαν, καθώς και η εξαγωγή γενικότερων συμπερασμάτων ως προς τη λειτουργία των μετατροπέων HVDC πολλαπλών επιπέδων.

Στο πρώτο μέρος του Κεφ. 4 πραγματοποιείται συγκριτική αξιολόγηση εναλλακτικών τεχνικών επίτευξης αδιάλειπτης λειτουργίας, με εφαρμογή τους σε ακτινική διασύνδεση VSC-HVDC ενός ΘΑΠ, που βασίζονται είτε σε μεταβολές των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών λειτουργίας του υπεράκτιου δικτύου, είτε στη χρήση εξωτερικών διατάξεων και υποδομών (τηλεπικοινωνιακά μέσα, βοηθητικά φορτία κλπ.). Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην αξιολόγηση μεθόδου αδιάλειπτης λειτουργίας που βασίζεται στη χρήση τηλεπικοινωνιακού μέσου αποστολής εντολών για τον περιορισμό της παραγόμενης ενεργού ισχύος εξόδου του ΘΑΠ, σε συνδυασμό με την έναυση βοηθητικών φορτίων μειωμένης ικανότητας για την τοπική κατανάλωση ενεργού ισχύος στον επίγειο σταθμό μετατροπής dc/ac, που δεν κατέστη εφικτό να περιοριστεί λόγω της χρονικής καθυστέρησης που υπεισέρχεται στο τηλεπικοινωνιακό σύστημα ελέγχου. Στο δεύτερο μέρος του Κεφ. 4 διερευνάται η συμβολή ενός ΘΑΠ στη ρύθμιση συχνότητας του ηπειρωτικού συστήματος, με εφαρμογή σε ένα δοκιμαστικό ΣΗΕ δύο περιοχών, το οποίο υιοθετείται εκτενώς στη βιβλιογραφία για μελέτες ευστάθειας συχνότητας [108]. Εξετάζεται η απόκριση συχνότητας του ΘΑΠ με χρήση των συμβατικών ελεγκτών συχνότητας των Α/Γ, πραγματοποιώντας εκτενείς παραμετρικές αναλύσεις ως προς τις εφαρμοζόμενες τιμές στατισμού, της ισοδύναμης σταθεράς αδρανείας και του επιπέδου εφεδρείας ισχύος των Α/Γ σε κανονική λειτουργία.

Με βάση τα συμπεράσματα που προκύπτουν από το Κεφ. 4, στο Κεφ. 5 επιχειρείται η συμμόρφωση ενός ΘΑΠ με τις τεχνικές απαιτήσεις των κωδίκων συστήματος με τη χρήση μιας ενιαίας στρατηγικής ελέγχου. Αναλυτικότερα, προτείνεται ένα σύστημα ελέγχου στον μετατροπέα πλευράς γεννήτριας των υπεράκτιων Α/Γ, το οποίο διαθέτει την εγγενή ιδιότητα εμφάνισης μόνιμου σφάλματος ρύθμισης ισχύος παρουσία διακυμάνσεων συχνότητας. Έτσι, προσφέρεται ταχύτερος έλεγχος στατισμού, καθιστώντας αποτελεσματική τη μέθοδο ταχείας αύξησης συχνότητας για την επίτευξη αδιάλειπτης λειτουργίας. Για τη συνδυαστική επίτευξη απόκρισης συχνότητας μεταβλητού στατισμού και αδρανειακής απόκρισης, προτείνεται ένας νέος ρυθμιστής συχνότητας, ο οποίος ενσωματώνεται στο σύστημα ελέγχου του υπεράκτιου μετατροπέα HVDC και επιβάλλει μεταβολές συχνότητας στο υπεράκτιο ac δίκτυο, με τρόπο που να απομαστεύει αιολική ισχύ επιθυμητού επιπέδου και ρυθμού μεταβολής.

Η ανάλυση της λειτουργίας ακτινικής διασύνδεσης VSC-HVDC επεκτείνεται στο Κεφ. 6 και σε εφαρμογές διασύνδεσης νησιωτικών ΣΗΕ, που παρουσιάζουν αυξημένη πολυπλοκότητα όσον αφορά στις πηγές ηλεκτροδότησης που μπορεί να λειτουργούν παράλληλα, όπως η περίπτωση παράλληλης λειτουργίας διασυνδέσεων ΕΡ και HVDC με τοπική συμβατική παραγωγή. Αναλυτικότερα, με βάση το μοντέλο μέσης τιμής του μετατροπέα MMC, που αξιολογείται στο Κεφ. 3, αναλύεται η δυναμική συμπεριφορά ενός νησιωτικού ΣΗΕ τόσο σε διακυμάνσεις της ζήτησης φορτίου, όσο και σε σοβαρές διαταραχές που αφορούν στη ξαφνική απώλεια των συνδεδεμένων πηγών ηλεκτροδότησης. Η ανάλυση πραγματοποιείται τόσο με χρήση των συμβατικών ελεγκτών του μετατροπέα VSC-HVDC του Κεφ. 4, όσο και με εφαρμογή του εναλλακτικού σχήματος ελέγχου που εφαρμόστηκε στο Κεφ. 5 και αφορά στον έλεγχο συγχρονισμού ισχύος του μετατροπέα HVDC χωρίς τη χρήση διάταξης κλειδώματος φάσης. Στη συνέχεια, προτείνεται ένας αδρανειακός ελεγκτής στο σύστημα ελέγχου του νησιωτικού μετατροπέα, και πραγματοποιείται παραμετρική ανάλυση της επίδρασής του στην απόκριση συχνότητας του νησιωτικού ΣΗΕ, κατόπιν διαδοχικής απώλειας της διασύνδεσης ΕΡ και του τοπικού συμβατικού σταθμού παραγωγής.

Η ανάλυση συστημάτων VSC-HVDC επεκτείνεται στο Κεφ. 7, όπου διερευνάται ο τρόπος ρύθμισης των ροών ισχύος και επιπέδων τάσης σε ένα δοκιμαστικό πολυτερματικό δίκτυο HVDC διασύνδεσης νησιών στο θαλάσσιο χώρο του Αιγαίου. Αναλυτικότερα, πραγματοποιείται συγκριτική αξιολόγηση χαρακτηριστικών ελέγχου ισχύος – τάσης που έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία, μέσω επίλυση ροής ισχύος και εξαγωγής αντιπροσωπευτικών κατανομών ισχύος και τάσης σε κάθε κόμβο. Έπειτα, προτείνεται μια γενική μεθοδολογία βέλτιστης ροής ισχύος, όπου περιγράφονται τα κριτήρια βελτιστοποίησης και οι περιορισμοί λειτουργίας, και εφαρμόζεται στο ανωτέρω πολυτερματικό δίκτυο, το οποίο βασίζεται σε σχήματα διασύνδεσης νησιών που έχουν προταθεί από τον ΑΔΜΗΕ σε παλαιότερες μελέτες. Η αξιολόγηση της επίδοσης της προτεινόμενης μεθόδου πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο προσομοίωσης Monte-Carlo, με στόχο την εξαγωγή πιθανοτικών κατανομών ισχύος και τάσης τόσο τους κόμβους των νησιωτικών ΣΗΕ όσο και στους επίγειους σταθμούς μετατροπής. Στο δεύτερο μέρος του κεφαλαίου πραγματοποιείται ανάλυση της μεταβατικής συμπεριφοράς ενός πολυτερματικού δικτύου HVDC σε συνθήκες ac σφάλματος, και διερευνάται η ικανότητα συμμετοχής του στη ρύθμιση συχνότητας ενός ή και ασύγχρονων ηπειρωτικών ΣΗΕ, αξιοποιώντας τις διαθέσιμες λειτουργίες ελέγχου στατισμού και αδρανειακής απόκρισης των διασυνδεδεμένων ΘΑΠ.

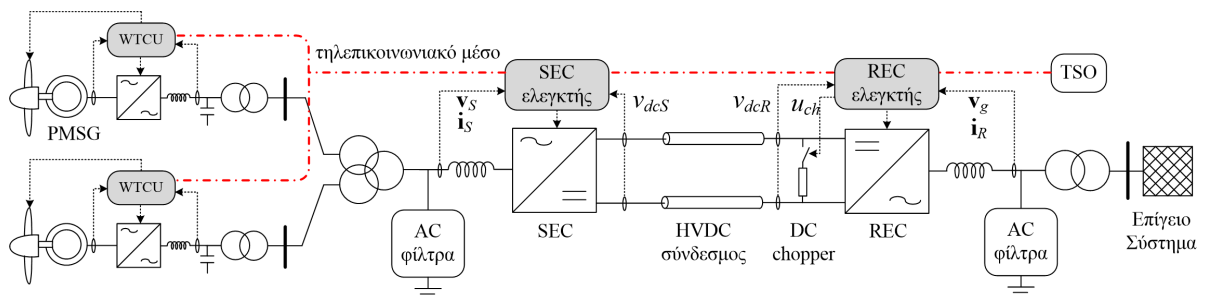
Στο Κεφ. 8 παρατίθενται τα κύρια συμπεράσματα του παρόντος τεύχους, επισημαίνονται τα σημεία καινοτομίας και παρατίθενται αντικείμενα μελλοντικής διερεύνησης. Τέλος, στα παραρτήματα δίνονται συγκεντρωτικά τα κύρια ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των εξεταζόμενων συστημάτων, καθώς και τιμές παραμέτρων των ελεγκτών. Επίσης, αποδεικνύονται μαθηματικά οι συναρτήσεις μεταφοράς που χρησιμοποιήθηκαν για τη σχεδίαση του προτεινόμενου ελεγκτή του Κεφ. 5, με εφαρμογή της μεθόδου ανάλυσης μικρού σήματος.

## 2 ΔΥΝΑΜΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΘΑΠ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΗΣ VSC-HVDC

### 2.1 Τοπολογία και αρχές ελέγχου εξεταζόμενου ΘΑΠ με σύστημα διασύνδεσης VSC-HVDC

#### 2.1.1 Εισαγωγή

Η τοπολογία του εξεταζόμενου ΘΑΠ διασυνδεδεμένου με σύνδεσμο VSC-HVDC εικονίζεται στο Σχήμα 2.1. Το ηλεκτρικό μέρος της Α/Γ αποτελείται από το ευρέως χρησιμοποιούμενο σε εμπορικές εφαρμογές σύστημα μετατροπών πλήρους ισχύος (Full Converter Wind Turbines – FCWTs) [54], [60], [70], μέσω του οποίου επιτυγχάνεται η σύνδεση στο υπεράκτιο ac δίκτυο. Η Α/Γ είναι εφοδιασμένη με σύγχρονη γεννήτρια μονίμων μαγνητών. Στην έξοδο του μετατροπέα της Α/Γ υπάρχει ένα φίλτρο εξόδου LC καθώς και Μ/Σ ανύψωσης ΧΤ/ΜΤ. Ο υπεράκτιος Υ/Σ αποτελείται από τον Μ/Σ ανύψωσης ΜΤ/ΥΤ και από το σταθμό μετατροπής ac/dc για τη μεταφορά της παραγόμενης ενεργού ισχύος στο ηπειρωτικό σύστημα μέσω υποβρύχιων dc καλωδίων αντίθετης πολικότητας. Ο επίγειος σταθμός μετατροπής αποτελείται από τον χερσαίο μετατροπέα ισχύος και τον Μ/Σ ισχύος για τη σύνδεση στο επιθυμητό σημείο σύνδεσης του ηπειρωτικού συστήματος. Στον επίγειο σταθμό θεωρείται ότι είναι εγκατεστημένο και σύστημα ελεγχόμενων dc φορτίων (ωμικές αντιστάσεις) για την τοπική κατανάλωση ενεργού ισχύος σε έκτακτες συνθήκες λειτουργίας, όπως π.χ. κατά τη διάρκεια ενός σφάλματος στο ηπειρωτικό ΣΗΕ που περιορίζει την ικανότητα έγχυσης ενεργού ισχύος προς αυτό.



Σχήμα 2.1. Τοπολογία εξεταζόμενου ΘΑΠ διασυνδεδεμένου με σύνδεσμο VSC-HVDC[104].

#### 2.1.2 Αρχές ελέγχου επίγειου σταθμού μετατροπής dc/ac

Το σύστημα ελέγχου του επίγειου μετατροπέα παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.2. Σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας, ο μετατροπέας εξάγει την εισερχόμενη ενεργό ισχύ που παράγεται από το ΘΑΠ στο ηπειρωτικό ac σύστημα, ρυθμίζοντας τη dc τάση λειτουργίας των καλωδίων στην ονομαστική της τιμή, με τη χρήση ενός PI ελεγκτή. Ο εσωτερικός βρόχος ελέγχου ρεύματος, βασίζεται στην καθιερωμένη τεχνική διανυσματικού ελέγχου στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς [35], [109], [110]. Ωστόσο, όπως θα παρουσιαστεί και στο Κεφ. 3, η χρήση μόνο του απλού διανυσματικού ελέγχου ρεύματος στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς δεν επαρκεί για τον έλεγχο της συνιστώσας ρεύματος αρνητικής ακολουθίας, η οποία μπορεί να

οδηγήσει σε σημαντικές υπερεντάσεις κατά την εμφάνιση ασύμμετρων ac σφαλμάτων. Για τον σκοπό αυτό, στο κύριο σχήμα ελέγχου προστίθεται και ένας ελεγκτής ρεύματος αρνητικής ακολουθίας ο οποίος λειτουργεί στο ανάστροφο πλαίσιο αναφοράς. Για να επιτευχθεί αποσυζευγμένη λειτουργία των ελεγκτών θετικής και αρνητικής ακολουθίας, γίνεται χρήση των φίλτρων καταστολής που εικονίζονται στο Σχήμα 2.2(α), με συχνότητα συντονισμού ίση με τη διπλάσια της θεμελιώδους συχνότητας.

Η διάταξη συγχρονισμού με το δίκτυο απεικονίζεται στο Σχήμα 2.2(β) και βασίζεται στη συμβατική διάταξη κλειδώματος φάσης (PLL) σε συνδυασμό με τη χρήση φίλτρων δευτέρου βαθμού (Second Order Generalized Integrators – SOGI) για την εξαγωγή της θετικής ακολουθίας της τάσης του δικτύου [111], [112] προκειμένου να μην επηρεάζεται αρνητικά η απόκριση του συστήματος PLL σε ασύμμετρες συνθήκες λειτουργίας.

Για την εξασφάλιση των απαιτήσεων σύγχρονων κωδίκων συστήματος σε συνθήκες σφάλματος, θα πρέπει καταρχήν να εξασφαλιστεί ο ταχύς περιορισμός του μέτρου του ρεύματος εξόδου του επίγειου μετατροπέα στη μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή σχεδιασμού. Παράλληλα, θα πρέπει να ενεργοποιηθεί η υποστήριξη της ac τάσης του δικτύου μέσω κατάλληλης ρύθμισης της αέργου συνιστώσας του ρεύματος εξόδου σύμφωνα με τη χαρακτηριστική που παρουσιάστηκε στο Σχήμα 1.5, η οποία στην παρούσα διατριβή υπολογίζεται βάσει της τάσεως θετικής ακολουθίας που εξάγεται από τη διάταξη συγχρονισμού DSOGI-PLL. Για τη διατήρηση του μέτρου του ρεύματος εξόδου στη μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή του  $I_{\max}$ , χρησιμοποιείται ο περιοριστής ρεύματος  $I_{d\max}$ , η τιμή του οποίου υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

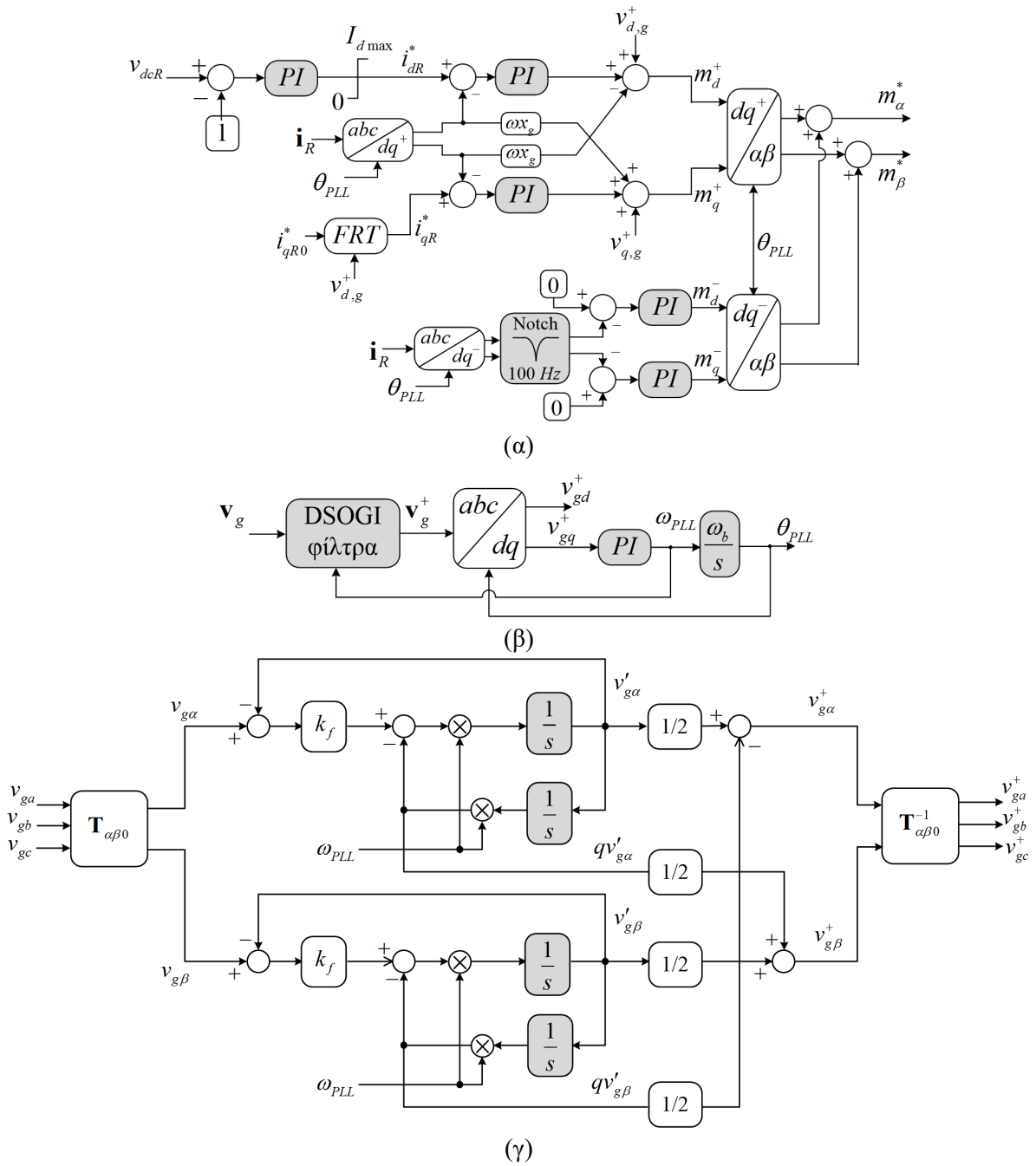
$$I_{d\max} = \sqrt{I_{\max}^2 - i_{qR}^{*2}} \quad (2.1)$$

Όπου  $I_{\max}$  είναι το ονομαστικό ρεύμα και  $i_{qR}^*$  είναι η άεργος συνιστώσα αναφοράς που διαμορφώνεται με βάση την προαναφερθείσα χαρακτηριστική ελέγχου  $V-I$ .

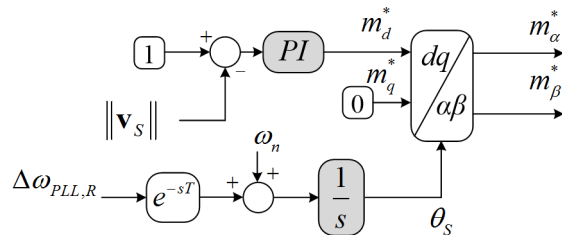
### 2.1.3 Αρχές ελέγχου υπεράκτιου σταθμού μετατροπής dc/ac

Ο υπεράκτιος μετατροπέας HVDC απορροφά την παραγόμενη ενεργό ισχύ του ΘΑΠ, ρυθμίζοντας την τάση και συχνότητα λειτουργίας του υπεράκτιου ac δικτύου. Το χρησιμοποιούμενο σχήμα ελέγχου απεικονίζεται στο Σχήμα 2.3, όπου το μέτρο της τάσης  $v_s$  ρυθμίζεται μέσω ενός PI ελεγκτή, ενώ η συχνότητα λειτουργίας ορίζεται στην ονομαστική τιμή  $\omega_n$  [49], [110]. Επιπρόσθετα, στην παρούσα διατριβή προτείνεται η τηλεπικοινωνιακή αποστολή των μετρούμενων μεταβολών συχνότητας του ηπειρωτικού συστήματος από το σύστημα συγχρονισμού του επίγειου μετατροπέα HVDC, με στόχο την εξομοίωση των συνθηκών λειτουργίας του ηπειρωτικού συστήματος στο υπεράκτιο ac δίκτυο. Στην ανάλυση λαμβάνεται υπόψη και η χρονική καθυστέρηση που εισάγει το τηλεπικοινωνιακό μέσο και μοντελοποιείται με τον όρο  $e^{-sT}$ . Η λειτουργικότητα της προτεινόμενης προσθήκης θα εξεταστεί στο Κεφ. 4.





Σχήμα 2.2. Σύστημα ελέγχου επίγειου μετατροπέα HVDC, (α) διάγραμμα βαθμίδων συστήματος ελέγχου ρεύματος και dc τάσης, (β) σύστημα συγχρονισμού με το δίκτυο, (γ) φίλτρα εξαγωγής της θετικής ακολουθίας της τάσης του δικτύου.



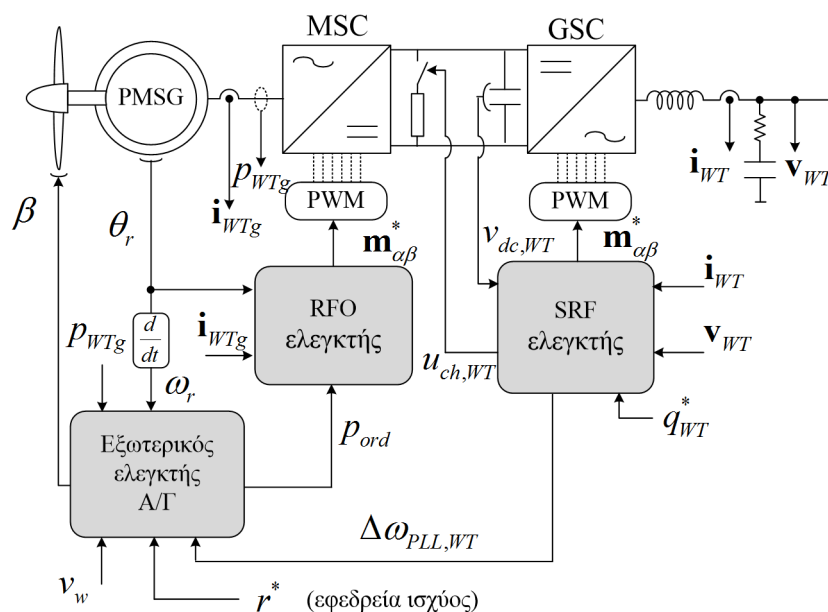
Σχήμα 2.3. Απλοποιημένο σύστημα ελέγχου υπερράκτιου μετατροπέα HVDC.

## 2.2 Μοντέλο Α/Γ με σύστημα μετατροπών πλήρους ισχύος

Το μοντέλο της Α/Γ τύπου FCWT περιγράφεται αναλυτικά στις [70], [113]-[115] και αποτελείται από το αεροδυναμικό και μηχανικό μοντέλο, καθώς από τα μοντέλα του ηλεκτρικού μέρους και των επιμέρους ελεγκτών.

Για τη μοντελοποίηση του αεροδυναμικού μέρους των Α/Γ χρησιμοποιήθηκε ένα απλουστευμένο μοντέλο που βασίζεται στο συντελεστή αεροδυναμικής ροπής και υλοποιεί την ευρέως χρησιμοποιούμενη στατική σχέση που συνδέει την αεροδυναμική ροπή με την ταχύτητα ανέμου [115]. Το μηχανικό μέρος της Α/Γ αναπαρίσταται από το μοντέλο μιας μάζας, το οποίο προτείνεται στη βιβλιογραφία για την προσομοίωση Α/Γ τύπου FCWT [70]. Το ηλεκτρικό μέρος περιλαμβάνει τη σύγχρονη γεννήτρια μονίμων μαγνητών και το σύστημα μετατροπών ισχύος. Για τη σύγχρονη γεννήτρια χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο 6<sup>ης</sup> τάξης που είναι διαθέσιμο στη βιβλιοθήκη του λογισμικού Matlab/Simulink. Το σύστημα μετατροπών αποτελείται από δύο ανεξάρτητα ελεγχόμενες μετατροπείς τύπου πηγής τάσης που συνδέονται μεταξύ τους με την παρεμβολή ενός πυκνωτή στους dc ακροδέκτες. Οι μετατροπείς υλοποιήθηκαν με διαθέσιμα διακοπτικά μοντέλα της βιβλιοθήκης του λογισμικού Matlab/Simulink.

Η τυπική διάταξη υπεράκτιας Α/Γ συνδεδεμένης με μετατροπείς πλήρους ισχύος εικονίζεται στο Σχήμα 2.4. Η γεννήτρια μονίμων μαγνητών ελέγχεται από τον μετατροπέα πλευράς γεννήτριας (Machine Side Converter – MSC), στον οποίο εφαρμόζεται έλεγχος προσανατολισμένου πεδίου (Rotor Field Oriented – RFO) για τον τελικό καθορισμό των σημάτων ελέγχου  $\mathbf{m}_{\alpha\beta}^*$  που οδηγούνται στον ελεγκτή διαμόρφωσης εύρους παλμών (Pulse Width Modulation – PWM). Η εσωτερική λειτουργία του RFO ελεγκτή απεικονίζεται στο Σχήμα 2.5, και στηρίζεται στη χρήση PI ελεγκτών και κατάλληλων όρων αποσύζευξης [54],[58],[65].

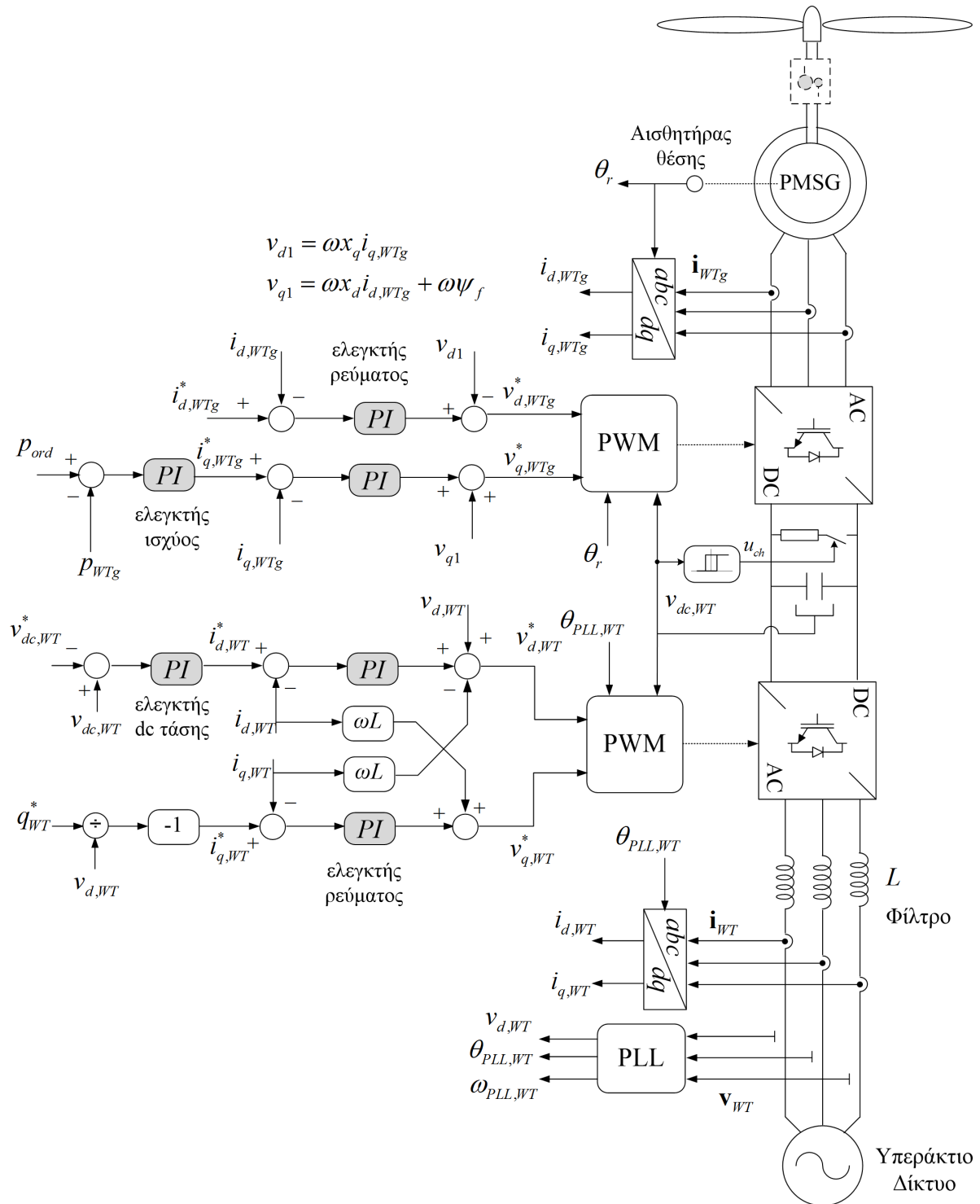


Σχήμα 2.4. Διάταξη Α/Γ με μετατροπείς πλήρους ισχύος.

Αντίστοιχα, ο μετατροπέας πλευράς δικτύου (Grid Side Converter – GSC) εγγχεί την παραγόμενη ενεργό ισχύ της Α/Γ στο υπεράκτιο ac δίκτυο, ρυθμίζοντας την dc τάση  $v_{dc,WT}$  του συστήματος μετατροπέων στην ονομαστική της τιμή. Στον μετατροπέα αυτό εφαρμόζεται διανυσματικός έλεγχος ρεύματος στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς (Synchronous Reference Frame – SRF), το οποίο ορίζεται από αποκλειστική διάταξη κλειδώματος φάσης (Phase Locked Loop – PLL) για τον συγχρονισμό με την τάση του δικτύου, όπως φαίνεται και αναλυτικότερα στο Σχήμα 2.5. Επιπρόσθετα, στην dc πλευρά του συστήματος μετατροπέων της Α/Γ υπάρχει και σύστημα βοηθητικών φορτίων [116], το οποίο ενεργοποιείται σε συνθήκες σφάλματος του υπεράκτιου ac δικτύου, για τον έλεγχο της dc υπέρτασης σε αποδεκτά επίπεδα, λόγω της μείωσης της ικανότητας έγχυσης ενεργού ισχύος στο υπεράκτιο σύστημα. Στην παρούσα διατριβή, η έναυση των βοηθητικών φορτίων ελέγχεται με ένα συμβατικό βρόχο υστέρησης, με χρήση προκαθορισμένων τιμών κατωφλίων ενεργοποίησης ως προς τη μετρούμενη dc τάση (1.1 και 1.05 α.μ. αντίστοιχα).

Ο εξωτερικός ελεγκτής της Α/Γ (Σχήμα 2.6) βασίζεται σε μοντέλα εμπορικά διαθέσιμων Α/Γ τύπου FCWT και η βασική λειτουργία του έγκειται στη ρύθμιση της ενεργού ισχύος αναφοράς  $p_{ord}$  και της γωνίας βήματος των πτερυγίων  $\beta$ . Η εσωτερική δομή του ελεγκτή παρουσιάζεται αναλυτικότερα στο Σχήμα 2.6, ο οποίος επιτελεί τις ακόλουθες λειτουργίες ελέγχου [70], [72]:

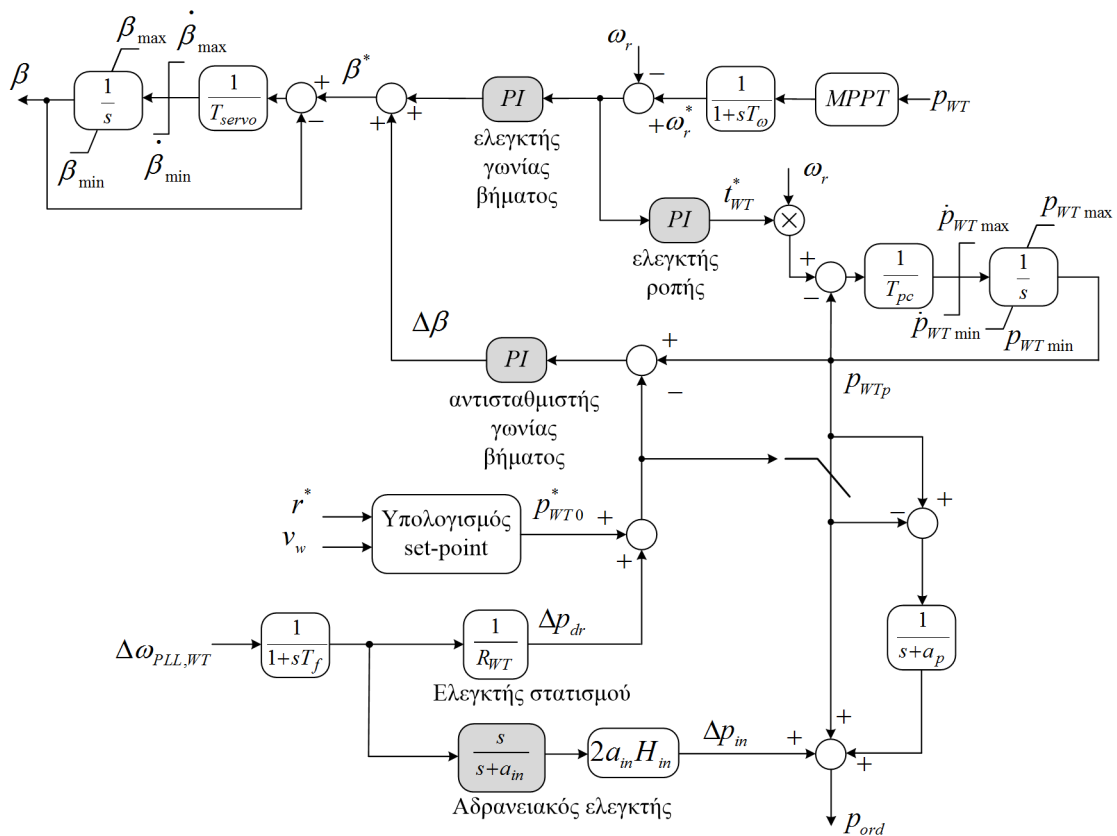
- **Έλεγχος ηλεκτρικής ροπής.** Ο ελεγκτής ροπής ρυθμίζει την ταχύτητα περιστροφής της Α/Γ  $\omega_r$  στην τιμή αναφοράς  $\omega_r^*$  που διαμορφώνεται από τη στρατηγική μέγιστης απολαβής ισχύος (Maximum Power Point Tracking – MPPT). Βάσει της ηλεκτρικής ροπής αναφοράς  $t_{WT}^*$  και του άνω ορίου  $p_{WT0}^*$ , διαμορφώνεται η τελική ενεργός ισχύς αναφοράς  $p_{ord}$ , με την παρεμβολή κατάλληλων περιοριστών ρυθμού μεταβολής και επιπέδου ρύθμισης της ενεργού ισχύος. Οι παράμετροι των ελεγκτών του εξωτερικού ελεγκτή της Α/Γ επιλέχθηκαν με βάση τυπικές τιμές που παρατίθενται στη βιβλιογραφία για τη διάταξη Α/Γ τύπου FCWT, και δίνονται στο Παράρτημα Δ.
- **Έλεγχος γωνίας βήματος πτερυγίων.** Ο ελεγκτής γωνίας βήματος αποτρέπει ανεπιθύμητες υπερταχύνσεις της Α/Γ, ενώ ένας πρόσθετος αντισταθμιστής αναδιαμορφώνει το αεροδυναμικό σημείο λειτουργίας της Α/Γ τόσο σε συνθήκες μόνιμης κατάστασης (περίπτωση τήρησης εφεδρείας ενεργού ισχύος σε κανονική λειτουργία), όσο και σε συνθήκες διαταραχών, π.χ. απόκριση στατισμού παρουσία διακυμάνσεων της συχνότητας λειτουργίας, για την προσαρμογή της αεροδυναμικής ισχύος στην ελεγχόμενη ηλεκτρική ισχύ εξόδου της Α/Γ. Για τη ρεαλιστική προσομοίωση του μηχανισμού αλλαγής της γωνίας βήματος, στο μοντέλο περιλαμβάνεται η χρονική καθυστέρηση που υπεισέρχεται λόγω του σερβομηχανισμού καθώς και τα όρια ρύθμισης της γωνίας βήματος και του ρυθμού μεταβολής της.



Σχήμα 2.5. Σχήμα ελέγχου συστήματος μετατροπέων υπεράκτιας A/Γ (τύπος FCWT).

- Ρύθμιση συχνότητας.** Η συγκεκριμένη λειτουργία αφορά στην ικανοποίηση τεχνικών απαιτήσεων ως προς την ικανότητα συμμετοχής της A/Γ στη ρύθμιση συχνότητας, με κατάλληλη αναδιαμόρφωση της εγχεόμενης ενεργού ισχύος συναρτήσει της συχνότητας λειτουργίας. Η απόκριση συχνότητας βασίζεται σε δύο θεμελιώδεις λειτουργίες: α) τον έλεγχο στατισμού, δηλ. τη μόνιμη αναπροσαρμογή της ισχύος εξόδου σε περίπτωση απόκλισης της συχνότητας λειτουργίας από την ονομαστική της τιμή, και β) την αδρανειακή απόκριση, η οποία βασίζεται σε ταχύτερη μεταβολή της ενεργού ισχύος

εξόδου, ευθέως ανάλογη του μετρούμενου ρυθμού μεταβολής της συχνότητας, προσομοιάζοντας τη φυσική αδρανιακή απόκριση στρεφόμενων ηλεκτρικών μηχανών απευθείας συνδεδεμένων στο δίκτυο. Η αδρανιακή απόκριση στηρίζεται κυρίως στην προσωρινή απελευθέρωση μέρους της κινητικής ενέργειας που είναι αποθηκευμένη στο δρομέα της Α/Γ, και συνεπώς δεν είναι αναγκαία η αναδιαμόρφωση του αεροδυναμικού σημείου λειτουργίας της Α/Γ μέσω του αντισταθμιστή της γωνίας βήματος των πτερυγίων. Για την υλοποίηση των υπόψη ελεγκτών, χρησιμοποιείται η μετρούμενη συχνότητα  $\omega_{PLL,WT}$  που εξάγεται από τη διάταξη PLL του ελεγκτή του μετατροπέα GSC (βλ. Σχήμα 2.5).



Σχήμα 2.6. Δομή εξωτερικού ελεγκτή της Α/Γ.

## 2.3 Μοντέλο πολυεπίπεδου μετατροπέα τύπου πηγής τάσης για εφαρμογές HVDC

### 2.3.1 Δομή και αρχές λειτουργίας

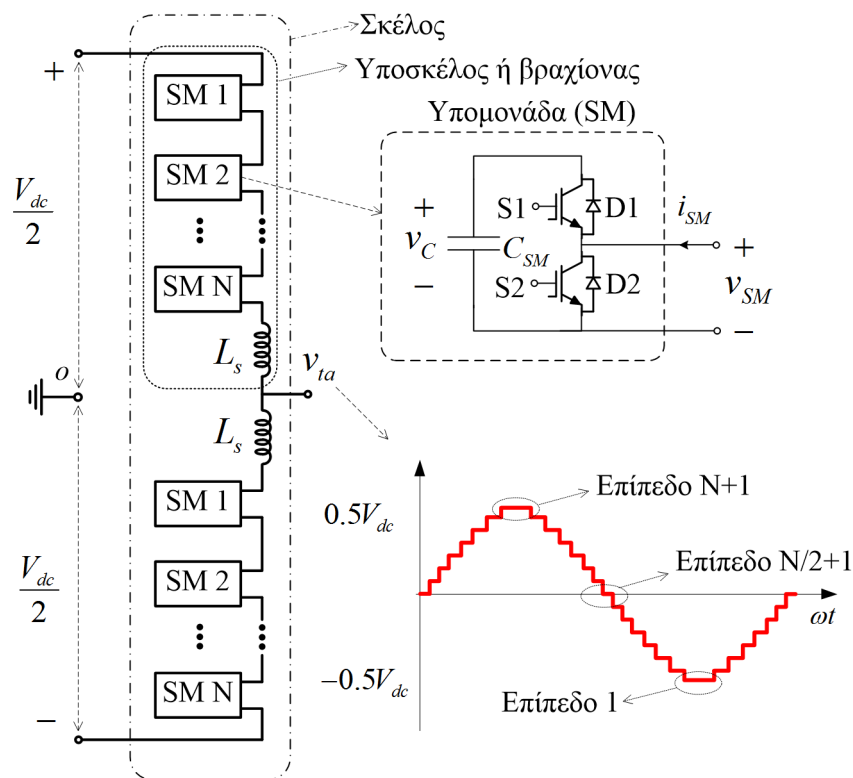
Η τεχνολογία του μετατροπέα τύπου πηγής τάσης πολλαπλών επιπέδων αποτελεί πλέον τη σημερινή πρακτική διασύνδεσης συστημάτων HVDC. Βασίζεται στη χρήση πλήθους υπομονάδων (submodules – SMs) για την τεχνητή σύνθεση μιας ημιτονοειδούς κυματομορφής τάσης [17]. Στο Σχήμα 2.7 εικονίζεται η κυκλωματική διάταξη μιας φάσης (σκέλους) και των υπομονάδων που αποτελούν το δομικό στοιχείο του μετατροπέα (Modular Multilevel Converter – MMC). Πιο αναλυτικά,  $N$  όμοιες υπομονάδες συνδέονται εν σειρά και σχηματίζουν τις αμέσως επόμενες χαρακτηριστικές δομικές συνιστώσες, τα υποσκέλη ή

βραχίονες (arms). Το ένα άκρο κάθε υποσκέλους συνδέεται στον θετικό ή αρνητικό πόλο της dc διασύνδεσης, ενώ το άλλο τους άκρο συνδέεται στον κοινό κόμβο της ac πλευράς. Έτσι, σε κάθε μία από τις τρεις φάσεις του μετατροπέα MMC υπάρχουν 2 υποσκέλη που συγκροτούν από κοινού ένα σκέλος (leg), το οποίο αποτελεί την ανώτερη δομική συνιστώσα του μετατροπέα.

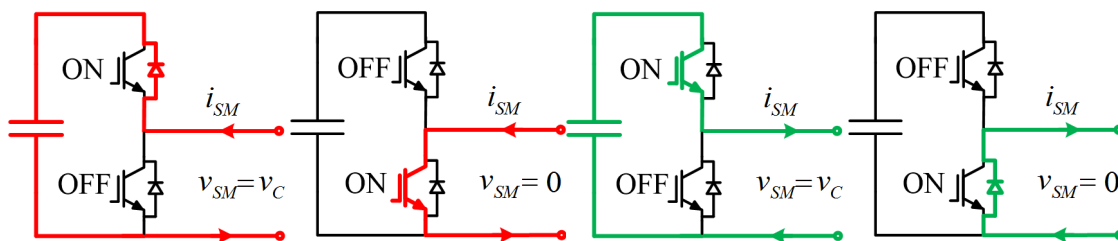
Η εξεταζόμενη υπομονάδα είναι τύπου ημίσειας γέφυρας (2 διακοπτικά στοιχεία ανά SM) και αποτελεί τη συνηθέστερη τοπολογία που εξετάζεται στη βιβλιογραφία για εφαρμογές διασυνδέσεων MMC-HVDC [18]-[22], [117]. Αποτελείται από δυο ημιαγωγίμους διακόπτες IGBTs, δύο διόδους ελεύθερης διέλευσης και έναν πυκνωτή, η τάση του οποίου αξιοποιείται για τη σύνθεση της επιθυμητής κυματομορφής της φασικής ac τάσης, όπως εικονίζεται απλοποιημένα στο Σχήμα 2.7. Η τάση ακροδεκτών της υπομονάδας μπορεί να είναι ίση με την τάση του πυκνωτή  $v_C$  ή 0, ανάλογα με την τιμή των διακοπτικών παλμών S1 και S2. Πιο αναλυτικά, υφίστανται τρεις εναλλακτικές καταστάσεις λειτουργίας:

- Εάν ο παλμός S1 είναι 1 (ON) και ο παλμός S2 0 (OFF), τότε η υπομονάδα εντάσσεται στο κύκλωμα του μετατροπέα και στην τάση εξόδου της επιβάλλεται η τάση του πυκνωτή. Όταν το ρεύμα  $i_{SM}$  εξέρχεται από τον θετικό ακροδέκτη της υπομονάδας, ο πυκνωτής εκφορτίζεται, ενώ όταν το ρεύμα εισέρχεται στον θετικό ακροδέκτη τότε ρέει μέσω της διόδου ελεύθερης διέλευσης D1, φορτίζοντας τον πυκνωτή.
- Εάν ο παλμός S1 είναι 0 (OFF) και ο παλμός S2 1 (ON), τότε η υπομονάδα απεντάσσεται από το κύκλωμα του μετατροπέα και η τάση εξόδου της γίνεται μηδενική. Η τάση του πυκνωτή παραμένει αμετάβλητη στην κατάσταση αυτή καθώς ο πυκνωτής παρακάμπτεται και δεν διαρρέεται από το ρεύμα  $i_{SM}$ .
- Εάν και οι δύο παλμοί S1 και S2 είναι 0 τότε το ρεύμα υποσκέλους του μετατροπέα ρέει μόνο μέσω των διόδων ελεύθερης διέλευσης και δεν υπάρχει άμεσος έλεγχος της τάσης εξόδου του πυκνωτή καθώς εξαρτάται αποκλειστικά από τη κατεύθυνση του ρεύματος υποσκέλους.

Στο Σχήμα 2.8 παρουσιάζονται οι τέσσερις πιθανές οδοί διέλευσης του ρεύματος στην υπομονάδα, θεωρώντας ότι η μία εκ των δύο βαλβίδων (IGBT – διάδος) βρίσκεται σε κατάσταση αγωγής και η άλλη σε κατάσταση αποκοπής (OFF). Συνεπώς, μέσω των διακοπτικών παλμών υπάρχει η δυνατότητα ένταξης ή απένταξης της υπομονάδας ανεξαρτήτως της κατεύθυνσης του ρεύματος υποσκέλους του μετατροπέα. Προφανώς όταν βρίσκεται σε φάση εισαγωγής, η τάση του πυκνωτή αυξομειώνεται διαρκώς συναρτήσει του ρεύματος υποσκέλους, γεγονός που υποδηλώνει την ανάγκη κατάλληλης διαστασιολόγησης της χωρητικότητας  $C_{SM}$  για τον περιορισμό της κυμάτωσης τάσης σε αποδεκτά επίπεδα σε κανονική λειτουργία, όπως επίσης και τη σωστή εναλλαγή των υπομονάδων που εντάσσονται στο κύκλωμα του μετατροπέα μέσω κατάλληλου ελέγχου, προκειμένου όλοι οι πυκνωτές που συγκροτούν κάθε σκέλος να φορτίζονται ομοιόμορφα και η τάση τους να κυμαίνεται σε παρόμοια επίπεδα.



Σχήμα 2.7. Δομή μίας φάσης (σκέλους) μετατροπέα MMC.



Σχήμα 2.8. Οδοί διέλευσης ρεύματος υποσκέλους για τις καταστάσεις “εισαγωγής” ή “παράκαμψης” σε μια υπομονάδα.

Στο κύκλωμα της υπομονάδας υπάρχουν και πρόσθετα στοιχεία προστασίας τα οποία δεν λαμβάνονται υπόψη στο πλαίσιο ανάλυσης της παρούσας διατριβής. Τα εν λόγω στοιχεία προστασίας είναι τα ακόλουθα [8]:

- Ένα αντιπαράλληλο θυρίστορ για την προστασία των διόδων και των διακοπτικών στοιχείων από υπερεντάσεις που προκύπτουν κατά τη διάρκεια σφαλμάτων στη dc πλευρά του μετατροπέα έως ότου ενεργοποιηθεί ο αντίστοιχος διακόπτης προστασίας.
- Μηχανικός διακόπτης παράκαμψης που αποσυνδέει την υπομονάδα σε περίπτωση εσφαλμένης λειτουργίας για τη διασφάλιση της ορθής λειτουργίας της υπόλοιπης διάταξης.

Για την ανάλυση της λειτουργίας ενός μετατροπέα MMC, στο Σχήμα 2.9 παρουσιάζεται μια ισοδύναμη κυκλωματική αναπαράστασή του, όπου οι υπομονάδες αναπαρίστανται ως

ελεγχόμενοι μεταγωγικοί διακόπτες δύο θέσεων (οι θέσεις στο Σχήμα 2.9 είναι τυχαίες). Ως  $S_{ανωji}$  συμβολίζεται η τιμή του διακοπτικού παλμού της υπομονάδας  $i$  που βρίσκεται στο άνω υποσκέλος της φάσης  $j$ , και  $S_{κατωji}$  η αντίστοιχη μεταβλητή για τις υπομονάδες του κάτω υποσκέλους του μετατροπέα. Εάν η τιμή της είναι ίση με 1, τότε το αντίστοιχο SM βρίσκεται στη φάση εισαγωγής, ενώ εάν είναι μηδενική τότε είναι ενεργοποιημένη η φάση παράκαμψης.

Σύμφωνα με το Σχήμα 2.9, κάθε υποσκέλος του μετατροπέα MMC επενεργεί ως μια ελεγχόμενη πηγή τάσης η οποία καθορίζεται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$v_{ανωj} = \sum_{i=1}^N (S_{ανωji} v_{Cανωji}) + L_s \frac{di_{ανωj}}{dt} \quad (2.2)$$

$$v_{κατωj} = \sum_{i=1}^N (S_{κατωji} v_{Cκατωji}) + L_s \frac{di_{κατωj}}{dt} \quad (2.3)$$

Όπου  $j=a,b,c$  είναι οι τρεις φάσεις του μετατροπέα MMC. Αναλύοντας το κύκλωμα του μετατροπέα ως προς την εικονική ενδιάμεση dc λήψη “ο” που φαίνεται στο Σχήμα 2.9 και εφαρμόζοντας τον Νόμο Τάσεων Kirchhoff (NTK), η φασική ac τάση  $v_{ijo}$  μπορεί να εκφραστεί ως:

$$v_{ijo} = -v_{ανωj} + \frac{V_{dc}}{2} = v_{κατωj} - \frac{V_{dc}}{2} \quad (2.4)$$

Λαμβάνοντας υπόψη τις Εξ. (2.2)-(2.4) και την επιθυμητή κυματομορφή τάσης που φαίνεται εποπτικά στο Σχήμα 2.7, διακρίνονται τρία κομβικά επίπεδα λειτουργίας:

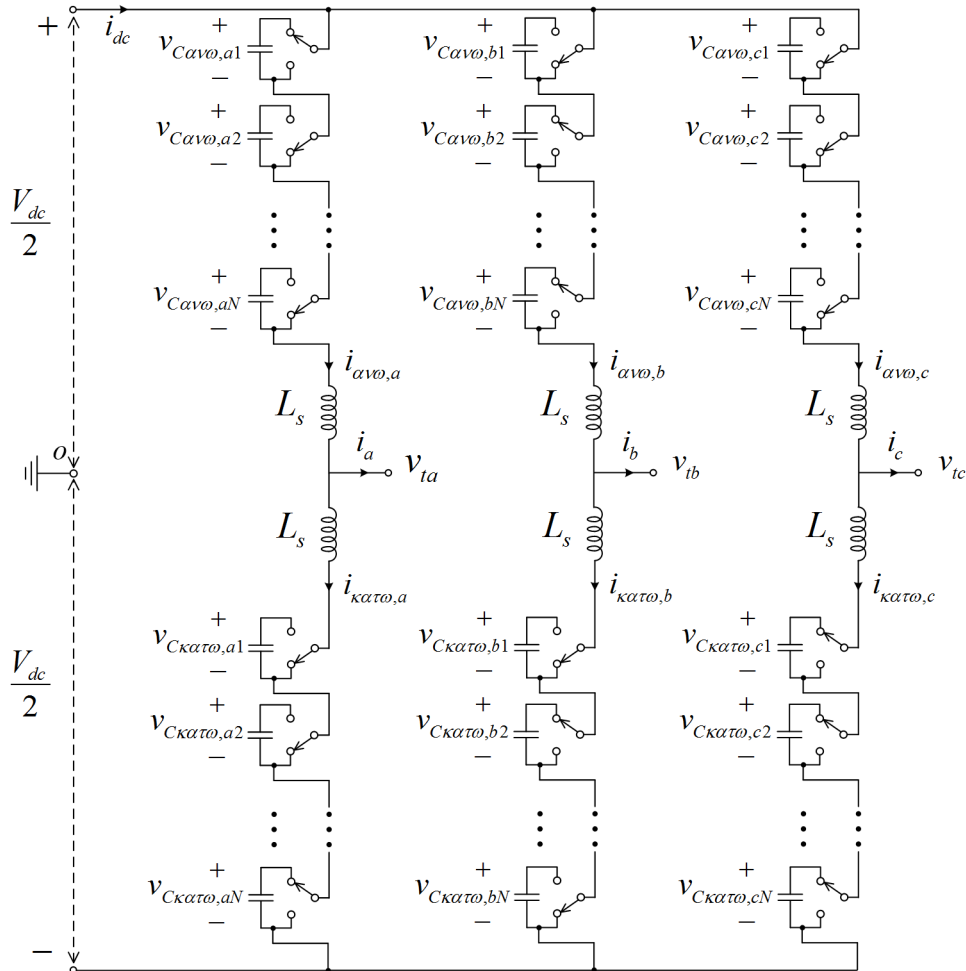
- **Επίπεδο 1.** Η επιθυμητή φασική τάση είναι  $v_{ijo} = -V_{dc} / 2$ , όπου σύμφωνα με την Εξ. (2.4) μπορεί να επιτευχθεί εφόσον  $v_{ανωj} = V_{dc}$  και  $v_{κατωj} = 0$ . Με άλλα λόγια, το υπόψη επίπεδο λειτουργίας επιτυγχάνεται με παράκαμψη του συνόλου των υπομονάδων του κάτω υποσκέλους του μετατροπέα, δηλ.  $S_{κατωji} = 0, \forall i$  και με την εισαγωγή του συνόλου των  $N$  υπομονάδων του άνω υποσκέλους του μετατροπέα, δηλ.  $S_{ανωji} = 1, \forall i$ .
- **Επίπεδο  $N/2+1$ .** Η επιθυμητή φασική τάση είναι  $v_{ijo} = 0$ , όπου σύμφωνα με την Εξ. (2.4) μπορεί να επιτευχθεί εφόσον  $v_{ανωj} = V_{dc} / 2$  και  $v_{κατωj} = V_{dc} / 2$ . Με άλλα λόγια, το υπόψη επίπεδο λειτουργίας επιτυγχάνεται με εισαγωγή ίσου πλήθους υπομονάδων μεταξύ του άνω και κάτω υποσκέλους του μετατροπέα, με την προϋπόθεση ότι η τάση της κάθε υπομονάδας είναι όμοια.
- **Επίπεδο  $N+1$ .** Στο υπόψη επίπεδο η επιθυμητή φασική τάση αντιστρέφεται σε  $v_{ijo} = V_{dc} / 2$ , όπου σύμφωνα με την Εξ. (2.4) μπορεί να επιτευχθεί εφόσον  $v_{ανωj} = 0$  και  $v_{κατωj} = V_{dc}$ . Το επίπεδο λειτουργίας επιτυγχάνεται με παράκαμψη του συνόλου των υπομονάδων του άνω υποσκέλους του μετατροπέα, δηλ.  $S_{ανωji} = 0, \forall i$  και με την



εισαγωγή του συνόλου των  $N$  υπομονάδων του κάτω υποσκέλους του μετατροπέα, δηλ.

$$S_{κατωji} = 1, \forall i.$$

Από τα παραπάνω συμπεραίνεται πως για τη σωστή λειτουργία του μετατροπέα MMC και τη σύνθεση της επιθυμητής κλιμακωτής κυματομορφής ac τάσης, είναι αναγκαία η τήρηση των ακόλουθων αρχών λειτουργίας:



Σχήμα 2.9. Ισοδύναμη κυκλωματική αναπαράσταση τριφασικού μετατροπέα MMC.

- Ανεξαρτήτως επιπέδου λειτουργίας, τα σήματα ελέγχου  $S_{avθji}$  και  $S_{κατωji}$  θα πρέπει να ελέγχονται με τέτοιο τρόπο ώστε κάθε στιγμή να ισχύει  $\sum_{i=1}^N (S_{avθji} + S_{κατωji}) = N$ . Με άλλα λόγια, αν  $n_{avθj}$  είναι ο αριθμός των υπομονάδων του άνω υποσκέλους σε κατάσταση εισαγωγής, τότε ο αντίστοιχος αριθμός των υπομονάδων του κάτω υποσκέλους  $n_{κατωj}$  θα προκύπτει  $n_{κατωj} = N - n_{avθj}$ .
- Με βάση τον παραπάνω κανόνα και την Εξ. (2.4), η μέση τιμή της τάσης των πυκνωτών που άγουν σε κάθε σκέλος του μετατροπέα διαμορφώνεται στη τιμή  $V_{dc} / N$ , γεγονός που υποδηλώνει την ανάγκη ισοκατανομής των τάσεων στους πυκνωτές στην υπόψη τιμή για τη σωστή λειτουργία του μετατροπέα MMC. Τυχόν αποτυχία στη διαδικασία

ισοκαταμερισμού της τάσης των πυκνωτών θα οδηγούσε σε μη ομαλή σύνθεση της φασικής ac τάσης ακροδεκτών και σε πιθανή βλάβη του εξοπλισμού της διάταξης (πυκνωτές, ημιαγωγία στοιχεία), όπως για παράδειγμα σε ενδεχόμενο επαναλαμβανόμενης ένταξης συγκεκριμένης υπομονάδας στο κύκλωμα του μετατροπέα που πιθανώς οδηγούσε σε προοδευτική αύξηση της τάσης λειτουργίας της, πέραν των ορίων προδιαγραφών της.

Η επίτευξη της κλιμακωτής μορφής τάσης αποτελεί και το βασικό πλεονέκτημα του μετατροπέα MMC σε σχέση με τους συμβατικούς μετατροπείς VSC δύο επιπέδων, οδηγώντας σε χαμηλότερο αρμονικό περιεχόμενο στην έξοδο, περιορίζοντας σημαντικά την ανάγκη εγκατάστασης φίλτρων στην έξοδο του μετατροπέα για το σκοπό αυτό. Εν κατακλείδι, η σημερινή τεχνολογία μετατροπέων MMC αποτελεί τη βασική επιλογή σε σημερινές αλλά και μελλοντικές εφαρμογές διασύνδεσης HVDC, συνεκτιμώντας και τα ακόλουθα βασικά πλεονεκτήματα:

- ✓ Τα διακοπτικά στοιχεία σε κάθε σκέλος δεν αλλάζουν κατάσταση ταυτόχρονα, σε αντίθεση με ένα συμβατικό μετατροπέα VSC, αλλά ξεκινούν ή παύουν να άγουν σε διαφορετικές χρονικές στιγμές ακολουθώντας το σήμα αναφοράς της φασικής τάσης. Έτσι, η διακοπτική συχνότητα του καθενός μπορεί να είναι σχετικά χαμηλή εξασφαλίζοντας παράλληλα μικρό αρμονικό περιεχόμενο στην τελική διαμόρφωση της τάσης εξόδου.
- ✓ Οι απαιτήσεις κάθε διακοπτικού στοιχείου σε σχέση με την τάση που αυτό δύναται να αποκόψει είναι σαφώς μειωμένες, αφού αυτή πλέον ισούται με την τάση στα άκρα του πυκνωτή μιας υπομονάδας, η οποία συναρτάται άμεσα με το πλήθος των υπομονάδων ανά υποσκέλος και την επιθυμητή τάση λειτουργίας της dc διασύνδεσης.
- ✓ Η κλιμακούμενη δομή στην οποία βασίζεται η φιλοσοφία του μετατροπέα MMC επιτρέπει τη λειτουργία αυτού ακόμα και σε περίπτωση αστοχίας μιας υπομονάδας, η οποία παρακάμπτεται έως ότου αντικατασταθεί, ενώ ο μετατροπέας συνεχίζει τη λειτουργία του με  $N-1$  διαθέσιμες υπομονάδες στο υποσκέλος όπου εμφανίστηκε η αστοχία.

### 2.3.2 Κυκλωματική ανάλυση

Στην παρούσα ενότητα συνεχίζεται πιο αναλυτικά η κυκλωματική ανάλυση του μετατροπέα MMC, ξεκινώντας με τις βασικές κυκλωματικές εξισώσεις για τη μία φάση ή σκέλος, και στη συνέχεια επεκτείνοντας την ανάλυση σε τριφασική λειτουργία.

Εάν  $\bar{v}_{C_{ανωj}}$  και  $\bar{v}_{C_{κατωj}}$  συμβολιστούν οι μέσες τιμές των πυκνωτών που εντάσσονται σε συγκεκριμένη στιγμή στο άνω και κάτω υποσκέλος του μετατροπέα αντίστοιχα, και  $n_{ανωj}$ ,  $n_{κατωj}$  ο αντίστοιχος αριθμός τους που είναι σε φάση εισαγωγής, τότε οι Εξ. (2.2)-(2.4) αναδιαμορφώνονται ως:

$$v_{ijo} = \frac{-n_{\alpha\omega j} \bar{v}_{C\alpha\omega j} + n_{\kappa\alpha\omega j} \bar{v}_{C\kappa\alpha\omega j}}{2} - \frac{L_s}{2} \frac{di_j}{dt} \quad (2.5)$$

Από την Εξ. (2.5) επιβεβαιώνεται ότι κυρίαρχο ρόλο στη σύνθεση της επιθυμητής φασικής τάσης εξόδου παίζει ο αριθμός των εντασσόμενων υπομονάδων μεταξύ άνω και κάτω υποσκέλους. Ωστόσο, και η εσωτερική αυτεπαγωγή  $L_s$  σε συνδυασμό με το ρεύμα που τη διαρρέει επιδρά και αυτή στην ac τάση εξόδου. Πέραν από την επίδραση που έχει στον έλεγχο της διάταξης, χρησιμεύει πρωτίστως στον περιορισμό των ρευμάτων που ρέουν εσωτερικά στον μετατροπέα σε περίπτωση σφάλματος, και ιδίως στην περίπτωση dc σφάλματος όπου αναμένεται πολύ υψηλός ρυθμός αύξησης ρεύματος. Η εισαγωγή των αυτεπαγωγών στο κύκλωμα του μετατροπέα είναι δυνατή καθώς πάντα υφίσταται κυκλωματική σύνδεση των δύο dc πόλων με τον μεσαίο κόμβο όπου εφαρμόζεται η ac τάση εξόδου, και συνεπώς υφίσταται ροή ρεύματος σε συνεχή βάση στα δύο υποσκέλη κάθε φάσης του μετατροπέα. Η αρχή αυτή δεν ισχύει στον συμβατικό VSC δύο επιπέδων όπου το ac σημείο σύνδεσης συνδέεται εναλλάξ στον θετικό και αρνητικό πόλο του dc ζυγού. Έτσι, σε περίπτωση χρήσης εσωτερικών αυτεπαγωγών θα προκαλούνταν σημαντικές υπερτάσεις τις στιγμές αλλαγής των καταστάσεων των ημιαγωγικών στοιχείων λόγω του υψηλού ρυθμού μεταβολής ρεύματος.

Οι πυκνωτές ενός υποσκέλους συνδέονται εν σειρά και επομένως η ισοδύναμη χωρητικότητα του άνω (κάτω) υποσκέλους προκύπτει από την εν σειρά σύνδεση  $n_{\alpha\omega(\kappa\alpha\tau\omega)j}$  όμοιων πυκνωτών και ισούται με:

$$C_{\alpha\omega(\kappa\alpha\tau\omega)j} = \frac{C_{SM}}{n_{\alpha\omega(\kappa\alpha\tau\omega)j}} \quad (2.6)$$

Από το παραπάνω διαπιστώνεται ότι ο αναμενόμενος ρυθμός μεταβολής της αθροιστικής τάσης των πυκνωτών επηρεάζεται σημαντικά από την ισοδύναμη χωρητικότητα του υποσκέλους, αλλά και από την κατεύθυνση του ρεύματος υποσκέλους  $i_{\alpha\omega(\kappa\alpha\tau\omega)j}$ , υποδηλώνοντας την ανάγκη ταχείας εξισορρόπησης της τάσης τους όσο και τη σωστή διαστασιολόγηση της χωρητικότητάς τους.

Σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας, το ρεύμα που ρέει σε κάθε υποσκέλος ή βραχίονα έχει μια ac συνιστώσα, πράγμα που συνεπάγεται διαφορά στα στιγμιαία ρεύματα που ρέουν σε αυτούς. Το στιγμιαίο ρεύμα στο ac σημείο σύνδεσης, καθώς εισέρχεται σε μία φάση του μετατροπέα, διαιρείται σε άνω και κάτω υποσκέλος και προκαλεί διαφορετική δυναμική συμπεριφορά στους αντίστοιχους πυκνωτές που άγουν εκείνη τη χρονική στιγμή. Έτσι, σε περίπτωση που το ρεύμα  $i_j$  είναι εισερχόμενο (δηλαδή θετικό με βάση τη σύμβαση φοράς στο Σχήμα 2.9), οι άνω άγοντες πυκνωτές θα εκφορτίζονται ενώ αντίθετα οι κάτω άγοντες θα φορτίζονται. Το ακριβώς αντίστροφο ισχύει για εξερχόμενο ρεύμα σε σχέση με τη φόρτιση/εκφόρτιση των πυκνωτών. Λόγω της μετατόπισης φάσης κατά 120 μοίρες των ac ρευμάτων, το μοτίβο φόρτισης και εκφόρτισης των υπομονάδων είναι σε αντιστοιχία μετατοπισμένο χρονικά ανάμεσα στα τρία σκέλη του μετατροπέα. Αναμένεται, δηλαδή, να υπάρχει απόκλιση στις στιγμιαίες τάσεις των πυκνωτών που ανήκουν σε διαφορετικά σκέλη,

ακόμα κι αν διατηρείται σταθερή και ίση η μέση τάση τους στη διάρκεια ενός κύκλου λειτουργίας. Συνεπώς, λόγω του σταθερού αριθμού των συνολικά ενταγμένων υπομονάδων σε κάθε σκέλος, η αθροιστική τάση που αυτά συνθέτουν παρουσιάζει διακύμανση κατά τη διάρκεια ενός ac κύκλου. Η ασυγχρόνιστη αυτή διακύμανση της αθροιστικής τάσης ανάμεσα στα σκέλη του μετατροπέα οδηγεί σε διαφορές δυναμικού και επομένως σε ρεύματα ανακυκλοφορίας [26], [28], [117]. Η ονομασία τους προέρχεται από το γεγονός πως αυτά ρέουν μόνο εσωτερικά στον MMC και δεν εμφανίζονται τόσο στο dc όσο και στο ac κύκλωμα. Παρά τη μη εμφάνιση των ρευμάτων αυτών εξωτερικά του μετατροπέα είναι επιθυμητό να διατηρούνται σε χαμηλά επίπεδα προς μείωση των απωλειών και μικρότερης διαστασιολόγησης όσον αφορά στο ρεύμα ανοχής των διακοπτικών στοιχείων.

Λόγω της εγγενούς ιδιότητας του μετατροπέα MMC ως προς τη δημιουργία εσωτερικών ρευμάτων ανακυκλοφορίας, η κατάσταση των κυκλωματικών εξισώσεων λειτουργίας καθίσταται πολύπλοκότερη καθώς τα ρεύματα υποσκέλους δεν μπορούν να εκφραστούν αναλυτικά, παρά μόνον λαμβάνοντας υπόψη εξ αρχής τις κύριες συνιστώσες που το συγκροτούν και είναι οι ακόλουθες τρεις [17], [18], [26], [28]:

- Μία dc συνιστώσα  $i_{ανω(κατω)dcj}$  που συνδέεται με την ανταλλαγή ισχύος διαμέσου του dc ζυγού. Η συνιστώσα αυτή ρέει σε κάθε σκέλος εξαιτίας της μόνιμης κυκλωματικής σύνδεσης του άνω υποσκέλους με τον θετικό ακροδέκτη και του κάτω υποσκέλους με τον αρνητικό ακροδέκτη του dc ζυγού, ανεξαρτήτως της κατάστασης των υπομονάδων. Η φορά αυτής της dc συνιστώσας εξαρτάται από τον ρόλο που επιτελεί ο μετατροπέας στο σύστημα, δηλαδή αν λειτουργεί ως ανορθωτής εγγέοντας ισχύ στην dc πλευρά ή ως αντιστροφέας που εγγείει ισχύ στην ac πλευρά. Βέβαια, είναι δυνατόν να υφίσταται εναλλαγή των ρόλων λειτουργίας ανάμεσα στους μετατροπείς μιας διασύνδεσης VSC-HVDC, όπως π.χ. σε εφαρμογές διασύνδεσης ασύγχρονων ac δικτύων ή νησιωτικών συστημάτων.

Μια εύλογη παραδοχή που μπορεί να υιοθετηθεί για την υπόψη συνιστώσα είναι ότι σε μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, το dc ρεύμα  $i_{dc}$  ισοκατανέμεται στα τρία σκέλη του μετατροπέα. Η παραδοχή αυτή στηρίζεται στο γεγονός ότι η ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση ανάμεσα στον θετικό και αρνητικό ακροδέκτη του dc ζυγού είναι όμοια σε κάθε σκέλος (π.χ. ίση τιμή αυτεπαγωγής υποσκέλους, ίδιος αριθμός ενταγμένων υπομονάδων κάθε σκέλους κλπ.). Ισχύει δηλαδή:  $i_{ανω(κατω)dcj} = \frac{i_{dc}}{3}$ .

- Μία ac συνιστώσα  $i_{ανω(κατω)acj}$  που συνδέεται με το ρεύμα της ac πλευράς,  $i_j$ . Το ρεύμα αυτό ρέει σε κάθε φάση του μετατροπέα MMC διαμέσου των βραχιόνων και παρουσιάζει την αναμενόμενη ολίσθηση φάσης των  $120^\circ$  ανάμεσα στις τρεις φάσεις.

Μια εύλογη παραδοχή που μπορεί να υιοθετηθεί για την υπόψη συνιστώσα είναι ότι το ac ρεύμα  $i_j$  που εισέρχεται ή εξέρχεται σε κάθε σκέλος ισοκατανέμεται ανάμεσα στους δύο βραχίονες ή υποσκέλη, καθώς η αντίσταση κάθε υπομονάδας είναι πρακτικά η ίδια ανεξαρτήτως αν είναι σε φάση εισαγωγής ή παράκαμψης, συνεπώς η αντίσταση

διέλευσης μεταξύ άνω και κάτω υποσκέλους είναι παρόμοια. Ισχύει δηλαδή:

$$i_{ανωαc_j} = \frac{i_j}{2} = -i_{κατωαc_j}.$$

- Μια συνιστώσα ρεύματος ανακυκλοφορίας  $i_{ανω(κατω)z_j}$ , λόγω της κυμάτωσης της αθροιστικής τάσης που εφαρμόζεται σε κάθε σκέλος από τις ενταγμένες υπομονάδες, και η οποία δεν γίνεται αντιληπτή εξωτερικά του μετατροπέα (ac ή dc πλευρά). Συνεπώς μπορεί να θεωρηθεί ότι το ρεύμα ανακυκλοφορίας άνω και κάτω υποσκέλους είναι το ίδιο, δηλ.  $i_{ανωz_j} = i_{κατωz_j} = i_{z_j}$ .

Με βάση τα παραπάνω, τα ρεύματα άνω/κάτω υποσκέλους μπορούν να εκφραστούν μαθηματικά ως:

$$i_{ανωj} = \frac{i_j}{2} + \frac{i_{dc}}{3} + i_{z_j} \quad (2.7)$$

$$i_{κατωj} = -\frac{i_j}{2} + \frac{i_{dc}}{3} + i_{z_j} \quad (2.8)$$

Λαμβάνοντας υπόψη τις Εξ. (2.2), (2.3) και με εφαρμογή του ΝΤΚ σε βρόχο που περιλαμβάνει ένα σκέλος του μετατροπέα και το dc ζυγό, προκύπτουν τα εξής:

$$-V_{dc} + \sum_{i=1}^N (S_{ανωji} v_{Cανωji}) + L_s \frac{di_{ανωj}}{dt} + L_s \frac{di_{κατωj}}{dt} + \sum_{i=1}^N (S_{κατωji} v_{Cκατωji}) = 0 \quad (2.9)$$

Συνδυάζοντας την Εξ. (2.9) με τις (2.7) και (2.8), η δυναμική του ρεύματος ανακυκλοφορίας καθορίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$L_s \frac{di_{z_j}}{dt} = \frac{V_{dc} - \sum_{i=1}^N (S_{ανωji} v_{Cανωji}) - \sum_{i=1}^N (S_{κατωji} v_{Cκατωji})}{2} \quad (2.10)$$

Από την ανωτέρω σχέση διαπιστώνεται πως με ταυτόχρονη μεταβολή της τάσης άνω και κάτω υποσκέλους κατά την ίδια ποσότητα μπορεί να μεταβληθεί το ρεύμα ανακυκλοφορίας χωρίς να αλλοιωθεί η επιθυμητή ac τάση εξόδου, όπως μπορεί να επιβεβαιωθεί από την Εξ. (2.5). Συνεπώς, διακρίνεται μια εγγενής δυνατότητα ελέγχου των ρευμάτων ανακυκλοφορίας, χωρίς να αλλοιώνεται ο επιθυμητός έλεγχος τάσης και ρεύματος εξόδου του μετατροπέα.

Προκειμένου να διερευνηθεί διεξοδικότερα η φυσική δυναμική των ρευμάτων ανακυκλοφορίας, χρειάζεται η μαθηματική ανάλυση της αναμενόμενης διακύμανσης της τάσης ή εναλλακτικά της χρονικά μεταβαλλόμενης αποθηκευμένης ενέργειας σε ένα σκέλος του μετατροπέα. Υπό συνθήκες μόνιμης κατάστασης και υποθέτοντας μικρή πτώση τάσης επί της αυτεπαγωγής  $L_s$ , το άθροισμα των ελεγχόμενων τάσεων άνω και κάτω υποσκέλους  $v_{ανω} + v_{κατω}$  ισούται ιδανικά με  $V_{dc}$ . Οι εφαρμοζόμενες τάσεις  $v_{ανω}$  και  $v_{κατω}$  υπολογίζονται από τα αντίστοιχα σήματα αναφοράς που διαμορφώνονται από τον ελεγκτή του μετατροπέα. Τα σήματα αυτά έχουν ημιτονοειδή μορφή προκειμένου να διαμορφωθεί η επιθυμητή φασική

ac τάση εξόδου. Επομένως, οι τάσεις άνω και κάτω υποσκέλους προσεγγίζονται από τις ακόλουθες σχέσεις [18]:

$$v_{\alpha\omega} = \frac{V_{dc}}{2}(1 - m \sin(\omega_0 t)) \quad (2.11)$$

$$v_{\kappa\alpha\omega} = \frac{V_{dc}}{2}(1 + m \sin(\omega_0 t)) \quad (2.12)$$

Όπου με  $m$  συμβολίζεται ο συντελεστής διαμόρφωσης (κυμαίνεται από 0 έως 1). Αγνοώντας προσωρινά την επίδραση των ρευμάτων ανακυκλοφορίας στα ρεύματα υποσκέλους, οι Εξ. (2.7) και (2.8) διαμορφώνεται ως εξής:

$$i_{\alpha\omega}(t) = \frac{I_{\max}}{2} \sin(\omega_0 t + \varphi) + \frac{I_{dc}}{3} \quad (2.13)$$

$$i_{\kappa\alpha\omega}(t) = -\frac{I_{\max}}{2} \sin(\omega_0 t + \varphi) + \frac{I_{dc}}{3} \quad (2.14)$$

Όπου με  $I_{\max}$ ,  $I_{dc}$  συμβολίζονται τα πλάτη των ac, dc ρευμάτων και  $\varphi$  η διαφορά φάσης ως προς την φασική ac τάση. Οι Εξ. (2.13), (2.14) αναδιατυπώνονται ως:

$$i_{\alpha\omega}(t) = \frac{I_{dc}}{3}(1 + k \sin(\omega_0 t + \varphi)) \quad (2.15)$$

$$i_{\kappa\alpha\omega}(t) = \frac{I_{dc}}{3}(1 - k \sin(\omega_0 t + \varphi)) \quad (2.16)$$

Όπου ο συντελεστής  $k$  ορίζεται ως:

$$k = \frac{3I_{\max}}{2I_{dc}} \quad (2.17)$$

Με βάση τα παραπάνω, μπορεί να εκφραστεί μαθηματικά η στιγμιαία ενεργός ισχύς που διακινείται στα υποσκέλη του μετατροπέα. Πιο αναλυτικά, η ενεργός ισχύς του άνω υποσκέλους  $p_{\alpha\omega}(t)$  προκύπτει:

$$p_{\alpha\omega}(t) = v_{\alpha\omega}(t) \cdot i_{\alpha\omega}(t) = \frac{V_{dc}}{2}(1 - m \sin(\omega_0 t)) \cdot \frac{I_{dc}}{3}(1 + k \sin(\omega_0 t + \varphi)) \quad (2.18)$$

Υστερα από πράξεις προκύπτει:

$$p_{\alpha\omega}(t) = \frac{V_{dc}I_{dc}}{6} \left( 1 - m \sin(\omega_0 t) + k \sin(\omega_0 t + \varphi) - \frac{km}{2}(\cos(\varphi) - \cos(2\omega_0 t + \varphi)) \right) \quad (2.19)$$

Ακολουθώντας τον ίδιο συλλογισμό για την ενεργό ισχύ του κάτω υποσκέλους, προκύπτει αντίστοιχα:

$$p_{\kappa\alpha\omega}(t) = \frac{V_{dc}I_{dc}}{6} \left( 1 + m \sin(\omega_0 t) - k \sin(\omega_0 t + \varphi) - \frac{km}{2}(\cos(\varphi) - \cos(2\omega_0 t + \varphi)) \right) \quad (2.20)$$

Συνεπώς, η συνολική ενεργός ισχύς του σκέλους τελικά προκύπτει:

$$p_{ανω}(t) + p_{κατω}(t) = \frac{V_{dc} I_{dc}}{6} \left( 2 - km \cos(\varphi) - \frac{km}{2} \cos(2\omega_0 t + \varphi) \right) \quad (2.21)$$

Σε συνθήκες μόνιμης κατάστασης, αναμένεται μηδενική dc συνιστώσα της ενεργού ισχύος κάθε σκέλους, συνεπώς θα ισχύει ότι  $2 - km \cos(\varphi) = 0$ . Η συνθήκη αυτή μπορεί να επαληθευτεί και από το ισοζύγιο ισχύος μεταξύ dc και ac πλευράς του μετατροπέα MMC. Αμελώντας τις απώλειες του μετατροπέα, η ενεργός ισχύς στην dc πλευρά ταυτίζεται με την ενεργό ισχύ στην ac πλευρά, συνεπώς ισχύει ότι:

$$V_{dc} I_{dc} = 3 \frac{m V_{dc} / 2}{\sqrt{2}} \frac{I_{\max}}{\sqrt{2}} \cos(\varphi) \quad (2.22)$$

Λαμβάνοντας υπόψη τον ορισμό του συντελεστή  $k$  στην Εξ. (2.17) και την ανωτέρω εξίσωση του ισοζυγίου ισχύος, επιβεβαιώνεται η συνθήκη  $2 - km \cos(\varphi) = 0$ . Συνεπώς, η τελική έκφραση της ενεργού ισχύος του σκέλους διαμορφώνεται ως:

$$p_{ανω}(t) + p_{κατω}(t) = \frac{V_{dc} I_{dc}}{6 \cos \varphi} \cos(2\omega_0 t + \varphi) \quad (2.23)$$

Σύμφωνα με την ανωτέρω σχέση, η στιγμιαία ισχύς που διακινείται στο σκέλος του μετατροπέα παρουσιάζει μια ημιτονοειδή διακύμανση με συχνότητα διπλάσια της θεμελιώδους, γεγονός που υποδηλώνει αντίστοιχη διακύμανση της τάσης των πυκνωτών. Συνεπώς, τα ρεύματα κυκλοφορίας που δημιουργούνται από την εν λόγω κυμάτωση αναμένεται να έχουν κυρίαρχη αρμονική τη διπλάσια της θεμελιώδους.

### 2.3.3 Σύστημα ελέγχου μετατροπέα MMC

Πρωταρχικό ζήτημα ελέγχου ενός μετατροπέα MMC είναι η διαδικασία επιλογής του αριθμού των υπομονάδων που εντάσσονται σε κάθε βραχίονα για κάθε χρονική στιγμή. Οι τεχνικές ελέγχου και διαμόρφωσης της τάσης εξόδου αποτελούν αντικείμενο επισταμένης έρευνας τις τελευταίες δεκαετίες στον τομέα των ηλεκτρονικών ισχύος. Έχουν προταθεί ποικίλες τεχνικές που απορρέουν από εδραιωμένες φιλοσοφίες διαμόρφωσης στο πεδίο μετατροπέων ισχύος, τόσο για τους κλασσικούς μετατροπείς δύο επιπέδων όσο και για τους πολυεπίπεδους μετατροπείς σε πιο πρόσφατες μελέτες. Γενικά, οι τεχνικές διαμόρφωσης που συνήθως χρησιμοποιούνται στους πολυεπίπεδους μετατροπείς μπορούν να χωριστούν σε τέσσερις μεγάλες κατηγορίες [17], [118], [119]:

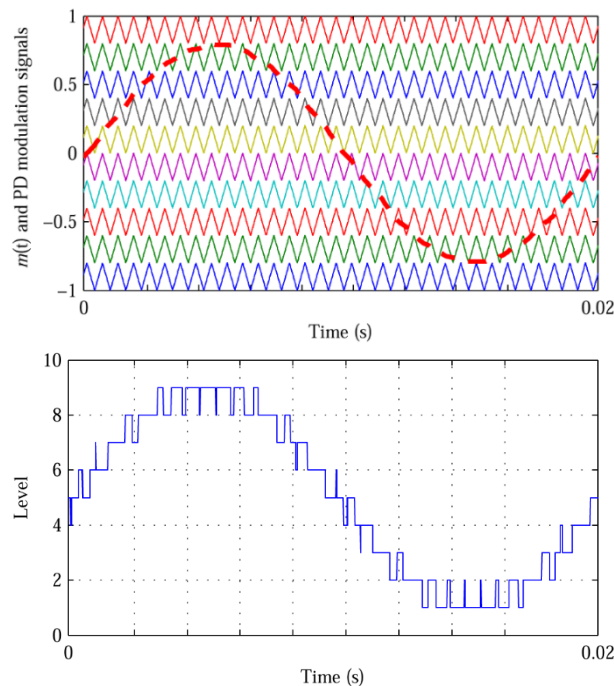
- Τεχνικές ημιτονοειδούς διαμόρφωσης εύρους παλμών (Sinusoidal Pulse Width Modulation – SPWM) με πολλαπλά φέροντα.
- Τεχνικές διαμόρφωσης εύρους παλμών με χρήση των διανυσμάτων χώρου του αντιστροφέα (Space Vector PWM – SVPWM).
- Τεχνικές διαμόρφωσης πλησιέστερου επιπέδου (Nearest Level Control – NLC).
- Τεχνικές διαμόρφωσης εύρους παλμών επιλεκτικής εξάλειψης αρμονικών (Selective Harmonic Elimination PWM – SHE-PWM).

Εξαιτίας των πλεοναζουσών διακοπτικών καταστάσεων που οδηγούν στο επιθυμητό επίπεδο τάσης εξόδου, υπάρχει μεγαλύτερη ευελιξία στον έλεγχο διαμόρφωσης σε σχέση με τους συμβατικούς μετατροπέες. Η επιλεγόμενη τεχνική διαμόρφωσης καθορίζει τον αριθμό των υπομονάδων που εντάσσονται σε κάθε υποσκέλος ή βραχίονα αλλά η τελική παλμοδότηση των διακοπτικών στοιχείων εξαρτάται και από την απαίτηση για εξισορρόπηση των τάσεων στους πυκνωτές [17], [117], [120]. Ο ρυθμός δειγματοληψίας (λήψη μέτρησης τάσεων στους πυκνωτές) και εκτέλεσης της διαδικασίας αυτής διαδραματίζει κυρίαρχο ρόλο στην επίτευξη των παραπάνω στόχων. Ωστόσο, η συχνή εναλλαγή κατάστασης των επιμέρους διακοπτικών στοιχείων λόγω της συνεχούς ταξινόμησης και εξισορρόπησης των πυκνωτών οδηγεί εύλογα σε μεγαλύτερες διακοπτικές απώλειες. Από την άλλη πλευρά, η διαμόρφωση με βάση κυρίως το επιθυμητό επίπεδο τάσης εξόδου και εξισορρόπηση σε αραιά διαστήματα, οδηγεί πιθανότατα σε μεγαλύτερες διακυμάνσεις και μη ιδανική ρύθμιση της ac τάσης, παρότι βελτιώνει τις προκαλούμενες απώλειες. Για το λόγο αυτό, οι διάφορες τεχνικές διαμόρφωσης είναι επιθυμητό να μην προκαλούν συνεχείς αλλαγές κατάστασης, διατηρώντας όμως παράλληλα ανεκτά επίπεδα διακύμανσης τάσης στους πυκνωτές. Απαιτείται, δηλαδή, ένα είδος συμβιβασμού στις παραπάνω απαιτήσεις, όσον αφορά στη στρατηγική διαμόρφωσης και τελικού ελέγχου της παλμοδότησης των ημιαγωγικών στοιχείων.

Στην παρούσα διατριβή, η τεχνική διαμόρφωσης εύρους παλμών που υιοθετήθηκε για τη μοντελοποίηση του μετατροπέα MMC είναι η ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνική χρήσης πολλαπλών συμφασικών φερόντων τα οποία μετατίθενται κατά επίπεδο (Phase Disposition Sinusoidal Pulse Width Modulation – PD-SPWM) [17], [18]. Πιο αναλυτικά, χρησιμοποιούνται  $N$  όμοια τριγωνικά φέροντα, το πλάτος των οποίων είναι ίσο με  $2/N$ , ώστε  $N$  φέροντα διαδοχικά μετατεθειμένα κατά πλάτος να οριοθετούν την περιοχή διαμόρφωσης -1 έως 1 του ημιτονικού σήματος διαμόρφωσης  $m(t)$  που διαμορφώνεται από τον εξωτερικό ελεγκτή ενεργού και αέργου ισχύος ( $P-Q$ ) του μετατροπέα. Στο Σχήμα 2.10 παρουσιάζεται γραφικά η υπόψη μέθοδος θεωρώντας 10 υπομονάδες ανά υποσκέλος ( $N=10$ ). Στο παράδειγμα του εν λόγω σχήματος, αν το σήμα ελέγχου  $m(t)$  γίνει ίσο με 0.8, τότε επιβάλλεται η ένταξη 9 υπομονάδων στο κάτω υποσκέλος και μόνο μίας στο άνω υποσκέλος. Εάν  $m(t)=0$  τότε επιβάλλεται η ένταξη 5 υπομονάδων στο άνω σκέλος και 5 στο κάτω.

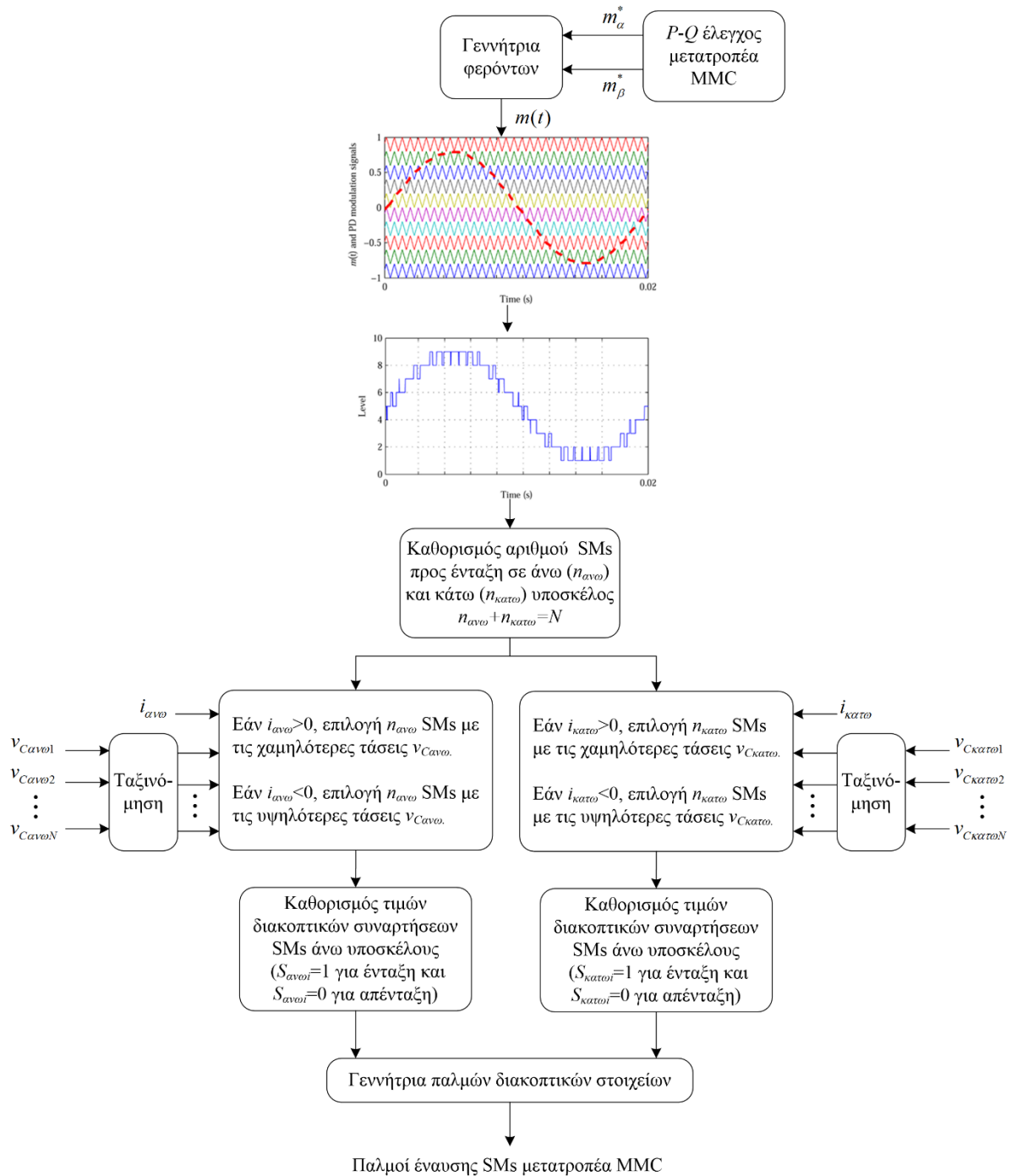
Η χρήση των τεχνικών μετάθεσης κατά επίπεδο έχει ταυτόσημο αποτέλεσμα με τη συμβατική τεχνική SPWM ως προς την μετάθεση των κυριαρχουσών αρμονικών. Έτσι, οι αρμονικές τάσεις που επικρατούν εντοπίζονται στην κοινή συχνότητα των φερόντων και γύρω από αυτή. Συγκεκριμένα, συμβολίζοντας με  $F_R$  τη συχνότητα διαμόρφωσης και  $F_B$  τη θεμελιώδη, υψηλές αρμονικές μπορούν να εμφανισθούν και σε συχνότητες που απέχουν  $(2k+1)*F_B$  εκατέρωθεν της  $F_R$ , με τον συντελεστή  $k$  να λαμβάνει μικρές ακέραιες τιμές. Ωστόσο, το πλάτος των κυριαρχουσών αρμονικών αναμένεται να είναι σημαντικά μικρότερο σε σχέση με έναν συμβατικό VSC με ίδια  $F_R$ , αφού η κλιμακωτή μορφή της τάσης εξόδου οδηγεί σε χαμηλότερες τιμές THD σε σχέση με την αντίστοιχη παλμική.





Σχήμα 2.10. Τεχνική διαμόρφωσης Phase Disposition SPWM για  $N=10$ , και παράδειγμα σήματος διαμόρφωσης  $m(t)$  πλάτους 0.8.

Επόμενο στάδιο στο εσωτερικό σύστημα ελέγχου του μετατροπέα είναι η επιλογή των προς ένταξη υπομονάδων από το σύνολο των  $N$  διαθέσιμων σε κάθε υποσκέλος, προκειμένου να επιτευχθεί το οριζόμενο επίπεδο λειτουργίας. Στο συγκεκριμένο στάδιο επενεργεί ο έλεγχος εξισορρόπησης τάσεως των πυκνωτών (Capacitor Voltage Balancing), με στόχο την ένταξη των πυκνωτών που οδηγούν κατά το δυνατό σε ισοκατανομή των τάσεων στο σύνολο των διαθέσιμων πυκνωτών, αποφεύγοντας υπερφόρτιση ή αποφόρτιση μεμονωμένων υπομονάδων. Όπως αναφέρθηκε και στις προηγούμενες ενότητες, η μεταβολή της τάσης σε κάθε πυκνωτή εξαρτάται από την κατάσταση λειτουργίας της υπομονάδας στην οποία ανήκει, καθώς και από το μέγεθος και την κατεύθυνση του ρεύματος υποσκέλους. Στην παρούσα διατριβή, υιοθετείται η ευρέως χρησιμοποιούμενη στη βιβλιογραφία μέθοδος ταξινόμησης (sorting) [17], [18], η λογική της οποίας παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.11 υπό μορφή διαγράμματος ροής. Πιο αναλυτικά, η υλοποίηση του ελέγχου εξισορρόπησης γίνεται αλγοριθμικά με κατάλληλο κώδικα ο οποίος ταξινομεί σε κάθε χρονική στιγμή τους πυκνωτές σε αύξουσα σειρά βάσει της μετρούμενης τάσης στα άκρα αυτών. Ο έλεγχος εξισορρόπησης δέχεται ως είσοδο τον επιθυμητό αριθμό υπομονάδων προς εισαγωγή στο κύκλωμα του μετατροπέα καθώς και τα μετρούμενα ρεύματα σε κάθε υποσκέλος. Έτσι, σε κάθε βήμα δειγματοληψίας, αν το μετρούμενο ρεύμα στο άνω υποσκέλος είναι θετικό επιλέγονται προς ένταξη οι υπομονάδες με τη χαμηλότερη τάση, ενώ αντίθετα αν είναι αρνητικό επιλέγονται εκείνες με την υψηλότερη. Η ίδια φιλοσοφία ελέγχου ισχύει και για το κάτω υποσκέλος θεωρώντας τη σύμβαση για τη θετική φορά των ρευμάτων όπως στο Σχήμα 2.9. Οι διακοπτικές συναρτήσεις  $S_{\text{ανω}}$  και  $S_{\text{κάτω}}$  που καθορίζουν την παλμοδότηση των διακοπτικών στοιχείων, λαμβάνουν τη λογική τιμή 1 όταν η υπομονάδα είναι σε φάση εισαγωγής και 0 όταν είναι σε φάση παράκαμψης.



Σχήμα 2.11. Διάγραμμα ροής τεχνικής διαμόρφωσης PD-SPWM σε κάθε φάση του μετατροπέα MMC, με ενσωματωμένη στρατηγική εξισορρόπησης της τάσης των πυκνωτών κάθε SM.

Η αποτελεσματικότητα της περιγραφόμενης μεθόδου εξαρτάται από τη συχνότητα με την οποία εφαρμόζεται ο αλγόριθμος εξισορρόπησης. Η εφαρμογή του σε κάθε μεμονωμένο βήμα ελέγχου της διάταξης, το οποίο είναι εύλογα μικρό (π.χ. της τάξης των δεκάδων μs) εξασφαλίζει ομοιομορφία στη διακύμανση των τάσεων και επιβεβαιώνει στην πράξη την σχετική θεώρηση στην ανάλυση των προηγούμενων παραγράφων. Προκύπτει, δηλαδή, πως σε κάθε χρονική στιγμή οι επιμέρους πυκνωτές κάθε βραχίονα έχουν ουσιαστικά την ίδια τάση στα άκρα τους.

### 2.3.4 Επιλογή παραμέτρων στο αναλυτικό μοντέλο του μετατροπέα MMC

Προκειμένου να αξιολογηθεί η δυναμική συμπεριφορά του μετατροπέα MMC σε εφαρμογές διασύνδεσης VSC-HVDC, απαιτείται η χρήση ενός κατά το δυνατόν αντιπροσωπευτικού μοντέλου προσομοίωσης συμπεριλαμβανομένων των επιμέρους συνιστωσών που το απαρτίζουν. Για τα ημιαγωγικά στοιχεία, επιλέγονται διαθέσιμα μοντέλα που διατίθενται στη βιβλιοθήκη του λογισμικού Matlab/Simulink. Σημαντικό ρόλο στη δυναμική συμπεριφορά ενός μετατροπέα MMC διαδραματίζει η επιλογή της χωρητικότητας των πυκνωτών  $C_{SM}$  και της εσωτερικής αυτεπαγωγής  $L_s$  των βραχιόνων. Οι συγκεκριμένες παράμετροι καθορίζουν σε σημαντικό βαθμό τη συμπεριφορά του μετατροπέα τόσο στη μόνιμη κατάσταση όσο και σε μεταβατικά φαινόμενα, κατά την εκδήλωση διαταραχών ή ελεγχόμενων αλλαγών στις συνθήκες λειτουργίας του εξεταζόμενου συστήματος.

Η διαστασιολόγηση των πυκνωτών που περιλαμβάνονται σε κάθε υπομονάδα αποτελεί αντικείμενο ενδελεχούς οικονομοτεχνικής μελέτης σε σχέση με το κόστος και τις τιθέμενες τεχνικές προδιαγραφές λειτουργίας. Εστιάζοντας στο τεχνικό σκέλος για την επιλογή της χωρητικότητας  $C_{SM}$ , θα πρέπει να συνεκτιμηθούν τα ακόλουθα κριτήρια:

- Το αποδεκτό εύρος της αναμενόμενης διακύμανσης που εμφανίζεται στην τάση των πυκνωτών.
- Τη δυναμική συμπεριφορά του συνδέσμου VSC-HVDC σε μεταβατικά φαινόμενα, η οποία σχετίζεται και με την αποθηκευμένη ενέργεια στο σύνολο των πυκνωτών του συστήματος των μετατροπέων MMC.
- Την απαιτούμενη τάση λειτουργίας στα άκρα των πυκνωτών, που εξαρτάται από τον αριθμό των υπομονάδων σε κάθε υποσκέλος ή βραχίονα.

Στην περίπτωση του μετατροπέα δυο επιπέδων, η χωρητικότητα συνδέεται σε κάθε πόλο ενώ στην περίπτωση ενός μετατροπέα MMC, η χωρητικότητα ενσωματώνεται στις υπομονάδες. Συνεπώς, διαμορφώνεται μια ισοδύναμη συνολική χωρητικότητα  $C_{eq}$  που χαρακτηρίζει τον μετατροπέα και επηρεάζει τη δυναμική συμπεριφορά του. Η επιλογή μικρής  $C_{eq}$  συνεπάγεται μικρή σταθερά χρόνου στην δυναμική απόκριση του συστήματος, επιτρέποντας ταχύτερο έλεγχο ισχύος όταν αυτό απαιτείται. Ωστόσο, αναμένεται μεγαλύτερη διακύμανση στην τάση κάθε υπομονάδας, επιφέροντας και μεγαλύτερες διακυμάνσεις στην τάση του dc ζυγού. Επιπρόσθετα, σε περιπτώσεις που η ισορροπία ισχύος διαταραχθεί μεταξύ των δύο άκρων της dc διασύνδεσης, όπως για παράδειγμα κατά την εμφάνιση ενός ac σφάλματος, θα προκληθεί διακύμανση στην dc τάση λειτουργίας, ο ρυθμός μεταβολής της οποίας εξαρτάται από την ισοδύναμη χωρητικότητα που εμφανίζουν οι μετατροπείς. Συνεπώς, ο σχεδιασμός τεχνικών ελέγχου που εξασφαλίζουν την ικανότητα αδιάλειπτης λειτουργίας στο σύστημα διασύνδεσης VSC-HVDC συναρτάται άμεσα με την εν λόγω ισοδύναμη χωρητικότητα του dc κυκλώματος. Μία συνήθης αναπαράσταση της χωρητικότητας  $C_{eq}$  είναι μέσω της ισοδύναμης σταθεράς χρόνου  $\tau_c$ , που προσδιορίζεται από την ακόλουθη σχέση [30]:

$$\tau_c = \frac{1}{2} \frac{C_{eq} V_{dc}^2}{S_n} \quad (2.24)$$

Η σταθερά αυτή αναπαριστά το χρόνο που χρειάζεται για να φορτιστεί ο ισοδύναμος πυκνωτής  $C_{eq}$  σε τάση  $V_{dc}$ , εάν τροφοδοτείται από πηγή σταθερής ισχύος  $S_n$ . Ο αριθμητής εκφράζει την αποθηκευμένη ενέργεια για λειτουργία υπό τάση  $V_n$ , ενώ  $S_n$  είναι η ικανότητα του μετατροπέα. Ενδεικτικές τιμές της σταθεράς αυτής σε εμπορικούς μετατροπείς VSC-HVDC είναι της τάξεως των 30–40 kJ/MVA (ms) [6], [7], όπου τα MVA αναφέρονται στην ικανότητα του μετατροπέα. Οι τιμές αυτές οδηγούν σε διακύμανση της τάσης των πυκνωτών της τάξεως του 10% για ονομαστικές συνθήκες λειτουργίας.

Η χωρητικότητα του πυκνωτή της υπομονάδας  $C_{SM}$  μπορεί να συσχετιστεί με την ισοδύναμη χωρητικότητα  $C_{eq}$  υπολογίζοντας την συνολική ενέργεια που αποθηκεύεται στα 6 υποσκέλη που περιλαμβάνει ένας τριφασικός μετατροπέας MMC. Πιο αναλυτικά, η αποθηκευμένη ενέργεια  $E_{MMC}$  προκύπτει ως εξής:

$$E_{MMC} = 3E_{MMCj} = 3 \left( 2 \frac{1}{2} \frac{C_{SM}}{N} V_{dc}^2 \right) = \frac{1}{2} \left( \frac{6C_{SM}}{N} \right) V_{dc}^2 \quad (2.25)$$

Από την παραπάνω σχέση διαπιστώνεται ότι η σχέση που συνδέει την ισοδύναμη χωρητικότητα του μετατροπέα με την χωρητικότητα του κάθε πυκνωτή είναι [28]:

$$C_{eq} = \frac{6C_{SM}}{N} \quad (2.26)$$

Αξίζει να σημειωθεί πως για τον παραπάνω υπολογισμό λήφθηκε υπόψη το γεγονός παρόλο που κάθε στιγμή εντάσσονται  $N$  συνολικά υπομονάδες σε κάθε σκέλος, στην πραγματικότητα υπάρχουν  $2N$  διαθέσιμες υπομονάδες οι οποίες εντάσσονται ετεροχρονισμένα στο κύκλωμα του μετατροπέα με κριτήριο την εξισορρόπηση της τάσης τους στην τιμή  $V_{dc} / N$ .

Αντικαθιστώντας την Εξ. (2.26) στην (2.24), η χωρητικότητα του πυκνωτή  $C_{SM}$  συνδέεται με την ισοδύναμη χρονική σταθερά  $\tau_c$  σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$C_{SM} = \frac{N \tau_c S_n}{3V_{dc}^2} \quad (2.27)$$

Η Εξ. (2.27) αποτελεί ένα χρήσιμο κριτήριο διαστασιολόγησης της χωρητικότητας  $C_{SM}$ . Όπως αναφέρθηκε και στην αρχή της παραγράφου, για δεδομένο πλήθος υπομονάδων, αυξημένη τιμή  $C_{SM}$  οδηγεί σε περιορισμό της διακύμανσης της τάσης των πυκνωτών και των ρευμάτων ανακυκλοφορίας αλλά αυξάνει την ισοδύναμη σταθερά  $\tau_c$ , γεγονός που υποδηλώνει βραδύτερη απόκριση του ελέγχου της διακινούμενης ενεργού ισχύος. Ωστόσο, αυξημένη τιμή της σταθεράς χρόνου είναι ευεργετική ως προς την ικανότητα αδιάλειπτης λειτουργίας του συστήματος διασύνδεσης σε συνθήκες ac σφάλματος, λόγω του μικρότερου ρυθμού μεταβολής της dc τάσης που αναμένεται σε μεταβατικές συνθήκες λειτουργίας, επιτρέποντας μεγαλύτερους χρόνους απόκρισης στις υποψήφιες τεχνικές επίτευξης αδιάλειπτης λειτουργίας, οι οποίες θα αναλυθούν στο Κεφ. 3. Τέλος, σημαντική είναι και η

επίδραση του επιθυμητού αριθμού επιπέδων διαμόρφωσης στην χωρητικότητα  $C_{SM}$ , καθώς για δεδομένη τιμή της χρονικής σταθεράς  $\tau_c$ , η απαιτούμενη χωρητικότητα του πυκνωτή της υπομονάδας προκύπτει ευθέως ανάλογη του αριθμού  $N$ , υποδηλώνοντας αρνητικό αντίκτυπο στο κόστος και στο μέγεθος της διάταξης.

Η επιλογή της κατάλληλης χωρητικότητας συμπληρώνεται από την ορθή διαστασιολόγηση της εσωτερικής αυτεπαγωγής  $L_s$ . Όπως αναφέρθηκε και στην κυκλωματική ανάλυση, η τοποθέτηση αυτεπαγωγής εσωτερικά στους βραχίονες συνιστά μια ακόμα ουσιώδη διαφορά με τον κλασικό VSC δύο επιπέδων. Ειδικότερα, η αυτεπαγωγή  $L_s$  επιτελεί δύο σημαντικές λειτουργίες [18]:

- ✓ Η τοποθέτηση της σε κάθε υποσκέλος εν σειρά με τους πυκνωτές, βοηθά στον περιορισμό των ρευμάτων σφάλματος που διαρρέουν τον μετατροπέα κατά τη διάρκεια διαταραχών στο δίκτυο ή στην dc πλευρά.
- ✓ Συνεισφέρει στον περιορισμό των ρευμάτων ανακυκλοφορίας που αναπόφευκτα εμφανίζονται εντός της διάταξης, λόγω της ανισορροπίας στις συνολικές τάσεις που εφαρμόζονται σε κάθε σκέλος.

Σχετικά με την ενδεικνυόμενη επιλογή ανάμεσα σε μια γκάμα τιμών της παραμέτρου  $L_s$  έχουν προταθεί διάφορες συστηματικές μέθοδοι. Η πλειοψηφία αυτών εστιάζει στον περιορισμό των εμφανιζόμενων ρευμάτων κυκλοφορίας, της διακύμανσης της τάσης στους πυκνωτές και την αποφυγή διέγερσης συγκεκριμένων αρμονικών λόγω φαινομένων συντονισμού [121], [122]. Στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής, η οποία επικεντρώνεται κυρίως στην ανάπτυξη εξωτερικών τεχνικών ελέγχου της ενεργού ισχύος που διακινείται μέσω του συστήματος διασύνδεσης, η επιλογή της παραμέτρου  $L_s$  βασίστηκε σε τυπικές τιμές που προτείνονται στη βιβλιογραφία για μοντέλα μετατροπέων MMC αντίστοιχης ισχύος και τάσης λειτουργίας [18], [19], [26]. Οι αναλυτικές τιμές παραμέτρων δίνονται συγκεντρωτικά στο Παράρτημα Γ.

### 2.3.5 Μοντέλο μέσης τιμής μετατροπέα MMC

Στόχος της παρούσας διατριβής, πέραν της χρήσης των λεπτομερών διακοπτικών μοντέλων προσομοίωσης των μετατροπέων MMC για την αξιολόγηση της δυναμικής συμπεριφοράς του, είναι και η ανάπτυξη ισοδύναμων απλοποιημένων μοντέλων προσομοίωσης που επιτρέπουν την ανάλυση της δυναμικής συμπεριφοράς του συστήματος διασύνδεσης VSC-HVDC και των επιμέρους μετατροπέων MMC χωρίς την ανάγκη μοντελοποίησης του συνολικού πλήθους των ημιαγωγικών στοιχείων που απαρτίζουν κάθε σκέλος του μετατροπέα, επιτρέποντας μεγαλύτερες χρονικές κλίμακες εξέτασης. Για το σκοπό αυτό, παρουσιάζεται ακολούθως ένα ισοδύναμο μοντέλο μέσης τιμής για τον μετατροπέα MMC, υιοθετώντας παραδοχές όσον αφορά στην κυκλωματική του αναπαράσταση, σύμφωνα με τις αρχές λειτουργίας και τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από τις προηγούμενες παραγράφους. Οι παραδοχές αυτές είναι οι ακόλουθες:

- Εφαρμόζεται ιδανικός έλεγχος ισοφόρτισης των πυκνωτών κάθε υποσκέλους, οπότε η τάση κάθε πυκνωτή αναπαρίσταται από τη χρονικά μεταβαλλόμενη μέση τιμή

$\bar{v}_{C_{ανω(κατω)j}}(t)$ , όπου  $j=a, b, c$ . Επίσης, το ρεύμα που διαρρέει κάθε πυκνωτή αναπαρίσταται από τη χρονικά μεταβαλλόμενη μέση τιμή  $\bar{i}_{C_{ανω(κατω)j}}(t)$ .

- Αμελείται η διακριτότητα των επιπέδων λειτουργίας του μετατροπέα MMC. Συνεπώς, ο αριθμός των υπομονάδων που εντάσσονται σε άνω ( $n_{ανωj}(t)$ ) και κάτω ( $n_{κατωj}(t)$ ) υποσκέλος κάθε φάσης  $j$ , διαμορφώνεται ιδεατά σύμφωνα με το σήμα διαμόρφωσης  $m_j(t)$  που προέρχεται από τον  $P$ - $Q$  ελεγκτή του μετατροπέα ως εξής:

$$n_{ανωj}(t) = \frac{N}{2}(1 - m_j(t)) \quad (2.28)$$

$$n_{κατωj}(t) = \frac{N}{2}(1 + m_j(t)) \quad (2.29)$$

- Η ισοδύναμη κατά Thevenin αντίσταση  $R_{SM}$  κάθε υπομονάδας παραμένει πρακτικά σταθερή ανεξαρτήτως της φάσης λειτουργίας που βρίσκεται (εισαγωγής ή παράκαμψης), καθώς και στις δύο περιπτώσεις προκύπτει ως παράλληλος συνδυασμός των αντιστάσεων των δύο διακοπτικών στοιχείων της υπομονάδας. Έτσι, στην ισοδύναμη κυκλωματική αναπαράσταση μπορεί να περιληφθεί η ισοδύναμη αντίσταση  $R_{eq}$  σε κάθε υποσκέλος, η οποία είναι ίση με  $R_{eq} = N \cdot R_{SM}$ .

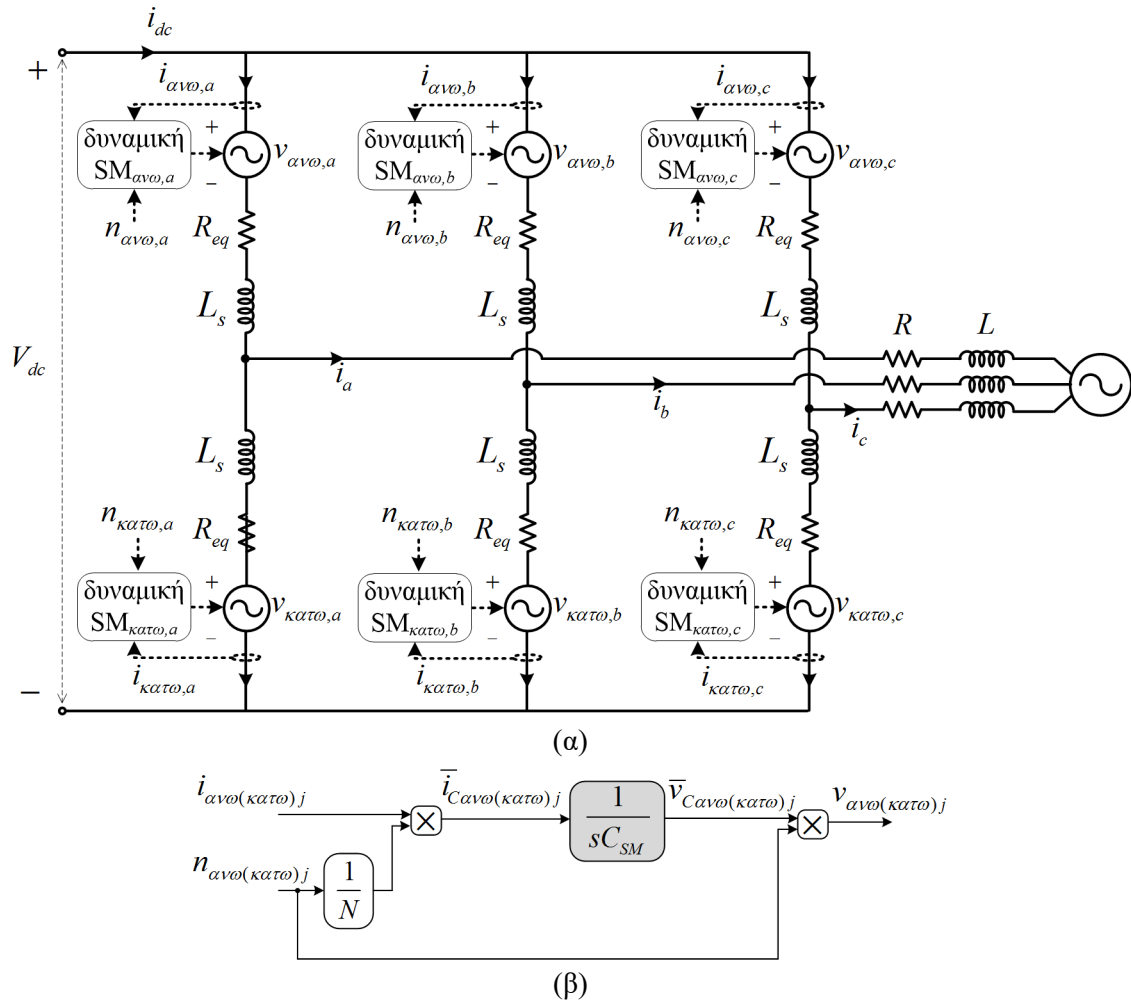
Με βάση τα παραπάνω, εξάγεται το ισοδύναμο μοντέλο μέσης τιμής του τριφασικού μετατροπέα MMC που εικονίζεται στο Σχήμα 2.12. Αξίζει να σημειωθεί πως με βάση το προτεινόμενο μοντέλο μέσης τιμής, οι εναλλασσόμενες τάσεις που επιβάλλονται σε κάθε υποσκέλος δεν είναι ιδανικές ημιτονικές κυματομορφές, αλλά επηρεάζονται και από τη δυναμική της τάσης  $\bar{v}_{C_{ανω(κατω)j}}(t)$ , η οποία μεταβάλλεται χρονικά λόγω της επίδρασης του εναλλασσόμενου ρεύματος υποσκέλους που διαρρέει τον ισοδύναμο πυκνωτή της υπομονάδας. Πιο αναλυτικά, λαμβάνοντας υπόψη τη διαδικασία ισοφόρτισης των  $N$  όμοιων πυκνωτών κάθε υποσκέλους και την απαίτηση για ένταξη  $n_{ανω(κατω)j}(t)$  υπομονάδων σε κάθε υποσκέλος και φάση, τότε η μέση τιμή του ρεύματος που τους διαρρέει είναι κοινή για συγκεκριμένο υποσκέλος και προσεγγίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\bar{i}_{C_{ανω(κατω)j}}(t) = \frac{n_{ανω(κατω)j}(t)}{N} i_{ανω(κατω)j}(t) \quad (2.30)$$

Έτσι, η εναλλασσόμενη τάση που επιβάλλεται σε κάθε υποσκέλος διαμορφώνεται ως εξής:

$$v_{ανωj}(t) = n_{ανωj}(t) \bar{v}_{C_{ανωj}}(t) = \frac{N}{4C_{SM}} (1 - m_j(t)) \int (1 - m_j(t)) i_{ανωj}(t) dt \quad (2.31)$$

$$v_{κατωj}(t) = n_{κατωj}(t) \bar{v}_{C_{κατωj}}(t) = \frac{N}{4C_{SM}} (1 + m_j(t)) \int (1 + m_j(t)) i_{κατωj}(t) dt \quad (2.32)$$



Σχήμα 2.12. Κυκλωματικό ισοδύναμο μοντέλου μέσης τιμής (α) τριφασικού μετατροπέα MMC και (β) ισοδύναμης υπομονάδας σε κάθε υποσκέλος και φάση.





## 3 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΩΝ MMC

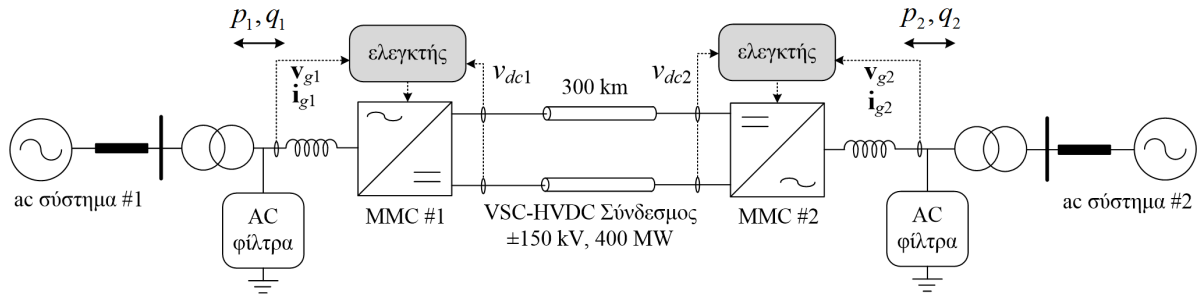
### 3.1 Εισαγωγή

Στόχος του παρόντος κεφαλαίου είναι η αξιολόγηση της δυναμικής συμπεριφοράς ενός συστήματος διασύνδεσης MMC-HVDC, με τη χρήση των μεταβατικών μοντέλων προσομοίωσης και των αρχών ελέγχου που παρουσιάστηκαν στο Κεφ. 2. Η ανάλυση βασίζεται στην εξέταση μιας ακτινικής διασύνδεσης MMC-HVDC με δύο σταθμούς μετατροπής ac/dc, μέσω της οποίας διασυνδέονται δύο ac συστήματα. Αρχικά, παρουσιάζονται οι βασικοί ελεγκτές ενεργού και αέργου ισχύος κάθε μετατροπέα, εξάγοντας και απλοποιημένους κανόνες ως προς την επιλογή των κερδών των ελεγκτών. Έπειτα, ακολουθούν αποτελέσματα προσομοιώσεων τόσο σε μεταβολές της διακινούμενης ενεργού ισχύος όσο και κατά την εμφάνιση διαταραχών στο ac σύστημα. Βασικά αντικείμενα εξέτασης αποτελούν τόσο η γενικότερη αξιολόγηση της δυναμικής συμπεριφοράς με τη χρήση του πλήρους διακοπτικού μοντέλου προσομοίωσης, όσο και η σύγκριση των αποτελεσμάτων με εφαρμογή του απλοποιημένου μοντέλου μέσης τιμής των μετατροπέων MMC όπως αυτό παρουσιάστηκε στο Κεφ. 2, προκειμένου να αξιολογηθεί η δυνατότητα χρήσης του ακόμα και για την ανάλυση ταχέων μεταβατικών φαινομένων.

### 3.2 Τοπολογία εξεταζόμενου συστήματος

Η τοπολογία της εξεταζόμενης διασύνδεσης εικονίζεται στο Σχήμα 3.1. Για τις ανάγκες ανάλυσης του παρόντος κεφαλαίου, τα δύο ac συστήματα αναπαρίστανται μέσω του ισοδύναμου Thevenin, ως ισοδύναμες πηγές τάσης εν σειρά με μια σύνθετη αντίσταση. Η τοπολογία του εξεταζόμενου συστήματος διασύνδεσης είναι συμμετρικού μονοπόλου, η οποία διασυνδέει δύο όμοιους μετατροπείς MMC δέκα επιπέδων ( $N=10$ ). Η ονομαστική dc τάση λειτουργίας επιλέχθηκε ίση με  $\pm 150$  kV, που οδηγεί σε τάση λειτουργίας στα άκρα των πυκνωτών κάθε υπομονάδας της τάξης των 30 kV. Τα dc καλώδια έχουν συνολικό μήκος 300 km και η ονομαστική τους μεταφορική ικανότητα περί τα 400 MW. Για τη μοντελοποίηση των dc καλωδίων χρησιμοποιήθηκε το κατανεμημένο μοντέλο που είναι διαθέσιμο στη βιβλιοθήκη του λογισμικού Matlab/Simulink. Αναλυτικές τιμές ηλεκτρικών χαρακτηριστικών παρατίθενται στο Παράρτημα Γ.

Στην ac πλευρά των μετατροπέων MMC και συγκεκριμένα στον ζυγό σύνδεσης των M/Σ ανύψωσης υπάρχουν εγκάρσια φίλτρα συντονισμού μικρής ικανότητας για τον περαιτέρω περιορισμό των αρμονικών στην ac τάση εξόδου. Οι μετασχηματιστές ανύψωσης είναι τοπολογίας τριγώνου/αστέρα και αναλαμβάνουν την ανύψωση από την υψηλή (150 kV) στην υπερυψηλή τάση (400 kV). Το δευτερεύον του κάθε μετασχηματιστή που βρίσκεται σε υπερυψηλή τάση αποτελεί το σημείο κοινής σύνδεσης με το ac σύστημα.



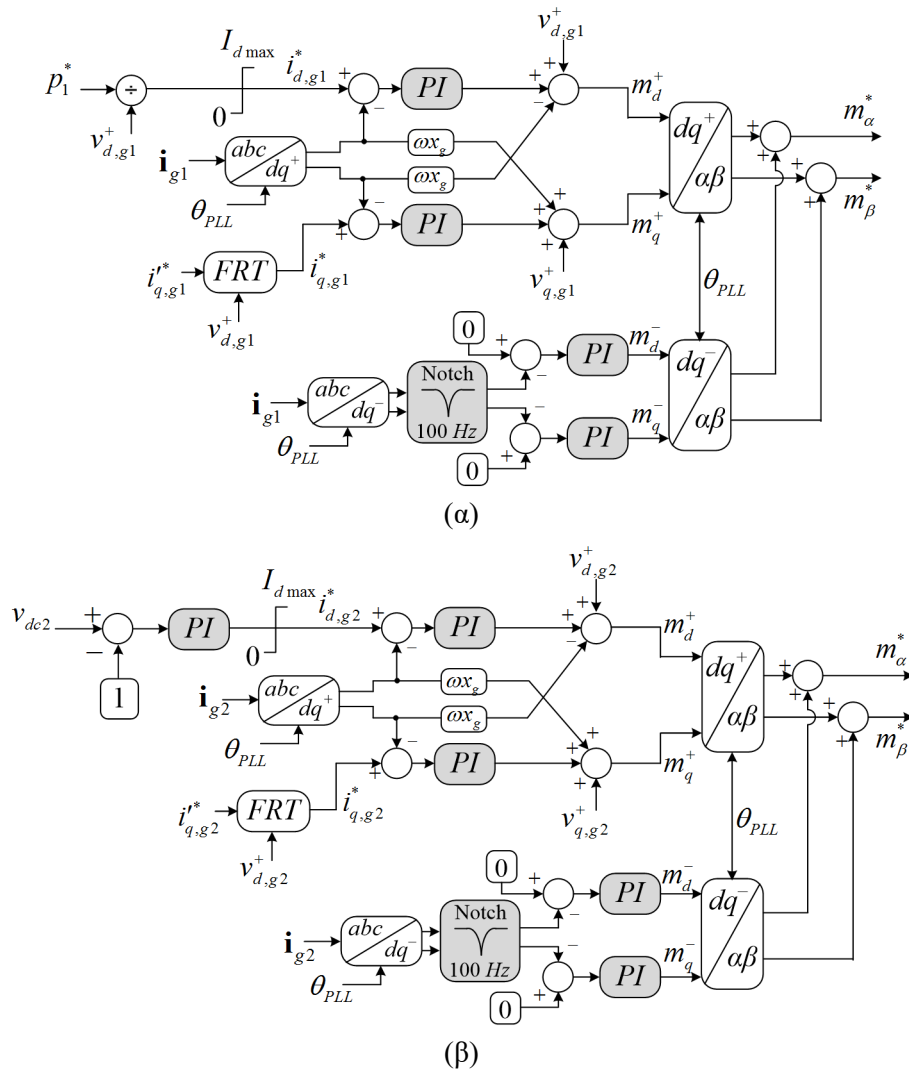
Σχήμα 3.1. Εξεταζόμενη τοπολογία ακτινικής διασύνδεσης MMC-HVDC μεταξύ δύο ac συστημάτων.

### 3.3 Συστήματα ελέγχου σταθμών μετατροπής dc/ac

#### 3.3.1 Περιγραφή σχημάτων ελέγχου

Το σύστημα που εικονίζεται στο Σχήμα 3.1 παρουσιάζει σημαντικές ομοιότητες με αυτό της περίπτωσης ακτινικής διασύνδεσης ΘΑΠ ως προς τη γενικότερη φιλοσοφία ελέγχου που πρέπει να εφαρμοστεί. Πιο αναλυτικά, η καθιερωμένη φιλοσοφία ελέγχου έγκειται στον έλεγχο της ενεργού ισχύος εξόδου του ενός μετατροπέα (εδώ ο MMC#1) σε μια εξωτερική εντολή αναφοράς, ενώ ο μετατροπέας στο άλλο άκρο της διασύνδεσης (εδώ ο MMC#2) προσαρμόζει την εγχεόμενη ενεργό ισχύ εξόδου του, ρυθμίζοντας το ισοζύγιο μεταξύ εισερχόμενης και εξερχόμενης ισχύος στο σύστημα διασύνδεσης, με έλεγχο της dc τάσης λειτουργίας, όπως και στην περίπτωση ενός επίγειου μετατροπέα HVDC σε εφαρμογές διασύνδεσης ΘΑΠ.

Στο Σχήμα 3.2 παρουσιάζονται τα σχήματα ελέγχου των δύο μετατροπέων MMC, τα οποία βασίζονται στη χρήση τοπικών μόνο μετρήσεων στην ac και dc πλευρά. Αναλυτικότερα, και στους δύο μετατροπέες εφαρμόζεται διανυσματικός έλεγχος ρεύματος στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς, χρησιμοποιώντας την εκτιμώμενη φάση της τάσης του δικτύου από το σύστημα συγχρονισμού DSOGI-PLL, το οποίο παρουσιάστηκε αναλυτικά στο Σχήμα 2.2. Για τον αποτελεσματικό έλεγχο ρεύματος σε ασύμμετρα σφάλματα δικτύου, προστίθεται και ο ελεγκτής ρεύματος αρνητικής ακολουθίας που εικονίζεται στο Σχήμα 3.2 ο οποίος υπερθέτει κατάλληλα σήματα ελέγχου σε αυτά του κύριου ελεγκτή. Σε εξωτερικό επίπεδο ελέγχου, ο μετατροπέας MMC #1 ρυθμίζει την ενεργό συνιστώσα του ρεύματος εξόδου με βάση την εξωτερική εντολή αναφοράς  $p_1^*$  και τη μετρούμενη  $d$  συνιστώσα της τάσης θετικής ακολουθίας  $v_{d,g1}^+$ , ενώ ο MMC #2 διαμορφώνει την ενεργό συνιστώσα  $i_{d,g2}^*$  μέσω ενός PI ελεγκτή της dc τάσης, όπως και στην περίπτωση διασύνδεσης ΘΑΠ. Για τη συμμόρφωση με τις απαιτήσεις των σύγχρονων κωδίκων συστήματος σε συνθήκες ac σφάλματος, και οι δύο μετατροπέες διαθέτουν τη δυνατότητα υποστήριξης της ac τάσης με ταχεία επαναρύθμιση της αέργου συνιστώσας του ρεύματος εξόδου κατόπιν ανίχνευσης συνθηκών βύθισης τάσης, με βάση τη μετρούμενη τάση θετικής ακολουθίας που εξάγεται από το σύστημα συγχρονισμού DSOGI-PLL.



Σχήμα 3.2. Σχήματα PQ ελέγχου μετατροπέων MMC, (α) ελεγκτής μετατροπέα MMC #1 (έλεγχος ισχύος), (β) ελεγκτής μετατροπέα MMC #2 (έλεγχος dc τάσης).

Τα τελικά σήματα ελέγχου  $m_{\alpha}^*$  και  $m_{\beta}^*$ , που είναι εκφρασμένα στο στατό πλαίσιο  $\alpha$ - $\beta$  αναφοράς, οδηγούνται στο εσωτερικό σύστημα ελέγχου του MMC που παρουσιάστηκε με λεπτομέρεια στο Σχήμα 2.11, για την επιλογή των εντασσόμενων υπομονάδων σε κάθε χρονική στιγμή. Το βήμα αυτό παραλείπεται στο μοντέλο μέσης τιμής, όπου υπολογίζεται απευθείας ο ιδεατός αριθμός εντασσόμενων υπομονάδων, με εφαρμογή των Εξ. (2.28) και (2.29).

### 3.3.2 Κανόνες ρύθμισης κερδών ελεγκτών

Για την επιλογή των ενδεικνυόμενων κερδών των ελεγκτών που παρουσιάστηκαν προηγουμένως είναι σκόπιμη η εξαγωγή απλοποιημένων κανόνων ρύθμισης των κερδών, με ανάλυση του εξεταζόμενου συστήματος ελέγχου στο πεδίο της συχνότητας. Στην ανάλυση που ακολουθεί, εξάγονται απλοποιημένες συναρτήσεις μεταφοράς δευτέρου βαθμού για τους βρόχους ελέγχου του ρεύματος εξόδου, της dc τάσης και του συγχρονισμού με τη φάση της τάσης του δικτύου.

Για την ανάλυση του συστήματος ελέγχου ρεύματος του μετατροπέα MMC, χρησιμοποιείται η κυκλωματική ανάλυση που φαίνεται στο Σχήμα 3.3. Ειδικότερα, το μέσο ελέγχου είναι οι συντιθέμενες τάσεις υποσκέλους  $\mathbf{v}_u$  και  $\mathbf{v}_l$ , οι οποίες ρυθμίζονται με χρήση των PI ελεγκτών ρεύματος που παρουσιάστηκαν στο Σχήμα 3.2. Με εφαρμογή ΝΤΚ στο κύκλωμα που φαίνεται στο Σχήμα 3.3, το διάνυσμα των τριφασικών τάσεων  $\mathbf{v}_t = [v_{t,a} \ v_{t,b} \ v_{t,c}]^T$  εκφράζεται ως εξής:

$$\mathbf{v}_t = \frac{-\mathbf{v}_u + \mathbf{v}_l}{2} - \frac{L_s}{2} \frac{d\mathbf{i}_g}{dt} \quad (3.1)$$

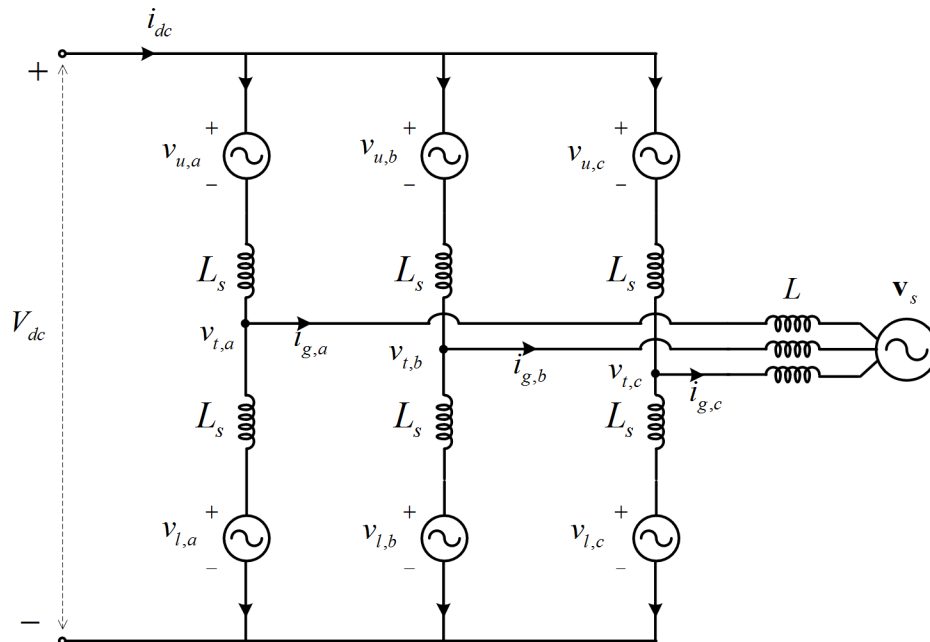
Λαμβάνοντας υπόψη τις αρχές λειτουργίας και τη διαδικασία ισοφόρτισης των πυκνωτών των υπομονάδων, το άθροισμα των συντιθέμενων τάσεων άνω και κάτω υποσκέλους θα πρέπει να ρυθμίζεται στην τιμή  $V_{dc}$ , δηλ.:

$$\mathbf{1}V_{dc} = \mathbf{v}_u + \mathbf{v}_l \quad (3.2)$$

Όπου με  $\mathbf{1}$  συμβολίζεται ο πίνακας  $[1 \ 1 \ 1]^T$ . Αντικαθιστώντας την Εξ. (3.2) στην Εξ. (3.1) προκύπτει:

$$\mathbf{v}_t = \mathbf{1} \frac{V_{dc}}{2} + \mathbf{v}_l - \frac{L_s}{2} \frac{d\mathbf{i}_g}{dt} \quad (3.3)$$

Η Εξ. (3.3) είναι σημαντική καθώς συσχετίζει τον ρυθμό μεταβολής του ρεύματος εξόδου με την ελεγχόμενη τάση υποσκέλους. Για τον μετασχηματισμό των κυκλωματικών εξισώσεων στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς, όπου λειτουργεί και ο ελεγκτής ρεύματος, εφαρμόζεται ο μετασχηματισμός Park ως εξής:



Σχήμα 3.3. Ισοδύναμο κύκλωμα τριφασικού μετατροπέα MMC, για την ανάλυση του συστήματος ελέγχου ρεύματος στο πεδίο της συχνότητας.

$$\begin{aligned}\mathbf{T}^{-1}\mathbf{v}_{dq0,t} &= \mathbf{1}\frac{V_{dc}}{2} + \mathbf{T}^{-1}\mathbf{v}_{dq0,l} - \frac{L_s}{2}\frac{d(\mathbf{T}^{-1}\mathbf{i}_{dq0,g})}{dt} \Rightarrow \\ \mathbf{v}_{dq0,t} &= \mathbf{T}\mathbf{1}\frac{V_{dc}}{2} + \mathbf{v}_{dq0,l} - \frac{L_s}{2}\mathbf{T}\frac{d(\mathbf{T}^{-1})}{dt}\mathbf{i}_{dq0,g} - \frac{L_s}{2}\frac{d(\mathbf{i}_{dq0,g})}{dt}\end{aligned}\quad (3.4)$$

Λαμβάνοντας υπόψη την ακόλουθη ιδιότητα:

$$\mathbf{T}\frac{d(\mathbf{T}^{-1})}{dt} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega & 0 \\ \omega & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}\quad (3.5)$$

και αντικαθιστώντας την Εξ. (3.5) στην Εξ. (3.4) προκύπτει:

$$v_{d,t} = v_{d,l} + \omega\frac{L_s}{2}i_{q,g} - \frac{L_s}{2}\frac{di_{d,g}}{dt}\quad (3.6)$$

$$v_{q,t} = v_{q,l} - \omega\frac{L_s}{2}i_{d,g} - \frac{L_s}{2}\frac{di_{q,g}}{dt}\quad (3.7)$$

Επαναλαμβάνοντας την ίδια διαδικασία για το εξωτερικό κύκλωμα του μετατροπέα προκύπτει:

$$v_{d,s} = v_{d,t} + \omega L_g i_{q,g} - L_g \frac{di_{d,g}}{dt}\quad (3.8)$$

$$v_{q,s} = v_{q,t} - \omega L_g i_{d,g} - L_g \frac{di_{q,g}}{dt}\quad (3.9)$$

Αντικαθιστώντας τις Εξ. (3.6), (3.7) στις Εξ. (3.8), (3.9) και ανάγοντας σε α.μ. τελικά προκύπτει:

$$v_{d,s} = v_{d,l} + \omega(x_g + \frac{x_s}{2})i_{q,g} - \frac{(x_g + \frac{x_s}{2})}{\omega_b}\frac{di_{d,g}}{dt}\quad (3.10)$$

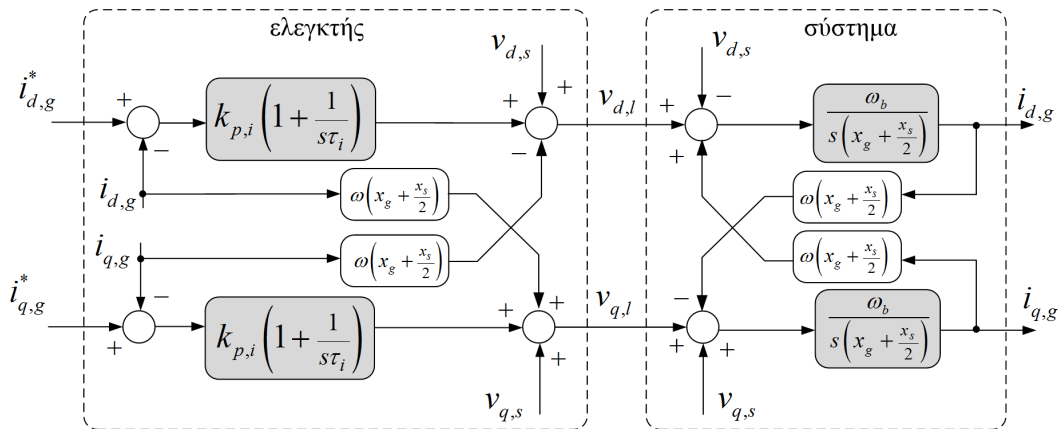
$$v_{q,s} = v_{q,l} - \omega(x_g + \frac{x_s}{2})i_{d,g} - \frac{(x_g + \frac{x_s}{2})}{\omega_b}\frac{di_{q,g}}{dt}\quad (3.11)$$

Αναλύοντας τις Εξ. (3.10), (3.11) στο πεδίο της συχνότητας με εφαρμογή του μετασχηματισμού Laplace, η δυναμική των ρευμάτων  $d$ - $q$  άξονα προσεγγίζεται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$i_{d,g} = \frac{\omega_b}{s(x_g + \frac{x_s}{2})}\left(v_{d,l} - v_{d,s} + \omega(x_g + \frac{x_s}{2})i_{q,g}\right)\quad (3.12)$$

$$i_{q,g} = \frac{\omega_b}{s(x_g + \frac{x_s}{2})}\left(v_{q,l} - v_{q,s} - \omega(x_g + \frac{x_s}{2})i_{d,g}\right)\quad (3.13)$$

Οι Εξ. (3.12), (3.13) αναπαριστούν τη φυσική δυναμική του συστήματος ως προς τη μεταβολή των ρευμάτων εξόδου συναρτήσει των ελεγχόμενων τάσεων του κάτω υποσκέλους. Με βάση τα παραπάνω, διαμορφώνεται το διάγραμμα βαθμίδων στο Σχήμα 3.4, στο οποίο εικονίζονται διακριτά η δομή του βρόχου ελέγχου και το ισοδύναμο μοντέλο του συστήματος προς έλεγχο, στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς. Λόγω των συζευγμένων όρων που υπεισέρχονται στις Εξ. (3.12), (3.13), προστίθενται αντίστοιχοι όροι αποσύζευξης και πρόσω-τροφοδότησης και στον ελεγκτή ρεύματος, για τη βελτίωση της μεταβατικής του απόκρισης.



Σχήμα 3.4. Διάγραμμα βαθμίδων ελεγκτή ρεύματος και συστήματος προς έλεγχο.

Με βάση το διάγραμμα βαθμίδων του συστήματος ελέγχου στο Σχήμα 3.4, η συνάρτηση μεταφοράς κλειστού βρόχου προκύπτει:

$$\frac{i_{dq,g}}{i_{dq,g}^*} = \frac{s \frac{k_{p,i}\omega_b}{(x_g+x_s/2)} + \frac{k_{p,i}\omega_b}{(x_g+x_s/2)\tau_i}}{s^2 + s \frac{k_{p,i}\omega_b}{(x_g+x_s/2)} + \frac{k_{p,i}\omega_b}{(x_g+x_s/2)\tau_i}} \quad (3.14)$$

Η Εξ. (3.14) εμφανίζει χαρακτηριστικά συστήματος δευτέρου βαθμού, από την οποία μπορούν να προσδιοριστούν ο συντελεστής απόσβεσης  $\zeta$  και η φυσική συχνότητα  $\omega_n$  ως εξής:

$$2\zeta\omega_n = \frac{k_{p,i}\omega_b}{(x_g + \frac{x_s}{2})} \quad (3.15)$$

$$\omega_n^2 = \frac{k_{p,i}\omega_b}{(x_g + \frac{x_s}{2})\tau_i} \quad (3.16)$$

Σε συστήματα ελέγχου δευτέρου βαθμού, το εύρος ζώνης  $\alpha$  μπορεί να προσδιοριστεί από την ακόλουθη σχέση:

$$\alpha = \omega_n \sqrt{1 - 2\zeta^2 + \sqrt{(1 - 2\zeta^2)^2 + 1}} \quad (3.17)$$

Με βάση τις ανωτέρω εξισώσεις, μπορούν να προσδιοριστούν οι τιμές της χρονικής σταθεράς ελέγχου  $\tau_i$  και του αναλογικού κέρδους  $k_{p,i}$  προκειμένου να επιτευχθούν οι επιθυμητές τιμές εύρους ζώνης και συντελεστή απόσβεσης. Αναλυτικότερα, προκύπτουν οι κάτωθι κανόνες ρύθμισης:

$$\tau_i = \frac{2\zeta_i}{\alpha_i \sqrt{1 - 2\zeta_i^2 + \sqrt{(1 - 2\zeta_i^2)^2 + 1}}} \quad (3.18)$$

$$k_{p,i} = 4\zeta_i^2 \frac{(x_g + \frac{x_s}{2})}{\omega_b \tau_i} \quad (3.19)$$

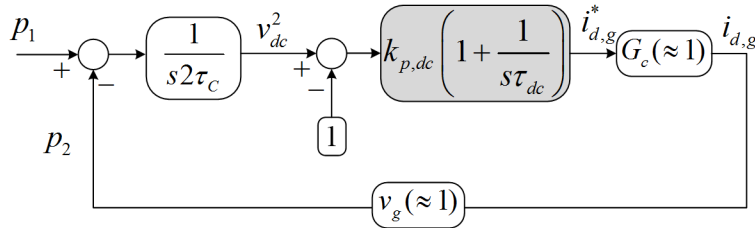
Ωστόσο, θα πρέπει να σημειωθεί ότι η ανωτέρω ανάλυση είναι προσεγγιστική καθώς δεν λαμβάνεται υπόψη η ύπαρξη του μηδενικού στη συνάρτηση μεταφοράς της Εξ. (3.14), το οποίο αλλοιώνει έως ένα βαθμό την απόλυτη επίτευξη των ανωτέρω κριτηρίων. Παρόλα αυτά, όπως θα αναλυθεί και στα αποτελέσματα προσομοιώσεων, οι ανωτέρω πρακτικοί κανόνες ρύθμισης κερδών επαρκούν για την επίτευξη ικανοποιητικής μεταβατικής απόκρισης των συστημάτων ελέγχου, απαλλάσσοντας έτσι από την ανάγκη διενέργειας πολυπλοκότερων αναλύσεων στο πεδίο της συχνότητας αποκλειστικά και μόνο για τη βέλτιστη δυνατή ρύθμιση των κερδών.

Η ρύθμιση των παραμέτρων ελέγχου των Εξ. (3.18) και (3.19) θα πρέπει να γίνει με γνώμονα την επίτευξη υψηλής ταχύτητας απόκρισης στον έλεγχο του ρεύματος εξόδου του μετατροπέα, με παράλληλη διατήρηση χαμηλού ποσοστού υπερπήδησης σε βηματική μεταβολή. Οι προαναφερθείσες προδιαγραφές αντιστοιχούν σε ρύθμιση υψηλού εύρους ζώνης  $\alpha_i$  (600 r/s στην παρούσα ανάλυση) και μεγάλο συντελεστή απόσβεσης  $\zeta_i$  (1 στην παρούσα ανάλυση). Αναλυτικές τιμές κερδών παρατίθενται στο Παράρτημα Δ.

Αναφορικά με τον ελεγκτή της dc τάσης του μετατροπέα MMC #2, σκοπός του είναι η επαναρύθμιση της ενεργού ισχύος εξόδου  $p_2$  κατόπιν μεταβολών της ενεργού ισχύος του μετατροπέα MMC #1, μέσω ταχείας επαναφοράς της dc τάσης λειτουργίας στην ονομαστική της τιμή. Λαμβάνοντας υπόψη την ανάλυση του Κεφ. 2 ως προς την ισοδύναμη χωρητικότητα που εμφανίζει ο κάθε μετατροπέας MMC στο dc κύκλωμα, η δυναμική της dc τάσης λειτουργίας μπορεί να περιγραφεί προσεγγιστικά από την ακόλουθη διαφορική εξίσωση:

$$p_1 - p_2 = 2\tau_c \frac{dv_{dc}^2}{dt} \quad (3.20)$$

Όπου  $\tau_c$  είναι η χρονική σταθερά της ισοδύναμης χωρητικότητας εκάστου μετατροπέα. Το διάγραμμα βαθμίδων του συστήματος ελέγχου κλειστού βρόχου της dc τάσης εικονίζεται στο Σχήμα 3.5, από το οποίο μπορεί να εξαχθεί αντίστοιχη συνάρτηση μεταφοράς δευτέρου βαθμού, με κατάλληλες απλοποιητικές παραδοχές, όπως π.χ. αμελώντας την ταχύτερη δυναμική του εσωτερικού βρόχου ελέγχου ρεύματος που παρουσιάστηκε στο Σχήμα 3.4.



Σχήμα 3.5. Διάγραμμα βαθμίδων ελεγκτή dc τάσης μετατροπέα MMC #2.

Με βάση τα παραπάνω, η συνάρτηση μεταφοράς κλειστού βρόχου προκύπτει:

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{s \frac{k_{p,dc}}{2\tau_c} + \frac{k_{p,dc}}{\tau_{dc} 2\tau_c}}{s^2 + s \frac{k_{p,dc}}{2\tau_c} + \frac{k_{p,dc}}{\tau_{dc} 2\tau_c}} \quad (3.21)$$

Εφαρμόζοντας παρόμοια μεθοδολογία ανάλυσης με αυτή του συστήματος ελέγχου ρεύματος, οι τιμές της χρονικής σταθεράς ελέγχου  $\tau_{dc}$  και του αναλογικού κέρδους  $k_{p,dc}$  μπορούν να εκτιμηθούν συναρτήσει των επιθυμητών τιμών εύρους ζώνης  $\alpha_{dc}$  και συντελεστή απόσβεσης  $\zeta_{dc}$  ως εξής:

$$\tau_{dc} = \frac{2\zeta_{dc}}{\alpha_{dc} \sqrt{1 - 2\zeta_{dc}^2} + \sqrt{(1 - 2\zeta_{dc}^2)^2 + 1}} \quad (3.22)$$

$$k_{p,dc} = 8\zeta_{dc}^2 \frac{\tau_c}{\tau_{dc}} \quad (3.23)$$

Ιδιαίτερη προσοχή θα πρέπει να δοθεί στην επιλογή του επιθυμητού εύρους ζώνης του συστήματος ελέγχου της dc τάσης σε σχέση με το εύρος ζώνης του ελεγκτή ρεύματος, προκειμένου να αποφευχθεί ανεπιθύμητη αλληλεπίδραση μεταξύ των ελεγκτών και επιδείνωση της ευστάθειας του συνολικού συστήματος [123], [124]. Λαμβάνοντας υπόψη την ανάγκη ακαριαίου ελέγχου ρεύματος, συμπεραίνεται ότι το εύρος ζώνης του ελεγκτή dc τάσης θα πρέπει να είναι σημαντικά μικρότερο, προκειμένου ο ελεγκτής dc τάσης να μην επενεργεί σε μικρότερες χρονικές κλίμακες. Το υπόψη επιχείρημα επιβεβαιώνεται και από επισκόπηση της Εξ. (3.23), από την οποία διαφαίνεται η ανάγκη ρύθμισης της χρονικής σταθεράς ελέγχου  $\tau_{dc}$  τουλάχιστον στην ίδια τάξη μεγέθους με αυτή της ισοδύναμης χωρητικότητας  $\tau_c$ , η οποία είναι της τάξεως των δεκάδων ms σε συστήματα MMC, προκειμένου να προκύπτουν εύλογα εύρη τιμών για το αναλογικό κέρδος  $k_{p,dc}$ .

Λαμβάνοντας υπόψη τα ανωτέρω, σε συνδυασμό με τη ρύθμιση του ελεγκτή ρεύματος που εξηγήθηκε προηγουμένως, το εύρος ζώνης  $\alpha_{dc}$  του συστήματος ελέγχου της dc τάσης ρυθμίστηκε σε αρκετά χαμηλότερη τιμή, της τάξης των 30 r/s, ενώ η τιμή του συντελεστή απόσβεσης  $\zeta_{dc}$  επιλέχθηκε ξανά ίση με 1, για την αποφυγή ανεπιθύμητων μεταβατικών διακυμάνσεων της dc τάσης λειτουργίας του συνδέσμου VSC-HVDC. Αναλυτικές τιμές κερδών παρατίθενται στο Παράρτημα Δ.

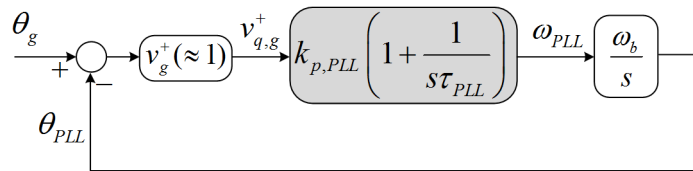


Τέλος, παρακάτω διενεργείται αντίστοιχη ανάλυση στο πεδίο της συχνότητας για το σύστημα συγχρονισμού με το δίκτυο, στόχος του οποίου είναι η ταχεία ρύθμιση της εκτιμώμενης φάσης  $\theta_{PLL}$  σε αυτή της τάσης του δικτύου  $\theta_g$ . Η εξαγωγή ενός γραμμικοποιημένου μοντέλου για το υπόψη σύστημα βασίζεται στην παραδοχή ότι το σφάλμα εκτίμησης  $\theta_g - \theta_{PLL}$  θα πρέπει να είναι αρκετά μικρό για την αποτελεσματική λειτουργία της διάταξης PLL, γεγονός που επιτρέπει την ακόλουθη προσέγγιση:

$$v_{q,g}^+ = v_g^+ \sin(\theta_g - \theta_{PLL}) \approx v_g^+ (\theta_g - \theta_{PLL}) \quad (3.24)$$

Με βάση την παραπάνω θεώρηση και τη φιλοσοφία ελέγχου του συστήματος PLL που έχει παρουσιαστεί και στο Σχήμα 2.2(β), προκύπτει το απλοποιημένο διάγραμμα βαθμίδων του συστήματος ελέγχου κλειστού βρόχου που εικονίζεται στο Σχήμα 3.6 [125]. Η αντίστοιχη συνάρτηση μεταφοράς προκύπτει:

$$\frac{\theta_{PLL}}{\theta_g} = \frac{sk_{p,PLL}\omega_b + \frac{k_{p,PLL}\omega_b}{\tau_{PLL}}}{s^2 + sk_{p,PLL}\omega_b + \frac{k_{p,PLL}\omega_b}{\tau_{PLL}}} \quad (3.25)$$



Σχήμα 3.6. Διάγραμμα βαθμίδων γραμμικοποιημένου συστήματος συγχρονισμού με το δίκτυο.

Επαναλαμβάνοντας την ανωτέρω μεθοδολογία ανάλυσης συστημάτων ελέγχου δευτέρου βαθμού, οι τιμές της χρονικής σταθεράς ελέγχου  $\tau_{PLL}$  και του αναλογικού κέρδους  $k_{p,PLL}$  μπορούν να εκτιμηθούν συναρτήσει των επιθυμητών τιμών εύρους ζώνης  $\alpha_{PLL}$  και συντελεστή απόσβεσης  $\zeta_{PLL}$  ως εξής:

$$\tau_{PLL} = \frac{2\zeta_{PLL}}{\alpha_{PLL}\sqrt{1-2\zeta_{PLL}^2 + \sqrt{(1-2\zeta_{PLL}^2)^2 + 1}}} \quad (3.26)$$

$$k_{p,PLL} = \frac{4\zeta_{PLL}^2}{\tau_{PLL}\omega_b} \quad (3.27)$$

Η ρύθμιση των παραμέτρων ελέγχου των Εξ. (3.26) και (3.27) θα πρέπει να γίνει με γνώμονα τον γρήγορο επανασυγχρονισμό της διάταξης κλειδώματος φάσης κατόπιν μεταβολών της συχνότητας λειτουργίας του ηπειρωτικού ΣΗΕ, και αποφυγή ανεπιθύμητων ταλαντώσεων της εκτιμώμενης συχνότητας, οι οποίες θα οφείλονταν αμιγώς στο σύστημα ελέγχου της διάταξης PLL και όχι σε πραγματικές ταλαντώσεις της συχνότητας λειτουργίας του δικτύου. Συνεπώς, το εύρος ζώνης  $\alpha_{PLL}$  δεν χρειάζεται να ρυθμιστεί σε πολύ υψηλές τιμές, της τάξης των εκατοντάδων r/s, αλλά ούτε σε πολύ χαμηλές τιμές που ενδεχομένως αλλοίωναν την απαιτούμενη ταχύτητα συγχρονισμού. Με βάση τα παραπάνω, το εύρος ζώνης ρυθμίστηκε σε ενδιάμεσες τιμές, της τάξης των 60 r/s, και ο συντελεστής απόσβεσης στην τιμή 1, χωρίς

ωστόσο οι εν λόγω τιμές να αποτελούν μοναδικές επιλογές για την επίτευξη της επιθυμητής απόκρισης. Αναλυτικές τιμές των κερδών παρατίθενται στο Παράρτημα Δ.

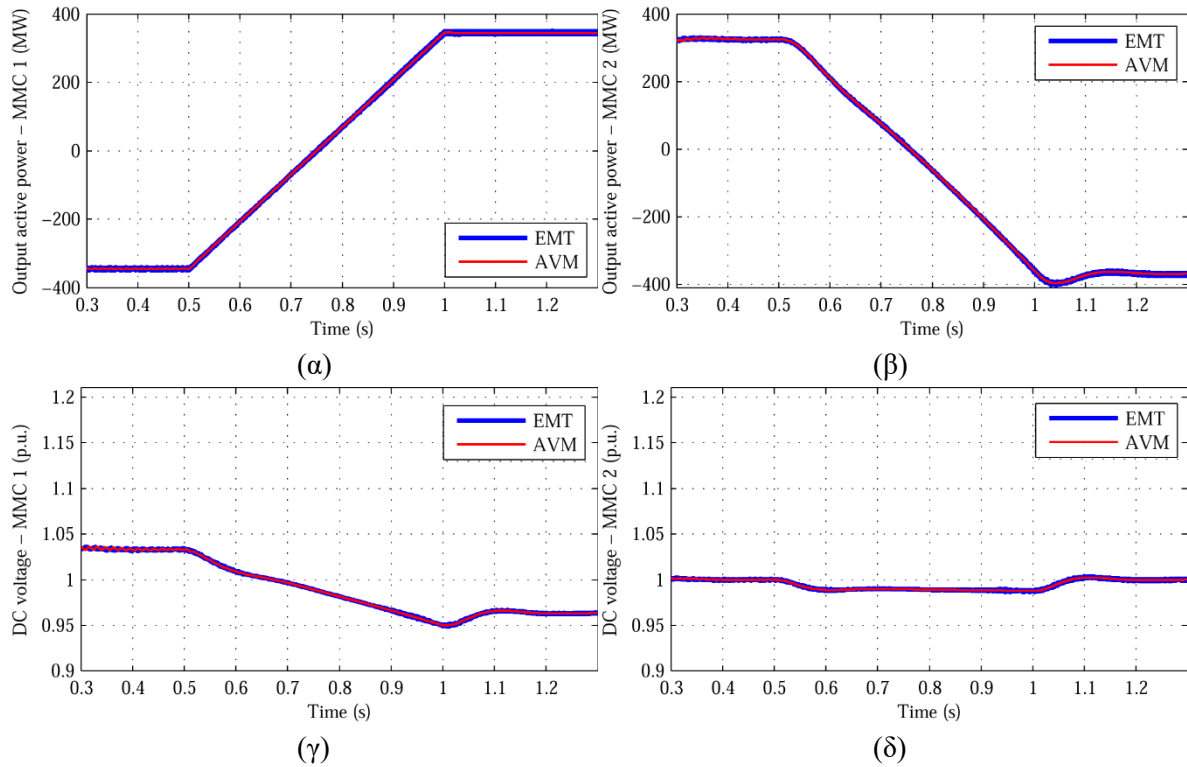
### 3.4 Συγκριτική αξιολόγηση μεταβατικών μοντέλων μετατροπέων MMC

Στόχος της παρούσας ενότητας είναι η ανάλυση της δυναμικής συμπεριφοράς της ακτινικής διασύνδεσης MMC-HVDC που παρουσιάστηκε στο Σχήμα 3.1, τόσο σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας όσο και σε διαταραχές δικτύου. Ειδικότερα, βασικά αντικείμενα εξέτασης είναι η επιβεβαίωση των χαρακτηριστικών λειτουργίας των μετατροπέων MMC όπως αναλύθηκαν στο Κεφ. 2, αλλά και η διερεύνηση της ικανότητας του απλοποιημένου μοντέλου μέσης τιμής να αναπαράγει με την απαιτούμενη ακρίβεια τη μεταβατική απόκριση του πλήρους διακοπτικού μοντέλου προσομοίωσης.

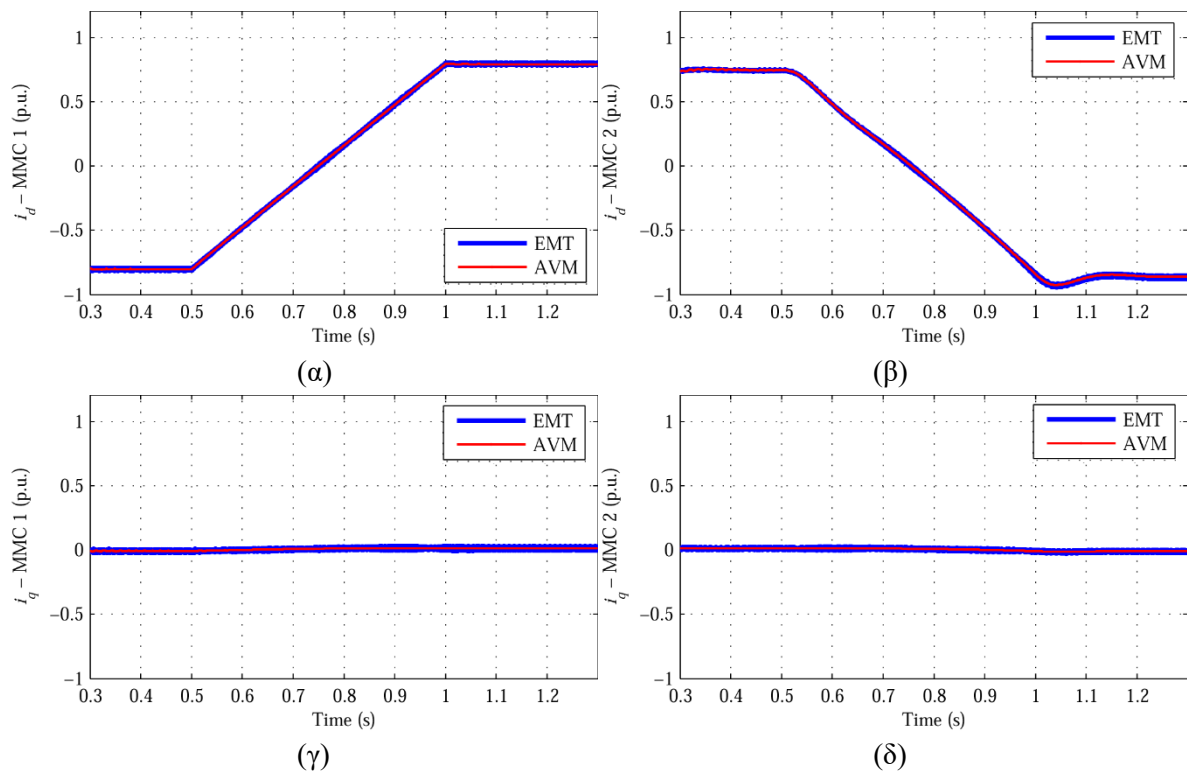
#### 3.4.1 Απόκριση συστήματος MMC-HVDC σε αντιστροφή ροής ισχύος

Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα της τεχνολογίας VSC-HVDC είναι η ικανότητα ταχείας αντιστροφής της ροής ισχύος επί της διασύνδεσης χωρίς την ανάγκη αντιστροφής της πολικότητας της dc τάσης λειτουργίας, όπως συνέβαινε με την παλαιά τεχνολογία CSC-HVDC. Στην παρούσα ενότητα, προσομοιώνεται η μεταβατική συμπεριφορά του συστήματος διασύνδεσης VSC-HVDC κατά την επιβολή ταχείας αντιστροφής ισχύος μεταξύ των διασυνδεδεμένων ac συστημάτων, με χρήση τόσο του διακοπτικού μοντέλου (Electromagnetic Transient – EMT model) όσο και του μοντέλου μέσης τιμής (Average value model – AVM), που αναπτύχθηκαν στο λογισμικό Matlab/Simulink.

Πιο αναλυτικά, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.7, προσομοιώθηκε η απόκριση των δύο μετατροπέων MMC, κατά την αντιστροφή της ενεργού ισχύος εξόδου του μετατροπέα MMC #1 από -350 MW (ροή ισχύος προς τον MMC #2) σε +350 MW εντός 0.5 s. Από τα αποτελέσματα επιβεβαιώνεται καταρχάς η ομαλή δυναμική συμπεριφορά του σχήματος διασύνδεσης που επιφέρει η ρύθμιση κερδών των ελεγκτών σύμφωνα με τα αναφερόμενα της Παραγράφου 3.3.2. Ειδικότερα, ο MMC #2 προσαρμόζει την ενεργό ισχύ εξόδου του στην ισχύ του MMC #1, μέσω ταχείας ρύθμισης της μετρούμενης dc τάσης ακροδεκτών στην ονομαστική της τιμή (1 α.μ.). Από την άλλη πλευρά, παρατηρείται εμφανής διαφοροποίηση των επιπέδων dc τάσης λειτουργίας στον MMC #1, όπως και αναμενόταν, λόγω της πτώσης τάσης επί των dc καλωδίων του συστήματος διασύνδεσης, η οποία εξαρτάται από τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των dc καλωδίων, το μήκος τους (εδώ 300 km), και την κατεύθυνση της ροής ισχύος. Έτσι, η αντιστροφή ροής ισχύος οδηγεί σε μετάβαση της dc τάσης σε τιμές μικρότερες της ονομαστικής τιμής, αλλά εντός αποδεκτών ορίων ( $\pm 5\%$ ). Στο Σχήμα 3.8 εικονίζονται η ομαλή απόκριση της ενεργού και αέργου συνιστώσας του ρεύματος εξόδου των μετατροπέων MMC, επιβεβαιώνοντας την αναμενόμενη αποσύζευξη στη λειτουργία του ελεγκτή ρεύματος ως προς τον ανεξάρτητο έλεγχο των  $d-q$  συνιστωσών, χάρη στο σύστημα συγχρονισμού με το δίκτυο.

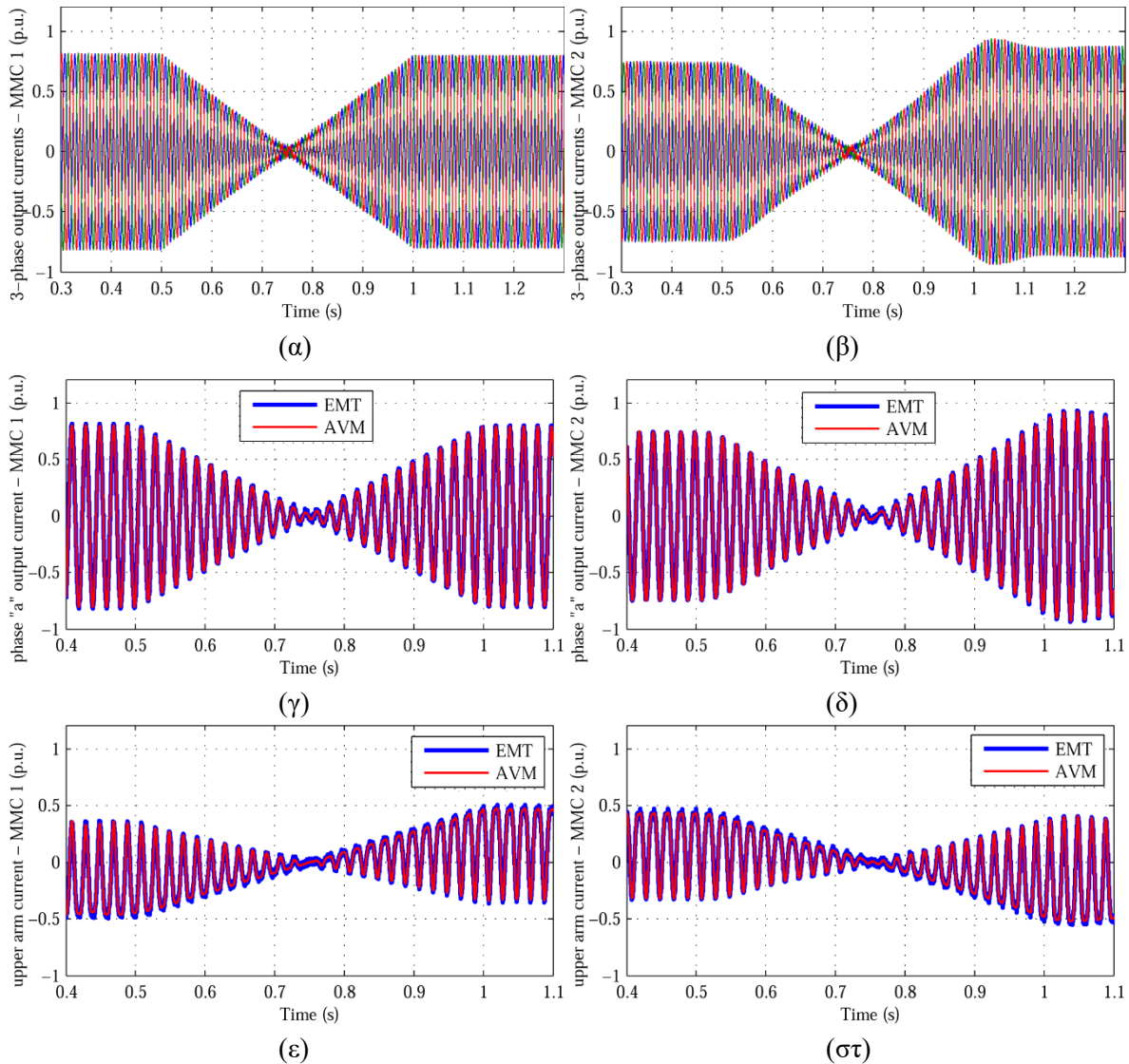


Σχήμα 3.7. Απόκριση συστήματος διασύνδεσης κατά την αντιστροφή ροής ισχύος από τον μετατροπέα MMC #1, (α) ενεργός ισχύς εξόδου MMC#1, (β) ενεργός ισχύς εξόδου MMC#2, (γ) dc τάση ακροδεκτών MMC#1, (δ) dc τάση ακροδεκτών MMC#2.



Σχήμα 3.8. Απόκριση ρευμάτων εξόδου κατά την αντιστροφή ισχύος από τον MMC#1, (α) ενεργός συνιστώσα ρεύματος εξόδου MMC#1, (β) ενεργός συνιστώσα ρεύματος εξόδου MMC#2, (γ) άεργος συνιστώσα ρεύματος εξόδου MMC#1, (δ) άεργος συνιστώσα ρεύματος εξόδου MMC#2.

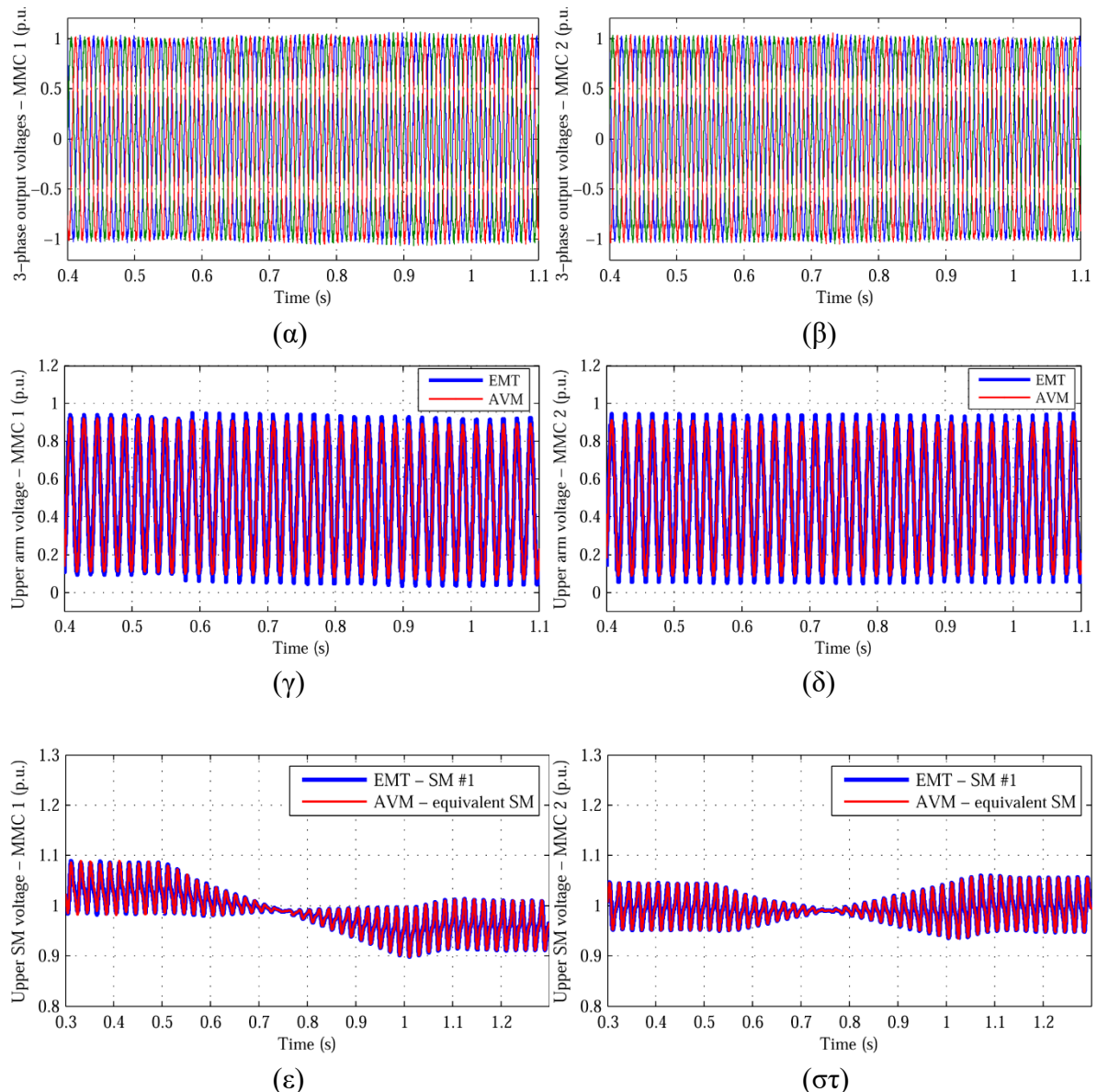
Στο Σχήμα 3.9 εικονίζονται αναλυτικά οι αποκρίσεις των ρευμάτων εξόδου και άνω υποσκέλους κάθε μετατροπέα, από τα οποία επιβεβαιώνονται τα κύρια χαρακτηριστικά λειτουργίας που αναλύθηκαν στην παράγραφο 2.3.2, ιδίως ως προς την αναμενόμενη κυματομορφή των ρευμάτων υποσκέλους. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.9, είναι εμφανής η ύπαρξη dc συνιστώσας, η οποία προκαλεί και την αντίστοιχη μετατόπιση των ρευμάτων υποσκέλους πριν και μετά την αντιστροφή της ροής ισχύος.



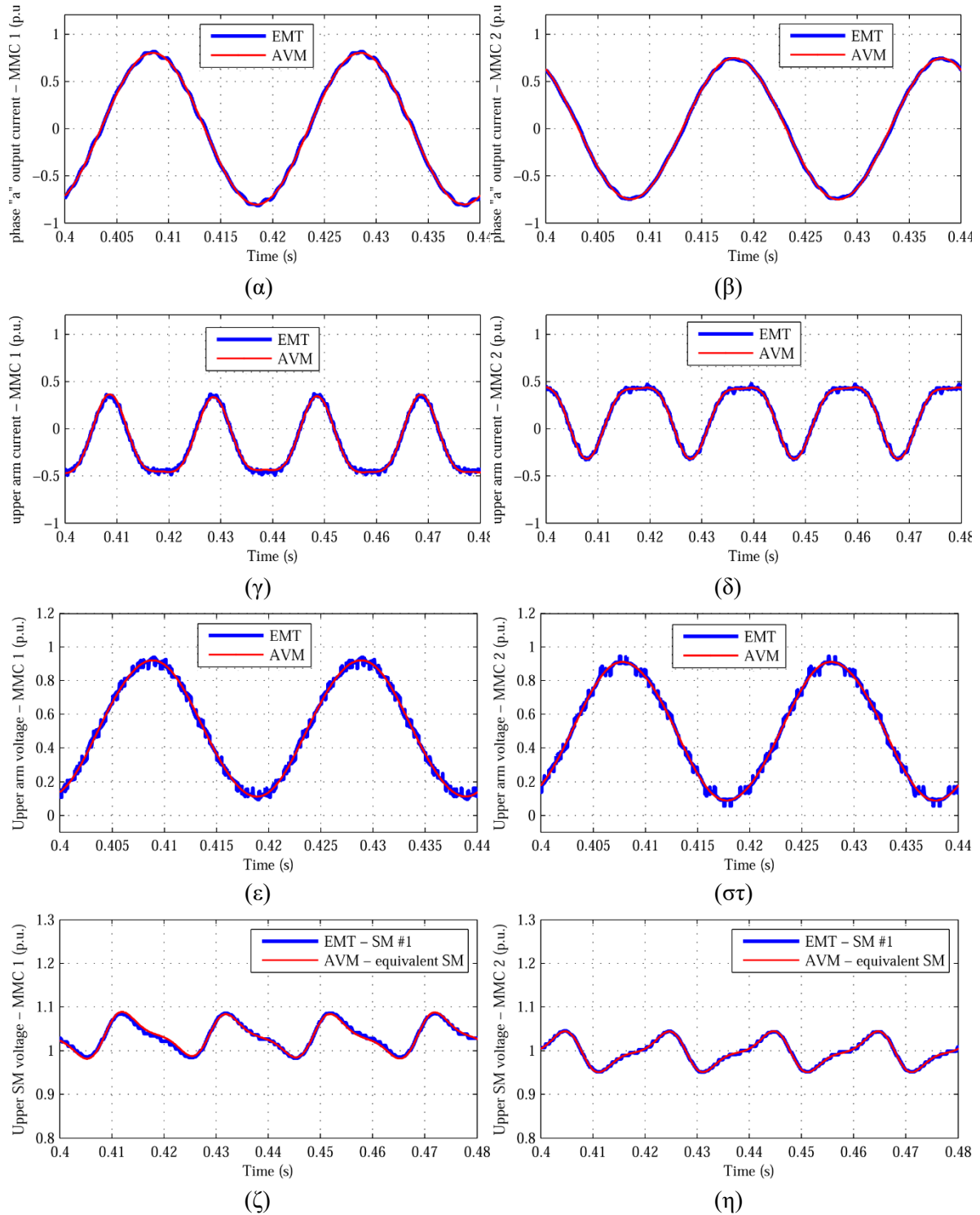
Σχήμα 3.9. Απόκριση ρευμάτων μετατροπέων MMC κατά την αντιστροφή ροής ισχύος, (α) τριφασικά ρεύματα εξόδου MMC#1, (β) τριφασικά ρεύματα εξόδου MMC#2, (γ) ρεύμα εξόδου MMC#1 φάσης “a”, (δ) ρεύμα εξόδου MMC#2 φάσης “a”, (ε) ρεύμα άνω υποσκέλους MMC#1 φάσης “a”, (στ) ρεύμα άνω υποσκέλους MMC#2 φάσης “a”.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει και η απόκριση του μοντέλου μέσης τιμής AVM των μετατροπέων MMC, το οποίο αναπαράγει με εξαιρετική ακρίβεια πρακτικά όλα τα εξεταζόμενα μεγέθη. Αξίζει να σημειωθεί ότι η υπόψη ακρίβεια δεν οφείλεται μόνο στην πιστή αναπαραγωγή της θεμελιώδους συνιστώσας της συντιθέμενης ac τάσης, αλλά και στην εξομοίωση της συνεχούς κυμάτωσης της τάσης των πυκνωτών των υπομονάδων που

συγκροτούν κάθε υποσκέλος της πραγματικής τοπολογίας, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.10, στο οποίο συγκρίνεται η κυμάτωση τάσης της υπομονάδας #1 του άνω υποσκέλους φάσης “a” με αυτή της ισοδύναμης υπομονάδας του μοντέλου AVM. Τα αποτελέσματα υποδηλώνουν και τη σωστή επιλογή παραμέτρων του μετατροπέα MMC, καθώς η κυμάτωση της τάσης των υπομονάδων δεν υπερβαίνει το 10%. Η ικανοποιητική ταύτιση αποκρίσεων μεταξύ EMT και AVM μοντέλων επιβεβαιώνεται και στο Σχήμα 3.11, στο οποίο εικονίζονται με μεγαλύτερη ευκρίνεια τα εναλλασσόμενα ρεύματα και τάσεις στο εξωτερικό και εσωτερικό κύκλωμα των μετατροπέων MMC#1 και #2.



Σχήμα 3.10. Σύγκριση απόκρισης τάσεων εξόδου και υποσκέλους μεταξύ EMT και AVM μοντέλων. (α) τριφασικές τάσεις εξόδου MMC#1, (β) τριφασικές τάσεις εξόδου MMC#2, (γ) συντιθέμενη εναλλασσόμενη τάση άνω υποσκέλους MMC#1 φάσης “a”, (δ) συντιθέμενη εναλλασσόμενη τάση άνω υποσκέλους MMC#2 φάσης “a”, (ε) κυμάτωση τάσης υπομονάδων άνω υποσκέλους MMC#1 φάσης “a”, (στ) κυμάτωση τάσης υπομονάδων άνω υποσκέλους MMC#2 φάσης “a”.



Σχήμα 3.11. Σύγκριση απόκρισης ρευμάτων και τάσεων μεταξύ EMT AVM μοντέλων. (α) ρεύμα εξόδου MMC#1 φάσης “a”, (β) ρεύμα εξόδου MMC#2 φάσης “a”, (γ) ρεύμα άνω υποσκέλους MMC#1 φάσης “a”, (δ) ρεύμα άνω υποσκέλους MMC#2 φάσης “a”, (ε) συντιθέμενη εναλλασσόμενη τάση άνω υποσκέλους MMC#1 φάσης “a”, (στ) συντιθέμενη εναλλασσόμενη τάση άνω υποσκέλους MMC#2 φάσης “a”, (ζ) κυμάτωση τάσης υπομονάδων άνω υποσκέλους MMC#1 φάσης “a”, (η) κυμάτωση τάσης υπομονάδων άνω υποσκέλους MMC#2 φάσης “a”.

Στον Πίνακα 3.1 παρατίθενται και συγκριτικά αποτελέσματα αναφορικά με τον απαιτούμενο χρόνο προσομοίωσης των μοντέλων EMT και AVM, για την προσομοίωση λειτουργίας 1 s, σε υπολογιστικό σύστημα με επεξεργαστή i7-4790 και κύρια μνήμη 16 gb. Από τα αποτελέσματα είναι εμφανής η δραστική επιτάχυνση της προσομοίωσης που επιφέρει το μοντέλο AVM από 7 έως 13 φορές, ανάλογα με το βήμα προσομοίωσης.

Πίνακας 3.1. Απαιτούμενος χρόνος προσομοίωσης μοντέλων EMT και AVM, για την προσομοίωση λειτουργίας της ακτινικής διασύνδεσης MMC-HVDC σε διάστημα 1 s.

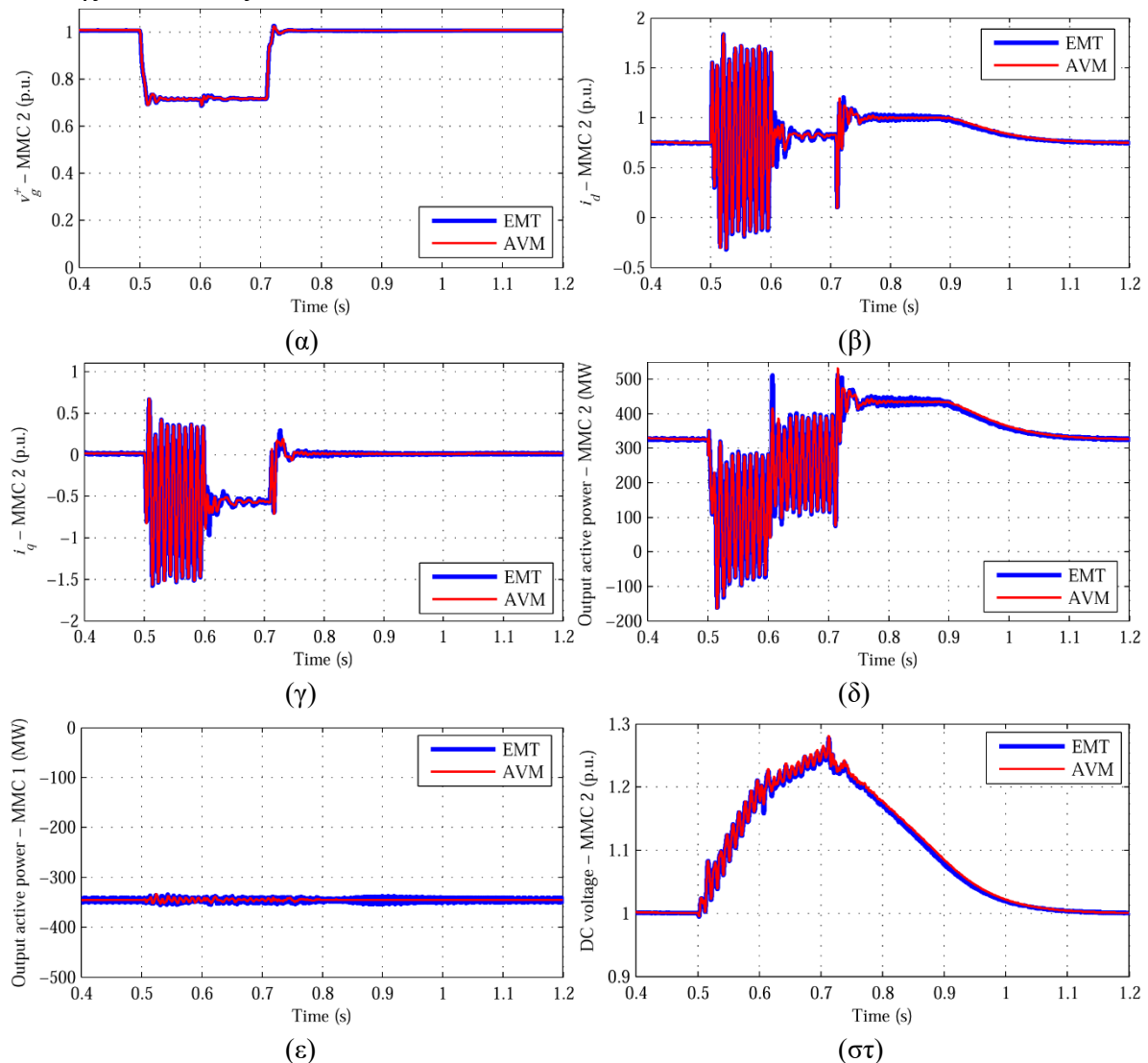
Βήμα προσομοίωσης (μs)	Μοντέλο EMT (s)	Μοντέλο AVM (s)	Συντελεστής επιτάχυνσης προσομοίωσης (EMT/AVM)
5	255	34	750%
10	168	17	988%
20	115	9	1277%

### 3.4.2 Απόκριση συστήματος MMC-HVDC σε διαταραχές δικτύου

Σκοπός της παρούσας παραγράφου είναι η εξέταση της απόκρισης του συστήματος διασύνδεσης κατά την εμφάνιση ενός ac σφάλματος και η διερεύνηση της ικανότητας του μοντέλου μέσης τιμής να αναπαράγει ικανοποιητικά την αναμενόμενη δυναμική συμπεριφορά κατά την εμφάνιση σφαλμάτων. Για το σκοπό αυτό, επιλέχθηκε η προσομοίωση της λειτουργίας κατά την εμφάνιση ενός μονοφασικού σφάλματος στην πλευρά 400 kV του Μ/Σ του μετατροπέα MMC #2, διάρκειας 200 ms, που οδηγεί σε απομένουσα τάση θετικής ακολουθίας περίπου 0.7 α.μ. Προκειμένου να αναδειχθεί η σημασία ενσωμάτωσης του ελεγκτή ρεύματος αρνητικής ακολουθίας που παρουσιάστηκε στο Σχήμα 3.2, θεωρείται ότι τα πρώτα 100 ms της διαταραχής (διάστημα 0.5-0.6 s) ο υπόψη ελεγκτής είναι απενεργοποιημένος, ενώ επενεργεί στα επόμενα 100 ms του σφάλματος (διάστημα 0.6-0.7 s).

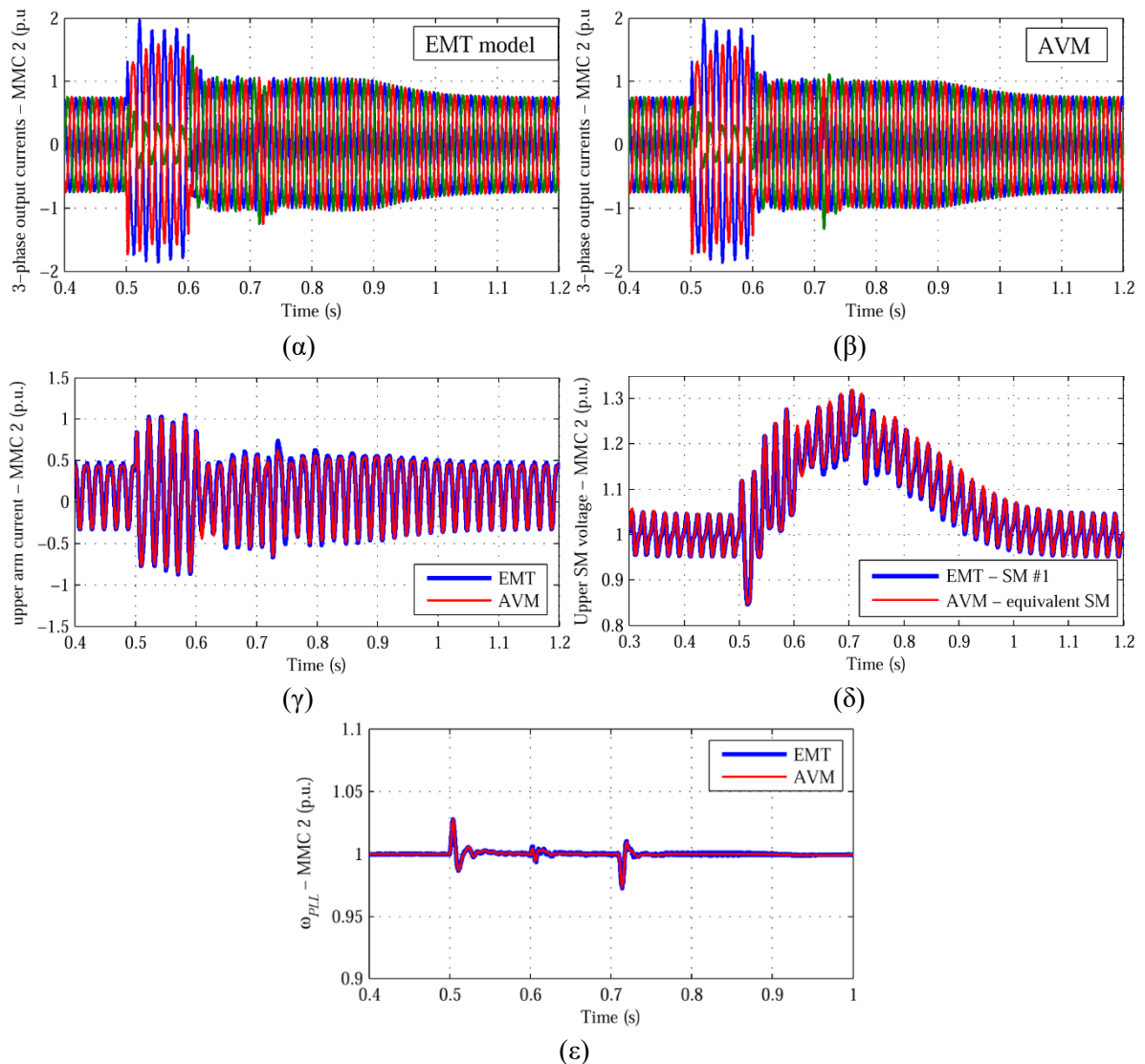
Όπως διαπιστώνεται και από τα αποτελέσματα στο Σχήμα 3.12, η απόκριση των ρευμάτων του μετατροπέα απουσία του ελεγκτή αρνητικής ακολουθίας δεν είναι ικανοποιητική καθώς εμφανίζονται σημαντικές υπερεντάσεις σε δύο φάσεις του συστήματος. Στο δεύτερο μισό της περιόδου του σφάλματος, όπου ενεργοποιείται ο υπόψη ελεγκτής, παρατηρείται σχεδόν ακαριαία συμμετρική ρύθμιση των ρευμάτων εξόδου (βλ. Σχήμα 3.13), εξαλείφοντας τις ταλαντώσεις 100 Hz που εμφανίζονται στο μετρούμενο ρεύμα του κύριου ελεγκτή ρεύματος ο οποίος λειτουργεί στο στρεφόμενο  $d-q$  πλαίσιο θετικής ακολουθίας, επιτρέποντας την ακριβή ρύθμιση της αέργου συνιστώσας στην τιμή αναφοράς που προκύπτει από την εφαρμοζόμενη χαρακτηριστική  $V-I$ . Η συνδυαστική λειτουργία των ελεγκτών θετικής και αρνητικής ακολουθίας επιφέρει οφέλη και στις διακυμάνσεις ρεύματος και τάσης υποσκέλους, οι οποίες περιορίζονται σημαντικά.

Η ανωτέρω ενεργοποίηση της λειτουργίας ταχείας υποστήριξης ac τάσης οδηγεί σε μερικό περιορισμό της ικανότητας έγχυσης ενεργού ισχύος με αποτέλεσμα τη σταδιακή αύξηση της dc τάσης λειτουργίας, λόγω της μόνιμης ανισορροπίας μεταξύ εισερχόμενης και εξερχόμενης ισχύος στο σύστημα διασύνδεσης. Το αποτέλεσμα αυτό αναδεικνύει την ανάγκη λήψης πρόσθετων μέτρων για την επίτευξη αδιάλειπτης λειτουργίας του συστήματος MMC-HVDC σε συνθήκες σφάλματος, τα οποία θα παρουσιαστούν και θα αξιολογηθούν εκτενώς στα Κεφ. 4 και 5 της παρούσας διατριβής. Τέλος, στο Σχήμα 3.13(ε) παρουσιάζεται και η απόκριση του συστήματος συγχρονισμού με το δίκτυο, από την οποία παρατηρούνται βραχύχρονες μόνο διακυμάνσεις της συχνότητας λειτουργίας του ελεγκτή του μετατροπέα, οι οποίες αποσβέννυνται εντός 50 ms μετά την εμφάνιση και εκκαθάριση του σφάλματος αντίστοιχα. Αξίζει να σημειωθεί ότι η συχνότητα λειτουργίας  $\omega_{PLL}$  είναι απαλλαγμένη από ανεπιθύμητες διακυμάνσεις συχνότητας 100 Hz, χάρη στην παρεμβολή των φίλτρων εξαγωγής της τάσης θετικής ακολουθίας.



Σχήμα 3.12. Απόκριση συστήματος διασύνδεσης MMC-HVDC σε 1Φ σφάλμα στην πλευρά 400 kV του Μ/Σ του MMC#2, (α) μετρούμενη τάση θετικής ακολουθίας, (β) ενεργός συνιστώσα ρεύματος εξόδου MMC#2, (γ) άεργος συνιστώσα ρεύματος εξόδου MMC#2, (δ) ενεργός ισχύος εξόδου MMC #2, (ε) ενεργός ισχύος εξόδου MMC#1, (στ) dc τάση ακροδεκτών MMC#2.





Σχήμα 3.13. Απόκριση μετατροπέα MMC#2 σε 1Φ σφάλμα στο ac δίκτυο, (α) τριφασικά ρεύματα εξόδου μοντέλου EMT, (β) τριφασικά ρεύματα εξόδου μοντέλου AVM, (γ) ρεύμα άνω υποσκέλους φάσης “a”, (δ) κυμάτωση τάσης υπομονάδων άνω υποσκέλους φάσης “a”, (ε) συχνότητα συστήματος συγχρονισμού με το δίκτυο.



## 4 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΜΒΑΤΙΚΩΝ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ ΓΙΑ ΤΗ ΣΥΜΒΑΤΟΤΗΤΑ ΘΑΠ ΜΕ ΚΩΔΙΚΕΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Στόχος του παρόντος κεφαλαίου είναι η διερεύνηση της συμβατότητας ενός ΘΑΠ με σχήμα διασύνδεσης VSC-HVDC με τις τεχνικές απαιτήσεις των σύγχρονων κωδίκων συστήματος που αφορούν στην ικανότητα αδιάλειπτης λειτουργίας σε συνθήκες σφάλματος και στη συμμετοχή του ΘΑΠ στη ρύθμιση συχνότητας του ηπειρωτικού συστήματος. Για τον σκοπό αυτό, αναπτύχθηκαν κατάλληλα μεταβατικά μοντέλα προσομοίωσης τόσο των υπεράκτιων Α/Γ και του συστήματος διασύνδεσης VSC-HVDC, όσο και του ηπειρωτικού ΣΗΕ, με τα οποία πραγματοποιήθηκαν εκτενείς παραμετρικές αναλύσεις στο πεδίο του χρόνου και συχνότητας, με εφαρμογή συμβατικών στρατηγικών ελέγχου που είτε έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία είτε χρησιμοποιούνται σε εμπορικές εφαρμογές ΘΑΠ.

### 4.1 Διερεύνηση αδιάλειπτης λειτουργίας ΘΑΠ με αποστολή εντολής περιορισμού ισχύος

#### 4.1.1 Εισαγωγή

Το ενδιαφέρον στη βιβλιογραφία σχετικά με τον τρόπο επίτευξης αδιάλειπτης λειτουργίας ΘΑΠ έχει επικεντρωθεί κυρίως στη χρήση τεχνικών ελέγχου που μεταβάλλουν τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά λειτουργίας του υπεράκτιου ac δικτύου του ΘΑΠ (τάση/συχνότητα) κατόπιν ανίχνευσης συνθηκών σφάλματος στο ηπειρωτικό ac σύστημα, με βασικό στόχο τον ταχύ περιορισμό της ισχύος εξόδου των υπεράκτιων Α/Γ. Ωστόσο, ο υψηλός βαθμός πολυπλοκότητάς τους περιορίζει εν γένει την εφαρμοσιμότητά τους σε εμπορικές εφαρμογές, καθώς απαιτεί ρύθμιση και συντονισμό παραμέτρων ελέγχου μεταξύ των υπεράκτιων Α/Γ και του υπεράκτιου μετατροπέα HVDC προκειμένου να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα.

Από την άλλη πλευρά, μια συνήθης πρακτική που εφαρμόζεται σε σύγχρονες εμπορικές εφαρμογές ΘΑΠ είναι η εγκατάσταση ελεγχόμενων dc αντιστάσεων στον χειρσαίο σταθμό μετατροπής HVDC, για την κατανάλωση της περίσσειας ισχύος που παράγεται από το ΘΑΠ κατά τη διάρκεια του σφάλματος [126], [127]. Ωστόσο, αν και η συγκεκριμένη τεχνική είναι η πλέον αποτελεσματική καθώς δεν απαιτείται καμία μεταβολή της λειτουργίας του ΘΑΠ, αναπόφευκτα αυξάνει το συνολικό κόστος της εγκατάστασης, καθώς απαιτείται η εγκατάσταση ελεγχόμενων μέσων κατανάλωσης ενεργού ισχύος της τάξεως των εκατοντάδων MW, ανάλογα με τη διαστασιολόγηση του ΘΑΠ.

Στην παρούσα παράγραφο διερευνάται η δυνατότητα μείωσης της ονομαστικής ισχύος των ελεγχόμενων dc αντιστάσεων, μέσω παράλληλης χρήσης μιας συμπληρωματικής τεχνικής FRT που αξιοποιεί τις τηλεπικοινωνιακές υποδομές εποπτείας και ελέγχου των υπεράκτιων Α/Γ που εγκαθίστανται σε εμπορικές εφαρμογές ΘΑΠ [47], [58], [128], [129] και αποτελεί βασική απαίτηση σύγχρονων κωδίκων συστήματος [10]. Ειδικότερα, στόχος της

εξεταζόμενης τεχνικής είναι η αποστολή τηλεπικοινωνιακών εντολών περιορισμού της ενεργού ισχύος εξόδου των Α/Γ, κατόπιν ανίχνευσης συνθηκών σφάλματος στο ηπειρωτικό σύστημα. Καθοριστικός παράγοντας που επηρεάζει την επίδοση και αξιοπιστία της συγκεκριμένης τεχνικής είναι η αναμενόμενη χρονική καθυστέρηση που εισάγει το τηλεπικοινωνιακό μέσο αποστολής εντολών σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας, καθώς λόγω των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών του συστήματος διασύνδεσης VSC-HVDC είναι αναγκαίος ο ταχύτατος περιορισμός της εγχεόμενης ενεργού ισχύος των υπεράκτιων Α/Γ για την επίτευξη αδιάλειπτης λειτουργίας, ο οποίος θα πρέπει να λαμβάνει χώρα το πολύ εντός λίγων δεκάδων ms.

Στην ανάλυση που ακολουθεί, παρουσιάζονται βασικές αρχές μοντελοποίησης του ΘΑΠ και του συστήματος διασύνδεσης VSC-HVDC, τόσο στο πεδίο του χρόνου όσο και στο πεδίο της συχνότητας, με στόχο την ανάλυση της λειτουργίας του συστήματος σε συνθήκες σφάλματος. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην επίδραση της χρονικής καθυστέρησης του τηλεπικοινωνιακού συστήματος ελέγχου στη μεταβατική συμπεριφορά του συστήματος διασύνδεσης VSC-HVDC και του ΘΑΠ σε συνθήκες σφάλματος, και άρα στην απαιτούμενη διαστασιολόγηση των εξωτερικών dc αντιστάσεων προκειμένου να εξασφαλιστεί η αδιάλειπτη λειτουργία του ΘΑΠ.

#### 4.1.2 Περιγραφή στρατηγικής ελέγχου FRT

Η εξεταζόμενη στρατηγική ελέγχου βασίζεται στην αποστολή εντολής περιορισμού της παραγόμενης ενεργού ισχύος εξόδου των υπεράκτιων Α/Γ, κατόπιν ανίχνευσης συνθηκών σφάλματος από τον επίγειο μετατροπέα VSC-HVDC. Για τον σκοπό αυτό, είναι αναγκαία η εκτίμηση της ικανότητας έγχυσης ενεργού ισχύος  $P_{Rmax}$  στο ηπειρωτικό ac σύστημα από το σύστημα ελέγχου του μετατροπέα REC, η οποία στην παρούσα ανάλυση υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση (βλ. Σχήμα 4.1):

$$P_{Rmax} = v_g^+ I_{dmax} \quad (4.1)$$

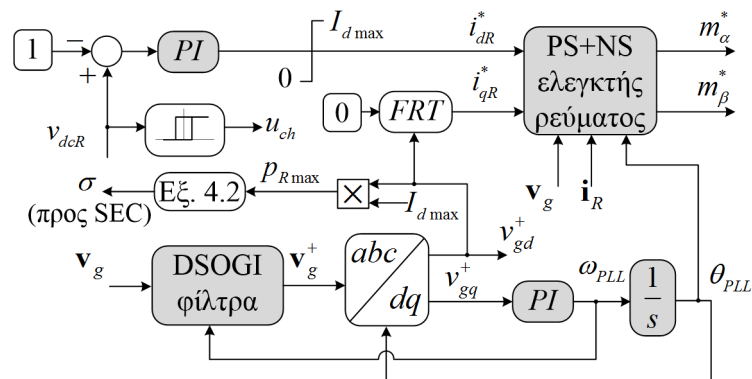
Όπου  $v_g^+$  είναι το μέτρο της τάσης θετικής ακολουθίας του ηπειρωτικού συστήματος, και  $I_{dmax}$  είναι η τιμή του περιοριστή της ενεργού συνιστώσας του ρεύματος εξόδου, όπως αυτή υπολογίζεται από την Εξ. (2.1) του Κεφ. 2.

Σε περίπτωση παράλληλης χρήσης εξωτερικών dc αντιστάσεων στον μετατροπέα REC για την επίτευξη αδιάλειπτης λειτουργίας, προκύπτει η δυνατότητα μικρότερου μεγέθους περικοπών ισχύος των Α/Γ για τον έλεγχο των dc υπερτάσεων σε αποδεκτά επίπεδα. Η απαιτούμενη ποσοστιαία μεταβολή  $\sigma$  της παραγόμενης ενεργού ισχύος των Α/Γ μπορεί να υπολογιστεί από την ακόλουθη σχέση [104]:

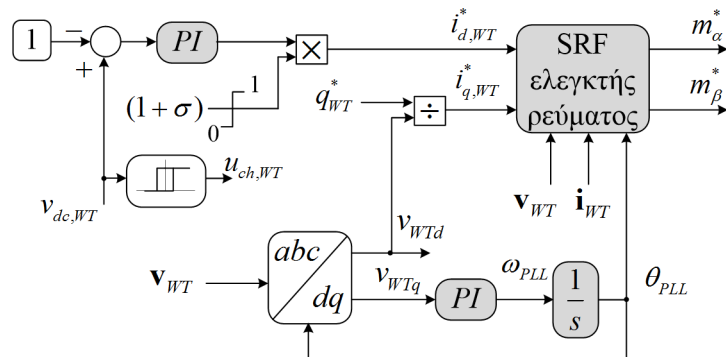
$$\sigma = \frac{P_{Rmax} - P_{R0}}{P_{R0}} + \frac{v_{dcR0}^2 / r_{ch}}{P_{R0}} \quad (4.2)$$

Όπου  $p_{R0}$  και  $v_{dcR0}$  είναι οι τιμές προ διαταραχής της ενεργού ισχύος εξόδου και της dc τάσης λειτουργίας αντίστοιχα, ενώ  $r_{ch}$  είναι η ωμική αντίσταση των βοηθητικών dc φορτίων. Ο ανωτέρω συντελεστής περικοπών  $\sigma$  αποστέλλεται στον υπεράκτιο μετατροπέα SEC μέσω ενός τηλεπικοινωνιακού μέσου (π.χ. μέσω οπτικών ινών οι οποίες εγκαθίστανται με τα υποβρύχια dc καλώδια), και στη συνέχεια αποστέλλεται σε κάθε A/Γ διακριτά με τη χρήση του τηλεπικοινωνιακού συστήματος ελέγχου του υπεράκτιου δικτύου του ΘΑΠ. Το μέσο επικοινωνίας μπορεί να είναι είτε ενσύρματο, είτε οπτικών ινών [58], [129] ή ακόμα και ασύρματης τεχνολογίας [130].

Λαμβάνοντας υπόψη το σύστημα ελέγχου του μετατροπέα πλευράς δικτύου της A/Γ που παρουσιάστηκε στο Κεφ. 2, μια σχετικά απλή μέθοδος ενσωμάτωσης της εντολής περικοπών  $\sigma$  είναι η αναπροσαρμογή της ενεργού συνιστώσας του ρεύματος αναφοράς  $i_{d,WT}^*$  η οποία σε κανονική λειτουργία καθορίζεται από τον PI ελεγκτή της dc τάσης του συστήματος μετατροπέων της A/Γ (βλ. Σχήμα 4.2). Παράλληλα, η ύπαρξη βοηθητικών dc φορτίων στην A/Γ επιτρέπει τον έλεγχο της dc τάσης του συστήματος μετατροπέων της A/Γ σε αποδεκτά επίπεδα, χωρίς την ανάγκη προσαρμογής της ηλεκτρικής ισχύος της γεννήτριας της A/Γ στη μειωμένη εγγεόμενη ενεργό ισχύ του μετατροπέα πλευράς δικτύου.



Σχήμα 4.1. Ελεγκτής μετατροπέα REC με ενσωματωμένη δυνατότητα αποστολής εντολής περιορισμού ενεργού ισχύος ΘΑΠ.



Σχήμα 4.2. Ελεγκτής μετατροπέα πλευράς δικτύου A/Γ με δυνατότητα περιορισμού ενεργού ισχύος κατόπιν λήψης εξωτερικής εντολής  $\sigma$ .

### 4.1.3 Μοντέλο μικρού σήματος ΘΑΠ – συστήματος διασύνδεσης VSC-HVDC

Για να εξεταστεί η ικανότητα αδιάλειπτης λειτουργίας του ΘΑΠ με συστηματικό τρόπο, χωρίς τη διενέργεια πολλαπλών και χρονοβόρων προσομοιώσεων στο πεδίο του χρόνου, στην παρούσα παράγραφο παρουσιάζεται ένα κατάλληλο μοντέλο του ΘΑΠ αναπτυγμένο στο πεδίο της συχνότητας, προκειμένου να εξεταστεί η επίδραση των διαφόρων παραμέτρων ελέγχου του κάθε υποσυστήματος στην επίδοση της εξεταζόμενης τεχνικής FRT. Η συνεισφορά του υπόψη μοντέλου είναι σημαντική, καθώς επιτρέπει με ευκολία τη διεξαγωγή παραμετρικών αναλύσεων, χωρίς να απαιτείται εξαρχής η ανάπτυξη μεταβατικών μοντέλων προσομοίωσης του συστήματος διασύνδεσης VSC-HVDC και του ΘΑΠ στο πεδίο του χρόνου.

Όπως εικονίζεται και στο Σχήμα 4.2, η προτεινόμενη στρατηγική περιορισμού της ισχύος εξόδου των Α/Γ εφαρμόζεται απευθείας στην ενεργό συνιστώσα του ρεύματος αναφοράς  $i_{d,WT}^*$ , ενώ ο PI ελεγκτής της dc τάσης μένει ανενεργός. Αμελώντας την επίδραση της δυναμικής του συστήματος PLL, η ενεργός ισχύς εξόδου  $p_{WT}$  μπορεί να εκτιμηθεί από τη σχέση:

$$p_{WT} = v_{WT} i_{d,WT} \quad (4.3)$$

Εφαρμόζοντας τη μέθοδο ανάλυσης μικρού σήματος γύρω από ένα σημείο ισορροπίας, η μεταβολή της ενεργού ισχύος  $\Delta p_{WT}$  μπορεί να εκτιμηθεί ως :

$$\Delta p_{WT} = v_{WT0} \Delta i_{d,WT} + \Delta v_{WT} i_{d,WT0} \quad (4.4)$$

Όπου  $v_{WT0}$  και  $i_{d,WT0}$  είναι οι τιμές προ διαταραχής της τάσης εξόδου και της ενεργού συνιστώσας του ρεύματος εξόδου της Α/Γ. Αμελώντας την μεταβολή της τάσης  $\Delta v_{WT}$ , η Εξ. (4.4) γίνεται:

$$\Delta p_{WT} \approx v_{WT0} \Delta i_{d,WT} \approx \frac{v_{WT0}}{1 + s\tau_{GSC}} \Delta i_{d,WT}^* \quad (4.5)$$

όπου  $\tau_{GSC}$  είναι η ισοδύναμη σταθερά χρόνου του ακαριαίου βρόχου ελέγχου ρεύματος (στην παρούσα ανάλυση θεωρήθηκε ίση με 1 ms), ενώ η μεταβολή του ρεύματος αναφοράς  $\Delta i_{d,WT}^*$  καθορίζεται από τη σχέση:

$$\Delta i_{d,WT}^* = \sigma i_{d,WT0} \quad (4.6)$$

Με βάση τις Εξ. (4.5) και (4.6), η προκληθείσα μεταβολή ενεργού ισχύος μπορεί να εκτιμηθεί από τη σχέση:

$$\Delta p_{WT} = \frac{\sigma p_{WT0}}{1 + s\tau_{GSC}} \quad (4.7)$$

Για την ανάλυση της δυναμικής συμπεριφοράς του συστήματος διασύνδεσης VSC-HVDC κατά την επιβολή περικοπών της παραγόμενης ισχύος των Α/Γ, απαιτείται η ανάπτυξη ενός

μοντέλου μικρού σήματος της διάταξης των μετατροπέων HVDC και των υποβρύχιων dc καλωδίων. Για το σκοπό αυτό, στην παρούσα διατριβή η μοντελοποίηση των dc καλωδίων πραγματοποιείται με τη χρήση του ονομαστικού π-ισοδύναμου κυκλώματος που εικονίζεται στο Σχήμα 4.3. Η ισοδύναμη χωρητικότητα  $C_{eq}$  στο κάθε άκρο διασύνδεσης δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$C_{eq} = C_{VSC} + C_{dc} / 4 \quad (4.8)$$

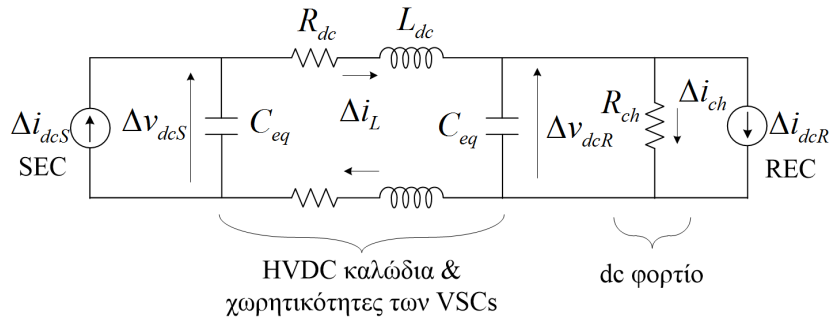
Όπου  $C_{VSC}$ ,  $C_{dc}$  είναι οι ισοδύναμες χωρητικότητες των μετατροπέων VSC και του κάθε dc καλωδίου αντίστοιχα. Με βάση την κυκλωματική αναπαράσταση στο Σχήμα 4.3, η δυναμική του συστήματος διασύνδεσης VSC-HVDC καθορίζεται από τις ακόλουθες διαφορικές εξισώσεις:

$$i_{dcS} - i_L = C_{eq} \frac{dv_{dcS}}{dt} \quad (4.9)$$

$$R_{dc} i_L + L_{dc} \frac{di_L}{dt} = \frac{v_{dcS} - v_{dcR}}{2} \quad (4.10)$$

$$i_L - i_{ch} - i_{dcR} = C_{eq} \frac{dv_{dcR}}{dt} \quad (4.11)$$

Όπου  $v_{dcS(R)}$ ,  $i_{dcS(R)}$  είναι η τάση και το ρεύμα στους dc ακροδέκτες του μετατροπέα SEC(REC),  $R_{dc}$ ,  $L_{dc}$  είναι τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των dc καλωδίων, και  $i_L$ ,  $i_{ch}$  είναι τα ρεύματα που διαρρέουν τα καλώδια και τις βοηθητικές dc αντιστάσεις αντίστοιχα.



Σχήμα 4.3. Κυκλωματική αναπαράσταση συστήματος διασύνδεσης VSC-HVDC με χρήση ονομαστικού π-ισοδύναμου κυκλώματος για τα υποβρύχια dc καλώδια.

Στην ανάλυση που ακολουθεί, οι Εξ. (4.9) – (4.11) εκφράζονται σε α.μ. χρησιμοποιώντας τις ακόλουθες τιμές βάσης (ισχύς:  $S_{bdc}$ , τάση:  $V_{bdc}$ , ρεύμα:  $I_{bdc}$ , αντίσταση:  $Z_{bdc}$ ):

$$S_{bdc} = S_{VSC} \quad (4.12)$$

$$V_{bdc} = v_{dcn} \quad (4.13)$$

$$I_{bdc} = S_{bdc} / V_{bdc} \quad (4.14)$$

$$Z_{bdc} = \frac{V_{bdc} / 2}{I_{bdc}} \quad (4.15)$$

Όπου  $v_{dcn}$  είναι η ονομαστική dc τάση ακροδεκτών και  $S_{VSC}$  η ικανότητα των μετατροπέων VSC. Εφαρμόζοντας τη μέθοδο ανάλυσης μικρού σήματος, και συνδυάζοντας τις Εξ. (4.9) – (4.11) με τις Εξ. (4.12) – (4.15), προκύπτουν οι ακόλουθες εξισώσεις στο πεδίο της συχνότητας, εκφρασμένες σε α.μ.:

$$\Delta i_{dcS} - \Delta i_L = 2s\tau_C \Delta v_{dcS} \quad (4.16)$$

$$r_{dc} \Delta i_L + sk_L \Delta i_L = \Delta v_{dcS} - \Delta v_{dcR} \quad (4.17)$$

$$\Delta i_L - \left( \frac{v_{dcR0}}{r_{ch}} m_{ch} + \frac{\Delta v_{dcR}}{r_{ch}} \right) - \Delta i_{dcR} = 2s\tau_C \Delta v_{dcR} \quad (4.18)$$

Όπου  $m_{ch}$  είναι το σήμα έναυσης του dc φορτίου,  $k_L$  είναι ο λόγος  $L_{dc} / Z_{bdc}$  και  $\tau_C$  είναι η ισοδύναμη σταθερά χρόνου της χωρητικότητας  $C_{eq}$ , και ορίζεται από τη σχέση:

$$\tau_C = \frac{C_{eq} v_{dcn}^2}{2S_{VSC}} \quad (4.19)$$

Η μικρή μεταβολή της ενεργού ισχύος εξόδου των μετατροπέων SEC και REC  $\Delta p_S$  και  $\Delta p_R$  προσεγγίζεται από:

$$\Delta p_S = v_{dcS0} \Delta i_{dcS} + (i_{L0} + \Delta i_{dcS}) \Delta v_{dcS} \quad (4.20)$$

$$\Delta p_R = v_{dcR0} \Delta i_{dcR} + (i_{L0} + \Delta i_{dcR}) \Delta v_{dcR} \quad (4.21)$$

Όπως θα εξηγηθεί και στην παράγραφο 4.1.4, κύριος στόχος του γραμμικοποιημένου μοντέλου είναι η εκτίμηση της αναμενόμενης απόκρισης σε συνθήκες σφάλματος που οδηγούν σε 100% μείωση της εγχεόμενης ενεργού ισχύος του μετατροπέα REC. Συνεπώς, οι όροι  $i_{L0} + \Delta i_{dcS(R)}$  των Εξ. (4.20) και (4.21) μπορούν να αμεληθούν, οδηγώντας στις ακόλουθες απλουστευμένες σχέσεις:

$$\Delta p_S \approx v_{dcS0} \Delta i_{dcS} \quad (4.22)$$

$$\Delta p_R \approx v_{dcR0} \Delta i_{dcR} \quad (4.23)$$

Με συνδυασμό των Εξ. (4.16) – (4.18) με τις Εξ. (4.22), (4.23), η απόκριση της dc τάσης στους ακροδέκτες του μετατροπέα REC μπορεί να εκτιμηθεί από την ακόλουθη σχέση:

$$\Delta v_{dcR} = G_{HVDC} \left( -\frac{\Delta p_R}{v_{dcR0}} - \frac{v_{dcR0}}{r_{ch}} u_{ch} + \frac{\Delta p_S}{v_{dcS0} G_1} \right) \quad (4.24)$$

Όπου οι συναρτήσεις μεταφοράς  $G_{HVDC}$ ,  $G_1$  δίνονται από:



$$G_{HVDC} = \frac{G_1}{G_2} = \frac{s^2 2\tau_c k_L + s 2r_{dc} \tau_c + 1}{a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0} \quad (4.25)$$

$$a_3 = 4\tau_c^2 k_L, \quad a_2 = 2\tau_c (2r_{dc} \tau_c + k_L / r_{ch}) \quad (4.26)$$

$$a_1 = 2\tau_c (2 + r_{dc} / r_{ch}), \quad a_0 = 1 / r_{ch} \quad (4.27)$$

Λαμβάνοντας υπόψη το σχήμα ελέγχου του μετατροπέα REC (Σχήμα 4.1) και την Εξ. (4.2), ο συντελεστής περικοπών  $\sigma$  που αποστέλλεται στις Α/Γ διαμορφώνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\sigma = \frac{1}{1 + s\tau_{sogi}} \left( 2\Delta v_g + \frac{v_{dcR0}^2}{r_{ch} p_{WT0}} u_{ch} \right) \quad (4.28)$$

Όπου  $\tau_{sogi}$  είναι η χρονική σταθερά (περίπου 5 ms [111]) της απόκρισης των φίλτρων εξαγωγής της τάσης θετικής ακολουθίας. Αν  $T_{com}$  είναι η χρονική καθυστέρηση που εισάγει το τηλεπικοινωνιακό σύστημα αποστολής εντολών, η αναμενόμενη μεταβολή της ισχύος που απορροφά ο μετατροπέας SEC προσεγγίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\Delta p_S = \frac{\sigma p_{WT0} e^{-sT_{com}}}{1 + s\tau_{GSC}} \quad (4.29)$$

Συνδυάζοντας τις Εξ. (4.24), (4.28) και (4.29), προκύπτει το διάγραμμα βαθμίδων που εικονίζεται στο Σχήμα 4.4, με βάση το οποίο μπορεί πλέον να εκτιμηθεί η αναμενόμενη απόκριση της dc τάσης  $\Delta v_{dcR}$  κατά την εμφάνιση βυθίσεων τάσης στο ηπειρωτικό σύστημα, με επίλυση της ακόλουθης εξίσωσης στο πεδίο του χρόνου:

$$\Delta v_{dcR}(t) = \mathcal{L}^{-1} \left\{ G_{HVDC}(s) \left( G_v(s) \Delta v_g(s) + G_u(s) u_{ch}(s) \right) \right\} \quad (4.30)$$

Όπου  $u_{ch}(s)$  είναι η συνάρτηση βηματικής μεταβολής, ενώ οι συναρτήσεις μεταφοράς  $G_v(s)$  και  $G_u(s)$  δίνονται από:

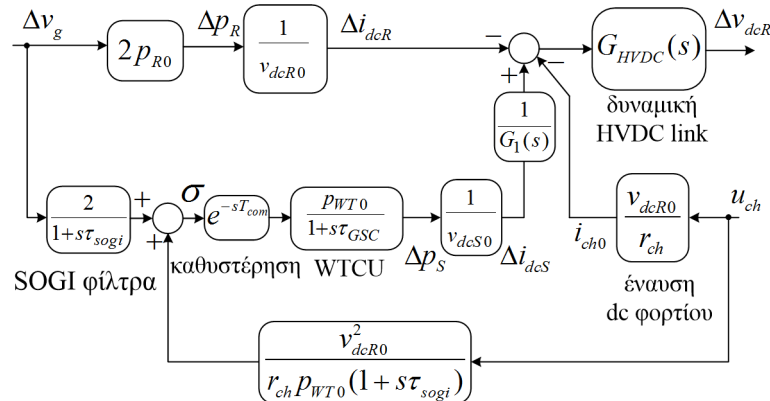
$$G_v(s) = -\frac{2p_{R0}}{v_{dcR0}} + \frac{2p_{WT0} e^{-sT_{com}}}{G_1(s) v_{dcS0} (1 + s\tau_{sogi}) (1 + s\tau_{GSC})} \quad (4.31)$$

$$G_u(s) = -\frac{v_{dcR0}}{r_{ch}} + \frac{e^{-sT_{com}} v_{dcR0}^2}{G_1(s) r_{ch} v_{dcS0} (1 + s\tau_{sogi}) (1 + s\tau_{GSC})} \quad (4.32)$$

#### 4.1.4 Παραμετρική ανάλυση αδιάλειπτης λειτουργίας ΘΑΠ σε συνθήκες σφάλματος

Βασικός προβληματισμός της εξεταζόμενης τεχνικής FRT αποτελεί η επίδραση της καθυστέρησης του τηλεπικοινωνιακού συστήματος αποστολής εντολών στην επίτευξη αδιάλειπτης λειτουργίας. Για τον σκοπό αυτό, διενεργείται ακολούθως μια παραμετρική ανάλυση χρησιμοποιώντας το γραμμικοποιημένο μοντέλο της Παραγράφου 4.1.3, προκειμένου να διερευνηθεί η επίδραση της καθυστέρησης  $T_{com}$  στην ικανότητα αδιάλειπτης

λειτουργίας, και συνεπώς στην αναγκαιότητα ή όχι χρήσης εξωτερικών ελεγχόμενων dc αντιστάσεων.



Σχήμα 4.4. Διάγραμμα βαθμίδων γραμμικοποιημένου μοντέλου ΘΑΠ- συστήματος διασύνδεσης VSC-HVDC, με συνδυαστική χρήση τηλεπικοινωνιακής μεθόδου και βοηθητικών dc φορτίων για την επίτευξη αδιάλειπτης λειτουργίας σε συνθήκες σφάλματος του ηπειρωτικού συστήματος.

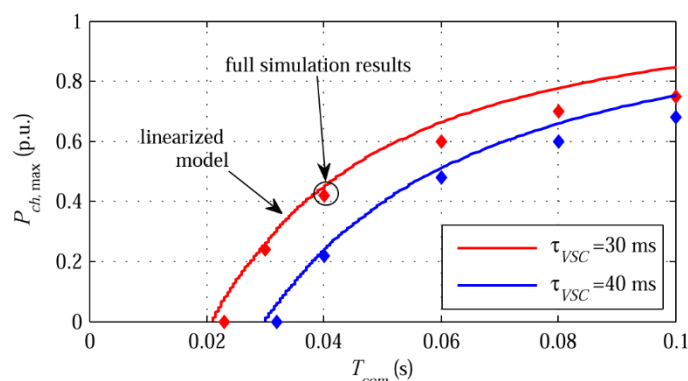
Η ανάλυση διενεργείται υπό δυσμενείς συνθήκες λειτουργίας, δηλ. εμφάνιση βύθισης τάσης 50% ενώ οι Α/Γ λειτουργούν υπό ονομαστική ενεργό ισχύ, γεγονός που οδηγεί σε μηδενική ικανότητα έγχυσης ενεργού ισχύος, συνεκτιμώντας τις απαιτήσεις του κώδικα για έγχυση αέργου ισχύος κατά την διάρκεια του σφάλματος. Στην παρούσα ανάλυση, επιτυχής αδιάλειπτη λειτουργία θεωρείται όταν η μέγιστη αναμενόμενη dc υπέρταση του συστήματος διασύνδεσης VSC-HVDC διατηρείται κάτω από 20%. Ως παράμετρος διαστασιολόγησης των ελεγχόμενων dc αντιστάσεων επιλέχθηκε η μέγιστη κατανάλωση ενεργού ισχύος  $P_{ch,max}$  σε συνθήκες μέγιστης dc υπέρτασης  $v_{dcR,max}$ , δηλ.:

$$P_{ch,max} = \frac{v_{dcR,max}^2}{r_{ch}} \quad (4.33)$$

Στο Σχήμα 4.5 παρουσιάζεται η απαιτούμενη ικανότητα των dc αντιστάσεων συναρτήσει της χρονικής καθυστέρησης που εισάγει το τηλεπικοινωνιακό σύστημα αποστολής εντολών περιορισμού της ισχύος. Ενδεικτικά παρουσιάζονται δύο διαφορετικές τιμές της χρονικής σταθεράς  $\tau_{VSC}$ , βάσει αντιπροσωπευτικών τιμών που αναφέρονται στη βιβλιογραφία σε εμπορικές εφαρμογές συστημάτων HVDC. Η συνεχής γραμμή αναπαριστά τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από το γραμμικοποιημένο μοντέλο, ενώ τα διακριτά σημεία προέκυψαν μετά από πολλαπλές προσομοιώσεις στο πεδίο του χρόνου με τη χρήση του πλήρους διακοπτικού μοντέλου.

Η επίδραση της καθυστέρησης  $T_{com}$  επηρεάζει δραστικά την απαιτούμενη ικανότητα των ελεγχόμενων dc αντιστάσεων. Εξίσου σημαντική είναι και η επίδραση της ισοδύναμης χωρητικότητας των μετατροπέων HVDC, όπως αναμενόταν, καθώς επηρεάζει σημαντικά το ρυθμό μεταβολής της dc τάσης σε συνθήκες περιορισμού της εγχόμενης ενεργού ισχύος στο

χερσαίο άκρο του συστήματος διασύνδεσης. Από το Σχήμα 4.5 διαπιστώνεται πως όταν η χρονική καθυστέρηση κυμαίνεται στο εύρος 20-30 ms, δεν απαιτείται η χρήση εξωτερικών dc αντιστάσεων για την επίτευξη αδιάλειπτης λειτουργίας. Αντίθετα, όταν το τηλεπικοινωνιακό σύστημα παρουσιάζει μεγαλύτερη καθυστέρηση, της τάξης των 60-80 ms, τότε η χρήση dc αντιστάσεων αποτελεί το κυριότερο μέσο επίτευξης αδιάλειπτης λειτουργίας. Ένα χρήσιμο συμπέρασμα από το Σχήμα 4.5, είναι ότι ακόμα και υπό την επίδραση σχετικά αυξημένης καθυστέρησης στο εύρος 40-60 ms, μπορεί να μειωθεί σημαντικά η απαιτούμενη ικανότητα των ελεγχόμενων dc αντιστάσεων, γεγονός που παρουσιάζει προφανή οφέλη τόσο από πλευράς κόστους όσο και απαιτούμενου χώρου εγκαταστάσεων στο χερσαίο σταθμό μετατροπής HVDC.



Σχήμα 4.5. Επίδραση χρονικής καθυστέρησης τηλεπικοινωνιακής μεθόδου FRT στην απαιτούμενη ικανότητα των βοηθητικών dc φορτίων για την επίτευξη αδιάλειπτης λειτουργίας σε συνθήκες σφάλματος του ηπειρωτικού συστήματος.

#### 4.1.5 Αποτελέσματα προσομοιώσεων

Στην παρούσα παράγραφο παρουσιάζονται αποτελέσματα προσομοιώσεων της δυναμικής συμπεριφοράς του συστήματος διασύνδεσης VSC-HVDC του ΘΑΠ σε συμμετρικά και ασύμμετρα σφάλματα δικτύου, με χρήση λεπτομερών διακοπτικών μοντέλων για το σύνολο των υποσυστημάτων που απαρτίζουν τη διάταξη, που αναπτύχθηκαν στο λογισμικό Matlab/Simulink. Βασικός στόχος της ανάλυσης είναι τόσο η επίδειξη της ικανότητας αδιάλειπτης λειτουργίας του ΘΑΠ όσο και η επικύρωση των αποτελεσμάτων του γραμμικοποιημένου μοντέλου της Παραγράφου 4.1.3, αναφορικά με την επίδραση της χρονικής καθυστέρησης  $T_{com}$  στην απαιτούμενη ικανότητα των dc αντιστάσεων ώστε να επιτευχθεί αδιάλειπτη λειτουργία σε συνθήκες σφάλματος.

Στο Σχήμα 4.6 προσομοιώνεται η απόκριση του ΘΑΠ σε 3Φ σφάλμα που εμφανίζεται στην πλευρά 400 kV του χερσαίου Μ/Σ, διάρκειας 200 ms, το οποίο οδηγεί σε απομένουσα τάση 0.5 α.μ. στην έξοδο του φίλτρου εξόδου του μετατροπέα REC. Κατά τη διάρκεια του σφάλματος, ενεργοποιείται η υποστήριξη της τάσης του δικτύου που είναι ενσωματωμένη στο σύστημα ελέγχου του χερσαίου μετατροπέα, ρυθμίζοντας την άεργο συνιστώσα του ρεύματος εξόδου στην τιμή αναφοράς που ορίζει η χρησιμοποιούμενη χαρακτηριστική  $V-I$  του Γερμανικού κώδικα (-1 α.μ), περίπου εντός 40 ms από την εμφάνιση του σφάλματος. Ο περιοριστής ρεύματος  $I_{dmax}$  περιορίζει την ενεργό ισχύ εξόδου του μετατροπέα REC σε

μηδενική τιμή, καθώς η μέγιστη επιτρεπόμενη ένταση λειτουργίας έχει θεωρηθεί ίση με 1 α.μ.

Στο Σχήμα 4.7 παρουσιάζονται αποτελέσματα προσομοίωσης για τρεις διαφορετικές τιμές της χρονικής καθυστέρησης  $T_{com}$ , προκειμένου να διερευνηθεί πιο αναλυτικά η επίδραση της καθυστέρησης επικοινωνίας στην απόκριση του συστήματος σε συνθήκες σφάλματος. Στην πρώτη περίπτωση (μπλε συνεχής γραμμή), όπου η χρονική καθυστέρηση είναι σχετικά μικρή (32 ms), επιτυγχάνεται αδιάλειπτη λειτουργία χωρίς την ανάγκη χρήσης εξωτερικών dc αντιστάσεων, καθώς η μέγιστη dc υπέρταση προκύπτει μικρότερη από 1.2. α.μ. Ωστόσο, απαιτείται η περικοπή της εγγεόμενης ισχύος του ΘΑΠ στο σύνολό της (-100%), γεγονός που υποδηλώνει την ανάγκη ενεργοποίησης του εσωτερικού συστήματος ελέγχου της Α/Γ για την κατανάλωση της παραγόμενης ενεργού ισχύος της γεννήτριας της Α/Γ τοπικά σε βοηθητικές dc αντιστάσεις.

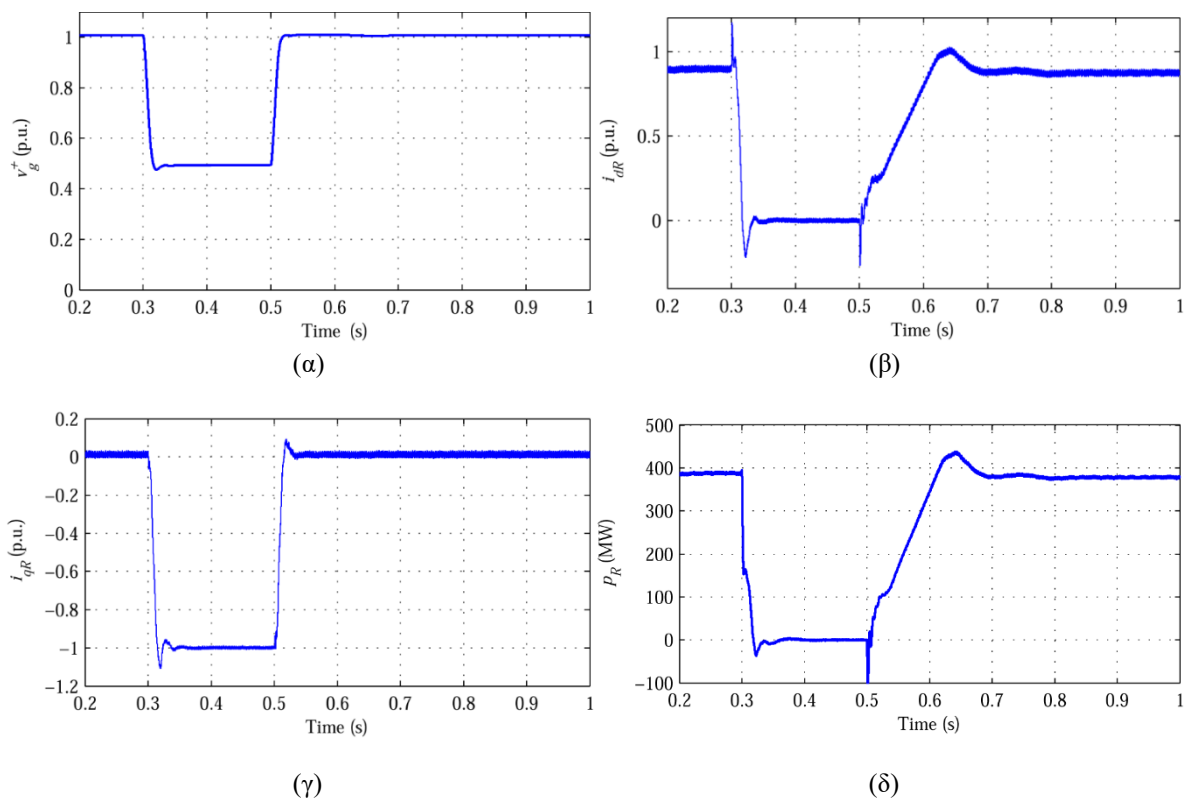
Όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο 4.1.4, η χρήση εξωτερικών dc αντιστάσεων στο σύστημα διασύνδεσης VSC-HVDC είναι αναγκαία παρουσία μεγαλύτερων χρονικών καθυστερήσεων, ώστε να αποφευχθούν εκτεταμένες και μη αποδεκτές dc υπερτάσεις. Από τις πρόσθετες προσομοιώσεις οι οποίες παρατίθενται στο Σχήμα 4.7, διαπιστώνεται πως όταν η αναμενόμενη χρονική καθυστέρηση είναι της τάξεως των 50 ms, είναι αναγκαία η χρήση dc αντιστάσεων ικανότητας τουλάχιστον 165 MW (0.4 α.μ.), με κριτήριο τον περιορισμό της dc υπέρτασης κάτω από 1.2. α.μ. Από την άλλη πλευρά, η χρήση dc φορτίων πλήρους ικανότητας (400 MW) επιτρέπει τον αποτελεσματικότερο έλεγχο της dc υπέρτασης σε χαμηλότερα επίπεδα, χωρίς την ανάγκη περιορισμού της ισχύος εξόδου των Α/Γ.

Η αξιοποίηση των τηλεπικοινωνιακών υποδομών του ΘΑΠ για την επίτευξη αδιάλειπτης λειτουργίας, πέραν του περιορισμού της ικανότητας των dc αντιστάσεων, οδηγεί και σε σημαντική μείωση του θερμικού φορτίου τους που εκλύεται υπό μορφή θερμότητας κατά τη διάρκεια του σφάλματος. Συγκρίνοντας τις λύσεις πλήρους και μερικής ικανότητας, η καταναλισκόμενη ενέργεια στην περίπτωση μερικής ικανότητας προκύπτει περίπου 100 MJ, επιτυγχάνοντας μείωσή της περίπου κατά 60% σε σχέση με τη λύση dc αντιστάσεων πλήρους ικανότητας. Ωστόσο, το συγκεκριμένο όφελος εξαρτάται δραστικά από τη μέγιστη αναμενόμενη καθυστέρηση του τηλεπικοινωνιακού συστήματος ελέγχου.

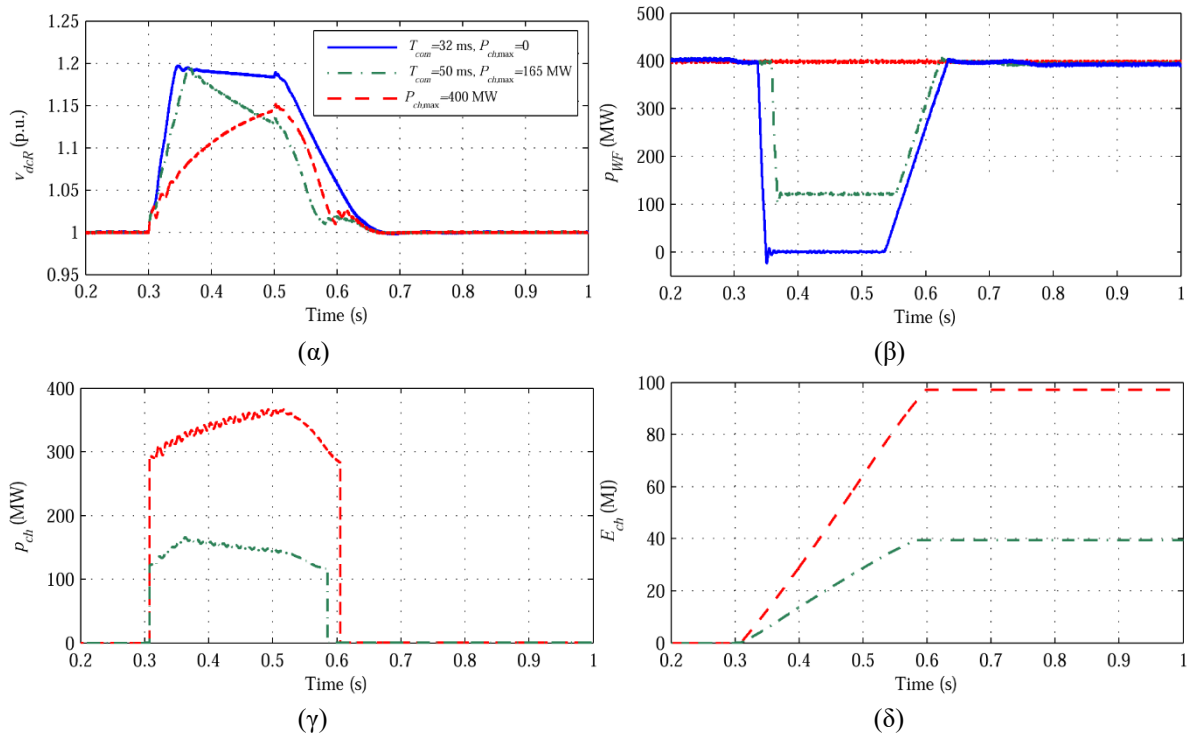
Παρακάτω προσομοιώνεται η απόκριση του ΘΑΠ και σε ασύμμετρα σφάλματα, προκειμένου να διερευνηθεί η επίδρασή τους στη δυναμική συμπεριφορά του συστήματος. Και εδώ η εξέταση διενεργείται υπό δυσμενείς συνθήκες λειτουργίας, δηλαδή θεωρώντας μηδενική αντίσταση σφάλματος, ενώ το ΘΑΠ λειτουργεί υπό ονομαστική ισχύ. Στο Σχήμα 4.8 προσομοιώνεται η απόκριση του συστήματος σε 2Φ σφάλμα προς γη στην πλευρά 400 kV του επίγειου Μ/Σ, διάρκειας 200 ms, που οδηγεί σε απομένουσα τάση θετικής ακολουθίας ίση με 0.42 α.μ. Γενικά, η απόκριση του συστήματος παρουσιάζει παρόμοια συμπεριφορά με αυτή στο Σχήμα 4.6. Ωστόσο, στην υπόψη περίπτωση εξέτασης επιβεβαιώνεται η ανάγκη ενσωμάτωσης του ελεγκτή ρεύματος αρνητικής ακολουθίας, καθώς απουσία αυτού

προκαλείται υπερένταση στη μία φάση του ac συστήματος. Η ενεργός ισχύς εξόδου του επίγειου μετατροπέα VSC-HVDC παρουσιάζει ταλαντώσεις στη διπλάσια συχνότητα της θεμελιώδους, λόγω εμφάνισης της τάσεως αρνητικής ακολουθίας σε συνδυασμό με την εξάλειψη του ρεύματος αρνητικής ακολουθίας από τον ελεγκτή ρεύματος.

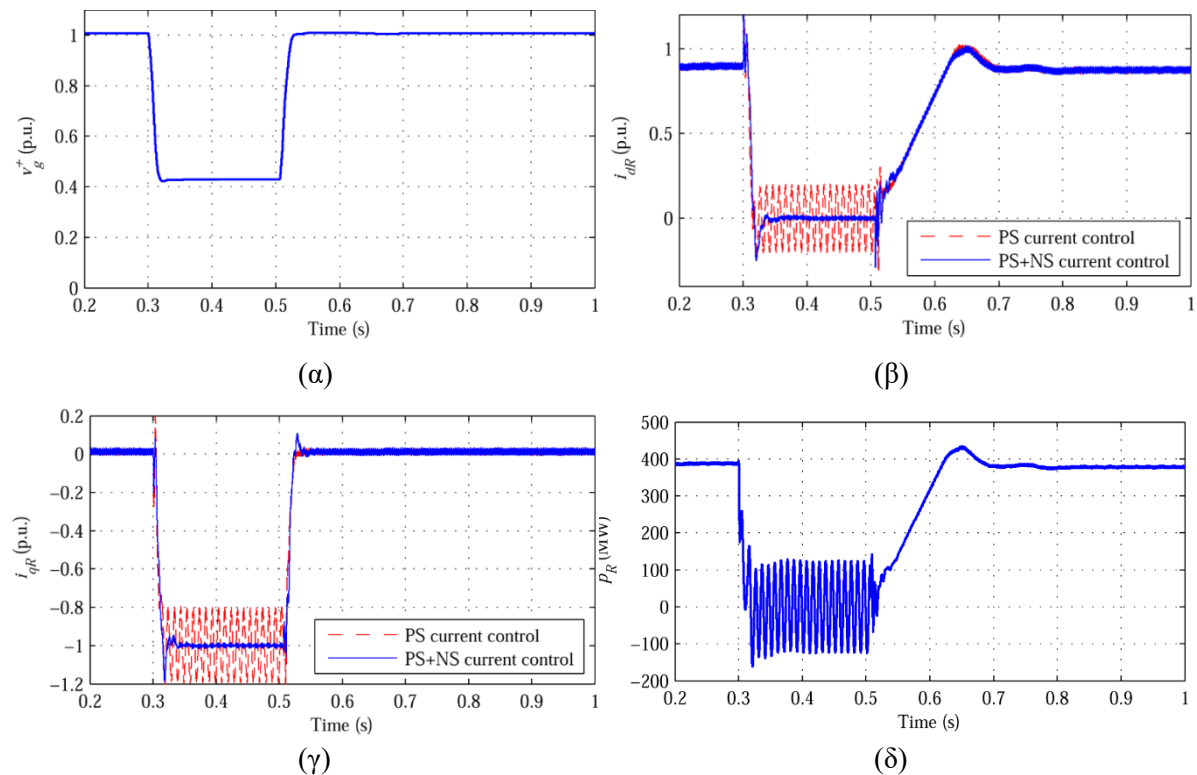
Στο Σχήμα 4.9 παρουσιάζονται πρόσθετα αποτελέσματα αναφορικά με την απόκριση της dc τάσης και της εγγεόμενης ενεργού ισχύος του ΘΑΠ. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα αποτελέσματα είναι πρακτικά τα ίδια με αυτά στο Σχήμα 4.7, καθώς η απομένουσα τάση θετικής ακολουθίας μειώνεται σε επίπεδα που έτσι και αλλιώς μηδενίζουν την ικανότητα έγχυσης ενεργού ισχύος στο ηπειρωτικό σύστημα. Αξίζει να σημειωθεί ότι η λειτουργία του ΘΑΠ δεν επηρεάζεται από τις ασύμμετρες συνθήκες σφάλματος, καθώς ο συντελεστής περικοπών ισχύος  $\sigma$  υπολογίζεται βάσει της τάσης θετικής ακολουθίας που εξάγεται από το σύστημα συγχρονισμού DSOGI-PLL του ελεγκτή του επίγειου μετατροπέα.



Σχήμα 4.6. Απόκριση μετατροπέα REC σε 3Φ βύθιση τάσης στην πλευρά 400 kV του Μ/Σ, (α) μετρούμενη τάση θετικής ακολουθίας, (β) ενεργός συνιστώσα ρεύματος εξόδου μετατροπέα REC, (γ) άεργος συνιστώσα ρεύματος εξόδου μετατροπέα REC, (δ) ενεργός ισχύς εξόδου μετατροπέα REC.

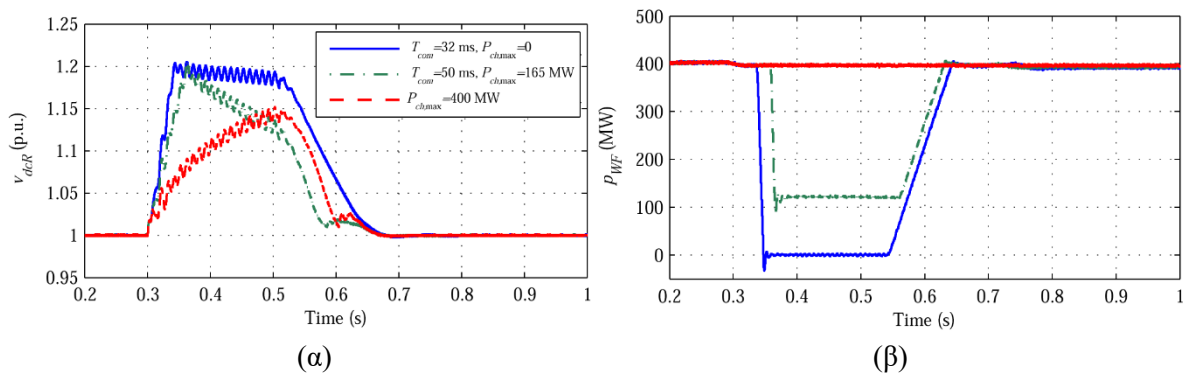


Σχήμα 4.7. Απόκριση ΘΑΠ – συστήματος διασύνδεσης VSC-HVDC σε 3Φ βύθιση τάσης (Σχήμα 4.6) για διαφορετικές τιμές της χρονικής καθυστέρησης  $T_{com}$  και της ικανότητας των βοηθητικών dc φορτίων, (α) dc τάση μετατροπέα REC, (β) ενεργός ισχύς εξόδου ΘΑΠ, (γ) καταναλισκόμενη ισχύς dc φορτίων, (δ) καταναλισκόμενη ενέργεια επί των dc φορτίων.

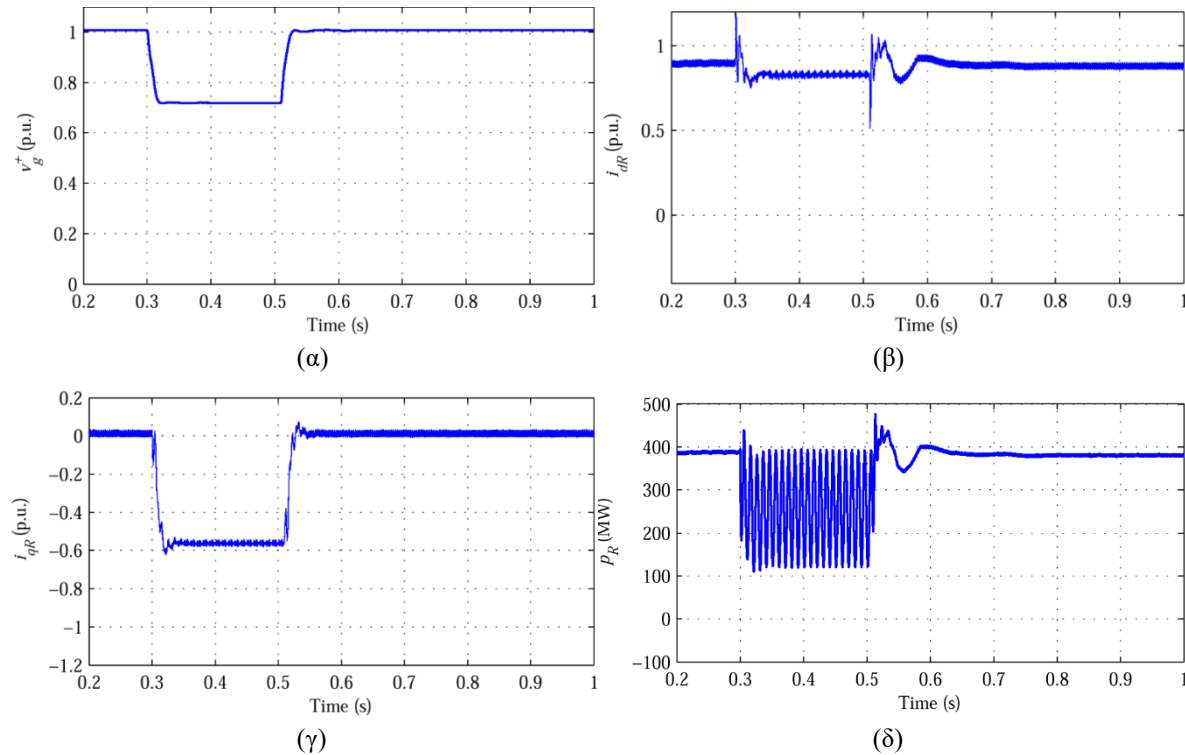


Σχήμα 4.8. Απόκριση μετατροπέα REC σε 2Φ βύθιση τάσης στην πλευρά 400 kV του Μ/Σ, (α) μετρούμενη τάση θετικής ακολουθίας, (β) ενεργός συνιστώσα ρεύματος εξόδου μετατροπέα REC, (γ) άεργος συνιστώσα ρεύματος εξόδου μετατροπέα REC, (δ) ενεργός ισχύς εξόδου μετατροπέα REC.

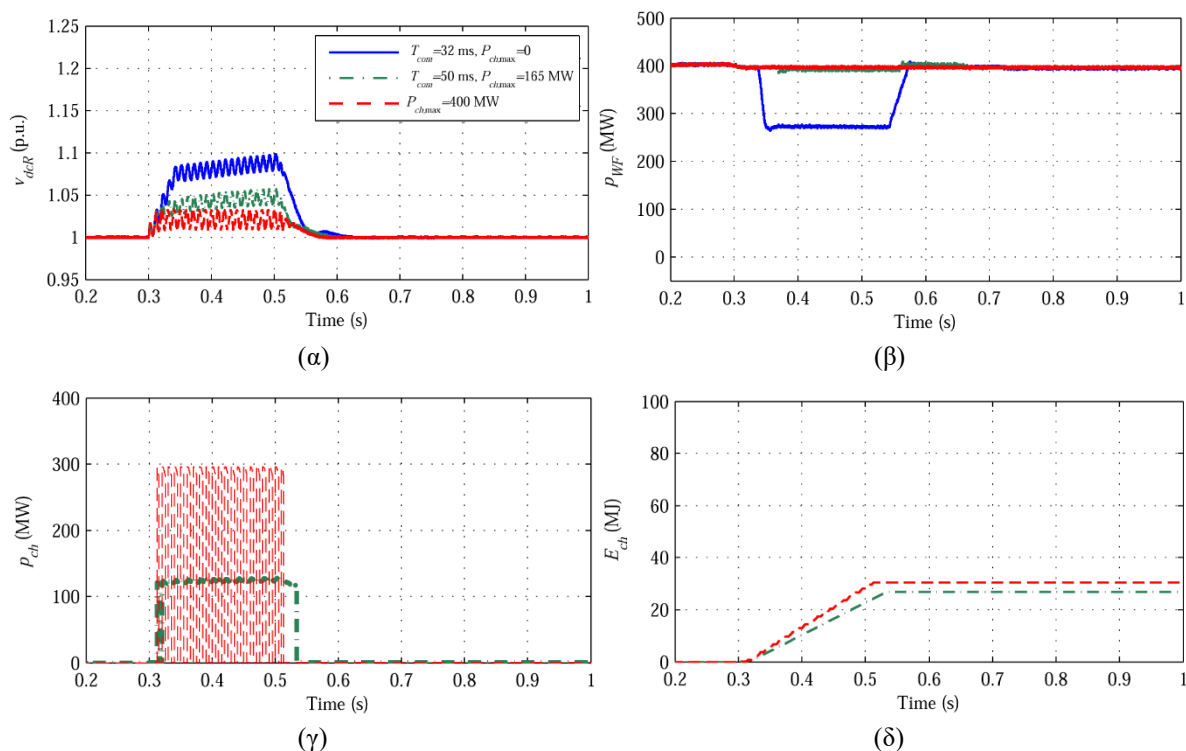
Τέλος, στο Σχήμα 4.10 εικονίζεται η απόκριση του συστήματος σε 1Φ σφάλμα. Η απομένουσα τάση θετικής ακολουθίας προκύπτει ίση με 0.72 α.μ., η οποία βάσει της χρησιμοποιούμενης χαρακτηριστικής  $V-I$ , οδηγεί στη ρύθμιση της αέργου συνιστώσας του ρεύματος εξόδου στην τιμή 0.56 α.μ. περίπου εντός 20 ms από την εμφάνιση του σφάλματος. Η επίδραση του συγκεκριμένου τύπου σφάλματος είναι σαφώς μικρότερη συγκριτικά με τις ανωτέρω περιπτώσεις 3Φ και 2Φ σφάλματος, ενώ το θερμικό φορτίο των dc αντιστάσεων είναι πρακτικά το ίδιο στις περιπτώσεις πλήρους και μερικής ικανότητας, καθώς απαιτείται η τοπική κατανάλωση περίσσειας ισχύος ίδιου μεγέθους, καθώς δεν απαιτήθηκε περιορισμός της παραγόμενης ισχύος του ΘΑΠ.



Σχήμα 4.9. Απόκριση ΘΑΠ – συστήματος διασύνδεσης VSC-HVDC σε 2Φ βύθιση τάσης για διαφορετικές τιμές της χρονικής καθυστέρησης  $T_{com}$  και της ικανότητας των βοηθητικών dc φορτίων, (α) dc τάση μετατροπέα REC, (β) ενεργός ισχύς εξόδου ΘΑΠ.



Σχήμα 4.10. Απόκριση μετατροπέα REC σε 1Φ βύθιση τάσης στην πλευρά 400 kV του Μ/Σ, (α) μετρούμενη τάση θετικής ακολουθίας, (β) ενεργός συνιστώσα ρεύματος εξόδου μετατροπέα REC, (γ) άεργος συνιστώσα ρεύματος εξόδου μετατροπέα REC, (δ) ενεργός ισχύς εξόδου μετατροπέα REC.



Σχήμα 4.11. Απόκριση ΘΑΠ – συστήματος διασύνδεσης VSC-HVDC σε 1Φ βύθιση τάσης για διαφορετικές τιμές της χρονικής καθυστέρησης  $T_{com}$  και της ικανότητας των βοηθητικών dc φορτίων, (α) dc τάση μετατροπέα REC, (β) ενεργός ισχύς εξόδου ΘΑΠ, (γ) καταναλισκόμενη ισχύς dc φορτίων, (δ) καταναλισκόμενη ενέργεια επί των dc φορτίων.

## 4.2 Διερεύνηση αδιάλειπτης λειτουργίας ΘΑΠ με τεχνητή βύθιση τάσης

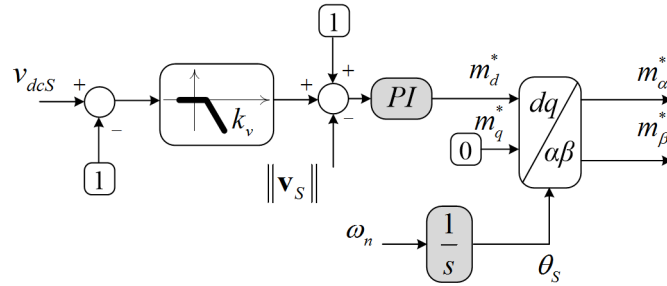
### 4.2.1 Απόκριση σε 3Φ σφάλμα δικτύου

Ένα βασικό συμπέρασμα της προηγούμενης τεχνικής FRT είναι η σημαντική επίδραση της αναμενόμενης χρονικής καθυστέρησης του τηλεπικοινωνιακού συστήματος ελέγχου στην ικανότητα αδιάλειπτης λειτουργίας του ΘΑΠ, γεγονός που μειώνει σημαντικά την αξιοπιστία της και καθιστά πιο ρεαλιστική τη χρήση βοηθητικών dc φορτίων αυξημένης ικανότητας στον επίγειο σταθμό μετατροπής dc/ac για την εξασφάλιση αδιάλειπτης λειτουργίας. Ωστόσο, στην υφιστάμενη βιβλιογραφία έχουν προταθεί εναλλακτικές τεχνικές FRT που βασίζονται στη μεταβολή των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών λειτουργίας του υπεράκτιου ac συστήματος, όπως η επιβολή τεχνητής βύθισης τάσης ή η αύξηση της συχνότητας λειτουργίας του ΘΑΠ.

Παρακάτω διερευνάται η ικανότητα αδιάλειπτης λειτουργίας του ΘΑΠ με την επιβολή τεχνητής βύθισης τάσης στο υπεράκτιο ac δίκτυο κατόπιν ανίχνευσης συνθηκών σφάλματος στο ηπειρωτικό σύστημα. Η υπόψη τεχνική παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.12 και βασίζεται στην επιτήρηση της dc τάσης λειτουργίας  $v_{dcS}$  του υπεράκτιου μετατροπέα SEC, η οποία μόλις υπερβεί μια τιμή κατωφλίου τότε ενεργοποιείται ελεγχόμενη βύθιση τάσης ανάλογη της μετρούμενης μεταβολής της dc τάσης. Βασική προϋπόθεση της συγκεκριμένης λύσης είναι η ικανότητα αδιάλειπτης λειτουργίας των υπεράκτιων Α/Γ προκειμένου η επιβολή βύθισης τάσης να μην οδηγήσει στην αποσύνδεση των Α/Γ από το υπεράκτιο ac δίκτυο. Προφανώς μια τέτοια υπόθεση εργασίας κρίνεται εύλογη σε σημερινές εφαρμογές Α/Γ,

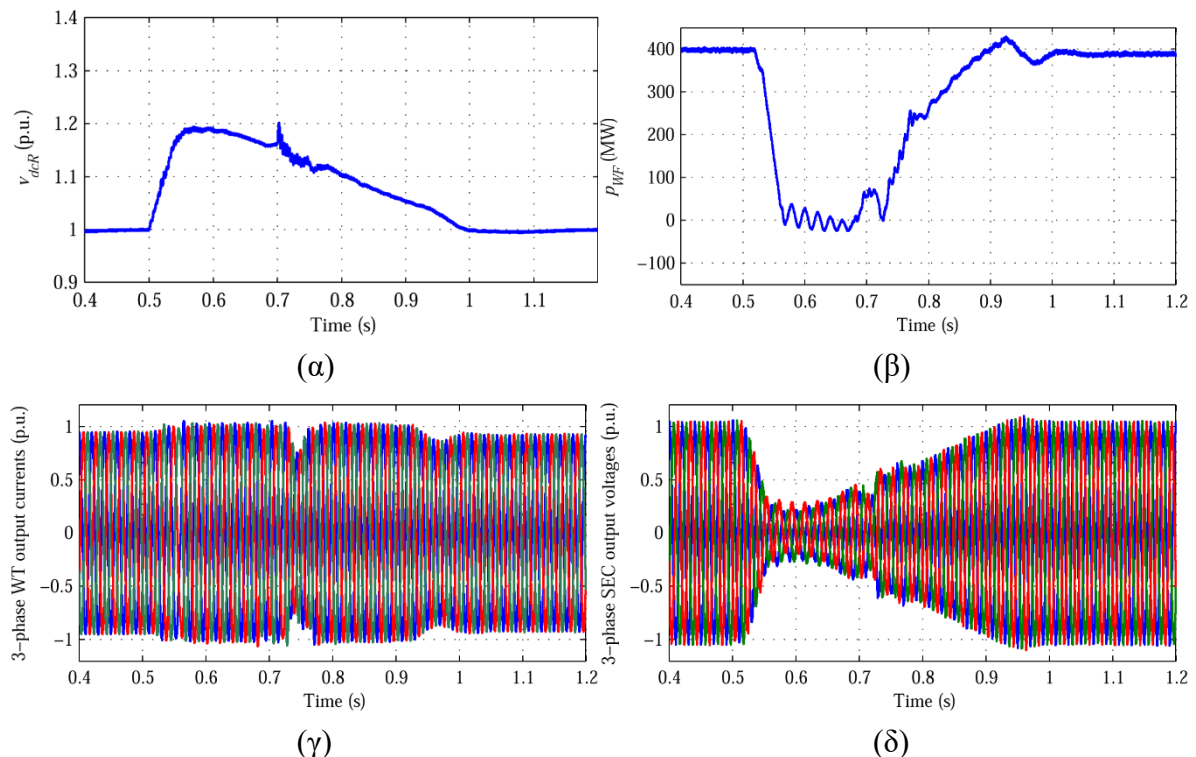


καθώς η ικανότητα αδιάλειπτης λειτουργίας εμπορικά διαθέσιμων Α/Γ σε σφάλμα δικτύου αποτελεί πλέον ένα συμβατικό τεχνικό χαρακτηριστικό τους για τη συμμόρφωση με τις τεχνικές απαιτήσεις σύγχρονων κωδικών συστήματος.



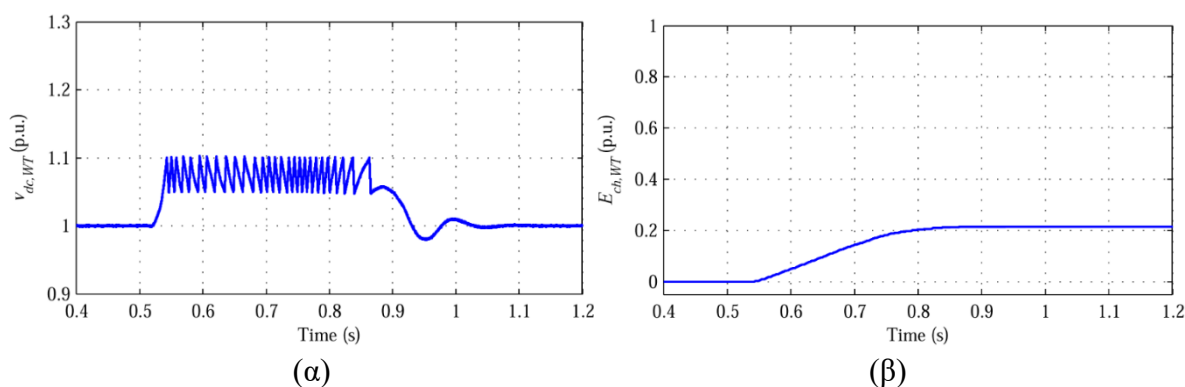
Σχήμα 4.12. Σύστημα ελέγχου υπεράκτιου μετατροπέα HVDC (SEC) με λειτουργία βύθισης ac τάσης σε συνθήκες σφάλματος του ηπειρωτικού συστήματος.

Στο Σχήμα 4.13 προσομοιώνεται η απόκριση του ΘΑΠ για την ίδια 3Φ βύθιση τάσης με αυτή της προηγούμενης παραγράφου. Λόγω του δραστικού περιορισμού της εγχεόμενης ενεργού ισχύος στο ηπειρωτικό σύστημα, προκαλείται ταχεία dc υπέρταση η οποία οδηγεί σε ενεργοποίηση της λειτουργίας βύθισης τάσης του μετατροπέα SEC, με αποτέλεσμα να επιβληθεί στιγμιαία μια μέγιστη βύθιση τάσης της τάξης του 80% στο υπεράκτιο ac δίκτυο. Η λειτουργία αυτή οδηγεί σε ταχύ περιορισμό της εγχεόμενης ενεργού ισχύος των Α/Γ, ενώ παράλληλα το μέτρο του ρεύματος εξόδου τους ρυθμίζεται σχεδόν ακαριαία στη μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή.



Σχήμα 4.13. Απόκριση ΘΑΠ – συστήματος διασύνδεσης ΘΑΠ σε 3Φ σφάλμα στην πλευρά 400 kV του Μ/Σ του μετατροπέα REC, με εφαρμογή τεχνητής βύθισης τάσης στο υπεράκτιο ac δίκτυο, (α) dc τάση μετατροπέα REC, (β) ενεργός ισχύς εξόδου ΘΑΠ, (γ) τριφασικά ρεύματα εξόδου των υπεράκτιων Α/Γ, (δ) τριφασικές τάσεις εξόδου μετατροπέα SEC.

Η επακόλουθη μείωση ισχύος προκαλεί dc υπέρταση και στο σύστημα μετατροπέων της Α/Γ, η οποία όμως ελέγχεται αποτελεσματικά λόγω έναυσης των ελεγχόμενων φορτίων στους dc ακροδέκτες, καταναλώνοντας τοπικά την παραγόμενη ισχύ της γεννήτριας. Το θερμικό φορτίο που εκλύθηκε υπό μορφή θερμότητας φαίνεται στο Σχήμα 4.14, το οποίο διατηρείται σε αποδεκτά επίπεδα με βάση χαρακτηριστικά εμπορικά διαθέσιμων Α/Γ (τυπικό όριο το 0.2 α.μ. [70]). Η μέγιστη dc υπέρταση στο σύστημα διασύνδεσης VSC-HVDC διατηρείται κάτω από 1.2 α.μ., γεγονός που υποδηλώνει την αποτελεσματικότητα της εξεταζόμενης τεχνικής FRT.



Σχήμα 4.14. Ενεργοποίηση βοηθητικών dc φορτίων Α/Γ σε συνθήκες βύθισης τάσης, (α) dc τάση λειτουργίας συστήματος μετατροπέων Α/Γ, (β) καταναλισκόμενη ενέργεια επί των βοηθητικών αντιστάσεων.

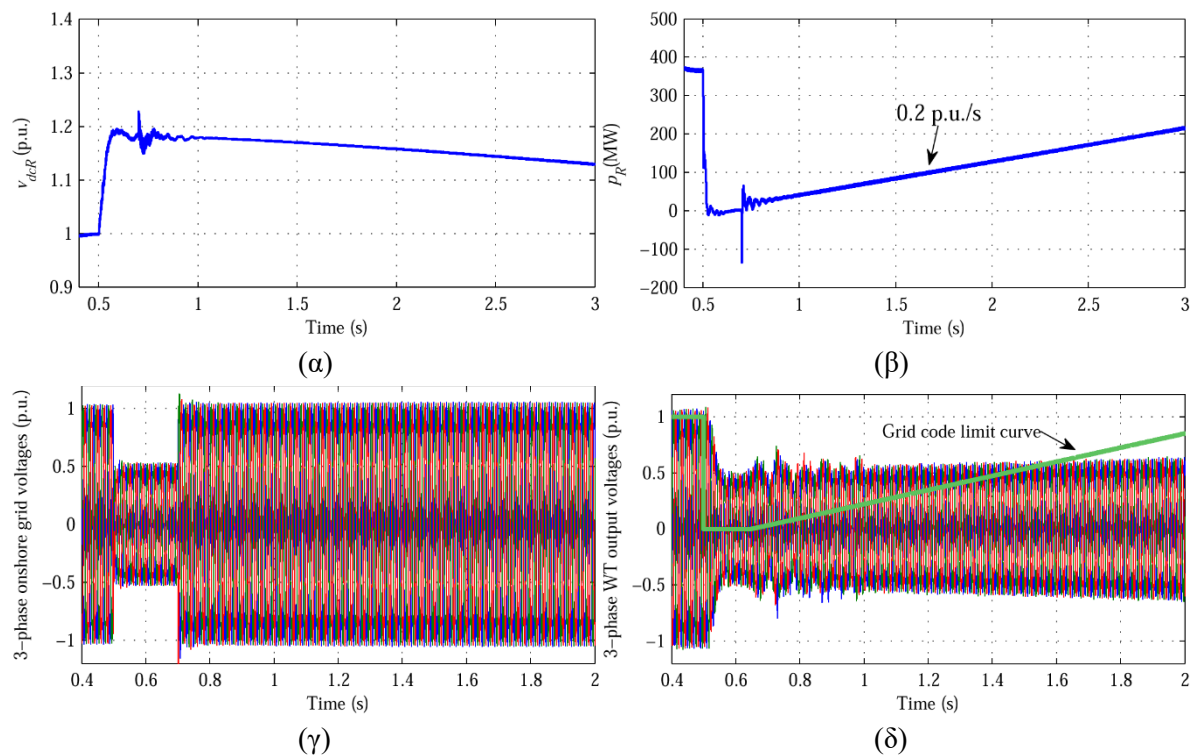
#### 4.2.2 Επίδραση ρυθμού αύξησης ισχύος μετά την εκκαθάριση του σφάλματος

Η επίδραση του ρυθμού αύξησης ισχύος μετά την εκκαθάριση του σφάλματος στην επίδοση των υπογήφιων τεχνικών επίτευξης αδιάλειπτης λειτουργίας αποτελεί ένα αντικείμενο διερεύνησης που δεν έχει λάβει επαρκή έκταση στη βιβλιογραφία. Στον Βρετανικό κώδικα απαιτείται η επαναφορά της εγχεόμενης ενεργού ισχύος εξόδου τουλάχιστον στο 90% της αρχικής παραγωγής εντός 1 s από την εκκαθάριση του σφάλματος [10], ενώ στον Γερμανικό κώδικα αναφέρεται ότι για τους σταθμούς που δεν αποσυνδέονται κατά τη διάρκεια του σφάλματος, θα πρέπει να αυξάνουν προοδευτικά την εγχεόμενη ενεργό ισχύ μετά την εκκαθάριση του σφάλματος με ρυθμό που κυμαίνεται μεταξύ 10% και 20% της ονομαστικής ισχύος ανά 1 s [11]. Ο ενδεικνύμενος ρυθμός αύξησης της εγχεόμενης ενεργού ισχύος αποτελεί αντικείμενο διερεύνησης στη βιβλιογραφία που συνδέεται άρρηκτα με τη μεταβατική ευστάθεια ΣΗΕ. Στο παράδειγμα της [131], διαπιστώνεται η θετική συμβολή μικρών ρυθμών αύξησης ισχύος Α/Π στη μεταβατική ευστάθεια ΣΗΕ, λόγω της εντονότερης επιβράδυνσης που μπορεί να επιτευχθεί στις συμβατικές γεννήτριες.

Με αφορμή την προαναφερθείσα αναφορά στον Γερμανικό κώδικα, στο Σχήμα 4.15 εξετάζεται η απόκριση του συστήματος διασύνδεσης VSC-HVDC και του ΘΑΠ για την ίδια 3Φ βύθιση τάσης, θεωρώντας όμως ότι η ενεργός ισχύς που εγχέεται στο ηπειρωτικό σύστημα αυξάνεται με ρυθμό 0.2 α.μ./s μετά την εκκαθάριση του σφάλματος, ενώ εφαρμόζεται ξανά η μέθοδος της τεχνητής βύθισης τάσης. Από τα αποτελέσματα διαπιστώνεται η σημαντικά βραδύτερη επαναφορά της λειτουργίας του ΘΑΠ στις συνθήκες προ διαταραχής, γεγονός που

οδηγεί σε παρατεταμένη βύθιση τάσης στο υπεράκτιο ac δίκτυο προκειμένου η εγχεόμενη ισχύς του ΘΑΠ να παρακολουθεί την εγχεόμενη ενεργό ισχύ στο επίγειο άκρο της διασύνδεσης. Μάλιστα, διαπιστώνεται ότι παρόλο που η τάση του ηπειρωτικού συστήματος βρίσκεται άνω του ορίου καμπύλης που προδιαγράφει ο Γερμανικός κώδικας, γεγονός που απαγορεύει την αποσύνδεση του ΘΑΠ, η τάση εξόδου στις υπεράκτιες Α/Γ μεταβαίνει κάτω από το όριο καμπύλης του κώδικα περίπου 1 s μετά την εκκαθάριση του σφάλματος, γεγονός που εγείρει προβληματισμούς ως προς την ικανότητα αδιάλειπτης λειτουργίας των υπεράκτιων Α/Γ στις εξεταζόμενες συνθήκες λειτουργίας.

Συμπερασματικά, αν και η επιβολή τεχνητής βύθισης τάσης επιφέρει την απαιτούμενη ταχύτητα στον περιορισμό της εγχεόμενης ενεργού ισχύος εξόδου, χρήζει επανεξέτασης ανάλογα με τις τιθέμενες απαιτήσεις των κωδικών συστήματος ως προς τις προδιαγραφόμενες καμπύλες τάσης-χρόνου και του ρυθμού αύξησης της ενεργού ισχύος εξόδου μετά την εκκαθάριση του σφάλματος [132].

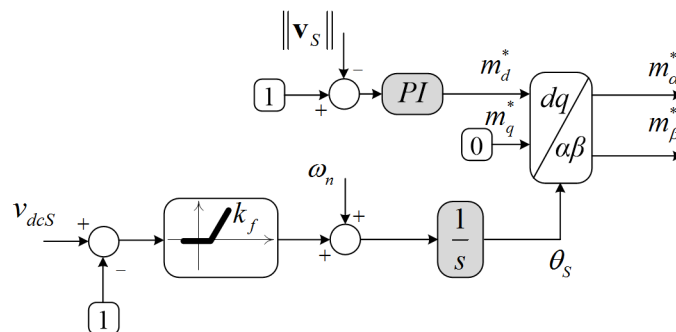


Σχήμα 4.15. Επίδραση ρυθμού αύξησης ενεργού ισχύος μετά την εκκαθάριση του σφάλματος στην απόκριση του υπεράκτιου ac δικτύου, (α) dc τάση λειτουργίας στην πλευρά του μετατροπέα REC, (β) ενεργός ισχύς εξόδου μετατροπέα REC, (γ) τριφασικές τάσεις ηπειρωτικού συστήματος, (δ) τριφασικές τάσεις εξόδου υπεράκτιων Α/Γ.

### 4.3 Διερεύνηση αδιάλειπτης λειτουργίας ΘΑΠ με τεχνητή αύξηση συχνότητας

Μια εναλλακτική στρατηγική ελέγχου που έχει προταθεί στη βιβλιογραφία για τον ταχύ περιορισμό της ισχύος εξόδου του ΘΑΠ σε συνθήκες σφάλματος του ηπειρωτικού συστήματος βασίζεται στην αύξηση της συχνότητας λειτουργίας του υπεράκτιου ac δικτύου, κατόπιν ανίχνευσης συνθηκών σφάλματος. Η συγκεκριμένη τεχνική προϋποθέτει την ύπαρξη σχήματος ελέγχου απόκρισης συχνότητας στις υπεράκτιες Α/Γ, μέσω του οποίου περιορίζεται η εγχεόμενη ενεργός ισχύος εξόδου κατόπιν ανίχνευσης συνθηκών υπερ-συχνότητας. Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση εξέτασης (τεχνητή βύθιση τάσης) η δυνατότητα περιορισμού της ισχύος εξόδου σε συνθήκες υπερ-συχνότητας αποτελεί ήδη βασική τεχνική απαίτηση σύγχρονων κωδικών συστήματος και εφαρμόζεται και σε σταθμούς ΑΠΕ μικρότερης ισχύος που συνδέονται σε Δίκτυα ΜΤ.

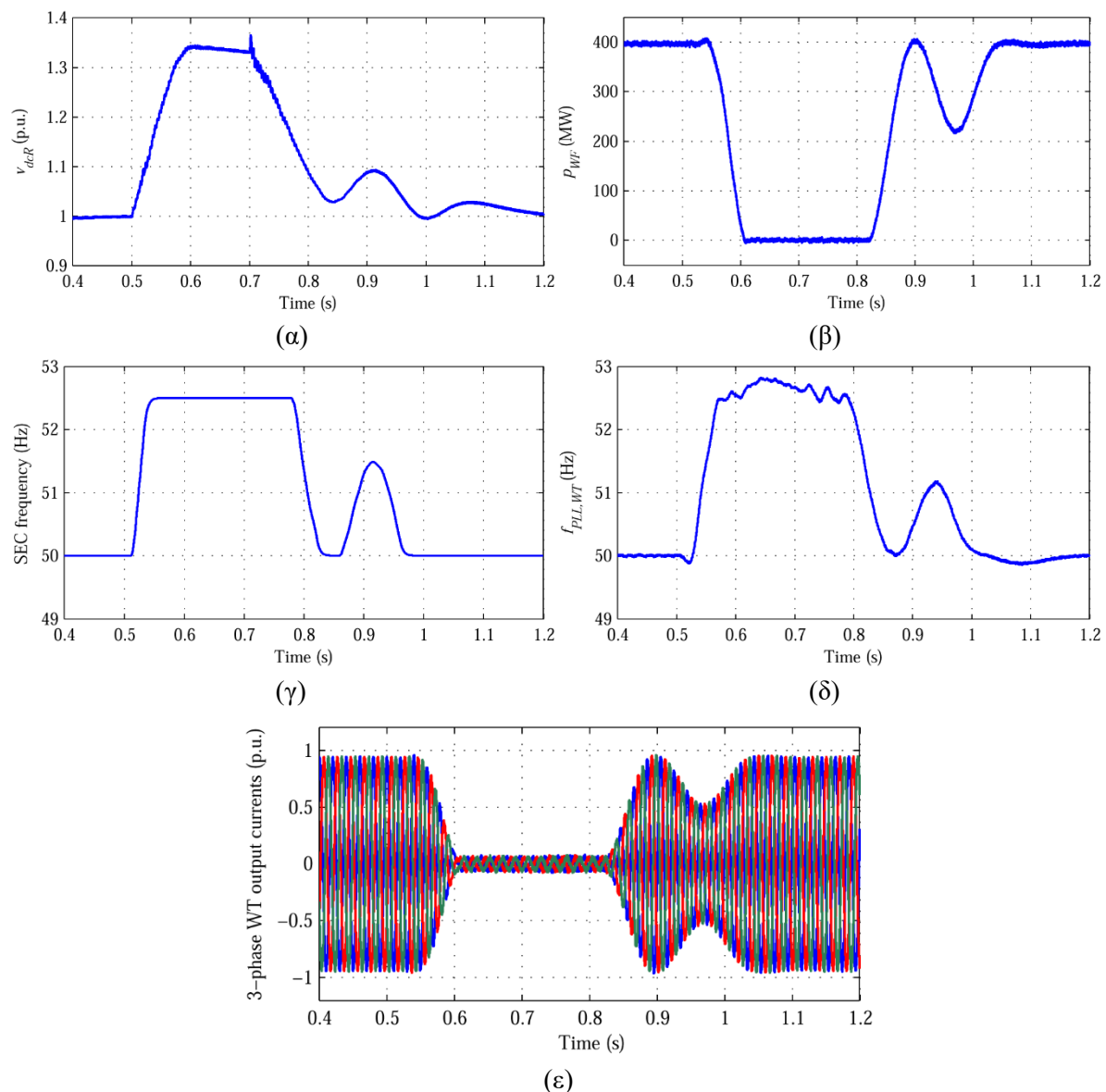
Το απαιτούμενο σχήμα ελέγχου για τη μεταβολή της συχνότητας λειτουργίας από τον υπεράκτιο μετατροπέα SEC εικονίζεται στο Σχήμα 4.16. Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, επιτρείνεται η dc τάση λειτουργίας στους ακροδέκτες του υπεράκτιου μετατροπέα και μόλις αυτή υπερβεί μια τιμή κατωφλίου, ενεργοποιείται η λειτουργία αύξησης συχνότητας. Όπως έχει παρουσιαστεί στο Σχήμα 2.6 της Παραγράφου 2.2, το απαιτούμενο σύστημα ελέγχου συχνότητας είναι ενσωματωμένο στον εξωτερικό ελεγκτή της Α/Γ και αναδιαμορφώνει την ενεργό ισχύ εξόδου της  $p_{ord}$  κατόπιν ανίχνευσης μεταβολών της συχνότητας λειτουργίας του υπεράκτιου ac δικτύου από το σύστημα συγχρονισμού του μετατροπέα πλευράς δικτύου.



Σχήμα 4.16. Σύστημα ελέγχου υπεράκτιου μετατροπέα HVDC (SEC) με λειτουργία αύξησης συχνότητας σε συνθήκες σφάλματος του ηπειρωτικού συστήματος.

Στο Σχήμα 4.17 εικονίζεται η απόκριση του ΘΑΠ σε 3Φ βύθιση τάσης του ηπειρωτικού συστήματος. Λόγω της ταχείας dc υπέρτασης ενεργοποιείται η λειτουργία αύξησης συχνότητας με αποτέλεσμα ο μετατροπέας SEC να επιβάλλει μια μεταβατική αύξηση συχνότητας κατά 2.5 Hz, η οποία οδηγεί σε μηδενισμό της εγχεόμενης ισχύος του ΘΑΠ. Ωστόσο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.17(α), η προκληθείσα dc υπέρταση υπερβαίνει την τιμή 1.3 α.μ., γεγονός που υποδηλώνει ότι η συνολική χρονική καθυστέρηση που εισάγουν οι επιμέρους ελεγκτές των υπεράκτιων Α/Γ δεν είναι αμελητέα στην εξεταζόμενη χρονική

κλίμακα. Συνεπώς η εξεταζόμενη τεχνική FRT εγείρει προβληματισμούς ως προς την επίδοση εμπορικά διαθέσιμων Α/Γ στις υπόψη συνθήκες λειτουργίας. Μάλιστα, αξίζει να σημειωθεί ότι τα αποτελέσματα στο Σχήμα 4.17 είναι ήδη πλεονεκτικά καθώς θεωρήθηκε απενεργοποιημένος ο περιοριστής του ρυθμού μεταβολής της ενεργού ισχύος εξόδου της Α/Γ (βλ. Σχήμα 2.6). Συμπερασματικά, τα ανωτέρω υποδηλώνουν ότι η αδιάλειπτη λειτουργία του ΘΑΠ με τη μέθοδο αύξησης συχνότητας είναι αμφίβολη και θα απαιτούσε την τροποποίηση ή και επαναρύθμιση των συμβατικών ελεγκτών συχνότητας και ενεργού ισχύος των Α/Γ, οι οποίοι ωστόσο είναι παραμετροποιημένοι με βάση την επιθυμητή λειτουργία της Α/Γ σε μεγαλύτερες χρονικές κλίμακες εξέτασης.



Σχήμα 4.17. Απόκριση ΘΑΠ – συστήματος διασύνδεσης ΘΑΠ σε 3Φ σφάλμα στην πλευρά 400 kV του Μ/Σ του μετατροπέα REC, με εφαρμογή τεχνητής αύξησης συχνότητας στο υπεράκτιο ac δίκτυο, (α) dc τάση μετατροπέα REC, (β) ενεργός ισχύς εξόδου ΘΑΠ, (γ) συχνότητα λειτουργίας υπεράκτιου ac δικτύου, (δ) μετρούμενη συχνότητα συστήματος PLL της Α/Γ, (ε) τριφασικά ρεύματα εξόδου Α/Γ.

#### 4.4 Διερεύνηση συμβολής ΘΑΠ στη ρύθμιση συχνότητας του ηπειρωτικού συστήματος

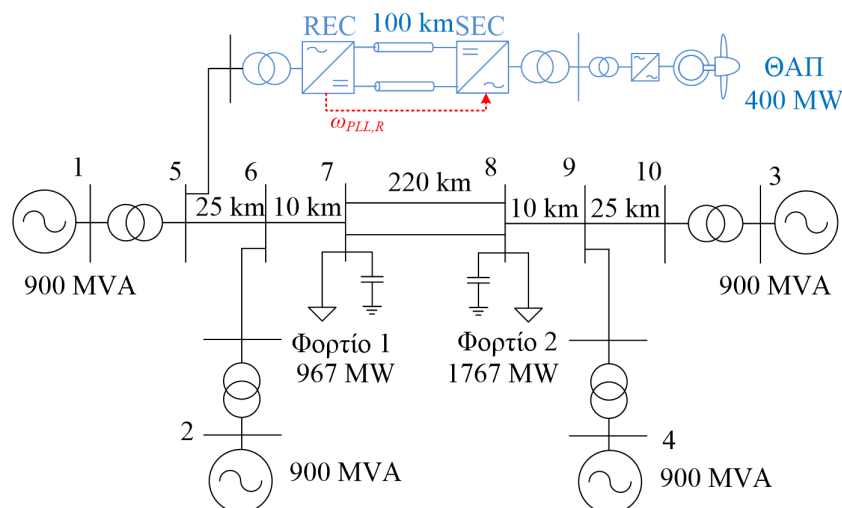
Σύμφωνα με τις τεχνικές απαιτήσεις των σύγχρονων κωδικών συστήματος που αναλύθηκαν στο Κεφ. 1, το σύστημα διασύνδεσης VSC-HVDC θα πρέπει να έχει τη δυνατότητα αναπροσαρμογής της εγγεόμενης ενεργού ισχύος εξόδου παρουσία διακυμάνσεων συχνότητας στο ηπειρωτικό σύστημα. Η απαίτηση αφορά τόσο στη δυνατότητα μόνιμης στήριξης της συχνότητας μέσω ρύθμισης στατισμού, όσο και στη δυνατότητα μεταβατικής υποστήριξης συχνότητας τα πρώτα δευτερόλεπτα ύστερα από την εμφάνιση διαταραχής, προσομοιάζοντας τη φυσική λειτουργία αδρανειακής απόκρισης των στρεφόμενων ηλεκτρικών μηχανών που είναι απευθείας συνδεδεμένες στο δίκτυο.

Στην παρούσα ενότητα, διερευνάται η ικανότητα συμμετοχής ενός ΘΑΠ με σχήμα διασύνδεσης VSC-HVDC στη ρύθμιση συχνότητας, με τη χρήση των συμβατικών σχημάτων ελέγχου που παρουσιάστηκαν στο Κεφ. 2. Ειδικότερα, πραγματοποιείται παραμετρική ανάλυση για ένα εύλογο εύρος τιμών των κερδών στατισμού και αδρανειακής απόκρισης, αλλά και του επιπέδου εφεδρείας ισχύος των υπεράκτιων Α/Γ σε κανονική λειτουργία. Λόγω της μεγάλης εξεταζόμενης χρονικής κλίμακας (δεκάδες δευτερόλεπτα), η ανάλυση διενεργείται με προσομοιώσεις στο πεδίο του χρόνου με τη χρήση φασιθετών (phasor simulation), δυνατότητα που διαθέτει το λογισμικό Matlab/Simulink [133]. Συνεπώς, αμελούνται υψίσυχα ηλεκτρικά φαινόμενα που σχετίζονται με τη διακοπτική λειτουργία των μετατροπέων ισχύος (HVDC και των Α/Γ), οι οποίοι αναπαρίστανται από ισοδύναμα μοντέλα θεμελιώδους συχνότητας, ακόμα και για τους μετατροπείς MMC.

Στο Σχήμα 4.18 εικονίζεται η τοπολογία του εξεταζόμενου συστήματος, το οποίο χρησιμοποιείται εκτενώς στη βιβλιογραφία για μελέτες ευστάθειας συχνότητας [108], [134]. Πρόκειται για σύστημα δύο περιοχών, το οποίο αποτελείται από τέσσερις συμβατικές μονάδες παρόμοιας ισχύος και μία μεγάλη διασυνδεδετική γραμμή ΥΤ διπλού κυκλώματος. Οι συμβατικές μονάδες  $G_1$ - $G_4$  είναι θερμικές και εξοπλισμένες με σύγχρονες γεννήτριες και ατμοστροβίλους τριών βαθμίδων. Για την αναπαράσταση του ρυθμιστή στροφών των μονάδων χρησιμοποιείται το μοντέλο IEEEG1, ενώ κάθε γεννήτρια είναι εφοδιασμένη με αυτόματο ρυθμιστή τάσης και σταθεροποιητή [135], τα οποία αναπαρίστανται με συμβατικά μοντέλα που είναι διαθέσιμα στη βιβλιοθήκη του λογισμικού Matlab/Simulink. Αναλυτικές παράμετροι των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών των σύγχρονων γεννητριών και των τιμών παραμέτρων των ρυθμιστών δίνονται στα Παραρτήματα Γ και Δ.

Το εξεταζόμενο ΘΑΠ συνδέεται στο ζυγό 5 μέσω του συστήματος διασύνδεσης VSC-HVDC. Η απόκριση συχνότητας του ΘΑΠ στηρίζεται στα σχήματα ελέγχου του Κεφ. 2, και ιδίως στην αξιοποίηση της μετρούμενης συχνότητας από το σύστημα συγχρονισμού του μετατροπέα REC και την αποστολή της στον μετατροπέα SEC (βλ. Σχήμα 2.3), με στόχο την εξομοίωση των συνθηκών λειτουργίας του ηπειρωτικού συστήματος στο υπεράκτιο ac δίκτυο. Η χρονική καθυστέρηση για την αποστολή των μετρούμενων μεταβολών συχνότητας

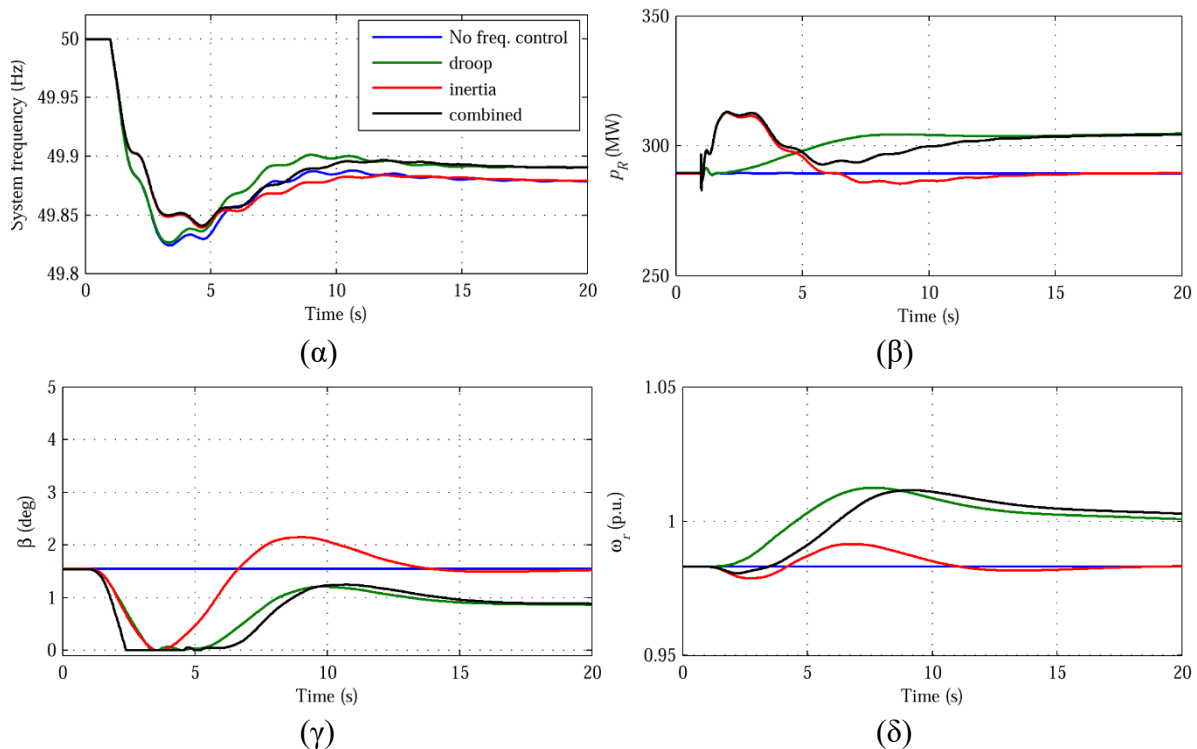
στον υπεράκτιο μετατροπέα μέσω τηλεπικοινωνιακού μέσου θεωρείται ίση με 20 ms, χωρίς ωστόσο να αναμένεται εμφανής επίδραση στην επιθυμητή απόκριση συχνότητας του ΘΑΠ ακόμα και για μεγαλύτερες τιμές, όπως θα παρουσιαστεί και στα παρακάτω αποτελέσματα προσομοιώσεων, λόγω της σημαντικά μεγαλύτερης χρονικής κλίμακας όπου λαμβάνουν χώρα οι διακυμάνσεις συχνότητας.



Σχήμα 4.18. Τοπολογία εξεταζόμενου συστήματος δύο περιοχών, για τη διερεύνηση της απόκρισης συχνότητας ΘΑΠ.

Στην ανάλυση που ακολουθεί, εξετάζεται η απόκριση του ΘΑΠ σε συνθήκες υπο-συχνότητας του ηπειρωτικού συστήματος, προσομοιώνοντας βηματική αύξηση του φορτίου του ζυγού 7 κατά 200 MW, ενώ η παραγόμενη προ διαταραχής ενεργός ισχύς του ΘΑΠ είναι περίπου ίση με 290 MW. Για να δοθεί στο ΘΑΠ η δυνατότητα συμβολής στη ρύθμιση του μόνιμου σφάλματος υπο-συχνότητας, θεωρείται ότι οι υπεράκτιες Α/Γ λειτουργούν με εντολή εφεδρείας ενεργού ισχύος ίση με 10%. Η τιμή του στατισμού  $R_{WF}$  και η ισοδύναμη σταθερά αδρανείας  $H_{WF}$  έχουν επιλεγεί αρχικά ίσες με 5% και 30 s αντίστοιχα.

Στο Σχήμα 4.19 παρατίθενται συγκριτικά αποτελέσματα της απόκρισης του συστήματος με εφαρμογή εναλλακτικών μεθόδων ελέγχου συχνότητας. Όταν δεν εφαρμόζεται έλεγχος συχνότητας στο ΘΑΠ, η μεταβατική μείωση της συχνότητας φθάνει τα 0.18 Hz (μπλε γραμμή). Ο έλεγχος στατισμού επιτυγχάνει μικρή βελτίωση του σφάλματος ρύθμισης συχνότητας, αξιοποιώντας τη δυνατότητα απελευθέρωσης πρόσθετης ενεργού ισχύος από τις υπεράκτιες Α/Γ, μέσω της μείωσης της γωνίας βήματος των πτερυγίων, ενώ δεν παρατηρείται βελτίωση στη μέγιστη βύθιση συχνότητας. Ο έλεγχος αδρανειακής απόκρισης επιτυγχάνει αισθητό περιορισμό του ρυθμού μεταβολής της συχνότητας λειτουργίας τα πρώτα δευτερόλεπτα μετά τη διαταραχή, ωστόσο δεν επιφέρει καμία βελτίωση του μόνιμου σφάλματος ρύθμισης, όπως και αναμενόταν. Η καλύτερη απόκριση επιτυγχάνεται με την εφαρμογή του συνδυασμένου ελέγχου, καθώς βελτιώνονται ταυτόχρονα το μόνιμο σφάλμα συχνότητας και ο ρυθμός μεταβολής της.



Σχήμα 4.19. Αξιολόγηση εναλλακτικών μεθόδων απόκρισης συχνότητας ΘΑΠ ( $R_{WF}=5\%$ ,  $H_{WF}=30$  s) σε βηματική αύξηση του φορτίου στο ζυγό 7 τη στιγμή  $t=10$  s. (α) Συχνότητα ηπειρωτικού συστήματος, (β) ενεργός ισχύς εξόδου επίγειου μετατροπέα HVDC, (γ) γωνία βήματος πτερυγίων υπεράκτιων A/G, (δ) ταχύτητα περιστροφής δρομέα A/G.

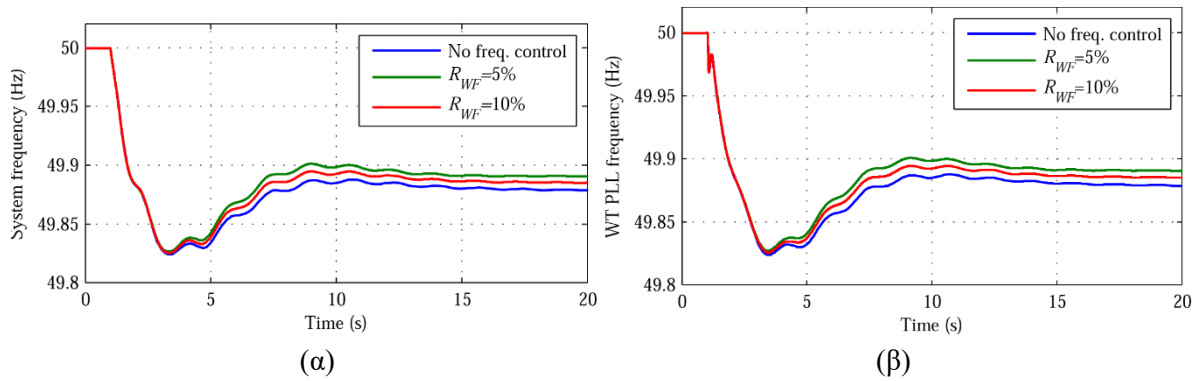
Τέλος, ενδιαφέρον παρουσιάζει η απόκριση της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα της A/G, η οποία ιδίως στη λειτουργία ελέγχου στατισμού υπερταχύνεται αμέσως μετά την εμφάνιση της διαταραχής. Η συγκεκριμένη απόκριση οφείλεται στις τιμές παραμέτρων του εξωτερικού ελεγκτή της A/G που επιλέχθηκαν με βάση την [70], οι οποίες οδηγούν σε ταχύτερη αύξηση της αεροδυναμικής ισχύος της A/G σε σχέση με την ηλεκτρική ισχύ της γεννήτριας, λόγω της λειτουργίας του περιοριστή του ρυθμού μεταβολής της ισχύος αναφοράς  $p_{ord}$  που έχει παρουσιαστεί στο Σχήμα 2.6 του Κεφ. 2. Συνεπώς, η απόκριση της A/G εξαρτάται σημαντικά από τις εκάστοτε τιμές παραμέτρων των ελεγκτών, που ενδεχομένως διαφοροποιούσαν τη μεταβατική συμπεριφορά της.

#### 4.4.1 Επίδραση ελέγχου στατισμού

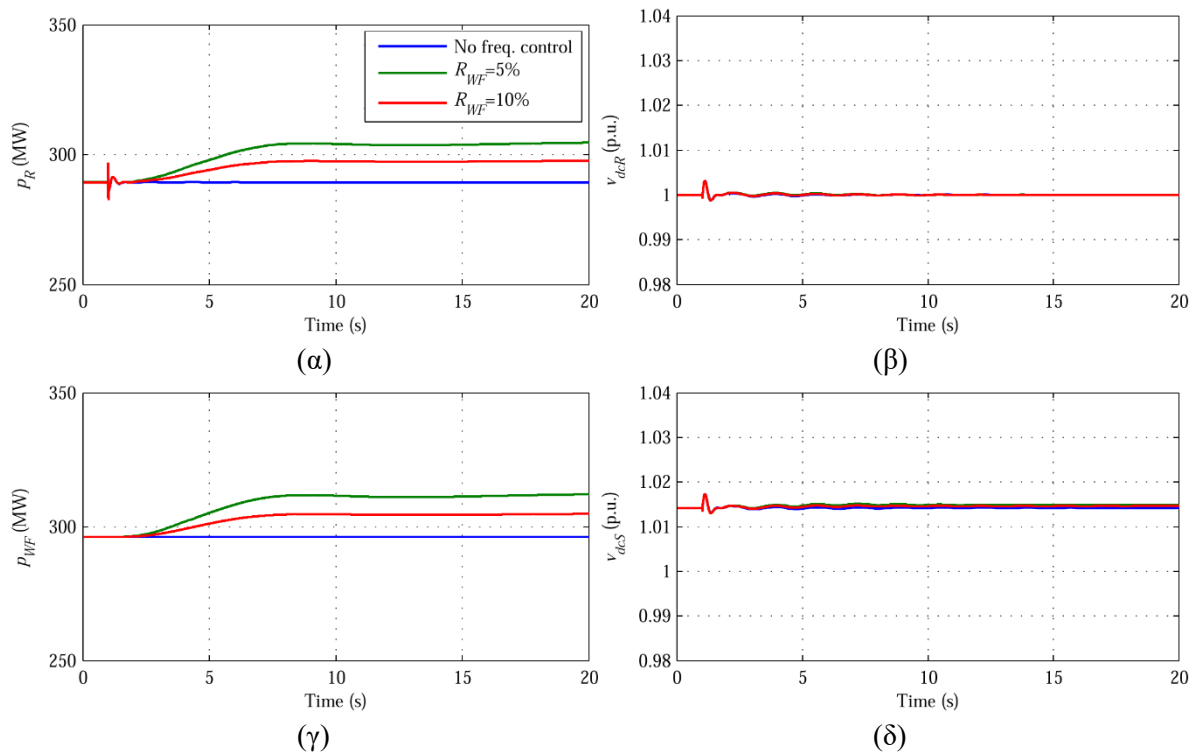
Για τη διερεύνηση της επίδρασης του ελέγχου στατισμού του ΘΑΠ στην απόκριση συχνότητας, πραγματοποιήθηκαν πρόσθετες προσομοιώσεις για την ίδια διαταραχή βηματικής αύξησης φορτίου, για δύο διαφορετικές τιμές της μεταβλητής  $R_{WF}$ . Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.20, ο έλεγχος στατισμού δε βελτιώνει αισθητά τη μεταβατική απόκριση συχνότητας αλλά κυρίως το μόνιμο σφάλμα μετά τη διαταραχή, καθώς μικρές τιμές στατισμού οδηγούν σε μεγαλύτερη ανάληψη φορτίου από το ΘΑΠ (βλ. Σχήμα 4.21). Η παραγόμενη ενεργός ισχύς του ΘΑΠ πρακτικά ταυτίζεται με την ενεργό ισχύ που εγχέεται στο ηπειρωτικό σύστημα από τον επίγειο μετατροπέα HVDC, λόγω της ταχύτατης απόκρισης του PI ελεγκτή της dc τάσης λειτουργίας. Για λόγους πληρότητας, στο Σχήμα 4.22 παρατίθενται και οι αποκρίσεις του ηλεκτρικού και μηχανικού μέρους της A/G, από τις οποίες



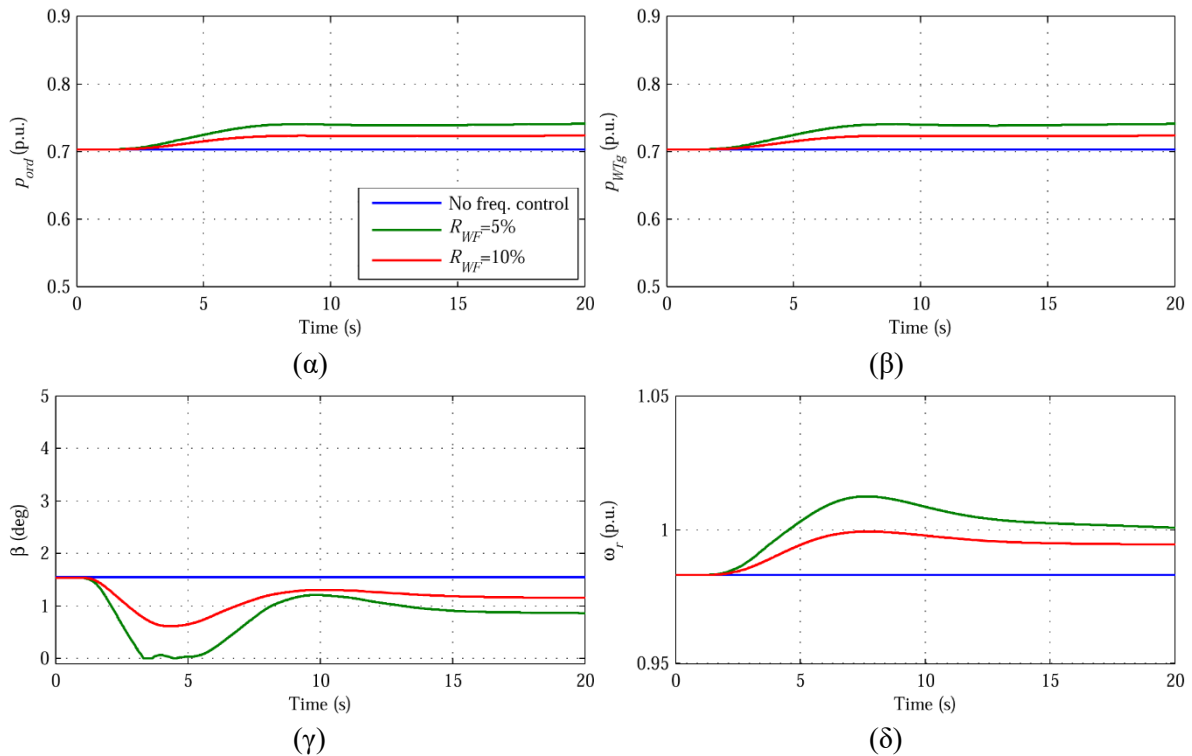
επιβεβαιώνεται η επιθυμητή λειτουργία του εξωτερικού ελεγκτή της Α/Γ ως προς την αναπροσαρμογή της ενεργού ισχύος αναφοράς  $p_{ord}$  συναρτήσει της μετρούμενης συχνότητας λειτουργίας του υπεράκτιου ac δικτύου, που είναι όμοια με του ηπειρωτικού συστήματος. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί πως μικρές τιμές στατισμού επιφέρουν όφελος ως προς την απόκριση συχνότητας αλλά ενισχύουν τις διακυμάνσεις της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα της Α/Γ προκειμένου να επιτευχθεί η επιθυμητή απόκριση.



Σχήμα 4.20. Επίδραση ελέγχου στατισμού στην απόκριση συχνότητας, (α) συχνότητα ηπειρωτικού συστήματος, (β) μετρούμενη συχνότητα λειτουργίας υπεράκτιου ac δικτύου.



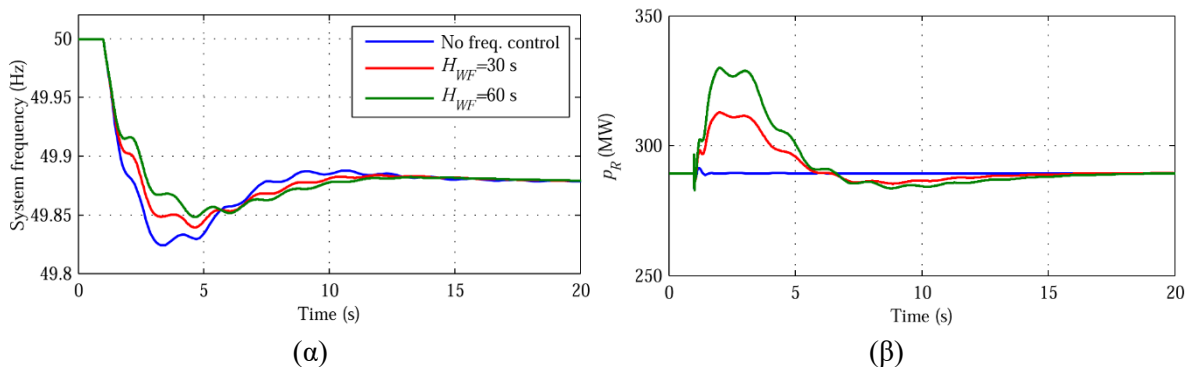
Σχήμα 4.21. Επίδραση στατισμού στην απόκριση του συστήματος διασύνδεσης VSC-HVDC, (α) ενεργός ισχύς εξόδου μετατροπέα REC, (β) dc τάση λειτουργίας μετατροπέα REC, (γ) ενεργός ισχύς εξόδου ΘΑΠ, (δ) dc τάση λειτουργίας μετατροπέα SEC.



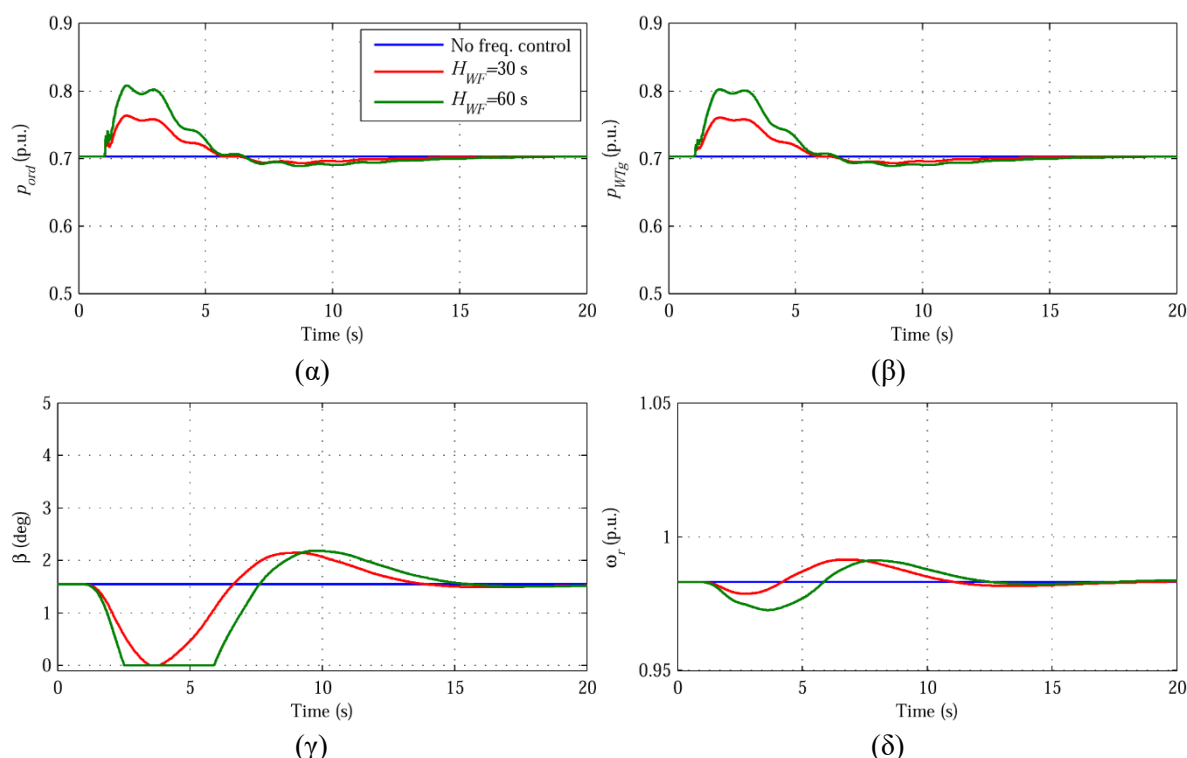
Σχήμα 4.22. Επίδραση στατισμού στην απόκριση του ηλεκτρικού και μηχανικού μέρους των υπεράκτιων A/G, (α) ενεργός ισχύς αναφοράς A/G, (β) ηλεκτρική ισχύς γεννήτριας, (γ) γωνία βήματος περυγίων, (δ) ταχύτητα περιστροφής δρομέα A/G.

#### 4.4.2 Επίδραση ελέγχου αδρανειακής απόκρισης

Η επίδραση του ελεγκτή αδρανειακής απόκρισης στη συχνότητα του συστήματος εικονίζεται στο Σχήμα 4.23, για την ίδια διαταραχή φορτίου αλλά με απενεργοποιημένο τον ελεγκτή στατισμού. Αυξάνοντας την ισοδύναμη σταθερά αδρανείας  $H_{WF}$  από 0 έως 60 s η μέγιστη μεταβολή της συχνότητας μειώνεται περίπου κατά 15%, ενώ παρατηρείται σημαντικός περιορισμός του ρυθμού μείωσης της συχνότητας λειτουργίας, γεγονός που επιφέρει σημαντικά οφέλη στην ευστάθεια συχνότητας.



Σχήμα 4.23. Επίδραση ελέγχου αδρανειακής απόκρισης στην απόκριση συχνότητας, (α) συχνότητα ηπειρωτικού συστήματος, (β) ενεργός ισχύς εξόδου επίγειου μετατροπέα REC.



Σχήμα 4.24. Επίδραση ελέγχου αδρανειακής απόκρισης στην απόκριση του ηλεκτρικού και μηχανικού μέρους των υπεράκτιων A/G, (α) ενεργός ισχύς αναφοράς A/G, (β) ηλεκτρική ισχύς γεννήτριας, (γ) γωνία βήματος πτερυγίων, (δ) ταχύτητα περιστροφής δρομέα A/G.

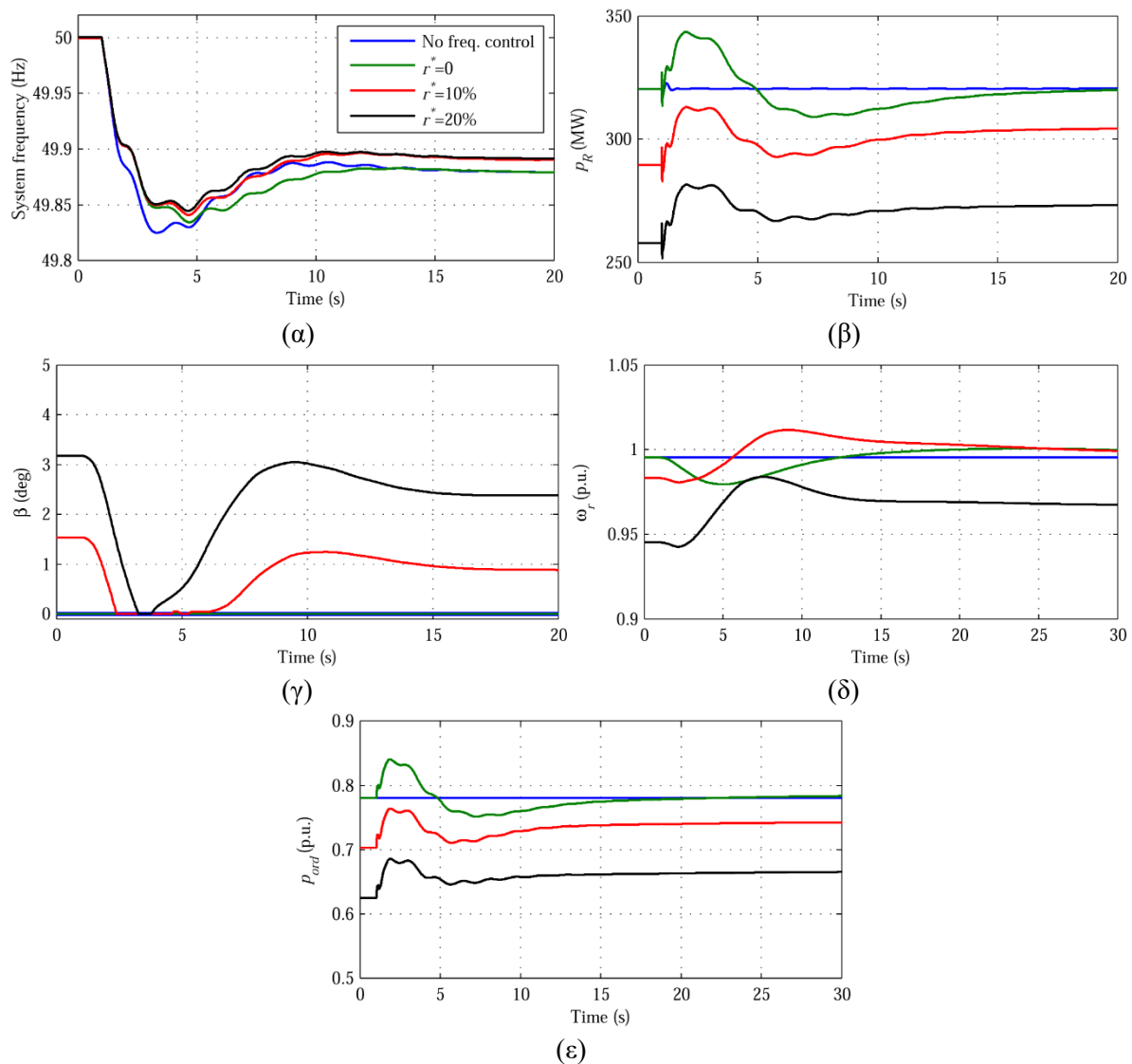
Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα με αυτά του ελέγχου στατισμού, παρατηρείται εμφανώς ταχύτερη έγχυση ενεργού ισχύος αμέσως μετά τη διαταραχή, αξιοποιώντας πρωτίστως τη διαθέσιμη κινητική ενέργεια του δρομέα της A/G και επιβραδύνοντάς τον προσωρινά (βλ. Σχήμα 4.24). Η ταχύτητα περιστροφής διατηρείται σε αποδεκτά επίπεδα μέσω της παράλληλης ρύθμισης της γωνίας βήματος ακόμα και για τις μεγάλες τιμές της ισοδύναμης σταθεράς αδρανείας που εξετάστηκαν στο υπόψη παράδειγμα, ενώ επανέρχεται στην αρχική της τιμή μετά το πέρας της διαταραχής.

#### 4.4.3 Επίδραση επιπέδου εφεδρείας ισχύος

Η τήρηση εφεδρείας ισχύος σε κανονική λειτουργία συνδέεται άμεσα με τον έλεγχο στατισμού και τη δυνατότητα έγχυσης πρόσθετης ενεργού ισχύος σε συνθήκες υποσυχνότητας. Για την αναλυτικότερη εξέταση της επίδρασης του επιπέδου εφεδρείας ισχύος στην απόκριση συχνότητας, διενεργήθηκαν πρόσθετες προσομοιώσεις για την ίδια διαταραχή φορτίου, εξετάζοντας τρία διαφορετικά επίπεδα εφεδρείας. Σε όλες τις περιπτώσεις εξέτασης εφαρμόζεται ο συνδυασμένος έλεγχος στατισμού και αδρανειακής απόκρισης.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η απόκριση του ΘΑΠ για μηδενική εφεδρεία ισχύος, δηλ. όταν οι υπεράκτιες A/G λειτουργούν στο σημείο μέγιστης απολαβής ισχύος και η γωνία βήματος είναι μηδενική. Όπως διαπιστώνεται στο Σχήμα 4.25, τα πρώτα δευτερόλεπτα μετά τη διαταραχή το ΘΑΠ απελευθερώνει πρόσθετη ενεργό ισχύ, η οποία όμως υποστηρίζεται μόνο από την αποθηκευμένη κινητική ενέργεια του δρομέα της κάθε A/G. Αποτέλεσμα της εν λόγω λειτουργίας είναι η επιβράδυνση του δρομέα της A/G, η οποία οδηγεί σε επακόλουθη μείωση

της ενεργού ισχύος αναφοράς  $p_{ord}$  από τον ρυθμιστή στροφών, προκειμένου η ταχύτητα περιστροφής να αποκατασταθεί στην τιμή προ διαταραχής. Συνεπώς, στην περίπτωση λειτουργίας με μηδενική εφεδρεία και σε συνθήκες υπο-συχνότητας, το ΘΑΠ πρακτικά παρουσιάζει λειτουργία αδρανειακής απόκρισης, ανεξαρτήτως ενεργοποίησης του ελέγχου στατισμού. Αντίθετα, μη μηδενικές τιμές εφεδρείας ισχύος επιφέρουν εμφανή οφέλη στην απόκριση συχνότητας, καθώς μειώνεται τόσο η μέγιστη βύθιση συχνότητας όσο και το μόνιμο σφάλμα ρύθμισης. Τα αποτελέσματα στο Σχήμα 4.25 υποδηλώνουν ότι επίπεδα εφεδρείας της τάξης του 10% εξασφαλίζουν την επιθυμητή απόκριση συχνότητας που ορίζουν οι κώδικες συστήματος, ενώ μεγαλύτερα ποσά εφεδρείας δεν επιφέρουν ουσιαστική βελτίωση για το συγκεκριμένο μέγεθος διαταραχής.



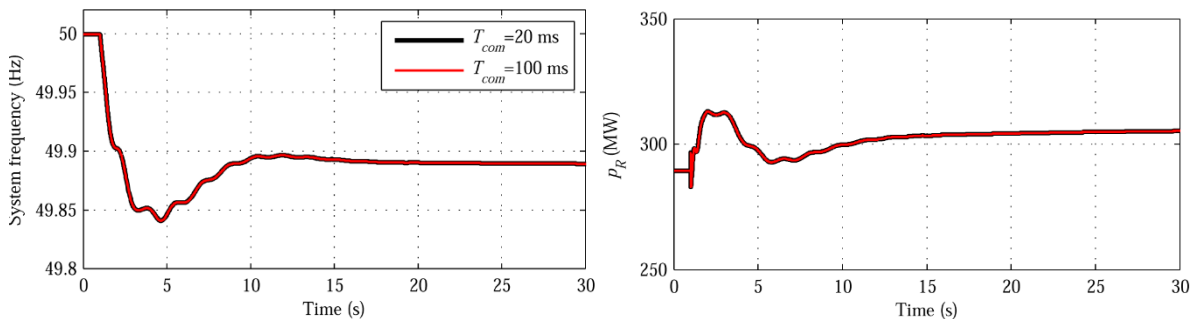
Σχήμα 4.25. Επίδραση επιπέδου εφεδρείας ισχύος στην απόκριση συχνότητας με συνδυασμένο έλεγχο συχνότητας, (α) συχνότητα ηπειρωτικού συστήματος, (β) ενεργός ισχύς εξόδου επίγειου μετατροπέα REC, (γ) γωνία βήματος περυνγίων, (δ) ταχύτητα περιστροφής δρομέα A/G, (ε) ενεργός ισχύς αναφοράς εξωτερικού ελεγκτή A/G.

Ωστόσο, είναι προφανές ότι κύριος ανασταλτικός παράγοντας της υπόψη λειτουργίας σε πραγματικές εφαρμογές είναι οι απαιτούμενες περικοπές ισχύος σε κανονική λειτουργία που

έχουν άμεσες οικονομικές συνέπειες για τον Παραγωγό του ΘΑΠ. Για τον λόγο αυτό, βασική προϋπόθεση για τη ρεαλιστική αξιοποίηση των διαθέσιμων λειτουργιών ελέγχου συχνότητας των αιολικών πάρκων γενικότερα είναι η εξασφάλιση της οικονομικής βιωσιμότητας της επένδυσης, ενώ κρίνεται σκόπιμη η συμμετοχή των σταθμών στην αγορά επικουρικών υπηρεσιών και ιδίως στην αγορά εφεδρειών πρωτεύουσας ρύθμισης συστήματος.

#### 4.4.4 Επίδραση χρονικής καθυστέρησης τηλεπικοινωνιακού μέσου αποστολής μεταβολών συχνότητας

Τέλος, στο Σχήμα 4.26 πραγματοποιείται μια σύντομη ανάλυση ευαισθησίας ως προς την επίδραση της χρονικής καθυστέρησης του μέσου επικοινωνίας των μετατροπέων SEC-REC, στην απόκριση συχνότητας. Όπως αναμενόταν, ακόμα και για μεγάλες χρονικές καθυστερήσεις της τάξης των 100 ms, δεν παρατηρείται ουσιαστικά καμία επίδραση στην τελική απόκριση συχνότητας, επιτυγχάνοντας έτσι την επιθυμητή απόκριση.



Σχήμα 4.26. Επίδραση χρονικής καθυστέρησης τηλεπικοινωνιακού μέσου αποστολής των μεταβολών συχνότητας στον υπεράκτιο μετατροπέα HVDC (α) στη συχνότητα του ηπειρωτικού συστήματος, (β) στην εγχεόμενη ενεργό ισχύ εξόδου του μετατροπέα REC.



## 5 ΣΥΜΒΑΤΟΤΗΤΑ ΘΑΠ ΜΕ ΚΩΔΙΚΕΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕ ΕΛΕΓΧΟ ΣΥΓΧΡΟΝΙΣΜΟΥ ΙΣΧΥΟΣ

### 5.1 Εισαγωγή

Όπως αναλύθηκε και στο Κεφ. 4, η συμβατότητα ενός ΘΑΠ με σύνδεσμο VSC-HVDC με τους κώδικες συστήματος, μπορεί να επιτευχθεί με ποικίλες τεχνικές ελέγχου που βασίζονται στη μεταβολή των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών λειτουργίας του υπεράκτιου δικτύου σε συνδυασμό με την αξιοποίηση εξωτερικών διατάξεων και υποδομών. Βασικό συμπέρασμα των ανωτέρω είναι η ανάγκη σχεδιασμού και ενεργοποίησης τεχνικών ελέγχου διαφορετικής φιλοσοφίας προκειμένου να επιτυγχάνεται το επιθυμητό αποτέλεσμα ανάλογα με την εμφανιζόμενη διαταραχή (ηλεκτρικό σφάλμα, μεταβολή συχνότητας, κλπ).

Στόχος του κεφαλαίου αυτού είναι η ανάπτυξη ενός νέου σχήματος ελέγχου για το υπεράκτιο σύστημα Α/Γ-μετατροπέα HVDC, με το οποίο επιχειρείται απλοποίηση των βασικών αρχών λειτουργίας που θα διέπουν το ΘΑΠ τόσο σε κανονικές όσο και σε έκτακτες συνθήκες λειτουργίας, με στόχο την ικανοποίηση του συνόλου των τεχνικών απαιτήσεων με τη χρήση μιας ενιαίας στρατηγικής ελέγχου. Στην παρούσα διατριβή, το ελεγχόμενο ηλεκτρικό μέγεθος που επιλέχθηκε για τον παραπάνω σκοπό είναι η συχνότητα λειτουργίας του υπεράκτιου δικτύου, η οποία μεταβάλλεται κατάλληλα τόσο σε συνθήκες σφάλματος όσο και κατά τη διάρκεια αργών μεταβολών της συχνότητας του ηπειρωτικού συστήματος.

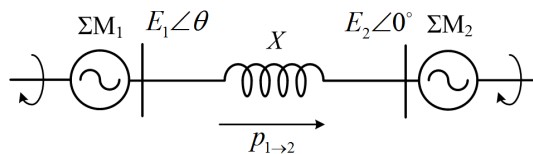
Το βασικό σημείο καινοτομίας της προτεινόμενης στρατηγικής ελέγχου εντοπίζεται στον έλεγχο του μετατροπέα πλευράς δικτύου της υπεράκτιας Α/Γ [105], με τον οποίο επιχειρείται η απαλοιφή των περιορισμών του συμβατικού σχήματος ελέγχου της Α/Γ ιδίως ως προς την αναμενόμενη επίδοσή του κατά την επιβολή ταχείων μεταβολών της συχνότητας λειτουργίας του υπεράκτιου δικτύου του ΘΑΠ, για την επίτευξη αδιάλειπτης λειτουργίας σε συνθήκες σφάλματος. Λαμβάνοντας υπόψη τις αρχές λειτουργίας του νέου συστήματος ελέγχου της Α/Γ, στην παρούσα διατριβή προτείνεται επίσης ένας νέος ρυθμιστής συχνότητας για τον υπεράκτιο μετατροπέα HVDC, ο οποίος πέραν της ταχείας αύξησης της συχνότητας σε συνθήκες σφάλματος, μεταβάλλει κατάλληλα τη συχνότητα σε κανονική λειτουργία, προκειμένου να επιτευχθεί η επιθυμητή απόκριση συχνότητας του ΘΑΠ που ορίζουν οι κώδικες συστήματος, όπως ο έλεγχος στατισμού και η αδρανειακή απόκριση.

### 5.2 Φιλοσοφία ελέγχου συγχρονισμού ισχύος

#### 5.2.1 Φυσικός μηχανισμός συγχρονισμού ισχύος σε ac συστήματα

Για την εξοικείωση με την έννοια του συγχρονισμού ισχύος (power synchronization) μεταξύ στρεφόμενων μηχανών, ως παράδειγμα επιλέγεται η απλοποιημένη ηλεκτρική σύνδεση δύο Σύγχρονων Μηχανών (ΣΜ) που εικονίζεται στο Σχήμα 5.1. Στην ανάλυση που ακολουθεί, θεωρείται ότι η ΣΜ<sub>1</sub> λειτουργεί ως γεννήτρια και η ΣΜ<sub>2</sub> ως κινητήρας. Η μεταβλητή  $X$  αναπαριστά τη συνολική επαγωγική αντίδραση μεταξύ των σύγχρονων μηχανών και της

γραμμής που τις διασυνδέει. Για την απλοποίηση της ανάλυσης, αμελούνται οι ωμικές αντιστάσεις των κυκλωμάτων.



Σχήμα 5.1. Απλοποιημένη αναπαράσταση διασύνδεσης δύο σύγχρονων μηχανών.

Κατά τη λειτουργία σε συνθήκες μόνιμης κατάστασης, η ενεργός ισχύς  $p_{1 \rightarrow 2}$  που μεταφέρεται από την ΣΜ₁ στην ΣΜ₂ υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$p_{1 \rightarrow 2} = \frac{E_1 E_2}{X} \sin \theta \quad (5.1)$$

Όπου  $\theta$  είναι η διαφορά φάσης μεταξύ των εσωτερικών Ηλεκτρεγερτικών Δυνάμεων (ΗΕΔ)  $E_1$  και  $E_2$  των δύο μηχανών. Έστω ότι η μηχανική ισχύς  $p_{m2}$  της ΣΜ₂ μειώνεται για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα και ύστερα επανέρχεται στην αρχική της τιμή. Αποτέλεσμα αυτής της προσωρινής μείωσης είναι η υπερτάχυνση του δρομέα της ΣΜ₂, σύμφωνα με την εξίσωση κίνησης:

$$p_{e2} - p_{m2} = H_2 \frac{d\omega_2^2}{dt} \quad (5.2)$$

Όπου  $H_2$  είναι η σταθερά αδράνειας της ΣΜ₂ και  $\omega_2$  είναι η ταχύτητα περιστροφής της. Η υπερτάχυνση του δρομέα της ΣΜ₂ προκαλεί μετατόπιση φάσης της εσωτερικής ΗΕΔ  $E_2$  της ΣΜ₂ κατά τρόπο που μειώνει τη διαφορά φάσης  $\theta$  μεταξύ των ΗΕΔ  $E_1$  και  $E_2$  και άρα μειώνει προσωρινά (βλ. Εξ.(5.1)) και την μεταφερόμενη ισχύ από την ΣΜ₁ στην ΣΜ₂. Λόγω της προκληθείσας μείωσης της ηλεκτρικής ισχύος  $p_{e1}$  της ΣΜ₁, προκαλείται υπερτάχυνση αυτής σύμφωνα με την εξίσωση κίνησης:

$$p_{m1} - p_{e1} = H_1 \frac{d\omega_1^2}{dt} \quad (5.3)$$

Η υπερτάχυνση της ΣΜ₁ έχει ως αποτέλεσμα την μετατόπιση φάσης της ΗΕΔ  $E_1$  προς την ίδια κατεύθυνση με την ΗΕΔ  $E_2$ , αυξάνοντας έτσι ξανά τη διαφορά φάσης  $\theta$  και επαναφέροντάς την στην τιμή προ διαταραχής, ενώ η ταχύτητα περιστροφής της ΣΜ₁ προσαρμόζεται στην ταχύτητα περιστροφής της ΣΜ₂.

Ο ανωτέρω φυσικός μηχανισμός συγχρονισμού μεταξύ των μηχανών επιτεύχθηκε μέσω μιας μεταβατικής διακύμανσης της μεταφερόμενης ισχύος, ο οποίος είναι παρόμοιος και σε μεγάλα ac συστήματα με διασυνδεδεμένες σύγχρονες μηχανές. Στην παράγραφο που ακολουθεί, προτείνεται ένα σχήμα ελέγχου υπεράκτιων Α/Γ που διέπεται από τις βασικές αρχές που εξηγήθηκαν ανωτέρω, με σκοπό τον συγχρονισμό του συστήματος μετατροπέων των Α/Γ με τη συχνότητα του υπεράκτιου ac δικτύου που ρυθμίζει ο μετατροπέας HVDC, χωρίς την ανάγκη χρήσης αποκλειστικής διάταξης κλειδώματος φάσης.



## 5.2.2 Έλεγχος συγχρονισμού ισχύος σε υπεράκτιες Α/Γ και ανάλυση στο πεδίο της συχνότητας

Βασικό συμπέρασμα της προηγούμενης παραγράφου είναι ότι ο συγχρονισμός μιας μηχανής ή και ηλεκτρονικής διάταξης μετατροπέα ισχύος με το δίκτυο μπορεί να επιτευχθεί με μεταβατικές μεταβολές της εγχεόμενης ενεργού ισχύος. Ειδικότερα, σε συστήματα μετατροπέων ισχύος η παραπάνω αρχή υποδεικνύει ότι η φάση της τάσεως ακροδεκτών μπορεί να ελεγχθεί απευθείας μέσω ενός βρόχου ελέγχου ισχύος, αντί της συμβατικής χρήσης αποκλειστικής διάταξης κλειδώματος φάσης. Με τον τρόπο αυτό, η φάση της τάσης ακροδεκτών του μετατροπέα ρυθμίζεται δυναμικά με βάση το σφάλμα της μετρούμενης ενεργού ισχύος από την τιμή αναφοράς, προσομοιάζοντας έτσι έως ένα βαθμό τη φυσική λειτουργία μιας στρεφόμενης μηχανής.

Παρακάτω αναλύεται η φιλοσοφία ελέγχου συγχρονισμού ισχύος (Power Synchronization Control – PSC) [40], εφαρμοσμένη στο σύστημα ελέγχου της Α/Γ, θεωρώντας καταρχήν την απλοποιημένη αναπαράσταση της διασύνδεσης υπεράκτιας Α/Γ – μετατροπέα VSC-HVDC που εικονίζεται στο Σχήμα 5.2, σε αντιστοιχία με το Σχήμα 5.1 της προηγούμενης παραγράφου. Ο έλεγχος της ενεργού και αέργου ισχύος εξόδου της Α/Γ στις τιμές αναφοράς  $p_{ord}$  και  $q_{WT}^*$  μπορεί να επιτευχθεί με εφαρμογή των παρακάτω προτεινόμενων νόμων ελέγχου:

- **Βρόχος συγχρονισμού ισχύος (Power synchronization loop).** Η συχνότητα λειτουργίας του μετατροπέα πλευράς δικτύου της Α/Γ ελέγχεται δυναμικά με βάση το σφάλμα της μετρούμενης ενεργού ισχύος από την τιμή αναφοράς, υπερθέτοντας στη βασική συχνότητα  $\omega_0$  (1 α.μ.) το σήμα  $\Delta\omega_{PSC}$  που καθορίζεται από τη σχέση:

$$\Delta\omega_{PSC} = R_{PSC}(p_{ord} - p_{WT}) \quad (5.4)$$

Όπου  $R_{PSC}$  είναι το αναλογικό κέρδος του ελεγκτή PSC. Συνεπώς, η φάση της τάσης ακροδεκτών  $\theta_{PSC}$  του μετατροπέα της Α/Γ διαμορφώνεται από τη σχέση:

$$\theta_{PSC} = \frac{\omega_b}{s}(\omega_0 + R_{PSC}(p_{ord} - p_{WT})) \quad (5.5)$$

Με άλλα λόγια, ο υπόψη νόμος ελέγχου είναι παρόμοιος με τη φυσική εξίσωση κίνησης μιας στρεφόμενης μηχανής, με τη βασική διαφορά ότι δεν εφαρμόζεται ολοκληρωτικός όρος στην Εξ. (5.4) αλλά μόνο αναλογικός έλεγχος, προκειμένου να αποφευχθούν προβλήματα ευστάθειας λόγω της αναμενόμενης πρόσθετης καθυστέρησης φάσης που θα εισήγαγε ο ολοκληρωτικός όρος.

Με τον νόμο ελέγχου της Εξ. (5.4) είναι προφανές ότι σε ονομαστικές συνθήκες λειτουργίας του υπεράκτιου δικτύου ( $\Delta\omega_{off}=0$ ), η μεταβλητή  $\Delta\omega_{PSC}$  θα είναι μηδενική, γεγονός που υποδηλώνει ότι η μετρούμενη ενεργός ισχύς  $p_{WT}$  θα έχει ρυθμιστεί στην

τιμή  $p_{ord}$ . Όταν όμως επιβληθεί μια ελεγχόμενη μεταβολή της συχνότητας λειτουργίας  $\Delta\omega_{off}$  από τον υπεράκτιο μετατροπέα VSC-HVDC, η εγχεόμενη ισχύς της Α/Γ επίσης θα μεταβληθεί και θα οδηγήσει στην προσαρμογή της συχνότητας λειτουργίας του μετατροπέα της Α/Γ  $\Delta\omega_{PSC}$  στην ίδια τιμή. Ωστόσο, λόγω της απουσίας ολοκληρωτικού όρου στην Εξ. (5.4), θα προκύψει ένα μόνιμο σφάλμα ρύθμισης της ενεργού ισχύος εξόδου  $p_{WT}$ , το οποίο είναι ελεγχόμενο και προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$\Delta p_{WT} = p_{ord} - p_{WT} = \frac{\Delta\omega_{off}}{R_{PSC}} \quad (5.6)$$

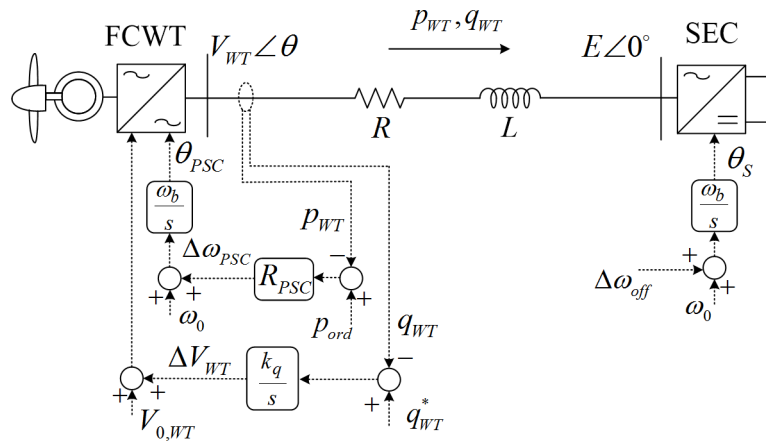
Με άλλα λόγια, ο προτεινόμενος ελεγκτής PSC προσομοιώνει τη λειτουργία ενός ελεγκτή συχνότητας μεταβλητού στατισμού, η τιμή του οποίου ταυτίζεται με το κέρδος  $R_{PSC}$ . Η εγγενής αυτή ιδιότητα μπορεί να αξιοποιηθεί τόσο για τον ταχύ περιορισμό της ισχύος εξόδου της Α/Γ κατά την επιβολή μιας τεχνητής αύξησης συχνότητας σε συνθήκες σφάλματος, όσο και για την αναδιαμόρφωσή της παρουσία διακυμάνσεων της συχνότητας του ηπειρωτικού συστήματος, επιτυγχάνοντας έτσι την απόκριση συχνότητας που ορίζουν οι σύγχρονοι κώδικες συστήματος [105].

- **Βρόχος ελέγχου αέργου ισχύος.** Σε αντιστοιχία με την ανωτέρω φιλοσοφία ελέγχου της ενεργού ισχύος, η άεργος ισχύς εξόδου της Α/Γ μπορεί να ρυθμιστεί με έλεγχο του μέτρου της τάσης ακροδεκτών  $V_{WT}$  συναρτήσει της απόκλισης της μετρούμενης αέργου ισχύος εξόδου  $q_{WT}$  από την τιμή αναφοράς  $q_{WT}^*$ . Στην παρούσα διατριβή, εφαρμόζεται ο παρακάτω νόμος ελέγχου:

$$\Delta V_{WT} = \frac{k_{iq}}{s} (q_{WT}^* - q_{WT}) \quad (5.7)$$

Όπως θα αναλυθεί και στην συνέχεια, για την ενίσχυση της ευστάθειας του υπόψη συστήματος ελέγχου, στο τελικό σχήμα ελέγχου του μέτρου της τάσης του μετατροπέα θα προστεθεί και ένας συμπληρωματικός ελεγκτής απόσβεσης, ο οποίος χρησιμοποιεί ανατροφοδότηση του μετρούμενου ρεύματος εξόδου του μετατροπέα της Α/Γ.

Για την ανάλυση του προτεινόμενου σχήματος ελέγχου στο πεδίο της συχνότητας και τον αναλυτικότερο σχεδιασμό του ελεγκτή PSC, αναπτύσσεται ένα μοντέλο μικρού σήματος που αναπαριστά τη δυναμική του σχήματος ελέγχου PSC. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.3, οποιαδήποτε ανισορροπία μεταξύ των συχνοτήτων  $\Delta\omega_{PSC}$  και  $\Delta\omega_{off}$  οδηγεί σε μεταβολή της διαφοράς φάσης  $\Delta\theta$  μεταξύ των τάσεων  $V_{WT}$  και  $E$  (Σχήμα 5.2), που με τη σειρά του μεταβάλλει και την εγχεόμενη ενεργό ισχύ  $\Delta p_{WT}$  της υπεράκτιας Α/Γ. Εφαρμόζοντας τη μεθοδολογία ανάλυσης μικρού σήματος που παρουσιάζεται αναλυτικά στο Παράρτημα Β, η απόκριση της ισχύος  $\Delta p_{WT}$  συναρτήσει της μεταβολής  $\Delta\theta$  καθορίζεται από την ακόλουθη συνάρτηση μεταφοράς  $J_{p\theta}(s)$  [40]:



Σχήμα 5.2. Απλοποιημένη αναπαράσταση διασύνδεσης υπεράκτιας Α/Γ – μετατροπέα VSC-HVDC.

$$J_{P\theta}(s) = \frac{\Delta p_{WT}}{\Delta \theta} = \frac{a_0 s^2 + a_1 s + a_2}{(sx / \omega_b + r)^2 + (\omega_0 x)^2} \quad (5.8)$$

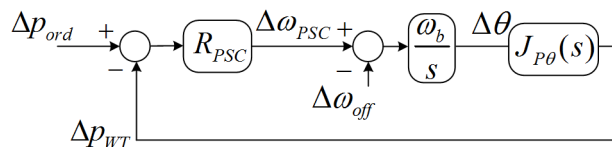
Όπου οι συντελεστές  $a_0, a_1, a_2$  δίνονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$\begin{aligned} a_0 &= x(E_0 V_{0,WT} \cos \theta_0 - V_{0,WT}^2) / (\omega_0 \omega_b^2) \\ a_1 &= r(E_0 V_{0,WT} \cos \theta_0 - V_{0,WT}^2) / (\omega_0 \omega_b) \\ a_2 &= \omega_0 x E_0 V_{0,WT} \cos \theta_0 - r E_0 V_{0,WT} \sin \theta_0 \end{aligned} \quad (5.9)$$

Όπως φαίνεται και από την Εξ.(5.8), η συνάρτηση μεταφοράς  $J_{P\theta}(s)$  χαρακτηρίζεται από ένα ζεύγος μιγαδικών πόλων  $p_{1,2}$  της μορφής:

$$p_{1,2} = \left( -\frac{r}{x} \pm j\omega_0 \right) \omega_b \quad (5.10)$$

οι οποίοι βρίσκονται στο αριστερό ημιεπίπεδο και εξαρτώνται από το λόγο  $r/x$ . Επειδή όμως η τιμή του λόγου  $r/x$  σε εφαρμογές διασύνδεσης ΘΑΠ είναι πολύ μικρή, γείρονται προβληματισμοί ευσταθούς λειτουργίας του βρόχου ελέγχου PSC λόγω της συχνότητας συντονισμού της  $J_{P\theta}(s)$  στη θεμελιώδη συχνότητα. Για τον λόγο αυτό, κρίνεται αναγκαία η τεχνητή απόσβεση των ταλαντώσεων θεμελιώδους συχνότητας μέσω του συστήματος ελέγχου PSC.



Σχήμα 5.3. Διάγραμμα βαθμίδων συστήματος ελέγχου PSC κλειστού βρόχου.

Ο προτεινόμενος ελεγκτής απόσβεσης βασίζεται στην ανατροφοδότηση του ρεύματος του μετατροπέα πλευράς δικτύου της Α/Γ  $i_{WT}$ , με στόχο την αναπροσαρμογή της τάσης αναφοράς του μετατροπέα GSC της Α/Γ σύμφωνα με τον ακόλουθο νόμο ελέγχου (εκφρασμένο στο στρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς του ελεγκτή PSC):

$$\begin{bmatrix} v_{d,WT}^* \\ v_{q,WT}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{0,WT} + \Delta V_{WT} \\ 0 \end{bmatrix} - H_{HP}(s) \begin{bmatrix} i_{d,WT} \\ i_{q,WT} \end{bmatrix} \quad (5.11)$$

Όπου  $H_{HP}(s)$  είναι ένα υπερβατικό φίλτρο της μορφής [40]:

$$H_{HP}(s) = \frac{k_v s}{s + a_v} \quad (5.12)$$

Επαναλαμβάνοντας την ανάλυση μικρού σήματος που περιλαμβάνεται στο Παράρτημα Β με τον νέο νόμο ελέγχου της Εξ.(5.11), η νέα συνάρτηση μεταφοράς  $J_{P\theta-HP}(s)$  προκύπτει:

$$J_{P\theta-HP}(s) = \frac{a_0 s^2 + a_1 s + a_2}{(sx / \omega_b + r + H_{HP}(s))^2 + (\omega_0 x)^2} \quad (5.13)$$

Όπου οι συντελεστές  $a_0, a_1, a_2$  δίνονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

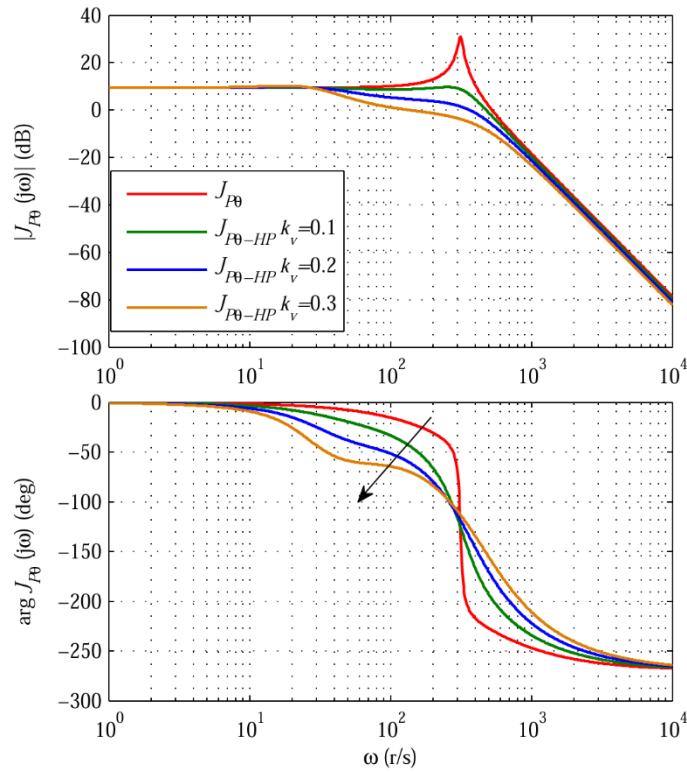
$$\begin{aligned} a_0 &= x(E_0 V_{0,WT} \cos \theta_0 - V_{0,WT}^2) / (\omega_0 \omega_b^2) \\ a_1 &= (r + H_{HP}(s))(E_0 V_{0,WT} \cos \theta_0 - V_{0,WT}^2) / (\omega_0 \omega_b) \\ a_2 &= \omega_0 x E_0 V_{0,WT} \cos \theta_0 - (r + H_{HP}(s)) E_0 V_{0,WT} \sin \theta_0 \end{aligned} \quad (5.14)$$

Στο Σχήμα 5.4 απεικονίζεται το διάγραμμα Bode της συνάρτησης μεταφοράς  $J_{P\theta}(s)$  με και χωρίς τον προτεινόμενο ελεγκτή απόσβεσης. Είναι εμφανής η δραστική αύξηση του περιθωρίου φάσης της συνάρτησης μεταφοράς  $J_{P\theta-HP}(s)$  για μεγαλύτερες τιμές του κέρδους  $k_v$ , εξασφαλίζοντας την απαιτούμενη ευστάθεια του συστήματος κλειστού βρόχου, ωστόσο μειώνεται παράλληλα η συχνότητα διασταύρωσης και το αναμενόμενο εύρος ζώνης, γεγονός που υποδηλώνει μεγαλύτερο χρόνο απόκρισης. Στην παρούσα διατριβή, η τιμή του κέρδους  $k_v$  επιλέγεται στην ενδιάμεση τιμή 0.2 α.μ., για τη διατήρηση υψηλής ταχύτητας απόκρισης και επαρκούς περιθωρίου φάσης.

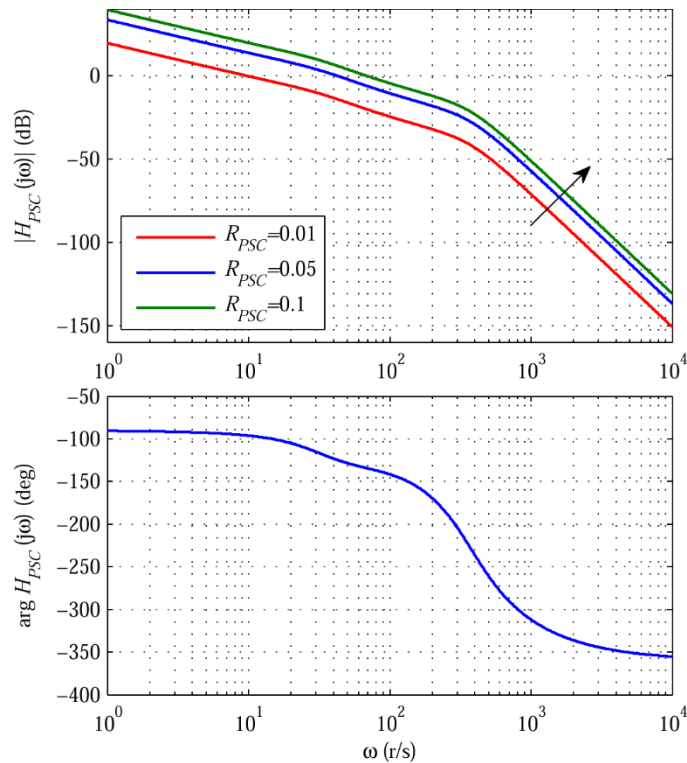
Για τον τελικό σχεδιασμό του προτεινόμενου ελεγκτή PSC, απομένει η επιλογή του κέρδους  $R_{PSC}$ . Η σχεδίαση πραγματοποιείται με την ανάλυση της συνάρτησης μεταφοράς ανοιχτού βρόχου  $H_{PSC}(s)$  όπως αυτή προκύπτει από το Σχήμα 5.3, δηλ.:

$$H_{PSC}(s) = R_{PSC} \frac{\omega_b}{s} J_{P\theta-HP}(s) \quad (5.15)$$

Στο Σχήμα 5.5 παρουσιάζεται το διάγραμμα Bode της συνάρτησης μεταφοράς  $H_{PSC}(s)$  για τρεις διαφορετικές τιμές του κέρδους  $R_{PSC}$ . Αυξημένες τιμές του κέρδους  $R_{PSC}$  οδηγούν σε ταχύτερη απόκριση του συστήματος αλλά με μειωμένο περιθώριο φάσης. Στην παρούσα διατριβή επιλέγεται η τιμή 5%, η οποία αποτελεί και τυπική τιμή στατισμού σε συμβατικές γεννήτριες.

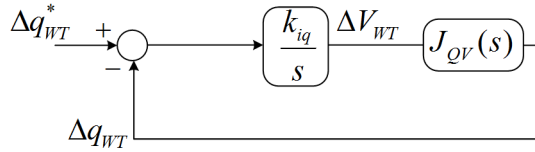


Σχήμα 5.4. Διάγραμμα Bode της συνάρτησης μεταφοράς  $J_{\rho\theta}(s)$ , με και χωρίς ελεγκτή απόσβεσης ( $E_0=1$  α.μ.,  $r=0.01$  α.μ.,  $x=0.3$  α.μ.,  $p_{WT}=1$  α.μ.,  $q_{WT}=0$ ,  $a_v=40$  rad/s).

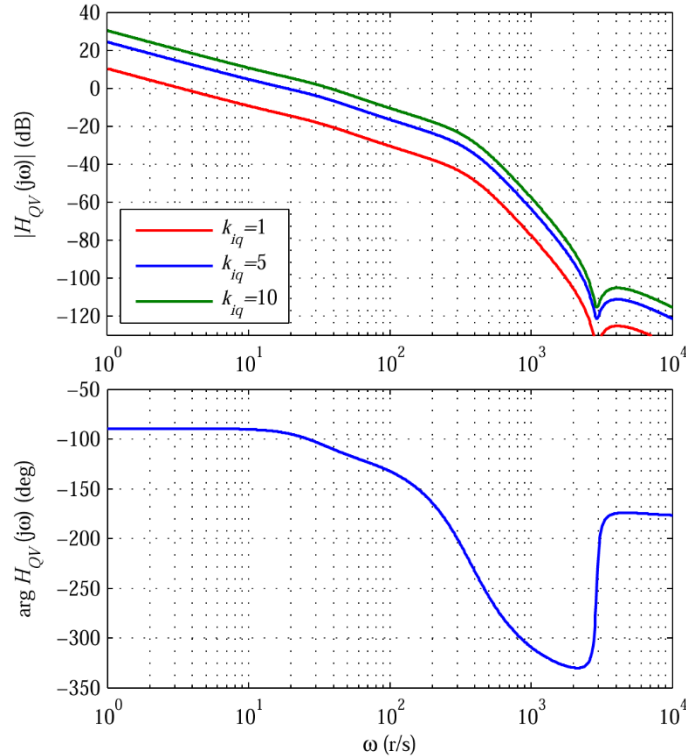


Σχήμα 5.5. Διάγραμμα Bode της συνάρτησης μεταφοράς ανοιχτού βρόχου  $H_{PSC}(s)$ , για διαφορετικές τιμές του κέρδους  $R_{PSC}$  ( $E_0=1$  α.μ.,  $r=0.01$  α.μ.,  $x=0.3$  α.μ.,  $p_{WT}=1$  α.μ.,  $q_{WT}=0$ ,  $k_v=0.2$  α.μ.,  $a_v=40$  rad/s).

Για τον σχεδιασμό του βρόχου ελέγχου αέργου ισχύος, ακολουθείται παρόμοια ανάλυση με αυτή του βρόχου ελέγχου ενεργού ισχύος, χρησιμοποιώντας το αντίστοιχο διάγραμμα βαθμίδων του συστήματος κλειστού βρόχου που απεικονίζεται στο Σχήμα 5.6.



Σχήμα 5.6. Διάγραμμα βαθμίδων συστήματος ελέγχου αέργου ισχύος κλειστού βρόχου.



Σχήμα 5.7. Διάγραμμα Bode της συνάρτησης μεταφοράς ανοιχτού βρόχου  $H_{QV}(s)$ , για διαφορετικές τιμές του κέρδους  $k_{iq}$  ( $E_0=1$  α.μ.,  $r=0.01$  α.μ.,  $x=0.3$  α.μ.,  $p_{WT}=1$  α.μ.,  $q_{WT}=0$ ,  $k_v=0.2$  α.μ.,  $a_v=40$  rad/s).

Εφαρμόζοντας ξανά τη μεθοδολογία ανάλυσης μικρού σήματος που παρουσιάζεται στο Παράρτημα Β, η απόκριση της αέργου ισχύος  $\Delta q_{WT}$  συναρτήσει της μεταβολής  $\Delta V_{WT}$  καθορίζεται από την ακόλουθη συνάρτηση μεταφοράς  $J_{QV}(s)$ :

$$J_{QV}(s) = \frac{\Delta q_{WT}}{\Delta V_{WT}} = \frac{b_0 s^2 + b_1 s + b_2}{(sx / \omega_b + r + H_{HP}(s))^2 + (\omega_0 x)^2} \quad (5.16)$$

Όπου οι συντελεστές  $b_0$ ,  $b_1$ ,  $b_2$  δίνονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$\begin{aligned} b_0 &= x(V_0 - E_0 \cos \theta_0) / (\omega_0 \omega_b^2) \\ b_1 &= (r + H_{HP}(s))(V_0 - E_0 \cos \theta_0) / (\omega_0 \omega_b) \\ b_2 &= \omega_0 x(2V_0 - E_0 \cos \theta_0) + (r + H_{HP}(s))E_0 \sin \theta_0 \end{aligned} \quad (5.17)$$

Για τη ρύθμιση του κέρδους  $k_{iq}$ , γίνεται χρήση της συνάρτησης μεταφοράς ανοιχτού βρόχου  $H_{QV}(s)$  όπως αυτή προκύπτει από το Σχήμα 5.6, δηλ.:

$$H_{QV}(s) = \frac{k_{iq}}{s} J_{QV}(s) \quad (5.18)$$

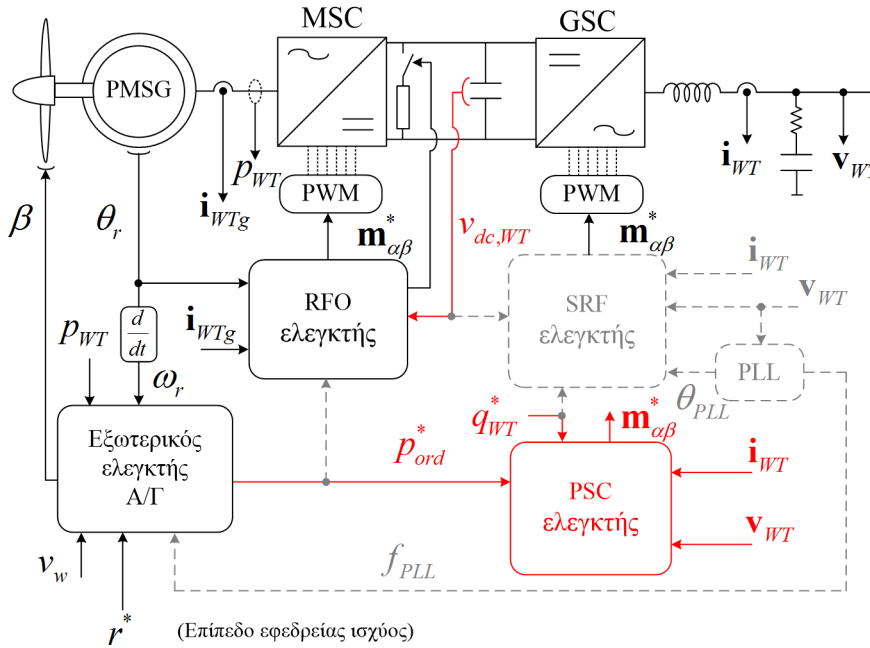
Η επίδραση του κέρδους  $k_{iq}$  στη συνάρτηση μεταφοράς ανοιχτού βρόχου  $H_{QV}(s)$  φαίνεται στο Σχήμα 5.7. Όπως και στην περίπτωση του συστήματος ελέγχου ενεργού ισχύος, αυξημένα κέρδη του ελεγκτή οδηγούν σε ταχύτερη απόκριση αλλά σταδιακή μείωση του περιθωρίου φάσης. Στην παρούσα διατριβή η τιμή του κέρδους  $k_{iq}$  επιλέχθηκε ίση με 5 α.μ.

### 5.2.3 Ενσωμάτωση ελεγκτή συγχρονισμού ισχύος στο σχήμα ελέγχου υπεράκτιων Α/Γ

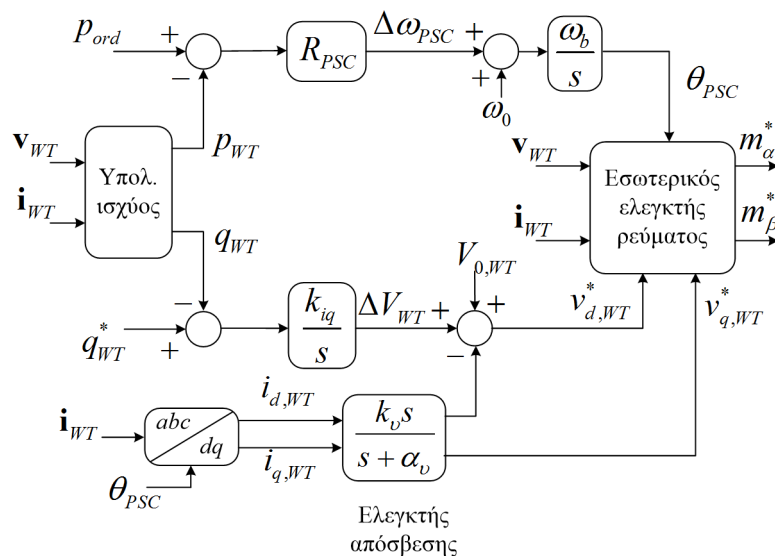
Στην παρούσα παράγραφο, παρουσιάζονται οι απαιτούμενες τροποποιήσεις του συμβατικού σχήματος ελέγχου των Α/Γ που παρουσιάστηκε στο Κεφ. 2, προκειμένου να επιτευχθεί η προτεινόμενη λειτουργία ελέγχου συγχρονισμού ισχύος. Στο Σχήμα 5.8 φαίνονται εποπτικά οι προτεινόμενες επεμβάσεις στη γενικότερη διάταξη του σχήματος ελέγχου, όπου με γκρι διακεκομμένη γραμμή παρουσιάζονται οι συμβατικοί ελεγκτές, ενώ με κόκκινη συνεχή γραμμή οι προτεινόμενες επεμβάσεις. Η κύρια διαφοροποίηση έγκειται στον έλεγχο του μετατροπέα πλευράς δικτύου της Α/Γ, για τον οποίο προτείνεται η κατάργηση της διάταξης συγχρονισμού με το δίκτυο (PLL), και η αντικατάσταση του συμβατικού ελεγκτή ρεύματος στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς (SRF) με τον νέο ελεγκτή PSC. Επειδή όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως ο ελεγκτής PSC αναλαμβάνει την απόκριση συχνότητας του ΘΑΠ μέσω του μηχανισμού συγχρονισμού ισχύος, προτείνεται η μετάθεση του ελέγχου της dc τάσης  $v_{dc,WT}$  στον μετατροπέα πλευράς γεννήτριας, για την προσαρμογή της ισχύος της γεννήτριας στην ενεργό ισχύ που εγγέεται στο υπεράκτιο ac δίκτυο, λειτουργία η οποία προτείνεται και στις αναφορές [65], [136]. Έτσι, η ενεργός ισχύς αναφοράς  $p_{ord}$  του εξωτερικού ελεγκτή της Α/Γ τροφοδοτείται απευθείας στον ελεγκτή PSC, ενώ η μετρούμενη dc τάση τροφοδοτείται στον ελεγκτή προσανατολισμένου πεδίου (RFO) του μετατροπέα πλευράς γεννήτριας. Αναφορικά με τη διάταξη του εξωτερικού ελεγκτή της Α/Γ, η μόνη επέμβαση έγκειται στην κατάργηση των ελεγκτών στατισμού και αδρανειακής απόκρισης που παρουσιάστηκαν στο Σχήμα 2.6, καθώς οι αντίστοιχες λειτουργίες επιτυγχάνονται πλέον με την επιδιωκόμενη σύζευξη λειτουργίας του ελεγκτή PSC με τον ρυθμιστή συχνότητας του υπεράκτιου μετατροπέα SEC.

Η εσωτερική διάταξη του προτεινόμενου ελεγκτή PSC εικονίζεται στο Σχήμα 5.9. Όπως αναλύθηκε και στην προηγούμενη παράγραφο, το μέτρο και η φάση της τάσης αναφοράς διαμορφώνονται από τους βρόχους ελέγχου ενεργού και αέργου ισχύος, ενώ υπερτίθενται και οι συνιστώσες του ελεγκτή απόσβεσης, ο οποίος στην είσοδό του λαμβάνει το μετρούμενο ρεύμα της Α/Γ. Αν και με το συγκεκριμένο σχήμα ελέγχου επιτυγχάνεται η επιθυμητή απόκριση ακόμα και σε συνθήκες σφάλματος του ηπειρωτικού συστήματος, δεν εξασφαλίζεται ο έλεγχος του μέτρου του ρεύματος εξόδου σε έκτακτες συνθήκες λειτουργίας εντός του υπεράκτιου ac δικτύου του ΘΑΠ, όπως π.χ. κατά την εμφάνιση ενός σφάλματος

στα υποβρύχια καλώδια συλλογής MT ή στον υπεράκτιο σταθμό μετατροπής. Για τον λόγο αυτό, ενσωματώνεται και ο εσωτερικός ελεγκτής ρεύματος που φαίνεται στο Σχήμα 5.9, ο οποίος συνθέτει τεχνητά ρεύματα αναφοράς χωρίς να αλλοιώνει την προτεινόμενη φιλοσοφία ελέγχου, και επενεργεί πρακτικά μόνο σε συνθήκες βύθισης τάσης εντός του υπεράκτιου δικτύου του ΘΑΠ.

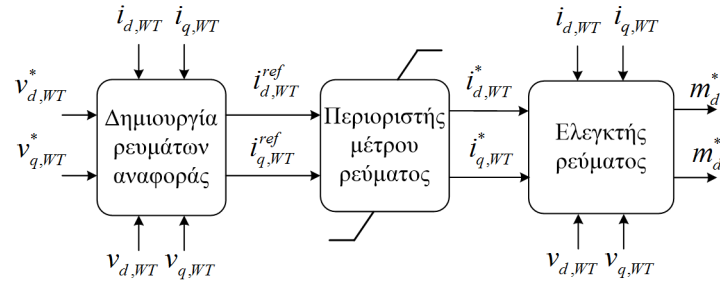


Σχήμα 5.8. Διάταξη A/G τύπου FCWT και προτεινόμενες επεμβάσεις στο σχήμα ελέγχου, γκρι διακεκομμένη γραμμή: συμβατικοί ελεγκτές (απενεργοποιημένοι), κόκκινες γραμμές: προτεινόμενες τροποποιήσεις.



Σχήμα 5.9. Εσωτερική διάταξη ελεγκτή PSC μετατροπέα πλευράς δικτύου της υπεράκτιας A/G.





Σχήμα 5.10. Δομή εσωτερικού ελεγκτή ρεύματος (βλ. Σχήμα 5.9).

Η διάταξη του εσωτερικού ελεγκτή ρεύματος εικονίζεται στο Σχήμα 5.10 και αποτελείται από τρία στάδια. Στο πρώτο στάδιο, διαμορφώνονται τα τεχνητά ρεύματα αναφοράς σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση (στο πλαίσιο αναφοράς του ελεγκτή PSC):

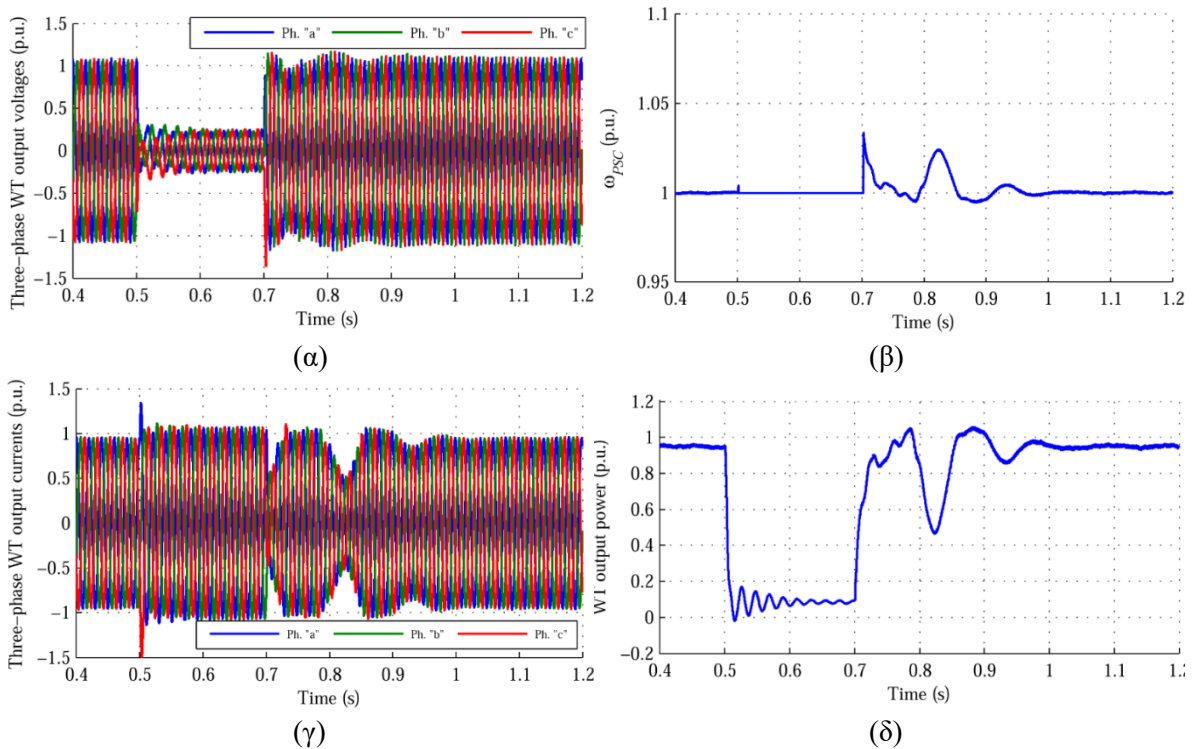
$$\begin{bmatrix} i_{d,WT}^{ref} \\ i_{q,WT}^{ref} \end{bmatrix} = \frac{1}{a_{WT}L} \begin{bmatrix} v_{d,WT}^* - v_{d,WT} + \omega_l L i_{q,WT} \\ v_{q,WT}^* - v_{q,WT} - \omega_l L i_{d,WT} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_{d,WT} \\ i_{q,WT} \end{bmatrix} \quad (5.19)$$

Όπου  $a_{WT}$  είναι το επιθυμητό εύρος ζώνης του ελεγκτή ρεύματος. Στο δεύτερο στάδιο επιβάλλεται περιορισμός του μέτρου των ρευμάτων αναφοράς στη μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή, το οποίο επενεργεί πρακτικά σε συνθήκες σφάλματος του υπεράκτιου ac δικτύου. Τέλος, στο τρίτο στάδιο εφαρμόζεται καθιερωμένος έλεγχος ρεύματος προκειμένου να καθοριστούν τα σήματα διαμόρφωσης  $\mathbf{m}_{dq}^*$  που οδηγούνται στον ελεγκτή PWM του μετατροπέα πλευράς δικτύου της Α/Γ, σύμφωνα με τον ακόλουθο νόμο ελέγχου:

$$\begin{bmatrix} m_d^* \\ m_q^* \end{bmatrix} = a_{WT}L \begin{bmatrix} i_{d,WT}^* - i_{d,WT} \\ i_{q,WT}^* - i_{q,WT} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{d,WT} - \omega_l L i_{q,WT} \\ v_{q,WT} + \omega_l L i_{d,WT} \end{bmatrix} \quad (5.20)$$

Συνδυάζοντας τις Εξ. (5.19) και (5.20) εύκολα συμπεραίνεται ότι σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας στο εσωτερικό δίκτυο του ΘΑΠ, όπου δεν επενεργεί ο περιοριστής μέτρου ρεύματος, ο νόμος ελέγχου της Εξ. (5.11) παραμένει αναλλοίωτος, ενώ σε συνθήκες σφάλματος επενεργεί πρακτικά ο νόμος ελέγχου της Εξ. (5.20), επιφέροντας τον επιθυμητό έλεγχο του μετρούμενου ρεύματος στη μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή. Ωστόσο, λόγω της ύπαρξης ολοκληρωτικών όρων στους βρόχους ελέγχου ενεργού και αέργου ισχύος, είναι απαραίτητη η αδρανοποίησή τους κατόπιν ανίχνευσης βύθισης τάσης στο υπεράκτιο δίκτυο.

Η αποτελεσματική λειτουργία του εσωτερικού ελεγκτή ρεύματος επιβεβαιώνεται στο Σχήμα 5.11, όπου προσομοιώθηκε η απόκριση των υπεράκτιων Α/Γ σε 3Φ βύθιση τάσης διάρκειας 200 ms στο εσωτερικό δίκτυο του ΘΑΠ. Κατά τη διάρκεια της βύθισης τάσης, ο εσωτερικός ελεγκτής ρεύματος ρυθμίζει ακαριαία το μέτρο του ρεύματος στη μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή, ενώ παρατηρείται βραχείας διάρκειας υπερένταση (λίγων ms) που κρίνεται αποδεκτή. Η λειτουργία ελέγχου συγχρονισμού ισχύος ενεργοποιείται ξανά μετά την επαναφορά της τάσης και η εγχεόμενη ενεργός ισχύς εξόδου της Α/Γ επανέρχεται στην τιμή προ διαταραχής εντός 250 ms.

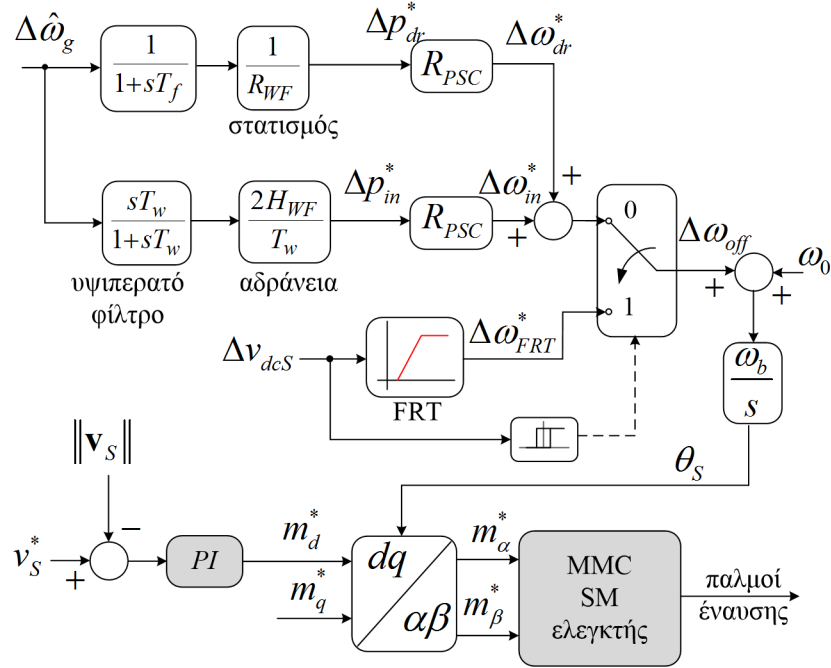


Σχήμα 5.11. Απόκριση υπεράκτιας A/Γ σε 3Φ βύθιση τάσης στο εσωτερικό δίκτυο του ΘΑΠ, (α) τριφασικές τάσεις εξόδου A/Γ, (β) συχνότητα λειτουργίας μετατροπέα πλευράς δικτύου A/Γ, (γ) τριφασικά ρεύματα εξόδου A/Γ, (δ) ενεργός ισχύς εξόδου A/Γ.

### 5.3 Ρυθμιστής συχνότητας λειτουργίας υπεράκτιου μετατροπέα HVDC

Η βασική λειτουργία του υπεράκτιου μετατροπέα HVDC έγκειται στην απορρόφηση της παραγόμενης ενεργού ισχύος του ΘΑΠ, με κατάλληλη ρύθμιση της τάσης και συχνότητας λειτουργίας του υπεράκτιου ac δικτύου. Όπως έχει αναλυθεί και στο Κεφ. 2, χρησιμοποιείται ένας ΡΙ ελεγκτής για τη ρύθμιση του μέτρου της τάσης στην επιθυμητή τιμή, ενώ η συχνότητα λειτουργίας ορίζεται στην ονομαστική της τιμή σε ονομαστικές συνθήκες λειτουργίας. Ωστόσο, για την επίτευξη αδιάλειπτης λειτουργίας σε συνθήκες σφάλματος αλλά και απόκρισης συχνότητας, απαιτούνται προσθήκες στο σχήμα ελέγχου της συχνότητας λειτουργίας, για την κατάλληλη ρύθμιση αυτής.

Η φιλοσοφία ελέγχου της συχνότητας λειτουργίας του υπεράκτιου δικτύου του ΘΑΠ εικονίζεται στο Σχήμα 5.12. Για τον αποτελεσματικό έλεγχο των dc υπερτάσεων σε συνθήκες σφάλματος του ηπειρωτικού συστήματος, επιβάλλεται ταχεία αύξηση της συχνότητας λειτουργίας, η οποία συναρτάται με τη δυναμική της μετρούμενης dc τάσης  $\Delta v_{dcS}$  και ενεργοποιείται όταν αυτή υπερβεί κάποια τιμή κατωφλίου (1.05 α.μ. στην παρούσα ανάλυση). Με τον τρόπο αυτό, η αύξηση της συχνότητας  $\Delta \omega_{FRT}^*$  αναμένεται να επιφέρει μόνιμο σφάλμα ρύθμισης της ενεργού ισχύος εξόδου των A/Γ και άρα την επιδιωκόμενη ταχεία μείωσή της για την αποφυγή επικίνδυνων dc υπερτάσεων στο σύνδεσμο VSC-HVDC.



Σχήμα 5.12. Σύστημα ελέγχου υπεράκτιου μετατροπέα HVDC με ενσωματωμένο ρυθμιστή συχνότητας, ελεγχόμενου στατισμού και αδρανειακής απόκρισης.

Για τη συμμετοχή του ΘΑΠ στη ρύθμιση συχνότητας του ηπειρωτικού συστήματος, αξιοποιείται η εκτίμηση των μεταβολών συχνότητας  $\Delta\hat{\omega}_g$  που εξάγονται από τη διάταξη συγχρονισμού του επίγειου μετατροπέα HVDC και αποστέλλονται στον υπεράκτιο ελεγκτή μέσω κατάλληλου τηλεπικοινωνιακού μέσου (π.χ. οπτικές ίνες ενσωματωμένες στα υποβρύχια καλώδια dc). Ο προτεινόμενος ρυθμιστής συχνότητας του υπεράκτιου μετατροπέα επιτελεί δύο λειτουργίες:

- **Έλεγχος στατισμού (droop control).** Αν  $R_{WF}$  είναι η επιθυμητή τιμή στατισμού του ΘΑΠ, τότε η μεταβολή της ενεργού ισχύος εξόδου  $\Delta p_R^{droop}$  που εγχέεται στο ηπειρωτικό σύστημα θα πρέπει να καθορίζεται από την σχέση:

$$\Delta p_R^{droop} = \frac{\Delta\hat{\omega}_g}{R_{WF}} \quad (5.21)$$

Λαμβάνοντας υπόψη την εγγενή ιδιότητα του ελεγκτή PSC της υπεράκτιας Α/Γ που φαίνεται στην Εξ. (5.6), η συχνότητα λειτουργίας του υπεράκτιου δικτύου του ΘΑΠ θα πρέπει να μεταβληθεί σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$\Delta\omega_{dr}^* = \frac{R_{PSC}}{R_{WF}} \Delta\hat{\omega}_g \quad (5.22)$$

Αξίζει να σημειωθεί πως αν η επιθυμητή τιμή στατισμού του ΘΑΠ ταυτίζεται με το προκαθορισμένο κέρδος  $R_{PSC}$  του ελεγκτή κάθε Α/Γ, τότε από την Εξ. (5.22) συμπεραίνεται ότι οι απαιτούμενες μεταβολές συχνότητας του υπεράκτιου δικτύου θα είναι πανομοιότυπες με αυτές του ηπειρωτικού συστήματος. Για διαφορετικές όμως τιμές

του επιθυμητού στατισμού  $R_{WF}$ , απαιτούνται μεταβολές συχνότητας διαφορετικού πλάτους, κατάλληλα κλιμακωμένου έτσι ώστε οι Α/Γ να μεταβάλλουν την ενεργό ισχύ εξόδου τους στην επιθυμητή τιμή.

- **Αδρανειακή απόκριση (inertia response).** Η αδρανειακή απόκριση συναρτάται με την ισοδύναμη σταθερά αδρανείας  $H_{WF}$  που θα πρέπει να χαρακτηρίζει το ΘΑΠ. Σε αυτή την περίπτωση, η ενεργός ισχύς εξόδου του επίγειου μετατροπέα θα πρέπει να μεταβάλλεται και με βάση το ρυθμό μεταβολής της συχνότητας  $\Delta\hat{\omega}_g$ , δηλαδή:

$$\Delta p_R^{inertia} = 2H_{WF} \frac{d\Delta\hat{\omega}_g}{dt} \quad (5.23)$$

Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, λαμβάνοντας υπόψη την Εξ. (5.6) του ελεγκτή PSC της Α/Γ, η συχνότητα λειτουργίας του υπεράκτιου δικτύου θα πρέπει να μεταβληθεί σύμφωνα με τη σχέση:

$$\Delta\omega_{in}^* = R_{PSC} \frac{2H_{WF}}{T_w} \frac{sT_w}{sT_w+1} \Delta\hat{\omega}_g \quad (5.24)$$

Όπως φαίνεται και στην Εξ. (5.24), για την εκτίμηση του ρυθμού μεταβολής της συχνότητας του ηπειρωτικού συστήματος, προτείνεται η χρήση ενός τυποποιημένου υψιπερατού φίλτρου της μορφής  $\frac{sT_w}{sT_w+1}$ , το οποίο παράλληλα καταστέλλει και υψίσυχνες αρμονικές που ενδεχομένως συνυπάρχουν στο σήμα  $\Delta\hat{\omega}_g$  που εξάγεται από τη διάταξη συγχρονισμού του επίγειου μετατροπέα HVDC.

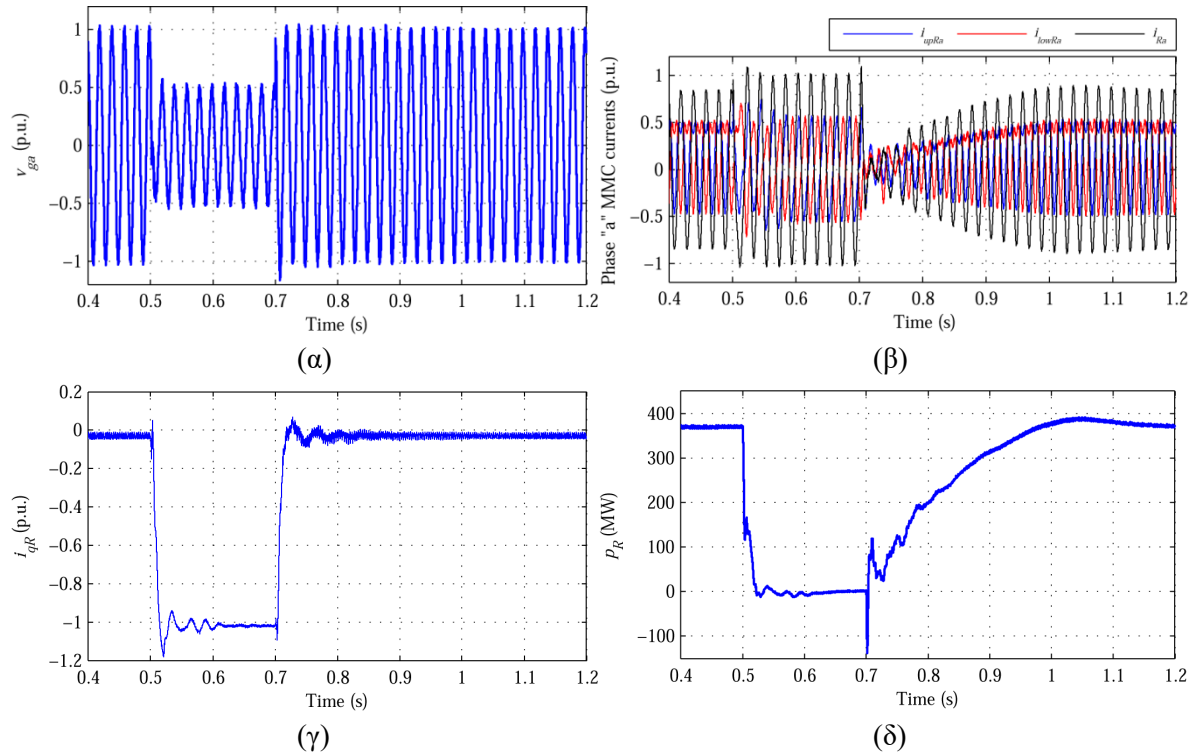
## 5.4 Διερεύνηση ικανότητας αδιάλειπτης λειτουργίας ΘΑΠ με έλεγχο συγχρονισμού ισχύος

### 5.4.1 Απόκριση σε 3Φ σφάλμα δικτύου

Στην παράγραφο αυτή αναλύεται η δυναμική συμπεριφορά του ΘΑΠ και του συνδέσμου VSC-HVDC σε συνθήκες σφάλματος του ηπειρωτικού συστήματος, με εφαρμογή του σχήματος ελέγχου των Παραγράφων 5.2 και 5.3. Η εξεταζόμενη τοπολογία ΘΑΠ έχει παρουσιαστεί στο Κεφ. 2 με τις τιμές παραμέτρων του Παραρτήματος Γ, ενώ η ανάλυση διενεργείται σε συνθήκες υψηλής φόρτισης της διασύνδεσης, δηλαδή λειτουργία του ΘΑΠ υπό ονομαστική ισχύ. Οι προσομοιώσεις διενεργήθηκαν στο λογισμικό Matlab/Simulink.

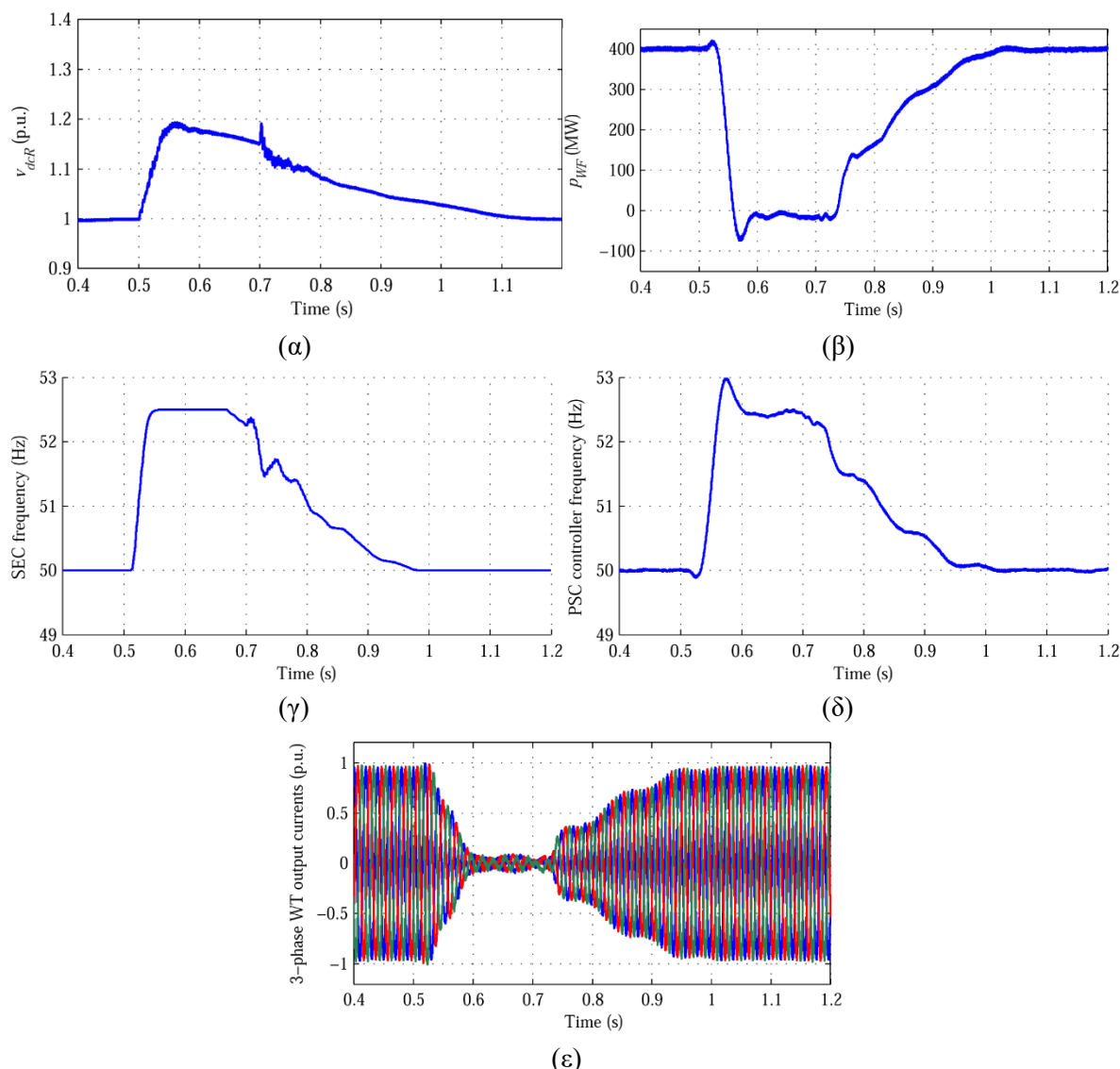
Στο Σχήμα 5.13 παρουσιάζεται η απόκριση του επίγειου σταθμού μετατροπής κατά την εμφάνιση ενός 3Φ σφάλματος στην πλευρά 400 kV του χερσαίου Μ/Σ, διάρκειας 200 ms, με απομένουσα τάση 0.5 α.μ. στην έξοδο του μετατροπέα REC. Κατά τη διάρκεια του σφάλματος, ενεργοποιείται η υποστήριξη της τάσης του δικτύου από το σύστημα ελέγχου του χερσαίου μετατροπέα, ο οποίος ρυθμίζει την άεργο συνιστώσα του ρεύματος εξόδου στην τιμή αναφοράς (-1 α.μ.), περίπου εντός 50 ms από την εμφάνιση του σφάλματος. Η

λειτουργία αυτή εξαντλεί και τη δυνατότητα έγχυσης ενεργού ισχύος στο ηπειρωτικό σύστημα, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.13. Το ρεύμα εξόδου, όπως επίσης και τα ρεύματα άνω/κάτω υποσκέλους του χερσαίου μετατροπέα MMC διατηρούνται εντός αποδεκτών ορίων κατά τη διάρκεια του σφάλματος.



Σχήμα 5.13. Απόκριση επίγειου μετατροπέα HVDC σε 3Φ βύθιση τάσης στην πλευρά 400 kV του χερσαίου Μ/Σ ισχύος. (α) Τάση εξόδου μετατροπέα MMC φάσης “a”, (β) ρεύματα εξόδου και άνω/κάτω υποσκέλους μετατροπέα MMC φάσης “a”, (γ) άεργος συνιστώσα ρεύματος εξόδου, (δ) ενεργός ισχύς εξόδου.

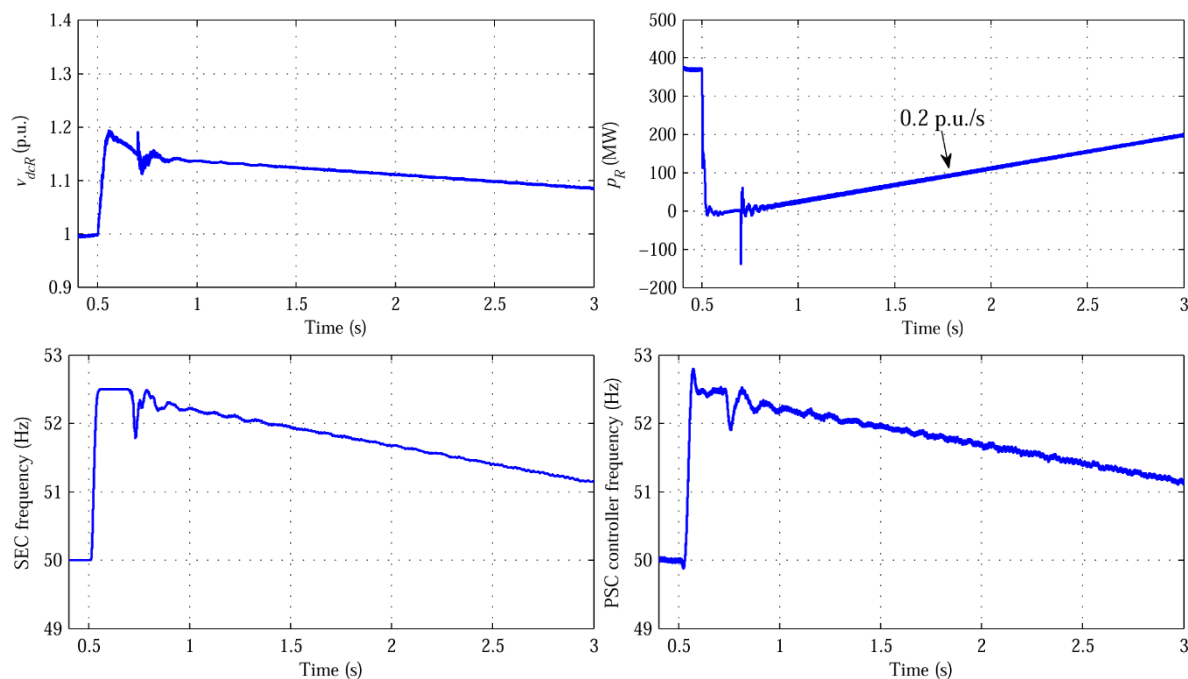
Στο Σχήμα 5.14 παρουσιάζονται αποτελέσματα της απόκρισης στην πλευρά του υπεράκτιου δικτύου του ΘΑΠ για την ίδια 3Φ βύθιση τάσης. Η εμφανιζόμενη dc υπέρταση ενεργοποιεί το μηχανισμό ταχείας αύξησης της συχνότητας λειτουργίας, η οποία ρυθμίζεται μεταβατικά στην τιμή των 52.5 Hz προκειμένου να επιτευχθεί ο απαιτούμενος περιορισμός της εγχεόμενης ενεργού ισχύος των υπεράκτιων Α/Γ, μέσω της ταχείας προσαρμογής της συχνότητας λειτουργίας του μετατροπέα πλευράς δικτύου των Α/Γ. Η αλληλεπίδραση αυτή μεταξύ Α/Γ – υπεράκτιου μετατροπέα HVDC οδηγεί σε έλεγχο της dc υπέρτασης κάτω από 1.2 α.μ., γεγονός που επιδεικνύει την αποτελεσματικότητα της υπόψη στρατηγικής για την επίτευξη αδιάλειπτης λειτουργίας. Συνεπώς, για την επιτυχή αδιάλειπτη λειτουργία επαρκεί ο προτεινόμενος έλεγχος της συχνότητας λειτουργίας, χωρίς την ανάγκη επιβολής τεχνητών βραχυκυκλωμάτων στο υπεράκτιο ac δίκτυο ή της χρήσης εξωτερικών διατάξεων αυξημένου κόστους για την κατανάλωση της περίσσειας ισχύος, λύσεις που παρουσιάστηκαν και αξιολογήθηκαν στο Κεφ. 4.



Σχήμα 5.14. Απόκριση ΘΑΠ και συνδέσμου VSC-HVDC για την ίδια 3Φ βύθιση τάσης με το Σχήμα 5.13. (α) dc τάση στην πλευρά του μετατροπέα REC, (β) ενεργός ισχύς εξόδου ΘΑΠ, (γ) συχνότητα λειτουργίας υπεράκτιου ac δικτύου, (δ) συχνότητα λειτουργίας μετατροπέα πλευράς δικτύου A/G, (ε) τριφασικά ρεύματα εξόδου A/G.

#### 5.4.2 Επίδραση ρυθμού αύξησης ισχύος μετά την εκκαθάριση του σφάλματος

Με αφορμή την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε στην Παράγραφο 4.2.2 του Κεφ. 4 ως προς την επίδραση του ρυθμού αύξησης ισχύος μετά την εκκαθάριση του σφάλματος στην επίδοση της εξεταζόμενης τεχνικής επίτευξης αδιάλειπτης λειτουργίας, στο Σχήμα 5.15 επαναλαμβάνεται η ίδια ανάλυση (απόκριση στην ίδια 3Φ βύθιση τάσης) αλλά με εφαρμογή του προτεινόμενου ελέγχου συγχρονισμού ισχύος. Όπως διαπιστώνεται από τα αποτελέσματα, ο χαμηλός ρυθμός αύξησης της ενεργού ισχύος εξόδου στο επίγειο άκρο της διασύνδεσης επιβάλλει παρατεταμένη λειτουργία σε συνθήκες υπερ-συχνότητας στο υπεράκτιο ac δίκτυο, χωρίς ωστόσο να εγείρονται οι προβληματισμοί της μεθόδου τεχνητής βύθισης τάσης, καθώς η τάση λειτουργίας στο υπεράκτιο δίκτυο παραμένει αμετάβλητη, ενώ η συχνότητα λειτουργίας του μετατροπέα πλευράς δικτύου των A/G ρυθμίζεται σχεδόν ακαριαία στη ρυθμιζόμενη συχνότητα λειτουργίας του υπεράκτιου μετατροπέα HVDC.



Σχήμα 5.15. Επίδραση ρυθμού αύξησης ενεργού ισχύος μετά την εκκαθάριση του σφάλματος στην απόκριση του υπεράκτιου ac δικτύου, (α) dc τάση λειτουργίας στην πλευρά του μετατροπέα REC, (β) ενεργός ισχύς εξόδου μετατροπέα REC, (γ) συχνότητα λειτουργίας υπεράκτιου μετατροπέα HVDC, (δ) συχνότητα λειτουργίας ελεγκτή PSC υπεράκτιων A/T.

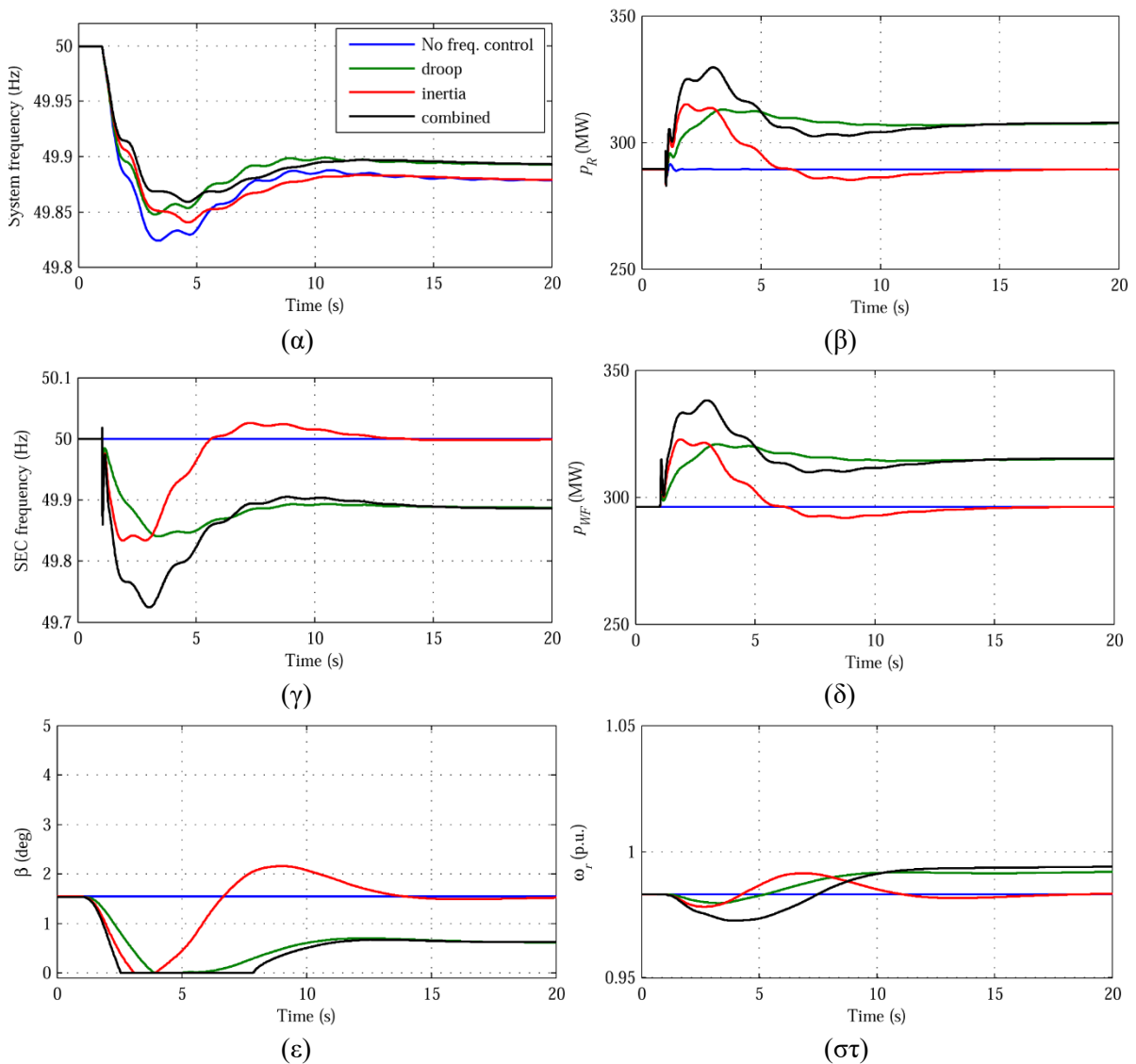
## 5.5 Διερεύνηση συμβολής ΘΑΠ στη ρύθμιση συχνότητας του ηπειρωτικού συστήματος με έλεγχο συγχρονισμού ισχύος

### 5.5.1 Συγκριτική αξιολόγηση ελεγκτών συχνότητας

Για τη διερεύνηση της δυνατότητας παροχής λειτουργιών ελέγχου στατισμού και αδρανειακής απόκρισης από το ΘΑΠ, με τον προτεινόμενο έλεγχο συγχρονισμού ισχύος, χρησιμοποιείται η ίδια τοπολογία του ΣΗΕ του Κεφ. 4, όπου προσομοιώνεται η ίδια διαταραχή βηματικής αύξησης φορτίου κατά 200 MW στο ζυγό 7. Και εδώ, η προσομοίωση πραγματοποιείται με τη μέθοδο προσομοίωσης φασιθετών, με χρήση απλοποιημένων μοντέλων θεμελιώδους συχνότητας για το σύνολο των μετατροπέων ισχύος που απαρτίζουν το ΘΑΠ και το σύστημα διασύνδεσης VSC-HVDC.

Στο Σχήμα 5.16 παρουσιάζεται η απόκριση του ΘΑΠ εφαρμόζοντας εναλλακτικές στρατηγικές απόκρισης συχνότητας. Όταν το ΘΑΠ δεν συμμετέχει στη ρύθμιση συχνότητας, εμφανίζεται μια μέγιστη βύθιση συχνότητας περίπου 0.18 Hz (μπλε γραμμή), λίγα δευτερόλεπτα μετά τη βηματική αύξηση του φορτίου. Η απόκριση του ΘΑΠ αποκλειστικά με έλεγχο στατισμού επιφέρει μείωση τόσο των μεταβατικών διακυμάνσεων συχνότητας (περίπου κατά 15%) όσο και του μόνιμου σφάλματος απόκλισης από την ονομαστική τιμή, χάρη στην αξιοποίηση των εφεδρειών λειτουργίας που τηρούνται από το ΘΑΠ σε κανονική λειτουργία. Από την άλλη πλευρά, η εφαρμογή του αδρανειακού ελεγκτή επιφέρει κυρίως περιορισμό του ρυθμού μεταβολής της συχνότητας κατά τη διάρκεια του μεταβατικού φαινομένου, αλλά δεν επηρεάζει το σφάλμα συχνότητας μόνιμης κατάστασης. Τέλος, όπως αναμενόταν, ο συνδυαστικός έλεγχος στατισμού και αδρανειακής απόκρισης είναι και ο

πλέον αποτελεσματικός, καθώς η μέγιστη διακύμανση της συχνότητας μειώνεται κατά 22%. Σε αντιδιαστολή με τα αποτελέσματα του συμβατικού σχήματος ελέγχου συχνότητας του Κεφ. 4, παρατηρείται εμφανής βελτίωση της απόκρισης συχνότητας ακόμα και στην περίπτωση ελέγχου στατισμού, καθώς η απαιτούμενη έγχυση ενεργού ισχύος για τις ανάγκες ρύθμισης συχνότητας παρέχεται απευθείας από τον ελεγκτή PSC, χωρίς την παρεμβολή του εξωτερικού ελεγκτή της Α/Γ για τον σκοπό αυτό. Η αμεσότερη δράση του ελεγκτή PSC οδηγεί και σε διαφορετικό προφίλ της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα των υπεράκτιων Α/Γ, η οποία μειώνεται μεταβατικά μετά την εμφάνιση της διαταραχής, αλλά επαναρυθμίζεται αποτελεσματικά μέσω της λειτουργίας του ελεγκτή γωνίας βήματος.



Σχήμα 5.16. Αξιολόγηση εναλλακτικών μεθόδων απόκρισης συχνότητας ΘΑΠ ( $R_{WF} = 5\%$ ,  $H_{WF} = 30$  s) σε βηματική αύξηση φορτίου, με εφαρμογή του προτεινόμενου ελεγκτή συγχρονισμού ισχύος. (α) συχνότητα ηπειρωτικού συστήματος, (β) ενεργός ισχύς εξόδου μετατροπέα REC, (γ) συχνότητα λειτουργίας υπεράκτιου ac δικτύου, (δ) ενεργός ισχύς εξόδου ΘΑΠ, (ε) γωνία βήματος πτερυγίων υπεράκτιων Α/Γ, (στ) ταχύτητα περιστροφής δρομέα Α/Γ.

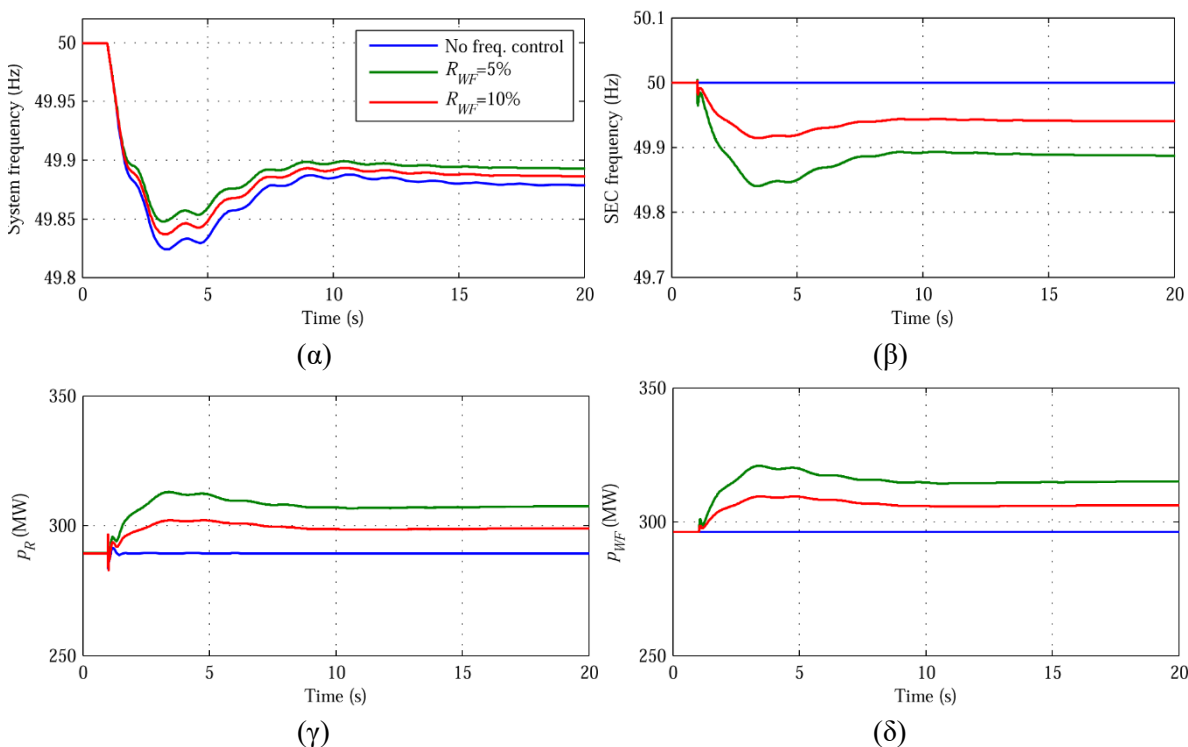


Αξίζει να σημειωθεί ότι η επιθυμητή απόκριση συχνότητας του ΘΑΠ (στατισμού ή και αδρανειακής απόκρισης) επιτεύχθηκε αποκλειστικά με μεταβολές συχνότητας ελεγχόμενου πλάτους και ρυθμού μεταβολής από τον ρυθμιστή του υπεράκτιου μετατροπέα HVDC που παρουσιάστηκε στο Σχήμα 5.12. Οι υπόψη στιγμιαίες μεταβολές απομαστεύουν αιολική ισχύ του επιθυμητού επιπέδου και ρυθμού μεταβολής, προς συμμόρφωση με τις τεχνικές απαιτήσεις κωδικών συστήματος.

### 5.5.2 Επίδραση ελέγχου στατισμού

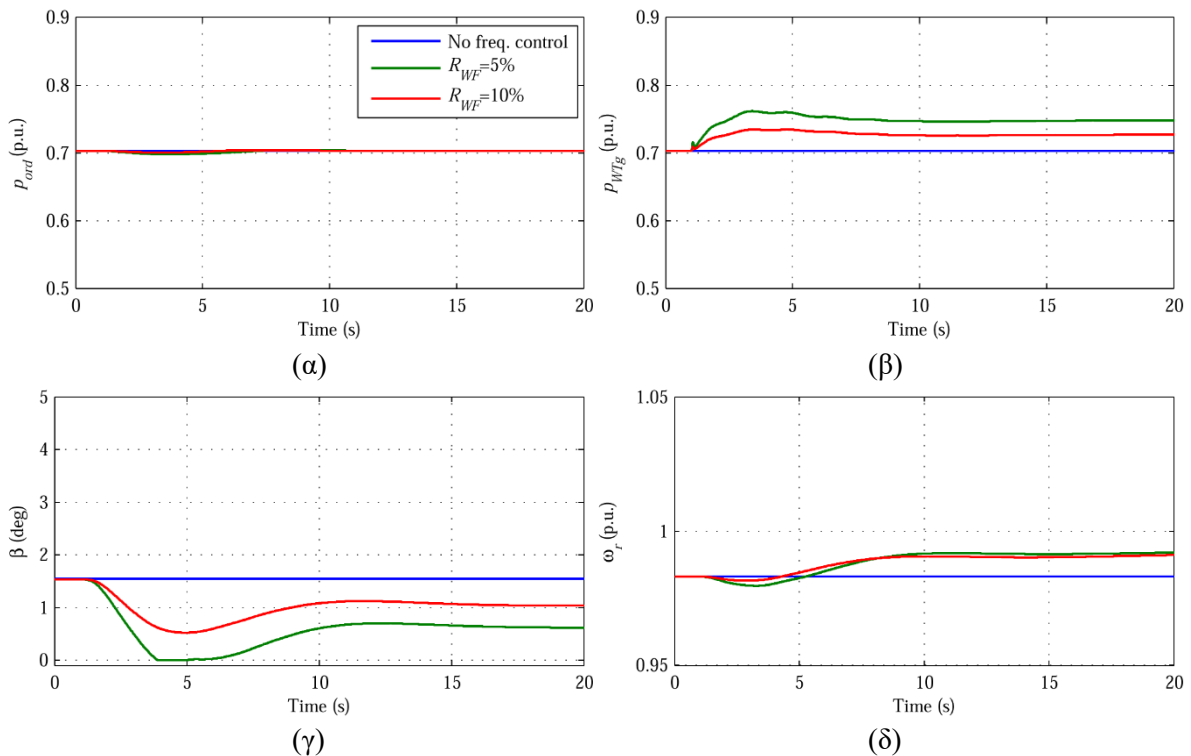
Ένα βασικό σημείο διαφοροποίησης της προτεινόμενης στρατηγικής ελέγχου σε σχέση με τον συμβατικό έλεγχο του Κεφ. 4 έγκειται στη φιλοσοφία μεταβολών της συχνότητας λειτουργίας στο υπεράκτιο δίκτυο. Στην περίπτωση εφαρμογής ελέγχου στατισμού, η τιμή του κέρδους του ελεγκτή PSC της Α/Γ, που αποτελεί και την ισοδύναμη τιμή στατισμού της, διατηρείται σταθερή καθώς αποτελεί βασική παράμετρο του συστήματος ελέγχου του μετατροπέα. Έτσι, σε περίπτωση όπου απαιτηθεί από τον διαχειριστή του συστήματος διαφορετική τιμή στατισμού, η λειτουργία αυτή επιτυγχάνεται μέσω του ρυθμιστή συχνότητας του υπεράκτιου μετατροπέα HVDC όπως παρουσιάστηκε στο Σχήμα 5.12.

Για την επιβεβαίωση των ανωτέρω, στο Σχήμα 5.17 προσομοιώθηκε η λειτουργία του ΘΑΠ για την ίδια διαταραχή φορτίου και για δύο διαφορετικές τιμές στατισμού. Από τα αποτελέσματα συμπεραίνεται ότι μικρότερες τιμές στατισμού οδηγούν σε μεγαλύτερη απόκλιση συχνότητας στο υπεράκτιο δίκτυο από την ονομαστική τιμή, στην οποία προσαρμόζεται και η συχνότητα λειτουργίας του ελεγκτή PSC.



Σχήμα 5.17. Επίδραση ελέγχου στατισμού στην απόκριση συχνότητας. (α) συχνότητα ηπειρωτικού συστήματος, (β) συχνότητα λειτουργίας υπεράκτιου δικτύου, (γ) ενεργός ισχύς εξόδου επίγειου μετατροπέα HVDC, (δ) ενεργός ισχύς εξόδου ΘΑΠ.

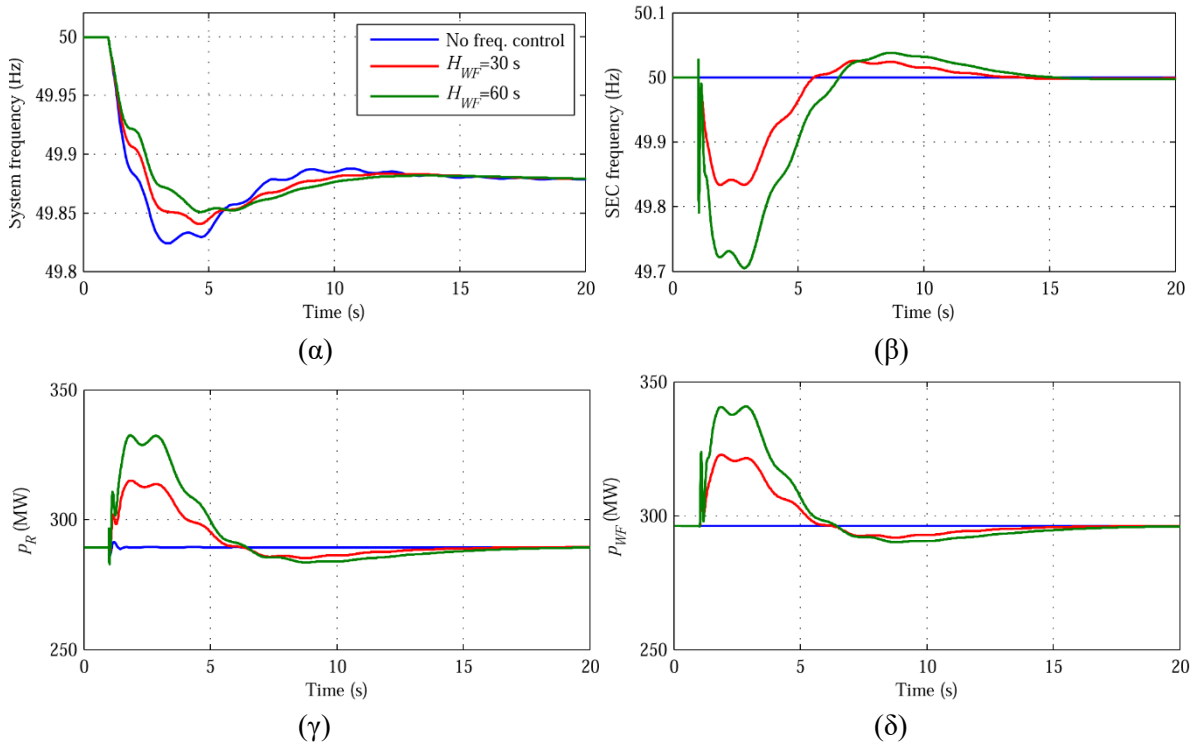
Στο Σχήμα 5.17 παρουσιάζεται και η επίδραση της τιμής στατισμού στην απόκριση της ενεργού ισχύος εξόδου του ΘΑΠ, η οποία παρουσιάζει αισθητά ταχύτερη απόκριση σε σχέση με αυτή του συμβατικού ελεγκτή συχνότητας. Το ίδιο συμπέρασμα ισχύει και για την απόκριση του ηλεκτρικού και μηχανικού μέρους των υπεράκτιων Α/Γ που παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.18, όπου διαπιστώνεται η ικανοποιητική σύζευξη λειτουργίας μεταξύ του εξωτερικού ελεγκτή της Α/Γ και του προτεινόμενου ελεγκτή PSC του μετατροπέα πλευράς δικτύου, καθώς από την μια πλευρά η ενεργός ισχύς αναφοράς  $p_{ord}$  που ορίζει ο εξωτερικός ελεγκτής της Α/Γ παραμένει πρακτικά σταθερή, από την άλλη ο ρυθμιστής γωνίας βήματος επενεργεί ικανοποιητικά για τον αποτελεσματικό έλεγχο της ταχύτητας περιστροφής της Α/Γ.



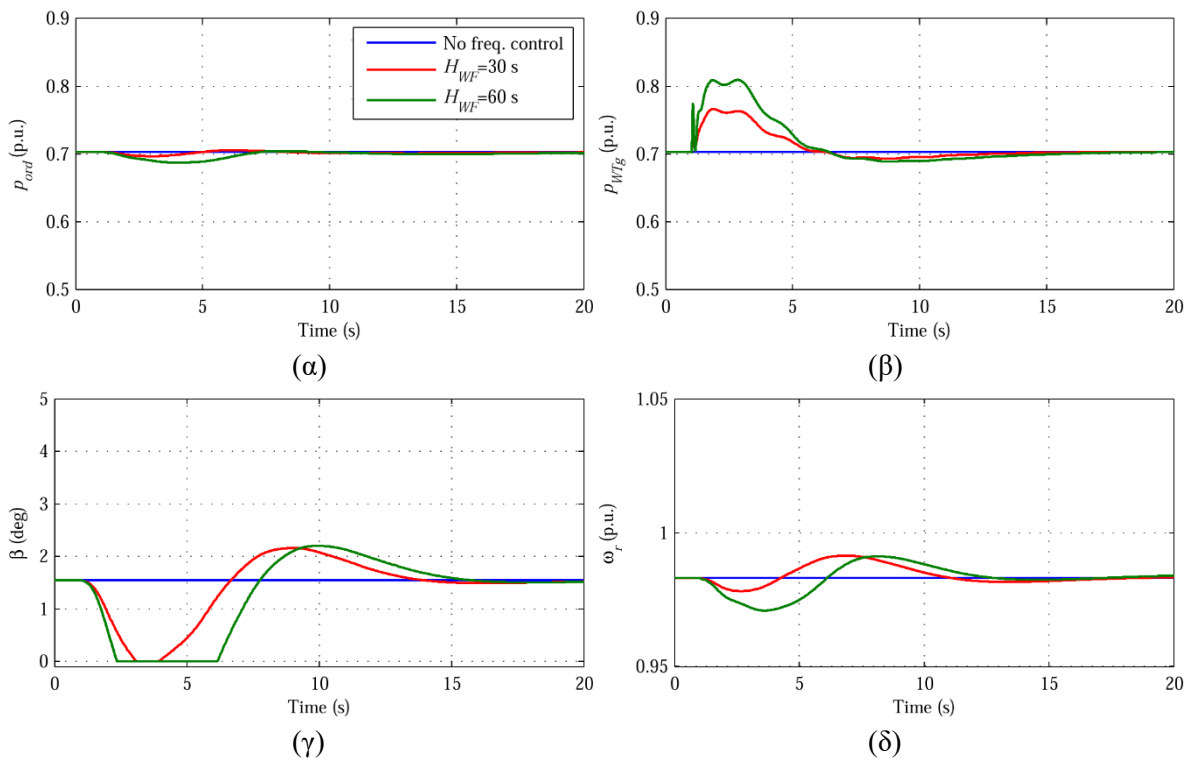
Σχήμα 5.18. Επίδραση ελέγχου στατισμού στην απόκριση του ηλεκτρικού και μηχανικού μέρους των υπεράκτιων Α/Γ. (α) Ενεργός ισχύς αναφοράς εξωτερικού ελεγκτή Α/Γ, (β) ηλεκτρική ισχύς γεννήτριας, (γ) γωνία βήματος περυνγίων, (δ) ταχύτητα περιστροφής δρομέα Α/Γ.

### 5.5.3 Επίδραση ελέγχου αδρανειακής απόκρισης

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει ο τρόπος επίτευξης αδρανειακής απόκρισης με τους προτεινόμενους ελεγκτές της Α/Γ και του μετατροπέα SEC. Στο Σχήμα 5.19 παρουσιάζονται οι αποκρίσεις συχνότητας για δύο διαφορετικές τιμές της ισοδύναμης σταθεράς αδρανείας  $H_{WF}$ , με απενεργοποιημένο τον ελεγκτή στατισμού. Διαπιστώνεται ότι παρόλο που η συχνότητα του ηπειρωτικού συστήματος κυμαίνεται σε τιμές μικρότερες της ονομαστικής, η συχνότητα λειτουργίας του υπεράκτιου δικτύου παρουσιάζει αυξομειώσεις γύρω από την ονομαστική συχνότητα λειτουργίας και τελικά αποκαθίσταται σε αυτή, καθώς η δυνατότητα έγχυσης ενεργού ισχύος σε τιμές μεγαλύτερες ή μικρότερες από την τιμή προ διαταραχής, καθορίζεται από το σφάλμα απόκλισης της συχνότητας λειτουργίας του ελεγκτή PSC από την ονομαστική τιμή.



Σχήμα 5.19. Επίδραση ελέγχου αδρανειακής απόκρισης στην απόκριση συχνότητας. (α) Συχνότητα ηπειρωτικού συστήματος, (β) συχνότητα λειτουργίας υπεράκτιου δικτύου, (γ) ενεργός ισχύς εξόδου επίγειου μετατροπέα HVDC, (δ) ενεργός ισχύς εξόδου ΘΑΠ.

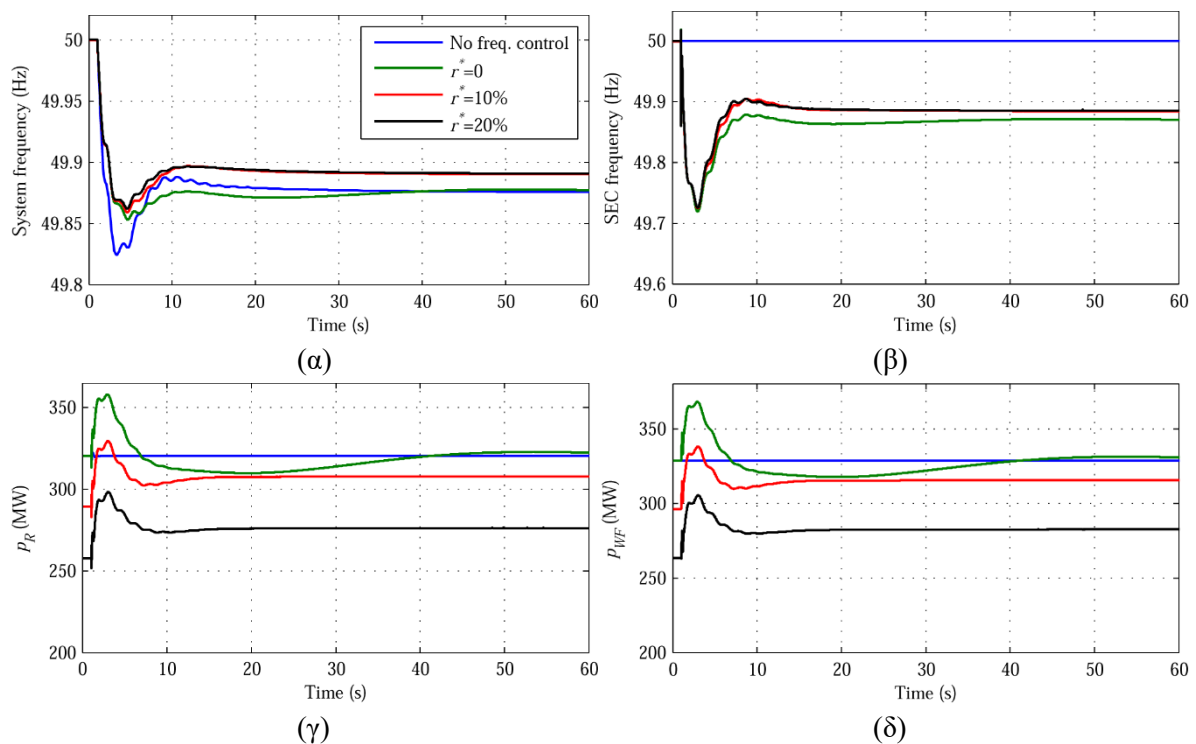


Σχήμα 5.20. Επίδραση ελέγχου αδρανειακής απόκρισης στο ηλεκτρικό και μηχανικό μέρος των υπεράκτιων Α/Γ. (α) Ενεργός ισχύς αναφοράς εξωτερικού ελεγκτή Α/Γ, (β) ηλεκτρική ισχύς γεννήτριας, (γ) γωνία βήματος πτερυγίων, (δ) ταχύτητα περιστροφής δρομέα Α/Γ.

Τέλος, στο Σχήμα 5.20 παρατίθενται τα αποτελέσματα της απόκρισης του ηλεκτρικού και μηχανικού μέρους των υπεράκτιων Α/Γ, από τα οποία διαπιστώνεται η πλήρης ταύτισή τους με αυτά του συμβατικού ελέγχου αδρανειακής απόκρισης, με τη μόνη διαφοροποίηση να έγκειται στην ενεργό ισχύ αναφοράς  $p_{ord}$ , η οποία παραμένει σταθερή στην περίπτωση εφαρμογής του προτεινόμενου ελεγκτή, καθώς η αδρανειακή απόκριση επιτυγχάνεται μέσω της σύζευξης λειτουργίας του ελεγκτή PSC με τον ρυθμιστή συχνότητας του μετατροπέα SEC.

### 5.5.4 Επίδραση επιπέδου εφεδρείας ισχύος

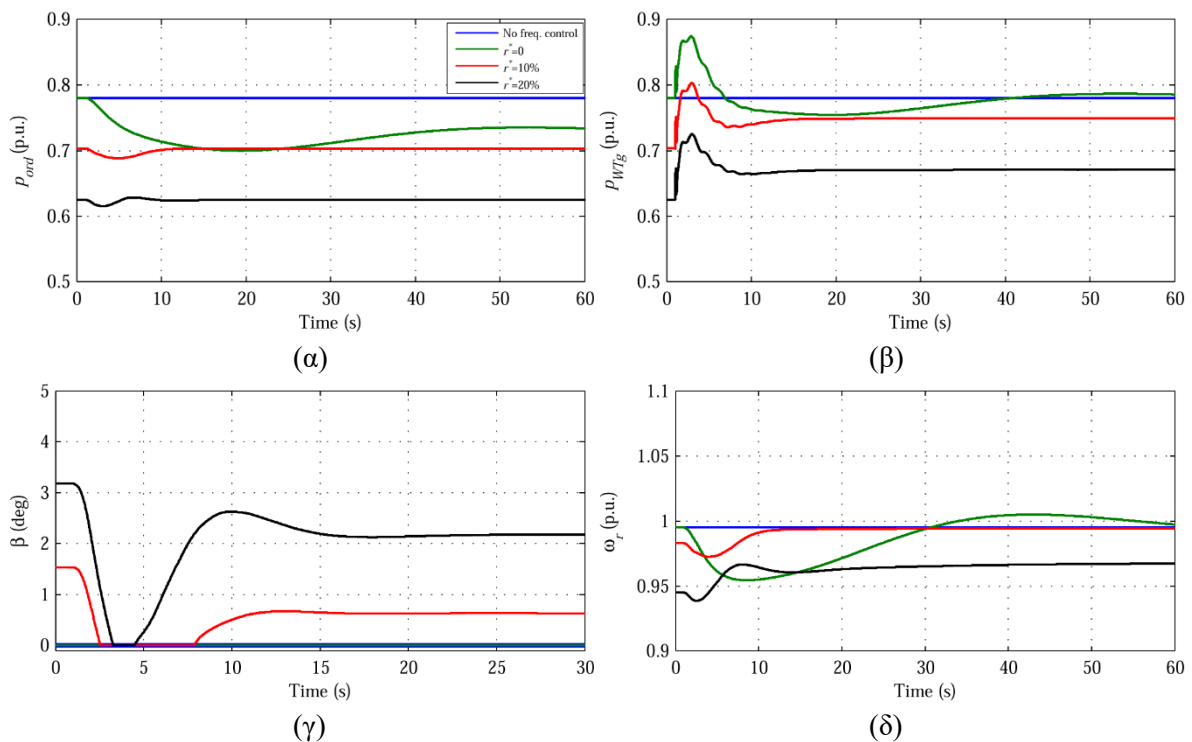
Στην παρούσα ενότητα εξετάζεται η επίπτωση του τηρούμενου επιπέδου εφεδρείας ισχύος των υπεράκτιων Α/Γ τόσο στην απόκριση συχνότητας όσο και στη λειτουργία του προτεινόμενου ελεγκτή PSC. Σε όλες τις περιπτώσεις εξέτασης εφαρμόζεται ο συνδυασμένος έλεγχος από τον ρυθμιστή συχνότητας του μετατροπέα SEC. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.21, μη μηδενικές τιμές εφεδρείας επιφέρουν εμφανή οφέλη στη μεταβατική απόκριση συχνότητας, αν και μεγαλύτερες τιμές εφεδρείας της τάξης του 20% δεν επιφέρουν πρόσθετη βελτίωση για το εξεταζόμενο μέγεθος διαταραχής.



Σχήμα 5.21. Επίδραση επιπέδου εφεδρείας ισχύος στην απόκριση συχνότητας. (α) Συχνότητα ηπειρωτικού συστήματος, (β) συχνότητα λειτουργίας υπεράκτιου δικτύου, (γ) ενεργός ισχύς εξόδου επίγειου μετατροπέα HVDC, (δ) ενεργός ισχύς εξόδου ΘΑΠ.

Στην περίπτωση λειτουργίας με μηδενική εφεδρεία ισχύος, η εφαρμογή του συνδυασμένου ελέγχου ρύθμισης συχνότητας οδηγεί στην απομάστευση ενεργού ισχύος από τις Α/Γ που μπορεί να υποστηριχθεί μόνο από την κινητική ενέργεια του δρομέα τους. Λόγω της εγγενούς ιδιότητας του ελεγκτή PSC ως προς την εμφάνιση μόνιμου σφάλματος ρύθμισης ισχύος

παρουσία διακυμάνσεων συχνότητας, παρατηρείται επιβράδυνση του δρομέα της Α/Γ μεγαλύτερου μεγέθους και διάρκειας (Σχήμα 5.22), γεγονός που προκαλεί την ανάγκη παρατεταμένης μείωσης της ενεργού ισχύος αναφοράς  $p_{ord}$  από τον ελεγκτή ροπής του εξωτερικού ελεγκτή της Α/Γ, προκειμένου να αποκατασταθεί η ταχύτητα περιστροφής της. Η εν λόγω λειτουργία καταλήγει σε μόνιμη εικονική μείωση της ισχύος αναφοράς  $p_{ord}$ , προκειμένου η ενεργός ισχύς που εγχέεται στο υπεράκτιο δίκτυο να επανέλθει στην τιμή προ διαταραχής, αντισταθμίζοντας έτσι το σφάλμα ρύθμισης ισχύος του ελεγκτή PSC. Παρόλα αυτά, ακόμα και σε αυτήν τη δυσμενή περίπτωση λειτουργίας (από πλευράς μεταβατικής συμπεριφοράς των υπεράκτιων Α/Γ), παρατηρείται σημαντική βελτίωση της μεταβατικής απόκρισης συχνότητας.



Σχήμα 5.22. Επίδραση επιπέδου εφεδρείας ισχύος στην απόκριση του ηλεκτρικού και μηχανικού μέρους των υπεράκτιων Α/Γ. (α) Ενεργός ισχύς αναφοράς εξωτερικού ελεγκτή Α/Γ, (β) ηλεκτρική ισχύς γεννήτριας, (γ) γωνία βήματος πτερυγίων, (δ) ταχύτητα περιστροφής δρομέα Α/Γ.



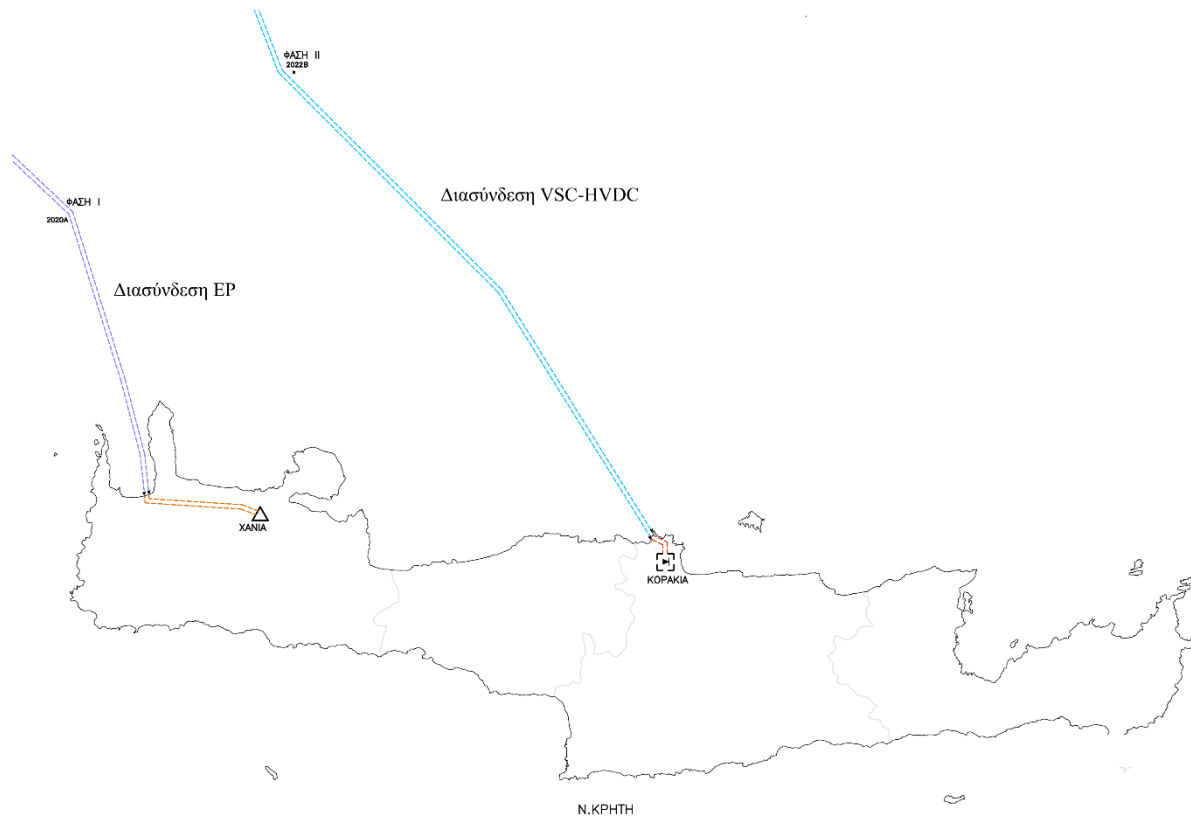
## 6 ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΥΓΧΡΟΝΙΣΜΟΥ ΙΣΧΥΟΣ ΣΕ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ MMC-HVDC ΝΗΣΙΩΤΙΚΩΝ ΣΗΕ ΜΕ ΣΥΝΥΠΑΡΞΗ ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΗΣ ΕΡ

### 6.1 Εισαγωγή

Όπως εξηγήθηκε και στις προηγούμενες παραγράφους, η φιλοσοφία ελέγχου ενός μετατροπέα MMC-HVDC για εφαρμογές διασύνδεσης ΘΑΠ βασίζεται στον έλεγχο του μέτρου τάσης και στην επιβολή της επιθυμητής συχνότητας λειτουργίας. Βασικό χαρακτηριστικό της εν λόγω στρατηγικής είναι η απουσία εξωτερικής εντολής ενεργού ισχύος στο σύστημα ελέγχου, καθώς η προαναφερθείσα ρύθμιση της τάσης του υπεράκτιου δικτύου επαρκεί για την απορρόφηση της στοχαστικής αιολικής ισχύος από τον μετατροπέα MMC. Συνεπώς, η τεχνική αυτή δεν είναι άμεσα εφαρμόσιμη σε πολυπλοκότερες εφαρμογές διασύνδεσης συστημάτων, όπως η περίπτωση διασύνδεσης νησιωτικών ΣΗΕ στις οποίες μπορεί να συνυπάρχουν και πρόσθετες πηγές ηλεκτροδότησης, όπως εξωτερική διασύνδεση ΕΡ ή και τοπική συμβατική παραγωγή. Σε αυτή την περίπτωση, ο σύνδεσμος MMC-HVDC δεν αποτελεί τη μόνη πηγή ηλεκτροδότησης, γεγονός που υποδηλώνει την ανάγκη σχεδίασης ενός ευέλικτου σχήματος ελέγχου που επιτρέπει αφενός τον συγχρονισμό του μετατροπέα με τη συχνότητα λειτουργίας του νησιωτικού ΣΗΕ, αφετέρου τη δυνατότητα ρύθμισης της ενεργού ισχύος εξόδου σε εξωτερική εντολή κατανομής.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα εφαρμογής διασύνδεσης νησιωτικού ΣΗΕ με τα ανωτέρω χαρακτηριστικά αποτελεί η προγραμματιζόμενη διασύνδεση του ηλεκτρικού συστήματος της Κρήτης με το ΕΣΜΗΕ, καθώς με βάση τα αναφερόμενα του πρόσφατου ΔΠΑ που υπέβαλε ο ΑΔΜΗΕ προς έγκριση στη ΡΑΕ [137], προγραμματίζεται πρωτίστως η θέση σε λειτουργία διασύνδεσης ΕΡ (Φάση I) και μετέπειτα η εγκατάσταση και δεύτερης διασύνδεσης, τεχνολογίας HVDC (Φάση II) (βλ. Σχήμα 6.1), ενώ επίσης βρίσκεται υπό διερεύνηση ο τρόπος διαχείρισης της τοπικής συμβατικής παραγωγής, η λειτουργία της οποίας θα αποσκοπεί στην ικανοποίηση όλων των κριτηρίων ασφαλούς λειτουργίας, τόσο σε κανονικές όσο και σε έκτακτες συνθήκες, όπως π.χ. σε ενδεχόμενο απώλειας ενός συνδέσμου HVDC ή ΕΡ.

Ένας βασικός προβληματισμός που προκύπτει αναφορικά με τον έλεγχο ενός μετατροπέα MMC-HVDC σε νησιωτικό ΣΗΕ με τα ανωτέρω χαρακτηριστικά, είναι η εξασφάλιση της ευσταθούς λειτουργίας του κατά τη μεταγωγή σε οποιαδήποτε πιθανή κατάσταση λειτουργίας, όπως π.χ. η μετάβαση σε λειτουργία παθητικού συστήματος κατόπιν απώλειας της διασύνδεσης ΕΡ. Ο συμβατικός έλεγχος με χρήση διάταξης κλειδώματος φάσης (βλ. Κεφ. 3) θα μπορούσε να επιφέρει τον απαιτούμενο συγχρονισμό με την εξωτερική διασύνδεση ΕΡ ή και τον τοπικό σταθμό παραγωγής, ωστόσο εγείρει προβληματισμούς ως προς την αναμενόμενη επίδοσή του σε ενδεχόμενη μετάβαση σε λειτουργία παθητικού συστήματος, καθώς σε αυτή την περίπτωση δεν υφίσταται πλέον εξωτερική πηγή ηλεκτροδότησης στο νησιωτικό ΣΗΕ για τον επιτυχή συγχρονισμό του μετατροπέα MMC.



Σχήμα 6.1. Προγραμματιζόμενες ηλεκτρικές διασυνδέσεις ΕΡ και HVDC του ηλεκτρικού συστήματος της Κρήτης, όπως περιλαμβάνονται στο σχέδιο ΔΠΑ του ΑΔΜΗΕ, περιόδου 2017-2026 [137].

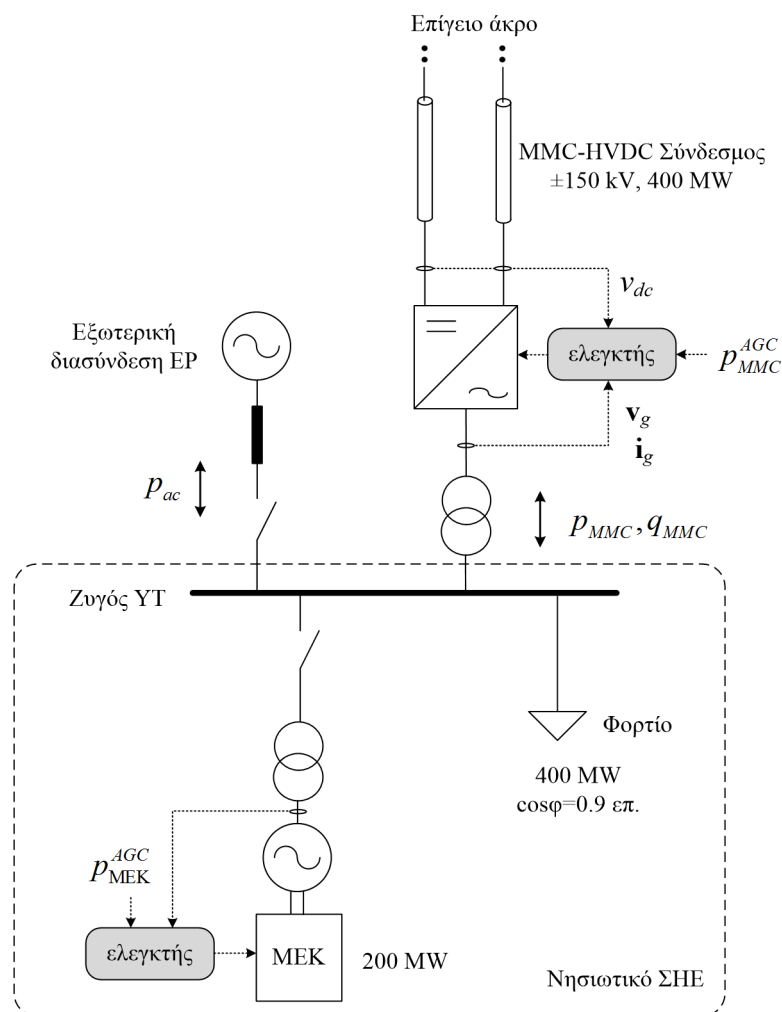
Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, στην παρούσα διατριβή διερευνάται η δυναμική συμπεριφορά ενός συνδέσμου MMC-HVDC κατά τη λειτουργία του σε νησιωτικό ΣΗΕ, όπου μπορεί να συνυπάρχουν πολλαπλές πηγές ηλεκτροδότησης, όπως π.χ. εξωτερική διασύνδεση ΕΡ σε συνδυασμό με τοπική συμβατική παραγωγή. Ειδικότερα, πραγματοποιείται συγκριτική αξιολόγηση της απόκρισης του νησιωτικού μετατροπέα MMC, με εφαρμογή του ελέγχου συγχρονισμού ισχύος, συγκριτικά με την επίδοση του συμβατικού σχήματος ελέγχου του Κεφ. 3, που βασίζεται στη χρήση διάταξης PLL. Η ανάλυση διενεργείται μέσω προσομοιώσεων στο πεδίο του χρόνου, στο λογισμικό Matlab/Simulink, χρησιμοποιώντας το μοντέλο μέσης τιμής για τον μετατροπέα MMC, που αναπτύχθηκε στο Κεφ. 2, η ακρίβεια του οποίου τεκμηριώθηκε επαρκώς στο Κεφ. 3, συγκριτικά με το πλήρες διακοπτικό μοντέλο προσομοίωσης.

## 6.2 Εξεταζόμενη τοπολογία και σχήματα ελέγχου

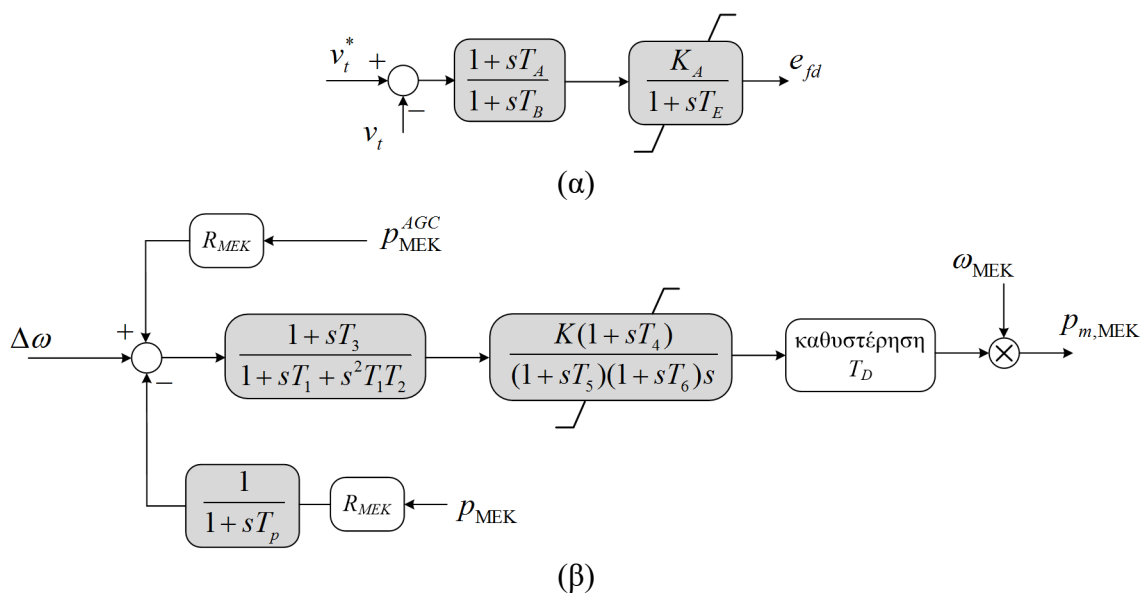
Η απλοποιημένη αναπαράσταση του νησιωτικού ΣΗΕ που επιλέχθηκε στην παρούσα διατριβή εικονίζεται στο Σχήμα 6.2. Για τον σύνδεσμο MMC-HVDC, χρησιμοποιείται το μοντέλο ακτινικής διασύνδεσης του Κεφ. 3, ενώ το νησιωτικό ΣΗΕ μοντελοποιείται ως σύστημα ενός ζυγού, στον οποίο συνδέεται το σύνολο της παραγωγής και του φορτίου. Για την εξέταση της ικανότητας συγχρονισμού του συνδέσμου VSC-HVDC σε όλες τις πιθανές καταστάσεις λειτουργίας, θεωρείται ότι υπάρχει και εξωτερική διασύνδεση ΕΡ, η οποία μοντελοποιείται με το ισοδύναμο Thevenin, χρησιμοποιώντας τυπικές τιμές στάθμης βραχυκύκλωσης σε επίπεδα τάσης των 150 kV (2000 MVA στην παρούσα ανάλυση).



Για λόγους ομαλής ρύθμισης του ΣΗΕ τόσο σε κανονική όσο και σε έκτακτες συνθήκες λειτουργίας, θεωρείται ότι υπάρχει τοπική συμβατική παραγωγή που αναπαρίσταται από μία ισοδύναμη μονάδα εσωτερικής καύσης (ΜΕΚ), η οποία διαθέτει κατάλληλο ρυθμιστή στροφών και αυτόματο ρυθμιστή τάσης (ΑΡΤ). Ο ΑΡΤ αναπαρίσταται από το απλοποιημένο διάγραμμα βαθμίδων που εικονίζεται στο Σχήμα 6.3(α), με τις τιμές παραμέτρων που δίνονται στον Πίνακα 6.1. Ο ρυθμιστής στροφών που μοντελοποιήθηκε είναι τύπου Woodward και εικονίζεται στο Σχήμα 6.3(β), ενώ οι τιμές παραμέτρων που επιλέχθηκαν δίνονται στον Πίνακα 6.2. Είσοδος του ρυθμιστή αποτελεί το σφάλμα στροφών της μονάδας, ενώ ο μόνιμος στατισμός υλοποιείται με ανάδραση της ηλεκτρικής ισχύος εξόδου της γεννήτριας. Επιπρόσθετα, ο ρυθμιστής λαμβάνει ως είσοδο εξωτερική εντολή κατανομής  $p_{MEK}^{AGC}$  από το αυτόματο σύστημα ρύθμισης της παραγωγής (AGC) για τις ανάγκες δευτερεύουσας και τριτεύουσας ρύθμισης του συστήματος. Τέλος, η ΜΕΚ μοντελοποιείται με βαθμίδα καθυστέρησης πρώτης τάξης, που αναπαριστά την καθυστέρηση στην απόκριση της μηχανικής ροπής, ενώ η σταθερά αδρανείας της επιλέχθηκε ίση με 2.45 s [138].



Σχήμα 6.2. Τοπολογία εξεταζόμενου νησιωτικού ΣΗΕ, με συνύπαρξη εξωτερικής διασύνδεσης ΕΡ, συνδέσμου MMC-HVDC, και τοπικής συμβατικής παραγωγής.



Σχήμα 6.3. Συστήματα ελέγχου μονάδας MEK, (α) απλοποιημένο διάγραμμα βαθμίδων APT και (β) ρυθμιστής στροφών Woodward [138].

Πίνακας 6.1. Τιμές παραμέτρων APT μονάδας MEK [139].

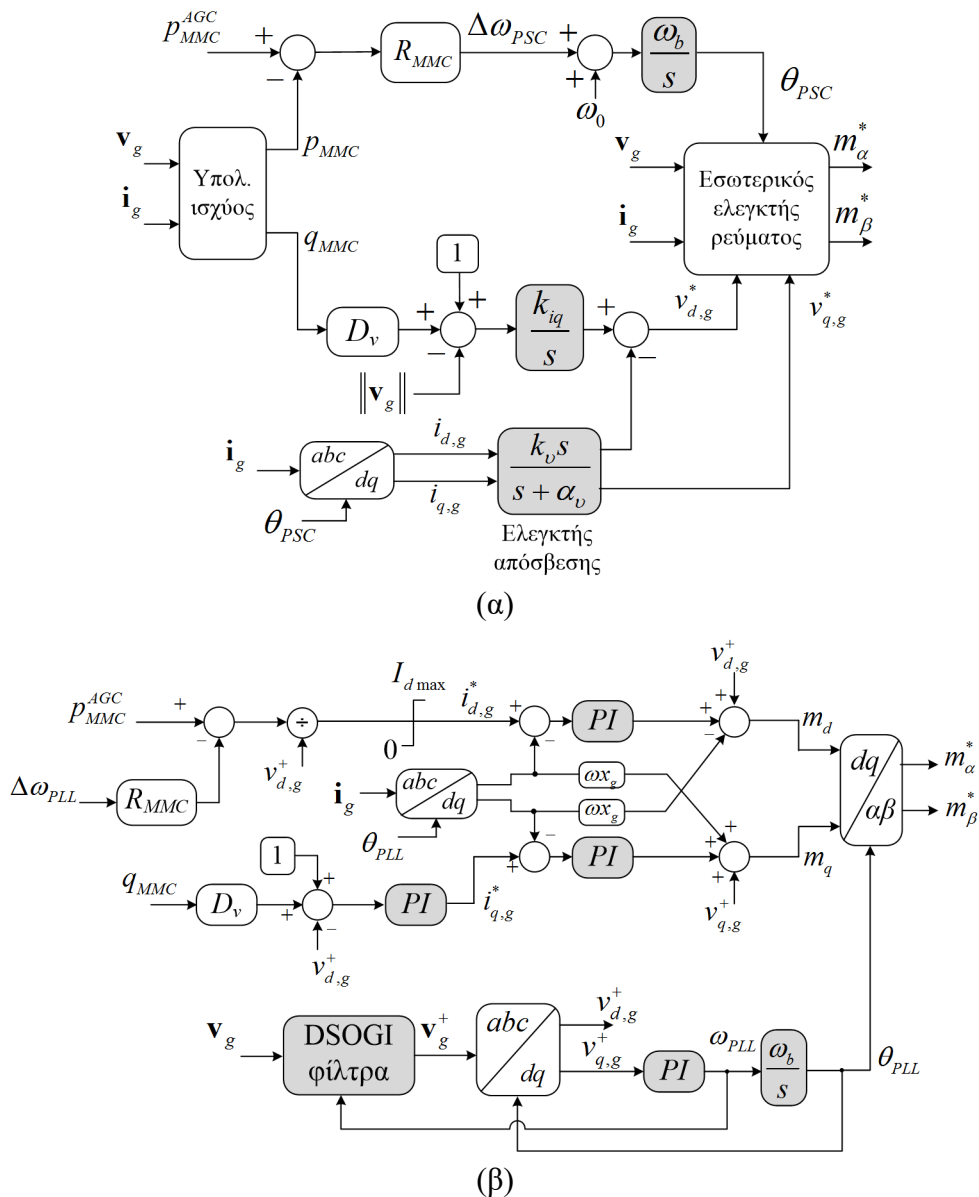
Παράμετρος	Τιμή
Αναλογικό κέρδος $K_A$	100
Χρονική σταθερά $T_A$	1.5 s
Χρονική σταθερά $T_B$	10 s
Χρονική σταθερά $T_E$	0.04 s

Πίνακας 6.2. Τιμές παραμέτρων ρυθμιστή στροφών μονάδας MEK [138].

Παράμετρος	Τιμή
Τιμή στατισμού $R_{MEK}$	5%
Χρονική σταθερά $T_p$	0.2 s
Χρονική σταθερά $T_3$	2 s
Χρονικές σταθερές $T_1, T_2$	0.01 s, 0
Κέρδος $K$	3 α.μ.
Χρονική σταθερά $T_4$	0.1 s
Χρονικές σταθερές $T_5, T_6$	0.1 s, 0.01 s
Χρονική καθυστέρηση $T_D$	0.043 s

Οι εναλλακτικές τεχνικές ελέγχου που επιλέχθηκαν προς αξιολόγηση για τον νησιωτικό μετατροπέα MMC εικονίζονται στο Σχήμα 6.4. Στην πρώτη περίπτωση, εφαρμόζεται ο έλεγχος συγχρονισμού ισχύος, ο οποίος αναλύθηκε λεπτομερώς στην Παράγραφο 5.2, με τη μόνη διαφοροποίηση να έγκειται στην προσθήκη ενός ελεγκτή ac τάσης με στατισμό  $D_v$  (0.1 α.μ. στην παρούσα ανάλυση), για τη συμμετοχή του μετατροπέα στη ρύθμιση τάσης του ΣΗΕ. Στη δεύτερη περίπτωση, εφαρμόζεται ο καθιερωμένος διανυσματικός έλεγχος ρεύματος που εικονίζεται στο Σχήμα 6.4(β), ο οποίος λειτουργεί με βάση την εκτιμώμενη φάση της τάσης του δικτύου που προσδιορίζεται από τη διάταξη κλειδώματος φάσης.

Και στις δύο περιπτώσεις ελέγχου, ο νησιωτικός μετατροπέας MMC ελέγχει την ισχύ του σε εξωτερική εντολή κατανομής  $P_{MMC}^{AGC}$  που προσδιορίζεται από το αυτόματο σύστημα ρύθμισης παραγωγής του νησιωτικού ΣΗΕ. Παράλληλα, διαθέτει και τη λειτουργία ελέγχου στατισμού, για τη συμμετοχή του στη ρύθμιση φορτίου-συχνότητας, ιδίως για την κατάσταση λειτουργίας όπου απουσιάζει η εξωτερική διασύνδεση ΕΡ. Στην περίπτωση εφαρμογής του συμβατικού σχήματος ελέγχου, η συγκεκριμένη λειτουργία επιτυγχάνεται με την αναδιαμόρφωση της ισχύος αναφοράς που δίνεται στο σύστημα ελέγχου του μετατροπέα (βλ. Σχήμα 6.4(β)), ενώ στην περίπτωση του ελέγχου PSC η επιθυμητή λειτουργία επιτυγχάνεται εγγενώς, όπως εξηγήθηκε και στην Παράγραφο 5.2. Η τιμή στατισμού  $R_{MMC}$  επιλέχθηκε ίση με 5%.

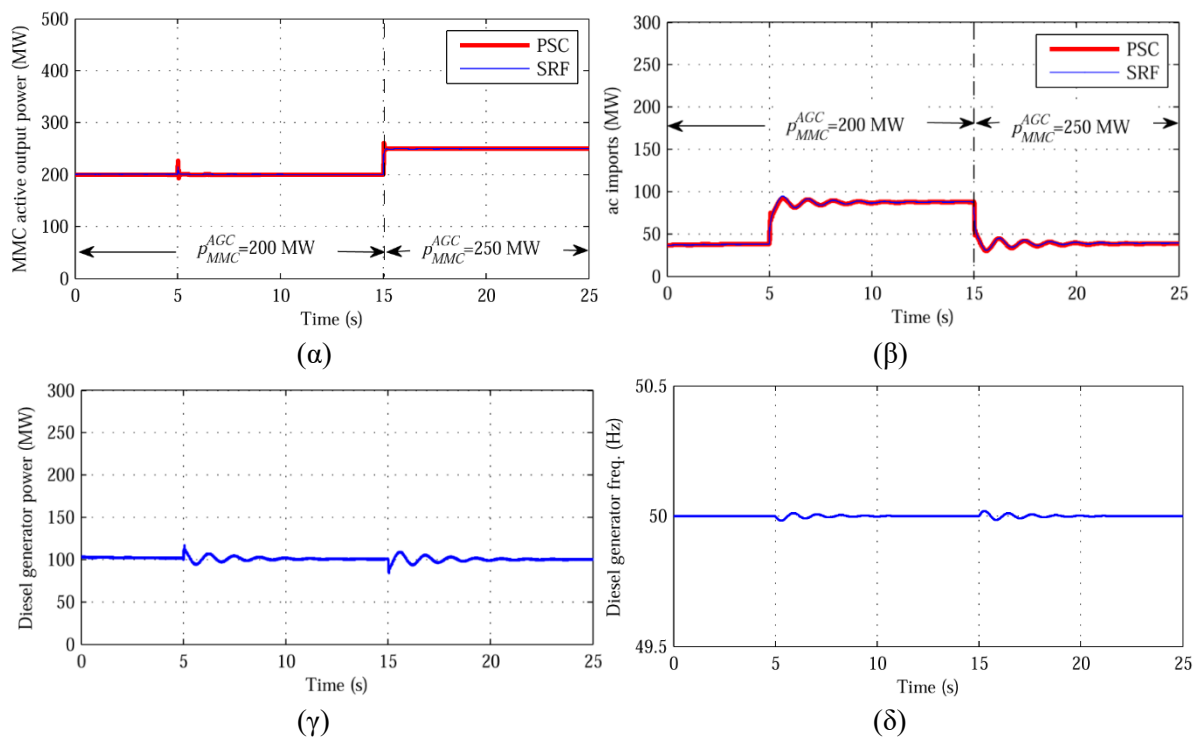


Σχήμα 6.4. Εναλλακτικές τεχνικές ελέγχου μετατροπέα MMC για εφαρμογές διασύνδεσης νησιωτικών ΣΗΕ, (α) έλεγχος συγχρονισμού ισχύος, (β) διανυσματικός έλεγχος ρεύματος στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς.

### 6.3 Απόκριση νησιωτικού ΣΗΕ σε μεταβολές φορτίου

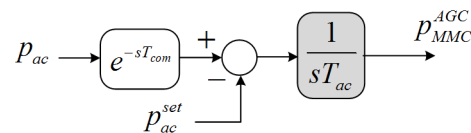
Στην ενότητα αυτή αξιολογείται η δυναμική συμπεριφορά του νησιωτικού ΣΗΕ σε μεταβολές φορτίου, θεωρώντας ότι όλες οι πηγές ηλεκτροδότησης που εικονίζονται στο Σχήμα 6.2 είναι συνδεδεμένες. Η αρχική ζήτηση είναι περίπου ίση με 350 MW, ενώ προσομοιώνεται βηματική αύξησή της κατά 50 MW. Οι αρχικές συνθήκες λειτουργίας αντιστοιχούν σε λειτουργία της μονάδας ΜΕΚ στο τεχνικό της ελάχιστο (50% στην παρούσα ανάλυση), ενώ η εντολή κατανομής του νησιωτικού μετατροπέα MMC έχει ρυθμιστεί στην τιμή των 200 MW, που αντιστοιχεί σε φόρτιση 50%. Το υπολειπόμενο φορτίο εξυπηρετείται με εισαγωγή ισχύος από την εξωτερική διασύνδεση ΕΡ.

Στο Σχήμα 6.5 παρουσιάζεται η απόκριση του διασυνδεδεμένου νησιωτικού συστήματος στην προαναφερθείσα βηματική αύξηση του φορτίου τη χρονική στιγμή 5 s. Λόγω της επιβαλλόμενης συχνότητας λειτουργίας στο νησιωτικό ΣΗΕ από την εξωτερική διασύνδεση ΕΡ, η οποία θεωρείται σταθερή στα 50 Hz, το πρόσθετο φορτίο εξυπηρετείται με φυσικό τρόπο από το εξωτερικό ac σύστημα, ενώ ο σύνδεσμος MMC-HVDC και η μονάδα ΜΕΚ διατηρούν την έγχυση ενεργού ισχύος στις εντολές κατανομής. Συμπερασματικά, η ανάληψη του πρόσθετου φορτίου από τον σύνδεσμο MMC-HVDC, παρουσία της εξωτερικής διασύνδεσης ΕΡ, μπορεί να επιτευχθεί μόνο με μεταβολή της εντολής κατανομής  $p_{MMC}^{AGC}$ , η οποία και προσομοιώνεται ετεροχρονισμένα τη χρονική στιγμή 15 s, αποκαθιστώντας την διακινούμενη ροή ισχύος επί της διασύνδεσης ΕΡ.

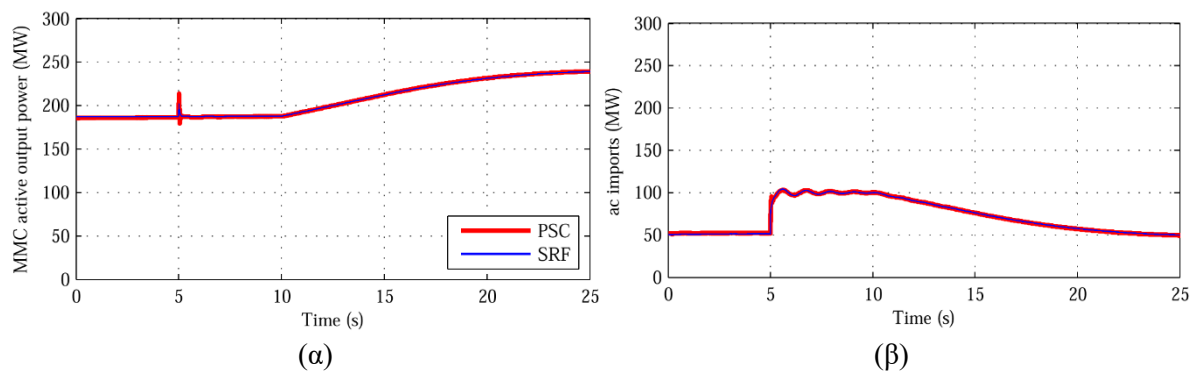


Σχήμα 6.5. Απόκριση νησιωτικού ΣΗΕ σε βηματική αύξηση του φορτίου, (α) ενεργός ισχύς εξόδου μετατροπέα MMC, (β) εισαγόμενη ισχύς από την εξωτερική διασύνδεση ΕΡ, (γ) ενεργός ισχύς γεννήτριας μονάδας ΜΕΚ, (δ) συχνότητα γεννήτριας ΜΕΚ.

Το προηγούμενο συμπέρασμα υποδηλώνει την ανάγκη ενσωμάτωσης της μέτρησης της διακινούμενης ενεργού ισχύος επί της διασύνδεσης ΕΡ,  $p_{ac}$ , στο αυτόματο σύστημα ρύθμισης παραγωγής του νησιωτικού ΣΗΕ, προκειμένου η φόρτιση του συνδέσμου MMC-HVDC να μεταβάλλεται και με πρόσθετο κριτήριο τη ρύθμιση της ισχύος  $p_{ac}$  στην επιθυμητή τιμή. Ένα παράδειγμα στοιχειώδους σχήματος ελέγχου με τα ανωτέρω χαρακτηριστικά εικονίζεται στο Σχήμα 6.6, το οποίο βασίζεται στην τηλεπικοινωνιακή αποστολή της διακινούμενης ισχύος επί της διασύνδεσης ΕΡ και στη χρήση ολοκληρωτικού ελεγκτή ισχύος για την αναπροσαρμογή της εντολής κατανομής  $p_{MMC}^{AGC}$  του νησιωτικού μετατροπέα MMC-HVDC. Στην ανάλυση που ακολουθεί, η χρονική καθυστέρηση  $T_{com}$  θεωρήθηκε ίση με 5 s, ενώ η χρονική σταθερά ελέγχου  $T_{ac}$  επιλέχθηκε ίση με 10 s. Στο Σχήμα 6.7 παρουσιάζεται η απόκριση του νησιωτικού μετατροπέα MMC-HVDC για τη βηματική αύξηση φορτίου του Σχήματος 6.5, θεωρώντας ότι επενεργεί ο απλοποιημένος ελεγκτής ισχύος του Σχήματος 6.6. Όπως διαπιστώνεται από το εν λόγω σχήμα, η ενεργός ισχύς του νησιωτικού μετατροπέα αυξάνεται με καθυστέρηση 5 s μετά την εμφάνιση της μεταβολής φορτίου, αναλαμβάνοντας το πρόσθετο νησιωτικό φορτίο, αποκαθιστώντας τη ροή ισχύος επί της διασύνδεσης ΕΡ στα 50 MW, εντός 20 s.



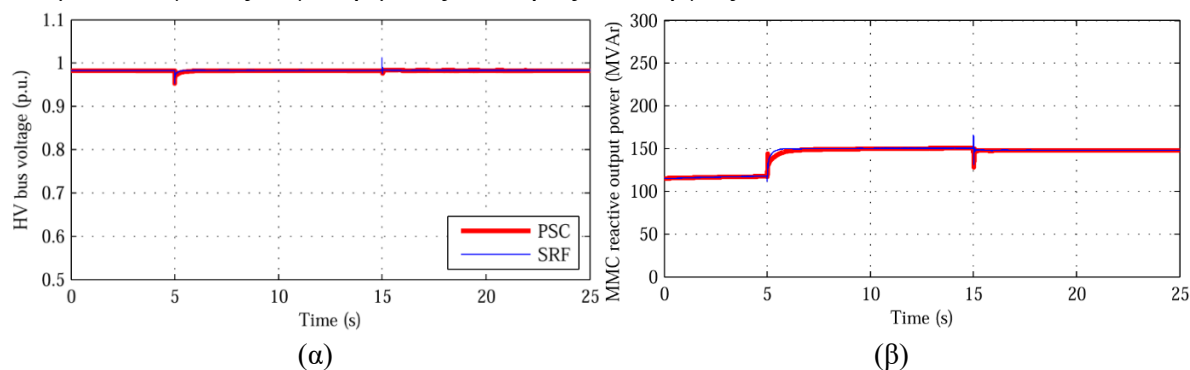
Σχήμα 6.6. Απλοποιημένος ολοκληρωτικός ελεγκτής ισχύος της διασύνδεσης ΕΡ με αναδιαμόρφωση της εντολής κατανομής  $p_{MMC}^{AGC}$  του νησιωτικού μετατροπέα MMC-HVDC.



Σχήμα 6.7. Απόκριση νησιωτικού μετατροπέα MMC-HVDC με ολοκληρωτικό έλεγχο ισχύος της διασύνδεσης ΕΡ, (α) ενεργός ισχύς εξόδου νησιωτικού μετατροπέα, (β) εισαγωγές ισχύος διασύνδεσης ΕΡ.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η απόκριση του νησιωτικού μετατροπέα MMC όσον αφορά στην διακινούμενη άεργο ισχύ κατά τη διάρκεια του μεταβατικού φαινομένου (βλ. Σχήμα 6.8). Τη στιγμή της βηματικής αύξησης φορτίου, παρατηρείται ισόποση αύξηση της αέργου ισχύος εξόδου  $q_{MMC}$ , η οποία οφείλεται στη λειτουργία ρύθμισης τάσης που επιτελεί παράλληλα ο σύνδεσμος MMC-HVDC, όπως παρουσιάστηκε στο Σχήμα 6.4, αποκαθιστώντας ταχύτατα τη βραχύχρονη βύθιση τάσης στον ζυγό ΥΤ, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6.8(β). Τέλος, η απόκριση του νησιωτικού μετατροπέα MMC είναι πρακτικά η

ίδια, ανεξαρτήτως της εφαρμοζόμενης τεχνικής ελέγχου (έλεγχος PSC ή SRF), όπως και αναμενόταν για τις συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας.



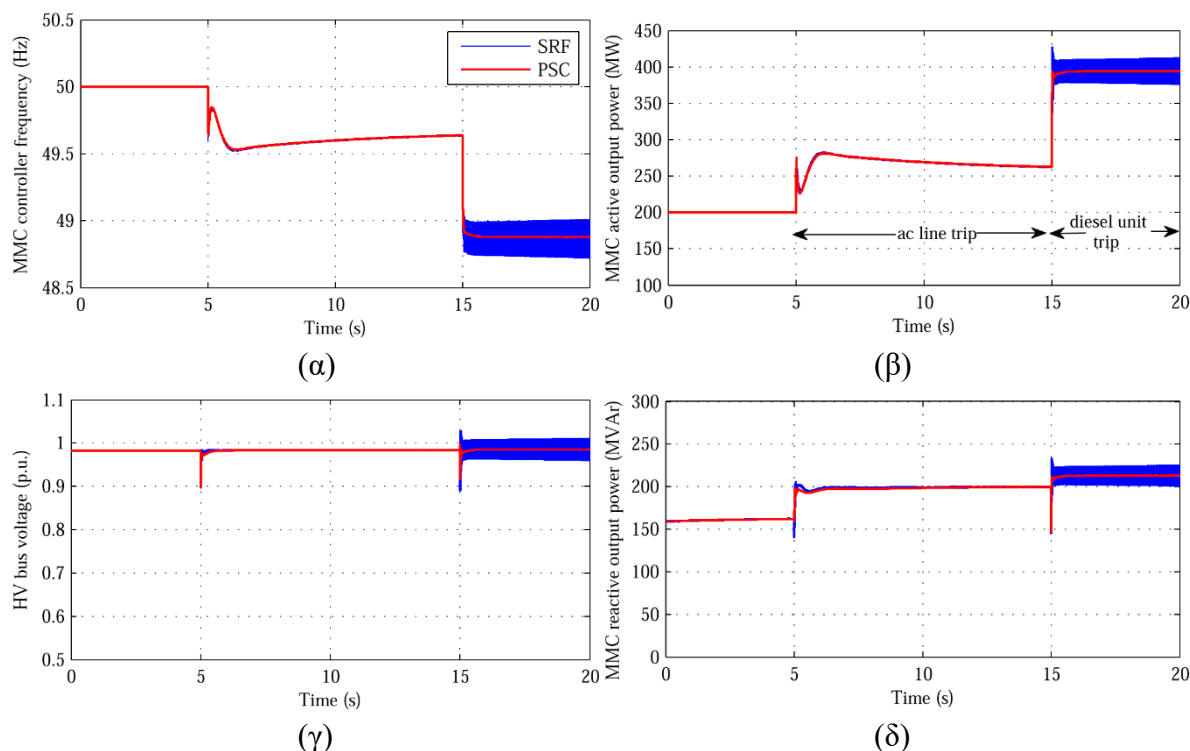
Σχήμα 6.8. Απόκριση νησιωτικού ΣΗΕ σε βηματική αύξηση του φορτίου, (α) μέτρο τάσης του ζυγού ΥΤ, (β) άεργος ισχύς εξόδου νησιωτικού μετατροπέα MMC.

#### 6.4 Απόκριση νησιωτικού ΣΗΕ σε απώλεια παραγωγής

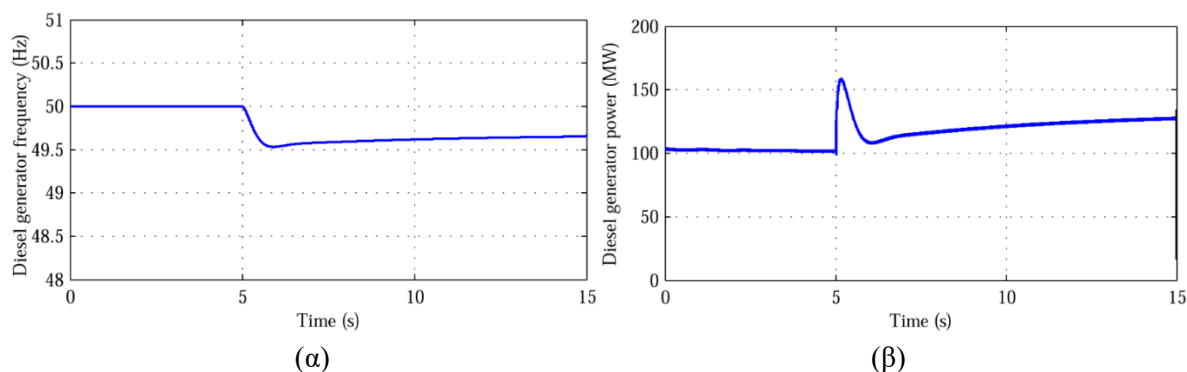
Στόχος της ενότητας αυτής είναι η διερεύνηση της ικανότητας συγχρονισμού του συνδέσμου MMC-HVDC κατά την εμφάνιση σοβαρών διαταραχών στο νησιωτικό ΣΗΕ σε συνθήκες μέγιστης ζήτησης φορτίου, που αφορούν είτε στη ξαφνική αποσύνδεση της εξωτερικής διασύνδεσης ΕΡ, είτε στη ξαφνική αποσύνδεση της τοπικής παραγωγής, που οδηγεί σε λειτουργία παθητικού συστήματος. Πιο αναλυτικά, προσομοιώνεται ένα ακραίο σενάριο λειτουργίας που αφορά στη διαδοχική αποσύνδεση (α) της εξωτερικής διασύνδεσης ΕΡ και στη συνέχεια (β) του τοπικού σταθμού παραγωγής, με βασικό στόχο την αξιολόγηση της μεταβατικής συμπεριφοράς του συνδέσμου MMC-HVDC και τον εντοπισμό ενδεχόμενων περιορισμών των εξεταζόμενων σχημάτων ελέγχου.

Στο Σχήμα 6.9 προσομοιώνεται αρχικά η απόκριση του ΣΗΕ σε ξαφνική απώλεια της εξωτερικής διασύνδεσης ΕΡ τη χρονική στιγμή 5 s. Η εν λόγω διαταραχή οδηγεί στην εμφάνιση ελλείμματος παραγωγής και στην επιβράδυνση της μονάδας ΜΕΚ, με αποτέλεσμα την ενεργοποίηση του ρυθμιστή στροφών της (βλ. Σχήμα 6.10). Η απόκριση αυτή οδηγεί σε γρήγορη αναδιαμόρφωση της συχνότητας λειτουργίας του νησιωτικού μετατροπέα MMC, ανεξαρτήτως της εφαρμοζόμενης τεχνικής ελέγχου, με αποτέλεσμα να επιτευχθεί η επιθυμητή λειτουργία απόκρισης υπο-συχνότητας, αναλαμβάνοντας το υπολειπόμενο φορτίο του νησιού.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η απόκριση του νησιωτικού ΣΗΕ κατά τη μεταγωγή σε λειτουργία παθητικού συστήματος, η οποία προσομοιώνεται με ξαφνική αποσύνδεση και της απομένουσας τοπικής παραγωγής τη χρονική στιγμή 15 s, δηλ. 10 δευτερόλεπτα μετά την απώλεια της εξωτερικής διασύνδεσης ΕΡ. Πλέον, ο συμβατικός έλεγχος ρεύματος εμφανίζει ασταθή απόκριση (πυκνές ταλαντώσεις στο Σχήμα 6.9), λόγω της ασταθούς λειτουργίας του συστήματος συγχρονισμού με το δίκτυο, η οποία οφείλεται στην απώλεια εξωτερικής πηγής τάσης στο νησιωτικό ΣΗΕ. Το συμπέρασμα αυτό αναδεικνύει την ανάγκη μεταγωγής ελέγχου σε περίπτωση λειτουργίας παθητικού συστήματος, καθώς ο μετατροπέας θα πρέπει πλέον να αναλάβει τη διαμόρφωση της συχνότητας λειτουργίας του ΣΗΕ.



Σχήμα 6.9. Απόκριση νησιωτικού μετατροπέα MMC σε διαδοχική απώλεια της εξωτερικής διασύνδεσης ΕΡ και της τοπικής παραγωγής, (α) συχνότητα λειτουργίας μετατροπέα, (β) ενεργός ισχύς εξόδου, (γ) μέτρο τάσης στον ζυγό ΥΤ, (δ) άεργος ισχύς εξόδου.



Σχήμα 6.10. Απόκριση μονάδας ΜΕΚ σε ξαφνική απώλεια της εξωτερικής διασύνδεσης ΕΡ, (α) ταχύτητα περιστροφής, (β) ενεργός ισχύς γεννήτριας ΜΕΚ.

Από την άλλη πλευρά, η απόκριση με τον έλεγχο συγχρονισμού ισχύος κρίνεται ικανοποιητική ακόμα και κατά τη μετάβαση σε λειτουργία παθητικού συστήματος, καθώς η συχνότητα και το μέτρο της τάσης στον ζυγό ΥΤ παρουσιάζουν ευσταθή απόκριση. Αξίζει να σημειωθεί πως η ενεργός ισχύς του μετατροπέα προσαρμόζεται στη ζήτηση φορτίου, με αποτελέσματα η συχνότητα λειτουργίας να διαμορφώνεται στην τιμή που επιβάλλει ο αναλογικός βρόχος ελέγχου που φαίνεται στο Σχήμα 6.4(α). Η συχνότητα λειτουργίας του παθητικού συστήματος μπορεί πλέον να επανέλθει στην ονομαστική τιμή με αλλαγή της εντολής κατανομής  $p_{MMC}^{AGC}$  που αποστέλλεται στο σύστημα ελέγχου του νησιωτικού μετατροπέα MMC.

## 6.5 Βελτίωση απόκρισης νησιωτικού μετατροπέα MMC-HVDC με εικονική αδράνεια

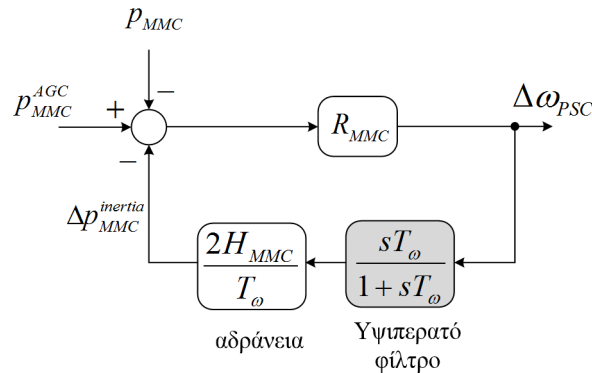
Ένα βασικό συμπέρασμα που προκύπτει από την προηγούμενη παράγραφο είναι ότι απουσία της εξωτερικής διασύνδεσης ΕΡ, η συχνότητα λειτουργίας του νησιωτικού ΣΗΕ καθορίζεται από τη δυναμική του συστήματος ελέγχου του νησιωτικού μετατροπέα MMC-HVDC σε συνδυασμό με τη δυναμική του ρυθμιστή στροφών των συμβατικών γεννητριών του νησιού. Μάλιστα, όπως διαπιστώθηκε και από την προηγούμενη ανάλυση, παρατηρείται έντονη μεταβατική μεταβολή της συχνότητας λειτουργίας του νησιωτικού ΣΗΕ κατόπιν απώλειας της διασύνδεσης ΕΡ ή και της τοπικής συμβατικής παραγωγής, γεγονός που υποδηλώνει υψηλό ρυθμό μεταβολής της συχνότητας λειτουργίας (Rate Of Change Of Frequency – ROCOF), εγείροντας προβληματισμούς ως προς την αναμενόμενη απόκριση τόσο των συμβατικών γεννητριών όσο και των σταθμών ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ, που ως επί το πλείστον συνυπάρχουν σε ένα νησιωτικό ΣΗΕ και διαθέτουν ειδικά συστήματα προστασίας συχνότητας.

Με αφορμή τα παραπάνω, στην παρούσα διατριβή προτείνεται η προσθήκη ενός αδρανειακού ελεγκτή στον βρόχο συγχρονισμού ισχύος που παρουσιάστηκε στο Σχήμα 6.4(α), με στόχο τον περιορισμό του ρυθμού μεταβολής της συχνότητας λειτουργίας του νησιωτικού μετατροπέα MMC-HVDC κατόπιν εμφάνισης σοβαρών διαταραχών, επιτυγχάνοντας ομαλότερη ρύθμιση της συχνότητας λειτουργίας του νησιωτικού ΣΗΕ σε οποιαδήποτε διαταραχή εμφανιστεί. Η προτεινόμενη διαμόρφωση του αδρανειακού ελεγκτή παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.11, στην οποία χρησιμοποιείται ανάδραση των μεταβολών της συχνότητας λειτουργίας  $\Delta\omega_{PSC}$  του βρόχου συγχρονισμού ισχύος, και παρεμβάλλεται ένα υπεραπλοποιημένο φίλτρο για την εκτίμηση του ρυθμού μεταβολής της συχνότητας λειτουργίας, το οποίο παράλληλα καταστέλλει έως έναν βαθμό υψίσυχνες αρμονικές που ενδεχομένως συνυπάρχουν στο σήμα ελέγχου  $\Delta\omega_{PSC}$ . Στην παρούσα ανάλυση, η τιμή της χρονικής σταθεράς  $T_\omega$  επιλέχθηκε ίση με 0.02 s. Η σχεδίαση του αδρανειακού ελεγκτή ολοκληρώνεται με την υπέρθεση του σήματος ισχύος  $\Delta p_{MMC}^{inertia}$  στον βρόχο συγχρονισμού ισχύος, το οποίο υπολογίζεται με βάση την παράμετρο ελέγχου  $H_{MMC}$ , που αναπαριστά και την ισοδύναμη σταθερά αδρανείας που εμφανίζει ο νησιωτικός μετατροπέας.

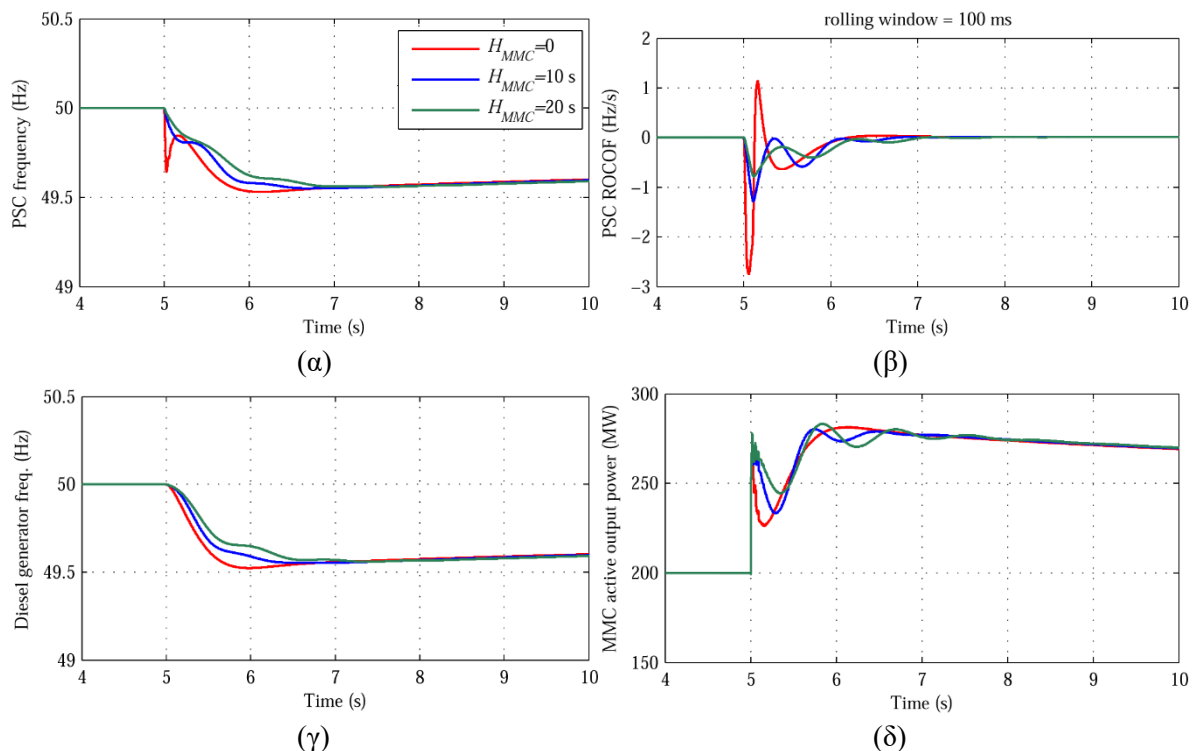
Για την αξιολόγηση της επίδοσης του προτεινόμενου αδρανειακού ελεγκτή στη συχνότητα λειτουργίας του νησιωτικού ΣΗΕ, πραγματοποιούνται πρόσθετες προσομοιώσεις με βάση το σενάριο λειτουργίας της Παραγράφου 6.4, που αφορά στην απώλεια της εξωτερικής διασύνδεσης ΕΡ τη χρονική στιγμή 5 s και έπειτα στην απώλεια και της μονάδας ΜΕΚ τη χρονική στιγμή 15 s, για την προσομοίωση της μετάβασης σε λειτουργία παθητικού συστήματος. Αναλυτικότερα, στο Σχήμα 6.12 παρουσιάζεται μεμονωμένα το στιγμιότυπο λειτουργίας που αφορά στην απώλεια της εξωτερικής διασύνδεσης ΕΡ, για δύο διαφορετικές τιμές της ισοδύναμης σταθεράς αδρανείας  $H_{MMC}$ . Όπως διαπιστώνεται και από το εν λόγω σχήμα, χωρίς τον αδρανειακό ελεγκτή παρατηρούνται γρήγορες μεταβολές της συχνότητας λειτουργίας του νησιωτικού μετατροπέα MMC τις πρώτες στιγμές μετά τη διαταραχή,



προκαλώντας βραχύχρονες αλλά υψηλές τιμές του δείκτη ROCOF (άνω του 1 Hz/s), οι οποίες υπολογίστηκαν με βάση κυλιόμενο παράθυρο μέτρησης (rolling window) εύρους 100 ms. Από την άλλη πλευρά, η προσθήκη του προτεινόμενου αδρανειακού ελεγκτή οδηγεί σε δραστική καταστολή του γρήγορων μεταβολών συχνότητας του ελεγκτή PSC, εγγέροντας με ταχύτερο ρυθμό πρόσθετη ενεργό ισχύ στο νησιωτικό ΣΗΕ, επιτυγχάνοντας παράλληλα βραδύτερες μεταβολές στην ταχύτητα περιστροφής της μονάδας MEK.

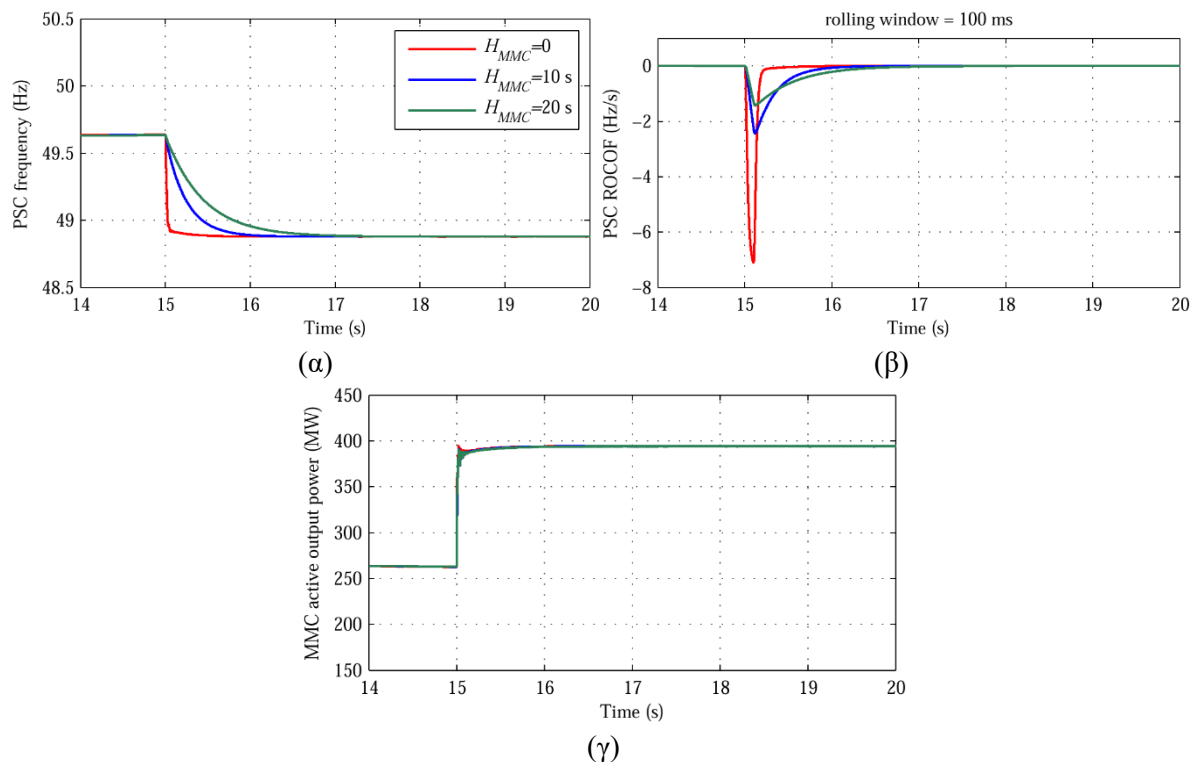


Σχήμα 6.11. Προτεινόμενη προσθήκη αδρανειακού ελεγκτή στον βρόχο συγχρονισμού ισχύος του Σχ. 6.4(α).



Σχήμα 6.12. Απόκριση νησιωτικού ΣΗΕ κατά το στιγμιότυπο απώλειας της εξωτερικής διασύνδεσης ΕΡ, (α) συχνότητα λειτουργίας νησιωτικού μετατροπέα MMC, (β) μετρούμενος ρυθμός μεταβολής της συχνότητας λειτουργίας του νησιωτικού μετατροπέα MMC, (γ) συχνότητα λειτουργίας γεννήτριας μονάδας MEK, (δ) ενεργός ισχύς εξόδου νησιωτικού μετατροπέα MMC.

Η συνεισφορά του αδρανειακού ελεγκτή είναι ακόμα μεγαλύτερη κατά το στιγμιότυπο λειτουργίας που εικονίζεται στο Σχήμα 6.13, όπου το νησιωτικό ΣΗΕ μεταβαίνει σε λειτουργία παθητικού συστήματος, λόγω αποσύνδεσης και της μονάδας ΜΕΚ. Αυξημένες τιμές της σταθεράς  $H_{MMC}$  αποτρέπουν την εμφάνιση απότομων μεταβολών της συχνότητας λειτουργίας, ενώ δεν επηρεάζεται η εγχεόμενη ενεργός ισχύς εξόδου του μετατροπέα, η οποία πρακτικά ρυθμίζεται από το φορτίο του νησιού. Έτσι, κατά τη λειτουργία παθητικού συστήματος, ο αδρανειακός ελεγκτής δρα μόνο στον εσωτερικό βρόχο συγχρονισμού ισχύος, επενεργώντας στον ρυθμό μεταβολής της συχνότητας που επιβάλλει ο ελεγκτής PSC στο νησιωτικό ΣΗΕ.



Σχήμα 6.13. Απόκριση νησιωτικού μετατροπέα MMC κατά το στιγμιότυπο απόλειας της μονάδας ΜΕΚ, (α) συχνότητα λειτουργίας νησιωτικού μετατροπέα MMC, (β) μετρούμενος ρυθμός μεταβολής της συχνότητας λειτουργίας του ηπειρωτικού μετατροπέα MMC, (γ) ενεργός ισχύς εξόδου του νησιωτικού μετατροπέα MMC.

## 7 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ ΣΕ ΠΟΛΥ-ΤΕΡΜΑΤΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ VSC-HVDC

### 7.1 Εισαγωγή

Στις προηγούμενες παραγράφους της παρούσας διατριβής, η ανάλυση επικεντρώθηκε στην εξέταση ακτινικών σχημάτων διασύνδεσης VSC-HVDC ΘΑΠ ή ασύγχρονων ac δικτύων, όπου η επιδιωκόμενη σύζευξη της λειτουργίας των δύο μετατροπέων HVDC επιτυγχάνεται μέσω ρύθμισης της dc τάσης λειτουργίας στο ένα άκρο της διασύνδεσης στην ονομαστική της τιμή σε συνεχή βάση. Ωστόσο, οι προοπτικές που προσφέρει η σημερινή τεχνολογία VSC-HVDC ως προς την ανάπτυξη μελλοντικών πολυτερματικών dc δικτύων ευρείας κλίμακας (Multi-Terminal DC – MTDC), καθιστούν αναγκαία την εξέταση εναλλακτικών τεχνικών ρύθμισης των ροών ισχύος σε MTDC δίκτυα, καθώς διαφαίνεται η ανάγκη ελεγχόμενης ανάληψης φορτίου από περισσότερους επίγειους μετατροπείς HVDC που συνυπάρχουν στο ίδιο dc δίκτυο, σε αναλογία με τη ρύθμιση φορτίου – συχνότητας που πραγματοποιείται στα ac συστήματα.

Τα βασικά σημεία διαφοροποίησης ως προς τη φιλοσοφία ελέγχου της ενεργού ισχύος μεταξύ ac και dc δικτύων είναι τα εξής:

- Στα ac συστήματα, η διακίνηση ενεργού ισχύος μεταξύ δύο άκρων οδηγεί σε μετατόπιση φάσης των εναλλασσόμενων τάσεων στα δύο άκρα της σύνδεσης, ενώ σε dc δίκτυα η διακίνηση ενεργού ισχύος οδηγεί σε διαφοροποίηση του επιπέδου της συνεχούς τάσης λειτουργίας μεταξύ των δύο άκρων.
- Στα ac συστήματα, η προσαρμογή της παραγόμενης ενεργού ισχύος στις διακυμάνσεις της απορροφούμενης ενεργού ισχύος επιτυγχάνεται με επιτήρηση της συχνότητας λειτουργίας του ac συστήματος, η δυναμική της οποίας συναρτάται με την ισοδύναμη σταθερά αδρανείας των στρεφόμενων μηχανών. Από την άλλη πλευρά, τυχόν ανισορροπία μεταξύ εισερχόμενης και εξερχόμενης ισχύος σε ένα MTDC δίκτυο οδηγεί σε ταχεία διακύμανση της dc τάσης λειτουργίας, η δυναμική της οποίας συναρτάται με την ισοδύναμη χωρητικότητα του dc κυκλώματος και κυρίως με την ισοδύναμη χωρητικότητα των μετατροπέων VSC-HVDC, όπως εξηγήθηκε αναλυτικά και στο Κεφ. 4.

Στόχος του παρόντος κεφαλαίου είναι η παρουσίαση και συγκριτική αξιολόγηση εναλλακτικών τεχνικών ρύθμισης ροών ισχύος που έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία για MTDC δίκτυα, καθώς και η ανάπτυξη μιας νέας στρατηγικής ελέγχου που βασίζεται στην εφαρμογή κανόνων βελτιστοποίησης. Τέλος, η ανάλυση ολοκληρώνεται με τη διερεύνηση της δυνατότητας συμβολής ενός MTDC δικτύου στη ρύθμιση συχνότητας του ηπειρωτικού συστήματος, μέσω αξιοποίησης των διαθέσιμων δυνατοτήτων ελέγχου συχνότητας των διασυνδεδεμένων ΘΑΠ, όπως αξιολογήθηκαν αναλυτικά και στο Κεφ. 4 για την περίπτωση ακτινικής διασύνδεσης.

## 7.2 Τεχνικές ελέγχου ρύθμισης ισχύος – τάσης σε MTDC δίκτυα

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, ο προσφορότερος τρόπος ρύθμισης των ροών ισχύος έγκειται στην επιτήρηση της dc τάσης λειτουργίας και αναπροσαρμογή της ενεργού ισχύος των διασυνδεδεμένων μετατροπέων HVDC. Στο Σχήμα 7.1 παρουσιάζεται η γενική δομή ενός MTDC δικτύου, όπου η σύμβαση για θετικό ρεύμα αντιστοιχεί σε έγχυση ισχύος στο MTDC δίκτυο. Συνεπώς, όταν το dc ρεύμα είναι θετικό (αρνητικό), ο μετατροπέας λειτουργεί ως ανορθωτής (αντιστροφέας). Ο υπολογισμός των dc ρευμάτων συναρτηθεί των τάσεων σε κάθε κόμβο μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας τη μήτρα αγωγιμοτήτων  $\mathbf{G}$  του MTDC δικτύου ως εξής:

$$\begin{bmatrix} i_{dc,1} \\ i_{dc,2} \\ \cdot \\ \cdot \\ i_{dc,n+m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & -G_{12} & \cdot & \cdot & -G_{1(n+m)} \\ -G_{12} & G_{22} & & & \\ \cdot & & \cdot & & \\ \cdot & & & \cdot & \\ -G_{1(n+m)} & & & & G_{(n+m)(n+m)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{dc,1} \\ v_{dc,2} \\ \cdot \\ \cdot \\ v_{dc,n+m} \end{bmatrix} \quad (7.1)$$

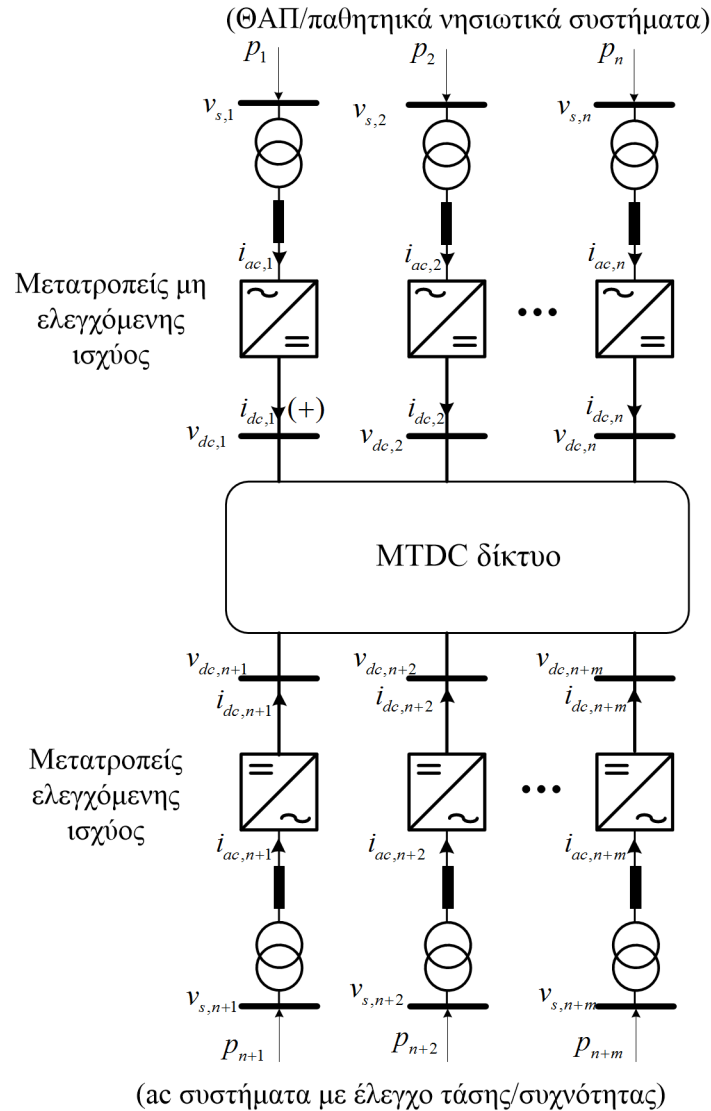
Όπου

$$G_{ii} = \sum_{j=1, \neq i}^{n+m} G_{ij} \quad i \in [1, n+m] \quad (7.2)$$

Από την Εξ. (7.1) επιβεβαιώνεται ότι η ρύθμιση του διανύσματος τάσεων  $v_{dc}$  και άρα των ροών ισχύος μπορεί να επιτευχθεί μέσω κατάλληλης στρατηγικής που θα επιφέρει την επιθυμητή αναπροσαρμογή του διανύσματος dc ρευμάτων  $i_{dc}$  που εγγεί κάθε μετατροπέας στο MTDC δίκτυο. Ωστόσο, είναι προφανές ότι δεν μπορούν όλοι οι μετατροπείς να συνδράμουν σε αυτή τη λειτουργία, όπως για παράδειγμα οι υπεράκτιοι μετατροπείς ΘΑΠ, καθώς η ενεργός ισχύς που διακινούν διαμορφώνεται στοχαστικά από την παραγόμενη ισχύ του ΘΑΠ, οπότε το dc ρεύμα που εγγέουν είναι μη ελεγχόμενο. Για τον λόγο αυτό, κρίνεται αναγκαία η κατηγοριοποίηση των μετατροπέων HVDC που συνδέονται σε ένα MTDC δίκτυο, ανάλογα με τη δυνατότητά τους να συμμετέχουν στη ρύθμιση ισχύος – dc τάσης ως εξής [106]:

- **Μετατροπείς μη ελεγχόμενης ισχύος.** Οι συγκεκριμένοι μετατροπείς συνδέονται σε ΘΑΠ ή παθητικά νησιωτικά συστήματα και συνεπώς η ενεργός ισχύς που εγγέουν ή απορροφούν από το MTDC δίκτυο εξαρτάται αποκλειστικά από τη στοχαστικότητα της παραγωγής ΑΠΕ ή και της ζήτησης φορτίου στην περίπτωση διασύνδεσης νησιωτικών συστημάτων. Συνεπώς, οι υπόψη μετατροπείς δε δύναται να συμμετέχουν στη ρύθμιση ισχύος – τάσης του MTDC δικτύου, καθώς το dc ρεύμα που εγγέουν είναι μη ελεγχόμενο και προκύπτει από την επίλυση ροής φορτίου μέσω της Εξ. (7.1).
- **Μετατροπείς ελεγχόμενης ισχύος.** Οι εν λόγω μετατροπείς συνδέονται σε μεγαλύτερα ac συστήματα όπου προϋπάρχει έλεγχος τάσης/συχνότητας, όπως για παράδειγμα σε ισχυρά ηπειρωτικά ac συστήματα ή ενδεχομένως και σε νησιωτικά συστήματα όπου

συνυπάρχει τοπική παραγωγική, συνεπώς η λειτουργία των μετατροπέων είναι ευέλικτη υπό την έννοια ότι προσφέρουν τη δυνατότητα ρύθμισης της ενεργού ισχύος εξόδου τους σε εξωτερική εντολή κατανομής που επιβάλλεται από τον διαχειριστή του συστήματος. Συνεπώς, παρέχουν τη δυνατότητα ρύθμισης ισχύος – τάσης του MTDC δικτύου, καθώς το dc ρεύμα τους μπορεί να ελεγχθεί και να αναδιαμορφωθεί συναρτήσει των συνθηκών λειτουργίας του MTDC δικτύου.



Σχήμα 7.1. Γενική τοπολογία ενός MTDC δικτύου.

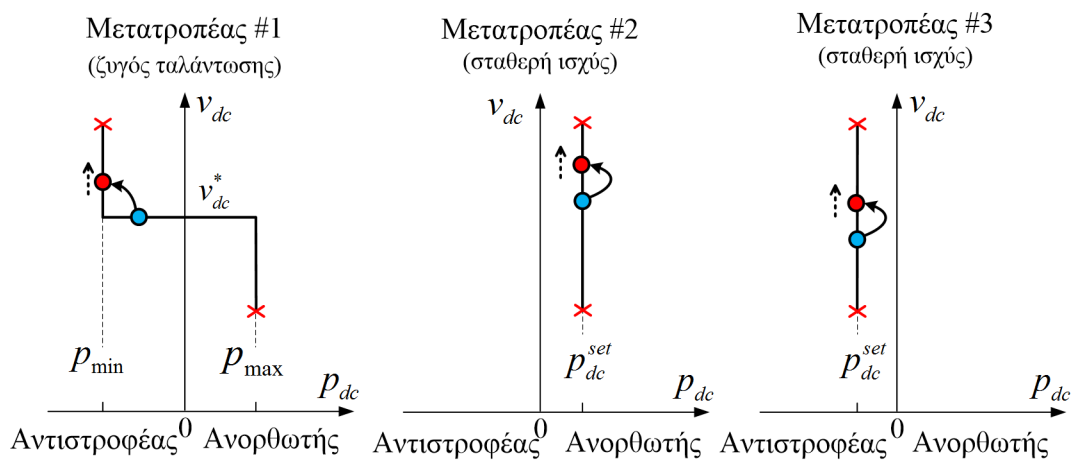
Στις παρακάτω παραγράφους παρουσιάζονται συνοπτικά οι κυριότερες τεχνικές ρύθμισης ισχύος – τάσης που έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία, παρουσιάζοντας τον τρόπο υλοποίησής τους, καθώς και τα πλεονεκτήματα/μειονεκτήματά τους.

### 7.2.1 Έλεγχος λειτουργίας κύριου-ακόλουθου (master – slave)

Η λειτουργία κύριου-ακόλουθου αποτελεί γενίκευση του τρόπου ελέγχου μιας ακτινικής διασύνδεσης VSC-HVDC και αποτελεί τον απλούστερο τρόπο ρύθμισης ενός MTDC δικτύου. Ένας μετατροπέας ελεγχόμενης ισχύος αναλαμβάνει τον ρόλο λειτουργίας ζυγού ταλάντωσης, ρυθμίζοντας την dc τάση λειτουργίας σε μία τιμή αναφοράς σε συνεχή βάση,

αναλαμβάνοντας εξολοκλήρου τις διακυμάνσεις ισχύος που εμφανίζονται στο MTDC δίκτυο, και αποδίδοντάς τες στο ac σύστημα. Στους υπόλοιπους μετατροπείς ελεγχόμενης ισχύος εφαρμόζεται έλεγχος σταθερής ισχύος στις τιμές αναφοράς που ορίζονται από τον διαχειριστή του συστήματος. Αν και η συγκεκριμένη τεχνική ελέγχου είναι απλή στην υλοποίησή της, εμφανίζει το σοβαρό μειονέκτημα της μειωμένης αξιοπιστίας λειτουργίας, καθώς ο ρόλος ρύθμισης τάσης αναλαμβάνεται αποκλειστικά από έναν μετατροπέα HVDC, απώλεια ή υπερφόρτιση του οποίου θα προκαλούσε μόνιμη ανισορροπία στο ισοζύγιο ισχύος και σε μόνιμη άνοδο ή κατάρρευση της dc τάσης λειτουργίας.

Στο Σχήμα 7.2 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα μη ευσταθούς λειτουργίας ενός υποθετικού MTDC δικτύου που περιλαμβάνει τρεις μετατροπείς ελεγχόμενης ισχύος, σε ενδεχόμενο μεταβατικής αύξησης της εισερχόμενης ισχύος στο MTDC δίκτυο (π.χ. αύξηση παραγωγής διασυνδεδεμένων ΘΑΠ). Σε περίπτωση όπου η φόρτιση του κύριου μετατροπέα είναι κοντά στην ικανότητά του, τότε περαιτέρω ανάληψη φορτίου από αυτόν ενδεχομένως οδηγούσε σε οριακή φόρτισή του, με αποτέλεσμα να δράσει το εσωτερικό σύστημα ελέγχου με στόχο τον περιορισμό της φόρτισής του στη μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή. Αποτέλεσμα της λειτουργίας αυτής είναι η ενδεχόμενη δημιουργία πλεονάσματος παραγωγής στο MTDC δίκτυο, που θα οδηγούσε σε μόνιμη αύξηση της dc τάσης λειτουργίας, με αποτέλεσμα την ασταθή λειτουργία του.



Σχήμα 7.2. Χαρακτηριστικές ελέγχου ισχύος-τάσης με λειτουργία κύριου-ακόλουθου, και παράδειγμα μη ευσταθούς λειτουργίας σε περίπτωση οριακής φόρτισης του κύριου μετατροπέα κατόπιν ανάληψης πρόσθετου φορτίου.

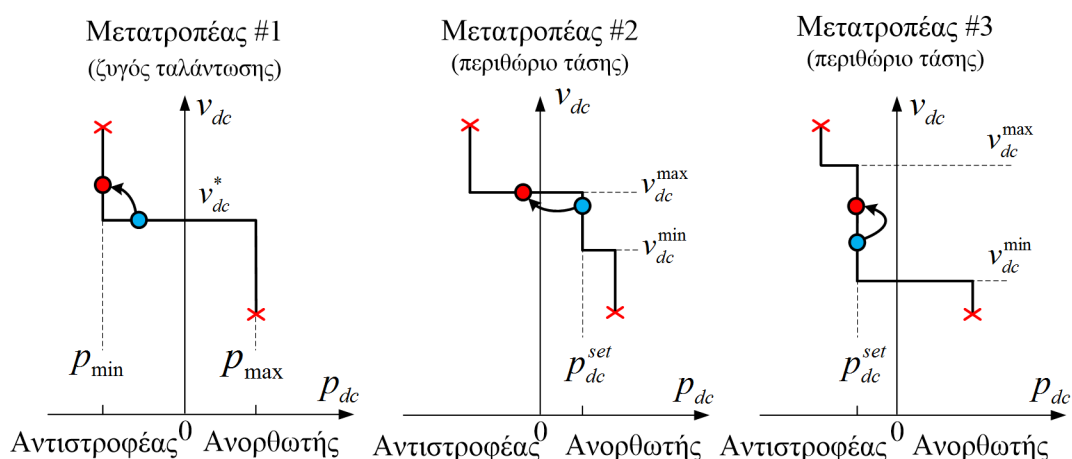
### 7.2.2 Έλεγχος περιθωρίου τάσης (voltage margin)

Η μέθοδος αυτή αποτελεί μια ελαστικότερη προσέγγιση της προαναφερθείσας λειτουργίας κύριου-ακόλουθου, ώστε να εξασφαλιστεί η ευσταθής λειτουργία και σε έκτακτες συνθήκες λειτουργίας. Η λειτουργία ζυγού ταλάντωσης ενσωματώνεται και στους υπόλοιπους μετατροπείς και ενεργοποιείται σε έκτακτες συνθήκες λειτουργίας, όπως π.χ. κατά την εμφάνιση διευρυμένων διακυμάνσεων της dc τάσης λειτουργίας.

Για να γίνει πιο κατανοητή η υπόψη λειτουργία, στο Σχήμα 7.3 παρουσιάζεται η αντίστοιχη περίπτωση εξέτασης που αναλύθηκε στο Σχήμα 7.2, εφαρμόζοντας στους μετατροπείς #2 και #3 έλεγχο περιθωρίου τάσης. Εάν η φόρτιση του μετατροπέα #1 είναι πλησίον της ικανότητάς του και παρουσιαστεί μεταβατική αύξηση της εισαγόμενης ενεργού ισχύος στο MTDC δίκτυο, τότε ο μετατροπέας #1 ενδεχομένως μεταβεί σε έλεγχο μέγιστης επιτρεπόμενης φόρτισης, ενώ η μεταβατική αύξηση της dc τάσης θα οδηγήσει σε μεταγωγή άλλου μετατροπέα (π.χ. μετατροπέα #2 που εικονίζεται στο Σχήμα 7.3) από λειτουργία σταθερής ισχύος σε λειτουργία ζυγού ταλάντωσης, αναλαμβάνοντας το υπολειπόμενο πλεόνασμα εισαγόμενης ισχύος στο MTDC δίκτυο, εξασφαλίζοντας έτσι την ευσταθή λειτουργία του.

Αν και η ανωτέρω φιλοσοφία ρύθμισης βελτιώνει δραστικά την αξιοπιστία λειτουργίας σε σχέση με τον έλεγχο κύριου-ακόλουθου, παραμένουν τα ακόλουθα μειονεκτήματα:

- Μόνο ένας μετατροπέας λειτουργεί με έλεγχο τάσης σε κάθε χρονική στιγμή, αναλαμβάνοντας εξολοκλήρου την απαιτούμενη ανάληψη φορτίου.
- Η μεταγωγή μεταξύ των λειτουργιών ελέγχου στον μετατροπέα ελεγχόμενης ισχύος μπορεί να προκαλέσει απότομες διακυμάνσεις στη μεταβατική συμπεριφορά του MTDC δικτύου.
- Απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή κατά τον σχεδιασμό των χαρακτηριστικών ελέγχου ισχύος – τάσης, ιδίως ως προς την επιλογή των κατωφλίων τάσης  $v_{dc}^{max}, v_{dc}^{min}$  για τη μεταγωγή των λειτουργιών ελέγχου, καθώς θα πρέπει να αποφευχθεί το ενδεχόμενο ταυτόχρονης μεταγωγής μετατροπέων HVDC σε λειτουργία ζυγού ταλάντωσης, γεγονός που θα δημιουργούσε ενδεχόμενη αρνητική επίπτωση στη δυναμική συμπεριφορά του MTDC δικτύου.

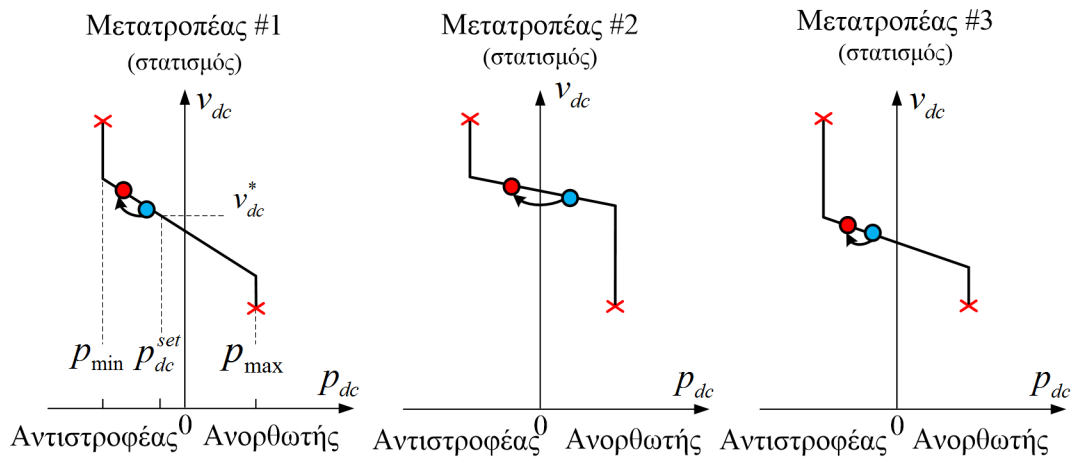


Σχήμα 7.3. Χαρακτηριστικές ελέγχου ισχύος – τάσης με λειτουργία περιθωρίου τάσης και παράδειγμα ευσταθούς λειτουργίας με μετάβαση από έλεγχο σταθερής ισχύος σε λειτουργία ζυγού ταλάντωσης.

### 7.2.3 Έλεγχος στατισμού τάσης (voltage droop)

Σε αναλογία με τη ρύθμιση φορτίου – συχνότητας ac συστημάτων μέσω χαρακτηριστικών ελέγχου ισχύος – συχνότητας, είναι εύλογη η εφαρμογή αντίστοιχων χαρακτηριστικών ελέγχου ισχύος – τάσης στους μετατροπείς ελεγχόμενης ισχύος. Σε συνέχεια του προηγούμενου παραδείγματος εξέτασης, εάν η dc τάση λειτουργίας αυξάνεται, αποτελεί ένδειξη πλεονάσματος εισερχόμενης ισχύος στο MTDC δίκτυο, συνεπώς οι μετατροπείς ελεγχόμενης ισχύος θα πρέπει να αυξήσουν την ενεργό ισχύ που εγχέουν στα ac συστήματα, ανάλογα με την τιμή του στατισμού των χαρακτηριστικών ελέγχου τους. Έτσι, ανάλογα με την ικανότητα των μετατροπέων και τη δυνατότητα διακίνησης ενεργού ισχύος στο ηπειρωτικό ΣΗΕ που συνδέονται, μπορεί να γίνει προσαρμογή των τιμών στατισμού προκειμένου να επιτυγχάνεται η επιθυμητή ανάληψη φορτίου μεταξύ των μετατροπέων ελεγχόμενης ισχύος.

Το σαφές πλεονέκτημα του ελέγχου στατισμού είναι η φιλοσοφία κατανεμημένου ελέγχου τάσης που εισάγει, γεγονός που εξασφαλίζει την ευσταθή και ομαλή λειτουργία του MTDC δικτύου σε κανονικές και έκτακτες συνθήκες, χωρίς την ανάγκη μεταγωγής λειτουργιών ελέγχου. Ωστόσο, λόγω της διαφοροποίησης των επιπέδων της dc τάσης λειτουργίας σε κάθε κόμβο του δικτύου, απαιτείται κατάλληλη επιλογή των τάσεων αναφοράς σε κάθε μετατροπέα ελεγχόμενης ισχύος, προκειμένου να επιτευχθεί και η απαιτούμενη ακρίβεια στη ρύθμιση των ροών ισχύος παρουσία εντολών κατανομής  $p_{dc}^{set}$ .



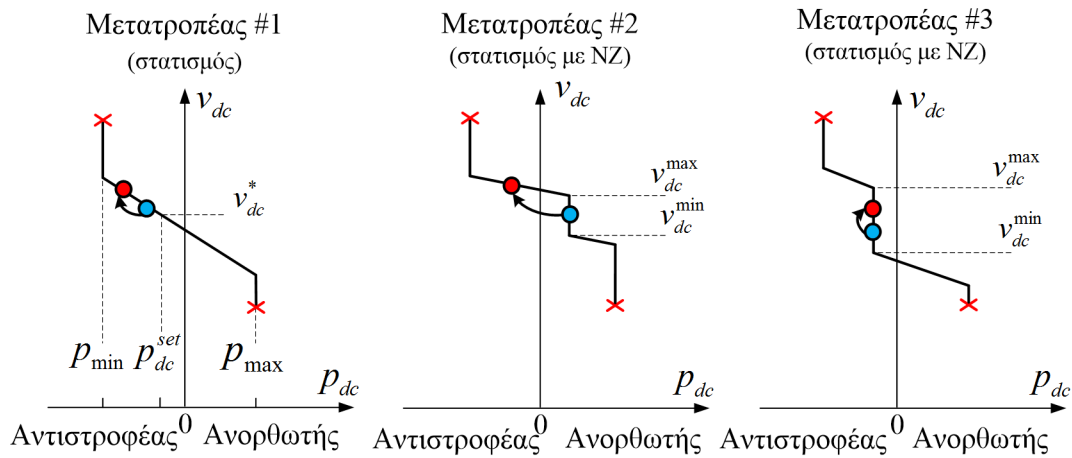
Σχήμα 7.4. Χαρακτηριστικές ελέγχου ισχύος – τάσης με λειτουργία στατισμού τάσης και παράδειγμα ευσταθούς λειτουργίας χωρίς την ανάγκη μεταγωγής λειτουργιών ελέγχου.

### 7.2.4 Έλεγχος στατισμού με νεκρή ζώνη (voltage droop with dead-band)

Τέλος, μια παραλλαγή των ανωτέρω τεχνικών ελέγχου είναι ο συνδυασμός του ελέγχου στατισμού με τον έλεγχο περιθωρίου τάσης, γεγονός που απαλλάσσει από την ανάγκη λειτουργίας ζυγού ταλάντωσης και παράλληλα επιτρέπει ακριβέστερο έλεγχο της ενεργού ισχύος όταν η dc τάση λειτουργίας λαμβάνει τιμές εντός της νεκρής ζώνης (NZ) που ορίζεται από τις τιμές κατωφλίων τάσης  $v_{dc}^{max}$ ,  $v_{dc}^{min}$ . Στο παράδειγμα που φαίνεται στο Σχήμα 7.5, η



αύξηση της εισερχόμενης ισχύος στο MTDC δίκτυο οδηγεί σε μετάβαση του μετατροπέα #2 από λειτουργία σταθερής ισχύος σε λειτουργία στατισμού, επαναρυθμίζοντας τα επίπεδα της dc τάσης από κοινού με τον μετατροπέα #1, ενώ η ισχύς του μετατροπέα #3 παραμένει η ίδια.



Σχήμα 7.5. Χαρακτηριστικές ελέγχου ισχύος – τάσης με λειτουργία στατισμού τάσης με νεκρή ζώνη, και παράδειγμα ευσταθούς λειτουργίας με μεταγωγή λειτουργιών ελέγχου.

### 7.2.5 Ενσωμάτωση χαρακτηριστικών ισχύος –τάσης στο σύστημα ελέγχου του μετατροπέα HVDC

Ο τρόπος ενσωμάτωσης των ανωτέρω χαρακτηριστικών ελέγχου ισχύος – τάσης στο σύστημα ελέγχου του μετατροπέα έχει αποτελέσει αντικείμενο πλήθους ερευνητικών εργασιών, που βασίζονται είτε στο σύστημα ελέγχου της dc τάσης είτε στο σύστημα ελέγχου της ενεργού ισχύος [82]-[90]. Λαμβάνοντας υπόψη το σχήμα ελέγχου που παρουσιάστηκε στο Κεφ. 2, στην παρούσα διατριβή επιλέχθηκε η υλοποίηση του σχήματος ελέγχου που εικονίζεται στο Σχήμα 7.6, η οποία ενσωματώνεται στο σύστημα ελέγχου του PI ελεγκτή της dc τάσης, ο οποίος υπάρχει κατά κανόνα σε εφαρμογές διασύνδεσης HVDC.

Ειδικότερα, η φιλοσοφία ελέγχου έγκειται στην αναπροσαρμογή της τάσης αναφοράς συναρτήσει της μετρούμενης ισχύος σύμφωνα με την ακόλουθη γενικευμένη σχέση:

$$\Delta v_{dc}^* = \rho_{dc} \left( 1 + \frac{1}{s\tau_p} \right) (v_{dc} i_{dc} - p^{set}) \quad (7.3)$$

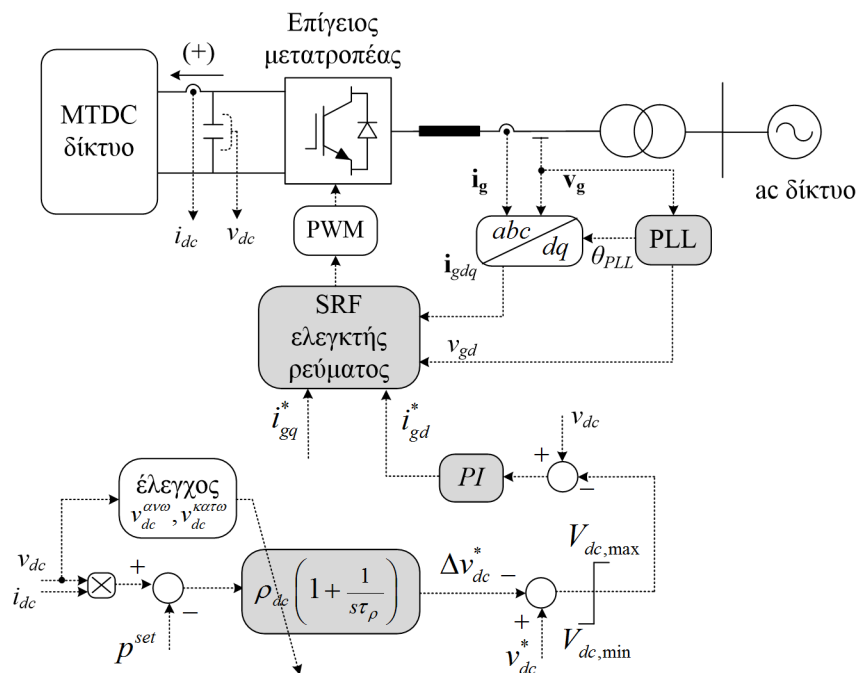
Όπου η ισοδύναμη χρονική σταθερά  $\tau_p$  εισάγεται μόνο στην περίπτωση όπου επιδιώκεται λειτουργία σταθερής ισχύος, αν και θα μπορούσε εναλλακτικά να επιτευχθεί με επαρκώς υψηλή τιμή του κέρδους  $\rho_{dc}$ . Στην περίπτωση όπου εφαρμόζεται έλεγχος στατισμού (αμελείται ο ολοκληρωτικός όρος), τότε λαμβάνοντας υπόψη τη λειτουργία του PI ελεγκτή της dc τάσης, η τιμή μόνιμης κατάστασης της τάσης αναμένεται να ρυθμιστεί στην τιμή:

$$v_{dc} = v_{dc}^* - \Delta v_{dc}^* = v_{dc}^* - \rho_{dc} (v_{dc} i_{dc} - p^{set}) \quad (7.4)$$

Ύστερα από πράξεις, η τελική τιμή της τάσης  $v_{dc}$  μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$v_{dc} = \frac{v_{dc}^* + \rho_{dc} P^{set}}{1 + \rho_{dc} i_{dc}} \quad (7.5)$$

Σύμφωνα με την ανωτέρω εξίσωση, πολύ μικρές τιμές του κέρδους στατισμού οδηγούν σε λειτουργία ζυγού ταλάντωσης, ενώ υψηλές τιμές οδηγούν σε λειτουργία σταθερής ισχύος. Συνεπώς η επιθυμητή χαρακτηριστική λειτουργίας μπορεί να επιτευχθεί πρακτικά με κατάλληλη ρύθμιση του κέρδους στατισμού  $\rho_{dc}$ , ανάλογα με την περιοχή της dc τάσης λειτουργίας. Τέλος, ένα άλλο χρήσιμο συμπέρασμα έγκειται στον τρόπο ρύθμισης της dc τάσης συναρτήσει της επιθυμητής ροής ενεργού ισχύος. Εάν η επιθυμητή λειτουργία είναι η εξαγωγή ισχύος από το MTDC δίκτυο προς το ac σύστημα ( $i_{dc} < 0$ ), απουσία εντολής  $p^{set}$ , τότε ο νόμος ελέγχου της Εξ. (7.5) επιβάλλει τη ρύθμιση της τάσης σε τιμές μεγαλύτερες της τιμής αναφοράς. Η συγκεκριμένη λειτουργία συνάδει και με τη φυσική δυναμική του MTDC δικτύου, καθώς αύξηση της εισερχόμενης ισχύος σε αυτό οδηγεί σε φόρτιση των πυκνωτών του dc κυκλώματος, γεγονός που υποδηλώνει την ανάγκη αντίστοιχης αύξησης της ισχύος που εξάγεται από το MTDC δίκτυο.



Σχήμα 7.6. Ενσωμάτωση χαρακτηριστικών ελέγχου ισχύος-τάσης MTDC δικτύου στο σύστημα ελέγχου dc τάσης του μετατροπέα HVDC.

## 7.3 Ανάλυση μόνιμης κατάστασης τεχνικών ελέγχου ισχύος – τάσης σε δοκιμαστικό MTDC δίκτυο διασύνδεσης νησιών

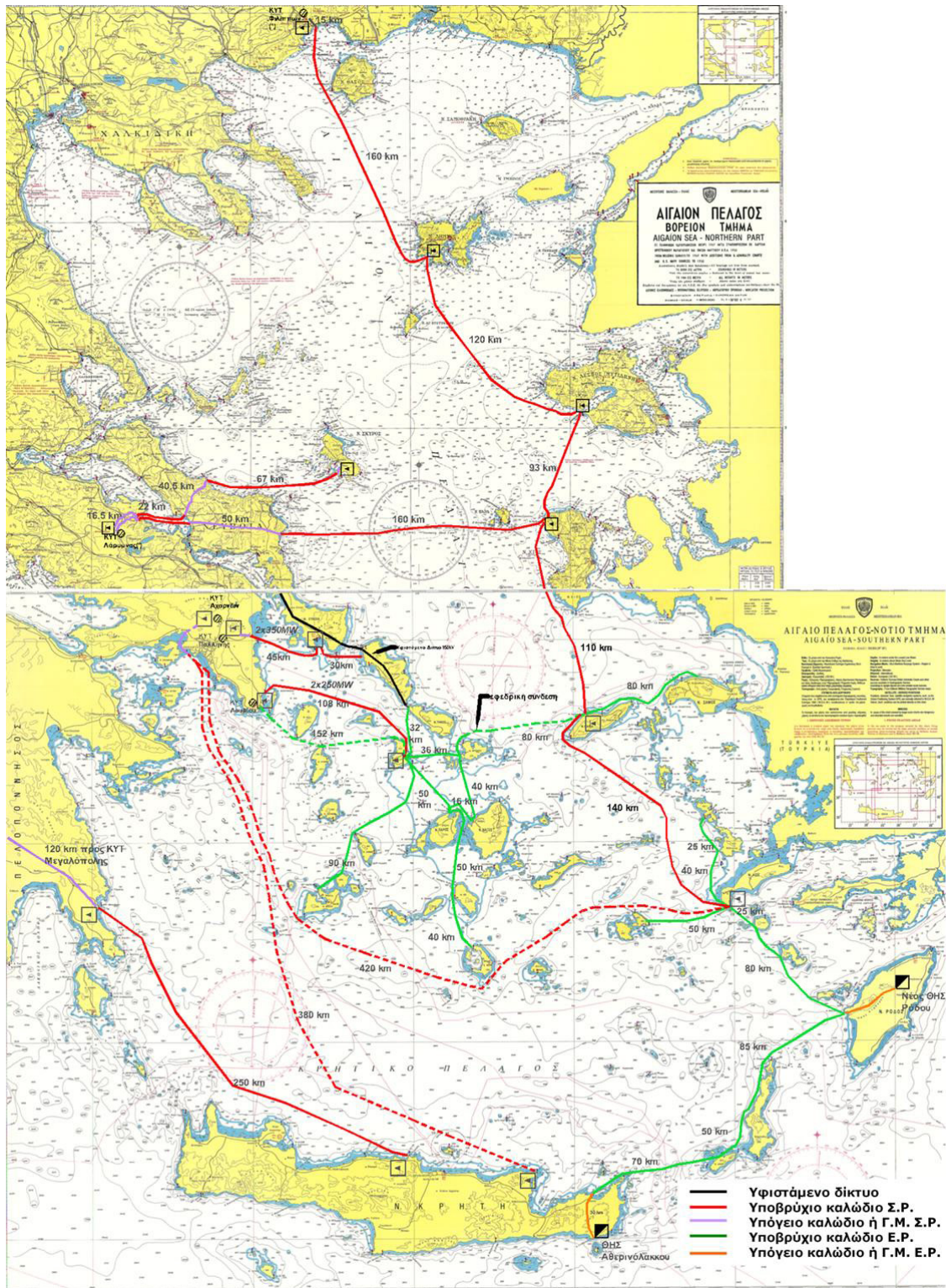
### 7.3.1 Εισαγωγή

Η υλοποίηση μελλοντικών MTDC δικτύων, πέραν του ενδιαφέροντος που παρουσιάζει για την αξιοποίηση αιολικής ισχύος σε μεγάλη κλίμακα, όπως π.χ. σε υποψήφιες εφαρμογές διασύνδεσης ΘΑΠ στη Β. Θάλασσα, ή και για τη διασύνδεση ασύγχρονων ac συστημάτων, παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον και για τα ελληνικά δεδομένα, ιδίως ως προς τη

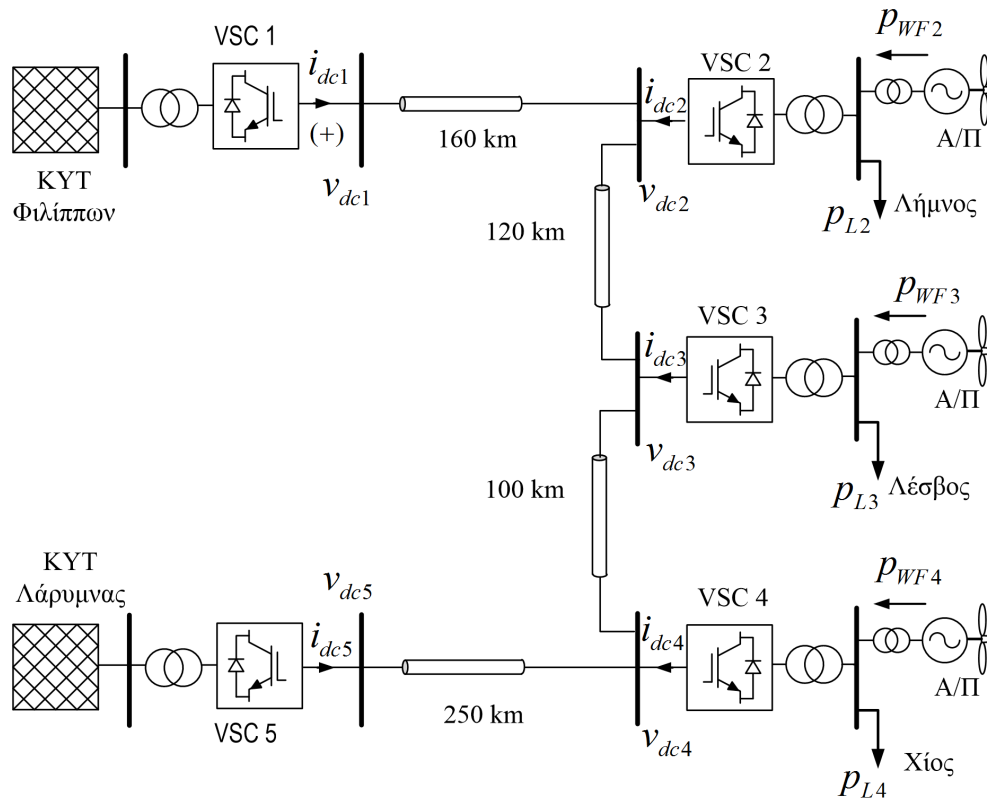
δυνατότητα ηλεκτρικής διασύνδεσης συμπλέγματος απομακρυσμένων νησιωτικών συστημάτων με το ηπειρωτικό σύστημα [140]. Σαφώς, μια εφαρμογή τέτοιου είδους απαιτεί πρωτίστως την εκπόνηση ενδελεχών μελετών κόστους-οφέλους συγκριτικά με άλλες εναλλακτικές λύσεις ηλεκτροδότησης σε μακροπρόθεσμο ορίζοντα, και αποτελεί σημερινό αντικείμενο διερεύνησης των αρμόδιων φορέων [141]. Οποσδήποτε όμως, λόγω των μεγάλων αποστάσεων που παρεμβάλλονται εν γένει μεταξύ των νησιών του Αιγαίου και του ηπειρωτικού συστήματος, η τεχνολογία VSC-HVDC αποτελεί ίσως το προσφορότερο σχήμα διασύνδεσης από τεχνικής άποψης, εγείροντας παράλληλα προβληματισμούς ως προς τον τρόπο ελέγχου και αξιοποίησης ενός MTDC δικτύου στο θαλάσσιο χώρο του Αιγαίου, όχι μόνο για την ενσωμάτωση και οικονομική ηλεκτροδότηση των νησιών, αλλά και για την αξιοποίησή του ως πρόσθετου μέσου ρύθμισης του Ελληνικού Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΕΣΜΗΕ), καθώς δεν υπάρχει ανάλογη εμπειρία πέραν της απλής ακτινικής διασύνδεσης Ελλάδας – Ιταλίας, στην οποία χρησιμοποιείται η παλαιότερη τεχνολογία HVDC με μετατροπείς τύπου πηγής ρεύματος.

Στόχος της ενότητας αυτής είναι η συγκριτική αξιολόγηση των τεχνικών ελέγχου που αναφέρθηκαν προηγουμένως, σε ένα δοκιμαστικό MTDC δίκτυο το οποίο βασίζεται σε σχήματα διασύνδεσης νησιών που έχουν προταθεί σε σχετικές μελέτες που έχει εκπονήσει ο ΑΔΜΗΕ για τον θαλάσσιο χώρο του Αιγαίου [142], [143], στις οποίες είχαν ληφθεί υπόψη σε μεγάλο βαθμό υποψήφιες επενδυτικές προτάσεις ανάπτυξης αιολικών σταθμών επί των νησιών. Στο Σχήμα 7.7 παρουσιάζεται ο προκαταρκτικός σχεδιασμός των διασυνδέσεων των νησιών του Αιγαίου, όπως αυτός είχε περιληφθεί στο δεκαετές πρόγραμμα ανάπτυξης του ΑΜΔΗΕ, περιόδου 2014-2023. Από τον φιλόδοξο αυτό σχεδιασμό, ένα αντιπροσωπευτικό παράδειγμα ανάπτυξης MTDC δικτύου εντοπίζεται στην περιοχή του Β. Α. Αιγαίου, και συγκεκριμένα στη βροχοειδή διασύνδεση των νησιών Λήμνου, Λέσβου και Χίου με το ΕΣΜΗΕ, μέσω dc καλωδίων, και εγκατάσταση σταθμών μετατροπής dc/ac τόσο επί των νησιών όσο και στο βόρειο και νότιο άκρο του ηπειρωτικού συστήματος, δηλ. στα ΚΥΤ Φιλίππων και ΚΥΤ Λάρυμνας αντίστοιχα. Ο προτεινόμενος σχεδιασμός αποσκοπούσε τόσο στην απορρόφηση αιολικής ισχύος από το ΕΣΜΗΕ της τάξεως των 700 MW, όσο και στην αξιόπιστη ηλεκτροδότηση των τριών νησιών, με ικανοποίηση του κριτηρίου N-1 σε περίπτωση βλάβης υποσυστήματος της βροχοειδούς διασύνδεσης.

Με αφορμή τα παραπάνω, η εξεταζόμενη τοπολογία MTDC δικτύου που επιλέχθηκε στο πλαίσιο ανάλυσης της παρούσας διατριβής εικονίζεται στο Σχήμα 7.8. Κάθε νησιωτικό σύστημα αναπαρίσταται από σύστημα ενός ζυγού, στο οποίο συνδέεται το σύνολο της αιολικής παραγωγής και του φορτίου του νησιού. Το MTDC δίκτυο αποτελείται από τους νησιωτικούς μετατροπείς dc/ac, υποβρύχια dc καλώδια τάσης λειτουργίας  $\pm 150$  kV και μεταφορικής ικανότητας της τάξεως των 500 MW, και τους επίγειους μετατροπείς ελεγχόμενης ισχύος, ονομαστικής ισχύος 500 MW έκαστος.



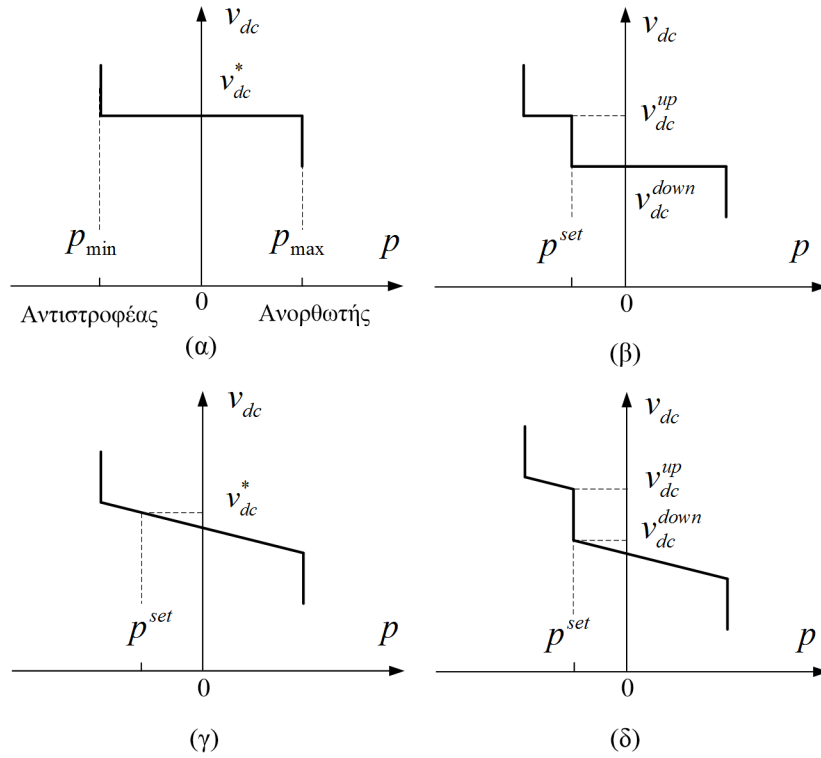
Σχήμα 7.7. Προκαταρκτικός σχεδιασμός διασυνδέσεων νησιών Αιγαίου, όπως περιλαμβάνονταν στο Δεκαετές Πρόγραμμα Ανάπτυξης Συστήματος Μεταφοράς 2014-2023 του ΑΔΜΗΕ[143].



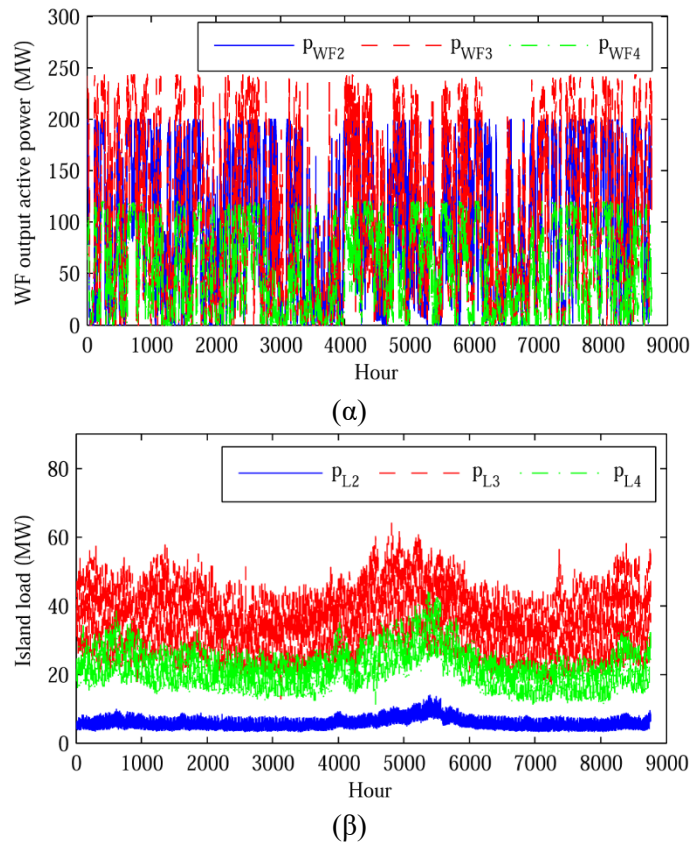
Σχήμα 7.8. Τοπολογία εξεταζόμενου 5-τερματικού MTDC δικτύου για την ηλεκτρική διασύνδεση νησιών του Β.Α. Αιγαίου με αυξημένη αιολική διείσδυση.

Προκειμένου να εξεταστεί η επίδραση των υποψήφιων χαρακτηριστικών ελέγχου ισχύος – τάσης στο ετήσιο προφίλ λειτουργίας του MTDC δικτύου, απαιτείται η ανάλυση ροής ισχύος σε ωριαία βάση, με χρήση των Εξ. (7.1) και (7.2) και των χαρακτηριστικών λειτουργίας που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες παραγράφους. Πιο αναλυτικά, επιλέχθηκαν προς αξιολόγηση τρεις στρατηγικές ελέγχου οι οποίες παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.1 και εφαρμόστηκαν στους δύο ηπειρωτικούς μετατροπέες ελεγχόμενης ισχύος. Στην Στρατηγική I, και οι δύο μετατροπέες λειτουργούν με έλεγχο στατισμού οπότε αναλαμβάνουν από κοινού τη ρύθμιση dc τάσης. Στην Στρατηγική II, η μόνη διαφοροποίηση έγκειται στον έλεγχο του μετατροπέα #1 (KYT Φιλίππων), στον οποίο εισάγεται μία νεκρή ζώνη στη λειτουργία στατισμού, προκειμένου να προσφερθεί και η δυνατότητα λειτουργίας σταθερής ισχύος, εφόσον αυτό είναι επιθυμητό από τον διαχειριστή του συστήματος για τις ανάγκες ρύθμισης του ηπειρωτικού συστήματος. Τέλος, στην Στρατηγική III, αντί χαρακτηριστικών στατισμού εφαρμόζεται η λειτουργία ζυγού ταλάντωσης στον μετατροπέα #5 σε μόνιμη βάση, ενώ ο μετατροπέας #1 λειτουργεί με έλεγχο περιθωρίου τάσης. Οι εξεταζόμενες χαρακτηριστικές λειτουργίας εικονίζονται στο Σχήμα 7.9.

Για την ανάλυση ροής ισχύος σε ωριαία βάση, χρησιμοποιήθηκαν διαθέσιμες ωριαίες χρονοσειρές τόσο για την αιολική παραγωγή σε κάθε νησιωτικό σύστημα όσο και για την ωριαία διακύμανση της ζήτησης φορτίου, και απεικονίζονται στο Σχήμα 7.10 [144].



Σχήμα 7.9. Εξεταζόμενες χαρακτηριστικές ελέγχου ισχύος – τάσης για τους μετατροπείς ελεγχόμενης ισχύος.



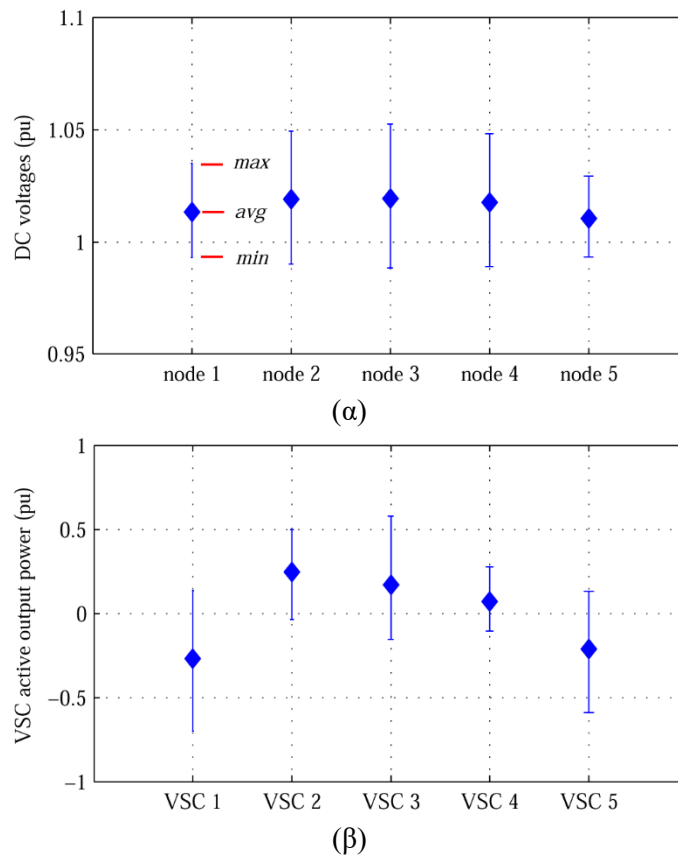
Σχήμα 7.10. Ωριαίες χρονοσειρές (α) αιολικής παραγωγής και (β) ζήτησης φορτίου, για το εξεταζόμενο MTDC δίκτυο.

Πίνακας 7.1. Εξεταζόμενες στρατηγικές ελέγχου ισχύος – τάσης και τιμές παραμέτρων.

Στρατηγική	VSC #1	VSC #5
I	Στατισμός ( $\rho_{dc1} = 5\%$ , $v_{dc1}^* = 1$ , $p_1^{set} = 0$ )	Στατισμός ( $\rho_{dc5} = 5\%$ , $v_{dc5}^* = 1$ , $p_5^{set} = 0$ )
II	Στατισμός με NZ ( $v_{dc1}^{up} = 1.05$ , $v_{dc1}^{down} = 0.95$ )	
III	Περιθώριο τάσης ( $v_{dc1}^{up} = 1.05$ , $v_{dc1}^{down} = 0.95$ , $p_1^{set}$ μεταβλητό)	Ζυγός ταλάντωσης ( $v_{dc5}^* = 1$ )

### 7.3.2 Συγκριτικά αποτελέσματα Στρατηγικών I-III

Στο Σχήμα 7.11 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα επίλυσης ροής ισχύος του MTDC δικτύου σε ετήσια βάση, με τη μορφή κατανομών dc τάσης και ισχύος σε κάθε κόμβο, εφαρμόζοντας την Στρατηγική I. Οι άνω και κάτω μπάρες αναπαριστούν την μέγιστη και ελάχιστη τιμή της εξεταζόμενης μεταβλητής αντίστοιχα, ενώ ο ενδιάμεσος δείκτης αναπαριστά τη μέση τιμή από το συνολικό δείγμα των 8760 τιμών που εξήχθησαν από την επίλυση της ροής ισχύος.



Σχήμα 7.11. Αποτελέσματα ροής ισχύος για λειτουργία υπό την Στρατηγική I. Διακυμάνσεις μόνιμης κατάστασης των (α) dc τάσεων (β) ενεργού ισχύος εξόδου μετατροπέων HVDC, σε κάθε κόμβο του MTDC δικτύου.

Σύμφωνα με το Σχήμα 7.11, οι τάσεις των κόμβων κυμαίνονται στο εύρος 0.99-1.05 α.μ. ενώ παρατηρούνται μεγαλύτερες διακυμάνσεις τάσης στους ακροδέκτες των μετατροπέων μη ελεγχόμενης ισχύος (των νησιωτικών συστημάτων), καθώς δεν έχουν τη δυνατότητα συμμετοχής στη ρύθμιση ισχύος-τάσης. Οι μέσες τιμές των  $v_{dc1}$  και  $v_{dc5}$  είναι μεγαλύτερες της τιμής 1 α.μ., υποδηλώνοντας ότι το MTDC δίκτυο εξάγει για το περισσότερο χρονικό διάστημα ενεργό ισχύ προς το ηπειρωτικό σύστημα. Ο συγκεκριμένος συνδυασμός αποτελεσμάτων ισχύος – τάσης μπορεί να επιβεβαιωθεί και με ανασκόπηση της Εξ. (7.5), όπου απουσία εντολής ενεργού ισχύος, η εξαγωγή ισχύος προς το ac σύστημα μπορεί να επιτευχθεί μόνο με ρύθμιση των επιπέδων dc τάσης σε τιμές μεγαλύτερες των αντίστοιχων αναφορών  $v_{dc1}^*$  και  $v_{dc5}^*$  (1 α.μ. στην παρούσα ανάλυση).

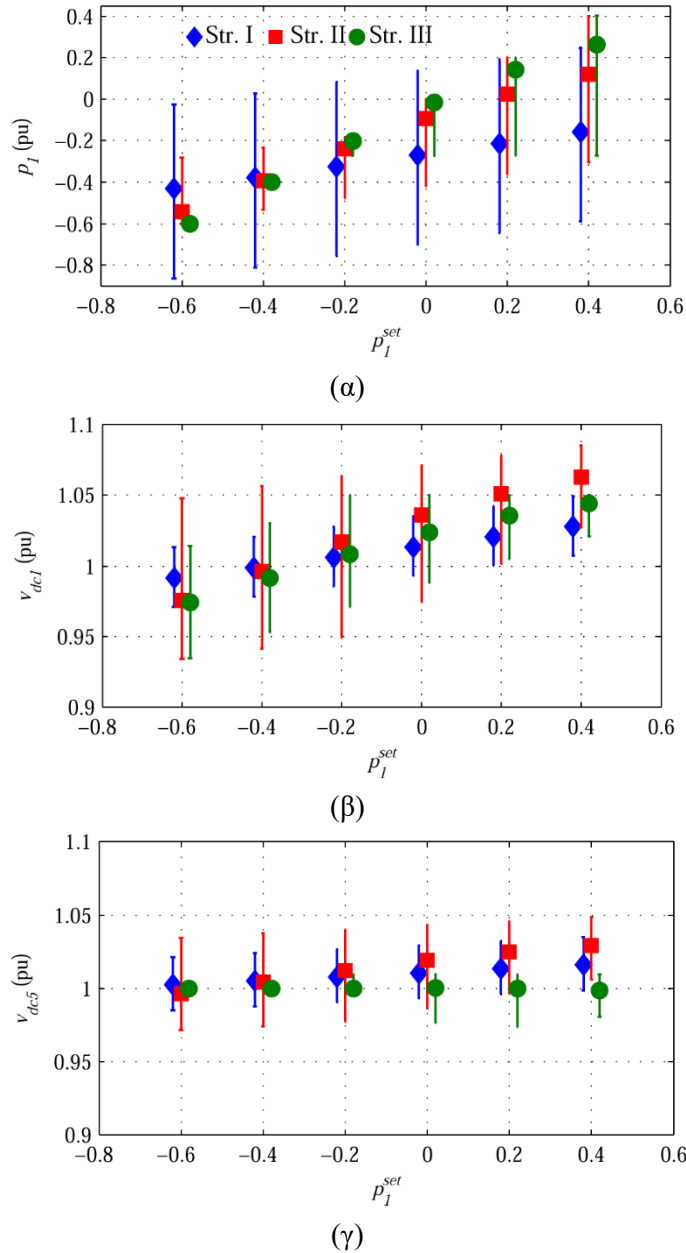
Από τα αποτελέσματα στο Σχήμα 7.11, συμπεραίνεται ότι η Στρατηγική I επιφέρει αποτελεσματική ρύθμιση των επιπέδων τάσης, αλλά οδηγεί σε έντονη στοχαστικότητα της ενεργού ισχύος κάθε ηπειρωτικού μετατροπέα, υποδηλώνοντας ότι αποκλειστικά η χρήση χαρακτηριστικών στατισμού δεν επαρκεί για τη ρύθμιση της ενεργού ισχύος σε ενδεχόμενη εντολή κατανομής από τον διαχειριστή του συστήματος. Από την άλλη πλευρά, πρέπει να σημειωθεί ότι δεν μπορεί να εφαρμοστεί έλεγχος σταθερής ισχύος στο σύνολο των μετατροπέων ενός MTDC δικτύου, καθώς πρέπει να τηρείται κάθε στιγμή το ισοζύγιο ισχύος μεταξύ εισερχόμενης και εξερχόμενης ισχύος, και συνεπώς η ευσταθής λειτουργία του συστήματος. Στην εξεταζόμενη περίπτωση, όπου υπάρχουν δύο μετατροπείς ελεγχόμενης ισχύος, εάν προστεθεί στον ένα η λειτουργία σταθερής ισχύος, έπεται ότι ο άλλος θα πρέπει να αναλάβει τον ρόλο ρύθμισης της dc τάσης, εγγέροντας στο ac σύστημα τις στοχαστικές διακυμάνσεις ισχύος των νησιωτικών μετατροπέων HVDC. Για να εξεταστεί το συγκεκριμένο ενδεχόμενο λειτουργίας, θεωρήθηκε ότι στον μετατροπέα #1 (KYT Φιλίππων) αποστέλλεται εντολή κατανομής για τις ανάγκες ρύθμισης του βορείου τμήματος του ηπειρωτικού συστήματος, ενώ ο μετατροπέας #5 (KYT Λάρυμνας) αναλαμβάνει τη ρύθμιση τάσης, θεωρώντας δηλ. το νότιο άκρο ως ισχυρότερο σημείο σύνδεσης με το ΕΣΜΗΕ.

Στο Σχήμα 7.12 διενεργήθηκε μια ανάλυση ευαισθησίας ως προς την επίδραση της εντολής κατανομής  $p_1^{set}$  στο προφίλ λειτουργίας του MTDC δικτύου, και για τις τρεις στρατηγικές ελέγχου. Εξετάζοντας τα αποτελέσματα της Στρατηγικής I, επιβεβαιώνεται πλήρως το συμπέρασμα ως προς την εγγενή αδυναμία του ελέγχου στατισμού να επιφέρει την απαιτούμενη ακρίβεια στη ρύθμιση της ενεργού ισχύος εξόδου του μετατροπέα #1, καθώς η μέση τιμή της αποκλίνει σημαντικά από την τιμή  $p_1^{set}$ , εμφανίζοντας και διευρυμένες διακυμάνσεις σε ετήσια βάση.

Η αδυναμία ακριβούς ρύθμισης των ροών ισχύος μέσω της Στρατηγικής I, αποτέλεσε το κίνητρο επιλογής της Στρατηγικής II, όπου στον μετατροπέα #1 εφαρμόζεται έλεγχος στατισμού με νεκρή ζώνη. Πλέον είναι εμφανής η βελτίωση στην ακρίβεια ρύθμισης της ενεργού ισχύος που διακινείται προς το KYT Φιλίππων, η οποία ωστόσο οδηγεί σε



μεγαλύτερες διακυμάνσεις των επιπέδων τάσης προκειμένου να επιτευχθεί η επιθυμητή ροή ισχύος.



Σχήμα 7.12. Αποτελέσματα ροής ισχύος συναρτήσει της ενεργού ισχύος αναφοράς  $p_1^{set}$ , με εφαρμογή των Στρατηγικών I-III, Διακυμάνσεις μόνιμης κατάστασης των (α) ενεργού ισχύος εξόδου μετατροπέα #1, (β) dc τάσης κόμβου #1, (γ) dc τάσης κόμβου #5.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει το προφίλ τάσεων συναρτήσει της ισχύος αναφοράς  $p_1^{set}$ , όπου η μετάβαση από αρνητικές σε θετικές τιμές, δηλ. από εξαγωγές σε εισαγωγές ισχύος από το ac σύστημα, οδηγεί σε προοδευτική αύξηση της μέσης τιμής της τάσης λειτουργίας. Στην περίπτωση επιβολής θετικών τιμών  $p_1^{set}$ , μεγαλύτερη αύξηση παρουσιάζει η μέση τιμή της τάσης  $v_{dc1}$ , η οποία διαμορφώνεται σε υψηλότερα επίπεδα από τη μέση τιμή της  $v_{dc5}$  προκειμένου να επιτευχθεί η επιθυμητή ροή ισχύος από το βόρειο προς το νότιο άκρο του MTDC δικτύου. Η ανωτέρω αύξηση των επιπέδων τάσης ενισχύεται και από τη λειτουργία

του μετατροπέα #5, ο οποίος εξάγει κατά κύριο λόγο ενεργό ισχύ προς το ηπειρωτικό σύστημα, οπότε η μέση τιμή της τάσης του ρυθμίζεται και αυτή σε τιμές μεγαλύτερες από 1 α.μ.

Ο περιορισμός των ανωτέρω διακυμάσεων τάσης και η περαιτέρω βελτίωση στη ρύθμιση ενεργού ισχύος μπορούν να επιτευχθούν εφόσον η dc τάση λειτουργίας στον κόμβο #1 διατηρείται για περισσότερο χρονικό διάστημα εντός των τιμών κατωφλίου, προκειμένου να επενεργεί ο έλεγχος σταθερής ισχύος. Για τον σκοπό αυτό, εξετάστηκε και η Στρατηγική III, η οποία αντιστοιχεί σε έλεγχο περιθωρίου τάσης στον μετατροπέα #1 και λειτουργία ζυγού ταλάντωσης στον μετατροπέα #5. Αξίζει να σημειωθεί ότι για αρνητικές τιμές της ενεργού ισχύος αναφοράς (εξαγωγή ισχύος προς το ac σύστημα), οι αποκλίσεις της ισχύος του μετατροπέα #1 πρακτικά εξαλείφονται με την υπόψη στρατηγική, καθώς η τάση λειτουργίας  $v_{dc1}$  διατηρείται εντός των τιμών κατωφλίου σε μόνιμη βάση. Παρόλα αυτά, η ρύθμιση αυτή δεν μπορεί να επιτευχθεί εξίσου αποτελεσματικά και στην περίπτωση επιβολής θετικών τιμών στην ενεργό ισχύ αναφοράς  $p_1^{set}$ , καθώς το κυρίαρχο εξαγωγικό προφίλ λειτουργίας των νησιών, σε συνδυασμό με την απαίτηση για μεταφορά ισχύος από το βόρειο προς το νότιο άκρο του MTDC δικτύου, οδηγεί σε επίπεδα τάσης κοντά στην τιμή κατωφλίου  $v_{dc1}^{up}$  και σε συχνή φόρτιση του μετατροπέα #5 πλησίον της ικανότητάς του. Αποτέλεσμα των ανωτέρω είναι η συχνότερη μεταγωγή λειτουργίας του μετατροπέα #1 σε έλεγχο τάσης, αλλοιώνοντας έτσι την επιθυμητή ρύθμιση της ενεργού ισχύος.

## 7.4 Ανάπτυξη μεθοδολογίας βέλτιστης ρύθμισης ισχύος-τάσης σε MTDC δίκτυα

### 7.4.1 Εισαγωγή

Ο τρόπος ελέγχου ενός MTDC δικτύου αποτελεί ένα ερευνητικό ζήτημα που βρίσκεται σε ώριμη φάση στη διεθνή βιβλιογραφία, καθώς έχουν προταθεί υποψήφιες τεχνικές ελέγχου οι οποίες από μια ευρύτερη σκοπιά εξέτασης αποτελούν εξειδικεύσεις της γενικής μεθόδου ελέγχου στατισμού τάσης. Ο συμβατικός έλεγχος στατισμού παρουσιάζει εμφανή πλεονεκτήματα ως προς τη φιλοσοφία κατανομημένου ελέγχου τάσης που εισάγει, επιτρέποντας τη ρυθμιζόμενη ανάληψη φορτίου από πολλούς μετατροπείς ελεγχόμενης ισχύος, εξασφαλίζοντας την ασφαλή λειτουργία του MTDC δικτύου χωρίς την ανάγκη μεταγωγής λειτουργιών ελέγχου. Ωστόσο, η ικανότητα ακριβούς ρύθμισης ενός MTDC δικτύου σε ενδεχόμενες εντολές κατανομής υπό στοχαστικές συνθήκες λειτουργίας των διασυνδεδεμένων μετατροπέων μη ελεγχόμενης ισχύος, αποτελεί ακόμα ένα ανοιχτό ερευνητικό ζήτημα το οποίο δεν έχει λάβει επαρκή έκταση στη βιβλιογραφία, καθώς η πλειοψηφία υφιστάμενων εργασιών επικεντρώνεται στη βέλτιστη ρύθμιση ενός MTDC δικτύου που επιφέρει αποκλειστικά ελαχιστοποίηση των απωλειών [91]-[95], χωρίς όμως να συνεκτιμάται στην ανάλυση και η πρόσθετη τεχνική απαίτηση που περιλαμβάνεται στο προσχέδιο κώδικα του ENTSO-E για συνδέσεις HVDC [13], αναφορικά με την ικανότητα των μετατροπέων HVDC να ρυθμίζουν την ενεργό ισχύ τους εντός μιας προκαθορισμένης ζώνης ανοχής γύρω από δεδομένη τιμή αναφοράς.

Στόχος της παρούσας παραγράφου είναι η παρουσίαση μιας μεθοδολογίας βέλτιστης ρύθμισης ισχύος-τάσης MTDC δικτύων που βασίζεται στην εφαρμογή κανόνων πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης. Στόχος της μεθόδου είναι η εν λειτουργία ρύθμιση των χαρακτηριστικών ελέγχου ισχύος-τάσης των μετατροπέων ελεγχόμενης ισχύος, προκειμένου να βελτιστοποιείται η λειτουργία του MTDC δικτύου ως προς το σύνολο των τιθέμενων κριτηρίων και περιορισμών λειτουργίας. Η τεχνική αυτή προϋποθέτει την ύπαρξη τηλεπικοινωνιακού συστήματος εποπτείας και ελέγχου του MTDC δικτύου [91], [145], μέσω του οποίου λαμβάνονται μετρήσεις ως προς τις στοχαστικές διακυμάνσεις της ισχύος των μετατροπέων μη ελεγχόμενης ισχύος, και ανανεώνονται οι τιμές παραμέτρων των εφαρμοζόμενων χαρακτηριστικών ελέγχου στατισμού μέσω επίλυσης του προβλήματος βέλτιστης ροής ισχύος. Η επίδοση της προτεινόμενης μεθοδολογίας εξετάζεται στο δοκιμαστικό 5-τερματικό MTDC δίκτυο διασύνδεσης νησιών που εξετάστηκε και στην προηγούμενη παράγραφο, εφαρμόζοντας όμως μια γενικότερη πιθανοτική ανάλυση της λειτουργίας του, χρησιμοποιώντας αντιπροσωπευτικές συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας για την ταχύτητα ανέμου και τη ζήτηση φορτίου σε κάθε νησιωτικό σύστημα. Η επίλυση της ροής ισχύος πραγματοποιείται με τη μέθοδο Monte-Carlo.

#### 7.4.2 Περιγραφή προβλήματος βέλτιστης ροής ισχύος

Στο Σχήμα 7.13 εικονίζεται η γενική τοπολογία ενός MTDC δικτύου με την προτεινόμενη φιλοσοφία ελέγχου. Το σύστημα εποπτείας και ελέγχου λαμβάνει ως είσοδο τις μετρούμενες ισχείς εξόδου των μετατροπέων μη ελεγχόμενης ισχύος, τα χαρακτηριστικά του MTDC δικτύου που περιγράφονται από τη μήτρα αγωγιμοτήτων  $\mathbf{G}$ , και τις εντολές ενεργού ισχύος που ορίζονται από τον διαχειριστή του συστήματος. Έπειτα, επιλύεται ένα πρόβλημα βέλτιστης ροής ισχύος (Optimal Power Flow – OPF), με το οποίο υπολογίζονται οι νέες τιμές των τάσεων αναφοράς  $v_{dc,i}^*$  που αποστέλλονται στο σύστημα ελέγχου των μετατροπέων ελεγχόμενης ισχύος μέσω κατάλληλου τηλεπικοινωνιακού μέσου.

Στόχος είναι η ελαχιστοποίηση του σφάλματος ρύθμισης της ενεργού ισχύος των μετατροπέων ελεγχόμενης ισχύος από τις αντίστοιχες τιμές αναφοράς  $p_i^{set}$ , σε συνδυασμό με την τήρηση χαμηλών απωλειών ενέργειας στο MTDC δίκτυο. Στην παρούσα διατριβή, η ενσωμάτωση των ανωτέρω κριτηρίων στην αντικειμενική συνάρτηση βελτιστοποίησης επιτυγχάνεται με χρήση γραμμικού προσθετικού μοντέλου [98], [147] και κατάλληλων συντελεστών βαρύτητας  $\omega_p$  και  $\omega_l$  που επενεργούν στα κριτήρια σφάλματος ρύθμισης ισχύος και απωλειών αντίστοιχα, ικανοποιώντας τη συνθήκη  $\omega_p + \omega_l = 1$ . Συνεπώς, η αντικειμενική συνάρτηση  $f_{OPF}$  του προβλήματος βέλτιστης ροής ισχύος διαμορφώνεται ως εξής:

$$f_{OPF} = \omega_p \sum_{i=n+1}^{n+m-1} (p_i - p_i^{set})^2 + \omega_l \left( \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n+m} \sum_{j=1}^{n+m} G_{ij} (v_{dc,i} - v_{dc,j})^2 + \sum_{i=1}^{n+m} p_{loss,VSC,i} \right) \quad (7.6)$$

Η Εξ. (7.6) είναι δομημένη κατά τρόπο που να μπορεί να δοθεί προτεραιότητα σε ένα από τα δύο κριτήρια βελτιστοποίησης με κατάλληλη ρύθμιση των συντελεστών βαρύτητας  $\omega_p$  και  $\omega_l$ . Στο πρόβλημα βελτιστοποίησης υπεισέρχονται οι ακόλουθοι ισοτικοί περιορισμοί:

$$\begin{bmatrix} i_{dc,1} & i_{dc,2} & \dots & i_{dc,n+m} \end{bmatrix}^T = \mathbf{G} \begin{bmatrix} v_{dc,1} & v_{dc,2} & \dots & v_{dc,n+m} \end{bmatrix}^T \quad (7.7)$$

$$v_{dc,i} i_{dc,i} = (v_{dc,i}^* - v_{dc,i}) / \rho_{dc,i} + p_i^{set} \quad i \in [n+1, n+m] \quad (7.8)$$

$$p_i = p_{w,i} - p_{l,i} \quad i \in [1, n] \quad (7.9)$$

$$v_{dc,i} i_{dc,i} = p_i - p_{loss,VSC,i} \quad i \in [1, n+m] \quad (7.10)$$

$$p_{loss,VSC,i} = a_0 + a_1 i_{ac,i} + (a_2 + r_c + r_{tr}) i_{ac,i}^2 \quad i \in [1, n+m] \quad (7.11)$$

$$i_{ac,i} = \frac{|p_i|}{v_{s,i} \cos \varphi_i} \quad i \in [1, n+m] \quad (7.12)$$

Η Εξ. (7.7) αποτελεί τη βασική εξίσωση επίλυσης της ροής ισχύος του MTDC δικτύου, η Εξ. (7.8) αποτελεί τον νόμο ελέγχου στατισμού των μετατροπέων ελεγχόμενης ισχύος, η Εξ. (7.9) συνδέει την ενεργό ισχύ εξόδου των μετατροπέων μη ελεγχόμενης ισχύος με το ισοζύγιο ισχύος των συνδεδεμένων ac συστημάτων (ΘΑΠ ή νησιωτικών δικτύων). Οι Εξ. (7.10)-(7.12) συσχετίζουν την ενεργό ισχύ κάθε μετατροπέα μεταξύ της ac και dc πλευράς, λαμβάνοντας υπόψη τις παρεμβαλλόμενες απώλειες. Οι τιμές παραμέτρων της πολυωνυμικής συνάρτησης απωλειών της Εξ. (7.11) επιλέχθηκαν με βάση τυπικές τιμές που προτείνονται στη βιβλιογραφία [148].

Οι παρακάτω ανισωτικοί περιορισμοί περιλαμβάνουν τα όρια λειτουργίας των μετατροπέων που αναπαρίστανται μέσω του μέγιστου επιτρεπόμενου ρεύματος λειτουργίας  $I_{max,VSC,i}$ , τα όρια των αποδεκτών dc τάσεων λειτουργίας σε κάθε κόμβο, και τη μέγιστη επιτρεπόμενη φόρτιση των dc καλωδίων:

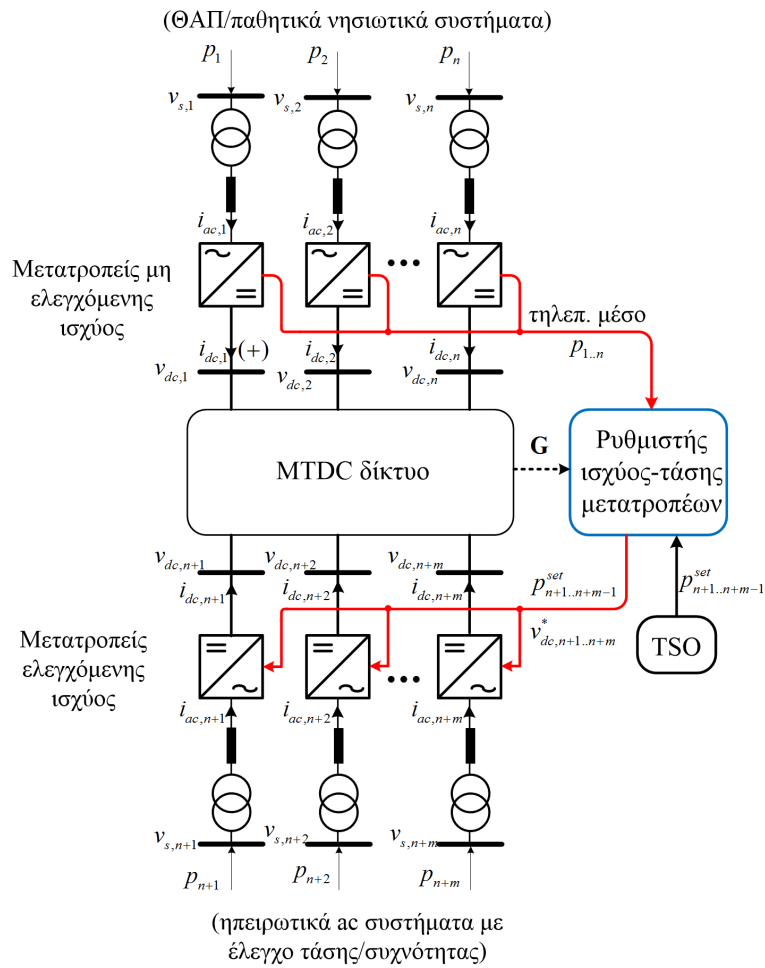
$$i_{ac,i} \leq I_{max,VSC,i} \quad i \in [1, n+m] \quad (7.13)$$

$$V_{dc,min,i} \leq v_{dc,i} \leq V_{dc,max,i} \quad i \in [1, n+m] \quad (7.14)$$

$$\left| G_{ij} (v_{dc,i} - v_{dc,j}) \right| \leq I_{max,c(i-j)} \quad i, j \in [1, n+m] \quad (7.15)$$

Αναφορικά με την επιλογή αλγορίθμου βελτιστοποίησης για το ανωτέρω μη γραμμικό πρόβλημα βελτιστοποίησης με περιορισμούς, υπάρχει ένα πλήθος εναλλακτικών τεχνικών που έχουν προταθεί και αξιολογηθεί στη βιβλιογραφία, και είναι διαθέσιμες σε εμπορικά

λογισμικά, όπως η μέθοδος εσωτερικού σημείου (interior point) [93], [94], [98], οι γενετικοί αλγόριθμοι (genetic algorithms) [149], ή η μέθοδος βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων (particle swarm optimization) [150]. Στο πλαίσιο ανάλυσης της παρούσας διατριβής, όπου ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης καθαντός δεν αποτελεί το πρώτιστο αντικείμενο διερεύνησης, επιλέχθηκε η χρήση της συνάρτησης βελτιστοποίησης *ga* του λογισμικού Matlab, η οποία εφαρμόζει τη μέθοδο των γενετικών αλγορίθμων. Συγκεκριμένες τιμές παραμέτρων δίνονται στον Πίνακα 7.2.



Σχήμα 7.13. Γενική τοπολογία MTDC δικτύου και αρχιτεκτονική συστήματος ελέγχου ισχύος-τάσης.

### 7.4.3 Εφαρμογή μεθοδολογίας σε δοκιμαστικό MTDC δίκτυο διασύνδεσης νησιών

Έως σήμερα, η πλειοψηφία των εξεταζόμενων MTDC δικτύων στη βιβλιογραφία έχει επικεντρωθεί στην ενσωμάτωση πολλαπλών ΘΑΠ στο ηπειρωτικό σύστημα και στη βέλτιστη ρύθμιση του δικτύου που επιφέρει ελαχιστοποίηση απωλειών. Στην παρούσα διατριβή, η προτεινόμενη μεθοδολογία βελτιστοποίησης εφαρμόστηκε στο δοκιμαστικό MTDC δίκτυο διασύνδεσης νησιών που εικονίζεται ξανά στο Σχήμα 7.14 με την προτεινόμενη φιλοσοφία ελέγχου.

Πίνακας 7.2. Τιμές παραμέτρων συνάρτησης βελτιστοποίησης για της παρούσας ανάλυσης.

Παράμετρος	Τιμή
Μέγεθος πληθυσμού	50
Μέθοδος επιλογής	Stochastic Uniform
Μέθοδος κλιμάκωσης	Rank
Αριθμός ελιτιστικών απογόνων	2.5
Μέθοδος επιχιασμού	Scattered
Ποσοστό επιχιασμού	80%
Μέθοδος μετάλλαξης	Adaptive feasible
Μέγιστος αριθμός γενεών	100
Πλήθος γενιών καθυστέρησης	50
Όριο μεταβολής fitness function	$10^{-6}$

Στόχος είναι η βέλτιστη ρύθμιση ισχύος-τάσης των δύο μετατροπέων ελεγχόμενης ισχύος (#4 και #5), θεωρώντας ότι στον μετατροπέα #4 αποστέλλεται και εντολή ενεργού ισχύος από τον διαχειριστή του συστήματος για τις ανάγκες ρύθμισης του ηπειρωτικού συστήματος. Ο μετατροπέας #5 αναλαμβάνει τον ρόλο ρύθμισης της dc τάσης, προσομοιάζοντας τη λειτουργία ζυγού ταλάντωσης αλλά με τη χρήση συμβατικής χαρακτηριστικής ελέγχου στατισμού. Το κεντρικό σύστημα ελέγχου λαμβάνει ως είσοδο τις μετρούμενες ισχείς εξόδου των τριών νησιωτικών μετατροπέων και τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του MTDC δικτύου που περιγράφονται από τη μήτρα αγωγιμοτήτων  $\mathbf{G}$ , και επιλύει το πρόβλημα βέλτιστης ροής ισχύος, από το οποίο υπολογίζονται οι νέες απαιτούμενες τιμές των τάσεων αναφοράς  $v_{dc,4}^*$  και  $v_{dc,5}^*$  που αποστέλλονται στο σύστημα ελέγχου των ηπειρωτικών μετατροπέων μέσω κατάλληλου τηλεπικοινωνιακού μέσου.

Προκειμένου να εξεταστεί η επίδραση της στοχαστικής λειτουργίας των νησιωτικών μετατροπέων στο επιθυμητό προφίλ λειτουργίας του MTDC δικτύου που ορίζεται από τον προτεινόμενο έλεγχο, απαιτείται η ανάλυση ροής ισχύος για επαρκώς μεγάλο πλήθος στατιστικών δειγμάτων της αναμενόμενης αιολικής παραγωγής και της ζήτησης φορτίου σε κάθε νησιωτικό σύστημα. Για τον σκοπό αυτό, τόσο η ταχύτητα ανέμου όσο και το φορτίο κάθε νησιού αναπαρίστανται από αντιπροσωπευτικές συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας, οι οποίες περιγράφονται ακολούθως.

Για τη μοντελοποίηση της στοχαστικότητας της αιολικής παραγωγής επί των εξεταζόμενων νησιών, υιοθετείται η ευρέως χρησιμοποιούμενη στατιστική κατανομή Weibull για την

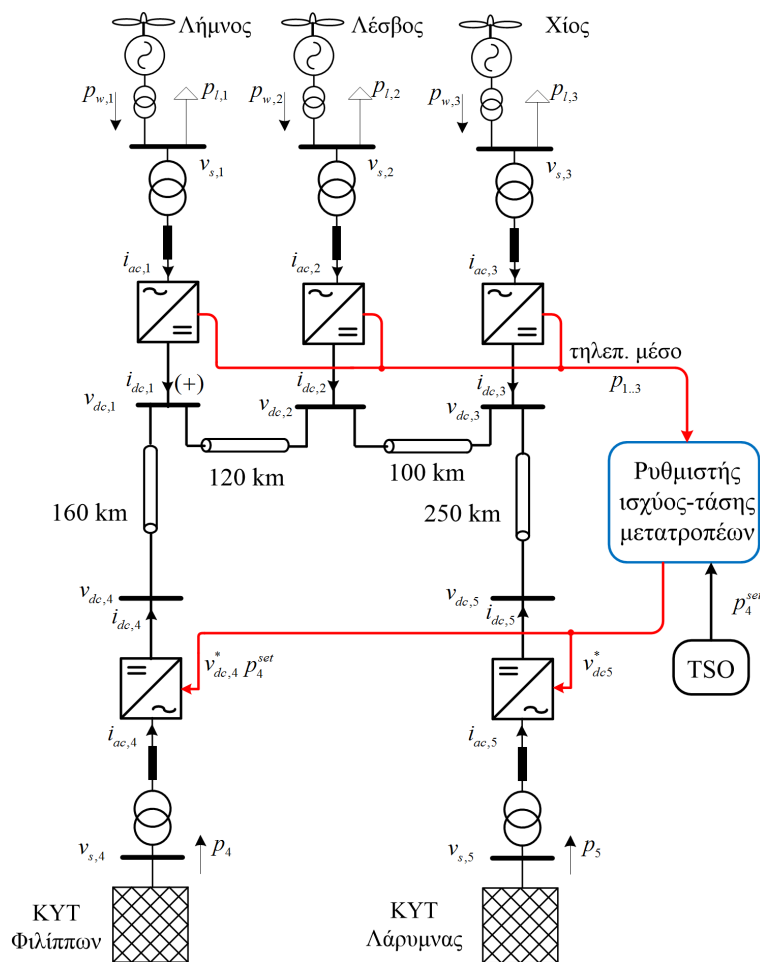
ταχύτητα ανέμου σε κάθε νησιωτικό σύστημα. Η συνάρτηση πυκνότητα πιθανότητας και η αθροιστική συνάρτηση κατανομής δίνονται από τις ακόλουθες σχέσεις [151]:

$$f(v_w) = \frac{k}{c} \left( \frac{v_w}{c} \right)^{k-1} e^{-(v_w/c)^k} \quad (7.16)$$

$$F(v_w) = 1 - e^{-(v_w/c)^k} \quad (7.17)$$

Οι τιμές παραμέτρων σε κάθε νησί παρατίθενται στον Πίνακα 7.3 και βασίζονται σε διαθέσιμες χρονοσειρές ταχυτήτων ανέμου. Η αναπαραγωγή ενός στατιστικού δείγματος ταχύτητας ανέμου  $v_w$  μεγέθους  $N_s$ , πραγματοποιείται με χρήση τυχαίας μεταβλητής  $u$  που ακολουθεί την ομοιόμορφη κατανομή  $U(0,1)$ , εφαρμόζοντας τον παρακάτω μετασχηματισμό:

$$v_w = c \sqrt[k]{-\ln(1-u)} \quad (7.18)$$



Σχήμα 7.14. Τοπολογία εξεταζόμενου 5-τερματικού MTDC δικτύου διασύνδεσης νησιών με την προτεινόμενη στρατηγική ελέγχου ισχύος-τάσης.

Η αναπαραγωγή τυχαίων αριθμών  $u$  που ακολουθούν την ομοιόμορφη κατανομή συμπεριλαμβάνεται σε συναρτήσεις εμπορικών λογισμικών, όπως η συνάρτηση  $rand$  του λογισμικού Matlab [152], που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διατριβή. Ωστόσο, λόγω της

κοντινής απόστασης των εξεταζόμενων νησιωτικών συστημάτων, δεν αρκεί η απλή αναπαραγωγή τυχαίων ταχυτήτων ανέμου που ακολουθούν την κατανομή Weibull, καθώς θα πρέπει να συνεκτιμηθεί στην ανάλυση ροής ισχύος και η συσχέτιση των ταχυτήτων ανέμου. Στην παρούσα ανάλυση, ακολουθείται η μέθοδος παραγοντοποίησης Cholesky [153], [154] για την επανασύνθεση τυχαίων στατιστικών δειγμάτων ταχυτήτων ανέμου που υπολογίζονται από την Εξ. (7.18), αλλά με την παράλληλη ικανοποίηση προκαθορισμένων συντελεστών συσχέτισης (βλ. Πίνακα 7.4 για τις τιμές της παρούσας ανάλυσης). Στη συνέχεια, διαμορφώνονται  $N_s$  στατιστικά δείγματα της ενεργού ισχύος  $p_i$  για κάθε νησιωτικό σύστημα, χρησιμοποιώντας τυπικές καμπύλες ισχύος εμπορικών Α/Γ, όπως π.χ. η καμπύλης ισχύος Α/Γ 2 MW της αναφοράς [16] που επιλέχθηκε στην παρούσα ανάλυση.

Αναφορικά με τη ζήτηση φορτίου σε κάθε νησιωτικό σύστημα, θεωρείται ότι ακολουθεί την κανονική κατανομή που περιγράφεται από την ακόλουθη σχέση [155]:

$$f(p_i) = \frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(p_i - \bar{p}_i)^2}{2\sigma_i^2}} \quad (7.19)$$

Οι τιμές παραμέτρων που επιλέχθηκαν για κάθε νησί δίνονται στον Πίνακα 7.3. Η αντίστοιχη σύνθεση πολυπαραγοντικού στατιστικού δείγματος φορτίων που ικανοποιούν δεδομένους συντελεστές συσχέτισης, πραγματοποιείται με χρήση της συνάρτησης *mvnrnd* του λογισμικού Matlab [152].

Πίνακας 7.3. Τιμές παραμέτρων συναρτήσεων πυκνότητας πιθανότητας ταχύτητας ανέμου και ζήτησης φορτίου σε κάθε νησιωτικό σύστημα.

Παράμετρος	Λήμνος	Λέσβος	Χίος
$c$	11.6	9.43	8.13
$k$	1.92	1.91	1.77
$\bar{p}_i$ (MW)	6.9	40	23.5
$\sigma_i$ (MW)	2.85	10.03	8.05

Πίνακας 7.4. Συντελεστές συσχέτισης ταχυτήτων ανέμου και ζήτησης φορτίου μεταξύ των εξεταζόμενων νησιωτικών συστημάτων

Ζεύγος νησιών	Συντελεστής συσχέτισης ταχυτήτων ανέμου	Συντελεστής συσχέτισης ζήτησης φορτίου
Λήμνος – Λέσβος	0.67	0.8
Λέσβος – Χίος	0.67	0.8
Χίος – Λήμνος	0.48	0.8



Με βάση τη διαδικασία που αναφέρθηκε παραπάνω, δημιουργούνται  $N_s$  δείγματα αιολικής παραγωγής και ζήτησης φορτίου σε κάθε νησιωτικό σύστημα, προκειμένου να υπολογιστεί η ενεργός ισχύς εξόδου των μετατροπέων μη ελεγχόμενης ισχύος και να επιλυθεί η βέλτιστη ροή ισχύος του MTDC δικτύου. Εν κατακλείδι, τα βασικά βήματα επίλυσης της πιθανοτικής ροής ισχύος με τη μέθοδο προσομοίωσης Monte-Carlo [151], [155], [156] συνοψίζονται ως ακολούθως:

- **Βήμα 1.** Ορίζονται τα απαιτούμενα δεδομένα εισόδου για την ανάλυση ροής ισχύος, όπως τα χαρακτηριστικά της μήτρας αγωγιμοτήτων  $\mathbf{G}$  του MTDC δικτύου, οι τιμές παραμέτρων των συναρτήσεων πυκνότητας πιθανότητας της ταχύτητας ανέμου, ζήτησης φορτίου, κλπ.
- **Βήμα 2.** Εφαρμόζεται η μέθοδος Monte-Carlo για τη σύνθεση  $N_s$  στατιστικών δειγμάτων (5000 στην παρούσα ανάλυση) αιολικής παραγωγής και ζήτησης φορτίου, που αποτελούν τη βάση για τον υπολογισμό της ενεργού ισχύος εξόδου των μετατροπέων μη ελεγχόμενης ισχύος.
- **Βήμα 3.** Για κάθε πολυπαραγοντικό στατιστικό δείγμα ισχύος που υπολογίστηκε στο βήμα 2, επιλύεται το προτεινόμενο πρόβλημα βέλτιστης ροής ισχύος, σε συνδυασμό με ένα σενάριο αναφοράς, π.χ. εφαρμόζοντας προκαθορισμένες χαρακτηριστικές ελέγχου στατισμού, προκειμένου να πραγματοποιηθεί συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.
- **Βήμα 4.** Μετά την ολοκλήρωση του βήματος 3, ακολουθεί η στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων ροής ισχύος, προκειμένου να αξιολογηθεί η επίδοση της προτεινόμενης μεθοδολογίας σε σχέση με το σενάριο αναφοράς.

Για τη στατιστική επεξεργασία και παρουσίαση των αποτελεσμάτων, επιλέχθηκαν οι ακόλουθοι στατιστικοί δείκτες:

- **Σύνοψη των 5 αριθμών (five number summary).** Οι εν λόγω 5 αριθμοί περιλαμβάνουν την ελάχιστη τιμή, το πρώτο τεταρτημόριο, το δεύτερο τεταρτημόριο ή διάμεσο, το τρίτο τεταρτημόριο και τη μέγιστη τιμή της εξαχθείσας κατανομής. Οι υπόψη τιμές αναπαρίστανται γραφικά με το θηκόγραμμα (boxplot).
- **Μέση τιμή και τυπική απόκλιση.** Οι δείκτες αυτοί αναδεικνύουν την επίδραση των стоχαστικών συνθηκών λειτουργίας στην επίδοση των εξεταζόμενων στρατηγικών ελέγχου.
- **Πιθανοτικός δείκτης.** Σύμφωνα με το προσχέδιο κώδικα του ENTSO-E για συνδέσμους HVDC, ένας σταθμός HVDC θα πρέπει να έχει τη δυνατότητα ρύθμισης της ενεργού ισχύος εξόδου του σε δεδομένη τιμή αναφοράς εντός μιας προκαθορισμένης ζώνης ανοχής  $\varepsilon_p$  ( $\pm 0.1$  α.μ. στην παρούσα ανάλυση). Η ικανότητα των μετατροπέων ελεγχόμενης ισχύος να ρυθμίζουν την ενεργό ισχύ τους εντός μιας ζώνης ανοχής, αποτιμάται με τον υπολογισμό της πιθανότητας  $P\left(\left|p_i - p_i^{set}\right| \leq \frac{\varepsilon_p}{2}\right)$ , η οποία εκτιμάται από

το κλάσμα του πλήθους των δειγμάτων που ικανοποιούν την υπόψη συνθήκη, διαιρεμένο με το συνολικό πλήθος  $N_s$ .

Η ανωτέρω μέθοδος πιθανοτικής αξιολόγησης του προφίλ λειτουργίας του MTDC δικτύου εφαρμόστηκε για δύο εναλλακτικές στρατηγικές ελέγχου:

- **Σενάριο αναφοράς (base case).** Οι μετατροπείς ελεγχόμενης ισχύος λειτουργούν με προκαθορισμένες χαρακτηριστικές ελέγχου στατισμού, χωρίς την ανάγκη χρήσης τηλεπικοινωνιακού συστήματος εποπτείας και ελέγχου. Οι τάσεις αναφοράς επιλέχθηκαν ίσες με  $v_{dc,4,5}^* = 1$  α.μ. και οι τιμές στατισμού  $\rho_{dc,4,5} = 5\%$ . Λόγω της ανάγκης τήρησης του ισοζυγίου ισχύος στο MTDC δίκτυο, ο μετατροπέας #5 θεωρείται ότι αναλαμβάνει τον ρόλο ρύθμισης της dc τάσης και συνεπώς δεν έχει νόημα να λάβει εντολή ενεργού ισχύος.
- **Σενάριο βέλτιστης ροής ισχύος (OPF).** Στο σενάριο αυτό επιλύεται το προτεινόμενο πρόβλημα βέλτιστης ροής ισχύος. Η βασική διαφορά σε σχέση με την προηγούμενη στρατηγική έγκειται στη συνεχή μεταβολή και ανανέωση των τάσεων αναφοράς  $v_{dc,4,5}^*$ , οι οποίες αποστέλλονται από το κεντρικό σύστημα ελέγχου κατόπιν επίλυσης του προβλήματος βέλτιστης ροής ισχύος. Οι συντελεστές βαρύτητας της αντικειμενικής συνάρτησης της Εξ. (7.6) επιλέχθηκαν αρχικά ίσοι με 0.5.

#### 7.4.4 Συγκριτικά αποτελέσματα στρατηγικών ελέγχου ισχύος-τάσης

Στο Σχήμα 7.15 και 7.16 εικονίζονται οι μεταβολές μόνιμης κατάστασης των dc τάσεων κάθε κόμβου και της ενεργού ισχύος κάθε μετατροπέα αντίστοιχα, για τις δύο εξεταζόμενες στρατηγικές ελέγχου. Η ενεργός ισχύς αναφοράς που αποστέλλεται στον μετατροπέα #4 τίθεται ίση με 0.5 α.μ., η οποία αντιστοιχεί σε ένα σενάριο λειτουργίας όπου επιδιώκεται η μεταφορά ενεργού ισχύος της τάξης των 250 MW από το βόρειο προς το νότιο άκρο του ηπειρωτικού συστήματος, ανεξαρτήτως των συνθηκών λειτουργίας των νησιωτικών συστημάτων. Οι κατανομές τάσης και ισχύος που εξήχθησαν κατόπιν επίλυσης της ροής ισχύος για το συνολικό πλήθος των 5000 δειγμάτων, εικονίζονται γραφικά μέσω των θηκογραμμμάτων.

Στο σενάριο αναφοράς οι τάσεις κόμβων κυμαίνονται στο εύρος 1-1.06 α.μ. (βλ. Πίνακα 7.5), ενώ από τις ισχείς εξόδου των μετατροπέων επιβεβαιώνεται το κυρίαρχο εξαγωγικό προφίλ λειτουργίας του MTDC δικτύου, λόγω της αυξημένης αιολικής διείσδυσης επί των νησιών. Το βασικό συμπέρασμα του ελέγχου στατισμού είναι ότι η ενσωμάτωση της ενεργού ισχύος αναφοράς  $p_4^{set}$  στο σύστημα ελέγχου του μετατροπέα (βλ. Σχήμα 7.6) δεν επιφέρει το αναμενόμενο αποτέλεσμα στην ακρίβεια ρύθμισης, καθώς η απόκλιση της μέσης τιμής  $\bar{P}_4$  από την ισχύ αναφοράς  $p_4^{set}$  προκύπτει -100% (βλ. Πίνακα 7.6), οδηγώντας σε μηδενική πιθανότητα  $P\left(|\Delta p_4| \leq \frac{\epsilon_p}{2}\right)$ . Παρόλα αυτά, η απόκριση του ελεγκτή στατισμού με ενσωματωμένη την ενεργό ισχύ αναφοράς οδηγεί σε μετατόπιση των dc τάσεων λειτουργίας μεταξύ των μετατροπέων #4 και #5, με αποτέλεσμα ενδεχόμενο έλλειμμα παραγωγής στα

νησιωτικά συστήματα να εξυπηρετείται από το βόρειο άκρο του MTDC δικτύου (εισαγωγή ενέργειας από το ΚΥΤ Φιλιππών), ενώ το νότιο άκρο εξάγει ισχύ προς το ηπειρωτικό σύστημα σε μόνιμη βάση.

Πίνακας 7.5. Επίδραση στρατηγικής ελέγχου στη μέση τιμή και τυπική απόκλιση των  $dc$  τάσεων.

Σενάριο	Δείκτες	Κόμβος 1	Κόμβος 2	Κόμβος 3	Κόμβος 4	Κόμβος 5
Αναφοράς	Μέση τιμή	1.0319	1.0300	1.0266	1.0300	1.0164
	Τυπ. Αποκλ.	0.0139	0.0149	0.0137	0.0100	0.0085
OPF	Μέση τιμή	1.0821	1.0742	1.0657	1.0885	1.0431
	Τυπ. Αποκλ.	0.0177	0.0174	0.0188	0.0195	0.0249

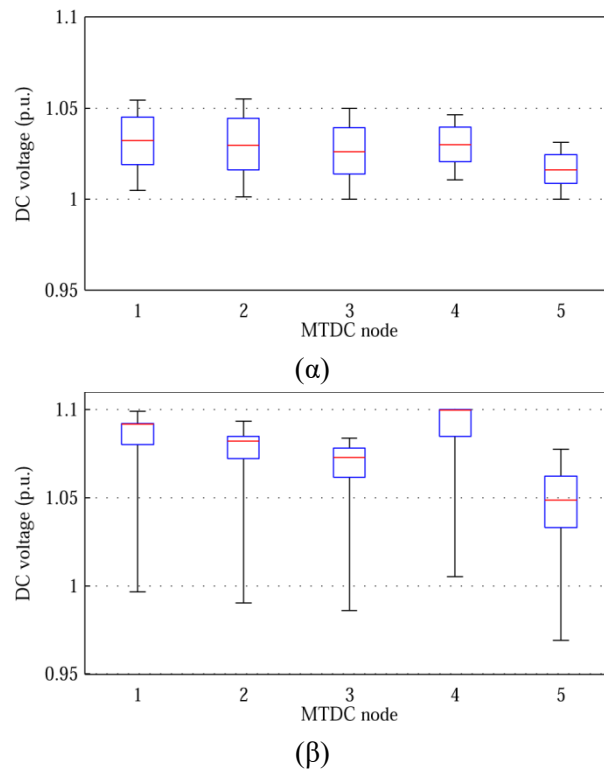
Πίνακας 7.6. Επίδραση στρατηγικής ελέγχου στη μέση τιμή και τυπική απόκλιση της ενεργού ισχύος εξόδου των μετατροπέων.

Σενάριο	Δείκτες	Κόμβος 1	Κόμβος 2	Κόμβος 3	Κόμβος 4	Κόμβος 5
Αναφοράς	Μέση τιμή	0.2352	0.1665	0.0545	-0.0869	-0.3149
	Τυπ. Αποκλ.	0.1568	0.1945	0.0935	0.1989	0.1684
OPF	Μέση τιμή	0.2352	0.1665	0.0545	0.3591	-0.7264
	Τυπ. Αποκλ.	0.1568	0.1945	0.0935	0.1361	0.2501

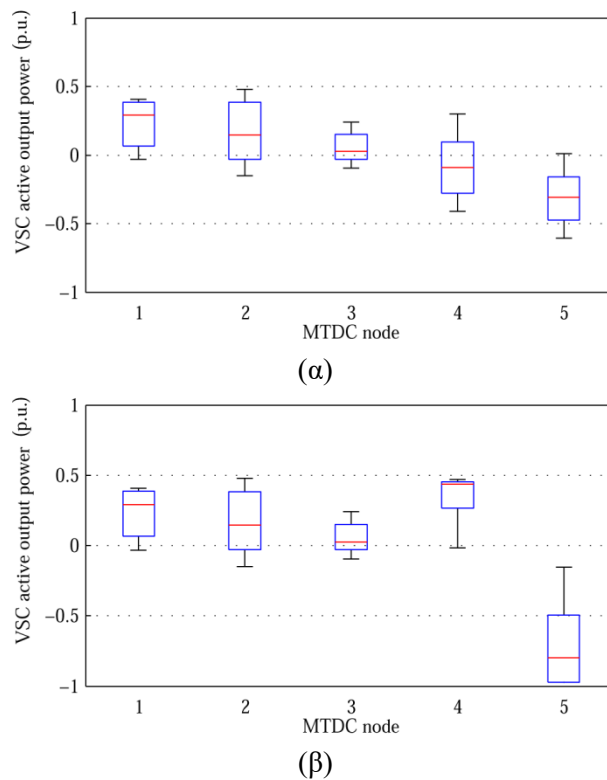
Η ανωτέρω εγγενής αδυναμία του ελέγχου στατισμού να επιφέρει την επιθυμητή ακρίβεια στη ρύθμιση της ισχύος εξόδου βελτιώνεται δραστικά με εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας OPF. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.15(β), το MTDC δίκτυο λειτουργεί σε εμφανώς υψηλότερα επίπεδα τάσης προκειμένου να επιτευχθούν χαμηλές απώλειες, ενώ παρατηρείται δραστική βελτίωση στην ακρίβεια ρύθμιση της ισχύος  $p_4$  καθώς η απόκλιση της μέσης τιμής  $\bar{p}_4$  από την τιμή αναφοράς περιορίστηκε στο -28% και η πιθανότητα

$P\left(|\Delta p_4| \leq \frac{\varepsilon_p}{2}\right)$  αυξήθηκε στην τιμή 0.659. Τα αποτελέσματα αυτά αναδεικνύουν την ευελιξία

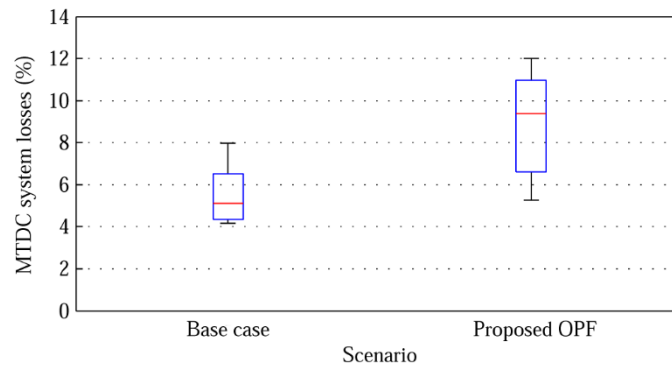
στη ρύθμιση ισχύος-τάσης που μπορεί να επιτευχθεί μέσω της προτεινόμενης στρατηγικής, αναδεικνύοντας παράλληλα χρήσιμα συμπεράσματα ως προς την επίδραση της επιδιωκόμενης ρύθμισης του MTDC δικτύου στα εφαρμοζόμενα κριτήρια βελτιστοποίησης. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα εξέτασης, όπου επιβάλλεται η απορρόφηση ενεργού ισχύος από το βόρειο άκρο του ηπειρωτικού συστήματος, εμφανίζονται υψηλότερες απώλειες σε σχέση με το σενάριο αναφοράς, καθώς επιβάλλεται η μεταφορά αυξημένων ποσοτήτων ενεργού ισχύος μέσω της όδευσης μεταξύ των κόμβων 3-5, η οποία παρουσιάζει το μεγαλύτερο μήκος (250 km) και άρα τη μεγαλύτερη ωμική αντίσταση του κυκλώματος. Ωστόσο, τα συγκεκριμένα αποτελέσματα προφανώς αναδεικνύουν τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά λειτουργίας του εξεταζόμενου MTDC δικτύου και συνεπώς είναι ευμετάβλητα.



Σχήμα 7.15. Επίδραση στρατηγικής ελέγχου στις κατανομές των dc τάσεων. (α) τάσεις κόμβων για το σενάριο αναφοράς, (β) τάσεις κόμβων για το σενάριο OPF.



Σχήμα 7.16. Επίδραση στρατηγικής ελέγχου στις κατανομές της ενεργού ισχύος εξόδου των μετατροπέων HVDC, (α) αποτελέσματα σεναρίου αναφοράς, (β) σεναρίου OPF.

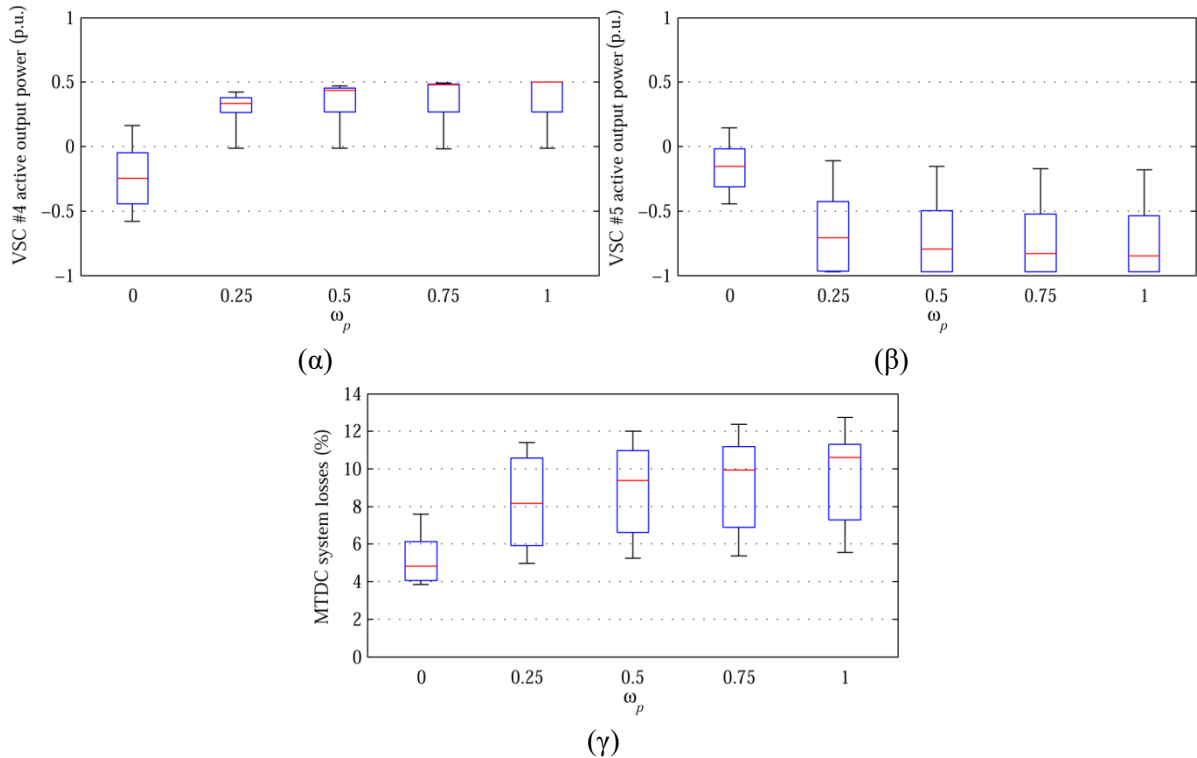


Σχήμα 7.17. Επίδραση στρατηγικής ελέγχου στις απώλειες του MTDC δικτύου.

#### 7.4.5 Επίδραση συντελεστών βαρύτητας στην επίδοση της βέλτιστης ροής ισχύος

Στα αποτελέσματα της προηγούμενης παραγράφου και οι δύο συντελεστές βαρύτητας  $\omega_p$ ,  $\omega_l$  της αντικειμενικής συνάρτησης της Εξ. (7.6) θεωρήθηκαν ίσοι. Στην παρούσα παράγραφο διενεργείται ανάλυση ευαισθησίας ως προς την επίδραση των συντελεστών βαρύτητας στην επίδοση της προτεινόμενης στρατηγικής ελέγχου. Ειδικότερα, επιλύθηκαν πρόσθετες ροές ισχύος για πέντε διαφορετικές τιμές του συντελεστή βαρύτητας  $\omega_p$ , από 0 έως 1. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται τόσο με τη μορφή θηκογραμμάτων στο Σχήμα 7.18, όσο και με τη μορφή μέσης τιμής και τυπικής απόκλισης στον Πίνακα 7.7 και 7.8. Εάν ο συντελεστής  $\omega_p$  τεθεί ίσος με 0 ( $\omega_l=1$ ), τότε η ενεργός ισχύς εξόδου των μετατροπέων ελεγχόμενης ισχύος ρυθμίζεται με αποκλειστικό κριτήριο την ελαχιστοποίηση απωλειών, με αποτέλεσμα να εμφανίζεται πλήρης αδυναμία ρύθμισης της ενεργού ισχύος του μετατροπέα #4 στην τιμή αναφοράς  $p_4^{set}$ . Ο συγκεκριμένος περιορισμός επίδοσης αντιμετωπίζεται με τη σταδιακή αύξηση του συντελεστή βαρύτητας  $\omega_p$ , καθώς η πιθανότητα  $P\left(|\Delta p_4| \leq \frac{\varepsilon_p}{2}\right)$  αυξάνεται από 0.073 σε 0.659 για τιμές του συντελεστή 0.25 και 0.5 αντίστοιχα. Ωστόσο, περαιτέρω αύξηση του συντελεστή δεν επιφέρει πρόσθετη βελτίωση στην ακρίβεια ρύθμισης για το συγκεκριμένο παράδειγμα εξέτασης ( $p_4^{set} = 0.5$  α.μ.), το οποίο οφείλεται στον περιορισμό του προβλήματος βελτιστοποίησης που εισάγει η μέγιστη επιτρεπόμενη φόρτιση του μετατροπέα #5, ο οποίος όπως φαίνεται και στο Σχήμα 7.18(β) εξαναγκάζεται να λειτουργεί σε υψηλά επίπεδα φόρτισης πλησίον της ικανότητάς του, λόγω της απορρόφησης της αυξημένης αιολικής παραγωγής επί των νησιών σε συνδυασμό με την επιβαλλόμενη διακίνηση ισχύος από το βόρειο προς το νότιο τμήμα του ηπειρωτικού συστήματος. Ωστόσο, τα συγκεκριμένα αποτελέσματα είναι ευμετάβλητα καθώς εξαρτώνται σημαντικά από τις ιδιαιτερότητες του MTDC δικτύου.

Με βάση τα παραπάνω, συμπεραίνεται ότι ένα MTDC δίκτυο, πέραν της προφανούς αξιοποίησής του για την αύξηση της διείσδυσης ΑΠΕ και την αξιόπιστη ηλεκτροδότηση απομακρυσμένων νησιωτικών συστημάτων, μπορεί να αξιοποιηθεί και ως ενσωματωμένο στοιχείο του συστήματος μεταφοράς, για τις ανάγκες ρύθμισης του ηπειρωτικού συστήματος, με την προϋπόθεση εφαρμογής ενός κατάλληλου σχήματος ελέγχου φόρτισης των μετατροπέων ελεγχόμενης ισχύος.



Σχήμα 7.18. Επίδραση συντελεστών βαρύτητας αντικειμενικής συνάρτησης στη βέλτιστη ροή ισχύος. Θηκογράμματα (α) ενεργού ισχύος μετατροπέα #4, (β) ενεργού ισχύος μετατροπέα #5, (γ) απωλειών MTDC δικτύου.

Πίνακας 7.7. Επίδραση στρατηγικής OPF στη μέση τιμή και τυπική απόκλιση της ενεργού ισχύος εξόδου των μετατροπέων ελεγχόμενης ισχύος.

$\omega_p$	VSC #4		VSC #5	
	Μέση τιμή	Τυπ. Αποκλ.	Μέση τιμή	Τυπ. Αποκλ.
0	-0.2435	0.2079	-0.1615	0.1608
0.25	0.2984	0.1045	-0.6728	0.2662
0.5	0.3591	0.1361	-0.7264	0.2501
0.75	0.3813	0.1493	-0.7453	0.2426
1	0.3927	0.1567	-0.7533	0.2386

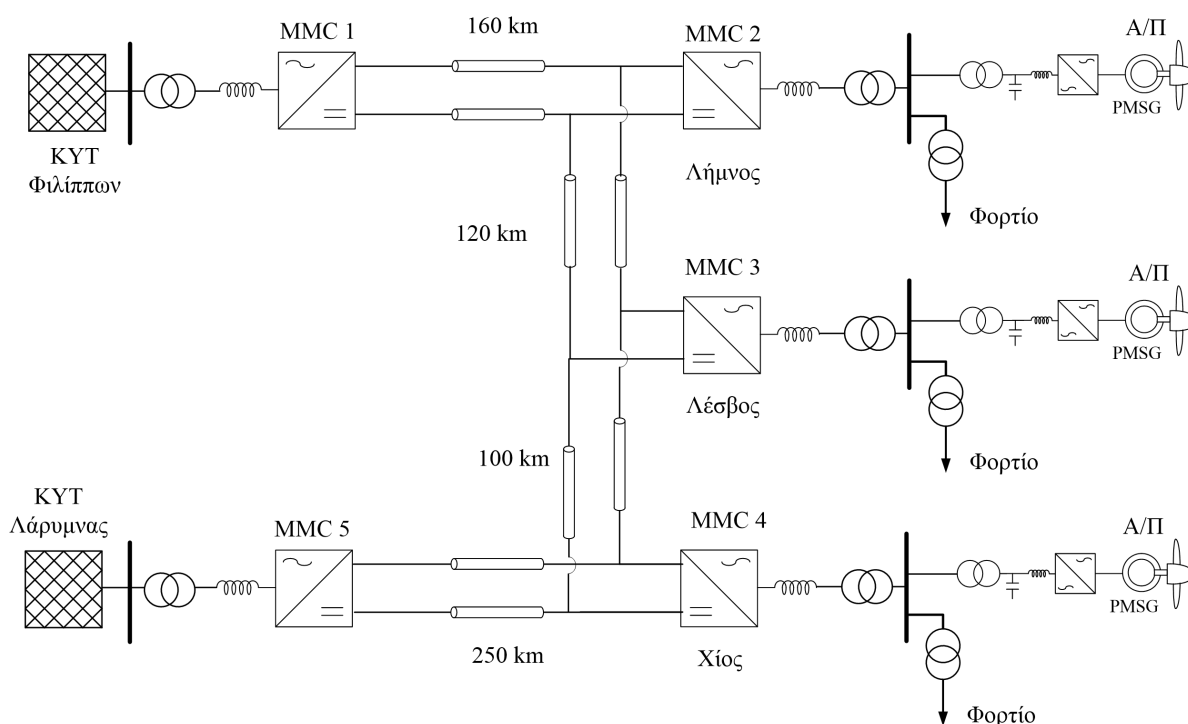
Πίνακας 7.8. Επίδραση στρατηγικής OPF στη μέση τιμή και τυπική απόκλιση των απωλειών του MTDC δικτύου και της ακρίβειας ρύθμισης ισχύος του μετατροπέα #4.

$\omega_p$	Mean	Std	$P\left(\left p_4 - p_4^{set}\right  \leq \frac{\epsilon_p}{2}\right)$
0	5.1273	1.0954	0
0.25	8.1832	2.1958	0.0726
0.5	8.9001	2.1963	0.6596
0.75	9.2215	2.2114	0.6636
1	9.5613	2.1618	0.6656

## 7.5 Διερεύνηση ικανότητας αδιάλειπτης λειτουργίας MTDC δικτύων σε συνθήκες σφάλματος του ηπειρωτικού συστήματος

### 7.5.1 Εισαγωγή

Στην παρούσα ενότητα η ανάλυση της λειτουργίας MTDC δικτύων επεκτείνεται και σε μεταβατικές συνθήκες, με χρήση των δυναμικών μοντέλων προσομοίωσης που παρουσιάστηκαν στο Κεφ. 2. Ειδικότερα, διερευνάται η δυνατότητα αδιάλειπτης λειτουργίας του 5-τερματικού MTDC δικτύου διασύνδεσης νησιών που παρουσιάστηκε στο Σχήμα 7.8, σε συνθήκες σφάλματος του ηπειρωτικού συστήματος. Η επίτευξη αδιάλειπτης λειτουργίας είναι ζωτικής σημασίας για την ασφαλή λειτουργία των διασυνδεόμενων ac συστημάτων, καθώς πιθανή αποσύνδεση της βροχοειδούς διασύνδεσης σε συνθήκες σφάλματος θα επέφερε σημαντική ανισορροπία του ισοζυγίου παραγωγής/ζήτησης του ηπειρωτικού συστήματος σε συνθήκες αυξημένης αιολικής διείσδυσης, καθώς και προσωρινή διακοπή ηλεκτροδότησης των νησιωτικών συστημάτων.



Σχήμα 7.19. Τοπολογία εξεταζόμενου 5-τερματικού δικτύου διασύνδεσης νησιών.

Για λόγους πληρότητας, το εξεταζόμενο σύστημα εικονίζεται ξανά στο Σχήμα 7.19 με μεγαλύτερη λεπτομέρεια ως προς τις αρχές μοντελοποίησης που υιοθετήθηκαν. Λόγω του μεγέθους του εξεταζόμενου συστήματος, οι πέντε μετατροπές MMC αναπαρίστανται από το ισοδύναμο μοντέλο μέσης τιμής που παρουσιάστηκε στο Κεφ. 2 και αξιολογήθηκε στο Κεφ. 3, από όπου διαπιστώθηκε ότι αναπαράγει με εξαιρετική ακρίβεια τη δυναμική συμπεριφορά του πλήρους διακοπτικού μοντέλου ακόμα και σε συνθήκες σφάλματος δικτύου. Κάθε νησιωτικό σύστημα αναπαρίσταται από σύστημα ενός ζυγού, στο οποίο συνδέεται μια ισοδύναμη A/Γ τύπου FCWT και φορτίο σταθερής αγωγιμότητας. Ο σύνδεσμος VSC-HVDC

μοντελοποιείται με τη συμβατική τοπολογία συμμετρικού μονοπόλου, ενώ τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των dc καλωδίων παρατίθενται στο Παράρτημα Γ. Τέλος, για τις ανάγκες ανάλυσης της παρούσας παραγράφου, το ac σύστημα στα δύο ηπειρωτικά άκρα του MTDC δικτύου αναπαρίσταται απλοποιημένα μέσω του ισοδύναμου Thevenin, ως ισοδύναμη πηγή τάση εν σειρά με μια σύνθετη αντίσταση, χρησιμοποιώντας τυπικές στάθμες βραχυκύκλωσης στην πλευρά των 400 kV των ΚΥΤ Φιλιππών και Λάρυμνας.

### 7.5.2 Απόκριση MTDC δικτύου σε τριφασική βύθισης τάσης στο ΕΣΜΗΕ

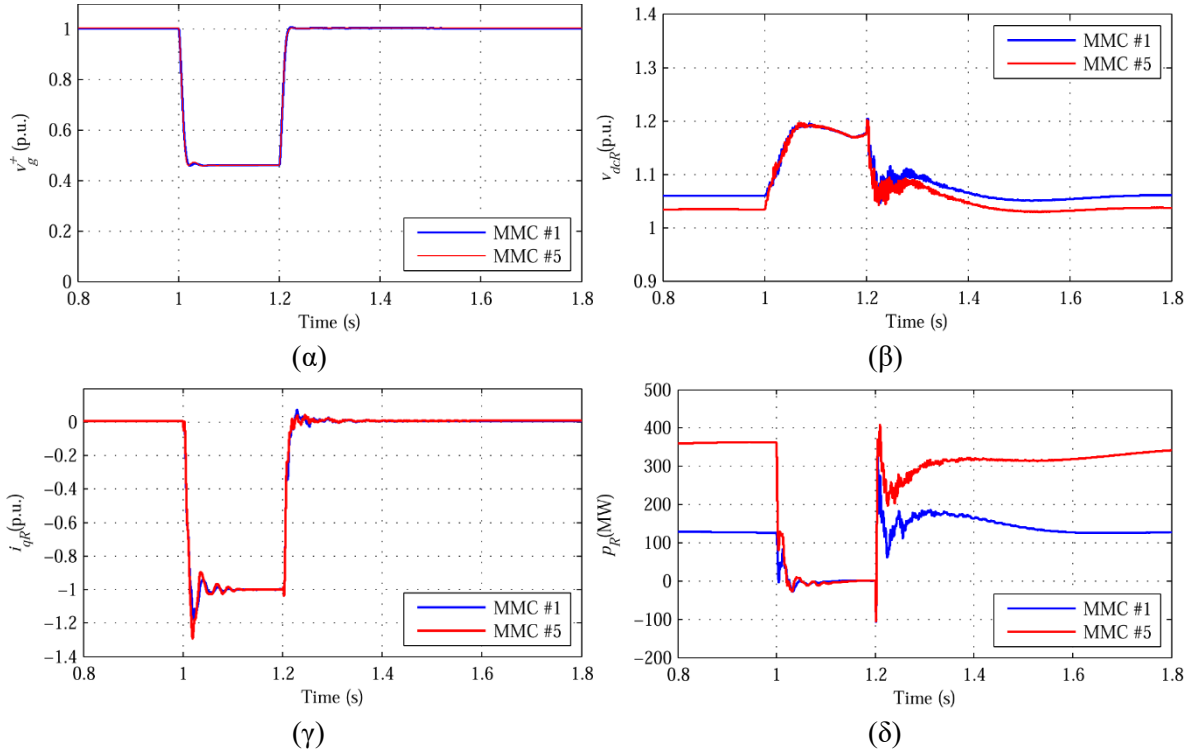
Η εξέταση της ικανότητας αδιάλειπτης λειτουργίας του MTDC δικτύου πραγματοποιείται υπό δυσμενείς συνθήκες λειτουργίας, δηλ. υπό ταυτοχρονισμένη αιολική παραγωγή της τάξεως του 80% της εγκατεστημένης ισχύος των Α/Π, σε συνδυασμό με την εμφάνιση ελάχιστης ζήτησης φορτίου στα νησιωτικά συστήματα. Στο παράδειγμα εξέτασης που ακολουθεί, η dc τάση αναφοράς του μετατροπέα #1 τέθηκε ίση με 1.05 α.μ. και στον μετατροπέα #5 ίση με 1 α.μ, με στόχο την αύξηση της ανάληψης φορτίου από τον μετατροπέα #5, που αντιστοιχεί σε έγχυση ενεργού ισχύος στο νότιο άκρο του MTDC δικτύου της τάξης του 75% της συνολικής εισερχόμενης ισχύος στο MTDC δίκτυο. Οι τιμές στατιμού τάσης και στους δύο μετατροπείς επιλέχθηκαν ίσες με 5%. Αναφορικά με την ενδεικνυόμενη τεχνική FRT στους νησιωτικούς μετατροπείς MMC, επιλέχθηκε η μέθοδος επιβολής τεχνητής βύθισης ac τάσης στα νησιωτικά συστήματα κατόπιν ανίχνευσης dc υπέρτασης, καθώς όπως αναλύθηκε και στο Κεφ. 4, η συγκεκριμένη τεχνική αποτελεί πιο αξιόπιστη λύση συγκριτικά με την επιβολή ταχείας αύξησης της συχνότητας λειτουργίας.

Στο Σχήμα 7.20 παρουσιάζεται η απόκριση των ηπειρωτικών μετατροπέων του MTDC δικτύου κατά την εμφάνιση 3Φ σφάλματος στο σύστημα 400 kV του ηπειρωτικού συστήματος, διάρκειας 200 ms, που οδηγεί σε κοινή βύθιση τάσης της τάξεως του 50% και στους δύο σταθμούς μετατροπής dc/ac. Κατά τη διάρκεια του σφάλματος, ενεργοποιείται η λειτουργία υποστήριξης της ac τάσης από το σύστημα ελέγχου των χερσαίων μετατροπέων, οι οποίοι ρυθμίζουν την άεργο συνιστώσα του ρεύματος εξόδου τους στην τιμή αναφορά (-1 α.μ.), περίπου εντός 50 ms από την εμφάνιση του σφάλματος. Η λειτουργία αυτή εξαντλεί τη δυνατότητα έγχυσης ενεργού ισχύος στο ηπειρωτικό σύστημα όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.20(δ). Τα ρεύματα εξόδου, όπως επίσης και τα ρεύματα άνω υποσκέλους φάσης “a” των ηπειρωτικών μετατροπέων MMC διατηρούνται εντός αποδεκτών ορίων κατά τη διάρκεια του σφάλματος (βλ. Σχήμα 7.21).

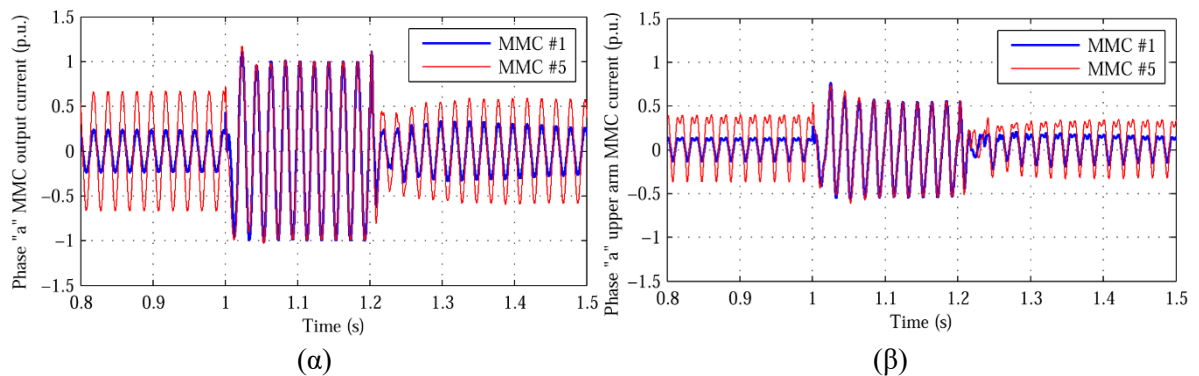
Στο Σχήμα 7.22 και 7.23 παρουσιάζονται αποτελέσματα της απόκρισης στην πλευρά των νησιωτικών συστημάτων. Η εμφανιζόμενη dc υπέρταση ενεργοποιεί το μηχανισμό τεχνητής βύθισης ac τάσης με αποτελέσματα και στα τρία νησιωτικά συστήματα να επιβληθεί στιγμιαία μια βύθιση τάσης της τάξης του 80%, προκειμένου να αξιοποιηθεί η ικανότητα αδιάλειπτης λειτουργίας των Α/Γ. Η λειτουργία αυτή οδηγεί σε ταχύ περιορισμό της εγγεόμενης ενεργού ισχύος των Α/Π, ενώ παράλληλα το μέτρο του ρεύματος εξόδου τους ρυθμίζεται σχεδόν ακαριαία στη μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή. Με την προτεινόμενη σύζευξη λειτουργίας μεταξύ των Α/Π και των νησιωτικών μετατροπέων MMC, η προκληθείσα dc



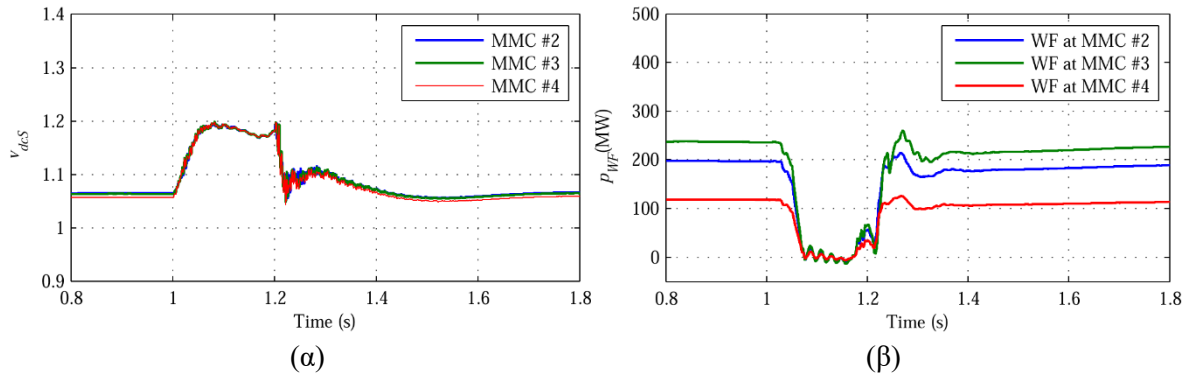
υπέρταση διατηρείται κάτω από 1.2 α.μ. σε κάθε dc κόμβο, γεγονός που υποδηλώνει την αποτελεσματικότητα της μεθόδου βύθισης ac τάσης και σε MTDC δίκτυα. Ωστόσο, στην ανάλυση δε θεωρήθηκε κάποιος περιορισμός ως προς τον ρυθμό αύξησης της ενεργού ισχύος των ηπειρωτικών μετατροπέων μετά την εκκαθάριση του σφάλματος.



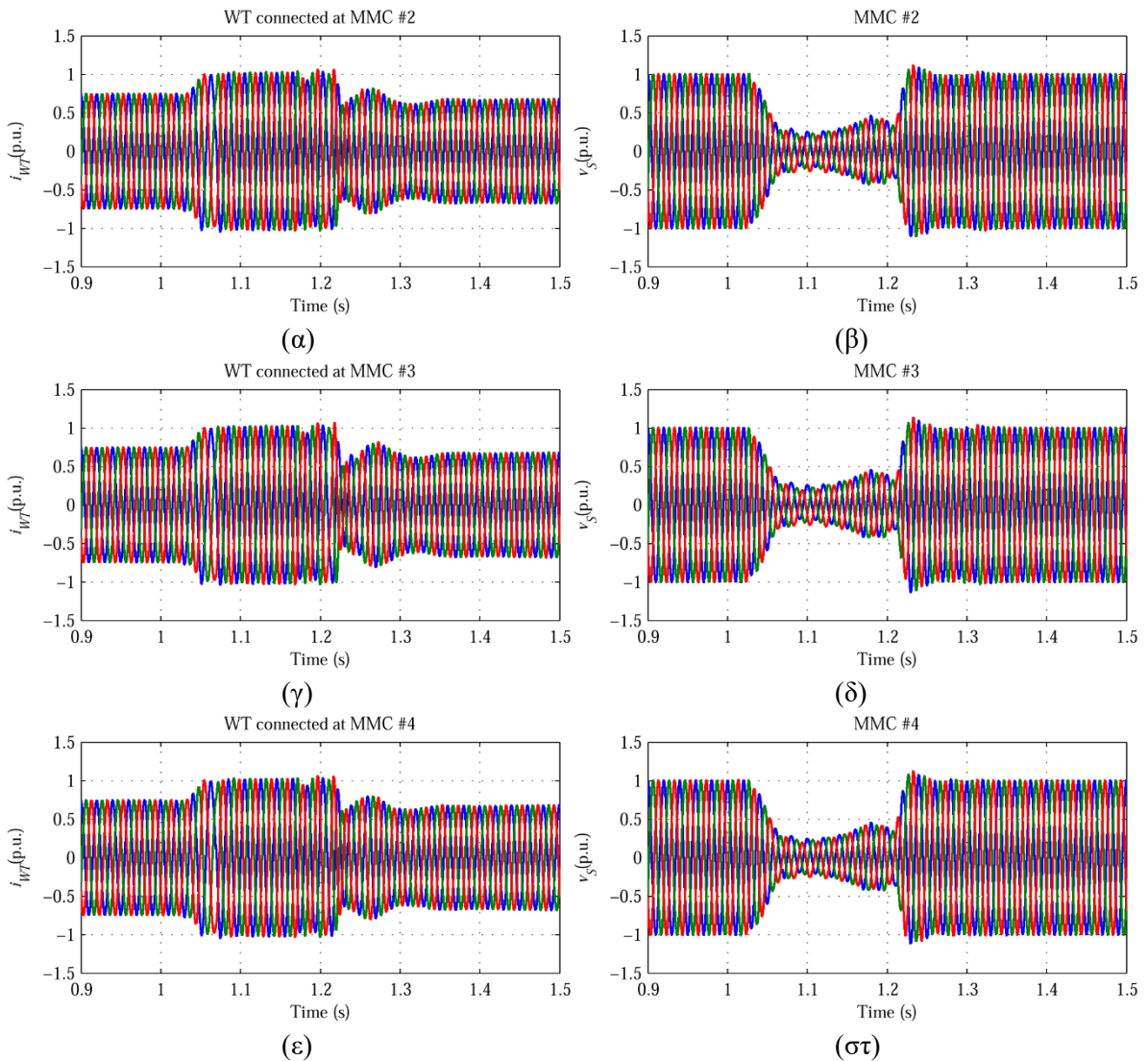
Σχήμα 7.20. Απόκριση ηπειρωτικών μετατροπέων MMC σε 3Φ σφάλμα του ηπειρωτικού συστήματος, με εφαρμογή τεχνητής βύθισης ac τάσης στα νησιωτικά συστήματα. (α) μετρούμενη τάση θετικής ακολουθίας, (β) dc τάση στους ακροδέκτες των μετατροπέων, (γ) άεργος συνιστώσα ρεύματος εξόδου μετατροπέων, (δ) ενεργός ισχύς εξόδου μετατροπέων.



Σχήμα 7.21. Απόκριση (α) ρεύματος εξόδου, (β) ρεύματος άνω υποσκέλους φάσης "α", των ηπειρωτικών μετατροπέων MMC.



Σχήμα 7.22. Απόκριση (α) dc τάσης στους ακροδέκτες των νησιωτικών μετατροπέων MMC, (β) ενεργού ισχύος εξόδου Α/Π επί των νησιών.



Σχήμα 7.23. Απόκριση τριφασικών ρευμάτων εξόδου Α/Γ επί των νησιωτικών συστημάτων (α, γ, ε), και τριφασικών τάσεων εξόδου των νησιωτικών μετατροπέων (β, δ, στ).

## 7.6 Διερεύνηση συμβολής MTDC δικτύων στη ρύθμιση συχνότητας του ηπειρωτικού συστήματος

### 7.6.1 Εισαγωγή

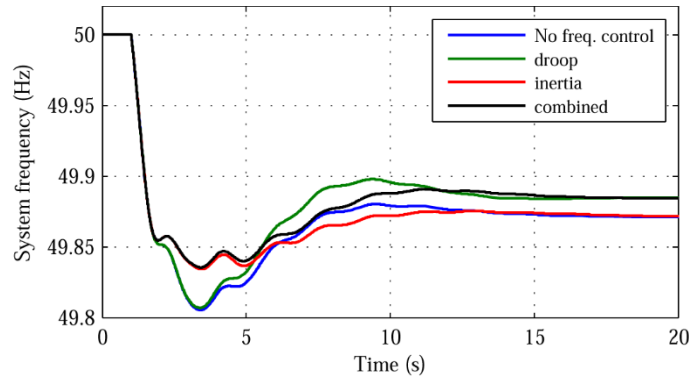
Ένα ενδιαφέρον ερευνητικό ζήτημα αποτελεί η δυνατότητα συμμετοχής ενός MTDC δικτύου στην απόκριση συχνότητας του ηπειρωτικού συστήματος, μέσω αξιοποίησης των διαθέσιμων λειτουργιών ρύθμισης συχνότητας των διασυνδεδεμένων ΘΑΠ, οι οποίες τεκμηριώθηκαν λεπτομερώς στο Κεφ. 4 για την περίπτωση ακτινικής διασύνδεσης VSC-HVDC. Για λόγους συγκρισιμότητας, χρησιμοποιείται η ίδια τοπολογία ηπειρωτικού συστήματος με αυτή στο Σχήμα 4.18, η οποία βασίζεται σε σύστημα δύο περιοχών. Το υπό εξέταση MTDC δίκτυο που εικονίζεται στο Σχήμα 7.24 διασυνδέει δύο όμοια ΘΑΠ ισχύος 300 MW έκαστο, και τα άκρα του συνδέονται στους ζυγούς 7 και 9 του ηπειρωτικού συστήματος [107]. Το μοντέλο του ΘΑΠ είναι πανομοιότυπο με αυτό του Κεφ. 2, και απαρτίζεται από υπεράκτιες Α/Γ που διαθέτουν τους συμβατικούς ελεγκτές απόκρισης συχνότητας. Για τις ανάγκες της παρούσας ανάλυσης, η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο χρήσης φασιθετών.

Στην υφιστάμενη βιβλιογραφία, η πλειοψηφία των εξεταζόμενων τεχνικών ρύθμισης συχνότητας μέσω MTDC δικτύων βασίζεται στη μεταβολή της dc τάσης λειτουργίας συναρτήσει των μετρούμενων μεταβολών συχνότητας, προκειμένου οι τεχνητές μεταβολές τάσης να αποτελέσουν ένα εικονικό μέσο επικοινωνίας στους υπεράκτιους μετατροπείς HVDC. Ωστόσο, η υπόψη μέθοδος παρουσιάζει εμφανή μειονεκτήματα ως προς τον τρόπο λειτουργίας του MTDC δικτύου, καθώς απαιτείται ο ορισμός μιας νεκρής ζώνης λειτουργίας, έτσι ώστε να αποσυζευχθούν οι διακυμάνσεις τάσης που προέρχονται από τη μεταβλητότητα των συνθηκών λειτουργίας, από τις τεχνητές διακυμάνσεις που στοχεύουν στην ενεργοποίηση των ρυθμιστών συχνότητας των υπεράκτιων μετατροπέων.

Στην παρούσα διατριβή εξετάζεται μια εναλλακτική μέθοδος απόκρισης συχνότητας, η οποία αποτελεί επέκταση της φιλοσοφίας που εξετάστηκε στο Σχήμα 4.18, και βασίζεται στην αξιοποίηση των διαθέσιμων τηλεπικοινωνιακών υποδομών του MTDC δικτύου για την αποστολή των μετρούμενων μεταβολών συχνότητας του ηπειρωτικού συστήματος από το σύστημα ελέγχου των μετατροπέων #3, #4 στο σύστημα ελέγχου των υπεράκτιων μετατροπέων #1, #2, με στόχο την εξομοίωση των συνθηκών λειτουργίας στο υπεράκτιο ac δίκτυο και την επακόλουθη ενεργοποίηση των ελεγκτών συχνότητας των υπεράκτιων Α/Γ. Για την αποστολή των μετρούμενων μεταβολών συχνότητας θεωρήθηκε μια χρονική καθυστέρηση της τάξεως των 20 ms, χωρίς ωστόσο να αναμένεται αισθητή διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων ακόμα και για μεγαλύτερες τιμές, λόγω των βραδύτερων μεταβολών συχνότητας.



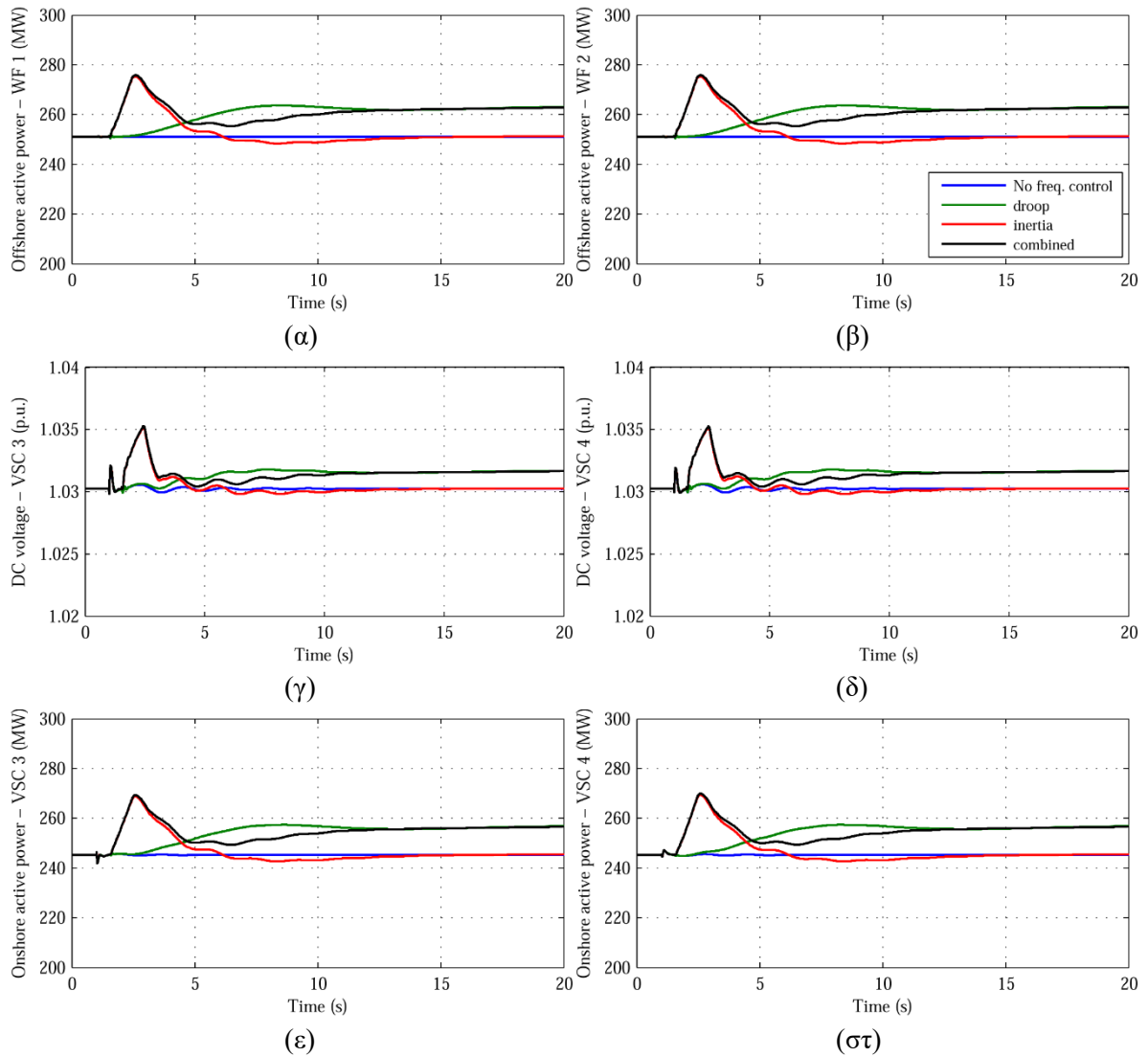
σε κανονικές όσο και σε μεταβατικές συνθήκες, μέσω της λειτουργίας του ελεγκτή στατισμού dc τάσης.



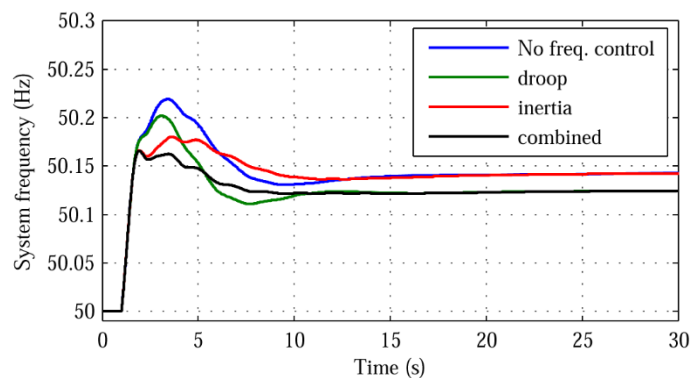
Σχήμα 7.25. Επίδραση εναλλακτικών λειτουργιών ελέγχου ΘΑΠ στην απόκριση συχνότητας ( $R_{WF} = 5\%$ ,  $H_{WF} = 30$  s), σε βηματική αύξηση φορτίου.

Στο Σχήμα 7.27 και 7.28 εξετάζεται η αντίστοιχη ικανότητα των ΘΑΠ να αναπροσαρμόσουν την εγχεόμενη ενεργό ισχύ σε συνθήκες υπερ-συχνότητας, προσομοιώνοντας βηματική μείωση του φορτίου στο ζυγό 7 κατά 200 MW. Όταν δεν εφαρμόζεται έλεγχος συχνότητας, η μεταβατική αύξησή της φθάνει τα 0.22 Hz. Ο έλεγχος στατισμού επιφέρει μικρό περιορισμό της αύξησης συχνότητας, σε αντίθεση με την πλήρη αδυναμία συμβολής του σε συνθήκες υπο-συχνότητας. Η ενώ λόγω μικρή διαφοροποίηση επίδοσης οφείλεται στη δομή του εξωτερικού ελεγκτή της Α/Γ, καθώς σε συνθήκες υπο-συχνότητας σημαντικό ρόλο παίζει η ταχύτητα απόκρισης του ελεγκτή ροπής της Α/Γ, ενώ στην περίπτωση υπερ-συχνότητας επιτυγχάνεται ταχύτερη απόκριση καθώς επενεργεί απευθείας ο περιοριστής επιπέδου ισχύος που έχει παρουσιαστεί στο Σχήμα 2.6. Ο έλεγχος αδρανειακής απόκρισης παρουσιάζει συμβολή στη μείωση του ρυθμού μεταβολής συχνότητας, ενώ ο συνδυαστικός έλεγχος επιφέρει μείωση της μεταβατικής αύξησης συχνότητας από 0.22 σε 0.16 Hz, δηλ. μείωση κατά 27%.

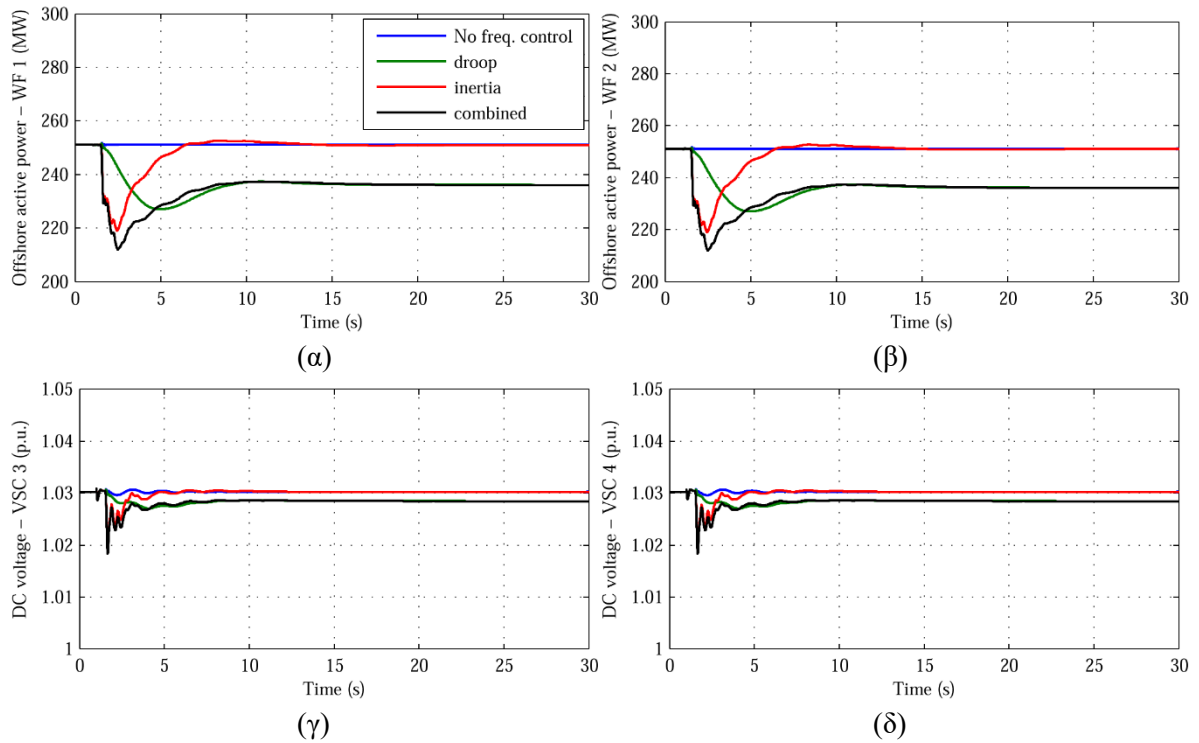
Τέλος, η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα που εικονίζεται στο Σχήμα 7.29 παρουσιάζει μια αισθητή μείωση τα πρώτα δευτερόλεπτα λόγω της ταχύτερης μείωσης της αεροδυναμικής ισχύος σε σχέση με την ενεργό ισχύ αναφοράς, η οποία συναρτάται με τον περιοριστή του ρυθμού μεταβολής της ισχύος αναφοράς. Η μόνιμη μείωση της ισχύος εξόδου επιτεύχθηκε μέσω της πρόσθετης αύξησης της γωνίας βήματος των πτερυγίων, ενώ η ταχύτητα περιστροφής μετά το πέρας διαταραχής επανέρχεται πρακτικά στην αρχική της τιμή.



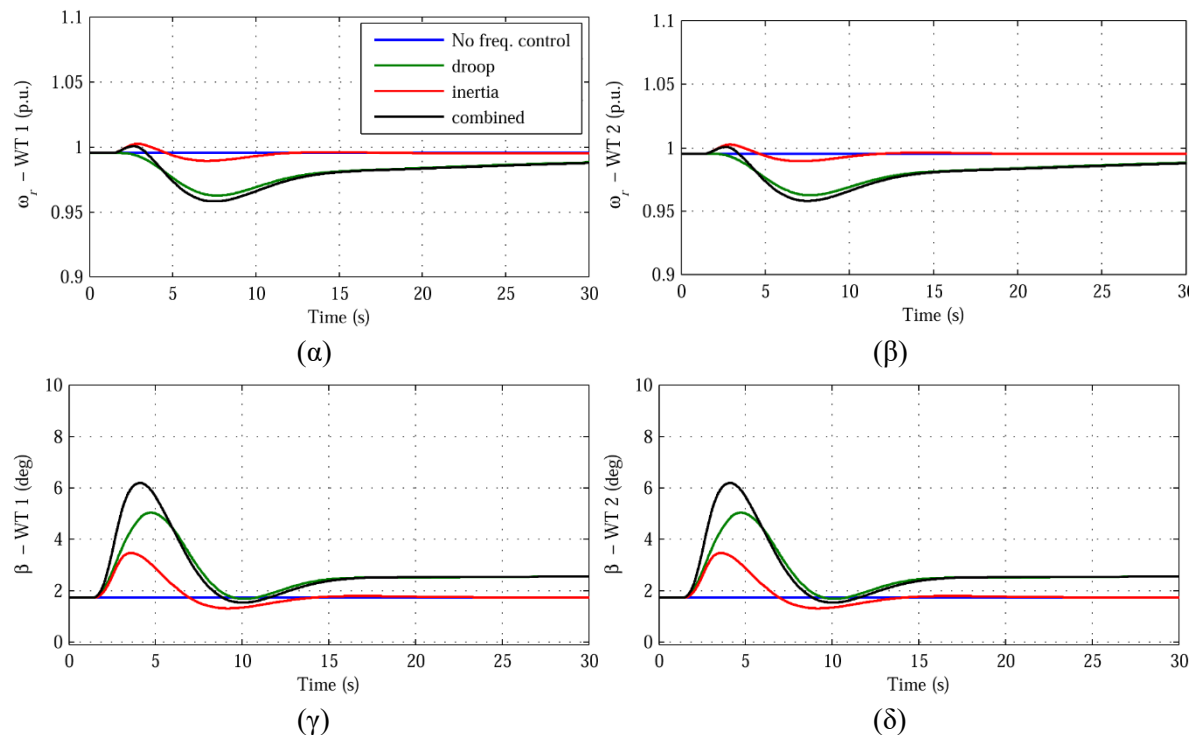
Σχήμα 7.26. Επίδραση εναλλακτικών λειτουργιών ελέγχου συχνότητας ΘΑΠ (α, β) στην εγχεόμενη ισχύ εξόδου των ΘΑΠ #1, #2, (γ, δ) στην dc τάση στην πλευρά των ηπειρωτικών μετατροπέων #3, #4, και (ε, στ) στην ενεργό ισχύ εξόδου των ηπειρωτικών μετατροπέων #3, #4.



Σχήμα 7.27. Επίδραση εναλλακτικών λειτουργιών ελέγχου ΘΑΠ στην απόκριση συχνότητας ( $R_{WF} = 5\%$ ,  $H_{WF} = 30$  s), σε βηματική μείωση φορτίου.



Σχήμα 7.28. Επίδραση εναλλακτικών λειτουργιών ελέγχου συχνότητας ΘΑΠ (α, β) στην εγγεόμενη ισχύ εξόδου των ΘΑΠ #1,#2, (γ, δ) στην dc τάση στην πλευρά των ηπειρωτικών μετατροπέων #3, #4.

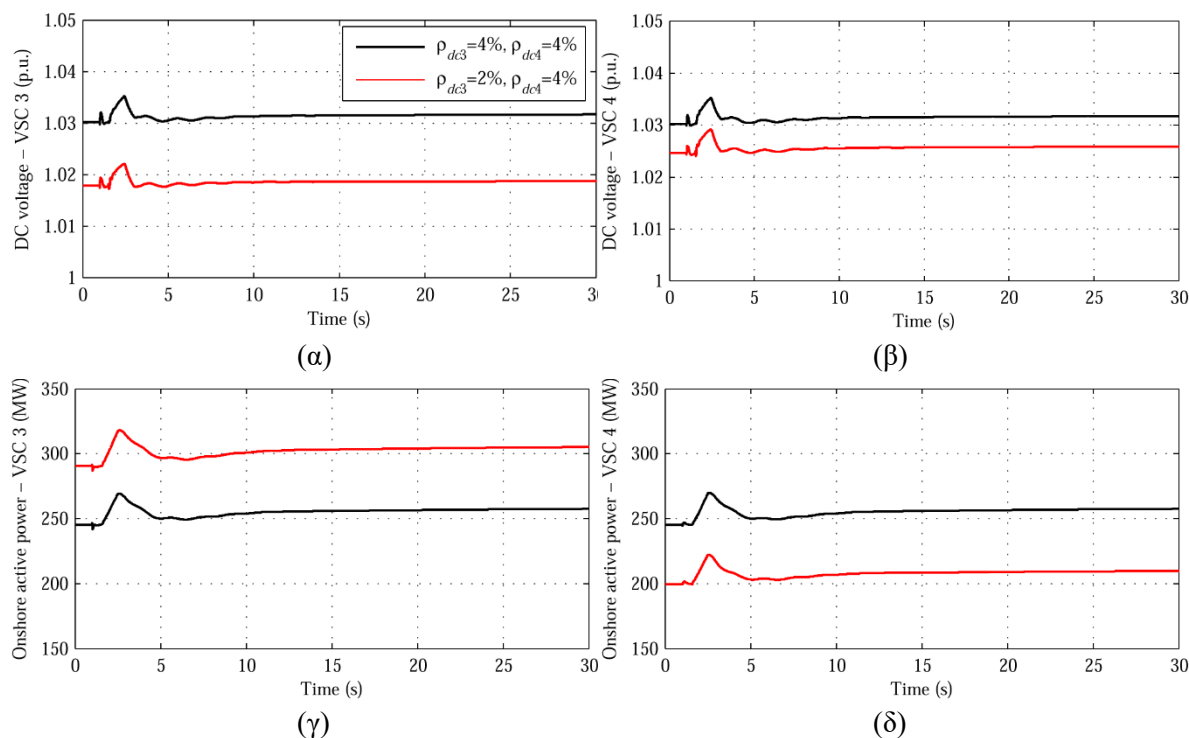


Σχήμα 7.29. Επίδραση εναλλακτικών λειτουργιών ελέγχου συχνότητας ΘΑΠ στην απόκριση (α, β) της ταχύτητας περιστροφής των υπεράκτιων Α/Γ των ΘΑΠ #1,#2 και (γ, δ) της γωνίας βήματος των πτερυγίων των υπεράκτιων Α/Γ των ΘΑΠ #1,#2.

### 7.6.3 Επίδραση κέρδους στατισμού dc τάσης των επίγειων μετατροπέων

Οι παραδοχές λειτουργίας της προηγούμενης παραγράφου οδήγησαν σε πανομοιότυπη δυναμική συμπεριφορά των ηπειρωτικών μετατροπέων, λόγω των ίδιων τιμών στατισμού και τάσης αναφοράς που επιλέχθηκαν στα συστήματα ελέγχου τους. Στην παρούσα παράγραφο διενεργείται μια πρόσθετη ανάλυση ευαισθησίας ως προς την επίδραση της τιμής στατισμού  $\rho_{dc}$  στην ανακατανομή των ροών ισχύος επί του MTDC δικτύου. Αναλυτικότερα, προσομοιώθηκε η ίδια βηματική αύξηση φορτίου κατά 200 MW, ενώ ο μετατροπέας #3 λειτουργεί με μικρότερη τιμή στατισμού από 4% σε 2%, το οποίο υποδηλώνει μεγαλύτερη ανάληψη φορτίου συγκριτικά με τον μετατροπέα #4, ο οποίος λειτουργεί με την αρχική τιμή στατισμού 4%. Στις υπεράκτιες Α/Γ επενεργεί ο συνδυασμένος έλεγχος στατισμού και αδρανειακής απόκρισης.

Όπως επιβεβαιώνεται και από τα αποτελέσματα στο Σχήμα 7.30, ο μετατροπέας #3 αναλαμβάνει περίπου το 60% της συνολικά εισερχόμενης ισχύος στο MTDC δίκτυο, γεγονός που αναδιαμορφώνει τα επίπεδα της dc τάσης λειτουργίας, με τις μικρότερες τιμές να εμφανίζονται στην πλευρά του μετατροπέα μικρότερης τιμής στατισμού. Η ρύθμιση αυτή οδηγεί και στην έγχυση του μεγαλύτερου μέρους της πρόσθετης ισχύος των ΘΑΠ (15 MW από τα 25 MW) στον ζυγό #7 όπου εμφανίστηκε και η αύξηση φορτίου. Ωστόσο, δεν παρουσιάζεται κάποια αλλαγή στην αναμενόμενη απόκριση συχνότητας του εξεταζόμενου ενιαίου ηπειρωτικού συστήματος, όπως και αναμενόταν.



Σχήμα 7.30. Επίδραση κέρδους στατισμού dc τάσης  $\rho_{dc}$  των ηπειρωτικών μετατροπέων, (α, β) στην dc τάση στην πλευρά των ηπειρωτικών μετατροπέων #3, #4, και (γ, δ) στην ενεργό ισχύ εξόδου των ηπειρωτικών μετατροπέων #3, #4.

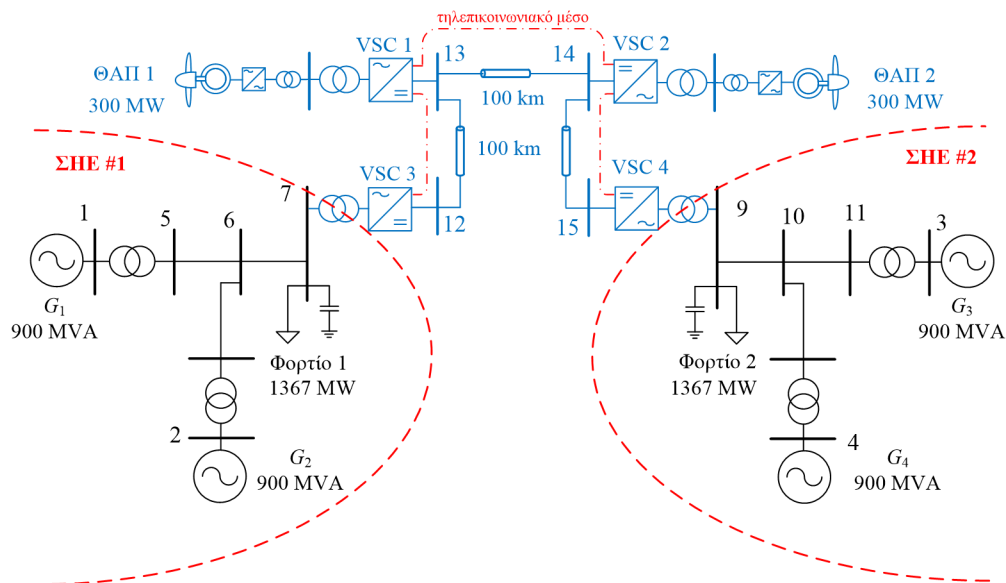


## 7.7 Διερεύνηση συμβολής MTDC δικτύων στη ρύθμιση συχνότητας ασύγχρονων ΣΗΕ

### 7.7.1 Εισαγωγή

Στην ανάλυση της προηγούμενης παραγράφου, η απόκριση συχνότητας του MTDC δικτύου επιτεύχθηκε αποκλειστικά με εξομοίωση των συνθηκών λειτουργίας του ηπειρωτικού συστήματος στα υπεράκτια δίκτυα των ΘΑΠ, απομαστεύοντας την επιθυμητή αιολική ισχύ χωρίς να απαιτείται τροποποίηση στους συμβατικούς ελεγκτές των ηπειρωτικών μετατροπέων. Ωστόσο, στην περίπτωση διασύνδεσης ασύγχρονων ΣΗΕ στο ίδιο MTDC δίκτυο, η προηγούμενη μέθοδος δε μπορεί να εφαρμοστεί αυτούσια, λόγω των διαφορετικών συχνοτήτων λειτουργίας των ηπειρωτικών συστημάτων.

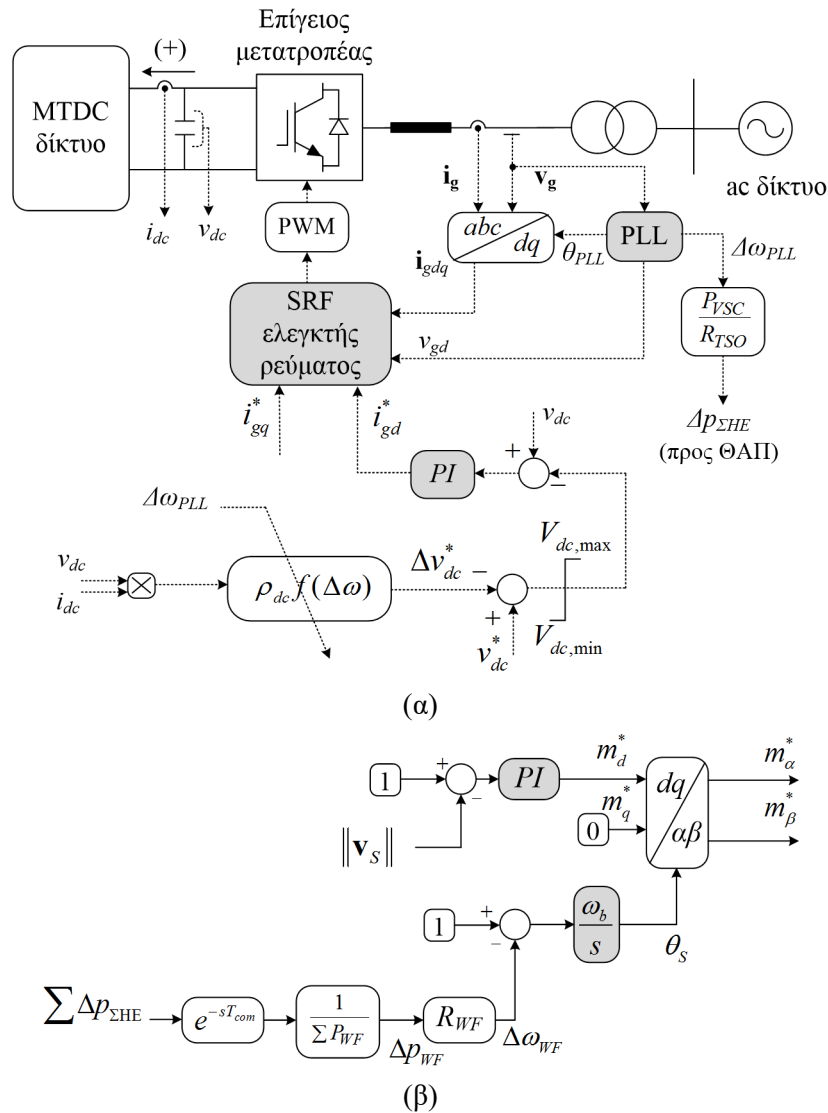
Στόχος της ενότητας αυτής είναι η διερεύνηση (α) του τρόπου ρύθμισης της συχνότητας λειτουργίας των υπεράκτιων δικτύων των ΘΑΠ συναρτήσει των απαιτήσεων απόκρισης συχνότητας των ασύγχρονων ΣΗΕ και (β) ο τρόπος διακίνησης της απαιτούμενης αιολικής ισχύος προς το ΣΗΕ που εμφανίζει κάθε φορά τη διαταραχή συχνότητας, ελαχιστοποιώντας την επίπτωση στη λειτουργία των άλλων διασυνδεδεμένων ΣΗΕ, στα οποία δεν υφίσταται η υπόψη διαταραχή. Για λόγους συγκρισιμότητας με την προηγούμενη περίπτωση εξέτασης, επιλέγεται η ίδια τοπολογία MTDC δικτύου με αυτή που παρουσιάστηκε στο Σχήμα 7.24, χωρίς ωστόσο να υπάρχουν οι διασυνδετικές γραμμές ΥΤ στο ηπειρωτικό ΣΗΕ, με βασική επιδίωξη την προσομοίωση λειτουργίας ενός MTDC δικτύου που συνδέεται σε δύο ασύγχρονα ΣΗΕ (βλ. Σχήμα 7.31). Τόσο τα χαρακτηριστικά των ΘΑΠ όσο και των συμβατικών γεννητριών των ηπειρωτικών ΣΗΕ παραμένουν τα ίδια με αυτά της Παραγράφου 7.6.



Σχήμα 7.31. Τοπολογία 4-τερματικού δικτύου MTDC δικτύου που συνδέεται σε δύο ασύγχρονα ΣΗΕ, για τη διερεύνηση της απόκρισης συχνότητας των ΘΑΠ.

**7.7.2 Προτεινόμενη τεχνική απόκρισης συχνότητας MTDC δικτύου που συνδέεται σε ασύγχρονα ΣΗΕ**

Βασικός προβληματισμός στην περίπτωση τηλεπικοινωνιακής αποστολής των μετρούμενων μεταβολών συχνότητας στα υπεράκτια δίκτυα των ΘΑΠ, αποτελεί ο τρόπος μεταβολής της συχνότητας που θα πρέπει να επιβληθεί στα ΘΑΠ, λαμβάνοντας ταυτόχρονα υπόψη τις ανάγκες απόκρισης συχνότητας των ασύγχρονων ΣΗΕ. Για τον λόγο αυτό, στην παρούσα διατριβή προτείνονται οι ελεγκτές που εικονίζονται στο Σχήμα 7.32, οι οποίοι αποτελούν γενίκευση της φιλοσοφίας ελέγχου που ήδη παρουσιάστηκε στην Παράγραφο 7.6.



Σχήμα 7.32. Προτεινόμενη μεθοδολογία απόκρισης συχνότητας MTDC δικτύου που συνδέεται σε ασύγχρονα ΣΗΕ, (α) ελεγκτής ηπειρωτικού μετατροπέα, (β) ρυθμιστής συχνότητας υπεράκτιου μετατροπέα.

Όπως εικονίζεται και στο Σχήμα 7.32(α), ο ηπειρωτικός μετατροπέας δεν αποστέλλει τις μετρούμενες μεταβολές συχνότητας στους υπεράκτιους μετατροπέες, όπως στην περίπτωση εξέτασης της Παραγράφου 7.6, αλλά υπολογίζει πρωτίστως την απαιτούμενη μεταβολή της εγγεόμενης ενεργού ισχύος προκειμένου να επιτευχθεί η απόκριση συχνότητας που ορίζει ο

διαχειριστής του ΣΗΕ, μέσω της τιμής στατισμού  $R_{TSO}$ . Η μεταβολή ενεργού ισχύος  $\Delta p_{\Sigma HE}$  αποστέλλεται (σε MW) στο σύστημα ελέγχου των υπεράκτιων μετατροπέων (βλ. Σχήμα 7.32(β)), μέσω των διαθέσιμων τηλεπικοινωνιακών υποδομών του MTDC δικτύου. Με βάση τη φιλοσοφία αυτή, κάθε υπεράκτιος μετατροπέας λαμβάνει τις συνολικές απαιτήσεις σε ενεργό ισχύ  $\sum \Delta p_{\Sigma HE}$  των ασύγχρονων ΣΗΕ, οι οποίες στη συνέχεια επιμερίζονται αναλογικά στα διασυνδεδεμένα ΘΑΠ, συναρτήσει της εγκατεστημένης ισχύος τους, ως εξής:

$$\Delta p_{WF} = \frac{\sum \Delta p_{\Sigma HE} \frac{P_{WF}}{\sum P_{WF}}}{P_{WF}} = \frac{\sum \Delta p_{\Sigma HE}}{\sum P_{WF}} \quad (7.20)$$

Λαμβάνοντας υπόψη την τιμή στατισμού των υπεράκτιων Α/Γ  $R_{WF}$ , η απαιτούμενη μεταβολή της συχνότητας λειτουργίας του ΘΑΠ  $\Delta \omega_{WF}$  προσδιορίζεται από την ακόλουθη σχέση (σε α.μ.):

$$\Delta \omega_{WF} = R_{WF} \Delta p_{WF} \quad (7.21)$$

Ο ρυθμιστής συχνότητας που διαμορφώνεται σύμφωνα με τις Εξ. (7.20) και (7.21) εικονίζεται στο Σχήμα 7.32(β), επιτρέπει την ενεργοποίηση των διαθέσιμων λειτουργιών συχνότητας των υπεράκτιων Α/Γ των διασυνδεδεμένων ΘΑΠ, με κριτήριο τη μεταβολή της εγγεόμενης ισχύος σύμφωνα με τις ανάγκες ρύθμισης συχνότητας των ασύγχρονων ΣΗΕ. Ωστόσο, ένας πρόσθετος προβληματισμός που παραμένει για την επίτευξη της επιθυμητής απόκρισης συχνότητας διακριτά σε κάθε ηπειρωτικό μετατροπέα είναι ο τρόπος διακίνησης της αιολικής ισχύος προς το ΣΗΕ που εμφανίζει τη διαταραχή συχνότητας, ελαχιστοποιώντας την επίπτωση στη λειτουργία του άλλου ηπειρωτικού ΣΗΕ που δεν εμφανίζει την εν λόγω διαταραχή.

Στην παρούσα διατριβή, η προτεινόμενη μέθοδος διακίνησης της αιολικής ισχύος προς την επιθυμητή κατεύθυνση βασίζεται στην επιβολή μεταβατικών διακυμάνσεων του στατισμού τάσης  $\rho_{dc}$  του συστήματος ελέγχου των ηπειρωτικών μετατροπέων, κατόπιν ανίχνευσης μεταβολών συχνότητας (βλ. Σχήμα 7.32(α)). Στόχος της προτεινόμενης λογικής ελέγχου είναι η ανάληψη της πρόσθετης ισχύος από τον ηπειρωτικό μετατροπέα του ΣΗΕ που εμφανίζει τη διαταραχή συχνότητας, διατηρώντας κατά το δυνατόν ανεπηρέαστα τα επίπεδα της τάσης λειτουργίας των υπόλοιπων ηπειρωτικών μετατροπέων, προκειμένου να μην αλλοιωθεί η ενεργός ισχύς που διακινούν στα υπόλοιπα ΣΗΕ, η οποία ελέγχεται από παρόμοιους ελεγκτές ισχύος – dc τάσης.

Με βάση τα παραπάνω, στόχος της προτεινόμενης τεχνικής αποτελεί η μεταβατική αναδιαμόρφωση του στατισμού τάσης  $\rho_{dc}$  από την ονομαστική του τιμή, σύμφωνα με έναν νόμο ελέγχου της μορφής:

$$\rho_{dc}' = \rho_{dc} f(\Delta \omega) \quad (7.22)$$

Ειδικότερα, σε περίπτωση μείωσης της συχνότητας λειτουργίας του ΣΗΕ, θα πρέπει να μειωθεί μεταβατικά ο στατισμός τάσης, με στόχο την αύξηση της εγχεόμενης ενεργού ισχύος από τον ηπειρωτικό μετατροπέα, γνωρίζοντας ότι η πρόσθετη ισχύς θα απελευθερωθεί από το σύνολο των διασυνδεδεμένων ΘΑΠ. Στην ανάλυση που ακολουθεί, προσδιορίζεται η μορφή του νόμου ελέγχου της Εξ. (7.22).

Η μεταβολή της απορροφούμενης ενεργού ισχύος ενός ηπειρωτικού μετατροπέα μέσω μεταβολής του στατισμού τάσης  $\rho_{dc}$ , διατηρώντας σταθερή την τάση αναφοράς  $v_{dc}^*$ , μπορεί να προσδιοριστεί από την ακόλουθη σχέση:

$$\Delta p = p' - p = \frac{1}{\rho_{dc}'} (v_{dc}^* - v_{dc}') - \frac{1}{\rho_{dc}} (v_{dc}^* - v_{dc}) \quad (7.23)$$

Η ανωτέρω εξίσωση αναδιατυπώνεται ως εξής:

$$\Delta p = \left( \frac{1}{\rho_{dc}'} - \frac{1}{\rho_{dc}} \right) (v_{dc}^* - v_{dc}) + \frac{1}{\rho_{dc}'} (v_{dc} - v_{dc}') \quad (7.24)$$

Αμελώντας την επίδραση της μεταβολής της τάσης λειτουργίας του MTDC δικτύου στην απορροφούμενη ισχύ  $\Delta p$ , η Εξ. (7.24) δίνει:

$$\Delta p \approx \left( \frac{1}{\rho_{dc}'} - \frac{1}{\rho_{dc}} \right) (v_{dc}^* - v_{dc}) \quad (7.25)$$

Λαμβάνοντας υπόψη την Εξ. (7.23), η ανωτέρω σχέση αναδιατυπώνεται ως εξής:

$$\Delta p = \left( \frac{1}{\rho_{dc}'} - \frac{1}{\rho_{dc}} \right) \rho_{dc} p \quad (7.26)$$

Η μεταβολή της απορροφούμενης ενεργού ισχύος του μετατροπέα HVDC, για τις ανάγκες ρύθμισης συχνότητας του ηπειρωτικού ΣΗΕ, θα πρέπει να προσεγγίσει την τιμή:

$$\Delta p = \frac{\Delta \omega}{R_{TSO}} \quad (7.27)$$

Συνδυάζοντας τις Εξ (7.26) και (7.27), συμπεραίνεται ότι η τιμή του στατισμού τάσης  $\rho_{dc}'$  θα πρέπει να μεταβληθεί σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$\rho_{dc}' = \rho_{dc} \frac{1}{1 + \frac{\Delta \omega}{p R_{TSO}}} \quad (7.28)$$

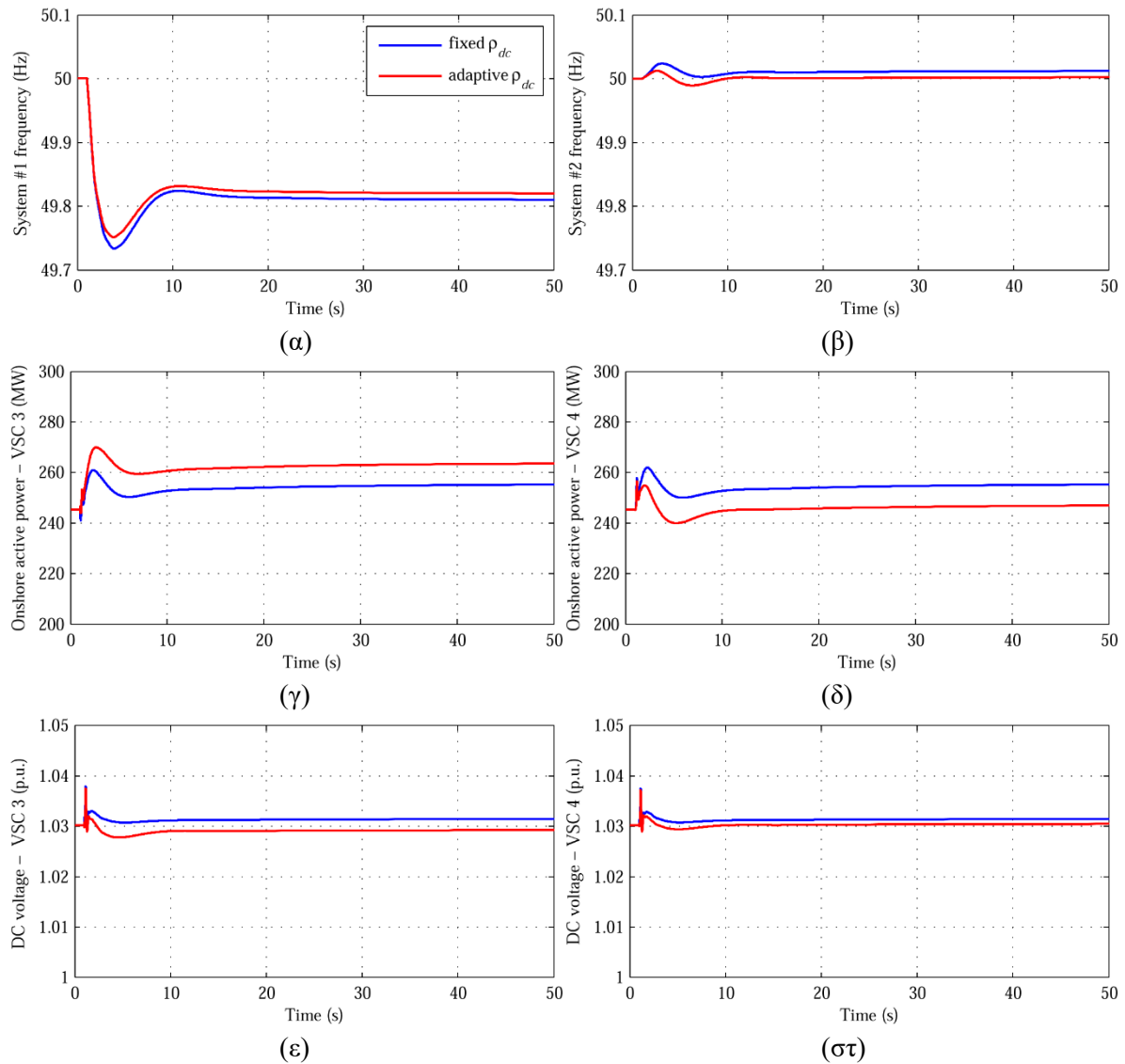
Όπως διαπιστώνεται από την Εξ. (7.28), για την ακριβή ρύθμιση του στατισμού τάσης, απαιτείται η μέτρηση των μεταβολών συχνότητας αλλά και η μέτρηση της απορροφούμενης ισχύος του επίγειου μετατροπέα HVDC.

### 7.7.3 Απόκριση MTDC δικτύου σε διαταραχές συχνότητας του ενός ΣΗΕ

Λαμβάνοντας υπόψη την προτεινόμενη μεθοδολογία απόκρισης συχνότητας της προηγούμενης παραγράφου, προσομοιώνεται ακολούθως η απόκριση του MTDC δικτύου σε βηματική αύξηση φορτίου του ΣΗΕ #1, με στόχο την αξιολόγηση της επιτευχθείσας ακρίβειας στην απόκριση συχνότητας του μετατροπέα #3 (βλ. Σχήμα 7.31). Στα αποτελέσματα προσομοιώσεων που ακολουθούν, επενεργεί ο συνδυασμένος έλεγχος στατισμού και αδρανειακής απόκρισης των υπεράκτιων Α/Γ, με τις ίδιες τιμές παραμέτρων με αυτές της Παραγράφου 7.6. Η τιμή στατισμού  $R_{TSO}$  για την απόκριση συχνότητας των ΣΗΕ #1 και #2 έχει οριστεί στην τιμή 5%.

Στο Σχήμα 7.33 παρουσιάζεται η απόκριση των ηπειρωτικών μετατροπέων σε βηματική αύξηση του φορτίου του ΣΗΕ #1 κατά 200 MW τη χρονική στιγμή 1 s. Όπως διαπιστώνεται και από τα αποτελέσματα προσομοίωσης, αν ο στατισμός  $\rho_{dc}$  μείνει αμετάβλητος (4% στην παρούσα ανάλυση), τότε η πρόσθετη αιολική ισχύς που απελευθερώνεται από τα ΘΑΠ #1 και #2, ισοκατανέμεται στα δύο ασύγχρονα ΣΗΕ, με αποτέλεσμα να εμφανίζεται μικρή αλλά ανεπιθύμητη αύξηση συχνότητας στο υγιές ΣΗΕ #2, και παράλληλα αδυναμία του επίγειου μετατροπέα #3 να επιτύχει την απαιτούμενη απόκριση στατισμού που ορίζει ο διαχειριστής του ΣΗΕ #1, καθώς αυτή τελικά διαμορφώνεται στην τιμή 10.9%. Από την άλλη πλευρά, ο προτεινόμενος νόμος ελέγχου της Εξ. (7.28) οδηγεί σε κατάλληλη μείωση του στατισμού  $\rho_{dc}$  του μετατροπέα #3, με αποτέλεσμα πρακτικά το σύνολο της πρόσθετης αιολικής ισχύος να διακινηθεί προς την επιθυμητή κατεύθυνση (προς ΣΗΕ #1), ενώ η συχνότητα του ΣΗΕ #2 παραμένει στην ονομαστική της τιμή. Η εν λόγω απόκριση επιβεβαιώνει και την ορθότητα της ανάλυσης που διενεργήθηκε στην Παράγραφο 7.7.2, ιδίως ως προς την αμελητέα μεταβολή των επιπέδων dc τάσης με την προτεινόμενη μέθοδο ρύθμισης του στατισμού τάσης. Τέλος, στα υπεράκτια ΘΑΠ επιβάλλεται μεταβολή συχνότητας μικρότερου μεγέθους συγκριτικά με τη διαταραχή του ΣΗΕ #1 (βλ. Σχήμα 7.34), η οποία δεν επηρεάζεται από τον τρόπο ρύθμισης του στατισμού  $\rho_{dc}$  των ηπειρωτικών μετατροπέων #3 και #4.

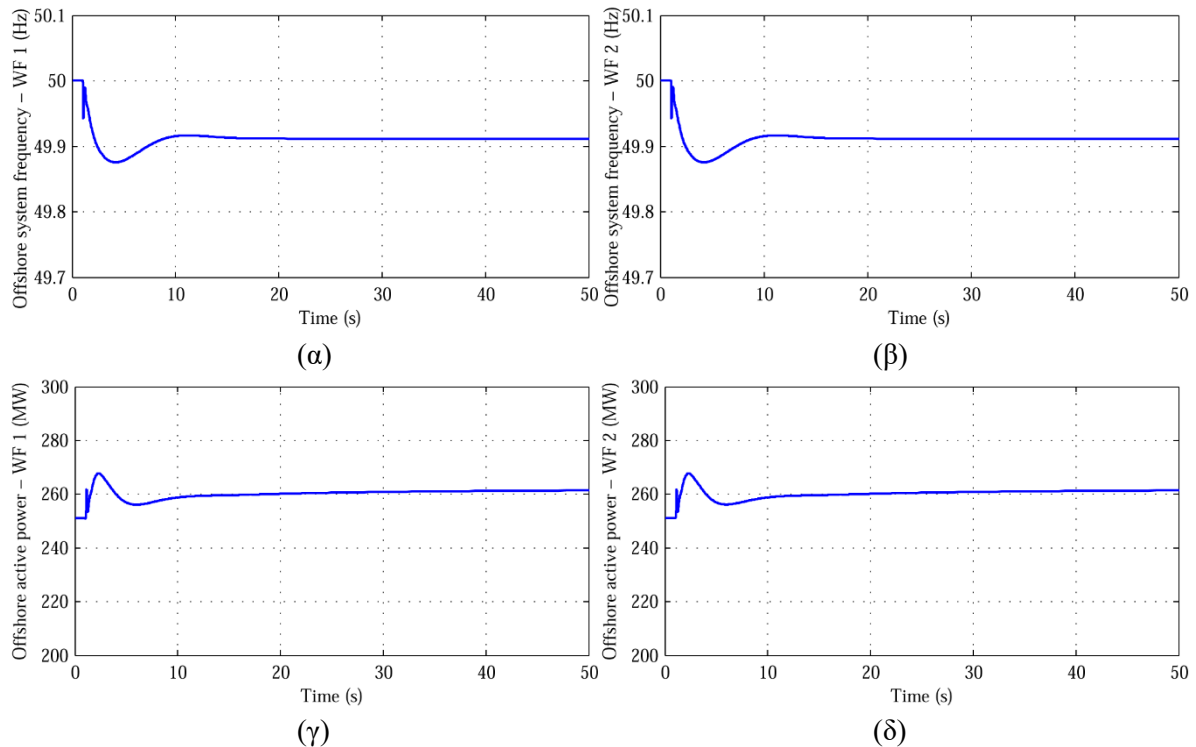
Η ικανοποιητική επίδοση της προτεινόμενης τεχνικής ελέγχου MTDC δικτύων παρουσία διακυμάνσεων συχνότητας, επιβεβαιώνεται και για διαφορετικές τιμές στατισμού  $R_{TSO}$ . Στον Πίνακα 7.9 παρατίθενται αναλυτικότερα τα αποτελέσματα της επιτευχθείσας τιμής στατισμού συχνότητας που εμφανίζει ο μετατροπέας #3, για δύο διαφορετικές τιμές του στατισμού  $R_{TSO}$ . Από τα εν λόγω αποτελέσματα επιβεβαιώνεται η δραστική βελτίωση που επιτυγχάνεται στην ακρίβεια ρύθμισης με την προτεινόμενη φιλοσοφία ελέγχου του στατισμού τάσης  $\rho_{dc}$ , γεγονός που καθιστά ρεαλιστική την τηλεπικοινωνιακή μέθοδο απόκρισης συχνότητας ακόμα και σε MTDC δίκτυα που συνδέονται σε ασύγχρονα ΣΗΕ.



Σχήμα 7.33. Απόκριση MTDC δικτύου με την προτεινόμενη τεχνική μεταβατικής διακόμανσης του στατισμού τάσης των ηπειρωτικών μετατροπέων, (α) συχνότητα λειτουργίας ΣΗΕ #1, (β) συχνότητα λειτουργίας ΣΗΕ #2, (γ) ενεργός ισχύς εξόδου ηπειρωτικού μετατροπέα #3, (δ) ενεργός ισχύς εξόδου ηπειρωτικού μετατροπέα #4, (ε) dc τάση ακροδεκτών μετατροπέα #3, (στ) dc τάση ακροδεκτών μετατροπέα #4.

Πίνακας 7.9. Συγκριτική αξιολόγηση επιτευχθείσας ακρίβειας στη ρύθμιση στατισμού συχνότητας του μετατροπέα #3, με και χωρίς την προτεινόμενη μέθοδο μεταβατικής ρύθμισης του στατισμού τάσης  $\rho_{dc}$ .

Επιθυμητή τιμή στατισμού $R_{TSO}$ (%)	Επιτευχθείσα τιμή με την προτεινόμενη τεχνική ελέγχου (%)	Επιτευχθείσα τιμή χωρίς παρεμβάσεις (%)
5	5.8	10.9
10	11.3	21.2



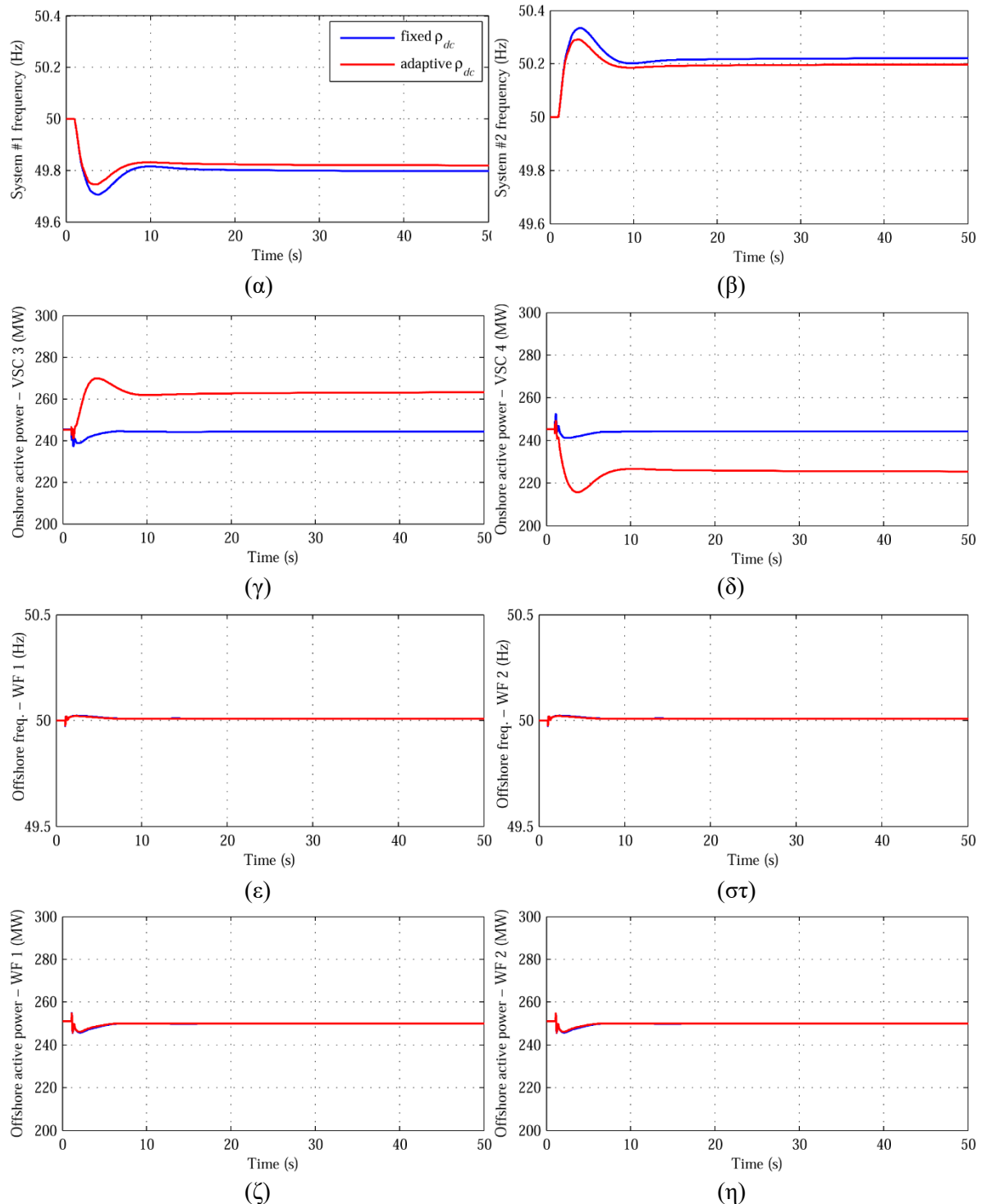
Σχήμα 7.34. Απόκριση ΘΑΠ #1 και #2 για τη βηματική αύξηση φορτίου του Σχ. 7.33, (α) συχνότητα λειτουργίας ΘΑΠ #1, (β) συχνότητα λειτουργίας ΘΑΠ #2, (γ) ενεργός ισχύς ΘΑΠ #1, (δ) ενεργό ισχύς ΘΑΠ #2.

#### 7.7.4 Απόκριση MTDC δικτύου σε ταυτόχρονες διαταραχές συχνότητας των ασύγχρονων ΣΗΕ

Η τεχνική που προτείνεται στην παρούσα διατριβή αναφορικά με τη μεταβατική ρύθμιση του στατισμού τάσης των ηπειρωτικών μετατροπέων HVDC παρουσία μεταβολών συχνότητας, είναι απαραίτητη όχι μόνο για την ελεγχόμενη διακίνηση της πρόσθετης αιολικής ισχύος που απελευθερώνεται (ή μειώνεται) από τα ΘΑΠ προς το ΣΗΕ που εμφανίζει τη διαταραχή, αλλά και για την επίτευξη της απαιτούμενης απόκρισης παρουσία ταυτόχρονων και ενδεχομένως αντιτιθέμενων μεταβολών συχνότητας στα ασύγχρονα ΣΗΕ, λόγω της αδυναμίας των ρυθμιστών συχνότητας των υπεράκτιων ΘΑΠ να διαφοροποιηθούν ως προς την επιβαλλόμενη μεταβολή (αύξηση ή μείωση) συχνότητας στα υπεράκτια δίκτυα, όπως διαπιστώνεται και από τη μορφή του νόμου ελέγχου της Εξ. (7.20).

Για την επιβεβαίωση του ανωτέρω επιχειρήματος, στο Σχήμα 7.35 προσομοιώνεται η απόκριση του MTDC δικτύου σε ένα θεωρητικό σενάριο λειτουργίας όπου υφίσταται ταυτόχρονα βηματική αύξηση του φορτίου του ΣΗΕ #1 κατά 200 MW, αλλά και ισόποση μείωση του φορτίου στο ΣΗΕ #2. Όπως επιβεβαιώνεται και από το εν λόγω σχήμα, λόγω της αλληλοαναίρεσης των απαιτήσεων σε ενεργό ισχύ των ΣΗΕ #1 και #2, το σήμα ελέγχου  $\sum \Delta p_{\Sigma \text{ΣΗΕ}}$  πρακτικά γίνεται μηδενικό, γεγονός που δε μεταβάλλει ουσιαστικά την παραγόμενη ισχύ των διασυνδεδεμένων ΘΑΠ. Έτσι, στην περίπτωση λειτουργίας των ηπειρωτικών μετατροπέων HVDC με σταθερή τιμή στατισμού dc τάσης, η ενεργός ισχύς εξόδου τους

πρακτικά δε μεταβάλλεται με αποτέλεσμα να μην επιφέρουν την επιθυμητή απόκριση συχνότητας.



Σχήμα 7.35. Απόκριση MTDC δικτύου σε ταυτόχρονες διαταραχές συχνότητας των ασύγχρονων ΣΗΕ, (α,β) συχνότητα ΣΗΕ #1,#2, (γ,δ)ενεργός ισχύς εξόδου ηπειρωτικού μετατροπέα #3,#4, (ε,στ) συχνότητα λειτουργίας ΘΑΠ #1,#2, (ζ,η) ενεργός ισχύς εξόδου ΘΑΠ #1,#2.

Από την άλλη πλευρά, με την εφαρμογή της προτεινόμενης τεχνικής ελέγχου, επιτυγχάνεται μείωση του στατισμού τάσης στον μετατροπέα #3 και ταυτόχρονη αύξηση του στον



μετατροπέα #4, με αποτέλεσμα οι ηπειρωτικοί μετατροπείς να επιφέρουν την απαιτούμενη απόκριση συχνότητας μόνο μέσω επανακατανομής των ροών ισχύος επί του MTDC δικτύου, χωρίς να απαιτείται η μεταβολή της παραγόμενης ισχύος των ΘΑΠ για τον σκοπό αυτό.

Συμπερασματικά, η προτεινόμενη μέθοδος τηλεπικοινωνιακής αποστολής των απαιτούμενων μεταβολών ενεργού ισχύος στους υπεράκτιους μετατροπείς των ΘΑΠ, σε συνδυασμό με τη μεταβατική διακύμανση του στατισμού τάσης των ηπειρωτικών μετατροπέων συναρτήσει των μεταβολών συχνότητας, επιφέρει την επιθυμητή απόκριση συχνότητας που ορίζουν οι κώδικες συστήματος, ακόμα και στη γενική περίπτωση σύνδεσης του MTDC δικτύου σε ασύγχρονα ΣΗΕ.



## 8 ΣΥΝΟΨΗ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

### 8.1.1 Ανακεφαλαίωση

Αντικείμενο της παρούσας διατριβής είναι η συμβολή στην ανάπτυξη μεταβατικών μοντέλων προσομοίωσης και τεχνικών ελέγχου ΘΑΠ, νησιωτικών ΣΗΕ, και συστημάτων διασύνδεσης VSC-HVDC, που εξασφαλίζουν την ικανοποίηση θεμελιωδών τεχνικών απαιτήσεων σύγχρονων κωδίκων συστήματος, όπως η αδιάλειπτη λειτουργία σε συνθήκες σφάλματος στην πλευρά του συστήματος ΕΡ και η συμμετοχή των σταθμών HVDC στη ρύθμιση συχνότητας.

Η διατριβή κινήθηκε σε τέσσερις βασικούς άξονες: (α) την ανάπτυξη δυναμικών μοντέλων προσομοίωσης υπεράκτιων Α/Γ και μετατροπέων MMC, (β) στη συγκριτική αξιολόγηση εναλλακτικών τεχνικών επίτευξης αδιάλειπτης λειτουργίας και απόκρισης συχνότητας σε ακτινική διασύνδεση VSC-HVDC ενός ΘΑΠ, (γ) στη διερεύνηση της ικανότητας συγχρονισμού ενός συνδέσμου VSC-HVDC που συνδέεται σε νησιωτικό ΣΗΕ με συνύπαρξη πολλαπλών πηγών ηλεκτροδότησης, και (δ) στον έλεγχο MTDC δικτύων τόσο σε συνθήκες μόνιμης κατάστασης όσο και σε μεταβατικές συνθήκες λειτουργίας.

Το θεωρητικό υπόβαθρο για την ανάπτυξη των μεταβατικών μοντέλων προσομοίωσης και των τεχνικών ελέγχου παρουσιάστηκε στο Κεφ. 2, τόσο για τις υπεράκτιες Α/Γ όσο και για τους κεντρικούς μετατροπέες HVDC πολλαπλών επιπέδων. Η επικύρωση των μοντέλων που αναπτύχθηκαν πραγματοποιήθηκε στο Κεφ. 3 εξετάζοντας ακτινική διασύνδεση VSC-HVDC μεταξύ δύο ac συστημάτων. Στη συνέχεια, στο Κεφ. 4 εξετάστηκαν εναλλακτικές μέθοδοι επίτευξης αδιάλειπτης λειτουργίας και διερευνήθηκε η συμβολή ενός ΘΑΠ στη ρύθμιση συχνότητας του ηπειρωτικού συστήματος. Στο Κεφ. 5 παρουσιάζεται μια ιδιαίτερα σημαντική συμβολή της παρούσας διατριβής, που αφορά στη σχεδίαση μιας νέας τεχνικής ελέγχου που εξασφαλίζει ταυτόχρονα αδιάλειπτη λειτουργία και απόκριση συχνότητας, χωρίς τους περιορισμούς επίδοσης των συμβατικών ελεγκτών συχνότητας των Α/Γ που αξιολογήθηκαν στο Κεφ. 4. Η σχεδίαση του ελεγκτή πραγματοποιήθηκε με εξαγωγή κατάλληλων συναρτήσεων μεταφοράς δευτέρου βαθμού, ενώ πραγματοποιήθηκαν και προσομοιώσεις στο πεδίο του χρόνου, με χρήση των διακοπτικών μοντέλων προσομοίωσης στην περίπτωση εξέτασης αδιάλειπτης λειτουργίας, και των απλοποιημένων μοντέλων θεμελιώδους συχνότητας για τη διερεύνηση της συμμετοχής ενός ΘΑΠ στη ρύθμιση συχνότητας με εφαρμογή του προτεινόμενων ελεγκτών των Α/Γ και του υπεράκτιου μετατροπέα HVDC. Στο Κεφ. 6 η ανάλυση επικεντρώνεται στην ανάπτυξη ενός σχήματος ελέγχου που επιφέρει την ευσταθή λειτουργία ενός συνδέσμου MMC-HVDC που συνδέεται σε νησιωτικό ΣΗΕ με συνύπαρξη εξωτερικής διασύνδεσης ΕΡ, σε οποιαδήποτε πιθανή κατάσταση λειτουργίας, όπως πχ σε ενδεχόμενο απώλειας της διασύνδεσης ΕΡ ή και κατά τη μετάβαση σε λειτουργία παθητικού συστήματος.

Το τελευταίο μέρος της διατριβής αφορά στην εξέταση MTDC δικτύων, τόσο σε συνθήκες μόνιμης κατάστασης, αλλά και σε μεταβατικές συνθήκες λειτουργίας. Πραγματοποιήθηκε συγκριτική αξιολόγηση εναλλακτικών χαρακτηριστικών ελέγχου με ανάλυση ροής ισχύος, επιλέγοντας ως παράδειγμα εξέτασης ένα MTDC δίκτυο που παρουσιάζει ενδιαφέρον για τα ελληνικά δεδομένα και αφορά στην ηλεκτρική διασύνδεση των νησιών του Β. Α. Αιγαίου με το ηπειρωτικό σύστημα. Τέλος, διερευνήθηκε η ικανότητα αδιάλειπτης λειτουργίας του MTDC δικτύου σε συνθήκες σφάλματος και η συμμετοχή του στη ρύθμιση συχνότητας, με βάση τις αρχές ελέγχου που αναπτύχθηκαν στο Κεφ. 4 για την περίπτωση ακτινικής διασύνδεσης ΘΑΠ.

### 8.1.2 Τελικά συμπεράσματα

Από τη συγκριτική αξιολόγηση των μεταβατικών μοντέλων προσομοίωσης μετατροπέων MMC που πραγματοποιήθηκε στο Κεφ. 3, διαπιστώνονται τα ακόλουθα:

- Το μοντέλο μέσης τιμής του μετατροπέα MMC, με την προσθήκη μοντέλου πρώτης τάξης για την ισοδύναμη υπομονάδα κάθε υποσκέλους του μετατροπέα, προσεγγίζει με εξαιρετική ακρίβεια τη μεταβατική απόκριση του διακοπτικού μοντέλου προσομοίωσης, με εξαίρεση το διακοπτικό περιεχόμενο των κυματομορφών τάσης και ρεύματος, ακόμα και κατά την εμφάνιση ταχέων μεταβατικών φαινομένων όπως ac σφάλματα δικτύου, επιτυγχάνοντας συντελεστές επιτάχυνσης της προσομοίωσης από 750% έως και 1280%, ανάλογα με το επιλεγόμενο βήμα προσομοίωσης. Συμπερασματικά, το εν λόγω μοντέλο κρίνεται κατάλληλο για τη μοντελοποίηση και ανάλυση της δυναμικής συμπεριφοράς σταθμών dc/ac σε MTDC δίκτυα, ακόμα και σε συνθήκες σφάλματος δικτύου.
- Η εφαρμογή των προτεινόμενων απλουστευμένων κανόνων ρύθμισης κερδών των ελεγκτών ρεύματος, dc τάσης και συστήματος συγχρονισμού με το δίκτυο, οι οποίοι έχουν αναχθεί σε α.μ., επιφέρει ικανοποιητική μεταβατική συμπεριφορά τόσο σε κανονικές συνθήκες όσο και σε συνθήκες διαταραχών δικτύου, απαλλάσσοντας από την ανάγκη διενέργειας πολυπλοκότερων αναλύσεων στο πεδίο της συχνότητας με στόχο τη βέλτιστη δυνατή ρύθμιση των κερδών.

Από τη συγκριτική αξιολόγηση των εναλλακτικών μεθόδων επίτευξης αδιάλειπτης λειτουργίας ακτινικής διασύνδεσης ΘΑΠ που διενεργήθηκε στο Κεφ. 4, προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- Η μέθοδος αποστολής τηλεπικοινωνιακών εντολών περιορισμού της ενεργού ισχύος εξόδου του ΘΑΠ σε συνθήκες ac σφάλματος επαρκεί για την επίτευξη αδιάλειπτης λειτουργίας, μόνο εφόσον η αναμενόμενη χρονική καθυστέρηση  $T_{com}$  που εισάγει το τηλεπικοινωνιακό σύστημα ελέγχου κυμαίνεται στο εύρος 20-30 ms, για τιμές της σταθεράς χρόνου  $\tau_C$  της ισοδύναμης χωρητικότητας του μετατροπέα που κυμαίνονται στο εύρος 30-40 ms. Συνεπώς, η συνθήκη  $T_{com}/\tau_C < 1$ , αποτελεί έναν πρώτο και γρήγορο κανόνα αξιολόγησης της επίδοσης της συγκεκριμένης τεχνικής, προτού διεξαχθούν αναλυτικότερες μελέτες.
- Για μεγαλύτερες τιμές της χρονικής καθυστέρησης, στο εύρος 40-60 ms, διαπιστώθηκε ότι η συνδυαστική χρήση βοηθητικών φορτίων ικανότητας 0.5 α.μ. επαρκεί για την

επίτευξη αδιάλειπτης λειτουργίας. Με άλλα λόγια, διαφαίνεται η σημαντική εξοικονόμηση κόστους και μεγέθους των απαιτούμενων διατάξεων κατανάλωσης ισχύος που μπορεί να επιτευχθεί, εάν αξιοποιηθούν οι υφιστάμενες υποδομές τηλεοπτείας και ελέγχου του ΘΑΠ, ενώ οι ανάγκες παρέμβασης στο σύστημα ελέγχου των υπεράκτιων Α/Γ είναι ελάχιστες.

- Η μέθοδος επιβολής ταχείας αύξησης της συχνότητας λειτουργίας κατόπιν ανίχνευσης συνθηκών υπέρτασης στον σύνδεσμο VSC-HVDC αποτελεί επισφαλή λύση, καθώς οι συμβατικοί ελεγκτές ισχύος και συχνότητας των Α/Γ είναι σχεδιασμένοι να αποκρίνονται σε βραδύτερες μεταβολές συχνότητας που σχετίζονται με τη σταθερά αδρανείας των συμβατικών στρεφόμενων γεννητριών. Από την άλλη πλευρά, η επιβολή τεχνητής βύθισης τάσης επιτυγχάνει την απαιτούμενη επίδοση, προϋποθέτει όμως την αδιάλειπτη λειτουργία των υπεράκτιων Α/Γ για όσο χρονικό διάστημα απαιτηθεί για την επαναφορά του συστήματος σε κανονική λειτουργία μετά την εκκαθάριση του σφάλματος.
- Η απόκριση συχνότητας με τη μέθοδο τηλεπικοινωνιακής αποστολής των μεταβολών συχνότητας του ηπειρωτικού συστήματος στον υπεράκτιο μετατροπέα HVDC κρίνεται αποτελεσματική, ενώ η χρονική καθυστέρηση που εισάγει το τηλεπικοινωνιακό μέσο, της τάξης των δεκάδων ms, δεν αλλοιώνει τα επιθυμητά χαρακτηριστικά απόκρισης συχνότητας του ΘΑΠ, λόγω των βραδύτερων μεταβολών συχνότητας που εμφανίζονται σε μεγάλα ΣΗΕ.
- Ο συνδυαστικός έλεγχος συχνότητας των υπεράκτιων Α/Γ επιφέρει τα βέλτιστα αποτελέσματα στη ρύθμιση συχνότητας του ηπειρωτικού συστήματος, ενώ ακόμα και χωρίς την τήρηση εφεδρείας ισχύος σε κανονική λειτουργία, το ΘΑΠ μπορεί να συμβάλει αισθητά στον περιορισμό του ρυθμού μεταβολής συχνότητας αμέσως μετά την εμφάνιση διαταραχής. Ωστόσο, η δυνατότητα λειτουργίας ελέγχου στατισμού σε συνθήκες υπο-συχνότητας είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την τήρηση εφεδρείας ισχύος σε κανονική λειτουργία, γεγονός που οπωσδήποτε εγείρει προβληματισμούς ως προς τη ρεαλιστική εφαρμογή της συγκεκριμένης λειτουργίας σε ΣΗΕ που δεν έχουν ενσωματωμένη την υπόψη απαίτηση στον κώδικα συστήματος. Στα αποτελέσματα της παρούσας διατριβής, επίπεδα εφεδρείας ισχύος άνω του 10% δεν επέφεραν ουσιαστικό όφελος που να δικαιολογεί την εφαρμογή τους.

Από την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε στο Κεφ. 4, διαπιστώνεται ότι με τη χρήση των συμβατικών ελεγκτών των Α/Γ αναπόφευκτα χρειάζεται η συνδυαστική εφαρμογή τεχνικών ελέγχου διαφορετικής φιλοσοφίας στον ελεγκτή του υπεράκτιου μετατροπέα HVDC, προκειμένου να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις αδιάλειπτης λειτουργίας και απόκρισης συχνότητας. Στην παρούσα διατριβή, επιχειρήθηκε η ανάπτυξη μιας τεχνικής ελέγχου που βασίζεται αποκλειστικά και μόνο στην επιβολή ελεγχόμενων μεταβολών συχνότητας, η οποία ωστόσο απαιτεί την τροποποίηση του ελεγκτή του μετατροπέα πλευράς δικτύου των υπεράκτιων Α/Γ, προκειμένου να επιτυγχάνεται η απαιτούμενη ταχύτητα στην απόκριση της εγγεόμενης ενεργού ισχύος εξόδου. Από την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε στο Κεφ. 5, προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Η ενσωμάτωση του ελέγχου συγχρονισμού ισχύος στον μετατροπέα πλευράς δικτύου των Α/Γ επιφέρει σχεδόν ακαριαίο έλεγχο στατισμού, το οποίο επιβεβαιώνεται από τον αποτελεσματικό περιορισμό της dc υπέρτασης κάτω του 1.2 α.μ. σε δυσμενείς συνθήκες λειτουργίας, δηλ. έγχυση ονομαστικής ισχύος ενώ εμφανίζεται βύθιση τάσης μεγέθους ικανού ώστε να μηδενίσει την ικανότητα έγχυσης ενεργού ισχύος στο ηπειρωτικό σύστημα. Έτσι, παρά την ανάγκη τροποποίησης του συστήματος ελέγχου του μετατροπέα της Α/Γ, απλοποιείται σημαντικά η φιλοσοφία ελέγχου σε επίπεδο Α/Γ, καθώς δεν απαιτείται η ενσωμάτωση ειδικού ελεγκτή συχνότητας για τον σκοπό αυτό, ενώ δε χρειάζεται παρέμβαση στις τιμές παραμέτρων του εξωτερικού ελεγκτή ισχύος των Α/Γ. Με βάση την εγγενή ιδιότητα του προτεινόμενου ελεγκτή συγχρονισμού ισχύος, οι λειτουργίες ελέγχου στατισμού και αδρανειακής απόκρισης μετατίθενται στο σύστημα ελέγχου του υπεράκτιου μετατροπέα HVDC, ο οποίος επιβάλλει μεταβολές συχνότητας που απομαστεύουν αιολική ισχύ κατάλληλου επιπέδου και ρυθμού μεταβολής, προς συμμόρφωση με το σύνολο των τεχνικών απαιτήσεων απόκρισης συχνότητας.
- Συγκρίνοντας τις αποκρίσεις συχνότητας του προτεινόμενου ελέγχου συγχρονισμού ισχύος με αυτές του συμβατικού ελέγχου των υπεράκτιων Α/Γ, διαπιστώνεται αμεσότερη απόκριση των Α/Γ παρουσία μεταβολών συχνότητας, γεγονός που επιφέρει ουσιαστική συμβολή στη μεταβατική απόκριση συχνότητας ακόμα και με τον έλεγχο στατισμού. Παράλληλα, παρατηρείται ομαλή σύζευξη με την απόκριση του εξωτερικού ελεγκτή των Α/Γ, οι τιμές παραμέτρων του οποίου διατηρούνται αμετάβλητες, επιτυγχάνοντας ομαλό έλεγχο της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα των Α/Γ.

Τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των εναλλακτικών τεχνικών επίτευξης αδιάλειπτης λειτουργίας ΘΑΠ σε συνθήκες σφάλματος, που εξετάστηκαν στα Κεφ. 4 και 5 και εξηγήθηκαν και ανωτέρω, συνοψίζονται στον Πίνακα 8.1.

Από τη διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε στο Κεφ. 6 ως προς τη δυναμική συμπεριφορά ενός νησιωτικού ΣΗΕ στο οποίο συνυπάρχουν διασυνδέσεις ΕΡ και HVDC, όπως επίσης και τοπική συμβατική παραγωγή, διαπιστώνονται τα ακόλουθα:

- Από τη συγκριτική αξιολόγηση των εναλλακτικών τεχνικών ελέγχου του νησιωτικού μετατροπέα MMC-HVDC, διαπιστώνεται η εγγενής αδυναμία του συμβατικού σχήματος ελέγχου με χρήση διάταξης κλειδώματος φάσης να επιφέρει ικανοποιητική απόκριση κατά τη μετάβαση του ΣΗΕ σε λειτουργία παθητικού συστήματος, η οποία ωστόσο υπερνικάται με τον έλεγχο συγχρονισμού ισχύος, καθώς η συχνότητα λειτουργίας σε αυτή την περίπτωση διαμορφώνεται με βάση την απόκλιση της εντολής κατανομής από την ισχύ του νησιωτικού φορτίου που απορροφάται από τον μετατροπέα MMC.

Πίνακας 8.1. Συγκριτική αξιολόγηση τεχνικών επίτευξης αδιάλειπτης λειτουργίας ΘΑΠ σε συνθήκες σφάλματος του ηπειρωτικού συστήματος.

Τεχνική ελέγχου	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
1. Τηλεπικοινωνιακή αποστολή εντολών περιορισμού ισχύος των υπεράκτιων Α/Γ	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ αξιοποίηση υφιστάμενων τηλεπικοινωνιακών υποδομών ΘΑΠ</li> <li>✓ ελάχιστες παρεμβάσεις στο σύστημα ελέγχου των υπεράκτιων Α/Γ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>× επισφαλής λύση παρουσία χρονικών καθυστερήσεων και ανάγκη χρήσης βοηθητικών φορτίων κατανάλωσης ισχύος, κατάλληλης ικανότητας</li> </ul>
2. Τεχνητή βύθιση ac τάσης	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ γρήγορη μείωση παραγόμενης ισχύος των Α/Γ</li> <li>✓ αξιοποίηση ικανότητας αδιάλειπτης λειτουργίας των υπεράκτιων Α/Γ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>× επέμβαση στο σύστημα ελέγχου του υπεράκτιου μετατροπέα SEC</li> <li>× παρατεταμένη βύθιση τάσης σε περίπτωση περιορισμού του ρυθμό αύξησης της ενεργού ισχύος του επίγειου μετατροπέα REC μετά την εκκαθάριση του σφάλματος</li> </ul>
3. Τεχνητή αύξηση συχνότητας υπεράκτιου δικτύου χωρίς επέμβαση στον έλεγχο των υπεράκτιων Α/Γ	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ στοχεύει στη μείωση ισχύος χωρίς παρέμβαση στις υπεράκτιες Α/Γ και χωρίς την επιβολή τεχνητού βραχυκυκλώματος</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>× επισφαλής λύση λόγω της βραδύτερης απόκρισης των ελεγκτών συχνότητας και ισχύος των εμπορικών Α/Γ</li> </ul>
4. Τεχνητή αύξηση συχνότητας με έλεγχο συγχρονισμού ισχύος στις υπεράκτιες Α/Γ	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ επιφέρει ταχεία απόκριση στατισμού χωρίς την ανάγκη μεταβολής της ισχύος αναφοράς των Α/Γ, που επαρκεί για την επίτευξη αδιάλειπτης λειτουργίας</li> <li>✓ δεν απαιτείται επαναρύθμιση των παραμέτρων ελέγχου του εξωτερικού ελεγκτή ισχύος των υπεράκτιων Α/Γ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>× χρειάζονται επεμβάσεις τόσο στο σύστημα ελέγχου του μετατροπέα GSC των Α/Γ όσο και του υπεράκτιου μετατροπέα SEC, καθώς και από κοινού παραμετροποίηση</li> </ul>

- Οι διακυμάνσεις της ζήτησης φορτίου του νησιωτικού ΣΗΕ εξυπηρετούνται πρωτίστως από την εξωτερική διασύνδεση ΕΡ λόγω της επιβαλλόμενης συχνότητας λειτουργίας από αυτήν, γεγονός που υποδηλώνει την ανάγκη σχεδίασης ενός κατάλληλου συστήματος αυτόματης ρύθμισης παραγωγής, για την αποκατάσταση της ροής ισχύος επί της διασύνδεσης ΕΡ, μέσω αναδιαμόρφωσης των εντολών κατανομής που αποστέλλονται στον μετατροπέα MMC-HVDC ή και στην τοπική συμβατική παραγωγή.

- Από τη διερεύνηση της μεταβατικής συμπεριφοράς του νησιωτικού ΣΗΕ σε σοβαρές διαταραχές, όπως πχ σε ξαφνική απώλεια της εξωτερικής διασύνδεσης ΕΡ ή και της τοπικής συμβατικής παραγωγής, παρατηρούνται απότομες μεταβολές της συχνότητας λειτουργίας του νησιωτικού μετατροπέα HVDC, γεγονός που οδηγεί στην εμφάνιση βραχύχρονων αλλά υψηλών τιμών ROCOF. Ο προτεινόμενος αδρανειακός ελεγκτής που ενσωματώνεται στον βρόχο συγχρονισμού ισχύος επιφέρει δραστικό περιορισμό του ρυθμού μεταβολής της συχνότητας λειτουργίας του νησιωτικού μετατροπέα και άρα σε ασφαλέστερη λειτουργία του νησιωτικού ΣΗΕ κατόπιν σοβαρών διαταραχών.

Αναφορικά με την ανάλυση της λειτουργίας πολυτεματικών δικτύων HVDC που διενεργείται στο Κεφ. 7, διαπιστώνονται τα ακόλουθα:

- Από τη συγκριτική αξιολόγηση των εναλλακτικών χαρακτηριστικών ελέγχου ισχύος-dc τάσης, διαπιστώνεται ότι ο έλεγχος στατισμού με νεκρή ζώνη παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα, καθώς αυξάνει σημαντικά την ακρίβεια ρύθμισης της ενεργού ισχύος των ηπειρωτικών μετατροπέων σε εξωτερική εντολή κατανομής, ενώ προσφέρει και τη δυνατότητα συμμετοχής σε κατανεμημένο έλεγχο της dc τάσης, εφόσον αυτό απαιτηθεί σε συνθήκες αυξημένων επιπέδων τάσης του MTDC δικτύου. Από την άλλη πλευρά, ο απλός έλεγχος στατισμού παρουσιάζει σοβαρή αδυναμία στη ρύθμιση της ενεργού ισχύος εξόδου σε εξωτερική εντολή κατανομής.
- Με τη θεώρηση ύπαρξης υποδομής τηλεοπτείας και ελέγχου του MTDC δικτύου, είναι εφικτή η καθολική χρήση χαρακτηριστικών ελέγχου στατισμού σε όλο το εύρος της dc τάσης λειτουργίας, εξασφαλίζοντας τη λειτουργία πρωτεύουσας ρύθμισης της dc τάσης από το σύνολο των μετατροπέων ελεγχόμενης ισχύος. Η απαιτούμενη ακρίβεια στη ρύθμιση της ενεργού ισχύος σε εξωτερική εντολή κατανομής επιτυγχάνεται με μετατόπιση των χαρακτηριστικών στατισμού, με βάση την επίλυση του προτεινόμενου προβλήματος βέλτιστης ροής ισχύος.
- Από τα αποτελέσματα εφαρμογής της προτεινόμενης μεθοδολογίας βέλτιστης ροής ισχύος στο MTDC δίκτυο διασύνδεσης νησιών, αναδεικνύεται η δυνατότητα αξιοποίησης του δικτύου ως πρόσθετου μέσου ρύθμισης του ηπειρωτικού συστήματος, πέραν της προφανούς χρησιμότητάς του για την αξιόπιστη ηλεκτροδότηση των νησιωτικών συστημάτων. Ωστόσο, όπως αναδεικνύεται και στο παράδειγμα εξέτασης, υπάρχουν εγγενείς περιορισμοί λειτουργίας που υπεισέρχονται στην επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης, οι οποίοι δεν επιτρέπουν πάντα τη ρύθμιση της ενεργού ισχύος των επίγειων μετατροπέων στην επιθυμητή τιμή.
- Από την ανάλυση της μεταβατικής συμπεριφοράς σε συνθήκες σφάλματος του ηπειρωτικού συστήματος, διαπιστώνεται η ικανοποιητική επίδοση της τεχνητής βύθισης τάσης στα νησιωτικά συστήματα, αξιοποιώντας την ενσωματωμένη ικανότητα αδιάλειπτης λειτουργίας των εξεταζόμενων Α/Γ. Η μέθοδος αύξησης συχνότητας έχει ήδη κριθεί επισφαλής, ενώ και η μέθοδος αποστολής τηλεπικοινωνιακών σημάτων περιορισμού ισχύος κρίνεται μη ρεαλιστική, καθώς θα απαιτούσε την υλοποίηση τηλεπικοινωνιακών υποδομών μεταξύ του νησιωτικού μετατροπέα HVDC και του συνόλου των εγκατεστημένων Α/Π επί των νησιών. Ωστόσο, είναι εξεταστέα η



συμπληρωματική χρήση εξωτερικών αντιστάσεων κατανάλωσης ισχύος στους νησιωτικούς ή και στους ηπειρωτικούς σταθμούς μετατροπής dc/ac, προκειμένου να περιοριστεί το μέγεθος της απαιτούμενης βύθισης ac τάσης που χρειάζεται να επιβληθεί στα νησιωτικά ΣΗΕ, και συνεπώς στα συνδεδεμένα νησιωτικά φορτία, για την επίτευξη αδιάλειπτης λειτουργίας του MTDC δικτύου.

- Από τη διερεύνηση της ικανότητας συμμετοχής MTDC δικτύων στη ρύθμιση συχνότητας του ηπειρωτικού ΣΗΕ, διαπιστώνεται ότι σε περίπτωση σύνδεσης σε ενιαίο ΣΗΕ, επαρκεί η τηλεπικοινωνιακή αποστολή των μετρούμενων μεταβολών συχνότητας στους ρυθμιστές συχνότητας των διασυνδεδεμένων ΘΑΠ για την επίτευξη της επιθυμητής απόκρισης. Ωστόσο, σε περίπτωση σύνδεσης του MTDC δικτύου σε ασύγχρονα ΣΗΕ, διαπιστώνεται η αναγκαιότητα ανάπτυξης ενός πολυπλοκότερου σχήματος ελέγχου που βασίζεται τόσο στον υπολογισμό των απαιτήσεων σε ενεργό ισχύ κάθε ηπειρωτικού ΣΗΕ για τον επιμερισμό τους στα διασυνδεδεμένα ΘΑΠ, όσο και στη μεταβατική διακύμανση του στατισμού dc τάσης των ηπειρωτικών μετατροπέων κατόπιν εμφάνισης μεταβολών συχνότητας, προκειμένου να επιτευχθούν οι απαιτούμενες μεταβολές της εγχόμενης ενεργού ισχύος, που επιφέρουν την επιθυμητή τιμή στατισμού συχνότητας που επιβάλλει ο διαχειριστής συστήματος σε κάθε ΣΗΕ.

### 8.1.3 Πρωτοτυπία – Συμβολή

Τα κύρια σημεία πρωτοτυπίας της παρούσας διατριβής συνοψίζονται ακολούθως:

- Αναπτύχθηκε ένα μοντέλο μέσης τιμής για τον μετατροπέα MMC, που δεν αναπαράγει μόνο τη θεμελιώδη συχνότητα της κυματομορφής τάσης, αλλά λαμβάνει υπόψη και τη δυναμική των πυκνωτών των υπομονάδων που υπάρχουν στο πραγματικό κύκλωμα, συμπεριλαμβάνοντας και ένα μοντέλο πρώτης τάξης ισοδύναμης υπομονάδας σε κάθε υποσκέλος του μετατροπέα. Το μοντέλο αναπαράγει με ακρίβεια την αναμενόμενη απόκριση ακόμα και στο εσωτερικό κύκλωμα του μετατροπέα, επιταχύνοντας δραστικά τον χρόνο προσομοίωσης σε σχέση με το λεπτομερές διακοπτικό μοντέλο.
- Προτείνονται απλοποιημένοι κανόνες ρύθμισης κερδών των ελεγκτών ρεύματος, dc τάσης και του συστήματος συγχρονισμού με το δίκτυο, οι οποίοι είναι άμεσα εφαρμόσιμοι και απαλλάσσουν από την ανάγκη διενέργειας πολυπλοκότερων αναλύσεων στο πεδίο της συχνότητας.
- Προτείνεται ένα γραμμικοποιημένο μοντέλο ακτινικής διασύνδεσης ΘΑΠ μέσω συνδέσμου VSC-HVDC στο πεδίο της συχνότητας, μέσω του οποίου μπορεί να εκτιμηθεί η απόκριση της dc τάσης λειτουργίας της διασύνδεσης σε συνθήκες σφάλματος δικτύου. Στην παρούσα διατριβή, χρησιμοποιήθηκε για την αξιολόγηση της επίδοσης της τηλεπικοινωνιακής μεθόδου επίτευξης αδιάλειπτης λειτουργίας, αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί ή και να εμπλουτιστεί για τη διενέργεια πρόσθετων παραμετρικών αναλύσεων.
- Προτείνεται ένα νέο σχήμα ελέγχου για τον μετατροπέα πλευράς δικτύου των υπεράκτιων Α/Γ, το οποίο βασίζεται στη φιλοσοφία ελέγχου συγχρονισμού ισχύος και όχι στη χρήση συμβατικής διάταξης κλειδώματος φάσης για τον συγχρονισμό με το

υπεράκτιο δίκτυο. Επιτυγχάνει πρακτικά ακαριαίο έλεγχο στατισμού, χωρίς την ανάγκη χρήσης εξωτερικών ελεγκτών για τον σκοπό αυτό.

- Προτείνεται ένας νέος ρυθμιστής συχνότητας για τον υπεράκτιο μετατροπέα HVDC, που αξιοποιεί την ανωτέρω ιδιότητα του ελεγκτή συγχρονισμού ισχύος των Α/Γ τόσο για την επίτευξη αδιάλειπτης λειτουργίας όσο και για την απομάστευση αιολικής ισχύος, που προσομοιάζει τις λειτουργίες ελέγχου μεταβλητού στατισμού και αδρανειακής απόκρισης, προς συμμόρφωση με το σύνολο των τεχνικών απαιτήσεων των κωδίκων συστήματος.
- Προτείνεται ένας αδρανειακός ελεγκτής στον βρόχο συγχρονισμού ισχύος νησιωτικού μετατροπέα MMC-HVDC, που περιορίζει δραστικά τον ρυθμό μεταβολής της συχνότητας λειτουργίας του νησιωτικού ΣΗΕ κατόπιν εμφάνισης σοβαρών διαταραχών, όπως η απώλεια εξωτερικής διασύνδεσης ΕΡ ή και της τοπικής συμβατικής παραγωγής.
- Προτείνεται μια μεθοδολογία βέλτιστης ροής ισχύος σε MTDC δίκτυα, η οποία αποσκοπεί στην εν λειτουργία μετατόπιση των χαρακτηριστικών ελέγχου στατισμού των μετατροπέων ελεγχόμενης ισχύος, με κριτήρια την ελαχιστοποίηση των απωλειών δικτύου και του σφάλματος ρύθμισης της ενεργού ισχύος των επίγειων σταθμών HVDC από τις αντίστοιχες εντολές κατανομής.
- Αναπτύχθηκε ένας αλγόριθμος πιθανοτικής ροής ισχύος, κατάλληλος για εφαρμογή σε νησιωτικά συστήματα με αιολική παραγωγή, συνδεδεμένα σε ένα MTDC δίκτυο. Προσφέρει τη δυνατότητα αξιολόγησης της επίδοσης υποψήφιων τεχνικών ρύθμισης ισχύος-τάσης σε MTDC δίκτυα διασύνδεσης νησιών υπό στοχαστικές συνθήκες λειτουργίας, με χρήση των εξαγόμενων στατιστικών κατανομών των εξεταζόμενων μεγεθών.
- Προτείνεται μια τεχνική μεταβατικής ρύθμισης του στατισμού dc τάσης ενός ηπειρωτικού μετατροπέα HVDC, που συνδέεται σε MTDC δίκτυο, συναρτήσει των μετρούμενων μεταβολών συχνότητας του ηπειρωτικού ΣΗΕ, με στόχο την ελεγχόμενη διακίνηση αιολικής ισχύος από το MTDC δίκτυο προς το ΣΗΕ που εμφανίζει τη διαταραχή συχνότητας, ελαχιστοποιώντας την επίπτωση στη λειτουργία άλλων ασύγχρονων ΣΗΕ που συνδέονται στο ίδιο MTDC δίκτυο και δεν υφίστανται την υπόψη διαταραχή.

Ορισμένα πρόσθετα σημεία συμβολής της παρούσας διατριβής είναι τα ακόλουθα:

- Αναπτύχθηκε ένα σύνολο μεταβατικών μοντέλων προσομοίωσης και παραλλαγών ελέγχου, τόσο για υπεράκτιες Α/Γ όσο και για συστήματα διασύνδεσης MMC-HVDC, σε λογισμικό Matlab/Simulink, τα οποία μπορούν να αξιοποιηθούν σε μελλοντικές διερευνήσεις διασύνδεσης ΘΑΠ και νησιωτικών ΣΗΕ με το ηπειρωτικό σύστημα.
- Πραγματοποιήθηκε εκτενής συγκριτική αξιολόγηση εναλλακτικών τεχνικών επίτευξης αδιάλειπτης λειτουργίας και απόκρισης συχνότητας, με στόχο την ανάδειξη των ρεαλιστικότερων επιλογών σε εμπορικές εφαρμογές.
- Πραγματοποιήθηκε εκτενής παραμετρική ανάλυση της απόκρισης συχνότητας ενός ΘΑΠ, με στόχο την ανάδειξη των επιμέρους λειτουργιών ελέγχου (στατισμού, αδρανειακής απόκρισης και επιπέδου εφεδρείας ισχύος) στη ρύθμιση συχνότητας του

ηπειρωτικού συστήματος και την επιλογή των τιμών παραμέτρων που εξασφαλίζουν ικανοποιητική στήριξη της συχνότητας, χωρίς επιδείνωση της δυναμικής συμπεριφοράς του ΘΑΠ.

#### 8.1.4 Προεκτάσεις

Το ευρύ φάσμα του αντικειμένου της παρούσας διατριβής αναμφίβολα περιλαμβάνει πλήθος ζητημάτων μελλοντικής διερεύνησης.

Ένα βασικό αντικείμενο εξέτασης που δεν περιλαμβάνεται στην παρούσα διατριβή αφορά στην ανάλυση της μεταβατικής συμπεριφοράς συνδέσμων MMC-HVDC σε συνθήκες dc σφάλματος. Η ανάλυση αυτή θα εντόπιζε πρόσθετες ανάγκες του συστήματος ελέγχου, όπως επίσης και πιθανών προσθηκών στο μοντέλο μέσης τιμής προκειμένου να αναπαράγει τη δυναμική συμπεριφορά του διακοπτικού μοντέλου.

Η μοντελοποίηση του μετατροπέα MMC-HVDC θα μπορούσε να επεκταθεί και με την εξέταση της τοπολογίας πλήρους γέφυρας σε σχέση με την τοπολογία ημίσειας γέφυρας της παρούσας διατριβής, με στόχο τον προσδιορισμό των πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων της κάθε τοπολογίας σε επίπεδο υπομονάδας, για εφαρμογές υποβρύχιων ή εναέριων διασυνδέσεων HVDC.

Μια χρήσιμη επέκταση της ανάλυσης της παρούσας διατριβής αφορά στην παραμετρική ανάλυση των μετατροπέων MMC ως προς τον αριθμό των χρησιμοποιούμενων επιπέδων λειτουργίας, και συγκριτική αξιολόγηση του προτεινόμενου μοντέλου μέσης τιμής με το διακοπτικό μοντέλο, τόσο ως προς την ακρίβεια απόκρισης όσο και ως προς τον συντελεστή επιτάχυνσης του χρόνου προσομοίωσης που μπορεί να επιτευχθεί.

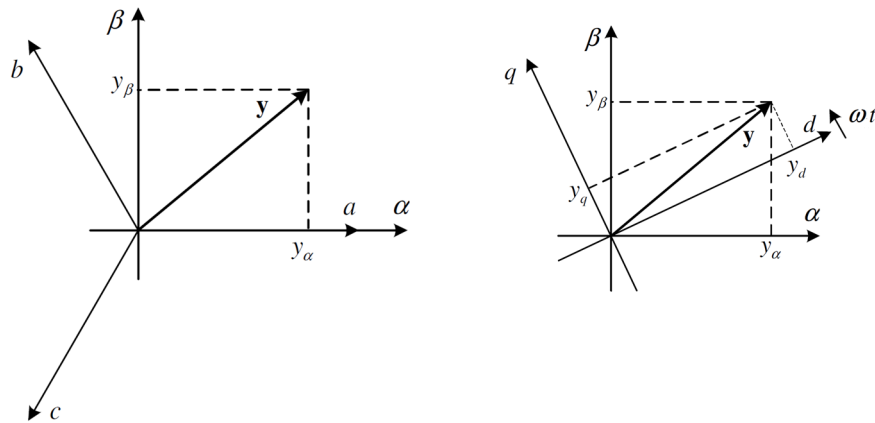
Μια ακόμα ενδιαφέρουσα προέκταση της διατριβής εντοπίζεται στην επέκταση του γραμμικοποιημένου μοντέλου του ΘΑΠ προκειμένου να περιλάβει και πρόσθετες τεχνικές επίτευξης αδιάλειπτης λειτουργίας ή και απόκρισης συχνότητας, με στόχο τη χρήση του στο πεδίο της συχνότητας για τη διεξαγωγή αναλύσεων ιδιοτιμών/ιδιοδιανυσμάτων.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η ανάλυση της λειτουργίας ενός συστήματος διασύνδεσης MMC-HVDC που συνδέεται σε νησιωτικό σύστημα, όπου μπορεί να συνυπάρχει τοπική συμβατική παραγωγή ή και εξωτερική διασύνδεση ΕΡ. Ειδικότερα, η ανάλυση ακτινικής διασύνδεσης MMC-HVDC νησιωτικού ΣΗΕ που ήδη πραγματοποιήθηκε στην παρούσα διατριβή, θα μπορούσε να συμπληρωθεί και με τη μοντελοποίηση της συνθετότερης τοπολογίας διπολικής διασύνδεσης, με δύο μετατροπείς MMC σε κάθε άκρο, με στόχο την αξιολόγηση της δυναμικής συμπεριφοράς του νησιωτικού ΣΗΕ κατόπιν απώλειας του ενός πόλου της διασύνδεσης HVDC, το οποίο αποτελεί ένα από τα βασικά σενάρια εξέτασης διαταραχών για τον προσδιορισμό των κανόνων ασφαλείας του νησιωτικού ΣΗΕ που σχετίζονται τόσο με τη φόρτιση της εξωτερικής διασύνδεσης ΕΡ, όσο και με την ανάγκη παράλληλης λειτουργίας τοπικής συμβατικής παραγωγής.

Ένα πρόσθετο ζήτημα που ανακύπτει από την εξέταση της συμμετοχής MTDC δικτύων στην απόκριση συχνότητας, αφορά στην ανάπτυξη ενός κατάλληλου συστήματος τηλεοπτείας και ελέγχου, το οποίο συνεκτιμά όχι μόνο την εγκατεστημένη ισχύ των διασυνδεδεμένων ΘΑΠ, αλλά και τη διαθέσιμη παραγωγή καθενός, με κριτήριο τη βελτιστοποίηση της απόκρισης συχνότητας των ΘΑΠ συναρτήσει των συνολικών απαιτήσεων σε ενεργό ισχύ που ορίζονται από τα ασύγχρονα ΣΗΕ.

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΜΕΤΑΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ PARK

Η δυναμική συμπεριφορά στρεφόμενων μηχανών αλλά και μετατροπέων ισχύος περιγράφεται από ένα σύστημα διαφορικών εξισώσεων με χρονικά μεταβαλλόμενες μεγέθη που συναρτώνται με τη συχνότητα λειτουργίας. Σε τριφασικά συστήματα, η χρησιμότητα του μετασχηματισμού χρονικά μεταβαλλόμενων μεγεθών σε συνεχή μεγέθη, δεν προέρχεται μόνο από τις ανάγκες ανάλυσης ac μηχανών, αλλά και για την υλοποίηση συστημάτων ελέγχου με την καθιερωμένη χρήση ΠΙ ελεγκτών οι οποίοι εξαλείφουν σφάλματα συνεχών μεγεθών.



Σχήμα Α.1. Μετασχηματισμός τριφασικών μεγεθών στο στατό  $\alpha$ - $\beta$  πλαίσιο αναφοράς (αριστερά) και από το στατό  $\alpha$ - $\beta$  στο στρεφόμενο  $d$ - $q$  πλαίσιο αναφοράς (δεξιά).

Μια τριφασική μεταβλητή  $y_{abc}$  μπορεί να μετασχηματιστεί στο στρεφόμενο  $d$ - $q$  πλαίσιο αναφοράς, με εφαρμογή του μετασχηματισμού Park, ο οποίος δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\mathbf{T}_{dq0} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \quad (\text{A.1})$$

Η γωνία μετασχηματισμού  $\theta$  προκύπτει από το ολοκλήρωμα της συχνότητας  $\int \omega dt$  του στρεφόμενου πλαισίου αναφοράς. Ο αντίστροφος μετασχηματισμός Park προκύπτει:

$$\mathbf{T}_{dq0}^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 1 \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & 1 \\ \cos(\theta + 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{A.2})$$

Ο μετασχηματισμός της τριφασικής μεταβλητής  $y_{abc}$  στο στατό  $\alpha$ - $\beta$  πλαίσιο αναφοράς επιτυγχάνεται μέσω του μετασχηματισμού Clark, ο οποίος αποτελεί ειδική περίπτωση του μετασχηματισμού Park, θέτοντας  $\theta=0$ .

Τέλος, συχνά χρησιμεύει και ο μετασχηματισμός του διανύσματος  $y$  από το στατό στο στρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς και αντίστροφα, με εφαρμογή των ακόλουθων μετασχηματισμών:

$$\begin{bmatrix} y_d \\ y_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_\alpha \\ y_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{A.3})$$

$$\begin{bmatrix} y_\alpha \\ y_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_q \\ y_d \end{bmatrix} \quad (\text{A.4})$$

Οποιοσδήποτε μετασχηματισμός θα πρέπει να ικανοποιεί το αναλλοίωτο της μεταφερόμενης ισχύος. Η στιγμιαία ισχύς εκφράζεται σε  $abc$  μεταβλητές ως εξής:

$$P_{abc} = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c \quad (\text{A.5})$$

Χρησιμοποιώντας τον μετασχηματισμό της Εξ. (A.1), προκύπτει:

$$P_{dq0} = P_{abc} = \frac{3}{2} (v_d i_d + v_q i_q + 2v_0 i_0) \quad (\text{A.6})$$

Ο συντελεστής  $3/2$  της ανωτέρω εξίσωσης οφείλεται στην επιλογή της σταθεράς του μετασχηματισμού Park, υποδηλώνοντας και την ανάγκη επιλογής κατάλληλων τιμών βάσης για την ισχύ και την τάση στο  $dq0$  σύστημα, προκειμένου να γίνεται σωστή αναγωγή στο α.μ. σύστημα. Ειδικότερα, ως βασική τάση  $V_{B(dq0)}$  και ρεύμα  $I_{B(dq0)}$  επιλέγονται τα πλάτη των εναλλασσόμενων κυματομορφών τάσης και ρεύματος, με αποτέλεσμα η βασική ισχύς  $S_B$  να δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$S_B = \frac{3}{2} V_{B(dq0)} I_{B(dq0)} \quad (\text{A.7})$$

Ανάγοντας την Εξ. (A.6) σε α.μ. και θεωρώντας συμμετρικές συνθήκες λειτουργίας, η ενεργός ισχύς τελικά προκύπτει:

$$p = v_d i_d + v_q i_q \quad (\text{A.8})$$

Και αντίστοιχα η άεργος ισχύς:

$$q = -v_d i_q + v_q i_d \quad (\text{A.9})$$

Οι Εξ. (A.8) και (A.9) αποτελούν τη βάση τεκμηρίωσης της δυνατότητας ανεξάρτητου ελέγχου της ενεργού και άεργου ισχύος εξόδου ενός μετατροπέα ισχύος, με ρύθμιση της  $d$  και  $q$  συνιστώσας του ρεύματος εξόδου αντίστοιχα, με την προϋπόθεση ότι ο ελεγκτής ρεύματος λειτουργεί σε στρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς με τον  $d$  άξονα ευθυγραμμισμένο με τον φασιθέτη της τάσης του δικτύου, γεγονός που επιτυγχάνεται μέσω του συστήματος συγχρονισμού με το δίκτυο.



$$v_q = Ri_q + \omega Li_d + L \frac{di_q}{dt} + e_q \quad (\text{B.5})$$

Παρακάτω η ανάλυση πραγματοποιείται στο στρεφόμενο  $d$ - $q$  πλαίσιο αναφοράς με τον  $d$  άξονα ευθυγραμμισμένο με τον φασιθέτη  $Ee^{j\omega t}$ , οπότε οι Εξ. (B.4), (B.5) διαμορφώνονται:

$$V \cos \theta = Ri_d - \omega Li_q + L \frac{di_d}{dt} + E \quad (\text{B.6})$$

$$V \sin \theta = Ri_q + \omega Li_d + L \frac{di_q}{dt} \quad (\text{B.7})$$

Εφαρμόζοντας τη μέθοδο ανάλυσης μικρού σήματος γύρω από ένα σημείο ισορροπίας, και θεωρώντας αμετάβλητες τις τιμές των τάσεων  $V=V_0$ ,  $E=E_0$ , και της συχνότητας λειτουργίας ( $\omega=\omega_0$ ) εφαρμόζονται οι ακόλουθες παραδοχές:

$$\theta = \theta_0 + \Delta\theta \quad (\text{B.8})$$

$$\sin(\theta_0 + \Delta\theta) \approx \sin \theta_0 + \cos \theta_0 \Delta\theta \quad (\text{B.9})$$

$$\cos(\theta_0 + \Delta\theta) \approx \cos \theta_0 - \sin \theta_0 \Delta\theta \quad (\text{B.10})$$

$$i_d = I_{d0} + \Delta i_d \quad (\text{B.11})$$

$$i_q = I_{q0} + \Delta i_q \quad (\text{B.12})$$

Αντικαθιστώντας τις Εξ. (B.8)-(B.12) στις (B.6), (B.7) προκύπτουν οι ακόλουθες σχέσεις:

$$L \frac{d\Delta i_d}{dt} = -R\Delta i_d + \omega_0 L \Delta i_q - V_0 \sin \theta_0 \Delta\theta \quad (\text{B.13})$$

$$L \frac{d\Delta i_q}{dt} = -R\Delta i_q - \omega_0 L \Delta i_d + V_0 \cos \theta_0 \Delta\theta \quad (\text{B.14})$$

$$V_0 \cos \theta_0 = RI_{d0} - \omega_0 LI_{q0} + E_0 \quad (\text{B.15})$$

$$V_0 \sin \theta_0 = RI_{q0} + \omega_0 LI_{d0} \quad (\text{B.16})$$

Εφαρμόζοντας τον μετασχηματισμό Laplace στις Εξ. (B.13), (B.14), οι μικρές μεταβολές ρεύματος  $d$ - $q$  άξονα συναρτήσει της μικρής μεταβολής της γωνίας  $\Delta\theta$ , η οποία ελέγχεται από το σύστημα ελέγχου PSC, διαμορφώνονται ως εξής:

$$\Delta i_d = V_0 \frac{\omega_0 L \cos \theta_0 - (sL + R) \sin \theta_0}{(sL + R)^2 + (\omega_0 L)^2} \Delta\theta \quad (\text{B.17})$$

$$\Delta i_q = V_0 \frac{\omega_0 L \sin \theta_0 + (sL + R) \cos \theta_0}{(sL + R)^2 + (\omega_0 L)^2} \Delta\theta \quad (\text{B.18})$$

Οι ανωτέρω εξισώσεις ανάγονται σε α.μ. ως εξής:



$$\Delta i_d = V_0 \frac{\omega_0 x \cos \theta_0 - (sx / \omega_b + r) \sin \theta_0}{(sx / \omega_b + r)^2 + (\omega_0 x)^2} \Delta \theta \quad (\text{B.19})$$

$$\Delta i_q = V_0 \frac{\omega_0 x \sin \theta_0 + (sx / \omega_b + r) \cos \theta_0}{(sx / \omega_b + r)^2 + (\omega_0 x)^2} \Delta \theta \quad (\text{B.20})$$

Για τον προσδιορισμό της επίδρασης της μικρής μεταβολής της γωνίας  $\Delta \theta$  στην εγχεόμενη ενεργό ισχύ  $\Delta p$ , χρησιμοποιείται η ακόλουθη σχέση (σε α.μ.):

$$p = v_d i_d + v_q i_q \quad (\text{B.21})$$

Εφαρμόζοντας τη μέθοδο ανάλυσης μικρού σήματος, η Εξ. (B.21) δίνει:

$$\Delta p = V_{d0} \Delta i_d + I_{d0} \Delta v_d + V_{q0} \Delta i_q + I_{q0} \Delta v_q \quad (\text{B.22})$$

Τα ρεύματα  $d$ - $q$  άξονα στο σημείο ισορροπίας μπορούν να εκτιμηθούν από τις Εξ. (B.15), (B.16), αμελώντας την επίδραση της ωμικής αντίστασης  $R$  ως εξής:

$$I_{d0} = \frac{V_0 \sin \theta_0}{\omega_0 x} \quad (\text{B.23})$$

$$I_{q0} = \frac{E_0 - V_0 \cos \theta_0}{\omega_0 x} \quad (\text{B.24})$$

Οι μικρές μεταβολές τάσης  $\Delta v_d$  και  $\Delta v_q$  μπορούν να εκτιμηθούν από τις Εξ. (B.13), (B.14), αμελώντας την επίδραση της μικρής ωμικής αντίστασης  $R$  ως εξής:

$$\Delta v_d = -V_0 \sin \theta_0 \Delta \theta = sx \Delta i_d / \omega_b - \omega_0 x \Delta i_q \quad (\text{B.25})$$

$$\Delta v_q = V_0 \cos \theta_0 \Delta \theta = sx \Delta i_q / \omega_b + \omega_0 x \Delta i_d \quad (\text{B.26})$$

Αντικαθιστώντας τις Εξ. (B.25), (B.26) στην Εξ. (B.22) προκύπτει:

$$\Delta p = (V_{d0} + s I_{d0} x / \omega_b) \Delta i_d - \omega_0 I_{d0} x \Delta i_q + (V_{q0} + s I_{q0} x / \omega_b) \Delta i_q + \omega_0 I_{q0} x \Delta i_d \quad (\text{B.27})$$

Αντικαθιστώντας τις Εξ. (B.19), (B.20) και (B.23), (B.24) στην Εξ. (B.27), τελικά εξάγεται η ακόλουθη συνάρτηση μεταφοράς:

$$J_{P\theta}(s) = \frac{\Delta p}{\Delta \theta} = \frac{a_0 s^2 + a_1 s + a_2}{(sx / \omega_b + r)^2 + (\omega_0 x)^2} \quad (\text{B.28})$$

Όπου οι συντελεστές  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$  δίνονται από τις σχέσεις:

$$\begin{aligned} a_0 &= x(E_0 V_0 \cos \theta_0 - V_0^2) / (\omega_0 \omega_b^2) \\ a_1 &= r(E_0 V_0 \cos \theta_0 - V_0^2) / (\omega_0 \omega_b) \\ a_2 &= \omega_0 x E_0 V_0 \cos \theta_0 - r E_0 V_0 \sin \theta_0 \end{aligned} \quad (\text{B.29})$$

Για την εξαγωγή της αντίστοιχης συνάρτησης μεταφοράς αέργου ισχύος – τάσης, ακολουθείται παρόμοια ανάλυση με την ανωτέρω, με τη μόνη διαφοροποίηση να έγκειται

στην επιδίωξη μεταβολής του μέτρου τάσης  $V$  για τη ρύθμιση της αέργου ισχύος στην επιθυμητή τιμή, ενώ αμελείται η επίδραση της υπόψη μεταβολής στη διαφορά φάσης  $\theta(=\theta_0)$ . Συνεπώς, η ανάλυση μικρού σήματος πραγματοποιείται με τις Εξ. (B.11), (B.12) και επιπρόσθετα της ακόλουθης:

$$V = V_0 + \Delta V \quad (\text{B.30})$$

Αντικαθιστώντας τις Εξ. (B.11),(B.12), (B.30) στις (B.6), (B.7) προκύπτουν οι ακόλουθες σχέσεις:

$$L \frac{d\Delta i_d}{dt} = -R\Delta i_d + \omega_0 L \Delta i_q + \Delta V \cos \theta_0 \quad (\text{B.31})$$

$$L \frac{d\Delta i_q}{dt} = -R\Delta i_q - \omega_0 L \Delta i_d + \Delta V \sin \theta_0 \quad (\text{B.32})$$

Οι ανωτέρω εξισώσεις ανάγονται σε α.μ. ως εξής:

$$\Delta i_d = \frac{\omega_0 x \sin \theta_0 + (sx / \omega_b + r) \cos \theta_0}{(sx / \omega_b + r)^2 + (\omega_0 x)^2} \Delta V \quad (\text{B.33})$$

$$\Delta i_q = \frac{-\omega_0 x \cos \theta_0 + (sx / \omega_b + r) \sin \theta_0}{(sx / \omega_b + r)^2 + (\omega_0 x)^2} \Delta V \quad (\text{B.34})$$

Για τον προσδιορισμό της επίδρασης της μικρής μεταβολής της τάσης  $\Delta V$  στην εγγεόμενη άεργο ισχύ  $\Delta q$ , χρησιμοποιείται η ακόλουθη σχέση (σε α.μ.):

$$q = -v_d i_q + v_q i_d \quad (\text{B.35})$$

Εφαρμόζοντας τη μέθοδο ανάλυσης μικρού σήματος, η Εξ. (B.35) δίνει:

$$\Delta q = -V_{d0} \Delta i_q - I_{q0} \Delta v_d + V_{q0} \Delta i_d + I_{d0} \Delta v_q \quad (\text{B.36})$$

Χρησιμοποιώντας τις Εξ. (B.23)-(B.26) στην Εξ. (B.36) προκύπτει:

$$\Delta q = (-V_{d0} + sI_{d0}x / \omega_b) \Delta i_q + \omega_0 I_{q0} x \Delta i_q + (V_{q0} - sI_{q0}x / \omega_b) \Delta i_d + \omega_0 I_{d0} x \Delta i_d \quad (\text{B.37})$$

Αντικαθιστώντας τις Εξ. (B.23), (B.24) και (B.33), (B.34) στην Εξ. (B.37), τελικά εξάγεται η ζητούμενη συνάρτηση μεταφοράς:

$$J_{QV}(s) = \frac{\Delta q}{\Delta V} = \frac{b_0 s^2 + b_1 s + b_2}{(sx / \omega_b + r)^2 + (\omega_0 x)^2} \quad (\text{B.38})$$

Όπου οι συντελεστές  $b_0, b_1, b_2$  δίνονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$\begin{aligned} b_0 &= x(V_0 - E_0 \cos \theta_0) / (\omega_0 \omega_b^2) \\ b_1 &= (r)(V_0 - E_0 \cos \theta_0) / (\omega_0 \omega_b) \\ b_2 &= \omega_0 x(2V_0 - E_0 \cos \theta_0) + rE_0 \sin \theta_0 \end{aligned} \quad (\text{B.39})$$

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Πίνακας Γ.1. Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά υπεράκτιων A/G

Παράμετρος	Τιμή
Ονομαστική ισχύς	3.4 MVA
Ονομαστική ενεργός ισχύς	2.5 MW
Ονομαστική πολική τάση	4000 V
Ονομαστική μαγνητική ροή μονίμων μαγνητών δρομέα	0.7 α.μ.
Ωμική αντίσταση στάτη	0.005 α.μ.
Επαγωγική αντίδραση <i>d</i> -άξονα	0.7 α.μ.
Επαγωγική αντίδραση <i>q</i> -άξονα	0.7 α.μ.
Ισοδύναμη σταθερά αδρανείας	4.18 s

Πίνακας Γ.2. Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά μετατροπέων MMC (συστήματος διασύνδεσης VSC-HVDC ΘΑΠ του Κεφ. 2 και ακτινικής διασύνδεσης Κεφ. 3)

Παράμετρος	Τιμή
Ονομαστική ισχύς MMC	430 MVA
Ονομαστική dc τάση	±150 kV
Ονομαστικό ρεύμα MMC	1.664 kA
Αριθμός υπομονάδων ανά υποσκέλος	10
Χωρητικότητα πυκνωτή υπομονάδας	640 μF
Αυτεπαγωγή υποσκέλους	33 mH
Αυτεπαγωγή ac φίλτρων εξόδου	8 mH
Χωρητικότητα ac φίλτρων εξόδου	2.5 μF
Διακοπτική συχνότητα	1350 Hz

Πίνακας Γ.3: Χαρακτηριστικά συνδέσεων VSC-HVDC ΘΑΠ και ηπειρωτικού ac συστήματος

Parameter	Value
Ονομαστική ac τάση ηπειρωτικού συστήματος	400 kV
Ισχύς βραχυκύκλωσης ηπειρωτικού συστήματος	20000 MVA
Ονομαστική ικανότητα M/Σ	500 MVA
Λόγος μετασχηματισμού επίγειου M/Σ	400/150 kV
Λόγος μετασχηματισμού υπεράκτιου M/Σ	150/33 kV
Επαγωγική αντίδραση M/Σ	12%
Ωμική αντίσταση HVDC καλωδίου	0.022 Ω/km
Αυτεπαγωγή HVDC καλωδίου	0.112 mH/km
Χωρητικότητα HVDC καλωδίου	0.141 μF/km

Πίνακας Γ.4. Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά σύγχρονων γεννητριών ΣΗΕ δύο περιοχών

Παράμετρος	Τιμή
Ονομαστική ισχύς	900 MVA
Ισοδύναμη σταθερά αδρανείας	6.5 s
Ωμική αντίσταση στάτη $R_a$	0.0025 α.μ.
Σύγχρονη επαγωγική αντίδραση ευθέως άξονα $X_d$	1.8 α.μ.
Σύγχρονη επαγωγική αντίδραση εγκάρσιου άξονα $X_q$	1.7 α.μ.
Επαγωγική αντίδραση σκέδασης στάτη $X_l$	0.2 α.μ.
Μεταβατική επαγωγική αντίδραση ευθέως άξονα $X_d'$	0.3 α.μ.
Μεταβατική επαγωγική αντίδραση εγκάρσιου άξονα $X_q'$	0.55 α.μ.
Υπομεταβατική αντίδραση ευθέως και εγκάρσιου άξονα $X_d''=X_q''$	0.25 α.μ.
Μεταβατική και υπομεταβατική χρονική σταθερά ανοιχτού κυκλώματος ευθέως άξονα $T_{do}', T_{do}''$	8 s, 0.03 s
Μεταβατική και υπομεταβατική χρονική σταθερά ανοιχτού κυκλώματος εγκάρσιου άξονα $T_{qo}', T_{qo}''$	0.4 s, 0.05 s

Πίνακας Γ.5. Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά 5-τερματικού MTDC δικτύου διασύνδεσης νησιών

Παράμετρος	Τιμή
	Φίλιπποι: 500 MW
	Λήμνος: 250 MW
Ονομαστική ενεργός ισχύς μετατροπέων MMC	Λέσβος: 300 MW
	Χίος: 150 MW
	Λάρυμνα: 500 MW
Ονομαστική dc τάση	$\pm 150$ kV
Βασική ισχύς	500 MW
Ονομαστική τάση KYT	400 kV
Ισχύς βραχυκύκλωσης στα KYT Φιλιππων και Λάρυμνας	20000 MVA
Ωμική αντίσταση πηνίων διασύνδεσης $r_c$	0.0025 α.μ.
Ωμική αντίσταση M/Σ $r_r$	0.005 α.μ.
Ωμική αντίσταση καλωδίων HVDC	0.0113 Ω/km
Μεταφορική ικανότητα HVDC καλωδίων	516 MW

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ: ΤΙΜΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΕΛΕΓΚΤΩΝ

Πίνακας Δ.1. Τιμές παραμέτρων ελεγκτή PSC υπεράκτιων Α/Γ

Παράμετρος	Τιμή
Κέρδος ελεγκτή PSC $R_{PSC}$	5%
Κέρδος ελεγκτή αέργου ισχύος $k_{iq}$	5 α.μ.
Κέρδος ελεγκτή απόσβεσης $k_v$	0.2 α.μ.
Σταθερά $\alpha_v$ ελεγκτή απόσβεσης	40 r/s
Εύρος ζώνης εσωτερικού ελεγκτή ρεύματος	1000 r/s

Πίνακας Δ.2. Τιμές παραμέτρων συμβατικών ελεγκτών μετατροπέων Α/Γ

Παράμετρος	Τιμή
PI ελεγκτής ρεύματος GSC	0.4+0.4/0.005s
PI ελεγκτής ρεύματος MSC	2+2/0.01s
PI ελεγκτής dc τάσης	1+1/0.1s
PI ελεγκτής συστήματος PLL	0.25+0.25/0.05s
Κέρδος $k_f$ φίλτρων DSOGI	1.4

Πίνακας Δ.3. Τιμές παραμέτρων εξωτερικού ελεγκτή υπεράκτιων Α/Γ

Παράμετρος	Τιμή
Χρονική σταθερά $T_f$	0.02 s
Κέρδος στατισμού $R_{WT}$	5%
Ισοδύναμη σταθερά αδρανείας $H_{WT}$	30 s
Σταθερά $\alpha_m$ αδρανειακού ελεγκτή	1 r/s
Χρονική σταθερά $T_{servo}$	0.3 s
Περιοριστής ρυθμού $\dot{\beta}_{max}, \dot{\beta}_{min}$	10, -10 deg/s
Περιοριστής επιπέδου $\beta_{max}, \beta_{min}$	27, 0 deg
Χρονική σταθερά $T_\omega$	6 s
PI ελεγκτής ροπής	0.3+0.1/s
PI ελεγκτής γωνίας βήματος	150+25/s
PI ελεγκτής αντιστάθμισης γωνίας βήματος	3+30/s
Χρονική σταθερά $T_{pc}$	0.05 s
Περιοριστές ρυθμού $\dot{p}_{WTmax}, \dot{p}_{WTmin}$	0.45, -0.45 α.μ./s
Περιοριστές επιπέδου $p_{WTmax}, p_{WTmin}$	1.12, 0 α.μ.
Σταθερά $\alpha_p$ περιοριστή ρυθμού μεταβολής $p_{ord}$	1 r/s

Πίνακας Δ.4. Τιμές παραμέτρων ελεγκτή υπεράκτιου μετατροπέα MMC με ενσωματωμένο ρυθμιστή συχνότητας (Σχήμα 5.12)

Παράμετρος	Τιμή
Χρονική σταθερά $T_f$	0.1 s
Χρονική σταθερά $T_w$	1 s
Παράμετροι ελεγκτών συχνότητας $R_{WF}, H_{WF}$	5%, 30 s
Κλίση χαρακτηριστικής FRT $\Delta\omega_{FRT}^* / \Delta v_{dcS}$	0.05 α.μ./0.15 α.μ.
PI ελεγκτής τάσης $\ v_s\ $	1+1/(0.01s)

Πίνακας Δ.5. Τιμές παραμέτρων ελεγκτή ρεύματος, dc τάσης και συστήματος συγχρονισμού μετατροπέων MMC

Παράμετρος	Τιμή
Αναλογικό κέρδος $k_{p,i}$	0.4 α.μ.
Χρονική σταθερά ελέγχου $\tau_i$	0.005 s
Αναλογικό κέρδος $k_{p,dc}$	4.8 α.μ.
Χρονική σταθερά ελέγχου $\tau_{dc}$	0.09 s
Αναλογικό κέρδος $k_{p,PLL}$	0.25 α.μ.
Χρονική σταθερά ελέγχου $\tau_{PLL}$	0.05 s

Πίνακας Δ.6. Τιμές παραμέτρων αυτόματου ρυθμιστή τάσης (τύπου DC1A κατά IEEE) [135]

Παράμετρος	Τιμή
Χρονική σταθερά $T_R$	0.01 s
Χρονικές σταθερές $T_B, T_C$	0, 0
Αναλογικό κέρδος $K_A$	50
Χρονική σταθερά ελέγχου $T_A$	0.04 s
Χρονική σταθερά $T_E$	0.03 s
Κέρδος $K_E$	1
Χρονική σταθερά $T_F$	1 s
Κέρδος $K_F$	0.02

Πίνακας Δ.7. Τιμές παραμέτρων αμοστροβίλων και ρυθμιστή στροφών [135]

Παράμετρος	Τιμή
Χρονική σταθερά $T_{CH}$	0.2 s
Χρονική σταθερά $T_{RH}$	4 s
Χρονική σταθερά $T_{CO}$	0.3 s
Συντελεστής $F_{HP}$	0.4
Συντελεστής $F_{IP}$	0.3
Συντελεστής $F_{LP}$	0.3
Στατισμός $R$	5%
Χρονική σταθερά $T_{SM}$	0.1 s
Κέρδος $K_F$	0.02
Κέρδος στατισμού ρυθμιστή στροφών	5%
Χρονική σταθερά $T_{SM}$	0.15 s

Πίνακας Δ.8. Τιμές παραμέτρων σταθεροποιητή (συνάρτηση μεταφοράς  $\frac{s}{s+c} \frac{1+s\alpha\tau}{1+s\tau} K_{PSS}$ ) [135]

Παράμετρος	Τιμή
Κέρδος $K_{PSS}$	3.5
Χρονική σταθερά $\tau$	0.05 s
Σταθερά $\alpha$	14
Σταθερά $c$	0.1 r/s

**ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- [1] “Offshore Transmission Technology Report”, European Network of Transmission System Operator for Electricity (ENTSO-E), Brussels, Belgium, Oct. 2012.
- [2] N. Flourentzou, V. G. Agelidis, G. D. Demetriades, “VSC-Based HVDC Power Transmission Systems: An Overview,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 24, pp. 592-602, Mar. 2009.
- [3] M. Barnes and A. Beddard, “Voltage Source Converter HVDC Links - The state of the Art and Issues Going Forward”, *Energy Procedia*, Jan. 2012.
- [4] Στέφανος Ν. Μανιάς, *Ηλεκτρονικά Ισχύος*, Εκδόσεις Συμμεών, Αθήνα, 2014.
- [5] “HVDC Light It’s time to connect,” ABB AB Grid Systems – HVDC, Sweden, 2013.
- [6] B. Jacobson, P. Karlsson, G. Asplund, L. Harnefors, and T. Jonsson, “VSC-HVDC transmission with cascaded two-level converters,” in *Proc. 2010 Int. Council on Large Elec. Syst. (CIGRE) Session*, B4-110, Paris, France, 2010.
- [7] “Voltage Source Converter (VSC) HVDC for Power Transmission – Economic Aspects and Comparison with other AC and DC Technologies,” Technical Brochure 492, Cigre Working Group B4.46, 2012.
- [8] “HVDC PLUS – Basics and Principle of Operation,” Siemens AG – Energy Sector, Germany, 2011.
- [9] “HVDC-VSC: transmission technology of the future,” Alstom Grid, 2011.
- [10] ‘THE GRID CODE’, Issue 5, Rev. 15, National Grid Electricity Transmission Plc., GB, Feb. 2016.
- [11] “Grid Code – High and extra high voltage,” Tennet TSO GmbH, Germany, 2015.
- [12] “Requirements for Offshore Grid Connections in the Grid of TenneT TSO GmbH,” TenneT TSO GmbH, Germany, 2012.
- [13] “ENTSO-E Draft Network Code on High Voltage Direct Current Connections and DC-connected Power Park Modules,” ENTSO-E, Brussels, Belgium, Apr. 2014.
- [14] “EirGrid Grid Code”, Version 6.0, EirGrid Plc., Ireland, 2015.
- [15] M. Tsili, and S. Papathanassiou, “A review of grid code technical requirements for wind farms,” *IET Renew. Power Gener.*, vol. 3, pp. 308 – 332, Sept. 2009.
- [16] ENERCON product overview, ENERCON GmbH, Germany, 2012, <http://www.enercon.de>.
- [17] S. Debnath, J. Qin, B. Bahrani, M. Saeedifard, and P. Barbosa, “Operation, Control, and Applications of the Modular Multilevel Converter: A Review,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 30, pp. 37-53, Jan. 2015.

- [18] M. Saeedifard, and R. Iravani, "Dynamic Performance of a Modular Multilevel Back-to-Back HVDC System," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 25, pp. 2903-2912, Oct. 2010.
- [19] H. Saad, X. Guillaud, J. Mahseredjian, S. Denetiere, and S. Nguéfeu, "MMC capacitor voltage decoupling and balancing controls," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 30, no. 2, pp. 704–712, April 2015.
- [20] M. Guan and Z. Xu, "Modeling and control of a modular multilevel converter-based HVDC system under unbalanced grid conditions," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 27, no. 12, pp. 4858–4867, Dec. 2012.
- [21] J. Qin and M. Saeedifard, "Predictive Control of a Modular Multilevel Converter for a Back-to-Back HVDC System," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 27, no. 3, pp. 1538 – 1547, July 2012.
- [22] G. T. Son, H.-J. Lee, T. S. Nam, Y.-H. Chung, and U.-H. Lee, "Design and control of a modular multilevel HVDC converter with redundant power modules for noninterruptible energy transfer," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 27, no. 3, pp. 1611–1619, Jul. 2012.
- [23] U. N. Gnanarathna, A. M. Gole and R. P. Jayasinghe, "Efficient Modeling of Modular Multilevel HVDC Converters (MMC) on Electromagnetic Transient Simulation Programs," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 26, pp. 316-324, Jan. 2011.
- [24] J. Xu, C. Zhao, W. Liu and C. Guo, "Accelerated Model of Modular Multilevel Converters in PSCAD/EMTDC," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 28, pp. 129-136, Jan. 2013.
- [25] H. Saad, S. Denetiere, J. Mahseredjian, P. Delarue, X. Guillaud, J. Peralta, and S. Nguéfeu, "Modular Multilevel Converter Models for Electromagnetic Transients," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 29, pp. 1481-1489, Jun. 2014.
- [26] Q. Song, W. Liu, X. Li, H. Rao S. Xu, and L. Li, "A Steady-State Analysis Method for a Modular Multilevel Converter," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 28, pp. 3702-3713, Aug. 2013.
- [27] Y. Zhou, J. Jiang, J. Guo, P. Hu, and Y. Liang, "Analysis and Control of Modular Multilevel Converters Under Unbalanced Conditions," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 28, pp. 1986–1995, Oct. 2013.
- [28] L. Harnefors, A. Antonopoulos, S. Norrga, L. Angquist, and H. –P. Nee, "Dynamic Analysis of Modular Multilevel Converters," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, pp. 2526-2537, Jul. 2013.
- [29] H. Saad, J. Peralta, S. Denetiere, J. Mahseredjian, J. Jatskevich, J. A. Martinez, A. Davoudi, M. Saeedifard, V. Sood, X. Wang, J. Cano, and A. Mehrizi-Sani, "Dynamic Averaged and Simplified Models for MMC-Based HVDC Transmission Systems," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 28, pp. 1723-1730, July 2013.



- [30] S. Liu, Z. Xu, W. Hua, G. Tang, and Y. Xue, "Electromechanical Transient Modeling of Modular Multilevel Based Multi-Terminal HVDC Systems," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 29, pp. 72-83, Jan. 2014.
- [31] J. Peralta, H. Saad, S. Denetiere, J. Mahseian, and S. Nguefeu, "Detailed and Averaged Models for a 401-Level MMC-HVDC System," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 27, pp. 1501-1508, Jul. 2012.
- [32] J. Xu, A. M. Gole, and C. Zhao, "The Use of Averaged-Value Model of Modular Multilevel Converter in DC Grid," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 30, pp. 519-528, Apr. 2015.
- [33] N.-T. Trinh, M. Zeller, K. Wuerflinger, and I. Erlich, "Generic Model of MMC-VSC-HVDC for Interaction Study With AC Power System," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 31, pp. 27-34, Jan. 2016.
- [34] L. Zhang, "Modeling and Control of VSC-HVDC Links Connected to Weak AC Systems," Ph.D. dissertation, Royal Institute of Technology, School of Electrical Engineering Electrical Machines and Power Electronics, Stockholm, 2010.
- [35] Rocabert, A. Luna, F. Blaabjerg, and P. Rodriguez, "Control of Power Converters in AC Microgrids," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 27, pp. 4734-4749, Nov. 2012.
- [36] A. Egea-Alvarez, S. Fekriasl, F. Hassan, and O. Gomis-Bellmunt, "Advanced vector control for voltage source converters connected to weak grids," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 30, pp. 3072-3081, Nov. 2015.
- [37] F. Blaabjerg, R. Teodorescu, M. Liserre, and A. V. Timbus, "Overview of Control and Grid Synchronization for Distributed Power Generation Systems," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 53, pp.1398-1409, Oct. 2006.
- [38] Q.-C. Zhong, and G. Weiss, "Synchronverters: Inverters That Mimic Synchronous Generators," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, pp.1259-1267, Apr. 2011.
- [39] Q.-C. Zhong, P.-L. Nguyen, Z. Ma, and W. Sheng, "Self-synchronised Synchronverters: Inverters without a Dedicated Synchronization Unit," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 29, pp.617-630, Feb. 2014.
- [40] L. Zhang, L. Harnfors, and H.-P. Nee, "Power-Synchronization Control of Grid-Connected Voltage-Source Converters," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 25, pp. 809-820, May 2010.
- [41] M. Guan, W. Pan, J. Zhang, Q. Hao, J. Cheng, and X. Zheng, "Synchronous Generator Emulation Control Strategy for Voltage Source Converter (VSC) Stations," *IEEE Power Syst.*, vol. 30, pp. 3093-3101, Nov. 2015.
- [42] J. A. Suul, S. D'Arco, P. Rodriguez, and M. Molinas, "Impedance-compensated grid synchronization for extending the stability range of weak grids with voltage source converters," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 10, pp. 1315-1326, 2016.

- [43] L. Zhang, L. Harnefors, and H.-P. Nee, "Modeling and Control of VSC-HVDC Links Connected to Island Systems," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 26, pp. 783-793, May. 2011.
- [44] L. Zhang, H.-P. Nee, L. Harnefors, "Analysis of Stability Limitations of a VSC-HVDC Link Using Power-Synchronization Control," *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 26, No. 3, Aug. 2011.
- [45] L. Zhang, L. Harnefors, H.-P. Nee, "Interconnection of Two Very Weak AC Systems by VSC-HVDC Links Using Power-Synchronization Control," *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 26, No. 1, Feb. 2011.
- [46] L. Harnefors, Y. Jiang-Haefner, M. Hyttinen, and T. Jonsson, "Ride-through methods for wind farms connected to the grid via a VSC-HVDC transmission," in *Proc. Nordic Wind Power Conf.*, 270 p., 2007.
- [47] R. L. Hendriks, R. Völzke and W. L. Kling, "Fault Ride-Through Strategies for VSC-Connected Wind Parks," in *Proc. European Wind Energy Conf. and Exhib. (EWEC)*, Marseille, France, 2009.
- [48] M. Mohammadi, M. Avendano-Mora, M. Barnes, and J. Chan, "A study on Fault Ride-Through of VSC-connected offshore wind farms," in *Proc. 2013 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PES)*, pp. 1-5, 2013.
- [49] C. Feltes, H. Wrede, F. W. Koch, and I. Erlich, "Enhanced fault ride-through method for wind farms connected to the grid through VSC-based HVDC transmission," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 24, pp. 1537-1546, Aug. 2009.
- [50] A. A. van der Meer, M. Ndreko, M. Gibescu, M. A. M. van der Meijden, "The Effect of FRT Behavior of VSC-HVDC Connected Offshore Wind Power Plants on AC/DC System Dynamics," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 31, pp. 878-887, Apr. 2016.
- [51] I. Erlich, C. Feltes, and F. Shewarega, "Enhanced Voltage Drop Control by VSC-HVDC Systems for Improving Wind Farm Fault Ridethrough Capability," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 29, pp. 378 – 385, Feb. 2014.
- [52] S. M. Muyeen, R. Takahashi, T. Murata, J. Tamura, M. H. Ali, Y. Matsumura, A. Kuwayama, and T. Matsumoto, "Low voltage ride through capability enhancement of wind turbine generator system during network disturbance," *IET Renew. Power Gener.*, vol. 3, pp. 65-74, Mar. 2009.
- [53] A. Mullane, G. Lightbody and R. Yacamini, "Wind-Turbine Fault Ride-Through Enhancement," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol 20, pp. 1929-1937, Nov. 2005.
- [54] S. Alepuz, A. Calle, S. Busquets-Monge, S. Kouro, and Wu Bin, "Use of Stored Energy in PMSG Rotor Inertia for Low-Voltage Ride-Through in Back-to-Back NPC Converter-Based Wind Power Systems," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, pp. 1787-1796, May 2013.

- [55] S. Li, T. A. Haskew, R. P. Swatloski, and W. Gathings, "Optimal and Direct-Current Vector Control of Direct-Driven PMSG Wind Turbines," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 27, pp. 2325-2337, May 2012.
- [56] I. Erlich, H. Wrede, and C. Feltes, "Dynamic Behavior of DFIG-Based Wind Turbines during Grid Faults," in *Proc. Power Conversion Conf. (PCC)*, Nagoya, Japan, 2007, pp. 1195-1200.
- [57] L. Xu, L. Yao, and S. Christian, "Grid integration of large DFIG-based wind farms using VSC transmission," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 22, pp. 976-984, Aug. 2007.
- [58] G. Ramtharan, A. Arulampalam, J. B. Ekanayake, F. M. Hughes, and N. Jenkins, "Fault ride through of fully rated converter wind turbines with AC and DC transmission," *IET Renew. Power Gener.*, vol. 3, pp. 426-438, Dec. 2009.
- [59] S. Chaudhary, R. Teodorescu, P. Rodriguez, and P. Kjar, "Chopper controlled resistors in VSC-HVDC transmission for WPP with full-scale converters," in *Proc. 2009 IEEE PES/IAS Sustainable Alternative Energy (SAE) Conf.*, pp. 1-8.
- [60] H. Liu and Z. Chen, "Contribution of VSC-HVDC to Frequency Regulation of Power Systems With Offshore Wind Generation," *IEEE Trans. Energy Conv.*, vol. 30, Sept. 2015.
- [61] Y. Pipelzadeh, B. Chaudhuri, and T. C. Green, "Inertial response from remote offshore wind farms connected through VSC-HVDC links: a communication-less scheme," in *Proc. 2012 IEEE Power and Energy Soc. General Meeting*, San Diego, CA, 2012, pp. 1-6.
- [62] Y. Phulpin, "Communication-free inertia and frequency control for wind generators connected by an HVDC-link," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 27, no. 2, pp. 1136-1137, Dec. 2011.
- [63] T. M. Haileselassie, R. E. Torres-Olguin, T. K. Vrana, K. Uhlen, and T. Undeland, "Main grid frequency support strategy for VSC-HVDC connected wind farms with variable speed wind turbines," in *Proc. 2011 IEEE PowerTech*, Trondheim, Norway, 2011, pp. 1-6.
- [64] I. M. Sanz, B. Chaudhuri, and G. Strbac, "Inertial Response From Offshore Wind Farms Connected Through DC Grids," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 30, pp. 1518-1527, May 2015.
- [65] I. D. Margaritis, S. A. Papathanassiou, N. D. Hatziargyriou, A. D. Hansen, and P. Sorensen, "Frequency Control in Autonomous Power Systems With High Wind Power Penetration," *IEEE Trans. Sust. Energy*, vol. 3, pp. 189-199, Apr. 2012.
- [66] M. Kayikci, and J. V. Milanovic, "Dynamic Contribution of DFIG-Based Wind Plants to System Frequency Disturbances," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 24, pp. 859-867, May 2009.

- [67] M. F. M. Arani, and E. F. El-Saadany, "Implementing Virtual Inertia in DFIG-Based Wind Power Generation," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, pp. 1373-1384, May 2013.
- [68] P. Moutis, S. A. Papathanassiou and N. D. Hatziargyriou, "Improved load-frequency control contribution of variable speed variable pitch wind generators," *Renewable Energy*, vol. 48, pp 514–523, Dec. 2012.
- [69] J. F. Conroy, and R. Watson, "Frequency Response Capability of Full Converter Wind Turbine Generators in Comparison to Conventional Generation," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 23, pp.649-656, May 2008.
- [70] K. Clark, N. W. Miller, and J. J. Sanchez-Gasca, "Modeling of GE Wind Turbine-Generators for Grid Studies," GE Energy, Schenectady, NY, Tech. Rep. Ver. 4.5, Apr. 2010.
- [71] J. Mauricio, A. Marano, A. Gomez-Exposito, and J. Ramos, "Frequency Regulation Contribution Through Variable-Speed Wind Energy Conversion Systems," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 24, pp. 173-180, Feb. 2009.
- [72] D. Gautam, L. Goel, R. Ayyanar, V. Vittal, and T. Harbour, "Control Strategy to Mitigate the Impact of Reduced Inertia Due to Doubly Fed Induction Generators on Large Power Systems," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 26, pp. 214-224, Feb. 2011.
- [73] A. Junyent-Ferre, Y. Pipelzadeh, and T. C. Green, "Blending HVDC-Link Energy Storage and Offshore Wind Turbine Inertia for Fast Frequency Response," *IEEE Trans. Sust. Energy*, vol. 6, pp. 1059-1066, Jul. 2015.
- [74] J. Zhu, C. D. Booth, G. P. Adam, A. J. Roscoe, and C. G. Bright, "Inertia Emulation Control Strategy for VSC-HVDC Transmission Systems," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, pp. 1277-1287, May 2013.
- [75] W. Wan, and M. Barnes, "Power Flow Algorithms for Multi-Terminal VSC-HVDC with Droop Control," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 29, pp. 1721-1730, Jul. 2014.
- [76] T. K. Vrana, J. Beerten, R. Belmans, and O. B. Fosso, "A classification of DC node voltage control methods for HVDC grids," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 103, pp. 137-144, Oct. 2013.
- [77] O. Gomis-Bellmunt, J. Liang, J. Ekanayake, and N. Jenkins, "Voltage-current characteristics of multiterminal HVDC-VSC for offshore wind farms," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 81, pp. 440-450, Feb. 2011.
- [78] C. Barker, R. Whitehouse, J. Lang, and S. Wang, "Risk of multiple cross-over of control characteristics in multi-terminal HVDC," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 10, pp. 1353-1360, Jan. 2016.
- [79] V. Akhmatov, M. Callavik, C. M. Franck, S. E. Rye, T. Ahndorf, M. K. Bucher, H. Muller, F. Schettler, and R. Wiget, "Technical Guidelines and Prestandardization Work for First HVDC Grids," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 29, no. 1, Feb. 2014.

- [80] A. Egea-Alvarez, J. Beerten, D. V. Hertem, and O. Gomis-Bellmunt, "Primary and secondary power control of multiterminal hvdc grids," in *Proc. 10th IET Int. Conf. on AC and DC Power Transmission (ACDC 2012)*.
- [81] X. Zhao, and K. Li, "Droop setting design for multi-terminal HVDC grids considering voltage deviation impacts," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 123 pp. 67-75, Jun. 2015.
- [82] J. Beerten, S. Cole, and R. Belmans, "Modeling of Multi-Terminal VSC HVDC Systems With Distributed DC Voltage Control," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 29, pp. 34-42, Jan. 2014.
- [83] R. Eriksson, J. Beerten, M. Ghandhari, and R. Belmans, "Optimizing dc voltage droop settings for ac/dc system interactions," *IEEE Trans. on Power Del.*, vol. 29, no. 1, pp. 362–369, Feb 2014.
- [84] E. Prieto-Araujo, A. Egea-Alvarez, S. Fekriasl, O. Gomis-Bellmunt, "DC voltage droop control design for multi-terminal HVDC systems considering AC and DC grid dynamics," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 31, pp. 575-585, Apr. 2016.
- [85] J. Liang, T. Jing, O. Gomis-Bellmunt, J. Ekanayake, and N. Jenkins, "Operation and Control of Multiterminal HVDC Transmission for Offshore Wind Farms," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 26, pp. 2596-2604, Oct. 2011.
- [86] K. Rouzbehi, A. Miranian, J. I. Candela, A. Luna, and P. Rodriguez, "A Generalized Voltage Droop Strategy for Control of Multi-Terminal DC Grids," *IEEE Trans. Ind. Applic.*, vol. 51, pp. 607-618, Feb. 2015.
- [87] E. Prieto-Araujo, F. D. Bianchi, A. Junyent-Ferre, and O. Gomis-Bellmunt, "Methodology for Droop Control Dynamic Analysis of Multiterminal VSC-HVDC Grids for Offshore Wind Farms," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 26, pp. 2476-2485, Oct. 2011.
- [88] T. M. Hailelassie, and K. Uhlen, "Impact of DC Line Voltage Drops on Power Flow of MTDC Using Droop Control," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 27, pp. 1441-1449, Aug. 2012.
- [89] A. Egea-Alvarez, F. Bianchi, A. Junyent-Ferre, G. Gross, O. Gomis-Bellmunt, "Voltage Control of Multiterminal VSC-HVDC Transmission Systems for Offshore Wind Power Plants: Design and Implementation in a Scaled Platform," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, pp. 2381-2391, Jun. 2013.
- [90] N. R. Chaudhuri, and B. Chaudhuri, "Adaptive Droop Control for Effective Power Sharing in Multi-Terminal DC (MTDC) Grids," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, pp. 21-29, Feb. 2013.
- [91] J. Cao, W. Du, H. F. Wang, and S. Q. Bu, "Minimization of Transmission Loss in Meshed AC/DC Grids With VSC-MTDC Networks," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, pp. 3047-3055, Aug. 2013.

- [92] A. S. Abdel-Khalik, A. M. Massoud, A. A. Elserougi, and S. Ahmed, "Optimum Power Transmission-Based Droop Control Design for Multi-Terminal HVDC of Offshore Wind Farms," *IEEE Tans. Power Syst.*, vol. 28 pp. 3401-3409, Aug. 2013.
- [93] M. Aragues-Penalba, A. Egea-Alvarez, O. Gomis-Bellmunt, and A. Sumper, "Optimum voltage control for loss minimization in HVDC multi-terminal transmission systems for large offshore wind farms," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 89 pp. 54-63, Aug. 2012.
- [94] M. Aragues-Penalba, A. Egea-Alvarez, S. G. Arellano, and O. Gomis-Bellmunt, "Droop control for loss minimization in HVDC multi-terminal transmission systems for large offshore wind farms," *Electr. Power Syst. Res.* vol. 112, pp. 48-55, Jul. 2014.
- [95] J. Khazaei, Z. Miao, L. Piyasinghe, and L. Fan, "Minimizing DC system loss in multi-terminal HVDC systems through adaptive droop control," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 126 pp. 78-86, Sept. 2015.
- [96] J. Cao, W. Du, and H. F. Wang, "An Improved Corrective Security Constrained OPF for Meshed AC/DC Grids With Multi-Terminal VSC-HVDC," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 31, pp. 485-495, Jan. 2016.
- [97] R. T. Pinto, P. Bauer, S. F. Rodrigues, E. J. Wiggelinkhuizen, J. Pierik, and B. Ferreira, "A Novel Distributed Direct-Voltage Control Strategy for Grid Integration of Offshore Wind Energy Systems Through MTDC Network," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, pp. 2429-2441, Jun. 2013.
- [98] J. Beerten and R. Belmans, "Analysis of power sharing and voltage deviations in droop-controlled dc grids," *IEEE Trans. on Power Syst.*, vol. 28, no. 4, pp. 4588-4597, Nov 2013.
- [99] B. Silva, C. L. Moreira, H. Leite, and J. A. Pecas-Lopes, "Control Strategies for AC Fault Ride Through in Multiterminal HVDC Grids," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 29, pp. 395-405, Feb. 2014.
- [100] L. Xu, and L. Yao, "DC voltage control and power dispatch of a multi-terminal HVDC system for integrating large offshore wind farms," *IET Renew. Power Gener.*, vol. 5, pp. 223-233, 2011.
- [101] N. R. Chaudhuri, R. Majumder, and B. Cahudhuri, "System Frequency Support Through Multi-Terminal DC (MTDC) Grids," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, pp.347-356, Feb. 2013.
- [102] B. Silva, C. L. Moreira, L. Seca, Y. Phulpin, and J. A. Pecas-Lopes, "Provision of Inertial and Primary Frequency Control Services Using Offshore Multiterminal HVDC Networks," *IEEE Trans. Sust. Energy*, vol. 4, pp. 800-808, Oct. 2012.
- [103] S. Akkari, J. Dai, M. Petit, and X. Guillaud, "Interaction between the voltage-droop and the frequency-droop control for multi-terminal HVDC systems," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 10, pp. 1345-1352, Jan. 2016.

- [104] S. Nanou, and S. Papathanassiou, "Evaluation of a communication-based fault ride-through scheme for offshore wind farms connected through high-voltage DC links based on voltage source converter," *IET Renew. Power Gener.*, vol. 9, pp. 882-891, Nov. 2015.
- [105] S. I. Nanou, and S. A. Papathanassiou, "Grid Code Compatibility of VSC-HVDC Connected Offshore Wind Turbines Employing Power Synchronization Control," *IEEE Trans. on Power Syst.*, υπό δημοσίευση (doi:10.1109/TPWRS.2016.2515504).
- [106] S. Nanou, O. Tzortzopoulos, S. Papathanassiou, "Evaluation of an enhanced power dispatch control for multi-terminal HVDC grids using Monte-Carlo simulation," *Electr. Power Syst. Res.*, υπό δημοσίευση (doi:10.1016/j.epsr.2016.04.012).
- [107] S. Nanou, A. Spetsiotis, S. Papathanassiou, "Provision of primary frequency support and inertia emulation by offshore wind farms connected through multi-terminal VSC-HVDC links," in *Proc. EWEA Annual Event 2015*, pp. 170-173, Paris, France, 2015.
- [108] M. Klein, G. J. Rogers, and P. Kundur, "A Fundamental Study of Inter-Area Oscillations in Power Systems," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 6, pp. 914-921, Aug. 1991.
- [109] A. Yazdani and R. Iravani, *Voltage-Sourced Converters in Power Systems: Modeling, Control, and Applications*, Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc., 2010.
- [110] S. M. Mueen, R. Takahashi, and J. Tamura, "Operation and Control of HVDC-Connected Offshore Wind Farm," *IEEE Trans. Sust. Energy*, vol. 1, no. 1, pp. 30-37, Apr. 2010.
- [111] P. Rodriguez, A. Luna, R. S. Munoz-Aguilar, I. Etxeberria-Otadui, R. Teodorescu, and F. Blaabjerg, "A Stationary Reference Frame Grid Synchronization System for Three-Phase Grid-Connected Power Converters under Adverse Grid Conditions," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 27, pp. 99-112, Jan. 2012.
- [112] S. I. Nanou, S. A. Papathanassiou, "Modeling of a PV system with grid code compatibility," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 116, pp. 301-310, Nov. 2014.
- [113] M. Asmine, J. Brochu, J. Fortmann, R. Gagnon, Y. Kazachkov, C.-E. Langlois, C. Larose, E. Muljadi, J. MacDowell, P. Pourbeik, S. A. Seman, and K. Wiens, "Model validation for wind turbine generator models," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 26, pp.1769–1782, Aug. 2011.
- [114] A. D. Hansen and G. Michalke, "Modelling and Control of Variable Speed Multi-Pole PMSG Wind Turbine," *Wind Energy*, vol. 11, no. 5, pp. 537-554, 2008.
- [115] B. Wu, Y. Lang, N. Zargari, and S. Kouro, *Power Conversion and Control of Wind Energy Systems*, John Wiley & Sons, Inc., 2011.
- [116] A. Sannino, P. Sandeberg, L. Stendius, R. Gerner, "Enabling the power of wind: HVDC Light® for large-scale offshore wind integration," ABB Review, Switzerland, March 2008. Διαθέσιμο ηλεκτρονικά: <http://www.abb.com/abbreview>.

- [117] Q. Tu, Z. Xu, and L. Xu, “Reduced Switching-Frequency Modulation and Circulating Current Suppression for Modular Multilevel Converters,” *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 26, pp. 2009-2017, Jul. 2011.
- [118] G. Konstantinou and V. Agelidis, “Performance Evaluation of Half-Bridge Cascaded Multilevel Converters Operated with Multicarrier Sinusoidal PWM Techniques,” in *Proc. IEEE Conf. Industrial Electronics and Applications*, 2009, pp. 3399–3404.
- [119] A. Hassanpoor, S. Norrga, H. Nee, and L. Angquist, “Evaluation of Different Carrier-Based PWM Methods for Modular Multilevel Converters for HVDC Application,” in *Proc. Conf. IEEE Industrial Electronics Society (IECON)*, 2012, pp. 388–393.
- [120] R. F. Lizana, M. A. Perez, and J. Rodriguez, “DC voltage balance control in a modular multilevel cascaded converter,” in *Proc. IEEE Int. Symp. Ind. Electron.*, May 28–31, 2012, pp. 1973–1978.
- [121] Y. Li and F. Wang, “Arm Inductance Selection Principle for Modular Multilevel Converters with Circulating Current Suppressing Control,” in *Proc. IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, 2013, pp. 1321–1325.
- [122] Q. Tu, Z. Xu, H. Huang, and J. Zhang, “Parameter Design Principle of the Arm Inductor in Modular Multilevel Converter based HVDC,” in *Proc. International Conf. Power System Technology (POWERCON)*, 2010, pp. 1–6.
- [123] L. Harnefors, M. Bongiorno, and S. Lundberg, “Input-admittance calculation and shaping for controlled voltage-source converters,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 54, pp. 3323–3334, Dec 2007.
- [124] Y. Song, C. Breitholtz: “Nyquist stability analysis of a VSC-HVDC system using a distributed parameter DC-cable model,” in *Proc. 19th International Federation of Automatic Control (IFAC) World Congress*, Cape Town, South Africa, 2014.
- [125] S.-K. Chung, “A Phase Tracking System for Three Phase Utility Interface Inverters,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 15, pp. 431-438, May 2000.
- [126] V. Hussennether, J. Rittiger, A. Barth, D. Worthington, G. Dell’Anna, M. Rapetti, B. Huhnerbein, M. Siebert, “Projects BorWin2 and HelWin1 – Large Scale Multilevel Voltage-Sourced Converter Technology for Bundling of Offshore Windpower,” in *Proc. Cigre Session*, B4-306, Paris, France, 2012.
- [127] “Review of Worldwide Experience of Voltage Source Converter (VSC) High Voltage Direct Current Technology (HVDC) Installations”, Sinclair Knight Merz (SKM), UK, Final Rev., 2013.
- [128] “WindAccess – Alstom’s SCADA – Supervisory Control and Data Acquisition system for onshore and offshore applications,” ALSTOM, 2012, Διαθέσιμο ηλεκτρονικά: <http://www.alstom.com/power>.
- [129] M. A. Ahmed, Y.-C. Kim, “Hierarchical Communication Network Architectures for Offshore Wind Power Farms,” *Energies*, vol. 7, pp. 3420-3437, 2014.



- [130] B. Antunes, M. Rui, I. Ferreira, “Wireless as an alternative communication network in wind farms,” in *Proc. EWEA Annu. Event*, Barcelona, Spain, 2014.
- [131] K. Johnstone, K. R. W. Bell, and C. D. Booth, “The impact of post-fault active power recovery ramp rates of wind turbines on transient stability in Great Britain,” in *Proc. EWEA Annual Event*, Paris, France, 2015.
- [132] S. I. Nanou, G. A. Patsakis, S. A. Papathanassiou, “Assessment of communication-independent grid code compatibility solutions for VSC-HVDC connected offshore wind farms,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 121, pp. 38-51, Apr. 2015.
- [133] “SimPowerSystems™ User’s Guide”, Hydro-Québec and The MathWorks, Inc., Massachusetts, 2010.
- [134] M. Singh, A. J. Allen, E. Muljadi, V. Gevorgian, Y. Zhang, and S. Santoso, “Interarea Oscillation Damping Controls for Wind Power Plants,” *IEEE Trans. Sust. Energy*, vol. 6, pp. 967-975, Jul. 2015.
- [135] P. Kundur, *Power System Stability and Control*, McGraw-Hill Professional, 1994.
- [136] X. Yuan, F. Wang, D. Boroyevich, Y. Li, and R. Burgos, “DC-link Voltage Control of a Full Power Converter for Wind Generator Operating in Weak-Grid Systems,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 24, no. 9, pp. 2178-2192, Sept. 2009.
- [137] “Δεκαετής Πρόγραμμα Ανάπτυξης Συστήματος Μεταφοράς περιόδου 2017-2026 – Σχέδιο προς ΡΑΕ”, ΑΔΜΗΕ, Αθήνα, Απρ. 2016.
- [138] Στέφανος Β. Παπαευθυμίου, “Συμβολή στην Ανάλυση Υβριδικών Αιολικών – Αντλησιοταμιευτικών Σταθμών Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας”, Διδακτορική Διατριβή, ΕΜΠ, Αθήνα, Νοε. 2012.
- [139] Ιωάννης Δ. Μάργαρης, “Μοντελοποίηση ανεμογεννητριών για τη μελέτη δυναμικών φαινομένων σε συνθήκες αυξημένης αιολικής διεύθυνσης”, Διδακτορική Διατριβή, ΕΜΠ, Αθήνα, Ιουλ. 2011.
- [140] S. Nanou, S. Papathanassiou, M. Papadopoulos, “HV Transmission technologies for the interconnection of Aegean Sea islands and offshore wind farms,” in *Proc. MedPower 2014*, Athens, Greece.
- [141] “Συγκρότηση Επιτροπής Εξέτασης Οικονομικότητας του τρόπου ηλεκτροδότησης των Μη Διασυνδεδεμένων Νησιών για την εφαρμογή της απόφαση 2014/536/ΕΚ της Ευρωπαϊκής Επιτροπής”, ΦΕΚ 959/2015.
- [142] “Μελέτη Διασυνδέσεων των Νησιών του Αιγαίου στο Ηπειρωτικό Σύστημα – Φάση Α Γενικός Σχεδιασμός”, ΔΕΣΜΗΕ, Αθήνα, 2010.
- [143] “Δεκαετής Πρόγραμμα Ανάπτυξης Συστήματος Μεταφοράς περιόδου 2014-2023”, ΑΔΜΗΕ, Αθήνα, 2014.
- [144] S. Nanou, O. Tzortzopoulos, S. Papathanassiou, “Evaluation of DC voltage control strategies for multi-terminal HVDC grids comprising island systems with high RES

- penetration,” in *Proc. 11th IET Int. Conf. on AC and DC Power Transmission*, pp. 1-7, Birmingham, UK, 2015.
- [145] J. Zhu, C. D. Booth, G. P. Adam, A. J. Roscoe, “Coordinated direct current matching control strategy for multi-terminal DC transmission systems with integrated wind farms,” *Electr. Power Syst. Res.* vol. 124, pp. 55-64, 2015.
- [146] O. Gomis-Bellmunt, J. Liang, J. Ekanayake, R. King, and N. Jenkins, “Topologies of multiterminal HVDC-VSC transmission for large offshore wind farms,” *Electric Power Syst. Res.*, vol. 81, pp. 271–281, 2011.
- [147] E. I. Vrettos, S. A. Papathanassiou, “Operating Policy and Optimal Sizing of a High Penetration RES-BESS System for Small Isolated Grids,” *IEEE Trans. Energy Conv.* vol. 26 pp. 744-756, 2011.
- [148] J. Beerten, S. Cole, R. Belmans, “A Sequential AC/DC Power Flow Algorithm for Networks Containing Multi-terminal VSC HVDC Systems,” in *Proc. 2010 IEEE PES General Meeting*, MN, pp 1-7.
- [149] S. Rodrigues, R. T. Pinto, P. Bauer, E. Wiggelinkhuizen, J. Pierik, “Optimal Power Flow of VSC-based Multi-Terminal DC Networks using Genetic Algorithm Optimization,” in *Proc. 2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, NC, pp. 1453-1460.
- [150] K. Rouzbehi, A. Miranian, A. Luna, P. Rodriguez, “Optimized control of multi-terminal DC Grids Using particle swarm optimization,” in *Proc. 2013 15th European Conf. on Power Electronics and Applications*, Lille, pp. 1-9.
- [151] G. Li, H. Yue, M. Zhou, J. Wei, “Probabilistic assessment of oscillatory stability margin of power systems incorporating wind farms,” *Electr. Power and Energy Syst.*, vol. 58, pp. 47-56, 2014.
- [152] “Statistics Toolbox for use with MATLAB®– User’s Guide,” The MathWorks, Inc., MA, 2003.
- [153] A. E. Feijóo, J. Cidrás, J. L. G. Dornelas, “Wind Speed Simulation in Wind Farms for Steady-state Security Assessment of Electrical Power Systems,” *IEEE Trans. Energy Conv.* vol. 14, pp. 1582-1588, 1999.
- [154] H. Yu, C. Y. Chung, K. P. Wong, H. W. Lee, J. H. Zhang, “Probabilistic Load Flow Evaluation with Hybrid Latin Hypercube Sampling and Cholesky Decomposition,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 24, pp. 661-667, 2009.
- [155] D. Villanueva, A. E. Feijoo, J. L. Pazos, “An analytical method to solve the probabilistic load flow considering load demand correlation using the DC load flow,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 110, pp. 1-8, 2014.
- [156] R. N. Allan, A. M. L. d. Silva and R. C. Burchett, “Evaluation Methods and Accuracy in Probabilistic Load Flow Solutions,” *IEEE Trans. Power App. Syst.*, PAS-100, pp. 2539-2546, 1981.

**ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ ΤΟΥ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ*****Σε διεθνή επιστημονικά περιοδικά με κριτές***

1. **S. I. Nanou**, S. A. Papathanassiou, “Modeling of a PV system with grid code compatibility,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 116, pp. 301-310, Nov. 2014.
2. **S. I. Nanou**, G. A. Patsakis, S. A. Papathanassiou, “Assessment of communication-independent grid code compatibility solutions for VSC-HVDC connected offshore wind farms,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 121, pp. 38-51, Apr. 2015.
3. **S. I. Nanou**, A. G. Papakonstantinou, S. A. Papathanassiou, “A generic model of two-stage grid-connected PV systems with primary frequency response and inertia emulation,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 127, pp. 186-196, Oct. 2015.
4. **S. Nanou**, S. Papathanassiou, “Evaluation of a communication-based fault ride-through scheme for offshore wind farms connected through high-voltage DC links based on voltage source converter,” *IET Renew. Power Gener.*, vol. 9, pp. 882-891, Nov. 2015.
5. **S. I. Nanou**, S. A. Papathanassiou, “Grid Code Compatibility of VSC-HVDC Connected Offshore Wind Turbines Employing Power Synchronization Control,” *IEEE Trans. Power Syst.*, υπό δημοσίευση (doi:10.1109/TPWRS.2016.2515504).
6. **S. I. Nanou**, O. D. Tzortzopoulos, S. A. Papathanassiou, “Evaluation of an enhanced power dispatch control for multi-terminal HVDC grids using Monte-Carlo simulation,” *Electr. Power Syst. Res.*, υπό δημοσίευση (doi:10.1016/j.epsr.2016.04.012).

***Σε πρακτικά συνεδρίων***

1. **S. Nanou**, G. Vokas, S. Papathanassiou, “Small signal analysis and gain scheduling control of a photovoltaic DC/DC converter,” in *Proc. 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference (EU PVSEC) and Exhibition*, pp. 3579-3583, Messe Frankfurt, Germany, Sept. 2012.
2. **S. Nanou**, A. Papakonstantinou, S. Papathanassiou, “Control of a PV generator to maintain active power reserves during operation,” in *Proc. 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference (EU PVSEC) and Exhibition*, pp. 4059-4063, Messe Frankfurt, Germany, Sept. 2012.
3. E. Georgoulas, E. Batzelis, **S. Nanou**, S. Papathanassiou, “Study of single-string and multi-string amorphous silicon single junction modules in partial shading conditions,” in *Proc. 28th European Photovoltaic Solar Energy Conference (EU PVSEC) and Exhibition*, pp. 2524-2529, Paris, France, Oct. 2013.
4. **S. Nanou**, E. Batzelis, S. Papathanassiou, “Enhanced MPPT control of a two-stage grid-connected system under fast-changing irradiance conditions,” in *Proc. 28th European*

- Photovoltaic Solar Energy Conference (EU PVSEC) and Exhibition*, pp. 3399-3403, Paris, France, Oct. 2013.
5. S. Nanou, E. Batzelis, S. Papathanassiou, "Evaluation of PV inverter control schemes under distorted and variable frequency grid conditions," in *Proc. 28th European Photovoltaic Solar Energy Conference (EU PVSEC) and Exhibition*, pp. 3404-3408, Paris, France, Oct. 2013.
  6. Σ. Νάνου, Π. Αναγνωστόπουλος, Σ. Παπαθανασίου, Ε. Καπόλου, Σ. Στρουμπούλης, Δ. Τελάκη, Ν. Δρόσος, "Σύνδεση ανεμογεννητριών στο δίκτυο ΧΤ," *Πρακτικά Συνόδου «Αθήνα 2013» της Ε.Ε. CIGRE*, Αθήνα, 2013.
  7. E. Batzelis, S. Nanou, S. Papathanassiou, "Active power control in PV systems based on a quadratic curve fitting algorithm for the MPP estimation," in *Proc. 29th European Photovoltaic Solar Energy Conference (EU PVSEC) and Exhibition*, pp. 3036-3040, Amsterdam, The Netherlands, Sept. 2014.
  8. S. Nanou, P. Anagnostopoulos, E. Kapolou, S. Papathanassiou, "Interconnection of small wind turbines to the LV network: technical issues and evaluation methodology," in *Proc. EWEA 2014 Annu. Event*, Barcelona, Spain, 2014.
  9. S. Nanou, S. Papathanassiou, "Evaluation of a communication-based fault ride-through scheme for offshore wind farms connected through VSC-HVDC links," in *Proc. EWEA 2014 Annu. Event*, pp. 131-134, Barcelona, Spain, 2014.
  10. S. Nanou, S. Papathanassiou, M. Papadopoulos, "HV Transmission technologies for the interconnection of Aegean Sea islands and offshore wind farms," in *Proc. MedPower 2014*, pp. 1-6, Athens, Greece.
  11. S. Nanou, O. Tzortzopoulos, S. Papathanassiou, "Evaluation of DC voltage control strategies for multi-terminal HVDC grids comprising island systems with high RES penetration," in *Proc. 11th IET Int. Conf. on AC and DC Power Transmission*, pp. 1-7, Birmingham, UK, 2015.
  12. G. Patsakis, S. Nanou, S. Papathanassiou, "Fault ride-through of VSC-HVDC connected offshore wind farms: A simplified model," in *Proc. EWEA 2015 Annu. Event*, Paris, France, 2015.
  13. S. Nanou, A. Spetsiotis, S. Papathanassiou, "Provision of primary frequency support and inertia emulation by offshore wind farms connected through multi-terminal VSC-HVDC links," in *Proc. EWEA 2015 Annu. Event*, pp. 170-173, Paris, France, 2015.
  14. S. Nanou, M. Papadopoulos, S. Papathanassiou, "Assessment of island interconnection projects via HVDC links of partial capacity: The case of Crete," αποδεκτό για παρουσίαση, *Cigre Paris Session*, Aug. 2016.